



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Αποθορυβοποίηση Σημάτων Βρόχου Μαγνήτισης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Ελένης Γ. Μουδήλου

Επιβλέπων: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου
Καθηγητής

Αθήνα, Νοέμβριος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Αποθορυβοποίηση Σημάτων Βρόχου Μαγνήτισης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Ελένης Γ. Μουδήλου

Επιβλέπων: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 8η Νοεμβρίου 2021

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Χριστοφόρου Ευάγγελος
καθηγητής

.....
Σωτηριάδης Παύλος Πέτρος
Αναπληρωτής Καθηγητής

.....
Τσαραμπάρης Παναγιώτης
Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Νοέμβριος 2021.

.....
Ελένη Γ. Μουδήλου

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

Copyright ©- Ελένη Γ. Μουδήλου, 2021.

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 ή 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 τη συγγραφέα.

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στο ψηφιακό φιλτράρισμα μαγνητικού σήματος υστέρησης το οποίο παράχθηκε από προτότυπο αισθητήρα μονού yoke του εργαστηρίου ηλεκτρονικών αισθητήρων. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική αναφορά στη κατασκευή αισθητήρων μέτρησης μαγνητικών σημάτων για τον ποιοτικό έλεγχο χάλυβων ως προς τις παραμένουσες τάσεις. Στη συνέχεια, ακολούθησε κατασκευή του αισθητηρίου και η μέτρηση πρότυπων δειγμάτων dog-bone και διφασικού χάλυβα κατηγορίας DP700. Η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου αισθητήρα για τη χρήση του στη βιομηχανία προϋποθέτει τη λήψη σήματος σε μη εργαστηριακό περιβάλλον και την έκθεση σε διάφορους ηλεκτρομαγνητικούς θορύβους. Εξετάστηκαν διάφορες ψηφιακές τεχνικές αποθορυβοποίησης των σημάτων με χρήση λογισμικού Matlab και επιλέχθηκε η βέλτιστη. Επίσης, μετά το φιλτράρισμα ακολούθησε η παραγωγή του βρόχου υστέρησης για την αξιολόγηση της διαδικασίας.

Λέξεις Κλειδιά

Μαγνητικός βρόχος υστέρησης, Ψηφιακά φίλτρα, Φερομαγνητικοί χάλυβες, μη καταστροφικές δοκιμές, Μαγνητικοί αισθητήρες, Μονό yoke

Abstract

The present diploma thesis focuses on the digital filtering of magnetic hysteresis measurements that were produced by novel single yoke magnetic sensor created in our Sensors Laboratory. Extensive bibliographic reference of prior work on the manufacturing of magnetic sensors for monitoring stresses in ferromagnetic steel is initially presented. Then, standard dogbone samples and dual phase steel (class DP700) were measured by the constructed sensor. Implementation of a complete sensing system for monitoring steel quality requires signal measurements in not electromagnetically insulated environments (e.g. steel plants) subjugated to noise. Various digital noise attenuation methods were examined, using `Matlab` software and the optimal was selected. Finally, after denoising the magnetic hysteresis loops were calculated to evaluate the process.

keywords

Magnetic hysteresis loop, Digital filters, Ferromagnetic steel, Nondestructive testing, Magnetic sensors, Single yoke

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου για τη καθοδήγηση και την συνεχή υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής αλλά και για τη ευκαιρία και την εμπιστοσύνη να ασχοληθώ με μια πρωτότυπη ιδέα του εργαστηρίου αισθητήρων.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια κ. Αφροδίτη Κτενά για την καθοδήγηση και επεξήγηση θεμάτων μαγνητισμού καθώς και τις επιπτώσεις διαφόρων μαγνητικών φαινομένων στις πειραματικές διατάξεις. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του εργαστηρίου και ιδιαίτερα τον Σπύρο Αγγελόπουλο για τη πολύτιμη βοήθεια του στα θέματα του εργαστηρίου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την στήριξη που μου παρείχαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής.

Μουδήλου Ελένη

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	3
Ευχαριστίες	5
Περιεχόμενα	8
1 Εισαγωγή - Θεωρητικό Υπόβαθρο	13
1.1 Φερομαγνητικοί χάλυβες	13
1.1.1 Θεωρία της αναταλλαγής	13
1.1.2 Μαγνητικά τοιχώματα - Ανισοτροπία	14
1.1.3 Εσωτερικές τάσεις.	15
1.2 Μη μαγνητικές τεχνικές μέτρησης των εσωτερικών τάσεων.	16
1.2.1 X-Ray Diffraction (XRD).	17
1.2.2 Neutron Diffraction (ND).	19
1.3 Μαγνητικές μέθοδοι προσδιορισμού εσωτερικών τάσεων.	19
1.3.1 Magnetic flux leakage (MLF)	19
1.3.2 Metallic Magnetic Memory (MMM).	20
1.3.3 Θόρυβος Barkhausen - Barkhausen Noise.	21
Διατάξεις και μέθοδοι μέτρησης του μαγνητικού θορύβου Barkhausen	
21	
Παράμετροι του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.	24
1.4 Υστέρηση - Hysterisis	27
1.4.1 Θεωρητικό υπόβαθρο	27
Παράμετροι που επηρεάζουν το βρόχο υστέρησης	28
1.4.2 Εργαστηριακές διατάξεις και αποτελέσματα.	30
Epstein Method	30
Single Sheet Tester - SST	32
Διατάξεις πολλαπλών πόλων	39
Διατάξεις μονού yoke	40
Συσχέτιση μαγνητικών ιδιοτήτων με εσωτερικά στρες	43

2	Πειραματική Διάταξη - Μετρήσεις	55
2.1	Αισθητήρας μαγνητικής διαπερατότητας	55
2.1.1	Ηλεκτρικές ιδιότητες πηνίων διέγερσης και λήψης	57
2.2	Δείγματα Dogbone	59
2.3	Μετρήσεις	60
2.4	Επεξεργασία μετρήσεων	65
2.4.1	IIR Φίλτρα	66
	Φίλτρο Butterworth	68
	Φίλτρο Chebyshev II	70
2.4.2	FIR Φίλτρα	73
	Κινητός Μέσος Ορός (Moving Average)	73
	Κινητός Μέσος Ορός με Βάρη (Weighted Moving Average)	73
	Κινητός Διάμεσος (Moving Median)	75
	Φίλτρο Savitzky–Golay	75
	Αναγνωριστικό Hampel (Hampel Identifier)	77
2.4.3	Wavelets	77
2.5	DP Χάλυβες	83
2.5.1	Γενικά Στοιχεία	83
	Παραγωγή	83
	Μηχανικές Ιδιότητες	84
	Μαγνητικές Ιδιότητες	85
2.6	Μετρήσεις - Επεξεργασία Μετρήσεων	87
2.6.1	Διέγερση συχνότητας 1 Hz	87
2.6.2	Διέγερση συχνότητας 0.5 Hz	91
3	Πειραματικός Βρόχος Υστέρησης	95
3.1	Dogbone Δείγματα	95
3.2	Δείγμα DP700	100
	Συμπεράσματα - Μελλοντική εργασία	102
	Βιβλιογραφία	103

Γραφήματα

1.1	Δημιουργία μαγνητικών τοιχωμάτων.	14
1.2	Μαγνητικά τοιχώματα Bloch και Néel.	15
1.3	Διάταξη Bragg-Brentano XRD	18
1.4	Διαφυγή μαγνητικών γραμμών σε παραμορφωμένο υλικό	20
1.5	Απόκριση των πεδίων H_x και H_y σε περιοχή παραμόρφωσης.	20
1.6	Διατάξεις μέτρησης θορύβου Barkhausen	23
1.7	Απόκριση σήματος θορύβου Barkhausen.	25
1.8	Απόκριση ενέργειας θορύβου Barkhausen.	25
1.9	Τυπική μορφή του βρόχου υστέρησης.	28
1.10	Μέθοδος Epstein.	31
1.11	Προτεινόμενες διατάξεις αισθητήρα SST	32
1.12	Σύγκριση αισθητήρα SST με τη μέθοδο Epstein	33
1.13	Διάταξη αισθητήρα SST	34
1.14	Τύποι yokes	34
1.15	Κάθετος αισθητήρας SST	35
1.16	Διάταξη τροποποιημένου SST.	38
1.17	Διάταξη αισθητήρα SST με dc συνιστώσα.	39
1.18	Κάτοψη γεωμετρίας διφασικού RSST.	40
1.19	Κάτοψη γεωμετρίας διφασικού RRSST.	40
1.20	Κάτοψη και τομή 6-πολικού RSST.	40
1.21	Τριφασικός SST με χρήση στάτορα.	40
1.22	Κάτοψη αισθητήρα SST μονού yoke.	41
1.23	Εξάρτηση του πεδίου H από τη διεύθυνση.	42
1.24	Διαφορά φάσης ανάμεσα στα πεδία H και B	42
1.25	SST μεταβλητών διαστάσεων.	43
1.26	Μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας σε συνθήκες παραμόρφωσης.	44
1.27	Διάταξη μονού yoke για τη μέτρηση διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας.	45
1.28	Εξάρτηση του πεδίου H από τη πλαστική παραμόρφωση.	45
1.29	Τομή του ac hysteresis graph.	46
1.30	Έξοδος της διάταξης στη μέγιστη ελαστική παραμόρφωση	46
1.31	Καμπύλη βαθμονόμησης σε όλο τον όγκο των υλικών	46
1.32	Κανονικοποιημένη καμπύλη βαθμονόμησης	46
1.33	Δείγμα dog-bone.	48
1.34	Καμπύλες βαθμονόμησης δειγμάτων χάλυβα (MASC).	48

1.35	Παραμένουσες τάσεις συναρτήσει της απόστασης (1/2)	50
1.35	Παραμένουσες τάσεις συναρτήσει της απόστασης (2/2)	51
1.36	Πειραματική διάταξη μέτρησης μαγνητικών ιδιοτήτων.	51
1.37	Ανάλυση της εξάρτησης της επαγόμενης τάσης από το πεδίο με ψευδο-Voigt συναρτήσεις.	53
1.38	Εξάρτηση της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας από το πεδίο.	53
1.39	Καμπύλη εύρεσης εσωτερικών στρες μέσω τοιχωμάτων 90°.	53
1.40	Καμπύλες $\mu_a(H)$ σε δείγματα διαφορετικής επιμήκυνσης.	54
1.41	Καμπύλη εύρεσης εσωτερικών στρες για επιμήκυνση 7.4% μέσω τοιχωμάτων 90°.	54
2.1	Σχηματικό πρωτότυπου Αισθητήρα.	56
2.2	Πρωτότυπος Αισθητήρας.	56
2.3	Γεννήτρια ημιτονικής διέγερσης αισθητήρα.	57
2.4	Παλμογράφος απεικόνισης σήματος λήψης.	57
2.5	Διαστάσεις δοκίμιων dogbone	59
2.6	Ενδεικτικό σήμα λήψης του αισθητήρα στο παλμογράφο.	61
2.7	Μέτρηση ύψους κορυφών σε μη επεξεργασμένα δεδομένα (1/2)	62
2.7	Μέτρηση ύψους κορυφών σε μη επεξεργασμένα δεδομένα (2/2)	63
2.8	Ιστόγραμμα διαφορών θετικών με αρνητικών κορυφών.	65
2.9	Μετασχηματισμός Fourier του ημιτόνου διέγερσης.	66
2.10	Σύγκριση μεταξύ φιλτραρισμένου σήματος και αρχικού με βαθυπερατό φίλτρο.	67
2.11	Έξοδος του αισθητήρα στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας.	68
2.12	Δοκιμαστικά βαθυπερατά φίλτρα Butterworth συναρτήσει της συχνότητας αποκοπής.	69
2.13	Δοκιμαστικά βαθυπερατά φίλτρα Butterworth συναρτήσει της τάξης.	70
2.14	Δοκιμαστικά βαθυπερατά φίλτρα Chebyshev τύπου II συναρτήσει της συχνότητας αποκοπής.	71
2.15	Δοκιμαστικά βαθυπερατά φίλτρα Chebyshev τύπου II συναρτήσει της τάξης.	72
2.16	Βέλτιστα IIR φίλτρα.	73
2.17	Φιλτράρισμα με χρήση κινητού μέσου όρου.	74
2.18	Φιλτράρισμα με χρήση κινητού μέσου όρου με βάρη.	75
2.19	Φιλτράρισμα με χρήση κινητού διάμεσου.	76
2.20	Φιλτράρισμα με χρήση φίλτρου Savitzky–Golay.	76
2.21	Εύρεση outliers με χρήση αναγνωριστικού Hampel.	78
2.22	Haar Wavelet [64]	79
2.23	Daubechies Wavelet [65]	80
2.24	Coiflets [66].	80
2.25	Symlets [66].	80

2.26	Αποθορυβοποίηση του σήματος με χρήση wavelets.	82
2.27	Αποθορυβοποιημένα σήματα διέγερσης και λήψης	82
2.28	Μέθοδοι παραγωγής DP χάλυβα.	84
2.29	Ταξινόμηση χαλύβων σύμφωνα με την επιμήκυνση και το όριο εφελκυστικής δύναμης.	85
2.30	Μετρήσεις βρόχου υστέρησης DP χάλυβα.	86
2.31	Κύριοι βρόχοι υστέρησης για δείγματα DP600, DP800 και DP1000. . .	87
2.32	Μαγνητική διαπερατότητα συναρτήσε του πεδίου μαγνήτισης.	87
2.33	Σήμα εξόδου του αισθητήρα για συχνότητα $1Hz$	88
2.34	FFT του ημιτόνου διέγερσης	89
2.35	Σύγκριση μεταξύ φιλτραρισμένου ημιτόνου και αρχικού με βαθυπερατό φίλτρο.	89
2.36	Απόκριση του αισθητήρα σε δείγμα DP700.	90
2.37	Φιλτράρισμα του σήματος με χρήση wavelets	91
2.38	Αποθορυβοποιημένα σήματα διέγερσης και λήψης χάλυβα DP700 . . .	92
2.39	Σήμα εξόδου του αισθητήρα για συχνότητα $0.5Hz$	92
2.40	Σύγκριση μεταξύ φιλτραρισμένου ημιτόνου και αρχικού με βαθυπερατό φίλτρο.	93
2.41	Απόκριση του αισθητήρα σε δείγμα DP700.	93
2.42	Φιλτράρισμα του σήματος με χρήση wavelets	94
2.43	Αποθορυβοποιημένα σήματα διέγερσης και λήψης χάλυβα DP700 . . .	94
3.1	Τελικό φιλτράρισμα σημάτων dogbone και βρόχοι υστέρησης (1/5) . .	96
3.1	Τελικό φιλτράρισμα σημάτων dogbone και βρόχοι υστέρησης (2/5) . .	97
3.1	Τελικό φιλτράρισμα σημάτων dogbone και βρόχοι υστέρησης (3/5) . .	98
3.1	Τελικό φιλτράρισμα σημάτων dogbone και βρόχοι υστέρησης (4/5) . .	99
3.1	Τελικό φιλτράρισμα σημάτων dogbone και βρόχοι υστέρησης (5/5) . .	100
3.2	Τελικό φιλτράρισμα δειγματος DP700 και βρόχοι υστέρησης	101

Πίνακες

2.1	Στοιχειομετρία δειγμάτων dogbone.	59
2.2	Μέγιστη τιμή εξόδου αισθητήρα στα δείγματα dogbone	60
2.3	Συνοπτικός πίνακας των τιμών κορυφών στα dogbone δείγματα	64

1 Εισαγωγή - Θεωρητικό Υπόβαθρο

1.1 Φερομαγνητικοί χάλυβες

Χαρακτηριστική ιδιότητα των φερομαγνητικών υλικών είναι η παραμένουσα μαγνήτιση του υλικού M_s (A/m) μετά την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H (A/m) σε θερμοκρασία μικρότερη της θερμοκρασίας Curie. Η σχέση ανάμεσα στη μαγνήτιση και το επιβαλλόμενο πεδίο είναι εξαιρετικά μη γραμμική. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται μέσω της θεωρίας της αλληλεπίδρασης. [1],[2] Ο σίδηρος αποτελεί ένα από τα πιο βασικά φερομαγνητικά υλικά με τη μεγαλύτερη μαγνητική ροπή $2.2M_B$ (μαγνητόνες του Bohr). [3] Όμως, ο καθαρός σίδηρος είναι εύκολα παραμορφώσιμος καθιστώντας τον δύσχρηστο στη βιομηχανία. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται κράματα σιδήρου, ή χάλυβες, που ενισχύουν τις μηχανικές ιδιότητες. Στη παρούσα εργασία μας απασχολούν οι χάλυβες που διατηρούν φερομαγνητικό χαρακτήρα (Φερομαγνητικοί χάλυβες - Ferromagnetic steels). [4]

1.1.1 Θεωρία της ανταλλαγής

Σε ένα μεμονωμένο άτομο σιδήρου ($[Ar]3d^64s^2$) λόγω του κανόνα του Hund και της αρχής του αποκλεισμού του Pauli, 4 από τα 5 τροχιακά 3d περιέχουν μη ζευγαρωμένα ηλεκτρόνια. Με την επιλογή των σπιν να είναι παράλληλα, τα ηλεκτρόνια βρίσκονται σε διαφορετικές τροχιές και η ηλεκτροστατική απώθηση Coulomb είναι μικρότερη από τη συμπλήρωση των τροχιακών. Συνολικά, τα παραπάνω αποτελούν την αλληλεπίδραση της ανταλλαγής ώστε το άτομο να ελαχιστοποιεί την ηλεκτροστατική του ενέργεια.

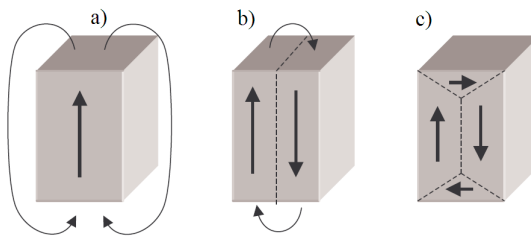
Όμως ενδιαφερόμαστε για τις μαγνητικές ιδιότητες των υλικών τα οποία οργανώνονται σε κρυσταλλικό πλέγμα. Στο σίδηρο τα ηλεκτρόνια δεν είναι δεσμευμένα από τα άτομα. Ενώ συνεχίζει να ισχύει υπό μία έννοια ο κανόνας του Hund, εμφανίζεται περαιτέρω μείωση της δυναμικής ενέργειας όταν τα ηλεκτρόνια αποκτούν παράλληλο σπιν λόγω της έλξης με τα θετικά ιόντα Fe. Τα ηλεκτρόνια που απαιτούνται για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας είναι 2.2 ανά άτομο. Καθοριστικός παράγοντας για την εμφάνισή ή μη φερομαγνητικού χαρακτήρα σε ένα υλικό είναι η τιμή της χαμιλτονιανής (1.1) όπου \mathcal{J}_{ij} το ολοκλήρωμα της ανταλλαγής, $\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_j$ η στροφορμή λόγω των σπιν, ενώ οι δείκτες i, j αναφέρονται στα γειτονικά ηλεκτρόνια του κρυσταλλικού πλέγματος. Για να ελαχιστοποιείται η ενέργεια όταν τα σπιν είναι παράλληλα, πρέπει ο όρος \mathcal{J} να είναι θετικός, κάτι που συμβαίνει για τα φερομαγνητικά υλικά. [1],[2]

$$\mathcal{H} = -2 \sum_{i>j} \mathcal{J}_{ij} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j \quad (1.1)$$

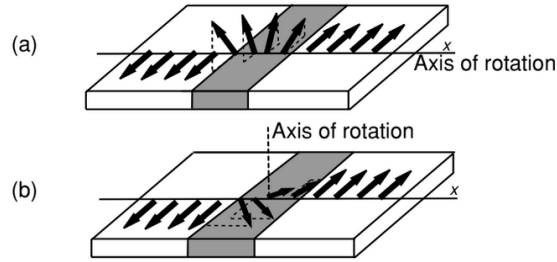
1.1.2 Μαγνητικά τοιχώματα - Ανισοτροπία

Αξίζει να ανεφερθούμε περισσότερο στις ιδιότητες των φερομαγνητικών υλικών. Πριν την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου τα δίπολα εσωτερικά του υλικού αυθόρμητα οργανώνονται σε μαγνητικές περιοχές (magnetic domains) προσανατολισμένα σε συγκεκριμένο κρυσταλλογραφικό άξονα. Η διεύθυνση προσανατολισμού της κάθε περιοχής είναι τέτοια ώστε η συνολική ενέργεια του υλικού να ελαχιστοποιείται. Πρακτικά, να μη διαφεύγουν μαγνητικές γραμμές εξωτερικά του υλικού. Εσωτερικά μίας μαγνητικής περιοχής τα δίπολα δεν είναι προσανατολισμένα σε μία τυχαία διεύθυνση. Στο σίδηρο, τα σπιν παραλληλίζονται ευκολότερα σε μία από τις έξι διευθύνσεις $\langle 100 \rangle$ που αντιστοιχούν στις 6 ακμές της κυβικής μονάδας της κυψελίδας. Αυτή η ιδιότητα του υλικού ονομάζεται μαγνητοκρυσταλλική **ανισοτροπία**. [2] Αναφέρθηκε ότι τα φερομαγνητικά υλικά τείνουν να μαγνητιστούν στη φορά του επιβαλλόμενου πεδίου, στη πραγματικότητα όμως, τα μαγνητικά τοιχώματα κινούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να διευρυνθεί η μαγνητική περιοχή που βρίσκεται περισσότερο προσανατολισμένη στο εξωτερικό πεδίο. [5]

Οι περιοχές διαχωρίζονται μεταξύ τους από τα μαγνητικά τοιχώματα (domain walls). Στο σίδηρο και κατ' επέκταση στους μαγνητικούς χάλυβες παρατηρούνται τοιχώματα 180° και 90° . Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1 το υλικό ελαχιστοποιεί την ενέργεια του μηδενίζοντας την μαγνήτισή του. Για την αποφυγή αύξησης της ενέργειας μεταξύ γειτονικών διπόλων δύο μαγνητικών περιοχών τα τοιχώματα εκτείνονται για εκατοντάδες ατομικά επίπεδα ($\approx 0.1\mu m$ στο σίδηρο) μεταβάλλοντας σταδιακά τη γωνία. [2] Η περιστροφή των διπόλων μπορεί να γίνεται παράλληλα με το επίπεδο (Néel τοίχωμα) ή κάθετα στο επίπεδο (Bloch τοίχωμα) (Σχήμα 1.2). [1]



Σχήμα 1.1: Δημιουργία μαγνητικών τοιχωμάτων. [6]



Σχήμα 1.2: Μαγνητικά τοιχώματα Bloch (a) και Néel (b).[1]

Τα τοιχώματα δεν διαφοροποιούνται μόνο στην αλλαγή διεύθυνσης: Τα μαγνητικά τοιχώματα 180° παρουσιάζουν υψηλότερη ενέργεια από τα τοιχώματα 90° . Επιπρόσθετα, τα πρώτα παρουσιάζουν υψηλή κινητικότητα και ευαισθησία υπό την παρουσία εξωτερικών δυνάμεων σε αντίθεση με τα άλλα. Η εφαρμογή εξωτερικών δυνάμεων (stress - σ) σε κάποιο κύριο κρυσταλλογραφικό άξονα ενός πολυκρυσταλλικού υλικού, υπό γωνία ϕ με τον εύκολο άξονα μαγνήτισης του υλικού, που παρουσιάζει ιστροπική μαγνητοσυστολή λ αυξάνει την ενέργεια του υλικού κατά ποσότητα E και οδηγεί στην κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων.[5]

$$E = -\frac{3}{2}\lambda\sigma\cos^2\phi \quad (1.2)$$

1.1.3 Εσωτερικές τάσεις

Η χρήση των φερομαγνητικών χαλύβων είναι ευρέως διαδεδομένη, από τις μονάδες ναυπήγησης και την αυτοκινητοβιομηχανία έως την κατασκευή σωληνώσεων και ηλεκτροκινητήρων. [5] Οι μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες μπορούν να επηρεαστούν σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη εσωτερικών τάσεων (residual stresses) οδηγώντας στην αύξηση του κόστους για επιδιορθώσεις. Συνεπώς, ο έλεγχος των εσωτερικών τάσεων αποτελεί υποχρεωτική πρακτική κατά τη κατασκευή. Να διευκρινιστεί ότι, με τον όρο εσωτερικές τάσεις εννοούμε τις τάσεις που παραμένουν στο χάλυβα κατά την απουσία εξωτερικών δυνάμεων και διαφορά θερμοκρασίας στον όγκο του υλικού, οι οποίες αλληλοαναιρούνται, δηλαδή:

$$\int \sigma dA = 0 \quad (1.3)$$

όπου, σ είναι η παραμόρφωση σε ένα σημείο και dA το απειροστό εμβαδόν της περιοχής. Οι παραμένουσες τάσεις μπορεί να δημιουργηθούν στο υλικό λόγω της επεξεργασίας του είτε λόγω γεωμετρικών ατελειών μεταξύ των μερών. [7]

Γίνεται αναφορά σε μακροσκοπικά και μικροσκοπικά στρες. Τα μακροσκοπικά έχουν μέγεθος συγκρίσιμο με το μέγεθος κόκκου ενώ αποτελούν τένσορες που το

μέγεθός τους αλλάζει σύμφωνα με τον προσανατολισμό. Υπολογίζονται για μια συγκεκριμένη θέση και διεύθυνση μετρώντας την παραμόρφωση υπό την ίδια διεύθυνση σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Οι μικροσκοπικές τάσεις είναι μονόμετρο μέγεθος που προκύπτουν από τις ατέλειες του κρυστάλλου και αλλάζουν από σημείο σε σημείο στο κρυσταλλικό πλέγμα. [8]

Διακρίνονται 3 είδη εσωτερικών τάσεων, τις εφελκυστικές, τις θλιπτικές και τις διατμητικές όμως πιο συχνή είναι η παρουσία των θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων. Οι εφελκυστικές τάσεις αποτελούν τον κύριο παράγοντα δημιουργίας ρωγμών. Αντίθετα, οι θλιπτικές τάσεις στο εσωτερικό λειτουργούν βοηθητικά καθώς αποτρέπουν τη δημιουργία ή την επέκταση των προηγούμενων. [9] Γενικά, υπό προϋποθέσεις, οι θερμικές κατεργασίες προσδίδουν θλιπτικές τάσεις στο υλικό. Κατά τη συγκόλληση όμως, δημιουργούνται και εφελκυστικές τάσεις. Ακόμα η κοπή με τροχό (grinding) προσθέτει επιφανειακές θλιπτικές τάσεις και θα πρέπει να αποφεύγεται. [7]

Η συγκόλληση αποτελεί αναπόσπαστη διεργασία στην κατασκευή εξαρτημάτων καθώς προσφέρει σθεναρή ένωση δύο μεταλλικών στοιχείων. Ο χάλυβας θερμαίνεται έως τη θερμοκρασία τήξης και στη συνέχεια με απότομη ψύξη οδηγείται σε παραμόρφωση της δομής και μετασχηματισμό της φάσης του. Αυτό οφείλεται στη μη ομοιόμορφη διαστολή, συρρίκνωση και κατανομή της θερμοκρασίας. Παρατηρείται η δημιουργία τριών περιοχών στο μέταλλο μετά τη συγκόλληση: τη ζώνη συγκόλλησης (FZ), ζώνη επηρεασμένη απ τη θερμότητα (HAZ) και το ανεπηρέαστο μέταλλο (BM). Η καταπόνηση του υλικού λόγω των εφελκυστικών τάσεων γίνεται πιο έντονη κοντά στον άξονα συγκόλλησης και μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν. Επίσης, οι θλιπτικές τάσεις που δημιουργούνται συγκεντρώνονται κυρίως στο ανεπηρέαστο μέταλλο και στα όρια της HAZ με αυτό. Ωστόσο, δεν είναι απαραίτητο, μελέτες δείχνουν πως η κατανομή των θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων εξαρτάται από το υλικό, τη μέθοδο της συγκόλλησης, τη θερμότητα που εκλύεται και την ακολουθία των σημείων συγκόλλησης. [7]

1.2 Μη μαγνητικές τεχνικές μέτρησης των εσωτερικών τάσεων

Οι κύριες κατηγορίες τεχνικών για την μέτρηση των εσωτερικών τάσεων μπορούν να διαχωριστούν εύκολά σε καταστροφικές, ημι-καταστροφικές (αλλιώς μηχανικές) και μη καταστροφικές. Οι μηχανικές τεχνικές αναλύουν το πως απελευθερώνεται το στρες όταν αφαιρείται ένα κομμάτι του μετάλλου. Οι πιο διαδεδομένες τεχνικές (ημί-)καταστροφικών τεχνικών αναφέρονται παρακάτω¹:

- Hole-drilling technique

¹Οι ονομασίες των τεχνικών παρατίθενται στην αγγλική όπως παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία.

- Deep hole method
- Sectioning technique
- Contour method
- Άλλες τεχνικές (excision, splitting, curvature, layer removal, slitting...)

Μη καταστροφικές μεθόδους αποτελούν τεχνικές που περιλαμβάνουν τη χρήση φυσικών φαινομένων όπως η περίθλαση (χρήση ακτίνων X ή νετρονίων), τους υπερήχους και τον μαγνητισμό. Οι τεχνικές που βασίζονται στη περίθλαση προσδιορίζουν την ελαστική παραμόρφωση από την μεταβολή της πλεγματικής απόστασης μέσω του νόμου του Bragg (εξίσωση 1.4). Η διαφορά ανάμεσα στη χρήση ακτίνων X και νετρονίων είναι το βάθος διείσδυσης με το τελευταίο να υπερτερεί. Μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι το κόστος εξοπλισμού και η αδυναμία της επαρκούς ανάλυσης της καμπύλης εξόδου της διάταξης για μεγάλα εξαρτήματα. Με την χρήση υπερήχων αξιοποιείται το φαινόμενο της ακουστικής ελαστικότητας (acoustic elasticity) των υλικών καθώς και πως μεταβάλλεται υπό την παρουσία εσωτερικών τάσεων. Η μέθοδος προσφέρει αποτελέσματα για όλο τον όγκο του υλικού υπό την προϋπόθεση χρήσης εξοπλισμού μεγάλης ακρίβειας.

Θα αφιερωθούν οι δύο επόμενες υπό-ενότητες στην ανάλυση της μεθοδολογίας των τεχνικών περίθλασης καθώς χρησιμοποιούνται ευρέως στην επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων πολλών προτεινόμενων μαγνητικών μεθόδων ελέγχου των εσωτερικών τάσεων. Να σημειωθεί ότι οι τεχνικές XRD και ND μπορούν να μετρήσουν στρες στην ελαστική περιοχή του υλικού, οποιαδήποτε πλαστική παραμόρφωση είναι μη ανιχνεύσιμη. [5],[10]

1.2.1 X-Ray Diffraction (XRD)

Η μέθοδος της περίθλασης των ακτίνων X εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι οι παραμένουσες τάσεις στην ελαστική περιοχή, δημιουργούν αλλαγές στο κρυσταλλικό πλέγμα. Μετρώντας την ατομική απόσταση εξάγονται συμπεράσματα για το στρες που εφαρμόζεται. [9] Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε κρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά υλικά με μικρό μέγεθος κόκκων τα οποία παρουσιάζουν περίθλαση ανεξαρτήτως της γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Η εξαγωγή αποτελεσμάτων απαιτεί τη μέτρηση της παραμόρφωσης σε τουλάχιστον δύο γνωστές διευθύνσεις σχετικές με την επιφάνεια του δείγματος. Πλεονέκτημα αποτελεί η μέτρηση τόσο μακροσκοπικών όσο και μικροσκοπικών εσωτερικών τάσεων, μη καταστροφικά σε βάθος έως 5μm. [8]

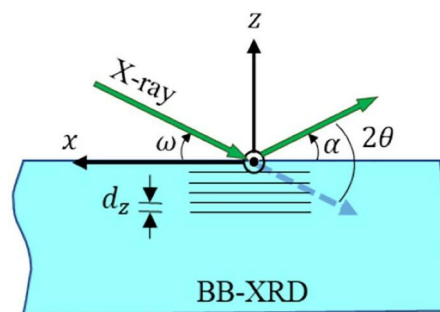
Βασική αρχή της τεχνικής της περίθλασης αποτελεί ο νόμος του Bragg (1.4) όπου n ακέραιος, λ το μήκος κύματος της ακτίνας X, d η πλεγματική απόσταση που

αναζητείται και θ η γωνία περίθλασης που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο επίπεδο ανάκλασης hkl . [8] Έχειδειχθεί ότι το μοτίβο της περίθλασης διαφοροποιείται ανάλογα την πλεγματική απόσταση. Η απόκριση του υλικού επίσης αλλάζει σύμφωνα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται. Όταν στο σημείο μέτρησης δέν υπάρχουν παραμένουσες τάσεις προκύπτει χαρακτηριστικό μοτίβο του υλικού. Με προσεκτική μέτρηση της μεταβολής της χαρακτηριστικής προκύπτουν οι ζητούμενες τιμές της παραμόρφωσης. [11]

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1.4)$$

Το δείγμα σαρώνεται για διάφορες γωνίες 2θ και στη συνέχεια επιλέγεται η γωνία που παρουσιάζει την υψηλότερη κορυφή και προσδιορίζεται η πλεγματική απόσταση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε γωνία ψ , όπου ψ η γωνία ανάμεσα στο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια του υλικού και τον άξονα z . Η επιλογή των γωνιών ψ γίνεται με διάφορες τεχνικές: single-angle technique, two-angle technique, $\sin^2\psi$ technique. [8] Η πιο διαδεδομένη τεχνική από αυτές είναι η $\sin^2\psi$ technique στην οποία χρησιμοποιούνται πολλές γωνίες ψ , προσδιορίζονται οι πλεγματικές αποστάσεις και με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίζεται η ευθεία παρεμβολής των δεδομένων. Πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί ο προσδιορισμός της εσωτερικής τάσης στο σημείο μέτρησης από την κλίση της βέλτιστης ευθείας με μεγάλη ακρίβεια.

Μία διάταξη που χρησιμοποιείται πολύ συχνά είναι η μέθοδος XRD Bragg-Brentano (BB-XRD Εικόνα 1.3). Χαρακτηριστικό της γεωμετρίας είναι ότι ο ανιχνευτής της ακτινοβολίας έχει την ίδια γωνία με τη γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων X. Αποτέλεσμα είναι η ανίχνευση ακτίνων μόνο από κρυσταλλογραφικά επίπεδα παράλληλα με την επιφάνεια του δείγματος. Σε πολυκρυσταλλικά υλικά επιτρέπει τη μέτρηση της πλεγματικής απόστασης πολλαπλών επιπέδων διαφορετικού προσανατολισμού. Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η αδυναμία μέτρησης εσωτερικών τάσεων σε υλικά με υψηλή αντανάκλαση. [12] Το βάθος διείσδυσης της διάταξης προκύπτει $t_{BB} = 3.45 \frac{\sin\theta}{\mu}$, όπου μ ο γραμμικός συντελεστής απόσβεσης του υλικού. [13]



Σχήμα 1.3: Διάταξη Bragg-Brentano XRD [12]

1.2.2 Neutron Diffraction (ND)

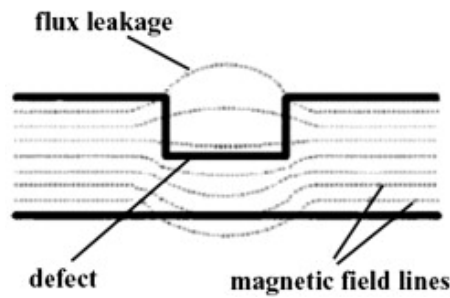
Η μέτρηση των εσωτερικών τάσεων με χρήση της μεθόδου περίθλασης νετρονίων υπακούει στις ίδιες αρχές με τη μέθοδο XRD. Η μόνη διαφοροποίηση είναι στο βάθος διείσδυσης: Τα νετρόνια λόγω της χαμηλής τους αλληλεπίδρασης μπορούν να διαπεράσουν από πολλά χιλιοστά έως εκατοστά στα περισσότερα υλικά. [14] Αύτη τους η ιδιότητα καθιστά τη μέθοδο αργή καθώς χρειάζεται περισσότερος χρόνος για κάθε μέτρηση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση είτε συνεχής ροή θερμικών νετρονίων από αντιδραστήρες, είτε παλμοί νετρονίων από πηγές εμφύτευσης. Η τεχνική ενδείκνυται για περίπλοκα υλικά με πολλαπλούς μετασχηματισμούς φάσης τα οποία παρουσιάζουν πολλές κοντινές κορυφές περίθλασης. [15]

Το μεγάλο βάθος διείσδυσης δίνει την δυνατότητα να καθοριστεί ο τένσορας του στρες σε ένα μικρό όγκο εσωτερικά του δοκιμίου. Καθώς πλέον αναφερόμαστε σε τένσορα και όχι μονόμετρο μέγεθος, για κάθε σημείο πρέπει να γίνουν μετρήσεις σε έξι προσανατολισμούς. Ωστόσο, όταν οι κύριες διευθύνσεις είναι γνωστές επαρκούν μόνο τρεις ακόμα προσανατολισμοί. Επειδή σε ένα συγκολλημένο δείγμα οι συμμετρίες συμπίπτουν με την καθετη, την εγκάρσια και την ακτινική διεύθυνση χρειάζονται μόνο οι μετρήσεις σε αυτή τη διεύθυνση για το προσδιορισμό του τένσορα. [14]

1.3 Μαγνητικές μέθοδοι προσδιορισμού εσωτερικών τάσεων

1.3.1 Magnetic flux leakage (MLF)

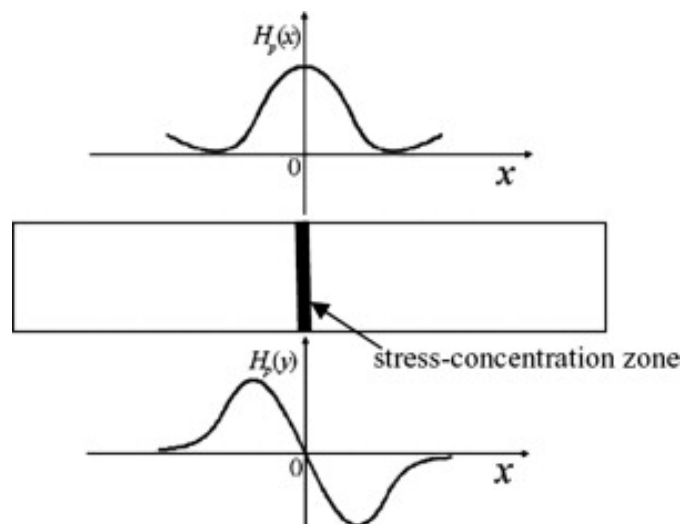
Η ιδέα πίσω από την τεχνική MLF βασίζεται στο ότι όταν εφαρμοστεί ένα ισχυρό εξωτερικό πεδίο σε φερομαγνητικό υλικό, κάθε ασυνέχεια στη γεωμετρική του δομή θα προκαλέσει απώλεια μαγνητικών γραμμών. Το φαινόμενο ποσοτικοποιείται με τη χρήση αισθητήρα μαγνητικού πεδίου. Για να μπορέσει η μέθοδος να θεωρηθεί αξιόπιστη θα πρέπει το πεδίο να είναι ισχυρό και ομογενές και ο μαγνητικός αισθητήρας να βρίσκεται κοντά στο σημείο αλλαγής της πυκνότητας της μαγνητικής ροής ώστε να μην υπάρχουν παρεμβολές από το μαγνητικό θόρυβο του περιβάλλοντος. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έχει περιγραφεί πλήρως με τη χρήση εξισώσεων για παραμορφώσεις απλής γεωμετρίας. Στη περίπτωση ακανόνιστων ελαττωμάτων χρησιμοποιείται η γραμμική προσέγγιση της θεωρίας των φερομαγνητικών υλικών. Συνδυαστικά με την επίλυση των μαθηματικών σχέσεων η χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων προσφέρει καλύτερη ερμηνεία των μετρήσεων. Αν και είναι διαδεδομένη, αδυναμία της τεχνικής αποτελεί η δυσκολία του πλήρη προσδιορισμού όλων των παραμέτρων που καθορίζουν τη μετρούμενη παραμόρφωση από το σήμα εξόδου. [16]



Σχήμα 1.4: Διαφυγή μαγνητικών γραμμών σε παραμορφωμένο υλικό [16]

1.3.2 Metallic Magnetic Memory (MMM)

Η μέθοδος έχει την ίδια αρχή με την τεχνική MLF, η διαφορά εντοπίζεται στο ότι η μαγνήτιση του υπό εξέταση χάλυβα προέρχεται από το μαγνητικό πεδίο της γης. Έχει παρατηρηθεί ότι το πεδίο που επάγεται επιδεικνύει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όταν υπάρχει ατέλεια. Το εφαπτόμενο πεδίο (H_x) φτάνει τη μέγιστη τιμή του ενώ το κάθετο (H_y) μηδενίζεται αλλάζοντας πολικότητα. Ακόμα, η απόσταση από κορυφή σε κορυφή του σήματος H_y και το ύψος της κορυφής του σήματος H_x είναι συνδεδεμένα με το μέγεθος και τη συγκέντρωση του στρες. Η κλίση του σήματος λήψης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό της ελαστικής παραμόρφωσης του υλικού. [17] Η μέθοδος παρουσιάζει διάφορα πλεονεκτήματα όπως η αποτελεσματικότητα, η ευκολία στο χειρισμό και η ταχύτητα λήψης των δεδομένων. [16] Από την άλλη πλευρά, η θέση του αισθητήρα, ο μαγνητικός θόρυβος του περιβάλλοντος και η θερμοκρασία είναι κάποιες από τις παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψιν για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. [17]



Σχήμα 1.5: Απόκριση των πεδίων H_x και H_y σε περιοχή παραμόρφωσης.[16]

1.3.3 Θόρυβος Barkhausen - Barkhausen Noise

Η κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων δεν είναι ανεξάρτητη του κρυσταλλικού πλέγματος του υλικού. Ατέλειες όπως το μέγεθος κόκκου, προσμίξεις ξένων στοιχείων ή μετακίνηση ατόμων εκτός του κρυσταλλικού πλέγματος λειτουργούν ανασταλτικά στη κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων δημιουργώντας ασυνέχειες. Ο μαγνητικός θόρυβος Barkhausen περιγράφει αυτές τις απότομες μετακινήσεις. Σε χαμηλά πεδία μαγνήτισης ο θόρυβος οφείλεται στις αντιστρεπτές και μη μετακινήσεις των τοιχωμάτων 180° (χαμηλά άλματα), ενώ σε υψηλά πεδία ο θόρυβος προκαλείται από τις περιστροφές των μαγνητικών περιοχών και είναι εντονότερος. [18]

Διατάξεις και μέθοδοι μέτρησης του μαγνητικού θορύβου Barkhausen

Οι διατάξεις για την μέτρηση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen αποτελούνται από τα εξής μέρη:

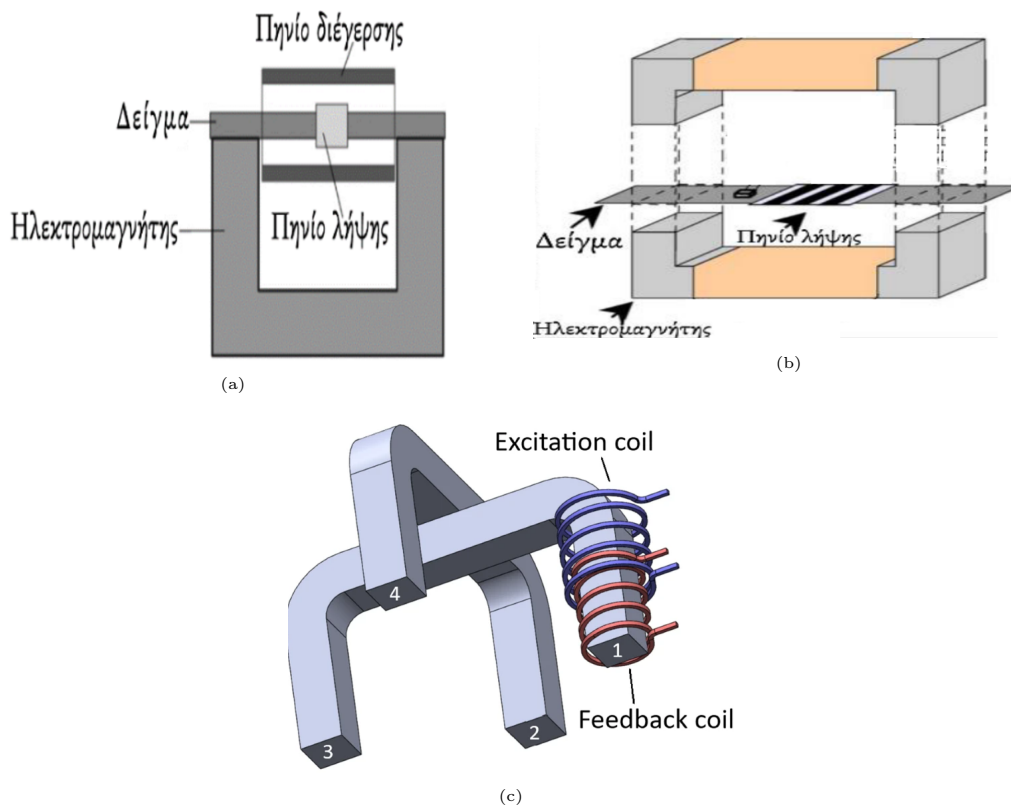
- Πηγή διέγερσης : ημιτονική ή τριγωνική διέγερση
- Πηνίο διέγερσης : Το πηνίο διέγερσης πολλές φορές είναι τυλιγμένο στο πάνω μέρος του ηλεκτρομαγνήτη. Όμως, μελέτη έδειξε ότι όσο μεγαλώνει το μήκος του μαγνητικού κυκλώματος, πιο συγκεκριμένα, η απόσταση μεταξύ του πηνίου διέγερσης και του πηνίου λήψης το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο εξασθενεί. Λύση σε αυτό το πρόβλημα αποτελεί η τοποθέτηση του πηνίου διέγερσης στα πόδια του ηλεκτρομαγνήτη. Σε μερικές περιπτώσεις τοποθετείται επιπλέον πηνίο μέτρησης της μαγνητικής ροής. [19]
- Ηλεκτρομαγνήτης: Όπως αναφέρεται, [19] ο ηλεκτρομαγνήτης πρέπει να είναι φτιαγμένος από υλικό μαγνητικά μαλακότερο από το δείγμα ώστε το μαγνητικό πεδίο να το διαπερνά εύκολα κατά τη διαδικασία της μαγνήτισης χωρίς όμως να φτάνει σε κορεσμό. Συνήθως, χρησιμοποιούνται φερρίτες αν και σε ιδιάζουσες περιπτώσεις έχει χρησιμοποιηθεί πυρήνας από καθαρό σίδηρο που παρουσιάζει τιμή κορεσμού υψηλότερη από τους φερρίτες. Ένα ακόμα υλικό που έχει δοκιμαστεί είναι το Supermendur καθώς έχει την υψηλότερη τιμή τιμή κορεσμού σε σύγκριση με τα παραπάνω.

