



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ανάπτυξη μαγνητικού αισθητήρα για τον εντοπισμό υπολειπόμενων τάσεων σε χάλυβες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εμίλ Κ. Αυγουστής - Μολτσάνοβ

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ανάπτυξη μαγνητικού αισθητήρα για τον εντοπισμό
υπολειπόμενων τάσεων σε χάλυβες**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εμίλ Κ. Αυγουστής - Μολτσάνοβ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26^η Μαρτίου 2025.

Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεώργιος Παναγόπουλος
Επικουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Εμμανουήλ Χουρδάκης
Επικουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
Εμίλ Κ. Αυγουστής – Μολτσάνοβ

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

Copyright © Εμίλ Αυγουστής – Μολτσάνοβ, 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

Στη σύγχρονη εποχή ο ηλεκτρικός χάλυβας χρησιμοποιείται ευρέως σε πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών, όπως είναι η κατασκευή ηλεκτρικών κινητήρων, γεννητριών και μετασχηματιστών. Επομένως, είναι σημαντικό να πραγματοποιείται έλεγχος της ποιότητάς του προκειμένου να αποφεύγονται οι επιβλαβείς συνέπειες από την ενδεχόμενη αποτυχία του. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικά εκτελώντας μη καταστροφικό έλεγχο, που είναι μία δημοφιλής πρακτική διότι δεν προκαλεί ζημία στο χαλύβδινο δείγμα κατά την διαδικασία εφαρμογής του. Η παρούσα διπλωματική εργασία λοιπόν αφορά την κατασκευή ενός μαγνητικού αισθητήρα ο οποίος ανιχνεύει με μη καταστροφικό τρόπο την ύπαρξη υπολειπόμενων τάσεων σε χαλύβδινα δείγματα. Ο εντοπισμός αυτός επιτυγχάνεται αξιοποιώντας το φαινόμενο ότι η ύπαρξη παραμένουσων τάσεων τοπικά στο δείγμα ελαττώνει τη μαγνητική διαπερατότητά του σε εκείνη την περιοχή. Στην αρχή της εργασίας αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων, των μαγνητικών αισθητήρων και των μη καταστροφικών τεχνικών ελέγχου. Έπειτα περιγράφεται λεπτομερώς η κυκλωματική διάταξη του αισθητήρα. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας τον συγκεκριμένο αισθητήρα καθώς και τα συμπεράσματα που προκύπτουν για την αποτελεσματικότητά του.

Λέξεις κλειδιά: μαγνητικός αισθητήρας, μαγνητική διαπερατότητα, ηλεκτρικός χάλυβας, μη καταστροφικός έλεγχος, υπολειπόμενη τάση

Abstract

In modern times, electrical steel is widely used in a variety of industrial applications, such as the manufacturing of electric motors, generators and transformers. Therefore, it is important to control its quality in order to avoid the harmful consequences due to its possible failure. This can be achieved effectively by performing non-destructive testing, which is a popular practice because it does not cause damage to the steel sample during its application. The present thesis therefore concerns the construction of a magnetic sensor that detects in a non-destructive way the existence of residual stresses in steel samples. This detection is achieved by exploiting the phenomenon that the existence of residual stresses locally in the sample reduces its magnetic permeability in that area. At the beginning of the thesis, the theoretical background of electromagnetic phenomena, magnetic sensors and non-destructive testing techniques is analyzed. Then, the circuit arrangement of the sensor is described in detail. Finally, the results of the measurements carried out in the laboratory using this particular sensor are presented, as well as the conclusions regarding its effectiveness.

Keywords: magnetic sensor, magnetic permeability, electrical steel, non-destructive testing, residual stress

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την ανάθεση της παρούσας εργασίας και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Μαρία Τσιρώνη, η οποία παρακολουθούσε κάθε βήμα της ανάπτυξης του αισθητήρα στο εργαστήριο, για την πολύτιμη βοήθειά της, τις συμβουλές της και για την φιλική ατμόσφαιρα κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υπομονή της και την στήριξη που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract.....	7
Ευχαριστίες.....	9
Περιεχόμενα.....	11
1 Εισαγωγή.....	15
2 Θεωρητικό Μέρος	17
2.1 Ηλεκτρομαγνητικές αρχές	17
2.1.1 Μαγνητικό Πεδίο.....	17
2.1.2 Μαγνητικά μεγέθη M και H	18
2.1.3 Μαγνητική διαπερατότητα	20
2.1.4 Εξισώσεις Maxwell	21
2.1.4.1 Νόμος Maxwell – Faraday	21
2.1.4.2 Νόμος Maxwell – Ampere.....	22
2.1.4.3 Νόμος Gauss για τον μαγνητισμό	24
2.1.4.4 Νόμος Gauss για τον ηλεκτρισμό	25
2.1.4.5 Αρχή διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου	26
2.1.5 Δινορρεύματα	27
2.1.6 Επιδερμικό φαινόμενο	27
2.2 Μαγνητικά υλικά.....	29
2.2.1 Διαμαγνητισμός.....	29
2.2.2 Παραμαγνητισμός.....	29
2.2.3 Σιδηρομαγνητισμός	30
2.2.3.1 Ορισμός του φαινομένου του σιδηρομαγνητισμού	30
2.2.3.2 Δυναμική τοιχωμάτων των μαγνητικών περιοχών	31

2.2.3.3	Δυναμική περιστροφής των μαγνητικών περιοχών.....	33
2.2.4	Βρόχος μαγνητικής υστέρησης.....	35
2.2.4.1	Δημιουργία βρόχου υστέρησης.....	35
2.2.4.2	Ταξινόμηση σιδηρομαγνητικών υλικών	36
2.2.5	Αντισιδηρομαγνητισμός	37
2.2.6	Σιδηριμαγνητισμός	38
2.3	Μαγνητικοί Αισθητήρες	39
2.3.1	Ορισμός μαγνητικού αισθητήρα	39
2.3.2	Κατηγορίες μαγνητικών αισθητήρων	39
2.3.2.1	Αισθητήρας επαγωγής.....	39
2.3.2.2	Αισθητήρας Hall.....	41
2.3.2.3	Αισθητήρας Squid.....	43
2.3.2.4	Μαγνητοσυστολικός αισθητήρας	45
2.3.2.5	Αισθητήρας μαγνητοαντίστασης	45
2.3.2.6	Flux-gate μαγνητόμετρο.....	46
2.4	Ηλεκτρικός χάλυβας - Υπολειπόμενη τάση	49
2.4.1	Ορισμός ηλεκτρικού χάλυβα.....	49
2.4.2	Ορισμός υπολειπόμενης τάσης	50
2.4.3	Είδη υπολειπόμενης τάσης	50
2.4.4	Αίτια υπολειπόμενης τάσης	51
2.4.4.1	Υπολειπόμενη τάση λόγω μηχανικής κατεργασίας	51
2.4.4.2	Υπολειπόμενη τάση λόγω συγκόλλησης	51
2.5	Μέτρηση υπολειπόμενης τάσης	53
2.5.1	Κατηγορίες μεθόδων μέτρησης υπολειπόμενης τάσης.....	53
2.5.2	Καταστροφικές μέθοδοι	53
2.5.2.1	Μέθοδος περιγράμματος	53

2.5.2.2	Μέθοδος σχισμής	54
2.5.2.3	Μέθοδος τρύπας.....	55
2.5.3	Μη καταστροφικές μέθοδοι.....	55
2.5.3.1	Μαγνητικός θόρυβος Barkhausen	55
2.5.3.2	Μέθοδος X-ray περίθλασης	58
2.5.3.3	Μέθοδος περίθλασης νετρονίων	59
2.5.3.4	Μέθοδος υπέρηχων	59
2.5.3.5	Μέθοδος μαγνητικής διαπερατότητας	61
3	Πειραματικό Μέρος	67
3.1	Περιγραφή της διάταξης.....	67
3.2	Ολοκληρωμένα εξαρτήματα	69
3.2.1	WeMos Lolin32	69
3.2.2	AD9850	70
3.2.3	OPA549.....	71
3.2.4	MCP4131	72
3.2.5	TL081.....	73
3.3	Ανάλυση του συνολικού κυκλώματος του αισθητήρα.....	75
3.3.1	Συνολικό κύκλωμα.....	75
3.3.2	Κύκλωμα διέγερσης.....	76
3.3.3	Πηνίο διέγερσης	80
3.3.4	Σιδηρομαγνητικός πυρήνας.....	81
3.3.5	Πηνίο λήψης	82
3.3.6	Χαλύβδινο δείγμα	83
3.3.7	Κύκλωμα λήψης	83
3.4	Μετρήσεις	87
3.4.1	Ανάλυση της διαδικασίας των μετρήσεων	87

3.4.2	Τελικά διαγράμματα.....	91
3.4.3	Σχολιασμός μετρήσεων	94
4	Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία	97
5	Βιβλιογραφία.....	99
6	Παράρτημα	105

1 Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την κατασκευή ενός αισθητήρα μαγνητικής διαπερατότητας για την μέτρηση υπολειπόμενων τάσεων σε δείγματα χάλυβα. Αποτελείται από ένα θεωρητικό και ένα πειραματικό μέρος.

Θεωρητικό μέρος

Κεφάλαιο 2.1: ορίζονται τα μεγέθη της πυκνότητας μαγνητικής ροής, της μαγνήτισης, της έντασης του μαγνητικού πεδίου και έπειτα αναλύονται οι εξισώσεις Maxwell.

Κεφάλαιο 2.2: τα μαγνητικά υλικά ταξινομούνται σε κατηγορίες ανάλογα με τις ιδιότητές του και αναλύεται ο βρόχος υστέρησης των σιδηρομαγνητικών υλικών.

Κεφάλαιο 2.3: ορίζεται η έννοια του μαγνητικού αισθητήρα και αναλύονται μερικές σημαντικές διατάξεις τέτοιου είδους αισθητήρων.

Κεφάλαιο 2.4: αρχικά περιγράφεται ο ηλεκτρικός χάλυβας και οι ιδιότητές του. Έπειτα ορίζεται η έννοια της υπολειπόμενης τάσης σε χάλυβες, κατατάσσεται σε κατηγορίες και αναλύονται οι αιτίες δημιουργίας της.

Κεφάλαιο 2.5: περιγράφονται ορισμένες καταστροφικές αλλά και μη καταστροφικές τεχνικές μέτρησης της υπολειπόμενης τάσης σε χάλυβες.

Πειραματικό μέρος

Κεφάλαιο 3.1: πραγματοποιείται μία γενική περιγραφή της λειτουργίας του μαγνητικού αισθητήρα που κατασκευάστηκε.

Κεφάλαιο 3.2: αναλύονται ξεχωριστά τα ολοκληρωμένα εξαρτήματα που εμπλέκονται στην κυκλωματική διάταξη του αισθητήρα.

Κεφάλαιο 3.3: αναλύεται λεπτομερώς κάθε στάδιο της διάταξης του αισθητήρα.

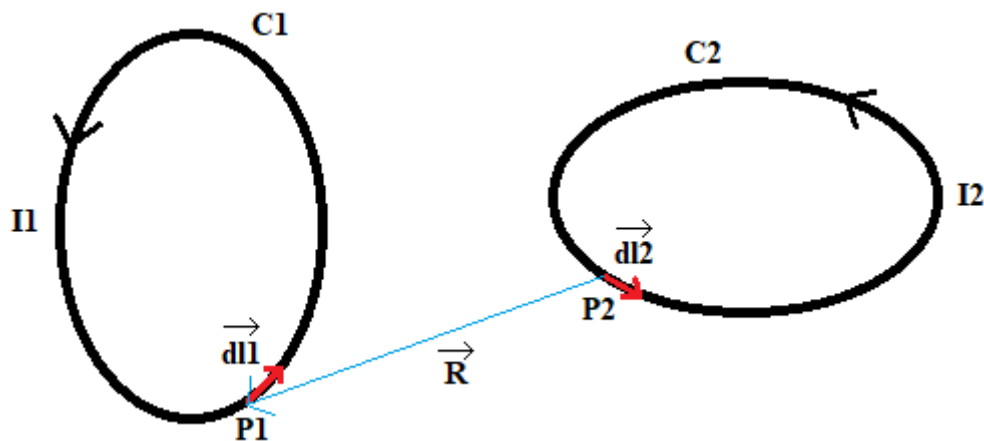
Κεφάλαιο 3.4: Αρχικά περιγράφονται οι διαδικασίες διεξαγωγής και επεξεργασίας των μετρήσεων. Έπειτα παρουσιάζονται και επεξηγούνται τα τελικά διαγράμματα που προκύπτουν με βάση αυτές.

2 Θεωρητικό Μέρος

2.1 Ηλεκτρομαγνητικές αρχές

2.1.1 Μαγνητικό Πεδίο

Τα ηλεκτρικά ρεύματα και γενικώς τα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία ασκούν μαγνητική δύναμη σε άλλα ηλεκτρικά φορτία. Αν για μία δεδομένη πηγή ηλεκτρικού ρεύματος υπολογιστεί σε κάθε σημείο του χώρου το μέτρο και η κατεύθυνση της δύναμης που θα ασκήσει αυτή σε ένα άλλο δεδομένο ηλεκτρικό φορτίο, τότε έχει προσδιοριστεί το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί αυτή η πηγή.



Σχήμα 1: Ρευματικοί βρόχοι που δημιουργούν μαγνητικό πεδίο

Έστω δύο κλειστοί βρόχοι C1, C2 που βρίσκονται στο κενό και διαρρέονται από ρεύματα I1 και I2 αντίστοιχα. Τότε, προκειμένου να υπολογιστεί το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στο τυχαίο σημείο P1 του βρόχου C1, ορίζεται το διάνυσμα της πυκνότητας μαγνητικής ροής B (μονάδα μέτρησης tesla (T)), μέσω της εξίσωσης:

$$\overrightarrow{dF_{12}} = I_1 \left(\overrightarrow{dl_1} \times \overrightarrow{B_2(P_1)} \right) \quad 2.1$$

Όπου:

$d\vec{l}_1$ – το διαφορικό διάνυσμα του παραπάνω σχήματος με αρχή το σημείο P1

$d\vec{F}_{12}$ - η δύναμη που ασκεί το ο βρόχος C2 στο διαφορικό τμήμα $d\vec{l}_1$

I_1 - το ρεύμα που διαρρέει τον βρόχο C1

$B_2(P_1)$ - το διάνυσμα της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο σημείο P1

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής $B_2(P_1)$ υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση, που ονομάζεται νόμος Biot-Savart [1] :

$$\vec{B}_2(P_1) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_2} \frac{I_2 (\vec{dl}_2 \times \vec{R})}{|\vec{R}|^3} \quad 2.2$$

Όπου:

$B_2(P_1)$ - το διάνυσμα της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο σημείο P1

μ_0 - η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ($4\pi/10^7$ H/m)

I_2 - το ρεύμα που διαρρέει τον βρόχο C2,

$d\vec{l}_2$ - το διαφορικό διάνυσμα του βρόχου C2

$\vec{R}$ - το διάνυσμα με αρχή που ταυτίζεται με αυτήν του $d\vec{l}_2$ και τέλος το σημείο P1

2.1.2 Μαγνητικά μεγέθη $\vec{M}$ και $\vec{H}$

Ο προσδιορισμός του μαγνητικού πεδίου που προκύπτει από ένα υλικό που δεν ταυτίζεται με τον κενό χώρο γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο. Η δομή του υλικού γενικώς μπορεί να αναπαρασταθεί σε μικροσκοπική κλίμακα σαν ένα σύνολο στοιχειωδών, κλειστών, επιπέδων ρευματικών βρόχων, που ονομάζονται μαγνητικά δίπολα, καθένας από τους οποίους βρίσκεται στον κενό χώρο και δημιουργεί ένα διαφορικό μαγνητικό πεδίο. Συνεπώς το συνολικό μαγνητικό πεδίο θα ισούται με το άθροισμα όλων των διαφορικών. Λόγω του υπερβολικά μεγάλου αριθμού των ρευματικών βρόχων, ο υπολογισμός αυτός καθίσταται δύσκολος. Για την διευκόλυνση της διαδικασίας, χρειάζεται να οριστούν μερικά βοηθητικά μεγέθη. Έστω ένα από

αυτά τα μαγνητικά δίπολα. Τότε ορίζεται το διάνυσμα $\vec{m}$, που ονομάζεται ροπή αυτού του μαγνητικού διπόλου, μέσω της εξίσωσης [2]:

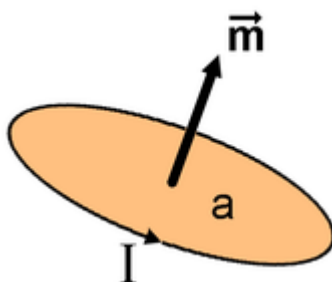
$$\vec{m} = (I * a)\vec{n} \quad 2.3$$

Όπου:

I - το ρεύμα που διαρρέει το μαγνητικό δίπολο

a - το εμβαδόν του μαγνητικού διπόλου

$\vec{n}$ - μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια του διπόλου με φορά που συνδέεται με αυτήν του ρεύματος σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιόστροφου κοχλία



Σχήμα 2: Αναπαράσταση της ροπής του μαγνητικού διπόλου [3].

Επίσης ορίζεται το μακροσκοπικό διάνυσμα της μαγνήτισης $\vec{M}$, που μετριέται σε tesla (T), μέσω της σχέσεως [4]:

$$\vec{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{m}}{\Delta V} \quad 2.4$$

Όπου:

$\vec{M}$ – το διάνυσμα της μαγνήτισης

ΔV - διαφορικός όγκος του υλικού

Δm - το διανυσματικό άθροισμα των διπολικών ροπών εντός του διαφορικού όγκου ΔV .

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου H , που έχει μονάδες μέτρησης ampere ανά μέτρο (A/m), ορίζεται ως:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad 2.5$$

Όπου:

B - η πυκνότητα μαγνητικής ροής

M - η μαγνήτιση

μ_0 - η μαγνητική διαπερατότητα του κενού

Η μαγνήτιση συνδέεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου μέσω της σχέσεως:

$$\vec{M} = \chi_m(\vec{H})\vec{H} \quad 2.6$$

Όπου:

M - η μαγνήτιση,

H - η ένταση του μαγνητικού πεδίου και

χ_m - η μαγνητική δεκτικότητα του υλικού [2].

2.1.3 Μαγνητική διαπερατότητα

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω εξισώσεις λαμβάνουμε:

$$\vec{B} = \mu_0 \left(1 + \chi_m(\vec{H}) \right) \vec{H} = \left(\mu_0 * \mu_r(\vec{H}) \right) \vec{H} = \mu(\vec{H})\vec{H} \quad 2.7$$

Όπου:

B - η πυκνότητα μαγνητικής ροής

H – η ένταση του μαγνητικού πεδίου

χ_m - η μαγνητική δεκτικότητα του υλικού

μ_0 - η μαγνητική διαπερατότητα του κενού

μ_r - η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού

μ - η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου H , σύμφωνα με τον νόμο Ampere, εξαρτάται αποκλειστικά από τα ελεύθερα ρεύματα και όχι από τα ρεύματα μαγνήτισης των μαγνητικών διπόλων. Συνεπώς, η παραπάνω εξίσωση δείχνει πως η μαγνητική επαγωγή ενός υλικού εξαρτάται από τα εξωτερικά επιβαλλόμενα ρεύματα και από την παράμετρο μ , που είναι χαρακτηριστική για κάθε υλικό και εκφράζει τις μαγνητικές του ιδιότητες.

Η μαγνήτιση δεν εξαρτάται πάντοτε γραμμικά από την ένταση του μαγνητικού πεδίου, διότι τα υλικά χωρίζονται σε πολλές κατηγορίες, όπως ισотροπικά, ανισотροπικά, γραμμικά, μη γραμμικά, με υστέρηση, χωρίς υστέρηση [2]. Γι' αυτό γενικώς η μαγνητική δεκτικότητα και συνεπώς η σχετική μαγνητική διαπερατότητα και η μαγνητική διαπερατότητα εκφράζονται ως συναρτήσεις της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

2.1.4 Εξισώσεις Maxwell

2.1.4.1 Νόμος Maxwell – Faraday

Έστω μία τμηματικά λεία ανοικτή επιφάνεια S με σύνορο την καμπύλη C . Τότε, ισχύουν [1]:

Ολοκληρωτική μορφή:

$$\mathbf{V} = - \frac{d}{dt} \left(\iint_S (\vec{B} \cdot \vec{n}) dS \right) \quad 2.8$$

Διαφορική μορφή:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Όπου:

∇ - η ηλεκτρεγερτική δύναμη κατά μήκος της καμπύλης C

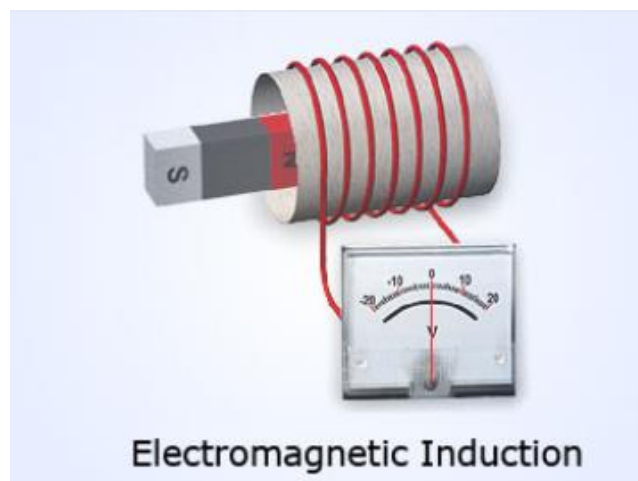
E - το διάνυσμα της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου

B - το διάνυσμα της πυκνότητας μαγνητικής ροής

n - το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια S με φορά που προσδιορίζεται από τον κανόνα του δεξιόστροφου κοχλία

dS - διαφορικό εμβαδό της επιφάνειας S

dt – το διαφορικό του χρόνου



Σχήμα 3: Η κίνηση του μαγνήτη στο εσωτερικό του πηνίου δημιουργεί ηλεκτρική τάση στα άκρα του εξαιτίας του νόμου Maxwell – Faraday [5].

Ο νόμος Maxwell – Faraday είναι χρήσιμος στις εφαρμογές μαγνητικών αισθητήρων επειδή συσχετίζει τον ρυθμό μεταβολής του μαγνητικού πεδίου με την ηλεκτρεγερτική δύναμη, που είναι ένα εύκολο μετρήσιμο μέγεθος.

2.1.4.2 Νόμος Maxwell – Ampere

Έστω μία τμηματικά λεία ανοικτή επιφάνεια S με σύνορο την καμπύλη C . Τότε, ισχύουν [1]:

Ολοκληρωτική μορφή:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S (\vec{J} \cdot \vec{n}) dS + \frac{d}{dt} \left(\iint_S (\vec{D} \cdot \vec{n}) dS \right) \quad 2.10$$

Διαφορική μορφή:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad 2.11$$

Όπου:

H - το διάνυσμα της εντάσεως του μαγνητικού πεδίου

dI - διαφορικό διάνυσμα εφαπτόμενο στην καμπύλη C

D - το διάνυσμα της διηλεκτρικής μετατόπισης

J – η χωρική πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος

n - μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια S

dS - διαφορικό εμβαδό της επιφάνειας S

dt – το διαφορικό του χρόνου

Οι φορές των διανυσμάτων dI, n εξαρτώνται από την φορά διαγραφής της καμπύλης C σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιόστροφου κοχλία.

Για ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλών συχνοτήτων, η παραπάνω ολοκληρωτική εξίσωση προσεγγίζεται ικανοποιητικά από την ακόλουθη:

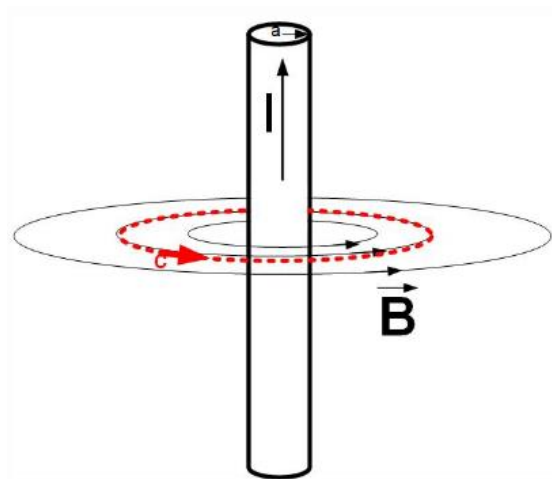
$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad 2.12$$

Όπου:

H - το διάνυσμα της εντάσεως του μαγνητικού πεδίου

dI - διαφορικό διάνυσμα εφαπτόμενο στην καμπύλη C

I - το συνολικό ρεύμα που διαπερνά την επιφάνεια S



Σχήμα 4: Νόμος Maxwell – Ampere για ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλών συχνοτήτων [6].

Αυτή η προσέγγιση χαμηλών συχνοτήτων του νόμου Maxwell – Ampere αξιοποιείται σε εφαρμογές μαγνητικών αισθητήρων διότι συνεπάγεται πως το μαγνητικό πεδίο μπορεί να μεταβάλλεται από ρεύμα που παρέχεται από εξωτερική πηγή.

2.1.4.3 Νόμος Gauss για τον μαγνητισμό

Έστω μία κλειστή επιφάνεια S. Τότε, ισχύουν [1]:

Ολοκληρωτική μορφή:

$$\oiint_S (\vec{B} \cdot \vec{n}) dS = 0 \quad 2.13$$

Διαφορική μορφή:

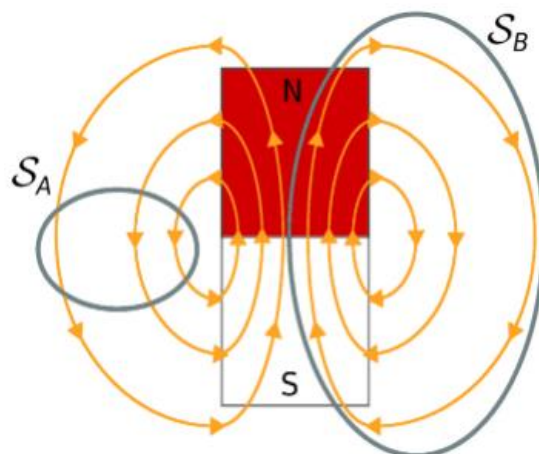
$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad 2.14$$

Όπου:

B - το διάνυσμα της πυκνότητας μαγνητικής ροής

n - το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια S

dS - διαφορικό εμβαδό της επιφάνειας S



Σχήμα 5: Ο νόμος Gauss για τον μαγνητισμό οδηγεί το διάνυσμα της πυκνότητας μαγνητικής ροής να διαμορφώνεται στον χώρο κατά τέτοιο τρόπο, ώστε σε οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια η μαγνητική ροή να προκύπτει μηδενική [7].

