



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

**Σχεδιασμός και Κατασκευή Συστήματος
Μετρήσεων με Μικροελεγκτή**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωσηφίνα–Παναγιώτα Δαή

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Χ. Πολιτόπουλος
Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Σχεδιασμός και Κατασκευή Συστήματος Μετρήσεων με Μικροελεγκτή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωσηφίνα–Παναγιώτα Δαή

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Χ. Πολιτόπουλος
Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Μαρτίου 2017.

.....

Κωνσταντίνος Πολιτόπουλος
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γεώργιος Καμπουράκης
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ματσόπουλος Γεώργιος
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2017

.....

Ιωσηφίνα-Παναγιώτα Ε. Δαή

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ιωσηφίνα-Παναγιώτα Ε. Δαή, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και υλοποίηση ενός ψηφιακού/αναλογικού κυκλώματος, το οποίο αποτελεί μέρος ενός σύνθετου συστήματος μέτρησης ελεγχόμενο από μικροελεγκτή, με σκοπό τη χρήση του σε βιοϊατρικές εφαρμογές.

Το σύστημα χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο αφορά στο κύκλωμα ενός αισθητήρα μετατόπισης μέσω της μέτρησης μικρής μεταβολής της αντίστασης. Το δεύτερο μέρος αφορά το κύκλωμα ενός αισθητήρα διοξειδίου του άνθρακα, στην είσοδο του οποίου εφαρμόζεται ένας τετραγωνικός παλμός μέσω του μικροελεγκτή, προκαλώντας στην έξοδό του την εμφάνιση μιας διαφοράς δυναμικού ανάλογης της συγκέντρωσης CO₂. Για μεγαλύτερη ακρίβεια κατά τις μετρήσεις, είναι απαραίτητος ο συνεχής έλεγχος των περιβαλλοντικών συνθηκών μέσω ενός αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας. Η καταγραφή και η επεξεργασία των αναλογικών σημάτων που λαμβάνονται από τους αισθητήρες, επιτυγχάνεται μέσω του μικροελεγκτή.

Αρχικά αναλύονται τα φυσικά φαινόμενα που αξιοποιούνται από τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη λήψη μετρήσεων. Εξετάζονται η λειτουργία του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, η λειτουργία γέφυρας, το πυροηλεκτρικό στοιχείο καθώς και η επιλογή των υπολοίπων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του τυπωμένου κυκλώματος (PCB - Printed Circuit Board).

Ακολουθεί η σχεδίαση των απαραίτητων αναλογικών κυκλωμάτων για την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Σε αυτό το στάδιο, έγιναν προσθήκες φίλτρων, ενισχυτών και λοιπών στοιχείων με σκοπό τη λήψη αξιοποιήσιμων σημάτων από τους αισθητήρες.

Η σχεδίαση των σχηματικών των κυκλωμάτων καθώς και η υλοποίηση του PCB, έγιναν σε ειδικά προγράμματα τύπου EDA (Electronic Design Automation).

Ο σχεδιασμός του PCB έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει προσαρμογές και επεκτάσεις του κυκλώματος, για να εξυπηρετηθούν οι παρούσες αλλά και μελλοντικές ανάγκες του Εργαστηρίου Βιοϊατρικής Οπτικής και Εφαρμοσμένης Βιοφυσικής.

***Λέξεις Κλειδιά:** βιοϊατρικές εφαρμογές, σχεδίαση, αναλογικό-ψηφιακό κύκλωμα, σύστημα μέτρησης, αισθητήρας, μετατόπιση νανομέτρων, μετατόπιση, γέφυρα, μεταβολή αντίστασης, μικροελεγκτής, πυροηλεκτρικό φαινόμενο, διοξείδιο του άνθρακα, θερμοκρασία, υγρασία, PCB*

Abstract

The scope of this diploma thesis is the design and implementation of a digital/analog circuit as part of a complex measuring system controlled by a microcontroller that is to be used for biomedical applications.

This system is split into two parts. The first concerns the circuit of a displacement sensor by measuring small changes in resistance. The second part concerns the circuit of a CO₂ sensor, at the input of which a square pulse is applied via the microcontroller, generating at its output a voltage difference proportional to the CO₂ concentration. For greater accuracy, a constant control of the environmental conditions is necessary; this is achieved via a temperature and humidity sensor. The recording and analysis of the analog signals received from the sensors is performed by the microcontroller.

Initially, the physical phenomena exploited by the sensors to take measurements are analysed. We present the operation of the piezoelectric element, the bridge mode, the pyroelectric element and the remaining element choices used to develop the Printed Circuit Board (PCB).

The design of the analog circuits necessary for the board's smooth operation follows. At this stage filters, amplifiers and other elements were added so that we receive usable signals from the sensors.

The design of the schematic diagrams and the PCB implementation were performed using specialized Electronic Design Automation (EDA) software.

The PCB was designed in such a way to allow adaptations and expansions and to cover the current and future needs of the Laboratory of Biomedical Optics and Applied Biophysics.

Keywords: *biomedical application, analog circuit design, measurement system, nanometers displacement, bridge, sensor, pyroelectric effect, carbon dioxide, NDIR, temperature, humidity, EDA, PCB*

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνησή της.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Πολιτόπουλο για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και τη δυνατότητα που μου δόθηκε να ασχοληθώ με αυτό το θέμα. Η συνεχής καθοδήγηση και υποστήριξη που μου προσέφερε ήταν παραπάνω από πολύτιμη για την εκπόνησή της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναστάσιο Γεωργακόπουλο, υποψήφιο Διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ο οποίος καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας ήταν πάντα πρόθυμος να προσφέρει τις γνώσεις και τη βοήθειά του.

Τέλος, χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Χρήστο, για τη συμπαράσταση και την υποστήριξή του σε όλη διάρκεια αυτής της πορείας.

Ιωσηφίνα Δαή

Αθήνα, Μάρτιος 2017

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	11
Ευρετήριο Εικόνων	13
Εισαγωγή	15
1 Γενικά στοιχεία αισθητήρων και σύστημα ελέγχου μέτρησης και ανάδρασης.....	16
1.1 Πιεζοηλεκτρικό στοιχείο	19
1.1.1 Θεωρητική ανάλυση πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και γέφυρας.....	27
1.1.1 Ενισχυτής Οργάνου (Instrumentation Amplifier).....	32
1.2 Κύκλωμα αισθητήρων διοξειδίου του άνθρακα και υγρασίας-θερμοκρασίας... 40	
1.2.1 Μέθοδος μη-διασπειρόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας (NDIR) και πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές	40
1.2.2 Αισθητήρας υγρασίας - θερμοκρασίας ChipCap2	44
2 Προγράμματα σχεδίασης PCB	46
3 Σχεδίαση ηλεκτρικών κυκλωμάτων	50
3.1 Κεντρική πλακέτα μικροελεγκτή	52
3.1.1 Τροφοδοσία κεντρικής πλακέτας μικροελεγκτή και σύνδεση με PC	53
3.1.2 Κύκλωμα γέφυρας και ενισχυτή οργάνου	59
3.1.3 Συνολικό ηλεκτρικό κύκλωμα κεντρικής πλακέτας	61
3.2 Κύκλωμα πλακέτας αισθητήρων	65
3.2.1 Κύκλωμα αισθητήρα CO ₂	65
3.2.2 Κύκλωμα αισθητήρα θερμοκρασίας-υγρασίας	67
3.2.3 Συνολικό ηλεκτρικό κύκλωμα πλακέτας αισθητήρων	69
3.3 Σχεδίαση κυκλώματος αισθητήρων για Kit EFM32WG-STK3800.....	71
4 Γενικοί κανόνες σχεδίασης PCB	73
4.1 Κατασκευή PCB μικροελεγκτή και συστήματος μέτρησης μετατόπισης.....	82
4.2 Κατασκευή PCB αισθητήρων CO ₂ , θερμοκρασίας-υγρασίας.....	85
4.2.1 Κατασκευή PCB αισθητήρων για το Wonder Gecko Starter Kit	87
Βιβλιογραφία.....	89

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Παθητικός αισθητήρας.....	16
Εικόνα 2: Ενεργητικός αισθητήρας	17
Εικόνα 3: Απλό Διάγραμμα Συστήματος Αισθητήρα.....	17
Εικόνα 4: Λειτουργικά στοιχεία ενός συστήματος μέτρησης	18
Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση συστήματος ανοιχτού βρόχου	18
Εικόνα 6: Σχηματική απεικόνιση συστήματος κλειστού βρόχου	18
Εικόνα 7: Πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος και αντιστάσεις	19
Εικόνα 8: Πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι συνδεδεμένοι σε σειρά.....	20
Εικόνα 9: Ταλάντωση πιεζοηλεκτρικού	20
Εικόνα 10: Υστέρηση πιεζοηλεκτρικού.....	21
Εικόνα 11: Πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και αντιστάσεις σχηματισμού γέφυρας.....	21
Εικόνα 12: Μετατόπιση	22
Εικόνα 13: Μετρητής σύρματος ή μετρητής μεταβολής αντίστασης	22
Εικόνα 14: Γέφυρα αντιστάσεων.....	23
Εικόνα 15: Πιεζοαντιστάσεις	24
Εικόνα 16: Πιεζοηλεκτρικό στοιχείο PZS001	30
Εικόνα 17: Κύκλωμα ενισχυτή οργάνου	32
Εικόνα 18: Ηλεκτρικό κύκλωμα του ενισχυτή οργάνου AD8557	37
Εικόνα 19: NDIR αισθητήρας.....	40
Εικόνα 20: Πυροηλεκτρικός αισθητήρας και ισοδύναμο κύκλωμα	41
Εικόνα 21: Αισθητήρας CO ₂ IRC-A1	42
Εικόνα 22: Αισθητήρας NDIR CO ₂ διπλού καναλιού	42
Εικόνα 23: Αισθητήρας υγρασίας-θερμοκρασίας CC2A25	45
Εικόνα 24: (Αριστερά) Διάτρητα στοιχεία – (Δεξιά) Στοιχεία επιφανειακής στήριξης (SMD)	46
Εικόνα 25: Δημιουργία βιβλιοθήκης στοιχείου (Αριστερά) Σχηματικό διάγραμμα – (Δεξιά) απεικόνιση στοιχείου πάνω στο PCB	47
Εικόνα 26: Στοιχεία από το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή.....	48
Εικόνα 27: Διαστάσεις στοιχείου από το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή	48
Εικόνα 28: Σχηματικό διάγραμμα θεωρητικού κυκλώματος	48
Εικόνα 29: (Αριστερά) PCB κεντρικής πλακέτας μικροελεγκτή – (Δεξιά) PCB αισθητήρων .. (Top layer)	50
Εικόνα 30: (Αριστερά) PCB κεντρικής πλακέτας μικροελεγκτή – (Δεξιά) PCB αισθητήρων .. (Bottom layer)	51
Εικόνα 31: Κύκλωμα USB για τροφοδοσία 5V και σύνδεση με PC	53
Εικόνα 32: Κύκλωμα USB για τροφοδοσία 5 V.....	54
Εικόνα 33: (Αριστερά) Τροφοδοσία πλακέτας μέσω JTAG Connector – (Δεξιά) Pinout for JTAG/SDW and Trace Connector	55
Εικόνα 34: Δίοδος Schottky και Ρυθμιστής Τάσης	55
Εικόνα 35: Τυπικό ηλεκτρικό ισοδύναμο ενός πυκνωτή.....	56
Εικόνα 36: Χωρητικής λειτουργία πυκνωτή ως προς τη συχνότητα	57
Εικόνα 37: Κύκλωμα τροφοδοσίας του EFM32WG380F256.....	58

Εικόνα 38: Ταλαντωτές χρονισμού ρολογιού μικροελεγκτή υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων.....	58
Εικόνα 39: Πιεζοηλεκτρικό PZS001	59
Εικόνα 40: Κύκλωμα σύνδεσης πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και στάδιο ενίσχυσης	60
Εικόνα 41: Κύκλωμα Αισθητήρα CO ₂	65
Εικόνα 42: Ψηφιακή διάταξη	67
Εικόνα 43: Αναλογική διάταξη	68
Εικόνα 44: Κύκλωμα Αισθητήρα Υγρασίας και Θερμοκρασίας CC2A25.....	68
Εικόνα 45: Κύκλωμα αισθητήρα CO ₂ για EFM32 Wonder Gecko Starter Kit	71
Εικόνα 46: Κύκλωμα αισθητήρα υγρασίας & θερμοκρασίας για EFM32 Wonder Gecko Starter Kit.....	72
Εικόνα 47: Κάτοψη στοιχείων στο PCB.....	73
Εικόνα 48: Κύκλωμα τυπωμένης πλακέτας με δύο επίπεδα	76
Εικόνα 49: PCB τεσσάρων επιπέδων.....	77
Εικόνα 50: Power plane	78
Εικόνα 51: Ένωση SMD στοιχείου που βρίσκεται στο Bottom Layer, με το Top layer με τη χρήση VIA.....	79
Εικόνα 52: Διάκριση VIAs και PADs	79
Εικόνα 53: Τοποθέτηση πολυγώνου συνδεδεμένο με το GND.....	80
Εικόνα 54: Top overlay	81
Εικόνα 55: Bottom Solder Paste Layer.....	81
Εικόνα 56: Υλοποίηση PCB πλακέτας μικροελεγκτή	82
Εικόνα 57: Σχεδίαση PCB της κεντρικής πλακέτας.....	83
Εικόνα 58: Πολυγώνου γείωσης και στα δύο επίπεδα του PCB	83
Εικόνα 59: 3D κεντρικής πλακέτας μικροελεγκτή	84
Εικόνα 60: Υλοποίηση PCB αισθητήρων_1	85
Εικόνα 61: Πολύγωνο γείωσης και στα δύο επίπεδα του PCB των αισθητήρων_1	86
Εικόνα 62: 3D PCB αισθητήρων_1.....	86
Εικόνα 63: Υλοποίηση PCB αισθητήρων_2	87
Εικόνα 64: Πολύγωνο γείωσης και στα δύο επίπεδα του PCB των αισθητήρων_2	87

Εισαγωγή

Το Εργαστήριο Βιοϊατρικής Οπτικής και Εφαρμοσμένης Βιοφυσικής έχει σαν σκοπό την ανάπτυξη και εφαρμογή οπτικών τεχνολογιών στην Ιατρική και τις Βιοεπιστήμες, καθώς και τη διεξαγωγή πρωτοπόρου έρευνας στην τομή της Φωτονικής με τις Βιοεπιστήμες και την επιστήμη του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού.

Όπως είναι φυσικό, η σύνθετη φύση ενός τέτοιου εργαστηρίου δημιουργεί ανάγκες πολύ συγκεκριμένων μετρήσεων και καταγραφών για παρακολούθηση και έλεγχο διαφόρων πειραμάτων που πραγματοποιούνται σε αυτό. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η δυνατότητα εξέλιξης του εξοπλισμού του, ώστε να λαμβάνονται πιο ακριβείς και έγκυρες μετρήσεις, η εξεύρεση νέων τρόπων προσέγγισης για ερωτήματα που προκύπτουν και η δυνατότητα εξειδικευμένης παραμετροποίησης των οργάνων που χρησιμοποιούνται προκειμένου να καλύψουν τις εκάστοτε ανάγκες.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται η μελέτη και σχεδίαση ενός σύνθετου συστήματος μετρήσεων και ελέγχου, το οποίο χωρίστηκε σε δύο μέρη:

- ✓ Ένα σύστημα μέτρησης μετατόπισης, με ακρίβεια νανομέτρων, για το μικροσκόπιο του εργαστηρίου το οποίο χρησιμοποιείται για τη μελέτη κυττάρων κολλαγόνου και ελαστίνης.
- ✓ Ένα σύστημα λήψης μετρήσεων των επιπέδων του διοξειδίου του άνθρακα, καθώς και των επιπέδων υγρασίας και θερμοκρασίας στον κλίβανο του εργαστηρίου όπου πραγματοποιείται συντήρηση καρκινικών κυττάρων προς μελέτη, καθώς και η καταγραφή των μετρήσεων από το σύνολο των αισθητήρων για περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία.

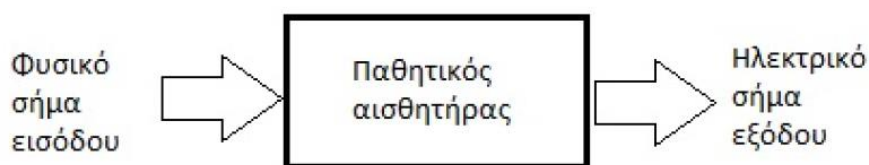
1 Γενικά στοιχεία αισθητήρων και σύστημα ελέγχου μέτρησης και ανάδρασης

Οι αισθητήρες είναι ξεχωριστές συσκευές ή περίπλοκες κατασκευές των οποίων η βασική λειτουργία είναι η ανίχνευση ενός φυσικού σήματος ή μιας διέγερσης και η παραγωγή μιας μετρήσιμης εξόδου. Ο αισθητήρας συνήθως είναι ένας μετατροπέας που μετασχηματίζει μία μορφή ενέργειας σε μία άλλη. Η ταξινόμησή τους μπορεί να γίνει με δύο τρόπους.

Αφ' ενός μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την αντίληψη του φυσικού κόσμου, που προϋποθέτει την ενασχόληση με ποικιλόμορφες φυσικές και χημικές ποσότητες, όπου έχουμε τις εξής κατηγορίες αισθητήρων:

- ✓ Θερμικοί: αντιλαμβάνονται θερμοκρασία, θερμότητα, ροή θερμότητας
- ✓ Μηχανικοί: αντιλαμβάνονται δύναμη, πίεση, ταχύτητα, επιτάχυνση, θέση
- ✓ Μαγνητικοί: αντιλαμβάνονται ένταση μαγνητικού πεδίου, πυκνότητα μαγνητικής ροής, μαγνητική τάση
- ✓ Χημικοί: αντιλαμβάνονται συγκέντρωση, σύνθεση ή ρυθμό αντίδρασης
- ✓ Ακτινοβολίας: αντιλαμβάνονται ένταση, μήκος κύματος, πόλωση, φάση

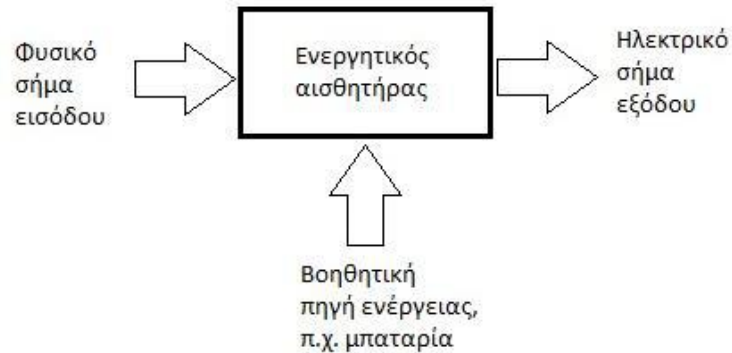
Ένας δεύτερος τρόπος ταξινόμησης των αισθητήρων βασίζεται στο κατά πόσο χρησιμοποιούν ή όχι βοηθητική πηγή ενέργειας για τη λειτουργία τους. Οι αισθητήρες που παράγουν ηλεκτρικό σήμα εξόδου χωρίς βοηθητική πηγή ενέργειας, καλούνται παθητικοί ή αυτοδιεγερόμενου σήματος εξόδου (self-generating).



Εικόνα 1: Παθητικός αισθητήρας

Ένα παράδειγμα αυτού του τύπου αισθητήρα είναι το θερμοστοιχείο το οποίο παράγει μια ηλεκτρεγερτική δύναμη από τη διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ των επαφών του.

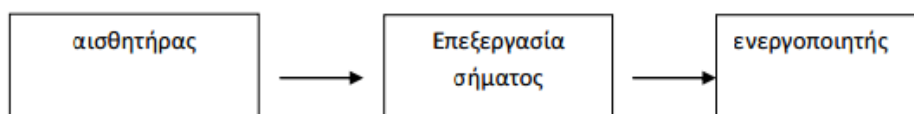
Αντίστοιχα, οι αισθητήρες που παράγουν ηλεκτρικό σήμα εξόδου με τη χρήση βοηθητικής πηγής ενέργειας, καλούνται ενεργητικοί ή διαμορφωμένου σήματος (modulating).



Εικόνα 2: Ενεργητικός αισθητήρας

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι φωτοδίοδοι, τα φωτοκύτταρα και τα θερμίστορ. Στους ενεργητικούς αισθητήρες, η βοηθητική πηγή ενέργειας χρησιμεύει σαν κύρια πηγή για το σήμα εξόδου του αισθητήρα και η μετρούμενη φυσική ποσότητα το διαμορφώνει ενισχύοντας ή υποβιβάζοντάς το.

Όπως προαναφέρθηκε, οι αισθητήρες μετατρέπουν το ηλεκτρικό σήμα που λαμβάνουν στην είσοδό τους σε μία μορφή που μπορεί να γίνει αντιληπτή από τις ανθρώπινες αισθήσεις ή από ένα σύστημα. Ένα απλό διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στην Εικόνα 3.



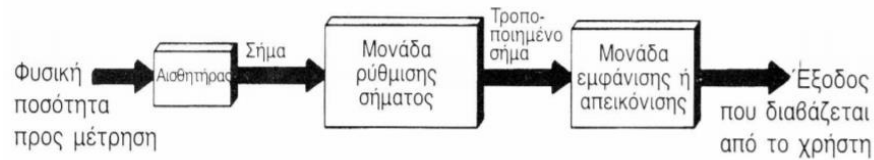
Εικόνα 3: Απλό Διάγραμμα Συστήματος Αισθητήρα

Ένα τυπικό σύστημα αισθητήρων μπορεί να αποτελείται από πολλές και διαφορετικές διατάξεις της σύγχρονης μικροηλεκτρονικής. Οι διατάξεις αυτές ενισχύουν τα αναλογικά σήματα, τα μετατρέπουν σε ψηφιακά και τελικά εισάγουν σε ένα μικροεπεξεργαστή ή ένα μικροελεγκτή τα σήματα που δημιουργούνται από τον αισθητήρα.

Οι κατηγορίες συστημάτων που έχουν εφαρμογή οι αισθητήρες, είναι οι ακόλουθες:

Συστήματα μέτρησης

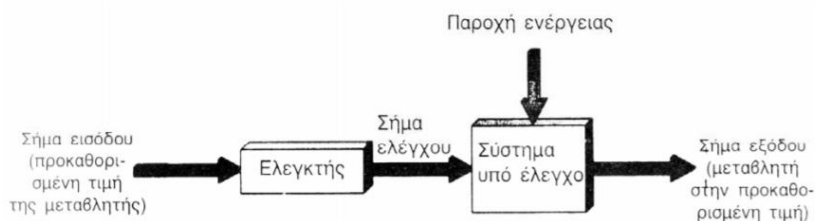
Ένα σύστημα μέτρησης εμφανίζει ή καταγράφει μία ποσοτική έξοδο που αντιστοιχεί στη μεταβλητή που μετρά, αλλά δεν ελέγχει την τιμή της ποσότητας εισόδου.



Εικόνα 4: Λειτουργικά στοιχεία ενός συστήματος μέτρησης

Συστήματα ελέγχου ανοικτού βρόχου

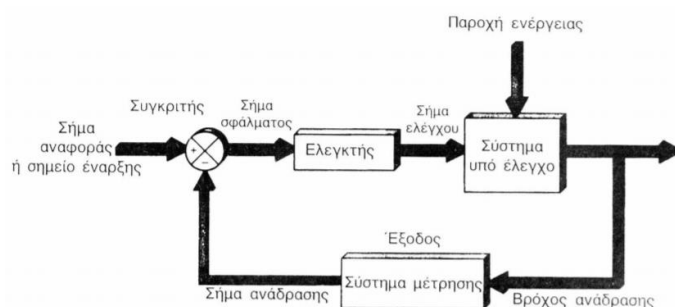
Η έξοδος ενός συστήματος ελέγχου ανοικτού βρόχου ελέγχεται από ένα σήμα που έχει μία προκαθορισμένη τιμή.



Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση συστήματος ανοικτού βρόχου

Συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου

Τέλος, ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου περιλαμβάνει ένα σύστημα μέτρησης και η κατάσταση της εξόδου επηρεάζεται άμεσα από την κατάσταση της εισόδου. Συγκεκριμένα, το σύστημα μετρά την τιμή της ελεγχόμενης παραμέτρου στην έξοδο του συστήματος και τη συγκρίνει με την επιθυμητή τιμή. Η διαφορά μεταξύ των τιμών καλείται σφάλμα.

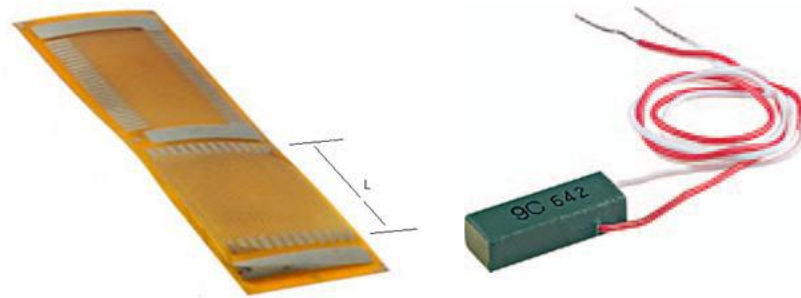


Εικόνα 6: Σχηματική απεικόνιση συστήματος κλειστού βρόχου

1.1 Πιεζοηλεκτρικό στοιχείο

Η ύπαρξη ανάγκης για μελέτη των βιολογικών ιστών (κυττάρων), οδήγησε στην εξεύρεση μιας μεθόδου μετατόπισης αντικειμενοφόρου πλάκας ενός μικροσκοπίου με ακρίβεια της τάξης μερικών νανομέτρων. Η μέθοδος αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση τριών βασικών στοιχείων:

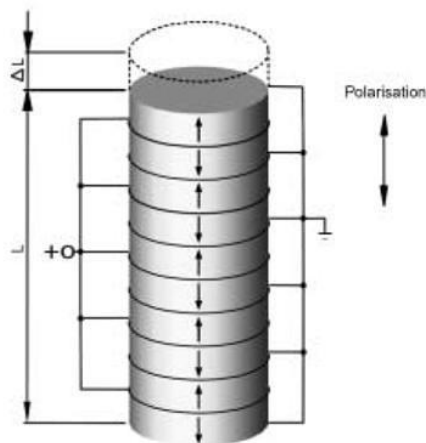
- ✓ ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, ο οποίος δημιουργεί τη μετατόπιση
- ✓ το τροφοδοτικό του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου υψηλής τάσης, το οποίο ελέγχεται μέσω του μικροελεγκτή
- ✓ ένα μετρητή μετατόπισης, του οποίου η αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα με τη μετατόπιση που προκαλεί ο κρύσταλλος. Λόγω του ότι η μεταβολή της αντίστασης είναι πάρα πολύ μικρή, είναι απαραίτητη η συνδεσμολογία γέφυρας και η χρήση ενισχυτή οργάνου



Εικόνα 7: Πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος και αντιστάσεις

Στην παρούσα διπλωματική θα ασχοληθούμε με ένα σύστημα μέτρησης κλειστού βρόχου. Το σύστημά μας αφορά τη μέτρηση μικρής μετατόπισης μέσω μεταβολής της αντίστασης του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου PZS001.

