



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ανάπτυξη Αισθητήρα Μέτρησης Χρόνου Πήξης του Αίματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλας Β. Γράβαλος

Επιβλέπων : Ευάγγελος Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ανάπτυξη Αισθητήρα Μέτρησης Χρόνου Πήξης του Αίματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλας Β. Γράβαλος

Επιβλέπων : Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 4^η Ιουλίου 2022.

.....
Ε. Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Α. Κτενά
Καθηγήτρια Ε.Κ.Π.Α

.....
Π. Τσαραμπάρης
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2022

.....
Νικόλας Β. Γράβαλος

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

Copyright © Νικόλας Β. Γράβαλος, 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. Η πρόοδος των θετικών επιστημών οδήγησε στην αλματώδη ανάπτυξη του τομέα της Βιοϊατρικής τεχνολογίας παγκοσμίως. Ειδικότερα, στον τομέα παροχής υπηρεσιών υγειονομικής περίθαλψης υφίσταται η ανάγκη για επαναλαμβανόμενη και συνεχή παρακολούθηση των ασθενών, λήψη μετρήσεων της φυσιολογίας τους, επόπτευση των ζωτικών λειτουργιών τους, με σκοπό τη λήψη αποφάσεων για τη διάγνωση, την πορεία της θεραπείας τους και την παρατήρηση της αποτελεσματικότητας των ιατρικών παρεμβάσεων. Για την εξυπηρέτηση όλων των προαναφερθέντων αναγκών, έχουν αναπτυχθεί αισθητήρες και διατάξεις συστημάτων αισθητήρων που κατέχουν σημαντική θέση στη σύγχρονη ιατρική, προσφέροντας σημαντικές διαγνωστικές αλλά και προγνωστικές δυνατότητες. Η προσπάθεια ανάπτυξης ενός μαγνητοσυστολικού αισθητήρα μέτρησης του χρόνου πήξης αίματος που βασίζεται στην εφαρμογή της τεχνικής των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης (MDL), παρουσιάζεται και αναλύεται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Με τη χρήση της αισθητήριας διάταξης, το βιολογικό φαινόμενο της πήξης του αίματος μετατρέπεται σε εύκολα μετρούμενο σήμα ηλεκτρικής τάσης. Η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται με τη βοήθεια διάταξης επαγωγικών πηνίων (πηνίο διέγερσης-πηνίο λήψης) στο εσωτερικό των οποίων τοποθετείται μαγνητοσυστολικό υλικό. Παρουσιάζεται αρχικά το θεωρητικό υπόβαθρο πίσω από τους μαγνητικούς αισθητήρες, καθώς και το μαγνητοσυστολικό φαινόμενο στο οποίο στηρίζεται η τεχνική MDL. Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων της διάταξης (κύκλωμα διέγερσης-κύκλωμα λήψης), και παρουσιάζεται η συνολική αισθητήρια διάταξη και τα πειραματικά αποτελέσματα που παρατηρήθηκαν κατά τη λειτουργία της. Τέλος, σχολιάζονται τα αποτελέσματα ώστε να εξακριβωθεί η ορθή λειτουργία του αισθητήρα και αναφέρονται ενδεχόμενες μελλοντικές βελτιώσεις του.

Λέξεις κλειδιά: Μαγνητικοί αισθητήρες, μαγνητοσυστολή, μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης, αίμα, πήξη.

Abstract

The rapid technological developments of the 21st century now affect every aspect of our lives. The advancement of science has led to the rapid growth of the Biomedical Technology sector worldwide. More specifically, in the field of health care services, there is need for repeated and continuous monitoring of patients, taking measurements of their physiology, monitoring vital functions, making decisions about their diagnosis, course of treatment, and generally observing of the effectiveness of medical interventions. To serve all the aforementioned needs, sensors and sensor systems have been developed that occupy a significant place in modern medicine, offering important diagnostic and prognostic possibilities. The attempt to develop a magnetostrictive sensor for measuring blood coagulation time based on the magnetostrictive delay lines (MDL) technique, is presented and analyzed in this dissertation. Using the sensing device, the biological phenomenon of blood clotting is converted into an easily measurable electrical voltage signal. This conversion is carried out with the assistance of an inductive coil device (excitation coil-search coil) inside of which the magnetostrictive material is placed. The theoretical background of magnetic sensors is presented first, as well as the magnetostrictive effect on which the MDL technique is based on. Then follows the analysis of the electronic circuits of the device (excitation circuit-receiving circuit), and the overall sensor system is presented as well as the experimental results observed during its operation. Finally, the results are commented in order to verify the correct operation of the sensor and possible future improvements are reported.

Keywords: Magnetic sensors, magnetostriction, magnetostrictive delay lines, blood, coagulation.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το επιβλέποντα καθηγητή κ. Χριστοφόρου που με καθοδήγησε στη διαδρομή μου προς την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης το διδάκτορα Σ. Αγγελόπουλο για τη βοήθεια και την καθοδήγηση του στο πειραματικό στάδιο της εργασίας μου και για τις πολύτιμες συμβουλές του.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που μου έχει προσφέρει με ανιδιοτέλεια τα πάντα σε όλο το διάστημα των σπουδών μου για τη συνεχή στήριξη και την υπομονή τους.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο- ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Η έννοια του αισθητήρα	1
1.2 Ταξινόμηση αισθητήρων	1
1.3 Μαγνητικοί Αισθητήρες	3
1.4 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης (MDLs)	5
1.5 Στόχος της εργασίας	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΗ.....	9
2.1 Μαγνητοσυστολή	9
2.2 Μαγνητικές περιοχές	11
2.3 Μαγνητικά φαινόμενα σε εφαρμογές αισθητήρων.....	12
2.3.1 Διάδοση μαγνητικών τοιχωμάτων(Domain wall dynamics).....	12
2.3.2 Περιστροφή μαγνητικών περιοχών (Domain rotation dynamics).....	14
2.3.3 «Εξαρτημένοι» μηχανισμοί (Dependent mechanisms).....	16
2.4 Μαγνητοσυστολικά υλικά – Άμορφα υλικά.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ.....	19
3.1 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης MDL – Τυπική διάταξη	19
3.1.1 Δημιουργία ελαστικού παλμού-Μαγνητοσυστολικό φαινόμενο	20
3.1.2 Διάδοση ελαστικού παλμού-Ακουστικό φαινόμενο	21
3.1.3 Λήψη παλμού-Αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο.....	22
3.2 Μοντελοποίηση MDL	23
3.3 Ιδιότητες MDL	26
3.3.1 Ανομοιομορφία (Non-uniformity).....	26
3.3.2 Φαινόμενο μαγνητικού πεδίου πόλωσης (Bias field Effect).....	27
3.3.3 Καθυστέρηση απόκρισης (Response delay)	27
3.3.4 Υστέρηση (Hysteresis)	27
3.3.5 Ανάλυση (Resolution)	27
3.3.6 Πλάτος παλμού διέγερσης ή απόκριση συχνότητας (Pulse width or frequency response).....	28
3.3.7 Ανακλάσεις (Reflections)	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο- Η ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ	29
4.1 Διάταξη MDL.....	30
4.2 Κύκλωμα διέγερσης.....	33
4.2.1 Προδιαγραφές κυκλώματος διέγερσης	33
4.2.2 Ανάλυση κυκλώματος διέγερσης.....	34
4.2.3 Προσομοίωση κυκλώματος διέγερσης	39

4.2.4 Απόκριση κυκλώματος διέγερσης	41
4.3 Κύκλωμα λήψης	44
4.3.1 Προδιαγραφές κυκλώματος λήψης	44
4.3.2 Ανάλυση κυκλώματος λήψης	45
4.3.3 Προσομοίωση κυκλώματος λήψης	52
4.3.4 Απόκριση κυκλώματος λήψης	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο- ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΤΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ ΔΙΑΤΑΞΗ	59
5.1 Αποτελέσματα κυκλώματος διέγερσης	60
5.2 Αποτελέσματα κυκλώματος λήψης	63
5.2.1 Αποτελέσματα πρώτου σταδίου (Ενίσχυση)	63
5.2.2 Αποτελέσματα δεύτερου σταδίου (Ανόρθωση)	68
5.3 Αποτελέσματα μετά την τοποθέτηση αίματος στο MDL	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	77
6.1 Προσθήκη μικροελεγκτή στη διάταξη του αισθητήρα	77
6.2 Μαγνητική θωράκιση (Magnetic shielding)	78
6.3 Μετατροπή διάταξης MDL	78
6.4 Σχεδίαση και κατασκευή κυκλωμάτων σε PCB (Printed Circuit Board)	80
Βιβλιογραφία	83

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1.1 Σχηματική διάταξη Αισθητήρα.....	1
Σχήμα 1.2.1 Διαφορά αναλογικών και ψηφιακών σημάτων ^[1]	3
Σχήμα 1.4.1 Ταξινόμηση σιδηρομαγνητικών υλικών ^[7]	5
Σχήμα 2.1.1 Περιστροφή των δίπολων ανάλογα με την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου (γκρι βέλος). Παρατηρείται η συστολή και η διαστολή του υλικού, λόγω του ελλειψοειδούς σχήματος των δίπολων. ^[10]	9
Σχήμα 2.1.2 (α) Διαστολή υλικού κατά ΔL υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου H, (b) Η σχέση μεταξύ της μαγνητοσυστολής λ και του μαγνητικού πεδίου H. ^[11]	10
Σχήμα 2.2.1 Δομή μη μαγνητισμένου σιδηρομαγνητικού υλικού σε μικροσκοπικό επίπεδο. ^[13]	11
Σχήμα 2.2.2 Σταδιακή περιστροφή των μοριακών δίπολων του μαγνητικού τοιχώματος (B) προς εναρμόνιση με τις προσκείμενες μαγνητικές περιοχές (A) και (C). ^[10]	12
Σχήμα 2.3.1.1 Διάδοση μαγνητικών τοιχωμάτων. (α) Διάδοση μέσω της bowing process, (b) Ακαμπτη διάδοση μέσω της παράλληλης κίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων. ^[15]	13
Σχήμα 2.3.2.1 Περιστροφή μαγνητικών περιοχών (α) Μη αναστρέψιμη περιστροφή, (b) Αναστρέψιμη περιστροφή. ^[15]	15
Σχήμα 2.4.1 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]	17
Σχήμα 3.1.1 Βασική διάταξη MDL: 1 Πηνίο διέγερσης, 2 Μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης, 3 Πηνίο λήψης. ^[30]	19
Σχήμα 3.1.1.1 Καμπύλη λ(H)-Εξάρτηση μικροπαραμορφώσεων από το μαγνητικό πεδίο. ^[8] 20	
Σχήμα 3.1.1.2 Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου. ^[31]	21
Σχήμα 3.1.2.1 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. ^[32]	21
Σχήμα 3.1.3.1 Απεικόνιση των τριών διαδοχικών γεγονότων της τεχνικής MDL στην τυπική διάταξη. ^[33]	22
Σχήμα 3.1.3.2 Φαινόμενο ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής στο οποίο στηρίζεται το πηνίο λήψης για ανίχνευση του ελαστικού παλμού. ^[34]	23
Σχήμα 3.2.1 Η τυπική διάταξη με διέγερση από έναν αγωγό κάθετο στον άξονα του MDL. ^[8]	24
Σχήμα 3.2.2 Δημιουργία, διάδοση και ανίχνευση μικροπαραμορφώσεων με σύντομο παλμό διέγερσης στα αριστερά, και μεγαλύτερης διάρκειας στα δεξιά. ^[8]	26
Σχήμα 4.1 Σχηματικό διάγραμμα συνολικής αισθητήριας διάταξης.....	29
Σχήμα 4.1.1 Πηνίο διέγερσης L_e (αριστερά), πηνίο λήψης L_s (δεξιά)......	32

Σχήμα 4.1.2 Η συνολική διάταξη MDL με το άμορφο ribbon να διαπερνά το εσωτερικό των πηνίων.....	32
Σχήμα 4.2.2.1 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος διέγερσης.	34
Σχήμα 4.2.2.2 Το mosfet σε λειτουργία ανοιχτού διακόπτη (περιοχή αποκοπής)(αριστερά) και σε λειτουργία κλειστού διακόπτη (περιοχή κορεσμού)(δεξιά). Διακοπτική σύνδεση του πηνίου με τη γείωση και δημιουργία παλμικού ρεύματος στο πηνίο.	35
Σχήμα 4.2.2.1.1 Περιοχές λειτουργίας του NMOS τρανζίστορ. ^[35]	36
Σχήμα 4.2.2.2.1 Μεταβολή ρεύματος I_F συναρτήσει της V_F της Schottky διόδου 1N5818. ^[37]	38
Σχήμα 4.2.3.1 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος διέγερσης στο TINA-TI.	39
Σχήμα 4.2.3.2 Κυματομορφές κυκλώματος διέγερσης μετά από transient analysis: Τάση πύλης mosfet (πράσινο), τάση πηγής mosfet (μπλε), τάση υποδοχής mosfet (κόκκινο), σήμα εισόδου(μωβ), DC τάση τροφοδοσίας (5V)(λαδί).....	40
Σχήμα 4.2.3.3 Κυματομορφές τάσης πύλης (V_g), τάσης υποδοχής (V_d), τάσης πηγής (Resistor Voltage), σήματος εισόδου (V_{ar}), DC τροφοδοσίας (DC).....	40
Σχήμα 4.2.3.4 Κυματομορφή τάσης στα άκρα της R_1 (Source του τρανζίστορ) με εισαγωγή δείκτη a για τη μέτρηση του πλάτους του σήματος.....	41
Σχήμα 4.2.4.1 Κατασκευή κυκλώματος διέγερσης σε πλακέτα δοκιμών.	42
Σχήμα 4.2.4.2 DC τροφοδοσία κυκλώματος breadboard μέσω τροφοδοτικού.	42
Σχήμα 4.2.4.3 Λειτουργία παλμικού σήματος εισόδου σε συχνότητα 1kHz.	43
Σχήμα 4.2.4.4 Πλάτος $V_{pp}=5V$ σήματος εισόδου.....	43
Σχήμα 4.2.4.5 Προσθήκη DC offset στον παλμό εισόδου $V_{DC}=2,5V$ ώστε να μην υπάρχει αρνητικό πλάτος.	43
Σχήμα 4.2.4.6 Εύρος παλμού εισόδου.....	43
Σχήμα 4.3.1.1 Μετατροπή σήματος εισόδου (κίτρινο) μετά από την επεξεργασία του από το κύκλωμα λήψης. Το σήμα εξόδου (κόκκινο) είναι πλέον ενισχυμένο και ανορθωμένο. ^[38]	45
Σχήμα 4.3.2.1 Σχηματική διάταξη κυκλώματος λήψης. Πρώτο στάδιο ενίσχυσης και αποθρομβοποίησης με χρήση του ενισχυτή INA128P (αριστερά). Δεύτερο στάδιο ανόρθωσης και αποθρομβοποίησης με χρήση του κυκλώματος superdiode και του ενισχυτή LM358 (δεξιά).....	46
Σχήμα 4.3.2.1.1 Προτεινόμενες συνθήκες λειτουργίας ενισχυτή INA128P. ^[39]	47
Σχήμα 4.3.2.1.2 Κέρδος (αριστερά) και CMRR (δεξιά) σε συνάρτηση με τη συχνότητα στον INA128. ^[39]	47
Σχήμα 4.3.2.1.3 Συνδεσμολογίες ικανές να δημιουργήσουν μονοπάτι για το ρεύμα πόλωσης εισόδου. ^[39]	49
Σχήμα 4.3.2.2.1 Κυκλωματική διάταξη superdiode. ^[40]	50
Σχήμα 4.3.3.1.1 Κυκλωματική διάταξη 1 ^ο σταδίου κυκλώματος λήψης.	52
Σχήμα 4.3.3.1.2 AC Sweep προσομοίωση του πρώτου σταδίου.....	53

Σχήμα 4.3.3.1.3 Προσομοίωση transient του πρώτου σταδίου με προσθήκη DC offset 1,5V στο σήμα εισόδου (πλάτους 5mV).	54
Σχήμα 4.3.3.1.4 Ενίσχυση σήματος εισόδου με κέρδος $G=20$	55
Σχήμα 4.3.3.2.1 Κυκλωματική διάταξη 2 ^ο σταδίου κυκλώματος λήψης.	56
Σχήμα 4.3.3.2.2 Προσομοίωση transient του δεύτερου σταδίου (superdiode).	56
Σχήμα 4.3.4.1 Κατασκευή πρώτου σταδίου κυκλώματος λήψης σε πλακέτα δοκιμών.	57
Σχήμα 5.1 Η συνολική διάταξη στην οποία πραγματοποιήθηκε η διεξαγωγή των πειραμάτων.	59
Σχήμα 5.1.1 Κύκλωμα διέγερσης σε through-hole πλακέτα.	60
Σχήμα 5.1.2 Arduino UNO πλακέτα, υπεύθυνη για την τροφοδοσία του κυκλώματος.	60
Σχήμα 5.1.3 Κώδικας υλοποίησης παλμικού σήματος εισόδου.	61
Σχήμα 5.1.4 Απεικόνιση σήματος στην πύλη (Gate) του mosfet.	61
Σχήμα 5.1.5 Απεικόνιση σήματος στην πηγή (Source) του mosfet.	62
Σχήμα 5.1.6 Απεικόνιση σήματος στην υποδοχή (Drain) του mosfet.	62
Σχήμα 5.2.1.1 Πρώτο στάδιο κυκλώματος λήψης σε through-hole πλακέτα.	64
Σχήμα 5.2.1.2 Απεικόνιση σήματος στην έξοδο του INA128.	64
Σχήμα 5.2.1.3 Μεταβολή σήματος εξόδου INA128 με εισαγωγή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (μαγνήτης) στη διάταξη MDL.	65
Σχήμα 5.2.1.4 Απεικόνιση καθυστέρησης του σήματος εξόδου του ενισχυτικού σταδίου σε σχέση με τον παλμό στο άκρο της πύλης του mosfet.	66
Σχήμα 5.2.1.5 Γραφική απεικόνιση των ανακλάσεων του ελαστικού παλμού στα δύο άκρα της γραμμής MDL. Στο πηνίο λήψης φτάνει πρώτα ο παλμός 1 και στη συνέχεια οι ανακλώμενοι παλμοί 2 και 3. ^[8]	66
Σχήμα 5.2.1.6 Απεικόνιση του σήματος εξόδου του ενισχυτικού σταδίου , με επισήμανση της αναστροφής των κορυφών του ανακλώμενου παλμού.	67
Σχήμα 5.2.2.1 Δεύτερο στάδιο κυκλώματος λήψης superdiode σε through-hole πλακέτα.	68
Σχήμα 5.2.2.2 Απεικόνιση σήματος εξόδου ανορθωτικού σταδίου superdiode.	68
Σχήμα 5.2.2.3 Μεταβολή σήματος εξόδου superdiode με εισαγωγή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (μαγνήτης) στη διάταξη MDL.	69
Σχήμα 5.2.2.4 Απεικόνιση καθυστέρησης του σήματος εξόδου του ανορθωτικού σταδίου σε σχέση με τον παλμό στο άκρο της πύλης του mosfet.	69
Σχήμα 5.3.1 Τοποθέτηση μίας σταγόνας αίματος στη γραμμή καθυστέρησης.	70
Σχήμα 5.3.2 Απεικόνιση αρχικού σήματος εξόδου INA.	70
Σχήμα 5.3.3 Απεικόνιση σήματος εξόδου INA μετά από $t=2\text{min}$ από την τοποθέτηση αίματος στο MDL.	71
Σχήμα 5.3.4 Απεικόνιση σήματος εξόδου INA μετά από $t=4\text{min}$ από την τοποθέτηση αίματος στο MDL.	71

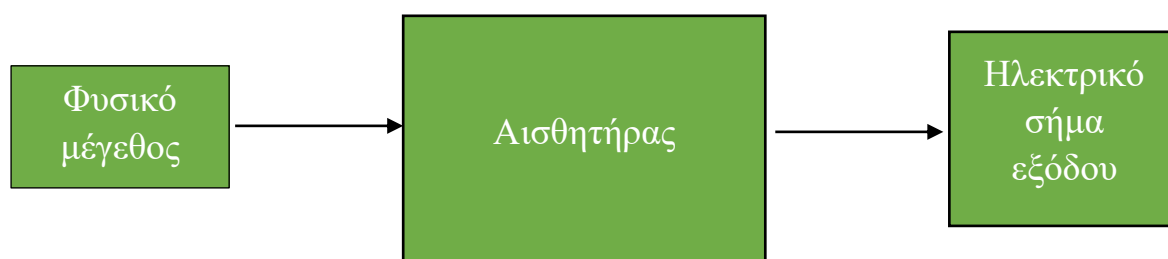
Σχήμα 5.3.5 Απεικόνιση σήματος εξόδου superdiode μετά από $t=2\text{min}$ από την τοποθέτηση αίματος στο MDL.....	71
Σχήμα 5.3.6 Απεικόνιση σήματος εξόδου superdiode μετά από $t=4\text{min}$ από την τοποθέτηση αίματος στο MDL.....	72
Σχήμα 5.3.7 Απεικόνιση σήματος εξόδου superdiode μετά από $t=8\text{min}$ από την τοποθέτηση αίματος στο MDL.....	72
Σχήμα 5.3.8 Απεικόνιση σήματος εξόδου superdiode μετά από $t=10\text{min}$ από την τοποθέτηση αίματος στο MDL.....	72
Σχήμα 5.3.9 Γραφική παράσταση πλάτους $V_{pp}(t)$ (με μέτρηση του ανά δύο λεπτά).	73
Σχήμα 5.3.10 Γραφική παράσταση πλάτους $V_{pp}(t)$ (με μέτρηση του ανά ένα λεπτό).....	74
Σχήμα 6.2.1 Μαγνητική θωράκιση της διάταξης MDL του αισθητήρα. ^[8]	78
Σχήμα 6.3.1 Μετατροπή της διάταξης MDL για ελεγχόμενη ποσότητα αίματος στον αισθητήρα. ^[41]	79

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 Η έννοια του αισθητήρα

Ένας αισθητήρας είναι μια συσκευή η οποία ανιχνεύει ή μετρά ή αντιδρά σε μια μορφή εισόδου από το φυσικό του περιβάλλον και την μετατρέπει σε δεδομένα που μπορούν να ερμηνευτούν είτε από άνθρωπο είτε από μηχανή. Οι περισσότεροι αισθητήρες είναι ηλεκτρονικοί (δηλαδή τα προαναφερθέντα δεδομένα μετατρέπονται σε ηλεκτρονικά δεδομένα- το ηλεκτρικό σήμα εξόδου να είναι είτε τάση είτε ρεύμα), αλλά υπάρχουν και πιο απλοί αισθητήρες, όπως ένα γυάλινο θερμομέτρο, το οποίο παρουσιάζει οπτικά δεδομένα.^[1]



Σχήμα 1.1.1 Σχηματική διάταξη Αισθητήρα.

1.2 Ταξινόμηση αισθητήρων

Υπάρχουν πολλές ταξινομήσεις αισθητήρων που έγιναν από διαφορετικούς συγγραφείς και ειδικούς. Μερικές είναι πολύ απλές και άλλες πολύ σύνθετες. Η ακόλουθη ταξινόμηση παρόλο που χρησιμοποιείται από έναν ειδικό του θέματος, αποτελεί μια πολύ απλή ταξινόμηση αισθητήρων.

Αρχικά, οι αισθητήρες χωρίζονται σε ενεργούς και παθητικούς ανάλογα με την ανάγκη τους για διέγερση ή τροφοδοσία. Ενεργοί είναι εκείνοι που απαιτούν ένα

εξωτερικό σήμα διέγερσης ή ένα σήμα ισχύος, ενώ οι παθητικοί αισθητήρες, δεν απαιτούν κανένα εξωτερικό σήμα ισχύος και παράγουν άμεσα απόκριση εξόδου.

Ο άλλος τύπος ταξινόμησης βασίζεται στα μέσα ανίχνευσης που χρησιμοποιούνται στον αισθητήρα. Μερικά από τα μέσα ανίχνευσης είναι ηλεκτρικά, βιολογικά, χημικά ραδιενεργά κ.λ.π.

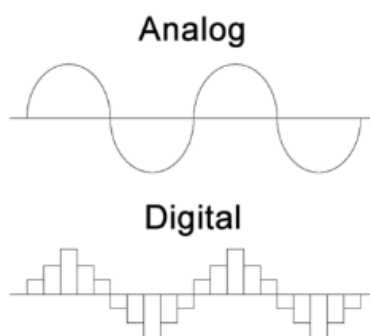
Η επόμενη ταξινόμηση βασίζεται στο φαινόμενο της μετατροπής, δηλαδή στην είσοδο και στην έξοδο. Μερικά από τα κοινά φαινόμενα μετατροπής είναι φωτοηλεκτρικά, θερμοηλεκτρικά, ηλεκτροχημικά, ηλεκτρομαγνητικά, θερμοοπτικά κ.λ.π.^[2]

Υπάρχουν πολλοί τρόποι κατηγοριοποίησης των αισθητήρων, και σε αυτήν την παράγραφο θα αναφερθούν τρεις. Ο πρώτος αφορά το τι μπορεί να μετρήσει ένας αισθητήρας με πιο σημαντική διάκριση αυτή μεταξύ των φυσικών και χημικών αισθητήρων. Οι φυσικοί αισθητήρες ελέγχουν φυσικά μεγέθη όπως θέση, μάζα, ρεύμα, χρόνο και σχετικά τους μεγέθη ενώ οι χημικοί ελέγχουν την παρουσία διαφορετικών αερίων σε συγκεκριμένη ατμόσφαιρα. Ο δεύτερος τρόπος σχετίζεται με τα υλικά στις φυσικές ιδιότητες των οποίων βασίζεται η λειτουργία του αισθητήρα, με κύριες κατηγορίες τους αισθητήρες με αγωγή, ημιαγωγή, διηλεκτρικά, μαγνητικά και υπεραγωγή υλικά. Τέλος ο τρίτος τρόπος κατηγοριοποίησης αναφέρεται στη χρήση του αισθητήρα με σημαντικότερες κατηγορίες τους βιομηχανικούς, τους ιατρικούς, στρατιωτικούς, περιβαλλοντικούς αισθητήρες, καθώς και τους αισθητήρες μεταφοράς και αυτοματισμού.^[3]

Οι αισθητήρες διαχωρίζονται επίσης σε απόλυτους (absolute) και σχετικούς (relative). Το κριτήριο αποτελεί την αναφορά της μέτρησης του αισθητήρα σε κάποια κλίμακα, δηλαδή, απόλυτος χαρακτηρίζεται ο αισθητήρας του οποίου το σήμα παραγωγής αναφέρεται σε μια απόλυτη (ακριβή) φυσική κλίμακα που είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες μέτρησης, όπως στην περίπτωση ενός μετρητή της πίεσης με αναφορά το κενό. Σχετικός αισθητήρας χαρακτηρίζεται εκείνος ο οποίος παράγει σήμα που αναφέρεται σε μια ειδική κλίμακα τιμών, όπως στην περίπτωση του μανομέτρου.^[5]

Τέλος, υπάρχουν δύο τύποι ηλεκτρονικών αισθητήρων, οι αναλογικοί και οι ψηφιακοί. Οι αναλογικοί αισθητήρες μετατρέπουν τα φυσικά δεδομένα σε αναλογικό σήμα. Οι αναλογικοί αισθητήρες είναι πολύ πιο ακριβείς από τους ψηφιακούς

αισθητήρες, οι οποίοι περιορίζονται σε ένα πεπερασμένο σύνολο πιθανών τιμών. Η διαφορά των αναλογικών και των ψηφιακών σημάτων φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 1.2.1 Διαφορά αναλογικών και ψηφιακών σημάτων^[1]

Επειδή τα αναλογικά σήματα είναι συνεχή, μπορούν να εντοπίσουν την παραμικρή αλλαγή στο φυσικό μέγεθος της εισόδου του αισθητήρα (όπως θερμοκρασία ή πίεση). Αντιθέτως, τα ψηφιακά σήματα περιορίζονται σε σταθερά δεδομένα (άσσοι και μηδενικά).

Οι αισθητήρες αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης καθημερινότητας για αυτό και πλέον υπάρχει πληθώρα διαφορετικών τύπων τους. Μόνο στα αυτοκίνητα, υπάρχουν δεκάδες τύποι διαφορετικών αισθητήρων. Καθώς η τεχνολογία αναπτύσσεται, η χρήση τους θα συνεχίσει να επεκτείνεται σε κάθε πτυχή της ζωής μας.^[1]

1.3 Μαγνητικοί Αισθητήρες

Ο μαγνητικός αισθητήρας ορίζεται ως ένας αισθητήρας που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση διαταραχών και αλλαγών σε ένα μαγνητικό πεδίο όπως η ισχύς, η διεύθυνση αλλά και η μαγνητική ροή του πεδίου αυτού. Υπάρχουν διάφοροι τύποι τέτοιων αισθητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγέθη όπως το φως, η πίεση, η θερμοκρασία. Αυτοί οι αισθητήρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συνολικού μαγνητικού πεδίου, ενώ η δεύτερη για τον υπολογισμό διανυσματικών συνιστωσών του πεδίου.^[4]

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός μαγνητικού αισθητήρα, βασίζεται στην αλληλένδετη σχέση μεταξύ μαγνητισμού και ηλεκτρισμού, και ειδικότερα στο γεγονός ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο περιβάλλει ηλεκτρικό ρεύμα καθώς και στις διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου οι οποίες μεταφράζονται σε διακυμάνσεις του

ηλεκτρικού ρεύματος που το περιβάλλει, σύμφωνα με τους νόμους που όρισε ο Michael Faraday και στη συνέχεια εξέφρασε μέσω μαθηματικών εξισώσεων ο James Clerk Maxwell.

Η ανίχνευση μαγνητικού πεδίου είναι απαραίτητη σε πολλές εφαρμογές όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία, στο στρατό, στην ρομποτική, στην ιατρική, στην υλοποίηση διαστημικού εξοπλισμού, στη γεωφυσική κ.λ.π. Πιο συγκεκριμένα, μαγνητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε πολλά συστήματα αυτόματου ελέγχου, όπως στην ανίχνευση θέσης ενός αντικειμένου, στην ανίχνευση του τερματικού σημείου ή στον έλεγχο στροφών σε έναν μηχανικό άξονα. Η απλή εφαρμογή, η εύκολη τοποθέτηση των μαγνητικών αισθητήρων στο σημείο μέτρησης και η μεγάλη απόδοσή τους, τους έχουν φέρει πρώτους στη λίστα εφαρμογής σε συστήματα ελέγχου για τη μέτρηση δευτερευόντων μεγεθών όπως της στάθμης, της ροής, της πίεσης κ.α. Για τη μέτρηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου ανεξαρτήτου εφαρμογής μπορούμε να διακρίνουμε τους παρακάτω αισθητήρες ή διατάξεις:^[5]

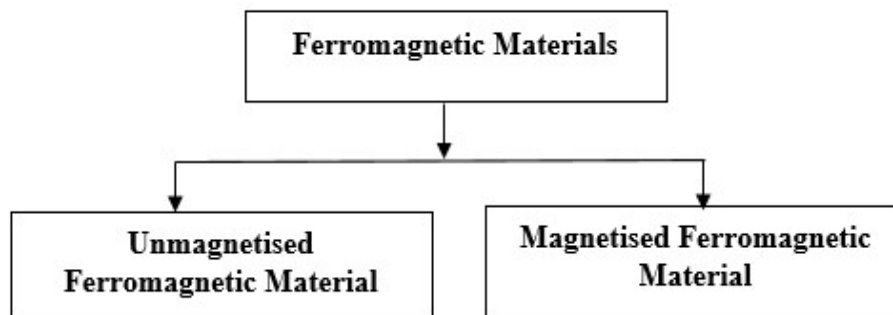
- Πηνίο ανίχνευσης,
- Μαγνητόμετρο πύλης ροής,
- Ατομικό μαγνητόμετρο,
- Αισθητήρες φαινομένου Hall,
- Μαγνητοδίοδος,
- Μαγνητοτρανζίστορ,
- Οπτικό μαγνητόμετρο,
- Αισθητήρας SQUID,
- Μαγνητόμετρο οπτικής άντλησης,
- Μαγνητοοπτικός αισθητήρας.