2.1.4.4 Νόμος Gauss για τον ηλεκτρισμό

Έστω ένας όγκος V με σύνορο την κλειστή επιφάνεια S . Τότε, ισχύουν [1]:

Ολοκληρωτική μορφή:

$$\oiint_S (\vec{D} \cdot \vec{n}) dS = \iiint_V \rho * dV \quad 2.15$$

Διαφορική μορφή:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad 2.16$$

Όπου:

D - το διάνυσμα της διηλεκτρικής μετατόπισης

n - μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια S

dS - διαφορικό εμβαδό της επιφάνειας S

ρ – η χωρική πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου

dV – διαφορικός όγκος του όγκου V

2.1.4.5 Αρχή διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου

Έστω ένας όγκος V με σύνορο την κλειστή επιφάνεια S . Τότε, ισχύουν [1]:

Ολοκληρωτική μορφή:

$$\oiint_S (\vec{J} \cdot \vec{n}) dS = -\frac{d}{dt} \left(\iiint_V \rho \, dV \right) \quad 2.17$$

Διαφορική μορφή:

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad 2.18$$

Όπου:

J – η χωρική πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος

n - μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια S

dS - διαφορικό εμβαδό της επιφάνειας S

ρ – η χωρική πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου

dV – διαφορικός όγκος του όγκου V

dt – το διαφορικό του χρόνου

Για ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλών συχνοτήτων, η παραπάνω ολοκληρωτική εξίσωση προσεγγίζεται ικανοποιητικά από την ακόλουθη:

$$\oiint_S (\vec{J} \cdot \vec{n}) dS = 0 \quad 2.19$$

Όπου:

J – η χωρική πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος

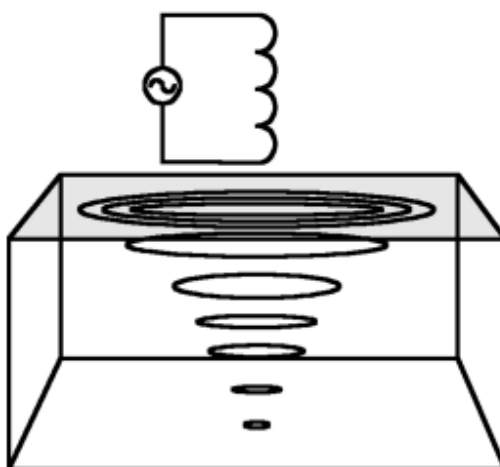
n - μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια S

dS - διαφορικό εμβαδό της επιφάνειας S

Η τελευταία εξίσωση αποτελεί γενικότερη μορφή του νόμου ρευμάτων Kirchhoff.

2.1.5 Δινorreύματα

Εάν στο εσωτερικό ενός αγωγίμου υλικού υπάρχει μεταβαλλόμενο με τον χρόνο μαγνητικό πεδίο, τότε εξαιτίας του νόμου επαγωγής Faraday προκαλούνται τάσεις οι οποίες με τη σειρά τους δημιουργούν ρεύματα που κινούνται σε κλειστούς βρόχους μέσα στο υλικό. Αυτό το είδος ρευμάτων ονομάζονται δινorreύματα, επειδή τείνουν να ρέουν σε κυκλικούς βρόχους, παρόμοια με τις δίνες σε μια ροή ρευστού. Είναι κάθετα στο πρωταρχικό μαγνητικό πεδίο και δημιουργούν δευτερεύοντα μαγνητικά πεδία, που αντιτίθενται στο αρχικό [8].



Σχήμα 6: Επαγωγή δινorreυμάτων [8].

2.1.6 Επιδερμικό φαινόμενο

Επιδερμικό φαινόμενο ονομάζεται η επιθυμία του εναλλασσόμενου ρεύματος να ρέει κυρίως στην επιφάνεια ενός αγωγού και όχι ομοιόμορφα σε όλη τη διατομή του, καθώς αυξάνεται η συχνότητά του. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει λόγω των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται από το

εναλλασσόμενο ρεύμα, τα οποία επάγουν δινορρέυματα μέσα στον αγωγό. Αυτά τα δινορρέυματα αντιτίθενται στη ροή του πρωτεύοντος ρεύματος σε μεγαλύτερα βάθη, προκαλώντας τη συγκέντρωση του ρεύματος κοντά στην επιφάνεια του αγωγού [9]. Η απόσταση από την επιφάνεια του αγωγού στην οποία η πυκνότητα ρεύματος πέφτει στο 37% της τιμής που έχει στην επιφάνεια του ονομάζεται βάθος διείσδυσης και υπολογίζεται με τον ακόλουθο τύπο:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi * f * \mu}} \quad 2.20$$

Όπου:

δ – το βάθος διείσδυσης

ρ – η ειδική αντίσταση του αγωγού

f – η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος

μ – η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού

2.2 Μαγνητικά υλικά

2.2.1 Διαμαγνητισμός

Ο διαμαγνητισμός είναι μία ιδιότητα όλων των υλικών και προκύπτει λόγω της κίνησης των ηλεκτρονίων στα άτομα. Όταν στα διαμαγνητικά υλικά εφαρμόζεται ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, προκαλείται αλλαγή στην τροχιακή κίνηση των ηλεκτρονίων τους και δημιουργείται, εξαιτίας του νόμου Lenz ένα μαγνητικό πεδίο προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν του εφαρμοζόμενου πεδίου. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα αυτών των υλικών είναι ελαφρώς μικρότερη της μονάδας. Παραδείγματα διαμαγνητικών υλικών είναι ο γραφίτης και το βισμούθιο. Ο διαμαγνητισμός είναι ένα τόσο αδύναμο φαινόμενο που μόνο εκείνα τα άτομα που έχουν μηδενική συνισταμένη μαγνητική ροπή ταξινομούνται ως διαμαγνητικά. Σε άλλα υλικά ο διαμαγνητισμός επισκιάζεται από πολύ ισχυρότερα φαινόμενα όπως ο σιδηρομαγνητισμός ή ο παραμαγνητισμός [10].

2.2.2 Παραμαγνητισμός

Στα παραμαγνητικά υλικά, τα μόρια τους χαρακτηρίζονται από μόνιμες μαγνητικές ροπές. Μεταξύ αυτών των μορίων η αλληλεπίδραση είναι μικρή και οι ροπές αυτές είναι τυχαία προσανατολισμένες. Γι'αυτό μακροσκοπικά τα υλικά αυτά εμφανίζονται αμαγνήτιστα. Όταν εφαρμόζεται εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οι μαγνητικές ροπές αρχίζουν να ευθυγραμμίζονται, αλλά μόνο ένα μικρό ποσοστό από αυτές εκτρέπεται προς την κατεύθυνση του πεδίου, για όλες τις πρακτικές τιμές του. Για χαμηλές τιμές εξωτερικού πεδίου, η μαγνήτιση προκύπτει ανάλογη της έντασης του μαγνητικού πεδίου και συνεπώς η μαγνητική δεκτικότητα χ_m του υλικού είναι σταθερή. Γενικά η χ_m είναι μεταξύ των τιμών 10^{-5} και 10^{-3} και συνεπώς η σχετική μαγνητική διαπερατότητα αυτών των υλικών είναι ελαφρώς μεγαλύτερη της μονάδας. Επίσης η μαγνητική δεκτικότητα των παραμαγνητικών υλικών είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας, σύμφωνα με την εξίσωση [10], [2]:

$$\chi_m = \frac{C}{T}$$

2.21

Όπου:

χ_m – η μαγνητική δεκτικότητα

C – η σταθερά Curie

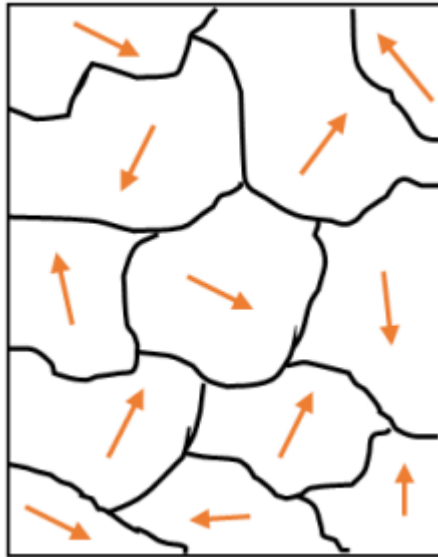
T – η απόλυτη θερμοκρασία

Παραδείγματα παραμαγνητικών υλικών είναι το αλουμίνιο και η πλατίνα.

2.2.3 Σιδηρομαγνητισμός

2.2.3.1 Ορισμός του φαινομένου του σιδηρομαγνητισμού

Ο σιδηρομαγνητισμός είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται στα στοιχεία του περιοδικού πίνακα που ανήκουν στην ομάδα του σιδήρου, όπως είναι ο σίδηρος, το νικέλιο και το κοβάλτιο. Σε αυτήν παραμένει ασυμπλήρωτος ο φλοιός 3d των ελεύθερων ατόμων και γι' αυτό εμφανίζουν μόνιμες μαγνητικές ροπές. Παρουσία γειτονικών ατόμων του ίδιου στοιχείου, οι μαγνητικές ροπές ελαττώνονται σε μέτρο, αλλά προσανατολίζονται παράλληλα και ομόρροπα. Αυτός ο αυθόρμητος προσανατολισμός προκαλείται εξαιτίας δυνάμεων ανταλλαγής [2]. Σύμφωνα με την θεωρία των μαγνητικών περιοχών του Pierre-Ernest Weiss, τα σιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούνται από πολλές μικρές περιοχές που χωρίζονται μεταξύ τους με τοιχώματα, σε κάθε μία από τις οποίες οι μαγνητικές ροπές των ατομικών διπόλων είναι παράλληλα και ομόρροπα προσανατολισμένες. Η κατεύθυνση της ευθυγράμμισης ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή με τυχαίο τρόπο, με αποτέλεσμα το συνολικό μαγνητικό πεδίο να ελαττώνεται με την αύξηση των μαγνητικών περιοχών. Έτσι, μακροσκοπικά το υλικό καθίσταται αμαγνήτιστο.



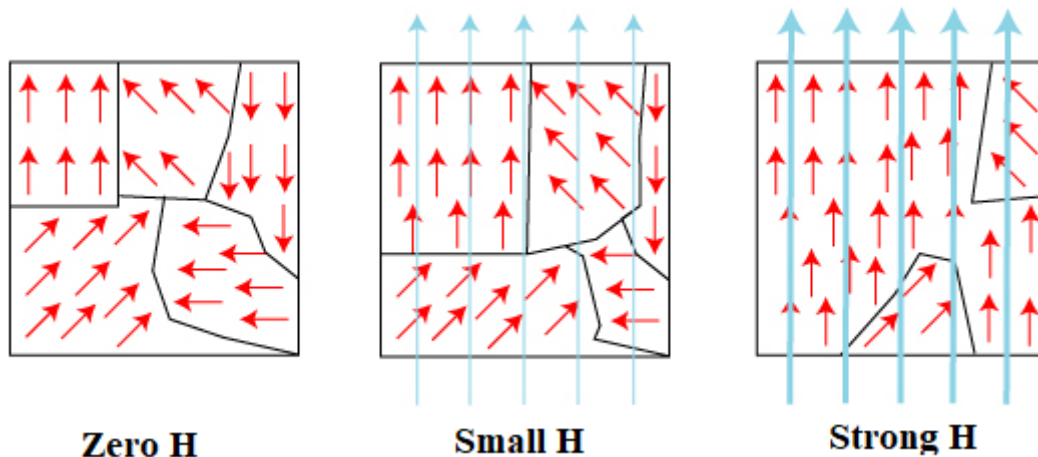
Σχήμα 7: Αναπαράσταση των μαγνητικών περιοχών ενός σιδηρομαγνητικού υλικού απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου [11].

Ο παραλληλισμός των μαγνητικών ροπών εξαφανίζεται, όταν η θερμοκρασία του υλικού ξεπεράσει την τιμή T_c , και ξαναεμφανίζεται όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από αυτήν [12]. Η θερμοκρασία T_c είναι χαρακτηριστική για κάθε υλικό και ονομάζεται σιδηρομαγνητική θερμοκρασία Curie. Για θερμοκρασίες πάνω από αυτήν το υλικό συμπεριφέρεται ως παραμαγνητικό.

Τα κύρια μαγνητικά φαινόμενα που συμβάλλουν στον σιδηρομαγνητισμό είναι η δυναμική τοιχωμάτων των μαγνητικών περιοχών και η δυναμική περιστροφής των μαγνητικών περιοχών. Τα φαινόμενα αυτά αναλύονται παρακάτω.

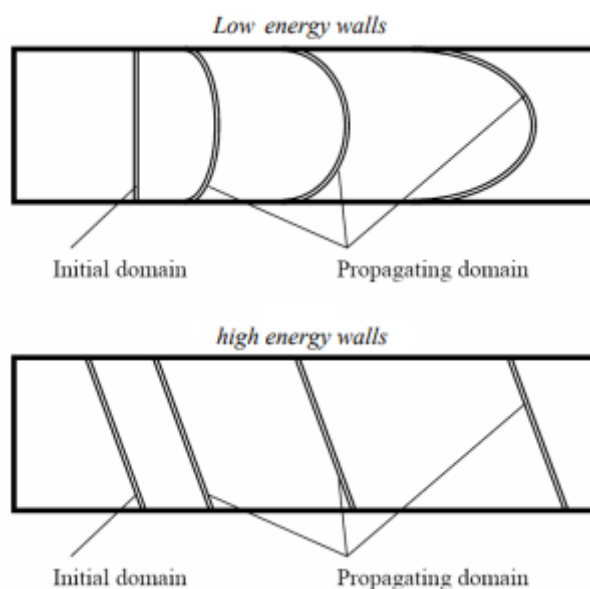
2.2.3.2 Δυναμική τοιχωμάτων των μαγνητικών περιοχών

Όταν στο σιδηρομαγνητικό υλικό εφαρμοστεί εξωτερικό πεδίο H , τα μαγνητικά τοιχώματα των μαγνητικών περιοχών αρχίζουν να μετατοπίζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε το μέγεθος των μαγνητικών περιοχών που είναι μαγνητισμένες προς την ίδια κατεύθυνση με αυτήν του εξωτερικού πεδίου να αυξάνεται σε σύγκριση με αυτό των υπόλοιπων.



Σχήμα 8: Διάδοση μαγνητικών τοιχωμάτων με εφαρμογή εξωτερικού πεδίου

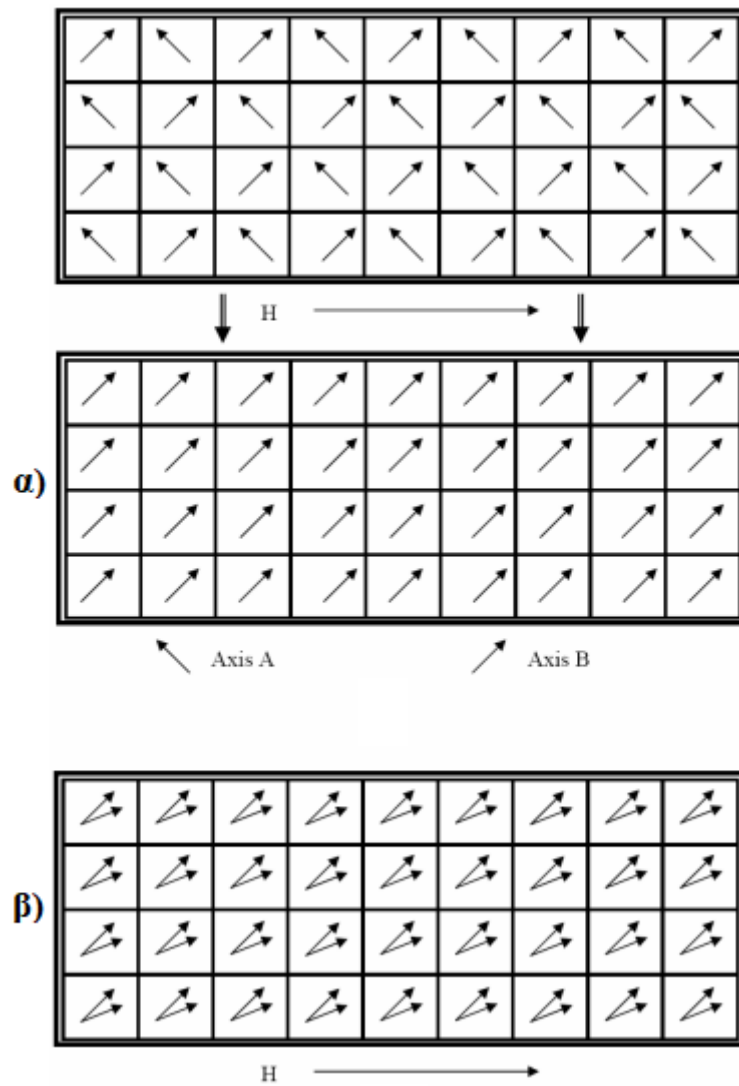
Η διάδοση των μαγνητικών τοιχωμάτων επιτυγχάνεται με δύο τρόπους. Ο τρόπος διάδοσης εξαρτάται από την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη μέσα σε αυτά τα τοιχώματα. Στα μαλακά μαγνητικά υλικά τα τοιχώματα περιέχουν χαμηλή ενέργεια και διαδίδονται μέσω της διαδικασίας υπόκλισης (bowing process), ενώ στα σκληρά μαγνητικά υλικά περιέχουν υψηλή ενέργεια και γι'αυτό λυγίζουν λιγότερο κατά την διάδοσή τους.



Σχήμα 9: Τρόποι διάδοσης των μαγνητικών τοιχωμάτων [13].

2.2.3.3 Δυναμική περιστροφής των μαγνητικών περιοχών

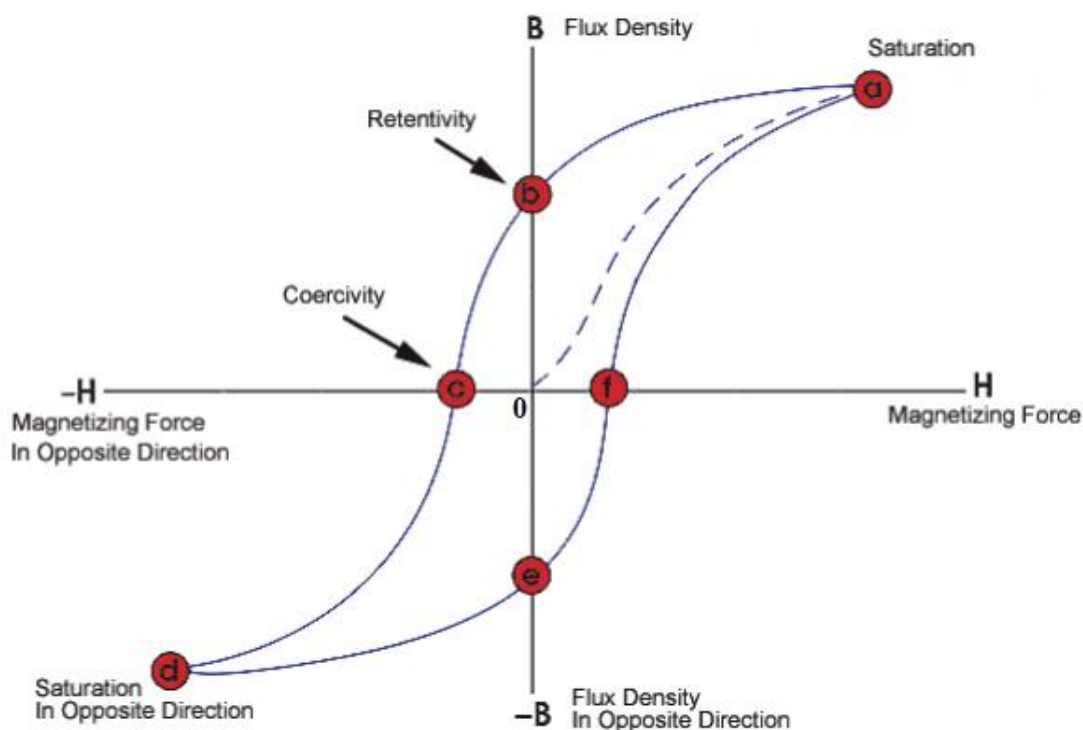
Οι διπολικές ροπές των μαγνητικών περιοχών μεταβάλλουν την κατεύθυνση τους εξαιτίας της παρουσίας εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Αυτές οι μεταβολές μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τις αντιστρεπτές και τις μη αντιστρεπτές. Αρχικά πραγματοποιούνται οι μη αντιστρέψιμες περιστροφές, όταν οι μαγνητικές περιοχές, που αρχικά είναι προσανατολισμένες κατά μήκος ενός δεδομένου εύκολου άξονα A, επαναπροσανατολίζονται κατά μήκος ενός δεύτερου εύκολου άξονα B, που η κατεύθυνσή του είναι περισσότερο παραπλήσια με αυτήν του εξωτερικού πεδίου H. Όταν η μη αντιστρέψιμη διαδικασία λάβει τέλος, αρχίζουν να πραγματοποιούνται αντιστρέψιμες περιστροφές. Επειδή εν γένει ο εύκολος άξονας B δεν είναι ίδιος με αυτόν του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι διπολικές ροπές συνεχίζουν να μεταβάλλουν την κατεύθυνσή τους προσπαθώντας να την ταυτίσουν με αυτήν του εξωτερικού πεδίου H. Αν το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο αφαιρεθεί, οι μαγνητικές ροπές περιστρέφονται πίσω στον εύκολο άξονα B και γενικώς η κατεύθυνσή των ροπών τους δεν επιστρέφει σε αυτήν του εύκολου άξονα A [13].



Σχήμα 10: Αναπαράσταση της αντιστρεπτής και της μη αντιστρεπτής περιστροφής των μαγνητικών περιοχών. α) Μη αντιστρεπτή περιστροφή έως τον εύκολο άξονα B, β) Μικρή αντιστρεπτή περιστροφή της γωνίας του άξονα μαγνήτισης [13].

2.2.4 Βρόχος μαγνητικής υστέρησης

2.2.4.1 Δημιουργία βρόχου υστέρησης



Σχήμα 11: Γραφική αναπαράσταση του βρόχου μαγνητικής υστέρησης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού [14].

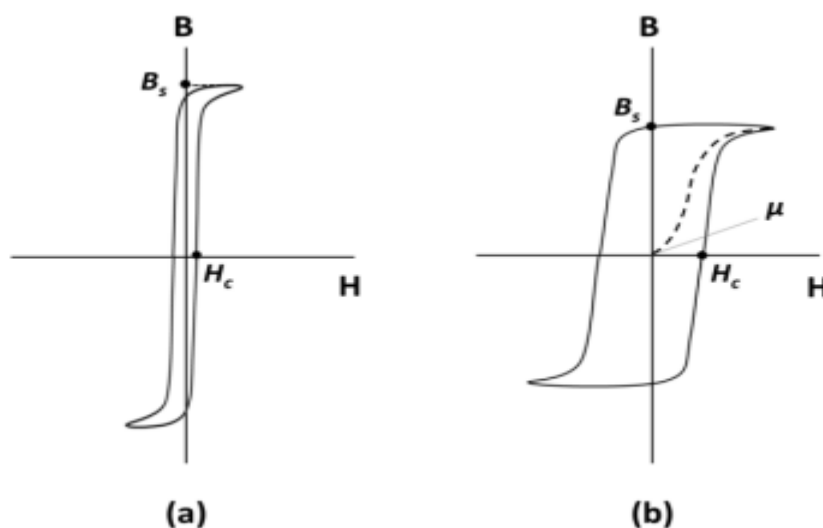
Έστω ένα αρχικά αμαγνήτιστο σιδηρομαγνητικό υλικό. Αν του επιβάλλουμε μαγνητικό πεδίο εντάσεως H , θετικού μέτρου, τότε μερικές μαγνητικές περιοχές του θα αρχίσουν να προσανατολίζονται προς την κατεύθυνση του εξωτερικού πεδίου. Με την αύξηση του H , το πλήθος των μαγνητικών περιοχών που ακολουθούν αυτήν τη διαδικασία θα αρχίσει κι'αυτό να αυξάνεται. Σε αυτό το σημείο, η τιμή του B σε συνάρτηση του H δίνεται από την διακεκομμένη καμπύλη $0a$. Μέχρι το σημείο a η μεταβολή είναι αντιστρέψιμη, δηλαδή για ελάττωση του H , η τιμή του B συναρτήσει του H δίνεται και πάλι από την $0a$. Στο σημείο a οι περισσότερες μαγνητικές περιοχές του υλικού έχουν προσανατολιστεί προς την κατεύθυνση του εξωτερικού πεδίου, και αυτό καθίσταται μαγνητικά κορεσμένο. Περαιτέρω αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου θα προκαλέσει πολύ μικρές

μεταβολές στην πυκνότητα μαγνητικής ροής. Εφόσον το υλικό έχει φτάσει στην κατάσταση μαγνητικού κορεσμού και το H αρχίσει να ελαττώνεται, η εξάρτηση του B από το H δεν θα δίνεται πια από την διακεκομμένη καμπύλη, αλλά από την ab . Όταν το μέτρο του H γίνει 0, ένα ποσοστό των μαγνητικών περιοχών διατηρούν τον προσανατολισμό που είχαν πριν, με αποτέλεσμα το B να μην μηδενίζεται αλλά να παίρνει μία θετική τιμή που ονομάζεται παραμένουσα μαγνητική επαγωγή. Προκειμένου αυτό να μηδενιστεί, το εξωτερικό πεδίο θα πρέπει να αρχίσει να αυξάνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση απ'ότι πριν. Θα ακολουθείται τώρα η καμπύλη bc και το B θα μηδενίζεται όταν το H λάβει μία τιμή που ονομάζεται συνεκτικό πεδίο [2]. Αν το H λάβει τιμές μικρότερες από αυτήν, θα ακολουθείται η καμπύλη cd , έως το σημείο d όπου το υλικό φτάνει στην κατάσταση μαγνητικού κορεσμού προς την αντίθετη κατεύθυνση. Τα σημεία a και d είναι συμμετρικά ως προς την αρχή των αξόνων. Περαιτέρω ελάττωση του H προκαλεί πολύ μικρή ελάττωση στο B . Αν τώρα το εξωτερικό πεδίο αρχίσει να αυξάνεται, η εξάρτηση του B από το H θα δίνεται ανίσοιχα από τις καμπύλες de , ef , fa . Έτσι, σχηματίζεται η κλειστή καμπύλη $abcdef$, που ονομάζεται βρόχος μαγνητικής υστέρησης του υλικού [15].

2.2.4.2 Ταξινόμηση σιδηρομαγνητικών υλικών

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το πόσο εύκολα αποκτούν και χάνουν τις μαγνητικές τους ιδιότητες σε σχέση με την μεταβολή του εξωτερικού πεδίου H . Η πρώτη κατηγορία είναι αυτή των μαλακών σιδηρομαγνητικών υλικών, στα οποία η τιμή του συνεκτικού πεδίου είναι μικρή και η πυκνότητα της μαγνητικής ροής λαμβάνει αρκετά μεγάλες τιμές ακόμα και όταν η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι μικρή. Συνεπώς ο βρόχος υστέρησης αυτών των υλικών προκύπτει στενός με μικρό εμβαδόν [16]. Τα υλικά αυτής της κατηγορίας χρησιμεύουν στην κατασκευή μετασχηματιστών, ηλεκτρομαγνητών και ηλεκτροκινητήρων. Παράδειγμα μαλακών σιδηρομαγνητικών υλικών είναι ο σίδηρος καθώς και κράματα σιδήρου – νικελίου. Η δεύτερη κατηγορία είναι αυτή των σκληρών σιδηρομαγνητικών υλικών, στα οποία η μαγνητική επαγωγή γίνεται μεγάλη μόνο όταν η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι μεγάλη, μαγνητίζονται και

απομαγνητίζονται δύσκολα και στα οποία το συνεκτικό πεδίο λαμβάνει αρκετά μεγάλες τιμές. Έτσι, ο βρόχος υστέρησης τους προκύπτει πλατύς με μεγάλο εμβαδόν. Παράδειγμα σκληρών υλικών είναι τα κράματα Alnico II, Alnico V, από τα οποία κατασκευάζονται μόνιμοι μαγνήτες.



Σχήμα 12: Βρόχοι υστέρησης σιδηρομαγνητικών υλικών, α) μαλακού, β)σκληρού [16].

