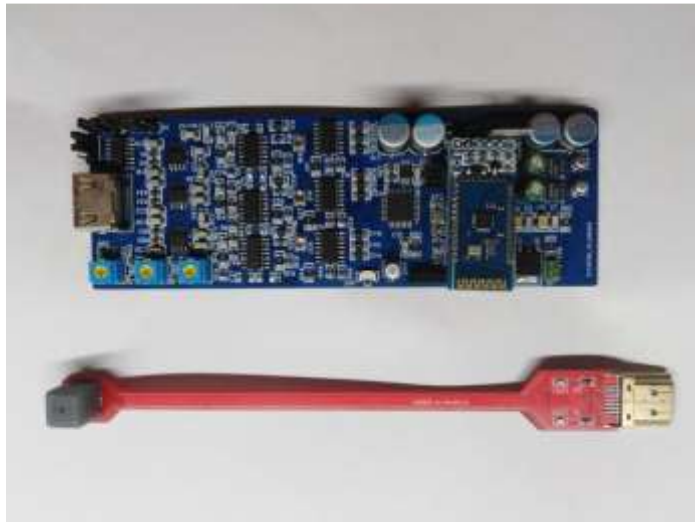




ΔΙΕΘΝΕΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
«ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΕΩΣ 3T ΣΕ  
ΤΡΕΙΣ ΑΞΟΝΕΣ»



Του φοιτητή  
Γεώργιου Δεληγιάννη  
Αρ. Μητρώου: 514032

Επιβλέπων  
Κιοσκερίδης Ιορδάνης  
Καθηγητής

Σεπτέμβριος 2020

Τίτλος Π.Ε.: Μετρητής Μαγνητικού πεδίου έως 3T σε τρεις άξονες

Κωδικός Π.Ε. 16130

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Δεληγιάννης Γεώργιος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Κιοσκερίδης Ιορδάνης

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε: 27/02/2018

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε: 18/9/2020

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Δι.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

## Πρόλογος

Κατά καιρούς το φαινόμενο του μαγνητισμού απασχόλησε πολλούς επιστήμονες και ερευνητές και τους οδήγησε στην ανακάλυψη νέων τεχνολογιών μέτρησης του, ώστε να μπορέσουν να δώσουν μια πιο πιστή και ακριβή τοποθέτηση στο φαινόμενο αυτό. Μία από αυτές τις τεχνολογίες γεννιέται το 1879, όταν ο Dr. Edwin Hall κατά την διάρκεια του διδακτορικού του, στο πανεπιστήμιο John Hopkins στην Βαλτιμόρη, παρατηρεί ένα φαινόμενο. Ο Dr. Hall προσπαθώντας να αποδείξει την θεωρία ροής ηλεκτρονίων από τον Kelvin, ανακάλυψε ότι, όταν τοποθετείτε ένας μαγνήτης κάθετα σε μια λεπτή επιφάνεια από αγώγιμο υλικό το οποίο διαρρέεται από ρεύμα, παρουσιάζεται μια διαφορά δυναμικού στα δύο άκρα του αγώγιμου υλικού. Παρατηρεί επίσης ότι η τάση είναι ανάλογη του ρεύματος που διαρρέει το αγώγιμο υλικό και ανάλογη της πυκνότητας του μαγνητικού πεδίου που είναι κάθετη σε αυτό. Για παραπάνω από 70 χρόνια αυτή η ανακάλυψη δεν βρίσκει κάπου εφαρμογή, μέχρι το 1965 με την έλευση των ημιαγωγών. Δυο μηχανικοί στον τομέα ανάπτυξης των ημιαγωγών ο Everett Vorthmann και ο Joe Maurin αποφασίζουν να συμπυκνώσουν όλη την αρχή λειτουργίας του φαινομένου που παρατήρησε ο Dr. Hall σε ένα μόνο chip από πυρίτιο, το οποίο και κατάφεραν.

Αυτό άλλαξε την κύρια λειτουργία που είχε ως αισθητήρας. Από μια απλή μέτρηση μαγνητικού πεδίου, γίνεται το κλειδί για την μέτρηση και άλλων μεγεθών, όπως είναι της πίεσης, ρεύματος, θέσης-μετατόπισης, θερμοκρασίας μέσω της ανίχνευσης μαγνητικού πεδίου. Τους αισθητήρες Hall τους εντοπίζουμε σχεδόν παντού στις μέρες μας. Αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροναυπηγικής, των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθώς και του ιατρικού εξοπλισμού.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία γίνεται η μελέτη, η σχεδίαση και η κατασκευή μια ολοκληρωμένης συσκευής που μετράει μαγνητικό πεδίο έως 3 Tesla σε τρεις άξονες. Τα κύρια σημεία που διαπραγματεύεται είναι οι τοπολογίες των ηλεκτρονικών διατάξεων που απαρτίζουν την συσκευή, καθώς και η σχεδίαση και υλοποίηση android εφαρμογής για την απεικόνιση των δεδομένων σε συσκευή τηλεφώνου μέσω bluetooth. Η συσκευή μέτρησης χωρίζεται σε δύο κομμάτια. Το ένα είναι το probe μέτρησης το οποίο έχει τοποθετημένους τους αισθητήρες μέτρησης και τα led ένδειξης φοράς μαγνητικού πεδίου και το δεύτερο κομμάτι της συσκευής, είναι η πλακέτα επεξεργασίας και προσαρμογής των δεδομένων. Αυτές οι δύο συνδέονται μέσω HDMI connector για ανταλλαγή δεδομένων αλλά και για την απαραίτητη μηχανική υποστήριξη. Παρατίθενται οι μέθοδοι που επιλέχτηκαν για την επίτευξη όλων αυτών αναλύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν καθώς και τρόποι βελτίωσης της συσκευής για περαιτέρω ανάπτυξη.

## ABSTRACT

In this thesis the study, design and construction of a complete device that measures a magnetic field up to 3 Tesla in three axes. The main points it deals with, are the topologies of the electronic circuits that make up the device, as well as the design and implementation of an android application for the display of data on a smartphone device via bluetooth. The measuring device is divided into two parts. One is the measurement probe which has mounted the measuring sensors and the magnetic field direction LEDs and the second part of the device is the data processing and conditioning board. These two are connected via HDMI connector for data exchange but also for the necessary mechanical support. The methods selected to achieve all these objectives are listed, the conclusions drawn and ways to improve the device for further development are analyzed.

## Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	4
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	7
1.1 Εισαγωγή.....	11
1.2 Μαγνητικό πεδίο .....	11
1.3 Μεγέθη του μαγνητικού πεδίου .....	12
1.4 Μαγνητικές ιδιότητες υλικών.....	14
1.5 Διαμαγνητικά υλικά.....	14
1.6 Παραμαγνητικά υλικά .....	14
1.7 Σιδηρομαγνητικά υλικά .....	15
1.8 Βρόχος υστέρησης .....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> Αισθητήρες μέτρησης μαγνητικού πεδίου .....	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Δομή αισθητήρα Hall.....	18
2.3 φαινόμενο Hall.....	18
2.4 Γεωμετρία αισθητήρα Hall και επιλογή υλικού κατασκευής.....	21
2.4.1 Γεωμετρία.....	21
2.4.2 Υλικά κατασκευής και ιδιότητες .....	22
2.5 Βασικά χαρακτηριστικά παρασιτικών φαινομένων σε αισθητήρες hall .....	22
2.5.1 Ευαισθησία αισθητήρα .....	22
2.5.2 Τάση μετατόπισης (offset) .....	23
2.5.3 Εξάρτηση εξόδου από μεταβολή θερμοκρασίας .....	23
2.5.4 Μη γραμμικότητα.....	24
2.5.5 Επίδραση θορύβου .....	24
2.5.6 Ακρίβεια μέτρησης μαγνητικού πεδίου .....	25
2.6 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Αισθητήρα Hall.....	26
2.7 Βασική κυκλωματική σύνδεση αισθητήρα Hall.....	26
2.8 Αναλογικοί αισθητήρες Hall .....	27
2.9 Συνάρτηση μεταφοράς αναλογικού αισθητήρα .....	28
2.10 Ψηφιακοί αισθητήρες Hall .....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> Βάσεις στήριξης αισθητήρων Hall(Probes) .....	30
3.1 Εισαγωγή.....	30

3.2 Βάση πεπλατυσμένης μορφής (transverse hall probe) .....	31
3.3 Βάση κυλινδρικής μορφής(Axial hall probe).....	32
3.4 Πολυδιάστατες μετρήσεις .....	32
3.5 Δημιουργία μοντέλου βάσης τοποθέτησης αισθητήρων με την βοήθεια τρισδιάστατου εκτυπωτή .....	33
3.6 Ρύθμιση αισθητήρα Hall (calibration) .....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> Κυκλωματικές διατάξεις .....	36
4.1 Εισαγωγή.....	36
4.2 Επιλογή αισθητήρα Hall .....	37
4.2 Σχεδιασμός τροφοδοτικού κυκλωμάτων .....	38
4.3 Κυκλώματα προσαρμογής και επεξεργασίας δεδομένων.....	40
4.3.1 Ανάλυση παθητικού φίλτρου και διαφορικού ενισχυτή οργανολογίας .....	40
4.3.2 Ανάλυση ψηφιακού ρυθμιστή κέρδους.....	41
4.3.3 Ανάλυση ενεργού φίλτρου 2 <sup>ης</sup> τάξης.....	43
4.3.4 Κύκλωμα προσαρμογής $y=-ax+b$ .....	45
4.3.5 Επεξεργασία δεδομένων.....	50
4.3.6 Επιλογή μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> Μικροελεγκτής συστήματος.....	53
5.1 Εισαγωγή.....	53
5.2 Μικροελεγκτής ATMEGA328-AU .....	53
5.3 Προγραμματιστικό περιβάλλον και προγραμματισμός μικροελεγκτή .....	54
5.3 Ανάλυση προγράμματος μικροελεγκτή .....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 <sup>ο</sup> Σχεδιασμός πλακέτας.....	58
6.1 Εισαγωγή.....	58
6.2 Σχεδιαστικό πρόγραμμα κατασκευής.....	59
6.3 Σχηματικά κυκλώματα και σχεδιασμός πλακέτας.....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 <sup>ο</sup> Απεικόνιση δεδομένων.....	65
7.1 Εισαγωγή.....	65
7.2 Πρωτόκολλο UART (universal asynchronous receiver-transmitter).....	65
7.2.1 Μεταφορά σειριακών δεδομένων.....	65
7.2.3 Πλαίσια χαρακτήρων .....	66
7.3 Πρωτόκολλο Bluetooth.....	66
7.4 Android εφαρμογή.....	67
7.5 Πρόγραμμα ροής εφαρμογής .....	68

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 <sup>ο</sup> Πειραματικές μετρήσεις συγκριτικά αποτελέσματα.....	73
8.1 Εισαγωγή.....	73
8.2 Calibrate συσκευής και μετρήσεις.....	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 <sup>ο</sup> Συμπεράσματα και βελτιώσεις .....	80
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	82
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	83
Παράρτημα 1 Κώδικας μικροελεγκτή C++.....	83

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Φυσικός μαγνήτης .....	9
Σχήμα 1.2 Ρευματοφόρος αγωγός .....	9
Σχήμα 1.3 Μαγνητικές ροπές Διαμαγνητικού υλικού πριν, κατά και μετά την επίδραση μαγνητικού πεδίου .....	12
Σχήμα 1.4 Μαγνητικές ροπές υλικού πριν, κατά και μετά την επίδραση μαγνητικού πεδίου B.....	12
Σχήμα 1.5 Μαγνητικές ροπές σιδηρομαγνητικού υλικού πριν, κατά μετά την επίδραση μαγνητικού πεδίου B σε θερμοκρασία μικρότερη της $T_c$ και τέλος απομαγνήτιση λόγω θερμοκρασίας μεγαλύτερης της $T_c$ .....	13
Σχήμα 1.6 Ρεύμα διαρροής πηνίου .....	14
Σχήμα 1.7 Καμπύλη βρόχου υστέρησης .....	14
Σχήμα 2.1 Εσωτερική δομή αισθητήρα Hall .....	16
Σχήμα 2.2 Φαινόμενο Hall κατά την απουσία μαγνητικού πεδίου .....	18
Σχήμα 2.3 φαινόμενο Hall κατά την παρουσία μαγνητικού πεδίου .....	18
Σχήμα 2.4 Απεικόνιση γωνίας $\theta$ .....	20
Σχήμα 2.5 Κατασκευαστικές δομές αισθητήρων Hall .....	21
Σχήμα 2.6 Μοντέλο πλήρους γέφυρας προσομοίωσης αισθητήρα Hall .....	23
Σχήμα 2.7 Απεικόνιση ακρίβειας μέτρησης μαγνητικού πεδίου με διάφορες τεχνικές σε συνάρτηση με το μαγνητικό πεδίο .....	25
Σχήμα 2.8 Βασικά περιφερειακά κυκλώματα προσαρμογής αισθητήρα Hall .....	27
Σχήμα 2.9 Εσωτερικά δομικά κυκλώματα προσαρμογής αισθητήρα Hall .....	27
Σχήμα 2.10 Παράδειγμα συνάρτησης μεταφοράς σε διαφορετικές τάσεις τροφοδοσίας .....	28

Σχήμα 2.11	Συνάρτηση μεταφοράς ψηφιακού αισθητήρα με υστέρηση .....	29
Σχήμα 2.12	Εσωτερικά δομικά κυκλώματα προσαρμογής ψηφιακού αισθητήρα με υστέρηση .....	29
Σχήμα 2.13	Χαρακτηριστική καμπύλη εισόδου-εξόδου ψηφιακού διπολικού αισθητήρα .....	30
Σχήμα 3.1	πραγματική Βάση αισθητήρα Hall πεπλατυσμένης μορφής .....	31
Σχήμα 3.2	Απεικόνιση τοποθέτησης αισθητήρα σε πεπλατυσμένη βάση .....	31
Σχήμα 3.3	Απεικόνιση τοποθέτησης αισθητήρα σε βάση κυλινδρικής μορφής .....	32
Σχήμα 3.4	Βάση κυλινδρικής μορφής όπως είναι στο εμπόριο .....	32
Σχήμα 3.5	Τοποθέτηση αισθητήρων για δισδιάστατη μέτρηση .....	32
Σχήμα 3.6	Τοποθέτηση αισθητήρων για τρισδιάστατη μέτρηση .....	32
Σχήμα 3.7	Απεικόνιση χαρακτηριστικών περιβλήματος αισθητήρα.....	33
Σχήμα 3.8	Εσοχές τοποθέτησης αισθητήρων στους 3 άξονες .....	34
Σχήμα 3.9	Γωνιακή απεικόνιση ολόκληρης της βάσης .....	34
Σχήμα 3.10	Διαμπερή εικόνα αγωγών αέρα, για την παθητική ψύξη των αισθητήρων.....	34
Σχήμα 3.11	Απεικόνιση ρύθμιση αισθητήρα σε μαγνήτη παραγωγής ομογενούς μαγνητικού πεδίου ...	35
Σχήμα 3.12	Απεικόνιση χώρου ρύθμισης αισθητήρων .....	35
Σχήμα 4.1	Περιγραφή συνάρτησης μεταφοράς αισθητήρα CYSJ302C .....	37
Σχήμα 4.2	κύκλωμα συνδεσμολογίας αναστροφέα τάσης.....	39
Σχήμα 4.3	Block διάγραμμα διάταξης τροφοδοτικού .....	39
Σχήμα 4.5	Σχηματικό παθητικού φίλτρου με συχνότητα αποκοπής τα 15.923Hz .....	40
Σχήμα 4.6	Σχηματική απεικόνιση σημείων σύνδεσης του AD623 .....	41
Σχήμα 4.7	: Εσωτερική δομή AD623 .....	41
Σχήμα 4.8	Απεικόνιση σημείων σύνδεσης τετραπλού μεταγωγικού διακόπτη CD4066 .....	32
Σχήμα 4.9	Απεικόνιση βαθμίδας ενίσχυσης με ελεγχόμενο κέρδος. Η μεταγωγικοί διακόπτες αντικαθίστανται με το ολοκληρωμένο CD4066 .....	42
Σχήμα 4.10	Χαμηλοπερατό φίλτρο δεύτερης τάξης τοπολογίας Butterworth με συχνότητα αποκοπής τα 11.23Hz.....	43
Σχήμα 4.11	Απόκριση συχνότητας ενεργού φίλτρου Butterworth. Κόκκινη καμπύλη τοπολογία πρώτης τάξης, μπλε καμπύλη τοπολογία δεύτερης τάξης.....	44
Σχήμα 4.12	Απεικόνιση εξόδου αισθητήρα σε έκθεση τυχαίου μαγνητικού πεδίου, με και χωρίς την επίδραση φίλτρου. Με το μπλε χρώμα είναι η αφιλτράριστη έξοδος με το κίτρινο είναι η έξοδος μετά την επίδραση του φίλτρου .....	44
Σχήμα 4.13	Απεικόνιση τάσης (κίτρινο χρώμα) στην έξοδο της βαθμίδας του φίλτρου σε κατάσταση ηρεμίας. Η τάση ανέρχεται στα -481uV. Με το κυανό και το μωβ απεικονίζονται οι τάσεις τροφοδοσίας των αισθητήρων. ....	45
Σχήμα 4.14	Σχηματικό κύκλωμα προσαρμογής σήματος από -3.9V σε 4.7V και από +3.9V σε 0.3V. ....	46

Σχήμα 4.15	Πλήρης block διάγραμμα στοιχείων επεξεργασίας και προσαρμογής .....	48
Σχήμα 4.16	Πλήρης σχηματικό κύκλωμα στοιχείων επεξεργασίας και προσαρμογής .....	49
Σχήμα 4.17	Εσωτερικό block διάγραμμα ADS1115 .....	52
Σχήμα 5.1	Περιγραφή των pins του μικροελεγκτή ATMEGA328-AU .....	54
Σχήμα 5.2	URL για την εισαγωγή core για τον ATMEGA328 .....	55
Σχήμα 5.3	: Σχηματικό κύκλωμα για εγγραφή bootloader στον μικροελεγκτή ATMEGA328-AU με προγραμματιστή την αναπτυξιακή πλακέτα Arduino Nano. ....	56
Σχήμα 5.4	usb to serial converter .....	56
Σχήμα 5.5	Συνδεσμολογία μετατροπέα usb to serial για προγραμματισμό μικροελεγκτή.....	57
Σχήμα 6.1	Σχηματικό κύκλωμα τροφοδοτικού .....	59
Σχήμα 6.2	Σχηματικό κύκλωμα επεξεργασίας σημάτων .....	60
Σχήμα 6.3	Σχηματικό κύκλωμα τάσης αναφοράς .....	61
Σχήμα 6.4	Σχηματικό κύκλωμα συνδεσμολογίας μικροεπεξεργαστή .....	62
Σχήμα 6.5	Σχηματικό κύκλωμα αισθητήρων.....	62
Σχήμα 6.6	Probe μέτρησης. Σχέδιο πλακέτας pcb.....	63
Σχήμα 6.7	: Probe μέτρησης 3D απεικόνιση .....	63
Σχήμα 6.8	Τελικό αποτέλεσμα κατασκευής.....	63
Σχήμα 6.9	Σχέδιο πλακέτας pcb επεξεργασίας δεδομένων.....	64
Σχήμα 6.10	Σχέδιο πλακέτας επεξεργασίας δεδομένων 3D απεικόνιση .....	64
Σχήμα 6.11	Τελικό αποτέλεσμα πλακέτας επεξεργασίας δεδομένων .....	64
Σχήμα 7.1	Block απεικόνιση μεταφοράς δεδομένων .....	65
Σχήμα 7.2	: Πλαίσιο δεδομένων πρωτοκόλλου UART .....	66
Σχήμα 7.3(α)	) Διάγραμμα ροής εφαρμογής android, λειτουργία button .....	68
Σχήμα 7.3(β)	Διάγραμμα ροής εφαρμογής android, λειτουργία κυρίως προγράμματος .....	69
Σχήμα 7.4	: Κεντρικό μενού εφαρμογής σχεδίασης android .....	70
Σχήμα 7.5	Κόκκινο βέλος απεικόνιση σημαντικών στοιχείων που τρέχουν στο background κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Αυτά είναι το bluetooth και ο χρονισμός.....	70
Σχήμα 7.6	: Πρόγραμμα για την επιλογή ζεύξης με το bluetooth .....	71
Σχήμα 7.7	Πρόγραμμα διαχείρισης και διαχωρισμού των δεδομένων προς απεικόνιση .....	72
Σχήμα 7.8	Πρόγραμμα λειτουργίας button .....	72
Σχήμα 8.1	Μαγνήτης αναφοράς για ρύθμιση αισθητήρων.....	73
Σχήμα 8.2	Καμπύλη πυκνότητας μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την απόσταση μέτρησης από τον μαγνήτη Q-08-08-04-N.....	74
Σχήμα 8.3	Χαρακτηρίστηκα μαγνήτη νεοδυμίου Q-08-08-04-N .....	74
Σχήμα 8.4	: Διάγραμμά μετρήσεων πριν από το calibrate των αισθητήρων .....	75

Σχήμα 8.5	Διάγραμμα μετρήσεων μετά από το calibrate των αισθητήρων .....	75
Σχήμα 8.6	Αποτελέσματα μετρήσεων πριν από το calibrate σύμφωνα με την εφαρμογή .....	76
Σχήμα 8.7	Αποτελέσματα μετρήσεων μετά από το calibrate σύμφωνα με την εφαρμογή .....	76
Σχήμα 8.8	Εικόνες κατά την διάρκεια μετρήσεων. Η άσπρη ταινία τοποθετήθηκε στον αισθητήρα Y για να μην βραχυκυκλώσουν τα pin του αισθητήρα όταν ακουμπάει επάνω του ο μαγνήτης .....	77
Σχήμα 8.9	Τιμές μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την απόσταση σύμφωνα με τον κατασκευαστή.....	77
Σχήμα 8.10	: : Σύγκριση τιμών κατασκευαστή με πραγματικές μετρήσεις συσκευής. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η ιδανική καμπύλη που δίνει και ο κατασκευαστής. Με τα χρώματα είναι οι μετρήσεις από τους αισθητήρες .....	78
Σχήμα 8.11	απεικόνιση κατά την διάρκεια μέτρησης Z άξονα .....	79
Σχήμα 8.12	απεικόνιση κατά την διάρκεια μέτρησης X άξονα .....	79
Σχήμα 8.13	απεικόνιση κατά την διάρκεια μέτρησης Y άξονα .....	79
Πίνακας 1.1	Θερμοκρασιακές στάθμες Curie υλικών .....	79
Πίνακας 2.1	Χάσμα και κινητικότητα ημιαγωγών στους 300K, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της ενεργού περιοχής Hall. Η σταθερά RH είναι υπολογισμένη για συγκεκριμένη δόση ντοπαρίσματος υλικού.....	22
Πίνακας 2.2	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αισθητήρα Hall .....	26
Πίνακας 4.1	Βήματα τάσης δειγματοληψίας σε σχέση με την επιλογή κλίμακας μέτρησης .....	51
Πίνακας 5.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά ATMEGA328-AU .....	53
Πίνακας 5.2	Μεταβλητές προγράμματος .....	57
Πίνακας 4.1	Βήματα τάσης δειγματοληψίας σε σχέση με την επιλογή κλίμακας μέτρησης .....	51
Πίνακας 5.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά ATMEGA328-AU	

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> Εισαγωγή στον μαγνητισμό

## 1.1 Εισαγωγή

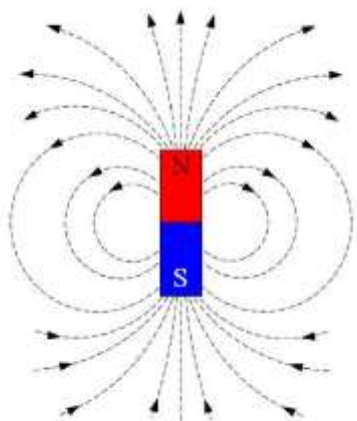
Η ιστορία του μαγνητισμού ξεκινά πριν από χιλιάδες χρόνια. Σε μία περιοχή της Μικράς Ασίας γνωστής ως Μαγνησία, βρέθηκαν λίθοι οι οποίοι είχαν την ιδιότητα ο ένας να έλκει τον άλλο. Οι λίθοι αυτοί ονομάστηκαν μαγνήτες εξαιτίας της περιοχής που ανακαλύφθηκαν. Ωστόσο μόλις τον δέκατο ένατο αιώνα έγινε κατανοητό ότι ο μαγνητισμός και ο ηλεκτρισμός είναι στενά συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Μια σπουδαία ανακάλυψη ήταν ότι το ρεύμα παράγει μαγνητικά πεδία όπως και οι ίδιοι οι μαγνήτες. Όλοι οι τύποι πρακτικών διατάξεων στηρίζουν την λειτουργία τους στους μαγνήτες, από τις πυξίδες στους κινητήρες και από τα ηχεία έως την μνήμη των υπολογιστών και τις ηλεκτρικές γεννήτριες.

## 1.2 Μαγνητικό πεδίο

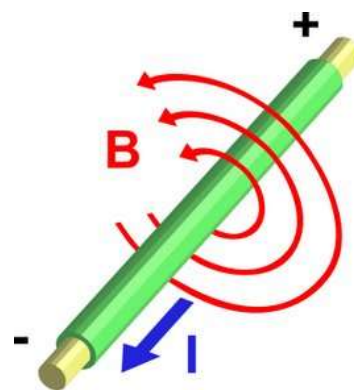
Όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη του μαγνητικού πεδίου, είναι η κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων. Αντίστοιχα, το μαγνητικό πεδίο των μόνιμων μαγνητών, οφείλεται στις κινήσεις των ηλεκτρονίων, γύρω από τον πυρήνα του ατόμου και τον άξονα τους. Οι κινήσεις των ηλεκτρονίων ισοδυναμούν με στοιχειώδη ηλεκτρικά ρεύματα, τα οποία αναπτύσσουν στοιχειώδη μαγνητικά πεδία. Κάθε άτομο οποιοδήποτε υλικού παράγει ένα μαγνητικό πεδίο και είναι ένας στοιχειώδης μαγνήτης, με βόρειο και νότιο πόλο.

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, από τα οποία κατασκευάζονται οι μαγνήτες, τα μαγνητικά πεδία των ατόμων του υλικού είναι προσανατολισμένα μέσα σε πολύ μικρές περιοχές του υλικού, οι οποίες ονομάζονται περιοχές Weiss και καθεμιά αποτελεί ένα μικροσκοπικό μαγνήτη. Όταν οι περιοχές Weiss του σιδηρομαγνητικού είναι προσανατολισμένες στην ίδια διεύθυνση, το υλικό έχει τα χαρακτηριστικά ενός μαγνήτη. Αν οι περιοχές Weiss είναι τυχαία προσανατολισμένες, το υλικό δεν παρουσιάζει μακροσκοπικά μαγνητικό πεδίο και εμφανίζεται αμαγνήτιστο.

Ένας ρευματοφόρος αγωγός ή ένας μαγνήτης δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, δηλαδή ένα χώρο γύρω του στον οποίο ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις. Στο (Σχήμα 1.1-2) απεικονίζονται οι μαγνητικές γραμμές που σχηματίζονται από φυσικό μαγνήτη και από ρευματοφόρο αγωγό. Η μορφή του μαγνητικού πεδίου παριστάνεται με τις μαγνητικές ή δυναμικές γραμμές. Οι μαγνητικές γραμμές είναι κλειστές καμπύλες και έχουν φορά από το βόρειο προς το νότιο πόλο, εξωτερικά του μαγνήτη. Οι μαγνητικές γραμμές συνεχίζονται στο εσωτερικό του μαγνήτη, σχηματίζοντας κλειστές διαδρομές. Οι δυναμικές γραμμές εκτός από την φορά και την διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιούνται στην παράσταση του μέτρου (ένταση). Όσο πυκνότερες είναι οι μαγνητικές γραμμές τόσο ισχυρότερο είναι το μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο είναι ισχυρότερο κοντά στους πόλους.



Σχήμα 1.1 Φυσικός μαγνήτης



Σχήμα 1.2 Ρευματοφόρος αγωγός

### 1.3 Μεγέθη του μαγνητικού πεδίου

Θεωρείται ένα πηνίο με  $N$  σπείρες, το οποίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα με ένταση  $i$ . Το πηνίο είναι τυλιγμένο σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, το οποίο αποτελεί τον πυρήνα. Το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται από το πηνίο περιορίζεται σχεδόν αποκλειστικά στο εσωτερικό του πυρήνα. Ο νόμος του Ampere ορίζει την ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα, σύμφωνα με την σχέση

$$Hl = Ni \quad (1.1)$$

Στην Εξ.(1.1) με  $H$  συμβολίζεται το μέτρο ενός διανυσματικού μεγέθους, το οποίο ονομάζεται ένταση του μαγνητικού πεδίου. Η διεύθυνση και η φορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου, ταυτίζονται με την διεύθυνση και τη φορά των μαγνητικών γραμμών. Το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα από την Εξ.(1.2), είναι

$$H = \frac{Ni}{l} \quad (1.2)$$

Ο αριθμητής στην Εξ.(1.2) ονομάζεται μαγνητεγερτική δύναμη. Μονάδα μέτρησης της μαγνητεγερτικής δύναμης είναι οι αμπεροστροφές (At). Η μαγνητεγερτική δύναμη είναι αντίστοιχη με την ηλεκτρεγερτική δύναμη στον ηλεκτρισμό. Όπως η ηλεκτρεγερτική δύναμη προκαλεί τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, έτσι και η μαγνητεγερτική δύναμη είναι η αιτία δημιουργίας του μαγνητικού πεδίου με ένταση  $H$ . Μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι AT/m.

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου εκφράζει το έργο που καταβάλλει το ηλεκτρικό ρεύμα  $i$ , για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα. Η ισχύς του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από το υλικό κατασκευής του πυρήνα και εκφράζεται από το διανυσματικό μέγεθος της μαγνητικής επαγωγής (flux density)  $B$ . Η μαγνητική επαγωγή συνδέεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, με την σχέση

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.3)$$

Όπου,  $\mu$  είναι η μαγνητική διαπερατότητα (permeability) του υλικού κατασκευής του πυρήνα. Η μαγνητική διαπερατότητα των υλικών εκφράζεται ως προς αυτή του κενού. Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού  $\mu_0$  είναι σταθερή και ίση με

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Atm} \quad (1.4)$$

Η μαγνητική διαπερατότητα οποιουδήποτε υλικού  $\mu$ , συνδέεται με εκείνη του κενού, μέσω της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu_r$

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1.5)$$

Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής είναι το Tesla (T). Από την Εξ(1.3) και (1.4) προκύπτει ότι

$$\mathbf{T} = \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \quad (1.6)$$

Επίσης ισχύει ότι :

$$\text{Gauss} \equiv \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2} \equiv 10^{-4} \text{ T} \quad (1.7)$$

Η μαγνητική επαγωγή σε Tesla ή σε Gauss, εκφράζει τον αριθμό των μαγνητικών γραμμών που περνούν κάθετα από μία επιφάνεια  $1\text{m}^2$  και  $1\text{cm}^2$  αντίστοιχα. Ο ολικός αριθμός των μαγνητικών γραμμών που περνά από μία επιφάνεια  $S$ , εκφράζεται από το μέγεθος της μαγνητικής ροής  $\Phi$ , σύμφωνα με την σχέση

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.8)$$

Αν το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής είναι σταθερό  $\sigma'$  όλη την επιφάνεια  $S$  και το διάνυσμα της είναι κάθετο στην επιφάνεια, η Εξ. (1.8) απλοποιείται ως

$$\Phi = BS \quad (1.9)$$

Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροής είναι είτε το Weber (Wb), είτε ισοδύναμα το Volt-second (Vs).

