



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Αισθητήρας Μέτρησης Μαγνητικής Απόκρισης σε Χάλυβες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημοσθένης Κ. Θανόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Αισθητήρας Μέτρησης Μαγνητικής Απόκρισης σε Χάλυβες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημοσθένης Θανόπουλος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25^η Φεβρουαρίου 2025.

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Εμμανουήλ Χουρδάκης
Επικουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Γεώργιος Παναγόπουλος
Επικουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π

Αθήνα, Φεβρουάριος 2025

.....

Δημοσθένης Κ. Θανόπουλος

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

Copyright © Δημοσθένης Θανόπουλος, 2025.

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

Η επίβλεψη της υγείας του χάλυβα αποτελεί σημαντικό ζήτημα σε αρκετούς τομείς της βιομηχανίας. Για το σκοπό αυτό, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη αισθητήριων διατάξεων, οι οποίες θα είναι ικανές να ανιχνεύουν δομικές ατέλειες και καταπονήσεις στους χάλυβες. Μάλιστα, οι διατάξεις αυτές είναι κρίσιμο να βασίζονται σε τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου, οι οποίες στοχεύουν η επιθεώρηση και η αξιολόγηση της υγείας του υλικού να υλοποιούνται χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η χρησιμότητά του μετέπειτα. Παράλληλα, οι αισθητήρες αυτοί οφείλουν σε επίπεδο κυκλώματος να είναι σε θέση να παράγουν ακριβή και αξιόπιστη καταγραφή των μετρήσεων.

Η διπλωματική αυτή εργασία επιχειρεί την κατασκευή μιας αισθητήριας διάταξης, βασιζόμενης σε μη καταστροφική μέθοδο, η οποία περιέχει ένα ηλεκτρομαγνητικό yoke, στο οποίο είναι προσαρτημένο ένα πηνίο διέγερσης συνδεδεμένο με κατάλληλο ηλεκτρονικό κύκλωμα για την παραγωγή του σήματος διέγερσης. Επιπλέον, η διάταξη περιλαμβάνει και ένα πηνίο λήψης τυλιγμένο γύρω από το yoke συνδεδεμένο με ένα αντίστοιχο ηλεκτρονικό κύκλωμα για τη λήψη και επεξεργασία του σήματος εξόδου. Το yoke πατάει πάνω στο χάλυβα και μετακινείται κατά μήκος του, καταγράφοντας σε κάθε θέση το σήμα λήψης. Η μορφή και το μέτρο του σήματος λήψης καθιστούν εφικτή την εξαγωγή συμπεράσματος για τοπική ατέλεια στο εξεταζόμενο δοκίμιο χάλυβα.

Λέξεις-κλειδιά: ηλεκτρομαγνητικό yoke, μη καταστροφικές τεχνικές ελέγχου, επιτήρηση υγείας χάλυβα, κυκλωματική διάταξη, μαγνητικός αισθητήρας

Abstract

Steel health monitoring is an important issue in several sectors of industry. For this reason, it is necessary to develop sensing devices capable of detecting structural defects and stresses in steel. Actually, it is crucial that these devices are based on non-destructive tests that do not compromise the usefulness of the material, as their principle of operation is the measurement of various physical properties of the materials. At the same time, these sensors must be circuitically capable of producing accurate and reliable recordings of the measurements.

This thesis aims to construct a sensor device based on non-destructive testing, which contains an electromagnetic yoke, to which an excitation coil is attached connected to a suitable electronic circuit for generating the excitation signal. In addition, the device also includes a receiving coil wrapped around the yoke connected to a corresponding electronic circuit for receiving and processing the output signal. This yoke presses against the steel and moves along it, recording the receive signal at each position. The shape and the measure of the received signal shall make it possible to draw a conclusion about local defects in the steel specimen under test.

Keywords: *electromagnetic yoke, steel health monitoring, non-destructive testing, circuit, magnetic sensor*

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όσους με στήριξαν και με βοήθησαν καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της πορείας.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου για την πολύτιμη καθοδήγησή του, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την αδιάκοπη υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας μου. Η εμπειρία και οι γνώσεις του υπήρξαν καθοριστικές για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω και στους βοηθούς του εργαστηρίου, Γεωργία Στάμου και Σπυρίδωνα Αγγελόπουλο, οι οποίοι βρίσκονταν καθημερινά δίπλα μου. Η βοήθειά τους ήταν ανεκτίμητη, όχι μόνο σε τεχνικό επίπεδο, αλλά και στην καθημερινή ενθάρρυνση και υποστήριξη.

Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους συμφοιτητές μου, με τους οποίους μοιραστήκαμε αμέτρητες ώρες μελέτης και εργασίας κατά τη διάρκεια αυτών των πέντε χρόνων. Η συνεργασία και η αλληλοϋποστήριξή μας αποτέλεσαν σημαντικό κομμάτι της ακαδημαϊκής μου πορείας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, που στάθηκαν στο πλευρό μου καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας. Η αγάπη και η υπομονή τους ήταν πηγή δύναμης για εμένα.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	5
Abstract	7
Πρόλογος – Ευχαριστίες	9
Πίνακας περιεχομένων	11
Ευρετήριο Σχημάτων.....	15
Ευρετήριο Πινάκων	19
1 Εισαγωγή.....	21
1.1 Ιστορία του Χάλυβα.....	21
1.2 Εφαρμογές και Αναγκαιότητα Ελέγχου.....	23
1.3 Σκοπός και Στόχος της Διπλωματικής	24
1.4 Διάρθρωση της Διπλωματικής	24
2 Επίβλεψη Υγείας Χάλυβα	27
2.1 Χάλυβας.....	28
2.1.1 Χημική Σύθεση.....	28
2.1.2 Τρόποι Παραγωγής.....	30
2.1.3 Ιδιότητες	31
2.1.4 Κατηγορίες Χάλυβα	32
2.2 Υγεία	36
2.2.1 Αίτια Ατελειών κατά την Παραγωγική Διαδικασία	36
2.2.2 Αίτια Φθοράς κατά τη Χρήση του	37
2.2.3 Ατέλειες	37
2.3 Επίβλεψη	39
2.3.1 Αισθητήρας.....	39
2.3.2 Μαγνητικοί Αισθητήρες	40
3 Τεχνικές Ελέγχου Υγείας Χάλυβα	47
3.1 Καταστροφικές Τεχνικές Ελέγχου	47
3.1.1 Drill Hole Testing.....	47

3.1.2	Tensile Testing	48
3.2	Μη Καταστροφικές Τεχνικές Ελέγχου	50
3.2.1	Ultrasonic Testing	50
3.2.2	XRD (X-Ray Diffraction)	52
3.2.3	Eddy Current Testing	53
3.3	Αρχή λειτουργίας αισθητήρα	55
4	Στοιχεία και Εργαλεία Διάταξης	59
4.1	Μαγνητικά Στοιχεία	59
4.1.1	Ηλεκτρομαγνητικό Yoke	59
4.1.2	Πηνία	60
4.2	Ηλεκτρονικά Μέρη	61
4.2.1	AD9850 DDS Signal Generator Module	61
4.2.2	ESP32 Μικροελεγκτής	63
4.2.3	Ενισχυτής OPA549	65
4.2.4	Ενισχυτής TL081	67
4.2.5	Σταθεροποιητής LM7905	69
4.3	Λογισμικά	71
4.3.1	Arduino IDE	71
4.3.2	Tina-Ti	71
5	Ηλεκτρονική Διάταξη	73
5.1	Στάδιο Δοκιμών	73
5.2	Διαδικασία Παραγωγής Σήματος Εισόδου	74
5.2.1	Ημιτονοειδές Σήμα Συχνότητας 1Hz	74
5.2.2	Κύκλωμα Αθροιστή	77
5.2.3	Κύκλωμα Ενισχυτή Ρεύματος	83
6	Πειραματικά Αποτελέσματα	89
6.1	Καθορισμός Παραμέτρων	89
6.2	Ολοκλήρωση διάταξης	91
6.2.1	Διάταξη και Δοκίμια	91
6.2.2	Βαθυπερατό Φίλτρο	94

6.3	Αποτελέσματα	97
6.3.1	Μελέτη Επίδρασης R_{c1}	97
6.3.2	Μελέτη Επίδρασης Συχνότητας.....	99
6.3.3	Αποτελέσματα για Ανίχνευση Ατελειών	100
7	Συμπεράσματα.....	105
7.1	Αξιολόγηση διάταξης.....	105
7.2	Μελλοντικές Επεκτάσεις	107
	Βιβλιογραφία	109

Ευρετήριο Σχημάτων

Εικόνα 1: Η μηχανή Bessemer εξωτερικά (Α), εσωτερικά (Β).	22
Εικόνα 2: Χρήση Χάλυβα ανά Τομέα [1].	23
Εικόνα 3: BCC δομή (Α), FCC δομή (Β)	29
Εικόνα 4: Οι μέθοδοι BF-BOF και EAF [9].	30
Εικόνα 5: Ιδιότητες Χάλυβα.	31
Εικόνα 6: Κατηγορίες Χάλυβα [11].	32
Εικόνα 7: Ηλεκτρικός Χάλυβας.	35
Εικόνα 8: Μη οριοθετημένος και οριοθετημένος σε κόκκους ηλεκτρικός χάλυβας.	36
Εικόνα 9: Δομικές τέλειες χάλυβα.	39
Εικόνα 10: Κατεύθυνση μαγνητικών γραμμών.	41
Εικόνα 11: Καμπύλη μαγνήτισης M-H [23].	43
Εικόνα 12: Μαγνητικό κύκλωμα [24].	44
Εικόνα 13: Μαγνητική συμπεριφορά Α) διαμαγνητικών υλικών Β) παραμαγνητικών υλικών.	45
Εικόνα 14: Α) Μη μαγνητισμένο φερρομαγνητικό υλικό, Β) Μαγνητισμένο φερρομαγνητικό υλικό.	46
Εικόνα 15: Μέθοδος Drill Hole.	48
Εικόνα 16: Tensile Testing.	50
Εικόνα 17: Διάταξη UT [28].	51
Εικόνα 18: Έλεγχος με αισθητήρα UT [28].	52
Εικόνα 19: Νόμος του Bragg.	52
Εικόνα 20: Ένταση περίθλασης ως προς γωνία 2θ.	53
Εικόνα 21: Διάγραμμα διαδικασίας ECT [30].	54
Εικόνα 22: Δημιουργία δινορρευμάτων.	55
Εικόνα 23: Αισθητήρια διάταξη.	55
Εικόνα 24: AMCC-25 yoke [35].	59

Εικόνα 25: Διαστάσεις AMCC-25 yoke [35].	60
Εικόνα 26: Διάγραμμα AD9850 με τα pins [36].	61
Εικόνα 27: Διάγραμμα WeMos Lolin32 με τα pins του [37].	64
Εικόνα 28: OPA549 [39].	66
Εικόνα 29: Διάγραμμα pins του OPA549 [39].	66
Εικόνα 30: TL081 [40].	68
Εικόνα 31: Διάγραμμα Pins του TL081 [40].	68
Εικόνα 32: LM7905 [41].	69
Εικόνα 33: Διάγραμμα Pins του LM7905 [41].	70
Εικόνα 34: Κύκλωμα εξομάλυνσης του σταθεροποιητή [41].	71
Εικόνα 35: Κυκλωματική διάταξη σύνδεσης AD9850 με ESP32.	74
Εικόνα 36: Προσθήκη πυκνωτή EN-GND [37].	75
Εικόνα 37: Σήμα εξόδου AD9850.	77
Εικόνα 38: Κύκλωμα αθροιστή.	77
Εικόνα 39: Κύκλωμα αθροιστή με τις καλωδιώσεις του TL081.	79
Εικόνα 40: Καλωδιώσεις σταθεροποιητή με διαιρέτη τάσης.	80
Εικόνα 41: Κύκλωμα διαιρέτη τάσης και είσοδος στον αθροιστή χωρίς buffer.	81
Εικόνα 42: Κύκλωμα buffer [44].	81
Εικόνα 43: Συνδέσεις καλωδίων για υλοποίηση buffer με ολοκληρωμένο TL081.	82
Εικόνα 44: Συνολικό κύκλωμα μετά την προσθήκη αθροιστή και buffer.	83
Εικόνα 45: Σήμα εξόδου αθροιστή.	83
Εικόνα 46: OPA549 ως μη αναστρέφοντας ενισχυτής.	84
Εικόνα 47: Διάγραμμα συνδέσεων του OPA549 [39].	85
Εικόνα 48: Καλωδιώσεις για OPA549 ως μη αναστρέφοντας ενισχυτής.	85
Εικόνα 49: Κυκλωματική διάταξη τελευταίου σταδίου (OPA549).	86
Εικόνα 50: Κυκλωματική διάταξη εισόδου στο πηνίο διέγερσης.	86
Εικόνα 51: Διαστάσεις OPA549 [39].	88
Εικόνα 52: Τάση εισόδου στο πηνίο διέγερσης.	88
Εικόνα 53: Ρεύμα εισόδου στο πηνίο διέγερσης.	88
Εικόνα 54: Δοκίμιο 1.	92
Εικόνα 55: Δοκίμιο 2.	92

Εικόνα 56: Δοκίμιο 3.....	92
Εικόνα 57: Θέσεις μετρήσεων.....	93
Εικόνα 58: Θορυβώδες σήμα εξόδου.....	94
Εικόνα 59: Βαθυπερατό RC φίλτρο.....	95
Εικόνα 60: Διάγραμμα Bode LPF.....	95
Εικόνα 61: Σήμα μετά την προσθήκη του LPF.....	96
Εικόνα 62: Συνολικό ηλεκτρονικό κύκλωμα.....	96
Εικόνα 63: Πειραματική διάταξη.....	96
Εικόνα 64: Επίδραση $RC_1 = 3,5k\Omega$	97
Εικόνα 65: Επίδραση $RC_1 = 5k\Omega$	97
Εικόνα 66: Επίδραση $RC_1 = 7k\Omega$	98
Εικόνα 67: Επίδραση $f = 1kHz$	99
Εικόνα 68: Επίδραση $f = 3kHz$	99
Εικόνα 69: Επίδραση $f = 5kHz$	99
Εικόνα 70: Έλεγχος δοκιμίου 1.....	101
Εικόνα 71: Έλεγχος δοκιμίου 2.....	102
Εικόνα 72: Έλεγχος δοκιμίου 3.....	103

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Παραγωγή Χάλυβα ανά Χώρα [1].	21
Πίνακας 2: Ιδιότητες κάθε κατηγορίας χάλυβα [12].	34
Πίνακας 3: Συνδέσεις AD9850 με ESP32.	74
Πίνακας 4: Ενδεικτικές τιμές I_{LIM} - R_{LIM}	87
Πίνακας 5: Τιμές Στοιχείων κυκλώματος.....	90
Πίνακας 6: Τιμές Τάσεων στο κύκλωμα.	90

1 Εισαγωγή

1.1 Ιστορία του Χάλυβα

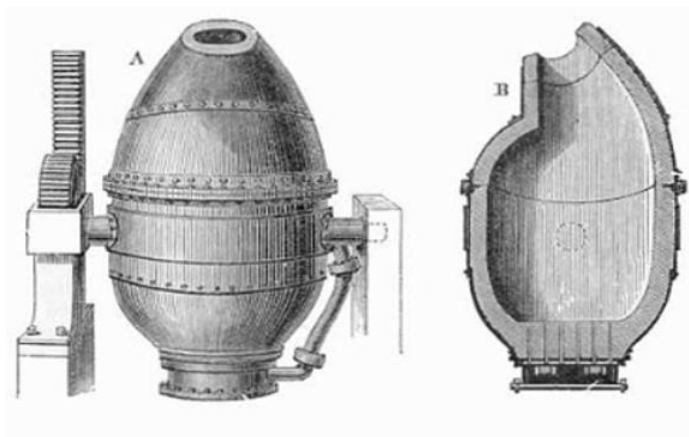
Ο χάλυβας είναι ένα από τα πιο ευρέως παραγόμενα υλικά παγκοσμίως. Η παραγωγή του σε αριθμούς διαρκώς αυξάνεται μέσα στα χρόνια, φτάνοντας μόνο το 2023 η παγκόσμια παραγωγή να αγγίζει τους 1,9 δις τόνους. Ηγέτιδα δύναμη είναι η Κίνα, η οποία καλύπτει πάνω από το 50% της κατασκευασμένης ποσότητας, με βασικότερη εταιρεία παραγωγής την China Baowu Group [1]. Η σημασία του χάλυβα σε παγκόσμιο επίπεδο είναι τεράστια και επηρεάζει σχεδόν κάθε τομέα της οικονομίας, της τεχνολογίας και της καθημερινής ζωής.

Πίνακας 1: Παραγωγή Χάλυβα ανά Χώρα [1].

Country	2023		2022	
	Rank	Tonnage	Rank	Tonnage
China	1	1 019.1	1	1 019.1
India	2	140.8	2	125.4
Japan	3	87.0	3	89.2
United States	4	81.4	4	80.5
Russia	5	76.0	5	71.7
South Korea	6	66.7	6	65.8
Germany	7	35.4	7	36.9
Türkiye	8	33.7	8	35.1
Brazil	9	31.8	9	34.1
Iran	10	31.0	10	30.6

Ιστορικά, η παραγωγή χάλυβα ξεκινάει πολλές χιλιάδες χρόνια πριν και ανά τους αιώνες επηρεάζει όλο και πιο καθοριστικά την εξέλιξη των κοινωνιών. Αυτό, λοιπόν, κατέστησε επιτακτική την ανάγκη ελέγχου της υγείας του υλικού. Όπως και η διαδικασία παραγωγής του, έτσι και οι τεχνικές ελέγχου της κατάστασής του ήταν αρχικά πρωτόγονες [2]. Τα αρχαία χρόνια, καθοριστικό ρόλο διαδραμάτιζε η εμπειρία του τεχνίτη, ο οποίος οπτικά μπορούσε να διακρίνει ένα μέρος των ατελειών, παρότι εκείνη την εποχή δεν κατανοούσαν τη χημεία του χάλυβα. Μάλιστα, οι μεταλλουργοί της εποχής ανακάλυψαν τον χάλυβα τυχαία, ως παραπροϊόν των σιδηρουργικών τους δραστηριοτήτων. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν απλές μέθοδοι, όπως η δοκιμή με χτύπημα ή με χρήση αιχμηρών αντικειμένων για να εκτιμηθεί η σκληρότητα του υλικού, καθώς και με φλόγα, όπου οι τεχνίτες μπορούσαν να εκτιμήσουν τη σύσταση

του χάλυβα από το χρώμα και τη συμπεριφορά του μετάλλου κατά την έκθεσή του στη θερμότητα. Αν και από τον 15^ο αιώνα η χρήση του χάλυβα είχε εδραιωθεί παγκοσμίως, κομβικό σημείο της ιστορίας είναι η βιομηχανική επανάσταση, τότε που ξεκίνησε η πιο συστηματική παραγωγή του. Η διαδικασία Bessemer, η οποία πήρε το όνομά της από τον ομώνυμο Άγγλο εφευρέτη και έγινε γνωστή το 1856, ήταν η πρώτη μαζική, γρήγορη και φθηνή διαδικασία παραγωγής χάλυβα, με αποτέλεσμα τη γιγάντωση της παραγωγής του [3]. Είναι εκπληκτικό, όμως ότι οι Κινέζοι φαίνεται να είχαν κάτι παρόμοιο με τη μέθοδο Bessemer ήδη από τον 2^ο αιώνα π.Χ. [4].

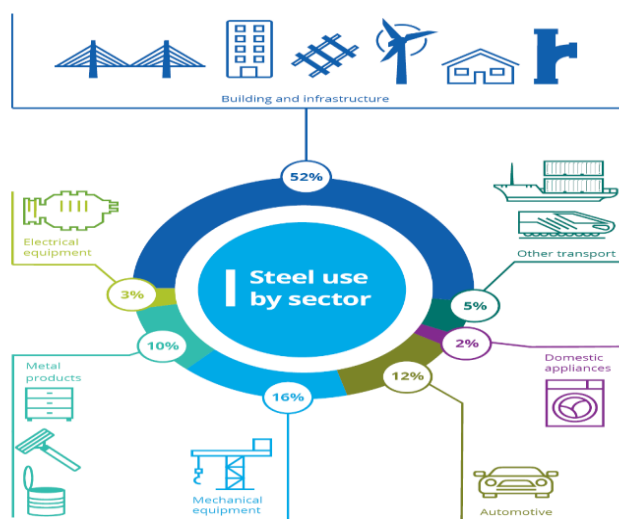


Εικόνα 1: Η μηχανή Bessemer εξωτερικά (Α), εσωτερικά (Β).

Η μαζικοποίηση της παραγωγής είχε ως αποτέλεσμα, να απαιτούνται πιο δομημένες διαδικασίες και πιο αυστηρές τεχνικές ελέγχου. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα των νέων τεχνικών είναι οι πρώτες δοκιμές εφελκυσμού, όπου ο χάλυβας τεντωνόταν έως ότου σπάσει για να εκτιμηθεί η αντοχή του σε εφελκυσμό. Ωστόσο, πολλές από αυτές τις τεχνικές ανήκαν στην κατηγορία του καταστροφικού ελέγχου. Αν και οι τεχνικές καταστροφικού ελέγχου παρέχουν ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα για ιδιότητες των υλικών, για αυτό και συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται, δεν αρκούν στη βιομηχανία. Ο βασικός λόγος είναι ότι το εξεταζόμενο κάθε φορά δείγμα καταστρέφεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής, γεγονός που οδηγεί σε πολύ υψηλά κόστη. Το ζήτημα αυτό περιορίστηκε με την ανάπτυξη των τεχνικών μη καταστροφικού ελέγχου που ξεκίνησαν να διαμορφώνονται από τα τέλη του 19^{ου} με αρχές του 20^{ου} αιώνα και από τότε διαρκώς εξελίσσονται [5].

1.2 Εφαρμογές και Αναγκαιότητα Ελέγχου

Ο αισθητήρας της τρέχουσας διπλωματικής ανήκει στην κατηγορία των τεχνικών μη καταστροφικού ελέγχου. Η αξία της προτεινόμενης αυτής αισθητήριας διάταξης για την επίβλεψη της υγείας του χάλυβα καθίσταται προφανής από τις εφαρμογές που αυτός βρίσκει στην καθημερινότητα του ανθρώπου. Οι μεγαλύτερες ποσότητες χάλυβα χρησιμοποιούνται σε υποδομές και εγκαταστάσεις. Λόγω της ανθεκτικότητάς του και της αντοχής του, ο χάλυβας αντικατέστησε το σίδηρο και πλέον χρησιμοποιείται κατά κόρον σε κάθε λογής κτίριο (πολυκατοικίες, εμπορικά κέντρα, στάδια κλπ.), σε γέφυρες, σε σιδηροδρομικά δίκτυα και πολλά ακόμη. Κατά συνέπεια, τυχόν φθορά του χάλυβα θέτει σε κίνδυνο τη δομική ακεραιότητα των κατασκευών αυξάνοντας τον κίνδυνο καταρρεύσεων. Επίσης, στον τομέα του μηχανικού εξοπλισμού, ο χάλυβας χρησιμοποιείται εκτενώς και αφορά την παραγωγή διαφόρων ειδών μηχανών και κυρίως βαριά βιομηχανικά μηχανήματα, γεωργικά μηχανήματα και μηχανήματα κατασκευών. Παράλληλα, σημαντική είναι και η χρήση του χάλυβα στην αυτοκινητοβιομηχανία, η οποία απορροφά το 12% της συνολικής χρήσης του. Ο χάλυβας παίζει καθοριστικό ρόλο στην κατασκευή αμαξωμάτων, πλαισίων και άλλων βασικών εξαρτημάτων των οχημάτων, προσφέροντας την απαιτούμενη ασφάλεια που χρειάζονται τα σύγχρονα οχήματα.



Εικόνα 2: Χρήση Χάλυβα ανά Τομέα [1].

1.3 Σκοπός και Στόχος της Διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική έχει ως στόχο την ανάπτυξη μιας αισθητήριας διάταξης, η οποία θα ανιχνεύει δομικές ατέλειες και καταπονήσεις στον χάλυβα. Η διάταξη αποτελείται από ένα ηλεκτρομαγνητικό yoke, έχοντας τυλιγμένο ένα πηνίο διέγερσης στο ένα του άκρο και ένα πηνίο λήψης στο άλλο του άκρο. Μετακινώντας το yoke κατά μήκος του εξεταζόμενου δοκιμίου χάλυβα, καταγράφεται σε κάθε σημείο η ηλεκτρική τάση και στις θέσεις που παρατηρείται αισθητή αλλαγή της τάσης, άρα αλλαγή της μαγνήτισης του υλικού, φανερώνεται εκεί η ύπαρξη ατέλειας. Για να υλοποιηθεί αυτό, απαιτείται η ανάπτυξη ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος διέγερσης του πηνίου διέγερσης με κατάλληλης μορφής και έντασης σήμα, καθώς και η κατασκευή ενός κυκλώματος λήψης στα άκρα του πηνίου λήψης για να λαμβάνεται το αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα εξόδου. Αυτή είναι μια μέθοδος μη καταστροφικής δοκιμής και προτιμήθηκε γιατί μπορεί να εντοπίζει τόσο επιφανειακά όσο και εσωτερικά ελαττώματα στο χάλυβα, διατηρώντας την ακεραιότητά του και με μικρότερο κόστος αφού δεν απαιτείται η καταστροφή του δείγματος μετά τον έλεγχο. Κρίθηκε απαραίτητο, οι μετρήσεις να γίνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερες επιρροές από το περιβάλλον και η χρήση του αισθητήρα να είναι απλή και ευκόλως αντιληπτή από το χρήστη. Περαιτέρω, κάθε ηλεκτρονικό μέρος των διατάξεων που χρησιμοποιήθηκε προσφέρει άμεση συνδεσιμότητα και αξιόπιστα αποτελέσματα, διασφαλίζοντας την αδιάλειπτη και αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος παρακολούθησης.

1.4 Διάρθρωση της Διπλωματικής

Η διπλωματική εργασία δομείται σε επτά κεφάλαια. Στο 1^ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια εισαγωγή στην ιστορία του χάλυβα, οι διάφορες εφαρμογές του, καθώς και η αναγκαιότητα του ελέγχου της κατάστασής του. Επιπλέον, ορίζεται ο σκοπός της εργασίας, που είναι η ανάπτυξη μιας αισθητήριας διάταξης παρακολούθησης της υγείας του χάλυβα βασιζόμενη στις μαγνητικές ιδιότητές του. Στο 2^ο κεφάλαιο, αναλύονται λεπτομερώς μια προς μια οι έννοιες Steel Health Monitoring. Το 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζει συνοπτικά διαδεδομένες μεθόδους

καταστροφικών δοκιμών (Destructive Testing) και πιο αναλυτικά αυτές των μη καταστροφικών δοκιμών (Non-Destructive Testing). Παράλληλα, παρέχεται το θεωρητικό υπόβαθρο της τεχνικής που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Στο 4^ο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα υλικά, τα εξαρτήματα και το απαραίτητο λογισμικό για την υλοποίηση της διάταξης. Στο 5^ο κεφάλαιο, αναλύεται η κυκλωματική διάταξη, καθώς περιγράφεται η χρησιμότητα και η αναγκαιότητα καθενός υφιστάμενου κυκλώματος και η διασύνδεσή αυτών μεταξύ τους, προκειμένου να παραχθεί το κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα διέγερσης. Στο 6^ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η συνολική αισθητήρια διάταξη και αναλύονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Τέλος στο 7^ο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την έρευνα, και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική ανάλυση και περαιτέρω μελέτη για την επέκταση και βελτιστοποίηση του αισθητήρα.

2 Επίβλεψη Υγείας Χάλυβα

Ο τομέας του Steel Health Monitoring ασχολείται με τη συσχέτιση της δομής και της μικροδομής του χάλυβα με τις μαγνητικές του, κυρίως, ιδιότητες. Σκοπός του πεδίου αυτού είναι η παρακολούθηση της κατάστασης και της ακεραιότητας του χάλυβα, η πρόβλεψη και ο εντοπισμός των ατελειών σε χαλύβδινες κατασκευές, καθώς και η αποκατάσταση της υγείας του με τοπικές μεθόδους, προκειμένου να μην αλλάζει η δομή όλου του υλικού. Το Steel Health Monitoring βρίσκει εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως στη ναυπηγική, στις κατασκευές, στις γέφυρες και άλλες υποδομές, όπου ο χάλυβας είναι βασικό υλικό. Χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της διάβρωσης και της παραμόρφωσης του χάλυβα, καθώς και για την ανίχνευση εσωτερικών ατελειών μέσω τεχνικών όπως χρήση μαγνητικών αισθητήρων, υπερηχητικών αισθητήρων, αισθητήρων τάσης, αλλά και μέσω ακουστικών μεθόδων. Αυτές οι τεχνικές βοηθούν στην πρόληψη ζημιών, επιτρέποντας έγκαιρη συντήρηση και επισκευή, ενώ παράλληλα αυξάνουν τη διάρκεια ζωής των κατασκευών.

Στο Κεφάλαιο 2, θα γίνει εμβάθυνση στη θεματική του Steel Health Monitoring, αναλύοντας διεξοδικά τις επιμέρους έννοιες που το συνθέτουν. Αρχικά, θα εξεταστεί η έννοια του Steel (χάλυβας), εστιάζοντας στη σύνθεσή του, στις ιδιότητές του και στα είδη του. Στη συνέχεια, θα διερευνηθεί η έννοια του Health (υγεία), σε σχέση με την ακεραιότητα και τη διατήρηση των χαρακτηριστικών του χάλυβα κατά τη διάρκεια της ζωής του. Παράλληλα, θα ερευνηθούν τα αίτια που οδηγούν στην καταστροφή του, καθώς και οι πιθανές ζημιές. Τέλος, θα αναλυθεί η έννοια του Monitoring (παρακολούθηση), εστιάζοντας κυρίως στους μαγνητικούς αισθητήρες που είναι ο τύπος αισθητήρων, που χρησιμοποιούνται στη διπλωματική.

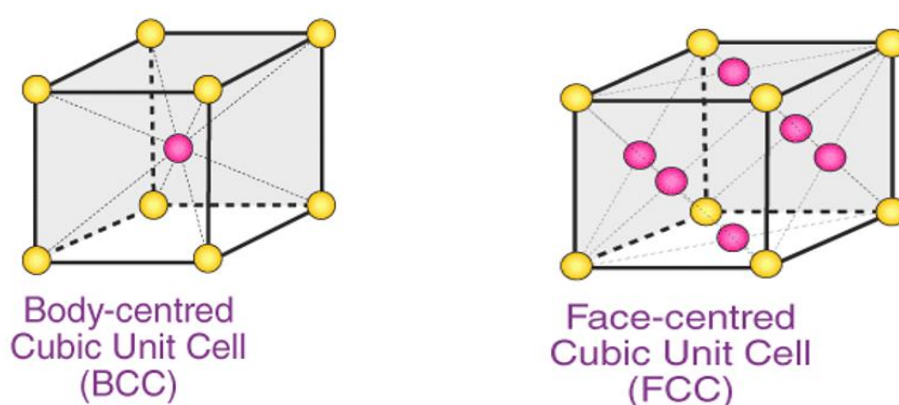
2.1 Χάλυβας

Ο χάλυβας είναι ένα κράμα σιδήρου και άνθρακα, γνωστό για τις εξαιρετικές του ιδιότητες. Παρακάτω θα εξεταστεί λεπτομερώς η χημική του σύσταση και πώς αυτή επηρεάζει τις φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες. Επιπλέον, θα περιγραφεί η διαδικασία παραγωγής του χάλυβα, αναφέροντας τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωσή του. Παράλληλα, θα παρουσιαστούν οι βασικές μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητές του, οι οποίες καθορίζουν τη συμπεριφορά και τις εφαρμογές του. Τέλος, θα γίνει αναφορά στα διάφορα είδη χάλυβα, κατηγοριοποιώντας τα με βάση τη σύστασή τους.