Το σχήμα του ηλεκτρομαγνήτη αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην ποιότητα των αποτελεσμάτων. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να αποφεύγεται η δημιουργία κενού μεταξύ του ηλεκτρομαγνήτη και του υλικού. Η γεωμετρία του εξαρτήματος υπό εξέταση καθορίζει την ύπαρξη επίπεδων οι καμπυλωτών άκρων στα σημεία επαφής. [19] Για τη δημιουργία μιας διάταξης ανεξάρτητης της γεωμετρίας του υλικού αποδεκτή λύση είναι η χρήση άκρων καμπυλότητας 3.35mm. [20]

Άλλη διαφορά, αποτελεί το πλήθος των ηλεκτρομαγνητών. Συναντώνται στη βιβλιογραφία διατάξεις με ένα ή δύο συμμετρικά τοποθετημένους ηλεκτρομαγνήτες εκατέρωθεν του υλικού (1.6).[18] Μία ακόμα διάταξη προτάθηκε το 2004 είναι το τετράπολο (tetrapole) (1.6c). Αποτελείται από 2 ηλεκτρομαγνήτες κάθετα τοποθετημένους, ενώ τα πηνία διέγερσης δημιουργούν συνιστώσες μαγνήτισης στο X και Y άξονα. Με αυτή τη τεχνική έχουμε περιστροφή του πεδίου χωρίς κίνηση της διάταξης. Η μέθοδος του τετραπόλου βρίσκει εφαρμογή σε δείγματα με ανισοτροπία. [19]

Αξίζει να αναφερθεί ότι σε κυλινδρική γεωμετρία του υπό εξέταση υλικού (π.χ. καλώδιο) ο μαγνητικά μαλακός πυρήνας μπορεί να αντικατασταθεί από πηνίο χαλκού. [19]

- Πηνίο λήψης: Το πηνίο λήψης μπορεί να περιέχει ή όχι πυρήνα. Η προσθήκη ενός μαλακού πυρήνα φερρίτη προσδίδει μεγαλύτερη ευαισθησία στον αισθητήρα.[19] Ακόμα, η τοποθέτηση του πηνίου λήψης μεταβάλλει τη μέτρηση. Αν το πηνίο βρίσκεται στην επιφάνεια του χάλυβα πρόκειται για επιφανειακή μέτρηση ενώ αν περικλείει το δείγμα η μέτρηση αφορά όλο τον όγκο του υλικού. [18]
- Μονάδα συλλογής δεδομένων, για παράδειγμα, παλμογράφος, ηλεκτρονικός υπολογιστής.



Σχήμα 1.6: Διατάξεις μέτρησης θορύβου Barkhausen (a) Μονού ηλεκτρομαγνήτη , (b) Διπλού ηλεκτρομαγνήτη,[18] (c)Τετράπολο: Με μπλέ χρώμα φαίνεται το πηνίο διέγερσης (Excitation coil) και με κόκκινο το προαιρετικό πηνίο μέτρησης της μαγνητικής ροής (Feedback coil)[19]

Η καταγραφή των τιμών του μαγνητικού θορύβου για τον χωρικό προδιορισμό τους στο χάλυβα, μπορεί να γίνει εύκολα εφαρμόζοντας πεδίο σταθερής διεύθυνσης σε κάθε σημείο μέτρησης. Η τεχνική αυτή ονομάζεται **γραμμική σημειακή μέτρηση**. Σημαντικό στοιχείο είναι η επιλογή των σημείων και ειδικότερα η απόσταση μεταξύ τους ώστε να προκύπτουν επαρκή δεδομένα για την μεταβολή του θορύβου. Αντίθετα, για την αξιολόγηση της ανισοτροπίας χρησιμοποιούνται **γωνιακές σημειακές μετρήσεις**. Μετά την πραγματοποίηση της κάθε μέτρησης ο ηλεκτρομαγνήτης περιστρέφεται με προκαθορισμένη γωνία και η μέτρηση επαναλαμβάνεται. Η ανισοτροπία προσδιορίζεται αφού κατά την διάρκεια ενός μαγνητικού κύκλου εμφανίζεται η μέγιστη τιμή μαγνήτισης και στη συνέχεια μειώνεται, για κάθε τιμή γωνίας η κατανομή αλλάζει. Προϋπόθεση για την επιτυχία της μεθόδου αποτελεί η διάρκεια μίας μέτρησης να είναι τουλάχιστον ίση με το χρόνο που χρειάζεται για μισό κύκλο μαγνήτισης (εμφάνιση ενός μέγιστου).

Η μέθοδος **Rotational Barkhausen Method - RBM** αξιοποιεί τη χρήση τετραπόλου που όπως προαναφέρθηκε προσφέρει πλεονεκτήματα όταν χρησιμοποιείται σε υλικό με γνωστή ανισοτροπία. Ένα από αυτά είναι ότι σύμφωνα με την

διεύθυνση του συνισταμένου πεδίου παρατηρούνται αλλαγές στη μαγνήτιση χωρίς να υπάρχει επιρροή της ανισοτροπίας. Αντίστοιχα όμως παρατηρήθηκαν φαινόμενα που δυσκολεύουν την μέτρηση, όπως η θέρμανση των πηνίων αφού η εκλυόμενη θερμότητα επηρεάζει το δείγμα υπο έλεγχο. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η μείωση της ωφέλιμης περιοχής λόγω της ανομοιομορφίας του πεδίου. [18] Τέλος, η ανάλυση του σήματος εξόδου συναρτήσει του χρόνου μπορεί να γίνει πολύ δύσκολη λόγω της χαοτικής μορφής του [21].

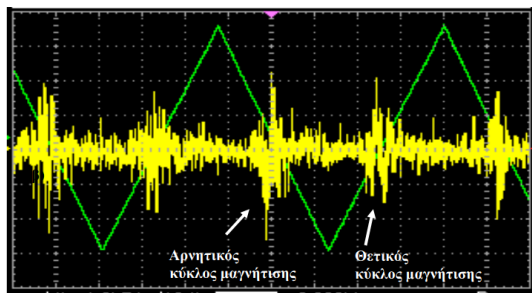
Ακόμα, έχουν προταθεί μέθοδοι που αντικαθιστούν τους ηλεκτρομαγνήτες με ισχυρούς μόνιμους μαγνήτες: **Continuous Barkhausen Method - CBM** και **Continuous Rotational Barkhausen Method - CRBM**. Στη πρώτη περίπτωση η διάταξη αποτελείται από ένα μόνιμο μαγνήτη με δυνατότητα κίνησης πάνω από το δείγμα ώστε να δημιουργείται χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο το οποίο ανιχνεύεται από πηνίο λήψης με πυρήνα φερρίτη. Η μέθοδος τροποποιήθηκε ώστε να μπορεί να εξάγει συμπεράσματα για την ανισοτροπία του χάλυβα. Η διάταξη αποτελείται από φερομαγνητικό πυρήνα στα άκρα του οποίου υπάρχουν μόνιμοι μαγνήτες νεοδημίου έχοντας τη δυνατότητα περιστροφής. Οι τεχνικές με μόνιμους μαγνήτες παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι αποφεύγεται η χρήση ρεύματος για την παραγωγή πεδίου διέγερσης. [18]

Παράμετροι του μαγνητικού θορύβου Barkhausen

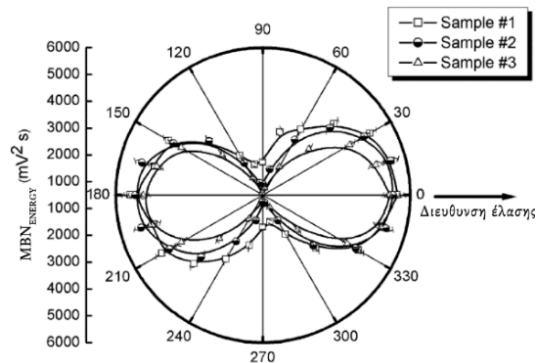
Τυπική μορφή της γραφικής παράστασης του μαγνητικού θορύβου Barkhausen φαίνεται στην εικόνα 1.7. Εύκολα εξάγονται οι εξής παράμετροι: Η ενεργός τιμή (MBN_{RMS}) και το μέγιστο πλάτος του θορύβου. Στη συνέχεια, με κατάλληλο λογισμικό μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω. Συνήθης πρακτική είναι η χρήση κατωφλίου ανάλογα με τον υπό εξέταση χάλυβα για την αύξηση της ευαισθησίας της μέτρησης. Η ενέργεια του μαγνητικού θορύβου (MBN_{ENERGY} (1.5) αποτελεί τη κύρια μετρική για την εύρεση της ανισοτροπίας. Ακόμα, σε συνδυασμό με τα παραπάνω πολλές μέλετες αξιοποιούν τη γραφική παράσταση του θορύβου Barkhausen συναρτήσει του επιβαλλόμενου πεδίου ($MBN_{ENVELOPE}$) για το δείγμα που εξετάζεται. Τέλος, ως ευσταθής παράμετρος έχει προταθεί η χρήση της ποσότητας MBN_{H_C} που αποτελεί τη τιμή μηδενισμού του ολοκληρώματος ως προς το χρόνο της τιμής εξόδου του μαγνητικού θορύβου συναρτήσει του εξωτερικώς επιβαλλόμενου πεδίου.

Για την τιμή της ενέργειας του μαγνητικού θορύβου χρησιμοποιείται πιο συχνά η εξίσωση (1.6), σε πολικές συντεταγμένες όπου, θ η γωνία εφαρμογής του πεδίου \mathbf{H} , ϕ η γωνία του άξονα εύκολης παραμόρφωσης με τον άξονα μέτρησης της γωνίας θ , ενώ α και β , συντελεστές που προκύπτουν από την μαθηματική ανάλυση και σχετίζονται με τον εύκολο άξονα μαγνήτισης (μη-αντιστρεπτή κίνηση των τοιχωμάτων 180°) και τις περιοχές που δεν συμβάλουν στην ανισοτροπική συμπεριφορά αντίστοιχα. Από του συντελεστές αυτούς προκύπτει ο συντελεστής ανισοτροπίας του υλικού k (1.7). Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι η εξίσωση (1.6) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ύστερα

από τις εξής παραδοχές: 1) Τα πεδία εσωτερικά του υλικού που δημιουργούνται είναι αμελητέα. 2) Φαινόμενα απομαγνήτισης εξαλείφονται λόγω της χρήσης ηλεκτρομαγνήτη. 3) Υπάρχει κοινός εύκολος άξονας μαγνήτισης στα πολυκρυσταλλικά υλικά. 4) Ο παράγοντας α' θεωρείται αμελητέος σε σχέση με τους α , β . Στο σχήμα 1.8 φαίνεται η μορφή του πολικού διαγράμματος της ενέργειας του θορύβου Barkhausen από το οποίο προσδιορίζονται οι συντελεστές α και β για την εύρεση της ανισοτροπίας. [18]



Σχήμα 1.7: Απόκριση σήματος θορύβου Barkhausen. Με πράσινο φάνεται το σήμα διέγερσης ενώ με κίτρινο το σήμα του θορύβου. [18]



Σχήμα 1.8: Απόκριση ενέργειας θορύβου Barkhausen σε δείγματα χάλυβα AISI 1070 με παραμόρφωση για προσδιορισμό του εύκολου άξονα μαγνήτισης. [18]

$$MBN_{ENERGY} = \sum_{events} \int V_{out}^2 dt \quad (1.5)$$

$$MBN_{ENERGY} = \alpha \cos^2(\theta - \phi) + (\alpha' \cos(\theta - \phi)) + \beta \quad (1.6)$$

$$k = \frac{\max(MBN_{ENERGY})}{\min(MBN_{ENERGY})} = \frac{\alpha + \beta}{\beta} \quad (1.7)$$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι παράγοντες που επιδρούν στην απόκριση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen:

- Κατά βάρος περιεκτικότητα σε άνθρακα (weight percent of chemical content of carbon): Παρουσιάζεται αύξηση του μαγνητικού θορύβου έως μια κρίσιμη τιμή (0.45%) ενώ στη συνέχεια μειώνεται.
- Ποσοστό κλάσματος όγκου φάσεων, μικροδομικών συστατικών και κατακρημνίσεων (Volume fraction of phases): Η παρουσία μαρτενσίτη οδηγεί σε πτώση της μαγνητικής απόκρισης του θορύβου. Από την άλλη πλευρά, ο θόρυβος αυξάνεται με την αύξηση του περλίτη έως μια κρίσιμη τιμή. Ακόμα η σφαιροποίηση σεμεντίτη οδηγεί σε πτώση της μαγνητικής απόκρισης.

- Μέγεθος, μορφολογία και κατανομή κόκκων (size, morphology and distribution of grains): Η αύξηση του μεγέθους κόκκων οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές μαγνητικού θορύβου, πιο συγκεκριμένα, η μαγνητική απόκριση αυξάνεται αντιστρόφως ανάλογα με τη τετραγωνική ρίζα του μεγέθους κόκκων.
- Μορφολογία, κατανομή και πυκνότητα διαταραχών (dislocations' morphology, distribution and density): Στη γενική περίπτωση, αύξηση των διαταραχών οδηγεί σε υψηλότερα άλματα του θορύβου όμως, κυρίαρχη παράμετρος αποτελεί η μορφολογία των διαταραχών.
- Όρια κόκκων (grain boundaries): Η απόκριση του θορύβου Barkhausen στα όρια των κόκκων εξαρτάται από τη γωνία αναντιστοιχίας, όταν η γωνία είναι μικρότερη των 15° παρατηρείται αύξηση.
- Επίδραση μηχανικής σκληρότητας στην απόκριση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (macro- and micro-hardness evaluation): Οι ανάστροφες τιμές της ενεργού τιμής, του ύψους της κορυφής, είναι ανάλογες με τις μεταβολές της σκληρότητας.
- Επίδραση τασικού πεδίου στην απόκριση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (stress field evaluation): Το ποσοστό της παραμορφωσιμότητας αυξάνει μονότονα το θόρυβο στην ελαστική περιοχή, ενώ παρατηρείται μείωση μετά το όριο θραύσης σε κοινό ανθρακούχο χάλυβα, ηλεκτρικό χάλυβα και φερίτοπερλιτικούς χάλυβες. Σε υψηλή παραμόρφωση οι ωστενιτικοί, οι ηλεκτρικοί και οι κοινοί χάλυβες παρουσιάζουν διπλή κορυφή. Σύμφωνα με μελέτη, οι εφελκυστικές παραμορφώσεις αυξάνουν το θόρυβο ενώ οι θλιπτικές προκαλούν μείωση. Αντίστοιχα αποτελέσματα προέκυψαν και για τις παραμένουσες τάσεις.

Η μέτρηση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη διαφόρων διεργασιών στους χάλυβες. Οι θερμικές κατεργασίες, όπως η ανόπτηση, τροποποιούν το μέγεθος κόκκων και μπορούν να οδηγήσουν και σε μετασχηματισμούς φάσης. Η μεταβολή της ενέργειας του θορύβου καθώς και η αλλαγή στο ύψος των τιμών χρησιμοποιούνται ως μετρικές αφού περιγράφουν τις επιμέρους διαδικασίες της ανόπτησης με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η ενεργός τιμή του μαγνητικού θορύβου χρησιμοποιείται για την αναγνώριση ύπαρξης μετασχηματισμού φάσεων στο χάλυβα. Ακόμα, η παραμόρφωση και ο ερπυσμός μπορούν να ανιχνευθούν και να αξιολογηθούν μη καταστροφικά σε φερομαγνητικά υλικά. Σε περιπτώσεις πολυκυκλικής ή στο πρώτο στάδιο ολιγοκυκλικής κόπωσης η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και παρουσιάζει μη γραμμική εξάρτηση με τους κύκλους φόρτισης. Τέλος, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της κατανομής των παραμενουσών τάσεων σε όλη την επιφάνεια συγκολλημένων δοκιμίων. [18]

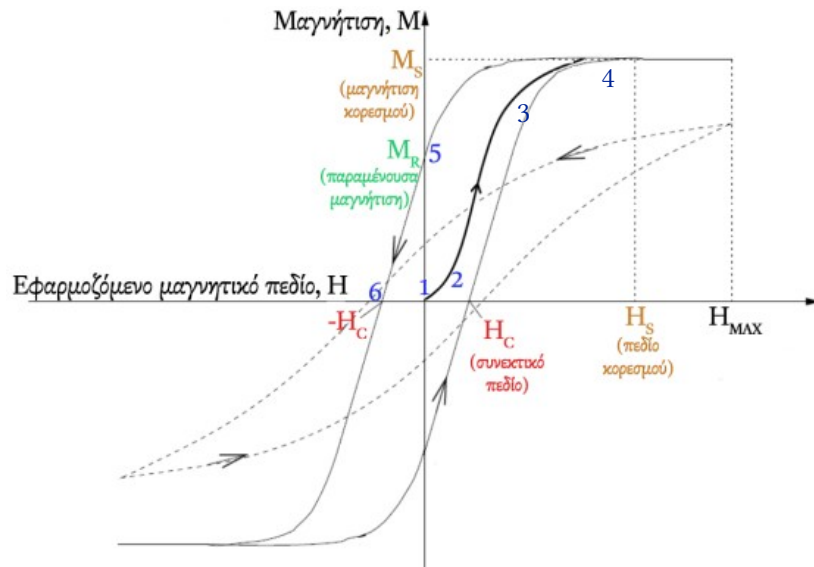
1.4 Υστέρηση - Hysterisis

1.4.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Η διαδικασία μαγνήτισης (M) ενός αμαγνήτιστου, πολυκρυσταλλικού φερομαγνητικού υλικού (Σχήμα 1.9) χαρακτηρίζεται από αντιστρεπτές και μη μεταβολές. Εφαρμόζοντας μικρό μαγνητικό πεδίο παρατηρείται αντιστρέψιμη κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων, δηλαδή, υπό απουσία πεδίου τα τοιχώματα μπορούν να επιστρέψουν στις αρχικές τους θέσεις (τμήμα 1-2). Στη συνέχεια, καθώς το πεδίο αυξάνεται και τα μαγνητικά τοιχώματα συνεχίζουν να κινούνται, συναντούν ατέλειες στο υλικό και η μαγνήτιση πραγματοποιείται σε άλματα σύμφωνα με το φαινόμενο Barkhausen (2-3). Όπως ήδη έχουμε αναφέρει η κίνηση αυτή είναι πλέον μη αντιστρεπτή αφού παρουσιάζεται έκλυση θερμότητας λόγω της παραμόρφωσης του πλέγματος και της δημιουργίας δινορευμάτων (φαινόμενο Joule). Σε κάποια τιμή του εξωτερικώς επιβαλλόμενου πεδίου η κίνηση των τοιχωμάτων σταματά και σε κάθε κρυσταλλικό κόκκο έχει επικρατήσει η μαγνήτιση σε εύκολο άξονα που σχηματίζει τη μικρότερη γωνία με το \mathbf{H} (σημείο 3). Το μόνο που μένει μέχρι την πλήρη μαγνήτιση του υλικού (M_s) είναι η περιστροφή των διπόλων μέχρι τον παραλληλισμό με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (3-4).

Μειώνοντας σταδιακά την ένταση του πεδίου, διατηρώντας την διεύθυνσή του, τα δίπολα σε κάθε κόκκο περιστρέφονται ώστε να γυρίσουν στον εύκολο άξονα μαγνήτισης, ενώ παράλληλα έχουμε και τη δημιουργία μικρών περιοχών (περιοχή 4-5). Κατά τον μηδενισμό του \mathbf{H} παρατηρούμε πως η μαγνήτιση του υλικού είναι μη μηδενική με τιμή M_r , η οποία αποκαλείται παραμένουσα μαγνήτιση. Για να μηδενιστεί η μαγνήτιση εφαρμόζουμε εκ νέου πεδίο σε αντίθετη διεύθυνση από την αρχική. Το πεδίο που απαιτείται για το μηδενισμό (σημείο 6) ονομάζεται συνεχτικό πεδίο H_c και παριστά την αντίσταση του υλικού στην απομαγνήτιση. Μαγνητίζοντας περαιτέρω στην αντίθετη διεύθυνση παρατηρούμε όμοια διαδικασία μαγνήτισης του υλικού και τιμή του πεδίου για πλήρη μαγνήτιση ίση με $-H_s$. Επιστρέφοντας στην αρχική διεύθυνση του πεδίου παρατηρούμε παραμένουσα μαγνήτιση $-M_r$ και η απόλυτη τιμή του συνεχτικού πεδίου παραμένει ίδια. Έτσι για ένα πλήρη κύκλο του μαγνητικού πεδίου H δημιουργείται βρόχος μαγνήτισης ή **Βρόχος υστέρησης** με κέντρο συμμετρίας την αρχή των αξόνων.

Η τιμή της μαγνήτισης κόρου είναι χαρακτηριστικό του υλικού. Όμως η μορφή της καμπύλης μέχρι την επίτευξη αυτής της τιμής εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες και την επεξεργασία που έχει υποστεί. Η δημιουργία βρόχου υστέρησης παρουσιάζεται για κάθε κύκλο μαγνήτισης ανεξάρτητα εάν το πεδίο που εφαρμόζεται είναι αρκετό ώστε να κορεστεί το υλικό. Ανάλογα την ένταση του πεδίου το σχήμα του βρόχου αλλάζει. Σε κάθε περίπτωση, το εμβαδόν την καμπύλης αποτελεί την ενέργεια που καταναλώνεται ανά μονάδα όγκου για την μαγνήτιση του υλικού. [2],[18]



Σχήμα 1.9: Τυπική μορφή του βρόχου υστέρησης, όπου αναγράφονται το συνεκτικό πεδίο, το πεδίο κορεσμού, η μαγνήτιση κορεσμού και η παραμένουσα μαγνήτιση. Με διακεκομμένη φαίνεται ένας ελάσσονας βρόχος υστέρησης.[18]

Οι καμπύλες $\mathbf{B} - \mathbf{H}$ και $\mathbf{M} - \mathbf{H}$ έχουν την ίδια συμπεριφορά. Οι χρήσιμες παράμετροι που εξάγονται από την κάθε μία είναι: η μαγνήτιση κορεσμού M_S , η παραμένουσα μαγνήτιση M_R , το συνεκτικό πεδίο H_C , οι οποίες προκύπτουν απευθείας απ' τη γραφική παράσταση $\mathbf{M} - \mathbf{H}$ αλλά και οι απώλειες του βρόχου W_H , η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα μ_0 (κλίση της αρχικής καμπύλης στο σημείο 0,0) και η μέγιστη τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας, μ_{max} (μέγιστη κλίση του βρόχου) οι οποίες προκύπτουν έμμεσα, αποτελούν χρήσιμες μετρικές. Παρόμοια, στο βρόχο $\mathbf{B} - \mathbf{H}$ προκύπτουν τα μεγέθη B_S : μαγνητική επαγωγή κορεσμού, B_R : παραμένουσα μαγνητική επαγωγή, χ_0 : η διαφορική μαγνητική επιδεκτικότητα, χ_{max} : η μέγιστη μαγνητική επιδεκτικότητα όπως και οι τιμές σε σχέση με το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο που αναφέρθηκαν νωρίτερα. [18]

Παράμετροι που επηρεάζουν το βρόχο υστέρησης

Εξετάζονται παρακάτω οι παράμετροι σύμφωνα με την επίδραση στη τιμή του συνεκτικού πεδίου και της παραμένουσας μαγνήτισης.[18]

- Κατά βάρος περιεκτικότητα σε άνθρακα (weight percent of chemical content of carbon): Παρουσιάζεται αύξηση του συνεκτικού πεδίου σε χάλυβες που δεν περιέχουν Mn. Η παραμένουσα μαγνήτιση ενώ δεν επηρεάζεται από το ποσοστό του άνθρακα, εξαρτάται από τη μορφολογία των καρβιδίων.
- Ποσοστό κλάσματος όγκου φάσεων, μικροδομικών συστατικών και κατακρημνίσεων (Volume fraction of phases): Έντονη αύξηση του συνεκτικού πεδίου

παρουσιάζεται στους μαρτενσιτικούς χάλυβες, λιγότερη στους φεριτο-περλιτικούς και η μικρότερη στους μπαινιτικούς. Επίσης, ο σφαιροποιημένος σεμεντίτης οδηγεί σε μείωση του συνεκτικού πεδίου αντίθετα με τον πλακοειδή. Για τη παραμένουσα μαγνήτιση διαπιστώθηκε αύξηση παρουσία περλίτη σφαιρικής μορφολογίας.

- Μέγεθος, μορφολογία και κατανομή κόκκων (size, morphology and distribution of grains): Για την εξάρτηση του συνεκτικού πεδίου από το μέγεθος κόκκου (D) έχει προταθεί η σχέση $H_c \propto \frac{1}{D^n}$ όπου $n = 0.8$ για μεγάλο μέγεθος κόκκου, $n = 0.57$ για μικρό μέγεθος κόκκου και $n = 0.5$ για τους ηλεκτρικούς χάλυβες. Μελέτες έδειξαν ότι το μέγεθος κόκκου δεν επιδρά στη μεταβολή του συνεκτικού πεδίου σε περλιτικούς χάλυβες όταν το κλάσμα όγκου των περλιτικών κόκκων είναι μικρότερο του 0.17, ενώ αυξάνει αναλογικά όταν είναι μεγαλύτερο του 0.6. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζουν οι φεριτικοί χάλυβες. Τέλος, στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους ή επαναφερμένους χάλυβες το μέγεθος των ωστενιτικών κόκκων δεν διαφοροποιεί το βρόχο υστέρησης. Διάφορες σχέσεις (1.8, 1.9, 1.10, 1.11) έχουν προταθεί για την εξάρτηση της μαγνητικής διαπερατότητας σύμφωνα με το μέγεθος κόκκου.

$$\frac{1}{\mu} \propto \frac{1}{D} \quad (1.8)$$

$$\mu \propto D^2 \quad (1.9)$$

$$\mu \propto \sqrt{D} \quad (1.10)$$

$$\mu \propto \log D \quad (1.11)$$

- Μορφολογία, κατανομή και πυκνότητα διαταραχών (dislocations' morphology, distribution and density): Με την αύξηση της πυκνότητας διαταραχών υψηλότερης πολυπλοκότητας δημιουργούνται περισσότερα σημεία αγκύρωσης παρεμποδίζοντας την κίνηση των τοιχωμάτων. Η σχέση 1.12 ποσοτικοποιεί αυτή τη παρατήρηση. Η μαγνητική διαπερατότητα επηρεάζεται σύμφωνα με τη σχέση 1.13 σε χαμηλά πεδία μαγνήτισης.

$$H_C \propto \sqrt{\rho} \quad (1.12)$$

$$\mu_0 \propto \frac{1}{\sqrt{\rho}} \quad (1.13)$$

$$(1.14)$$

- Όρια κόκκων (grain boundaries): Εν γένει, το μέγεθος και η κατανομή των κατακρημνίσεων στα όρια των κόκκων επηρεάζουν σημαντικά τα χαρακτηριστικά του βρόχου υστέρησης. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές του συνεκτικού πεδίου

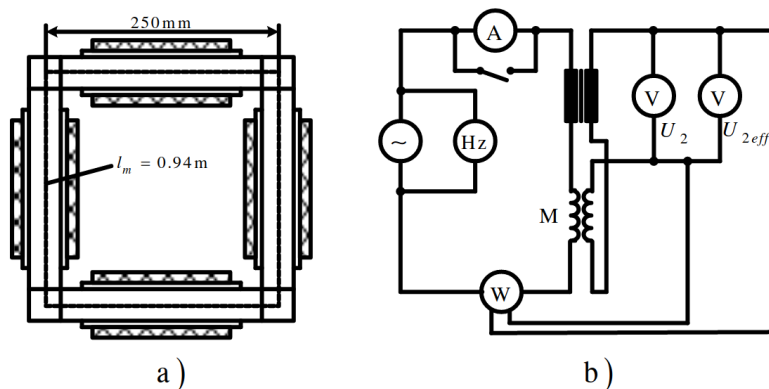
αυξάνονται με το ποσοστό του άνθρακα. Ακόμα, οι τιμές της παραμένουσας μαγνητικής επαγωγής και των απωλειών του βρόχου υστέρησης παρουσίαζαν δραματική αύξηση, όταν ο χάλυβας χαρακτηρίζονταν από ενδοκρυσταλλική παρουσία σεμεντίτη.

- Επίδραση μηχανικής σκληρότητας στην απόκριση του μαγνητικού βρόχου υστέρησης (macro- and micro-hardness evaluation): Οι τιμές του συνεκτικού πεδίου είναι ανάλογες με τις μεταβολές της σκληρότητας σε φερριτο-περλιτικούς και φερριτο-μπαϊνιτικούς χάλυβες αλλά και σε χάλυβες με παρουσία επαναφερόμενου μαρτενσίτη.
- Επίδραση τασικού πεδίου στο βρόχο υστέρησης (stress field evaluation): Οι τιμές τόσο του συνεκτικού πεδίου, όσο και των απωλειών του βρόχου υστέρησης αυξάνουν με την αύξηση του ποσοστού παραμόρφωσης σε φερριτο-περλιτικούς και φερριτο-μπαϊνιτικούς χάλυβες, εξαιτίας της αύξησης της πυκνότητας των διαταραχών. Αντίθετα, σε μαρτενσιτικούς χάλυβες, η αύξηση των τιμών της παραμόρφωσης οδηγεί σε μείωση των παραπάνω μαγνητικών τιμών.

1.4.2 Εργαστηριακές διατάξεις και αποτελέσματα

Epstein Method

Το 1996 τυποποιήθηκε παγκοσμίως για πρώτη φορά η χρήση Epstein frame για την μέτρηση των μαγνητικών ιδιοτήτων, με έμφαση στις AC απώλειες σε μαλακά μαγνητικά υλικά. [22],[23] Η τυποποιημένη συσκευή των 25cm αποτελείται από 4 όμοια πρωτεύοντα και δευτερεύοντα πηνία, με τα δευτερεύοντα να είναι εμφωλευμένα στα πρωτεύοντα, ελάχιστου μήκους 19mm. Το υπό μελέτη δείγμα κόβεται σε λωρίδες (πλήθος πολλαπλάσιο του 4) πλάτους $30mm \pm 0.2mm$ και μήκους $280mm \leq l \leq 320mm$, ενώ η διαφορά στο μήκος μεταξύ των δειγμάτων πρέπει να είναι μικρότερη από 0.5mm [24]. Στη συνέχεια διπλώνονται οι άκρες των δειγμάτων και τοποθετούνται στο εσωτερικό των πηνίων υπό βάρος. Τα πηνία είναι προσαρτημένα σε τετράγωνο σκελετό, ενώ ηλεκτρολογικά συνδέονται μεταξύ τους εν σειρά (Σχήμα 1.10) [22],[24].



Σχήμα 1.10: Μέθοδος Epstein. a) Πειραματική διάταξη. b) Συνδεσμολογία και κύκλωμα μετρήσεων. [23]

Η μέτρηση των απωλειών γίνεται με χρήση των παρακάτω τύπων:

$$U_2 = 4fN_2 \frac{R_i}{R_i + R_t} SJ \quad (1.15)$$

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{(1.111U_2)^2}{R_1} \quad (1.16)$$

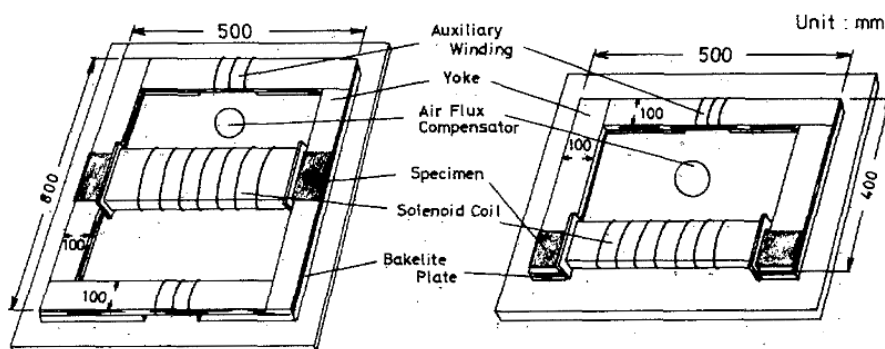
$$P_s = \frac{P_c}{m_a} = \frac{4Pcl}{ml_m} \quad (1.17)$$

όπου, U_2 η επαγόμενη τάση στο δευτερεύον τύλιγμα, S η διατομή του δείγματος, f η συχνότητα, J το μέγιστο ρεύμα διέγερσης, N_1 , N_2 οι περιελίξεις του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου αντίστοιχα, R_i η αντίσταση των οργάνων μέτρησης στο δευτερεύον κύκλωμα, R_t η εν σειρά αντίσταση και αλληλεπαγωγή των δευτερευόντων πηνίων, P_m οι απώλειες των οργάνων μέτρησης στο δευτερεύον κύκλωμα, P_c οι συνολικές απώλειες του δείγματος, P_s οι ειδικές συνολικές απώλειες και $m_a = ml_m/4l$ η ενεργή μάζα του δείγματος.

Οι συγγραφείς [24] αναφέρουν ότι οι μετρήσεις παρουσιάζουν σχετική τυπική απόκλιση 1.5% σε μη προσανατολισμένο υλικό με μαγνήτιση έως $1.7T$ η ίδια τιμή διατηρείται και σε προσανατολισμένο υλικό έως $1.5T$. Ακόμα έχει αναπτυχθεί μέθοδος εξαγωγής αποτελεσμάτων με ψηφιοποίηση των μετρήσεων. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί ότι το ελάχιστο πλήθος ψηφίων κωδικοποίησης είναι 12 καθώς λιγότερα αυξάνουν κατά πολύ το σφάλμα. Όπως αναφέρεται [22], η μέθοδος αποτυγχάνει στη πλήρη περιγραφή της καμπύλης B-H καθώς η μαγνήτιση του δείγματος δεν είναι ομογενής κατά την διαδικασία της μέτρησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απόκλιση των τιμών των απωλειών από τις θεωρητικά αναμενόμενες είτε σε DC είτε σε AC διέγερση. Πιο συγκεκριμένα, σε AC διέγερση η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας.

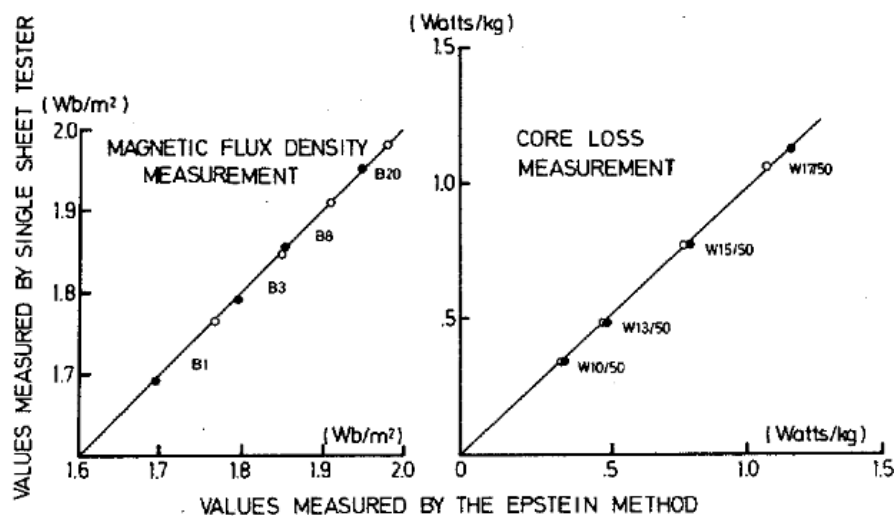
Single Sheet Tester - SST

Το 1974 οι Takaki Yamamoto και Yoshihiro Ohya [25] πρότειναν μια νέα διάταξη για τη μέτρηση τις απώλειες βρόχου και τη μαγνητική διαπερατότητα φύλλου χάλυβα με πυρίτιο (silicon steel sheet) σε συχνότητες 50 και 60 Hz. Οι αισθητήρες σχεδιάστηκαν για χρήση φύλλου πάχους 2mm και πλάτους 10 και 20 cm (Σχήμα 1.11). Η σχεδίαση πλάτους 20 cm προκύπτει από την ένωση δύο διατάξεων 10 cm. Οι απώλειες των yokes δεν συμπεριλαμβάνονται στη μέτρηση και η χρήση τους αποσκοπεί στην διατήρηση της έντασης του πεδίου και της μαγνητικής ροής, ομοιόμορφων. Χαρακτηριστικά, η μεταβολή της έντασης του πεδίου για απόσταση μέτρησης 3cm με DC διέγερση χωρίς τα yokes είναι 3% ενώ με τη χρήση yokes η μεταβολή πέφτει στο 0.2%. Οι απώλειες της υστέρησης υπολογίζονται με χρήση της σχέσης: $\frac{1}{T} \int_0^T \left(\int \frac{dB}{dt} dt \right) \times \frac{dH}{dt} dt$. Σε κάθε μέτρηση, η τάση που επάγεται από το H coil ενισχύεται ενώ η τάση που επάγεται από το B coil ολοκληρώνεται και στη συνέχεια ενισχύεται. Στη συνέχεια, οι δύο τάσεις πολλαπλασιάζονται μεταξύ τους και προκύπτει ο μέσος όρος σε μία περίοδο, το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι ανάλογο των απωλειών.



Σχήμα 1.11: Προτεινόμενες διατάξεις αισθητήρα SST [25]

Η παραπάνω διάταξη προτάθηκε ως αντικαταστάτης της μεθόδου Epstein ειδικά σε φύλλα χάλυβα με προσανατολισμό κόκκου όπου απαιτείται ειδική προεργασία καθιστώντας τη μέθοδο αργή. Ο αισθητήρας SST αξιολογήθηκε σε 24 δείγματα χάλυβα προσανατολισμένου κόκκου με πλάτος 3cm και μήκος 50cm. Τα συγκριτικά αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 1.12. Οι διαφορές στις μετρήσεις των απωλειών ήταν εντός του $\pm 2\%$ ενώ για τη μαγνητική διαπερατότητα εντός του $\pm 0.5\%$.



