



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ανάπτυξη τεχνικής ελέγχου εσωτερικών τάσεων σε χάλυβες
με την μέθοδο των μαγνητοσυστολικών γραμμών
καθυστέρησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Χ. Καραμπίνας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ανάπτυξη τεχνικής ελέγχου εσωτερικών τάσεων σε χάλυβες
με την μέθοδο των μαγνητοσυστολικών γραμμών
καθυστέρησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Χ. Καραμπίνας

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29^η Ιουλίου.

Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ιωάννης Γκόνοσ
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ευστάθιος Συκάσ
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2022

.....
Ιωάννης Χ. Καραμπίνας

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

Copyright © Ιωάννης Χ. Καραμπίνας, 2022.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Οι ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις του 21^{ου} αιώνα επηρεάζουν πλέον κάθε έκφανση της ζωής μας. Ένας χώρος που η τεχνολογία επηρέασε έντονα είναι η βιομηχανία σε παγκόσμιο επίπεδο. Η αύξηση της ζήτησης αλλά και παράλληλα η απαίτηση των υψηλών προδιαγραφών, ανάγκασε την βιομηχανία να στραφεί στην τελευταία λέξη της τεχνολογίας. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε πολλά συστήματα αυτομάτου ελέγχου στις γραμμές παραγωγής και έφερε ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας της παραγωγής σε μεγάλο βαθμό. Με σκοπό να ικανοποιηθούν οι υψηλές προδιαγραφές, η αυτοματοποίηση αποκλειστικά ως λύση, κρίθηκε ανεπαρκής. Έτσι, προστέθηκαν συστήματα που αναλαμβάνουν τον ποιοτικό έλεγχο στην παραγωγή. Για την εξυπηρέτηση όλων των προαναφερθέντων, εκτός από την προσθήκη των ρομπότ και των έξυπνων αλγορίθμων, απαιτήθηκαν αμέτρητοι αισθητήρες διαφόρων ειδών, οι οποίοι διέθεταν χρήσιμη πληροφορία για την αυτοματοποίηση και τον ποιοτικό έλεγχο. Η προσπάθεια ανάπτυξης τεχνικής ελέγχου εσωτερικών τάσεων σε χάλυβες με την μέθοδο των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης (MDL), παρουσιάζεται και αναλύεται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Με τη χρήση της διάταξης, το σύστημα είναι ικανό να ανιχνεύει τυχόν παραμορφώσεις ή κατασκευαστικές ατέλειες στον χάλυβα. Το σύστημα μετατρέπει την εσωτερική μηχανική τάση του υλικού σε ηλεκτρική τάση, με σκοπό την μέτρηση της και την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Η μετατροπή αυτή επιτυγχάνεται με την βοήθεια διάταξης επαγωγικών πηνίων, στο εσωτερικό των οποίων τοποθετείται μαγνητοσυστολικό υλικό. Στα πλαίσια της εργασίας παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για τους μαγνητικούς αισθητήρες και το μαγνητοσυστολικό φαινόμενο που βασίζεται η τεχνική MDL. Κατόπιν, παρουσιάζεται το πρακτικό κομμάτι το οποίο περιλαμβάνει τα τρία βασικά υποσυστήματα της διάταξης (κύκλωμα διέγερσης – κύκλωμα λήψης -έλεγχος) και τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την λειτουργία του αισθητήρα. Τέλος, σχολιάζονται τα αποτελέσματα σχετικά με την ορθή λειτουργία του αισθητήρα και αναφέρονται δυνατές μελλοντικές βελτιώσεις.

Λέξεις κλειδιά:

Μαγνητικοί αισθητήρες, μαγνητοσυστολή, μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης, χάλυβας, βιομηχανία, ποιοτικός έλεγχος, μικροελεγκτής

Abstract

The rapid technological developments of the 21st century now affect every aspect of our lives. One area that technology has strongly influenced is industry on a global scale. The increase in demand, but also the requirement of high standards, forced the industry to turn to the latest technology. This fact led to many automation control systems in production lines and resulted in increasing the speed of production to a great extent. In order to meet the high standards, automation as an exclusively solution was deemed insufficient. Thus, systems were added that take over quality control in production. To satisfy all of the above in the production line, robots, machine vision, smart algorithms and countless sensors of various kinds were required. The sensors provide useful information for both automation and quality control. In this thesis, an attempt to develop a technique for controlling internal stresses in steels using the method of magnetostrictive delay lines (MDL), is presented and analyzed. By using the device, the system is able to detect distortions of manufacturing defects in the steel. The system converts the internal mechanical stress of the material into electrical voltage in order to measure and extract results. This conversion is achieved with the help of an inductive arrangement of coils, inside which, magnetostrictive material is placed. In the framework of the work, the theoretical background for magnetic sensors and the magnetostrictive effect, on which the MDL technique is based, is presented. The practical application of the method is also presented, which includes the three basic subsystems of the device (excitation circuit - sensing circuit - control) and the experimental results that acquired during the operation of the sensor. In conclusion, results regarding the correct operation of the sensor are discussed and potential future improvements are mentioned.

Keywords:

Magnetic sensors, magnetostriction, magnetostrictive delay lines, steel, industry, quality control, microcontroller

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την πολύτιμη υποστήριξη του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, τόσο σε τεχνικά όσο και σε θεωρητικά ζητήματα. Ακόμη, επειδή μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επιπλέον, ένα θερμό ευχαριστώ στο διδακτορικό Σπυρίδωνα Αγγελόπουλο ο οποίος ήταν δίπλα σε οποιαδήποτε απορία μου και με συμβούλευε. Τελευταίο και μεγαλύτερο ευχαριστώ είναι αυτό στην οικογένεια μου για την στήριξη και την ανιδιοτελή αγάπη της όλα αυτά τα χρόνια.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Ο ορισμός του αισθητήρα	1
1.2 Ταξινόμηση Αισθητήρων.....	1
1.3 Μαγνητικοί αισθητήρες.....	3
1.4 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης (MDL).....	10
1.5 Στόχος της εργασίας	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο – ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΗ.....	13
2.1 Μαγνητοσυστολή	13
2.2 Φαινόμενο Joule και Villari	14
2.3 Εξήγηση του φαινομένου της μαγνητοσυστολής	16
2.4 Μαγνητικές περιοχές	17
2.5 Μαγνητικά φαινόμενα σε εφαρμογές αισθητήρων.....	18
2.6 Άμορφα υλικά	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο – ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ	25
3.1 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης MDL – Τυπική διάταξη.....	25
3.2 Μοντελοποίηση MDL.....	30
3.3 Ιδιότητες MDL.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο – ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ	35
4.1 Διάταξη MDL	35
4.2 Κύκλωμα διέγερσης.....	39
4.2.1 Προδιαγραφές κυκλώματος διέγερσης.....	40
4.2.2 Ανάλυση κυκλώματος διέγερσης.....	42
4.2.3 Προσομοίωση κυκλώματος διέγερσης	46
4.2.4 Απόκριση κυκλώματος διέγερσης.....	51
4.3 Κύκλωμα λήψης.....	53
4.3.1 Προδιαγραφές κυκλώματος λήψης.....	54
4.3.2 Ανάλυση κυκλώματος λήψης.....	56
4.3.3 Προσομοίωση κυκλώματος λήψης.....	62
4.3.4 Απόκριση κυκλώματος λήψης.....	66
4.4 Μονάδα μικροελεγκτή (MCU)	67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	73
5.1 Κύκλωμα διέγερσης – Συνδεσμολογία – Αποτελέσματα.....	74
5.2 Κύκλωμα λήψης – Συνδεσμολογία - Αποτελέσματα.....	80
5.3 Συλλογή δεδομένων	90
5.4 Σχεδίαση πλακέτας PCB	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6° – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗ	103
6.1 Μαγνητική θωράκιση	103
6.2 Παραμετροποίηση κυκλώματος μέσω software	104
6.3 Αντικατάσταση μικροελεγκτή με Field Programmable Gate Array (FPGA)	106
Βιβλιογραφία.....	107

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Σχηματική διάταξη αισθητήρα	1
Σχήμα 1.2.1 Κατηγοριοποίηση των αισθητήρων ^[3]	3
Σχήμα 1.3.1 Απεικόνιση των αρχών λειτουργίας των μαγνητόμετρων fluxgates. Το σήμα εξόδου διαμορφώνεται οδηγώντας τον μαλακό μαγνητικό πυρήνα μέσα και έξω από τον κορεσμό. Οι σκιασμένες περιοχές υποδεικνύουν τις περιοχές λειτουργίας. .5	
Σχήμα 1.3.2 Σχηματικό του SQUID.....	6
Σχήμα 1.3.3 Σχηματικό του αισθητήρα φαινομένου Hall	7
Σχήμα 2.1.1 Μαγνητοσυστολή Joule. (a) Οι αλλαγές στο σχήμα ως απόκριση στο μαγνητικό πεδίο H. Το πεδίο H είναι ανάλογο του ρεύματος που διέρχεται (i), όπως φαίνεται στο σχήμα. (b) Το γράφημα $H(\Delta LL)$	13
Σχήμα 2.2.1 Σε μορφή βρόγχου πεταλούδας	15
Σχήμα 2.3.1 Σχηματική εικόνα που απεικονίζει τη μαγνητοσυστολή που προκαλείται από την περιστροφή της μαγνήτισης.....	17
Σχήμα 2.5.1 Διάδοση μαγνητικών τοιχωμάτων. (α) Διάδοση μέσω του bowing process, (b) Άκαμπτη διάδοση μέσω της παράλληλης κίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων. ^[21]	19
Σχήμα 2.5.2 Περιστροφή μαγνητικών περιοχών (α) Μη αναστρέψιμη περιστροφή, (b) Αναστρέψιμη περιστροφή. ^[21]	21
Σχήμα 2.6.1 Κρυσταλλική δομή συμβατικού μετάλλου (αριστερά) και άμορφου μαγνητοσυστολικού υλικού (δεξιά), όπου φαίνεται η ομογένεια της δομής του άμορφου υλικού σε σύγκριση με ένα απλό μέταλλο. ^[29]	23
Σχήμα 3.1.1 Βασική διάταξη MDL: 1 Πηνίο διέγερσης, 2 Μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης, 3 Πηνίο λήψης. ^[30]	25
Σχήμα 3.1.2 Καμπύλη λ(H)-Εξάρτηση μικροπαραμορφώσεων από το μαγνητικό πεδίο. ^[21]	26
Σχήμα 3.1.3 Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου. ^[51]	27
Σχήμα 3.1.4 Σχέση μαγνητικού πεδίου πόλωσης με διαμήκη ταχύτητα διάδοσης σε γραμμή από άμορφο σύρμα $Fe_{77,5}Si_{7,5}B_{15}$ με διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας.	28

Σχήμα 3.1.5 Απεικόνιση των τριών διαδοχικών γεγονότων της τεχνικής MDL στην τυπική διάταξη. ^[14]	29
Σχήμα 3.1.6 Φαινόμενο ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής στο οποίο στηρίζεται το πηνίο λήψης για ανίχνευση του ελαστικού παλμού. ^[52]	29
Σχήμα 3.2.1 Η τυπική διάταξη με διέγερση από έναν αγωγό κάθετο στον άξονα του MDL. ^[21]	30
Σχήμα 3.2.2 Δημιουργία, διάδοση και ανίχνευση μικροπαραμορφώσεων με σύντομο παλμό διέγερσης στα αριστερά, και μεγαλύτερης διάρκειας στα δεξιά. ^[21]	32
Σχήμα 4.1 Σχεδιάγραμμα του συστήματος του αισθητήρα.....	35
Σχήμα 4.1.1 Πηνίο διέγερσης (Αριστερά), Πηνίο λήψης (δεξιά).....	38
Σχήμα 4.1.2 Διάταξη MDL	38
.....	39
Σχήμα 4.1.3 Διάμετρος περιελίξεων πηνίου διέγερσης (δεξιά), διάμετρος περιελίξεων πηνίου λήψης(αριστερά).....	39
.....	39
Σχήμα 4.1.4 Ωμική αντίσταση πηνίου διέγερσης(αριστερά), ωμική αντίσταση πηνίου λήψης(δεξιά).....	39
Σχήμα 4.2.1 Κύκλωμα διέγερσης σχεδιασμένο στο LTSpice	40
Σχήμα 4.2.1.1 Παράδειγμα ενός επαγωγικού spike ^[53]	41
Σχήμα 4.2.2.1 Η λειτουργία ενός NMOS όταν άγει(αριστερά) και όταν δεν άγει(δεξιά) ^[41]	42
Σχήμα 4.2.2.2 Χαρακτηριστικά του nMOS ^[40]	43
Σχήμα 4.2.2.3 Καμπύλη τάσης V_F συναρτήσει του ρεύματος I_F	45
Σχήμα 4.2.2.4 Λειτουργικότητα του decoupling capacitor σε γράφημα	46
Σχήμα 4.2.3.1 Κύκλωμα διέγερσης – Προσομοίωση.....	47
Σχήμα 4.2.3.2 Ρύθμιση παραμέτρων του παλμού εισόδου	47
Σχήμα 4.2.3.3 Παλμός διέγερσης.....	48
Σχήμα 4.2.3.4 Αριστερά η γραφική του ρεύματος του πηνίου διέγερσης συναρτήσει του χρόνου και δεξιά η συμπεριφορά του κυκλώματος διέγερσης όταν άγει το MOSFET.....	49
Σχήμα 4.2.3.5 Κώδικας MATLAB για παραγωγή γραφήματος και επαλήθευση	50
Σχήμα 4.2.3.6 Αποτέλεσμα του κώδικα – Γραφική ρεύματος	50

Σχήμα 4.2.3.7 Τάση στα άκρα του πηνίου διέγερσης(πράσινο χρώμα) και ρεύμα πηνίου διέγερσης(κόκκινο χρώμα)	51
Σχήμα 4.2.4.1 Συχνότητα στην γεννήτρια.....	52
Σχήμα 4.2.4.2 Peak to Peak τάση παλμού γεννήτριας	52
Σχήμα 4.2.4.3 Duty cycle παλμού	52
Σχήμα 4.2.4.4 DC offset.....	53
Σχήμα 4.3.1 Κύκλωμα λήψης σχεδιασμένο στο LTSpice	54
Σχήμα 4.3.1.1 Ισοδύναμο μοντέλο θορύβου αντίστασης	55
Σχήμα 4.3.2.1 Απεικόνιση της διαφοράς μεταξύ ενός απλού ενισχυτή με ενός διαφορικού ενισχυτή στην αποθορυβοποίηση.....	57
Σχήμα 4.3.2.2 Αναλυτικό σχηματικό του INA128P	58
Σχήμα 4.3.2.3 Τα χαρακτηριστικά και οι εφαρμογές του INA128P όπως παρουσιάζονται στο φύλλο δεδομένων	58
Σχήμα 4.3.2.4 Διάγραμμα κέρδους-συχνότητας(αριστερά), CMR – συχνότητας(κέντρο), θόρυβος εισόδου – συχνότητα(δεξιά).....	59
Σχήμα 4.3.2.5 Συνδεσμολογίες που παρέχουν ρεύμα πόλωσης – εισόδου	60
Σχήμα 4.3.2.5 Πιθανή υλοποίηση ρύθμισης της τάσης στο pin Ref	61
Σχήμα 4.3.2.7 Δεύτερο στάδιο στο κύκλωμα λήψης σχεδιασμένο στο LTSpice	62
Σχήμα 4.3.3.1 Το σύμβολο της πηγής ρεύματος(αριστερά) και το σύμβολο της πηγής τάσης(δεξιά).....	63
Σχήμα 4.3.3.2 Κύκλωμα λευκού θορύβου παραγόμενο από πηγή τάσης(αριστερά), από πηγή ρεύματος(δεξιά)	63
Σχήμα 4.3.3.3 Το σήμα λευκού θορύβου της πηγής τάσης(μπλε) και το σήμα λευκού θορύβου της πηγής ρεύματος(πράσινο).....	63
Σχήμα 4.3.3.4 Ημιτονοειδές σήμα(κόκκινο), λευκός θόρυβος(μπλε), είσοδος θετικού ακροδέκτη στο chip(πράσινο)	64
Σχήμα 4.3.3.5 Πρώτο στάδιο προσομοίωσης	65
Σχήμα 4.3.3.6 Έξοδος chip INA128P με $V_{ref} = 0$	65
Σχήμα 4.3.3.7 Έξοδος chip INA128P με $V_{ref} = 2.5V$	66
Σχήμα 4.3.3.8 Διάγραμμα Bode στην έξοδο του δεύτερου σταδίου.....	66
Σχήμα 4.4.1 Αποτυχημένη υλοποίηση παλμού διέγερσης σε Arduino UNO	68
Σχήμα 4.4.2 Επιτυχημένη υλοποίηση παλμού διέγερσης σε Arduino UNO	68

Σχήμα 4.4.3 STM32F103C8T6	70
Σχήμα 3.4.4 ST-LINK	70
Σχήμα 4.4.5 Αρχικό widget στο περιβάλλον του STM32CubeIDE	70
Σχήμα 4.4.6 Configuration Page	71
Σχήμα 4.4.7 Παραμετροποίηση των pins	71
Σχήμα 4.4.8 Παραμετροποίηση στο ρολόι.....	72
Σχήμα 5.1.1 Κύκλωμα διέγερσης στο breadboard	74
Σχήμα 5.1.2 Κύκλωμα διέγερσης σε through hole πλακέτα	75
Σχήμα 5.1.3 Πλακέτα Arduino UNO	75
Σχήμα 5.1.4 Παλμός διέγερσης από την πλακέτα του Arduino UNO	76
Σχήμα 5.1.5 Τάση στο source του MOSFET με το Arduino UNO	77
Σχήμα 5.1.6 Τάση στο drain του MOSFET με το Arduino UNO	78
Σχήμα 5.1.7 Παλμός διέγερσης από την πλακέτα του STM32F103C8.....	79
Σχήμα 5.1.8 Τάση στο source του MOSFET με το STM 32F103C8.....	80
Σχήμα 5.2.1 Κύκλωμα λήψης του σταδίου INA128P στο breadboard.....	81
Σχήμα 5.2.2 Πρώτο στάδιο κυκλώματος λήψης (INA128P) κολλημένο σε through hole πλακέτα	82
Σχήμα 5.2.3 Έξοδος πρώτου σταδίου στο κύκλωμα λήψης.....	82
Σχήμα 5.2.4 Δεύτερο στάδιο κυκλώματος λήψης (ενίσχυση) κολλημένο σε through hole πλακέτα.....	83
Σχήμα 5.2.5 Έξοδος δεύτερου σταδίου κυκλώματος λήψης	84
Σχήμα 5.2.6 Έξοδος συστήματος για P = 50 MPa.....	84
Σχήμα 5.2.7 Έξοδος συστήματος για P =65 MPa.....	85
Σχήμα 5.2.8 Έξοδος συστήματος για P =75 MPa.....	85
Σχήμα 5.2.9 Έξοδος συστήματος για P =92 MPa.....	86
Σχήμα 5.2.10 Έξοδος συστήματος για P =105 MPa.....	86
Σχήμα 5.2.11 Έξοδος συστήματος για P =120 MPa.....	87
Σχήμα 5.2.12 Έξοδος συστήματος για P =132 MPa.....	87
Σχήμα 5.2.13 Έξοδος συστήματος για P =150 MPa.....	88
Σχήμα 5.2.14 Συνολική διάταξη συστήματος	89
Σχήμα 5.3.1 Υλοποίηση της συνάρτησης που δημιουργεί καθυστέρηση microseconds	90

Σχήμα 5.3.2 Υλοποίηση συνάρτησης που γυρνάει τον χρόνο που εκτελείται ο κώδικας σε microseconds	91
Σχήμα 5.3.3 Μέρος 1 ^ο της συνάρτησης getMinMax	92
Σχήμα 5.3.4 Μέρος 2 ^ο της συνάρτησης getMinMax	93
Σχήμα 5.3.5 Αρχικοποίηση μεταβλητών στον κώδικα	94
Σχήμα 5.3.6 Κύριος κώδικας μέρος 1 ^ο	95
Σχήμα 5.3.7 Κύριος κώδικας μέρος 2 ^ο	95
Σχήμα 5.3.8 FT232RL.....	96
Σχήμα 5.3.9 Κώδικας Python	97
Σχήμα 5.3.10 Η παραγόμενη έξοδος στον υπολογιστή με ζωντανά δεδομένα	98
Σχήμα 5.4.1 Voltage regulators	99
Σχήμα 5.4.2 Schematic κυκλώματος διέγερσης.....	100
Σχήμα 5.4.3 Schematic μικροελεγκτή	100
Σχήμα 5.4.4 Schematic κυκλώματος λήψης	101
Σχήμα 5.4.5 Top layer του PCB	101
Σχήμα 5.4.6 Top slide manufacturing του PCB.....	102
Σχήμα 5.4.7 Bottom slide manufacturing του PCB.....	102
Σχήμα 6.1.1 Μαγνητική θωράκιση της διάταξης MDL του αισθητήρα [21]	104
Σχήμα 6.2.1. Σήμα εξόδου (κίτρινο χρώμα) και σήμα εξόδου μετά από low pass φίλτρο 80kHz (ροζ).....	105
Σχήμα 6.2.2. Σήμα εξόδου (κίτρινο χρώμα) και σήμα εξόδου μετά από low pass φίλτρο 160kHz (ροζ).....	105

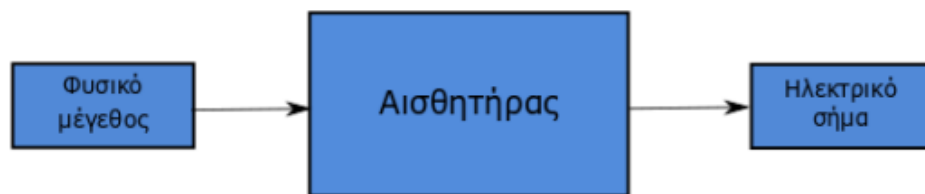
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εισαγωγή της εργασίας, θα αναλυθεί η έννοια του αισθητήρα και θα γίνει μια προσπάθεια ταξινόμησης των διαφόρων τύπων αισθητήρων, που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές. Στη συνέχεια, θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά στους μαγνητικούς αισθητήρες καθώς και στα φαινόμενα τα οποία παρατηρούνται κατά τη λειτουργία τους. Επιπλέον, θα παρουσιαστεί συνοπτικά η τεχνική των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης και τέλος θα παρατεθεί ο στόχος της εργασίας.

1.1 Ο ορισμός του αισθητήρα

Ζούμε σε έναν κόσμο αισθητήρων. Καθημερινά, αν κοιτάξουμε γύρω μας σίγουρα θα παρατηρήσουμε αμέτρητους αισθητήρες, στα σπίτια, στο γραφείο είτε στα αυτοκίνητα. Υπάρχουν πολλοί ορισμοί ως προς το τι είναι ένας αισθητήρας. Ένας κοινός ορισμός είναι ότι ο αισθητήρας αποτελεί μία συσκευή εισόδου, η οποία παρέχει μία έξοδο σε σχέση με μία συγκεκριμένη φυσική ποσότητα^[1].

Κρίνεται ενδιαφέρον και σημαντικό ότι το σήμα εξόδου αναπαριστά ένα ηλεκτρικό σήμα ανεξαρτήτως φυσικού μεγέθους.



Σχήμα 1.1 Σχηματική διάταξη αισθητήρα

1.2 Ταξινόμηση Αισθητήρων

Υπάρχουν πολλές ταξινομήσεις αισθητήρων που έχουν γίνει από διαφορετικούς συγγραφείς και ειδικούς. Κάποιες παρουσιάζονται απλά ενώ άλλες με σύνθετο τρόπο. Η ακόλουθη ταξινόμηση των αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιείται ήδη από κάποιον

εξειδικευμένο στον τομέα, αλλά αυτή είναι μια πολύ απλή ταξινόμηση των αισθητήρων. Σαν πρώτη ταξινόμηση των αισθητήρων χωρίζονται σε ενεργητικούς και παθητικούς αισθητήρες:

Ενεργητικοί: Απαιτούν ένα εξωτερικό σήμα διέγερσης ή ένα σήμα ισχύος.

Παθητικοί: Δεν απαιτούν κανένα εξωτερικό σήμα διέγερσης και παράγουν άμεσα απόκριση εξόδου.

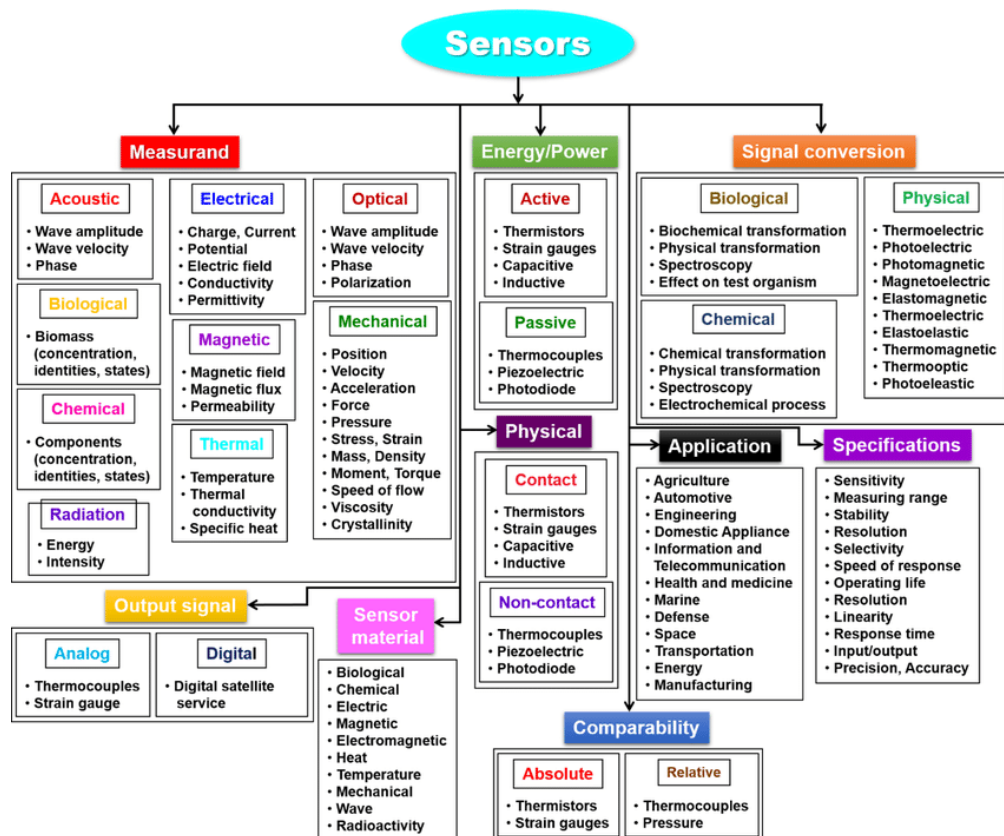
Η επόμενη διαφοροποίηση στηρίζεται στα μέσα ανίχνευσης που χρησιμοποιούνται στον αισθητήρα. Μερικά από τα μέσα ανίχνευσης είναι τα ηλεκτρικά, βιολογικά, χημικά, ραδιενεργά κ.λ.π. Η επόμενη ταξινόμηση βασίζεται στο φαινόμενο μετατροπής, δηλαδή την είσοδο και την έξοδο. Μερικά από τα κοινά φαινόμενα μετατροπής είναι τα φωτοηλεκτρικά, θερμοηλεκτρικά, ηλεκτροχημικά, ηλεκτρομαγνητικά, θερμοοπτικά, κ.λπ.

Μια σημαντική ταξινόμηση στον κόσμο των αισθητήρων είναι οι αναλογικοί και οι ψηφιακοί αισθητήρες. Οι αναλογικοί αισθητήρες παράγουν μια αναλογική έξοδο, δηλαδή ένα συνεχές σήμα εξόδου (συνήθως τάση αλλά μερικές φορές άλλες ποσότητες όπως η αντίσταση κ.λπ.) σχετιζόμενη με την ποσότητα που μετράται. Οι ψηφιακοί αισθητήρες, σε αντίθεση με τους αναλογικούς αισθητήρες, λειτουργούν με διακριτά ή ψηφιακά δεδομένα. Τα δεδομένα εξόδου στους ψηφιακούς αισθητήρες, τα οποία χρησιμοποιούνται για μετατροπή και μετάδοση, είναι ψηφιακής φύσης.^[1]

Ακόμη, οι αισθητήρες κατατάσσονται αναλόγως της έξοδού τους. Υπάρχουν τρία είδη. Οι αισθητήρες εξόδου τάσης, εξόδου ρεύματος και εξόδου συχνότητας. Οι εξόδου τάσης προτιμώνται συνήθως όταν τα καλώδια έχουν μικρό μήκος και το σύστημα δεν είναι θορυβώδες. Επίσης έχουν χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος. Αντιθέτως δεν προτιμώνται, όταν τα καλώδια έχουν μεγάλο μήκος, καθώς θα υπάρξει μεγάλη πτώση τάσης και το πιθανόν το αποτέλεσμα να εξάγεται λανθασμένα. Οι εξόδου ρεύματος, κρίνονται κατάλληλοι όταν το ρεύμα πρέπει να περάσει μέσα από καλώδια μεσαίου μήκους, πριν υποβληθεί σε επεξεργασία. Η αποστολή σήματος σε μεγαλύτερες αποστάσεις παράγει απώλειες τάσης στο σύστημα, ωστόσο το μέγεθος του ρεύματος στον βρόχο, δεν επηρεάζεται από πτώσεις τάσης στην καλωδίωση του συστήματος. Το άλλο πλεονέκτημα της χρήσης ενός βρόχου ρεύματος έναντι της τάσης είναι η εγγενής έλλειψη ευαισθησίας του βρόχου ρεύματος στον ηλεκτρικό θόρυβο. Οι αισθητήρες εξόδου συχνότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολύ μακριά καλώδια, χωρίς να διακυβεύεται η ακρίβεια της μετρούμενης συχνότητας και επομένως η υπολογισμένη καταπόνηση, πίεση κ.λπ.. Στην περίπτωση της αποκοπής του

καλωδίου και της επανασύνδεσης του, με ένα καλώδιο κακής ποιότητας, επιφέρεται αύξηση στην αντίσταση του καλωδίου. Ωστόσο, αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς η αντίσταση του καλωδίου δεν επηρεάζει την συχνότητα του σήματος, αλλά μόνο το πλάτος του. Ακόμη, το σήμα είναι ανθεκτικό στον επαγόμενο θόρυβο από ηλεκτρομαγνητικές πηγές και πηγές ραδιοσυχνοτήτων.^[2]

Υπάρχουν και άλλες υποκατηγοριοποιήσεις αλλά στα πλαίσια της εργασίας αυτή δε γίνεται εκτενέστερη ανάλυση. Στο παρακάτω σχήμα υπάρχει μια πιο αναλυτική κατηγοριοποίηση.



Σχήμα 1.2.1 Κατηγοριοποίηση των αισθητήρων^[3]

1.3 Μαγνητικοί αισθητήρες

Στα πλαίσια της εργασίας απαιτήθηκε η μελέτη και η κατανόηση των μαγνητικών αισθητήρων. Οι μαγνητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση διαταραχών και αλλαγών μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο όπως η ισχύς, η κατεύθυνση και η ροή. Συνήθως χωρίζονται σε δύο ομάδες, όπου η μία αναφέρεται στο μέτρο του μαγνητικού πεδίου και η άλλη στα διανυσματικά μεγέθη.^[4]

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός μαγνητικού αισθητήρα, στηρίζεται στην άμεση σχέση του μαγνητισμού και του ηλεκτρισμού. Συγκεκριμένα ένα

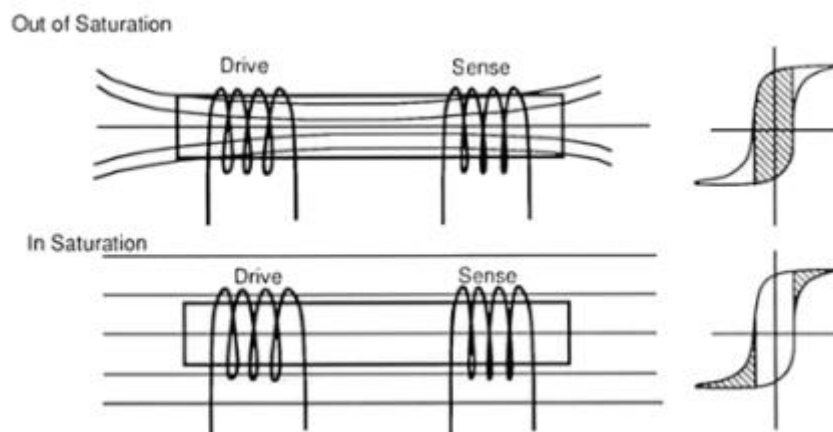
μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο περιβάλλει μια ροή μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Όπως προκύπτει από τους νόμους που όρισε ο Michael Faraday και αποτύπωσε σε εξισώσεις ο James Clerk Maxwell.

Σε αυτή την παράγραφο θα αναφερθούν κάποια είδη διανυσματικών μαγνητόμετρων. Υπάρχουν πολλά προβλήματα που επηρεάζουν τους περισσότερους διανυσματικούς αισθητήρες. Πρώτον, σχεδόν όλα τα διανυσματικά μαγνητόμετρα υποφέρουν από θόρυβο^[6], ειδικά από θόρυβο $1/f$ ^[7]. Ο θόρυβος $1/f$ ή αλλιώς όπως αποκαλείται, ροζ θόρυβος είναι θόρυβος χαμηλής συχνότητας για τον οποίο η ισχύς του θορύβου είναι αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας. Μια προσπάθεια μετριασμού της επίδρασης του θορύβου, είναι η εργασία που γίνεται σε μια συσκευή, τον συμπακνωτή ροής MEMS^[9-10], ο οποίος θα μετατοπίσει τη συχνότητα λειτουργίας πάνω από το εύρος όπου κυριαρχεί ο θόρυβος. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα με τα διανυσματικά μαγνητόμετρα, που συζητήθηκε ωρύτερα, είναι ότι επηρεάζονται από περιστροφικούς κραδασμούς.

Search-Coil Magnetometer: Σε μία ίσως ελληνική μετάφραση μαγνητόμετρο πηνίου λήψης. Η αρχή πίσω από το μαγνητόμετρο πηνίου λήψης είναι ο νόμος της επαγωγής του Faraday. Εάν αλλάξει η μαγνητική ροή μέσω ενός σπειροειδούς αγωγού, δημιουργείται τάση ανάλογη, με τον ρυθμό μεταβολής της ροής, μεταξύ των ακροδεκτών του. Η ροή διαμέσου του πηνίου θα αλλάξει, εάν το πηνίο βρίσκεται σε μαγνητικό πεδίο που μεταβάλλεται με το χρόνο, εάν το πηνίο περιστρέφεται σε ομοιόμορφο πεδίο, ή εάν το πηνίο κινείται μέσω ενός ανομοιόμορφου πεδίου. Συνήθως, μια ράβδος από σιδηρομαγνητικό υλικό με υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, εισάγεται μέσα στο πηνίο με σκοπό να «συγκεντρώσει» το περιβάλλον μαγνητικό πεδίο και να αυξήσει την πυκνότητα ροής (η διαπερατότητα ενός υλικού είναι ένα μέτρο του βαθμού στον οποίο τροποποιεί τη μαγνητική ροή στο υλικό). Το σήμα που ανιχνεύεται από ένα μαγνητόμετρο πηνίου λήψης, εξαρτάται από τη διαπερατότητα του υλικού του πυρήνα, την περιοχή του πηνίου, τον αριθμό των σπειρών και τον ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής μέσω του πηνίου. Η απόκριση συχνότητας του αισθητήρα, μπορεί να περιορίζεται από την αναλογία της επαγωγής του πηνίου προς την αντίστασή του, η οποία καθορίζει το χρόνο, που χρειάζεται το επαγόμενο ρεύμα για να διαλυθεί, όταν αφαιρεθεί το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Όσο μεγαλύτερη είναι η αυτεπαγωγή, τόσο πιο αργά διαχέεται το ρεύμα ενώ όσο μικρότερη είναι η αντίσταση, τόσο πιο γρήγορα διαχέεται. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η χωρητικότητα μεταξύ περιέλιξης μπορεί να περιορίσει την απόκριση συχνότητας. Ωστόσο στην πράξη, τα ηλεκτρονικά που

«διαβάζουν» τάση, μπορούν να περιορίσουν τόσο την ευαισθησία όσο και την απόκριση συχνότητας του αισθητήρα. Οι αισθητήρες αυτού του τύπου μπορούν να ανιχνεύσουν πεδία τόσο αδύναμα όσο 20 fT-nT και δεν υπάρχει ανώτατο όριο στο εύρος ευαισθησίας τους. Το χρήσιμο εύρος συχνοτήτων τους είναι τυπικά από 1 Hz έως 1 MHz, με το ανώτερο όριο να ορίζεται από την αναλογία της επαγωγής του πηνίου προς την αντίστασή του. Αυτό το είδος αισθητήρα αναλύθηκε εκτενώς καθώς αποτελεί σημαντικό σημείο αναφοράς για την εφαρμογή της συγκεκριμένης εργασίας.

Fluxgate – Magnetometer: Το μαγνητόμετρο fluxgate^[11] που απεικονίζεται στο σχήμα 1.3.1 αποτελείται από ένα σιδηρομαγνητικό υλικό τυλιγμένο με δύο πηνία, ένα πηνίο διέγερσης(οδήγησης) και ένα πηνίο λήψης(αίσθησης). Εκμεταλλεύεται τη μαγνητική επαγωγή μαζί με το γεγονός ότι όλο το σιδηρομαγνητικό υλικό φτάνει σε κορεσμό σε υψηλά πεδία. Αυτός ο κορεσμός μπορεί να φανεί στους βρόχους υστέρησης που φαίνονται στη δεξιά πλευρά στο σχήμα 1.3.1. Όταν εφαρμόζεται ένα αρκετά μεγάλο ημιτονοειδές ρεύμα στο πηνίο οδήγησης, ο πυρήνας φτάνει στη μαγνήτιση κορεσμού του, μία φορά κάθε μισό κύκλο.



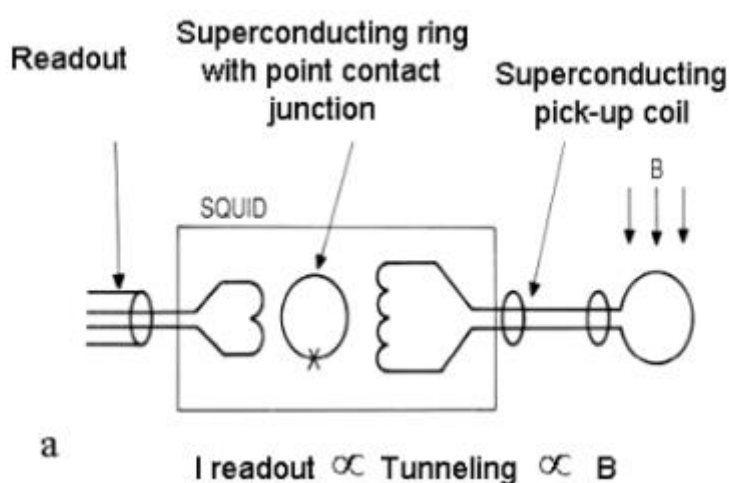
Σχήμα 1.3.1 Απεικόνιση των αρχών λειτουργίας των μαγνητόμετρων fluxgates. Το σήμα εξόδου διαμορφώνεται οδηγώντας τον μαλακό μαγνητικό πυρήνα μέσα και έξω από τον κορεσμό. Οι σκιασμένες περιοχές υποδεικνύουν τις περιοχές λειτουργίας.

Η ευαισθησία αυτού του αισθητήρα εξαρτάται από το σχήμα της καμπύλης υστέρησης. Για μέγιστη ευαισθησία, η καμπύλη μαγνητικής επαγωγής του μαγνητικού πεδίου (B-H) θα πρέπει να είναι τετράγωνη, επειδή αυτή παράγει την υψηλότερη επαγόμενη ηλεκτρομαγνητική δύναμη (emf), για μια δεδομένη τιμή του μαγνητικού πεδίου. Για ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, το υλικό πυρήνα πρέπει να έχει χαμηλές τιμές καταναγκασμού και κορεσμού. Το εύρος ευαισθησίας είναι από 10^{-2} έως 10^7 nT. Η

απόκριση συχνότητας του αισθητήρα περιορίζεται από το πεδίο διέγερσης και τον χρόνο απόκρισης του σιδηρομαγνητικού υλικού.

Superconductor Magnetometers:

- a) SQUID sensors (SQUID αισθητήρες): Το πιο ευαίσθητο από όλα τα όργανα για τη μέτρηση ενός μαγνητικού πεδίου σε χαμηλές συχνότητες (1 Hz) είναι η υπεραγώγιμη συσκευή κβαντικής παρεμβολής (SQUID)^{[12], [13]}, που απεικονίζεται στο σχήμα 1.3.2. Βασίζεται στις αξιοσημείωτες αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρικών ρευμάτων και των μαγνητικών πεδίων, που παρατηρούνται όταν ορισμένα υλικά ψύχονται κάτω από μια υπεραγώγιμη θερμοκρασία μετάπτωσης. Σε αυτή τη θερμοκρασία, τα υλικά γίνονται υπεραγωγοί και χάνουν κάθε αντίσταση στη ροή του ηλεκτρισμού.

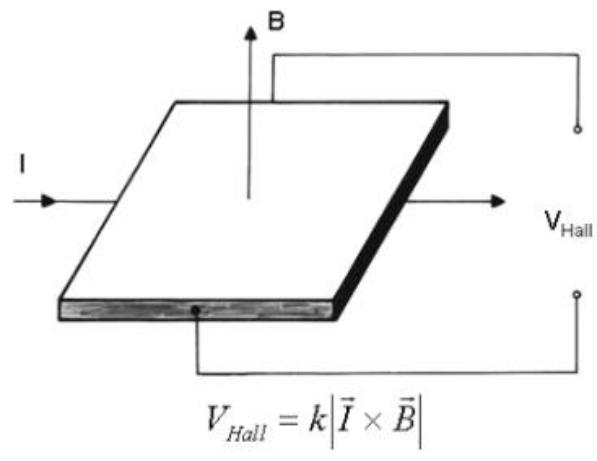


Σχήμα 1.3.2 Σχηματικό του SQUID

- b) Meissner effect (Φαινόμενο Meissner): Τα επαγόμενα ρεύματα στους υπεραγωγούς αποκλείουν τα μαγνητικά πεδία κάτω από ένα κρίσιμο πεδίο. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται φαινόμενο Meissner^[14].

Hall Effect Sensor (Φαινόμενο Hall)^[15] είναι ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος αισθητήρας χαμηλού κόστους του οποίου η λειτουργία απεικονίζεται στο σχήμα 1.3.3. Ο αισθητήρας εκμεταλλεύεται ένα φυσικό φαινόμενο που ανακαλύφθηκε από τον Edwin H. Hall πριν από περισσότερα από 100 χρόνια. Βρήκε ότι μια διαφορά τάσης εμφανίζεται, σε ένα λεπτό ορθογώνιο χρυσού, τοποθετημένο σε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο, κάθετο στο επίπεδο του ορθογώνιου όταν στέλνεται ηλεκτρικό ρεύμα κατά μήκος του. Ένα ηλεκτρόνιο που κινείται μέσα από ένα μαγνητικό πεδίο δέχεται μια δύναμη, γνωστή ως δύναμη Lorentz, η οποία είναι κάθετη τόσο προς την κατεύθυνση

της κίνησής του όσο και προς την κατεύθυνση του πεδίου. Η απόκριση σε αυτή τη δύναμη δημιουργεί την τάση Hall. Το φαινόμενο Hall είναι πολύ μικρό στους μεταλλικούς αγωγούς, αλλά ένας ημιαγωγός δίνει πολύ μεγαλύτερο αποτέλεσμα. Δεδομένου ότι υπάρχουν λιγότερα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας σε έναν ημιαγωγό, εάν το συνολικό ρεύμα μέσω αυτού είναι το ίδιο με αυτό μέσω ενός μετάλλου, τα ηλεκτρόνια στον ημιαγωγό πρέπει να έχουν πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα μετατόπισης από αυτά στο μέταλλο. Όσο πιο γρήγορα κινούνται τα ηλεκτρόνια, τόσο ισχυρότερη είναι η δύναμη που βιώνουν και τόσο αυξάνεται η τάση Hall που παράγεται σε κατάσταση ισορροπίας.