2.1.1 Χημική Σύσταση

Ο χάλυβας είναι ένα κράμα που αποτελείται κυρίως από σίδηρο και άνθρακα, με την περιεκτικότητα σε άνθρακα να κυμαίνεται κάτω από 2% και με μαγγάνιο που δεν υπερβαίνει το 1%. Περιλαμβάνει επίσης μικρές ποσότητες στοιχείων όπως πυρίτιο, φώσφορο, θείο και οξυγόνο. Ωστόσο, ο χάλυβας δεν είναι ένα ομοιογενές υλικό, καθώς υπάρχουν πάνω από 3.500 διαφορετικές ποιότητες, κάθε μία με μοναδικές φυσικές, χημικές και περιβαλλοντικές ιδιότητες. Το κύριο συστατικό του χάλυβα είναι ο σίδηρος, ο οποίος παρασκευάζεται αφαιρώντας το οξυγόνο και άλλες ακαθαρσίες μετά από κατεργασία από το μέταλλευμα σιδήρου. Ο σίδηρος είναι ένα μέταλλο που στην καθαρή του κατάσταση δεν είναι ιδιαίτερα σκληρό (ελαφρώς σκληρότερος από το χαλκό) και στη στερεή του κατάσταση είναι, ως μέταλλο, πολυκρυσταλλικός, δηλαδή αποτελείται από πολλούς κρυστάλλους που συνδέονται μεταξύ τους. Οι κρύσταλλοι αυτοί αποτελούν καλά οργανωμένες διατάξεις ατόμων, γνωστές ως πλέγματα, τα οποία διατάσσονται με συγκεκριμένο τρόπο στο χώρο [6]. Η μοναδικότητα του χάλυβα προκύπτει από την αλλοτροπία του σιδήρου, δηλαδή την ικανότητά του να εμφανίζεται σε δύο κρυσταλλικές δομές την bcc (body-centered cubic, κυβική με κέντρο σώματος) και την fcc (face-centred cubic structure, κυβική με κέντρο έδρας). Στη διάταξη bcc, υπάρχει ένα επιπλέον άτομο σιδήρου στο κέντρο κάθε κύβου. Στην fcc υπάρχει ένα επιπλέον άτομο σιδήρου στο κέντρο κάθε μιας από τις έξι έδρες του μοναδιαίου κύβου. Στη δομή fcc υπάρχει περισσότερος χώρος για

να διατηρηθούν τα ξένα (δηλ. κραματικά) άτομα σε στερεό διάλυμα κι αυτό έχει άμεση επίδραση στη δημιουργία του χάλυβα, καθώς αυτός περιέχει κράματα μαγγανίου, χρωμίου κ.α. Αυτό επιτρέπει την ανάπτυξη κραμάτων με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, όπως αυξημένη αντοχή, ελαστικότητα και ανθεκτικότητα στη διάβρωση. Αντίθετα, η δομή bcc, που οι αποστάσεις μεταξύ των ατόμων είναι μικρότερες, περιορίζει την ικανότητα ενσωμάτωσης των ξένων ατόμων και αυτό μπορεί να επηρεάσει την ευρωστία του κράματος ή να περιορίσει τη δυνατότητα προσθήκης συγκεκριμένων κραματικών στοιχείων [7].

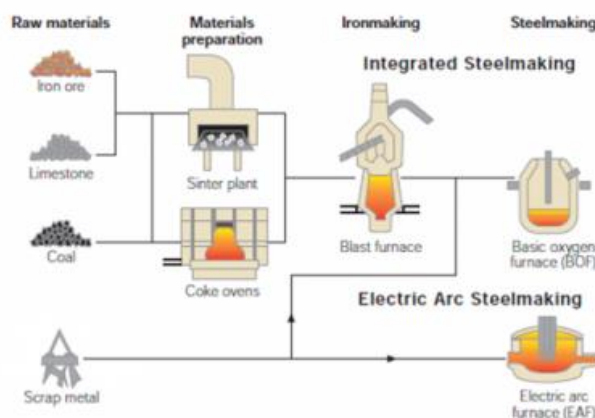


Εικόνα 3: BCC δομή (Α), FCC δομή (Β)

Η κύρια μέθοδος ενίσχυσής του σιδήρου και μετατροπής του σε χάλυβα είναι η προσθήκη μικρών ποσοτήτων άνθρακα. Η περιεκτικότητα σε άνθρακα αλλάζει και καθορίζει τις τελικές μηχανικές ιδιότητες του προκύπτοντος χάλυβα. Η θερμική επεξεργασία είναι επίσης μια διαδικασία για την τροποποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα. Μέσω τέτοιων θερμικών διαδικασιών, όπως για παράδειγμα η ανόπτηση, είναι εφικτό οι ιδιότητες του χάλυβα να προσαρμοστούν στις εκάστοτε ανάγκες. Ένας τρίτος τρόπος είναι, η προσθήκη και άλλων κραματικών στοιχείων που μπορούν να προσδώσουν στο χάλυβα ιδιότητες που δεν είναι δυνατές στον απλό ανθρακούχο χάλυβα.

2.1.2 Τρόποι Παραγωγής

Ο χάλυβας παράγεται μέσω δύο κύριων μεθόδων: της μεθόδου υψικαμίνου-βασικού κλιβάνου οξυγόνου (Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace, BF-BOF) και της μεθόδου κλιβάνου ηλεκτρικού τόξου (Electric Arc Furnace, EAF). Υπάρχουν επίσης παραλλαγές και συνδυασμοί αυτών των μεθόδων παραγωγής. Η βασική διαφορά μεταξύ των μεθόδων είναι το είδος των πρώτων υλών που καταναλώνουν. Για τη μέθοδο BF-BOF οι πρώτες ύλες είναι κυρίως σιδηρομετάλλευμα, άνθρακας και ανακυκλωμένος χάλυβας, ενώ η διαδρομή EAF χρησιμοποιεί κυρίως ανακυκλωμένο χάλυβα και ηλεκτρική ενέργεια. Συνολικά, περίπου το 70% του χάλυβα παράγεται με τη μέθοδο BF-BOF. Αρχικά, τα σιδηρομεταλλεύματα ανάγονται σε σίδηρο, και στη συνέχεια, ο σίδηρος μετατρέπεται σε χάλυβα στο βασικό φούρνο οξυγόνου (BOF). Μετά τη χύτευση και την έλαση, ο χάλυβας παραδίδεται σε μορφή πλάκας, ράβδου κ.α [8]. Από την άλλη, ο χάλυβας που παράγεται σε κλίβανο ηλεκτρικού τόξου (EAF) χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια για να λιώσει τον ανακυκλωμένο χάλυβα. Πρόσθετα κράματα, χρησιμοποιούνται για να προσαρμοστούν στην επιθυμητή χημική σύνθεση. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να συμπληρωθεί με οξυγόνο που διοχετεύεται στο EAF. Τα μεταγενέστερα στάδια διεργασίας, όπως η χύτευση, η αναθέρμανση και η έλαση, είναι παρόμοια με εκείνα της διαδρομής BF-BOF [9]. Αυτές οι μέθοδοι παραγωγής μπορούν να χρησιμοποιήσουν ανακυκλωμένα θραύσματα χάλυβα ως εισροή. Ο περισσότερος νέος χάλυβας περιέχει ανακυκλωμένο χάλυβα.



Εικόνα 4: Οι μέθοδοι BF-BOF και EAF [9].

2.1.3 Ιδιότητες

Ο χάλυβας είναι ένα πολυχρηστικό υλικό με μοναδικές ιδιότητες που τον καθιστούν ιδανικό για πληθώρα εφαρμογών. Μπορεί με την κατάλληλη διεργασία να αποκτήσει, στο βαθμό που απαιτεί η βιομηχανική του χρήση, τις ακόλουθες ιδιότητες:

- **Αντοχή:** Η ικανότητα του χάλυβα να αντέχει μηχανικές δυνάμεις χωρίς να σπάσει ή να παραμορφωθεί. Εξαρτάται από τη σύνθεση (π.χ. περιεκτικότητα σε άνθρακα), την επεξεργασία (π.χ. θερμική κατεργασία) και τον τύπο του χάλυβα.
- **Αντοχή στη διάβρωση:** Αυτό επιτυγχάνεται με προσθήκη χρωμίου, νικελίου και μολυβδαινίου.
- **Ανθεκτικότητα στο χρόνο:** Η ικανότητα του χάλυβα να αντιστέκεται σε απώλεια υλικού λόγω τριβής και επαναλαμβανόμενης χρήσης.
- **Δύναμη/Σκληρότητα:** Ο χάλυβας είναι ένα υλικό υψηλής αντοχής, ιδιαίτερα σε εφελκυσμό. Ο βαθμός της δύναμής του εξαρτάται από τον τρόπο κατασκευής του και τον σκοπό χρήσης του.
- **Ευπλαστικότητα:** Η ικανότητα να διαμορφώνεται και να παραμορφώνεται χωρίς να σπάει. Αυτή η ιδιότητα προέρχεται από την περιεκτικότητα σε άνθρακα.
- **Ικανότητα συγκόλλησης**
- **Μαγνητικές ιδιότητες:** Μπορεί να αλληλεπιδράσει με μαγνητικά πεδία. Οι μαγνητικές ιδιότητες εξαρτώνται από τη σύστασή του και τη θερμική του κατεργασία.



Εικόνα 5: Ιδιότητες Χάλυβα.

2.1.4 Κατηγορίες Χάλυβα

Υπάρχουν αρκετές χιλιάδες ποιότητες χάλυβα οι οποίες έχουν διαφορετικές χημικές συνθέσεις. Με βάση τη χημική τους σύνθεση, οι χάλυβες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες: χάλυβες άνθρακα, χάλυβες κράματος, ανοξείδωτους χάλυβες και χάλυβες εργαλείων. (carbon steels, alloy steels, stainless steels, tool steels). Μια ειδική κατηγορία που χρήζει ανάλυσης είναι ο ηλεκτρικός χάλυβας (electrical steel) [11].



Εικόνα 6: Κατηγορίες Χάλυβα [11].

Οι ανθρακούχοι χάλυβες παράγονται και χρησιμοποιούνται μακράν περισσότερο, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 90% της παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα, καθώς βρίσκουν ευρεία εφαρμογή λόγω και του χαμηλού κόστους τους [11]. Ο άνθρακας, που είναι το κύριο στοιχείο του κράματος και η περιεκτικότητά του επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες του χάλυβα. Αν η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι μικρότερη από 0,25%, τότε ονομάζεται χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα (Low Carbon Steels/Mild Steels) και χαρακτηρίζεται για την υψηλή ολκιμότητά του και την καλή πλαστικότητά του. Βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε κατασκευές, σωλήνες και μαγειρικά σκεύη. Αν η περιεκτικότητα σε άνθρακα βρίσκεται μεταξύ 0,25% και 0,6%, τότε προκύπτει μεσαίας περιεκτικότητας άνθρακα χάλυβας (Medium Carbon Steels) και χαρακτηρίζεται για τη μεγάλη του αντοχή, ενώ μπορεί να ανταποκριθεί εξαιρετικά στη θερμική επεξεργασία. Τέλος, αν η περιεκτικότητά του άνθρακα κυμαίνεται από 0,6% έως 2,1%, τότε πρόκειται για χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας άνθρακα (High Carbon Steels). Αυτός ο τύπος ανθρακούχου χάλυβα χαρακτηρίζεται

από υψηλή σκληρότητα και αντοχή στη φθορά. Είναι κατάλληλος για μαχαίρια, λάμες, εργαλεία κοπής, ελατήρια και σιδηροδρομικές ράγες.

Ο κραματικός χάλυβας είναι ένας από τους πιο ξεχωριστούς τύπους χάλυβα που υπάρχουν. Αποτελείται από κοινά κράματα μετάλλων (αλουμίνιο, μαγγάνιο, τιτάνιο, νικέλιο, χαλκό, πυρίτιο και χρώμιο) σε διάφορες αναλογίες, γεγονός που καθιστά αυτόν τον τύπο χάλυβα ευέλικτο και κατάλληλο για πολλές εφαρμογές. Διαχωρίζεται σε χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε κράματα (Low-Alloy, κραματικά στοιχεία <8%) και σε χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε κράματα (High-Alloy, κραματικά στοιχεία >8%). Η προσθήκη δαπανηρών κραμάτων αρχίζει όταν ζητούνται συνδυασμοί ιδιοτήτων που δεν μπορούν να ικανοποιηθούν από τους χάλυβες άνθρακα. Ειδική σημαντική κατηγορία των Low-Alloy είναι οι χάλυβες HSLA (High-Strength Low-Alloy Steels), οι οποίοι είναι ειδικοί τύποι χάλυβα που περιέχουν μικρές ποσότητες κραματικών στοιχείων όπως το χρώμιο, το νικέλιο, το μολυβδαίνιο και το βανάδιο. Αυτά τα στοιχεία προστίθενται σε χαμηλές συγκεντρώσεις για να ενισχύσουν την αντοχή και την ανθεκτικότητα του χάλυβα χωρίς σημαντική αύξηση του βάρους. Οι HSLA χάλυβες χαρακτηρίζονται από την υψηλή αντοχή τους σε εφελκυσμό και τη βελτιωμένη αντοχή στη διάβρωση, ενώ παραμένουν σχετικά ελαφροί και εύκολα κατεργάσιμοι [12]. Μάλιστα, οι σύγχρονοι HSLA προσφέρουν μεγαλύτερη αντοχή με μικρότερο βάρος, συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τα τελικά προϊόντα, όπως τα αυτοκίνητα.

Ο ανοξείδωτος χάλυβας χαρακτηρίζεται κυρίως από την περιεκτικότητά του σε χρώμιο που κυμαίνεται από 10% έως 20% της συνολικής του σύνθεσης και το οποίο του προσδίδει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση, στη σκουριά και ευκολία στον καθαρισμό του. Στην πραγματικότητα, είναι περίπου 200 φορές πιο ανθεκτικός στη σκουριά σε σύγκριση με άλλους χαλυβδοσωλήνες, θεωρείται πιο κομψός και γι' αυτό η τιμή του είναι πιο υψηλή. Εκτεταμένη χρήση βρίσκει σε υγειονομικά περιβάλλοντα [12].

Οι χάλυβες εργαλείων παράγονται σε μικρές ποσότητες και περιέχουν ακριβά κράματα. Είναι ακριβώς αυτό που υποδηλώνει το όνομά τους — ένας τύπος χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα που έχει σχεδιαστεί ειδικά για τη χρήση στην

κατασκευή εργαλείων, όπως τρυπάνια, λεπίδες πριονιών και κοπτικά εργαλεία. Τα κράματα χάλυβα εργαλείων - μαζί με άλλα μέταλλα όπως το βολφράμιο, το χρώμιο και το βανάδιο - βελτιώνουν την αντοχή, τη σκληρότητα και την ανθεκτικότητα στη φθορά, τη διάβρωση και την υπερθέρμανση.

Πίνακας 2: Ιδιότητες κάθε κατηγορίας χάλυβα [12].

Properties	Carbon Steels	Alloy Steels	Stainless Steels	Tool Steels
Density (1000 kg/m ³)	7.85	7.85	7.75-8.1	7.72-8.0
Elastic Modulus (GPa)	190-210	190-210	190-210	190-210
Poisson's Ratio	0.27-0.3	0.27-0.3	0.27-0.3	0.27-0.3
Thermal Expansion (10 ⁻⁶ /K)	11-16.6	9.0-15	9.0-20.7	9.4-15.1
Melting Point (°C)			1371-1454	
Thermal Conductivity (W/m-K)	24.3-65.2	26-48.6	11.2-36.7	19.9-48.3
Specific Heat (J/kg-K)	450-2081	452-1499	420-500	
Electrical Resistivity (10 ⁻⁹ W-m)	130-1250	210-1251	75.7-1020	
Tensile Strength (MPa)	276-1882	758-1882	515-827	640-2000
Yield Strength (MPa)	186-758	366-1793	207-552	380-440
Percent Elongation (%)	10-32	4-31	12-40	5-25
Hardness (Brinell 3000kg)	86-388	149-627	137-595	210-620

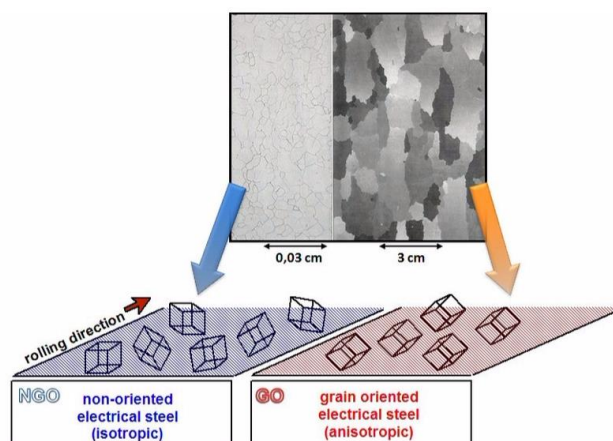
Chart: The Balance • Source: efunda

Οι ηλεκτρικοί χάλυβες είναι εξειδικευμένοι τύποι χάλυβα που χρησιμοποιούνται βασικά σε ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές, κυρίως με περιοδικά μεταβαλλόμενα πεδία, λόγω των εξαιρετικών τους μαγνητικών ιδιοτήτων, που επιτρέπουν την παραγωγή και τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η εφαρμογή τους σε κινητήρες, γεννήτριες και μετασχηματιστές. Οι ηλεκτρικοί χάλυβες περιέχουν πυρίτιο (συνήθως από 1% έως 3,5%), το οποίο βελτιώνει την ηλεκτρική αντίσταση και μειώνει τις απώλειες από την υστέρηση, όπως και τα δινορρέυματα (eddy currents). Διαθέτουν υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, που επιτρέπει τη δημιουργία ισχυρών μαγνητικών πεδίων με λιγότερη απαιτούμενη ενέργεια. Η χρήση ηλεκτρικού χάλυβα αποτελεί πάνω από το 80% όλων των μαγνητικά μαλακών υλικών. Γι' αυτούς τους λόγους και οι δοκιμές του αισθητήρα θα γίνουν σε τέτοιου είδους χάλυβες.



Εικόνα 7: Ηλεκτρικός Χάλυβας.

Ο ηλεκτρικός χάλυβας κατηγοριοποιείται σε δύο είδη, το μη οριοθετημένο (Non-Oriented - NO) και τον οριοθετημένο σε κόκκους (Grain-Oriented - GO) και η διάκριση βασίζεται στη διάταξη και ευθυγράμμιση των κρυστάλλων του χάλυβα, κάτι που επηρεάζει τις μαγνητικές του ιδιότητες και την απόδοσή του. Ο μη οριοθετημένος ηλεκτρικός χάλυβας δεν έχει ειδική ευθυγράμμιση των κρυστάλλων του. Τα κρύσταλλα του χάλυβα είναι τυχαία κατανεμημένα και η κατεύθυνση της μαγνητικής ροής είναι ανεξάρτητη από την κατεύθυνση των κρυστάλλων. Έχει καλές μαγνητικές ιδιότητες σε πολλές κατευθύνσεις, αλλά η αποδοτικότητά του είναι γενικά χαμηλότερη σε σύγκριση με τον οριοθετημένο σε κόκκους χάλυβα. Αντιθέτως, ο οριοθετημένος σε κόκκους ηλεκτρικός χάλυβας υπόκειται σε ειδική διαδικασία επεξεργασίας, στην οποία οι κρύσταλλοι του χάλυβα ευθυγραμμίζονται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αυτή η διαδικασία βελτιστοποιεί τη μαγνητική απόκριση του χάλυβα στην κατεύθυνση των κρυστάλλων, προσφέροντας μεγαλύτερη αποδοτικότητα στην κατανάλωση ενέργειας. Οι μαγνητικές του ιδιότητες είναι βελτιστοποιημένες για μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, προσφέροντας πολύ υψηλή απόδοση σε εφαρμογές που απαιτούν σταθερή και ισχυρή μαγνητική ροή. Η διαδικασία παραγωγής του είναι πιο πολύπλοκη και απαιτεί υψηλότερη τεχνολογία, οπότε ο GO χάλυβας είναι πιο ακριβός από τον NO [13].



Εικόνα 8: Μη οριοθετημένος και οριοθετημένος σε κόκκους ηλεκτρικός χάλυβας.

2.2 Υγεία

Ο χάλυβας γενικώς είναι ένα υλικό που έχει αντοχή στο χρόνο και σε αντίξοες συνθήκες και αναλόγως το είδος του και τα κράματα που χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγή του αυτή μπορεί να βελτιωθεί. Η υγεία του χάλυβα αναφέρεται στην κατάσταση του μετάλλου όσον αφορά την ποιότητά του, την ακεραιότητα και την ανθεκτικότητά του σε εξωτερικές συνθήκες. Ειδικότερα, αφορά την ικανότητά του να αντέχει σε διάφορες καταπονήσεις χωρίς να παρουσιάσει φθορές και ατέλειες, που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση και τη μακροζωία του [14].

2.2.1 Αίτια Ατελειών κατά την Παραγωγική Διαδικασία

Κατά την παραγωγική διαδικασία του χάλυβα, η δημιουργία ατελειών μπορεί να προκύψει από διάφορους παράγοντες, οι οποίοι απαιτούν προσεκτικό έλεγχο και αξιολόγηση για τη διασφάλιση της ποιότητας του τελικού προϊόντος. Ένα από τα βασικά αίτια είναι η χρήση μη καθαρών πρώτων υλών κι ο ανεπαρκής καθαρισμός από υπολείμματα προηγούμενων σταδίων παραγωγής, όπως σκόνη, γράσο, σκωρία. Αυτά τα υπολείμματα μπορούν να ενσωματωθούν στη μικροδομή του υλικού, με αποτέλεσμα να προκύψει ακάθαρτο αποτέλεσμα. Επίσης, το θερμικό σοκ που προκύπτει από λανθασμένο έλεγχο της θερμοκρασίας κατά τη θερμική επεξεργασία, μπορεί να προκαλέσει ρωγμές και εσωτερικές τάσεις, επηρεάζοντας την ομοιογένεια και την αντοχή του υλικού. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας είναι η ζημιά που προκαλείται από εργαλεία κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, όπως το τρίψιμο και

η λείανση. Τέτοιες εργασίες είναι πιθανό να αφήσουν σημάδια, γρατζουνιές ή ανώμαλες επιφάνειες, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν ως σημεία εκκίνησης μελλοντικών ατελειών. Παράλληλα, ατέλειες στη συγκόλληση, που δημιουργούν ασυνέχειες και ύπαρξη σταγόνων λιωμένου υλικού στην επιφάνεια μπορεί να οδηγήσουν σε ανομοιομορφία που δύναται να επηρεάσει μελλοντικά την αντοχή του υλικού. Επομένως, απαιτείται η πολύ αυστηρή τήρηση των κανόνων της ορθής παραγωγικής διαδικασίας του χάλυβα και ο ποιοτικός έλεγχος με κατάλληλες διατάξεις επιτήρησης της υγείας του.

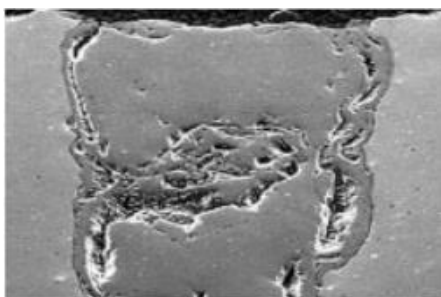
2.2.2 Αίτια Φθοράς κατά τη Χρήση του

Κατά τη χρήση του χάλυβα η φθορά του υλικού οφείλεται σε εξωγενείς παράγοντες. Η υγρασία, η βροχή και γενικότερα το υγρό κλίμα αποτελούν σημαντικές αιτίες διάβρωσης, καθώς συνδυασμός του νερού με τον ατμοσφαιρικό αέρα μπορεί να δημιουργήσει, οξείδια στην επιφάνεια του χάλυβα, μειώνοντας τη μηχανική αντοχή του. Επιπλέον, οι επαναλαμβανόμενες αλλαγές θερμοκρασίας από το κρύο στη ζέστη, είτε λόγω βιομηχανικών ελέγχων και διαδικασιών, είτε λόγω των καιρικών συνθηκών προκαλεί συστολή/διαστολή του υλικού και καταστροφή της δομής του. Αντιστοίχως και η υπεριώδης ακτινοβολία του ηλίου συμβάλλει περαιτέρω στην υποβάθμιση της ποιότητας του χάλυβα. Επιπλέον, η έκθεση σε χημικές ουσίες, οξέα και ατμοσφαιρικούς ρύπους, που συχνά συναντώνται σε βιομηχανικά και αστικά περιβάλλοντα, μπορεί να επιβαρύνει την υγεία του χάλυβα [15]. Τέλος, η κακή μεταχείριση του υλικού, όπως και η μεγάλη καταπόνηση και η έκθεσή του σε μεγάλα φορτία και ισχυρές μηχανικές τάσεις αλλοιώνουν τη μορφολογία του και μειώνουν τη διάρκεια ζωής του.

2.2.3 Ατέλειες

Ο χάλυβας, παρά την ανθεκτικότητά του, μπορεί να παρουσιάζει διάφορες ατέλειες που επηρεάζουν τόσο την απόδοσή του όσο και την αισθητική του. Μία από τις κύριες ατέλειες είναι η εισροή μη μεταλλικών στοιχείων, όπως οξείδια και καρβίδια, τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε οξείδωση/σκουριά, υποβαθμίζοντας τη συνοχή και τη δομική ακεραιότητα του υλικού [16]. Επίσης, μπορούν να προκύψουν

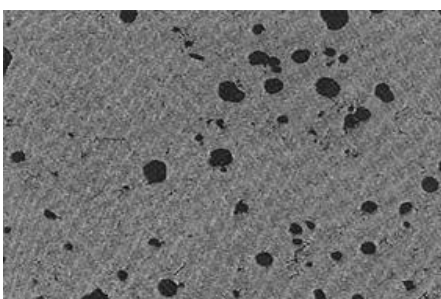
οπές και πόροι κατά τη διαδικασία παραγωγής, είτε στο στάδιο της χύτευσης είτε της συγκόλλησης, αλλά και από θερμικές κατεργασίες και καταπονήσεις καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του υλικού, δημιουργώντας παράλληλα και κηλίδες με ανομοιομορφία χρωματικών τόνων, που καθιστούν το χάλυβα πιο ευάλωτο σε μηχανικές καταπονήσεις. Ρωγμές, θραύσεις και ραγίσματα είναι επίσης κοινές ατέλειες που μειώνουν την αντοχή του υλικού. Μάλιστα, οι έντονες θερμικές μεταβολές μπορούν να προκαλέσουν εξασθένηση και αποχρωματισμό των προστατευτικών στρωμάτων του χάλυβα [17]. Πολλαπλές επιστρώσεις στην επιφάνεια του χάλυβα μπορεί να οδηγούν σε ανομοιογενή φινιρίσματα, ενώ η τριβή μπορεί να προκαλέσει απώλεια υλικού και να δημιουργήσει περιοχές με μειωμένη ανθεκτικότητα. Επιπλέον, βαθουλώματα και εξογκώματα, που συχνά προκύπτουν από χτυπήματα, καθώς και γρατζουνιές, μειώνουν την αισθητική και την αντοχή του χάλυβα σε διάβρωση και κόπωση. Οι παραπάνω ατέλειες καθιστούν απαραίτητη τη συστηματική επιθεώρηση και συντήρηση του χάλυβα για να διασφαλιστεί η μακροχρόνια απόδοσή του και η διατήρηση των επιθυμητών μηχανικών του ιδιοτήτων [18].



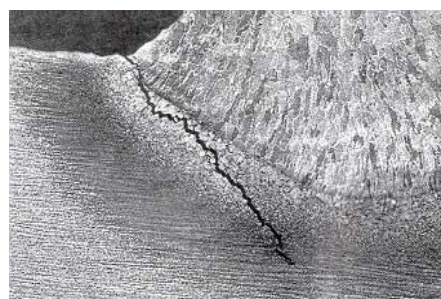
A) Μη μεταλλικές εισροές [17].



B) Οξείδωση.



Γ) Πόροι [17].



Δ) Ρωγμή.



Ε) Χρωματιστές κηλίδες θερμικής καταπόνησης [18].



ΣΤ) Ανομοιογενές φινίρισμα, εξογκώματα, γρατζουνιά.

Εικόνα 9: Δομικές τέλειες χάλυβα.

2.3 Επίβλεψη

Ο όρος "Monitoring" στην περίπτωση του χάλυβα αναφέρεται στη διαδικασία παρακολούθησης της κατάστασης και της απόδοσης του υλικού, με στόχο των εντοπισμό φθορών στο υλικό. Αν και ακόμα είναι σε ισχύ στη βιομηχανία καταστροφικοί έλεγχοι η τεχνολογία έχει εξελιχθεί με την ανάπτυξη αισθητήριων διατάξεων και μη καταστροφικών τεχνικών επιθεώρησης, που επιτρέπουν την ακριβή παρακολούθηση της υγείας του υλικού χωρίς να επηρεάζεται η δομή του. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στους αισθητήρες, και ιδιαιτέρως στους μαγνητικούς, οι οποίοι κατά βάση δε θέτουν σε κίνδυνο το υλικό, αναλύοντας κρίσιμες έννοιες για την κατανόηση της μαγνητικής συμπεριφοράς του χάλυβα.

2.3.1 Αισθητήρας

Αισθητήρας είναι μια συσκευή η οποία μετατρέπει ένα φυσικό φαινόμενο σε ένα ηλεκτρικό σήμα με σκοπό την ανίχνευσή του. Πρακτικά, ανιχνεύει συμβάντα ή αλλαγές στο περιβάλλον και στέλνει αυτές τις πληροφορίες σε ένα ηλεκτρονικό σύστημα επεξεργασίας. Τα πιο γνωστά και συχνά φυσικά μεγέθη για τα οποία χρησιμοποιούνται αισθητήρες είναι η θερμοκρασία, η πίεση, το φως, ο ήχος, η κίνηση κλπ. Είναι χαρακτηριστικό ότι στη σύγχρονη βιομηχανία κατασκευών και κατασκευαστικών υλικών, οι αισθητήρες αποτελούν περίπου το 20-25% της συνολικής τεχνολογικής επένδυσης [19].