2.2.5 Αντισιδηρομαγνητισμός

Αντισιδηρομαγνητικά ονομάζονται τα υλικά των οποίων οι γειτονικές μαγνητικές ροπές έχουν ίσα μέτρα και προσανατολίζονται παράλληλα και αντίρροπα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον μηδενισμό της συνολικής μαγνήτισης, κάνοντας τα υλικά αυτά να φαίνονται αμαγνήτιστα σε μακροσκοπικό επίπεδο, απουσία εξωτερικού πεδίου. Χαρακτηριστικό μέγεθος καθενός υλικού αυτής της κατηγορίας αποτελεί η κρίσιμη θερμοκρασία T_N , η οποία ονομάζεται θερμοκρασία Neel. Κάτω από αυτήν, η εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου προκαλεί αρκετά ελαφριά μαγνήτιση του υλικού. Πάνω από την T_N όμως, ο αντιπαράλληλος προσανατολισμός των ροπών αλλοιώνεται εξαιτίας της θερμότητας και η απόκρισή του υλικού σε εξωτερικά πεδία είναι παρόμοια με αυτή ενός παραμαγνητικού. Παραδείγματα αντισιδηρομαγνητικών υλικών είναι τα MnO , FeO , και NiO [10], [2].



Σχήμα 13: Μαγνητικές ροπές αντισιδηρομαγνητικού υλικού

2.2.6 Σιδηριμαγνητισμός

Στα σιδηριμαγνητικά υλικά, όπως και στα αντισιδηρομαγνητικά, οι μαγνητικές ροπές των διπόλων προσανατολίζονται αντιπαράλληλα. Η διαφορά όμως είναι ότι εδώ οι δύο ομάδες ροπών έχουν άνισα μέτρα. Παρόλα αυτά, σε μακροσκοπικό επίπεδο και αυτά τα υλικά εμφανίζονται αμαγνήτιστα απουσία εξωτερικού πεδίου, διότι στο εσωτερικό τους υπάρχει ένα σημαντικό ποσοστό μαγνητικών διπόλων που οι ροπές τους είναι αυθόρμητα προσανατολισμένες, με αποτέλεσμα να εξουδετερώνονται. Παρουσία εξωτερικού πεδίου όμως, αυτά τα υλικά συμπεριφέρονται σαν σιδηρομαγνητικά, με τη διαφορά όμως ότι η μαγνητική επαγωγή κόρου λαμβάνει μικρότερες τιμές, σε σχέση με τα τελευταία. Μια σημαντική κατηγορία σιδηριμαγνητικών υλικών είναι οι φερρίτες, όπως ο μαγνητίτης Fe_3O_4 . Τα τελευταία αποτελούν οξειδία με ειδικές αγωγιμότητες αρκετά μικρότερες των μετάλλων, με αποτέλεσμα να ελλατώνονται οι απώλειες λόγω δινορρευσμάτων στο εσωτερικό τους. Αυτό καθιστά τους φερρίτες χρήσιμους στην κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών. Τέλος, κάθε σιδηριμαγνητικό υλικό χαρακτηρίζεται από μία θερμοκρασία Curie, πάνω από την οποία οι ροπές των διπόλων του αποκτούν αυθαίρετο προσανατολισμό και το υλικό συμπεριφέρεται σαν παραμαγνητικό [2], [10].



Σχήμα 14: Μαγνητικές ροπές σιδηριμαγνητικού υλικού

2.3 Μαγνητικοί Αισθητήρες

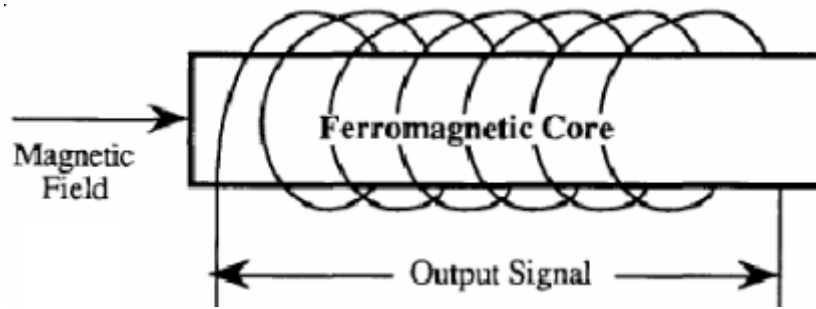
2.3.1 Ορισμός μαγνητικού αισθητήρα

Η μέτρηση του μαγνητικών πεδίων είναι απαραίτητη για τον χαρακτηρισμό των μαγνητικών ιδιοτήτων ενός υλικού. Ως μαγνητικός αισθητήρας ορίζεται μία διάταξη η οποία είναι ικανή να ανιχνεύει το μαγνητικό πεδίο. Όπως μαρτυρούν οι εξισώσεις Maxwell, τα μαγνητικά και τα ηλεκτρικά φαινόμενα εξαρτώνται το ένα από το άλλο και αυτό επιτρέπει στους μαγνητικούς αισθητήρες να μετατρέπουν το μαγνητικό πεδίο σε ηλεκτρικό και να το διαβιβάζουν στην έξοδό τους. Οι μαγνητικοί αισθητήρες λόγω του χαμηλού τους κόστους αλλά και της ακρίβειας που παρέχουν αξιοποιούνται ευρέως στην σύγχρονη εποχή. Για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται στη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου της γης, στους σκληρούς δίσκους των ηλεκτρονικών υπολογιστών, στα μέσα μεταφοράς, στην παραγωγή, στην ιατρική [17].

2.3.2 Κατηγορίες μαγνητικών αισθητήρων

2.3.2.1 Αισθητήρας επαγωγής

Ο αισθητήρας επαγωγής αποτελείται από ένα σωληνοειδές πηνίο που μετράει το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του μέσω της ηλεκτρικής τάσης στα άκρα του. Αυτή η τάση ισούται, σύμφωνα με την εξίσωση Maxwell – Faraday, με τον ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής που διαπερνά το πηνίο. Φέρνοντας τον αισθητήρα κοντά σε μεταλλικά αντικείμενα ή ηλεκτρικά κυκλώματα, τα μαγνητικά πεδία τους θα μεταβάλλουν την μαγνητική επαγωγή στο εσωτερικό του πηνίου και άρα την τάση στα άκρα του. Συνεπώς, ο αισθητήρας επαγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση των μαγνητικών πεδίων αυτών των εξωτερικών στοιχείων. Συνήθως, το πηνίο τυλίγεται γύρω από μία σιδηρομαγνητική ράβδο υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, προκειμένου να αυξηθεί η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του.



Σχήμα 15: Επαγωγικός μαγνητικός αισθητήρας [17].

Αν το σιδηρομαγνητικό υλικό είναι σταθερού εμβαδού και κάνουμε μία νοητή τομή στο εσωτερικό του που καταλαμβάνει επιφάνεια S και είναι κάθετη στο μαγνητικό πεδίο, τότε, υποθέτοντας πως η μαγνητική επαγωγή είναι σταθερή στα σημεία αυτής της επιφάνειας, η τάση στα άκρα του πηνίου εξαιτίας του νόμου Maxwell-Faraday θα ισούται με:

$$V = N \frac{d}{dt} \left(\iint_S (\vec{B} \cdot \vec{n}) dS \right) \quad 2.22$$

Όπου:

V – η τάση στα άκρα του πηνίου

N – ο αριθμός σπειρών του πηνίου

B – η πυκνότητα μαγνητικής ροής στα σημεία της επιφάνειας S

n – μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια S

dS – διαφορικό εμβαδό της επιφάνειας S

dt – το διαφορικό του χρόνου

Όμως, λόγω του σταθερού εμβαδού του υλικού, εξαιτίας του νόμου Gauss για τον μαγνητισμό, η μαγνητική επαγωγή θα προκύψει ίδια σε όλα τα σημεία του. Οπότε, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί ως:

$$V = (N * S) \frac{d(\vec{B} \cdot \vec{n})}{dt}$$

Όπου:

V – η τάση στα άκρα του πηνίου

N – ο αριθμός σπειρών του πηνίου

B – η πυκνότητα μαγνητικής ροής

n – μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια S

dt – το διαφορικό του χρόνου

Ο αισθητήρας επαγωγής είναι ικανός να μετράει μαγνητικά πεδία με μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο των 20fT και συνήθως χρησιμοποιείται σε πεδία συχνοτήτων από 1Hz έως 1MHz [18].

2.3.2.2 Αισθητήρας Hall

Ο αισθητήρας Hall είναι ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος αισθητήρας χαμηλού κόστους. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο φαινόμενο Hall. Σύμφωνα με αυτό, αν σε ένα αγώγιμο υλικό που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα εφαρμόσουμε μαγνητικό πεδίο κάθετο στην διεύθυνση του ρεύματος, τότε θα δημιουργηθεί διαφορά δυναμικού στα άκρα του υλικού με διεύθυνση κάθετη στο ρεύμα και στο επιβαλλόμενο πεδίο. Αυτό συμβαίνει επειδή το εξωτερικό πεδίο ασκεί δύναμη Lorentz στα ηλεκτρόνια που αποτελούν το ηλεκτρικό ρεύμα του αγώγιμου υλικού, με αποτέλεσμα αυτά να συσσωρεύονται στη μία μεριά του.

$$\vec{F} = q(\vec{u} \times \vec{B})$$

Όπου:

F – η δύναμη Lorentz

q – το φορτίο του ηλεκτρονίου

u – η ταχύτητα του ηλεκτρονίου

B – η πυκνότητα μαγνητικής ροής του εξωτερικού πεδίου

Έτσι, η ανισορροπία στη κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου στα άκρα του αγώγιμου υλικού δημιουργεί την τάση Hall [19]:

$$V_h = \frac{I * B}{q * n * t} \quad 2.25$$

Όπου:

V_h – η τάση Hall

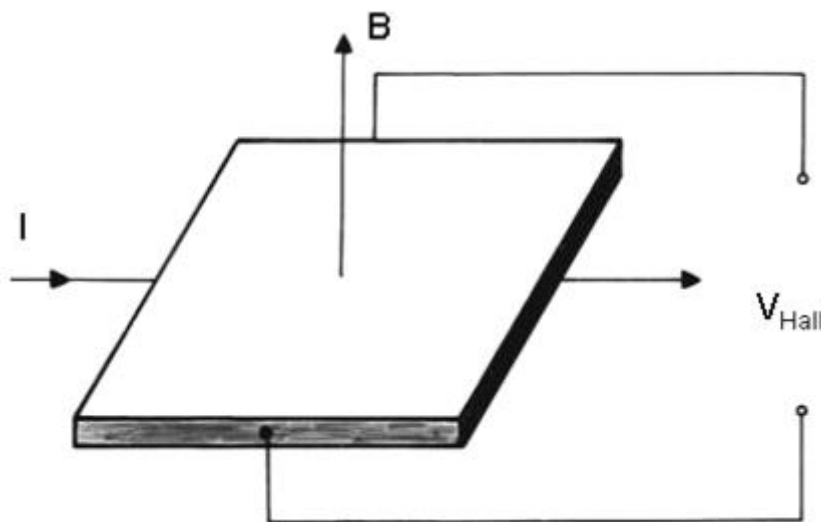
I – το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το αγώγιμο υλικό

B – η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του αγώγιμου υλικού

q – το φορτίο του ηλεκτρονίου

n – η πυκνότητα των ηλεκτρονίων του αγώγιμου υλικού

t – το πάχος του αγώγιμου υλικού, με διεύθυνση ίδια με αυτήν της μαγνητικής επαγωγής



Σχήμα 16: Φαινόμενο Hall [18].

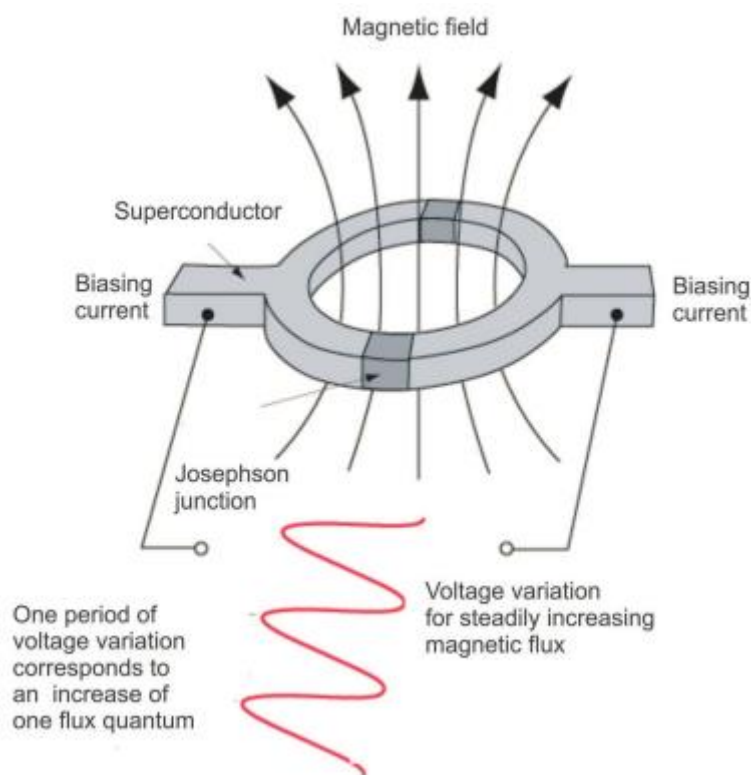
Το φαινόμενο Hall είναι πολύ μικρό στους μεταλλικούς αγωγούς, γι'αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται ημιαγώγιμα υλικά που δίνουν αρκετά καλύτερο αποτέλεσμα. Στους ημιαγωγούς τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας είναι λιγότερα, οπότε, αν το ρεύμα στο εσωτερικό τους έχει το ίδιο μέτρο με αυτό ενός μεταλλικού αγωγού, τότε αναγκαστικά η ταχύτητα ηλεκτρονίων στους ημιαγωγούς θα είναι αρκετά μεγαλύτερη. Σύνεπως, σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, δέχονται ισχυρότερες δυνάμεις Lorentz με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τάση Hall. Γενικώς οι χαμηλού κόστους αισθητήρες Hall κατασκευάζονται από πυρίτιο. Για αυξημένη ακρίβεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ημιαγωγοί στοιχείων από τις ομάδες III – V του περιοδικού πίνακα, διότι σε αυτούς η ταχύτητα των ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι στο πυρίτιο. Ένα μεγάλο πλήθος μαγνητόμετρων Hall στην αγορά είναι κατασκευασμένο από τον ημιαγωγό InSb (Indium antimonide). Οι διατάξεις που βασίζονται στο πυρίτιο είναι ικανές να μετρήσουν μαγνητικά πεδία της τάξεως των $10^6 - 10^8$ nT, ενώ οι διατάξεις InSb καταφέρνουν να κατεβάσουν το κάτω όριο σε 10^2 nT.

Οι αισθητήρες Hall μπορούν να μετρήσουν πεδία συχνότητας έως και 1MHz και για τη λειτουργία τους απαιτούν ισχύ από 0.1 έως 0.2 W [18].

2.3.2.3 Αισθητήρας Squid

Ο αισθητήρας Squid (Superconducting Quantum Interference Device), είναι ένας αισθητήρας υψηλής ακρίβειας που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων, μικρότερων του 1Hz. Τα υλικά από τα οποία κατασκευάζεται ψύχονται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες αυτής της υπεραγώγιμης θερμοκρασίας μετάβασης, προκειμένου να χάσει όλη την ηλεκτρική του αντίσταση και να γίνει υπεραγώγιμος. Στο εσωτερικό του αισθητήρα υπάρχει ένας υπεραγώγιμος δακτύλιος, που είναι ένα τοροειδές με διάμετρο μερικά χιλιοστά, κατασκευασμένο από μόλυβδο ή νιόβιο. Όταν αυτός ο δακτύλιος εισέρχεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, τότε η μαγνητική ροή που τον διαπερνά προκύπτει κβαντισμένη και επάγει ρεύμα στον δακτύλιο. Ο προσδιορισμός αυτού του ρεύματος αρκεί για να υπολογιστεί το περιβάλλον μαγνητικό πεδίο. Για να επιτευχθεί αυτό, ένα μικρό τμήμα του δακτύλιου

αποτελείται από έναν ασθενή σύνδεσμο Josephson, που είναι είτε ένα λεπτό στρώμα μονωτικού υλικού είτε μία περιοχή του υπεραγωγού που έχει στενέψει ώστε η διατομή της να είναι αρκετά μικρή. Ο σύνδεσμος αυτός θα διαρρέεται από υπερρεύμα που θα είναι περιοδική συνάρτηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του. Οι περιοδικές διακυμάνσεις αυτού του ρεύματος είναι της ίδιας μορφής με τους κροσσούς παρεμβολής που παράγονται από την περίθλαση του φωτός και οφείλονται στη κβάντιση της μαγνητικής ροής του υπεραγωγίμου δακτυλίου. Αξιοποιούνται για τη μέτρηση του ρεύματος στον υπεραγωγίμο δακτύλιο και συνεπώς του μαγνητικού πεδίου που το περιβάλλει. Ο δακτύλιος συνδέεται επαγωγικά σε ένα κύκλωμα ραδιοσυχνοτήτων που πολώνει τη διάταξη με ένα πρωταρχικό πεδίο και λειτουργεί ως κύκλωμα λήψης. Αλλαγές στο ρεύμα του δακτυλίου αλλάζουν τη συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος, με αποτέλεσμα η έξοδος να αλλάζει περιοδικά καθώς το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται. Αυτές οι μεταβολές του πεδίου μπορούν να μετρηθούν αξιοποιώντας τα μέγιστα και ελάχιστα της συναρτήσεως εξόδου [18].



Σχήμα 17: Αρχή λειτουργίας του αισθητήρα Squid [20].

2.3.2.4 Μαγνητοσυστολικός αισθητήρας

Ο μαγνητοσυστολικός αισθητήρας είναι μία διάταξη υψηλής ευαισθησίας, που η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο φαινόμενο της μαγνητοσυστολής και στο αντίστροφο αυτού. Αν παράλληλα στην διεύθυνση ενός μαγνητοσυστολικού υλικού εφαρμοστεί εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, τότε θα αλλάξουν οι μηχανικές του ιδιότητες, όπως το μήκος του. Αντιθέτως, εάν ένα μαγνητοσυστολικό υλικό παραμορφωθεί, η συνέπεια θα είναι η δημιουργία μαγνητικού πεδίου στην περιοχή του. Η είσοδος του μαγνητοσυστολικού αισθητήρα συνήθως είναι ένα πηνίο διέγερσης που διαρρέεται από ρεύμα και δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό, εξαιτίας της μαγνητοσυστολής, προκαλεί αλλαγές στη δομή του υλικού, με αποτέλεσμα αυτό να διαστέλλεται ή να συστέλλεται. Αυτές οι παραμορφώσεις μπορούν να συνδεθούν με μηχανικές τάσεις. Συνεπώς, ο μαγνητοσυστολικός αισθητήρας χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μηχανικών τάσεων και δυνάμεων [21].

2.3.2.5 Αισθητήρας μαγνητοαντίστασης

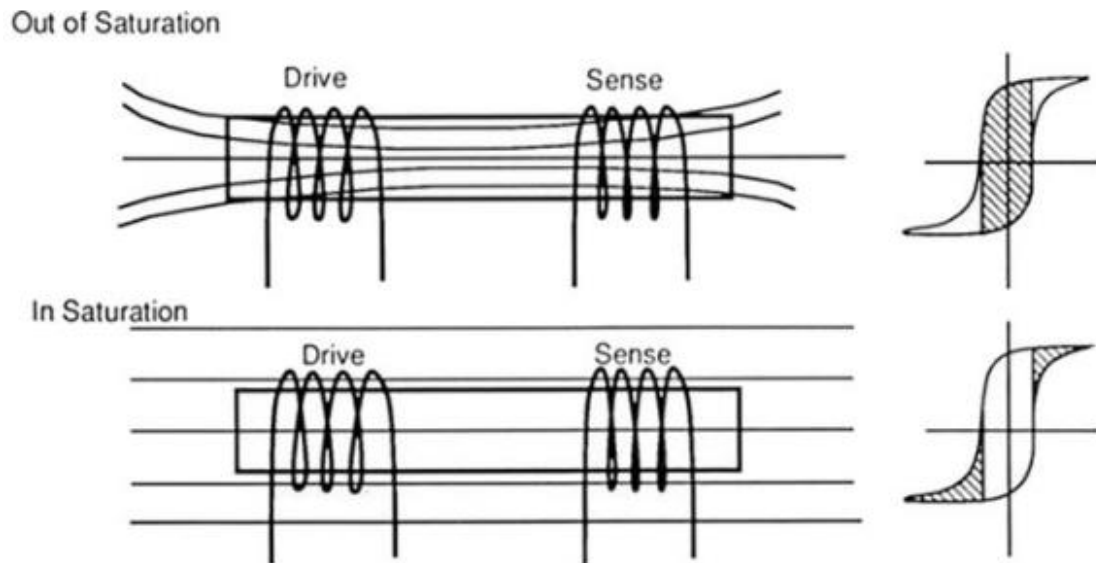
Ο αισθητήρας μαγνητοαντίστασης ανιχνεύει αλλαγές στην ηλεκτρική αντίσταση εξαιτίας ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης οφείλεται στις δυνάμεις Lorentz, οι οποίες ασκούνται στα αγωγίμα ηλεκτρόνια που κινούνται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Τα μαγνητικά δίπολα του σιδηρομαγνητικού υλικού μαζί με το ηλεκτρικό ρεύμα που οφείλεται στην κίνηση των ηλεκτρονίων δημιουργούν δυνάμεις Lorentz που προστίθενται στις δυνάμεις Coulomb μεταξύ των αγωγίμων ηλεκτρονίων και των ζωνών σθένους του πλέγματος. Η μαγνητοαντίσταση του υλικού προκύπτει από το σύνολο των διασκορπισμών που οφείλονται στις δυνάμεις Lorentz, ενώ η ωμική αντίσταση του υλικού προκύπτει από το σύνολο των ηλεκτροστατικών διασκορπισμών. Αυτή η διαδικασία από μόνη της είναι μερικώς υπεύθυνη για την αρκετά υψηλότερη ειδική αντίσταση που παρουσιάζουν τα σιδηρομαγνητικά υλικά. Όταν ο αισθητήρας βρεθεί στην περιοχή ενός μαγνητικού πεδίου, η διαδικασία μαγνήτισης αλλάζει τη διαμόρφωση των μαγνητικών τοιχωμάτων και τον προσανατολισμό των διπόλων των μαγνητικών περιοχών. Αυτό, με τη σειρά του, οδηγεί στη

μεταβολή του αθροίσματος των διασκορπισμών που οφείλονται στις δυνάμεις Lorentz, με αποτέλεσμα να αλλάζει η μαγνητοαντίσταση του υλικού ως συνάρτηση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου [21].

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι αξιοποίησης του φαινομένου της μαγνητοαντίστασης. Για παράδειγμα, οι διατάξεις μπορεί να είναι κατασκευασμένες έτσι ώστε η αντίσταση να αλλάζει γραμμικά σε σχέση με την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Άλλες διατάξεις είναι οι αισθητήρες γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR), που βασίζονται στην πολυστρωματική δομή επαναλαμβανόμενων διπλών στρωμάτων πολύ λεπτών (μεγέθους nm) σιδηρομαγνητικών-παραμαγνητικών φιλμ, στους οποίους η αντίσταση αλλάζει σημαντικά ακόμα και σε μικρές διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου. Μια ακόμα κατηγορία είναι αυτή των αισθητήρων μαγνητοαντίστασης σήραγγας (TMR). Το βασικό στοιχείο αυτών των διατάξεων είναι μια δομή όπου ένα στρώμα μαλακού μαγνήτη και ένα άλλο σκληρού μαγνήτη χωρίζονται από ένα μονωτικό στρώμα. Η αντίσταση αλλάζει με βάση τη σχετική ευθυγράμμιση της μαγνήτισης των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων [21].

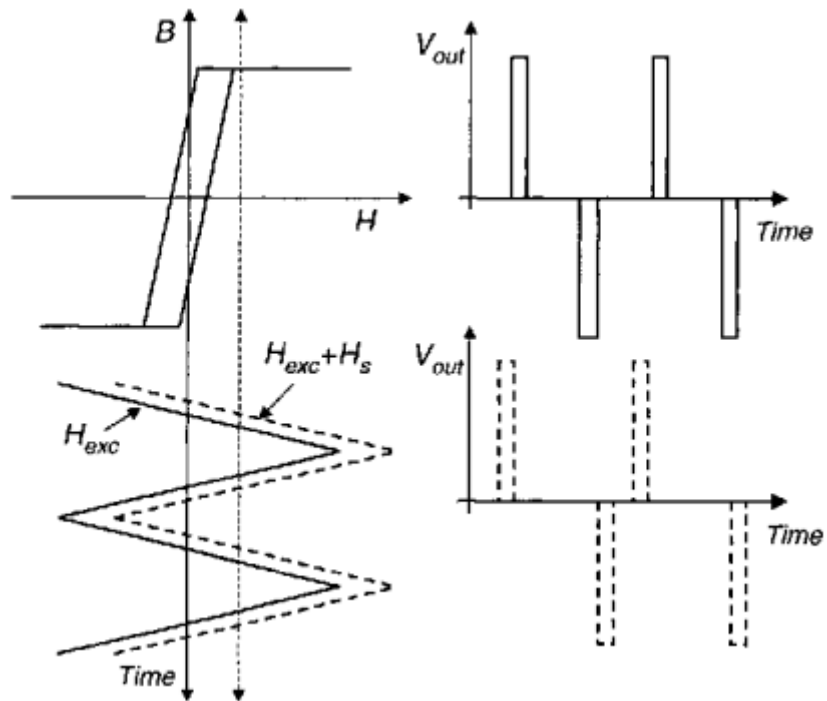
2.3.2.6 Flux-gate μαγνητόμετρο

Το flux-gate μαγνητόμετρο αποτελείται από ένα σιδηρομαγνητικό υλικό γύρω από το οποίο έχουμε τυλίξει δύο σωληνοειδή πηνία. Το ένα από αυτά τα πηνία διαρρέεται από ρεύμα που παρέχεται από εξωτερική πηγή. Έτσι, σύμφωνα με τον νόμο Ampere στο εσωτερικό του θα αναπτύσσεται ένταση μαγνητικού πεδίου H . Άρα, σε εκείνη την περιοχή του σιδηρομαγνητικού υλικού θα δημιουργείται πυκνότητα μαγνητικής ροής B εξαιτίας της μαγνητικής διαπερατότητάς του. Η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας εξαρτάται από το επιβαλλόμενο πεδίο H και λόγω της υστέρησης του υλικού η τιμή της μαγνητικής επαγωγής θα προκύπτει από τον βρόχο υστέρησης του. Αυτή η μαγνητική επαγωγή μεταφέρεται σε όλο το μήκος του σιδηρομαγνητικού υλικού μέσω του νόμου του Gauss για τον μαγνητισμό. Οπότε εμφανίζεται μαγνητική ροή στο εσωτερικό του δεύτερου πηνίου, η ταχύτητα μεταβολής της οποίας δημιουργεί τάση στα άκρα του μέσω του νόμου επαγωγής Faraday.



Σχήμα 18: Flux gate μαγνητόμετρο [17].

Επιλέγοντας μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό και επιβάλλοντας ημιτονοειδές εξωτερικό πεδίο H , ο βρόχος υστέρησης προκύπτει στενός, οπότε για μικρές τιμές του H το B αλλάζει απότομα και άρα παρατηρούνται γρήγορες μεταβολές στην τάση του δεύτερου πηνίου, ενώ όταν το H βρίσκεται στην περιοχή της μέγιστης ή ελάχιστης τιμής του, το υλικό είναι μαγνητικά κορεσμένο, το B μεταβάλλεται πολύ λίγο σε σχέση με το H και άρα η τάση στα άκρα του δεύτερου πηνίου λαμβάνει αρκετά μικρές τιμές [18].