Τα κυριότερα μαγνητικά φαινόμενα που παρατηρούνται στη λειτουργία των μαγνητικών αισθητήρων στις διάφορες εφαρμογές τους, είναι αυτά της μαγνητοαντίστασης (MR), της μαγνητοεμπέδησης (MI), της μαγνητοσυστολής, της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής καθώς και του φαινομένου Hall. Ο σχεδιασμός των αισθητήρων αυτών αποσκοπεί στην εκμετάλλευση των δύο κύριων μηχανισμών των μαγνητικών περιοχών (magnetic domains) στα μαγνητικά υλικά. Η διάδοση των μαγνητικών τοιχωμάτων και η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών αποτελούν τους προαναφερθέντες μηχανισμούς σε μικροσκοπική ή μακροσκοπική κλίμακα.^[6]

1.4 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης (MDLs)

Σε ορισμένα υλικά, εμφανίζεται αυθόρμητη καθαρή μαγνήτιση σε ατομικό επίπεδο, ακόμη και με απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Αυτά τα υλικά ονομάζονται σιδηρομαγνητικά ή φερρομαγνητικά υλικά (ferromagnetic materials). Όταν τοποθετούνται σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, τα υλικά αυτά μαγνητίζονται έντονα προς την κατεύθυνση του πεδίου. Μερικά παραδείγματα σιδηρομαγνητικών υλικών είναι το κοβάλτιο, ο σίδηρος, το νικέλιο, το γαδολίνιο, το δυσπρόσιο κ.α.

Υπάρχουν δύο τύποι σιδηρομαγνητικών υλικών, τα μη μαγνητισμένα και τα μαγνητισμένα σιδηρομαγνητικά υλικά.^[7]



Σχήμα 1.4.1 Ταξινόμηση σιδηρομαγνητικών υλικών ^[7]

Από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των φερρομαγνητικών υλικών είναι η μικρή μεταβολή των διαστάσεών τους (επιμήκυνση ή συστολή) που συμβαίνει κατά τη μαγνήτισή τους.

Ευρέως διαδεδομένη είναι η χρήση άμορφων φερρομαγνητικών συρμάτων και ταινιών, σε εφαρμογές αισθητήρων τύπου μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης (MDL). Από τα πιο ελκυστικά χαρακτηριστικά των διατάξεων αυτής της τεχνικής είναι η καλή ευαισθησία των σημάτων τους σε εφαρμογές όπου άλλες τεχνικές υστερούν στην ευαισθησία και στην απόκρισή τους. Με την τεχνική των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης, έχουν αναπτυχθεί αισθητήρες ανίχνευσης δύναμης, ροπής, μετατόπισης και μαγνητικού πεδίου.

Οι παράμετροι που μπορούν να τροποποιήσουν το εύρος της παλμικής τάσης εξόδου μιας τέτοιας διάταξης είναι οι εξής: η μεταβολή του παλμικού ή του μαγνητικού πεδίου πόλωσης, κατά μήκος του MDL, και η αλλαγή των μαγνητοσυστολικών ιδιοτήτων του υλικού της διάταξης (π.χ. εξαιτίας της εφαρμογής δύναμης κατά μήκος

του MDL). Τροποποιώντας μία και μόνο παράμετρο κάθε φορά, προκύπτει και ένας νέος αισθητήρας.^{[8],[9]}

1.5 Στόχος της εργασίας

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, θα δοθεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση του φαινομένου της μαγνητοσυστολής και κατ' επέκταση της τεχνικής των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης στην οποία στηρίζεται η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα.

Βασικός στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή ενός αισθητήρα μέτρησης χρόνου της πήξης του αίματος, εκμεταλλευόμενοι το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής και της τεχνικής MDL. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση των αλλαγών του ιξώδους που συμβαίνουν μέσα στα υγρά υλικά. Εφαρμογή αυτής της αρχής μέτρησης είναι η χρονική μέτρηση της πήξης του αίματος. Η κατασκευή ενός τέτοιου αισθητήρα κρίνεται εξαιρετικά χρήσιμη διότι θα μπορεί να μετρηθεί ο χρόνος πήξης του αίματος (σε αντίθεση με άλλες τυποποιημένες μεθόδους) ανεξάρτητα από την ποσότητα του αίματος που τοποθετείται προς μέτρηση (απαιτείται ελάχιστος όγκος αίματος για την εκτέλεση μιας απλής δοκιμαστικής εφαρμογής). Επιπλέον πλεονεκτήματα του αισθητήρα είναι η δυνατότητα εκτέλεσης από οποιοδήποτε μη εκπαιδευμένο άτομο καθώς και το ότι οι εργαστηριακές εγκαταστάσεις για την εκτέλεση μιας δοκιμής καθίστανται περιττές. Το σημαντικότερο όμως πλεονέκτημα του αισθητήρα είναι η ταχύτητα της μέτρησης (τα αποτελέσματα είναι διαθέσιμα σε λίγα λεπτά) η οποία μπορεί να είναι κρίσιμης σημασίας σε ορισμένες έκτακτες περιπτώσεις.

Σε επόμενα κεφάλαια περιγράφεται η διάταξη MDL που χρησιμοποιήθηκε και αναλύεται ο τρόπος κατασκευής της. Επιπλέον αναλύεται και το ηλεκτρονικό κομμάτι της διάταξης δηλαδή τα κυκλώματα διέγερσης και λήψης που συνοδεύουν τη διάταξη MDL και επεξεργάζονται το σήμα που μεταδίδεται κατά μήκος της ώστε να λάβουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα και να εξαχθούν σωστά συμπεράσματα.

Αναφορικά με το πειραματικό μέρος της εργασίας, παρατίθενται τα καλύτερα σήματα που παρατηρήθηκαν όταν όλη η αισθητήρια διάταξη και τα μέρη της (MDL/κύκλωμα διέγερσης/κύκλωμα λήψης) λειτουργούσαν συνολικά. Σύμφωνα με τα σήματα αυτά εξάγονται συμπεράσματα ως προς την αποτελεσματικότητα του

αισθητήρα αλλά και την πιθανή εφαρμογή του μελλοντικά. Τέλος, αναφέρονται μελλοντικές βελτιώσεις που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στη συγκεκριμένη αισθητήρια διάταξη.

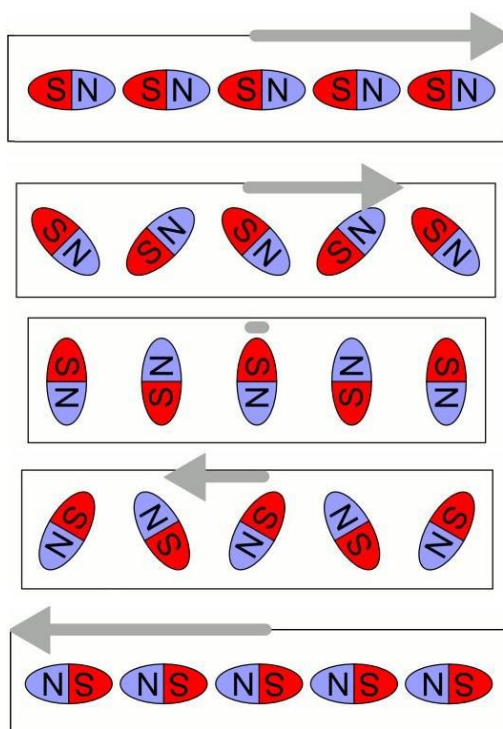
Συνοψίζοντας, ο χαρακτήρας της εργασίας είναι κατασκευαστικός και αποσκοπεί στην υλοποίηση του αισθητήρα με βάση τη θεωρία και τη διαθέσιμη βιβλιογραφία. Η παροχή διαφόρων υλικών και εξαρτημάτων των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που κατασκευάστηκαν αλλά και σημαντικής τεχνογνωσίας και καθοδήγησης πραγματοποιήθηκε από το Εργαστήριο Αισθητηρίων του ΕΜΠ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΗ

Στο δεύτερο κεφάλαιο, θα δοθεί ο ορισμός του φαινομένου της μαγνητοσυστολής, καθώς και η έννοια των μαγνητικών περιοχών μέσα στα υλικά. Στη συνέχεια θα αναλυθούν μαγνητικά φαινόμενα τα οποία παρατηρούνται σε εφαρμογές ανίχνευσης και θα γίνει αναφορά στα μαγνητοσυστολικά υλικά καθώς και στα άμορφα μαγνητοσυστολικά υλικά, στα οποία εμφανίζεται το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής.

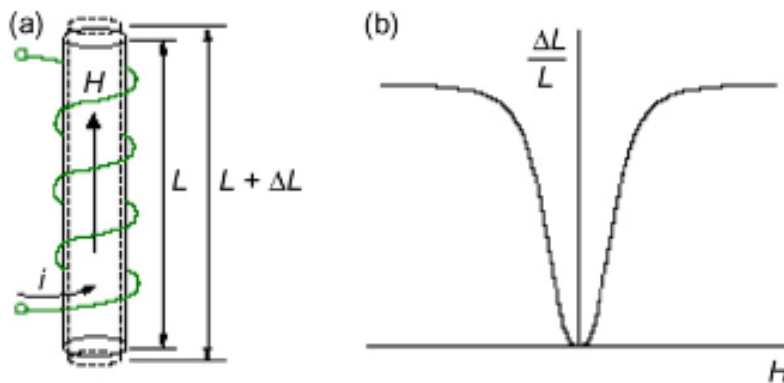
2.1 Μαγνητοσυστολή

Η μαγνητοσυστολή είναι μια ιδιότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών, να διαστέλλονται ή να συστέλλονται όταν βρίσκονται υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου. Το φαινόμενο αυτό επιτρέπει τη μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε μηχανική στα μαγνητοσυστολικά υλικά. Όταν ένα μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται στο υλικό, τα δίπολά του σε μοριακό επίπεδο καθώς και τα όρια του μαγνητικού πεδίου περιστρέφονται ώστε να ευθυγραμμιστούν με το εφαρμοζόμενο πεδίο. Αυτό προκαλεί τέντωμα και επιμήκυνση του υλικού.^[10]



Σχήμα 2.1.1 Περιστροφή των δίπολων ανάλογα με την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου (γκρι βέλος). Παρατηρείται η συστολή και η διαστολή του υλικού, λόγω του ελλειψοειδούς σχήματος των δίπολων.^[10]

Το αποτέλεσμα του φαινομένου της μαγνητοσυστολής, απεικονίζεται καλύτερα στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.1.2 (α) Διαστολή υλικού κατά ΔL υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου H , (β) H σχέση μεταξύ της μαγνητοσυστολής λ και του μαγνητικού πεδίου H .^[11]

Μια ράβδος από μαγνητικό υλικό μήκους L , περιβάλλεται από ένα πηνίο το οποίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα i , με αποτέλεσμα τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου H κατά μήκος της ράβδου. Η ροή του ρεύματος, οδηγεί στην αύξηση του μήκους της ράβδου κατά μια μικρή ποσότητα ΔL . Η ποσότητα $\lambda = \frac{\Delta L}{L}$, ονομάζεται μαγνητοσυστολή. Το πρόσημο του μεγέθους λ , εξαρτάται από το αποτέλεσμα της μαγνητοσυστολής. Πιο συγκεκριμένα, αν το υλικό διαστέλλεται, το λ θα είναι θετικό ενώ αν συστέλλεται το λ θα είναι αρνητικό. Το σχήμα 2.1.2(α) δείχνει επίσης ότι εκτός από αύξηση του μήκους προς την κατεύθυνση του πεδίου, υπάρχει επίσης μείωση του μήκους στις κάθετες κατευθύνσεις με αποτέλεσμα ο όγκος της ράβδου να παραμένει σχεδόν, αλλά όχι απόλυτα, σταθερός.^[11]

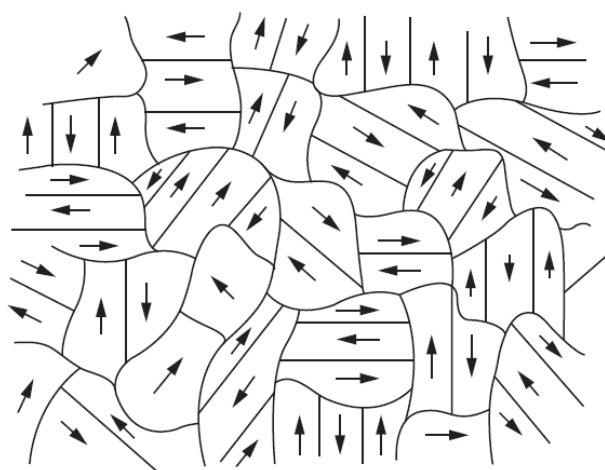
Το λ εξαρτάται από το μαγνητικό πεδίο H που εφαρμόζεται στο υλικό και έτσι σχηματίζεται η συνάρτηση $\lambda(H)$ του σχήματος 2.1.2(b). Το σχήμα 2.1.2(b) επίσης, αποκαλύπτει δύο σημαντικά χαρακτηριστικά της μαγνητοσυστολής. Πρώτον για υψηλές τιμές μαγνητικού πεδίου H , το λ φτάνει τελικά μια σταθερή τιμή λ_{sat} , 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 του μαγνητικού πεδίου.^[11] Η συνάρτηση $\lambda(H)$ είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης, αφού μπορεί να μοντελοποιήσει τη λειτουργία μιας διάταξης MDL και κατά συνέπεια τη διάταξη του αισθητήρα που βασίζεται στην τεχνική MDL. Για να επιτευχθεί σωστή υλοποίηση του αισθητήρα, πρέπει να ληφθεί υπόψη η δυναμική απόκριση του $\lambda(H)$,

όσον αφορά τη συχνότητα, και όχι μόνο τη σταθερά μαγνητοσυστολής κορεσμού λ_{sat} ή τη συνάρτηση στατικής μαγνητοσυστολής. Έχει αναπτυχθεί ένας αριθμός μέσων ώστε να υπολογίζονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά της συνάρτησης αυτής, όπως και η σταθερά λ_{sat} .^[20]

Για την πληρέστερη κατανόηση του φαινομένου της μαγνητοσυστολής, θα πρέπει να διερευνηθούν θεμελιώδεις έννοιες, όπως αυτές των μαγνητικών περιοχών, ο τρόπος δημιουργίας αυτών καθώς και οι μηχανισμοί και τα φαινόμενα της συμπεριφοράς τους.

2.2 Μαγνητικές περιοχές

Ο ορισμός των μαγνητικών περιοχών, προκύπτει μέσω της ανάλυσης της συμπεριφοράς των σιδηρομαγνητικών υλικών σε μικροσκοπικό επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό αν δεν εφαρμοστεί εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, η συνολική μαγνήτισή του, όπως είναι αναμενόμενο, θα είναι μηδενική. Ωστόσο, αν επιχειρηθεί μέτρηση σε μικροσκοπικό επίπεδο, δηλαδή σε ένα πολύ μικρό κομμάτι του σιδηρομαγνητικού υλικού, θα παρατηρούνταν ότι είναι πλήρως μαγνητισμένο. Αυτό συμβαίνει διότι στην πραγματικότητα, υπάρχουν πολύ μικρές περιοχές που είναι μαγνητισμένες σε διαφορετικές κατευθύνσεις, με τέτοιο τρόπο, ώστε η συνολική μέση τιμή μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού να είναι μηδενική. Οι περιοχές αυτές ορίζονται ως μαγνητικές περιοχές (magnetic domains) και προκύπτουν από την ανάγκη του υλικού για ελαχιστοποίηση της μαγνητικής του ενέργειας.^[13]

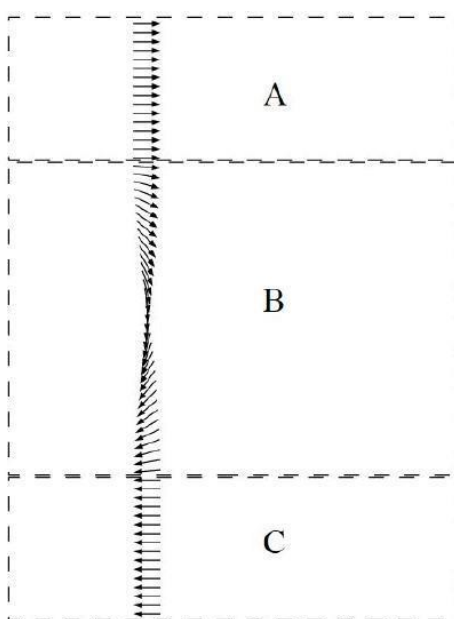


Σχήμα 2.2.1 Δομή μη μαγνητισμένου σιδηρομαγνητικού υλικού σε μικροσκοπικό επίπεδο.^[13]

Οι μαγνητικές περιοχές χωρίζονται μεταξύ τους μέσω των μαγνητικών τοιχωμάτων (domain walls). Τα μαγνητικά τοιχώματα είναι ουσιαστικά λεπτά

στρώματα μορίων των οποίων τα μοριακά δίπολα περιστρέφονται σταδιακά ώστε να είναι ευθυγραμμισμένα με τις προσκείμενες μαγνητικές περιοχές, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.2.^[10]

Η διάδοση των μαγνητικών τοιχωμάτων (Domain wall dynamics) καθώς και η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών (Domain rotation dynamics) αποτελούν δύο σημαντικούς μηχανισμούς των μαγνητικών περιοχών που θα αναλυθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου.



Σχήμα 2.2.2 Σταδιακή περιστροφή των μοριακών δίπολων του μαγνητικού τοιχώματος (B) προς εναρμόνιση με τις προσκείμενες μαγνητικές περιοχές (A) και (C).^[10]

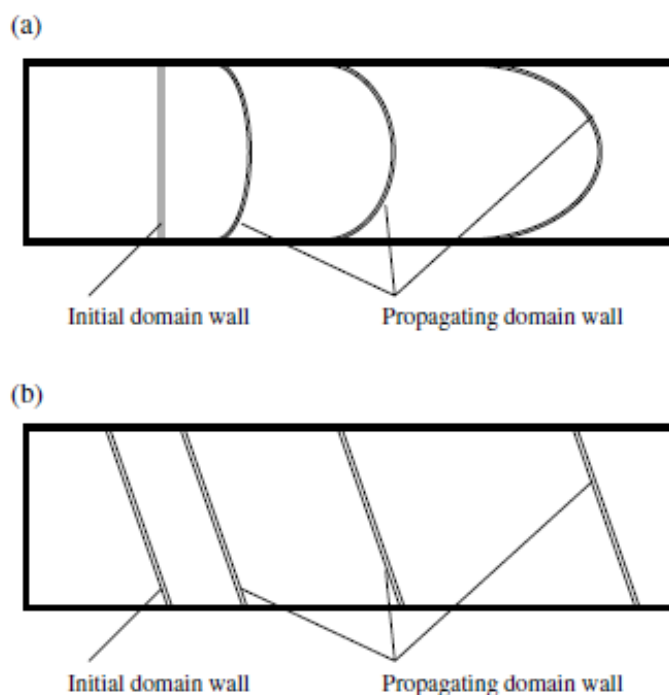
2.3 Μαγνητικά φαινόμενα σε εφαρμογές αισθητήρων

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.

2.3.1 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 διάδοση τους στη μαγνητική ουσία.^[14] 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 της bowing process όπως φαίνεται δηλαδή στο σχήμα 2.3.1.1(α). Τοιχώματα υψηλής ενέργειας διαδίδονται πιο άκαμπτα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.1.1(b).^[15]



Σχήμα 2.3.1.1 Διάδοση μαγνητικών τοιχωμάτων. (α) Διάδοση μέσω της bowing process, (b) Άκαμπτη διάδοση μέσω της παράλληλης κίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων.^[15]

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.^[16]

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.^[15]

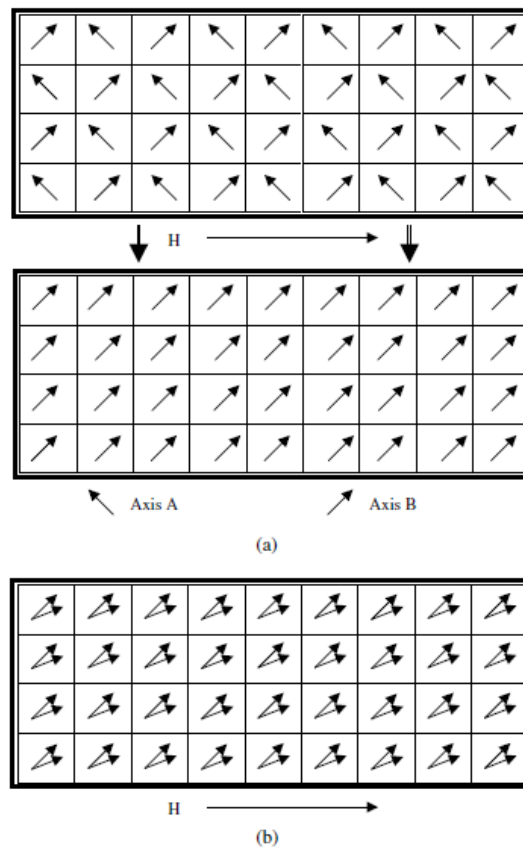
2.3.2 Περιστροφή μαγνητικών περιοχών (Domain rotation dynamics)

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.^[19]

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.^[17] 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 2.3.2.1(a). 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 2.3.2.1(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.^[15]



Σχήμα 2.3.2.1 Περιστροφή μαγνητικών περιοχών (α) Μη αναστρέψιμη περιστροφή, (β) Αναστρέψιμη περιστροφή.^[15]

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.^[18]

2.3.3 «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.^[15]

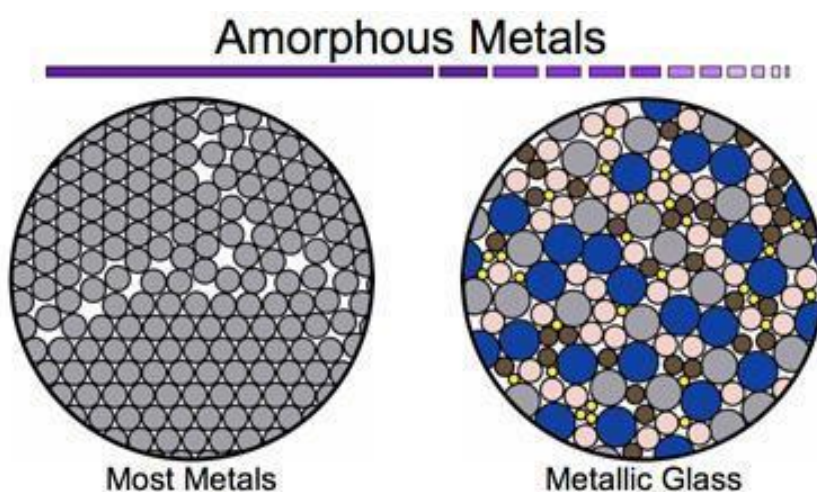
Ένα άλλο αποτέλεσμα είναι το ac MR effect ή MI effect ^[23-24]. Σύμφωνα με αυτό το φαινόμενο, η ac αντίσταση ή η σύνθετη αντίσταση μιας μαγνητικής ουσίας ποικίλλει ανάλογα με το εφαρμοζόμενο πεδίο. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται και σε μη σιδηρομαγνητικά υλικά λόγω του skin effect αν και η επίδρασή του 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.^[15]

2.4 Μαγνητοσυστολικά υλικά – Άμορφα υλικά

Όπως διαπιστώθηκε από τον ορισμό της μαγνητοσυστολής που δόθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, τα μαγνητοσυστολικά υλικά είναι υλικά στα οποία προκαλείται συστολή ή διαστολή των διαστάσεων τους υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου. Όλα τα μαγνητικά υλικά είναι στην πράξη 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) και 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 είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε μηχανικές τάσεις.^[27] Η παρασκευή τους πραγματοποιείται με την μέθοδο ταχείας ψύξης και είναι εμπορικά γνωστά με το όνομα Metglas (metallic glass).^[28]



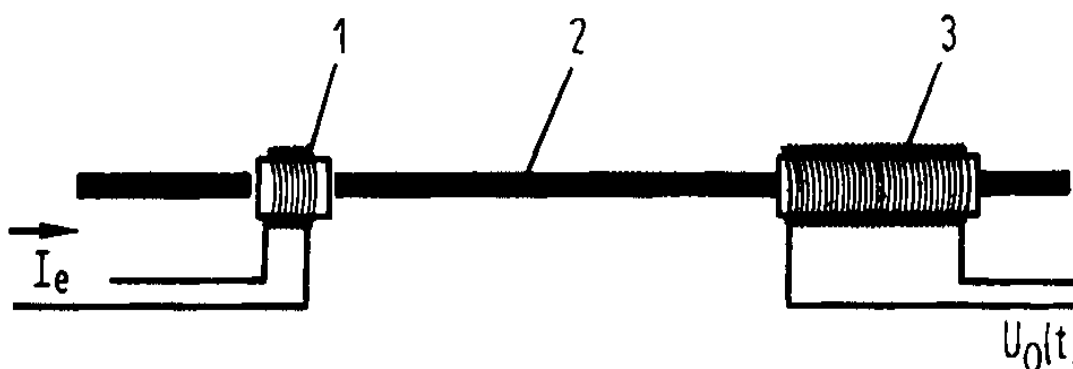
Σχήμα 2.4.1 Κρυσταλλική δομή συμβατικού μετάλλου (αριστερά) και άμορφου μαγνητοσυστολικού υλικού (δεξιά), όπου φαίνεται η ομογένεια της δομής του άμορφου υλικού σε σύγκριση με ένα απλό μέταλλο.^[29]

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 στη διέγερση και στη λήψη 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

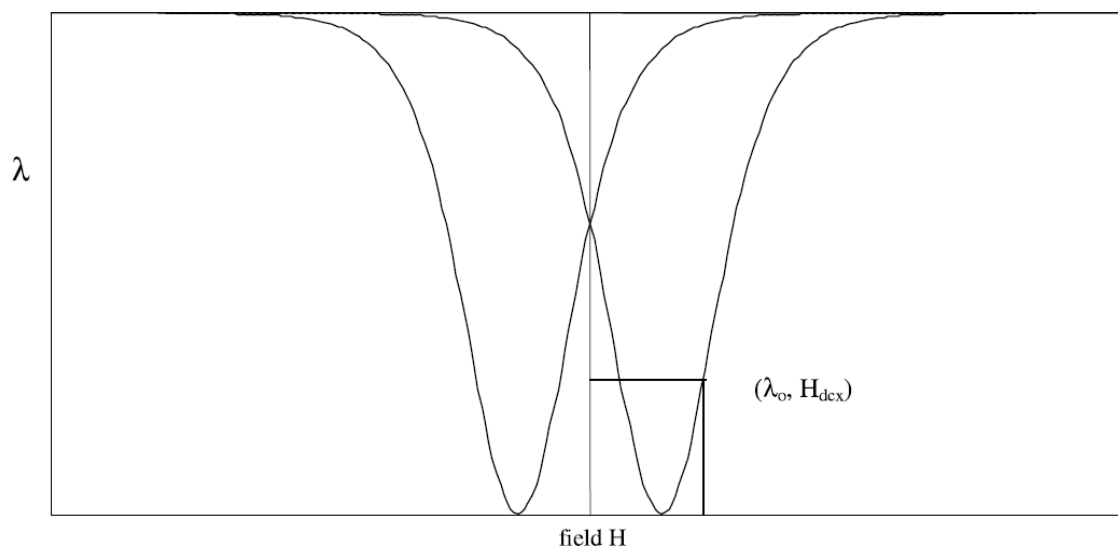
Έχοντας αναλύσει τα χαρακτηριστικά του φαινομένου της μαγνητοσυστολής που αφορούν την τεχνική MDL, είναι πλέον δυνατή η περιγραφή της τεχνικής μέσω μιας τυπικής διάταξης. Η διάταξη αυτή όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1.1 αποτελείται από το μέσο διέγερσης, το μέσο λήψης και την μαγνητοσυστολική γραμμή 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 γεγονότα: 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]

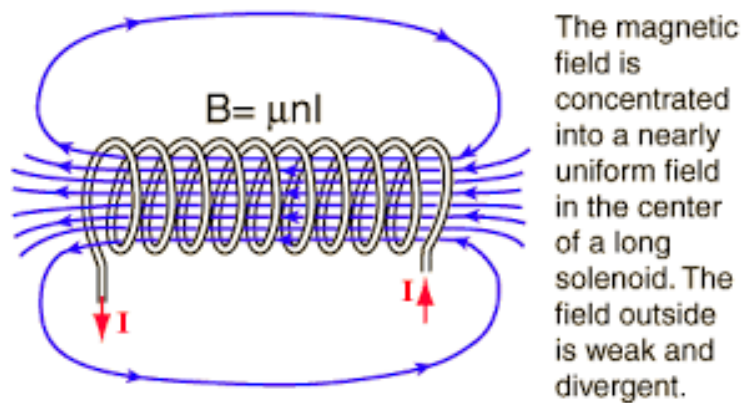
3.1.1 Δημιουργία ελαστικού παλμού-Μαγνητοσυστολικό φαινόμενο

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 δημιουργία τοπικής μικροπαραμόρφωσης του MDL $\delta\lambda_0$, όπως φαίνεται στο σημείο $(\delta\lambda_0, H_{dcx})$ του σχήματος 3.1.1.1, 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 3.1.1.1 Καμπύλη $\lambda(H)$ -Εξάρτηση μικροπαραμορφώσεων από το μαγνητικό πεδίο.^[8]

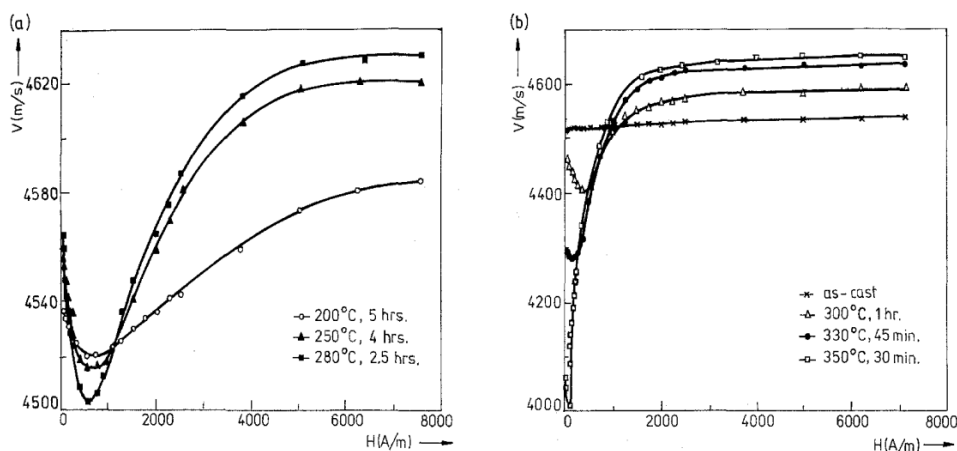
Και στις δύο περιπτώσεις διέγερσης, η περιστροφή των περιοχών, και η επακόλουθη τοπική μικροπαραμόρφωση του υλικού συμβαίνει στην τομή της γραμμής MDL, με τον πυρήνα του πηνίου, όπου είναι συγκεντρωμένη η μαγνητική ροή του πηνίου.



