



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ανάπτυξη Μαγνητικών Κυκλωμάτων για Χρήση σε
Αυτόνομους Αισθητήρες Μέτρησης Εσωτερικών
Τάσεων σε Χάλυβες**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Πολυχρόνης Παττακός

Επιβλέπων Καθηγητής:
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Ανάπτυξη Μαγνητικών Κυκλωμάτων για Χρήση σε
Αυτόνομους Αισθητήρες Μέτρησης Εσωτερικών Τάσεων σε
Χάλυβες**

Πολυχρόνης Παττακός

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ευάγγελος Χριστοφόρου

Αφροδίτη Κτενά

Κωνσταντίνος Πολιτόπουλος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 29^η Ιουνίου 2023.

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Αφροδίτη Κτενά
Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

.....
Κωνσταντίνος Πολιτόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δημήτρης Μανωλάκος
Καθηγητής ΕΜΠ

K. T. Ευθυμιάδης

.....
Κωνσταντίνος Ευθυμιάδης
Καθηγητής ΑΠΘ

.....
Ιωάννης Γκόνος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χρήστος Χριστοδούλου
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2023



.....
Πολυχρόνης Παττακός

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

Copyright © Πολυχρόνης Παττακός 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Στην οικογένεια μου, Μαρίνα και Τόμας.

Πρόλογος

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στον Τομέα Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Ευάγγελου Χριστοφόρου, κατά την περίοδο 2019-2023. Αντικείμενο της αποτελεί η ανάπτυξη μαγνητικών κυκλωμάτων για χρήση σε αυτόνομους αισθητήρες μέτρησης εσωτερικών τάσεων σε χάλυβες. Πρωταρχικός μας σκοπός υπήρξε η επέκταση ανάλογων θεμάτων μαγνητικών αισθητήρων, τα οποία είχαν μελετηθεί κατά το παρελθόν από τον επιβλέποντα και τους συνεργάτες του, και η ανάπτυξη νέων με βάση τις προδιαγραφές του Μη Καταστροφικού Ελέγχου, αλλά και τις σύγχρονες τάσεις της τεχνολογίας οι οποίες περικλείονται στον γενικότερο όρο Διαδίκτυο των Αντικειμένων, όπως η ενεργειακή αυτονομία και η συλλογή και μετάδοση δεδομένων.

Οι μεθοδολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται μπορούν να αποτελέσουν την βάση για βιομηχανικές εφαρμογές με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης μεγαλύτερων βιομηχανικών συστημάτων, αλλά και την τήρηση προδιαγραφών οι οποίες σχετίζονται με την περιβαλλοντική συνειδητοποίηση και την ασφάλεια δομικών έργων και υποδομών. Η συμβολή της διατριβής εντοπίζεται στην καλύτερη κατανόηση προϋπάρχουσων διατάξεων, με την χρήση τους στην διεξαγωγή νέων μετρήσεων, αλλά και στην κατασκευή νέων αισθητήρων, βελτιώνοντας παλαιότερες μεθόδους και τεχνικές, και κάνοντας χρήση νέων υλικών και τεχνολογιών σε βιομηχανικές διατάξεις ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.

Περίληψη

Η Διδακτορική Διατριβή αυτή πραγματεύεται τα παρακάτω:

1. Την ανάπτυξη και λειτουργία της διάταξης single sheet tester, που αποτελεί εργαστηριακή διάταξη αναφοράς για τον προσδιορισμό των μαγνητικών παραμέτρων και του βρόχου μαγνήτισης σε μαλακά μαγνητικά υλικά. Στην διάταξη αυτή μπορούν να χαρακτηρισθούν δείγματα δοσμένων διαστάσεων. Η διάταξη, εκτός της μέτρησης των μαγνητικών χαρακτηριστικών, χρησιμεύει για την ανάπτυξη μαγνητικών προτύπων μεταφοράς για την διακρίβωση άλλων διατάξεων μέτρησης παρόμοιων χαρακτηριστικών.
2. Την ανάπτυξη ηλεκτρομαγνητικής διάταξης (electromagnetic yoke) για τον προσδιορισμό της εξάρτησης της μαγνητικής διαπερατότητας από το μαγνητικό πεδίο σε βιομηχανικές εφαρμογές πεδίου. Η διακρίβωσή της εξαρτάται από το πρότυπο μεταφοράς που χαρακτηρίζεται στον single sheet tester.
3. Την ανάπτυξη διάταξης yoke με μόνιμο μαγνήτη και μαλακά μαγνητικά άκρα, πολώνοντας με συγκεκριμένο πεδίο στην περιοχή μέτρησης και κάνοντας χρήση αισθητήρα Hall για την μέτρηση. Η διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις που απαιτείται μικρή κατανάλωση και δεν μπορεί κατά συνέπεια να χρησιμοποιηθεί το electromagnetic yoke, λόγω ενεργειακής κατανάλωσης. Στην λογική αυτή, αναπτύχθηκε και διάταξη μέτρησης μαγνητικών παραμέτρων ακτινικά στο κάθε σημείο μέτρησης, δίνοντας έτσι και μετρήσεις ανισοτροπίας. Ακόμη, αναπτύχθηκε διάταξη απολαβής ενέργειας (magnetic harvester) με απόδοση της τάξης των mW.

Αυτές οι τρεις διατάξεις αποτελούν την βάση για την ανάπτυξη του ISO 17025 & ISO 17020 του εργαστηρίου ηλεκτρονικών αισθητήρων για την μέτρηση της κατανομής της μαγνητικής διαπερατότητας και κατά συνέπεια την μέτρηση της κατανομής των παραμενοουσών τάσεων σε χάλυβες.

Αναλυτικότερα, στο θεωρητικό μέρος (Κεφάλαιο 1) γίνεται μια Βιβλιογραφική Ανασκόπηση με σκοπό την μελέτη του θεωρητικού υπόβαθρου στο οποίο στηρίζεται η μελέτη μαγνητικών κυκλωμάτων, αλλά και την επισκόπηση σύγχρονων προβλημάτων και μεθόδων στα οποία αυτή η ανάλυση είναι χρήσιμη. Επιπλέον, γίνεται μια παρουσίαση των μαγνητικών αισθητήρων, της χρησιμότητας και της λειτουργίας τους, αλλά και αναφορά στον Μη Καταστροφικό Έλεγχο και στην χρήση αισθητήρων ως μέρος ενός Συστήματος Αυτομάτου Ελέγχου.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι Βασικές Αρχές της Σχεδίασης Μαγνητικών Κυκλωμάτων. Αυτό περιλαμβάνει την ανάλυση ενός απλού μαγνητικού κυκλώματος, την παρουσίαση των αναλογιών με ηλεκτρικά κυκλώματα και κάποια στοιχεία μεθοδολογίας τα οποία είναι απαραίτητα για την κατανόηση του πειραματικού μέρους.

Για το πειραματικό μέρος, στο Κεφάλαιο 3 γίνεται η παρουσίαση των διατάξεων αισθητήρων οι οποίες μελετήθηκαν, κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της Μαγνητικής Διαπερατότητας δειγμάτων χαλύβων με σκοπό την εκτίμηση της αλλοίωσης των μηχανικών τους ιδιοτήτων και της καταπόνησης τους από εξωτερικές τάσεις και άλλους παράγοντες. Οι διατάξεις αισθητήρων οι οποίες αναλύονται είναι ο Single Sheet Tester, ο Αισθητήρας Μαγνητικής Διαπερατότητας σχήματος yoke με διέγερση πηνίου, ο Αισθητήρας Μαγνητικής Διαπερατότητας με πυρήνα *Metglas*, ο Αισθητήρας Μόνιμου Μαγνήτη με αισθητήριο Hall και ο Αισθητήρας με Πολλαπλά αισθητήρια Hall.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται η μεθοδολογία κατασκευής και η πειραματική χρήση ενός Συστήματος Συγκομιδής Ενέργειας. Στην συνέχεια, το σύστημα αυτό, χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τους αισθητήρες οι οποίοι έχουν ήδη αναλυθεί για

την κατασκευή αυτόνομων διατάξεων μέτρησης όπως ο Αυτόνομος Αισθητήρας Μαγνητικής Διαπερατότητας και ο Αυτόνομος Αισθητήρας Μόνιμου Μαγνήτη με αισθητήριο Hall.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διατριβής αυτής ενώ αναλύονται κάποια θέματα τα οποία προκύπτουν ως μελλοντική εργασία για περαιτέρω έρευνα στον τομέα των μαγνητικών αισθητήρων και των εφαρμογών τους. Τέτοια θέματα είναι η διάταξη Αισθητήρα με ολοκληρωμένο κύκλωμα πολλαπλών Hall και η Γεννήτρια Συγκομιδής Ενέργειας Τριών Διαστάσεων.

***Λέξεις Κλειδιά:** μαγνητικά κυκλώματα, μαγνητικοί αισθητήρες, Μη Καταστροφικός Έλεγχος, έλεγχος υγείας χαλύβων, συγκομιδή ενέργειας, αυτόνομες διατάξεις.*

Abstract

This Doctoral Thesis examines the following subjects:

1. The development and operation of the Single Sheet Tester device, which is a laboratory reference device for determining the magnetic parameters and the magnetization loop in soft magnetic materials. In this arrangement, samples of given dimensions can be characterized. The device, in addition to the measurement of magnetic characteristics, serves to develop magnetic transfer standards for the calibration of other devices for measuring similar characteristics.

2. The development of an electromagnetic device (electromagnetic yoke) to determine the dependence of the magnetic permeability on the magnetic field in industrial field applications. Its calibration depends on the transfer pattern characterized in the Single Sheet Tester.

3. The development of a yoke arrangement with a permanent magnet and soft magnetic ends, polarizing with a specific field in the measurement area and using a Hall sensor for the measurement. The device can be used in cases where low consumption is required and therefore the electromagnetic yoke cannot be used, due to energy consumption. In this logic, a device was developed to measure magnetic parameters radially at each measurement point, thus also giving anisotropy measurements. Furthermore, an energy harvesting device (magnetic harvester) was developed with an efficiency of the order of mW.

These three provisions form the basis for the development of ISO 17025 & ISO 17020 of the electronic sensor laboratory for the measurement of the distribution of

magnetic permeability and consequently the measurement of the distribution of residual stresses in steels.

More in detail, in the theoretical part (Chapter 1) a Bibliographic Review is made with the aim of studying the theoretical background on which the study of magnetic circuits is based, but also the overview of contemporary problems and methods in which this analysis is useful. In addition, there is a presentation of magnetic sensors, their usefulness and operation, as well as a reference to Non-Destructive Testing and the use of sensors as part of an Automatic Control System. Furthermore, the Basic Principles of Magnetic Circuit Design are presented. This includes the analysis of a simple magnetic circuit, the presentation of analogies with electric circuits and some elements of methodology which are necessary to understand the experimental part.

For the experimental part, the sensor arrangements that were studied, manufactured and used to measure the Magnetic Permeability of steel samples in order to assess the alteration of their mechanical properties and their strain from external stresses and other factors, are presented. The sensor arrangements analyzed are the Single Sheet Tester, the yoke-shaped Magnetic Permeability Sensor with coil excitation, the Magnetic Permeability Sensor with *Metglas* core, the Permanent Magnet Sensor with Hall sensing element and the Permanent Magnet with Multiple Hall sensing element. Next, the construction, methodology and experimental use of an Energy Harvesting System are analyzed. Subsequently, this system is used in conjunction with sensors that have already been analyzed for the construction of autonomous measuring devices such as the Autonomous Magnetic Permeability Sensor and the Autonomous Permanent Magnet Sensor with a Hall sensing element.

Finally, the conclusions of this thesis are presented while analyzing some issues that arise as future work for further research in the field of magnetic sensors and their applications. Such topics are the Multiple Hall Integrated Circuit Sensor and the Three-Dimensional Energy Harvesting Generator.

Keywords: *magnetic circuits, magnetic sensors, Non-Destructive Testing, energy harvesting, autonomous devices.*

Ευχαριστίες

Για την συμβολή τους στην εκπόνηση της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής, χωρίς την βοήθεια των οποίων δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωσή της, θα ήθελα να ευχαριστήσω:

- τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την εμπιστοσύνη την οποία μου έδειξε και την παρότρυνση του να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και την καθοδήγησή και την βοήθειά του όλα αυτά τα χρόνια·
- την Καθηγήτρια κ. Αφροδίτη Κτενά για την συμβολή και την ανεκτίμητη βοήθειά της κατά την συγγραφή και την διόρθωσή της Διατριβής·
- τα μέλη της συμβουλευτικής και εξεταστικής επιτροπής για τις συμβουλές και υποδείξεις τους·
- τον αείμνηστο Παναγιώτη Τσαραμπάρη για την συμβολή του, ως επιβλέπων Καθηγητής, στα πρώτα χρόνια της Διατριβής·
- τον Δρ. Σπύρο Αγγελόπουλο και τους συναδέλφους Υποψηφίους Διδάκτορες της ομάδας του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων του Ε.Μ.Π. για την άριστη συνεργασία τους· τους Δημήτρη Παπαγγελή και Μενέλαο Παπαϊωάννου για την συμβολή τους στην διεξαγωγή των μετρήσεων·
- τους συνοδοιπόρους στις μη-επιστημονικές μου ενασχολήσεις Χρήστο Αναγνωστόπουλο, Χαράλαμπο Αμοργίνο, Αλέξη Μετσίογλου και Andrew Gorny· την οικογένεια Νούλα, Άρη, Κατερίνα και Άγη· τους Τάσσο Μαυρίδη, Νίκο Μπερέτα, Μιχαήλ Άγγελο Σκαρδάση, Δημήτρη Νομικό και Αλέξανδρο Σαμαρά· τους Μιχάλη Χατζηιωάννου και Νίκο Παντζαρτζίδη· τους Παναγιώτη και Κυριακή Μουζάκη-Πίκουλη· την οικογένεια Δούρου, Γιάννη, Αθηνά, Έλενα και Πάνο· την οικογένεια Πεντεφούντη, Τάκη, Αθηνά και Ιόλη, για την κατανόηση και την στήριξη τους·
- τους κ.κ. Καθηγητές Δήμο Δημαρόγκωνα, Ιάσωνα Κόκκινο και Πολύβιο Πρατικάκη για την ηθική τους υποστήριξη. Είναι τιμή μου να μπορώ να τους αποκαλώ φίλους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, Μαρίνα και Τόμας, τα αδέρφια μου Δημήτρη, Κωστή και Αιμιλία, και τους συντρόφους τους, καθώς και τους γονείς μου Γεώργιο και Βασιλική για την υπομονή, την συμπαράσταση, την στήριξη και, κυρίως, την αγάπη τους.