Σχήμα 1.3.3 Σχηματικό του αισθητήρα φαινομένου Hall

Magneto resistive Magnetometers: Τα μαγνητόμετρα με αντίσταση ΔR ^[16] χρησιμοποιούν μια αλλαγή στην αντίσταση που προκαλείται από ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο H. Τα μαγνητόμετρα αυτά είναι πολύ ελκυστικά για εφαρμογές χαμηλού κόστους, επειδή απλά ενεργοποιούνται με την εφαρμογή σταθερού ρεύματος και η τάση εξόδου είναι ένα μέτρο του μαγνητικού πεδίου.

Spin-Valve Transistors (Τρανζίστορ βαλβίδας περιστροφής): Τα τρανζίστορ βαλβίδας περιστροφής^[17] αποτελούν βαλβίδες περιστροφής τοποθετημένες μεταξύ ενός ζεύγους ημιαγωγών, ο ένας από τους οποίους είναι ο εκπομπός και ο άλλος ο συλλέκτης. Το ρεύμα μέσω της συσκευής αλλάζει ως συνάρτηση του μαγνητικού πεδίου. Έχουν παρατηρηθεί αλλαγές ρεύματος με αυξανόμενο μαγνητικό πεδίο έως και 200%, αλλά, προς το παρόν, τα ρεύματα εξόδου είναι τάξης μικροαμπερ και είναι πολύ μικρά για τις περισσότερες εφαρμογές αισθητήρων.

Giant Magnetoimpedance (GMI) Magnetic Sensors: Η σύνθετη αντίσταση των άμορφων συρμάτων και ταινιών (amorphous wires and ribbons) μειώνεται απότομα^[18] ^[19], σε πεδία μικρότερα από 50 Oe. Το φαινόμενο έχει ονομαστεί φαινόμενο GMI. Η

σύνθετη αντίσταση εξαρτάται τόσο από το μαγνητικό πεδίο όσο και από την συχνότητα του ρεύματος κίνησης. Για ομοιόμορφα, μονοφασικά υλικά, η αρχή του φαινομένου είναι η εξάρτηση από την σύνθετη αντίσταση του βάθους του επιφανειακού στρώματος, η οποία είναι συνάρτηση της εγκάρσιας διαπερατότητας [20]. Για τα σύνθετα σύρματα NiFe/Cu, το μέγεθος της αλλαγής της σύνθετης αντίστασης κορυφώνεται σε συχνότητα αρκετών MHz που εξαρτάται από την επεξεργασία ανόπτησης του σύρματος. Για να χρησιμοποιηθεί το φαινόμενο απαιτείται χρήση ρευμάτων μονάδας GHz.

Magnetodiode (Μαγνητοδίοδος): Μια μαγνητοδίοδος είναι ουσιαστικά μια δίοδος ημιαγωγών, ή pn επαφή. Σε μια μαγνητοδίοδο, ωστόσο, η p περιοχή διαχωρίζεται από την n περιοχή, από μία περιοχή μη εμποτισμένου πυριτίου. Η συσκευή κατασκευάζεται με εναπόθεση πυριτίου και στη συνέχεια, διοξειδίου του πυριτίου σε ένα υπόστρωμα ζαφειριού. Εάν μια επαφή μετάλλου στην p περιοχή με πρόσμιξη, έχει θετικό δυναμικό και μια μεταλλική επαφή στην n περιοχή με πρόσμιξη, έχει αρνητικό δυναμικό, οπές στο υλικό τύπου p και ηλεκτρόνια στο υλικό τύπου n, θα εγχυθούν στο μη εμποτισμένο πυρίτιο. Το ρεύμα είναι το άθροισμα του ρεύματος των οπών και του ρεύματος ηλεκτρονίων.

Magnetotransistor: Αυτός ο αισθητήρας, όπως και η μαγνητοδίοδος, είναι μια ενσωματωμένη συσκευή πυριτίου. Όπως το τρανζίστορ, αποτελείται από έναν εκπομπό με n πρόσμιξη που διαχωρίζεται, από έναν συλλέκτη με p πρόσμιξη με μια βάση με p πρόσμιξη. Η διαφορά είναι ότι υπάρχουν δύο συλλέκτες αντί για έναν. Ελλείψει μαγνητικού πεδίου, ίσος αριθμός φορέων φορτίου φτάνει και στους δύο συλλέκτες. Εάν υπάρχει ένα μαγνητικό πεδίο κάθετο στην διεύθυνση της διαδρομής των φορέων φορτίου, αυτοί εκτρέπονται προς τον έναν ή τον άλλο συλλέκτη, ανάλογα με την διεύθυνση του πεδίου. Οι τάσεις των δύο συλλεκτών τροφοδοτούνται σε έναν διαφορικό ενισχυτή, του οποίου η έξοδος είναι ανάλογη του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.

Σε αυτή την παράγραφο θα αναφερθούν κάποια είδη βαθμωτών μαγνητόμετρων. Τα μαγνητόμετρα βαθμωτού πεδίου έχουν το σημαντικό πλεονέκτημα της μη ευαισθησίας στις περιστροφικές δονήσεις. Τα μαγνητόμετρα βαθμωτού πεδίου χρησιμοποιούν το γεγονός, ότι η διάσπαση μεταξύ ορισμένων επιπέδων ενέργειας ηλεκτρονίων ή πυρηνικού σπιν, είναι ανάλογη με το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου σε ένα εύρος πεδίου επαρκές για μαγνητομετρία. Η απόκτηση υψηλής ευαισθησίας, απαιτεί τη χρήση συντονισμών με στενές γραμμές με μεγάλη διάρκεια ζωής. Τέτοιες

γραμμές, περιορίζουν τη συχνότητα δειγματοληψίας. Έτσι, η ευαισθησία αυτών των μαγνητομέτρων μειώνεται γρήγορα για συχνότητες πάνω από 10 Hz.

Optically Pumped Magnetometer: Ένα optically pumped magnetometer εκμεταλλεύεται τρεις ενεργειακές καταστάσεις, που είναι διαθέσιμες στο απλό ηλεκτρόνιο σθένους του καισίου: δύο χαμηλότερες καταστάσεις που είναι κοντά μεταξύ τους, και μία κατάσταση με πολύ υψηλότερη ενέργεια. Η διαφορά ενέργειας μεταξύ των κατώτερων καταστάσεων, αντιστοιχεί σε μια φασματική γραμμή ραδιοσυχνότητας ή σε μια συχνότητα μικροκυμάτων. Η μετάβαση μεταξύ μιας από τις χαμηλότερες ενεργειακές καταστάσεις και της υψηλότερης κατάστασης αντιστοιχεί σε μια φασματική γραμμή στην οπτική περιοχή.

Nuclear-Precession Magnetometer:

Το μαγνητόμετρο, εκμεταλλεύεται την απόκριση σε ένα μαγνητικό πεδίο των πυρηνικών ροπών των ατόμων σε ένα ρευστό υδρογονάνθρακα όπως το βενζόλιο. Η κλίμακα των ατομικών και πυρηνικών ροπών ορίζεται από το μαγνητρόνιο Bohr $e\hbar/(2\pi m)$, όπου e είναι το ηλεκτρονικό φορτίο, \hbar είναι η σταθερά του Planck και m είναι η μάζα. Δεδομένου ότι οι πυρήνες έχουν μάζες πολύ μεγαλύτερες από τη μάζα του ηλεκτρονίου, οι πυρηνικές μαγνητικές ροπές είναι πολύ μικρότερες από τις ηλεκτρονικές ροπές.

Τα πρωτόνια σε ένα ρευστό μπορούν να ευθυγραμμιστούν προσωρινά, από το ομοίμορφο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ένα ρεύμα μέσω ενός πηνίου. Όταν το ρεύμα πόλωσης είναι απενεργοποιημένο, τα πρωτόνια θα αρχίσουν να προχωρούν γύρω από το μαγνητικό πεδίο του περιβάλλοντος. Ο άξονας spin ενός πρωτονίου που είναι εκτός ευθυγράμμισης με σταθερό μαγνητικό πεδίο, όπως ο άξονας ενός γυροσκοπίου εκτός ευθυγράμμισης με ένα βαρυτικό πεδίο, διαγράφει έναν κύκλο γύρω από μια ευθεία παράλληλη στο πεδίο. Ο ρυθμός με τον οποίο ανιχνεύεται αυτός ο κύκλος, που ονομάζεται συχνότητα μετάπτωσης, είναι ανάλογος με την ισχύ του μαγνητικού πεδίου. Έτσι, τα πρωτόνια που προηγούνται παράγουν ένα σήμα στο πηνίο του οποίου η συχνότητα είναι ανάλογη με την ισχύ του μαγνητικού πεδίου.

Overhauser Magnetometer:

Τα μαγνητόμετρα Overhauser χρησιμοποιούν ένα φαινόμενο που είχε προβλέψει ο Overhauser όταν ήταν μεταπτυχιακός φοιτητής στο Berkeley τη δεκαετία του 1950. Προέβλεψε ότι σε ορισμένα συστήματα μπορεί να επιτευχθεί αύξηση κατά 1000, στην πυρηνική πόλωση φτάνοντας στον κορεσμό τον συντονισμό του spin των ηλεκτρονίων.

Αυτή η αύξηση συμβαίνει, επειδή τα σπιν πρωτονίων και τα σπιν ηλεκτρονίων αλληλεπιδρούν μέσω του υπερλεπτού όρου της Hamiltonian αναπαράστασης. Αυτός ο όρος, είναι ανάλογος με το διανυσματικό γινόμενο του σπιν ηλεκτρονίων και του πυρηνικού σπιν. Η ουσία που χρησιμοποιείται στα μαγνητόμετρα Overhauser είναι ένα υγρό που περιέχει πρωτόνια και ελεύθερες ρίζες. Οι ελεύθερες ρίζες είναι μόρια με ασύζευκτα ηλεκτρόνια που έχουν πλάτη γραμμής συντονισμού ηλεκτρονίων που είναι πολύ στενά, περίπου 1 Oe ή 10^5 nT. Το μαγνητικό πεδίο προσδιορίζεται με τη μέτρηση της συχνότητας μετάπτωσης πρωτονίων που είναι ανάλογη με το μαγνητικό πεδίο. Η αυξημένη πόλωση πρωτονίων αυξάνει την ισχύ του σήματος. Τα μαγνητόμετρα Overhauser μπορούν να επιτύχουν επίπεδα θορύβου 0,015 nT/rt Hz στο 1 Hz. Τα μαγνητόμετρα Overhauser είναι μια τάξη μεγέθους πιο ευαίσθητα από τα μαγνητόμετρα μετάπτωσης πρωτονίων και δεν έχουν νεκρές ζώνες.

1.4 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης (MDL)

Η μαγνητοσυστολή, μια ιδιαίτερη επίδραση στα μαγνητικά υλικά, έχει διερευνηθεί διεξοδικά ως προς τη θεωρία και τη μοντελοποίησή της, καθώς και από την άποψη των πειραματικών λεπτομερειών και εφαρμογών. Η θεωρία της βασίζεται κυρίως στις αρχές της μικρομαγνητικής. Οι εφαρμογές αφορούν αισθητήρες και ενεργοποιητές, που απαιτούν υλικά μηχανικής σταθεράς μαγνητοσυστολής της τάξης των 30 και 1000 ppm, αντίστοιχα. Μια τεχνική που χρησιμοποιεί το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη αισθητήρων που μετρούν τη μετατόπιση, την τάση και το πεδίο είναι η τεχνική της μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης (MDL)^[21-29].

Πιο συγκεκριμένα σε μία διάταξη γραμμής καθυστέρησης, υπολογίζεται η χρονική διαφορά μεταξύ του σήματος εισόδου και εξόδου, για την μέτρηση του επιθυμητού μεγέθους, ενώ το μαγνητοσυστολικό φαινόμενο είναι μία ιδιότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών, όπου συστέλλονται ή διαστέλλονται, με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου και αντιστρόφως. Επομένως, ένας αισθητήρας MDL μπορεί να υλοποιηθεί με διέγερση του σήματος εξόδου και λήψης του σήματος εισόδου, μέσω μαγνητοσυστολής ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, και να υπολογιστεί το επιθυμητό μέγεθος, με μέτρηση της χρονικής διαφοράς των δύο παραπάνω σημάτων. Αυτό το είδος αισθητήρων μπορεί να ενσωματωθεί σε εφαρμογές μέτρησης θέσης, μετατόπισης, μηχανικής τάσης και πίεσης αλλά και μαγνητικού πεδίου, με ικανοποιητική ακρίβεια, χαμηλό κόστος και μικρή πολυπλοκότητα. Να προστεθεί ότι

εκτός από την καθυστέρηση παρατηρώντας αλλαγές στο πλάτος του σήματος ή στον μετασχηματισμό FOURIER (FFT) παρατηρούνται κάποια χρησιμοποιήσιμα φαινόμενα που θα αναφερθούν παρακάτω.

1.5 Στόχος της εργασίας

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, επιχειρείται να δοθεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση του φαινομένου της μαγνητοσυστολής καθώς και της τεχνικής των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης στην οποία στηρίζεται η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα ανίχνευσης παραμορφώσεων σε σιδηρομαγνητικά υλικά αλλά και στιγμιαίων δυνάμεων που ασκούνται πάνω του.

Βασικός στόχος της διπλωματικής είναι η κατασκευή αισθητήρα ελέγχου εσωτερικών τάσεων στον χάλυβα. Ο αισθητήρας έχει ως σκοπό την χρησιμοποίηση του σε γραμμή παραγωγής σιδηρομαγνητικών υλικών, στην συγκεκριμένη εφαρμογή χάλυβα, ως εργαλείο ανίχνευσης ελαττωματικών κομματιών. Αυτό έχει διάφορα πλεονεκτήματα καθώς η αυτοματοποίηση του συστήματος είναι αρκετά εύκολη, φθηνή και σε μεγάλο ποσοστό αξιόπιστη (ικανοποιεί τα πρότυπα της βιομηχανίας). Σε επόμενα κεφάλαια θα αναλυθεί εκτενώς η διάταξη του συστήματος που χρησιμοποιήθηκε για τον στόχο της εργασίας, πως υλοποιήθηκε και τον λόγο της υλοποίησης της με μία συγκεκριμένη μεθοδολογία. Συμπληρωματικά, θα παρουσιαστεί το μηχανολογικό κομμάτι και το ηλεκτρονικό κομμάτι (τα απαραίτητα κυκλώματα). Στο πειραματικό στάδιο θα παρατεθούν τα αποτελέσματα των σημάτων που λήφθηκαν.

Συνοψίζοντας, ο χαρακτήρας της εργασίας είναι κατασκευαστικός και αποσκοπεί στην υλοποίηση του αισθητήρα με βάση την θεωρία και την διαθέσιμη βιβλιογραφία. Το εργαστήριο αισθητηρίων του ΕΜΠ παρείχε τα απαραίτητα υλικά και εξαρτήματα για το μηχανολογικό κομμάτι όσο και για το ηλεκτρονικό. Τα μέλη του εργαστηρίου προσέφεραν σημαντική τεχνογνωσία και καθοδήγηση για την πραγματοποίηση της εργασίας.

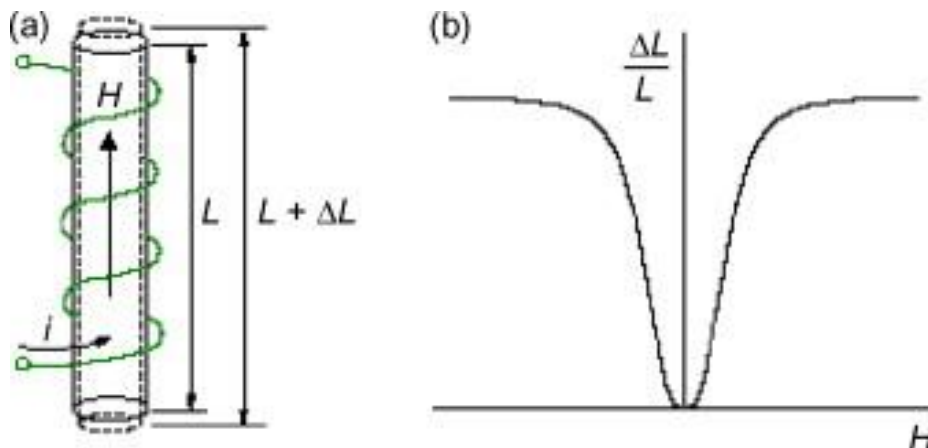
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΗ

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα μελετηθεί λεπτομερώς η έννοια της μαγνητοσυστολής, η οποία συνδέεται στενά με τους μηχανισμούς των μαγνητικών περιοχών μέσα στα υλικά. Ακόμα θα γίνει αναφορά στα άμορφα υλικά, που παρουσιάζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά, κατάλληλα για εφαρμογές αισθητήρων.

2.1 Μαγνητοσυστολή

Ένα μαγνητοσυστολικό υλικό θα αλλάξει σχήμα όταν τοποθετηθεί σε ένα μαγνητικό πεδίο. Τα περισσότερα σιδηρομαγνητικά υλικά παρουσιάζουν κάποια μετρήσιμη μαγνητοσυστολή. Δεδομένου ότι το φαινόμενο περιλαμβάνει μια αμφίδρομη ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ μαγνητικών και ελαστικών καταστάσεων, αυτά τα υλικά παρέχουν έναν μηχανισμό τόσο για εφαρμογές ενεργοποίησης όσο και για εφαρμογές ανίχνευσης. Χρησιμοποιούνται επίσης με επιτυχία σε μια μεγάλη ποικιλία συσκευών για τον έλεγχο των κραδασμών του μηχανολογικού εξοπλισμού.

Η φύση αυτού του φαινομένου απεικονίζεται στο σχήμα 2.1.1. Μια ράβδος από ένα μαγνητικό υλικό μήκους L , φαίνεται να περιβάλλεται από ένα πηνίο σύρματος, που μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα έτσι ώστε ένα μαγνητικό πεδίο, H , να παράγεται κατά μήκος της ράβδου (a). Με το ρεύμα που ρέει, το μήκος της ράβδου αυξάνεται κατά ένα μικρό ποσό ΔL . Το στέλεχος $\Delta L/L$ ονομάζεται μαγνητοσυστολή (για το οποίο χρησιμοποιείται το σύμβολο λ).^[31]



Σχήμα 2.1.1 Μαγνητοσυστολή Joule. (a) Οι αλλαγές στο σχήμα ως απόκριση στο μαγνητικό πεδίο H . Το πεδίο H είναι ανάλογο του ρεύματος που διέρχεται (i), όπως φαίνεται στο σχήμα. (b) Το γράφημα $H(\frac{\Delta L}{L})$

Το σχήμα 2.1.1(a) δείχνει ακόμα ότι εκτός από την αύξηση του μήκους προς την κατεύθυνση του πεδίου, υπάρχει επίσης, συνήθως μείωση του μήκους στις κάθετες

κατευθύνσεις, και ως αποτέλεσμα αυτού, ο όγκος της ράβδου παραμένει σχεδόν, αλλά όχι αρκετά, σταθερός. Το σχήμα 2.1.1 (β) αποκαλύπτει δύο σημαντικά χαρακτηριστικά της μαγνητοσυστολής: πρώτον, για υψηλές τιμές H , το λ φτάνει τελικά σε μια σταθερή τιμή $\lambda_{\text{saturation}}$, υποδεικνύοντας κορεσμό, και δεύτερον, το πρόσημο του λ δεν αλλάζει όταν το πεδίο H γίνεται αρνητικό. Η ράβδος αυξάνεται σε μήκος τόσο για θετικές όσο και για αρνητικές τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου. (Η μαγνητοσυστολή είναι επομένως ένα φαινόμενο δεύτερης τάξης [32].)

Παρατίθενται τα κύρια μαγνητοσυστολικά αποτελέσματα που παρατηρήθηκαν πειραματικά:

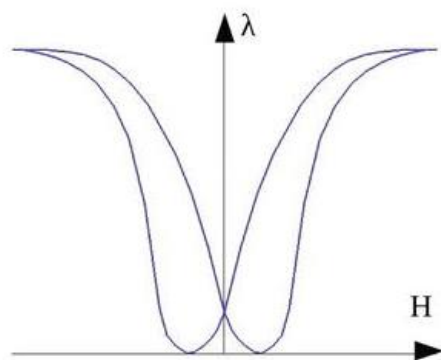
- Το φαινόμενο Joule. Αυτό μπορεί να είναι μια επέκταση ή μια συστολή στην ίδια κατεύθυνση με το μαγνητικό πεδίο ή σε κάποια άλλη κατεύθυνση.
- Το φαινόμενο όγκου (ογκομετρική επέκταση), ένα πολύ αδύναμο αποτέλεσμα.
- Το φαινόμενο Wiedemann (μια απόκριση διατμητικής τάσης στο μαγνητικό πεδίο, ανάλογη με την τάση εφελκυσμού ή συμπίεσης που παράγεται στο φαινόμενο Joule). Επιπλέον, παρατηρούνται αντίστροφες επιδράσεις, όπως το φαινόμενο Villari. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μια αλλαγή στη μαγνητική διαπερατότητα ως απόκριση σε μια εφαρμοζόμενη τάση. Αυτό αναφέρεται επίσης ως μαγνητοσυστολικό ή μαγνητομηχανικό φαινόμενο. Για τις περισσότερες εφαρμογές μορφοτροπέα (transducer) η μέγιστη δύναμη ή κίνηση, επιθυμείται ως έξοδος, και έτσι το φαινόμενο Joule ή το αντίστροφο του (Villari), είναι τα πιο χρήσιμα στην τεχνολογία. Επομένως, στην συνέχεια θα γίνει λόγος κυρίως σε αυτές τις επιπτώσεις. Πληροφορίες για άλλα φαινόμενα μπορούν να βρεθούν στην αναφορά [33].

2.2 Φαινόμενο Joule και Villari

Ένα σιδηρομαγνητικό υλικό με σχήμα παραλληλεπίπεδου επιμηκύνεται ή συρρικνώνεται κάτω από ένα μαγνητικό πεδίο σύμφωνα με το διάμηκες φαινόμενο Joule. Η αλλαγή της μαγνήτισης όταν υποβάλλεται σε μηχανική καταπόνηση είναι γνωστή ως φαινόμενο Villari. Αυτά τα φαινόμενα απεικονίζονται από τις καμπύλες μαγνητοσυστολής υλικού που περιγράφουν τη μεταβολή της σχετικής παραμόρφωσης $\lambda = \frac{\Delta L}{L}$, όπου L είναι το μήκος του δείγματος, έναντι H του μαγνητικού πεδίου που εφαρμόζεται στο υλικό.

Μια τυπική καμπύλη χαρακτηρίζεται από μία μέγιστη τιμή, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.1. Επιπλέον, παρατηρεί κανείς, ξεκάθαρα κάποια υστέρηση που ονομάζεται «βρόχος πεταλούδας», λόγω του συμμετρικού σχήματός της καμπύλης. Στο επόμενο μέρος, οι καμπύλες περιορίζονται στα θετικά πεδία. Η ασυμπτωτική επιμήκυνση ή συρρίκνωση, προκαλεί μαγνητοσυστολή κατά τον κορεσμό• η μέγιστη τιμή λ_s αντιστοιχεί στον μαγνητοσυστολικό συντελεστή κορεσμού, δηλαδή τη δύναμη της μαγνητοελαστικής σύζευξης, η οποία μπορεί επομένως να είναι είτε θετική είτε αρνητική, αντιστοίχως. Συνήθως η τιμή αυτή συναντάται κοντά στο 10^{-6} , αλλά θα μπορούσε να αυξηθεί έως και 10^{-3} στην περίπτωση του Terfenol-D ($Tb_xDy_{1-x}Fe_2$, $x \sim 0,3$), η οποία συμπεριφέρεται ως το καλύτερο μαγνητοσυστολικό υλικό. Η μαγνητοσυστολή μπορεί να περιγραφεί με μια τετραγωνική συνάρτηση και το πρόσημο εξαρτάται αυστηρά από το υλικό, όχι από την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Να σημειωθεί ότι διαφέρει από τον πιεζομαγνητισμό (ανάλογα πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο), ο οποίος χαρακτηρίζεται από μια γραμμική σύζευξη μεταξύ της μηχανικής καταπόνησης και της μαγνητικής πόλωσης.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η συνάρτηση $\lambda(H)$ δεν είναι γραμμική και θα μπορούσε να είναι πιο τραχιά από την τυπική (σχήμα 2.2.1). Επιπλέον, η παραμόρφωση δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το μαγνητικό πεδίο. Πράγματι, μεταξύ των άλλων παραμέτρων, η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο• όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, η επιμήκυνση μειώνεται καθώς μειώνεται η μαγνήτιση. Οι καμπύλες μαγνητοσυστολής εξαρτώνται και από την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου σε σχέση με τους άξονες εύκολης μαγνήτισης, δηλαδή από το σχήμα, τη χημική καθαρότητα του δείγματος και τη θερμομαγνητική ιστορία του^[34].



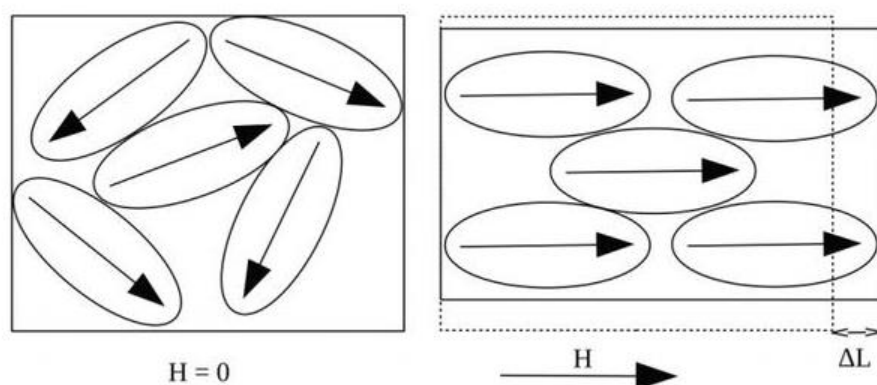
Σχήμα 2.2.1 Σε μορφή βρόγχου πεταλούδας

2.3 Εξήγηση του φαινομένου της μαγνητοσυστολής

Οι δύο μεγαλύτερες συνεισφορές στα μαγνητικά φαινόμενα προκύπτουν λόγω των κινήσεων των ασύζευκτων ηλεκτρονίων. Επειδή τα ηλεκτρόνια περιστρέφονται, παράγεται ένα μαγνητικό πεδίο και επειδή τα ηλεκτρόνια κινούνται επίσης σε τροχιακά γύρω από τον ατομικό πυρήνα, παράγεται επίσης ένα άλλο μαγνητικό πεδίο. Υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των μαγνητικών πεδίων, η οποία προκαλεί τα spins διαφορετικών μη ζευγαρωμένων ηλεκτρονίων κοντά το ένα στο άλλο να ευθυγραμμιστούν κατά μήκος της ίδιας κατεύθυνσης, και υπάρχει επίσης μια αλληλεπίδραση που προκαλεί την ευθυγράμμιση των τροχιακών επίσης προς την ίδια κατεύθυνση, εάν υπάρχει ελευθερία να γίνει^[35]. Ωστόσο, στα κρυσταλλικά στερεά τα άτομα είναι διατεταγμένα σε κανονικά σχέδια και η απόσταση μεταξύ ενός ατόμου ή ιόντος και των γειτόνων του είναι σταθερή εντός ορισμένων ορίων. Οι γενικές ελκτικές δυνάμεις αναγκάζουν τα άτομα να πλησιάζουν το ένα το άλλο και να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά το ένα στο άλλο. Ωστόσο, ο περιοριστικός παράγοντας που αντιτίθεται σε αυτή την κίνηση είναι τα τροχιακά των εξωτερικών ηλεκτρονίων κάθε ατόμου ή ιόντος. Τα τροχιακά ηλεκτρονίων συνήθως απεικονίζονται ως κυκλικά, αλλά αυτό ισχύει μόνο για τα μικρότερα και απλούστερα άτομα ή για τα εσωτερικά ηλεκτρόνια σε πιο πολύπλοκα άτομα. Στα μαγνητικά υλικά που παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον, τα εξωτερικά τροχιακά ηλεκτρονίων είναι πολύ ασύμμετρα, επιμήκη προς μια κατεύθυνση και πεπλατυσμένα προς μια άλλη. Επίσης στα κρυσταλλικά πλέγματα η απόσταση μεταξύ ενός μεμονωμένου ατόμου ή ιόντος και του πλησιέστερου γείτονά του εξαρτάται από το πού βρίσκεται αυτός ο γείτονας. Για άτομα διατεταγμένα σε ορθογώνιο μοτίβο, ο πλησιέστερος γείτονας είναι το επόμενο άτομο στη σειρά, αλλά το πλησιέστερο σε κατεύθυνση στις 90° προς αυτή τη σειρά μπορεί να είναι πιο μακριά και το πλησιέστερο σε κατεύθυνση στις 45° στη σειρά είναι πιθανό να είναι ακόμα πιο μακριά, και ούτω καθεξής. Επομένως, στα περισσότερα κρυσταλλικά πλέγματα υπάρχει περιθώριο για την υποδοχή τροχιακών ηλεκτρονίων, τα οποία είναι επιμήκη προς μία κατεύθυνση.

Συνεπάγεται ότι υπάρχουν κατευθύνσεις που είναι συγκεκριμένες για ορισμένους κρυστάλλους όπου είναι εύκολο να μαγνητιστεί το υλικό και, ως αποτέλεσμα, μικρές ομάδες ατόμων ή ιόντων τείνουν να οργανώνονται αυθόρμητα σε μαγνητικές περιοχές όπου τα spins και τα τροχιακά των μη ζευγαρωμένων ηλεκτρονίων είναι όλα ευθυγραμμισμένα. Ωστόσο, οι περιοχές δεν μπορούν να είναι πολύ μεγάλες

λόγω ενεργειακών εκτιμήσεων. Εάν δεν επιβληθεί εξωτερικό μαγνητικό πεδίο στο υλικό, η ενέργεια ελαχιστοποιείται όταν υπάρχει μεγάλος αριθμός περιοχών σε ένα δείγμα υλικού, με το μαγνητικό πεδίο σε κάθε τομέα να προσανατολίζεται σε διαφορετική κατεύθυνση.



Σχήμα 2.3.1 Σχηματική εικόνα που απεικονίζει τη μαγνητο συστολή που προκαλείται από την περιστροφή της μαγνήτισης

2.4 Μαγνητικές περιοχές

Μια μαγνητική περιοχή ορίζεται ως μια περιοχή μέσα σε ένα μαγνητικό υλικό, στην οποία η μαγνήτιση διαμορφώνεται σε ομοιόμορφη κατεύθυνση. Αυτό συνιστά ότι οι μεμονωμένες μαγνητικές ροπές των ατόμων εμφανίζονται ευθυγραμμισμένες μεταξύ τους και δείχνουν προς την ίδια κατεύθυνση. Όταν ψύχεται κάτω από μια θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Κιουρί, η μαγνήτιση ενός κομματιού σιδηρομαγνητικού υλικού, διαιρείται αυθόρμητα σε πολλές μικρές περιοχές που ονομάζονται μαγνητικές περιοχές. Η μαγνήτιση σε κάθε τομέα, δείχνει προς μια ομοιόμορφη κατεύθυνση, αλλά η μαγνήτιση διαφορετικών περιοχών, μπορεί να δείχνει προς διαφορετικές κατευθύνσεις. Η δομή του μαγνητικού τομέα, ευθύνεται για τη μαγνητική συμπεριφορά σιδηρομαγνητικών υλικών όπως ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο και τα κράματά τους. Αυτό περιλαμβάνει το σχηματισμό μόνιμων μαγνητών και την έλξη σιδηρομαγνητικών υλικών σε ένα μαγνητικό πεδίο. Οι περιοχές που διαχωρίζουν τις μαγνητικές περιοχές ονομάζονται τοιχώματα περιοχών, όπου η μαγνήτιση περιστρέφεται συνεκτικά, από την κατεύθυνση σε μια περιοχή σε αυτήν στην επόμενη περιοχή. Η μελέτη των μαγνητικών περιοχών ονομάζεται μικρομαγνητική.

Οι μαγνητικές περιοχές σχηματίζονται σε υλικά που έχουν μαγνητική διάταξη, δηλαδή τα δίπολά τους ευθυγραμμίζονται αυθόρμητα λόγω της αλληλεπίδρασης

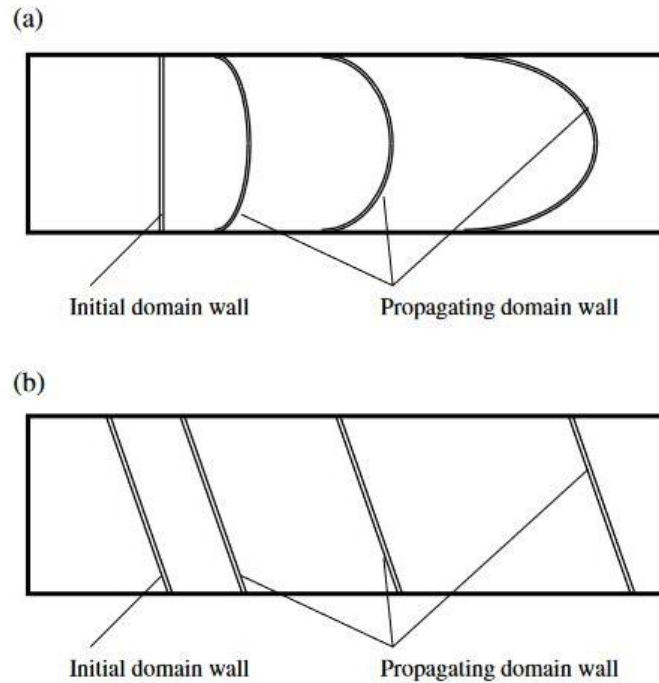
ανταλλαγής. Αυτά είναι τα σιδηρομαγνητικά και αντισιδηρομαγνητικά υλικά. Τα παραμαγνητικά και διαμαγνητικά υλικά, στα οποία τα δίπολα ευθυγραμμίζονται ως απόκριση σε ένα εξωτερικό πεδίο αλλά δεν ευθυγραμμίζονται αυθόρμητα, δεν έχουν μαγνητικές περιοχές.

2.5 Μαγνητικά φαινόμενα σε εφαρμογές αισθητήρων

Σε αυτήν την ενότητα, θα αναλυθούν τα φαινόμενα της διάδοσης των μαγνητικών τοιχωμάτων, της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών καθώς και άλλοι εξαρτώμενοι μηχανισμοί (dependent mechanisms) που αξιοποιούνται κατά τη σχεδίαση μαγνητικών αισθητήρων.

Διάδοση μαγνητικών τοιχωμάτων (Domain wall dynamics):

Η διάδοση των μαγνητικών τοιχωμάτων, και η αντίστοιχη χρήση τους σε εφαρμογές αισθητήρων, αφορά την πυρήνωση και την κινητικότητα ή διάδοσή τους στη μαγνητική ουσία.^[45] Υπάρχουν δύο μηχανισμοί διάδοσης μαγνητικών τοιχωμάτων. Η πρώτη διαδικασία ονομάζεται bowing process ενώ η δεύτερη είναι η παράλληλη κίνηση των τοιχωμάτων (parallel motion of the domain walls). Ο τρόπος διάδοσης εξαρτάται από την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στα τοιχώματα. Τοιχώματα χαμηλής ενέργειας διαδίδονται μέσω του bowing process όπως φαίνεται δηλαδή στο σχήμα 2.5.1(α). Τοιχώματα υψηλής ενέργειας διαδίδονται πιο άκαμπτα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5.1(b).^[21]



Σχήμα 2.5.1 Διάδοση μαγνητικών τοιχωμάτων. (α) Διάδοση μέσω του bowing process, (β) Άκαμπτη διάδοση μέσω της παράλληλης κίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων.^[21]

Η διαδικασία bowing, είναι πιο πιθανό να συμβεί σε μαλακά μαγνητικά υλικά, ενώ η άκαμπτη κίνηση εμφανίζεται στα πιο σκληρά. Η αντιστρεψιμότητα της διάδοσης των μαγνητικών τοιχωμάτων καθορίζει την παρουσία ή όχι της υστέρησης στο φαινόμενο που χρησιμοποιείται στο αισθητήριο στοιχείο και εξαρτάται κυρίως από τα ελαττώματα της μαγνητικής ουσίας που οδηγούν σε φαινόμενα αγκίστρωσης (pinning effect). Το φαινόμενο της διάδοσης των μαγνητικών τοιχωμάτων χρησιμοποιείται για μετρήσεις μικρών πεδίων καθώς και για μηχανικούς αισθητήρες μέτρησης χαμηλής έντασης μαγνητικών πεδίων.^[46]

Συνεπώς, ο σχεδιαστής του αισθητήριου στοιχείου, που χρησιμοποιεί το φαινόμενο της διάδοσης των μαγνητικών τοιχωμάτων, θα πρέπει να προσαρμόζει το μαγνητικό υλικό σύμφωνα με τις ανάγκες και τις επιταγές της εφαρμογής του. Δηλαδή, αν αυτό που χρειάζεται ο αισθητήρας είναι υστέρηση στο ελάχιστο δυνατό πλάτος, τότε το υλικό που θα επιλεγεί θα πρέπει να έχει χαμηλή μαγνητοσυστολή, όσο το δυνατόν λιγότερες ατέλειες και μικρότερες εσωτερικές τάσεις και να είναι όσο πιο μαλακό γίνεται.^[21]

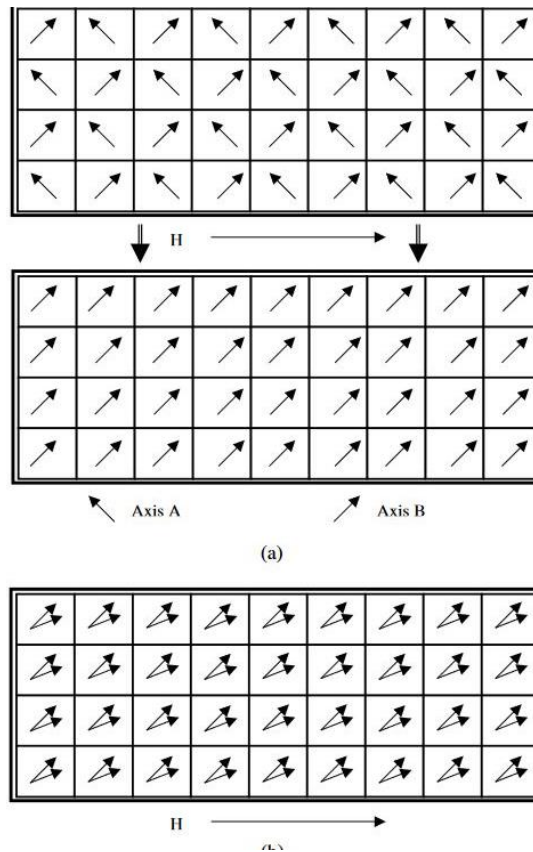
Περιστροφή μαγνητικών περιοχών (Domain rotation dynamics):

Η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών είναι το πιο σημαντικό φαινόμενο που θα αναλυθεί, καθώς αποτελεί τον κύριο μηχανισμό τον οποίο εκμεταλλεύεται η τεχνική

των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης. Πιο συγκεκριμένα, το φαινόμενο αυτό ευθύνεται για τη δημιουργία των ελαστικών παλμών του MDL.^[49]

Προτού αναλυθεί το φαινόμενο της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών, θα πρέπει να δοθεί ο ορισμός του «εύκολου» άξονα (easy axis). Ένα χαρακτηριστικό των μαγνητικών υλικών, είναι η μαγνητική ανισοτροπία. Το χαρακτηριστικό αυτό, επιτρέπει στα μαγνητικά υλικά να αντιδρούν διαφορετικά σε ένα μαγνητικό πεδίο, ανάλογα με την διεύθυνσή του. Η αντίδραση αυτή, εξαρτάται από τη δομή και το σχήμα των κρυστάλλων του υλικού, όπως και από την ύπαρξη εσωτερικών μηχανικών τάσεων.^[47] Με αυτόν τον τρόπο, το υλικό αποκτά άξονες ως προς τους οποίους η μαγνήτισή του είναι ευνοϊκότερη σε σχέση με άλλους. Οι άξονες αυτοί ορίζονται ως «εύκολοι» άξονες (easy axis) και στη διεύθυνσή τους η μαγνήτιση του υλικού είναι ευκολότερη. Η ύπαρξη των εύκολων αξόνων, έχει ως αποτέλεσμα τη διαίρεση σε δύο πεδία της λειτουργίας του μηχανισμού της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών. Το πρώτο πεδίο λειτουργίας είναι η μη αναστρέψιμη περιστροφή και το δεύτερο η αναστρέψιμη.

Μη αναστρέψιμη περιστροφή συμβαίνει όταν οι μαγνητικές περιοχές, προσανατολισμένες κατά μήκος ενός δεδομένου εύκολου άξονα A, επαναπροσανατολίζονται κατά μήκος ενός άλλου εύκολου άξονα B, πιο κοντά στον άξονα του εξωτερικού πεδίου H, λόγω της παρουσίας του ίδιου του πεδίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5.2 (α). Η αναστρέψιμη περιστροφή εμφανίζεται αφού έχει πραγματοποιηθεί πρώτα η μη αναστρέψιμη διαδικασία περιστροφής. Δεδομένου ότι ο νέος εύκολος άξονας B δεν είναι ο ίδιος με τον άξονα του εξωτερικού πεδίου H, τα μαγνητικά δίπολα περιστρέφονται αναστρέψιμα προς τον άξονα του πεδίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5.2 (b). Καθώς το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο αφαιρείται, οι μαγνητικές περιοχές περιστρέφονται πίσω στην κατεύθυνση του εύκολου άξονα B, κατά μήκος της οποίας είχε αρχικά και αμετάκλητα επαναπροσανατολιστεί. Γενικότερα, οι μαγνητικές περιοχές δεν επιστρέφουν στον αρχικό τους εύκολο άξονα A.^[21]



Σχήμα 2.5.2 Περιστροφή μαγνητικών περιοχών (α) Μη αναστρέψιμη περιστροφή, (β) Αναστρέψιμη περιστροφή.^[21]

Τόσο η αναστρέψιμη όσο και η μη αναστρέψιμη διαδικασία, σχετίζονται με την παρουσία μαγνητοσυστολής. Η μη αναστρέψιμη διαδικασία, είναι επιπλέον υπεύθυνη για την εισαγωγή μαγνητικού θορύβου στο αισθητήριο στοιχείο. Η χρήση της μη αναστρέψιμης διαδικασίας έχει ως αποτέλεσμα την υστέρηση στη μαγνητική μαγνητική περιστροφή, καθώς και το υψηλότερο επίπεδο θορύβου σε σχέση με την αναστρέψιμη διαδικασία. Τόσο η υστέρηση όσο και ο θόρυβος επηρεάζουν την αβεβαιότητα οποιουδήποτε μαγνητικού αισθητήρα. Επομένως αν η κατασκευή του αισθητήρα απαιτεί ελαχιστοποίηση της υστέρησης και του θορύβου, θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο η αναστρέψιμη διαδικασία της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών. Αντιθέτως, αν ο στόχος είναι η υψηλή υστέρηση, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί η μη αναστρέψιμη διαδικασία. Το φαινόμενο της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών έχει βρει εφαρμογές κυρίως στον τομέα των μηχανικών αισθητήρων.^[48]

«Εξαρτημένοι» μηχανισμοί (Dependent mechanisms):

Εκτός από τη διάδοση των μαγνητικών τοιχωμάτων και τη περιστροφή των μαγνητικών περιοχών, υπάρχουν και άλλα εξαρτώμενα μαγνητικά αποτελέσματα (dependent magnetic effects) που μπορούν να μετρηθούν και να χρησιμοποιηθούν ως μακροσκοπικές ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες του υλικού.