Σχήμα 3.1.1.2 Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου.^[31]

3.1.2 Διάδοση ελαστικού παλμού-Ακουστικό φαινόμενο

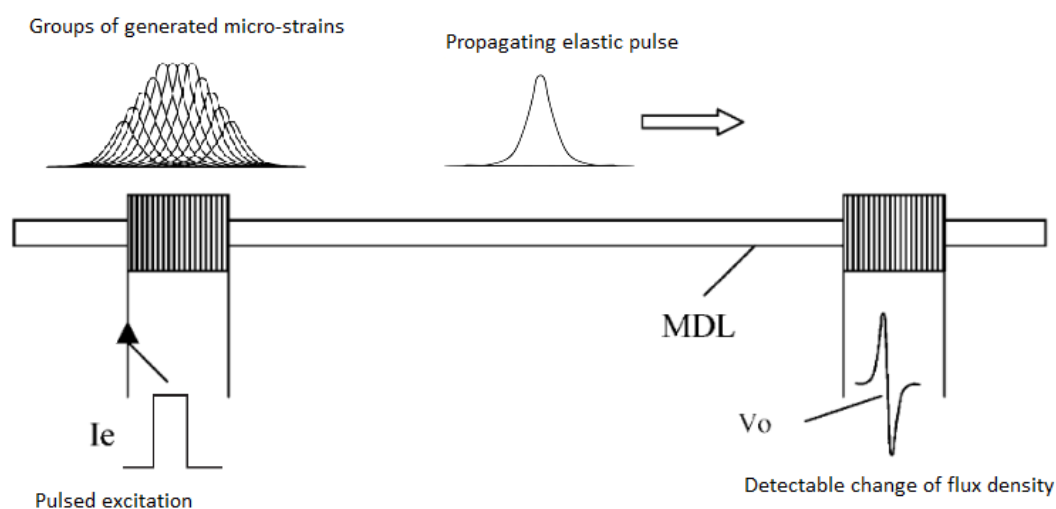
Ο ελαστικός παλμός που προκαλείται από την παλμική διέγερση του πηνίου θα διαδοθεί με την διαμήκη ακουστική ταχύτητα του υλικού ως δύο διαμήκη κύματα, ίδιου πλάτους αλλά αντίθετης κατεύθυνσης, κινούμενα από το σημείο της διέγερσης προς τα δύο άκρα του μέσου διάδοσης, δηλαδή της γραμμής MDL που λειτουργεί 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 3.1.2.1. 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).^[8]



Σχήμα 3.1.2.1 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.^[32]

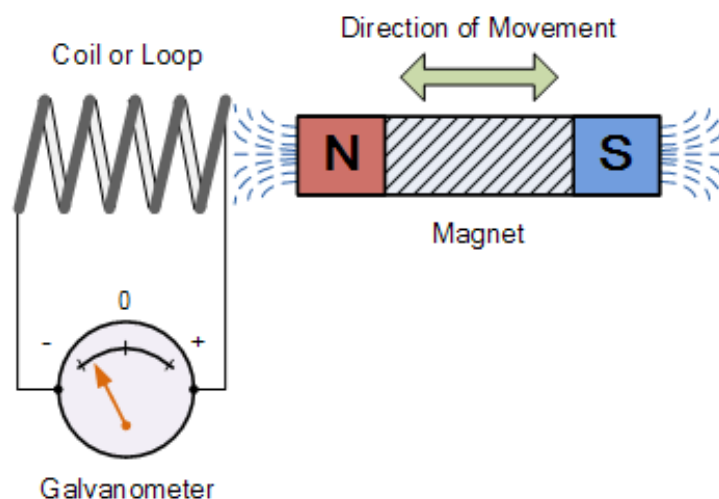
3.1.3 Λήψη παλμού-Αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο

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.^[8]



Σχήμα 3.1.3.1 Απεικόνιση των τριών διαδοχικών γεγονότων της τεχνικής MDL στην τοπική διάταξη.^[33]

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 3.1.3.2 όπου το κινούμενο κύμα και η μεταβολή στην μαγνητική ροή που προκαλεί προσομοιώνεται από έναν μαγνήτη για λόγους απλότητας.



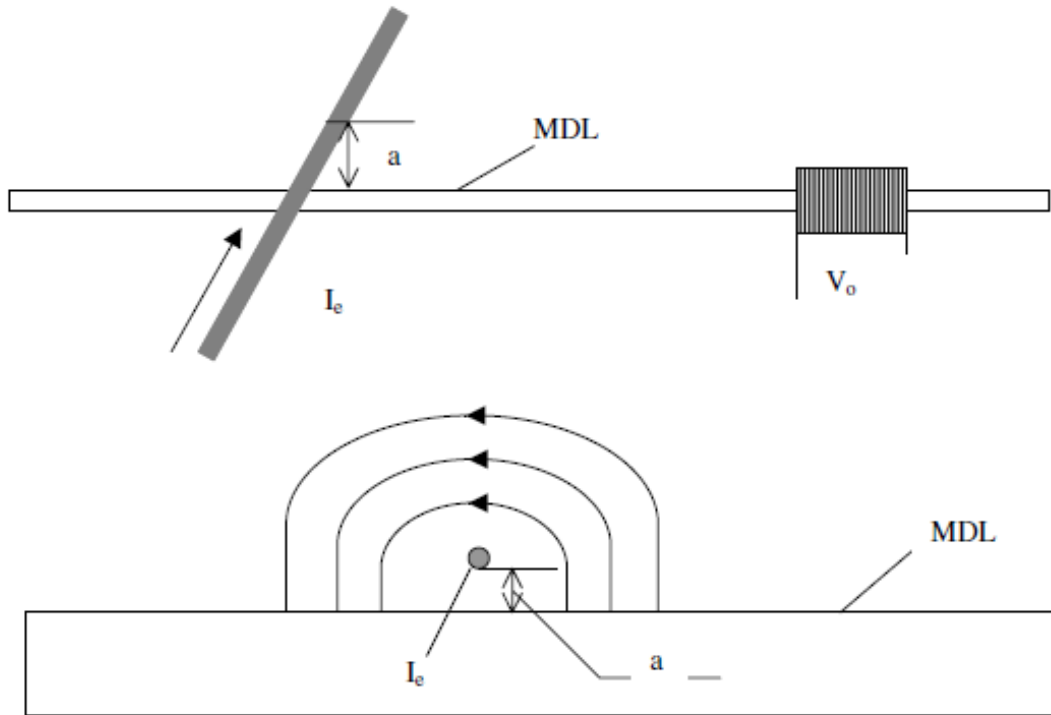
Σχήμα 3.1.3.2 Φαινόμενο ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής στο οποίο στηρίζεται το πηνίο λήψης για ανίχνευση του ελαστικού παλμού.^[34]

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.^[8] Στην συγκεκριμένη μοντελοποίηση 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.^[8]

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 είναι η απόσταση 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 $G_r(x,t)$:

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

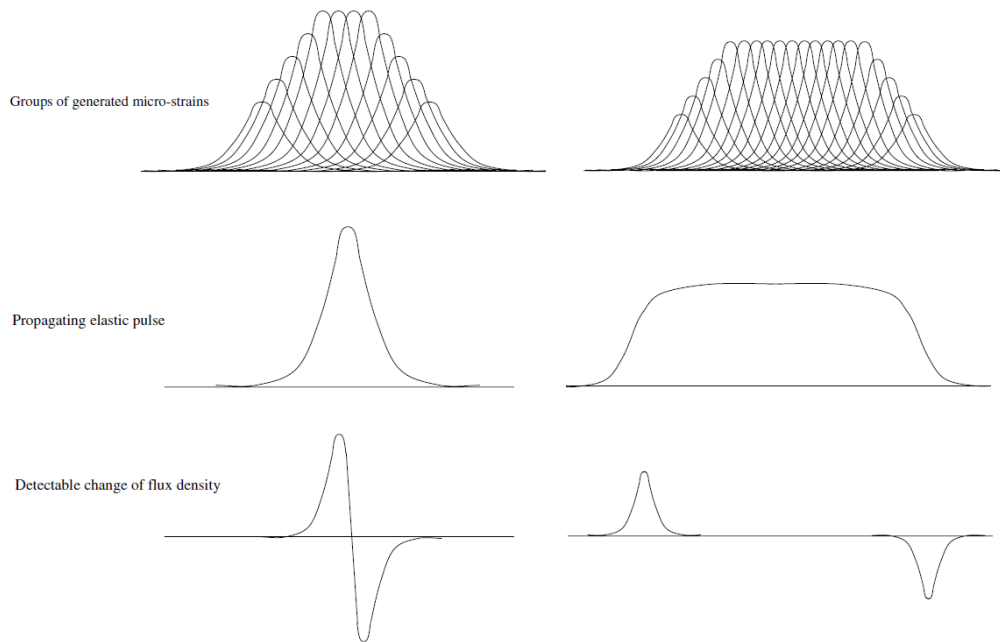
όπου v η διαμήκης ακουστική ταχύτητα του MDL. Με σταθερό ρεύμα οι μικροτάσεις αθροίζονται σε σύνολο τάσεων $G_s(x,t)$:

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

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

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

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 προς 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.^[8]

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:^[8]

3.3.1 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.

3.3.2 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.

3.3.3 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.

3.3.4 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.

3.3.5 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 αντίχρευσή τους. Η ανάλυση ενός MDL μπορεί να βελτιωθεί σε άμορφα σύρματα κατάλληλη κατεργασία όπως με μαγνητική ανόπτηση.

3.3.6 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.

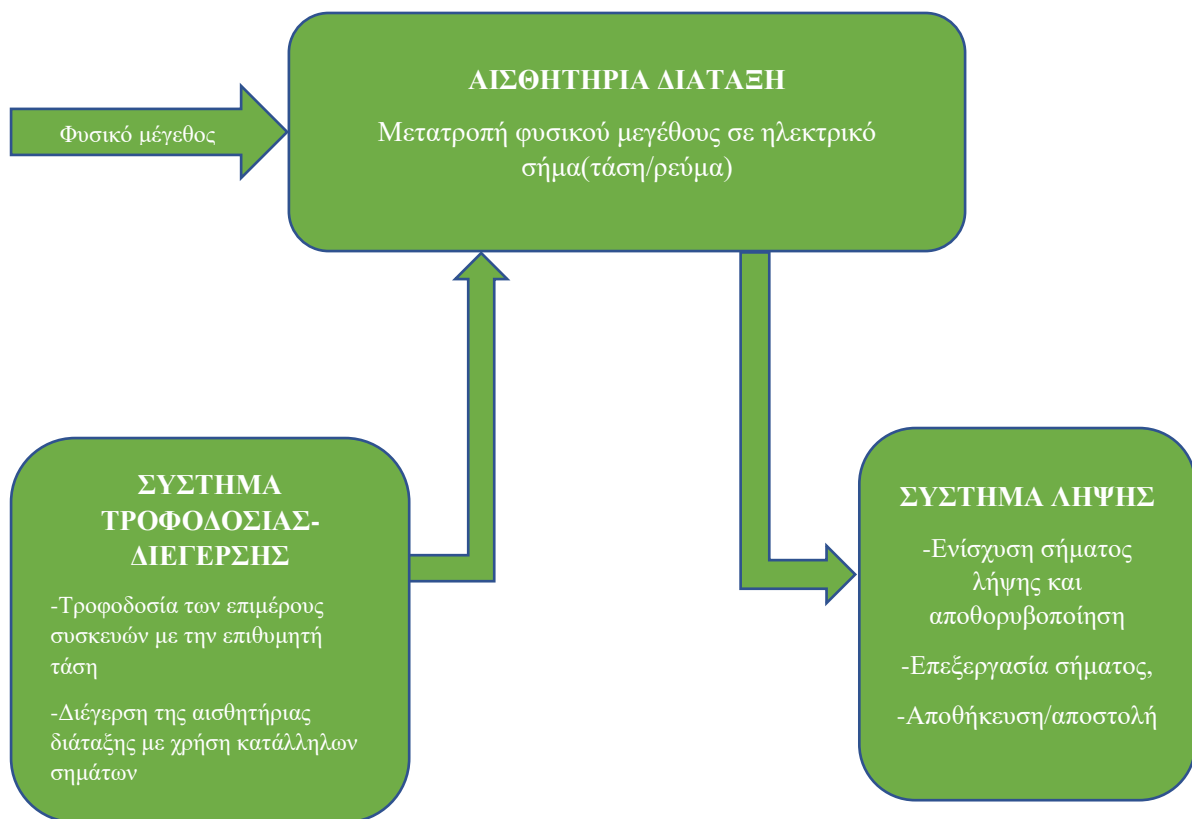
3.3.7 Ανακλάσεις (Reflections)

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- Η ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

Το σύστημα μιας αισθητήριας διάταξης εκτός από την μετατροπή ενός φυσικού μεγέθους σε ηλεκτρικό σήμα, επιτελεί πολλές άλλες λειτουργίες. Λειτουργίες όπως η τροφοδοσία και η διέγερση συσκευών, η ανάγνωση σημάτων λήψης καθώς και η επεξεργασία τους για μετατροπή σε χρήσιμη για το χρήστη πληροφορία και αποθήκευση των δεδομένων. Με βάση τις λειτουργίες αυτές, θα μπορούσαμε να χωρίσουμε ένα σύστημα αισθητήρα σε 3 υποσυστήματα:

- Σύστημα τροφοδοσίας-διέγερσης,
- Αισθητήρια διάταξη,
- Σύστημα λήψης.



Σχήμα 4.1 Σχηματικό διάγραμμα συνολικής αισθητήριας διάταξης

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα κυκλώματα διέγερσης και λήψης που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του αισθητήρα.

4.1 Διάταξη MDL

Η διάταξη MDL που χρησιμοποιήθηκε είναι ταυτόσημη με την τυπική διάταξη MDL που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.1. Αποτελείται δηλαδή από τη μαγνητοσυστολική γραμμή, το πηνίο διέγερσης και το πηνίο λήψης. Τόσο το πηνίο διέγερσης όσο και το πηνίο λήψης έχουν σταθερή θέση και ανάμεσα τους (πάνω στη μαγνητοσυστολική γραμμή) τοποθετείται το υλικό προς μέτρηση (στη συγκεκριμένη εφαρμογή δηλαδή το αίμα).

Το μαγνητοσυστολικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη γραμμή καθυστέρησης είναι ένα άμορφο ribbon FeSiB, το οποίο επιλέχθηκε για τις μαλακές μαγνητικές ιδιότητές του.

Το πηνίο διέγερσης αποτελείται από περίπου 10-15 περιελίξεις σύρματος χαλκού με διάμετρο 0,1mm ενώ η διάμετρος των περιελίξεων είναι ίση με τη διάμετρο του ribbon της μαγνητοσυστολικής γραμμής. Η αυτεπαγωγή L του πηνίου υπολογίστηκε σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

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

Όπου N ο αριθμός των περιελίξεων, D η διάμετρος τους, d η διάμετρος του χάλκινου σύρματος και μ_0 , μ_r οι σχετικές μαγνητικές διαπερατότητες του κενού και του χαλκού αντίστοιχα. Οπότε για τις παρακάτω τιμές:

- $d = 0,1\text{mm}$,
- $N = 12$ σπείρες,
- $D = 1,5\text{mm}$,
- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$,
- $\mu_r \approx 0,9999$,

Η τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου διέγερσης υπολογίστηκε σε $L_e \approx 378,2 \text{ nH}$.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, χρησιμοποιήθηκε μικρός αριθμός σπειρών καθώς και μικρή διάμετρος σύρματος προκειμένου να διατηρηθούν οι διαστάσεις του πηνίου όσο το δυνατόν μικρότερες. Με αυτόν τον τρόπο, το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο από την παλμική διέγερση επιδρά σε περιορισμένη περιοχή της γραμμής MDL.

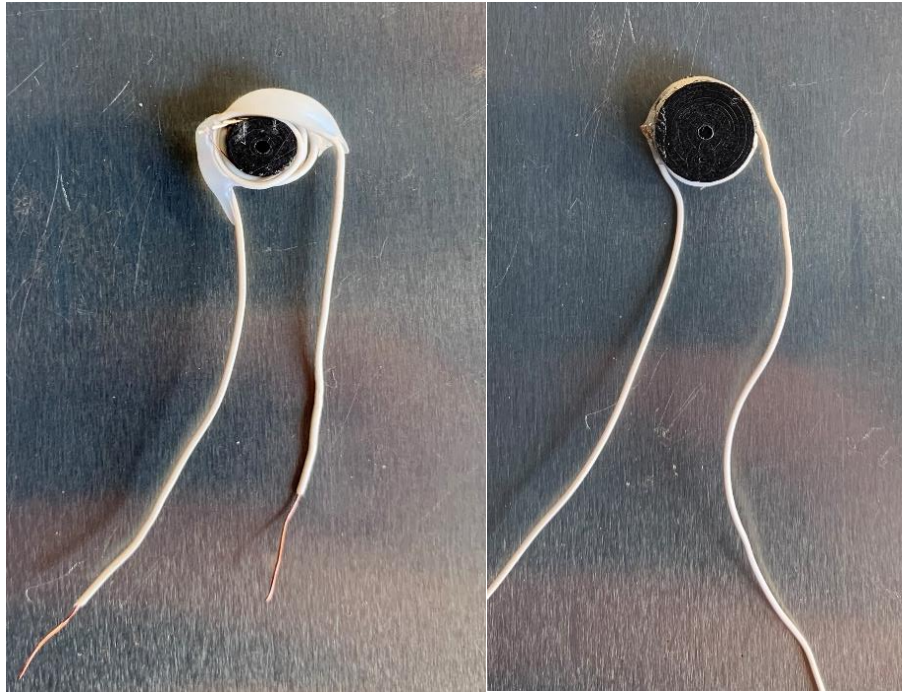
Το πηνίο λήψης αποτελείται από 300 περιελίξεις χάλκινου σύρματος τυλιγμένες σε μήκος 2mm. Η διάμετρος του σύρματος είναι 0,06mm. Ομοίως με το πηνίο διέγερσης, η αυτεπαγωγή του πηνίου λήψης υπολογίστηκε σε $L_s \approx 280 \mu\text{H}$.

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 τύπου:

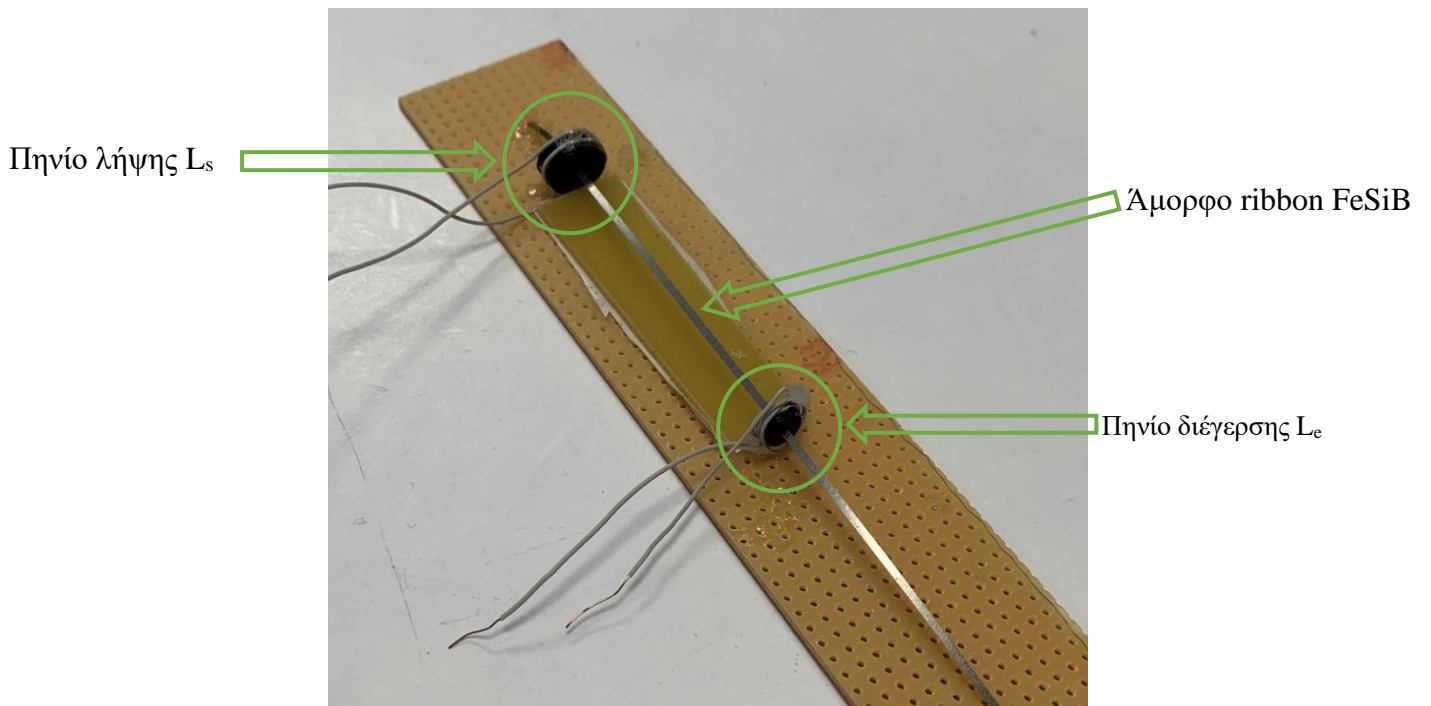
$$V_L = N \frac{d\phi}{dt} \quad (4.1.2)$$

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 αυτό, ότι για δεδομένη τιμή της μαγνητικής ροής ϕ , η τάση του πηνίου V_L , μπορεί να αυξηθεί με αύξηση του αριθμού των περιελίξεων.

Και τα δύο πηνία τυλίχτηκαν γύρω από ειδικά 3-D εκτυπωμένες βάσεις με διάμετρο βασισμένη στο πλάτος του ribbon καθώς και λαμβάνοντας υπόψιν τα χαρακτηριστικά του κάθε πηνίου. Η εκτύπωση έγινε στον 3-D εκτυπωτή του Εργαστηρίου Αισθητηρίων του ΕΜΠ. Να αναφερθεί επίσης ότι για να διατηρηθεί το σχήμα του πηνίου αλλά και οι περιελίξεις σφιχτές, μετά το τύλιγμα και την απομάκρυνση της μόνωσης των χάλκινων συρμάτων, το πέρας των πηνίων κολλήθηκε με καλώδιο το οποίο στη συνέχεια τυλίχθηκε γύρω από τη βάση σφιχτά και παρέμεινε στη θέση του με χρήση θερμόκολλας.



Σχήμα 4.1.1 Πηνίο διέγερσης L_e (αριστερά), πηνίο λήψης L_s (δεξιά).



Σχήμα 4.1.2 Η συνολική διάταξη MDL με το άμορφο ribbon να διαπερνά το εσωτερικό των πηνίων.

4.2 Κύκλωμα διέγερσης

Όπως αναφέρθηκε και στο 3^ο κεφάλαιο της εργασίας, το αρχικό στάδιο σε μια αισθητήρια διάταξη που βασίζεται στην τεχνική MDL, περιλαμβάνει τη δημιουργία ελαστικού παλμού στη μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης μέσω της τροφοδότησης του πηνίου διέγερσης με παλμικό ρεύμα.

4.2.1 Προδιαγραφές κυκλώματος διέγερσης

Το κύκλωμα διέγερσης πρέπει να τηρεί ορισμένες προδιαγραφές που καθορίζονται από τις παρακάτω παραμέτρους:

- Μικρό εύρος παλμού διέγερσης (της τάξης των μs),
- Σύντομοι χρόνοι rise/fall (της τάξης των ns),
- Ύπαρξη επαγωγικού φορτίου (πηνίο διέγερσης),
- Υψηλή ένταση ρεύματος στο πηνίο (της τάξης των A),

Και τέλος πρέπει να καθοριστούν τα παρακάτω:

- Συχνότητα των διαδοχικών διεγέρσεων,
- Ακριβές εύρος παλμού διέγερσης.

Πιο συγκεκριμένα, το κύκλωμα διέγερσης πρέπει να έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτεί το πηνίο διέγερσης με παλμικό ρεύμα (στιγμιαίο) μερικών μs . Με αυτόν τον τρόπο, ο ελαστικός παλμός είναι σύντομος και δεν προκαλεί διαχωρίσιμους παλμούς τάσης στο πηνίο λήψης. Οι χρόνοι rise/fall του παλμού ρεύματος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο σύντομοι (της τάξης των ns) έτσι ώστε το παλμικό μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται να φτάνει τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του το γρηγορότερο δυνατό. Επιπλέον πρέπει να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά τα inductive spikes που δημιουργούνται από την διακοπτική λειτουργία επαγωγικών φορτίων. Το επαγωγικό φορτίο στο κύκλωμα διέγερσης, το οποίο διαρρέεται από υψηλή τιμή έντασης ρεύματος για παραγωγή ισχυρού μαγνητικού πεδίου, είναι ικανό να προκαλέσει τέτοιου είδους spikes και η αντιμετώπιση αυτών προϋποθέτει ειδική μεταχείριση των κυκλωματικών προδιαγραφών.

Επιπρόσθετα, το κύκλωμα πρέπει 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 με την ανίχνευση των

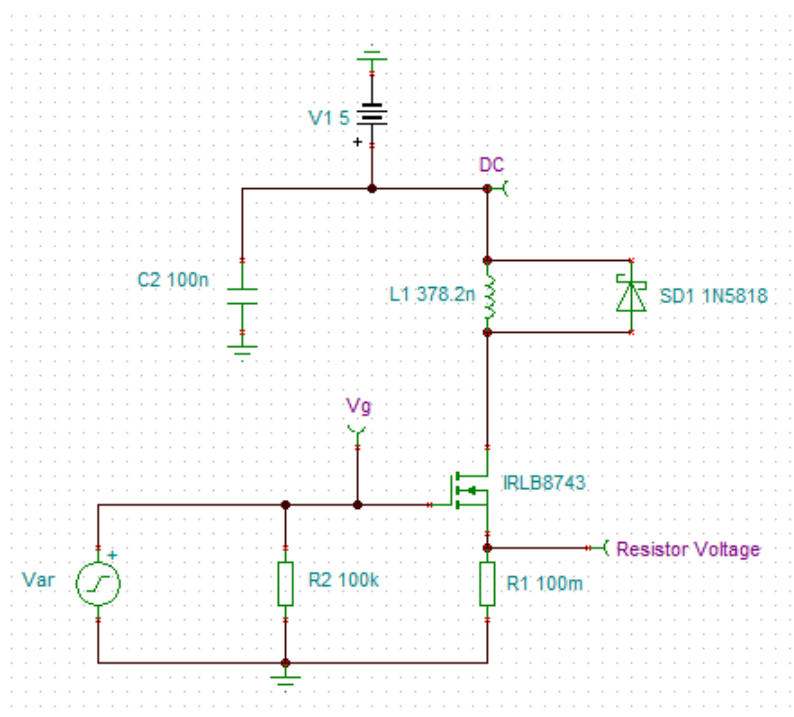
επόμενων παλμών. Αντίθετα, σε χαμηλές συχνότητες, εντοπίζεται πολύ μεγάλη χρονική καθυστέρηση μεταξύ των μετρήσεων του αισθητήρα με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για πολλαπλές μετρήσεις. Τέλος, το κύκλωμα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί για διάφορες τιμές της τάσης τροφοδοσίας ώστε να μπορούμε με πειραματικές μετρήσεις να καθορίσουμε το βέλτιστο ρεύμα που θα διαρρέει το πηνίο κατά τη διέγερσή του.

4.2.2 Ανάλυση κυκλώματος διέγερσης

Το κύκλωμα διέγερσης είναι ουσιαστικά ένα διακοπτικό κύκλωμα mosfet το οποίο αποτελείται από τα παρακάτω components:

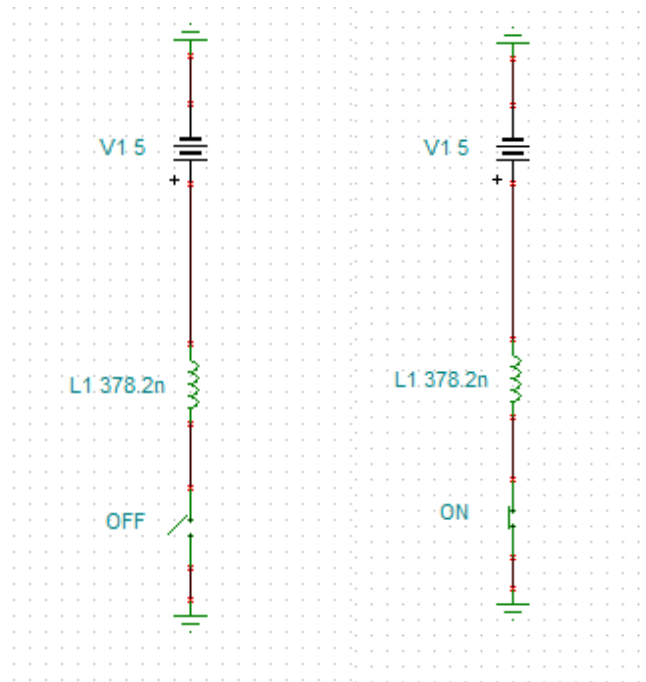
- Δύο αντιστάσεις (R_1 , R_2),
- Ένα πυκνωτή (C),
- Ένα logic level N-channel power mosfet (IRLB8743),
- Μία δίοδο Schottky (IN5818),
- Πηνίο διέγερσης (Excitation coil L_e).

Προφανώς υπάρχουν και οι ακροδέκτες τροφοδοσίας, ένας για την εισαγωγή του εξωτερικού παλμικού σήματος και ένας για την DC τροφοδοσία ολόκληρου του κυκλώματος (5V). Τόσο το σήμα διέγερσης (παλμός πλάτους 5V, εύρους 1μs) όσο και η DC τροφοδοσία παρέχονται στο κύκλωμα από μια πλακέτα Arduino.



Σχήμα 4.2.2.1 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος διέγερσης.

Ο σκοπός του κυκλώματος διέγερσης είναι να τροφοδοτήσει το πηνίο με παλμικό ρεύμα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία παλμικού μαγνητικού πεδίου. Όπως είναι γνωστό, το mosfet στην περιοχή λειτουργίας κορεσμού λειτουργεί σαν κλειστός διακόπτης ενώ στην περιοχή αποκοπής σαν ανοιχτός. Για το λόγο αυτό το κύκλωμα διέγερσης χαρακτηρίζεται ως διακοπτικό κύκλωμα. Συνεπώς, στην περιοχή κορεσμού, το πηνίο θα συνδέεται με τη γείωση (GND) ενώ στην περιοχή αποκοπής θα αποσυνδέεται με τη γείωση, άρα το παλμικό άνοιγμα και κλείσιμο του mosfet έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία παλμικού ρεύματος στο πηνίο.