Γι' αυτό είναι αναγκαίο οι αισθητήριες διατάξεις να διαθέτουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που εξασφαλίζουν την ακρίβεια, την αξιοπιστία και την αποδοτικότητά τους στις εφαρμογές τους. Για την αξιολόγηση των αισθητήρων υπάρχουν συγκεκριμένες μετρήσιμες παράμετροι, οι οποίες καθορίζουν την ποιότητά τους. Αρχικά είναι η ευαισθησία, η οποία αναφέρεται στη μεταβολή του φυσικού μεγέθους που απαιτείται για να παρατηρηθεί η ελάχιστη μεταβολή στο μετρητικό σύστημα, δηλαδή η σχέση μεταξύ μιας μικρής αλλαγής στο ηλεκτρικό σήμα και της αντίστοιχης μικρής αλλαγής στο φυσικό σήμα, η αβεβαιότητα, η οποία εκφράζει το μεγαλύτερο προσδοκώμενο λάθος μεταξύ της πραγματικής τιμής του σήματος εξόδου και της ιδεατής τιμής του και το εύρος μέτρησης του φυσικού μεγέθους που μπορεί να καταγράψει ο αισθητήρας [19]. Πρόσθετα, σημαντικές παραμέτρους είναι η γραμμικότητα, που αναφέρεται στο πόσο γραμμική είναι η απόκριση του αισθητήρα σε όλο το εύρος μέτρησης, ο χρόνος απόκρισης, που εκφράζει το χρόνο που χρειάζεται ο αισθητήρας, για να ανταποκριθεί σε μια αλλαγή της ποσότητας που μετρά και η σταθερότητα, που περιγράφει την ικανότητα του αισθητήρα να παρέχει αξιόπιστες μετρήσεις για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να απαιτείται βαθμονόμηση. Τέλος, η ανοχή θορύβου αναφέρεται στην ικανότητα του αισθητήρα να αγνοεί εξωτερικούς ηλεκτρικούς ή μηχανικούς θορύβους που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοσή του.

2.3.2 Μαγνητικοί Αισθητήρες

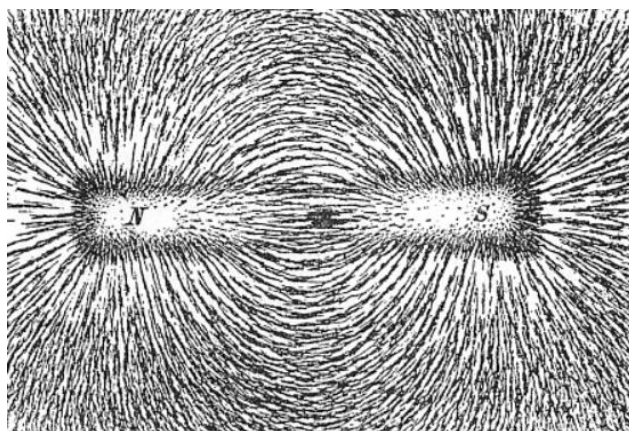
Η παρούσα διπλωματική ασχολείται με την ανάπτυξη μιας αισθητήριας διάταξης που ανήκει στην κατηγορία των μαγνητικών αισθητήρων. Ένας μαγνητικός αισθητήρας ανιχνεύει την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και μετατρέπει το μέγεθος αυτό ή τις μεταβολές του σε μετρούμενο ηλεκτρικό σήμα [20]. Στον τομέα του Steel Health Monitoring οι μαγνητικές μέθοδοι συνδέουν τις μακροσκοπικές μαγνητικές ιδιότητες με τη μικροδομή του υλικού. Για την κατανόηση της πλειοψηφίας των μαγνητικών αισθητήρων και ειδικότερα του αισθητήρα της παρούσας εργασίας είναι αναγκαία η κατανόηση των ακόλουθων βασικών εννοιών.

Μαγνητικό πεδίο και Μαγνητική Ροή

Η μαγνητική επαγωγή B (μονάδα μέτρησης 1Tesla) είναι διανυσματικό μέγεθος που περιγράφει το μαγνητικό πεδίο και εκφράζει πόσο ισχυρό είναι σε κάθε σημείο του. Πηγή προέλευσης του μαγνητικού πεδίου είναι το κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο, δηλαδή το ρεύμα. Η ποσότητα του μαγνητικού πεδίου έντασης B που περνάει μέσα από μια επιφάνεια A ονομάζεται μαγνητική ροή, συμβολίζεται με Φ και μετριέται σε Weber. Η μαγνητική ροή Φ είναι μονόμετρο μέγεθος και σε κλειστή επιφάνεια $\Phi = 0$ [21].

Μαγνητικές Γραμμές

Οι μαγνητικές γραμμές είναι νοητές γραμμές που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν το μαγνητικό πεδίο. Έχουν κατεύθυνση που συμπίπτει με την κατεύθυνση του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου (B) σε κάθε σημείο. Οι μαγνητικές γραμμές δεν τέμνονται ποτέ και εκεί που οι μαγνητικές γραμμές είναι πιο έντονες η ένταση B είναι μεγαλύτερη. Σε αντίθεση με τις ηλεκτρικές, οι μαγνητικές γραμμές είναι κλειστές, εξέρχονται από το βόρειο πόλο, εισέρχονται στο νότιο και συνεχίζουν και μέσα στο σώμα του μαγνητικού υλικού πηγαίνοντας από το νότιο στο βόρειο πόλο [21]. Η μαγνητική ροή Φ είναι ανάλογη του αριθμού των μαγνητικών γραμμών. Χρήσιμη ιδιότητα για τη συνέχεια είναι ότι οι μαγνητικές γραμμές παραμορφώνονται όταν διέρχονται από υλικά με διαφορετική μαγνητική διαπερατότητα.



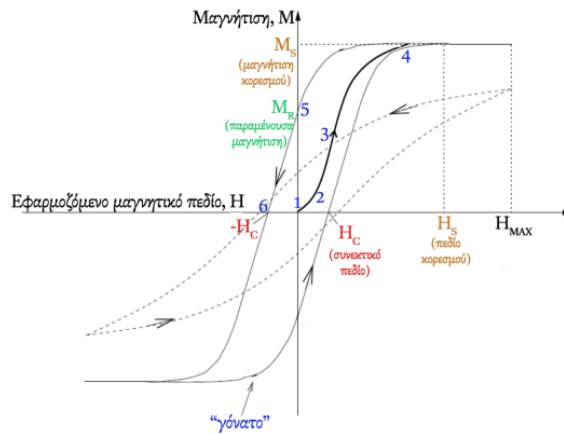
Εικόνα 10: Κατεύθυνση μαγνητικών γραμμών.

Μαγνητική διαπερατότητα

Η ικανότητα ενός υλικού ή μέσου να μαγνητίζεται όταν τοποθετείται σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο είναι αυτό που ονομάζεται μαγνητική διαπερατότητα. Συμβολίζεται με το γράμμα μ και μετράται σε μονάδες Henry ανά μέτρο (H/m). Μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα συνεπάγεται μικρότερη αντίσταση διέλευσης μαγνητικών γραμμών και ροής, καθώς και υψηλότερη αγωγιμότητα του πεδίου. Υλικά με υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, όπως ο χάλυβας και ο μαλακός σίδηρος, είναι ιδανικά για εφαρμογές όπου απαιτείται ενίσχυση του μαγνητικού πεδίου, π.χ., σε πυρήνες μετασχηματιστών ή ηλεκτρομαγνήτες. Η μαγνητική διαπερατότητα μπορεί να μεταβάλλεται αναλόγως την ένταση του μαγνητικού πεδίου, τη θέση του υλικού μέσα στο μαγνητικό πεδίο, τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου πεδίου, την υγρασία, τη θερμοκρασία κ.λπ. Από τη χαρακτηριστική καμπύλη μαγνήτισης του υλικού είναι εφικτό να προκύψει η μαγνητική του διαπερατότητα [22].

Καμπύλη μαγνήτισης

Η μαγνήτιση M ενός υλικού αναφέρεται στην πυκνότητα μαγνητικών διπόλων (ή μαγνητικών ροών) μέσα στο υλικό, δηλαδή στην αντίδραση του υλικού σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Η μαγνήτιση εκφράζει την ένταση της μαγνητικής ροής που δημιουργείται στο υλικό, όταν εκτίθεται σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Η καμπύλη μαγνήτισης ενός υλικού περιγράφει τη σχέση μεταξύ της μαγνήτισης του υλικού M και της έντασης του μαγνητικού πεδίου H , κατά τη διάρκεια ενός κύκλου μαγνήτισης και απομαγνήτισης του υλικού. Η μαγνητική επαγωγή B συνδέεται με τη μαγνήτιση M και τη μαγνητική ένταση H μέσω της εξίσωσης $B = \mu_0 * (M + H)$. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ_r του υλικού ισούται με $\mu_r = 1 + \frac{M}{H}$. Άρα αντιστοίχως μπορεί να παραχθεί και η καμπύλη $B-H$ του υλικού.



Εικόνα 11: Καμπύλη μαγνήτισης M-H [23].

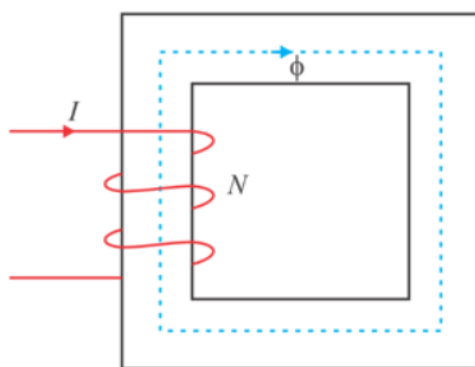
Αρχικά παρατηρείται ότι, όταν το εξωτερικό πεδίο (H) αρχίζει να αυξάνεται από το μηδέν, το υλικό μαγνητίζεται σταδιακά. Αυτό αντιστοιχεί στη φάση όπου οι μαγνητικοί τομείς αναδιοργανώνονται και ευθυγραμμίζονται με την κατεύθυνση του πεδίου. Όταν το πεδίο H είναι αρκετά ισχυρό, το υλικό φτάνει στη μαγνήτιση κορεσμού (M_s). Σε αυτό το σημείο, όλες οι μαγνητικές περιοχές έχουν πλήρως ευθυγραμμιστεί με το πεδίο. Καθώς το πεδίο μειώνεται προς το μηδέν, η μαγνήτιση δεν επιστρέφει στο μηδέν, αλλά παραμένει κάποια ποσότητα μαγνήτισης, που ονομάζεται υπολειπόμενη μαγνήτιση (M_r), φανερώνοντας την ικανότητα του υλικού να διατηρεί μαγνήτιση. Αυτό οφείλεται στη μαγνητική υστέρηση. Για να μηδενιστεί η μαγνήτιση, απαιτείται εφαρμογή αντίθετου πεδίου (αρνητικό H). Αυτό είναι το συνεκτικό πεδίο (H_c) και δείχνει πόσο "ισχυρή" είναι η υστέρηση του υλικού. Με περαιτέρω αύξηση του αρνητικού πεδίου, το υλικό φτάνει ξανά σε κορεσμό στην αντίθετη κατεύθυνση. Όταν το πεδίο αυξάνεται ξανά στη θετική κατεύθυνση, το υλικό επιστρέφει στον θετικό κορεσμό, κλείνοντας έτσι τον κύκλο.

Μαγνητικό κύκλωμα

Μαγνητικό κύκλωμα ονομάζεται μια διάταξη, η οποία περιλαμβάνει κλειστό βρόχο μαγνητικής ροής προκαλούμενης από μαγνητικό πεδίο. Έστω ένα τυπικό μαγνητικό κύκλωμα που αποτελείται από ένα μαγνητικό πυρήνα υλικού υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας (π.χ. σιδήρου), περιτυλιγμένο από ένα πηνίο N σπειρών σε ένα σημείο του [24]. Στο πηνίο αυτό διοχετεύεται ρεύμα i , άρα δημιουργείται μαγνητικό πεδίο, και αναπτύσσεται μια μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ). Αυτό το

πεδίο προκαλεί μαγνητική ροή Φ , η οποία εγκλωβίζεται μέσα στον πυρήνα σιδήρου. Οι μαγνητικές γραμμές ροής ακολουθούν τον κλειστό βρόχο του κυκλώματος, ρέοντας μέσα στον πυρήνα. Επίσης, υπάρχει και η αντίσταση R_μ του κυκλώματος η οποία αντιστέκεται στη μαγνητική ροή και ισούται με $R_\mu = \frac{l}{\mu_r * \mu_0 * S}$, όπου l μέσο μήκος μαγνητικής ροής, μ_r σχετική μαγνητική διαπερατότητα σιδήρου, μ_0 μαγνητική διαπερατότητα κενού και S διατομή υλικού. Ισχύει η εξίσωση:

$$\Phi = \frac{ME\Delta}{R_\mu} = \frac{N * i}{\frac{l}{\mu_r * \mu_0 * S}} = \frac{N * i * \mu_r * \mu_0 * S}{l}$$



Εικόνα 12: Μαγνητικό κύκλωμα [24].

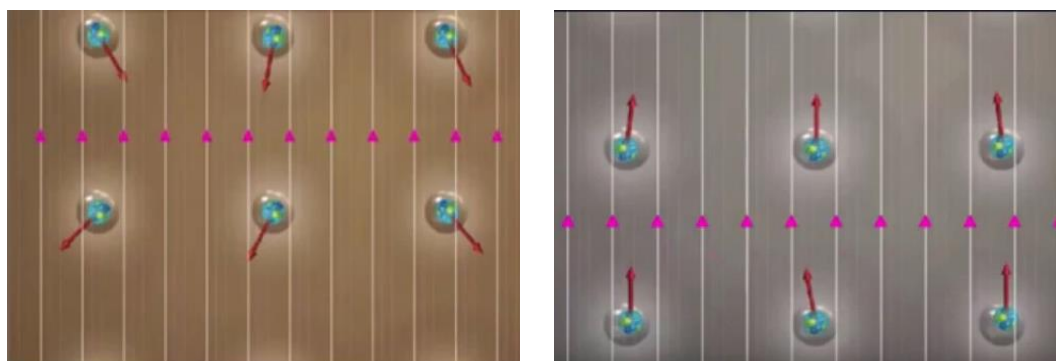
Κατηγοριοποίηση μαγνητικών υλικών

Το κριτήριο διάκρισης των μαγνητικών υλικών βασίζεται στην μαγνητική τους αντίδραση σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και άρα τις μαγνητικές ιδιότητες που εμφανίζει. Οι κύριες κατηγορίες περιλαμβάνουν τα διαμαγνητικά, τα παραμαγνητικά και τα φερρομαγνητικά υλικά [25].

Τα διαμαγνητικά υλικά (π.χ. χρυσός, χαλκός), που αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία των υλικών, αντιστέκονται στο εξωτερικώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτή η αντίδραση προκύπτει από την κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα στα άτομα, η οποία δημιουργεί ένα αδύναμο πεδίο αντίθετης κατεύθυνσης. Το φαινόμενο αυτό είναι εξαιρετικά ασθενές, δεν εμφανίζουν μόνιμο μαγνητισμό και γι' αυτό χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία προστασίας από εξωτερικά μαγνητικά πεδία. Όταν πάψει να υφίσταται το εξωτερικό πεδίο παύει να υπάρχει και η

μαγνητική συμπεριφορά των υλικών αυτών. Η μαγνητική διαπερατότητά τους είναι $\mu < 1$, καθώς το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του υλικού εξασθενεί [22].

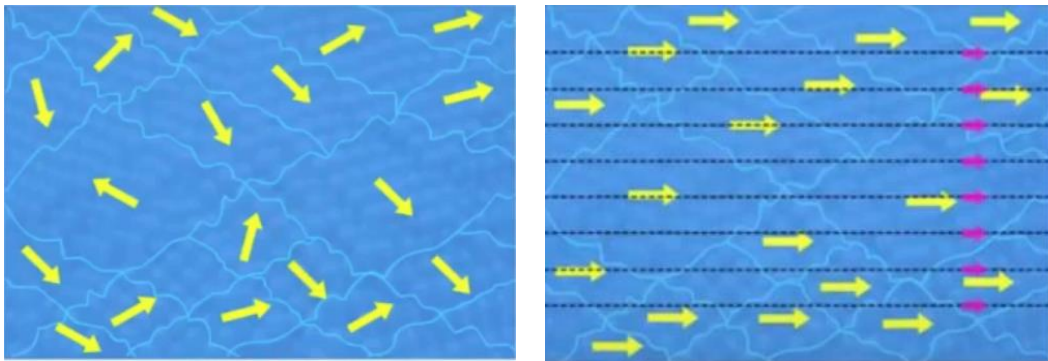
Στα παραμαγνητικά υλικά το κάθε άτομο παρουσιάζει από μόνο του μια μαγνητική συμπεριφορά, δηλαδή συμπεριφέρεται σα μικρός μαγνήτης. Ωστόσο, αυτοί οι μαγνήτες είναι άτακτα διατεταγμένοι, με αποτέλεσμα συνολικά το υλικό να μην παρουσιάζει μαγνητική συμπεριφορά. Τα παραμαγνητικά υλικά, όπως το αλουμίνιο και το οξυγόνο, έλκονται ασθενώς από τα μαγνητικά πεδία όταν αυτά εφαρμόζονται, αλλά δε διατηρούν το μαγνητισμό μετά την απομάκρυνση των πεδίων. Εμφανίζουν όμοιας κατεύθυνσης πεδίο, αλλά ασθενούς τιμής έντασης σε σχέση με το εξωτερικώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Η τιμή αυτή είναι χαμηλή, διότι μόνο ένα μικρό μέρος των ατόμων σε σχέση με το σύνολο προσανατολίζει το μαγνητικό τους πεδίο κατά τη φορά του εξωτερικού. Αφαιρώντας το μαγνητικό πεδίο χάνεται ο προσανατολισμός των ατόμων, άρα και το κομμάτι του υλικού παύει να έχει μαγνητική συμπεριφορά. Η μαγνητική διαπερατότητά τους είναι $\mu > 1$, καθώς πλέον το μαγνητικό πεδίο είναι ελαφρώς ισχυρότερο από πριν.



Εικόνα 13: Μαγνητική συμπεριφορά Α) διαμαγνητικών υλικών Β) παραμαγνητικών υλικών.

Τα φερρομαγνητικά υλικά, όπως ο χάλυβας και ο σίδηρος, είναι υλικά που έλκονται έντονα από τα μαγνητικά πεδία και μπορούν να μαγνητιστούν μόνιμα. Σε μη μαγνητισμένο φερρομαγνητικό υλικό, οι μικρές μαγνητικές περιοχές που υπάρχουν (μαγνητικοί τομείς - magnetic domains) έχουν τυχαίες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα να αλληλοαναιρείται η συνολική μαγνήτιση. Όταν εφαρμόζεται εξωτερικό μαγνητικό πεδίο πολλοί τομείς αρχίζουν και ευθυγραμμίζονται με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και υπάρχει μεγάλη αύξηση του πεδίου. Τα υλικά αυτά

έλκονται από τους μαγνήτες. Αν όλοι ευθυγραμμιστούν με το εξωτερικό πεδίο, το υλικό φτάνει στην κατάσταση κορεσμού, δηλαδή η μαγνήτιση δεν μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω. Αν το εξωτερικό πεδίο αφαιρεθεί, ορισμένοι τομείς μπορεί να παραμείνουν ευθυγραμμισμένοι λόγω της μαγνητικής υστέρησης, δημιουργώντας μόνιμη μαγνήτιση και τότε πρόκειται για σκληρό σιδηρομαγνητικό υλικό (χάλυβας), ενώ αν δεν παραμείνουν ευθυγραμμισμένοι οι τομείς, τότε το υλικό χαρακτηρίζεται ως μαλακό σιδηρομαγνητικό (καθαρός σίδηρος). Η μαγνητική τους διαπερατότητα είναι $\mu \gg 1$, καθώς έλκονται ισχυρά από το πεδίο.



Εικόνα 14: Α) Μη μαγνητισμένο φερρομαγνητικό υλικό, Β) Μαγνητισμένο φερρομαγνητικό υλικό.

3 Τεχνικές Ελέγχου Υγείας Χάλυβα

Στο παρόν κεφάλαιο, θα εξεταστούν αναλυτικά οι υφιστάμενες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της υγείας του χάλυβα, με σκοπό να γίνουν κατανοητές οι αρχές λειτουργίας τους, τα προτερήματα και τα ελαττώματά τους. Συγκεκριμένα, οι τεχνικές αυτές θα διαχωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες: τις καταστροφικές και τις μη καταστροφικές. Οι καταστροφικές μέθοδοι περιλαμβάνουν δοκιμές που απαιτούν την αλλοίωση ή την καταστροφή ενός δείγματος του υλικού, ενώ οι μη καταστροφικές μέθοδοι δίνουν τη δυνατότητα αξιολόγησης της δομής και της αντοχής του χάλυβα χωρίς να προκαλείται φθορά στο υλικό. Ακολούθως, θα παρουσιαστεί η θεωρητική ανάλυση, η μεθοδολογία και τα χαρακτηριστικά της διάταξης, που υλοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική.

3.1 Καταστροφικές Τεχνικές Ελέγχου

Ο καταστροφικός έλεγχος (Destructive Testing - DT) αποτελεί μια κρίσιμη διαδικασία αξιολόγησης της μηχανικής αντοχής και των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών. Οι μέθοδοι αυτές περιλαμβάνουν τη μόνιμη αλλοίωση ή καταστροφή του δοκιμίου, με στόχο την ακριβή μέτρηση των παραμέτρων του. Τα βασικά τους πλεονεκτήματα σε σχέση με τις τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου (Non-Destructive Testing – NDT) είναι ότι επιτρέπουν την πλήρη ανάλυση της εσωτερικής δομής του υλικού, σε αντίθεση με τις NDT, που βασίζονται σε έμμεσες ενδείξεις και δοκιμάζουν το υλικό σε πραγματικές συνθήκες φόρτισης. Γι' αυτό οι DT δοκιμές είναι απαραίτητες για την πιστοποίηση υλικών και προϊόντων σύμφωνα με διεθνή πρότυπα (ASTM, ISO, EN).

3.1.1 Drill Hole Testing

Η μέθοδος Drill Hole Testing (δοκιμή δημιουργίας οπής) χρησιμοποιείται για να εξετάσει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου για την παρακολούθηση της υγείας του χάλυβα βασίζεται στη διαδικασία της διάτρησης του υλικού, με σκοπό την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με την

κατάστασή του [26]. Αρχικά, προσδιορίζεται το σημείο, που θα γίνει η διάτρηση. Συνήθως, επιλέγονται σημεία τα οποία είναι εκτεθειμένα σε πιο έντονες καταπονήσεις. Στη συνέχεια, δημιουργείται η τρύπα με τρόπο τέτοιο ώστε να είναι ακριβής και να αποφευχθεί ζημιά στο υπόλοιπο υλικό. Το δείγμα του υλικού που εξάγεται, αναλύεται ώστε να ανιχνευτεί η ύπαρξη οποιασδήποτε μορφής ατελειών στο υλικό, καθώς και έλεγχος αντοχής σε εφελκυσμό. Μετά τη διάτρηση, μπορεί να γίνει μέτρηση του πάχους του χάλυβα για να διαπιστωθεί αν υπάρχει μείωση του πάχους λόγω διάβρωσης. Επίσης, στην περιοχή γύρω από την τρύπα πραγματοποιείται έλεγχος για τυχόν φθορές στην επιφάνεια του χάλυβα ή σημάδια που μπορεί να υποδηλώνουν έντονη καταπόνηση. Η τρύπα που δημιουργείται στη μέθοδο της διάτρητης οπής δεν είναι πλήρης σε βάθος για μείωση της ζημιάς στο υλικό, αλλά έχει καθορισμένο βάθος, το οποίο εξαρτάται από την εφαρμογή και τη μέθοδο ανάλυσης που χρησιμοποιείται. Η τεχνική αυτή έχει τα πλεονεκτήματα της καλής ακρίβειας και αξιοπιστίας, της τυποποιημένης διαδικασίας και της εύκολης πρακτικής εφαρμογής. Η ζημιά που προκαλείται στο δείγμα περιορίζεται στην μικρή διάτρητη οπή και συχνά είναι ανεκτή ή επισκευάσιμη.

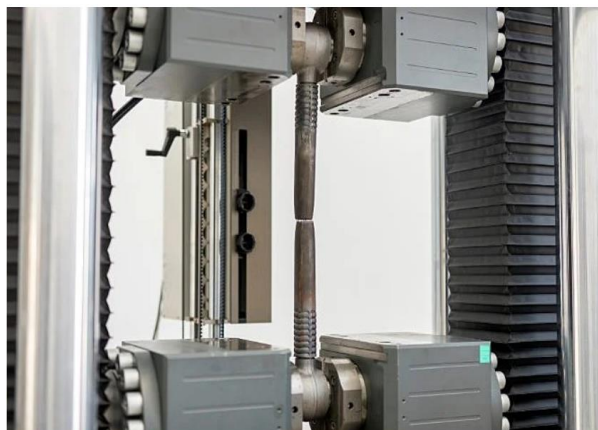


Εικόνα 15: Μέθοδος Drill Hole.

3.1.2 Tensile Testing

Η δοκιμή εφελκυσμού (Tensile Testing) είναι μία από τις πιο βασικές καταστροφικές μεθόδους για τη μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την αξιολόγηση της ποιότητάς του. Η δοκιμή εφελκυσμού είναι ένας τύπος δοκιμής καταπόνησης, που πραγματοποιείται μέσω επιμήκυνσης ή

συμπίεσης του δείγματος για τον προσδιορισμό της αντοχής του υλικού. Στην ουσία, η δοκιμή εφελκυσμού εντοπίζει τη μέγιστη φόρτιση που μπορεί να αντέξει το υλικό χωρίς να σπάσει, δίνοντας έτσι σημαντικά δεδομένα για την υγεία του χάλυβα. Η δοκιμή εφελκυσμού περιλαμβάνει την εφαρμογή αυξανόμενης τάσης (εφελκυστικής δύναμης) σε ένα δείγμα του υλικού, το οποίο είναι τοποθετημένο σε ένα δοκιμαστικό μηχάνημα. Το δείγμα υπόκειται σε φόρτιση μέχρι να σπάσει ή να υποστεί κάποια παραμόρφωση [27]. Αρχικά, το δείγμα επιλέγεται να είναι σε μορφή κυλινδρικού ή παραλληλόγραμμου σώματος, για να αποφεύγονται τα σφάλματα στις μετρήσεις και τα άκρα του δείγματος είναι συχνά τοποθετημένα σε ειδικούς σφιγκτήρες που είναι συνδεδεμένοι με το μηχάνημα εφελκυσμού. Εν συνεχεία, τοποθετείται στο μηχάνημα εφελκυσμού, το οποίο είναι εξοπλισμένο με αισθητήρες, ώστε να καταγράφονται με ακρίβεια η δύναμη και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις του δείγματος, καθώς αυξάνεται η τάση. Το υλικό εισέρχεται αρχικά στην ελαστική περιοχή, όπου το υλικό επιστρέφει στην αρχική του μορφή όταν αφαιρεθεί η δύναμη, και έπειτα στην πλαστική περιοχή, όπου το υλικό παραμορφώνεται μόνιμα. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το υλικό να φτάσει στη μέγιστη αντοχή του, δηλαδή την μέγιστη δύναμη που το υλικό μπορεί να αντέξει πριν τη θραύση. Αν η αντοχή σε εφελκυσμό είναι χαμηλή, αυτό μπορεί να υποδεικνύει ακατάλληλη θερμική επεξεργασία, εσωτερικές ατέλειες ή κακή ποιότητα του υλικού. Η διαδικασία θραύσης μπορεί να προσφέρει πληροφορίες για τη μικροδομή του υλικού. Η κατεύθυνση της ρωγμής ή η αιχμηρότητα της θραύσης μπορεί να αποκαλύψουν το σημείο εκκίνησης για τη διάδοση της ατέλειας. Αν το δείγμα σπάσει σε σημεία όπου δεν αναμενόταν ή αν η θραύση είναι τραχιά και ακανόνιστη, αυτό δείχνει περιοχές με υψηλότερη εσωτερική ένταση, που επιδεινώνονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής.



Εικόνα 16: Tensile Testing.

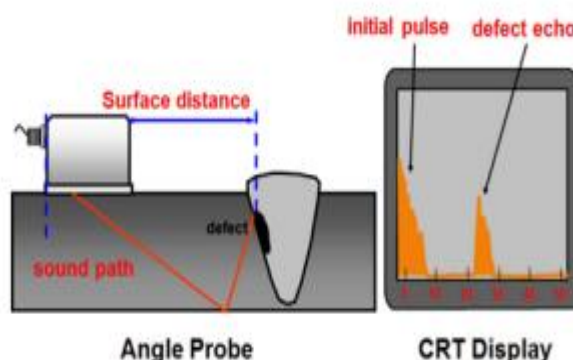
3.2 Μη Καταστροφικές Τεχνικές Ελέγχου

Οι μη καταστροφικές δοκιμές (Non-Destructive Testing - NDT) είναι τεχνικές που επιτρέπουν την αξιολόγηση της ακεραιότητας και των ιδιοτήτων ενός υλικού, χωρίς να προκαλούν μόνιμη φθορά ή καταστροφή. Χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία για την ανίχνευση ελαττωμάτων, τη διασφάλιση της ποιότητας και την πρόληψη αστοχιών. Τα βασικά τους προτερήματα, πέρα από το προφανές της μη καταστροφής του υλικού, είναι η εξαγωγή αποτελεσμάτων άμεσα, η δυνατότητα οι έλεγχοι να γίνονται επιτόπου, χωρίς διακοπή της παραγωγής ή της λειτουργίας μιας εγκατάστασης και η εφαρμογή τους ακόμα και σε μεγάλες μεταλλικές κατασκευές, σωληνώσεις, συγκολλήσεις και μηχανήματα χωρίς να απαιτείται αποσυναρμολόγηση.

3.2.1 Ultrasonic Testing

Η μέθοδος υπερήχων UT χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ατελειών στο εσωτερικό της επιφάνειας του υλικού και τη μέτρηση του πάχους του υλικού. Για να εφαρμοστεί, απαιτεί έναν πομπό/δέκτη, μονάδες ελέγχου του ηλεκτρονικού σήματος, μια οθόνη, μετατροπείς, καλώδια και υγρό σύζευξης. Ορισμένες φορές απαιτείται προετοιμασία της επιφάνειας, η οποία περιλαμβάνει βούρτσες, δίσκους λείανσης, ξύστρες και σφυριά. Η διαδικασία περιλαμβάνει την τοποθέτηση ενός πομπού υπερήχων στην επιφάνεια του χάλυβα, ο οποίος στέλνει τα κύματα στο υλικό. Όταν τα κύματα συναντούν μια ανωμαλία, ανακλώνται και επιστρέφουν στον

ανιχνευτή, επιτρέποντας την ακριβή εκτίμηση της θέσης και του μεγέθους της ανωμαλίας και των οποιονδήποτε εσωτερικών ελαττωμάτων του υλικού [28].



Εικόνα 17: Διάταξη UT [28].