## 1.4 Μαγνητικές ιδιότητες υλικών

Όταν ένα μεταλλικό σώμα έρχεται σε επαφή, με έναν μαγνήτη ή βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο του, τότε αυτό μαγνητίζεται. Τα υλικά παρουσιάζουν μαγνητικές ιδιότητες που εξαρτώνται από την περιστροφή των ηλεκτρονίων γύρω από τον άξονα τους σύμφωνα με την κβαντική θεωρία του spin, και διακρίνονται σε :

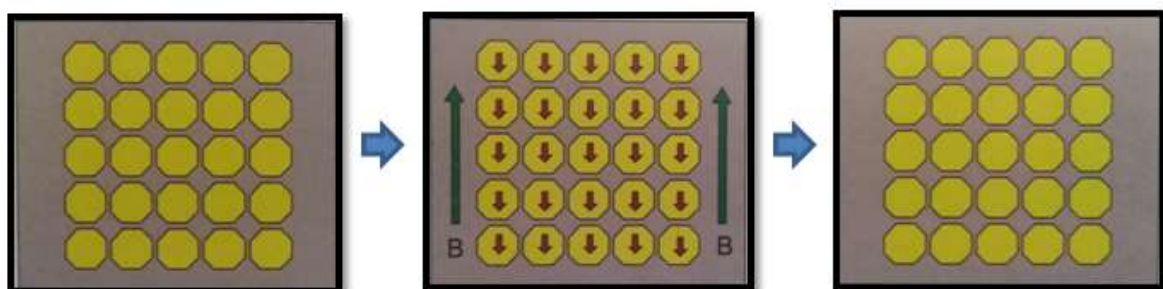
- Διαμαγνητικά
- Παραμαγνητικά
- Σιδηρομαγνητικά

## 1.5 Διαμαγνητικά υλικά

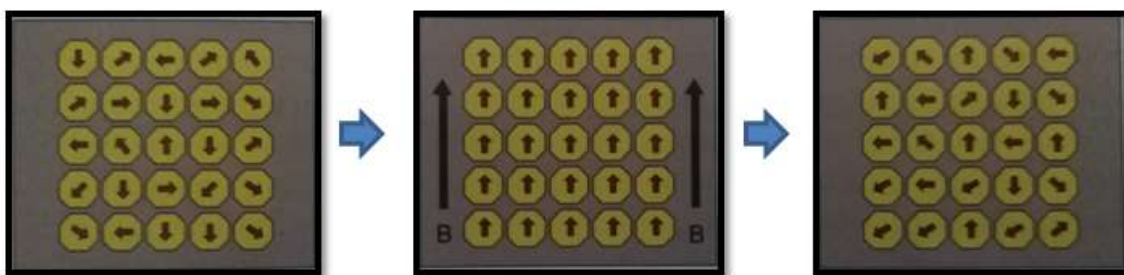
Διαμαγνητικά υλικά όπως αντιμόνιο, ο άργυρος, όλα τα αέρια (εκτός του οξυγόνου), ο υδράργυρος, κ.α., καλούνται τα υλικά εκείνα που όταν βρεθούν μέσα σε μαγνητικό πεδίο  $B$  δημιουργούν μαγνήτιση με φορά αντίθετη προς αυτή που την προκάλεσε, απωθώντας το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Όταν το υλικό βρεθεί εκτός μαγνητικού πεδίου παύουν να υφίστανται οι μαγνητικές γραμμές σε αυτό (Σχ.1.3). Ο συντελεστής μαγνήτισης των διαμαγνητικών υλικών είναι μικρότερος της μονάδος ( $\mu < 1$ ).

## 1.6 Παραμαγνητικά υλικά

Τα παραμαγνητικά υλικά όπως το αλουμίνιο, το αργίλιο, ο λευκόχρυσος, το όζον, κ.α., παρουσιάζουν σε αντίθεση με τα διαμαγνητικά υλικά ροπή με τυχαία κατεύθυνση. Όταν ένα παραμαγνητικό υλικό βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο  $B$ , τότε η μαγνητική ροπή κάθε στοιχειώδη μαγνήτη προσανατολίζεται προς την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου παρουσιάζοντας ελαφρά μαγνήτιση (Σχ.1.4). ο βαθμός της μαγνήτισης εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου και τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το υλικό. Ο συντελεστής μαγνήτισης των παραμαγνητικών υλικών είναι μεγαλύτερος της μονάδος ( $\mu > 1$ ).



Σχήμα 1.3: Μαγνητικές ροπές Διαμαγνητικού υλικού πριν, κατά και μετά την επίδραση μαγνητικού πεδίου  $B$ .



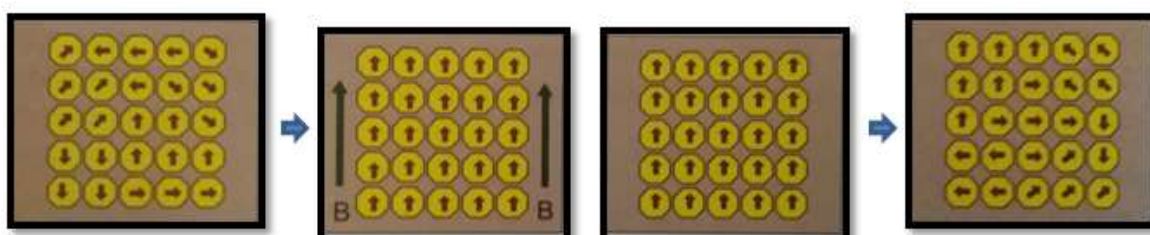
Σχήμα 1.4: Μαγνητικές ροπές υλικού πριν, κατά και μετά την επίδραση μαγνητικού πεδίου B

## 1.7 Σιδηρομαγνητικά υλικά

Πίνακας 1.1 Θερμοκρασιακές στάθμες Curie υλικών

Υλικά	Θερμοκρασία Curie (°C)
Σίδηρος	770
Νικέλιο	358
Κοβάλτιο	1130
Φερρίτης	400-700

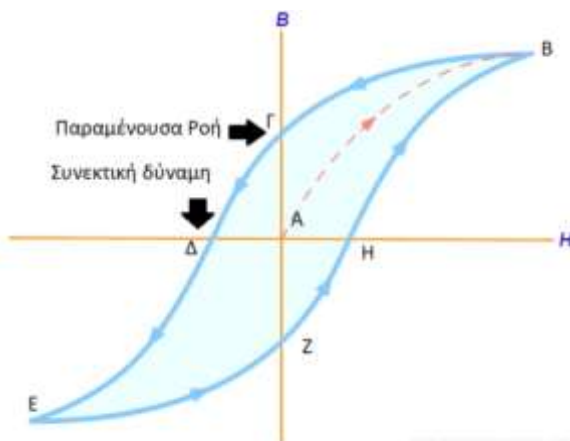
Σιδηρομαγνητικά υλικά καλούνται εκείνα τα υλικά τα οποία όταν βρεθούν μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο B αποκτούν μαγνήτιση την οποία και διατηρούν όταν το υλικό βρεθεί εκτός μαγνητικού πεδίου. Καθοριστικό ρόλο στην μαγνήτιση του υλικού έχει η θερμοκρασία Curie ( $T_c$ ). Για να υποστεί μόνιμη μαγνήτιση ένα σιδηρομαγνητικό υλικό θα πρέπει να βρεθεί μέσα στο μαγνητικό πεδίο σε θερμοκρασία μικρότερη της θερμοκρασίας στάθμης Curie ( $T_c$ ). Όταν ένα μαγνητισμένο σιδηρομαγνητικό υλικό βρεθεί σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της θερμοκρασίας στάθμης  $T_c$ , τότε μεταβάλλεται σε παραμαγνητικό υλικό (Σχ.1.5). Στον πίνακα 1.1 παρουσιάζονται θερμοκρασιακές στάθμες Curie τυπικών υλικών. Ο συντελεστής μαγνήτισης των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι πολύ μεγαλύτερος της μονάδος ( $\mu \gg 1$ ).



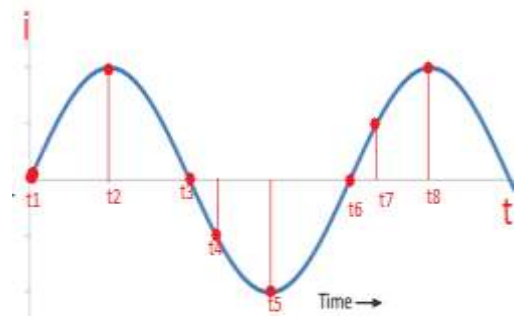
Σχήμα 1.5: Μαγνητικές ροπές σιδηρομαγνητικού υλικού πριν, κατά μετά την επίδραση μαγνητικού πεδίου B σε θερμοκρασία μικρότερη της  $T_c$  και τέλος απομαγνήτιση λόγω θερμοκρασίας μεγαλύτερης της  $T_c$ .

## 1.8 Βρόχος υστέρησης

Στη μελέτη των αισθητήρων μέτρησης μαγνητικών πεδίων ιδιαίτερη σημασία έχει η έννοια του βρόχου υστέρησης του υλικού. Σε ένα πηνίο το οποίο είναι τυλιγμένο σε σιδηροπυρήνα εφαρμόζουμε εναλλασσόμενο ρεύμα εντάσεως  $i$  (Σχ.1.6). Καθώς το ρεύμα διαρρέει το πηνίο από το χρόνο  $t_1$  σε  $t_2$  ο σιδηροπυρήνας μαγνητίζεται ακολουθώντας την καμπύλη A-B του Σχήματος (1.7). Το σημείο B καλείται σημείο μαγνήτισης κορεσμού. Στην κατάσταση μαγνήτισης κορεσμού όλα τα μαγνητικά δίπολα του υλικού είναι ευθυγραμμισμένα παράλληλα με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο όπως στο σχήμα (1.5β). Κατά την χρονική διάρκεια  $t_2$  σε  $t_3$  που η ένταση του ρεύματος αρχίζει να μειώνεται, η μαγνητική ροή του πυρήνα ακολουθεί την πορεία μεταξύ των σημείων B-Γ. Παρατηρούμε ότι στο σημείο Γ η μαγνητική ροή δεν μηδενίζεται καθώς το ρεύμα στο χρονικό σημείο  $t_3$  είναι ίσο με μηδέν, αλλά παραμένει στην τιμή του σημείου Γ, η οποία καλείται παραμένουσα μαγνητική ροή (residual flux). Για την απομαγνήτιση του πυρήνα παρατηρούμε από την καμπύλη του βρόχου υστέρησης ότι το ρεύμα στο πηνίο θα πρέπει να αλλάξει φορά λαμβάνοντας αρνητική τιμή ώστε η μαγνητική ροή να μηδενιστεί στο σημείο Δ. Το σημείο Δ εξαρτάται από το συνεκτικό πεδίο του υλικού. Με την αντίθετη φορά του ρεύματος ο πυρήνας μαγνητίζεται αντίθετα φτάνοντας στο σημείο κόρου ακολουθώντας το βρόχο υστέρησης κατά την αντίθετη φορά. Η τιμή της παραμένουσας μαγνήτισης του σημείου εξαρτάται από το είδος του υλικού του πυρήνα. Κάθε υλικό παρουσιάζει έναν δικό του βρόχο υστέρησης που εξαρτάται από την δομή του.



Σχήμα 1.7 Καμπύλη βρόχου υστέρησης



Σχήμα 1.6 Ρεύμα διαρροής πηνίου

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> Αισθητήρες μέτρησης μαγνητικού πεδίου

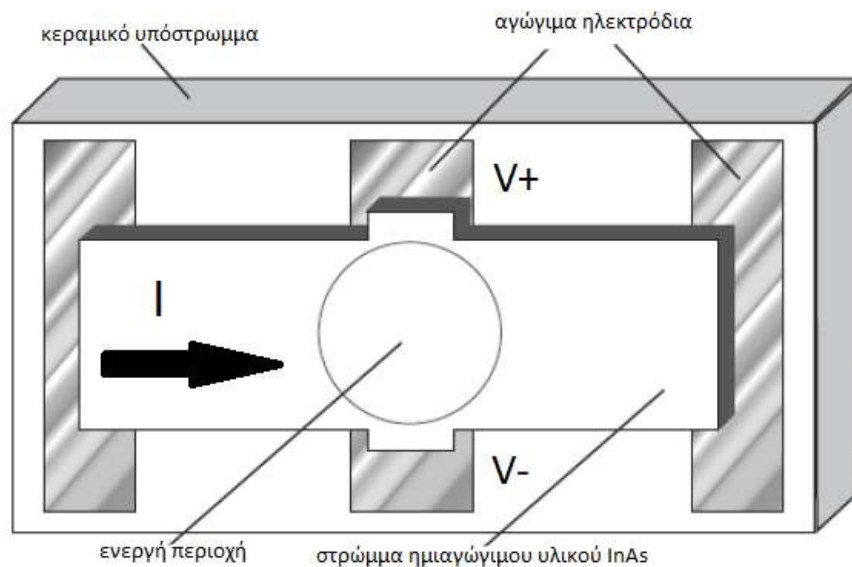
### 2.1 Εισαγωγή

Σε πολλά συστήματα αυτομάτου ελέγχου όπως στην ανίχνευση θέσης ενός αντικειμένου, στην ανίχνευση του τερματικού σημείου ή στον έλεγχο στροφών σε έναν άξονα, χρησιμοποιούνται αισθητήρες ανίχνευσης μαγνητικού πεδίου. Η απλή εφαρμογή, η εύκολη τοποθέτηση των αισθητήρων ανίχνευσης μαγνητικού πεδίου στο σημείο μέτρησης και η μεγάλη απόδοση τους, έχουν φέρει πρώτους στη λίστα εφαρμογής σε συστήματα ελέγχου για την μέτρηση δευτερευόντων μεγεθών όπως: της στάθμης, της ροής, της πίεσης κ.α. Για την μέτρηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου ανεξαρτήτου εφαρμογής διακρίνουμε τους παρακάτω αισθητήρες ή διατάξεις:

- Πηνίο ανίχνευσης
- Μαγνητόμετρο πύλης ροής
- Ατομικό μαγνητόμετρο
- Αισθητήρες φαινομένου Hall
- Μαγνητοαντίσταση
  1. Ανισοτροπική Μαγνητοαντίσταση
  2. Γιγάντια μαγνητοαντίσταση
  3. Μαγνητοαντίσταση τούνελ
- Μαγνητοδίοδος
- Μαγνητοτρανζίστορ
- Οπτικό μαγνητόμετρο
- Αισθητήρας SQUID
  1. Αισθητήρας RF SQUID
  2. Αισθητήρας DC SQUID
- Μαγνητόμετρο οπτικής άντλησης
- Μαγνητοοπτικός αισθητήρας

Παρακάτω θα αναλυθεί περαιτέρω ο αισθητήρας φαινομένου Hall ο οποίος και επιλέχθηκε για την υλοποίηση της πτυχιακής εργασίας.

## 2.2 Δομή αισθητήρα Hall



Σχήμα 2.1 Εσωτερική δομή αισθητήρα Hall

Ένας αισθητήρας Hall αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα ημιαγωγίου υλικού, αυτό είναι και το ενεργό μέρος μέτρησης του αισθητήρα, τυπικά κυμαίνεται από 0,01mm με 0.1mm το οποίο είναι ευαίσθητο στο μαγνητικό πεδίο. Επίσης περιέχει και δύο ηλεκτρόδια από τα οποία επιτρέπεται η διέλευση του ρεύματος  $I$  στο στρώμα του αγωγίου υλικού και ακόμη δύο ηλεκτρόδια από τα οποία παίρνουμε την μετρούμενη ποσότητα της τάσης Hall. Το αισθητήριο Hall είναι επικολλημένο σε ένα κεραμικό υπόστρωμα, το οποίο παρέχει βελτιωμένη μηχανική υποστήριξη και θερμική σταθερότητα την οποία απαιτεί ο αισθητήρας. Το σχήμα (2.1) παρουσιάζει ένα τυπικό σχεδιάγραμμα εσωτερικής δομής αισθητήρα Hall.

## 2.3 φαινόμενο Hall

Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του φαινομένου, όταν ένα πλακίδιο από αγωγίμο υλικό διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως  $I$  και βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο  $B$  τότε εμφανίζεται σε αυτό εγκάρσια τάση  $V$ . Η τάση αυτή είναι ανάλογη του ρεύματος που διαρρέει των αγωγό και του μαγνητικού πεδίου που είναι κάθετο σε αυτόν. Το φαινόμενο Hall εξηγείται από την επίδραση της δύναμης Lorentz(FL) που ασκείται σε ηλεκτρικό φορτίο το οποίο κινείται με ταχύτητα  $u$  μέσα σε μαγνητικό πεδίο  $B$ . Όταν το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο προς το ηλεκτρικό, τότε λόγω των διανυσματικών μεγεθών  $u$  και  $B$  υπάρχει εκτροπή των φορτίων κάθετα στη δομή του στοιχείου. Καθώς η συσσώρευση των φορτίων συνεχίζεται, η εγκάρσια ηλεκτροστατική δύναμη που αναπτύσσεται εξισορροπεί τη μαγνητική δύναμη. Η τάση Hall, της τάξης των  $\mu V$ , που αναπτύσσεται σε στοιχεία ημιαγωγών δίνεται από την Εξ.(2.1).

$$V_H = \frac{R_H BI}{d} \quad (2.1)$$

Όπου,

d: το πάχος του ημιαγωγού

I: έντασης ρεύματος

$R_H$ : η σταθερά Hall  $\frac{1}{nq}$

B: μαγνητική επαγωγή.

Οι σύγχρονοι αισθητήρες ημιαγωγού Hall κατασκευάζονται από στοιχεία πυριτίου (Si), αρσενίδιο του ινδίου (InAs), αρσενίδιο του γαλλίου (GaAs) και από αντιμίδιο του ινδίου (InSb).

$$R_H = \frac{p\mu_h^2 - n\mu_e^2}{q_e(p\mu_h + n\mu_e)^2} \quad (2.2)$$

Όπου,

n: η συγκέντρωση ηλεκτρονίων

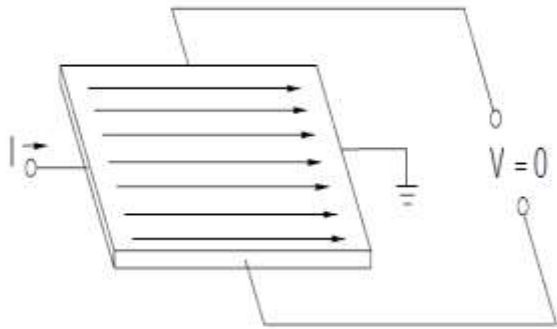
p: συγκέντρωση οπών

$\mu_e$ : η κινητικότητα ηλεκτρονίων

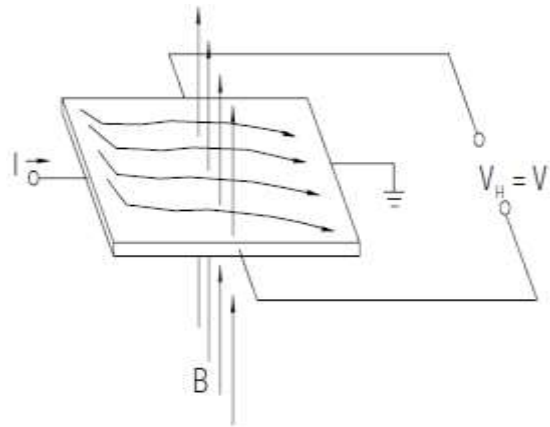
$\mu_h$ : η κινητικότητα των οπών, και

$q_e$ : το φορτίο ηλεκτρονίου

Στις παρακάτω εικόνες παρατηρούμε την αρχή φαινομένου Hall κατά την απουσία σχήμα 2.2 και κατά την παρουσία σχήμα 2.3 του μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 2.2 Φαινόμενο Hall κατά την απουσία μαγνητικού πεδίου



Σχήμα 2.3 φαινόμενο Hall κατά την παρουσία μαγνητικού πεδίου

**Παρατήρηση 1:** η τάση Hall εξαρτάται γραμμικά από

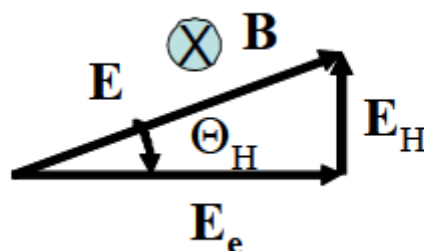
- Την ταχύτητα των φορτισμένων φορέων
- Την πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου
- Την απόσταση των ηλεκτροδίων μέτρησης της ενεργού περιοχής

**Παρατήρηση 2:** Η σταθερά Hall  $R_H$  σχετίζεται με την πυκνότητα των ηλεκτρονίων μέσα στο υλικό κατασκευής αλλά και με την κινητικότητα που έχει το ίδιο το υλικό. Η μέτρηση του συντελεστή υλικών του αισθητήρα με γνωστή αγωγιμότητα υποδεικνύει την απευθείας κινητικότητα των φορέων που είναι υπεύθυνα για την αγωγή.

**Παρατήρηση 3:** Επιπλέον για την κινητικότητα των φορέων, το πάχος της ενεργού περιοχής είναι ύψιστης σημασίας.

**Παρατήρηση 4:** Το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο  $E$  είναι το άθροισμα του εξωτερικού πεδίου  $E_e$  και του πεδίου του αισθητήρα Hall τα οποία δεν είναι παράλληλα. Η γωνία Hall  $\Theta_H$  ορίζεται από την γωνία μεταξύ  $E_e$  και του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου  $E$  σχήμα 2.4. Το μέτρο της γωνίας εξαρτάται από την πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου και από την κινητικότητα των φορέων σύμφωνα με την εξίσωση 2.3.

$$\operatorname{tg} \Theta_H = \frac{E_H}{E_e} = -\mu_n \cdot B \quad (2.3)$$



Σχήμα 2.4: Απεικόνιση γωνίας  $\theta$

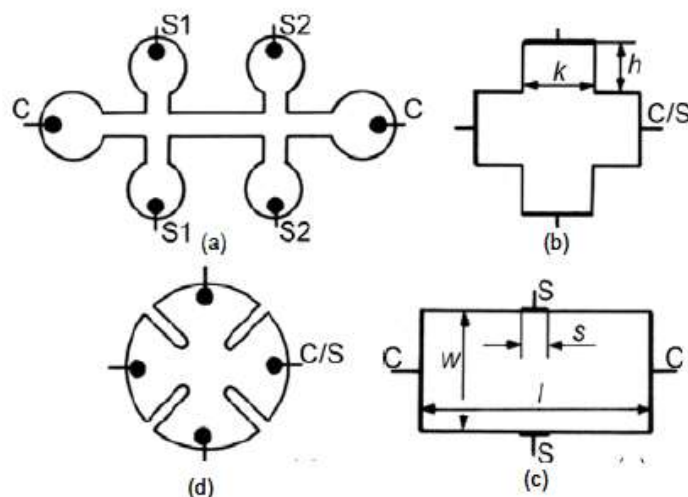
## 2.4 Γεωμετρία αισθητήρα Hall και επιλογή υλικού κατασκευής

### 2.4.1 Γεωμετρία

Για έναν πραγματικό αισθητήρα οι διαστάσεις του πεπερασμένου μεγέθους των επαφών μέτρησης του ενεργού μέρους, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Αυτές δημιουργούν ένα αδιάστατο γεωμετρικό συντελεστή  $G$ , ο οποίος κυμαίνεται από 0 μέχρι 1 και πολλαπλασιάζει την τάση Hall στην εξίσωση (2.4).

$$V_H = \frac{G \left( \frac{l}{w}, \theta_H, B \right) R_H I B}{d} \quad (2.4)$$

Αυτός ο συντελεστής βασίζεται στην γεωμετρία του ενεργού μέρους, της γωνίας Hall και του μαγνητικού πεδίου. Καθορίζει επίσης την μείωση της τάσης Hall λόγω του περιορισμού της ροής ρεύματος στον αισθητήρα. Εξαρτάται κυρίως από τον λόγο  $l/w$ . Παρακάτω στο σχήμα (2.5) φαίνονται κάποιες προσεγγίσεις εσωτερικής δομής κατασκευής αισθητήρα Hall. Το σχήμα (a) είναι μία καλή προσέγγιση σχεδίασης με μεγάλα βέβαια ηλεκτρόδια μέτρησης ενεργού μέρους τα οποία μπορεί να προκαλέσουν παρασιτικά φαινόμενα από την υψηλή αντίσταση καθώς και από την θερμοκρασία. Παρόλα αυτά μπορούν με διαφορές τεχνικές να μειωθούν. Η σταυροειδής απεικόνιση σχήμα (b) και η κυκλική σταυροειδής (d) έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Προσφέρουν το πλεονέκτημα της μεγάλης διόρθωσης του γεωμετρικού συντελεστή ο οποίος τείνει να φτάνει την μονάδα  $G \rightarrow 1$ . Οι επαφές μέτρησης και τροφοδοσίας του αισθητήρα μπορούν να εναλλάσσονται δίχως να υπάρχει θέμα με την ασυμμετρία. Αυτές οι σχεδιάσεις είναι ιδανικές για τον περιορισμό του φαινομένου της ολίσθησης τάσης. Επιπλέον αποδίδεται καλύτερα ο προσδιορισμός του ενεργού μέρους του αισθητήρα.



Σχήμα 2.5: Κατασκευαστικές δομές αισθητήρων Hall

## 2.4.2 Υλικά κατασκευής και ιδιότητες

Η επιλογή του υλικού κατασκευής του αισθητήρα Hall είναι ύψιστης σημασίας. Οι αισθητήρες κατασκευάζονται από ημιαγωγούς τύπου n, όπου κυρίαρχοι φορτισμένοι φορείς είναι τα ηλεκτρόνια τα οποία έχουν υψηλότερη κινητικότητα από της οπές. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τιμές από το ημιαγωγικό χάσμα του κάθε ημιαγωγού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή αισθητήρα Hall, καθώς και την κινητικότητα τους σε θερμοκρασία δωματίου.

Πίνακας 2.1 Χάσμα και κινητικότητα ημιαγωγών στους 300K, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της ενεργού περιοχής Hall. Η σταθερά  $R_H$  είναι υπολογισμένη για συγκεκριμένη δόση ντοπαρίσματος υλικού.

Υλικό	$E_g$ [eV]	$\mu_n$ [ $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ ]	$n$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$R_H$ [ $\text{cm}^3 \text{c}^{-1}$ ]
Si	1.12	15 00	$2.5 \cdot 10^{15}$	$2.5 \cdot 10^3$
InSb	0.17	80 000	$9 \cdot 10^{16}$	70
InAs	0.36	33 000	$5 \cdot 10^{16}$	125
GaAs	1.42	85 00	$1.45 \cdot 10^{15}$	$2.1 \cdot 10^3$

## 2.5 Βασικά χαρακτηριστικά παρασιτικών φαινομένων σε αισθητήρες hall

Η ποιότητα ενός αισθητήρα Hall μπορεί να αξιολογηθεί με τα παρακάτω κριτήρια

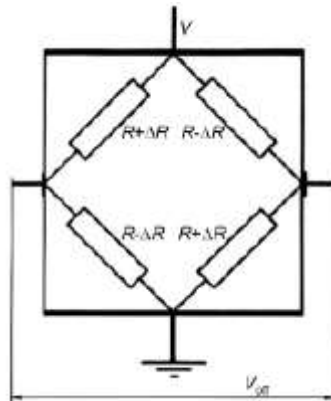
1. ευαισθησία στο μαγνητικό πεδίο
2. την ολίσθηση της τάσης στην απουσία μαγνητικού πεδίου
3. το μικρό σφάλμα γραμμικότητας στην τάση Hall
4. μείωση θορύβου που προκαλείται από θερμότητα και από τις αρμονικές συχνότητες στο κύκλωμα
5. πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας
6. λειτουργικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες
7. το κόστος

### 2.5.1 Ευαισθησία αισθητήρα

Η ευαισθησία του αισθητήρα εκφράζει την ανταπόκριση που έχει η έξοδος του (τάση hall ) σε σχέση με την είσοδο του (μαγνητικό πεδίο). Στο παρακάτω παράδειγμα ο συντελεστής του B στην εξίσωση(2.4) εκφράζει την ευαισθησία του αισθητήρα.

$$V_{out}(\text{volt}) = (6.25 \cdot 10^{-4} \cdot V_s) \cdot B \quad (2.4)$$

### 2.5.2 Τάση μετατόπισης (offset)



Σχήμα 2.6 Μοντέλο πλήρους γέφυρας προσομίωσης αισθητήρα Hall

Η τάση μετατόπισης offset voltage είναι μία παρασιτική τάση εξόδου η οποία εμφανίζεται στην απουσία του μαγνητικού πεδίου. Μερικές από τις αιτίες που προκαλείται είναι:

1. Η δομική ασυμμετρία του ενεργού μέρους του αισθητήρα
2. Λάθος ευθυγράμμισης στις επαφές μέτρησης όπου και παρουσιάζεται διαφορά αντίστασης.

Η τάση μετατόπισης αλλάζει με την πάροδο του χρόνου. Αυτό προκαλείται από την γήρανση του ημιαγωγού. σημαντικότερο ρόλο παίζει σε κρυογόνους αισθητήρες Hall. Οι θερμικοί κύκλοι σε περιοχές 4.4 K και 300K προκαλούν μικρό-σπασίματα στην ενεργό περιοχή του υλικού. Η μηχανική καταπόνηση που δέχεται αλλάζει την συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στην περιοχή και η εξέλιξη αυτού του φαινομένου έχει ως αποτέλεσμα να αλλάζει ο συντελεστής Hall  $R_H$  και ως εκ τούτου η τάση Hall.

Πρακτικά σαν μια ανάλογη προσομοίωση του αισθητήρα χρησιμοποιείται ένα μοντέλο γέφυρας σχήμα (2.6) με τέσσερις αντιστάσεις οι οποίες είναι ίσες. Οποιαδήποτε αλλαγή σε ένα από τα πόδια τους οδηγεί την γέφυρα σε ασυμμετρία (όταν ο αισθητήρας δεν εκτίθεται σε μαγνητικό πεδίο) το οποίο και προκαλεί την τάση ολίσθησης offset voltage.

### 2.5.3 Εξάρτηση εξόδου από μεταβολή θερμοκρασίας.

Η ευαισθησία του αισθητηρίου μπορεί να επηρεαστεί από περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως είναι η θερμοκρασία. Η κύρια αιτία του φαινομένου προέρχεται από την ενεργοποίηση ζωνών λόγω θερμοκρασίας όπου υπάρχει συγκέντρωση φορέων. Κάποια στοιχεία hall είναι φτιαγμένα από υλικά με μικρό χάσμα ζώνης (όπως είναι InSb) και είναι πιο εξαρτημένα από την διαφορά θερμοκρασίας. Εξαρτώνται από την εσωτερική πυκνότητα των φορέων  $n_i$  οι οποίοι αυξάνονται όπως ορίζει ο νόμος ενεργοποίησης εξίσωση (2.5). Αυτή η εξάρτηση μπορεί να περιοριστεί εισάγοντας δότες οι οποίοι αποκαθιστούν την εσωτερική δομή. Σε αυτή την περίπτωση η συγκέντρωση φορέων από θερμική ενεργοποίηση είναι αμελητέα και η συγκέντρωσή τους παραμένει απaráλλακτη σε ένα εύρος θερμοκρασίας. Σε αυτό το εύρος η σταθερά Hall  $R_H$  παραμένει σταθερή. Άλλα στοιχεία hall είναι φτιαγμένα από υλικά πολύ μεγάλο χάσμα ζώνης (InAs). Ο ημιαγωγός δεν δέχεται καμία μεταβολή της

δομής του σε υψηλές θερμοκρασίες παρά το χαμηλό ντοπάρισμα δοτών. Ο συντελεστής θερμικής ευαισθησίας και θερμικής εξάρτησης της τάσης Hall εκφράζεται παρακάτω από την εξίσωση(2.6).

$$n_i = T^{\frac{3}{2}} e^{-E_g/2k \cdot T} \quad (2.5)$$

$$\gamma_T = \frac{1}{V_H} \cdot \frac{\delta V_H}{\delta T} [K^{-1}] = \frac{\delta V_{offset}}{\delta T} \left[ \frac{\mu V}{K} \right] \quad (2.6)$$

#### 2.5.4 Μη γραμμικότητα

Αν και αναλογικός αισθητήρας Hall θεωρείται ότι έχει αναλογική έξοδο, η μετρούμενη τάση Hall σε μία ενεργό περιοχή αισθητήρα Hall δεν είναι καθαρά γραμμική συνάρτηση του μαγνητικού πεδίου. Αυτή η μη γραμμικότητα προέρχεται από την ιδιότητα του υλικού κατασκευής NLM η οποία αλλάζει την σταθερά Hall RH. Ένας άλλος παράγοντας είναι ο NLG που καθορίζει την σχέση μεταξύ μαγνητικού πεδίου με τον γεωμετρικό παράγοντα G. αυτοί οι παράγοντες NLG και NLM εκθέτουν μια εξάρτηση τετραγωνικού μαγνητικού πεδίου με διαφορετικές κατευθύνσεις και ίδια μέτρα. Οι αισθητήρες κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε αυτοί οι παράγοντες να αντισταθμίζονται μεταξύ τους.

$$NL = NLM + NLG \quad (2.7)$$

$$NL = \frac{V_H(I, B) - V_{Hfit}}{V_{Hfit}} \cdot 100\% \quad (2.8)$$

Υψηλής γραμμικότητας αισθητήρες παρουσιάζουν συντελεστή NL μικρότερο του 0.2%.