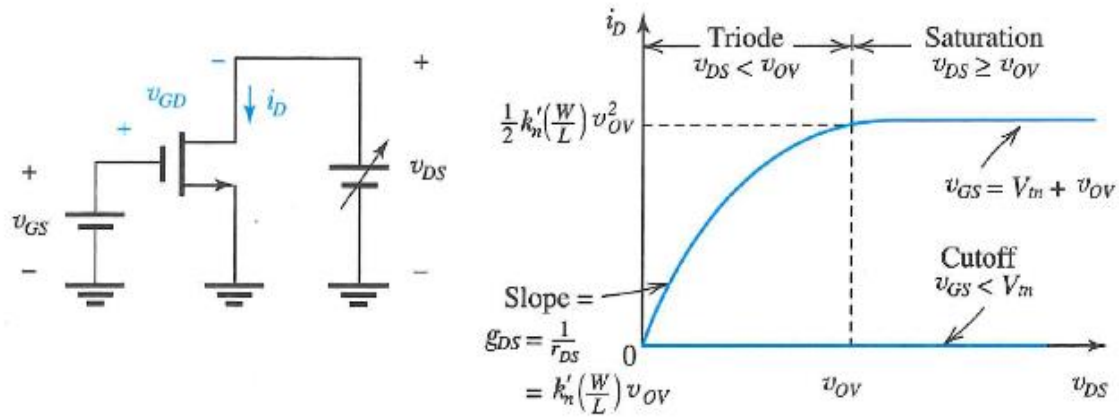


Σχήμα 4.2.2.2 Το mosfet σε λειτουργία ανοιχτού διακόπτη (περιοχή αποκοπής)(αριστερά) και σε λειτουργία κλειστού διακόπτη (περιοχή κορεσμού)(δεξιά). Διακοπτική σύνδεση του πηνίου με τη γείωση και δημιουργία παλμικού ρεύματος στο πηνίο.

4.2.2.1 Λειτουργία Mosfet (IRLB8743)

Οι συνθήκες που διέπουν (και οι εξισώσεις που περιγράφουν) τη λειτουργία του NMOS τρανζίστορ σε κάθε μια από τις τρεις πιθανές καταστάσεις (περιοχές) λειτουργίας του θα αναφερθούν παρακάτω. Οι τρεις περιοχές λειτουργίας του τρανζίστορ είναι: η περιοχή αποκοπής, η περιοχή τριόδου και η περιοχή κορεσμού. Στην περίπτωση που το mosfet χρησιμοποιείται ως διακόπτης είναι χρήσιμες η περιοχή αποκοπής (cut off region) και η περιοχή κορεσμού (saturation region). Στο αριστερό τμήμα του σχήματος 4.2.2.1.1 απεικονίζεται ένα κύκλωμα που αποτελείται από ένα mosfet τρανζίστορ και δύο DC τροφοδοσίες που παρέχουν τις τάσεις V_{GS} και V_{DS} . Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται ότι G είναι ο ακροδέκτης της πύλης (Gate) του mosfet, S ο ακροδέκτης της πηγής (Source) του mosfet και V_{TH} η τάση κατωφλίου (Threshold

voltage). Τάση κατωφλίου V_{TH} αποκαλείται η τιμή της V_{GS} στην οποία συσσωρεύεται επαρκής αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων στην περιοχή καναλιού για να σχηματιστεί κανάλι αγωγής. Οι τιμές των τριών αυτών τάσεων είναι πολύ χρήσιμες για την εύρεση της περιοχής λειτουργίας του ενδιαφερόμενου mosfet.



Σχήμα 4.2.2.1.1 Περιοχές λειτουργίας του NMOS τρανζίστορ.^[35]

Πιο συγκεκριμένα, όταν $V_{GS} < V_{TH}$, τότε δεν υπάρχει κανάλι και το τρανζίστορ βρίσκεται σε αποκοπή δηλαδή $I_D = 0$ άρα και το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο διέγερσης είναι μηδενικό. Στην περιοχή αποκοπής η εσωτερική αντίσταση R_{DS} μεταξύ του ακροδέκτη πηγής S και του ακροδέκτη D της υποδοχής (Drain) αποκτά πολύ υψηλή τιμή με αποτέλεσμα τη δημιουργία ανοικτοκυκλώματος μεταξύ αυτών των δύο ακροδεκτών. Αντίθετα, όταν $V_{GS} > V_{TH}$ και $V_{DS} > V_{OV} = V_{GS} - V_{TH}$, τότε το mosfet λειτουργεί στην περιοχή κορεσμού, η R_{DS} αποκτά πολύ μικρή τιμή και δημιουργείται αγωγίμος δρόμος μεταξύ των ακροδεκτών υποδοχής D και πηγής S. Τότε το ρεύμα I_D άρα και το ρεύμα που θα διαρρέει το πηνίο διέγερσης, δίνεται από την παρακάτω εξίσωση.^[35]

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right) V_{OV}^2 = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (4.2.2.1.1)$$

Το mosfet IRLB8743 χρησιμοποιήθηκε αρχικά επειδή πρόκειται για ένα logic level mosfet, το οποίο σημαίνει έχει σχεδιαστεί για να ενεργοποιείται πλήρως από το λογικό επίπεδο ενός μικροεπεξεργαστή. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο σε περίπτωση που σε μελλοντικές βελτιώσεις της διάταξης χρησιμοποιηθεί μικροελεγκτής για την αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων. Ένα άλλο πλεονέκτημα του IRLB8743 είναι η χαμηλή τιμή του Gate Threshold Voltage $V_{GS(th)max} = 2.35V$. Αυτό σημαίνει ότι το mosfet θα φτάσει στην περιοχή κορεσμού (και άρα θα λειτουργεί σαν κλειστός

διακόπτης) πολύ γρήγορα, εφόσον τροφοδοτούμε το κύκλωμά μας με παλμικό σήμα πλάτους 5V. Ειδικότερα, όταν η τιμή της τάσης V_{GS} φτάσει τα 2.35V τότε το mosfet θα επιτρέπει τη ροή $I_D=100\mu A$ στο κύκλωμα. Επιπρόσθετα, το IRLB8743 έχει πολύ μικρή τιμή R_{DS} (της τάξης των mA). Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να οδηγήσει ρεύμα υψηλής έντασης στο πηνίο διέγερσης- ιδιότητα πολύτιμη αφού χρειαζόμαστε τη δημιουργία ισχυρού μαγνητικού πεδίου- της τάξης των 32-40 A για τιμή τάσης $V_{GS}=4.5-10 V$. Τέλος, διαθέτει εξαιρετικά χαμηλή αντίσταση πύλης (Gate) R_G .^[36]

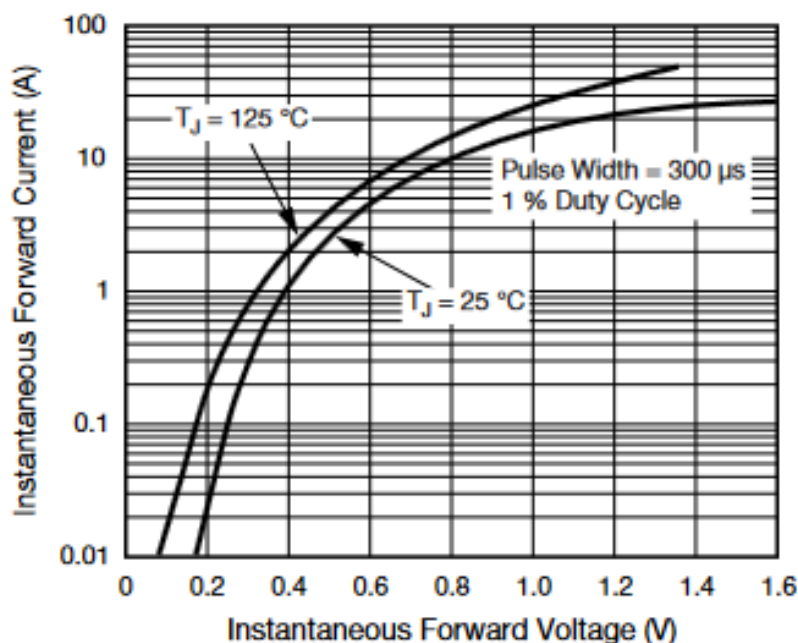
4.2.2.2 Λειτουργία Διόδου Schottky (1N5818)

Το πηνίο λήψης L_s , όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως διαρρέεται από ρεύμα I_D όταν το mosfet βρίσκεται στην περιοχή κορεσμού, ενώ όταν δουλεύει στην περιοχή αποκοπής το πηνίο δε διαρρέεται από ρεύμα. Στην περίπτωση αυτή, δηλαδή όταν το επαγωγικό φορτίο σταματά να διαρρέεται από ρεύμα και αποκόπτεται απότομα από την τροφοδοσία, το μαγνητικό πεδίο του πηνίου καθώς σταματά να υπάρχει, δημιουργεί ρεύμα αντίθετης κατεύθυνσης από το ρεύμα I_D . Η μεταβολή αυτή στην κατεύθυνση του ρεύματος υπακούει στο νόμο του Lenz (τα επαγωγικά ρεύματα έχουν τέτοια φορά, ώστε να αντιτίθενται στο αίτιο που τα προκαλεί).

Το ρεύμα αντίθετης κατεύθυνσης που δημιουργείται, έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλών κορυφών αρνητικού δυναμικού (negative voltage spikes) στα άκρα του L_s . Αυτό συμβαίνει διότι με το άνοιγμα του mosfet-διακόπτη, δεν υπάρχει μονοπάτι εκτόνωσης στο κύκλωμα για το εν λόγω ρεύμα, αφού πλέον υπάρχει ανοικτοκύκλωμα στη διάταξη. Οι κορυφές αυτές λόγω των υψηλών τιμών τους μπορεί να ξεπεράσουν τις ακραίες συνθήκες λειτουργίας των εξαρτημάτων του κυκλώματος διέγερσης, γεγονός επικίνδυνο για τη λειτουργικότητα του. Για να διασφαλιστεί η ασφάλεια των components μας δημιουργείται μέσω μιας διόδου ελεύθερης διέλευσης (flyback diode) ένα μονοπάτι-διέξοδος μέσω του οποίου εκτονώνεται το ρεύμα που δημιουργεί τα ανεπιθύμητα spikes. Το μονοπάτι αυτό δεν επηρεάζει την λειτουργία του κυκλώματος διέγερσης όταν το mosfet λειτουργεί στην περιοχή κορεσμού.

Η δίοδος που επιλέχθηκε είναι η Schottky 1N5818 αρχικά λόγω της χαμηλής τιμής $V_F=0,55V$ (forward voltage) καθώς και για άλλους παράγοντες όπως το εξαιρετικά γρήγορο on/off switching που διαθέτει αλλά και οι πολύ μικρές απώλειες αγωγιμότητας που την χαρακτηρίζουν. Γενικότερα η δίοδος αυτή χρησιμοποιείται για προστασία από υπέρταση (overvoltage protection) όπως και οι συμβατικές διόδους αλλά

για την συγκεκριμένη εφαρμογή, μετά από προσομοιώσεις και πειραματικές δοκιμές επιλέχθηκε η 1N5818 κυρίως λόγω της χαμηλής V_F . Στην παρακάτω γραφική φαίνεται το ρεύμα I_F (forward current) δηλαδή το ρεύμα που θα διαρρέει το L_S συναρτήσει της τιμής του V_F για την 1N5818:^[37]



Σχήμα 4.2.2.2.1 Μεταβολή ρεύματος I_F συναρτήσει της V_F της Schottky διόδου 1N5818.^[37]

4.2.2.3 Λειτουργία Αντιστάσεων

Η αντίσταση R_1 έχει τοποθετηθεί μεταξύ του άκρου της πηγής (Source) του mosfet και της γείωσης. Η αντίσταση αυτή είναι εξαιρετικά βοηθητική αφού με μέτρηση της τάσης V_S μπορούμε πολύ εύκολα να υπολογίσουμε το ρεύμα που θα την διαρρέει και άρα το ρεύμα που θα διαρρέει το πηνίο L_S αφού βρίσκονται στο ίδιο μονοπάτι. Λόγω της θέσης της στο κύκλωμα, μπορούμε επιπλέον να υπολογίσουμε την τιμή της τάσης V_{GS} και άρα την περιοχή λειτουργίας του τρανζίστορ. Εξαιτίας της μικρής τιμής της ($R_1=0.1\Omega$) η επίδραση της αντίστασης στην V_{GS} είναι αμελητέα.

Επιπλέον τοποθετήθηκε μια pulldown αντίσταση $R_2=100k\Omega$ στην πύλη (Gate) του τρανζίστορ. Η αντίσταση αυτή εμποδίζει την πύλη να βρεθεί σε ανεπιθύμητη κατάσταση floating όταν η είσοδος μας είναι στα 0V. Επιπροσθέτως συμβάλλει και στην αποθορυβοποίηση του σήματος μας (παρατηρήθηκε πειραματικά).

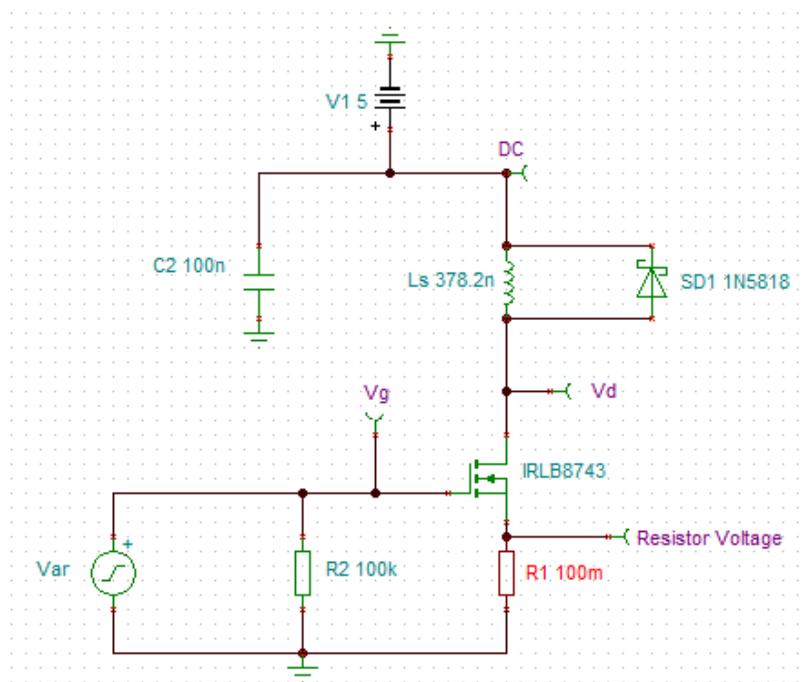
4.2.2.4 Λειτουργία Πυκνωτή

Ο πυκνωτής C_2 που χρησιμοποιήθηκε είναι ένας decoupling πυκνωτής των $0.1\mu F$ που συμβάλλει κυρίως στην αποφυγή των βυθίσεων στο σήμα εξόδου του

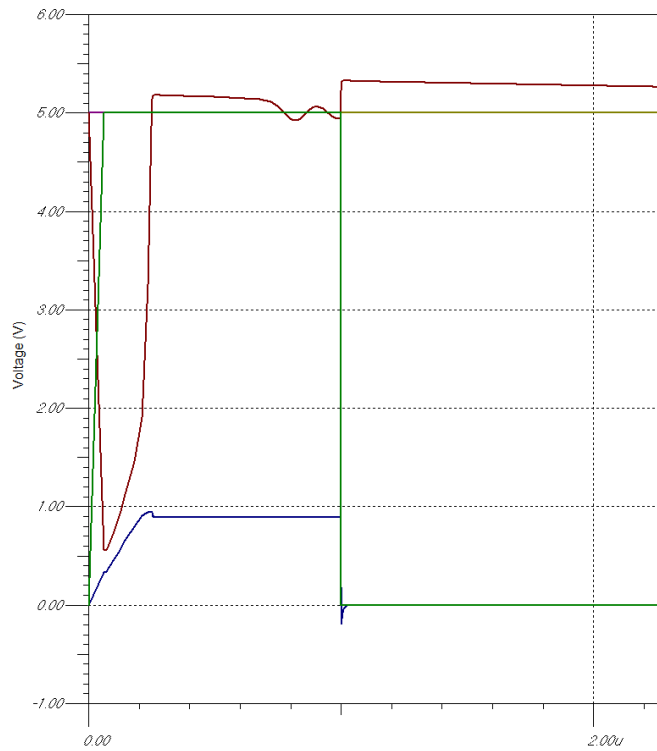
κυκλώματος διέγερσης (Power supply voltage drops). Γενικά οι decoupling πυκνωτές χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό ενός τμήματος ηλεκτρικού κυκλώματος από ένα άλλο. Ο θόρυβος που προκαλείται από άλλα στοιχεία του κυκλώματος διοχετεύεται μέσω του πυκνωτή μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την επίδραση που έχει στο υπόλοιπο κύκλωμα. Πράγματι ο πυκνωτής C₂ παρατηρήθηκε πειραματικά ότι συνέβαλλε στην αποθορυβοποίηση καθώς και στη σταθεροποίηση του σήματος εξόδου στο πηνίο διέγερσης. Συνεχίζοντας τις πειραματικές δοκιμές παρατηρήθηκε ότι μια συστοιχία παράλληλων πυκνωτών (0.1μF-100μF) λειτουργούσε ακόμη πιο αποτελεσματικά από τον 0.1μF μόνο του. Οπότε στο τελικό κύκλωμα χρησιμοποιήθηκε η συστοιχία αυτή.

4.2.3 Προσομοίωση κυκλώματος διέγερσης

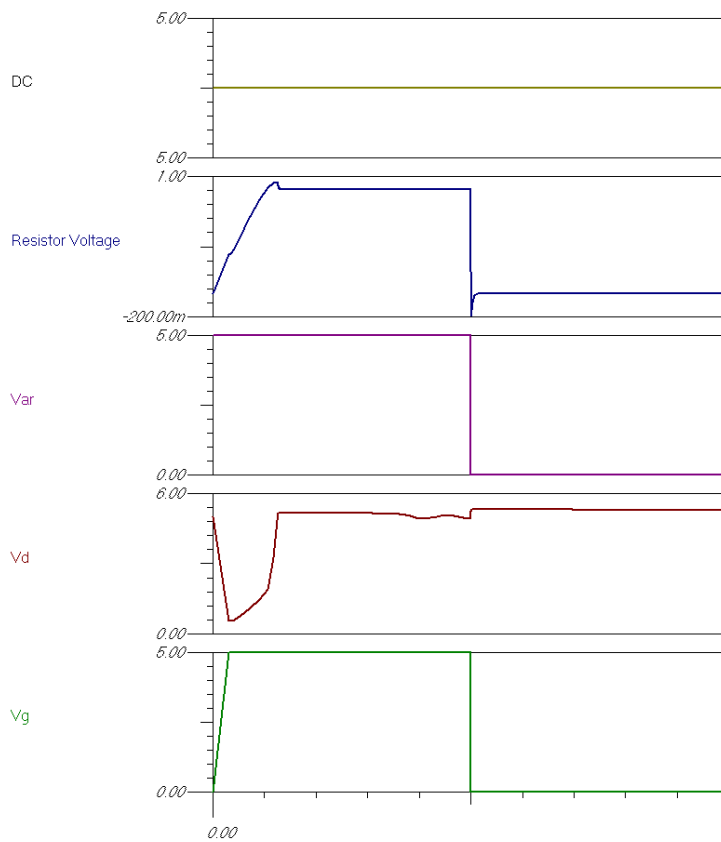
Για την προσομοίωση των κυκλωμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα TINA-TI της Texas Instruments. Το σήμα εισόδου είναι ένας τετραγωνικός παλμός με πλάτος $V_{pp}=5V$ (θετικό) και εύρος 1μs. Η τροφοδοσία του κυκλώματος τέθηκε στα $V_{CC}=5V$. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (transient analysis) για χρονικό διάστημα 6μs και χάραξη των κυματομορφών των τάσεων της πύλης (Gate), της πηγής (Source) και της υποδοχής (Drain) του τρανζίστορ. Οι κυματομορφές αυτές φαίνονται στο ίδιο σύστημα στο σχήμα 4.2.3.2, και η καθεμία ξεχωριστά στο σχήμα 4.2.3.3.



Σχήμα 4.2.3.1 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος διέγερσης στο TINA-TI.



Σχήμα 4.2.3.2 Κυματομορφές κυκλώματος διέγερσης μετά από transient analysis: Τάση πύλης mosfet (πράσινο), τάση πηγής mosfet (μπλε), τάση υποδοχής mosfet (κόκκινο), σήμα εισόδου(μωβ), DC τάση τροφοδοσίας (5V)(λαδί).

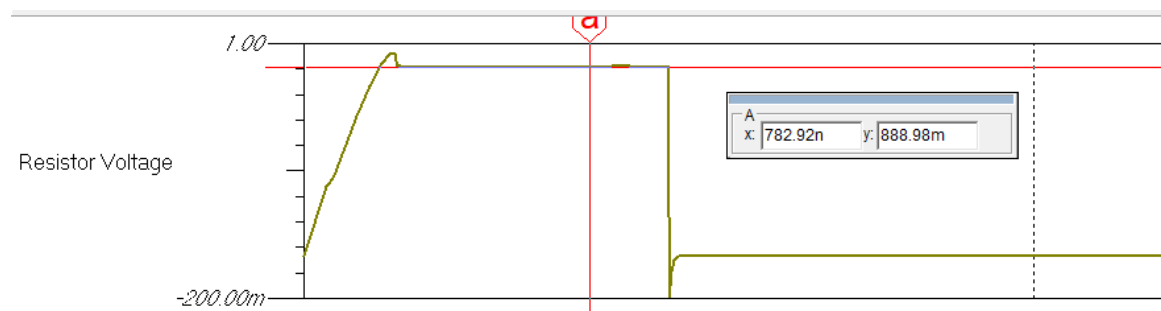


Σχήμα 4.2.3.3 Κυματομορφές τάσης πύλης (V_g), τάσης υποδοχής (V_d), τάσης πηγής (Resistor Voltage), σήματος εισόδου (V_{ar}), DC τροφοδοσίας (DC).

Μέσω της κυματομορφής της πηγής του τρανζίστορ μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα που θα διαρρέει το πηνίο L_s . Επειδή η αντίσταση R_1 και το πηνίο L_s θα διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα όταν το τρανζίστορ άγει, υπολογίζοντας το ρεύμα I_{R1} υπολογίζουμε και το ρεύμα του πηνίου διέγερσης. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας το πλάτος του παλμικού σήματος του σχήματος 4.2.3.4, το ρεύμα I_s υπολογίζεται ως εξής:

$$I_s = I_{R1} = \frac{V_{R1}}{R_1} \approx \frac{888,98mV}{0,1\Omega} \approx 8,9A$$

Η υψηλή τιμή του ρεύματος στα 9 A περίπου είναι επιθυμητή καθώς με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ισχυρό μαγνητικό πεδίο και άρα καλύτερη μετάδοση παλμικού σήματος στο MDL.

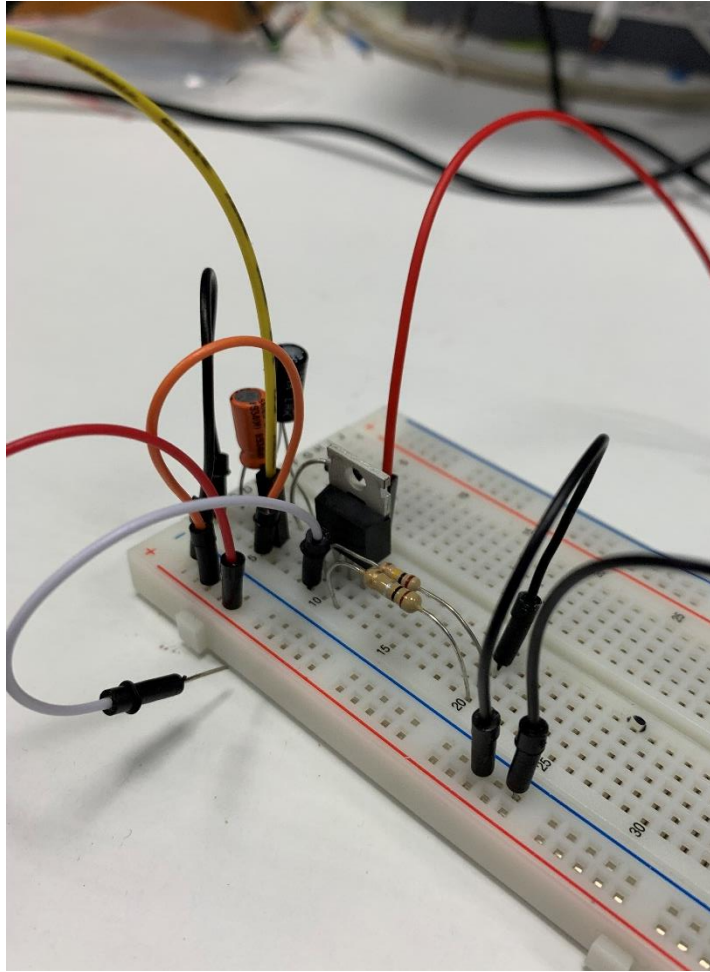


Σχήμα 4.2.3.4 Κυματομορφή τάσης στα άκρα της R_1 (Source του τρανζίστορ) με εισαγωγή δείκτη a για τη μέτρηση του πλάτους του σήματος.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρόλο που διαφέρουν από τα πειραματικά αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν σε επόμενη ενότητα, προσφέρουν μια αρκετά καλή εκτίμηση για την πραγματική (εργαστηριακή) λειτουργία του κυκλώματος διέγερσης.

4.2.4 Απόκριση κυκλώματος διέγερσης

Το κύκλωμα διέγερσης υλοποιήθηκε αρχικά σε πλακέτα δοκιμών (breadboard) ώστε να εξακριβωθεί η σωστή λειτουργία του, πριν προχωρήσουμε στο επόμενο στάδιο της κόλλησης της πλακέτας.



Σχήμα 4.2.4.1 Κατασκευή κυκλώματος διέγερσης σε πλακέτα δοκιμών.

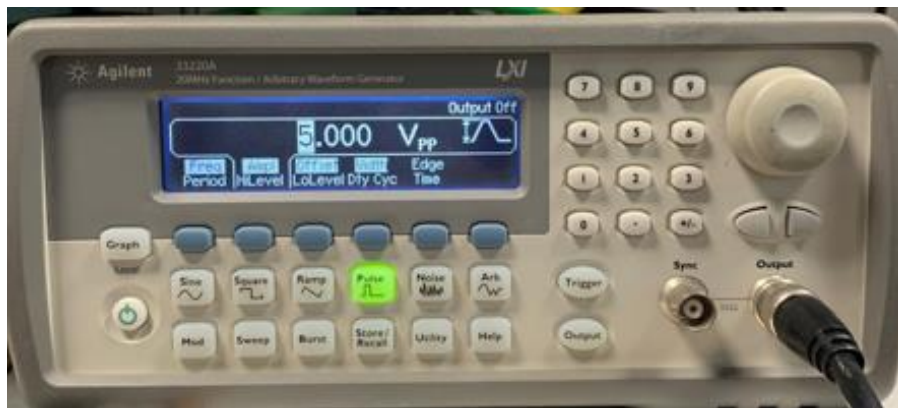
Η τροφοδοσία του breadboard έγινε μέσω τροφοδοτικού στα 5V (εικόνα 4.2.4.2) ενώ την παλμική είσοδο προσέφερε γεννήτρια του εργαστηρίου (εικόνες 4.2.4.3-4.2.4.6) τηρώντας τις προδιαγραφές που αναφέρθηκαν στις ενότητες 4.2.1-4.2.2.



Σχήμα 4.2.4.2 DC τροφοδοσία κυκλώματος breadboard μέσω τροφοδοτικού.



Σχήμα 4.2.4.3 Λειτουργία παλμικού σήματος εισόδου σε συχνότητα 1kHz.



Σχήμα 4.2.4.4 Πλάτος $V_{pp}=5V$ σήματος εισόδου.



Σχήμα 4.2.4.5 Προσθήκη DC offset στον παλμό εισόδου $V_{DC}=2,5V$ ώστε να μην υπάρχει αρνητικό πλάτος.



Σχήμα 4.2.4.6 Εύρος παλμού εισόδου.

Οι κυματομορφές που παρατηρήθηκαν μετά τη δοκιμή του breadboard κυκλώματος ήταν αρκετά υποσχόμενες οπότε προχωρήσαμε σε κόλληση του κυκλώματος σε through-hole πλακέτα, όπου και παρατηρήθηκαν αντίστοιχα σήματα και μάλιστα λιγότερο θορυβώδη (οι κυματομορφές που παρατηρήθηκαν στον παλμογράφο παρατίθενται σε επόμενο κεφάλαιο).

4.3 Κύκλωμα λήψης

Όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως, το παλμικό σήμα των άκρων του πηνίου διέγερσης, μεταδίδεται στη συνέχεια με τη μορφή ελαστικού παλμού κατά μήκος του MDL και φτάνει στο πηνίο λήψης. Με την άφιξη αυτού του ελαστικού παλμού στο L_s , 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.

4.3.1 Προδιαγραφές κυκλώματος λήψης

Η διαφορά με το κύκλωμα διέγερσης είναι ότι για το κύκλωμα λήψης δεν μπορούμε να γνωρίζουμε εκ των προτέρων τις ακριβείς προδιαγραφές του. Αυτές θα καθοριστούν από τα χαρακτηριστικά του σήματος που εμφανίζεται στο πηνίο λήψης.

Αρχικά, παρατηρήθηκε η μορφή του σήματος στα άκρα του πηνίου λήψης. Το σήμα αυτό είχε αρκετές ομοιότητες με το σήμα δύο αντίθετων παλμών που αναλύθηκε στο 3^ο κεφάλαιο και πιο συγκεκριμένα στην ενότητα 3.2. Ωστόσο το πλάτος του σήματος ήταν πολύ μικρό (της τάξης των mV) και εξαιρετικά θορυβώδες. Ο θόρυβος αυτός πιθανόν οφείλεται (εξαιτίας της μαγνητικής φύσης του αισθητήρα) σε παρεμβολές από γειτονικά εξωτερικά μαγνητικά πεδία που υφίστανται στο περιβάλλον του εργαστηρίου. Επιπλέον, τα καλώδια (jumpers) του εργαστηρίου, όπως και κάποια από τα components που χρησιμοποιήθηκαν στο κύκλωμα διέγερσης αλλά και το γεγονός ότι η κυκλωματική διάταξη βρισκόταν σε breadboard (και στη συνέχεια σε through-hole πλακέτα) και όχι σε τυπωμένο PCB, ενδεχομένως προσδίδουν θόρυβο στο σήμα μας. Τέλος, τα «υλικά» της διάταξης MDL που χρησιμοποιήθηκαν (πηνία

και gibbon μαγνητοσυστολικής γραμμής) δεν μπορούμε να γνωρίζουμε αν λειτουργούν βέλτιστα. Ένα ποσό του θορύβου του σήματος πιθανόν οφείλεται και σε αυτά.