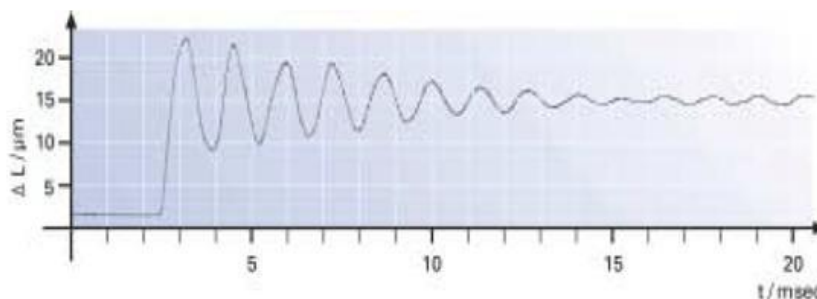
Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική μετατόπιση από την επιβαλλόμενη τάση. Εφαρμόζοντας τάση στον κρύσταλλο, τα μικρότερα κρυσταλλικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται, πολώνονται και προκαλείται μετατόπιση.



Εικόνα 8: Πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι συνδεδεμένοι σε σειρά

Για να προκληθεί η μέγιστη μεταβολή (περίπου 20 μm σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του στοιχείου που διαθέτει το εργαστήριο) χρειάζεται η τοποθέτηση πολλών κρυστάλλων σε σειρά. Η τροφοδοσία τους είναι της τάξεως των 150 V και γίνεται μέσω ενός ειδικού παλμικού τροφοδοτικού. Η σχεδίαση και η ανάλυσή του αφορά ξεχωριστή διπλωματική εργασία.

Σε απότομες μεταβολές της τάσης, ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος παρουσιάζει ταλαντώσεις. Η ταλάντωση αυτή φθίνει, και η τιμή της τείνει να σταθεροποιηθεί με το πέρασμα του χρόνου. Για την μείωση του χρόνου αυτού, χρησιμοποιείται συνήθως ένα ελατήριο το οποίο πιέζει τον κρύσταλλο.

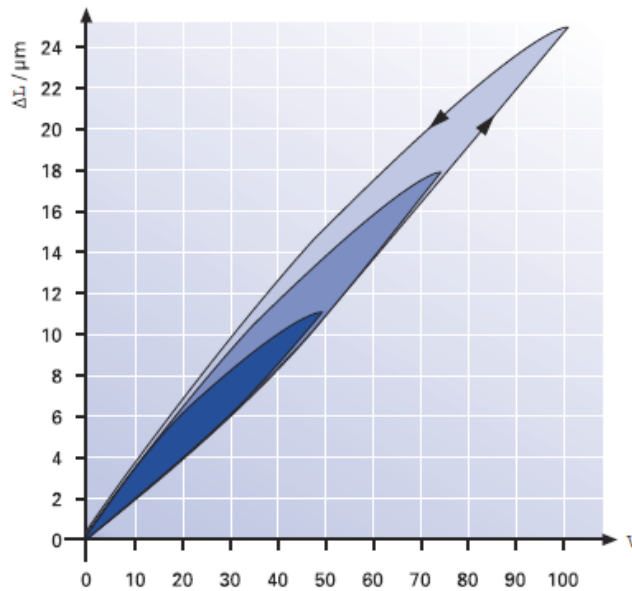


Εικόνα 9: Ταλάντωση πιεζοηλεκτρικού

Στον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο εμφανίζεται μία υστέρηση, η οποία βασίζεται σε επιδράσεις της κρυσταλλικής πόλωσης και σε μοριακή τριβή. Η απόλυτη μετατόπιση που παράγεται από ένα πιεζοηλεκτρικό ανοικτού βρόχου, εξαρτάται από το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται και το κέρδος του πιεζοηλεκτρικού, το οποίο σχετίζεται με την παραμένουσα πόλωση. Δεδομένου ότι η παραμένουσα πόλωση όπως και το κέρδος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων επηρεάζεται από το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται σε αυτά, η μετατόπιση που προκαλείται εξαρτάται κατά βάση από το αν λειτουργήσει

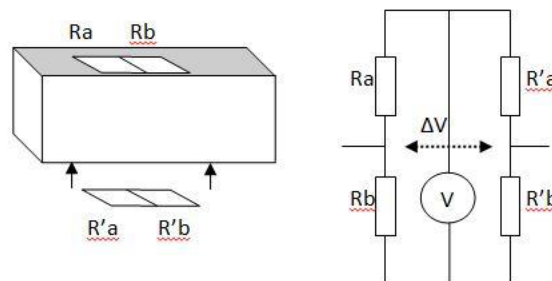
προηγούμενως σε υψηλότερη ή χαμηλότερη τάση. Η υστέρηση είναι τυπικά της τάξης του 10 % έως 15 % της επιθυμητής μετατόπισης.

Η χρήση του ελατηρίου φόρτισης μειώνει το βρόχο υστέρησης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 10, αλλά και τη μέγιστη μετατόπιση.



Εικόνα 10: Υστέρηση πιεζοηλεκτρικού

Για τους παραπάνω λόγους είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα μέτρησης της μετατόπισης και να μη βασιστούμε απλώς στην τροφοδοσία του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Για να μετρήσουμε αυτήν τη μετατόπιση χρησιμοποιούνται αντιστάσεις οι οποίες παραμορφώνονται (strain gauges) όταν προκληθεί κάποια μετατόπιση. Οι αντιστάσεις αυτές προσαρτώνται επάνω στον κρύσταλλο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11.

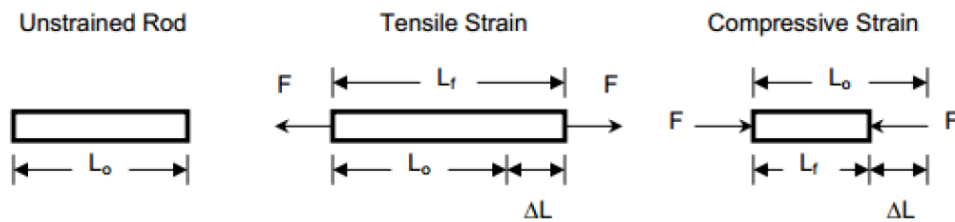


Εικόνα 11: Πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και αντιστάσεις σχηματισμού γέφυρας

Μετατόπιση (Strain)

Η μετατόπιση είναι ένα μέτρο της παραμόρφωσης που προκαλείται σε ένα σώμα εξαιτίας μίας ασκούμενης δύναμης και ορίζεται ως η σχετική μεταβολή του μήκους:

$$strain = \frac{\Delta L}{L}$$

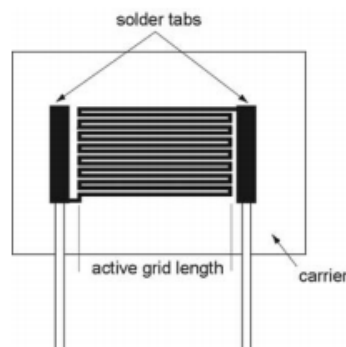


Εικόνα 12: Μετατόπιση

Η μετατόπιση μπορεί να είναι είτε εκτατική (tensile) είτε συμπιεστική (compressive) και εκφράζεται σε τιμές όπως in/in ή mm/mm. Ωστόσο, το μέγεθος της μετρούμενης μετατόπισης είναι πολύ μικρό και συνήθως εκφράζεται σε microstrain, που αντιστοιχεί σε $m * 10^{-6}$.

Αντιστάσεις παραμόρφωσης (Strain Gauges)

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος μέτρησης της μετατόπισης είναι η χρήση ενός μετρητή. Αυτός αποτελεί μία συσκευή της οποίας η ηλεκτρική αντίσταση κυμαίνεται ανάλογα με την ποσότητα παραμόρφωσης της. Ο πιο κοινός μετρητής είναι ο μετρητής σύρματος ή αλλιώς μετρητής μεταβολής αντίστασης.

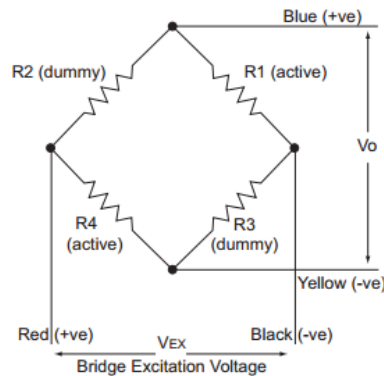


Εικόνα 13: Μετρητής σύρματος ή μετρητής μεταβολής αντίστασης

Ο μετρητής αυτός αποτελείται από ένα πολύ λεπτό σύρμα ή έλασμα, σε μορφή πλέγματος, το οποίο μεγιστοποιεί την ποσότητα του υλικού που υπόκειται σε επιμήκυνση. Αυτό το πλέγμα συνδέεται σε έναν φορέα και στη συνέχεια απευθείας επάνω στο μετρούμενο αντικείμενο. Έτσι, η μεταβολή του μήκους του αντικειμένου μεταφέρεται απευθείας στον μετρητή, ο οποίος διαστέλλεται ή συστέλλεται, προκαλώντας ανάλογη μεταβολή στην ηλεκτρική του αντίσταση.

Οι μετατοπίσεις του συστήματός μας είναι της τάξης των μm , γι' αυτό απαιτείται μεγάλη ευαισθησία μέτρησης των μεταβολών της αντίστασης.

Προκειμένου να μετρηθούν αυτές οι μικρές μεταβολές στην αντίσταση, χρησιμοποιούνται πιεζοαντιστάσεις σε συνδεσμολογία γέφυρας. Σχηματίζεται μία γέφυρα Wheatstone, η οποία αποτελείται από τέσσερις κλάδους αντίστασης και ένα δυναμικό διέγερσης V_{EX} που εφαρμόζεται κατά μήκος της γέφυρας (Εικόνα 14).



Εικόνα 14: Γέφυρα αντιστάσεων

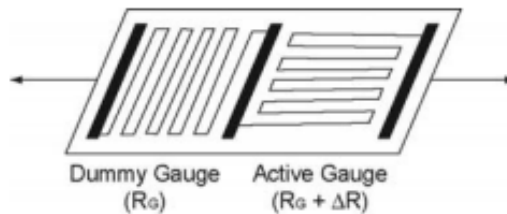
Η τάση εξόδου της γέφυρα V_o , ισούται με:

$$V_o = \left[\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] * V_{EX}$$

Από την παραπάνω σχέση συμπεραίνουμε πως όταν $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$, η τάση εξόδου V_o θα είναι μηδέν και η γέφυρα βρίσκεται σε ισορροπία. Οποιαδήποτε μεταβολή της αντίστασης σε κάποιον κλάδο της γέφυρας θα έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή στη μηδενική τιμή της εξόδου.

Ιδανικά, η αντίσταση του μετρητή θα έπρεπε να αλλάζει μόνο όταν εφαρμόζεται κάποια μετατόπιση. Όμως, το υλικό του, καθώς και το αντικείμενο στο οποίο είναι προσαρτημένος, επηρεάζεται επίσης από αλλαγές της θερμοκρασίας. Χρησιμοποιώντας

την διάταξη γέφυρας, η επίπτωση της θερμοκρασίας μπορεί να ελαχιστοποιηθεί. Για παράδειγμα, στην Εικόνα 15 φαίνεται η διάταξη ενός τέτοιου μετρητή μετατόπισης όπου η μία αντίσταση είναι τοποθετημένη κάθετα στη μετατόπιση (RG + ΔR, Active Gauge), ενώ η δεύτερη αντίσταση (Dummy Gauge) είναι τοποθετημένη εγκάρσια στην εφαρμοζόμενη μετατόπιση.



Εικόνα 15: Πιεζοαντιστάσεις

Η μετατόπιση έχει ελάχιστη επίπτωση στην κάθετη αντίσταση, ενώ η θερμοκρασία επηρεάζει και τους δύο εξίσου. Επειδή οι αλλαγές της θερμοκρασίας και στους δύο μετρητές είναι πανομοιότυπες, ο λόγος των αντιστάσεων δεν αλλάζει. Έτσι, η τάση V_0 δεν αλλάζει και η επίδραση της θερμοκρασίας ελαχιστοποιείται.

Να σημειωθεί ότι οι εξισώσεις που αναφέρονται παραπάνω για τα κυκλώματα γέφυρας Wheatstone αφορούν μία γέφυρα αρχικώς ισορροπημένη, δηλαδή μια γέφυρα που παράγει μηδενική έξοδο όταν δεν προκαλείται κάποια μετατόπιση. Στην πράξη, όμως, η ανοχή των αντιστάσεων και η μετατόπιση που προκαλείται, παράγουν ένα μη μηδενικό αρχικό δυναμικό (offset voltage). Ο τρόπος επίλυσης αυτού του προβλήματος εξετάζεται παρακάτω.

Στην ανάλυσή μας έχουμε υποθέσει ότι η αντίσταση των καλωδίων σύνδεσης είναι μηδενική. Εάν όμως αγνοηθούν στην πράξη, μπορεί να οδηγήσουν σε σφάλμα. Αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί εάν η αντίσταση του σύρματος R_L μετρηθεί και περιληφθεί στους υπολογισμούς. Επιπλέον προβλήματα μπορεί να προκύψουν και από τις αλλαγές της αντίστασης των συρμάτων, λόγω θερμοκρασιακών διακυμάνσεων σε μη ισορροπημένα μήκη σύρματος.

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η μέτρηση της μετατόπισης περιλαμβάνει πάρα πολύ μικρές αλλαγές στην αντίσταση. Για το λόγο αυτό, απαιτείται κατάλληλη επιλογή γέφυρας, επεξεργασία σήματος, καλωδίωσης και εξαρτημάτων συλλογής δεδομένων για αξιόπιστες μετρήσεις. Για να εξασφαλίσουμε επομένως ακριβή αποτελέσματα στις μετρήσεις, είναι σημαντικό να λάβουμε υπόψη μας τις επόμενες παραμέτρους.

Διέγερση (excitation)

Οι επεξεργαστές σήματος του μετρητή μετατόπισης παρέχουν μία σταθερή πηγή τάσης AC ή DC για την γέφυρα. Το συνηθισμένο επίπεδο τάσης διέγερσης είναι μεταξύ των 2 V και 10 V. Παρότι μία υψηλότερη τάση διέγερσης θα προκαλούσε αντίστοιχα υψηλότερη τάση εξόδου, δεν το προτιμούμε διότι μπορεί να προκαλέσει σφάλματα στις μετρήσεις μας λόγω υπερθέρμανσης.

Τηλεπισκόπηση - τηλεανίχνευση (remote sensing)

Το κύκλωμα του μετρητή μετατόπισης πρέπει να τοποθετηθεί όσο το δυνατόν πιο κοντά γίνεται στον επεξεργαστή σήματος και την πηγή διέγερσης. Διαφορετικά, η πτώση τάσης λόγω μεταβολών στην αντίσταση των καλωδίων που συνδέουν την πηγή διέγερσης με την γέφυρα, είναι πιθανή πηγή σφαλμάτων.

Ενίσχυση (amplification)

Η έξοδος του μετρητή καταπόνησης και της γέφυρας είναι σχετικά μικρή, συνήθως οι τιμές εξόδου είναι της τάξης των 100 mV. Συνεπώς, ένα τέτοιο κύκλωμα θα πρέπει περιλαμβάνει στην έξοδό του ένα ενισχυτικό στάδιο για να αυξήσει την ανάλυση της μέτρησης και να βελτιώσει το λόγο σήματος προς θόρυβο.

Φιλτράρισμα (filtering)

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε βαθυπερατά φίλτρα σε συνδυασμό με το μετρητή καταπόνησης ώστε να αφαιρέσουμε τον θόρυβο υψηλών συχνοτήτων που επικρατεί στα περισσότερα περιβάλλοντα εργασίας.

Αντιστάθμιση (offset)

Όπως προαναφέραμε, όταν εγκαθιστούμε μια γέφυρα, είναι σχεδόν απίθανο να είναι ισοσταθμισμένη. Μικρές παραλλαγές στις αντιστάσεις των κλάδων, μπορούν να προκαλέσουν μία αρχική τάση απόκλισης. Η αντιστάθμιση λοιπόν της γέφυρας είναι απαραίτητη και μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε επίπεδο υλικού είτε λογισμικού.

a. Χρήση Λογισμικού

Θα πρέπει να πάρουμε μια αρχική μέτρηση προτού εφαρμοστεί οποιαδήποτε καταπόνηση. Η απόκλιση που θα προκύψει, χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση των

επερχόμενων μετρήσεων. Η μέθοδος αυτή είναι απλή, γρήγορη και δεν απαιτεί χειροκίνητες ρυθμίσεις. Το μειονέκτημά της είναι πως η απόκλιση δεν αφαιρείται από τη γέφυρα. Έτσι, αν η απόκλιση μεγαλώσει αρκετά, περιορίζει το κέρδος του ενισχυτή που μπορεί να εφαρμοστεί στην τάση εξόδου και συνεπώς περιορίζει το δυναμικό εύρος της μέτρησης.

b. *Κύκλωμα Αντιστάθμισης*

Η αντιστάθμιση σε επίπεδο υλικού, μπορεί να γίνει με τη χρήση μίας μεταβλητής αντίστασης έτσι ώστε να προσαρμόσει την έξοδο της γέφυρας στο μηδέν. Εναλλακτικά, ο ενισχυτής του σήματος μπορεί να χρησιμοποιεί την δική του ρύθμιση απαλοιφής της απόκλισης.

Βαθμονόμηση (calibration)

Επειδή είναι δύσκολο να μετρηθεί με ακρίβεια η μικρή μετατόπιση που υφίσταται ο κρύσταλλος, είναι αναγκαίο να γίνει βαθμονόμηση του συστήματος του αισθητήρα και να αναπτυχθεί ένα μέτρο αναφοράς της τιμής της μετατόπισης. Η διαδικασία αυτή γίνεται σε επόμενο στάδιο της ανάπτυξης του συστήματος.

1.1.1 Θεωρητική ανάλυση πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και γέφυρας

Οι μετρητές σύρματος που αναφέραμε και παραπάνω, στηρίζονται στη μεταβολή της τιμής της αντίστασης ενός μεταλλικού σύρματος, όταν μεταβάλλεται το μήκος της κύριας διάστασής του. Για τον υπολογισμό της ποσοτικής σχέσης θεωρούμε την εξίσωση που σχετίζει την αντίσταση του σύρματος με τα φυσικά του χαρακτηριστικά:

$$R = \rho_0 \frac{L}{A}$$

Λόγω του ότι οι μεταβολές της αντίστασης είναι πάρα πολύ μικρές, μπορούμε να προσεγγίσουμε τη μεταβολή αυτή μέσω του διαφορικού της παραπάνω σχέσης.

Συνεπώς, το διαφορικό της παραπάνω σχέσης ως προς τα χαρακτηριστικά του ρ_0 , L και A , μας δίνει:

$$dR = \rho_0 * \frac{1}{A} * dL - \rho_0 * \frac{1}{A^2} * dA + \frac{L}{A} * d\rho_0$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{\rho_0 * \frac{1}{A} * dL - \rho_0 * \frac{1}{A^2} * dA + \frac{L}{A} * d\rho_0}{\rho_0 * \frac{L}{A}}$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho_0}{\rho_0}$$

Θέτοντας τη μεταβολή της επιφάνειας συναρτήσει του μήκους L και ενός συντελεστή μ :

$$\frac{dA}{A} = -\mu \frac{dL}{L}$$

Η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu) \frac{dL}{L} + \frac{d\rho_o}{\rho_o}$$

$$\frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dL}{L}} = (1 + 2\mu) + \frac{\frac{d\rho_o}{\rho_o}}{\frac{dL}{L}} = G_F \text{ (gauge factor)}$$

Επειδή το υλικό του μετρητή είναι το μέταλλο, η μεταβολή της εσωτερικής αντίστασης ρ_o θα είναι αμελητέα σε σχέση με τη μεταβολή του μήκους L και της επιφάνειας A . Επομένως, η ευαισθησία του μετρητή μετατόπισης εκφράζεται με τον μετρητικό παράγοντα (Gauge Factor) G_F και ορίζεται ως η ποσοστιαία μεταβολή της αντίστασης προς την ποσοστιαία μεταβολή του μήκους.

$$G_F = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

Ο μετρητικός παράγοντας του μετρητή μετατόπισης που χρησιμοποιούμε είναι τυπικά ίσος με 2.

Το πιεζοηλεκτρικό που χρησιμοποιούμε στην υλοποίησή μας, έχει τοποθετημένες τις 4 αντιστάσεις σε σχηματισμό γέφυρας (Εικόνα 14), στο πάνω και στο κάτω μέρος του. Και στις δύο πλευρές του πιεζοηλεκτρικού, οι αντιστάσεις είναι τοποθετημένες σύμφωνα με τη διάταξη που φαίνεται στην Εικόνα 15. Μόνο οι αντιστάσεις που είναι εγκάρσια τοποθετημένες στην κατεύθυνση της μετατόπισης, R_1 και R_4 , υφίστανται κάποια μεταβολή.

Παραγωγίζοντας τη συνάρτηση της τάσης εξόδου ως προς τη μεταβολή του μήκους η οποία προκαλείται από τη μεταβολή των αντιστάσεων R_1 και R_4 , προκύπτουν τα εξής:

$$V_o = \left[\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] * V_{EX}$$

$$\begin{aligned}
\frac{dV_o}{dl} &= V_{EX} * \left[\frac{\partial \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)}{\partial R_1} * \frac{\partial R_1}{\partial l} - \frac{\partial \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)}{\partial R_4} * \frac{\partial R_4}{\partial l} \right] \\
&= V_{EX} * \left[\frac{R_1 + R_2 - R_1}{(R_1 + R_2)^2} * \frac{\partial R_1}{\partial l} - \frac{-R_3}{(R_3 + R_4)^2} * \frac{\partial R_4}{\partial l} \right] \\
&= V_{EX} * \left[\frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2} * \frac{\partial R_1}{\partial l} + \frac{R_3}{(R_3 + R_4)^2} * \frac{\partial R_4}{\partial l} \right]
\end{aligned}$$

Υποθέτοντας πως, $R_2 = R_4 = R_G$ και $R_1 = R_3 = R_G$, με R_1 και R_4 ενεργές αντιστάσεις, υφίστανται δηλαδή μία μεταβολή ΔR , η ανωτέρω εξίσωση γράφεται:

$$\begin{aligned}
\frac{dV_o}{dl} &= V_{EX} * \left[\frac{R_G}{(2 * R_G)^2} * \frac{\partial R_G}{\partial l} + \frac{R_G}{(2 * R_G)^2} * \frac{\partial R_G}{\partial l} \right] \\
&= V_{EX} * \left[\frac{2 * R_G}{(2 * R_G)^2} * \frac{\partial R_G}{\partial l} \right]
\end{aligned}$$

$$\frac{dV_o}{dL} = V_{EX} * \left[\frac{1}{2 * R_G} * \frac{dR_G}{dL} \right]$$

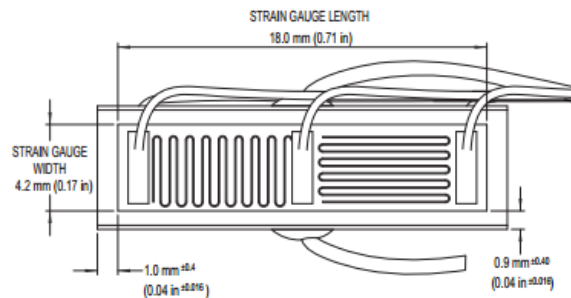
$$dV_o = \frac{V_{EX}}{2 * R_G} * dR_G$$

Για το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο PZS001, από το φύλλο δεδομένων που δίνεται από τον κατασκευαστή, έχουμε τα εξής χαρακτηριστικά

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά του PZS001 πιεζοηλεκτρικού

Μήκος L	18 mm
Μετατόπιση ΔL	17,4 μm ± 2 μm
Αντίσταση R_G[*]	350 Ω
Gauge Factor G_F	2

R_G^{*}: είναι η αντίσταση του κάθε κλάδου της γέφυρας



Εικόνα 16: Πιεζοηλεκτρικό στοιχείο PZS001

Η μεταβολή των αντιστάσεων του μετρητή, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\Delta R = \frac{G_F * \Delta L}{L_0} * R$$

Για τους παρακάτω υπολογισμούς, θεωρείται το μήκος κάθε κλάδου της αντίστασης ίσο με $L_0 = 9 \text{ mm}$.

Για παράδειγμα, αν στο παραπάνω πιεζοηλεκτρικό, μήκους $L = 18 \text{ mm}$ και αντίσταση $R_G = 350 \Omega$, προκληθεί μετατόπιση $\Delta L = 1 \mu\text{m}$, θα υπάρξει μεταβολή στην αντίστασή του ίση με:

$$\Delta R = \frac{G_F * \Delta L}{L_0} * R$$

$$\Delta R = \frac{2 * 1 * 10^{-6}}{9 * 10^{-3}} * 350$$

$$\Delta R \cong 0,077 \Omega$$

Αντίστοιχα, από τα χαρακτηριστικά του στοιχείου που αναφέρονται παραπάνω, η μέγιστη μετατόπιση που μπορεί να προκληθεί είναι περίπου $\Delta L \cong 20 \mu m$. Συνεπώς, η μέγιστη μεταβολή στην αντίστασή του θα είναι:

$$\Delta R = \frac{G_F * \Delta L}{L_0} * R$$

$$\Delta R = \frac{2 * 20 * 10^{-6}}{9 * 10^{-3}} * 350$$

$$\Delta R \cong 1,555 \Omega$$

Παρατηρούμε τις πολύ μικρές μεταβολές των αντιστάσεων. Χρησιμοποιώντας τον τύπου για τη μεταβολή τάσης της γέφυρας, συναρτήσει της μεταβολής της αντίστασης, προκύπτει:

$$\Delta V_o = \frac{V_{EX}}{2 * R_G} * \Delta R_G \rightarrow \Delta V_o = \frac{V_{EX}}{2 * R_G} * \frac{G_F * \Delta L}{L_0} * R_G$$

$$\Delta V_o = \frac{V_{EX}}{2} * \frac{G_F * \Delta L}{L_0}$$

- i. $\Delta V_o \cong 0,555 mV$, για $\Delta L = 1 \mu m$
- ii. $\Delta V_o \cong 11,111 mV$, για $\Delta L = 20 \mu m$

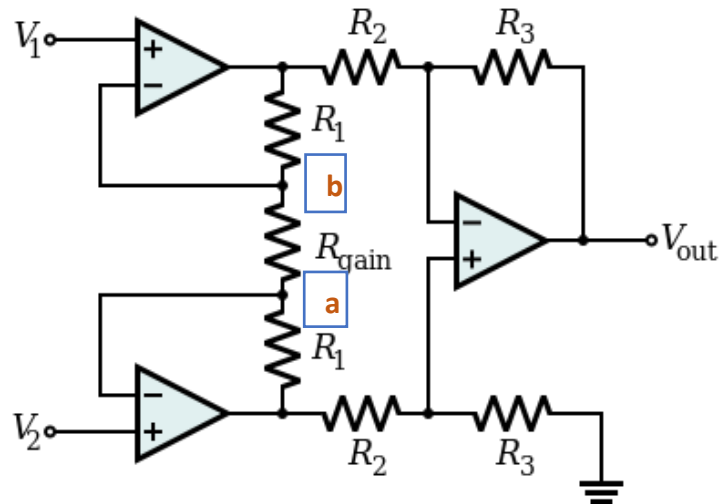
Παρατηρούμε ότι η τάση εξόδου της γέφυρας είναι πολύ μικρή, της τάξης μερικών mV. Για να μπορέσουμε να αξιοποιήσουμε αυτή την τιμή, είναι αναγκαία η χρήση ενός ισχυρού ενισχυτικού σταδίου, που θα αυξήσει την ανάλυση των μετρήσεών μας, χωρίς να προκληθεί επιπλέον θόρυβος στο σήμα μας.

