



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

Διπλωματική Εργασία

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΔΥΝΑΜΗΣ/ΡΟΠΗΣ 5-ΑΞΟΝΩΝ

Κλάιντ Λίκα

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2013

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στο σχεδιασμό και στην κατασκευή ενός πολυαξονικού αισθητήρα δύναμης. Πρόκειται για μέτρηση δύναμης και ροπής σε τρεις και σε δύο καρτεσιανούς άξονες αντίστοιχα. Ο αισθητήρας αυτός μετράει δύναμη και ροπή σε τυχαίες κατευθύνσεις και κάνει την αποσύζευξη τους με μηχανικό και υπολογιστικό τρόπο. Το μεγάλο κόστος απόκτησης τέτοιων αισθητήρων, αλλά και η ειδική του εφαρμογή αποτελούν τα κίνητρα του όλου εγχειρήματος.

Η εφαρμογή του αφορά τη μέτρηση των δυνάμεων και ροπών αντίδρασης που προκαλούνται από το έδαφος στο πέλμα ενός τετράποδου ρομπότ. Λόγω της πρόσκρουσης του ποδιού στο έδαφος, δημιουργούνται κρουστικά φορτία. Έτσι η δύναμη έχει, εκτός από υψηλές τιμές και υψηλές συχνότητες. Για αυτόν τον λόγο πρέπει η συχνότητα δειγματοληψίας να είναι υψηλή έτσι ώστε να ανακατασκευαστεί η καμπύλη φόρτισης με αρκετή ακρίβεια.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, μελετάται ο σχεδιασμός ενός ολοκληρωμένου συστήματος μέτρησης έτσι ώστε να ικανοποιεί ένα σύνολο προδιαγραφών, που ορίζονται επίσης από την εφαρμογή. Η προσομοίωση των επιδόσεων του και το αν ικανοποιούνται οι προδιαγραφές, γίνεται με το σχεδιαστικό και αναλυτικό πακέτο SolidWorks. Οι διάφορες σχεδιαστικές λύσεις εξετάζονται με το πακέτο προσομοιώσεων που κάνει εύκολη την εφαρμογή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων. Τελικά, εξετάζεται και υλοποιείται και η κατασκευαστική λύση η οποία είναι οικονομικά αποδεκτή και μπορεί να κατασκευαστεί σε ένα μηχανουργείο.

Η κατασκευασμένη μηχανοτρονική διάταξη ελέγχθηκε ως προς τις επιδόσεις της με πειράματα και συγκρίθηκε με έναν αντίστοιχο αισθητήρα του εμπορίου. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων δείχνουν, ότι οι επιδόσεις τους είναι της ίδιας τάξης μεγέθους ενώ τα κόστη τους έχουν μεγάλη διαφορά. Τέλος, γίνεται μια αναφορά για μελλοντική εργασία στον αισθητήρα, προϊόν της οποίας θα μπορούσε να είναι ένας άμεσα συγκρίσιμος ως προς τις επιδόσεις αισθητήρας, με ακόμη χαμηλότερο κόστος.

Abstract

This thesis addresses the design and construction of a multi-axis force sensor. This sensor is used for measuring force and torque in three and two axes respectively. The sensor can measure forces and torques in an arbitrary direction and resolve them, in its Cartesian axes by proper mechanical design and computational method. The motivation for this design is to have a sensor for a special application at a reasonable cost.

Its application is to measure the ground reaction from a quadruped robot's toe. Its motion creates impact forces and torques. Thus, the force reaches very high values and the excitation frequency is also very high. For this reason the sampling frequency has to be high enough to reconstruct the load curve smoothly.

Taking into account the above, a research is done in the design of an integrated measuring system that can satisfy a bunch of specifications defined by the application. SolidWorks provides great help in analyzing the design, so that can satisfy the specifications. Many design scenarios are analyzed with the simulation toolbox that makes the implementation of the Finite Element Analysis an easy job. Finally, its construction is affordable and easy to be build to a mechanical workshop.

The performance of the constructed mechatronic system is checked with experiments and is compared with a commercial force sensor. The results shows that the performance is of the same magnitude and the cost is of great difference. Finally, a future work for the force sensor is proposed.

Ευχαριστίες

Η διάρκεια αυτής της εργασίας ήταν κάτι παραπάνω από ένα ημερολογιακό έτος. Οπότε, ποικίλα, πρωτόγνωρα προβλήματα και δυσκολίες παρουσιάστηκαν μπροστά μου. Για την αντιμετώπισή τους και την υπερπήδηση τους έλαβα σπουδαία βοήθεια από όλα τα μέλη της ομάδας του εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου ΕΜΠ αλλά και από τους κοντινούς μου ανθρώπους. Όλοι με βοήθησαν με τον τρόπο τους και τους ευχαριστώ ειλικρινά.

Ιδιαίτερως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Ευάγγελο Παπαδόπουλο. Είμαι ευγνώμων για τη διάθεση που έδειξε στο να με καθοδηγήσει και για τις ανεκτίμητες συμβουλές που μου προσέφερε σε τεχνικά και επιστημονικά κομμάτια, κατά όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου. Θέλω επίσης, να τον ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο προσωπό μου. Είναι ένας ιδιαίτερος άνθρωπος, με γνώσεις και προοπτική που δύσκολα συναντώνται.

Από τα μέλη της ομάδας, ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Θεοφάνη Πλαγιανάκο για την διάθεση του να με βοηθήσει σε θέματα Δυναμικής και Κρούσεων και τον υποψήφιο Διδάκτορα Ιωάννη Κοντολάτη για τις συμβουλές του σε διάφορα θέματα αλλά και για την καθοδήγησή του ιδιαίτερα τις δύσκολες πρώτες μέρες. Επίσης, ευχαριστώ τον διπλωματούχο μηχανολόγο μηχανικό Δημήτρη Μυρσιιώτη για τις πολλές ώρες που μοιραστήκαμε τον ίδιο χώρο εργασίας.

Τέλος, για την αμέριστη συμπαράσταση τους στην προσπάθειά μου να πραγματοποιήσω κάτι το οποίο απαίτησε την επαναλαμβανόμενη απουσία μου από αυτούς, ευχαριστώ πάρα πολύ τους φίλους μου Κώστα, Σωτήρη, Σοφία, Θανάση, Κλεβίς, Ιωάννη και Δημήτρη.

Αφιερώνεται στην οικογενειά μου και στη Μαργαρίτα.

Περιεχόμενα

Περίληψη	I
Abstract	II
Ευχαριστίες	III
Κατάλογος Σχημάτων.....	VIII
Κατάλογος Πινάκων	XI
1 Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός Εργασίας	1
1.1.1 Ανάγκη αισθητήρα δύναμης	2
1.2 Αισθητήρες Δύναμης.....	4
1.2.1 Αρχές λειτουργίας – Επιμέρους υποσυστήματα	4
1.2.2 Εφαρμογή στη Ρομποτική	7
1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	8
1.4 Δομή Εργασίας	10
2 Προκαταρκτικός Σχεδιασμός Αισθητήρα Δύναμης/Ροπής 5-Αξόνων ...	13
2.1 Εισαγωγή.....	13
2.2 Σχεδιαστική Διαδικασία	14
2.3 Προσδιορισμός Προδιαγραφών	14
2.4 Γεωμετρικοί Περιορισμοί	19
2.5 Σχεδιασμός Μηχανικού Υποσυστήματος στο SolidWorks	22
2.6 Ανάλυση Κατασκευής με FEM στο SolidWorks.....	24
2.6.1 Στήσιμο Προσομοιώσεων.....	25
2.6.2 Επιλογή παραμέτρων σχεδιασμού	28
2.6.3 Επιλογή υλικού.....	29
2.6.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων και αξιολόγηση.....	30
2.7 Σχεδιασμός Ηλεκτρονικού Υποσυστήματος.....	38
2.7.1 Strain gage και γέφυρα Wheatstone	39
2.7.1.1 Φόρτιση F_z – ΣΧ1	41
2.7.1.2 Φόρτιση F_x – ΣΧ1.....	43

2.7.1.3	Φόρτιση F_y – ΣΧ1	44
2.7.1.4	Φόρτιση M_y – ΣΧ1	45
2.7.1.5	Φόρτιση M_x – ΣΧ1	47
2.7.1.6	Φόρτιση M_z – ΣΧ1	48
2.7.1.7	Φόρτιση F_x – ΣΧ2	49
2.7.1.8	Φόρτιση F_y – ΣΧ2	50
2.7.1.9	Φόρτισεις M_y , M_x , M_z και F_z – ΣΧ2	51
2.7.2	Επεξεργασία αναλογικού σήματος	51
2.7.3	Επιλογή αναλογικοψηφιακού μετατροπέα (ADC)	52
2.7.4	Σχεδιασμός πρότυπης πλακέτας PCB στο EAGLE	55
3	Τελικός Σχεδιασμός και Κατασκευή.....	57
3.1	Εισαγωγή	57
3.2	Τελικός Σχεδιασμός.....	57
3.2.1	Επιλογή στοιχείων σύνδεσης μηχανικών μερών	58
3.2.2	Εσοχές και οπές καλωδίωσης	58
3.2.3	Προσαρμογέας αισθητήρα και ποδιού	59
3.3	Κατασκευή Μηχανικού Υποσυστήματος.....	59
3.3.1	Προετοιμασία τεμαχίων.....	60
3.3.2	Συγκράτηση τεμαχίων.....	63
3.3.3	Παραγωγή G-code με SolidCAM για την Haas Minimill CNC	64
3.3.4	Επιλογή κοπτικών εργαλείων	65
3.3.5	Λοιπές κατεργασίες με συμβατικές εργαλειομηχανές και εργαλεία ..	66
3.4	Τελικός Σχεδιασμός και Κατασκευή Ηλεκτρονικού Υποσυστήματος	68
3.4.1	Σχεδιασμός τελικού PCB	68
3.4.2	Καλωδίωση.....	69
3.4.3	Επικοινωνία	70
3.4.4	Κόλληση SG πάνω στην κατασκευή.....	71
3.5	Συναρμολόγηση Τεμαχίων και Πλακέτας	73
4	Βαθμονόμηση Αισθητήρα	77
4.1	Εισαγωγή	77
4.2	Υπολογισμός Σφάλματος Αντιστάθμισης (Offset Error).....	78

4.3	Μητρώο Αποσύζευξης Βαθμών Ελευθερίας (Decoupling Matrix)	79
4.3.1	Υπολογισμός μητρώου αποσύζευξης.....	80
4.3.2	Εφαρμογή Μητρώου Βαθμονόμησης	81
4.3.3	Προγραμματισμός πειραμάτων βαθμονόμησης	82
4.4	Σχεδιασμός και Κατασκευή Βάσης Βαθμονόμησης.....	82
4.4.1	Σχεδιασμός βάσης.....	82
4.4.2	Κατασκευή βάσης.....	83
5	Πειραματική Εκτέλεση	87
5.1	Επικοινωνία	87
5.1.1	Συνδεσμολογία.....	88
5.1.2	Λειτουργία Arduino Uno	89
5.2	Αλγόριθμος Βαθμονόμησης.....	90
5.3	Επεξεργασία Μετρήσεων και Υπολογισμός Μητρώου Αποσύζευξης	91
5.3.1	Προγραμματισμός πειραμάτων	91
5.3.2	Υπολογισμός Μητρώου Αποσύζευξης	93
5.4	Εφαρμογή Μητρώου Αποσύζευξης στις Μετρήσεις	101
5.5	Πειράματα Αξιολόγησης.....	103
5.5.1	Πείραμα μονοαξονικής καταπόνησης.....	103
5.5.2	Πείραμα σύνθετης καταπόνησης.....	108
5.5.3	Πείραμα κρουστικών φορτίων	109
6	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	115
6.1	Συμπεράσματα	115
6.2	Μελλοντική Εργασία	116
	Βιβλιογραφία.....	117
	Παράρτημα Α.....	119
	Παράρτημα Β.....	130
	Παράρτημα Γ	135

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1. Δυνάμεις και ροπές αντίδρασης πέλματος.	2
Σχήμα 1-2. Κύριες δυνάμεις αντίδρασης κατά την κίνηση.....	3
Σχήμα 1-3. Γέφυρα Wheatstone.	5
Σχήμα 1-4. Επικόλληση SG σε καμπτόμενη δοκό.	6
Σχήμα 1-5. Επιμηκυνσιόμετρο τύπου ημιαγωγού.....	7
Σχήμα 1-6. Διάφορες ζυγαριές. Πάνω μηχανικές. Κάτω ηλεκτρονική.	8
Σχήμα 1-7. Στοιχείο τύπου μεμβράνης και σταυρού.	9
Σχήμα 1-8. Στοιχείο PPB.....	10
Σχήμα 2-1. Αποτελέσματα προσομοίωσης για την εκτίμηση των μέγιστων δυνάμεων...	15
Σχήμα 2-2. Προσομοιώσεις σε περιβάλλον ADAMS.....	17
Σχήμα 2-3. Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης ελαστομερούς υλικού.	18
Σχήμα 2-4. Γεωμετρικοί περιορισμοί σχεδιασμού αισθητήρα.	20
Σχήμα 2-5. Διάφορα SG από Omega Engineering.	21
Σχήμα 2-6. Αισθητήρας δύναμης 5-αξόνων και αποτελούμενα μέρη.....	23
Σχήμα 2-7. ΣΧ2. Στις εικόνες φαίνεται το μονό στοιχείο PPB και οι κοχλιοσυνδέσεις.....	24
Σχήμα 2-8. Απλοποιημένες κατασκευές για προσομοιώσεις.	25
Σχήμα 2-9. Πάκτωση του αισθητήρα με το πόδι.	25
Σχήμα 2-10. Προσομοίωση στατικής φόρτισης F_z	26
Σχήμα 2-11. Αναγωγή δύναμης F_x	27
Σχήμα 2-12. Παράμετροι σχεδιασμού.	29
Σχήμα 2-13. Προσομοιώσεις υπερφόρτωσης και έλεγχος ανάλυσης της F_z	32
Σχήμα 2-14. Προσομοιώσεις υπερφόρτωσης και έλεγχος ανάλυσης της F_y	33
Σχήμα 2-15. Προσομοιώσεις υπερφόρτωσης και έλεγχος ανάλυσης της F_x	34
Σχήμα 2-16. Προσομοιώσεις υπερφόρτωσης και έλεγχος ανάλυσης της M_x	35
Σχήμα 2-17. Προσομοιώσεις υπερφόρτωσης και έλεγχος ανάλυσης της M_y	36
Σχήμα 2-18. Προσομοιώσεις υπερφόρτωσης και έλεγχος ανάλυσης της M_z	37
Σχήμα 2-19. Επιλεγμένα SG 350 Ohm από την Omega.....	40
Σχήμα 2-20. Κόλληση SG και παραμορφώσεις για την F_z	41
Σχήμα 2-21. Σύγκριση γραμμικής και μη γραμμικής περίπτωσης.....	43
Σχήμα 2-22. Κόλληση SG και παραμορφώσεις για την F_x	44
Σχήμα 2-23. Κόλληση SG και παραμορφώσεις για την F_y	45
Σχήμα 2-24. Κόλληση SG και παραμορφώσεις για την M_y	46
Σχήμα 2-25. Κόλληση SG και παραμορφώσεις για την M_x	47
Σχήμα 2-26. Κόλληση SG και παραμορφώσεις για την M_z	48
Σχήμα 2-27. Κόλληση SG και παραμορφώσεις για την F_x	49

Σχήμα 2-28. Κόλληση SG και παραμορφώσεις για την F_y .	50
Σχήμα 2-29. Βαθυπερατό φίλτρο κυκλώματος.	52
Σχήμα 2-30. Τσίπ.	54
Σχήμα 2-31. Δομικό διάγραμμα MCP3903.	54
Σχήμα 2-32. Κυκλωματικό σχέδιο ηλεκτρονικού υποσυστήματος.	56
Σχήμα 2-33. Πλακέτα μέσα στην κατασκευή.	56
Σχήμα 3-1. Κοχλίας-περικόχλιο ασφαλείας γαλβανιζέ.	58
Σχήμα 3-2. Οπές για καλωδίωση και για τους υποδοχείς (connectors).	59
Σχήμα 3-3. Μηχανουργείο Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου ΕΜΠ.	60
Σχήμα 3-4. Εργαλειομηχανές και εργαλεία.	61
Σχήμα 3-5. Συμπαγής κυλινδρική δοκός.	62
Σχήμα 3-6. Κομμένη και κατεργασμένη επιφάνεια.	62
Σχήμα 3-7. Προετοιμασία του προσαρμογέα.	63
Σχήμα 3-8. Συγκράτηση τεμαχίων.	63
Σχήμα 3-9. Σταυρός μετά την κατεργασία στην CNC.	64
Σχήμα 3-10. Συστήματα συντεταγμένων για την κατεργασία του PPB.	65
Σχήμα 3-11. Σπειροτόμηση.	67
Σχήμα 3-12. Κατασκευασμένα τεμάχια.	68
Σχήμα 3-13. (α) Πλακέτα μέσα στο καπάκι, (β) προσαρμογέας.	69
Σχήμα 3-14. Πηνιόσυρμα.	69
Σχήμα 3-15. Συνδέσεις και προσαρμογέας.	70
Σχήμα 3-16. Θέσεις ακροδεκτών επικοινωνίας στην πλακέτα.	71
Σχήμα 3-17. Αυτοκόλλητη ταινία πάνω στο SG.	72
Σχήμα 3-18. Κοχλιοσυνδέσεις τριβής.	74
Σχήμα 3-19. Συναρμολογημένος αισθητήρας.	75
Σχήμα 3-20. Ολοκληρωμένη κατασκευή ΣΧ1 και ΣΧ2.	75
Σχήμα 4-1. Συνολικό σφάλμα ενός άξονα.	77
Σχήμα 4-2. Σύστημα πολλών εισόδων και εξόδων	80
Σχήμα 4-3. Λειτουργία βάσης βαθμονόμησης.	83
Σχήμα 4-4. Αλφαδιασμένη βάση.	84
Σχήμα 4-5. Τροχαλίες με νήματα για τις μάζες.	84
Σχήμα 4-6. Αλφάδι.	85
Σχήμα 5-1. Διάγραμμα ροής σήματος.	87
Σχήμα 5-2. Επικοινωνία Arduino – MCP3903.	89
Σχήμα 5-3. Παράδειγμα ευθείας αναδρομής.	92
Σχήμα 5-4. Βαθμονόμηση άξονα F_z – ΣΧ1.	95
Σχήμα 5-5. Βαθμονόμηση άξονα F_x – ΣΧ1.	96

Σχήμα 5-6. Βαθμονόμηση άξονα F_y – ΣΧ1.....	96
Σχήμα 5-7. Βαθμονόμηση άξονα M_x – ΣΧ1.....	97
Σχήμα 5-8. Βαθμονόμηση άξονα M_y – ΣΧ1.....	97
Σχήμα 5-9. Βαθμονόμηση άξονα F_z – ΣΧ2.....	98
Σχήμα 5-10. Βαθμονόμηση άξονα F_x – ΣΧ2.....	98
Σχήμα 5-11. Βαθμονόμηση άξονα F_y – ΣΧ2.....	99
Σχήμα 5-12. Βαθμονόμηση άξονα M_x – ΣΧ2.....	99
Σχήμα 5-13. Βαθμονόμηση άξονα M_y – ΣΧ2.....	100
Σχήμα 5-14. Παράδειγμα απεικόνισης μετρήσεων.....	101
Σχήμα 5-15. Σύγκριση φιλτραρισμένων και πραγματικών μετρήσεων.....	102
Σχήμα 5-16. Φόρτιση μόνο κατά F_x με μάζα 0,5kg.	104
Σχήμα 5-17. Φόρτιση μόνο κατά F_y με μάζα 0,5kg.	105
Σχήμα 5-18. Φόρτιση μόνο κατά F_y με μάζα 1kg.	106
Σχήμα 5-19. Φόρτιση μόνο κατά M_x με μάζα 0,5kg και μοχλοβραχίονα 42,4mm.	107
Σχήμα 5-20. Φόρτιση μόνο κατά M_y με μάζα 0,5kg και μοχλοβραχίονα 42,4mm.	108
Σχήμα 5-21. Σύνθετη καταπόνηση κατά F_z (1,298kg) και F_x (0,500kg).	109
Σχήμα 5-22. Κρούση πλάκας 1,298kg.	110
Σχήμα 5-23. Δεδομένα μόνο κατά F_z . Έχει εφαρμοστεί φίλτρο αποθρομβοποίησης.	111
Σχήμα 5-24. Τρεις κρούσεις της πλάκας.....	112

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1. Ενδεικτικές τιμές μέγιστων αναπτυσσομένων δυνάμεων.....	16
Πίνακας 2-2. Προδιαγραφές διάφορων χαρακτηριστικών του αισθητήρα.	19
Πίνακας 2-3. Περιπτώσεις φόρτισης της κατασκευής.....	26
Πίνακας 2-4. Αναθεωρημένες προδιαγραφές της κατασκευής.....	28
Πίνακας 2-5. Τελικές τιμές σχεδιαστικών παραμέτρων	30
Πίνακας 2-6. Ιδιοσυχνότητες και συμμετοχή μάζας στις τρεις κατευθύνσεις για το ΣΧ1.	38
Πίνακας 2-7. Εκτιμώμενες τιμές χαρακτηριστικών ηλεκτρονικού υποσυστήματος.....	54
Πίνακας 3-1. Κοπτικά εργαλεία και τρυπάνια.	66
Πίνακας 3-2. Ακροδέκτες καλωδίων επικοινωνίας.	71
Πίνακας 5-1. Τιμές φορτίων βαθμονόμησης.	93

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Στην παρούσα εργασία περιγράφεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός πολυαξονικού αισθητήρα δύναμης. Αν ψάξει κανείς στο διαδίκτυο θα δει ότι οι αισθητήρες δύναμης έχουν αυξημένο κόστος αγοράς, της τάξης των χιλιάδων ευρώ. Ειδικότερα, υψηλό κόστος έχουν οι πολυαξονικοί, οι οποίοι μετράνε δύναμη και ροπή στις τρεις καρτεσιανές διευθύνσεις. Οι αισθητήρες δύναμης λόγω της ευαισθησίας και της ακαμψίας που χρειάζεται στις εφαρμογές, συνηθίζεται να λειτουργούν στο όριο της μηχανικής αντοχής του φερόμενου της δύναμης/ροπής τεμάχιο. Κάθε φορά που χρησιμοποιείται ο αισθητήρας χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή να μην ξεπεραστεί το όριο υπερφόρτωσης για να μην υπάρξουν μόνιμες παραμορφώσεις και τελικά ο αισθητήρας να μην μπορεί να μετράει σωστά.

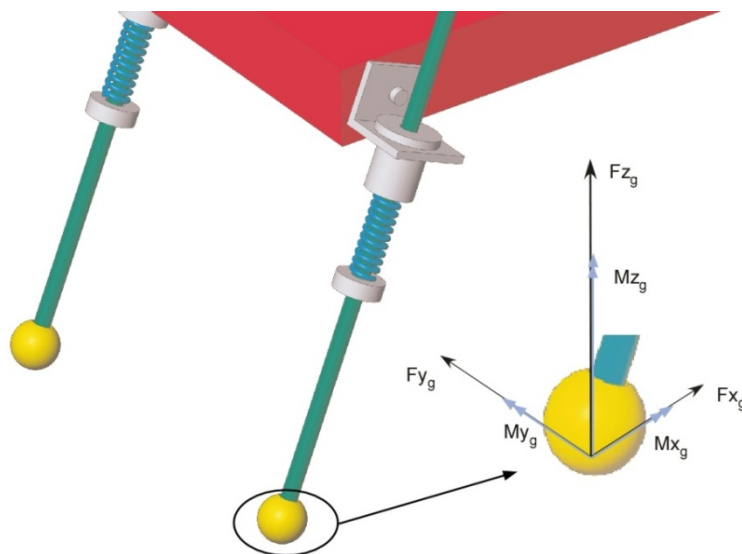
Οι αισθητήρες δύναμης θα εφαρμοστούν στα πέλματα ενός τετράποδου ρομπότ. Λόγω του αμφιβόλου της τιμής της δύναμης κρούσης που δέχονται τα πέλματα, ιδιαίτερα κατά την αρχική φάση που αφήνεται από αυθαίρετο ύψος, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να υπερφορτωθούν οι αισθητήρες. Έτσι προέκυψε η ανάγκη να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν αισθητήρες δύναμης/ροπής, εντός του εργαστηρίου Αυτόματου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Οι αισθητήρες αυτοί πρέπει να έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής για να μπορούν να ανακατασκευάζονται στις δυσμενείς περιπτώσεις όπου παθαίνουν ανεπανόρθωτες βλάβες. Επίσης θα πρέπει να

μπορούν να προσαρμόζονται σε ποικιλία γεωμετριών, σε περίπτωση που χρειαστούν χρησιμοποιηθούν σε ένα νέο τετράποδο ρομπότ ή σε κάποια άλλη εφαρμογή.

1.1.1 Ανάγκη αισθητήρα δύναμης

Το ρομπότ για την κίνηση του χρησιμοποιεί διάφορους διασκελισμούς. Αυτοί είναι το bounding, το trotting και το pronking. Κατά τους διασκελισμούς αυτούς, τα πόδια του ρομπότ μπορεί να βρίσκονται στον αέρα ή στο έδαφος. Οι φάσεις αυτές ονομάζονται φάση πτήσης και φάση εδάφους. Για να ελεγχθεί το ρομπότ είναι απαραίτητη η γνώση του χρόνου αλλαγής φάσης, καθώς κάθε φάση χαρακτηρίζεται από δική της δυναμική. Έτσι κρίνεται αναγκαίο να υπάρχει κάποιος τρόπος με τον οποίο θα μπορεί ο ελεγκτής να καταλαβαίνει αν ένα πόδι είναι στην φάση εδάφους ή στην φάση πτήσης. Αυτό γίνεται για να πηγαίνουν τα πόδια στην επιθυμητή, σύμφωνα με τον έλεγχο, γωνία πριν την πρόσκρουση και να δίνεται η κατάλληλη ροπή στην φάση εδάφους. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ένας encoder στο πάνω μέρος του ποδιού, ο οποίος μετράει εμμέσως την μεταβολή του ενεργού μήκους του ποδιού. Κατά την πρόσκρουση όπου έχουμε άμεση συσπίρωση του ελατηρίου, το ενεργό μήκος του ποδιού μεταβάλλεται και ο ελεγκτής καταλαβαίνει ότι το εκάστοτε πόδι προσέκρουσε στο έδαφος.

Ο δεύτερος τρόπος με τον οποίο θα μπορούσε να καταλάβει το ρομπότ ότι ένα από τα πόδια του ακούμπησε το έδαφος, θα ήταν με την χρήση κάποιου αισθητήρα δύναμης ο οποίος θα βρίσκεται στο πέλμα του. Όταν βρίσκεται σε φάση πτήσης στο πέλμα ασκείται μηδενική δύναμη, ενώ όταν ακουμπάει η δύναμη αυτή παύει να είναι μηδενική και αποκτάει κάποια τιμή.



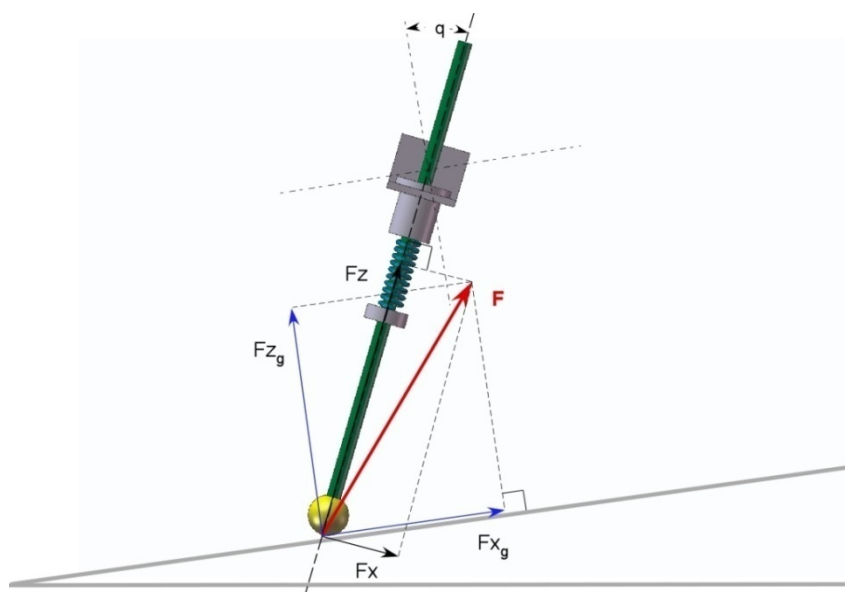
Σχήμα 1-1. Δυνάμεις και ροπές αντίδρασης πέλματος.

Όταν το πόδι βρίσκεται στο έδαφος, τότε σε αυτό ασκείται μια δύναμη επαφής και ενδεχομένως μια ροπή. Στο Σχήμα 1-1 φαίνονται οι συνιστώσες της δύναμης και της ροπής. Θεωρώντας αμελητέα την ροπή, λόγω της σφαιρικής επιφάνειας του πέλματος, μπορούμε να πούμε ότι ασκούνται σε αυτό τρεις συνιστώσες δύναμης ως προς το σύστημα συντεταγμένων του εδάφους F_{x_g} , F_{y_g} και F_{z_g} . Έτσι ασκούνται μια δύναμη αντίδρασης κάθετη στην επιφάνεια του εδάφους και δύο τριβής που κείνται στο επίπεδο του εδάφους.

Εξαιτίας του τρόπου κίνησης του ρομπότ η συνιστώσες που συνεισφέρουν περισσότερο, είναι η κάθετη στο έδαφος F_{z_g} και η F_{x_g} . Η F_{x_g} προκύπτει από την τριβή του πέλματος με το έδαφος. Η τριβή αυτή είναι απαραίτητη για να μην ολισθαίνει το πόδι στο έδαφος. Στο Σχήμα 1-2 φαίνεται η F_{z_g} και η F_{x_g} καθώς επίσης και οι ανηγμένες F_z και F_x στο σύστημα συντεταγμένων του ποδιού όπως αυτό έχει οριστεί. Παρακάτω αναπτύσσονται οι σχέσεις μεταξύ τους.

$$F_x = F_{x_g} \cos q + F_{z_g} \sin q \quad (1.1)$$

$$F_z = F_{z_g} \cos q + F_{x_g} \sin q \quad (1.2)$$



Σχήμα 1-2. Κύριες δυνάμεις αντίδρασης κατά την κίνηση.

Η γνώση των τιμών των δυνάμεων αντίδρασης με το έδαφος είναι πολύ σημαντική πληροφορία για το ρομπότ καθώς παρέχει μια λεπτομερέστερη γνώση για την αλληλεπίδραση με το εξωτερικό περιβάλλον. Μπορεί να γνωρίζει ανά πάσα στιγμή σε ποια φάση βρίσκονται τα πόδια του και λαμβάνοντας υπόψη την τιμή αντίδρασης, μπορεί να καταλαβαίνει το είδος του εδάφους που πατάει και να προσαρμόζει την κίνηση του

ανάλογα με αυτό. Μπορεί, για παράδειγμα με αυτό τον τρόπο να κινείται πιο αποδοτικά χωρίς τον κίνδυνο ανατροπής.

Έτσι κρίνεται αναγκαίο να τοποθετηθούν αισθητήρες δύναμης στο πόδι για την μέτρηση των δυνάμεων σε πραγματικό χρόνο. Απλοποιώντας το πρόβλημα, θεωρείται ότι η κίνηση γίνεται σε δύο διαστάσεις και ότι οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται είναι κατά κύριο λόγο οι F_{z_g} και F_{x_g} . Στόχος, γίνεται ο σχεδιασμός ενός αισθητήρα δύναμης/ροπής ο οποίος θα μπορεί να μετράει με ακρίβεια δυνάμεις σε τουλάχιστον δύο άξονες.

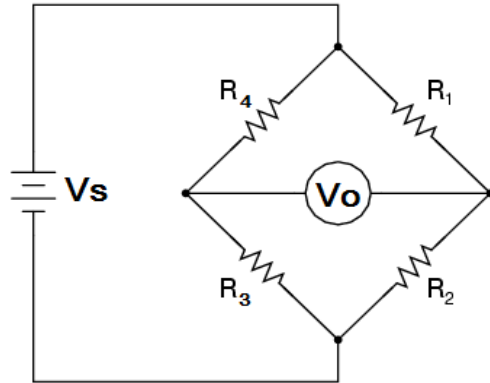
1.2 Αισθητήρες Δύναμης

1.2.1 Αρχές λειτουργίας – Επιμέρους υποσυστήματα

Η μέτρηση της δύναμης γίνεται έμμεσα χρησιμοποιώντας διάφορα υποσυστήματα που βοηθάνε στην υλοποίηση της. Αυτά ορίζονται εδώ, ως μηχανικό και ηλεκτρονικό υποσύστημα.

Το μηχανικό αποτελείται συνήθως από κάποια μεταλλική κατασκευή κατάλληλα σχεδιασμένη για να φέρει τις μετρούμενες δυνάμεις. Μπορεί να αποτελείται από ένα κομμάτι μόνο, για παράδειγμα να είναι μια δοκός ή μπορεί να είναι πιο σύνθετο και να αποτελείται από πολλά κομμάτια που συνδέονται μεταξύ τους με βίδες, περικόχλια, συγκολλήσεις και να έχει μηχανισμούς αποφυγής υπερφόρτωσης.

Το ηλεκτρονικό αποτελείται από γέφυρες Wheatstone που φέρουν επιμηκυσσιόμετρα (Strain Gage – εν συντομία SG) και αντιστάσεις. Τα SG είναι επικολλημένα πάνω στην κατασκευή και λαμβάνουν τις μηχανικές παραμορφώσεις που είναι αποτέλεσμα άσκησης δύναμης σε κάποιο σημείο. Η παραμόρφωση στα SG προκαλεί αλλαγή στις αντιστάσεις και συνδεδεμένα σε μια γέφυρα Wheatstone κατάλληλα μεταβάλλουν την τάση εξόδου V_o (Σχήμα 1-3).



Σχήμα 1-3. Γέφυρα Wheatstone.

Η σχέση μεταξύ της παραμόρφωσης ($\varepsilon = \Delta L/L_0$) και της αλλαγής της αντίστασης σε ένα SG περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \varepsilon \quad (1.3)$$

Ο συντελεστής k είναι μια σταθερά του SG και προσδιορίζεται πειραματικά από τον κατασκευαστή. Συνήθως είναι περίπου $k = 2 \sim 4$. Στο [1] αναλύονται διεξοδικότερα οι γέφυρες Wheatstone και οι τρόποι σύνδεσης των SG σε αυτά. Η τάση εξόδου V_o με την τάση εισόδου V_s , για ίσες ονομαστικές αντιστάσεις των SG, περιγράφονται από την παρακάτω εξίσωση

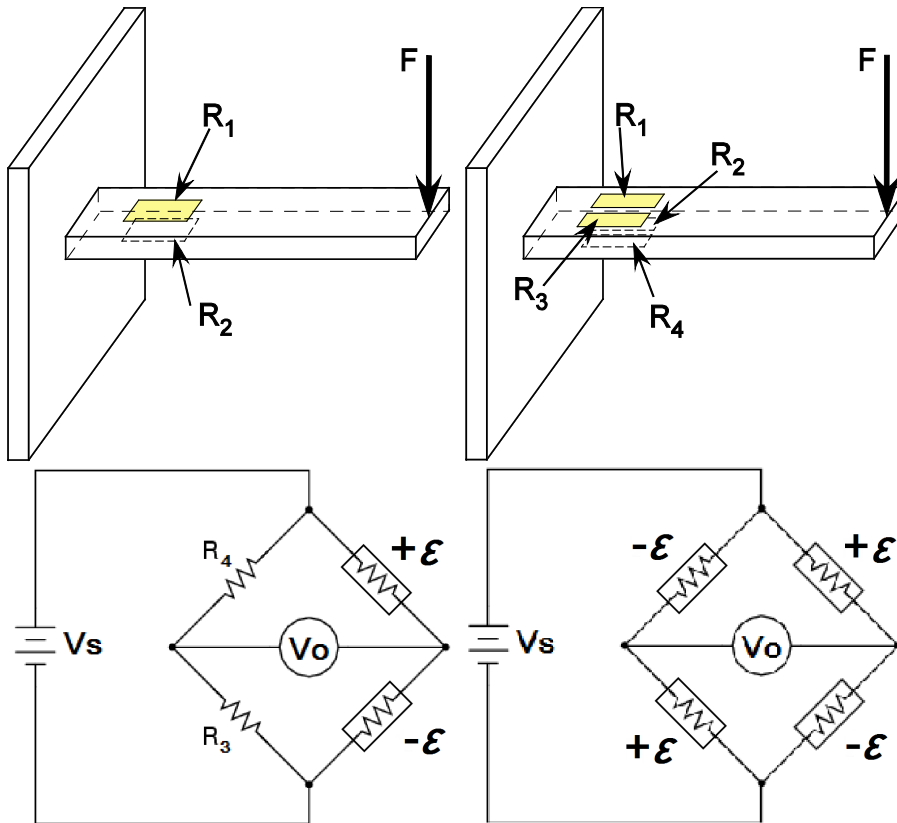
$$V_o = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \cdot V_s \quad (1.4)$$

Αν στην παραπάνω αντικατασταθούν τα R με $R + \Delta R$ προκύπτει

$$V_o = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot (1 + n) \cdot V_s \quad (1.5)$$

Ο n είναι ένας μη γραμμικός όρος, που είναι συνάρτηση των αντιστάσεων. Αποδεικνύεται στο [1] και στο [3] ότι για πλήρη και μισή γέφυρα, των οποίων τα SG είναι επικολλημένα πάνω σε καμπτόμενη δοκό με συμμετρικές παραμορφώσεις, όπως στο Σχήμα 1-4, ότι ο n είναι αμελητέος. Στην περίπτωση εφελκυσμού ή θλίψης μιας δοκού (η περίπτωση αυτή δεν αντιμετωπίζεται), αποδεικνύεται ότι για $\Delta R/R_0 = k \cdot \varepsilon \leq 0,03$ το σχετικό σφάλμα είναι κάτω από 0,5% του FS. Για ένα μαλακό μέταλλο, όπως το αλουμίνιο, η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση πριν την διαρροή είναι $\varepsilon = 0,001 \sim 0,008$. Οι τιμές των σταθερών k των SG είναι το πολύ 2,2 στην περίπτωση μας. Έτσι σύμφωνα με την Εξ. (1.3) έχουμε

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \varepsilon = 0,008 \cdot 2,2 = 0,0176 < 0,03$$



Σχήμα 1-4. Επικόλληση SG σε καμπτόμενη δοκό.

Έτσι η Εξ.(1.5), εξαιτίας των παραπάνω μπορεί να γίνει

$$V_o = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot V_s \quad (1.6)$$

Η παραπάνω εξίσωση αντιστοιχεί στη γραμμική σχέση της τάσης εξόδου με την μεταβολή στις αντιστάσεις.

Αποδεικνύεται επίσης, υπό την παραδοχή ότι οι παραμορφώσεις είναι μικρές (πράγμα που συμβαίνει για μέταλλα όπως αλουμίνιο ή χάλυβα), ότι οι παραμορφώσεις είναι γραμμικές συναρτήσεις της δύναμης F . Έτσι, προκύπτουν τα ακόλουθα

$$\varepsilon = c_1 \cdot F, \quad \frac{\Delta R}{R} = c_2 \cdot \varepsilon, \quad V_o = c_3 \cdot \frac{\Delta R}{R} \Rightarrow \quad (1.7)$$

$$\Rightarrow V_o = c_3 \cdot c_2 \cdot c_1 \cdot F \Rightarrow V_o = c_o \cdot F \quad (1.8)$$

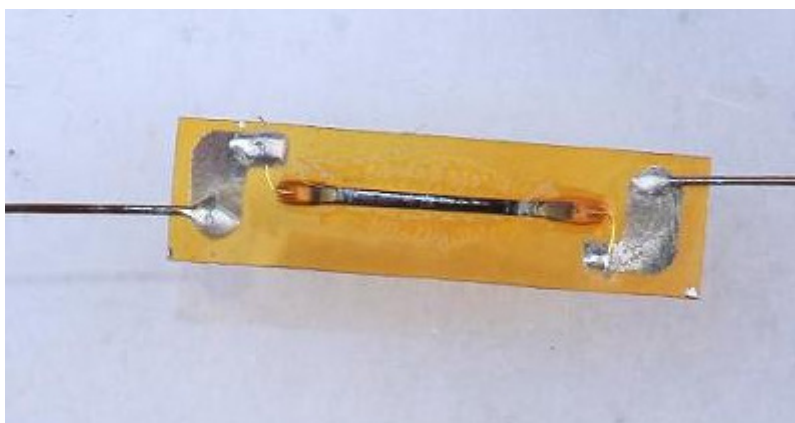
c_1 σταθερά που είναι συνάρτηση της δυσκαμψίας

c_2 σταθερά που σχετίζεται με την σταθερά k των SG

c_3 σταθερά που σχετίζεται με την συνδεσμολογία

Τελικά, μετρώντας την V_o και έχοντας γνώση της σταθεράς c_o υπολογίζεται η δύναμη που ασκείται. Χρησιμοποιώντας σαν δομική μονάδα παρόμοιες διατάξεις με την καμπτόμενη δοκό στην οποία είναι επικολλημένα SG, εξασφαλίζεται η γραμμικότητα της τάσης εξόδου με την παραμόρφωση. Στο εδάφιο 2.7.1 αναλύονται διεξοδικά οι περιπτώσεις των γεφυρών Wheatstone κάθε άξονα.

Εκτός από τα συμβατικά SG μεταλλικού τύπου όπως είναι τα παραπάνω, υπάρχουν και τα τύπου ημιαγωγού. Εν γένει, τα τελευταία έχουν μη γραμμική συμπεριφορά. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο δεν επιλέχθηκαν. Όμως με συγκεκριμένη συνδεσμολογία η σχέση δύναμης παραμόρφωσης θα μπορούσε να προσεγγιστεί ως γραμμική. Και πάλι όμως για την περίπτωση του αισθητήρα που σχεδιάζεται στο Κεφ. 2 κάτι τέτοιο θα αύξανε την πολυπλοκότητα και συνεπώς θα δυσκόλευε στην κατασκευή.



Σχήμα 1-5. Επιμηκυνσιόμετρο τύπου ημιαγωγού.

1.2.2 Εφαρμογή στη Ρομποτική

Οι αισθητήρες δύναμης χρησιμοποιούνται στη ρομποτική, όταν είναι αναγκαίο από τον ελεγκτή να γνωρίζει τις δυνάμεις που ασκούνται στο ρομπότ από το περιβάλλον του και είναι απαραίτητοι κατά τον συμμορφούμενο έλεγχο. Συμμορφούμενος έλεγχος κίνησης ονομάζεται ο έλεγχος της κίνησης του ρομπότ όταν τούτο βρίσκεται σε επαφή με το περιβάλλον του λ.χ. το αντικείμενο που επεξεργάζεται, συναρμολογεί, βιδώνει, ή κατεργάζεται ένα τεμάχιο. Στις περιπτώσεις αυτές το ρομπότ καλείται να ασκήσει ορισμένη δύναμη/ροπή στο αντικείμενο για να υπάρχει επιθυμητό αποτέλεσμα. Επίσης χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου το ρομπότ δεν έχει επίγνωση του περιβάλλοντος του και πρέπει να σταματήσει ή να προσαρμόσει την κίνηση του έτσι ώστε να μην καταστρέψει τα αντικείμενα γύρω του, ή να μην κάψει τους κινητήρες του προκειμένου να ολοκληρώσει την εργασία που του έχει ανατεθεί. Για παράδειγμα μια μηχανή CNC

πρέπει να μπορεί να διακόψει την πρόωση, που λανθασμένα της έχει ανατεθεί, αν συγκρουστεί με το τεμάχιο προς κατεργασία.

1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Οι αισθητήρες δύναμης υπάρχουν στην αγορά αρκετά χρόνια και σε αρκετά μεγάλη ποικιλία για πολλές εφαρμογές. Ως οι πιο διαδεδομένοι αισθητήρες δύναμης θεωρούνται οι ζυγοί (βλ. Σχήμα 1-6), που αποτελούν την περίπτωση του μονοαξονικού αισθητήρα δύναμης, ο οποίος χρησιμοποιείται για την μέτρηση του βάρους ή της μάζας ενός σώματος. Οι ζυγαριές μπορούν να είναι ηλεκτρονικές και αναλογικές. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί κανείς να μετράει δύναμη. Από αυτούς ο προτιμότερος, πιο αξιόπιστος, γρηγορότερος και ακριβέστερος τρόπος με τον οποίο μετράται η δύναμη είναι μέσω μέτρησης παραμόρφωσης μιας ελαστικής κατασκευής με επιμηκυσσιόμετρα ή αλλιώς Strain Gage.

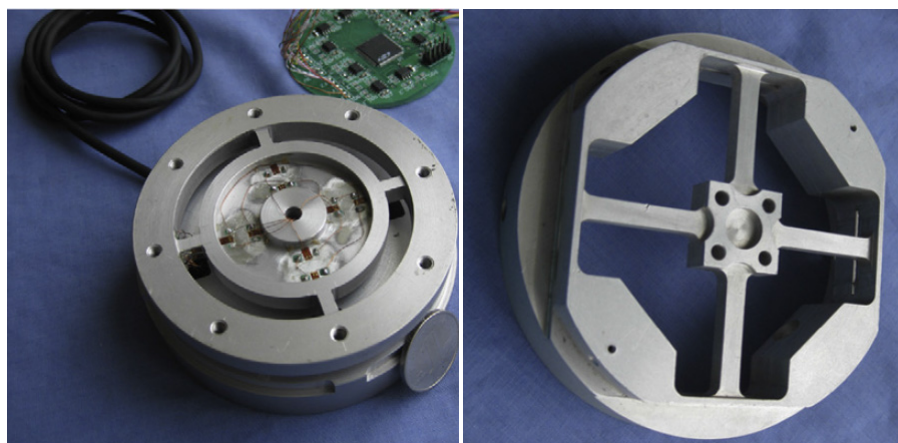


Σχήμα 1-6. Διάφορες ζυγαριές. Πάνω μηχανικές. Κάτω ηλεκτρονική.

Η μέτρηση του βάρους ενός αντικειμένου είναι μια σχετική εύκολη εργασία, καθώς η δύναμη που πρέπει να μετρηθεί είναι μονοαξονική γνωστής κατεύθυνσης. Στην περίπτωση των πολλών αξόνων ο τρόπος μέτρησης περιπλέκεται λίγο. Εν γένει, για την μέτρηση πολλών αξόνων ταυτόχρονα χρησιμοποιούνται κατασκευές σε σχήμα σταυρού που φέρουν στα άκρα τους αλλά και κοντά στο κέντρο τους SG. Αυτό γενικά δίνει καλή αποσύζευξη μεταξύ των συνιστωσών ή οποία όμως παρόλα αυτά δεν επαρκεί, για τον λόγο αυτόν γίνεται επεξεργασία των μετρήσεων και εφαρμόζεται αλγόριθμος αντιστάθμισης των σφαλμάτων που προκύπτουν από σύζευξη ενός ή περισσότερων αξόνων μεταξύ τους.

Ο σταυρός πρέπει να είναι μεγάλος για να υπάρχουν ξεκάθαρα σημεία τα οποία παραμορφώνονται κυρίως από δύναμη ενός άξονα. Στην περίπτωση του τετραπόδου ρομπότ κατ'ί τεύτοιο δεν είναι επιθυμητό όπως προκύπτει και από τους γεωμετρικούς περιορισμούς. Για αυτόν τον λόγο γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση και μελετώνται άλλοι τρόποι ή μέθοδοι με τους οποίους μπορεί να σχεδιαστεί ένας αισθητήρας δύναμης μικρός σε μέγεθος.

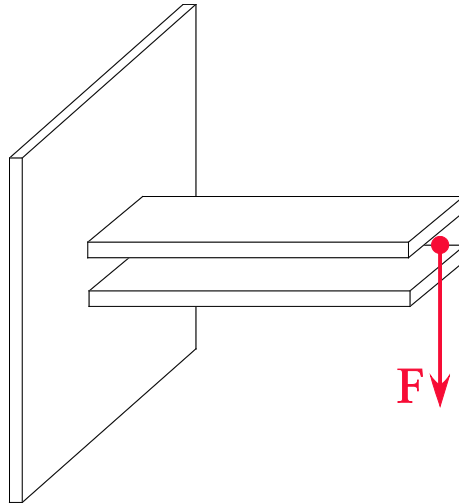
Στο [7] γίνεται σύγκριση ενός αισθητήρα δύναμης/ροπής 6-αξόνων βασισμένο σε στοιχεία τύπου μεμβράνης και ενός με στοιχεία τύπου σταυρού (Σχήμα 1-7). Στο [12] επίσης σχεδιάζεται ένας αισθητήρας δύναμης 3-αξόνων με στοιχεία τύπου μεμβράνης.



Σχήμα 1-7. Στοιχείο τύπου μεμβράνης και σταυρού.

Στα [7], [10] και [11] χρησιμοποιείται σταυρός για παραλάβει όλες τις δυνάμεις. Στο [10] και [11] συγκεκριμένα, επειδή σχεδιάζονται για τρεις άξονες και δεν έχουν μεγάλες δυνάμεις να φέρουν, οι δοκοί έχουν πολύ μικρό πάχος. Αυτό, τους επιτρέπει να αναπτύσσονται συγκεντρωμένες παραμορφώσεις και τα καθιστούν σημεία επικόλλησης των SG για την μέτρηση των δυνάμεων χωρίς περιορισμούς στις διαστάσεις. Έτσι υιοθετείται το στοιχείο Parallel Plate Beam (PPB) στις εργασίες [4], [5] και [6] για την μέτρηση των εναπομενόντων αξόνων, που είτε δεν χωράνε να μπουν στον σταυρό, είτε

βοηθούν στην αύξηση της ευαισθησίας σε έναν άξονα χωρίς να μειώνεται η αντοχή σε άλλον. Πρόκειται για δύο πλάκες παράλληλα τοποθετημένες πακτωμένες στο ένα τους άκρο και ελεύθερο στο άλλο και χρησιμοποιούνται για να φέρουν κάθετες δυνάμεις (βλ. Σχήμα 1-8).



Σχήμα 1-8. Στοιχείο PPB.

1.4 Δομή Εργασίας

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε ο σκοπός της παρούσας εργασίας. Πρόκειται για έναν αισθητήρα δύναμης ο οποίος πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε εξειδικευμένη εφαρμογή. Επίσης αναφέρθηκαν και οι αρχές λειτουργίας και οι εφαρμογές που μπορεί να έχει στην βιομηχανία. Ο αισθητήρας δύναμης που αναπτύσσεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές.

Στο δεύτερο κεφάλαιο σχεδιάζεται ο αισθητήρας λαμβάνοντας υπόψη τα αναφερθέντα του πρώτου κεφαλαίου. Η ανάλυση και ο σχεδιασμός γίνεται με πακέτα λογισμικού όπως το SolidWorks, το EAGLE. Τα πακέτα αυτά επιταχύνουν κατά πολύ τη διαδικασία της ανάλυσης. Στο SolidWorks δοκιμάζονται διάφοροι σχεδιασμοί. Εξετάζονται σενάρια φόρτισης με την βοήθεια του περιβάλλοντος προσομοίωσης που παρέχει και εξετάζονται οι κατασκευές σε αντοχή. Επίσης βοηθάει στον προσδιορισμό και την δημιουργία επιφανειών επικόλλησης των SG. Το EAGLE χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό της πλακέτας των ηλεκτρονικών του αισθητήρα.

Το τρίτο κεφάλαιο ασχολείται κυρίως με μελέτη του τελικού σχεδιασμού. Ο τελικός σχεδιασμός σε σχέση με τον προκαταρκτικό του δευτέρου κεφαλαίου έχει την διαφορά ότι σε αυτόν προσδιορίζονται χαρακτηριστικά όπως διάμετρος κοχλιών, ροπές σύσφιξης, οπές και αυλάκια καλωδίωσης, οπές στην πλακέτα, προσαρμογείς και καλωδιώσεις.

Παράγεται G-code από το SolidCAM για την κατεργασία των σχεδιασμένων τεμαχίων με το κέντρο κατεργασίας CNC Haas minimill. Παρατίθενται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την κατασκευή των τεμαχίων. Επίσης περιγράφεται η τοποθέτηση και επικόλληση των SG με συγκεκριμένες μεθόδους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εισάγεται η βαθμονόμηση και η αποσύζευξη των βαθμών ελευθερίας του αισθήτηρα καθώς επίσης και η κατασκευή της απαραίτητης βάσης βαθμονόμησης. Τέλος, το πέμπτο κεφάλαιο ασχολείται με την πειραματική διαδικασία για τον υπολογισμό του μητρώου βαθμονόμησης/αποσύζευξης και τον τρόπο που γίνεται η επικοινωνία με τον υπολογιστή. Το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία.

2 Προκαταρκτικός Σχεδιασμός Αισθητήρα Δύναμης/Ροπής 5-Αξόνων

2.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός μηχανολογικών διατάξεων προϋποθέτει γνώση των προδιαγραφών και των περιορισμών που σχετίζονται με τη διάταξη. Οι περιορισμοί είναι πολλοί και για αυτό πολλές φορές πολλοί από αυτούς μπορούν να αρθούν με την εμπειρία, έτσι ώστε να μην μετέχουν στον προκαταρκτικό σχεδιασμό. Άλλοι, μπορούν να αμεληθούν σε μια συγκεκριμένη φάση της σχεδίασης και να ληφθούν υπόψη σε μεταγενέστερη φάση. Όμως στον τελικό σχεδιασμό πρέπει να ικανοποιούνται όλες οι απαιτήσεις για να θεωρηθεί ότι η σχεδιαστική διαδικασία είναι επιτυχής.