#### 2.5.5 Επίδραση θορύβου

Η εμφάνιση του θορύβου στο σήμα εξόδου είναι ένας από τους βασικούς περιορισμούς που καθορίζουν την ακρίβεια. Ποικίλες πηγές θορύβου παράγονται από τον ίδιο τον αισθητήρα. Ο θόρυβος Johnson προέρχεται από την έγκλιση θερμοκρασίας λόγω κινητικότητας των ηλεκτρονίων . Το αποτέλεσμα της παρασιτικής τάσης δίνεται από την εξίσωση (2.9)

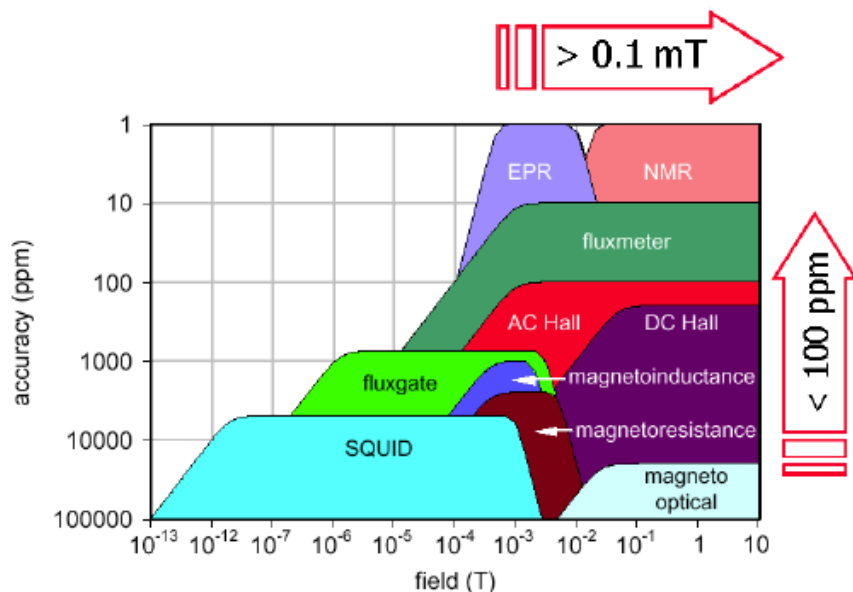
$$V_{jh} = \sqrt{4KTRB_w} \quad (2.9)$$

όπου  $K$  σταθερά Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ )  $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία σε kelvin  $R$  είναι η αντίσταση σε ohm  $B_w$  είναι το εύρος σε Hertz. Για να περιοριστεί αυτό το φαινόμενο πρέπει το εύρος να διατηρείται μικρό, όσο χρειάζεται για να περάσει το επιτρεπτό σήμα. Το φαινόμενο Johnson περιορίζεται κατάλληλα με ένα εύρος της τάξης των 10 kHz καθώς και με την κατάλληλη επιλογή αντιστάσεων.

### 2.5.6 Ακρίβεια μέτρησης μαγνητικού πεδίου

Πρέπει να επιλέγεται κάθε φορά ο κατάλληλος αισθητήρας για την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου, έτσι ώστε να μπορούν να χαρτογραφηθούν όσα περισσότερα χαρακτηριστικά γι αυτό. Οι παρακάτω παράμετροι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη:

1. Η ποσότητα της μέτρησης
2. Το εύρος του μαγνητικού πεδίου μέτρησης
3. Η επαναληψιμότητα και η ακρίβεια
4. Η γεωμετρία του μαγνητικού πεδίου
5. Το εύρος συχνότητας λειτουργίας
6. Η περιβαλλοντική κατάσταση χώρου μέτρησης (κενό, αέρας, κρουγονικός χώρος).



Σχήμα 2.7 Απεικόνιση ακρίβειας μέτρησης μαγνητικού πεδίου με διάφορες τεχνικές σε συνάρτηση με το μαγνητικό πεδίο

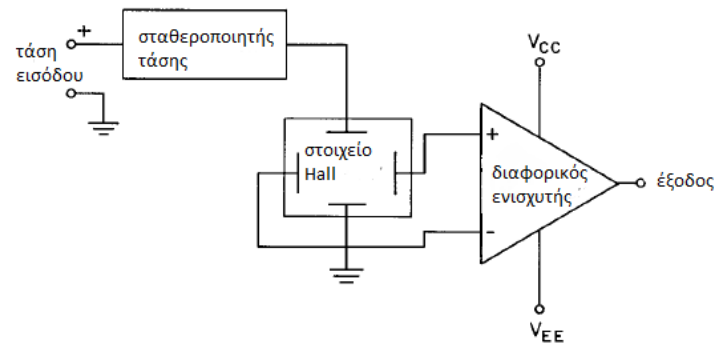
## 2.6 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Αισθητήρα Hall

Πίνακας 2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αισθητήρα Hall

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1. Είναι ιδανικός για μετρήσεις περίπλοκων γεωμετριών μαγνητικών πεδίων	1. Ευαισθησία θερμοκρασίας
2. Χαρτογράφηση μαγνητικών πεδίων	2. Μη απόλυτα γραμμικό
3. Γρήγορη απόκριση μέτρησης	3. Ολίσθηση τάσης
4. Μεγάλη κάλυψη εύρους μέτρησης	4. Ολίσθηση ευαισθησίας για λειτουργία σε μεγάλα χρονικά διαστήματα
5. Μέτρηση σε εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία	5. Θόρυβος
6. Λειτουργεί και σε μη ομογενή πεδία	6. Χαμηλή ακρίβεια σε σύστημα πολυδιάστατης μέτρησης
7. Δουλεύει σε κρυογονικές θερμοκρασίες	7. Συχνή επίβλεψη για ρύθμιση

## 2.7 Βασική κυκλωματική σύνδεση αισθητήρα Hall

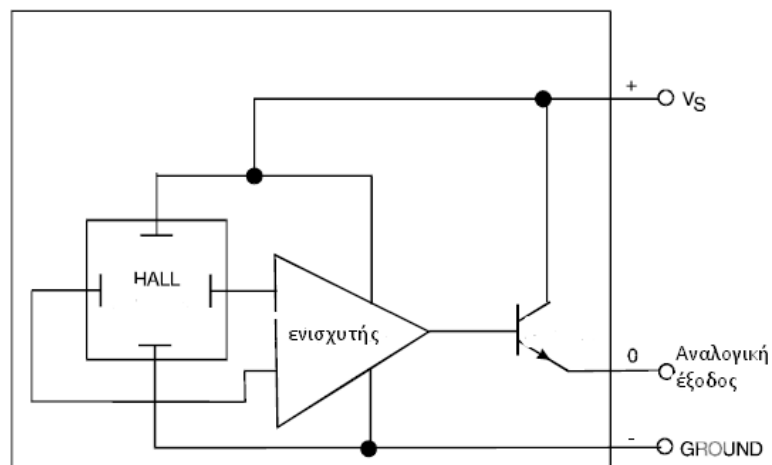
Η τάση εξόδου του αισθητήρα Hall είναι της τάξης των  $\mu\text{V}$ , οπότε χρειάζεται το σήμα να ενισχυθεί ώστε να είναι κατάλληλο προς επεξεργασία. Οπότε τα κύρια κυκλώματα που απαιτούνται γι' αυτήν την δουλειά είναι ένας ενισχυτής, καθώς και ένας σταθεροποιητής τάσης, ή ρεύματος ώστε να μην υπάρχει διακύμανση στα αποτελέσματα από την ανισορροπία τροφοδοσίας του. Εάν μετρηθεί η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ακίδων από τα οποία παράγεται η τάση Hall κατά την απουσία μαγνητικού πεδίου η μέτρηση θα είναι ιδανικά 0 Volt. Ένα όμως μετρηθεί η διαφορά των δύο ακίδων διαδοχικά ως προς την γείωση του κυκλώματος θα παρατηρήσουμε ότι η μέτρηση δεν θα είναι μηδέν. Αυτή ονομάζεται διαφορά κοινής τάσης και διαφέρει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κατασκευής του κάθε αισθητήρα Hall. Στο σχήμα (2.8) παρατίθεται ένα στοιχειώδη κύκλωμα μέτρησης μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 2.8 Βασικά περιφερειακά κυκλώματα προσαρμογής αισθητήρα Hall

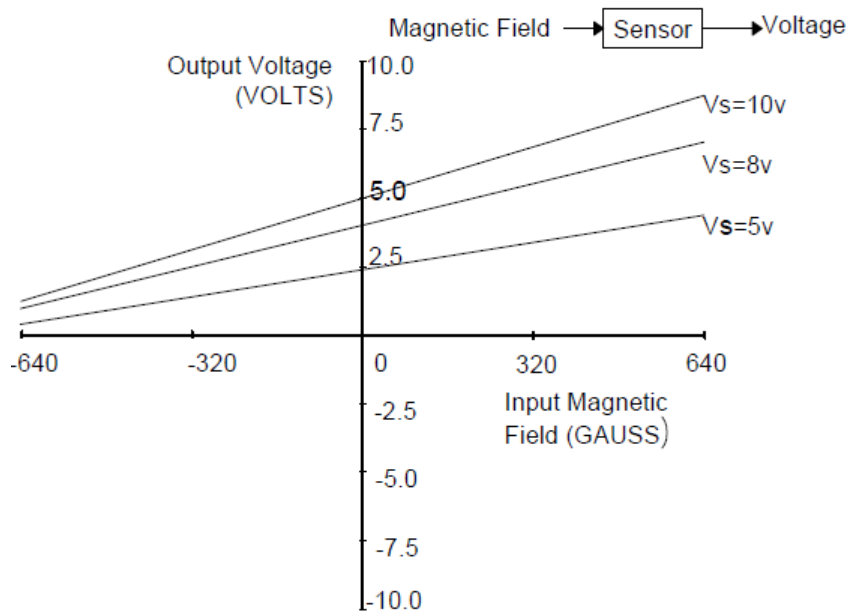
## 2.8 Αναλογικοί αισθητήρες Hall

Η τάση στους αναλογικούς αισθητήρες Hall είναι ανάλογη του μαγνητικού πεδίου στο οποίο είναι εκτεθειμένοι. Σημαντικό ρόλο στον αισθητήρα Hall παίζουν τα εσωτερικά ολοκληρωμένα κυκλώματα σχήμα (2.9) τα οποία είναι υπεύθυνα για την σταθερότητα του γινομένου των δύο μεγεθών από τα οποία αποτελείται η τάση. Αυτή η αναλογία επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες τους οποίους θα αναλύσουμε παρακάτω. Το μέτρο του μαγνητικού πεδίου που μετράει ο αισθητήρας μπορεί να είναι είτε θετικό είτε αρνητικό. Ως αποτέλεσμα και η έξοδος του αισθητήρα θα είναι ή θετική ή αρνητική. Για να μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον αισθητήρα στο πλήρες εύρος των δυνατοτήτων του αλλά και για να μπορούμε να πάρουμε μια διπολική μέτρηση, βασική προϋπόθεση είναι να έχουμε τροφοδοτήσει των αισθητήρα με την σωστή τάση που υποδεικνύει ο εκάστοτε κατασκευαστής. Η έξοδος του εσωτερικού ενισχυτή του αισθητήρα δεν μπορεί να υπερβεί το όριο της τάσης που έχει τεθεί από την τροφοδοσία του. Όταν ο αισθητήρας βρεθεί σε ένα μεγαλύτερο μαγνητικό πεδίο από αυτό της μέτρησης του, δεν καταστρέφεται αλλά ο εσωτερικός ενισχυτής του φτάνει σε σημείο κορεσμού.



Σχήμα 2.9 Εσωτερικά δομικά κυκλώματα προσαρμογής αισθητήρα Hall

## 2.9 Συνάρτηση μεταφοράς αναλογικού αισθητήρα



Σχήμα2.10: Παράδειγμα συνάρτησης μεταφοράς σε διαφορετικές τάσεις τροφοδοσίας

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός αισθητήρα περιγράφει την έξοδο του σε σχέση με την είσοδο. Η συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να περιγραφεί είτε με μαθηματική εξίσωση είτε με γράφημα. Για έναν αναλογικό αισθητήρα Hall η συνάρτηση μεταφοράς περιγράφει την είσοδο του που είναι το μαγνητικό πεδίο σε σχέση με την έξοδο του που είναι η τάση. Ένα παράδειγμα δίνεται στην εικόνα (2.10)

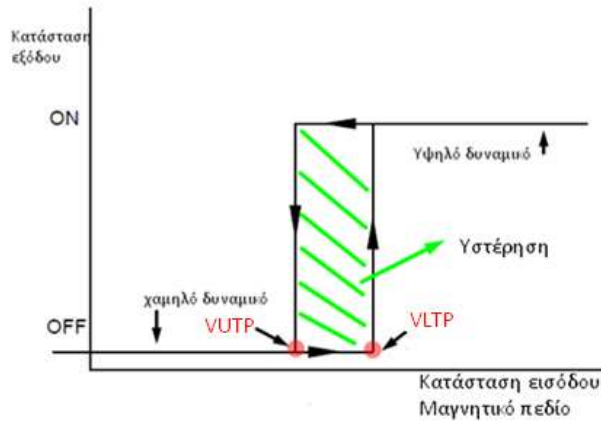
Επίσης η εξίσωση της συγκεκριμένης συνάρτησης μεταφοράς δίνεται:

$$V_{out}(\text{volt}) = (6.25 \cdot 10^{-4} \cdot V_s) \cdot B + (0.5 \cdot V_s) \quad (2.10)$$

$$-640 < B(\text{Gauss}) < +640 \quad (2.11)$$

Αν και ένας αναλογικός αισθητήρας Hall θεωρείται γραμμικός, στην πραγματικότητα, δεν αντιπροσωπεύει πλήρως την γραμμικότητα. Ο προσδιορισμός της γραμμικότητας, ορίζεται από την απόκλιση που έχει η έξοδος του αισθητήρα σε σχέση με την επιθυμητή έξοδο που είναι ευθεία γραμμή. Τα κυκλώματα προσαρμογής του αισθητήρα σχεδιάζονται κατάλληλα ώστε η έξοδος του αισθητήρα να βρίσκεται όσο πιο κοντά σε αυτή την ευθεία γραμμή.

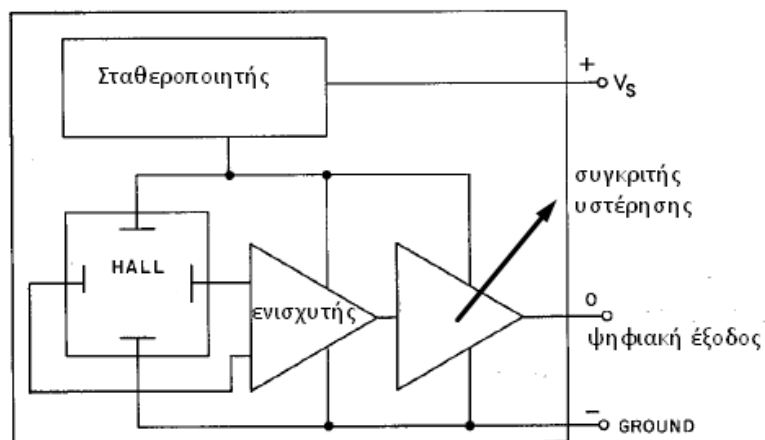
## 2.10 Ψηφιακοί αισθητήρες Hall



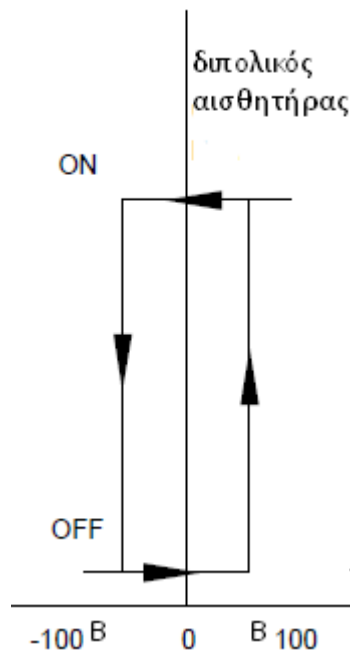
Σχήμα 2.11 Συνάρτηση μεταφοράς ψηφιακού αισθητήρα με υστέρηση

Η έξοδος των ψηφιακών αισθητήρων Hall ανάλογα με το είδος τους ανταποκρίνεται σε δύο λογικές καταστάσεις 0 και 1. Ένας αναλογικός αισθητήρας μπορεί να μετατραπεί σε ψηφιακό με την χρήση κατάλληλων κυκλωμάτων. Ένας διαφορικός ενισχυτής σε συνδυασμό με έναν συγκριτή υστέρησης είναι τα κύρια κυκλώματα που απαρτίζουν έναν ψηφιακό αισθητήρα. Ο συγκριτής υστέρησης συγκρίνει την έξοδο του διαφορικού ενισχυτή με μία τάση κατωφλίου. Όταν η τάση εξόδου του ενισχυτή ξεπεράσει την υψηλή τάση κατωφλίου  $V_{UTP}$  η έξοδος οδηγείται σε υψηλό δυναμικό και όταν πέσει κάτω από την χαμηλή τάση κατωφλίου  $V_{LTP}$  οδηγείται σε χαμηλό δυναμικό. Η υστέρηση εισάγεται για να αποφθεχθούν ανεπιθύμητες καταστάσεις στην έξοδο. Σχήμα (2.11). Η υστέρηση ορίζεται από την εξίσωση (2.12). Τα εσωτερικά κυκλώματα που απαρτίζουν ένα ψηφιακό αισθητήρα Hall απεικονίζονται παρακάτω. Σχήμα 2.12.

$$V_{HYST} = V_{UTP} - V_{LTP} \quad (2.12)$$



Σχήμα 2.12 Εσωτερικά δομικά κυκλώματα προσαρμογής ψηφιακού αισθητήρα με υστέρηση



Σχήμα 2.13 Χαρακτηριστική καμπύλη εισόδου-εξόδου ψηφιακού διπολικού αισθητήρα

Υπάρχουν βέβαια και ψηφιακοί αισθητήρες οι οποίοι είναι διπολικοί. Αυτό τους επιτρέπει να παίρνουν μέτρηση και στα δύο τεταρτημόρια εύρους του μαγνητικού πεδίου. Ανάλογα ανταποκρίνεται και η έξοδος τους. Η έξοδος οδηγείται σε υψηλό δυναμικό όταν ο αισθητήρας εκτίθεται σε νότιο πόλο μαγνητικού πεδίου και αντίστοιχα σε χαμηλό δυναμικό όταν εκτίθεται σε βόρειο πόλο μαγνητικού πεδίου, οδηγείται σε χαμηλό δυναμικό. Σχήμα (2.13).

Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε αναφορά στον τύπο των αισθητήρων και αναλύθηκε περαιτέρω ο αισθητήρας Hall, ο οποίος και χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την πτυχιακή. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά σχετικά με την τοποθέτηση του σε όργανα μέτρησης, την ρύθμιση του, το μοντέλο αισθητήρα Hall που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και ο σχεδιασμός μοντέλου τρισδιάστατης εκτύπωσης που έγινε ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες για την πιο ορθή μέτρηση στο όργανο που κατασκευάστηκε.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> Βάσεις στήριξης αισθητήρων Hall(Probes)

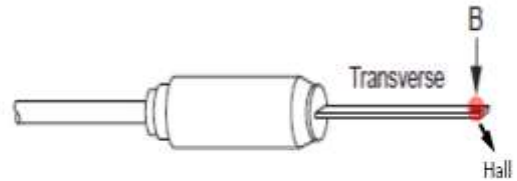
### 3.1 Εισαγωγή

Κατά καιρούς διάφορες εταιρίες έχουν δημιουργήσει κατάλληλες βάσεις προσαρμογής αισθητήρων Hall, έτσι ώστε να διευκολύνεται η διαδικασία μέτρησης, αλλά και για να γίνεται πιο σωστά η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου. Έτσι δημιουργήθηκαν κάποια στάνταρτ βάσεων, όπου κάποια από αυτά είναι πιο διαδεδομένα για το λόγο ότι χρησιμοποιούνται συχνότερα.

### 3.2 Βάση πεπλατυσμένης μορφής (transverse hall probe)



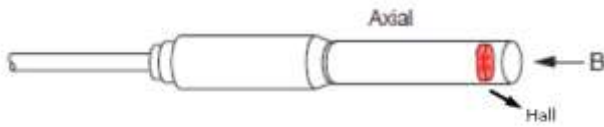
Σχήμα 3.1 πραγματική Βάση αισθητήρα Hall πεπλατυσμένης μορφής



Σχήμα 3.2 Απεικόνιση τοποθέτησης αισθητήρα σε πεπλατυσμένη βάση

Μια τέτοιου είδους βάση απεικονίζεται παρακάτω. Εικόνες (3.1-2). Ο αισθητήρας τοποθετείται στην κορυφή της βάσης και η μέτρηση πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το μαγνητικό πεδίο να διαπερνά κάθετα το αισθητήριο. Η βάση προσφέρει ευελιξία μέτρησης σε δυσπρόσιτα μέρη όπου είναι αδύνατο με άλλο τρόπο. Επίσης πρέπει να υπάρχει απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων επεξεργασίας για να μην εντείνεται το φαινόμενο της μαγνητικής παρεμβολής στο κύκλωμα σε περίπτωση που εκτεθεί σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Γι αυτό και πολλές φορές η ζεύξη μεταξύ βάσης και κυκλωμάτων ελέγχου γίνεται με ειδικό καλώδιο. Αυτό προσφέρει εργονομία στην χρήση του οργάνου αλλά και την απαραίτητη απομόνωση από τις παρεμβολές του μαγνητικού πεδίου. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει η δυνατότητα διατήρησης αυτής της απόστασης, απαραίτητη είναι η μελέτη για θωράκιση των κυκλωμάτων επεξεργασίας.

### 3.3 Βάση κυλινδρικής μορφής(Axial hall probe)



Σχήμα 3.3 Απεικόνιση τοποθέτησης αισθητήρα σε βάση κυλινδρικής μορφής



Σχήμα 3.4 Βάση κυλινδρικής μορφής όπως είναι στο εμπόριο

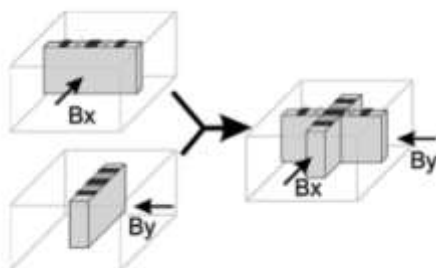
Στην βάση κυλινδρικής μορφής Σχήμα(3.3-4), ο αισθητήρας και σε αυτή την περίπτωση τοποθετείται στην κορυφή της βάσης. Τέτοιου είδους βάση χρησιμοποιείται όταν η καθετότητα του μαγνητικού πεδίου στον χώρο βρίσκεται σε άλλη διάσταση για μέτρηση, όπου η βάση πεπλατυσμένης μορφής δεν έχει την δυνατότητα να το μετρήσει σωστά.

Και στις δύο αυτές περιπτώσεις οι αισθητήρες που έχουν προσαρμοστεί πάνω στις βάσεις έχουν την δυνατότητα μόνο μιας διάστασης την στιγμή της μέτρησης. Παρακάτω θα αναλυθεί πως γίνεται η ταυτόχρονη μέτρηση πολλών διαστάσεων.

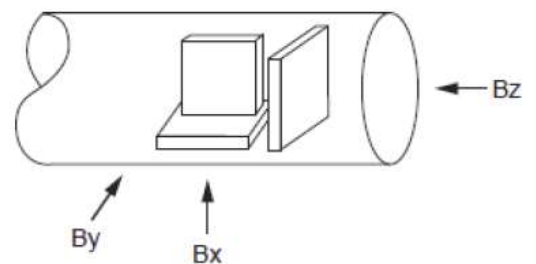
### 3.4 Πολυδιάστατες μετρήσεις

Ένα όργανο μέτρησης μαγνητικού πεδίου αισθητήρα Hall έχει την δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης δύο ή και τριών διαστάσεων ανάλογα με το πώς έχει κατασκευαστεί ο αισθητήρας ή ανάλογα με το πώς έχουν τοποθετηθεί οι αισθητήρες μίας διάστασης.

Στην πρώτη περίπτωση ο αισθητήρας από την κατασκευή του έχει την δυνατότητα αυτή. Μέσα του το υλικό ημιαγωγού έχει διαταχθεί με τέτοιο τρόπο για να υπάρχει σωστή ορθογωνικότητα μεταξύ των ενεργών μέρων μέτρησης, έτσι ώστε τα αποτελέσματα μέτρησης να αποδίδουν όσο το δυνατόν την πραγματική τιμή του μαγνητικού πεδίου. Στην δεύτερη περίπτωση η οποία και χρησιμοποιήθηκε για αυτή την πτυχιακή, είναι η επιλογή μεμονωμένων αισθητήρων που προσφέρουν την επιθυμητή μονοδιάστατη μέτρηση. Κατασκευάστηκε κατάλληλη βάση ώστε να δημιουργηθεί η απαραίτητη ορθογωνικότητα για την μέτρηση. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι διατάξεις τοποθέτησης πολυδιάστατης μέτρησης αισθητήρων εσωτερικής δομής. Σχήματα( 3.5-6-7).



Σχήμα 3.5 Τοποθέτηση αισθητήρων για δισδιάστατη μέτρηση

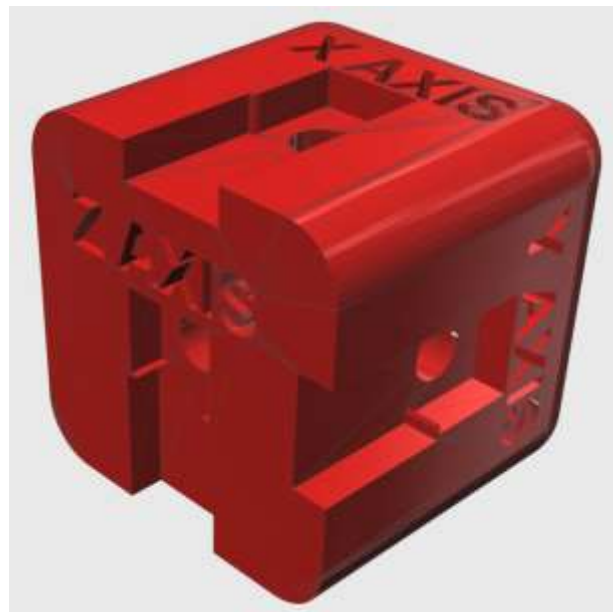


Σχήμα 3.6 Τοποθέτηση αισθητήρων για τρισδιάστατη μέτρηση

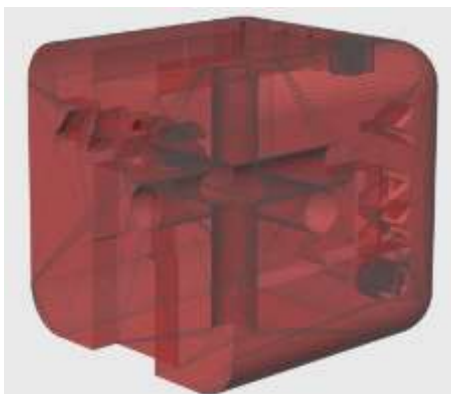




Σχήμα 3.8 Εσωχές τοποθέτησης αισθητήρων στους 3 άξονες



Σχήμα 3.9 Γωνιακή απεικόνιση ολόκληρης της βάσης



Σχήμα 3.10 Διαμπερή εικόνα αγωγών αέρα, για την παθητική ψύξη των αισθητήρων

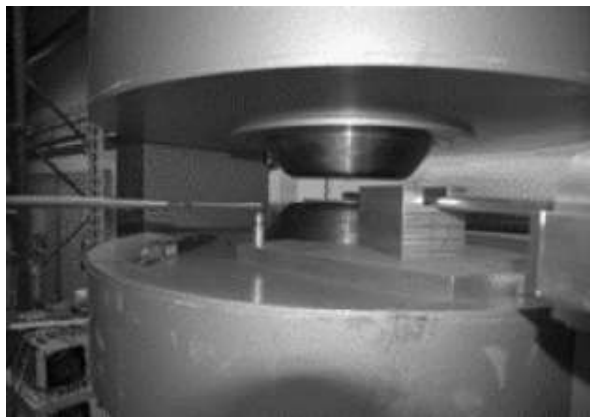
### 3.6 Ρύθμιση αισθητήρα Hall (calibration)

Η ρύθμιση είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της πραγματικής εξόδου του αισθητήρα. Όπως προαναφέρθηκε η τάση hall δεν είναι απόλυτα γραμμική συνάρτηση του σύμφωνα με το μαγνητικού πεδίου και αυτό το επηρεάζει η θερμοκρασία. Αυτούς τους παράγοντες που επηρεάζουν την μέτρηση πρέπει να τους γνωρίζουμε πριν από την μέτρηση. Η ρύθμιση είναι μία δοκιμαστική κατάσταση που εκτίθεται ο αισθητήρας σε είδη γνωστό μαγνητικό πεδίο καταγράφοντας την έξοδο του. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται σε όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος μέτρησης και πραγματοποιείται συχνά ώστε να αποφεύγονται να προβλήματα με την ολίσθηση τάσης.

Για να γίνει σωστά μια ρύθμιση απαιτεί:

1. Σωστή σχεδίαση αισθητήρα hall που είναι προς δοκιμή
2. Υψηλής ακρίβεια βολτόμετρο για μέτρηση της τάσης εξόδου του αισθητήρα
3. Ένα πιστοποιημένο όργανο μέτρησης μαγνητικού πεδίου για την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου που εφαρμόζεται στο αισθητήριο
4. Ένας ομογενής μαγνήτης ρύθμισης
5. Σταθερή θερμοκρασία χώρου

Στις παρακάτω φωτογραφίες απεικονίζεται μια διαδικασία ρύθμισης.



Σχήμα 3.11: Απεικόνιση ρύθμιση αισθητήρα σε μαγνήτη παραγωγής ομογενούς μαγνητικού πεδίου



Σχήμα 3.12: Απεικόνιση χώρου ρύθμισης αισθητήρων

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> Κυκλωματικές διατάξεις

### 4.1 Εισαγωγή

Ανάλογα με τις απαιτήσεις αλλά και τις ανάγκες του χρήστη, πρέπει η μετρητική συσκευή να διαμορφωθεί ανάλογα. Αυτό προϋποθέτει την σωστή σχεδίαση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων αλλά και την επιλογή των κατάλληλων εξαρτημάτων, ώστε να συνθέσουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Κύρια επιλογή εξαρτήματος σε αυτή την περίπτωση είναι ο αισθητήρας Hall. Πρέπει να επιλεγεί ο κατάλληλος αισθητήρας μέσα από μία πληθώρα τέτοιων στοιχείων, ώστε να πληροί τα κριτήρια λειτουργίας καθώς και των μετρήσεων που θα πρέπει να αντιμετωπίσει.

Ένα από αυτά τα κριτήρια είναι ότι θα πρέπει να είναι ικανός για μέτρηση μαγνητικού πεδίου στην περιοχή των 3 Tesla. Το μαγνητικό πεδίο τέτοιου μεγέθους είναι αρκετά μεγάλο και οι επιλογές για τέτοιου είδους αισθητήριο, είναι από το πρώτο κιάλας κριτήριο επιλογής, αρκετά περιορισμένες, πράγμα που δυσκόλεψε την εύρεση, αλλά και αγορά του. Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα ισχύος, μαγνητικών πεδίων.

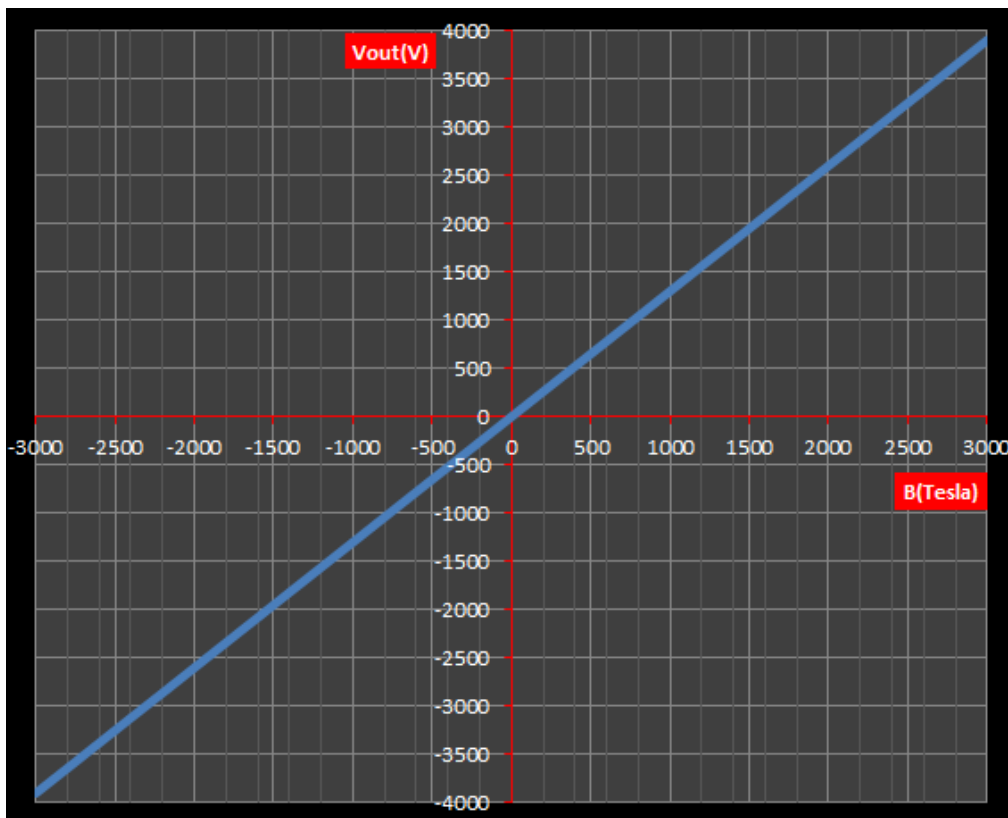
- ❖ 31.869  $\mu\text{T}$  – Μαγνητικό πεδίο Γής σε 0<sup>ο</sup> γεωγραφικό μήκος και 0<sup>ο</sup> γεωγραφικό πλάτος.
- ❖ 5 mT – Μαγνητική ισχύ απλού μαγνήτη.
- ❖ 1.25 T – Μαγνητική ισχύ μαγνήτη νεοδυμίου.
- ❖ 1.5 T με 3 T – Μαγνητική ισχύ μαγνητικού τομογράφου.
- ❖ 4 T – Ισχύς υπεραγωγίμου μαγνήτη στο CERN.
- ❖ 11.75 T – Ισχύς μαγνήτη INUMAC, ο ισχυρότερος μαγνητικός τομογράφος.
- ❖ 14.5 T – Η μεγαλύτερη καταγεγραμμένη μαγνητική ισχύ σε επιταχυντή στο εργαστήριο Fermi lab.
- ❖ 108 – 1011 T Εύρος δύναμης μαγνητικού πεδίου αστέρων νετρονίων.