Ένας τρόπος για να ενισχύσουμε τα σήματα που λαμβάνονται από τη γέφυρα είναι με τη χρήση του ενισχυτή οργάνου μέτρησης.

1.1.1 Ενισχυτής Οργάνου (Instrumentation Amplifier)

Ένας ενισχυτής οργάνου μέτρησης, είναι ένα είδος διαφορικού ενισχυτή, ο οποίος δέχεται τα σήματα εισόδου του μέσα από απλούς ενισχυτές.

Το πιο σύνηθες κύκλωμα του ενισχυτή οργάνου μέτρησης είναι το ακόλουθο:



Εικόνα 17: Κύκλωμα ενισχυτή οργάνου

Στην Εικόνα 17 παρουσιάζονται τα δύο στάδια του ενισχυτή οργάνου μέτρησης. Το πρώτο στάδιο αποτελείται από τους τελεστικούς ενισχυτές A_1 , A_2 και τις αντιστάσεις ανάδρασης R_G και R_1 . Οι ενισχυτές A_1 και A_2 χρησιμοποιούν μη-αναστρέφουσα συνδεσμολογία και λειτουργούν σαν ακόλουθοι τάσης. Με αυτήν την συνδεσμολογία επιτυγχάνεται πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου.

Τα εικονικά βραχυκυκλώματα στις εισόδους των τελεστικών A_1 και A_2 προκαλούν την εμφάνιση των τάσεων U_1 και U_2 στους ακροδέκτες της αντίστασης R_G . Έτσι, η διαφορική τάση εισόδου που εμφανίζεται στα άκρα της R_G προκαλεί ροή ρεύματος:

$$I_{RG} = \frac{U_{id}}{R_G} = \frac{U_1 - U_2}{R_G}$$

το οποίο διαρρέει και τις δύο αντιστάσεις R_1 των αναδράσεων.

Το ρεύμα αυτό, προκαλεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις εξόδους των τελεστικών A_1 και A_2 του πρώτου σταδίου, ίση με:

$$\Delta U_o = U_{o1} - U_{o2} = I_{RG} * (2 * R_1 + R_G)$$

Με αντικατάσταση της σχέσης του ρεύματος, η διαφορά δυναμικού είναι:

$$\Delta U_o = \left(1 + \frac{2 * R_1}{R_G}\right) * U_{id}$$

Συνεπώς, το κέρδος του πρώτου σταδίου είναι:

$$G_1 = \left(1 + \frac{2 * R_1}{R_G}\right)$$

Η τάση εξόδου U_{o1} και U_{o2} των ενισχυτών A_1 και A_2 αντίστοιχα, εξαρτάται εξίσου από τα σήματα εισόδου U_1 και U_2 .

Για να μελετήσουμε ξεχωριστά την έξοδο του κάθε ενισχυτή ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία, μηδενίζοντας κάθε φορά τη μία από τις δύο εισόδους, του πρώτου σταδίου.

Εάν θεωρήσουμε $U_2 = 0$, τότε ο κόμβος a, όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 17*, βραχυκυκλώνεται εικονικά και ο A_1 λειτουργεί σαν μη-αναστρέφων ενισχυτής με κέρδος:

$$U_{o1} = \left(\frac{R_1 + R_G}{R_G}\right) * U_1$$

Αντίστοιχα, αν θεωρήσουμε $U_1 = 0$, τότε ο κόμβος b βραχυκυκλώνεται εικονικά, και ο A_1 λειτουργεί σαν αναστρέφων ενισχυτής με κέρδος:

$$U_{o1} = \left(-\frac{R_1}{R_G}\right) * U_2$$

Επομένως, το σήμα εξόδου του A_1 ενισχυτή ως προς τη γη, προσθέτοντας τα δεύτερα μέλη των παραπάνω εξισώσεων, δίνεται από τη σχέση:

$$U_{o1} = \left(\frac{R_1 + R_G}{R_G}\right) * U_1 - \left(\frac{R_1}{R_G}\right) * U_2$$

$$U_{o1} = \left(\frac{R_1}{R_G}\right) * (U_1 - U_2) + U_1$$

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία και για τον τελεστικό ενισχυτή A_2 , προκύπτει ότι η έξοδος του θα είναι:

$$U_{o2} = \left(\frac{R_1}{R_G}\right) * (U_1 - U_2) + U_2$$

Στο δεύτερο στάδιο έχουμε τον ενισχυτή διαφορών, ή αλλιώς αφαιρέτη, που υλοποιείται με τον τελεστικό ενισχυτή A_3 και τις αντιστάσεις ανάδρασης R_2 και R_3 . Ο ενισχυτής διαφορών, ιδανικά, ενισχύει το διαφορικό σήμα εισόδου και απορρίπτει το κοινό σήμα εισόδου. Ο A_3 ενισχυτής δέχεται στην είσοδό του τη διαφορά δυναμικού $(U_{o1} - U_{o2})$, που είναι οι έξοδοι των ενισχυτών του πρώτου σταδίου.

Συνεπώς, στην έξοδο του δεύτερου σταδίου έχουμε την τάση:

$$U_o = \left(\frac{R_3}{R_2}\right) * (U_{o2} - U_{o1})$$

Το κέρδος του δεύτερου σταδίου είναι:

$$G_2 = \left(\frac{R_3}{R_2}\right)$$

Με αντικατάσταση των U_{o1} και U_{o2} , στη σχέση εξόδου του δεύτερου σταδίου, προκύπτει η σχέση:

$$U_o = (U_2 - U_1) * \left(1 + \frac{2 * R_1}{R_G}\right) * \left(\frac{R_3}{R_2}\right)$$

Επομένως, το διαφορικό κέρδος του ενισχυτή οργάνου, είναι:

$$G = G_1 * G_2 = \left(1 + \frac{2 * R_1}{R_G}\right) * \left(\frac{R_3}{R_2}\right)$$

Συνήθως, στη υλοποίηση ενός ενισχυτή οργάνου, προτιμάται να λαμβάνεται το απαιτούμενο συνολικό κέρδος ή τουλάχιστον ένα ποσοστό του διαφορικού κέρδους στο πρώτο στάδιο του ενισχυτή και να επιτελείται η διαφορική λειτουργία στο δεύτερο στάδιο. Για το λόγο αυτό, το δεύτερο στάδιο του ενισχυτή, σχεδιάζεται για αρκετά μικρό διαφορικό κέρδος.

Στην ιδανική περίπτωση, ο ενισχυτής διαφορών (A_3) ενισχύει μόνο το διαφορικό σήμα εισόδου ΔU_o και απορρίπτει το κοινό σήμα εισόδου U_{CM} . Στην πράξη όμως, ο ενισχυτής αυτός παρέχει μία τάση εξόδου όπου δίνεται από τη σχέση:

$$U_o = G * \Delta U_o + A_{CM} U_{CM}$$

όπου A_{CM} είναι το κέρδος κοινού σήματος (ιδανικά θα πρέπει να είναι μηδέν). Η αποτελεσματικότητα ενός διαφορικού ενισχυτή μετράται βάσει του βαθμού κατά τον οποίο απορρίπτει το κοινό σήμα. Η συμπεριφορά αυτή ποσοτικοποιείται με ένα μέγεθος το οποίο αποκαλείται *λόγος απόρριψης κοινού σήματος* στην είσοδο του ενισχυτή διαφορών (Common Mode Rejection Ratio). Ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος στην είσοδο του ενισχυτή διαφορών (CMRR) ορίζεται ως ο λόγος του κέρδους του διαφορικού σήματος στην είσοδο ως προς το κέρδος του κοινού σήματος στην είσοδο.

$$CMRR = \frac{A_D}{A_{CM}}$$

Όπου A_D είναι το διαφορικό κέρδος και A_{CM} είναι το κέρδος κοινού σήματος. Ενδεικτικές τιμές του κέρδους κοινού σήματος είναι της τάξης του 1/1000. Το διαφορικό κέρδος εξαρτάται από το εύρος του σήματος που θέλουμε να ενισχύσουμε και τα όρια της τάσης εξόδου του ενισχυτή.

Πολλές φορές ο λόγος απόρριψης του κοινού σήματος εκφράζεται σε dB μέσω της σχέσης:

$$CMRR = 20 * \log\left(\frac{A_D}{A_{CM}}\right)$$

Ικανοποιητικές τιμές για το CMRR είναι πάνω από 90dB. Όσο αυξάνει το διαφορικό κέρδος A_D τόσο αυξάνει και ο λόγος απόρριψης του κοινού σήματος. Αν δύο ενισχυτές έχουν ίδιο κέρδος κοινού σήματος A_{CM} , αλλά ο ένας έχει μεγαλύτερο διαφορικό κέρδος σε σχέση με τον δεύτερο, τότε θα είναι διαφορετικοί και οι λόγοι απόρριψης κοινού σήματος. Το γεγονός αυτό δημιουργεί πρόβλημα καθώς και οι δύο ενισχυτές αποσβένουν το κοινό σήμα στην είσοδό τους με τον ίδιο τρόπο όμως έχουν διαφορετικούς λόγους απόρριψης κοινού σήματος. Όταν θέλουμε να έχουμε μεγάλη απόρριψη κοινού σήματος από έναν ενισχυτή πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά το κέρδος κοινού σήματος. Ικανοποιητικές τιμές για το κέρδος κοινού σήματος A_{CM} είναι οι τιμές μικρότερες από -50db, που σημαίνει ότι η απόσβεση του κοινού σήματος στην είσοδο να είναι μεγαλύτερη από 50dB.

Κοινό σήμα στην είσοδο του ενισχυτή σημαίνει ότι και στις δύο εισόδους του ενισχυτή θα παρουσιαστεί το ίδιο ακριβώς σήμα. Το σήμα αυτό συνήθως είναι θόρυβος και

πρέπει να αποσβεστεί σημαντικά ώστε να εμφανίζεται στην έξοδο του ενισχυτή ένα ελάχιστο κλάσμα του αρχικού κοινού σήματος.

Ανάλογα με την ανάλυση για το διαφορικό κέρδος, τα εικονικά βραχυκυκλώματα στις εισόδους των τελεστικών A_1 και A_2 , προκαλούν την εμφάνιση της κοινής τάσης εισόδου στους ακροδέκτες της αντίστασης R_G . Επειδή οι δύο αυτές τάσεις είναι ίδιες, δε διαρρέεται ρεύμα δια μέσω των αντιστάσεων ανάδρασης του πρώτου σταδίου. Έτσι, οι τάσεις εξόδου των τελεστικών A_1 και A_2 θα είναι ίσες με τις κοινές τάσεις εισόδου. Ουσιαστικά, το κοινό σήμα στην είσοδο του ενισχυτή οργάνου δεν ενισχύεται από το πρώτο στάδιο αλλά μεταφέρεται στην έξοδό του με μοναδιαίο κέρδος. Στην περίπτωση αυτή, το δεύτερο στάδιο δέχεται ένα διαφορικό σήμα ενισχυμένο με το κέρδος G_1 και το αρχικό κοινό σήμα, οπότε οι συνθήκες είναι σαφώς καλύτερες. Όπως αναφέραμε και παραπάνω, το δεύτερο στάδιο του ενισχυτή έχει αρκετά μικρό διαφορικό κέρδος ή και καθόλου οπότε η σημαντικότερη λειτουργία του είναι η απόσβεση του κοινού σήματος που δέχεται στην είσοδο.

Οι ενισχυτές οργάνων μέτρησης χρησιμοποιούνται σε συστήματα όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια και σταθερότητα του κυκλώματος τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα.

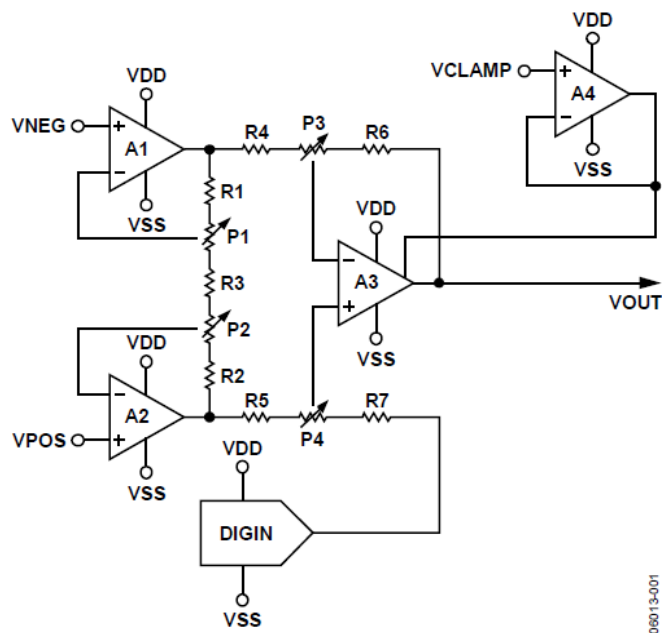
Φυσικό είναι στην υλοποίηση του ενισχυτή να υπάρχει κάποιο στατικό σφάλμα, το οποίο θα εμφανίζεται στην έξοδο. Ο υπολογισμός αυτού του σφάλματος είναι απαραίτητος για μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων μας.

1.1.1.1 Σύντομη περιγραφή του ενισχυτή οργάνου AD8557

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η τάση εξόδου της γέφυρας μπορεί να είναι μεταξύ των 0,6 mV έως 12 mV. Η τάση αυτή αποτελεί και την είσοδο του ενισχυτή οργάνου. Επιπλέον, επιθυμούμε ο θόρυβος στην είσοδο του ενισχυτή να είναι το πολύ 12 μ V. Μετά από κατάλληλη έρευνα για τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ο ενισχυτής οργάνου για να καλύπτει τις ανάγκες της συγκεκριμένης κατασκευής, επιλέχτηκε ο ενισχυτής AD8557.

Ο AD8557 είναι ένας ενισχυτής οργάνου σχεδιασμένος έτσι ώστε να μπορεί να μετατρέπει εύκολα και με ακρίβεια μεταβλητές εξόδων αισθητήρων, σε ένα καλά προσδιορισμένο εύρος τάσης.

Το κύκλωμά του χωρίζεται σε δύο στάδια κέρδους και αποτελείται από μία τυπική διάταξη τριών τελεστικών ενισχυτών σε συνδυασμό με αντιστάσεις και ψηφιακά ποτενσιόμετρα. Επιπλέον, περιέχει δύο ψηφιακούς διαύλους επικοινωνίας (DIGIN, DIGOUT) με τον εκάστοτε μετατροπέα ADC ή DAC. Τέλος, είναι εφοδιασμένος με έναν επιπλέον τελεστικό ενισχυτή μέσω του οποίου περιορίζει την μέγιστη τάση στο κύκλωμα, VCLAMP.



Εικόνα 18: Ηλεκτρικό κύκλωμα του ενισχυτή οργάνου AD8557

Παρότι έχει κάποια σύνθετα χαρακτηριστικά για τον προσδιορισμό μόνιμου κέρδους μέσω της λειτουργίας τήξης (fuse), έχει και κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα που μπορούν να αξιοποιηθούν στο συγκεκριμένο κύκλωμα που σχεδιάζουμε. Αυτά είναι, πρώτον, η ιδιότητα ψηφιακού προγραμματισμού του κέρδους του ενισχυτή σε πολλές

τιμές που προσφέρουν ευελιξία και δυνατότητα ακρίβειας ως προς την ενίσχυση. Δεύτερον, έχει επίπεδα θορύβου αρκετά χαμηλά σε ευνοϊκά πλαίσια για την υλοποίησή μας. Τέλος, έχει τη δυνατότητα επαναπρογραμματισμού, εφόσον δεν γίνει χρήση της λειτουργίας τήξης.

Το κέρδος αυτού του ενισχυτή μπορεί να προγραμματιστεί ψηφιακά, σε ένα μεγάλο εύρος τιμών από 28 έως 1300, μέσω μίας διεπαφής σειριακών δεδομένων. Οι τιμές του κέρδους αναφέρονται στο τελικό κέρδος που προκύπτει από τα δύο στάδια ενίσχυσης. Το πρώτο στάδιο ρυθμίζεται από ένα σύνολο αντιστάσεων και τις τιμές δύο ψηφιακών ποτενσιομέτρων και παίρνει τιμές από 2.8 έως 5.2, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2, με ανάλυση 7-bit, προσδιορίζοντας το κέρδος με ακρίβεια της τάξης του 0.49 %. Το δεύτερο στάδιο ρυθμίζεται από ένα διαφορετικό σετ αντιστάσεων και ψηφιακών ποτενσιομέτρων, ώστε να κυμαίνεται μεταξύ του 10 και του 250, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.

Ενδεικτικά, οι πίνακες που δίνουν το κέρδος κάθε σταδίου φαίνονται στην επόμενη σελίδα.

Πίνακας 2: Κέρδος πρώτου σταδίου – Κωδικός κέρδους πρώτου σταδίου

First Stage Gain Code	First Stage Gain	First Stage Gain Code	First Stage Gain	First Stage Gain Code	First Stage Gain	First Stage Gain Code	First Stage Gain
0	2.800	32	3.273	64	3.825	96	4.471
1	2.814	33	3.289	65	3.844	97	4.493
2	2.827	34	3.305	66	3.863	98	4.515
3	2.841	35	3.321	67	3.881	99	4.537
4	2.855	36	3.337	68	3.900	100	4.559
5	2.869	37	3.353	69	3.919	101	4.581
6	2.883	38	3.370	70	3.939	102	4.603
7	2.897	39	3.386	71	3.958	103	4.626
8	2.911	40	3.403	72	3.977	104	4.649
9	2.926	41	3.419	73	3.997	105	4.671
10	2.940	42	3.436	74	4.016	106	4.694
11	2.954	43	3.453	75	4.036	107	4.717
12	2.969	44	3.470	76	4.055	108	4.740
13	2.983	45	3.487	77	4.075	109	4.763
14	2.998	46	3.504	78	4.095	110	4.786
15	3.012	47	3.521	79	4.115	111	4.810
16	3.027	48	3.538	80	4.135	112	4.833
17	3.042	49	3.555	81	4.156	113	4.857
18	3.057	50	3.573	82	4.176	114	4.881
19	3.072	51	3.590	83	4.196	115	4.905
20	3.087	52	3.608	84	4.217	116	4.929
21	3.102	53	3.625	85	4.237	117	4.953
22	3.117	54	3.643	86	4.258	118	4.977
23	3.132	55	3.661	87	4.279	119	5.001
24	3.147	56	3.679	88	4.300	120	5.026
25	3.163	57	3.697	89	4.321	121	5.050
26	3.178	58	3.715	90	4.342	122	5.075
27	3.194	59	3.733	91	4.363	123	5.100
28	3.209	60	3.751	92	4.384	124	5.125
29	3.225	61	3.770	93	4.406	125	5.150
30	3.241	62	3.788	94	4.427	126	5.175
31	3.257	63	3.806	95	4.449	127	5.200

Πίνακας 3: Κέρδος δεύτερου σταδίου και εύρος συνολικού κέρδους – Κωδικός δεύτερου σταδίου

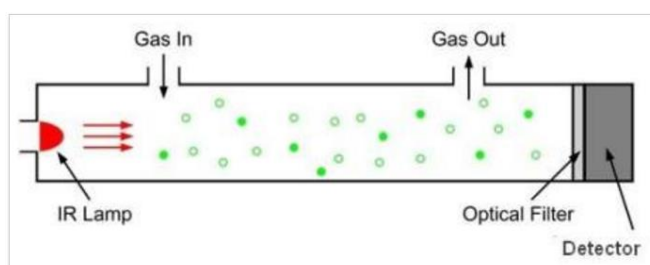
Second Stage Gain Code	Second Stage Gain	Minimum Combined Gain	Maximum Combined Gain
0	10	28.0	52.0
1	16	44.8	83.2
2	25	70.0	130.0
3	40	112.0	208.0
4	63	176.4	327.6
5	100	280.0	520.0
6	160	448.0	832.0
7	250	700.0	1300.0

1.2 Κύκλωμα αισθητήρων διοξειδίου του άνθρακα και υγρασίας-θερμοκρασίας

Σε κάποιες από τις μελέτες και αναλύσεις που γίνονται στο εργαστήριο, απαιτείται η μέτρηση των επιπέδων του διοξειδίου του άνθρακα στο χώρο που πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Μία από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους μέτρησης των επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα, είναι η μέθοδος Μη-Διασπειρόμενης Υπέρυθρης Ακτινοβολίας (Non-Dispersive InfraRed – NDIR). Επειδή όμως τέτοιου είδους αισθητήρες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στις περιβαλλοντικές συνθήκες, είναι απαραίτητος ο ταυτόχρονος έλεγχος των επιπέδων της θερμοκρασίας και της υγρασίας του περιβάλλοντος χώρου.

1.2.1 Μέθοδος μη-διασπειρόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας (NDIR) και πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές

Ένας αισθητήρας NDIR, λειτουργεί σαν ένας αισθητήρας φασματοσκοπίας που συχνά χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής αερίων, όπως διοξείδιο ή μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο θείου, άζωτο, κ.α. Η μέθοδος λέγεται μη διασπειρόμενη, με την έννοια της χρωματικής διασποράς, δηλαδή η υπέρυθρη ακτινοβολία επιτρέπεται να περάσει μέσω της κοιλότητας του ατμοσφαιρικού δείγματος χωρίς να υπόκειται σε χρωματική διασπορά ή αλλιώς αλλοίωση.



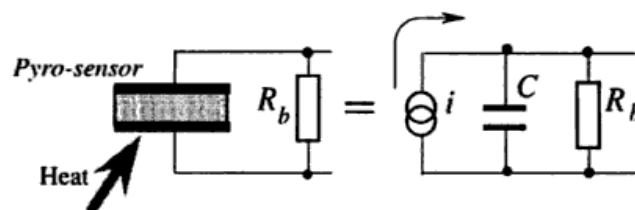
Εικόνα 19: NDIR αισθητήρας

Τα κύρια στοιχεία ενός αισθητήρα NDIR είναι μία πηγή υπέρυθρων (λάμπα), μία δειγματική οπτική κοιλότητα, ένα φίλτρο φως και ένας ανιχνευτής υπέρυθρων. Η υπέρυθρη ακτινοβολία κατευθύνεται μέσω της κοιλότητας προς τον ανιχνευτή. Παράλληλα σε αυτήν την κοιλότητα υπάρχει μία δεύτερη, όπου περιέχει ένα αέριο αναφοράς, συνήθως άζωτο. Το αέριο στην δειγματική κοιλότητα προκαλεί απορρόφηση σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, σύμφωνα με το νόμο Beer-Lambert. Στον ανιχνευτή μετράται η εξασθένιση αυτών των μηκών κύματος ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η

συγκέντρωση του αερίου. Το οπτικό φίλτρο που είναι τοποθετημένο μπροστά στον ανιχνευτή, εξαλείφει όλα τα μήκη κύματος εκτός από εκείνα που μπορούν να απορροφήσουν τα μόρια του επιλεγμένου αερίου.

Ο ανιχνευτής υπερύθρων μπορεί να είναι ένα θερμοηλεκτρικό ή ένα πυροηλεκτρικό στοιχείο. Στην παρούσα διπλωματική θα χρησιμοποιήσουμε αισθητήρα που είναι βασισμένος στη λειτουργία του πυροηλεκτρικού στοιχείου.

Για την κατασκευή τέτοιων αισθητήρων, χρησιμοποιούνται πυροηλεκτρικά υλικά σε μορφή λεπτών τεμαχίων ή μεμβρανών με ηλεκτρόδια στις απέναντι πλευρές, για να συγκεντρώνουν τα θερμικώς προκαλούμενα ρεύματα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 20.



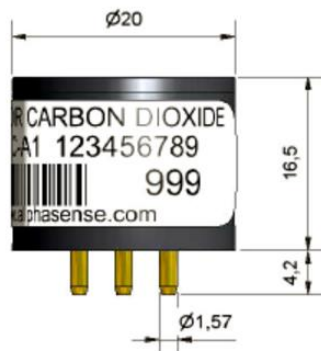
Εικόνα 20: Πυροηλεκτρικός αισθητήρας και ισοδύναμο κύκλωμα

Ο πυροηλεκτρικός ανιχνευτής είναι ουσιαστικά ένας πυκνωτής που μπορεί να φορτιστεί από μία εισροή ρεύματος. Ο ανιχνευτής δεν απαιτεί κανένα εξωτερικό δυναμικό πόλωσης, δηλαδή κάποιο σήμα διέγερσης. Χρειάζεται μόνο ένα κατάλληλο ηλεκτρικό κύκλωμα διεπαφής, ικανό να μετρήσει το ρεύμα. Στην Εικόνα 20 απεικονίζεται ένας πυροηλεκτρικός ανιχνευτής (πυρο-αισθητήρας) συνδεδεμένος με μία αντίσταση R_b , που αντιπροσωπεύει είτε την εσωτερική αντίσταση διαρροών είτε μία συνδυασμένη αντίσταση εισόδου του κυκλώματος διεπαφής που συνδέεται με τον αισθητήρα. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του αισθητήρα φαίνεται στα δεξιά. Αποτελείται από τρία μέρη, την πηγή ρεύματος που παράγει ένα θερμικά προκαλούμενο ρεύμα i , τη χωρητικότητα του αισθητήρα C και την αντίσταση διαρροών R_b .

Οι πυροηλεκτρικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση κάποιας μεταβαλλόμενης θερμικής ακτινοβολίας ή μίας ροής θερμότητας. Μερικά παραδείγματα τέτοιων αισθητήρων, είναι οι ανιχνευτές κίνησης για συστήματα ασφαλείας και διακόπτες ελέγχου φωτός, στιγμιαία ιατρικά θερμομέτρα υπερύθρων και μετρητές ισχύος λέιζερ. Επιπλέον, οι πυροηλεκτρικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε συστήματα μέτρησης επιπέδων συγκέντρωσης αερίων, όπως στην περίπτωση του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), η οποία εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

1.1.1.1 Αισθητήρας IRC-A1 NDIR

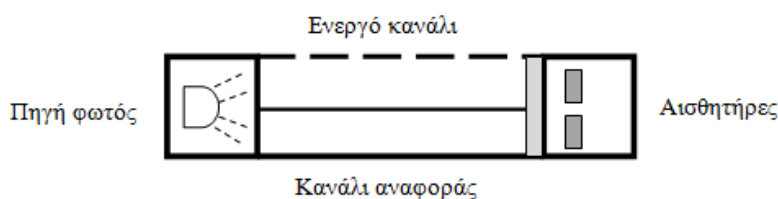
Για το κύκλωμά μας επιλέχτηκε ο αισθητήρας IRC-A1 Alphasense, 0-20% vol (Combustion) ο οποίος χρησιμοποιεί τη μέθοδο NDIR για να προσδιορίσει τη συγκέντρωση αερίου CO₂.



Εικόνα 21: Αισθητήρας CO₂ IRC-A1

Αποτελείται από μία πηγή υπερύθρων, μία οπτική κοιλότητα, έναν πυροηλεκτρικό ανιχνευτή διπλού καναλιού και ένα εσωτερικό θερμίστορ. Το αέριο διαχέεται εντός της οπτικής κοιλότητας. Το φως που προέρχεται από την πηγή υπερύθρων, περνά μέσω της οπτικής κοιλότητας όπου αλληλοεπιδρά με το αέριο προτού προσπέσει στον ανιχνευτή.