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1. Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου.	4
Σχήμα 2. Καμπύλη Μαγνήτισης του Καθαρού Σιδήρου.....	7
Σχήμα 3. Βρόχος Υστέρησης.	7
Σχήμα 4. Βρόχος υστέρησης για α) μαλακό μαγνητικό υλικό και β) σκληρό μαγνητικό υλικό.....	9
Σχήμα 5. Σχηματική αναπαράσταση διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας..	10
Σχήμα 6. Απλοποιημένο μαγνητικό κύκλωμα.	11
Σχήμα 7. Μαγνητικό κύκλωμα με διάκενο.....	12
Σχήμα 8. Σχηματική αναπαράσταση μαγνητικών ταινιών.	22
Σχήμα 9. Σύστημα Προσαρμοστικού Ελέγχου με χρήση Μοντέλου Αναφοράς [167]......	47
Σχήμα 10. Ηλεκτρικό κύκλωμα (αριστερά) και μαγνητικό κύκλωμα (δεξιά).	49
Σχήμα 11. Μαγνητικό Κύκλωμα με μόνιμο μαγνήτη.	50
Σχήμα 12. Ηλεκτρικό κύκλωμα ανάλογο μαγνητικού κυκλώματος.....	51
Σχήμα 13. Ανάλογο ηλεκτρικό κύκλωμα μαγνητικού κυκλώματος με απώλειες.	51
Σχήμα 14. Ηλεκτρικό και αντίστοιχο μαγνητικό κύκλωμα.....	53
Σχήμα 15. Μαγνητική Αντίσταση με διάκενο αέρος (air gap).....	54
Σχήμα 16. Ιδανικός Μετασχηματιστής.....	57
Σχήμα 17. Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μετασχηματιστή.	57
Σχήμα 18. Δινορεύματα στο εσωτερικό πυρήνα πηνίου.	58
Σχήμα 19. Ισοδύναμο κύκλωμα μη ιδανικού μετασχηματιστή. Στο πλαίσιο βρίσκεται το μέρος του μετασχηματιστή το οποίο θεωρούμε ιδανικό.....	60
Σχήμα 20. Διάταξη Βασικής Αρχής Λειτουργίας Single Sheet Tester (πρόσοψη).	62
Σχήμα 21. Πρωτεύον και δευτερεύον πηνίο Single Sheet Tester.	62
Σχήμα 22. Σχισμή εισόδου δοκιμίου (πλάγια όψη).	63
Σχήμα 23. Μαγνητικό κύκλωμα (αριστερά) και ανάλογο ηλεκτρικό (δεξιά).....	63
Σχήμα 24. Εργαστηριακά δοκίμια χάλυβα.	64

Σχήμα 25. Επίπεδες επιφάνειες.	65
Σχήμα 26. Πλευρές των μπομπινών.	65
Σχήμα 27. Βάση του SST συναρμολογημένη.	65
Σχήμα 28. Τελική διάταξη Single Sheet Tester.	66
Σχήμα 29. SST κατά την συσκευασία του.	66
Σχήμα 30. Είσοδος δοκιμίου.	67
Σχήμα 31. Τροφοδοσία πρωτεύοντος πηνίου (αριστερά) και έξοδος σήματος (δεξιά).	67
Σχήμα 32. Ολοκληρωμένο διάγραμμα συστήματος Single Sheet Tester.	68
Σχήμα 33. Είσοδος – έξοδος SST.	68
Σχήμα 34. Μονάδα ελέγχου/ανάγνωσης σήματος.	69
Σχήμα 35. Επιμέρους μέρη που απαρτίζουν την μονάδα ελέγχου. Φαίνονται: a) Οθόνη – αισθητήρας IR, b) κυρίως κύκλωμα και c) υποδοχή εξωτερικής τροφοδοσίας.	70
Σχήμα 36. Πρωτότυπο κύκλωμα ελέγχου Single Sheet Tester. Φαίνονται: a) Υποδοχή σύνδεσης οθόνης – αισθητήρα IR, b) Teensy 3.5, c) κύκλωμα preamp, d) σταθεροποίηση τάσης εξωτερικής τροφοδοσίας και e) κύκλωμα active rectifier και peak detector.	71
Σχήμα 37. Ένδειξη οθόνης Single Sheet Tester σε λειτουργία.	71
Σχήμα 38. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, σειρά δοκιμών RX, συχνότητα 0.1 Hz, μέση του δοκιμίου [172].	74
Σχήμα 39. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, σειρά δοκιμών RX, συχνότητα 0.1 Hz, άκρη του δοκιμίου [172].	74
Σχήμα 40. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, σειρά δοκιμών RX, συχνότητα 1 Hz, μέση του δοκιμίου [172].	75
Σχήμα 41. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, σειρά δοκιμών RX, συχνότητα 1 Hz, άκρη του δοκιμίου [172].	75
Σχήμα 42. Κλίση (slope a) του διαγράμματος τάσης εισόδου – τάσης εξόδου σε σχέση με το συσσωμάτωμα του υλικού (grain) στην άκρη (μπλε) και στη μέση (πορτοκαλί) [172].	76
Σχήμα 43. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, δοκίμιο RX1, άκρη του δοκιμίου [172].	76

Σχήμα 44. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, δοκίμιο RX1, μέση του δοκιμίου [172].	77
Σχήμα 45. Αισθητήρας μαγνητικής διαπερατότητας.	78
Σχήμα 46. Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα Αισθητήρα Μαγνητικής Διαπερατότητας.	78
Σχήμα 47. Μηχανολογικό σχέδιο αισθητήρα (αριστερά-διαστάσεις σε mm), αισθητήρας μαγνητικής διαπερατότητας (δεξιά).	79
Σχήμα 48. Ισοδύναμο κύκλωμα πηνίου.	79
Σχήμα 49. Κύκλωμα μέτρησης με ολοκληρωτή.	81
Σχήμα 50. Υλοποίηση κυκλώματος σε breadboard.	81
Σχήμα 51. Θέση διακρίβωσης.	82
Σχήμα 52. Απεικόνιση Y-T. Αισθητήρας I ως είσοδος, Αισθητήρας II ως έξοδος.	83
Σχήμα 53. Απεικόνιση X-Y. Αισθητήρας I ως είσοδος, Αισθητήρας II ως έξοδος.	83
Σχήμα 54. Απεικόνιση Y-T. Πηνίο Α Αισθητήρα I ως είσοδος, πηνίο Β Αισθητήρα II ως έξοδος.	84
Σχήμα 55. Απεικόνιση X-Y. Πηνίο Α Αισθητήρα I ως είσοδος, πηνίο Β Αισθητήρα II ως έξοδος (Βρόχος Υστέρησης).	84
Σχήμα 56. Απεικόνιση Y-T. Πηνίο Α Αισθητήρα II ως είσοδος, πηνίο Β Αισθητήρα I ως έξοδος.	84
Σχήμα 57. Απεικόνιση X-Y. Πηνίο Α Αισθητήρα II ως είσοδος, πηνίο Β Αισθητήρα I ως έξοδος (Βρόχος Υστέρησης).	85
Σχήμα 58. Βρόχοι Υστέρησης Δείγματος Α.	85
Σχήμα 59. Βρόχοι Υστέρησης Δείγματος Β.	86
Σχήμα 60. Βρόχοι Υστέρησης Δείγματος Γ.	86
Σχήμα 61. Δείγματα χάλυβα Α, Β και Γ.	87
Σχήμα 62. Χάλκινη ράβδος.	87
Σχήμα 63. Διάταξη μέτρησης τάσεων (πρόσοψη).	88
Σχήμα 64. Διάταξη μέτρησης τάσεων (κάτοψη).	88
Σχήμα 65. Διάγραμμα Μετρήσεων Δείγματος Α.	89
Σχήμα 66. Διαγράμματα Μετρήσεων Τάσης (σε V, άξονας γ) προς Δύναμη (σε N, άξονας χ) Δειγμάτων Β (αριστερά) και Γ (δεξιά).	90
Σχήμα 67. Πυρήνες από Metglas διαφόρων μεγεθών [175].	91

Σχήμα 68. Μηχανολογικό σχέδιο πυρήνα Metglas [175].	91
Σχήμα 69. Μηχανολογικό σχέδιο μπομπίνας. (όλες οι διαστάσεις σε mm). [Created with FreeCAD 0.19 software].	92
Σχήμα 70. Τελική μπομπίνα [Created with FreeCAD 0.19 software].	92
Σχήμα 71. Εικόνα 3D Slicer. [created with Creality Slicer 4.8 software].	92
Σχήμα 72. Μηχανολογικό σχέδιο αισθητήρα.	93
Σχήμα 73. Τελικός αισθητήρας.	93
Σχήμα 74. Γενική άποψη αισθητήρα.	94
Σχήμα 75. Έξοδος του αισθητήρα για το άψογο (αριστερά) και το φθαρμένο μέρος (δεξιά) του δείγματος.	94
Σχήμα 76. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, δοκίμιο RX1, μέση του δοκιμίου [176].	95
Σχήμα 77. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, δοκίμιο RX1, μέση του δοκιμίου [176].	95
Σχήμα 78. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, δοκίμιο TS1, μέση του δοκιμίου [176].	96
Σχήμα 79. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, δοκίμιο TS1, μέση του δοκιμίου [176].	96
Σχήμα 80. Διάταξη αισθητήριου με μόνιμο μαγνήτη, φερρομαγνητικούς πόλους και δυο αισθητήρες Hall [178].	97
Σχήμα 81. Πλακέτα ηλεκτρονικών με μικροελεγκτή και εξωτερικό ADC [178].	97
Σχήμα 82. Ολοκληρωμένη διάταξη [178].	98
Σχήμα 83. Τελική μορφή του αισθητήρα μόνιμου μαγνήτη συνδεδεμένου με υπολογιστή μέσω USB [178].	98
Σχήμα 84. Το δοκίμιο πριν (αριστερά) και μετά την προσθήκη της ατέλειας στο κέντρο (δεξιά) [183].	99
Σχήμα 85. Πειραματική διάταξη [183].	99
Σχήμα 86. Ανισοτροπική συμπεριφορά του δείγματος. Η μπλε γραμμή και η πορτοκαλί γραμμές υποδηλώνουν αντίστοιχα την μέτρηση πριν και μετά την προσθήκη της ατέλειας: (a) Πολικό διάγραμμα, (b) καρτεσιανό διάγραμμα [183].	100
Σχήμα 87. Πειραματική διάταξη με μετατόπιση 5 mm. Η προηγούμενη θέση φαίνεται με μπλε περίγραμμα [183].	101

Σχήμα 88. Ανισοτροπική συμπεριφορά πριν την ατέλεια. Μέτρηση πάνω στο σημείο (πορτοκαλί) και μέτρηση με 5 mm offset (μπλε): (a) Πολικό διάγραμμα, (b) καρτεσιανό διάγραμμα [183].	101
Σχήμα 89. Ανισοτροπική συμπεριφορά μετά την ατέλεια. Μέτρηση πάνω στο σημείο (πορτοκαλί) και μέτρηση με 5 mm offset (μπλε): (a) Πολικό διάγραμμα, (b) καρτεσιανό διάγραμμα [183].	102
Σχήμα 90. Διάταξη αισθητηρίου στοιχείου τριπλού Hall.	103
Σχήμα 91. Γεωμετρία Αισθητήρα Τριπλού Hall.	103
Σχήμα 92. Μαγνητική διαδρομή.	104
Σχήμα 93. Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του Αισθητήρα Τριπλού Hall.	105
Σχήμα 94. Προσομοίωση Αισθητήρα Τριπλού Hall.	106
Σχήμα 95. Μαγνητικό πεδίο υπό-εξέταση υλικού (γενική όψη - created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).	106
Σχήμα 96. Μαγνητικό πεδίο υπό-εξέταση υλικού (κάτοψη όψη - created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).	107
Σχήμα 97. Μαγνητικό πεδίο υπό-εξέταση υλικού με ατέλεια (κάτοψη - created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).	107
Σχήμα 98. Τρίποδο μαγνητικού κυκλώματος.	108
Σχήμα 99. Αισθητήριο στοιχείο τριπλού Hall.	109
Σχήμα 100. Τελικό μαγνητικό μέρος του αισθητήρα.	109
Σχήμα 101. Αισθητήρας συνδεδεμένος με τα ηλεκτρονικά του μέρη.	110
Σχήμα 102. Υπό-εξέταση δοκίμιο πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την προσθήκη της φθοράς (τονισμένη με μπλε).	110
Σχήμα 103. Πειραματική διάταξη. Τα πόδια του αισθητήρα βρίσκονται στις -120° (αριστερά), 0° (κέντρο) και 120° (δεξιά).	111
Σχήμα 104. Μέτρηση του πεδίου των τριών PM σε σειρά.	111
Σχήμα 105. Μετρήσεις Αισθητήρα Πολλαπλών Hall.	112
Σχήμα 106. Προσαρμοσμένες μετρήσεις Αισθητήρα Πολλαπλών Hall.	112
Σχήμα 107. Προσαρμοσμένες μετρήσεις Αισθητήρα Πολλαπλών Hall μετά την προσθήκη της ατέλειας.	113
Σχήμα 108. Μηχανικό σύστημα αδρανειακής μάζας μέσα σε κέλυφος.	117
Σχήμα 109. Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας.	118

Σχήμα 110. Ηλεκτρικό κύκλωμα ισοδύναμο του Microgenerator.....	120
Σχήμα 111. Ισοδύναμο κύκλωμα κατά τον συντονισμό.....	120
Σχήμα 112. 3D μοντέλο (αριστερά) και τελική μορφή μικρογεννήτριας (δεξιά) [191]......	122
Σχήμα 113. Σύστημα τριών γεννητριών [190]......	123
Σχήμα 114. Γεννήτρια ταλαντώσεων.....	123
Σχήμα 115. Έξοδος συστήματος τριών γεννητριών στα 5 Hz [190].	124
Σχήμα 116. Έξοδος συστήματος τριών γεννητριών στα 10 Hz [190].	124
Σχήμα 117. Έξοδος συστήματος τριών γεννητριών στα 15 Hz [190].	124
Σχήμα 118. Έξοδος συστήματος τριών γεννητριών στα 20 Hz [190].	125
Σχήμα 119. Πρότυπο κύκλωμα διαχείρισης, αποθήκευσης και απόδοσης ηλεκτρικής ισχύος [190].	126
Σχήμα 120. Ολοκληρωμένο Σύστημα Αυτόνομου Αισθητήρα Μαγνητικής Διαπερατότητας [191].	127
Σχήμα 121. Κύκλος λειτουργίας Αυτόνομου Αισθητήρα Μαγνητικής Διαπερατότητας.....	128
Σχήμα 122. Ολοκληρωμένο Σύστημα Αυτόνομου Αισθητήρα Hall Μελέτης Ανισοτροπίας [183]......	129
Σχήμα 123. Τοπολογία αισθητήρα με εννέα Hall SS49E (created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).	132
Σχήμα 124. Προσομοίωση μαγνητικού πεδίου αισθητήρα με εννέα Hall SS49E (created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).....	133
Σχήμα 125. Μαγνητικό κύκλωμα αισθητήρα με εννέα Hall SS49E.....	134
Σχήμα 126. Κυλινδρικός αισθητήρας ολοκληρωμένου πολλαπλών Hall.....	135
Σχήμα 127. Σχέδιο γεννήτριας συγκομιδής ενέργειας τριών διαστάσεων: α) πλάγια όψη, β) πρόσοψη.	136
Σχήμα 129. Κύκλωμα προενίσχυσης.	159
Σχήμα 130. Κύκλωμα Full Wave Active Rectifier.....	160
Σχήμα 131. Κύκλωμα εύρεσης κορυφής.	160