Στην περίπτωση του σχεδιασμού ενός αισθητήρα δύναμης, ο προκαταρκτικός σχεδιασμός μπορεί να θεωρηθεί, μόνο κατά μια έννοια, συστηματικός καθώς πρόκειται για ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα που ανακύπτει από την μελέτη διαφορετικής φύσης υποσυστημάτων. Οι περιορισμοί που θα συμμετέχουν στον προκαταρκτικό σχεδιασμό αναπτύσσονται λεπτομερέστερα παρακάτω. Επιγραμματικά και μόνο σε αυτό το σημείο αναφέρεται ότι οι κύριοι περιορισμοί είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής, το απαιτούμενο χαμηλό βάρος, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η συμβατότητα με τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά του ρομπότ.

2.2 Σχεδιαστική Διαδικασία

Σκοπός αυτής της εργασίας, όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο είναι ο σχεδιασμός ενός πολυαξονικού αισθητήρα δύναμης. Στο Σχήμα 1-4 φαίνεται ένας στοιχειώδης αισθητήρας δύναμης. Αυτούσιος, αλλά και παραλλαγμένος χρησιμοποιείται ως δομική λίθος για τον σχεδιασμό. Η ιδανική περίπτωση θα ήταν να σχεδιαστεί μια κατασκευή η οποία θα τους συνθέτει κατάλληλα, έτσι ώστε όταν σε ένα σημείο ασκηθεί μια δύναμη προς τυχαία κατεύθυνση, τότε θα μπορεί να κάμπτεται συγκεκριμένο τμήμα για κάθε συνιστώσα. Ο σχεδιασμός μιας τέτοιας κατασκευής είναι δύσκολη διαδικασία και πολλές φορές αδύνατη. Ακόμα και αν γινόταν, πάντα θα υπάρχουν κατασκευαστικές ατέλειες και μη συμμετρικές κολλήσεις στα SG που δεν επιτρέπουν την μηχανική αποσύζευξη των συνιστωσών. Έτσι αυτό που γίνεται είναι, κάθε συνιστώσα να παραμορφώνει περισσότερο ένα τμήμα και λιγότερο κάποιο άλλο. Ορίζεται για κάθε συνιστώσα δύναμης/ροπής μια πρωτεύουσα παραμόρφωση και οι δευτερεύουσες της. Με ύστερη επεξεργασία των μετρήσεων και με χρήση του μητρώου αποσύζευξης οι δευτερεύουσες αντισταθμίζονται.

Η κατασκευή πρέπει μετά τον σχεδιασμό να ελεγχθεί σε αντοχή σε κάθε περίπτωση φόρτισης. Πρέπει επίσης να γίνει μια εκτίμηση των παραμορφώσεων στα σημεία τοποθέτησης των SG για να επιτευχθεί ευαισθησία κοντά στην επιθυμητή. Η ανάλυση αυτή γίνεται με την βοήθεια του SolidWorks. Επίσης, κατά τον σχεδιασμό πρέπει να ληφθούν υπόψη οι γεωμετρικοί περιορισμοί.

Προκειμένου να ξεκινήσει η σχεδιαστική διαδικασία πρέπει πρώτα να γίνουν κάποιες αναλύσεις επί της εφαρμογής, που θα επιτρέψουν τον προσδιορισμό των προδιαγραφών του αισθητήρα.

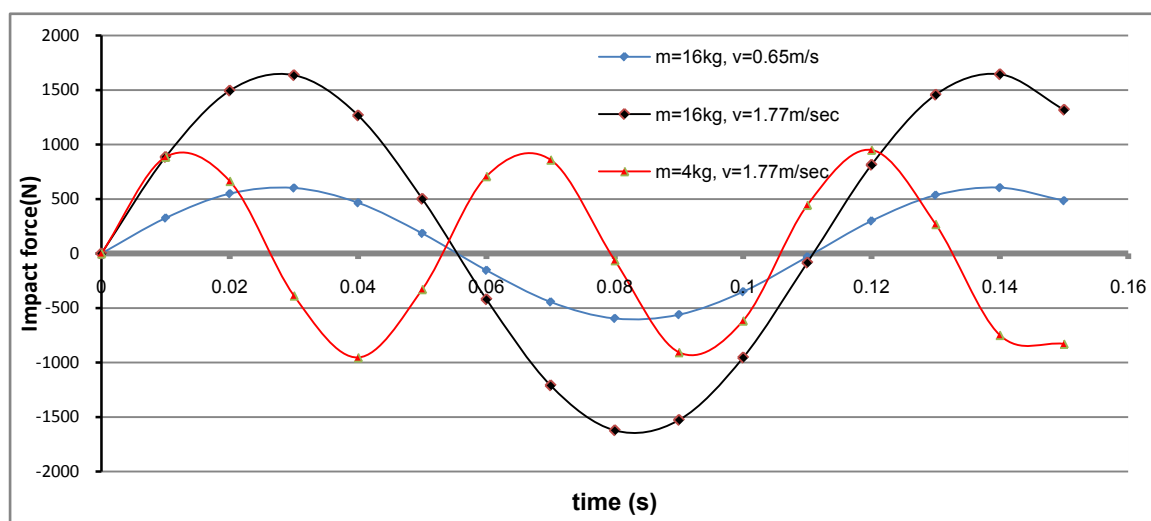
2.3 Προσδιορισμός Προδιαγραφών

Η εφαρμογή, απαιτεί ο αισθητήρας να πληροί κάποιες προδιαγραφές προκειμένου οι μετρήσεις να έχουν την ακρίβεια που χρειάζεται η εφαρμογή και η κατασκευή να έχει επαρκή αντοχή. Για να οριστούν οι αρχικές προδιαγραφές πρέπει να μελετηθούν οι ανάγκες της εφαρμογής.

Πρώτη ανάλυση, είναι εκείνη με την οποία θα προσδιοριστούν οι **μέγιστες δυνάμεις και ροπές** που ασκούνται σε κάθε κατεύθυνση, για να σχεδιαστεί ένας αισθητήρας ο οποίος θα μπορεί να φέρει αυτές τις δυνάμεις χωρίς να αστοχήσει μηχανικά. Ο υπολογισμός των μέγιστων ροπών είναι έμμεσος και προσδιορίζεται μετά το σχεδιασμό, καθώς είναι συνάρτηση της γεωμετρίας. Αυτό συμβαίνει λόγω της θεώρησης

ότι στην επαφή του πέλματος με το έδαφος δεν ασκούνται ροπές αφού πρόκειται για σφαιρική επιφάνεια. Στην πραγματικότητα ασκούνται, αλλά είναι αμελητέες σε σχέση με αυτές που επάγονται από τις δυνάμεις. Για να γίνει αυτό, πρέπει να υπολογιστούν οι δυνάμεις που ασκούνται στις δεδομένες γεωμετρίες του πέλματος υπό τις δυσμενέστερες συνθήκες. Έτσι μελετάται η περίπτωση κίνησης του τετραπόδου ρομπότ. Θεωρείται ότι το ρομπότ αφήνεται να πέσει από κάποιο ύψος και προσγειώνεται με το ένα πόδι και ότι αυτό συμβαίνει αρχικά. Σε αυτές, το ύψος ρίψης είναι πολλαπλάσιο του ύψους αναπήδησης κατά την ευσταθή κατάσταση. Ως ύψος θεωρείται η απόσταση του πέλματος από το έδαφος. Τελικά, μελετάται η περίπτωση κρούσης μιας μάζας m (16kg) με το έδαφος, ως αποτέλεσμα ελεύθερης πτώσης από αρχικό ύψος h (16cm). Η μάζα στην άκρη φέρει ένα ελαστομερές πέλμα δεδομένης γεωμετρίας με σταθερά δυσκαμψίας k_z (50.000N/m). Το έδαφος θεωρείται ως άκαμπτο.

Το παραπάνω πρόβλημα προσεγγίζεται με την περίπτωση ταλάντωσης μάζας ελατηρίου με αρχική ταχύτητα της μάζας, αυτή που αναπτύσσεται από την πτώση λίγο πριν την κρούση. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 2-1. Πρόκειται για την απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της δύναμης. Επίσης φαίνονται και τα αποτελέσματα της κρούσης του μονόποδου ρομπότ σε ελεύθερη πρώτη από αρχικό ύψος 16cm. Σημειώνεται ότι το σύστημα είναι χωρίς απόσβεση και για αυτό παρατηρείται μια ελεύθερη ταλάντωση. Υπόψη λαμβάνονται μόνο οι μέγιστες τιμές στο διάγραμμα.



Σχήμα 2-1. Αποτελέσματα προσομοίωσης για την εκτίμηση των μέγιστων δυνάμεων.

Στο Σχήμα 2-1 φαίνεται επίσης η ταχύτητα που αναπτύσσεται λόγω της ελεύθερης πτώσης με επιτάχυνση βαρύτητας g ίση με $9,81\text{m/s}^2$. Η ταχύτητα αυτή χρησιμοποιείται ως αρχική συνθήκη στην επίλυση του προβλήματος. Στον Πίνακα 2-1 φαίνονται οι μέγιστες δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κρούση.

Πίνακας 2-1. Ενδεικτικές τιμές μέγιστων αναπτυσσομένων δυνάμεων.

	Αρχική ταχύτητα του πέλματος $v(m/s)$	Ύψος ρίψης h (cm)	F (N)	
Μάζα 16 kg	0,65	2,15	603,67	
Μάζα 16 kg	1,77	16	1643,85	
Μάζα 4 kg	0,65	2,15	350,34	
Μάζα 4 kg	1,77	16	954,14	

Τα παραπάνω σχετίζονται με την δύναμη F_z , την οποία καλείται να παραλάβει ο αισθητήρας. Για την ασφάλεια της κατασκευής πολλαπλασιάζουμε την μέγιστη δύναμη του πίνακα επί έναν συντελεστή ασφαλείας $S = 2$. Έτσι, πρέπει να σχεδιαστεί ένας αισθητήρας οποίος θα αντέχει τουλάχιστον $3300 N$ κατά τον άξονα z , δηλαδή

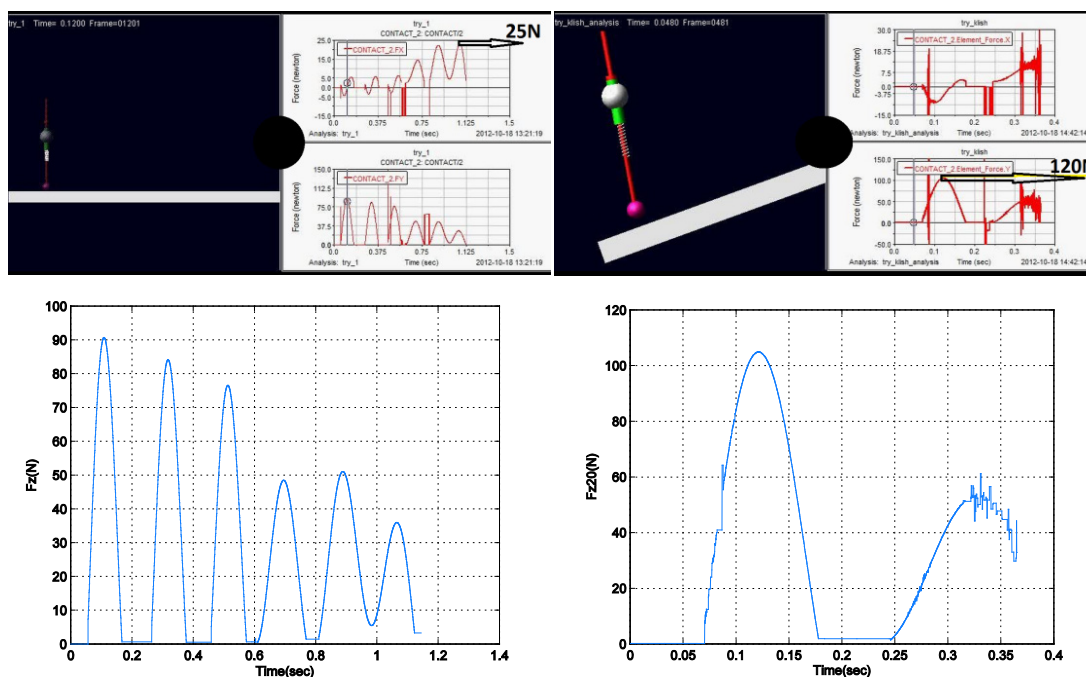
$$F_{z,max} \geq 2 \cdot 1643,85 \approx 3300 N \quad (2.1)$$

Για την μέγιστη δύναμη F_x , χρησιμοποιείται έμμεσος υπολογισμός με παραδοχές, οι οποίες βρίσκονται στην συντηρητική πλευρά του σχεδιασμού. Με την βοήθεια του περιβάλλοντος προσομοιώσεων για την κίνηση του ρομπότ που αναπτύχθηκε από τον Κωνσταντίνο Κουτσούκη [14] γίνονται εκτιμήσεις της F_x . Μετά από πειράματα που γίνονται, και λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των δυνάμεων του Πίνακα 2-1, βλέπουμε ότι η δύναμη F_z που φαίνεται να αναπτύσσεται κατά τις προσομοιώσεις σε ADAMS διαφέρει. Αυτό οφείλεται κυρίως επειδή σε αυτές τις προσομοιώσεις λήφθηκε υπόψη η περίπτωση του μονόποδου ρομπότ κατά την ευσταθή λειτουργία όπου το ύψος αναπήδησης είναι 2,5 cm και σε λανθασμένες εκτιμώμενες τιμές των μηχανικών σταθερών των στοιχείων. Στο Σχήμα 2-2 φαίνεται, ότι η τιμή της δύναμης F_z είναι το πολύ $120 N$ και η F_x το πολύ $25 N$, στις περιπτώσεις ανηφορικού εδάφους κλίσης 20 μοιρών και οριζοντίου. Έτσι αυτό που αποκομίζεται από τις προσομοιώσεις αυτές, είναι ο λόγος του F_z προς F_x . Προσδιορίζεται λοιπόν η $F_{x,max}$ όπως παρακάτω.

$$F_z = 120 N, \quad F_x = 25 N \rightarrow a = \frac{120}{25} = 4,8$$

Οπότε,

$$F_{x,max} = \frac{F_{z,max}}{4,8} \geq 687,5 N \quad (2.2)$$



Σχήμα 2-2. Προσομοιώσεις σε περιβάλλον ADAMS.

Δεύτερη ανάλυση, είναι εκείνη στην οποία θα προσδιοριστούν οι **ονομαστικές δυνάμεις και ροπές λειτουργίας** σε ευσταθή κατάσταση. Ομοίως με την πρώτη, μελετάται η περίπτωση κρούσης των παραπάνω αντικειμένων. Η διαφορά είναι στο ύψος που αυτή την φορά πρόκειται για το ύψος αναπήδησης, το οποίο λαμβάνεται ίσο με $2,15\text{ cm}$. Τα αποτελέσματα φαίνονται επίσης στον Πίνακα 2-1. Ως ονομαστική $F_{z,R}$ δύναμη ορίζεται η τιμή 604 N . Ο υπολογισμός της $F_{x,R}$ (Rated) γίνεται, χρησιμοποιώντας τον λόγο α ,

$$F_{x,R} = \frac{F_{z,R}}{4,8} \approx \frac{604}{4,8} \approx 125\text{ N} \quad (2.3)$$

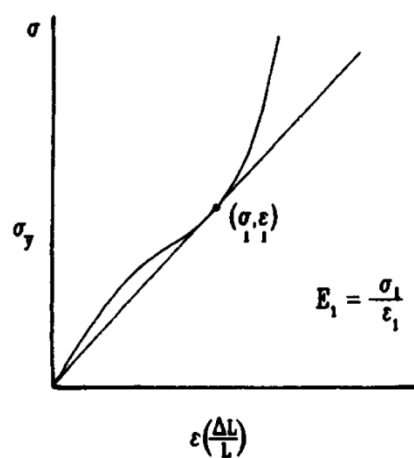
Τρίτη ανάλυση, είναι εκείνη που θα βοηθήσει στον προσδιορισμό της απαιτούμενης συχνότητας δειγματοληψίας. Η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μπορεί κανείς, μετά την συλλογή των δεδομένων να ανακατασκευάσει την καμπύλη που ακολουθεί η τιμή της δύναμης, με κάποια δεδομένη ακρίβεια. Πρέπει λοιπόν, να προσδιοριστεί αρχικά η μέγιστη συχνότητα f_{\max} με την οποία διεγείρεται το πέλμα κατά την κρούση. Μια πρώτη εκτίμηση της f_{\max} είναι 20 Hz και φαίνεται στο Σχήμα 2-1. Αυτή η τιμή όμως, δεν είναι η πραγματική και η τιμή της μπορεί να αλλάζει κατά την διάρκεια της κρούσης. Αυτό γίνεται, γιατί κατά τους υπολογισμούς λήφθηκε ένας μέσος

όρος της δυσκαμψίας k ($50.000N/m$) κατά την κατεύθυνση της κρούσης. Το k αυτό προσδιορίστηκε μέσα από πειράματα για το πέλμα. Με αυτή την τιμή μοντελοποιήθηκε η κρούση ως μια μάζα πάνω σε ένα ελατήριο που υπακούει στον νόμο του Hooke. Όμως ο νόμος του Hooke θεωρεί το k σταθερό, κάτι που δεν συμβαίνει στην περίπτωση της πολυουρεθάνης. Η πολυουρεθάνη είναι ένα ελαστομερές, μη γραμμικό υλικό για το οποίο η δυσκαμψία, είναι μια συνάρτηση μη γραμμική της παραμόρφωσης (Σχήμα 2-3).

$$k = f(\varepsilon) \quad (2.4)$$

όπου ε παραμόρφωση

Περισσότερες λεπτομέρειες μπορεί να βρει κανείς στο [2].



Σχήμα 2-3. Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης ελαστομερούς υλικού.

Επειδή οι πειραματικές διαδικασίες που απαιτούνται για τον προσδιορισμό αυτής της καμπύλης είναι χρονοβόρες και μη αναγκαίες, λαμβάνεται μια πρώτη εκτίμηση της f_{max} και πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή για λόγους ασφαλείας. Έτσι, σχεδιάζεται ένας αισθητήρας που μπορεί να μετράει πολύ υψηλότερα και επαληθεύεται στο πέμπτο κεφάλαιο ότι η τιμή της μέγιστης πραγματικής συχνότητας κρούσης είναι κοντά στην εκτιμώμενη. Αφού, ο αισθητήρας δειγματοληπτεί με πολύ υψηλότερη συχνότητα από $2 \cdot f_{max} = 40Hz$, μπορούμε να πούμε ότι δεν θα προκύψει κάποια παραμόρφωση στις μετρήσεις σύμφωνα με το κριτήριο Nyquist. Τελικά, η τιμή που δίνεται είναι πολλαπλασιασμένη επί 5 της προηγούμενης, για να μπορεί να ανακατασκευαστεί με ικανοποιητική ακρίβεια η καμπύλη αλλά και για λόγους ασφάλειας έναντι των υπολογισμών. Οπότε έχουμε,

$$f_{s,min} = 2 \cdot 5 \cdot f_{max} = 200Hz \quad (2.5)$$

$$fs \geq f_{s,min} \geq 200Hz \quad (2.6)$$

Η τελευταία συχνότητα χρησιμοποιείται τόσο για την επιλογή του ADC, όσο και για την σύγκριση με την 1^η φυσική συχνότητα της κατασκευής του αισθητήρα που θα προκύψει μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού. Εν γένει, η κατασκευή δεν πρέπει να διεγείρεται με συχνότητες κοντά στις ιδιοσυχνότητες για ασφάλεια της κατασκευής, αλλά και για την ακρίβεια των μετρήσεων. Έτσι, ως προδιαγραφή ορίζεται επίσης η f_{1fmin} (1st fundamental), μια ελάχιστη τιμή της 1^{ης} ιδιοσυχνότητας της κατασκευής χονδρικά στα 1000Hz για να μπορεί κανείς να πει ότι η διεγείρουσα δύναμη έχει πολύ μικρότερες συχνότητες.

Τελευταία προδιαγραφή ορίζεται η ανάλυση των μετρήσεων. Αυτή εμπειρικά και δεδομένης της εφαρμογής ορίζεται στο $1/1000$ του συνολικού εύρους μετρήσεων (Ονομαστικές δυνάμεις/ροπές) ή αλλιώς FS (Full Scale).

Συνοψίζοντας, μπορεί να πει κανείς ότι οι παραπάνω είναι οι σημαντικότερες προδιαγραφές που πρέπει να ικανοποιηθούν προκειμένου να έχουν νόημα οι μετρήσεις για την δεδομένη εφαρμογή. Παρατίθεται ο Πίνακας 2-2 ο οποίος παρουσιάζει συγκεντρωμένες τις τιμές που υπολογίστηκαν.

Πίνακας 2-2. Προδιαγραφές διάφορων χαρακτηριστικών του αισθητήρα.

Περιγραφή χαρακτηριστικού	Σύμβολο	Τιμή
Υπερφόρτωση στον άξονα z	$F_{z,max}$ (N)	3300
Υπερφόρτωση στον άξονα x	$F_{x,max}$ (N)	687,5
Ονομαστικό φορτίο στον άξονα z	$F_{z,R}$ (N)	604
Ονομαστικό φορτίο στον άξονα x	$F_{x,R}$ (N)	125
Ανάλυση μέτρησης σε κάθε άξονα (F ονομαστικό φορτίο)	d (N)	$F/1000$
Συχνότητα δειγματοληψίας	$f_{s,min}$ (Hz)	200
1 ^η φυσική συχνότητα κατασκευής	f_{1f} (Hz)	1000

2.4 Γεωμετρικοί Περιορισμοί

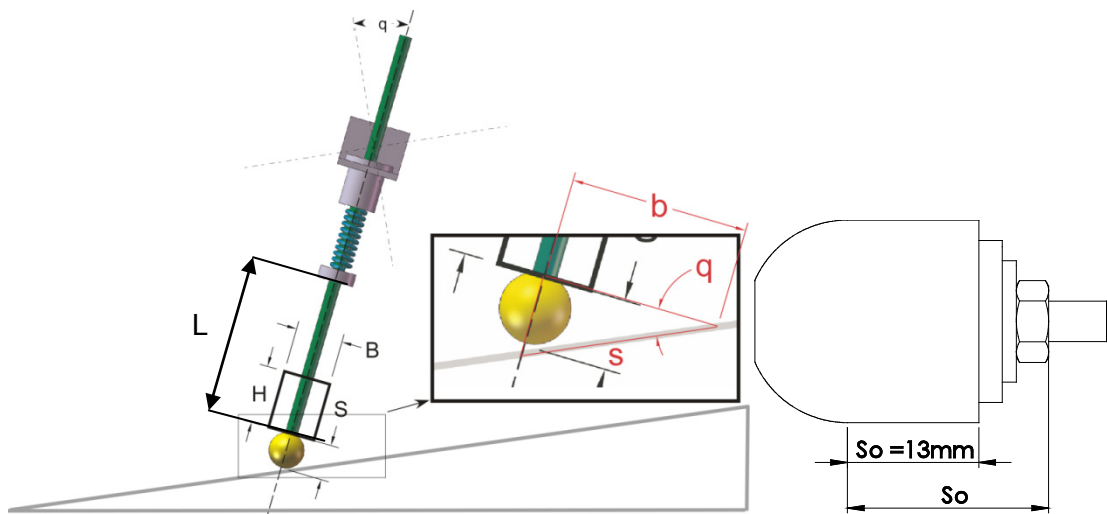
Για την ομαλή διεξαγωγή των μετρήσεων, πρέπει ο αισθητήρας να μην ακουμπάει στο έδαφος κατά την κίνηση του ρομπότ. Από το Σχήμα 2-4 φαίνεται ότι η διάσταση B πρέπει να είναι τόση ώστε, με δεδομένη την απόσταση S (απόσταση εδάφους από το πέρας του πέλματος) και την γωνία α στην μέγιστη τιμή της, να μην ακουμπάει στο έδαφος. Η απόσταση S αλλάζει ανάλογα με την σύνδεση του πέλματος με το πόδι καθώς μπορεί να έχει περικόχλια, ροδέλες και ελατήρια σύσφιξης που την μεταβάλλουν. Εκφράζεται από

την Εξ. 2-7. Η μέγιστη γωνία q που είναι αποτέλεσμα της συνθήκης μη ολίσθησης και ορίζεται από τον ελεγκτή είναι $q=25^\circ$ μοίρες. Το S_0 το οποίο είναι η απόσταση από το τέλος της ημισφαιρικής επιφάνειας του πέλματος μέχρι την αρχή του αισθητήρα (βλ. Σχήμα 2-4). Λαμβάνει την ελάχιστη τιμή του είναι όταν αποτελείται μόνο από το κυλινδρικό τμήμα του πέλματος. Αυτό μετράται με παχύμετρο και είναι ίσο με $13mm$. Το r είναι η ακτίνα της σφαιρικής επιφάνειας του πέλματος και είναι ίση με $10mm$.

$$S = S_0 + r \cdot \cos q \quad (2.7)$$

$$b = \frac{S}{\tan q} = \frac{S_0 + r \cdot \cos q}{\tan q} = \frac{13 + 10 \cdot \cos 25}{\tan 25} = 47,3mm$$

$$\frac{B}{2} \leq 47,3mm \Rightarrow B \leq 94,6mm \quad (2.8)$$



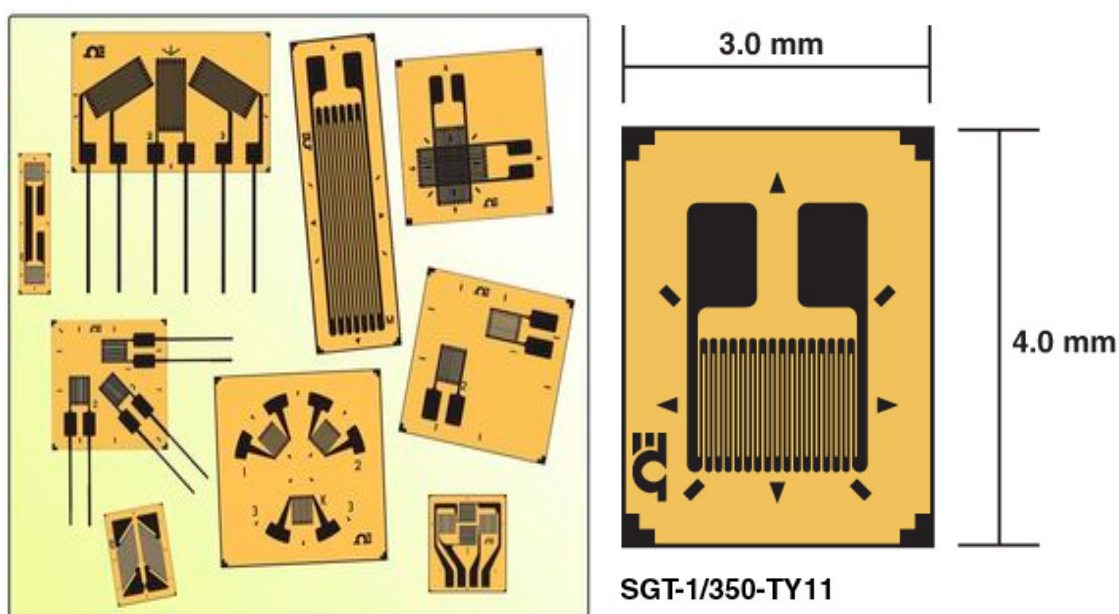
Σχήμα 2-4. Γεωμετρικοί περιορισμοί σχεδιασμού αισθητήρα.

Έτσι παραπάνω ορίστηκε η μέγιστη εγκάρσια διάσταση B του αισθητήρα. Παρόλα αυτά η διάσταση B δεν μπορεί να είναι όσο δείχνει η Εξ. (2.8). Προτιμότερο είναι η διάσταση αυτή να είναι όσο γίνεται μικρότερη καθώς αυξάνει την ροπή αδράνειας του ποδιού έχοντας συγκεντρωμένη μάζα σε μεγάλη απόσταση από την άτρακτο του κινητήρα.

Το H περιορίζεται από το μήκος του ποδιού που είναι κάτω από το ελατήριο (L). Όπως θα φανεί στην πορεία το τελικό H είναι αρκετά μικρότερο από το L . Για λόγους πληρότητας όμως το μήκος αυτό μετράται με παχύμετρο και είναι $L=110mm$.

$$H \leq 110mm \quad (2.9)$$

Επιπλέον γεωμετρικός περιορισμός, είναι η εξασφάλιση αρκετής επιφάνειας στα σημεία επιλογής τοποθέτησης των SG για να χωράνε. Τα SG που υπάρχουν στην αγορά βγαίνουν σε αρκετά μεγάλη ποικιλία μεγέθους και σχήματος. Μια ερευνά στις μεγαλύτερες κατασκευάστριες εταιρίες SG, όπως οι HBM, Omega και MicroMeasurements έδειξε, ότι το SG με κατάλληλα χαρακτηριστικά για μεταλλάκτες έχει διαστάσεις $3 \times 4 \text{ mm}$ σε ορθογώνιο σχήμα (Σχήμα 2-5). Γενικότερα υπάρχουν και εταιρίες οι οποίες κατασκευάζουν SG κατά παραγγελία, αλλά αυτό το ενδεχόμενο αυξάνει πολύ το κόστος και μειώνει την αξιοπιστία στις μετρήσεις καθώς ένα custom SG μπορεί να μην έχει την επιθυμητή συμπεριφορά. Έτσι, επιλέγονται ήδη δοκιμασμένα SG που παράγονται σε μεγάλες ποσότητες στις εταιρίες και έχουν χαμηλότερο κόστος.



Σχήμα 2-5. Διάφορα SG από Omega Engineering.

Πρέπει λοιπόν, να εξασφαλιστεί αρκετή επιφάνεια πάνω στην κατασκευή προκειμένου να χωρέσουν τα SG για κάθε άξονα μέτρησης. Για λόγους εξασφάλισης της γραμμικότητας της τάσης εξόδου της γέφυρας V_o αλλά και της ευαισθησίας, επιλέγεται για κάθε άξονα η γέφυρα Wheatstone να είναι το λιγότερο μισή, δηλαδή να αποτελείται το λιγότερο από δύο SG. Τελικά πρέπει να εξασφαλιστούν, το λιγότερο 10 ορθογωνικές επιφάνειες των $3 \times 4 \text{ mm}$. Όπως θα φανεί στην πορεία για να επιτευχθεί αυτό επιλέγονται και διπλά SG, με την έννοια ότι για εξοικονόμηση επιφάνειας βρίσκονται στο ίδιο φέρον υλικό.

Για λόγους μείωσης του θορύβου επιλέγεται να σχεδιαστεί μια πλακέτα για τις μετρήσεις η οποία θα βρίσκεται εντός του αισθητήρα. Μέσω καλωδίων θα βγαίνει από τον αισθητήρα το ψηφιακό σήμα που παράγει ο ADC για να μην αλλοιώνονται οι

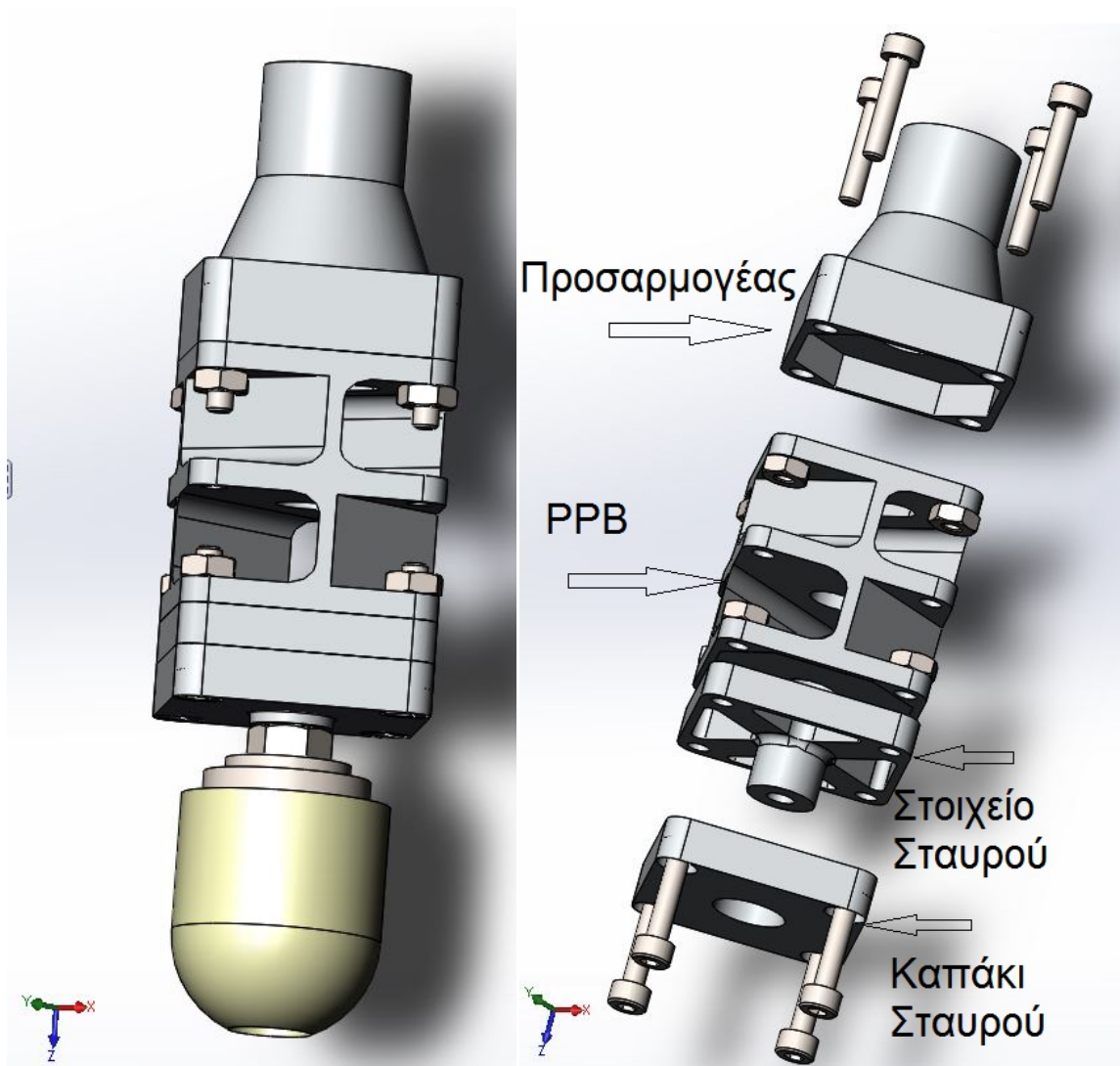
μετρήσεις. Έτσι πρέπει να εξασφαλιστεί χώρος αρκετός ώστε να χωράει η πλακέτα. Ο σχεδιασμός της πλακέτας γίνεται παράλληλα με τον σχεδιασμό της κατασκευής για να μπορούν να τροποποιούνται, ώστε να βρεθεί ένα κοινό σημείο σχεδιασμού.

2.5 Σχεδιασμός Μηχανικού Υποσυστήματος στο SolidWorks

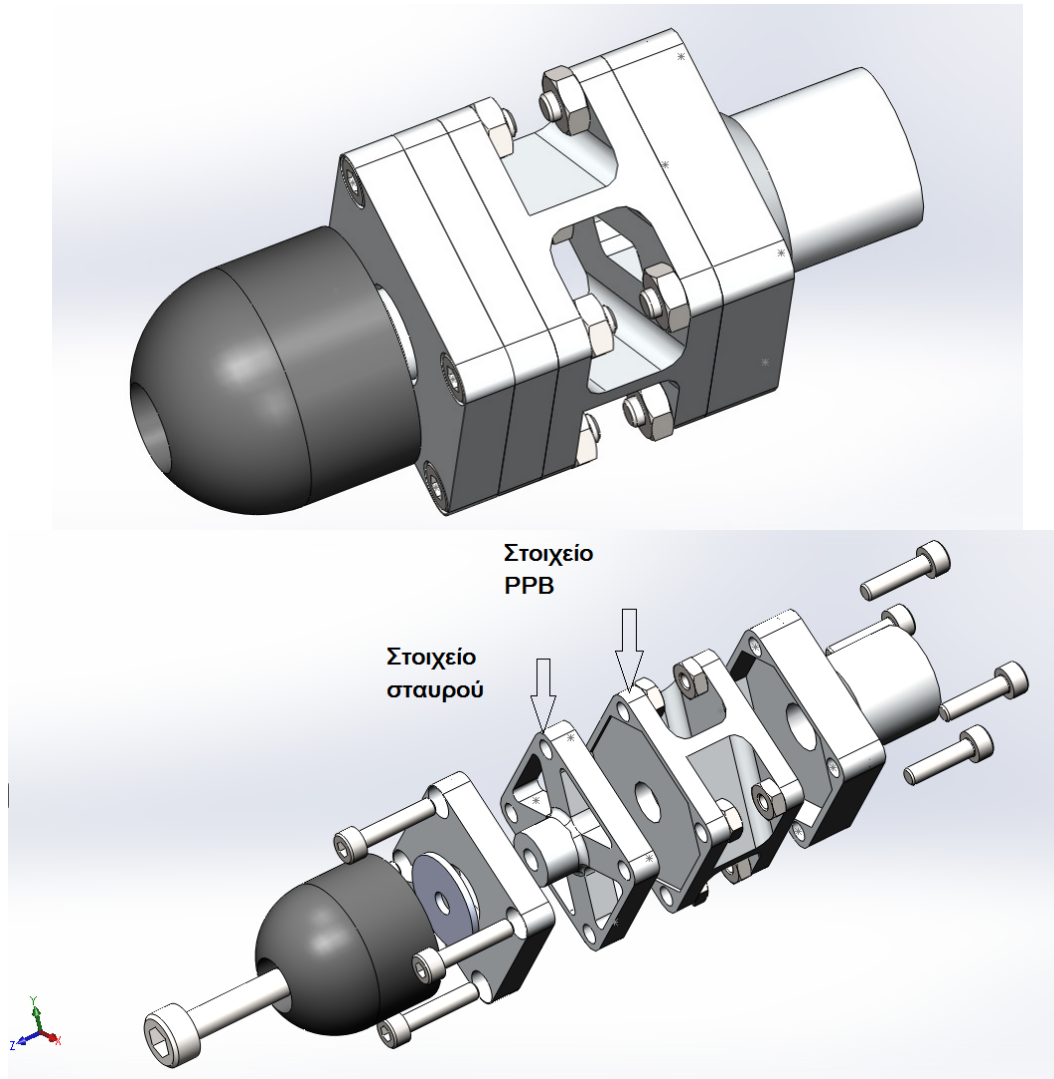
Για τον σχεδιασμό μιας κατασκευής που θα ικανοποιούσε τα αναφερθέντα στα εδάφια 2.3 και 2.4 και θα χρησιμοποιούσε στοιχεία όπως εκείνα στο Σχήμα 1-4, αναζητήθηκαν στη βιβλιογραφία ήδη σχεδιασμένοι αισθητήρες. Τα στοιχεία τύπου μεμβράνης δεν επιλέγονται, καθώς αυξάνουν πολύ τις συνολικές διαστάσεις και συνήθως χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό ενός αισθητήρα με μεγαλύτερη διάσταση B από H. Έτσι, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί στοιχείο τύπου σταυρού.

Αυτό που παρατηρήθηκε κατά την σύνθεση των παραπάνω στοιχείων, ήταν να αυξάνεται η αντοχή σε έναν άξονα με ταυτόχρονη μείωση της ευαισθησίας σε άλλους ή να αυξάνεται η ευαισθησία και να μειώνεται σε άλλους ή να μειώνεται η αντοχή. Έτσι, η σύνθεση έγινε με δοκιμές και πολλές εκδόσεις του αισθητήρα. Σχεδιάστηκαν διάφορες εκδόσεις και αξιολογήθηκαν όλες με την βοήθεια του SolidWorks Simulation Toolbox. Τελικά η όγδοη προσπάθεια φάνηκε να ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς και προδιαγραφές που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και ενότητες. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα τεμάχια από τα οποία αποτελείται, καθώς και η συναρμολογημένη κατασκευή. Επίσης, παρουσιάζεται και μια δευτέρη έκδοση η οποία είναι μια απόπειρα βελτίωσης των διαστάσεων (Σχεδιασμός 2 ή ΣΧ2). Το ΣΧ2 προέκυψε ως μια απόπειρα ελαχιστοποίησης των διαστάσεων. Σημειώνεται ότι και για αυτήν έχει χρησιμοποιηθεί η τελική ανάλυση. Έτσι στο ΣΧ2 χρησιμοποιείται ένα στοιχείο PPB από δύο που ήταν στο ΣΧ1. Αυτό όμως, όπως αποδείχθηκε πειραματικά εμφάνιζε υψηλή σύζευξη μεταξύ των δυνάμεων F_y και M_x και τελικά χρησιμοποιείται για να μετράει μόνο τις δυνάμεις F_z , F_x και M_y αλλά με την ίδια ανάλυση και αντοχή. Στο Σχήμα 2-6 φαίνεται το ΣΧ1 ενώ στο Σχήμα 2-7 το ΣΧ2.

Ολοκληρώνεται με αυτόν τον τρόπο η πρώτη φάση σχεδιασμού. Ένας γενικός κανόνας που ακολουθήθηκε για να υπάρχει ικανοποιητικό αποτέλεσμα, είναι ότι η κατασκευή πρέπει να είναι τέτοια ώστε τα επικίνδυνα σημεία της να είναι και τα σημεία μέτρησης. Με αυτό τον τρόπο εκμεταλλεύονται οι παραμορφώσεις της κατασκευής στο μέγιστο. Αυτό συμβαίνει επειδή η παραμόρφωση που μπορούμε να μετρήσουμε με τα SG και τα ηλεκτρονικά τους, έχει ένα κάτω όριο και ο συντελεστής αναλογίας c_1 έχει με αυτόν τον τρόπο την μέγιστη του τιμή. Έτσι, μεγιστοποιείται η συνολική ευαισθησία του μετρητικού συστήματος.



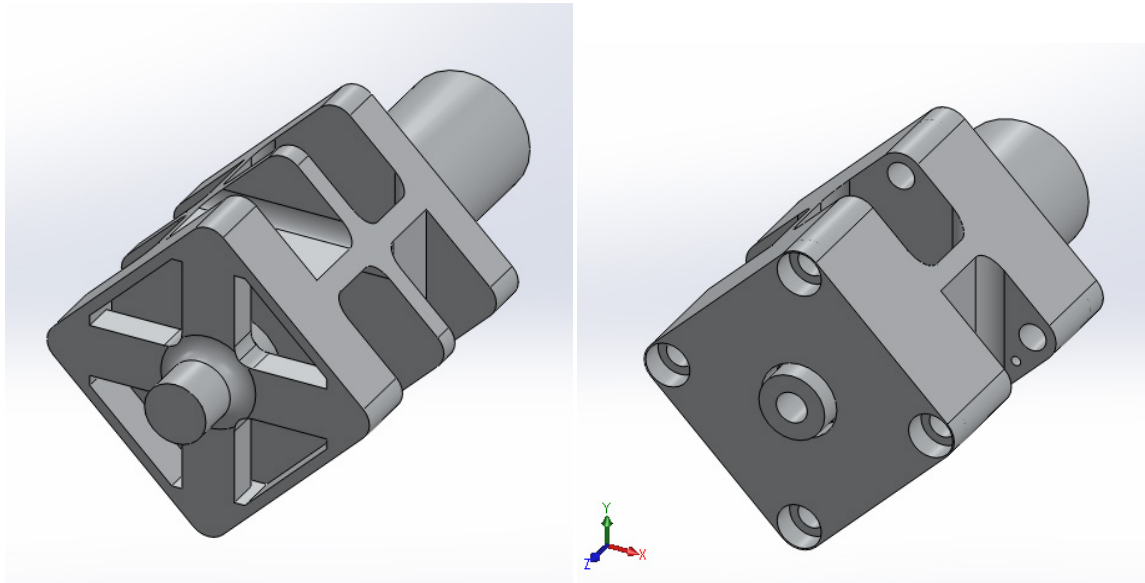
Σχήμα 2-6. Αισθητήρας δύναμης 5-αξόνων και αποτελούμενα μέρη.



Σχήμα 2-7. ΣΧ2. Στις εικόνες φαίνεται το μονό στοιχείο ΡΡΒ και οι κοχλιοσυνδέσεις.

2.6 Ανάλυση Κατασκευής με FEM στο SolidWorks

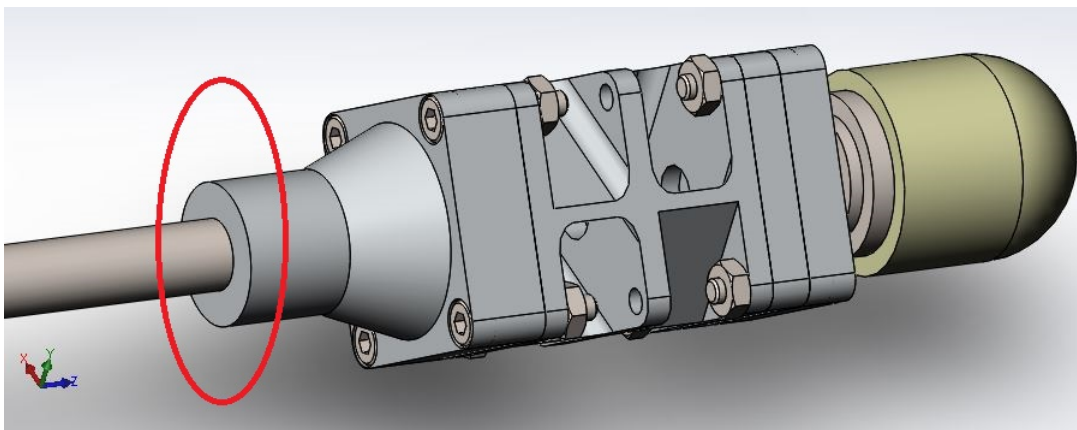
Για μικρότερο χρόνο εκτέλεσης των προσομοιώσεων οι παραπάνω κατασκευές απλουστεύονται ως προς την σύνδεση των τεμαχίων. Οι κοχλιοσυνδέσεις καταργούνται και τα τεμάχια είναι συνδεδεμένα ως ένα. Επίσης χαρακτηριστικά όπως οπές, γωνίες και αυλάκια που δεν συνεισφέρουν ουσιαστικά στα αποτελέσματα και αυξάνουν την πολυπλοκότητα της κατασκευής, έχουν αντικατασταθεί από απλές γεωμετρίες. Για τον έλεγχο αυτών των παραδοχών εξετάστηκαν σε λίγες περιπτώσεις φόρτισης και τα δύο μοντέλα. Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι υπάρχουν μικρές διαφορές στις προκύπτουσες παραμορφώσεις και τάσεις. Στο Σχήμα 2-8 φαίνονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.



Σχήμα 2-8. Απλοποιημένες κατασκευές για προσομοιώσεις.

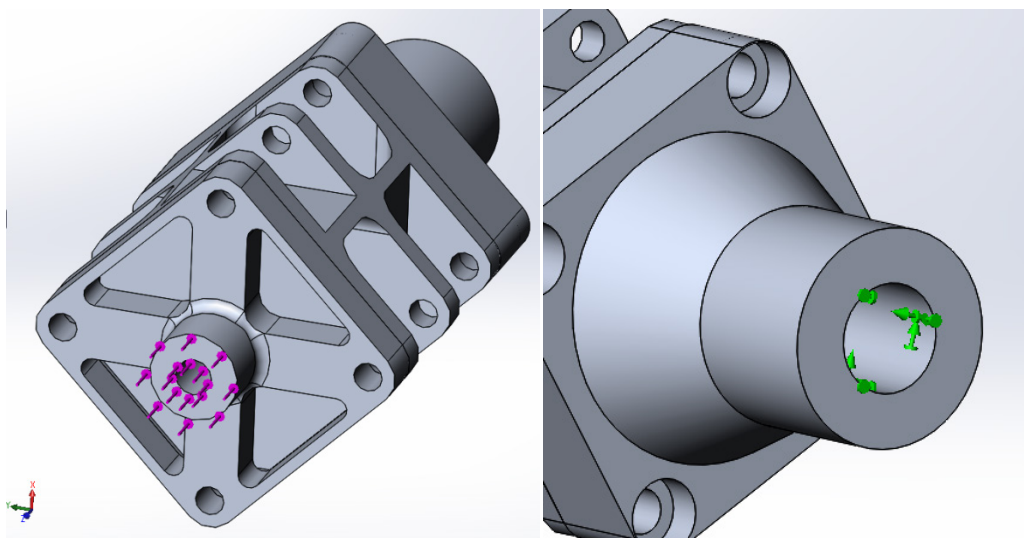
2.6.1 Στήσιμο Προσομοιώσεων

Ο αισθητήρας θα είναι πακτωμένος στο πόδι του ρομπότ μέσω σπειρώματος το οποίο θα βρίσκεται στο πίσω μέρος του (βλ. Σχήμα 2-9). Για την ακρίβεια θα βρίσκεται στο πίσω μέρος του καπακιού της πλακέτας ή αλλιώς προσαρμογέα του ποδιού. Το τεμάχιο αυτό είναι σχεδιασμένο για να ταιριάζει στο μονόποδο και το τετράποδο του εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου, αλλά μπορεί να επανασχεδιάζεται έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμόζει και αλλού.



Σχήμα 2-9. Πάκτωση του αισθητήρα με το πόδι.

Προσομοιώνεται λοιπόν, η στατική φόρτιση του ρομπότ με επιφάνεια εφαρμογής δύναμης/ροπής εκείνη στην οποία πατάει το πίσω μέρος του πέλματος και στήριξη μια πάκτωση στο σπείρωμα του καπακιού της πλακέτας. Στο Σχήμα 2-10 φαίνεται το στήσιμο της περίπτωσης φόρτισης της F_z .



Σχήμα 2-10. Προσομοίωση στατικής φόρτισης F_z .

Η περίπτωση της στατικής φόρτισης χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί η αντοχή στην περίπτωση υπερφόρτωσης και η παραμόρφωση στην περίπτωση άσκησης δύναμης ίσης με αυτή της ακρίβειας που ορίστηκε στο εδάφιο 2.3 και φαίνεται στον Πίνακα 2-2. Η ανάλυση ζητείται να είναι ίση με το $1/1000$ του ονομαστικού φορτίου. Επειδή όμως είναι συνάρτηση και του ηλεκτρονικού υποσυστήματος, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για τον προσδιορισμό της ανάλυσης των μετρήσεων. Εμπειρικά η παραμόρφωση πρέπει να είναι $\varepsilon \geq 0.5 \cdot 10^{-7}$ για να μπορεί να μετρηθεί χωρίς προβλήματα θορύβου. Έτσι, οι προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται για να κρατηθεί ο συνδυασμός ευαισθησίας-αντοχής σε επιτρεπτά επίπεδα, όπως αυτά ορίστηκαν από τις προδιαγραφές. Στον Πίνακα 2-3 παρατίθενται οι εξεταζόμενες περιπτώσεις φόρτισης.

Πίνακας 2-3. Περιπτώσεις φόρτισης της κατασκευής.

Δύναμη/Ροπή	Περίπτωση φόρτισης για έλεγχο αντοχής (N/Nm)	Περίπτωση φόρτισης για έλεγχο ανάλυσης (N/Nm)
F_z	3300	1,00
F_y	1000	0,25
F_x	1000	0,25
M_x	15	0,00575
M_y	15	0,00575
M_z	10	0,005

Μετά τον προσδιορισμό των ονομαστικών φορτίων $F_{x,R}$ και $F_{y,R}$ και τον προσδιορισμό της απόστασης S προσδιορίζονται οι ονομαστικές ροπές $M_{x,R}$ και $M_{y,R}$ ως εξής

$$M_{x,R} = F_{y,R} \cdot S_{\max} \quad (2.10)$$

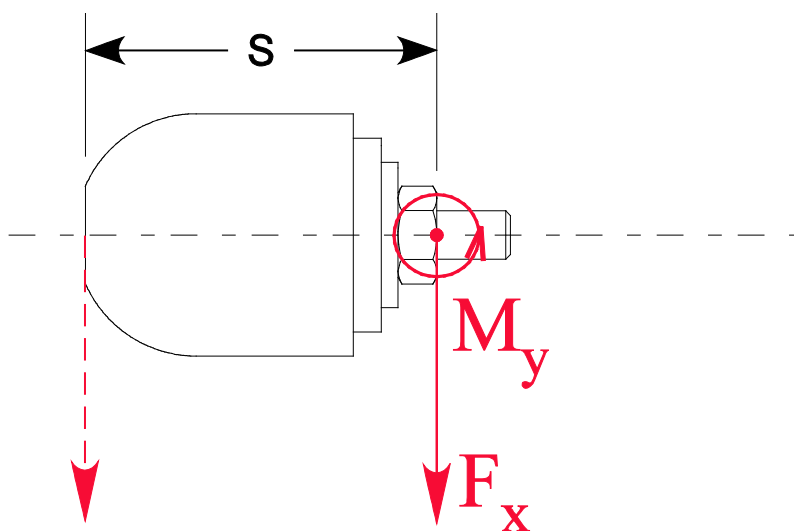
$$M_{x,R} = 250 \cdot 0,023 = 5,75 Nm \Rightarrow M_{x,R} = 5,75 Nm \quad M_{y,R} = 5,75 Nm$$

Επίσης προσδιορίζονται και οι υπερφορτώσεις

$$M_{x,\max} = F_{y,\max} \cdot S_{\max} \quad (2.11)$$

$$M_{x,\max} = 687,5 \cdot 0,023 = 15.81 Nm \Rightarrow M_{x,\max} = 15.81 Nm \quad M_{y,\max} = 15.81 Nm$$

Οι ροπές προκύπτουν κατά την επαγωγή των δυνάμεων από το άκρο του πέλματος στην αισθητήρια επιφάνεια της κατασκευής (βλ. Σχήμα 2-11). Αντίστοιχα ισχύει και για την M_x .