Το τελικό σήμα μετά τη διαμόρφωση λοιπόν, θα πρέπει να είναι σίγουρα ενισχυμένο και αποθορυβοποιημένο. Επίσης, σε ενδεχόμενη μελλοντική βελτίωση του αισθητήρα η προσθήκη μικροελεγκτή καθίσταται αναγκαία. Οπότε για να διασφαλίσουμε την ασφαλή λειτουργία του μικροελεγκτή, στο τελικό σήμα που θα λαμβάνουμε θα πρέπει να μην υπάρχει αρνητική τάση. Συμπερασματικά, το κύκλωμα λήψης θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να ενισχύει το σήμα, να το αποθορυβοποιεί και να «κόβει» τις αρνητικές τάσεις ή να μετατρέπει ενδεχομένως όλες τις αρνητικές τιμές τάσης σε θετικές.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, μπορεί να ξεκινήσει η ανάλυση των προδιαγραφών του κυκλώματος λήψης. Το κύκλωμα θα πρέπει να είναι ικανό να ενισχύσει το σήμα εισόδου σε επίπεδα τάσης μερικών mV ή και ακόμα περισσότερο αφού η αρχική τάση των μερικών mV ($\approx 10-20\text{mV}$) είναι αντικειμενικά πολύ μικρή και εμποδίζει την περαιτέρω μελέτη ή επεξεργασία του σήματος. Συνεπώς το σήμα θα ενισχύεται με κέρδος τουλάχιστον 10, $G > 10$. Επιπροσθέτως αναγκαία καθίσταται η σημαντική αποθορυβοποίηση του σήματος τόσο των εξωτερικών παρεμβολών όσο και του θορύβου των εξαρτημάτων του κυκλώματος. Τέλος, επιθυμητή είναι η ανόρθωση του τελικού σήματος ώστε να αποφευχθούν οι εμφανίσεις αρνητικών τάσεων.

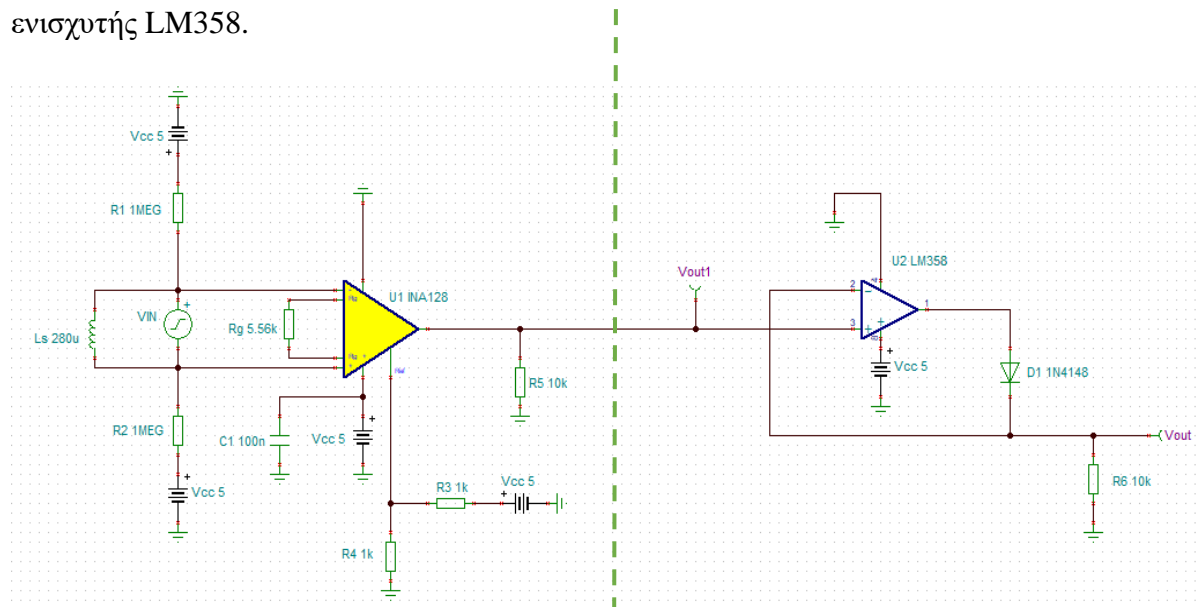


Σχήμα 4.3.1.1 Μετατροπή σήματος εισόδου (κίτρινο) μετά από την επεξεργασία του από το κύκλωμα λήψης. Το σήμα εξόδου (κόκκινο) είναι πλέον ενισχυμένο και ανορθωμένο.^[38]

4.3.2 Ανάλυση κυκλώματος λήψης

Το κύκλωμα λήψης διαμορφώνει το σήμα που δέχεται το πηνίο λήψης στα άκρα του ώστε να είναι πιο καθαρό, ενισχυμένο και κατάλληλα επεξεργασμένο ώστε να

μπορεί να το διαχειριστεί στη συνέχεια ένας μικροελεγκτής. Το κύκλωμα περιέχει πληθώρα αντιστάσεων και πυκνωτών, αλλά ουσιαστικά αποτελείται από δύο στάδια. Ένα στάδιο ενίσχυσης και αποθορυβοποίησης που αποτελεί ένα κύκλωμα ενισχυτή INA128P, και ένα στάδιο ανόρθωσης (superdiode) που χρησιμοποιείται ο τελεστικός ενισχυτής LM358.



Σχήμα 4.3.2.1 Σχηματική διάταξη κυκλώματος λήψης. Πρώτο στάδιο ενίσχυσης και αποθορυβοποίησης με χρήση του ενισχυτή INA128P (αριστερά). Δεύτερο στάδιο ανόρθωσης και αποθορυβοποίησης με χρήση του κυκλώματος superdiode και του ενισχυτή LM358 (δεξιά).

Το σήμα που απεικονίζεται στο σχήμα 4.3.2.1 ως V_{out} είναι το σήμα που θα επεξεργαστεί τελικά ο μικροελεγκτής.

4.3.2.1 Λειτουργία πρώτου σταδίου (Ενίσχυση)

Το πρώτο στάδιο ενίσχυσης αποτελείται από τα παρακάτω components:

- Έναν τελεστικό ενισχυτή χαμηλής ισχύος (INA128P),
- Έξι αντιστάσεις (R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 , R_g),
- Έναν πυκνωτή (C_1),
- Πηνίο λήψης (Search coil L_s).

Λειτουργία ενισχυτή INA128:

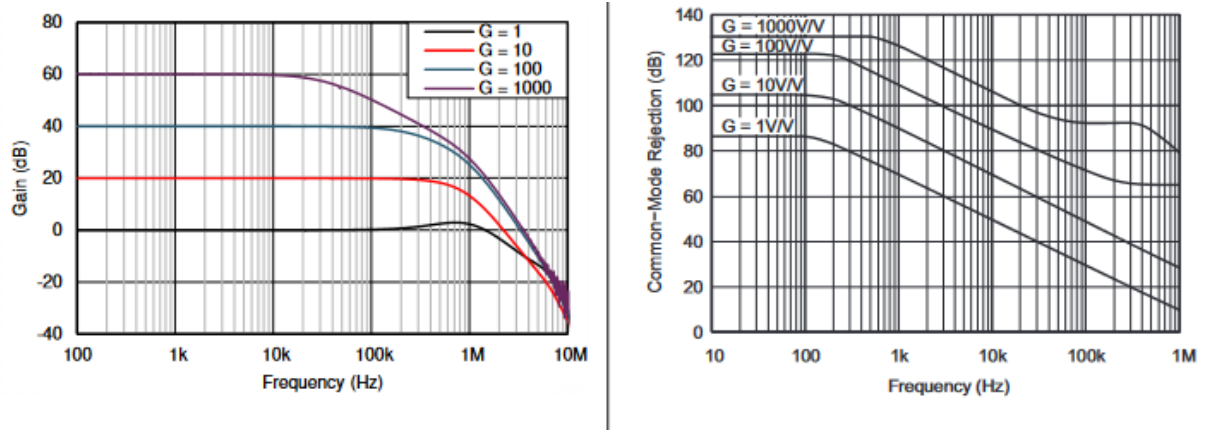
Για το πρώτο στάδιο επιλέχθηκε ο ολοκληρωμένος ενισχυτής INA128. Ο ενισχυτής αυτός προσφέρει εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια, έχει χαμηλό offset voltage (της τάξης των μV) καθώς και εισαγωγή ελάχιστου θορύβου στο κύκλωμα ($8nV/\sqrt{Hz}$, $0,2\mu V_{pp}$). Επιπλέον διαθέτει μεγάλο εύρος τροφοδοσίας ($\pm 2,5V$ - $\pm 18V$), γεγονός το οποίο μας βολεύει καθώς μπορούμε να τροφοδοτήσουμε τόσο το κύκλωμα διέγερσης όσο και το κύκλωμα λήψης με την ίδια πλακέτα Arduino (5V). Όπως παρατηρούμε και από το

datasheet του εξαρτήματος, μπορούμε να τροφοδοτήσουμε τον ενισχυτή μας με single-supply voltage των 4,5V (minimum) και 36V (maximum)^[39].

			MIN	TYP	MAX	UNIT
V _S	Supply voltage	Single-supply	4.5	30	36	V
		Dual-supply	±2.25	±15	±18	
Input common-mode voltage range for V _O = 0 V			(V-) + 2		(V+) - 2	V
T _A	Specified temperature		-40		85	°C

Σχήμα 4.3.2.1.1 Προτεινόμενες συνθήκες λειτουργίας ενισχυτή INA128P.^[39]

Πέρα από την ενίσχυση, ο INA συμβάλλει και στην αποθρομβοποίηση του σήματος καθώς έχει υψηλό λόγο απόρριψης κοινού σήματος (CMRR) και ρυθμίζοντας κατάλληλα το κέρδος, θόρυβος με φασματικό περιεχόμενο μεγαλύτερης συχνότητας από το εύρος ζώνης του σήματος λήψης θα βρεθεί στη μη γραμμική και φθίνουσα περιοχή της καμπύλης κέρδους όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3.2.1.2.



Σχήμα 4.3.2.1.2 Κέρδος (αριστερά) και CMRR (δεξιά) σε συνάρτηση με τη συχνότητα στον INA128P.^[39]

Λειτουργία αντίστασης R_G:

Το κέρδος του ενισχυτή καθορίζεται από την αντίσταση R_G μεταξύ των άκρων 1 και 8 σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \quad (4.3.2.1.1)$$

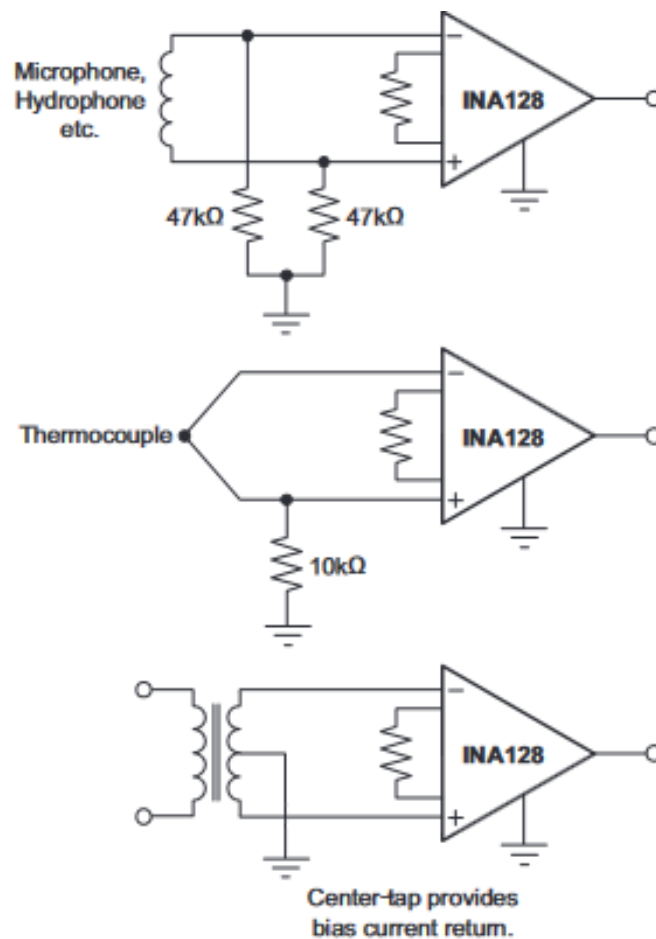
Συνεπώς, μεταβάλλοντας την τιμή της R_G, μπορούμε να επιτύχουμε διαφορετικές τιμές κέρδους. Για το λόγο αυτό αντί να τοποθετήσουμε έναν αντιστάτη συγκεκριμένης αντίστασης, μεταξύ των pin 1 και 8 τοποθετήθηκε ένα ποτενσιόμετρο. Μεταβάλλοντας την τιμή του ποτενσιόμετρου, υπήρχε η δυνατότητα να παρατηρούμε πως μεταβάλλεται το σήμα και να δρούμε αναλόγως.

Λειτουργία αντιστάσεων R_3, R_4 :

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η τροφοδοσία του INA128 θα είναι single-supply. Αυτό σημαίνει ότι το pin-2 (V_{IN-}) του ενισχυτή θα είναι γειωμένο και θα τροφοδοτούμε με 5V το pin-3 (V_{IN+}). Είναι γνωστό ότι το σήμα εξόδου αναπτύσσεται σε σχέση με την τάση στον ακροδέκτη αναφοράς (pin-5) R_{ef} . Για το λόγο αυτό, και επειδή ο INA βρίσκεται σε single-supply λειτουργία, είναι χρήσιμο να θέτουμε το R_{ef} pin σε κατάσταση ημιτροφοδοσίας (δηλαδή αν $V_{cc}=5V$, τότε $V_{Ref}=2,5V$). Αυτό επιτυγχάνεται με τις αντιστάσεις $R_3=R_4=1k\Omega$ σε συνδεσμολογία διαιρέτη τάσης.

Λειτουργία αντιστάσεων R_1, R_2 :

Η αντίσταση εισόδου του INA είναι εξαιρετικά υψηλή (10 GΩ περίπου). Ωστόσο, πρέπει να παραχωρηθεί ένα μονοπάτι για το ρεύμα πόλωσης εισόδου των δύο εισόδων. Αυτό το ρεύμα πόλωσης είναι πολύ μικρό (2nA περίπου). Η πολύ υψηλή τιμή της αντίστασης εισόδου, σημαίνει ότι αυτό το ρεύμα αλλάζει ελάχιστα με μεταβολή της τάσης εισόδου. Το κύκλωμα πριν την είσοδο του ενισχυτή πρέπει να παρέχει μια διαδρομή για το ρεύμα πόλωσης εισόδου ώστε να επιτευχθεί σωστή λειτουργία. Το σχήμα 4.3.2.1.2 δείχνει κάποιες πιθανές συνδεσμολογίες ικανές να δημιουργήσουν μια τέτοια διαδρομή. Χωρίς τη διαδρομή αυτή, οι εισοδοί οδηγούνται σε ανεπιθύμητη κατάσταση floating 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 λόγω του ρεύματος πόλωσης και καλύτερη υψηλή-συχνότητα απόρριψης κοινής λειτουργίας (high-frequency common-mode rejection).



Σχήμα 4.3.2.1.3 Συνδεσμολογίες ικανές να δημιουργήσουν μονοπάτι για το ρεύμα πόλωσης εισόδου.^[39]

Για του λόγους που αναλύθηκαν παραπάνω, στο πρώτο στάδιο του κυκλώματος λήψης χρησιμοποιήθηκαν οι αντιστάσεις $R_1=R_2=1\text{M}\Omega$. Χρησιμοποιήθηκε μεγάλη τιμή αντίστασης ώστε να μην «τραβάνε» μεγάλο ποσό ρεύματος, αν και ακόμα και με χρήση μικρότερων αντιστάσεων διαπιστώθηκε πειραματικά ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά.

Λειτουργία πυκνωτή C_1 :

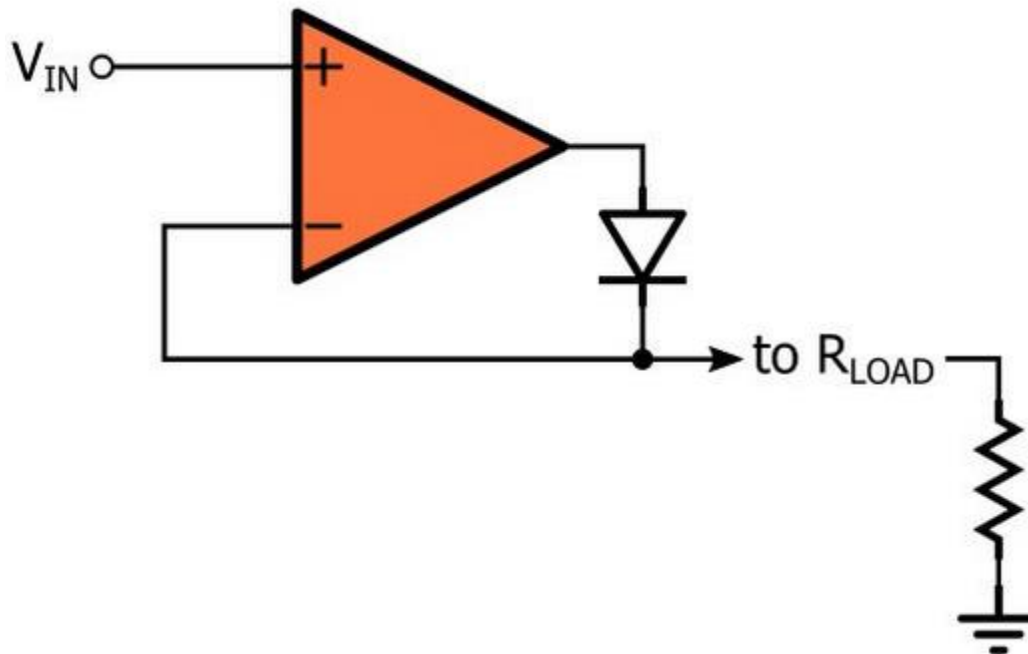
Ο πυκνωτής C_1 είναι ουσιαστικά ένας decoupling πυκνωτής, ο οποίος χρησιμοποιείται για ακύρωση θορύβου (μειώνει την επίδραση που έχει ο θόρυβος στο υπόλοιπο κύκλωμα) και την αποφυγή βυθίσεων στο τελικό σήμα εξόδου του ενισχυτή INA. Σύμφωνα με το datasheet οι πυκνωτές αυτοί λειτουργούν βέλτιστα όταν βρίσκονται όσο πιο κοντά στα pin του ενισχυτή μας γίνεται.

Λειτουργία αντίστασης R_5 :

Ο αντιστάτης αντίστασης R_5 έχει τοποθετηθεί ώστε το κύκλωμα του 1^{ου} σταδίου του κυκλώματος λήψης να έχει ένα ωμικό φορτίο και φυσικά να έχουμε τη δυνατότητα να μετρήσουμε τη τιμή της τάσης στην έξοδο.

4.3.2.2 Λειτουργία δεύτερου σταδίου (Ανόρθωση)

Για την ανόρθωση του σήματος που λαμβάνουμε από το πρώτο στάδιο του ενισχυτή INA χρησιμοποιήθηκε το κύκλωμα suprediode το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 4.3.2.2.1.



Σχήμα 4.3.2.2.1 Κυκλωματική διάταξη suprediode.^[40]

Το κύκλωμα suprediode αποτελείται ουσιαστικά από έναν ενισχυτή και μια δίοδο που λειτουργούν ταυτόχρονα για να δημιουργήσουν τη suprediode. Στο κύκλωμα αυτό έχουμε προφανώς σύνδεση αρνητικής ανάδρασης, αλλά είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι ο ενισχυτής (LM358) θα λειτουργεί τόσο ως ενισχυτής κλειστού βρόχου (closed-loop amplifier) όσο και ως ενισχυτής ανοιχτού βρόχου (open-loop amplifier).

Ας υποθέσουμε ότι χρησιμοποιούμε τη suprediode για να ανορθώσουμε ένα ημιτονοειδές σήμα (το σήμα που θα λάβουμε στην έξοδο του INA θα είναι εν μέρει ημιτονοειδές). Όταν η είσοδος είναι αρνητική και η τάση εξόδου είναι στα 0V, η έξοδος του op-amp είναι κορεσμένη και κατά συνέπεια η δίοδος δεν άγει. Με τη δίοδο να λειτουργεί σαν ανοιχτοκύκλωμα, η σύνδεση ανάδρασης διακόπτεται και ο ενισχυτής λειτουργεί σαν ενισχυτής ανοιχτού βρόχου με πολύ υψηλό κέρδος. Μόλις η τάση εισόδου υπερβεί τα 0V, υπάρχει μια μικρή διαφορά μεταξύ της εισόδου αναστροφής (inverting input) -η οποία είναι γειωμένη- και της μη αναστρέφουσας εισόδου (non-inverting input). Το πολύ υψηλό κέρδος του ενισχυτή προκαλεί κορεσμό της εξόδου

και αυτό οδηγεί σε μια διόδο με πόλωση προς τα εμπρός. Η διόδος είναι τώρα αγώγιμη και έτσι έχει δημιουργηθεί μια διαδρομή αρνητικής ανάδρασης. Αυτό σημαίνει ότι η τάση στη μη αναστρέφουσα είσοδο θα πρέπει να ισούται με την τάση στην αναστρέφουσα είσοδο. Με άλλα λόγια, μόλις η τάση εισόδου γίνει θετική, $V_{out}=V_{in}$.

Αυτή η συνθήκη παραμένει ενεργή όσο η τάση εισόδου είναι πάνω από 0V. Μόλις αυτή γίνει αρνητική, η έξοδος θα προσπαθήσει να κινηθεί και αυτή αρνητικά, αλλά αυτό θα αντιστρέψει τη διόδο και θα επιστρέψει τον ενισχυτή στην κατάσταση ανοιχτού βρόχου. Η έξοδος «έλκεται» και πάλι προς τη γείωση μέσω της αντίστασης φορτίου R_{LOAD} . Το αποτέλεσμα είναι ένας σχεδόν τέλειος ανορθωτής δηλαδή: Όταν η τάση εισόδου είναι θετική, η έξοδος ισούται με την είσοδο. Όταν η τάση εισόδου είναι αρνητική, η έξοδος είναι σταθερή στα 0V.^[40]

Λειτουργία ενισχυτή LM358:

Αναλύθηκε παραπάνω η λειτουργία του ενισχυτή. Οι λόγοι που επιλέχθηκε συγκεκριμένα ο LM358 παρατίθενται σε αυτή την παράγραφο. Ο LM358 διαθέτει ένα μεγάλο εύρος τροφοδοσιών (3V-32V) που σημαίνει ότι μπορεί να λειτουργήσει με DC τροφοδοσία 5V που διαθέτουμε εμείς για τη συνολική αισθητήρια διάταξη. Επιπλέον, διαθέτει πολύ μικρή τιμή έντασης ρεύματος παροχής (500μΑ περίπου) ανεξάρτητα από την τάση τροφοδοσίας. Πλεονέκτημα θεωρείται επίσης και η χαμηλή τιμή τάσης offset στα 2mV. Επιπρόσθετα, ο LM358 εξαλείφει την ανάγκη για διπλή τροφοδοσία και είναι συμβατός σε λειτουργία (τροφοδοσία) μέσω μπαταρίας, σε ενδεχόμενη μελλοντική βελτίωση του αισθητήρα.

Λειτουργία διόδου 1N4148:

Ο ρόλος της διόδου στο κύκλωμα αναλύθηκε παραπάνω. Η διόδος 1N4148 επιλέχθηκε για το εξαιρετικά γρήγορο switching της, καθώς και για την τιμή της V_F που διαθέτει (1V maximum).

Λειτουργία αντίστασης φορτίου R_{LOAD} :

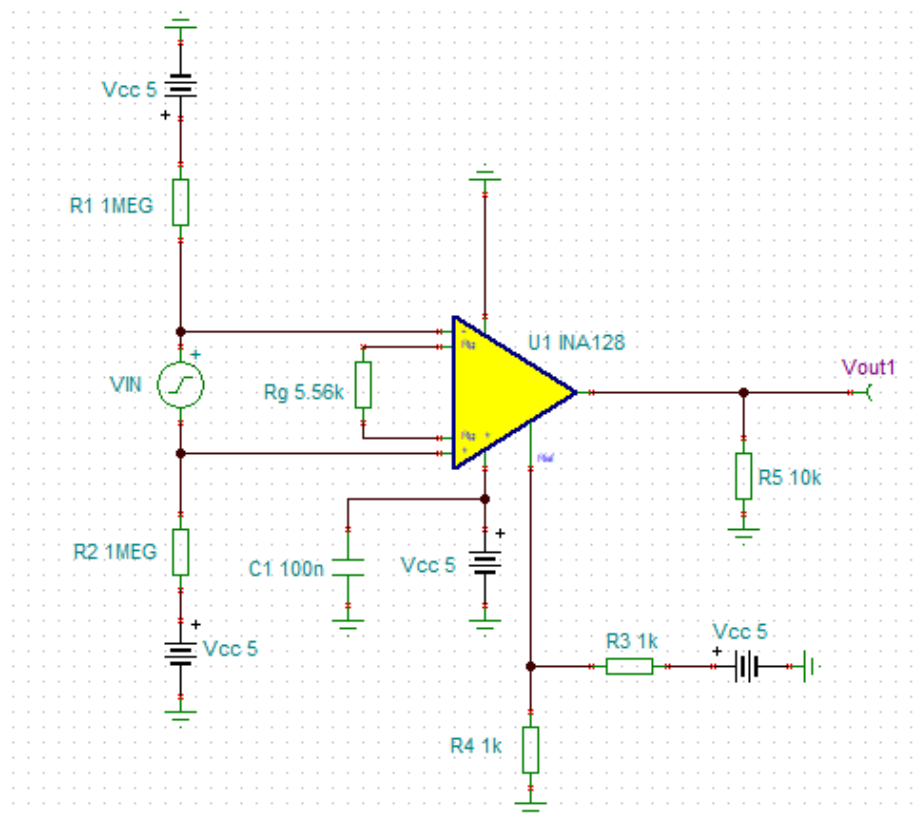
Εκτός από τη λειτουργία της αντίστασης φορτίου που αναφέρθηκε προηγουμένως, πρέπει να λάβουμε υπόψιν ότι η αντίσταση αυτή είναι αναπόσπαστο κομμάτι του κυκλώματος. Δεν μπορούμε να συνδέσουμε την έξοδο της superdiode απευθείας σε μια θύρα υψηλής σύνθετης αντίστασης, επειδή όταν η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη, η έξοδος του ενισχυτή θα βρίσκεται ουσιαστικά σε κατάσταση floating, γεγονός ανεπιθύμητο.

4.3.3 Προσομοίωση κυκλώματος λήψης

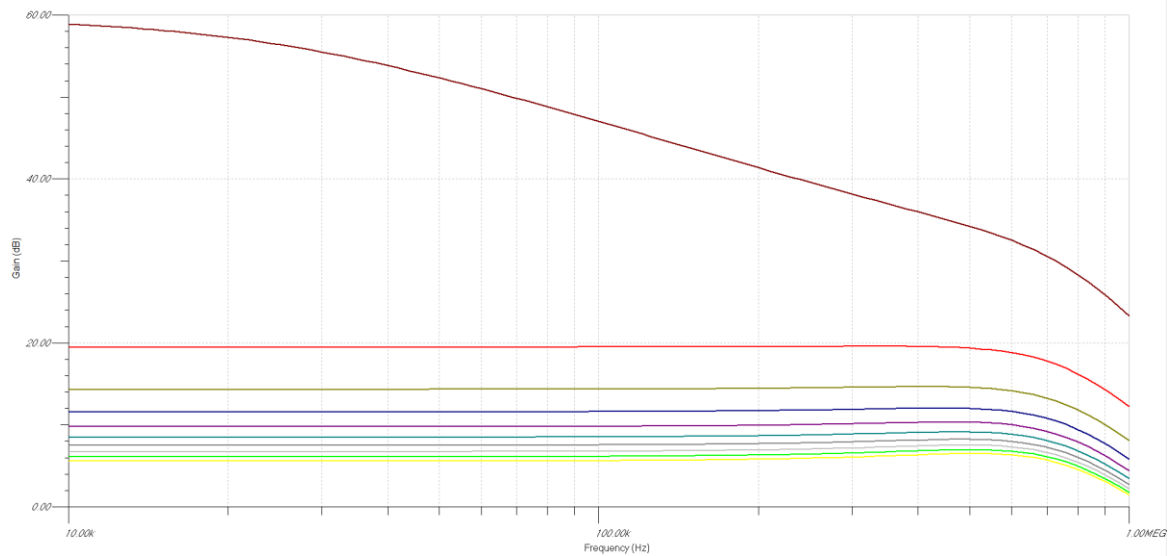
Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση και των δύο σταδίων στο πρόγραμμα TINA-TI της Texas Instruments ώστε να εμφανιστεί γραφικά η απόκριση του κάθε κυκλώματος και να γίνει μια εκτίμηση των αποτελεσμάτων που θα παρατηρήσουμε στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας την πειραματική διάταξη του αισθητήρα.

4.3.3.1 Προσομοίωση πρώτου σταδίου (Ενίσχυση)

Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκε ανάλυση της απόκρισης στο πεδίο της συχνότητας (AC Sweep) για διάφορες τιμές της αντίστασης R_G (10 περιπτώσεις, με την R_G να κυμαίνεται από 50Ω έως $50k\Omega$) και επομένως διαφορετικές τιμές κέρδους του ενισχυτή. Η AC Sweep προσομοίωση φαίνεται στο σχήμα 4.3.3.1.2.