Extended Abstract Figure Index

Figure 1. Hysteresis Loop	169
Figure 2. Basic electric (left) and magnetic (right) circuits.	170
Figure 3. Air gap as magnetic resistance.	171
Figure 4. Basic principle of Single Sheet Tester.	172
Figure 5. SST with specimen in slot.....	173
Figure 6. Magnetic circuit of Single Sheet Sensor.	173
Figure 7. Overview of Single Sheet Tester system.....	174
Figure 8. SST input (yellow) and output (green) signals.	175
Figure 9. Electrical steel laboratory specimens.	175
Figure 10. Input-output for RX series specimens [172]......	176
Figure 11. Magnetic permeability sensor.	176
Figure 12. a) Mechanical schematic diagram (dimensions in mm) and b) actual image of the magnetic permeability sensor.	177
Figure 13. Calibration position.....	177
Figure 14. Measurements' circuit.....	178
Figure 15. Hysteresis Loops formed using the two sensors.	179
Figure 16. Stress measurements set-up.	179
Figure 17. Stress measurements diagram for the two sensors.....	179
Figure 18. Metglas cores of various sizes [175]......	180
Figure 19. General view of sensor.	180
Figure 20. Sensor input (yellow) and output (green) for flawless (left) and flawed (right) part of the specimen.....	181
Figure 21. PM sensing element with two Hall sensors [178].	182
Figure 22. Completed sensor and electronics system [178].	182
Figure 23. The final device in its 3D-printed packaging, connected to a laptop via a USB cable [178].	183
Figure 24. Image of specimen: (a) Being flawless; (b) With a flaw at its center [183].	183
Figure 25. Experimental configuration [183]......	184

Figure 26. Anisotropic behavior of specimen; blue line indicates before and orange after the flaw was added: (a) Polar diagram; (b) Linear diagram [183].....	185
Figure 27. Experimental configuration offset by 5 mm; previous position marked by blue outline [183].....	185
Figure 28. Anisotropic behavior of specimen before the flaw; orange line indicates measurement on point and blue with a 5 mm offset: (a) Polar diagram; (b) Linear diagram [183].....	186
Figure 29. Anisotropic behavior of specimen after the flaw was added; orange line indicates measurement on point and blue with a 5 mm offset: (a) Polar diagram; (b) Linear diagram [183].....	186
Figure 30. Three Hall sensor arrangement (dimension in mm).....	187
Figure 31. Proposed geometry of sensor.....	188
Figure 32. Sensor magnetic circuit.....	188
Figure 33. Sensor simulation (created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).	189
Figure 34. Sensor simulation without (left) and with (right) defect. Defect shown in parallel diagonal lines (created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).....	189
Figure 35. Sensor tripod without (left) and with (center) bolt. Sensing element (right).	190
Figure 36. Sensor with electronics.....	190
Figure 37. Experimental configuration. Sensor's legs are at -120° (left), 0° (center) and 120° (right).....	191
Figure 38. Experimental measurements for flawless SU-T (above) and with added defect (below), (S_1 -blue, S_2 -orange, S_3 -gray).....	192
Figure 39. 3D model (left) and constructed microgenerator (right) [191].....	193
Figure 40. Three microgenerator system [190].....	193
Figure 41. Energy management system prototype.	194
Figure 42. Autonomous Magnetic Permeability Sensor system overview [191].	195
Figure 43. Autonomous Steel Health Monitoring System Based on Hall Effect Measurements system overview.....	196

Figure 44. Suggested topology of Multiple Hall Sensor with 9 Hall sensors (created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).	198
Figure 45. Simulation of magnetic field pattern of steel under test (created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).	199
Figure 46. Multiple Hall sensor magnetic circuit.	199
Figure 47. Cylinder-shaped Multiple Hall effect sensor. Bottom view (left) and side view of the AA' section (right).	200
Figure 48. 3D design of future work configuration for a 3-dimensional harvester: (a) side view; (b) front view.	201

Ευρετήριο ακρωνυμίων

ALD

Atomic Layer Deposition, 18

AMFA

Adaptive Magnetic Field Adder, 41

ASIC

Application Specific Integrated Circuits, 18

AVF

Azimuthally Varying Field, 35

BESS

Battery Energy Storage System, 41

BHN

Barkhausen Noise, 23

CHB

Cascaded H-Bridge, 40

CI

Coupled Inductor, 40

CNN

Convolutional Neural Network, 29

COTS

Commercial Off-The-Shelf, 43

CS

Central Solenoid, 34

CVD

Chemical Vapor Deposition, 18

DAB

Dual-Active-Bridge, 39, 41

DPS

Dual-Phaseshift, 41

DSAC-SLSM

Double-Sided Air-Cored Superconducting Linear Synchronous Motors, 27

DT

Digital Transformation, 47

ECT

Eddy Current Testing, 45

EES

Switching Energy Extraction, 45

EMI

External Magnetic Interference, 45

EV

Electric Vehicles, 31

FEM

Finite Elements Method, 27

FESS

Flywheel Energy Storage System, 29, 31

FIPMSM

Flux-Intensifying Permanent Magnet Synchronous Motor, 28

fMRI

Functional Magnetic Resonance Imaging, 37

FTS

Fast Tool Servo, 31

GAFMT

General Airgap Field Modulation Theory, 30

GMI

Gigantic Magnetic Impedance, 17

GMR

Giant Magnetoresistance, 17

HDD

Hard Disk Drive, 37

HFIMI

High-Frequency Isolated Matrix Inverter, 39

HIM

Homopolar Inductor Machine, 29

HL-LHC AUP

High-Luminosity Large Hadron Collider Accelerator Upgrade Project, 43

HMC

Magnetic Couplers with Hybrid Coils, 42

HMC-VFMM

Hybrid-Magnetic-Circuit Variable Flux Hybrid Magnet Memory Machine, 28

HPF

High Pass Filter, 36

HPM

Hybrid Permanent Magnet, 28

HTS

High-Temperature Superconducting Magnets, 31

IIoT

Industrial Internet of Things, 47

IM

Induction Motor, 35

IoT

Internet of Things, 46

IPM

Internal Permanent Magnet, 28

IPT

Inductive Power Transfer, 31

LCF

Low Coercive Field, 30

LHC

Large Hadron Collider, 43

LSRM

Linear Switched Reluctance Motors, 31

LVDT

Linear Variable Differential Transformer, 15

MAD

Magnetic Anomaly Detection, 25

Mag-Lev ή maglev

Magnetic Levitation, 44

MAMR
 Microwave Assisted Magnetic Recording, 37

MARS
 Models of Advanced Recording Systems, 37

MAS
 Microwave Assisted Switching, 37

MDL
 Magnetostrictive Delay Line, 22

MDMA
 Multidimensional Discrete Magnetostrictive Actuator, 29

MEC
 Magnetic Equivalent Circuit, 27

MEMS
 Micro-Electromechanical Systems, 114

MFCIs
 Magnetic Flux Controlled Inductors, 42

MICC
 Modified Interleaved Capacitor Clamped, 39

MLHRM
 Modular split-tooth Linear Hybrid Reluctance Motor, 31

MMM
 Magnetic Memory Method, 24

MRAC
 Model-Reference Adaptive Control, 47

MS
 Magnetization State, 31

Mx
 Μαγνητοσυστολικοί Αισθητήρες, 15

NDE
 Nondestructive Evaluation, 26

NDI
 Nondestructive Inspection, 26

NDT
 Nondestructive Testing, 26

NMR
 Nuclear Magnetic Resonance, 44

NO
 Non Oriented, 45

NRSS
 Non-Resonant Soft-Switching, 39

PF
 Poloidal Field, 34

PMaSynR SG
 Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Starter Generator, 29

PMSMs
 Permanent Magnet Synchronous Machines, 29

PVD
 Physical Vapor Deposition, 18

PWM
 Pulse Width Modulation, 30

SBIM
Squirrel-Cage Bearingless Induction Motor, 29

SHMFF
Steady High Magnetic Field Facility, 39

SMES
Superconducting Magnetic Energy Storage, 30

SMR
Shingled Magnetic Recording, 38

SNR
Signal Noise Ratio, 20

SPE-SRM
Stator PM Excitation Solid Rotor Machine, 31

SPION
Super-Paramagnetic Iron Oxides, 18

SPSG
Salient Pole Synchronous Generators, 28

SRC
Series Resonant Converter, 38

SST
Single Sheet Tester, 64

TDMR
Two Dimensional Magnetic Recording, 38

TMR
Tunnelling Magnetoresistance, 46

TPS
Triple Phase-Shift, 41

UHVDC
Ultrahigh-Voltage Direct Current, 39

VCA
Voice Coil Actuator, 43

VF
Variable Frequency, 41

VFMM
Variable Flux Memory Machine, 30, 31

VHGMS
Vertical-ring High Gradient Superconducting Magnetic Separation, 44

VPM
Vernier Permanent Magnet, 30

VRM
Voltage Regulator Module, 39

WCS.
Wireless Charging System, 42

WSN
Wireless Sensor Networks, 114

ZVS
Zero-Voltage Switching, 32

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1. Αναλογίες Μεγεθών μεταξύ Ηλεκτρικών και Μαγνητικών Κυκλωμάτων.	52
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά εργαστηριακών δειγμάτων.	72
Πίνακας 3. Μετρήσεις δειγμάτων σειράς RX σε συχνότητα 0.1 Hz.	73
Πίνακας 4. Μετρήσεις δειγμάτων σειράς RX σε συχνότητα 1 Hz.	73
Πίνακας 5. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πηνίων A και B.	79
Πίνακας 6. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πηνίων A και B του Αισθητήρα II.	80
Πίνακας 7. Αποτελέσματα μετρήσεων.	86
Πίνακας 8. Μετρήσεις Δείγματος Α.	88
Πίνακας 9. Μετρήσεις Δείγματος Β.	89
Πίνακας 10. Μετρήσεις Δείγματος Γ.	89
Πίνακας 11. Διαστάσεις του AMCC-16B (όλες οι διαστάσεις σε mm εκτός από αυτές που υποδεικνύονται) [175].	91
Πίνακας 12. Χαρακτηριστικά πηνίων αισθητήρα.	93
Πίνακας 13. Μετρήσεις Αισθητήρα Πολλαπλών Hall πριν την ατέλεια.	166
Πίνακας 14. Μετρήσεις Αισθητήρα Πολλαπλών Hall μετά την ατέλεια.	167
Πίνακας 15. Μέσοι όροι μετρήσεων πριν την ατέλεια.	167
Πίνακας 16. Μέσοι όροι μετρήσεων μετά την ατέλεια.	167

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος.....	vii
Περίληψη.....	ix
Abstract	xiii
Ευχαριστίες.....	xvii
Ευρετήριο Σχημάτων.....	xix
Extended Abstract Figure Index	xxv
Ευρετήριο Πινάκων	xxxiii
1. Βιβλιογραφική Έρευνα	1
1.1. Γενικά	1
1.1.1. Γενικά περί Ηλεκτρομαγνητισμού.....	1
1.1.2. Φερρομαγνητικά υλικά	5
1.1.3. Μαγνητικά Κυκλώματα	11
1.2. Μαγνητικοί Αισθητήρες.....	12
1.2.1. Γενικά.....	12
1.2.2. Αισθητήρες Μαγνητικής Επαγωγής	14
1.2.3. Αισθητήρες Μαγνητοσυστολής.....	15
1.2.4. Αισθητήρες Μαγνητομεταφοράς.....	16
1.2.5. Υλικά και Προσαρμογή Ιδιοτήτων	18
1.2.6. Σχεδιασμός Αισθητήρων	20
1.2.7. Τάσεις της Τεχνολογίας	24
1.3. Μη καταστροφικός έλεγχος	26
1.4. State-of-the-Art.....	27
1.4.1. Γενικά.....	27
1.4.2. Ηλεκτρικές Μηχανές.....	27
1.4.3. Συστήματα Φόρτισης – Συγκομιδή Ενέργειας	31
1.4.4. Μαθηματικά Μοντέλα - Προσομοιώσεις.....	33

1.4.5.	Μαγνητική Αποθήκευση Δεδομένων.....	36
1.4.6.	Μετασχηματιστές.....	38
1.4.7.	Ασύρματη Μεταφορά Ισχύος.....	41
1.4.8.	Άλλες Εφαρμογές	43
1.4.9.	Αισθητήρες	45
1.5.	Ερευνητικό Κίνητρο	46
1.5.1.	Διαδίκτυο των Αντικειμένων	46
1.5.2.	Αυτόματος Έλεγχος.....	47
2.	Σχεδίαση Μαγνητικών Κυκλωμάτων	49
2.1.	Γενικά	49
2.2.	Αναλογίες με ηλεκτρικά κυκλώματα	50
2.3.	Νόμοι Κυκλωμάτων	52
2.4.	Μαγνητική Αντίσταση.....	54
2.5.	Μη Ιδανικοί Μετασχηματιστές – Απώλειες Μαγνήτισης	55
2.5.1.	Αυτεπαγωγή Πηνίου.....	55
2.5.2.	Μετασχηματιστές.....	56
3.	Συστήματα Μέτρησης Διαπερατότητας	61
3.1.	Γενικά περί Μαγνητικής Διαπερατότητας.....	61
3.2.	Single Sheet Tester.....	62
3.2.1.	Περιγραφή.....	62
3.2.2.	Κατασκευή.....	64
3.2.3.	Πειραματική Διάταξη - Αποτελέσματα	67
3.3.	Υoke με πηνίο διέγερσης	77
3.3.1.	Αισθητήρας Μαγνητικής Διαπερατότητας με Πυρήνα Υoke	77
3.3.2.	Αισθητήρας Μαγνητικής Διαπερατότητας με Πυρήνα <i>Metglas</i>	90
3.4.	Υoke με Μόνιμο Μαγνήτη	97
3.4.1.	Συσκευή Παρακολούθησης Υγείας Χαλύβων με Αισθητήρα Hall	97
3.4.2.	Συσκευή Παρακολούθησης Υγείας Χαλύβων με Πολλαπλούς Αισθητήρες Hall	102
4.	Συγκομιδή Ενέργειας – Εφαρμογές Αυτόνομων Αισθητήρων ..	115

4.1.	Γενικά	115
4.2.	Σύστημα Συγκομιδής Ενέργειας	116
4.2.1.	Μεθοδολογία Σχεδίασης.....	116
4.2.2.	Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά	122
4.3.	Αυτόνομος Αισθητήρας Μαγνητικής Διαπερατότητας.....	126
4.4.	Αυτόνομος Αισθητήρας Hall	128
5.	Συμπεράσματα – Μελλοντική Εργασία.....	131
5.1.	Γενικά	131
5.2.	Βελτιωμένος Αισθητήρας Πολλαπλών Hall	132
5.2.1.	Περιγραφή.....	132
5.3.	Γεννήτρια Συγκομιδής Ενέργειας 3D	135
5.3.1.	Γενικά.....	135
	Βιβλιογραφία	137
	Παράρτημα	159
1.1.	Κυκλώματα.....	159
1.1.1.	Κύκλωμα Preamp	159
1.1.2.	Active rectifier	159
1.1.3.	Κύκλωμα Peak detector	160
1.2.	<i>Arduino IDE sketch code</i>	161
1.2.1.	<i>Single Sheet Tester</i>	161
1.3.	<i>Μετρήσεις Αισθητήρα Πολλαπλών Hall</i>	166
	Extended Abstract.....	169
1.1.	Introduction	169
1.1.1.	Basic Concepts	169
1.2.	Magnetic Circuits	170
1.2.1.	Introduction.....	170
1.2.2.	State-Of-The-Art	171
1.3.	Magnetic Permeability Sensor with Coil Excitation.....	172
1.3.1.	Single Sheet Tester	172
1.3.2.	Yoke Sensor	176
1.3.3.	Yoke Sensor with <i>Metglas</i> core	180

1.4.	Magnetic Permeability Sensor with Permanent Magnet	181
1.4.1.	Permanent Magnet with Hall Sensor	181
1.4.2.	Permanent Magnets with Multiple Hall Sensors.....	187
1.5.	Energy Harvesting	193
1.5.1.	Single Dimension Energy Harvester.....	193
1.6.	Autonomous Applications.....	194
1.6.1.	Autonomous Magnetic Permeability Sensor.....	194
1.6.2.	Autonomous Steel Health Monitoring System Based on Hall Effect Measurements	196
1.7.	Conclusions – Future Work.....	197
1.7.1.	General Conclusions	197
1.7.2.	Proposed Multiple Hall Sensors Sensing Element.....	198
1.7.3.	Proposed Three-dimensional harvester	200
	Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Περιοδικά	203
	Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Συνέδρια	205

1.