Σχήμα 1.12: Σύγκριση αισθητήρα SST με τη μέθοδο Epstein [25]

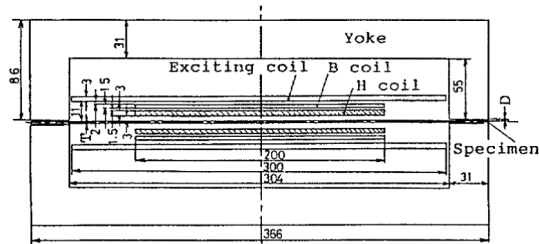
Η χρήση του SST με H coil γρήγορα διευρύνθηκε λόγω της ακρίβειας που παρείχε σε σύγκριση με τη μέθοδο Epstein. Για τη δημιουργία πρότυπης μέτρησης το 1982 στο πανεπιστήμιο της Okayama [26] διερευνήθηκε η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην απόκριση του αισθητήρα. Πιο συγκεκριμένα, το κενό ανάμεσα στο δείγμα και το yoke, η μη γραμμικότητα του δείγματος και η ακρίβεια του H coil εξετάστηκαν. Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν χάλυβας με πυρίτιο προσανατολισμένου κόχχου (βαθμός AISI -75 M-5), πλάτους 30cm και μαγνητικής διαπερατότητας 10000.

Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της απόστασης μεταξύ του δείγματος και του yoke οδηγούσε σε μη ικανοποιητικά αποτελέσματα στο H coil. Επίσης, η μη γραμμικότητα του δείγματος οδηγεί σε μεγάλα σφάλματα στις μετρήσεις για τιμές του πεδίου κοντά στο συνεχτικό πεδίο. Ακόμα παρατηρήθηκε ότι το H coil θα πρέπει να βρίσκεται τουλάχιστον 30mm πιο μακριά από το yoke ώστε οι μαγνητικές γραμμές που διαφεύγουν να μην επηρεάζουν τη μέτρηση.

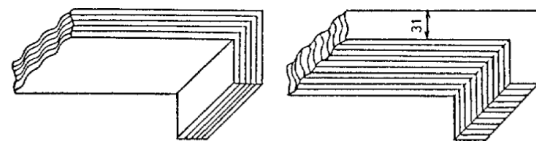
Εκτός από τη χρήση H coil αναπτύχθηκε και δεύτερη μέθοδος μέτρησης των μαγνητικών χαρακτηριστικών από το ρεύμα μαγνήτισης (ρεύμα στο πρωτεύον πηνίο). Παρακάτω θα παρουσιαστεί μία από τις πρώτες συγκρίσεις που έγινε ανάμεσα στις μεθόδους [27]. Η μέθοδος που αξιοποιεί το ρεύμα μαγνήτισης απαιτεί τη γνώση του μήκους της μαγνητικής διαδρομής l_m . Ως προσεγγίσεις της ποσότητας αυτής προτείνονται να χρησιμοποιηθεί η εσωτερική περίμετρος των yokes ή μέσω χρήσης των αποτελεσμάτων από H coil ή όπως αναφέρεται από πρότυπο προσαρμογή από τις μετρήσεις Epstein. Ακόμα, η μέτρηση εξαρτάται από το υλικό των yokes, τη κατασκευή του αισθητήρα και το κενό ανάμεσα στο δείγμα και το SST.

Για την πειραματική αξιολόγηση της μεθόδου ρεύματος μαγνήτισης στον αισθητήρα SST (Σχήμα 1.13) χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι yokes όπως φαίνεται στο Σχήμα

1.14. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιήθηκαν φύλλα χάλυβα προσανατολισμένου κόκκου τύπου G10, G6H καθώς και άμορφος χάλυβας. Το πάχος του δείγματος ήταν 0.3mm . Αρχικά, σε κενό 3.5mm μετρήθηκε η μαγνητική ροή στα yokes για τιμές πεδίου στο κορεσμό και σε μέγιστη μαγνητική διαπερατότητα. Τα αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση έδειξαν ότι για τιμές κοντά στο κορεσμό η τιμή της μαγνητικής ροής στο H coil ήταν η ίδια. Αντίθετα, για τιμές μέγιστης μαγνητικής διαπερατότητας η συνιστώσα της μαγνητικής ροής κάθετη στο δείγμα είναι μεγαλύτερη.



Σχήμα 1.13: Διάταξη αισθητήρα SST, στο σχήμα αναγράφονται οι διαστάσεις σε mm [27]



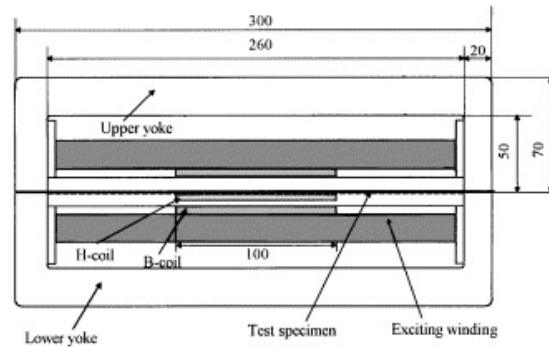
Σχήμα 1.14: Τύποι yokes: Αριστερά "περιελυγμένο" (wound) yoke, Δεξιά "στιβαγμένο" (stacked) yoke

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε το σφάλμα στη μέτρηση του πεδίου H για κάθε μέθοδο. Στη μέθοδο του ρεύματος μαγνήτισης το πεδίο υπολογίζεται από τη διαίρεση του πλήθους περιελίξεων στο πηνίο επί το ρεύμα διέγερσης με την απόσταση ανάμεσα στα πόδια του yoke. Ο υπολογισμός αυτός αμελεί τη μαγνητική αντίσταση των yoke και το κενό αέρα. Συνέπεια είναι το σφάλμα της μέτρησης να προκύψει περίπου 10 φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο σφάλμα της μέτρησης με H coil. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση της μαγνητικής διαπερατότητας οδηγεί σε αύξηση του σφάλματος και στις δύο μεθόδους. Επιπρόσθετα, η αύξηση του πάχους οδηγεί σε αύξηση του σφάλματος λόγω των πεδίων απομαγνήτισης.

Η χρήση διαφορετικού τύπου yokes δεν επηρέασε τη μέτρηση με H coil. Αντίθετα, η μέθοδος του ρεύματος μαγνήτισης εμφανίζει ελαφρώς αυξημένο σφάλμα στη περίπτωση του περιελιγμένου yoke. Τέλος, μετρήθηκε η επίδραση του κενού ανάμεσα στα yokes και τον αισθητήρα σε χάλυβα τύπου GH6 και άμορφο χάλυβα. Σε κενό 75mm προκύπτει αύξηση του σφάλματος και στις δύο μεθόδους. Ακόμα, το σφάλμα αυξάνεται και για υλικά με μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα. Συνολικά, παρότι το σφάλμα προέκυψε μεγαλύτερο η μέθοδος του ρεύματος μαγνήτισης προτιμάται λόγω της απλότητας στη μέτρηση.

Το 2000 ο Nakata παρουσιάζει μία νέα σύγκριση των μεθόδων, αυτή τη φορά περιγράφοντας και τις μαθηματικές σχέσεις των μετρήσεων. [28] Η διάταξη του αισθητήρα φαίνεται στο Σχήμα 1.15. Χρησιμοποιήθηκε B-coil με 284 περιελίξεις (N_b) για τη μέτρηση της πύκνότητας ροής μαγνήτισης στο δείγμα, H-coil 100 περιελίξεων (N_h), πηνίο διέγερσης 901 περιελίξεων (N_{ex}) σε 4 στρώσεις. Επιπλέον, χρησιμοποι-

ηθηκαν 2 βοηθητικά πηνία στο πάνω yoke: B-coil 15 περιελίξεων και πηνίο διέγερσης 24 περιελίξεων (N_{ey}) για την απομονωμένη μαγνήτιση και μέτρησή τους. Το δείγμα αποτελεί χάλυβα με πυρίτιο προσανατολισμένου κόκκου (τύπος 30 ZH 110) διαστάσεων $100 \times 30 \times 0.3mm$.



Σχήμα 1.15: Κάθετος αισθητήρας SST και οι διαστάσεις των διάφορων μερών του [28]

Οι εξισώσεις για την μέτρηση των διάφορων φυσικών μεγεθών με χρήση του αισθητήρα SST για την κάθε μέθοδο παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Χρήση H-coil

$$B = c \int v_b dt \quad (1.18)$$

$$H_h = \frac{1}{N_h A \mu_0} \int v_h dt \quad (1.19)$$

$$P = \frac{f}{p} \int_0^T H \frac{dB}{dt} dt = k \int_0^T \left(\int v_h dt \right) v_b dt \quad (1.20)$$

Όπου, v_b , v_h οι επαγόμενες τάσεις στα αντίστοιχα πηνία, $N_h A = 0.3146m^2$, f η συχνότητα, p η πυκνότητα, ενώ c , k σταθερές.

- Μέθοδος ρεύματος μαγνήτισης

$$H_m = N_{ex} \frac{i}{lm} \quad (1.21)$$

$$v = N_{ex} \frac{v_b}{N_b} \quad (1.22)$$

$$P_m = \frac{fl}{ml_m} \int_0^T i v dt \quad (1.23)$$

$$W_y = f \int_0^T i_y \frac{N_{ey}}{N_{by}} v_{by} dt \quad (1.24)$$

Όπου, i το ρεύμα διέγερσης, $l_m = 260\text{mm}$ το μήκος της μαγνητικής διαδρομής, m , l η μάζα και το μήκος του δείγματος, i_y το ρεύμα στο βοηθητικό πηνίο διέγερσης. Η εξίσωση 1.24 αποτελεί προσθήκη στη μέθοδο, υπολογίζοντας τις απώλειες λόγω των yokes (η μέτρηση γίνεται με αφαίρεση των κύριων τυλιγμάτων). Αφαιρώντας την από την 1.23 προκύπτει βελτιωμένη μέτρηση της ισχύος των απωλειών.

Οι μετρήσεις έγιναν για μέγιστες τιμές πεδίου μαγνήτισης $B_m : 0.5, 1, 1.5, 1.69 T$. Για κάθε τιμή, το πεδίο H υπολογισμένο με χρήση H-coil προέκυπτε μικρότερο από την αντίστοιχη τιμή της μεθόδου ρεύματος μαγνήτισης. Η διαφορά των τιμών ανάμεσα στις μεθόδους μειώθηκε με την αύξηση της μαγνήτισης έως τη τιμή $B_m = 1.69T$ όπου η διαφορά αυξήθηκε λίγο. Ενώ μέγιστη και ελάχιστη ποσοστιαία διαφορά ήταν 3.85% και 1.68% αντίστοιχα. Ακόμα μετρήθηκε το πεδίο και οι απώλειες των yokes για τις ίδιες τιμές μαγνήτισης. Όπως ήταν αναμενόμενο με αύξηση της μαγνήτισης αυξήθηκαν και οι τιμές του πεδίου και οι απώλειες. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι απώλειες των yokes αντιστοιχούν περίπου στο 1-2% των συνολικών απωλειών.

Οι συγγραφείς στη συνέχεια παρουσίασαν την επίδραση της μεταβολής στην αντίσταση στην επιφάνεια του yoke. Λόγω των διεργασιών κοπής για τη δημιουργία του αισθητήρα παρουσιάζονται φαινόμενα βραχυκύκλωσης στην επιφάνεια μεταξύ των στρώσεων. Πλένοντας τα yokes με οξύ αυξάνεται η επιφανειακή αντίσταση αυξήθηκε από 0.4Ω στα 800Ω . Αυτή η αλλαγή οδήγησε σε μεταβολή των τιμών P_m έως 3% ($B_m = 1.5T$).

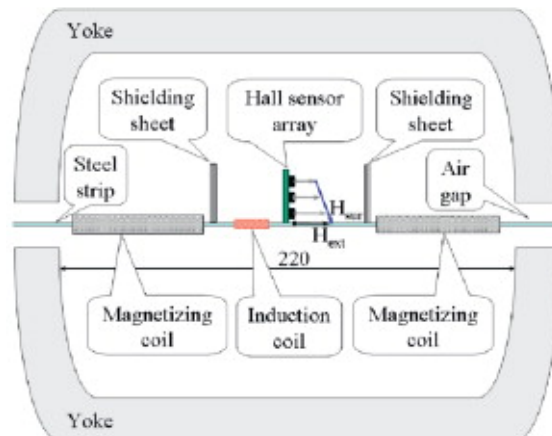
Ο αισθητήρας εξετάστηκε και σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας (έως $100^\circ C$) [29] με διέγερση από $0.1T$ έως $2.0T$ σε συχνότητα 50Hz . Η μέτρηση του πεδίου έγινε με τη χρήση 2 H-coil, ένα κοντά και ένα μακριά. Δείγματα αποτέλεσαν χάλυβες υψηλής και χαμηλής ποιότητας (τύπος 35A250 και 50A1300 αντίστοιχα). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ήταν σύμφωνα με τη θεωρία. Με την αύξηση της θερμοκρασίας η μαγνητική διαπερατότητα μειώθηκε αφού η θερμική κίνηση των διπόλων εμποδίζουν την ευθυγράμμιση με το μαγνητικό πεδίο. Ακόμα παρατηρήθηκε μείωση των δινορευμάτων, συνεπώς και των απωλειών, λόγω της αύξησης της αντίστασης. Συνολικά, η ακρίβεια των μετρήσεων σε θερμοκρασία μικρότερη των $100^\circ C$ ήταν εντός του 1%.

Καθώς ο αισθητήρας SST άρχισε να χρησιμοποιείται σε μεγάλη έκταση στην Ιαπωνική βιομηχανία, νέες τροποποιήσεις προτάθηκαν στο υπάρχον πρότυπο μέτρησης για τη μέτρηση και άλλων τύπων χάλυβα. Ένα παράδειγμα αποτελεί η εργασία [30], στην οποία κατασκευάστηκε αισθητήρας για χρήση σε φύλλα ηλεκτρικού χάλυβα με δυνατότητα μέτρησης πυκνότητας μαγνητικής ροής μεγαλύτερη από $2T$. Η διάταξη της μέτρησης σχεδιάστηκε για δείγματα πλάτους 60mm και στηρίχθηκε στο σχεδιασμό της εργασίας [29]. Το πηνίο διέγερσης αποτελείται από 4275 περιελίξεις (164

σε 24 στρώσεις), με πάχος καλωδίου 1.0mm . Χρησιμοποιήθηκε η τεχνική 2H-coil με το κάθε πηνίο μήκους 27mm να αποτελείται από 340 περιελίξεις σύρματος διαμέτρου 0.03mm . Τα πηνία τυλίχθηκαν γύρω από πλαστικό σκελετό ενισχυμένο με γυάλινες ίνες (GFRP). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε μη προσανατολισμένο ηλεκτρικό χάλυβα τύπου 35A360 και 50A470.

Η αύξηση του πεδίου διέγερσης απαιτεί την αύξηση των τυλιγμάτων, οι συγγραφείς όμως επισημαίνουν ότι με την αύξηση των σπειρών το πεδίο εσωτερικά του πηνίου δεν θα είναι ομογενές καθώς αποκλίνει από τη γεωμετρία του σωληνοειδούς. Για το πηνίο διέγερσης που χρησιμοποιήθηκε μετρήθηκε πτώση του πεδίου μικρότερη από 20% στα άκρα του σε σχέση με το κέντρο. Για μέτρηση του πεδίου επιλέχθηκε μήκος 27mm με κέντρο το κέντρο του πηνίου διέγερσης όπου η μεταβολή του πεδίου ήταν μικρότερη από 0.3%. Οι μετρήσεις που προέκυψαν συμφωνούν με τη θεωρία έως τιμή πεδίου $H_b = 56000\text{A/m}$ η οποία προκύπτει από αύξηση των σπειρών του πηνίου διέγερσης. Ακόμα δείχθηκε ότι μπορούν να μετρηθούν οι μαγνητικές ιδιότητες μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα έως 2.1T . Η ακρίβεια της μεθόδου δείχθηκε μετρώντας με χρήση της διάταξης τις απώλειες δινορευμάτων σε φύλλο χαλκού. Μειονέκτημα του προτεινόμενου αισθητήρα είναι ότι η διάταξη αν συρρικνωθεί για χρήση σε δείγματα πλάτους 8mm ή 5mm ο θόρυβος στο H-coil δεν είναι αμελητέος.

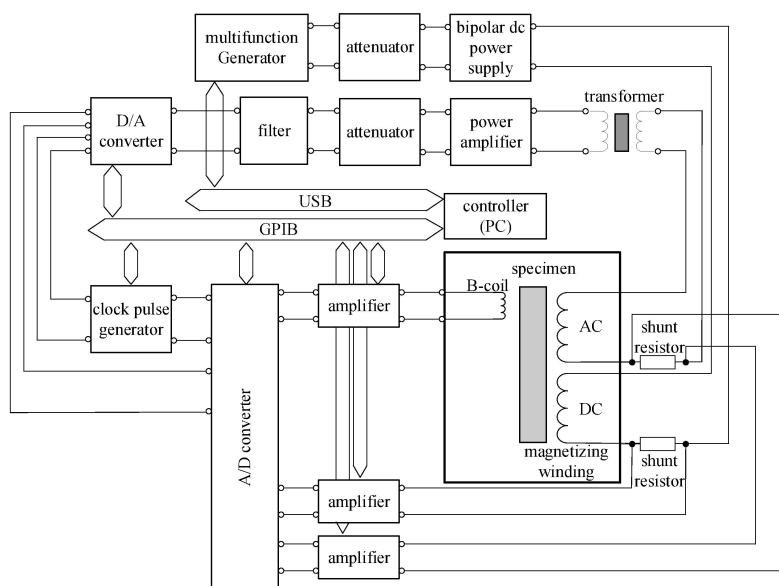
Η διάταξη που προτάθηκε στην εργασία του Stupakov [31] φαίνεται στο σχήμα 1.16. Αποτελεί μία τροποποιημένη έκδοση του αισθητήρα SST. Το ηλεκτρονικό κύκλωμα για τη λειτουργία του αισθητήρα αποτελείται από γεννήτρια και ενισχυτή που παρέχει $\pm 20\text{V}$ και $\pm 5\text{A}$ για τη διέγερση. Η σχεδίαση επιτρέπει τη χρήση διάφορων σημάτων διέγερσης. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε σήμα ημιτόνου συχνότητας 50Hz . Κατά την λήψη το σήμα φιλτράρεται, ψηφιοποιείται σε συχνότητα δειγματοληψίας $100 - 200\text{kHz}$ και εφαρμόζεται ψηφιακός αλγόριθμος ανατροφοδότησης (feedback) για τη διόρθωση αποκλίσεων. Όλες οι μετρούμενες φυσικές ποσότητες που εξετάζονται στο βρόχο υστέρησης προκύπτουν με τη χρήση λογισμικού.



Σχήμα 1.16: Διάταξη τροποποιημένου SST. Από αριστερά προς τα δεξιά τα μέρη του αισθητήρα: δοκίμιο, πηνίο μαγνήτισης, φύλλο μαγνητικής μόνωσης, πηνίο λήψης, στοιβάδα αισθητήρων Hall. [31]

Η χρήση μαγνητικής μόνωσης στον αισθητήρα εξυπηρετεί την αποφυγή παρεμβολής μαγνητικού θορύβου λόγω των πεδίων διαφυγής κατά τη λήψη των μετρήσεων. Πριν τη χρήση, οι αισθητήρες Hall μηδενίζονται σε ειδικό θάλαμο. Μειονέκτημα των αισθητήρων Hall είναι το υψηλό σφάλμα μέτρησης λόγω θερμικού θορύβου, λύση αποτέλεσε η πραγματοποίηση πολλών κύκλων μέτρησης στο ίδιο σημείο (3000) και η εύρεση του μέσου όρου καθώς ο θερμικός θόρυβος χαρακτηρίζεται από γκαουσιανή κατανομή. Ακόμα, η διέγερση σε χαμηλότερες συχνότητες και υψηλότερα πεδία μειώνουν το χρόνο των μετρήσεων. Επιπρόσθετα η μικρή περιοχή όπου ο αισθητήρας Hall είναι ευαίσθητος καθιστά δύσκολη τη χρήση σε χάλυβες με μεγάλο μέγεθος κόκκου. Οι μετρήσεις του πεδίου H συγκρίθηκαν και με τον “κλασικό” SST: είχαν διαφορά αλλά διατηρούν τη γραμμικότητά τους.

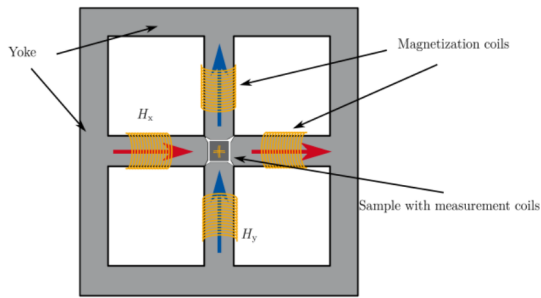
Μια ακόμα διαφοροποίηση προέκυψε με τη χρήση δύο τυλιγμάτων στον αισθητήρα SST, ένα dc διέγερσης 4 στρώσεων και τύλιγμα ac διέγερσης 2 στρώσεων τοποθετημένων σε σειρά (Σχήμα 1.17). [32] Ασυμμετρικοί βρόχοι υστέρησης δημιουργούνται όταν η dc συνιστώσα περάσει το κατώφλι B_{max} του υλικού. Το B_{max} έχει υπολογιστεί ξεχωριστά στο συμμετρικό βρόχο υστέρησης με διαφορετικά πεδία διέγερσης. Εξετάστηκαν ηλεκτρικοί χάλυβες σε συχνότητες 50 Hz και 100 Hz. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στο μη συμμετρικό βρόχο οι απώλειες των μη-προσανατολισμένων ηλεκτρικών χαλύβων δεν αυξάνονται ημιτονικά, για τιμές $1.0T < B_{max} < 1.5T$ έχουμε αύξηση των απωλειών ενώ για $1.5T < B_{max}$ οι απώλειες μειώνονται. Αντίθετα, σε προσανατολισμένους χάλυβες οι απώλειες αυξάνονται μονοτονικά έως $B_{max} < 1.9T$. Τέλος, η μέθοδος δεν απαιτεί χρήση αισθητήρα μαγνητικής ροής για το dc πεδίο αφού χρησιμοποιείται ο συμμετρικός βρόχος υστέρησης.



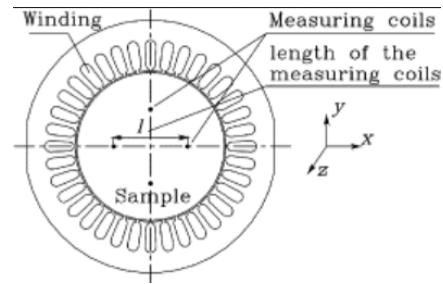
Σχήμα 1.17: Διατάξη αισθητήρα SST με dc συνιστώσα [32]

Διατάξεις πολλαπλών πόλων

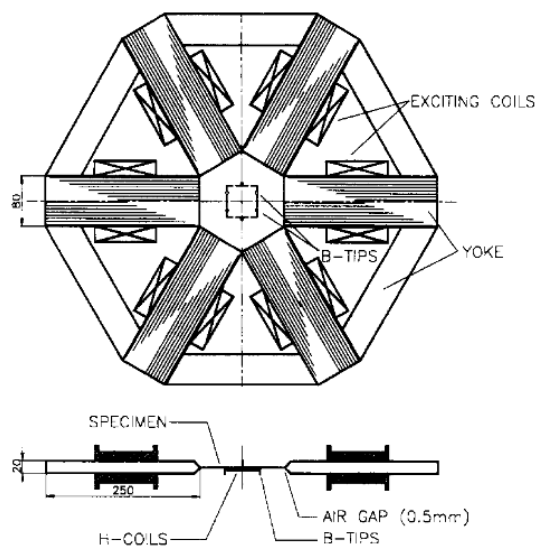
Χάριν πληρότητας αναφέρουμε ενδεικτικά διατάξεις περιστρεφόμενων SST 2 ή 3 φάσεων για τη μέτρηση της υστέρησης μη προσανατολισμένων ηλεκτρικών χαλύβων σε 2 διαστάσεις. [33], [34], [35], [36] Στις 2 φάσεις συναντώνται είτε ορθογώνιες γεωμετρίες (RSST) (Σχήμα 1.18), είτε κυκλικές (RRSST) (Σχήμα 1.18). Η τοποθέτηση και μέτρηση με τα B-coils ακολουθεί τις προδιαγραφές που έχουν αναφερθεί παραπάνω. Η λογική πίσω από τη δημιουργία του αισθητήρα είναι ότι με έλεγχο του ρεύματος μαγνήτισης μπορεί να παραχθεί μαγνητικό πεδίο σε γεωμετρικό τόπο οποιασδήποτε έλλειψης στο επίπεδο xy με κέντρο το κέντρο του αισθητήρα. Αξίζει να αναφερθεί ότι στη περίπτωση του RRSST οι συγγραφείς αξιοποιούν τη χρήση μαγνητικών ασπίδων εκατέρωθεν του δείγματος επηρεάζοντας τη z συνιστώσα του πεδίου B για καλύτερη ομοιογένεια του πεδίου μαγνήτισης. Μειονεκτήματα των διφασικών διεγέρσεων ήταν η παραγωγή πολύ υψηλών διαμαγνητικών πεδίων στο δείγμα αλλά και η δυσκολία μαγνήτισης δειγμάτων με υψηλή ανισοτροπία. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων αναπτύχθηκαν τριφασικές διατάξεις με χρήση 6-πολικών διατάξεων (Σχήμα 1.20) ή ακόμα και με τη χρήση στάτορα (Σχήμα 1.21) για τη μαγνήτιση και σε συνδυασμό με σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου.



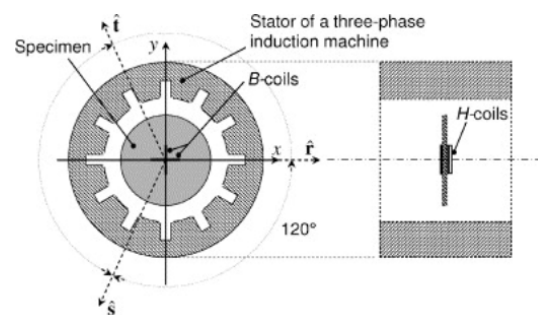
Σχήμα 1.18: Κάτοψη γεωμετρίας διφασικού RSST. Με κίτρινο φαίνονται τα πηνία μαγνήτισης. [33]



Σχήμα 1.19: Κάτοψη γεωμετρίας διφασικού RRSST. Το μήκος των πηνίων λήψης σημειώνεται με l . [34]



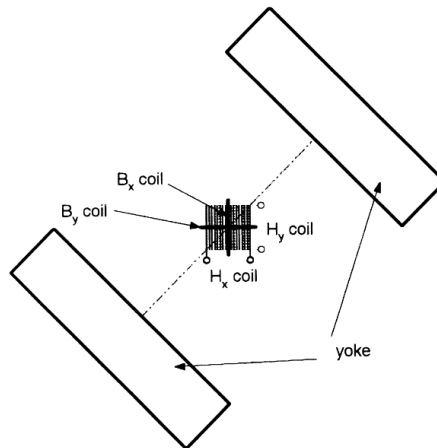
Σχήμα 1.20: Κάτοψη και τομή 6-πολικού RSST. Στο σχήμα σημειώνονται τα μέρη και οι διαστάσεις. [35]



Σχήμα 1.21: Τριφασικός SST με χρήση στάτορα. Στην απεικόνιση φαίνεται κυκλικό δείγμα διαμέτρου 120 – 140mm, B-coils 5 περιελίξεων και διπλό H-coil 700 στροφών. [36]

Διατάξεις μονού yoke

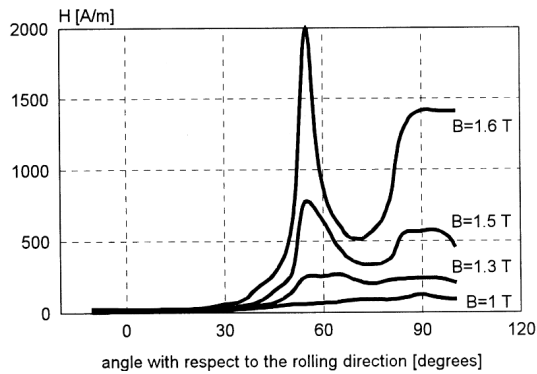
Η ανάγκη για πιο λεπτομερή μέτρηση των χαρακτηριστικών στην επιφάνεια ηλεκτρικών χαλύβων οδήγησε στη δημιουργία τροποποιημένου SST αισθητήρα με χρήση μονού yoke. [37] Η διάταξη αποτελείται από 2 εφαπτομενικά στο υλικό H-coils των 200 περιελίξεων, διαστάσεων $30 \times 30mm$ και 2 B-coils για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών στις συνιστώσες x , y του επιπέδου (Σχήμα 1.22). Η μαγνήτιση επιτυγχάνεται με τύλιγμα γύρω από το yoke. Αν και η μαγνήτιση είναι λιγότερο ομογενής στο υλικό σε σύγκριση με τη συμμετρική, η περιστροφή του αισθητήρα είναι πολύ ευκολότερη. Ακόμα, πρέπει να ληφθεί υπόψιν η αύξηση του σφάλματος της μέτρησης λόγω του μεταβαλλόμενου κενού αέρα ανάμεσα στη διάταξη και το φύλλο κατά την περιστροφή.



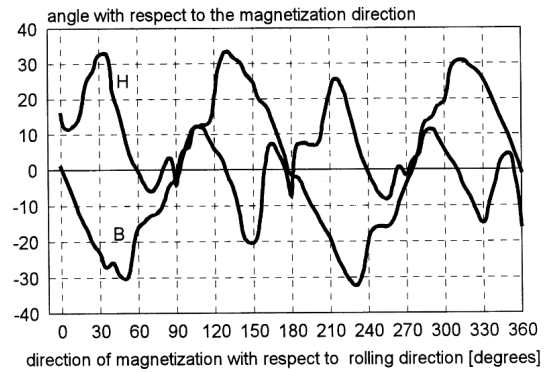
Σχήμα 1.22: Κάτοψη αισθητήρα SST μονού yoke. [37]

Η μέτρηση του πεδίου H πραγματοποιήθηκε με τη τοποθέτηση των πηνίων συμμετρικά πάνω και κάτω από το δείγμα. Λόγω των μεγάλων πεδίων διαρροής υπήρξε έντονη διαφορά στις μετρήσεις πάνω και κάτω απ το φύλλο. Για τους αισθητήρες του πεδίου B οι συγγραφείς επέλεξαν καταστροφική μέθοδο μέτρησης: 4 τρύπες διαμέτρου 0.2mm με απόσταση 40mm μεταξύ τους δημιουργήθηκαν με ακτίνα λέιζερ και στη συνέχεια τυλίχθηκε πηνίο μίας περιέλιξης. Για την μη καταστροφή του υλικού γύρω από την τρύπα λόγω της θερμοκρασίας απαιτείται ανόπτηση. Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση προκύπτει από το γεγονός ότι η προσεκτική δημιουργία οπών διαμέτρου κάτω των 0.5mm μηχανικά το υλικό δεν χρειαζόταν ανόπτηση.

Στα πειράματα που έγιναν φάνηκε η χρησιμότητα της διάταξης για την εύρεση της ανισοτροπίας του υλικού αλλά και των απωλειών (Σχήμα 1.24). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.23, για τυπικό προσανατολισμένο ηλεκτρικό χάλυβα προκύπτουν δύσκολοι άξονες μαγνήτισης στις 90° και 55° ως προς διεύθυνση έλασης (rolling direction). Το σφάλμα στην ακρίβεια της μεθόδου αξιολογήθηκε $5\% - 10\%$ λόγω της διαφοράς στη μέτρηση των H coils αλλά και στη μεγάλη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού με την περιστροφή του αισθητήρα.



Σχήμα 1.23: Εξάρτηση του πεδίου H από τη διεύθυνση. Ο δεύτερος δύσκολος άξονας στις 55° εμφανίζεται για μαγνήτιση μεγαλύτερη του $1.5T$ [37]



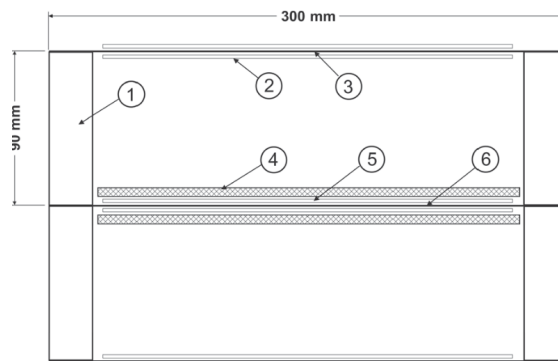
Σχήμα 1.24: Διαφορά φάσης ανάμεσα στα πεδία H και B . Η επιφάνεια ανάμεσα στις καμπύλες είναι ενδεικτική των απωλειών του υλικού. [37]

Σε δεύτερη μελέτη [38] ο Stupakov χρησιμοποιεί τον αισθητήρα [31] ως διάταξη μονού yoke μεταφέροντας το τύλιγμα διέγερσης πάνω στο yoke. Επιλέχθηκαν δείγματα ηλεκτρικού χάλυβα προσανατολισμένου (GO) ή μη (NO) κόκκου διαστάσεων $300 \times 30 \times 0.25 - 0.5mm^3$ τα οποία καλύφθηκαν από μονωτική στρώση πάχους $0.5\mu m$ προσδίδοντάς τους εφελκυστικές τάσεις οι οποίες βελτίωσαν τις μαγνητικές ιδιότητες. Οι πόλοι απέχουν $220mm$ εσωτερικά και $300mm$ εξωτερικά. Οι μετρήσεις έγιναν με σταθερό $B_{max} = 1, 1.25T$ και $B_{max} = 1.25, 1.5T$ στους NO και GO χάλυβες αντίστοιχα και συχνότητα διέγερσης $f = 50Hz$.

Οι μαγνητικές παράμετροι που μετρήθηκαν είναι οι εξής: H_{ext} , H_{sur} , H_i όπου H_{ext} η παρέκταση του πεδίου (extrapolation), H_{sur} το επιφανειακό πεδίο μετρούμενο από τους αισθητήρες Hall και H_i το πεδίο μετρούμενο με τη μέθοδο του ρεύματος μαγνήτισης σύμφωνα με τον τύπο 1.21 όπου $l_m = 220mm$. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πεδίο H_{ext} δεν επηρεάστηκε από το κενό αέρος μεταξύ του yoke και του δείγματος. Όπως ήταν αναμενόμενο, το πεδίο H_i φθίνει μονοτονικά με το κενό λόγω των διαμαγνητικών πεδίων στο υλικό. Ακόμα, τα δεδομένα έδειξαν ότι η απόσταση μεταξύ των πόλων εσωτερικά πρέπει να είναι τουλάχιστον $100mm$. Επιπρόσθετα, στο χάλυβα GO το σφάλμα των μετρήσεων ήταν έως 3 φορές μεγαλύτερο σε σύγκριση με τους NO. Ένα πλεονέκτημα της διάταξης που προέκυψε ήταν ότι οι μετρήσεις των απωλειών και του συνεκτικού πεδίου ήταν σθεναρές και χωρίς τη διόρθωση της κυματομορφής $B(t)$. Επιπλέον, για σταθερό κενό αέρος, η ποσότητα H_i παρέχει ακριβή αποτελέσματα στη μέτρηση των W , H_c . Τέλος, παρατηρήθηκε ότι τα δεδομένα αποκλίνουν από τα αντίστοιχα με μέτρηση σε τυποποιημένη διάταξη SST λόγω του κενού αέρος, δινορευμάτων, δυσκολία στη βαθμονόμηση της διάταξης και παρασιτικών πεδίων.

Σε μια προσπάθεια να ενοποιήσει όλες τις διατάξεις SST που είχαν προκύψει για την μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων σε διάφορους τύπους χάλυβα, αλλά και για διαφορετικές διαστάσεις δειγμάτων ο Zbigniew Gmyrek [39] πρότεινε τη κατασκευή

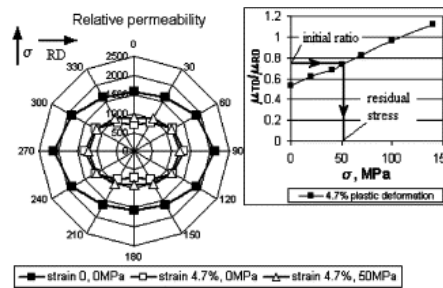
αισθητήρα SST μεταβλητών διαστάσεων. Τα yokes αποτελούνται από 3 μέρη: 2 ορθογώνια “πόδια” από μαλακό φερρίτη (τύπος 3C90) και ένα φύλλο από μαγνητικό υλικό (τύπος M130-35S). Το πρωτεύον πηνίο αποτελείται από 400 περιελίξεις σε δύο στρώσεις ενώ τα δευτερεύοντα (δείγματος και yoke) κατασκευάστηκαν σε μία στρώση 300 στροφών (Σχήμα 1.25). Η χρήση φερρίτη στο yoke έχει ως πλεονέκτημα αμελητέα δινορεύματα. Ακόμα, παρόλο που ο φερρίτης έχει μικρό συνεκτικό πεδίο, λόγω του μεγάλου όγκου δεν επιδρά στις μετρήσεις. Στις μετρήσεις που έγιναν συγκριτικά με τη μέθοδο Epstein frame υπήρχε απόκλιση 4%-6% στη καμπύλη μαγνήτισης, ακρίβεια αποδεκτή σύμφωνα με το συγγραφέα.



Σχήμα 1.25: SST μεταβλητών διαστάσεων. 1) Φερρίτης. 2) Δευτερεύον πηνίο yoke. 3) Φύλλο μαγνητικού υλικού. 4) Πρωτεύον πηνίο. 5) Δευτερεύον πηνίο δείγματος. 6) Δείγμα. [39]

Συσχέτιση μαγνητικών ιδιοτήτων με εσωτερικά στρες

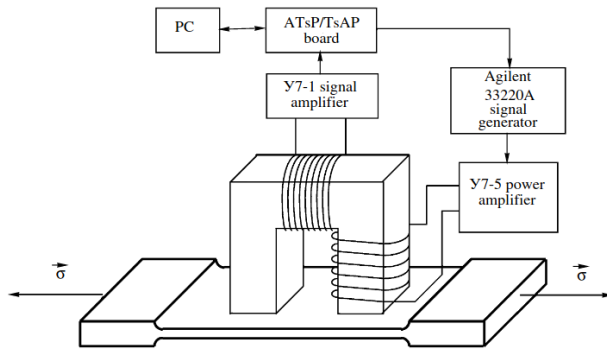
Η μέτρηση των μαγνητικών ιδιοτήτων αξιοποιήθηκε και για την εύρεση παραμενουσών τάσεων μετά από πλαστική παραμόρφωση. Πιο συγκεκριμένα, μελέτη σε μη προσανατολισμένο χάλυβα ανέδειξε τη χρησιμότητα της μεθόδου. [40] Στη μελέτη δείγματα χάλυβα τύπου V-850-65 διαστάσεων $70 \times 190\text{mm}$ υποβλήθηκαν σε πλαστική παραμόρφωση κάτω του 6% ώστε να μην αλλοιωθούν οι κρυσταλλογραφικές παράμετροι. Για τη μέτρηση χρησιμοποιήθηκαν 2 yokes φερρίτη με τα οποία έφεραν τα τυλίγματα διέγερσης. Οι μετρήσεις έγιναν πριν και μετά από τη πλαστική παραμόρφωση σε συνδυασμό και με ελαστική παραμόρφωση με ημιτονική μαγνητική επαγωγή πλάτους $0.4T$, συχνότητας 50Hz .



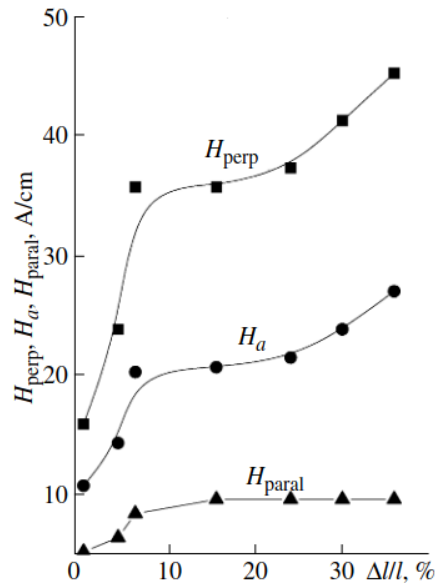
Σχήμα 1.26: Μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας σε συνθήκες παραμόρφωσης. Η παραμόρφωση ασκήθηκε κάθετα στον άξονα έλασης (RD). Ακόμα, φαίνεται ο προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων από τη πλαστική παραμόρφωση μέσω σύγκρισης με τις αρχικές συνθήκες. [40]

Οι ποσότητες που συσχετίστηκαν με τα εσωτερικά στρες ήταν οι απώλειες και η σχετική μαγνητική επαγωγή. Σύμφωνα με τη μελέτη η μέτρηση μόνο της μίας ήταν επαρκής για την εξαγωγή αποτελεσμάτων ενώ αν είναι γνωστή η κατεύθυνση της πλαστικής παραμόρφωσης αρκεί οι μετρήσεις να γίνουν σε δύο διευθύνσεις. Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων 1.26 έγιναν μετρήσεις με XRD. Παρατηρήθηκαν θλιπτικές τάσεις τόσο στη κατεύθυνση έλασης όσο και κάθετα σε αυτή με την κάθετη συνιστώσα να κυριαρχεί. Επίσης, διαφορά παρατηρήθηκε στα παραμένοντα στρες ανάμεσα στη μονωμένη ή όχι πλευρά. Αξίζει να αναφερθεί ότι με τις μαγνητικές μετρήσεις οι εσωτερικές τάσεις μετρήθηκαν 51MPa και ο μέσος όρος της μέτρησης στις δύο πλευρές με XRD έδειξε 45MPa , καθιστώντας τη μέθοδο αξιόπιστη.

Αντίστοιχη μελέτη [41] καταγράφεται με δείγματα χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα τύπου 09Γ2 διαστάσεων $300 \times 60 \times 1.2\text{mm}$. Το φύλλο χάλυβα υποβλήθηκε βηματικά σε εφελκυστική πλαστική παραμόρφωση έως 36% και στη συνέχεια μετρήθηκε με διάταξη μονού yoke (διάσταση πόλων: $12 \times 28\text{mm}$, εσωτερική απόσταση πόλων: 32mm) όπου τα πηνία διέγερσης και λήψης ήταν τυλιγμένα σε αυτό (Σχήμα 1.27). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μαγνητική διαπερατότητα μεταβάλλεται διαφορετικά κατά τη διάρκεια επιβολής εξωτερικής δύναμης στον χάλυβα από όταν δεν ασκούνται δυνάμεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.28. Αυτό εξηγείται από την παρουσία θλιπτικών στρες στο υλικό. Ακόμα παρατηρήθηκε ότι η εφελκυστικές τάσεις επηρεάζουν πιο έντονα το πεδίο που σχηματίζεται από τη κίνηση τοιχωμάτων 90° . Συνολικά, οι συγγραφείς κατέληξαν ότι η διάταξη μονου yoke που προτείνουν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μέτρηση της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας και των εσωτερικών στρες σε χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα.