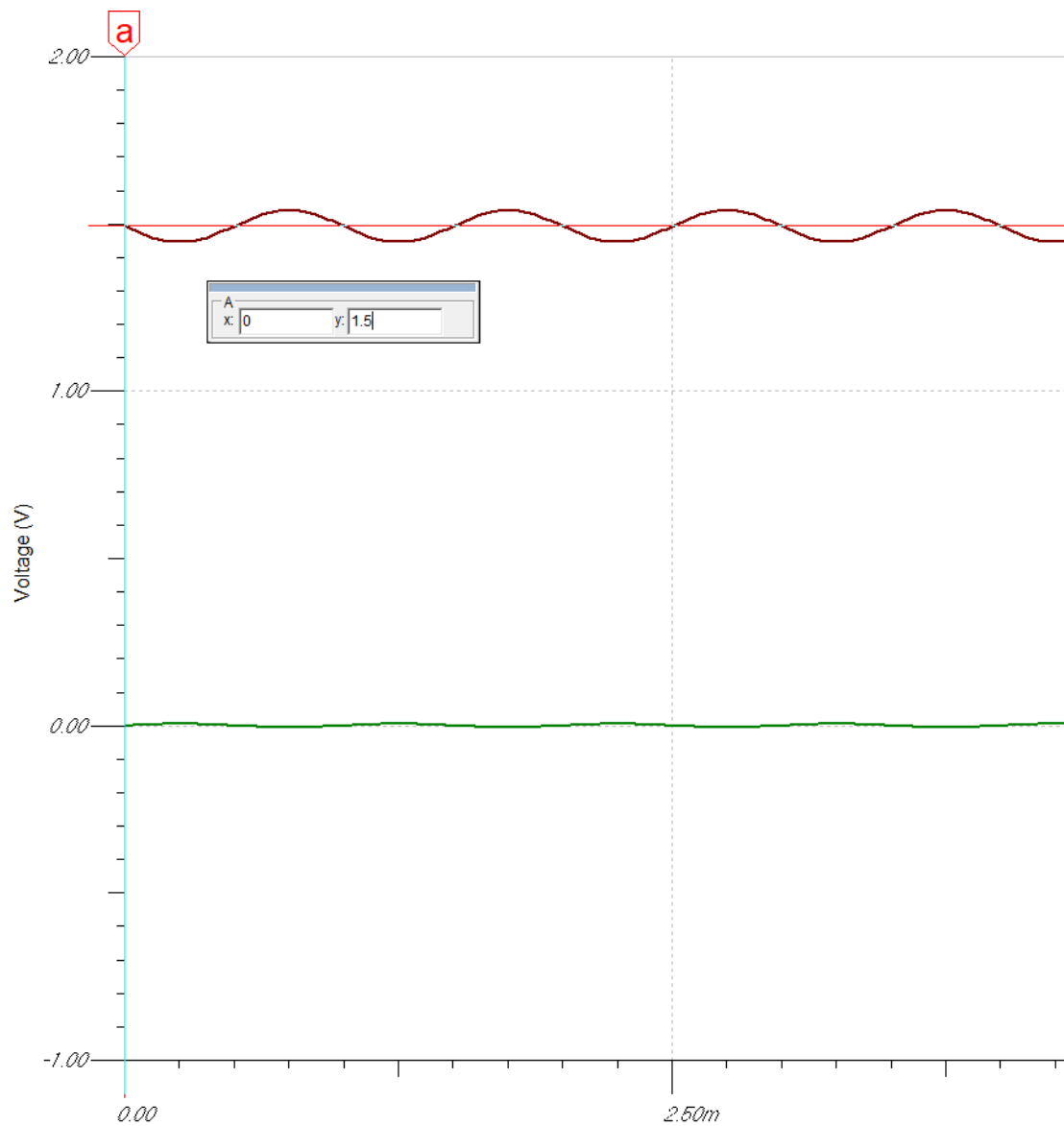
Σχήμα 4.3.3.1.1 Κυκλωματική διάταξη 1^{ου} σταδίου κυκλώματος λήψης.



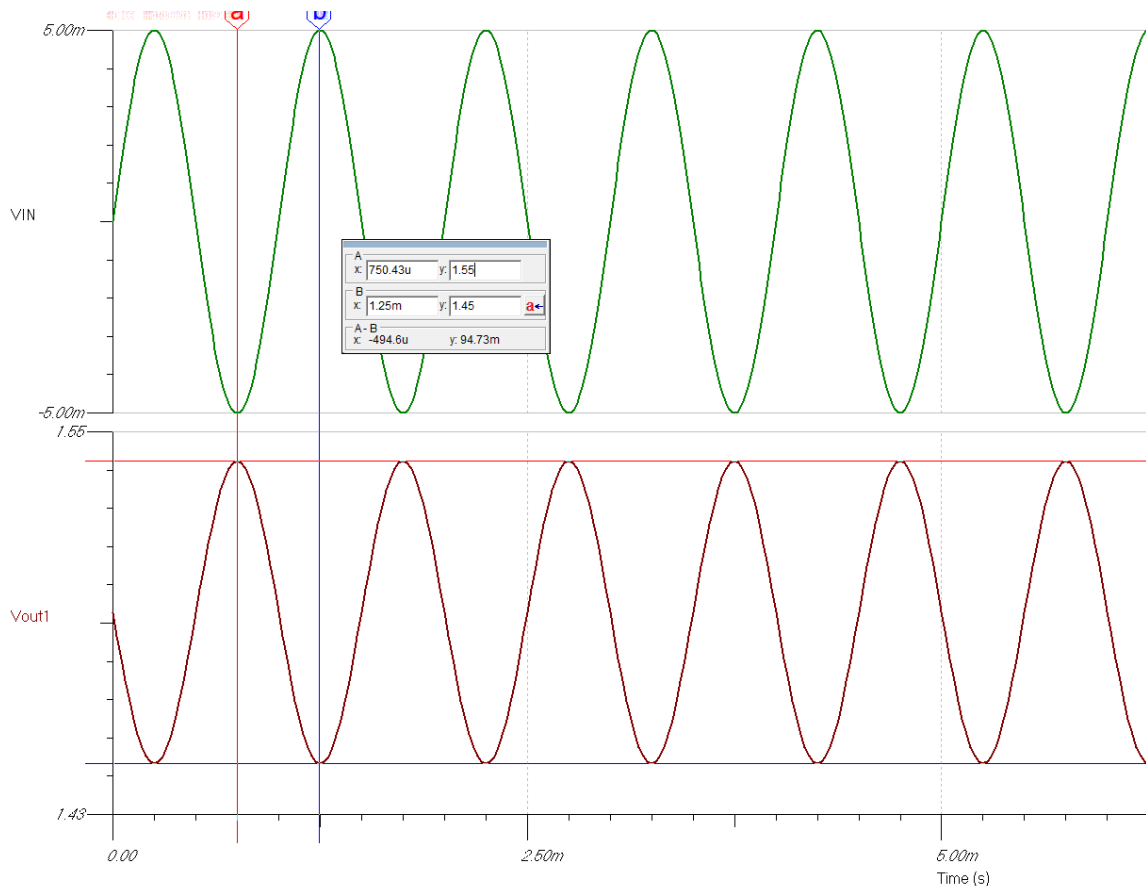
Σχήμα 4.3.3.1.2 AC Sweep προσομοίωση του πρώτου σταδίου.

Προτιμήσαμε την κόκκινη επιλεγμένη καμπύλη του σχήματος 4.3.3.1.2 με κέρδος $G \approx 20$. Η τιμή της αντίστασης R_G σε αυτή την περίπτωση είναι περίπου $5,56k\Omega$, οπότε στην υλοποίηση του κυκλώματος σε breadboard χρησιμοποιήσαμε την τιμή αυτή.

Στο δεύτερο στάδιο της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε ανάλυση της απόκρισης στο πεδίο του χρόνου (transient analysis) για να παρασταθεί γραφικά η ενίσχυση του INA128. Επειδή γνωρίζουμε ότι το σήμα που λαμβάνει το πηνίο λήψης είναι της τάξης των mV, ως σήμα εισόδου στην προσομοίωση χρησιμοποιήσαμε ένα ημιτονοειδές σήμα πλάτους 5mV (αρκετά μικρό για να σιγουρευτούμε ότι το κύκλωμα ενίσχυσης θα μπορέσει να το επεξεργαστεί και τελικά να το ενισχύσει) και συχνότητας 1kHz.



Σχήμα 4.3.3.1.3 Προσομοίωση transient του πρώτου σταδίου με προσθήκη DC offset 1,5V στο σήμα εισόδου (πλάτους 5mV).



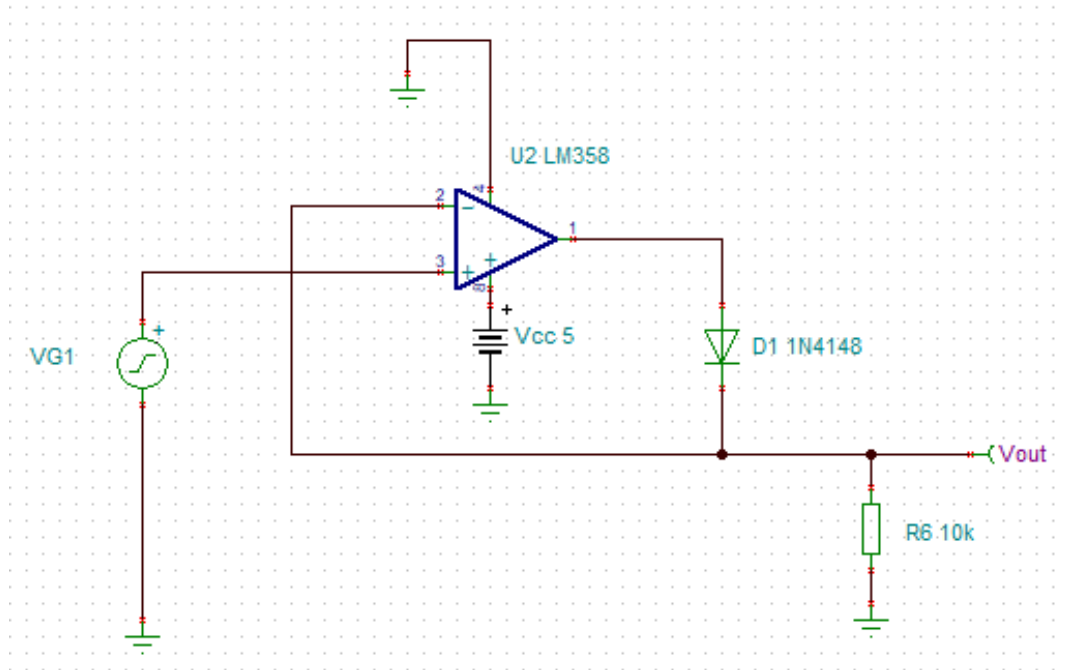
Σχήμα 4.3.3.1.4 Ενίσχυση σήματος εισόδου με κέρδος $G=20$.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρατηρούμε ότι το πρώτο στάδιο του κυκλώματος λήψης ενισχύει το σήμα με κέρδος $G=20$ (πλάτος σήματος εισόδου 5mV- πλάτος σήματος εξόδου 100mV) και ταυτόχρονα προσθέτει DC offset στο σήμα μας (περίπου 1,5V). Η μετατόπιση του σήματος αυτή είναι επιθυμητή καθώς με αυτόν τον τρόπο τιμές αρνητικής τάσης παύουν να υπάρχουν. Οποιαδήποτε τιμή τάσης παραμένει κάτω από το μηδέν ακόμα και μετά τη μετατόπιση του σήματος, θα εξαλειφθεί στο επόμενο στάδιο της ανόρθωσης.

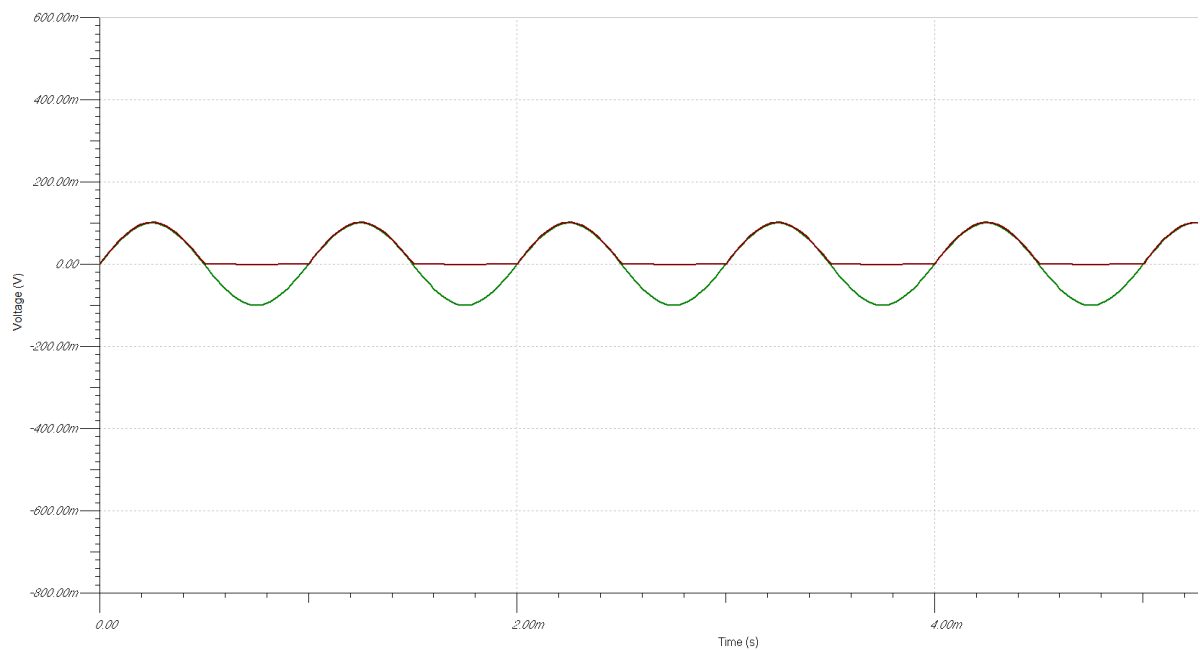
4.3.3.2 Προσομοίωση δεύτερου σταδίου (Ανόρθωση)

Για την προσομοίωση του δεύτερου σταδίου της superdiode πραγματοποιήθηκε transient ανάλυση με είσοδο ημιτονοειδή παλμό με πλάτος 100mV (όπως θα έρθει δηλαδή από τον INA) και συχνότητας 1kHz. Στην είσοδο της superdiode δεν προστέθηκε το DC offset που οφείλεται στον INA καθώς τότε, η λειτουργία της καθίσταται άσκοπη. Η αναγκαιότητα της superdiode διαπιστώθηκε πειραματικά καθώς υπήρχαν spikes (υψηλές κορυφές αρνητικού δυναμικού) που η μετατόπιση που προσέφερε ο INA δε μπορούσε να τις μετατρέψει σε θετικές. Αυτό κατορθώνει με τη λειτουργία του το δεύτερο στάδιο του κυκλώματος λήψης.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3.3.2.2 η superdiode επιτελεί ακριβώς τη λειτουργία που αναλύθηκε στην παράγραφο 4.3.2.2. Όταν $V_{IN} > 0$, τότε $V_{OUT} = V_{IN}$ και όταν $V_{IN} < 0$, τότε $V_{OUT} = 0$.



Σχήμα 4.3.3.2.1 Κυκλωματική διάταξη 2^{ου} σταδίου κυκλώματος λήψης.



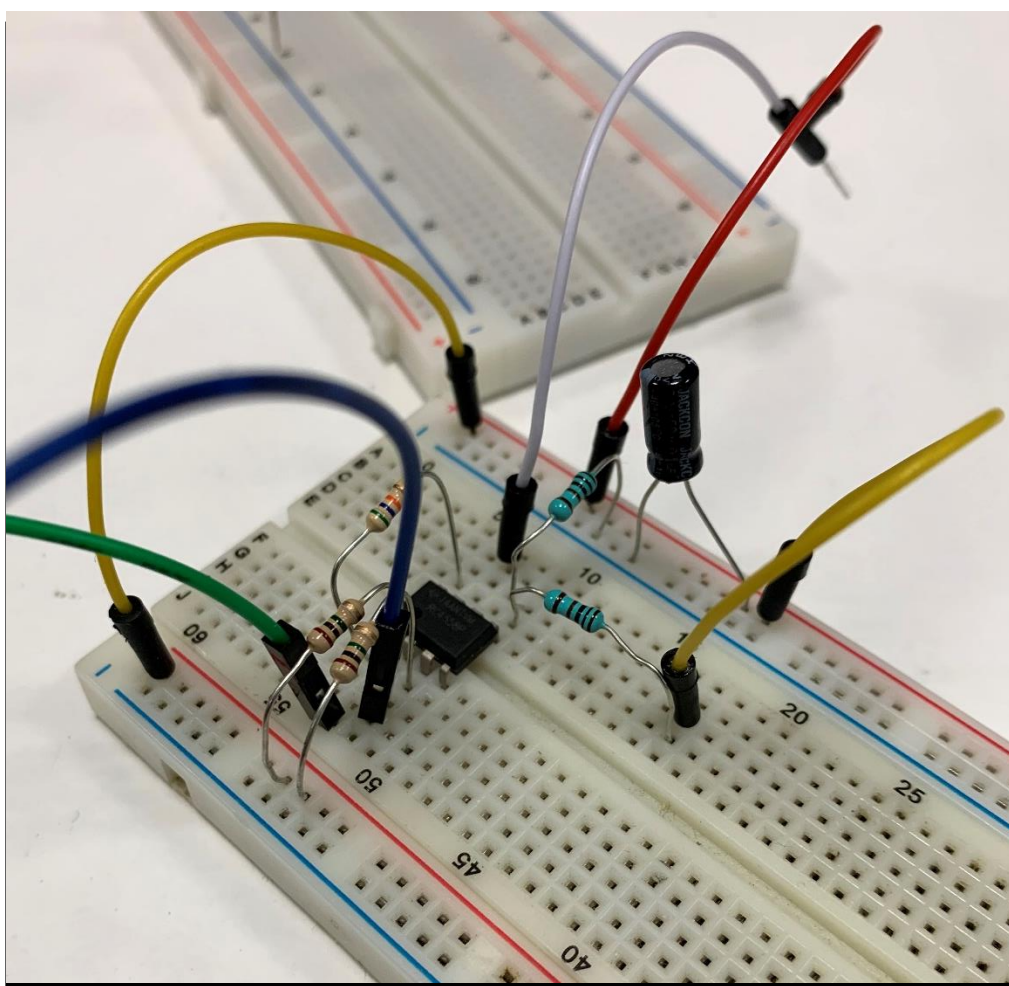
Σχήμα 4.3.3.2.2 Προσομοίωση transient του δεύτερου σταδίου (superdiode).

Οι παραπάνω προσομοιώσεις, τόσο του ενισχυτικού όσο και του ανορθωτικού σταδίου, προσφέρουν μια ενδεικτική εικόνα της λειτουργίας του κυκλώματος λήψης. Προφανώς, στην πειραματική διαδικασία τα αποτελέσματα δεν είναι ακριβώς τα ίδια

και για το λόγο αυτό ενδεχομένως πραγματοποιήθηκαν κάποιες αλλαγές στις τιμές των αντιστάσεων, πυκνωτών η άλλων εξαρτημάτων. Για παράδειγμα αρχικά υπήρχε η πεποίθηση ότι μόνο το ενισχυτικό στάδιο του INA θα αρκούσε, αλλά διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη του δεύτερου σταδίου προσφέρει ακόμη καλύτερα αποτελέσματα.

4.3.4 Απόκριση κυκλώματος λήψης

Το κύκλωμα λήψης υλοποιήθηκε αρχικά σε πλακέτα δοκιμών (breadboard) ώστε να εξακριβωθεί η σωστή λειτουργία του, πριν προχωρήσουμε στο επόμενο στάδιο της κόλλησης της πλακέτας.



Σχήμα 4.3.4.1 Κατασκευή πρώτου σταδίου κυκλώματος λήψης σε πλακέτα δοκιμών.

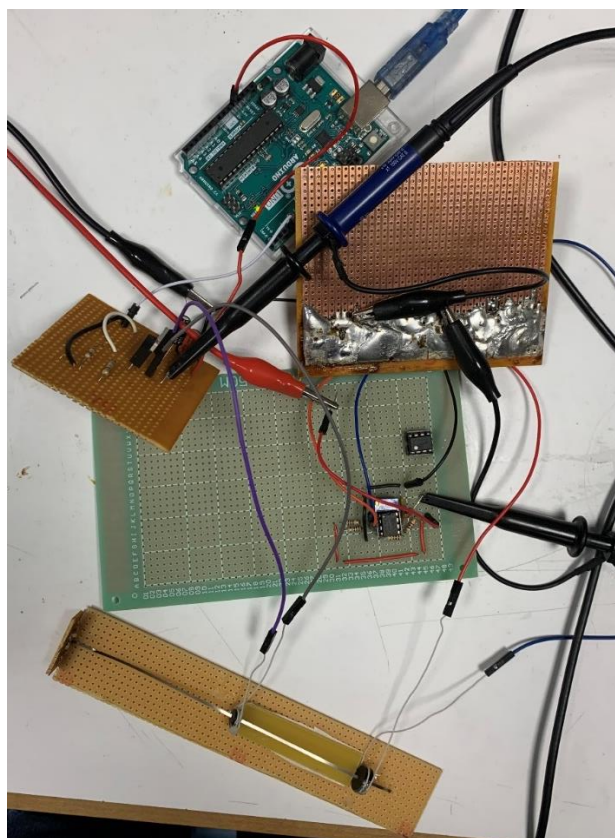
Το σήμα τροφοδοτήθηκε στο κύκλωμα από τη θέση του πηνίου λήψης και παρατηρήθηκαν στον παλμογράφο οι έξοδοι του κάθε σταδίου. Για σήμα εισόδου χρησιμοποιήθηκε ένας ημιτονικός παλμός πλάτους 1V και συχνότητας 1kHz, ο οποίος παρεχόταν στο κύκλωμα μέσω της γεννήτριας του εργαστηρίου. Η μεταβλητή

αντίσταση R_G στην πλακέτα δοκιμών τέθηκε στα $R_G=5,56k\Omega$. Από τις κυματομορφές που παρατηρήσαμε φανερώθηκε η ορθή λειτουργία του κυκλώματος και για το λόγο αυτό προχωρήσαμε σε κόλληση του κυκλώματος σε through-hole πλακέτα. Οι κυματομορφές που παρατηρήθηκαν σε αυτό το στάδιο ήταν παρόμοιες με αυτές που θα παρατεθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Το δεύτερο στάδιο της superdiode δε δοκιμάστηκε σε πλακέτα δοκιμών, καθώς όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η αναγκαιότητά του διαπιστώθηκε αργότερα στο πειραματικό μέρος της εργασίας, οπότε και κολλήθηκε κατευθείαν σε through-hole πλακέτα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο- ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΤΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ ΔΙΑΤΑΞΗ

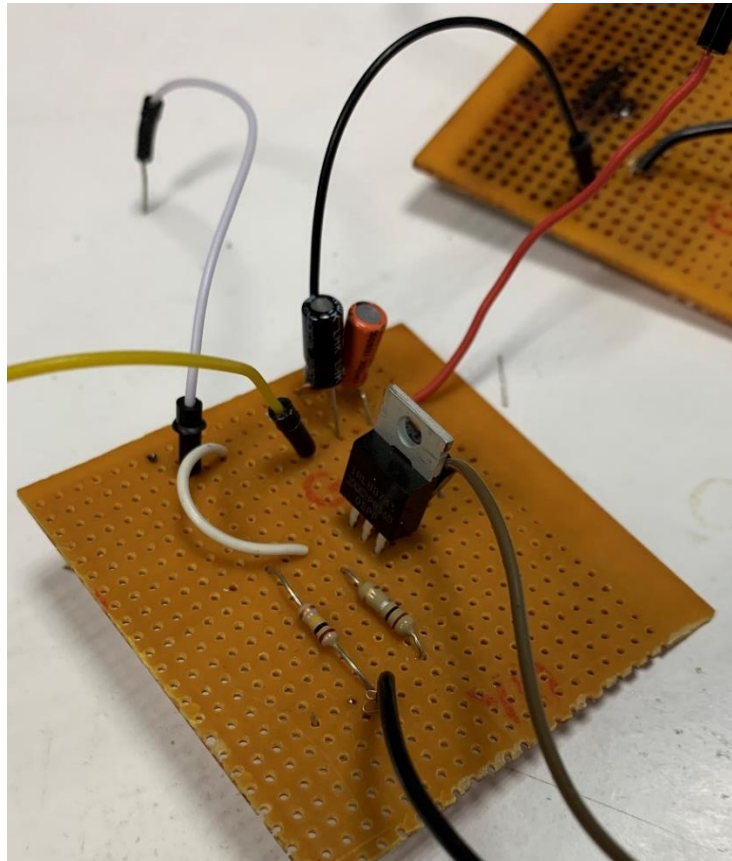
Σε προηγούμενα κεφάλαια παρατέθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο της τεχνικής των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης (MDL) και αναλύθηκαν και επαληθεύτηκαν μέσω προσομοιώσεων οι λειτουργίες των κυκλωμάτων διέγερσης και λήψης. Για την εξακρίβωση όμως των αποτελεσμάτων του αισθητήρα καθώς και για την επαλήθευση της λειτουργίας του, είναι απαραίτητο να κατασκευαστεί μια συνολική διάταξη, όπου όλα τα μέρη της (κύκλωμα διέγερσης-διάταξη MDL-κύκλωμα λήψης) λειτουργούν ταυτόχρονα. Αυτό που θα επιβεβαίωνε την ορθή λειτουργία του αισθητήρα θα ήταν η παρατήρηση κάποιας μεταβολής στο σήμα που λαμβάνουμε στο τέλος του ανορθωτικού σταδίου του κυκλώματος λήψης, όταν πάνω στη γραμμή MDL τοποθετείται το υλικό προς μελέτη, δηλαδή στα πλαίσια αυτής της εργασίας, το αίμα. Για το λόγο αυτό υλοποιήθηκε στο εργαστήριο μια συνολική διάταξη, με κόλληση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων σε through-hole πλακέτα. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρατεθούν τα πειραματικά αποτελέσματα δηλαδή οι κυματομορφές που παρατηρήθηκαν αλλά και πως επηρεάζονταν αυτές με την εισαγωγή κάποιου νέου παράγοντα στη διάταξη.



Σχήμα 5.1 Η συνολική διάταξη στην οποία πραγματοποιήθηκε η διεξαγωγή των πειραμάτων.

5.1 Αποτελέσματα κυκλώματος διέγερσης

Για την ορθή εξακρίβωση των αποτελεσμάτων της συνολικής διάταξης, έγινε μελέτη του κάθε σταδίου ξεχωριστά, ξεκινώντας φυσικά από το κύκλωμα διέγερσης.



Σχήμα 5.1.1 Κύκλωμα διέγερσης σε through-hole πλακέτα.

Η τροφοδοσία του κυκλώματος διέγερσης πραγματοποιήθηκε μέσω μιας Arduino UNO πλακέτας που φαίνεται στο σχήμα 5.1.2.



Σχήμα 5.1.2 Arduino UNO πλακέτα, υπεύθυνη για την τροφοδοσία του κυκλώματος.

Η πλακέτα αυτή παρέιχε τη DC τροφοδοσία (5V) στο κύκλωμα διέγερσης καθώς και τον παλμό εισόδου (πλάτους 5V και εύρους 1μs) ο οποίος υλοποιήθηκε μέσω του παρακάτω κώδικα (σχήμα 5.3).

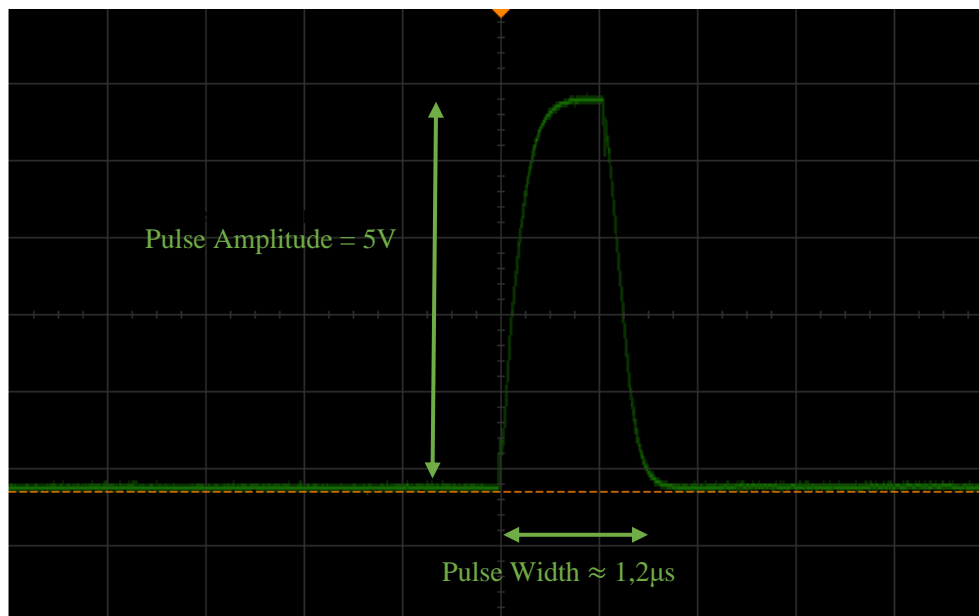
```
int pin = 2;
int val = 1;
int per = 1000;

void setup()
{
  pinMode(pin, OUTPUT);
  cli();
}

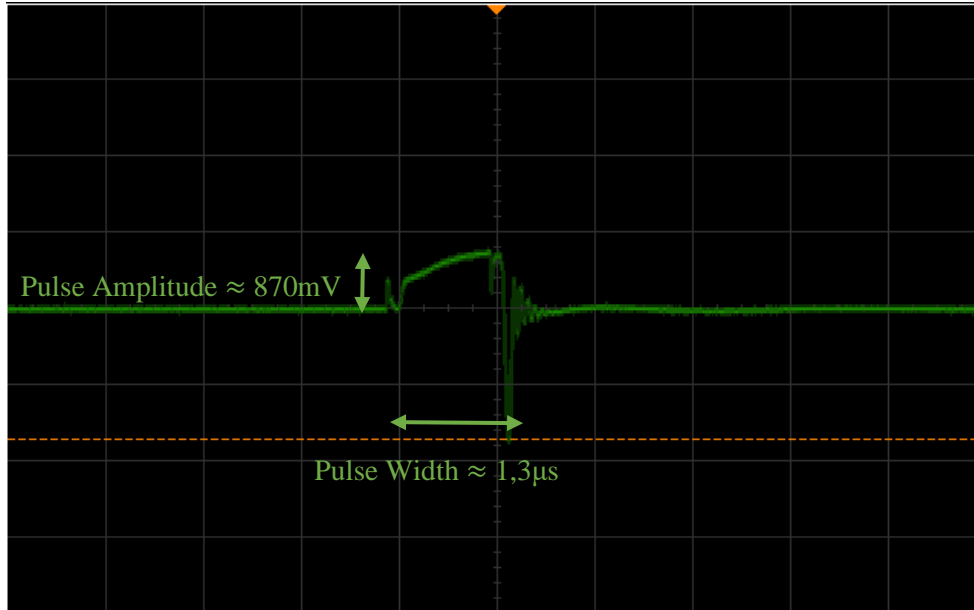
void loop()
{
  PORTC |= B00010000;
  __asm__("nop\n\t" "nop\n\t" "nop\n\t" "nop\n\t" "nop\n\t" "nop\n\t"
\t "nop\n\t" "nop\n\t" "nop\n\t" "nop\n\t" "nop\n\t" "nop\n\t" "nop\n\t" "nop\n\t"
\n\t "nop\n\t" "nop\n\t");
  PORTC &= B11101111;
  delayMicroseconds(per - val);
}
```

Σχήμα 5.1.3 Κώδικας υλοποίησης παλμικού σήματος εισόδου.

Συνδέοντας το πηνίο διέγερσης L_e στο άκρο D (υποδοχή) του mosfet και στην τροφοδοσία, παρατηρήθηκαν οι παρακάτω κυματομορφές.



Σχήμα 5.1.4 Απεικόνιση σήματος στην πύλη (Gate) του mosfet.