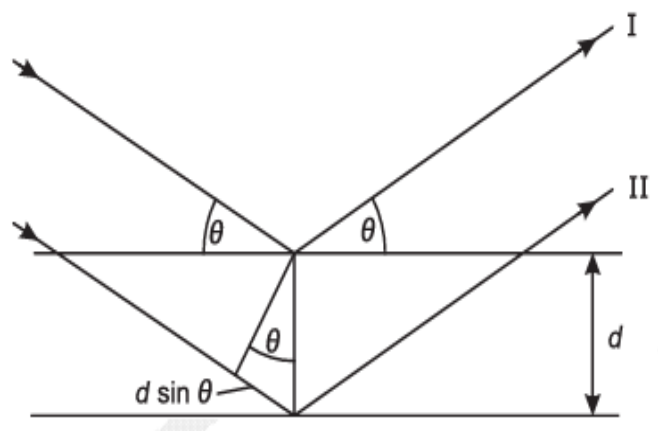
Ο πομπός είναι το πρώτο στοιχείο στη διάταξη και λειτουργεί ως υπερηχητικός μετατροπέας, που είναι υπεύθυνος για την παραγωγή των υπερηχητικών κυμάτων και την αποστολή τους στο υλικό, μέσα στο οποίο διαδίδονται. Ο πομπός μπορεί να είναι είτε μονής είτε διπλής λειτουργίας (εκπέμπει και λαμβάνει τα κύματα). Πολύ συχνά παρατηρείται, η παρουσία κενών αέρα μεταξύ της επαφής του μετατροπέα UT και της επιφάνειας του δοκιμίου με αποτέλεσμα τη διάσπαση των κυμάτων. Για το λόγο αυτό, εφαρμόζεται ένα υγρό (gel) επαφής στην επιφάνεια για να ενισχυθεί η σύνδεση στο πεδίο και να αποτραπεί η διάσπαση των κυμάτων. Το ανακλώμενο σήμα επιστρέφει στο δέκτη και τα ληφθέντα σήματα μεταδίδονται σε μια οθόνη, όπου απεικονίζονται ως κυματομορφές. Ανάλογα με την ένταση, το χρόνο και τη θέση των ανακλάσεων, μπορεί να εκτιμηθεί το μέγεθος, το βάθος και η θέση της ατέλειας. Η μέθοδος UT θεωρείται μια γρήγορη μέθοδος NDT. Η ακρίβεια της στην ανίχνευση ελαττωμάτων και η δυνατότητα φορητότητας της διάταξης είναι σημαντικά πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής. Ωστόσο, είναι λιγότερο αποτελεσματική για την επιθεώρηση πολύ λεπτών εξαρτημάτων και στοιχείων με πολύπλοκη γεωμετρία.



Εικόνα 18: Έλεγχος με αισθητήρα UT [28].

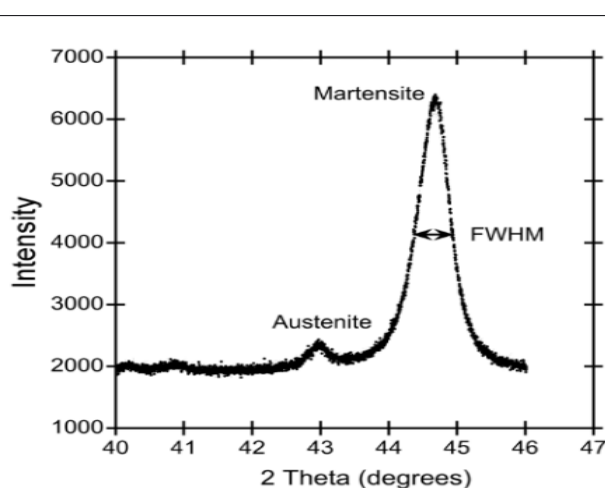
3.2.2 XRD (X-Ray Diffraction)

Ένα σύστημα XRD περιλαμβάνει μια πηγή ακτίνων X, δηλαδή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων υψηλής ενέργειας που αλληλεπιδρούν με τα άτομα του υλικού, η οποία παράγει μονοχρωματικές ακτίνες. Στην ανάλυση μέσω XRD, οι ακτίνες X κατευθύνονται στην επιφάνεια ενός δείγματος και ανακλώνται προς έναν ανιχνευτή από το κρυσταλλικό πλέγμα λόγω της περίθλασης κατά Bragg. Η περίθλαση εμφανίζεται όταν οι ανακλώμενες ακτίνες από διαφορετικά επίπεδα πλέγματος ενισχύονται μεταξύ τους λόγω συμβολής. Η γωνία και η ένταση των περιθλώμενων ακτίνων X καθορίζονται από τη σχέση του Bragg: $n\lambda = 2d\sin\theta$, όπου n =τάξη περίθλασης (συνήθως 1), λ = μήκος κύματος των ακτίνων X, d = απόσταση μεταξύ των ατομικών επιπέδων και θ = γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων X [29].



Εικόνα 19: Νόμος του Bragg.

Η ταυτοποίηση των φάσεων επιτυγχάνεται συγκρίνοντας το πρότυπο περίθλασης ακτινών Χ που λαμβάνεται από ένα άγνωστο δείγμα με πρότυπα μιας βάσης δεδομένων αναφοράς (η πιο ολοκληρωμένη βάση δεδομένων διατηρείται από το International Centre of Diffraction Data). Η ανάλυση γίνεται με σάρωση του δείγματος σε διάφορες γωνίες και καταγραφή των κορυφών περίθλασης στο διάγραμμα 2θ. Αποκλίσεις από το φυσιολογικό πρότυπο φάσης ή το μέγεθος της κορυφής δείχνουν την ύπαρξη ατελειών.



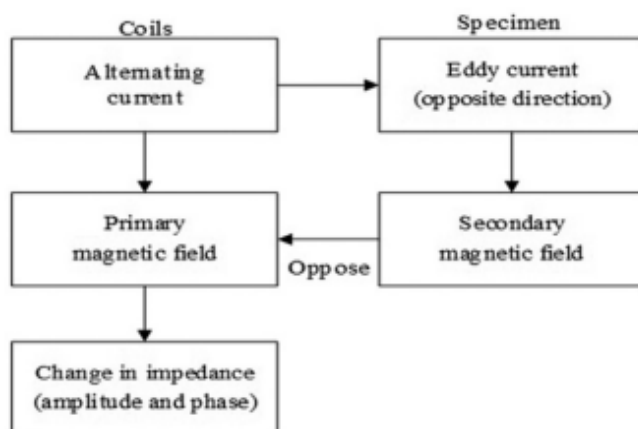
Εικόνα 20: Ένταση περίθλασης ως προς γωνία 2θ.

Το XRD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ατελειών στον χάλυβα, κυρίως σε ό,τι αφορά τις κρυσταλλικές ατέλειες και τις μικροδομικές ανωμαλίες. Η εκτέλεση μετρήσεων XRD μπορεί να θεωρηθεί και ως καταστροφική τεχνική λόγω της τομής που απαιτείται συνήθως στο υλικό, προκειμένου να ληφθεί δείγμα του υλικού. Ωστόσο, αυτό το δείγμα στη συνέχεια δεν υπόκειται σε καταστροφικό έλεγχο, γι' αυτό και η τεχνική εν τέλει θεωρείται μη καταστροφική. Ο λόγος που προτιμάται είναι η πολύ υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία στην ανίχνευση φάσεων και η δυνατότητα ανάλυσης μικρών ποσοτήτων δείγματος.

3.2.3 Eddy Current Testing

Η τεχνική των δινορρευμάτων βασίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ μιας πηγής μαγνητικού πεδίου και του εξεταζόμενου υλικού, η οποία προκαλεί την εμφάνιση δινορρευμάτων στο υλικό, καθιστώντας εφικτή την ανίχνευση πολύ μικρών ρωγμών και παρακολουθώντας τις αλλαγές στη ροή των δινορρευμάτων. Στη διάταξη υπάρχει

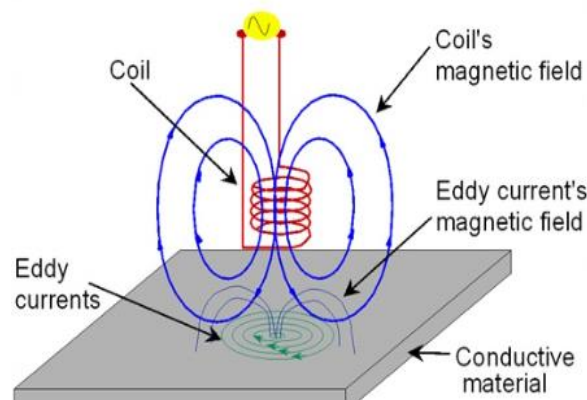
ένα πηνίο που τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα και συνεπώς δημιουργεί το κύριο μαγνητικό πεδίο, που μεταβάλλεται με το χρόνο. Το πεδίο αυτό παράγει τα δινορρεύματα στο χάλυβα, τα οποία δημιουργούν ένα δευτερεύον μαγνητικό πεδίο σε αντίθετη κατεύθυνση. Οι ατέλειες στο δείγμα διαταράσσουν τα δινορρεύματα και μειώνουν το δευτερεύον μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα την αλλαγή της εμπέδησης του πηνίου.



Εικόνα 21: Διάγραμμα διαδικασίας ECT [30].

Η απόκριση των δινορρευσμάτων επηρεάζεται έντονα από τη συχνότητα που επιλέγεται για την έρευνα. Αυτός ο παράγοντας πρέπει να επιλεγεί κατάλληλα από τον χειριστή, με βάση το δείγμα ανίχνευσης ρωγμών. Γενικώς, επιλέγονται χαμηλότερες συχνότητες για τον χαρακτηρισμό όγκου και υψηλότερες συχνότητες για τον χαρακτηρισμό επιφάνειας. Στην επιθεώρηση χαλύβων, εφαρμόζονται δοκιμές χαμηλής συχνότητας για να διεισδύσουν στο υπό εξέταση δείγμα και να αντισταθμίσουν την υψηλή τους διαπερατότητα. Ο χάλυβας μάλιστα είναι υλικό που λόγω της χαμηλής σχετικά αγωγιμότητάς του επιτρέπει μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης των δινορρευσμάτων στο υλικό. Πιο σημαντική παράμετρος είναι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, τα H/M σήματα επηρεάζονται σημαντικά από τα φερρομαγνητικά υλικά λόγω της αύξησης της ροής που παράγεται από τη μεγάλη σχετική διαπερατότητά τους [30]. Η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού αλλάζει τη σύνδεση του πηνίου με το αγωγίμο δείγμα και στη συνέχεια επηρεάζει την αντίδραση του πηνίου. Η τεχνική αυτή επιτρέπει τον εντοπισμό ρωγμών σε μια μεγάλη ποικιλία αγωγίμων υλικών, είτε φερρομαγνητικών είτε μη φερρομαγνητικών, ενώ άλλες μη καταστροφικές τεχνικές, περιορίζονται σε φερρομαγνητικά μέταλλα. Ένα ακόμη

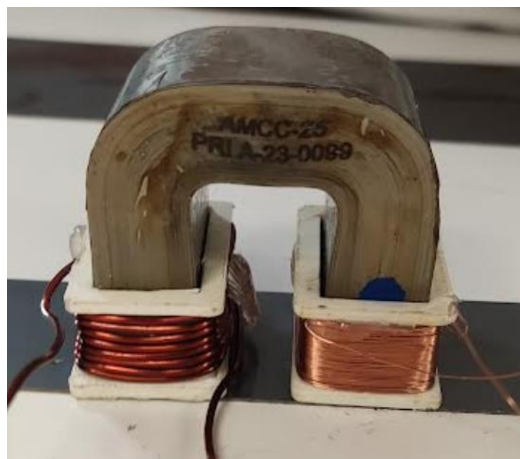
πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η επιθεώρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς φυσική επαφή μεταξύ του αισθητήρα και του δοκιμίου.



Εικόνα 22: Δημιουργία δινορρευσμάτων.

3.3 Αρχή λειτουργίας αισθητήρα

Η διάταξη αποτελείται από ένα ηλεκτρομαγνητικό γοκε στο οποίο είναι προσαρτημένο ένα πηνίο διέγερσης στο ένα του άκρο και ένα πηνίο λήψης στο άλλο [31].



Εικόνα 23: Αισθητήρια διάταξη.

Από το ρεύμα που επάγεται στο πηνίο διέγερσης δημιουργείται εναλλασσόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στο γοκε. Από τον κανόνα του δεξιού χεριού βρίσκεται η κατεύθυνση του πεδίου. Όταν ηλεκτρικό ρεύμα I διαρρέει το πηνίο διέγερσης, σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού, το μαγνητικό πεδίο B που παράγεται έχει κατεύθυνση ώστε αν κλείσει κάποιος τη δεξιά παλάμη γύρω από το πηνίο με τα

δάχτυλα προς την κατεύθυνση του ρεύματος, ο αντίχειρας δείχνει τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου μέσα στο yoke. Αυτό σημαίνει ότι το πεδίο κατευθύνεται μέσα στο yoke, οδηγώντας τις μαγνητικές γραμμές από το ένα σκέλος του yoke στο άλλο [32].

Το yoke είναι κατασκευασμένο από υλικό Mu-metal, έχει ως χαρακτηριστικό την πολύ υψηλή μαγνητική διαπερατότητα ως υλικό και χρησιμεύει στη μαγνήτιση του δείγματος. Όταν το yoke τοποθετείται πάνω στο δοκίμιο χάλυβα, ολοκληρώνει το μαγνητικό κύκλωμα, επιτρέποντας στις μαγνητικές γραμμές να περάσουν μέσα από το δοκίμιο. Χρησιμοποιείται επίσης ώστε να αυξηθεί η μαγνητική ροή και να μειωθεί η μαγνητική αντίσταση επιτρέποντας έτσι στο πεδίο να διέρχεται ευκολότερα μέσα από το yoke και το δοκίμιο [33]. Αυτό συμβάλλει στην εστίαση και την οδήγηση της μαγνητικής ροής, διαμορφώνοντας ένα πιο ομοιόμορφο και ελεγχόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο βελτιώνει τη σύζευξη με το δοκίμιο. Το πεδίο λόγω της υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας του yoke προτιμάει να περάσει μέσα από το yoke κι όχι να διασκορπιστεί στον αέρα, διότι το μαγνητικό πεδίο έχει την ιδιότητα να ακολουθεί τη διαδρομή ελάχιστης μαγνητικής αντίστασης. Το yoke συνεπώς συγκεντρώνει τις μαγνητικές γραμμές και είναι κατ' επέκταση ικανό να προσφέρει ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο. Η χρήση του λοιπόν, μειώνει τις απώλειες και αυξάνει την απόδοση, καθώς απαιτείται λιγότερο ρεύμα διέγερσης για τη δημιουργία του επιθυμητού πεδίου.

Το yoke πρέπει να είναι κοντά όσο γίνεται στο χάλυβα που μετράται, δηλαδή να υπάρχει όσο το δυνατόν μικρότερο air gap, ώστε οι μαγνητικές γραμμές να συνεχίσουν όλες την πορεία τους μέσα από το χάλυβα [31]. Ο αέρας έχει τεράστια μαγνητική αντίσταση (R_m) σε σχέση με τον χάλυβα, γιατί η μαγνητική του διαπερατότητα είναι πολύ μικρή. Άρα, αν το διάκενο αέρα είναι μεγάλο, η μαγνητική ροή θα μειωθεί δραστικά και δεν θα περάσει επαρκώς στο χάλυβα. Επιπλέον, πολλές μαγνητικές γραμμές θα "ξεφύγουν" στον αέρα, αντί να εισέλθουν στο δοκίμιο και το πεδίο θα είναι ασθενέστερο, με αποτέλεσμα η ευαισθησία του πηνίου λήψης να μειωθεί, καθιστώντας πιο δύσκολη την ανίχνευση ατελειών. Παρ' όλα αυτά χρειάζεται να υπάρχει ένα air gap ανάμεσα στο yoke και στο δοκίμιο χάλυβα ώστε να

σέρνεται πάνω στο υλικό. Ένα μικρό διάκενο αέρα μειώνει την τριβή, επιτρέποντας στο γοke να γλιστράει ομαλά κατά τη διάρκεια της σάρωσης.

Το δημιουργούμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο διαπερνά το δοκίμιο χάλυβα, προκαλώντας μαγνητική ροή μέσα στο υλικό, καθιστώντας την όλη διάταξη ένα ηλεκτρομαγνητικό κύκλωμα. Αν το δοκίμιο είναι συνεχές και χωρίς ατέλειες, η μαγνητική ροή κατανέμεται ομοιόμορφα [34]. Αν υπάρχει ατέλεια, η μαγνητική ροή δεν μπορεί να περάσει από το σημείο της ασυνέχειας και δημιουργεί ένα διαρρέον μαγνητικό πεδίο γύρω από την ατέλεια. Το πηνίο λήψης ανιχνεύει αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο, δηλαδή τις διαρροές που προκαλούνται από τις ατέλειες. Οι αλλαγές αυτές προκαλούν επαγωγική τάση στο πηνίο λήψης, η οποία μπορεί να μετρηθεί και να αναλυθεί. Η πτώση της τάσης στο πηνίο λήψης οφείλεται στην αλλαγή της μαγνητικής ροής λόγω της παρουσίας ατελειών στο υλικό. Σύμφωνα με τον νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday, η τάση (V) που επάγεται στο πηνίο λήψης είναι: $V = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NA \frac{dB}{dt}$. Όταν το δοκίμιο είναι άθικτο, η μαγνητική ροή διαδίδεται ομοιόμορφα μέσα στο υλικό, και το πλάτος της επαγόμενης τάσης στο πηνίο λήψης δε διαταράσσεται. Αν όμως υπάρχει ατέλεια, μέρος της μαγνητικής ροής διαρρέεται εκτός δοκιμίου, προκαλώντας μείωση της συνολικής ροής που συλλαμβάνει το πηνίο λήψης [32]. Η μείωση της μαγνητικής ροής συνεπάγεται μικρότερη μεταβολή $\frac{d\Phi}{dt}$ άρα και μικρότερο πλάτος τάσης. Έτσι, όταν σαρώνεται το υλικό και παρατηρείται πτώση της τάσης, αυτό υποδηλώνει ότι η μαγνητική ροή έχει διαταραχθεί λόγω της ύπαρξης μιας ατέλειας.

Σύμφωνα με το Νόμο του Faraday, μια χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή επάγει ηλεκτρικά ρεύματα μέσα στο αγώγιμο δοκίμιο. Αυτά τα επαγόμενα ρεύματα κυκλοφορούν σε κλειστούς βρόχους μέσα στο χάλυβα, σχηματίζοντας τα δινορρεύματα. Σύμφωνα με τον Νόμο του Lenz, τα δινορρεύματα δημιουργούν το δικό τους μαγνητικό πεδίο, το οποίο αντιστέκεται στην αρχική μεταβολή της μαγνητικής ροής, με αποτέλεσμα την πρόκληση απωλειών. Αυτές οι απώλειες είναι συνήθως αναλογικές προς την τετραγωνική τιμή της συχνότητας και εξαρτώνται από την συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε χαμηλές συχνότητες, τα δινορρεύματα είναι μικρότερα, οπότε οι απώλειες είναι μικρότερες, ενώ σε υψηλές

τα δινορρεύματα είναι ισχυρότερα και οι απώλειες αυξάνονται. Όταν εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ρεύμα στον χάλυβα (ή σε οποιοδήποτε μαγνητικό υλικό), εμφανίζεται το φαινόμενο του επιφανειακού ρεύματος ή skin effect. Σε υψηλότερες συχνότητες, τα δινορρεύματα περιορίζονται στην επιφάνεια του υλικού, ενώ σε πιο χαμηλές μπορεί να διεισδύσουν βαθύτερα στο υλικό. Αυτό προκύπτει και από τον τύπο για το βάθος διείσδυσης δ :

$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}}$, όπου δ είναι το βάθος διείσδυσης, ρ είναι η αντίσταση του υλικού, μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, ω είναι η γωνιακή συχνότητα του πεδίου. Για αυτούς τους λόγους η πειραματική διάταξη θα λειτουργήσει σε χαμηλές συχνότητες, οι οποίες ονομάζονται και quasi DC.

4 Στοιχεία και Εργαλεία Διάταξης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα απαραίτητα εργαλεία, το λογισμικό και τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της αισθητήριας διάταξης. Θα περιγραφούν τα βασικά στοιχεία του συστήματος, η λειτουργία τους και ο ρόλος που διαδραματίζουν στη συνολική διάταξη. Επίσης, θα αναλυθούν τα κριτήρια επιλογής των εξαρτημάτων, καθώς και η σημασία τους για την αποδοτικότητα και την ακρίβεια του αισθητήρα. Η σωστή επιλογή και ο συνδυασμός των στοιχείων αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη βέλτιστη απόδοση της τελικής διάταξης.

4.1 Μαγνητικά Στοιχεία

Ως μαγνητικά στοιχεία μιας διάταξης ορίζουμε τα εξαρτήματα που εμπλέκονται στη δημιουργία, καθοδήγηση, ενίσχυση ή ανίχνευση μαγνητικών πεδίων. Αυτά τα στοιχεία αξιοποιούν τις ιδιότητες του μαγνητισμού και της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής για τη λειτουργία της διάταξης.

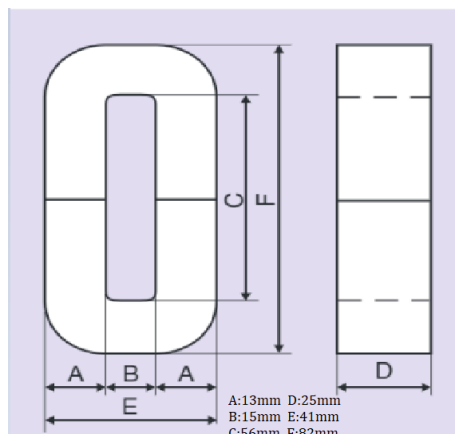
4.1.1 Ηλεκτρομαγνητικό Yoke

Για την παρούσα διάταξη χρησιμοποιήθηκε το yoke AMCC-25, το οποίο είναι κατασκευασμένο από Mu-metal. Πρόκειται για ένα μαλακό σιδηρομαγνητικό κράμα νικελίου-σιδήρου με πολύ υψηλή διαπερατότητα, που έχει τη μορφή σχήματος Π (yoke shaped).



Εικόνα 24: AMCC-25 yoke [35].

Αυτός ο τύπος γοκε είναι κατάλληλος για χρήση σε εφαρμογές με μετασχηματιστή ισχύος ή πηνίο επαγωγής, ειδικά σε εύρος υψηλών συχνοτήτων, και συμβάλλει στη μείωση του μεγέθους και στη βελτίωση της απόδοσης τους. Επίσης, χρησιμοποιείται και για τη θωράκιση ευαίσθητου ηλεκτρονικού εξοπλισμού έναντι στατικών ή χαμηλής συχνότητας μαγνητικών πεδίων [35].



Εικόνα 25: Διαστάσεις AMCC-25 γοκε [35].

4.1.2 Πηνία

Πάνω στο γοκε προσαρμόζεται σε κάθε του άκρο μια πλαστική βάση - με διαστάσεις τέτοιες ώστε να εφαρμόζουν ακριβώς στο κάθε άκρο του- που γύρω της τυλίγεται ένα πηνίο. Στη βάση του ενός άκρου το πηνίο που τυλίγεται έχει εξωτερική διάμετρο ίση με 1mm και χαρακτηρίζεται ως πηνίο διέγερσης, ενώ στο άλλο χρησιμοποιείται πηνίο μικρότερης διαμέτρου ίσης με 0,15mm, που χαρακτηρίζεται ως πηνίο λήψης. Ο λόγος που το πηνίο διέγερσης έχει μεγαλύτερη διάμετρο από το πηνίο λήψης είναι διότι από αυτό διέρχεται σημαντικά μεγαλύτερη ένταση ρεύματος, καθώς εκεί θα εφαρμοστεί η έξοδος του ενισχυτή ρεύματος και συνεπώς πρέπει να είναι πιο ανθεκτικό σε υπερθέρμανση και απώλεια ενέργειας.

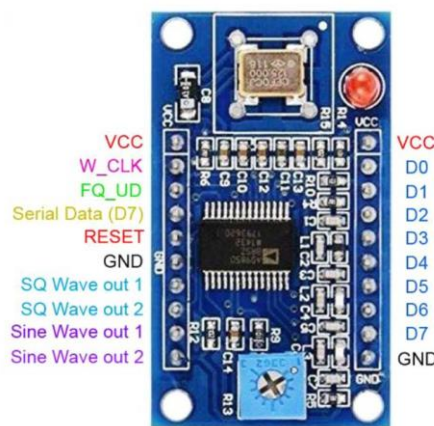
Αναφορικά με το πηνίο διέγερσης, οι σπείρες που το αποτελούν ανέρχονται σε $N1 = 8$ και η αντίστασή του, που προκύπτει από τον τύπο $R = \rho \frac{L}{A}$, ισούται με $R = 0,6\Omega$. Αντίστοιχα, το πηνίο λήψης αποτελείται από 5 επιστροφές των $[8/0,15] = 53$ σπειρών, άρα συνολικά $N2 = 265$ σπείρες.

4.2 Ηλεκτρονικά Μέρη

4.2.1 AD9850 DDS Signal Generator Module

Το AD9850 DDS παρέχει ημιτονοειδείς και τετραγωνικές κυματομορφές στο εύρος συχνοτήτων 0-40MHz. Είναι εξοπλισμένο με έναν ισχυρό ταλαντωτή 125MHz.

Η μονάδα έχει μικρό συμπαγές μέγεθος περίπου 4,5×2,6×1,7cm. Διαθέτει δύο κανάλια τετραγωνικών κυματομορφών και δύο κανάλια ημιτονικών κυματομορφών. Μπορεί να λειτουργήσει από τα 3,3V έως την τάση εισόδου 5V [36].



Εικόνα 26: Διάγραμμα AD9850 με τα pins [36].

Περιγραφή λειτουργίας των πιο σημαντικών pins του DDS.

VCC:

- Pin της τάσης τροφοδοσίας.
- Είσοδος τροφοδοσίας 3.3V ή 5V.

GND:

- Pin γείωσης.

W_CLK:

- Ενημέρωση συχνότητας.
- Στην ανερχόμενη ακμή αυτού του ρολογιού, το DDS ενημερώνεται στη συχνότητα (ή φάση) που έχει φορτωθεί στον καταχωρητή εισόδου δεδομένων.

- Επαναφέρει τον δείκτη στη λέξη 0.

DATA:

- Pin φόρτωσης σειριακών δεδομένων D7.

RESET:

- Λειτουργία reset.
- Όταν είναι στο high, εκκαθαρίζει όλους τους καταχωρητές (εκτός από τον καταχωρητή εισόδου).
- Η έξοδος του DAC (Digital-Analog Converter) θα πάει στο Cosine 0 μετά από επιπλέον κύκλους ρολογιού.

D0–D7:

- Είσοδος δεδομένων 8-bit.
- Χρησιμοποιείται για τη σταδιακή φόρτωση της συχνότητας 32-bit και της λέξης φάσης 8-bit/28–25 ελέγχου.
- D7 = MSB (πιο σημαντικό bit). D0 = LSB (λιγότερο σημαντικό bit).
- Το D7 (Pin 25) χρησιμεύει επίσης ως pin εισόδου για τη σειριακή λέξη δεδομένων 40-bit.

Τετραγωνικό Κύμα Έξοδος 1:

- Η κανονική έξοδος του συγκριτή.

Τετραγωνικό Κύμα Έξοδος 2:

- Η συμπληρωματική έξοδος του συγκριτή.

Ημιτονικό Κύμα Έξοδος 1:

- Αναλογική έξοδος ρεύματος του DAC.

Ημιτονικό Κύμα Έξοδος 2:

- Συμπληρωματική αναλογική έξοδος του DAC.

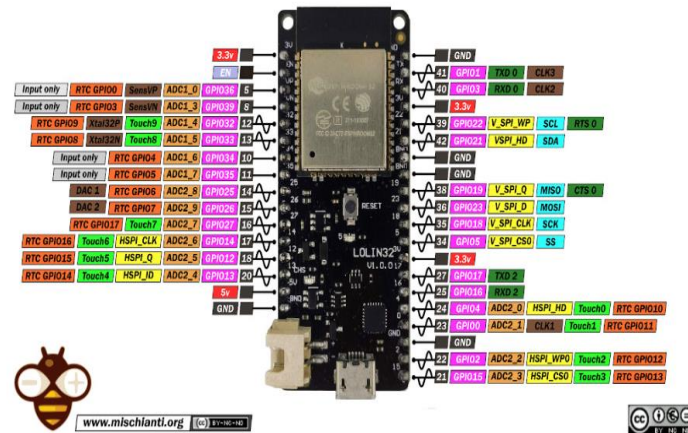
4.2.2 ESP32 Μικροελεγκτής

Η ESP32 είναι μια σειρά μικροελεγκτών χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας με ενσωματωμένο Wi-Fi και dual-mode Bluetooth. Η σειρά ESP32 χρησιμοποιεί, είτε ένα μονοπύρρηνο ή διπύρρηνο μικροεπεξεργαστή Tensilica Xtensa LX6, είτε ένα μικροεπεξεργαστή διπλού πυρήνα Xtensa LX7, είτε ένα μικροεπεξεργαστή RISC-V ενός πυρήνα. Περιλαμβάνει ενσωματωμένους διακόπτες κεραιών, RF balun, ενισχυτή ισχύος, ενισχυτή λήψης χαμηλού θορύβου, φίλτρα και μονάδες διαχείρισης ισχύος. Κάθε έκδοσή του αποτελεί ένα ενιαίο τσιπ συνδυασμού Wi-Fi και Bluetooth 2,4 GHz, σχεδιασμένο με το χαμηλής ισχύος τσιπ 40 nm της TSMC τεχνολογίας. Έχει σχεδιαστεί για να επιτυγχάνει την καλύτερη δυνατή απόδοση ισχύος και RF, επιδεικνύοντας στιβαρότητα, ευελιξία και αξιοπιστία σε μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών [37].

Για την παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε η έκδοση ESP32 Wemos Lolin32. Το μοντέλο αυτό επίσης διαθέτει έναν 32-bit διπύρρηνο μικροελεγκτή που λειτουργεί στα 2,4GHz και έχει 4MB αποθηκευτικού χώρου flash. Μπορεί να προγραμματιστεί σε διάφορες γλώσσες, όπως microPython, LUA, C/C++ στο Arduino IDE, όπως ακριβώς και κάθε άλλος μικροελεγκτής. Μπορεί να τροφοδοτηθεί μέσω μπαταριών πολυμερούς λιθίου με ένα 500mA μέγιστο ρεύμα φόρτισης ή μέσω micro USB. Επιπλέον, περιλαμβάνει ένα FTDI FT231x, το οποίο μετατρέπει το USB σε σειριακό και επιτρέπει σε έναν υπολογιστή να προγραμματίζει και να επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή [38].

Οι βασικοί λόγοι που προτιμήθηκε ο συγκεκριμένος μικροεπεξεργαστής αρχικά είναι η ευκολία σύνδεσης με την ενσωματωμένη δυνατότητα Wi-Fi, σε συνδυασμό με υψηλή υπολογιστική ισχύ. Επίσης, σημαντικό ρόλο έπαιξε το γεγονός ότι είναι συμβατός με το Arduino IDE, το οποίο είναι οικείο στη χρήση, ενώ παράλληλα διαθέτει αρκετά GPIO pins για την σύνδεση με το υπόλοιπο κύκλωμα που χρειάστηκε. Τέλος, υπήρχε διαθέσιμη η απαραίτητη βιβλιογραφία, καθώς είναι αρκετά διαδεδομένη η χρήση του [37].

Παρακάτω ακολουθεί πιο αναλυτικά το διάγραμμα των pins του μικροελεγκτή και οι προδιαγραφές του:



Εικόνα 27: Διάγραμμα WeMos Lolin32 με τα pins του [37].

Επεξεργαστές:

- CPU: 32-bit LX6, που λειτουργεί στα 160 ή 240 MHz και αποδίδει έως και 600 DMIPS.