Ορισμένα αέρια απορροφούν υπέρυθρη ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, τις λεγόμενες ζώνες απορρόφησης. Για τον αισθητήρα διοξειδίου του άνθρακα η απορρόφηση υφίσταται στα 4260 nm. Ο ανιχνευτής διπλού καναλιού απαρτίζεται από ένα ενεργό κανάλι και ένα κανάλι αναφοράς.



Εικόνα 22: Αισθητήρας NDIR CO₂ διπλού καναλιού

Το σύστημα είναι εφοδιασμένο με ένα φίλτρο το οποίο επιτρέπει να περάσει μόνο το φως με μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη ζώνη απορρόφησης του εξεταζόμενου αερίου. Η ένταση του φωτός που ανιχνεύεται από το κανάλι αναφοράς, δεν επηρεάζεται από την παρουσία αερίου. Η χρήση του καναλιού αναφοράς επιτρέπει την αντιστάθμιση των διακυμάνσεων της έντασης του φωτός. Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται σε

αυτά τα συστήματα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να παρακολουθείται συνεχώς η θερμοκρασία για να αντισταθμίζεται η έξοδος. Για το σκοπό αυτό, ο αισθητήρας IRC-A1 διαθέτει εσωτερικά ένα θερμίστορ. Το κανάλι αναφοράς του ανιχνευτή από την πλευρά του είναι εφοδιασμένο με ένα φίλτρο που επιτρέπει να περνάνε μόνο μήκη κύματος φωτός που δεν ανήκουν στις ζώνες απορρόφησης.

Για να ληφθούν χρήσιμα σήματα από τον ανιχνευτή ενός NDIR αισθητήρα, εφαρμόζεται ένας τετραγωνικός παλμός, συχνότητας 1 Hz έως 3 Hz και 50% duty cycle¹, μέσω του μικροελεγκτή, προκαλώντας στην έξοδό του την εμφάνιση μιας διαφοράς δυναμικού ανάλογης της συγκέντρωσης CO₂. Μία σταθερή παροχή ενέργειας στον αισθητήρα, θα είχε ως αποτέλεσμα τη θερμική ισορροπία του συστήματος. Συνεπώς η τάση στην έξοδο του αισθητήρα θα ήταν σταθερή.

¹ Ο χρόνος που ένα σήμα ή ένα σύστημα είναι ενεργό

1.2.2 Αισθητήρας υγρασίας - θερμοκρασίας ChipCap2

Ο αισθητήρας υγρασίας-θερμοκρασίας χρησιμεύει στην επαλήθευση της ορθότητας των αποτελεσμάτων του αισθητήρα του διοξειδίου του άνθρακα.

Ως *υγρασία* ορίζουμε την περιεκτικότητα των υδρατμών στον αέρα ή άλλα αέρια. Οι μετρήσεις υγρασίας μπορούν να διατυπωθούν με διάφορους όρους και μονάδες. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι όροι είναι οι εξής:

- ✓ *Απόλυτη υγρασία* (Absolute Humidity - AH) είναι η αναλογία της μάζας υδρατμών προς τον όγκο του αέρα ή αερίου (gr/m³).
- ✓ *Σημείο υγροποίησης* (Dew point) (°C ή °F) είναι η θερμοκρασία και πίεση στην οποία το αέριο ξεκινά να υγροποιείται.
- ✓ *Σχετική υγρασία* (Relative Humidity - RH) είναι η αναλογία (%) της περιεκτικότητας σε υγρασία του αέρα, συγκρινόμενη στο επίπεδο κορεσμένης υγρασίας, στην ίδια θερμοκρασία και πίεση.

Το ενδιαφέρον της παρούσας εργασίας εστιάζεται στην σχετική υγρασία.

Τα είδη των αισθητήρων RH είναι τα εξής:

- ✓ Κεραμικοί
- ✓ Ημιαγωγοί
- ✓ Πολυμερείς, οι οποίοι χωρίζονται σε:
 - *Αισθητήρες RH αντίστασης*: αντιλαμβάνονται αλλαγές στην τιμή της αντίστασης του υλικού ανίχνευσης, με κάθε αλλαγή στην υγρασία.
 - *Χωρητικοί αισθητήρες RH*: είναι στην ουσία ένας πυκνωτής που έχει ως διηλεκτρικό ένα φιλμ πολυμερούς ευαίσθητο στην υγρασία.

Οι αισθητήρες υγρασίας αποτελούνται από ένα υγροσκοπικό διηλεκτρικό υλικό που βρίσκεται ανάμεσα σε ένα ζεύγος ηλεκτροδίων, δημιουργώντας έναν μικρό πυκνωτή. Οι περισσότεροι χωρητικού τύπου αισθητήρες χρησιμοποιούν ένα πλαστικό ή ένα πολυμερές ως διηλεκτρικό υλικό, με τυπική διηλεκτρική σταθερά μεταξύ 2 και 15. Με την απουσία υγρασίας η διηλεκτρική σταθερά του υγροσκοπικού διηλεκτρικού υλικού και η γεωμετρία του αισθητήρα καθορίζουν την τιμή της χωρητικότητας.

Σε κανονική θερμοκρασία δωματίου η διηλεκτρική σταθερά των ατμών του νερού έχει τιμή περίπου στα 80, που είναι πολύ μεγαλύτερη από την σταθερά του αισθητήρα. Έτσι, η απορρόφηση υδρατμών από τον αισθητήρα οδηγεί σε αύξηση της χωρητικότητάς του. Σε συνθήκες ισορροπίας, η ποσότητα υγρασίας που είναι παρούσα σε ένα υγροσκοπικό υλικό εξαρτάται από την θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλά και την πίεση των υδρατμών

του περιβάλλοντος. Εξ' ορισμού, η σχετική υγρασία είναι μία συνάρτηση και των δύο συνθηκών περιβάλλοντος, δηλαδή της θερμοκρασίας και της πίεσης υδρατμών. Για τον λόγο αυτό υπάρχει μία σχέση μεταξύ της σχετικής υγρασίας, δηλαδή της ποσότητας υγρασίας που περιέχεται στον αισθητήρα, και της χωρητικότητας του αισθητήρα. Αυτή η σχέση είναι που οδηγεί στην λειτουργία ενός οργάνου μέτρησης υγρασίας χωρητικού τύπου.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, για την μέτρηση της υγρασίας και της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας Telaire ChipCar2 της Amphenol. Ο αισθητήρας αυτός έχει ακρίβεια μέτρησης 2% RH για συνθήκες εντός 20~80% RH. Η τάση τροφοδοσίας του μπορεί να κυμαίνεται από 2.3 V έως 5.5 V. Η τιμή που συνιστάται είναι είτε 3.3 V (± 0.5 V), είτε 5.0 V (± 0.5 V).



Εικόνα 23: Αισθητήρας υγρασίας-θερμοκρασίας CC2A25

Ο αισθητήρας αυτός είναι χωρητικού τύπου, αποτελείται από ένα κελί ανίχνευσης και ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα συσκευασμένο σε ένα πακέτο προσαρτώμενο σε επιφάνειες τύπου LCC (Leadless Chip Carrier).

Λόγω της ευαισθησίας του στις συνθήκες περιβάλλοντος και για μεγιστοποίηση της απόδοσής του, πρέπει να τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο στο συνολικό κύκλωμα, ώστε να εξασφαλίζεται η κατάλληλη ροή αέρα στην εξεταζόμενη ατμόσφαιρα. Τέλος, επειδή η σχετική υγρασία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, θα πρέπει η θερμοκρασία του αισθητήρα να διαφυλάσσεται ίδια με του περιβάλλοντός του.

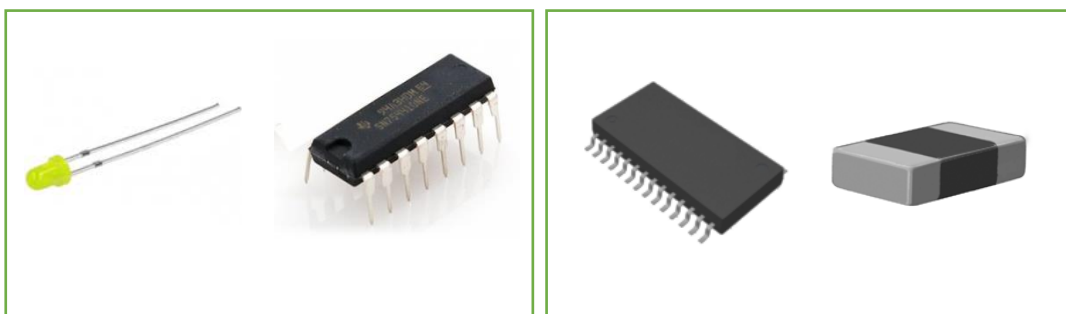
2 Προγράμματα σχεδίασης PCB

Ένα πολύ σημαντικό σημείο των διάφορων εφαρμογών ηλεκτρονικού περιεχομένου, είναι η μετάβαση από την θεωρητική ανάλυση στην πρακτική υλοποίηση.

Για να μπορέσει να αξιοποιηθεί στην πράξη η παραπάνω μελέτη, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός τυπωμένου κυκλώματος (PCB - Printed Circuit Board). Ο σχεδιασμός αυτός γίνεται σε εξειδικευμένα προγράμματα τύπου EDA (Electronic Design Automation). Τα προγράμματα αυτά αποτελούν τμήμα ενός ολοκληρωμένου περιβάλλοντος με το οποίο έχουμε τη δυνατότητα σχεδίασης του σχηματικού διαγράμματος ενός κυκλώματος, της προσομοίωσης λειτουργίας του και της σχεδίασης της τελικής πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος.

Θεμελιώδη κομμάτια της δομής αυτών των προγραμμάτων είναι οι βάσεις δεδομένων στις οποίες αποθηκεύονται τα ηλεκτρικά σχέδια των στοιχείων, η μορφή και ο τρόπος με τον οποίο συγκολλούνται στο PCB, καθώς και η απεικόνισή τους σε 3D μορφή με τις πραγματικές τους διαστάσεις. Οι πληροφορίες αυτές είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους ώστε σε κάθε ηλεκτρικό σχέδιο να αντιστοιχεί μια συγκεκριμένη απεικόνιση (footprint).

Για κάθε στοιχείο (πυκνωτής, αντίσταση, ολοκληρωμένα κυκλώματα ICs, connectors, θύρες USB) υπάρχει μία βιβλιοθήκη η οποία περιέχει το ηλεκτρικό σχέδιο του στοιχείου και την αντίστοιχη απεικόνισή του. Συνήθως, τα προγράμματα σχεδίασης PCB διαθέτουν κάποιες βιβλιοθήκες βασικών στοιχείων (πυκνωτές, αντιστάσεις, διόδους κα) αλλά πολλές φορές χρειάζεται να δημιουργηθούν νέες βιβλιοθήκες για τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν, αν αυτά δεν υπάρχουν.

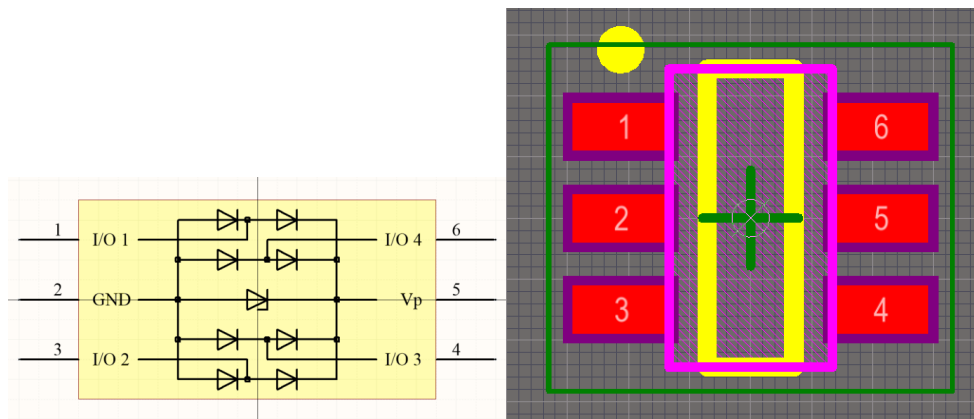


Εικόνα 24: (Αριστερά) Διάτρητα στοιχεία – (Δεξιά) Στοιχεία επιφανειακής στήριξης (SMD)

Τα ηλεκτρικά στοιχεία κατά γενικό κανόνα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, στα διάτρητα και στα επιφανειακής στήριξης (SMD - Surface-Mount Device), όπως φαίνονται και στην

Εικόνα 24. Τα προγράμματα αυτά διαθέτουν κάποιες γενικές μορφές συσκευασίας (packaging) και απεικόνισης των ηλεκτρικών στοιχείων που υπάρχουν στην αγορά. Έτσι κατά τη διαδικασία δημιουργίας νέων βιβλιοθηκών υπάρχει η δυνατότητα επιλογής της μορφής συσκευασίας που έχει το στοιχείο (πχ τύπου TSOP, SOT QFP κα) και μπορεί να προσαρμοστεί ακριβώς στις διαστάσεις του στοιχείου, σύμφωνα με τις ακριβείς διαστάσεις που δίνονται από το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή (datasheet).

Παρακάτω φαίνεται η βιβλιοθήκη ενός στοιχείου SMD που δεν υπήρχε εκ των προτέρων στο πρόγραμμα και δημιουργήθηκε για τις ανάγκες της κεντρικής πλακέτας. Αριστερά φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του ολοκληρωμένου, το πλήθος των ακροδεκτών του (pins) καθώς και οι ονομασίες τους, σύμφωνα με τα στοιχεία που δίνονται από το datasheet. Δεξιά φαίνεται η απεικόνιση του στοιχείου πάνω στο PCB. Από το πρόγραμμα επιλέχθηκε η κατηγορία συσκευασίας του στοιχείου TSOP6 και προσαρμόστηκαν τα μεγέθη των pads σύμφωνα με τις διαστάσεις της Εικόνα 27.



Εικόνα 25: Δημιουργία βιβλιοθήκης στοιχείου (Αριστερά) Σχηματικό διάγραμμα – (Δεξιά) απεικόνιση στοιχείου πάνω στο PCB

Table 1. Pinning

Pin	Symbol	Description	Simplified outline	Graphic symbol
1	I/O 1	ESD protection		
2	GND	ground		
3	I/O 2	ESD protection		
4	I/O 3	ESD protection		
5	V _P	supply voltage		
6	I/O 4	ESD protection		

018aaa142

Εικόνα 26: Στοιχεία από το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή

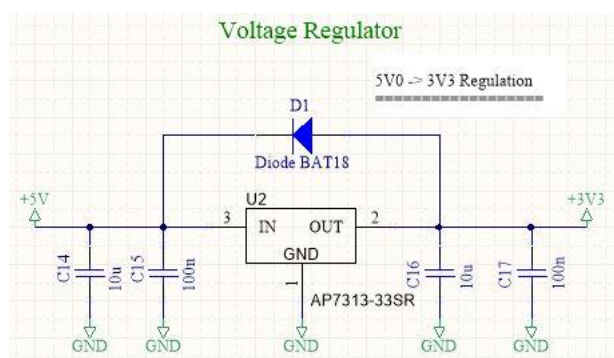
DIMENSIONS (mm are the original dimensions)

UNIT	A	A ₁	b _p	c	D	E	e	H _E	L _p	Q	v	w	y
mm	1.1 0.9	0.1 0.013	0.40 0.25	0.26 0.10	3.1 2.7	1.7 1.3	0.95	3.0 2.5	0.6 0.2	0.33 0.23	0.2	0.2	0.1

Εικόνα 27: Διαστάσεις στοιχείου από το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή

Για να ξεκινήσει η διαδικασία σχεδίασης του PCB, πρέπει πρώτα να σχεδιαστεί το σχηματικό – ηλεκτρικό διάγραμμα του κυκλώματος. Τοποθετούνται όλα τα στοιχεία του κυκλώματος καθώς και οι ηλεκτρικές συνδέσεις μεταξύ τους. Έτσι, δημιουργούνται οι κόμβοι του κυκλώματος, οι οποίοι θα αποτελέσουν σημείο αναφοράς για τη συνέχεια.

Ένα παράδειγμα σχηματικού διαγράμματος ενός κυκλώματος, φαίνεται στην Εικόνα 28.



Εικόνα 28: Σχηματικό διάγραμμα θεωρητικού κυκλώματος

Ένα σημαντικό σημείο της διαδικασίας αυτής, που δεν είναι καθιερωμένο στις συνηθισμένες θεωρητικές αναλύσεις, είναι πως πρέπει, εκτός από τα στοιχεία, να υπάρξει πρόβλεψη και για τον τρόπο σύνδεσης του κυκλώματος της πλακέτας με άλλα

κυκλώματα. Για αυτό τον λόγο, θα πρέπει να τοποθετηθούν κατάλληλες επαφές (connectors) για τη σύνδεση του κυκλώματος με τις διάφορες εισόδους/εξόδους καθώς και με την τροφοδοσία.

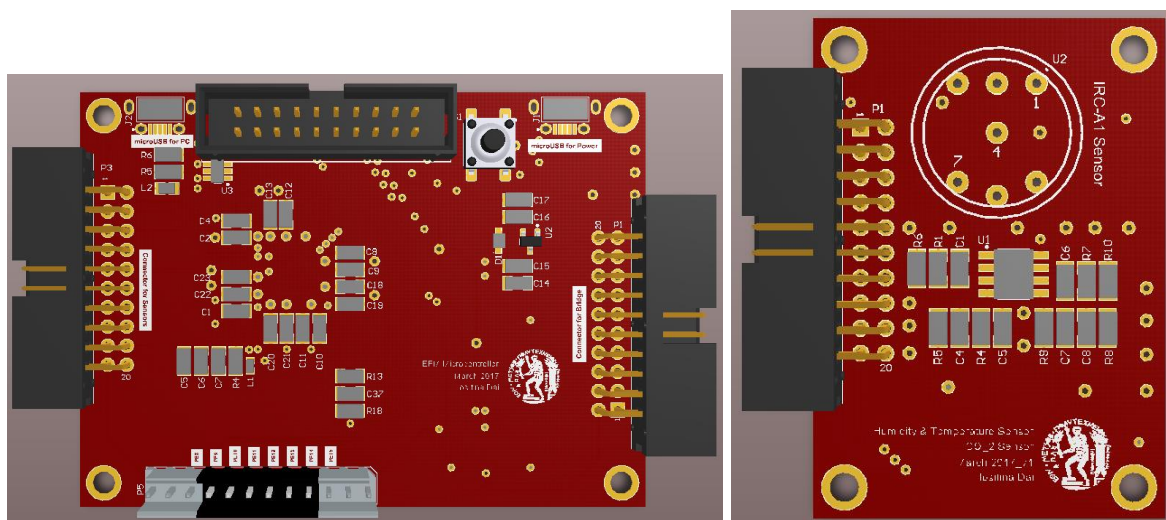
Στο τέλος της σχεδίασης, υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου του κυκλώματος, κυρίως για το αν έχουν μείνει κάποια κενά σημεία επαφής (floating points).

3 Σχεδίαση ηλεκτρικών κυκλωμάτων

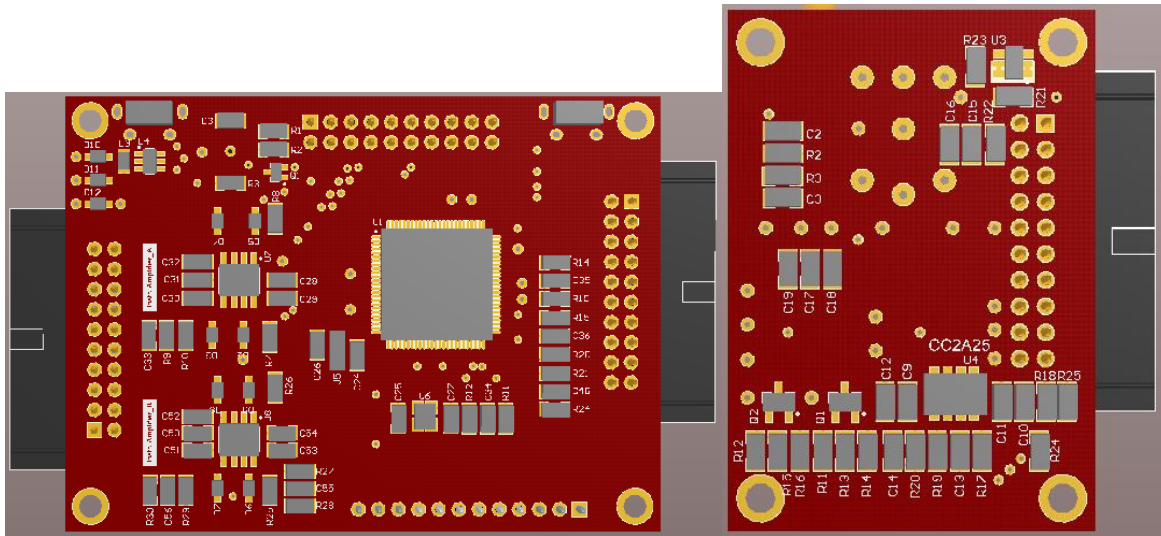
Για τη σχεδίαση του τυπωμένου κυκλώματος έγινε χρήση προγράμματος σχεδίασης PCB τύπου EDA. Το κύκλωμα περιέχει τους αισθητήρες και τα κατάλληλα συστήματα μετρήσεων καθώς και τη δυνατότητα αποθήκευσης και επεξεργασίας των δεδομένων που καταγράφονται.

Η κατασκευή χωρίστηκε σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά μία πλακέτα που εμπεριέχει το κατάλληλο κύκλωμα για τη σύνδεση με το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο καθώς και έναν μικροελεγκτή που είναι απαραίτητος για την επεξεργασία των λαμβανόμενων σημάτων. Με κατάλληλο προγραμματισμό, στέλνονται από τον μικροελεγκτή τα απαραίτητα ψηφιακά ή αναλογικά σήματα που απαιτούνται για τη λειτουργία των διάφορων κυκλωμάτων. Επιπλέον, ορίζεται και ο τρόπος αποθήκευσης και επεξεργασίας των δεδομένων που λαμβάνονται από τους αισθητήρες. Ο κώδικας για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή είναι κομμάτι άλλης διπλωματικής εργασίας.

Το δεύτερο μέρος αφορά την κατασκευή μιας επιπλέον πλακέτας που αποτελείται από έναν αισθητήρα διοξειδίου του άνθρακα CO₂ και έναν αισθητήρα για τη μέτρηση των επιπέδων υγρασίας και θερμοκρασίας.



Εικόνα 29: (Αριστερά) PCB κεντρικής πλακέτας μικροελεγκτή – (Δεξιά) PCB αισθητήρων (Top layer)



Εικόνα 30: (Αριστερά) PCB κεντρικής πλακέτας μικροελεγκτή – (Δεξιά) PCB αισθητήρων (Bottom layer)

Για τη σχεδίαση των παρακάτω σχηματικών διαγραμμάτων (Schematics), δημιουργήθηκαν όλες οι απαραίτητες βιβλιοθήκες των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν.

3.1 Κεντρική πλακέτα μικροελεγκτή

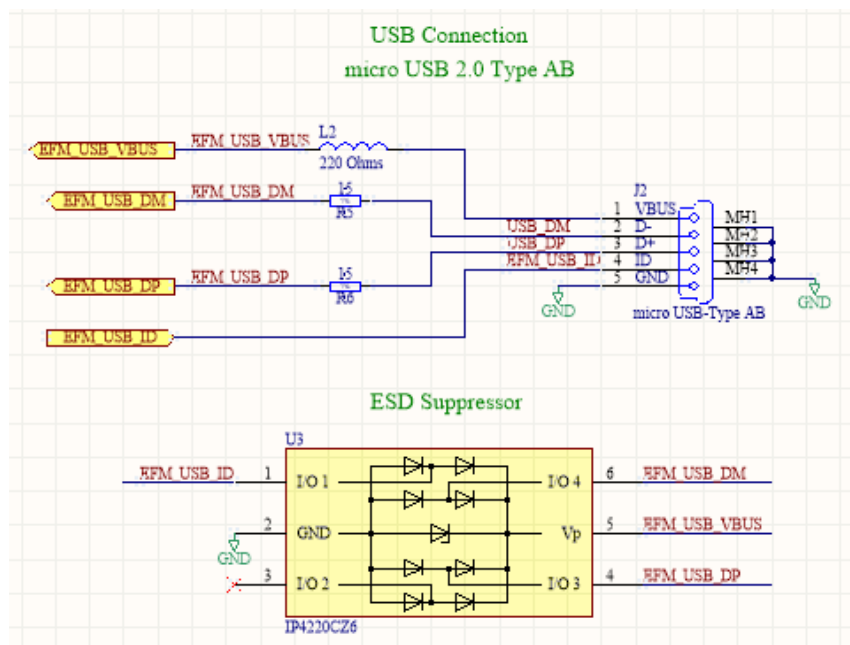
Πιο αναλυτικά, η κεντρική πλακέτα σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας τον μικροελεγκτή EFM32WG380 της Silicon Labs, με κύκλωμα τροφοδοσίας πολλαπλών εισόδων και θύρα για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή μέσω του JTAG καθώς και θύρα microUSB για σύνδεση και ανταλλαγή δεδομένων με Η/Υ. Στην πλακέτα προστέθηκε επίσης κύκλωμα για τη μέτρηση και την ενίσχυση των αναλογικών διαφορικών σημάτων που προέρχονται από τη γέφυρα καθώς και κατάλληλο κύκλωμα σύνδεσης της κεντρικής πλακέτας με τη δεύτερη πλακέτα που κατασκευάστηκε, ενώ προβλέφθηκαν κατάλληλες επαφές για τη δυνατότητα σύνδεσης στο PCB εξωτερικών περιφερειακών στοιχείων, για την κάλυψη μελλοντικών αναγκών.

Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε είναι τεχνολογίας ARM 32-bit και η συχνότητα λειτουργίας του μπορεί να φτάσει τα 48 MHz, ενώ διαθέτει 256 KB Flash Memory και 32 KB RAM. Η τάση τροφοδοσίας του κυμαίνεται μεταξύ των 1.98 V έως 3.8 V, ενώ το εύρος θερμοκρασιών κάτω από τις οποίες μπορεί να λειτουργήσει είναι μεταξύ -40 °C έως 85 °C. Διαθέτει 81 εισόδους/εξόδους γενικής χρήσης, 12-bit μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC), 3 τελεστικούς ενισχυτές των οποίων η είσοδος είναι rail to rail και το κέρδος τους μπορεί να καθοριστεί ψηφιακά μέσω του προγραμματισμού του.

3.1.1 Τροφοδοσία κεντρικής πλακέτας μικροελεγκτή και σύνδεση με PC

Για τη λειτουργία του κυκλώματος είναι απαραίτητη η τροφοδοσία του με 5 V, καθώς αυτή είναι και η τάση λειτουργίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (ICs) που χρησιμοποιήθηκαν.

Για την τροφοδοσία, χρησιμοποιείται μία θύρα microUSB (Εικόνα 31). Μέσω της εισόδου τροφοδοσίας EFM_USB_VBUS παρέχονται στο κύκλωμα τα +5 V που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του, καθώς επίσης και για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή. Επιπλέον, μέσω των σημάτων EFM_USB_DM και EFM_USB_DP, τα οποία συνδέονται στο μικροελεγκτή, γίνεται η σύνδεση με Η/Υ και είναι δυνατή η ανταλλαγή δεδομένων καθώς και η επεξεργασία τους. Επιπλέον, μέσω αυτής της θύρας microUSB, μπορεί να φορτωθεί κατάλληλο πρόγραμμα για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή.