Σχήμα 19: Η επίδραση του βρόχου υστέρησης στην τάση του πηνίου λήψης, όταν επιβάλλεται μεταβαλλόμενο εξωτερικό πεδίο [22].

2.4 Ηλεκτρικός χάλυβας - Υπολειπόμενη τάση

2.4.1 Ορισμός ηλεκτρικού χάλυβα

Ο ηλεκτρικός χάλυβας είναι ένα είδος χάλυβα που αξιοποιεί τις σιδηρομαγνητικές ιδιότητες του σιδήρου. Ανήκει στην κατηγορία των μαλακών σιδηρομαγνητικών υλικών, επειδή χαρακτηρίζεται από μικρού μέτρου συνεκτικό πεδίο. Από το σύνολο της ποσότητας αυτών των υλικών που παράγονται, ο ηλεκτρικός χάλυβας αποτελεί πάνω από το 90% αυτής. Χρησιμοποιείται στην κατασκευή ηλεκτρικών κινητήρων, γεννητριών και μετασχηματιστών [23].

Όταν στον ηλεκτρικό χάλυβα επιβάλλεται εξωτερικό χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, προκαλούνται απώλειες ενέργειας, οι οποίες ονομάζονται απώλειες σιδήρου. Αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι αυτή των απωλειών λόγω υστέρησης, που συμβαίνει λόγω της μετανάστευσης των μαγνητικών περιοχών στον χάλυβα. Η δεύτερη είναι αυτή των απωλειών λόγω δινορρευμάτων, που προκαλείται όταν δινορρεύματα επάγονται στο υλικό εξαιτίας εναλλασσόμενης μαγνητικής ροής. Ο ηλεκτρικός χάλυβας πρέπει να παρέχει ελάχιστες απώλειες σιδήρου και να αργεί να φτάσει στην κατάσταση του μαγνητικού κορεσμού. Ο ηλεκτρικός χάλυβας ονομάζεται επίσης χάλυβας πυριτίου, καθώς το Si αποτελεί το κύριο πρόσθετο στοιχείο του. Η αύξηση της περιεκτικότητας πυριτίου βελτιώνει τις μαλακές μαγνητικές ιδιότητες του χάλυβα. Για παράδειγμα, αυξάνεται η μαγνητική διαπερατότητα, λόγω της μικρής μαγνητο-κρυσταλλικής ανισοτροπίας και των χαμηλών μαγνητοσυστολικών συντελεστών. Επίσης, οι απώλειες σιδήρου εξαιτίας δινορρευμάτων μειώνονται, λόγω της αύξησης της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης. Άλλη μία αποτελεσματική μέθοδος προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες δινορρευμάτων, είναι η μείωση του πάχους του φύλλου. Γι'αυτό το πάχος του ηλεκτρικού χάλυβα ανήκει γενικώς στο διάστημα [0.2mm, 0,65 mm]. Συνήθως στον ηλεκτρικό χάλυβα εφαρμόζονται ηλεκτρικά μονωτικά επιχρίσματα προκειμένου να δημιουργηθεί

ένα στρώμα μόνωσης μεταξύ ελασματοποιημένων χαλύβδινων φύλλων για να αποφευχθεί η αύξηση της απώλειας δινορευμάτων [23].

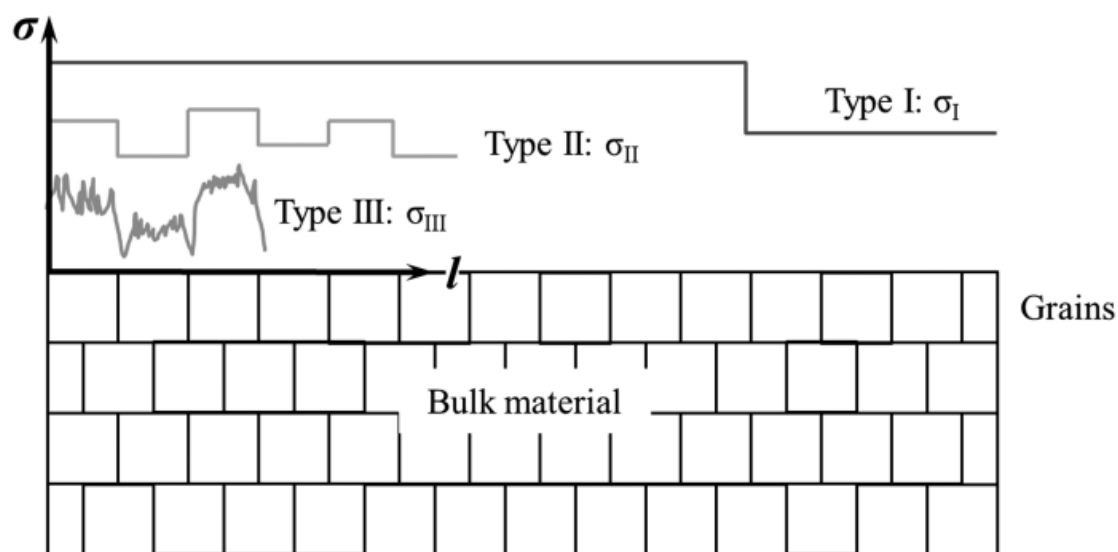
2.4.2 Ορισμός υπολειπόμενης τάσης

Τα μηχανολογικά υλικά κατά την παραγωγή τους υπόκεινται σε διάφορες διαδικασίες μέχρι να λάβουν την τελική τους μορφή, όπως χύτευση, σφυρηλάτηση, συγκόλληση, κοπή [24]. Κατά την διάρκεια αυτών των διαδικασιών, στα υλικά εφαρμόζονται μηχανικές τάσεις και υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα στο τέλος της κατασκευής να υπάρχουν υπολειπόμενες τάσεις. Οι τάσεις αυτές παραμένουν ακόμα και όταν στο υλικό δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις. Επιδρούν σε αρκετό μήκος του υλικού και μερικές φορές σε ολόκληρη τη γεωμετρία του εξαρτήματος. Επηρεάζουν τη δομή και την ανθεκτικότητα των εξαρτημάτων και μπορούν να οδηγήσουν σε αναπάντεχη αστοχία [25]. Για παράδειγμα όταν στο υλικό εφαρμόζεται εξωτερικό φορτίο, το άθροισμα των υπολειπόμενων και εξωτερικών τάσεων ενδέχεται να ξεπεράσει το όριο αντοχής του υλικού, με αποτέλεσμα αυτό να σπάσει.

2.4.3 Είδη υπολειπόμενης τάσης

Οι υπολειπόμενες τάσεις κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με την κλίμακα του υλικού στην οποία εμφανίζονται. Η πρώτη κατηγορία παραμένουσων τάσεων (macro stress) επηρεάζει ταυτόχρονα πολλούς κόκκους του υλικού. Αιτίες διαμόρφωσης τέτοιων τάσεων μπορεί να αποτελούν απότομες μεταβολές στη θερμοκρασία του υλικού και ανομοιογενής πλαστική παραμόρφωση. Οποιαδήποτε διαδικασία κατασκευής ή συντήρησης του υλικού που αλλάζει το σύνολο αυτού του είδους υπολειπόμενων τάσεων θα έχει ως αποτέλεσμα να αλλάξουν οι μακροδιαστάσεις του. Η δεύτερη κατηγορία (micro stress), παρατηρείται σε αποστάσεις ίδιας κλίμακας με τους κόκκους του υλικού και οφείλεται στην μικροδομή του. Η τρίτη κατηγορία (sub-micro stress) εμφανίζεται εντός του

κόκκου του υλικού, σε ατομική κλίμακα, λόγω ατέλειων στην κρυσταλλική δομή του [26].



Σχήμα 20: Οι τρεις κατηγορίες υπολειπόμενης τάσης (Type I, Type II, Type III), σε σχέση με την κλίμακα του υλικού. Τα τετράγωνα λειτουργούν ως αναπαράσταση των κόκκων ενός πολυκρυσταλλικού υλικού [27].

2.4.4 Αίτια υπολειπόμενης τάσης

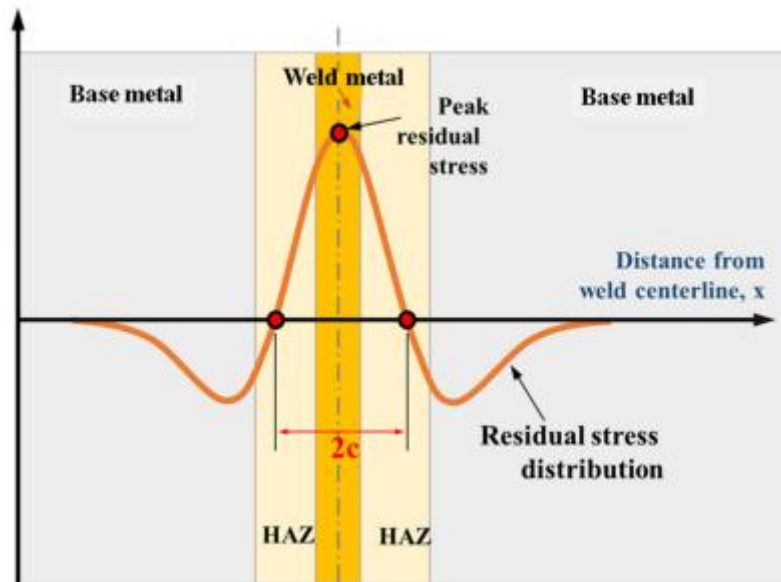
2.4.4.1 Υπολειπόμενη τάση λόγω μηχανικής κατεργασίας

Σε διάφορα στάδια της κατασκευής του υλικού, όπως είναι η λείανση, τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται αναπτύσσουν θερμότητα στο υλικό, όταν αυτό βρίσκεται σε επαφή με αυτά. Αυτό μπορεί να προκαλέσει θερμικές διαστολές και συστολές στο υλικό, και άρα ανεπιθύμητες παραμορφώσεις, που με τη σειρά τους συμβάλλουν στη δημιουργία υπολειπόμενων τάσεων στο εσωτερικό του εξαρτήματος [28].

2.4.4.2 Υπολειπόμενη τάση λόγω συγκόλλησης

Η συγκόλληση είναι μία διαδικασία κατασκευής που χρησιμοποιείται για την ένωση υλικών μεταξύ τους. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, εφαρμόζεται υψηλή θερμοκρασία στην περιοχή της συγκόλλησης με αποτέλεσμα αυτή να διαστέλλεται θερμικά. Έπειτα εφαρμόζεται ψύξη για να στερεοποιηθεί η συγκόλληση. Το υλικό εντός της περιοχής συγκόλλησης συρρικνώνεται καθώς

ψύχεται και, ως αποτέλεσμα, αναπτύσσεται υπολειπόμενη τάση ώστε να διατηρηθεί δεσμός μεταξύ του θερμικά συστελούμενου υλικού και των διπλανών του [29].



Σχήμα 21: Γραφική αναπαράσταση της κατανομής της υπολειπόμενης τάσης που δημιουργείται σε μία ένωση συγκόλλησης [30].

2.5 Μέτρηση υπολειπόμενης τάσης

2.5.1 Κατηγορίες μεθόδων μέτρησης υπολειπόμενης τάσης

Οι μέθοδοι μέτρησης της υπολειπόμενης τάσης ποικίλουν σε αριθμό, αλλά γενικά μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Αυτές είναι οι καταστροφικές μέθοδοι και οι μη καταστροφικές.

Οι καταστροφικές μέθοδοι, όπως είναι η μέθοδος τρύπας (hole drilling method [31]), αναφέρονται σε έναν τύπο δοκιμής όπου το υλικό ή το εξάρτημα που δοκιμάζεται υπόκειται σε δυνάμεις, συνθήκες ή περιβάλλοντα που θα του προκαλέσουν μόνιμη ζημιά. Ο σκοπός των καταστροφικών μεθόδων είναι να γίνει κατανοητό πώς συμπεριφέρεται το υλικό κάτω από ακραίες συνθήκες, να προσδιοριστούν η αντοχή και όριά του, προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοσή του και να εντοπιστούν οι αδυναμίες του.

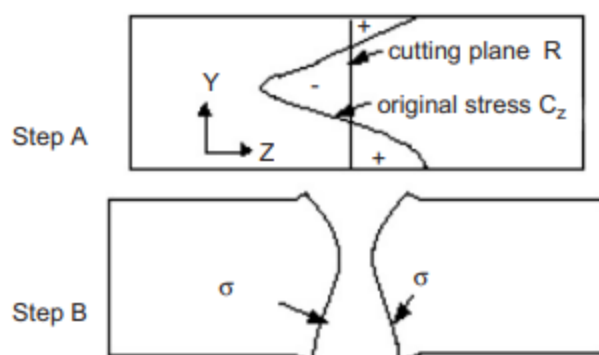
Οι μη καταστροφικές μέθοδοι [32], όπως είναι οι μέθοδοι ηλεκτρομαγνητικών αισθητήρων, αναφέρονται σε μια σειρά τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων ενός υλικού ή εξαρτήματος χωρίς να προκληθεί βλάβη σε αυτό. Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται συνήθως για την επιθεώρηση, τη μέτρηση και την αξιολόγηση της ακεραιότητας των υλικών. Ο ρόλος τους είναι σημαντικός για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας, της ασφάλειας και της μακροζωίας των υλικών και των εξαρτημάτων, καθώς επιτρέπουν τον έγκαιρο εντοπισμό πιθανών ζητημάτων χωρίς να κινδυνεύει η λειτουργικότητα του αντικειμένου που δοκιμάζεται.

2.5.2 Καταστροφικές μέθοδοι

2.5.2.1 Μέθοδος περιγράμματος

Με την μέθοδο περιγράμματος πραγματοποιείται τομή στο υλικό σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο όπου χρειάζεται να μετρηθεί η υπολειπόμενη τάση. Αυτή η τομή θα μειώσει τις μηχανικές τάσεις στην επιφάνεια όπου πραγματοποιήθηκε. Έπειτα οι τελικές παραμορφώσεις μετρούνται με χρήση

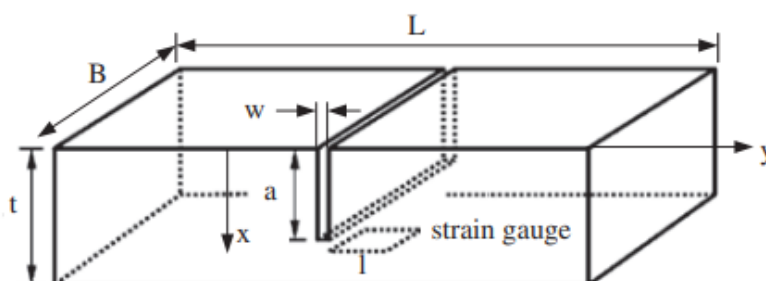
μετρητών παραμόρφωσης και χρησιμοποιούνται ως οριακές συνθήκες για την ταξινόμηση των υπολειπόμενων τάσεων πριν εφαρμοστεί η τομή [33].



Σχήμα 22: Κατανομές υπολειπόμενων τάσεων στο υλικό, α) Πριν την εφαρμογή της μεθόδου περιγράμματος, β) Μετά την εφαρμογή [33].

2.5.2.2 Μέθοδος σχισμής

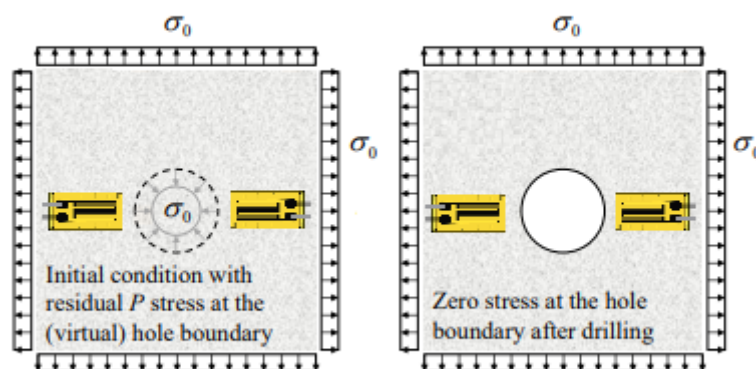
Με την μέθοδο σχισμής αρχικά πραγματοποιείται μία στενή σχισμή, σταδιακά αυξανόμενου βάθους, στο υλικό. Κατά την διαδικασία της κοπής, οι υπολειπόμενες τάσεις εκείνης της περιοχής ελαττώνονται με αποτέλεσμα το υλικό να παραμορφώνεται. Αυτές οι παραμορφώσεις μετρούνται με χρήση μετρητών παραμόρφωσης και αξιοποιούνται για τον προσδιορισμό των υπολειπόμενων τάσεων του υλικού. Για μετρήσεις διαμέσου του πάχους, ο μετρητής παραμόρφωσης τοποθετείται στο πίσω μέρος της επιφάνειας του υλικού, ενώ για μετρήσεις κοντινής επιφάνειας ο μετρητής τοποθετείται στην πάνω επιφάνεια του υλικού [34].



Σχήμα 23: Διάταξη που χρησιμοποιεί την μέθοδο σχισμής με μετρητή παραμόρφωσης τοποθετημένο στο πίσω μέρος της επιφάνειας [34].

2.5.2.3 Μέθοδος τρύπας

Με την μέθοδο τρύπας δημιουργείται μία τρύπα στο υλικό στην περιοχή όπου χρειάζεται να μετρηθούν οι υπολειπόμενες τάσεις. Κατά την διαδικασία του τρυπήματος, οι τάσεις εκείνης της περιοχής χαλαρώνουν με αποτέλεσμα να εμφανίζονται τοπικές παραμορφώσεις. Αυτές οι παραμορφώσεις μετρώνται με χρήση μετρητών παραμόρφωσης που είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του υλικού και με βάση αυτές προσδιορίζονται οι αντίστοιχες τάσεις. Αν η διάνοιξη της τρύπας πραγματοποιείται σταδιακά, τότε οι μετρήσεις που προκύπτουν από τον μετρητή παραμόρφωσης πρέπει να συλλέγονται και να αποθηκεύονται για κάθε βήμα του εργαλείου φρεζαρίσματος και στη συνέχεια μετατρέπονται σε μία ορισμένη κατανομή μηχανικών τάσεων στο υλικό [35].



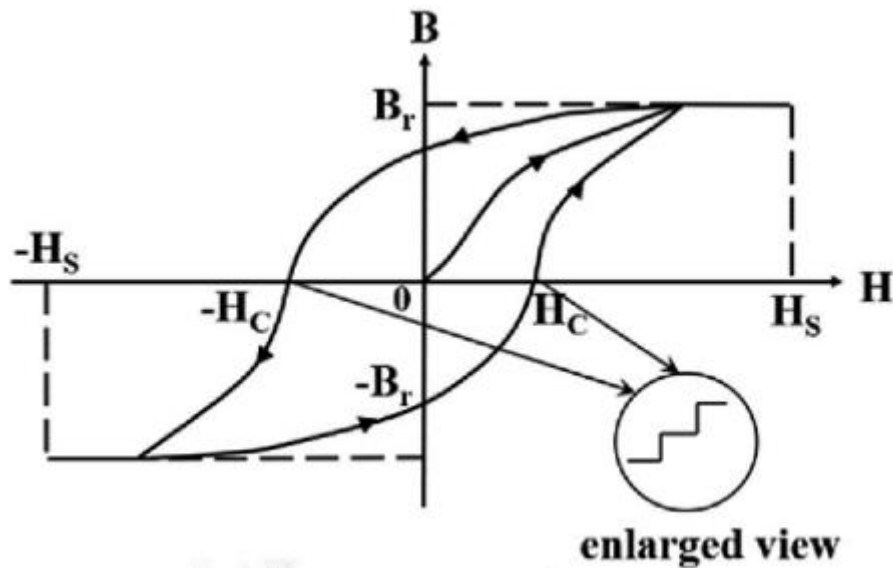
Σχήμα 24: Μέτρηση υπολειπόμενων τάσεων με διάνοιξη τρύπας [35].

2.5.3 Μη καταστροφικές μέθοδοι

2.5.3.1 Μαγνητικός θόρυβος Barkhausen

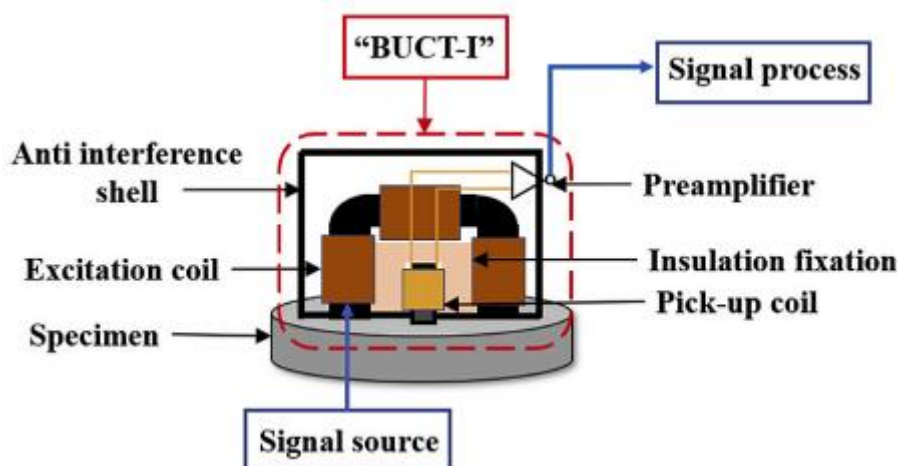
Το συγκεκριμένο φαινόμενο παρατηρείται στα σιδηρομαγνητικά υλικά όταν μεταβάλλεται η μαγνήτισή τους. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να πραγματοποιηθούν με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στο υλικό, εξαιτίας του οποίου οι ροπές των διπόλων των μαγνητικών περιοχών θα περιστραφούν προς την κατεύθυνση του επιβαλλόμενου πεδίου. Αυτή η

διαδικασία απελευθερώνει μαγνητικό πεδίο που στο πιο απότομο τμήμα του βρόχου υστέρησης παρατηρείται ως παλμοί υψηλής συχνότητας που έχουν τυχαίο πλάτος, διάρκεια και χρονικό διαχωρισμό. Γι'αυτό οι παλμοί αυτοί περιγράφονται χονδρικά ως θόρυβος, που ονομάζεται μαγνητικός θόρυβος Barkhausen (MBN) [36].



Σχήμα 25: Ο μαγνητικός θόρυβος Barkhausen στον βρόχο υστέρησης [36].

Προκειμένου να μετρηθούν οι υπολειπόμενες τάσεις ενός εξαρτήματος με την τεχνική MBN, χρησιμοποιείται μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό σε σχήμα yoke. Στο yoke τυλίγεται ένα πηνίο διέγερσης, το εξάρτημα τοποθετείται στα άκρα του yoke και το μαγνητικό πεδίο που παρέχεται από το yoke μεταφέρεται στο εξάρτημα. Πάνω στην επιφάνεια του εξαρτήματος τοποθετείται ένα πηνίο λήψης που λαμβάνει τον MBN.



Σχήμα 26: Διάταξη μέτρησης υπολειπόμενης τάσης με χρήση της τεχνικής MBN [36].

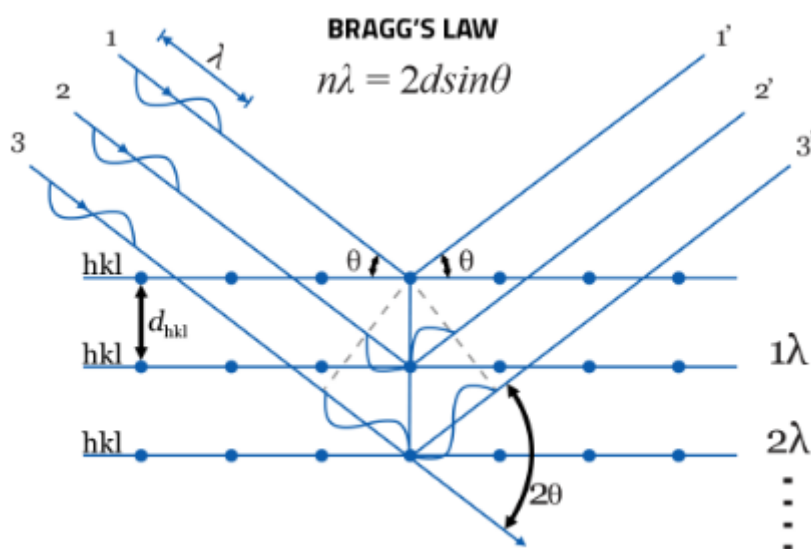
Η τεχνική MBN εφαρμόζεται γενικά σε σχετικά υψηλές συχνότητες και επομένως είναι πιο ευαίσθητη στην επιφάνεια του δείγματος λόγω του επιδερμικού φαινομένου. Η υπολειπόμενη τάση μπορεί να μετρηθεί επειδή ο θόρυβος MBN που προκαλείται από την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων παρουσία υπολειπόμενων τάσεων είναι διαφορετικός από τον θόρυβο που προκαλείται στο υλικό απουσία αυτών των τάσεων. Οι υπολειμματικές εφελκυστικές τάσεις αυξάνουν τον MBN επειδή αποσταθεροποιούν την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων, ενώ οι παραμένουσες συμπιεστικές τάσεις μειώνουν τον θόρυβο Barkhausen, διότι σταθεροποιούν την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων.

Η μέθοδος μαγνητικού θορύβου Barkhausen επιτυγχάνει να προσδιορίσει με ακρίβεια τις συνθήκες καταπόνησης στα σιδηρομαγνητικά υλικά. Ωστόσο, μετράει μόνο τις υπολειπόμενες τάσεις που βρίσκονται σε ρηχό βάθος από την επιφάνεια του υλικού και επίσης υπάρχει η προϋπόθεση ότι το τελευταίο πρέπει να είναι σιδηρομαγνητικό [37].

2.5.3.2 Μέθοδος X-ray περίθλασης

Η X-ray περίθλαση είναι μία μη καταστροφική μέθοδος που εφαρμόζεται σε κρυσταλλικά υλικά με σχετικά μικρό μέγεθος κόκκου για τον υπολογισμό των υπολειπόμενων τάσεων σε απόσταση μικρομέτρων από την επιφάνεια των υλικών. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, αξιοποιεί τις μετατόψεις των ελαστικών παραμορφώσεων των ατομικών πλεγμάτων αυτών των υλικών.

Στο υλικό αρχικά εφαρμόζονται ακτίνες X και μετρώνται οι γωνίες περίθλασης που διασκορπίζονται από την κρυσταλλική δομή του υλικού. Έπειτα, αξιοποιώντας τον νόμο Bragg, υπολογίζεται η απόσταση πλέγματος συναρτήσει της γωνίας περίθλασης. Οι παραμένουσες συμπιεστικές τάσεις μειώνουν την απόσταση του πλέγματος, ενώ οι υπολειπόμενες εφελκυστικές τάσεις την αυξάνουν. Συνεπώς, λόγω της εξάρτησης της απόστασης πλέγματος από την υπολειπόμενη τάση, η τελευταία μπορεί να προσδιοριστεί, αν υπολογιστεί η απόσταση πλέγματος ενός υλικού με άγνωστη κατανομή υπολειπόμενων τάσεων και την συγκριθεί με αυτήν ενός υλικού αναφοράς όπου είναι γνωστό πως δεν περιέχει υπολειπόμενες τάσεις [38].



Σχήμα 27: Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου X-ray περίθλασης [39].