Το πιο γνωστό και χρησιμοποιημένο αποτέλεσμα, είναι το MR-effect ^[21-22] που παρατηρείται κυρίως σε λεπτά μαγνητικά φιλμ (magnetic thin films). Σύμφωνα με αυτό το φαινόμενο, η dc ηλεκτρική αντίσταση ενός μαγνητικού φιλμ αλλάζει περίπου 2-3% σε σχέση με το εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο, λόγω της περιστροφής του μαγνητικού πεδίου και σε ορισμένες περιπτώσεις λόγω της πυρήνωσης (nucleation) των τοιχωμάτων. Το πιο σημαντικό μαγνητοαντιστατικό φαινόμενο, δηλαδή το “giant” magnetostrictive effect ή GMR εμφανίζεται σε μαγνητικά στρώματα λεπτής μεμβράνης όπου η αλλαγή στην αντίσταση κυμαίνεται στο εύρος 50-80% σε θερμοκρασία δωματίου. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην κάθετη ανισοτροπία των μαγνητικών στρωμάτων που προκαλεί κάθετη περιστροφή μαγνητικών τοιχωμάτων. Τέλος, ο φαινόμενο που ονομάζεται “colossal” magnetostrictive effect έχει παρατηρηθεί στα μαγνητικά οξειδία, προσφέροντας ακόμα μεγαλύτερες αλλαγές στην αντίσταση, αλλά σε κρυογονικά περιβάλλοντα. Το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης χρησιμοποιείται κυρίως σε αισθητήρες πεδίου και σε εφαρμογές πολυμέσων εγγραφής.^[21]

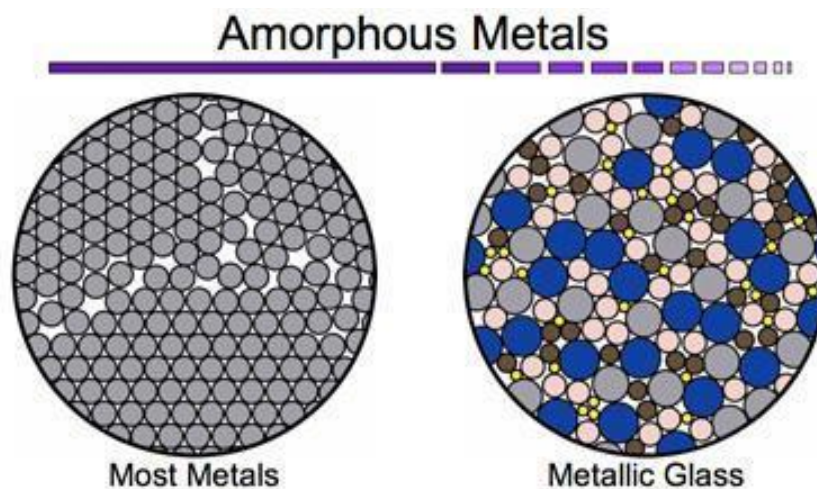
Ένα άλλο αποτέλεσμα είναι το ac MR effect ή MI effect ^[23-24]. Σύμφωνα με αυτό το φαινόμενο, η ac αντίσταση ή η σύνθετη αντίσταση μιας μαγνητικής ουσίας ποικίλλει ανάλογα με το εφαρμοζόμενο πεδίο. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται και σε μη σιδηρομαγνητικά υλικά λόγω του skin effect αν και η επίδρασή του είναι πολύ μικρότερη από ότι στα σιδηρομαγνητικά υλικά. Το αποτέλεσμα αυτό χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία λόγω της μεγάλης του ευαισθησίας σε μαγνητικό πεδίο.

Εκτός από τα παραπάνω, τα κλασικά επαγωγικά φαινόμενα (classical inductive effects) έχουν υλοποιηθεί με τη μορφή της ρύθμισης fluxgate ^[25] για ακριβή ανίχνευση πεδίου και ο γραμμικής μεταβλητής διαφορικός μετασχηματιστής (linear variable differential transformer ή LVDT) για ανίχνευση μετατόπισης.^[26] Σχετικά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα αποτελούν το φαινόμενο Hall, το κβαντικό φαινόμενο Hall και το SQUID, τα οποία χρησιμοποιούνται επίσης για ανίχνευση πεδίου^[21].

2.6 Άμορφα υλικά

Όπως διαπιστώθηκε από τον ορισμό της μαγνητοσυστολής που δόθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, τα μαγνητοσυστολικά υλικά συστέλλονται ή διαστέλλονται, υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου. Όλα τα μαγνητικά υλικά εμφανίζονται στην πράξη ως μαγνητοσυστολικά και κατηγοριοποιούνται είτε ανάλογα με την σταθερά μαγνητοσυστολής λ_s είτε ανάλογα του μηχανισμού παραμόρφωσης του υλικού. Τα κλασικά μαγνητοσυστολικά υλικά έχουν τιμές λ που κυμαίνονται από μερικά ppb (parts per billion) ως μερικές δεκάδες ppm (parts per million), περιλαμβάνουν κράματα πλούσια σε Fe-Co-Ni (σίδηρο, κοβάλτιο, νικέλιο) και χαρακτηρίζονται από υστερητική ή μη υστερητική απόκριση της συνάρτησης $\lambda(H)$, ανάλογα με την κατεργασία του υλικού κατά την παρασκευή του.

Για αισθητήρες στηριζόμενους στο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο απαιτείται μη υστερητική συμπεριφορά της συνάρτησης $\lambda(H)$, και προτιμώνται άμορφα μαγνητοσυστολικά υλικά που πέρα από Fe-Co-Ni περιλαμβάνουν και άλλα μεταλλοειδή όπως Si (Πυρίτιο), B (Βόριο) ή P (Φώσφορο).^[12] Τα υλικά αυτά έχουν σχεδόν ισοτροπική και ομογενή δομή και οι μαγνητικές τους ιδιότητες παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευαισθησία σε μηχανικές τάσεις.^[27] Η παρασκευή τους, πραγματοποιείται με την μέθοδο ταχείας ψύξης και είναι γνωστά στο εμπόριο, με το όνομα Metglas (metallic glass).^[28]



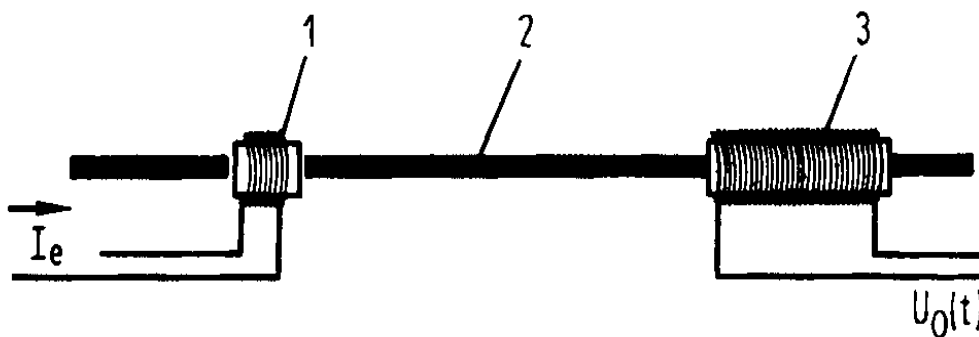
Σχήμα 2.6.1 Κρυσταλλική δομή συμβατικού μετάλλου (αριστερά) και άμορφου μαγνητοσυστολικού υλικού (δεξιά), όπου φαίνεται η ομογένεια της δομής του άμορφου υλικού σε σύγκριση με ένα απλό μέταλλο.^[29]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφεί ποιοτικά η αρχή λειτουργίας της βασικής διάταξης μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης. Θα επεξηγηθεί το ευθύ και το αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο όπως αυτό εμφανίζεται κατά τη διέγερση και στη λήψη σήματος διατάξεων MDL και θα δοθεί το μαθηματικό μοντέλο, όπως παρουσιάζεται στη βιβλιογραφία. Τέλος, παρατίθενται οι ιδιότητες των γραμμών καθυστέρησης που τις χαρακτηρίζουν.

3.1 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης MDL – Τυπική διάταξη

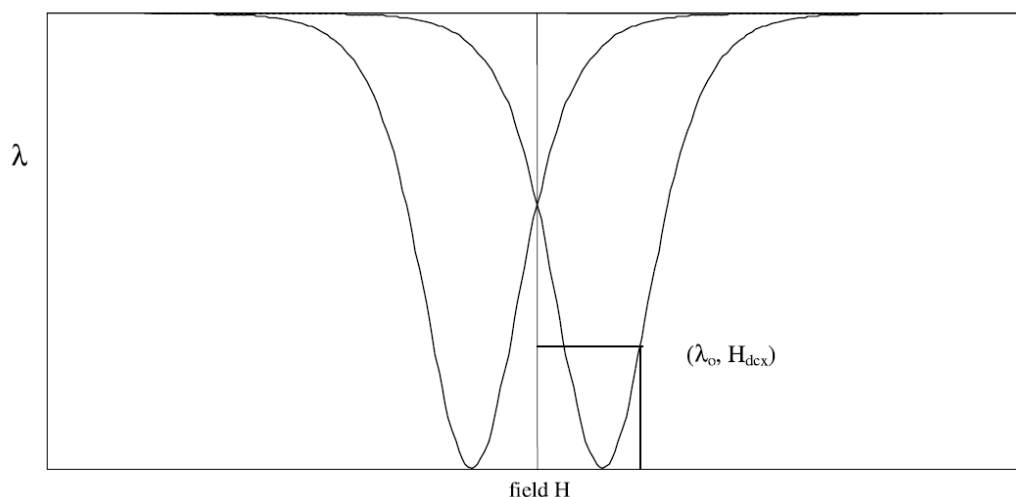
Έχοντας αναλύσει τα χαρακτηριστικά του φαινομένου της μαγνητοσυστολής που αφορούν την τεχνική MDL, είναι πλέον δυνατή η περιγραφή της τεχνικής μέσω μιας τυπικής διάταξης. Η διάταξη αυτή όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1.1 αποτελείται από το μέσο διέγερσης, το μέσο λήψης και την μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης.^[30] Το μέσο της διέγερσης και λήψης είναι ένα σωληνοειδές πηνίο, ενώ η γραμμή καθυστέρησης αποτελείται από ένα μαγνητοσυστολικό υλικό. Η λειτουργία της διάταξης χωρίζεται σε τρία διαδοχικά στάδια: στην δημιουργία ελαστικού παλμού, στην διάδοση του παλμού κατά μήκος της γραμμής καθυστέρησης και στην λήψη του παλμού.



Σχήμα 3.1.1 Βασική διάταξη MDL: 1 Πηνίο διέγερσης, 2 Μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης, 3 Πηνίο λήψης.^[30]

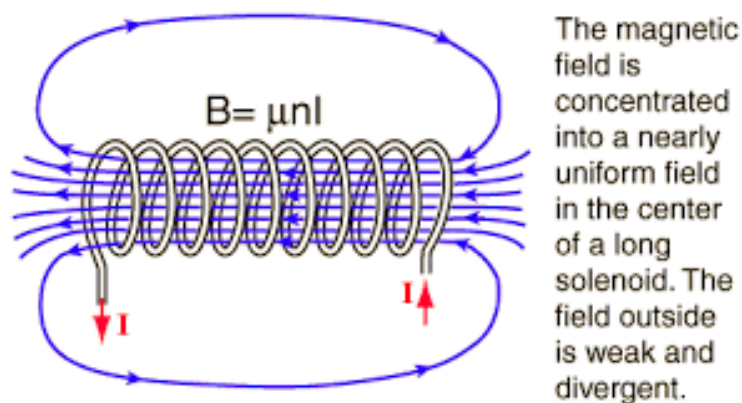
Δημιουργία ελαστικού παλμού-Μαγνητοσυστολικό φαινόμενο:

Όπως αναλύθηκε κατά την εξέταση του φαινομένου της μαγνητοσυστολής προηγουμένως, με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου, τα δίπολα των μαγνητικών περιοχών του μαγνητοσυστολικού υλικού αναπροσανατολίζονται προς την κατεύθυνση του πεδίου. Επομένως με την τροφοδότηση του πηνίου διέγερσης με σταθερό ρεύμα, δημιουργείται σταθερό πεδίο πόλωσης H_{dcx} κατά μήκος του άξονα της μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης και τοπική μικροπαραμόρφωση του MDL $\delta\lambda_0$, όπως φαίνεται στο σημείο $(\delta\lambda_0, H_{dcx})$ του σχήματος 3.1.2, καθώς περιστρέφονται τα δίπολα των τοπικών μαγνητικών περιοχών (μαγνητοσυστολικό φαινόμενο). Αντίστοιχα, μικροπαραμόρφωση του MDL $\delta\lambda(t)$ προκαλείται και με διέγερση του πηνίου με παλμικό ρεύμα, όπου δημιουργείται παλμική μαγνητική ροή $H_e(t)$ παρόμοιας κυματομορφής με του ρεύματος, η οποία προστίθεται σε οποιαδήποτε προ υπάρχουσα μαγνητική ροή στο MDL. Σε αντίθεση όμως με την σταθερή πόλωση, μία μικροπαραμόρφωση οφειλόμενη σε παλμικό πεδίο, προκαλεί την δημιουργία ελαστικού κύματος που διαδίδεται και στις δυο αντίθετες κατευθύνσεις κατά μήκος του MDL.^[30]



Σχήμα 3.1.2 Καμπύλη $\lambda(H)$ -Εξάρτηση μικροπαραμορφώσεων από το μαγνητικό πεδίο.^[21]

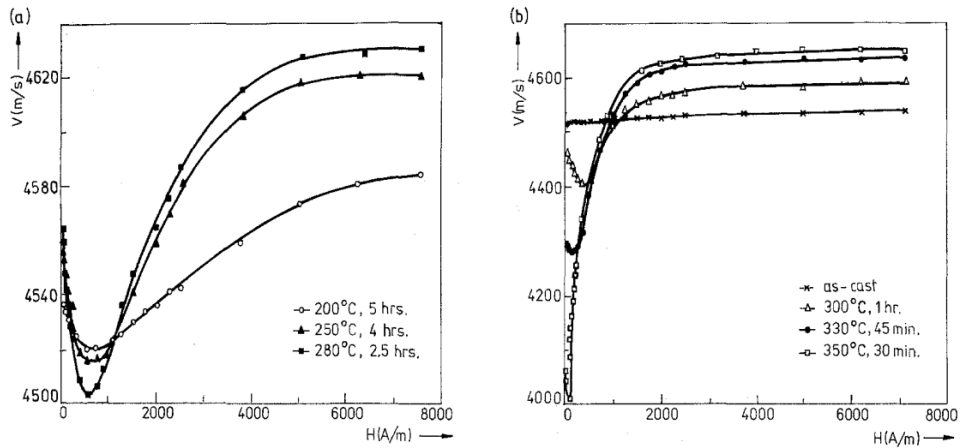
Και στις δύο περιπτώσεις διέγερσης, η περιστροφή των περιοχών, και η επακόλουθη τοπική μικροπαραμόρφωση του υλικού συμβαίνει στην τομή της γραμμής MDL, με τον πυρήνα του πηνίου, όπου είναι συγκεντρωμένη η μαγνητική ροή του πηνίου.



Σχήμα 3.1.3 Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου.^[51]

Διάδοση ελαστικού παλμού-Ακουστικό φαινόμενο:

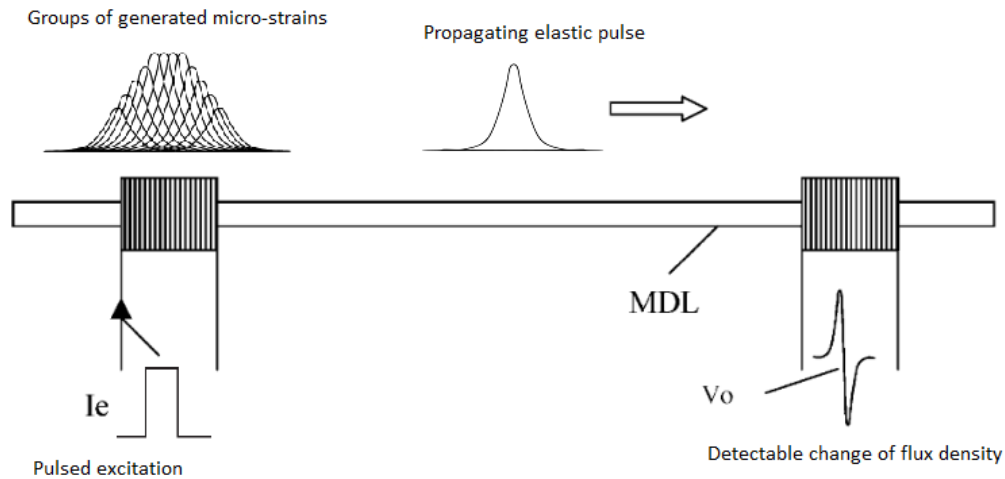
Ο ελαστικός παλμός που προκαλείται από την παλμική διέγερση του πηνίου, θα διαδοθεί με την διαμήκη ακουστική ταχύτητα του υλικού ως δύο διαμήκη κύματα, ίδιου πλάτους, αλλά αντίθετης κατεύθυνσης, κινούμενα από το σημείο της διέγερσης προς τα δύο άκρα του μέσου διάδοσης, δηλαδή της γραμμής MDL που λειτουργεί ως ακουστικός κυματοδηγός. Η ταχύτητα αυτή στα άμορφα υλικά εξαρτάται από το πεδίο πόλωσης αλλά και την επεξεργασία του υλικού κατά την παραγωγή του όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.4. Επίσης η διάδοση των κυμάτων στον κυματοδηγό παρουσιάζει απόσβεση ανάλογη της διανυόμενης απόστασης, και το κύμα ανακλάται προς τα πίσω με την άφιξη του στο άκρο του μέσου.^[30] Στα κλασικά μαγνητοσυστολικά υλικά το βέλτιστο πλάτος της παλμικής μαγνητικής διέγερσης είναι της τάξης μερικών μικροδευτερολέπτων (microseconds), οπότε το μήκος κύματος (wavelength) του ελαστικού παλμού είναι της τάξης μερικών χιλιοστών (millimetres).^[21]



Σχήμα 3.1.4 Σχέση μαγνητικού πεδίου πόλωσης με διαμήκη ταχύτητα διάδοσης σε γραμμή από άμορφο σύρμα $Fe_{7.5}Si_{7.5}B_{15}$ με διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας.

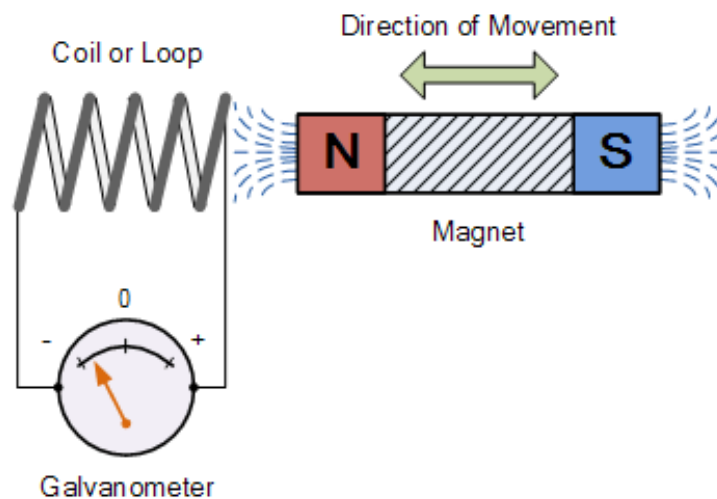
Λήψη παλμού-Αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο:

Καθώς διαδίδεται ο ελαστικός παλμός κατά μήκος του άξονα του MDL, αλλάζει την διεύθυνση μαγνήτισης των τοπικών μαγνητικών δίπολων, με προϋπόθεση το MDL να είναι τοπικά μαγνητικά πολωμένο. Στην περίπτωση που το MDL αποτελείται από άμορφο πυρήνα, η επίδραση του μαγνητικού πεδίου της γης επαρκεί για την μαγνητική πόλωση που απαιτείται, οπότε δεν χρειάζεται να εφαρμοστεί επιπρόσθετο μαγνητικό πεδίο. Η συνολική μακροσκοπική μεταβολή της μαγνητικής ροής στον άξονα του MDL, οφείλεται στο στατιστικό άθροισμα των απειροελάχιστων αναπροσανατολισμών των μαγνητικών δίπολων στην πορεία του διαδιδόμενου ελαστικού κύματος. Το φαινόμενο αυτό είναι στην πράξη το αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο, και καθώς ο ελαστικός παλμός περνάει από την περιοχή του πηνίου λήψης, η μεταβολή στην μαγνητική ροή που προκαλείται ανιχνεύεται από το πηνίο ως παλμική τάση στα άκρα του, ανάλογη της πρώτης παραγώγου της μαγνητικής ροής.



Σχήμα 3.1.5 Απεικόνιση των τριών διαδοχικών γεγονότων της τεχνικής MDL στην τοπική διάταξη.^[14]

Η εμφάνιση της τάσης στα άκρα του πηνίου, λόγω της μεταβολής της μαγνητικής ροής από το κινούμενο ελαστικό κύμα, οφείλεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και αναπαρίσταται στο σχήμα 3.1.6 όπου το κινούμενο κύμα και η μεταβολή στην μαγνητική ροή που προκαλεί, προσομοιώνεται από έναν μαγνήτη για λόγους απλότητας.



Σχήμα 3.1.6 Φαινόμενο ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής στο οποίο στηρίζεται το πηνίο λήψης για ανίχνευση του ελαστικού παλμού.^[52]

Συνοψίζοντας λοιπόν, το σύνθετο φαινόμενο μπορεί να χωριστεί σε 3 μέρη:

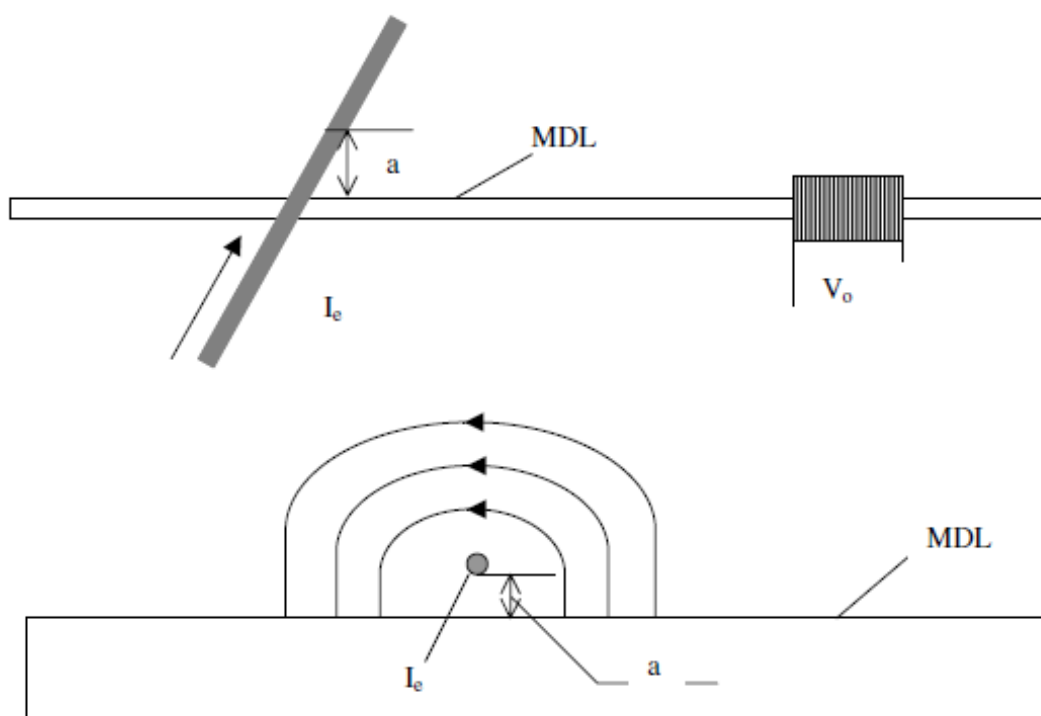
- Επιβολή μαγνητικού πεδίου από το μέσο διέγερσης: τα δίπολα μαγνητικών περιοχών προσανατολίζονται προς τη διεύθυνση του πεδίου, παρουσιάζουν

μαγνητοσυστολή και προκαλούνται μικροπαραμορφώσεις στη γραμμή καθυστέρησης.

- Το άθροισμα των μικροπαραμορφώσεων συνθέτει ελαστικό παλμό (διαμήκες μηχανικό κύμα) που διαδίδεται κατά μήκος του MDL με την ταχύτητα διάδοσης του ήχου μέσα στο υλικό και παρουσιάζει απόσβεση ανάλογη της απόστασης.
- Οι μικροπαραμορφώσεις επιβάλλονται στις γειτονικές περιοχές και προσανατολίζουν τα μαγνητικά δίπολα, ενώ αλλάζοντας τη μαγνητική ροή κατά τον άξονα του MDL, επάγεται τάση στο πηνίο λήψης ανάλογη της μεταβολής της μαγνητικής ροής.

3.2 Μοντελοποίηση MDL

Για πιο πλήρη ανάλυση της βασικής διάταξης MDL, στο σημείο αυτό παρατίθεται το μοντέλο της όπως περιγράφεται στην βιβλιογραφία.^[21] Στην συγκεκριμένη μοντελοποίηση(σχήμα 3.2.1) για λόγους απλότητας, θεωρείται ως διέγερση ένας αγωγός κάθετος στο άξονα της γραμμής MDL, τροφοδοτούμενος με παλμικό ρεύμα.



Σχήμα 3.2.1 Η τυπική διάταξη με διέγερση από έναν αγωγό κάθετο στον άξονα του MDL.^[21]

Το παλμικό πεδίο $H(x,t)$ κατά μήκος της γραμμής MDL , λόγω του παλμικού ρεύματος $I(t)$ είναι:

$$H(x,t) = f(x)I(t) = \frac{1}{\sqrt{a^2 + x^2}} I(t) \quad (3.2.1)$$

όπου a , η απόσταση μεταξύ του αγωγού παλμικού ρεύματος και του MDL. Το παλμικό ρεύμα $I(t)$ θεωρείται ότι αποτελείται από μία θετική κλίση στο χρονικό διάστημα $0 \leq t \leq n_1 T$, από ένα σταθερό ρεύμα I_0 στο διάστημα $n_1 T \leq t \leq n_2 T$ και μια αρνητική κλίση από I_0 έως 0 στο διάστημα $n_2 T \leq t \leq n_3 T$, όπου T σταθερά χρόνου και n_i ακέραιος αριθμός.

Στηριζόμενοι σε πειραματικά δεδομένα, στην περίπτωση υστερητικής συμπεριφοράς, οι μικροπαραμορφώσεις οφειλόμενες στο παλμικό μαγνητικό πεδίο $H(x,t)$ μπορούν να εκφραστούν από το μοντέλο:

$$\lambda(H) = \lambda_s (1 - e^{-cH^2}) \quad (3.2.2)$$

οπού ο θετικός αριθμός c είναι μία προσαρμοστική παράμετρος και ο λ_s η σταθερά μαγνητοσυστολής κορεσμού.

Οι μικροτάσεις $\lambda(x,t)$ προκαλούμενες από την παροδική αύξηση του ρεύματος αθροίζονται σε ένα σύνολο τάσεων $G_r(x,t)$:

$$G_r(x,t) = \sum_{n=1}^{n_1} \lambda_s \left(1 - \exp \left(-c \frac{\left(n \frac{I_0}{n_1} \right)^2}{a^2 + (x - (n_3 + n_2 + n_1 - n)Tv)^2} \right) \right) \quad (3.2.3)$$

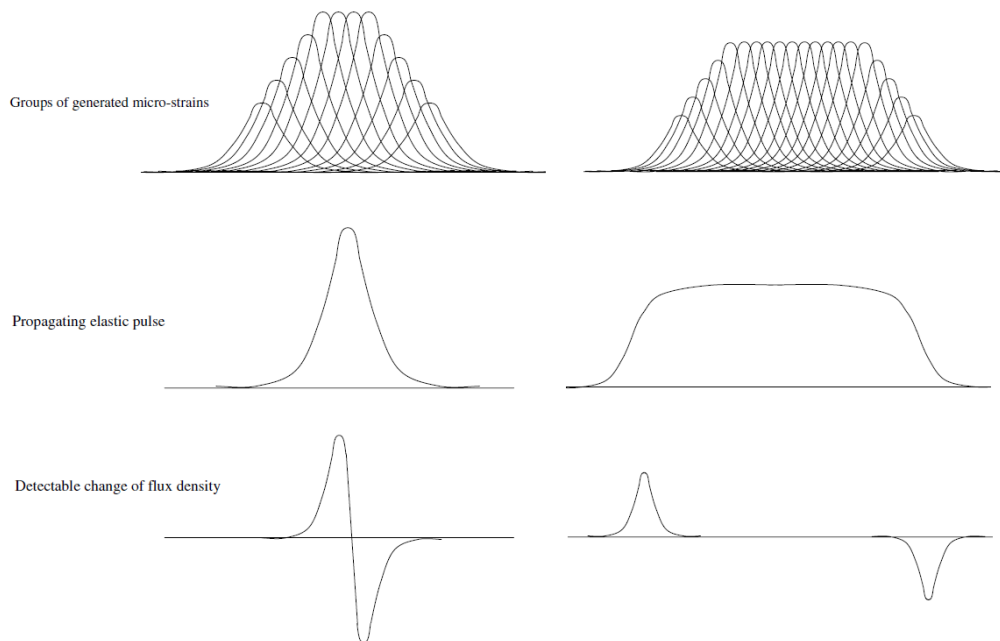
όπου v η διαμήκης ακουστική ταχύτητα του MDL. Με σταθερό ρεύμα οι μικροτάσεις αθροίζονται σε σύνολο τάσεων $G_s(x,t)$:

$$G_s(x,t) = \sum_{n=1}^{n_1} \lambda_s \left(1 - \exp \left(-c \frac{I_0^2}{a^2 + (x - (n_3 + n_2 + n_1 - n)Tv)^2} \right) \right) \quad (3.2.4)$$

ενώ με παροδική μείωση του ρεύματος σε σύνολο $G_f(x,t)$:

$$G_f(x, t) = \sum_{n=1}^{n_1} \lambda_s (1 - \exp\left(-c \frac{\left((n - n_3) \frac{I_0}{n_1}\right)^2}{a^2 + (x - (n_3 + n_2 + n_1 - n)Tv)^2}\right)) \quad (3.2.5)$$

Αυτά τα σύνολα μικροτάσεων διαδίδονται κατά μήκος της μαγνητοσυστολικής γραμμής του MDL ως ελαστικός παλμός, που προκαλεί την αλλαγή της μαγνητικής ροής με την κίνηση του, κατά μήκος του υλικού. Η αλλαγή της μαγνητικής ροής μπορεί να ανιχνευθεί από το πηνίο λήψης λόγω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής ως ηλεκτρική τάση στα άκρα του. Η επαγωγική τάση αυτή ακολουθεί την πρώτη παράγωγο του ελαστικού παλμού, δηλαδή αυξάνεται όσο έχει ανοδική πορεία ο ελαστικός παλμός ως προς το πλάτος του, μηδενίζεται όσο ο παλμός διατηρεί σταθερή τιμή, και μειώνεται με την μείωση του πλάτους του ελαστικού παλμού. Επομένως, στην περίπτωση σύντομης παλμικής διέγερσης, η μεταβολή στην μαγνητική ροή θα προκαλέσει τάση μορφής της παραγώγου ενός παλμού στα άκρα του πηνίου λήψης, ενώ αν η παλμική διέγερση έχει σταθερή κατάσταση για μεγαλύτερη διάρκεια τότε, η πρώτη παράγωγος του ελαστικού παλμού χωρίζεται σε δύο αντίθετους ως προ το πρόσημο παλμούς, με αντίστοιχη τάση στα άκρα του πηνίου λήψης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.2.



Σχήμα 3.2.2 Δημιουργία, διάδοση και ανίχνευση μικροπαραμορφώσεων με σύντομο παλμό διέγερσης στα αριστερά, και μεγαλύτερης διάρκειας στα δεξιά.^[21]

3.3 Ιδιότητες MDL

Υπάρχουν διάφορες ιδιότητες των μαγνητοσυστολικών υλικών στις οποίες στηρίζεται η τεχνική MDL για την ανάπτυξη αισθητήρων. Επομένως είναι απαραίτητη η κατανόηση των ιδιοτήτων αυτών ώστε να γίνει κατάλληλη κατεργασία του μαγνητοσυστολικού υλικού τόσο κατά την παραγωγή του αλλά και κατά την ενσωμάτωση του στον αισθητήρα, για το βέλτιστο ταίριασμα του με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Οι ιδιότητες αυτές είναι οι ακόλουθες:^[21]

Ανομοιομορφία (Non-uniformity):

Η διακύμανση της συνάρτησης ομοιομορφίας $V_0(x)$, δηλαδή της εξάρτησης της μέγιστης τάσης V_0 στο πηνίο λήψης από την απόσταση μεταξύ πηνίου διέγερσης και πηνίου λήψης, ορίζεται ως ανομοιομορφία. Με μεθόδους κατεργασίας όπως η μέθοδος ανόπτησης (stress-current annealing) και κανονικοποίησης (normalization) εξαλείφονται οι τοπικές τάσεις και διορθώνεται το φαινόμενο των μη ευθυγραμμισμένων μαγνητικών περιοχών που δημιουργούνται κατά την παραγωγή, με αποτέλεσμα την καλύτερη ομοιομορφία στο υλικό.

Φαινόμενο μαγνητικού πεδίου πόλωσης (Bias field Effect):

Η εξάρτηση της τάσης εξόδου του MDL στη επίδραση σταθερού μαγνητικού πεδίου ονομάζεται φαινόμενο μαγνητικού πεδίου πόλωσης και είναι μια σημαντική ιδιότητα του MDL, καθώς ένα απροσδόκητο μαγνητικό πεδίο μπορεί να επιδράσει έντονα στην απόκριση μιας διάταξης και να καταστρέψει το σήμα εξόδου του αισθητήρα. Επομένως το φαινόμενο αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την ανάπτυξη διατάξεων MDL και να υπάρξει μόνωση από την επίδραση εξωτερικών μαγνητικών πεδίων, ή να γίνεται συνεχής μέτρηση της περιβαλλοντικής μαγνήτισης και να αντισταθμίζεται.

Καθυστέρηση απόκρισης (Response delay):

Καθυστέρηση απόκρισης ορίζεται ως η χρονική διαφορά μεταξύ της στιγμής της διέγερσης και της λήψης του ελαστικού παλμού. Η χρονική διαφορά αυτή επηρεάζεται κυρίως από την σταθερότητα της ταχύτητας διάδοσης του ελαστικού παλμού στο μαγνητοσυστολικό υλικό της γραμμής MDL. Επομένως είναι απαραίτητη

η σταθεροποίηση της ταχύτητας διάδοσης κατά μήκος του υλικού, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλες μεθόδους κατεργασίας του MDL ή με εφαρμογή πεδίου πόλωσης.

Υστέρηση (Hysteresis):

Υστέρηση ενός MDL είναι ένα υψηλά μη γραμμικό φαινόμενο και ορίζεται ως η διαφορά της συνάρτησης της τάσης εξόδου V_0 (I_e) μεταξύ των τιμών που παίρνει για μέγιστο παλμικό ρεύμα I_e και για μηδενικό ρεύμα I_e . Με την χρήση άμορφων μαγνητοσυστολικών υλικών ως MDL η υστέρηση μπορεί να είναι πολύ μικρή, και περαιτέρω μείωση της μπορεί να επιτευχθεί με λειτουργία του MDL στην περιοχή κορεσμού.

Ανάλυση (Resolution):

Ανάλυση ορίζεται ως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών σημείων διέγερσης του MDL ώστε να δημιουργηθούν δύο ξεχωριστοί ελαστικοί παλμοί οι οποίοι θα διαχωρίζονται και ως προς την ανίχνευση τους. Η ανάλυση ενός MDL μπορεί να βελτιωθεί σε άμορφα σύρματα με κατάλληλη κατεργασία όπως με μαγνητική ανόπτηση.

Πλάτος παλμού διέγερσης ή απόκριση συχνότητας (Pulse width or frequency response):

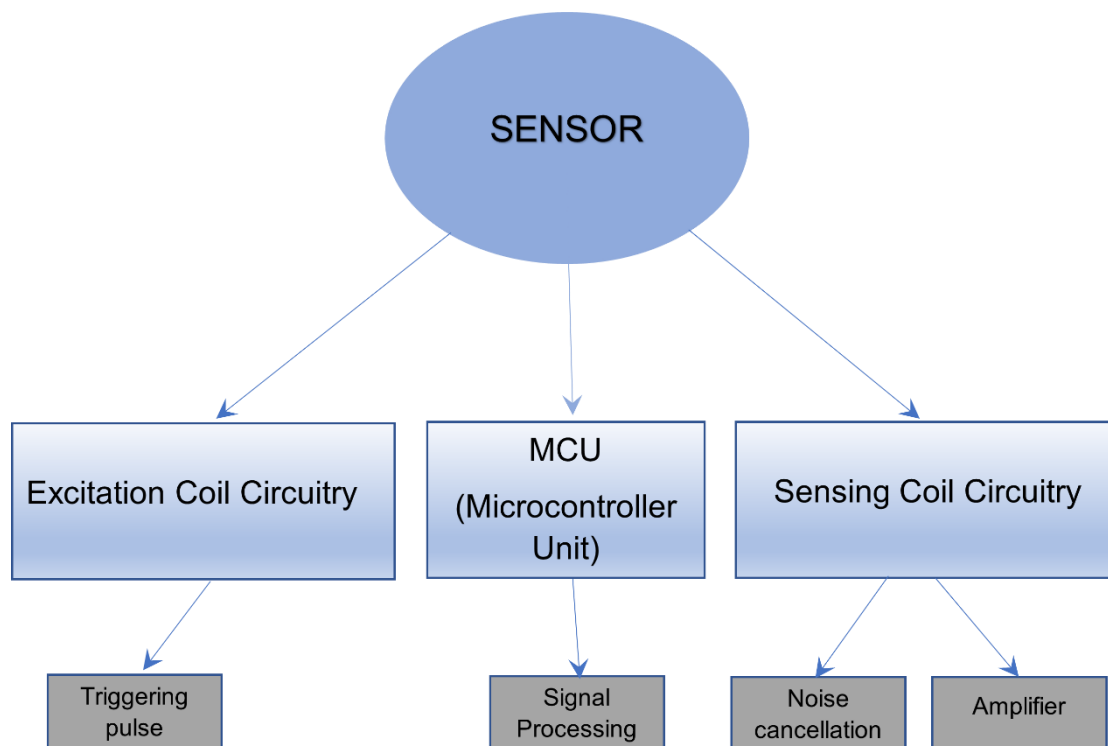
Πλάτος παλμού διέγερσης ή απόκριση συχνότητας ορίζεται ως η εξάρτηση της παλμικής τάσης εξόδου στο εύρος ζώνης της παλμικής διέγερσης. Με χρήση κατάλληλων τεχνικών ανόπτησης η απόκριση συχνότητας μπορεί να αυξηθεί μέχρι και τα 10 MHz.

Ανακλάσεις (Reflections):

Καθώς ο ελαστικός παλμός φτάνει στο άκρο του κυματοδηγού, ανακλάται προς την αντίθετη κατεύθυνση και συνεχίζει να διασχίζει το μέσο διάδοσης. Η ανάκλαση αυτή του παλμού μπορεί να μειώσει την ευαισθησία και την ανάλυση του MDL. Επομένως είναι απαραίτητη η εξάλειψη των ανακλάσεων κάτι που μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλο τερματισμό της μαγνητοσυστολικής γραμμής καθώς και ορθό σχεδιασμό της γεωμετρίας της διάταξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο – ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Το συνολικό σύστημα ενός αισθητήρα συνήθως χωρίζεται σε διάφορα υποσυστήματα. Με την συγκεκριμένη μέθοδο απλουστεύεται η διαδικασία της ανάπτυξης του αισθητήρα. Αυτό είναι ευρέως γνωστό ως κατηγοριοποίηση σε modules, ή segments. Στην ανάπτυξη λογισμικού αυτή η μέθοδος ονομάζεται agile. Η χρήση των υποσυστημάτων φαίνεται σε μεγάλο βαθμό στο testing και στο debugging του συστήματος, διότι η κύρια λειτουργία χωρίζεται σε μικρότερες υπολειτουργίες. Στην παρούσα εργασία κρίθηκε μείζονος σημασίας, η χρήσης αυτής της μεθόδου, για την κατασκευή του αισθητήρα. Παρακάτω παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1 ένας «γράφος» που απεικονίζει τα κύρια υποσυστήματα του αισθητήρα.



Σχήμα 4.1 Σχεδιάγραμμα του συστήματος του αισθητήρα

4.1 Διάταξη MDL

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε είναι ταυτόσημη με την τυπική διάταξη MDL, όπως έχει οριστεί στην ενότητα 3.1, αποτελείται δηλαδή από την μαγνητοσυστολική γραμμή, ένα σωληνοειδές πηνίο λήψης και ένα διέγερσης. Στην εφαρμογή της δοθείσας εργασίας δεν απαιτείται να είναι σε σταθερό σημείο τα πηνία λήψης – διέγερσης. Στο εργαστήριο, για τον ποιοτικό έλεγχο χρησιμοποιήθηκαν δύο «πρωτόκολλα» τα οποία θα αναφερθούν παρακάτω. Ανάμεσα από τα πηνία τοποθετείται το μαγνητοσυστολικό

υλικό. Το μαγνητοσυστολικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι ράβδος από χάλυβα, που επιλέχθηκε για τις μαγνητικές του ιδιότητες, και επειδή αυτή η εφαρμογή μπορεί να προσελκύσει το ενδιαφέρον της βιομηχανίας του χάλυβα, στο πεδίο του ποιοτικού ελέγχου. Τα παραπάνω στοιχεία απαιτούνται για την υλοποίηση της διάταξης MDL.

Οι τεχνικές λεπτομέρειες της διάταξης κρύβονται στα πηνία, καθώς το υλικό είναι δύσκολο να προσδιοριστεί. Επίσης η γενίκευση του για την εφαρμογή στην βιομηχανία απαιτεί την διαμόρφωση του συστήματος ως μαύρο κουτί (black box). Το πηνίο διέγερσης, αποτελείται από μία σπείρα σύρματος χαλκού με διάμετρο 0.1 mm, με στόχο την επάρκεια του ρεύματος της εφαρμογής και του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου. Η διάμετρος των περιελίξεων είναι περίπου 10 mm δηλαδή όσο και η διάμετρος της ράβδου. Στο τέλος της ενότητας θα παρουσιαστεί το σχήμα 4.1.3, όπου παρατηρείται το μικρό σφάλμα στην διάμετρο των περιελίξεων. Η αυτεπαγωγή L του πηνίου, υπολογίστηκε σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$L = N^2 \mu_0 \mu_r \left(\frac{D}{2} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{8 \cdot D}{d} \right) - 2 \right] \quad (4.1.1)$$

Τα στοιχεία που αποτελούν την παραπάνω εξίσωση είναι τα εξής:

- N (ο αριθμός των περιελίξεων)
- D (η διάμετρος των περιελίξεων, δηλαδή της ράβδου)
- d η διάμετρος του χάλκινου σύρματος και μ_0 , μ_r οι σχετικές μαγνητικές διαπερατότητες του κενού και του χαλκού αντίστοιχα.

Γνωρίζοντας ότι για την διάταξη της εργασίας οι τιμές είναι οι εξής:

- d = 0.1 mm
- N = 1 σπείρα
- D = 10 mm
- $\mu_0 = 4 * \pi * 10^{(-7)} \frac{H}{m}$
- $\mu_r \approx 0.999994$ ^[38]

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι $L_{excitation_coil} = L_e = 25,08 \text{ nH}$ ^[39]

Στο πηνίο λήψης (search coil ή sensing coil), σε σύγκριση με το πηνίο διέγερσης χρησιμοποιήθηκε αρκετά μεγαλύτερος αριθμός σπειρών. Συγκεκριμένα, 300 σπείρες χάλκινου σύρματος τυλιγμένες σε μήκος 1.5 mm. Η διάμετρος του σύρματος είναι 0.06 mm. Να σημειωθεί ότι μπορεί να υπάρχει μία μέγιστη απόκλιση περίπου 20 περιελίξεων στο πηνίο λήψης, διότι η κατασκευή των πηνίων έγινε σε περιελίκτρια, υπό την επίβλεψη ανθρώπινου παράγοντα, δημιουργώντας σφάλμα στον υπολογισμό. Για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής του πηνίου λήψης ακολουθήθηκε ακριβώς η

παραπάνω διαδικασία και προκύπτει ότι $L_{\text{sensing_coil}} = L_s = 2,546 \text{ mH}$. Οι τιμές αυτές επαληθεύτηκαν και πειραματικά με ένα πολύμετρο. Αν και το κοινό πολύμετρο δεν μπορεί να μετρήσει επαγωγή πηνίου υπάρχουν και άλλες τεχνικές, στις οποίες για τους σκοπούς της εργασίας δεν θα υπάρξει επέκταση.^[36] Επίσης για λόγους πιθανής θεωρητικής ανάλυσης στην συχνότητα ή κάποιας προσομοίωσης, μετρήθηκε και η ωμική αντίσταση, καθώς η σύνθετη αντίσταση του πηνίου ισούται με $Z = R + j * \omega * L$. Παρακάτω φαίνονται τιμές τους στο σχήμα 4.1.4

Στο πηνίο λήψης, χρησιμοποιήθηκαν αρκετά περισσότερες περιελίξεις σε σύγκριση με το πηνίο διέγερσης, ώστε η τάση στα άκρα του πηνίου που θα δημιουργηθεί, από τη διάδοση του ελαστικού παλμού κατά μήκος του MDL και τη μεταβολή στη μαγνητική ροή που προκαλεί, να είναι όσο μεγάλη χρειάζεται ώστε να καθίσταται ανιχνεύσιμη. Η τάση αυτή υπολογίζεται μέσω του εξής τύπου:

$$V_L = N \frac{d\phi}{dt} \quad (4.1.2)$$

Όπου V_L η επαγόμενη τάση του πηνίου, N ο αριθμός των περιελίξεων του πηνίου και $\frac{d\phi}{dt}$ ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής. Φαίνεται από τον τύπο, ότι για δεδομένη τιμή της μαγνητικής ροής ϕ , η τάση του πηνίου V_L , μπορεί να γίνει υψηλότερη μέσω της αύξησης του αριθμού των περιελίξεων.