Σχήμα 1.27: Διάταξη μονού yoke για τη μέτρηση διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας. [41]

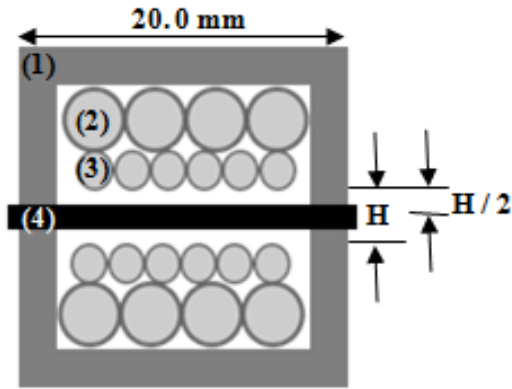


Σχήμα 1.28: Εξάρτηση του πεδίου H από τη πλαστική παραμόρφωση. H_{perp} : Το πεδίο που σχηματίζεται λόγω τοιχωμάτων 90° , αντίστοιχα $H_{parallel}$: λόγω των τοιχωμάτων 180° και H_a : το πεδίο ανισοτροπίας της επιμήκυνσης. [41]

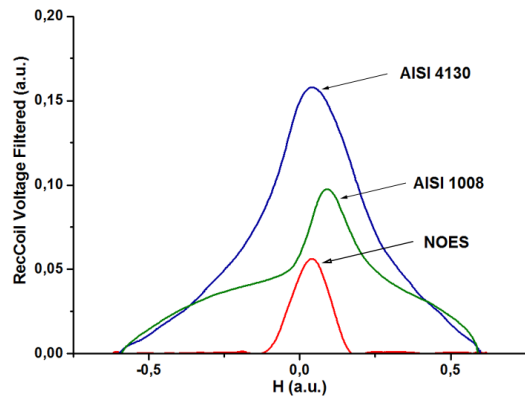
Στο εργαστήριό αισθητήρων της σχολής προτάθηκε συσχέτιση της κατανομής των εσωτερικών τάσεων μετά από συγκόλληση με μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας [5], [42]. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα είδη χαλύβων, ευρεως διαδεδομένα στη βιομηχανία με διαφορετικές μεθόδους επεξεργασίας: 1) Μη προσανατολισμένος ηλεκτρικός χάλυβας (NOES), $60 \times 120 \times 0.28mm$, 2) Χαλύβας χαμηλός σε περιεκτικότητα άνθρακα (AISI 1008), $80 \times 200 \times 15mm$, 3) microalloyed ανθρακούχος χάλυβας (AISI 4130), 2) Χαλύβας χαμηλός σε περιεκτικότητα άνθρακα (AISI 1008), $80 \times 200 \times 15mm$ και 4) Ανθρακούχος χάλυβας υπερυψηλής αντοχής (TRIP 800), $60 \times 200 \times 15mm$. Αρχικά, κάθε είδος χάλυβα κόπηκε σε συγκεκριμένες διαστάσεις και συγκολλήθηκε με όμοιο του κάθετα [5] ή παράλληλα [42] στη διεύθυνση έλασης, με χρήση TIG και υπό ελεγχόμενες συνθήκες ώστε να διασφαλιστεί η έλλειψη πόρων και ρωγμών. Έπειτα, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε εφελκυστικές και θλιπτικές δυνάμεις εντός της ελαστικής περιοχής. Ύστερα, μη βαθμονομημένη διάταξη διπλού yoke μετρά τη διαφορική μαγνητική διαπερατότητα σε συγκεκριμένα σημεία. Τέλος, με τη χρήση XRD και της μεθόδου διάθλασης νετρονίων, υπολογίζονται οι τιμές των εσωτερικών τάσεων στα ίδια σημεία.

Η διάταξη μέτρησης έχει ως εξής: γύρω από το δείγμα προς μελέτη τυλίγεται το πηνίο λήψης και το πηνίο διέγερσης. Το μαγνητικό κύκλωμα κλείνει με τη χρήση μαγνητικού πυρήνα όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.29. Το πηνίο διέγερσης τροφοδοτείται με ημιτονοειδές ρεύμα συχνότητας 0.1 Hz που εξασφαλίζει ομογενές πεδίο στο σημείο της μέτρησης. Η τάση που δημιουργείται στα άκρα του πηνίου λήψης είναι

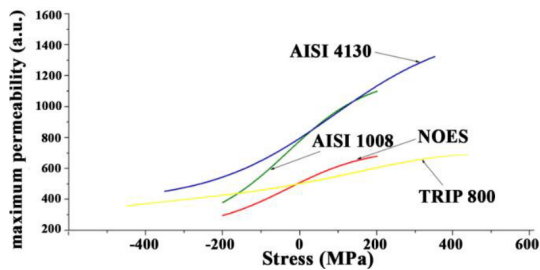
ανάλογη της διαφορικής διαπερατότητας στον κάθετο άξονα. Στη συνέχεια το σήμα εξόδου ενισχύεται και μέσω φίλτρου κόβονται οι παρεμβολές χαμηλής συχνότητας και οι υψηλές αρμονικές. Στην εικόνα 1.30 φαίνεται η τάση στα άκρα του πηνίου λήψης συναρτήσει του επιβαλλόμενου πεδίου (σε αυθαίρετες μονάδες) και για τα τρία είδη χαλύβων.



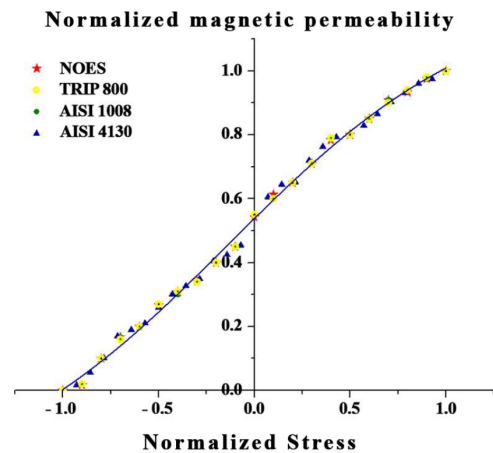
Σχήμα 1.29: Τομή του ac hysteresigraph. (1): ηλεκτρομαγνήτης, (2): πηνίο διέγερσης, (3): πηνίο λήψης, (4): δοκίμιο [5]



Σχήμα 1.30: Έξοδος της διάταξης στη μέγιστη ελαστική παραμόρφωση[5]



Σχήμα 1.31: Καμπύλη βαθμονόμησης σε όλο τον όγκο των υλικών.[42]



Σχήμα 1.32: Κανονικοποιημένη καμπύλη βαθμονόμησης[42]

Με την χρήση XRD και διάθλαση νετρονίων προέκυψαν οι καμπύλες του σχήματος 1.31 όπου συσχετίζεται η τάση στα άκρα εξόδου του ac hysteresigraph με τις εσωτερικές τάσεις του υλικού. Επισημαίνεται ότι θετικές τιμές του στρες υποδηλώνουν εφελκυστικές τάσεις ενώ αρνητικές συμπίεση. Παρατηρούμε ότι το TRIP που αποτελεί το μηχανικά μαλακότερο υλικό καταγράφει και τη χαμηλότερη μαγνητική διαπερατότητα σε αυτές τις τιμές εσωτερικού στρες. Αντίθετα, το AISI 4130

αποτελώντας το σκληρότερο υλικό εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές μ , διατηρώντας σχήμα καμπύλης ίδιο με τα υπόλοιπα. Αυτή η παρατήρηση φαίνεται καλύτερα στο σχήμα 1.32.

Σε σταθερή θερμοκρασία η μαγνητική επαγωγή B και η παραμόρφωση λ του υλικού εξαρτώνται μόνο από το πεδίο H και τις εσωτερικές τάσεις. Με παραγωγή της εξίσωσης (1.25) προκύπτει η εξίσωση (1.27) όπου ο παράγοντας αποτελεί τη μαγνητική διαπερατότητα μ . Αντίστοιχα, παραγωγίζοντας τη σχέση (1.26) προκύπτει η (1.28).

$$B = f(H, \sigma) \quad (1.25)$$

$$\lambda = f(H, \sigma) \quad (1.26)$$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial \sigma \partial H} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{\partial B}{\partial H} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \mu \quad (1.27)$$

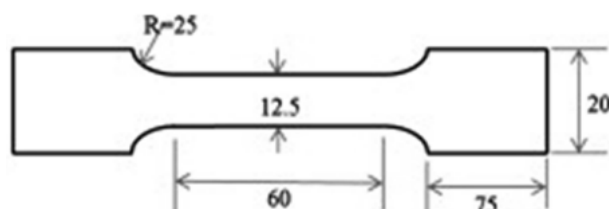
$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial \sigma \partial H} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{\partial \lambda}{\partial H} \quad (1.28)$$

Σε σταθερό πεδίο H η εξίσωση (1.27) γίνεται $\left(\frac{dB}{d\sigma}\right)_H$, ενώ υπό σταθερό σ η παράγωγος της σχέσης (1.26) προκύπτει $\left(\frac{d\lambda}{dH}\right)_\sigma$. Σύμφωνα με την συνθήκη ισοπποτίας του le Chatelier χωρίς υστέρηση ισχύει $\left(\frac{dB}{d\sigma}\right)_H = \left(\frac{d\lambda}{dH}\right)_\sigma$, ενώ για απειροστές αλλαγές του H , σ οι σχέσεις (1.27) και (1.28) προκύπτουν κατά μέλη ίσες.

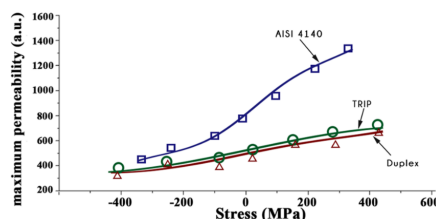
Για δοσμένη τιμή εσωτερικών τάσεων η μέγιστη διαφορική μαγνητική διαπερατότητα, η οποία παρατηρήθηκε σε περίπου σταθερή τιμή του επαγωγικού πεδίου $B(H)$, είναι ανάλογη της παραγώγου της καμπύλης $\lambda(H)$ ως προς σταθερή τιμή H_0 του εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου. Δηλαδή, οι καμπύλες βαθμονόμησης περιγράφουν επίσης την ποσότητα $\frac{\partial \lambda}{\partial H}$. Επιπρόσθετα, επειδή οι τάσεις που επιβάλλονται στο υλικό είναι στην ελαστική του περιοχή, περαιτέρω παραμόρφωση του υλικού προκύπτει μόνο από τη μαγνητοσυστολή του: $\lambda(\sigma, H) = Y\sigma + \lambda_{\sigma 0}(H)$. Εάν ακόμα υποθέσουμε ότι βρισκόμαστε στη γραμμική περιοχή της μη υστερητικής μαγνητοσυστολής τότε: $\mu(\sigma, H) \propto \frac{\partial \lambda(\sigma, H)}{\partial H}$.

Αντίστοιχα αποτελέσματα προέκυψαν και σε επόμενη μελέτη [43] όπου δείγματα AISI 4140, TRIP 800 και Duplex (ανοξειδωτος χάλυβας) πάχους 0.58mm, 15mm, 25mm αντίστοιχα κόπηκαν σύμφωνα με πρότυπο (dogbone) όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.33 και υποβλήθηκαν σε παραμόρφωση ρυθμού $5 \times 10^{-5} s^{-1}$. Στη συνέχεια, μετρήθηκαν με τον αισθητήρα του εργαστηρίου μας 1.29, [5] και προέκυψαν οι αντίστοιχες καμ-

πύλες βαθμονόμησης (1.34) οι οποίες ακολουθούν τη συμπεριφορά του σχήματος 1.31.



Σχήμα 1.33: Δείγμα dog-bone. Αναγράφονται οι διαστάσεις σε χιλιοστά. [43]



Σχήμα 1.34: Καμπύλες βαθμονόμησης δειγμάτων χάλυβα (MASC). Η υψηλή παρουσία άνθρακα και χαμηλή φερριτή στους τύπους TRIP και Duplex οδηγεί σε μικρή μαγνητική απόκριση. [43]

Συνέχεια της παραπάνω έρευνας [42] αποτελούν η εργασία της Vourna το 2016 [44] και των Vourna κ.α. το 2018 [10] όπου στη πρώτη έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων για διάφορες τεχνικές συγκόλλησης ενώ στη δεύτερη υπολογίστηκε η αβεβαιότητα της μεθόδου. Οι τεχνικές συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκαν είναι: TIG, Plasma, EB [44]. Οι μετρήσεις έγιναν σε προκαθορισμένα σημεία ξεκινώντας 15mm από την επιφάνεια συγκόλλησης και στη συνέχεια με βήμα 0.5mm παράλληλα και κάθετα από αυτή. Η απόσταση των 15mm είναι αρκετή για να μην επηρεαστούν οι μετρήσεις από φαινόμενα των άκρων λόγω της κοπής. Ως διέγερση χρησιμοποιήθηκε ημιτονικό ρεύμα, συχνότητας 0.5 Hz και η κάθε μέτρηση επαναλήφθηκε 6 φορές. [10]

Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων συγκρίθηκαν οι τιμές που προέκυψαν με τα προφίλ εσωτερικών τάσεων που προέκυψαν από μεθόδους διάθλασης. Αρχικά, με χρήση της μεθόδου XRD-BB υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τοπικών επιφανειακών μικροτάσεων καθώς συσχετίζονται με τις μετρήσεις της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας, το βάθος διείσδυσης δεν ξεπερνά τα 20μm. Αντίστοιχα, στη μέθοδο διάθλασης νετρονίων παρέχονται αποτελέσματα για τη μέτρηση της διαπερατότητας εσωτερικά του χάλυβα καθώς οι μετρήσεις γίνονται αποτελεσματικά σε βάθος έως 5mm. Η αβεβαιότητα των μετρήσεων και στις 2 μεθόδους ήταν 5% στα πειράματα που διεξήχθησαν. Οι τελικές τιμές των εσωτερικών στρες προέκυψαν με χρήση του Young's modulus (κλίση της καμπύλης στην ελαστική περιοχή) για κάθε υλικό και του λόγου του Poisson. Τέλος, έγινε χαρακτηρισμός της μικροδομής με χρήση SEM (Surface Electron Microscopy).

Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα υστέρησης, οδηγώντας σε περαιτέρω μείωση της αβεβαιότητας. Τα αποτελέσματα κανονικοποιήθηκαν σύμφωνα με τις σχέσεις (1.29), (1.30) για καλύτερη εξαγωγή συμπερασμάτων.

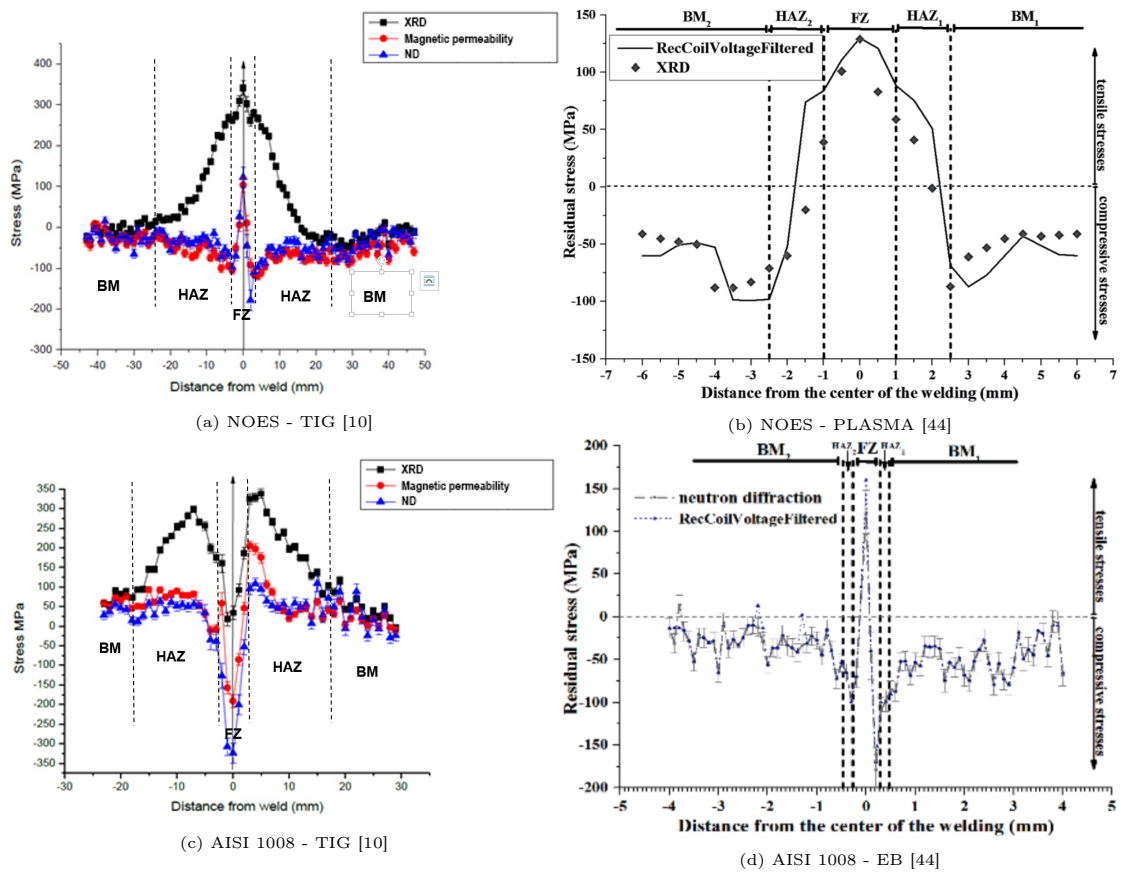
$$\mu_n = \frac{\mu_i - \mu_{-Yp}}{\mu_{+Yp} - \mu_{-Yp}} \quad (1.29)$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_i - \sigma_{-Yp}}{\sigma_{+Yp} - \sigma_{-Yp}} \quad (1.30)$$

Όπου, ο δείκτης i συμβολίζει το σημείο μέτρησης, και οι δείκτες $\pm Yp$ τη μέτρηση στα σημεία μέγιστης εφελκυστικής και θλιπτικής τάσης αντίστοιχα.

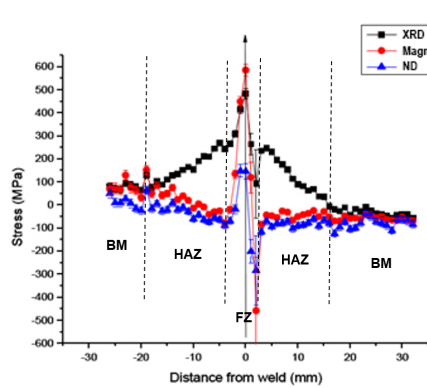
Στα σχήματα 1.35, 1.35 φαίνονται οι κατανομές των τιμών των εσωτερικών τάσεων συναρτήσει της θέσης της μέτρησης. Παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις συγκλίνουν όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια συγκόλλησης και προχωράμε προς το μέσο του κάθε δείγματος. Χαρακτηριστική είναι η μέτρηση στην επιφάνεια συγκόλλησης (FZ): για τα δείγματα NOES και AISI 4130 με τη χρήση ακτίνων X προκύπτουν επιφανειακά πολύ μεγάλες εφελκυστικές τάσεις οι οποίες μηδενίζονται όσο απομακρυνόμαστε. Αντίθετα, τα αποτελέσματα της διάθλασης νετρονίων δείχνουν και παρουσία υψηλών θλιπτικών τάσεων στον όγκο της συγκόλλησης. Στη περίπτωση του AISI 1008, AISI 4130 (d) η γραφική παράσταση φαίνεται ανεστραμμένη λόγω διαφοράς στην κατανομή θερμότητας του υλικού. Σε κάθε περίπτωση, τα εσωτερικά στρες μηδενίζονται όσο απομακρυνόμαστε.

Στη συνέχεια με τη χρήση του SEM επιβεβαιώθηκαν οι πολλαπλοί μετασχηματισμοί φάσης που ήταν αναμενόμενοι λόγω των υψηλών εσωτερικών τάσεων. Αυτές οι αλλαγές στο κρυσταλλικό πλέγμα απαιτούν υψηλότερη ενέργεια ώστε να μετακινήθούν τα μαγνητικά τοιχώματα και τα δίπολα να ευθυγραμμιστούν με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Υπό αυτή την έννοια ο μαγνητικός βρόχος και παράγωγός του (μαγνητική διαπερατότητα) συνδέει τη μικροδομή με το μακρόκοσμο. Η συνολική αβεβαιότητα της μεθόδου που προτείνεται σε όλα τα πειράματα κυμαίνεται μεταξύ 0.1% και 0.2%, ενώ οι συγγραφείς τονίζουν ότι οι μετρήσεις έγιναν με το χέρι, που συντελεί στην αύξηση της αβεβαιότητας. Ακόμα, υποστηρίζεται ότι ο χρόνος λήψης μιας μέτρησης διαρκεί μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου. Συνολικά, η εργασία καταλήγει στο ότι η μέθοδος είναι ανώτερη όσον αφορά την αβεβαιότητα της μέτρησης σε σύγκριση με τις μεθόδους που έχουν προταθεί.

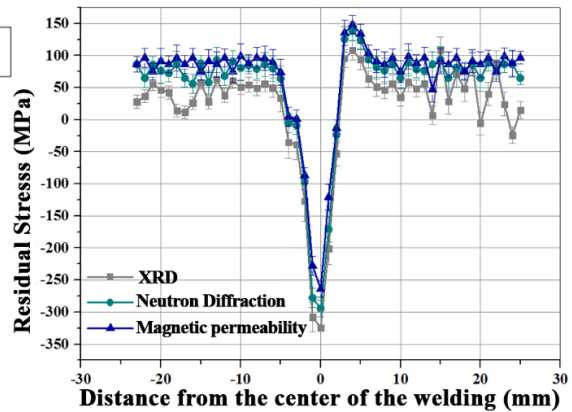


Σχήμα 1.35: Παραμένουσες τάσεις συναρτήσει της απόστασης από τη ζώνη συγκόλλησης (FZ) με χρήση XRD, ND και μαγνητικές τεχνικές (1/2)

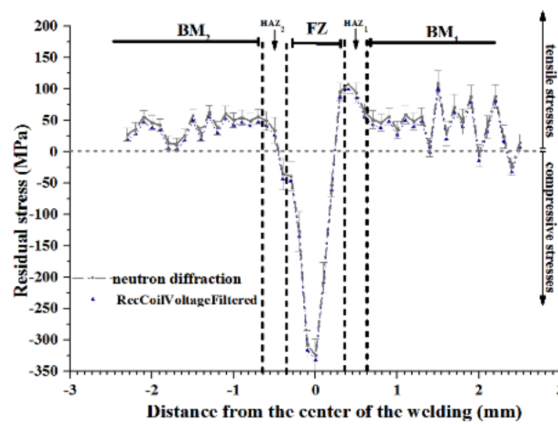
Σε μία σειρά από μελέτες ([45], [46], [47]) παρουσιάζεται πειραματική μέθοδος μαγνητικού προσδιορισμού των εσωτερικών τάσεων μετά από πλαστική παραμόρφωση σε χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα με την εφαρμογή εξωτερικού στρες ως μέσο αντιστάθμισης. Σκοπός της έρευνας είναι η απομόνωση της συνεισφοράς στη μαγνητική συμπεριφορά λόγω της μετακίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων 90° καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στις παραμένουσες θλιπτικές τάσεις. Εξετάστηκε χάλυβας τύπου St3 διαστάσεων $267 \times 3 \times 2\text{mm}$ ο οποίος υποβλήθηκε σε ανόπτηση και στη συνέχεια εφαρμόστηκε πλαστική παραμόρφωση επιμήκυνσης 2.1 ή 8.4%. Η μέτρηση της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας (μ_d) ή της επαγόμενης τάσης ($U^-(H)$) έγινε με χρήση της διάταξης που φαίνεται στο Σχήμα 1.36. Ο κύριος βρόχος υστέρησης παράχθηκε από το σωληνοειδές με πεδίο συχνότητας $5 \cdot 10^{-3}\text{Hz}$ και μέγιστης τιμής 135A/cm , η μέτρηση του μ_d πραγματοποιήθηκε με ζεύγος διαφορικών πηνίων ενώ για την ποσότητα $U^-(H)$ το ένα πηνίο χρησιμοποιήθηκε ως διέγερση συχνότητας 30Hz και το άλλο λήψη.



(e) AISI 4130 - TIG [10]

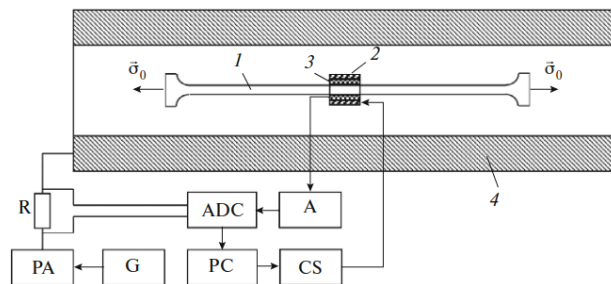


(f) AISI 4130 - TIG [42]



(g) AISI 4130 - EB [44]

Σχήμα 1.35: Παραμένουσες τάσεις συναρτήσει της απόστασης από τη ζώνη συγκόλλησης (FZ) με χρήση XRD, ND και μαγνητικές τεχνικές (2/2)



Σχήμα 1.36: Πειραματική διάταξη μέτρησης μαγνητικών ιδιοτήτων. (1) Δείγμα, (2) Πηνίο διέγερσης, (3) Πηνίο λήψης, (4) Σωληνοειδές, A: Ενισχυτής, G: Γεννήτρια, PA: Ενισχυτής ισχύος, CS: Πηγή Ρεύματος, ADC: analog-to-digital converter, PC: Υπολογιστής. [45]

Σύμφωνα με τις μετρήσεις προκύπτει κυματομορφή με δύο κορυφές για τιμές πεδίου μαγνήτισης $H_1 > 0$, $H_2 < 0$ όπου η συμβολή των μη αντιστρεπτών μετα-

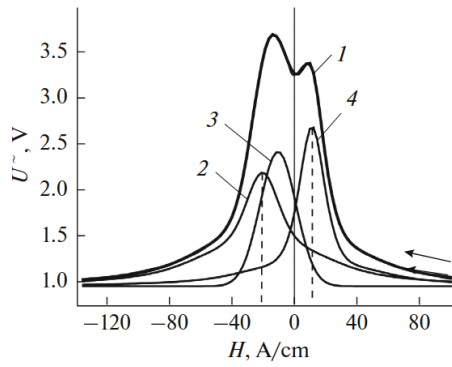
ινήσεων των τοιχωμάτων 180° και 90° είναι αδιαχώριστη. Αρχική λύση προτάθηκε η ανάλυση της καμπύλης με χρήση ψευδό-Voigt συναρτήσεων (Σχήμα 1.37). Οι τιμές του πεδίου από την ανάλυση αυτή απέκλιναν λιγότερο από 5.3% [45]. Εναλλακτική μεθοδολογία αποτέλεσε η εφαρμογή εφελκυστικής ελαστικής παραμόρφωσης και μέτρηση εκ νέου της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας η οποία επηρεάζεται πλέον μόνο από τη κίνηση τοιχωμάτων 180° (Σχήμα 1.38). Με την αφαίρεση των δύο καμπυλών προκύπτουν 2 μέγιστα ($H_1^* > 0$, $H_2^* < 0$) που περιγράφουν την κίνηση των τοιχωμάτων 90° (Σχήμα 1.39). Με χρήση των εξισώσεων 1.31, 1.32 όπου θ_0 η γωνία που σχηματίζει το πλέγμα του κόκκου από τον κύριο κρυσταλλογραφικό άξονα (τύπου [100]), H_σ^{exp} το μαγνητοελαστικό πεδίο, M_s η μαγνήτιση στο κόρο και λ_{100} η μαγνητοσυστολική σταθερά του σιδήρου. Οι συγγραφείς σημειώνουν ότι η παραπάνω μεθοδολογία είναι ορθή στη περίπτωση που το υλικό παρουσιάζει όριο κόκκου μεγάλης γωνίας (High Angle Boundaries - HAB).

$$H_\sigma^{exp} = \frac{-(H_1^* + |H_2^*|)}{2(\cos \theta_0 + \sin \theta_0)} \quad (1.31)$$

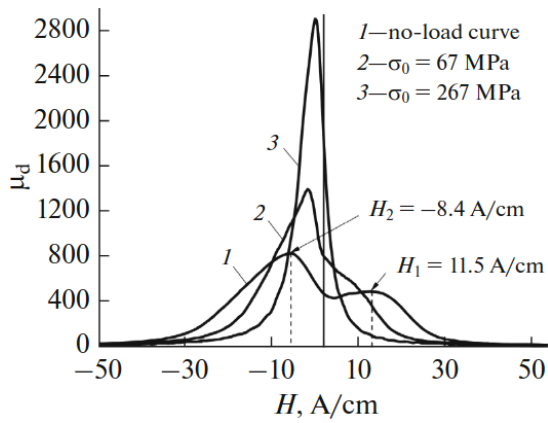
$$\sigma_i = \frac{2H_\sigma^{exp} M_s}{3\lambda_{100}} \quad (1.32)$$

Οι συγγραφείς έκριναν ότι η εφαρμογή εξωτερικού στρες στη μεθοδολογία δεν είναι εύκολο για χρήση στη βιομηχανία. Ως αντικατάσταση της καμπύλης (3) του Σχήματος 1.38 πρότειναν τη χρήση μέτρησης της μαγνητικής διαπερατότητας πριν την πλαστική παραμόρφωση. Μετά την αφαίρεση των καμπυλών (Σχήμα 1.41) η διαφορά του μέσου πεδίου προέκυψε 8%, αποδεκτή σύμφωνα με τη μελέτη αφού η μέθοδος δεν χρειάζεται βαθμονόμηση. Ακόμα, με μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας κάθετα στη παραμόρφωση του δείγματος είναι δυνατή και η μέτρηση των εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων.

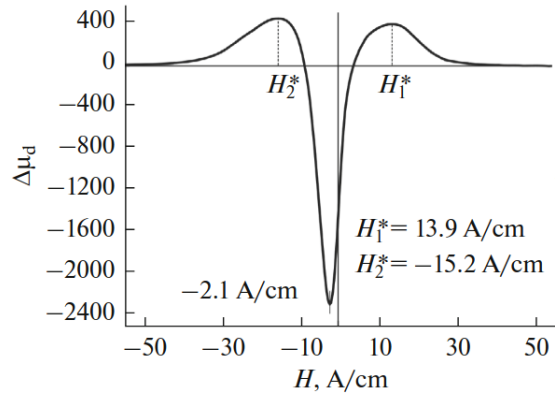
Για την ανάπτυξη φορητού συστήματος η διάταξη του αισθητηρίου άλλαξε: Στο εσωτερικό του πηνίου διέγερσης τοποθετήθηκε πυρήνας (yoke) από μαλακό μαγνητικό υλικό με διάσταση των πόλων $18 \times 28mm$ και εσωτερική απόσταση πόλων $29mm$. Η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου γίνεται με αισθητήρα Hall και η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα με πηνίο λήψης 500 στροφών πάνω στο πυρήνα. Η επεξεργασία και απεικόνιση των αποτελεσμάτων γίνεται με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. [47]



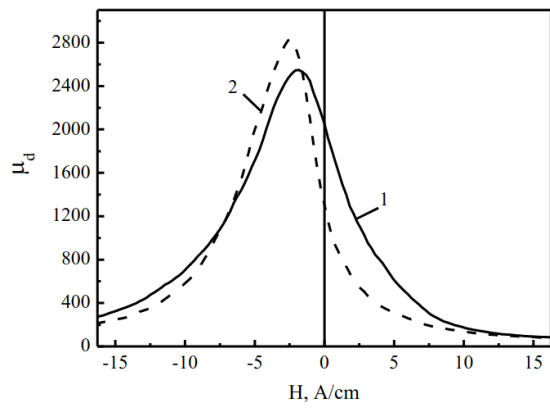
Σχήμα 1.37: Ανάλυση της εξάρτησης της επαγόμενης τάσης από το πεδίο με ψευδο-Voigt συναρτήσεις. Το δείγμα είχε υποστεί παραμόρφωση 2.1%. [45]



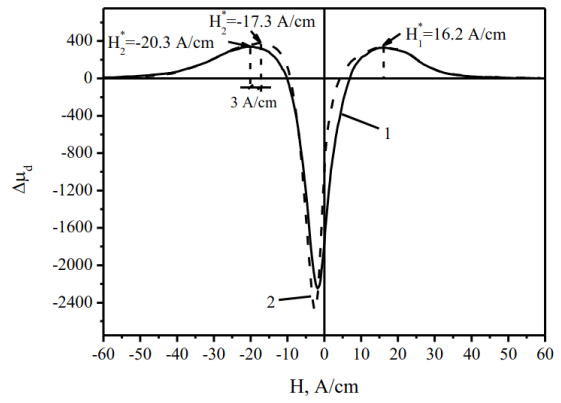
Σχήμα 1.38: Εξάρτηση της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας από το πεδίο. (1) Καμπύλη χωρίς φορτίο, επιμήκυνση 2.1%, (2) Επιβολή ελαστικής παραμόρφωσης $\sigma_0 = 67 \text{ MPa}$, (3) Επιβολή ελαστικής παραμόρφωσης $\sigma_0 = 267 \text{ MPa}$ [46]



Σχήμα 1.39: Καμπύλη εύρεσης εσωτερικών στρες μέσω τοιχωμάτων 90° . Η καμπύλη προέκυψε από την αφαίρεση της καμπύλης (3) από την (1) του Σχήματος 1.38. [46]



Σχήμα 1.40: Καμπύλες $\mu_d(H)$ σε δείγματα διαφορετικής επιμήκυνσης. (1) Μέτρηση μετά την ανόπτηση χωρίς πλαστική παραμόρφωση, (2) Δείγμα με επιμήκυνση 7.4% και υπο ελαστικό στρες [47]



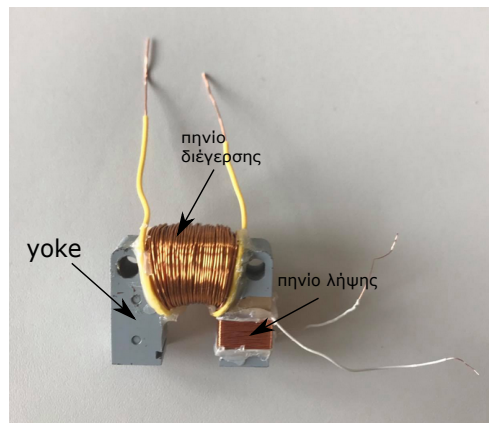
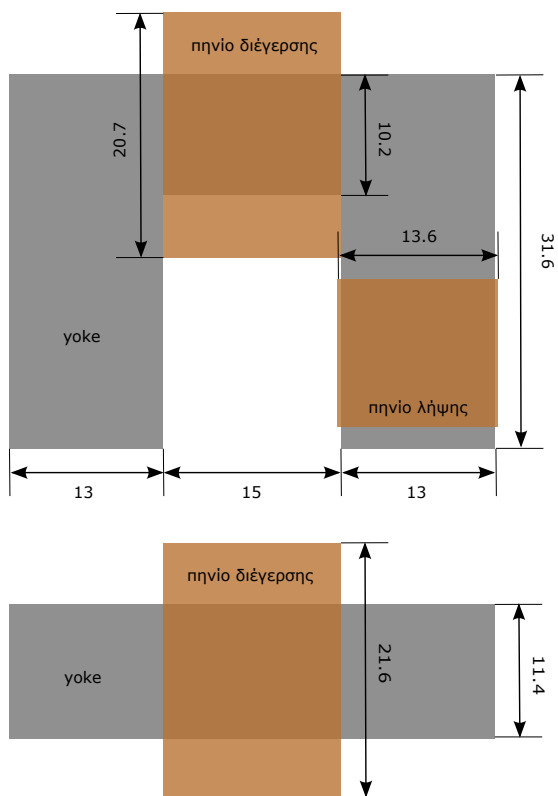
Σχήμα 1.41: Καμπύλη εύρεσης εσωτερικών στρες για επιμήκυνση 7.4% μέσω τοιχωμάτων 90° . Με διακεκομμένες είναι η αφαίρεση της καμπύλης (2) ενώ με συνεχή γραμμή της (1). Η ποσότητα H_1^* συμπίπτει και στις 2 καμπύλες, αντίθετα παρατηρείται μετατόπιση κατά $3A/m$ στο H_2^* . [47]

2 Πειραματική Διάταξη - Μετρήσεις

2.1 Αισθητήρας μαγνητικής διαπερατότητας

Η μέτρηση των μαγνητικών ιδιοτήτων έγινε με την ανάπτυξη πρωτότυπου, μη βαθμονομημένου αισθητήρα στο εργαστήριο. Ο αισθητήρας αποτελεί διάταξη μονού yoke όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά αναλύονται παρακάτω:

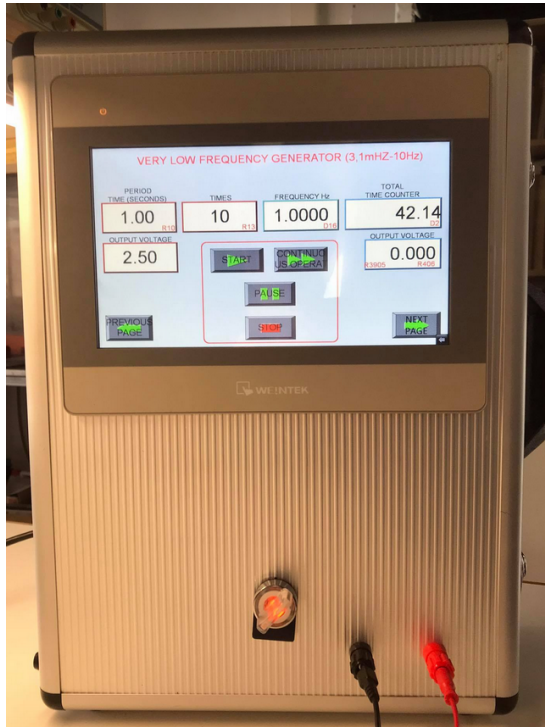
- **Yoke:** Πυρήνας μετασχηματιστή (σχήματος 'U' χωρίς στρογγυλεμένες ακμές) από φύλλα πάχους 0.25mm μη προσανατολισμένου χάλυβα. Το υλικό κατασκευής είναι φερρίτης μονής φάσης με περιεκτικότητα 1.45% Si, $7 - 8$ ppm C και $6 - 7$ ppm S. Η χρήση πολλαπλών μονωμένων φύλλων ηλεκτρικού χάλυβα ελαχιστοποιεί τις μαγνητικές απώλειες.
- **Πηνίο διέγερσης:** Χρησιμοποιήθηκε καλώδιο διαμέτρου 0.5mm , ώστε σε μέγιστη τιμή ρεύματος μαγνήτισης $1\text{A} - 2\text{A}$ να μην παρατηρείται έντονη θέρμανση. Τυλίχθηκε με το χέρι σε 9 στρώσεις με συνολικό αριθμό σπειρών $N = 190$.
- **Πηνίο λήψης:** Τυλίχθηκε με το χέρι καλώδιο διαμέτρου 0.03mm συνολικά 300 περιελίξεις σε 10 στρώσεις.
- **Πηγή διέγερσης:** Custom-made γεννήτρια ρεύματος ημιτονικής κυματομορφής συχνοτήτων $3.1\text{mHz} - 10\text{Hz}$. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η οθόνη ελέγχου της γεννήτριας. Με κόκκινο πλαίσιο απεικονίζονται οι ποσότητες που τροποποιεί ο χρήστης: Η περίοδος του ημιτόνου, το μέγιστο πλάτος και πλήθος περιόδων λειτουργίας. Με μπλε πλαίσιο η γεννήτρια μας δίνει πληροφορίες για τη συχνότητα του σήματος, το πλάτος εξόδου κάθε στιγμή και το χρόνο συνεχόμενης λειτουργίας. Με το πλήκτρο "START" παράγεται σήμα για πλήθος περιόδων το οποίο έχουμε ορίσει και μετά σταματά. Με το πλήκτρο "CONTINUOUS OPERATION" η γεννήτρια παράγει ασταμάτητα έξοδο. Τέλος, έχουμε την επιλογή "PAUSE" ή "STOP" όπου διατηρείται η τιμή της εξόδου ή μηδενίζεται αντίστοιχα.
- **Απεικόνιση μετρήσεων:** Παλμογράφος EZ WideView DS-1530 (Σχήμα 2.4) με δυνατότητα εξαγωγής των δεδομένων σε μορφή text/csv/image σε εξωτερική μονάδα αποθήκευσης USB flash drive



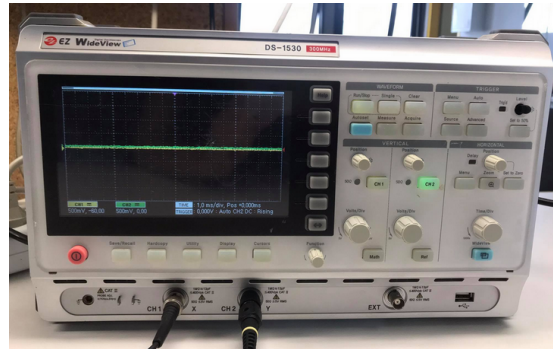
Σχήμα 2.2: Πρωτότυπος Αισθητήρας.

Σχήμα 2.1: Σχηματικό πρωτότυπου Αισθητήρα. Αναγράφονται οι διαστάσεις σε χιλιοστά.

Κατά την κατασκευή στα άκρα των πηνίων κολλήθηκαν καλώδια με εξωτερικό πλαστικό περίβλημα αντίστοιχης διατομής για να διασφαλιστεί η ποιότητα από καλώσεις στο χαλκό λόγω συνεχών συνδέσεων - αποσυνδέσεων με τα όργανα. Ακόμα, η σταθερότητα των γεωμετρικών χαρακτηριστικών επιτεύχθηκε με τη χρήση θερμοκόλλας όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Λόγω του όγκου του πηνίου διέγερσης και της διαδικασίας κατασκευής φαίνεται πως αποκλίνει από τον ιδανικό κύλινδρο που θα θέλαμε να επιτύχουμε χωρίς όμως να επηρεάζει τη διαδικασία μαγνήτισης.



Σχήμα 2.3: Γεννήτρια ημιτονικής διέγερσης αισθητήρα.



Σχήμα 2.4: Παλμογράφος απεικόνισης σήματος λήψης.