Σχήμα 2-11. Αναγωγή δύναμης F_x .

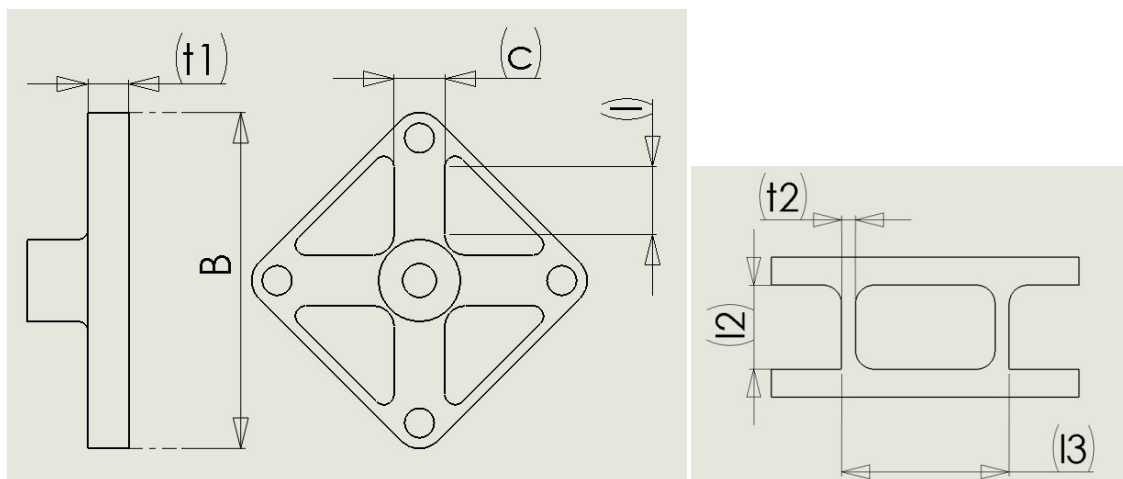
Οι υπολογισμοί αυτοί είναι συντηρητικοί καθώς το S_{\max} δεν θα είναι $23mm$ λόγω της ελαστικότητας του πέλματος που για πολυουρεθάνη είναι αρκετά υψηλή. Για την περίπτωση της $M_{z,\max}$ βάζουμε $10 Nm$ μόνο για λόγους ελέγχου αντοχής της κατασκευής και για το ενδεχόμενο της επέκτασης του αισθητήρα 5-αξόνων σε 6-αξόνων. Έτσι στον Πίνακα 2-4 παρουσιάζονται και τα επιπλέον υπολογισμένα μεγέθη και οι αναθεωρημένες τιμές των ονομαστικών φορτίων του Πίνακα 2-3.

Πίνακας 2-4. Αναθεωρημένες προδιαγραφές της κατασκευής.

Περιγραφή χαρακτηριστικού	Σύμβολο (Μονάδες)	Τιμή
Υπερφόρτωση στον άξονα z (δύναμη)	$F_{z,max}$ (N)	3300
Υπερφόρτωση στον άξονα y (δύναμη)	$F_{y,max}$ (N)	687,5
Υπερφόρτωση στον άξονα x (δύναμη)	$F_{x,max}$ (N)	687,5
Υπερφόρτωση στον άξονα y (ροπή)	$M_{y,max}$ (Nm)	15,81
Υπερφόρτωση στον άξονα x (ροπή)	$M_{x,max}$ (Nm)	15,81
Υπερφόρτωση στον άξονα z (ροπή)	$M_{z,max}$ (Nm)	10
Ονομαστικό φορτίο στον άξονα z (δύναμη)	$F_{z,R}$ (N)	1000
Ονομαστικό φορτίο στον άξονα y (δύναμη)	$F_{y,R}$ (N)	250
Ονομαστικό φορτίο στον άξονα x (δύναμη)	$F_{x,R}$ (N)	250
Ονομαστικό φορτίο στον άξονα y (ροπή)	$M_{y,R}$ (Nm)	5,75
Ονομαστικό φορτίο στον άξονα x (ροπή)	$M_{x,R}$ (Nm)	5,75
Ονομαστικό φορτίο στον άξονα z (ροπή)	$M_{z,R}$ (Nm)	5
Ανάλυση μέτρησης σε κάθε άξονα (F ονομαστικό φορτίο)	d (N/Nm)	$F/1000$
Συχνότητα δειγματοληψίας	$F_{s,min}$ (Hz)	200
1 ^η φυσική συχνότητα κατασκευής	f_{1fmin} (Hz)	1000

2.6.2 Επιλογή παραμέτρων σχεδιασμού

Ύστερα από κάποιες δοκιμές βλέπουμε ότι κάποιες διαστάσεις τις κατασκευής επηρεάζουν άμεσα την αντοχή και την ευαισθησία της. Αυτές φαίνονται στο Σχήμα 2-12 και είναι προφανές, ότι επηρεάζουν ελάχιστα τις εξωτερικές διαστάσεις. Συγκεκριμένα μεταβάλλουν μόνο το μήκος H του αισθητήρα.



Σχήμα 2-12. Παράμετροι σχεδιασμού.

Οι τιμές των διαστάσεων I , I_2 , των δοκών επιλέγονται και κρατούνται σταθερές, ευρισκόμενες πάντα μέσα στα εύρη που επιτρέπουν οι εξωτερικοί γεωμετρικοί περιορισμοί και τα μεγέθη των SG. Έτσι, οι παράμετροι που μεταβάλλονται είναι οι t_1 , t_2 , c και I_3 . Σε περίπτωση που, δεν ευρεθεί λύση μεταβάλλοντας τις παραμέτρους αυτές τέτοιες ώστε να ικανοποιούνται οι προδιαγραφές, τότε μεταβάλλονται οι άλλες διαστάσεις με τρόπο που να βελτιώνει το χαρακτηριστικό που χρήζει βελτίωσης. Η τιμή του πάχους του σταυρού επηρεάζει άμεσα την αντοχή και την ευαισθησία του. Το I_2 , I_3 και t_2 είναι ίδιο και στο ΣΧ1 για τα δύο PPB.

2.6.3 Επιλογή υλικού

Είναι προφανές ότι οι μηχανικές τάσεις και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται, είναι συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού που χρησιμοποιείται. Οι παραμορφώσεις που ζητούνται να αναπτύξει το υλικό πρέπει να είναι αρκετά μεγάλες ώστε να μπορούν να μετρηθούν. Πρέπει όμως να έχουν και ένα άνω όριο, για να μην αστοχήσει. Επιλέγεται για υλικό κατασκευής, ένα κράμα αλουμινίου που σχετικά με τα υπόλοιπα μέταλλα έχει μικρότερη σταθερά ελαστικότητας (μερικά από τα κράματα του φτάνουν αντοχές συγκρίσιμες με του χάλυβα).

Το κράμα αλουμινίου λόγω της χαμηλής πυκνότητας δίνει σε μια κατασκευή μεγάλο λόγο αντοχής προς βάρος. Έτσι η κατασκευή μπορεί να έχει μεγάλη αντοχή, και παράλληλα να εξασφαλίζει καλή ελαστικότητα. Επίσης, επιτρέπει μεγαλύτερη απορρόφηση ισχύος, σε θερμότητα, σε σχέση με τους χάλυβες με συνέπεια να μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη τάση παροχής της γέφυρας Wheatstone. Τελικά, υποβοηθάει πολύ στην αύξηση της ευαισθησίας του συστήματος. Ένα μέγεθος που θα μπορούσε να αξιολογήσει ένα υλικό ως προς την καταλληλότητα ενός υλικού για αισθητήρα δύναμης με SG είναι ο λόγος τάσης διαρροής προς το μέτρο ελαστικότητας.

Ο λόγος αυτός πρέπει να είναι όσο γίνεται μεγάλος. Για τα κράματα αλουμινίου φτάνει έως $(\sigma_{yield}/E)_{max} = 0,00764$ ενώ για τον χάλυβα περίπου $(\sigma_{yield}/E)_{max} = 0,005$. Άλλο πλεονέκτημα αυτής της επιλογής, είναι η ευκολία στην κατεργασία. Τα μειονεκτήματα σε σχέση με τον χάλυβα είναι το κόστος αγοράς του και το ότι η κατασκευή θα είναι μεγαλύτερη σε όγκο.

Το κράμα αλουμινίου με την μεγαλύτερη τιμή του παραπάνω λόγου είναι το **7075-T6** ή **T651**. Έχει όριο διαρροής στα 505 MPa και μέτρο ελαστικότητας 70.000 MPa . Χρησιμοποιείται στην κατασκευή μερών αεροσκαφών λόγω της υψηλής του αντοχής και του χαμηλού του βάρους. Στο παράρτημα Β φαίνεται το πιστοποιητικό του αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε.

2.6.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων και αξιολόγηση

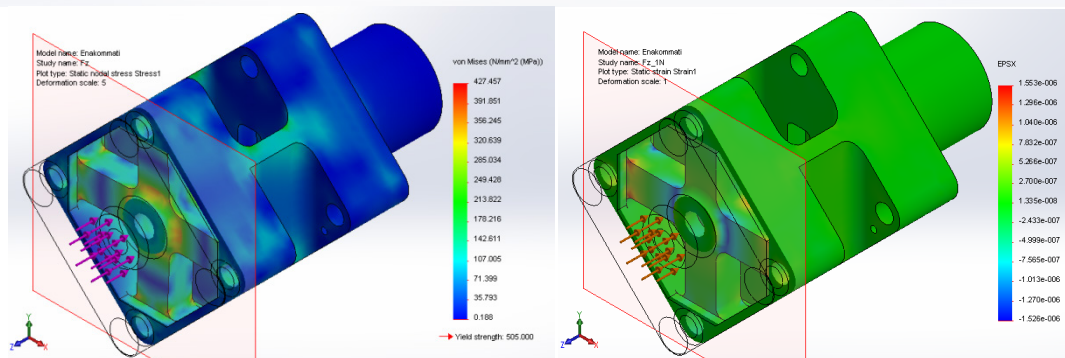
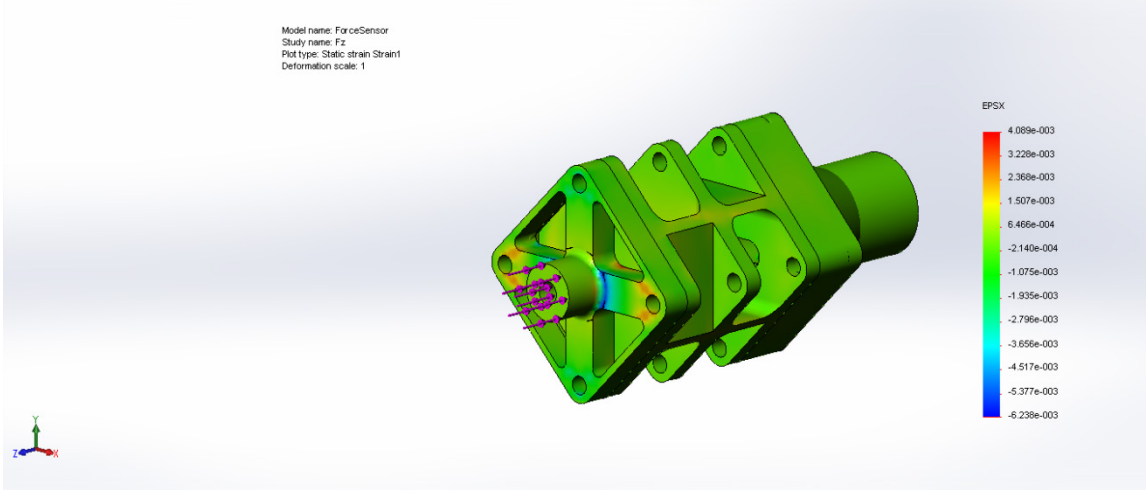
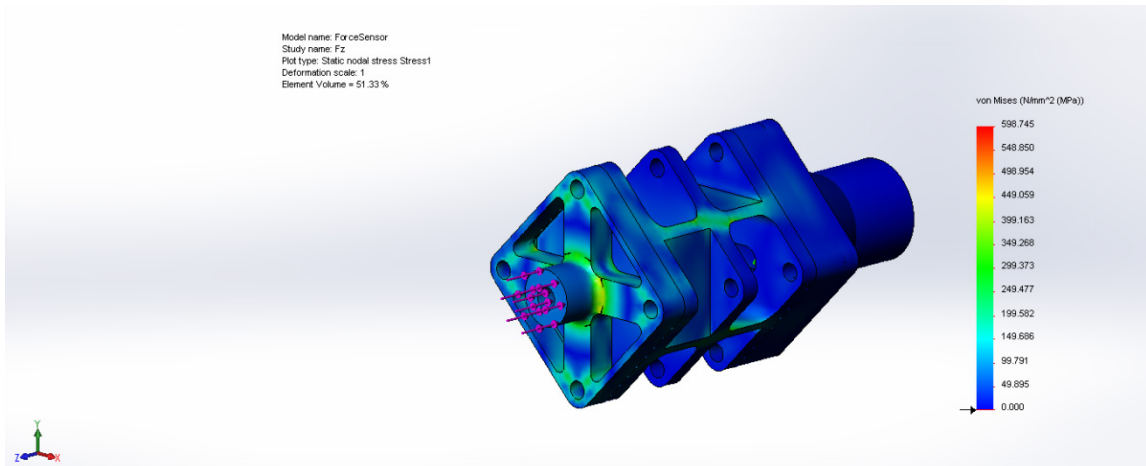
Ακολουθώντας τη διαδικασία που αναφέρεται στο εδάφιο 2.6.2, προσδιορίζονται οι τελικές τιμές των διαστάσεων t_1 , t_2 , c , l , l_2 και l_3 , οι οποίες ικανοποιούν τις προδιαγραφές. Με αυτόν τον τρόπο ολοκληρώνεται η δεύτερη φάση του σχεδιασμού. Αν δεν υπήρχε λύση με αυτές τις τιμές, αυτό που θα μπορούσε να γίνει θα ήταν η επιστροφή στην πρώτη φάση. Οι παράμετροι αυτές προσδιορίστηκαν με δοκιμές. Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι δεν πρόκειται για τις βέλτιστες τιμές που θα μπορούσαν να υπάρξουν άλλα για μια από τις πολλές λύσεις. Αυτές θα μπορούσαν να προσδιοριστούν, εφαρμόζοντας κάποια μέθοδο βελτιστοποίησης. Επειδή κάτι τέτοιο, δεν αποτελεί αντικείμενο αυτής της εργασίας, δεν εξετάζεται εδώ και αυτό που γίνεται είναι να εντοπιστεί μια λύση που ικανοποιεί τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Οι τελικές τιμές των παραμέτρων t_1 , t_2 , c , l , l_2 και l_3 φαίνονται στον Πίνακα 2-5.

Πίνακας 2-5. Τελικές τιμές σχεδιαστικών παραμέτρων

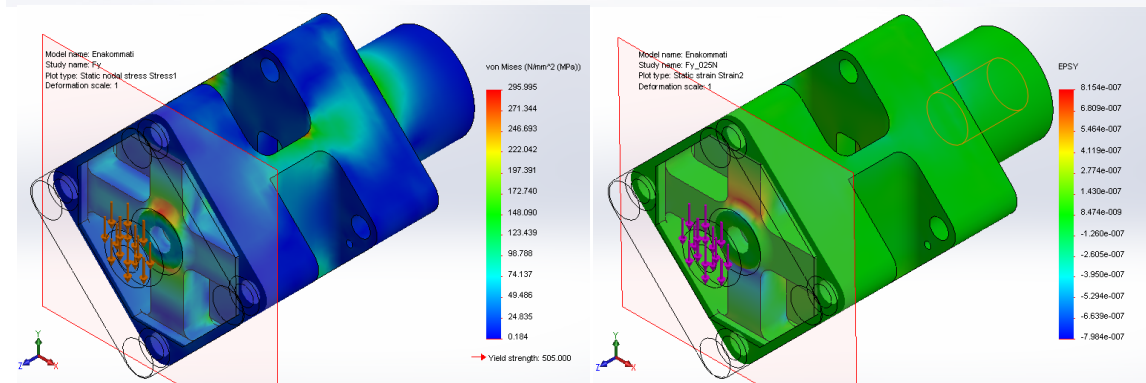
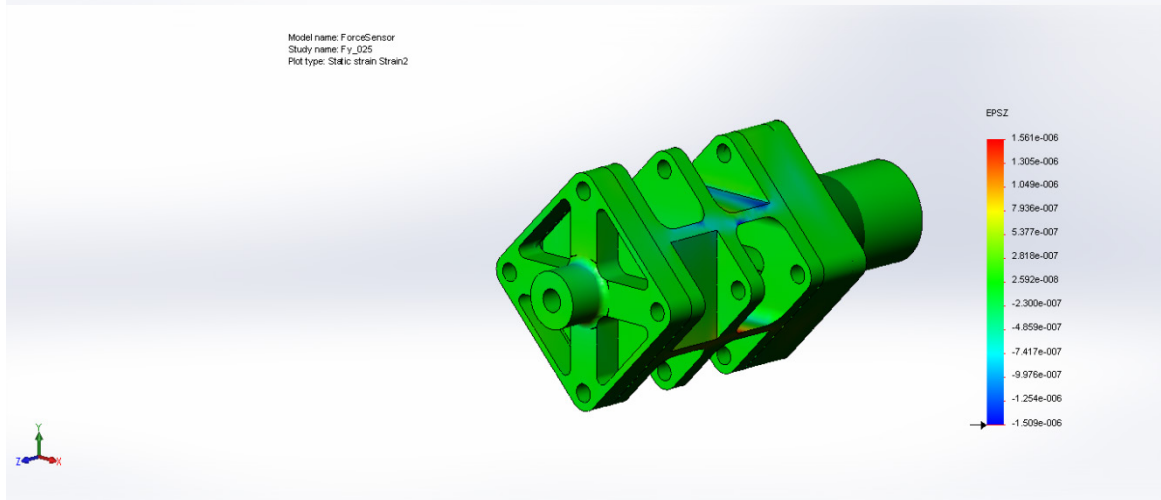
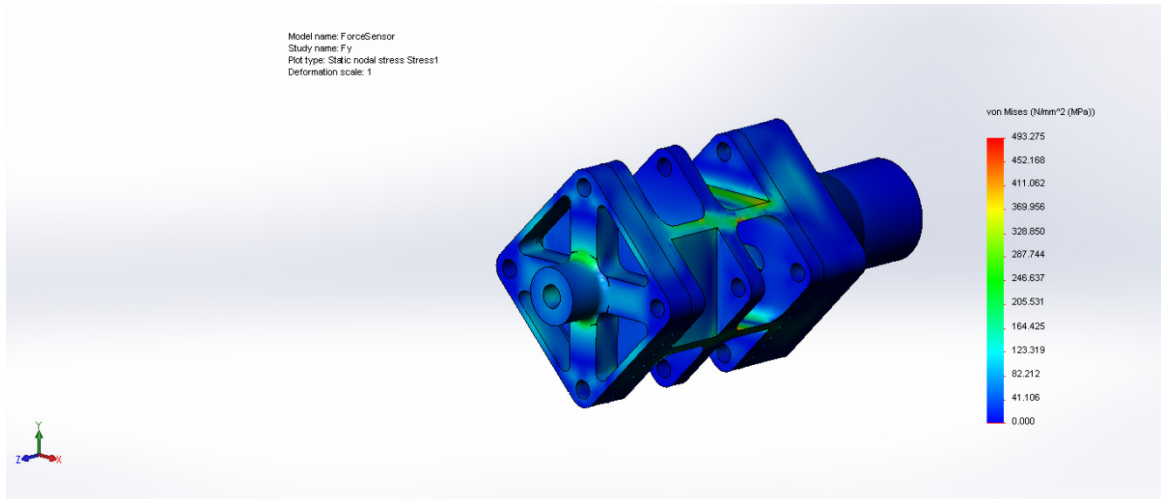
Σχεδιαστική παράμετρος	Τιμή (mm)
t_1	4,00
t_2	1,50
C	5,00
L	6,67
l_2	9,00
l_3	17,93

Τελικά, λαμβάνοντας τις περιπτώσεις φόρτισης του Πίνακα 2-3 και τις τελικές τιμές των σχεδιαστικών παραμέτρων του παραπάνω πίνακα γίνονται οι κατάλληλες προσομοιώσεις. Αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στα Σχήματα 2-13 έως 2-18 για τους δύο σχεδιασμούς. Συγκεκριμένα σε κάθε σχήμα:

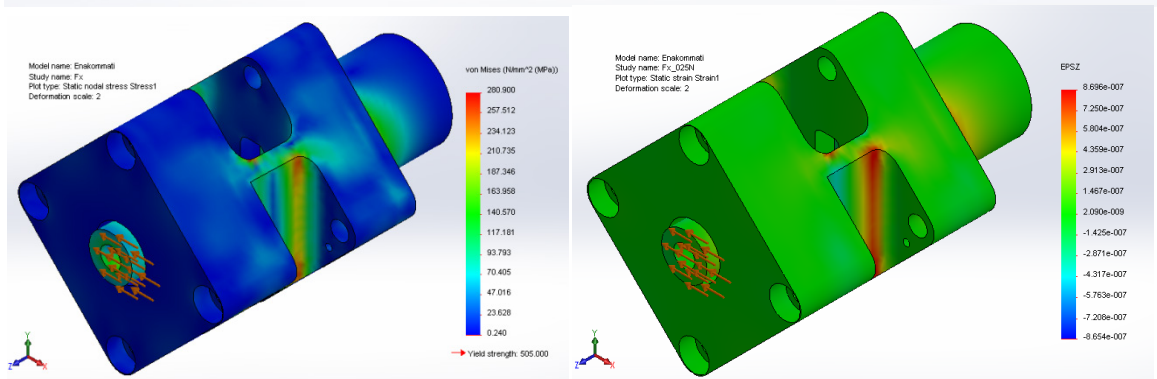
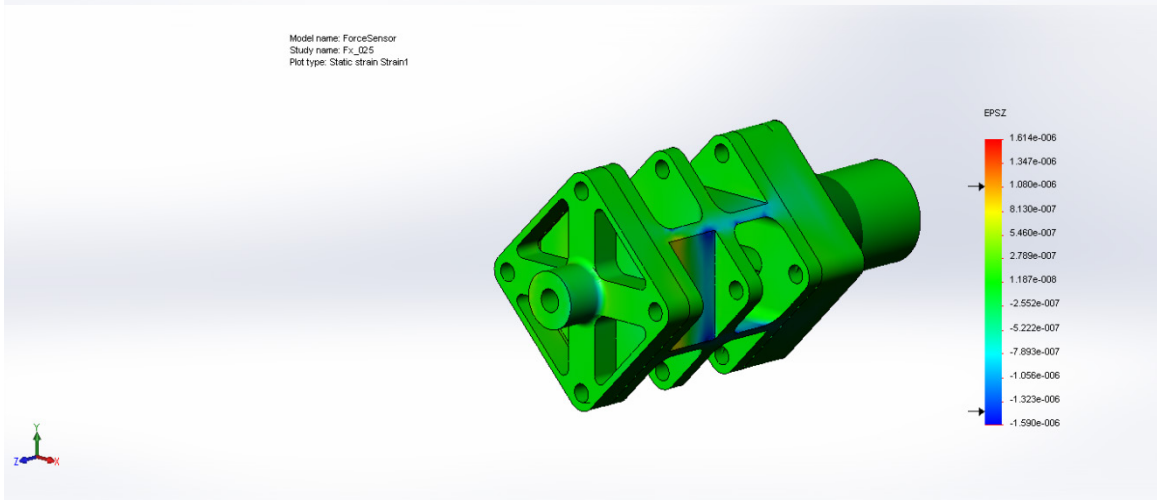
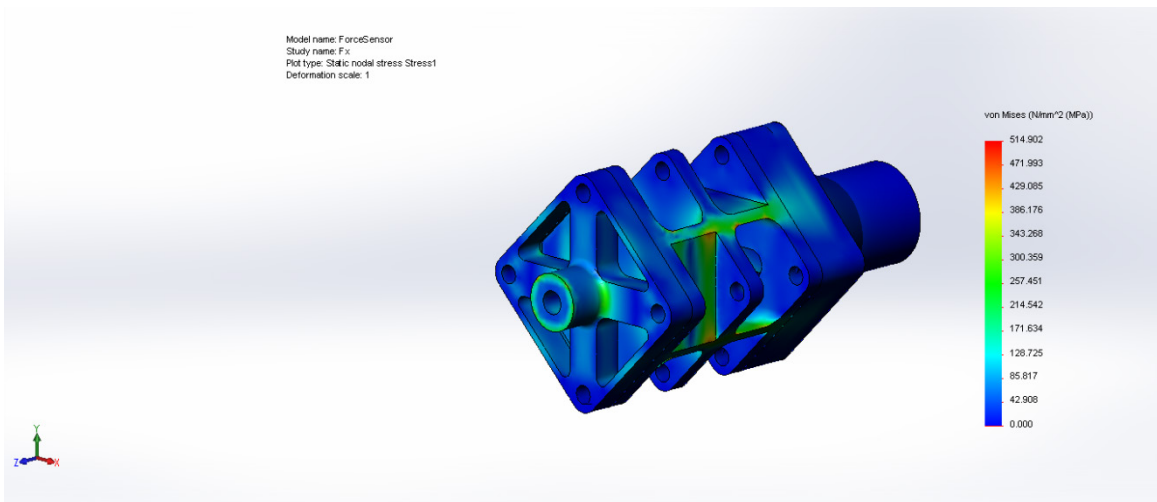
- Η πρώτη εικόνα από κάθε σχεδιασμό αφορά τις περιπτώσεις των υπερφορτώσεων. Ελέγχεται η μέγιστη αναπτυσσόμενη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises έτσι ώστε να μην ξεπερνάει το όριο διαρροής του υλικού που φαίνεται κάτω δεξιά. Οι περιπτώσεις M_x και M_y ξεπερνούν το όριο αλλά λόγω της υψηλής ασφάλειας της κατασκευής και του μη πυκνού πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων σε αλλαγή γεωμετρίας στο σημείο αστοχίας, οι περιπτώσεις θεωρούνται αποδεκτές.
- Η δεύτερη εικόνα έχει να κάνει με την περίπτωση της μέτρησης του ελάχιστου φορτίου, δηλαδή της ανάλυσης της μέτρησης σε κάθε άξονα. Ελέγχεται αν για το ελάχιστο φορτίο που θέλουμε να μετρήσουμε, οι παραμορφώσεις στις κατευθύνσεις που μετράνε τα SG στα επικίνδυνα σημεία, είναι πάνω από 0,5 μstrain .



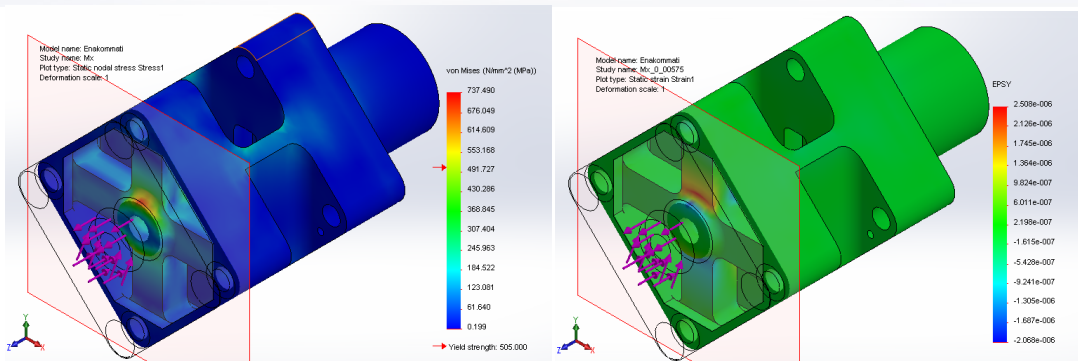
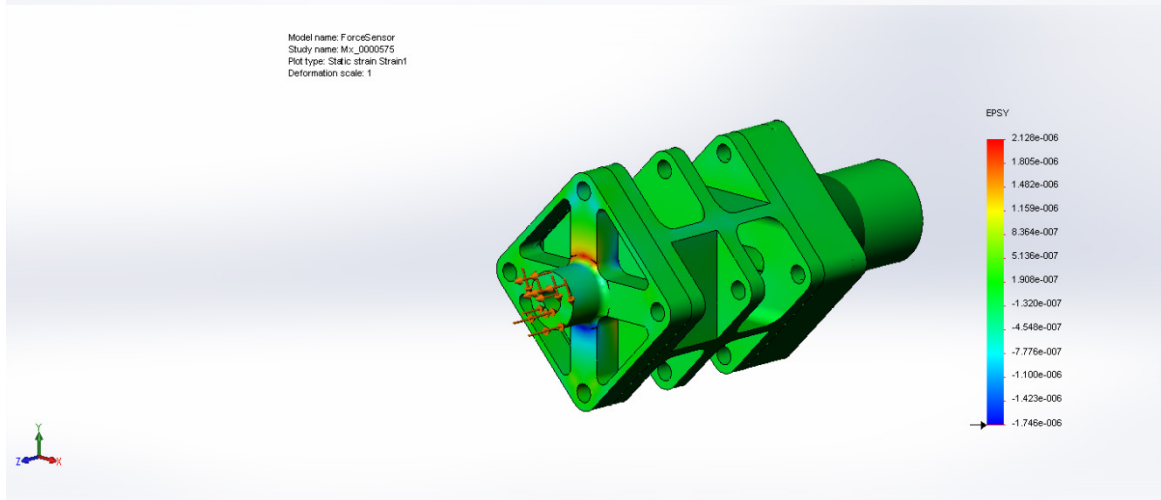
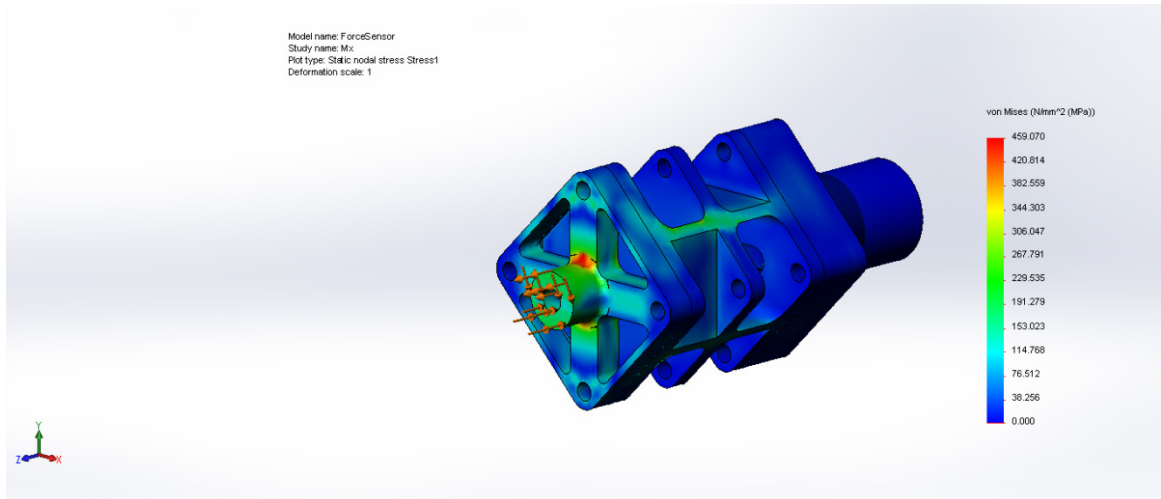
Σχήμα 2-13. Προσομοιώσεις υπερφόρτωσης και έλεγχος ανάλυσης της Fz.



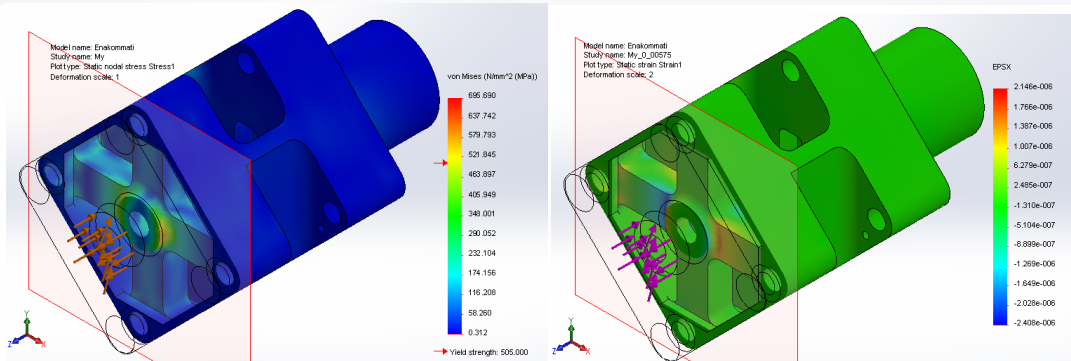
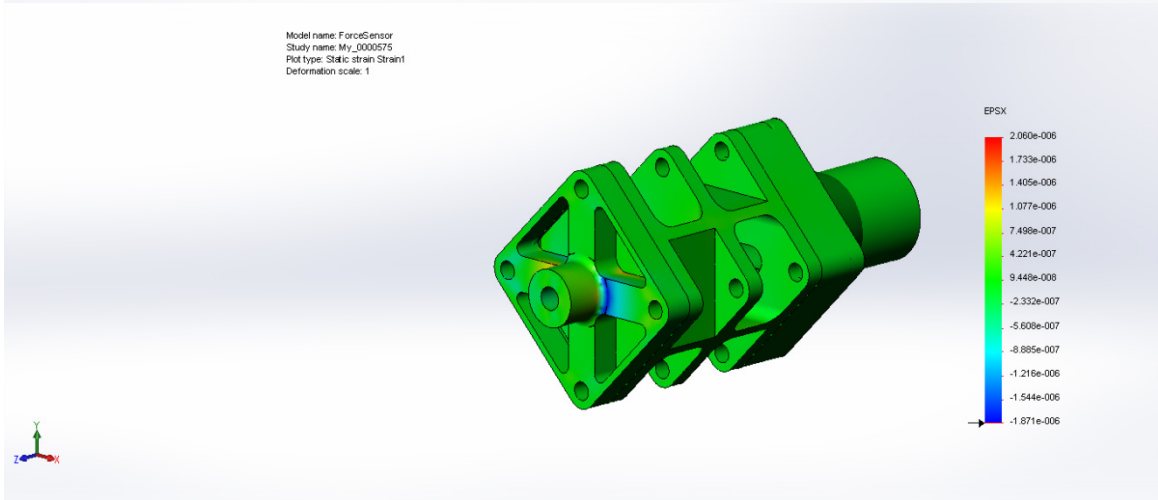
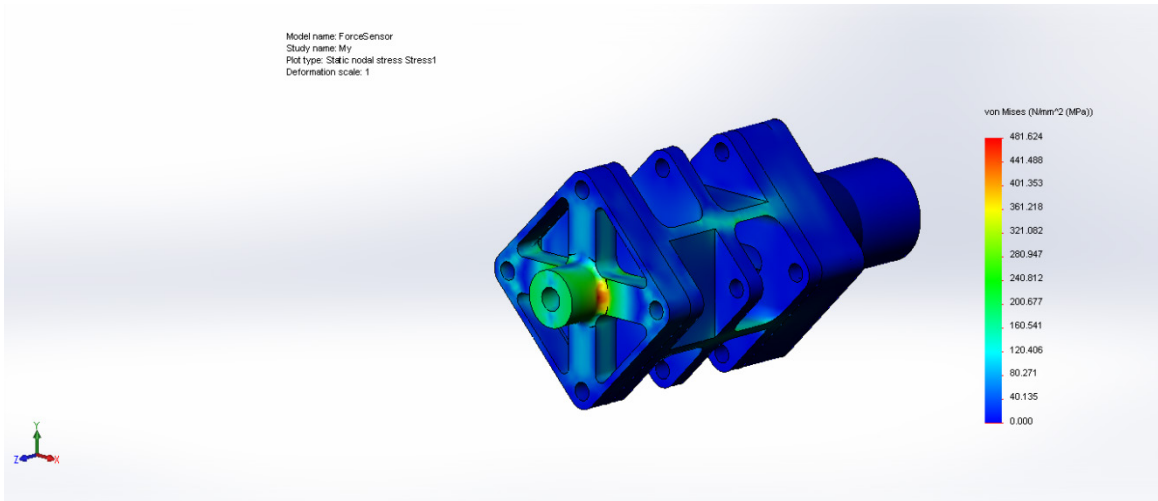
Σχήμα 2-14. Προσομοιώσεις υπερφόρτωσης και έλεγχος ανάλυσης της F_y .



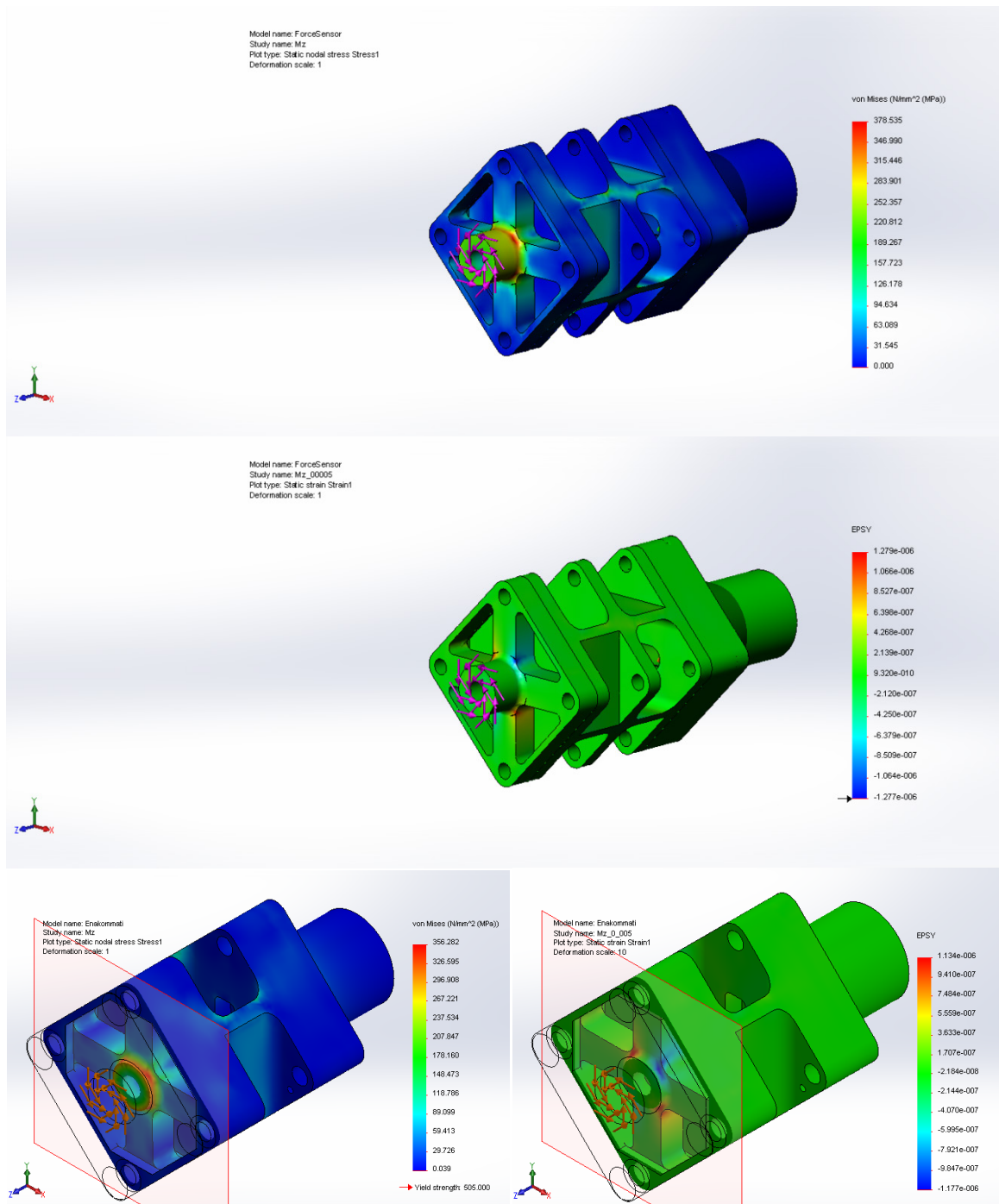
Σχήμα 2-15. Προσομοιώσεις υπερφόρτωσης και έλεγχος ανάλυσης της F_x .



Σχήμα 2-16. Προσομοιώσεις υπερφόρτωσης και έλεγχος ανάλυσης της M_x .



Σχήμα 2-17. Προσομοιώσεις υπερφόρτωσης και έλεγχος ανάλυσης της My.



Σχήμα 2-18. Προσομοιώσεις υπερφόρτωσης και έλεγχος ανάλυσης της M_z .

Για κάθε περίπτωση φόρτισης επιλέγεται να φανούν οι παραμορφώσεις κατά συγκεκριμένο άξονα. Τα SG αλλάζουν την αντίστασή τους αν παραμορφωθούν κατά το μήκος τους. Ως επιφάνειες κόλλησης των SG, επιλέγονται εκείνες που εμφανίζουν την μεγαλύτερη συγκέντρωση παραμορφώσεων. Έτσι, το SG επικολλάται σε τέτοια διεύθυνση που να λαμβάνει τις παραμορφώσεις κατά τον άξονα που η παραμόρφωση έχει την μεγαλύτερη τιμή. Ελέγχεται λοιπόν, σύμφωνα με τα αναφερθέντα στο εδάφιο 2.6.1, το ϵ αυτό να είναι μεγαλύτερο από $0,5 \cdot 10^{-6}$. Λόγω ανομοιομορφίας του

παραμορφωσιακού πεδίου λαμβάνεται υπόψη ο μέσος όρος της περιοχής επικόλλησης. Επειδή, η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων χρησιμοποιεί πεπερασμένα στοιχεία, το SolidWorks δίνει την δυνατότητα υπολογισμού του μέσου όρου παραμορφώσεων σε συγκεκριμένα στοιχεία.

Αφού, η πρώτη φάση σχεδιασμού είναι επιτυχής, δηλαδή ικανοποιούνται οι προδιαγραφές της αντοχής και ευαισθησίας, επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των ιδιομορφών της κατασκευής. Η εργασία αυτή, είναι εν γένει μια απλή διαδικασία μέσω SolidWorks.

Η πάκτωση εφαρμόζεται όπως στη στατική ανάλυση, ενώ η κάτω πλευρά θεωρείται ως άρθρωση. Στον Πίνακα 2-6 παρακάτω φαίνονται οι 9 πρώτες ιδιοσυχνότητες της κατασκευής καθώς και το ποσοστό μάζας σε κάθε κατεύθυνση, που συμμετέχει σε αυτές. Επίσης στο Παράρτημα Γ φαίνονται οι πέντε πρώτες ιδιομορφές της.

Πίνακας 2-6. Ιδιοσυχνότητες και συμμετοχή μάζας στις τρεις κατευθύνσεις για το ΣΧ1.

Mode No.	Freq (Hz)	X direction (kg/kg·100%)	Y direction (kg/kg·100%)	Z direction (kg/kg·100%)
1	2405.8	0.41802	7.62E-01	2.55E-05
2	2662.2	6.74E-01	0.48504	1.36E-02
3	6533.3	5.06E-04	3.07E-03	1.60E-02
4	7970.1	1.36E-04	0.04117	6.25E-01
5	8527	7.97E-04	2.52E-02	0.5412
6	12798	0.010674	4.46E-06	2.19E-02
7	13701	0.18908	7.98E-03	1.72E-03
8	20230	1.16E-03	7.25E-02	5.39E-07
9	23408	8.33E-04	0.1197	0.00052061
		Sum X = 0.61784	Sum Y = 0.646	Sum Z = 0.54179

2.7 Σχεδιασμός Ηλεκτρονικού Υποσυστήματος

Το ηλεκτρονικό υποσύστημα πρέπει να σχεδιαστεί για να μπορεί να διαβάζει την μεταβολή που προκύπτει στην έξοδο της γέφυρας Wheatstone από την ελάχιστη δύναμη

που έχει οριστεί ως προδιαγραφή στον Πίνακα 2-4. Όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα πρέπει σε κάθε άξονα το ηλεκτρονικό υποσύστημα, να μπορεί να μετράει κατ' ελάχιστο $0,5 \cdot 10^{-6}$ μηχανική τάση.

Η πλακέτα που θα φέρει τα αναλογικά φίλτρα και τον ADC πρέπει να είναι ενσωματωμένη στην κατασκευή. Επίσης, πρέπει να μπορεί να λειτουργήσει σε συμβατότητα με τα ηλεκτρονικά του ρομπότ. Αυτό σημαίνει, ότι πρέπει να μπορεί να τροφοδοτείται και να διαβάζεται από εκεί. Έτσι, πρέπει η πολυπλοκότητα του συστήματος να είναι όσο μειωμένη γίνεται. Η τάση τροφοδοσίας θα είναι κοινή και για την λειτουργία της πλακέτας και για την τροφοδοσία των γεφυρών. Στην ιδανική περίπτωση κάθε γέφυρα θα είχε την δική της τάση τροφοδοσίας και το δικό της ADC που θα δούλευε σε τάσεις ανάλογες της V_s . Έτσι θα γινόταν πλήρης εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των SG και η ευαισθησία των αξόνων θα βρισκόταν στο μέγιστο της. Κάτι τέτοιο, αυξάνει τις απαιτήσεις σε χώρο πάνω στην πλακέτα και υπάρχουν δυσκολίες στην χωροθέτηση των στοιχείων. Με τα υπάρχοντα ηλεκτρονικά στην αγορά, κάτι τέτοιο είναι σχεδόν αδύνατο. Έτσι, η λύση που προτείνεται είναι όλες οι γέφυρες να έχουν κοινή τάση τροφοδοσίας μεταξύ τους και κοινή γείωση με τον ADC.

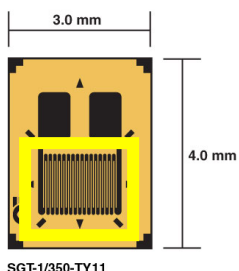
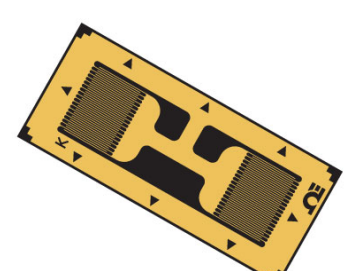
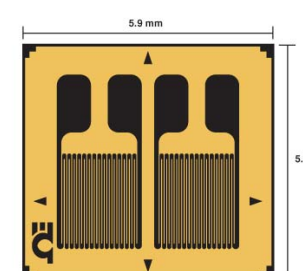
2.7.1 Strain gage και γέφυρα Wheatstone

Τα SG που υπάρχουν στο εμπόριο έχουν συγκεκριμένες διαστάσεις. Η περιοχή που μετράει παραμορφώσεις είναι εκείνη που καλύπτει ο αγωγός σε σχήμα κελιού του Σχήματος 2-19. Επειδή είναι εξαιρετικά λεπτά σε πάχος, είναι και πολύ ευαίσθητα όσον αφορά την αντοχή τους σε μηχανικές καταπονήσεις. Για να μην τραυματιστούν, οι κατασκευαστές τα παρέχουν με προστατευτικές επικαλύψεις. Η επικάλυψη εκτός από την αντοχή βοηθάει και στην τοποθέτηση των SG και στην ηλεκτρική μόνωση μεταξύ του υλικού της κατασκευής και του υλικού του SG. Η επικάλυψη αυτή αυξάνει το μέγεθος του SG. Θα βόλευε το SG να είναι όσο γίνεται μικρότερο για να μπορεί η κατασκευή να είναι μικρή.

Το SG ως αντίσταση, παράγει θερμότητα που πρέπει να μπορεί να το διαχύσει στο περιβάλλον του. Η θερμότητα αυτή είναι άμεση συνάρτηση της τάσης τροφοδοσίας της γέφυρας V_s και της ονομαστικής αντίστασης του R . Έτσι για να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του, πρέπει η V_s να έχει ένα πάνω όριο. Έχοντας ως πρωταρχικό στόχο την ελαχιστοποίηση των διαστάσεων της κατασκευής, η επιλογή των SG ως αρχικό κριτήριο είχε τις εξωτερικές διαστάσεις του και σαν δεύτερο τις ονομαστικές αντιστάσεις. Τα παραπάνω πρέπει να πληρούν παράλληλα και τις προδιαγραφές. Αυτό που όμως ζητείται από έναν αισθητήρα είναι η μεγιστοποίηση της ευαισθησίας του, πράγμα που επιτυγχάνεται σύμφωνα με την Εξ. (1.4) με την μεγιστοποίηση της V_s . Μια τιμή που

ικανοποιεί τις προδιαγραφές του ADC αλλά και τις προδιαγραφές του σχεδιασμού (όσον αφορά την ευαισθησία του), είναι τα 3,3V. Σημειώνεται ότι, το πλεονέκτημα της τάσης αυτής δεν είναι μόνο το ότι η τάση εξόδου της γέφυρας είναι εντός του εύρους μέτρησης του ADC αλλά και το ότι μειώνει τις απαιτήσεις σε ηλεκτρονικά. Με αυτή την επιλογή, η πλακέτα προκύπτει απλοποιημένη και μικρή σε μέγεθος.

Τελικά, τα SG που επελέγησαν είναι τέτοια ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πλήρη γέφυρα με μια μέγιστη τιμή της τροφοδοσίας V_s , η οποία παρέχεται από την κατασκευάστρια εταιρία. Ο κατάλογος δίνει για κάθε τύπο SG και για κάθε αντίσταση διαφορετική τιμή. Είναι, επίσης συνάρτηση του μετάλλου που θα επικολληθεί. Αυτό γίνεται γιατί κάθε μέταλλο μπορεί να απορροφήσει συγκεκριμένη ισχύ. Παρακάτω, φαίνονται οι διαστάσεις των SG καθώς και η μέγιστη τάση στην οποία μπορεί να δουλέψει ο κάθε τύπος. Για λόγους ευκολίας, η ονομαστική αντίσταση επιλέγεται για όλα να είναι $R = 350 \text{ Ohm}$. Στο Σχήμα 2-19 φαίνονται τα επιλεγμένα SG και οι διαστάσεις τους. Είναι προφανές, ότι πρέπει να χρησιμοποιηθεί $V_s < 6 \text{ Volt}$. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, επιλέχθηκε τάση τροφοδοσίας της γέφυρας 3,3 Volt. Έτσι, αυτά τα SG κρίνονται κατάλληλα για αυτή την εφαρμογή.

	 <p>SGT-1/350-TY11</p>		 <p>SGT-2/350-DY11</p>
	3×4 mm	4×9,2 mm	5,9×5,5 mm
Vmax	6 V	9 V	9,5 V

Σχήμα 2-19. Επιλεγμένα SG 350 Ohm από την Omega.

Ανάλογα με τη συνδεσμολογία η έξοδος της γέφυρας Wheatstone είναι διαφορετική. Εδώ θα αναλυθούν οι κύριοι τρόποι περιπτώσεις συνδεσμολογίας των SG σε μια γέφυρα και οι παραμορφώσεις που ασκούνται σε αυτά. Στο Σχήμα 1-4 φαίνονται οι περιπτώσεις καμπτόμενης δοκού. Σημειώνεται ότι οι περισσότερες περιπτώσεις είναι

παραλλαγές της καμπτόμενης δοκού. Σε αυτές επιλέγεται να κολληθούν τα SG σε σημεία που έχουν ίσες και αντίθετες παραμορφώσεις. Η V_o για αυτές τις περιπτώσεις εκφράζεται από την Εξ. (1.4). Έτσι, παρακάτω αναλύεται για κάθε άξονα η συνδεσμολογία του.

2.7.1.1 Φόρτιση F_z – ΣΧ1

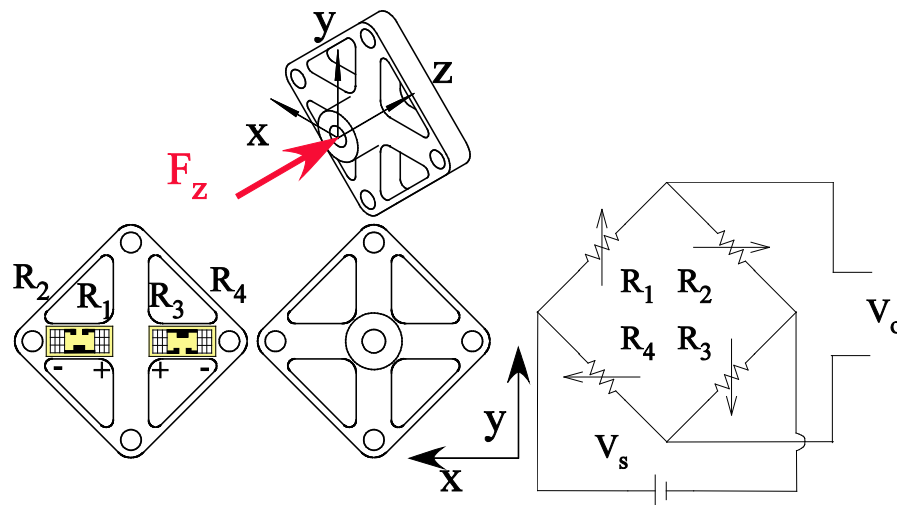
Στην περίπτωση της δύναμης F_z , λόγω έλλειψης χώρου δεν μπορεί να τοποθετηθούν και τα τέσσερα SG σε σημεία που προκαλούνται παραμορφώσεις ίσου μέτρου. Έτσι επιλέγεται να τοποθετηθούν ανά δύο SG σε σημεία με παραμορφώσεις ίδιου μέτρου δηλαδή

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_3 \text{ και } \varepsilon_2 = \varepsilon_4 \quad (2.12)$$

Επίσης ισχύει

$$\varepsilon_2 = -n \cdot \varepsilon_1 \quad (2.13)$$

Τονίζεται, ότι το n δεν αφορά το λόγο Poisson αλλά μια σταθερά αναλογίας μεταξύ των παραμορφώσεων. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται και η χωροθέτηση των SG.