Μνήμη:

- SRAM 520 KiB

Ασύρματη συνδεσιμότητα:

- Wi-Fi: 802.11 b/g/n
- Bluetooth: v4.2 BR/EDR και BLE (μοιράζεται το ραδιόφωνο με το Wi-Fi)

Περιφερειακές διασυνδέσεις:

- 12-bit SAR ADC έως 18 κανάλια
- 2 × 8-bit DACs
- 10 × αισθητήρες αφής
- 4 × SPI
- 2 × I²S διεπαφές
- 2 × I²C διεπαφές
- 3 × UART

- Διασύνδεση Ethernet MAC με αποκλειστική DMA και υποστήριξη του πρωτοκόλλου χρόνου ακριβείας IEEE 1588
- Δίαυλος CAN 2.0
- PWM κινητήρα
- LED PWM (έως 16 κανάλια)

4.2.3 Ενισχυτής OPA549

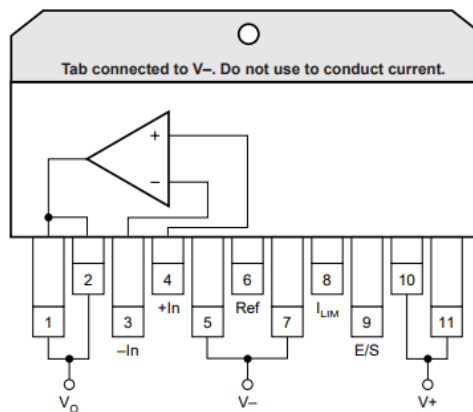
Ο OPA549 είναι ένας οικονομικός λειτουργικός ενισχυτής που μπορεί να αποδώσει υψηλή τάση και ρεύμα, κατάλληλος για την οδήγηση διαφόρων τύπων φορτίων με αρκετά καλή ακρίβεια. Μπορεί να λειτουργήσει είτε με μονή τροφοδοσία από +8V έως +60V, είτε με διπλή τροφοδοσία από $\pm 4V$ έως $\pm 30V$, δίνοντας μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό κυκλωμάτων και επεκτείνοντας το εύρος εισόδου του και σε αρνητική τροφοδοσία. Ο OPA549 διαθέτει εσωτερική προστασία από υπερθέρμανση και υπερφόρτωση ρεύματος, ενώ επιτρέπει στον χρήστη να ρυθμίσει με ακρίβεια το όριο ρεύματος που επιθυμεί από 0A έως 10A χρησιμοποιώντας μια αντίσταση ή ποτενσιόμετρο ή να ελέγχεται ψηφιακά με ένα μετατροπέα τάσης ή ρεύματος από ψηφιακό σε αναλογικό (DAC). Μπορεί να αντέξει σε βιομηχανικό εύρος θερμοκρασιών, από $-40^{\circ}C$ έως $+85^{\circ}C$.

Ο OPA549 βρίσκει εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα συστημάτων και συσκευών υψηλής απόδοσης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ως ενισχυτής για την οδήγηση βαλβίδων και ενεργοποιητών (Valve, Actuator Drivers), καθώς και σε συστήματα οδήγησης συγχρονιστών και σερβοκινητήρων (Synchro, Servo Drivers). Επιπλέον, είναι ιδανικός για χρήση σε τροφοδοτικά ισχύος (Power Supplies), εξοπλισμό δοκιμών (Test Equipment), καθώς και για την τροφοδότηση μετατροπέων (Transducer Excitation). Ακόμα, ο OPA549 μπορεί να λειτουργήσει ως ενισχυτής ισχύος για εφαρμογές ήχου (Audio Power Amplifiers), προσφέροντας υψηλή απόδοση και αξιοπιστία σε απαιτητικά περιβάλλοντα [39].



Εικόνα 28: OPA549 [39].

Ο ενισχυτής OPA549 αποτελείται από 11 pins.



Εικόνα 29: Διάγραμμα pins του OPA549 [39].

Pin 1 και Pin 2 (Output - Vout):

- Η έξοδος του ενισχυτή. Εδώ παράγεται το ενισχυμένο σήμα, το οποίο μπορεί να είναι είτε τάση είτε ρεύμα ανάλογα με την εφαρμογή.

Pin 3 (Vin-):

- Η αρνητική είσοδος του ενισχυτή.

Pin 4 (Vin+):

- Η θετική είσοδος του ενισχυτή.

Pin 5 και Pin 7 (V-):

- Η αρνητική τροφοδοσία του κυκλώματος, όπου εφαρμόζεται η αρνητική τάση λειτουργίας.

Pin 6 (Ref):

- Χρησιμοποιείται για να παρέχει τάση αναφοράς στον ενισχυτή.

Pin 8 (I_{Lim}):

- Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του ορίου ρεύματος εξόδου. Συνδέοντας εξωτερικά μια αντίσταση ή ποτενσιόμετρο, μπορεί να ρυθμιστεί το μέγιστο ρεύμα εξόδου. Παρόλο που ο σχεδιασμός του OPA549 επιτρέπει ρεύματα εξόδου μέχρι 10A, δεν συνιστάται η λειτουργία της διάταξης συνεχώς σε αυτό το επίπεδο, καθώς υποβαθμίζεται η μακροπρόθεσμη αξιοπιστία του. Το υψηλότερο ονομαστικό συνεχές ικανότητα συνεχούς ρεύματος είναι 8A.

Pin 9 (E/S):

- Χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση του ενισχυτή ή για την παρακολούθηση της κατάστασης θερμικής απενεργοποίησης.

Pin 10 και Pin 11 (V+):

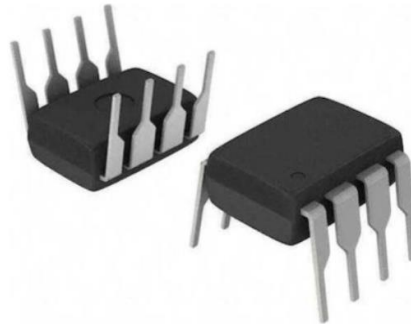
- Η θετική τροφοδοσία του κυκλώματος, όπου εφαρμόζεται η θετική τάση λειτουργίας.

4.2.4 Ενισχυτής TL081

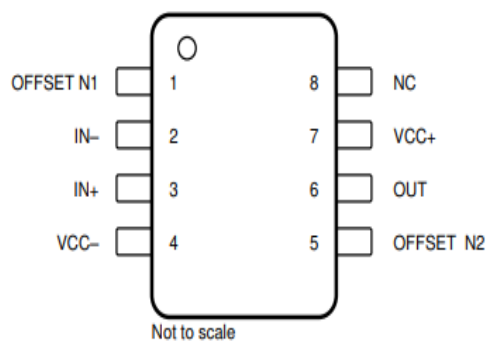
Ο TL081 είναι ένας ενισχυτής χαμηλού κόστους, υψηλής ταχύτητας, που χρησιμοποιεί είσοδο βασισμένη σε τρανζίστορ JFET και περιέχει ένα μόνο ενισχυτή στο εσωτερικό του (single op-amp). Έχει υψηλό slew rate της τάξης 20 V/μs, γεγονός που επιτρέπει γρήγορες μεταβολές στην τάση εξόδου ως απόκριση στις αλλαγές στην είσοδο, ενώ παράλληλα απαιτεί χαμηλό ρεύμα πόλωσης εισόδου, καθώς και χαμηλή κατανάλωση ισχύος, καθιστώντας τον οικονομικό στην κατανάλωση ενέργειας. Παρά

τις χαμηλές απαιτήσεις τροφοδοσίας, ο TL081 διατηρεί μεγάλο εύρος ζώνης-ενίσχυσης, παρέχοντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα για ευρύ φάσμα επιλογής τάσης τροφοδοσίας από $\pm 2.25\text{ V}$ έως $\pm 20\text{ V}$ ή από 4.5 V έως 40 V , επιτρέποντας ευελιξία στην εφαρμογή. Αποτελείται από 8 pins.

Κάποιες από τις κυριότερες εφαρμογές που χρησιμοποιείται ο ενισχυτής TL081 είναι τα συστήματα ηλιακής ενέργειας, που ενσωματώνεται στα strings και στους central inverters, ο έλεγχος οδήγησης κινητήρων ac και servo, σε συστήματα αδιάλειπτης παροχής ενέργειας (UPS), τόσο μονοφασικά όσο και τριφασικά, καθώς και σε εξοπλισμό ήχου [40].



Εικόνα 30: TL081 [40].



Εικόνα 31: Διάγραμμα Pins του TL081 [40].

Pin 1 και Pin 5 (Offset N1 και N2):

- Χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση του offset του σήματος εισόδου.

Pin 2 (Vin-):

- Η αρνητική είσοδος του ενισχυτή.

Pin 3 (Vin+):

- Η θετική είσοδος του ενισχυτή.

Pin 4 και Pin 7 (VCC- και VCC+):

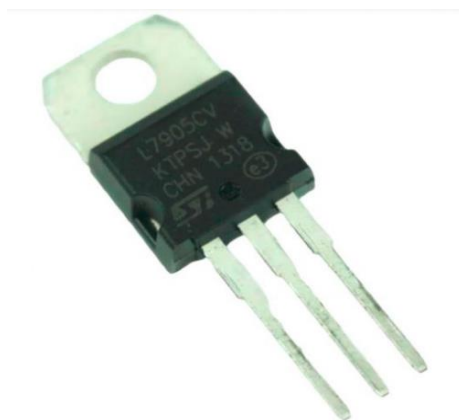
- Η αρνητική (θετική) τροφοδοσία του κυκλώματος, όπου εφαρμόζεται η αρνητική (θετική) τάση λειτουργίας.

Pin 8 (NC):

- Not Connected.

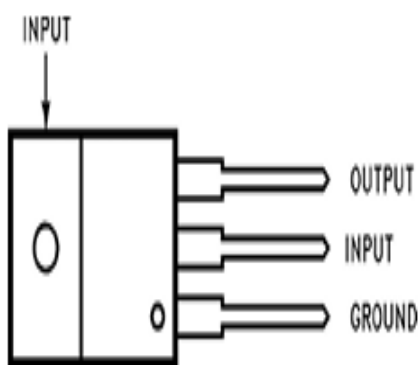
4.2.5 Σταθεροποιητής LM7905

Η σειρά σταθεροποιητών τάσης **LM79XX** με 3 ακροδέκτες έχει ως στόχο την παραγωγή σταθερών τάσεων εξόδου $-5V$, $-12V$ και $-15V$ και είναι ικανή να παρέχει ρεύμα εξόδου έως $1,5A$. Με αυτόν τον τρόπο παραμένει η επιθυμητή τάση ανεξάρτητη από μεταβολές που μπορεί να οφείλονται σε διακυμάνσεις στο δίκτυο τροφοδοσίας ή αλλαγές στην κατανάλωση ρεύματος από τη εκάστοτε συσκευή, προσφέροντας παράλληλα ενισχυμένη αξιοπιστία στο σύστημα. Σημαντική απήχηση βρίσκει σε διατάξεις με τελεστικούς ενισχυτές, διατάξεις συστημάτων με διπλή τροφοδοσία (dual power supply systems), καθώς και σε εφαρμογές σχετικές με τη φόρτιση μπαταριών.



Εικόνα 32: LM7905 [41].

Ο LM7905 αποτελείται από 3 pins.



Εικόνα 33: Διάγραμμα Pins του LM7905 [41].

Pin 1 (GROUND):

- Γείωση του κυκλώματος.

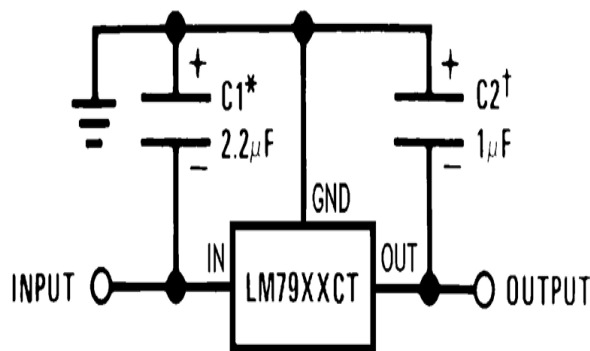
Pin 2 (INPUT):

- Τάση του κυκλώματος που πρέπει να ρυθμιστεί

Pin 3 (OUTPUT):

- Σταθερή τάση εξόδου -5V.

Κατά τη χρήση του, είναι απαραίτητη η τοποθέτηση ενός πυκνωτή 2,2μF ανάμεσα στο input και στη γείωση και ενός πυκνωτή 1μF ανάμεσα στο output και στη γείωση. Ο πυκνωτής 2,2μF χρησιμεύει για τη σταθεροποίηση της τάσης εισόδου του LM7905 βοηθώντας στην εξομάλυνση της τάσης τροφοδοσίας, ενώ ο πυκνωτής 1μF σταθεροποιεί την τάση εξόδου και μειώνει τις επιδράσεις του θορύβου συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στη βελτίωση της ευστάθειας του κυκλώματος.



Εικόνα 34: Κύκλωμα εξομάλυνσης του σταθεροποιητή [41].

4.3 Λογισμικά

Τα λογισμικά παίζουν καθοριστικό ρόλο στη δράση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, καθώς βοηθούν τόσο στον σχεδιασμό όσο και στον έλεγχο και στη λειτουργία τους. Δύο βασικές εφαρμογές τους, που θα αναλυθούν και παρακάτω, είναι ο σχεδιασμός και η προσομοίωση κυκλωμάτων και ο προγραμματισμός μικροελεγκτών

4.3.1 Arduino IDE

Το Arduino IDE είναι ένα λογισμικό ανοικτής πηγής, το οποίο χρησιμοποιείται για τη συγγραφή και τη μεταφόρτωση κώδικα στις πλακέτες Arduino. Η εφαρμογή IDE είναι κατάλληλη για διαφορετικά λειτουργικά συστήματα, όπως Windows, Mac OS X και Linux. Υποστηρίζει τις γλώσσες προγραμματισμού C και C++ και είναι εύκολο στη χρήση για αρχάριους ή προχωρημένους χρήστες. Έχει επίσης της δυνατότητα διασύνδεσης με τον μικροελεγκτή ESP32, που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική και αυτό το κατέστησε κατάλληλο προς χρήση [38].

4.3.2 Tina-Ti

Το Tina-Ti είναι ένα ισχυρό εργαλείο προσομοίωσης κυκλωμάτων κατάλληλο για την προσομοίωση αναλογικών κυκλωμάτων και κυκλώματα SMPS (switched-mode power supply). Το Tina-Ti παρέχει δυνατότητες ανάλυσης DC, στο πεδίο του χρόνου (transient) και στο πεδίο της συχνότητας, επιτρέποντας παράλληλα την επεξεργασία και μορφοποίηση των προσκοπτόντων αποτελεσμάτων τους. Επειδή είναι

σχεδιασμένο από την εταιρεία Texas Instruments έχει στη βιβλιοθήκη του ένα μεγάλο αριθμό εξαρτημάτων (modules) της εταιρείας, όπως λειτουργικούς ενισχυτές, τροφοδοτικά, μετατροπείς, αλλά και τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που απαιτεί η εργασία αυτή [42].

5 Ηλεκτρονική Διάταξη

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία του κυκλώματος διέγερσης, αναλύοντας κάθε στάδιο βήμα προς βήμα. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα κριτήρια που καθόρισαν τις επιμέρους επιλογές και αποφάσεις, εξηγώντας τη λογική πίσω από κάθε ρύθμιση και προσαρμογή που πραγματοποιήθηκε. Παράλληλα, παρουσιάζονται τα σήματα που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, αποτυπώνοντας την ηλεκτρική συμπεριφορά του συστήματος, ενώ επιπλέον εξετάζονται οι διασυνδέσεις των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μεταξύ τους, περιγράφοντας τον ρόλο και τη λειτουργία τους στον αισθητήρα.

5.1 Στάδιο Δοκιμών

Κατά το πρώτο στάδιο των δοκιμών, ήταν απαραίτητο να καθοριστούν οι βασικές παράμετροι που θα επηρεάσουν τη λειτουργία του συστήματος και τις τιμές των στοιχείων του ηλεκτρονικού κυκλώματος. Συγκεκριμένα, χρειάστηκε να αποφασιστεί η συχνότητα και η κυματομορφή του σήματος εισόδου, καθώς και η ένταση του ρεύματος που απαιτείται για την εφαρμογή πάνω στο πηνίο διέγερσης του yoke. Η διαδικασία καθορισμού τους πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της γεννήτριας σήματος, η οποία επιτρέπει τη δυνατότητα αλλαγής της κυματομορφής, της συχνότητας και της παραγόμενης τιμής της τάσης. Στη συνέχεια, η ενίσχυση και η καταγραφή του ρεύματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενισχυτή ρεύματος. Το σήμα εξόδου απεικονιζόταν σε παλμογράφο. Η διαδικασία έγινε σε διάφορα δοκίμια ηλεκτρικού χάλυβα με διαφορετικές μορφές ατελειών στην επιφάνειά τους. Τελικά, αποφασίστηκε η λειτουργία της διάταξης να είναι στα 1Hz, το σήμα εισόδου να έχει ημιτονοειδή μορφή και το απαιτούμενο ρεύμα να κυμαίνεται έως ± 3 A, προκειμένου να αποτρέπεται και η υπερθέρμανση.

5.2 Διαδικασία Παραγωγής Σήματος Εισόδου

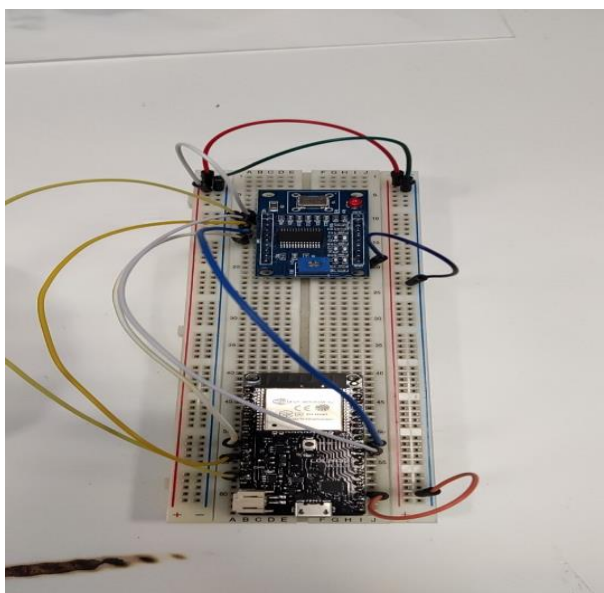
5.2.1 Ημιτονοειδές Σήμα Συχνότητας 1Hz

Ο τελικός σκοπός είναι η παραγωγή ενός ημιτονοειδούς σήματος που θα εφαρμόζεται στο πηνίο διέγερσης και θα έχει την κατάλληλη ένταση για την ανίχνευση των ατελειών του χάλυβα. Το πρώτο βήμα που πρέπει να γίνει είναι η παραγωγή ενός σήματος ημιτονοειδούς μορφής με συχνότητα 1Hz. Αυτό καθίσταται εφικτό με τη διασύνδεση του AD9850 με το μικροελεγκτή ESP32 και τον κατάλληλο κώδικα από το Arduino IDE [38]. Όταν το πρόγραμμα φορτωθεί στο ESP32, ο AD9850 θα παράγει ένα σήμα ημιτονοειδούς μορφής και συχνότητας 1 Hz στην έξοδο του.

Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να γίνουν με καλώδια οι ακόλουθες συνδέσεις ανάμεσα στα pins του AD9850 και του ESP32, οι οποίες προκύπτουν από την αντιστοιχία των pinout διαγραμμάτων τους:

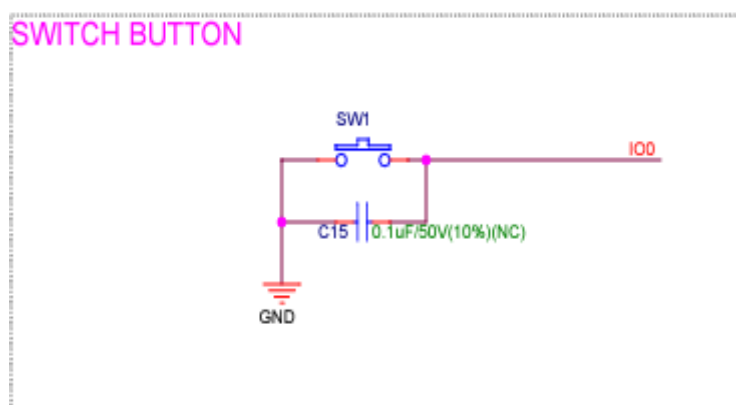
Πίνακας 3: Συνδέσεις AD9850 με ESP32.

AD9850	ESP32
VCC	3.3V
CLK	Pin 18
FQ_UD	Pin 14
MOSI	Pin 23
RESET	Pin 26
GND	GND



Εικόνα 35: Κυκλωματική διάταξη σύνδεσης AD9850 με ESP32.

Εκτός από αυτές τις συνδέσεις πειραματικά παρατηρήθηκε ότι κάποιες φορές δεν ήταν εφικτό να φορτωθεί ο κώδικας στον ESP32 και να ξεκινήσει η παραγωγή σήματος. Από τη βιβλιογραφία διαπιστώθηκε ότι πολλές φορές είναι απαραίτητη η προσθήκη ενός πυκνωτή 0.1-10μF μεταξύ του pin **EN** και της γείωσης (**GND**) προκειμένου να λειτουργήσει. Αυτή πληροφορία υπάρχει και στο εγχειρίδιο χρήσης του ESP32.



Εικόνα 36: Προσθήκη πυκνωτή EN-GND [37].

Στη συνέχεια, γίνεται η σύνδεση της διάταξης με το Arduino IDE μέσω καλωδίου USB σε micro USB από θύρα του υπολογιστή στην υποδοχή του ESP32 ώστε να φορτωθεί ο κώδικας. Ο κώδικας σε C για την παραγωγή του επιθυμητού σήματος παρουσιάζεται παρακάτω:

```
1  #include "AD985X.h"
2  //VCC: 5V, CLK: 18, FQ_UD: 14, MOSI: 23, RESET: 26, GND
3  AD9850 freqGen(25, 26, 14, 23, 18);
4  float freq = 1;
5  uint32_t prev = 0;
6  float max_freq;
7
8  void setup()
9  {
10     Serial.begin(115200);
11     freqGen.begin();
12     freqGen.powerUp();
13     max_freq = freqGen.getMaxFrequency();
14 }
15
```

```

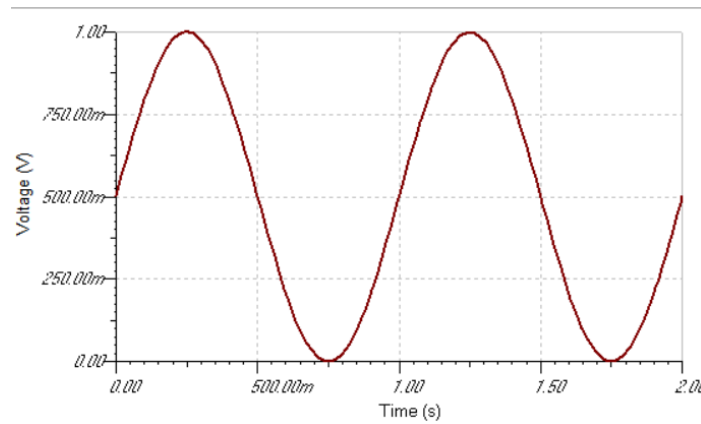
16 void loop() {
17   if (Serial.available() > 0) {
18     int incomingByte = Serial.read();
19     switch (incomingByte)
20     {
21       case 'f':
22         {
23           Serial.println("Insert the value of frequency [Hz]:");
24           while (!Serial.available())
25           {
26           }
27           freq = Serial.parseFloat();
28           Serial.print("Frequency set to ");|
29           Serial.print(freq);
30           Serial.println(" Hz");
31           break;
32         }
33       }
34     if (freq > max_freq) freq =max_freq;
35   }
36
37   if (prev != freq) {
38     freqGen.setFrequency(freq);
39     prev = freq;
40   }
41 }

```

Το πρώτο μέρος του κώδικα είναι η συνάρτηση setup. Αρχικά, στον κώδικα εισάγεται η βιβλιοθήκη AD985X, η οποία παρέχει τις απαραίτητες συναρτήσεις και κλάσεις για την επικοινωνία του ESP32 με τη γεννήτρια συχνοτήτων AD9850, δημιουργεί ένα αντικείμενο freqGen που αναπαριστά τον AD9850 και ορίζει τις θύρες σύνδεσης. Μέσα στη συνάρτηση setup καθορίζεται η ταχύτητα της σειριακής επικοινωνίας, δηλαδή ο ρυθμός μετάδοσης της πληροφορίας. Αφού αρχικοποιηθεί ο AD9850, η συχνότητα λειτουργίας του ρυθμίζεται στο 1Hz. Η συνάρτηση setup() εκτελείται μία φορά κατά την αρχικοποίηση του μικροελεγκτή.

Το δεύτερο μέρος του κώδικα είναι η συνάρτηση loop. Μόλις ολοκληρωθεί η συνάρτηση setup, η συνάρτηση loop επαναλαμβάνεται διαρκώς έως ότου είτε να επανεκκινήσει ο μικροελεγκτής είτε να διακοπεί η παροχή ρεύματος. Η loop έχει σχεδιαστεί για να παρακολουθεί δεδομένα που εισέρχονται μέσω της σειριακής επικοινωνίας και να χρησιμοποιεί αυτά τα δεδομένα για να ρυθμίζει τη συχνότητα του AD9850 να παραμένει σταθερή στην επιθυμητή (1Hz).

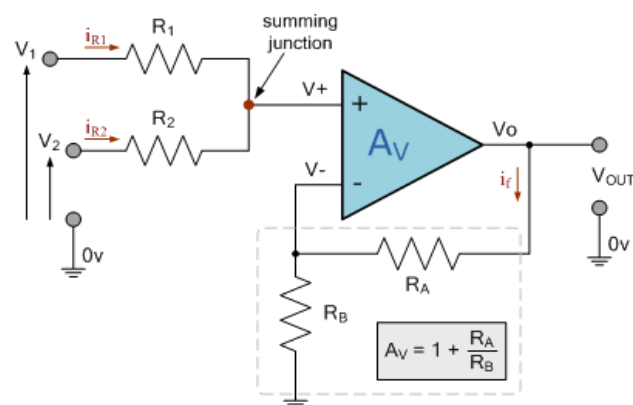
Δεδομένου ότι ο AD9850 στην έξοδό του μπορεί να δώσει σήματα που η τιμή της τάσης τους είναι αποκλειστικά θετική, το παραγόμενο ημίτονο θα εκτείνεται από 0V έως 1V.



Εικόνα 37: Σήμα εξόδου AD9850.

5.2.2 Κύκλωμα Αθροιστή

Παρατηρείται ότι το παραγόμενο σήμα έχει ένα DC Offset 0.5V, αφού το επιθυμητό σήμα που θα εισαχθεί στο πηνίο διέγερσης πρέπει να είναι συμμετρικό ως προς το 0. Συνεπώς αυτή η DC συνιστώσα των 0.5V χρειάζεται να αφαιρεθεί. Το κύκλωμα που θα χρησιμοποιηθεί για την αφαίρεση της συνιστώσας αυτής είναι το κύκλωμα του μη αναστρέφοντα αθροιστή, που η λειτουργία είναι η αλγεβρική πρόσθεση δύο σημάτων με κάποιο κέρδος, αναλόγως την τιμή των αντιστάσεων [44]. Γι' αυτό το λόγο το ένα σήμα που προστίθεται θα είναι το σήμα εξόδου του AD9850 και το δεύτερο μια DC συνιστώσα -0.5V.



Εικόνα 38: Κύκλωμα αθροιστή.

Το πλεονέκτημα του μη αναστρέφοντα ενισχυτή σε σχέση με τον αναστρέφοντα είναι πρώτον ότι η έξοδος του είναι στην ίδια φάση με την είσοδο και η τιμή της είναι το ζυγισμένο άθροισμα των τιμών τάσεων της εισόδου. Δεύτερον, δεν υπάρχει η

ανάγκη εικονικής γείωσης, καθώς η αντίσταση εισόδου του είναι πολύ υψηλή και συνεπώς δεν "τραβάει" ρεύμα από τις πηγές, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει το σήμα.

Ανάλυση κέρδους μη αναστρέφοντα αθροιστή

$$I_{R1} + I_{R2} = 0 = \frac{V_1 - V_+}{R_1} + \frac{V_2 - V_+}{R_2} \quad (1)$$

Οι αντιστάσεις R_1 και R_2 είναι υπεύθυνες να μην επιτρέπουν να διέρχεται πολύ ρεύμα προς τον ενισχυτή. Για την απλοποίηση της ανάλυσης θεωρούνται ίσες και θα έχουν πάντα την ίδια τιμή και πειραματικά.

$$(1) \Rightarrow \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) V_+ = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \Rightarrow \left(\frac{2}{R} \right) V_+ = \frac{V_1 + V_2}{R} \Rightarrow V_+ = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2)$$

Λόγω της αρνητικής ανάδρασης του κυκλώματος ισχύει:

$$V_+ = V_- \quad (3)$$

Για την τάση εξόδου ισχύει από διαίρεση τάσης:

$$(2), (3) \Rightarrow V_- = \frac{R_B}{R_A + R_B} V_{out} \Rightarrow V_+ = \frac{R_B}{R_A + R_B} V_{out} \Rightarrow V_{out} = \left(1 + \frac{R_B}{R_A} \right) V_+ \quad (4)$$

Το κέρδος της διάταξης υπολογίζεται:

$$(2), (4) \Rightarrow A_v = \frac{V_{out}}{V_+} = \frac{\left(1 + \frac{R_B}{R_A} \right) V_+}{V_+} \Rightarrow A_v = \left(1 + \frac{R_B}{R_A} \right) \quad (5)$$

Και η τάση εξόδου:

$$(5) \Rightarrow V_{out} = A_v * V_+ = \left(1 + \frac{R_B}{R_A} \right) V_+ \Rightarrow V_{out} = \left(1 + \frac{R_B}{R_A} \right) \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (6)$$

Τα δεδομένα είναι:

$$V_{out} = 0,5 * \sin(2\pi t) \text{ V}, V_1 = 0,5 + 0,5 * \sin(2\pi t) \text{ V}, V_2 = -0,5 \text{ V}$$

Άρα από τη σχέση (6):

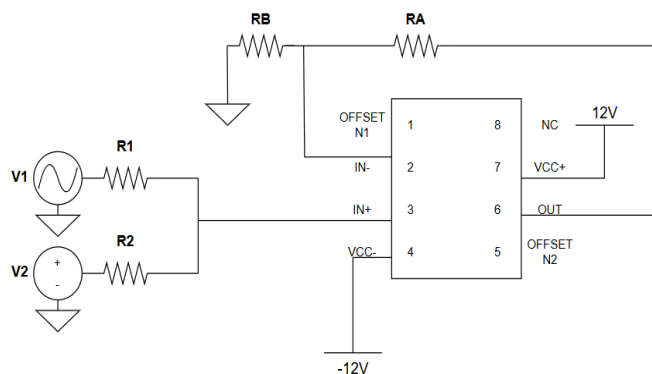
$$(6) \Rightarrow 0,5 * \sin(t) = \left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right) * \frac{0,5 + 0,5 * \sin(t) - 0,5}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 0,5 * \sin(t) = \left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right) * \frac{1}{2} 0,5 * \sin(t) \Rightarrow 1 = \left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right) * \frac{1}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2 = 1 + \frac{R_B}{R_A} \Rightarrow 1 = \frac{R_B}{R_A} \Rightarrow R_A = R_B$$

Επομένως για να επιτευχθεί η απαλοιφή της DC συνιστώσας θα χρειαστεί οι αντιστάσεις R_A και R_B να είναι ίσες, εφόσον $V_1 = 0,5 + 0,5 * \sin(2\pi t)$ V και $V_2 = -0,5$ V. Συνεπώς: $V_{out1} = V_1 + V_2 = 0,5 * \sin(2\pi t)$ V

Η τάση τροφοδοσίας πρέπει να είναι συμμετρική αφού το τελικό σήμα θα έχει θετικό και αρνητικό μέρος και ισούται με ± 12 V, τιμή τάσης που δε θα ξεπεράσει η διάταξη. Η τάση τροφοδοσίας λαμβάνεται από γεννήτρια τάσης δύο καναλιών. Το ένα κανάλι της γεννήτριας παράγει +12V και το άλλο -12V, τα οποία τοποθετούνται στο pin 7 και στο pin 4 του TL081.