2.5.3.3 Μέθοδος περίθλασης νετρονίων

Όπως και στην μέθοδο X-ray περίθλασης, ο υπολογισμός των υπολειπόμενων τάσεων με την μέθοδο περίθλασης νετρονίων βασίζεται στον προσδιορισμό των πλεγματικών παραμορφώσεων που επιτυγχάνεται με ακριβές μετρήσεις των πλεγματικών αποστάσεων.

Στο υλικό εφαρμόζεται μία δέσμη νετρονίων που διαθλάται από το ατομικό πλέγμα. Η περιθλασμένη δέσμη υπακούει τον νόμο του Bragg, οπότε ο νόμος αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της απόστασης πλέγματος της περιοχής υπό τάση. Η υπολειπόμενη τάση υπολογίζεται βαθμονομώντας ένα υλικό χωρίς τάση και συνδέοντας την πλεγματική του απόσταση με αυτήν του υπό τάση δείγματος.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου περίθλασης νετρονίων είναι ότι τα νετρόνια διεισδύουν πολύ βαθύτερα στα περισσότερα υλικά απ'ότι οι ακτίνες X. Για παράδειγμα, για την εξασθένιση μιας δέσμης νετρονίων στο ήμισυ της αρχικής της έντασης, είναι απαραίτητα 6 mm χάλυβα ή 70 mm αλουμίνιο. Αυτές οι τιμές είναι περίπου τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές των ακτίνων X [40]. Γι'αυτό, η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκει εφαρμογή σε παχιά, μεγάλα δείγματα και εξαρτήματα όπως βαρέα μέταλλα και σύνθετα υλικά.

2.5.3.4 Μέθοδος υπέρηχων

Ο έλεγχος με υπέρηχους είναι μια μη καταστροφική μέθοδος που προκειμένου να υπολογίσει τις υπολειπόμενες τάσεις εκμεταλλεύεται την ακουστικοελαστική ιδιότητα των υλικών στέλνοντας και λαμβάνοντας υπερηχητικά κύματα. Τα υπερηχητικά κύματα είναι κύματα με συχνότητες υψηλότερες από το ανώτερο ακουστικό όριο της ανθρώπινης ακοής.

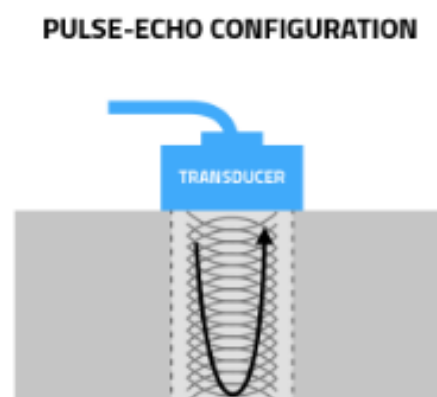
Αυτά τα κύματα αποστέλλονται στο δείγμα και έπειτα χαρακτηρίζονται μετρώντας την ταχύτητα του κύματος και αναλύοντας τις αλλαγές στην ανακλώμενη ταχύτητα, το πλάτος, τη συχνότητα και τις αρμονικές του ήχου παρουσία τάσης. Όταν τα υπερηχητικά κύματα περνούν μέσα από το υλικό, η ταχύτητά τους αλλάζει εξαιτίας της παρουσίας υπολειπόμενων τάσεων. Σε

περιοχές όπου οι παραμένουσες τάσεις είναι εφελκυστικές, η ταχύτητα του κύματος μειώνεται, ενώ σε περιοχές με θλιπτικές τάσεις, η ταχύτητα κύματος τείνει να αυξάνεται.

Το κύριο είδος κυμάτων που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μέθοδο είναι τα διαμήκη κύματα, τα οποία ταξιδεύουν προς την κατεύθυνση διάδοσης και επηρεάζονται από τις ελαστικές παραμορφώσεις του υλικού λόγω παραμένουσων τάσεων. Υπάρχουν όμως και τεχνικές που χρησιμοποιούν διατμητικά κύματα. Ένα παράδειγμα χρήσης διατμητικών κυμάτων είναι η επιθεώρηση των συγκολλημένων περιοχών. Εδώ, ένα τέτοιο κύμα προβάλλεται υπό λοξή γωνία στο υλικό για να ανιχνεύσει ρωγμές που είναι ευθυγραμμισμένες κάθετα προς την επιφάνεια, οι οποίες δεν θα ήταν ορατές από ένα κύμα που προβάλλονταν κάθετα στην επιφάνεια του υλικού [41].

Συνήθως, ένας μετατροπέας τοποθετείται στη μια πλευρά του δείγματος και του μεταδίδει το κατάλληλο υπερηχητικό κύμα. Έπειτα, ο ίδιος μετατροπέας λαμβάνει τις αντανakλάσεις του. Εάν υπάρχουν ελαττώματα, τότε το κύμα αντανakλάται από αυτά. Η τεχνική αυτή ονομάζεται pulse-echo.

Η μέθοδος υπέρηχων απαιτεί δείγματα βαθμονόμησης τάσης για διαφορετικά υλικά και συνθήκες καταπόνησης.



Σχήμα 28: Διάταξη pulse-echo για την μέτρηση της υπολειπόμενης τάσης με χρήση υπέρηχων [42].

2.5.3.5 Μέθοδος μαγνητικής διαπερατότητας

Η παρουσία υπολειπόμενων τάσεων στο εσωτερικό ενός σιδηρομαγνητικού υλικού ελαττώνουν την μαγνητική επαγωγή και συνεπώς την μαγνητική του διαπερατότητα. Ο αισθητήρας μαγνητικής διαπερατότητας αξιοποιεί αυτό το φαινόμενο προκειμένου να υπολογίσει τις παραμένουσες τάσεις σιδηρομαγνητικών δειγμάτων, μετρώντας την διαφορική μαγνητική διαπερατότητα:

$$\mu_d = \frac{dB}{dH} \quad 2.26$$

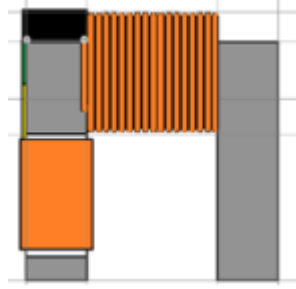
Όπου:

μ_d – η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα

dB – το διαφορικό της πυκνότητας μαγνητικής ροής

dH – το διαφορικό της έντασης του μαγνητικού πεδίου

Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται αποτελείται από έναν πυρήνα σε σχήμα yoke κατασκευασμένο από μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό. Πάνω του συνδέονται ένα πηνίο διέγερσης που δημιουργεί μαγνητική ροή στο εσωτερικό του πυρήνα καθώς και ένα πηνίο λήψης το οποίο λαμβάνει την πυκνότητα μαγνητικής ροής. Τα άκρα του πυρήνα συνδέονται στο σιδηρομαγνητικό δείγμα και κατά την διαδικασία της μέτρησης πρέπει να ληφθούν υπόψη τα κενά αέρος μεταξύ τους. Τα πηνία διέγερσης και λήψης διαφέρουν ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους. Συνήθως το πηνίο λήψης αποτελείται από μεγαλύτερο αριθμό σπειρών και το σύρμα από το οποίο είναι κατασκευασμένο είναι μικρότερης διατομής από αυτό του πηνίου διέγερσης [43].



Σχήμα 29: Αισθητήρας μαγνητικής διαπερατότητας [43].

Με βάση τα παραπάνω, τα πεδιακά μεγέθη υπολογίζονται ως:

$$H = \frac{N1}{Z1 * L} V1 \quad 2.27$$

Όπου:

H – η ένταση του μαγνητικού πεδίου

N1 – ο αριθμός σπειρών του πηνίου διέγερσης

Z1 – η εμπέδηση του πηνίου διέγερσης

L – το μήκος του πηνίου διέγερσης

V1 – η τάση στα άκρα του πηνίου διέγερσης

$$B = \frac{1}{N2 * S} \int_0^t V2(t) dt \quad 2.28$$

Όπου:

B - η πυκνότητα μαγνητικής ροής

N2 - ο αριθμός σπειρών του πηνίου λήψης

S – το εμβαδόν διατομής του σιδηρομαγνητικού πυρήνα

V2 – η τάση στα άκρα του πηνίου λήψης

Αξιοποιώντας τις δύο παραπάνω εξισώσεις, η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα υπολογίζεται ως:

$$\mu_d = \frac{dB}{dH} = \frac{dB/dt}{dH/dt} = \frac{Z1 * L}{N1 * N2 * S} * \frac{V2}{dV1/dt} \quad 2.29$$

Όπου:

μ_d – η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα

$Z1$ – η εμπέδηση του πηνίου διέγερσης

L – το μήκος του πηνίου διέγερσης

$N1$ – ο αριθμός σπειρών του πηνίου διέγερσης

$N2$ - ο αριθμός σπειρών του πηνίου λήψης

S – το εμβαδόν του σιδηρομαγνητικού πυρήνα

$V2$ – η τάση στα άκρα του πηνίου λήψης

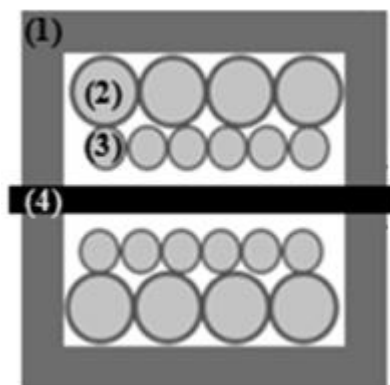
$dV1/dt$ – η παράγωγος της τάσης στα άκρα του πηνίου διέγερσης

Συνεπώς, από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει το συμπέρασμα ότι μείωση της τάσης στα άκρα του πηνίου λήψης συνεπάγεται μείωση της μαγνητικής διαπερατότητας και άρα παρουσία υπολειπόμενων τάσεων στο σιδηρομαγνητικό δείγμα.

Magnetic Stress Calibration – σύνδεση μεταξύ μαγνητικής διαπερατότητας και υπολειπόμενης τάσης

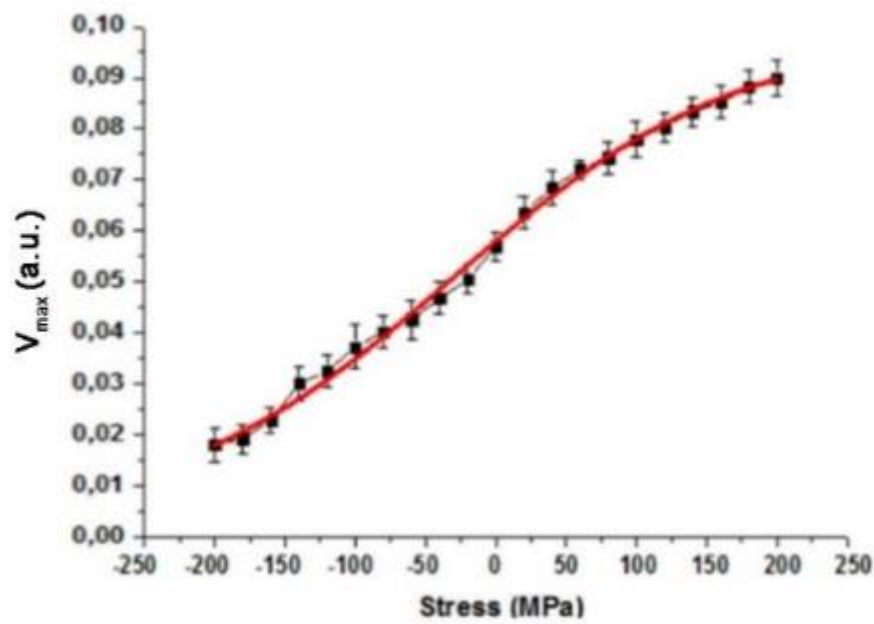
Η τεχνική Magnetic Stress Calibration (MASC) χρησιμοποιείται σε χάλυβες προκειμένου να συσχετιστούν η μαγνητική διαπερατότητά τους με την παραμένουσα τάση στο εσωτερικό τους. Αρχικά, τα σιδηρομαγνητικά δείγματα χάλυβα υπόκεινται σε διαδοχικά επίπεδα τάσεων, τόσο εφελκυστικές όσο και θλιπτικές, στο εύρος της ελαστικής παραμόρφωσης τους και κάτω από το σημείο Villari, ώστε να είναι βέβαιο ότι προκαλούνται μόνο υπολειμματικές τάσεις. Οι μηχανικές τάσεις μπορούν να προκληθούν με

ελεγχόμενο τρόπο χρησιμοποιώντας μία μηχανή, όπως η INSTRON. Σε κάθε επίπεδο τάσης, το δείγμα εκφορτώνεται και μετράται η διαφορική μαγνητική διαπερατότητά του. Η μέγιστη τιμή της, μ_{max} , σχεδιάζεται ως συνάρτηση της τάσης που εφαρμόζεται [31]. Η τιμή μ_{max} μετριέται χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα μαγνητικής διαπερατότητας όπως αυτός του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα 30: Διατομή του αισθητήρα μαγνητικής διαπερατότητας. (1) – ηλεκτρομαγνητικός πυρήνας, (2) – πηνίο διέγερσης, (3) – πηνίο λήψης, (4) – χαλύβδινο δείγμα [44].

Σύμφωνα με την εξίσωση 2.29, η ηλεκτρική τάση στα άκρα του πηνίου λήψης είναι ανάλογη της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητάς του δείγματος. Στην αρχή προσδιορίζεται η μέγιστη τιμή αυτής της τάσης, V_{max} που παρατηρείται όταν η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι κοντά στο συνεκτικό πεδίο. Έπειτα, με βάση τα παραμετρικά χαρακτηριστικά του πεδίου διέγερσης και του πηνίου λήψης υπολογίζεται η σταθερά αναλογίας των V_{max} και μ_{max} . Για παράδειγμα, για χάλυβα τύπου AISI1008 αυτή η σταθερά προκύπτει να ισούται με 1.5 mWb/Am. Τέλος, σχεδιάζοντας την V_{max} ως συνάρτηση της σ προκύπτει η καμπύλη MASC του χαλύβδινου δείγματος [31].

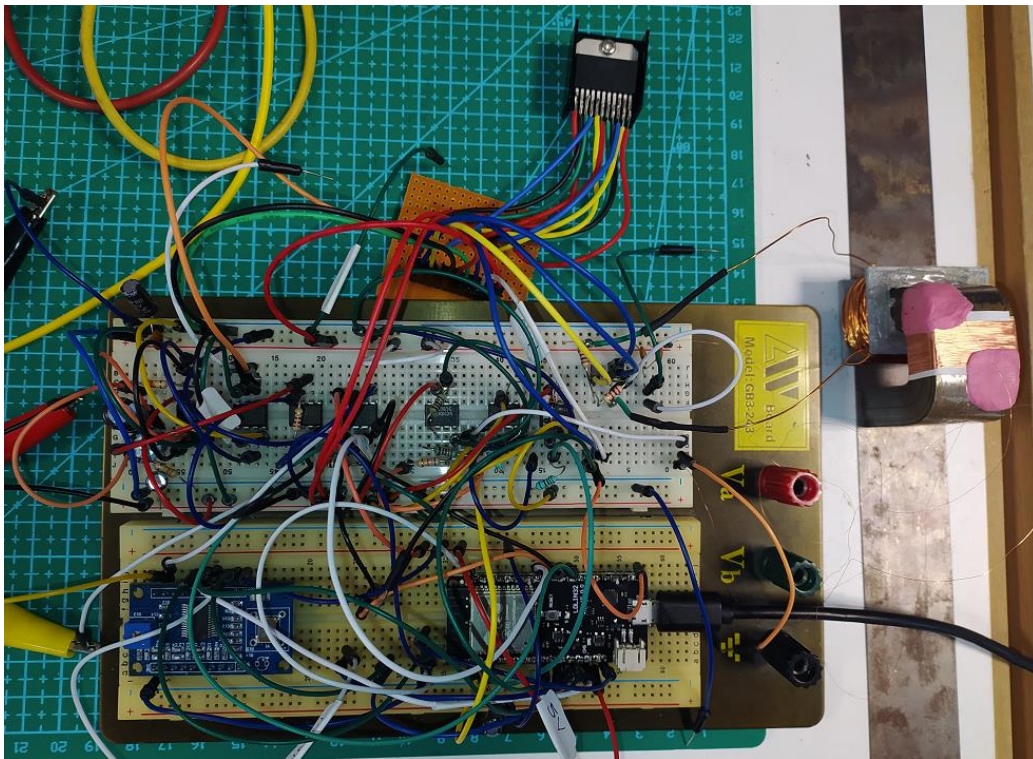


Σχήμα 31: Καμπύλη MASC για χάλυβα τύπου AISI1008. Τα μαύρα σημάδια με τις γραμμές σφάλματος υποδεικνύουν τις μετρούμενες τιμές διαπερατότητας για κάθε επίπεδο υπολειπόμενης τάσης ενώ η κόκκινη γραμμή είναι μία προσαρμοσμένη καμπύλη. [31].

3 Πειραματικό Μέρος

3.1 Περιγραφή της διάταξης

Η διάταξη που κατασκευάστηκε στο πειραματικό μέρος είναι ένας αισθητήρας μαγνητικής διαπερατότητας, ανάλογος με αυτόν που περιγράφηκε στην ενότητα 2.5.3.5. Ο αισθητήρας αυτός χρησιμοποιήθηκε έπειτα για να προσδιοριστεί η ύπαρξη υπολειπόμενων τάσεων σε χαλύβδινο δείγμα, μετρώντας την ηλεκτρική τάση στο πηνίο λήψης του. Υλοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε ο χρήστης να μπορεί μέσω του υπολογιστή, με χρήση του λογισμικού Arduino IDE, να καθορίζει τη συχνότητα και το πλάτος του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο διέγερσης. Επίσης, κατασκευάστηκε κατάλληλο κύκλωμα το οποίο δειγματοληπτεί και συλλέγει τις τιμές των τάσεων του πηνίου λήψης και τις εμφανίζει στο λογισμικό Arduino IDE. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα αυτές οι τιμές να αποθηκευτούν και έπειτα να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία.



Σχήμα 32: Ο αισθητήρας μαγνητικής διαπερατότητας που κατασκευάστηκε

3.2 Ολοκληρωμένα εξαρτήματα

Πριν πραγματοποιηθεί η ανάλυση του συνολικού κυκλώματος του πειραματικού μέρους, θα περιγραφούν ξεχωριστά τα ολοκληρωμένα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν:

3.2.1 WeMos Lolin32

Το WeMos Lolin32 είναι μια συμπαγής και ευέλικτη αναπτυξιακή πλακέτα που βασίζεται στον μικροελεγκτή ESP32. Αποτελεί μέρος της σειράς WeMos D1, η οποία είναι συμβατή με το Arduino και το MicroPython, καθιστώντας την δημοφιλή επιλογή για εφαρμογές ηλεκτρονικών αισθητήρων, ενεργοποιητών και οθονών. Αποτελείται από έναν διπύρηνο επεξεργαστή (Xtensa LX6), η συχνότητα του οποίου φτάνει έως και τα 240MHz. Διαθέτει 520 KB SRAM και 4 MB μνήμη flash για αποθήκευση προγραμματιστικών δεδομένων. Επίσης διαθέτει 19 ψηφιακές ακίδες εισόδου/εξόδου, μερικές από τις οποίες υποστηρίζουν λειτουργίες SPI, PWM, I2C, καθώς και 9 αναλογικές ακίδες εισόδου, οι οποίες λειτουργούν ως 12-bit analog-to-digital converters (ADC). Λειτουργεί με τάση 3.3V την οποία λαμβάνει μέσω μίας θύρας micro-usb, η οποία πέρα από αυτό χρησιμοποιείται για την φόρτωση προγραμμάτων στην πλακέτα. Η πλακέτα μπορεί να προγραμματιστεί χρησιμοποιώντας το Arduino IDE με τον πυρήνα ESP32, το ESP-IDF για πιο προηγμένες εφαρμογές ή το MicroPython για απλούστερες [45].

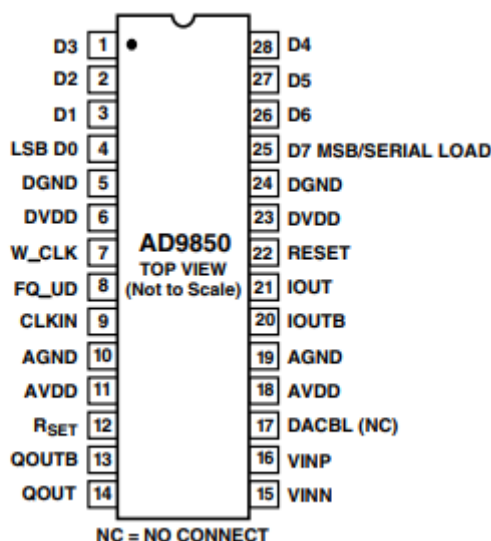


Σχήμα 33: Διαμόρφωση των ακίδων του Wemos Lolin32

3.2.2 AD9850

Η πλακέτα AD9850 είναι ένα υψηλού βαθμού ολοκληρωμένο CMOS τσιπ που λειτουργεί ως πλήρες Direct Digital Synthesizer (DDS) με ενσωματωμένο 10-bit digital-to-analog converter (DAC). Έχει σχεδιαστεί για να παράγει αναλογικά σήματα εξόδου υψηλής συχνότητας, υψηλής ανάλυσης με ακριβή έλεγχο συχνότητας και φάσης. Είναι ικανό να παράγει συχνότητες εξόδου έως και 125 MHz, καθιστώντας το κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών αισθητήρων και επικοινωνιών. Προσφέρει 32 bit ανάλυση συντονισμού συχνότητας, επιτρέποντας πολύ μικρά βήματα συχνότητας (έως 0,0291 Hz σε συχνότητα ρολογιού 125 MHz). Η συσκευή παρέχει επίσης 5-bit ψηφιακά ελεγχόμενη διαμόρφωση φάσης, η οποία επιτρέπει τη μετατόπιση της φάσης εξόδου σε βήματα των 180°, 90°, 45°, 22,5°, 11,25° και οποιονδήποτε συνδυασμό αυτών. Το ενσωματωμένο 10-bit DAC παρέχει ένα καθαρό αναλογικό σήμα εξόδου, το οποίο μπορεί να φιλτραριστεί για να παράγει ένα ημιτονοειδές ή τετραγωνικό σήμα. Οι παράμετροι συντονισμού συχνότητας, ελέγχου και διαμόρφωσης φάσης μπορούν να φορτωθούν στον AD9850 είτε

μέσω παράλληλης είτε μέσω σειριακής φόρτωσης. Η πλακέτα λειτουργεί με μία τροφοδοσία των 5V ή των 3,3V , με τυπική κατανάλωση ισχύος 380 mW στα 125 MHz. Όλα τα παραπάνω καθιστούν την πλακέτα AD9850 ένα ευέλικτο και ευρέως χρησιμοποιούμενο τσιπ, ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν ακριβή έλεγχο συχνότητας και φάσης με ελάχιστα εξωτερικά εξαρτήματα [46].

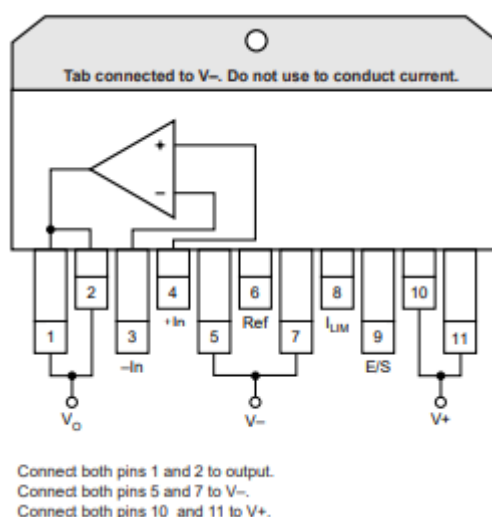


Σχήμα 34: Διαμόρφωση των ακίδων του AD9850 [46].

3.2.3 OPA549

Ο OPA549 είναι ένας τελεστικός ενισχυτής υψηλής τάσης, υψηλού ρεύματος που σχεδιάστηκε από την Texas Instruments. Είναι σε θέση να παρέχει υψηλό ρεύμα εξόδου και να λειτουργεί σε υψηλά επίπεδα τάσης, καθιστώντας τον κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που απαιτούν σημαντική ενίσχυση ισχύος. Μπορεί να παρέχει συνεχές ρεύμα εξόδου έως και 8A καθώς και στιγμιαίο ρεύμα έως 10A. Διαθέτει ενσωματωμένη προστασία θερμικής απενεργοποίησης για την αποφυγή ζημιών από υπερθέρμανση. Η συσκευή περιλαμβάνει μια ακίδα ILIM που δίνει την δυνατότητα να ρυθμίζεται το όριο του ρεύματος εξόδου από 0 έως 10A. Αυτό επιτυγχάνεται συνδέοντας μια εξωτερική αντίσταση κατάλληλης τιμής ή έναν DAC (που θα παρέχει την κατάλληλη τάση) στην ακίδα. Έτσι ο ενισχυτής και το φορτίο προστατεύονται από συνθήκες υπερέντασης. Επίσης διαθέτει μία ακίδα E/S η οποία

απενεργοποιεί την εξόδου του ενισχυτή. Αυτό επιτυγχάνεται θέτοντας την διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακίδων E/S και REF στην τιμή λογικό 0 (όχι πάνω από 0,8V). Για κανονική λειτουργία, αυτή η τάση πρέπει να τεθεί στην τιμή λογικό 1 (τουλάχιστον 2,4V). Η ακίδα E/S λειτουργεί ακόμα ως μια θερμική προειδοποιητική σημαία για να υποδεικνύει πότε η συσκευή πλησιάζει τα όρια θερμοκρασίας της. Με slew rate 9 V/ μ s, ο OPA549 μπορεί να ανταποκριθεί γρήγορα σε αλλαγές στο σήμα εισόδου, καθιστώντας τον κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας. Λειτουργεί σε ένα ευρύ φάσμα τάσης τροφοδοσίας από ± 4 V έως ± 30 V (ή 8V έως 60V με μονή παροχή) [47].

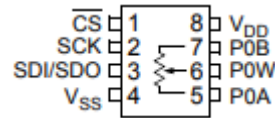


Σχήμα 35: Διαμόρφωση ακίδων του OPA549 [47].

3.2.4 MCP4131

Το MCP4131 της Microchip είναι ένα ψηφιακό ποτενσιόμετρο, το οποίο είναι μια συσκευή στερεάς κατάστασης που μιμείται τη λειτουργικότητα ενός παραδοσιακού μηχανικού ποτενσιόμετρου. Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε στο πειραματικό μέρος ήταν ικανό να παρέχει αντίσταση από 0 έως και 10k Ω , με 129 επίπεδα αντίστασης για δυνατότητα ακριβούς ελέγχου της τιμής της. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί κάνοντας τις ακίδες POW και POB (ή POA) να λειτουργούν ως τα άκρα της αντίστασης και αφήνοντας την ακίδα POA (ή POB) στον αέρα. Για ομαλή λειτουργία της συσκευής τα δυναμικά των ακίδων που λειτουργούν ως τα άκρα της

αντίστασης πρέπει να βρίσκονται μεταξύ των τιμών τροφοδοσίας. Η συσκευή επικοινωνεί μέσω σειριακής περιφερειακής διεπαφής (SPI), καθιστώντας εύκολη την ενσωμάτωση με μικροελεγκτές και άλλα ψηφιακά συστήματα. Λειτουργεί σε εύρος τάσης, από 2,7V έως 5,5V, καθιστώντας την κατάλληλη για συστήματα 3,3V και 5V [48].