Εικόνα 31: Κύκλωμα USB για τροφοδοσία 5V και σύνδεση με PC

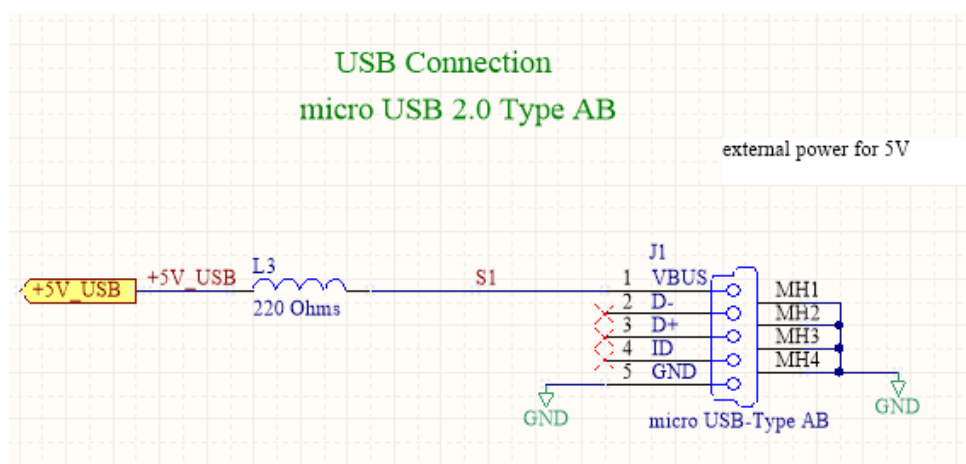
Στο παραπάνω κύκλωμα, λόγω πιθανής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης² (ESD – Electrostatic Discharge) υπάρχει ο κίνδυνος της εσφαλμένης λειτουργίας των στοιχείων του κυκλώματος. Για την προστασία του κυκλώματος χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο P4220CZ6 της Nexperia. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που δίνονται από τον κατασκευαστή, μπορεί να χειριστεί εκφορτίσεις της τάξεως των ± 8 kV. Αποτελείται από

² Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι η ξαφνική ροή ρεύματος μεταξύ δύο ηλεκτρικά φορτισμένων αντικειμένων

τέσσερα ζεύγη διόδων (Εικόνα 31) για σήματα εισόδου/εξόδου και μία δίοδο Zener για την τροφοδοσία. Η μέγιστη τάση για την τροφοδοσία του είναι τα +5.5 V. Λόγω της ιδιότητας των διόδων (rail-to-rail), η τάση εισόδου και εξόδου μπορεί να είναι έως τη μέγιστη τιμή της τροφοδοσίας του στοιχείου.

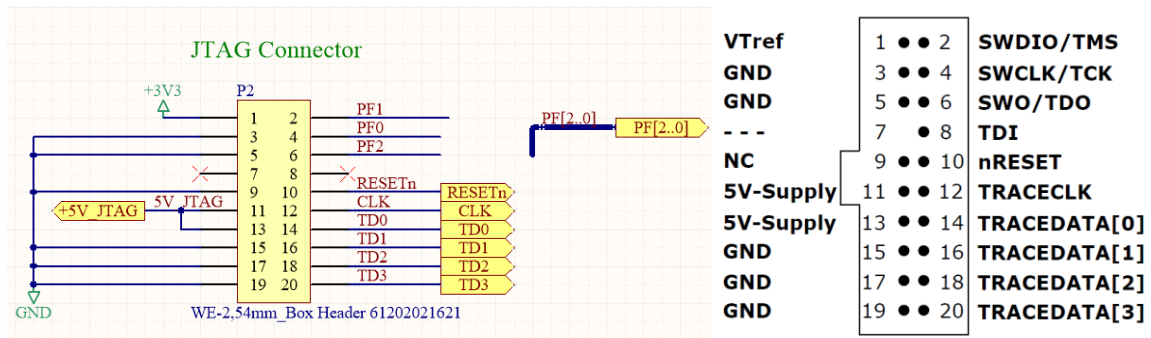
Κάθε σήμα από τη θύρα microUSB, συνδέεται σε δύο διόδους, όπου η μία δίοδος είναι συνδεδεμένη στη γείωση (GND) και η δεύτερη στους πυκνωτές της τροφοδοσίας (+5 V). Με αυτό τον τρόπο προστατεύονται τα υπόλοιπα κυκλώματα, είτε αναλογικά είτε ψηφιακά, από απότομες στιγμιαίες αλλαγές της τάσης και του ρεύματος. Έτσι, σε περίπτωση όπου η τάση που συνδέουμε είναι μεγαλύτερη από τα +5 V, η δεύτερη δίοδος που είναι συνδεδεμένη με την τροφοδοσία αποκόπτεται και το σήμα οδηγείται στη γείωση.

Ένας δεύτερος τρόπος τροφοδοσίας της πλακέτας γίνεται μέσω του σήματος τροφοδοσίας +5V_USB της δεύτερης θύρας microUSB που έχει τοποθετηθεί στο κύκλωμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 32. Η θύρα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για τροφοδοσία και όχι για σύνδεση με Η/Υ.



Εικόνα 32: Κύκλωμα USB για τροφοδοσία 5 V

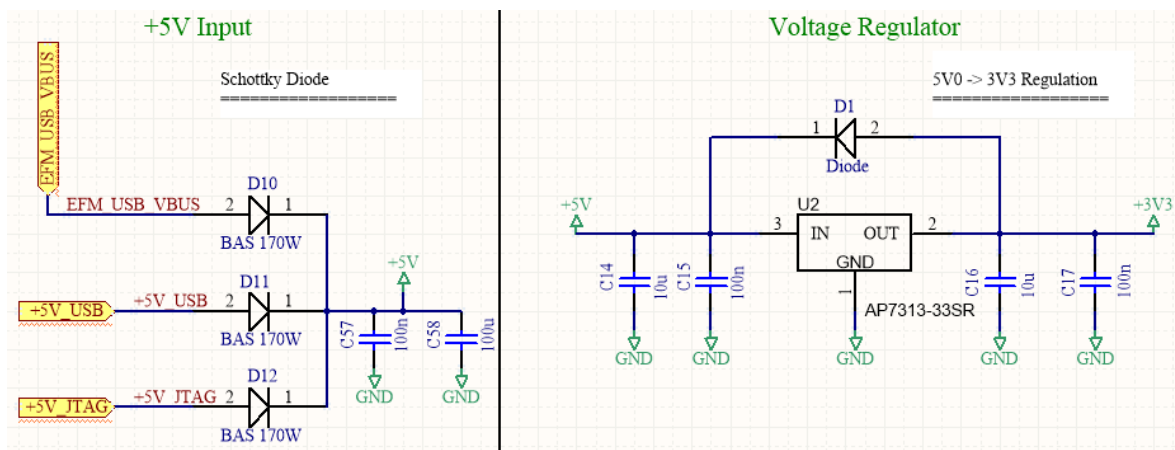
Τέλος, ένας τρίτος τρόπος για την τροφοδοσία του κυκλώματος, είναι μέσω του σήματος τροφοδοσίας +5V_JTAG που λαμβάνεται από τη σύνδεση με τον προγραμματιστή JTAG J-Link/J-Trace της Segger που διαθέτει το εργαστήριο (Εικόνα 33). Μέσω του JTAG φορτώνεται κατάλληλο πρόγραμμα για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή, ώστε να μπορεί να διαβάσει και να επεξεργαστεί τις μετρήσεις που λαμβάνει από τους αισθητήρες.



Εικόνα 33: (Αριστερά) Τροφοδοσία πλακέτας μέσω JTAG Connector – (Δεξιά) Pinout for JTAG/SDW and Trace Connector

Η επιλογή των διαφορετικών εισόδων τροφοδοσίας, EFM_USB_VBUS, +5V_USB και +5V_JTAG, γίνεται μέσω τριών διόδων Schottky, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 34. Έτσι, σε κάθε περίπτωση άγει μία μόνο από τις τρεις διόδους, και το κύκλωμα τροφοδοτείται με +5 V.

Σαν τάση τροφοδοσίας του μικροελεγκτή, επιλέχθηκαν τα +3.3 V. Για την παραγωγή τους χρησιμοποιήθηκε ένας γραμμικός ρυθμιστής τάσης (Voltage Regulator) από +5 V σε +3.3 V. Όπως φαίνεται και στο δεξί κύκλωμα της Εικόνας 34, η έξοδος του ρυθμιστή συνδέεται με την είσοδο μέσω μίας ανάστροφης διόδου. Έτσι σε περίπτωση που διακοπεί η τάση εισόδου, η έξοδος του ρυθμιστή τάσης συνδέεται με την είσοδό του.



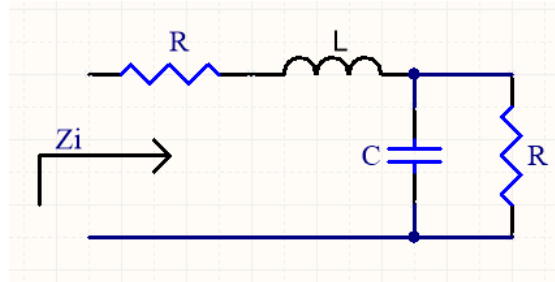
Εικόνα 34: Δίοδος Schottky και Ρυθμιστής Τάσης

Για να εξασφαλίσουμε τη σωστή λειτουργία του ρυθμιστή τάσης, στην είσοδο και στην έξοδό του συνδέουμε του πυκνωτές απόζευξης C₁₄, C₁₅, C₁₆ και C₁₇.

Σε όλα τα αναλογικά σήματα τροφοδοσίας, είναι αναγκαία η χρήση πυκνωτών απόζευξης (Decoupling Capacitors). Οι πυκνωτές αυτοί χρησιμοποιούνται για τη μείωση του θορύβου που προκαλείται από τις διακυμάνσεις των ρευμάτων που καταναλώνουν τα

διάφορα στοιχεία του κυκλώματος. Με τον αυτόν τον τρόπο, σταθεροποιείται η τάση τροφοδοσίας αποκόπτοντας τις όποιες μεταβολές τείνουν να δημιουργηθούν από τις απότομες διακυμάνσεις των ρευμάτων.

Ένας πραγματικός πυκνωτής μαζί με τους ακροδέκτες του και τις γραμμές σύνδεσης έχει ένα τυπικό ηλεκτρικό ισοδύναμο (Εικόνα 35), το οποίο εκτός από τη χωρητικότητά του, αποτελείται και από μία παρασιτική επαγωγή και αντιστάσεις.



Εικόνα 35: Τυπικό ηλεκτρικό ισοδύναμο ενός πυκνωτή

Ένας πυκνωτής συμπεριφέρεται σαν ένα κύκλωμα συντονισμού. Η σύνθετη αντίσταση ενός πυκνωτή σε χαμηλές συχνότητες, μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$Z = \frac{1}{sC} + R$$

Ενώ, σε υψηλές συχνότητες, υπερισχύει η σχέση:

$$Z = s * L + R$$

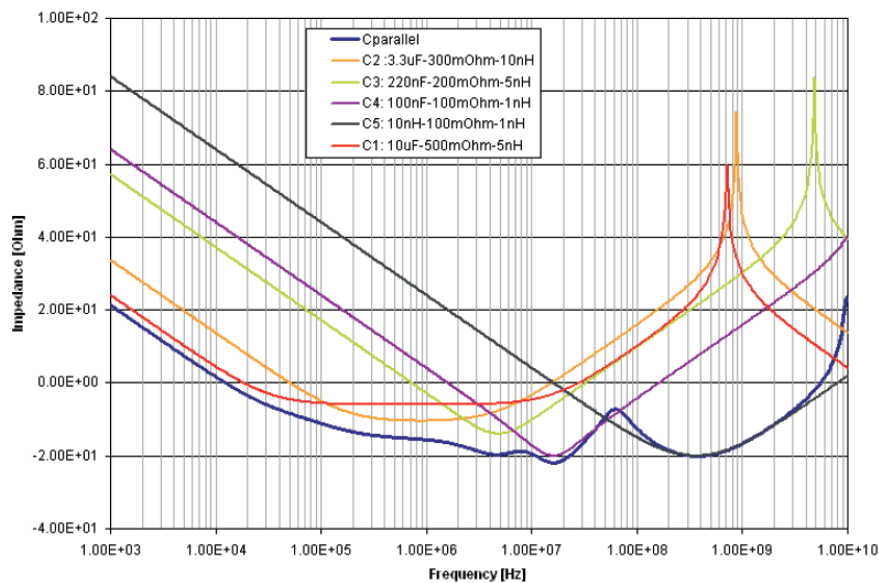
Υπάρχει μία τιμή της συχνότητας, όπου ισχύει $\frac{1}{sC} = sL$ και η λειτουργία του πυκνωτή είναι ωμική. Η συχνότητα αυτή καλείται ιδιοσυχνότητα (SRF, self-resonant frequency) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L * C}}$$

Τα χωρητικά χαρακτηριστικά του πυκνωτή, ισχύουν μέχρι η συχνότητα του κυκλώματος να γίνει ίση με ιδιοσυχνότητά του. Από αυτή την τιμή της συχνότητας και μετά, οι παρασιτικές επιδράσεις κυριαρχούν και ο πυκνωτής δρα ως επαγωγικό στοιχείο. Για να μπορεί να έχει ένα κύκλωμα χαμηλή σύνθετη AC αντίσταση σε μία ευρεία περιοχή συχνοτήτων πρέπει να χρησιμοποιηθούν πυκνωτές με διαφορετικές τιμές, συνδεδεμένοι παράλληλα.

Οι πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας, παρουσιάζουν χαμηλή σύνθετη αντίσταση σε μικρές συχνότητες (η ιδιοσυχνότητά τους έχει σχετικά χαμηλή τιμή). Έτσι, το εύρος συχνοτήτων που λειτουργούν σαν χωρητικά στοιχεία είναι μικρό. Αντίθετα, πυκνωτές μικρότερης χωρητικότητας, έχουν χαμηλή αντίσταση σε μεγαλύτερες συχνότητες (η ιδιοσυχνότητά τους είναι αρκετά μεγαλύτερη) επομένως, το εύρος συχνοτήτων που λειτουργούν σαν χωρητικά στοιχεία είναι μεγαλύτερο.

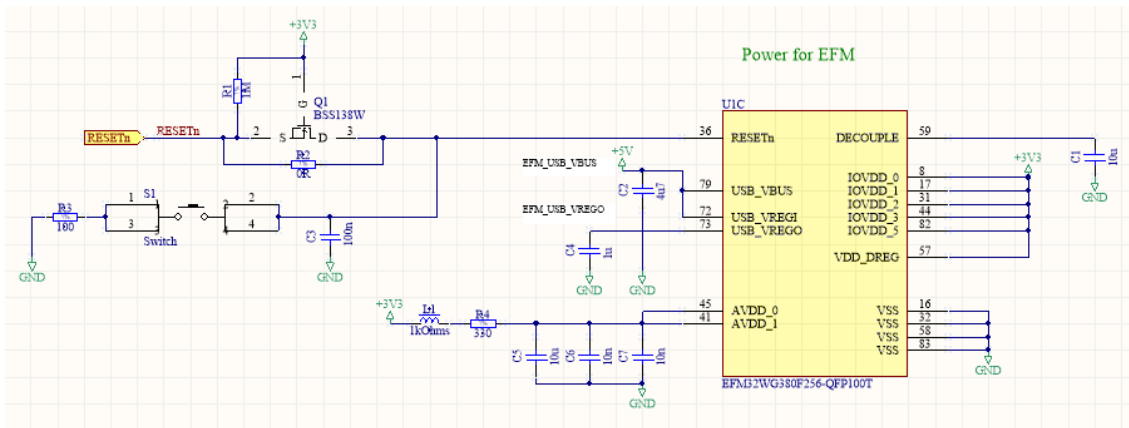
Στο διάγραμμα της Εικόνας 36, φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη της τυπικής αντίστασης που παρουσιάζει έναν πυκνωτή ως προς τη συχνότητα. Η μπλε καμπύλη του διαγράμματος, δείχνει πως με την παράλληλη σύνδεση των πυκνωτών, αυξάνεται το εύρος συχνοτήτων όπου η σύνθετη αντίστασή τους παραμένει χαμηλή.



Εικόνα 36: Χωρητικής λειτουργία πυκνωτή ως προς τη συχνότητα

Για τη μείωση των επαγωγικών φαινομένων στο κύκλωμα που υλοποιήθηκε, χρησιμοποιήθηκαν δύο πυκνωτές απόξευξης, 100 nF και 10 μ F, σε κάθε αναλογική είσοδο τροφοδοσίας.

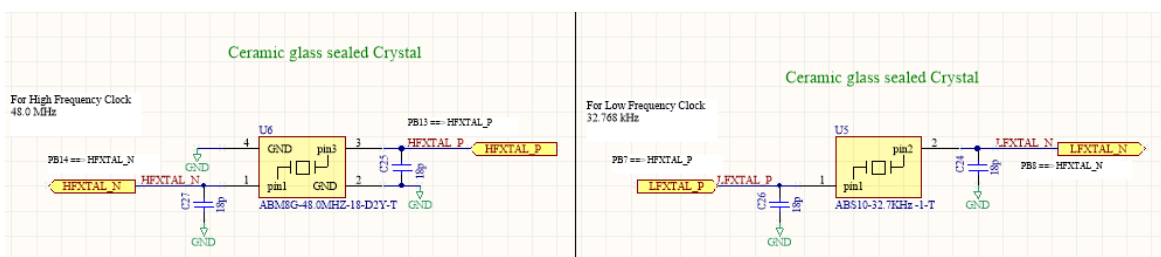
Αντίστοιχα, για τη σωστή τροφοδοσία και λειτουργία του μικροελεγκτή χρησιμοποιήθηκαν οι πυκνωτές απόξευξης στις αναλογικές εισόδους τροφοδοσίας IOVDD[0..5] και VDD_DREG.



Εικόνα 37: Κύκλωμα τροφοδοσίας του EFM32WG380F256

Ο μικροελεγκτής διαθέτει το σήμα RESETn, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 37, το οποίο καθυστερεί την εκκίνηση του μικροελεγκτή, μέχρι η τροφοδοσία να σταθεροποιηθεί στην επιθυμητή τιμή. Το σήμα RESETn είναι αρνητικής λογικής και εσωτερικά του μικροελεγκτή συνδέεται με μία αντίσταση προς την τροφοδοσία. Για να επιτύχουμε την καθυστέρηση εκκίνησης λειτουργίας, συνδέουμε εξωτερικά τον πυκνωτή C₃, ο οποίος καθυστερεί την ενεργοποίηση του σήματος RESETn, λόγω φόρτισης του πυκνωτή. Η εκφόρτιση του σήματος RESETn καθώς και ο επανεκκίνηση του μικροελεγκτή μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: είτε στέλνοντας κατάλληλο σήμα από τον προγραμματιστή JTAG, είτε χειροκίνητα μέσω του διακόπτη που έχει τοποθετηθεί.

Τέλος, για το κύκλωμα χρονισμού του μικροελεγκτή, χρησιμοποιήθηκαν δύο ταλαντωτές. Ο κρυσταλλικός ταλαντωτής, ABS10 της ABRACON CORPORATION, χρησιμοποιήθηκε για το χρονισμό του ρολογιού σε χαμηλές συχνότητες (32.768 kHz), ενώ ο κεραμικός ταλαντωτής ABM8G για το χρονισμό σε υψηλές συχνότητες (48 MHz).

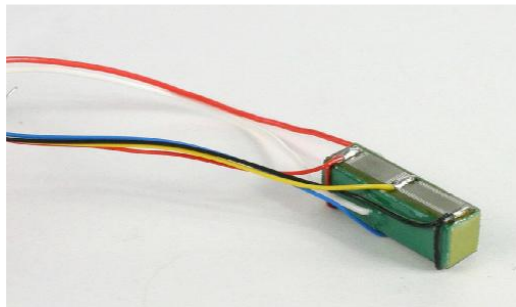


Εικόνα 38: Ταλαντωτές χρονισμού ρολογιού μικροελεγκτή υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων

3.1.2 Κύκλωμα γέφυρας και ενισχυτή οργάνου

Η σχεδίαση του κυκλώματος μέτρησης μικρών μεταβολών της αντίστασης (της τάξεως των νανομέτρων), εκτός από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και τον ενισχυτή περιλαμβάνει και κάποια επιπλέον στοιχεία που βοηθούν στη βελτίωση της λειτουργίας του.

Στο κύκλωμα έχει τοποθετηθεί κατάλληλη επαφή για τη σύνδεση με το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, καθώς θα γίνεται η προσάρτησή του στο μικροσκόπιο.



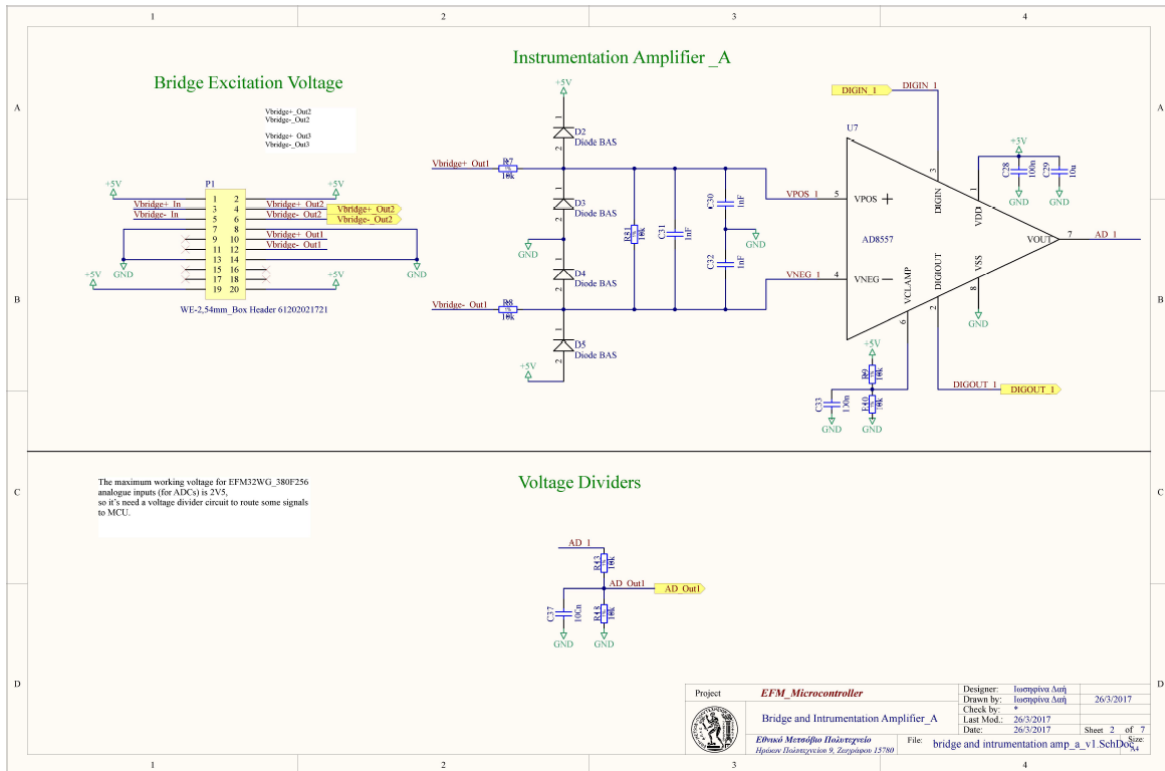
Εικόνα 39: Πιεζοηλεκτρικό PZS001

Το σήμα εξόδου (διαφορά δυναμικού) της γέφυρας που λαμβάνεται και αφορά τη μεταβολή που προκαλείται στις αντιστάσεις της, οδηγείται στον ενισχυτή. Για την προστασία του ενισχυτή από τον θόρυβο και τις διακυμάνσεις της τάσης, χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλοι πυκνωτές και διόδους πριν την είσοδο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 40. Η χρήση των διόδων είναι απαραίτητη για την προστασία των εισόδων του ψηφιακού ενισχυτή οργάνου AD8557, σε περίπτωση διακυμάνσεων της τάσης. Η τάση στην είσοδο του ενισχυτή δεν μπορεί να ξεπεράσει την τάση τροφοδοσίας (rail to rail).

Σε περίπτωση που υπάρξουν κάποιες αποκλίσεις στη λειτουργία της γέφυρας, (πχ μηδενική είσοδος δεν αντιστοιχεί σε μηδενική έξοδο), έχει τοποθετηθεί μία αντίσταση μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου της γέφυρας. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να ρυθμιστεί η ισορροπία της γέφυρας.

Και σε αυτή την περίπτωση, για τη σωστή τροφοδοσία και λειτουργία του ενισχυτή χρησιμοποιούνται πυκνωτές απόζευξης στις αναλογικές εισόδους τροφοδοσίας του.

Το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος που υλοποιήθηκε, φαίνεται στην Εικόνα 40.

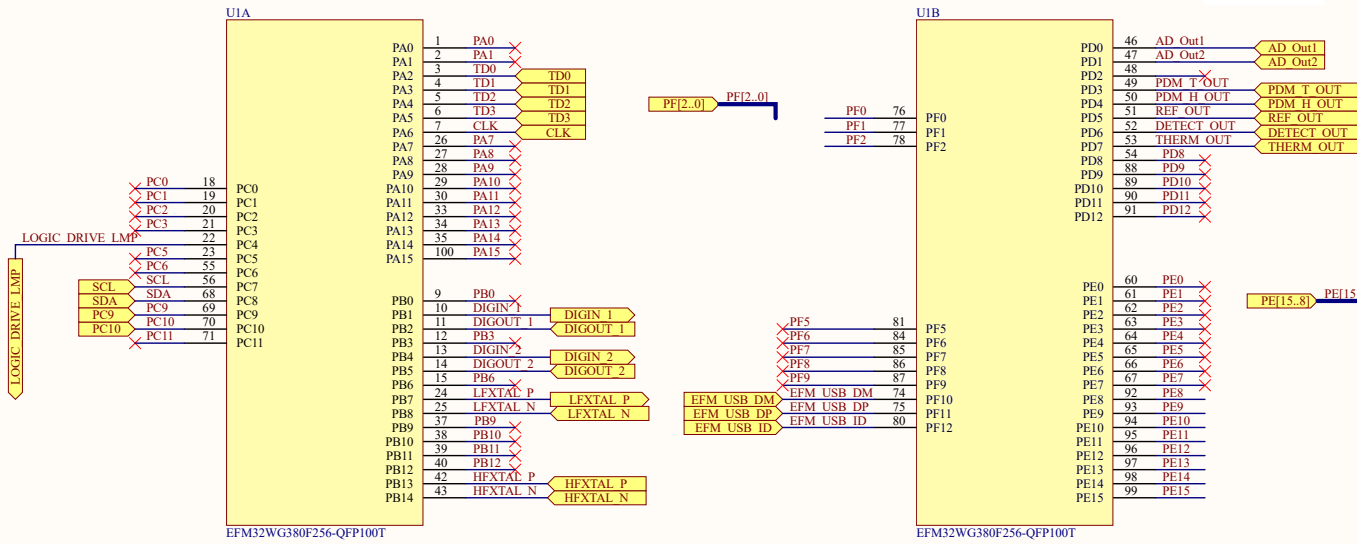


Εικόνα 40: Κύκλωμα σύνδεσης πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και στάδιο ενίσχυσης

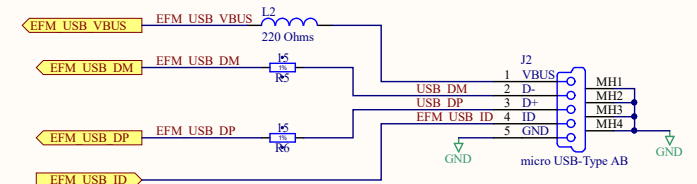
Τέλος, στην έξοδο του ενισχυτή εφαρμόστηκε βαθυπερατό φίλτρο, με σκοπό την αποκοπή οποιουδήποτε επιπλέον θορύβου δημιουργείται κατά τη διαδικασία ενίσχυσης του σήματος, πριν τη σύνδεση με τον μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό του μικροελεγκτή, σε συνδυασμό με έναν διαιρέτη τάσης, διότι η μέγιστη τάση εισόδου αναλογικών σημάτων στον μικροεπεξεργαστή είναι 2.5 V.