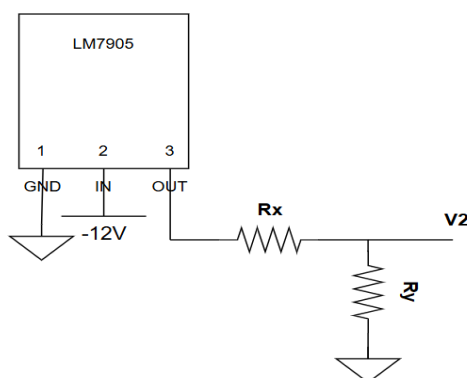
Εικόνα 39: Κύκλωμα αθροιστή με τις καλωδιώσεις του TL081.

Αν το κύκλωμα παρέμενε όπως παραπάνω θα χρειαζόταν ένα τρίτο κανάλι της γεννήτριας προκειμένου να παραγάγει και τα -0,5V. Ωστόσο, τα -0,5V παρατηρείται ότι μπορούν να προκύψουν από τα -12V με μια διαίρεση τάσης με τις κατάλληλες τιμές των αντιστάσεων. Αυτό δοκιμάστηκε και διαπιστώθηκε ότι δε λαμβανόταν το αναμενόμενο αποτέλεσμα, διότι υπήρχαν απώλειες και διακυμάνσεις της τάσης λόγω της τάσης τροφοδοσίας του δικτύου. Γι' αυτό κρίθηκε απαραίτητη η

χρησιμοποίηση του σταθεροποιητή LM7905 πριν τη διαίρεση τάσης. Η είσοδος στο LM7905 θα είναι η τάση -12V που περιέχει διακυμάνσεις λόγω δικτύου. Αυτές οι διακυμάνσεις έχουν εξαλειφθεί σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση 2 πυκνωτών παράλληλα με την τάση τροφοδοσίας και τη γείωση, οι οποίοι βελτιώνουν τη σταθερότητα της τροφοδοσίας και μειώνουν το θόρυβο. Ο ένας πυκνωτής είναι ηλεκτρολυτικός 10μF, ο οποίος φιλτράρει χαμηλής συχνότητας θόρυβο και μεταβολές στην τάση τροφοδοσίας, ενώ ο δεύτερος είναι κεραμικός 0,1μF, ο οποίος καταστέλλει τον υψηλής συχνότητας θόρυβο που προκαλείται από την απότομη εναλλαγή σημάτων [45]. Παρ' όλα αυτά για να είναι απολύτως σταθερή η τάση περνάει από τον LM7905. Η έξοδος του LM7905 θα βγει -5V DC και με κατάλληλη επιλογή αντιστάσεων στο διαιρέτη τάσης υποβαθμίζεται σε -0,5V.

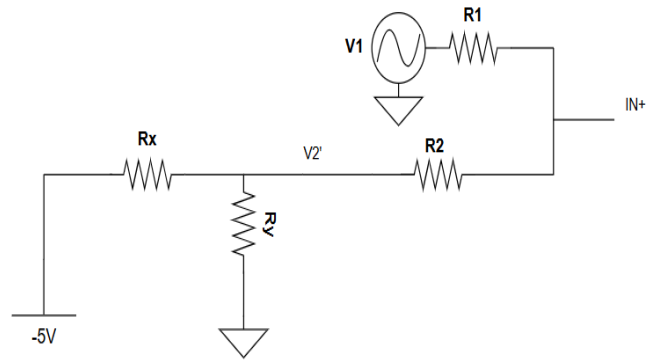
Εξίσωση διαιρέτη τάσης:

$$V_y = \frac{R_y}{R_x + R_y} * V_x \Rightarrow -0.5 = \frac{R_y}{R_x + R_y} * (-5) \Rightarrow R_x = 9 * R_y$$



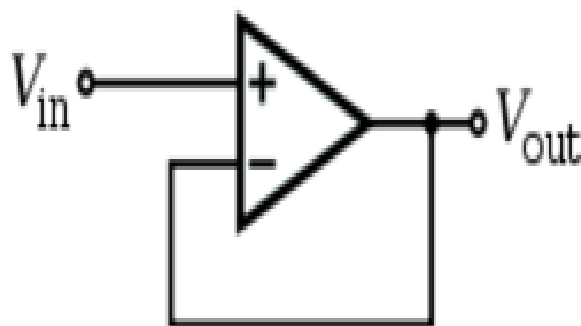
Εικόνα 40: Καλωδιώσεις σταθεροποιητή με διαιρέτη τάσης.

Η τάση V2' στην έξοδο του LM7905 είναι -0,5V υπό κενό φορτίο. Αν ο ακροδέκτης V2' ταυτιζόταν με τον ακροδέκτη στο αριστερό άκρο της R₂, τότε η τάση θα διαιρούταν και η δεύτερη τάση (εικόνα 41) που θα εισαγόταν στον αθροιστή θα είχε τιμή μικρότερη σημαντικά των -0,5V.



Εικόνα 41: Κύκλωμα διαιρέτη τάσης και είσοδος στον αθροιστή χωρίς buffer.

Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η λειτουργία μιας διάταξης που ονομάζεται buffer ή αλλιώς ακόλουθος πηγής μοναδιαίου κέρδους. Για την υλοποίησή του χρησιμοποιείται ένας τελεστικός ενισχυτής με αρνητική ανάδραση, όπου η έξοδός του συνδέεται με την αναστρέφουσα είσοδο του, ενώ η πηγή σήματος συνδέεται με τη μη αναστρέφουσα είσοδο. Ως κύριο χαρακτηριστικό έχει την υψηλή αντίσταση εισόδου και χαμηλή αντίσταση εξόδου. Παρόλο που η τάση ενίσχυσής του είναι 1, διαθέτει υψηλή ενίσχυση ρεύματος. Η χρήση του buffer είναι απαραίτητη στη συγκεκριμένη περίπτωση, διότι λόγω της πολύ υψηλής αντίστασης εισόδου ($R_{in} \rightarrow \infty$) και της συνδεσμολογίας του εξασφαλίζεται ότι η αντίσταση εισόδου του σταδίου του αθροιστή δεν επιβαρύνει την αντίσταση εξόδου του προηγούμενου σταδίου (έξοδος LM7905 και διαιρέτης τάσης), κάτι που προκαλεί ανεπιθύμητη απώλεια στη μεταφορά του σήματος [44].



Εικόνα 42: Κύκλωμα buffer [44].

Ανάλυση κέρδους buffer

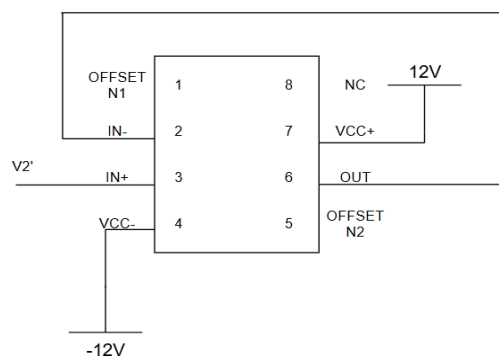
$$V_{out} = A_{OL}((V_+) - (V_-)) \Rightarrow \frac{V_{out}}{A_{OL}} = (V_+) - (V_-) \quad (1)$$

Υποθέτοντας ότι $A_{OL} \rightarrow \infty$ τότε: $(1) \Rightarrow 0 = (V_+) - (V_-) \Rightarrow (V_+) = (V_-) \quad (2)$

$$V_{out} = (V_-) = (V_+) = V_{in} \Rightarrow \mathbf{V_{out} = V_{in} \Rightarrow A_v = 1}$$

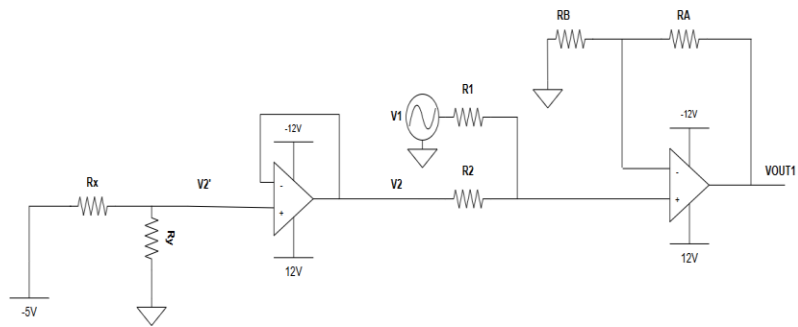
$$\text{Άρα: } \mathbf{V_2 = V_2' = \frac{R_y}{R_x + R_y} * (-5)V \approx -0,5V}$$

Για την υλοποίηση της διάταξης του buffer χρησιμοποιείται πάλι ο TL081 με τις ακόλουθες συνδέσεις.

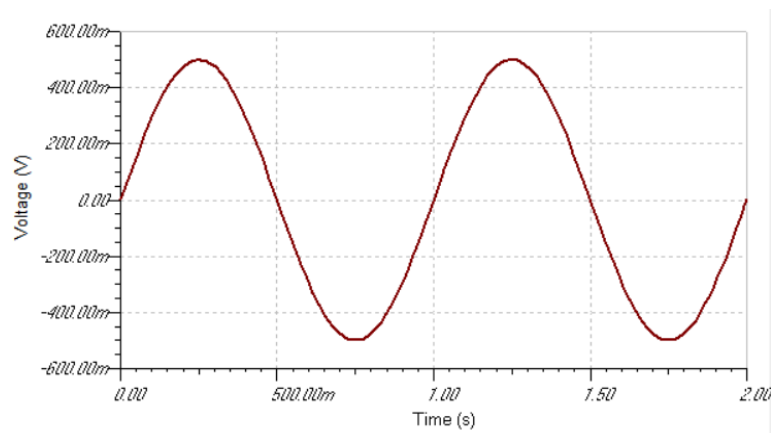


Εικόνα 43: Συνδέσεις καλωδίων για υλοποίηση buffer με ολοκληρωμένο TL081.

Συνοψίζοντας για τις δύο εισόδους του αθροιστή, η πρώτη (V_1) έχει προκύψει από την έξοδο του AD9850 μετά από άμεση διασύνδεσή του με τον ESP32, ενώ η δεύτερη (V_2) αποτελεί την έξοδο του buffer, όπου επάγεται DC τάση $-0,5V$. Το συνολικό – μέχρι στιγμής – κύκλωμα μετά την προσθήκη και του buffer:



Εικόνα 44: Συνολικό κύκλωμα μετά την προσθήκη αθροιστή και buffer.



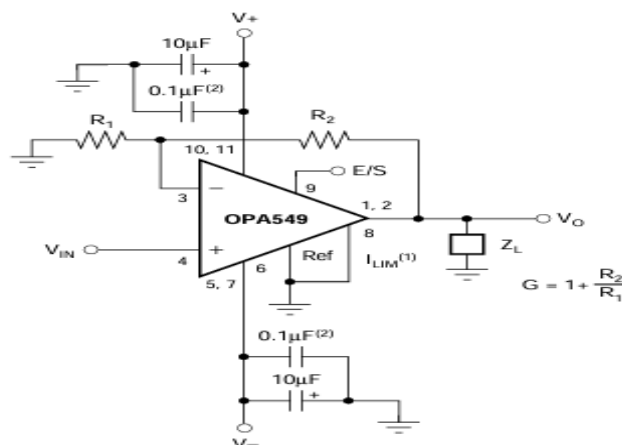
Εικόνα 45: Σήμα εξόδου αθροιστή.

Όπως φαίνεται στην προσομοίωση ο στόχος της απαλοιφής της DC συνιστώσας 0,5V επιτυγχάνεται. Ωστόσο, επειδή στο πραγματικό κύκλωμα υπάρχουν σημαντικές απώλειες ισχύος από διάφορες παραμέτρους, κρίνεται απαραίτητη η αντικατάσταση μερικών αντιστάσεων με κάποιο ποτενσιόμετρο (κεφ. 6). Ένα ποτενσιόμετρο χρησιμοποιείται αντί μιας αντίστασης επειδή επιτρέπει την αλλαγή της αντίστασής του περιστρέφοντας ένα μικρό άξονα και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η επιθυμητή τιμή αντίστασης στο κύκλωμα.

5.2.3 Κύκλωμα Ενισχυτή Ρεύματος

Αφού έχει παραχθεί η επιθυμητή μορφή του σήματος είναι απαραίτητο να γίνει η ενίσχυση της ισχύος, μέσω του ρεύματος, προκειμένου να διεγερθεί καταλλήλως το πηνίο διέγερσης. Μια απλή ενίσχυση με τρανζίστορ ή έναν τυπικό τελεστικό

ενισχυτή δεν μπορεί να επιτύχει τα υψηλά επίπεδα ρεύματος, που απαιτούνται, χωρίς επιπρόσθετα εξαρτήματα. Γι' αυτό χρησιμοποιείται ο ενισχυτής ρεύματος OPA549, ο οποίος παρέχει υψηλή ισχύ, προστασία, ανθεκτικότητα και σταθερότητα στη σχεδίαση. Ο OPA549 μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρακτικά σε οποιαδήποτε διαμόρφωση τελεστικού ενισχυτή, αλλά στο τρέχον κύκλωμα θα λειτουργήσει ως μη αναστρέφων ενισχυτής.



Εικόνα 46: OPA549 ως μη αναστρέφοντα ενισχυτής.

Ανάλυση κέρδους μη αναστρέφοντα ενισχύτη

Αφού οι πυκνωτές δεν συνδέονται απευθείας στην είσοδο ή στην ανατροφοδότηση του κυκλώματος, δεν επηρεάζουν την έκφραση για το κέρδος. Οι πυκνωτές 10μF και 0,1μF κοντά στις τάσεις τροφοδοσίας (V_{CC} , $-V_{CC}$) λειτουργούν ως παράκαμψη (bypass capacitors) για τη σταθεροποίηση της τροφοδοσίας [45].

$$V_{in} = V_+ \quad (1)$$

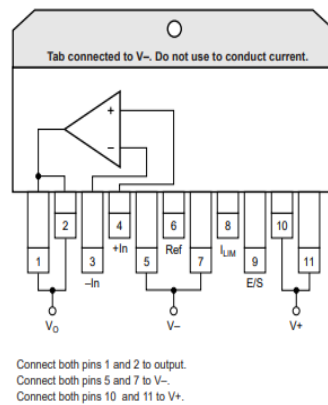
$$(1) \Rightarrow V_- = V_+ = V_{in} \quad (2)$$

$$V_- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_{out} \Rightarrow V_{in} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_{out} \Rightarrow (R_1 + R_2) * V_{in} = R_2 * V_{out} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow \mathbf{Av = 1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

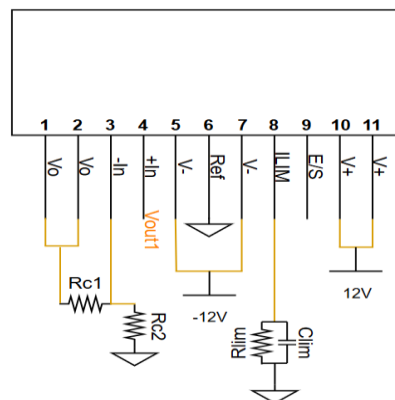
Με βάση αυτό το κέρδος τάσης του ενισχυτή και την αντίσταση του πηνίου διέγερσης που είναι μετρήσιμη και ίση με 0,6 Ωm είναι εφικτό να διεγερθεί το πηνίο με το επιθυμητό ρεύμα από το νόμο του Ohm [46].

Από το διάγραμμα των συνδέσεων που δίνεται στα φύλλα δεδομένων του ενισχυτή ρεύματος OPA549 είναι υποχρεωτικό για την ορθή λειτουργία του να είναι βραχυκυκλωμένα τα δύο pins (1 & 2) που αφορούν την τάση εξόδου V_{out} μεταξύ τους, βραχυκυκλωμένα τα δύο pins που αφορούν την αρνητική τάση τροφοδοσίας μεταξύ τους (5 & 7) και αντιστοίχως τα δύο pins που αφορούν τη θετική τάση τροφοδοσίας (10 & 11) [39].

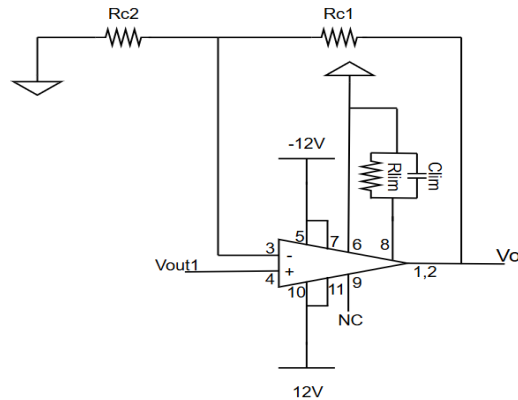


Εικόνα 47: Διάγραμμα συνδέσεων του OPA549 [39].

Για την υλοποίηση της διάταξης του μη αναστρέφοντος ενισχυτή με τη χρήση του OPA549 υλοποιούνται οι ακόλουθες συνδέσεις.



Εικόνα 48: Καλωδιώσεις για OPA549 ως μη αναστρέφοντας ενισχυτής.

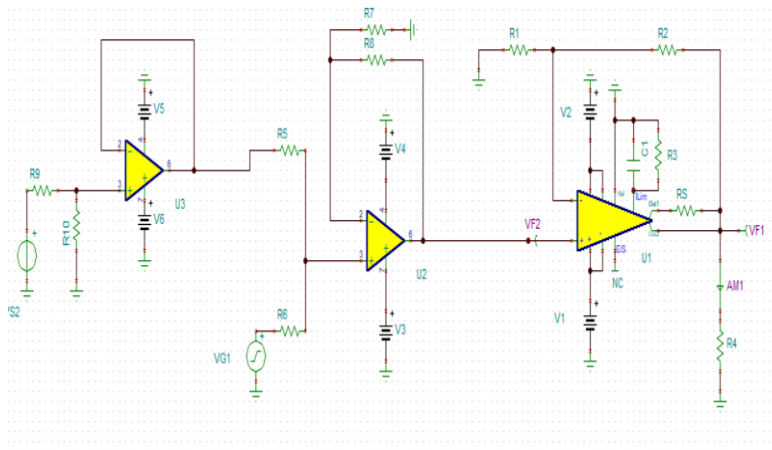


Εικόνα 49: Κυκλωματική διάταξη τελευταίου σταδίου (OPA549).

Συνεπώς, με βάση αυτές τις παραμέτρους για τις αντιστάσεις του κυκλώματος:

$$V_o = A_v * V_{out1} = \left(1 + \frac{R_{c1}}{R_{c2}}\right) * 0,5 * \sin(2\pi t) \text{ V}$$

Το συνολικό κύκλωμα μετά και την προσθήκη του τελευταίου σταδίου στο Tina-Ti



Εικόνα 50: Κυκλωματική διάταξη εισόδου στο πηνίο διέγερσης.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω υπάρχει μια αντίσταση της οποίας η τιμή (R_{LIM}) καθορίζει το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα εξόδου. Αν το pin 8 (I_{LIM}) είναι στον αέρα, το ρεύμα εξόδου προγραμματίζεται στο μηδέν, ενώ αν το I_{LIM} συνδεθεί απευθείας στη Ref, το μέγιστο όριο ρεύματος εξόδου προγραμματίζεται αυτομάτως στα 10A [39]. Οι ενδιάμεσες τιμές επιτυγχάνονται με τη χρήση της R_{LIM} με βάση την εξίσωση:

$$R_{LIM} = \frac{75k\Omega}{I_{LIM}} - 7,5k\Omega$$

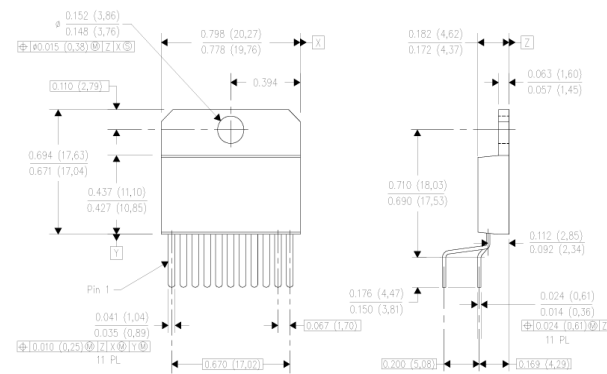
Πίνακας 4: Ενδεικτικές τιμές I_{LIM} - R_{LIM} .

OPA549 CURRENT LIMIT: 0A to 10A

DESIRED CURRENT LIMIT	RESISTOR ⁽¹⁾ (R_{CL})	CURRENT (I_{SET})	VOLTAGE (V_{SET})
0A ⁽²⁾	I_{LIM} Open	0μA	(Ref) + 4.75V
2.5A	22.6kΩ	158μA	(Ref) + 3.56V
3A	17.4kΩ	190μA	(Ref) + 3.33V
4A	11.3kΩ	253μA	(Ref) + 2.85V
5A	7.5kΩ	316μA	(Ref) + 2.38V
6A	4.99kΩ	380μA	(Ref) + 1.90V
7A	3.24kΩ	443μA	(Ref) + 1.43V
8A	1.87kΩ	506μA	(Ref) + 0.95V
9A	845Ω	570μA	(Ref) + 0.48V
10A	I_{LIM} Connected to Ref	633μA	(Ref)

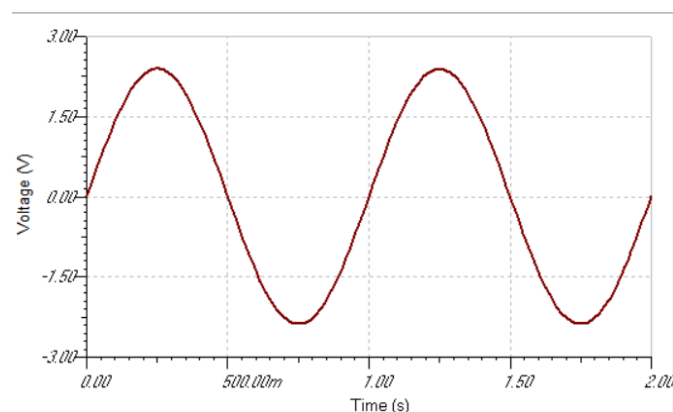
Ο OPA549 διαθέτει κύκλωμα θερμικής απενεργοποίησης που προστατεύει τον ενισχυτή από ζημιά λόγω υπερθέρμανσης [39]. Το κύκλωμα θερμικής προστασίας απενεργοποιεί την έξοδο όταν η θερμοκρασία της επαφής φτάσει περίπου τους 160°C, επιτρέποντας στη συσκευή να ψυχθεί. Όταν η θερμοκρασία της επαφής πέσει περίπου στους 140°C, το κύκλωμα εξόδου ενεργοποιείται ξανά αυτόματα. Ανάλογα με το φορτίο και τις συνθήκες του σήματος, το κύκλωμα θερμικής προστασίας μπορεί να ενεργοποιείται και να απενεργοποιείται κυκλικά. Για αξιόπιστη λειτουργία, η θερμοκρασία της επαφής θα πρέπει να περιορίζεται σε μέγιστο όριο τους 125°C. Αυτή είναι η εσωτερική προστασία του OPA549 η οποία έχει σχεδιαστεί για να προστατεύει από συνθήκες υπερφόρτωσης, αλλά όχι να αντικαταστήσει τη χρησιμοποίηση ψύκτρας. Το κρίσιμο μέγεθος που πρέπει να μελετηθεί είναι η ισχύς διάχυσης. Η ισχύς διάχυσης (power dissipation) δείχνει την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμότητα κατά τη λειτουργία μιας συσκευής, όπως ενός ενισχυτή. Αυτή η ενέργεια δεν χρησιμοποιείται για την παροχή ωφέλιμης ισχύος στο φορτίο και πρέπει να διαχέεται στο περιβάλλον, ώστε να αποτρέπεται η υπερθέρμανση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ψύκτρας, η οποία διαχειρίζεται πιο αποτελεσματικά την ισχύ διάχυσης, καθώς αυξάνει την επιφάνεια που είναι διαθέσιμη για την απαγωγή της θερμότητας στο περιβάλλον. Η χρήση ψύκτρας αυξάνει σημαντικά τη μέγιστη ισχύ διάχυσης σε μια δεδομένη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Γι' αυτούς τους λόγους είναι κρίσιμη η τοποθέτηση ψύκτρας στην πίσω πλευρά του OPA549, η οποία θα κολληθεί με θερμοαγώγιμη πάστα, ώστε να

εξασφαλίζεται η αποτελεσματικότερη μετάδοση θερμότητας και θα είναι συμβατή με το μέγεθος, τις διαστάσεις και τον τρόπο τοποθέτησης του ενισχυτή στο κύκλωμα.

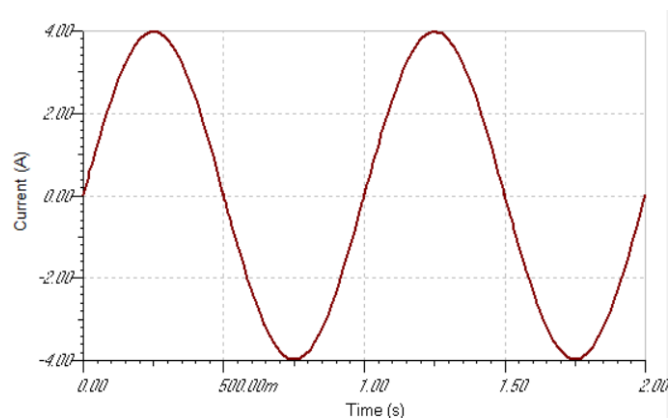


Εικόνα 51: Διαστάσεις ΟΡΑ549 [39].

Όσον αφορά την τάση και το ρεύμα εξόδου του OP4549, τα οποία θα δοθούν ως είσοδος στο πηνίο διέγερσης, υπάρχουν τα εξής διαγράμματα από το Tina-Ti με κάποιες ενδεικτικές τιμές των αντιστάσεων



Εικόνα 52: Τάση εισόδου στο πηνίο διέγερσης.



Εικόνα 53: Ρεύμα εισόδου στο πηνίο διέγερσης.

6 Πειραματικά Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό, θα περιγραφεί αναλυτικά η διαδικασία των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και η αντιμετώπιση των προβλημάτων που προέκυψαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Επίσης, θα καθοριστούν οι τελικές τιμές των κυκλωματικών στοιχείων και θα διαμορφωθεί η συνολική κυκλωματική διάταξη. Τέλος, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των δοκιμών που έγιναν στο εργαστήριο, με στόχο την αξιόπιστη ανίχνευση ατελειών σε δοκίμια ηλεκτρικού χάλυβα και την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος.

6.1 Καθορισμός Παραμέτρων

Η πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε παραπάνω και αποτελείται από τα τρία προαναφερθέντα στάδια, επιτρέπει σε κάθε στάδιο την προσαρμογή βασικών παραμέτρων για τη βελτιστοποίηση της εξόδου, ανάλογα με τις συνθήκες του πειράματος και τη μορφή της μετρούμενης διάταξης. Το πρώτο στάδιο με τη διασύνδεση του ESP32 με το AD9850, είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του ημιτονοειδούς σήματος. Η μόνη μεταβλητή παράμετρος που είναι εφικτό να μεταβάλλεται είναι η συχνότητα του ημιτόνου, με σταθερές τιμές για το πλάτος και τη φάση, ώστε να παρατηρηθεί η απόκριση του δείγματος στις διαφορετικές συχνότητες. Στο δεύτερο στάδιο, το παραγόμενο ημιτονοειδές σήμα συνδυάζεται με μια DC πηγή ($\approx 0,5V$), μέσω ενός κυκλώματος αθροιστή, ώστε να διασφαλιστεί ότι το τελικό σήμα είναι συμμετρικό ως προς το 0. Για να επιτευχθεί αυτή η συμμετρία, χρησιμοποιείται ένα ποτενσιόμετρο αντί της αντίστασης R_x , διότι πρέπει να ληφθεί υπόψη η ανάγκη αντιστάθμισης των απωλειών του κυκλώματος, που μπορεί να προκύψουν λόγω μη ιδανικών συνθηκών λειτουργίας. Συνεπώς, δεν είναι απαραίτητο ότι η DC τάση που αποτελεί τη μία είσοδο του αθροιστή θα είναι ακριβώς $-0,5V$. Είναι δεδομένο ότι θα μεταβάλλεται όμως κοντά στο $-0,5V$ και η ακριβής τιμή της καθορίζεται με τη βοήθεια της R_x , η οποία ανήκει στο κύκλωμα του διαιρέτη τάσης. Στο τρίτο στάδιο, της ενίσχυσης ρεύματος, χρησιμοποιείται ένα ποτενσιόμετρο για τη ρύθμιση της αντίστασης R_{c1} , που καθορίζει το κέρδος του ενισχυτή. Η προσαρμογή της R_{c1} είναι απαραίτητη, ώστε να παράγεται το

απαιτούμενο ρεύμα διέγερσης του πηνίου, αναλόγως από τα χαρακτηριστικά του χαλύβδινου δοκιμίου. Επίσης, προκειμένου να υπάρχει πλήρης ελευθερία της λειτουργίας του κυκλώματος, παράλληλα με προστασία της διάταξης από υπερένταση ρεύματος τοποθετείται ποτενσιόμετρο στη θέση της R_{LIM} , η οποία είναι υπεύθυνη να περιορίζει το ρεύμα εξόδου του ενισχυτή αναλόγως με τον πίνακα 4. Οι τελικές τιμές των στοιχείων του κυκλώματος παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5: Τιμές Στοιχείων κυκλώματος.

Στοιχείο Κυκλώματος	Τιμή
R_x	trimmer
R_y	1k Ω
R_1	2,2k Ω
R_2	2,2k Ω
R_A	2,7k Ω
R_B	2,7k Ω
R_{c1}	trimmer
R_{c2}	6,8k Ω
R_{LIM}	trimmer

Πίνακας 6: Τιμές Τάσεων στο κύκλωμα.