2.1.1 Ηλεκτρικές ιδιότητες πηνίων διέγερσης και λήψης

Όπως αναφέρεται [48], οι αναλυτικοί τύποι για τον υπολογισμό της επαγωγής (L) και του αναπτυσσόμενου μαγνητικού πεδίου (B) γίνονται προσεγγιστικοί και περιγράφουν μόνο μερικές γεωμετρικές διατάξεις. Για το θεωρητικό υπολογισμό της επαγωγής χρησιμοποιήθηκε η σχέση (2.1) όπου η ποσότητα μ_α περιγράφει τη φαινόμενη σχετική μαγνητική διαπερατότητα και προκύπτει από τον τύπο $\mu_r/[1 + D(\mu_r - 1)]$ όπου D ο διαμαγνητικός παράγοντας του πυρήνα (2.3). Θεωρώντας ότι το μ_r παραμένει σταθερό και το πηνίο έχει σχήμα ελλειψοειδούς προκύπτει η σχέση (2.2) με την ποσότητα m να περιγράφει το λόγο μήκους - διαμέτρου του πηνίου. Επειδή το πηνίο που κατασκευαστήκε αποτελείται από πολλές στρώσεις, ως διάμετρος επιλέχθηκε η μέση διάμετρος ($15.45mm$) άρα $m = 15/15.45 = 0.98$. Ακόμα, ο λόγος l_w/l (μήκος πηνίου / μήκος πυρήνα) προκύπτει ίσος με $15/41 \approx 0.37$, για τις διαστάσεις που φαίνονται στο σχήμα 2.1. Μετά τις πράξεις προκύπτει για το πηνίο διέγερσης $\mu_\alpha = 2.95$ και $L = 0.234mH$

$$L = N^2 \frac{\mu_0 \mu_\alpha A_{core}}{l} \left(\frac{l_w}{l} \right)^{-3/5} \quad (2.1)$$

$$\mu_\alpha = \frac{1}{D} \quad (2.2)$$

$$D = \frac{1}{m^2 - 1} \left[\frac{m}{\sqrt{m^2 - 1}} \ln(m + \sqrt{m^2 - 1}) - 1 \right] \quad (2.3)$$

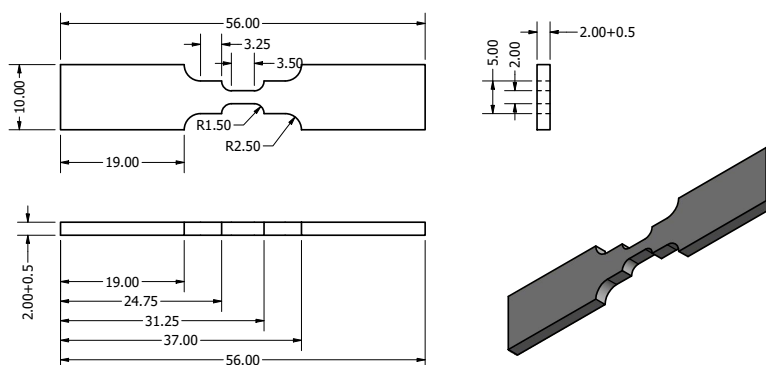
Η επαγωγή του πηνίου διέγερσης και λήψης μετρήθηκε και πειραματικά με χρήση του LCR meter ακριβείας HP 4284A που βρίσκεται στο εργαστήριο. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε για συχνότητα διέγερσης $20Hz$, η μικρότερη που υποστηρίζει το μηχανήμα. Προέκυψε: $L_{excitation} = 1.28mH$, $|Z_{excitation}| = 0.69\Omega$ και $L_{sens} = 5.35mH$, $|Z_{sens}| = 30.32\Omega$. Παρατηρούμε πώς ο θεωρητικός υπολογισμός για το πηνίο διέγερσης διαφέρει κατά μια τάξη μεγέθους περίπου, αφού έχουν γίνει πολλές απλοποιήσεις και παραδοχές για την χρήση αυτών των τύπων. Η αξία του θεωρητικού υπολογισμού δεν χάνεται όμως, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα ως κατευθυντήριες παράμετροι πριν τη κατασκευή του πηνίου. Στη πραγματικότητα μας ενδιαφέρουν οι τιμές $L_{excitation}$ και L_{sens} στο διάστημα $(0.1, 10)Hz$ όπου είναι και το εύρος μετρήσεων του αισθητήρα. Αναμένεται αύξηση της επαγωγής των πηνίων με μείωση της συχνότητας η οποία όμως δεν αλλοιώνει την ανάλυση των μετρήσεων που θα ακολουθήσει. Τέλος, η συγγραφέας δεν προχώρησε στον θεωρητικό υπολογισμό της παραμέτρου L_{sens} λόγω ότι στη διάταξη το πηνίο δεν βρίσκεται στο μέσο του πυρήνα και δεν είναι ομοιόμορφη η μαγνήτισή του.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια μέτρησης μαγνητικών ιδιοτήτων σε χαμηλές συχνότητες (υστέρηση). Ως δείγματα χρησιμοποιήθηκαν dog-bone δοκίμια και χάλυβας τύπου DP700 υποκατηγορία της κλάσης AHSS (νεότερος τύπος φύλλων χάλυβα υψηλής αντοχής).

Πίνακας 2.1: Στοιχειομετρία δειγμάτων dogbone.

	S1	S4	S8	S10	S11	S13	S16	S22	S3	S6	S12
Fe	34.31	31.50	29.39	32.61	29.44	27.92	30.38	28.83	21.16	18.32	19.91
Co	25.48	26.93	28.16	27.31	28.39	29.43	27.60	29.15	23.79	23.88	23.38
Ni	22.28	22.61	25.12	21.64	25.95	24.55	24.09	26.37	25.61	28.86	24.55
Al	9.14	10.87	9.16	9.58	7.77	10.04	8.99	7.38	17.99	18.62	10.04
Mn	9.79	8.09	8.17	8.86	8.45	8.05	8.95	8.26	11.46	10.32	8.05
Fe+Co +Ni	82.07	81.04	82.67	81.56	83.78	81.90	82.07	84.35	70.56	71.06	67.84
Al+Mn	18.93	18.96	17.33	18.44	16.22	18.09	17.94	15.64	29.45	28.94	18.09
$\frac{Al+Mn}{Fe+Co+Ni}$	0.23	0.23	0.21	0.23	0.19	0.22	0.22	0.19	0.42	0.41	0.27
	as-is	as-is	as-is	HT	HT	HT	as-is	HT	HT	HT	as-is

2.2 Δείγματα Dogbone



Σχήμα 2.5: Διαστάσεις δοκίμων dogbone.

Τα δείγματα που εξετάστηκαν φέραν τα αναγνωριστικά Al_6 και Al_{10} . Σε όσα είχαν υποστεί θερμική επεξεργασία υπήρχαν τα αρχικά “HT” ενώ τα υπόλοιπα “asis”. Στη συνέχεια χωρίστηκαν στις κατηγορίες “tens” για τις εφελκυστικές και “comp” για τις θλιπτικές μηχανικές τάσεις στις οποίες υποβλήθηκαν. Η γεωμετρία και οι διαστάσεις ήταν πανομοιότυπες σε όλα τα δείγματα εκτός του S_{21} το οποίο ήταν παχύτερο από τα υπόλοιπα. (Στη παρούσα εργασία οι μετρήσεις του καταγράφηκαν αλλά εξαιρούνται από τη ποιοτική ανάλυση.) Στο Σχήμα 2.5 φαίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις σε χιλιοστά. Ακόμα στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η στοιχειομετρία των δειγμάτων σε ποσοστό % και δίνεται το κλάσμα όγκου $Al + Mn$ προς $Fe + Co + Ni$, δηλαδή ο λόγος των μη φερομαγνητικών προς φερομαγνητικών στοιχείων.

Πίνακας 2.2: Μέγιστη τιμή εξόδου αισθητήρα στα δείγματα dogbone σε διέγερση $11V_{p-p}$, $1Hz$

	Al_6		Al_{10}	
	as-is	HT	as-is	HT
Tens (mV)	280 (S_8)	-	280 (S_{12})	400 (S_{15})
	280 (S_{16})	-	280 (S_{19})	460 (S_{21})
Comp (mV)	240 (S_1)	260 (S_{10})	320 (S_{23})	360 (S_3)
	260 (S_4)	260 (S_{11})	280 (S_{20})	300 (S_6)
extra (mV)	280 (S_{25})	280 (S_{25})		

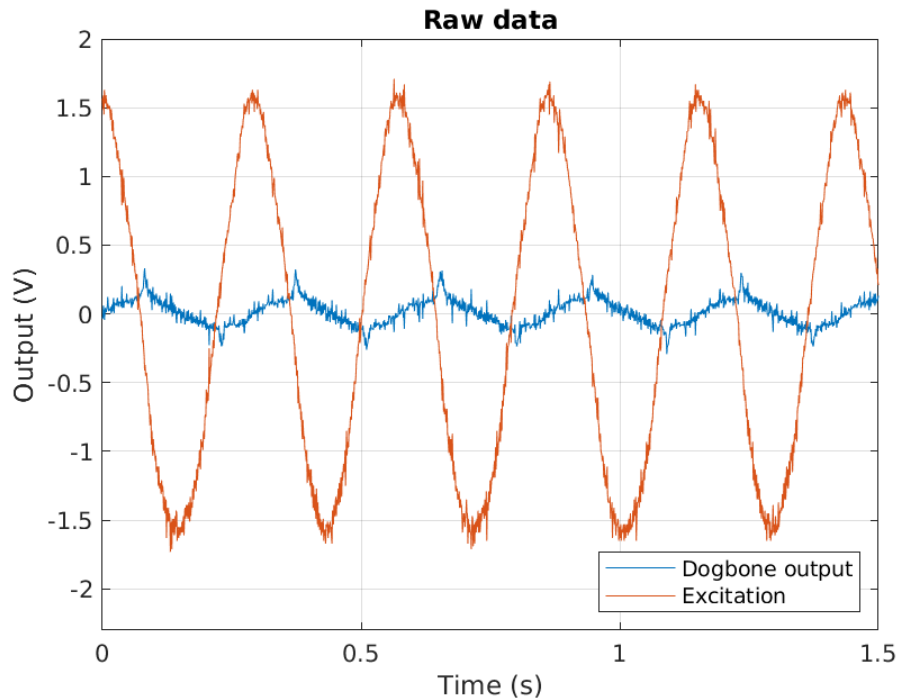
2.3 Μετρήσεις

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι όπως φάνηκε και απο το παραπάνω Σχήμα 2.5 τα άκρα του δείγματος έχουν μικρότερη επιφάνεια από τους πόλους του yoke. Συνεπώς, επιπλέον μαγνητικές γραμμές από τη συνολική μαγνήτιση χάνονται στον αέρα. Επιπρόσθετα, λόγω των μικρων διαστάσεων τα φαινόμενα άκρων στο δείγμα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν.

Οι πρώτες μετρήσεις έγιναν σε συχνότητα $1Hz$ και ημίτονο διέγερσης πλάτους $11V_{p-p}$. Το μέγιστο ρεύμα μαγνήτισης μετρήθηκε $3A$ και καταγράφηκε η μεγιστη τιμή της τάσης εξόδου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 2.2 όπου δεξιά των τιμών αναγράφεται η ονομασία του δείγματος. Παρατηρούμε οτι δεν προκύπτει σαφής πληροφορία από αυτή τη μέτρηση για αυτό στη συνέχεια για κάθε δείγμα ξανά μετράμε λαμβάνοντας ολόκληρη την κυματομορφή εισόδου και εξόδου ψηφιακά από τον παλμογράφο.

Στις νέες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδές σήμα απ τη γεννήτρια πλάτους $V_{GEN,p-p} = 5V$ και περιόδου $T = 0.3sec$. Σε αυτή τη περίπτωση το μέγιστο ρεύμα στο πηνίο διέγερσης είχε τιμή $I_{exc,max} = 1.3A$. Η αλλαγή στις συνθήκες των μετρήσεων εξαρτήθηκε από δύο παράγοντες: Πρώτον, η υψηλή τιμή του ρεύματος στις αρχικές μετρήσεις ενώ αύξανε τη μαγνήτιση οδηγούσε σε υπερθέρμανση του πηνίου διέγερσης μειώνοντας κατά πολύ την επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Δεύτερον, με τη μείωση της μαγνήτισης του δείγματος σε συχνότητα $1Hz$ το ωφέλιμο σήμα χανόταν στο θόρυβο της μέτρησης για αυτό χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερη συχνότητα διέγερσης. Συνδυάζοντας τα παραπάνω κρίθηκαν ως καλύτερες συνθήκες μέτρησης οι ανώτερες. Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται ενδεικτικά η μέτρηση ¹του δείγματος “al6 comp asis 1” με τα δεδομένα όπως λήφθηκαν από το παλμογράφο.

¹Η κυματομορφές που προέκυψαν είναι ανάλογες σε όλα τα δείγματα dogbone. Το δειγμα “al6 comp asis 1” επιλέχθηκε τυχαία ως ενδεικτικό



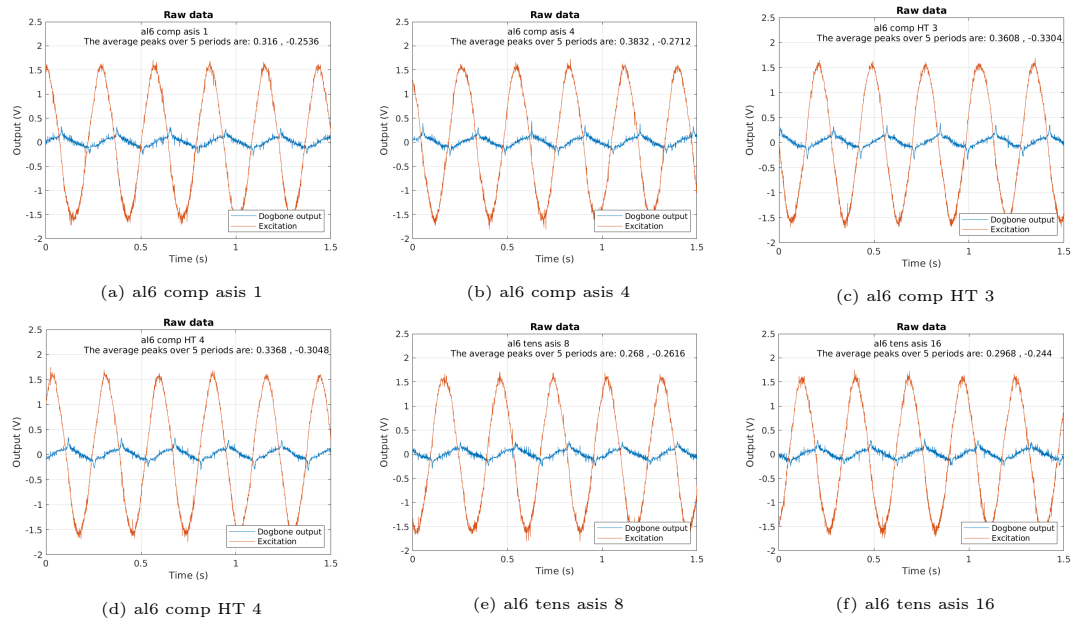
Σχήμα 2.6: Ενδεικτικό σήμα λήψης του αισθητήρα στο παλμογράφο. Με πορτοκαλί φαίνεται το σήμα διέγερσης του αισθητήρα για καλύτερη ερμηνεία της εξόδου.

Από τη γραφική παράσταση του ημιτόνου εύκολα παρατηρούμε μια πτώση τάσης 1V peak to peak λόγω της σύνθετης αντίστασης που εμφανίζει το πηνίο διέγερσης. Από το γενικευμένο νόμο του Ohm (2.4) προκύπτει εύκολα ότι η αντίσταση (προσεγγιστικά) που παρουσιάζει το πηνίο για περίοδο $T = 0.3sec$ είναι της τάξης του 1Ω . Η αύξηση από τη πειραματική τιμή όπως μετρήθηκε από το LCR meter ακριβείας HP 4284A είναι αναμενόμενη αφού ο αισθητήρας τροφοδοτείται με συχνότητα διέγερσης μικρότερη της αρχικής μέτρησης άρα η επαγωγή ($L_{excitation}$) έχει αυξηθεί. Επίσης, αναφέρεται προσεγγιστικά διότι τόσο τα δεδομένα από τους ακροδέκτες της λήψης του αισθητήρα όσο και το σήμα διέγερσης, όπως παράχθηκε από τη γεννήτρια εμφανίζουν υψηλό θόρυβο. Ένα ακόμα σημείο το οποίο η συγγραφέας επιθυμεί να τονιστεί, είναι ότι η γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε δεν παρουσιάζει θόρυβο στη μέτρηση με καθαρά ωμικό φορτίο.

$$|Z| = \frac{|V|}{|I|} = \frac{1.5}{1.3} = 1.15\Omega \quad (2.4)$$

Στο σήμα λήψης διακρίνεται η χαρακτηριστική μορφή των κορυφών στην αντιστροφή του πεδίου (σημείο μέγιστου ρυθμού μεταβολής της μαγνητισής). Παρατηρώντας ότι το μέτρο του θορύβου δεν ξεπερνά σε καμία από τις μετρήσεις την απόλυτη τιμή των κορυφών μετρήθηκαν, με τη χρήση λογισμικού, η μέγιστη τιμή κορυφής που

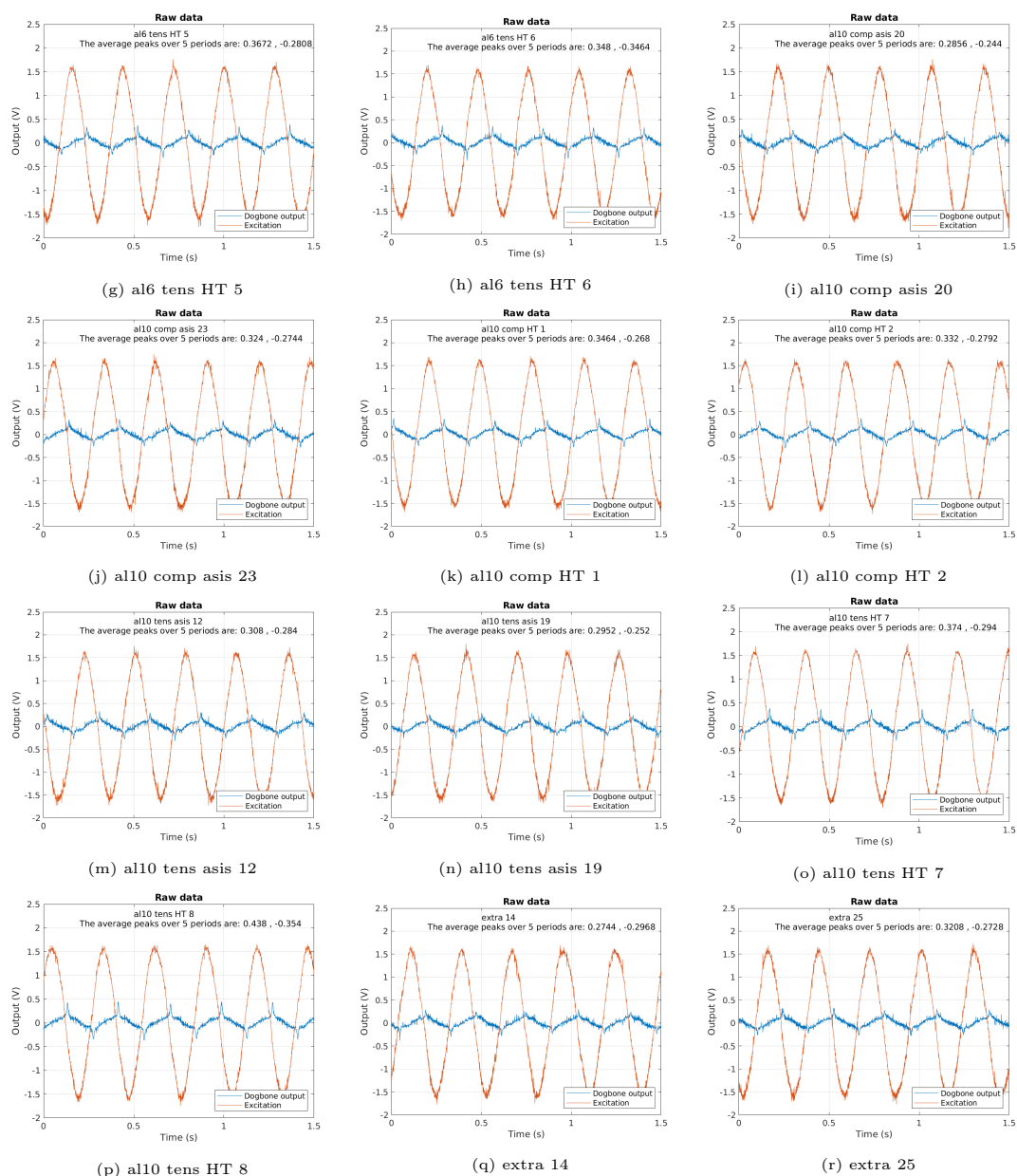
παρουσιάζει κάθε δείγμα για την αξιολόγηση των δεδομένων. Η τιμές που προέκυψαν αποτελούν το μέσο όρο των 5 κορυφών που καταγράφηκαν στο παλμογράφο για την μείωση του στοχαστικού θορύβου και φαίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 2.3. Χάριν πληρότητας παρουσιάζονται και οι γραφικές παραστάσεις στο Σχήμα 2.7 όπως προέκυψαν με τη χρήση MATLAB.



Σχήμα 2.7: Μέτρηση ύψους κορυφών σε μη επεξεργασμένα δεδομένα (1/2). Στα επιμέρους γραφήματα αναγράφονται οι τιμές των κορυφών

Με μία πρώτη ματιά παρατηρούμε τα εξής:

- Στο Σχήμα 2.7 επιβεβαιώνουμε πως οι αποκρίσεις έχουν την ίδια μορφή για όλα τα δείγματα. Ενώ στη παραγωγή της διέγερσης έχουμε εντονότερο θόρυβο στο αρνητικό μέγιστο.
- Σε όλες τις μετρήσεις με εξαίρεση το δείγμα “extra 14” το ύψος της αρνητικής κορυφής είναι μικρότερο από τη θετική. Η διαφορά αυτή κυμαίνεται στο διάστημα $[0.0016, 0.112]V$ με μέση τιμή $0.0521V$. Στο Σχήμα 2.8 φαίνεται το ιστόγραμμα της τρίτης στήλης του Πίνακα 2.3 εξαιρουμένης της τιμής -0.0224 . Από τα 17 εναπομείναντα δείγματα οι διαφορές των κορυφών σε 4 εμπίπτουν στο διάστημα $[0.04, 0.05]V$, 3 στο $[0.08, 0.09]V$, ενώ καμία στα διαστήματα $[0.01, 0.02]V$ και $[0.09, 0.1]V$. Οι διαφορές αυτές προκύπτουν από την αδυναμία παραγωγής της αρνητικής κορυφής αντίστοιχη της θετικής στο ημίτονο διέγερσης. Για αυτό το λόγο θα αξιοποιήσουμε τα δεδομένα των θετικών κορυφών για την εξαγωγή συμπερασμάτων παρακάτω.



Σχήμα 2.7: Μέτρηση ύψους κορυφών σε μη επεξεργασμένα δεδομένα (2/2). Στα επιμέρους γραφήματα αναγράφονται οι τιμές των κορυφών

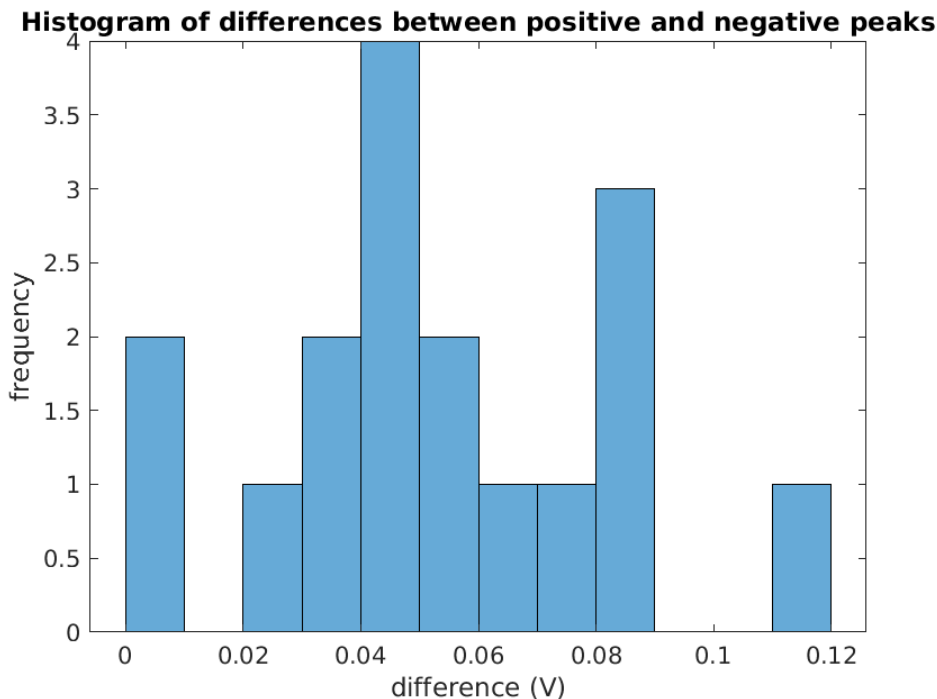
- Στη κατηγορία “al6 asis” τα δείγματα που έχουν υποβληθεί σε θλιπτικές (“comp”) τάσεις εμφανίζουν υψηλότερες κορυφές από την εφαρμογή εφελκυστικών τάσεων (“tens”). Από την άλλη πλευρά τα δείγματα “al6 HT”, δηλαδή όσα είχαν λάβει θερμική κατεργασία, είχαν την ίδια απόκριση στα “tens” και “comp” δείγματα. Τέλος στη κατηγορία “Tens al6” τα θερμικά επεξεργασμένα δείγματα εμφανί-

Πίνακας 2.3: Συνοπτικός πίνακας των τιμών κορυφών στα dogbone δείγματα.

		Peak max (V)	Peak low (V)	Difference (V)	
Comp	asis	al6 1	0.316	-0.2536	0.0624
		al6 4	0.3832	-0.2712	0.112
		al10 20	0.2856	-0.244	0.0416
		al10 23	0.324	-0.2744	0.0496
	HT	al6 3	0.3608	-0.3304	0.0304
		al6 4	0.3368	-0.3048	0.032
		al10 1	0.3464	-0.268	0.0784
		al10 2	0.332	-0.2792	0.0528
Tens	asis	al6 8	0.268	-0.2616	0.0064
		al6 16	0.2968	-0.244	0.0528
		al10 12	0.308	-0.284	0.024
		al10 19	0.2952	-0.252	0.0432
	HT	al6 5	0.3672	-0.2808	0.0864
		al6 6	0.348	-0.3464	0.0016
		al10 7	0.374	-0.294	0.08
		al10 8	0.438	-0.354	0.084
extra 14		0.2744	-0.2968	-0.0224	
extra 25		0.3208	-0.2728	0.048	

ζουν αρκετα υψηλότερες κορυφές ($> 0.05V$) από τα “asis” δείγματα

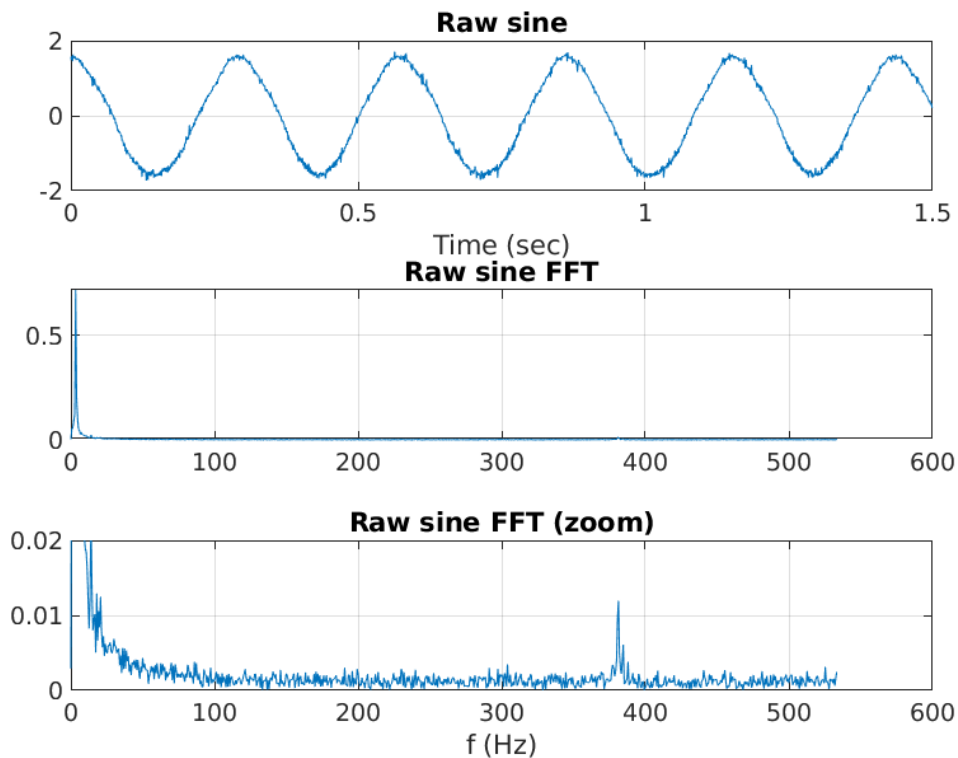
- Τα δείγματα “al10 HT” τα “tens” εμφανίζουν μεγαλύτερες κορυφές από τα “comp” (δεν λαμβάνεται υπόψιν η απόκριση του δείγματος “al10 HT Tens 8” λόγω διαφοράς στο πάχος). Επιπρόσθετα, και στα “comp” και στα “tens” τα “HT” δοκίμια εμφανίζουν υψηλότερες κορυφές από τα μη επεξεργασμένα.
- Ανάμεσα στα “al6” και “al10” δεν εμφανίζεται κάποια χαρακτηριστική διαφορά στο ύψος των κορυφών, στις διάφορες κατηγορίες, όπως προκύπτουν από τις αρχικές μετρήσεις.



Σχήμα 2.8: Ιστόγραμμα διαφορών θετικών με αρνητικών κορυφών. Τα bins έχουν πλάτος $0.01V$ και καλύπτουν όλο το εύρος των διαφορών.

2.4 Επεξεργασία μετρήσεων

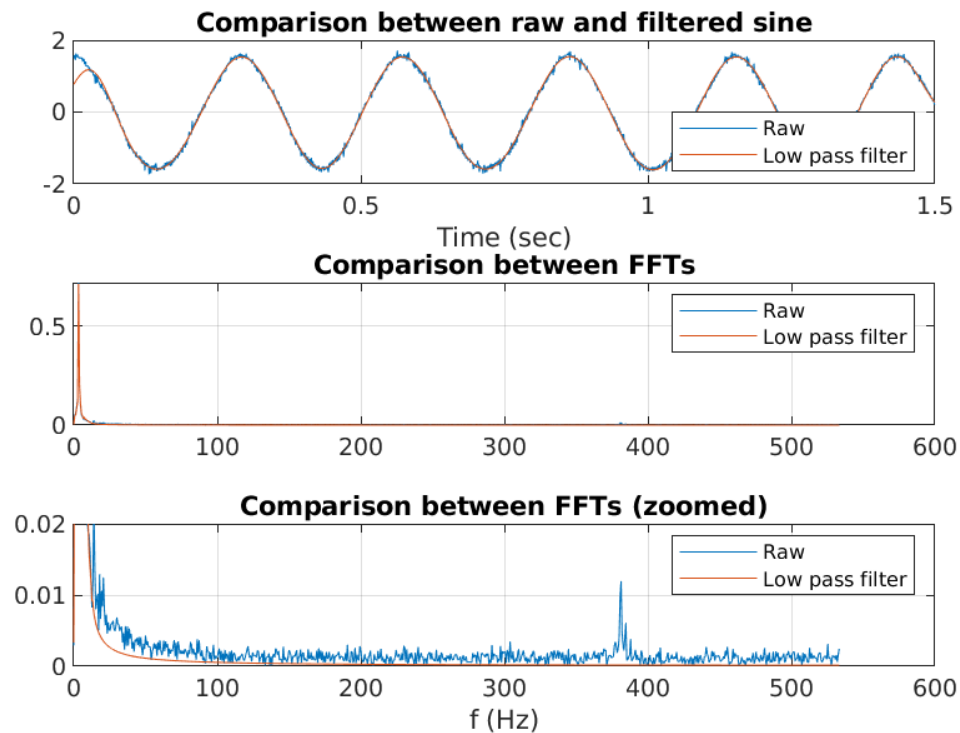
Στη συνέχεια για την απομάκρυνση του θορύβου, χρησιμοποιήθηκαν διάφορα φίλτρα όπως υλοποιούνται από το λογισμικό MATLAB. Αρχικά με τη χρήση Fast Fourier Transform (FFT) θέλουμε να βρούμε τις κυρίαρχες συχνότητες θορύβου. Στο Σχήμα 2.9 φαίνεται ξεκάθαρα η κυρίαρχη συχνότητα του ημιτόνου διέγερσης ενώ ο θόρυβος καταλαμβάνει όλο το φάσμα σε πολύ μικρές συχνότητες. Υπό αυτή τη μορφή, εύκολα, με τη χρήση ψηφιακού βαθυπερατού φίλτρου μπορεί να γίνει αποθορυβοποίηση του σήματος. Επιλέχθηκε συχνότητα $f_{-3dB} = 5Hz$ και η παράμετρος $steepness = 0.99$ η οποία καθορίζει τη κλίση της απόκρισης πλάτους του φίλτρου, παίρνει τιμές στο διάστημα $[0.5, 1)$ ενώ αν δεν οριστεί από το χρήστη έχει προεπιλεγθεί η τιμή 0.85 . Η αύξηση της παραμέτρου ενώ οδηγεί σε ιδανικό ημίτονο όπως επιβεβαιώνεται και στο σχήμα 2.10 οδηγεί σε μικρή παραμόρφωση της πρώτης κορυφής των δειγμάτων χωρίς όμως να επηρεάζονται οι υπόλοιπες περιόδους.



Σχήμα 2.9: Μετασχηματισμός Fourier του ημιτόνου διέγερσης. Στο πρώτο γράφημα φαίνεται η παραγωγή ενός ενδεικτικού ημιτόνου από τη γεννήτρια. Στο δεύτερο, ο FFT με τη μηδενική αρμονική στα 3Hz ενώ στο τρίτο σχήμα η μεγένθυση του δεύτερου στις υπόλοιπες συχνότητες.

2.4.1 IIR Φίλτρα

Στη συνέχεια, έγινε προσπάθεια αφαίρεσης του θορύβου του σήματος εξόδου του αισθητήρα. Αρχικά, με χρήση FFT (Σχήμα 2.11) βλέπουμε μια συνολική εικόνα για το συχνοτικό περιεχόμενο του σήματος λήψης και στη συνέχεια έγινε φιλτράρισμα με χρήση βαθυπερατών αναλογικών IIR φίλτρων Butterworth και Chebyshev τύπου II. Τα φίλτρα επιλέχθηκαν καθώς εμφανίζουν τη πιο επίπεδη απόκριση στη ζώνη διέλευσης σε σύγκριση με τα υπόλοιπα φίλτρα της κατηγορίας. Το φίλτρο Butterworth εμφανίζει τη πιο ευθεία απόκριση από όλα αλλά χρειάζεται μεγαλύτερη τάξη για να παράξει συγκεκριμένες απαιτήσεις στη ζώνη αποκοπής σε σύγκριση με τα Chebyshev τύπου II. Λίγες πληροφορίες για τα φίλτρα δίνονται παρακάτω [54]:



Σχήμα 2.10: Σύγκριση μεταξύ φιλτραρισμένου σήματος και αρχικού με βαθυπερατό φίλτρο. Με μπλε φαίνεται το αρχικό σήμα ενώ με κόκκινο το φιλτραρισμένο.

- **Φίλτρα Butterworth:** Έχουν την ιδιότητα ότι η απόκριση του μέτρου εμφανίζει μονότονη συμπεριφορά στη ζώνη διέλευσης και στη ζώνη φραγής. Η συνάρτηση του τετραγωνικού μέτρου μοναδιαίου κέρδους δίνεται στην εξίσωση 2.5 όπου ω_c (rad) η συχνότητα αποκοπής και n η τάξη του φίλτρου.

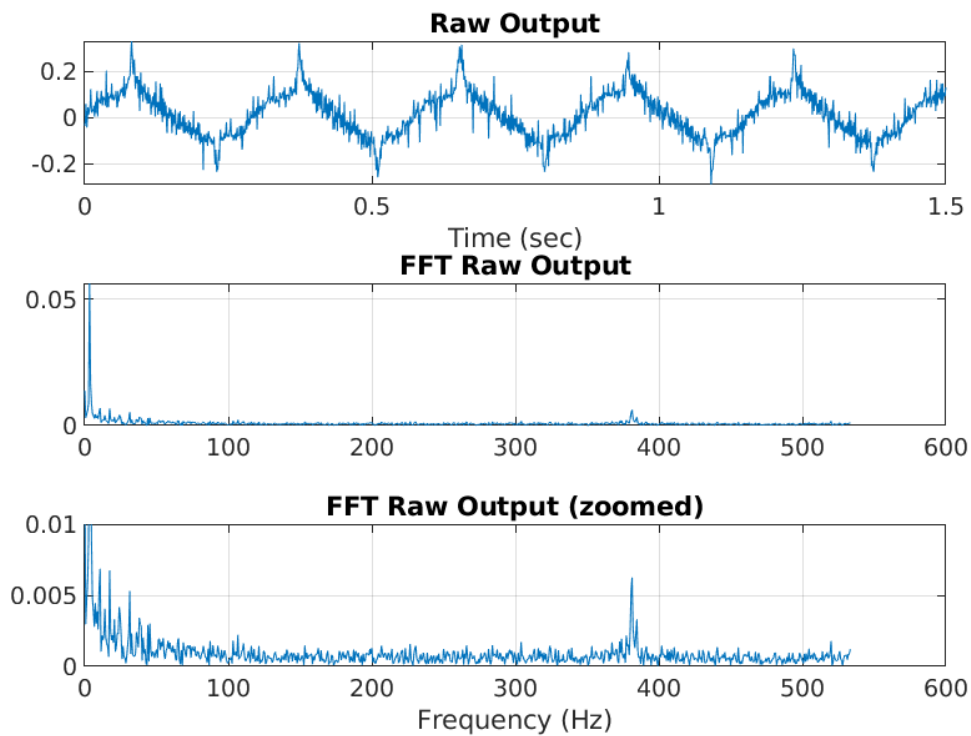
$$|H_c(j\omega)|^2 = \frac{1}{(1 + \frac{j\omega}{j\omega_c})^{2n}} \quad (2.5)$$

- **Φίλτρα Chebyshev:** Τα φίλτρα αυτής της κατηγορίας αξιοποιούν τη χρήση ισοκυματισμού είτε στη ζώνη διέλευσης (τύπου I), είτε στη ζώνη αποκοπής (τύπου II) για αποδοτικότερο σχεδιασμό σε χαμηλότερη τάξη. Οι συναρτήσεις του τετραγώνου του μέτρου για τους τύπους I και II φαίνονται αντίστοιχα στις εξισώσεις 2.6, 2.7 όπου το ϵ καθορίζεται από την επιτρεπόμενη κυμάτωση και $V_n(x) = \cos(N \cos^{-1}(x))$ το n -τάξιο πολυώνυμο Chebyshev το οποίο υπ-

ολογίζεται αναδρομικά.

$$|H_c(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 V_n^2 \left(\frac{j\omega}{j\omega_c}\right)} \quad (2.6)$$

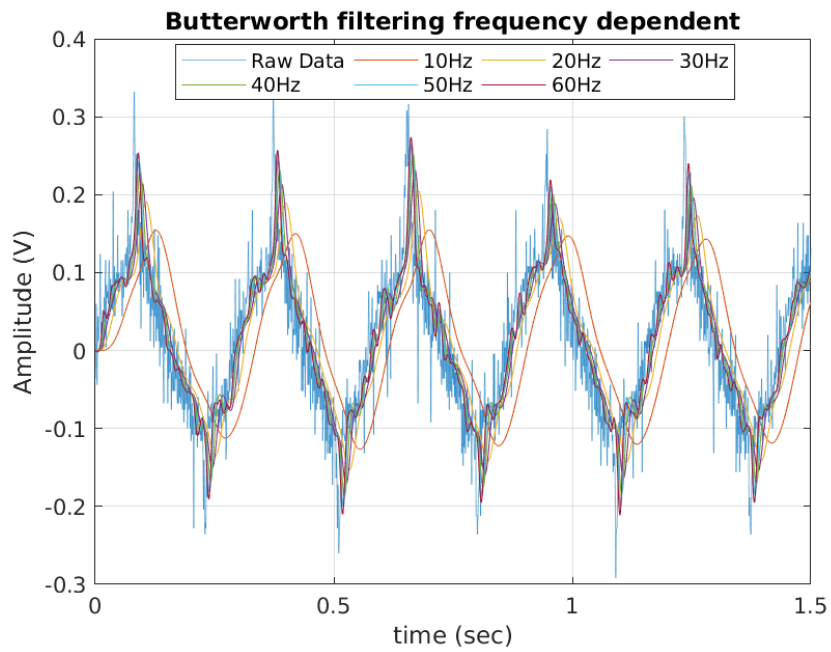
$$|H_c(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \frac{1}{\epsilon^2 V_n^2 \left(\frac{j\omega}{j\omega_c}\right)}} \quad (2.7)$$



Σχήμα 2.11: Έξοδος του αισθητήρα στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Στο 3ο διάγραμμα φαίνονται σε μεγένθυση η απόκριση σε υψηλότερες συχνότητες.