Σχήμα 2-20. Κόλληση SG και παραμορφώσεις για την F_z .

Από την εξίσωση στοιχείου του SG,

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (2.14)$$

Έχουμε,

$$\frac{\Delta R_1}{k_1 \cdot R_1} = \varepsilon_1, \frac{\Delta R_2}{k_2 \cdot R_2} = \varepsilon_2, \frac{\Delta R_3}{k_3 \cdot R_3} = \varepsilon_3, \frac{\Delta R_4}{k_4 \cdot R_4} = \varepsilon_4 \quad (2.15)$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στην Εξ. (2.12) έχουμε,

$$\frac{\Delta R_1}{k_1 \cdot R_1} = -\frac{\Delta R_2}{n \cdot k_2 \cdot R_2} = \frac{\Delta R_3}{k_3 \cdot R_3} = -\frac{\Delta R_4}{n \cdot k_4 \cdot R_4} \quad (2.16)$$

Θεωρώντας ότι τα SG στη γέφυρα έχουν ίσες ονομαστικές αντιστάσεις R και ίδια σταθερά k τότε

$$\Delta R_1 = -\frac{\Delta R_2}{n} = \Delta R_3 = -\frac{\Delta R_4}{n} \quad (2.17)$$

Έτσι για τις αντιστάσεις R_1, R_2, R_3 και R_4 ισχύει

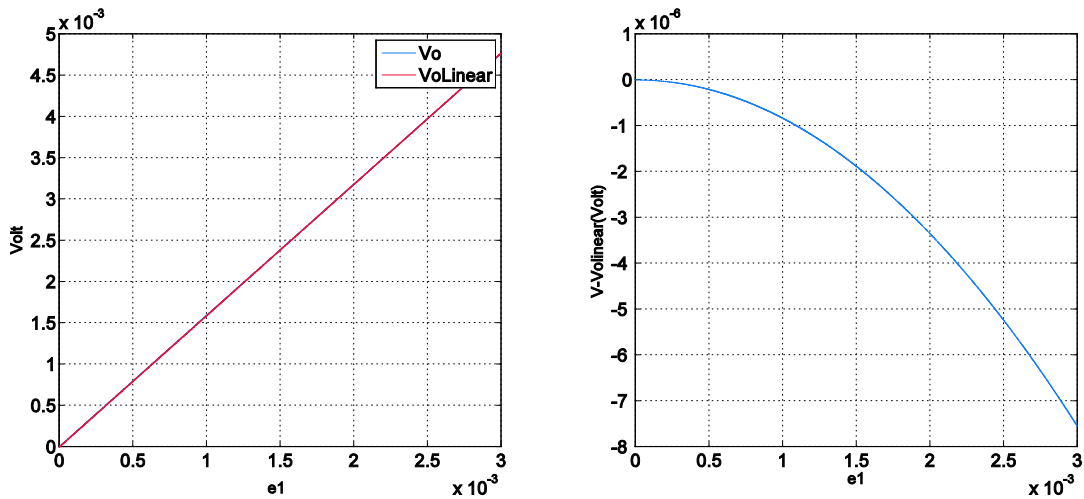
$$\begin{aligned} R_1 &= R + \Delta R_1 \\ R_2 &= R + \Delta R_2 \\ R_3 &= R + \Delta R_3 \\ R_4 &= R + \Delta R_4 \\ R_1 &= R + \Delta R_1 \\ R_2 &= R - n \cdot \Delta R_1 \\ R_3 &= R + \Delta R_1 \\ R_4 &= R - n \cdot \Delta R_1 \end{aligned} \quad (2.18)$$

Αντικαθιστώντας την Εξ. (2.18) στην Εξ. (1.4) προκύπτουν τα εξής

$$V_o = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \cdot V_s = \dots = \frac{\frac{\Delta R_1}{R} \cdot (1+n)}{2 + \frac{\Delta R_1}{R} \cdot (1-n)} \cdot V_s = \frac{k \cdot \varepsilon_1 (1+n)}{k \cdot \varepsilon_1 (1-n) + 2} \cdot V_s \quad (2.19)$$

Γίνεται σαφές ότι πρέπει να ελεγχθεί η μη γραμμικότητα της παραπάνω εξίσωσης. Αυτή ελέγχεται εποπτικά με τα αποτελέσματα του κώδικα **Fzlinearity.m** σε matlab για την περιοχή λειτουργίας της δύναμης Fz. Στο Σχήμα 2-21 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ της υποτιθέμενης γραμμικής και της πραγματικής μη γραμμικής λειτουργίας.

Ελέγχεται η μη γραμμικότητα μέχρι $\varepsilon_1 = 3 \cdot 10^{-3}$ επειδή θεωρείται ότι γύρω από αυτή την τιμή κυμαίνεται η παραμόρφωση για το ονομαστικό φορτίο Fz. Ο κώδικας υπολογίζει και το σφάλμα [4] λόγω μη γραμμικότητας πλήρους εύρους και είναι 0,16% για $n=0,5$. Αυτό σημαίνει ότι η μέτρηση που αντιστοιχεί σε $\varepsilon_1 = 3 \cdot 10^{-3}$ έχει σφάλμα από την μη γραμμικότητα 0,16%. Σημειώνεται ότι αυτή η τιμή μικραίνει για μικρότερες παραμορφώσεις.



Σχήμα 2-21. Σύγκριση γραμμικής και μη γραμμικής περίπτωσης.

2.7.1.2 Φόρτιση F_x – ΣΧ1

Στην φόρτιση F_x οι παραμορφώσεις είναι ίσες και αντίθετες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-22. Αυτό συμβαίνει, επειδή η κατασκευή είναι συμμετρική και η δύναμη ασκείται στο κέντρο του άξονα συμμετρίας.

Ισχύει στην περίπτωση αυτή για τις παραμορφώσεις,

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 \quad (2.20)$$

Από την εξίσωση στοιχείου του SG,

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (2.21)$$

Έχουμε,

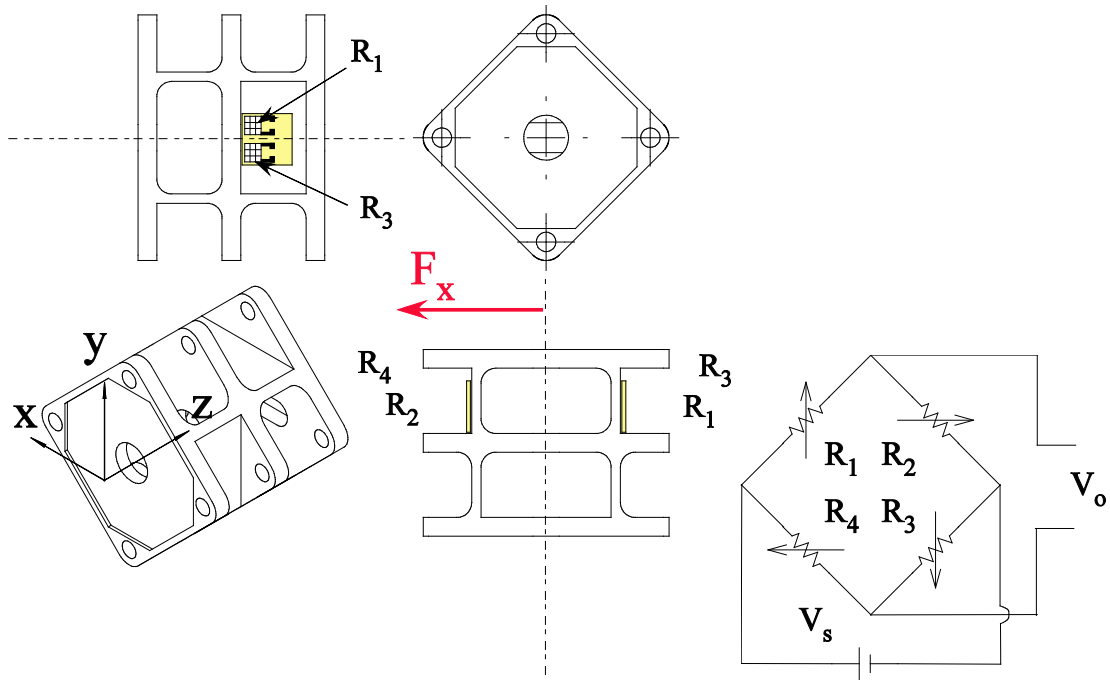
$$\frac{\Delta R_1}{k_1 \cdot R_1} = \varepsilon_1, \frac{\Delta R_2}{k_2 \cdot R_2} = \varepsilon_2, \frac{\Delta R_3}{k_3 \cdot R_3} = \varepsilon_3, \frac{\Delta R_4}{k_4 \cdot R_4} = \varepsilon_4 \quad (2.22)$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στην Εξ. (2.20) έχουμε,

$$\frac{\Delta R_1}{k_1 \cdot R_1} = -\frac{\Delta R_2}{k_2 \cdot R_2} = \frac{\Delta R_3}{k_3 \cdot R_3} = -\frac{\Delta R_4}{k_4 \cdot R_4} \quad (2.23)$$

Θεωρώντας ότι τα SG σε κάθε γέφυρα έχουν ίσες ονομαστικές αντιστάσεις R και ίδια σταθερά k τότε

$$\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R_4 \quad (2.24)$$



Σχήμα 2-22. Κόλληση SG και παραμορφώσεις για την F_x .

Έτσι για τις αντιστάσεις R_1 , R_2 , R_3 και R_4 ισχύει

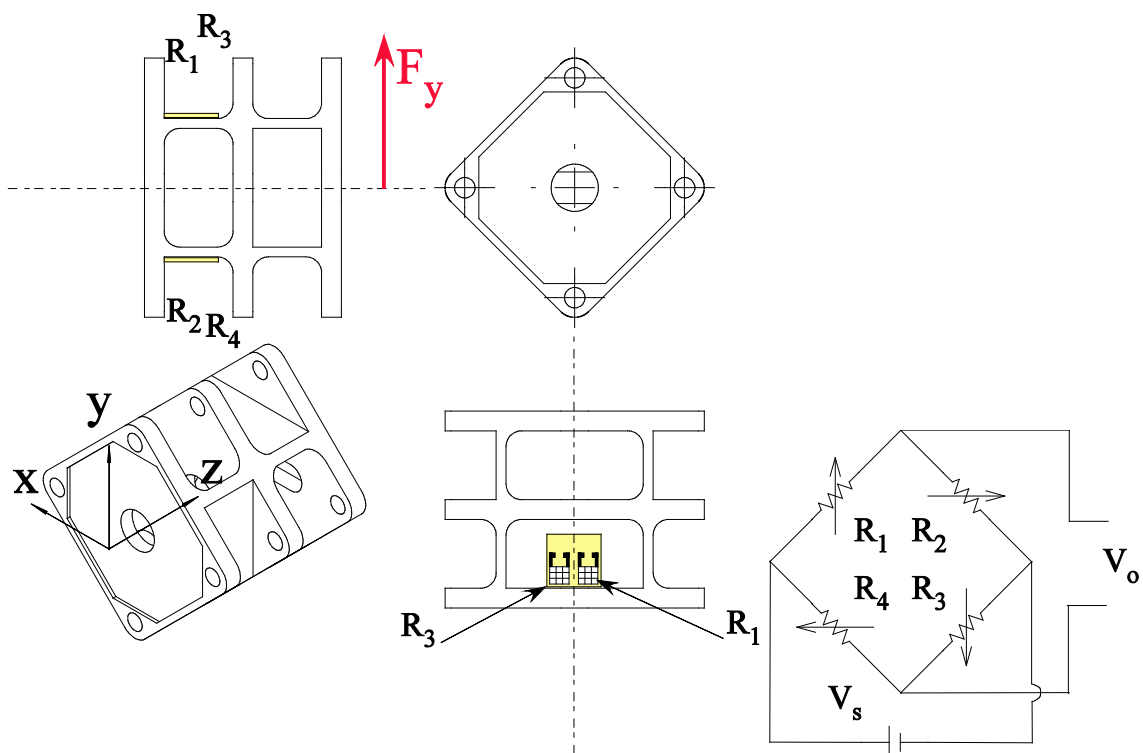
$$\begin{aligned}
 R_1 &= R + \Delta R_1 \\
 R_2 &= R + \Delta R_2 \\
 R_3 &= R + \Delta R_3 \\
 R_4 &= R + \Delta R_4 \\
 R_1 &= R + \Delta R_1 \\
 R_2 &= R - \Delta R_1 \\
 R_3 &= R + \Delta R_1 \\
 R_4 &= R - \Delta R_1
 \end{aligned}
 \tag{2.25}$$

Αντικαθιστώντας την Εξ. (2.25) στην Εξ. (1.4) προκύπτουν τα εξής

$$V_o = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \cdot V_s = \dots = \frac{\Delta R_1}{R} \cdot V_s = k \cdot \varepsilon_1 \cdot V_s
 \tag{2.26}$$

2.7.1.3 Φόρτιση F_y – ΣΧ1

Ισχύουν τα ίδια με την F_x με την διαφορά ότι τα SG είναι επικολλημένα στο δευτέρο PPB που βρίσκεται πιο κοντά στον προσαρμογέα (βλ. Σχήμα 2-23).



Σχήμα 2-23. Κόλληση SG και παραμορφώσεις για την F_y .

2.7.1.4 Φόρτιση M_y – ΣΧ1

Στην περίπτωση της M_y λόγω έλλειψης χώρου που καταλαμβάνεται από τα SG της F_z , τοποθετούνται δύο ενεργά SG και δύο μη ενεργά. Τα μη ενεργά SG δεν βρίσκονται πάνω στην κατασκευή αλλά είναι τοποθετημένα στην πλακέτα. Δηλαδή

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 \text{ και } \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0 \quad (2.27)$$

Από την εξίσωση στοιχείου του SG,

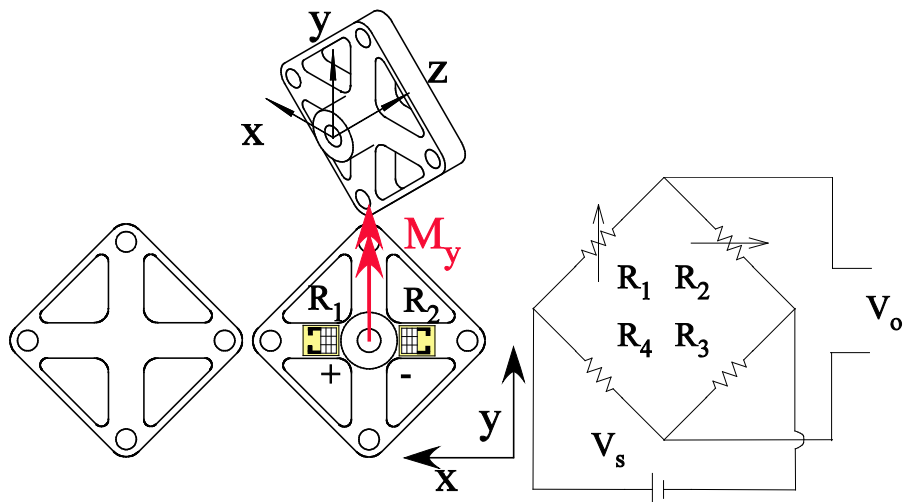
$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (2.28)$$

Έχουμε,

$$\frac{\Delta R_1}{k_1 \cdot R_1} = \varepsilon_1, \frac{\Delta R_2}{k_2 \cdot R_2} = \varepsilon_2, \frac{\Delta R_3}{k_3 \cdot R_3} = \varepsilon_3, \frac{\Delta R_4}{k_4 \cdot R_4} = \varepsilon_4 \quad (2.29)$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στην Εξ. (2.27) έχουμε,

$$\frac{\Delta R_1}{k_1 \cdot R_1} = -\frac{\Delta R_2}{k_2 \cdot R_2} \text{ και } \frac{\Delta R_3}{k_3 \cdot R_3} = \frac{\Delta R_4}{k_4 \cdot R_4} = 0 \quad (2.30)$$



Σχήμα 2-24. Κόλληση SG και παραμορφώσεις για την M_y .

Θεωρώντας ότι τα SG στη γέφυρα έχουν ίσες ονομαστικές αντιστάσεις R και ίδιο k τότε

$$\Delta R_1 = -\Delta R_2 \text{ και } \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0 \quad (2.31)$$

Έτσι για τις αντιστάσεις R_1, R_2, R_3 και R_4 ισχύει

$$\begin{aligned} R_1 &= R + \Delta R_1 \\ R_2 &= R + \Delta R_2 \\ R_3 &= R + \Delta R_3 \\ R_4 &= R + \Delta R_4 \\ R_1 &= R + \Delta R_1 \\ R_2 &= R - \Delta R_1 \\ R_3 &= R \\ R_4 &= R \end{aligned} \quad (2.32)$$

Αντικαθιστώντας την Εξ. (2.32) στην Εξ. (1.4) προκύπτουν τα εξής

$$V_o = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \cdot V_s = \dots = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R} \cdot V_s = \frac{k \cdot \varepsilon_1 \cdot V_s}{2} \quad (2.33)$$

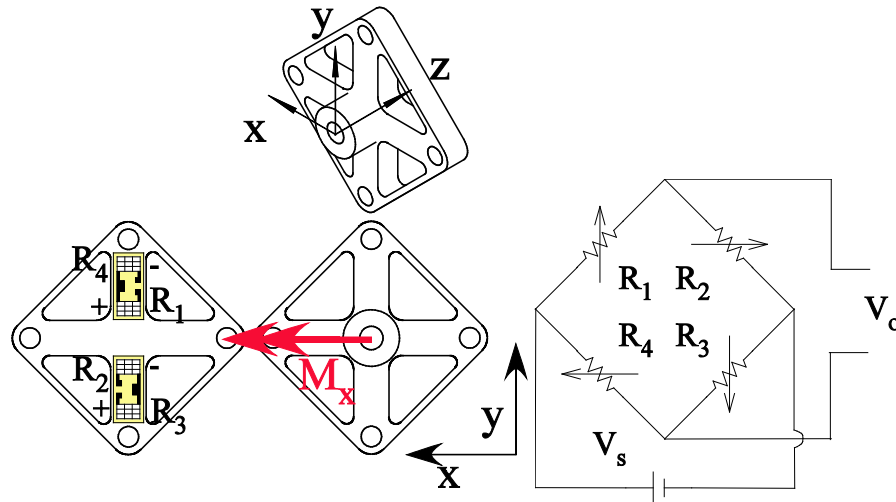
Έτσι, έχουμε ότι

$$V_o = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \cdot V_s = \dots = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R} \cdot V_s = \frac{k \cdot \varepsilon_1 \cdot V_s}{2} \quad (2.34)$$

2.7.1.5 Φόρτιση M_x – ΣΧ1

Στην περίπτωση της M_x οι παραμορφώσεις είναι ανά δύο ίσου μέτρου και αντίθετου πρόσημου. Ισχύει δηλαδή,

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 \text{ και } \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 \quad (2.35)$$



Σχήμα 2-25. Κόλληση SG και παραμορφώσεις για την M_x .

Από την εξίσωση στοιχείου του SG,

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (2.36)$$

Έχουμε,

$$\frac{\Delta R_1}{k_1 \cdot R_1} = \varepsilon_1, \frac{\Delta R_2}{k_2 \cdot R_2} = \varepsilon_2, \frac{\Delta R_3}{k_3 \cdot R_3} = \varepsilon_3, \frac{\Delta R_4}{k_4 \cdot R_4} = \varepsilon_4 \quad (2.37)$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στην Εξ. (2.35) έχουμε,

$$\frac{\Delta R_1}{k_1 \cdot R_1} = -\frac{\Delta R_2}{k_2 \cdot R_2} \text{ και } \frac{\Delta R_3}{k_3 \cdot R_3} = -\frac{\Delta R_4}{k_4 \cdot R_4} \quad (2.38)$$

Θεωρώντας ότι τα SG στη γέφυρα έχουν ίσες ονομαστικές αντιστάσεις R και ίδιο k τότε

$$\Delta R_1 = -\Delta R_2 \text{ και } \Delta R_3 = -\Delta R_4 \quad (2.39)$$

Έτσι για τις αντιστάσεις R_1, R_2, R_3 και R_4 ισχύει

$$\Rightarrow \begin{aligned} R_1 &= R + \Delta R_1 \\ R_2 &= R + \Delta R_2 \\ R_3 &= R + \Delta R_3 \\ R_4 &= R + \Delta R_4 \\ R_1 &= R + \Delta R_1 \\ R_2 &= R - \Delta R_1 \\ R_3 &= R + \Delta R_3 \\ R_4 &= R - \Delta R_3 \end{aligned} \quad (2.40)$$

Αντικαθιστώντας την Εξ. (2.40) στην Εξ. (1.4) προκύπτουν τα εξής

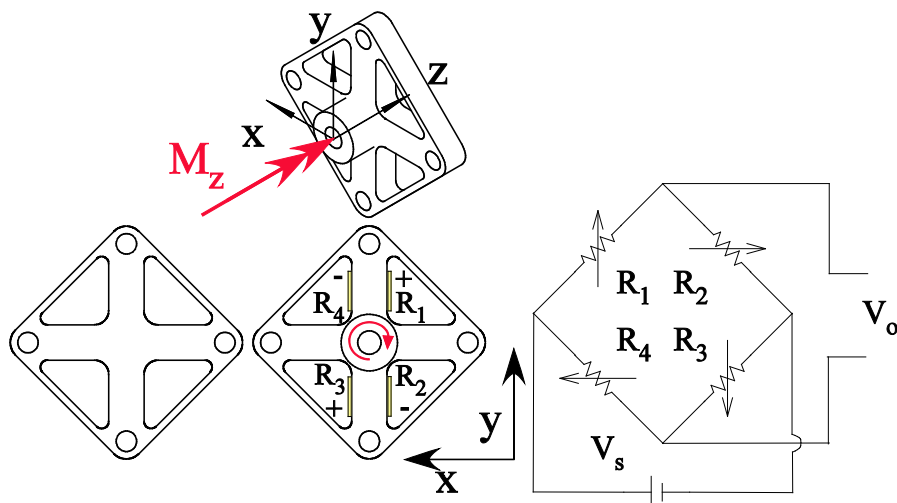
$$V_o = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \cdot V_s = \dots = \frac{\Delta R_1 + \Delta R_3}{2R} \cdot V_s = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) \cdot k}{2} \cdot V_s \quad (2.41)$$

Και επειδή $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$, η σχέση μεταξύ V_o και ε_1 είναι τελείως γραμμική

2.7.1.6 Φόρτιση M_z – ΣΧ1

Λόγω της αμελητέας τιμής που λαμβάνει η M_z στο πέλμα κατά την κρούση η περίπτωση αυτή δεν εφαρμόζεται στον αισθητήρα αλλά απλά μελετάται για ενδεχόμενη επέκταση σε αισθητήρα 6 αξόνων. Στην περίπτωση της M_z ισχύουν τα ίδια με την περίπτωση της F_x δηλαδή

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 \quad (2.42)$$



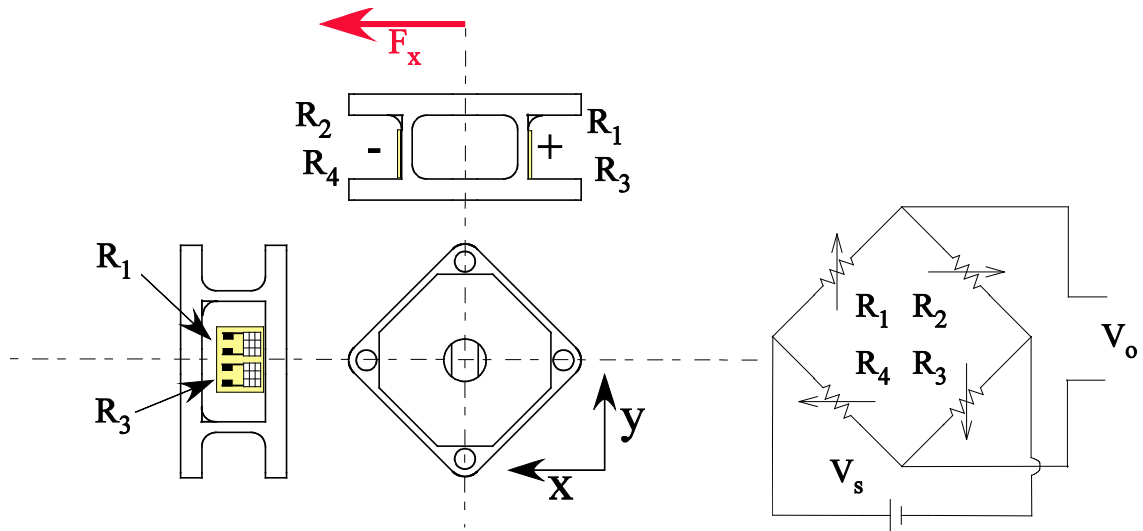
Σχήμα 2-26. Κόλληση SG και παραμορφώσεις για την M_z .

Έτσι ισχύει για την V_o

$$V_o = k \cdot \varepsilon_1 \cdot V_s \quad (2.43)$$

2.7.1.7 Φόρτιση F_x – ΣΧ2

Στην φόρτιση F_x οι παραμορφώσεις είναι ίσες και αντίθετες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-27. Αυτό συμβαίνει, επειδή η κατασκευή είναι συμμετρική και η δύναμη ασκείται στο κέντρο του άξονα συμμετρίας. Πρόκειται για ίδια περίπτωση με αυτήν της F_x του ΣΧ1.



Σχήμα 2-27. Κόλληση SG και παραμορφώσεις για την F_x .

Ισχύει στην περίπτωση αυτή για τις παραμορφώσεις,

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 \quad (2.44)$$

Από την εξίσωση στοιχείου του SG,

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (2.45)$$

Έχουμε,

$$\frac{\Delta R_1}{k_1 \cdot R_1} = \varepsilon_1, \frac{\Delta R_2}{k_2 \cdot R_2} = \varepsilon_2, \frac{\Delta R_3}{k_3 \cdot R_3} = \varepsilon_3, \frac{\Delta R_4}{k_4 \cdot R_4} = \varepsilon_4 \quad (2.46)$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στην Εξ. (2.44) έχουμε,

$$\frac{\Delta R_1}{k_1 \cdot R_1} = -\frac{\Delta R_2}{k_2 \cdot R_2} = \frac{\Delta R_3}{k_3 \cdot R_3} = -\frac{\Delta R_4}{k_4 \cdot R_4} \quad (2.47)$$

Θεωρώντας ότι τα SG σε κάθε γέφυρα έχουν ίσες ονομαστικές αντιστάσεις R και ίδια σταθερά k τότε

$$\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R_4 \quad (2.48)$$

Έτσι για τις αντιστάσεις R_1, R_2, R_3 και R_4 ισχύει

$$\begin{aligned} R_1 &= R + \Delta R_1 \\ R_2 &= R + \Delta R_2 \\ R_3 &= R + \Delta R_3 \\ R_4 &= R + \Delta R_4 \\ \Rightarrow R_1 &= R + \Delta R_1 \\ R_2 &= R - \Delta R_1 \\ R_3 &= R + \Delta R_1 \\ R_4 &= R - \Delta R_1 \end{aligned} \quad (2.49)$$

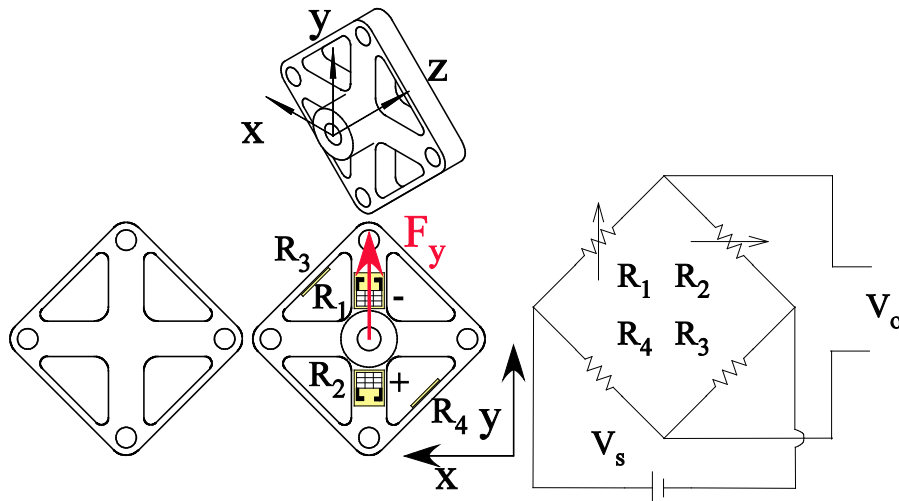
Αντικαθιστώντας την Εξ.(2.49) στην Εξ. (1.4) προκύπτουν τα εξής

$$V_o = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \cdot V_s = \dots = \frac{\Delta R_1}{R} \cdot V_s = k \cdot \varepsilon_1 \cdot V_s \quad (2.50)$$

2.7.1.8 Φόρτιση F_y – ΣΧ2

Στην περίπτωση της F_y λόγω έλλειψης χώρου τοποθετούνται δύο ενεργά SG και δύο μη ενεργά. Δηλαδή

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 \text{ και } \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0 \quad (2.51)$$



Σχήμα 2-28. Κόλληση SG και παραμορφώσεις για την F_y .

Από την εξίσωση στοιχείου του SG,

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (2.52)$$

Έχουμε,

$$\frac{\Delta R_1}{k_1 \cdot R_1} = \varepsilon_1, \frac{\Delta R_2}{k_2 \cdot R_2} = \varepsilon_2, \frac{\Delta R_3}{k_3 \cdot R_3} = \varepsilon_3, \frac{\Delta R_4}{k_4 \cdot R_4} = \varepsilon_4 \quad (2.53)$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στην Εξ. (2.44) έχουμε,

$$\frac{\Delta R_1}{k_1 \cdot R_1} = -\frac{\Delta R_2}{k_2 \cdot R_2} \text{ και } \frac{\Delta R_3}{k_3 \cdot R_3} = \frac{\Delta R_4}{k_4 \cdot R_4} = 0 \quad (2.54)$$

Θεωρώντας ότι τα SG στη γέφυρα έχουν ίσες ονομαστικές αντιστάσεις R και ίδιο k τότε

$$\Delta R_1 = -\Delta R_2 \text{ και } \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0 \quad (2.55)$$

Έτσι για τις αντιστάσεις R₁, R₂, R₃ και R₄ ισχύει

$$\begin{aligned} R_1 &= R + \Delta R_1 \\ R_2 &= R + \Delta R_2 \\ R_3 &= R + \Delta R_3 \\ R_4 &= R + \Delta R_4 \\ R_1 &= R + \Delta R_1 \\ R_2 &= R - \Delta R_1 \\ R_3 &= R \\ R_4 &= R \end{aligned} \quad (2.56)$$

Αντικαθιστώντας την Εξ. (2.56) στην Εξ. (1.4) προκύπτουν τα εξής

$$V_o = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \cdot V_s = \dots = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R} \cdot V_s = \frac{k \cdot \varepsilon_1 \cdot V_s}{2} \quad (2.57)$$

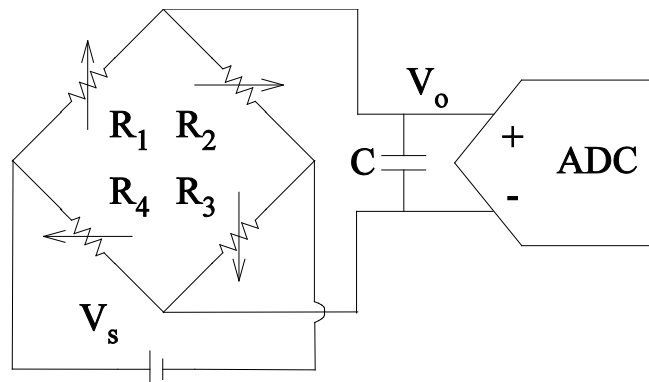
2.7.1.9 Φόρτισεις M_y, M_x, M_z και F_z – ΣΧ2

Οι φορτίσεις αυτές παραλαμβάνονται από τις γέφυρες Wheatstone με τον ίδιο ακριβώς τρόπο με αυτόν του ΣΧ1 και ισχύουν οι ίδιες εξισώσεις.

2.7.2 Επεξεργασία αναλογικού σήματος

Το διαφορικό σήμα στην έξοδο κάθε καναλιού χρήζει φιλτραρίσματος πριν γίνει η αναλογικοψηφιακή μετατροπή. Αυτό γίνεται, για να μην υπάρχουν υψηλότερες συχνότητες στην είσοδο του ADC και εμφανίζεται παραμόρφωση στο σήμα (aliasing). Επιλέγεται ένα βαθυπερατό φίλτρο πρώτης τάξης, το οποίο υλοποιείται

χρησιμοποιώντας έναν πυκνωτή ανάμεσα στον αρνητικό και θετικό ακροδέκτη του διαφορικού σήματος. Η συχνότητα αποκοπής πρέπει να είναι τουλάχιστον δύο φορές κάτω από την συχνότητα δειγματοληψίας. Το εύρος των συχνοτήτων που καταστούν αξιόπιστη την καταγραφή της δύναμης αντίδρασης δίνεται από τις προδιαγραφές του αισθητήρα όπως αυτές ορίστηκαν στον Πίνακα 2-4. Έτσι, το φίλτρο πρέπει να αποκόπτει συχνότητες πάνω από 200Hz καθώς δεν έχουν σχέση με τις μετρήσεις. Η δειγματοληψία των ADC γίνεται συνήθως σε πολύ υψηλότερες συχνότητες. Συγκεκριμένα, ο ADC που επιλέχθηκε να κάνει αυτή την δουλειά και φαίνεται παρακάτω, έχει συχνότητα δειγματοληψίας 1MHz . Κάτι τέτοιο δεν εμποδίζει στο να αποκόπτονται οι συχνότητες πολύ υψηλότερα (κάτω από $0,5\text{MHz}$, σύμφωνα με το κριτήριο *Nyquist*) και να γίνεται ψηφιακή επεξεργασία σήματος. Αυτό βοηθάει στο να υπάρχει μια καλύτερη εσοπτεία του σήματος χωρίς αυτό να αλλοιώνεται. Έτσι, ο πυκνωτής ($0,1\mu\text{F}$) που μπαίνει ανάμεσα στους ακροδέκτες σε συνδυασμό με τη συνολική αντίσταση της γέφυρας Wheatstone 350Ω , δημιουργεί ένα βαθυπερατό αναλογικό φίλτρο πρώτης τάξης με συχνότητα αποκοπής $f_c = 4,547\text{kHz}$.



Σχήμα 2-29. Βαθυπερατό φίλτρο κυκλώματος.

Το φίλτρο θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερης τάξης για να αποκόπτει με μεγαλύτερο ρυθμό τις υψηλές συχνότητες, αλλά κάτι τέτοιο δεν ενδιαφέρει σε αυτή την περίπτωση. Αντίθετα αυτό που επιζητείται είναι να κάνει την μετατροπή με όσα λιγότερα στοιχεία γίνεται για να μην αυξάνονται οι απαιτήσεις σε χώρο στην πλακέτα.

2.7.3 Επιλογή αναλογικοψηφιακού μετατροπέα (ADC)

Ο ADC που καλείται να κάνει την αναλογικοψηφιακή μετατροπή πρέπει να μπορεί να μετράει ταυτόχρονα και τα έξι κανάλια, και να παρέχει τουλάχιστον 1000 sps (samples per second) για κάθε κανάλι. Η τάση αναφοράς του πρέπει να είναι εντός του εύρους της τάσης που αναπτύσσεται στις εξόδους των γεφυρών Wheatstone σε κάθε κανάλι. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και από τις σχέσεις των γεφυρών σε κάθε κανάλι

λαμβάνεται μια τάξη μεγέθους της τάσης που αναπτύσσεται κατά την πλήρη μηχανική φόρτιση σύμφωνα με την παρακάτω λογική.

Η κατασκευή αστοχεί όταν η ισοδύναμη τάση σε κάποιο σημείο ξεπεράσει το όριο διαρροής του υλικού. Μέχρι να φτάσει σε αυτό θεωρείται ότι το υλικό συμπεριφέρεται γραμμικά, δηλαδή η δύναμη F είναι ανάλογη της παραμόρφωσης ε και κατ' επέκταση η μηχανική τάση σ ανάλογη της ε . Ο αισθητήρας πρέπει να μπορεί να μετράει γραμμικά μέχρι ένα σημείο. Αυτό ορίζεται από το ονομαστικό φορτίο F_R σε κάθε άξονα. Για να μην υπάρξει κορεσμός στον ADC, δηλαδή να αυξηθεί η τάση εισόδου περισσότερο από ότι μπορεί να μετρήσει, επιλέγεται να θεωρηθεί ως μέγιστη τάση του συστήματος η τάση που προκύπτει κατά την διαρροή του υλικού. Έτσι για αλουμίνιο, έχουμε:

$$\sigma_{yield} = 505MPa \text{ και } E = 75000MPa$$

$$\text{τότε } \varepsilon_{max} = \frac{\sigma_{yield}}{E} = 0,007214$$

Επιλέγεται να υπολογισθεί η τάση εξόδου V_o στην περίπτωση της F_x καθώς είναι μεγαλύτερη από των υπόλοιπων καναλιών. Έτσι αν $V_s = 3,3 V$ και $k = 2,2$ τότε σύμφωνα με την Εξ. (2.9) έχουμε

$$V_o = k \cdot \varepsilon_{max} \cdot V_s = 2,2 \cdot 0,007214 \cdot 3,3 = 0,524 V \quad (2.58)$$

Στον Πίνακα 2-7 δίνεται η αναπτυσσόμενη τάση στα άκρα του κάθε διαφορικού καναλιού. Αυτή εξαρτάται και από την τιμή του κέρδους του ενισχυτή. Σημειώνεται ότι τα στοιχεία του πίνακα είναι υπολογισμένα θεωρώντας αμελητέες τις διαφορές στα χαρακτηριστικά λόγω θερμοκρασιακών ή άλλων μεταβολών. Δηλαδή πρόκειται για εκτιμώμενες τιμές που απλά δίνουν μια τάξη μεγέθους για ενδιαφερόμενα χαρακτηριστικά.

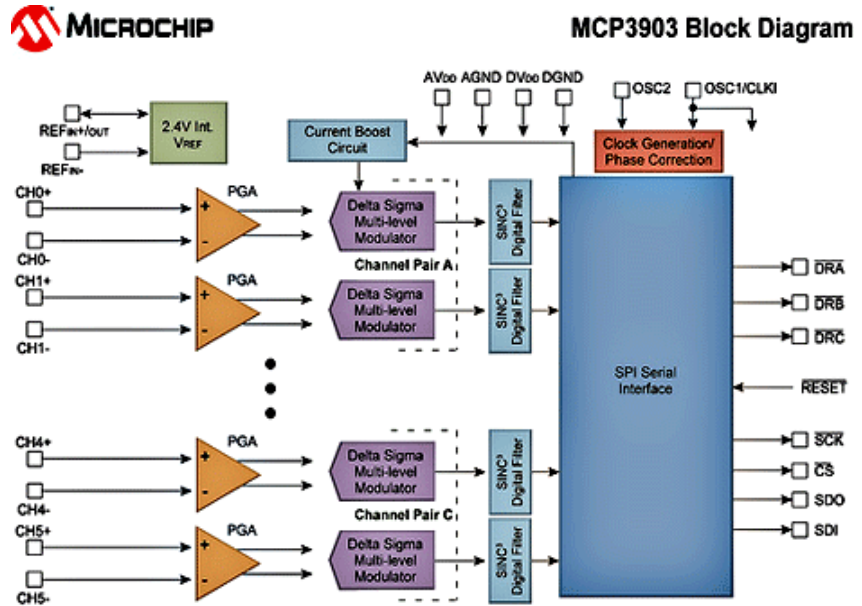
Ο ADC που επιλέχθηκε είναι ο MCP3903. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

- Ενσωματωμένος ενισχυτής του σήματος (PGA).
- Μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας f_s για κάθε κανάλι 3906 sps (6 σύνολο).
- Διαφορική είσοδος.
- Ταυτόχρονο διάβασμα καναλιών.
- SPI για επικοινωνία.
- Τροφοδοσία 5V για το αναλογικό τμήμα και τροφοδοσία 3,3V για το ψηφιακό τμήμα.

Αυξανόμενης της τιμής του κέρδους του ενισχυτή αυξάνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο του ADC με ταυτόχρονη μείωση της μέγιστης διαφοράς τάσης στα άκρα των καναλιών. Στο Σχήμα 2-30 φαίνεται η εξωτερική εμφάνιση του MCP3903 και το δομικό του διάγραμμα.



Σχήμα 2-30. Τσίπ.



Σχήμα 2-31. Δομικό διάγραμμα MCP3903.

Πίνακας 2-7. Εκτιμώμενες τιμές χαρακτηριστικών ηλεκτρονικού υποσυστήματος.

	F_z	F_x	F_y	M_x	M_y
Τάση τροφοδοσίας V_s (V)	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
Ονομαστικές Δυνάμεις \pm (N/Nm)	1000	250	250	5	5
Τάση πλήρους εύρους \pm (V)	0,016665	0,0083325	0,0073326	0,016665	0,016665
Κέρδος	48	96	96	24	24
ADC max input range \pm (V)	0,03125	0,015625	0,015625	0,0625	0,0625
ADC Vref (default 2,4V)	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
$\epsilon_{\max} \pm$	0,0025	0,00125	0,0011	0,0025	0,0025

Για το διάβασμα και γράψιμο στους καταχωρητές, χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο επικοινωνίας SPI. Το MCP3903 έχει ανάλυση 24 bit, άρα κάθε δείγμα έρχεται με αυτή την ανάλυση. Η τάση αναφοράς του είναι $V_{ref} = 2,4V$. Θεωρητικά, χωρίς εσωτερικό θόρυβο και σφάλματα του ADC, η μικρότερη τάση που θα μπορούσε να διαβαστεί υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση,

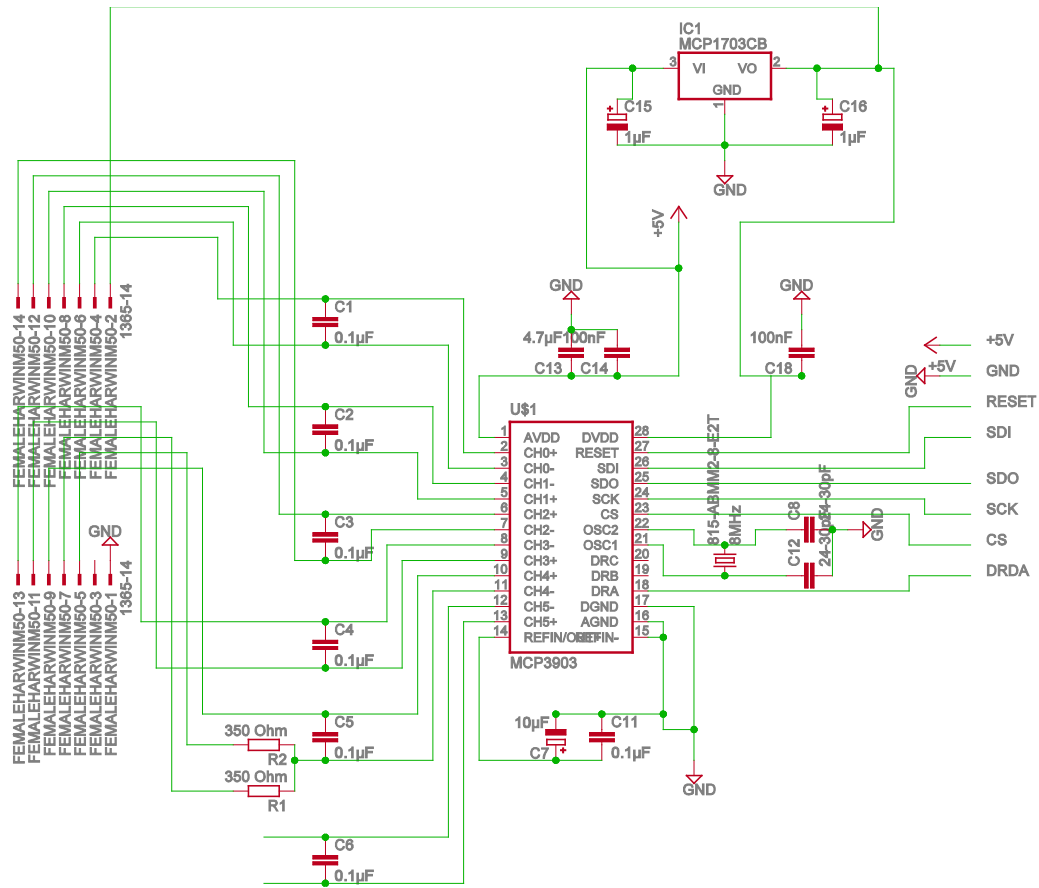
$$d = \frac{V_{ref}}{2^{24} - 1} = 1,43 \cdot 10^{-7} V \quad (2.59)$$

Λόγω του εσωτερικού θορύβου του MCP3903 η ανάλυση είναι μερικές τάξεις μεγαλύτερη από εκείνη που υπολογίζεται θεωρητικά. Τελικά η ανάλυση του προσδιορίζεται πειραματικά. Βαθμονομείται αρχικά ο κάθε άξονας και ύστερα προσδιορίζεται η ακρίβεια σε μονάδες δύναμης/ροπή. Η έξοδος του ADC ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή την είσοδο του και κάποια τυπική απόκλιση. Ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης είναι αρκετά εύκολος ειδικά με τη χρήση Matlab. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά του θορύβου.

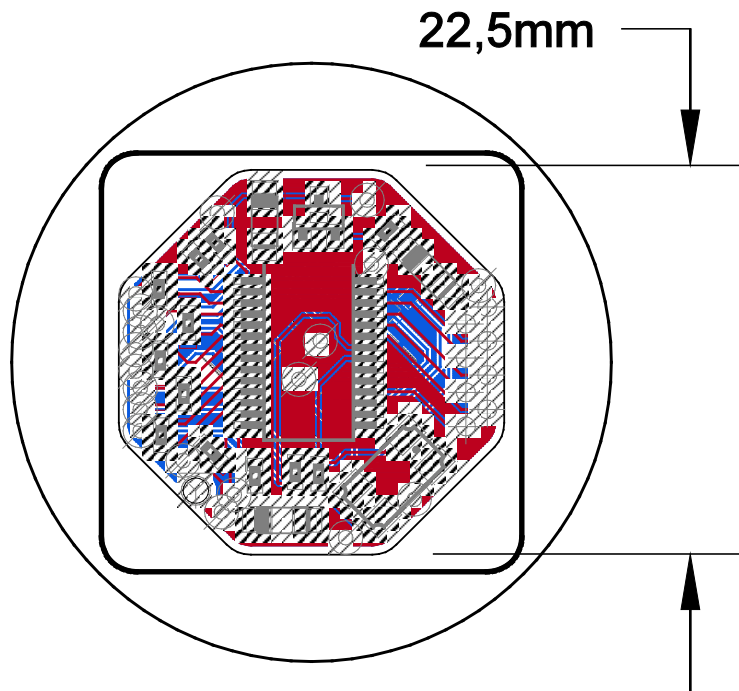
2.7.4 Σχεδιασμός πρότυπης πλακέτας PCB στο EAGLE

Ο σχεδιασμός της πλακέτας έγινε στο σχεδιαστικό πακέτο EAGLE το οποίο δίνει την δυνατότητα σχεδιασμού της πλακέτας από το σχέδιο του κυκλώματος. Σκοπός του σχεδιασμού είναι, να έχει πάνω όλα τα ηλεκτρονικά στοιχεία που είναι απαραίτητα, προκειμένου η τροφοδοσία της συσκευής MCP3903 και η τροφοδοσία των γεφυρών να έρχονται από δύο ακροδέκτες τροφοδοσίας. Το MCP3903 χρειάζεται μια αναλογική τροφοδοσία στα 5V και μια ψηφιακή στα 3,3V. Έτσι, η τροφοδοσία προς την πλακέτα πρέπει να είναι 5V, ώστε να τροφοδοτεί το αναλογικό τμήμα του ολοκληρωμένου. Αυτή η τάση μπορεί να περαστεί από έναν ρυθμιστή τάσης με σταθερή τάση εξόδου στα 3,3V και να χρησιμοποιηθεί από το ψηφιακό τμήμα του ολοκληρωμένου και από τις γέφυρες για την τροφοδοσία τους.

Εκτός από τους ακροδέκτες τροφοδοσίας είναι απαραίτητοι και 6 ακροδέκτες για την επικοινωνία του MCP3903 με μικροελεγκτή. Επίσης, είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν υποδοχείς πάνω στην πλακέτα για την σύνδεση των καλωδίων. Στο Σχήμα 2-32 φαίνεται το κυκλωματικό σχέδιο απευθείας από το πρόγραμμα EAGLE και στο Σχήμα 2-33, η πλακέτα PCB (Printed Circuit Board). Το σχήμα της πλακέτας είναι οκταγωνικό και έχει διαστάσεις τέτοιες, ώστε να χωράει στο καπάκι της πλακέτας όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-7.



Σχήμα 2-32. Κυκλωματικό σχέδιο ηλεκτρονικού υποσυστήματος.



Σχήμα 2-33. Πλακέτα μέσα στην κατασκευή.

3 Τελικός Σχεδιασμός και Κατασκευή

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθεί ο τελικός σχεδιασμός των δύο υποσυστημάτων και θα δοθεί σημασία στον τρόπο σύνδεσης μεταξύ τους. Επίσης θα παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο έγινε η κατεργασία των απαραίτητων τεμαχίων και οι υπόλοιπες εργασίες οι οποίες είναι απαραίτητες για την κατασκευή του αισθητήρα. Περιγραφικά και με φωτογραφίες επιχειρείται να γίνει η παρουσίαση των απαραίτητων βημάτων για την κατασκευή του.

3.2 Τελικός Σχεδιασμός

Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός του μηχανικού υποσυστήματος στο προηγούμενο κεφάλαιο περιλαμβάνει μόνο τα βασικά στοιχεία που είναι απαραίτητα για να γίνουν οι προσομοιώσεις και να αποκτηθούν κάποιες βασικές διαστάσεις που είναι απαραίτητες για την ικανοποίηση των γεωμετρικών περιορισμών. Ο τελικός σχεδιασμός ενσωματώνει τις λεπτομέρειες που είναι απαραίτητες για την σύνδεση των τεμαχίων μεταξύ τους, για την καλωδίωση, τα σπειρώματα. Αναφέρεται και στον ορισμό των διαστάσεων του καπακιού της πλακέτας που είναι και ο προσαρμογέας του αισθητήρα στο πόδι. Επίσης η πλακέτα παίρνει τελικά το σχήμα που έχει εσωτερικά το καπάκι της πλακέτας.

3.2.1 Επιλογή στοιχείων σύνδεσης μηχανικών μερών

Ένας τρόπος που μπορούν να συνδεθούν τα τεμάχια μεταξύ τους είναι με κοχλιοσυνδέσεις. Συγκεκριμένα, επιλέγεται κοχλιοσύνδεση με περαστούς κοχλίες και περικόχλια ασφαλείας καθώς είναι απαραίτητη η μεταφορά διατμητικής δύναμης από ένα τεμάχιο σε ένα άλλο και αυτό γίνεται με προένταση του κοχλία με συγκεκριμένη ροπή σύσφιξης. Οι κοχλίες-περικόχλια είναι τυποποιημένα κατά το μετρικό σύστημα M2,5 με ποιότητα 10.9 ή 12.9 και φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.

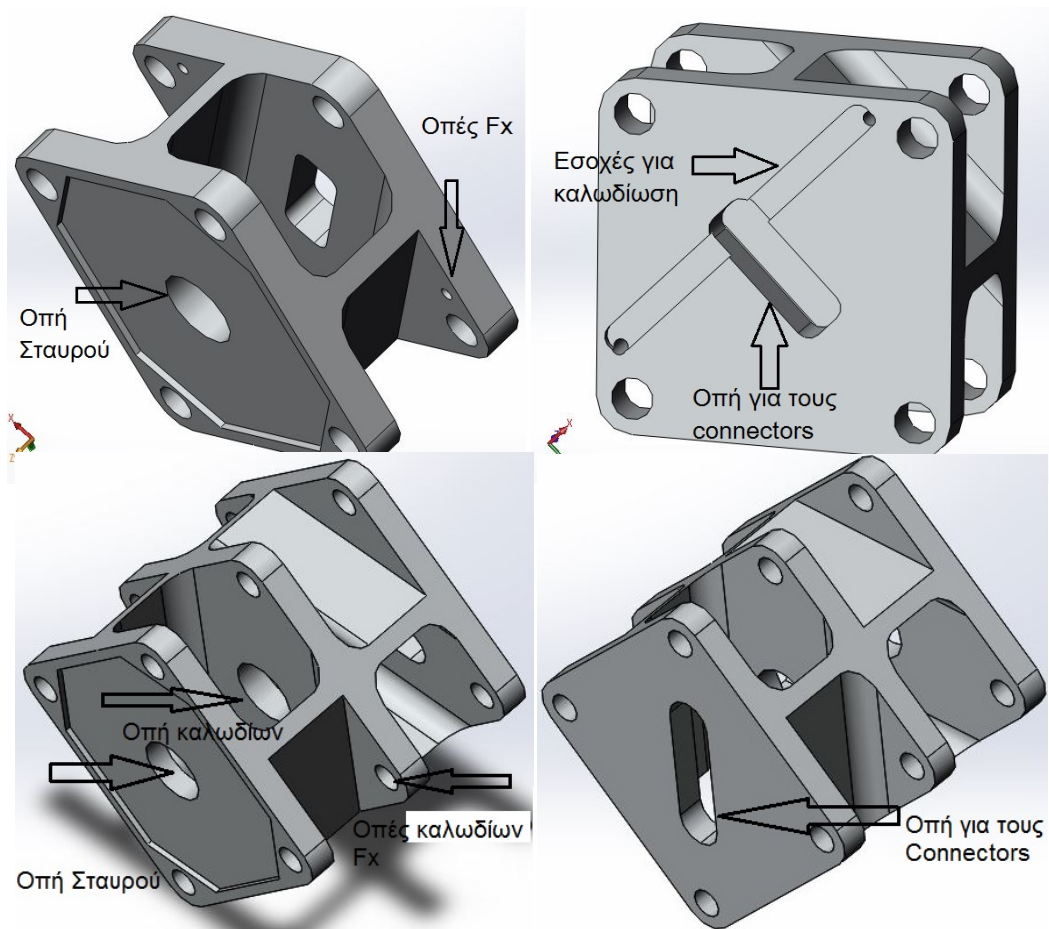


Σχήμα 3-1. Κοχλίας-περικόχλιο ασφαλείας γαλβανιζέ.