Από αυτό το παράδειγμα γίνεται αντιληπτό πως τα ισχυρά μαγνητικά πεδία βρίσκονται σε συγκεκριμένους τομείς εξειδίκευσης. Οπότε και η παραγωγή αισθητήρων μέτρησης τέτοιου όγκου μαγνητικών πεδίων από της βιομηχανίες είναι περιορισμένη και απευθύνεται σε συγκεκριμένους τομείς. Μια παρατήρηση που έγινε είναι πως ακόμα και η ίδια εταιρία, που έστειλε τους αισθητήρες δεν έδινε επαρκείς πληροφορίες σε όλο το εύρος λειτουργίας για το προϊόν (αισθητήρα Hall). Η πρώτη υπόθεση που έγινε είναι ότι η εταιρία έστειλε λανθασμένα τα φύλλα δεδομένων. Μετά όμως από επικοινωνία που υπήρξε με την ίδια την εταιρία, διευκρινίστηκε πως η δημιουργία μηχανήματος παραγωγής μεγάλης ισχύος μαγνητικού πεδίου για έλεγχο πλήρους εύρους του αισθητήρα δεν την συμφέρει (το εύρος μέτρησης αισθητήρα Hall InAs ανέρχεται στα 10T) , σε σχέση με την τιμή του προϊόντος και επιλέγει να δίνει προσεγγίσιμες τιμές με αλγόριθμους πέρα από την ζώνη ελέγχου που κάνει. Υπήρξαν αρκετά προβλήματα κατά την διάρκεια λειτουργίας του αισθητήρα τα οποία θα αναφερθούν και παρακάτω. Έπειτα από αρκετές αλληλογραφίες με τον υπεύθυνο παραγωγής ο οποίος ήταν πρόθυμος να βοηθήσει, λύθηκαν και έφτασα σε ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

## 4.2 Επιλογή αισθητήρα Hall

Ο τύπος αισθητήρα που επιλέχθηκε είναι ο CYSJ302C. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας έχει εύρος λειτουργίας έως 3T. Παραπάνω από αυτή την τιμή ο αισθητήρας δεν καταστρέφεται καθώς το στοιχείο που είναι φτιαγμένος έχει την δυνατότητα έκθεσης σε πεδία άνω των 10T, αλλά τα εσωτερικά κυκλώματα λειτουργίας του, φτάνουν σε σημείο κορεσμού την έξοδο του. Η μέγιστη τάση λειτουργίας του είναι τα 12V και αυτό ύστερα από υπόδειξη του κατασκευαστή, καθώς στα φύλλα δεδομένων η αναγραφόμενη τιμή ήταν τα 10V. Το θερμοκρασιακό εύρος που μπορεί να λειτουργεί χωρίς πρόβλημα ο αισθητήρας είναι από -40°C έως 125°C. Βέβαια για να μην υπάρχει απόκλιση στις μετρήσεις πρέπει να προστεθεί στην συνάρτηση μεταφοράς και ο όρος που δίνει την μεταβολή της εξόδου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ώστε να μπορεί να εξισορροπηθεί το αποτέλεσμα της εξόδου. Η τάση ολίσθησης που δίνει ο κατασκευαστής κυμαίνεται από -11mV έως 11mV στους 25°C. Η συνάρτηση μεταφοράς δίνεται από την εξίσωση(4.1), η συνάρτηση μεταφοράς υπολογίστηκε στους 25°C. Η γραμμικότητα του είναι 2%.

$$V_{out} = 1.3 \cdot B(T) \mp 11mV \quad (4.1)$$

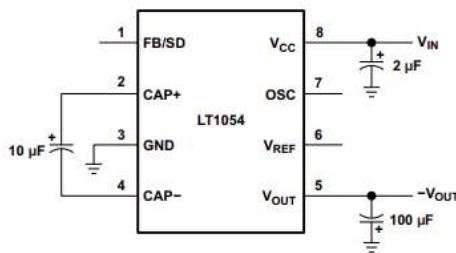


Σχήμα 4.1 Περιγραφή συνάρτησης μεταφοράς αισθητήρα CYSJ302C

## 4.2 Σχεδιασμός τροφοδοτικού κυκλωμάτων

Έχοντας σαν βάση τα παραπάνω στοιχεία του αισθητήρα, πρέπει να κατασκευαστούν κυκλωματικές διατάξεις που να συνεργάζονται άψογα μεταξύ τους, ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν οι δυνατότητες του αισθητήρα στο έπακρον και να υπάρξει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Σημαντικό ρόλο παίζει η πηγή ενέργειας που θα τροφοδοτεί τον αισθητήρα αλλά και τα κυκλώματα προσαρμογής και επεξεργασίας. Σε αυτήν την περίπτωση πηγή ενέργειας είναι μια μπαταρία των 9V και χωρητικότητας 450mA. Επιλέχθηκε μπαταρία ώστε η συσκευή να είναι φορητή. Η τάση που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρας είναι διπολική  $\pm 6V$ . Για να μετατραπεί η τάση +9V σε +6V χρησιμοποιήθηκε ένας γραμμικός μετατροπέας υποβιβασμού τάσης, συγκεκριμένα είναι ο MC7806 (ολοκληρωμένο κύκλωμα σε chip). Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να αποδώσει είναι το 1A το οποίο υπερκαλύπτει τις ανάγκες των φορτίων του κυκλώματος. Στην περίπτωση αυτή τα φορτία που χρησιμοποιούν αυτό το επίπεδο τάσης είναι οι αισθητήρες, οι ενισχυτές οργανολογίας, οι διατάξεις των φίλτρων και τα κυκλώματα ενίσχυσης. Επίσης το συγκεκριμένο chip παρέχει προστασία από βραχυκύκλωμα σε περίπτωση σφάλματος και προστασία από υπερθέρμανση.

Οι αισθητήρες χρειάζονται όμως και το χαμηλό δυναμικό που είναι τα -6V. Όπως αναφέρθηκε η τάση τροφοδοσίας είναι τα 9V. Για να μετατραπεί αυτή η τάση στο επίπεδο -6V πρέπει να σχεδιαστεί συγκεκριμένη κυκλωματική διάταξη. Μετά από έρευνα επιλέχθηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα LT1054 από την Texas instruments. Το chip έχει ως μέγιστη τάση εισόδου τα 16V και μπορεί να τροφοδοτήσει φορτία μέχρι 100mA. Να σημειωθεί όμως πως αν χρησιμοποιηθεί στο μέγιστο των δυνατοτήτων του για έξοδο ρεύματος, η τάση εισόδου έχει διαφορά με την έξοδο του γύρω στα 1.1V. Αυτό σημαίνει ότι ο βαθμός απόδοσης του μικραίνει σε σχέση με το τυπικό που δίνει ο κατασκευαστής, στην φυσιολογική λειτουργία κατανάλωσης ρεύματος που είναι περίπου τα 10mA. Ο βαθμός απόδοσης στα 10 mA φτάνει το 98%. Να σημειωθεί πως ο κατασκευαστής δίνει την δυνατότητα σύνδεσης δύο ολοκληρωμένων κυκλωμάτων παράλληλα αν το ρεύμα κατανάλωσης υπερβαίνει το ονομαστικό. Το LT1054 μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες κυκλωματικές διατάξεις. Αυτό το επιτρέπει ο σχεδιασμός του, από την στιγμή που είναι διακοπτικής σχεδίασης, με συχνότητα λειτουργίας τα 25KHz η οποία με εξωτερικά παθητικά στοιχεία ρυθμίζεται. Ανάλογα τον τρόπο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί επιλέγονται τα κατάλληλα περιφερειακά ηλεκτρονικά στοιχεία ώστε να συνθέσουν την ανάλογη τοπολογία. Στην περίπτωση μας το χρειαζόμαστε σαν αναστροφέα τάσης και τα στοιχεία που συνθέτουν αυτή την κυκλωματική διάταξη είναι δύο πυκνωτές. Η πυκνωτές εξόδου και εισόδου πρέπει να επιλεγούν με αναλογία 10:1 για την καλύτερη λειτουργία του κυκλώματος. Οι τιμές που επιλέχθηκαν είναι 100μF και 10μF αντίστοιχα. Έχοντας συνθέσει το κύκλωμα του σχήματος (4.2), η τάση εξόδου ανέρχεται στα -8.8V.



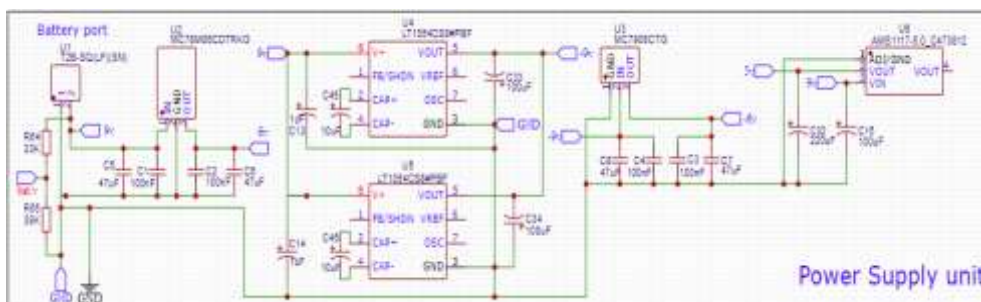
Σχήμα 4.2 κύκλωμα συνδεσμολογίας αναστροφέα τάσης

Τα pins τα οποία δεν είναι συνδεδεμένα δεν επηρεάζουν την λειτουργία του καθώς χρησιμοποιούνται στην περίπτωση ξεχωριστών κυκλωματικών διατάξεων. Έχοντας σαν σημείο αναφοράς τα -8.8V εύκολα με το κατάλληλο ολοκληρωμένο κύκλωμα MC7906 μετατρέπεται η τάση στο επίπεδο των -6V. Το MC7906 έχει την δυνατότητα να δεχτεί στην είσοδο του τάση έως -35V και να αποδώσει ρεύμα έως 1A το οποίο τα καθιστά κατάλληλο για την εφαρμογή. Επίσης πραγματοποιήθηκε η προσπάθεια να γίνει μετατροπή της θετικής τάσης σε αρνητική από την έξοδο του MC7806, παίρνοντας την έξοδο των +6V και οδηγώντας την στην είσοδο του LT1054 όπου θα την μετέτρεπε σε -6V αποφεύγοντας έτσι το επιπλέον ολοκληρωμένο κύκλωμα MC7906. Η προσπάθεια αυτή ήταν ανεπιτυχής καθώς πέρα του ότι με την κατανάλωση ρεύματος από τους αισθητήρες η τάση δεν παρέμενε αρκετά σταθερή, υπήρχε θέμα με την συχνότητα λειτουργίας του LT1054 καθώς η διακοπτική λειτουργία επηρέαζε τα αποτελέσματα της εξόδου των αισθητήρων. Γι αυτό και επιλέχθηκε να γίνει η σχεδίαση με τον γραμμικό σταθεροποιητή MC7906 ο οποίος πρόσφερε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Στην συνέχεια απομένει ακόμα ένα επίπεδο τάσης που πρέπει να δημιουργηθεί από τη τάση της μπαταρίας των 9V και αυτό είναι τα 5V. Με αυτό το επίπεδο τάσης τροφοδοτούνται ο επεξεργαστής ο αναλογικός πολυπλέκτης καθώς και το ολοκληρωμένο κύκλωμα μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Για την μετατροπή αυτή επιλέχθηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα AMS1117 το οποίο παρέχει σταθερή τάση εξόδου 5V και μπορεί να διοχετεύσει ρεύμα έως 1A.



Σχήμα 4.3 Block διάγραμμα διάταξης τροφοδοτικού



Σχήμα 4.4 Ολοκληρωμένο σχηματικό κύκλωμα διάταξης τροφοδοτικού

### 4.3 Κυκλώματα προσαρμογής και επεξεργασίας δεδομένων

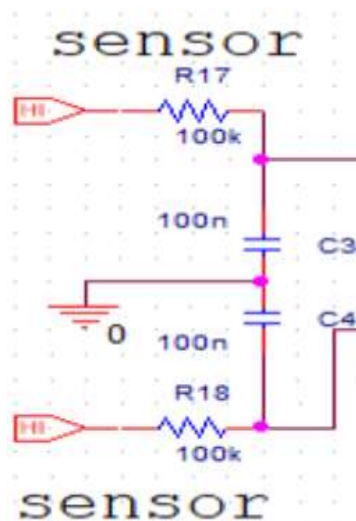
Αφού έχουν τροφοδοτηθεί οι αισθητήρες με την κατάλληλη τάση λειτουργίας, είναι σε θέση να παράγουν την κατάλληλη τάση εξόδου, όταν εκτεθούν σε μαγνητικό πεδίο. Αυτή τάση πρέπει να προσαρμοστεί και να διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε να μπορεί να είναι συμβατή με την μονάδα μικροεπεξεργαστή που έχει επιλεγεί για την συσκευή αυτή. Οι διατάξεις που περιλαμβάνονται είναι το παθητικό φίλτρο το οποίο βρίσκεται στην έξοδο των αισθητήρων, ο διαφορικός ενισχυτής οργανολογίας, το κύκλωμα επιλογής κέρδους αναστρέφων ενισχυτή, ο αναστρέφων ενισχυτής, ενεργό φίλτρο τοπολογίας Butterworth 2<sup>ης</sup> τάξης, κύκλωμα προσαρμογής σήματος από ±3.9V σε 0.3-4.7V, ο μετατροπέας από ψηφιακό σε αναλογικό και τέλος ο μικροεπεξεργαστής όπου λαμβάνει τα διαμορφωμένα κατάλληλα σήματα τα επεξεργάζεται και τα αποστέλλει μέσω σειριακού πρωτοκόλλου στο Bluetooth module, το οποίο με την σειρά του αποστέλλει ασύρματα τα δεδομένα στο κινητό του χρήστη.

#### 4.3.1 Ανάλυση παθητικού φίλτρου και διαφορικού ενισχυτή οργανολογίας

Το παθητικό φίλτρο βρίσκεται στην έξοδο του κάθε αισθητήρα ώστε τα δεδομένα να φιλτράρονται από τυχόν θόρυβο ξεχωριστά. Η τοπολογία του είναι η χαμηλοπερατή 1<sup>ης</sup> τάξης με συχνότητα αποκοπής τα 15.923Hz. Η εξίσωση που δίνει την συχνότητα αποκοπής δίνεται από την εξ.(4.2).

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.2)$$

Τα pins που αναγράφεται sensor στο σχήμα(4.4) αντιστοιχούν στα pins του κάθε αισθητήρα. Με την επιλογή των τιμών για τις αντιστάσεις τα 100K και τους πυκνωτές 100nF πετυχαίνεται η κατάλληλη συχνότητα αποκοπής.



Σχήμα 4.5: Σχηματικό παθητικού φίλτρου με συχνότητα αποκοπής τα 15.923Hz

Στην συνέχεια μετά το φίλτρο ακολουθεί ο διαφορικός ενισχυτής οργανολογίας. Επιλέχθηκε ο AD623 καθώς έχει άψογη συμπεριφορά στην λεπτομερή επεξεργασία του σήματος. Η τάση που τροφοδοτείται είναι τα  $\pm 6V$ . Ο συγκεκριμένος έχει την δυνατότητα ενίσχυσης του σήματος με την τοποθέτηση της κατάλληλης αντίστασης επιλογής κέρδους στα pins 1 και 8. Η αντίσταση επιλογής κέρδους δίνεται από την εξίσωση(4.3).

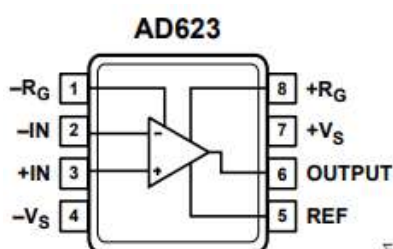
$$R_G = \frac{100K}{G - 1} \quad (4.3)$$

Σε αυτήν την περίπτωση αυτά τα pins είναι ασύνδετα (το κέρδος είναι 1 και δεν επηρεάζεται η λειτουργία του), δηλαδή δεν χρησιμοποιείται ενίσχυση. Η τάση στην έξοδο του παραμένει ίδια με την διαφορά των τάσεων στις εισόδους του. Στο pin 5 μπορεί να δεχτεί τάση αναφοράς, η οποία μπορεί να κυμαίνεται από  $-6$  έως  $6 V$ , αν κρίνεται βέβαια απαραίτητη για διόρθωση της τάσης ολίσθησης αν τυχόν έχει κάποιος αισθητήρας. Η τάση αναφοράς επιλέγεται από ένα ποτενσιόμετρο και στην συνέχεια ακολουθεί ένας buffer για την σταθεροποίηση της. Να σημειωθεί ότι για να μπορεί να γίνει χρήση της τάσης αναφοράς πρέπει ο χρήστης να αλλάξει το συγκεκριμένο σημείο μεταγωγής που έχει επάνω η πλακέτα από την θέση 1 στην 2, καθώς η θέση 1 έχει μόνιμα βραχυκυκλωμένο το pin 5 του AD623 στην γείωση. Η έξοδος του βρίσκεται στο pin 6 όπου συνδέεται στην είσοδο buffer έτσι ώστε το σήμα να μην έχει διακυμάνσεις με τις αλλαγές των αντιστάσεων που ακολουθούν στις επόμενες βαθμίδες. Η έξοδος του δίνεται από την εξίσωση(4.4)

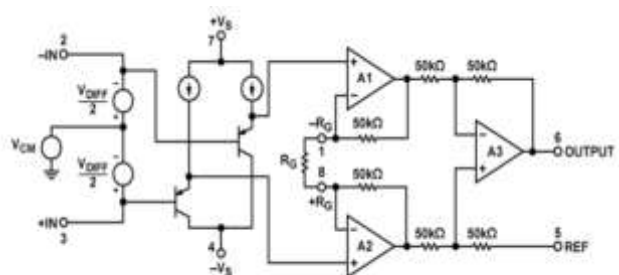
$$V_{out} = \left(1 + \frac{100K}{R_G}\right) (V_{IN+} - V_{IN-}) \quad (4.4)$$

### 4.3.2 Ανάλυση ψηφιακού ρυθμιστή κέρδους

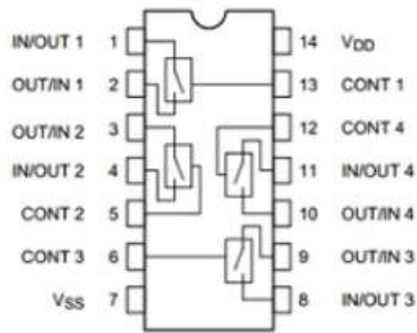
Στην συνέχεια το σήμα εισάγεται σε ένα ψηφιακό διακόπτη ο οποίος είναι υπεύθυνος για την εναλλαγή των αντιστάσεων κέρδους, έτσι ώστε να μπορεί να γίνεται η εναλλαγή της κλίμακας μέτρησης. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για αυτή τη δουλειά είναι το CD4066 το οποίο ως μέγιστη τάση τροφοδοσίας έχει τα  $20V$ , στην περίπτωση αυτή τροφοδοτείται με  $5V$ . Έχει τέσσερις εσωτερικά ολοκληρωμένους μεταγωγικούς διακόπτες οι οποίοι ελέγχονται με ψηφιακό σήμα από το μικροεπεξεργαστή για την κατάσταση τους, αν είναι ανοιχτή ή κλειστή. Στην κατάσταση που ο διακόπτης είναι κλειστός η αντίσταση αγωγής είναι περίπου  $120 \Omega$  σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Αυτό συνεπάγεται ότι προστίθεται στις αντιστάσεις ρύθμισης κέρδους και πρέπει να συνυπολογιστεί.



Σχήμα 4.6: Σχηματική απεικόνιση σημείων σύνδεσης του AD623



Σχήμα 4.7: Εσωτερική δομή AD623



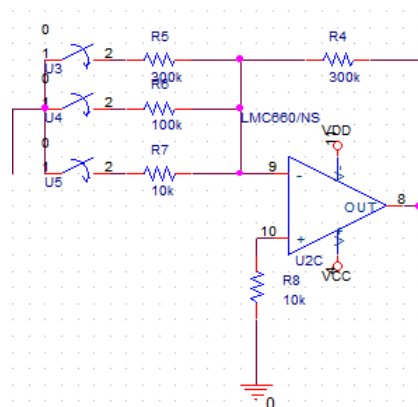
Σχήμα 4.8: Απεικόνιση σημείων σύνδεσης τετραπλού μεταγωγικού διακόπτη CD4066

Στο σημείο αυτό έχει υπολογιστεί ότι για κάθε επιλογή κλίμακας το σήμα θα πρέπει να ενισχύεται και να φτάνει το επίπεδο των  $\pm 3.9V$ . Έχουν δημιουργηθεί 3 κλίμακες. Η πρώτη κλίμακα αναφέρεται σε μετρήσεις από  $-100mT$  έως  $100mT$ . Η δεύτερη κλίμακα απευθύνεται σε μετρήσεις από  $-1000mT$  έως  $1000mT$  και η Τρίτη από  $-3T$  έως  $3T$ . Σύμφωνα με την συνάρτηση μεταφοράς προκύπτει ότι για  $-3T$  η έξοδος του αισθητήρα θα έχει δυναμικό  $-3.9V$  από την στιγμή που η συνάρτηση μεταφοράς είναι:

$$V_{out} = 1.3 \cdot B(T) \mp 11mV \quad (4.5)$$

Και αντίστοιχα στα  $3T$  η έξοδος δίνει  $3.9V$ . Το κύκλωμα ενίσχυσης φαίνεται στο σχήμα(4.8). Στην κλίμακα των  $\pm 100mT$  η τάση του αισθητήρα στα μέγιστα όρια της κλίμακας είναι  $\pm 130mV$ . Πρέπει να γίνει κατάλληλη ενίσχυση ώστε αυτές οι τάσεις να μετατρέπονται στις μέγιστες που μπορεί να αποδώσει ο αισθητήρας με μηδενική ενίσχυση. Αυτό γίνεται για μπορούν να προσαρμοστούν και οι τρεις κλίμακες στην μεθεπόμενη βαθμίδα που είναι η προσαρμογή στην τάση επεξεργασίας. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν για την πρώτη κλίμακα αντιστάσεις  $R4=300K$  και  $R7=10K$  με απόδοση κέρδους  $A_v = -30$ , καθώς το κέρδος αναστρέφων ενισχυτή δίνεται από την εξίσωση (4.6).

$$A_v = - \frac{R4}{R_{κλίμακας} + R120} \quad (4.6)$$



Σχήμα 4.9: Απεικόνιση βαθμίδας ενίσχυσης με ελεγχόμενο κέρδος. Η μεταγωγικοί διακόπτες αντικαθίστανται με το ολοκληρωμένο CD4066

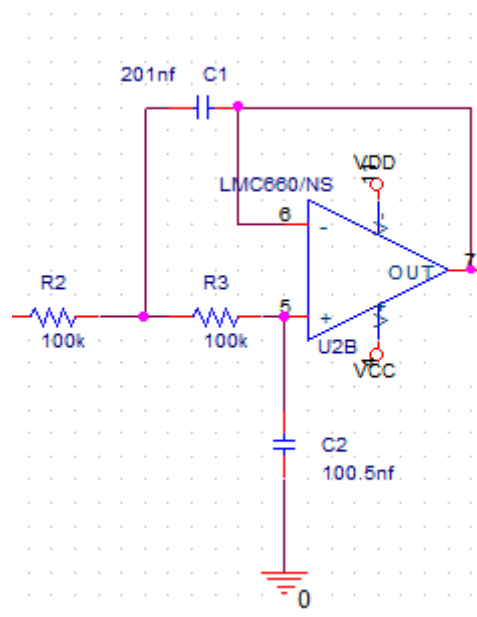
Για την δεύτερη κλίμακα R4=300K κ' R6=100K με απόδοση κέρδους  $A_v = -10$  καθώς η έξοδος του αισθητήρα σε αυτή την περίπτωση, στα μέγιστα όρια έχει διαφορά δυναμικού  $\pm 1300\text{mV}$ , και αντίστοιχα για την τρίτη κλίμακα όπου δεν υπάρχει ενίσχυση για το λόγο ότι η έξοδος του αισθητήρα δίνει διαφορά δυναμικού  $\pm 3.9\text{V}$  όπου και ο αισθητήρας έχει φτάσει στα μέγιστα των δυνατοτήτων του, γίνεται μόνο αναστροφή με επιλογή αντιστάσεων R4 και R5=300K με απόδοση κέρδους  $A_v = -1$ .

### 4.3.3 Ανάλυση ενεργού φίλτρου 2<sup>ης</sup> τάξης

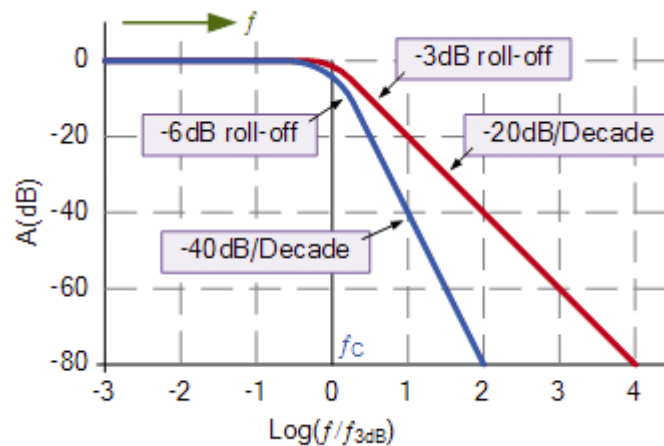
Αφού το σήμα διαμορφώνεται κατάλληλα και για τις τρεις κλίμακες στο επόμενο στάδιο εισέρχεται σε κύκλωμα ενεργού χαμηλοπερατού φίλτρου 2<sup>ης</sup> τάξης τοπολογίας Butterworth, για την αποκοπή θορύβου που προέρχεται και από τον αισθητήρα αλλά και από τον περιβάλλοντα χώρο. Η παρουσία του φίλτρου σε αυτή την θέση είναι απαραίτητη καθώς στις δύο πρώτες κλίμακες μέτρησης που γίνεται ενίσχυση, μαζί με την ενίσχυση της τάσης που μας δίνει τα δεδομένα ενισχύεται και ο θόρυβος και με αυτόν τον τρόπο επηρεάζονται οι μετρήσεις. Στο σχήμα (4.9) απεικονίζεται το σχηματικό διάγραμμα του φίλτρου. Η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου δίνεται από την εξίσωση (4.7).

$$F_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2}} \quad (4.6)$$

Με τα επιλεγμένα στοιχεία του κυκλώματος R2=100K, R3=100K, C1=201nF και C2=100.5nF η συχνότητα αποκοπής είναι  $F_c = 11.23\text{Hz}$ .

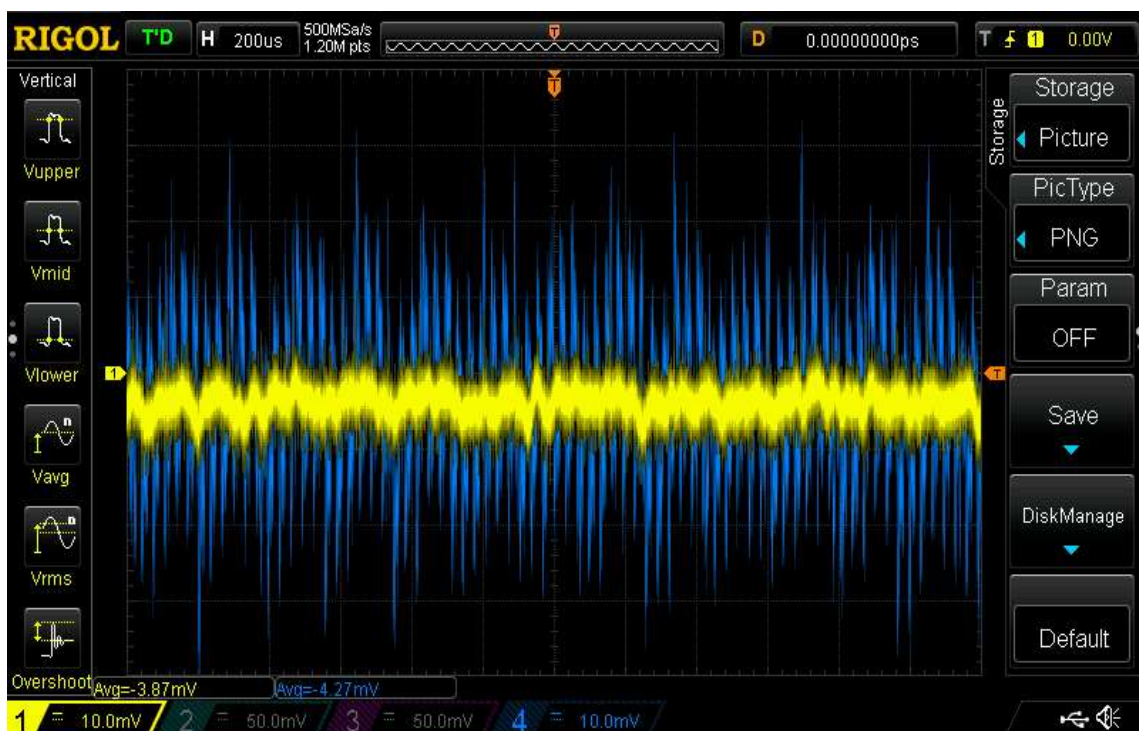


Σχήμα 4.10: Χαμηλοπερατό φίλτρο δεύτερης τάξης τοπολογίας Butterworth με συχνότητα αποκοπής τα 11.23Hz.



Σχήμα 4.11: Απόκριση συχνότητας ενεργού φίλτρου Butterworth. Κόκκινη καμπύλη τοπολογία πρώτης τάξης, μπλε καμπύλη τοπολογία δεύτερης τάξης.

Η επιλογή φίλτρου δεύτερης τάξης έγινε για το λόγο ότι η κλίση της καμπύλης στην συχνότητα αποκοπής είναι πιο απότομη όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα (4.10), μειώνοντας έτσι το πλάτος του θορύβου πιο γρήγορα με ρυθμό 40dB ανά δεκάδα. Στο σχήμα (4.11) φαίνεται μία πραγματική μέτρηση που έγινε στο κύκλωμα, με και χωρίς φίλτρο.



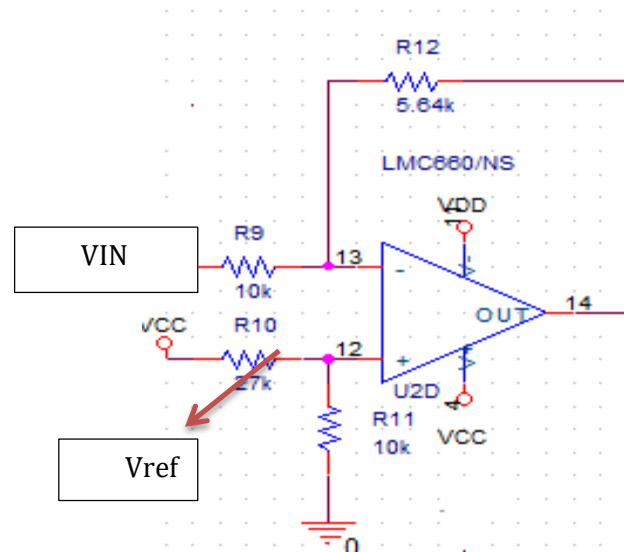
Σχήμα 4.12: Απεικόνιση εξόδου αισθητήρα σε έκθεση τυχαίου μαγνητικού πεδίου, με και χωρίς την επίδραση φίλτρου. Με το μπλε χρώμα είναι η αφιλτράριστη έξοδος με το κίτρινο είναι η έξοδος μετά την επίδραση του φίλτρου.