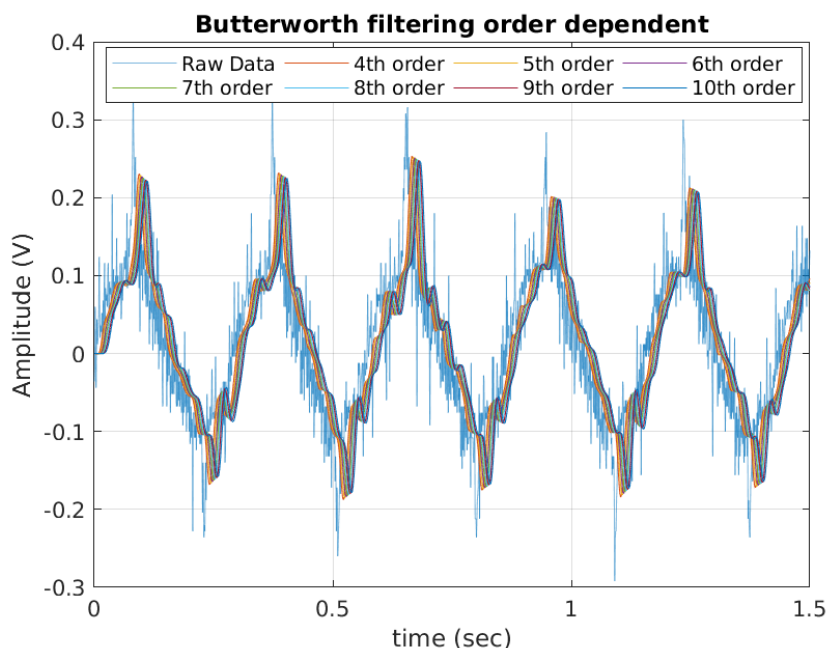
Φίλτρο Butterworth

Για την εύρεση του βέλτιστου φίλτρου Butterworth δοκιμάστηκαν διάφορες τάξεις και συχνότητες αποκοπής του φίλτρου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα 2.12 και 2.13. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 2.12 δοκιμάστηκε η αποθρομβοποίηση του σήματος με χρήση βαθυπερατού φίλτρου Butterworth για διάφορες συχνότητες αποκοπής. Όπως φαίνεται και στο σχήμα όσο μειώνεται η f_{-3dB} τόσο το σήμα λήψης χάνει τη χαρακτηριστική μορφή κορυφών. Ενώ για πιο υψηλές συχνότητες



Σχήμα 2.12: Δοκιμαστικά βαθυπερατά φίλτρα Butterworth συναρτήσει της συχνότητας αποκοπής. Η τάξη έχει επιλεγεί $n = 8$

δεν αποκόπτει καλά το θόρυβο. Συνολικά επιλέχθηκε ως καλύτερη απόκριση $f_{-3dB} = 40Hz$. Η επόμενη παράμετρος του φίλτρου

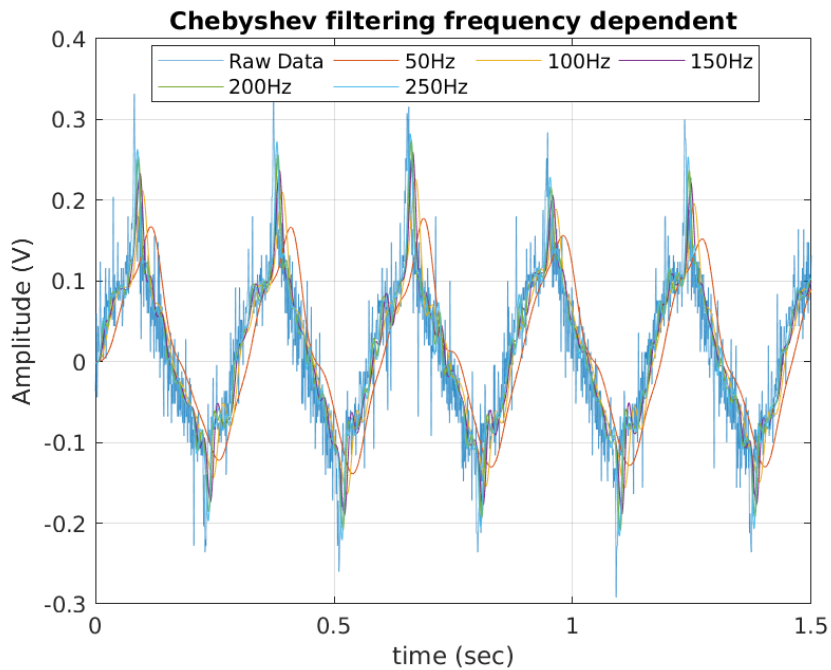


Σχήμα 2.13: Δοκιμαστικά βαθυπερατά φίλτρα Butterworth συναρτήσει της τάξης. Η συχνότητα αποκοπής έχει επιλεγεί σύμφωνα με τα παραπάνω στα $40Hz$

είναι η τάξη. Στο Σχήμα 2.13 μελετώνται οι αποκρίσεις με μεταβολή της τάξης του φίλτρου στο διάστημα $[4, 10]$ και αυτό που προέκυψε είναι ότι αύξηση του n ισοδυναμεί με αύξηση της καθυστέρησης ομάδας και μείωση του πλάτους ενώ η κυματομορφή δεν φαίνεται να εξομαλύνεται περαιτέρω. Συνολικά ως βέλτιστο φίλτρο Butterworth επιλέχθηκαν οι παράμετροι $n = 6$ και $f_{-3dB} = 40Hz$.

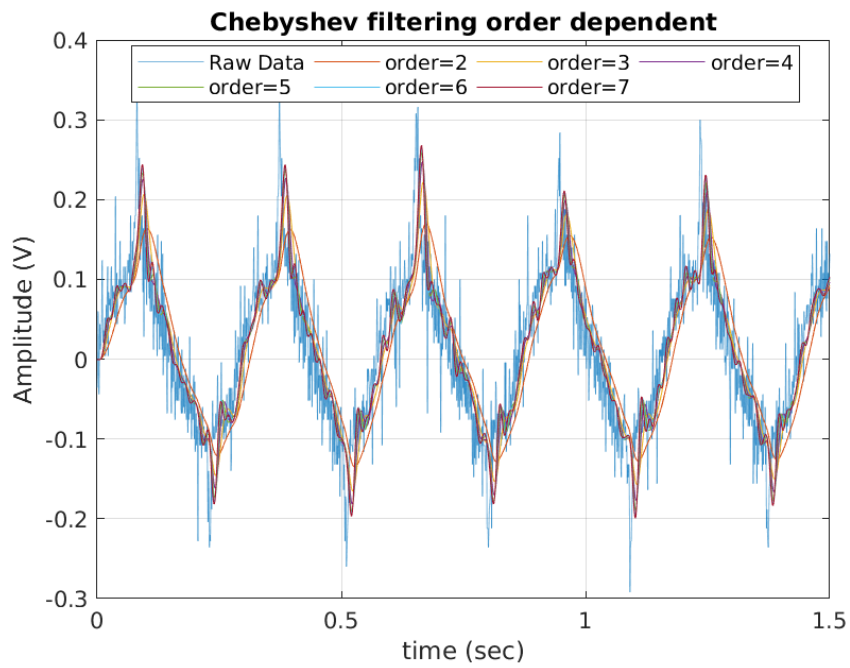
Φίλτρο Chebyshev II

Αντίστοιχη μεθοδολογία ακολουθήθηκε στην εύρεση του βέλτιστου φίλτρου Chebyshev. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα. Αρχικά στο Σχήμα 2.14 παρατηρούμε ότι η συχνότητα αποκοπής πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερη (σχεδόν τριπλάσια) από τη αντίστοιχη του φίλτρου Butterworth ώστε να μην εκφυλίζεται η μορφή του σήματος. Επιλέγοντας συχνότητα $150Hz$ διερευνήθηκε η επίδραση της τάξης στο φιλτράρισμα. Στο Σχήμα 2.15 δείξαμε ότι αύξηση της τάξης “ακολουθεί πιο πιστά” την αρχική κυματομορφή. Τελικά επιλέχθηκε φίλτρο Chebyshev τύπου II με παράμετρος $f_{-3dB} = 150Hz$, $n = 5$. Ένα σημείο που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι η καθυστέρηση ομάδας φαίνεται μικρότερη στο φίλτρο που επιλέχθηκε.

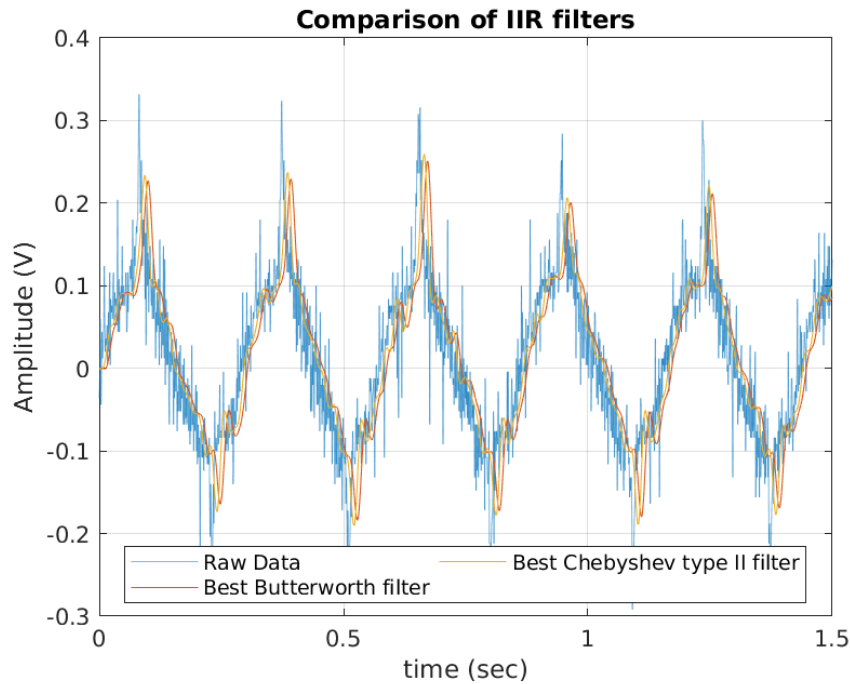


Σχήμα 2.14: Δοκιμαστικά βαθυπερατά φίλτρα Chebyshev τύπου II συναρτήσει της συχνότητας αποκοπής. Η τάξη έχει επιλεγθεί $n = 5$

Τα φίλτρα που επιλέχθηκαν ως βέλτιστα και στις δύο κατηγορίες αντιπαρατίθενται στο Σχήμα 2.16. Παρατηρούμε ότι το αντίστροφο φίλτρο Chebyshev εμφανίζει μικρότερη καθυστέρηση ομάδας και “ακολουθεί” καλύτερα τις κορυφές από το φίλτρο Butterworth. Συνολικά, κανένα από τα δύο φίλτρα δεν μας δίνει το επιθυμητό αποτέλεσμα για αυτό στη συνέχεια εξετάζουμε και άλλες τεχνικές.



Σχήμα 2.15: Δοκιμαστικά βαθυπερατά φίλτρα Chebyshev τύπου II συναρτήσεως της τάξης. Η συχνότητα αποκοπής έχει επιλεγεί σύμφωνα με τα παραπάνω στα 150Hz



Σχήμα 2.16: Βέλτιστα IIR φίλτρα. Με πορτοκαλί φαίνεται φίλτρο Butterworth ($n = 6$, $f_{-3dB} = 40Hz$), ενώ με κίτρινο φίλτρο Chebyshev τύπου II ($n = 5$, $f_{-3dB} = 150Hz$)

2.4.2 FIR Φίλτρα

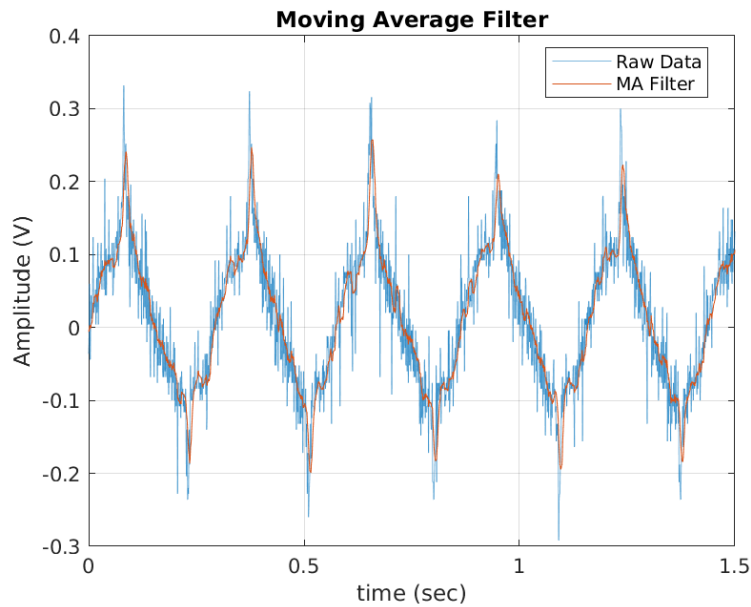
Κινητός Μέσος Ορός (Moving Average)

Κάθε δεδομένο αντικαθίσταται με τον μέσο όρο των k προηγούμενων σημείων χωρίς τη χρήση βαρών. Μαθηματικά τα νέα σημεία προκύπτουν σύμφωνα με την Εξίσωση 2.8 όπου p_i τα αρχικά δεδομένα και n το τελευταίο σημείο υπολογισμού. Τα αποτελέσματα για 10 σημεία υπολογισμού φαίνονται στο Σχήμα 2.17 [55].

$$MA_k = \frac{1}{k} \sum_{i=n-k+1}^n p_i \quad (2.8)$$

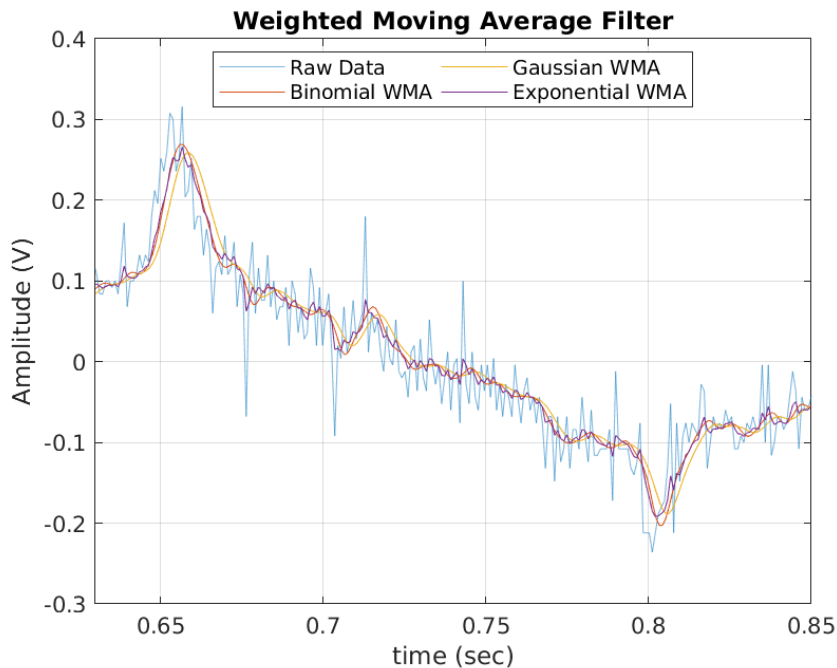
Κινητός Μέσος Ορός με Βάρη (Weighted Moving Average)

Το παράθυρο που χρησιμοποιείται περιέχει βάρη σύμφωνα με τα οποία αλλάζει η συνεισφορά κάθε τιμής των αρχικών δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, αποτελεί τη συνέλιξη μίας συνάρτησης βαρών με τα δεδομένα. Δοκιμάστηκε η διωνυμική ανάπτυξη του $[1/2, 1/2]^n$ το οποίο για μεγάλες τιμές του n προσομοιώνει τη κανονική κατανομή. Επιλέχθηκε η παράμετρος $n = 15$ ενώ χρειάστηκε να γίνει χειροκίνητα η μετατόπιση



Σχήμα 2.17: Φιλτράρισμα με χρήση κινητού μέσου όρου. Βέλτιστο πλήθος σημείων επιλέχθηκε $k = 10$.

της κυματομορφής στον άξονα του χρόνου. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε εκθετικά μειούμενη συνάρτηση με παράμετρο $\alpha \in (0, 1)$ όπου μεγαλύτερες τιμές του α εξομαλύνουν λιγότερο την κυματομορφή, επιλέχθηκε $\alpha = 0.25$. Ακόμα δοκιμάστηκε και η παραθύρωση με κανονική κατανομή πλάτους 30 δειγμάτων και $\sigma = 3$. Στο Σχήμα 2.18 φαίνονται τα αποτελέσματα σε μεγένθυση καθώς οι αποκρίσεις ήταν πολύ κοντινές [55].



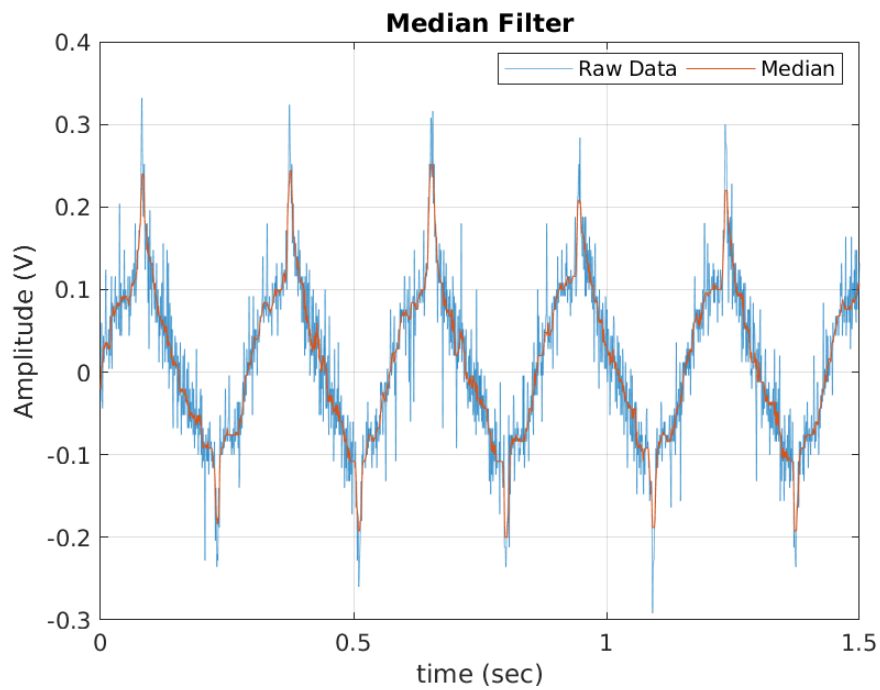
Σχήμα 2.18: Φιλτράρισμα με χρήση κινητού μέσου όρου με βάρη. Για λόγους ευκρίνειας απεικονίζεται μόνο μια περίοδος.

Κινητός Διάμεσος (Moving Median)

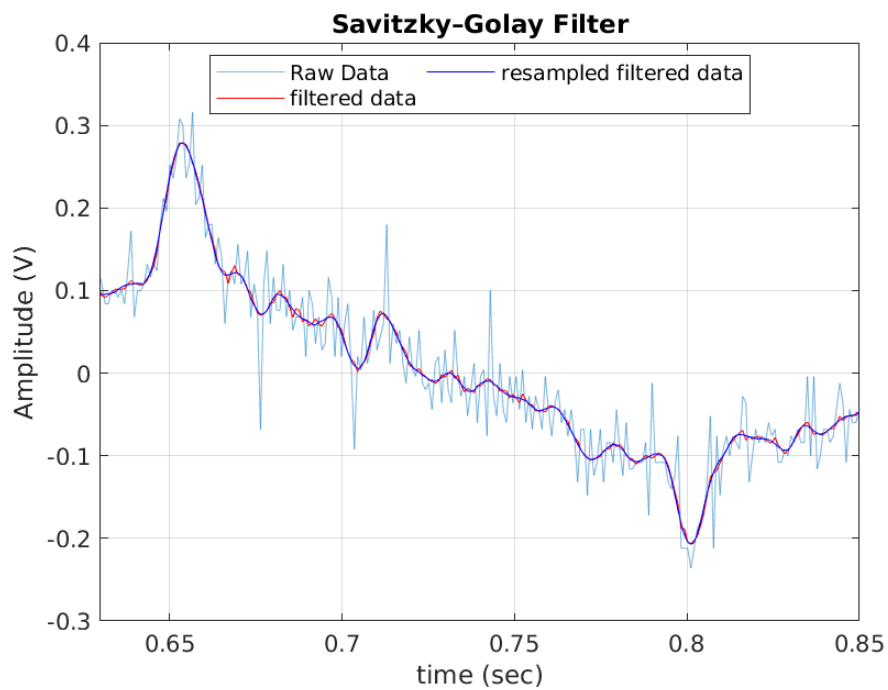
Η χρήση του διάμεσου σε παράθυρο n δειγμάτων για το φιλτράρισμα ενδείκνυται όταν το σήμα παρουσιάζει πολύ απότομες αλλαγές, ειδικά όταν οι διακυμάνσεις ακολουθούν κανονική ή (βέλτιστα) λαπλασιανή κατανομή. Για τα δεδομένα της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε κινητός μέσος όρος 10 δειγμάτων με την παράμετρο `truncate` η οποία μειώνει το πλήθος δειγμάτων του παραθύρου όταν πλησιάζει στα άκρα. Στο Σχήμα 2.19 παρουσιάζεται η απόκριση του φίλτρου [55].

Φίλτρο Savitzky–Golay

Στα φίλτρα Savitzky–Golay σε κάθε παράθυρο τα δεδομένα μετασχηματίζονται σύμφωνα με πολυωνυμική παλινδρόμηση με χρήση πολυωνύμου σταθερού βαθμού. Παρόλο που αυτό το φίλτρο χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να διατηρηθεί το περιεχόμενο υψηλών συχνοτήτων στην περιπτωσή μας, επιλέχθηκε λόγω της ιδιότητάς του να μην εξομαλύνει όσο τα προηγούμενα φίλτρα τις κορυφές. Χρησιμοποιήθηκε παράθυρο 21 δειγμάτων και πολυώνυμο 4ης τάξης. Στη συνέχεια στο σήμα που προέκυψε έγινε δειγματοληψία με ρυθμό 3/2 και εφαρμόστηκε εκ νέου το φίλτρο Savitzky–Golay. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.20 με τη δεύτερη εφαρμογή του φίλτρου οι κορυφές διατηρούνται απαράλλακτες ενώ εξομαλύνεται καλύτερα ο θόρυβος [56],[57].



Σχήμα 2.19: Φιλτράρισμα με χρήση κινητού διαμέσου 10 σημείων.



Σχήμα 2.20: Φιλτράρισμα με χρήση φίλτρου Savitzky-Golay. Με σκούρο μπλέ απεικονίζεται η δεύτερη εφαρμογή στην οποία παρατηρούμε πιο ομαλή κυματομορφή.

Αναγνωριστικό Hampel (Hampel Identifier)

Σε ακολουθία x_1, x_2, \dots, x_n και μήκος παραθύρου k υπολογίζεται εκτίμηση του διαμέσου και της τυπικής απόκλισης σύμφωνα με τις Εξισώσεις 2.9, 2.10 [58]. Στην εξίσωση 2.11 η συνάρτηση $erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$ ονομάζεται συνάρτηση λάθους (error function) και ανήκει στην οικογένεια των σιγμοειδών συναρτήσεων [59]. Στη συνέχεια αν για δείγμα x_i ισχύει ότι $|x_i - m_i| > n_\sigma \sigma_i$ όπου n_σ δοσμένο κατώφλι, τότε το x_i δηλώνεται έκτοπη τιμή (outlier) και αντικαθίσταται με m_i . Στο Σχήμα 2.21 φαίνεται σε μεγένθυση η εφαρμογή αναγνωριστικού Hampel στα δεδομένα του αισθητήρα. Τα δεδομένα δεν εξομαλύνθηκαν στο βαθμό που θέλουμε ώστε να είναι χρήσιμα για περαιτέρω επεξεργασία αλλά η την ανίχνευση των έκτοπων σημείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως στάδιο προεπεξεργασίας του σήματος πριν την χρήση άλλων φίλτρων.

$$m_i = \text{median}(x_{i-k}, x_{i-k+1}, x_{i-k+2}, \dots, x_i, \dots, x_{i+k-2}, x_{i+k-1}, x_{i+k}) \quad (2.9)$$

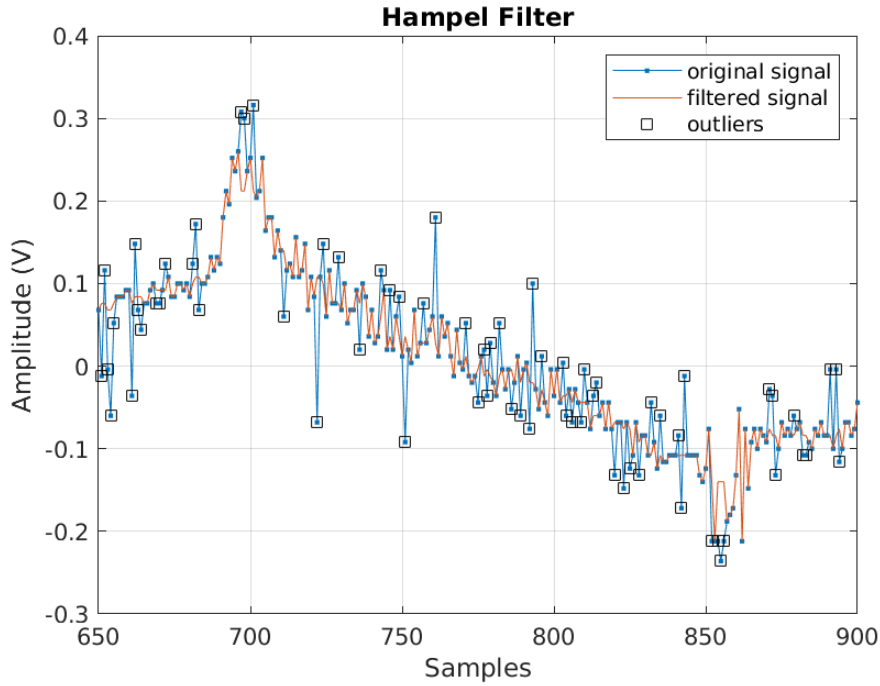
$$\sigma_i = \kappa \text{median}(|x_{i-k} - m_i|, \dots, |x_{i+k} - m_i|) \quad (2.10)$$

$$\kappa = \frac{1}{\sqrt{2} \text{erf}^{-1}(1/2)} \approx 1.4826 \quad (2.11)$$

2.4.3 Wavelets

Τα wavelets αποτελούν συναρτήσεις παρόμοιες με κύματα οι οποίες ξεκινάνε και τελειώνουν στο μηδέν μετά απο ένα συγκεκριμένο αριθμό ταλαντώσεων [60]. Παρακάτω παρατίθεται ο φορμαλιστικός ορισμός του ορθοκανονικού wavelet και του ολοκληρωτικού μετασχηματισμού wavelet: Ορίζεται συνάρτηση $\psi \in L^2(\mathbb{R})$ ως ορθοκανονικό wavelet όταν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ορισμό βάσης Hilbert η οποία είναι πλήρες ορθοκανονικό σύστημα στο χώρο των L^2 συναρτήσεων². Η βάση Hilbert κατασκευάζεται από οικογένεια συναρτήσεων $\psi_{jk} : j, k \in \mathbb{Z}$ (Εξίσωση 2.12) με την εφαρμογή δυαδικών τελεστών μετατόπισης (translation) και διαστολής (dilation). Αν το εσωτερικό γινόμενο στο $L^2(\mathbb{R})$ όπως φαίνεται στην Εξίσωση 2.13 είναι ορθοκανονικό τότε προκύπτει ορθοκανονικό σύστημα και η πληρότητα ικανοποιείται αν κάθε συνάρτηση $f \in L^2(\mathbb{R})$ μπορεί να αναπτυχθεί στη Σειρά 2.14. Η Εξίσωση 2.15 περιγράφει τον ολοκληρωτικό μετασχηματισμό wavelet όπου c_{jk} (Εξίσωση 2.16) οι συντελεστές του wavelet. Σημειώνεται πως η Εξίσωση 2.15 στο χρόνο αναπαριστά τον συνεχή μετασχηματισμό wavelet (Continuous Wavelet Transform - CWT) με παράμετρο a τη κλιμακα [61].

² L^2 συναρτήσεις ονομάζονται οι συναρτήσεις για τις οποίες ισχύει $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C} \in L^2 \iff \int_{-\infty}^{\infty} |f(x)|^2 dx < \infty$



Σχήμα 2.21: Εύρεση outliers με χρήση αναγνωριστικού Hampel. Χρησιμοποιήθηκε μήκος παραθύρου $k = 10$ και κατώφλι $n_\sigma = \sigma_i$.

$$\psi_{jk}(x) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j x - k) \quad (2.12)$$

$$\langle \psi_{jk}, \psi_{lm} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{jk} \overline{\psi_{lm}} dx = \delta_{jl} \delta_{km} \quad (2.13)$$

$$f(x) = \sum_{j,k=-\infty}^{\infty} c_{jk} \psi_{jk}(x) \quad (2.14)$$

$$[W_\psi f](a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} f(x) dx \quad (2.15)$$

$$c_{jk} = [W_\psi f](2^{-j}, k2^{-j}) \quad (2.16)$$

Ο διακριτός μετασχηματισμός wavelet (Discrete Wavelet Transform - DWT) ορίζεται ως η μη πλεονάζουσα δειγματοληψία του CWT. Σκοπός του DWT είναι η αναπαράσταση της διακριτής χρονοσειράς $x(n)$ σε συντελεστές wavelets. Η χρήση ορθογώνιων βάσεων εξασφαλίζει τη μη πλεονάζουσα αναπαράσταση, δηλαδή χρησιμοποιούνται μόνο τόσοι συντελεστές όσοι προϋπήρχαν στο δείγμα χρησιμοποιών-

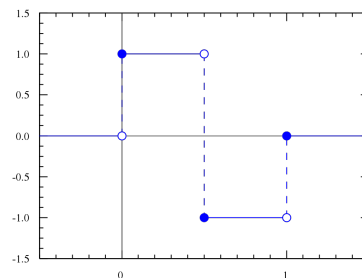
τας λιγότερους υπολογιστικούς πόρους. [61] Ο DWT χρησιμοποιείται κυρίως για συμπίεση σημάτων ή μείωση του θορύβου, χρήση την οποία θα παρουσιάσουμε παρακάτω. [60]

Η αποθορυβοποίηση του σήματος εξόδου του αισθητήρα έγινε με τη χρήση του Wavelet Signal Denoiser App και της συνάρτησης `wdenoise` οι οποίες προσφέρουν πληθώρα παραμέτρων. [62], [63].

- **Level:** Το επίπεδο αποσύνθεσης σήματος καθορίζει το πλήθος των ζωνών συχνότητας. Όσο πιο πολλές οι ζώνες τόσο μεγαλύτερη η ανάλυση στη συχνότητα. Το επίπεδο εξαρτάται από το μητρικό wavelet που χρησιμοποιήθηκε και είναι μικρότερο ή ίσο του $\text{floor}(\log_2 n)$, όπου n το πλήθος των σημείων στο σήμα.
- **Wavelet:** Το όνομα του wavelet που θα χρησιμοποιηθεί για την αποθορυβοποίηση. Οι έτοιμες οικογένειες ορθογώνιων wavelets περιλαμβάνουν τα `haar`, `dbN`, `fkN`, `coifN`, `symN` με N το πλήθος των μηδενισμών του wavelet.

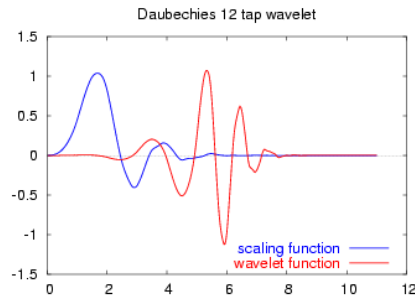
- Haar Wavelet: Αποτελεί ακολουθία αναπροσαρμοσμένων συναρτήσεων τετράγωνης μορφής οι οποίες σχηματίζουν μια οικογένεια wavelets. Το μητρικό wavelet περιγράφεται από τη Σχέση 2.17 [64].

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < \frac{1}{2} \\ -1, & \frac{1}{2} \leq t < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.17)$$



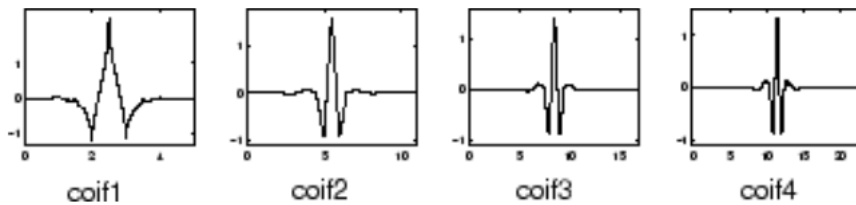
Σχήμα 2.22: Haar Wavelet [64]

- Daubechies Wavelet: Γενικά τα wavelets αυτής της κατηγορίας κατασκευάζονται να έχουν το μέγιστο αριθμό μηδενισμών (N) για δεδομένο πλήθος συντελεστών ($2N$). Στις 2^{N-1} πιθανές λύσεις επιλέγεται αυτή που το φίλτρο της κλίμακας έχει τη μέγιστη φάση.



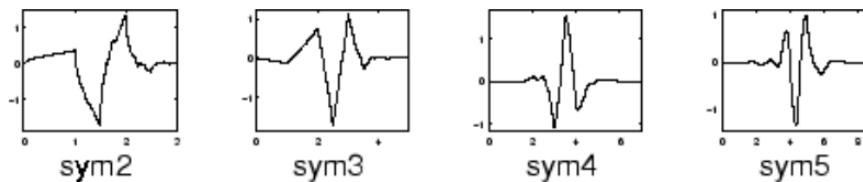
Σχήμα 2.23: Daubechies Wavelet [65]

- Coiflets: Κατασκευάστηκαν επίσης από τη Daubechies έτσι ώστε η συνάρτηση του wavelet να έχει $2N$ σημεία μηδενισμού ενώ η συνάρτηση κλίμακας $2N - 1$ [66].



Σχήμα 2.24: Coiflets [66].

- Symlets: Προτάθηκαν από τη Daubechies ως τροποποίηση στην οικογένεια db με παρόμοιες ιδιότητες [66].



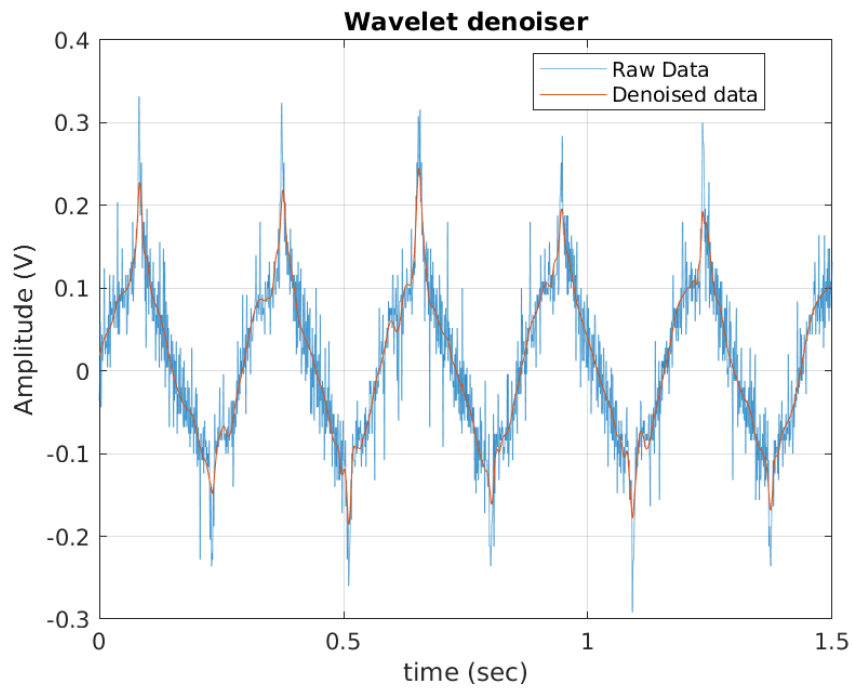
Σχήμα 2.25: Symlets [66].

- **Method:** Μέθοδος αποθρομβοποίησης, **Threshold Rule:** Κανόνας Κατωφλίου [63]

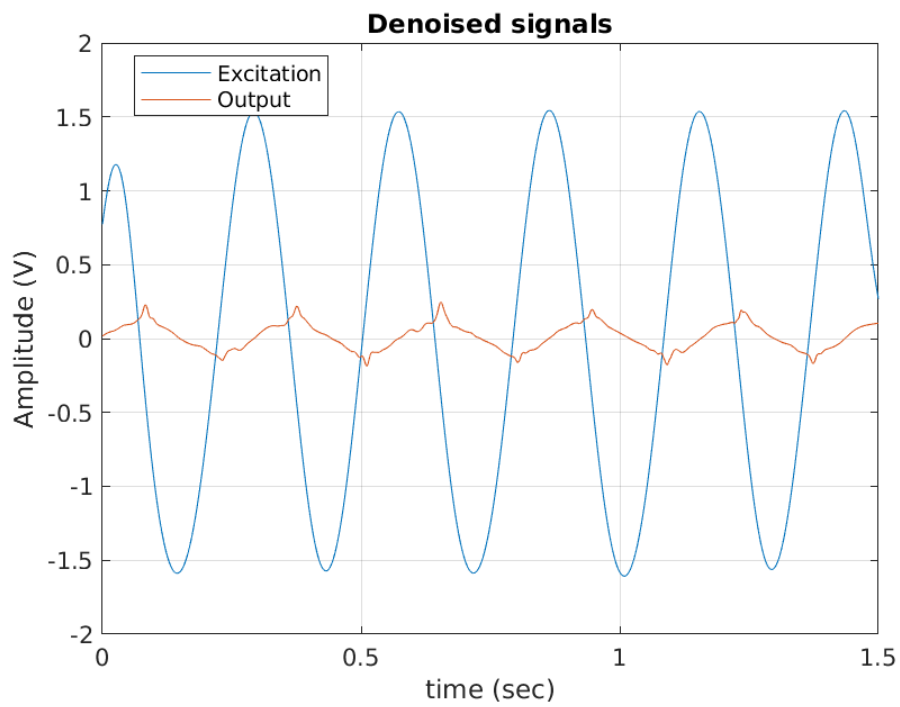
- Bayes - Εμπειρικός Bayes: Η επιλογή της νέας τιμής με τη χρήση κατωφλίου σύμφωνα με τη παραδοχή ότι η κάθε μέτρηση έχει ανεξάρτητη κατανομή. Επιλογές κατωφλίου: “Median”, “Mean”, “Soft”, ή “Hard”.

- **BlockJS** — Block James-Stein: Η μέθοδος βασίζεται στην επιλογή βέλτιστου μεγέθους “μπλοκ” και κατωφλίου. Προσφέρει ταυτόχρονα βέλτιστη τοπική και ολική προσαρμογή.
 - **FDR** — False Discovery Rate: Χρησιμοποιεί κανόνα κατωφλίου βασισμένο στον έλεγχο της αναμενόμενης αναλογίας των λάθους με σωστών μετρήσεων. Η μέθοδος δουλεύει καλύτερα σε αραιά δεδομένα. Επιλογές κατωφλίου: “Hard”.
 - **Minimax** — Minimax Εκτίμηση: Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα κατώφλι που επιλέχθηκε για να αποφέρει minimax απόδοση για μέσο τετραγωνικό σφάλμα έναντι μιας ιδανικής διαδικασίας. Επιλογές κατωφλίου: “Soft”, ή “Hard”.
 - **SURE** — Stein’s Unbiased Risk Estimate: Χρησιμοποιεί έναν κανόνα επιλογής κατωφλίου που βασίζεται στην αμερόληπτη εκτίμηση του κινδύνου Stein (συνάρτηση τετραγωνικής απώλειας). Η εκτίμηση του σφάλματος για μια συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου. Η ελαχιστοποίηση των κινδύνων δίνει μια επιλογή της τιμής κατωφλίου. Επιλογές κατωφλίου: “Soft”, ή “Hard”.
 - **UniversalThreshold** = $\sqrt{2\ln(\text{length}(x))}$. Κατώφλι σταθερής μορφής που αποδίδει ελάχιστη απόδοση πολλαπλασιαζόμενη με έναν μικρό παράγοντα ανάλογο του $\ln(\text{length}(x))$. Επιλογές κατωφλίου: “Soft”, ή “Hard”.
- **Noise Estimation** - Μέθοδος εκτίμησης διακύμανσης θορύβου.
 - **LevelIndependent**: Υπολογισμός της διακύμανσης του θορύβου με βάση τους συντελεστές wavelets μεγαλύτερης κλίμακας (υψηλότερης ανάλυσης).
 - **LevelDependent**: Υπολογισμός της διακύμανσης του θορύβου με βάση τους συντελεστές wavelet σε κάθε επίπεδο ανάλυσης.

Με χρήση της εντολής `waveletSignalDenoyer` στη γραμμή εντολών του MATLAB εισερχόμαστε σε περιβάλλον εφαρμογής για την αποθορυβοποίηση του σήματος. Αρχικά γίνεται προσθήκη του σήματος όπως λήφθηκε από τον παλμογράφο και στη συνέχεια αλλάζονται οι παράμετροι για να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Βέλτιστη κρίθηκε η χρήση των *symlets* με μεθοδο αποθορυβοποίησης *Bayes*, επίπεδο **7**, με κανόνα *soft* και $N=7$. Στο Σχήμα 2.26 παρατηρούμε πως με την ίδια ή μικρότερη μείωση στις κορυφές, επιτυγχάνουμε μέγιστη εξομάλυνση της κυματομορφής και χωρίς εισαγωγή καθυστέρησης. Στο Σχήμα 2.27 φαίνονται τα πλέον “καθαρά” σήματα του ημιτόνου διέγερσης και της λήψης.



Σχήμα 2.26: Αποθορυβοποίηση του σήματος με χρήση wavelets.



Σχήμα 2.27: Αποθορυβοποιημένα σήματα διέγερσης και λήψης

2.5 DP Χάλυβες

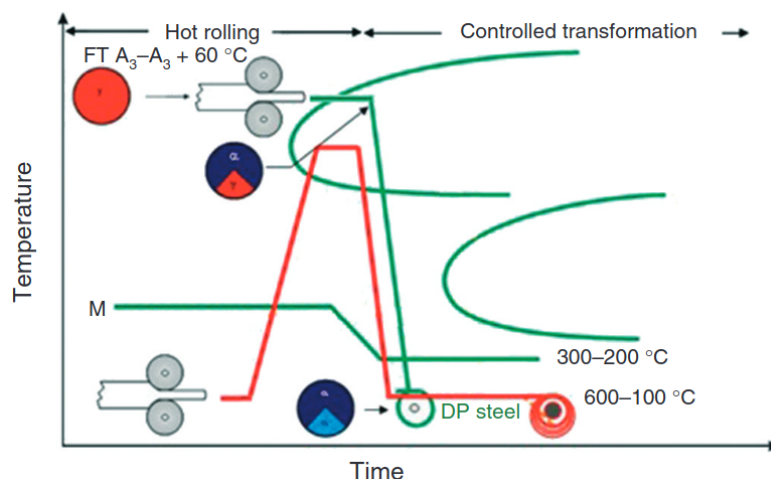
2.5.1 Γενικά Στοιχεία

Τα αρχικά DP προέρχονται από το "Dual Phase" που σημαίνει χάλυβες διπλής φάσης. Χαρακτηριστικό της μικροδομής τους είναι η παρουσία κόκκων σκληρού μαρτενσίτη σε ένα πλέγμα μαλακού φερρίτη προσδίδοντας πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες όπως υψηλή αντοχή σε συνδυασμό έντονη ολκιμότητα. Βασική χρήση του DP χάλυβα είναι στα δομικά μέρη κατασκευών και ως ενίσχυση ιδιαίτερα στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας.