Η σύνδεση του πέλματος με τον αισθητήρα γίνεται με μετρικό σπείρωμα M4. Το σπείρωμα αποτελεί μέρος του σταυρού και έχει βάθος τουλάχιστον 5 mm. Ο αισθητήρας με το υπόλοιπο πόδι συνδέεται και αυτός με εσωτερικό σπείρωμα M8.

3.2.2 Εσοχές και οπές καλωδίωσης

Τα SG ενώνονται μεταξύ τους και με το υπόλοιπο σύστημα με καλώδια. Για να γίνει αυτή η δουλειά, χρησιμοποιείται πηνιόσυρμα με διάμετρο 0,5 mm. Στόχος, είναι να περαστούν εσωτερικά τα καλώδια και να μην είναι εκτεθειμένα στο περιβάλλον. Για να γίνει αυτό, χρειάζονται να γίνουν οπές στο PPB για να περάσουν από τον σταυρό προς την πλακέτα. Επίσης, για τον άξονα F_x υπάρχει ανάγκη να γίνουν οπές για να περαστεί το πηνιόσυρμα από τα SG προς την πλακέτα. Στο Σχήμα 3-2 φαίνονται οι οπές και οι εσοχές που είναι απαραίτητες για την καλωδίωση. Επίσης, φαίνεται και η οπή που χρειάζεται για τους υποδοχείς των καλωδίων των γεφυρών με την πλακέτα.



Σχήμα 3-2. Οπές για καλωδίωση και για τους υποδοχείς (connectors).

3.2.3 Προσαρμογέας αισθητήρα και ποδιού

Για την σύνδεση του αισθητήρα και του υπόλοιπου ποδιού είναι υπεύθυνο το τελευταίο κομμάτι του αισθητήρα το οποίο χρησιμοποιείται για να συγκρατεί την πλακέτα με τον υπόλοιπο αισθητήρα. Για αυτόν τον λόγο το κομμάτι αυτό είναι διαμορφωμένο έτσι ώστε να χωράει εσωτερικά η πλακέτα. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 2-7. Το βάθος της συγκεκριμένης ποκέτας είναι άμεσα εξαρτώμενο από το μέγιστο πάχος της πλακέτας με τα ηλεκτρονικά. Ύστερα από έναν πρόχειρο υπολογισμό, η διάσταση αυτή προκύπτει ίση με 4 mm . Για λόγους ασφάλειας επιλέγεται η διάσταση αυτή να αυξηθεί κατά 1 mm . Τελικά, το κομμάτι αυτό μπορεί να αλλάζει ανάλογα με την εφαρμογή και στην περίπτωση του ποδιού η σύνδεση επιτυγχάνεται με ένα εσωτερικό σπείρωμα M8.

3.3 Κατασκευή Μηχανικού Υποσυστήματος

Για την κατασκευή του μηχανικού υποσυστήματος χρησιμοποιήθηκαν σχεδόν όλα τα εργαλεία και μηχανήματα του μηχανουργείου του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου.

Χρησιμοποιήθηκε για τις βασικές κατεργασίες, το κέντρο κατεργασίας CNC Haas minimill. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν ο τόννος, η φρέζα, η πριονοκορδέλα, το πριόνι χειρός, η μέγγενη, το κολαούζο, οι λίμες και άλλα μικρότερα εργαλεία χειρός. Τα κύρια εργαλεία και οι εργαλειομηχανές που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στα Σχήμα 3-3 και Σχήμα 3-4.



Σχήμα 3-3. Μηχανουργείο Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου ΕΜΠ.

Εναλλακτική μέθοδος παραγωγής είναι η χύτευση, αλλά για τις ποσότητες που χρειάζονται δεν είναι συμφέρουσα μέθοδος και θα αύξανε πολύ τον χρόνο κατασκευής.

3.3.1 Προετοιμασία τεμαχίων

Για την κατασκευή των τεμαχίων χρησιμοποιούνται συμπαγείς κυλινδρικοί δοκοί διαμέτρου 35 mm και υπενθυμίζεται ότι πρόκειται για κράμα αλουμινίου με ονομασία 7075-T6 ή T651. Οι κύριες κατεργασίες των τεμαχίων γίνονται στην CNC. Για να μπορεί να γίνει η κατεργασία το υλικό θέλει μια προετοιμασία.



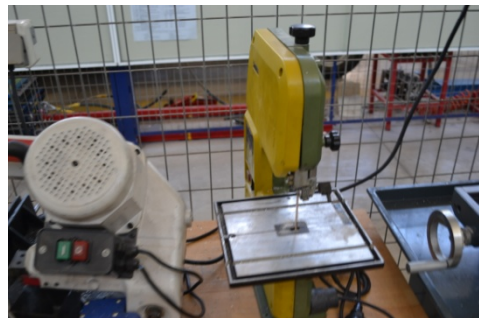
α. Haas minimill.



β. Τόρνος.



γ. Φρέζα.



δ. Πριονοκορδέλα.



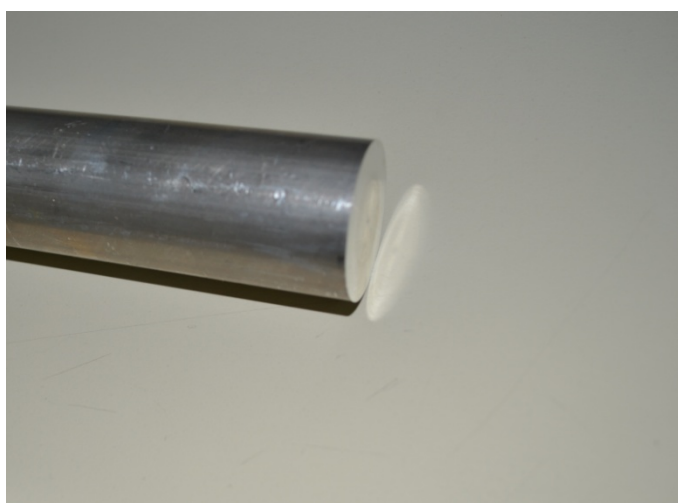
ε. Κοπτικά εργαλεία.

Σχήμα 3-4. Εργαλειομηχανές και εργαλεία.



Σχήμα 3-5. Συμπαγής κυλινδρική δοκός.

Πρώτη δουλειά είναι το κόψιμο των δοκών σε μήκος που δεν ξεπερνάνε τις διαστάσεις εργασίας της τράπεζας και επιτρέπει την αλλαγή των εργαλείων από την CNC. Αυτό γίνεται είτε με την πριονοκορδέλα είτε με το πριόνι χειρός. Η κατεργασία αυτή αφήνει πολύ κακή επιφάνεια τομής. Έτσι δεύτερη εργασία είναι η επιπεδοποίηση της τομής αυτής στην φρέζα, για να παραχθεί μια επιφάνεια με ικανοποιητική τραχύτητα ώστε να είναι ευκολότερες οι εργασίες με την CNC.



Σχήμα 3-6. Κομμένη και κατεργασμένη επιφάνεια.

Ο προσαρμογέας του ποδιού εκτός από την παραπάνω προετοιμασία, χρειάζεται και μια ειδική προετοιμασία με τον τόρνο προκειμένου να δημιουργηθεί ο μικρός κύλινδρος που φέρει το σπείρωμα M8. Ύστερα, πιάνεται στο τσοκ από την κατεργασμένη επιφάνεια το οποίο είναι δεμένο στην CNC και γίνονται οι υπόλοιπες κατεργασίες. Στο Σχήμα 3-7 φαίνεται ο μικρός κύλινδρος στον οποίο γίνεται η αναφορά.



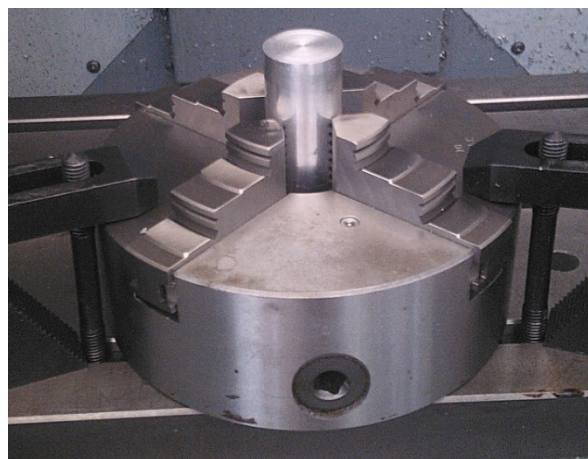
Σχήμα 3-7. Προετοιμασία του προσαρμογέα.

3.3.2 Συγκράτηση τεμαχίων

Το δέσιμο των τεμαχίων γίνεται σε τσοκ. Για το στοιχείο PPB το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 3-2, το τσοκ είναι με τρία μάγουλα και είναι δεμένος με βίδες, πάνω στον διαιρέτη της CNC όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-8α. Για τα υπόλοιπα τρία κομμάτια, το τσοκ που χρησιμοποιείται είναι με τέσσερα μάγουλα και δένεται με νύχια σε κεντρικό σημείο πάνω στην τράπεζα της CNC. Το PPB κατεργάζεται επιπλέον με άλλη συγκράτηση από εκείνη των υπόλοιπων τεμαχίων για να γίνουν οι οπές και κάποιες ποκέτες που δεν μπορούν να γίνουν κατευθείαν με την πρώτη συγκράτηση (βλ. Σχήμα 3-8β).



α. Τσοκ στον διαιρέτη



β. Τσοκ στην τράπεζα

Σχήμα 3-8. Συγκράτηση τεμαχίων.

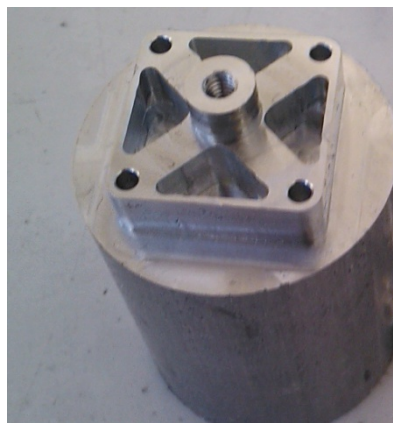
Στην περίπτωση του τσοκ στην τράπεζα, ως μηδενικό σημείο του συστήματος αναφοράς του τεμαχίου ορίζεται το κέντρο της κυκλικής διατομής του ενός άκρου. Στην περίπτωση του τσοκ στο διαιρέτη, ως μηδενικό σημείο ορίζεται το σημείο που είναι πάνω

στην περίμετρο του κυκλικής διατομής του άκρου στο μεγαλύτερο ύψος z. Σημειώνεται εδώ, ότι αφού μηδενιστεί το τεμάχιο, γίνεται μηδενισμός όλων των κοπτικών εργαλείων και εισάγεται στο λογισμικό της CNC η διάμετρος κάθε εργαλείου προκειμένου να γίνει αντιστάθμιση των διαστάσεων.

3.3.3 Παραγωγή G-code με SolidCAM για την Haas Minimill CNC

Η παραγωγή του G-code (κώδικας G) για την κατεργασία των τεμαχίων έγινε με το λογισμικό SolidCAM 2009. Για κάθε τεμάχιο, ορίστηκαν μέσα από το πρόγραμμα διάφορες εργασίες ή operations, όπως ονομάζονται στο SolidCAM. Κάθε operation ορίζει μια διαδρομή με συγκεκριμένο κοπτικό εργαλείο σε κατάλληλες στροφές και πρόωση και ισχύει για συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων.

Τα τεμάχια εκτός από το PPB κατεργάζονται στη CNC με μια μόνο συγκράτηση και ύστερα γίνονται και οι υπόλοιπες κατεργασίες για να αποκτήσει την τελική του μορφή. Για αυτά, τα αρχεία *STAVROS.TAP*, *KAPAKISTAVROY.TAP* και *KAPAKIPLAKETAS.TAP* απλά χρησιμοποιούνται με τα κατάλληλα εργαλεία από τον ελεγκτή της CNC και παράγουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Στο Σχήμα 3-9 φαίνεται ο σταυρός ως παράδειγμα. Το στοιχείο PPB κατεργάζεται με ένα κύριο κώδικα G που χρησιμοποιεί την συγκράτηση πάνω στον διαιρέτη και άλλους δύο που χρησιμοποιούν την συγκράτηση πάνω στην τράπεζα, έναν για κάθε επιφάνεια για να γίνουν οι σπές των κοχλιών και μια ποκέτα. Η μεταφορά των αρχείων από υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Windows 7 64-bit, γίνεται μέσω RS-232 με το πρόγραμμα NCnetLite 7.0.

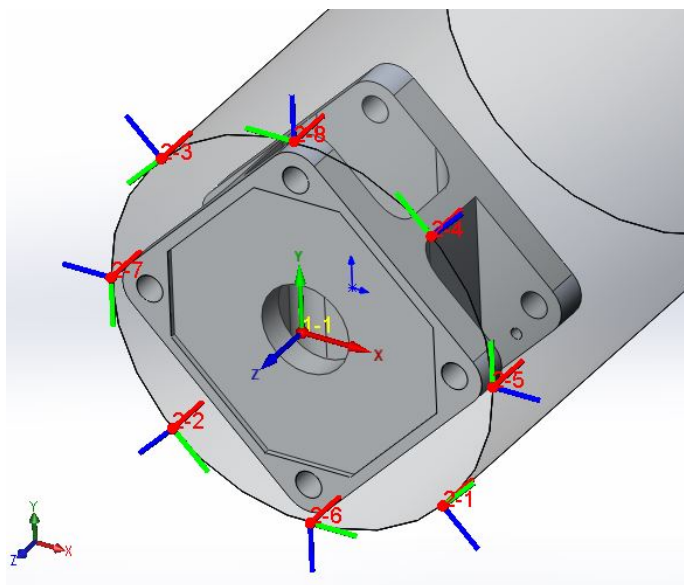


Σχήμα 3-9. Σταυρός μετά την κατεργασία στην CNC.

Για κάθε τεμάχιο ο κώδικας G που βγαίνει έχει κάποια σημεία στην σύνταξη που διαφέρουν από εκείνα που δέχεται η CNC, τα οποία όμως διορθώνονται με το Σημειωματάριο των Windows καθώς είναι λίγα (Πριν την εντολή M06 T01 για την αλλαγή του εργαλείου υπάρχει ένα N που πρέπει να σβηστεί). Εκτός από τα συντακτικά λάθη

που πρέπει να διορθωθούν, για τον κώδικά του PPB πρέπει να γίνουν και κάποιες προσθήκες που αφορούν την περιστροφή του τεμαχίου γύρω από τον άξονα x της μηχανής.

Συγκεκριμένα, για το στοιχείο PPB ορίζονται οχτώ διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων των οποίων η αρχή βρίσκεται στην περίμετρο του κύκλου και ο άξονας y είναι εφαπτόμενος σε αυτόν. Είναι τοποθετημένα ανά 45 μοίρες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-10. Για να μπορεί η μηχανή να αλλάξει σύστημα, πρέπει μετά την παραγωγή του κώδικα G από το SolidCAM να μπει με το Σημειωματάριο, ανάμεσα σε κάθε αλλαγή συστήματος, το γράμμα A και η γωνία κατά την οποία θέλουμε να περιστραφεί. Αυτό φαίνεται καλύτερα και στο αρχείο *PPB.TAP*. Για το PPB χρησιμοποιούνται επιπλέον κώδικες για να κάνουν τις όψεις που φαίνονται στο Σχήμα 3-2. Αυτά ονομάζονται *PPBcontourkaitrypes2.5kai&8_PART5^ENNALAKTIKO-4.TAP* και *PPBpoketaitrypes1mm&2.5mm* και παράγουν την αριστερή και δεξιά μπροστινή όψη των φωτογραφιών αντίστοιχα (Τα ονομάτα των κωδικών G ενδέχεται να αλλάξουν στην πορεία).



Σχήμα 3-10. Συστήματα συντεταγμένων για την κατεργασία του PPB.

3.3.4 Επιλογή κοπτικών εργαλείων

Κάθε κώδικας G χρησιμοποιεί διαφορετικό σετ εργαλείων, το οποίο ορίζεται από τις εργασίες που έχει να εκτελέσει. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται όλα τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται. Χρησιμοποιούνται κονδύλια διαφόρων διαμέτρων, αριθμού φτερών και υλικού. Επίσης, χρησιμοποιούνται κεντραδόροι για τις τρύπες και τρυπάνια για την ολοκλήρωσή τους.

Πίνακας 3-1. Κοπτικά εργαλεία και τρυπάνια.

α/α	Είδος εργαλείου	Υλικό	Φ (mm)	Μήκος ενεργό (mm)	Μήκος συνολικό (mm)	Αρ. Φτερών
1	Κονδύλι	M0402C6 LC, AICrN	2	6	50	3
2		HSS Co8, Short	4	30	80	2
3		HSS Co8, Short	8	11	61	2
4		HSS Co8, Short	10	22	72	4
5		HSS Co8, Short	12	26	83	4
6	Τρυπάνι	Καρβιδίου	2,5			1
7		Καρβιδίου	3,3			1
8		Καρβιδίου	5			1
9		Καρβιδίου	6,5			1
10		Καρβιδίου	8,5			1
11	Κεντραδόρος	DIN 333 Form A HSS	3,15x8			1

Σε κάθε κώδικα χρησιμοποιούνται διαφορετικά εργαλεία. Το STAVROS.TAP χρησιμοποιεί τα **1, 2, 4, 6, 7** και **11**, το ΚΑΡΑΚΙΣΤΑΒΡΟΥ.TAP τα **2, 4, 6, 8, 10** και **11**, το ΚΑΡΑΚΙΠΛΑΚΕΤΑΣ.TAP τα **2, 3, 5, 6, 9** και **11**, το PPB.TAP τα **2** και **5**. Για τα εργαλεία φαίνονται και τα χαρακτηριστικά τους σε παρενθέσεις μέσα στο κείμενο. Τα εργαλεία του Πίνακα 3-1 ενδέχεται να αλλάξουν με την αλλαγή των κωδικών G και σημειώνεται ότι πρόκειται για ενδεικτικά εργαλεία που μπορούν να παραξούν τα τεμάχια.

3.3.5 Λοιπές κατεργασίες με συμβατικές εργαλειομηχανές και εργαλεία

Εφόσον κατεργαστούν τα τεμάχια πρέπει να κοπούν από τον υπόλοιπο κύλινδρο όπως φαίνεται για τον σταυρό στο Σχήμα 3-9. Αυτό γίνεται στην πριονοκορδέλα. Αν υπάρχει δυσκολία και μπουκώνει το πριόνι, χρησιμοποιείται το πριόνι χειρός. Μετά από αυτή την εργασία, πρέπει η κομμένη επιφάνεια να καθαριστεί και να αποκτήσει τις επιθυμητές

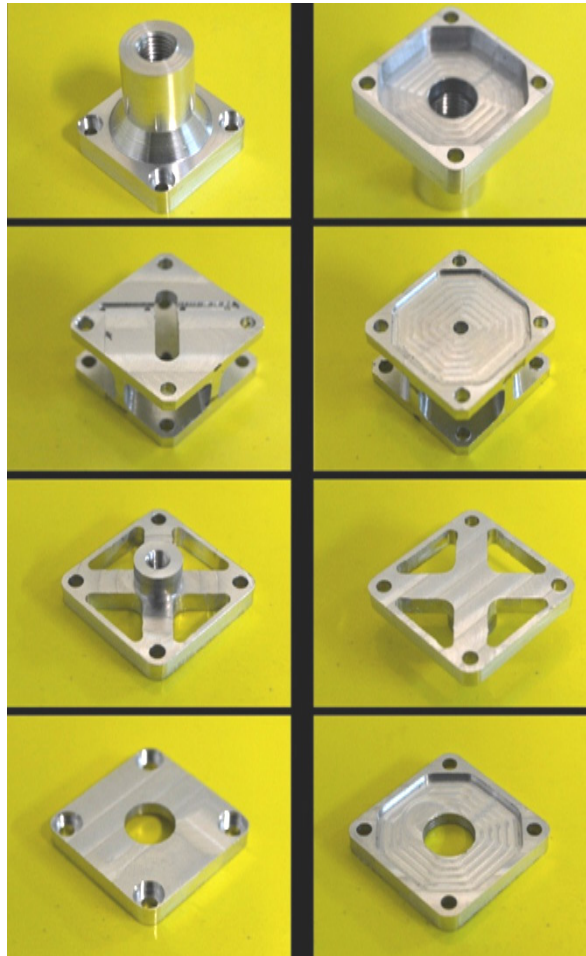
διαστάσεις. Έτσι χρησιμοποιείται η φρέζα, στην οποία το τεμάχιο συγκρατείται με μέγγενη και παράλληλους δοκούς.

Ο σταυρός και το καπάκι της πλακέτας έχουν εσωτερικό σπείρωμα M4 και M8 αντίστοιχα. Οι διάμετροι των οπών είναι επιλεγμένες ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί σωστό σπείρωμα τυποποιημένο σύμφωνα με το μετρικό σύστημα. Για το M4 είναι 3,3 mm και για το M8 είναι 6,5 mm. Η δημιουργία σπειρωμάτων γίνεται με σπειροτόμους ή αλλιώς κολαούζα. Στο Σχήμα 3-11 φαίνεται η δημιουργία σπειρωμάτων M8.



Σχήμα 3-11. Σπειροτόμηση.

Στο Σχήμα 3-12 φαίνονται η μπροστινή και η πίσω όψη των τελικών κατασκευασμένων τεμαχίων τα οποία είναι έτοιμα για συναρμολόγηση.



Σχήμα 3-12. Κατασκευασμένα τεμάχια.

3.4 Τελικός Σχεδιασμός και Κατασκευή Ηλεκτρονικού Υποσυστήματος

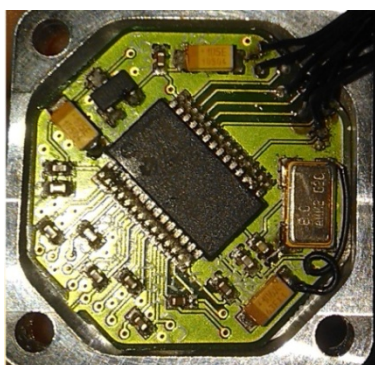
3.4.1 Σχεδιασμός τελικού PCB

Το τελικό PCB σχεδιάστηκε ώστε να είναι εύκολη η συναρμολόγηση και η αποσυναρμολόγηση του με προσαρμογείς. Δεν χρειάζεται δηλαδή, να κολληθούν τα καλώδια των γεφυρών πάνω του. Επίσης χωράει μέσα στον αισθητήρα και είναι σταθερό σε αυτόν χωρίς οι συνδέσεις του να περνάνε από μέρη υπό φόρτιση. Έτσι μπορεί να αντέχει στα κρουστικά φορτία χωρίς να καταστρέφεται και οι μόνες δυνάμεις που δέχεται είναι οι αδρανειακές από τις επιταχύνσεις.

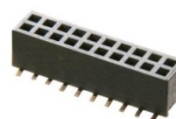
Επίσης δημιουργήθηκαν συγκεντρωμένα σημεία στην πάνω όψη, στα οποία συνδέονται τα καλώδια επικοινωνίας με τον μικροεπεξεργαστή. Σκοπός είναι, να χρειάζεται όσο λιγότερα καλώδια γίνεται για να χωράνε τα καλώδια μέσα από το πόδι. Έτσι δημιουργήθηκαν οχτώ θέσεις. Η τροφοδοσία έχει μόνο δύο καλώδια με διαφορά

δυναμικού 5V και είναι κοινή για τον ADC και για τις γέφυρες. Για τις γέφυρες, απαιτείται ρεύμα από την έξοδο του ρυθμιστή τάσης (voltage regulator) στα 3,3V από όπου τροφοδοτείται και το ψηφιακό κομμάτι του ADC.

Στην κάτω όψη τοποθετήθηκε ένας προσαρμογέας που χρησιμοποιείται για να ενώσει τα καλώδια των γεφυρών με τις εισόδους των καναλιών του MCP3903. Έχει συνολικά 14 ακροδέκτες, δύο για κάθε κανάλι και δύο για την τροφοδοσία η οποία είναι κοινή για όλα τα κανάλια. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται η κατασκευασμένη πλακέτα με τα ηλεκτρονικά κολλημένα πάνω και ο προσαρμογέας.



(α)



(β)

Σχήμα 3-13. (α) Πλακέτα μέσα στο καπάκι, (β) προσαρμογέας.

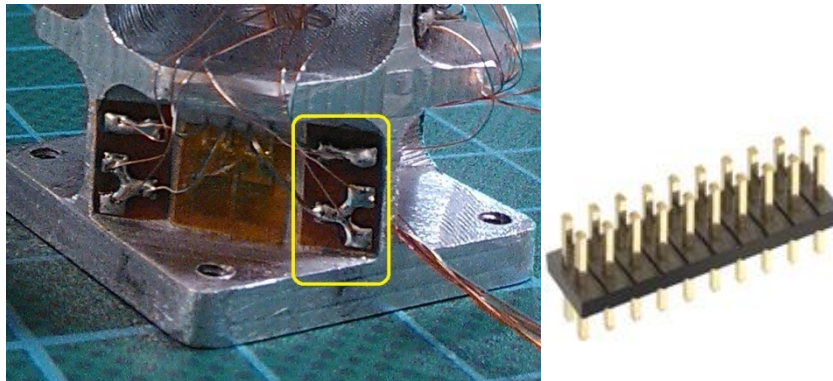
3.4.2 Καλωδίωση

Η σύνδεση των SG μεταξύ τους αλλά και των γεφυρών από και προς την πλακέτα γίνεται με πηνιόσυρμα. Το πηνιόσυρμα είναι πολύ εύκαμπτο και αρκετά μικρής διατομής, πράγμα που βολεύει για να χωράνε οι πολλές συνδέσεις που έχουν οι 5 γέφυρες, μέσα στην κατασκευή. Είναι μονωμένο και δεν κάνει επαφή με το υλικό της κατασκευής. Το μειονέκτημα του είναι ότι είναι δύσκολο στην κόλληση.



Σχήμα 3-14. Πηνιόσυρμα.

Τα SG παρέχονται από την κατασκευάστρια εταιρεία με κολλημένα καλώδια που προεξέχουν. Έτσι, επικολλούνται πρώτα σε κάποιους ενδιάμεσους ακροδέκτες οι οποίοι επίσης παρέχονται από την εταιρεία που κατασκευάζει τα SG. Οι ακροδέκτες αυτοί είναι κολλημένοι σε ένα μονωτικό υλικό και συνολικά επικολλούνται σε κάποιες ελεύθερες επιφάνειες πάνω στην κατασκευή όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-15. Χρησιμεύουν ως κόμβοι για την σύνδεση με το πηνιόσυρμα. Τελικά από εκεί φεύγουν και καταλήγουν σε προσαρμογέα που συνδέεται με τον προσαρμογέα της πλακέτας.



Σχήμα 3-15. Συνδέσεις και προσαρμογέας.

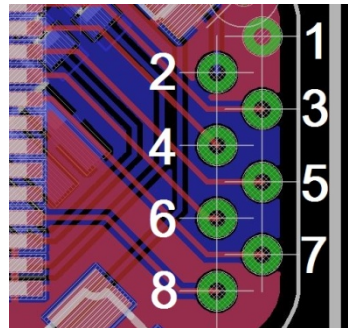
3.4.3 Επικοινωνία

Η πλακέτα έχει οχτώ συνδέσεις που φαίνονται στην πάνω όψη της (βλ. Σχήμα 3-16). Οι συνδέσεις αυτές χρησιμεύουν στην επικοινωνία και στην τροφοδοσία. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, για την τροφοδοσία χρησιμοποιούνται δύο ακροδέκτες. Η ανταλλαγή πληροφοριών με μικροεπεξεργαστή γίνεται μέσω του πρωτόκολλου επικοινωνίας SPI. Έτσι, τέσσερις ακροδέκτες χρησιμοποιούνται για αυτόν τον λόγο. Ένας ακροδέκτης χρησιμοποιείται για να μεταφέρει το σήμα το οποίο δηλώνει ότι το MCP3903 έχει έτοιμα δεδομένα για ανάγνωση. Αυτά είναι αποθηκευμένα στους καταχωρητές του. Έτσι χρησιμοποιείται σαν interrupt από τον μικροεπεξεργαστή και ονομάζεται DRDA. Ο όγδοος και τελευταίος ακροδέκτης είναι αυτός που αντιστοιχεί στο RESET του MCP3903 και χρησιμοποιείται για την επανεκκίνηση του. Για την λειτουργία του διατηρείται HIGH (5V) και αν χρειαστεί επανεκκίνηση γίνεται για 200 μ sec LOW. Στον Πίνακα 3-2 φαίνονται εν συντομία οι ακροδέκτες και η λειτουργία τους.

Πίνακας 3-2. Ακροδέκτες καλωδίων επικοινωνίας.

Pin α/α	Όνομα	Λειτουργία
1	V-	GND
2	V+	5V
3	RESET	Επανεκκίνηση
4	MOSI	SPI
5	MISO	SPI
6	SCK	SPI
7	CS	SPI
8	DRDA	Data ready pin

Στο Σχήμα 3-16 φαίνονται οι θέσεις του Πίνακα 3-2 πάνω στην πλακέτα. Πρόκειται για οπές επιχαλκωμένες, πάνω στις οποίες επικολλούνται με καλάι τα καλώδια. Από εκεί, φεύγουν μέσα από το καπάκι της πλακέτας και μέσα από την κοίλη δοκό που αποτελεί το πόδι του ρομπότ και καταλήγουν στο πάνω άκρο του και τελικά συνδέονται με τον μικροεπεξεργαστή, ο οποίος βρίσκεται τοποθετημένος πάνω στον κορμό του ρομπότ.



Σχήμα 3-16. Θέσεις ακροδεκτών επικοινωνίας στην πλακέτα.

Η εσωτερική διάμετρος του ποδιού είναι κυκλικής διατομής με διάμετρο $3,5 \text{ mm}$. Για να χωρέσουν τα καλώδια μέσα από το πόδι, επιλέχθηκαν καλώδια μικρής διατομής και μονωμένα. Η εξωτερική διάμετρος τους είναι $0,7 \text{ mm}$ και φαίνονται επικολλημένα πάνω στην πλακέτα στο Σχήμα 3-13.

3.4.4 Κόλληση SG πάνω στην κατασκευή

Για μακροχρόνιες αλλά και αξιόπιστες μετρήσεις, ώστε να προσεγγίζεται όσο γίνεται περισσότερο το μοντελοποιημένο σύστημα του προηγούμενου κεφαλαίου, πρέπει η κόλληση των SG πάνω στην κατασκευή να ακολουθήσει συγκεκριμένη μέθοδο όπως

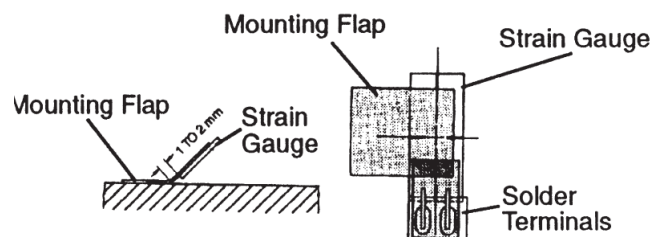
αυτή παρέχεται από τον κατασκευαστή τους. Εδώ αναφέρονται τα βήματα της μεθόδου αυτής.

Προετοιμασία μεταλλικής επιφάνειας.

1. Καθαρισμός βρωμιών, σκουριών και απολίπανση με οινόπνευμα.
2. Λείανση επιφάνειας για να φύγουν οι χαρακιές, οι εντοπισμένες ανωμαλίες και γενικά για να γίνει επίπεδη η επιφάνεια. Αυτό γίνεται με κάποια λίμα ή και με γυαλόχαρτο μεγάλου κόκκου.
3. Απολίπανση επιφάνειας με ασετόν.
4. Αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας με γυαλόχαρτο βαθμού 220 έως 360. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει ή βρέχοντας την επιφάνεια με ασετόν ή με ξηρή επιφάνεια.
5. Καθαρισμός με ασετόν των παραγόμενων από την προηγούμενη διαδικασία τριμμάτων αλουμινίου. Το βήμα αυτό χρειάζεται ειδική προσοχή και πρέπει η επιφάνεια με το τέλος αυτού του βήματος, να είναι πεντακάθαρη.

Προετοιμασία SG.

6. Επικόλληση αυτοκόλλητης ταινίας στην πίσω επιφάνεια, για ευκολία στην τοποθέτηση. (Σχήμα 3-17)



Σχήμα 3-17. Αυτοκόλλητη ταινία πάνω στο SG.

Τοποθέτηση SG.

7. Ευθυγράμμιση και τοποθέτηση με προσοχή κατά την κατεύθυνση που θέλουμε να μετράει. Κολλάει η ταινία πάνω στο μέταλλο και το τμήμα του SG μπορεί να ανασηκώνεται.

Κόλληση.

8. Ανασήκωμα του SG και καθαρισμός της επιφάνειας με ασετόν μέχρι να στεγνώσει. Αναμονή μέχρι το στέγνωμα.
9. Τοποθέτηση μιας σταγόνας κυανοακρυλικής κόλλας και εξάπλωση της με ταινία τεφλόν με ελάχιστη δύναμη. Η εξάπλωση πρέπει να δημιουργήσει ένα λεπτό φιλμ χωρίς κενά και φουσκάλες.

10. Κατέβασμα του SG και ομαλή άσκηση πίεσης με το δάχτυλο σε όλη την επιφάνεια που καλύπτει το SG για περίπου 2 λεπτά. Για να μην κολλήσει το δάχτυλο μαζί με το SG τοποθετείται από πάνω μια ταινία τεφλόν.

11. Αφαίρεση ταινίας τεφλόν και αυτοκόλλητης ταινίας και αναμονή για 24 ώρες.

Με τα παραπάνω βήματα επιτυγχάνεται η κόλληση και μπορεί να καταγραφεί σωστό σήμα μετά από 24 ώρες. Η κόλλα είναι κυανοακρυλικού τύπου και μπορεί να βρεθεί εύκολα στην αγορά. Για να ακολουθηθούν πιστά οι οδηγίες και να ικανοποιηθούν οι προδιαγραφές που δίνει ο κατασκευαστής των SG, η κόλλα επιλέχθηκε να είναι αυτή που παρέχει η κατασκευάστρια εταιρεία OMEGA. Έχει κωδική ονομασία SG401.

3.5 Συναρμολόγηση Τεμαχίων και Πλακέτας

Τα τεμάχια συνδέονται μεταξύ τους με κοχλίες-περικόχλια ασφαλείας, τυποποιημένα από το μετρικό σύστημα ως M2,5 όπως αναφέρθηκε και στο εδάφιο 3.2.1. Λόγω του τρόπου φόρτισης του αισθητήρα οι κοχλίες δεν καταπονούνται σε εφελκυσμό από την F_z . Καταπονούνται όμως, από την προένταση που πρέπει να έχουν για να φέρουν με κοχλιοσυνδέσεις τριβής τη δύναμη F_x και από τα καμπτικά φορτία που επάγει η δύναμη αυτή. Για λόγους υπερδιαστασιολόγησης, μικρής τιμής των δυνάμεων αυτών και για ευκολία στους υπολογισμούς επιλέχθηκε να μην ληφθούν υπόψη τα δεύτερα. Έτσι αυτό που γίνεται είναι, ο έλεγχος απλά της αντοχής και η μελέτη λειτουργίας της κοχλιοσύνδεσης. Στο [13] βλέπει κανείς ότι για τον υπολογισμό της ελάχιστης ονομαστικής διαμέτρου είναι απαραίτητο να γνωρίζει κανείς πολλά στοιχεία. Οι κοχλιοσύνδεσεις όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-18, θέλουμε να μεταφέρουν συνολικά $F_x = 1000 N$. Επομένως με απλή διαίρεση, κάθε κοχλίας πρέπει να μεταφέρει $250 N$.

$$F_{\pi} = \frac{F_x}{4} \cdot \frac{S_{ολ}}{\mu_o} = 250 \cdot \frac{1,25}{0,5} = 625 N = 63,73 kp \quad (3.1)$$

$S_{ολ}$: Συντελεστής ασφαλείας

μ_o : Στατικός συντελεστής τριβής πλακών αλουμινίου

$$F_{\piμεγ} = a_{\pi} \cdot (F_{\pi} + F_z) = 1,5 \cdot (63,73 + 5) = 103,1 kp \quad (3.2)$$

a_{π} : Συντελεστής προεντάσεως (αφορά τον τρόπο σύσφιξης)

F_z : Πτώση δύναμης προεντάσεως λόγω καθίζησης των θλιβόμενων μερών

Η ονομαστική διάμετρος του κοχλία για την $F_{\pi\mu\epsilon\gamma}$ υπολογίζεται παρακάτω

$$d = (1,33 + 1,58 \cdot \mu_o) \frac{\sqrt{F_{\pi\mu\epsilon\gamma} + 2,1}}{\sqrt{\sigma_{z0,2}}} = 2,12 \cdot \frac{\sqrt{103,1 + 2,1}}{\sqrt{108}} = 2,49 \approx 2,5\text{mm} \quad (3.3)$$

$\sigma_{z0,2}$: το όριο μηκύνσεως του υλικού το κοχλία

Η ροπή σύσφιξης υπολογίζεται για μετρικό σπείρωμα

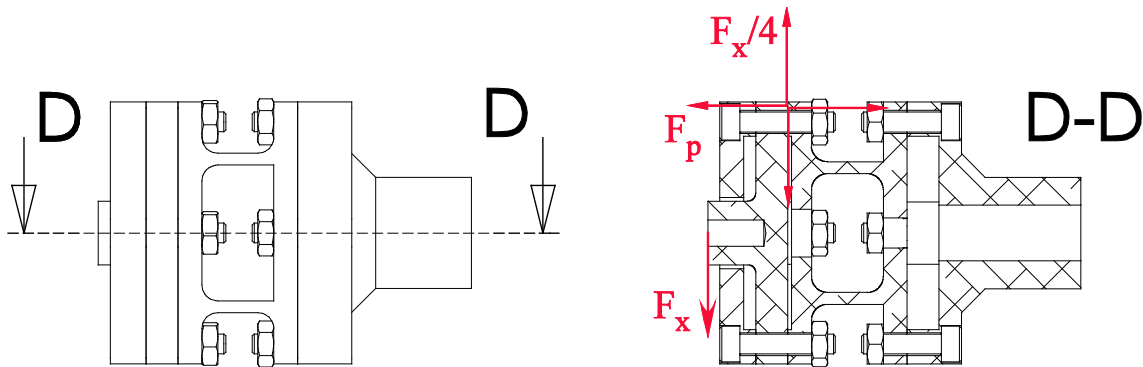
$$T_{\pi} = F_{\pi\mu\epsilon\gamma} \cdot d \cdot (\mu_o (1,232 - 0,375 \cdot \frac{P}{d}) + 0,159 \cdot \frac{P}{d}) = 151,97\text{kprmm} = 1,49\text{Nm} \quad (3.4)$$

$F_{\pi\mu\epsilon\gamma}$: Μέγιστη δύναμη προεντάσεως

d : Ονομαστική διάμετρος κοχλία

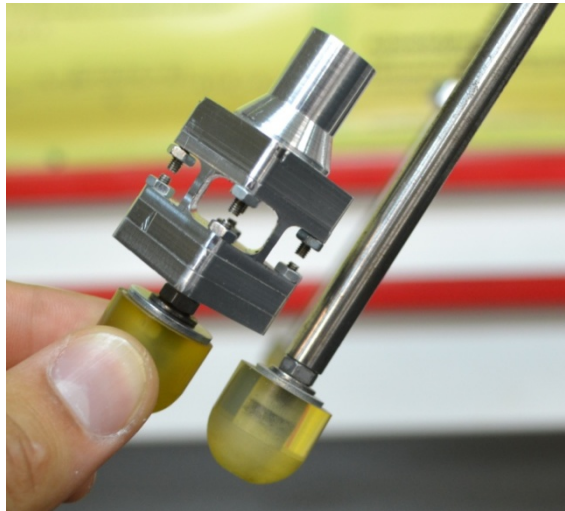
P : Βήμα σπειρώματος

μ_o : Στατικός συντελεστής τριβής μεταξύ κοχλία και αλουμινίου

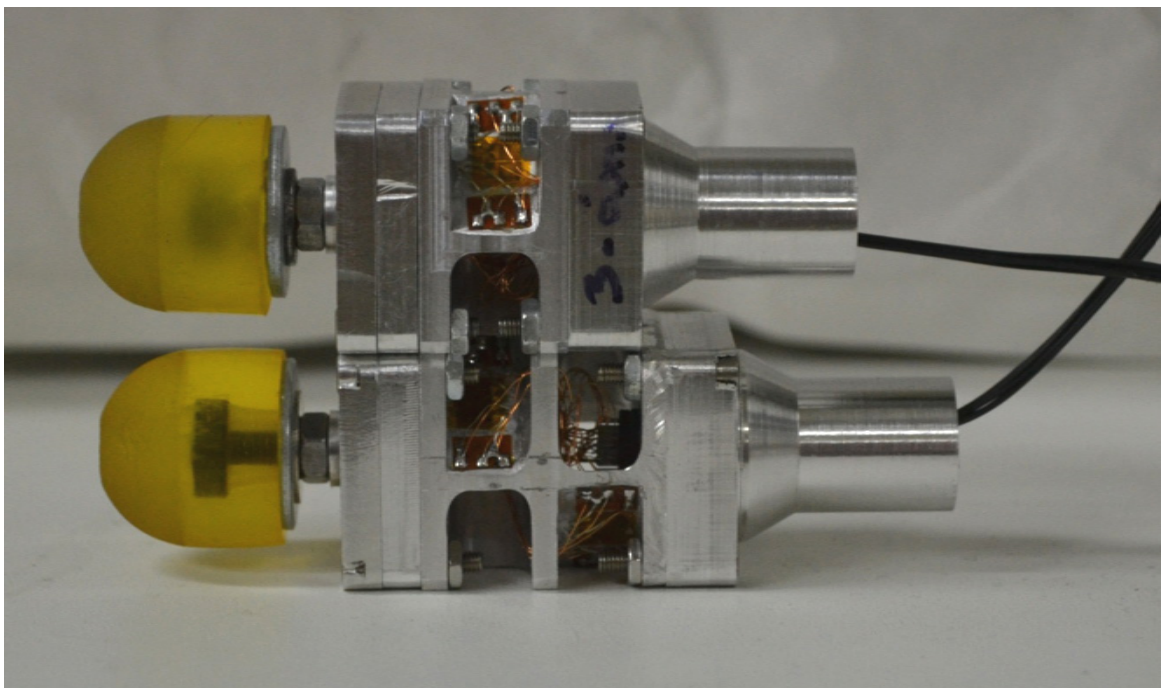


Σχήμα 3-18. Κοχλιοσυνδέσεις τριβής.

Για την σύσφιξη του προσαρμογέα πάνω στο PPB χρησιμοποιούμε την ίδια ροπή με την παραπάνω, καθώς τα φορτία που δέχεται είναι σχεδόν ίδια με μια μικρή διαφορά που είναι μικρής σημασίας λόγω των υψηλών συντελεστών ασφαλείας που έχουν επιλεγθεί. Πρώτα όμως, μπαίνει η πλακέτα μεταξύ των δύο τεμαχίων. Μεταξύ της πλακέτας και του αλουμινίου μπαίνει μονωτικό φιλμ κομμένο στις διαστάσεις της πλακέτας. Η πλακέτα επικολλάται με κόλλα στιγμής πάνω στον προσαρμογέα αφού έχει τυλιχθεί με μονωτική ταινία. Στο Σχήμα 3-19 φαίνονται τα συνδεδεμένα τεμάχια και το πέλμα συνδεδεμένο όπως στο πόδι.



Σχήμα 3-19. Συναρμολογημένος αισθητήρας.

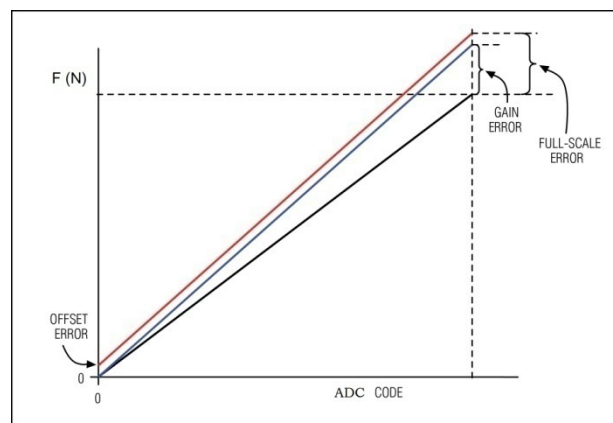


Σχήμα 3-20. Ολοκληρωμένη κατασκευή ΣΧ1 και ΣΧ2.

4 Βαθμονόμηση Αισθητήρα

4.1 Εισαγωγή

Για να έχουν νόημα οι μετρήσεις και να αντιστοιχούν σε μέγεθος δύναμης (N) πρέπει να γίνει βαθμονόμηση του αισθητήρα. Αυτή γίνεται λαμβάνοντας υπόψη και διορθώνοντας το συνολικό σφάλμα, που αποτελείται από το σφάλμα αντιστάθμισης (offset error) και από το σφάλμα κέρδους (gain error), Σχήμα 4-1. Επειδή όμως, τα κανάλια συνδέονται μεταξύ τους, με την έννοια ότι επάγουν σήμα το ένα στο άλλο, το πρόβλημα εξετάζεται συνολικά και μαζί με την βαθμονόμηση γίνεται και η αποσύζευξη των αξόνων.



Σχήμα 4-1. Συνολικό σφάλμα ενός άξονα.

Η αποσύζευξη γίνεται υπολογίζοντας το Μητρώο Αποσύζευξης ή Decoupling Matrix (DM) και πολλαπλασιάζοντας το με το διάνυσμα εισόδου. Το διάνυσμα εισόδου

πρέπει να αντισταθμιστεί πρώτα πριν πολλαπλασιαστεί με το DM. Για αυτό τον λόγο πρέπει να υπολογιστεί πρώτα το σφάλμα αντιστάθμισης για όλους του άξονες.

4.2 Υπολογισμός Σφάλματος Αντιστάθμισης (Offset Error)

Τα σφάλμα αντιστάθμισης προκύπτει από διάφορα μεγέθη και συσσωρεύεται στο σήμα καθώς αυτό περνάει από το μέγεθος της δύναμης μέχρι τον κώδικα του ADC. Κατά την κόλληση και το σφίξιμο των κοχλιών μερικά SG στην ίδια γέφυρα μπορεί να είναι περισσότερο παραμορφωμένα από άλλα, έτσι δημιουργείται μια αρχική αντιστάθμιση. Για την μη “ισοροπημένη γέφυρα”, όπως λέγεται, ευθύνονται εκτός από τα παραπάνω, οι ανοχές των αντιστάσεων των SG και το μήκος των καλωδίων σύνδεσης. Έτσι, αν μετρήσιον η γέφυρα με έναν ιδανικό ADC χωρίς να ασκείται κάποια δύναμη στον αισθητήρα, θα έδινε μη μηδενική έξοδο. Επίσης, ένας πραγματικός ADC έχει από την κατασκευή ένα σφάλμα αντιστάθμισης. Συσσωρευμένα λοιπόν όλα αυτά τα σφάλματα σε συνθήκες μηδενικής καταπόνησης δίνουν ένα σφάλμα αντιστάθμισης.

Ο υπολογισμός αυτού το σφάλματος είναι εύκολος. Μετράται με τον ADC το σήμα όταν στον αισθητήρα δεν ασκείται κάποια δύναμη ή ροπή και καταγράφεται. Κατά προτίμηση αυτό είναι καλό να γίνεται με τον αισθητήρα να βρίσκεται κατακόρυφα με το πέλμα να κοιτάει το έδαφος. Αυτό γίνεται για να μην ληφθεί σαν σφάλμα και η καταπόνηση που συμβαίνει λόγω ιδίου βάρους της κατασκευής.

Η διαδικασία αυτή εξάγει ένα διάνυσμα πέντε στοιχείων και χρησιμοποιείται κατά τον υπολογισμό του DM αλλά και κατά την εφαρμογή του για να δώσει αξιόπιστες μετρήσεις. Σημειώνεται, ότι δεν συνεισφέρουν οι τιμές στον υπολογισμό του DM άμεσα, αλλά χρησιμοποιείται για να διαβάζονται τιμές χωρίς το offset. Αυτό σημαίνει, ότι αν αλλάξει π.χ. το offset του ADC λόγω αύξησης της θερμοκρασίας, το DM δεν αλλάζει.

Το διάνυσμα ονομάζεται E_o και είναι αυτό το οποίο δίνει την έξοδο του αισθητήρα για μηδενική φόρτιση. Το στοιχεία του μετρούνται σε μονάδες ψηφιακού κωδικού.

$$E_o = \begin{pmatrix} e_{F_{x0}} \\ e_{F_{y0}} \\ e_{F_{z0}} \\ e_{M_{x0}} \\ e_{M_{y0}} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

4.3 Μητρώο Αποσύζευξης Βαθμών Ελευθερίας (Decoupling Matrix)

Η έξοδος ενός καναλιού είναι μέγεθος που εκφράζεται σε κώδικα δεκαδικής μορφής. Το παρακάτω διάνυσμα συμβολίζει τις εξόδους του ADC υπό φόρτιση.

$$E' = \begin{pmatrix} e'_{F_x} \\ e'_{F_y} \\ e'_{F_z} \\ e'_{M_x} \\ e'_{M_y} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Η έξοδος αυτή αποτελείται από το κύριο σήμα (π.χ. για την e'_{F_z} είναι η F_z), από το offset error και από τα δευτερεύοντα σήματα που προκύπτουν από την παρεμβολή των άλλων δυνάμεων/ροπών. Αυτό γίνεται γιατί η δύναμη σε έναν άξονα δεν παραμορφώνει μόνο SG του ίδιου άξονα, αλλά και SG άλλου άξονα. Τα δευτερεύοντα σήματα μπορεί να πει κανείς ότι προσεγγίζονται με ικανοποιητική ακρίβεια από γραμμικές σχέσεις των δυνάμεων/ροπών. Έτσι μπορεί να πει κανείς ότι ισχύουν τα εξής

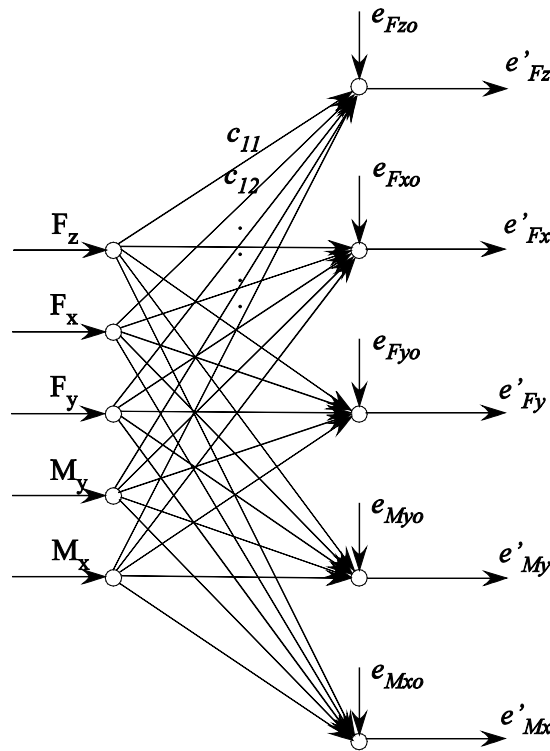
$$\begin{aligned} e'_{F_x} &= c_{11} \cdot F_z + c_{12} \cdot F_x + c_{13} \cdot F_y + c_{14} \cdot M_y + c_{15} \cdot M_x + e_{F_{x0}} \\ e'_{F_y} &= c_{21} \cdot F_z + c_{22} \cdot F_x + c_{23} \cdot F_y + c_{24} \cdot M_y + c_{25} \cdot M_x + e_{F_{y0}} \\ e'_{F_z} &= c_{31} \cdot F_z + c_{32} \cdot F_x + c_{33} \cdot F_y + c_{34} \cdot M_y + c_{35} \cdot M_x + e_{F_{z0}} \\ e'_{M_x} &= c_{41} \cdot F_z + c_{42} \cdot F_x + c_{43} \cdot F_y + c_{44} \cdot M_y + c_{45} \cdot M_x + e_{M_{x0}} \\ e'_{M_y} &= c_{51} \cdot F_z + c_{52} \cdot F_x + c_{53} \cdot F_y + c_{54} \cdot M_y + c_{55} \cdot M_x + e_{M_{y0}} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Αφού φέρουμε τα στοιχεία του διανύσματος E_0 στο αριστερό μέρος των εξισώσεων έχουμε σε μητρική μορφή,

$$\underbrace{\begin{pmatrix} e_{F_x} \\ e_{F_y} \\ e_{F_z} \\ e_{M_x} \\ e_{M_y} \end{pmatrix}}_E = \underbrace{\begin{pmatrix} e'_{F_x} \\ e'_{F_y} \\ e'_{F_z} \\ e'_{M_x} \\ e'_{M_y} \end{pmatrix}}_{E'} - \underbrace{\begin{pmatrix} e_{F_{z0}} \\ e_{F_{y0}} \\ e_{M_{x0}} \\ e_{M_{y0}} \end{pmatrix}}_{E_0} = \underbrace{\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} \end{pmatrix}}_C \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \end{pmatrix}}_F \quad (4.4)$$

Το διάνυσμα E αποτελείται από τις αντισταθμισμένες εξόδους του αισθητήρα από το διάνυσμα μηδενικής φόρτισης E_0 .