Ο μηχανισμός της διάταξης πρέπει να προσδίδει αξιοπιστία, τόσο σε κυκλωματικό επίπεδο, όσο και σε μηχανολογικό. Έτσι για να τυλιχθούν σωστά τα πηνία με την βοήθεια των μελών του Εργαστηρίου Αισθητηρίων του ΕΜΠ, σχεδιάστηκαν ειδικές βάσεις σε 3-D printer. Για την μηχανική αντοχή, κολλήθηκε καλώδιο στις άκρες των πηνίων και προστέθηκε θερμόκολλα γύρω από τις βάσεις για την σταθερότητά τους.



Σχήμα 4.1.1 Πηνίο διέγερσης (Αριστερά), Πηνίο λήψης (δεξιά)



Σχήμα 4.1.2 Διάταξη MDL



Σχήμα 4.1.3 Διάμετρος περιελίξεων πηνίου διέγερσης (δεξιά), διάμετρος περιελίξεων πηνίου λήψης(αριστερά)

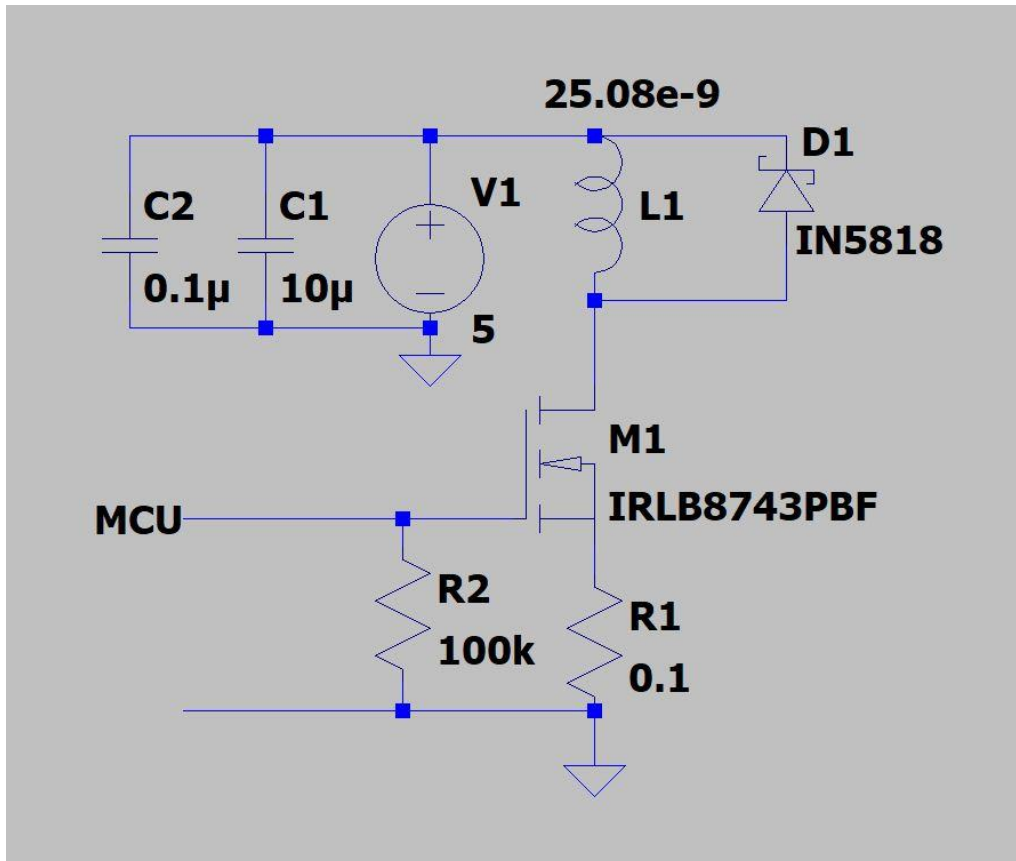


Σχήμα 4.1.4 Ωμική αντίσταση πηνίου διέγερσης(αριστερά), ωμική αντίσταση πηνίου λήψης(δεξιά)

4.2 Κύκλωμα διέγερσης

Στην ανάπτυξη ενός αισθητήρα με την τεχνική MDL θεωρείται αναγκαίο να περιλαμβάνεται ένα στάδιο που συχνά αποκαλείται κύκλωμα διέγερσης. Ονομάζεται έτσι καθώς περιλαμβάνει τη δημιουργία ελαστικού παλμού στη μαγνητοσυστολική

γραμμή καθυστέρησης μέσω της τροφοδότησης του πηνίου διέγερσης με παλμικό ρεύμα.



Σχήμα 4.2.1 Κύκλωμα διέγερσης σχεδιασμένο στο LTSpice

4.2.1 Προδιαγραφές κυκλώματος διέγερσης

Οι ακόλουθες προδιαγραφές απαιτούνται από το συγκεκριμένο κύκλωμα και θα πρέπει να πληρούνται πάντα για την ορθή λειτουργία του συστήματος:

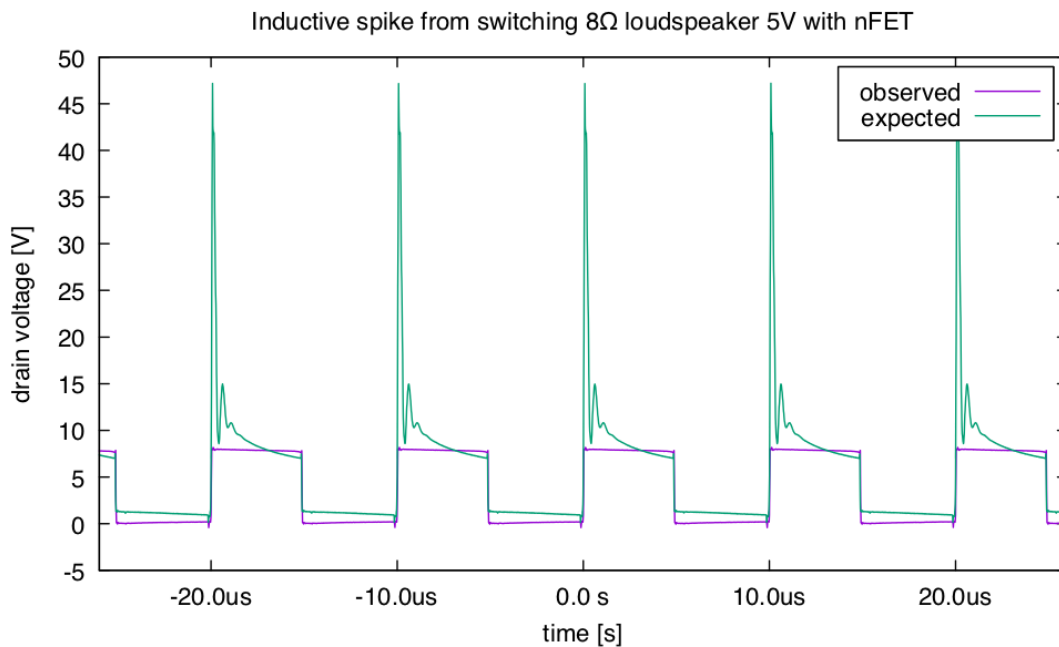
1. Ύπαρξη επαγωγικού φορτίου (πηνίο διέγερσης)
2. Να διαπεράσει το πηνίο υψηλό ρεύμα(στιγμιαία) της τάξεως των 8-20 A.
3. Παλμική διέγερση πολύ μικρού χρόνου, της τάξεως των 1-2 μs
4. Γρήγορη ανταπόκριση, δηλαδή γρήγοροι χρόνοι ανόδου και καθόδου(rise/fall time) της τάξεως των ns, όσο δηλαδή προδιαγράφεται από το chip που χρησιμοποιείται.
5. Συχνότητα λειτουργίας

Αναλυτικότερα κρίνεται μείζονος σημασίας το κύκλωμα να τροφοδοτεί το πηνίο με ρεύμα για λίγα μs έτσι ώστε ο ελαστικός παλμός να διαρκεί τόσο, όσο να μην προκαλεί διαχωρίσιμους παλμούς τάσης στο πηνίο λήψης. Οι χρόνοι ανόδου και καθόδου απαιτείται να είναι τόσοι μικροί καθώς καθίσταται προτιμότερο να φτάνει από το ελάχιστο (0 V) στο μέγιστο (+ Vcc) όσο πιο γρήγορα γίνεται (rise time) και

αντιστοίχως το ανάποδο (fall time). Με τον ορισμό της εξίσωσης του ρεύματος του πηνίου η αιτία του φαινομένου αυτού απλοποιείται.

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} \quad (4.2.1.1)$$

Επομένως όσο πιο απότομη η αλλαγή στη V_L (τάση στα άκρα του πηνίου), τόσο μεγαλύτερη η παράγωγος, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μεγαλύτερο στιγμιαίο ρεύμα, το οποίο επιθυμείται στην εφαρμογή μας. Η ύπαρξη του επαγωγικού φορτίου, καθιστά δυνατή, την εμφάνιση ισχυρού μαγνητικού πεδίου. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του ρεύματος που διαπερνά το επαγωγικό φορτίο, τόσο ισχυρότερο το μαγνητικό πεδίο που εμφανίζεται. Το ισχυρό μαγνητικό πεδίο αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αποτελεσματικότερη λειτουργία του κυκλώματος λήψης, το οποίο θα επεξηγηθεί παρακάτω. Αυτό όμως μπορεί να δημιουργήσει ανεπιθύμητες συμπεριφορές στο κύκλωμα, που στην ορολογία αποκαλούνται ως inductive spikes και προκαλούνται από την διακοπτική λειτουργία των επαγωγικών φορτίων.



Σχήμα 4.2.1.1 Παράδειγμα ενός επαγωγικού spike^[53]

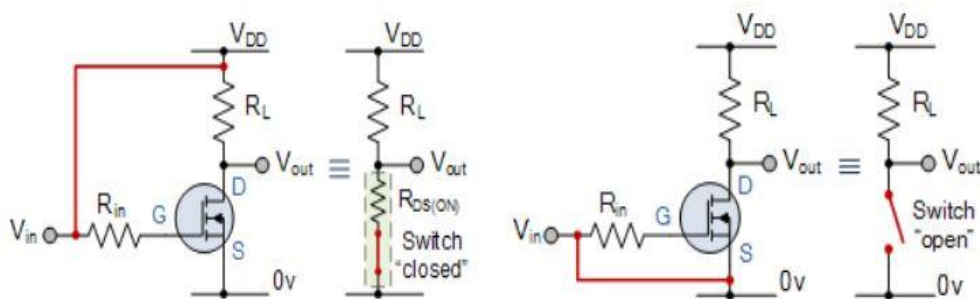
Επιπροσθέτως, το κύκλωμα οφείλει να επιτρέπει τη διαμόρφωση του ακριβούς εύρους του παλμού διέγερσης (στην κλίμακα των μs) καθώς και τη συχνότητα των διεγέρσεων. Αυτό θεωρείται αναγκαίο αφού σε υψηλές συχνότητες ελλοχεύει ο κίνδυνος της παρεμβολής των ελαστικών παλμών προηγούμενων διεγέρσεων κατά την ανίχνευση των επόμενων παλμών. Αντίθετα, σε χαμηλές συχνότητες, εντοπίζεται πολύ μεγάλη

χρονική καθυστέρηση μεταξύ των μετρήσεων του αισθητήρα, με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για πολλαπλές μετρήσεις. Τέλος, άλλη μία προϋπόθεση είναι, το κύκλωμα να λειτουργεί πλήρως, σε ένα εύρος τάσεων τροφοδοσίας, με σκοπό να βρεθεί και να καθοριστεί η αποδοτικότερη λειτουργία του.

4.2.2 Ανάλυση κυκλώματος διέγερσης

Το κύκλωμα διέγερσης αφενός είναι πολύ απαιτητικό ως προς κάποιες λειτουργίες του, αφετέρου η βασική ιδέα είναι πολύ απλή. Συγκεκριμένα, ένα nMOS transistor λειτουργεί σαν διαμεσολαβητής της διέγερσης ως απλός διακόπτης.

MOSFET as a Switch



Σχήμα 4.2.2.1 Η λειτουργία ενός NMOS όταν άγει (αριστερά) και όταν δεν άγει (δεξιά)^[41]

Η επιλογή ενός MOSFET αντί για ενός BJT έγινε με τα εξής κριτήρια:

- Απλοποιημένο κύκλωμα`
- Ελάχιστη κατανάλωση (Εδώ να σημειωθεί ότι ο αισθητήρας σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον μπορεί να δουλεύει συνεχώς)
- Τα MOSFETs ελέγχονται από τάση και όχι από ρεύμα όπως τα BJTs.
- Τα MOSFETs μπορούν να οδηγήσουν πολύ μεγαλύτερο ρεύμα από ότι τα BJTs για δεδομένο κόστος και τιμές τάσης, ρεύματος και συχνότητας που έχουν πρακτικό ενδιαφέρον για την εφαρμογή
- Γρηγορότερο on/off το οποίο αποτελεί σημαντική προϋπόθεση για το κύκλωμα.
- Καλύτερη απαγωγή θερμότητας

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε ένα **Logic level N-channel power MOSFET (IRLB8743)**. Το logic level είναι βασικό χαρακτηριστικό για το συγκεκριμένο κύκλωμα, διότι ο παλμός παράγεται από ένα μικροελεγκτή

(MCU). Logic level MOSFET σημαίνει ότι, έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ενεργοποιείται πλήρως από το λογικό επίπεδο ενός επεξεργαστή. Συμπληρωματικά, αυτή η επιλογή έγινε για δύο ισχυρούς λόγους: έχει μικρή $R_{DS(ON)}$ και μικρή τιμή Q_{gate} ... Τα παραπάνω στοιχεία κρίνονται πολύτιμα, επειδή αυτή η αντίσταση, όπως φαίνεται και από το όνομα της, βρίσκεται μεταξύ του drain και του source του MOSFET όταν αυτό άγει. Επομένως αν αυτή η αντίσταση έχει υψηλή τιμή τότε θα έχουμε μεγαλύτερες απώλειες αλλά και περισσότερη παραγόμενη θερμότητα πάνω στο MOSFET.

Κρίσιμο χαρακτηριστικό είναι η γρήγορη φόρτιση και εκφόρτιση του πυκνωτή, αφού αν δεν προλαβαίνει να φορτίσει σε αυτό το μικρό διάστημα των μs , η λειτουργία του κυκλώματος θα ήταν ανεπιτυχής.

Type Designator: IRLB8743
Type of Transistor: MOSFET
Type of Control Channel: N -Channel
Maximum Power Dissipation (Pd): 140 W
Maximum Drain-Source Voltage |Vds|: 30 V
Maximum Gate-Source Voltage |Vgs|: 20 V
Maximum Drain Current |Id|: 150 A
Total Gate Charge (Qg): 36 nC
Maximum Drain-Source On-State Resistance (Rds): 0.0032 Ohm

Σχήμα 4.2.2.2 Χαρακτηριστικά του nMOS^[40]

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2.1, στο κύκλωμα διέγερσης υπάρχει και μία δίοδος ή οποία συνηθίζεται να αποκαλείται flyback diode. Ο όρος flyback σημαίνει επιστροφή στο αρχικό σημείο του ηλεκτρικού ρεύματος. Για να αποφευχθεί ο παλμός τάσης αντίστροφης πολικότητας, κατά την απενεργοποίηση του διακόπτη (δηλαδή του MOSFET), μια ανάστροφη δίοδος συνδέεται παράλληλα με το πηνίο. Η λειτουργία της δίοδου flyback επιτρέπει σε ένα ηλεκτρικό ρεύμα να διέρχεται μόνο προς μία κατεύθυνση, ενώ το εμποδίζει προς την αντίθετη κατεύθυνση. Όπως μια σφαιρική βαλβίδα αντεπιστροφής για υγρά, η βαλβίδα επιτρέπει τη ροή προς τα εμπρός, αλλά, εάν το υγρό ανακάμψει, η σφαίρα εδράζεται και η δίοδος εμποδίζεται. Εάν η τάση σε μια δίοδο flyback είναι αρνητική (το ρεύμα κυκλώματος ρέει και ο διακόπτης είναι

κλειστός), δεν μπορεί να ρέει ρεύμα από τη δίοδο γιατί είναι απενεργοποιημένη, δηλαδή έχει "αντίστροφη πόλωση". Αντιστοίχως κοινές ονοματολογίες είναι freewheeling diode, snubber diode, suppressor diode, catch diode, clamp diode και commutating diode.

Όπως επεξηγήθηκε παραπάνω, το κύκλωμα διέγερσης ενεργοποιεί-απενεργοποιεί το MOSFET, μέσω ενός microcontroller περιοδικά. Μελετώντας το σύστημα σε μία περίοδο παρατηρείται η εξής συμπεριφορά:

- Ο μικροελεγκτής παράγει λογικό σήμα 1
- Το MOSFET άγει και το πηνίο διαπερνάται από ρεύμα
- Ο μικροελεγκτής παράγει λογικό σήμα 0
- Το MOSFET δεν άγει

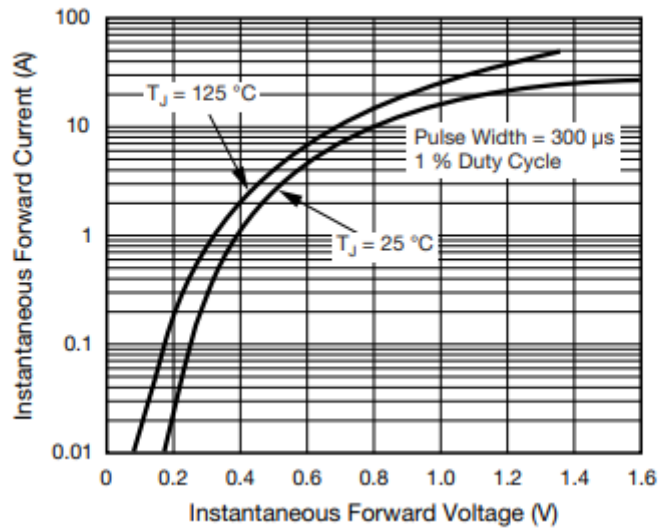
Στο βήμα όπου το MOSFET ακαριαία (εξαιρετικά απότομα) δεν άγει, η τάση στα άκρα του πηνίου από θετική γίνεται μηδενική. Επομένως η μεταβολή της τάσης είναι ακαριαία (εξαιρετικά απότομα) και αρνητική. Επειδή η παράγωγος του ρεύματος ενός πηνίου, είναι ανάλογη με την τάση στα άκρα του, προκύπτει ότι παράγεται ένα στιγμιαίο ρεύμα πολλών Ampere με αρνητική κατεύθυνση, το οποίο εάν δεν εκτονωθεί με ασφαλή τρόπο, αναμένεται να καεί κάποια ασφάλεια, το MOSFET ή χειρότερα η τροφοδοσία του συστήματος. Η flyback diode αποσκοπεί στην εκτόνωση αυτού του ρεύματος.

Στο εργαστήριο επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μια Schottky diode (1N5818) για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της, όπως αυτά παρουσιάζονται στο datasheet(φύλλο δεδομένων) [42]:

- Guarding for overvoltage protection (Προστασία από υπέρταση)
- Very small conduction losses (Πολύ μικρές απώλειες)
- Extremely fast switching (Εξαιρετικά γρήγορες εναλλαγές)
- Low forward voltage drop (Χαμηλή πτώση τάσης)
- High frequency operation (Ικανή λειτουργία σε υψηλές συχνότητες)

Ιεραρχώντας τα παρακάτω κριτήρια, παρόλο που όλα κρίνονται αξιοσημείωτα, ύψιστης σημασίας αποτελούν η χαμηλή V_F και η ορθή λειτουργία σε υψηλές συχνότητες. Η τάση είναι πολύ σημαντική, διότι συνηθίζεται η προτίμηση της τροφοδοσίας των chips στα κυκλώματα, να είναι χαμηλή για λόγους κατανάλωσης. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψιν ότι η ανάστροφη τάση είναι συνάρτηση του ρεύματος, υπάρχει περίπτωση υψηλού overshooting, δημιουργώντας προβλήματα ευστάθειας.

Παρακάτω φαίνεται η καμπύλη της τάσης συναρτήσει του ρεύματος I_F , που διαπερνά την δίοδο όταν αυτή άγει, όπως δίνεται από το datasheet του προϊόντος.



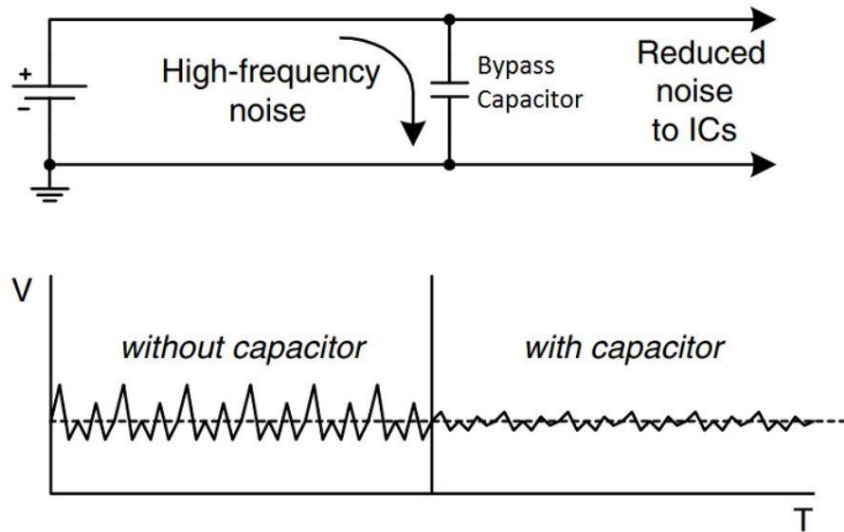
Σχήμα 4.2.2.3 Καμπύλη τάσης V_F συναρτήσει του ρεύματος I_F

Τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος είναι εξίσου σημαντικά για την αποδοτικότητα του κυκλώματος. Ωστόσο η λειτουργία των στοιχείων αυτών είναι αρκετά πιο απλή και σύντομη. Ο πυκνωτής C1, C2 στο σχήμα 4.2.1 είναι, όπως ευρέως αποκαλούνται στην ηλεκτρολογική κοινότητα, decoupling capacitors (πυκνωτές αποσύζευξης ή εξομάλυνσης). Ο decoupling capacitor λειτουργεί ως ένα είδος αποθήκης ενέργειας. Τοποθετείται συνήθως όσο το δυνατόν πιο κοντά στην τροφοδοσία ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος (IC). Μόλις φορτιστεί πλήρως, η δουλειά του είναι να ανταποκριθεί σε οποιαδήποτε απροσδόκητη αλλαγή στις τάσεις εισόδου, όπως παραδείγματος χάριν ενός τροφοδοτικού. Δύο είναι οι κύριες λειτουργίες που αναλαμβάνει:

1. Αν μειωθεί η τάση εισόδου, τότε θα είναι σε θέση να παρέχει αρκετή ισχύ στο ολοκληρωμένο ώστε να διατηρήσει σταθερή την τάση και να αποφευχθεί η αποσταθεροποίηση.
2. Εάν η τάση αυξηθεί, τότε είναι σε θέση να απορροφήσει την περίσσεια ενέργεια που προσπαθεί να ρέει στο IC, διατηρώντας την τάση σταθερή.

Οι λειτουργίες αυτές μεταφράζονται σε ευστάθεια της τροφοδοσίας, εξάλειψη θορύβου και ανεπιθύμητων spikes. Συνηθίζεται αυτό να επιτυγχάνεται με τον συνδυασμό δύο πυκνωτών παράλληλα συνδεδεμένων (π.χ 0.1 uF και 10 uF).

Στο σχήμα 4.2.2.4 φαίνεται η χρησιμότητα του decoupling capacitor. Στο σχήμα παρουσιάζεται ως bypass capacitor, στην πράξη ταυτίζονται οι δύο αυτές έννοιες. Θεωρητικά η μόνη διαφοροποίηση εμφανίζεται στο ότι ο bypass capacitor υποτίθεται, χρησιμοποιείται για πολύ υψηλές συχνότητες.



Σχήμα 4.2.2.4 Λειτουργικότητα του decoupling capacitor σε γράφημα

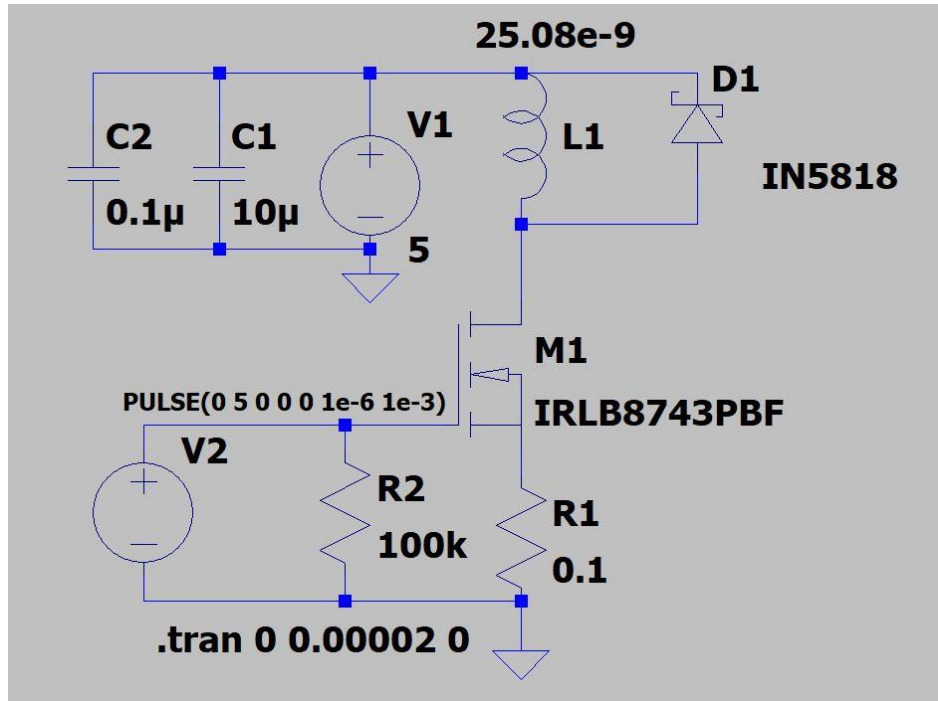
Τέλος, η αντίσταση R2 χρειάζεται για την ορθή λειτουργία του MOSFET και η R1 αποτελεί απλά φορτίο. Έτσι, υπολογίζεται η τάση της αντίστασης R1, για να μετρηθεί ευκολότερα η τιμή του ρεύματος του πηνίου. Η R2 ορίζεται ως μία αντίσταση pull-down. Η χρήση μιας pull-down αντίστασης, διασφαλίζει ότι το σήμα θα είναι 0 ή γείωση. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή όταν ο μικροελεγκτής δίνει λογικό 1, είναι προσδιορίσιμη η λειτουργία. Όταν δίνει λογικό 0 υπάρχει αβεβαιότητα, αν στο gate του MOSFET, εμφανίζεται γείωση ή ανοιχτοκύκλωμα. Επομένως για να διασφαλιστεί η ορθή λειτουργία, προστίθεται μια pull-down αντίσταση, (συνήθως αρκετά μεγάλης τιμής για ελάχιστη κατανάλωση) έτσι ώστε, πάντα το gate στο λογικό 0 να είναι στην γείωση. Ειδάλλως, υπάρχει απροσδιοριστία και το σύστημα μπορεί να εμφανίσει ζητήματα ευστάθειας. Ακόμη, χρησιμοποιείται pull-down έναντι pull-up εξαιτίας του N-channel MOSFET.

4.2.3 Προσομοίωση κυκλώματος διέγερσης

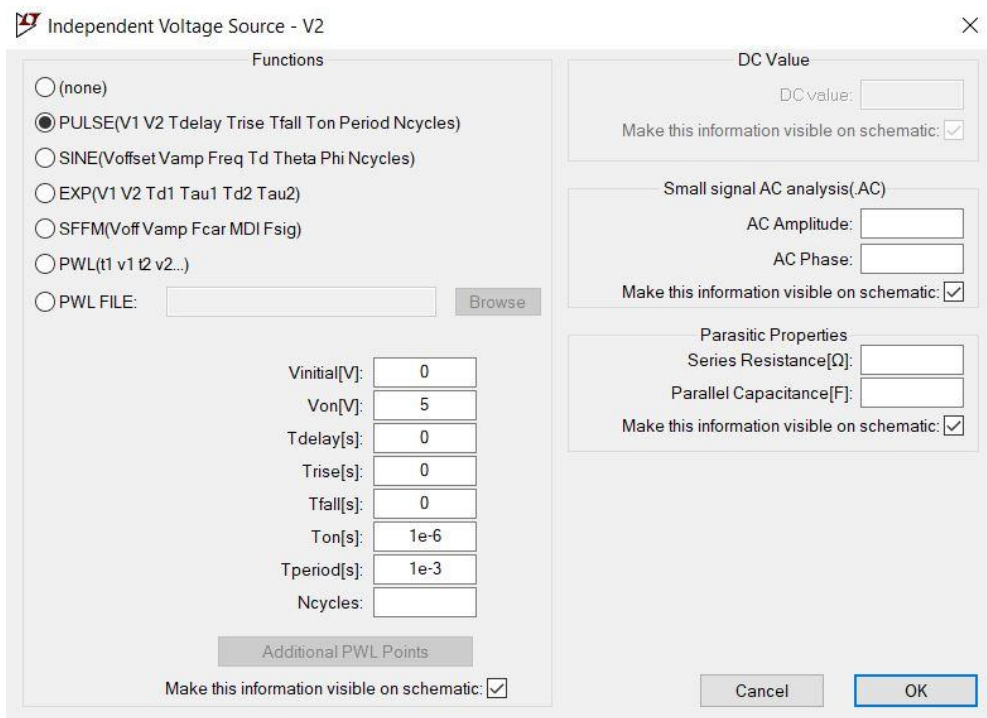
Για την προσομοίωση του κυκλώματος διέγερσης χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα της εταιρίας Analog Devices, LTspice. Είναι ευρέως

διαδεδομένο, επειδή είναι υπολογιστικά γρήγορο, κατάλληλο για προσομοιώσεις ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, υπάρχει εκπαιδευτικό υλικό online (tutorials, components) και διατίθεται δωρεάν.

Για την προσομοίωση επειδή δεν μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί ένας μικροελεγκτής ως κυκλωματικό στοιχείο προστέθηκε μία πηγή τάσης.



Σχήμα 4.2.3.1 Κύκλωμα διέγερσης – Προσομοίωση



Σχήμα 4.2.3.2 Ρύθμιση παραμέτρων του παλμού εισόδου

Στο επόμενο σχήμα θα παρουσιαστεί μια δυσκολία, η οποία θα αναλυθεί αργότερα στην επιλογή του microcontroller.

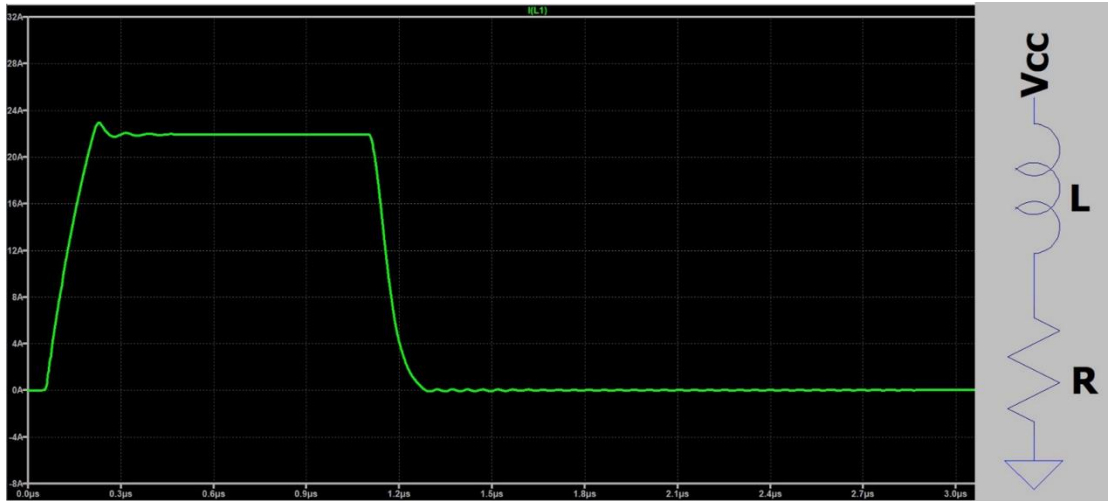
Παρόλο που έχει επιλεγθεί σαν $T_{on}[s] = 1 \text{ us}$ φαίνεται πώς λόγω του t_{rise} και t_{fall} είναι μεγαλύτερος ο χρόνος. Για την συγκεκριμένη εφαρμογή το T_{on} μεταφράζεται στον χρόνο όπου ισχύει:

$$(V_{pulse} = V_{gate}) > (V_{th} + V_{source}) \quad (4.2.3.1)$$



Σχήμα 4.2.3.3 Παλμός διέγερσης

Επίσης, στην προσομοίωση κρίνεται απαραίτητη η μέτρηση, της τιμής του ρεύματος του πηνίου συναρτήσει του χρόνου. Εδώ, να σημειωθεί πως η γραφική του ρεύματος που θα προκύψει θα απέχει από το πραγματικό σήμα, καθώς κατά τον ενδιάμεσο υπολογισμό των αποτελεσμάτων, δεν λαμβάνονται υπόψιν όλες οι παράμετροι (π.χ Θόρυβος).



Σχήμα 4.2.3.4 Αριστερά η γραφική του ρεύματος του πηνίου διέγερσης συναρτήσει του χρόνου και δεξιά η συμπεριφορά του κυκλώματος διέγερσης όταν άγει το MOSFET

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης εκτιμάται ορθό και λογικό. Όταν άγει το MOSFET το κύκλωμα διέγερσης μπορεί να παρασταθεί, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.2.3.4(δεξιά). Εστιάζοντας στο κομμάτι που το MOSFET άγει, δηλαδή η τάση του παλμού διέγερσης είναι μεγαλύτερη της τάσης κατωφλίου (V_{th}) του MOSFET, το κύκλωμα γίνεται ισοδύναμο με ένα RL series κύκλωμα.

Από την κυκλωματική ανάλυση, λύνοντας μια διαφορική εξίσωση πρώτου βαθμού και χρησιμοποιώντας τους νόμους του Kirchhoff, προκύπτει η εξίσωση του ρεύματος του πηνίου.

$$I(t) = \frac{E}{R} * \left(1 - \exp\left(-\frac{R * t}{L}\right)\right) \quad (4.2.3.2)$$

Όπου E η τάση τροφοδοσίας (V_{CC}) σε Volts, R η αντίσταση σε σειρά σε Ohms, L η αυτεπαγωγή του πηνίου σε Henry και το t ο χρόνος σε seconds.

Αυτός ο τύπος ισχύει για το αριστερό κομμάτι όπου το ρεύμα ανεβαίνει, δηλαδή για $t \in [t_1, t_2]$, με t_1 να είναι ο χρόνος όπου η τάση V_{gs} , από μικρότερη γίνεται ίση με την τάση threshold και t_2 , όταν σταθεροποιείται η τάση του πηνίου.

Σε παρόμοια ανάλυση, όταν ξαφνικά το MOSFET σταματά να άγει, προκύπτει ο τύπος για το δεξιό κομμάτι της γραφικής:

$$I(t) = \frac{E}{R} * \left(\exp\left(-\frac{R * t}{L}\right)\right) \quad (4.2.3.3)$$

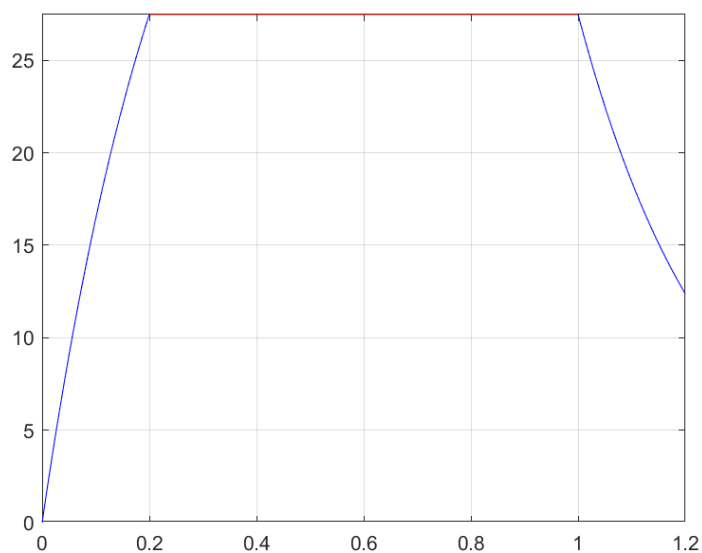
Για να επαληθευθεί η θεωρία που αναφέρθηκε παραπάνω, υλοποιήθηκε σε MATLAB ένα script, όπου σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.2.3.2 – 4.2.3.3) παράγει την γραφική παράσταση.

```

1  %%parameters
2  Vcc = 5;    %Volts
3  R = 0.1;    %Ohm
4  L = 25.08;  %nHenry
5  A = Vcc/R;
6  Vstable = A*( 1- exp(-a*0.2));
7  a = R *1000/L;
8
9  %%define equations
10 eq1(t) = A*( 1- exp(-a*t));
11 eq2(t) = Vstable*(exp(-a*(t-1)));
12
13 %%plot
14 fplot(@(t) eq1(t), [0, 0.2], 'b');
15 hold on;
16 fplot(@(t) Vstable, [0.2, 1], 'r');
17 hold on;
18 fplot(@(t) eq2(t), [1, 1.2], 'b');
19 hold off;
20 grid on;|
21
22 % syms I(t);
23 % I(t) = piecewise(0 < t < 0.2, eq1(t), 0.2 <= t < 1, Vstable, 1 <= t < 1.2, eq2(t));
24 % fplot(I);

```

Σχήμα 4.2.3.5 Κώδικας MATLAB για παραγωγή γραφήματος και επαλήθευση



Σχήμα 4.2.3.6 Αποτέλεσμα του κώδικα – Γραφική ρεύματος

Συγκρίνοντας τα σχήματα, επαληθεύεται η θεωρία. Παρακάτω προστίθεται η γραφική της τάσης στα άκρα του πηνίου σε κοινό γράφημα.



Σχήμα 4.2.3.7 Τάση στα άκρα του πηνίου διέγερσης(πράσινο χρώμα) και ρεύμα πηνίου διέγερσης(κόκκινο χρώμα)

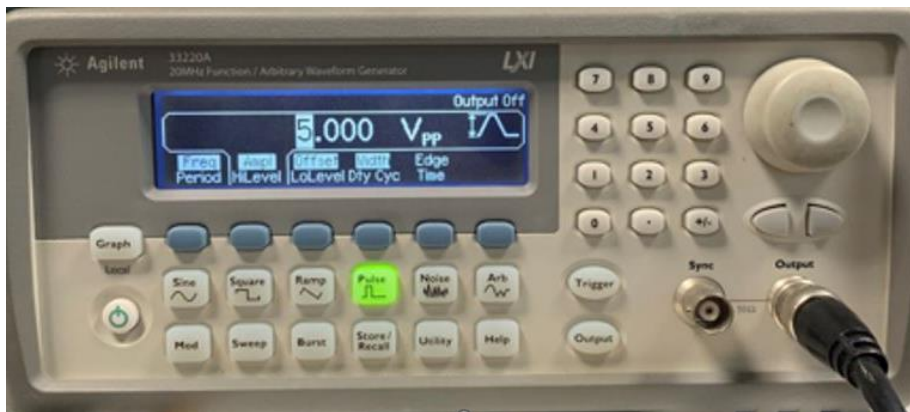
Στο σχήμα 4.2.3.7 φαίνεται πως το αποτέλεσμα που εξάχθηκε από την προσομοίωση, είναι ορθό και προβλεπόμενο. Όταν η τάση είναι μηδέν, η παράγωγος του ρεύματος είναι μηδέν, επομένως το ρεύμα έχει σταθερή τιμή. Όταν η τάση είναι μεταβαλλόμενη, αποδείχθηκε με τις εξισώσεις (4.2.3.2 – 4.2.3.3), γιατί προκύπτει με την μορφή αυτή, το γράφημα του ρεύματος. Η ενδιαφέρουσα παρατήρηση σε αυτό το γράφημα είναι η μικρή ταλάντωση που συμβαίνει όταν $t \geq 1.2 \mu s$. Ακόμη, παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζεται στην γραφική του ρεύματος, ενώ στην τάση φαίνεται πιο καθαρά και έντονα. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι αναπάντεχο αυτό το σήμα. Συμπεριλαμβάνοντας όμως την συνολική λειτουργία, είναι η σωστή συμπεριφορά και αυτό το φαινόμενο οφείλεται στην flyback diode και στο χαρακτηριστικό της που ονομάζεται recovery time.

4.2.4 Απόκριση κυκλώματος διέγερσης

Το τελευταίο τεστ που υλοποιήθηκε στο κύκλωμα διέγερσης με την βοήθεια μιας γεννήτριας, για να αποφευχθεί στο πρώιμο στάδιο η ανάπτυξη του software στον microcontroller, ήταν να παραχθεί ως είσοδος, ένας παλμός στο κύκλωμα διέγερσης, το οποίο πλέον έχει τοποθετηθεί σε breadboard πλακέτα. Παρατίθενται σχετικά σχήματα στο κεφάλαιο 5, στο οποίο αναφέρεται στο εργαστηριακό κομμάτι. Στην γεννήτρια ορίστηκε, παλμός πλάτους 5 V και συχνότητα 1kHz με $T(on) = 1 \mu s$. Ακόμη, το κύκλωμα χρειαζόταν τροφοδοσία 5 V, η οποία αποκτήθηκε μέσω ενός τροφοδοτικού εργαστηρίου.