Τάσεις	Τιμή
V1	$0.5 + 0.5 \cdot \sin(2\pi t)$ V
V2'	$\frac{R_y}{R_x + R_y} \cdot (-5)$ V $\approx -0,5$ V
V2	$\frac{R_y}{R_x + R_y} \cdot (-5)$ V $\approx -0,5$ V
Vout1	$V1 + V2 = 0.5 \cdot \sin(2\pi t)$ V
Vo	$\left(1 + \frac{R_{c1}}{R_{c2}}\right) \cdot 0.5 \cdot \sin(2\pi t)$ V

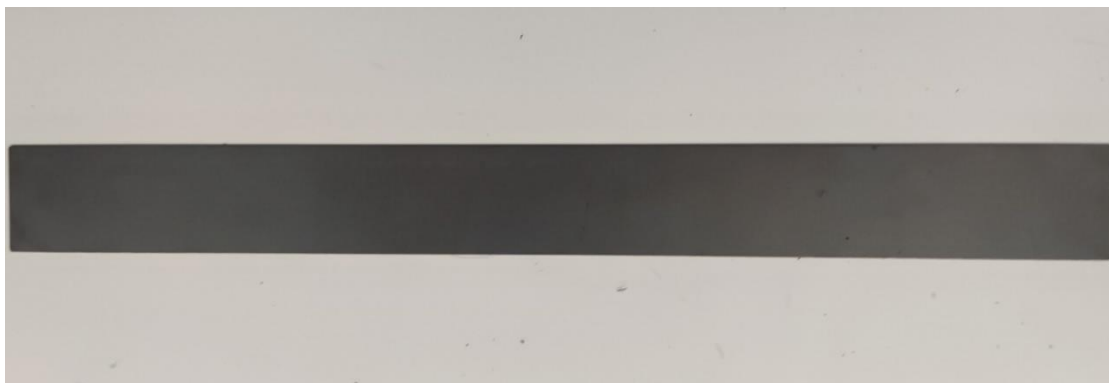
6.2 Ολοκλήρωση διάταξης

6.2.1 Διάταξη και Δοκίμια

Στη συγκεκριμένη διάταξη, η συμμετρική τροφοδοσία, ίση με $\pm 12V$, παρέχεται χρησιμοποιώντας δύο από τα κανάλια της γεννήτριας, ενώ παράλληλα ο μικροελεγκτής ESP32 φορτώνει τον κατάλληλο κώδικα, ώστε να παράγεται το επιθυμητό αρχικό ημιτονοειδές σήμα. Το σήμα διέγερσης στη μια πλευρά του γοκε (τάση εισόδου) και το σήμα λήψης στην έτερη πλευρά του γοκε (τάση εξόδου) απεικονίζονται στον παλμογράφο, επιτρέποντας την παρακολούθηση της λειτουργίας του κυκλώματος και της μαγνητικής απόκρισης του χάλυβα κατά τη σάρωσή του με γοκε. Παράλληλα, στη γεννήτρια εμφανίζεται και το ρεύμα εισόδου στο πηνίο διέγερσης που χρειάζεται η διάταξη, μετά την ενίσχυση που πραγματοποιείται από τον ενισχυτή OPA549.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις είναι φτιαγμένα από χάλυβα τύπου St42 και οι διαστάσεις τους είναι $300 \times 30 \times 0,6$ mm. Κάθε δοκίμιο είναι διαφορετικό από τα υπόλοιπα, καθώς οι αστοχίες είναι διαφορετικού είδους και βρίσκονται και σε διαφορετικά σημεία στην επιφάνειά τους. Αφού τα δοκίμια είναι 30cm, αποφασίζεται να γίνονται 6 μετρήσεις στο καθένα ανά 5cm δηλαδή. Το γοκε θα σαρώνει το δοκίμιο κατά το μήκος του και θα αποτυπώνεται εικόνα ανά 5cm. Το μετρούμενο μέγεθος με βάση το οποίο θα εξάγεται το συμπέρασμα για τυχόν ατέλεια είναι το V_{pp} του σήματος εξόδου.

Τα υπό εξέταση δοκίμια και οι θέσεις που θα ληφθούν ενδεικτικές τιμές πάνω στο χάλυβα ακολουθούν παρακάτω:



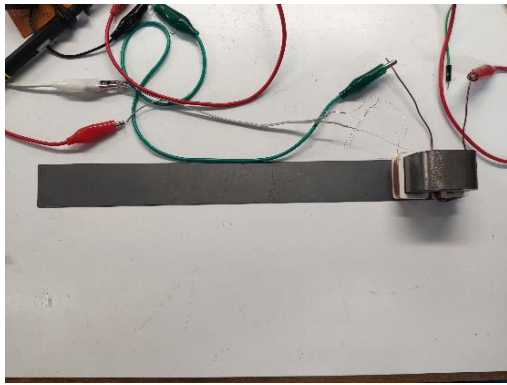
Εικόνα 54: Δοκίμιο 1.



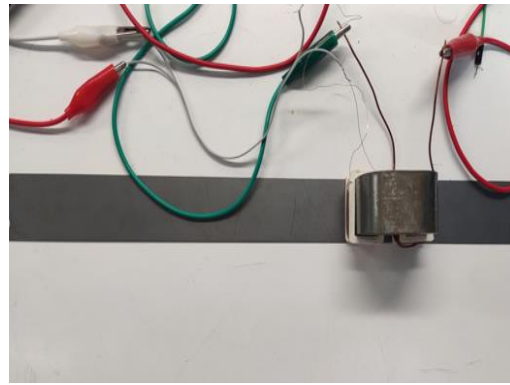
Εικόνα 55: Δοκίμιο 2.



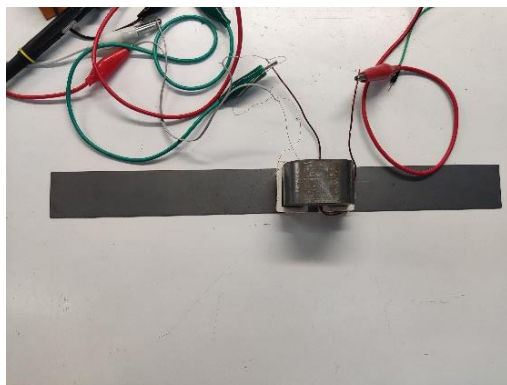
Εικόνα 56: Δοκίμιο 3.



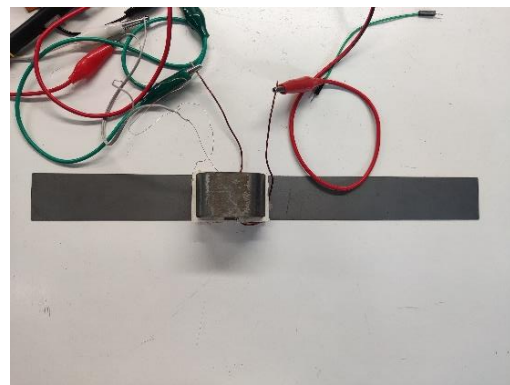
A) Θέση 1.



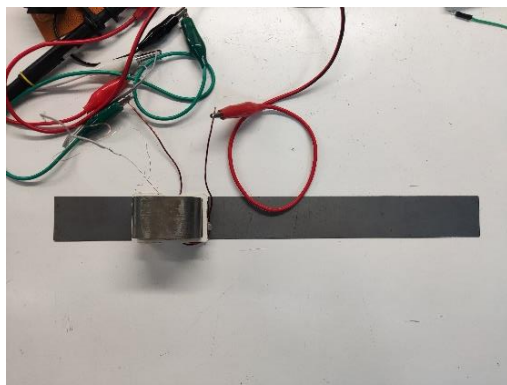
B) Θέση 2.



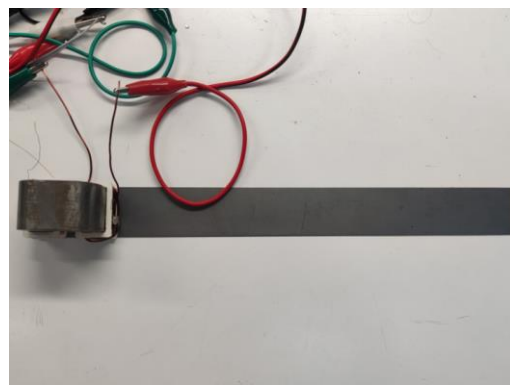
Γ) Θέση 3.



Δ) Θέση 4.



Θέση 5.

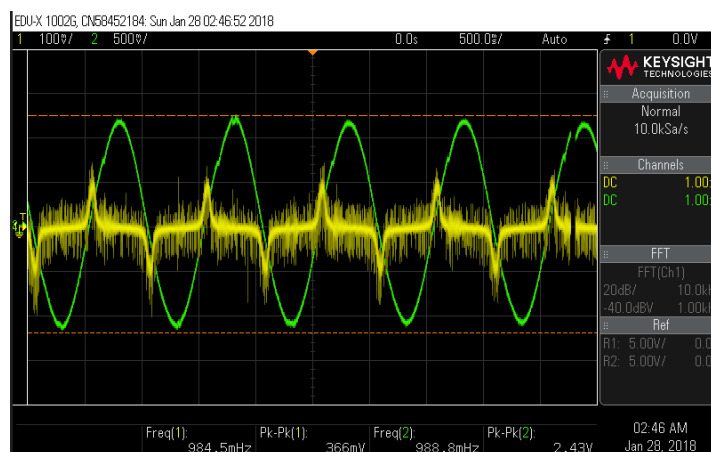


Θέση 6.

Εικόνα 57: Θέσεις μετρήσεων.

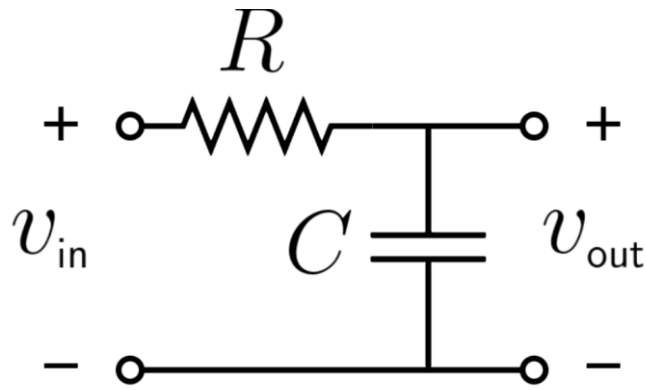
6.2.2 Βαθυπερατό Φίλτρο

Ξεκινώντας οι μετρήσεις και παρατηρώντας τα πρώτα αποτελέσματα διαπιστώθηκε η παρουσία πολλών μικρών αιχμών (spikes) θορύβου στο σήμα εξόδου. Με πράσινο απεικονίζεται το σήμα διέγερσης και με κίτρινο το σήμα λήψης.

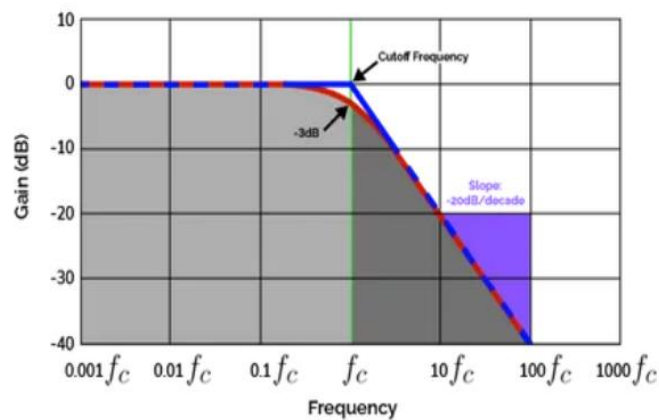


Εικόνα 58: Θορυβώδες σήμα εξόδου.

Πραγματοποιήθηκε ανάλυση αυτών των αιχμών με τη βοήθεια φασματογράφου, ο οποίος επιτρέπει τη μελέτη των συχνοτήτων που συνθέτουν ένα σήμα, όπου και εντοπίστηκαν οι συχνότητες που τα προκαλούσαν. Βλέποντας, λοιπόν, το σήμα στο πεδίο των συχνοτήτων, μέσω FFT (Fast Fourier Transform), παρατηρείται ότι οι συχνότητες του θορύβου εμφανίζονται ως αιχμές στο φάσμα, που διαφέρουν από το κανονικό σήμα [48]. Στο σήμα αυτό οι αιχμές βρίσκονται στις υψηλότερες συχνότητες, συνεπώς επιλέγεται ένα άνω όριο τιμής συχνότητας, πάνω από το οποίο οι συχνότητες θα απορριφθούν. Πρακτικά, η αποκοπή των ανεπιθύμητων συχνοτήτων επιτυγχάνεται με ένα βαθυπερατό φίλτρο (Low Pass Filter). Το φίλτρο έχει μια συγκεκριμένη συχνότητα αποκοπής f_c , η οποία είναι το όριο μεταξύ των συχνοτήτων που περνούν (χαμηλές) και των συχνοτήτων που αποκόπτονται (υψηλές). Για συχνότητες μικρότερες από f_c , το φίλτρο επιτρέπει την ανεμπόδιστη διέλευση του σήματος, ενώ για μεγαλύτερες το φίλτρο μειώνει σταδιακά το πλάτος του σήματος. Ο πυκνωτής που περιέχει η διάταξη λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα στις υψηλές συχνότητες και κατευθύνει το ρεύμα μακριά από το κύκλωμα εξόδου, ενώ οι χαμηλές συχνότητες περνούν, καθώς ο πυκνωτής παρουσιάζει υψηλή αντίσταση σε αυτές.



Εικόνα 59: Βαθυπερατό RC φίλτρο.

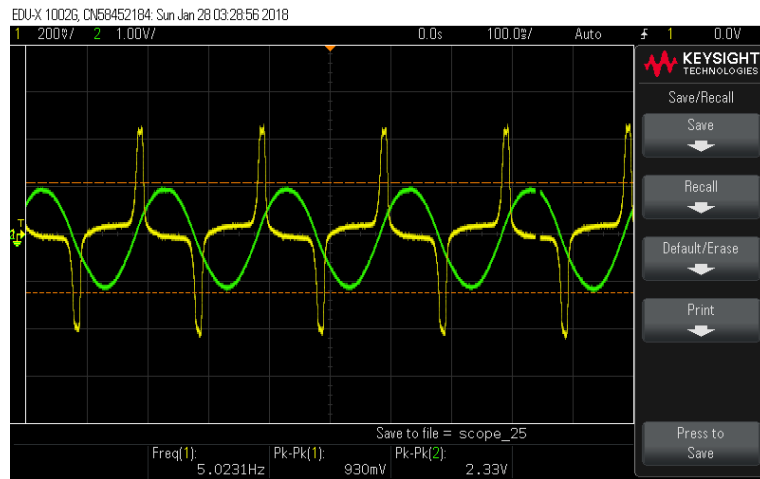


Εικόνα 60: Διάγραμμα Bode LPF.

Οι παράμετροι f_c συχνότητα αποκοπής, C τιμή πυκνωτή και R τιμή αντίστασης για το κύκλωμα του βαθυπερατού φίλτρου προσδιορίζονται ως εξής:

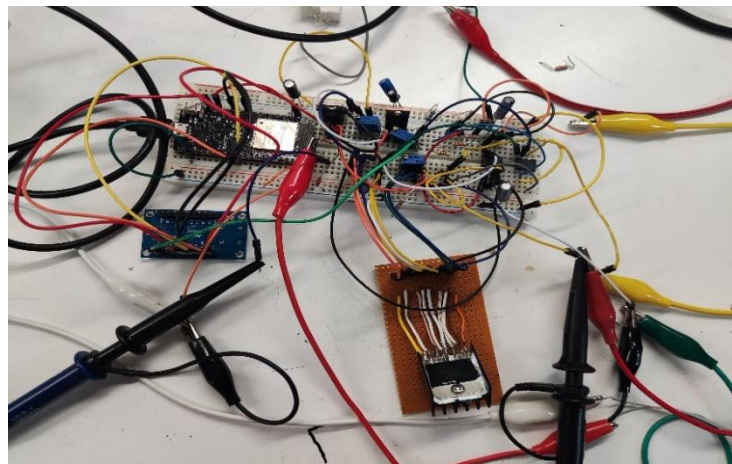
$$f_c = \frac{1}{2\pi R C}, \quad C = \frac{1}{2\pi R f_c}, \quad R = \frac{1}{2\pi C f_c}$$

Από την ανάλυση των αρμονικών στο φασματογράφο για τη διάταξη παρατηρήθηκε ότι οι αρμονικές, οι οποίες προκαλούν το θόρυβο είναι για $f > 1800\text{Hz}$. Ωστόσο, προκειμένου να υπάρχει ασφάλεια στις μετρήσεις και αφού το σήμα δεν αλλοιώνεται, αποφασίζεται η συχνότητα αποκοπής να είναι $f_c \approx 600\text{Hz}$. Με βάση τις διαθέσιμες τιμές των αντιστάσεων και πυκνωτών επιλέγεται $C = 100\text{nF}$ και $R = 2700\text{k}\Omega$ και άρα $f_c = 589,5\text{Hz}$. Μετά την προσθήκη του RC Low Pass Filter το σήμα φιλτράρεται και είναι σαφώς λιγότερο θορυβώδες:

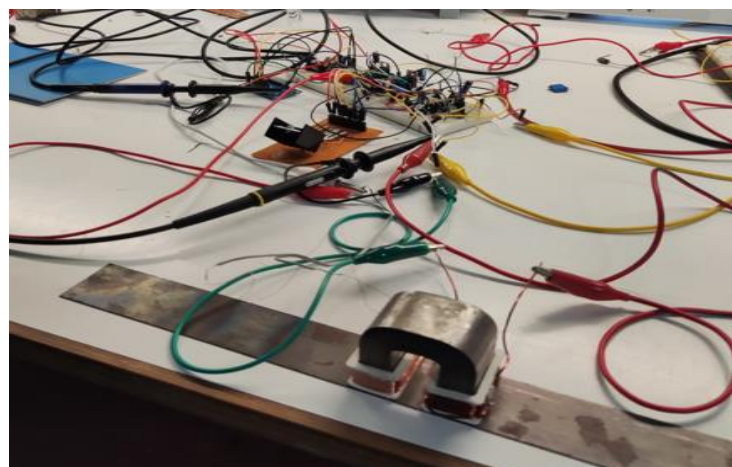


Εικόνα 61: Σήμα μετά την προσθήκη του LPF.

Το συνολικό κύκλωμα μετά και την προσθήκη του τελικού σταδίου, του βαθυπερατού φίλτρου, είναι:



Εικόνα 62: Συνολικό ηλεκτρονικό κύκλωμα.

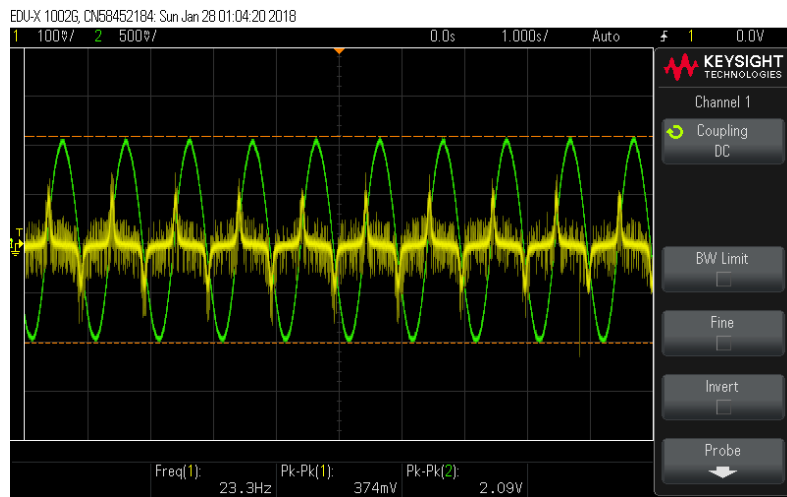


Εικόνα 63: Πειραματική διάταξη.

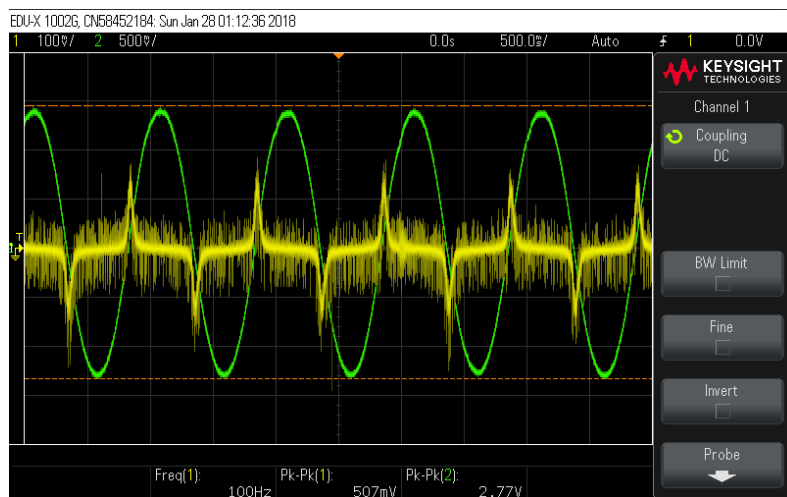
6.3 Αποτελέσματα

6.3.1 Μελέτη Επίδρασης R_{c1}

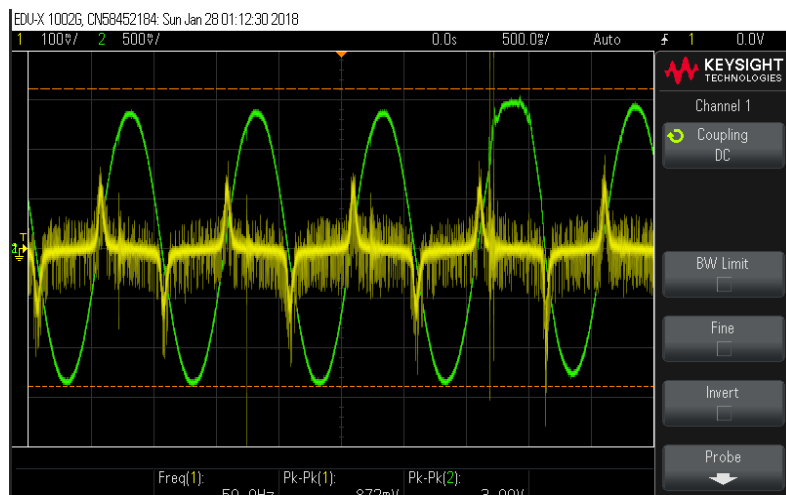
Για τις ίδιες συνθήκες μέτρησης, δηλαδή κοινό δοκίμιο χάλυβα και μέτρηση στο ίδιο ακριβώς σημείο πάνω στο δοκίμιο, μεταβάλλεται η R_{c1} .



Εικόνα 64: Επίδραση $RC_1 = 3,5k\Omega$.



Εικόνα 65: Επίδραση $RC_1 = 5k\Omega$.

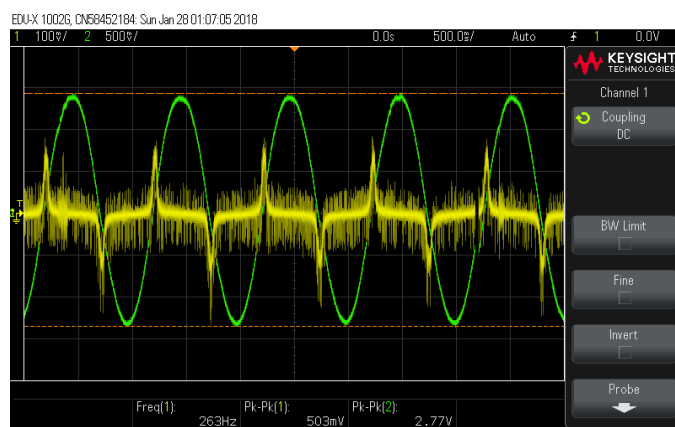


Εικόνα 66: Επίδραση $R_{C1} = 7k\Omega$.

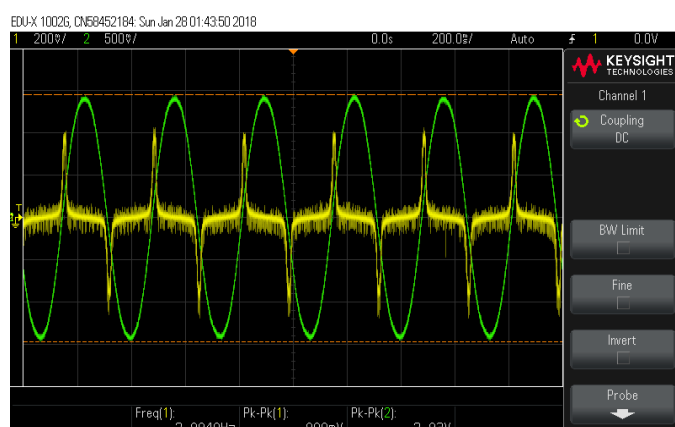
Η R_{C1} καθορίζει το κέρδος του κυκλώματος, άρα πρακτικά ελέγχει το μέγεθος της τάσης εισόδου στο πηνίο διέγερσης. Αυξάνοντας την R_{C1} αυξάνεται η τάση εισόδου στο πηνίο διέγερσης, που σημαίνει ότι το ρεύμα μπορεί να αυξηθεί αν η συνολική εμπέδηση του κυκλώματος το επιτρέπει. Αν η εμπέδηση του κυκλώματος δεν επιτρέπει τη σωστή ροή του ρεύματος, το σήμα εξόδου θα είναι μειωμένο. Μεγαλύτερη τάση εισόδου στο πηνίο διέγερσης σημαίνει ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο, άρα και μεγαλύτερη μαγνητική ροή, επομένως αναμένεται και μεγαλύτερη τάση εξόδου. Άλλος ένας παράγοντας που μπορεί να μην επιτρέπει αύξηση του ρεύματος είναι η R_{LIM} , που βρίσκεται στον OPA549, και επιτρέπει συγκεκριμένο ρεύμα εξόδου αναλόγως την τιμή της. Αν το ρεύμα που επιτρέπει αυτή η αντίσταση είναι μικρότερο του ρεύματος που μπορεί να δώσει η καθορισμένη ενίσχυση του κυκλώματος, τότε δε θα παρατηρείται στο σήμα εξόδου αύξηση στο V_{pp} και θα είναι παραμορφωμένο (πιο τετραγωνισμένο). Η R_{C1} θα μεταβάλλεται σε κάθε μέτρηση σε συνάρτηση και με την R_{LIM} , προκειμένου να αποφασιστεί κάθε φορά το απαιτούμενο ρεύμα διέγερσης. Η R_{C1} θα κυμαίνεται από 2-10k Ω , ενώ η R_{LIM} θα λαμβάνεται από τον πίνακα 4.

6.3.2 Μελέτη Επίδρασης Συχνότητας

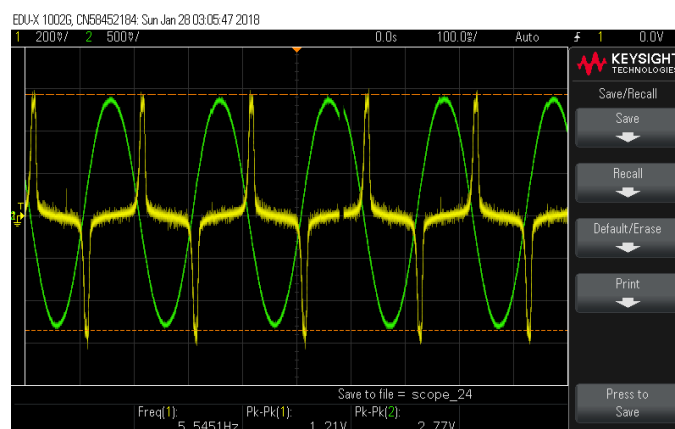
Έχοντας ένα συγκεκριμένο δοκίμιο χάλυβα και μετρώντας ακριβώς στην ίδια θέση μεταβάλλεται η συχνότητα προκειμένου να μελετηθεί η επιρροή της.



Εικόνα 67: Επίδραση $f = 1\text{kHz}$.



Εικόνα 68: Επίδραση $f = 3\text{kHz}$.



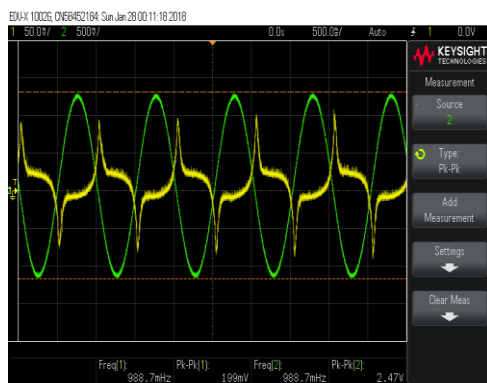
Εικόνα 69: Επίδραση $f = 5\text{kHz}$.

Παρατηρείται ότι αυξανόμενης της συχνότητας αυξάνεται και το V_{pp} του σήματος λήψης. Αυτό έχει μαθηματική εξήγηση, καθώς το σήμα λήψης δίνεται από τον τύπο $V_o = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$ και το ρεύμα διέγερσης είναι της μορφής $I_{in} = I_d \cos(\omega t)$. Αφού το ρεύμα διέγερσης είναι ημιτονοειδές, τότε και το μαγνητικό πεδίο B και η μαγνητική ροή Φ επίσης θα έχουν εναλλασσόμενο χαρακτήρα με συχνότητα $\omega = 2\pi f$. Επειδή η παράγωγος μιας ημιτονοειδούς συνάρτησης δίνει έναν παράγοντα ω , προκύπτει ότι η επαγόμενη τάση στο πηνίο λήψης αυξάνεται με την άνοδο της συχνότητας. Παρότι όπως φαίνεται η μεγαλύτερη συχνότητα παρουσιάζει πιο “καθαρά” αποτελέσματα η τελική συχνότητα που επιλέγεται είναι το 1Hz, διότι παράγει αρκετά αντιπροσωπευτικές μετρήσεις, χωρίς να επάγονται πολύ υψηλές τάσεις, ενώ παράλληλα περιορίζονται και ανεπιθύμητα φαινόμενα, όπως το skin effect.

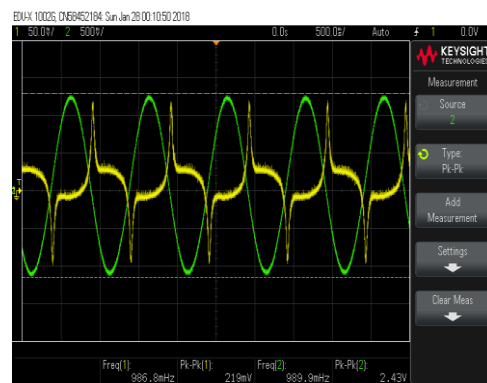
6.3.3 Αποτελέσματα για Ανίχνευση Ατελειών

Ο σκοπός είναι να εξεταστεί η ικανότητα του αισθητήρα να εντοπίζει ατέλειες σε ολόκληρη την επιφάνεια του χάλυβα. Θα χρησιμοποιηθούν τα τρία δείγματα του χάλυβα για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα του αισθητήρα. Οι τιμές των ποτενσιομέτρων R_{c1} , R_{LIM} και R_x ρυθμίζονται, έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ευκρίνεια κάθε φορά, εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι το ρεύμα διέγερσης είναι επαρκές χωρίς να το αποκόπτει η R_{LIM} ή να προκαλείται υπερθέρμανση. Η R_x χρησιμοποιείται για τη στάθμιση του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης, προκειμένου να είναι συμμετρικό γύρω από το 0. Η συχνότητα ορίζεται στα 1 Hz.

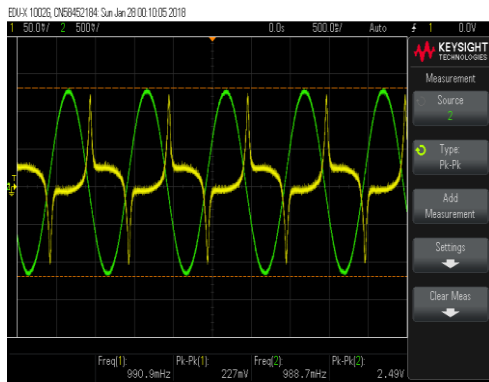
Για το δοκίμιο 1:



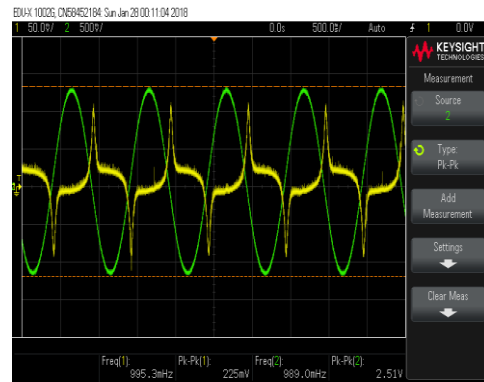
A) Θέση 1.