Στο τελικό κύκλωμα που κατασκευάστηκε, το παραπάνω κύκλωμα επαναλήφθηκε δύο φορές, προκειμένου να καλυφθούν με μελλοντικές ανάγκες ή για σύνδεση περισσότερων πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (για μετατόπιση περισσότερων διαστάσεων (X-Y)).

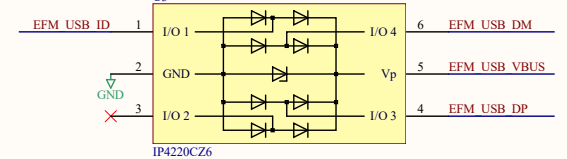
IC MCU 32BIT 256KB FLASH 100LQFP I/O Pins



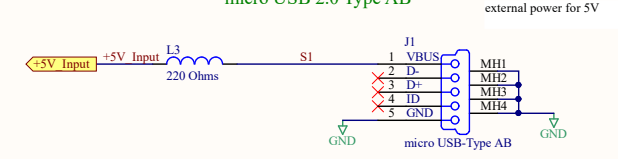
USB Connection micro USB 2.0 Type AB



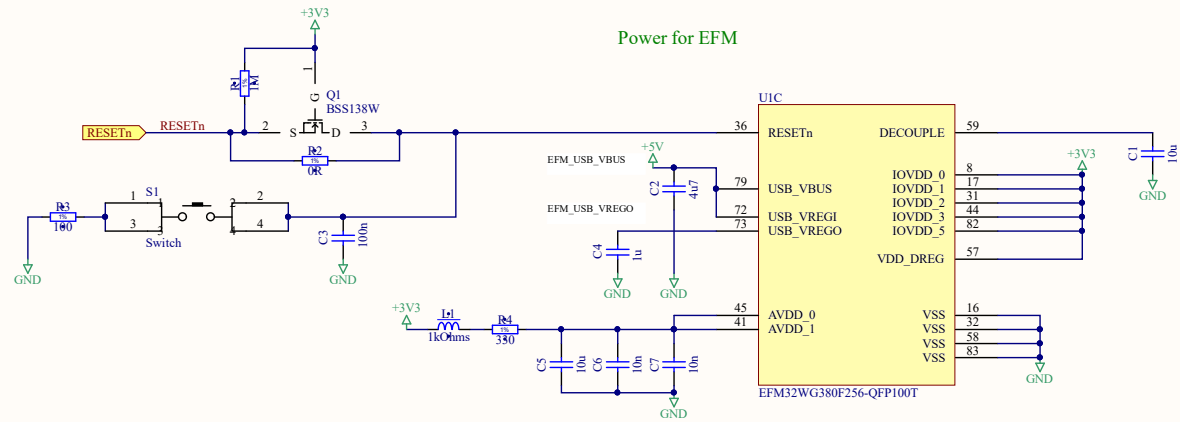
ESD Suppressor



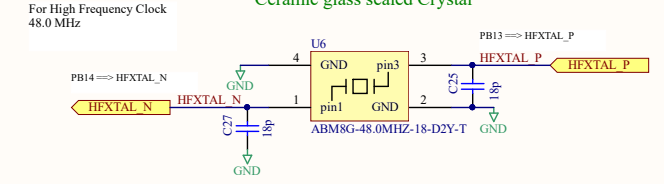
USB Connection micro USB 2.0 Type AB



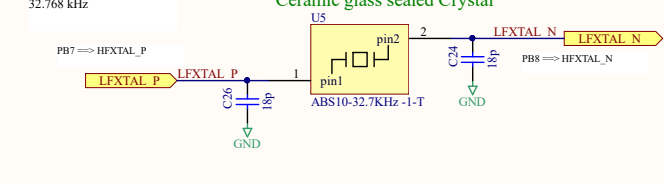
Power for EFM



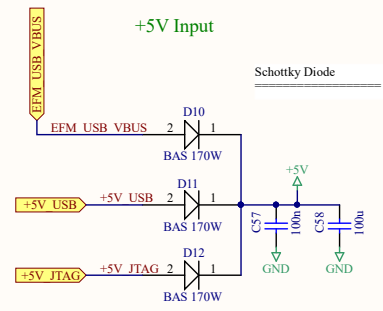
Ceramic glass sealed Crystal



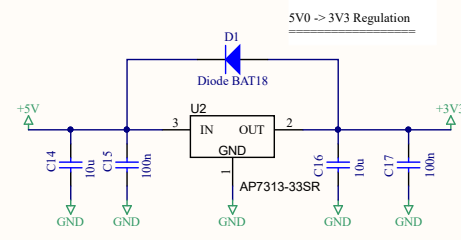
Ceramic glass sealed Crystal



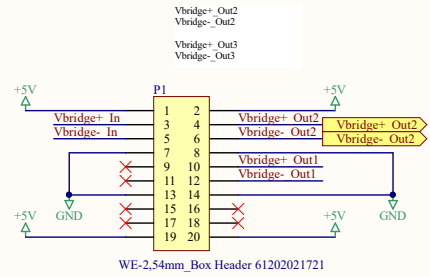
+5V Input



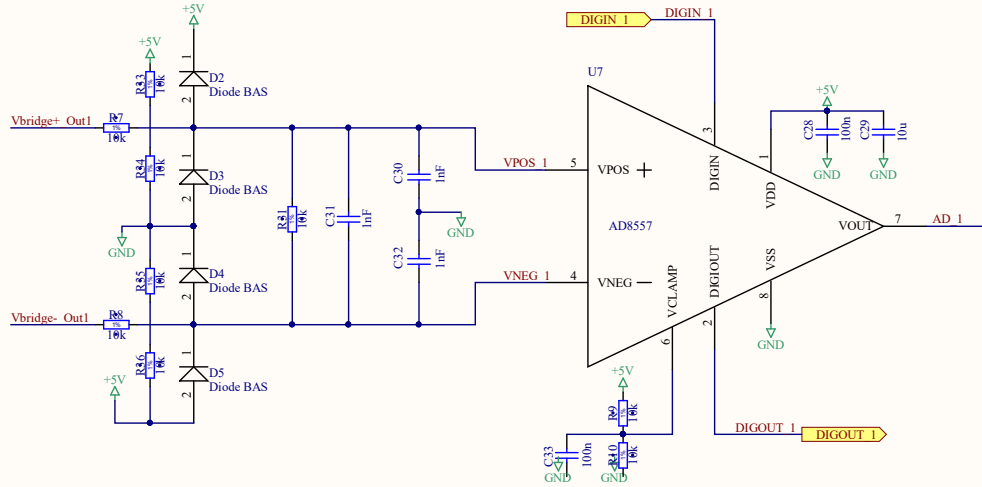
Voltage Regulator



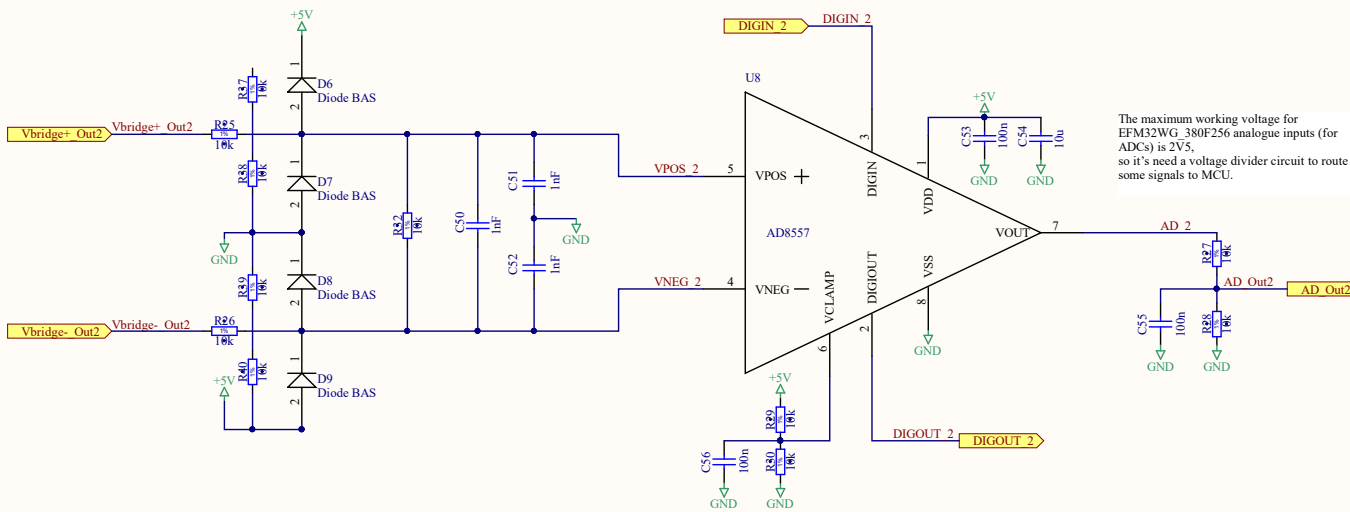
Bridge



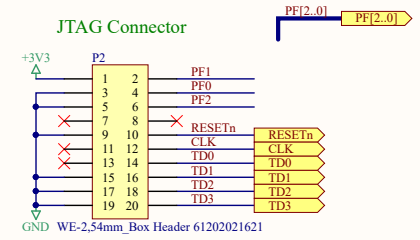
Instrumentation Amplifier_A



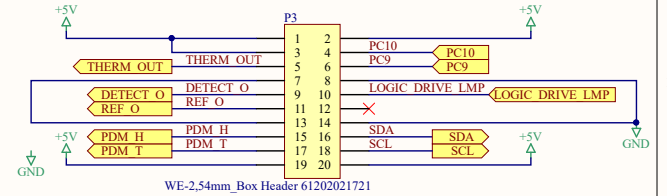
Instrumentation Amplifier_B



JTAG Connector

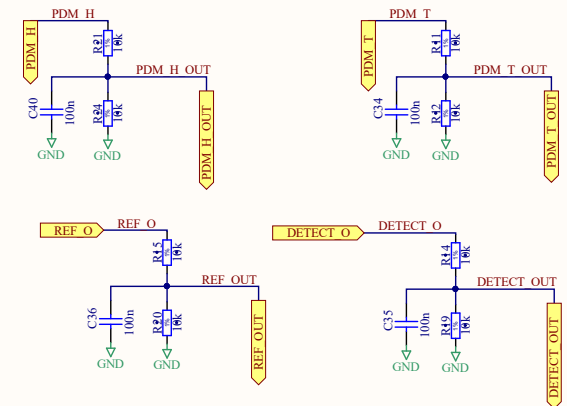


Connector for Sensors



Voltage Dividers

The maximum working voltage for EFM32WG_380F256 analogue inputs (for ADCs) is 2V5, so it's need a voltage divider circuit to route some signals to MCU.



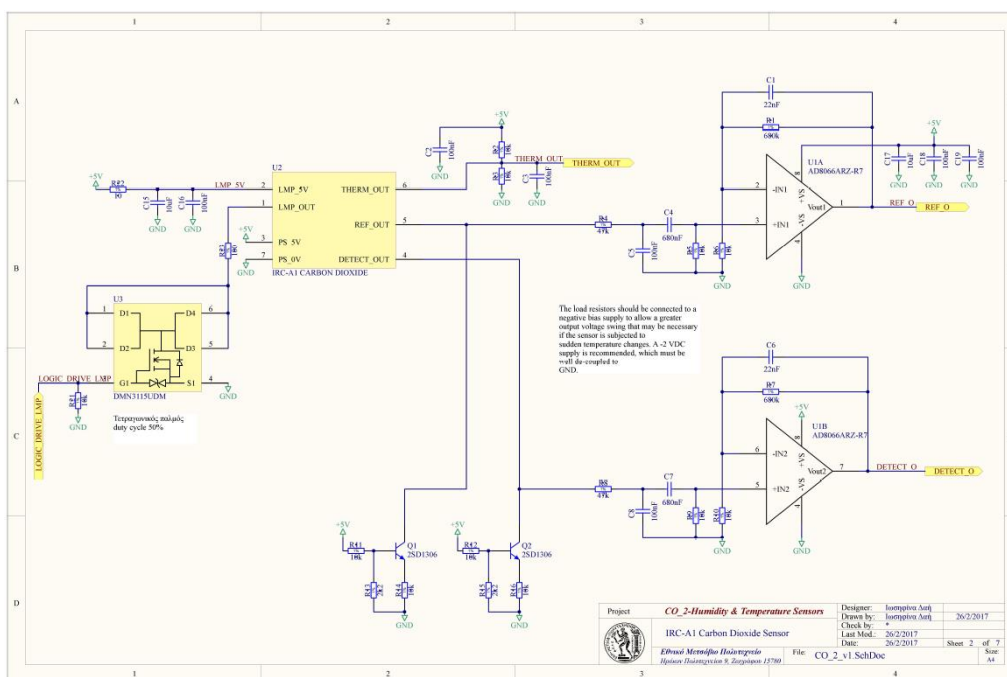
3.2 Κύκλωμα πλακέτας αισθητήρων

Το κύκλωμα αυτό περιλαμβάνει τον αισθητήρα διοξειδίου του άνθρακα IRC-A1, και τον αισθητήρα ChipCar2, καθώς και κατάλληλη επαφή για τη σύνδεσή της με το μικροελεγκτή.

3.2.1 Κύκλωμα αισθητήρα CO₂

Ο αισθητήρας IRC-A1, συνδέεται με μία πηγή τετραγωνικού παλμού με 50% duty cycle στην συχνότητα των 2.5 Hz. Το σήμα αυτό (Logic Drive LMP) λαμβάνεται από τον μικροελεγκτή σε συνδυασμό με τη χρήση ενός τρανζίστορ που συνδέεται με τον αισθητήρα. Με τη χρήση κατάλληλου κυκλώματος δημιουργούνται σχεδόν ημιτονικά σήματα εξόδου του ανιχνευτή και σαν τιμή εξόδου λαμβάνουμε την peak to peak τιμή του πλάτους της εξόδου.

Στην έξοδο του αισθητήρα επιθυμούμε ρεύμα πόλωσης περίπου 30 μA και για αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο ηρη τρανζίστορ BC846 σε συνδυασμό με διαίρεση τάσης των 5 V της τροφοδοσίας και κατάλληλες αντιστάσεις. Στο σημείο αυτό η αναμενόμενη ονομαστική τιμή της τάσης είναι 0.6 V-1.2 V. Οι εικονικές πηγές σταθερού ρεύματος που δημιουργήθηκαν με τα τρανζίστορ, σε συνδυασμό με τη μεγάλη εσωτερική αντίσταση που έχουν καθώς και τη μικρή μεταβολή ρεύματος που προκαλείται, έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανίζεται στην έξοδο η μέγιστη δυνατή μεταβολή τάσης.



Εικόνα 41: Κύκλωμα Αισθητήρα CO₂

Στη συνέχεια ακολουθεί το φιλτράρισμα και η ενίσχυση του λαμβανόμενου σήματος. Με τη χρήση υπερυπερατού φίλτρου (πυκνωτές C_4 και C_7 αντίστοιχα), επιτυγχάνεται η εξάλειψη του θορύβου υψηλών συχνοτήτων (η συχνότητα αποκοπής είναι περίπου τετραπλάσια του τετραγωνικού παλμού της εισόδου). Επιπλέον, η χρήση βαθυπερατών φίλτρων (πυκνωτές C_1 , C_5 , C_6 και C_8) εγγυάται την αποκοπή της DC συνιστώσας από τα τρανζίστορ. Η έξοδος του αισθητήρα IRC-A1 έχει μία τυπική διακύμανση 45mV peak-to-peak.

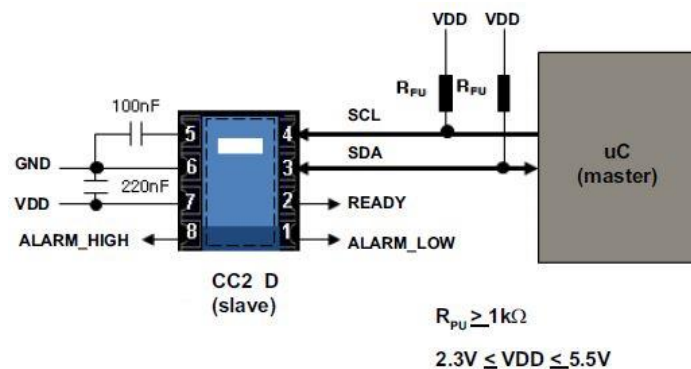
Για να είναι αξιοποιήσιμα τα σήματα εξόδου του αισθητήρα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατάλληλο ενισχυτικό στάδιο. Στη συνέχεια, τα σήματα οδηγούνται στον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό (ADC) του μικροεπεξεργαστή. Στο ενισχυτικό στάδιο χρησιμοποιήθηκε ο διπλός τελεστικός ενισχυτής AD8066ARZ-R7. Το σήμα που οδηγείται στο μικροελεγκτή, μετά το στάδιο ενίσχυσης, έχει διακύμανση περίπου 2.5V-3V peak-to-peak.

3.2.2 Κύκλωμα αισθητήρα θερμοκρασίας-υγρασίας

Ο αισθητήρας ChipCap2 μπορεί να παρέχει γραμμική έξοδο αναλογικού ή ψηφιακού τύπου, ανάλογα με τις ανάγκες μας.

Για ψηφιακή έξοδο (I²C Interface³) μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το CC2D, η κυκλωματική διάταξη του οποίου φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 42).

Η τάση τροφοδοσίας του είναι 5 V και οι ακροδέκτες VDD και GND χρειάζεται να απομονωθούν με έναν πυκνωτή των 220 nF. Επιπλέον, ο ακροδέκτης V_{CORE} πρέπει πάντα να συνδέεται μέσω ενός εξωτερικού πυκνωτή 100 nF στην γείωση, όπως φαίνεται και στο κυκλωματικό του διάγραμμα παρακάτω.



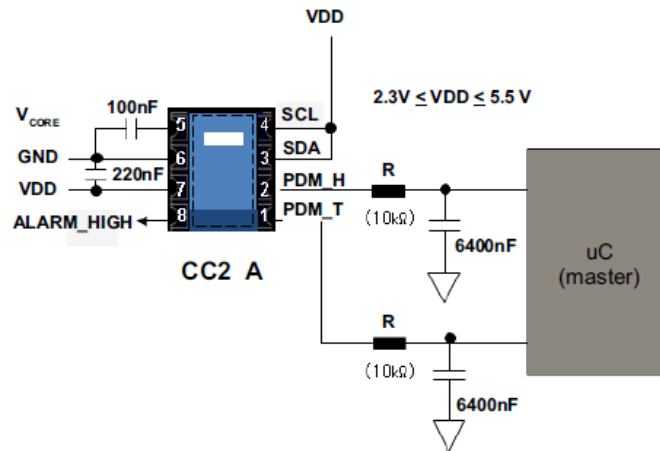
Εικόνα 42: Ψηφιακή διάταξη

Τα δεδομένα του αισθητήρα μεταφέρονται μέσω του ακροδέκτη SDA, ενώ η επικοινωνία μεταξύ του ChipCap2 και του μικροεπεξεργαστή γίνεται μέσω του SCL. Εσωτερικά ο αισθητήρας περιέχει έναν θερμοκρασιακά αντισταθμισμένο ταλαντωτή, ο οποίος παρέχει την βάση χρονισμού όλων των διεργασιών και χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας συμβατό με το I²C.

Τέλος, είναι απαραίτητη η χρήση αντιστάσεων pull-up ($R \geq 1 k\Omega$) στα σήματα SCL και SDA μεταξύ του αισθητήρα και του μικροελεγκτή όπως φαίνονται και στην Εικόνα 42 .

³ Σειριακός διάυλος που δημιουργήθηκε από τη Philips και χρησιμοποιείται για την σύνδεση περιφερειακών συστημάτων μικρής ταχύτητας, όπως σε motherboard, embedded systems, κινητά τηλέφωνα ή άλλες ηλεκτρονικές συσκευές

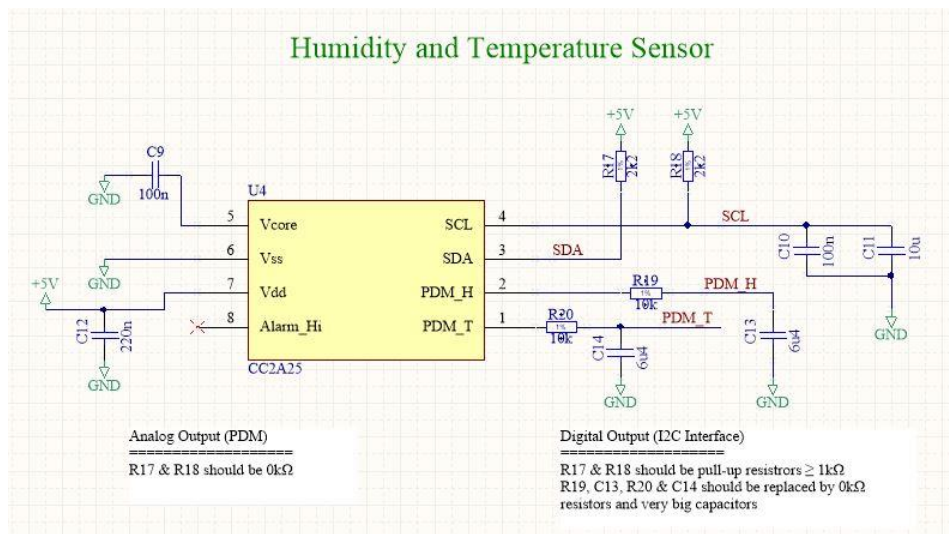
Αντίστοιχα, για αναλογική έξοδο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το CC2A, η κυκλωματική διάταξη του οποίου φαίνεται στην Εικόνα 43.



Εικόνα 43: Αναλογική διάταξη

Τα δεδομένα για την υγρασία και τη θερμοκρασία λαμβάνονται από τα σήματα PDM_H και PDM_T αντίστοιχα. Μεταξύ του CC2A και του μικροελεγκτή, δημιουργείται ένα βαθυπερατό φίλτρο με τη χρήση της μίας αντίστασης ($R \geq 10k\Omega$) και ενός πυκνωτή (RC φίλτρο).

Στο PCB που κατασκευάστηκε, υλοποιήθηκε κατάλληλη συνδεσμολογία ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον είτε το ψηφιακό είτε το αναλογικό ChipCap2, αλλάζοντας μόνο κάποιους πυκνωτές και αντιστάσεις. Περισσότερες πληροφορίες αναγράφονται στα σχηματικά του κυκλώματος.



Εικόνα 44: Κύκλωμα Αισθητήρα Υγρασίας και Θερμοκρασίας CC2A25

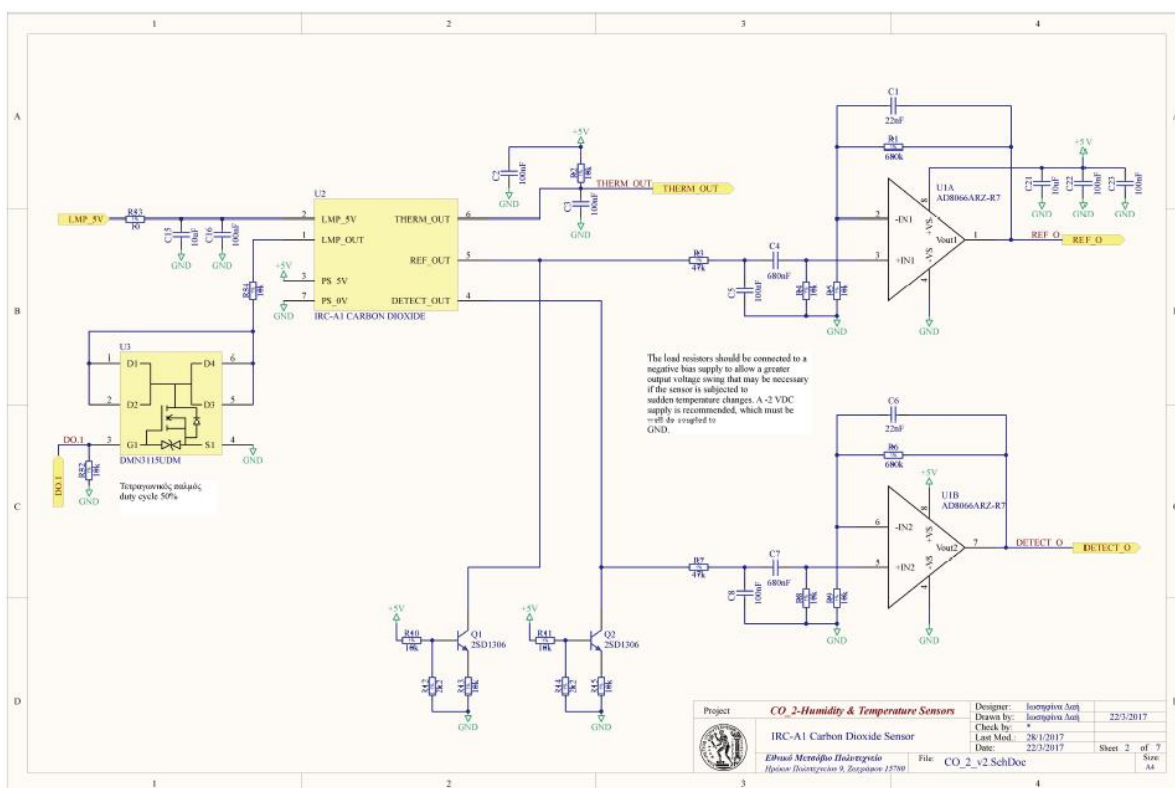
3.3 Σχεδίαση κυκλώματος αισθητήρων για Kit EFM32WG-STK3800

Σαν έναν αρχικό σχεδιασμό του κυκλώματος των αισθητήρων, καθώς και για την πιο άμεση αξιοποίησή του στο εργαστήριο, σχεδιάστηκε μια πρότυπη πλακέτα για τη μέτρηση του διοξειδίου του άνθρακα και των επιπέδων υγρασίας και θερμοκρασίας, η οποία συνδέεται στο EFM32 Wonder Gecko Starter Kit που διαθέτει το εργαστήριο. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να εξετάσουμε την ορθότητα της λειτουργίας τόσο του κυκλώματος που σχεδιάστηκε όσο και του αντίστοιχου κώδικα για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή.