Βιβλιογραφική Έρευνα

1.1. Γενικά

1.1.1. Γενικά περί Ηλεκτρομαγνητισμού

1.1.1.1. Βασικές Έννοιες

Κατά την ανάλυση των μαγνητικών φαινομένων, είναι χρήσιμο να οριστούν κάποιες βασικές έννοιες οι οποίες χρησιμοποιούνται [1]. Ως μαγνητικό πεδίο, ορίζουμε τον χώρο μέσα στον οποίο όταν βρεθεί μια μαγνητική ποσότητα ασκείται σε αυτήν μια δύναμη. Αποδεικνύεται, τελικά, ότι οι μαγνητικές αυτές ποσότητες είναι κινούμενα φορτία είτε μόνα τους είτε πολλά μαζί μέσα σε αγωγό σε μορφή ηλεκτρικού ρεύματος. Η πυκνότητα της μαγνητικής ροής του πεδίου ή μαγνητική επαγωγή συμβολίζεται με \mathbf{B} και είναι διανυσματικό μέγεθος που σχετίζεται με κάθε σημείο του χώρου. Στην γενικότερη περίπτωση όπου ένα φορτίο q , κινούμενο με ταχύτητα \mathbf{v} , δέχεται ταυτόχρονα και την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E} , τότε δρα πάνω του η δύναμη Lorentz [Hendrik Antoon Lorentz (1853 – 1928)], η οποία φαίνεται στη Σχέση (1.1).

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E} + q \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1.1)$$

Εκτός από την μαγνητική επαγωγή \mathbf{B} , το μαγνητικό πεδίο περιγράφεται από ένα ακόμη μέγεθος το οποίο ονομάζεται ένταση μαγνητικού πεδίου και συμβολίζεται με \mathbf{H} και ορίζεται από την σχέση (1.2).

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{M} \quad (1.2)$$

Στον κλασικό ηλεκτρομαγνητισμό το μέγεθος \mathbf{M} ονομάζεται διάνυσμα μαγνήτισης και εκφράζει την πυκνότητα στοιχειωδών μαγνητικών δίπολων σε ένα μαγνητικό υλικό, ενώ μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, η οποία είναι παγκόσμια σταθερά [2] με $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί και στη μορφή της Σχέσης (1.3):

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (1.3)$$

Τα μεγέθη \mathbf{M} και \mathbf{B} μπορούν να εκφραστούν ως συναρτήσεις του \mathbf{H} . Για οποιοδήποτε σύστημα ή υλικό θα υπάρχει μια ποσότητα μ , την οποία ονομάζουμε μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, για την οποία θα ισχύει η Σχέση (1.4).

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad (1.4)$$

Κατά τον ίδιο τρόπο ορίζουμε την μαγνητική επιδεκτικότητα χ , ενός υλικού για την οποία θα ισχύει η Σχέση (1.5).

$$\mathbf{M} = \chi \cdot \mathbf{H} \quad (1.5)$$

Επειδή το χ είναι μέτρο της ευαισθησίας ενός υλικού στα μαγνητικά πεδία χρησιμοποιείται σαν κριτήριο για την κατηγοριοποίηση των μαγνητικών υλικών και είναι καθαρός αριθμός. Τα παραπάνω μεγέθη συνδέονται από την Σχέση (1.6).

$$\mu = \mu_0 \cdot (\chi + 1) \quad (1.6)$$

Τα μεγέθη μ και χ δεν είναι ούτε σταθερά ούτε απαραίτητα γραμμικές συναρτήσεις του πεδίου \mathbf{H} .

Στην περίπτωση ρευματοφόρου αγωγού, ο οποίος διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα I και περικλείεται από κλειστό βρόχο με διαφορικό τμήμα $d\mathbf{l}$, για το μαγνητικό πεδίο \mathbf{H} γύρω του ισχύει ο Νόμος του Ampère [André-Marie Ampère (1775 – 1836)] ο οποίος δίνεται στην Σχέση (1.7).

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (1.7)$$

Για πλήθος N ρευματοφόρων αγωγών ο Νόμος του Ampère διαμορφώνεται στη μορφή της Σχέσης (1.8).

$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{I} = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \quad (1.8)$$

Στην περίπτωση κατά την οποία χρειάζεται να υπολογιστεί η ένταση μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} το οποίο προκαλείται από ρευματοφόρο αγωγό ρεύματος \mathbf{I} , αυτή δίνεται ολοκληρώνοντας την Σχέση (1.9) η οποία αποκαλείται και Νόμος Biot - Savart [Jean-Baptiste Biot (1774 –1862); Félix Savart (1791 – 1841)].

$$d\mathbf{H} = \frac{\mu_0}{4\pi r^2} \cdot \mathbf{I} \cdot d\mathbf{l} \times \mathbf{r} \quad (1.9)$$

Σε αυτήν την σχέση $d\mathbf{l}$ είναι ένα στοιχειώδες τμήμα του αγωγού το οποίο προκαλεί το πεδίο σε σημείο του χώρου το οποίο βρίσκεται σε απόσταση r , ενώ \mathbf{r} είναι το διάνυσμα με αρχή το $d\mathbf{l}$ και πέρας το σημείο αυτό.

1.1.1.2. Εξισώσεις Maxwell

Με τον όρο εξισώσεις Maxwell [James Clerk Maxwell (1831 –1879)] περιγράφεται το σύνολο των μερικών διαφορικών εξισώσεων οι οποίες μαζί με τον Νόμο της δύναμης Lorentz αποτελούν τη βάση του Κλασικού Ηλεκτρομαγνητισμού. Οι εξισώσεις αυτές θεωρούνται υπεύθυνες για την ενοποίηση των εννοιών του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού [3].

Συνοπτικά, οι εξισώσεις αυτές στην ολοκληρωτική τους μορφή γράφονται ως εξής:

I. Νόμος Gauss. [Johann Carl Friedrich Gauss (1777 – 1855)] Περιγράφει την συμπεριφορά του ηλεκτροστατικού πεδίου \mathbf{E} (Σχέση (1.10)). Ο Νόμος λέει ότι σε μια κλειστή επιφάνεια το επιφανειακό ολοκλήρωμα του \mathbf{E} είναι ανάλογο με το ολικό φορτίο που περικλείεται από την επιφάνεια.

$$\oint_{\partial\Omega} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint_{\Omega} \rho \cdot dV \quad (1.10)$$

II. Νόμος Gauss για τον μαγνητισμό. Σε αναλογία με τον προηγούμενο Νόμο, στο μαγνητικό πεδίο το επιφανειακό ολοκλήρωμα του \mathbf{B} σε μια κλειστή επιφάνεια είναι μηδέν (1.11). Αυτό συμβαίνει επειδή δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα για να δράσουν ως πηγές μαγνητικού πεδίου.

$$\oint_{\partial\Omega} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1.11)$$

III. Εξίσωση Maxwell-Faraday. [Michael Faraday (1791 – 1867)]. Η εξίσωση αυτή λέει ότι μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει ηλεκτρικό πεδίο (1.12).

$$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.12)$$

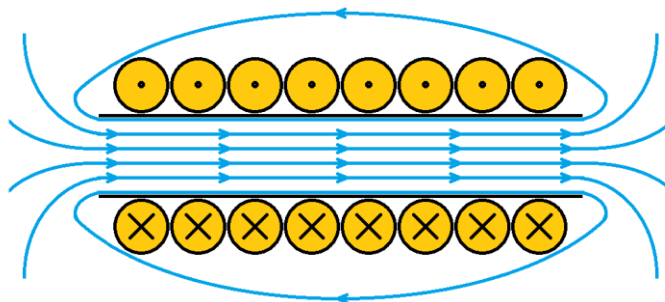
IV. Νόμος Ampere με προσθήκη Maxwell. Ο Νόμος αυτός μας λέει ότι ως πηγές μαγνητικού πεδίου μπορούν να δράσουν το ρεύμα αγωγιμότητας αλλά και το ρεύμα μετατόπισης. Ισχύει η σχέση (1.13).

$$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \left(\iint_{\Sigma} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \right) \quad (1.13)$$

Στις παραπάνω σχέσεις έχουμε \mathbf{E} η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, \mathbf{B} η μαγνητική επαγωγή, \mathbf{J} η πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος, ε_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού, μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, c η ταχύτητα του φωτός, ρ η πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου, S η κλειστή επιφάνεια που περικλείει τα φορτία και V ο όγκος αυτής.

1.1.1.3. Μαγνητική ροή

Σε αναλογία με το ηλεκτρικό πεδίο, το μαγνητικό πεδίο παράγει μαγνητική ροή Φ της οποίας οι μαγνητικές γραμμές ξεκινούν στον θετικό ή Νότιο πόλο και καταλήγουν στον αρνητικό ή Βόρειο πόλο ενός μαγνήτη. Στην περίπτωση ενός σωληνοειδούς πηνίου η διεύθυνση των μαγνητικών γραμμών είναι κάθετη στην διεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος και ακολουθεί τον κανόνα του δεξιού χεριού (Σχήμα 1). Για την μαγνητική ροή ισχύει ότι, ο αριθμός των μαγνητικών γραμμών οι οποίες διαπερνούν μία επιφάνεια S αντιστοιχεί στην δύναμη των μαγνητικών πόλων οι οποίοι παράγουν το πεδίο και μετρείται σε Wb [4].



Σχήμα 1. Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου.

Η μαγνητική ροή Φ η οποία διέρχεται από επιφάνεια S και η πυκνότητα μαγνητικής ροής ή μαγνητική επαγωγή B όταν αυτή διέρχεται από στοιχειώδη επίπεδη επιφάνεια dS συνδέονται με την Σχέση (1.14).

$$\Phi = \int B \cdot dS \quad (1.14)$$

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η μεταβολή στο ηλεκτρικό πεδίο, όπως στην περίπτωση κινούμενων ηλεκτρονίων, παράγει μαγνητικό πεδίο. Με τον ίδιο τρόπο και η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου παράγει ηλεκτρικό πεδίο, το επονομαζόμενο επαγόμενο μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται όταν αλλάξουν ή κινηθούν οι δυναμικές γραμμές [4]. Σύμφωνα με το Νόμο του Faraday, η επαγόμενη διαφορά δυναμικού είναι ανάλογη της μεταβολής των δυναμικών γραμμών (1.15).

$$V = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.15)$$

Στο παραπάνω παράδειγμα του σωληνοειδούς πηνίου με σπείρες και διατομή, το οποίο βρίσκεται μέσα σε μεταβλητό πεδίο επαγωγής, η επαγόμενη διαφορά δυναμικού στα άκρα του θα δίνεται από την (1.16):

$$V = -N \cdot S \cdot \frac{dB}{dt} \quad (1.16)$$

Στις παραπάνω Σχέσεις [(1.15), (1.16)] το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει το γεγονός ότι η επαγόμενη διαφορά δυναμικού θα είναι αντίθετη στον ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής.

Από τα παραπάνω βλέπουμε ότι το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει τις μεταβολές στην μαγνητική ροή και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως σε κυκλώματα αισθητήρων και άλλες συσκευές.

1.1.2. Φερρομαγνητικά υλικά

1.1.2.1. Γενικά

Ανάλογα με την συμπεριφορά τους ως προς την μαγνήτιση όλα τα υλικά κατατάσσονται σε κατηγορίες. Οι τρεις πιο συνηθισμένες είναι τα διαμαγνητικά, τα παραμαγνητικά και τα φερρομαγνητικά. Στην κατηγορία των φερρομαγνητικών υλικών κατατάσσονται όλα τα υλικά των οποίων οι μαγνητικές ιδιότητες μπορούν να παρατηρηθούν στην

καθημερινότητα και χωρίς χρήση εξειδικευμένων οργάνων [5]. Συγκεκριμένα, τέτοια υλικά είναι οι μόνιμοι μαγνήτες και τα υλικά που έλκονται από αυτούς. Μόνιμους μαγνήτες καλούμε τα υλικά τα οποία αποκτούν μαγνητικές ιδιότητες παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και τις διατηρούν όταν το εξωτερικό αυτό πεδίο απομακρυνθεί. Τα πιο συνήθη φερρομαγνητικά υλικά είναι ο σίδηρος (Fe), το νικέλιο (Ni) και το κοβάλτιο (Co) καθώς και οι ενώσεις τους.

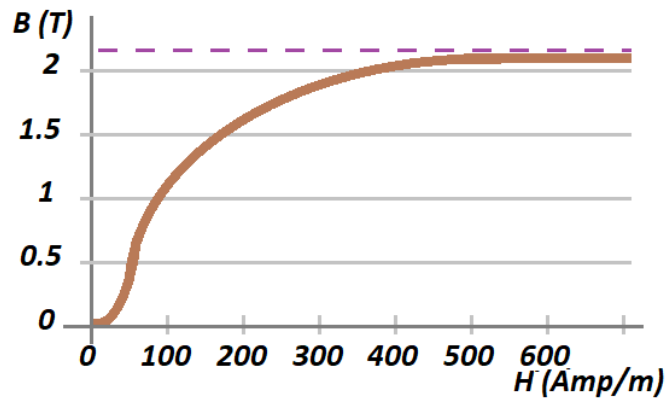
Η μαγνητική συμπεριφορά των φερρομαγνητικών υλικών είναι ένα μακροσκοπικό φαινόμενο το οποίο βρίσκει την εξήγησή του στον μικρόκοσμο. Τα ηλεκτρόνια στα άτομα του υλικού έχουν, εκτός από το φορτίο, ακόμα μια εγγενή ιδιότητα που τα χαρακτηρίζει, η οποία λέγεται spin. Οι δυο ιδιότητες αυτές του ηλεκτρονίου το κάνουν να παρουσιάζει μαγνητική διπολική ροπή, δηλαδή να συμπεριφέρεται σαν στοιχειώδης μαγνήτης, ενώ η συμπεριφορά του αυτή ενισχύεται από την περιστροφική του κίνηση γύρω από τον πυρήνα του ατόμου στο οποίο ανήκει.

Η ιδιότητα του spin εμφανίζεται με δυο διαφορετικές κατευθύνσεις. Στα υλικά στα οποία οι εξωτερικές στοιβάδες των ατόμων είναι συμπληρωμένες, τα ηλεκτρόνια βρίσκονται σε ζεύγη, με τα ηλεκτρόνια του ζεύγους να έχουν αντίθετο spin, άρα και αντίθετες μαγνητικές διπολικές ροπές που αλληλοαναιρούνται. Έτσι, το κάθε άτομο ξεχωριστά αλλά και το υλικό συνολικά, δεν εμφανίζουν μαγνητική διπολική ροπή.

Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή οι εξωτερικές στοιβάδες των ατόμων των υλικών δεν είναι συμπληρωμένες το υλικό παρουσιάζει μαγνητικές ιδιότητες. Αυτό κάνει τα μαγνητικά δίπολα να ενισχύουν αθροιστικά το ένα το πεδίο του άλλου και έτσι στο σύνολό του το φερρομαγνητικό υλικό να παρουσιάζει κατά πολύ εντονότερες μαγνητικές ιδιότητες.