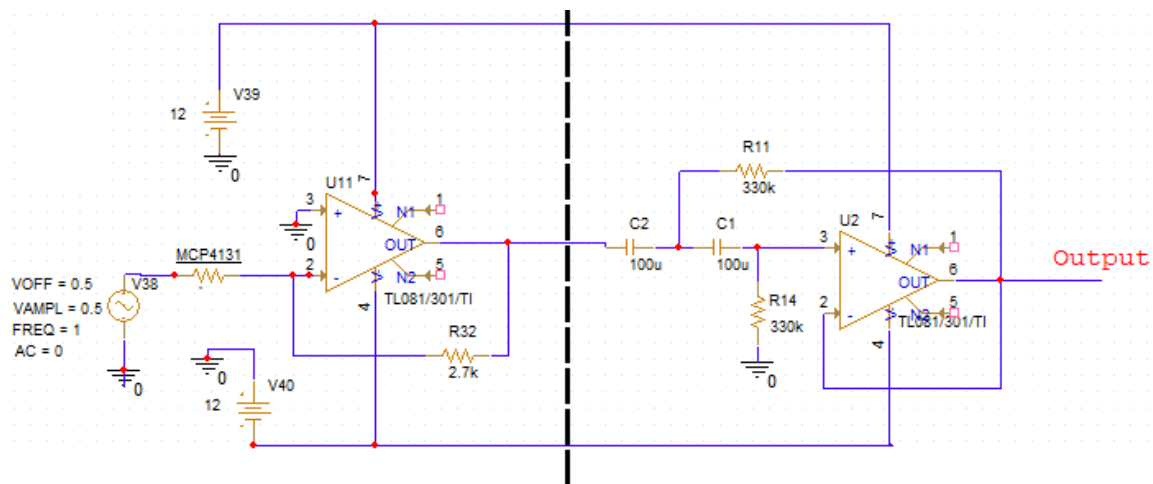
Σχήμα 36: Διαμόρφωση ακίδων του MCP4131 [48].

3.2.5 TL081

Ο TL081 είναι ένας δημοφιλής τελεστικός ενισχυτής τύπου JFET που χρησιμοποιείται σε αναλογικά κυκλώματα λόγω της υψηλής αντίστασης εισόδου, του χαμηλού θορύβου, του υψηλού ρυθμού μεταβολής εξόδου (slew rate = 20V/μs) και εύρους ζώνης κέρδους (gain bandwidth = 3MHz) του [49].

3.3.2 Κύκλωμα διέγερσης

Αρχικά έγιναν οι κατάλληλες συνδέσεις στις ακίδες των πλακετών Wemos Lolin32 και AD9850, ώστε μέσω της πρώτης να φορτώνεται η επιθυμητή συχνότητα στην τελευταία, σε λειτουργία σειριακής φόρτωσης. Για να επιτευχθεί αυτό, γράφτηκε κατάλληλο πρόγραμμα για το Wemos Lolin32 στο λογισμικό Arduino IDE και ο χρήστης μπορούσε να αλλάζει την συχνότητα μέσω του Serial Monitor. Το σήμα εξόδου του AD9850 ήταν της μορφής $V_0(1 + \sin(2\pi ft))$, όπου $V_0=0.5V$. Έπειτα το σήμα αυτό εφαρμόστηκε ως είσοδος στο παρακάτω κύκλωμα:



Σχήμα 38: Στάδιο ενίσχυσης τάσης και αποκοπής της DC συνιστώσας της

Το πρώτο στάδιο είναι ένας αναστρέφων ενισχυτής. Η πηγή τάσης αντιστοιχεί στην έξοδο του AD9850 και όπως φαίνεται αυτή αρχικά διοχετεύεται στο ψηφιακό ποτενσιόμετρο MCP4131. Ο MCP4131 επιλέχθηκε προκειμένου ο αναστρέφων ενισχυτής να λειτουργεί με μεταβαλλόμενο κέρδος και η τιμή της αντίστασης του φορτώνεται μέσω της πλακέτας Wemos Lolin32 με χρήση του πρωτοκόλλου SPI. Το κέρδος του ενισχυτή είναι:

$$G_a = - \frac{2.7k\Omega}{R_p} \quad 3.1$$

Όπου:

Ga – το κέρδος του αναστρέφων ενισχυτή

Rp – η τιμή της αντίστασης του MCP4131

Η έξοδος αυτού του ενισχυτή περνάει στην είσοδο ενός υψιπερατού φίλτρου 2^{ου} βαθμού τύπου Sallen – Key. Για τη συνάρτηση μεταφοράς αυτού του φίλτρου ισχύει:

$$H(j\omega) = \frac{j\omega(R11)(C2)}{\frac{R11}{R14} \left(1 + \frac{C2}{C1}\right) + j\omega(R11)(C2) + \frac{1}{j\omega(R14)(C1)}} \quad 3.2$$

Όπου:

H(jω) – η συνάρτηση μεταφοράς του υψιπερατού φίλτρου

ω – η κυκλική συχνότητα

R11, R14, C1, C2 – οι αντίστοιχες τιμές αντιστάσεων και πυκνωτών όπως φαίνονται στο παραπάνω σχήμα

Όπως μαρτυρά το παραπάνω κύκλωμα, οι τιμές των αντιστάσεων και των πυκνωτών του φίλτρου επιλέχθηκαν έτσι ώστε R11 = R14 = 330kΩ και C1 = C2 = 100μF. Αν συμβολίσουμε την κοινή τιμή των δύο αυτών αντιστάσεων με R και την κοινή τιμή των δύο αυτών πυκνωτών με C, τότε για το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς, που αποτελεί το κέρδος τάσης του φίλτρου, ισχύει:

$$Gf(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{\omega RC}{\sqrt{2^2 + \left(\omega RC - \frac{1}{\omega RC}\right)^2}} \quad 3.3$$

Όπου:

Gf(ω) – το κέρδος τάσης του υψιπερατού φίλτρου

H(jω) - η συνάρτηση μεταφοράς του υψιπερατού φίλτρου

ω – η κυκλική συχνότητα

R – η κοινή τιμή των αντιστάσεων R11 και R14

C - η κοινή τιμή των πυκνωτών C1 και C2

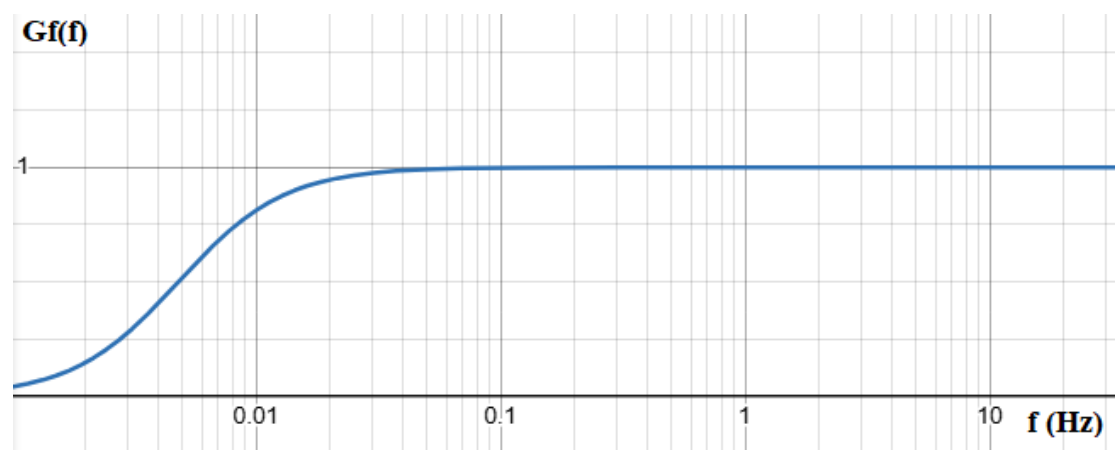
Αντικαθιστώντας τις τιμές R και C με αυτές που πραγματικά τις αντιστοιχούν και θέτοντας $\omega = 2\pi f$, λαμβάνουμε:

$$Gf(f) = \frac{66\pi f}{\sqrt{4 + \left(66\pi f - \frac{1}{66\pi f}\right)^2}} \quad 3.4$$

Όπου:

$Gf(f)$ – το κέρδος πλάτους του υψιπερατού φίλτρου

f – η συχνότητα

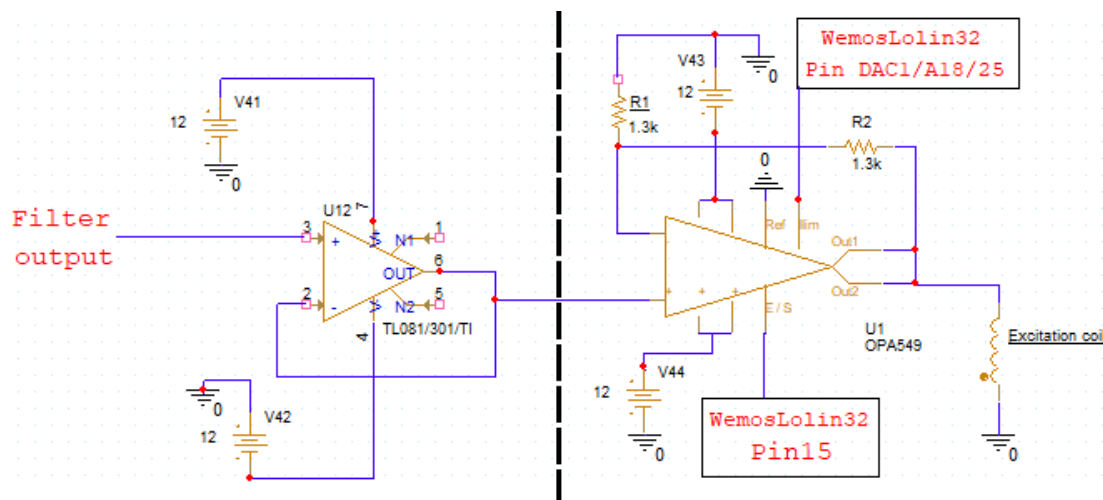


Σχήμα 39: Γραφική παράσταση του κέρδους τάσης του φίλτρου ως συνάρτηση της συχνότητας, όπου ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα

Η συχνότητα αποκοπής f_c του φίλτρου βρίσκεται θέτοντας το κέρδος πλάτους ίσο με $1/\sqrt{2}$ και λύνοντας την εξίσωση 3.4 ως τη συχνότητα. Τελικά προκύπτει $f_c = 7.49\text{mHz}$. Οι τιμές των κυκλωματικών στοιχείων του φίλτρου επιλέχθηκαν τέτοιες ώστε η συχνότητα αποκοπής f_c να είναι μικρότερη από οποιαδήποτε από τις συχνότητες στις οποίες θα λειτουργούσε το πηνίο διέγερσης του αισθητήρα, οι οποίες βρίσκονταν στο διάστημα $[0.1\text{Hz}, 10\text{Hz}]$. Το υψιπερατό φίλτρο χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να αποκόψει την DC συνιστώσα τάσης

που παράγαγε ο AD9850. Επίσης, για $0.1\text{Hz} \leq f \leq 10\text{Hz}$, από την παραπάνω γραφική παράσταση προκύπτει ότι $Gf \approx 1$.

Η έξοδος του υπερπαρατονίου φίλτρου διοχετεύεται στο παρακάτω κύκλωμα:



Σχήμα 40: Στάδιο αποκοπής ρεύματος και ενίσχυσης ισχύος

Αρχικά αποκόπτονται τα ανεπιθύμητα ρεύματα μέσω ενός ακόλουθου τάσης και έπειτα το σήμα ενισχύεται μέσω ενός μη αναστρέφοντος ενισχυτή κέρδους τάσης $G_o = 2$. Το φορτίο στην έξοδο του τελευταίου είναι το πηνίο διέγερσης του αισθητήρα. Ο μη αναστρέφων ενισχυτής υλοποιείται με χρήση ενός OPA549 και ο κύριος ρόλος του δεν είναι να προκαλεί ενίσχυση τάσης αλλά να λειτουργεί ως πηγή ρεύματος ικανή να προσφέρει ισχυρά ρεύματα στο πηνίο διέγερσης. Επίσης, όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, στον OPA549 η ακίδα E/S η οποία απενεργοποιεί την έξοδο του ενισχυτή και η ακίδα Ilim που καθορίζει την μέγιστη τιμή ρεύματος στην έξοδό του είναι συνδεδεμένες με κατάλληλες ακίδες του Wemos Lolin32. Έτσι, ο χρήστης μέσω του Serial Monitor του λογισμικού Arduino IDE μπορεί να απενεργοποιεί ή να ενεργοποιεί την έξοδο του OPA549 ανάλογα με τις ανάγκες του και μπορεί επίσης να καθορίζει το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να παράξει αυτός ο ενισχυτής.

3.3.3 Πηνίο διέγερσης



Σχήμα 41: Το πηνίο διέγερσης του αισθητήρα

Το πηνίο διέγερσης του αισθητήρα υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας χάλκινο σύρμα διαμέτρου 0.5mm και αποτελείται από 180 τυλίγματα που τυλίχθηκαν με το χέρι πάνω σε μία 3D εκτυπωμένη θήκη, σε 6 στρώσεις. Η εμπέδηση του μετρήθηκε να είναι ίση με 3Ω.

Συμβολίζοντας την εμπέδηση του πηνίου διέγερσης με R_{ec} , το ρεύμα του, σύμφωνα με την ανάλυση της προηγούμενης ενότητας, προκύπτει ίσο με:

$$I_{ec}(t) = \frac{V_o * G_a * G_f * G_o * \sin(2\pi ft)}{R_{ec}} \rightarrow \quad 3.5$$

$$I_{ec}(t) = -\frac{900V}{R_p} \sin(2\pi ft)$$

Όπου:

V_o - το πλάτος τάσης της εξόδου του AD9850

G_a – το κέρδος του αναστρέφοντος ενισχυτή

G_f – το κέρδος πλάτους του υπερπαρατού φίλτρου

G_o – το κέρδος του μη αναστρέφων ενισχυτή

R_p – η τιμή της αντίστασης του MCP4131

R_{ec} - η τιμή της εμπίδησης του πηνίου διέγερσης

f – η συχνότητα της τάσης εξόδου που παράγει ο AD9850

3.3.4 Σιδηρομαγνητικός πυρήνας



Σχήμα 42: Ο σιδηρομαγνητικός πυρήνας του αισθητήρα

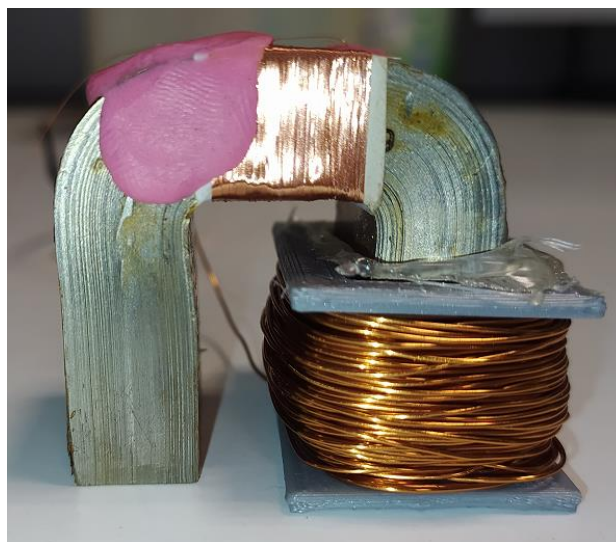
Για τον πυρήνα του αισθητήρα επιλέχθηκε το μοντέλο AMCC-25 της εταιρείας Metglas. Οι διαστάσεις του είναι $41 \times 25 \times 41 \text{ mm}^3$. Αποτελείται από μεγάλο αριθμό στρώσεων μαλακού σιδηρομαγνητικού υλικού, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι απώλειες λόγω δινορρευμάτων. Επίσης, η μεγάλη τιμή μαγνητικής επαγωγής κορεσμού του, που ισούται με 1.56 T , τον καθιστούν κατάλληλο για εφαρμογές υψηλών πεδίων. Τέλος, χαρακτηρίζεται από μειωμένες απώλειες πυρήνα.

3.3.5 Πηνίο λήψης



Σχήμα 43: Το πηνίο λήψης του αισθητήρα

Το πηνίο λήψης του αισθητήρα υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας χάλκινο σύρμα διαμέτρου 0.1mm και αποτελείται από 130 τυλίγματα που τυλίχθηκαν με το χέρι πάνω στον πυρήνα σε 1 στρώση, με τη μεσολάβηση μονωτικού υλικού ενδιάμεσά τους. Η εμπέδηση του μετρήθηκε να είναι ίση με 25.2Ω.



Σχήμα 44: Ο πυρήνας μαζί με τα πηνία διέγερσης και λήψης

3.3.6 Χαλύβδινο δείγμα



Σχήμα 45: Το χαλύβδινο δείγμα στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις

Το χαλύβδινο δείγμα στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είναι ηλεκτρικός χάλυβας διαστάσεων 30cm x 3cm x 0.55mm. Οι μετρήσεις έγιναν αρχικά σε μία περιοχή του όπου ήταν γνωστό ότι οι υπολειπόμενες τάσεις απουσίαζαν. Έπειτα έγιναν μετρήσεις σε μία δεύτερη περιοχή του η οποία είχε θερμανθεί με χρήση RF heater. Το ισχυρό μαγνητικό πεδίο του RF heater προκαλεί δινορρεύματα στον αγωγίμο χάλυβα, με αποτέλεσμα αυτός να θερμαίνεται τοπικά και να δημιουργούνται υπολειπόμενες τάσεις στην περιοχή που θερμάνθηκε.

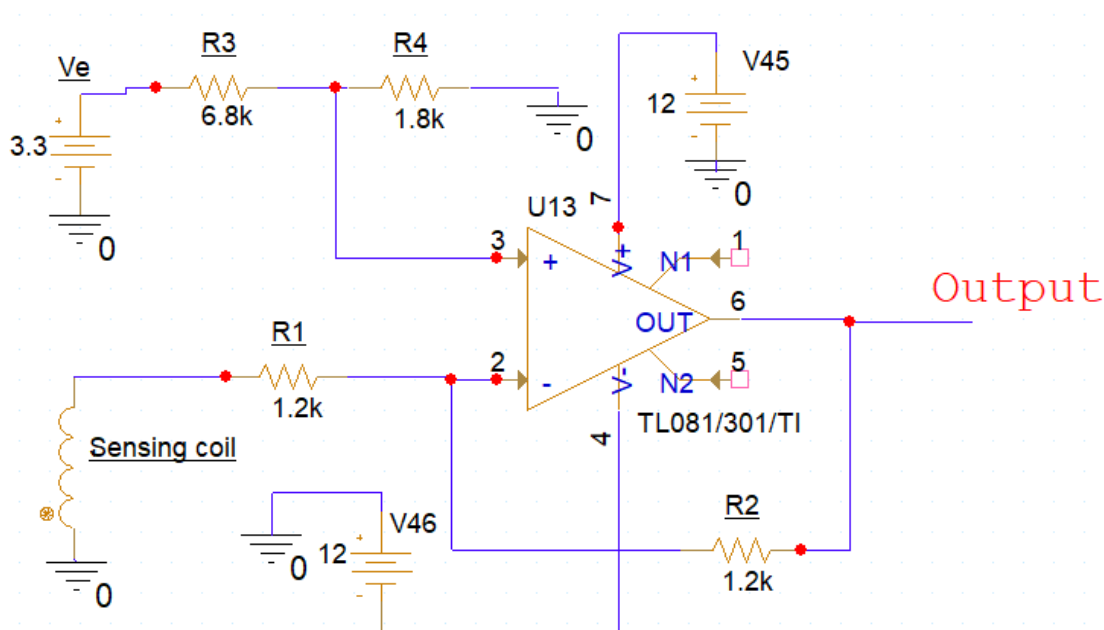


Σχήμα 46: Οι δύο περιοχές του χάλυβα στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Το μαύρο βέλος δείχνει την περιοχή όπου οι παραμένουσες τάσεις απουσιάζουν, ενώ το κόκκινο δείχνει αυτήν όπου οι παραμένουσες τάσεις υπάρχουν

3.3.7 Κύκλωμα λήψης

Η τάση στα άκρα του πηνίου λήψης, σύμφωνα με την εξίσωση 2.29, μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε την ύπαρξη υπολειπόμενων τάσεων στο χαλύβδινο δείγμα. Οι τιμές αυτής της τάσης διαβάζονται από την πλακέτα Wemos Lolin32 και έπειτα εμφανίζονται στον Serial Monitor του λογισμικού Arduino IDE. Οι ακίδες input της Wemos Lolin32 επιτρέπεται να δέχονται τάσεις από

τιμές 0 έως 3.3V. Επίσης η τάση στα άκρα του πηνίου λήψης παρουσιάζει εν γένη και θετικές και αρνητικές τιμές. Για τους δύο παραπάνω λόγους μεταξύ του πηνίου λήψης και της ακίδας της Wemos Lolin32 (η οποία επιλέχθηκε να είναι η ακίδα UP) που διαβάζει τις τιμές των τάσεων του μεσολαβεί ένα κατάλληλο κύκλωμα λήψης. Αρχικά η τάση του πηνίου λήψης διοχετεύεται στο ακόλουθο κύκλωμα:



Σχήμα 47: Στάδιο προσθήκης DC συνιστώσας τάσης

Αν η τάση του πηνίου λήψης συμβολιστεί με V_{sc} , τότε για την τάση εξόδου V_o του παραπάνω κυκλώματος ισχύει:

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_{sc} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_e \quad 3.6$$

Όπου:

V_o – η τάση εξόδου του παραπάνω κυκλώματος

V_{sc} – η τάση του πηνίου λήψης

V_e – τάση 3.3V που προέρχεται από την ακίδα 3V της πλακέτας Wemos Lolin32

R1, R2, R3, R4 – οι τιμές των αντιστάσεων όπως φαίνονται στο παραπάνω σχήμα

Αντικαθιστώντας τις τιμές R1, R2, R3, R4 με αυτές που λαμβάνουν στην πραγματικότητα, προκύπτει:

$$V_o = -V_{sc} + 1.38V \quad 3.7$$

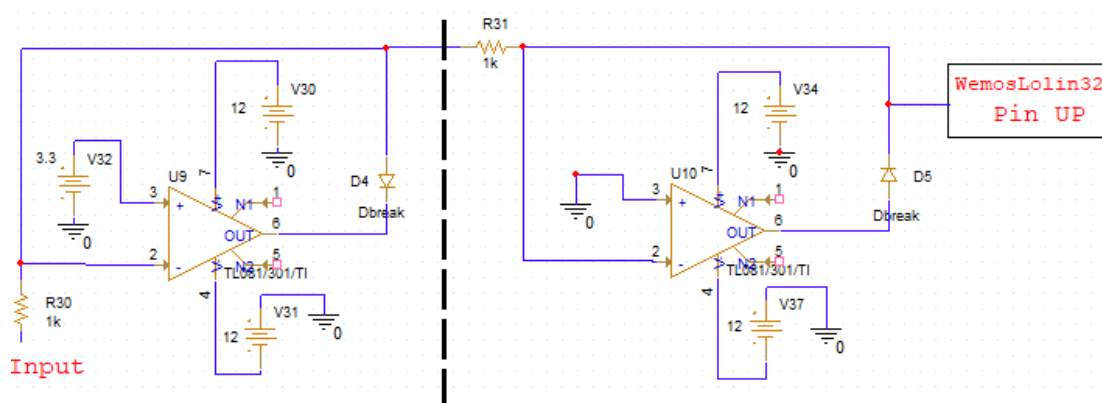
Όπου:

V_o – η τάση εξόδου του παραπάνω κυκλώματος

V_{sc} – η τάση του πηνίου λήψης

Ο κύριος λόγος που χρησιμοποιήθηκε το παραπάνω κύκλωμα ήταν για να προσθέσει μία DC συνιστώσα τάσης σε αυτήν του πηνίου λήψης, ώστε το τελικό σήμα να μην λαμβάνει αρνητικές τιμές.

Έπειτα το σήμα διοχετεύεται στην είσοδο του παρακάτω κυκλώματος.



Σχήμα 48: Κύκλωμα προστασίας από υπερτάσεις και υποτάσεις

Το κύκλωμα που βρίσκεται αριστερά της μαύρης διακεκομμένης γραμμής λειτουργεί ως εξής. Όταν το δυναμικό στον ακροδέκτη – του τελεστικού ενισχυτή είναι πάνω από 3.3V, η έξοδος του λαμβάνει την τιμή $V_{ee} = -12V$, οπότε η διόδος είναι ορθά πολωμένη. Συνεπώς αυτή λειτουργεί ως ανάδραση και άρα το δυναμικό στον ακροδέκτη + του τελεστικού ενισχυτή θα ισούται με αυτό στον ακροδέκτη –. Οπότε η τάση 3.3V της πηγής τάσης V32 περνάει στην έξοδο του κυκλώματος. Τώρα, όταν το δυναμικό στον ακροδέκτη – του

τελεστικού ενισχυτή είναι κάτω από 3.3V, η έξοδος του λαμβάνει την τιμή $V_{cc} = +12V$ και η διόδος πολώνεται ανάστροφα. Έτσι η τάση εισόδου (input), μεταβαίνει στην έξοδο του κυκλώματος. Συνεπώς το συγκεκριμένο κύκλωμα επιτρέπει στην έξοδο του να εμφανιστούν μόνο τάσεις μικρότερες της τιμής 3.3V.

Το κύκλωμα που βρίσκεται δεξιά της μαύρης διακεκομμένης γραμμής λειτουργεί ως εξής. Όταν το δυναμικό στον ακροδέκτη – του τελεστικού ενισχυτή είναι κάτω από 0V, η έξοδος του λαμβάνει την τιμή $V_{cc} = +12V$, οπότε η διόδος είναι ορθά πολωμένη. Συνεπώς αυτή λειτουργεί ως ανάδραση και άρα το δυναμικό στον ακροδέκτη + του τελεστικού ενισχυτή θα ισούται με αυτό στον ακροδέκτη –. Οπότε η τάση 0V της πηγής τάσης στον ακροδέκτη + του τελεστικού ενισχυτή περνάει στην έξοδο του κυκλώματος. Τώρα, όταν το δυναμικό στον ακροδέκτη – του τελεστικού ενισχυτή είναι πάνω από 0V, η έξοδος του λαμβάνει την τιμή $V_{ee} = -12V$ και η διόδος πολώνεται ανάστροφα. Έτσι η τάση εισόδου του κυκλώματος μεταβαίνει στην έξοδο του, που είναι η ακίδα UP της πλακέτας Wemos Lolin32, η οποία διαβάζει αυτές τις τιμές τάσης. Συνεπώς το συγκεκριμένο κύκλωμα επιτρέπει στην έξοδο του να εμφανιστούν μόνο τάσεις μεγαλύτερες της τιμής 0V.

Έτσι γίνεται κατανοητό ότι το συνολικό κύκλωμα του παραπάνω σχήματος προστατεύει την ακίδα UP της πλακέτας Wemos Lolin32 από τάσεις πάνω από 3.3V και κάτω από 0V.

3.4 Μετρήσεις

3.4.1 Ανάλυση της διαδικασίας των μετρήσεων

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε περιοχή του χαλύβδινου δείγματος όπου απουσίαζαν οι υπολειπόμενες τάσεις.

Στην αρχή το πηνίο διέγερσης τροφοδοτήθηκε με ρεύμα σταθερού πλάτους 0.5A και μέσω της πλακέτας Wemos Lolin32, συλλέχθηκαν οι τιμές της τάσης του πηνίου λήψης για κάθεμία από τις ακόλουθες συχνότητες ρεύματος: 0.1Hz, 0.2Hz, 0.3Hz, 0.4Hz, 0.5Hz, 0.6Hz, 0.7Hz, 0.8Hz, 0.9Hz, 1Hz, 1.5Hz, 2Hz, 2.5Hz, 3Hz, 5Hz, 7Hz και 10Hz.