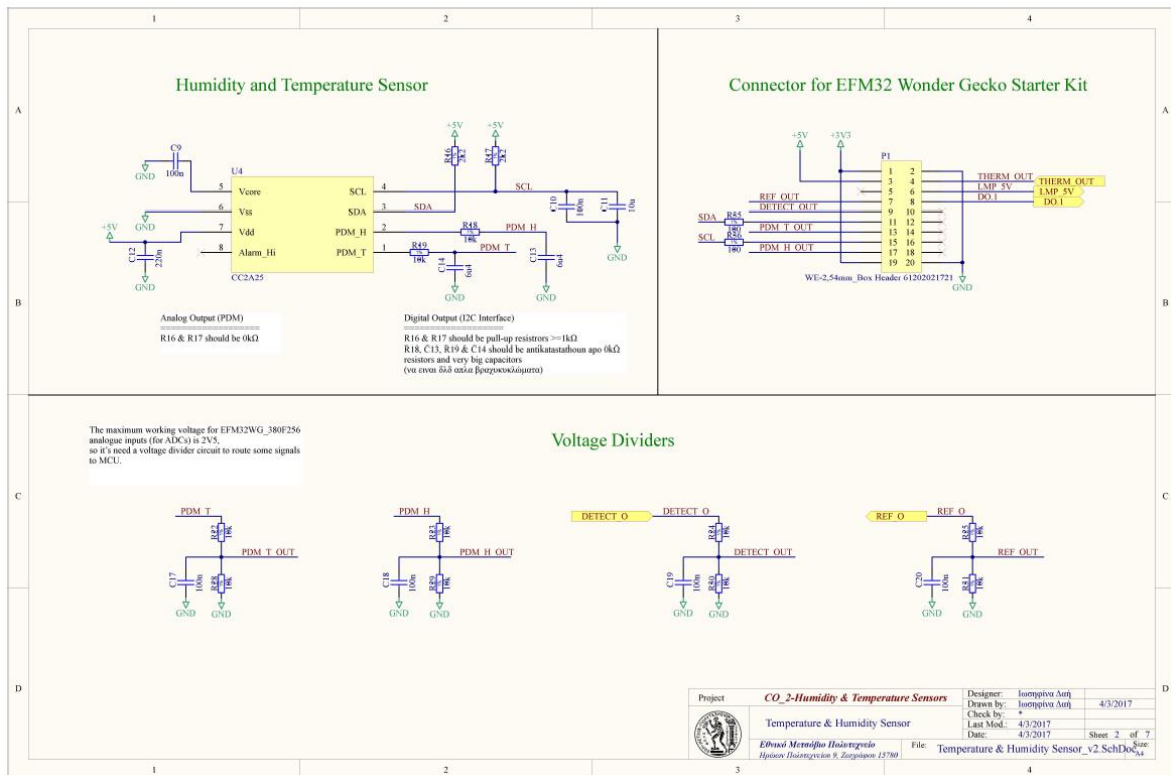
Περισσότερες πληροφορίες για τη λειτουργία του EFM32 Wonder Gecko Starter Kit, μπορούν να βρεθούν στο <http://www.silabs.com/products/development-tools/mcu/32-bit/efm32-wonder-gecko-starter-kit>

Το θεωρητικό ηλεκτρικό κύκλωμα για αυτή την πλακέτα είναι παρόμοιο με το κύκλωμα των αισθητήρων που αναφέρθηκε παραπάνω.

Στις *Εικόνα 45* και *Εικόνα 46* φαίνεται το ηλεκτρικό κύκλωμα των αισθητήρων.



Εικόνα 45: Κύκλωμα αισθητήρα CO₂ για EFM32 Wonder Gecko Starter Kit



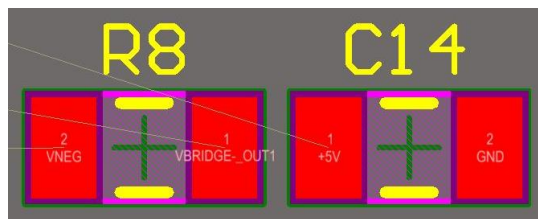
Εικόνα 46: Κύκλωμα αισθητήρα υγρασίας & θερμοκρασίας για EFM32 Wonder Gecko Starter Kit

Οι έξοδοι των αισθητήρων είναι αναλογικά σήματα τα οποία στέλνονται στις αντίστοιχες εισόδους του μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC) του μικροεπεξεργαστή. Η μέγιστη δυνατή τάση εισόδου των αναλογικών σημάτων στον μικροεπεξεργαστή, είναι +2.5V. Και σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητη η χρήση διαιρετών τάσης.

Η μόνη διαφορά στον σχεδιασμό αυτού του κυκλώματος σε σχέση με αυτό που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, είναι ότι οι διαιρέτες τάσης που χρειάζονται για τα αναλογικά σήματα, πρέπει να τοποθετηθούν σε αυτή την πλακέτα μιας και δεν μπορούν να τοποθετηθούν στην πλακέτα του μικροεπεξεργαστή. Επιπλέον, για τη σύνδεση με το EFM32 Wonder Gecko Starter Kit, τηρήθηκε η συνδεσμολογία που δίνεται από το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή.

4 Γενικοί κανόνες σχεδίασης PCB

Έχοντας τελειώσει τη σχεδίαση του θεωρητικού σχεδίου, το επόμενο στάδιο είναι η σχεδίαση του τυπωμένου κυκλώματος (PCB). Αρχικά, γίνεται η εισαγωγή όλων των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στο σχηματικό του κάθε κυκλώματος, στα αντίστοιχα αρχεία των PCBs. Τα στοιχεία εμφανίζονται ως κατόψεις (Εικόνα 47) πάνω στην πλακέτα. Για την καλύτερη τοποθέτηση των στοιχείων είναι καλό να γνωρίζουμε το επιθυμητό τελικό μέγεθος και σχήμα της τελικής πλακέτας που θέλουμε να κατασκευάσουμε.



Εικόνα 47: Κάτοψη στοιχείων στο PCB

Όλα τα στοιχεία πρέπει να τοποθετηθούν σε κατάλληλα επιλεγμένες θέσεις, έτσι ώστε να μπορούν εύκολα να ενωθούν μεταξύ τους με αγωγούς χαλκού (tracks). Προτείνεται να μην αρχίσει η σχεδίαση των αγωγών πριν να βρεθούν ικανοποιητικές θέσεις για όλα τα στοιχεία. Επίσης, η τοποθέτηση στοιχείων του ίδιου τμήματος του κυκλώματος κοντά μεταξύ τους, κατά κανόνα βοηθά στην σχεδίαση.

Σε κατασκευές που υπάρχουν αναλογικά και ψηφιακά σήματα, θα πρέπει τα επιμέρους κυκλώματα, να τοποθετούνται με κάποια απόσταση μεταξύ τους ώστε να μην αλληλοεπιδρά το ένα με το άλλο, δημιουργώντας παρασιτικά σήματα. Το ίδιο ισχύει και για τα σήματα υψηλής και χαμηλής συχνότητας .

Μετά την τοποθέτηση των στοιχείων στο PCB, γίνεται χάραξη των αγωγών χαλκού για τη σύνδεσή του. Το μέγεθος των αγωγίμων διαδρομών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το είδος των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν, τα αναμενόμενα ρεύματα στους αγωγούς και φυσικά ποιο είναι το ελάχιστο μέγεθος αγωγού που μπορεί να κατασκευάσει ο εκάστοτε κατασκευαστής. Η διαδικασία σχεδίασης του PCB δεν είναι απλή διαδικασία και η σωστή λειτουργία του κυκλώματος δεν είναι πάντα δεδομένη, όταν αυτό μεταφέρεται από την προσομοίωση σε τυπωμένη πλακέτα. Ειδικά όταν το κύκλωμα λειτουργεί σε μεγάλες συχνότητες η σχεδίαση πρέπει να γίνεται με προσοχή καθώς υπάρχει ένα πλήθος φαινομένων τα οποία μπορεί να επηρεάσουν την λειτουργία του κυκλώματος. Ενδεικτικά, κάποια από τα πιο συνηθισμένα φαινόμενα που μπορεί να επηρεάσουν την λειτουργία του θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

Κάθε σχεδίαση έχει συγκεκριμένες ηλεκτρικές προδιαγραφές ανάλογα με τα ρεύματα και τις τάσεις που υπάρχουν στο κύκλωμα. Συνεπώς, το μέγεθος των αγώγιμων διαδρομών μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το σήμα. Για παράδειγμα, οι αγώγιμες διαδρομές σημάτων τροφοδοσίας καλό είναι να έχουν μεγαλύτερο μέγεθος από τις αγώγιμες διαδρομές αναλογικών ή ψηφιακών σημάτων. Οι αγώγιμες διαδρομές λειτουργούν σαν μία αντίσταση, οπότε παράγεται θερμότητα ανάλογα με τα ρεύματα τα οποία διαρρέουν αυτές και ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χαλκού.

Η γραμμή χαλκού μπορεί να ορισθεί ως μια αγώγιμη σύνδεση μεταξύ δύο σημείων, ικανή να μεταφέρει κάποιο σήμα. Ιδανικά σε ένα τυπωμένο κύκλωμα οι γραμμές που συνδέουν τα διάφορα στοιχεία μεταξύ τους πρέπει να έχουν μηδενική αντίσταση, επαγωγή και χωρητικότητα. Η αντίσταση των αγώγιμων γραμμών, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$R = \frac{\rho * l}{A}$$

όπου ρ ($\Omega \text{ cm} * 10^{-6}$) είναι η ειδική αντίσταση της γραμμής, l (cm) το μήκος της, και A (cm^2) η επιφάνεια της διατομής της.

Για μικρές συχνότητες μπορεί να γίνει αυτή η παραδοχή, αλλά όσο η συχνότητα των σημάτων μεγαλώνει οι γραμμές δεν συμπεριφέρονται ως ιδανικές και παρουσιάζουν χωρητικότητες και επαγωγές που μπορούν να δημιουργήσουν πρόβλημα στην λειτουργία του κυκλώματος. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση κατάλληλου πάχους των γραμμών. Οι αγώγιμες διαδρομές με μεγαλύτερο πάχος γραμμών, έχουν μικρότερη αντίσταση DC. Αντίστοιχα, οι ίδιου μήκους διαδρομές με μικρότερο πάχος μπορεί να λειτουργήσουν σαν επαγωγικά στοιχεία, το οποίο θα επηρεάσει το κύκλωμα ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας.

Στον Πίνακα 4 φαίνονται κάποια ενδεικτικά μεγέθη των γραμμών ανάλογα με το ρεύμα που τις διαρρέει.

Πίνακας 4: Προτεινόμενο μέγεθος αγώγιμων διαδρομών

Current/A	Track Width(mil)	Track Width(mm)
1	10	0,25
2	30	0,76
3	50	1,27
4	80	2,03
5	110	2,79
6	150	3,81
7	180	4,57
8	220	5,59
9	260	6,2
10	300	7,62

Αν δεν υπάρξει ειδική μέριμνα, οι χαρακτηριστικές αντιστάσεις των αγώγιμων διαδρομών δεν θα έχουν την ίδια τιμή με τις χαρακτηριστικές αντιστάσεις των πηγών και των φορτίων στα οποία καταλήγουν. Όταν συμβαίνει αυτό, ένα μέρος της ενέργειας του σήματος δεν απορροφάται από το φορτίο και ανακλάται πίσω προς στην πηγή. Η διαδικασία αυτή, ειδικά όταν το κύκλωμα λειτουργεί σε μεγάλες συχνότητες, αλλοιώνει το μεταφερόμενο σήμα δημιουργώντας σε αυτό φαινόμενα όπως υπερύψωση (overshoot) ή κωδωνισμό (ringing). Κάθε φορά που ένα σήμα περνάει από μία γραμμή μεταφοράς, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο. Όταν δύο γραμμές μιας τυπωμένης πλακέτας βρίσκονται πολύ κοντά η μία με την άλλη, το πεδίο της μίας δημιουργεί ανεπιθύμητα ρεύματα στην διπλανή της γραμμή και το αντίθετο (crosstalk). Τέλος, οι γραμμές που συνδέουν τα διάφορα εξαρτήματα σε μια τυπωμένη πλακέτα είναι δυνατόν να λειτουργήσουν σαν κεραίες και να εισάγουν στο κύκλωμα ανεπιθύμητη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (EMI - Electromagnetic Interference).

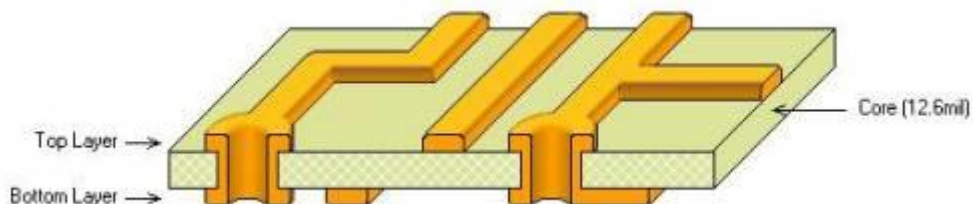
Ένας αρκετά γενικός κανόνας χάραξης των αγώγιμων διαδρομών στο PCB, είναι για αναλογικά ή ψηφιακά σήματα να χρησιμοποιούνται γραμμές μεγέθους 25 mil, για την τροφοδοσία και τη γείωση γραμμές μεγέθους 50 mil και για τα σήματα που ενώνουν τις επαφές των ολοκληρωμένων στοιχείων (ICs) του κυκλώματός μας γραμμές μεγέθους 10mil - 15 mil. Οι διαδρομές αυτές θα πρέπει να έχουν γωνίες 45° και να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερο μήκος.

Εξίσου σημαντική είναι και η ηλεκτρική απομόνωση (Electrical Clearance) τόσο των στοιχείων όσο και των αγώγιμων διαδρομών του κυκλώματος, η οποία εξαρτάται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κυκλώματος, τάση και ρεύμα που διαρρέει τις γραμμές. Στον Πίνακα 5, αναγράφονται οι ελάχιστες αποστάσεις που πρέπει να τηρούμε στη σχεδιάσή μας, μεταξύ των αγώγιμων διαδρομών και των στοιχείων, ανάλογα με τις τάσεις που έχουμε στο κύκλωμά μας.

Πίνακας 5: Ηλεκτρική απομόνωση

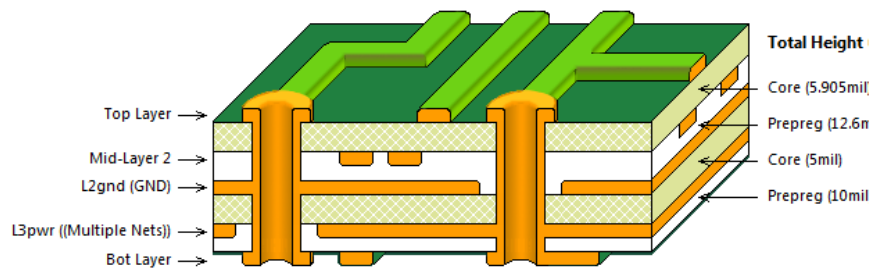
Voltage DC or Peak AC	Εσωτερικό Layer	Εξωτερικό Layer για χρήση μέχρι ύψος 3050 m	Εξωτερικό Layer για χρήση μεγαλύτερου ύψους
0 - 15 V	0,05 mm	0,1 mm	0,1 mm
16 - 30 V	0,05 mm	0,1 mm	0,1 mm
31 - 50 V	0,1 mm	0,6 mm	0,6 mm
51 - 100 V	0,1 mm	0,6 mm	1,5 mm
101 - 150 V	0,2 mm	0,6 mm	3,2 mm
151 - 170 V	0,2 mm	1,25 mm	3,2 mm
171 - 250 V	0,2 mm	1,25 mm	6,4 mm
251 - 300 V	0,2 mm	1,25 mm	12,5 mm
301 - 500 V	0,25 mm	2,5 mm	12,5 mm

Μία πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB) μπορεί να αποτελείται από ένα, δύο ή και περισσότερα επίπεδα, ανάλογα πόσο περίπλοκο είναι το ηλεκτρικό κύκλωμα που θέλουμε να κατασκευάσουμε. Όσο πιο σύνθετο γίνεται ένα κύκλωμα, τόσο πιο δύσκολη είναι και η σχεδιάσή του.



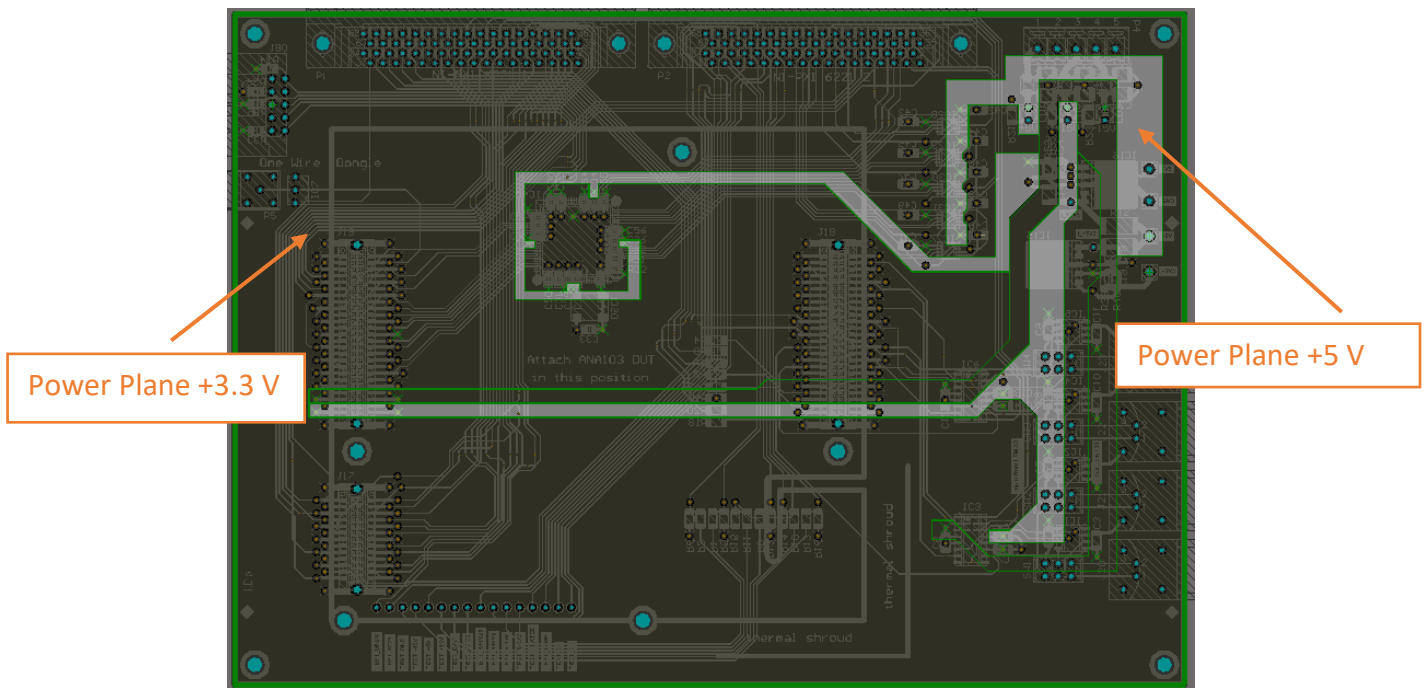
Εικόνα 48: Κύκλωμα τυπωμένης πλακέτας με δύο επίπεδα

Ένα συνηθισμένο πρόβλημα που εμφανίζεται, είναι πως σε ορισμένες περιπτώσεις, λόγω της θέσης των στοιχείων, δεν μπορούν να χαραχθούν οι αγωγοί χαλκού χωρίς να διασταυρωθούν με κάποιους άλλους, δημιουργώντας έτσι βραχυκυκλώματα. Μια προφανής λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση πολλαπλών επιπέδων/στρώσεων (Layers) στην πλακέτα. Με αυτό τον τρόπο, αν δεν μπορεί να χαραχτεί ένας αγωγός σε ένα επίπεδο, μπορεί να χαραχτεί σε ένα άλλο. Τα διαφορετικά επίπεδα της πλακέτας μπορούν να ενωθούν με αγώγιμο τρόπο με την τεχνική των VIAs (Vertical Interconnect Access), τα οποία είναι οπές με αγώγιμη επικάλυψη. Οι οπές αυτές δεν επιτελούν κανέναν άλλο ρόλο εκτός από το να προσφέρουν την αγώγιμη σύνδεση μεταξύ επιπέδων. Σε όλο το μήκος μίας αγώγιμης διαδρομής, συνιστάται ο λιγότερος δυνατός αριθμός VIAs για να μην υπάρχει κίνδυνος αλλοίωσης του σήματός μας.



Εικόνα 49: PCB τεσσάρων επιπέδων

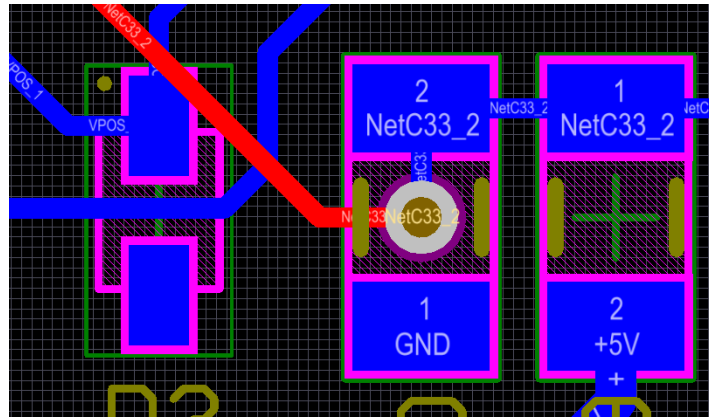
Σε κατασκευές πολλαπλών επιπέδων (τουλάχιστον τέσσερα), συνηθίζεται να χρησιμοποιείται το πάνω και το κάτω επίπεδο για τις συνδέσεις των σημάτων και τα δύο ενδιάμεσα επίπεδα για τη γείωση (GND) και την τροφοδοσία, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 49. Η χρήση ξεχωριστών επιπέδων μόνο για την τροφοδοσία και τη γείωση έχει το πλεονέκτημα της μείωσης θορύβου στο κύκλωμα.



Εικόνα 50: Power plane

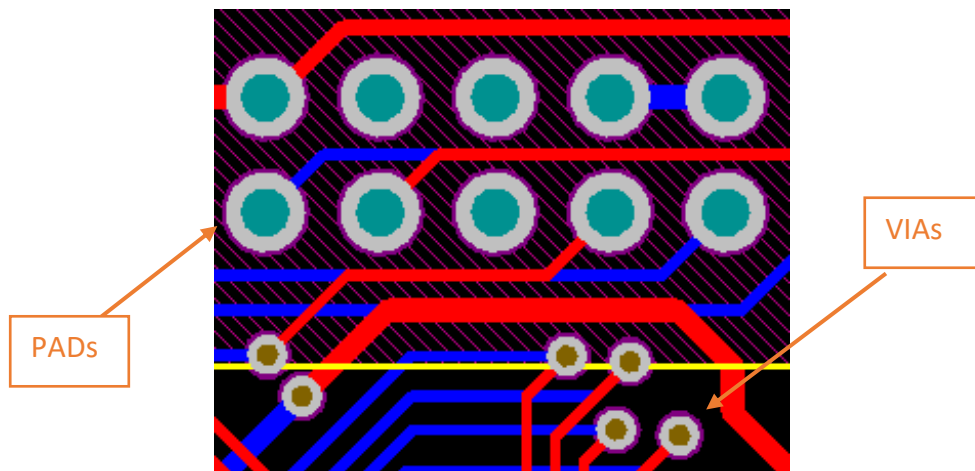
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 50, μπορεί να οριστεί στο επίπεδο της τροφοδοσίας μία τιμή, για παράδειγμα + 3.3 V ή + 5 V, ανάλογα με το ποια χρησιμοποιείται περισσότερο. Σε αρκετές περιπτώσεις, σε ένα κύκλωμα μπορεί να υπάρξουν διαφορετικές τιμές τάσης. Σε αυτή την περίπτωση, αν ορίσουμε σαν κεντρική τροφοδοσία του PCB για παράδειγμα τα + 3.3 V, μπορούμε να χαράξουμε μικρότερες επιφάνειες με την τροφοδοσία που θέλουμε, για παράδειγμα + 5 V. Η ένωση των στοιχείων σε αυτές τις επιφάνειες γίνεται με την χρήση των VIAs.

Τα προηγούμενα χρόνια, για την υλοποίηση του κυκλώματος, γινόταν χρήση διάτρητων στοιχείων, των οποίων οι οπές εκτείνονταν σε όλα τα επίπεδα. Τελευταία, έχει καθιερωθεί η χρήση των στοιχείων επιφανειακής τοποθέτησης SMD (Surface-Mount Device), τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν τόσο στο πάνω, όσο και στο κάτω επίπεδο της πλακέτας. Έτσι, σε μικρότερη επιφάνεια μπορούν να τοποθετηθούν περισσότερα στοιχεία. Μικρότερη σχεδίαση PCB συνεπάγεται μικρότερο κόστος για την κατασκευή του.



Εικόνα 51: Ένωση SMD στοιχείου που βρίσκεται στο Bottom Layer, με το Top layer με τη χρήση VIA

Ένα άλλο είδος διάτρητων οπών που συναντάμε στην κατασκευή PCB είναι τα PADs. Αυτά τα χρησιμοποιούνται συνήθως για την τοποθέτηση των διάτρητων στοιχείων, όπως παράδειγμα μια διάτρητη αντίσταση ή μία επαφή (connector). Ο κάθε κατασκευαστής ορίζει τις προδιαγραφές για το πόσο μικρές τρύπες μπορεί να κάνει στο PCB.

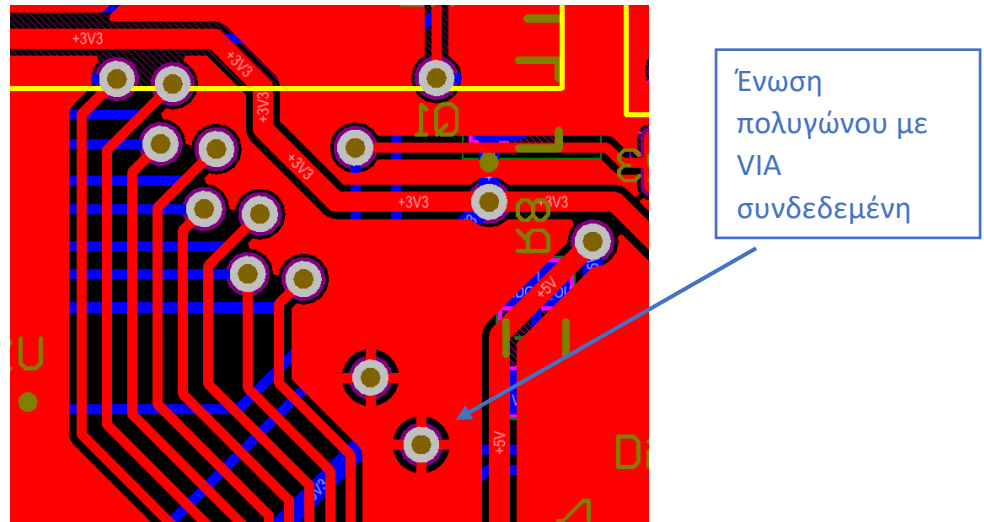


Εικόνα 52: Διάκριση VIAs και PADs

Αντίστοιχα, και τα PADs είναι οπές με αγώγιμη επικάλυψη. Τόσο στα PADs όσο και στα VIAs, η αγώγιμη επικάλυψη περιφερειακά της οπής, πρέπει να έχει διάμετρο το λιγότερο 1.8 φορές τη διάμετρο της οπής, ή να είναι τουλάχιστον κατά 0,5 mm μεγαλύτερη από την οπή.