Η ιδιαιτερότητα αυτή των φερρομαγνητικών υλικών μεταφέρεται στην μαγνητική συμπεριφορά τους όταν βρεθούν μέσα σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Συγκεκριμένα, η μαγνητική επαγωγή B που αναπτύσσεται δεν εξαρτάται μόνο από την ένταση H του μαγνητικού πεδίου αλλά και την υπάρχουσα μαγνήτιση M του υλικού. Χαρακτηριστικό των φερρομαγνητικών υλικών είναι ότι η μαγνήτιση M φτάνει σε κορεσμό όταν όλα τα στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα ευθυγραμμιστούν. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι στα φερρομαγνητικά υλικά όταν αυξάνεται το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο αυξάνεται και η μαγνητική επαγωγή στο εσωτερικό τους, αλλά μόνο μέχρι ενός συγκεκριμένου σημείου. Πέρα από αυτό η επαγωγή παραμένει σταθερή και έτσι θεωρείται πλέον ότι το υλικό έχει

φτάσει σε κατάσταση κορεσμού. Για τον σίδηρο η καμπύλη που περιγράφει αυτήν την συμπεριφορά φαίνεται στο Σχήμα 2.

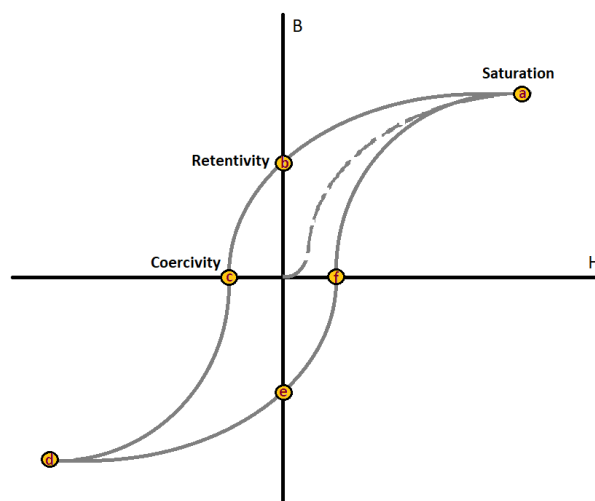


Σχήμα 2. Καμπύλη Μαγνήτισης του Καθαρού Σιδήρου.

Τα διάφορα φερρομαγνητικά υλικά έχουν παρόμοια συμπεριφορά αλλά διαφέρουν στην τιμή του κορεσμού και στο πόσο εύκολα φτάνουν σε αυτόν σε σχέση με την αύξηση του εξωτερικού πεδίου.

1.1.2.2. Βρόχος Υστέρησης

Βρόχος Υστέρησης ή Βρόχος B-H λέγεται το σχήμα το οποίο σχηματίζεται όταν μελετηθεί η μαγνητική επαγωγή B που παρουσιάζει ένα φερρομαγνητικό υλικό ως συνάρτηση μεταβαλλόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου έντασης H . Ο Βρόχος B-H σχηματίζεται λόγω του κορεσμού, της παραμένουσας μαγνήτισης του υλικού αλλά και του συνεκτικού πεδίου αυτού, τα οποία εξηγούνται στη συνέχεια. Ένας τυπικός Βρόχος Υστέρησης έχει το παρακάτω Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Βρόχος Υστέρησης.

Το σχήμα αυτό δίνει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη μαγνητική συμπεριφορά του υλικού. Ακολουθώντας την πορεία της μαγνήτισης όπως αυτή υποδεικνύεται από τα γράμματα a-b-c-d-e-f-a φαίνεται ότι η σχέση ανάμεσα στη μαγνήτιση και το εξωτερικό πεδίο είναι διαφορετική όταν το πεδίο αυξάνεται από εκείνη και όταν το πεδίο ελαττώνεται. Συγκεκριμένα μελετώντας τον Βρόχο Υστέρησης φαίνεται ότι το υλικό περνάει από τις εξής φάσεις:

- Φάση a: Το υλικό ξεκινάει με μηδενική μαγνήτιση και αυξάνοντας το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο έντασης H φτάνει στο σημείο κορεσμού (saturation), όπως αυτό φαίνεται στην διακεκομμένη καμπύλη. Η μαγνητική του επαγωγή δεν μεταβάλλεται περαιτέρω με την αύξηση του πεδίου. Το σημείο αυτό εξαρτάται μόνο από το υλικό κατασκευής. Η απόκριση κατά την αρχική επιβολή του εξωτερικού πεδίου παριστάνεται στο σχήμα με την διακεκομμένη γραμμή.

- Φάση b: Μειώνοντας την ένταση του εξωτερικού πεδίου παρατηρείται μείωση στη μαγνητική επαγωγή του υλικού η οποία όμως είναι δυσανάλογα μικρή έως ανεπαίσθητη σε κάποιες περιπτώσεις. Όταν το εξωτερικό πεδίο μηδενιστεί το υλικό δεν έχει απομαγνητιστεί και διατηρεί την λεγόμενη παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_r (retentivity).

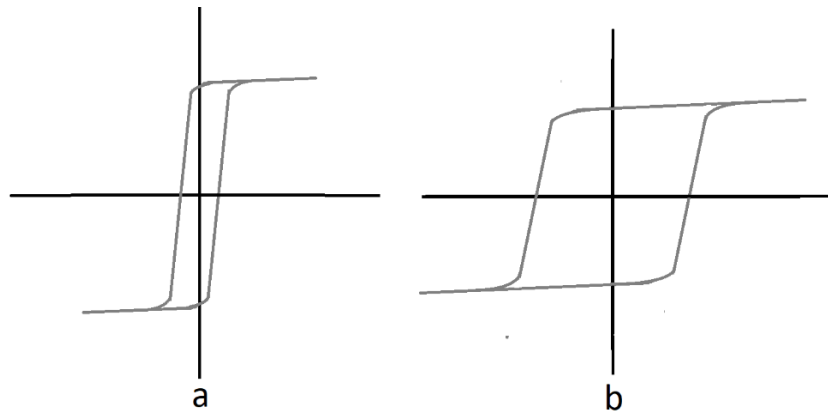
- Φάση c: Για να μηδενιστεί η μαγνητική επαγωγή του υλικού πρέπει να εφαρμόσουμε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο αντίθετης φοράς. Η ένταση του εξωτερικού πεδίου που μηδενίζει την συνολική μαγνήτιση του υλικού λέγεται συνεκτικό πεδίο H_c (coercivity).

- Φάσεις d, e, f: Όπως φαίνεται και από την συμμετρία του σχήματος του Βρόχου Υστέρησης ως προς το κέντρο των αξόνων η ίδια συμπεριφορά για τα B και H παρατηρείται και κατά την αύξηση του μαγνητικού πεδίου ως προς την αντίθετη φορά. Το υλικό φτάνει και πάλι σε κορεσμό (σημείο d) αντίθετης επαγωγής και στη συνέχεια παρουσιάζει παραμένουσα μαγνήτιση αντίθετης φοράς (σημείο e), ενώ για να μηδενιστεί η μαγνήτιση του χρειάζεται συνεκτικό πεδίο ορθής φοράς (σημείο f). Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την αυξομείωση του εξωτερικού πεδίου το B δεν μηδενίζεται ποτέ μαζί με το H λόγω της παραμένουσας μαγνήτισης του υλικού οπότε και το σχήμα $B-H$ δεν ξαναπερνάει ποτέ από την αρχική θέση (0,0).

Η παραμένουσα μαγνήτιση M_r προκαλεί την λεγόμενη παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_r . Τα δυο αυτά μεγέθη συνδέονται με την Σχέση (1.17).

$$\mathbf{B}_r = \mu_0 \cdot \mathbf{M}_r \quad (1.17)$$

Το συνεκτικό πεδίο εξαρτάται και αυτό αποκλειστικά από το υλικό και την κατεργασία και μορφοποίηση που έχει υποστεί. Με βάση το μέγεθος του συνεκτικού πεδίου, την ένταση, δηλαδή, του πεδίου που χρειάζεται για να απομαγνητιστεί ένα υλικό, τα φερρομαγνητικά υλικά χωρίζονται σε σκληρά μαγνητικά και μαλακά μαγνητικά. Πειραματικά έχει παρατηρηθεί ότι αυτό σχετίζεται με την μηχανική τους αντοχή, δηλαδή ότι τα υλικά από σίδηρο ή χάλυβα με μεγάλη σκληρότητα έχουν υψηλό μαγνητικό πεδίο και χαμηλή μαγνητική διαπερατότητα, ενώ τα μαλακά υλικά έχουν χαμηλό συνεκτικό πεδίο και σχετικά μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα [6]. Στον βρόχο υστέρησης αυτό αποτυπώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.



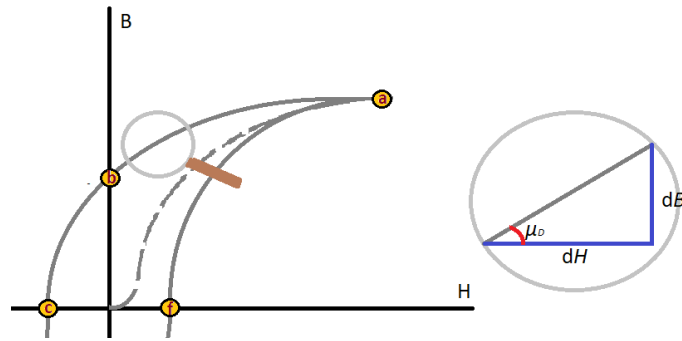
Σχήμα 4. Βρόχος υστέρησης για α) μαλακό μαγνητικό υλικό και β) σκληρό μαγνητικό υλικό.

1.1.2.3. Διαφορική μαγνητική διαπερατότητα

Η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας μ για τα φερρομαγνητικά υλικά δεν έχει σταθερή τιμή αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με την προηγούμενη της μαγνήτιση και σύμφωνα με το αν βρίσκεται σε πεδίο του οποίου η τιμή αυξάνεται ή μειώνεται. Αν θεωρήσουμε τα \mathbf{B} και \mathbf{H} παράλληλα διανύσματα τότε από την Σχέση (1.4) προκύπτει για τα μέτρα τους B και H η Σχέση (1.17).

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1.18)$$

Ακολουθώντας την λογική του διαφορικού λογισμού μπορούμε να θεωρήσουμε μικρές μεταβολές dB και dH κατά τις οποίες το μ θεωρούμε ότι δεν μεταβάλλεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5. Σχηματική αναπαράσταση διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας.

Ορίζουμε βάσει αυτών ένα νέο μέγεθος το οποίο ονομάζεται διαφορική μαγνητική διαπερατότητα, όπου συμβολίζεται με μ_D και φαίνεται στην Σχέση (1.19). [7]

$$\mu_D := \frac{dB}{dH} \quad (1.19)$$

Προφανώς η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα είναι η παράγωγος του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής B ως προς το μέτρο της έντασης μαγνητικού πεδίου H . Για μη γραμμικά μαγνητικά υλικά είναι πιο χρήσιμο να ληφθεί υπόψη η διαφορική διαπερατότητα, λόγω των πληροφοριών τις οποίες παρέχει. Για τα υλικά αυτά είναι αριθμητικά μεγαλύτερη από 0, πράγμα που σημαίνει ότι η καμπύλη B-H αυξάνεται μονότονα, ενώ μειώνεται μετά τον μαγνητικό κορεσμό μέχρι την τιμή της διαπερατότητας του κενού [8].

1.1.2.4. Ανιστροπία

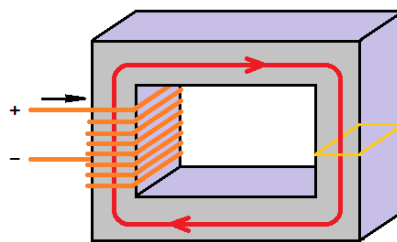
Ο όρος ανιστροπία χρησιμοποιείται για να εξηγήσει οποιαδήποτε μακροσκοπική προτίμηση μπορεί να εμφανίσει μια ιδιότητα ενός υλικού για μια δεδομένη κατεύθυνση ή κατευθύνσεις. Στην περίπτωση των μαγνητικών υλικών, η ανιστροπία αντανακλά την τάση του διανύσματος μαγνήτισης να βρίσκεται κατά μήκος μιας συγκεκριμένης κατεύθυνσης. Οι προτιμώμενοι άξονες ονομάζονται εύκολοι άξονες μαγνήτισης σε αντίθεση με τους υπόλοιπους, οι οποίοι είναι σκληροί άξονες. Από θερμοδυναμική άποψη, οποιοδήποτε σύστημα ή υλικό τείνει να ελαχιστοποιεί την εσωτερική του ενέργεια. Ως εκ τούτου, ο εύκολος άξονας είναι η κατεύθυνση της μαγνήτισης κατά την οποία το μαγνητικό υλικό ελαχιστοποιεί την ενέργεια. Ανάλογα με την προέλευση, η ανιστροπία μπορεί να ταξινομηθεί ως μαγνητοκρυσταλλική, μαγνητοσυστολική, σχήματος και επαγόμενη [9].

1.1.3. Μαγνητικά Κυκλώματα

Με τον όρο μαγνητικά κυκλώματα περιγράφονται οι διατάξεις εκείνες οι οποίες συμπεριφέρονται σαν ένας ή περισσότεροι κλειστοί βρόχοι μαγνητικής ροής [4]. Η μαγνητική αυτή ροή μπορεί να έχει σαν πηγή έναν ή περισσότερους ηλεκτρομαγνήτες ή μόνιμους μαγνήτες ενώ περιορίζεται, αποφεύγοντας την σκέδασή της, με την χρήση μαγνητικού πυρήνα κατασκευασμένου από φερρομαγνητικό υλικό.

Οι διατάξεις αυτές είναι εύκολο να μελετηθούν καθώς η έννοια του μαγνητικού κυκλώματος και ο τρόπος ανάλυσής τους αναπτύχθηκε σε αναλογία με τα ηλεκτρικά κυκλώματα με σκοπό να χρησιμοποιηθούν τεχνικές και έννοιες πολύ κοινές στην ηλεκτροτεχνία. Με τον τρόπο αυτό απλοποιήθηκε η μελέτη συσκευών όπως οι ηλεκτρικοί κινητήρες και οι μετασχηματιστές.

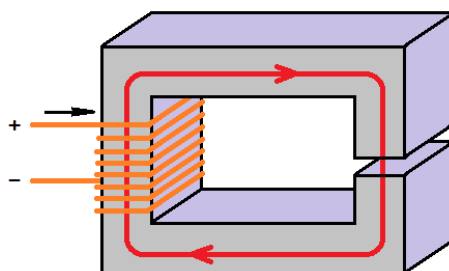
Στην πιο απλή του μορφή ένα μαγνητικό κύκλωμα έχει την μορφή η οποία φαίνεται στο Σχήμα 6 .



Σχήμα 6. Απλοποιημένο μαγνητικό κύκλωμα.

Στο Σχήμα 6 φαίνεται πηνίο N στρωφών τυλιγμένο γύρω από την μία πλευρά πυρήνα ο οποίος είναι κατασκευασμένος από φερρομαγνητικό υλικό με διατομή A . Το πηνίο τροφοδοτείται με ρεύμα I και λειτουργεί ως πηγή η οποία δημιουργεί μαγνητικό πεδίο έντασης B στο εσωτερικό του. Για τα μαγνητικά κυκλώματα, σε αναλογία με το ηλεκτρικά και παρόλο που δεν αποτελεί δύναμη από φυσικής άποψης, λέμε ότι δρα ως μαγνητεγερτική δύναμη. Μέσω του υλικού το μαγνητικό πεδίο διαχέεται σε όλο τον πυρήνα δίνοντας την εικόνα κλειστού κυκλώματος.