Παραγωγή

Δύο είναι οι μέθοδοι για τη παραγωγή χάλυβα διπλής φάσης οι οποίες φαίνονται και γραφικά στο Σχήμα :

- **Κρύα έλαση σε συνδυασμό με διακριτική ανόπτηση (intercritical annealing) και απότομη ψύξη (quenching).** Πιο συγκεκριμένα, θερμαίνεται χάλυβας μικροδομής φερρίτη-περλίτη ανάμεσα στις θερμοκρασίες A_{c1} , A_{c3} όπου συγκεκριμένη ποσότητα ωστενίτη δημιουργείται και στη συνέχεια ψύχεται απότομα σε θερμοκρασία δωματίου. Για αύξηση της ολκιμότητας μπορεί να γίνει γήρανση του χάλυβα σε θερμοκρασία έως $400^{\circ}C$ για $1.5min$. Ακόμα δυνατός είναι ο γαλβανισμός του χάλυβα κατά τη διάρκεια ψύξης. [49]
- **Ζεστή έλαση και ελεγχόμενη ψύξη (controlled quenching).** Η ζεστή έλαση λαμβάνει χώρα στην ωστενιτική περιοχή. Έπειτα, ψύχεται έως την διακριτική (intercritical) περιοχή όπου έχουμε πυρήνωση του φερρίτη και δημιουργία του από ασταθή ωστενίτη. Τέλος, εφαρμόζεται αρκετά ταχεία ψύξη για την μετατροπή ωστενίτη σε μαρτενσίτη.[49]

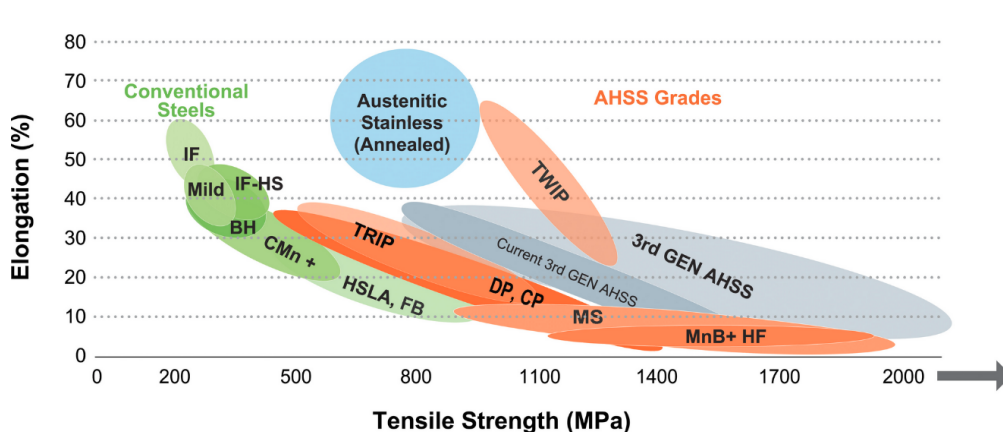


Σχήμα 2.28: Μέθοδοι παραγωγής DP χάλυβα. Με πράσινο φαίνεται η παραγωγή μέσω ζεστής έλασης ενώ με πορτοκαλί η κρύα έλαση [49]

Μηχανικές Ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες του DP χάλυβα επηρεάζονται κατά κύριο λόγο από το ποσοστό φερρίτη - μαρτενσίτη και το μέγεθος κόκκου. [50] Η αύξηση του ποσοστού όγκου του μαρτενσίτη οδηγεί σε αύξηση της σκληρότητας, της αντοχής θραύσης και του μέγιστου ορίου εφελκυσμού ενώ μειώνεται η συνολική επιμήκυνση. Ακόμα, η μείωση του μεγέθους κόκκου φερρίτη συντελεί στην αύξηση της αντοχής του υλικού σύμφωνα με το φαινόμενο Hall-Petch³. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με την ορολογία η ονομασία των χαλύβων διπλής φάσης υπό τη μορφή $DPxxx/yyy$ όπου xxx δηλώνει το ελάχιστο όριο ελαστικής παραμόρφωσης του υλικού (minimum Yield Strength - YS) το οποίο κυμαίνεται στα 350 - 1200MPa και yyy το ελάχιστο όριο ανοχής σε εφελκυστικές δυνάμεις (Ultimate Tensile Strength - UTS). Τέλος, το ποσοστό συνολικής επιμήκυνσης είναι κυμαίνεται σε 5% - 35% και μειώνεται με την αύξηση της αντοχής στις εφελκυστικές δυνάμεις (Σχήμα 2.29).

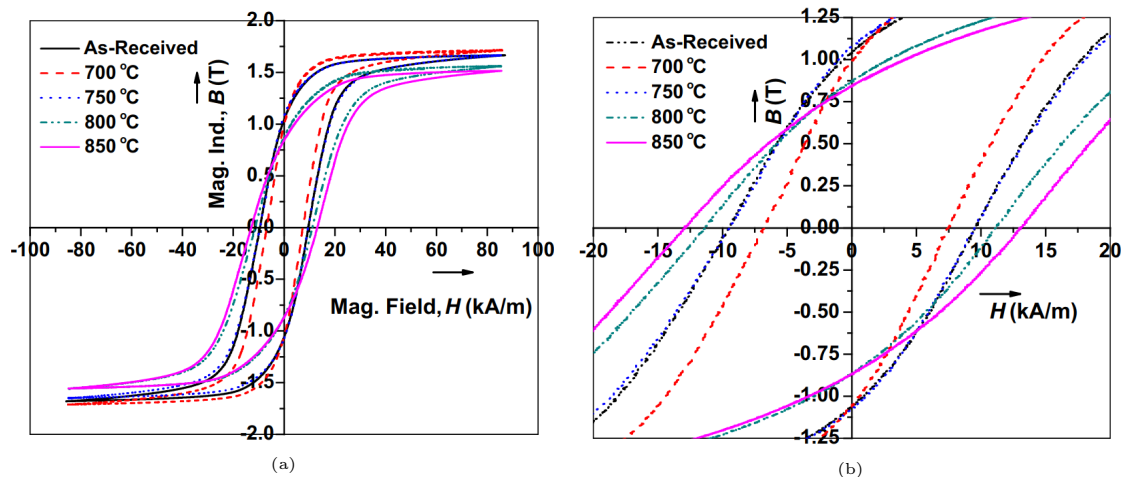
³Το φαινόμενο περιγράφεται από τη σχέση $\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}}$ με τη συνθήκη $d \geq 10nm$ (d : μέση διάμετρος κόκκου). [51]



Σχήμα 2.29: Ταξινόμηση χαλύβων σύμφωνα με την επιμήκυνση και το όριο εφελκυστικής δύναμης. Με πράσινο χρώμα φαίνονται οι συμβατικοί χάλυβες, με πορτοκαλί ο τύπος AHSS (όπου ανήκουν και οι DP χάλυβες), με μπλε οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι και με γκρι νέοι χάλυβες 3ης γενιάς AHSS. [52].

Μαγνητικές Ιδιότητες

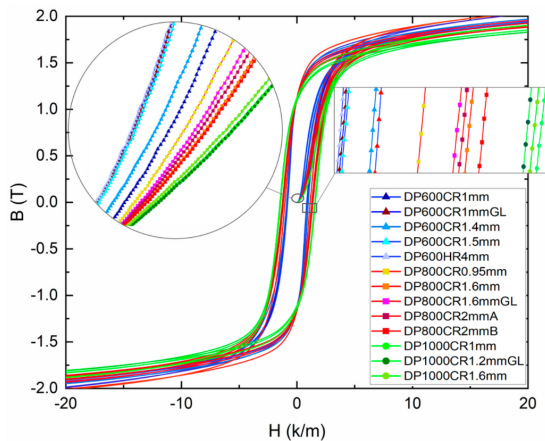
Στη βιβλιογραφία δεν αναφέρονται πολλές μελέτες των μαγνητικών ιδιοτήτων των διφασικών χαλύβων. Στην παρούσα εργασία αναφέρονται οι δύο πιο ενδεικτικές κατά την άποψη του συγγραφέα. Η πρώτη μελέτη επικεντρώνεται στη μεταβολή των μαγνητικών ιδιοτήτων μετά από διάφορες θερμοκρασίες ανόπτησης και συσχέτιση με τη μεταβολή του κλάσματος όγκου μαρτενσίτη [53]. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν πανομοιότυπα φύλλα DP χάλυβα πάχους 1.3mm στα οποία έγινε μέτρηση του μαγνητικού βρόχου υστέρησης σε πεδίο μαγνήτισης 80kA/m και συχνότητας 0.05Hz μέσω της συσκευής *MagSTAR*. Η διαδικασία επαναλήφθηκε και μετά τη θέρμανση του υλικού για 15 λεπτά από 700 έως 800°C με βήμα 25°C ενώ μετά από κάθε θέρμανση ακολούθηθηκε απότομη ψύξη σε νερό ώστε να υπάρχει ποικιλία μαρτενσίτη στα δείγματα. Στο Σχήμα 2.30 φαινονται οι μετρήσεις για επιλεγμένες θερμοκρασίες. Αναλύοντας τα δεδομένα οι ερευνητές κατέληξαν στα παρακάτω συμπεράσματα: Μετά τη θέρμανση στους 700°C υπήρξε απότομη μείωση του συνεκτικού πεδίου, αύξηση της μαγνητικής επαγωγής και μικρή μείωση στη παραμένουσα μαγνήτιση σε σύγκριση με την αρχική μέτρηση. Οι διαφορές αυτές εξηγούνται από την υψηλή πυκνότητα παραμενουσών τάσεων και την μεγάλη παρουσία φάσεων μαρτενσίτη στην αρχική κατάσταση του χάλυβα. Η ανόπτηση σε αυτή τη θερμοκρασία αύξησε το κλάσμα φερρίτη καθιστώντας το υλικό πιο μαλακό μαγνητικά και μειώθηκαν τα σημεία αγκίστρωσης. Μετά την θερμοκρασία των 725°C παρατηρήθηκε μείωση του φερρίτη και κατά συνέπεια αύξηση του συνεκτικού πεδίου ενώ μετά τους 775°C καταγράφηκε μείωση της παραμένουσας μαγνήτισης.



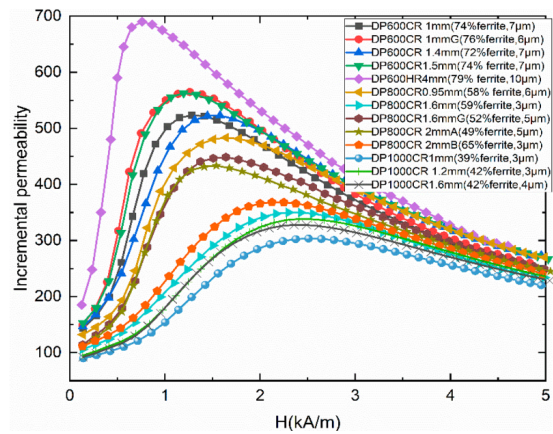
Σχήμα 2.30: (a) Μετρήσεις βρόχου υστέρησης DP χάλυβα σε διάφορες θερμοκρασίες ανόπτησης. (b) Μεγέθυνση στη περιοχή του συνεκτικού πεδίου.[53]

Σε μία πολύ πρόσφατη μελέτη [50] μετρήθηκαν οι μαγνητικές ιδιότητες διαφόρων τύπων DP χάλυβα (DP600, DP800, DP1000) πάχους 1-4mm με χρήση κύριου βρόχου υστέρησης αλλά και minor βρόχων. Για την μαγνήτιση του κύριου βρόχου υστέρησης χρησιμοποιήθηκε ρεύμα συχνότητας 1Hz ενώ για τους minor βρόχους χρησιμοποιήθηκε πληθώρα εντάσεων πεδίου μαγνήτισης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα 2.31 και 2.32. Από το κύριο βρόχο B-H προκύπτει ότι το συνεκτικό πεδίο μειώνεται γραμμικά όσο αυξάνεται το κλάσμα όγκου φερρίτη, σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία. Το όριο θραύσης συνδέεται ανάλογα και γραμμικά με το συνεκτικό πεδίο για τους χάλυβες διπλής φάσης σε συνδιασμό με τα δεδομένα από άλλες έρευνες. Αξίζει να σημειωθεί πως με τα δεδομένα μόνο αυτής της έρευνας η εξάρτηση του όριου θραύσης από το συνεκτικό πεδίο παρουσιάζει τετραγωνικό χαρακτήρα.

Στο Σχήμα 2.32 φαίνεται η μαγνητική διαπερατότητα όπως μετρήθηκε από τους minor βρόχους. Προκύπτει ότι η μαγνητική διαπερατότητα για $H = 0$, (μ_i) αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του όγκου κλάσματος φερρίτη. Αντίθετα, το όριο θραύσης ακολουθεί αντίστροφη εκθετική συνάρτηση. Συνολικά, για τις επιμέρους κατηγορίες DP χάλυβα οι ερευνητές κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα σύμφωνα με τη μέγιστη μαγνητική διαπερατότητα: Ο DP600 παρουσιάζει στενότερη και υψηλότερη κορυφή λόγω του υψηλού ποσοστού κλάσματος φερρίτη που οδηγεί σε λιγότερα σημεία αγκίστρωσης. Κατα συνέπεια, με τη μείωση του φερρίτη στα δείγματα DP800 και DP1000 η αύξηση των σημείων αγκίστρωσης χαμηλώνει, πλαταίνει και μετατοπίζει τη κορυφή δεξιότερα σε υψηλότερα πεδία μαγνήτισης. Για μεγάλες τιμές του πεδίου μαγνήτισης βλέπουμε σύγκλιση των γραφικών παραστάσεων λόγω κορεσμού του υλικού.



Σχήμα 2.31: Κύριοι βρόχοι υστέρησης για δείγματα DP600, DP800 και DP1000. [50]



Σχήμα 2.32: Μαγνητική διαπερατότητα συναρτήσει του πεδίου μαγνήτισης. Χαρακτηριστικό του τύπου DP χάλυβα η θέση και η κλίση στη μέγιστη τιμή. [50]

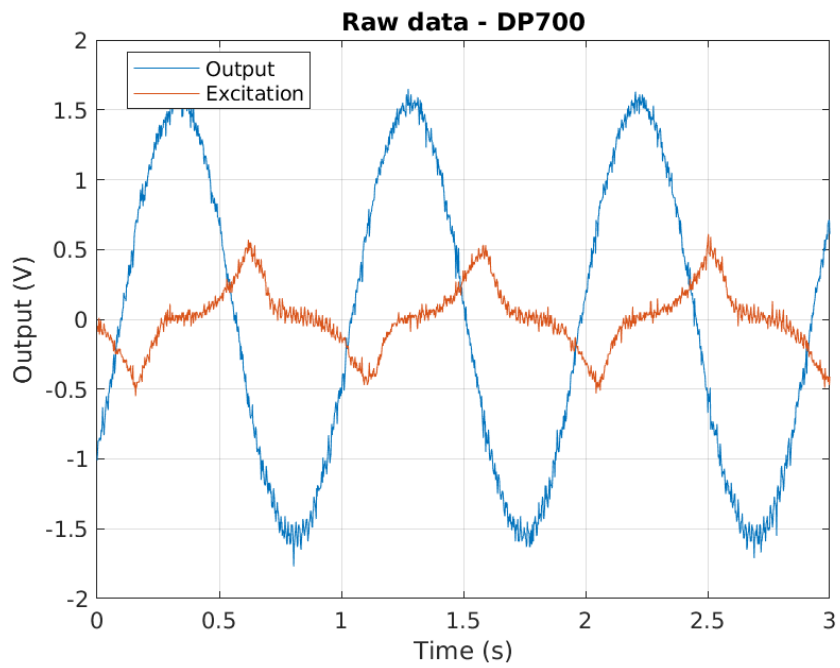
2.6 Μετρήσεις - Επεξεργασία Μετρήσεων

Στο πλαίσιο μελέτης του αισθητήρα και την απόκριση σε διαφορετικούς χάλυβες μετρήθηκε χάλυβας της κατηγορίας DP700 σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου και διαστάσεων $M \times \Pi \times Y = 100 \times 60 \times 8$ (mm). Το δείγμα μετρήθηκε με επιλογή τάσης διέγερσης από τη γεννήτρια $V_{GEN,P-P} = 5V$ συχνότητας $1Hz$ και $0.5Hz$. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν ώστε να μπορούμε να αγνοήσουμε τα φαινόμενα δινορευμάτων κατά τη μαγνήτιση. Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία και κώδικας για την επεξεργασία των μετρήσεων του χάλυβα DP700 όπως στα δείγματα dogbone. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.

2.6.1 Διέγερση συχνότητας 1 Hz

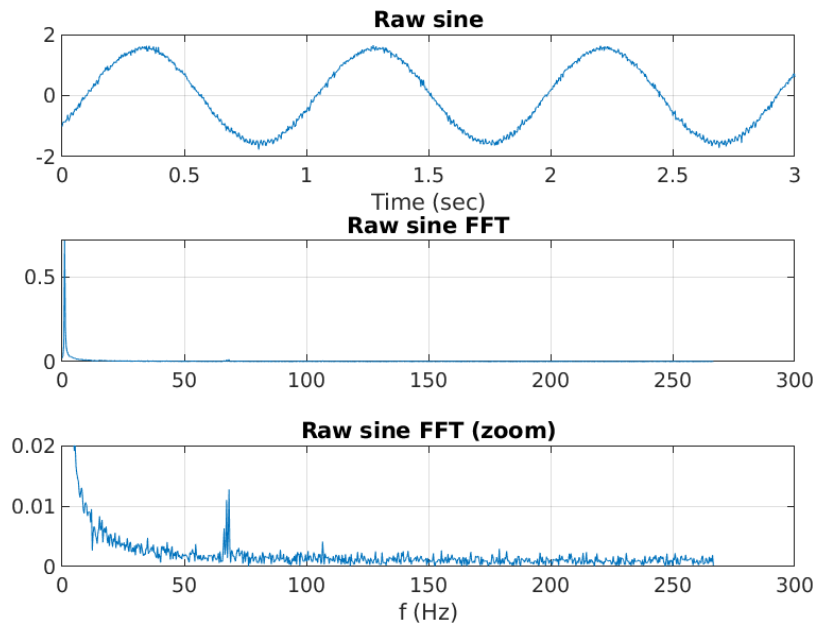
Στο Σχήμα 2.33 απεικονίζονται οι κυματομορφές όπως προέκυψαν από τον παλμογράφο. Παρατηρούμε ίδια πτώση τάσης στον αισθητήρα, αναμενόμενο, αφού το φορτίο της γεννήτριας είναι ο αισθητήρας και όχι το δείγμα. Το σήμα λήψης εμφανίζει τις χαρακτηριστικές κορυφές, αλλά πεπλατυσμένες εξαιτίας της μη αμελητέας διάστασης του ύψους στο δείγμα αλλά και του πολύ μεγαλύτερου όγκου. Με χρήση *FFT* αναλύουμε το φάσμα συχνοτήτων ώστε να βρεθούν οι κυρίαρχες συχνότητες θορύβου. Στο Σχήμα 2.34 φαίνεται η θέση της μηδενικής αρμονικής στο $1Hz$ ενώ ο θορυβος κατανέμεται σε όλο το φάσμα ισόποσα εκτός από μία έντονη κορυφή στα $65Hz$ περίπου. Η διαφοροποίηση αυτή προκύπτει όχι λόγω της αλλαγής του δείγματος αλλά λόγω εξωτερικών παραγόντων που προκαλούν θόρυβο.

Χρησιμοποιήθηκε βαθυπερατό φίλτρο συχνότητας αποκοπής $f_{-3dB} = 2Hz$ και παραμέτρου $steepness = 0.99$. Από το Σχήμα 2.35 επιβεβαιώνεται η ιδανική μορφή

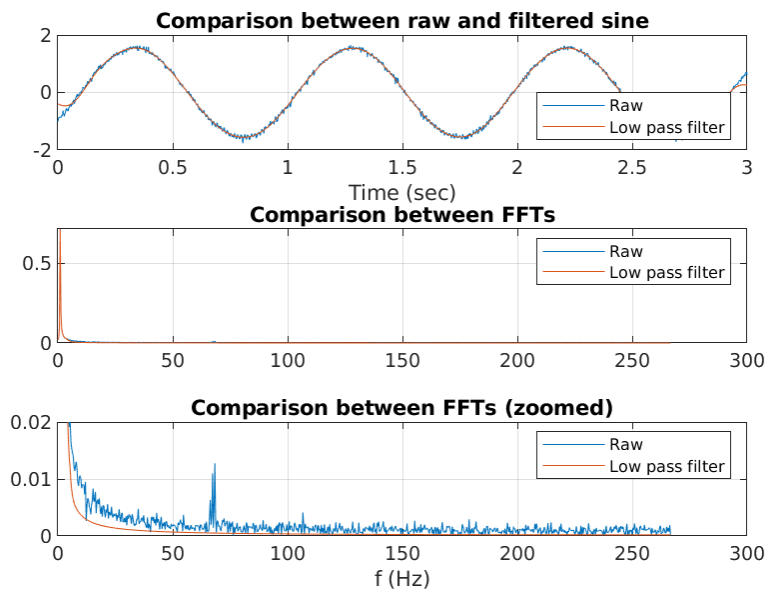


Σχήμα 2.33: Σήμα εξόδου του αισθητήρα για συχνότητα 1Hz σε δείγμα χάλυβα DP700.

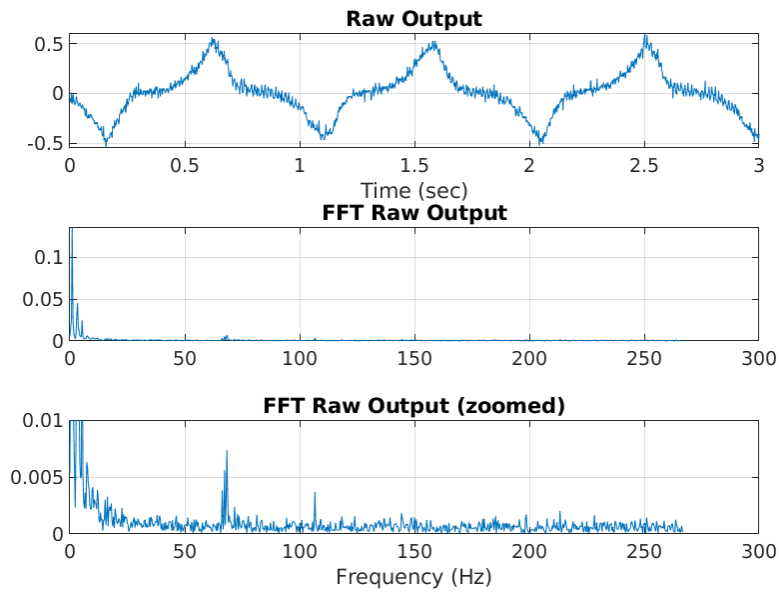
του ημιτόνου. Αντίστοιχα στο Σχήμα 2.36 φαίνεται το συχνотικό περιεχόμενο του σήματος λήψης.



Σχήμα 2.34: FFT του ημιτόνου διέγερσης. Στο τρίτο σχήμα φαίνεται σε μεγέθυνση το φάσμα των συχνοτήτων θορύβου.

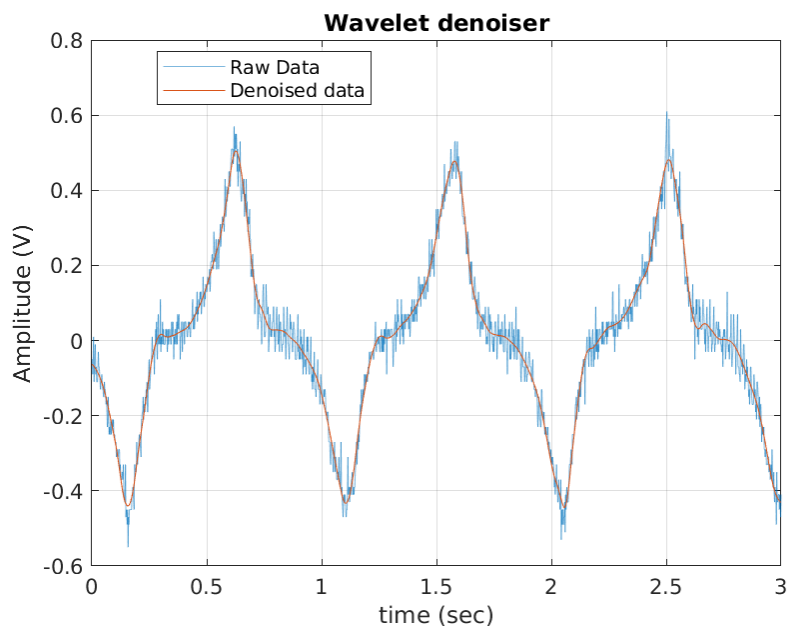


Σχήμα 2.35: Σύγκριση μεταξύ φιλτραρισμένου ημιτόνου και αρχικού με βαθυπερατό φίλτρο.



Σχήμα 2.36: Απόκριση του αισθητήρα σε δείγμα DP700 στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας.

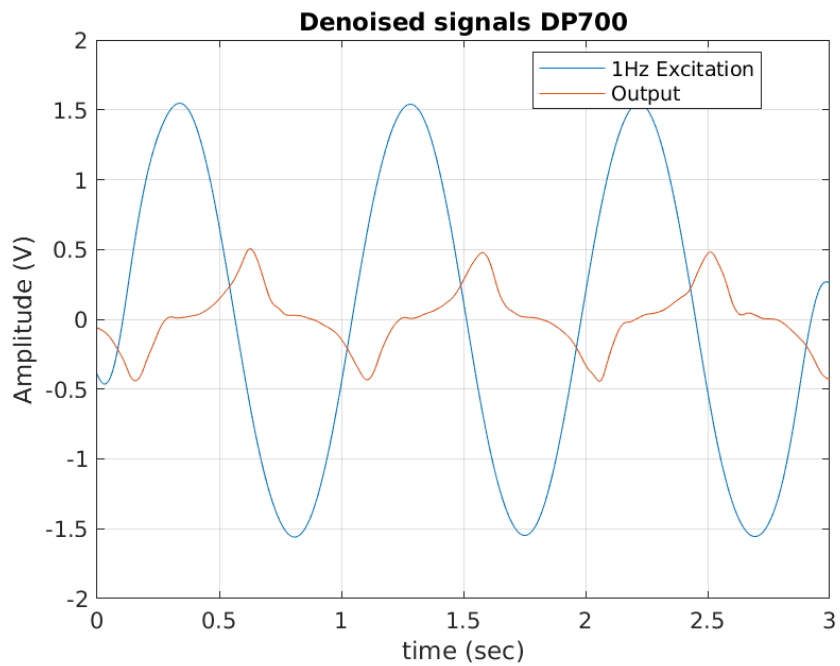
Ως ιδανικό φιλτράρισμα επιλέχθηκε η χρήση των wavelets στη προηγούμενη ενότητα. Κατ' αντιστοιχία φιλτράρουμε απ' ευθείας με τις παραμέτρους που είχαν επιλεχθεί στα δείγματα dogbone αλλά δεν υπάρχει επαρκής εξομάλυνση της κυματομορφής. Αλλάζοντας το πλήθος των επιπέδων σε 5 από 7 και υπολογίζοντας την διακύμανση του θορύβου σύμφωνα με τους συντελεστές του επιπέδου και όχι με τους υψηλότερης ανάλυσης (LevelDependent) προκύπτει το αποτέλεσμα του Σχήματος 2.37. Στη περίπτωση του χάλυβα DP700 παρατηρούμε πως η χρήση των wavelets παράγει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα και στην διατήρηση των κορυφών αλλά και στη συνολική εξομάλυνση του σήματος. Αυτό δικαιολογείται και από τη συνολικά καλύτερη ποιότητα απόκρισης του αισθητήρα σε μεγαλύτερο μέγεθος δείγματος. Στο Σχήμα 2.38 φαίνονται τα σήματα μετά τη χρήση των επιλεγμένων φίλτρων



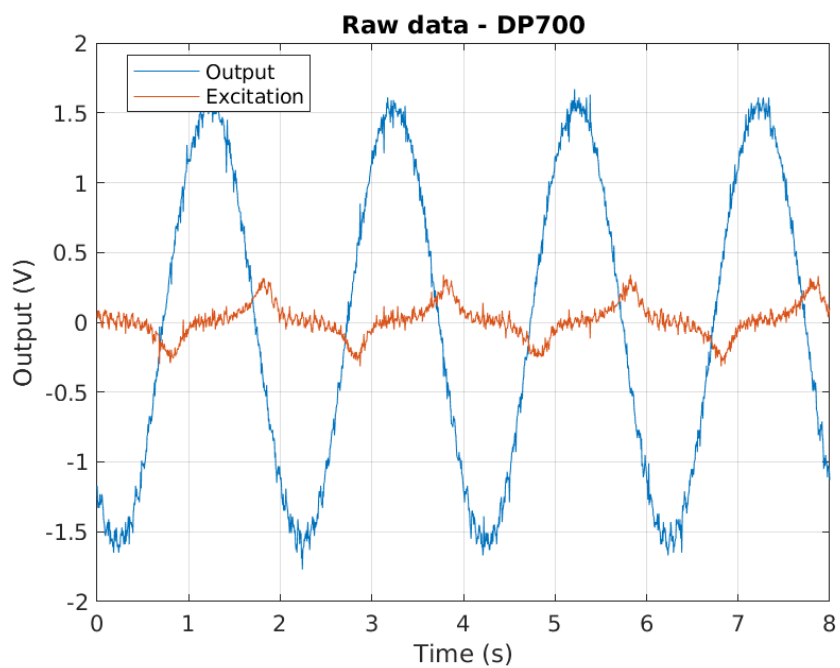
Σχήμα 2.37: Φιλτράρισμα του σήματος λήψης με χρήση wavelets.

2.6.2 Διέγερση συχνότητας 0.5 Hz

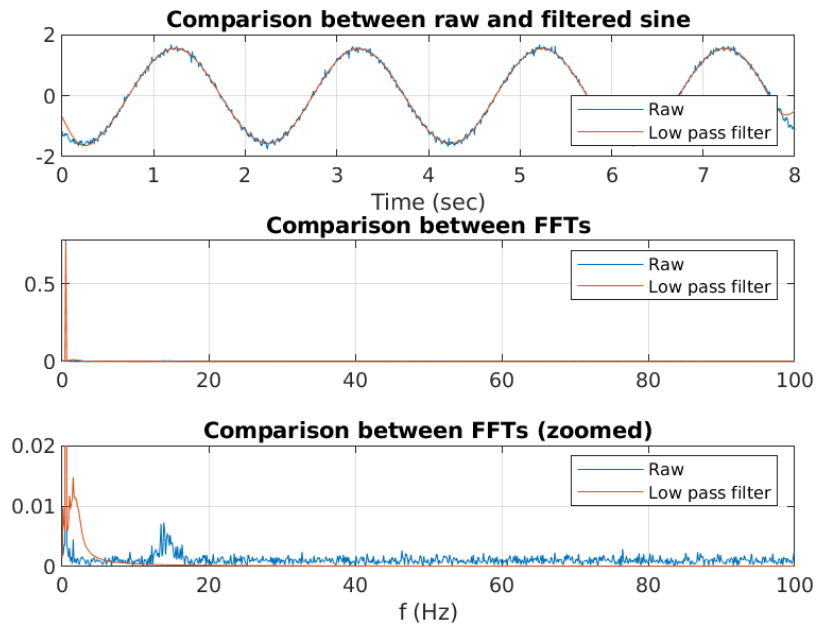
Σε αυτή την υποενότητα παρατίθενται οι ίδιες γραφικές παραστάσεις με τη προηγούμενη καθώς η μόνη αλλαγή ήταν η συχνότητα διέγερσης του δείγματος. Παρατηρήθηκε μείωση των κορυφών (Σχήμα 2.39), αύξηση του θορύβου (Σχήματα 2.40, 2.41) αλλά η χαρακτηριστική μορφή της λήψης παρέμεινε αμετάβλητη. Ένα ακόμα σημείο που αξίζει να τονιστεί, είναι η αύξηση του θορύβου στις χαμηλές συχνότητες στο ημίτονο. Επίσης παρατηρείται αδυναμία της έτοιμης συνάρτησης βαθυπερατού φίλτρου του Matlab να αποκριθεί σε συχνότητα αποκοπής $1Hz$, χωρίς όμως αυτό να δημιουργεί πρόβλημα στο τελικό αποτέλεσμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.40. Ακόμα, στο σήμα λήψης εμφανίζονται εντονότερες οι κορυφές του συχνολογικού φάσματος $(0.5, 5)Hz$ (Σχήμα 2.41). Τέλος, η χρήση των ίδιων παραμέτρων στην αποθορυβοποίηση με wavelets οδηγεί σε ικανοποιητικό αποτέλεσμα με μικρή επιπλέον μείωση των κορυφών. Στο Σχήμα 2.43 φαίνονται τα αποθορυβοποιημένα σήματα.



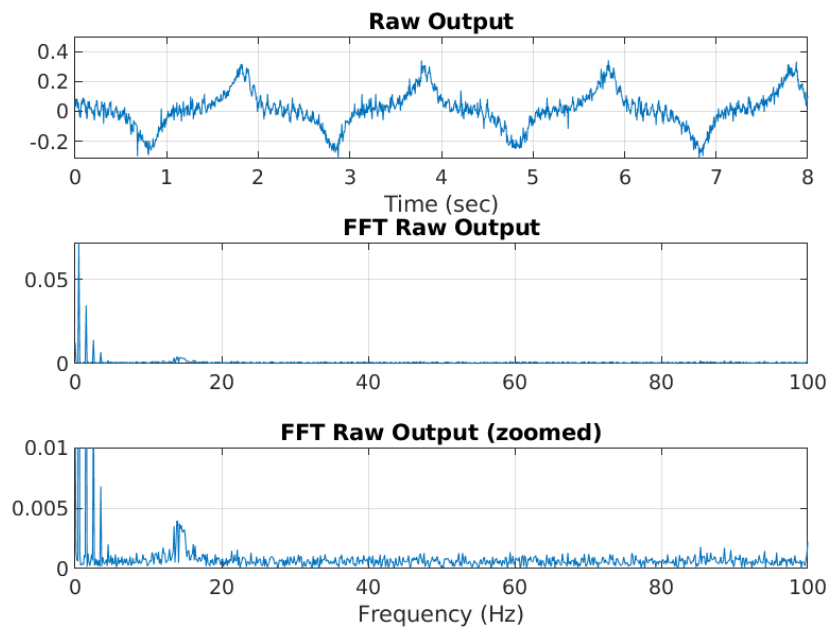
Σχήμα 2.38: Αποθρομβωποιημένα σήματα διέγερσης και λήψης χάλυβα DP700 σε συχνότητα διέγερσης 1Hz



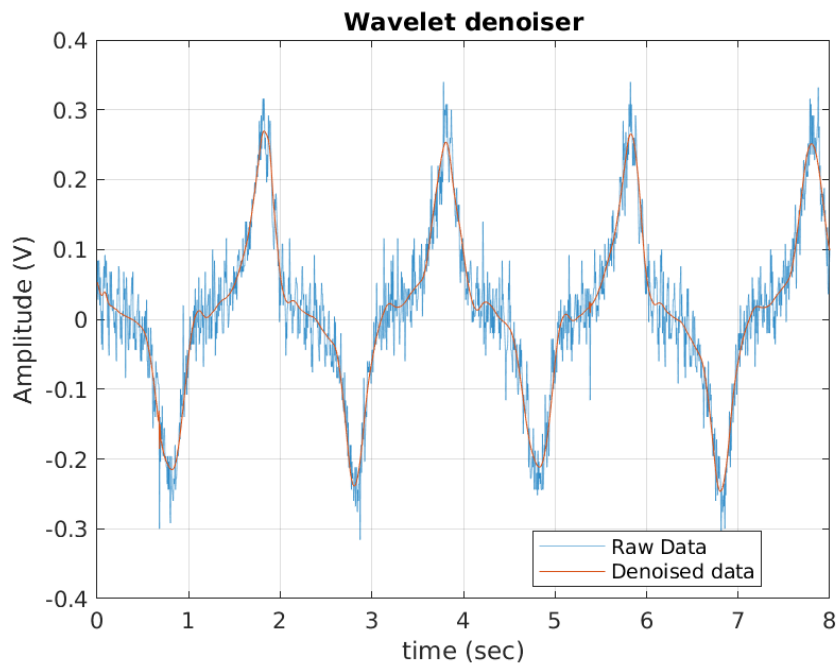
Σχήμα 2.39: Σήμα εξόδου του αισθητήρα για συχνότητα 0.5Hz σε δείγμα χάλυβα DP700.



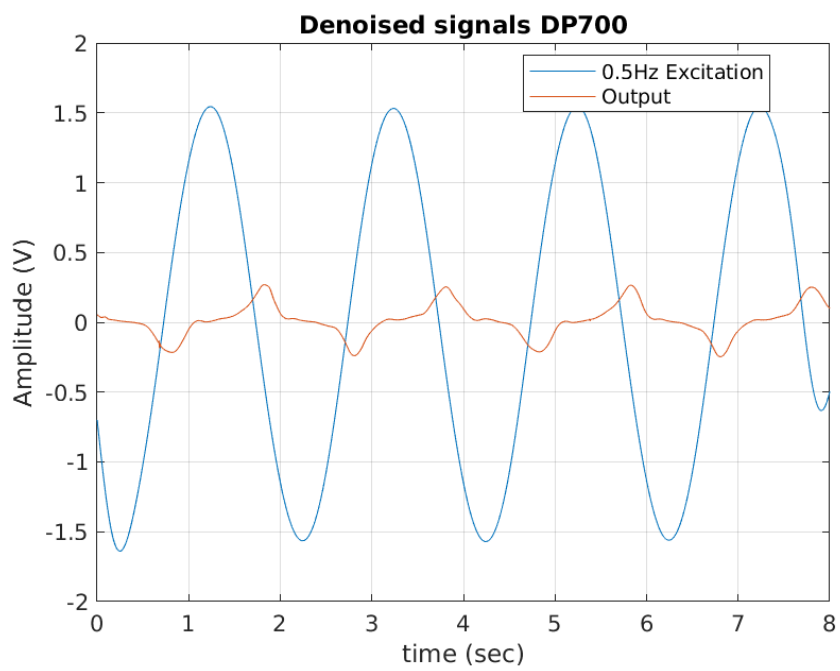
Σχήμα 2.40: Σύγκριση μεταξύ φιλτραρισμένου ημιτόνου και αρχικού με βαθυπερατό φίλτρο.



Σχήμα 2.41: Απόκριση του αισθητήρα σε δείγμα DP700 στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας.



Σχήμα 2.42: Φιλτράρισμα του σήματος λήψης με χρήση wavelets.



Σχήμα 2.43: Αποθρομβωποιημένα σήματα διέγερσης και λήψης χάλυβα DP700 σε συχνότητα διέγερσης 0.5Hz

3 Πειραματικός Βρόχος Υστέρησης

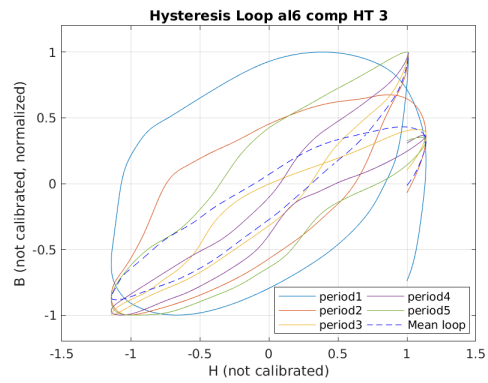
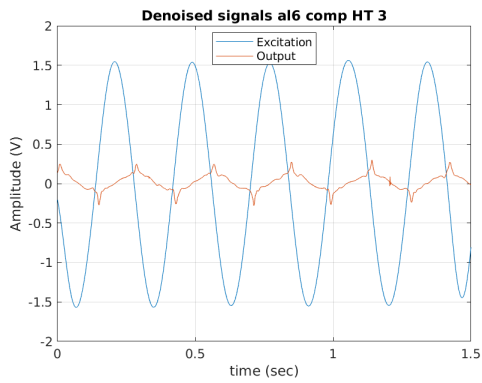
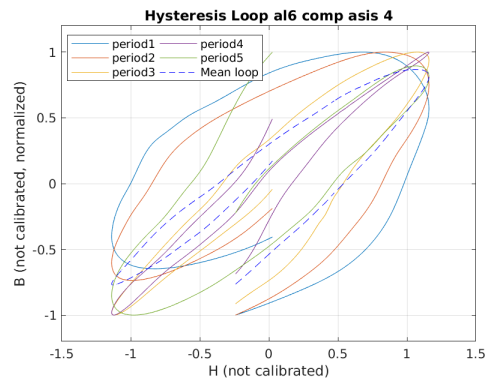
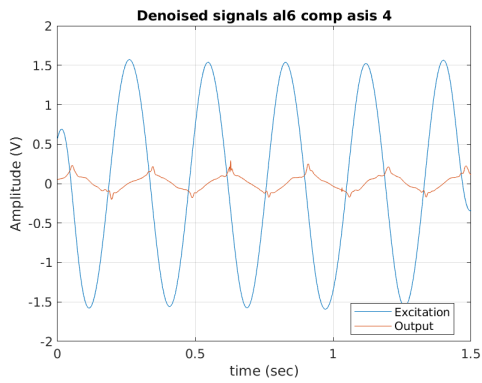
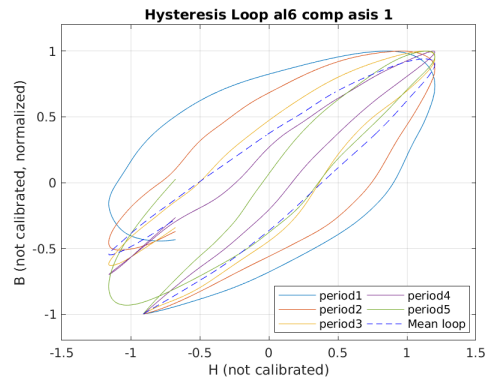
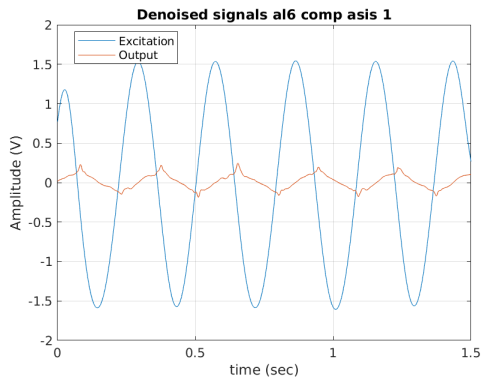
3.1 Dogbone Δείγματα

Για την μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων απαραίτητη είναι η κατασκευή του βρόχου υστέρησης. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: Αρχικά για κάθε δείγμα dogbone αποθηκεύτηκε η φιλτραρισμένη διέγερση και απόκριση του αισθητήρα. Στη συνέχεια το σήμα χωρίστηκε στις επιμέρους περιόδους και για κάθε περίοδο έγινε ολοκλήρωση στο χρόνο με τη μέθοδο των τραπεζίων όπως υλοποιείται από τη συνάρτηση `trapz` του `Matlab`. Στη συνέχεια, για τη σωστή απεικόνιση του βρόχου, αφαιρέθηκε η μέση τιμή του σήματος ολοκλήρωσης, ώστε να συμπίπτει το κέντρο του βρόχου με το κέντρο των αξόνων.