#### 4.3.4 Κύκλωμα προσαρμογής $y=-ax+b$

Για να μπορούν τα δεδομένα να επεξεργαστούν από τον μικροελεγκτή, πρέπει να είναι συμβατά με την τάση λειτουργίας του. Τα δεδομένα έρχονται στην μορφή των  $\pm 3.9V$  από την έξοδο του φίλτρου. Η τάση  $3.9$  αντιστοιχεί σε  $-3T$  όταν ο αισθητήρας έχει εκτεθεί σε νότιο μαγνητικό πεδίο και  $-3.9$  που αντιστοιχεί σε  $3T$  όταν ο αισθητήρας έχει εκτεθεί σε βόρειο μαγνητικό πεδίο. Η τάση  $0V$  είναι το σημείο διχοτόμησης βόρειου και νότιου μαγνητικού πεδίου. Είναι επίσης το σημείο ηρεμίας του αισθητήρα, δηλαδή όταν ο αισθητήρας δεν είναι εκτεθειμένος σε κάποιο μαγνητικό πεδίο, η τάση στην έξοδο του φίλτρου πρέπει να αντιστοιχεί σε  $0 V$ . Συγκεκριμένα μπορεί να υπάρχει η απόκλιση των  $\pm 11mV$  σύμφωνα με τον κατασκευαστή σε κατάσταση ηρεμίας. Το σχήμα 4.12 παρουσιάζει πραγματική μέτρηση σε κατάσταση ηρεμίας. Όταν η τάση παραμένει στο θετικό μέτωπο τα δεδομένα μπορούν εύκολα να επεξεργαστούν. Αυτό δεν ισχύει όταν η τάση πέσει κάτω από τα  $0V$  καθώς είναι εκτός ορίων του μικροελεγκτή και μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε καταστροφή των εσωτερικών του κυκλωμάτων. Γι αυτό το λόγο πρέπει να προσαρμοστούν κατάλληλα οι τάσεις, ώστε να είναι πλήρως διαχειρίσιμο όλο το εύρος λειτουργίας του αισθητήρα.



Σχήμα 4.13: Απεικόνιση τάσης (κίτρινο χρώμα) στην έξοδο της βαθμίδας του φίλτρου σε κατάσταση ηρεμίας. Η τάση ανέρχεται στα  $-481\mu V$ . Με το κίτρινο και το μπλε απεικονίζονται οι τάσεις τροφοδοσίας των αισθητήρων.



Σχήμα 4.14: Σχηματικό κύκλωμα προσαρμογής σήματος από -3.9V σε 4.7V και από +3.9V σε 0.3V.

Το επόμενο στάδιο είναι η προσαρμογή των τάσεων  $\pm 3.9V$  στα επίπεδα 0.3V και 4.7V αντίστοιχα. Το κύκλωμα που δημιουργήθηκε για αυτήν την λειτουργία απεικονίζεται στο σχήμα (4.13). Η εξίσωση 4.7 περιγράφει την συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος.

$$V_{out} = -0.564 \cdot V_{IN} + 2.499 \quad (4.7)$$

Οι όροι -0.564 και 2.499 αντιστοιχούν στις μεταβλητές της εξίσωσης 4.8 και υπολογίζονται ως εξής:

$$y = -\alpha \cdot x + \beta \quad (4.8)$$

Στην περίπτωση που η τάση εισόδου είναι  $V_{in1}=+3.9V$ , τότε πρέπει αυτή η τάση να αντιστοιχεί σε  $V_{out1}=0.3V$ , και όταν είναι  $V_{in2}=-3.9V$  πρέπει να αντιστοιχεί σε  $V_{out2}=4.7V$ . Από αυτό προκύπτουν δύο εξισώσεις.

$$V_{out1} = -\alpha \cdot V_{in1} + \beta \quad (4.9)$$

$$V_{out2} = -\alpha \cdot V_{in2} + \beta \quad (4.10)$$

Αντικαθιστώντας και λύνοντας τις εξισώσεις προκύπτουν οι όροι  $\alpha$  και  $\beta$ , όπου  $\alpha = -0.564$  και  $\beta = 2.499$

Για να υπολογιστούν τα στοιχεία του κυκλώματος σχήμα 4.13 πρέπει να εφαρμοστεί το θεώρημα της υπέρθεσης. Αρχικά βραχυκυκλώνεται η  $V_{ref}$  και η έξοδος είναι εξαρτώμενη μόνο από την  $V_{in}$ .

$$V_{out1} = V_{in} \left( -\frac{R12}{R9} \right) \quad (4.11)$$

Στην συνέχεια βραχυκυκλώνεται η  $V_{in}$  και η έξοδος είναι εξαρτώμενη μόνο από την  $V_{ref}$ .

$$V_{out2} = V_{ref} \left( \frac{R11}{R10 + R11} \right) \left( \frac{R12 + R9}{R9} \right) \quad (4.12)$$

Αθροίζοντας τις δύο εξισώσεις η τελική εξίσωση της  $V_{out}$  που προκύπτει είναι η εξής:

$$\begin{aligned} V_{out} &= V_{out1} + V_{out2} = \\ &= -V_{in} \left( \frac{R12}{R9} \right) + V_{ref} \left( \frac{R11}{R10 + R11} \right) \left( \frac{R12 + R9}{R9} \right) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Όπως φαίνεται αντιστοιχεί με την εξίσωση ευθείας γραμμής Εξ.(4.8), οπότε :

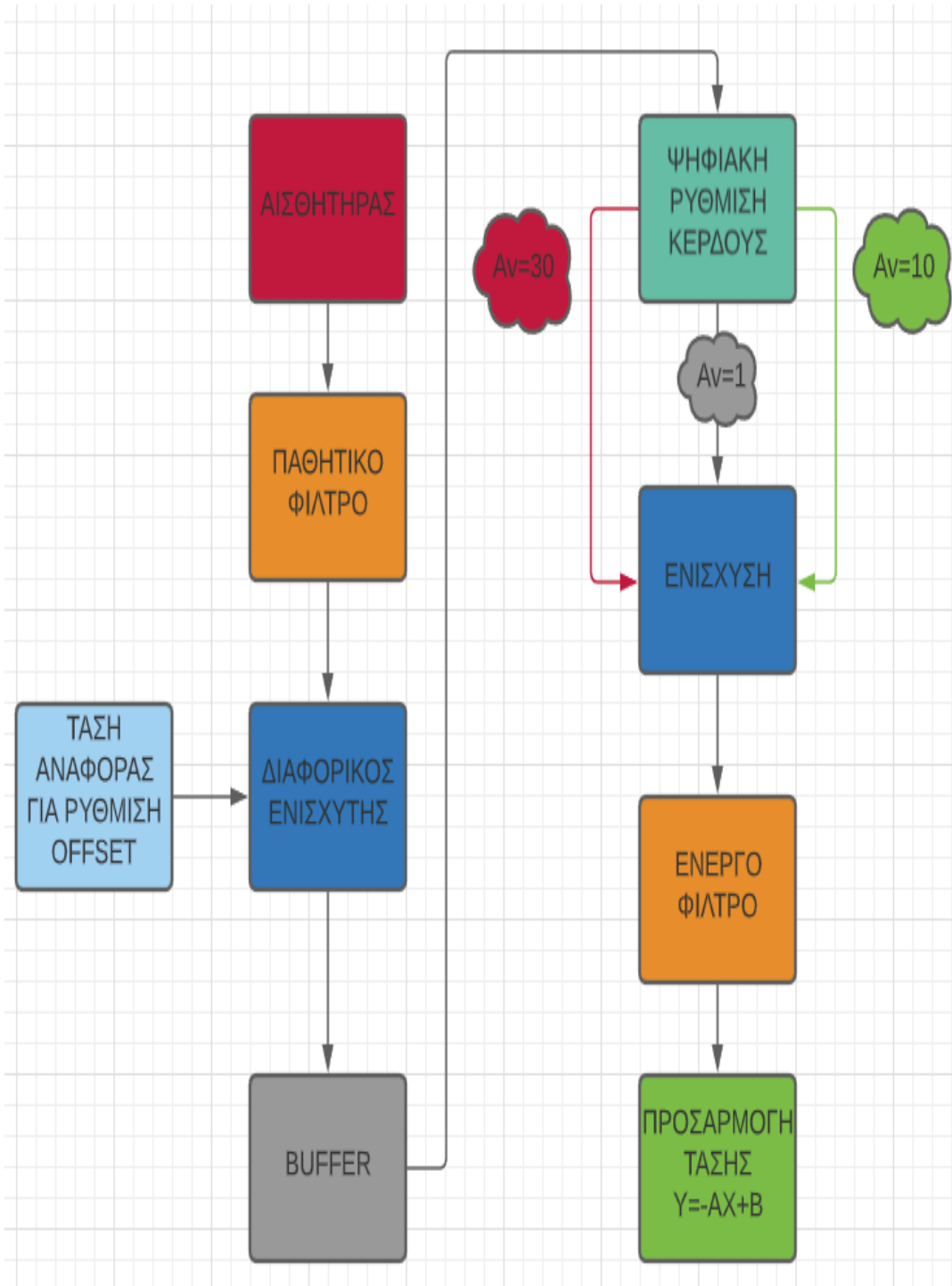
$$\alpha = \frac{R12}{R9} \quad (4.14)$$

$$\beta = V_{ref} \left( \frac{R11}{R10 + R11} \right) \left( \frac{R12 + R9}{R9} \right) \quad (4.15)$$

Θέτοντας την  $R9 = 10K$  και λύνοντας την Εξ(4.14) προκύπτει  $R12 = 5.64K$ . Θέτοντας στην Εξ(4.15) την  $R11 = 10K$  προκύπτει  $R10 = 27.53K$ .

Για την δημιουργία των φίλτρων, της βαθμίδας αναστρέφων ενισχυτή καθώς και του κυκλώματος προσαρμογής χρησιμοποιήθηκε ο τελεστικός ενισχυτής LMC660 τεχνολογίας CMOS. Ο συγκεκριμένος είναι rail to rail δηλαδή η τάση στην έξοδο του μπορεί να φτάσει πολύ κοντά με τα επίπεδα τροφοδοσίας του. Η τάση που τροφοδοτείται είναι τα  $\pm 6V$ , ενώ η μέγιστη μπορεί να φτάσει τα 15 V.

Στο σχήμα 4.15 φαίνεται το πλήρη σχηματικό διάγραμμα των κυκλωμάτων επεξεργασίας.



Σχήμα 4.15 : Πλήρης block διάγραμμα στοιχείων επεξεργασίας και προσαρμογής



### 4.3.5 Επεξεργασία δεδομένων

Για να επεξεργαστεί ένας υπολογιστής ή άλλη ψηφιακή συσκευή (σε αυτήν την περίπτωση μικροελεγκτής) αναλογικά σήματα, πρέπει πρώτα να τα μετατρέψει από αναλογική σε ψηφιακή μορφή. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται κβαντισμός.

Τα όρια του αναλογικού σήματος του κυκλώματος προσαρμογής είναι όπως φαίνεται και παραπάνω 0.3V με 4.7V τα οποία αντιστοιχούν και στα όρια της κάθε κλίμακας. Σε αυτό το σήμα πρέπει να γίνει δειγματοληψία ώστε να είναι κατάλληλο για επεξεργασία. Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των δεδομένων είναι ο ATMEGA328AU της εταιρίας Microchip.

Αυτός ο μικροελεγκτής έχει ενσωματωμένο μετατροπέα σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό (ADC) το οποίο παρέχει  $2^{10}=1024$  στάθμες κβαντισμού. Αν διαιρεθεί αυτός ο αριθμός με την τάση αναφοράς που δίνεται στο κύκλωμα μετατροπής από αναλογικό σε ψηφιακό, που έχει οριστεί στο κύκλωμα αυτό 5V, προκύπτει το βήμα με το οποίο γίνεται δειγματοληψία στο σήμα. Δηλαδή :

$$V_n = \frac{5}{1024} = 4.88 \cdot 10^{-3} V \quad (4.16)$$

Στην περίπτωση που έχει επιλεγεί η πρώτη κλίμακα δηλαδή για τα  $\pm 100\text{mT}$  ισχύει:

Η συνάρτηση μεταφοράς του αισθητήρα μας δίνει το βήμα της εξόδου του σε συνάρτηση με το μαγνητικό πεδίο. Για 1mT η έξοδος του αντιστοιχεί σε 1.3mV. Στην πρώτη κλίμακα αυτό πολλαπλασιάζεται με το κέρδος  $A_n=30$  και μας δίνει 39mV/1mT, στην συνέχεια γίνεται η προσαρμογή του με την εξίσωση (4.7)σελ44, και το αποτέλεσμα δίνει 2.52V. Αν αφαιρεθεί από το σημείο αναφοράς 0 της συνάρτησης (4.7), το αποτέλεσμα δίνει 21mV. Αυτό είναι και το βήμα, το οποίο αυξάνεται κατά 21mV για κάθε 1mT. Το βήμα του μικροελεγκτή όπως υπολογίστηκε είναι 4.88mV, από αυτό συμπεραίνεται ότι το βήμα του αισθητήρα μπορεί και σπάει σε τέσσερα κομμάτια καθώς τα βήματα αποδίδονται με ακέραιους αριθμούς, αφού :

$$n1 = \frac{V_{\text{βήμα αισθητήρα1}}}{V_{\text{ADC}}} = \frac{21\text{mV}}{4.88\text{mV}} = 4.30 \quad (4.17)$$

αποδίδοντας έτσι μεγαλύτερη ακρίβεια και ευελιξία στην διαχείριση των ψηφιακών δεδομένων.

Στην δεύτερη περίπτωση που έχει επιλεγεί η δεύτερη κλίμακα το βήμα του αισθητήρα πολλαπλασιάζεται με το κέρδος  $A_n=10$ , το 1.3mV για κάθε 1mT γίνεται 13mV/1mT. Στην συνέχεια αφού γίνει η προσαρμογή του η συνάρτηση(4.7) δίνει αποτέλεσμα 2.5063V. Αν γίνει αφαίρεση από το σημείο αναφοράς το βήμα προκύπτει 7.3mV/1mT. Το βήμα του ADC του μικροελεγκτή μπορεί να καλύψει και αυτό το ρυθμό αλλαγής βήματος, βέβαια η ακρίβεια είναι σε χαμηλότερο επίπεδο καθώς μόλις ένα βήμα μπορεί να χωρέσει στο βήμα αλλαγής δίνοντας λιγότερες κωδικές λέξεις στον μικροελεγκτή προς επεξεργασία.

$$n2 = \frac{V_{\text{βήμα αισθητήρα2}}}{V_{\text{ADC}}} = \frac{7.3\text{mV}}{4.88\text{mV}} = 1.49 \quad (4.18)$$

Το πρόβλημα δημιουργείται στην κλίμακα τρία όπου δεν υπάρχει κάποια ενίσχυση. Το βήμα του αισθητήρα εισάγεται αυτούσιο στην συνάρτηση προσαρμογής (4.7) και ως αποτέλεσμα δίνει 2.5003V για κάθε 1 mT. Αυτό δίνει βήμα συνάρτησης 1.3mV/1mT. Από αυτό συμπεραίνεται ότι το βήμα του ADC δε μπορεί να καλύψει της ανάγκες αυτής της κλίμακας μέτρησης καθώς ανά 4mT αποστέλλεται κωδική λέξη από τον ADC στον μικροελεγκτή για επεξεργασία.

$$n3 = \frac{V_{\text{βήμα αισθητήρα3}}}{V_{\text{ADC}}} = \frac{1.3\text{mV}}{4.88\text{mV}} = 0.26 \quad (4.18)$$

Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε ξεχωριστή μονάδα επεξεργασίας μετατροπής σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό.

#### 4.3.6 Επιλογή μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα

Το ADS1115 είναι ένα chip μετατροπής σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό με δυνατότητα απόδοσης βημάτων κβαντισμού  $2^{16}$  το οποίο δίνει 65636 βήματα. Η μέγιστη τάση λειτουργίας του είναι 5.5V. Περιέχει τέσσερις αναλογικές εισόδους με δυνατότητα μετατροπής τους σε διαφορικές εισόδους, που σε αυτή την περίπτωση οι εισοδοί γίνονται δύο. Η συχνότητα δειγματοληψίας του ανέρχεται στα 860 δείγματα ανά δευτερόλεπτο. Η επικοινωνία με άλλες ψηφιακές συσκευές πραγματοποιείται μέσω πρωτοκόλλου I<sup>2</sup>C, το οποίο δίνει την δυνατότητα σύνδεσης και άλλων chip παράλληλα αν χρειάζονται περισσότερες αναλογικές εισοδοί.

Το ADS1115 δίνει την δυνατότητα μέσω προγραμματισμού του να επιλεγεί κλίμακα μέτρησης η οποία καθορίζει το βήμα δειγματοληψίας. Ο πίνακας παρακάτω δίνει τα απαραίτητα στοιχεία.

Πίνακας 4.1 : Βήματα τάσης δειγματοληψίας σε σχέση με την επιλογή κλίμακας μέτρησης

ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΒΗΜΑ ΤΑΣΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ
ΜΕΧΡΙ 6.144V	0.1875mV
ΜΕΧΡΙ 4.096V	0.125mV
ΜΕΧΡΙ 2.048V	0.0625mV
ΜΕΧΡΙ 1.024V	0.03125mV
ΜΕΧΡΙ 0.512V	0.01562mV
ΜΕΧΡΙ 0.256V	0.007812mV

Έχοντας τα παραπάνω στοιχεία η κλίμακα που έχει επιλεγεί είναι η πρώτη με το όριο των 6.144V, καθώς τα όρια του σήματος που δειγματοληπτούνται είναι 0.3V με 4.7V. Σε περίπτωση που επιλεγεί άλλη κλίμακα και το σήμα την ξεπερνάει υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του chip.

Με τα καινούργια δεδομένα έχοντας σαν βήμα δειγματοληψίας τα 0.187mV προκύπτει ότι για την πρώτη κλίμακα μέτρησης του οργάνου ισχύει:

$$n1 = \frac{V_{\text{βήμα αισθητήρα1}}}{V_{\text{ADC}}} = \frac{21\text{mV}}{0.187\text{mV}} = 112.29 \quad (4.17)$$

112 βήματα μέτρησης για κάθε μεταβολή 1mT.

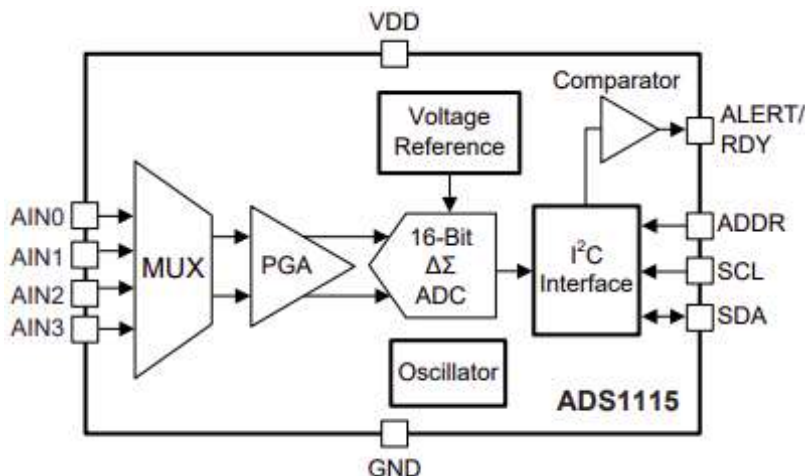
Για την δεύτερη κλίμακα ισχύει:

$$n2 = \frac{V_{\text{βήμα αισθητήρα1}}}{V_{\text{ADC}}} = \frac{7.3\text{mV}}{0.187\text{mV}} = 39.03 \quad (4.17)$$

39 βήματα μέτρησης για κάθε μεταβολή 1mT.

$$n3 = \frac{V_{\text{βήμα αισθητήρα1}}}{V_{\text{ADC}}} = \frac{1.3\text{mV}}{0.187\text{mV}} = 6.9 \quad (4.17)$$

6 βήματα μέτρησης για κάθε μεταβολή 1mT. Σε αυτή την κλίμακα δεν υπήρχε κανένα βήμα μέτρησης για την μεταβολή 1mT, καθώς ανά 4 mT μπορούσε να δειγματοληπτήσει ο ADC του ATMEGA328AU. Παρατηρείται ότι πλέον γίνεται δειγματοληψία και στις τρεις κλίμακες με υπέρ ικανοποιητικό αριθμό βημάτων, προσφέροντας έτσι την επιθυμητή ακρίβεια για κάθε κλίμακα μέτρησης.



Σχήμα 4.17: Εσωτερικό block διάγραμμα ADS1115

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> Μικροελεγκτής συστήματος

### 5.1 Εισαγωγή

Μικροελεγκτής είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, το οποίο έχει ενσωματωμένα εκτός από τον μικροεπεξεργαστή και διάφορα περιφερειακά όπως πχ. μνήμες RAM, ROM, πόρτες I/O, χρονοιστές /απαριθμητές, σειριακή επικοινωνία, μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, κτλ. Χρησιμοποιούνται σε όλες τις εφαρμογές αυτοματισμού (πχ εργοστάσια, ηλεκτρικές συσκευές, ρομποτική), σε συστήματα ελέγχου (H/Y, αυτοκίνητα, κινητά), σε συστήματα ελέγχου προσπέλασης (ασφάλεια), κτλ. Με άλλα λόγια, μπορεί ένας μικροελεγκτής (μέσω των ενσωματωμένων περιφερειακών του) να συνδεθεί με διάφορες εξωτερικές συσκευές, όπως πχ. αισθητήρες, αντιστάσεις, εξωτερικό ρολόι, βηματικούς κινητήρες, διακόπτες, bluetooth, usb, κτλ. και να προκαλέσει ανάλογα με την ρύθμιση του, την επιθυμητή ενέργεια, η να εμφανίσει το αποτέλεσμα στην οθόνη. συμβατή με τα χαρακτηριστικά εισόδου της συσκευής (μορφή τάσης, τάση λειτουργίας, ισχύς εισόδου).

### 5.2 Μικροελεγκτής ATMEGA328-AU

Πρωταγωνιστικό ρόλο σε αυτή τη συσκευή μέτρησης παίζει ο μικροελεγκτής ATMEGA328-AU καθώς είναι υπεύθυνος για τις διεργασίες υπολογισμών και σωστής συνεργασίας των περιφερειακών συστημάτων μέτρησης και αποστολής δεδομένων. Τα κύρια χαρακτηριστικά του δίνονται στον πίνακα παρακάτω.

Πίνακας 5.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά ATMEGA328-AU

Χωρητικότητα μνήμης EEPROM	1kB
Χωρητικότητα μνήμης SRAM	2kB
Χωρητικότητα μνήμης FLASH	32kB
Συχνότητα ρολογιού	20MHz
PWM έξοδοι	6
8bit χρονοιστές	2
16bit χρονοιστές	1
Τάση τροφοδοσίας	1.8-5.5V
Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας	-40-85°C
Είσοδοι εξωτερικής διακοπής προγράμματος	24
10bit A/D μετατροπείς	8

Επίσης ο μικροελεγκτής έχει τις παρακάτω διεπαφές:

- I2C
- SPI X 2
- UART

Ακόμη περιλαμβάνει εσωτερικό αισθητήρα θερμοκρασίας, watchdog timer, και 32kHz εσωτερικό ταλαντωτή για Real Time Clock (RTC).

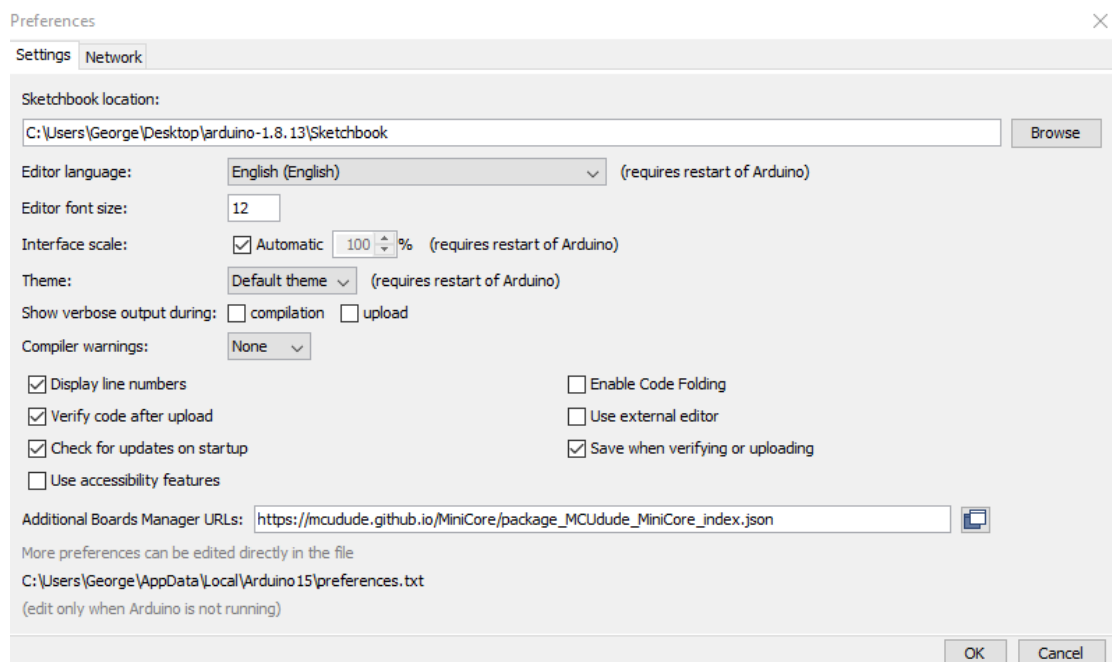


στον μικροελεγκτή και παραμένει για όλη την διάρκεια λειτουργίας του. Η εγγραφή του γίνεται σε ξεχωριστό κομμάτι μνήμης του μικροελεγκτή και γι αυτό δεν χάνεται αν ξαναφορτωθεί κάποιο άλλο πρόγραμμα. Το Arduino IDE περιέχει επιλογή εγράφης σε αναπτυξιακές πλακέτες Arduino, όπου επιλέγεις την πλακέτα που θέλεις να γράψεις κάποιο πρόγραμμα και γίνεται αυτόματα. Αυτό όμως προϋποθέτει ότι το εγγεγραμμένο bootloader που είναι στον μικροελεγκτή της πλακέτας είναι συμβατό με το πυρήνα επιλογής πλακέτας που έχει το Arduino IDE ώστε να μπορεί να επικοινωνήσει και να γράψει το πρόγραμμα.

Η δυσκολία εδώ ήταν να βρεθεί κατάλληλο bootloader ώστε να συνεργαστεί με κάποια από τις από τις διαθέσιμες πλακέτες που προτείνει το αναπτυξιακό περιβάλλον. Μετά από έρευνα πάρθηκε η απόφαση να εγκατασταθεί ξεχωριστό board choice της AVR στο αναπτυξιακό περιβάλλον του Arduino IDE με το δικό του bootloader. Αυτός ο συνδυασμός αποτέλεσε την χρυσή τομή που έκανε τον μικροελεγκτή να λειτουργήσει.

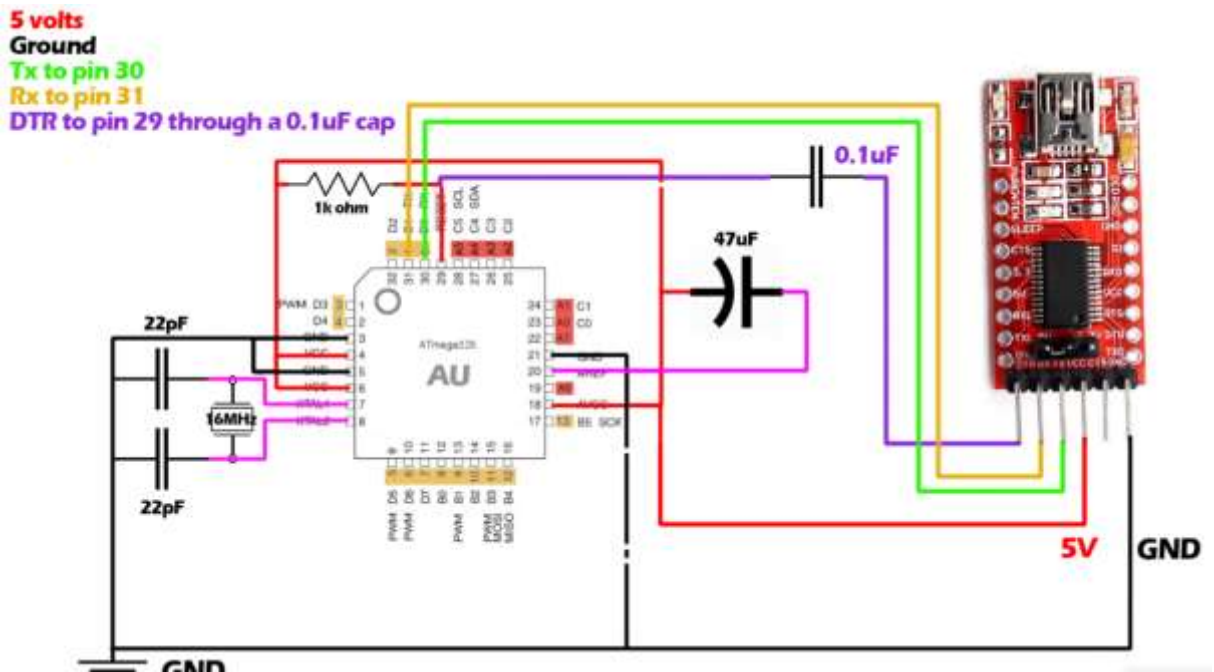
Για την εγκατάσταση αυτού, ανοίγουμε το Arduino IDE, πατώντας Preferences (επιλογές) ανοίγει η καρτέλα όπου στο πλαίσιο Additional Boards Manager URLs: γράφουμε την διεύθυνση.

Όταν ολοκληρωθεί η εγκατάσταση του πυρήνα μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία εγγραφής του bootloader στο chip του μικροελεγκτή. Επειδή δεν υπήρχε η δυνατότητα εύρεσης συσκευής προγραμματισμού η οποία εξειδικεύεται γι αυτή την δουλειά, έπρεπε να βρεθεί εναλλακτική λύση. Για αυτή την δουλειά χρησιμοποιήθηκε άλλος μικροελεγκτής ο οποίος είχε είδη έτοιμο φορτωμένο το bootloader. Αυτός χρησιμοποιήθηκε ως προγραμματιστής μετά την κατάλληλη εγγραφή προγράμματος που έγινε, έτσι ώστε να φορτωθεί το bootloader στο νέο μικροελεγκτή. Σαν προγραμματιστής επιλέχθηκε η αναπτυξιακή πλακέτα Arduino Nano.