Ένα διάγραμμα ροής του παραπάνω συστήματος πολλών εισόδων και πολλών εξόδων φαίνεται στο Σχήμα 4-2.



Σχήμα 4-2. Σύστημα πολλών εισόδων και εξόδων

Έτσι, αν έχουμε γνώση του μητρώου C και του E_o μπορούμε με αντιστροφή του πρώτου και αφαίρεση του δευτέρου, να υπολογίσουμε τις δυνάμεις που ασκούνται αποσυζευγμένες την μια από την άλλη. Δηλαδή

$$\mathbf{F} = \mathbf{C}^{-1} \cdot (\mathbf{E}' - \mathbf{E}_o) \quad (4.5)$$

Ορίζεται ως Μητρώο Αποσύζευξης ή Decoupling Matrix το \mathbf{C}^{-1} .

4.3.1 Υπολογισμός μητρώου αποσύζευξης

Για να υπολογιστεί το DM πρέπει να εισάγουμε στο σύστημα γνωστές εισόδους (φορτίσεις) και να μετράμε τις εξόδους του. Συγκεκριμένα εισάγεται στο σύστημα μια σειρά από γνωστές εισόδους μονοαξονικής φόρτισης. Δηλαδή όλοι οι όροι του διανύσματος εισόδου είναι μηδενικοί εκτός από τον όρο της δύναμης για την οποία γίνεται η βαθμονόμηση. Π.χ. για την F_z έχουμε,

$$\mathbf{F}_z = (F_{z1}, F_{z2}, \dots, F_{zN}) \text{ και } F_x, F_y, M_y, M_x = 0$$

όπου $N = \text{αριθμός σημείων}$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ (F_{z1}, F_{z2}, \dots, F_{zN}) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Η έξοδος είναι

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} e_{F_x i}(F_{zi}) \\ e_{F_y i}(F_{zi}) \\ e_{F_z i}(F_{zi}) \\ e_{M_x i}(F_{zi}) \\ e_{M_y i}(F_{zi}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e'_{F_x i}(F_{zi}) \\ e'_{F_y i}(F_{zi}) \\ e'_{F_z i}(F_{zi}) \\ e'_{M_x i}(F_{zi}) \\ e'_{M_y i}(F_{zi}) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} e_{F_{x0}} \\ e_{F_{y0}} \\ e_{F_{z0}} \\ e_{M_{x0}} \\ e_{M_{y0}} \end{pmatrix} \quad \text{όπου } i = 1, 2, \dots, N \quad (4.7)$$

Έτσι, έχοντας αυτό το σύνολο από σημεία, δηλαδή τις εξόδους \mathbf{E}_i και τις εισόδους $F_{z,i}$, μπορεί κανείς με προσαρμογή σε ευθείες αναδρομής (έχει γίνει παραδοχή για γραμμικές σχέσεις μεταξύ e και F_z) να προσδιορίσει τα c_{13} , c_{23} , c_{33} , c_{43} και c_{53} , δηλαδή την τρίτη στήλη του πίνακα \mathbf{C} . Γίνεται δηλαδή προσαρμογή του παραπάνω ζεύγους σημείων με την βοήθεια της μεθόδου των ελάχιστων τετραγώνων σε μια ευθεία της μορφής,

$$e = c \cdot F + w \quad (4.8)$$

Όπου w σφάλμα θορύβου το οποίο απαλοίφεται καθώς θεωρείται ότι ο μέσος όρος του είναι μηδέν. Δεν έχει σχέση με το offset error του κάθε άξονα.

4.3.2 Εφαρμογή Μητρώου Βαθμονόμησης

Χρησιμοποιώντας την μέθοδο του προηγούμενου εδαφίου και για τους υπόλοιπους άξονες χτίζεται όλος ο πίνακας \mathbf{C} . Έτσι, ο πίνακας αυτός είναι τετραγωνικής μορφής και μπορεί να αντιστραφεί.

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{F} \Rightarrow \\ \mathbf{C}^{-1} \cdot \mathbf{E} &= \mathbf{C}^{-1} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{F} \Rightarrow \\ \mathbf{C}^{-1} \cdot \mathbf{E} &= \mathbf{F} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Συνεπώς, έχοντας ένα διάνυσμα εξόδου από τον ADC \mathbf{E}' και έχοντας υπολογίσει νωρίτερα το διάνυσμα μηδενικής φόρτισης \mathbf{E}_0 μπορεί κανείς πολλαπλασιάζοντας την διαφορά τους με το μητρώο αποσύζευξης \mathbf{C}^{-1} να υπολογίσει τις δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε κατεύθυνση.

4.3.3 Προγραμματισμός πειραμάτων βαθμονόμησης

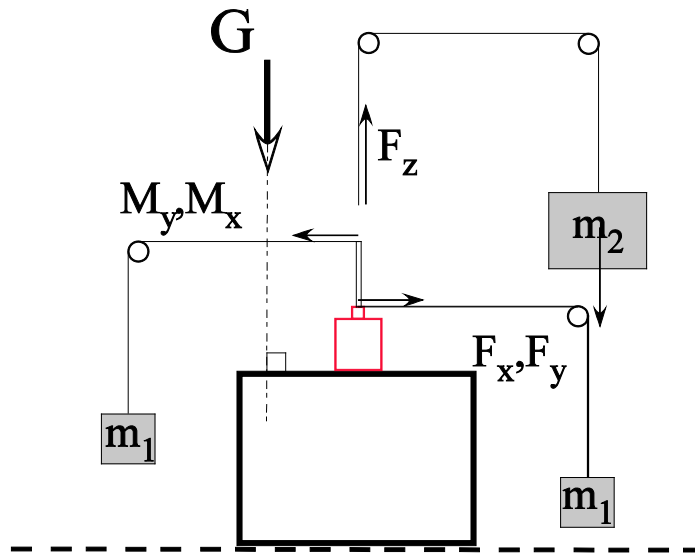
Για να γίνει σωστά η βαθμονόμηση πρέπει τα σημεία να επιλεγθούν έτσι ώστε να καλύπτουν όλο το εύρος των δυνάμεων. Αυτό ισχύει, γιατί με αυτόν τον τρόπο γίνεται μια επαλήθευση της γραμμικότητας της σχέσης παραμόρφωσης δύναμης σε όλο το εύρος της. Βέβαια, η βαθμονόμηση σε όλο το εύρος είναι κάτι δύσκολο καθώς δεν υπάρχουν πρότυπες μάζες που να αντιστοιχούν στις ονομαστικές δυνάμεις των προδιαγραφών αλλά και να υπήρχαν είναι δύσκολη η τοποθέτηση στην μικρή επιφάνεια του αισθητήριου σημείου. Για αυτό τον λόγο γίνεται βαθμονόμηση στις μέγιστες δυνάμεις που μπορούν να επιτευχθούν και η συμπεριφορά μέχρι το επιθυμητό εύρος προσεγγίζεται υπό την θεώρηση της γραμμικής συμπεριφοράς. Κάτι τέτοιο, προϋποθέτει επίσης ότι πρέπει τουλάχιστον να επιτευχθούν τα εύρη των φορτίων που ασκούνται στην ευσταθή λειτουργία του ρομπότ, δηλαδή τον ονομαστικών φορτίων.

Λόγω του θορύβου του αισθητήρα, η κατανομή των σημείων κοντά στα ελάχιστα φορτία πρέπει να είναι όσο πιο πυκνή γίνεται και οι μετρήσεις για κάθε σημείο περισσότερες από μια φορά. Όσο αυξάνεται το φορτίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν μάζες με μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ τους.

4.4 Σχεδιασμός και Κατασκευή Βάσης Βαθμονόμησης

4.4.1 Σχεδιασμός βάσης

Ο υπολογισμός του Μητρώου Βαθμονόμησης δεν μπορεί να επιτευχθεί αν δεν υπάρχουν μονοαξονικές καταπονήσεις. Δηλαδή, όταν ασκείται η δύναμη για την οποία γίνεται βαθμονόμηση, να μην ασκείται καμία άλλη εκτός από αυτήν. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο πρέπει να σχεδιαστεί μια βάση στην οποία θα δένεται ο αισθητήρας και θα καταπονείται από γνωστές δυνάμεις. Η βάση αυτή, πρέπει να είναι όσο πιο απλή γίνεται και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ευκολία. Για την εφαρμογή γνωστών δυνάμεων οι εταιρείες που κατασκευάζουν αισθητήρες δύναμης, χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο ακριβό και μεγάλο εξοπλισμό, ο οποίος δίνει την δυνατότητα εφαρμογής δύναμης μέσω κάποιου επενεργητή. Κάτι τέτοιο δεν συμφέρει στην περίπτωση μας και για αυτό επιλέγονται ως γνωστές δυνάμεις εκείνες που προκύπτουν από πρότυπες μάζες σε βαρυτικό πεδίο. Για το υπόγειο του εργαστηρίου αυτομάτου ελέγχου η επιτάχυνση της βαρύτητας θεωρείται $g = 9,81m/sec^2$. Προτείνεται λοιπόν μια βάση με την λειτουργικότητα του Σχήματος 4-3. Η δύναμη που προκαλεί το βάρος της μάζας περνάει μέσα από το νήμα και αλλάζει κατεύθυνση για να μεταφερθεί στον αισθητήριο σημείο με την επιθυμητή κατεύθυνση λόγω των τροχαλιών που υπάρχουν στο σύστημα.



Σχήμα 4-3. Λειτουργία βάσης βαθμονόμησης.

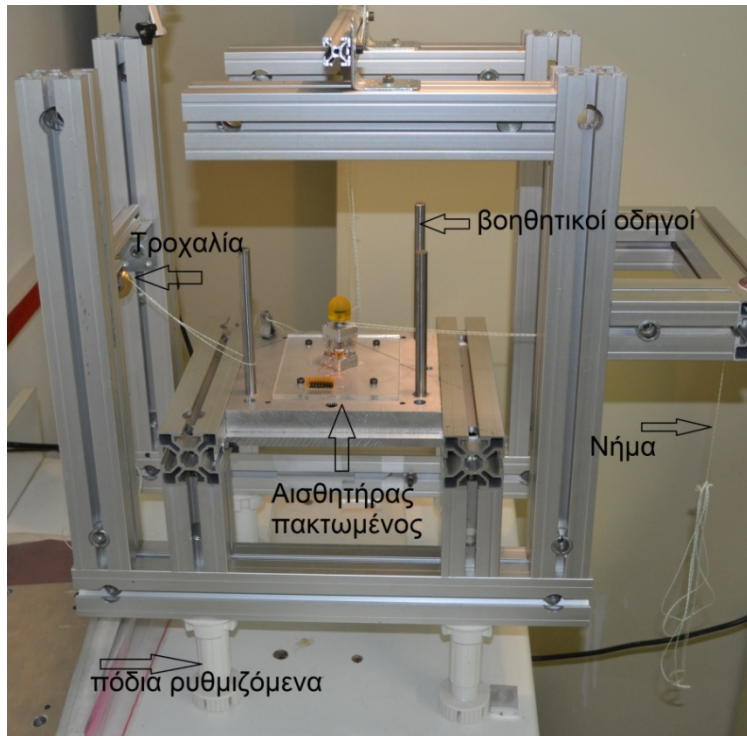
Για την άσκηση θετικής δύναμης F_z , τοποθετούνται οι πρότυπες μάζες ακριβώς πάνω στο αισθητήριο σημείο. Για αρνητική δύναμη, χρησιμοποιείται ο μηχανισμός με τις δύο τροχαλίες και οι μάζες στην θέση της m_2 . Οι δυνάμεις F_x και F_y αρνητικές και θετικές χρησιμοποιούν μια μάζα m_1 και την τροχαλία, περιστρέφοντας ανάλογα την περίπτωση κατά 90 μοίρες τον αισθητήρα.

Οι περιπτώσεις M_x και M_y χρησιμοποιούν εκτός από τις τροχαλίες και μια ράβδο χαμηλού βάρους (για να μην επηρεάζεται η F_z), ως μοχλοβραχίονα με μήκος L_m . Το ένα άκρο του μοχλοβραχίονα είναι πακτωμένο και ακριβώς στο σημείο της πάκτωσης εφαρμόζεται μια δύναμη που προκύπτει από την μάζα m_1 που χρησιμοποιείται και από τις F_x και F_y . Στο άλλο άκρο ασκείται μια δύναμη ίσου μέτρου αλλά αντίθετης κατεύθυνσης. Έτσι, στο αισθητήριο σημείο ασκείται μόνο ροπή ίση με $m_1 \cdot g \cdot L_m$.

Η βάση πρέπει να είναι καλά στερεωμένη για να φέρει τα φορτία, χωρίς να ανατρέπεται και πρέπει να είναι αλφαδιαστεί έτσι ώστε η επιφάνεια του αισθητήριου σημείου στο οποίο τοποθετούνται οι μάζες στην βαθμονόμηση της F_z , να είναι κάθετη στο διάνυσμα της βαρύτητας.

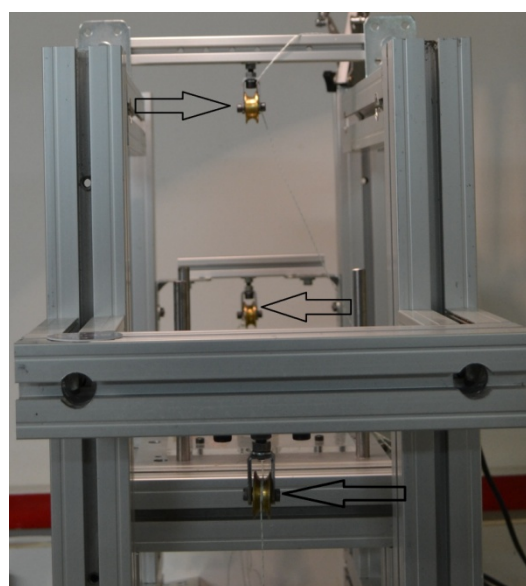
4.4.2 Κατασκευή βάσης

Η κατασκευή της βάσης που ικανοποιεί τα παραπάνω έγινε με ειδικά προφίλ αλουμινίου. Τα προφίλ αυτά βγαίνουν σε ποικιλία μεγεθών και μπορεί κανείς να τα συνθέσει με οποιονδήποτε τρόπο. Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα να ρυθμιστούν πολλές διαστάσεις οι οποίες είναι μεταβλητές και μπορούν να αλλάζουν από αισθητήρα σε αισθητήρα. Παρακάτω, φαίνεται η κατασκευασμένη βάση, αλφαδιασμένη και έτοιμη για χρήση.



Σχήμα 4-4. Αλφαδιασμένη βάση.

Στην παραπάνω όψη, οι τροχαλίες δεν φαίνονται. Για αυτό παρατίθεται και μια πλάγια όψη στην οποία φαίνονται οι τροχαλίες που πρέπει να εκτελέσουν τις λειτουργίες στο Σχήμα 4-3. Σημειώνεται ότι στην φωτογραφία δεν φαίνονται ευθυγραμμισμένες οι τροχαλίες. Κάτι τέτοιο όμως διορθώνεται πολύ εύκολα, καθώς μπορούν να λυθούν να μετακινηθούν κατά τους οδηγούς που παρέχονται από τα προφίλ και να συσφιχθούν ξανά γρήγορα.



Σχήμα 4-5. Τροχαλίες με νήματα για τις μάζες.

Το αλφάδιασμα γίνεται με ένα κοινό αλφάδι (βλ. Σχήμα 4-6) το οποίο τοποθετείται στο επίπεδο συγκράτησης του αισθητήρα.

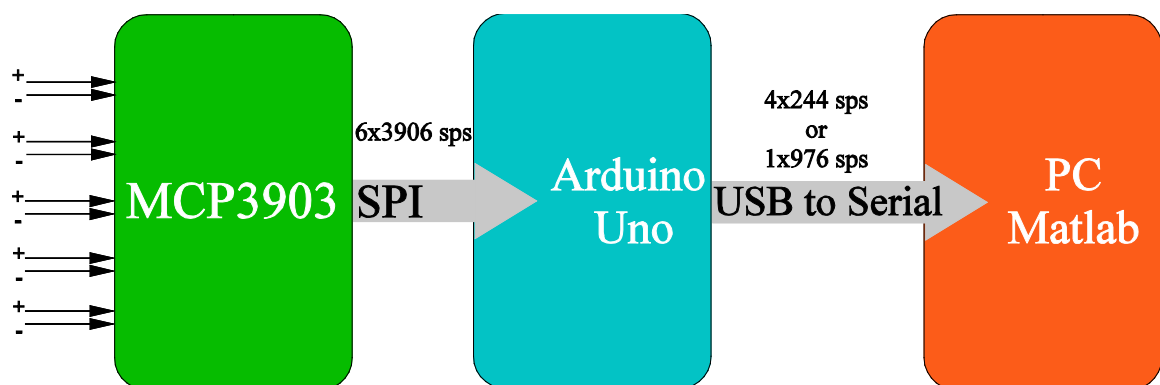


Σχήμα 4-6. Αλφάδι.

5 Πειραματική Εκτέλεση

5.1 Επικοινωνία

Για να μπορούν να γίνουν τα πειράματα χρησιμοποιούνται διάφορες δομικές μονάδες. Πρόκειται για πειράματα που αφορούν την βαθμονόμηση, τον προσδιορισμό φίλτρου αλλά και το διάβασμα. Χρησιμοποιείται ένας μικροεπεξεργαστής για να μπορεί να διαβάσει από τους καταχωρητές του MCP3903, τα δεδομένα. Μετά από τον μικροεπεξεργαστή, το σήμα μεταφέρεται μέσω σειριακής θύρας στον κεντρικό υπολογιστή, όπου τα επεξεργάζεται με Matlab και απεικονίζονται τα δεδομένα. Ένα διάγραμμα ροής των παραπάνω φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



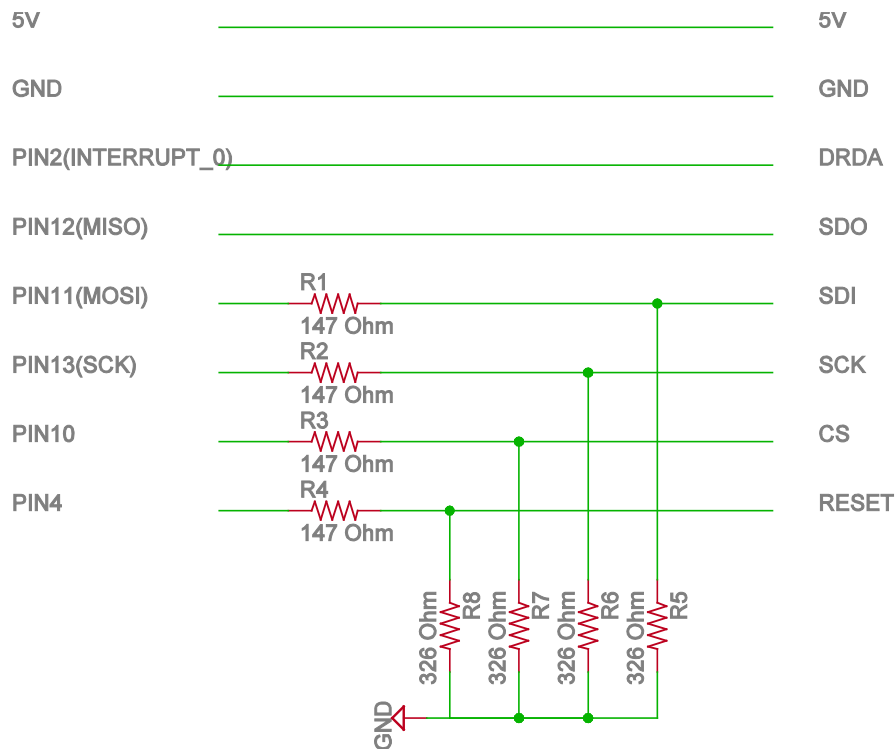
Σχήμα 5-1. Διάγραμμα ροής σήματος.

5.1.1 Συνδεσμολογία

Το arduino είναι μια πλατφόρμα ηλεκτρονικών εισόδων και εξόδων και άλλων περιφερειακών μονάδων με ευκολία στην πρόσβαση τους και στηρίζεται σε έναν μικροελεγκτή της Atmel τον ATmega328. Επίσης, είναι σχετικά εύκολος στον προγραμματισμό ενώ στο διαδίκτυο υπάρχει μεγάλη κοινότητα με τη βοήθεια της οποίας μπορούν να λυθούν απορίες και να διαβαστούν παραδείγματα λειτουργίας του. Περισσότερες πληροφορίες για το arduino μπορεί κανείς να βρει στο <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>.

Εδώ, χρησιμοποιείται για την ρύθμιση του MCP3903, για το διάβασμα και την επεξεργασία των δεδομένων και για την αποστολή τους στον υπολογιστή. Επιλέχθηκε το arduino να κάνει αυτή την εργασία καθώς είναι φθινό, εύχρηστο και συνδυάζει όλες τις λειτουργίες που χρειάζονται. Συγκεκριμένα, έχει interrupt pins, SPI, σειριακή θύρα και μπορεί να τροφοδοτήσει ικανοποιητικά την πλακέτα με 5V. Τα μειονεκτήματα του για την περίπτωση της εφαρμογής αυτής είναι, το λογικό επίπεδο του που είναι στα 5V (TTL) ενώ του MCP3903 είναι στα 3,3V και η χαμηλότερη ταχύτητα αποστολής δεδομένων από αυτήν που μπορεί να δώσει το MCP3903. Το τελευταίο δεν σημαίνει ότι δεν ικανοποιεί τις προδιαγραφές που τέθηκαν στον Πίνακα 2-2, αλλά ότι δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί πλήρως της δυνατότητες του MCP3903. Άλλωστε, το arduino χρησιμοποιείται μόνο για την βαθμονόμηση του αισθητήρα και τον υπολογισμό του DM. Ο υπολογισμός γίνεται με την χρήση στατικών φορτίων και δεν απαιτείται η υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας. Για το διάβασμα πάνω στο πόδι θα χρησιμοποιηθεί άλλος μικροεπεξεργαστής ο οποίος μπορεί να χειριστεί μεγαλύτερο ρυθμό δεδομένων και οι καμπύλες των καταπονήσεων θα μπορούν να ανακατασκευαστούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Για το πρώτο μειονέκτημα, δηλαδή την διαφορά ανάμεσα στα λογικά επίπεδα του arduino και του MCP3903 χρησιμοποιείται ένα απλό κύκλωμα που κάνει την μετάβαση από 5V σε 3,3V. Το κύκλωμα αποτελείται από τέσσερις διαιρέτες τάσης, και υλοποιείται με δύο αντιστάσεις. Οι τρεις από τους τέσσερις χρησιμοποιούνται από το SPI για τα MOSI, SCK και CS και ο ένας για το RESET pin που είναι ουσιαστικά αυτά που στέλνει το arduino στο MCP3903. Για τους υπόλοιπους δύο ακροδέκτες που πάνε αντίθετα δεν χρησιμοποιείται κάτι για την μετατροπή καθώς για τα 3,3V το LOW (0V - 0,8V) και το HIGH (3,3V) είναι μέσα στα όρια του επιπέδου TTL. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η υλοποίηση με αντιστάσεις.



Σχήμα 5-2. Επικοινωνία Arduino – MCP3903.

Η επιλογή των αντιστάσεων μπορεί να είναι οποιοσδήποτε συνδυασμός ικανοποιεί τον λόγο $R_1/R_5 \approx 0,5$. Όμως λόγω του θορύβου που μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες αντιστάσεις επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν μικρές αντιστάσεις που ικανοποιούν τον λόγο αυτό. Συγκεκριμένα επιλέγεται το $R_1 = 147 \text{ Ohm}$ και το $R_5 = 326 \text{ Ohm}$.

Για την αποστολή προς τον υπολογιστή χρησιμοποιείται η σειριακή θύρα του arduino η οποία υλοποιείται με ένα καλώδιο USB.

5.1.2 Λειτουργία Arduino Uno

Ο προγραμματισμός του arduino γίνεται μέσω λογισμικού που παρέχεται από την ιστοσελίδα του και είναι δωρεάν. Το λογισμικό αυτό, παρέχει κάποιες έτοιμες δομές και συναρτήσεις καθώς και κάποιες πολύ σημαντικές για την επικοινωνία βιβλιοθήκες.

Το πρόγραμμα που συντάσσεται, χρησιμοποιεί τις δύο στάνταρ συναρτήσεις void που εκτελούνται σε κάθε πρόγραμμα τις setup() και loop(). Η πρώτη κάνει κάποιες αρχικοποιήσεις και ρυθμίζει τους ακροδέκτες αν θα είναι INPUT ή OUTPUT, την συχνότητα του ρολογιού, την εκκίνηση του interrupt, την ταχύτητα μετάδοσης της σειριακής, το ξεκίνημα της SPI επικοινωνίας και ένα από τα τέσσερα MODE στο οποίο δουλεύει αυτό. Η δεύτερη ξεκινάει τον ατέρμονα βρόχο του μικροεπεξεργαστή στον οποίο εκτελούνται οι εργασίες που πρέπει να γίνουν. Μέσα σε αυτό εκτελείται την πρώτη

φορά μόνο, μια σειρά εντολών που ξεκινάει το MCP3903 και ρυθμίζει τις λειτουργίες του μέσω των καταχωρητών του με την συνάρτηση `writeRegister`.

Στην `writeRegister` ορίζονται αρχικά οι διευθύνσεις της μνήμης με *8 bit* και ύστερα οι ρυθμίσεις στην συγκεκριμένη διεύθυνση με *24 bit*. Οι καταχωρητές που ρυθμίζονται είναι το GAIN, το STATUS και το CONFIG. Για τον τρόπο που αυτά ορίζονται και για την σειρά που πρέπει να γίνουν μπορεί να δει κανείς στα κεφάλαια 6 και 7 του εγχειριδίου του MCP3903.

Επίσης το πρόγραμμα χρησιμοποιεί και τη συνάρτηση `readRegister24`, η οποία διαβάζει μέσω SPI τα έξι κανάλια και μετατρέπει τις τιμές που είναι σε *24 bit* σε μεταβλητή `long` (*32 bit*). Οι έξι μεταβλητές `long` είναι οι τιμές που επιστρέφει η συνάρτηση. Η `readRegister24` εκτελείται κάθε φορά που το MCP3903 έχει έτοιμα δεδομένα προς αποστολή. Το DRDA γίνεται LOW κάθε φορά που είναι έτοιμο, έτσι χρησιμοποιείται από τον ακροδέκτη `interrupt` του `arduino` ως ο διεγέρτης. Αφού πάρει τα δεδομένα τα αθροίζει σε ένα βρόχο `while` όσες φορές χρειάζεται να πέσει η ταχύτητα μεταφοράς SPI στην μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να επιτύχει η σειριακή. Στο παράρτημα B έχει τοποθετηθεί ο κώδικας που εκτελείται μέσα στο `arduino` ο οποίος κάνει τις απαραίτητες ρυθμίσεις, διαβάζει από το MCP3903 και τα στέλνει στην σειριακή θύρα τα πέντε κανάλια.

Ο κώδικας που εκτελεί το `arduino` φαίνεται στο Παράρτημα A.

5.2 Αλγόριθμος Βαθμονόμησης

Ο αλγόριθμος βαθμονόμησης εκτελείται στην Matlab με τέσσερις κώδικες, τους `Decoupling.m`, `ReaData.m`, `FilteredMean.m` και `Lowpass_Filter.m`.

Ο κύριος κώδικας είναι ο `Decoupling.m` ο οποίος χρησιμοποιεί τις συναρτήσεις `ReaData.m` και `FilteredMean.m`. Σε αυτόν αρχικά υπολογίζονται οι φιλτραρισμένοι μέσοι των `Offset error` των αξόνων σε μέγεθος ψηφιακού κώδικα. Οι μέσοι υπολογίζονται για έναν αριθμό δειγμάτων που αντιστοιχεί σε ένα επαρκές χρονικό διάστημα και γίνεται με την συνάρτηση `FilteredMean.m` λόγω της ύπαρξης θορύβου. Στην συνέχεια αφήνει 5 δευτερόλεπτα χρονικό διάστημα για την τοποθέτηση των φορτίων. Αφού τοποθετηθούν τα φορτία χρησιμοποιεί την συνάρτηση `ReaData.m` η οποία δέχεται ως είσοδο τους μέσους των `Offset error` και των αριθμό δειγμάτων και υπολογίζει τους μέσους όρους των εξόδων των καναλιών για το στατικό φορτίο βαθμονόμησης. Επίσης απεικονίζει τα δεδομένα για να γίνει ένας εποπτικός έλεγχος των μετρήσεων.

Ο κώδικας `FilteredMean.m` χρησιμοποιείται για να εφαρμόσει ένα βαθυτερατό φίλτρο στα δεδομένα μέσω της συνάρτησης `Lowpass_Filter.m`. Το φίλτρο επιλέγεται να

είναι 1^{ης} τάξης με συχνότητα αποκοπής 3 Hz κατά την βαθμονόμηση. Η συχνότητα αποκοπής είναι γενικά χαμηλή γιατί τα φορτία κατά την βαθμονόμηση είναι στατικά. Ύστερα υπολογίζει τον αριθμητικό μέσο των φιλτραρισμένων δεδομένων. Χρησιμοποιείται από την συνάρτηση ReaData.m και από τον κύριο κώδικα Decoupling.m.

Ο κώδικας ReaData.m παίρνει ως είσοδο τα Offset error, διαβάζει, αντισταθμίζει και απεικονίζει τα δεδομένα. Τέλος υπολογίζει με την συνάρτηση FilteredMean.m τους μέσους των στατικών φορτίων σε αριθμό δειγμάτων που αντιστοιχεί σε ένα επαρκές χρονικό διάστημα.

Τελικά για να τρέξει μια περίπτωση ενός φορτίου πατιέται Run στον κώδικα Decoupling.m. Πριν πατηθεί το Run αποφορτίζεται πλήρως ο αισθητήρας από κάθε άξονα και αφού πατηθεί αναμένεται για να εμφανίσει στην γραμμή εντολών συνοδευόμενο από ένα ηχητικό εφέ, ένα μήνυμα που λέει πόσο χρόνος απομένει για να εφαρμοστεί και να ισορροπήσει το φορτίο. Στο τέλος του χρόνου αυτού ακούγεται ξανά ο ήχος ο οποίος δηλώνει ότι πρέπει το φορτίο να έχει ασκηθεί και να έχει ισορροπήσει μέχρι εκείνη την στιγμή. Σε περίπτωση λάθους πρέπει να ξανατρέξει ο κώδικας. Αφού τελειώσει εμφανίζει πέντε τιμές με τους μέσους των στατικών φορτίων οι οποίοι καταγράφονται μαζί με το φορτίο που ασκήθηκε στον άξονα. Επίσης εμφανίζει πέντε διαγράμματα σε κάθε άξονα με τα οποία ελέγχεται αν η άσκηση του φορτίου είναι σταθερή.

Στο Παράρτημα Α παρατίθενται οι κώδικες που υλοποιούν την παραπάνω λογική.

5.3 Επεξεργασία Μετρήσεων και Υπολογισμός Μητρώου Αποσύζευξης

5.3.1 Προγραμματισμός πειραμάτων

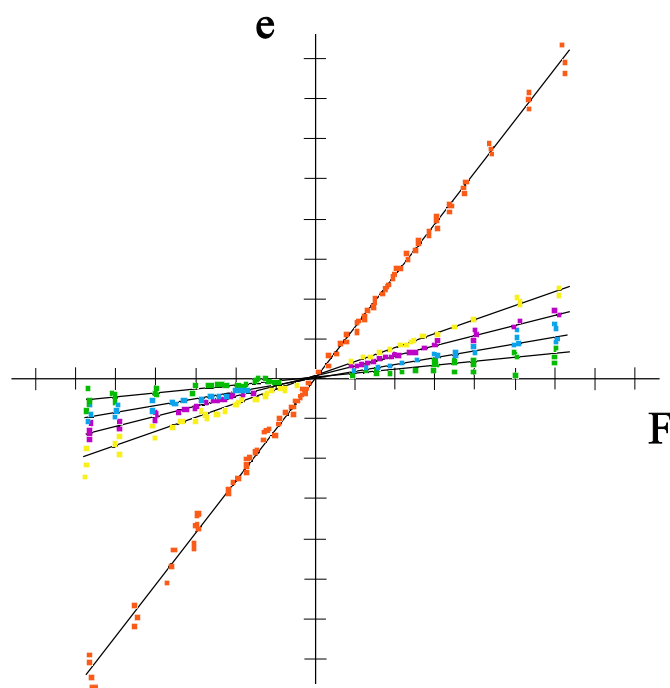
Για κάθε δύναμη/ροπή, όπως αναφέρθηκε και στο εδάφιο 4.3.3, πρέπει να δημιουργηθεί ένα σετ από εισόδους το οποίο θα εφαρμοστεί στον αισθητήρα και θα εξάγει ένα σετ διανυσμάτων εξόδου. Τα σετ από σημεία θα χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστούν με προσαρμογή σε ευθεία αναδρομής, τα στοιχεία του πίνακα **C**. Για να είναι καλυμμένη η διαδικασία της βαθμονόμησης από στατιστικής πλευράς πρέπει τα σημεία αυτά να είναι σε κάποια συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους όσον αφορά τον οριζόντιο άξονα. Στα χαμηλά φορτία πρέπει τα σημεία αυτά να είναι πυκνά και στα μεγάλα φορτία μπορούν να είναι αραιά.

Η προσαρμογή των σημείων γίνεται με το Microsoft Excel μέσω της γραμμής τάσης και χρησιμοποιεί την μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων. Υπάρχει επιλογή η

οποία εμφανίζει την γραμμική συσχέτιση R μεταξύ των μεγεθών. Για να θεωρηθεί ότι η συμπεριφορά της εξόδου e είναι γραμμική σε σχέση με την δύναμη πρέπει η τιμή της γραμμικής συσχέτισης R^2 να είναι κοντά στην μονάδα.

Η εφαρμογή των φορτίων υλοποιείται με εφαρμογή μαζών. Αν για τα υψηλά φορτία που απαιτεί η βαθμονόμηση δεν υπάρχουν πρότυπες μάζες, τότε χρησιμοποιούνται υλικά με μεγάλο βάρος που βρίσκονται εντός του εργαστηρίου και ζυγίζονται σε ζυγαριά ακριβείας από όπου προσμετρείται η τιμή της μάζας τους.

Στο Σχήμα 5-3 μπορεί να δει κανείς τα σημεία όπως αυτά μετρώνται για διάφορες τιμές του F σε κάθε ένα από τα πέντε e . Με πορτοκαλί χρώμα φαίνεται το κύριο σήμα για κάθε άξονα όπως αυτό αναφέρεται στο 4.3 και τα υπόλοιπα είναι τα δευτερεύοντα σήματα που προκύπτουν από την παρεμβολή. Τα δευτερεύοντα σήματα καλό θα ήταν να έχουν όσο μικρότερη κλίση γίνεται σε σχέση με το κύριο σήμα, καθώς με αυτόν τον τρόπο μειώνεται το σφάλμα αποσύζευξης. Δηλαδή η συμμετοχή των δευτερευόντων σημάτων στην αντιστάθμιση του κύριου σήματος θα είναι μικρότερη και συνεπώς και το τελικό σφάλμα.



Σχήμα 5-3. Παράδειγμα ευθείας αναδρομής.

Στον Πίνακα 5-1 φαίνονται οι τιμές των φορτίων που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση. Αναλυτικότερα μπορεί να δει κανείς στο αρχείο *Calibration.xlsx*.

Πίνακας 5-1. Τιμές φορτίων βαθμονόμησης.

F_z (kg)	F_x (kg)	F_y (kg)	M_y (kg·mm)	M_x (kg·mm)
0,01	0,01	0,01	0,848	0,848
0,02	0,02	0,02	2,12	2,12
0,03	0,03	0,03	4,24	4,24
0,04	0,04	0,04	8,48	8,48
0,05	0,05	0,05	21,2	21,2
0,07	0,07	0,07	42,4	42,4
0,10	0,10	0,10		
0,20	0,20	0,20		
0,30	0,30	0,30		
0,40	0,40	0,40		
0,50	0,50	0,50		
0,70	0,70	0,70		
1,00	1,00	1,00		
1,20	1,20	1,20		
1,50	1,50	1,50		
1,798	1,90	1,90		
2,298				
2,798				
3,914				
6,536				
8,326				

5.3.2 Υπολογισμός Μητρώου Αποσύζευξης

Για τον υπολογισμό του DM πρέπει μετά από κάθε τρέξιμο του Decoupling.m να καταγράφονται οι τιμές MeanFz, MeanFx, MeanFy, MeanMx, MeanMy και τα φορτία από τα οποία προέκυψαν. Για κάθε φορτίο ο κώδικας εκτελείται τρεις φορές για να υπάρχει μεγάλο δείγμα και οι μετρήσεις να καταστούν στατιστικά πιο αξιόπιστες. Οι τιμές αυτές καταγράφονται σε ένα φύλλο excel και έτσι δημιουργούνται πέντε πίνακες για κάθε περίπτωση βαθμονόμησης. Οι πίνακες που αντιστοιχεί σε ΣΧ1 των F_z, F_x, F_y, M_x και M_y. λόγω του μεγάλου όγκου δεν παρατίθενται και φαίνονται μόνο τα διαγράμματα τους.

Αφού δημιουργηθούν οι πίνακες, κατασκευάζονται τα διαγράμματα με την επιλογή για τον άξονα x (οριζόντιος άξονας), η στήλη των φορτίων του Πίνακα 5-1 αφού έχουν μετατραπεί σε Newton και πέντε σειρές για τον κατακόρυφο άξονα επιλέγοντας τις στήλες που έχουν προκύψει από τα MeanFz, MeanFx, MeanFy, MeanMx και MeanMy. Έτσι προκύπτουν διαγράμματα, όπως αυτά στο Σχήμα 5-3. Ύστερα, επιλέγεται κάθε μια γραμμή ξεχωριστά και προστίθενται οι γραμμικές γραμμές τάσης ή αλλιώς ευθείες αναδρομής. Μαζί με τις εξισώσεις των ευθειών αναδρομής επιλέγεται να εμφανιστούν και οι τιμές R². Έτσι ελέγχεται αν η τιμή R είναι κοντά στην μονάδα για να αποδειχθεί, ότι πειραματικά υπάρχει υψηλή γραμμική συσχέτιση.

Η εξίσωση αναδρομής είναι της μορφής

$$y = a \cdot x + b \quad (5.1)$$

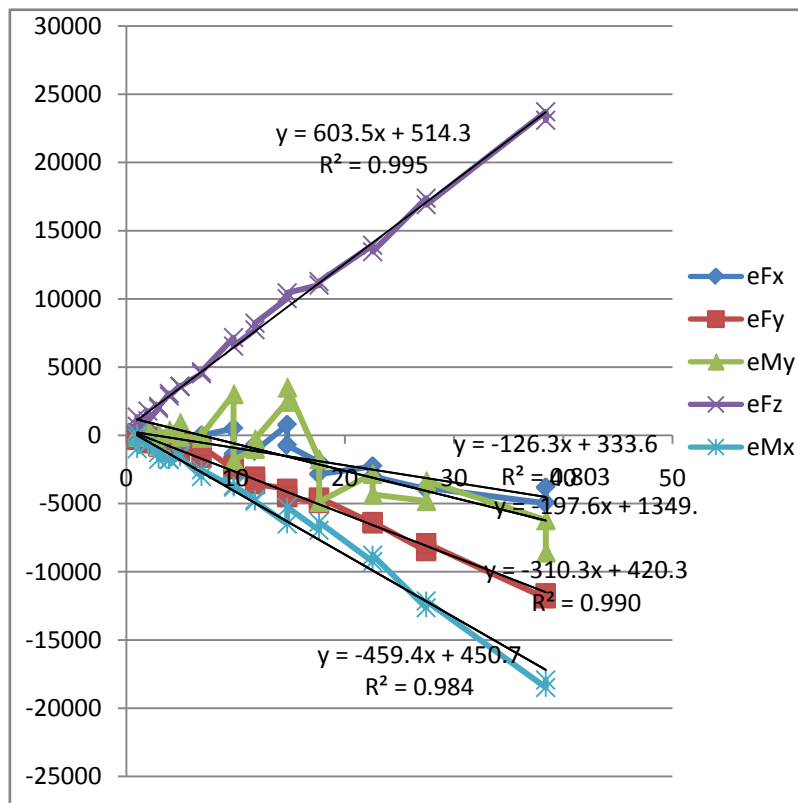
Η τιμή b παραμελείται, καθώς πρόκειται για σφάλμα λόγω θορύβου και μετά την αντιστάθμιση του offset error πρέπει να είναι μηδέν. Πρακτικά δεν συμβάλει καθόλου στον υπολογισμό του DM.

Η τιμή a είναι αυτή που ενδιαφέρει, καθώς πρόκειται για τις τιμές του πίνακα **C** . π.χ. για το διάγραμμα της F_z οι τιμές a είναι οι τιμές c₁₁, c₂₁, c₃₁, c₄₁ και c₅₁. Αυτό που πρέπει να προσέχει κανείς είναι να μπου με την σωστή σειρά στον πίνακα **C** , γιατί εύκολα μπορεί να μπερδευτεί κανείς.

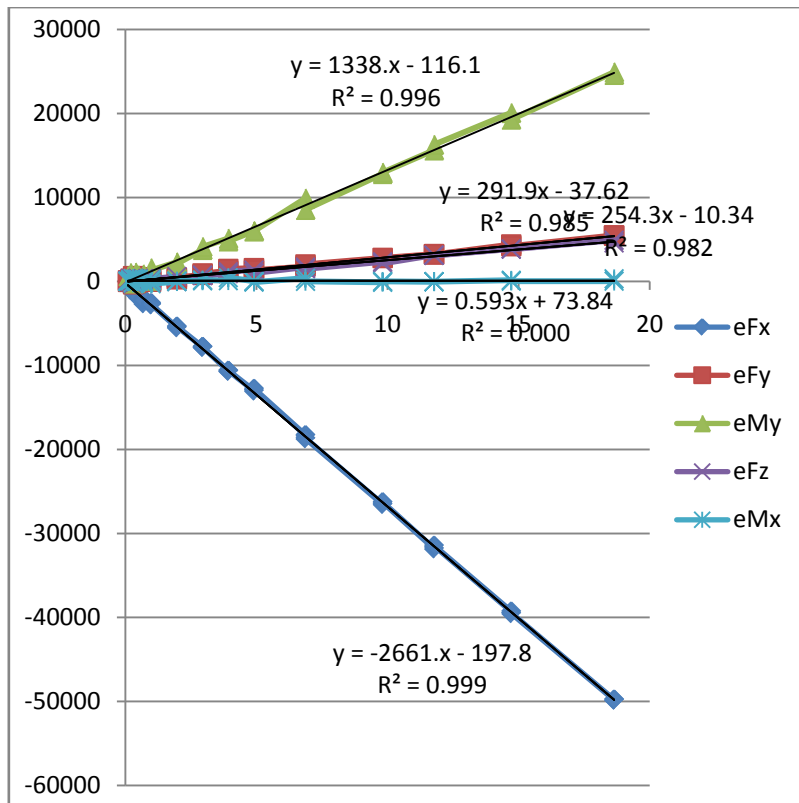
Παρακάτω, φαίνονται τα διαγράμματα των πειραμάτων και το μητρώο αποσύζευξης για τα ΣΧ1 και ΣΧ2. Για το ΣΧ1, η τιμή του R για τα περισσότερα είναι κοντά στο 1, ακόμα και σε πολλές περιπτώσεις των δευτερευόντων σημάτων. Επομένως μπορούμε να πούμε ότι η παραδοχή της γραμμικότητας αυτών , δεν αποτελεί εσφαλμένη θεώρηση και ότι η αποσύζευξη των δυνάμεων με αυτήν την μέθοδο είναι αρκετά ικανοποιητική. Για το ΣΧ2 παρατηρείται ότι υπάρχει υψηλή σύζευξη μεταξύ των F_y και M_x. Στην περίπτωση της βαθμονόμησης κατά M_x, η F_y δείχνει μεγαλύτερη ευαισθησία. Αυτό συνεπάγεται ότι μετά την αποσύζευξή με το υπολογισμένο μητρώο, αυτό που θα συμβαίνει θα είναι ο θόρυβος της F_y να καλύπτει το σημά από το M_x και αντιστρόφως. Τελικά οι δύο αυτοί άξονες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν και λαμβάνονται υπόψη οι τιμές τους μόνο για να δώσουν αποσυζευγμένους τους άλλους άξονες. Δηλαδή χρησιμοποιούνται για να καθάρσουν το σήμα των άλλων αξόνων αλλά όχι για να δώσουν το δικό τους σήμα. Τελικά το ΣΧ2 χρησιμοποιείται ως αισθητήρας δύναμης 3 αξόνων, των F_z, F_x και M_y. Μπορεί βέβαια, να χρησιμοποιηθεί για να μετράει δυνάμεις από το έδαφος για το ρομπότ καθώς πρόκειται για τις τρεις πλέον σημαντικές δυνάμεις που ασκούνται.

Σημειώνεται ότι για κάθε καινούργιο αισθητήρα και πλακέτα το μητρώο αποσύζευξης είναι διαφορετικό και πρέπει να υπολογίζεται εκ νέου. Αυτό συμβαίνει λόγω

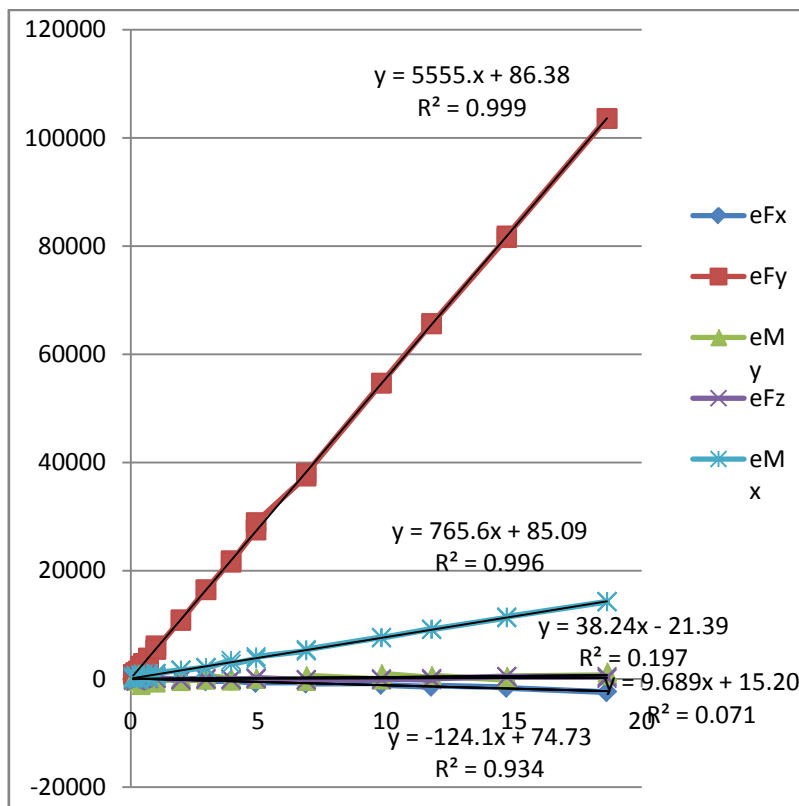
των κατασκευαστικών ατελειών που διαφέρουν από αισθητήρα σε αισθητήρα και από πλακέτα σε πλακέτα. Όμως από την στιγμή που υπολογιστεί δεν αλλάζει παρά μόνο σε βάθος χρόνου που μπορεί λόγω του φαινομένου του ερπυσμού οι βίδες να χαλαρώσουν, η κατασκευή να αποκτήσει παραμένουσες παραμορφώσεις και γενικά να συμβούν αλλαγές στα χαρακτηριστικά. Αυτό μπορεί να εξετάζεται με ειδικά πειράματα πάνω στην βάση βαθμονόμησης και θα αναλυθεί στα εδάφια 5.5.1 και 5.5.2.



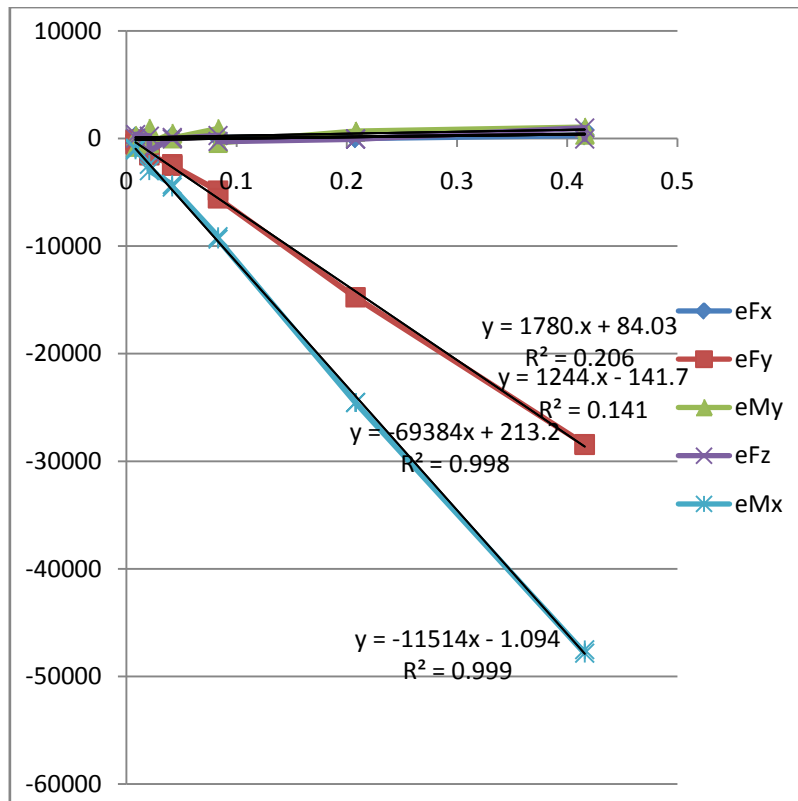
Σχήμα 5-4. Βαθμονόμηση άξονα F_z – ΣΧ1.



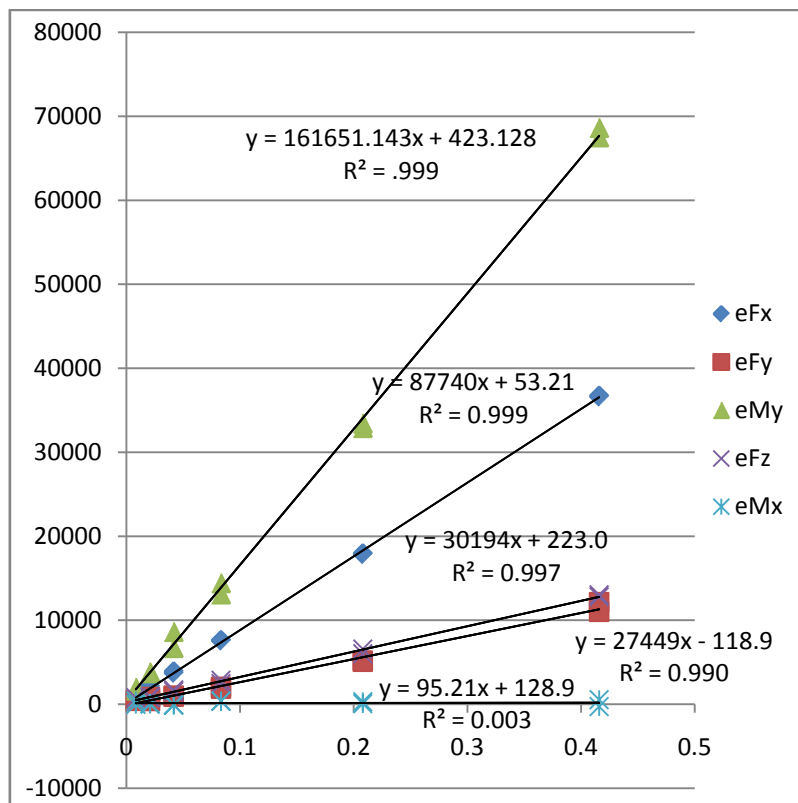
Σχήμα 5-5. Βαθμονόμηση άξονα F_x – ΣΧ1.



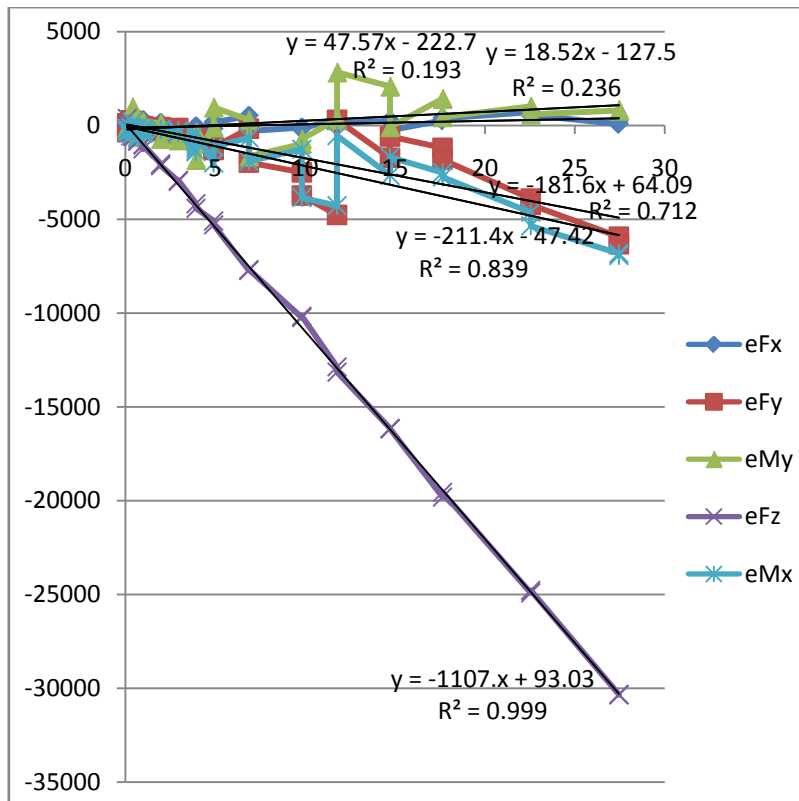
Σχήμα 5-6. Βαθμονόμηση άξονα F_y – ΣΧ1.