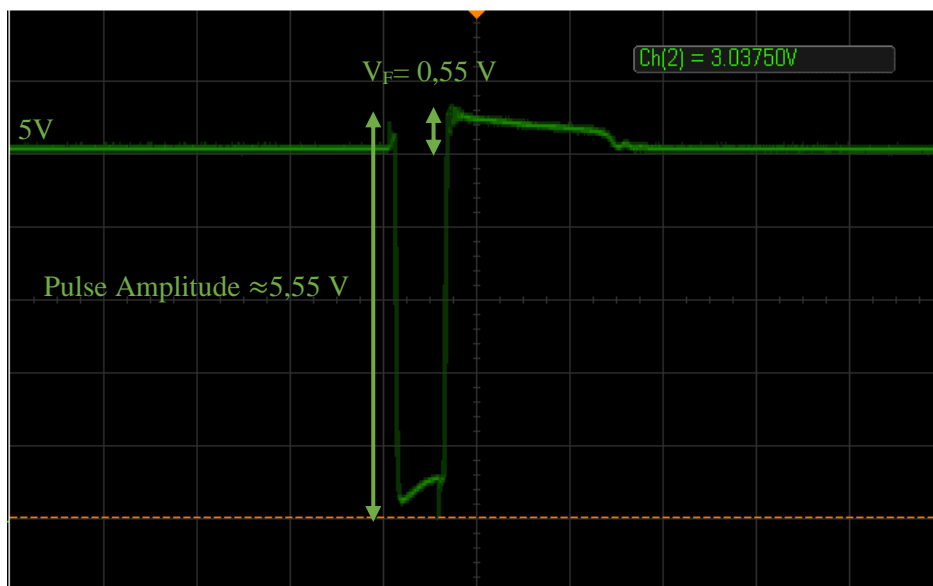


Σχήμα 5.1.5 Απεικόνιση σήματος στην πηγή (Source) του mosfet.

Παρατηρούμε από την κυματομορφή του σχήματος 5.1.5, ότι το πλάτος του παλμού στην πηγή του mosfet είναι περίπου ίσο με το πλάτος του αποτελέσματος της προσομοίωσης του κυκλώματος διέγερσης (ενότητα 4.2.3). Χρησιμοποιώντας την τιμή του πλάτους μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε το ρεύμα I_s που θα διαρρέει το πηνίο διέγερσης:

$$I_s = \frac{V_{R_1}}{R_1} \approx \frac{870mV}{0,1\Omega} \approx 8,7A$$

Η τιμή του ρεύματος είναι υψηλή και μάλιστα αρκετά μεγάλη ώστε να δημιουργηθεί ισχυρό μαγνητικό πεδίο και άρα καλύτερη μετάδοση του παλμού στο MDL.



Σχήμα 5.1.6 Απεικόνιση σήματος στην υποδοχή (Drain) του mosfet.

Το σήμα του σχήματος 5.1.6 παριστάνει την τάση στο άκρο S του mosfet σε σχέση με τη γείωση και άρα δε φανερώνει την τάση στα άκρα του πηνίου διέγερσης. Η τάση αυτή υπολογίζεται εύκολα αν αφαιρέσουμε το σήμα αυτό από τα 5V της DC τροφοδοσίας. Δηλαδή:

$$V_{L_s} = V_{DC} - V_s$$

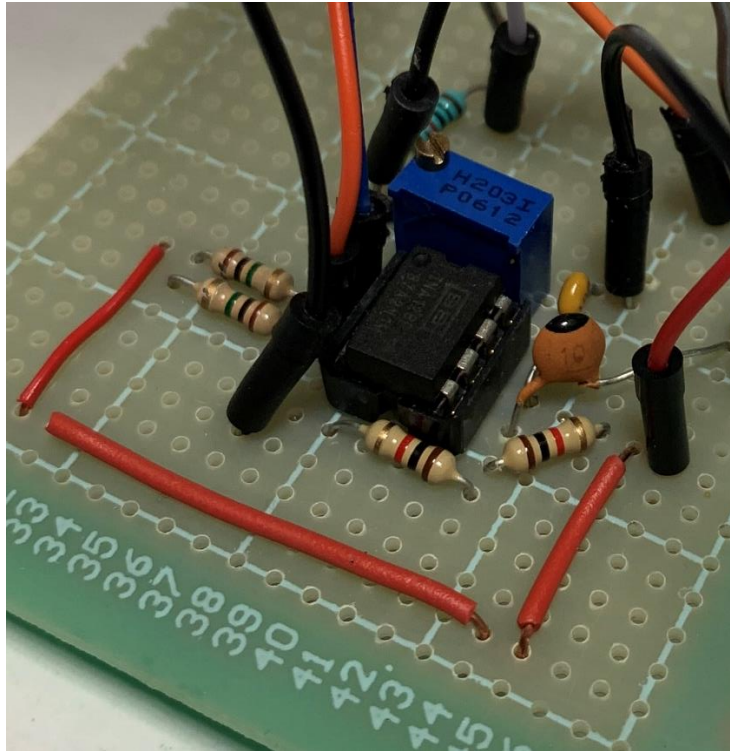
Η μικρή ανύψωση στο τέλος του παλμού οφείλεται στο V_F (forward voltage) της διόδου 1N5818 που χρησιμοποιήθηκε. Για αυτό το λόγο χρειαζόμασταν μικρή τιμή της V_F , ώστε να ελαχιστοποιήσουμε όσο γίνεται το spike αυτό.

5.2 Αποτελέσματα κυκλώματος λήψης

Η πειραματική επαλήθευση του κυκλώματος λήψης πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Αρχικά ελέγχοντας το 1^ο στάδιο της ενίσχυσης και αποθορυβοποίησης με τον INA128 και στη συνέχεια με την επαλήθευση της λειτουργίας του κυκλώματος superdiode.

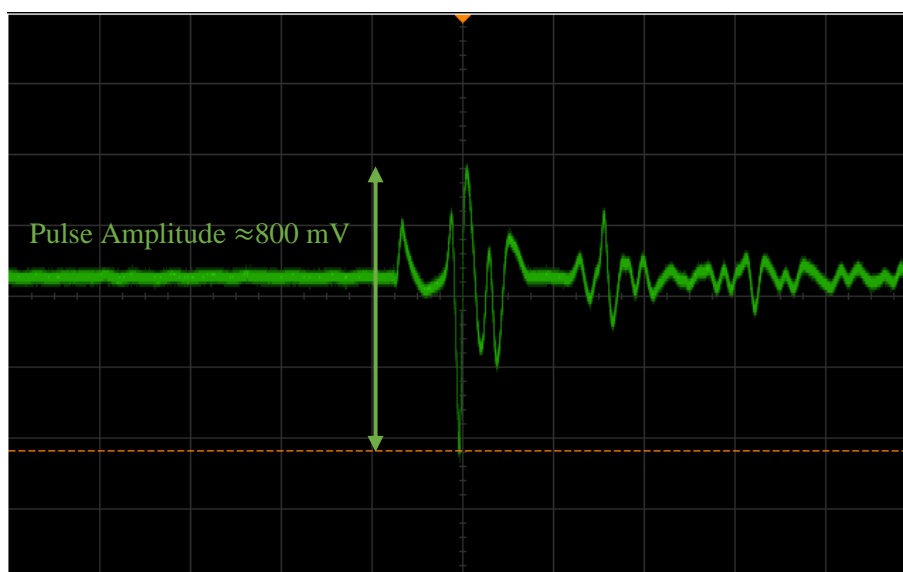
5.2.1 Αποτελέσματα πρώτου σταδίου (Ενίσχυση)

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, στη θέση της R_G του κυκλώματος ενίσχυσης τοποθετήθηκε ένα ποτενσιόμετρο, ώστε να μπορούμε να διαμορφώνουμε το κέρδος G του κυκλώματος σύμφωνα με τις απαιτήσεις μας. Επίσης, διαπιστώθηκε πειραματικά ότι ένας πυκνωτής 1nF στην έξοδο του κυκλώματος προσέφερε καλύτερα αποτελέσματα.



Σχήμα 5.2.1.1 Πρώτο στάδιο κυκλώματος λήψης σε through-hole πλακέτα.

Η τροφοδοσία του κυκλώματος λήψης έγινε μέσω του τροφοδοτικού του εργαστηρίου (στα 5V). Θα μπορούσε φυσικά να γίνει μέσω της πλακέτας Arduino όπως στο διέγερσης, αλλά δεν υπήρχε δεύτερο pin του Arduino για τροφοδοσία 5V, οπότε δε γινόταν να παρέχουμε και στα δύο κυκλώματα ταυτόχρονα 5V. Συνδέοντας τα άκρα του πηνίου λήψης στα pin 2-3 του INA128, παρατηρήσαμε τις παρακάτω κυματομορφές.



Σχήμα 5.2.1.2 Απεικόνιση σήματος στην έξοδο του INA128.

Παρατηρούμε ότι το σήμα όντως ενισχύεται με κέρδος $G \approx 20$ (Πλάτος αρχικού σήματος περίπου 40mV, πλάτος σήματος εξόδου INA περίπου 800mV). Αλλάζοντας την τιμή του ποτενσιόμετρου, μπορούμε να αλλάξουμε και την τιμή του κέρδους. Ωστόσο μειώνοντας τη τιμή του πολύ παρατηρήσαμε ότι το σήμα χαλούσε και δεν ήταν ορατές οι ανακλάσεις του παλμικού σήματος MDL που μας ενδιαφέρουν αλλά ούτε και το αρχικό ανιχνεύσιμο σήμα που φτάνει πρώτο στο πηνίο λήψης. Αντίθετα με μεγαλύτερη τιμή του ποτενσιόμετρου, το κέρδος δεν ήταν αρκετά μεγάλο. Επιπρόσθετα, σε σύγκριση με το σήμα του σχήματος 5.2.1.2, το σήμα είναι σαφώς αποθρομβοποιημένο.

Λόγω της μαγνητικής φύσης του αισθητήρα, το λαμβανόμενο σήμα επηρεάζεται από εξωτερικά μαγνητικά πεδία. Για να δούμε την απόκριση του σήματος σε εξωτερικές μαγνητικές παρεμβολές, φέραμε κοντά στη διάταξη MDL και στα πηνία ένα μαγνήτη. Αντιληφθήκαμε με αυτόν τον τρόπο ότι το σήμα είναι πολύ ευαίσθητο σε τέτοιου είδους παρεμβολές και μεταβάλλεται έντονα (όχι πάντα με καλό τρόπο). Η μεταβολή αυτή του σήματος φαίνεται στο σχήμα 5.2.1.4.



Σχήμα 5.2.1.3 Μεταβολή σήματος εξόδου INA128 με εισαγωγή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (μαγνήτης) στη διάταξη MDL.

Παρατηρήθηκε ωστόσο ότι σε συγκεκριμένα σημεία της διάταξης MDL η εισαγωγή του μαγνήτη βελτίωνε σε ένα βαθμό το σήμα μας. Το γεγονός αυτό θα αναλυθεί στη συνέχεια του κεφαλαίου. Τέλος, επιβάλλοντας δύναμη στο MDL στην περιοχή ανάμεσα από τα πηνία, παρατηρήθηκε αλλαγή στο πλάτος V_{pp} του σήματος, αφού με αυτόν τον τρόπο επηρεάζουμε τη μετάδοση του παλμικού σήματος κατά μήκος του MDL. Αυτή την αλλαγή στο πλάτος V_{pp} εκμεταλλεύεται ο αισθητήρας της εργασίας για τον προσδιορισμό της μέτρησης χρόνου πήξης του αίματος. Η μεταβολή αυτή στο

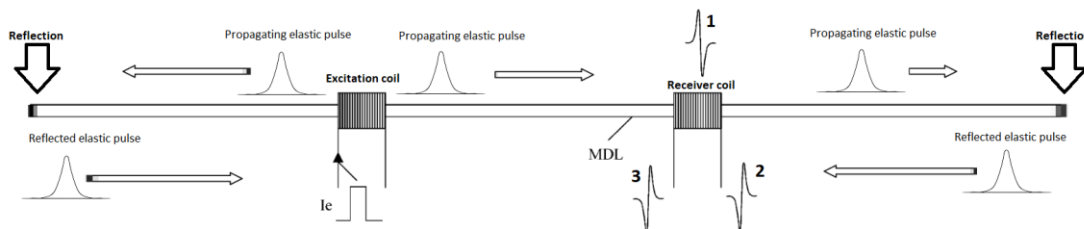
σήμα λόγω της δύναμης καθώς και η μεταβολή που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη, υποδεικνύουν ότι η διάταξη MDL λειτουργεί σωστά και αποτελεσματικά.

Ένας άλλος τρόπος εξακρίβωσης της ορθής λειτουργίας της διάταξης MDL είναι η καθυστέρηση (delay) του σήματος στην έξοδο του INA σε σχέση με τον αρχικό μας παλμό. Αν δεν υπάρχει αυτή η καθυστέρηση σημαίνει ότι δε διαδίδεται σωστά το παλμικό σήμα κατά μήκος του MDL. Η καθυστέρηση ανάμεσα στα δύο προαναφερθέντα σήματα φαίνεται στο σχήμα 5.2.1.5.



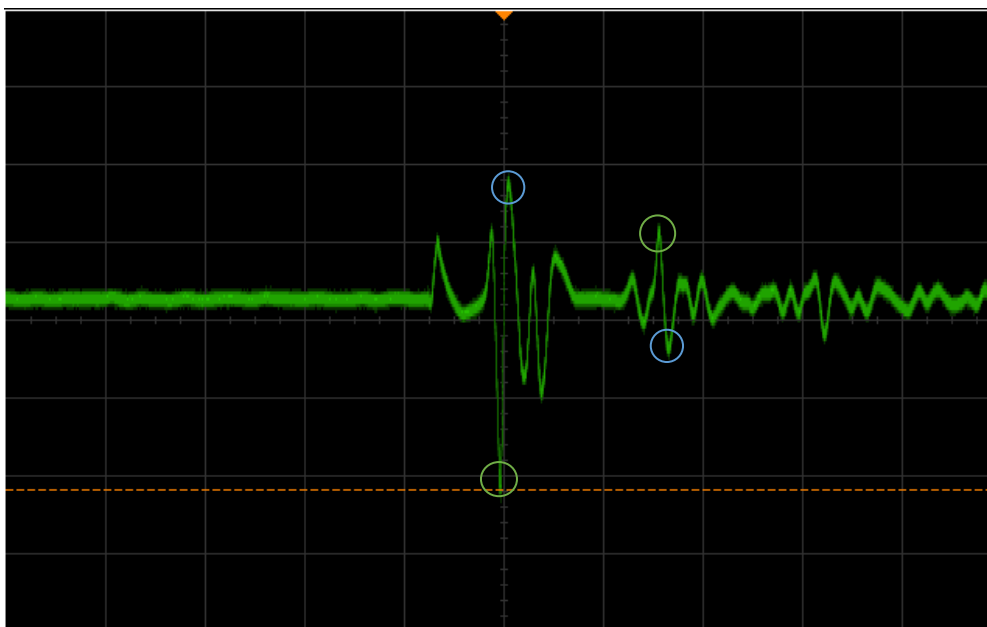
Σχήμα 5.2.1.4 Απεικόνιση καθυστέρησης του σήματος εξόδου του ενισχυτικού σταδίου σε σχέση με τον παλμό στο άκρο της πύλης του mosfet.

Τέλος, από το σήμα εξόδου του INA επιβεβαιώνουμε την ιδιότητα του MDL που αφορά τις ανακλάσεις του ελαστικού παλμού. Πιο 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.



Σχήμα 5.2.1.5 Γραφική απεικόνιση των ανακλάσεων του ελαστικού παλμού στα δύο άκρα της γραμμής MDL. Στο πηνίο λήψης φτάνει πρώτα ο παλμός 1 και στη συνέχεια οι ανακλώμενοι παλμοί 2 και 3.^[8]

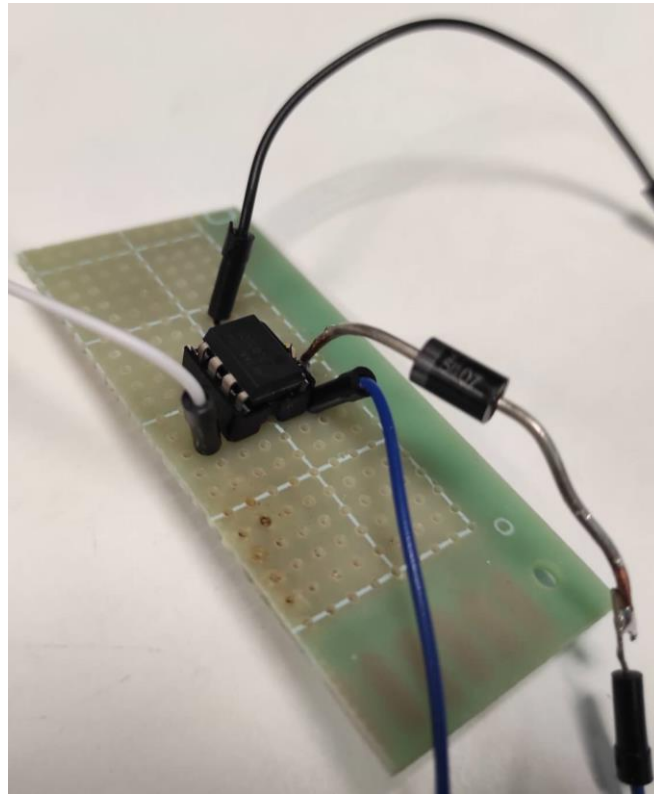
Στο σχήμα 5.2.1.7 φαίνεται ο αρχικός παλμός καθώς και η ανάκλαση από το άκρο της πλευράς του πηνίου λήψης. Οι υπόλοιπες ανακλάσεις δεν είναι ορατές ούτε και εύκολα διακριτές, καθώς τόσο λόγω της ανάκλασης αλλά και με τη διάδοση στη γραμμή, εξασθενείται σημαντικά το πλάτος του ανακλώμενου παλμού.



Σχήμα 5.2.1.6 Απεικόνιση του σήματος εξόδου του ενισχυτικού σταδίου, με επισήμανση της αναστροφής των κορυφών του ανακλώμενου παλμού.

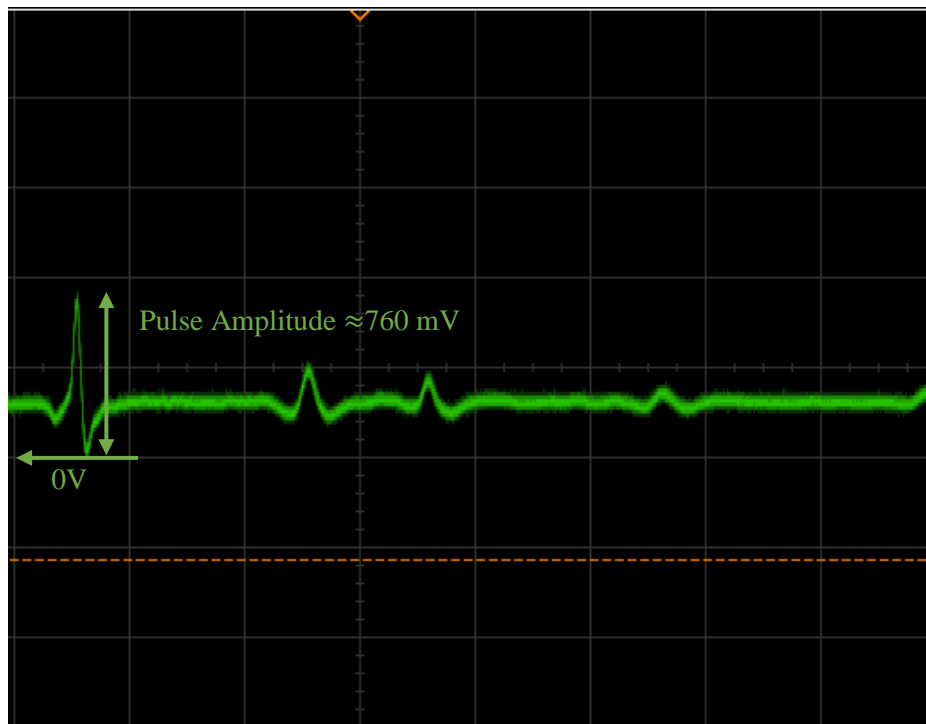
Συνοψίζοντας, το ενισχυτικό κομμάτι του κυκλώματος λήψης λειτουργεί ικανοποιητικά. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι παρόλο που προστέθηκε DC offset στο σήμα εισόδου, κάποιες κορυφές αρνητικού δυναμικού είναι αρκετά υψηλές και παραμένουν κάτω από τα 0V. Το γεγονός αυτό κρίνεται επικίνδυνο για τη λειτουργία μικροελεγκτή που ενδεχομένως επεξεργαστεί το σήμα. Για το λόγο αυτό, προστέθηκε το ανορθωτικό κύκλωμα της superdiode σε σειρά με το ενισχυτικό στάδιο, ώστε να αποκοπούν και οι τελευταίες αρνητικές κορυφές.

5.2.2 Αποτελέσματα δεύτερου σταδίου (Ανόρθωση)



Σχήμα 5.2.2.1 Δεύτερο στάδιο κυκλώματος λήψης superdiode σε through-hole πλακέτα.

Το σήμα που παρατηρήσαμε στην έξοδο του κυκλώματος superdiode φαίνεται παρακάτω (σχήμα 5.2.2.2).



Σχήμα 5.2.2.2 Απεικόνιση σήματος εξόδου ανορθωτικού σταδίου superdiode.

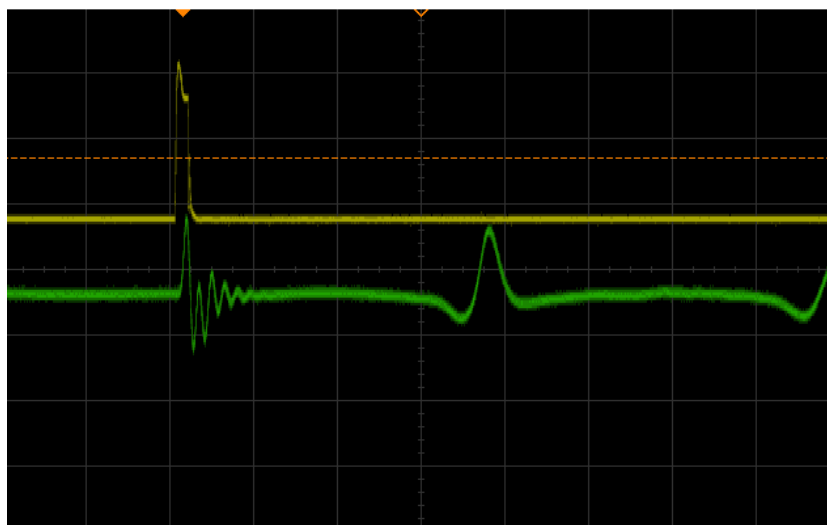
Παρατηρούμε ότι πλέον οι αρνητικές κορυφές των σημάτων έχουν αποκοπεί, με μια αμελητέα μείωση στο πλάτος των ημιτονοειδών παλμών και ανακλάσεων. Η μείωση αυτή δεν μας εμποδίζει να βγάλουμε ασφαλή συμπεράσματα στη συνέχεια που θα τοποθετηθεί το αίμα στη γραμμή MDL.

Όπως και το σήμα εξόδου του INA επηρεαζόταν από εξωτερικές μαγνητικές παρεμβολές, έτσι και το σήμα εξόδου του superdiode παρουσιάζει ανάλογη ευαισθησία.



Σχήμα 5.2.2.3 Μεταβολή σήματος εξόδου superdiode με εισαγωγή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (μαγνήτης) στη διάταξη MDL.

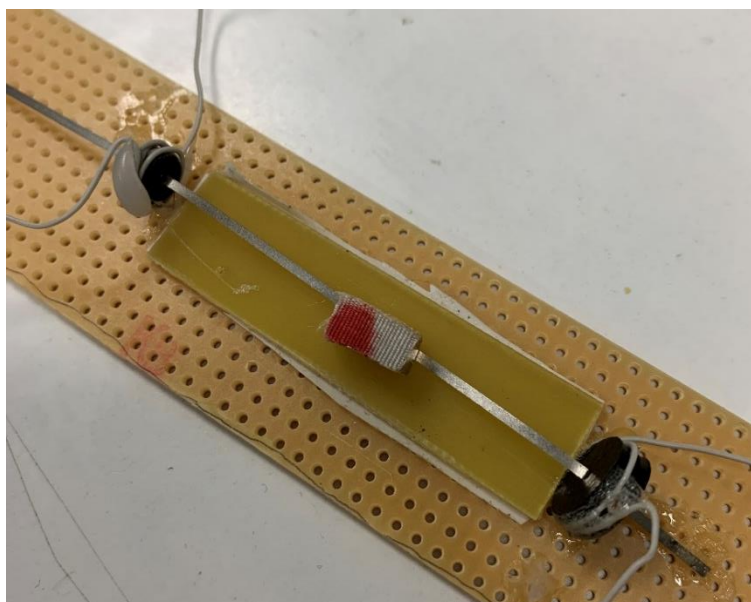
Τέλος, όμοια με την έξοδο του ενισχυτικού σταδίου, υπάρχει καθυστέρηση στην απόκριση του superdiode με το αρχικό σήμα εισόδου της διέγερσης (σχήμα 5.2.2.4)



Σχήμα 5.2.2.4 Απεικόνιση καθυστέρησης του σήματος εξόδου του ανορθωτικού σταδίου σε σχέση με τον παλμό στο άκρο της πύλης του mosfet.

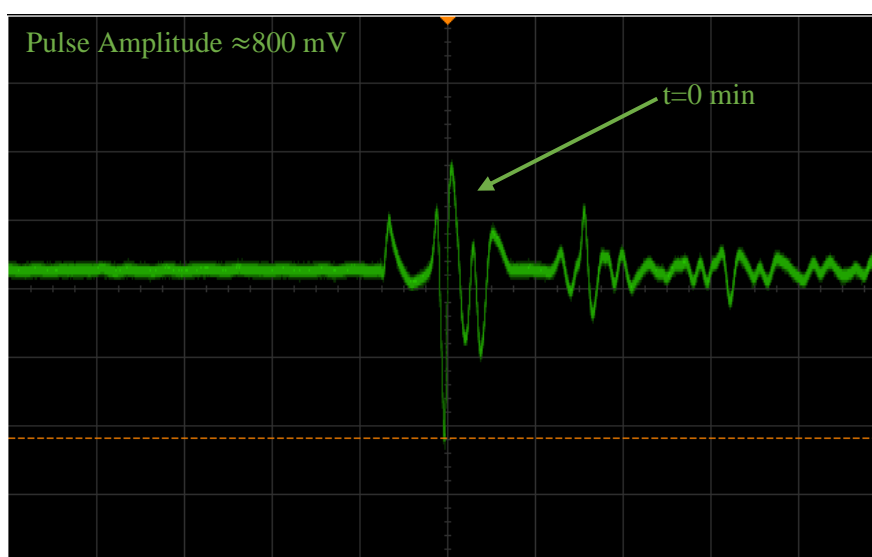
5.3 Αποτελέσματα μετά την τοποθέτηση αίματος στο MDL

Τελευταίο στάδιο για την εξακρίβωση στις σωστής λειτουργίας του αισθητήρα, είναι η τοποθέτηση αίματος στη γραμμή καθυστέρησης και η παρατήρηση των μεταβολών στο σήμα εξόδου.

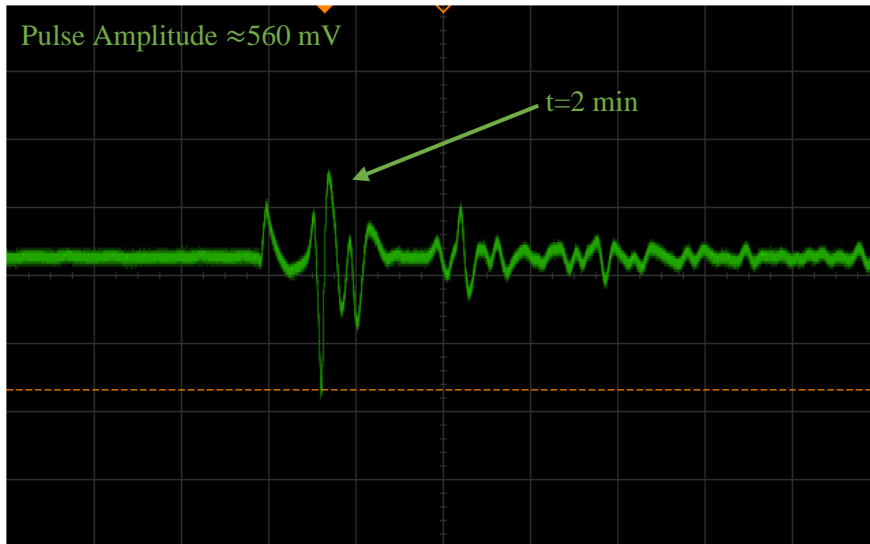


Σχήμα 5.3.1 Τοποθέτηση μίας σταγόνας αίματος στη γραμμή καθυστέρησης.

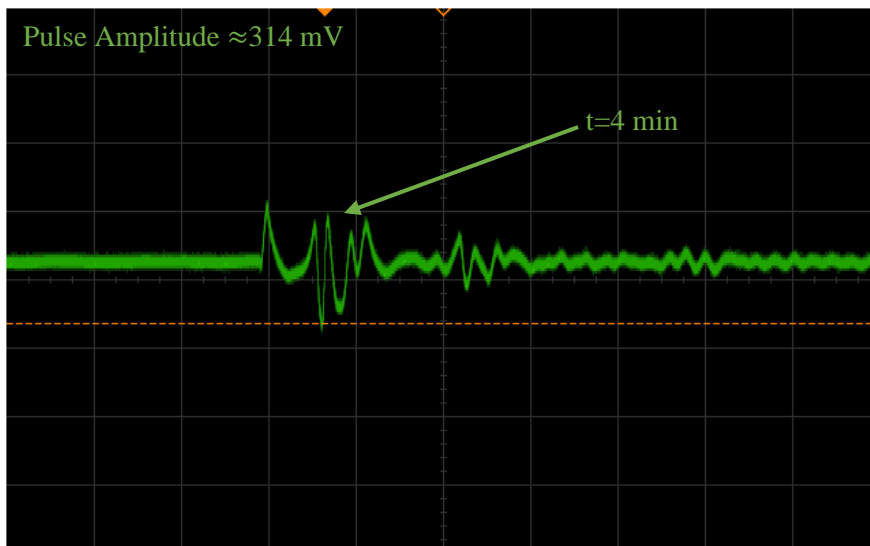
Αυτό που παρατηρήσαμε είναι ότι με την τοποθέτηση αίματος στο MDL και με την πάροδο του χρόνου το πλάτος V_{pp} του σήματος στην έξοδο του INA αλλά και στην έξοδο του κυκλώματος superdiode μειωνόταν συνεχώς, μέχρι που έφτανε μια τελική (minimum) τιμή. Η μείωση αυτή στο πλάτος (τόσο του ανιχνευόμενου από το πηνίο λήψης παλμού όσο και των ανακλάσεων) φαίνεται στα σχήματα 5.3.2-5.3.8.



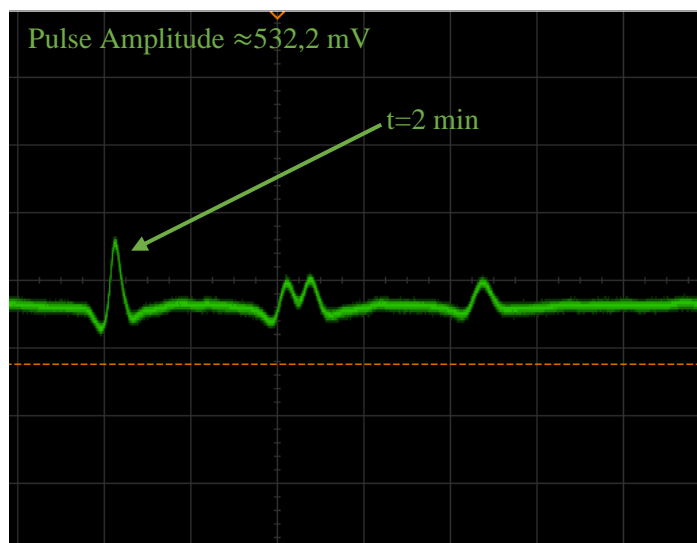
Σχήμα 5.3.2 Απεικόνιση αρχικού σήματος εξόδου INA.