Μια πιο σύνθετη περίπτωση μαγνητικού κυκλώματος είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7. Μαγνητικό κύκλωμα με διάκενο.

Σε αυτήν την περίπτωση ο πυρήνας δεν είναι συνεχής αλλά υπάρχει ένα κενό με αέρα (air gap). Αυτό κάνει την μαγνητική ροή να διαχέεται (φαινόμενο σκέδασης) στο σημείο αυτό, ενώ σε αναλογία με τα ηλεκτρικά κυκλώματα δίνει την εντύπωση μίας μαγνητικής “αντίστασης”.

1.2. Μαγνητικοί Αισθητήρες

1.2.1. Γενικά

Οι αισθητήρες, στο σύνολο τους, είναι συσκευές και διατάξεις οι οποίες λειτουργούν επιτρέποντας την αλληλεπίδραση συστημάτων μεταξύ τους ή μεταξύ του φυσικού περιβάλλοντος και ενός ή περισσότερων συστημάτων. Κατά την χρήση τους μετρούν φυσικές ποσότητες τις οποίες μετασχηματίζουν σε ηλεκτρικά σήματα. Τα σήματα αυτά με την σειρά τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για παρακολούθηση των ποσοτήτων αυτών ή την ανατροφοδότηση σε κάποιο βρόχο ελέγχου [10]. Έτσι, είναι απαραίτητοι σε οποιοδήποτε σύστημα το οποίο χαρακτηρίζεται ως «έξυπνο» και οι χρήσεις τους στην κατασκευή υλικών, ηλεκτρονικών συστημάτων, δομικών έργων και εμπορικών διεργασιών έχει οδηγήσει στον πολλαπλασιασμό των αρχών λειτουργίας αλλά και του σχεδιασμού τους [11].

Μαγνητικοί Αισθητήρες ονομάζονται οι αισθητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούν φερρομαγνητικά υλικά τα οποία αλλάζουν μηχανικές, ηλεκτρικές ή μαγνητικές ιδιότητες όταν βρίσκονται υπό την επήρεια ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου $\mathbf{H}(t)$ σε ορισμένες συνθήκες λειτουργίας όπως θερμοκρασία και συχνότητα μεταβολής πεδίου. Ο ορισμός αυτός περιλαμβάνει την παραμετρική μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας T και της συχνότητας f του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, αλλά εξαιρεί τον αισθητήρα φαινομένου

Hall ο οποίος επηρεάζεται από εξωτερικό μαγνητικό πεδίο αλλά χρησιμοποιεί ημιαγώγιμα υλικά [12]. Οι Μαγνητικοί Αισθητήρες κατέχουν εδώ και αρκετά χρόνια ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό της συνολικής αγοράς αισθητήρων πράγμα το οποίο καθιστά την μελέτη τους απαραίτητη καθώς οι εφαρμογές τους είναι ευρύτατα διαδεδομένες [13].

Το υλικό του κάθε μαγνητικού αισθητήρα είναι τέτοιο ώστε όταν βρίσκεται μέσα σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο $\mathbf{H}(t)$ να μεταβάλλεται μια μακροσκοπική παράμετρος του. Βάσει αυτής της παραμέτρου μπορεί να γίνει και η ταξινόμησή τους σε είδη. Οι μαγνητικοί αισθητήρες, στο σύνολό τους, όταν βρίσκονται μέσα σε κάποιο μαγνητικό πεδίο αποκρίνονται μεταβάλλοντας ένα από τα φυσικά μεγέθη τα οποία τους χαρακτηρίζουν όπως απόσταση, δύναμη, εμπέδηση κλπ. Η μεταβολή αυτή, συνήθως διαμέσου των ηλεκτρονικών του αισθητήρα, μετατρέπεται σε σήμα εξόδου του συστήματος αισθητήρα με την μορφή, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, ηλεκτρικής τάσης $V_{out}(t)$. Για αυτό το σήμα εξόδου του αισθητήρα θα πρέπει να βρεθεί η συσχέτιση την οποία έχει με τις αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού, όπως η διαπερατότητα, η παραμένουσα μαγνήτιση, η μαγνητική αντίσταση, η μαγνητοσυστολή κ. α. των οποίων οι τιμές εξαρτώνται από τα φυσικά μεγέθη τα οποία βρίσκονται υπό παρακολούθηση. Στην γενική της μορφή, η σχέση η οποία συνδέει το σήμα εξόδου με τις φυσικές αυτές ποσότητες $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ είναι η (1.20).

$$V_{out} = g\{f[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]\} \quad (1.20)$$

Στην σχέση αυτή, με g , παριστάνεται η συνάρτηση η οποία συνδέει την τάση εξόδου με τις μακροσκοπικές μαγνητικές παραμέτρους και f η συνάρτηση η οποία συνδέει τις μαγνητικές παραμέτρους με τις φυσικές ποσότητες οι οποίες μεταβάλλονται. Το ζητούμενο ενός σωστού σχεδιασμού ενός μαγνητικού αισθητήρα είναι να υπάρχει μονοτονικότητα στις συναρτήσεις οι οποίες συνδέουν τη φυσική ποσότητα με τη ή τις μαγνητικές παραμέτρους που μπορεί να επιδρούν στην έξοδο συνδυαστικά ή ανεξάρτητα η μία από την άλλη, οι οποίες μπορούν να επιδρούν στην έξοδο ανεξάρτητα η μια από την άλλη. Στην περίπτωση κατά την οποία αυτό δεν είναι δυνατό χρειάζεται προσεχτικός παραμετρικός έλεγχος της εξόδου. Έχοντας υπόψη όλα αυτά, οι μαγνητικοί αισθητήρες μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις κατηγορίες βάσει των αντιστοιχών φαινομένων τα οποία παρατηρούνται: α) η μαγνητική επαγωγή, β) η μαγνητοσυστολή και γ) η μαγνητομεταφορά [10].

1.2.2. Αισθητήρες Μαγνητικής Επαγωγής

Στους αισθητήρες μαγνητικής επαγωγής η ιδιότητα της ύλης η οποία μεταβάλλεται με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο \mathbf{H} , είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής \mathbf{B} και οι σχετιζόμενες με αυτή, όπως η μαγνητική διαπερατότητα, η παραμένουσα μαγνήτιση και το συνεκτικό πεδίο του υλικού. Η επαγωγή είναι το αποτέλεσμα της κίνησης ηλεκτρικού φορτίου σε ένα μαγνητικό πυρήνα και άρα μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας το αντίστροφο φαινόμενο, δηλαδή τοποθετώντας ένα πηνίο γύρω ή από πάνω από ένα μαγνητικό πυρήνα το οποίο μετατρέπει τις αλλαγές στην μαγνήτιση του πυρήνα σε ένα σήμα εξόδου όπως φαίνεται στη Σχέση (1.21).

$$V_{out}(t) = g[\mathbf{B}(\mathbf{H}, \sigma, \dots)] \quad (1.21)$$

Το \mathbf{B} μας δείχνει την εξάρτηση διαφόρων φυσικών παραμέτρων όπως το μαγνητικό πεδίο \mathbf{H} ή η παραμόρφωση του υλικού σ , το οποίο συνήθως προσδιορίζεται από τον Βρόχο Υστέρησης.

Η ποσότητα υπό μέτρηση η οποία είναι η πιο συνήθης είναι το επιβαλλόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο \mathbf{H} για το οποίο έχουν σχεδιαστεί αρκετοί αισθητήρες και μαγνητόμετρα, το κάθε ένα με διαφορετική ευαισθησία και αβεβαιότητα ανάλογα με το είδος του. Ανάμεσα στους αισθητήρες μαγνητικών φαινομένων, ο αισθητήρας ο οποίος θεωρείται ο πιο αξιόπιστος είναι ο αισθητήρας fluxgate. Οι αισθητήρες fluxgate βασίζονται στην απότομη αλλαγή της μαγνήτισης στα κρίσιμα σημεία του Βρόχου Υστέρησης, όπως είναι το «γόνατο» το οποίο σχηματίζεται κοντά στο σημείο ανισοτροπίας. Οι τυχαίες μεταβολές του μαγνητικού πεδίου λόγω του περιβάλλοντός του αλλάζουν την φάση και το πλάτος της μέγιστης διαφοράς δυναμικού στην έξοδο του αισθητήρα το οποίο συνδέεται με την παράγωγο της εξάρτησης του πεδίου από την μαγνητική επαγωγή όπως φαίνεται στην Σχέση (1.22),

$$V_{out,max}(t) = k \left[\frac{d\mathbf{B}}{dt} \right]_{max} \quad (1.22)$$

όπου k είναι μια σταθερά η οποία εξαρτάται από την συχνότητα της διέγερσης και την γεωμετρία του αισθητήρα. Κατά συνέπεια, η εξάρτηση της εξόδου από την παράγωγο της μαγνητικής επαγωγής δίνει ένα αισθητήριο ευαίσθητο στις μεταβολές του πεδίου.

Η δεύτερη πιο διαδεδομένη ποσότητα από άποψη συχνότητας μέτρησης είναι η θέση ενός αντικειμένου και τα μεγέθη τα οποία σχετίζονται με αυτή όπως η ταχύτητα, η ροή των ρευστών, η επιτάχυνση κλπ. Το συνηθέστερο παράδειγμα τέτοιου αισθητήρα θέσης είναι ο αισθητήρας **LVDT** (Linear Variable Differential Transformer). Αυτού του τύπου αισθητήρες χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες στη βιομηχανία και την έρευνα καθώς προσφέρει ευαισθησία και αβεβαιότητα της τάξεως του μm [14]. Πρόκειται για ένα διαφορικό μετασχηματιστή με διέγερση στο πρωτεύον και ευαισθησία στο δευτερεύον πηνίο.

Η τρίτη οικογένεια μαγνητικών αισθητήρων επαγωγής είναι οι αισθητήρες εγγύτητας. Τέτοιοι αισθητήρες απαντώνται συνήθως σε μαγνητικούς διακόπτες, οι οποίοι αναγνωρίζουν την παρουσία ή μη μιας μαγνητικής ποσότητας. Είναι τύπου yoke, βασισμένοι στον Νόμο του Faraday και λειτουργούν με τις Αρχές των μαγνητικών κυκλωμάτων. Σε αυτά συνήθως υπάρχει ένας πυρήνας από φερρομαγνητικό υλικό ο οποίος σχηματίζει μαγνητικό κύκλωμα με το στοιχείο υπό μέτρηση. Η τάση η οποία επάγεται στα άκρα του αισθητήριου πηνίου το οποίο είναι τυλιγμένο γύρω από τον πυρήνα είναι ανάλογη με την χρονική παράγωγο της μαγνητικής ροής, όπως είδαμε ήδη στη Σχέση (1.15). Οι πυρήνες σχήματος yoke είναι συνήθως φτιαγμένοι από μαλακό φερρομαγνητικό υλικό, όπως χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ο οποίος ονομάζεται ηλεκτρικός χάλυβας. Τα yoke και τα στοιχεία του υπόλοιπου μαγνητικού κυκλώματος έχουν πολλά και διαφορετικά σχήματα. Είναι εύκολα στην κατασκευή τους, χαμηλού κόστους, ευσταθή στη απόδοσή τους και για το λόγο αυτό ιδιαίτερος διαδεδομένα σε βιομηχανικές εφαρμογές όπως ο μη καταστροφικός έλεγχος, ο οποίος αναλύεται σε επόμενη παράγραφο. Μια πολύ διαδεδομένη εφαρμογή τέτοιων αισθητήρων είναι η μέτρηση του θορύβου Barkhausen [15].

1.2.3. Αισθητήρες Μαγνητοσυστολής

Οι αισθητήρες μαγνητοσυστολής μοιάζουν με τους αισθητήρες επαγωγής στο ότι χρησιμοποιούν πηνία για να παράξουν το σήμα εξόδου τους, ωστόσο έχουν το χαρακτηριστικό ότι συνδέουν την μηχανική τάση με την μαγνητική επαγωγή και έτσι είναι ιδανικοί κατά τον σχεδιασμό διατάξεων οι οποίες μετρούν επιμήκυνση, δύναμη, επιτάχυνση κλπ. [16]. Οι μαγνητοσυστολικοί αισθητήρες (**Mx**) μπορεί να διαφέρουν στην μηχανικές τους ιδιότητες κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου καθώς μπορεί να

επηρεάζονται κατά μια, δυο ή και τρεις διευθύνσεις [17]. Η έξοδος εξαρτάται από την φυσική παράμετρο εισόδου και την μαγνητοελαστική παράμετρο ζεύξης λ του υλικού του Mx και περιγράφεται με την γενική μορφή της Σχέσης (1.23).

$$V_{out}(t) = g[\lambda(\mathbf{H}, \sigma, \dots)] \quad (1.23)$$

Τα αισθητήρια στοιχεία μαγνητοσυστολής χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με την τάξη μεγέθους της τιμής του παράγοντα μαγνητοσυστολής λ_s . Οι τιμές για τους κοινούς, τεράστιους και κολοσσιαίους Mx είναι 10^1 , 10^3 και 10^5 ppm, αντίστοιχα.

1.2.4. Αισθητήρες Μαγνητομεταφοράς

Στην τρίτη κατηγορία αισθητήρων την οποία θα εξετάσουμε βρίσκονται οι αισθητήρες οι οποίοι βασίζονται σε φαινόμενα μαγνητομεταφοράς. Σε αυτούς τους αισθητήρες, η παράμετρος η οποία αλλάζει είναι η αντίσταση ή εμπέδηση όταν αυτή βρίσκεται υπό την επήρεια εξωτερικού μαγνητικού πεδίου ή τάσης στο αισθητήριο. Οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο το οποίο εμπλέκεται. Στην πρώτη κατηγορία είναι οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης, στην δεύτερη οι αισθητήρες μαγνητοεμπέδησης και στην τρίτη οι αισθητήρες σήραγγας (tunneling). Η εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από ηλεκτρικές ιδιότητες όπως η αντίσταση, ή ταυτόχρονα επαγωγικές και ηλεκτρικές ιδιότητες όπως η εμπέδηση ή το φαινόμενο tunnel σε κάποιες δομές, έχουν οδηγήσει σε σχέδια αισθητήρων τα οποία είναι πολύ συχνά ανώτερα από τα αντίστοιχα επαγωγικά.

Το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης οφείλεται στην δύναμη Lorentz η οποία εφαρμόζεται στα ηλεκτρόνια μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Τα μαγνητικά δίπολα του φερρομαγνητικού υλικού μαζί με το ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο οφείλεται στην κίνηση των ηλεκτρονίων παράγουν δυνάμεις Lorentz οι οποίες προστίθενται στις δυνάμεις Coulomb, οι οποίες υπάρχουν διάχυτες ανάμεσα στα αγωγιμα ηλεκτρόνια και στις ζώνες σθένους του κρυσταλλικού πλέγματος.