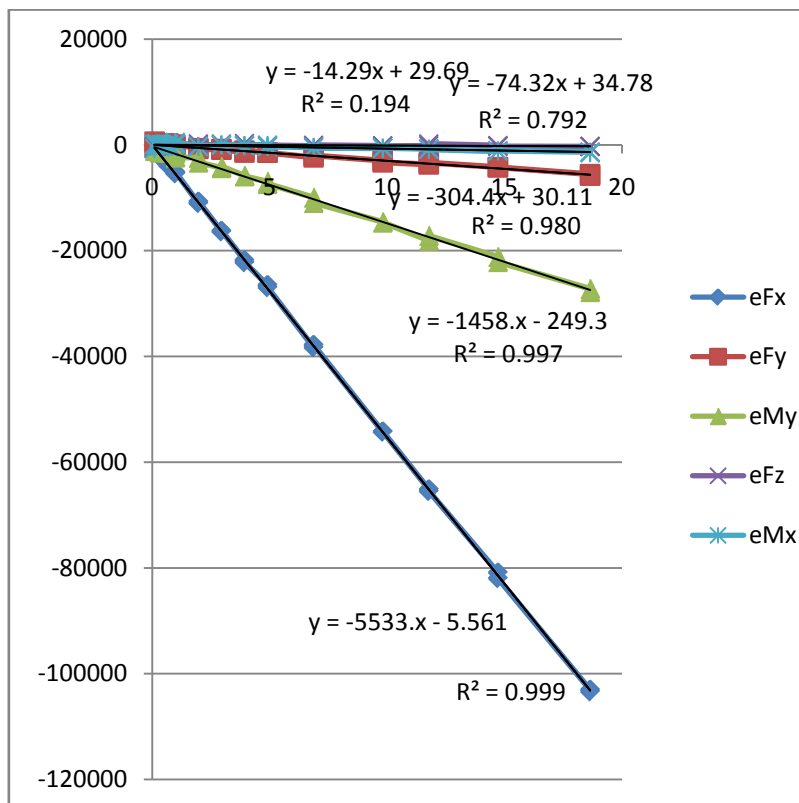
Σχήμα 5-7. Βαθμονόμηση άξονα M_x – ΣΧ1.



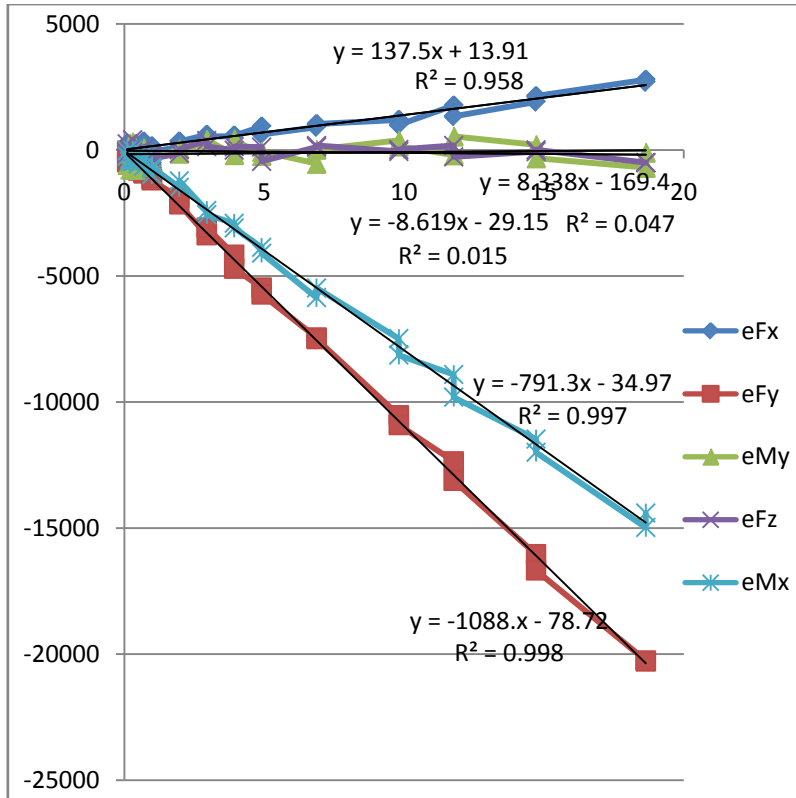
Σχήμα 5-8. Βαθμονόμηση άξονα M_y – ΣΧ1.



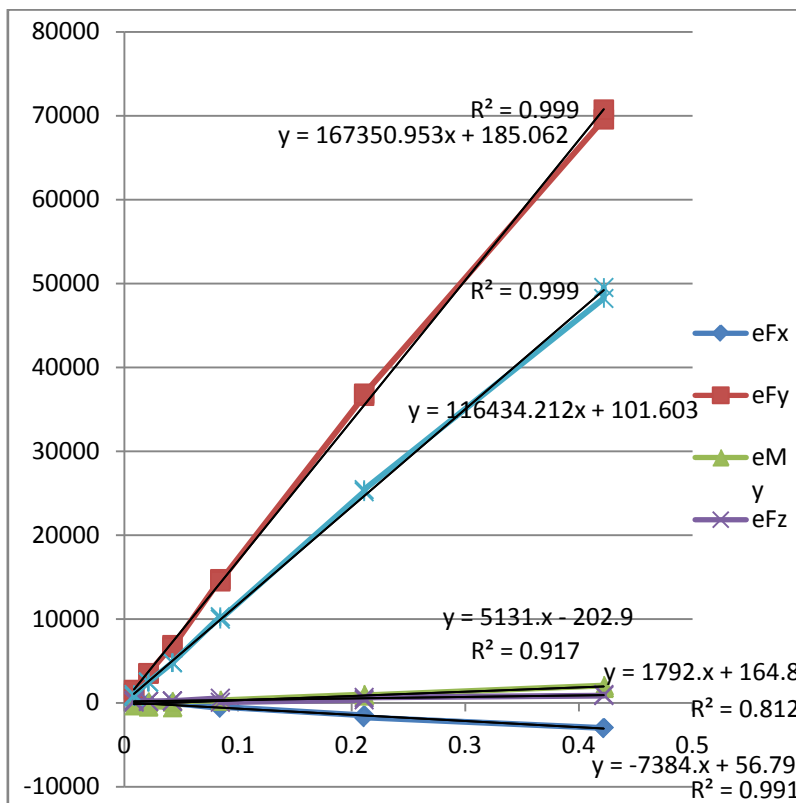
Σχήμα 5-9. Βαθμονόμηση άξονα $F_z - \Sigma\chi_2$.



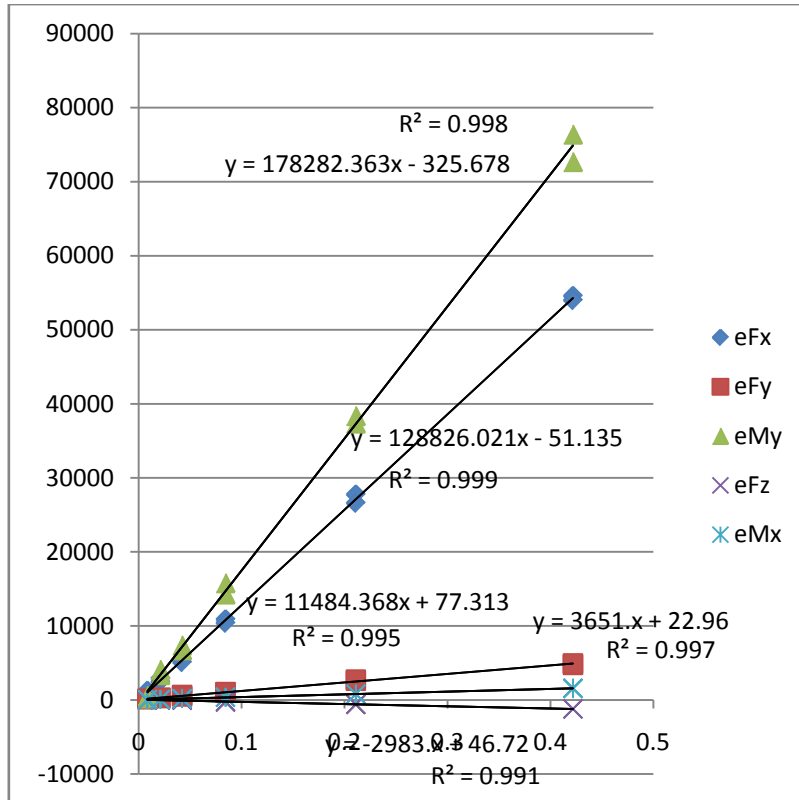
Σχήμα 5-10. Βαθμονόμηση άξονα $F_x - \Sigma\chi_2$.



Σχήμα 5-11. Βαθμονόμηση άξονα F_y – ΣΧ2.



Σχήμα 5-12. Βαθμονόμηση άξονα M_x – ΣΧ2.



Σχήμα 5-13. Βαθμονόμηση άξονα My – ΣΧ2.

Υπολογισμένα Μητρώα Αποσύζευξης ή Decoupling Matrix
ΣΧ1.

$$C^{-1} = \begin{pmatrix} -2661 & -124,1 & -126,3 & 1780 & 87639 \\ 291,4 & 5555 & -310,3 & -69384 & 29106 \\ 254,3 & 9,7 & 603,5 & 500 & 30888 \\ 0,6 & 756,6 & -459 & -115140 & -651 \\ 1338 & 38,24 & -197 & 1244 & 163656 \end{pmatrix}^{-1} \quad (5.2)$$

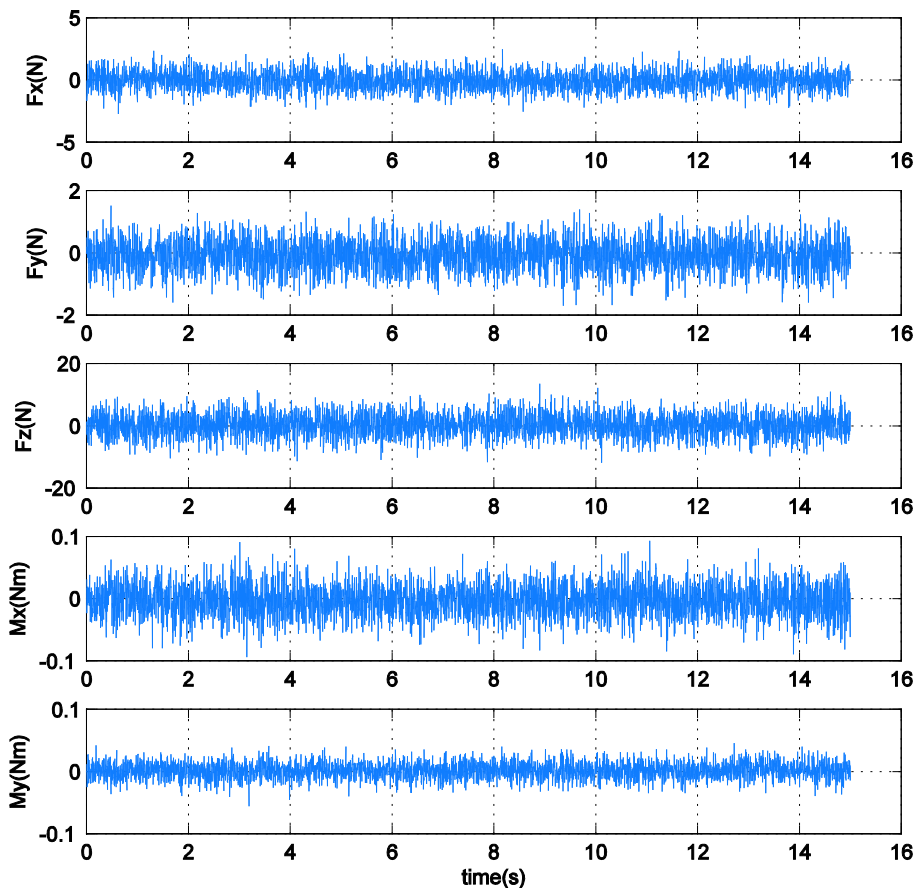
ΣΧ2.

$$C^{-1} = \begin{pmatrix} -5533 & 137,5 & -18,5 & -7384 & 128826 \\ -304 & -1088 & -181,6 & 167351 & 11484 \\ -74 & -37 & -1107 & 1792 & -2988 \\ -15 & -731,3 & -211,4 & 116434 & 3651 \\ -1458 & 8,3 & 47,6 & 5131 & 178282 \end{pmatrix}^{-1} \quad (5.3)$$

5.4 Εφαρμογή Μητρώου Αποσύζευξης στις Μετρήσεις

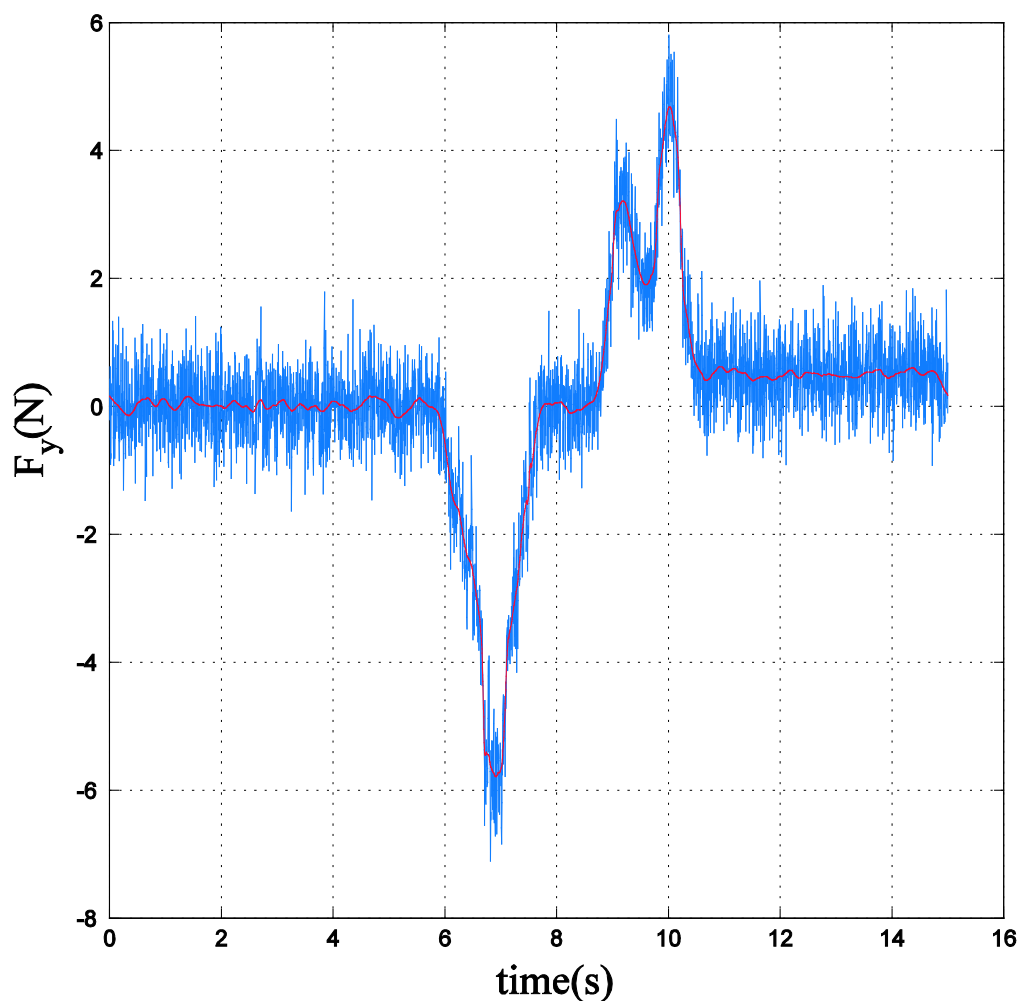
Το DM εφαρμόζεται μέσω του κώδικα `Diavasma.m` ο οποίος είναι παρόμοιος με τον κώδικα `Decoupling.m` που χρησιμοποιείται για να γίνει η βαθμονόμηση. Ο κώδικας αυτός σε κάθε τρέξιμο διαβάζει ένα σύνολο δειγμάτων για να υπολογίσει το \mathbf{E}_o . Μέχρι να τελειώσει τον υπολογισμό δεν πρέπει να ασκηθεί καμία φορτίση στον αισθητήρα.

Για το διάβασμα από την σειριακή θύρα, χρησιμοποιείται το ίδιο κομμάτι κώδικα όπως αυτό του `Decoupling.m`. Για τον υπολογισμό των φιλτραρισμένων μέσων των τιμών του διανύσματος \mathbf{E}_o , καλείται η συνάρτηση `OFFSET.m` η οποία με τη σειρά της καλεί το `FilteredMean.m`. Μετά την έξοδο από την συνάρτηση `OFFSET` ο κώδικας διαβάζει το διάνυσμα εξόδου του αισθητήρα \mathbf{E}' αφαιρεί το \mathbf{E}_o και το πολλαπλασιάζει κατευθείαν με το \mathbf{C}^{-1} . Τελικά, οι τιμές αυτές είναι οι πραγματικές τιμές των δυνάμεων/ροπών που ασκούνται στον αισθητήρα αποσυζευγμένες και αντισταθμισμένες. Αυτές αποθηκεύονται σε μεταβλητές τις Matlab και απεικονίζονται με την συνάρτηση `plot`. Παράδειγμα απεικόνισης φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5-14. Παράδειγμα απεικόνισης μετρήσεων.

Επίσης, αναπτύχθηκε και μικρός κώδικας ο οποίος ονομάζεται FFT.m και πραγματοποιεί γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transform) σε ένα από τους άξονες. Είναι αρκετά χρήσιμος για να μπορεί να δει κανείς το φάσμα των συχνοτήτων σε διάφορες περιπτώσεις κρούσεων αλλά και για έλεγχο των δεδομένων. Επίσης, υπολογίζει και εφαρμόζει ένα βαθυτερατό φίλτρο Butterworth και απεικονίζει τα αρχικά δεδομένα συγκριτικά με τα φιλτραρισμένα. Έτσι, μπορεί κανείς να επιλέξει φίλτρο ανάλογα με την εφαρμογή. Ο κώδικας αυτός είναι χρήσιμος γιατί χρησιμοποιεί κατευθείαν τα δεδομένα που εξάγει ο κώδικας Diavasma.m και εκτελείται σειριακά.



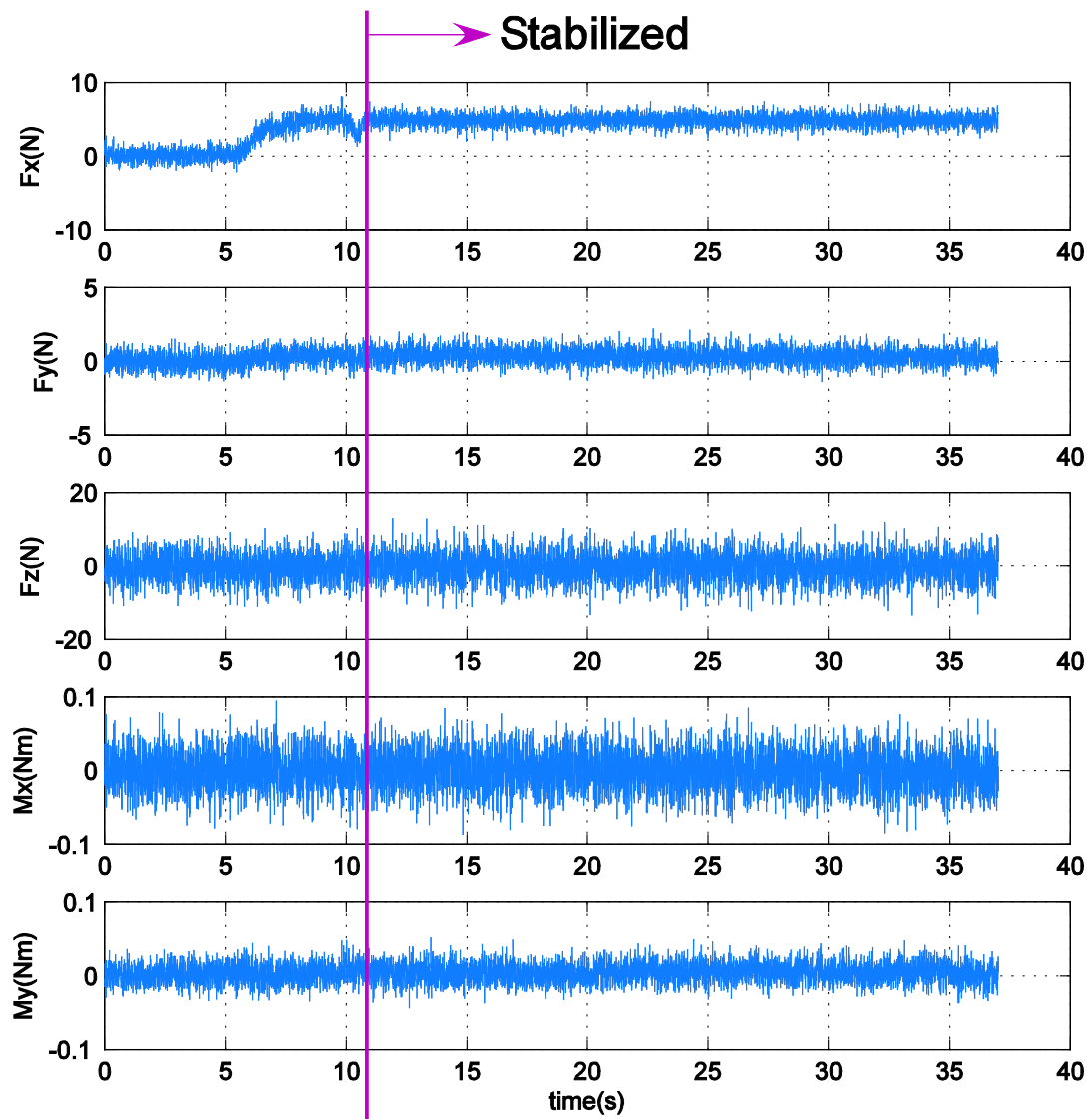
Σχήμα 5-15. Σύγκριση φιλτραρισμένων και πραγματικών μετρήσεων.

5.5 Πειράματα Αξιολόγησης

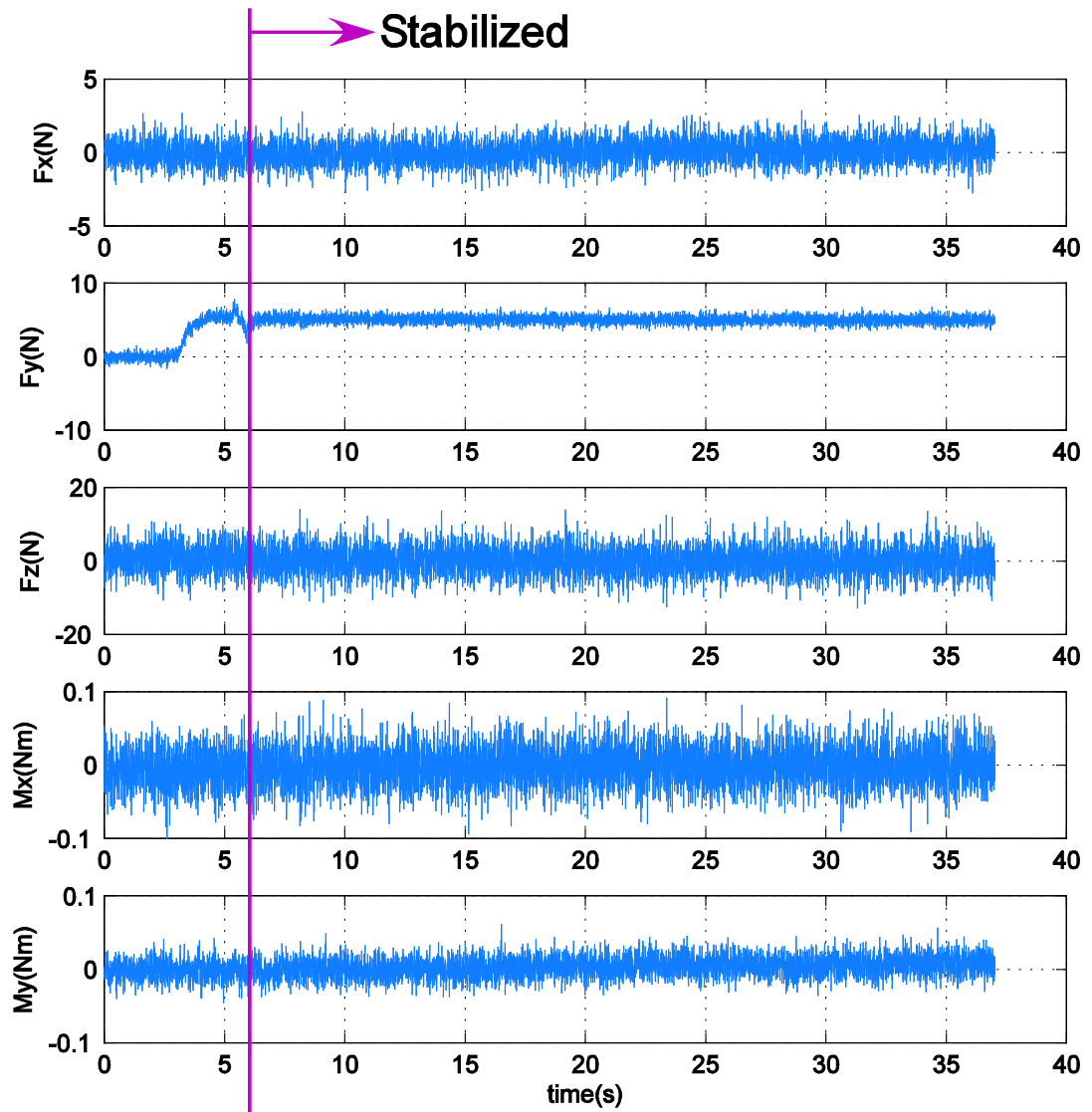
Μετά τον υπολογισμό του DM, προκειμένου να καταστούν αξιόπιστες οι μετρήσεις πρέπει να γίνουν διάφοροι έλεγχοι. Αυτό γίνεται με τα πειράματα μονοαξονικών καταπονήσεων με τα οποία ελέγχεται ο βαθμός αποσύζευξης και με τα πειράματα σύνθετων καταπονήσεων στα οποία ελέγχονται αν σε δύο ή παραπάνω άξονες μετράει σωστά ο αισθητήρας.

5.5.1 Πείραμα μονοαξονικής καταπόνησης

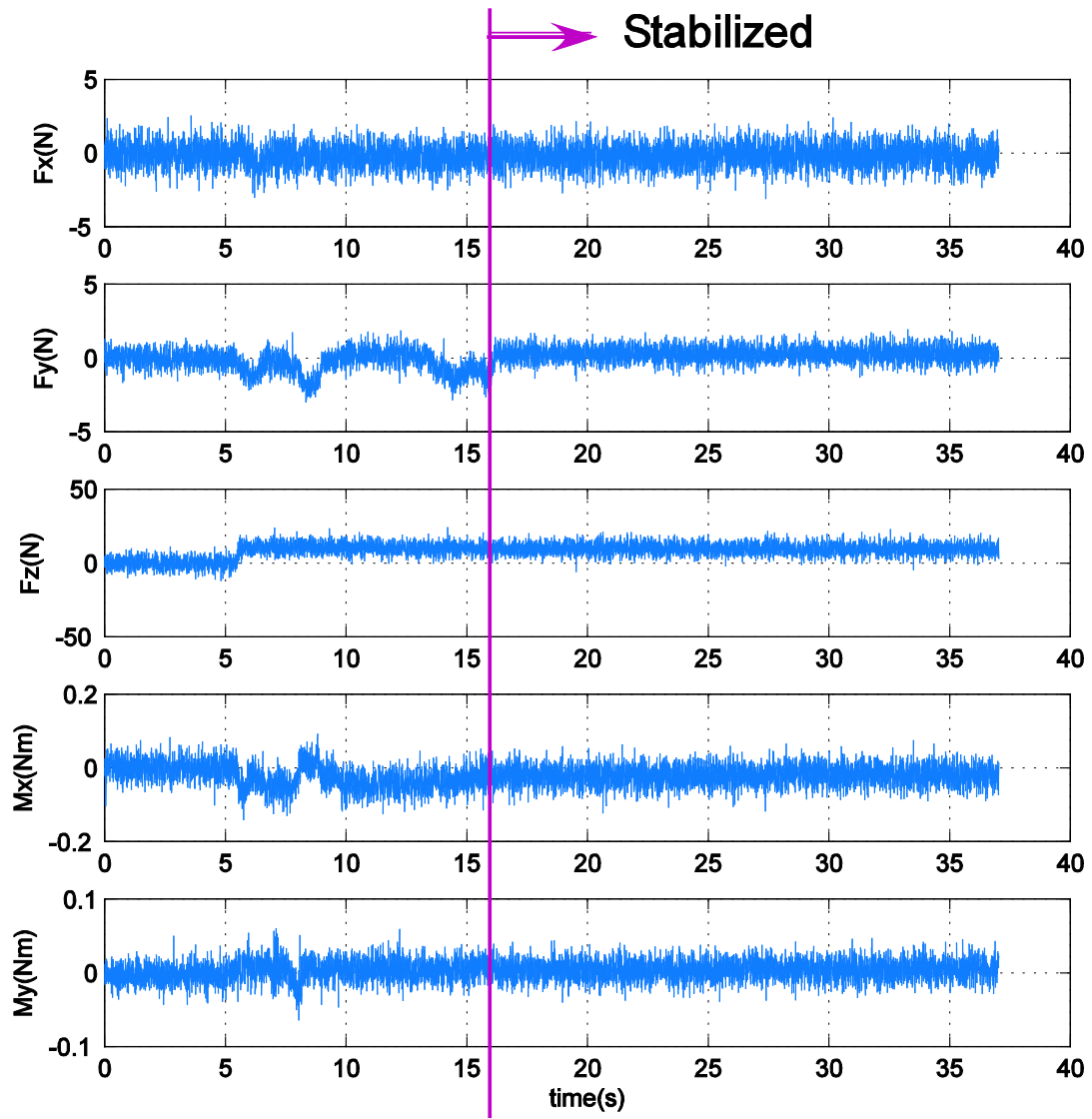
Για να γίνει το πρώτο πείραμα αξιολόγησης, δηλαδή αυτό της μονοαξονικής καταπόνησης, απλά εκτελείται ο κώδικας `Diavasma.m`. Αναμένεται μέχρι να υπολογίσει το `offset error` και τελικά εφαρμόζεται δύναμη μόνο σε έναν άξονα, με τον αισθητήρα πακτωμένο στην βάση βαθμονόμησης όπως ακριβώς και κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης. Οι άξονες είναι ορισμένοι όπως κατά την βαθμονόμηση, για αυτό και για να πετύχει κανείς μονοαξονική καταπόνηση πρέπει να το καταπονήσει κατά τους άξονες της βαθμονόμησης. Αυτός είναι ένας έλεγχος για το αν η αποσύζευξη των αξόνων είναι επιτυχής. Στα Σχήματα 5-16 έως 5-20 φαίνονται τα διαγράμματα σε πεντάδες όπου φαίνεται σε κάθε ένα να έχει επηρεαστεί μόνο ο άξονας στον οποίο καταπονείται. Τα αποτελεσμάτά αφορούν μόνο το ΣΧ1.



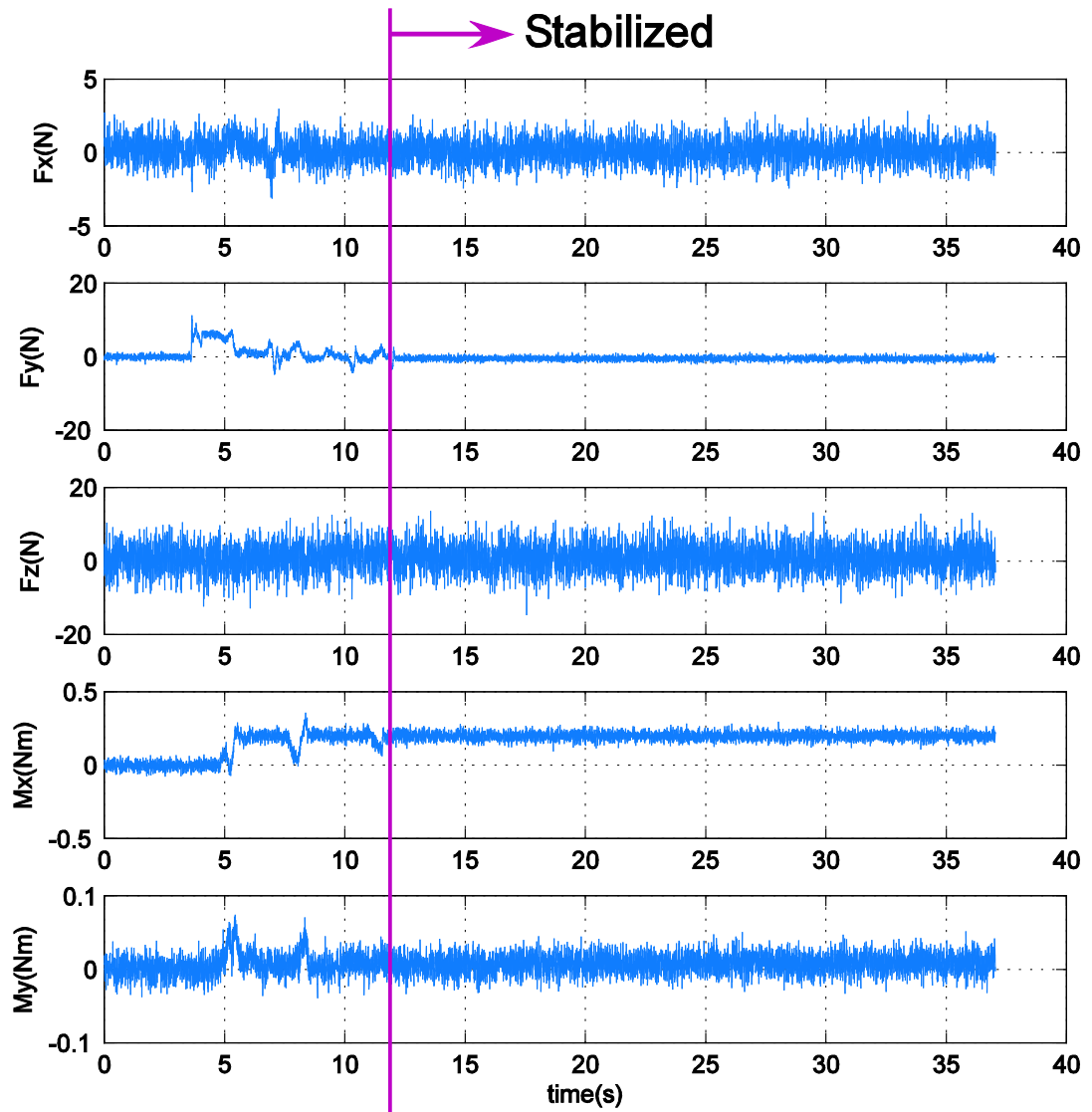
Σχήμα 5-16. Φόρτιση μόνο κατά F_x με μάζα 0,5kg.



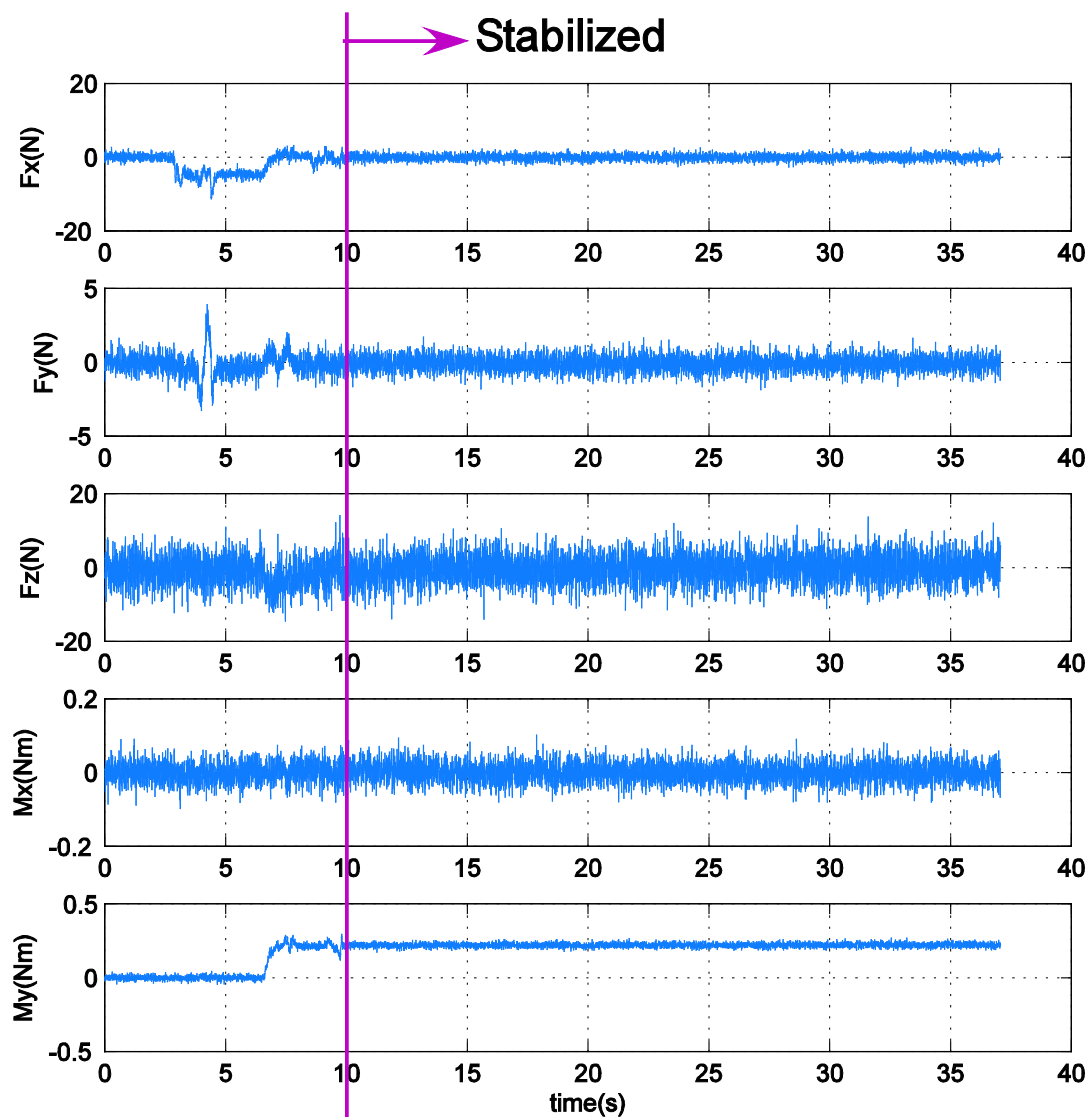
Σχήμα 5-17. Φόρτιση μόνο κατά F_y με μάζα 0,5kg.



Σχήμα 5-18. Φόρτιση μόνο κατά F_z με μάζα 1kg.



Σχήμα 5-19. Φόρτιση μόνο κατά M_x με μάζα 0,5kg και μοχλοβραχίονα 42,4mm.

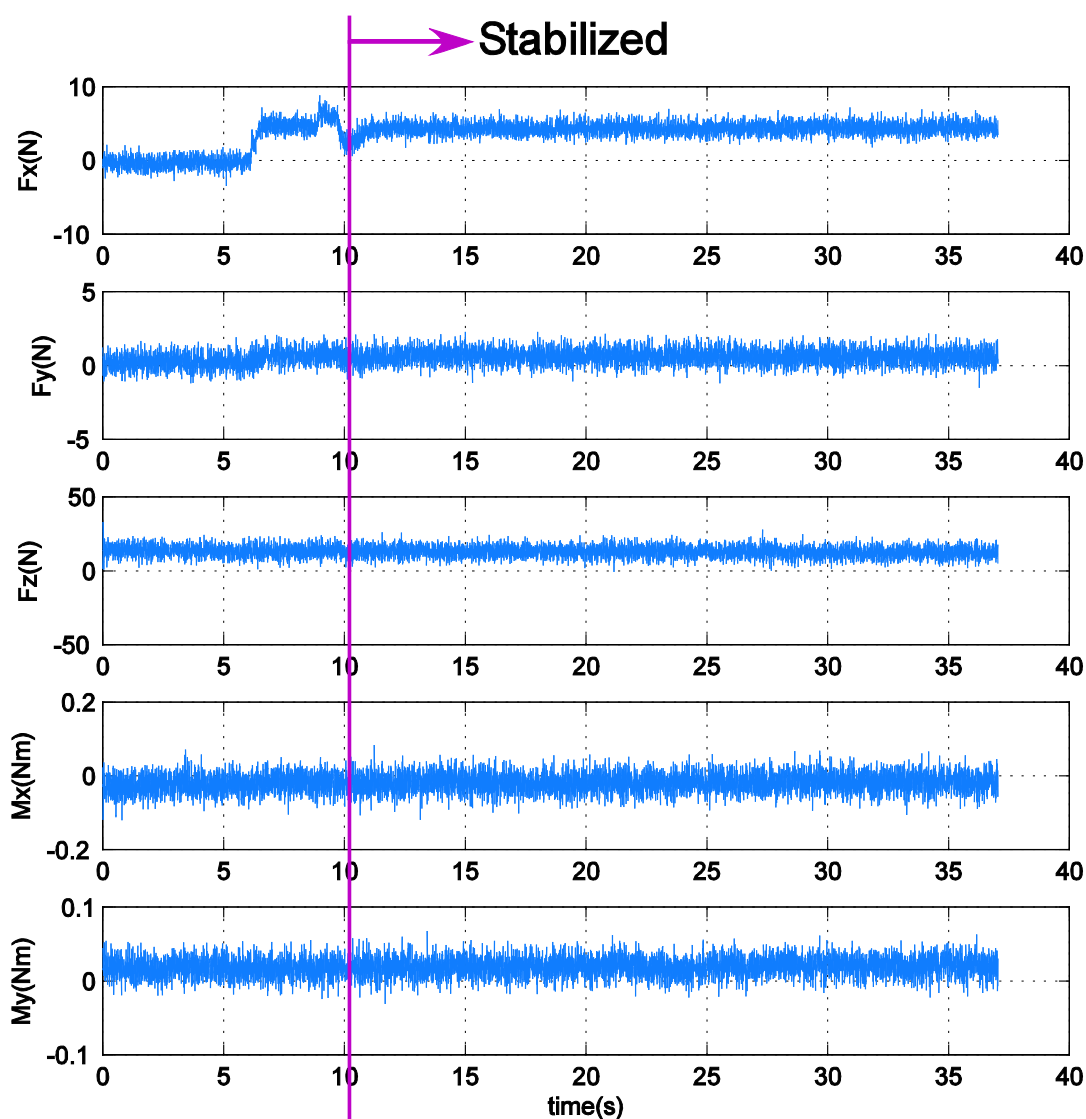


Σχήμα 5-20. Φόρτιση μόνο κατά M_y με μάζα 0,5kg και μοχλοβραχίονα 42,4mm.

5.5.2 Πείραμα σύνθετης καταπόνησης

Το πείραμα σύνθετης καταπόνησης γίνεται για να ελεγχθεί κατά πόσο μπορεί ο αισθητήρας να διαβάσει σύνθετη δύναμη τυχαίας κατεύθυνσης και να την αναλύει στις συνιστώσες του, δίνοντας τους το σωστό μέτρο. Για να γίνει αυτό πρέπει να ασκηθεί στον αισθητήρα γνωστή δύναμη της οποίας οι συνιστώσες είναι γνωστές. Έτσι ο αισθητήρας πάλι είναι πακτωμένος στην βάση του και ασκούνται σε αυτόν σε δύο ή περισσότερες γνωστές δυνάμεις σε γνωστές κατευθύνσεις με την βοήθεια πάλι της βάσης βαθμονόμησης και των πρότυπων μαζών. Επειδή οι συνδυασμοί που μπορούν να γίνουν είναι πολλοί, αντί να εξεταστούν όλες οι περιπτώσεις, αυτό που γίνεται είναι να εξεταστεί μόνο η περίπτωση της καταπόνησης από F_x και από F_z που είναι και η

σημαντικότερη περίπτωση στην εφαρμογή. Στο Σχήμα 5-21 φαίνεται μια περίπτωση σύνθετης καταπόνησης όπου οι δυνάμεις φαίνονται στο υπόμνημα.

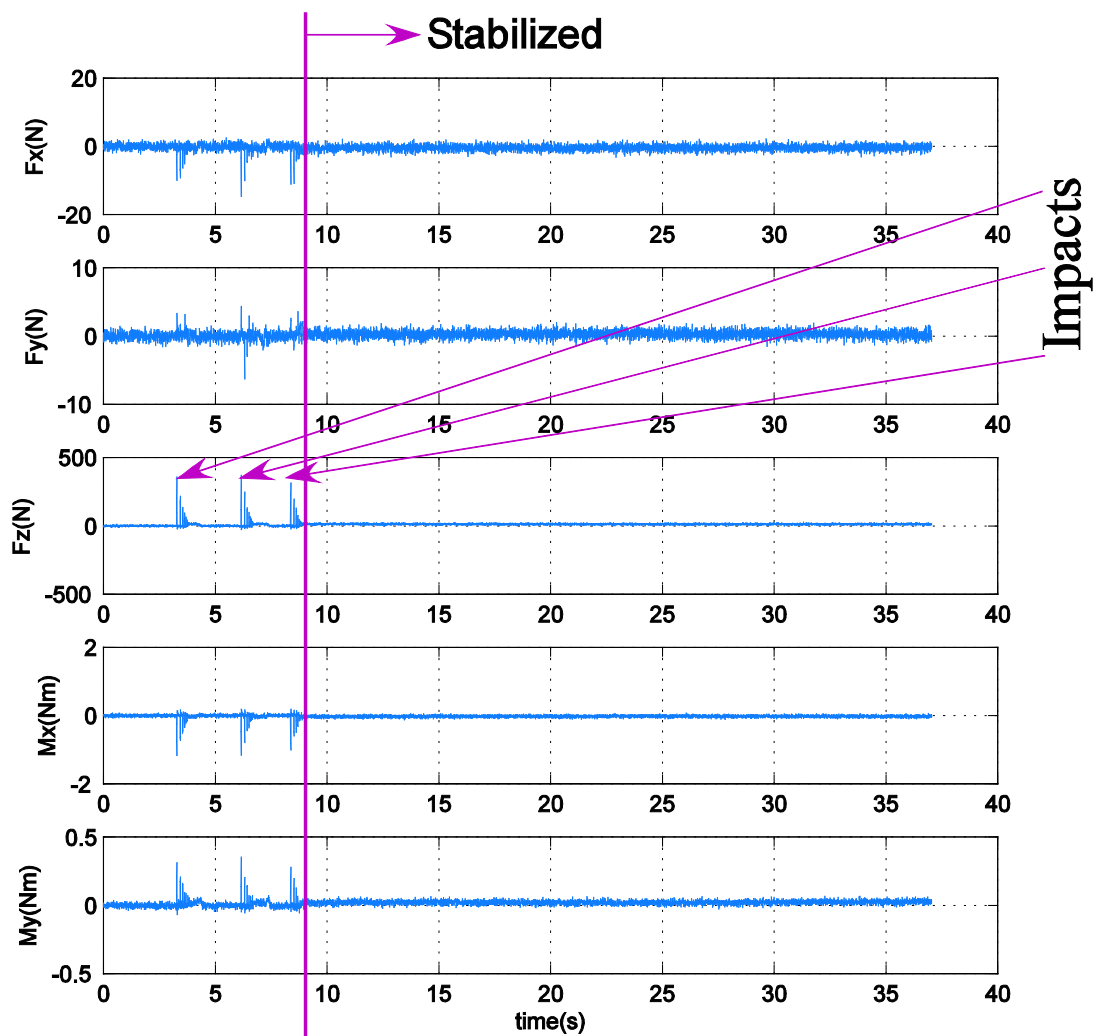


Σχήμα 5-21. Σύνθετη καταπόνηση κατά F_z (1,298kg) και F_x (0,500kg).

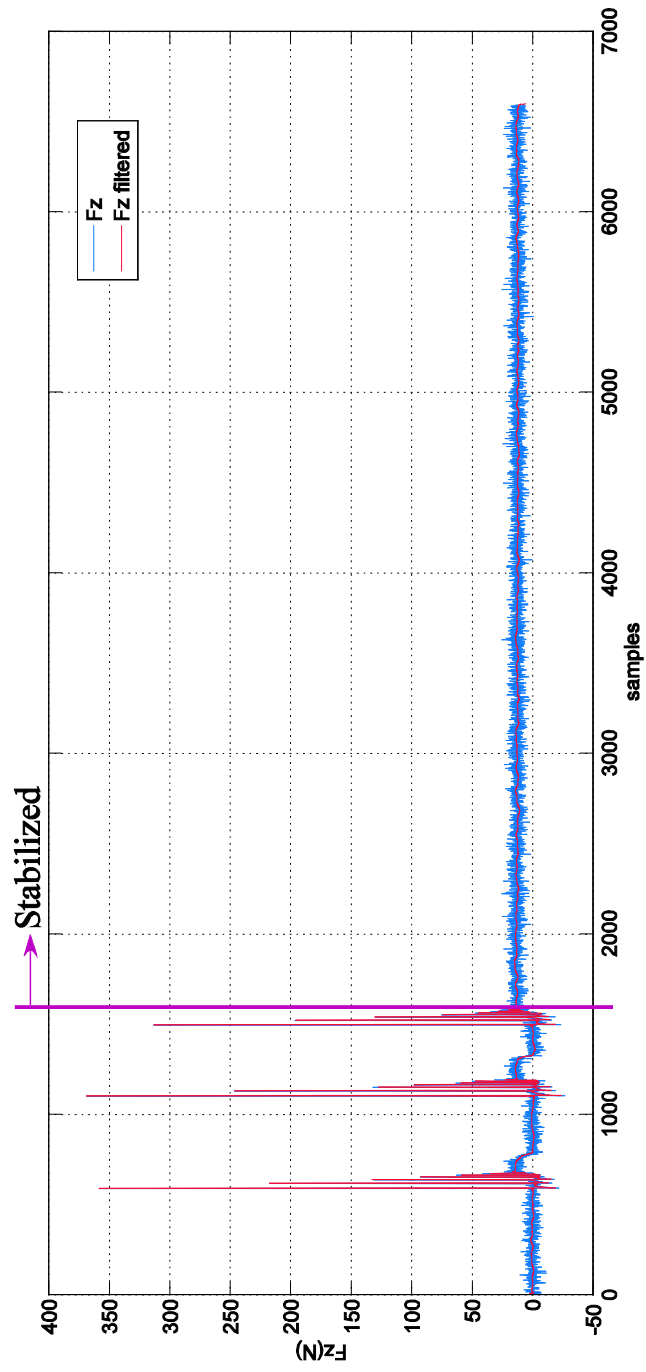
5.5.3 Πείραμα κρουστικών φορτίων

Επειδή η κύρια φόρτιση στην οποία υπόκειται το πόδι του ρομπότ είναι κρουστική F_z , ο αισθητήρας πρέπει να υποβληθεί σε πείραμα κρούσης. Για να γίνει αυτό επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί μια πλάκα μάζας 1,298kg και να αφηθεί από ύψος 45mm με τον αισθητήρα να είναι πακτωμένος στην βάση του. Ο αισθητήρας φέρει το πέλμα του ποδιού του ρομπότ στο σημείο επαφής. Τα κρουστικά φορτία έχουν εν γένει υψηλές συχνότητες. Έτσι η πλάκα 1,298 κιλών επιλέχθηκε γιατί τα κρουστικά φορτία που αναμένεται να προκαλέσει έχουν υψηλότερες συχνότητες από την περίπτωση του

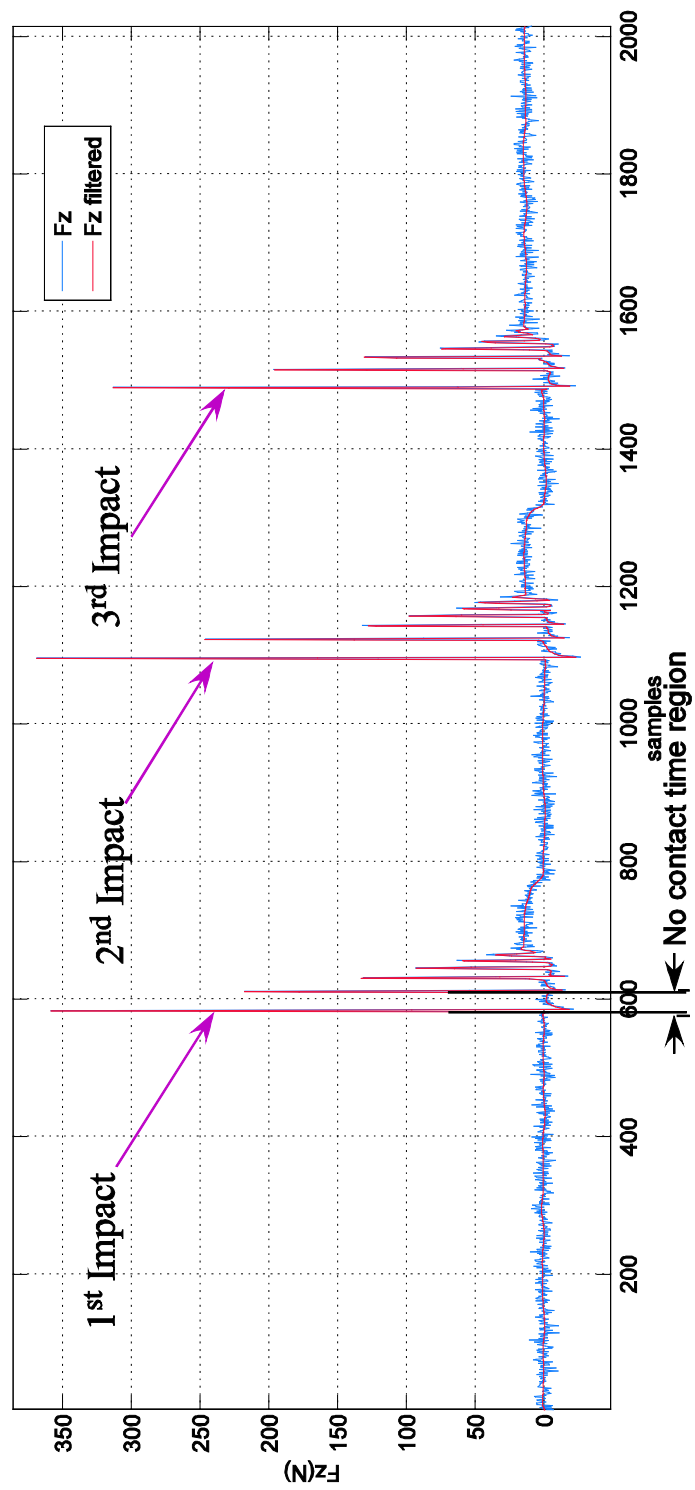
ποδίου κατά την πρόσκρουση στο έδαφος. Στο Σχήμα 5-22 φαίνονται οι μεταβολές σε όλους τους άξονες.