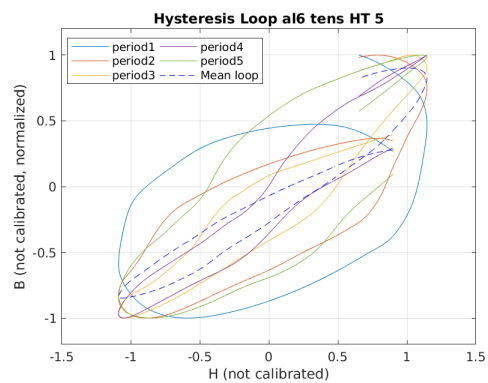
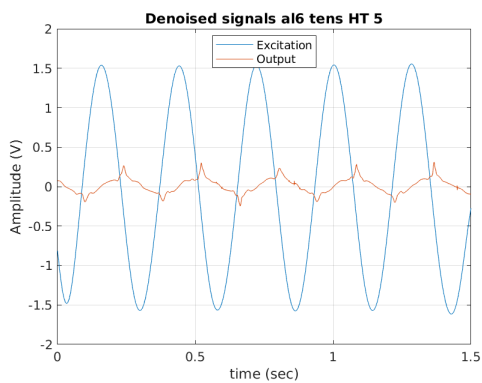
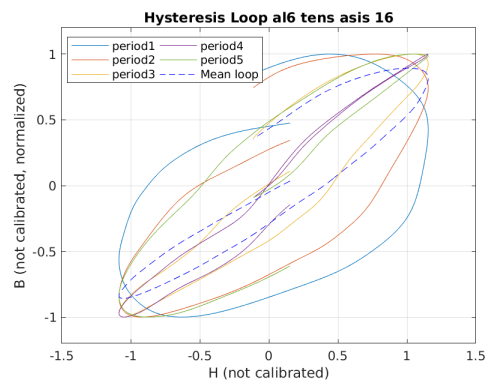
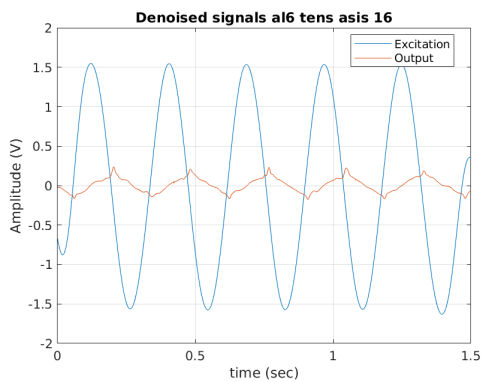
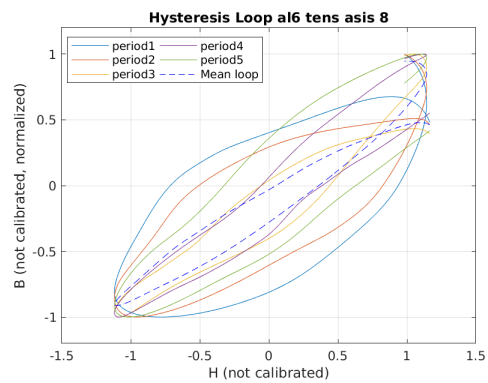
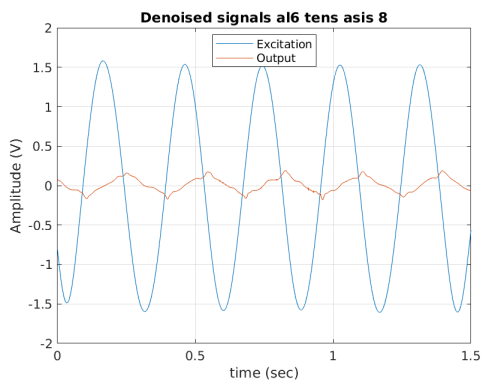
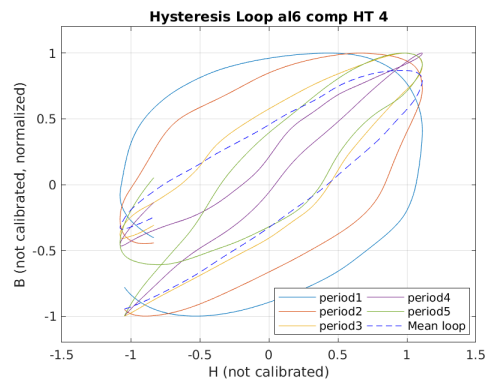
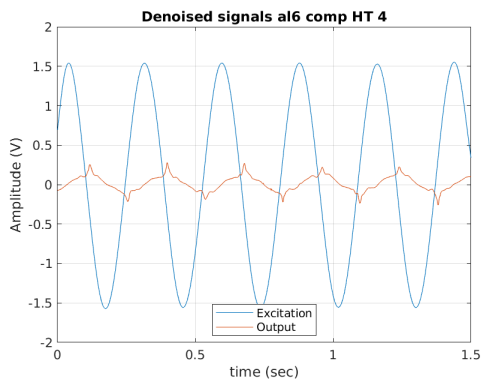
Τα αποτελέσματα αναπαράχθηκαν σε γράφημα ως προς την τιμή του ημιτόνου παραγωγής τους. Η τάση διέγερσης αντιστοιχεί αναλόγως στο εξωτερικό πεδίο H μαγνήτισης του δείγματος για αυτό και στα στους βρόχους ο οριζόντιος άξονας δίνεται ως H αλλά μη βαθμονομημένος. Για την ακριβή μέτρηση του πεδίου H απαιτείται χρήση βαθμονομημένου μαγνητόμετρου υψηλής ακρίβειας ο οποίος θα είχε τοποθετηθεί ανάμεσα στους πόλους του αισθητήρα μας. Ο αναλυτικός υπολογισμός δεν είναι δυνατός λόγω της γεωμετρίας και της μη γραμμικότητας του $yoke$.

Οι βρόχοι που προέκυψαν είναι επίσης μη βαθμονομημένοι, καθώς το πεδίο μαγνητικής επαγωγής B εξαρτάται από το H και τα χαρακτηριστικά της διάταξης με την μορφή σταθερών. Η κυρίαρχη εξάρτηση της μαγνήτισης του δείγματος υπολογίζεται από την ολοκλήρωση της τάσης εξόδου. Η ασυμμετρία των κορυφών που παρατηρήθηκε στον Πίνακα 2.3 απεικονίζεται στην αδυναμία δημιουργίας κλειστού βρόχου. Ακόμα, σε όλα τα δείγματα ο πρώτος βρόχος που προκύπτει είναι πολύ πλατύς σε σύγκριση με τους υπόλοιπους, ενώ προοδευτικά γίνονται στενότεροι. Μια εξήγηση για αυτό το φαινόμενο, είναι πως δεν έχει προηγηθεί απομαγνήτιση των δειγμάτων ούτε μόνωση από μαγνητικό θόρυβο άρα οδηγούμαστε σε μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση. Καθώς τα δείγματα μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται σε $minor B - H$ βρόχους (χωρίς τη επίτευξη κορεσμού) σιγά σιγά μειώνεται η παραμένουσα μαγνήτιση. Τέλος, με διακεκομμένες απεικονίζεται ο μέσος βροχος υστέρησης όπως προκύπτει από τις 5 περιόδους.

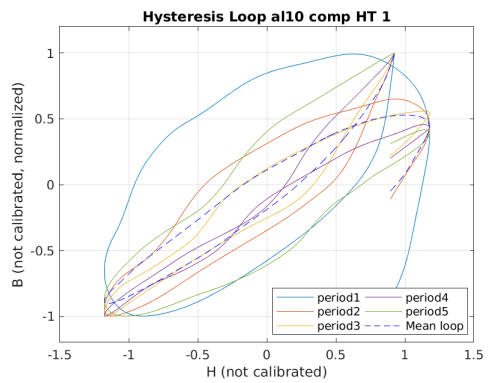
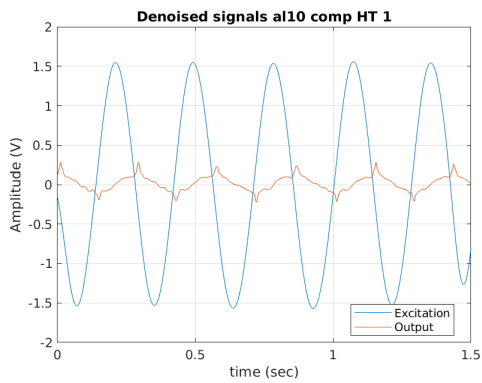
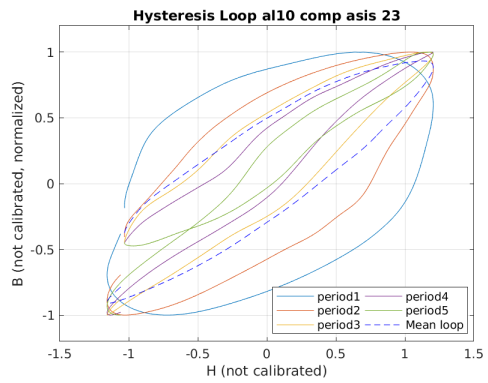
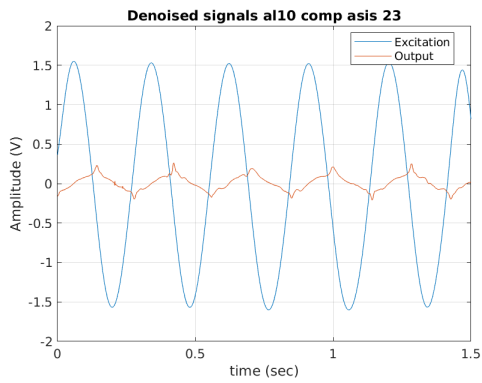
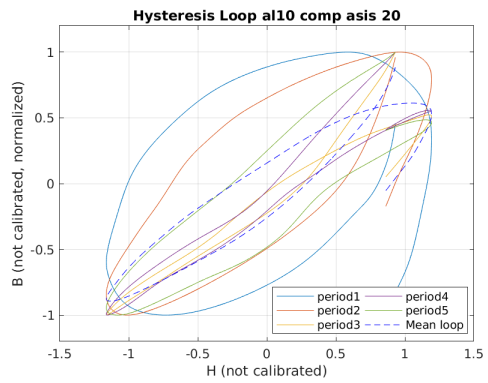
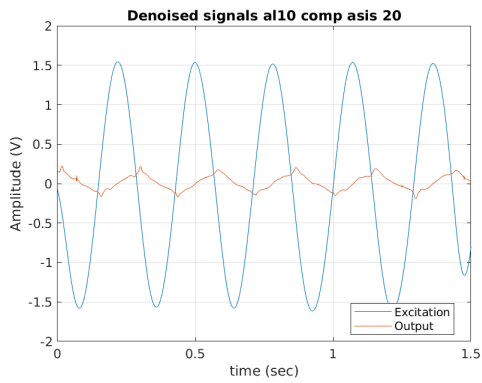
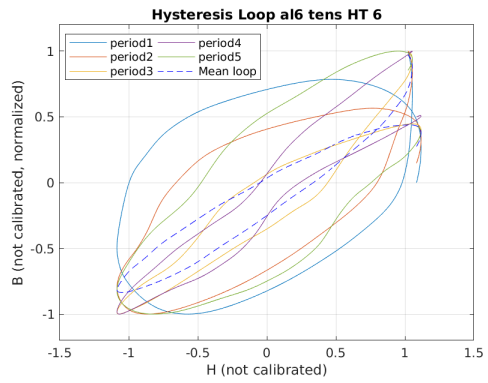
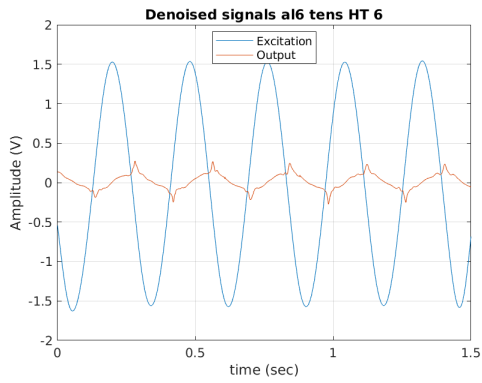
Παρακάτω, φαίνονται στα αριστερά τα φιλτραρισμένα σήματα για όλα τα dogbone δείγματα και οι αντίστοιχοι βρόχοι υστέρησης στα δεξιά.



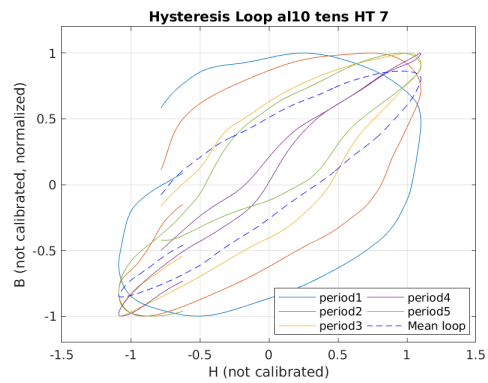
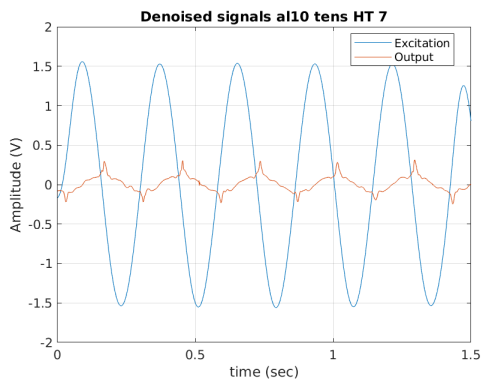
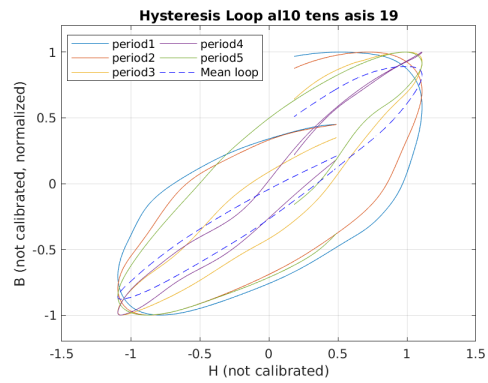
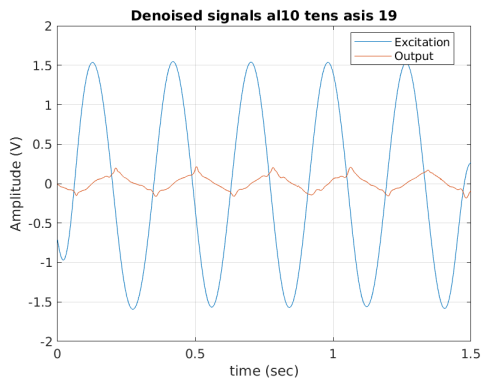
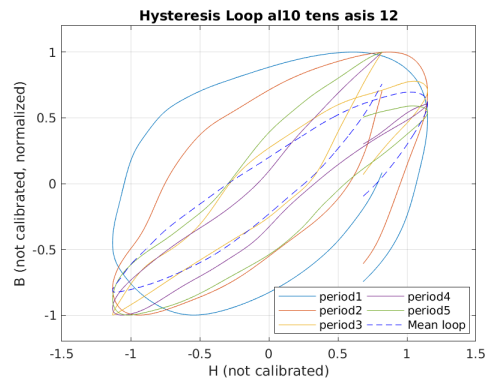
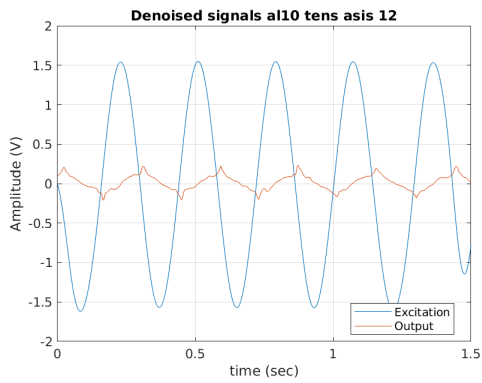
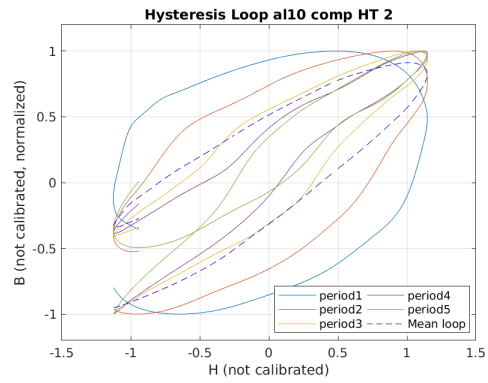
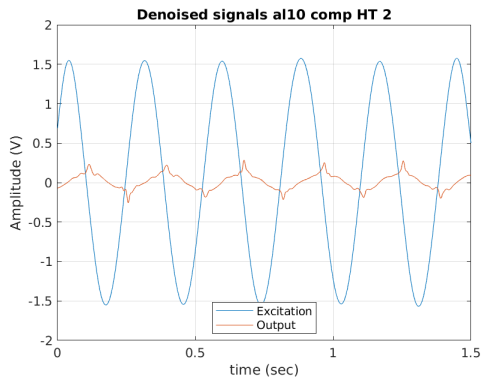
Σχήμα 3.1: Τελικό φιλτράρισμα σημάτων dogbone και βρόχοι υστέρησης (1/5). Στα επιμέρους γραφήματα αναγράφονται στον τίτλο η ονομασία του δείγματος.



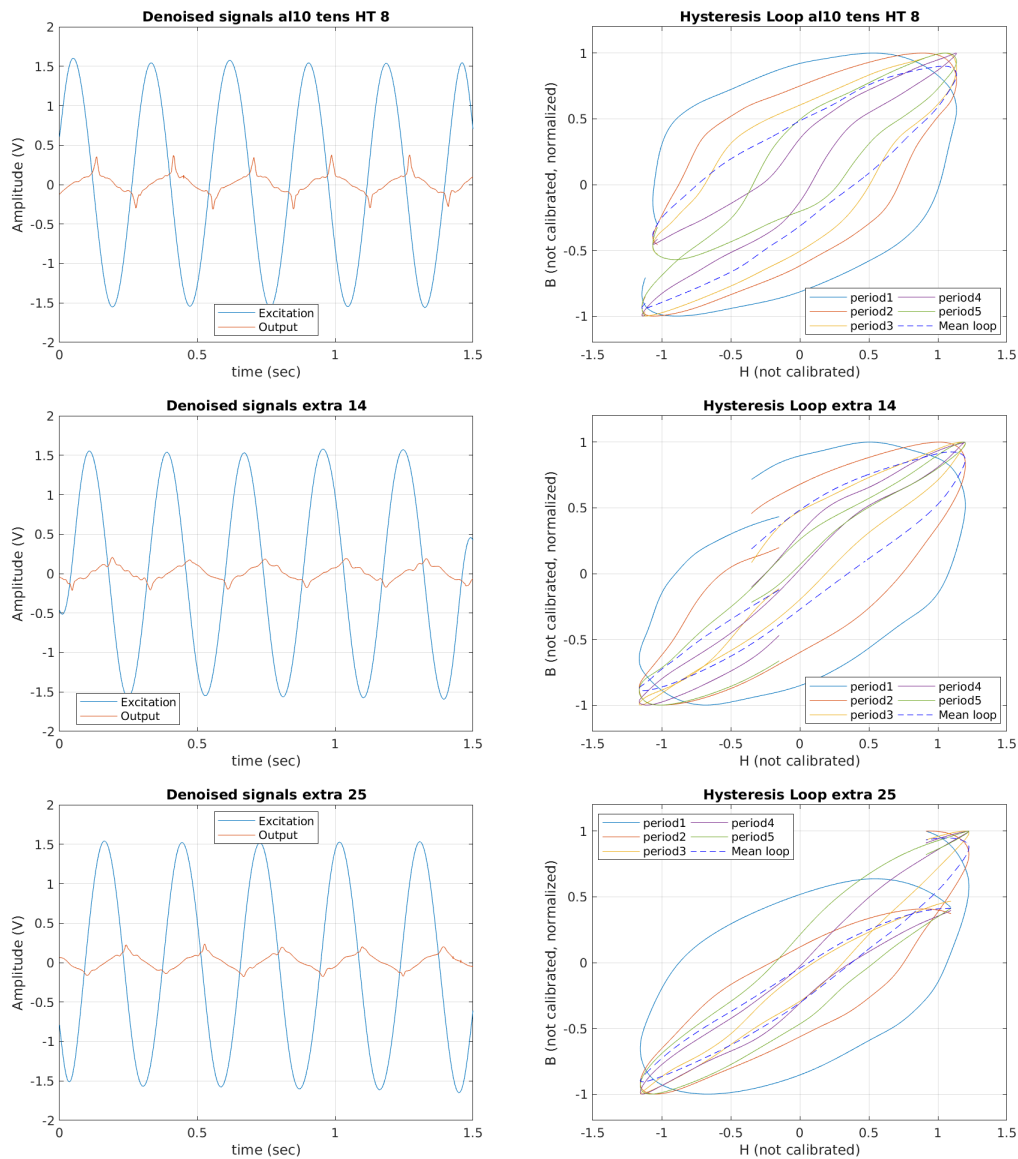
Σχήμα 3.1: Τελικό φιλτράρισμα σημάτων dogbone και βρόχοι υστέρησης (2/5). Στα επιμέρους γραφήματα αναγράφονται στον τίτλο η ονομασία του δείγματος.



Σχήμα 3.1: Τελικό φιλτράρισμα σημάτων dogbone και βρόχοι υστέρησης (3/5). Στα επιμέρους γραφήματα αναγράφονται στον τίτλο η ονομασία του δείγματος.



Σχήμα 3.1: Τελικό φιλτράρισμα σημάτων dogbone και βρόχοι υστέρησης (4/5). Στα επιμέρους γραφήματα αναγράφονται στον τίτλο η ονομασία του δείγματος.

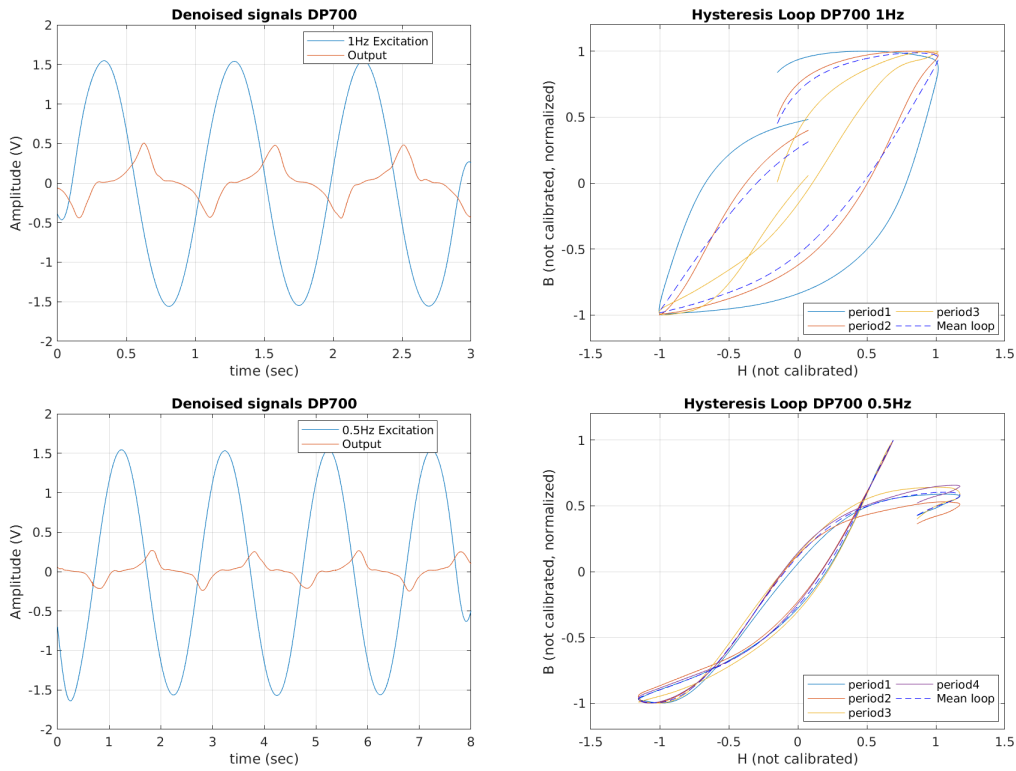


Σχήμα 3.1: Τελικό φιλτράρισμα σημάτων dogbone και βρόχοι υστέρησης (5/5). Στα επιμέρους γραφήματα αναγράφονται στον τίτλο η ονομασία του δείγματος.

3.2 Δείγμα DP700

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε για το δείγμα DP700. Οι βρόχοι που προέκυψαν έχουν μεγαλύτερη συνέπεια λόγω της καλύτερης ποιότητας μετρήσεων. Εξαιρεση αποτελεί η τρίτη περίοδος του σήματος λήψης με διέγερση $1Hz$. Καθώς δεν περιγράφεται επαρκώς η τελευταία κορυφή. Η ασυμμετρία των κορυφών πάλι υπάρχει,

αλλά σε μικρότερο βαθμό λόγω της καλύτερης ποιότητας μέτρησης. Παρατηρούμε στη περίπτωση του $1Hz$ ότι πλησιάζει στο κορεσμό στα άκρα του βρόχου, αλλά και αρκετή παραμένουσα μαγνήτιση. Στα $0.5Hz$ έχουμε μεγαλύτερη διείσδυση καθώς προσεγγίζουμε DC μαγνήτιση ενώ ο βρόχος εμφανίζεται στενότερος.



Σχήμα 3.2: Τελικό φιλτράρισμα δείγματος DP700 και βρόχοι υστέρησης. Στη πρώτη σειρά απεικονίζεται η διέγερση συχνότητας $1Hz$ ενώ στη δεύτερη έχουμε συχνότητα $0.5Hz$.

Συμπεράσματα - Μελλοντική εργασία

Στη διπλωματική αυτή εργασία περιγράφηκε η υλοποίηση μαγνητικού αισθητήρα μονού yoke, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δείγματα dogbone και διφασικό χάλυβα. Κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων διαπιστώθηκε η αναγκαιότητα χρήσης φίλτρων για την αποθρομβοποίηση του σήματος. Λόγω των πολύ χαμηλών συχνοτήτων ($< 10\text{Hz}$) η υλοποίηση φίλτρων σε πλακέτα κρίθηκε ασύμφορη και άσκοπη. Για αυτό επιλέχθηκε το λογισμικό Matlab και οι έτοιμες υλοποιήσεις που παρέχει σε πληθώρα θεωρητικών φίλτρων. Να σημειωθεί ότι η χρήση του Matlab δεν είναι υποχρεωτική, τα φίλτρα μπορούν να υλοποιηθούν και σε άλλες γλώσσες προγραμματισμού ανάλογα με την εφαρμογή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ακόμα και σε πολύ θορυβώδη σήματα η χρήση wavelets παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα στο σήμα εξόδου του αισθητήρα. Οι βρόχοι υστέρησης που υπολογίστηκαν στη συνέχεια δεν έχουν την ιδανική μορφή λόγω περιορισμού στον εξοπλισμό (γεννήτρια) αλλά μας δίνουν ποιοτικά χαρακτηριστικά των μετρήσεων και αποτελούν proof of concept.

Κομμάτια της παρούσας εργασίας έχουν χρησιμοποιηθεί στη συγγραφή του paper με τίτλο: "On the use of differential permeability and magnetic Barkhausen Noise Measurements for Magnetic NDT Applications" η οποία θα δημοσιευτεί στο Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Επιπρόσθετα, βρισκόμαστε στη συγγραφή άρθρων υλοποίησης ολοκληρωμένου αισθητήρα μέτρησης μαγνητικών ιδιοτήτων σε φερομαγνητικούς χάλυβες για ποιοτικό έλεγχο. Επιπλέον, σκοπός του εργαστηρίου και του συγγραφέα είναι η δημοσίευση άρθρου σύγκρισης των μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου που βασίζονται σε μέτρηση του μαγνητικού βρόχου υστέρησης με χρήση αισθητήρων μονού yoke, διπλού yoke (SST) ή πολλαπλών yoke. Συνέχεια αυτής της έρευνας αποτελεί η μέτρηση περισσότερων ειδών χάλυβα και η δημιουργία πρότυπου αισθητήρα για την εξάλειψη των σφαλμάτων κατασκευής.

Βιβλιογραφία

- [1] J. M. D. Coey, *Magnetism and Magnetic materials*. Cambridge University Press, 2009, ISBN: 9780521816144.
- [2] S. Kasap, *Αρχές ηλεκτρονικών υλικών και διατάξεων*, 2nd ed. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2002, ISBN: 9607530578.
- [3] M. McHenry, “Magnetic steels,” in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, K. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilschner, E. J. Kramer, S. Mahajan, and P. Veyssi re, Eds., Oxford: Elsevier, 2001, pp. 4961–4964, ISBN: 978-0-08-043152-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00862-7>.
- [4] Wikipedia. (2021). Steel, [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Steel> (visited on 02/16/2021).
- [5] E. Hristoforou, P. Vourna, A. Ktena, and P. Svec, “On the universality of the dependence of magnetic parameters on residual stresses in steels,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 5, pp. 1–6, May 2016, ISSN: 1941-0069. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2509642.
- [6] Wikipedia. (2021). Magnetic domain, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_domain (visited on 03/08/2021).
- [7] N. Nasir, M. K. A. Abdul Razab, S. Mamat, and I. Ahmad, “Review on welding residual stress,” vol. 11, pp. 6166–6175, May 2016.
- [8] P. Prevey, “X-ray diffraction residual stress technique,” *Lambda Research, Inc. Littleton, MA, USA*, vol. 4, 1986.
- [9] N. Rossini, M. Dassisti, K. Benyounis, and A. Olabi, “Methods of measuring residual stresses in components,” *Materials & Design*, vol. 35, pp. 572–588, 2012, New Rubber Materials, Test Methods and Processes, ISSN: 0261-3069. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.022>.
- [10] P. Vourna, A. Ktena, P. Tsarabaris, and E. Hristoforou, “Magnetic residual stress monitoring technique for ferromagnetic steels,” *Metals*, vol. 8, p. 592, Jul. 2018. DOI: 10.3390/met8080592.
- [11] M. Fitzpatrick, A. Fry, and P. Holdway, “Npl good practice guide no. 52 determination of residual stresses by x-ray diffraction-issue 2,” *NPL, Great Britain*, Jan. 2005.

- [12] F. Motazedian, Z. Wu, J. Zhang, B. Samsam Shariat, D. Jiang, M. Martyniuk, Y. Liu, and H. Yang, “Determining intrinsic stress and strain state of fibre-textured thin films by x-ray diffraction measurements using combined asymmetrical and bragg-brentano configurations,” *Materials & Design*, vol. 181, p. 108063, 2019, ISSN: 0264-1275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108063>.
- [13] G. Vourlias, “Application of x-rays diffraction for identifying thin oxide surface layers on zinc coatings,” *Coatings*, vol. 10, no. 10, 2020, ISSN: 2079-6412. DOI: [10.3390/coatings10101005](https://doi.org/10.3390/coatings10101005).
- [14] M. J. Park, H. N. Yang, D. Y. Jang, J. S. Kim, and T. E. Jin, “Residual stress measurement on welded specimen by neutron diffraction,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 155-156, pp. 1171–1177, 2004, Proceedings of the International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies: Part 2, ISSN: 0924-0136.
- [15] H.-R. Wenk and P. V. Houtte, “Texture and anisotropy,” *Reports on Progress in Physics*, vol. 67, no. 8, pp. 1367–1428, Jul. 2004. DOI: [10.1088/0034-4885/67/8/r02](https://doi.org/10.1088/0034-4885/67/8/r02).
- [16] Z. Wang, Y. Gu, and Y. Wang, “A review of three magnetic ndt technologies,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 324, no. 4, pp. 382–388, 2012, ISSN: 0304-8853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.08.048>.
- [17] P. Shi, S. Su, and Z. Chen, “Overview of researches on the nondestructive testing method of metal magnetic memory: Status and challenges,” *J Nondestruct Eval*, vol. 39, no. 43, 2020, ISSN: 0304-8853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.08.048>.
- [18] P. Vourna, “Correlation of magnetic properties with microstructure and mechanical propertiew of wileded ferromagnetic steels,” National Technical University of Athens, 2015.
- [19] S. Santa-aho, A. Laitinen, A. Sorsa, and M. Vippola, “Barkhausen noise probes and modelling: A review.,” *J Nondestruct Eval*, vol. 38, no. 94, Sep. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-019-0636-z>.
- [20] N. P. Gaunkar, O. Kypris, I. C. Nlebedim, and D. Jiles, “Optimization of sensor design for barkhausen noise measurement using finite element analysis,” *Journal of Applied Physics*, vol. 115, no. 17, Feb. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4864438>.
- [21] Y. Tsuchida, Y. Yoshitomi, and M. Enokizono, “Chaotic behavior of rotational barkhausen noises,” *Journal of The Magnetism Society of Japan*, vol. 25, pp. 1099–1102, Jan. 2001. DOI: [10.3379/jmsjmag.25.1099](https://doi.org/10.3379/jmsjmag.25.1099).

- [22] E. Antonelli, E. Cardelli, and A. Faba, “Epstein frame: How and when it can be really representative about the magnetic behavior of laminated magnetic steels,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 5, pp. 1516–1519, 2005. DOI: 10.1109/TMAG.2005.845072.
- [23] Wikipedia. (2021). Epstein frame, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Epstein_frame (visited on 05/22/2015).
- [24] B. Koprivica, A. Milovanovic, and M. Plazinić, “Standard methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet,” Nov. 2012.
- [25] T. Yamamoto and Y. Ohya, “Single sheet tester for measuring core losses and permeabilities in a silicon steel sheet,” *IEEE transactions on magnetics*, vol. 10, no. 2, pp. 157–159, 1974.
- [26] “Analysis of magnetic fields in a single sheet tester using an h coil,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 26, no. 1, pp. 179–180, 1982, ISSN: 0304-8853. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(82\)90146-9](https://doi.org/10.1016/0304-8853(82)90146-9).
- [27] T. Nakata, N. Takahashi, Y. Kawase, M. Nakano, M. Miura, and J. Sievert, “Numerical analysis and experimental study of the error of magnetic field strength measurements with single sheet testers,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 22, no. 5, pp. 400–402, 1986. DOI: 10.1109/TMAG.1986.1064405.
- [28] T. Nakata, Y. Ishihara, M. Nakaji, and T. Todaka, “Comparison between the h-coil method and the magnetizing current method for the single sheet tester,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 215-216, pp. 607–610, 2000, ISSN: 0304-8853. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(00\)00239-0](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(00)00239-0).
- [29] M. Nakaoka, A. Fukuma, H. Nakaya, D. Miyagi, M. Nakano, and N. Takahashi, “Examination of temperature characteristics of magnetic properties using a single sheet tester,” *Ieej Transactions on Fundamentals and Materials*, vol. 125, pp. 63–68, Apr. 2005. DOI: 10.1541/ieejfms.125.63.
- [30] D. Miyagi, T. Yamazaki, D. Otome, M. Nakano, and N. Takahashi, “Development of measurement system of magnetic properties at high flux density using novel single-sheet tester,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 10, pp. 3889–3892, 2009. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2022332.
- [31] O. Stupakov, “System for controllable magnetic measurement with direct field determination,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 324, no. 4, pp. 631–636, 2012, ISSN: 0304-8853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.08.058>.

- [32] H. Okama, Y. Takahashi, and K. Fujiwara, “A measurement method of minor hysteresis loss of electrical steel sheet by means of a single sheet tester,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 505, p. 166 688, 2020, ISSN: 0304-8853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166688>.
- [33] F. Müller, G. Bavendiek, B. Schauerte, and K. Hameyer, “Measurement and simulation of a rotational single sheet tester,” *Archives of Electrical Engineering*, pp. 173–183, 2019.
- [34] M. Jesenik, V. Goričan, M. Trlep, A. Hamler, and B. Štumberger, “Field homogeneity in a two-phase round rotational single sheet tester with one and both side shields,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 254-255, pp. 247–249, 2003, Proceedings of the 15th International Conference on Soft Magnetic Materials (SMM15), ISSN: 0304-8853. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00780-1](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00780-1).
- [35] A. Hasenzagl, B. Weiser, and H. Pfützner, “Novel 3-phase excited single sheet tester for rotational magnetization,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 160, pp. 180–182, 1996, ISSN: 0304-8853. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(96\)00158-8](https://doi.org/10.1016/0304-8853(96)00158-8).
- [36] C. Ragusa and F. Fiorillo, “A three-phase single sheet tester with digital control of flux loci based on the contraction mapping principle,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 304, no. 2, e568–e570, 2006, Proceedings of the 17th International Symposium on Soft Magnetic Materials, ISSN: 0304-8853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.02.177>.
- [37] S. Tumanski and T. Bakon, “Measuring system for two-dimensional testing of electrical steel,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 223, no. 3, pp. 315–325, 2001, ISSN: 0304-8853. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(00\)01332-9](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(00)01332-9).
- [38] O. Stupakov, “Controllable magnetic hysteresis measurement of electrical steels in a single-yoke open configuration,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 12, pp. 4718–4726, 2012. DOI: [10.1109/TMAG.2012.2203139](https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2203139).
- [39] Z. Gmyrek, “Single sheet tester with variable dimensions,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, pp. 1–8, Apr. 2016. DOI: [10.1109/TIM.2016.2540839](https://doi.org/10.1109/TIM.2016.2540839).
- [40] A. Pulnikov, V. Permiakov, R. Petrov, J. Gyselinck, G. Langelaan, H. Wiselink, L. Dupre, Y. Houbaert, and J. Melkebeek, “Investigation of residual stresses by means of local magnetic measurement,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 272-276, pp. 2303–2304, 2004, ISSN: 0304-8853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2003.12.935>.

- [41] A. P. Nichipuruk, A. N. Stashkov, V. N. Kostin, and M. K. Korkh, “Possibilities of magnetic inspection of plastic deformations preceding failures of low-carbon steels constructions,” *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 45, pp. 616–622, 2010, ISSN: 1061-8309. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061830909090034>.
- [42] P. Vourna, E. Hristoforou, A. Ktena, P. Svec, and E. Mangiorou, “Dependence of magnetic permeability on residual stresses in welded steels,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 4, pp. 1–4, 2017. DOI: 10.1109/TMAG.2016.2628025.
- [43] E. Hristoforou, A. Ktena, P. Vourna, and K. Argiris, “Dependence of magnetic permeability on residual stresses in alloyed steels,” *AIP Advances*, vol. 8, p. 047201, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4994202>.
- [44] P. Vourna, “An accurate method for determining residual stresses with magnetic non-destructive techniques in welded ferromagnetic steels,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 108, p. 012017, 2016. DOI: 10.1088/1757-899X/108/1/012017.
- [45] A. N. Stashkov, V. G. Kuleev, E. A. Schapova, and A. P. Nichipuruk, “Studying field dependence of reversible magnetic permeability in plastically deformed low-carbon steels,” *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 54, no. 12, pp. 855–860, 2018. DOI: 10.1134/S1061830918120094.
- [46] V. G. Kuleev, A. N. Stashkov, T. P. Tsar’kova, and A. P. Nichipuruk, “Experimental determination of critical fields of 90-degree domain wall displacement in plastically deformed low-carbon steels,” *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 54, no. 10, pp. 711–716, 2018. DOI: 10.1134/S1061830918100078.
- [47] A. N. Stashkov, A. P. Nichipuruk, V. G. Kuleev, and E. A. Schapova, “Magnetic non-destructive testing of residual stresses in low carbon steels,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1389, p. 012032, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1389/1/012032.
- [48] P. Ripka, *Magnetic Sensors and Magnetometers*. Artech House Publishers, 2001, ISBN: 1580530575,9781580530576. [Online]. Available: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=e194381534c121b7bc65fc4008d25b0d>.
- [49] A. Ramazani, B. Berme, and U. Prael, “Steel and iron based alloys,” in *Structural Materials and Processes in Transportation*. John Wiley & Sons, Ltd, 2013, ch. 1, pp. 5–48, ISBN: 9783527649846. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527649846.ch1>. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527649846.ch1>.

- [50] M. Aghadavoudi Jolfaei, L. Zhou, and C. Davis, “Consideration of magnetic measurements for characterisation of ferrite–martensite commercial dual-phase (dp) steel and basis for optimisation of the operating magnetic field for open loop deployable sensors,” *Metals*, vol. 11, no. 3, 2021, ISSN: 2075-4701. DOI: 10.3390/met11030490.
- [51] Wikipedia. (2021). Grain boundary strengthening, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Grain_boundary_strengthening (visited on 04/26/2015).
- [52] WorldAutoSteel. (2020). Steel your strength, [Online]. Available: <https://www.worldautosteel.org/why-steel/steel-your-strength>.
- [53] J. Mohapatra, S. Kumar, A. Akela, S. Rao, and K. Marutiram, “Magnetic hysteresis loop as a tool for the evaluation of microstructure and mechanical properties of dp steels,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 25, Apr. 2016. DOI: 10.1007/s11665-016-2066-8.
- [54] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΩΝ*, 3rd. FountasBooks, 2010, ISBN: 978960330740-2.
- [55] Wikipedia. (2021). Moving average, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Moving_average (visited on 10/31/2021).
- [56] —, (2021). Savitzky–golay filter, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Savitzky%E2%80%93Golay_filter (visited on 09/02/2021).
- [57] MathWorks. (2021). Sgolayfilt, [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/signal/ref/sgolayfilt.html?s_tid=doc_ta.
- [58] —, (2021). Hampel, [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/hampel.html#description>.
- [59] Wikipedia. (2021). Error function, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Error_function (visited on 10/21/2021).
- [60] E. Ghaderpour, S. D. Pagiatakis, and Q. K. Hassan, “A survey on change detection and time series analysis with applications,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 13, 2021, ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app11136141.
- [61] P. White, “Transforms, wavelets,” in *Encyclopedia of Vibration*, S. Braun, Ed., Oxford: Elsevier, 2001, pp. 1419–1435, ISBN: 978-0-12-227085-7. DOI: <https://doi.org/10.1006/rwvb.2001.0157>.
- [62] MathWorks. (2021). Wavelet signal denoiser, [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/waveletsignaldenoiser-app.html>.
- [63] —, (2021). Wdenoise, [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/wdenoise.html#d123e121181>.

- [64] Wikipedia. (2021). Haar wavelet, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Haar_wavelet (visited on 09/04/2021).
- [65] —, (2021). Daubechies wavelet, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Daubechies_wavelet (visited on 09/28/2021).
- [66] MathWorks. (2021). Introduction to wavelet families, [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/gs/introduction-to-the-wavelet-families.html>.