Η συνισταμένη όλων των διαδικασιών σκέδασης Lorentz ισοδυναμεί με τη μαγνητοαντίσταση του υλικού, ενώ η συνισταμένη όλων των διαδικασιών ηλεκτροστατικής σκέδασης ισοδυναμεί με την ωμική αντίσταση του υλικού. Το φαινόμενο αυτό από μόνο του είναι εν μέρει υπεύθυνο για τη σημαντικά υψηλότερη ειδική αντίσταση των φερρομαγνητικών υλικών. Από την άλλη πλευρά, η διαδικασία μαγνήτισης αλλάζει τη

διαμόρφωση των τοιχωμάτων των περιοχών και τον προσανατολισμό των δίπολων στις μαγνητικές περιοχές. Αυτό με τη σειρά του προκαλεί τη μεταβολή του αθροίσματος των διαδικασιών σκέδασης της δύναμης Lorentz, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της μαγνητοαντίστασης ως συνάρτηση του εφαρμοζόμενου πεδίου, $MR(H)$, της τάξης του 1 με 2 % [18].

Μια ιδιαίτερη διάταξη υλικών που βασίζεται στον παραπάνω μηχανισμό και ενισχύει την απόκριση MR είναι το φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (**GMR** - Giant Magnetoresistance) [19]. Ο αισθητήρας GMR βασίζεται στην πολυστρωματική δομή επαναλαμβανόμενων διπλών στρωμάτων εξαιρετικά λεπτών (μεγέθους nm) φερρομαγνητικών - παραμαγνητικών υμενίων (φιλμ). Κάθε μικρή αναντιστοιχία στο πλέγμα των διαδοχικών φερρομαγνητικών και παραμαγνητικών υμενίων, αναγκάζει τα μαγνητικά δίπολα κάθε φερρομαγνητικού στρώματος να είναι λίγο εκτός επιπέδου. Με αυτόν τον τρόπο, η μεταβολή της μαγνητοαντίστασης, σε σχέση με το εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο παράλληλα προς την επιφάνεια του φιλμ, είναι σημαντική, της τάξης του 100 με 200 %.

Η δεύτερη οικογένεια αισθητήρων μαγνητομεταφοράς είναι οι αισθητήρες μαγνητικής εμπέδησης [20]. Όταν ρεύμα υψηλής συχνότητας διαρρέει κάποιο υλικό, αυτό διαδίδεται επιδερμικά του υλικού, με αποτέλεσμα να λειτουργεί σαν αντίσταση μεγαλύτερη από την DC αντίσταση του υλικού. Αυτή η αυξημένη αντίσταση ονομάζεται σύνθετη αντίσταση, για να διαχωρίζεται από την DC αντίσταση του υλικού. Έτσι, όταν το υλικό έχει περιμετρική επιφανειακή μαγνητική ανισοτροπία, όπως συμβαίνει στα μηδενικά ή αρνητικά μαγνητοσυστολικά υλικά, η σύνθετη αντίσταση του υλικού εξαρτάται από την περιμετρική διαπερατότητα του υλικού, επιτρέποντας έτσι αλλαγές στο βάθος του, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα γιγαντιαίες αλλαγές της μαγνητικής εμπέδησης (**GMI** – Gigantic Magnetic Impedance), που φτάνουν σε επίπεδα 700 – 800%. Στα αρνητικά μαγνητοσυστολικά υλικά η μεταβολή της διαπερατότητας εξαρτάται επίσης από την τάση, επιτρέποντας το λεγόμενο φαινόμενο τάσης-αντίστασης [21].

Η τελευταία οικογένεια διατάξεων μαγνητομεταφοράς είναι οι διατάξεις κβαντικής σήραγγας, οι επονομαζόμενες βαλβίδες spin [22]. Οι βαλβίδες spin αποτελούνται από μια διάταξη SM-D-HM, όπου οι SM και HM αντιπροσωπεύουν έναν μαλακό και έναν (ημι)σκληρό μαγνήτη αντίστοιχα, και το D αντιπροσωπεύει ένα λεπτό μονωτικό στρώμα,

που επιτρέπει τη μεταφορά κβαντικής σήραγγας. Στην περίπτωση που το SM είναι παράλληλο με το HM, επιτρέπεται η κβαντική μεταφορά σήραγγας, ενώ στην αντίθετη περίπτωση, όταν το SM είναι αντιπαράλληλο με το HM, η κβαντική σήραγγα δεν επιτρέπεται. Σε όλα τα ενδιάμεσα στάδια της μαγνήτισης του SM (η HM δεν αλλάζει με το μικρό εύρος των μαγνητικών πεδίων του περιβάλλοντος ή των μετρήσιμων μαγνητικών πεδίων) η σήραγγα τροποποιείται, επιτρέποντας την ανάγνωση μιας αντίστασης, ανάλογης με το πεδίο που μαγνητίζει το SM.

1.2.5. Υλικά και Προσαρμογή Ιδιοτήτων

1.2.5.1. Υλικά αισθητήρων

Τα πιο συνήθη υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ως αισθητήρια στοιχεία είναι τα λεπτά υμένια (φιλμ), οι σκόνες και τα υλικά που αποσβήνονται γρήγορα. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι μαγνητικοί πυρήνες ανίχνευσης είναι μαγνητικά μαλακοί. Τα λεπτά υμένια παρασκευάζονται κυρίως με μεθόδους φυσικής εναπόθεσης ατμών (**PVD** – Physical Vapor Deposition), [23] ή χημικής εναπόθεσης ατμών (**CVD** - Chemical Vapor Deposition) [24] [25]. Πρόσφατα, η τεχνολογία εναπόθεσης ατομικών στρωμάτων (**ALD** - Atomic Layer Deposition) εφαρμόστηκε για την επίτευξη τραχύτητας ατομικών στρωμάτων [26].

Η τεχνολογία των μαγνητικών λεπτών υμενίων είναι χρήσιμη από βιομηχανική και παραγωγική άποψη εάν συνδυαστεί με την τεχνολογία της μικροηλεκτρονικής. Προς το παρόν, τα κράματα Fe-Ni μονής στρώσης μπορούν να εναποτεθούν πάνω σε ολοκληρωμένα κυκλώματα ειδικών εφαρμογών (**ASIC** - Application Specific Integrated Circuits), επιτρέποντας έτσι τη σμίκρυνση αυτού του τύπου μαγνητικών αισθητήρων.

Οι μαγνητικές σκόνες χρησιμοποιούνται επίσης σε διάφορες εφαρμογές ανίχνευσης, κυρίως σε βιοϊατρικές εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται κυρίως ως φορείς κατάλληλων συνδέσμων, όπως τα ολιγοπεπτίδια [27]. Η συντριπτική πλειονότητα των κόνεων οι οποίες χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ανίχνευσης και παρακολούθησης είναι οξειδία. Οι πρόσφατες τάσεις στις μαγνητικές σκόνες αναφέρονται στη χρήση των υπερπαραμαγνητικών ιδιοτήτων τους, που εμφανίζονται σε νανομεγέθεις σκόνες, οι οποίες ονομάζονται SPION (**SPION** - Super-Paramagnetic Iron Oxides).

Η τρίτη μεγάλη οικογένεια περιλαμβάνει τα υλικά με ταχεία απόσβεση [28]. Έχουν τη μορφή ταινιών, συρμάτων και καλυμμένων με γυαλί συρμάτων. Η βασική στοιχειομετρία

τους είναι $TM_{80}M_{20}$ (όπου τα TM και M αντιστοιχούν σε μέταλλο μετάπτωσης και μεταλλοειδές αντίστοιχα). Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη ένωση μαγνητοσυστολής είναι η $Fe_{78}Si_7B_{15}$, ενώ η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη ένωση μηδενικής μαγνητοσυστολής είναι η $Fe_{78}Co_4Si_7B_{15}$.

Οι άμορφες ταινίες έχουν τυπικό πάχος ~ 25 μm και παράγονται σε διάφορα πλάτη, από 1 mm έως αρκετά cm, ενώ το μήκος τους μπορεί να είναι από μερικά m έως αρκετά km. Η βέλτιστη τεχνολογία για την κατασκευή ταινιών είναι η μέθοδος επίπεδης ροής, η οποία επιτρέπει τον κατάλληλο έλεγχο της αμορφικότητας και της μορφολογίας τους, κυρίως όσον αφορά την τραχύτητα και το πλάτος [29] [30].

Τα καλυμμένα με γυαλί σύρματα παράγονται με τη μέθοδο Taylor. Η τυπική εξωτερική τους διάμετρος είναι της τάξης των ~ 10 με 30 μm και μπορούν να παραχθούν σε μήκη από μερικά μέτρα έως και αρκετά χιλιόμετρα. Παρουσιάζουν επίσης μαγνητική διστακτικότητα [31][32]. Πρόσφατα, τα μαγνητικά νανοκαλώδια τα οποία κατασκευάζονται με ηλεκτρολυτικές μεθόδους χρησιμοποιούνται επίσης σε εφαρμογές αισθητήρων [33].

1.2.5.2. Ιδιότητες αισθητήρων

Οι σημαντικότερες ιδιότητες των μαγνητικών αισθητήρων είναι η ομοιομορφία, η ευαισθησία-θόρυβος και η αβεβαιότητα. Η μαγνητική ομοιομορφία, με άλλα λόγια η ομοιομορφία ή η ανομοιομορφία οποιουδήποτε είδους μαγνητικών ιδιοτήτων κατά μήκος του μαγνητικού πυρήνα ανίχνευσης, αποτελεί βασικό ζήτημα για όλους τους μαγνητικούς αισθητήρες, καθορίζοντας την επαναληψιμότητά τους [34].

Η δεύτερη σημαντική ιδιότητα των μαγνητικών πυρήνων είναι η ευαισθησία ή ο θόρυβος τους. Με τον όρο αυτό εννοούμε την ελάχιστη ποσότητα φυσικού μεγέθους, ικανή να μεταβάλει το λιγότερο σημαντικό ψηφίο της εξόδου του αισθητήρα και εξαρτάται κυρίως από τον θόρυβο του μαγνητικού υλικού ή του στοιχείου ανίχνευσης και τον θόρυβο των ηλεκτρονικών που χρησιμοποιούνται για τον αισθητήρα, όσον αφορά την παρακολούθηση και την αποτελεσματική χρήση είτε του βρόχου μαγνήτισης (επαγωγική απόκριση), είτε του βρόχου μαγνητοσυστολής (μαγνητοελαστική απόκριση), είτε της μαγνητοαντίστασης, είτε του βρόχου μαγνητικής εμπέδησης (απόκριση μαγνητομεταφοράς). Η τυπική εξάρτηση του θορύβου από τη συχνότητα ακολουθεί ένα νόμο αντίστροφης τετραγωνικής ρίζας (ο θόρυβος είναι ανάλογος του $f^{-1/2}$) [35].

Η τρίτη σημαντική ιδιότητα ενός μαγνητικού πυρήνα αισθητήρα είναι η αβεβαιότητα στη μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους. Η κύρια πηγή αβεβαιότητας είναι το φαινόμενο της υστέρησης το οποίο υπάρχει σε όλους τους τύπους βρόχων, μαγνήτισης, μαγνητοσυστολής ή μαγνητομεταφοράς, και σχετίζεται επίσης με τη διαδικασία μαγνήτισης και την αλληλεπίδραση μεταξύ μικροδομικών και μαγνητικών ιδιοτήτων [36].

1.2.6. Σχεδιασμός Αισθητήρων

1.2.6.1. Αισθητήρες Μαγνητικού Πεδίου

Οι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου (ή μαγνητόμετρα) αποτελούν τη ναυαρχίδα των μαγνητικών αισθητήρων, αντιπροσωπεύοντας τις περισσότερες δημοσιεύσεις στη διεθνή βιβλιογραφία και τις περισσότερες πατέντες που αφορούν τους μαγνητικούς αισθητήρες. Οι αισθητήρες αυτοί χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες, τους επαγωγικούς, τους αγωγικούς και τους διάφορους αισθητήρες. Οι πιο συνηθισμένοι είναι οι κλασικοί τύπου fluxgate [37]. Στους fluxgate, ο αισθητήρας εκμεταλλεύεται το "γόνατο" της καμπύλης μαγνήτισης, παρέχοντας έτσι μια παλμική έξοδο σήματος υπό ημιτονοειδές ή τριγωνικό σήμα διέγερσης, η χρονική θέση του οποίου μεταβάλλεται με το πεδίο. Μια άλλη διάταξη fluxgate, που προσφέρει καλύτερη ευαισθησία και λόγο σήματος προς θόρυβο (**SNR** – Signal Noise Ratio) είναι ο ορθογώνιος fluxgate [38]. Στην περίπτωση αυτή, το ημιτονοειδές ή τριγωνικό σήμα μεταδίδεται μέσω του πυρήνα ανίχνευσης, ο οποίος είναι ένα άμορφο σύρμα σχεδόν μηδενικής μαγνητικής συστολής για την περίπτωση αυτή, που έχει υποστεί επίσης μαγνητική ανόπτηση.

Εκτός από αυτούς τους δυο fluxgate, στο παρελθόν έχει παρουσιαστεί και ένας άλλος επαγωγικός αισθητήρας, ο οποίος επιτρέπει την κατασκευή ASIC και υβριδικών συστημάτων [39]. Το περιστρεφόμενο πεδίο χρησιμοποιείται για τη μαγνήτιση ενός δισκοειδούς κυκλικού, δισδιάστατου πυρήνα ανίχνευσης με περιστροφικό τρόπο σε επίπεδο, με πεδίο διέγερσης μεγαλύτερο από το πεδίο ανισοτροπίας του πυρήνα ανίχνευσης. Με αυτόν τον τρόπο, δεν παρατηρείται θόρυβος Barkhausen από το στοιχείο ανίχνευσης. Υπάρχουν επίσης και άλλοι τύποι επαγωγικών αισθητήρων που μοιάζουν με fluxgate, μαγνητικών περιοχών, οι οποίοι βασίζονται στη δισταθή (bistable) συμπεριφορά μηδενικής ή αρνητικής μαγνητοσυστολής συρμάτων και καλυμμένων με γυαλί συρμάτων [40].

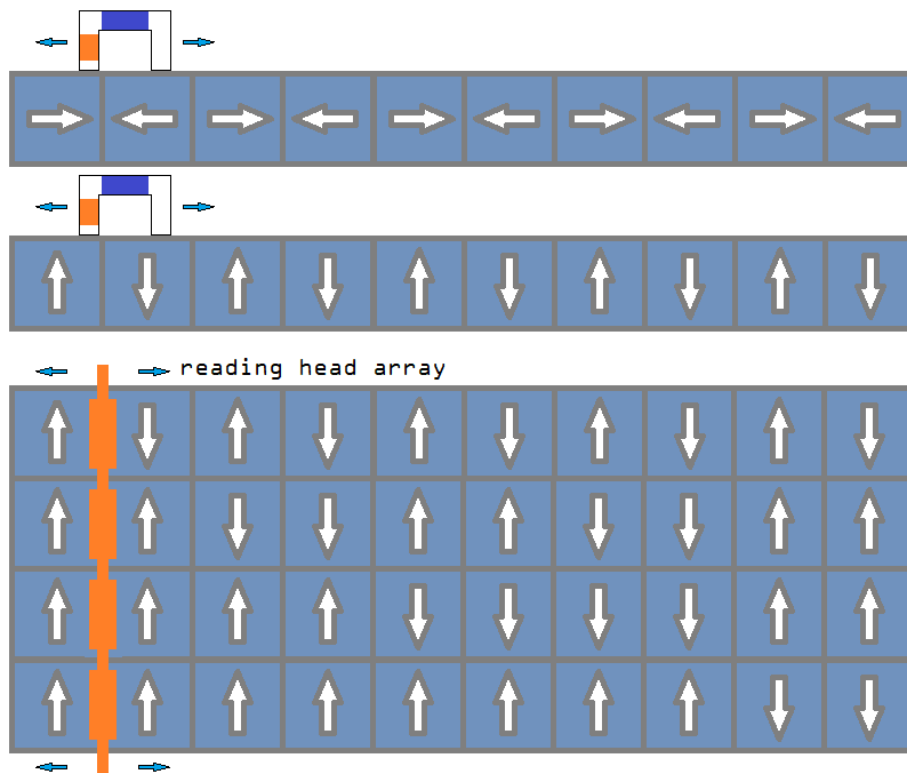
Η άλλη σημαντική κατηγορία στους αισθητήρες πεδίου είναι οι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου με αγώγιμο τρόπο λειτουργίας, που βασίζονται στα φαινόμενα μαγνητομεταφοράς, δηλαδή AMR, GMR και GMI, αλλά και η νέα οικογένεια πολυφερροϊκών αισθητήρων, καθώς και ο αγώγιμος τρόπος λειτουργίας της αρχής του περιστρεφόμενου πεδίου που παρουσιάστηκε παραπάνω [41] [42] [43].