Σχήμα 5-22. Κρούση πλάκας 1,298kg.



Σχήμα 5-23. Δεδομένα μόνο κατά F_z . Έχει εφαρμοστεί φίλτρο αποθρομβοποίησης.



Σχήμα 5-24. Τρεις κρούσεις της πλάκας.

6 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

6.1 Συμπεράσματα

Η εργασία αυτή αποσκοπούσε στο σχεδιασμό και στην κατασκευή ενός αισθητήρα δύναμης πολλών αξόνων. Ο αισθητήρας αυτός έπρεπε να πληροί κάποια εξωτερικά χαρακτηριστικά και να ικανοποιεί κάποιες προδιαγραφές, όπως αυτές ορίστηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο. Επίσης, έπρεπε να κατασκευάζεται με πολύ χαμηλό κόστος και να βαθμονομείται εύκολα.

Η απαιτήσεις σε αντοχή επιτυγχάνονται πλήρως, πράγμα που επιβεβαιώνεται από τις προσομοιώσεις με το σχεδιαστικό και αναλυτικό πακέτο λογισμικού, SolidWorks. Άλλες μέθοδοι ελέγχου όπως, οι καταστροφικές, είναι ασύμφωρες. Ο έλεγχος παρότι περιλάμβανε μόνο στατικές αναλύσεις φόρτισης για τον προσδιορισμό του μέγιστου φορτίου αντοχής, έγινε λαμβάνοντας υπόψη τα πολλαπλάσια φορτία που ασκούνται σε κρούσεις και εισάχθηκε συντελεστής ασφαλείας. Παρόλα αυτά, ελέχθησαν οι φυσικές ιδιοσυχνότητες της κατασκευής και η πρώτη ιδιοσυχνότητα εντοπίστηκε πολύ μακριά από την μέγιστη συχνότητα διέγερσης, δηλαδή είναι περίπου στα 2,405 kHz. Επομένως, δεν υπάρχει περίπτωση να μετράει ο αισθητήρας ιδιοταλαντώσεις ούτε να καταπονηθεί από δυναμικά φορτία κοντά στις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής.

Η ακρίβεια είναι διαφορετική σε κάθε άξονα καθώς είναι άμεσα εξαρτώμενη από την αντοχή. Επίσης είναι συνάρτηση της συχνότητας δειγματοληψίας και μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας. Αυτό γίνεται γιατί αυξάνεται ο θόρυβος στα ηλεκτρονικά. Με την βοήθεια ενός κατάλληλου βαθυπερατού ψηφιακού φίλτρου ή ενός ειδικού φίλτρου αποθορυβοποίησης το μέγιστο πιθανό σφάλμα μειώνεται σημαντικά.

Τελικά, οι επιδόσεις του μπορούν να συγκριθούν εύκολα με έναν πολυαξονικό αισθητήρα δύναμης του εμπορίου ο οποίος έχει κόστος της τάξης των πολλών χιλιάδων ευρώ.

6.2 Μελλοντική Εργασία

Ο αισθητήρας που αναπτύχθηκε είναι ο πρωτότυπος και σχεδιάστηκε για συγκεκριμένη εφαρμογή εκ του μηδενός. Συνολικά θα μπορούσε να το δει κανείς και σαν μια πρώτη έκδοση ενός αισθητήρα δύναμης. Κάποιες από τις μελλοντικές εργασίες που θα μπορούσαν να γίνουν επί του πρωτοτύπου, αναφέρονται παρακάτω. Κάποιες από αυτές απαιτούν αρκετή εργασία για την υλοποίησή τους και κάποιες άλλες είναι πιο απλές.

- Επιλογή και εφαρμογή των επιμηκυνσιομέτρων ημιαγωγού τύπου στην υπάρχουσα κατασκευή. Η εργασία αυτή απαιτεί πιθανότατα αλλαγή στα ηλεκτρονικά του συστήματος. Χρειάζεται μελέτη στην εφαρμογή, καθώς έχουν διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία.
- Βελτιστοποίηση διαστάσεων για ακριβέστερη μηχανική αποσύζευξη. Αυτό θα μπορούσε να γίνει με ταυτόχρονο βέλτιστο υπολογισμό παραμέτρων που επηρεάζουν αντοχή και ευαισθησία. Για αυτό θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα υπολογιστικό φύλλο excel στο οποίο θα εισάγονται μέγιστα φορτία και ευαισθησία και θα υπολογίζει τις απαραίτητες διαστάσεις. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσε να σχεδιάζει κανείς, αισθητήρες για ειδικές εφαρμογές χωρίς αυξημένο κόστος.
- Βελτιστοποίηση ηλεκτρονικής πλακέτας και γενικότερα συστήματος μετατροπής από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα.
- Δημιουργία ενός γραφικού περιβάλλοντος για την ρύθμιση των παραμέτρων του ADC, την βαθμονόμηση, καθώς και την ζωντανή απεικόνιση των καναλιών.
- Επανασχεδιασμός της κατασκευής σε έναν αισθητήρα ποιο γενικής χρήσης σε σχέση με τον υπάρχοντα. Αυτό απαιτεί διορθώσεις στα καπάκια στην πίσω και στην εμπρός πλευρά, για να δημιουργηθούν υποδοχές για φλάντζες σύσφιξης.
- Σχεδιασμός μιας σταθερής και ακριβέστερης βάσης βαθμονόμησης.
- Καταστροφικός έλεγχος αντοχής της κατασκευής για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.
- Σύγκριση και επιβεβαίωση καταγεγραμμένων μετρήσεων με αισθητήρα του εμπορίου.

Βιβλιογραφία

- [1] James W. Dally, William F. Riley, Kenneth G. McConnell, *Instrumentation for Engineering Measurements*, Wiley, USA, 1984.
- [2] Finney H. Robert, “Finite Element Analysis”, *Engineering with Rubber*, HLA Engineers, Dallas, USA, 2001.
- [3] Hoffmann Karl, “Applying the Wheatstone Bridge Circuit”, Darmstadt, HBM.
- [4] Gab Soon Kim, “Development of a small 6-axis force/moment sensor for robot's fingers”, *Measurements Science and Technology*, Volume 15, Issue 11, Korea 2004.
- [5] Gab Soon Kim, “Design of a six-axis wrist force/moment sensor using FEM and its fabrication for an intelligent robot”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 135, Issue 1, March 2007, pp. 27–34.
- [6] Gab Soon Kim, Hi-Jun Shin, Jungwon Yoon, “Development of 6-axis force/moment sensor for a humanoid robot's intelligent foot”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 141, Issue 2, February 2008, pp. 276–281.
- [7] Qiaokang Liang, Dan Zhang, Quanjun Song, Yunjian Ge, Huibin Cao, Yu Ge, “Design and fabrication of a six-dimensional wrist force/torque sensor based on E-type membranes compared to cross beams”, *Measurement*, Volume 43, Issue 10, December 2012, pp. 1702-1719.
- [8] Juqing Ma, Aiguo Song, Jing Xiao, “A Robust Static Decoupling Algorithm for 3-Axis Force Sensors Based on Coupling Error Model and e-SVR”, *Sensors*, Volume 12, August 2012, pp. 1453-1455.
- [9] Hiroko Oshima, Nobutaka Tsujiuchi, Takayuki Koizumi, Yuichiro Hayashi, Akihito Ito, Youtaro Tsuchiya, “Optimized Design Method of Three-Axis Force Sensor for Robot Fingers”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, December 2009, Guilin, China. Ππ. 700-706.
- [10] Aiguo Song, “Multi-Dimensional Force Sensor Design for Haptic Human-Computer Interaction”, *Human Computer Interaction*, Ioannis Pavlidis, Chapter 15, October 2008.
- [11] Li Xiaotao, Xu Guan, Toshitsugu Ueda, Shozo Tomita, Tatsuji Nishihara, Chiaki Kitamura, “Research on a Novel Sensor for Measuring Force in Arbitrary

Direction”, *International Conference on Computer and Electrical Engineering*, December 2008, pp. 241-244.

- [12] Weichao Yang, Bo Song, Yong Yu and Yunjian Ge, “Design of a Micro Six-Axis Force Sensor Based on Double Layer E-type Membrane”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Automation*, June 2008, Zhangjiajie, China.
- [13] Γραικούση Ρ. “Στοιχεία μηχανών-Στοιχεία συνδέσεως”, Εκδόσεις Γιαχουδή, Θεσσαλονίκη, 1983.
- [14] Κουτσούκης Κωνσταντίνος, “Ανάπτυξη Περιβάλλοντος Μοντελοποίησης και Προσομοίωσης με Πειραματική Αξιολόγηση για Μονόποδο Ρομπότ”, *Διπλωματική Εργασία*, Αθήνα, ΕΜΠ, 2012.
- [15] Χατζάκος Παναγιώτης, “Παραμετρική Ανάλυση και Συστηματικός Σχεδιασμός Ρομπότ με Πόδια”, *Διδακτορική Διατριβή*, Αθήνα, ΕΜΠ, 2009.
- [16] Χερουβείμ Νικόλαος Δημήτριος, “Δυναμική και Έλεγχος Ρομποτικών Συστημάτων με Πόδια”, *Διδακτορική Διατριβή*, Αθήνα, ΕΜΠ, 2009.

Παράρτημα Α

Κώδικας Arduino για το MCP3903, *mcp3903.ino*.

```
// Include SPI library
#include <SPI.h>

// pins used for connection with the ADC
const int CS = 10;
const int RESET = 4;

// Calculations Constants

const long BAUDRATE = 57600;
const int SAMAVG = 20; //Samples to average

// address Mask
const byte Mask = 0b01000000;

// channel address
const int READ0 = 0b01000001; // Diavasma kanaliou 0

//preferences
const byte MOD = (0x06 << 1) | Mask;
const unsigned long MODV = 0b001100110011001100110011;
const byte PHASE = (0x07 << 1) | Mask;
const unsigned long PHASEV = 0b000000000000000000000000;
const byte GAIN = (0x08 << 1) | Mask;
const unsigned long GAINV = 0b101111011011110110111011; // See datasheet for configuration of Gain
const byte STATUS = (0x09 << 1) | Mask;
const unsigned long STATUSV = 0b1001111111111111000001111111;
const byte CONFIG = (0x0A << 1) | Mask;
const unsigned long CONFIGV = 0b000000000000111111110000;

// other constants

volatile int ca = 0;
volatile long bla = 0;
volatile int state = LOW;

int State = state;
long Resulta = 0;
long Resultb = 0;
long Resultc = 0;
long Resultd = 0;
long Resulte = 0;
long Resultf = 0;
int k = 0;
int k2 = 0;

void setup()
{
  Serial.begin(BAUDRATE);
  SPI.begin();

  pinMode(CS,OUTPUT);
  pinMode(RESET,OUTPUT);
  SPI.setDataMode(SPI_MODE3);
  SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV4);
  SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
  attachInterrupt(0,readRegister24,FALLING);
  delay(100);
}

void loop()
{
  if (k == 0)
  {
    // Register control - Only the first loop
    digitalWrite(RESET,LOW);
    delay(100);
  }
}
```

```

digitalWrite(RESET,HIGH);
delay(400);
writeRegister(GAIN,GAINV,STATUS,STATUSV,CONFIG,CONFIGV);
k=1+k;
delay(200);
Serial.println();
Serial.println(10,'DEC'); // After this character you can start reading 10 = 'A'
}

long resulta = 0;
long resultb = 0;
long resultc = 0;
long resultd = 0;
long resulte = 0;
int ba = 0;

// while loop for averaging (downsampling) before sending to serial port
while (ba < SAMAVG)
{
    if (state != State)
    {
        resulta = resulta + Resulta;
        resultb = resultb + Resultb;
        resultc = resultc + Resultc;
        resultd = resultd + Resultd;
        resulte = resulte + Resulte;
        ba = ba+1;
    }
    if (ba == SAMAVG)
    {
        resulta = resulta/SAMAVG;
        resultb = resultb/SAMAVG;
        resultc = resultc/SAMAVG;
        resultd = resultd/SAMAVG;
        resulte = resulte/SAMAVG;
    }
}

Serial.println(resulta); //Fy The sequence has to be checked

Serial.println(resultb); // My

Serial.println(resultc); // Fx

Serial.println(resultd); // Fz

Serial.println(resulte); // Mx

Serial.flush();

}

//-----READ from REGISTER interrupt routine (24-bit)-----//

void readRegister24()
{
    if (ca == 0)
    {
        digitalWrite(CS, LOW);
        ca = ca + 1;
        SPI.transfer(READ0);
    }

    byte a1 = SPI.transfer(0x00);
    byte a2 = SPI.transfer(0x00);
    byte a3 = SPI.transfer(0x00);
    byte b1 = SPI.transfer(0x00);
    byte b2 = SPI.transfer(0x00);
    byte b3 = SPI.transfer(0x00);
    byte c1 = SPI.transfer(0x00);
    byte c2 = SPI.transfer(0x00);
    byte c3 = SPI.transfer(0x00);
    byte d1 = SPI.transfer(0x00);
    byte d2 = SPI.transfer(0x00);
}

```

```

byte d3 = SPI.transfer(0x00);
byte e1 = SPI.transfer(0x00);
byte e2 = SPI.transfer(0x00);
byte e3 = SPI.transfer(0x00);
byte f1 = SPI.transfer(0x00);
byte f2 = SPI.transfer(0x00);
byte f3 = SPI.transfer(0x00);

// For Returning the desired Channel

long a = 0;
a = (((a | a1) << 8) | a2) << 8 | a3 ;
byte signa = a1 >> 7;
if (signa == 1 )
{
a = a | 0b11111111000000000000000000000000;
}
Resulta = a;

long b = 0;
b = (((b | b1) << 8) | b2) << 8 | b3 ;
byte signb = b1 >> 7;
if (signb == 1 )
{
b = b | 0b11111111000000000000000000000000;
}
Resultb = b;

long c = 0;
c = (((c | c1) << 8) | c2) << 8 | c3 ;
byte signc = c1 >> 7;
if (signc == 1 )
{
c = c | 0b11111111000000000000000000000000;
}
Resultc = c;

long d =0;
d = (((d | d1) << 8) | d2) << 8 | d3 ;
byte signd = d1 >> 7;
if (signd == 1 )
{
d = d | 0b11111111000000000000000000000000;
}
Resultd = d;

long e =0;
e = (((e | e1) << 8) | e2) << 8 | e3 ;
byte signe = e1 >> 7;
if (signe == 1 )
{
e = e | 0b11111111000000000000000000000000;
}
Resulte = e;

long f = 0;
f = (((f | f1) << 8) | f2) << 8 | f3 ;
byte signf = f1 >> 7;
if (signf == 1 )
{
f = f | 0b11111111000000000000000000000000;
}
Resultf = f;

state = !state;
bla = bla + 1;

}

//-----WRITE to REGISTER function-----//

void writeRegister(byte thisAddress1, unsigned long thisValue1,byte thisAddress2, unsigned long thisValue2,byte
thisAddress3, unsigned long thisValue3)
{

```

```

long report = 0;
unsigned long mask1 = 0xFF0000; //0b111111110000000000000000;
unsigned long mask2 = 0xFF00; //0b000000001111111100000000;
unsigned long mask3 = 0xFF; //0b000000000000000011111111;
byte thisValue11 = (thisValue1 & mask1) >> 16;
byte thisValue12 = (thisValue1 & mask2) >> 8;
byte thisValue13 = (thisValue1 & mask3);
byte thisValue21 = (thisValue2 & mask1) >> 16;
byte thisValue22 = (thisValue2 & mask2) >> 8;
byte thisValue23 = (thisValue2 & mask3);
byte thisValue31 = (thisValue3 & mask1) >> 16;
byte thisValue32 = (thisValue3 & mask2) >> 8;
byte thisValue33 = (thisValue3 & mask3);

digitalWrite(CS, LOW);
delayMicroseconds(50);
SPI.transfer(thisAddress1);
SPI.transfer(thisValue11); //-----//
SPI.transfer(thisValue12); //----1 byte----//
SPI.transfer(thisValue13); //-----//
SPI.transfer(thisValue21); //-----//
SPI.transfer(thisValue22); //----2 byte----//
SPI.transfer(thisValue23); //-----//
SPI.transfer(thisValue31); //-----//
SPI.transfer(thisValue32); //----3 byte----//
SPI.transfer(thisValue33); //-----//

digitalWrite(CS, HIGH);
}

```

Κύριος κώδικας *Decoupling.m*

```

clear all
clc

BAUDRATE = 57600;
SamplingRate = 219.7125; %Samples per second
SamplingTime = 1/SamplingRate;
OffsetSeconds = 10;
SamplesSeconds = 10;
OffsetSamples = round(SamplingRate*OffsetSeconds);
Samples = round(SamplingRate*SamplesSeconds);
GAIN = 1; %Check MCP3903 For properly specification of this parameter
(actually Gain = 3)

%-----OPEN SERIAL PORT-----%

% Find a serial port object.
obj1 = instrfind('Type', 'serial', 'Port', 'COM3', 'Tag', '');

% Create the serial port object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.
if isempty(obj1)
    obj1 = serial('COM3');
else
    fclose(obj1);
    obj1 = obj1(1)
end
% Connect to instrument object, obj1.
fopen(obj1);
% Configure instrument object, obj1.
set(obj1, 'BaudRate', BAUDRATE);

fprintf(obj1, '1');

```

```

%-----OFFSET CALIBRATION-----%

%Arxikopoihsh pinakwn

OffsetFy = zeros(OffsetSamples-1,1);
OffsetMy = zeros(OffsetSamples-1,1);
OffsetFx = zeros(OffsetSamples-1,1);
OffsetFz = zeros(OffsetSamples-1,1);
OffsetMx = zeros(OffsetSamples-1,1);

%-----Drop the first bad data-----%

wastedata = fscanf(obj1);
while wastedata ~= 'A'
    wastedata = fscanf(obj1);
end

for i = 1 : OffsetSamples-1

    for j = 1:5

        dataoffset=fscanf(obj1);
        Dataoffset = str2double(dataoffset);
        if j == 1 %
            OffsetFy(i) = Dataoffset; %
        elseif j == 2 %
            OffsetMy(i) = Dataoffset; %
        elseif j == 3 % Anaprosarmogi analoga
me tin kollisi
            OffsetFx(i) = Dataoffset; %
        elseif j == 4 %
            OffsetMx(i) = Dataoffset; %
        else %
            OffsetFz(i) = Dataoffset; %
        end

    end

end

fclose(obj1);

[OFFSETMY, OFFSETMX, OFFSETFZ, OFFSETFX, OFFSETFY, FilteredMY, FilteredMX,
FilteredFZ, FilteredFX, FilteredFY] = FilteredMean(OffsetMy, OffsetMx, OffsetFz,
OffsetFx, OffsetFy, SamplingTime);

T_to_wait = 5;
str = sprintf('Offsets Measured ... %d sec to start applying loads',
T_to_wait);
disp(str);

%-----Hxos enarxis topothetisis kai telous-----%
sound(100,10000,8)
pause(T_to_wait)
sound(100,10000,8)
%-----Hxos enarxis topothetisis kai telous-----%

```

```
[MeanMy, MeanMx, MeanFz, MeanFx, MeanFy]=ReaData( OFFSETMY, OFFSETMX, OFFSETFZ,
OFFSETFX, OFFSETFY, Samples, obj1, SamplingTime);
```

```
format long
```

```
MeanFy = round(MeanFy)
MeanMy = round(MeanMy)
MeanFx = round(MeanFx)
MeanFz = round(MeanFz)
MeanMx = round(MeanMx)
```

```
sound(100,10000,8)
```

```
fclose(obj1);
```

Συνάρτηση **ReaData.m**

```
function [ MeanMy, MeanMx, MeanFz, MeanFx, MeanFy ] = ReaData( OFFMY, OFFMX,
OFFFZ, OFFFX, OFFFY, Sa, obj1, ST )
```

```
%Arxikopoihsh Pinakwn Fy , My , Fx , Fz
OdataFy = zeros(Sa,1);
OdataMy = zeros(Sa,1);
OdataFx = zeros(Sa,1);
OdataFz = zeros(Sa,1);
OdataMx = zeros(Sa,1);
```

```
% Read Data from serial Port
fopen(obj1);
klaid=1;
```

```
wastedata = fscanf(obj1);
while wastedata ~= 'A'
    wastedata = fscanf(obj1);
end
```

```
for i=1:Sa
    for j=1:5
        data1=fscanf(obj1);
        Data1 = str2double(data1);

        if j == 1
            OdataFy(i) = Data1;
        elseif j == 2
            OdataMy(i) = Data1;
        elseif j == 3
            OdataFx(i) = Data1;
        elseif j == 4
            OdataMx(i) = Data1;
        else
            OdataFz(i) = Data1;
        end
    end
end
```

```
fclose(obj1);
```

```

for i = 1 : Sa

    OdataFy(i) = OdataFy(i) - OFFFY;
    OdataMy(i) = OdataMy(i) - OFFMY;
    OdataFx(i) = OdataFx(i) - OFFFX;
    OdataFz(i) = OdataFz(i) - OFFFZ;
    OdataMx(i) = OdataMx(i) - OFFMX;

end

[MeanMy, MeanMx, MeanFz, MeanFx, MeanFy, FilteredMy, FilteredMx, FilteredFz,
FilteredFx, FilteredFy] = FilteredMean(OdataMy, OdataMx, OdataFz, OdataFx,
OdataFy, ST);

subplot(5,1,1), plot([ST: ST: Sa*ST], (6.699719e-5)*OdataFx, [ST: ST:
Sa*ST], (6.699719e-5)*FilteredFx, 'r')
ylabel('Fx')
grid on
subplot(5,1,2), plot([ST: ST: Sa*ST], (6.699719e-5)*OdataFy, [ST: ST:
Sa*ST], (6.699719e-5)*FilteredFy, 'r')
ylabel('Fy')
grid on
subplot(5,1,3), plot([ST: ST: Sa*ST], (6.699719e-5)*OdataMy, [ST: ST:
Sa*ST], (6.699719e-5)*FilteredMy, 'r')
ylabel('My')
grid on
subplot(5,1,4), plot([ST: ST: Sa*ST], (6.699719e-5)*OdataFz, [ST: ST:
Sa*ST], (6.699719e-5)*FilteredFz, 'r')
ylabel('Fz')
grid on
subplot(5,1,5), plot([ST: ST: Sa*ST], (6.699719e-5)*OdataMx, [ST: ST:
Sa*ST], (6.699719e-5)*FilteredMx, 'r')
ylabel('Mx')
grid on

end

```

Συνάρτηση *FilteredMean.m*

```

function [ MMy, MMx, MFz, MFx, MFy, FMy, FMx, FFz, FFx, FFy] = FilteredMean( My,
Mx, Fz, Fx, Fy, ST)

FMy = Lowpass_Filter(My, ST);
FMx = Lowpass_Filter(Mx, ST);
FFz = Lowpass_Filter(Fz, ST);
FFx = Lowpass_Filter(Fx, ST);
FFy = Lowpass_Filter(Fy, ST);

MMy = mean(FMy(500:length(FMy)));
MMx = mean(FMx(500:length(FMx)));
MFz = mean(FFz(500:length(FFz)));
MFx = mean(FFx(500:length(FFx)));
MFy = mean(FFy(500:length(FFy)));

end

```

Συνάρτηση *Lowpass_Filter.m*

```

function [ Output ] = Lowpass_Filter( F, ST )
fcut=3;

Fs=1/ST;
[b,a]=butter(1,fcut/(Fs/2));
Output = filter(b,a,F);

end

```

Κύριος κώδικας *Diavasma.m*

```

clear all
clc

%-----CONSTANTS-----%

BAUDRATE = 57600;
SamplingRate = 219.7125; %Samples per second
SamplingTime = 1/SamplingRate;
OffsetSeconds = 6;
SamplesSeconds = 10;
OffsetSamples = round(SamplingRate*OffsetSeconds);
Samples = round(SamplingRate*SamplesSeconds);
GAIN = 1; %Check MCP3903 For properly specification of this parameter
(actually Gain = 3)

% Decoupling matrix
C = [527.5 -7.244 5939 -3.646 6.6654; 12.98 746.2 107.3 -15.75 8.6654; -147.7
9.676 24899 -38 10.6654; -19.66 14.87 4795 -200.2 6.0; -59 5.68 1025 -46
8.6654];
C_1 = inv(C);

%-----%

%-----Serial Port configuration-----%
% Find a serial port object.
obj1 = instrfind('Type', 'serial', 'Port', 'COM3', 'Tag', '');

% Create the serial port object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.
if isempty(obj1)
    obj1 = serial('COM3');
else
    fclose(obj1);
    obj1 = obj1(1)
end
% Connect to instrument object, obj1.
fopen(obj1);
% Configure instrument object, obj1.
set(obj1, 'BaudRate', BAUDRATE);

fprintf(obj1, '1');

%-----%

Fx = zeros(Samples,1);

```



```

Fy = zeros(Samples,1);
My = zeros(Samples,1);
Fz = zeros(Samples,1);
Mx = zeros(Samples,1);

fclose(obj1);

[ FXOFFSET, FYOFFSET, MYOFFSET, FZOFFSET, MXOFFSET] = OFFSET(OffsetSamples,
obj1, C_1, SamplingTime);

T_to_wait = 2;
str = sprintf('Offsets Measured ...wait %d sec to start applying loads',
T_to_wait);
disp(str);

%-----Hxos enarxis topothetisis kai telous-----%
sound(100,10000,8)
pause(T_to_wait)
sound(100,10000,8)
%-----Hxos enarxis topothetisis kai telous-----%

fopen(obj1)

wastedata = fscanf(obj1);
while wastedata ~= 'A'
    wastedata = fscanf(obj1);
end
timew = 0;

for i = 1 : Samples
    tic
    for j = 1:5
        data=fscanf(obj1);
        Data = str2double(data);
        if j == 1
            eFy(i) = Data;
        elseif j == 2
            eMy(i) = Data;
        elseif j == 3
            eFx(i) = Data;
        elseif j == 4
            eMx(i) = Data ;
        else
            eFz(i) = Data ;
        end
    end

    Fx(i) = C_1(1,:) * [eFx(i); eFy(i); eMy(i); eFz(i); eMx(i)];
    Fy(i) = C_1(2,:) * [eFx(i); eFy(i); eMy(i); eFz(i); eMx(i)];
    My(i) = C_1(3,:) * [eFx(i); eFy(i); eMy(i); eFz(i); eMx(i)];
    Fz(i) = C_1(4,:) * [eFx(i); eFy(i); eMy(i); eFz(i); eMx(i)];
    Mx(i) = C_1(5,:) * [eFx(i); eFy(i); eMy(i); eFz(i); eMx(i)];

    Fx(i) = Fx(i) - FXOFFSET;
    Fy(i) = -(Fy(i) - FYOFFSET);
    My(i) = -(My(i) - MYOFFSET);
    Fz(i) = Fz(i) - FZOFFSET;
    Mx(i) = -(Mx(i) - MXOFFSET);

    timew = timew + toc
end

fclose(obj1);

```

```

figure(1)

time=SamplingTime:SamplingTime:SamplesSeconds;

subplot(5,1,1), plot(time,Fz(1:Samples));
grid on
ylabel('Fz (N)')
subplot(5,1,2), plot(time,Fx(1:Samples));
grid on
ylabel('Fx (N)')
subplot(5,1,3), plot(time,Fy(1:Samples));
grid on
ylabel('Fy (N)')
subplot(5,1,4), plot(time,My(1:Samples));
grid on
ylabel('My (Nm)')
subplot(5,1,5), plot(time,Mx(1:Samples));
grid on
ylabel('Mx (Nm)')
xlabel('sec')

```

Συνάρτηση **OFFSET.m**

```

function [ MeanFx, MeanFy, MeanMy, MeanMz, MeanMx ] = OFFSET( OffsetSamples,
obj1, C_1, SamplingTime)

OffsetFy = zeros(OffsetSamples,1);
OffsetMy = zeros(OffsetSamples,1);
OffsetFx = zeros(OffsetSamples,1);
OffsetFz = zeros(OffsetSamples,1);
OffsetMx = zeros(OffsetSamples,1);

fopen(obj1);
klaid=1;

wastedata = fscanf(obj1);
while wastedata ~= 'A'
    wastedata = fscanf(obj1);
end

for i = 1 : OffsetSamples

    for j = 1:5
        dataoffset=fscanf(obj1);
        Dataoffset = str2double(dataoffset);
        if j == 1
            OffsetFy(i) = Dataoffset;
        elseif j == 2
            OffsetMy(i) = Dataoffset;
        elseif j == 3
            OffsetFx(i) = Dataoffset;
        elseif j == 4
            OffsetMx(i) = Dataoffset;
        else
            OffsetFz(i) = Dataoffset;
        end
    end

end

```

```
end
fclose(obj1);

[OffsetMY, OffsetMX, OffsetFZ, OffsetFX, OffsetFY]=FilteredMean( OffsetMy,
OffsetMx, OffsetFz, OffsetFx, OffsetFy, SamplingTime)

F = (C_1)*[OffsetFX OffsetFY OffsetMY OffsetFZ OffsetMX]';

MeanFx = F(1);
MeanFy = F(2);
MeanMy = F(3);
MeanMz = F(4);
MeanMx = F(5);

fclose(obj1)
end
```

Παράρτημα Β

Τεχνικά φυλλάδια των Strain gage.

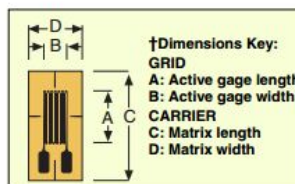


TRANSDUCER QUALITY STRAIN GAGE LINEAR PATTERN STRAIN GAGES

The linear pattern strain gages are used to measure strain in a single direction. They are used for experimental stress analysis, and transducer applications. The strain gage pattern is shown on the left side of the table. The "arrows" indicate the principal stress direction of the gage. OMEGA® offers miniature linear patterns for strain measurement of a stress concentration or high gradient areas, and larger sizes. The solder pads/ribbon leads are offered both at one end of the grid, or with one at each end of the grid. Wide or narrow linear grid patterns are available.

Dimensions are listed for pattern gage grid length (A) and width (B), and the matrix or carrier length (C) and width (D). The patterns include alignment triangles.

Note: To determine if the strain gages have temperature characteristics matched to steel or aluminum, see the column labeled "COMP" short for compensation, "ST" indicates steel, "AL" indicates aluminum. See the column labeled "BTP" for accessory bondable terminal pad model numbers.



MOST POPULAR MODELS HIGHLIGHTED!



To Order (Specify Model Number)											
	MODEL NO.	PRICE PER PKG OF 5	NOM. RESISTANCE (Ω)	DIMENSIONS mm (in)				MAX V* (Vrms)	TERMINATION	TEMP COMP	TERM PAD
				GRID		CARRIER					
				A	B	C	D				
Shown actual size 4 mm Leads not shown	SGT-1/350-TY11	\$27.60	350	1.0	1.8	4.0	3.0	4.5	Ribbon Leads	ST	
	SGT-1/350-TY13	27.60	350	(0.039)	(0.071)	(0.157)	(0.118)	6	Ribbon Leads	AL	
	SGT-1/350-TY41	19.60	350	Miniature linear pattern, measurement of stress concentration 350 Ω				4.5	Solder Pads	ST	
	SGT-1/350-TY43	19.60	350					6	Solder Pads	AL	

TRANSDUCER QUALITY STRAIN GAGE DUAL GRID FOR BENDING APPLICATIONS

MOST POPULAR MODELS HIGHLIGHTED!



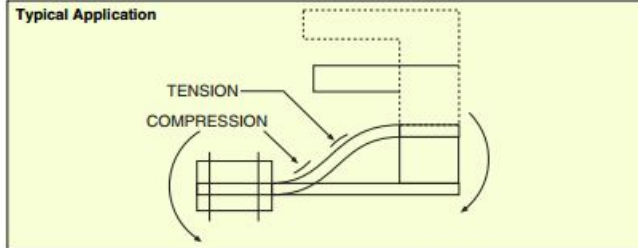
To Order (Specify Model Number)										
	MODEL NO.	PRICE PER PKG OF 5	NOM. RESISTANCE (Ω)	DIMENSIONS mm (in)				MAX V* (Vrms)	TERMINATION	TEMP COMP
				GRID		CARRIER				
				A	B	C	D			
Shown actual size 5.5 mm Leads not shown	SGT-2/350-DY11	\$44	350	2.0	2.0	5.5	5.9	6.5	Ribbon Leads	ST
	SGT-2/350-DY13	44	350	(0.079)	(0.079)	(0.217)	(0.232)	9.5	Ribbon Leads	AL
	SGT-2/350-DY41	34	350	Miniature, parallel dual grid pattern, bending strain 350 Ω				6.5	Solder Pads	ST
	SGT-2/350-DY43	34	350					9.5	Solder Pads	AL



TRANSDUCER QUALITY STRAIN GAGE HALF BRIDGE UNIAXIAL STRAIN GAGES

- ✓ Available with Ribbon Leads or Solder Pads
- ✓ Temperature Characteristics Matched to Steel or Aluminum
- ✓ Dual Linear Half-Bridge for Double Bend Transducer Applications
- ✓ Custom Gages Available

OMEGA® offers transducer quality strain gages in dual linear patterns in a half-bridge design with a common tab. These strain gages might be used for transducer design for beams that have a contraflexure point. Defined as a point in a structure where bending occurs in opposite directions. A transducer may also be described as a reversed bending beam. The grids are linear, both in the same direction, and are typically used for bending strain applications.

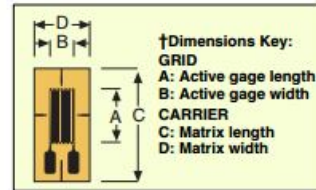


Three styles are available:


Standard: SGT-1LH/350-TY**, with grid centerline to centerline spacing of 5.46 mm (0.215")

Wide Grid: SGT-1LH/1000-TY**, with grid centerline to centerline spacing of 5.46 mm (0.215")


Large: SGT-2LH/350-TY**, with grid centerline to centerline spacing of 10.50 mm (0.413")



 MOST POPULAR MODELS HIGHLIGHTED!

To Order (Specify Model Number)										
	MODEL NO.	PRICE PER PKG OF 5	NOM. RESISTANCE (Ω)	DIMENSIONS mm (in) ¹				MAX V* (Vrms)	TERMINATION	TEMP COMP
				GRID		CARRIER				
				A	B	C	D			
Shown larger than actual size 9.2 mm  Leads not shown	SGT-1LH/350-TY11	\$32.80	350	1.5	2.5	9.2	4.0	6.5	Ribbon Leads	ST
	SGT-1LH/350-TY13	32.80	350	(0.059)	(0.098)	(0.362)	(0.157)	9	Ribbon Leads	AL
	SGT-1LH/350-TY41	24.80	350	Linear pattern, dual grid, half-bridge, common-tab pattern				6.5	Solder Pads	ST
	SGT-1LH/350-TY43	24.80	350	350 Ω				9	Solder Pads	AL

Μηχανικές και χημικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 7075 T6 βάσει του πιστοποιητικού.



ΚΡΑΜΖ
 40, Εργασιματικων στ.
 40011, 5 Κινηματικα
 Μοσχου, Ελλαδα

Κρασιγερσκ Μεταλλουργικη Επιτ.
INSPECTION CERTIFICATE
 KR 0204-11

Α019116
 No 15616
 Date 23.08.98

CONTRACT No: 11/2297 APPENDIX No: 15106 ORDER No: 362018
 ORDER No of the consignor
 Mark of manufacturer:

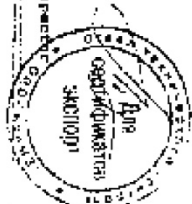
Description of Goods	Aluminum Bars	Dimension	35	Length	3020 mm
Alloy and Temper	7075 T6611				
Lot No:	12017	Net Weight	720	kg	121
					kg
Documentation	ASME A 721H-2002				

MECHANICAL PROPERTIES	Ultimate strength	Yield strength	Elongation	Hardness
Control	550	500	4.5	
Final	550	500	4.5	
Test results	535	510	4.0	

CHEMICAL COMPOSITION %

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ti+Zr
Final	0.04	0.06	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Test results	0.04	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Part No: 4-75	0.04	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

The test results certified that the above material is manufactured in compliance with the specified standards and meets the stipulated requirements. The test data is prepared by the laboratory. Please refer to page 2 and 3 for details regarding the testing of the material of the heat's part.



Quality Control Inspection



MCP3903

Six Channel Delta Sigma A/D Converter

Features

- Six Synchronous Sampling 16/24-bit Resolution Delta-Sigma A/D Converters with Proprietary Multi-Bit Architecture
- 91 dB SINAD, -100 dBc Total Harmonic Distortion (THD) (up to 35th harmonic), 102 dB Spurious-free Dynamic Range (SFDR) for Each Channel
- Programmable Data Rate up to 64 ksp/s
- Ultra Low-Power Shutdown Mode with $<2 \mu\text{A}$
- -115 dB Crosstalk Between any Two Channels
- Low Drift Internal Voltage Reference: 5 ppm/ $^{\circ}\text{C}$
- Differential Voltage Reference Input Pins
- High Gain PGA on Each Channel (up to 32 V/V)
- Phase Delay Compensation Between Each Pair of Channels with 1 μs Time Resolution
- High-Speed Addressable 10 MHz SPI Interface with Mode 0,0 and 1,1 Compatibility
- Independent Analog and Digital Power Supplies 4.5V - 5.5V AV_{DD} , 2.7V - 3.6V DV_{DD}
- Available in Small 28-lead SSOP Package
- Extended Temperature Range: -40 $^{\circ}\text{C}$ to +125 $^{\circ}\text{C}$

Applications

- Energy Metering and Power Measurement
- Portable Instrumentation
- Medical and Power Monitoring

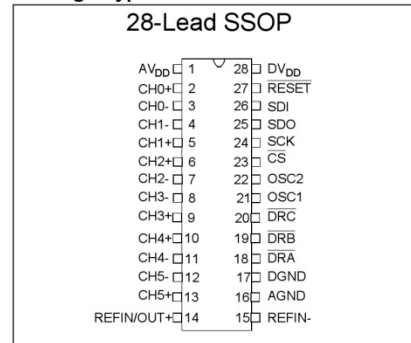
Description

The MCP3903 is a six-channel Analog Front End (AFE) containing three pairs made out of two synchronous sampling Delta-Sigma Analog-to-Digital Converters (ADC) with PGA, a phase delay compensation block, internal voltage reference, and high-speed 10MHz SPI compatible serial interface. The converters contain a proprietary dithering algorithm for reduced idle tones and improved THD.

The internal register map contains 24-bit wide ADC data words, a modulator output register as well as six 24-bit writable control registers to program gain, over-sampling ratio, phase, resolution, dithering, shut-down, reset and several communication features.

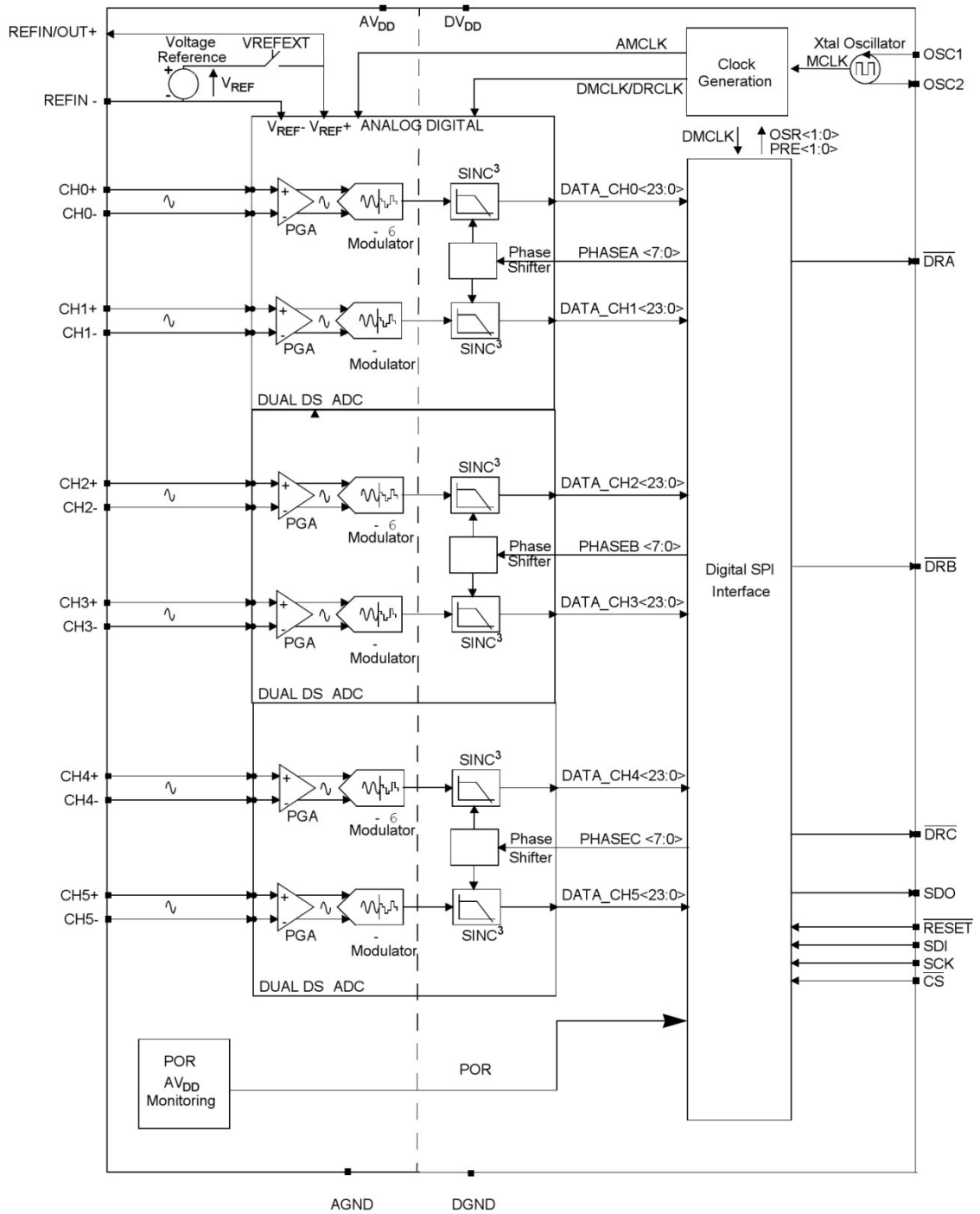
The communication is largely simplified with various Continuous Read modes that can be accessed by the Direct Memory Access (DMA) of an MCU and with separate Data Ready pins that can directly be connected to the Interrupt Request (IRQ) input of an MCU. The MCP3903 is capable of interfacing to a large variety of voltage and current sensors including shunts, current transformers, Rogowski coils, and Hall-effect sensors.

Package Type



MCP3903

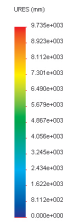
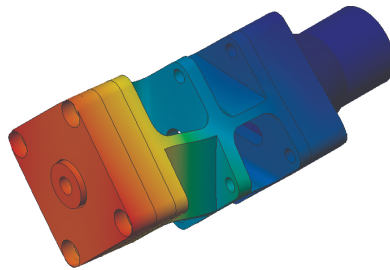
Functional Block Diagram



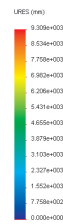
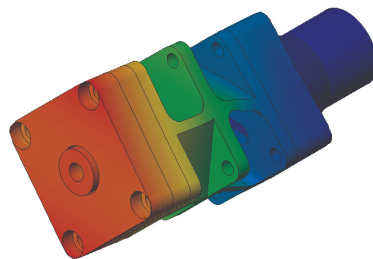
Παράρτημα Γ

Οι πέντε πρώτες ιδιομορφές της κατασκευής ΣΧ1

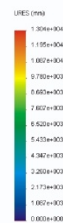
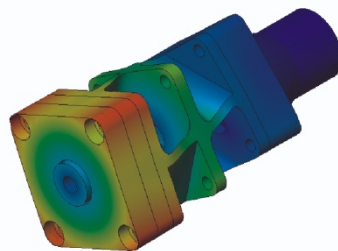
Model name: ForceSensor
Study name: Study 1
Plot type: Frequency Displacement1
Mode Shape: 1 Value = 2405.8 Hz
Deformation scale: 0.000674431



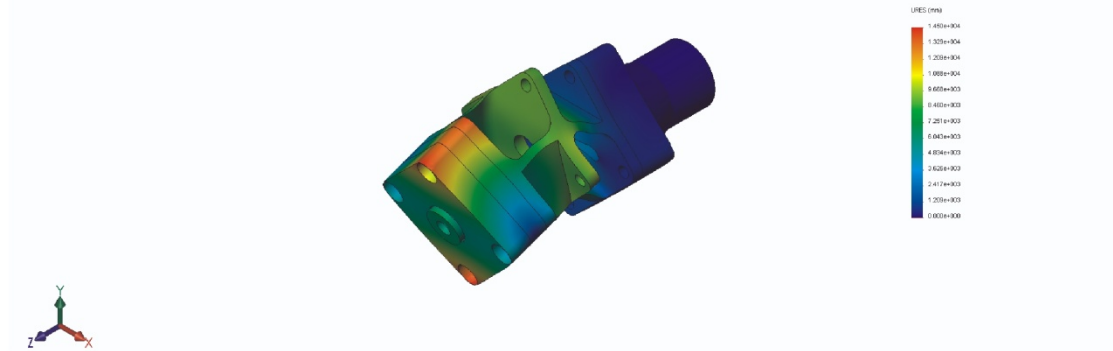
Model name: ForceSensor
Study name: Study 1
Plot type: Frequency Displacement2
Mode Shape: 2 Value = 2962.2 Hz
Deformation scale: 0.000705922



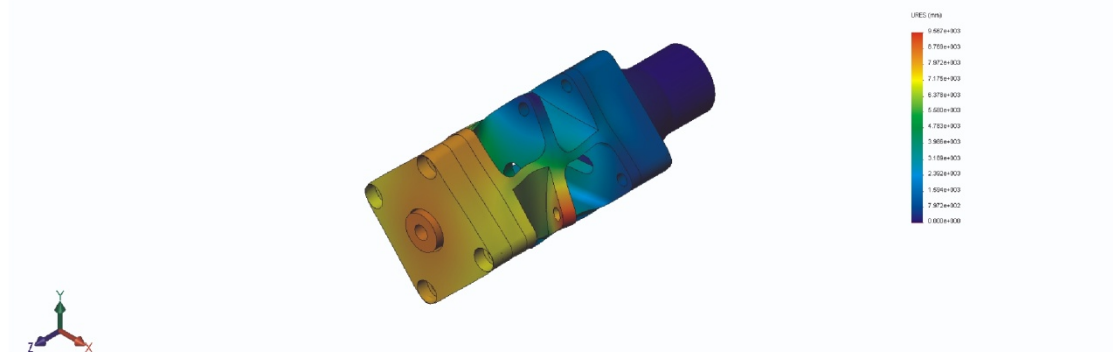
Model name: ForceSensor
Study name: Study 1
Plot type: Frequency Displacement3
Mode Shape: 3 Value = 6533.3 Hz
Deformation scale: 0.000463134



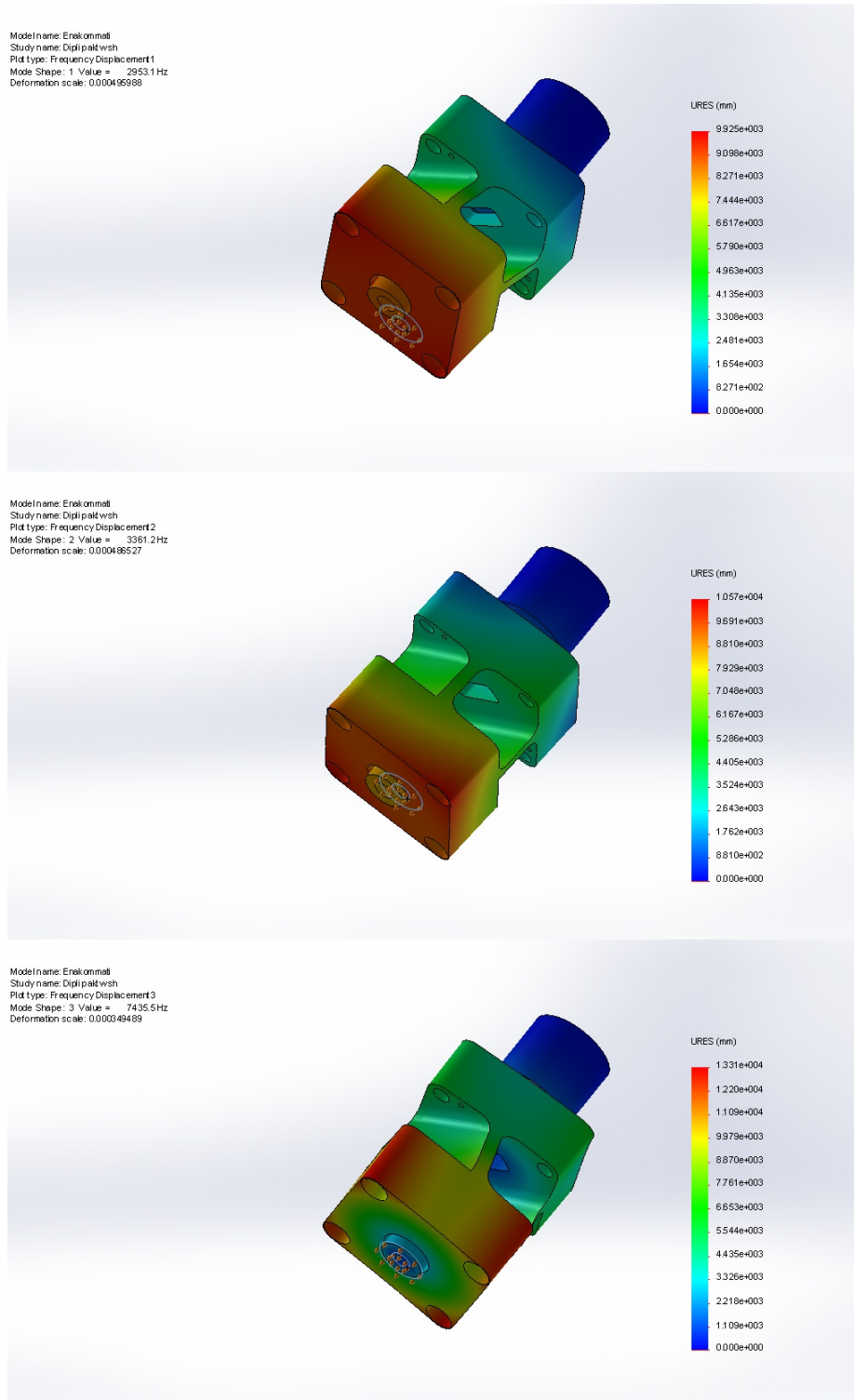
! name: ForceSensor
! name: Study 1
! type: Frequency Displacement4
! Shape - 4 Value = 7970.1 Hz
! max on scale: 0.000468714



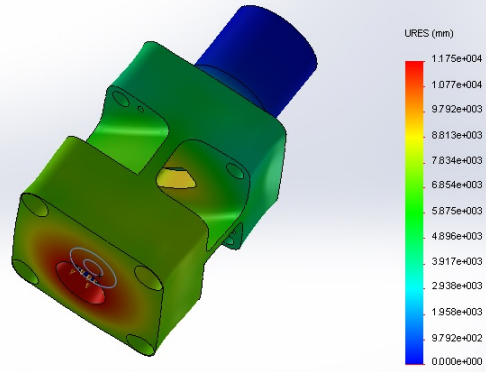
! name: ForceSensor
! name: Study 1
! type: Frequency Displacement5
! Shape - 5 Value = 8527 Hz
! max on scale: 0.0000607



Οι πέντε πρώτες ιδιομορφές της κατασκευής ΣΧ2



Model name: Enkonnmall
Study name: Diplipalkvsh
Plot type: Frequency Displacement4
Mode Shape: 4 Value = 13477 Hz
Deformation scale: 0.000395747



Model name: Enkonnmall
Study name: Diplipalkvsh
Plot type: Frequency Displacement5
Mode Shape: 5 Value = 14136 Hz
Deformation scale: 0.00039582