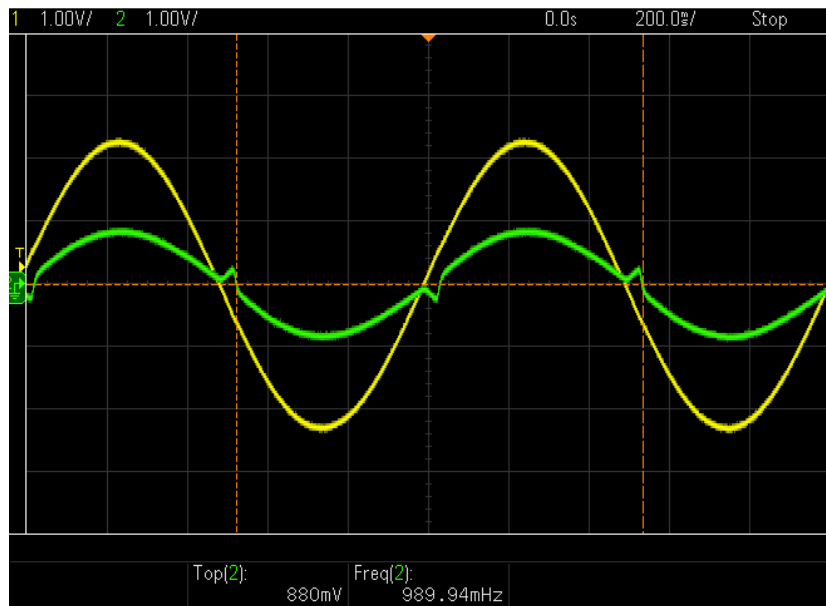
Έπειτα το πηνίο διέγερσης τροφοδοτήθηκε με ρεύμα σταθερής συχνότητας 0.5Hz και μέσω της πλακέτας Wemos Lolin32, συλλέχθηκαν οι τιμές της τάσης του πηνίου λήψης για καθένα από τα ακόλουθα πλάτη ρεύματος του πηνίου διέγερσης: 0.2A, 0.4A, 0.6A, 0.8A, 1A, 1.2A, 1.4A.

Στη συνέχεια παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε με τη διαφορά ότι το πηνίο διέγερσης τροφοδοτήθηκε με ρεύμα σταθερής συχνότητας 1Hz.

Έπειτα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε περιοχή του χαλύβδινου δείγματος όπου ήταν γνωστό ότι υπήρχαν παραμένουσες τάσεις. Μέσω της πλακέτας Wemos Lolin32, συλλέχθηκαν οι τιμές της τάσης του πηνίου λήψης για τα ακόλουθα ζεύγη τιμών συχνότητας και πλάτους ρεύματος του πηνίου διέγερσης: (0.5Hz, 0.6A), (0.5Hz, 1A), (1Hz, 0.6A), (1Hz, 1A).

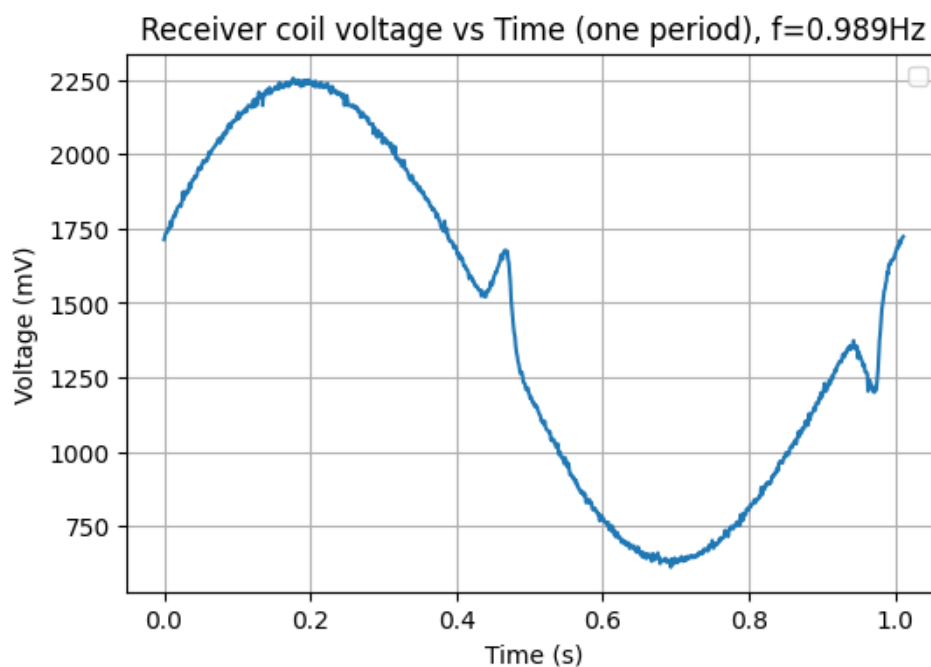
Οπότε πραγματοποιήθηκαν συνολικά 35 μετρήσεις.

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά οι κυματομορφές που προέκυψαν σε μία συγκεκριμένη από αυτές, που έγινε σε περιοχή του δείγματος όπου οι παραμένουσες τάσεις απουσίαζαν, για πλάτος ρεύματος πηνίου διέγερσης 1A και συχνότητα 1Hz.



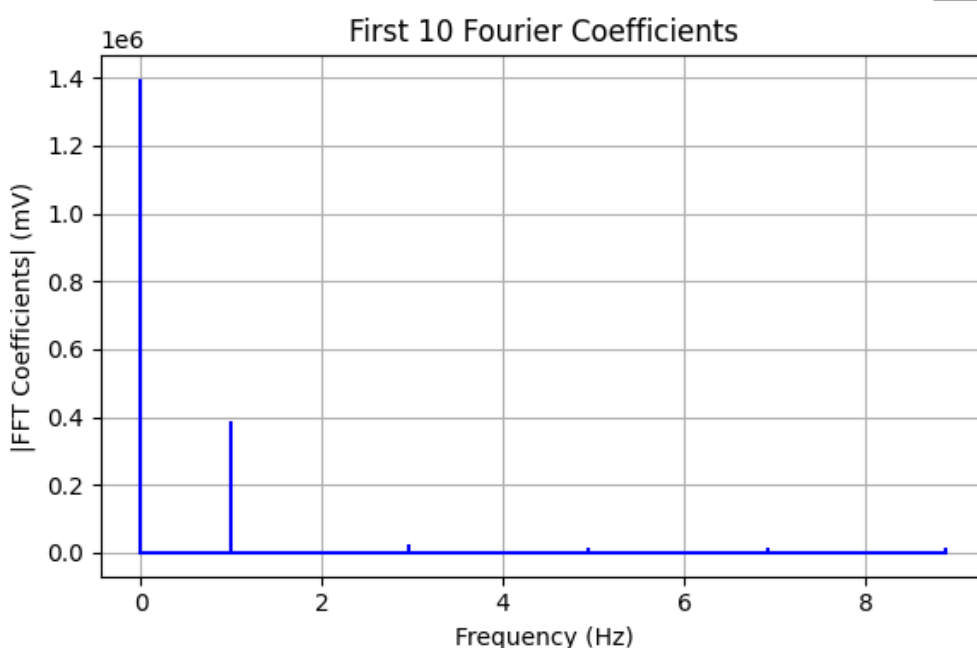
Σχήμα 49: Οι τάσεις των πηνίων όπως μετρήθηκαν στον παλμογράφο. Η κίτρινη κυματομορφή αντιστοιχεί στο πηνίο διέγερσης ενώ η πράσινη στο πηνίο λήψης

Οι τιμές των τάσεων που συλλεχθήκαν μέσω της πλακέτας Wemos Lolin32 επεξεργάστηκαν με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python, με τη βοήθεια της οποίας προέκυψε η παρακάτω καμπύλη:



Σχήμα 50: Η τάση στην ακίδα U_p της πλακέτας Wemos Lolin32

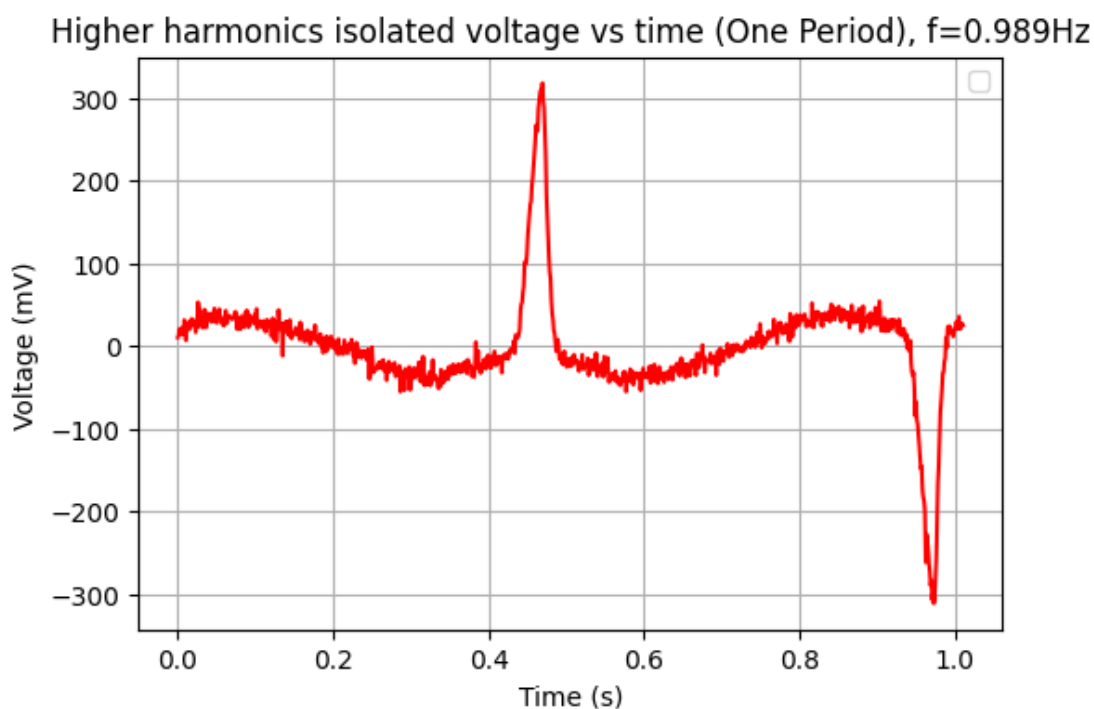
Η παραπάνω καμπύλη αντιστοιχεί στην τάση του πηνίου λήψης ανεστραμμένη, συν μία DC συνιστώσα τάσης ίση με 1.38V που προσθέτει το κύκλωμα λήψης του αισθητήρα, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.3.7. Η μορφή της σε γενικές γραμμές είναι ημιτονοειδής, υπάρχει όμως μία μικρή παραμόρφωση που προκαλείται από τις υψηλότερες αρμονικές. Εφόσον το πλάτος του ρεύματος του πηνίου διέγερσης καθώς και η συχνότητά του παραμένουν σταθερές, το μέγεθος αυτής της παραμόρφωσης είναι ακριβώς αυτό που μας βοηθάει να εκτιμήσουμε κατά πόσο πολύ η περιοχή του χαλύβδινου δείγματος πάσχει από υπολειπόμενες τάσεις. Οπότε, κρίθηκε εύλογο αυτή η παραμόρφωση να απομονωθεί προκειμένου να μπορεί να μελετηθεί ξεχωριστά. Για να επιτευχθεί αυτό, το παραπάνω σήμα αρχικά υπέστη Fourier ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας με χρήση της γλώσσας Python και σαν αποτέλεσμα προέκυψαν οι παρακάτω συντελεστές Fourier του:



Σχήμα 51: Τα μέτρα των πρώτων δέκα συντελεστών Fourier της τάσης στην ακίδα Up της πλακέτας Wemos Lolin32

Ο πρώτος συντελεστής Fourier αντιστοιχεί στην DC συνιστώσα τάσης του σήματος ενώ ο δεύτερος στην θεμελιώδη συχνότητα του. Όπως μαρτυρά το παραπάνω σχήμα οι δύο αυτοί συντελεστές είναι εκείνοι που ευθύνονται κυρίως για την διαμόρφωση του σήματος. Οι υπόλοιποι συντελεστές έχουν

μικρότερο μέτρο και αντιστοιχούν στις υψηλότερες αρμονικές. Το σήμα παραμόρφωσης λοιπόν, στο πεδίο της συχνότητας, θα έχει όλους τους συντελεστές Fourier του ίδιους με αυτούς του πρωταρχικού σήματος, με εξαίρεση των πρώτων δύο οι οποίοι θα ισούνται με 0. Γνωρίζοντας το μέτρο όλων των συντελεστών του, το σήμα παραμόρφωσης μπορεί να ανακατασκευαστεί στο πεδίο του χρόνου εφαρμόζοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier.



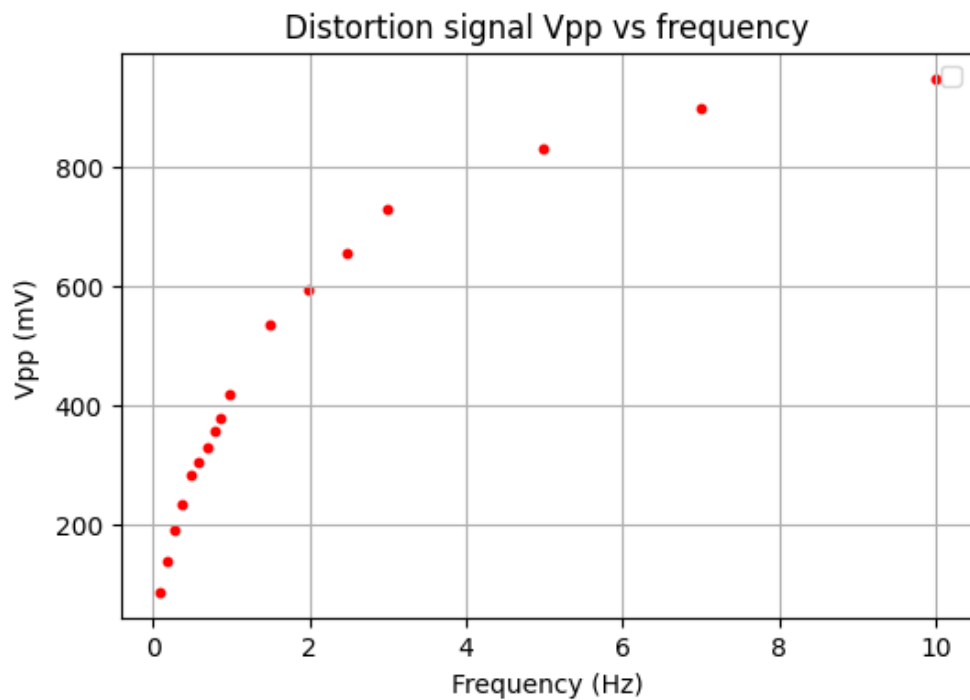
Σχήμα 52: Το σήμα παραμόρφωσης απομονωμένο στο πεδίο του χρόνου

Συγκρίνοντας της καμπύλες των σχημάτων 50 και 52, παρατηρούμε ότι οι απότομες μεταβολές της τάσης του σχήματος 52 πραγματοποιούνται τις ίδιες χρονικές στιγμές που η τάση του σχήματος 50 αποκλίνει από την γενικώς ημιτονοειδή μορφή της.

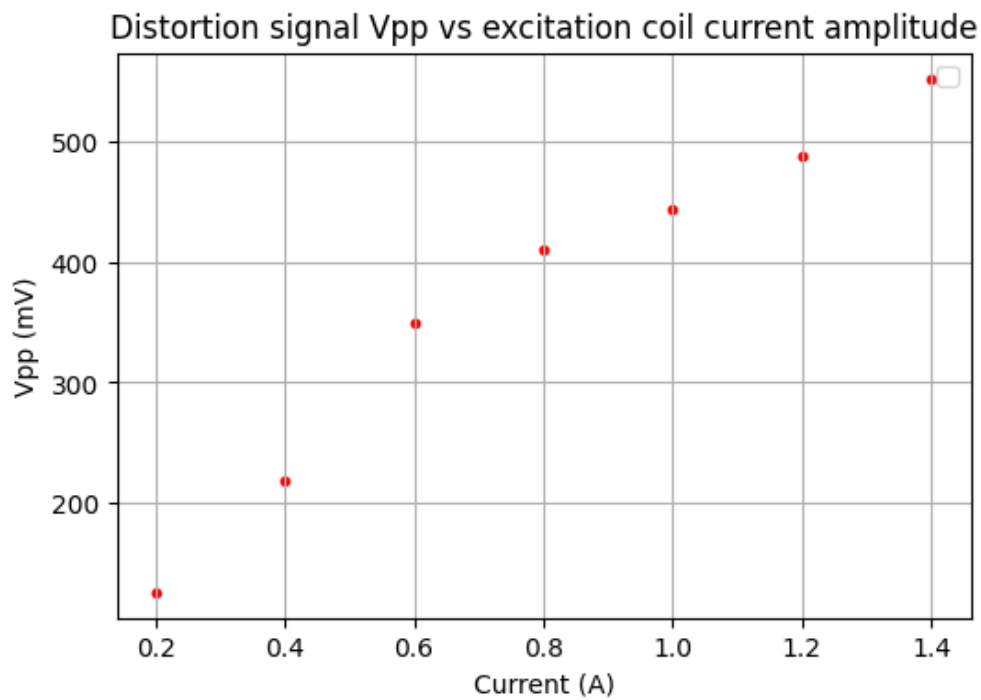
Τώρα πια που το σήμα παραμόρφωσης απομονώθηκε, η ανάλυση του καθίσταται αρκετά ευκολότερη, με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προκύψουν τα διαγράμματα της ακόλουθης ενότητας.

3.4.2 Τελικά διαγράμματα

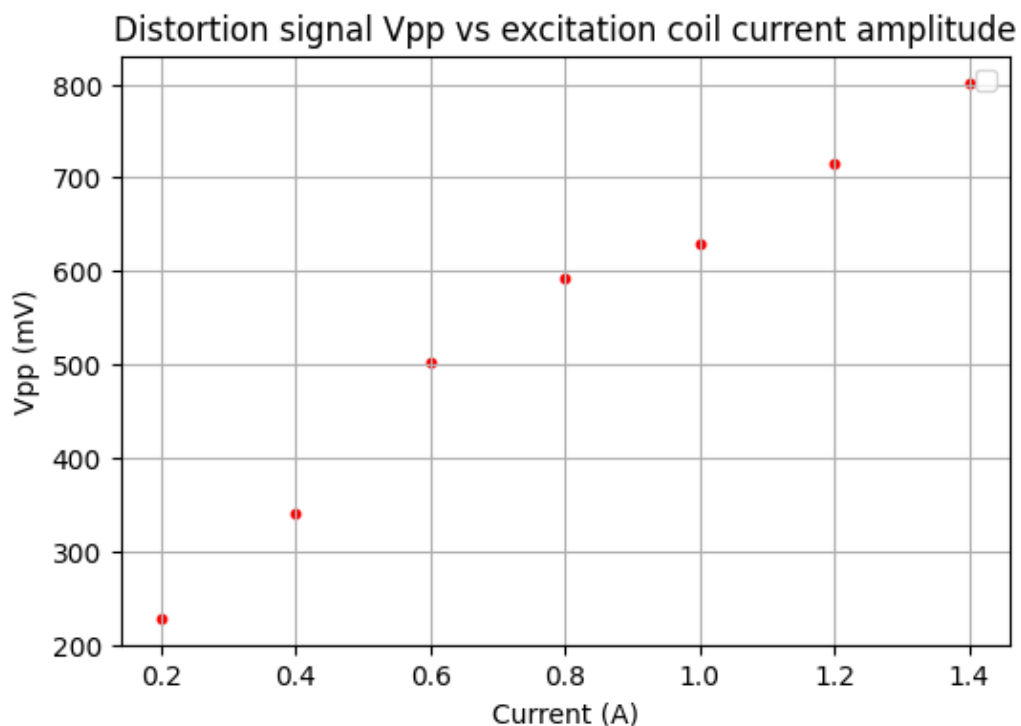
- Μετρήσεις στη περιοχή του χαλύβδινου δείγματος όπου οι υπολειπόμενες τάσεις απουσιάζουν:



Σχήμα 53: Γραφική παράσταση της τάσης από κορυφή σε κορυφή (Vpp) του σήματος παραμόρφωσης ως συνάρτηση της συχνότητας, για σταθερό πλάτος ρεύματος του πηνίου διέγερσης ίσο με 0.5A



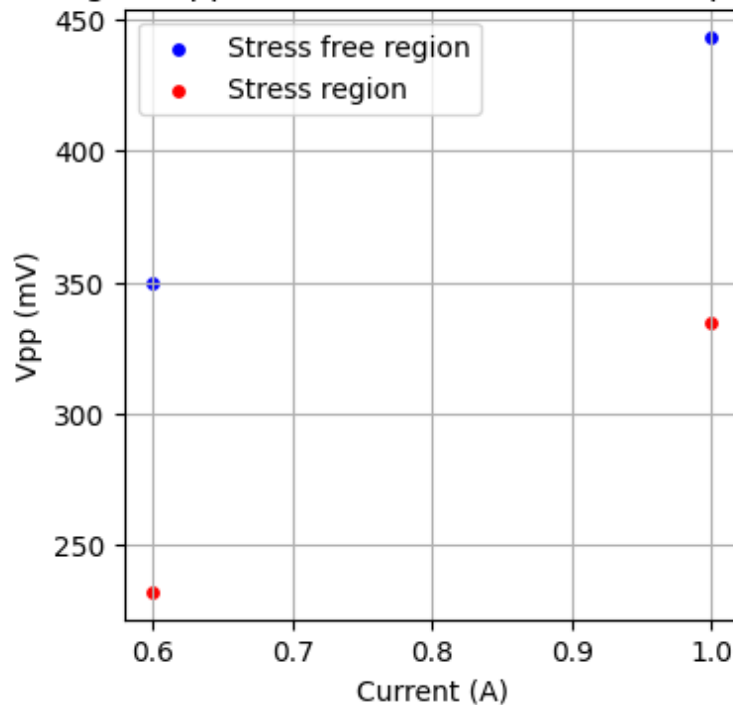
Σχήμα 54: Γραφική παράσταση της τάσης από κορυφή σε κορυφή (V_{pp}) του σήματος παραμόρφωσης ως συνάρτηση του πλάτους ρεύματος του πηνίου διέγερσης, για σταθερή συχνότητα 0.5Hz



Σχήμα 55: Γραφική παράσταση της τάσης από κορυφή σε κορυφή (V_{pp}) του σήματος παραμόρφωσης ως συνάρτηση του πλάτους ρεύματος του πηνίου διέγερσης, για σταθερή συχνότητα 1Hz

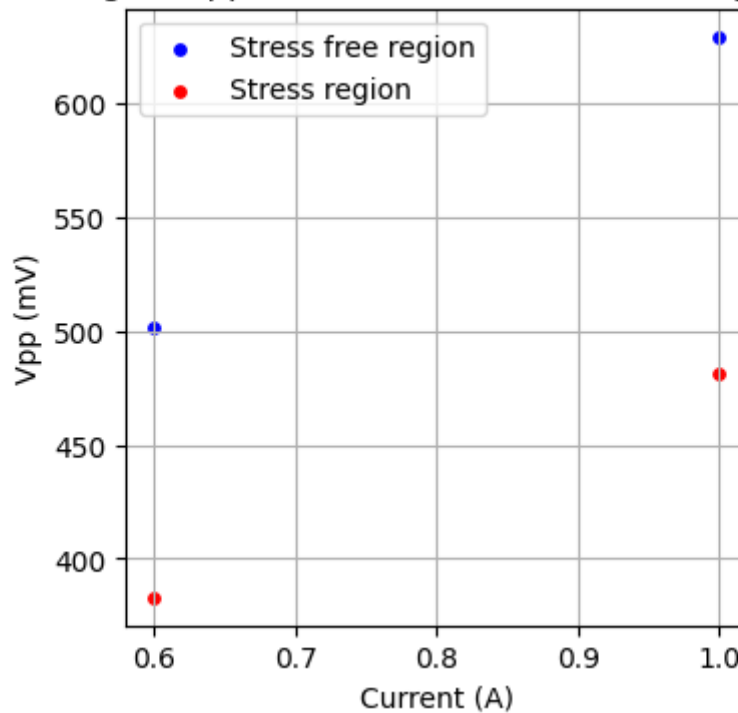
- Μετρήσεις στη περιοχή του χαλύβδινου δείγματος που παρουσιάζει υπολειπόμενες τάσεις

Distortion signal V_{pp} vs excitation coil current amplitude, $f=0.5\text{Hz}$



Σχήμα 56: Γραφική παράσταση της τάσης από κορυφή σε κορυφή (V_{pp}) του σήματος παραμόρφωσης ως συνάρτηση του πλάτους ρεύματος του πηνίου διέγερσης, για σταθερή συχνότητα 0.5Hz. Η κόκκινη γραφική αντιστοιχεί στην περιοχή του δείγματος όπου παρουσιάζονται παραμένουσες τάσεις, ενώ η μπλε σε εκείνη όπου αυτές απουσιάζουν

Distortion signal Vpp vs excitation coil current amplitude, f=1Hz



Σχήμα 57: Γραφική παράσταση της τάσης από κορυφή σε κορυφή (Vpp) του σήματος παραμόρφωσης ως συνάρτηση του πλάτους ρεύματος του πηνίου διέγερσης, για σταθερή συχνότητα 1Hz. Η κόκκινη γραφική αντιστοιχεί στην περιοχή του δείγματος όπου παρουσιάζονται παραμένουσες τάσεις, ενώ η μπλε σε εκείνη όπου αυτές απουσιάζουν

3.4.3 Σχολιασμός μετρήσεων

Η ερμηνεία των παραπάνω μετρήσεων βασίζεται κυρίως στην εξίσωση 2.29. Αν το πηνίο διέγερσης τροφοδοτηθεί με ρεύμα $i_{ec}(t) = (i_{ec})\sin(2\pi ft)$, τότε για την τάση του πηνίου λήψης, σύμφωνα αυτήν την εξίσωση, θα ισχύει:

$$V_{sc} = \frac{N1 * N2 * S}{Z1 * L} \mu d \frac{dV1}{dt} \rightarrow$$

$$V_{sc} = \frac{N1 * N2 * S}{Z1 * L} \mu d \frac{d(Z1 * i_{ec} * \sin(2\pi ft))}{dt} \rightarrow$$

$$V_{sc} = \frac{N1 * N2 * S}{L} \mu d * i_{ec} * 2\pi f * \cos(2\pi ft) \quad 3.8$$

Όπου:

V_{sc} – η τάση στα άκρα του πηνίου λήψης

μ_d – η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα

Z_1 – η εμπέδηση του πηνίου διέγερσης

L – το μήκος του πηνίου διέγερσης

N_1 – ο αριθμός σπειρών του πηνίου διέγερσης

N_2 - ο αριθμός σπειρών του πηνίου λήψης

S – το εμβαδόν του σιδηρομαγνητικού πυρήνα

I_{ec} – το πλάτος ρεύματος του πηνίου λήψης

f – η συχνότητα

Το διάγραμμα του σχήματος 53 προκύπτει ως εξής. Για συχνότητες από 0 έως 1Hz, το πλάτος τάσης του πηνίου λήψης είναι ανάλογο της συχνότητας, σύμφωνα με την εξίσωση 3.8, οπότε το πλάτος V_{pp} του σήματος παραμόρφωσης αυξάνεται και αυτό γραμμικά σε αυτό το διάστημα συχνοτήτων. Για συχνότητες μεγαλύτερες του 1Hz, οι απώλειες λόγω δινορρευσμάτων του σιδηρομαγνητικού πυρήνα αλλοιώνουν την λειτουργία του κυκλώματος, με αποτέλεσμα η κλίση της καμπύλης V_{pp} της τάσης παραμόρφωσης να ελαττώνεται με την αύξηση της συχνότητας.