Σχήμα5.2: URL για την εισαγωγή core για τον ATMEGA328





Σχήμα 5.5: Συνδεσμολογία μετατροπέα usb to serial για προγραμματισμό μικροελεγκτή

### 5.3 Ανάλυση προγράμματος μικροελεγκτή

Ο σωστός προγραμματισμός καθιστά την συσκευή λειτουργική, διότι μέσω του προγράμματος ελέγχεται η σειρά επικοινωνίας περιφερειακών συσκευών, για επεξεργασία και απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

Αρχικά στο πρόγραμμα γίνεται η εισαγωγή των βιβλιοθηκών <Wire.h> <Adafruit\_ADS1015.h> οι οποίες είναι υπεύθυνες για την σωστή επικοινωνία με τον A/D. Συνεχίζοντας γίνεται αρχικοποίηση μεταβλητών οι οποίες χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα. Αυτές είναι:

Πίνακας 5.2: Μεταβλητές προγράμματος

<pre>float z_axis = 0; float y_axis = 0; float x_axis = 0;</pre>	<p><b>Μεταβλητές υπεύθυνες για την αποθήκευση δεδομένων από τον A/D</b></p>
<pre>float z_option = 0; float x_option = 0; float y_option = 0;</pre>	<p>Μεταβλητές για την τελική αποθήκευση των δεδομένων μετά από την απαραίτητη επεξεργασία</p>
<pre>int R10K = 4; int R100K = 3; int R300K = 2;</pre>	<p>Μεταβλητές επιλογής κλίμακας μέτρησης</p>
<pre>char com;</pre>	<p>Μεταβλητή αποθήκευσης εισερχόμενων σειριακών δεδομένων</p>

<code>unsigned long previousMillis = 0;</code> <code>const long interval = 1000;</code>	Μεταβλητές για την αρχικοποίηση timer
<code>int16_t adc0, adc1, adc2, adc3;</code>	Μεταβλητές ορισμού αναλογικών εισόδων A/D
<code>float z3adj = 0;</code> <code>float y3adj = 0;</code> <code>float x3adj = 0;</code> <code>float z2adj = 0;</code> <code>float x2adj = 0;</code> <code>float y2adj = 0;</code> <code>float z1adj = 0;</code> <code>float x1adj = 0;</code> <code>float y1adj = 0;</code>	Μεταβλητές για επεξεργασία δεδομένων ρύθμισης μηδενός

Στην συνέχεια αφού δίνεται εντολή να καθαρίσει ο buffer της σειριακής επικοινωνίας, δίνεται εντολή να ξεκινήσει η επικοινωνία με τον A/D και ορίζεται στο πρόγραμμα το pin 2 να οδηγηθεί σε λογικό 1 έτσι ώστε ο ψηφιακός διακόπτης να επιλέξει την αντίσταση για χαμηλό κέρδος, για να ξεκινάει η συσκευή με την μεγαλύτερη κλίμακα μέτρησης. Προχωρώντας στον βρόχο επανάληψης, γίνεται αποθήκευση του χρόνου για το λόγο ότι χρησιμοποιείται timer interrupt, και λαμβάνονται τα δεδομένα από τον A/D για να επεξεργαστούν. Με τις κατάλληλες πράξεις τα δεδομένα μετατρέπονται σε τάση από την μορφή που έρχονται η οποία είναι βήματα. Ακολουθούν εξισώσεις γραμμικής συνάρτησης μεταφοράς έτσι ώστε τα γίνει η προσαρμογή των δεδομένων για κάθε κλίμακα μέτρησης. Έπειτα γίνεται ο έλεγχος μέτρησης του άξονα z με μία τάση αναφοράς έτσι ώστε να ανάβει το αντίστοιχο led ανάλογα με το αν είναι εκτεθειμένος ο αισθητήρας σε βόρειο ή νότιο μαγνητικό πεδίο. Στην συνέχεια γίνεται έλεγχος σε αναλογική είσοδο που παίρνει τάση από ένα διαιρέτη τάσης του κυκλώματος, για τον έλεγχο τάσης της μπαταρίας. Αν η τάση της μπαταρίας φτάσει σε χαμηλό επίπεδο αναβοσβήνουν τα led από το probe 3 φορές. Στην συνέχεια γίνεται συνεχής έλεγχος στον σειριακό δίαυλο για το αν υπάρχουν δεδομένα που έχουν αποσταλεί μέσω bluetooth και αν υπάρχουν έπειτα από κατάλληλους ελέγχους γίνεται η επιθυμητή ενέργεια του χρήστη για αλλαγή κλίμακας ή μηδενισμού σημείου μέτρησης. Μετά από ένα δευτερόλεπτο ενεργοποιείται το σημείο αναφοράς του timer και τα δεδομένα αποστέλλονται σειριακά στο bluetooth το οποίο τα λαμβάνει και τα αποστέλλει ασύρματα στο κινητό του χρήστη. Επειδή τα δεδομένα αποστέλλονται σαν πακέτο δεν θα ήταν δυνατόν να απεικονιστούν ξεχωριστά 3 διαφορετικές μετρήσεις. Γι αυτό το λόγο έχει τοποθετηθεί ειδικός χαρακτήρας ανάμεσα στα αποτελέσματα ο οποίος αναγνωρίζεται από την android εφαρμογή για διαχωρισμό των δεδομένων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> Σχεδιασμός πλακέτας

### 6.1 Εισαγωγή

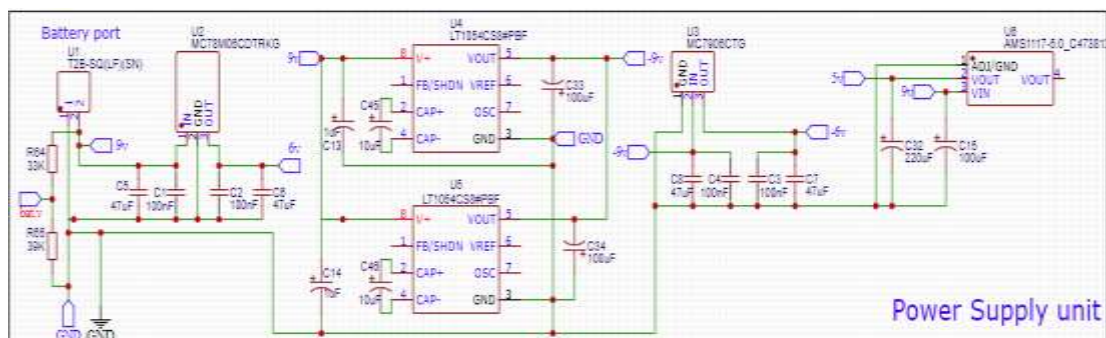
Η σχεδίαση και η δημιουργία πλακέτας στα ηλεκτρονικά συστήματα έχει πρωταρχικό ρόλο καθώς προσφέρει καλύτερη οργάνωση, έλεγχο του συστήματος, ευκολία στην περιοδική συντήρηση, ταξινόμηση των στοιχείων και εξοικονόμηση χώρου. Έχοντας αυτά υπόψη

δημιουργήθηκε η επιθυμία για κατασκευή πλακέτας. Μια απλή πλακέτα αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα χαλκού το οποίο αποτελεί το αγώγιμο μέρος και από ένα στρώμα μονωτικού υλικού. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας διάφορες εταιρίες έχουν επενδύσει στην μελέτη για την κατασκευή πλακετών για καλύτερα υλικά αγωγής και μόνωσης και φτάσανε σε σημείο να μπορούν να παράγουν πλακέτα δύο όψεων η οποία είναι και η πιο κοινή στις μέρες μας, αλλά και πλακετών ειδικής κατασκευής οι οποίες φτάνουν ακόμη και τα 16 στρώματα χαλκού. Ο σχεδιασμός πλακέτας προϋποθέτει καλή γνώση σχεδιασμού και εμπειρία. Ανάλογα με το σχέδιο κατασκευής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την λειτουργία του κυκλώματος λόγω λανθασμένου σχεδιασμού. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθεί το πρόγραμμα κατασκευής και γίνει παράθεση σχημάτων από την πλακέτα κατασκευής καθώς και επεξήγηση των διάφορων τμημάτων της.

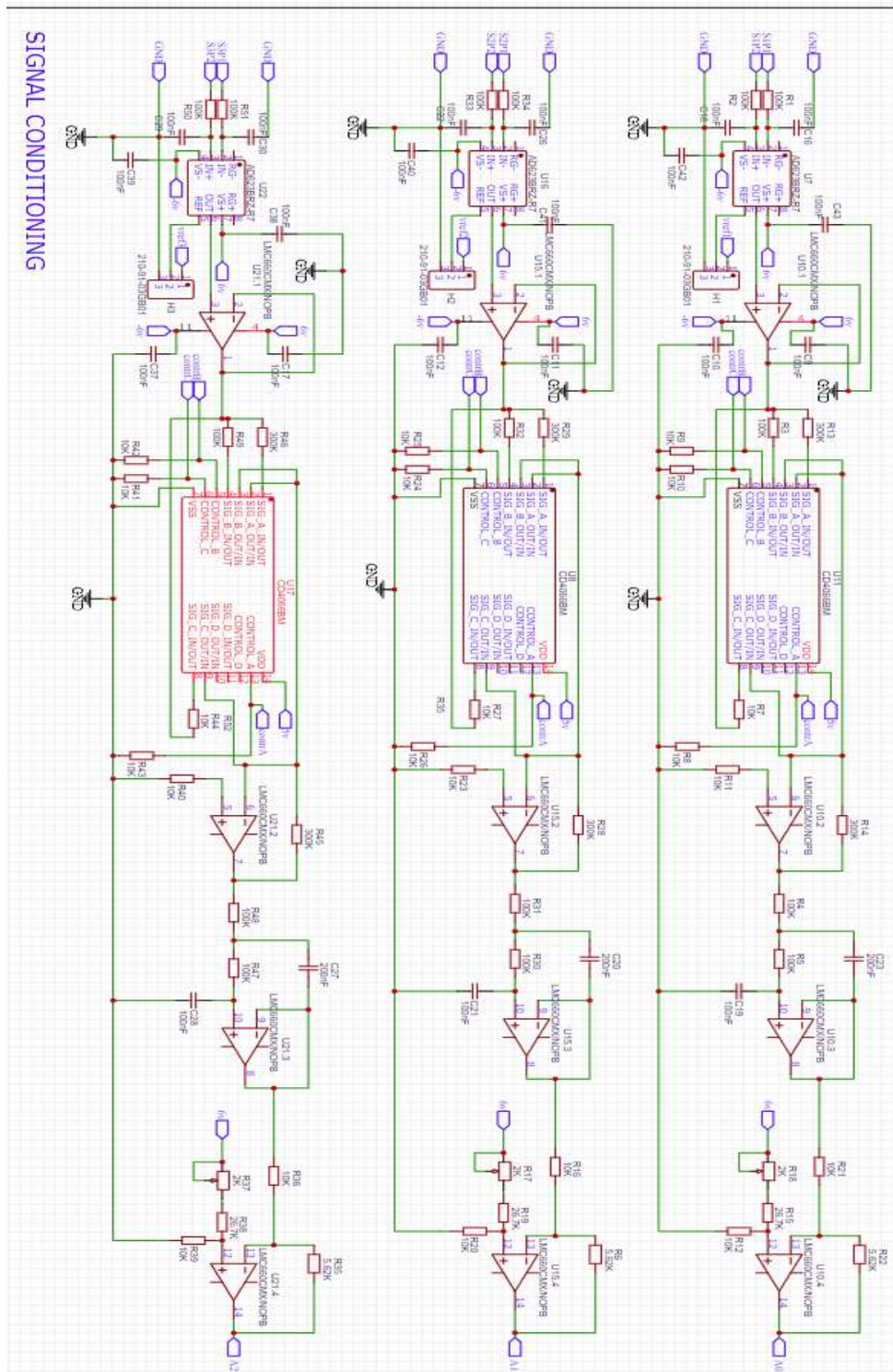
## 6.2 Σχεδιαστικό πρόγραμμα κατασκευής

Το σχεδιαστικό πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι το EasyEda. Το πρόγραμμα αυτό είναι δωρεάν διαδικτυακή εφαρμογή σχεδίασης με αρκετές δυνατότητες. Δίνει την δυνατότητα σχεδίασης πλακέτας μέχρι δύο όψεις και η βιβλιοθήκη εξαρτημάτων που περιέχει καλύπτει μια τεράστια γκάμα. Το πρόγραμμα αποθηκεύει online τα σχέδια δίνοντας την δυνατότητα στον χρήστη για επεξεργασία από οπουδήποτε και αν βρίσκεται. Βασική προϋπόθεση είναι να έχει ο χρήστης πρόσβαση σε δίκτυο. Μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής ειδικού αρχείου με τα χαρακτηριστικά της κατασκευής για την παραγωγή πλακέτας. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα με την ολοκλήρωση του σχεδιασμού, η πλακέτα να ελεγχθεί και αν θέλει ο χρήστης να την αποστείλει για παραγωγή στην εταιρία JLCPCB με την οποία και συνεργάζεται. Η εταιρία JLCPCB έχει έδρα την Κίνα και η τιμές που δίνει για παραγωγή πλακετών είναι αρκετά ανταγωνιστικές. Στην κατασκευή αυτή επιλέχθηκε αυτή η λύση καθώς είναι πολύ πιο οικονομική και το αποτέλεσμα ασύγκριτα ικανοποιητικό.

## 6.3 Σχηματικά κυκλώματα και σχεδιασμός πλακέτας

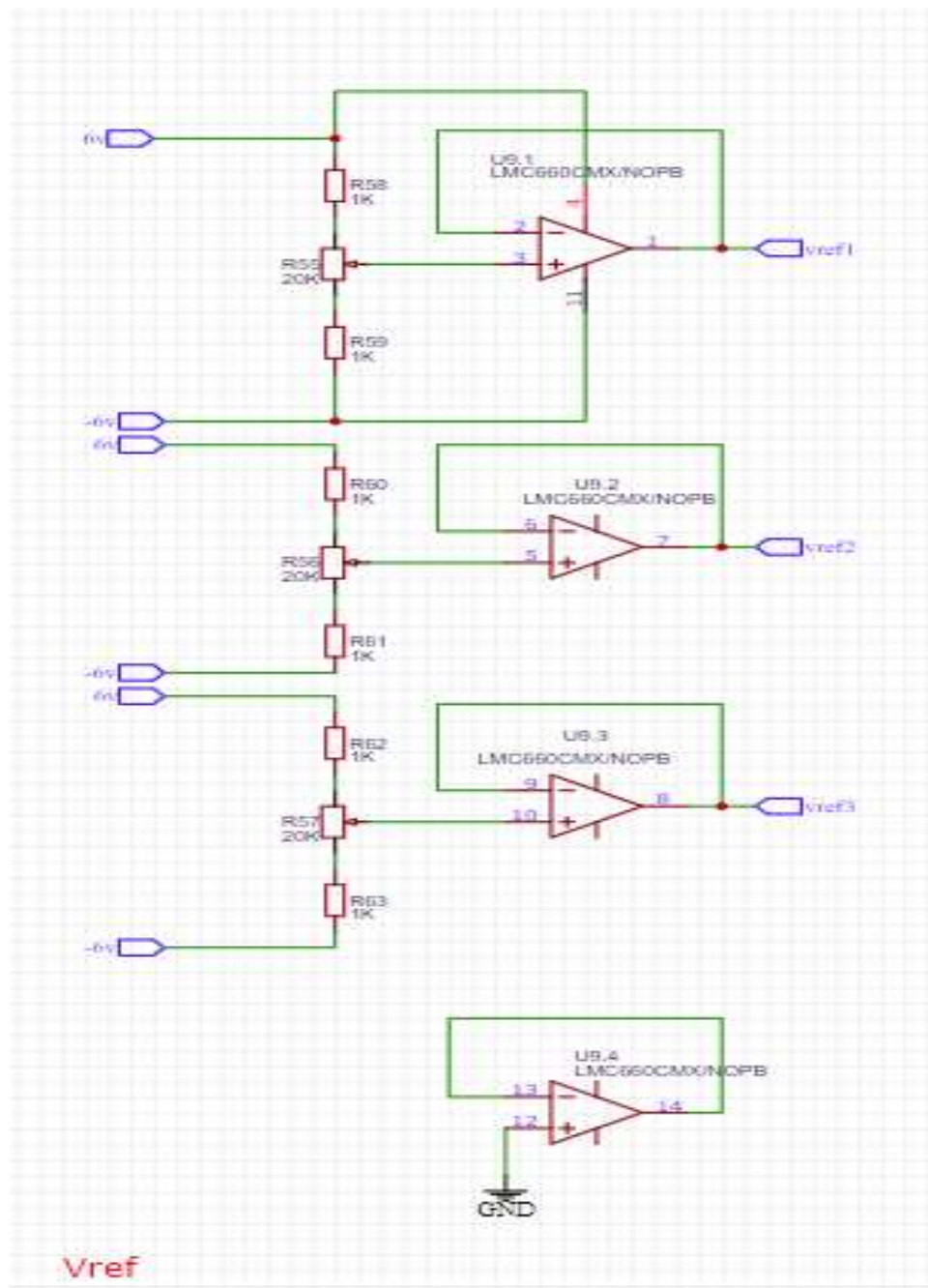


Σχήμα6.1: Σχηματικό κύκλωμα τροφοδοτικού

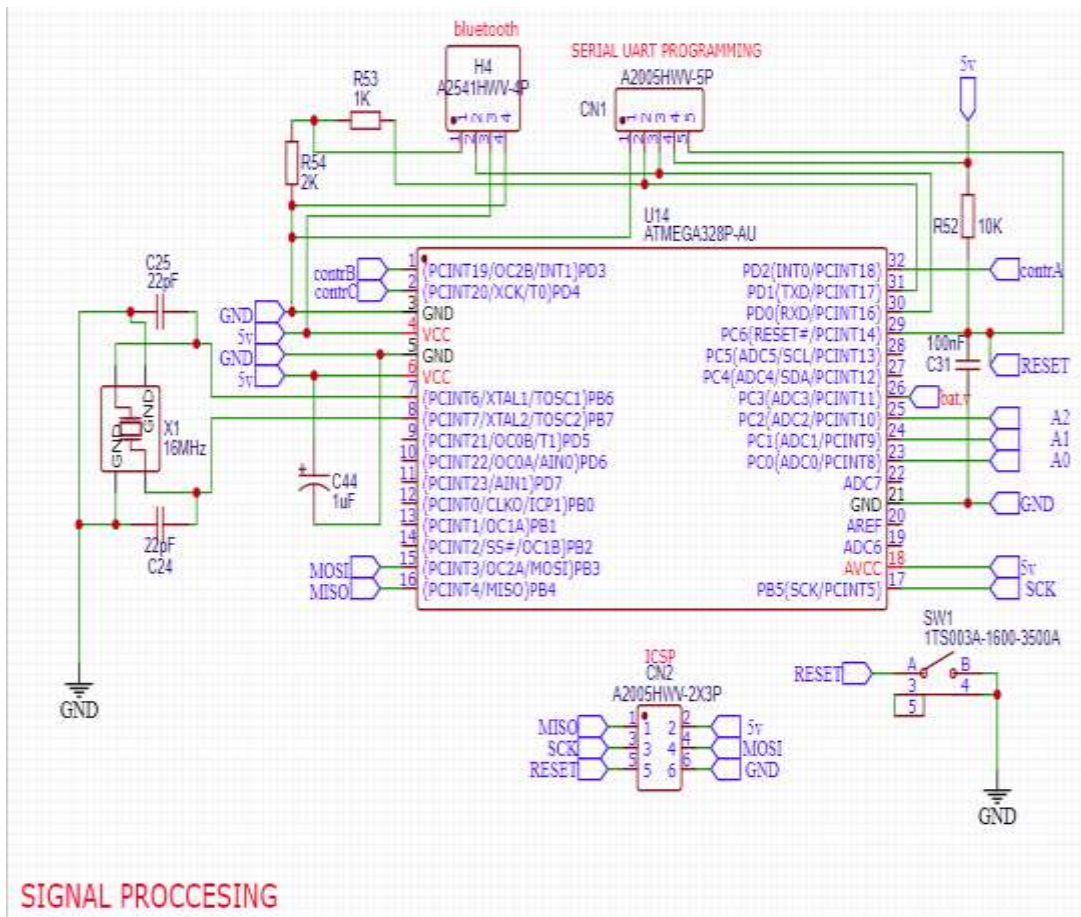


**SIGNAL CONDITIONING**

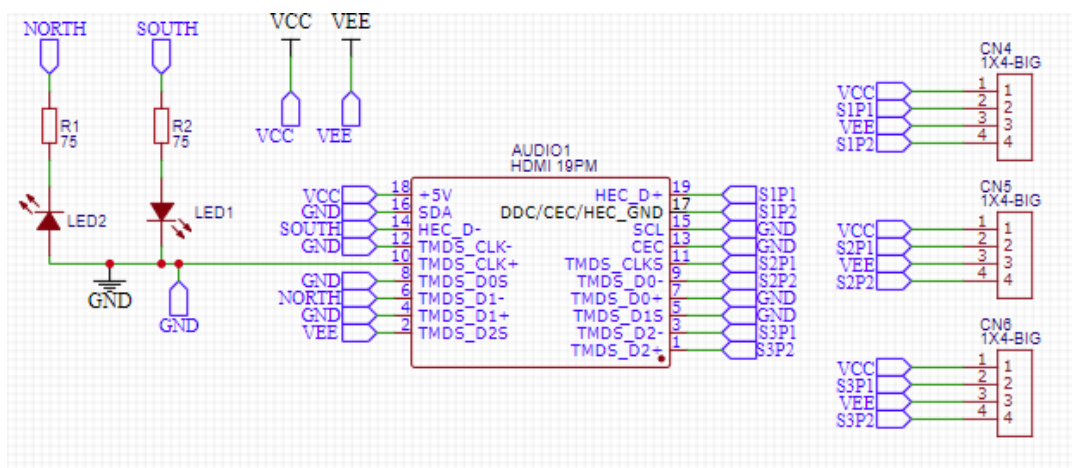
Σχήμα6.2: Σχηματικό κύκλωμα επεξεργασίας σημάτων



Σχήμα6.3: Σχηματικό κύκλωμα τάσης αναφοράς



Σχήμα6.4: Σχηματικό κύκλωμα συνδεσμολογίας μικροεπεξεργαστή



Σχήμα6.5: Σχηματικό κύκλωμα αισθητήρων

Όλα τα στοιχεία των παραπάνω σχηματικών έπρεπε να διαταχθούν με τέτοιον τρόπο ώστε να καταναλώνουν όσο το δυνατόν μικρότερο χώρο στην πλακέτα. Επειδή η κατασκευή είναι φορητή το κριτήριο περιορισμού όγκου κατασκευής είναι βασικό. Γι αυτό το λόγο τα στοιχεία σύνθεσης των κυκλωμάτων επιλέχθηκαν στην SMD(Surface Mount Device) μορφή τους οδηγώντας έτσι την κατασκευή σε ένα όμορφο και επιθυμητό αποτέλεσμα. Βασική προσοχή δόθηκε στην κατασκευή του probe που στηρίζει την βάση με τους αισθητήρες. Η μελέτη έγινε με τέτοιον τρόπο ώστε το αποτέλεσμα του probe να είναι μικρό και ευκίνητο για μετρήσεις σε δύσκολα σημεία. Ο μόνος περιορισμός είναι ο όγκος της βάσης των αισθητήρων που ανέρχεται στα 10x10mm. Μετά από αρκετή δουλειά το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω στις εικόνες Σχ(6.6-7-8).

Η παρακάτω πλακέτα αποτελεί το κομμάτι του probe μέτρησης. Στα αριστερά φαίνεται το σημείο σύνδεσης αυτής της πλακέτας με την πλακέτα της επεξεργασίας σήματος. Επιλέχθηκε HDMI connector διότι παρέχει πιο καλή μηχανική υποστήριξη κατά την σύνδεση και αποσύνδεση του, από την πλακέτα επεξεργασίας. Αμέσως μετά φαίνονται τα led που σαν κύριο ρόλο έχουν την υπόδειξη της φοράς του μαγνητικού πεδίου. Σαν δευτερεύον ρόλο έχουν την υπόδειξη χαμηλής μπαταρίας αναβοσβήνοντας τρεις φορές. Το κομμάτι της πλακέτας έπειτα στενεύει για τον περιορισμό του όγκου, αλλά και για την ευκολία μέτρησης σε δύσκολα σημεία. Στην κορυφή παρατηρείται ο κύβος τρισδιάστατης εκτύπωσης, που ο κύριος ρόλος του, όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 3 είναι η μηχανική στήριξη των αισθητήρων σε κλίση 90<sup>0</sup> ως προς τις τρεις κατευθύνσεις των αξόνων.



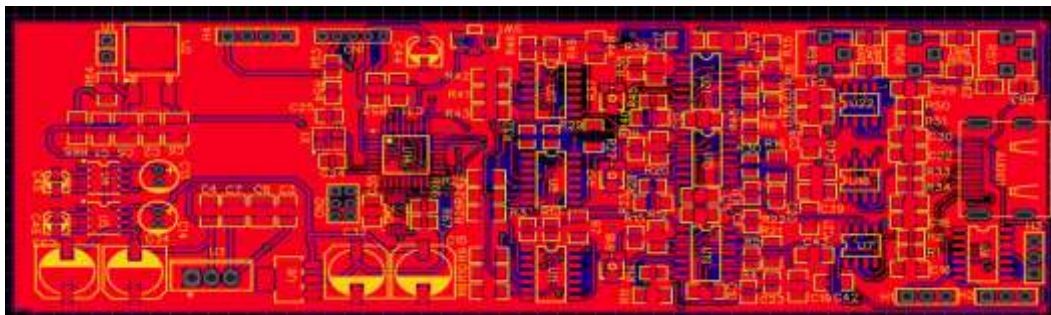
Σχήμα6.6: .Probe μέτρησης. Σχέδιο πλακέτας pcb.



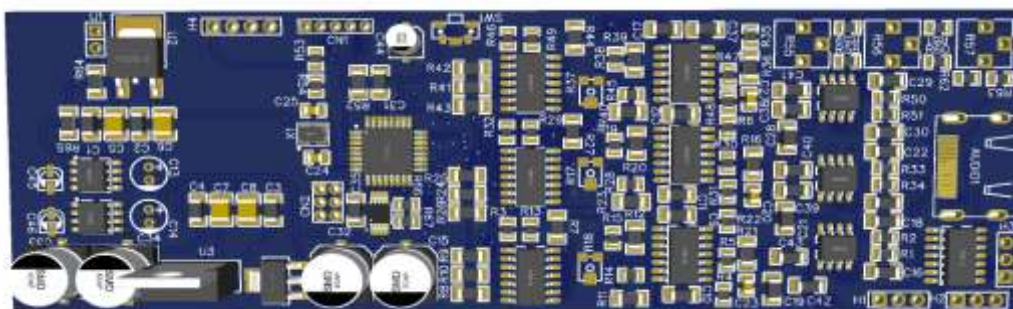
Σχήμα6.7: Probe μέτρησης 3D απεικόνιση



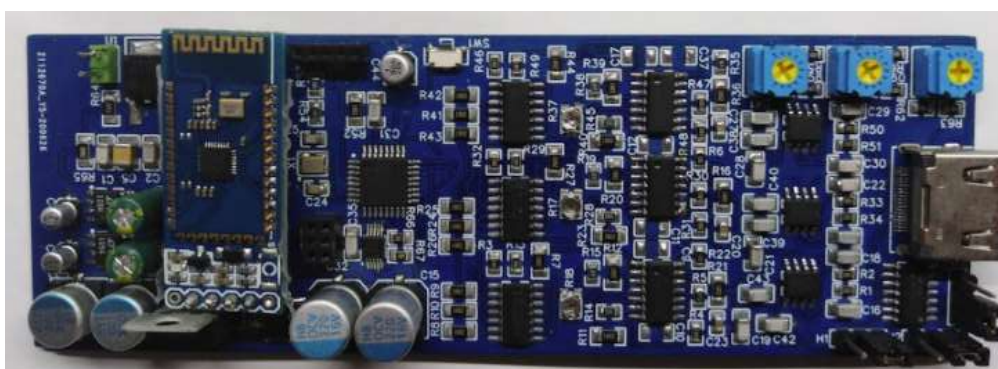
Σχήμα6.8: Τελικό αποτέλεσμα κατασκευής



Σχήμα 6.9: Σχέδιο πλακέτας pcb επεξεργασίας δεδομένων



Σχήμα 6.10: Σχέδιο πλακέτας επεξεργασίας δεδομένων 3D απεικόνισης



Σχήμα 6.11: Τελικό αποτέλεσμα πλακέτας επεξεργασίας δεδομένων

### 7.1 Εισαγωγή



Σχήμα7.1: Block απεικόνιση μεταφοράς δεδομένων

Η απεικόνιση των δεδομένων είναι μια βασική διεργασία έτσι ώστε ο χρήστης να έχει την καλύτερη δυνατή αλληλεπίδραση με την μετρητική συσκευή. Στην παρούσα συσκευή η απεικόνιση των δεδομένων γίνεται σε κινητό, όπου έχει δημιουργηθεί κατάλληλη εφαρμογή Android για την συνεργασία και ανταλλαγή δεδομένων. Η επικοινωνία μεταξύ μετρητικής συσκευής και κινητού επιτυγχάνεται με μια διαδοχική σειρά πρωτοκόλλων τα οποία λειτουργούν σαν συνδεδεμένοι κρίκοι, ώστε το τελικό αποτέλεσμα να απεικονίζεται στην οθόνη του κινητού. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι η σειριακή επικοινωνία (UART) και το Bluetooth.

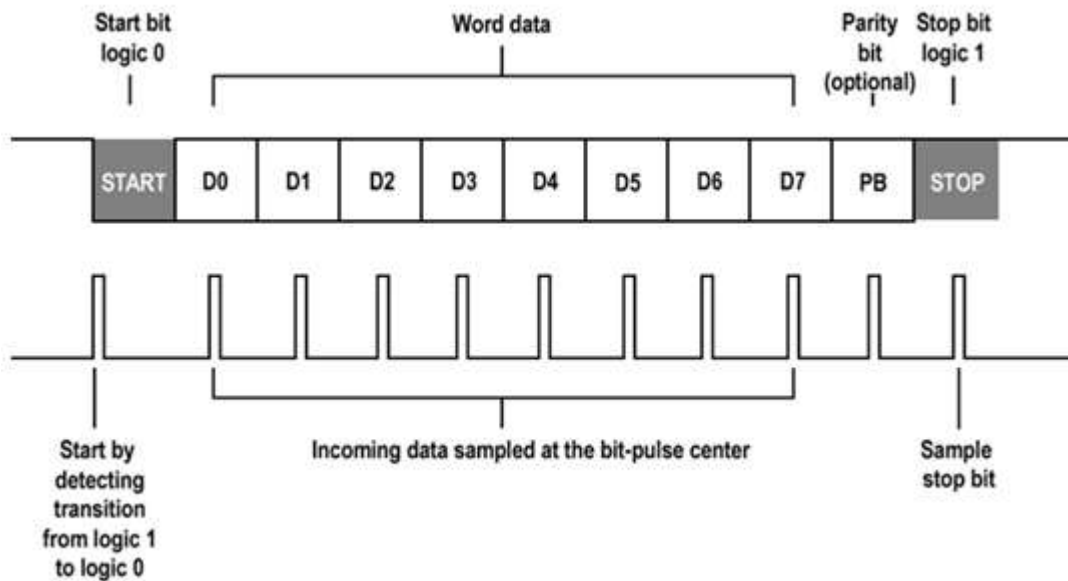
### 7.2 Πρωτόκολλο UART (universal asynchronous receiver-transmitter)

Μετά την επεξεργασία των δεδομένων από τον κεντρικό επεξεργαστή του κυκλώματος μας, απαραίτητη είναι η χρήση πρωτοκόλλου σειριακής επικοινωνίας ώστε να καταφέρει ο κεντρικός επεξεργαστής να ανταλλάξει τα δεδομένα με την πλακέτα επεξεργασίας του Bluetooth. Το πρωτόκολλο σειριακής επικοινωνίας UART χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση. Η ταχύτητα του πρωτοκόλλου μπορεί να παραμετροποιηθεί και μετρείται σε baud rate (bit/sec). Σήμερα υπάρχουν έτοιμα chip τα οποία είναι υπεύθυνα για την σύνθεση αυτών των πρωτοκόλλων.

#### 7.2.1 Μεταφορά σειριακών δεδομένων.

Ένα chip UART παίρνει bytes δεδομένων και τα στέλνει σε σειριακή μορφή ως bits. Στον προορισμό αποκωδικοποιούνται από την αντίστοιχη συσκευή μετατροπής πρωτοκόλλου τα bits και δημιουργεί τα bytes δεδομένων. Κάθε chip περιέχει ένα καταχωρητή ολίσθησης ο οποίος χρησιμοποιείται για την μετατροπή της σειριακής σε παράλληλη μορφή. Για να μπορεί ένα chip UART να πραγματοποιήσει εγγραφή ή ανάγνωση δεδομένων ή αντίστοιχα αποστολή ή λήψη τα δεδομένα που λαμβάνονται, στέλνονται σε ένα chip UART θα πρέπει να αποθηκεύονται με παράλληλο τρόπο. Στην επικοινωνία μεταξύ των chip χρησιμοποιούνται κατάλληλα εξωτερικά κυκλώματα τα οποία μετατρέπουν τα σήματα στα κατάλληλα λογικά επίπεδα τάσης ώστε να μπορεί να γίνει η επεξεργασία των δεδομένων. Η προτυποποίηση των επιπέδων σήματος τάσης ορίζεται από τον οργανισμό EIA(Electronic Industries Alliance). Η επικοινωνία μέσω πρωτοκόλλου UART μπορεί να είναι απλή( simplex προς μία κατεύθυνση) χωρίς να υπάρχει πρόβλεψη ο δέκτης να στείλει πίσω κάποιο σήμα, αμφίδρομη (πλήρης ταυτόχρονη επικοινωνία full duplex) οι δύο συσκευές αποστέλλουν και δέχονται δεδομένα την ίδια στιγμή, αμφίδρομη εναλλασσόμενη επικοινωνία (half duplex κάθε συσκευή παίρνει σειρά στο να λάβει ή να αποστείλει δεδομένα.

### 7.2.3 Πλαίσια χαρακτήρων



Σχήμα 7.2 : Πλαίσιο δεδομένων πρωτοκόλλου UART

Κατά την επικοινωνία UART στέλνονται πλαίσια δεδομένων (data frames), όπου το καθένα περιέχει ένα χαρακτήρα. Το μέγεθος του πλαισίου χαρακτήρων μπορεί να είναι 10 bits (χωρίς έλεγχο parity) όπου υπάρχει ένα start bit και ένα stop bit στην αρχή και στο τέλος και είναι διαθέσιμα 8 bits για την κωδικοποίηση του χαρακτήρα που στέλνουμε παίρνουμε. Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται ένα πλαίσιο δεδομένων. Το αριστερό bit είναι το (LSB Least Significant bit) και πάντα αποστέλλεται πρώτο. Εάν υπάρχει bit ελέγχου parity τότε αυτό μπαίνει μετά από τα bits των δεδομένων και πριν το τελικό stop bit.

### 7.3 Πρωτόκολλο Bluetooth.

Το Bluetooth είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας το οποίο επιτρέπει συσκευές να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Χρησιμοποιεί χαμηλής ισχύος ραδιοκύματα ώστε να συνδέονται σε αυτό υπολογιστές κινητά τηλέφωνα και άλλες συσκευές που είναι συμβατές με αυτό το πρωτόκολλο, να ανταλλάσσουν δεδομένα σε μικρές αποστάσεις, τυπικά η μέγιστη απόσταση επικοινωνίας μεταξύ συσκευών είναι γύρω στα 10 μέτρα.

Αυτό επιτυγχάνεται με επενδυμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα πομποδέκτη τα οποία υπάρχουν στην συσκευή. Η μπάντα συχνότητας στην οποία γίνεται η μετάδοση των δεδομένων είναι στα 2.45GHz. Αυτή η συχνότητα έχει καθοριστεί έπειτα από διεθνή συμφωνία για την χρήση της σε βιομηχανικές, επιστημονικές και ιατρικές εφαρμογές. Το Bluetooth μπορεί να υποστηρίξει έως 8 συσκευές ταυτόχρονα και κάθε μία συσκευή έχει μία μοναδική διεύθυνση των 48 bit σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802. Οι συνδέσεις μπορεί να είναι μεταξύ δύο σημείων ή ακόμα μεταξύ πολλαπλών σημείων.