Σχήμα 4.2.4.1 Συχνότητα στην γεννήτρια



Σχήμα 4.2.4.2 Peak to Peak τάση παλμού γεννήτριας



Σχήμα 4.2.4.3 Duty cycle παλμού

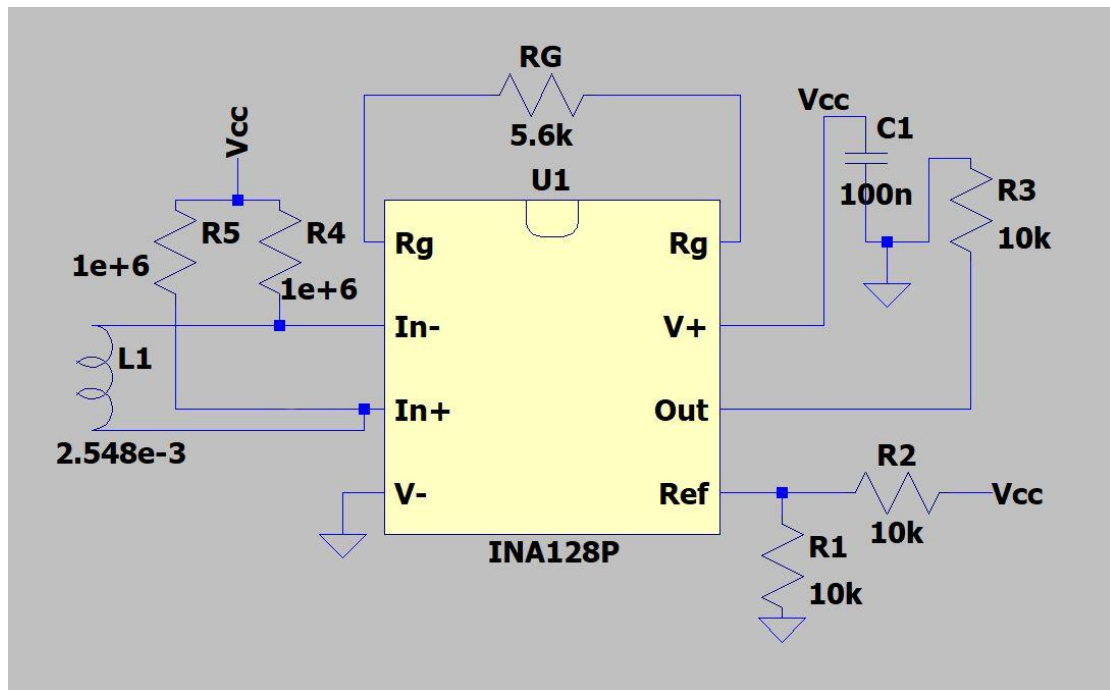


Σχήμα 4.2.4.4 DC offset

Το DC offset προστέθηκε με την λογική να μην υπάρχει αρνητική τάση. Αν και στα πλαίσια των δοκιμών της δεδομένης στιγμής, δεν ήταν απαραίτητη. Όμως, προτιμήθηκε να είναι όσο πιο παραπλήσιο γίνεται στο τελικό πείραμα. Οι κυματομορφές, που παρατηρήθηκαν μετά τη δοκιμή στο breadboard, ήταν αρκετά υποσχόμενες. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η κόλληση του κυκλώματος σε through-hole πλακέτα, που παρατηρήθηκαν αντίστοιχα σήματα και αισθητά λιγότερο θορυβώδη (οι κυματομορφές που παρατηρήθηκαν στον παλμογράφο παρατίθενται στο 5^ο κεφάλαιο).

4.3 Κύκλωμα λήψης

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, το παλμικό σήμα των άκρων του πηνίου διέγερσης, στη συνέχεια μεταδίδεται με τη μορφή ελαστικού παλμού κατά μήκος του MDL και φτάνει στο πηνίο λήψης. Με την άφιξη αυτού του ελαστικού παλμού στο Ls, φανερώνεται ένα αναλογικό σήμα στα άκρα του. Το σήμα αυτό δεν είναι σε κατάλληλη μορφή ώστε να μπορέσουμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για τη λειτουργία του αισθητήρα, οπότε μέσω της διάταξης λήψης, το σήμα αυτό διαμορφώνεται (ενισχύεται και αποθορυβοποιείται κυρίως) ανάλογα με τις προτιμήσεις μας. Το κύκλωμα λήψης φαίνεται στο σχήμα 4.3.1:



Σχήμα 4.3.1 Κόκλωμα λήψης σχεδιασμένο στο LTSpice

4.3.1 Προδιαγραφές κυκλώματος λήψης

Η υλοποίηση της ορθής λειτουργίας του κυκλώματος λήψης παρουσιάζει κάποιες δυσκολίες, που δεν εντοπίζονται τόσο εύκολα. Δηλαδή, σε συνθήκες που φαίνεται ιδανική η λειτουργία, μπορεί εύκολα με μία μικρή μεταβολή συνθηκών, να αποτύχει, απορρίπτοντας την αρχική ιδέα σχεδίασης. Έτσι προκύπτουν ζητήματα αξιοπιστίας και ευστάθειας.

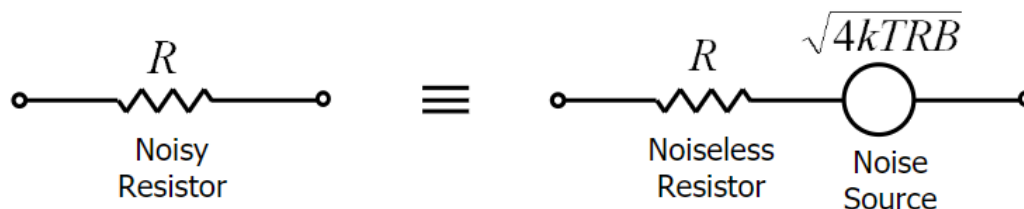
Για την επίλυση αυτών των θεμάτων, πρέπει αρχικά να εξεταστεί το σήμα εισόδου στο κύκλωμα λήψης. Είναι πολύ δύσκολο το σήμα εισόδου να προβλεφθεί είτε θεωρητικά είτε με προσομοίωση. Επομένως, για να προσδιορίσουμε καλύτερα τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται, για την ορθή λειτουργία του, πρέπει να εφαρμοστεί αποκλειστικά πειραματική μέθοδος. Για την καλύτερη κατανόηση μετρήθηκε αρκετές φορές το σήμα στα άκρα του πηνίου λήψης, δηλαδή το σήμα εισόδου.

Αρχικά, παρατηρήθηκε η μορφή του σήματος στα άκρα του πηνίου λήψης. Το σήμα αυτό είχε αρκετές, ποιοτικές ομοιότητες, με το σήμα δύο αντίθετων παλμών που αναλύθηκε στο 3ο κεφάλαιο και συγκεκριμένα στην ενότητα 3.2. Τα δύο κύρια χαρακτηριστικά που παρατηρήθηκαν:

1. Το σήμα εισόδου είναι πολύ θορυβώδες.
2. Πολύ χαμηλό σήμα της τάξης των 10-80 mV.

Με το 2^ο χαρακτηριστικό συσχετίζεται το πηνίο διέγερσης, όπως αναφέρθηκε στην υποένότητα 4.2.1, απαιτείται να έχουμε μεγάλο ρεύμα. Η συγκεκριμένη απαίτηση προέκυψε με σκοπό, την δημιουργία μεγαλύτερου πλάτους εισόδου στο κύκλωμα λήψης. Σε τόσο χαμηλό πλάτος, εύλογα συμπεραίνεται ότι το σήμα θα είναι θορυβώδες. Ο θόρυβος πιθανόν να εμφανίζεται για τους εξής λόγους:

1. **Υλικά.** Οι αντιστάσεις, οι πυκνωτές και τα καλώδια παράγουν κάποιο θόρυβο στο σήμα. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο, είναι συνηθισμένα και όχι ειδικής χρήσεως. Τα πηνία, επειδή κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο με χειρωνακτικό τρόπο, ίσως δημιουργούν περισσότερο θόρυβο έναντι κάποιων με βιομηχανικές προδιαγραφές. Η ποιότητα των συνηθισμένων καλωδίων σε ένα τόσο μικρό σήμα ασκούν επιρροή στο σήμα. Αν προσομοιωθεί το καλώδιο ως αντίσταση με τον τύπο: $R = \rho * \frac{l}{S}$, τότε ισοδυναμεί, με μία αντίσταση και μία πηγή θορύβου, της οποίας ο τύπος φαίνεται στο σχήμα 4.3.1.1.



Σχήμα 4.3.1.1 Ισοδύναμο μοντέλο θορύβου αντίστασης

Προσεγγιστικά μπορεί να παρουσιαστεί και να προσομοιωθεί ως white noise. Στην πραγματικότητα διαφέρει από τον λευκό θόρυβο, αλλά στα πλαίσια μιας προσομοίωσης θεωρείται ικανοποιητική λύση.

2. **Flicker Noise.** Αυτό το είδος θορύβου πιστεύεται ότι προκαλείται από φορείς φορτίου που παγιδεύονται τυχαία και απελευθερώνονται μεταξύ των διεπαφών δύο υλικών.
3. **Εξωτερικές παρεμβολές.** Σε παρεμβολές από γειτονικά εξωτερικά μαγνητικά πεδία που υφίστανται στο περιβάλλον του εργαστηρίου (ίσως εντονότερα λόγω και της μαγνητικής φύσης του αισθητήρα)
4. **Ground Noise or electrical interference or crosstalk.** Θόρυβος από την γείωση. Το ρεύμα που ρέει στη γείωση ενός κυκλώματος από άλλο κύκλωμα προκαλεί αύξηση του δυναμικού γείωσης (θόρυβος). Επίσης, η δημιουργία

ground loop(βρόγχος γείωσης) μπορεί να επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις. Δεν θα επεκταθεί στην παρούσα εργασία η έννοια του ground loop.

Να τονισθεί, ότι κρίσιμο ρόλο διαδραμάτισε, η πραγματοποίηση των πρώτων τεστ σε breadboard.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, το σήμα εισόδου πρέπει να αποθρομβοποιηθεί και να ενισχυθεί. Με τα δεδομένα στοιχεία μπορούν να τεθούν αναλυτικότερα οι προδιαγραφές. Το αναλογικό σήμα εισόδου, επειδή διαβάζεται από έναν μικροελεγκτή, πρέπει να ενισχυθεί τουλάχιστον επί είκοσι φορές, θεωρώντας ότι το εύρος εισόδου είναι 10-80 mV. Αν το σήμα σε κάποιες περιοχές είναι αρνητικό, θα προκύψει πρόβλημα στο αναλογικό διάβασμα της τάσης, από το αναλογικό pin του μικροελεγκτή και πιθανόν να καεί το chip. Συνεπάγεται ότι, είτε πρέπει να ημιανορθωθεί το σήμα, είτε να προστεθεί ένα DC offset.

4.3.2 Ανάλυση κυκλώματος λήψης

Στάδιο διαφορικού ενισχυτή:

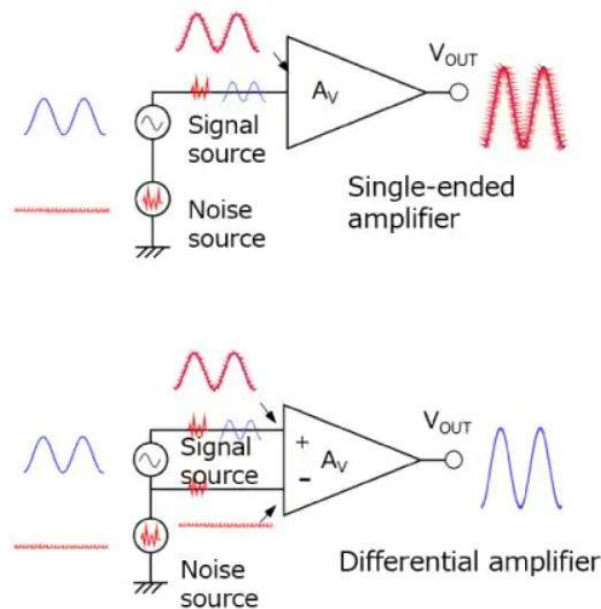
Το κύκλωμα λήψης διαμορφώνει το σήμα που δέχεται το πηνίο λήψης στα άκρα του, ώστε να λαμβάνεται πιο καθαρό, ενισχυμένο και κατάλληλα επεξεργασμένο, με σκοπό να είναι διαχειρίσιμο το σήμα, από τον μικροελεγκτή. Γνωρίζοντας τις προδιαγραφές, ορίστηκαν τα θεμέλια για την υλοποίηση του κυκλώματος λήψης. Στα αναλογικά κυκλώματα, όταν περιλαμβάνεται το κριτήριο της ενίσχυσης, συνήθως η λύση για την ικανοποίηση του κριτηρίου, είναι ένας τελεστικός ενισχυτής (op amp). Βέβαια τίθενται τα προβλήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, μικρό εύρος τάσης και πολύς θόρυβος. Οι περισσότεροι op amps ενισχύουν σήματα μεγαλύτερου εύρους τάσης και δεν διαθέτουν την ικανότητα ενίσχυσης τόσο μικρού εύρους. Ακόμη δεν είναι ικανοποιητικά αποτελεσματικοί, για τον βαθμό αποθρομβοποίησης που χρειάζεται στην συγκεκριμένη εφαρμογή.

Το επόμενο βήμα, ήταν η επιλογή ενός ποιοτικού διαφορικού ενισχυτή. Ένας διαφορικός ενισχυτής παρουσιάζει μεγάλο πλεονέκτημα, έναντι ενός απλού τελεστικού, στο ζήτημα της αποθρομβοποίησης. Τα χαρακτηριστικά του εξαλείφουν τον θόρυβο σε ικανοποιητικό βαθμό. Για αυτό, χρησιμοποιούνται κυρίως για την καταστολή του θορύβου. Ο θόρυβος αποτελείται από τυπικό διαφορικό θόρυβο και θόρυβο κοινής λειτουργίας, ο οποίος μπορεί εύκολα να κατασταλεί με έναν ενισχυτή. Υπάρχουν δύο κύριες αιτίες του θορύβου κοινής λειτουργίας:

1. Ο θόρυβος δημιουργείται στα καλώδια, λόγω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής κ.λπ., έτσι, προκαλεί διαφορά στο δυναμικό (δηλαδή θόρυβο) μεταξύ της γείωσης της πηγής σήματος και της γείωσης του κυκλώματος.
2. Το ρεύμα που ρέει στη γείωση ενός κυκλώματος από ένα άλλο κύκλωμα προκαλεί αύξηση του δυναμικού γείωσης (θόρυβος).

Και στις δύο περιπτώσεις, το πιθανό δυναμικό γείωσης, μια αναφορά (κόμβος αναφοράς) για ένα κύκλωμα, κυμαίνεται λόγω του θορύβου. Είναι δύσκολο να αφαιρεθεί ο θόρυβος κοινής λειτουργίας με τυπικά φίλτρα. Οι διαφορικοί ενισχυτές χρησιμοποιούνται ως μέσο καταστολής του θορύβου κοινής λειτουργίας. Απλουστευμένα, ο διαφορικός ενισχυτής ενισχύει την διαφορά των δύο σημάτων. Αφού ο θόρυβος προστίθεται και στα δύο σήματα, όταν αυτά αφαιρούνται μεταξύ τους, αφαιρείται και ο θόρυβος.

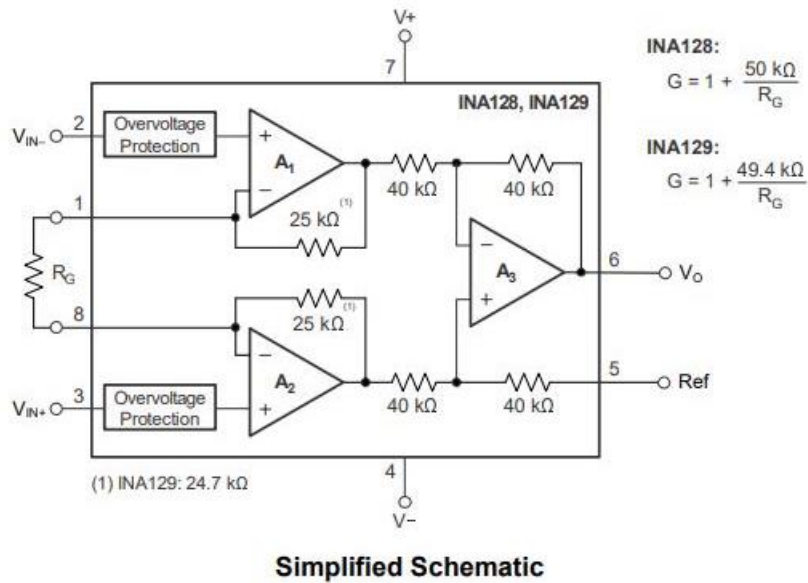
$$V = V1 - V2 = u1 + Vnoise - (u2 + Vnoise) = u1 - u2 \quad (4.3.2.1)$$



Σχήμα 4.3.2.1 Απεικόνιση της διαφοράς μεταξύ ενός απλού ενισχυτή με ενός διαφορικού ενισχυτή στην αποθροβοποίηση

Αθροίζοντας όλα τα ζητούμενα επιλέχθηκε το chip INA128P. Είναι ένα chip-ενισχυτής χαμηλής κατανάλωσης που προσφέρει εξαιρετική ακρίβεια. Η ευέλικτη σχεδίαση των τριών λειτουργικών ενισχυτών και το μικρό μέγεθος, τον κάνει μία εξαιρετική επιλογή για ευρύ φάσμα εφαρμογών. Το κύκλωμα εισόδου τρέχουσας ανάδρασης παρέχει ακόμη μεγάλο εύρος ζώνης σε υψηλό κέρδος (200 kHz με $G = 100$, $G =$ κέρδος). Με μία αντίσταση εξωτερικά ορίζεται το κέρδος από 1 έως 10.000.

Ακόμη, παρέχει ένα βιομηχανικό πρότυπο εξίσωσης κέρδους χρησιμοποιώντας αντίσταση 50 kΩ.



Σχήμα 4.3.2.2 Αναλυτικό σχηματικό του INA128P

1 Features

- Low offset voltage: 50 μV, maximum
- Low drift: 0.5 μV/°C, maximum
- Low input bias current: 5 nA, maximum
- Low noise: 8 nV/√Hz, 0.2 μVpp
- High CMR: 120 dB, minimum
- Bandwidth: 1.3 MHz (G = 1)
- Inputs protected to ±40 V
- Wide supply range: ±2.25 V to ±18 V
- Low quiescent current: 700 μA
- Packages: 8-pin plastic DIP, SO-8

2 Applications

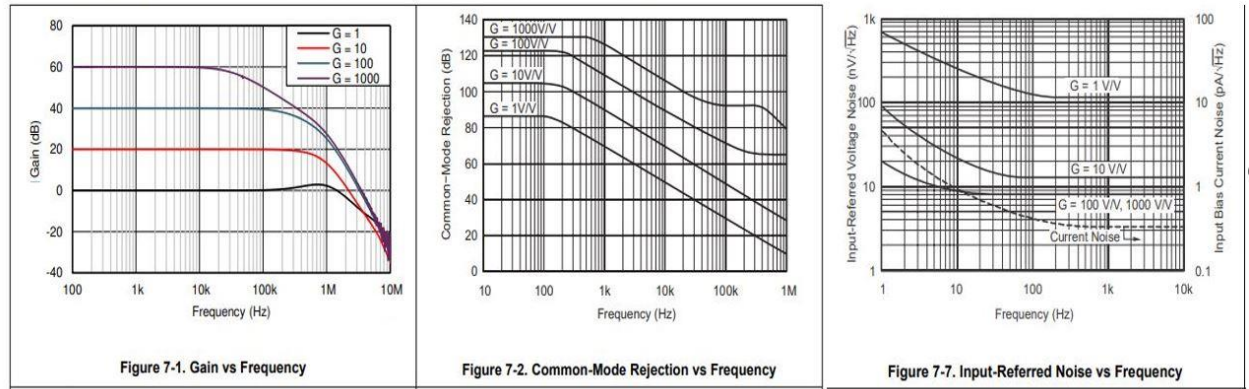
- [Pressure transmitter](#)
- [Temperature transmitter](#)
- [Weigh scale](#)
- [Electrocardiogram \(ECG\)](#)
- [Analog input module](#)
- [Data acquisition \(DAQ\)](#)

Σχήμα 4.3.2.3 Τα χαρακτηριστικά και οι εφαρμογές του INA128P όπως παρουσιάζονται στο φύλλο δεδομένων

Τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και σημαντικό όφελος διακρίνονται στο σχήμα 4.3.2.3. Το chip προσφέρει μεγάλο εύρος στο κέρδος, μεγάλο bandwidth συχνοτήτων, ελάχιστη κατανάλωση, προστασία από υπέρταση, μεγάλο εύρος τροφοδοσίας εισόδου, υψηλό CMR(common rejection mode) και χαμηλό θόρυβο.

7.6 Typical Characteristics

at $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{ V}$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$, $V_{REF} = 0\text{ V}$, $V_{CM} = V_S / 2$, and $G = 1$ (unless otherwise noted)



Σχήμα 4.3.2.4 Διάγραμμα κέρδους-συχρότητας(αριστερά), CMR – συχρότητας(κέντρο), θόρυβος εισόδου – συχρότητα(δεξιά)

Επιπρόσθετα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.2.2 υπάρχει ένα pin που ονομάζεται Ref. Η τιμή της DC τάσης, σε αυτό το pin, προσθέτει ένα DC offset στο σήμα, ίδιας τιμής. Είναι κατανοητό ότι το chip *INA128P* ή έστω ένα παρόμοιο, κρίνεται το ιδανικό για την εφαρμογή της διπλωματικής, καθώς καλύπτονται όλες οι προδιαγραφές με μόνο ένα chip.

Επιλογή αντίστασης R_G :

Επειδή εξ αρχής υπήρχε δυσκολία για τον προσδιορισμό της τιμής της αντίστασης R_G , τοποθετήθηκε ένα multiturn trimmer (μεταβλητή αντίσταση), ώστε να καθοριστεί η τελική τιμή της πειραματικά.

Αντιστάσεις R_4 , R_5 :

Η αντίσταση εισόδου του INA είναι εξαιρετικά υψηλή (10 GΩ περίπου). Ωστόσο, πρέπει να παραχωρηθεί ένα μονοπάτι για το ρεύμα πόλωσης εισόδου, και των δύο εισόδων. Αυτό το ρεύμα πόλωσης είναι πολύ μικρό (2 nA είναι επαρκές). Η πολύ υψηλή τιμή της αντίστασης εισόδου, σημαίνει ότι αυτό το ρεύμα αλλάζει ελάχιστα με την μεταβολή της τάσης εισόδου. Το κύκλωμα πριν την είσοδο του ενισχυτή πρέπει να παρέχει μια διαδρομή για το ρεύμα πόλωσης εισόδου, ώστε να επιτευχθεί η σωστή λειτουργία του. Για chips που χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές, συνηθίζεται στο φύλλο δεδομένων, να περιέχεται μία ενότητα που αποκαλείται typical application. Στο συγκεκριμένο φύλλο δεδομένων, σε αυτή την ενότητα, υπάρχουν κάποιες πιθανές συνδεσμολογίες, ικανές να δημιουργήσουν μια τέτοια διαδρομή. Χωρίς τη διαδρομή

αυτή, οι εισόδοι οδηγούνται σε ανεπιθύμητη κατάσταση, με αποτέλεσμα το δυναμικό να υπερβαίνει το εύρος κοινής λειτουργίας και οι ενισχυτές εισόδου να κορεστούν. Με υψηλότερη σύνθετη αντίσταση πηγής, η χρήση δύο ίσων αντιστάσεων παρέχει ένα πιο ισορροπημένο σήμα εισόδου, με πιθανά πλεονεκτήματα την χαμηλότερη τάση εισόδου offset, που επιτυγχάνεται μέσω του ρεύματος πόλωσης, καλύτερη υψηλή-συχνότητα απόρριψης κοινής λειτουργίας (high-frequency common-mode rejection).

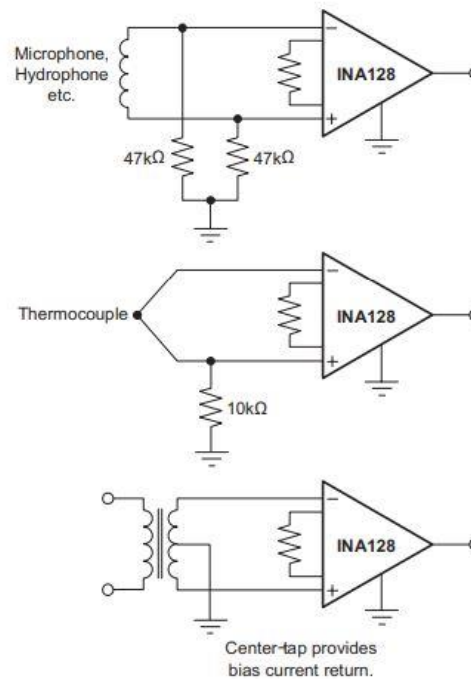


Figure 9-3. Providing an Input Common-Mode Current Path

Σχήμα 4.3.2.5 Συνδεσμολογίες που παρέχουν ρεύμα πόλωσης – εισόδου

Αντιστάσεις R1, R2:

Οι αντιστάσεις R1, R2 έχουν τοποθετηθεί για να καθορίζουν την τάση στο pin Ref του chip. Η τάση που δημιουργείται σε αυτό το pin προστίθεται στο τελικό σήμα. Επομένως, αυτές οι αντιστάσεις καθορίζουν το DC offset, το οποίο όπως εξηγήθηκε είναι σημαντικό για το αναλογικό pin του μικροελεγκτή. Οι τιμές 10kΩ δεν επιλέχθηκαν με κάποιο μαθηματικό τρόπο. Επειδή προτιμήθηκε η τάση σε αυτό το pin να ισούται με $0,5 * V_{cc}$, έτσι αποφασίστηκε να έχουν την ίδια ακριβώς τιμή. Η ουσία βρίσκεται στη δημιουργία ενός διαιρέτη τάσης με συντελεστή 0,5. Το datasheet δίνει μία συνδεσμολογία με ένα op amp της οικογενείας OPA για να ρυθμίζει την τάση, αλλά

για την εφαρμογή διαπιστώθηκε ότι δεν ήταν απαραίτητο να υλοποιηθεί επιπλέον κυκλωματική διάταξη.

9.2.2.3 Offset Trimming

The INA12x is laser trimmed for low-offset voltage and low offset voltage drift. Most applications require no external offset adjustment. Figure 9-2 shows an optional circuit for trimming the output offset voltage. The voltage applied to the REF pin is summed with the output. The op-amp buffer provides low impedance at the REF pin to preserve good common-mode rejection.

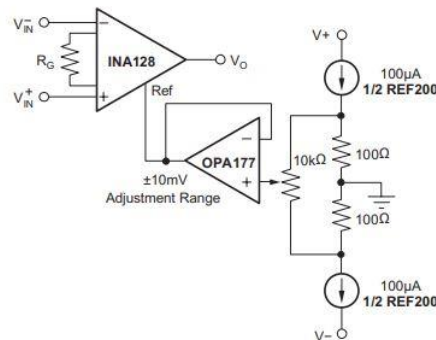


Figure 9-2. Optional Trimming of Output Offset Voltage

Σχήμα 4.3.2.5 Πιθανή υλοποίηση ρύθμισης της τάσης στο pin Ref

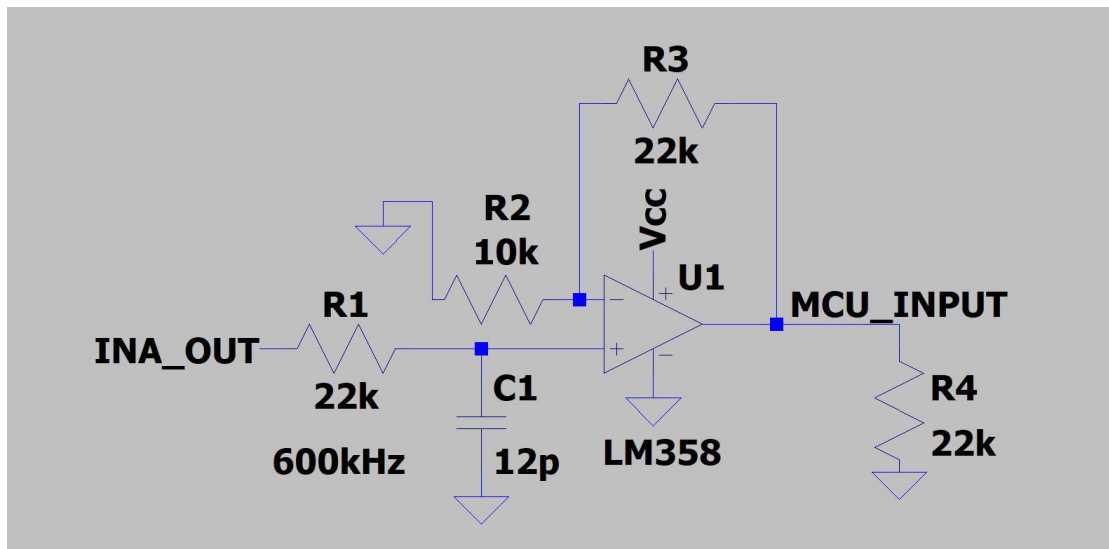
Στοιχεία R3, C1:

Ο πυκνωτής C1 λαμβάνει το ρόλο του decoupling πυκνωτή, που η λειτουργία του έχει εξηγηθεί στην υποένοτητα 4.2.2. Η R3 είναι το φορτίο στην έξοδο. Η τιμή της R3 επιλέχθηκε χωρίς ιδιαίτερους υπολογισμούς, αφού μπορεί να χαρακτηριστεί σε αυτό το κύκλωμα, «αδιάφορη». Να σημειωθεί ότι, δεν συνίσταται αντίσταση λίγων Ohm, για την αποφυγή μεγάλων ρευμάτων.

Στάδιο φίλτρου – ενίσχυση:

Μετά το στάδιο της ενίσχυσης και της αποθρομβοποίησης, υλοποιήθηκε άλλο ένα στάδιο, με τις εξής λειτουργίες:

- φιλτράρισμα υψίσυχνων σημάτων
- ενίσχυση, εφόσον αυτή θεωρηθεί αναγκαία



Σχήμα 4.3.2.7 Δεύτερο στάδιο στο κύκλωμα λήψης σχεδιασμένο στο LTSpice

Από τα πειραματικά δεδομένα, παρατηρήθηκε ότι ένα χαμηλοπερατό (low pass) φίλτρο, συχνότητας αποκοπής περίπου μεγαλύτερης των 600 kHz δεν παραμορφώνει το σήμα εισόδου, αντιθέτως το «καθαρίζει» λίγο. Το low pass φίλτρο αποτελείται από την αντίσταση R1 και τον πυκνωτή C1. Η ακριβής θεωρητική συχνότητα αποκοπής υπολογίστηκε στα 603,16 kHz από τον τύπο:

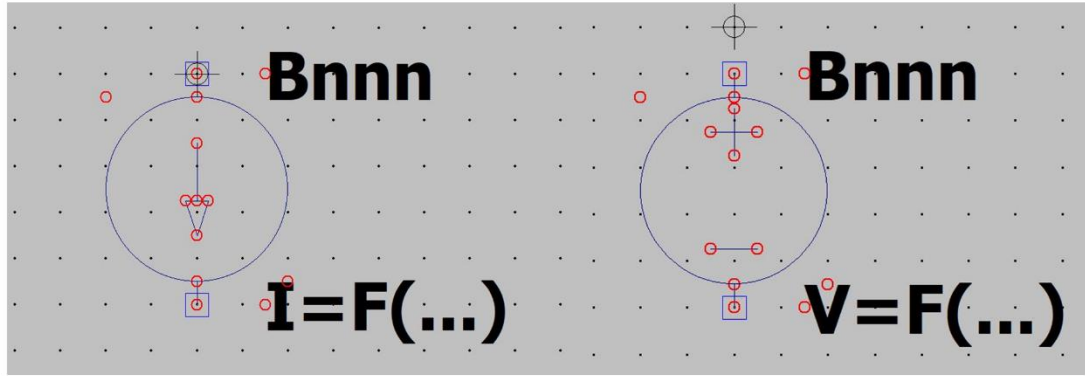
$$f_{cutoff} = \frac{1}{2 * \pi * R * C} \quad (4.3.2.1)$$

Η ενίσχυση στην πραγματικότητα δεν είναι σταθερή όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.2.7, ο λόγος R3/R2 καθορίζει την ενίσχυση. Για πρακτικούς λόγους, όπως, ευκολία στο testing, τοποθετήθηκε στο κύκλωμα ένα multiturn trimmer (R3). Η έξοδος οδηγείται σε ένα αναλογικό pin του μικροελεγκτή. Η R4 είναι το φορτίο και μια pull-down αντίσταση.

4.3.3 Προσομοίωση κυκλώματος λήψης

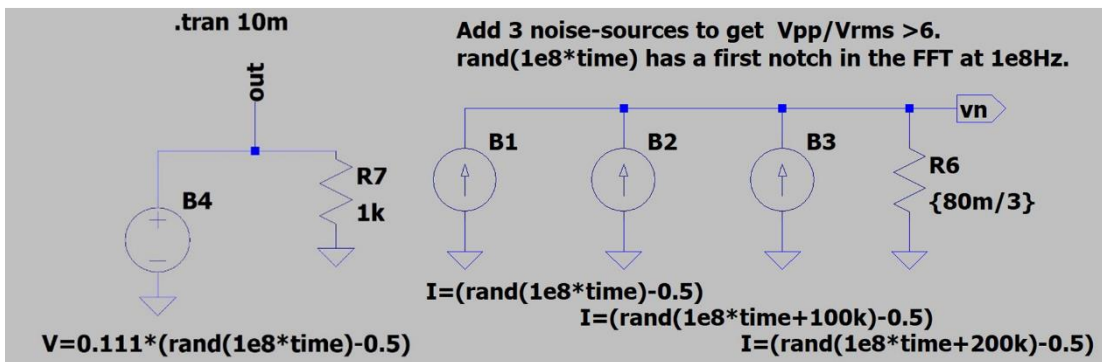
Όπως αναφέρθηκε στις προδιαγραφές του κυκλώματος λήψης, το θορυβώδες σύστημα μπορεί να προσεγγιστεί ως λευκός θόρυβος. Για αυτό τον λόγο, στο LTSpice υλοποιήθηκε ένα κύκλωμα που παράγει λευκό θόρυβο.

Θα παρουσιαστούν δύο τρόποι παραγωγής λευκού θορύβου, ο ένας με πηγή ρεύματος και ο άλλος με πηγή τάσης. Στην τελική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος με την πηγή τάσης. Αρχικά, δημιουργήθηκαν τα .asy αρχεία που είναι τα σύμβολα για το schematic του LTSpice.

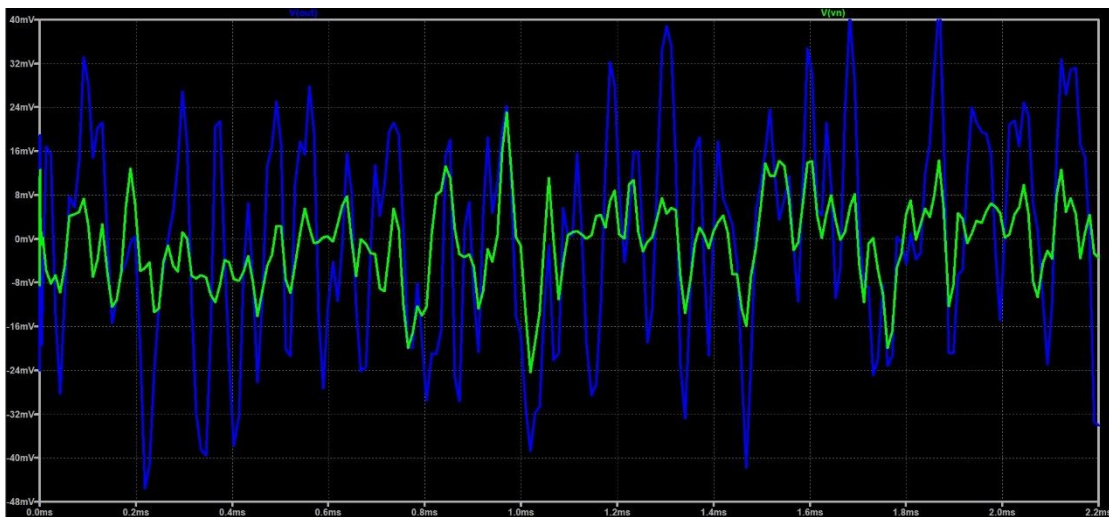


Σχήμα 4.3.3.1 Το σύμβολο της πηγής ρεύματος(αριστερά) και το σύμβολο της πηγής τάσης(δεξιά)

Μετάπειτα υλοποιήθηκαν τα κυκλώματα που παράγουν τον θόρυβο.



Σχήμα 4.3.3.2 Κύκλωμα λευκού θορύβου παραγόμενο από πηγή τάσης(αριστερά), από πηγή ρεύματος(δεξιά)

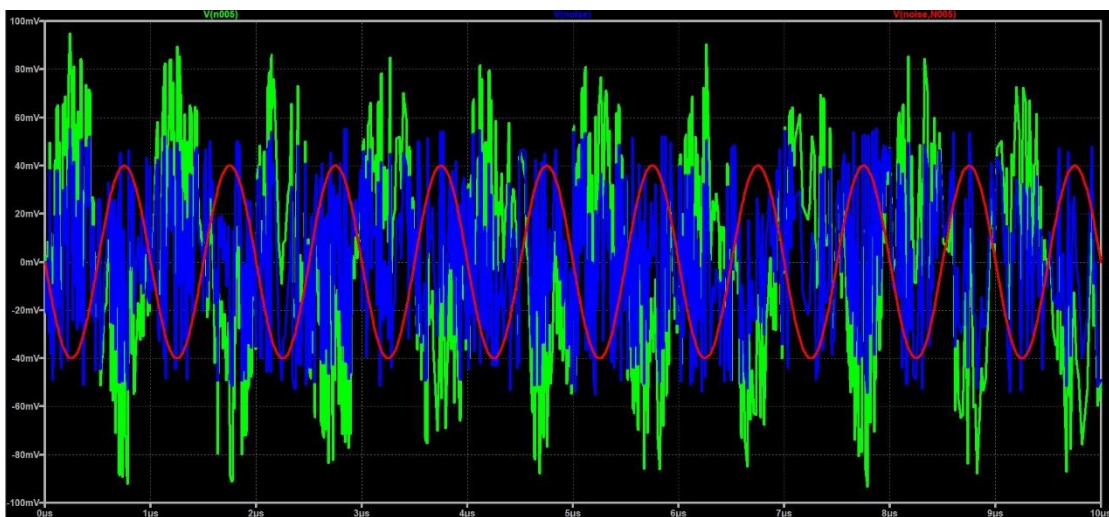


Σχήμα 4.3.3.3 Το σήμα λευκού θορύβου της πηγής τάσης(μπλε) και το σήμα λευκού θορύβου της πηγής ρεύματος(πράσινο)

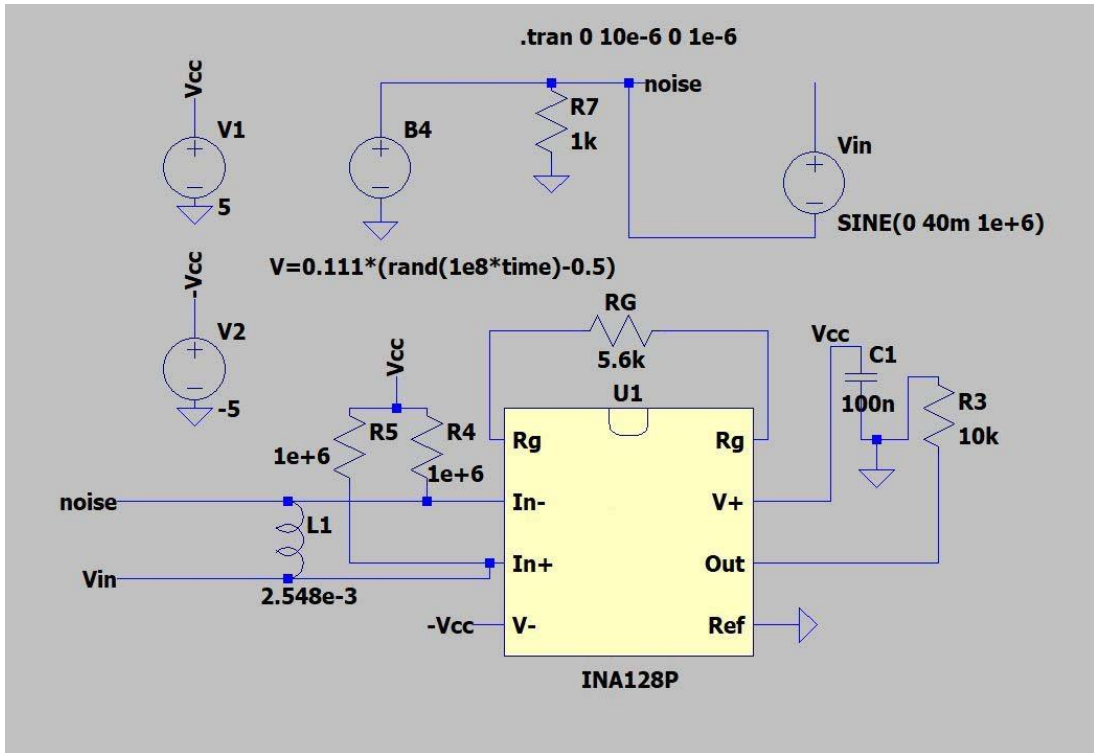
Στο σχήμα 4.3.3.3 φαίνεται, πως τα σήματα είναι σχεδόν όμοια, με μια διαφοροποίηση στο πλάτος, που έγινε σκοπίμως, με στόχο να είναι εμφανές ότι είναι ίδια, ειδάλλως θα ταυτιζόντουσαν στο σχήμα και δεν θα φαινόταν στην προσομοίωση.

Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση του INA128P, ώστε να αποδειχθεί σε προσομοίωση ότι ο θόρυβος απορρίπτεται.

Στο LTspice, θα δοθεί και στα 2 άκρα του ενισχυτή ως είσοδος το θορυβώδες σήμα. Επιπλέον, σε ένα από τα δύο pins εισόδου (οποιοδήποτε), θα προστεθεί ένα ημιτονοειδές σήμα. Το ημιτονοειδές σήμα έχει πλάτος 40 mV, λόγω του ότι ήδη γνωρίζεται πως το σήμα εισόδου θα είναι χαμηλής τάσης. Σύμφωνα με την θεωρία και την λειτουργία του chip, πρέπει να παρατηρηθεί στην έξοδο μόνο το ημιτονοειδές σήμα, αλλά ενισχυμένο. Θα δοκιμαστεί με $V_{Ref} = 0$ και με $V_{Ref} = 2.5$ V.

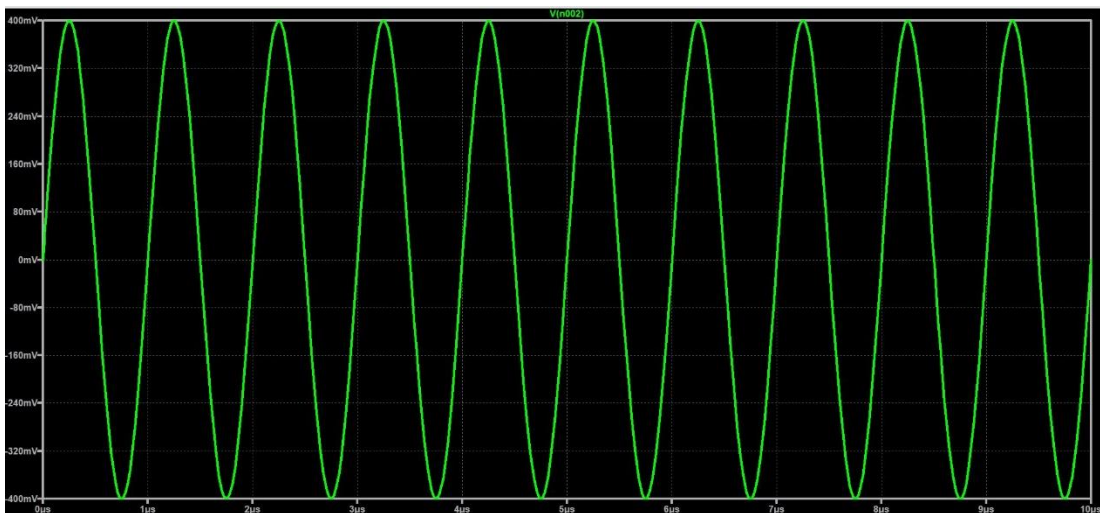


Σχήμα 4.3.3.4 Ημιτονοειδές σήμα(κόκκινο), λευκός θόρυβος(μπλε), είσοδος θετικού ακροδέκτη στο chip(πράσινο)

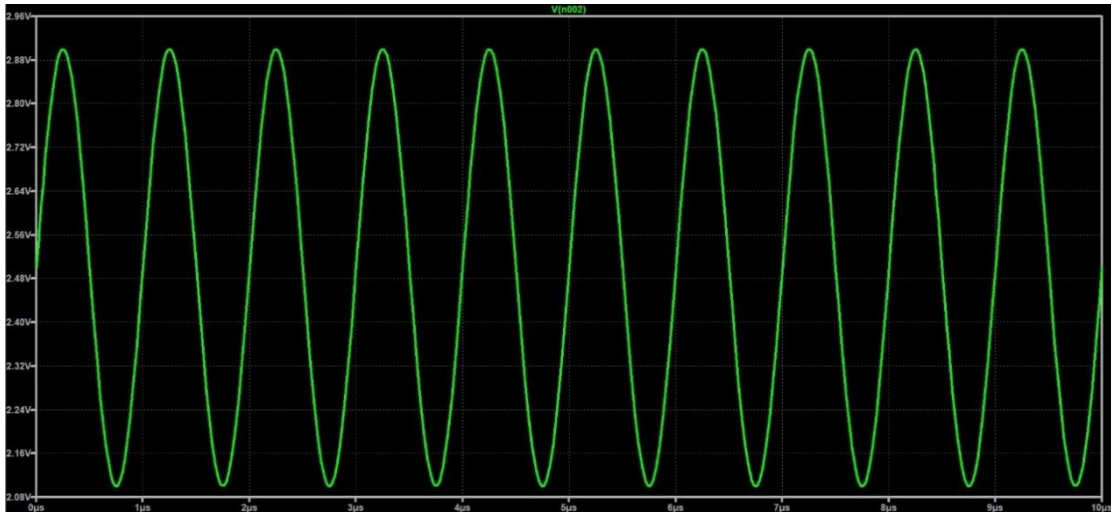


Σχήμα 4.3.3.5 Πρώτο στάδιο προσομοίωσης

Το αποτέλεσμα που λήφθηκε ήταν το αναμενόμενο, ένα ενισχυμένο ημιτονοειδές σήμα με G (κέρδος) = 10 αφού η αντίσταση κέρδους είναι 5.6 kΩ.