Η μορφή του διαγράμματος του σχήματος 54 προκύπτει από το γεγονός ότι η τάση του πηνίου λήψης είναι ανάλογη του πλάτους ρεύματος του πηνίου διέγερσης, σύμφωνα με την εξίσωση 3.8. Συνεπώς, με την αύξηση του πλάτους αυτού του ρεύματος αυξάνεται και η τάση V_{pp} του σήματος παραμόρφωσης. Ανάλογη είναι και η συμπεριφορά του διαγράμματος του σχήματος 55, με τη διαφορά ότι εδώ οι τάσεις V_{pp} λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές απ'ότι στην προηγούμενη γραφική εξαιτίας του διπλασιασμού της συχνότητας. Αυτό συμβαίνει διότι η τάση του πηνίου λήψης είναι ανάλογη της συχνότητας.

Στο διάγραμμα του σχήματος 56 παρατηρούμε ότι οι τάσεις V_{pp} της περιοχής του δείγματος όπου παρουσιάζονται παραμένουσες τάσεις λαμβάνουν μικρότερες τιμές από τις τάσεις V_{pp} της περιοχής όπου οι τελευταίες απουσιάζουν. Αυτό συμβαίνει επειδή σύμφωνα με την ενότητα 2.5.3.5, η ύπαρξη παραμένουσων τάσεων ελαττώνει την διαφορική μαγνητική διαπερατότητα, ενώ η τάση του πηνίου λήψης είναι ανάλογη αυτής της διαπερατότητας, σύμφωνα με την εξίσωση 3.8. Παρόμοια είναι και η συμπεριφορά του διαγράμματος του σχήματος 57, απλώς εδώ οι τάσεις V_{pp} και των δύο περιοχών έχουν μεγαλύτερες τιμές απ'ότι στην προηγούμενη γραφική εξαιτίας της διπλάσιας συχνότητας. Αυτό συμβαίνει διότι η τάση του πηνίου λήψης είναι ανάλογη της συχνότητας.

4 Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία

Από την παραπάνω ανάλυση του αισθητήρα μαγνητικής διαπερατότητας προκύπτει το συμπέρασμα ότι, αν το πλάτος και η συχνότητα του ρεύματος του πηνίου διέγερσης τεθούν σε μία συγκεκριμένη τιμή και πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε διάφορες περιοχές του χαλύβδινου δείγματος, παρατηρείται ότι η τάση του πηνίου λήψης αποκλίνει σε κάποια σημεία από την γενικώς ημιτονοειδή μορφή της. Αυτό συμβαίνει διότι η μεσολάβηση του χαλύβδινου δείγματος στο κλειστό μαγνητικό κύκλωμα που συνίσταται από αυτό το δείγμα και τον σιδηρομαγνητικό πυρήνα έχει ως αποτέλεσμα η διάταξη να μην λειτουργεί ως μετασχηματιστής. Έτσι, δημιουργούνται υψηλότερες αρμονικές σήματος στην τάση του πηνίου λήψης. Αν οι τελελευταίες απομονωθούν χρησιμοποιώντας Fourier ανάλυση και με τα πλάτη τους κατασκευαστεί στο πεδίο του χρόνου το σήμα παραμόρφωσης που οφείλεται σε αυτές, τότε η μείωση της τάσης V_{pp} αυτού του σήματος θα αντιστοιχεί σε μείωση της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας. Συνεπώς, αν είναι γνωστή μία περιοχή του δείγματος όπου απουσιάζουν οι παραμένουσες τάσεις και προσδιοριστεί η τάση V_{pp} του σήματος παραμόρφωσης που της αντιστοιχεί, τότε περιοχές με πιο μικρή τιμή τάσης V_{pp} θα παρουσιάζουν υπολειπόμενες τάσεις, τόσο περισσότερες όσο μικρότερη είναι η τιμή V_{pp} , διότι ακριβώς αυτές οι παραμένουσες τάσεις ευθύνονται για την μείωση της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας.

Επίσης, κατά την διαδικασία των μετρήσεων παρατηρήθηκε ότι για συχνότητες μικρότερες των 0.4Hz, η τάση του πηνίου λήψης (ανάλογη με αυτήν του σχήματος 49) δεν παρουσίαζε σημαντικά επίπεδα παραμόρφωσης εξαιτίας υψηλότερων αρμονικών. Έτσι, το σήμα παραμόρφωσης, αφού είχε απομονωθεί με χρήση Fourier ανάλυσης, προέκυπτε θορυβώδες και δεν ήταν κατάλληλο για τον προσδιορισμό υπολειπόμενων τάσεων στο δείγμα. Συνεπώς, για την ορθή λειτουργία του αισθητήρα η συχνότητα ρεύματος πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 0.4Hz.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, τα κυκλώματα διέγερσης και λήψης του αισθητήρα κατασκευάστηκαν πάνω σε breadboard και για την τροφοδοσία τους χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία πάγκου. Περαιτέρω μελέτη θα ήταν η κατασκευή μίας ολοκληρωμένης πλακέτας που θα περιείχε τα δύο παραπάνω κυκλωματικά στάδια και η χρήση μπαταριών ως μέσω τροφοδοσίας. Έτσι θα εξαλειφόταν ο θόρυβος που εισάγει το τροφοδοτικό πάγκου και ο αισθητήρας θα μπορούσε να μεταφέρεται σε περιοχές εκτός του εργαστηρίου.

5 Βιβλιογραφία

- [1] Ι. Α. Ρουμελιώτης και Ι. Λ. Τσαλαμέγκας, Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία Τόμος Α' Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία και Κύματα, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2017.
- [2] Ι. Α. Ρουμελιώτης και Ι. Λ. Τσαλαμέγκας, Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία Τόμος Β' Στατικά και Μόνιμα Πεδία, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2018.
- [3] [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_moment (τελευταία πρόσβαση 21/2/2025).
- [4] J. M. D. COEY, Μαγνητισμός και μαγνητικά υλικά, Θεσσαλονίκη: CCITY PUBLISH, 2014.
- [5] [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.simply.science/images/content/physics/Electromagnetism/E_M_induction/Concept_map/Faradays_Law.html (τελευταία πρόσβαση 21/2/2025).
- [6] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ximera.osu.edu/electromagnetics/electromagnetics/magnetostatics/digInAmpereLaw> (τελευταία πρόσβαση 21/2/2025).
- [7] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.first4magnets.com/us/blog/what-does-gauss-mean/> (τελευταία πρόσβαση 21/2/2025).
- [8] A. Sophian, G. Y. Tian, D. Taylor και J. Rudlin, «Electromagnetic and eddy current NDT: a review,» *Insight* , τόμ. 43, αρ. 5, 2001.
- [9] C. Poole και I. Darwazeh, Microwave Active Circuit Analysis and Design, Academic Press, 2016.
- [10] N. A. Spaldin, Magnetic Materials Fundamentals and Applications

Second Edition, Cambridge University Press, 2010.

- [11] R. Nisticò, F. Cesano και . F. Garelli, «Magnetic Materials and Systems: Domain Structure Visualization and Other Characterization Techniques for the Application in the Materials Science and Biomedicine,» *Inorganics*, 8(1), 6, 2020, <https://doi.org/10.3390/inorganics8010006>.
- [12] P. Mohn και E. P. Wohlfarth, «The Curie temperature of the ferromagnetic transition metals and their compounds,» *Journal of Physics F: Metal Physics*, τόμ. 17, 1987, doi: 10.1088/0305-4608/17/12/016.
- [13] E. Hristoforou, «Magnetostrictive delay lines: engineering theory and sensing applications,» *Measurement Science and Technology*, τόμ. 14, αρ. 2, 2003, DOI 10.1088/0957-0233/14/2/201.
- [14] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.nde-ed.org/Physics/Magnetism/Demagnetization.xhtml> (τελευταία πρόσβαση 21/2/2025).
- [15] H. W. Sung και C. Rudowicz, «Physics behind the magnetic hysteresis loop—a survey of misconceptions in magnetism literature,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, τόμ. 260, αρ. 1–2, pp. 250-260, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)01339-2](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)01339-2).
- [16] C. Oikonomou, «Surface Characterization of Soft Magnetic Composite Powder and Compacts,» Chalmers Reproservice, Gothenburg, 2014.
- [17] J. Lenz, «A Review of Magnetic Sensors,» *Proceedings of the IEEE* 78(6), pp. 973 - 989, 1990 DOI: 10.1109/5.56910.
- [18] J. Lenz και A. Edelstein, «Magnetic Sensors and Their Applications,» *IEEE Sensors Journal* 6(3), pp. 631 - 649, 2006 DOI: 10.1109/JSEN.2006.874493.

- [19] R. S. Popovic, Hall Effect Devices, CRC Press, 2003.
- [20] P. Marcon και K. Ostanina, «Overview of Methods for Magnetic Susceptibility Measurement,» *PIERS Proceedings*, 27–30, 2012.
- [21] E. Hristoforou, A. Ktena και S. Gong, «Magnetic Sensors: Taxonomy, Applications, and New Trends,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019, DOI: 10.1109/TMAG.2018.2888642.
- [22] F. Fiorillo, Measurement and Characterization of Magnetic Materials A volume in Elsevier Series in Electromagnetism, Elsevier Inc, 2004.
- [23] Y. Hayakawa, «Electrical Steels,» *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*, τόμ. 2, pp. 208-213, 2022 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00004-1>.
- [24] E. Brinksmeier, J. T. Cammett, W. König, P. Leskovar, J. Peters και H. K. Tönshoff, «Residual Stresses — Measurement and Causes in Machining Processes,» *Annals of the CIRP* , 1982 doi: 10.1016/S0007-8506(07)60172-3.
- [25] X. Chun-Auang , T. Hai-Bing , L. Pei-Lu και . S. Jian-Feng, «Detection and Control Technology of Welding Residual Stress in Railway,» σε *2017 Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT)*, 2017 DOI: 10.1109/FENDT.2017.8584540.
- [26] B. Liscic, H. M. Tensi και W. Luty, Theory and Technology of Quenching, New York: Springer-Verlag, 1992.
- [27] L. Dong και P. E. Flewitt , «Raman Measurements of Stress in Films and Coatings,» τόμ. 45, 2014 DOI: 10.1039/9781782621485-00141.
- [28] H. Kun , Y. Wenyu και Y. Xiaoming , «Adjustment of machining-induced residual stress based on parameter inversion,» *International Journal of Mechanical Sciences*, τόμ. 135, pp. 43-52, 2018

<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.11.014>.

- [29] W. Le και Q. Xudong , «Welding residual stresses and their relaxation under cyclic loading in,» *International Journal of Fatigue*, τόμ. 162, 2022 <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106992>.
- [30] T. N. Thanh , S. P. Van, A. T. Hoang , H. N. Duc , H. N. Thu και B. D. Hong , «Effect of Residual Stress on Mode-I Stress Intensity Factor: A Quantitative Evaluation and a Suggestion of an Estimating Equation,» *Metals*, τόμ. 13 1132, 2023 <https://doi.org/10.3390/met13061132>.
- [31] . E. Hristoforou, A. Ktena , P. Vourna και P. Tsarabaris, «Magnetic Residual Stress Monitoring Technique for Ferromagnetic Steels,» *Metals*, τόμ. 8(8) 592, 2018 <https://doi.org/10.3390/met8080592>.
- [32] E. Hristoforou, A. Ktena, P. Vourna και P. E. Tsakiridis, «A novel approach of accurately evaluating residual stress and microstructure of welded electrical steels,» *NDT & E International*, τόμ. 71, pp. 33-42, 2015 <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.09.011>.
- [33] P. J. Withers, M. Turski, L. Edwards, P. J. Bouchard και D. J. Buttle, «Recent advances in residual stress measurement,» *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, τόμ. 85, αρ. 3, pp. 118-127, 2008 <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2007.10.007>.
- [34] M. Shokrieh και S. Akbari, «Simulation of slitting method for calculation of compliance functions of laminated composites,» *Journal of Composite Materials*, τόμ. 46(9) , pp. 1101-1109, 2012 DOI: 10.1177/0021998311415725.
- [35] C. Santus, P. Neri, L. Romoli και M. Cococcioni, «Residual Stress Determination with the Hole-Drilling Method on FDM 3D-Printed Precurved Specimen through Digital Image Correlation,» *Appl. Sci.* , Τόμ. %1 από %214(10), 3992, 2024 <https://doi.org/10.3390/app14103992>.

- [36] Y. Zhang, D. Hu , J. Chen και L. Yin, «Research on non-destructive testing of stress in ferromagnetic components based on metal magnetic memory and the Barkhausen effect,» *NDT & E International*, τόμ. 138 102881, 2023 <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102881>.
- [37] C. O. Ruud, «A review of selected non-destructive methods for residual stress measurement,» *NDT International*, τόμ. 15, αρ. 1, pp. 15-23, 1982 [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(82\)90083-9](https://doi.org/10.1016/0308-9126(82)90083-9).
- [38] M. E. Fitzpatrick, T. A. Fry, P. Holdway, F. Kandil, J. Shackleton και L. Suominen, «Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction,» *OAI*, 2002.
- [39] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.vdqter.co.uk/residual-stress-measurement/x-ray-diffraction> (τελευταία πρόσβαση 21/2/2025).
- [40] L. Pintschovius, V. Jung, E. Macherauch και O. Vöhringer, «Residual stress measurements by means of neutron diffraction,» *Materials Science and Engineering*, τόμ. 61, αρ. 1, pp. 43-50, 1983 [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(83\)90124-6](https://doi.org/10.1016/0025-5416(83)90124-6).
- [41] M. J. Lowe, «ULTRASONICS,» *Encyclopedia of Vibration*, pp. 1437-1441, 2001 <https://doi.org/10.1006/rwvb.2001.0143>.
- [42] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.vdqter.co.uk/residual-stress-measurement/ultrasound> (τελευταία πρόσβαση 21/2/2025).
- [43] E. Hristoforou, A. Ktena, P. Tsarabaris, S. Angelopoulos, A. Katsoulas και P. Pattakos, «Development of an Autonomous Magnetic Permeability Sensor,» *IEEE Transactions on Magnetics*, Τόμ. %1 από %2PP(99):1-1, 2022 DOI: 10.1109/TMAG.2022.3205106.
- [44] E. Hristoforou, A. Ktena, P. Vourna και K. Argiris, «Dependence of magnetic permeability on residual stresses in alloyed steels,» *AIP Advances* , 8, 047201 (2018) <https://doi.org/10.1063/1.4994202>.

- [45] [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf (τελευταία πρόσβαση 21/2/2025).
- [46] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9850.pdf> (τελευταία πρόσβαση 21/2/2025).
- [47] [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa549.pdf?ts=1740130422596&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Famplifier-circuit%252Fop-amps%252Fpower%252Fproducts.html (τελευταία πρόσβαση 21/2/2025).
- [48] [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/22060b.pdf>
(τελευταία πρόσβαση 21/2/2025).
- [49] [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl081.pdf?ts=1741353255607&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTL081
(τελευταία πρόσβαση 27/2/2025).

6 Παράρτημα

Κώδικας Arduino IDE για την πλακέτα WemosLolin32

```
#include <Arduino.h>
#include <driver/dac.h>
#include "driver/adc.h"
#include "esp_adc_cal.h"
#include <SPI.h>
#include <AD9850.h>
#include <cmath>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string>
#include <string.h>
#include <bits/stdc++.h>

//MCP-4131
// 1 SS:5 | 2 SCK:18 | 3 MISO:19 & R100--23 | 4 GND | 5-6-7 R | 8
VCC:5V

//OPA549
//E/S: 25

// ESP32 to AD9850 connections
int W_CLK = 27;
int FQ_UD = 14;
int DATA = 12;
int RESET = 13;

//ESP32 to OPA549 E_S connection
int E_S = 15;

//ESP32 read end signal
bool beginReading = false;
int tempRead = 0;

int CS_X = 5;
float iout = 0;
float previout = 0;
float descurent = 0;

float rout = 3;
int r2dig;
float maxr2 = 9500;
```

```

float ilim = 3;
float max_ilm = 6;
float min_ilm = 3;
float previlm = 3;

float minInductorCur = 0.1;

float vin = 0.5;
float vinTemp = 0.5;
float prevvin = 0.5;

double freq = 0;
double prevfreq = 0;
double max_freq = 1000000;
double T;

bool capacitorsReady = false;
bool firstTimeEnterCur = true;
unsigned long myTime;

//These values show if OPA549 output is enabled or disabled AFTER the
initial receiver coil
//output current has been set and 90 seconds have passed.
int enableStatus = 1;
int previousEnableStatus = 1;
int tempEnableStatus;

double calf = 125000000;

// SAMPLE_COUNT is the number of samples for ONE period
int SAMPLE_COUNT = 1000;

#define ADC_CHANNEL ADC1_CHANNEL_0 //GPIO36 (PIN UP)

// ADC characteristics for converting to voltage
const float conversion_factor = 3.3f / 4095.0f;
esp_adc_cal_characteristics_t adc_chars;

SPISettings potSettings(4000000, MSBFIRST, SPI_MODE0); // 1 MHz, MSB
first, SPI mode 0
SPISettings ddsSettings(4000000, MSBFIRST, SPI_MODE2); // 4 MHz, MSB
first, SPI mode 2

int calculateResist(float descurent)
{
    float vout = descurent * rout;

```

```

float gain = vout / vin;
//Serial.println(gain);
float r2 = 5400 / gain;
Serial.println(r2);
r2dig = (uint8_t)(r2/maxr2 * 127);
//Serial.println(r2dig);
return(r2dig);
}

void digitalPotWrite(int CS_pin, int value)
{
    SPI.end();
    SPI.begin();
    SPI.beginTransaction(potSettings);
    digitalWrite(CS_pin, LOW);
    SPI.transfer(0x00);
    SPI.transfer(value);
    digitalWrite(CS_pin, HIGH);
    SPI.endTransaction();
    delay(1000);
}

void ilim_setter(float ilim){
    //current limiter range: 3-10
    //initial value: 3
    float vset = 4.75 - ((7500 * ilim) / 15800);
    int vdig = static_cast<int>(round((vset / 3.3) * 255));
    dac_output_voltage(DAC_CHANNEL_1, vdig);
    delay(500);
}

void setAmplifierOutputState(bool val)
{
    if(val)
    {
        digitalWrite(E_S, HIGH);
    }
    else if(!val)
    {
        digitalWrite(E_S, LOW);
    }
}

void storeSensorVoltages(double T, int num)
{
    int rd_delay = static_cast<int>(round((T * 1000000) / SAMPLE_COUNT));

```

```

int total_samples = num * SAMPLE_COUNT;

struct v_t_data
{
    uint16_t v;
    unsigned long t;
};

v_t_data *p;
p = new v_t_data[total_samples];

unsigned long presentMoment = micros();

// Read values as fast as possible
for(int i = 0; i < total_samples; i++)
{
    (p + i)->v = adc1_get_raw(ADC1_CHANNEL_0);
    (p + i)->t = micros() - presentMoment;

    delayMicroseconds(rd_delay);
}

Serial.print("time (us)");
Serial.print(",");
Serial.println("voltage (mV)");

// Process and print results
for(int i = 0; i < total_samples; i++)
{
    //Convert to voltage using calibration
    float voltage_mv = (float)esp_adc_cal_raw_to_voltage((p + i)->v,
&adc_chars);

    Serial.print((p + i)->t);
    Serial.print(",");
    Serial.println(voltage_mv);
}

delete[] p;
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    //Set ESP32 to AD9850 output pins
    DDS.begin(W_CLK, FQ_UD, DATA, RESET);
    DDS.calibrate(calf);

```

```

//Set OPA549 output current limit to 3A
dac_output_enable(DAC_CHANNEL_1);
dac_output_voltage(DAC_CHANNEL_1, 255);

//Disable OPA549 output current
pinMode(E_S, OUTPUT);
setAmplifierOutputState(false);

pinMode(CS_X, OUTPUT);
digitalPotWrite(CS_X, 64);

SPI.begin();

// Configure ADC
adc1_config_width(ADC_WIDTH_BIT_12);
adc1_config_channel_atten(ADC_CHANNEL, ADC_ATTEN_DB_11);

//Characterize ADC for better accuracy
esp_adc_cal_characterize(ADC_UNIT_1, ADC_ATTEN_DB_11,
ADC_WIDTH_BIT_12, 1100, &adc_chars);
}

void loop() {

    if(millis() >= (myTime + 90000) && !capacitorsReady &&
!firstTimeEnterCur)
    {
        capacitorsReady = true;
        setAmplifierOutputState(true);
        Serial.println("OPA549 output is enabled.");
    }

    if (Serial.available()>0){
        int incomingByte = Serial.read();
        switch (incomingByte){
            case 'i':
                {
                    Serial.println("Insert the value of current limit [A]:");
                    delay(3000);
                    while(!Serial.available()){
                    }
                    ilim = Serial.parseFloat();
                    if (ilim > max_ilim) {
                        ilim = max_ilim;
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        Serial.println("You have set the current limiter to a very
high value. Automatically set to maximum allowed value.");
    }
    else if (ilim < min_ilim) {
        ilim = min_ilim;
        //min_ilim is set to 3A because the ESP32 gpio's maximum
output voltage is 3.3V,
        //which corresponds to 3A current limit in OPA549 datasheet
        Serial.println("You have set the current limiter to a very
low value. Automatically set to minimum allowed value.");
    }
    Serial.print("Current set to ");
    Serial.print(ilim);
    Serial.println(" A");
    break;
}
case 'g':
{
    Serial.println("Insert the value of receiver coil current
[A]:");
    delay(3000);
    while (!Serial.available()){
    iout = Serial.parseFloat();
    if (iout > ilim)
    {
        iout = ilim;
        Serial.println("You have selected an output current that
exceeds the current limit. Consider readjusting the current limiter or
select a lower value.");
    }
    else if(iout < minInductorCur)
    {
        iout = minInductorCur;
        Serial.println("The inductor current you entered is smaller
then the lower limit. Inductor current set to lower limit.");
    }
    Serial.print("Current set to ");
    Serial.print(iout);
    Serial.println(" A");
    break;
}
case 'v':
{
    Serial.println("Insert the value of input voltage [V]:");
    delay(3000);
    while(!Serial.available()){
    vinTemp = Serial.parseFloat();

```

```

    Serial.print("You have entered an input voltage of ");
    Serial.print(vinTemp);
    Serial.println(" V");
    break;
}
case 'f':
{
    Serial.println("Insert the value of frequency [Hz]:");
    delay(3000);
    while (!Serial.available()){

        freq = Serial.parseFloat();
        if (freq > max_freq) {freq = max_freq;}
        Serial.print("Frequency set to ");
        Serial.print(freq);
        Serial.println(" Hz");
        break;
    }
}
case 'o':
{
    Serial.println("Type 0 if you want to disable OPA549 output, or  
type 1 if you want to enable it.");
    delay(3000);
    while (!Serial.available()){

        tempEnableStatus = Serial.parseInt();

        if(tempEnableStatus == 0)
        {
            enableStatus = tempEnableStatus;
            Serial.println("OPA549 output will be disabled.");
        }
        else if(tempEnableStatus == 1)
        {
            enableStatus = tempEnableStatus;
            Serial.println("OPA549 output will be enabled.");
        }
        else
        {
            Serial.println("You didn't enter correct value... ");
        }

        break;
    }
}
case 'r':
{

```

```

        Serial.println("Type 1 if you want to read output inductor
voltages, or type 0 if you don't.");
        delay(3000);
        while (!Serial.available()){

            tempRead = Serial.parseInt();

            if(tempRead == 1)
            {
                beginReading = true;
                Serial.println("The reading of output inductor voltages
will begin now.");
            }
            else if(tempEnableStatus != 1 && tempEnableStatus != 0)
            {
                Serial.println("You didn't enter correct value... ");
            }
            break;
        }
    }

}

if(beginReading)
{
    beginReading = false;

    Serial.println("---begin reading ---");
    storeSensorVoltages(T, 2);
    Serial.println("---end reading ---");
}

if (previlim != ilim)
{
    ilim_setter(ilim);
    previlim = ilim;
}

if (previout != iout)
{
    digitalPotWrite(CS_X, calculateResist(iout));
    previout = iout;

    // If you set current for the first time, then enable OPA549 output
after 90s
    if(firstTimeEnterCur)

```



```

    {
        Serial.println("OPA549 output will be enabled after 90
seconds.");
        myTime = millis();
        firstTimeEnterCur = false;
    }
}

if (prevvin != vinTemp)
{
    vin = vinTemp;
    prevvin = vinTemp;
}

if (prevfreq != freq)
{
    DDS.setfreq(freq, 0);
    prevfreq = freq;
    T = freq != 0 ? 1 / freq : 1;
}

if(previousEnableStatus != enableStatus)
{
    previousEnableStatus = enableStatus;
    setAmplifierOutputState(enableStatus == 1 ? true : false);
}
}

```

Κώδικας Python για την επεξεργασία των μετρήσεων

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

def process_csv_and_plot(csv_file, frequency, n):

    data = pd.read_csv(csv_file)

    time_us = data['time (us)'].values # Time in microseconds
    voltage_mv = data['voltage (mV)'].values # Voltage in
millivolts

    # Convert time from microseconds to seconds
    time_s = time_us * 1e-6

    period = 1.0 / frequency

    # Find the indices corresponding to one period
    indices = np.where(time_s <= period)
    time_one_period = time_s[indices]
    voltage_one_period = voltage_mv[indices]

    fft_coefficients = np.fft.fft(voltage_one_period)
    fft_frequencies = np.fft.fftfreq(len(voltage_one_period),
d=time_one_period[1] - time_one_period[0])

    # Create a new set of FFT coefficients with the first two set
to zero
    new_fft_coefficients = fft_coefficients.copy()
    new_fft_coefficients[0] = 0
    new_fft_coefficients[1] = 0
    new_fft_coefficients[-1] = 0

    new_signal = np.fft.ifft(new_fft_coefficients)
    new_signal_real = np.real(new_signal)

    # Find the maximum and minimum values of the real part of the
new signal
    max_value = np.max(new_signal_real)
    min_value = np.min(new_signal_real)
    vpp = max_value - min_value

    print(f"Maximum value of the new signal: {max_value}")
    print(f"Minimum value of the new signal: {min value}")
```

```

print(f"Vpp: {vpp}")

plt.figure(figsize=(6, 4))
plt.plot(time_one_period, voltage_one_period)
plt.xlabel('Time (s)')
plt.ylabel('Voltage (mV)')
plt.title(f'Receiver coil voltage vs Time (one period),
f={frequency}Hz')
plt.legend()
plt.grid(True)

plt.figure(figsize=(6, 4))
plt.stem(fft_frequencies[:n], np.abs(fft_coefficients[:n]),
'b', markerfmt=" ", basefmt="-b")
plt.xlabel('Frequency (Hz)')
plt.ylabel('|FFT Coefficients| (mV)')
plt.title(f'First {n} Fourier Coefficients')
plt.grid(True)

plt.tight_layout()
plt.show()

plt.figure(figsize=(6, 4))
plt.plot(time_one_period, new_signal_real, color='red')
plt.xlabel('Time (s)')
plt.ylabel('Voltage (mV)')
plt.title(f'Higher harmonics isolated voltage vs time (One
Period), f={frequency}Hz')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

# Example usage
csv_file = '/content/1A-1Hz.csv' # Replace with your CSV file
path
frequency = 1 # Replace with your signal frequency in Hz
n = 10 # Number of Fourier coefficients to plot

process_csv_and_plot(csv_file, frequency, n)

```