Το πρώτη έκδοση του ήταν το πρότυπο 1.2 το οποίο είχε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων το 1 Mbps. Η δεύτερη έκδοση ήταν η 2.0+EDR με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων τα 3 Mbps. Η τρίτη έκδοση ήταν η 3.0+HS με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων τα 24Mbps. Η τελευταία έκδοση είναι η 4.0 η οποία έχει περίπου τον ίδιο αριθμό μετάδοσης δεδομένων με το πρότυπο 3.0+HS. Το πρότυπο 4.0 χρησιμοποιεί AES 128-bit κρυπτογράφηση για ασφαλή μετάδοση δεδομένων. Σε αυτήν την πτυχιακή η Bluetooth συσκευή που χρησιμοποιείται είναι η HC-06 και έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Η τάση λειτουργίας είναι τα 5V αν και κεντρικός επεξεργαστής του Bluetooth λειτουργεί στα 3.3V. Αυτό επιτυγχάνεται με έναν σταθεροποιητή τάσης ο οποίος υποβιβάζει την τάση στο επιθυμητό επίπεδο. Η συχνότητα λειτουργίας είναι τα 2.4GHz και το πρότυπο που χρησιμοποιεί είναι το V2.0+EDR. Η επικοινωνία μεταξύ του Bluetooth και του επεξεργαστή του συστήματος μας γίνεται μέσω σειριακής επικοινωνίας(UART). Σημαντική προσοχή πρέπει να δοθεί στην επικοινωνία. Όπως είπαμε η συγκεκριμένη πλακέτα χρησιμοποιεί σταθεροποιητή για την τροφοδοσία της η οποία μπορεί να κυμαίνεται από 3.6 με 6V. Στην μετάδοση όμως των δεδομένων μεταξύ της πλακέτας Bluetooth και το κεντρικού επεξεργαστή μας πρέπει να μεσολαβήσει ένας μετατροπέας, ο οποίος θα μετατρέπει τα λογικά σήματα του κεντρικού επεξεργαστή στα επιθυμητά επίπεδα τάσης του επεξεργαστή που χρησιμοποιεί η πλακέτα του Bluetooth.

Στην συνέχεια ο κεντρικός επεξεργαστής του Bluetooth chip αφού πάρει τα δεδομένα από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του κυκλώματος μας σειριακά, τα αποκωδικοποιεί και τα μετατρέπει σε κατάλληλα πακέτα δεδομένων ώστε οι πληροφορίες να είναι κωδικοποιημένες σύμφωνα με το εκάστοτε πρότυπο που είναι εγκατεστημένο. Στην συνέχεια αποστέλλονται τα δεδομένα ασύρματα σε συσκευή κινητού τηλεφώνου όπου λαμβάνονται οι πληροφορίες με τον αντίστοιχο Bluetooth δέκτη, αποκωδικοποιούνται και αποστέλλονται σε android εφαρμογή όπου επεξεργάζονται για την απεικόνιση τους στην οθόνη του κινητού.

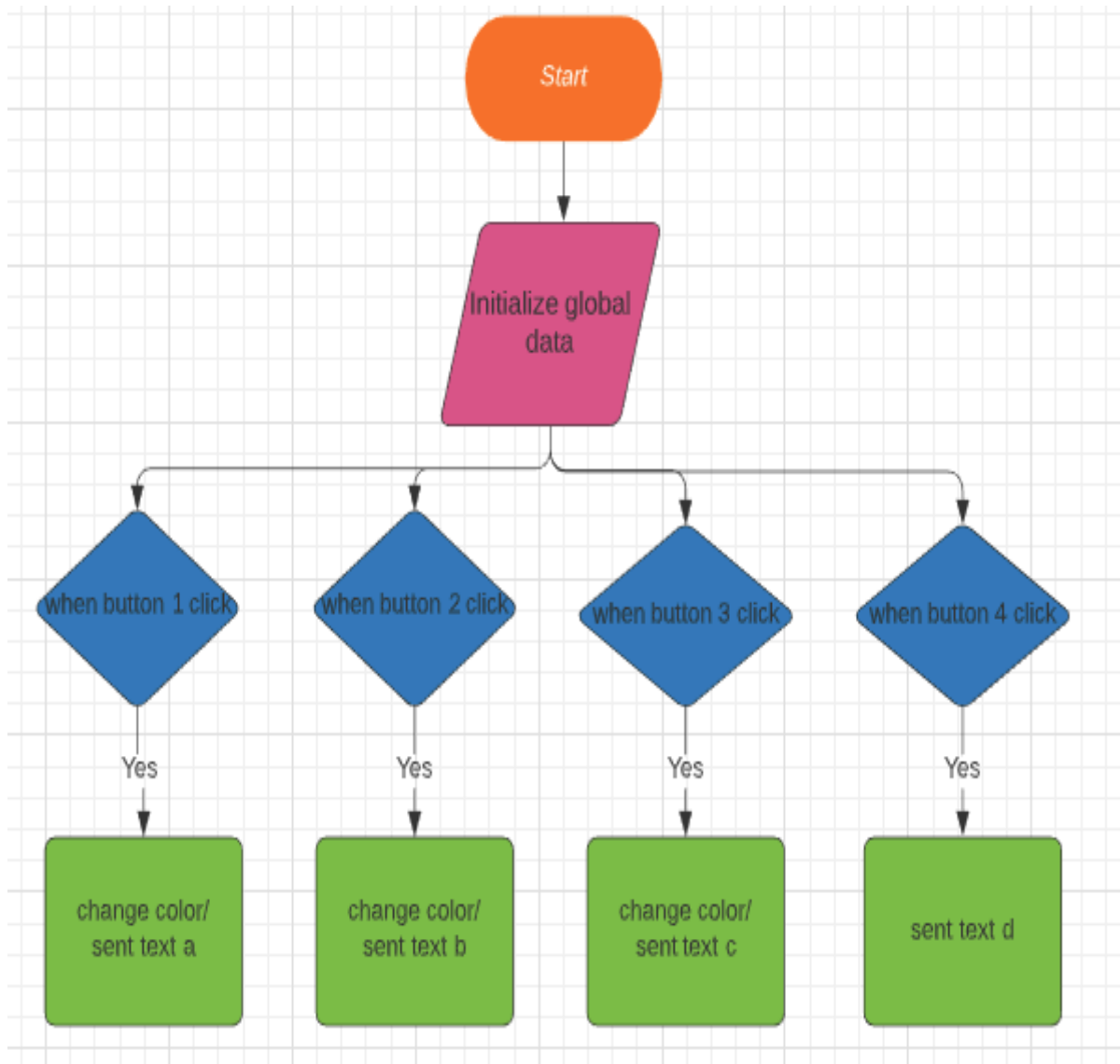
## **7.4 Android εφαρμογή**

Τα δεδομένα που έχουν ληφθεί στην συσκευή κινητού χρίζουν επεξεργασίας και γι αυτό είναι απαραίτητη η χρήση εφαρμογής λογισμικού android ώστε να μπορέσουν να επεξεργαστούν και να απεικονιστούν σωστά.

Αν και υπάρχουν αρκετές εφαρμογές android που υποστηρίζουν το πρωτόκολλο Bluetooth για την επεξεργασία δεδομένων, στην συγκεκριμένη πτυχιακή δημιουργήθηκε η εφαρμογή android έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης έλεγχος της συσκευής μας, αλλά και για να δημιουργηθεί ένα γραφικό περιβάλλον σύμφωνα με τις προτιμήσεις του δημιουργού.

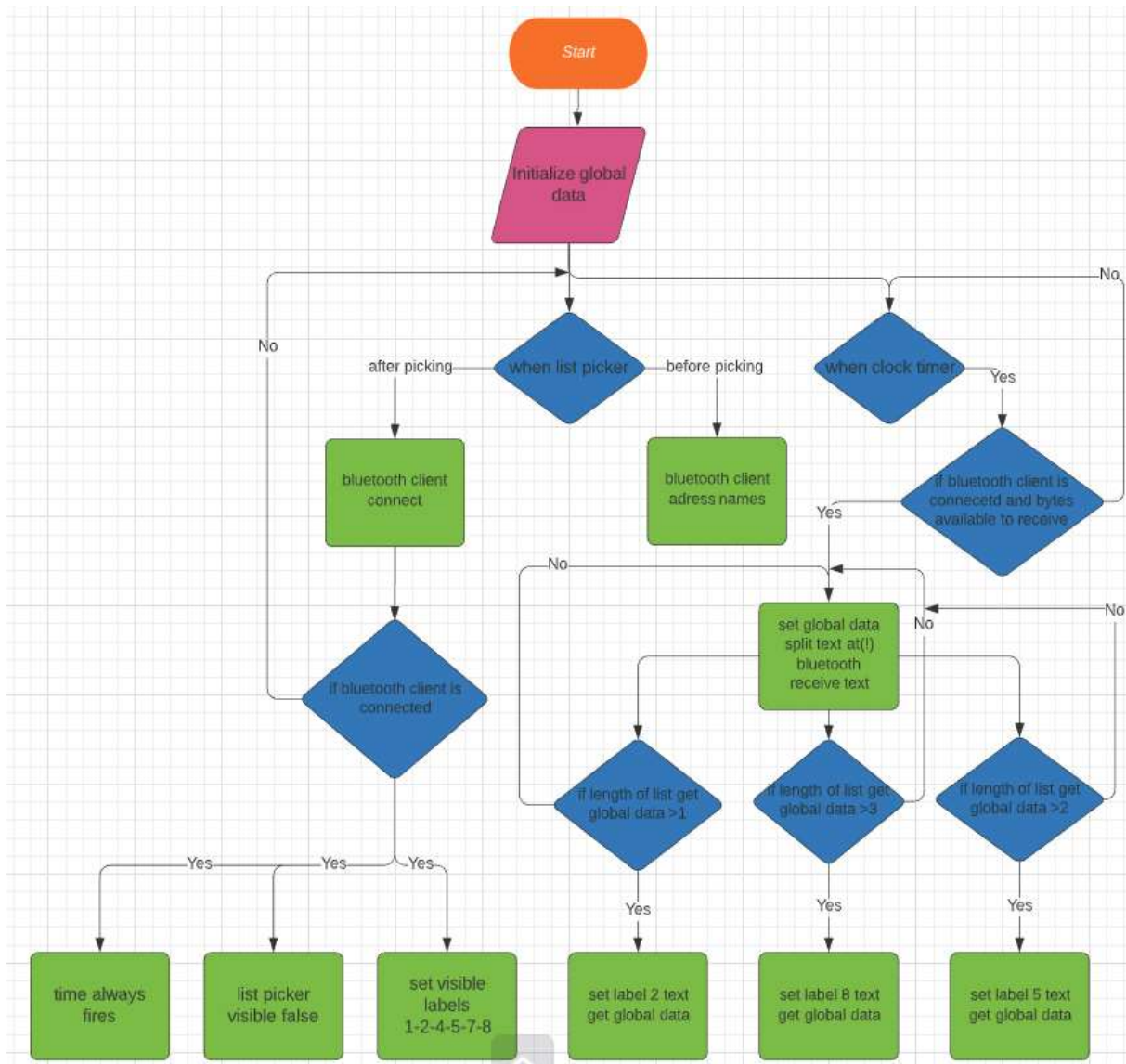
Η πλατφόρμα που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία της android εφαρμογής είναι το MIT APP INVENTOR. Το MIT APP INVENTOR είναι μια δικτυακή εφαρμογή δημιουργίας λογισμικού το οποίο παρέχεται από την Google και συντηρείται από το πανεπιστήμιο Μασαχουσέτης (MIT). Επιτρέπει στον προγραμματιστή να δημιουργήσει εφαρμογή η οποία μπορεί να λειτουργεί και στα δυο λειτουργικά συστήματα που υπάρχουν(android, ios). Χρησιμοποιεί γραφικό περιβάλλον παρόμοιο με τις γλώσσες προγραμματισμού Scratch και Start logo το οποίο επιτρέπει στον χρήστη να μετακινεί εικονικά αντικείμενα και να δημιουργεί την εφαρμογή.

## 7.5 Πρόγραμμα ροής εφαρμογής



Σχήμα 7.3: (α) Διάγραμμα ροής εφαρμογής android, λειτουργία button.

Στο παραπάνω διάγραμμα ροής ελέγχεται συνέχεια, παράλληλα με την ρουτίνα αν έχει πατηθεί κάποιο από τα button που έχουν οριστεί, έτσι ώστε η εφαρμογή να στείλει συγκεκριμένο χαρακτήρα πίσω στην συσκευή οργάνου. Πατώντας το button 1 Αποστέλλεται ο χαρακτήρας (a) και αλλάζει χρώμα το button έτσι ώστε να γνωρίζει ο χρήστης ποιά κλίμακα έχει επιλεγμένη. Αντίστοιχη λειτουργία έχουν και τα επόμενα δύο button. Επιλέγοντας το button 4 αποστέλλεται ο χαρακτήρας d, αναγνωρίζεται από το πρόγραμμα του μικροελεγκτή και μηδενίζει τις μετρήσεις που υπάρχουν εκείνη την στιγμή.



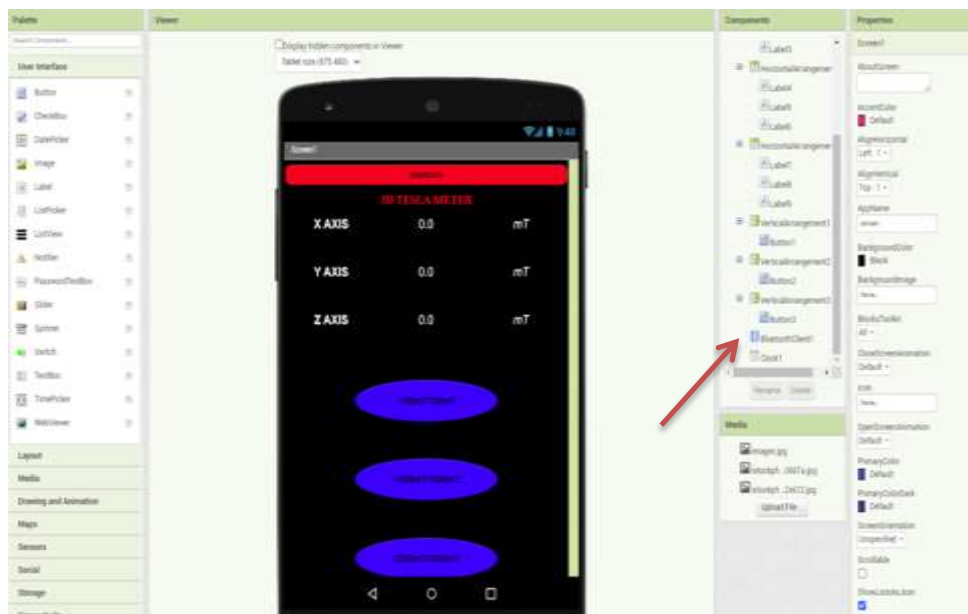
Σχήμα 7.3: (β) Διάγραμμα ροής εφαρμογής android, λειτουργία κυρίως προγράμματος

Ξεκινώντας το πρόγραμμα κάνει αρχικοποίηση μεταβλητών. Στη συνέχεια το πρόγραμμα ελέγχει εάν ο χρήστης έχει επιλέξει ένα συγκεκριμένο πεδίο list picker το οποίο βγάζει στον χρήστη ένα μενού για να επιλέξει την συσκευή με την οποία θα κάνει ζεύξη. Αφού πραγματοποιηθεί η ζεύξη το πρόγραμμα μπαίνει σε μία ρουτίνα η οποία ελέγχει συνεχώς αν η συσκευή μας είναι συνδεδεμένη και αν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα προς παραλαβή. Αν υπάρχουν τα επεξεργάζεται και τα κατατάσσει σε συγκεκριμένα πεδία labels τα οποία είναι υπεύθυνα για την απεικόνιση των δεδομένων μας στην οθόνη. Παρακάτω θα γίνει παράθεση στον τρόπο σχεδιασμού της εφαρμογής ο οποίος αποτελείται από δύο μέρη(designer-blocks) και του κυρίως κώδικα της εφαρμογής όπου και θα εξηγηθεί αναλυτικά.



Σχήμα 7.4 : Κεντρικό μενού εφαρμογής σχεδίασης android

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται το κεντρικό μενού του προγράμματος δημιουργίας της εφαρμογής. Επιλέγοντας τα κατάλληλα εργαλεία μπορούμε να διαμορφώσουμε την απεικόνιση της εφαρμογής στο κινητό. Δηλαδή να ορίσουμε πως θέλουμε να φαίνεται αλλά και το που θα φαίνεται κάθε στοιχείο που εισάγουμε. Αφού τελειοποιήσουμε το παρουσιαστικό της εφαρμογής, πρέπει να ορίσουμε κάποιες μεταβλητές οι οποίες δεν θα είναι ορατές στην οθόνη αλλά ο ρόλος τους είναι σημαντικός, διότι δίχως αυτές δεν μπορεί να λειτουργήσει η εφαρμογή. Οι μεταβλητές αυτές καθορίζουν τον χρονισμό επικοινωνίας αλλά και το πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ της συσκευής τηλεφώνου και της συσκευής μέτρησης.

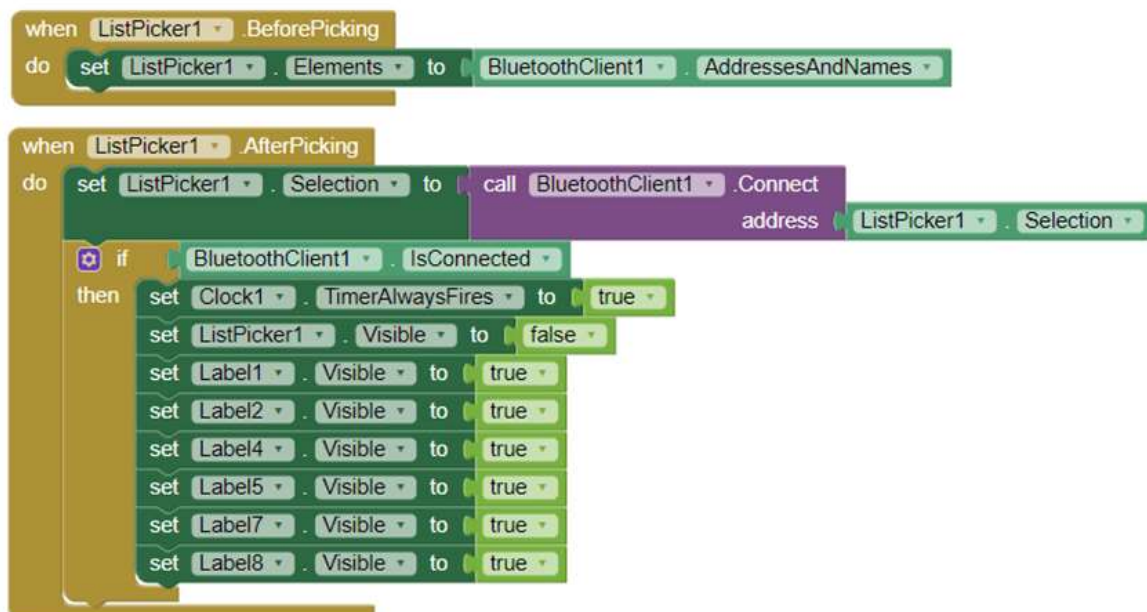


Σχήμα 7.5: Κόκκινο βέλος απεικόνιση σημαντικών στοιχείων που τρέχουν στο background κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Αυτά είναι το bluetooth και ο χρονισμός

Αφού ολοκληρωθεί και αυτό το στάδιο περνάμε στο δεύτερο μέρος, το οποίο είναι ο προγραμματισμός λειτουργίας σε αυτά που σχεδιάστηκαν στο πρώτο μέρος.

Το list picker αναφέρεται στο πάνω τμήμα της εφαρμογής στο πεδίο που αναγράφει Bluetooth. Είναι υπεύθυνο όταν επιλεγθεί να βγάξει προς επιλογή διαθέσιμες συσκευές προς ζεύξη. Αφού επιλεγθεί και συνδεθεί η συσκευή μας ενεργοποιείται η μεταβλητή ρολογιού η οποία και είναι υπεύθυνη για τον χρονισμό του προγράμματος αλλά και της μεταφοράς δεδομένων. Στην συνέχεια γίνεται μία αλλαγή λογικής κατάστασης σε κάποια πεδία, που ορίζεται αν θα παραμείνουν ορατά ή όχι κατά την συνέχεια του προγράμματος.

Ακολουθώντας το πρόγραμμα γίνεται αρχικοποίηση του τύπου μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω στο πρόγραμμα. Όταν βρεθεί παλμός ρολογιού πραγματοποιούνται δύο ενέργειες. Ελέγχεται αν υπάρχει ακόμα η ζεύξη και αν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα προς παραλαβή. Αν ισχύουν και οι δύο καταστάσεις το πρόγραμμα προχωρεί στον διαχωρισμό των δεδομένων, ( καθώς έρχονται με συγκεκριμένη μορφή από την μετρητική συσκευή) την εισαγωγή τους σε λίστα και την απεικόνιση τους στα κατάλληλα πεδία. Παράλληλα με το κυρίως πρόγραμμα, γίνεται συνεχώς έλεγχος στην κατάσταση συγκεκριμένων πεδίων (button)για το αν έχουν πατηθεί, καθώς αν ισχύει μία τέτοια συνθήκη πρέπει η εφαρμογή να αποστείλει δεδομένα πίσω στην μετρητική συσκευή πραγματοποιώντας την λειτουργία που προαναφέρθηκε, δηλαδή να αλλάξει κλίμακα μέτρησης το μετρητικό όργανο. Συγκεκριμένα αποστέλλει τους χαρακτήρες a, b, c και το πρόγραμμα από την άλλη μεριά της μετρητικής συσκευής με κατάλληλες συνθήκες κάνει την αναγνώριση και επιτελεί την συγκεκριμένη λειτουργία. Παράλληλα με την αποστολή χαρακτήρων ορίζεται και η αλλαγή του χρώματος του button ώστε να ξέρει ο χρήστης ποία κλίμακα μέτρησης είναι επιλεγμένη.



```
when ListPicker1 BeforePicking
do
  set ListPicker1 Elements to BluetoothClient1 AddressesAndNames

when ListPicker1 AfterPicking
do
  set ListPicker1 Selection to call BluetoothClient1 Connect
  address ListPicker1 Selection
  if BluetoothClient1 IsConnected
  then
    set Clock1 TimerAlwaysFires to true
    set ListPicker1 Visible to false
    set Label1 Visible to true
    set Label2 Visible to true
    set Label4 Visible to true
    set Label5 Visible to true
    set Label7 Visible to true
    set Label8 Visible to true
```

Σχήμα 7.6: Πρόγραμμα για την επιλογή ζεύξης με το bluetooth

```

initialize global (data) to create empty list

when Clock1 Timer
do if BluetoothClient1 IsConnected and call BluetoothClient1 BytesAvailableToReceive 0
then set global data to split text call BluetoothClient1 ReceiveText
    numberOfBytes call BluetoothClient1 BytesAvailableToReceive
    at 0
    if length of list list get global data 1
    then set Label2 Text to select list item list get global data
        index 1
    if length of list list get global data 2
    then set Label5 Text to select list item list get global data
        index 2
    if length of list list get global data 3
    then set Label8 Text to select list item list get global data
        index 3

```

Σχήμα 7.7: Πρόγραμμα διαχείρισης και διαχωρισμού των δεδομένων προς απεικόνιση

```

when Button1 Click
do set Button1 BackgroundColor to green
   set Button2 BackgroundColor to blue
   set Button3 BackgroundColor to blue
   call BluetoothClient1 SendText
       text " a "

when Button2 Click
do set Button2 BackgroundColor to green
   set Button1 BackgroundColor to blue
   set Button3 BackgroundColor to blue
   call BluetoothClient1 SendText
       text " b "

when Button3 Click
do set Button3 BackgroundColor to green
   set Button2 BackgroundColor to blue
   set Button1 BackgroundColor to blue
   call BluetoothClient1 SendText
       text " c "

when Button4 Click
do call BluetoothClient1 SendText
    text " d "

```

Εικόνα Σχήμα 7.8: Πρόγραμμα λειτουργίας button

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup> Πειραματικές μετρήσεις συγκριτικά αποτελέσματα

## 8.1 Εισαγωγή

Πέρα από τον θεωρητικό υπολογισμό και την σχεδίαση κυκλωμάτων πρέπει κάθε συσκευή να ελέγχεται ολοκληρωτικά, στο αν συνεργάζονται τα κυκλώματα σωστά μεταξύ τους και κατά πόσο σωστά, αποδίδονται τα μετρητικά αποτελέσματα. Η σύγκριση αυτή γίνεται με βάση το θεωρητικό κομμάτι το οποίο πρεσβεύει πολλές φορές το ιδανικό, το οποίο όμως είναι και το ζητούμενο. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν μετρήσεις της συσκευής, θα γίνει συγκριτικός έλεγχος με βάση θεωρητικές μελέτες, καθώς και το πώς έγινε το calibrate του αισθητήρα.

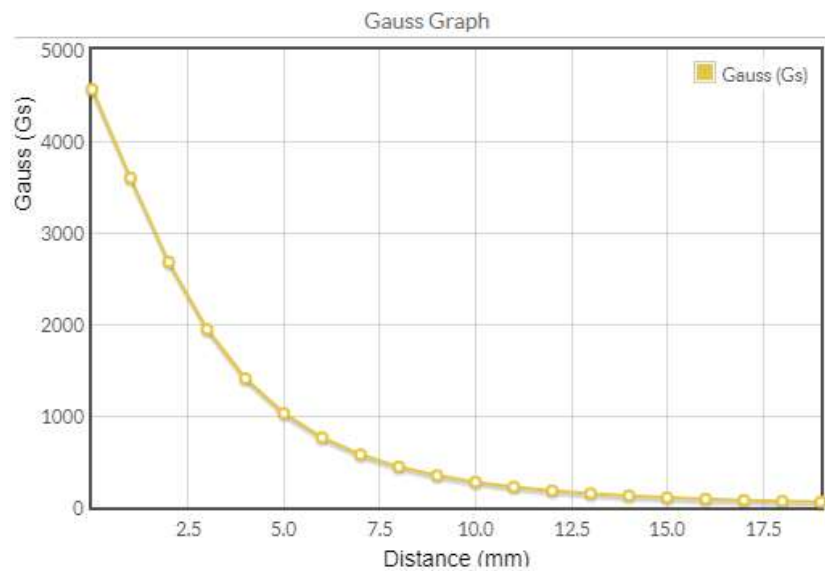
## 8.2 Calibrate συσκευής και μετρήσεις

Για να μπορέσει μία συσκευή να ρυθμιστεί σωστά ώστε να αποδίδει το σωστό αποτέλεσμα, θα πρέπει να έχει στοιχεία αναφοράς του μετρούμενου μεγέθους, στα οποία θα βασιστεί για να ρυθμιστεί και να έρθει όσο το δυνατόν πιο κοντά σε αυτά. Στην περίπτωση αυτή μέγεθος προς μέτρηση είναι το μαγνητικό πεδίο. Εταιρίες έχουν κατασκευάσει ειδικούς μαγνήτες αναφοράς οι οποίοι έχουν σταθερή τιμή. Στον μαγνήτη αυτό υπάρχει ειδική εσοχή όπου μπαίνει το αισθητήριο. Σχ.(8.1) Στην περιοχή εκείνη το μαγνητικό πεδίο είναι ομογενές και η μέτρηση δεν επηρεάζεται από εξωτερικές μεταβλητές. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται μία εικονική ρύθμιση συσκευής έχοντας όμως ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ο λόγος για την εικονική έγινε, διότι για σωστή ρύθμιση του αισθητηρίου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και άλλοι πολυσύνθετοι παράγοντες. Στο κεφάλαιο 3 γίνεται περαιτέρω επεξήγηση για το πώς κάνουν calibrate οι εταιρίες στους αισθητήρες. Να σημειωθεί ότι στον παραπάνω τρόπο ρύθμισης σταθερού ειδικού μαγνήτη, το αισθητήριο ρυθμίζεται για μία συγκεκριμένη περιοχή μέτρησης.

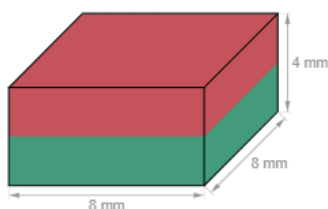


Σχήμα 8.1: Μαγνήτης αναφοράς για ρύθμιση αισθητήρων

Επειδή δεν υπήρχε η δυνατότητα για εύρεση τέτοιου ειδικού μαγνήτη, έπρεπε να βρεθεί κάτι ώστε να ελεγχθεί η συσκευή κατά πόσο μετράει σωστά. Μετά από έρευνα τα αποτελέσματα για εύρεση αξιόπιστης πηγής αναφοράς ήταν αρνητικά. Έτσι προέκυψε η ιδέα για μέτρηση απλού μαγνήτη, μετατρέποντας το μέγεθος μέτρησης του σε πυκνότητα μαγνητικού πεδίου. Συνήθη μέγεθος μέτρησης μαγνητών είναι η δύναμη έλξης και μετριέται σε Newton. Αυτό το μέγεθος μπορεί μέσω εξισώσεων να γίνει μετατροπή και να αποδοθεί σε άλλα μεγέθη όπως είναι τα κιλά ή η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου. Έχοντας αυτό υπόψη αγοράστηκε ένας μαγνήτης νεοδυμίου από συγκεκριμένη εταιρία, διότι έπρεπε να είναι γνωστές οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά κατασκευής του. Τα χαρακτηριστικά του μαγνήτη παρατίθενται στις εικόνες παρακάτω. Παρατηρείται πως δεν αναφέρεται κάπου η πυκνότητα μαγνητικού πεδίου. Γίνεται αναφορά μόνο στην δύναμη έλξης. Γι αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο πρόγραμμα μετατροπής δύναμης έλξης μαγνήτη, σε μαγνητική πυκνότητα. Παρακάτω στο σχήμα (8.2) φαίνεται η μαγνητική πυκνότητα, σε σχέση με την απόσταση μέτρησης από την επιφάνεια του μαγνήτη.