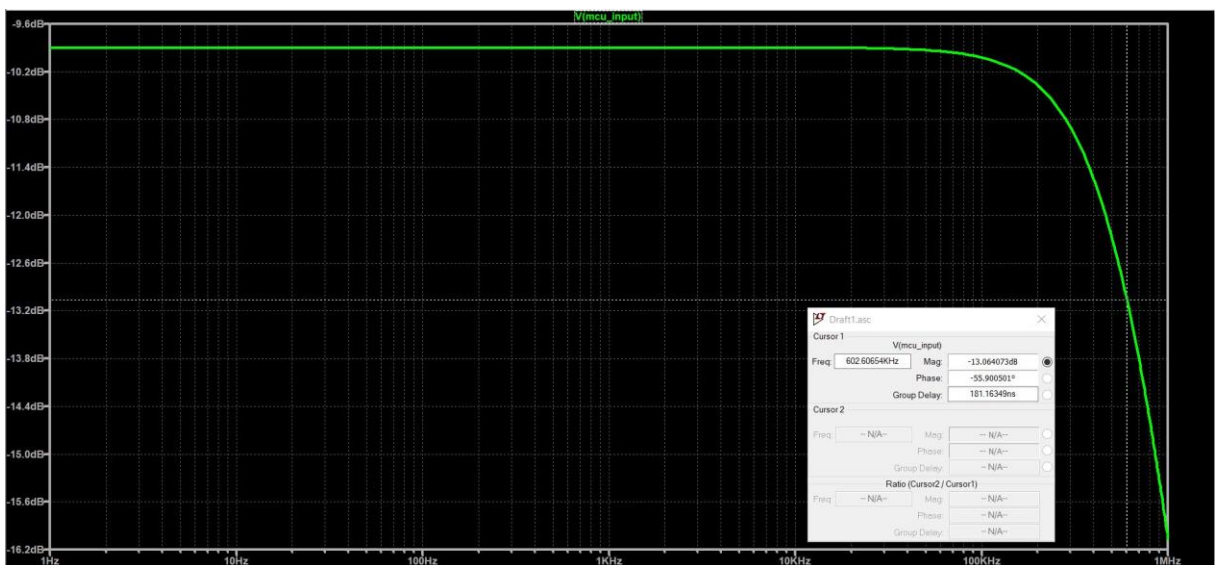


Σχήμα 4.3.3.6 Έξοδος chip INA128P με $V_{ref} = 0$



Σχήμα 4.3.3.7 Έξοδος chip INA128P με $V_{ref}=2.5V$

Για το δεύτερο στάδιο, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.3.2.7 αρκεί απλά να πραγματοποιηθεί μια ac analysis στο LTspice και να μελετηθεί το διάγραμμα Bode.



Σχήμα 4.3.3.8 Διάγραμμα Bode στην έξοδο του δεύτερου σταδίου

Από το διάγραμμα επιβεβαιώνεται ότι η λειτουργία του είναι ορθή.

4.3.4 Απόκριση κυκλώματος λήψης

Δοκιμάστηκε η λειτουργία του κυκλώματος λήψης, αφού τοποθετήθηκε σε πλακέτα breadboard. Στην πραγματικότητα στο κύκλωμα λήψης, είναι δύσκολο να αναπαραχθεί, έστω και ένα σήμα που θα ήταν προσεγγιστικά κοντά στο πραγματικό. Παρόλα αυτά, για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας, με την γεννήτρια παράχθηκε ένα ημιτονοειδές σήμα μικρού πλάτους και επιβεβαιώθηκε ότι δουλεύει ορθά. Ακόμη έγινε μια προσπάθεια που σαν ιδέα είναι εξαιρετικά ενδιαφέροντα αλλά

όχι πολλά υποσχόμενη. Μέσω ενός DAC (Digital to Analog Converter), που διαθέτε το εργαστήριο και την βοήθεια του μικροελεγκτή, υλοποιήθηκε κάποιος θόρυβος από το software. Βέβαια, εν τέλει συνάντησε κάποιες δυσκολίες και δεν επεκτάθηκε η ιδέα, επειδή ήταν προτιμότερο να προχωρήσει η κόλληση σε through-hole πλακέτα, που ήταν αρκετά υποσχόμενη επιλογή, σε αντίθεση με την προσομοίωση.

4.4 Μονάδα μικροελεγκτή (MCU)

Ένα σημαντικό υποσύστημα του συνολικού συστήματος είναι ο μικροελεγκτής. Είναι η γέφυρα επικοινωνίας μεταξύ του κυκλώματος διέγερσης και λήψης. Ο μικροελεγκτής παράγει τον παλμό εισόδου, διαβάζει και αναλύει τα δεδομένα. Πρακτικά, αποτελεί το εξωτερικό σύστημα, που διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο για την ορθή λειτουργία του συστήματος.

Επιλογή μικροελεγκτή:

Αρχικά προτιμήθηκε ένα Arduino UNO, που είναι ένας αρκετά φθηνός μικροελεγκτής και πολύ εύκολος στον προγραμματισμό. Τα σημαντικά χαρακτηριστικά του είναι:

- 8-bit μικροελεγκτής
- ενσωματωμένο ADC (Analog to Digital Converter) ακρίβειας 10 bit
- η αναλογική τάση που διαβάζει κυμαίνεται από 0-5 Volt
- συχνότητα ρολογιού 16 MHz

Ήδη, από τα πρώτα πειράματα προέκυψαν κάποια προβλήματα. Ο παλμός διέγερσης όπως τονίστηκε στις προδιαγραφές του, πρέπει να είναι της τάξεως 1-2 μ s. Για αυτό τον λόγο υλοποιήθηκε ένα μικρό script στο περιβάλλον του Arduino IDE το οποίο υλοποιούσε έναν παλμό περιόδου 1 ms με duty cycle 0.1%.

```

void setup()
{
  pinMode(3, OUTPUT);
}

void loop()
{
  digitalWrite(3,HIGH);
  delayMicroseconds(1);
  digitalWrite(3,LOW);
  delayMicroseconds(999);
}

```

Σχήμα 4.4.1 Αποτυχημένη υλοποίηση παλμού διέγερσης σε Arduino UNO

Πειραματικά αυτό αποδείχθηκε ότι δεν μπορεί να ικανοποιήσει την ζητούμενη λειτουργία. Με έρευνα διαπιστώθηκε ότι αυτό συμβαίνει, καθώς, μόνο η εντολή digitalWrite, χρειάζεται 3,4 μs για να εκτελεστεί σε Arduino UNO. Αυτό το πρόβλημα ξεπεράστηκε, επειδή στους μικροελεγκτές υπάρχει η δυνατότητα να γράφεις και να διαβάζεις απευθείας στους registers(καταχωρητές). Ακόμα, είναι εφικτό να υλοποιηθούν ρουτίνες σε assembly.

```

/* we are going to use PORTD instead of digitalWrite because its much faster #DIRECT PORT MANIPULATION
PORTD 0-7 pin
# https://docs.arduino.cc/hacking/hardware/PinMapping168
*/

#define NOP __asm__ __volatile__ ("nop\n\t") //https://forum.arduino.cc/t/very-short-delays/43445/6

const unsigned int inputPulse(3), tON(1), period(1000);
const unsigned int tOFF(period - tON);

void setup()
{
  pinMode(inputPulse, OUTPUT);
  //cli clears the global interrupt flag in SREG so prevent any form of interrupt occurring
  cli();
}

void loop()
{
  PORTD |= 0b00001000; //DIGITAL PIN 3 HIGH
  // NOP command creates delay time of 62.5ns on a 16MHz AtMega
  // the time delay depends on the microcontroller
  NOP; NOP; NOP; NOP; //250 ns
  NOP; NOP; NOP; NOP;
  NOP; NOP; NOP; NOP;
  NOP; NOP; NOP; NOP;
  PORTD &= 0b11110111; //PIN 3 LOW
}

```

Σχήμα 4.4.2 Επιτυχημένη υλοποίηση παλμού διέγερσης σε Arduino UNO

Στα πειραματικά αποτελέσματα, που φαίνεται και ο σωστός παλμός, θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

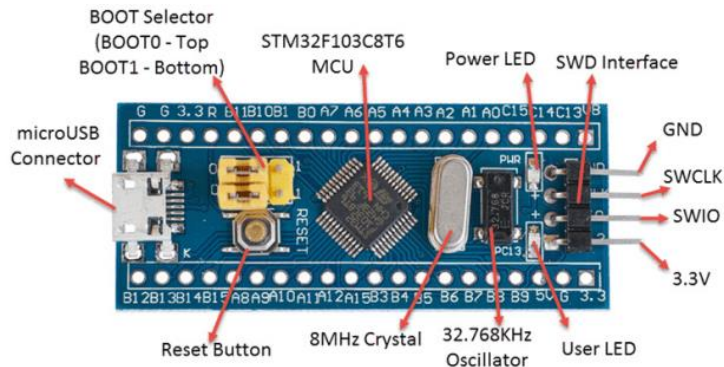
Τελικά, η επιλογή του Arduino UNO μετέπειτα απορρίφθηκε. Οι λόγοι ήταν, η ακρίβεια στον ADC και η ταχύτητα του. Γνωρίζοντας ότι, 10 bit ADC resolution σημαίνει 2^{10} διακριτά στοιχεία (0-1023) στα 5000 mV. Η μικρότερη αλλαγή τάσης που μπορεί να ανιχνεύσει το Arduino UNO είναι $\frac{5000}{1024}$ mV, δηλαδή περίπου 5mV, το οποίο για την συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να αποδειχθεί σημαντικό.

Η επόμενη απόφαση ήταν η επιλογή ενός 32-bit μικροελεγκτή, με καλύτερο ADC resolution και καλύτερη ταχύτητα. Λόγω προσωπικής εμπειρίας επιλέχθηκε ο μικροελεγκτής STM32F103C8, γνωστός και ως blue pill. Ορισμένα χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- 32 bit μικροελεγκτής
- ενσωματωμένο ADC (Analog to Digital Converter) ακρίβειας 12 bit
- η αναλογική τάση που κωδικοποιεί κυμαίνεται από 0-3,3 Volt
- συχνότητα ρολογιού 72 MHz

Ένας 32-bit μικροελεγκτής σε σχέση με έναν 8-bit σημαίνει πιο δύσκολος προγραμματισμός χωρίς αυτό να δημιουργεί εμπόδια. Γνωρίζοντας ότι, 12 bit resolution σε εύρος 3,3 V, μεταφράζεται στο ότι ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής μπορεί να αντιληφθεί αλλαγή τάσης με 0,82 mV. Η συχνότητα του ρολογιού δεν δημιουργεί κανένα πρόβλημα ταχύτητας στις εντολές των digitalWrite. Εκτός αυτών, ο STM32F103C8 επιλέχθηκε και για το προγραμματιστικό του περιβάλλον, STM32CubeIDE. Είναι πολύ φιλικό ως προς τον χρήστη και διαθέτει ωραία προγραμματιστικά εργαλεία. Το πιο χρήσιμο, κατά την προσωπική μου γνώμη, είναι η δυνατότητα επιλογής του μοντέλου STM32 που χρησιμοποιείται. Μαζί με αυτή την επιλογή, παρέχεται και η ικανότητα της ρύθμισης (configuration) του μικροελεγκτή μέσω του UI. Ακόμη, αφού ρυθμιστεί ο STM32, αναπαράγεται αυτόματα ο βασικός κώδικας για τις αρχικοποιήσεις που απαιτούνται, γλιτώνοντας πολύτιμο χρόνο στην συνολική σχεδίαση.

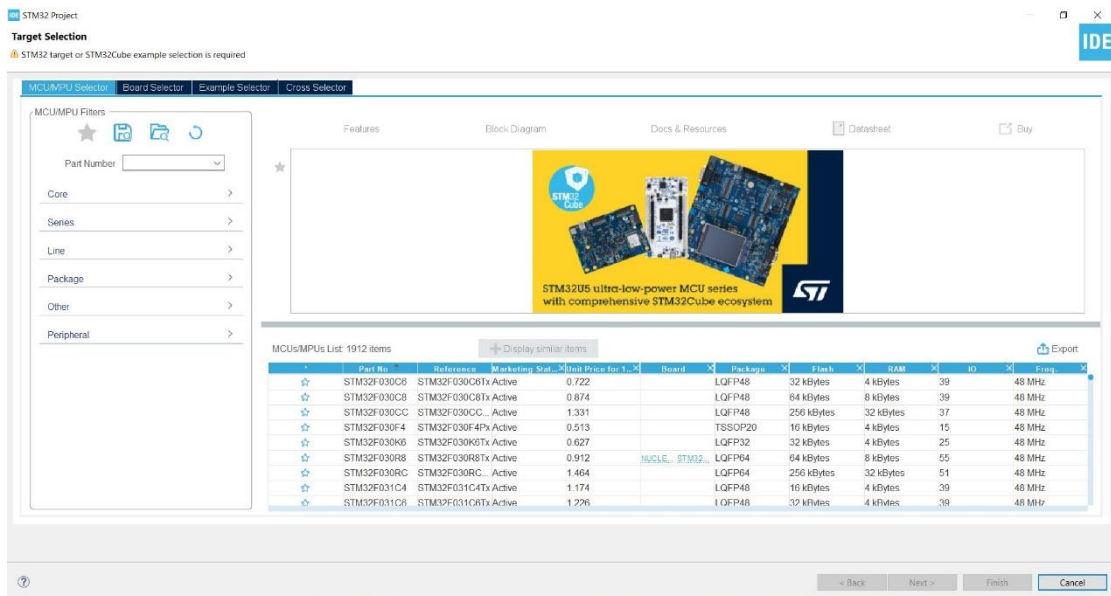
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται το περιβάλλον STM32CubeIDE. Φαίνεται ότι μπορεί να επιλεγθεί ένας μικροελεγκτής, αναλόγως τις προδιαγραφές του project, προσθέτοντας τα κατάλληλα φίλτρα. Μετά την επιλογή είναι το στάδιο των ρυθμίσεων. Για να προγραμματιστεί χρησιμοποιείται ένα ST-LINK.



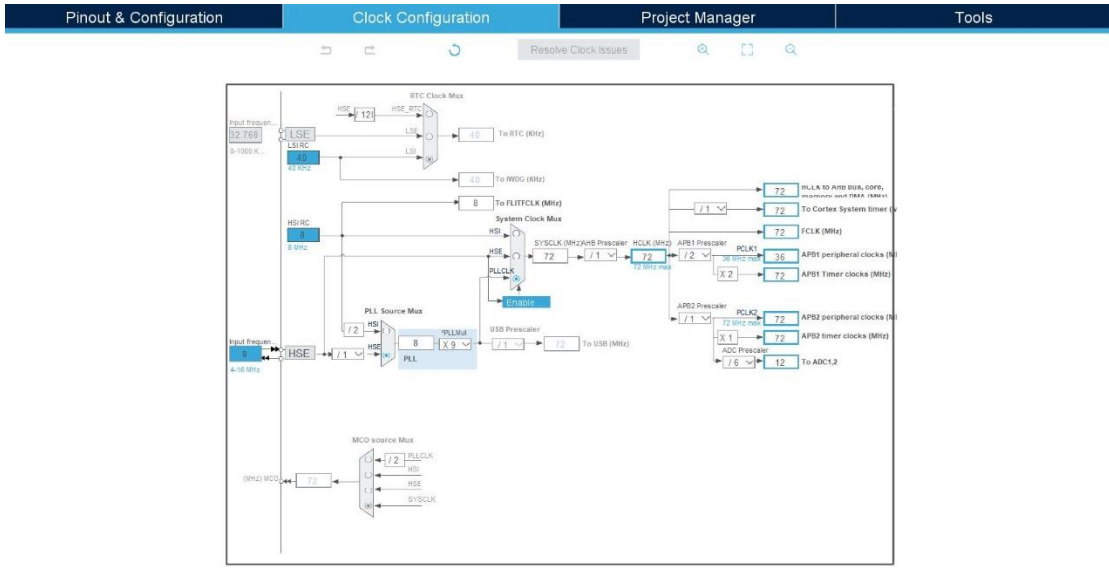
Σχήμα 4.4.3 STM32F103C8T6



Σχήμα 3.4.4 ST-LINK



Σχήμα 4.4.5 Αρχικό widget στο περιβάλλον του STM32CubeIDE



Σχήμα 4.4.8 Παραμετροποίηση στο ρολόι

Στο pinout & configuration προστέθηκαν κάποια πράγματα, τα οποία για τα πειραματικά αποτελέσματα δεν χρειάζονται, αλλά είναι χρήσιμα για πιθανές κυκλωματικές επεκτάσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ένας γενικότερος κανόνας που εφαρμόστηκε κατά την πορεία της διπλωματικής εργασίας και στο εργαστήριο, για την βέλτιστη αποδοτικότητα και λειτουργία ενός κυκλώματος, είναι τα εξής 4 βήματα:

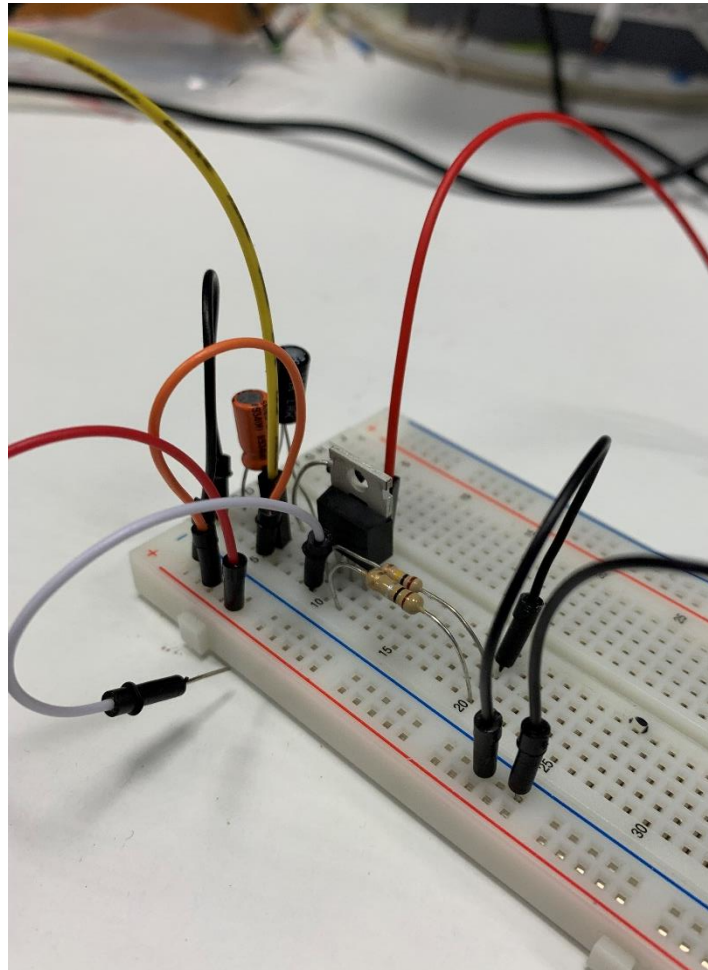
1. Προσομοίωση σε κάποιο υπολογιστικό πρόγραμμα όπως το TINA, LTspice, Pspice, Cadence, MATLAB. Αυτά είναι κάποια γνωστά προγράμματα μεταξύ πολλών που χρησιμοποιούνται για προσομοιώσεις ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το LTspice, καλύπτοντας σε ικανοποιητικό επίπεδο όλες τις απαιτήσεις. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι το καλύτερο πρόγραμμα, ίσως και με διαφορά, είναι το Cadence. Ωστόσο, απορρίφθηκε γιατί δεν διατίθεται δωρεάν, έχει υψηλό κόστος και είναι “overkill” (υπερβολικό από άποψη σχεδίασης) για τα πλαίσια της εργασίας.
2. Δοκιμαστικό κύκλωμα σε breadboard. Το breadboard έχει όσο θετικά τόσο αρνητικά στοιχεία. Η αρχική υλοποίηση γίνεται σε breadboard, γιατί παρέχει σημαντική ευελιξία σε αλλαγές. Αυτή η ευελιξία δημιουργεί αδιαμφισβήτητα ένα χρήσιμο εργαλείο για δοκιμές, γιατί κερδίζεται πολύτιμος χρόνος στο debugging του κυκλώματος. Είναι φθηνό και δεν χρειάζονται κολλήσεις. Αντιθέτως, θεωρείται αναξιόπιστο για την εξαγωγή τελικών αποτελεσμάτων. Υπάρχουν περιπτώσεις στο breadboard, στις οποίες τα σήματα είναι λάθος αλλά στην πραγματικότητα να είναι πλήρως λειτουργικό το κύκλωμα. Επίσης είναι βαρύ, χρειάζεται μεγάλο χώρο (σε κλίμακα ηλεκτρονικών κυκλωμάτων) και προσωρινό. Ακόμη, είναι πολύ εύκολο να «χαλάσει» η συνδεσμολογία.
3. Με αφορμή το βήμα 2, το βήμα 3 είναι η κόλληση πλακέτας prototyping through-hole. Η through-hole πλακέτα προσδίδει στο σύστημα αξιοπιστία και σταθερότητα, τόσο ηλεκτρολογικά όσο και μηχανολογικά. Φυσικά, μειώνεται η ευελιξία αλλά για αυτόν ακριβώς τον λόγο προηγείται το βήμα 2.
4. Αυτό βήμα θα αναφερθεί ως προαιρετικό. Αν οι καταστάσεις το επιτρέπουν (χρόνος, budget, τεχνογνωσία), να σχεδιαστεί και να υλοποιηθεί τυπωμένη πλακέτα (Printed Circuit Board).

Το βήμα 1 παρουσιάστηκε στο 4^ο κεφάλαιο. Το βήμα 2 αναφέρθηκε και αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι συνδεσμολογίες των

βημάτων 2,3 αλλά και τα αποτελέσματα τους. Ακόμη θα παρουσιαστεί και η σχεδίαση της πλακέτας.

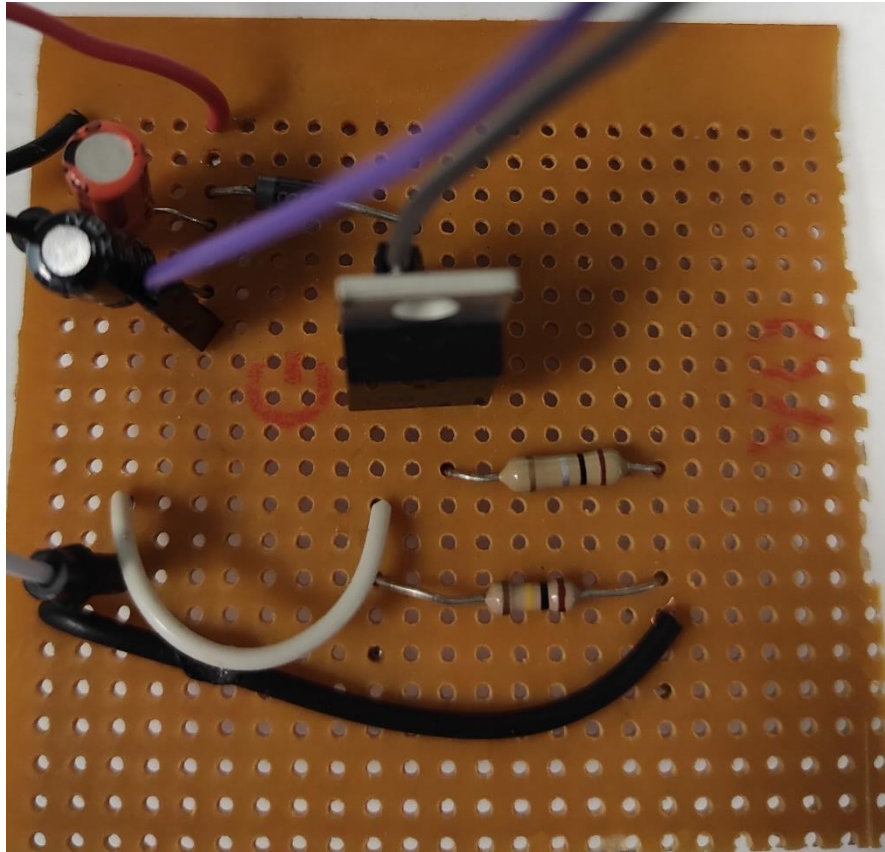
5.1 Κύκλωμα διέγερσης – Συνδεσμολογία – Αποτελέσματα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπήρχε μία συγκεκριμένη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή του αισθητήρα. Με αυτά τα βήματα επιτυγχάνεται η αποφυγή σοβαρών λαθών και η καλύτερη λειτουργία του συστήματος.



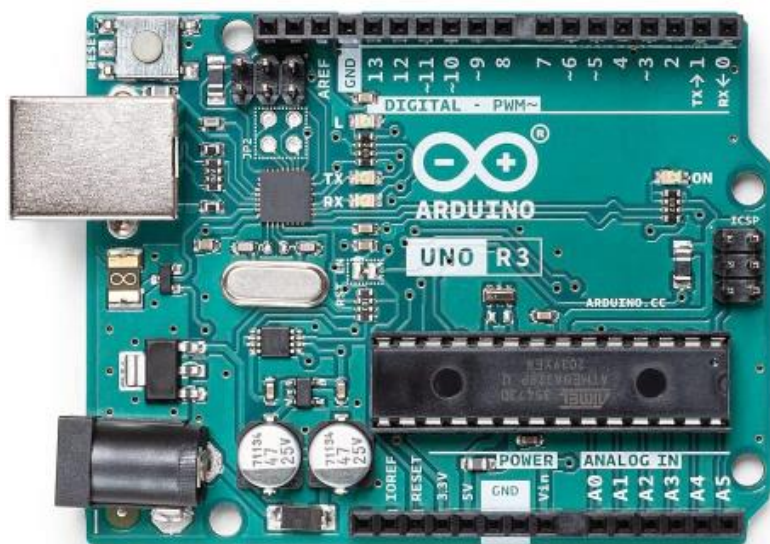
Σχήμα 5.1.1 Κύκλωμα διέγερσης στο breadboard

Το βήμα 2 πραγματοποιήθηκε και δοκιμάστηκε με επιτυχία. Επομένως προχώρησε η διαδικασία στο βήμα 3.



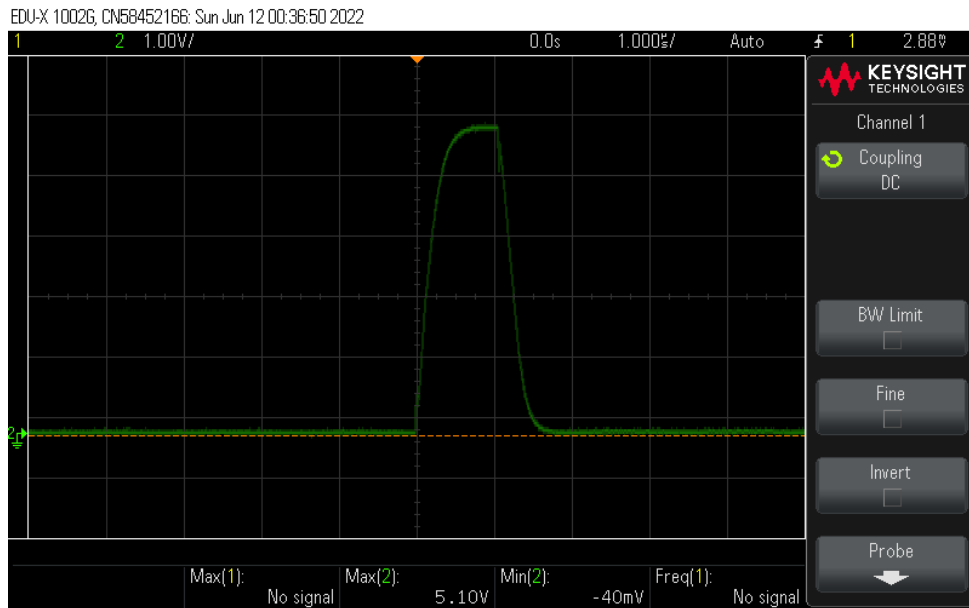
Σχήμα 5.1.2 Κόκλωμα διέγερσης σε through hole πλακέτα

Στα αρχικά πειράματα, η τροφοδοσία και ο παλμός διέγερσης δόθηκαν από το Arduino UNO. Ακόμα, κρίθηκε αναγκαία η προσθήκη μίας εξωτερικής τροφοδοσίας στο σύστημα, για την τροφοδοσία του Arduino UNO. Σε κάθε περίπτωση, ανεξαρτήτως τύπου μικροελεγκτή, απαιτείται εξωτερική τροφοδοσία.



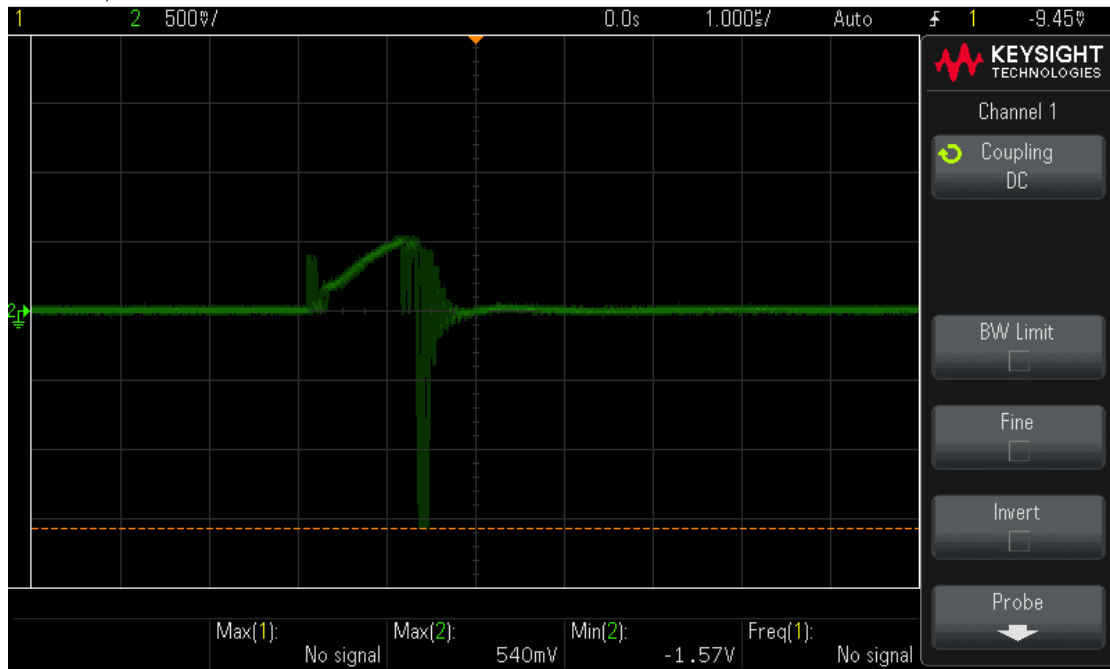
Σχήμα 5.1.3 Πλακέτα Arduino UNO

Όταν η συνδεσμολογία ήταν έτοιμη, έχοντας ήδη δοκιμαστεί μια φορά σε πρώιμο στάδιο με την γεννήτρια, δοκιμάστηκε χωρίς αυτή, αλλά με το Arduino.



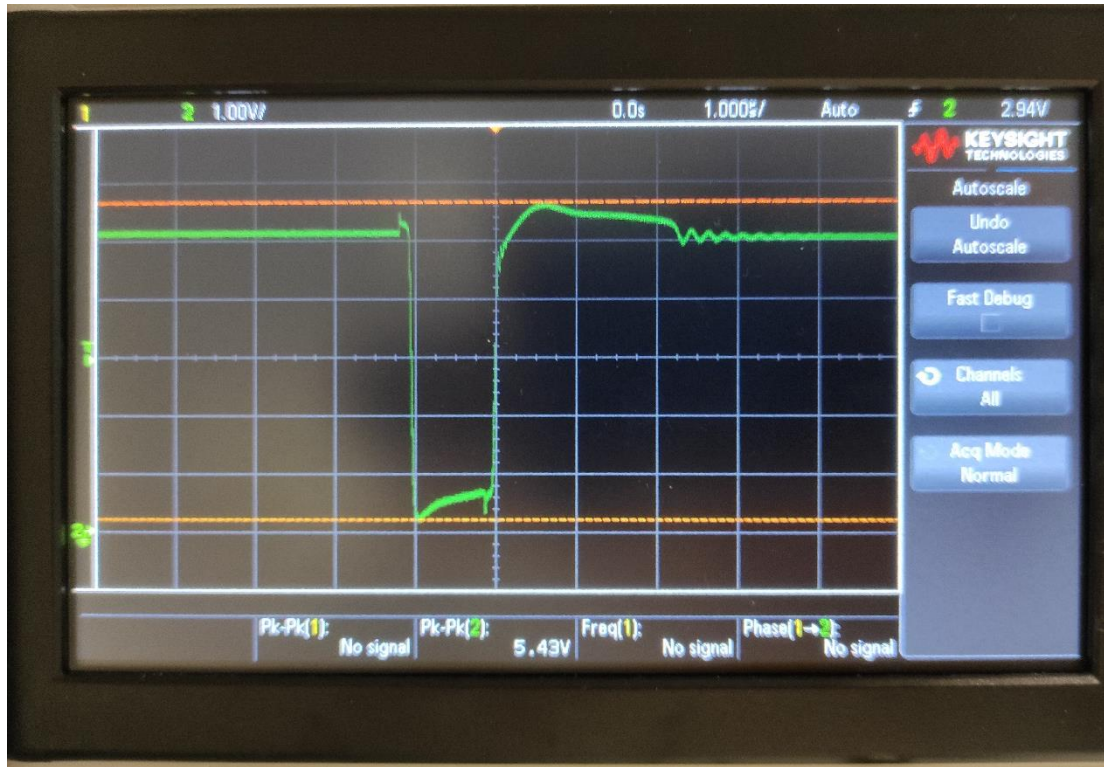
Σχήμα 5.1.4 Παλμός διέγερσης από την πλακέτα του Arduino UNO

Όπως φαίνεται από τις τιμές του παλμογράφου, με την απευθείας επικοινωνία με τον register και την εντολή por της assembly, επιτεύχθηκε παλμός περίπου 1,2 µs, κάτι που είναι αρκετά αξιόλογο. Να υπογραμμισθεί ότι, η απεικονιζόμενη τάση ταυτίζεται με την τάση στο gate του MOSFET. Παρακάτω θα αναλυθούν και θα σχολιαστούν, τα αποτελέσματα στο source του MOSFET και στο drain (τάση του πηνίου λήψης).



Σχήμα 5.1.5 Τάση στο source του MOSFET με το Arduino UNO

Στο σχήμα 5.1.5 απεικονίζεται η τάση στο source του MOSFET. Σημειώνεται ότι, το μέγιστο ρεύμα που διαπερνά το πηνίο, εφόσον η αντίσταση στο source έχει τιμή $0,1\Omega$, είναι $5,4\text{ A}$. Αυτή η τιμή, δεν θεωρείται ικανοποιητική για την εφαρμογή. Μία ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι, η απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής της τάσης, είναι μεγαλύτερη από την απόλυτη τιμή της μέγιστης τιμής. Έτσι, προκύπτει ότι το fall time είναι πιο γρήγορο από το rise time, διότι, πιο απότομη μεταβολή στην τάση, σημαίνει μεγαλύτερο ρεύμα.



Σχήμα 5.1.6 Τάση στο drain του MOSFET με το Arduino UNO

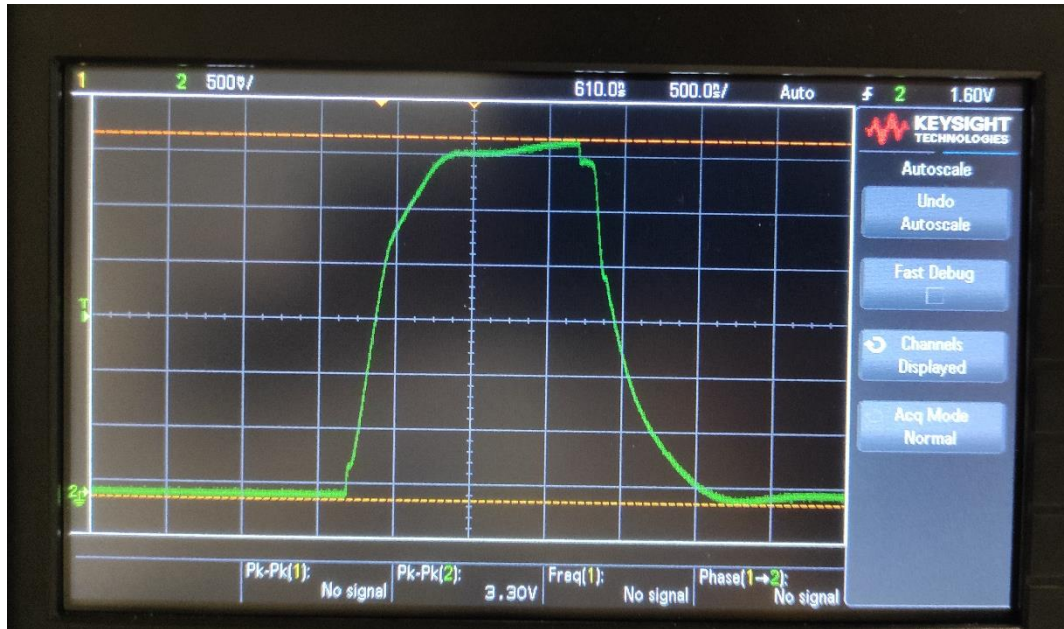
Η τάση στα άκρα του πηνίου υπολογίζεται εύκολα, επειδή ισούται με την τροφοδοσία του κυκλώματος, μείον την τάση στο drain του MOSFET. Επομένως, γνωρίζοντας την τάση στο drain ως προς την γη (όλες οι μετρήσεις έγιναν ως προς τον κοινό κόμβο(γη)), υπολογίζεται και η τάση στο πηνίο. Η συμπεριφορά της τάσης στο drain, είναι απολύτως φυσιολογική. Πρέπει να επισημανθεί ότι το overshoot οφείλεται στην $V_{forward}$ της διόδου. Αυτή η τάση είναι συναρτήσε του ανάστροφου ρεύματος. Το overshoot που παρατηρείται κυμαίνεται στα 400 – 500 mV, το οποίο είναι πολύ καλό αν συνηπολογιστεί ότι, ήταν περίπου 15 A το ανάστροφο ρεύμα. Με μία κοινή δίοδο σε τόσο μεγάλο ανάστροφο ρεύμα, το overshoot μπορεί να φτάσει αρκετά Volts.

$$V_{drain} = V_{cc} + V_L \quad (5.1.1)$$

Καθίσταται σαφές πως η V_L , ισούται με την τάση $V_{forward}$ όταν δεν άγει το MOSFET. Έτσι προκύπτει αυτό το overshoot. Ακόμη μία ενδιαφέρουσα έννοια που παρατηρείται στο σχήμα, αποτελεί το recovery time μιας διόδου. Επειδή προτιμήθηκε η δίοδος να έχει χαμηλή ανάστροφη τάση, έγινε ο συμβιβασμός, το recovery time να είναι λίγο μεγαλύτερο από το συνηθισμένο, εφόσον δεν επηρεάζει στην συγκεκριμένη εφαρμογή. Το recovery time είναι περίπου 3 χρονικά κουτάκια στον παλμογράφο που σημαίνει

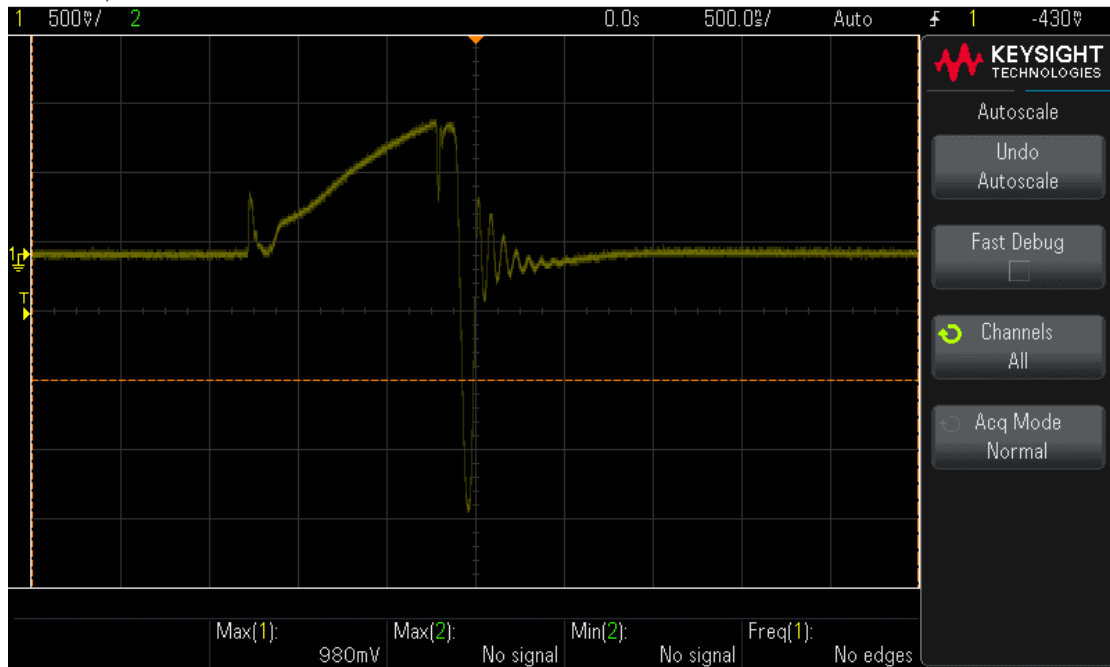
περίπου 3 μ s. Υπάρχει άλλη μια έννοια που αποκαλείται leakage current, αλλά δεν θα αναλυθεί περαιτέρω στα πλαίσια της εφαρμογής.

Πριν παρουσιαστούν τα αποτελέσματα στο κύκλωμα λήψης, θα παρατεθούν τα ίδια αποτελέσματα με το STM32, διότι όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.4, λόγω των αποτελεσμάτων στο κύκλωμα λήψης, το Arduino UNO απορρίφθηκε.



Σχήμα 5.1.7 Παλμός διέγερσης από την πλακέτα του STM32F103C8

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.4, ένας 32-bit microcontroller είναι πιο δύσκολος στον προγραμματισμό. Το να επιτευχθεί ο παλμός του σχήματος 5.1.7, είναι σχετικά εύκολο στον προγραμματισμό. Ωστόσο, για να προνοηθεί ο προγραμματισμός της λήψης των δεδομένων από το κύκλωμα λήψης, πρέπει να πραγματοποιηθεί σε αρχικό στάδιο, η ορθή υλοποίησή του. Έτσι, ο κώδικας θα παρουσιαστεί συνολικά στο τέλος και όχι σταδιακά. Στο drain παρατηρείται το ίδιο σήμα όπως με το Arduino UNO. Η μοναδική διαφοροποίηση, παρατηρείται στο πλάτος και στο Pk-Pk (3.3 V και 3.8 V αντιστοίχως).