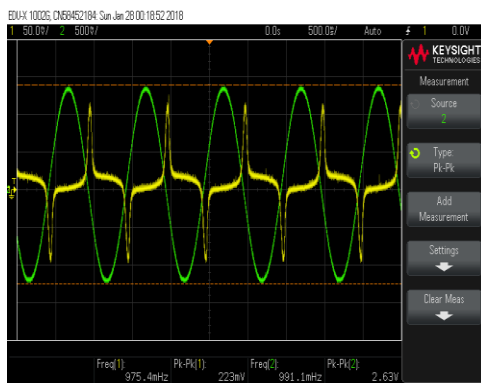
B) Θέση 2.



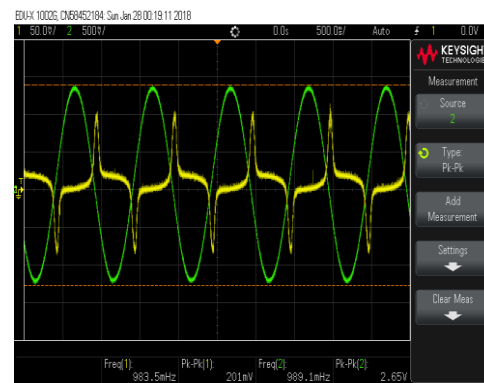
Γ) Θέση 3.



Δ) Θέση 4.



Ε) Θέση 5.

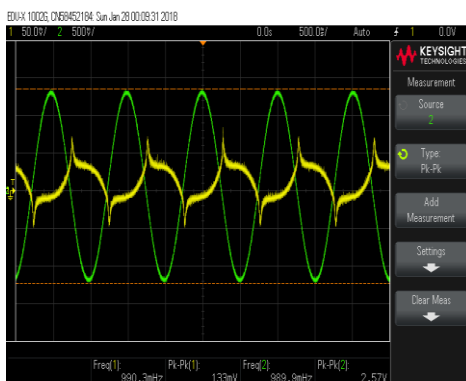


ΣΤ) Θέση 6.

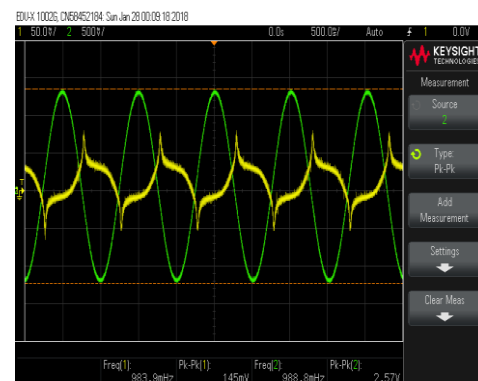
Εικόνα 70: Έλεγχος δοκιμίου 1.

Το δοκίμιο 1 είναι αρκετά καθαρό. Κατά την αξιολόγησή του με τη χρήση του αισθητήρα για τυχόν ατέλειες, διαπιστώθηκε ότι στο πηνίο λήψης καταγράφηκε μια σχεδόν ομοιόμορφη τάση V_{pp} σε όλο το μήκος του δείγματος. Αυτό υποδεικνύει ότι δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές ανωμαλίες στην ακεραιότητά του.

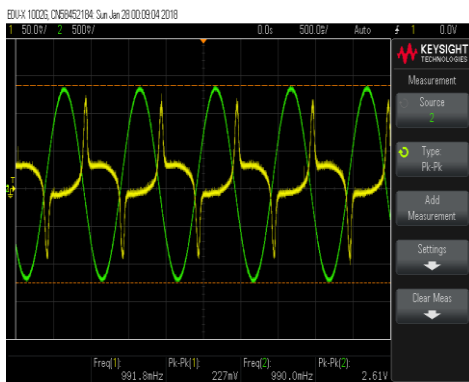
Για το δοκίμιο 2:



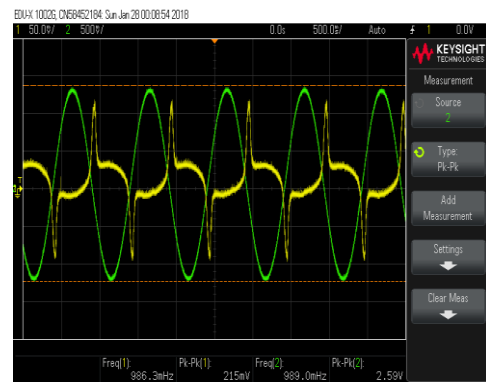
Α) Θέση 1.



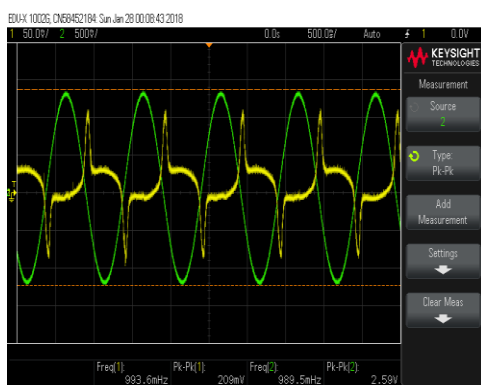
Β) Θέση 2.



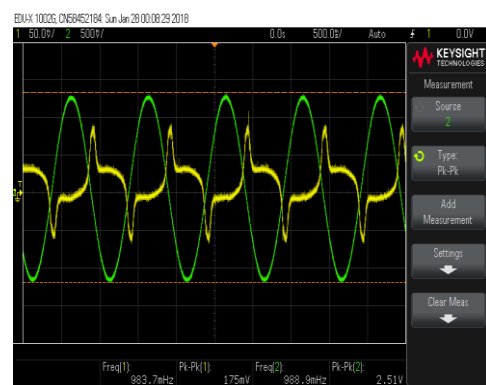
Γ) Θέση 3.



Δ) Θέση 4.



Ε) Θέση 5.

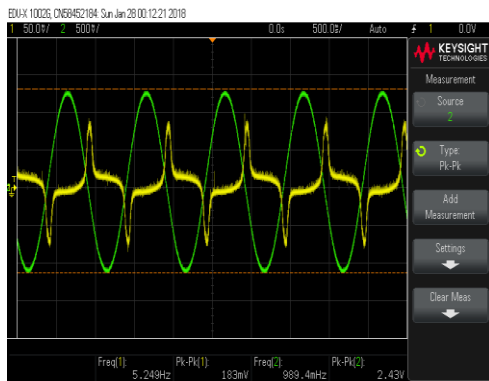


ΣΤ) Θέση 6.

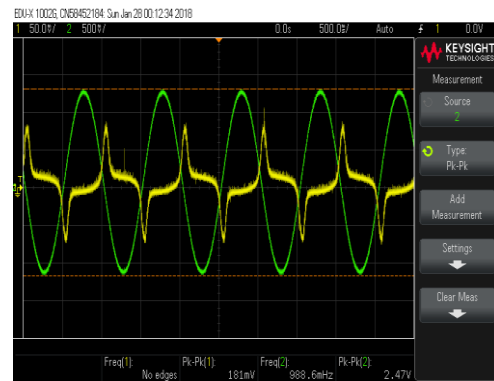
Εικόνα 71: Έλεγχος δοκιμίου 2

Ο αισθητήρας εντοπίζει με ακρίβεια τις ατέλειες στο δοκίμιο 2, συγκεκριμένα στις θέσεις 1, 2 και 6. Στα σημεία 1 και 2 παρατηρούνται κηλίδες αποχρωματισμού, και αυτό ανιχνεύεται από τον αισθητήρα αφού μετράται σημαντικά χαμηλότερη τάση στα σημεία αυτά. Στη θέση 6, όπου υπάρχει έντονη φθορά λόγω τριβών, η τάση είναι επίσης μειωμένη, αλλά όχι τόσο όσο στις πρώτες δύο θέσεις. Στις ενδιάμεσες θέσεις πάλι υπάρχουν ατέλειες πολύ μικρότερης κλίμακας για αυτό και εκεί υπάρχουν διακυμάνσεις του V_{pp} , αλλά σαφώς λιγότερο σημαντικές.

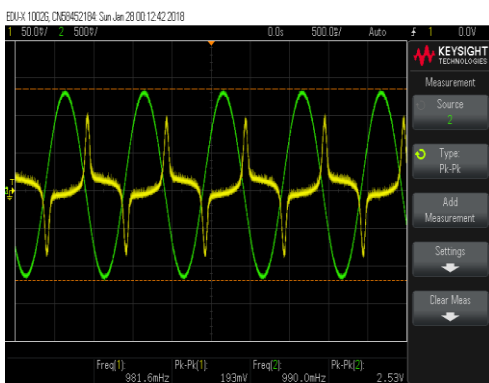
Για το δοκίμιο 3:



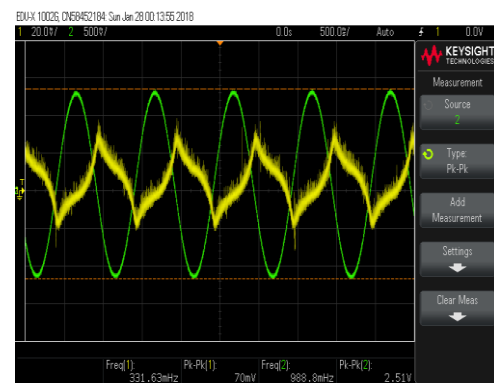
Α) Θέση 1.



Β) Θέση 2.



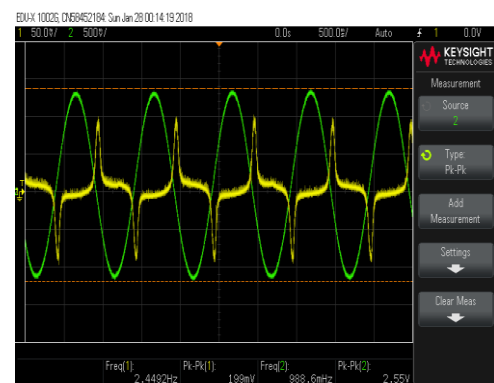
Γ) Θέση 3.



Δ) Θέση 4.



Ε) Θέση 5.



ΣΤ) Θέση 6.

Εικόνα 72: Έλεγχος δοκιμίου 3.

Στο δοκίμιο 3, ο αισθητήρας ανιχνεύει μια πολύ εμφανή ατέλεια στη θέση 4, η οποία επηρεάζει αισθητά το σήμα εξόδου. Σε αυτό το σημείο, εκτός από τη μείωση της τάσης V_{pp} , το σήμα εξόδου εμφανίζει και παραμόρφωση, κάτι που δείχνει ότι η επιφάνεια έχει επηρεαστεί σημαντικά. Επιπλέον, στη θέση 5, όπου το πόδι του γοκε

εμπεριέχεται μερικώς στην ατέλεια, το πλάτος του σήματος παρουσιάζει πάλι μείωση, αν και σε μικρότερο βαθμό. Στις υπόλοιπες θέσεις ο αισθητήρας πάλι έχει σχετικά παρόμοια τιμή V_{pp} .

7 Συμπεράσματα

Στο τελευταίο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα και η συνολική αποτίμηση της απόδοσης του αισθητήρα, αξιολογώντας την αποτελεσματικότητα του συστήματος και τις πιθανές βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν. Επιπλέον, θα συζητηθούν οι μελλοντικές επεκτάσεις του αισθητήρα, προσαρμογής του σε νέες εφαρμογές και συνθήκες μέτρησης, με στόχο την ακόμα πιο αποδοτική και ακριβή λειτουργία του.

7.1 Αξιολόγηση διάταξης

Ο αισθητήρας που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, με στόχο την ανίχνευση ατελειών σε δοκίμια χάλυβα, κατασκευάστηκε με επιτυχία και ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της μελέτης. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορεί να εντοπίζει τις ατέλειες με ικανοποιητικό βαθμό ακρίβειας, επιβεβαιώνοντας τη σωστή λειτουργία του. Η απόδοσή του κρίνεται θετική, καθώς καταγράφει τις μεταβολές της τάσης στο υλικό και προσφέρει αξιόπιστες ενδείξεις για την παρουσία ατελειών.

Οι κύριοι στόχοι της διπλωματικής εργασίας έχουν επιτευχθεί. Αρχικά, είναι ένας αισθητήρας NDT που δεν προκαλεί καμία ζημιά ή αλλοίωση στο υλικό (βασική απαίτηση σε βιομηχανικές εφαρμογές), το οποίο απλώς σκανάρεται με το *yoke*. Μάλιστα, ο αισθητήρας λειτουργεί χωρίς να απαιτείται φυσική επαφή με το υλικό, γεγονός που μειώνει τη φθορά και την ανάγκη για συντήρηση. Η διαδικασία μέτρησης είναι απλή και φιλική προς τον χρήστη, καθώς χρειάζεται η σύνδεση του τροφοδοτικού στην πρίζα και στα δύο καλώδια τροφοδοσίας του κυκλώματος και στη συνέχεια ο παλμογράφος απεικονίζει τα επιθυμητά σήματα. Συνεπώς, καθίσταται άμεση η χρήση του αισθητήρα και χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη εκπαίδευση. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των μετρήσεων που παρατίθενται είναι ευκόλως ερμηνεύσιμα, αφού η πληροφορία που χρειάζεται εξήγηση είναι η τιμή της V_{pp} και η μορφή του σήματος εξόδου, επιτρέποντας έτσι στον χρήστη να αποκτήσει γρήγορα και αξιόπιστα συμπεράσματα για την ποιότητα του υλικού. Όταν παρατηρεί αισθητή

μείωση του V_{pp} ή αλλαγή της μορφολογίας του σήματος, τότε αντιλαμβάνεται την ύπαρξη ατέλειας. Επειδή βασίζεται σε μαγνητικά πεδία και όχι σε υψηλές τάσεις και ρεύματα, η διάταξη καταναλώνει λίγη ενέργεια, ενώ αναλόγως με την ισχύ του μαγνητικού πεδίου και τη συχνότητα διέγερσης, ο αισθητήρας μπορεί να ανιχνεύσει ατέλειες όχι μόνο στην επιφάνεια, αλλά και σε κάποιο βάθος μέσα στο υλικό. Τέλος, το κόστος των αναγκαίων υλικών είναι χαμηλό, καθώς η διάταξη αποτελείται απλώς από το ηλεκτρομαγνητικό yoke, τα πηνία, τα ολοκληρωμένα, το breadboard και το Arduino, τα οποία είναι ευρέως διαδεδομένα και διαθέσιμα στην αγορά.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφερθούν και συγκεκριμένοι προβληματισμοί για τη λειτουργικότητα της διάταξης. Η αισθητήρια διάταξη παράγει αποτελέσματα με μικρές διαφορές, ακόμα και όταν οι συνθήκες παραμένουν οι ίδιες. Αυτή η μεταβλητότητα μπορεί να αποδοθεί σε παράγοντες, όπως η ευαισθησία του εξοπλισμού, οι μικρές διακυμάνσεις στο περιβάλλον, η ύπαρξη μεταλλικών αντικειμένων κοντά στην επιφάνεια μέτρησης και σε τυχαία σφάλματα κατά τη διαδικασία μέτρησης. Ακόμα και κατά τη διάρκεια ελέγχου του ίδιου δοκιμίου, λόγω απωλειών στα εξαρτήματα, μπορεί να προκύψει η ανάγκη για προσαρμογή της διαδικασίας (π.χ. συμμετρικότητα σήματος εισόδου ως προς το 0). Τα ποτενσιόμετρα επιτρέπουν τη ρύθμιση και την αντιστάθμιση αυτών των μικρών αποκλίσεων που μπορεί να εμφανιστούν, διατηρώντας έτσι την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και τη σωστή λειτουργία της διάταξης. Ωστόσο, η αναγκαιότητα αυτών των προσαρμογών καθιστά τη διαδικασία ελέγχου ευμετάβλητη. Επίσης, δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί εκ των προτέρων το λαμβανόμενο σήμα ούτε ως προς τη μορφή ούτε ως προς την ένταση, ώστε να μπορούν να επαληθευτούν τα αποτελέσματα με ακρίβεια. Αυτός είναι ο λόγος που χρησιμοποιούνται οι μεταβολές στο σήμα, είτε σε μορφή είτε σε ένταση, ως δείκτες για την ανίχνευση των φθορών στο υλικό. Τέλος, οι χάλυβες μεγάλου όγκου και βάθους απαιτούν τελείως διαφορετική προσέγγιση κυρίως στο κύκλωμα διέγερσης.

Συνεπώς, το σύστημα μπορεί να αποτελέσει μια χρήσιμη βάση για περαιτέρω έρευνα και βελτιώσεις, στοχεύοντας σε ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια και ευαισθησία.

7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Η ανάπτυξη και η υλοποίηση του αισθητήρα που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία αποτελεί ένα σημαντικό βήμα στην κατεύθυνση της καινοτομίας και της τεχνολογικής προόδου, καθώς λίγα εργαστήρια παγκοσμίως ασχολούνται με αυτό το θέμα, γεγονός που καθιστά την έρευνα και τις εξελίξεις σε αυτόν τον τομέα ακόμη πιο σημαντικές. Οι δυνατότητες για μελλοντικές βελτιώσεις και επεκτάσεις είναι πάντα ανοιχτές. Γι' αυτό εξετάζονται πιθανές κατευθύνσεις στις οποίες θα μπορούσε να εξελιχθεί ο αισθητήρας, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις τεχνολογικές εξελίξεις όσο και τις ανάγκες του πραγματικού κόσμου. Βασικός στόχος είναι να ενισχυθούν οι λειτουργίες του αισθητήρα, και να διευρυνθεί το φάσμα των εφαρμογών στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Η αισθητήρια διάταξη μπορεί να βρει εφαρμογή στο εργαστήριο για την ανάλυση δειγμάτων χάλυβα σε σύγκριση με γνωστά βαθμονομημένα δείγματα. Βαθμονομημένα δείγματα είναι εκείνα των οποίων η σύσταση, η μικροδομή και οι ιδιότητές τους είναι γνωστές με ακρίβεια, συνήθως μέσω αξιόπιστων τεχνικών ανάλυσης. Για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα, ένα γνωστό βαθμονομημένο δείγμα μετράται πρώτα με τις καθιερωμένες μεθόδους και στη συνέχεια με τον αισθητήρα της εργασίας. Τα αποτελέσματα καταγράφονται και συγκρίνονται, δημιουργώντας μια σχέση βαθμονόμησης μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου. Μόλις ολοκληρωθεί η βαθμονόμηση, ο αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση νέων δειγμάτων, επιτρέποντας τη σύγκριση της ποιότητάς τους με τον "καλό" χάλυβα. Αυτή η διαδικασία προσφέρει ταχύτερες μετρήσεις, μείωση κόστους και αυτοματοποίηση της ανάλυσης, καθιστώντας τον αισθητήρα ένα πολύτιμο εργαλείο στον ποιοτικό έλεγχο του χάλυβα. Επίσης, μια άλλη εφαρμογή που μπορεί να βρει σε εργαστηριακό περιβάλλον είναι ο υπολογισμός της μαγνητικής διαπερατότητας του εξεταζόμενου δοκιμίου, δεδομένης της μαγνητικής διαπερατότητας του yoke. Παρατηρώντας την τάση εξόδου στο πηνίο λήψης, από το νόμο του Faraday μπορεί να βρεθεί η μαγνητική ροή Φ και κατ' επέκταση η μαγνητική επαγωγή B και η ένταση H του μαγνητικού πεδίου. Υπολογίζεται η συνολική μαγνητική διαπερατότητα του

κυκλώματος και όντας γνωστές η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα και του γοκε βρίσκεται και η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού.

Μια σημαντική βελτιστοποίηση για τον αισθητήρα θα ήταν η υλοποίηση του ηλεκτρονικού κυκλώματος σε πλακέτα PCB (Printed Circuit Board), η οποία θα ενσωμάτωνε όλα τα απαραίτητα στοιχεία σε ένα συμπαγές και οργανωμένο σχεδιασμό, γεγονός που θα βοηθούσε στη μαζικοποίηση της παραγωγής και μείωση του κόστους. Επιπλέον, η χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων θα μπορούσε να αντικαταστήσει την ανάγκη για εξωτερική γεννήτρια, καθιστώντας τον αισθητήρα ακόμα πιο εύχρηστο και διευκολύνοντας τη δυνατότητα για πακετάρισμα της διάταξης. Μια άλλη βελτίωση θα μπορούσε να ήταν η μείωση των διαστάσεων του γοκε. Ένα μικρότερο γοκε μπορεί να αυξήσει την ευαισθησία του αισθητήρα, καθώς το μαγνητικό πεδίο θα είναι πιο συγκεντρωμένο και πιο έντονο στην περιοχή που σκανάρεται. Αυτό σημαίνει ότι με μικρότερες διαστάσεις, ο αισθητήρας μπορεί να ανιχνεύσει μικρότερες ατέλειες και μικρότερες αλλαγές στη μαγνήτιση, καθώς η περιοχή ανίχνευσης είναι πιο συγκεντρωμένη.

Τέλος, μια σημαντική επέκταση θα ήταν η δυνατότητα χρησιμοποίησης σε πιο ογκώδεις κατασκευές με μεγαλύτερο βάθος. Αυτό προϋποθέτει αλλαγές σε όλα τα στάδια, αλλά η δομή θα παρέμενε η ίδια. Δηλαδή, για να αυξηθεί το βάθος ανίχνευσης, ο μαγνητικός πυρήνας πρέπει να είναι μεγαλύτερος, ώστε να δημιουργείται ένα ισχυρότερο και πιο εκτεταμένο μαγνητικό πεδίο, ενώ θα απαιτούταν και παχύτερο σύρμα, ώστε να μπορεί να αντέξει υψηλότερα ρεύματα χωρίς υπερθέρμανση, αυξάνοντας έτσι την ισχύ του μαγνητικού πεδίου. Επίσης, αλλαγές στα ηλεκτρονικά μέρη, ώστε το σήμα από το πηνίο λήψης να μπορεί να ενισχυθεί ακόμα περισσότερο, για να ανιχνευθούν ασθενέστερα σήματα από μεγαλύτερο βάθος.

Βιβλιογραφία

- [1] World Steel Association, World Steel in Figures 2024. World Steel Association, 2024. [Online]. Available: worldsteel.org
- [2] W. Durant, The Story of Civilization: Our Oriental Heritage. New York, NY, USA: Simon & Schuster, 1942
- [3] W. M. Lord, "The Development of the Bessemer Process in Lancashire, 1856–1900," Trans. Newcomen Soc., vol. 25, no. 1, pp. 163–180, 1945. doi: 10.1179/tns.1945.017.
- [4] D. B. Wagner, Iron and Steel in Ancient China, 2nd ed. Leiden, Netherlands: E. J. Brill, 1993.
- [5] L. Holappa, 'Historical overview on the development of converter steelmaking from Bessemer to modern practices and future outlook', Mineral Processing and Extractive Metallurgy, τ. 128, τχ. 1–2, σελ. 3–16, Απριλίου 2019, doi: 10.1080/25726641.2018.1539538.
- [6] Encyclopedia Britannica, "Testing of properties," Britannica, [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/steel/Testing-of-properties#ref81356>.
- [7] M. Müller, P. Erhart, και K. Albe, 'Analytic bond-order potential for bcc and fcc iron—comparison with established embedded-atom method potentials', J. Phys.: Condens. Matter, τ. 19, τχ. 32, σελ. 326220, Αυγούστου 2007, doi: 10.1088/0953-8984/19/32/326220.
- [8] Encyclopedia Britannica, "Primary steelmaking," *Britannica*, [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/steel/Primary-steelmaking>.
- [9] P. Warrian, A Profile of the Steel Industry: Global Reinvention for a New Economy. New York, NY, USA: Business Expert Press LLC, 2012.
- [10] Bringas, John E. (2004). Handbook of Comparative World Steel Standards: Third Edition (PDF) (3rd. ed.). ASTM International. p. 14. ISBN 0-8031-3362-6. Archived from the original (PDF) on 27 January 2007.

[11] BigRentz, "4 Types of Steel: What Makes Them Different?" BigRentz, Apr. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.bigrentz.com/blog/types-of-steel>.

[12] Bell, "Steel Grades and Properties," ThoughtCo, Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.thoughtco.com/steel-grades-2340174>.

[13] K. H. J. Buschow et al., Eds., Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Elsevier, 2001, pp. 4807–4808. ISBN: 0-08-043152-6.

[14] J. Villalobos, A. Del-Pozo, B. Campillo, J. Mayen, και S. Serna, 'Microalloyed Steels through History until 2018: Review of Chemical Composition, Processing and Hydrogen Service', Metals, τ. 8, τχ. 5, σελ. 351, Μαΐου 2018, doi: 10.3390/met8050351.

[15] S. Talebi κ.ά., 'Causes of Defects Associated with Tolerances in Construction: A Case Study', J. Manage. Eng., τ. 37, τχ. 4, σελ. 05021005, Ιουλίου 2021, doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000914.

[16] X. Wen, J. Shan, Y. He, και K. Song, 'Steel Surface Defect Recognition: A Survey', Coatings, τ. 13, τχ. 1, σελ. 17, Δεκεμβρίου 2022, doi: 10.3390/coatings13010017.

[17] Y. Xu, P. Jiao, and J. Liu, "CFM-YOLOv5: CFPNet module and multi-target prediction head incorporating YOLOv5 for metal surface defect detection," PLOS ONE, vol. 18, 2023, Art. no. e0289179. doi: 10.1371/journal.pone.0289179.

[18] T. Yang and J. Li, "Steel Surface Defect Detection Based on SSAM-YOLO," Int. J. Inf. Technol. Syst. Approach, vol. 16, pp. 1-13, 2023, doi: 10.4018/IJITSA.328091.

[19] Wikipedia contributors, "Sensor," Wikipedia, The Free Encyclopedia. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sensor>.

[20] Sensor Technology Handbook. Amsterdam: Elsevier, 2005.

[21] "Φυσική – Τεύχος Β' Γενικού Λυκείου, Κεφάλαιο 4 και 5," ebooks.edu.gr. [Online].

[22] Edward M. Purcell Ηλεκτρισμός – Μαγνητισμός. Μαθήματα Φυσικής - Πανεπιστήμιο Berkeley. Έκδοση Ε.Μ.Π.

[23] Π. Βουρνά, "Συσχέτιση μαγνητικών ιδιοτήτων με τη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες σε συγκολλημένους φερρομαγνητικούς χάλυβες," Mar. 2015.

[24] S. Zurek, *Characterisation of Soft Magnetic Materials Under Rotational Magnetisation*, 1η έκδ. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2017.: CRC Press, 2017. doi: 10.1201/b22374.

[25] S. Tumanski, *Handbook of Magnetic Measurements*, 0 έκδ. CRC Press, 2016. doi: 10.1201/b10979.

[26] G. S. Schajer, 'Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part I—Stress Calculation Procedures', *Journal of Engineering Materials and Technology*, τ. 110, τχ. 4, σελ. 338–343, Οκτωβρίου 1988, doi: 10.1115/1.3226059.

[27] E. W. Hart, 'Theory of the tensile test', *Acta Metallurgica*, τ. 15, τχ. 2, σελ. 351–355, Φεβρουαρίου 1967, doi: 10.1016/0001-6160(67)90211-8.

[28] S. S. Khedmatgozar Dolati, N. Caluk, A. Mehrabi, και S. S. Khedmatgozar Dolati, 'Non-Destructive Testing Applications for Steel Bridges', *Applied Sciences*, τ. 11, τχ. 20, σελ. 9757, Οκτωβρίου 2021, doi: 10.3390/app11209757.

[29] M. Brown κ.ά., 'Destructive and non-destructive testing methods for characterization and detection of machining-induced white layer: A review paper', *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, τ. 23, σελ. 39–53, Νοεμβρίου 2018, doi: 10.1016/j.cirpj.2018.10.001.

[30] J. García-Martín, J. Gómez-Gil, και E. Vázquez-Sánchez, 'Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing', *Sensors*, τ. 11, τχ. 3, σελ. 2525–2565, Φεβρουαρίου 2011, doi: 10.3390/s110302525.

[31] O. Stupakov, H. Kikuchi, T. Liu, και T. Takagi, 'Applicability of local magnetic measurements', *Measurement*, τ. 42, τχ. 5, σελ. 706–710, Ιουνίου 2009, doi: 10.1016/j.measurement.2008.11.005.

[32] W. L. Soong, 'BH Curve and Iron Loss Measurements for Magnetic Materials'.

[33] O. Stupakov, I. Tomáš, και J. Kadlecová, 'Optimization of single-yoke magnetic testing by surface fields measurement', J. Phys. D: Appl. Phys., τ. 39, τχ. 2, σελ. 248–254, Ιανουαρίου 2006, doi: 10.1088/0022-3727/39/2/003.

[34] V. I. Klyukhin κ.ά., 'Measuring the Magnetic Flux Density in the CMS Steel Yoke', J Supercond Nov Magn, τ. 26, τχ. 4, σελ. 1307–1311, Απριλίου 2013, doi: 10.1007/s10948-012-1967-5.

[35] Hitachi Metals, Ltd., "Power Electronics Components Catalog: Metglas® AMCC Series Cut Core and FINEMET® F3CC Series Cut Core," Hitachi Metals, Ltd., Tokyo, Japan, Apr. 16.

[36] AD9850 DDS Signal Generator Module," *Components101*, [Online]. Available: <https://components101.com/modules/ad9850-dds-signal-generator-module>.

[37] R. Mischianti, "ESP32 WeMos LOLIN32 high resolution pinout and specs," Mischianti.org, [Online]. Available: <https://mischianti.org/esp32-wemos-lolin32-high-resolution-pinout-and-specs/>.

[38] AZ-Delivery, "Wemos-ESP32-Lolin32-Board-BOOK-ENGLISH," AZ-Delivery Vertriebs GmbH.

[39] Texas Instruments, OPA549 High-Voltage, High-Current Operational Amplifier, SBOS093E, Oct. 2005.

[40] Texas Instruments, "TL08xx FET-Input Operational Amplifiers," SLOS081L, Feb. 1977, Revised Jul. 2021.

[41] Texas Instruments, LM7905, LM7912, LM7915: LM79XX Series 3-Terminal Negative Regulators, SNOSB07C, May 2013.

[42] Texas Instruments, "Getting Started with TINA-TI," SBOU052A, Aug. 2007, Revised Aug. 2008.

[43] Espressif Systems, ESP32 DevKitC V4 Schematic, V4, June 7, 2018

[44] A. S. Sedra και K. C. Smith, Microelectronic circuits, Seventh edition. στο The Oxford series in electrical and computer engineering. New York ; Oxford: Oxford University Press, 2015.

[45] T. Schmitz and M. Wong, "Choosing and Using Bypass Capacitors," Application Note 1325, Intersil Corporation, Oct. 10, 2011.

[46] "Non-Inverting Op Amp," Analog Devices Glossary. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/resources/glossary/non-inverting-op-amp.html>.

[47] S. J. G. Gift and B. Maundy, *Electronic Circuit Design and Application*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2021.

[48] C. K. Alexander and M. N. O. Sadiku, Fundamentals of Electric Circuits, 7th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, Feb. 2020.