Μία επιπλέον δυνατότητα που έχουμε στην κατασκευή PCB, είναι η χρήση των πολυγώνων (Polygon Plane). Το πολύγωνο καλύπτει μία περιοχή που επιλέγουμε, με χαλκό ο οποίος εκτείνεται γύρω από τις αγώγιμες διαδρομές και τις οπές. Η χρήση των

πολυγώνων προσφέρει ένα πολύ καλό επίπεδο γείωσης (GND) στο κύκλωμα. Τα πολύγωνα μπορούν να τοποθετηθούν είτε στο πάνω, είτε στο κάτω επίπεδο του PCB. Ένα παράδειγμα χρήσης πολυγώνου συνδεδεμένου στη γείωση φαίνεται στην Εικόνα 53, το οποίο βρίσκεται γύρω από τις αγώγιμες διαδρομές και τις σπές διαφορετικών σημάτων από τη γείωση, ενώ ενώνεται με αυτά που είναι συνδεδεμένα στη γείωση.



Εικόνα 53: Τοποθέτηση πολυγώνου συνδεδεμένο με το GND

Οι παραπάνω κανόνες σχεδίασης PCB συντελούν στην ελάττωση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και θορύβου στα σήματα, τα οποία μπορεί να μειώσουν την αποτελεσματικότητα του κυκλώματος.

Εκτός από τα επίπεδα χαλκού σε ένα PCB, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη σχεδίαση των αγώγιμων διαδρομών, υπάρχουν και κάποια επιπλέον επίπεδα ή αλλιώς βοηθητικά στρώματα, εξίσου σημαντικά. Τα βοηθητικά αυτά στρώματα βοηθούν στην προστασία και τη συναρμολόγηση του κυκλώματος. Μερικά από τα πιο συνηθισμένα βοηθητικά στρώματα που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:

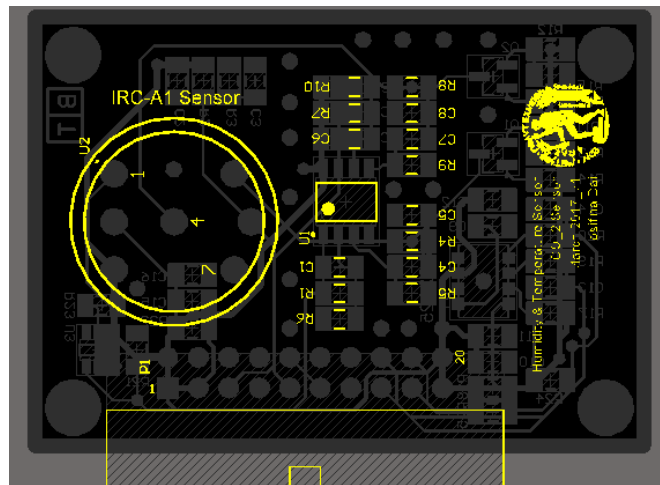
Solder Mask, η μάσκα χαλκού

Πρόκειται για ένα λεπτό στρώμα ειδικού βερνικιού που μπαίνει πάνω από τα εξωτερικά στρώματα χαλκού της πλακέτας αφήνοντας εκτεθειμένα μόνο τα σημεία στα οποία θα κολληθεί κάποιο εξάρτημα. Έχει συνήθως πράσινο χρώμα και βοηθάει στην αποφυγή βραχυκυκλωμάτων αλλά και στην προστασία της πλακέτας από την διάβρωση.

Silkscreen (Top and Bottom Overlay)

Σε αυτό το βοηθητικό στρώμα που βρίσκεται πάνω από τη μάσκα χαλκού, υπάρχει η δυνατότητα εκτύπωσης κειμένου ή σχεδίων για την διευκόλυνση στην συναρμολόγηση των στοιχείων στο PCB. Με αυτή την μέθοδο συνήθως τυπώνεται πάνω στην πλακέτα η

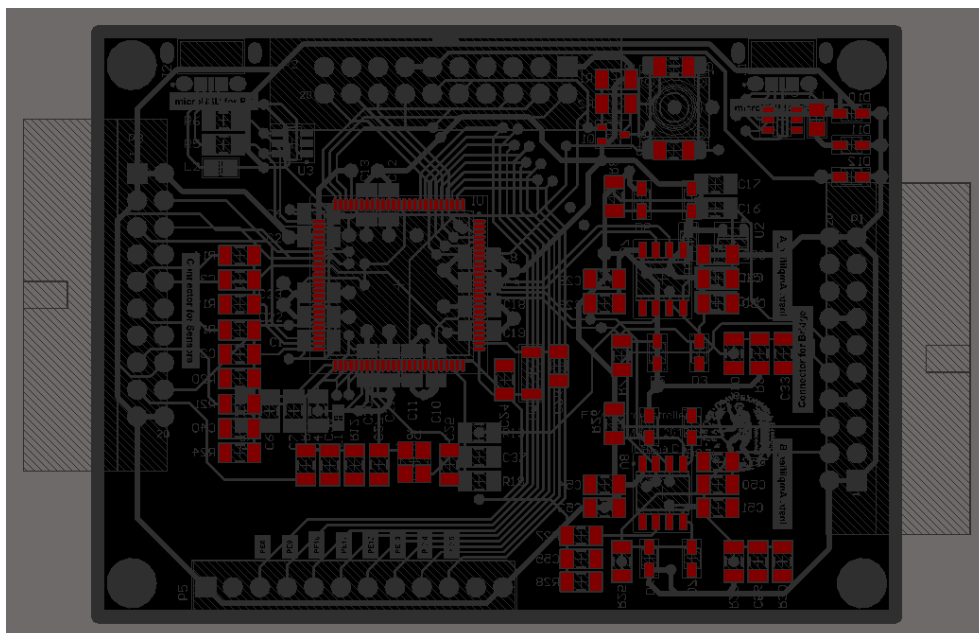
θέση, ο προσανατολισμός καθώς και το όνομα (C1, R1, U1 κτλ) των διάφορων εξαρτημάτων αλλά και άλλες πληροφορίες που μπορεί να ορίσει ο σχεδιαστής. Συχνά τυπώνονται και πληροφορίες όπως το όνομα, το λογότυπο, ημερομηνία κατασκευής κ.α.



Εικόνα 54: Top overlay

Solder Paste Layer

Πρόκειται για μία λεπτή στρώση από ειδική ουσία (solder paste) η οποία διευκολύνει στην ροή της κόλλησης πάνω στον χαλκό και βοηθάει στην κόλληση των εξαρτημάτων SDM. Η ουσία αυτή μπαίνει στις περιοχές των επαφών (pads) οι οποίες δεν καλύπτονται από τη μάσκα χαλκού.



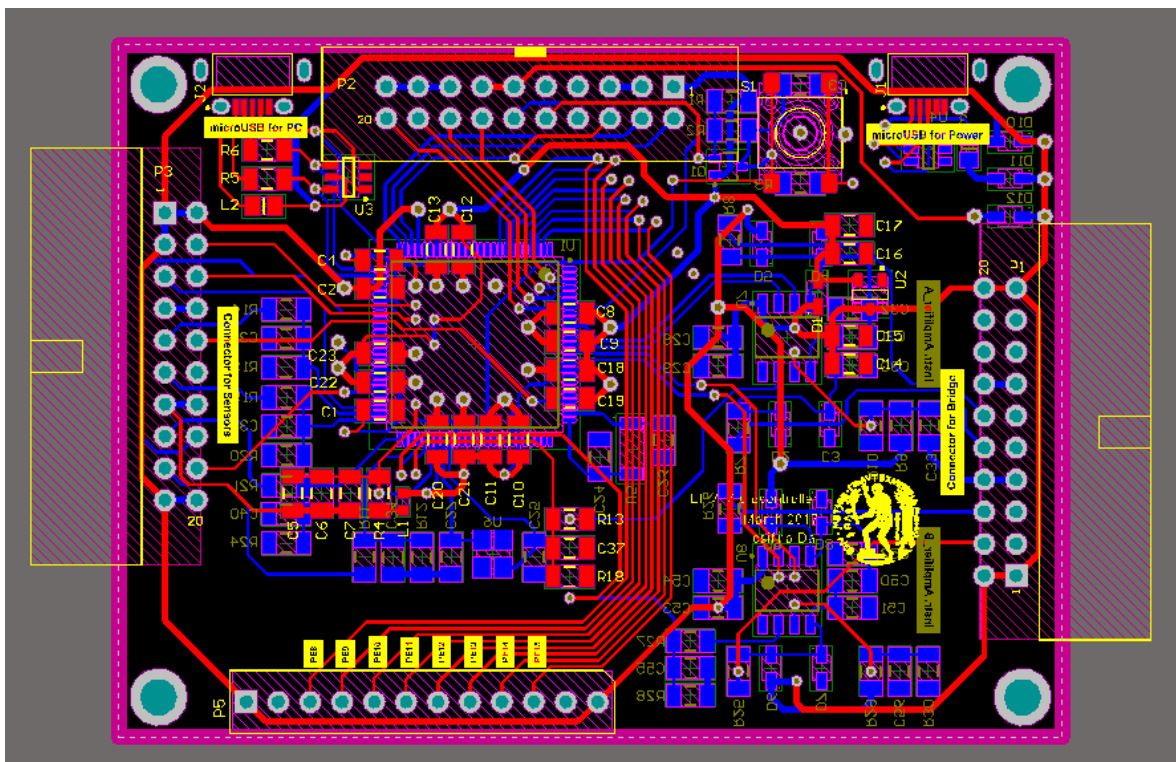
Εικόνα 55: Bottom Solder Paste Layer

4.1 Κατασκευή PCB μικροελεγκτή και συστήματος μέτρησης μετατόπισης

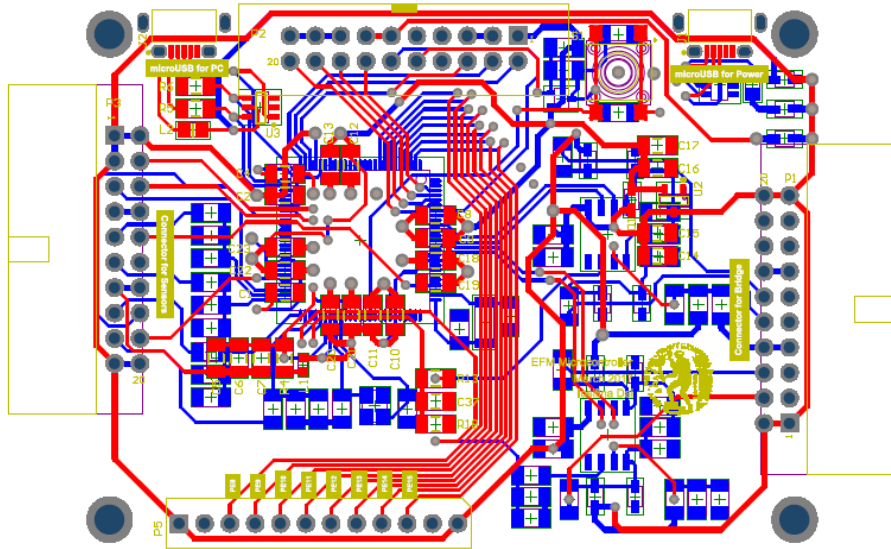
Για την κατασκευή του PCB της κεντρικής πλακέτας η οποία περιέχει τον μικροελεγκτή και το κύκλωμα μέτρησης μικρής μετατόπισης, σχεδιάστηκε μια πλακέτα δύο επιπέδων. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η τοποθέτηση των στοιχείων κυκλώματος, τόσο στο πάνω επίπεδο (Top layer – κόκκινο) όσο και στο κάτω επίπεδο (Bottom layer – μπλε). Στις άκρες του PCB τοποθετήθηκαν κατάλληλες επαφές για να είναι πιο εύκολη η σύνδεση με περιφερειακά στοιχεία, όπως θύρα USB για τροφοδοσία, επαφές για σύνδεση γέφυρας, JTAG και με την πλακέτα των αισθητήρων CO₂, υγρασίας και θερμοκρασίας.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 56, το τσιπ του μικροελεγκτή τοποθετήθηκε στο κάτω επίπεδο και στο πάνω επίπεδο τοποθετήθηκαν, όσο το δυνατόν πιο κοντά στους ακροδέκτες τροφοδοσίας του, οι πυκνωτές απόζευξης. Αυτό γίνεται λόγω της επαγωγικής επίδρασης που μπορεί να προκαλέσει μια μεγαλύτερη αγώγιμη διαδρομή, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα.

Για τους αγωγούς χαλκού τροφοδοσίας και γείωσης, επιλέχθηκε πάχος 20 mil, ενώ για τους υπόλοιπους αγωγούς, πάχος 10 mil.

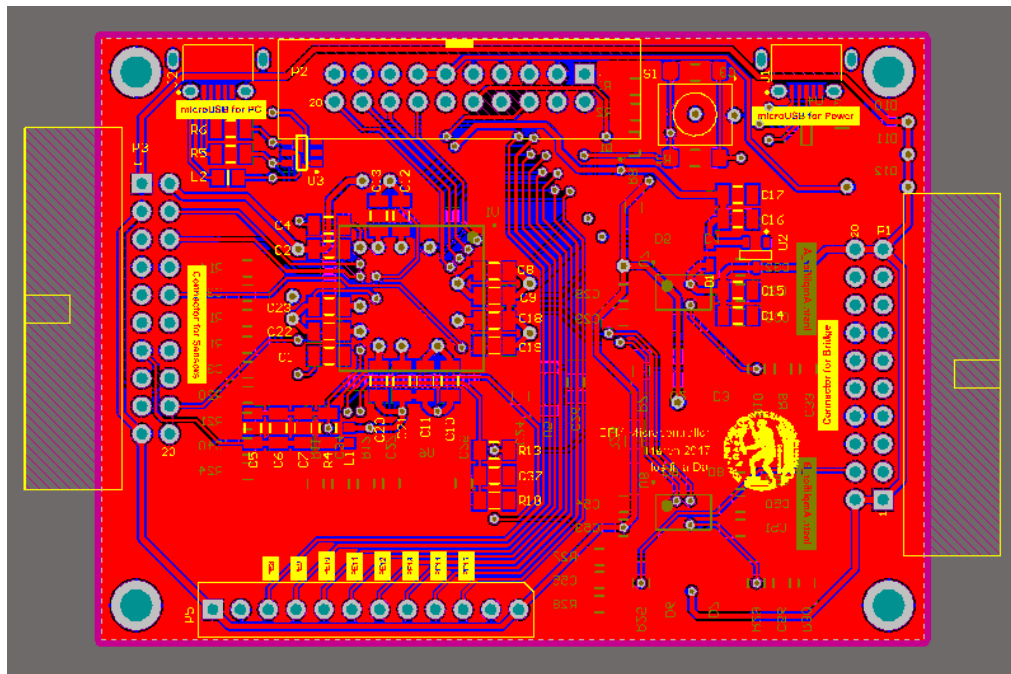


Εικόνα 56: Υλοποίηση PCB πλακέτας μικροελεγκτή

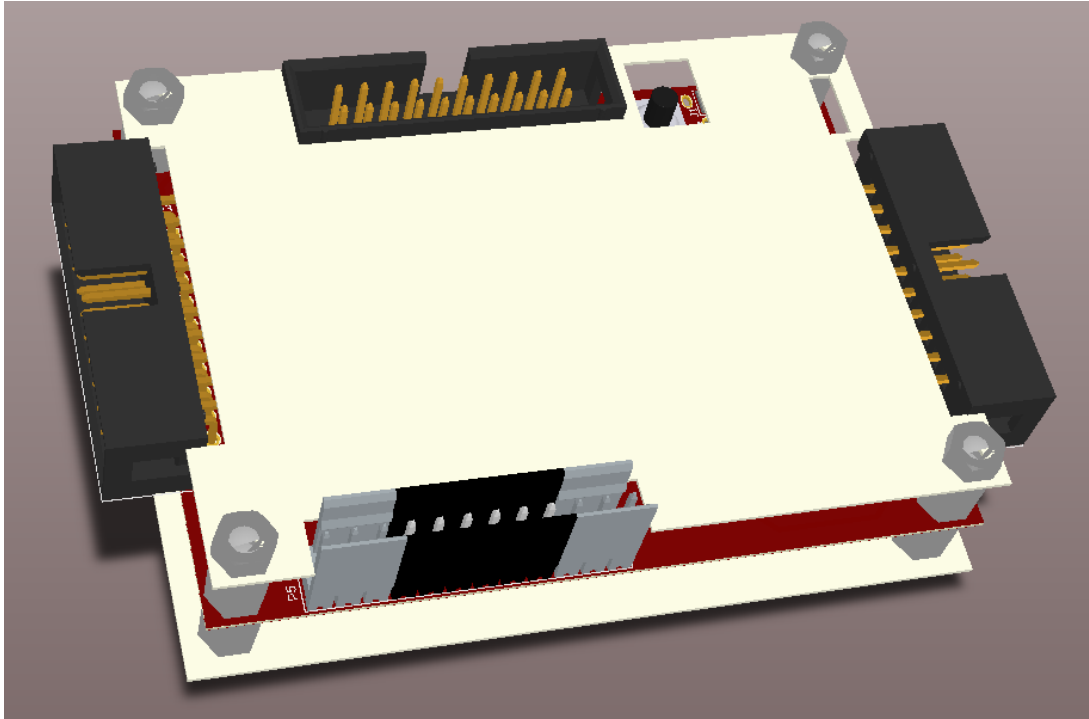


Εικόνα 57: Σχεδίαση PCB της κεντρικής πλακέτας

Τέλος, στη σχεδίαση του PCB τοποθετήθηκαν πολύγωνα γείωσης και στις δύο επιφάνειες (Top και Bottom layer). Έτσι η γείωση είναι μεγάλη σε επιφάνεια και ενιαία, συνεπώς και πιο αποτελεσματική.



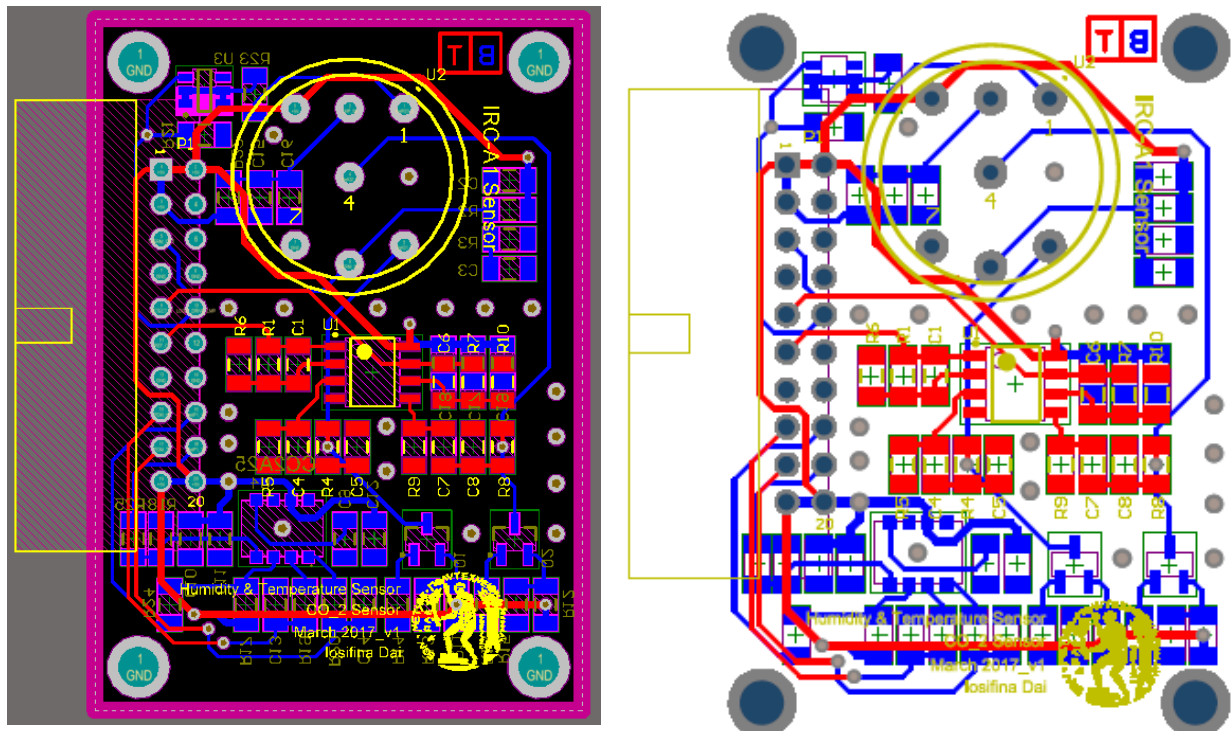
Εικόνα 58: Πολύγωνα γείωσης και στα δύο επίπεδα του PCB



Εικόνα 59: 3D κεντρικής πλακέτας μικροελεγκτή

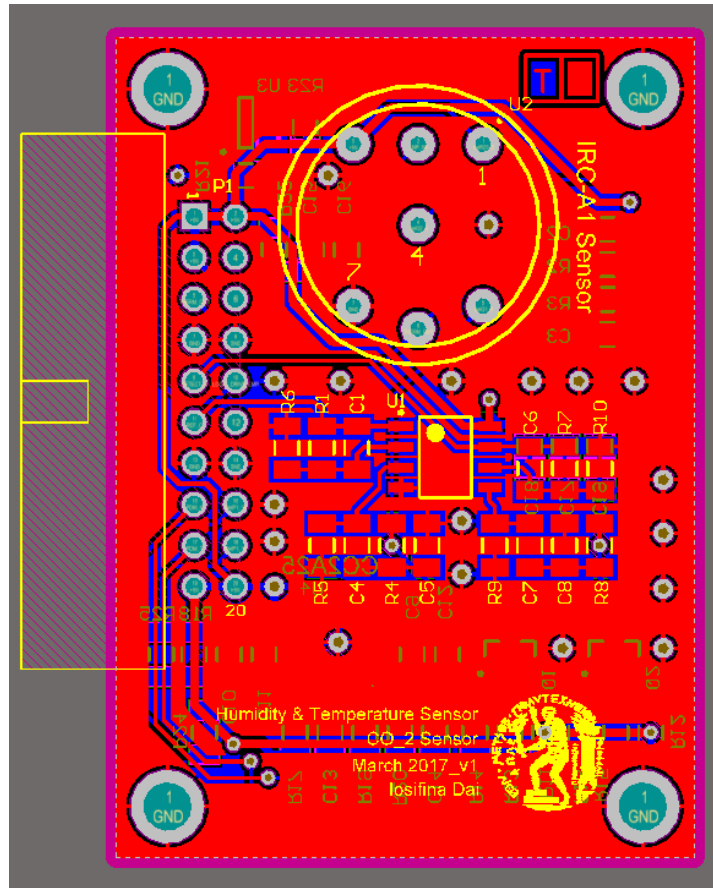
4.2 Κατασκευή PCB αισθητήρων CO₂, θερμοκρασίας-υγρασίας

Και σε αυτή την υλοποίηση επιλέχθηκε πάχος 10 mil για τους αγωγούς χαλκού αναλογικών και ψηφιακών σημάτων. Αντίστοιχα, για τους αγωγούς τροφοδοσίας και γείωσης επιλέχθηκε πάχος 20 mil.

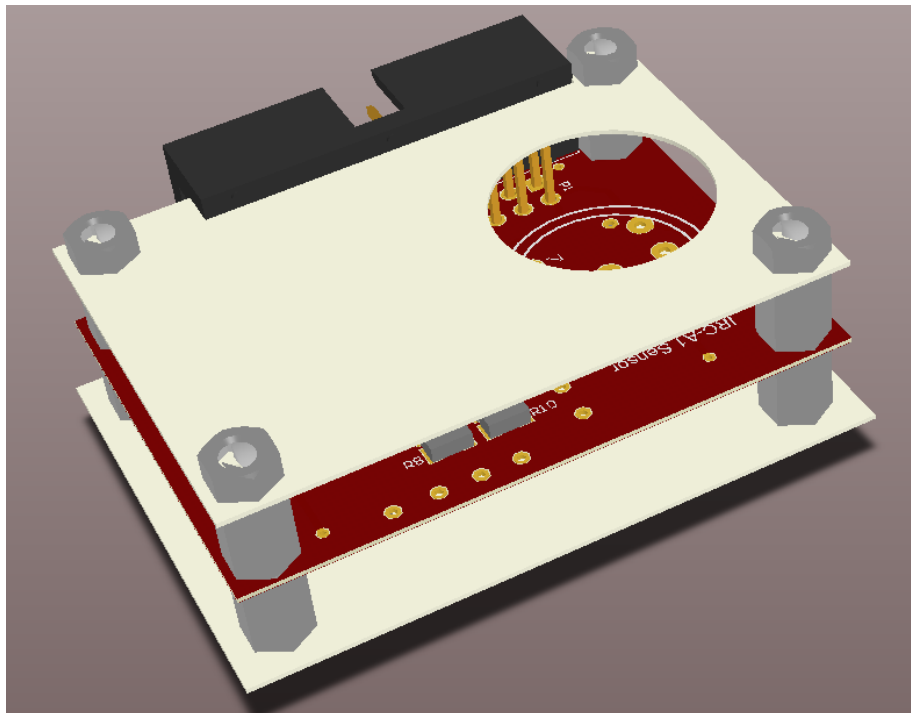


Εικόνα 60: Υλοποίηση PCB αισθητήρων_1

Τέλος και σε αυτή την υλοποίηση χρησιμοποιήθηκαν πολύγωνα γείωσης και στις δύο επιφάνειες του PCB (Top και Bottom layer).



Εικόνα 61: Πολύγωνο γείωσης και στα δύο επίπεδα του PCB των αισθητήρων_1



Εικόνα 62: 3D PCB αισθητήρων_1

Βιβλιογραφία

1. <https://www.thorlabs.de/drawings/342278c705a00a77-1443F649-5056-2306-D962D3DBCFE9689A/PZS001-Manual.pdf>
2. <https://www.thorlabs.de/drawings/342278c705a00a77-1443F649-5056-2306-D962D3DBCFE9689A/PZS001-SpecSheet.pdf>
3. http://www.pi-usa.us/tutorial/4_20.html#4_21
4. <http://www.ti.com/lit/ml/slyp163/slyp163.pdf>
5. Κ. Χ. Πολιτόπουλος, Οργανολογία και τεχνικές, Βοιατρικές εφαρμογές, Εκδόσεις ΕΜΠ
6. Sedra/Smith Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα, Πέμπτη Έκδοση, Αθήνα 2010, Εκδόσεις Παπασωτηρίου
7. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8557.pdf>
8. https://en.wikipedia.org/wiki/Nondispersive_infrared_sensor
9. <https://www.intl-lighttech.com/sites/default/files/pdf/application/ndir-gas-sensor.pdf>
10. http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2016/01/AAN_202-04.pdf
11. <http://www.electronics-base.com/projects/complete-projects/dspic30f4013-and-ndir-infrared-gas-sensor-alphasense-irc-a1-co2-example>
12. <http://www.electronics-base.com/general-description/gas-sensors/non-dispersive-infrared-ndir-gas-sensors>
13. <http://www.mouser.com/ds/2/18/AAS-920-558D-Telaire%20ChipCap2-020316-web-850612.pdf>

14. <https://www.amphenol-sensors.com/en/component/edocman/1-humidity/34-relative-humidity-sensors/37-chipcap-2/341-telaire-chipcap-2-application-guide>
15. <http://gr.mouser.com/new/Silicon-Laboratories/silabs-efm32-wonder-gecko-mcu/>
16. <http://www.silabs.com/products/development-tools/mcu/32-bit/efm32-wonder-gecko-starter-kit>
17. High-Speed Layout Guidelines, Texas Instrument
<http://www.ti.com/lit/an/scaa082/scaa082.pdf>
18. David L. Jones, PCB Design Tutorial,
https://server.ibfriedrich.com/wiki/ibfwikien/images/d/da/PCB_Layout_Tutorial_e.pdf