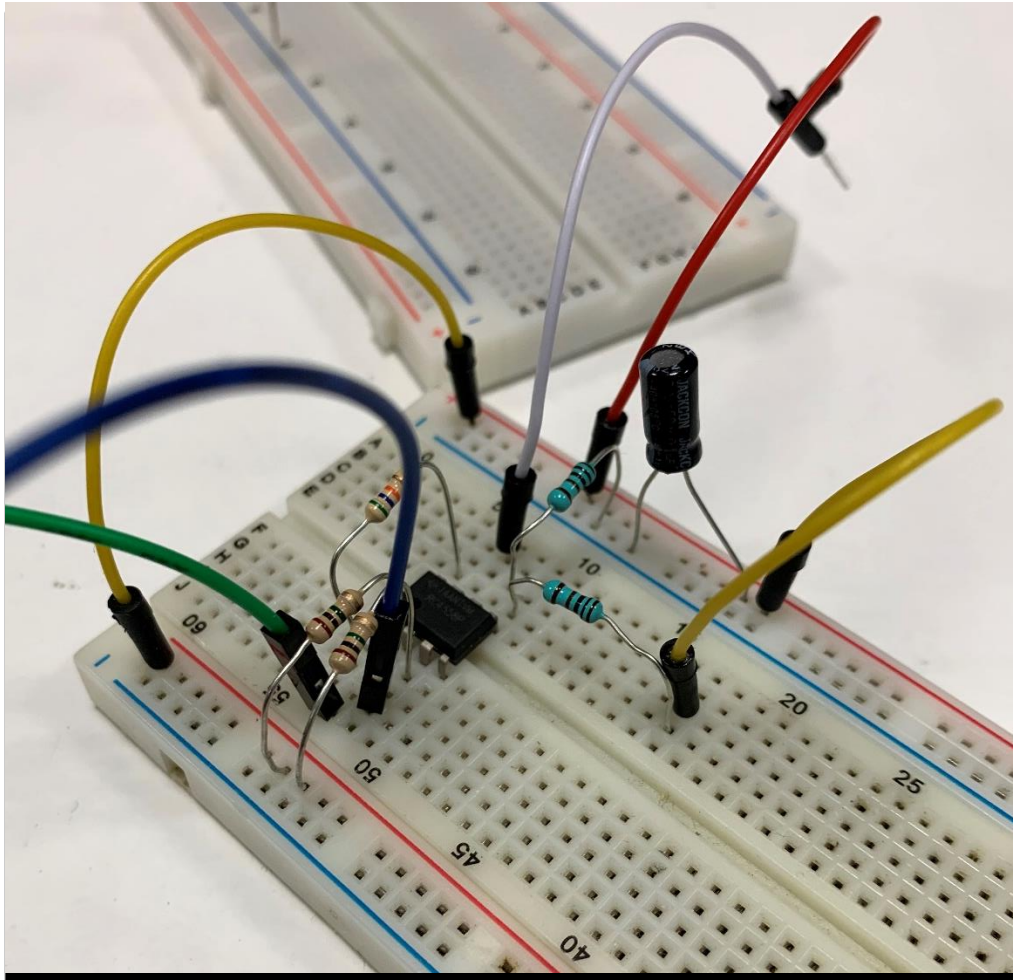


Σχήμα 5.1.8 Τάση στο source του MOSFET με το STM32F103C8

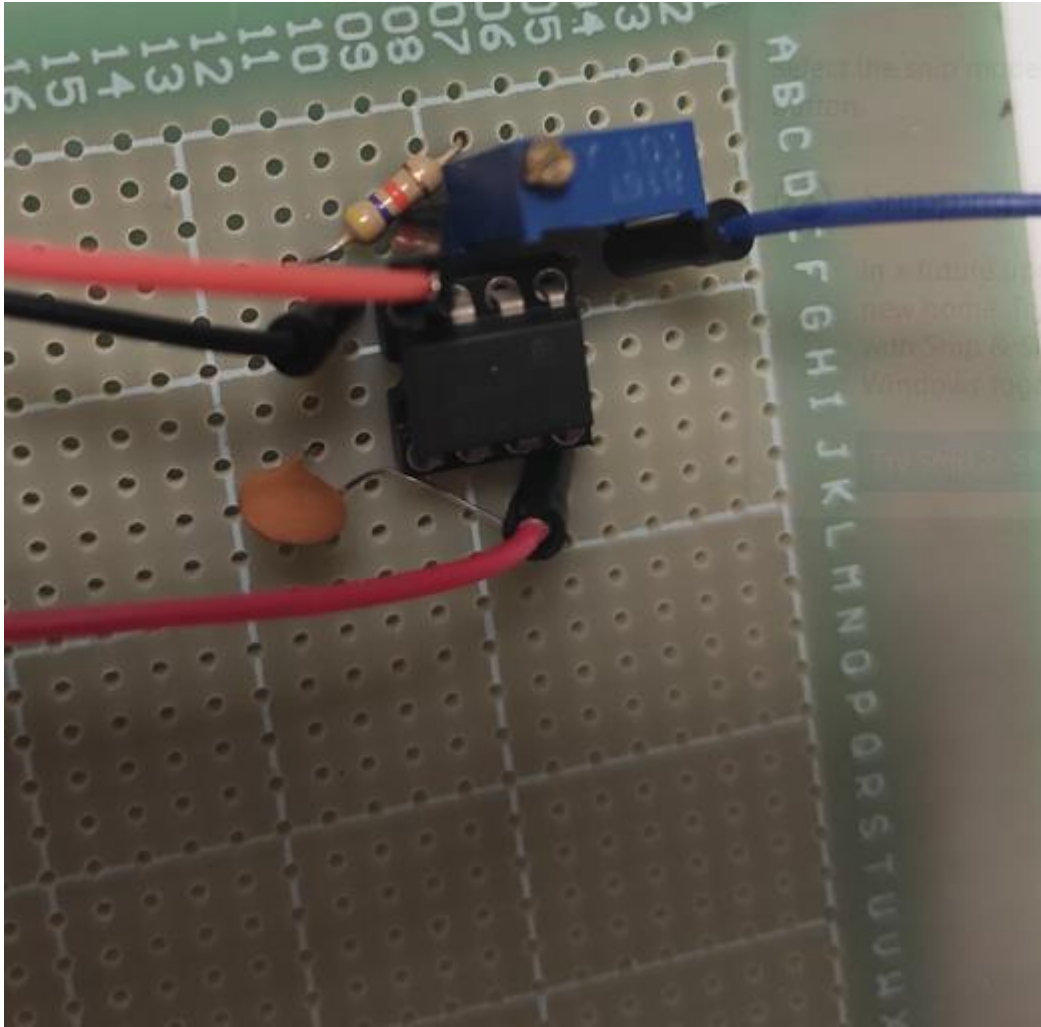
Φαίνεται, πως το σήμα στο source του MOSFET έχει την ίδια μορφή είτε με Arduino UNO είτε με STM32F103C8. Η κρίσιμη διαφορά, εντοπίζεται στην σχεδόν διπλάσια μέγιστη τιμή της τάσης, κάτι, που μεταφράζεται σε διπλάσιο ρεύμα, σχεδόν 10A. Το μεγάλο ρεύμα έχει κυρίαρχο ρόλο για την καλύτερη λειτουργία του συστήματος. Εδώ παρατηρήθηκε η μία εκ των δύο, σημαντική διαφορά μεταξύ των μικροελεγκτών.

5.2 Κύκλωμα λήψης – Συνδεσμολογία - Αποτελέσματα

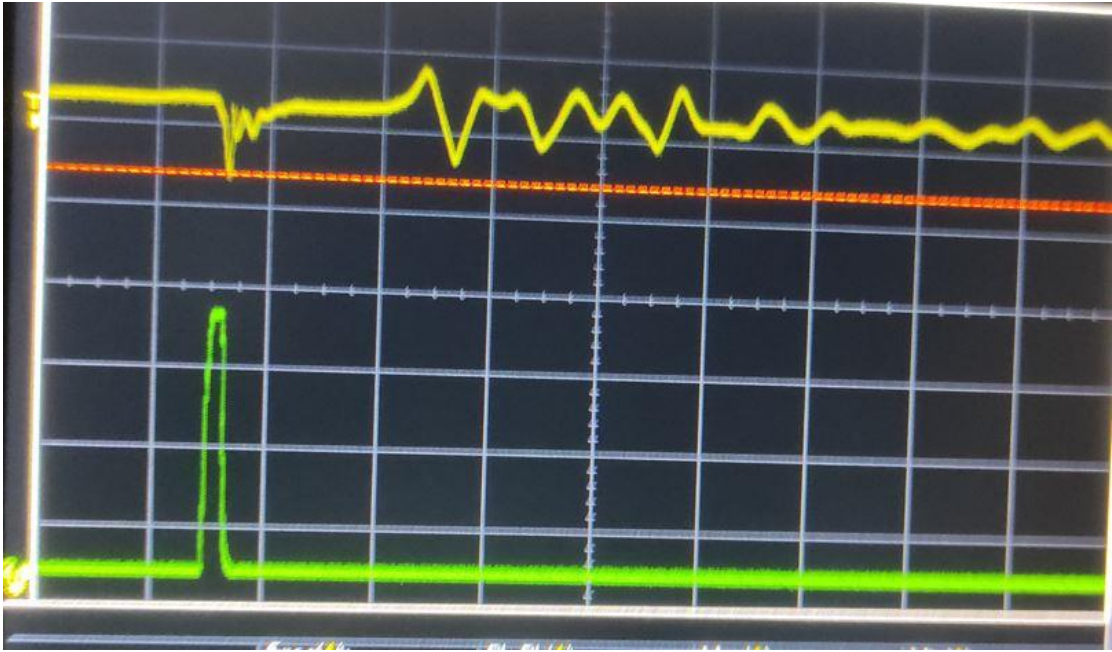
Όπως στο κύκλωμα διέγερσης ακολουθήθηκε μια συγκεκριμένη μεθοδολογία, έτσι και στο κύκλωμα λήψης, πραγματοποιήθηκαν όμοια βήματα.



Σχήμα 5.2.1 Κύκλωμα λήψης του σταδίου INA128P στο breadboard



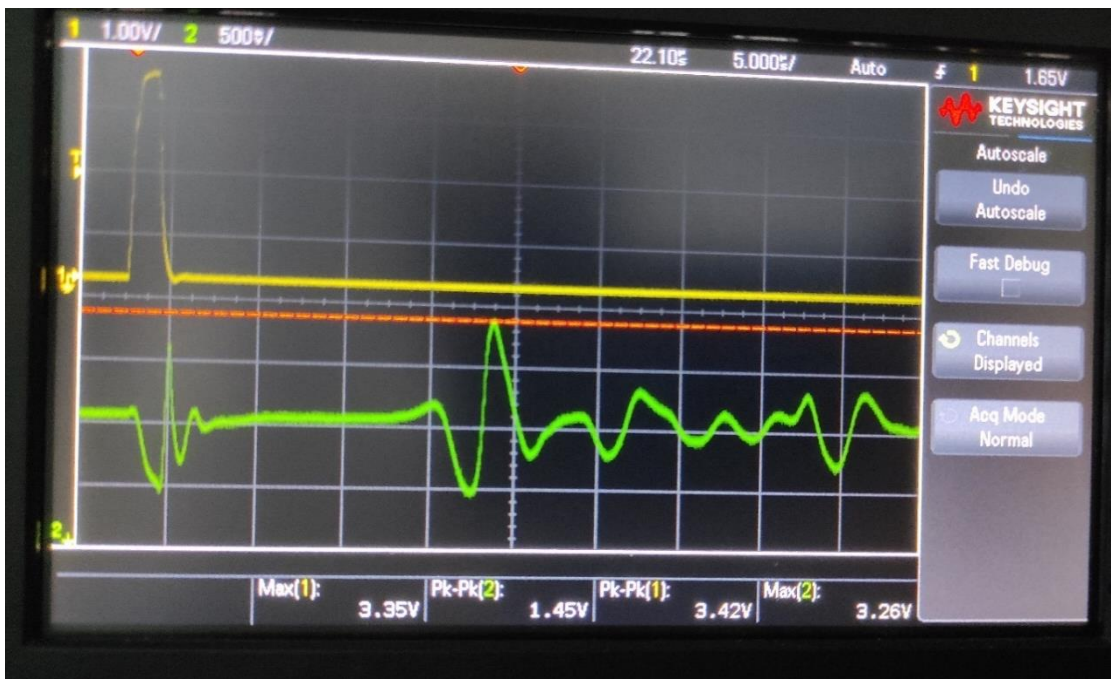
Σχήμα 5.2.4 Δεύτερο στάδιο κυκλώματος λήψης (ενίσχυση) κολλημένο σε through hole πλακέτα



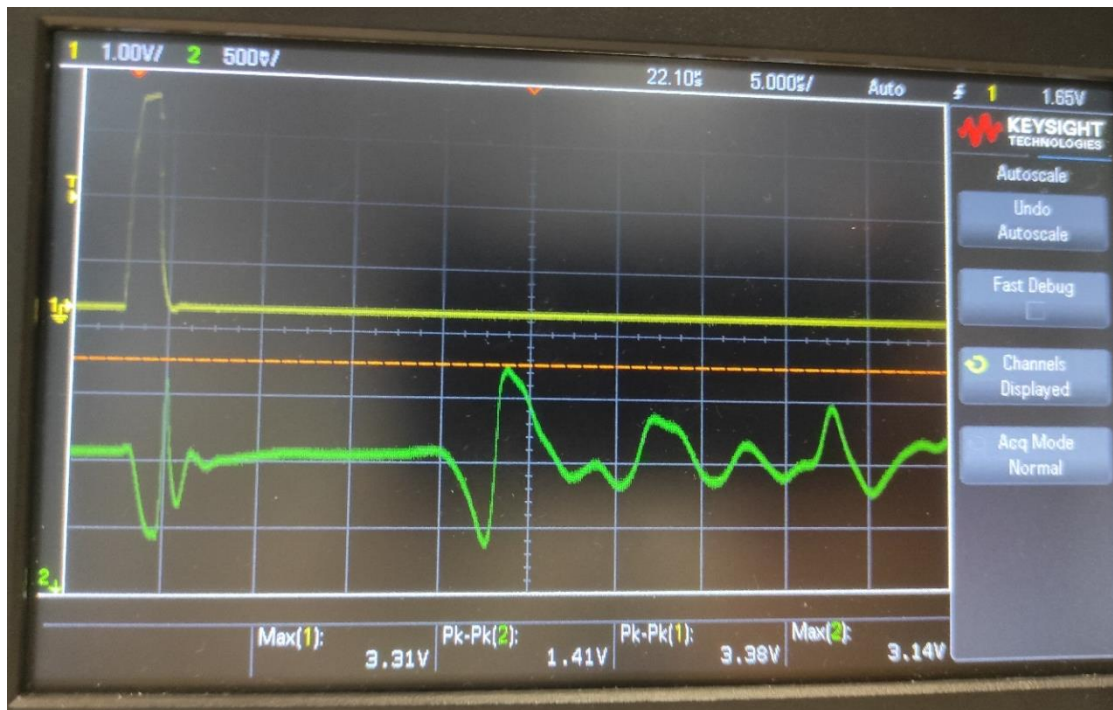
Σχήμα 5.2.5 Έξοδος δεύτερου σταδίου κυκλώματος λήψης

Συγκρίνοντας τα σχήματα 5.2.3 και 5.2.5 είναι εμφανές, γιατί το δεύτερο στάδιο ενίσχυσης επιθυμείται. Το κέρδος ρυθμίζεται μέσω ενός ποτενσιόμετρου.

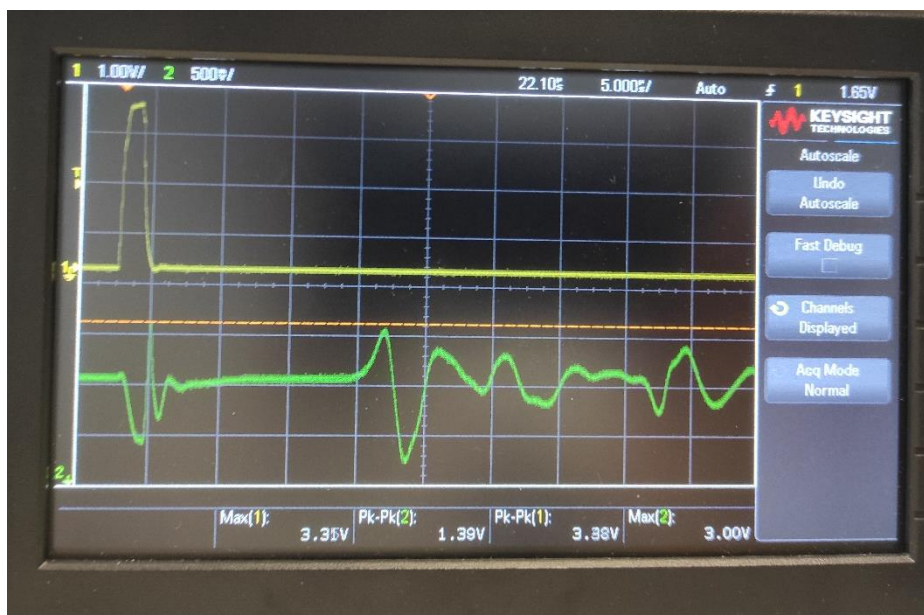
Με την βοήθεια του παλμογράφου, διαπιστώθηκαν τα ορθά σήματα και οι μεταβολές στο peak το peak σε σχέση με τις εσωτερικές μηχανικές τάσεις στον χάλυβα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



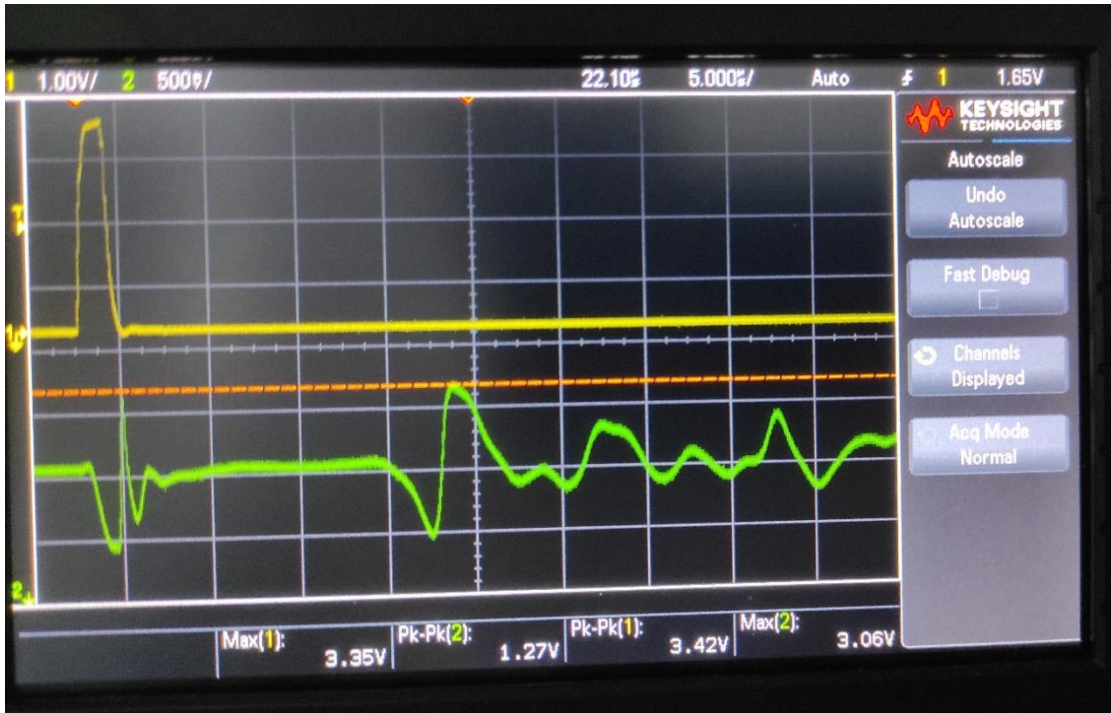
Σχήμα 5.2.6 Έξοδος συστήματος για $P = 50 \text{ MPa}$



Σχήμα 5.2.7 Έξοδος συστήματος για $P = 65$ MPa



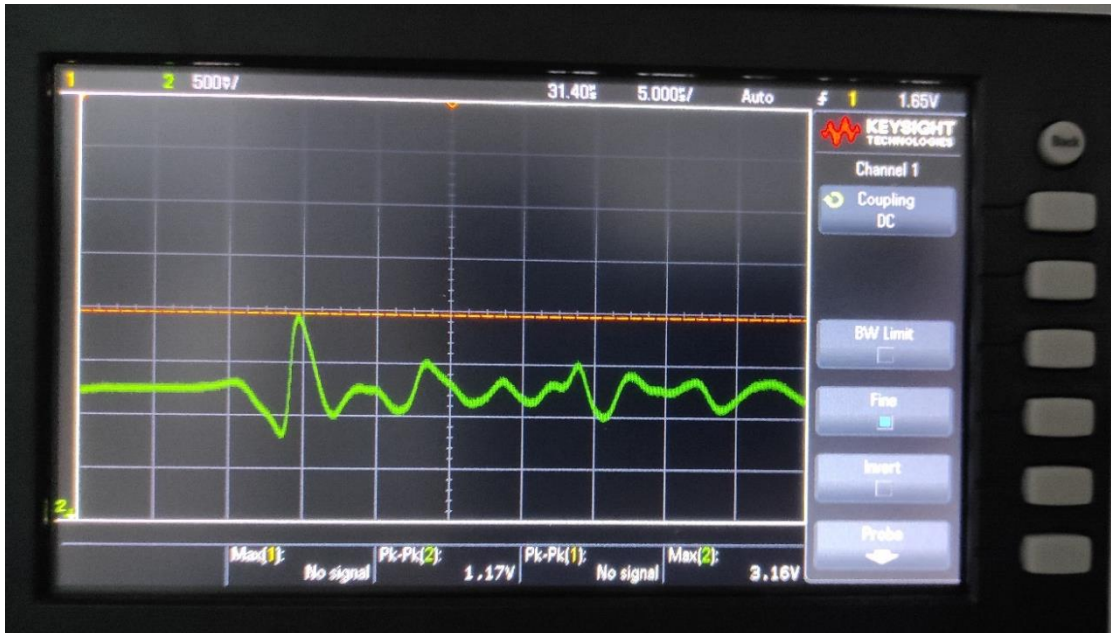
Σχήμα 5.2.8 Έξοδος συστήματος για $P = 75$ MPa



Σχήμα 5.2.9 Έξοδος συστήματος για $P=92$ MPa



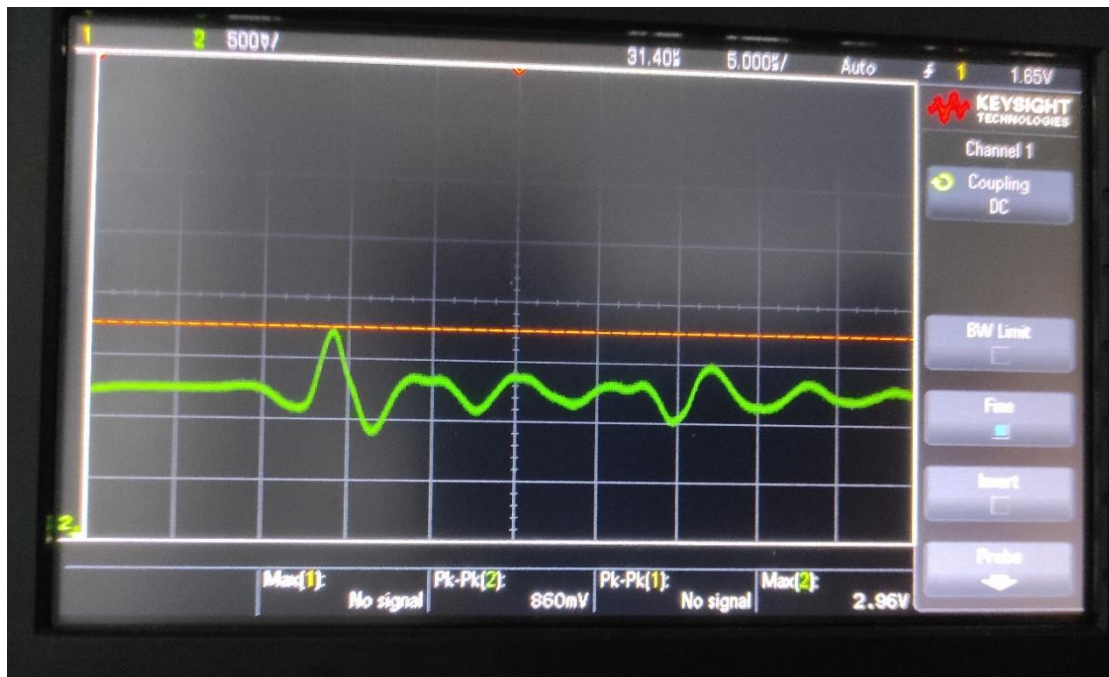
Σχήμα 5.2.10 Έξοδος συστήματος για $P=105$ MPa



Σχήμα 5.2.11 Έξοδος συστήματος για $P=120$ MPa



Σχήμα 5.2.12 Έξοδος συστήματος για $P=132$ MPa

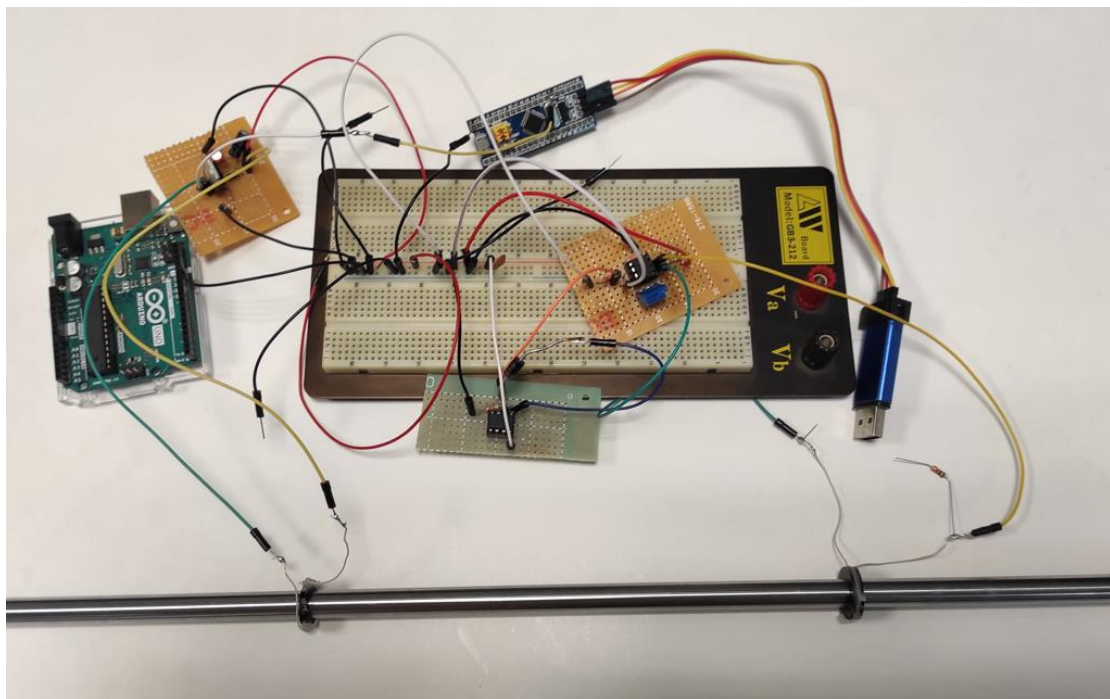


Σχήμα 5.2.13 Έξοδος συστήματος για $P=150$ MPa

Για τον υπολογισμό της μηχανικής τάσης στον χάλυβα, εφαρμόστηκε δύναμη, μεταξύ 5 και 15 κιλών σε ακίδα επιφάνειας 1 mm^2 . Έτσι επιτεύχθηκε το εύρος τιμών, 50 – 150 MPa. Παρατηρείται, πως το σήμα παραμένει ίδιο σε μορφή, αλλά μειώνεται το Peak to Peak με την αύξηση της εσωτερικής μηχανικής τάσης. Να σημειωθεί ότι, από το τελικό σήμα εξόδου επιβεβαιώνουμε την ιδιότητα του MDL, που αφορά τις ανακλάσεις του ελαστικού παλμού. Συγκεκριμένα, με τη διέγερση του L_e , προκαλούνται δύο ελαστικοί παλμοί αντίθετης κατεύθυνσης διάδοσης, οι οποίοι ανακλώνται με την άφιξή τους στα άκρα του μέσου διάδοσης. Κάθε ανακλώμενος παλμός, ανιχνεύεται στο πηνίο λήψης με αντίστροφη πολικότητα, σε σχέση με τον αρχικό λόγω της ανάκλασής του. Οι υπόλοιπες ανακλάσεις είναι πολύ χαμηλού πλάτους, για αυτό και δεν είχε νόημα να υπάρχουν στα σχήματα. Ακόμη, αυτές οι μετρήσεις έγιναν με συγκεκριμένη απόσταση των πηνίων, περίπου 10 cm. Επίσης, από τα αποτελέσματα, επιβεβαιώνεται η ιδιότητα του MDL, σχετικά με την χρονική καθυστέρηση μεταξύ του σήματος διέγερσης και λήψης. Επειδή η απόσταση των πηνίων ήταν σταθερή, έτσι και το delay, σε όλα τα σχήματα είναι ίδιο, περίπου 15 μs . Αν μετακινηθεί το πηνίο, παρατηρήθηκε ότι ορθώς το delay αλλάζει αναλόγως την απόσταση.

Συνοπτικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

P (MPa)	Peak to Peak (Volts)
50	1,45
65	1,41
75	1,39
92	1,27
105	1,23
120	1,17
132	1,15
150	0,86



Σχήμα 5.2.14 Συνολική διάταξη συστήματος

Το breadboard χρησιμοποιήθηκε μόνο ως διευκόλυνση στην κοινή γείωση.

5.3 Συλλογή δεδομένων

Η συλλογή και η ψηφιοποίηση των δεδομένων, πραγματοποιήθηκε με τον μικροελεγκτή STM32F103C8T6.

Στο STM32 είναι πολύ γνωστή η βιβλιοθήκη HAL Library. Η βιβλιοθήκη αυτή παρέχει μία συνάρτηση για χρονική καθυστέρηση, που δέχεται ως είσοδο milliseconds. Επιπλέον, υπάρχει άλλη μια συνάρτηση που επιστρέφει τον χρόνο που εκτελείται ο κώδικας σε milliseconds. Για την σωστή συλλογή των δεδομένων απαιτείται ακρίβεια μικροδευτερολέπτων, για αυτό τον λόγο, θα υλοποιηθούν συναρτήσεις, αντίστοιχα σε microseconds.

Σε αυτό το σημείο, να επισημανθεί ότι δεν θα παρουσιαστεί ολόκληρος ο κώδικας καθώς λόγω συγκεκριμένων «αρχικοποιήσεων», είναι περίπου 600 γραμμές. Έτσι, θα παρουσιαστούν και θα σχολιασθούν τα κομβικά σημεία του.

```
76 /* Private user code -----*/
77 /* USER CODE BEGIN 0 */
78 void delay_us(uint16_t us)
79 {
80     __HAL_TIM_SET_COUNTER(&htim1,0); // set the counter value a 0
81     while (__HAL_TIM_GET_COUNTER(&htim1) < us); // wait for the counter to reach the us input in the parameter
82 }
83 /* USER CODE END 0 */
84
---
```

Σχήμα 5.3.1 Υλοποίηση της συνάρτησης που δημιουργεί καθυστέρηση microseconds

```
main.c  micros.h  MinMaxFunction.h  ThesisSTM32F103C8.ioc
1 /*
2  * micros.h
3  *
4  *   Author: giann
5  */
6
7 #pragma once
8 #ifndef MICROS_H_
9 #define MICROS_H_
10
11 #include "main.h"
12
13 __STATIC_INLINE void DWT_Init(void)
14 {
15     CoreDebug->DEMCR |= CoreDebug_DEMCR_TRCENA_Msk;
16     DWT->CYCCNT = 0;
17     DWT->CTRL |= DWT_CTRL_CYCCNTENA_Msk;
18 }
19
20 __STATIC_INLINE uint64_t GetTickCountInMicroseconds(void)
21 {
22     return DWT->CYCCNT / (SystemCoreClock / 1000000U);
23 }
24
25 #endif /* INC_MICROS_H_ */
26
```

Σχήμα 5.3.2 Υλοποίηση συνάρτησης που γυρνάει τον χρόνο που εκτελείται ο κώδικας σε microseconds.

Παρουσιάζονται πρώτα δύο υλοποιήσεις, που σχετίζονται με την χρονική καθυστέρηση και τον υπολογισμό του χρόνου, στο σχήμα 5.3.1, 5.3.2 αντιστοίχως. Η συνάρτηση **delay_us**, δέχεται ως όρισμα έναν ακέραιο αριθμό, ο οποίος ορίζει την χρονική καθυστέρηση, που θα προκύψει όσο εκτελείται ο κώδικας, σε microseconds.

Η συνάρτηση **GetTickCountInMicroseconds** δεν δέχεται κάποιο όρισμα και όταν καλείται, επιστρέφει τον χρόνο την δεδομένη στιγμή, σε σχέση με την αρχή της εκτέλεσης του κώδικα, σε microseconds.

Πριν αναπτυχθεί το κύριο κομμάτι, θα διατυπωθεί άλλη μία συνάρτηση, που λαμβάνει κομβικό ρόλο. Η συνάρτηση αυτή, βρίσκει σε έναν πίνακα μεγέθους n, την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή. Η ιδιαίτερη απαίτηση αυτής της συνάρτησης είναι, ότι πρέπει να εκτελείται γρήγορα, ειδάλλως θα υπάρχει πρόβλημα στην συλλογή των δεδομένων.

```
main.c  micros.h  MinMaxFunction.h  ThesisSTM32F103C8.ioc
1 /*
2  * UtilFunctions.h
3  *|
4  *   Author: giann
5  */
6
7 #ifndef SRC_MINMAXFUNCTION_H_
8 #define SRC_MINMAXFUNCTION_H_
9
10 #include<stdio.h>
11
12 /* structure is used to return two values from minMax() */
13 struct pair
14 {
15     int min;
16     int max;
17 };
18
19 struct pair getMinMax(int arr[], int n)
20 {
21     struct pair minmax;
22     int i;
23
24     /* If array has even number of elements then
25      initialize the first two elements as minimum and
26      maximum */
27     if (n%2 == 0)
28     {
29         if (arr[0] > arr[1])
30         {
31             minmax.max = arr[0];
32             minmax.min = arr[1];
33         }
34         else
35         {
36             minmax.min = arr[0];
37             minmax.max = arr[1];
38         }
39     }
40     i = 2; /* set the starting index for loop */

```

Σχήμα 5.3.3 Μέρος 1^ο της συνάρτησης getMinMax

```
main.c  micros.h  MinMaxFunction.h  ThesisSTM32F103C8.ioc
39     i = 2; /* set the starting index for loop */
40     }
41
42     /* If array has odd number of elements then
43     initialize the first element as minimum and
44     maximum */
45     else
46     {
47         minmax.min = arr[0];
48         minmax.max = arr[0];
49         i = 1; /* set the starting index for loop */
50     }
51
52     /* In the while loop, pick elements in pair and
53     compare the pair with max and min so far */
54     while (i < n-1)
55     {
56         if (arr[i] > arr[i+1])
57         {
58             if(arr[i] > minmax.max)
59                 minmax.max = arr[i];
60             if(arr[i+1] < minmax.min)
61                 minmax.min = arr[i+1];
62         }
63         else
64         {
65             if (arr[i+1] > minmax.max)
66                 minmax.max = arr[i+1];
67             if (arr[i] < minmax.min)
68                 minmax.min = arr[i];
69         }
70     }
71     i += 2; /* Increment the index by 2 as two
72     elements are processed in loop */
73
74     return minmax;
75 }
76
77 #endif /* SRC MINMAXFUNCTION H */
```

Σχήμα 5.3.4 Μέρος 2^ο της συνάρτησης getMinMax

Αφού παρουσιάστηκαν όλες οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται, θα αναλυθεί και θα εξηγηθεί η κύρια υλοποίηση.


```

120  MX_SPI2_Init();
121  /* USER CODE BEGIN 2 */
122  HAL_TIM_Base_Start(&htim1);
123
124  long long previousTime = 0;
125
126  uint16_t period = 1000, tOn = 1, avoidReadingBadData = 15; //in us
127  uint16_t indexOfLoops = 0, numOfLoops = 10, indexOfArray = 0;
128  uint16_t ADCClockFrequency = 12; //in MHz
129  uint16_t readForUS = 80; // in us
130  uint16_t numOfElements;
131
132  float samplingTime = 1.5;
133  float numOfCycles = 12.5;
134  float timeOfConversionADC = 0.0; // in us
135  timeOfConversionADC = (samplingTime + numOfCycles) / (float)ADCClockFrequency;
136  numOfElements = floor( readForUS/ timeOfConversionADC);
137
138  uint16_t ADCValue[numOfElements];
139  uint16_t minADCValue[numOfLoops];
140  uint16_t maxADCValue[numOfLoops];
141
142  memset( ADCValue, 0, numOfElements*sizeof(uint16_t) );
143  memset( minADCValue, 0, numOfLoops*sizeof(uint16_t) );
144  memset( maxADCValue, 0, numOfLoops*sizeof(uint16_t) );
145  /* USER CODE END 2 */
146

```

Σχήμα 5.3.5 Αρχικοποίηση μεταβλητών στον κώδικα

Σε αυτό το σημείο αρχικοποιούνται κάποιες παράμετροι. Για αυτό, θα αναλυθεί και θα προσδιοριστεί ο ρόλος των παραμέτρων στον κύριο κώδικα. Η μεταβλητή *avoidReadingBadData* εκφράζει μεταβλητή χρόνου σε microseconds. Σε κάθε έξοδο από το σύστημα, παρατηρήθηκε μία τάση, που είναι συγχρονισμένη με τον παλμό εισόδου, η οποία όμως δεν πρέπει να μελετηθεί. Δημιουργείται από την αυτεπαγωγή των πηνίων και πρέπει να αγνοηθεί. Από τα πειραματικά δεδομένα του παλμογράφου διαπιστώθηκε, πως αγνοώντας τα δεδομένα για 15 microseconds, από την στιγμή που στάλθηκε ο παλμός διέγερσης, δεν χάνεται αξιοποιήσιμη πληροφορία.

Επειδή το σύστημα είναι λίγο θορυβώδες, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ένα φίλτρο μέσου όρου, το οποίο εξάγει το τελικό αποτέλεσμα μετά από 10 μετρήσεις. Έτσι, ορίστηκε η μεταβλητή *numOfLoops*.

Ο χρόνος της περιόδου είναι 1 ms. Σε τόσο σύντομο χρονικό διάστημα περιορίζεται η υπολογιστική ικανότητα. Για αυτό τον λόγο, πρέπει να σχολιαστεί ο καταμερισμός του χρόνου. Η συνάρτηση *getMinMax*, εμφανίζει την μεγαλύτερη χρονική πολυπλοκότητα ($O(n)$), επομένως θα δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον χρόνο εκτέλεσης της. Από τα πειραματικά δεδομένα, διαπιστώθηκε ότι για την εύρεση του peak-to-peak, η ανάγνωση των δεδομένων για 80 microseconds, επαρκεί για την απαιτούμενη πληροφορία.

Γνωρίζοντας τον χρόνο, που χρειάζεται ο ADC, για να διαβάσει και να μετατρέψει την αναλογική τιμή σε ψηφιακή, μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός των θέσεων του πίνακα,

που αποθηκεύει τις ψηφιακές τιμές. Αύτη η πληροφορία παρέχεται από το φύλλο δεδομένων

Συνυπολογίζοντας τους χρόνους των υπολοίπων διεργασιών, διατίθενται στην συνάρτηση εύρεσης του μεγίστου-ελαχίστου, περίπου 900 microseconds. Πειραματικά, αποδείχθηκε αξιόπιστο και επαρκές σε χρόνο για τους υπολογισμούς.

Στον κύριο κώδικα αρχικοποιείται ο Analog to Digital Converter, δημιουργείται ο παλμός διέγερσης γράφοντας απευθείας στους registers, αρχικοποιείται ο μετρητής χρόνου και μηδενίζεται, διότι αν εκτελείται για πολλές ώρες συνεχόμενα, θα γίνει υπερχείλιση (overflow) και θα υπάρξει απροσδιοριστία στην συμπεριφορά του συστήματος. Ακόμη, αγνοεί την αυτεπαγωγή, διαβάζει το σήμα και σε κάθε επανάληψη ανιχνεύει την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή.

```
148 /* USER CODE BEGIN WHILE */
149 while (1)
150 {
151     HAL_ADC_Start(&hadc1);
152     indexOfLoops = 0; numOfLoops = 10; indexOfArray = 0;
153     uint16_t maxValue = 0, minValue = 0;
154
155     while (indexOfLoops < numOfLoops)
156     {
157         DWT_Init(); // in every loop set counter to 0 in order to not occur overflow in the timer
158         previousTime = GetTickCountInMicroseconds();
159         GPIOA->ODR = 0b000000000000010; // set A1_Pin to HIGH
160         delay_us(t0n);
161         GPIOA->ODR = 0b0000000000000000; // set A2_Pin to LOW
162         indexOfLoops = 0;
163         while(GetTickCountInMicroseconds() - previousTime <= (period - t0n) )
164         {
165             delay_us(avoidReadingBadData);
166             while( indexOfArray < numofElements)
167             {
168                 ADCValue[indexOfArray] = HAL_ADC_GetValue(&hadc1);
169                 indexOfArray++;
170             }
171             // to not waste the net time and exploit the remaining time i will calculate here the max min value
172             //because if we do that in the end, the calculation may exceed the 1 ms. And this is a problem!!!!!!!!!!!!!!
173             struct pair minmax = getMinMax (ADCValue, numofElements);
174             minADCValue[indexOfLoops] = minmax.min;
175             maxADCValue[indexOfLoops] = minmax.max;
176         }
177         maxValue += maxADCValue[indexOfLoops];
178         minValue += minADCValue[indexOfLoops];
179         indexOfLoops++;
180     }
181 }
```

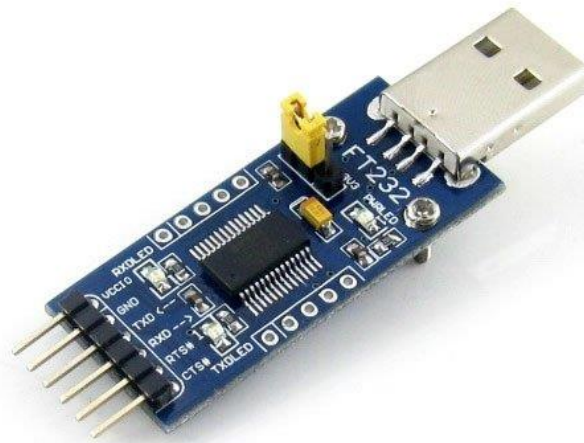
Σχήμα 5.3.6 Κύριος κώδικας μέρος 1°

```
182 //Calculate the average maximum minimum value
183 //Send the data via UART to python
184 maxValue /= numOfLoops;
185 minValue /= numOfLoops;
186 uint16_t PeakToPeak = maxValue - minValue;
187 // UART send only 8 bits but the value is 16 bit, enable UART1 and UART3
188 uint8_t partAPeakToPeak = (uint8_t)((PeakToPeak & 0xFF00) >> 8);
189 uint8_t partBPeakToPeak = (uint8_t)(PeakToPeak & 0x00FF);
190 HAL_UART_Transmit_IT(&huart1,partAPeakToPeak,sizeof(partAPeakToPeak));
191 HAL_UART_Transmit_IT(&huart3,partBPeakToPeak,sizeof(partBPeakToPeak));
192 //
193 /* USER CODE END WHILE */
194
195 /* USER CODE BEGIN 3 */
196 }
197 /* USER CODE END 3 */
```

Σχήμα 5.3.7 Κύριος κώδικας μέρος 2°

Στο τέλος, μετά από 10 επαναλήψεις υπολογίζει τον μέσο όρο και μεταφέρει την πληροφορία μέσω UART πρωτοκόλλου στον υπολογιστή.