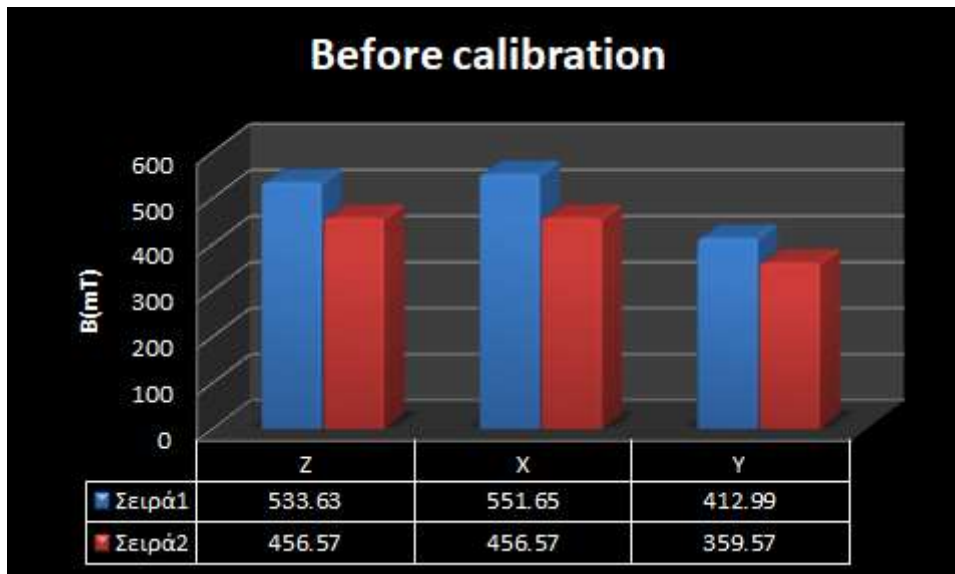


Σχήμα 8.2: Καμπύλη πυκνότητας μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την απόσταση μέτρησης από τον μαγνήτη Q-08-08-04-N



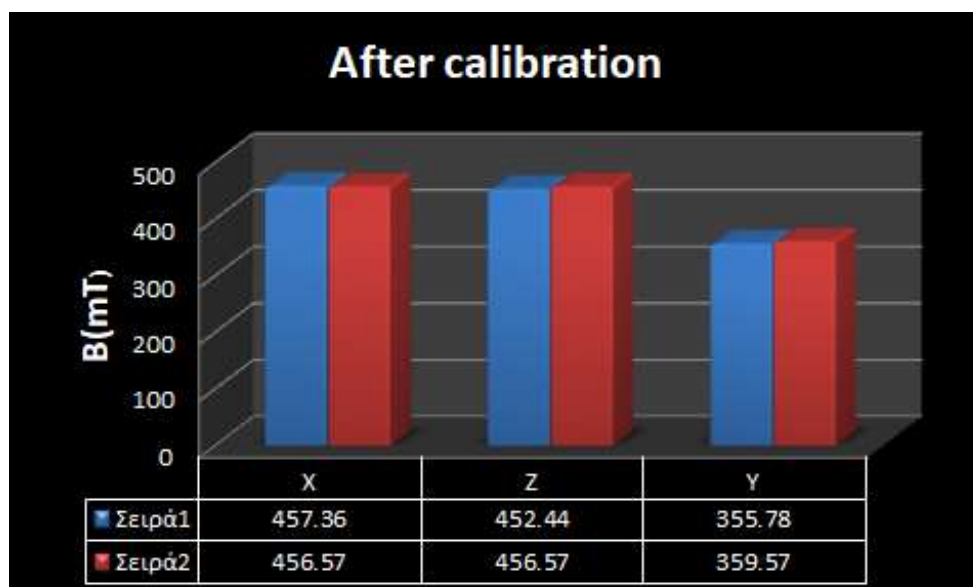
Article ID	Q-08-08-04-N
EAN	7640155435871
Material	NdFeB
Shape	Block
Size	8 x 8 x 4 mm
Tolerance	+/- 0,1 mm
Direction of magnetisation	Axis 4 mm
Coating	Nickel-plated (Ni-Cu-Ni)
Magnetisation	N45
Strength	approx. 1,5 kg (approx. 14,7 N)
Max. working temperature	80°C
Weight	1,9 g

Σχήμα 8.3: Χαρακτηρίστηκα μαγνήτη νεοδυμίου Q-08-08-04-N



Σχήμα 8.4 : Διάγραμμα μετρήσεων πριν από το calibrate των αισθητήρων

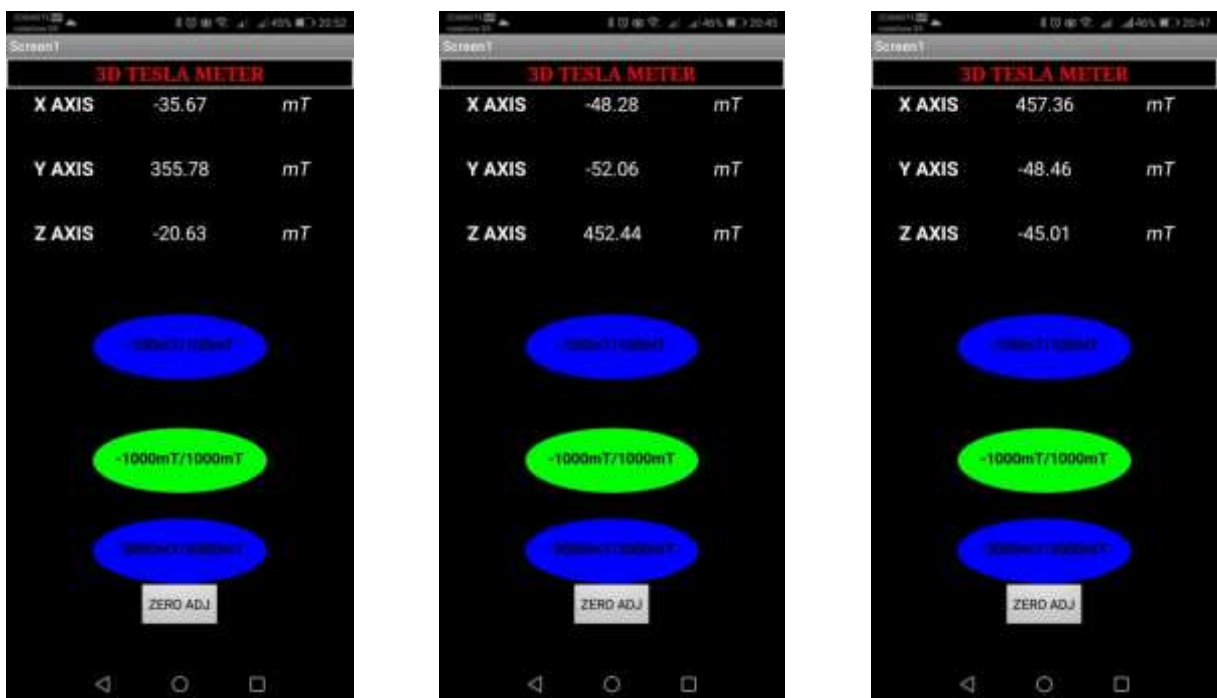
Έχοντας σαν αναφορά τα παραπάνω στοιχεία έγιναν οι πρώτες μετρήσεις πριν το calibrate των αισθητήρων και μετά. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα (8.4-5). Οι πρώτες μετρήσεις πάρθηκαν από την επιφάνεια του μαγνήτη (456.56mT τιμή κατασκευαστή) έτσι ώστε να μην παίζει ρόλο ο παράγοντας της απόστασης, καθώς όπως παρατηρήθηκε ακόμα και η μεταβολή δέκατου του χιλιοστού άλλαζε αρκετά την μέτρηση. Επίσης παρατηρήθηκε πως παίζει ρόλο ακόμα και η κλίση τοποθέτησης του μαγνήτη αλλάζοντας τα αποτελέσματα, επιβεβαιώνοντας έτσι την αρχή της ορθογωνικότητας που αναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια. Γίνεται αντιληπτό πως μετά από το calibrate των αισθητήρων τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά σε αυτά που δίνει ο κατασκευαστής του μαγνήτη. Η μέτρηση του αισθητήρα Y επειδή είναι στην επιφάνεια της πλακέτας έχει απόσταση από την επιφάνεια μέτρησης, που είναι από την κάτω μεριά 1mm. Οπότε έγινε η αντιστοίχιση μέτρησης στην απόσταση του ενός χιλιοστού.



Σχήμα 8.5 : Διάγραμμα μετρήσεων μετά από το calibrate των αισθητήρων



Σχήμα 8.6: Αποτελέσματα μετρήσεων πριν από το calibrate σύμφωνα με την εφαρμογή

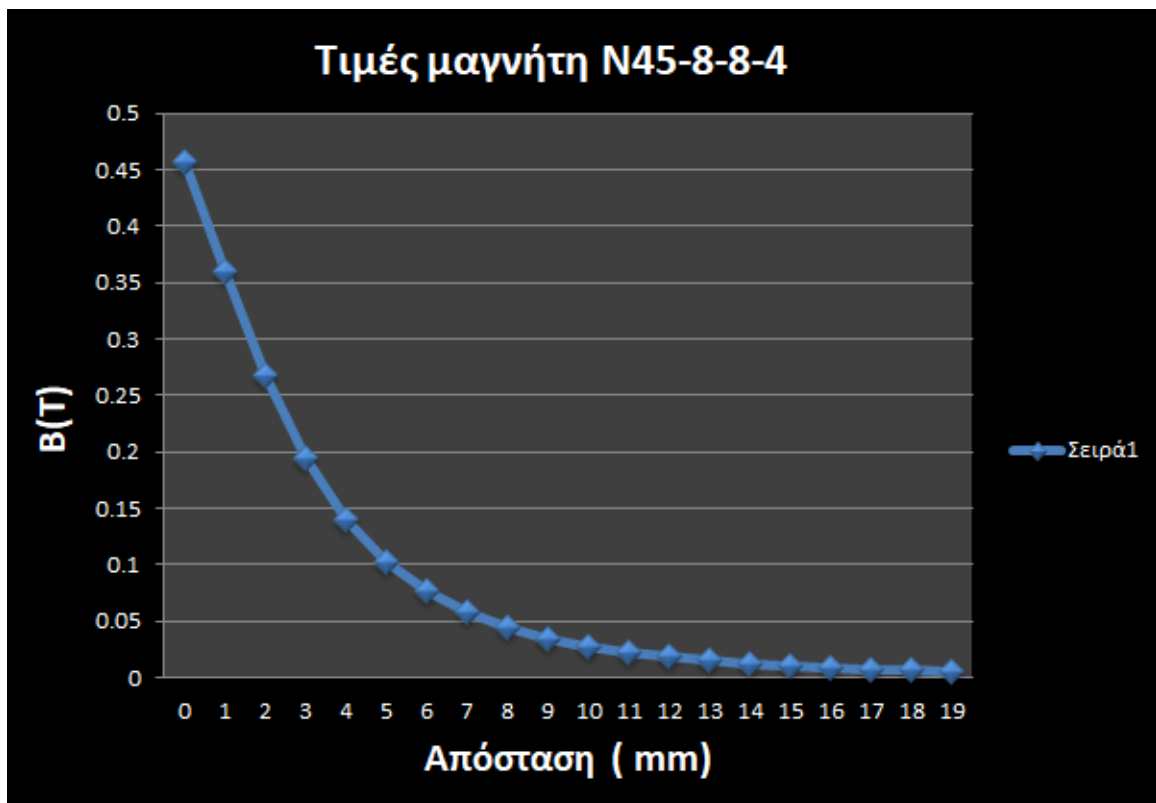


Σχήμα 8.7: Αποτελέσματα μετρήσεων μετά από το calibrate σύμφωνα με την εφαρμογή

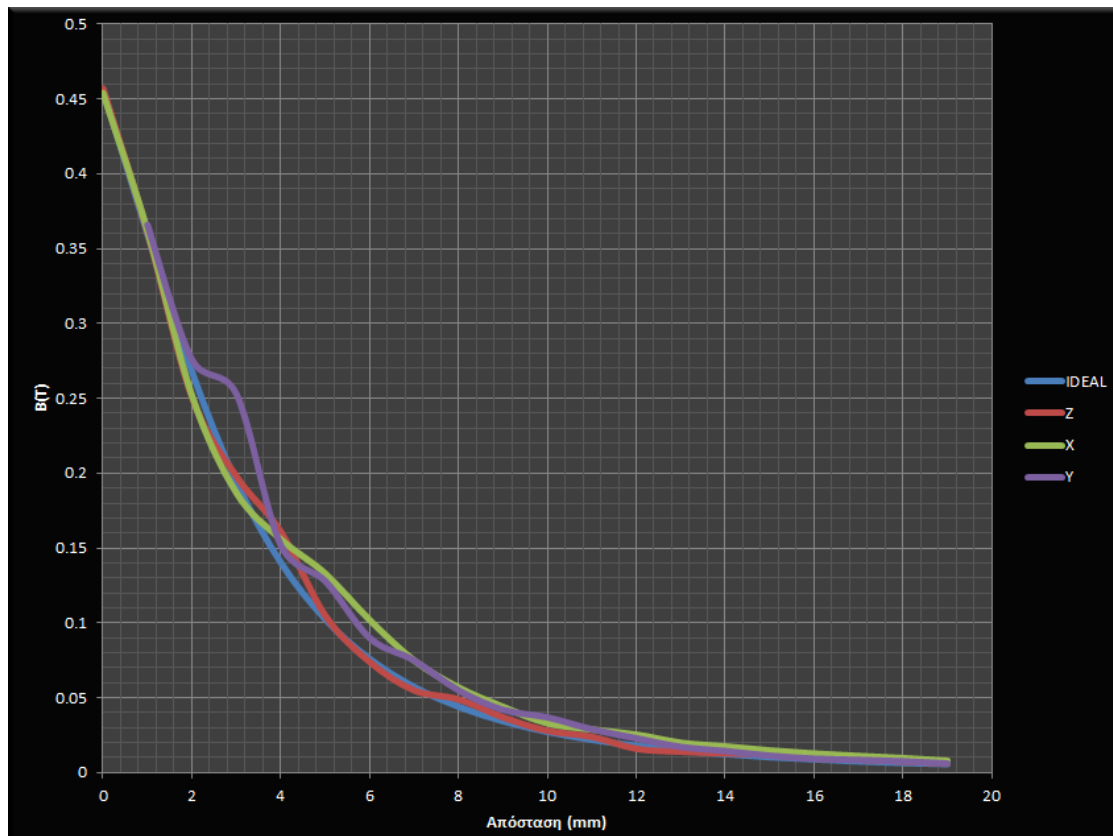


Σχήμα 8.8 : Εικόνες κατά την διάρκεια μετρήσεων. Η άσπρη ταινία τοποθετήθηκε στον αισθητήρα Y για να μην βραχυκυκλώσουν τα pin του αισθητήρα όταν ακουμπάει επάνω του ο μαγνήτης

Στην συνέχεια έγιναν μετρήσεις μαγνητικής πυκνότητας, σε σχέση με την απόσταση μέτρησης από την επιφάνεια μαγνήτη. Στο σχήμα 8.8 απεικονίζονται η τιμές που δίνει ο κατασκευαστής για το μαγνητικό πεδίο ανάλογα με την απόσταση. Παρατηρείτε ότι η τιμές μειώνονται εκθετικά σε σχέση με την απόσταση μέτρησης. Το δύσκολο στις μετρήσεις που έγιναν ήταν η ακριβείς τοποθέτηση του μαγνήτη ανάλογα με την απόσταση που έδινε ο κατασκευαστής, διότι η παραμικρή αλλαγή προξενούσε μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα. Μετά από αρκετές προσπάθειες τα αποτελέσματα ήταν τα ακόλουθα.



Σχήμα 8.9: Τιμές μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την απόσταση σύμφωνα με τον κατασκευαστή



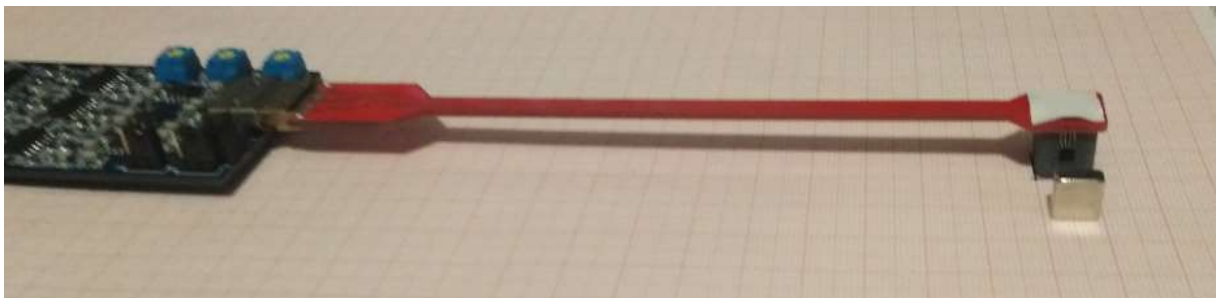
Σχήμα 8.10: Σύγκριση τιμών κατασκευαστή με πραγματικές μετρήσεις συσκευής. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η ιδανική καμπύλη που δίνει και ο κατασκευαστής. Με τα χρώματα είναι οι μετρήσεις από τους αισθητήρες.

Παρατηρείτε πως η απόκλιση του αισθητήρα Z είναι η μικρότερη σε σχέση με τα αποτελέσματα μετρήσεων που δίνει ο κατασκευαστής. Αυτό συνέβη, διότι στον άξονα που είναι τοποθετημένος η μέτρηση έγινε πρακτικά πιο εύκολα. Ενδιάμεσα των τιμών 2mm και 10mm παρατηρούνται οι πιο μεγάλες αποκλίσεις. Δεν είναι απαραίτητα λάθος μέτρησης της συσκευής, καθώς η συνθήκες και ο τρόπος μέτρησης δεν ήταν ο ιδανικός. Η παραμικρή κλίση του μαγνήτη προς τον αισθητήρα μπορεί να επηρεάσει το αποτέλεσμα. Η πραγματικές μετρήσεις από κατασκευαστές γίνονται σε συνθήκες μηδενισμού λάθους ανθρωπίνου παράγοντα καθώς γίνονται από μηχανήματα ακριβείας αυτόματα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το λάθος λόγω λανθασμένης τοποθέτησης του μαγνήτη είναι αυξημένο, μη αποδίδοντας έτσι πιστή απεικόνιση μέτρησης σε όλο το εύρος. Στον αισθητήρα X αν και παρατηρείται σχετικά σταθερή καμπύλη, έχει σταθερά ανοδικά αποτελέσματα από τους άλλους αισθητήρες. Αυτό γίνεται διότι αυτός ο αισθητήρας είχε κατασκευαστικό θέμα με αποτέλεσμα η γέφυρα του να έρχεται σταθερά σε ασυμμετρία, προσθέτοντας στην τάση του ολίσθηση, δίνοντας έτσι αυτά τα αποτελέσματα. Για τον αισθητήρα Y τα αποτελέσματα έχουν πολλές διακυμάνσεις, λόγω δυσκολίας μέτρησης, της ακριβής απόστασης από την επιφάνεια του μαγνήτη.



Σχήμα 8.11: απεικόνιση κατά την διάρκεια μέτρησης Z άξονα

Οι μετρήσεις έγιναν σε μιλιμετρέ χαρτί, για το λόγο ότι διευκόλυνε αρκετά την διατήρηση σταθερής απόστασης και καθετότητας του μαγνήτη προς τον αισθητήρα. Παρόλα αυτά σίγουρα υπάρχουν αποκλίσεις οι οποίες έπειτα από προσπάθειες περιορίστηκαν όσο το δυνατόν πιο πολύ.



Σχήμα 8.12: απεικόνιση κατά την διάρκεια μέτρησης X άξονα



Σχήμα 8.13: απεικόνιση κατά την διάρκεια μέτρησης Y άξονα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup> Συμπεράσματα και βελτιώσεις

Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του μετρητή μαγνητικού πεδίου έως 3 T σε τρεις άξονες ολοκληρώθηκε επιτυχώς. Αυτή η πτυχιακή αποτέλεσε ένα συναρπαστικό ταξίδι στον χώρο των ηλεκτρονικών συστημάτων, διότι αποτελείται από αρκετά κυκλώματα τα οποία έπρεπε να συνδεθούν αρμονικά μεταξύ τους για το επιθυμητό αποτέλεσμα. Από την αρχή μελέτης της πτυχιακής αυτής, τα προβλήματα ήταν αρκετά και έπρεπε να αντιμετωπιστούν, ώστε να βγει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Το δύσκολο κομμάτι ήταν η εύρεση του κατάλληλου αισθητήρα ώστε να μπορεί να πάρει μέτρηση σε ισχυρά μαγνητικά πεδία. Μετά από αρκετό ψάξιμο βρέθηκε ο κατάλληλος αισθητήρας και έγινε η αγορά. Κατά την διάρκεια αναμονής για παραλαβή είχαν υπολογιστεί θεωρητικά τα αποτελέσματα που θα έπρεπε να αποδώσει ο αισθητήρας σε συνδυασμό με τα κυκλώματα επεξεργασίας. Με το που έγινε όμως η παραλαβή και κούμπωσε στο κύκλωμα ξεκίνησαν τα προβλήματα καθώς, δεν δούλευε όπως είχε υπολογιστεί. Ένας συγκεκριμένος αισθητήρας, είχε offset πάνω από 100mV. Ο κατασκευαστής έδινε μόνο  $\pm 11\text{mV}$ . Έπρεπε να σχεδιαστεί επιπλέον κύκλωμα κατάλληλο για να εξαλείφει αυτό το φαινόμενο. Μετά από αρκετές προσπάθειες σχεδιάστηκε ένα κύκλωμα το οποίο εξισορροπεί το φαινόμενο αυτό, αλλά παρατηρήθηκε ο αισθητήρας αυτός εισάγει τυχαίο offset κάθε φορά κατά την διάρκεια μέτρησης. Χωρίς χάσιμο χρόνου στέλνεται αλληλογραφία στον υπεύθυνο παραγωγής εξηγώντας του το πρόβλημα. Η απάντηση δεν ήταν ικανοποιητική καθώς ενημέρωσε πως πιθανόν ο αισθητήρας να έχει δομικό θέμα εσωτερικής κατασκευής και για να γίνει αντικατάσταση έπρεπε να αποσταλεί πίσω για έλεγχο και να στείλουν άλλο. Δεν έγινε κάτι τέτοιο, διότι το κόστος ήταν αρκετά μεγάλο και ο κατασκευαστής δεν κάλυπτε τα έξοδα μεταφοράς. Τυχερός στάθηκα στο γεγονός πως μόνο ο ένας αισθητήρας παρουσίαζε τέτοιο πρόβλημα. Στην συνέχεια, θέμα υπήρξε με τα φύλλα δεδομένων, διότι δεν δινόντουσαν επαρκείς πληροφορίες. Έπειτα από επαναλαμβανόμενη αλληλογραφία δόθηκαν κάποια νέα χαρακτηριστικά από τον υπεύθυνο τα οποία δεν είχαν σχέση με αυτά που έδιναν κατά την αγορά του αισθητήρα. Συνάρτηση μεταφοράς δινόταν ελλιπής και μετά από υπόδειξη στοιχείων χρειάστηκε να την κατασκευάσω μόνος μου στο πλήρη εύρος του αισθητήρα.

Στην συνέχεια έπρεπε να σχεδιαστεί κατάλληλο κύκλωμα για την επιλογή κέρδους, ώστε να μπορεί να επιλέγει ο χρήστης κλίμακα ανάλογα με την μέτρηση. Το κύκλωμα δεν μπορούσε να συνεργαστεί με τις βαθμίδες μη αναστρέφουσας ενίσχυσης και έπρεπε να γίνει ενίσχυση σε αναστρέφων ενισχυτή. Αυτό είχε ως συνέπεια να αλλάξει και ο σχεδιασμός της προσαρμογής του σήματος.

Επειδή δεν χρησιμοποιήθηκε κάποια αναπτυξιακή πλακέτα μικροελεγκτή τα προβλήματα δεν έλειψαν από αυτό το κομμάτι. Για να πραγματοποιηθεί η εγγραφή του bootloader ήταν μια δύσκολη διαδικασία καθώς δεν υπήρχε στην διάθεση μου κατάλληλη συσκευή προγραμματιστή για αυτή την δουλειά και έπρεπε να βρεθεί μία λύση ώστε να μπορέσω να προγραμματίσω τον μικροελεγκτή. Μετά από αρκετή έρευνα σε αυτό το κομμάτι η λύση βρέθηκε μέσα από ένα συνδυασμό τρόπων και τεχνικών. Έπρεπε να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές εκδόσεις του διαχειριστικού προγράμματος Arduino για να καταφέρει να ολοκληρωθεί η εγγραφή του bootloader. Από την παλιά έκδοση πάρθηκε το πρόγραμμα εγγραφής και στην καινούργια

προστέθηκε ο κατάλληλος πυρήνας εγγραφής. Αυτό έγινε, γιατί η παλιά έκδοση δεν έδινε δυνατότητα πρόσθεσης ξεχωριστού πυρήνα.

Για την κατασκευή της πλακέτας υπήρχε ένα βασικό υπόβαθρο σχεδίασης, αλλά έγινε περεταίρω έρευνα και μελέτη για να μην υπάρχουν επιπλοκές. Το κομμάτι της σχεδίασης είναι αρκετά δύσκολο σε επαγγελματικές εφαρμογές και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη αρκετοί παράγοντες οι οποίοι μπορούν να υπολογιστούν μόνο με προγράμματα προσομοίωσης.

Στην δημιουργία android εφαρμογής αφιερώθηκε αρκετός χρόνος, διότι δεν είχα ασχοληθεί άλλη φορά με τέτοιου είδους προγραμματισμό. Αρκετές δυσκολίες υπήρξαν. Στον τρόπο επικοινωνίας της συσκευής και στην διαχείριση των δεδομένων. Με αρκετούς πειραματισμούς όμως τα θετικά αποτελέσματα δεν άργησαν να έρθουν.

Μετά από ένα εύλογο χρονικό διάστημα μελέτης και πειραματισμών τα αποτελέσματα ήταν αρκετά κοντά στα υπολογισμένα, χαρίζοντας έτσι μια αίσθηση ικανοποίησης και ανταμοιβής για όλη αυτή την διαδικασία. Η εμπειρία που αποκτήθηκε μέσα από αυτό το ταξίδι ήταν αρκετά μεγάλη και σίγουρα αποτέλεσε ένα ακόμα σκαλοπάτι στην εξέλιξη και πρόοδο μου.

Σε κάθε κατασκευή πάντα υπάρχει χώρος για το κομμάτι των βελτιώσεων. Σίγουρα η επιλογή αισθητήρων με πιο συγκεκριμένα χαρακτηριστικά θα αποτελούσε μία βελτίωση. Η εύρεση καταλληλότερου τρόπου για επιλογή κέρδους, καθώς και η αυτόματη ρύθμιση τάσης offset. Η πιο σωστή σχεδίαση βαθμίδας τροφοδοτικού θα αποτελέσει μία σημαντική βελτίωση στο κομμάτι διαχείρισης της ενέργειας. Επιπλέον η κατασκευή probe μέτρησης με διαφορετική τοποθέτηση αισθητήρων σε κάθε ένα για δυνατότητα μέτρησης ξεχωριστής μοναδικής μέτρησης με δυνατότητα ζεύξης με την υπάρχον συσκευή επεξεργασίας δεδομένων. Ο σχεδιασμός της πλακέτας μπορεί να βελτιωθεί αρκετά με δυνατότητες που έχουν άλλα προγράμματα σχεδίασης. Θα περιοριστεί σημαντικά ο όγκος κατασκευής. Ακόμα η κατασκευή κατάλληλου κουτιού τοποθέτησης της συσκευής είναι σημαντικό κομμάτι, διότι προσφέρει ασφάλεια κατά την μεταφορά και από τυχόν πτώση. Στο κομμάτι του προγράμματος της εφαρμογής οι βελτιώσεις είναι αρκετές καθώς στο κομμάτι των γραφικών αναπαράστασης ο μόνος περιορισμός είναι η φαντασία.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] R. S. Popovic, Hall Effect Devices, second edition (Institute of Physics Publishing, Bristol, 2004).
- [2] E. Ramsden, Hall Effect Sensors – Theory and Application (Newnes, Oxford, 2006).
- [3] S. C. Mukhopadhyay and R. Yueh-Min Huang, Sensors: Advancements in Modeling, Design, Issue, Fabrication and Practical Applications (Springer, Berlin, 2008).
- [4] S. Y. Yurish and M. T. S. R. Gomes, Smart Sensors and MEMS (Kluwer, Dordrecht, 2004).
- [5] Ch. S. Roumenin, Microsensors for magnetic fields, *in* MEMS a Practical Guide to Design and Analysis and Applications, Eds. J. G. Korvink and O. Paul (Andrew Publ., 2005), pp. 453–520.
- [6] Ηλεκτρονικά ισχύος Κιοσκερίδης Ιορδάνης , Εκδόσεις Τζιολα(2016)
- [7] Ηλεκτρονικές μετρήσεις και οργανολογία Μιχάλης Ν. Σπάσος, Εκδόσεις Αιβαζη(2014)
- [8] Αισθητήρες μέτρησης και ελέγχου Κωνσταντίνος Καλοβρέκτης Νικόλαος Κατέβας, Εκδόσεις Τζιολα(2014)
- [9] Wikipedia bluetooth protocol available at:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_Bluetooth\\_protocols](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Bluetooth_protocols)
- [10] Honeywell, Hall Effect Sensing and Application, MICRO SWITCH Sensing and Control manual, available at  
<http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/solidstate/technical/hallbook.pdf>.
- [11] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications, third edition (Springer, New York, 2003).
- [12] P. Ripka and A. Tipek, Modern Sensors Handbook (ISTE, London, 2007).
- [13] P. Ripka, Magnetic Sensors and Magnetometers (Artech House, Boston, 2001).
- [14] J. A. Clarke, The Science and Technology of Undulators and Wigglers (Oxford University Press, 2004).
- [15] H. Onuki and P. Elleaume, Undulators, Wigglers and their Applications (Taylor & Francis, London, 2003).
- [16] HALL probes: physics and application to magnetometry (Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland)
- [17] MIT App Inventor creator available at: <https://appinventor.mit.edu/>
- [18] Arduino software available at: <https://www.arduino.cc/en/main/software>

- [19] 3D printing design available at: <https://autodesk-123d-design.en.lo4d.com/windows>
- [20] Sonnecy Hall sensors elements and instruments available at: <https://www.sonnecy-shop.com/en/linear-hall-effect-sensors-elements-cysj362a-max.-sensitivity-3.1-4.1-mv/mt-measuring-range-3t.html>
- [21] Analog devices AD623 datasheet available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad623.pdf>
- [22] Texas instruments CD4066 datasheet available at:  
[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4066b.pdf?ts=1600420863878&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4066b.pdf?ts=1600420863878&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
- [23] Microchip-Atmel ATMEGA 328au datasheet available at:  
[http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P\\_Datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf)
- [24] Pcb designer program available at: <https://easyeda.com/>
- [25] Texas instruments LMC660 datasheet available at:  
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmc660.pdf>
- [26] Texas Instruments ADS1115 datasheet available at:  
[https://www.ti.com/lit/ds/sbas444d/sbas444d.pdf?ts=1600421179947&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/sbas444d/sbas444d.pdf?ts=1600421179947&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Παράρτημα 1 Κώδικας μικροελεγκτή C++

```
#include <Wire.h>

#include <Adafruit_ADS1015.h>

Adafruit_ADS1115 ads;

float z_axis = 0;

float y_axis = 0;

float x_axis = 0;

float z_option = 0;
```

```
float x_option = 0;
float y_option = 0;

int i = 0;
char com;
int R10K = 2;
int R100K = 3;
int R300K = 4;

unsigned long previousMillis = 0;
const long interval = 1000;

float z3adj = 0;
float y3adj = 0;
float x3adj = 0;
float z2adj = 0;
float x2adj = 0;
float y2adj = 0;
float z1adj = 0;
float x1adj = 0;
float y1adj = 0;

int16_t adc0, adc1, adc2, adc3;

int batcont;

void setup() {
    pinMode(12,OUTPUT);
    pinMode(11,OUTPUT);
```

```

Serial.flush();

Serial.begin(9600);

pinMode(R10K, OUTPUT);
digitalWrite(R10K, HIGH);

pinMode(R100K, OUTPUT);
digitalWrite(R100K, LOW);

pinMode(R300K, OUTPUT);
digitalWrite(R300K, LOW);

ads.begin();
}

void loop() {

  unsigned long currentMillis = millis();

  batcont=analogRead(A3);

  float volt= batcont * 5 / 1023 ;

  if (volt<3.1){

    digitalWrite(12, HIGH);

    digitalWrite(11, HIGH);

    delay(500);

    digitalWrite(12, LOW);

    digitalWrite(11, LOW);

    delay(500);

  }

  adc0 = ads.readADC_SingleEnded(0);

  adc1 = ads.readADC_SingleEnded(1);

```

```

adc2 = ads.readADC_SingleEnded(2);

float fadc0 = (adc0 * 0.1875) * 0.001;
float fadc1 = (adc1 * 0.1875) * 0.001;
float fadc2 = (adc2 * 0.1875) * 0.001;

// Serial.print("Z_AXIS =" + String(fadc1));
//Serial.print(" Y_AXIS =" + String(fadc0));
// Serial.println(" X_AXIS =" + String(fadc2));

z_axis=fadc1;
float z1 = (z_axis * 45.45 -0.41) - 112.628;

float z2 = z_axis * 445.45 - 1110.92;

float z3 = z_axis * 1363.63 - 3404.9;

y_axis = fadc0;
float y1 = (y_axis * 45.45 - 0.41) - 113.62;

float y2 = y_axis * 445.45 - 1114.12;
float y3 = y_axis * 1363.63 - 3392.37;

x_axis = fadc2;
float x1 = (x_axis * 45.45 -0.41) - 122.62;

```

```
float x2 = x_axis * 445.45 - 1120.12;
```

```
float x3 = x_axis * 1363.63 - 3406.94;
```

```
if ( z_axis > 2.6)
```

```
{
```

```
  pinMode(12, OUTPUT);
```

```
  digitalWrite(12, HIGH);
```

```
}
```

```
else {
```

```
  digitalWrite(12, LOW);
```

```
}
```

```
if ( z_axis < 2.4)
```

```
{
```

```
  pinMode(11, OUTPUT);
```

```
  digitalWrite(11, HIGH);
```

```
}
```

```
else {
```

```
  digitalWrite(11, LOW);
```

```
}
```

```
if (Serial.available() > 0 ) {
```

```
com = Serial.read();  
Serial.flush();  
if (com == 'd') {  
  
    z1adj = z1;  
    x1adj = x1;  
    y1adj = y1;  
  
    z2adj = z2;  
    x2adj = x2;  
    y2adj = y2;  
  
    z3adj = z3;  
    y3adj = y3;  
    x3adj = x3;  
}  
  
if (com == 'a') {  
    digitalWrite(R10K, LOW);  
    digitalWrite(R100K, LOW);  
    digitalWrite(R300K, HIGH);  
  
}  
if (com == 'b') {
```

```

digitalWrite(R10K, LOW);

digitalWrite(R100K, HIGH);

digitalWrite(R300K, LOW);

}

if (com == 'c') {

    digitalWrite(R10K, HIGH);

    digitalWrite(R100K, LOW);

    digitalWrite(R300K, LOW);

}

}

if (currentMillis - previousMillis >= interval) {

    previousMillis = currentMillis;

    if (digitalRead(R300K) == HIGH) {

        if (z1 != 0) {

            z_option = z1 - z1adj;

        }

        if (x1 != 0) {

            x_option = x1 - x1adj;

        }

        if (y1 != 0) {

            y_option = y1 - y1adj;

```

```

}
}

if (digitalRead(R100K) == HIGH) {
  if (z2 != 0) {
    z_option = z2 - z2adj;
  }
  if (x2 != 0) {
    x_option = x2 - x2adj;
  }
  if (y2 != 0) {
    y_option = y2 - y2adj;
  }
}

if (digitalRead(R10K) == HIGH) {
  if (z3 != 0) {
    z_option = z3 - z3adj;
  }
  if (x3 != 0) {
    x_option = x3 - x3adj;
  }
  if (y3 != 0) {
    y_option = y3 - y3adj;
  }
}

Serial.print(x_option);

Serial.print("|");

```

```
Serial.print(y_option);
```

```
Serial.print("|");
```

```
Serial.print(z_option);
```

```
Serial.print("|")}}
```