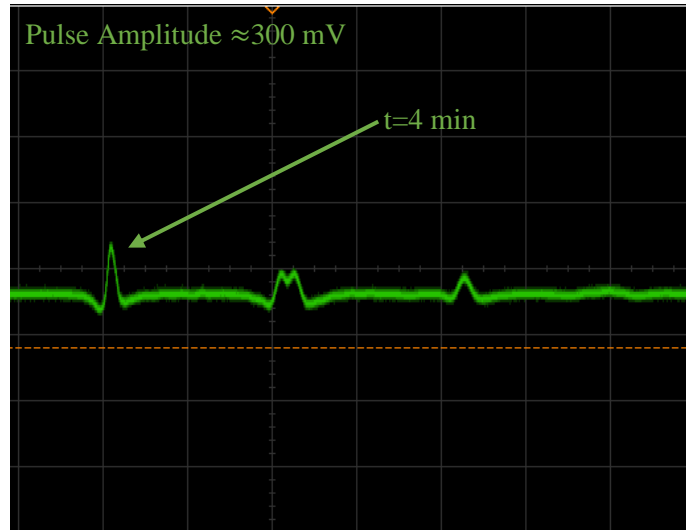
Σχήμα 5.3.3 Απεικόνιση σήματος εξόδου INA μετά από $t=2$ min από την τοποθέτηση αίματος στο MDL.



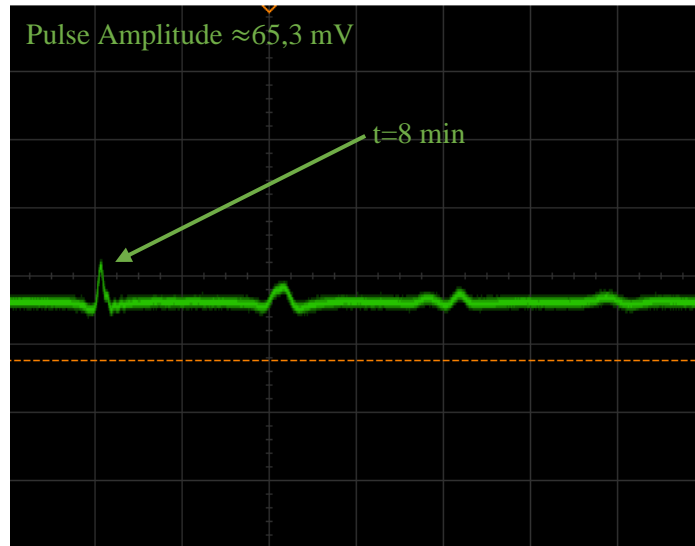
Σχήμα 5.3.4 Απεικόνιση σήματος εξόδου INA μετά από $t=4$ min από την τοποθέτηση αίματος στο MDL.



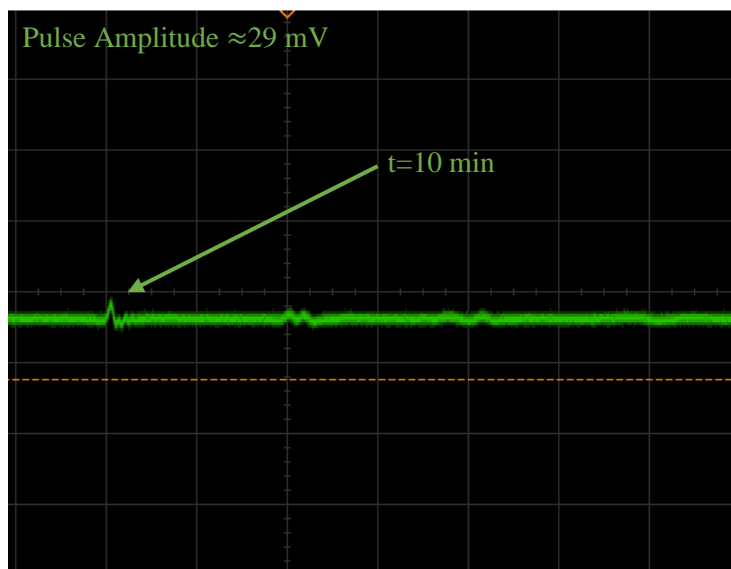
Σχήμα 5.3.5 Απεικόνιση σήματος εξόδου superdiode μετά από $t=2$ min από την τοποθέτηση αίματος στο MDL.



Σχήμα 5.3.6 Απεικόνιση σήματος εξόδου superdiode μετά από $t=4$ min από την τοποθέτηση αίματος στο MDL.



Σχήμα 5.3.7 Απεικόνιση σήματος εξόδου superdiode μετά από $t=8$ min από την τοποθέτηση αίματος στο MDL.

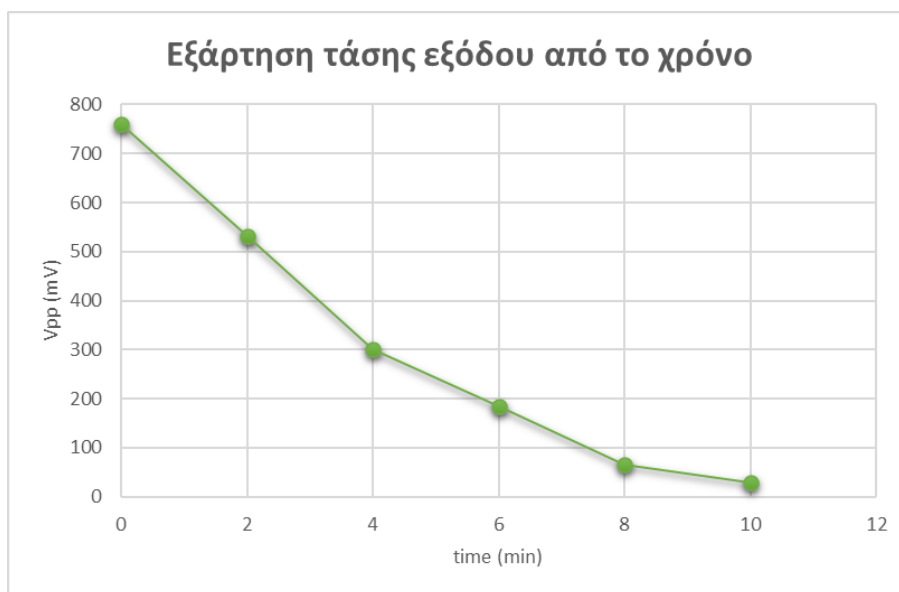


Σχήμα 5.3.8 Απεικόνιση σήματος εξόδου superdiode μετά από $t=10$ min από την τοποθέτηση αίματος στο MDL.

Μετρώντας το πλάτος V_{pp} ανά δύο λεπτά στην έξοδο του superdiode λήφθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας 1	
Χρόνος t (min)	Πλάτος V_{pp} (mV)
0	760
2	532,2
4	300
6	184,5
8	65,3
10	29

Και διαμορφώθηκε το διάγραμμα του σχήματος 5.3.9.

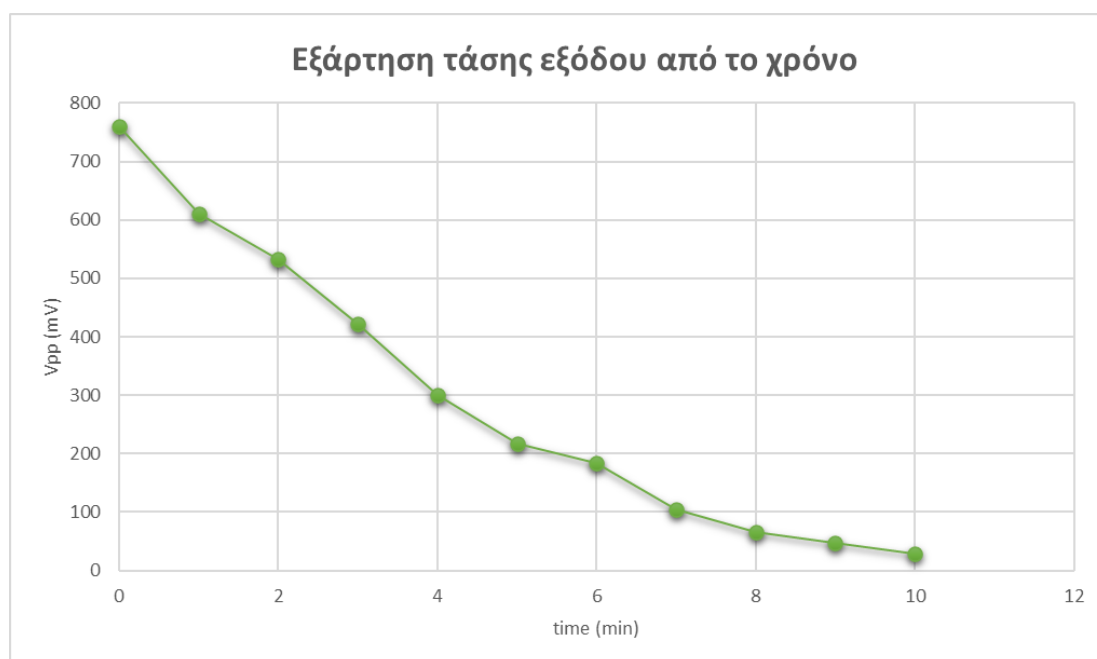


Σχήμα 5.3.9 Γραφική παράσταση πλάτους $V_{pp}(t)$ (με μέτρηση του ανά δύο λεπτά).

Για να έχουμε μια ακόμα πιο ακριβής απεικόνιση της εξάρτησης του πλάτους V_{pp} της τάσης εξόδου με το χρόνο, πήραμε μετρήσεις ανά ένα λεπτό και σχηματίσαμε τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2	
Χρόνος t (min)	Πλάτος V_{pp} (mV)
0	760
1	610
2	532,2
3	422,5
4	300
5	218
6	184,5
7	103,6
8	65,3
9	48
10	29

Και διαμορφώθηκε το διάγραμμα του σχήματος 5.3.10.



Σχήμα 5.3.10 Γραφική παράσταση πλάτους $V_{pp}(t)$ (με μέτρηση του ανά ένα λεπτό).

Συμπερασματικά, όσο το αίμα πήζει παρατηρούμε αλλαγές (μεταβολές) στην τάση εξόδου της αισθητήριας διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, το πλάτος της τάσης εξόδου μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, και τελικά όταν το αίμα έχει τελικά πήξει, σταθεροποιείται σε μια συγκεκριμένη minimum τιμή. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να υπολογίσουμε το χρόνο πήξης του αίματος σύντομα και αποτελεσματικά.

Ακόμα πιο ενδιαφέροντες είναι οι γραφικές παραστάσεις των σχημάτων 5.3.9 και 5.3.10. Παρατηρούμε ότι η απόκριση του σήματος τάσης στην πάροδο του χρόνου, μοιάζει με την εκθετική συνάρτηση. Αυτό σημαίνει ότι η τιμή του πλάτους V_{pp} είναι εκθετική συνάρτηση του χρόνου δηλαδή:

$$V_{pp}(t) = V_{pp} \cdot e^{-at} \quad (5.3.1)$$

Το πλάτος V_{pp} είναι το αρχικό πλάτος δηλαδή εκείνο που μετράμε λίγο πριν τοποθετηθεί το αίμα στην επιφάνεια MDL. Οι δοκιμές με αίμα που έγιναν στο εργαστήριο καθώς και οι μετρήσεις που ακολούθησαν παρουσίασαν όλες μια ανάλογη εκθετική συμπεριφορά, όπως αυτή των σχημάτων 5.3.9, 5.3.10. Αυτό σημαίνει ότι η μέθοδος που χρησιμοποιεί ο αισθητήρας της εργασίας είναι πρώτον ανεξάρτητη από την ποσότητα του αίματος (προσπαθούσαμε πάντα να τοποθετήσουμε μια σταγόνα αίματος, αλλά δε γινόταν κάθε φορά να τοποθετείται η ίδια ακριβώς ποσότητα) και δεύτερον επαναλαμβανόμενη στο χρόνο επιφέροντας ασφαλή και αξιόπιστα

αποτελέσματα. Τέλος, όπως είναι εύκολα κατανοητό, ο έλεγχος διαφορετικών δειγμάτων αίματος (καθώς και διαφορετικής ποσότητας αίματος), μπορεί να έχει το ίδιο αρχικό πλάτος V_{pp} , αλλά θα οδηγήσει σε διαφορετική τιμή του εκθετικού συντελεστή α της παραπάνω εξίσωσης. Ως εκ τούτου το πλάτος του εκθετικού συντελεστή α , μπορεί να λειτουργήσει σαν ενδεικτική παράμετρος της πήξης του αίματος.

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 την ικανότητα μέτρησης του χρόνου πήξης του αίματος. Μπορούμε μέσω αυτής να βγάλουμε κάπως ασφαλή συμπεράσματα για την πήξη της ποσότητας αίματος που τοποθετούμε στη μαγνητοσυστολική γραμμή, ωστόσο υπάρχουν ακόμα αδυναμίες της υλοποιούμενης διάταξης της εργασίας που μπορούν να παραπλανήσουν το χρήστη και να οδηγήσουν σε όχι και τόσο ακριβή αποτελέσματα. Στο κεφάλαιο αυτό 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 Προσθήκη μικροελεγκτή στη διάταξη του αισθητήρα

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, η προσθήκη μικροελεγκτή στο τέλος της συνολικής μας διάταξης αποτελεί μια μελλοντική βελτίωση του αισθητήρα, καθώς με αυτήν την προσθήκη μπορούμε εύκολα να επεξεργαστούμε τα δεδομένα που μας ενδιαφέρουν και να βγάλουμε εύκολα τα συμπεράσματα στην οθόνη ενός υπολογιστή.

Ειδικότερα, το σήμα εξόδου του κυκλώματος λήψης -το οποίο φυσικά είναι αναλογικό- θα μπορούσε να διοχετευτεί σε ένα Analog input μιας πλακέτας Arduino (μια πλακέτα Arduino UNO διαθέτει 6 Analog input). Το σήμα αυτό στη συνέχεια θα μετατραπεί σε ψηφιακό καθώς η πλακέτα Arduino διαθέτει ADC (Analog to Digital converter) και να στέλνει τα επιθυμητά δεδομένα μέσω ενός digital output στον υπολογιστή. Πιο συγκεκριμένα, με κατάλληλο προγραμματισμό, θα μπορούσαμε να μετράμε ανά ένα λεπτό (ή και ανά 30 δευτερόλεπτα) το πλάτος V_{pp} του σήματος εξόδου και να καταγράφονται αναλυτικά. Δίπλα από κάθε τιμή πλάτους θα βρίσκεται και η χρονική στιγμή στην οποία καταγράφηκε. Στο τέλος της μέτρησης, δηλαδή όταν το πλάτος σταματήσει να μειώνεται, καταγράφεται η χρονική στιγμή και γίνεται πλέον αυτόματα η μέτρηση του χρόνου πήξης του αίματος.

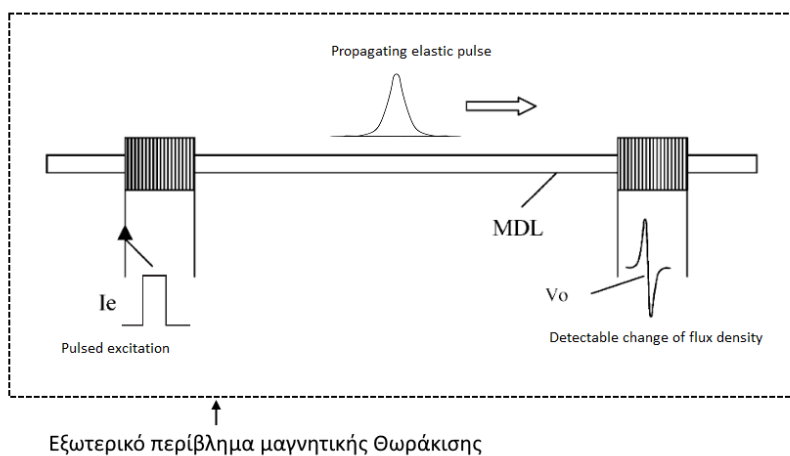
Το Arduino UNO ADC διαθέτει 10 bit resolution (άρα ακέραιες τιμές από 0- $2^{10}=1023$). Αυτό σημαίνει ότι θα αντιστοιχίσει τάσεις εισόδου μεταξύ 0 και 5V σε

ακέραιες τιμές μεταξύ 0 και 1023. Η τιμή αυτή του resolution είναι επαρκής για την εφαρμογή του αισθητήρα, για αυτό και δεν προτιμώνται μικροελεγκτές μεγαλύτερου resolution αφού θα αποτελούσαν μια ακριβότερη λύση, χωρίς κάποιο σοβαρό λόγο.

6.2 Μαγνητική θωράκιση (Magnetic shielding)

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 μόνιμοι μαγνήτες (permanent magnets) ή προκαλούνται τα λεγόμενα αντίθετα πεδία.

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 άρα «καθαρότερο» σήμα στην έξοδο της κυκλωματικής διάταξης.



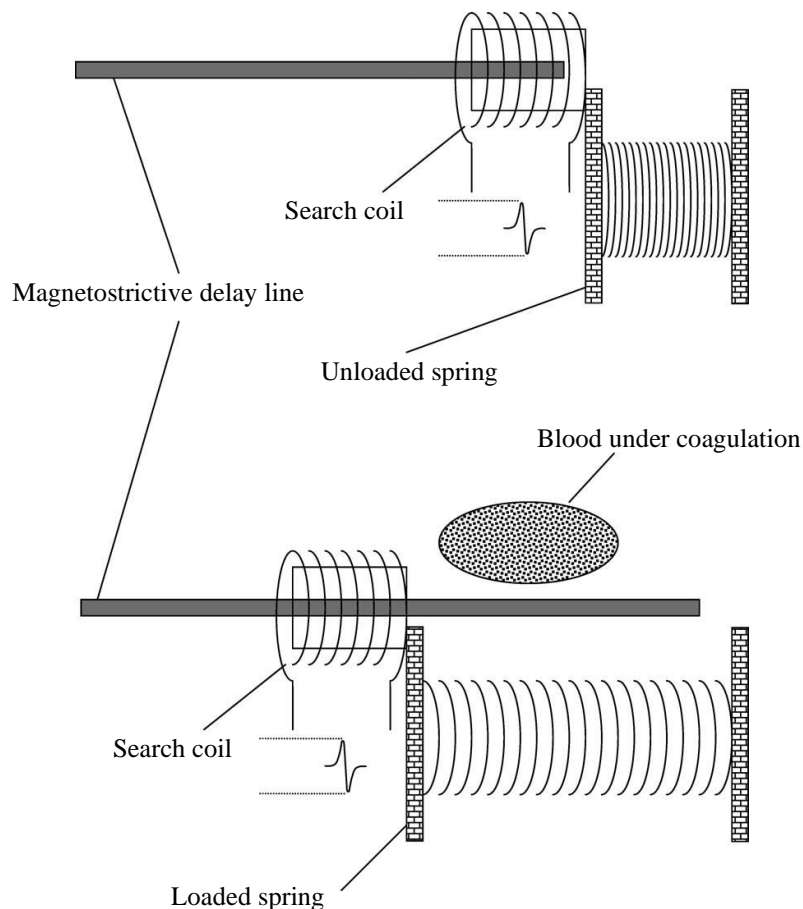
Σχήμα 6.2.1 Μαγνητική θωράκιση της διάταξης MDL του αισθητήρα.^[8]

6.3 Μετατροπή διάταξης MDL

Ένα μειονέκτημα του αισθητήρα αποτελεί η ποσότητα του αίματος που θα τοποθετηθεί στη μαγνητοσυστολική γραμμή. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι ο όγκος του αίματος καθορίζει αισθητώς την έξοδο του σήματος του MDL. Δηλαδή με διαφορετικές ποσότητες αίματος ενδέχεται να οδηγηθούμε σε διαφορετικές εξόδους

σήματος, με αποτέλεσμα η διάκριση μεταξύ της ποσότητας του υγρού και του χρόνου πήξης του αίματος να καθίσταται δύσκολη. Η αλλαγή της θέσης του πηνίου λήψης είναι ένα πρώτο βήμα προς τη διατήρηση της επαναληψιμότητας του αισθητήρα. Ειδικότερα η αλλαγή της θέσης του πηνίου λήψης -με τον τρόπο που θα περιγραφεί παρακάτω- συμβάλλει στην ακριβή μέτρηση του όγκου αίματος που τοποθετείτε στο MDL, ώστε σε κάθε μέτρηση που θα γίνεται να ξέρουμε ότι χρησιμοποιείται ακριβώς η ίδια ποσότητα υλικού και κατ' επέκταση ασφαλή αποτελέσματα που αφορούν μόνο το χρόνο πήξης του αίματος και όχι την ποσότητα που χρησιμοποιείται.

Η καινούρια διάταξη MDL που απεικονίζεται στο σχήμα 6.3.1, τοποθετεί το αίμα προς πήξη κάτω από το πηνίο λήψης. Πριν τοποθετηθεί όμως το αίμα, το πηνίο λήψης μαζί με ένα ορθογώνιο στήριγμα μετακινείται προς την πλευρά του πηνίου διέγερσης, χρησιμοποιώντας ένα μηχανικό μέσο, όπως ένα ελατήριο. Το αίμα τοποθετείται στη θέση του και το πηνίο λήψης επαναφέρεται στην αρχική του θέση. Με αυτόν τον τρόπο, η ποσότητα του αίματος που παραμένει στη επιφάνεια της μαγνητοσυστολικής γραμμής καλύπτεται από το πηνίο λήψης και ελέγχεται αποτελεσματικά ο όγκος του.



Σχήμα 6.3.1 Μετατροπή της διάταξης MDL για ελεγχόμενη ποσότητα αίματος στον αισθητήρα.^[41]

Η τεχνική αυτή προσφέρει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα: η διαδικασία πήξης του αίματος έχει ως αποτέλεσμα την εφαρμογή πρόσθετων εφελκυστικών τάσεων στην επιφάνεια του MDL. Αφού το MDL είναι θετικό μαγνητοσυστολικό υλικό, τέτοιες πρόσθετες τάσεις έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του αντίστροφου φαινομένου μαγνητοσυστολής (inverse magnetostriction effect), καθώς βοηθούν στον ευκολότερο προσανατολισμό της μαγνήτισης κατά μήκος του άξονα των εφαρμοζόμενων τάσεων. Επομένως το σήμα του MDL σε μια τέτοια περίπτωση μειώνεται για δύο λόγους: ο πρώτος είναι η ελαστική ενέργεια που διοχετεύεται στο αίμα όσο αυτό πήζει και ο δεύτερος είναι οι τάσεις εφελκυσμού κατά τη διάρκεια συμπύκνωσης του υγρού που μειώνει επίσης το πλάτος της μετρούμενης τάσης εξόδου.^[41]

6.4 Σχεδίαση και κατασκευή κυκλωμάτων σε PCB (Printed Circuit Board)

Το τελικό στάδιο της κατασκευής του αισθητήρα θα ήταν η κατασκευή του σε PCB με χρήση SMD components. Η υλοποίηση σε through-hole πλακέτα επέφερε ικανοποιητικά αποτελέσματα, ωστόσο η κατασκευή των κυκλωματικών διατάξεων (κύκλωμα λήψης-κύκλωμα διέγερσης) σε τυπωμένη πλακέτα θα ήταν σαφώς αποτελεσματικότερη. Η χρήση καλωδίων jumpers του εργαστηρίου σε σύγκριση με τα τυπωμένα μονοπάτια (paths) ενός PCB είναι σίγουρα πιο θορυβώδη και επηρεάζουν το τελικό σήμα. Επιπλέον οι κολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν στη through-hole πλακέτα σίγουρα δεν είναι καλύτερες από μια PCB που θα κατασκεύαζε μια εταιρία του εξωτερικού. Τέλος, τα κυκλώματα συνδεδεμένα μεταξύ τους δεν είχαν ποτέ «κοινή γη». Σίγουρα το γεγονός αυτό προκαλούσε αυξημένο θόρυβο στο τελικό μας σήμα, καθώς όταν έγινε μια απόπειρα διόρθωσης του θέματος αυτού (χρησιμοποιήθηκε μια πλακέτα με μεγάλη ποσότητα καλάν και συνδέθηκαν σε αυτή όλες οι γειώσεις της συνολικής διάταξης ώστε να έχουν όλα τα κυκλωματικά στοιχεία «κοινή γη») παρατηρήσαμε ότι το τελικό σήμα αποθορυβοποιήθηκε μερικώς.

Επιπλέον, υλοποιώντας τα δύο κυκλώματα διέγερσης και λήψης σε PCB θα είχαμε τεράστια εξοικονόμηση χώρου. Ο σχεδιασμός μιας τέτοιας πλακέτας σε ένα πρόγραμμα σχεδίασης όπως το Altium θα ήταν πιο αποτελεσματικός και η διάταξη των εξαρτημάτων πολύ πιο συμπυκνωμένη σε εξαιρετικά μικρότερες πλακέτες. Με αυτόν τον τρόπο, δηλαδή όταν η συνολική διάταξη του αισθητήρα μας είναι πολύ μικρότερη,

καθίσταται πιο εύκολη τόσο η μαγνητική θωράκιση του αισθητήρα μας όσο και η τοποθέτησή του σε κάποιου είδους θήκη (case) για πιο άνετη χρήση.

Συμπερασματικά η σχεδίαση του ηλεκτρονικού μέρους της διάταξης σε PCB συμβάλλει στην αποθρομβοποίηση του λαμβανόμενου σήματος καθώς και στην πιο εύκολη διαχείριση του αισθητήρα από το χρήστη. Το ζήτημα δηλαδή τίθεται ως ένα βαθμό αναγκαίο αλλά και πρακτικό. Δυστυχώς λόγω έλλειψης χρόνου αλλά και διαθέσιμων components η υλοποίηση αυτή δεν πραγματοποιήθηκε.

Βιβλιογραφία

- [1] <https://www.fierceelectronics.com/sensors/what-a-sensor>
- [2] <https://www.electronicshub.org/different-types-sensors/>
- [3] Herceg, E. E. "Handbook of Measurement and Control, revised edition." *Schaevitz Engineering, Pennsauken, NJ* (1976).
- [4] <https://www.elprocus.com/magnetic-sensor-working-and-its-applications/>
- [5] Καλοβρέκτης, Κωνσταντίνος, and Ν. Κατέβας. "Αισθητήρες μέτρησης και ελέγχου." *Εκδόσεις: Τζιόλα* (2012).
- [6] Jiles, David. *Introduction to magnetism and magnetic materials*. CRC press, 2015.
- [7] <https://www.elprocus.com/what-are-ferromagnetic-materials-types-their-applications/>
- [8] Hristoforou, E. "Magnetostrictive delay lines: engineering theory and sensing applications." *Measurement Science and Technology* 14.2 (2003): R15.
- [9] Hristoforou, E. "Magnetostrictive delay lines and their applications." *Sensors and Actuators A: Physical* 59.1-3 (1997): 183-191.
- [10] [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_\(Materials_Science\)/Magnetic_Properties/Magnetostriction](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_(Materials_Science)/Magnetic_Properties/Magnetostriction)
- [11] 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.
- [12] Hristoforou, Evangelos, and Aphrodite Ktena. "Magnetostriction and magnetostrictive materials for sensing applications." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 316.2 (2007): 372-378.
- [13] Feynman, Leighton, Sands, *The Feynman lectures on physics Vol. II*, Basic Books 1964.
- [14] Vázquez, M., et al. "Magnetic bistability of amorphous wires and sensor applications." *IEEE transactions on magnetics* 30.2 (1994): 907-912.
- [15] Hristoforou, E. "Magnetostrictive delay lines: engineering theory and sensing applications." *Measurement Science and Technology* 14.2 (2003): R15.
- [16] 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.
- [17] Aharoni, Amikam. *Introduction to the Theory of Ferromagnetism*. Vol. 109. Clarendon Press, 2000.
- [18] 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.
- [19] Kakuno, K., S. Masuda, and T. Yamada. "Scattered magnetoelastic waves in amorphous wires." *Le Journal de Physique Colloques* 49.C8 (1988): C8-2037.
- [20] Kraus, L. "A novel method for measurement of the saturation magnetostriction of amorphous ribbons." *Journal of Physics E: Scientific Instruments* 22.11 (1989): 943.

- [21] Garcia, D. J., and B. Alascio. "Low field magnetoresistance in double exchange compounds." *Physica B: Condensed Matter* 320.1-4 (2002): 7-12.
- [22] Lenssen, K-MH, et al. "Giant magnetoresistance and its application in recording heads." *Sensors and Actuators A: Physical* 60.1-3 (1997): 90-97.
- [23] Yoshinga, T., S. Furukawa, and K. Mohri. "Magneto-impedance effect in etched thin amorphous wires." *IEEE transactions on magnetics* 35.5 (1999): 3613-3615.
- [24] Pirota, K. R., et al. "Magnetostriction and GMI in Joule-heated CoFeSiB glass-covered microwires." *Journal of magnetism and magnetic materials* 226 (2001): 730-732.
- [25] Nielsen, Otto V., et al. "A high-precision triaxial fluxgate sensor for space applications: Layout and choice of materials." *Sensors and Actuators A: Physical* 59.1-3 (1997): 168-176.
- [26] Chiriac, H., et al. "Linear variable differential transformer sensor using Fe-rich amorphous wires as an active core." *Journal of Applied Physics* 87.9 (2000): 5344-5346.
- [27] Furthmüller, J., M. Fähnle, and G. Herzer. "Theory of magnetostriction in amorphous and polycrystalline ferromagnets I. Description of the formalism." *Journal of magnetism and magnetic materials* 69.1 (1987): 79-88.
- [28] Dapino, Marcelo J. "On magnetostrictive materials and their use in smart material transducer." *Struct. Eng. Mech.* J 17 (2002): 1-28.
- [29] <https://3dprint.com/223235/slm-3d-printing-metallic-glass/>
- [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] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/solenoid.html>
- [32] Chiriac, H., et al. "Dependence of the sound velocity in Fe77. 5Si7. 5B15 amorphous wires on the magnetic bias field." *Journal of magnetism and magnetic materials* 157 (1996): 229-230.
- [33] Hristoforou, E. "Amorphous magnetostrictive wires used in delay lines for sensing applications." *Journal of magnetism and magnetic materials* 249.1-2 (2002): 387-392.
- [34] <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/electromagnetic-induction.html>
- [35] Sedra, Adel S., et al. *Microelectronic circuits*. Vol. 4. New York: Oxford university press, 2004.
- [36] https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRLB8743-DataSheet-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a4015356605d6b2593
- [37] <https://www.vishay.com/docs/88525/1n5817.pdf>
- [38] https://www.researchgate.net/Σχῆμα/Half-wave-rectification-and-amplification-of-a-1-MHz-500-mV-b-50-MHz-500-mV-c-1_fig16_270005377
- [39] https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina128.pdf?ts=1655455339479&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [40] <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/when-a-diode-simply-isnt-good-enough-the-superdiode/>

[41] Maliaritsi, E., et al. "Coagulation sensors based on magnetostrictive delay lines for biomedical and chemical engineering applications." *Journal of magnetism and magnetic materials* 299.1 (2006): 41-52.