Για να σταλθεί στον υπολογιστή χρειάζεται ένα επιπλέον board. Στην εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε το FT232RL σαν διαμεσολαβητής της επικοινωνίας του STM32F103C8 με τον υπολογιστή. Είναι ένας σειριακός αντάπτορας (adapter) σε USB (UART to USB).



Σχήμα 5.3.8 FT232RL

Μέσω αυτού του board, είναι ικανός ο υπολογιστής να λαμβάνει, αλλά και να στέλνει δεδομένα στο STM32. Για την εφαρμογή χρειάστηκε μόνο να διαβάσει και όχι να στέλνει πληροφορία. Για την αποφυγή τυχόν σφαλμάτων, επειδή το UART μπορεί να στέλνει μόνο 8 bits, και η πληροφορία που παράγεται είναι 16 bits, χρησιμοποιήθηκαν δύο από τα τρία διαθέσιμα UARTs buses του STM32F103C8, με σκοπό το ένα να στέλνει τα 8 πρώτα bits και το άλλο τα υπόλοιπα. Αυτό επειδή είναι τετριμμένο, η υλοποίηση έγινε σε ρυθμό για ταχύτητα στο development, αφού δεν απαιτείται ιδιαίτερη υπολογιστική απόδοση.

```

import serial
import Queue
import threading
import numpy as np
import math

queue = Queue.Queue(2)

def serial_read(s):
    while True:
        line = s.readline()
        queue.put(line)

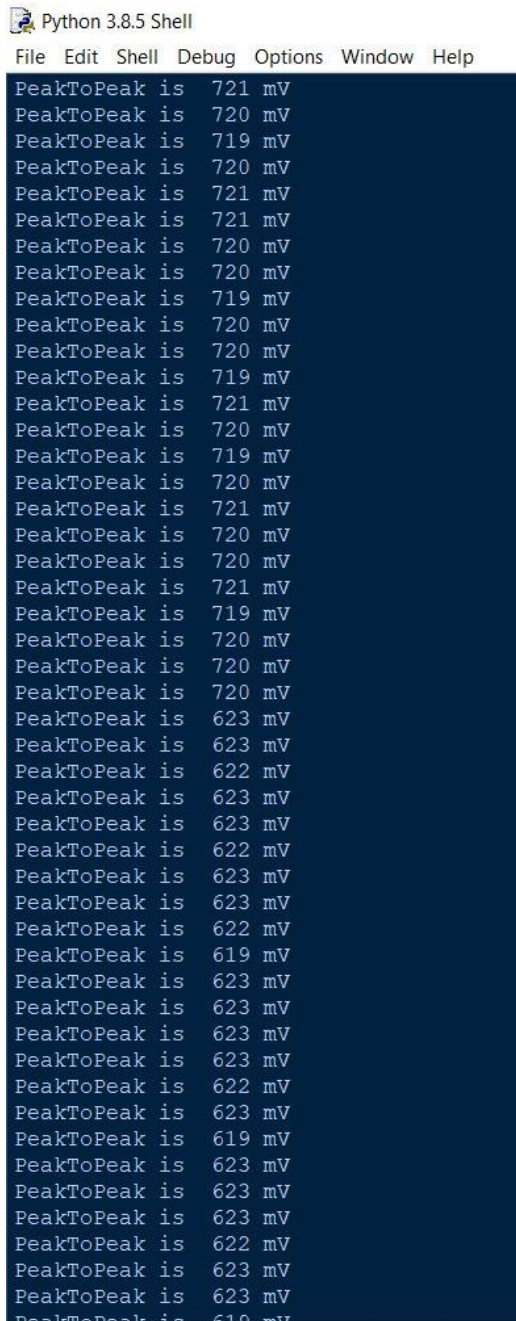
serial0 = serial.Serial('/dev/ttyUSB0')
serial1 = serial.Serial('/dev/ttyUSB1')

thread1 = threading.Thread(target=serial_read, args=(serial0,)).start()
thread2 = threading.Thread(target=serial_read, args=(serial1,)).start()

#queue is FIFO (First In First Out)
#so the first that you get is the partB(left part)
#considering that we send it from the stm
while queue.full():
    partB = queue.get()
    partA = queue.get()
    PeakToPeak = np.uint( np.uint(partA << 8) | partB);
    #stm32 send the value between 0-4095, must convert this to mV
    PeakToPeakInmV = math.ceil( PeakToPeak * 3.3 *10000/4095 )
    print("PeakToPeak is " , PeakToPeakInmV, "mV")

```

Σχήμα 5.3.9 Κώδικας Python



```
Python 3.8.5 Shell
File Edit Shell Debug Options Window Help
PeakToPeak is 721 mV
PeakToPeak is 720 mV
PeakToPeak is 719 mV
PeakToPeak is 720 mV
PeakToPeak is 721 mV
PeakToPeak is 721 mV
PeakToPeak is 720 mV
PeakToPeak is 720 mV
PeakToPeak is 720 mV
PeakToPeak is 719 mV
PeakToPeak is 720 mV
PeakToPeak is 720 mV
PeakToPeak is 719 mV
PeakToPeak is 721 mV
PeakToPeak is 720 mV
PeakToPeak is 719 mV
PeakToPeak is 720 mV
PeakToPeak is 721 mV
PeakToPeak is 720 mV
PeakToPeak is 720 mV
PeakToPeak is 721 mV
PeakToPeak is 719 mV
PeakToPeak is 720 mV
PeakToPeak is 720 mV
PeakToPeak is 720 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 622 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 622 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 622 mV
PeakToPeak is 619 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 622 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 619 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 622 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 623 mV
PeakToPeak is 619 mV
```

Σχήμα 5.3.10 Η παραγόμενη έξοδος στον υπολογιστή με ζωντανά δεδομένα

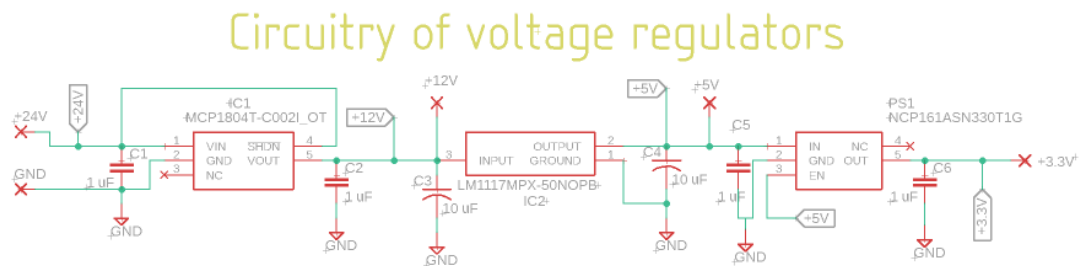
Στο σχήμα 5.3.9, φαίνεται η υλοποίηση σε python και στο σχήμα 5.3.10, η έξοδος όταν το συνολικό σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία. Στο σχήμα 5.3.10 φαίνεται το peak-to-peak ζωντανά. Να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο πείραμα έγινε για average τιμή 40 και όχι 10, έτσι ώστε να είναι πιο σταθερό το σύστημα και η python να προλαβαίνει να τυπώνει με σιγουριά, αν και διαπιστώθηκε πειραματικά ότι δεν υπάρχει διαφορά.

5.4 Σχεδίαση πλακέτας PCB

Τα 3 πρώτα βήματα που αναφέρθηκαν στην αρχή του 5^{ου} κεφαλαίου εκτελέστηκαν με επιτυχία, επομένως τώρα στόχος είναι το βήμα 4, δηλαδή να πραγματοποιηθεί η σχεδίαση πλακέτας, και να τυπωθεί (PCB). Όπως ήδη εξηγήθηκε, η τυπωμένη πλακέτα προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα.

Για τον στόχο αυτό, υπάρχουν διάφορα προγράμματα, ικανά για σχεδίαση πλακέτας. Αρκετά γνωστά είναι το KiCad, Altium και Eagle. Και τα τρία προγράμματα είναι πολύ γνωστά και πολύ καλά. Ωστόσο το Altium φημίζεται, ότι είναι το καλύτερο. Όμως, απορρίφθηκε σαν επιλογή επειδή δεν διατίθεται δωρεάν. Μεταξύ των άλλων δύο προγραμμάτων επιλέχθηκε το Eagle, γιατί υπήρχε προσωπική εμπειρία και επειδή αποτελεί ένα εξαιρετικό και εύχρηστο πρόγραμμα με πολλές ικανότητες.

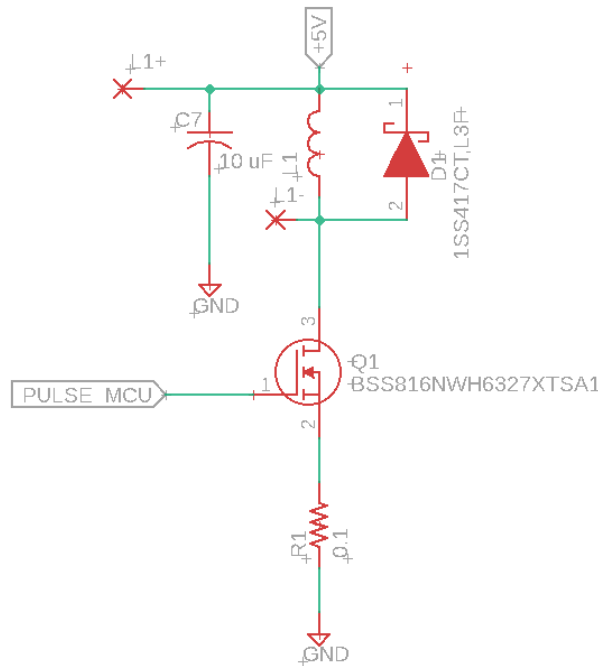
Αρχικά, θα υλοποιηθεί το schematic στα επιμέρους κομμάτια του, και μετά το PCB. Όλα τα components που επιλέχθηκαν είναι SMD. Οι αντιστάσεις και οι πυκνωτές έχουν footprint 0805, διότι από προσωπική εμπειρία είναι εφικτό να κολληθούν, ειδικά πιο μικρό footprint, είναι δύσκολο με κολλητήρι και απαιτείται πάστα και φούρνος.



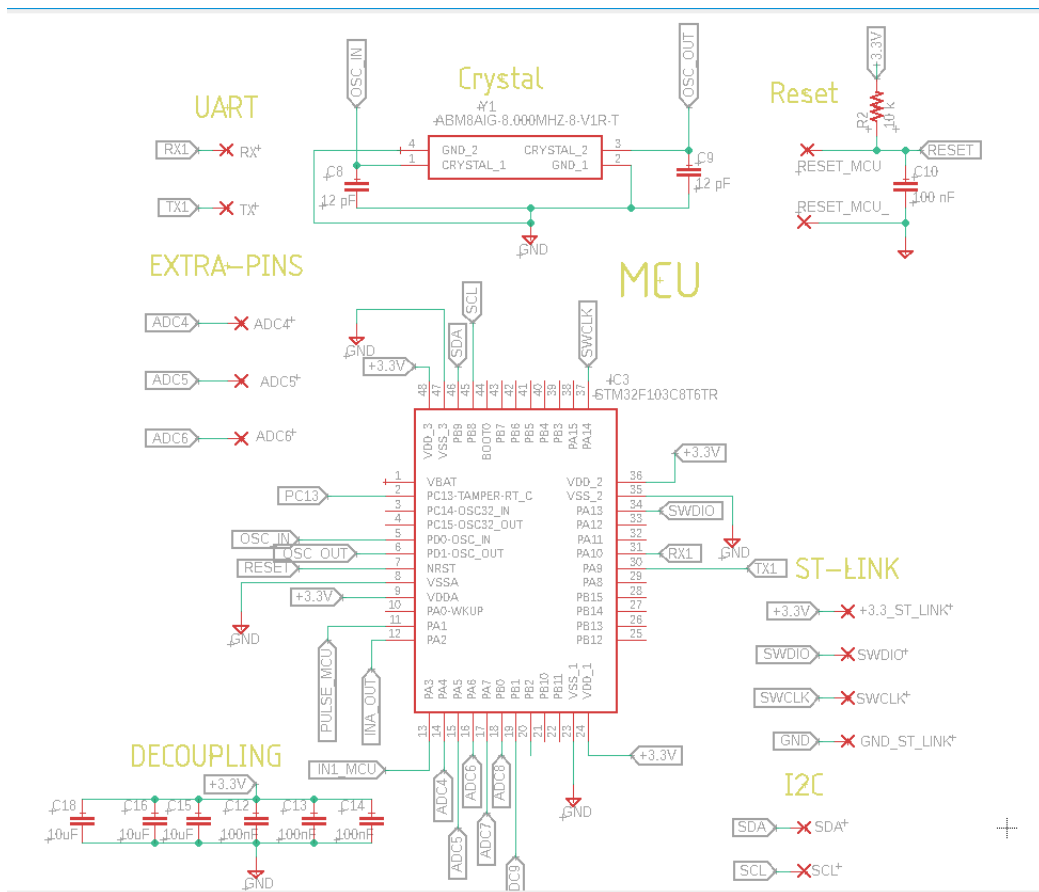
Σχήμα 5.4.1 Voltage regulators

Αποφασίστηκε η κύρια τροφοδοσία της πλακέτας να είναι 24 Volts. Αυτή η απόφαση πάρθηκε, με σκοπό την τελική υλοποίηση σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου είναι πολύ συνηθισμένο η DC τροφοδοσία να είναι 24V. Προστέθηκαν στο σύνολο τρεις ακόμη voltage regulators, που τροφοδοτούν κάποια chips στην πλακέτα. Συμπληρωματικά, αυτές οι τάσεις, δίνονται και ως έξοδοι της πλακέτας, για πιθανόν εξωτερική κυκλωματική επέκταση.

Circuitry of excitation coil

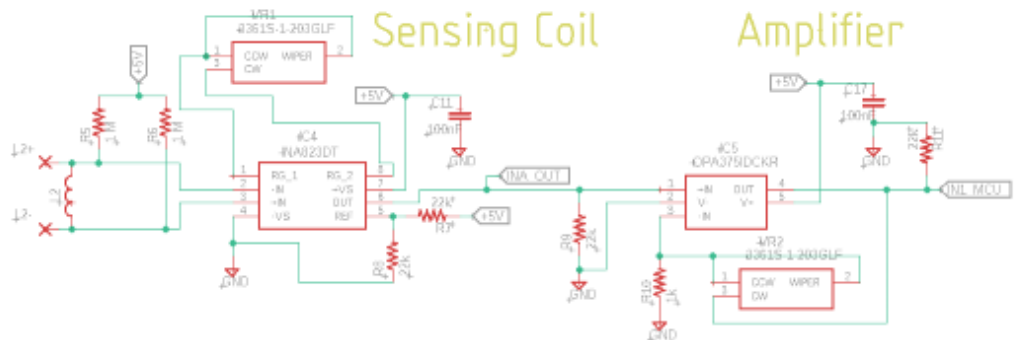


Σχήμα 5.4.2 Schematic κυκλώματος διέγερσης



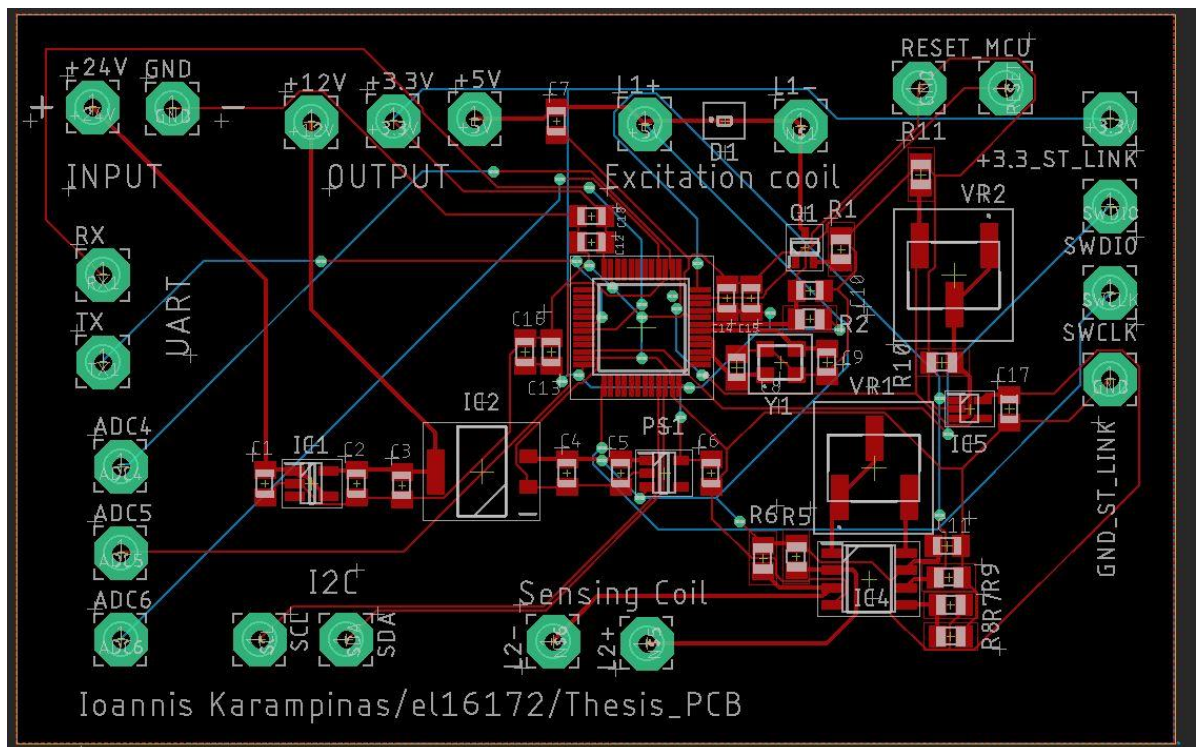
Σχήμα 5.4.3 Schematic μικροελεγκτή

Στο schematic του μικροελεγκτή έχει προστεθεί ένας εξωτερικός κρύσταλλος. Σχεδόν πάντα, σε κάθε schematic που περιέχεται μικροελεγκτής, θα υπάρχει και ένας εξωτερικός κρύσταλλος γιατί προσδίδει σταθερότητα στους κύκλους του ρολογιού, δηλαδή στην συχνότητα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά ο εσωτερικός κρύσταλλος του STM32F103C8, αλλά αποδεδειγμένα σε όλους τους microcontroller αυτό δεν αρκεί για πλήρη σταθερότητα.

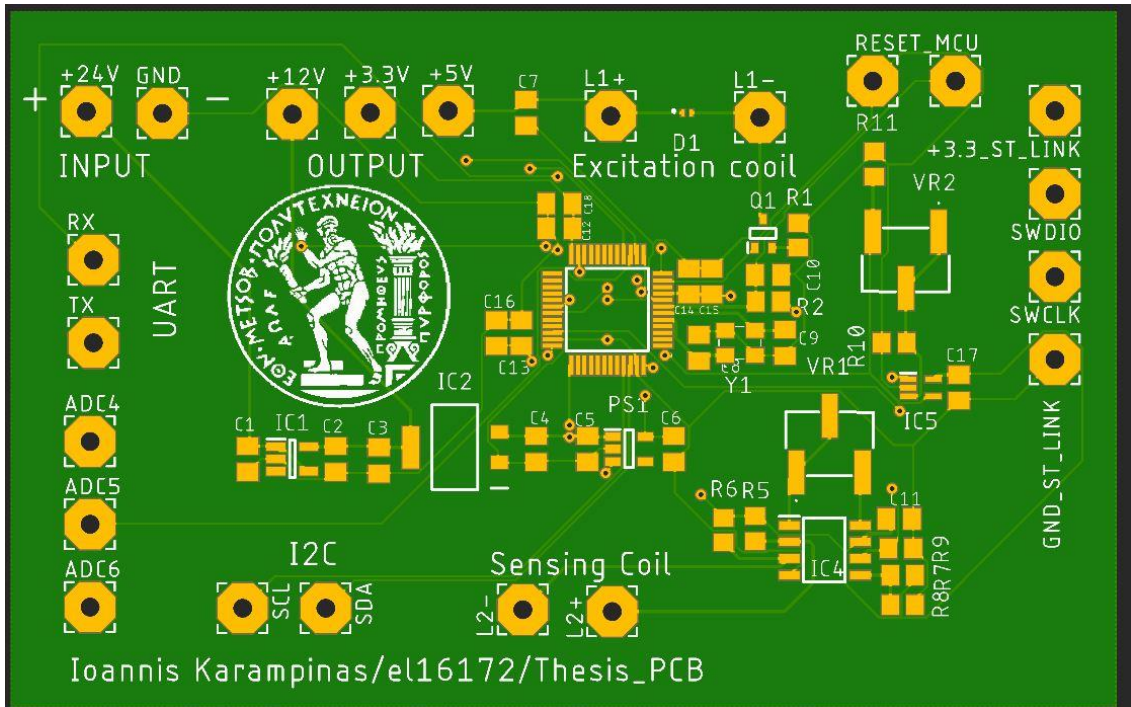


Σχήμα 5.4.4 Schematic κυκλώματος λήψης

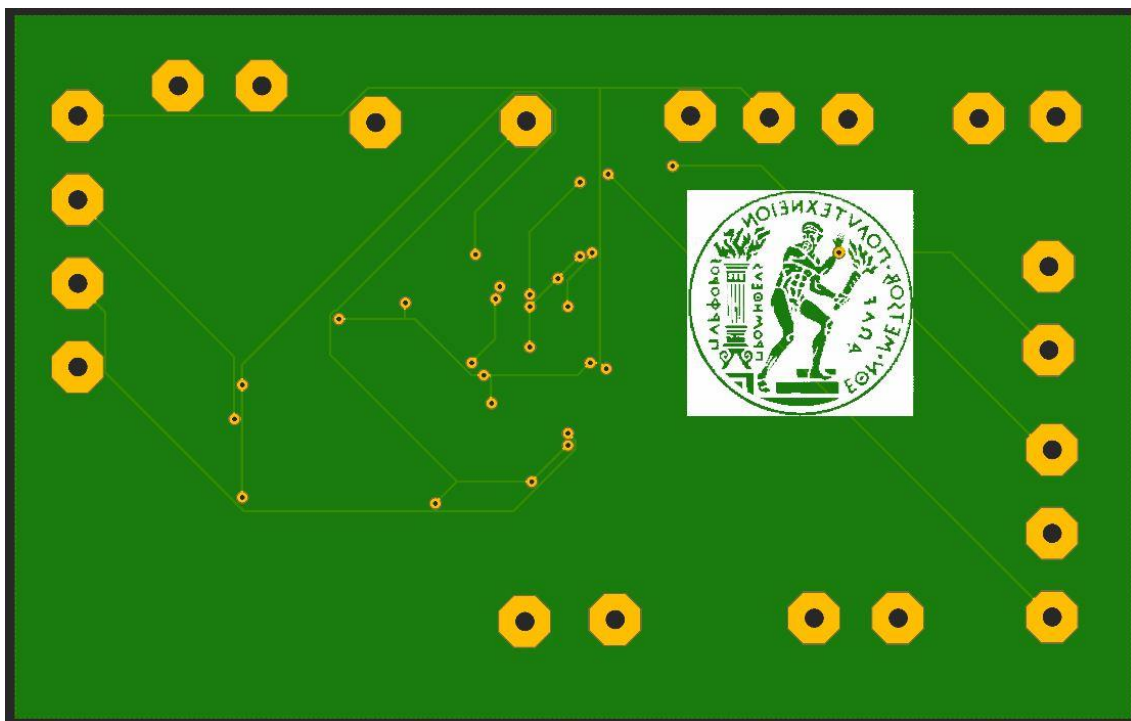
Αφού σχεδιάστηκε το schematic, φυσικό ακόλουθο ήταν η σχεδίαση του PCB.



Σχήμα 5.4.5 Top layer του PCB



Σχήμα 5.4.6 Top slide manufacturing του PCB



Σχήμα 5.4.7 Bottom slide manufacturing του PCB

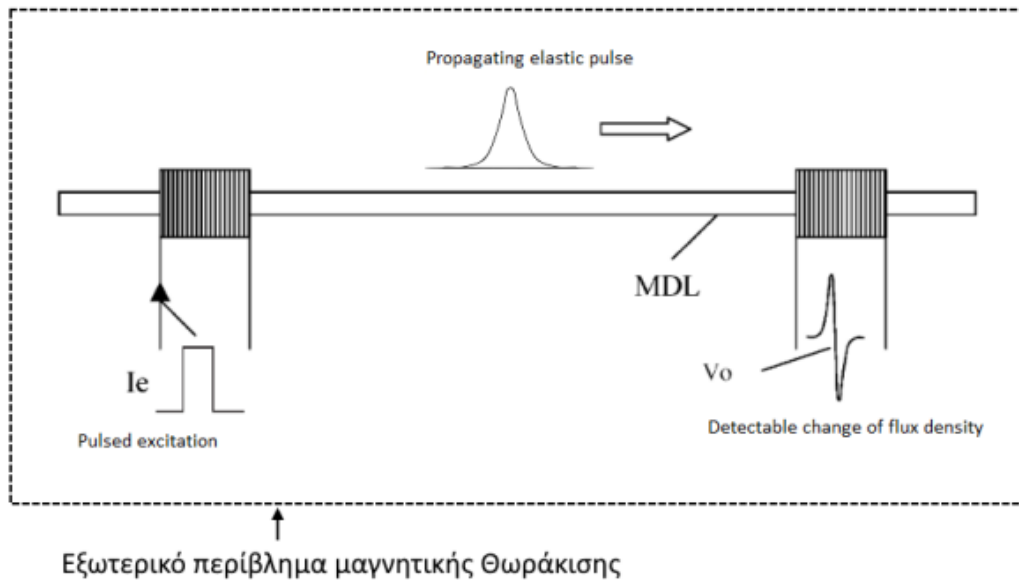
Δυστυχώς, επειδή υπάρχει τεράστιο πρόβλημα παγκοσμίως, με την παραγωγή των chips, υπήρχε μεγάλη έλλειψη σε αποθέματα ηλεκτρονικών και αυτό δημιούργησε σημαντικό πρόβλημα στο χρονοδιάγραμμα της διπλωματικής. Όποτε η τύπωση της πλακέτας δεν πραγματοποιήθηκε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Συμπερασματικά, τα πειραματικά αποτελέσματα που παρατηρήθηκαν από τη λειτουργία της συνολικής διάταξης του αισθητήρα, παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον αναφορικά με τον έλεγχο εσωτερικών τάσεων στον χάλυβα. Αξιοποιώντας την τεχνική MDL, μπορούμε να εξάγουμε κάποια ικανοποιητικά αποτελέσματα, για τον αν μια ράβδος από χάλυβα έχει κατασκευαστικές ατέλειες. Οι αδυναμίες όμως, της υλοποιούμενης διάταξης, καθιστά αδύνατη την χρήση του αισθητήρα σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον. Στο κεφάλαιο, θα αναφερθούν πιθανές βελτιώσεις του αισθητήρα, που μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την ποιότητα των μετρήσεων και των τελικών αποτελεσμάτων, να επιτρέψουν τη λειτουργία και την εφαρμογή του σε οποιοδήποτε περιβάλλον καθώς και τη χρήση από οποιοδήποτε μη εκπαιδευμένο άτομο.

6.1 Μαγνητική θωράκιση

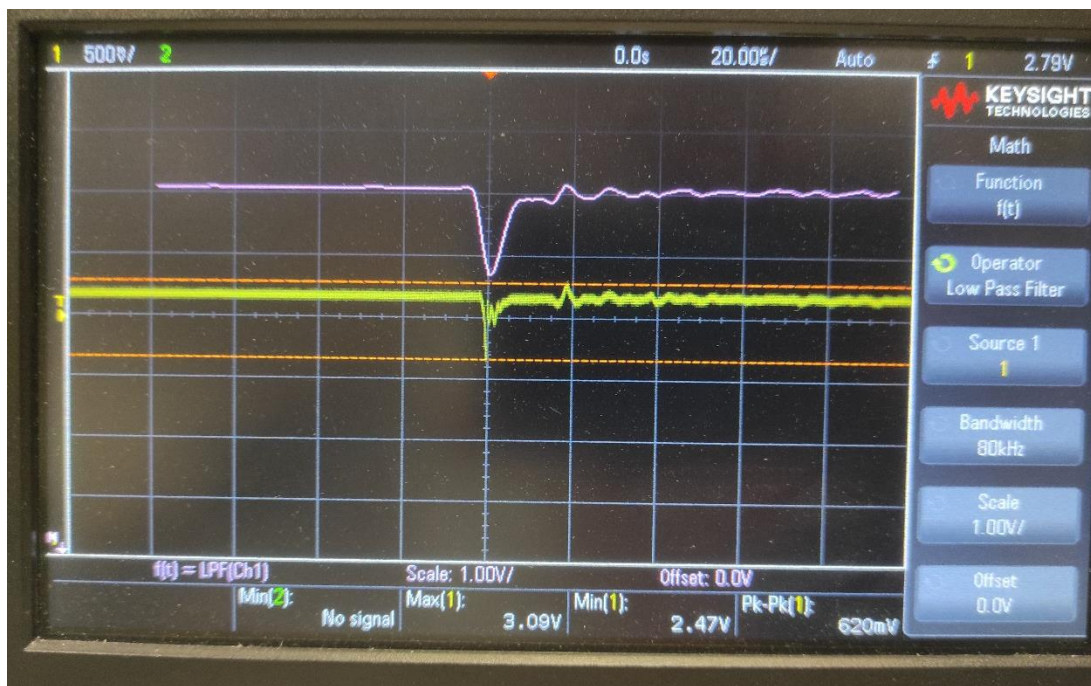
Η μαγνητική θωράκιση περιγράφει μια διαδικασία κατά την οποία ένα μαγνητικό πεδίο αποκλείεται από μια συγκεκριμένη περιοχή ανακατευθύνοντας σκόπιμα τις γραμμές του πεδίου του. Για το σκοπό αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται περιβλήματα από κατάλληλα υλικά ή πηνία αντιστάθμισης. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο η μαγνητική φύση του αισθητήρα, τον καθιστά ευάλωτο σε εξωτερικές μαγνητικές παρεμβολές. Το φαινόμενο αυτό, αποδείχτηκε και πειραματικά στο κεφάλαιο 5 της εργασίας, όπου φαίνεται ότι το σήμα της διάταξης διαταράσσεται με την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Επομένως η εφαρμογή μαγνητικής θωράκισης στη διάταξη MDL του αισθητήρα μπορεί να οδηγήσει σε σταθερότερη ανίχνευση του ελαστικού παλμού, που διαδίδεται κατά μήκος του MDL και να έχει «καθαρότερο» σήμα στην έξοδο της κυκλωματικής διάταξης.



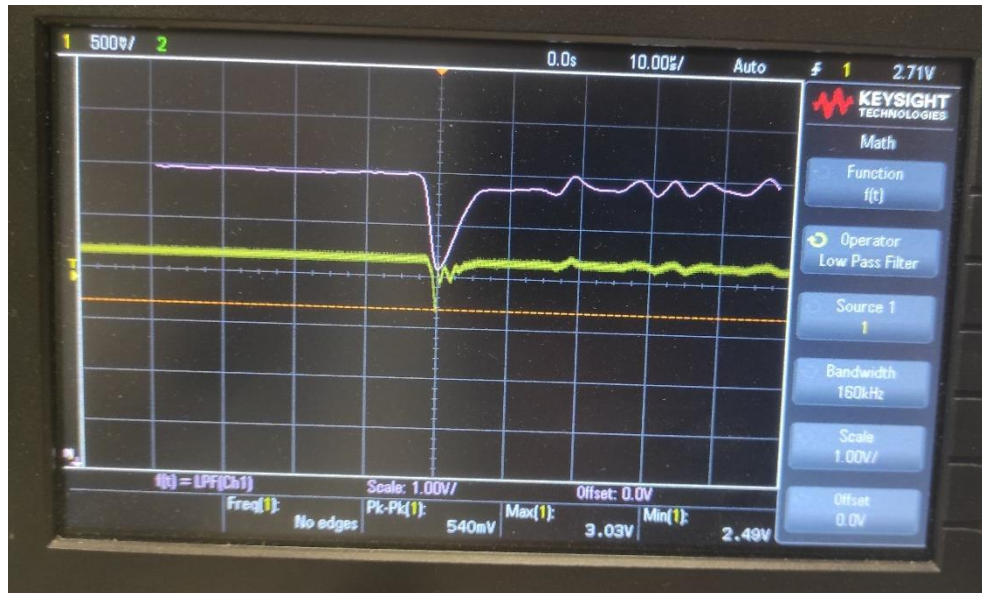
Σχήμα 6.1.1 Μαγνητική θωράκιση της διάταξης MDL του αισθητήρα [21]

6.2 Παραμετροποίηση κυκλώματος μέσω software

Κατά την διάρκεια των δοκιμών του κυκλώματος, χρειάστηκε πολλές φορές να αλλάξουμε παραμέτρους όπως το κέρδος ή την τιμή του average φίλτρου. Αυτό οδηγούσε πολλές φορές σε συνεχόμενες διακοπές. Για αυτό τον λόγο, θα μπορούσε το κύκλωμα να οργανωθεί με έναν τρόπο ώστε οι αλλαγές του να γίνονται σύντομα, με εξωτερικό. Το chip INA128P, μπορεί να αντικατασταθεί με ένα programmable gain instrumentation amplifier chip της οικογένειας AD825x. Αυτό προτείνεται, διότι αν θωρακιστεί ο αισθητήρας, δεν είναι λειτουργικό το ποτενσιόμετρο. Στο κεφάλαιο 4, αναφέρθηκε ότι προστέθηκε μετά το στάδιο του INA128P, ένα αναλογικό low pass φίλτρο και η τιμή του επιλέχθηκε αρκετά υψηλότερη, διότι μπορεί να αποκόπτεται χρήσιμη πληροφορία. Επομένως, προτείνεται να υλοποιηθεί ένα ψηφιακό φίλτρο στον μικροελεγκτή, που θα υλοποιείται από μία συνάρτηση με παράμετρο την συχνότητα αποκοπής. Το πλεονέκτημα του ψηφιακού φίλτρου θα παρουσιαστεί στο σχήμα 6.2.1 και 6.2.2. Στα σχήματα εμφανίζονται δύο σήματα εξόδου, με διαφορετική συχνότητα αποκοπής. Οι λίγο διαφορετικές συνθήκες διεξαγωγής του 2^{ου} πειράματος, οδήγησαν σε μεγαλύτερη συχνότητα αποκοπής για να «καθαρίσει» το σήμα. Επομένως, η αναλογική λύση δεν συνίσταται.



Σχήμα 6.2.1. Σήμα εξόδου (κίτρινο χρώμα) και σήμα εξόδου μετά από low pass φίλτρο 80kHz (ροζ)



Σχήμα 6.2.2. Σήμα εξόδου (κίτρινο χρώμα) και σήμα εξόδου μετά από low pass φίλτρο 160kHz (ροζ)

Όλες αυτές οι μεταβλητές, ορίζονται στον κύριο κώδικα του μικροελεγκτή. Επειδή δεν είναι πρακτικό να επαναπρογραμματίζεται ο μικροελεγκτής, θα ήταν χρήσιμο οι μεταβλητές αυτές να διαβάζονται από ένα εξωτερικό αρχείο τύπου .json. Έτσι, με ένα εξωτερικό reset ο μικροελεγκτής θα διαβάζει απευθείας τι νέες τιμές. Επιπλέον, πιο

πρακτικό θα ήταν, να γίνει όλη αυτή η διαδικασία μέσω μια απλής εφαρμογής κινητού ή υπολογιστή. Η εφαρμογή θα μπορούσε να επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή μέσω Wifi ή bluetooth. Ο μικροελεγκτής ESP32 προσφέρει αυτή την δυνατότητα. Με όλες αυτές τις προσθήκες – αλλαγές, οι δοκιμές θα ήταν πολύ γρήγορες και η κατανόηση καλύτερη, γιατί θα προσέφερε πολλές δυνατότητες.

6.3 Αντικατάσταση μικροελεγκτή με Field Programmable Gate Array (FPGA)

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, ο μικροελεγκτής εκτέλεσε ικανοποιητικά όλες τις απαιτούμενες λειτουργίες, αλλά δεν αποτελεί την βέλτιστη. Στην μέτρηση του peak to peak δεν απαιτείται ιδιαίτερη επεξεργαστική ταχύτητα, αντιθέτως στην μέτρηση της χρονικής διαφοράς, μεταξύ της στιγμής της διέγερσης και της λήψης απαιτείται. Όταν χρειαστεί να αυτοματοποιηθεί πλήρως η διαδικασία και το ένα πηνίο θα είναι κινούμενο, η χρονική καθυστέρηση θα επιδείξει το σημείο που υπάρχει η κατασκευαστική ατέλεια. Επίσης, ένα FPGA, επειδή κατέχει εξαιρετικά γρήγορη επεξεργαστική ισχύ, θα μπορούσε να επεξεργάζεται παράλληλα πολλούς ράβδους στο ίδιο board, χωρίς να προκύπτουν προβλήματα.

Βιβλιογραφία

- [1] <https://www.electronicshub.org/different-types-sensors/>
- [2] <https://www.geosense.co.uk/sensor-outputs/>
- [3] Naresh, Varnakavi, and Nohyun Lee. "A review on biosensors and recent development of nanostructured materials-enabled biosensors." *Sensors* 21.4 (2021): 1109.
- [4] Lenz, James, and S. Edelstein. "Magnetic sensors and their applications." *IEEE Sensors journal* 6.3 (2006): 631-649.
- [5] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080431529021588>
- [6] Nor, AF Md, et al. "Noise in NiFeCo/Cu spin valve sensors." *Sensors and Actuators A: Physical* 81.1-3 (2000): 67-70.
- [7] Van de Veerdonk, R. J. M., et al. "1/f noise in anisotropic and giant magnetoresistive elements." *Journal of Applied Physics* 82.12 (1997): 6152-6164.
- [8] Hristoforou, E. "Magnetostrictive delay lines and their applications." *Sensors and Actuators A: Physical* 59.1-3 (1997): 183-191.
- [9] Edelstein, Alan S., and Gregory A. Fischer. "Minimizing 1/f noise in magnetic sensors using a microelectromechanical system flux concentrator." *Journal of applied physics* 91.10 (2002): 7795-7797.
- [10] Edelstein, A. S., et al. "Progress toward a thousandfold reduction in 1/f noise in magnetic sensors using an ac microelectromechanical system flux concentrator." *Journal of applied physics* 99.8 (2006): 08B317.
- [11] Ripka, Pavel. "Advances in fluxgate sensors." *Sensors and Actuators A: Physical* 106.1-3 (2003): 8-14.
- [12] Pizzella, Vittorio, et al. "SQUID systems for biomagnetic imaging." *Superconductor Science and Technology* 14.7 (2001): R79.
- [13] R. Cantor, "SQUID's and emerging applications," *Supercond. Cryo-electron.*, vol. 13, pp. 16–22, 2001
- [14] Hristoforou, E. "Amorphous magnetostrictive wires used in delay lines for sensing applications." *Journal of magnetism and magnetic materials* 249.1-2 (2002): 387-392.
- [15] Popovic, R. S. "Hall Effect Sensors." *Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia*. UK, 2004.

- [16] Tumanski, Slawomir. "Thin film magnetoresistive sensors." (2001).
- [17] van't Erve, O. M. J., et al. "Transfer ratio of the spin-valve transistor." *Applied physics letters* 80.20 (2002): 3787-3789.
- [18] Beach, R. S., and A. E. Berkowitz. "Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire." *Applied Physics Letters* 64.26 (1994): 3652-3654.
- [19] Li, X. P., et al. "Enhancement of giant magnetoimpedance effect of electroplated NiFe/Cu composite wires by dc Joule annealing." *Journal of applied physics* 94.12 (2003): 7626-7630.
- [20] Xiao, Shu-qin, et al. "Giant magnetoimpedance and domain structure in FeCuNbSiB films and sandwiched films." *Physical Review B* 61.8 (2000): 5734.
- [21] Hristoforou, E. "Magnetostrictive delay lines: engineering theory and sensing applications." *Measurement Science and Technology* 14.2 (2003): R15.
- [22] O'handley, Robert C. *Modern magnetic materials: principles and applications*. Wiley, 2000.
- [23] Hristoforou, Evangelos, and Aphrodite Ktena. "Magnetostriction and magnetostrictive materials for sensing applications." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 316.2 (2007): 372-378.
- [24] Hayes, J. P., et al. "Magnetic and magnetoelastic properties of thin films by pulsed laser deposition." *IEEE Transactions on Magnetics* 33.5 (1997): 3613-3615.
- [25] Grabham, N. J., S. P. Beeby, and N. M. White. "The formulation and processing of a thick-film magnetostrictive material." *Measurement Science and Technology* 13.1 (2001): 59.
- [26] Hernando, A., M. Vazquez, and J. M. Barandiaran. "Metallic glasses and sensing applications." *Journal of Physics E: Scientific Instruments* 21.12 (1988): 1129.
- [27] Bieńkowski, Adam. "Magnetoelastic Villari effect in Mn-Zn ferrites." *Journal of magnetism and magnetic materials* 215 (2000): 231-233.
- [28] Aharoni, Amikam. *Introduction to the Theory of Ferromagnetism*. Vol. 109. Clarendon Press, 2000.
- [29] Onoe, Morio. "Theory of Ultrasonic Delay Lines for Direct-Current Pulse Transmission." *The Journal of the Acoustical Society of America* 34.9A (1962): 1247-1254.
- [30] Hristoforou, E., H. Chiriac, and M. Neagu. "Pulse width effect on magnetostrictive amorphous ribbons and wires." *physica status solidi (a)* 143.2 (1994): 391-397.
- [31] Ekreem, N. B., et al. "An overview of magnetostriction, its use and methods to measure these properties." *Journal of Materials Processing Technology* 191.1-3 (2007): 96-101.

- [32] Piercy, A. R. "The changing shape of magnetostriction." *Physics Education* 32.3 (1997): 160.
- [33] Lee, Eric W. "Magnetostriction and magnetomechanical effects." *Reports on progress in physics* 18.1 (1955): 184.
- [34] Le Bras, Yannick, and Jean-Marc Greneche. "Magneto-elastic resonance: principles, modeling and applications." *Resonance* (2017).
- [35] Callister, William D., and David G. Rethwisch. *Materials science and engineering: an introduction*. Vol. 9. New York: Wiley, 2018.
- [36] <https://www.wikihow.com/Measure-Inductance#Measuring-with-an-LCR-Meter>
- [37] https://en.wikipedia.org/wiki/Inductance#cite_note-35
- [38] https://www.engineeringtoolbox.com/permeability-d_1923.html
- [39] https://learnemc.com/EXT/calculators/Inductance_Calculator/L-circle.html
- [40] <https://alltransistors.com/mosfet/transistor.php?transistor=13113>
- [41] https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_7.html
- [42] <https://www.vishay.com/docs/88525/1n5817.pdf>
- [43] https://www.electronicshub.org/bypass-capacitor-tutorial/#How_Bypass_Capacitor_Eliminates_Power_Supply_Noise
- [44] https://toshiba.semiconstorage.com/eu/semiconductor/knowledge/faq/linear_opamp/what-is-the-purpose-of-using-a-differential-amplifier.html
- [45] Vázquez, M., et al. "Magnetic bistability of amorphous wires and sensor applications." *IEEE transactions on magnetics* 30.2 (1994): 907-912.
- [46] Mizutani, M., et al. "Distance sensors utilizing large Barkhausen effect excited by wire current pulse train in twisted amorphous magnetostrictive wires." *IEEE transactions on magnetics* 29.6 (1993): 3174-3176.
- [47] Aharoni, Amikam. *Introduction to the Theory of Ferromagnetism*. Vol. 109. Clarendon Press, 2000.
- [48] Chen, Y. H., and D. C. Jiles. "The magnetomechanical effect under torsional stress in a cobalt ferrite composite." *IEEE transactions on magnetics* 37.4 (2001): 3069-3072.
- [49] Kakuno, K., S. Masuda, and T. Yamada. "Scattered magnetoelastic waves in amorphous wires." *Le Journal de Physique Colloques* 49.C8 (1988): C8-2037.

[50] Garcia, D. J., and B. Alascio. "Low field magnetoresistance in double exchange compounds." *Physica B: Condensed Matter* 320. 1-4 (2002): 7-12.

[51] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/solenoid.html>

[52] <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/electromagnetic-induction.html>

[53] <https://gasstationwithoutpumps.wordpress.com/2019/05/10/inductive-spikes/>