Η τελευταία οικογένεια μαγνητόμετρων είναι η κατηγορία των διαφόρων μαγνητομετρικών διατάξεων. Σε αυτή την κατηγορία βρίσκονται τρεις διαφορετικοί τύποι αισθητήρων: τα πολυφερροϊκά μαγνητόμετρα [44], τα μαγνητόμετρα TMR [45] με βάση τη βαλβίδα spin και ο περιστρεφόμενος αισθητήρας AMR [10].

Όλα αυτά τα μαγνητόμετρα τα οποία βασίζονται σε μαγνητικά υλικά έχουν ένα κοινό πλεονέκτημα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε λειτουργία κλειστού βρόχου ανάδρασης, επιτρέποντας έτσι τη βελτίωση του επιπέδου θορύβου κατά μία τάξη μεγέθους. Λαμβάνεται με τον προγραμματισμό του αισθητήρα για τη μετάδοση συνεχούς ρεύματος στα μέσα διέγερσης, τα οποία μπορούν να περιλαμβάνουν τη συνάρτηση θορύβου του συγκεκριμένου αισθητήρα, μειώνοντας έτσι το επίπεδο θορύβου του.

1.2.6.2. Αισθητήρες Θέσης

Οι αισθητήρες θέσης αποτελούν επίσης μια σημαντική κατηγορία αισθητήρων οι οποίοι βασίζονται σε μαγνητικά υλικά. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε προηγμένες κατασκευαστικές διαδικασίες, σε αυτοματοποιημένα συστήματα, σε έξυπνους δρόμους και πόλεις κ.λπ. Ο τύπος αναφοράς των μαγνητικών αισθητήρων θέσης ήταν η μαγνητική ταινία, ενώ οι μαγνητοσυστολικοί αισθητήρες γραμμής καθυστέρησης έγιναν επίσης σημαντικοί. Εκτός από αυτούς, έχουν προταθεί και άλλοι διάφοροι αισθητήρες, οι οποίοι προσφέρουν εναλλακτικές και δημιουργικές λύσεις για τη μέτρηση της θέσης. Η μαγνητική ταινία ή ο γραμμικός κωδικοποιητής [46] είναι πρακτικά υπόστρωμα που φιλοξενεί μόνιμους μαγνήτες σε αντιπαράλληλη διάταξη, είτε εντός είτε εκτός επιπέδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8. Μια μαγνητική κεφαλή κινείται κατά μήκος του επιπέδου, ανιχνεύοντας εναλλασσόμενα σήματα μαγνήτισης συν και πλην. Αυτός ο συμβατικός σχεδιασμός, που μετράει τις αλλαγές πρόσημου, ονομάζεται αυξητικός ή διαφορικός αισθητήρας θέσης.



Σχήμα 8. Σχηματική αναπαράσταση μαγνητικών ταινιών.

Οι σύγχρονες μαγνητικές ταινίες είναι εξοπλισμένες με δυαδικές λέξεις από μόνιμους μαγνήτες, κατά μήκος της ταινίας, που επιτρέπουν την παρακολούθηση της απόλυτης θέσης για ορισμένα μήκη. Μια σειρά μονών αντίθετων μόνιμων μαγνητών, γειτονεύουν με μια σειρά ζευγών μόνιμων μαγνητών, η οποία γειτονεύει με μια σειρά διπλών ζευγών μόνιμων μαγνητών. Έτσι, μια κατάλληλη διάταξη κεφαλών ανάγνωσης (συστοιχία αισθητήρων GMR ή TMR) μπορεί να παρέχει την απόλυτη θέση, με εύρος που ελέγχεται από τη διάταξη μόνιμου μαγνήτη.

Η δεύτερη οικογένεια αισθητήρων θέσης βασίζονται στην τεχνολογία μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης (**MDL** - Magnetostrictive Delay Line) [47]. Το παλμικό ρεύμα μεταδίδεται μέσω ενός πηνίου διέγερσης που περιβάλλει το στοιχείο ανίχνευσης MDL και δημιουργεί μια παλμική διαμήκη τάση λόγω του φαινομένου της μαγνητοσυστολής, η οποία διαδίδεται ως παλμικό ελαστικό κύμα κατά μήκος των δύο κατευθύνσεων του MDL, επιτρέποντας σε αυτό να λειτουργεί ως ακουστικός κυματοδηγός. Καθώς το υλικό MDL είναι κατασκευασμένο από μαγνητικά εξαιρετικά μαλακή άμορφη μαγνητοσυστολική κορδέλα ή σύρμα $Fe_{78}Si_7B_{15}$, η συνιστώσα του γήινου πεδίου που είναι παράλληλη προς το σύρμα είναι αρκετή για να το μαγνητίσει και να προκαλέσει αλλαγές ροής κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης του ελαστικού παλμού. Έτσι, η τοποθέτηση ενός

πηνίου αναζήτησης σε μια δεδομένη θέση έχει ως αποτέλεσμα μια παλμική τάση εξόδου, με χρόνο καθυστέρησης ανάλογο της απόστασης μεταξύ των πηνίων αναζήτησης και διέγερσης [48].

Ένας εναλλακτικός αισθητήρας θέσης χρησιμοποιεί ζεύγη αγωγών παλμικού ρεύματος, τοποθετημένα συμμετρικά πάνω και κάτω από μαλακούς μαγνήτες, καθώς και έναν μαλακό μαγνητικό δίσκο ως πυρήνα ανίχνευσης που κινείται παράλληλα και κοντά στο MDL. Η ισορροπημένη δομή των αγωγών παλμικού ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα μηδενική μαγνητική ροή στην τομή με το MDL. Με την παρουσία του μαλακού μαγνητικού δίσκου, αυτή η ισορροπημένη συμμετρία των ροών σπάει, επιτρέποντας τη δημιουργία και διάδοση ενός ελαστικού παλμού, ο οποίος ανιχνεύεται από το πηνίο αναζήτησης [49] [50].

Τέλος, έχουν αναπτυχθεί αισθητήρες και ψηφιοποιητές δύναμης, με βάση την τεχνική MDL [51]. Ένα στοιχείο συμπίεσης και κύλισης (όπως καουτσούκ ή πλαστικό ή παρόμοιο) συνδέει το MDL. Κατά συνέπεια, εμφανίζεται μια ελαστική ανάκλαση, με βάση τη δύναμη του στοιχείου πίεσης. Το μέγεθος της ανακλώμενης παλμικής τάσης εξόδου καθορίζει τη δύναμη που εφαρμόζεται στο MDL, ενώ ο χρόνος καθυστέρησης της ανάκλασης καθορίζει τη θέση της δύναμης.

Στο παρελθόν έχουν επίσης προταθεί διάφοροι αισθητήρες θέσης. Για παράδειγμα, στο [52] παρουσιάζεται ένας μαγνητικός αισθητήρας θέσης, ο οποίος προσφέρει γραμμική απόκριση με τη μετατόπιση μιας μαγνητικής ράβδου κατά μήκος ενός ζεύγους μαλακών μαγνητών που τροφοδοτούνται από ρεύμα, χωρίς πηνία αναζήτησης. Αυτός ο τύπος αισθητήρα προσφέρει εύρος διπλάσιο από αυτό του κλασικού γραμμικού μεταβλητού διαφορικού μετασχηματιστή (LVDT).

1.2.6.3. Αισθητήρες Μηχανικών Τάσεων

Οι μετρήσεις μηχανικών τάσεων είναι σημαντικές σε πολλές εφαρμογές, εκ των οποίων η πιο κρίσιμη είναι η παρακολούθηση των παραμενουσών τάσεων, δεδομένου ότι έτσι μπορεί να προβλεφθεί η θέση και την πιθανότητα έναρξης της ρωγμής. Επίσης, σημαντική είναι η παρακολούθηση της τάσης μέσω της τάνυσης του ίδιου του αισθητήριου στοιχείου το οποίο χρησιμοποιείται και για την παρακολούθηση της υγείας του χάλυβα, με βάση συγκεκριμένες τεχνολογίες, όπως η παρακολούθηση του θορύβου Barkhausen (**BHN** – Barkhausen Noise) [53], οι μετρήσεις συσχέτισης της μαγνητικής διαπερατότητας με τις

τάσεις [54] [55] και η μέθοδος της μαγνητικής μνήμης (**MMM** – Magnetic Memory Method) [56].

Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αισθητήρες για τη μέτρηση της επιφανειακής και της μαζικής διαπερατότητας. Η πιο συνηθισμένη είναι η χρήση yoke διέγερσης για τη δημιουργία κλειστού μαγνητικού κυκλώματος, που επιτρέπει τον προσδιορισμό της άγνωστης διαπερατότητας του χάλυβα υπό τάση, γνωρίζοντας τη διαπερατότητα του ζυγού, καθώς και τις συνθήκες διέγερσης του μαγνητικού κυκλώματος. Στην περίπτωση που πρόκειται να παρακολουθηθούν υλικά στην περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης, οι μετρήσεις διαπερατότητας πρέπει να συμπληρώνονται με μετρήσεις μαγνητοσυστολής.

Άλλες εφαρμογές αισθητήρων καλύπτουν την ανάγκη παρακολούθησης των τάσεων σε μαγνητικές, αλλά και σε μη μαγνητικές δομές. Μία από αυτές είναι μια διάταξη ανοικτού βρόχου με πηνίο, που χρησιμοποιεί έναν μαλακό μαγνητοσυστολικό πυρήνα, δηλαδή μια άμορφη μαγνητοσυστολική κορδέλα, ως στοιχείο ανίχνευσης [57]. Μια άλλη μέθοδος είναι η χρήση της αρχής MDL. Με βάση αυτήν, ο συντελεστής μαγνητοελαστικής σύζευξης μειώνεται παρόμοια με τη διάταξη πηνίου - πηνίου και η παλμική τάση εξόδου MDL αλλάζει (μειώνεται). Στην πραγματικότητα, η απόκριση αυτή είναι πολύ ευαίσθητη, προσφέροντας μια εκθετική εξάρτηση της απόκρισης της MDL από την μηχανική τάση [58].

1.2.7. Τάσεις της Τεχνολογίας

Το κύριο σημείο ενδιαφέροντος στις προηγμένες εφαρμογές κατασκευής με τη χρήση μαγνητικών αισθητήρων αφορά τη βιομηχανία χάλυβα. Η κλασική προσέγγιση για την παραγωγή χαλύβδινων πηνίων, φύλλων και ράβδων, καθώς και για την κατασκευή χάλυβα σε αγωγούς, δοχεία, πλοία κ.λπ., είναι η τήρηση προτύπων και διαδικασιών, με στόχο την επαναλαμβανόμενη ποιότητα. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις στις οποίες η επαναλαμβανόμενη αυτή ποιότητα δεν μπορεί να πιστοποιηθεί λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας στον προσδιορισμό της κατανομής του πεδίου τάσεων στον παραγόμενο ή κατασκευασμένο χάλυβα, η οποία είναι υπεύθυνη για τη μελλοντική έναρξη ρωγμών σε αυτόν. Εφόσον υπάρχει μια μέθοδος για την πραγματική παρακολούθηση της κατανομής του τανυστή τάσεων σε ολόκληρη την επιφάνεια ή τον όγκο του παραγόμενου χάλυβα, είναι δυνατή η πρόβλεψη ή η πρόληψη των ρωγμών.

Μια άλλη σημαντική εφαρμογή των μαγνητικών αισθητήρων αφορά τον έλεγχο υποβρυχίων και τον έλεγχο ενάντια στην παράνομη εξόρυξη φυσικών πόρων, μέσω της ανίχνευσης μαγνητικών ανωμαλιών (**MAD** – Magnetic Anomaly Detection). Πράγματι, για την περίπτωση των χαλύβδινων υποβρυχίων, δεν υπάρχει σχεδόν καμία άλλη μέθοδος παρακολούθησης, σε περίπτωση που το πλοίο βρίσκεται σε αθόρυβη λειτουργία, εκτός από το MAD.

Η ανίχνευση μαγνητικών ανωμαλιών μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε γεωλογικές μελέτες. Η παρακολούθηση της μετατόπισης της ηφαιστειακής λάβας, των αποθεμάτων νερού ή πετρελαίου και άλλων γεωλογικών μελετών μπορεί να πραγματοποιηθεί με μελέτες MAD, χρησιμοποιώντας τα ευαίσθητα μαγνητόμετρα τάξης pT, τα οποία λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου.

Όσον αφορά τις βιοϊατρικές εφαρμογές, μαγνητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται στο μαγνητοκαρδιογράφημα και στο μαγνητοεγκεφαλογράφημα. Τα ευαίσθητα μαγνητόμετρα sub-pT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της καρδιακής δραστηριότητας, επιτρέποντας τη χρήση φορητών λύσεων σε ειδικές εφαρμογές παρακολούθησης της καρδιάς, για ηλικιωμένους, αθλητές κ.λπ. Αυτή η on-line παρακολούθηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση των δεδομένων στο ιατρικό κέντρο ή στο γιατρό, προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση της καρδιάς σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η κλασική εφαρμογή του lab-on-a-chip [59] μπορεί να ενισχυθεί από τις ιδιότητες των νέων ευαίσθητων μαγνητομέτρων sub-pT. Έξυπνοι και επαρκώς ευαίσθητοι fluxgate μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση μικρού αριθμού μαγνητικών νανοσωματιδίων, βελτιώνοντας έτσι το επίπεδο ευαισθησίας των διαγνωστικών αισθητήρων.

Τέλος, μια σημαντική τάση που βρήκε το δρόμο της στην αγορά αισθητήρων και ασφάλειας είναι τα όργανα που αφορούν την αντικλεπτική τεχνολογία. Τα όργανα αυτά, έχουν διεισδύσει στην αγορά ασφάλειας σε διεθνές επίπεδο και βασίζονται στις εξαιρετικά μαλακές μαγνητικές ιδιότητες των νανοκρυσταλλικών υλικών και ενώσεων [60].

1.3. Μη καταστροφικός έλεγχος

Η χρήση αισθητήρων επιτρέπει τον χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων των υλικών, το οποίο είναι απαραίτητο για την κατανόηση της συμπεριφοράς τους σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και ενώ βοηθάει τον σχεδιασμό νέων προϊόντων. Η ανάγκη για αξιόπιστο χαρακτηρισμό υλικών και δομών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων τεχνικών και οργανολογίας. Πολλές από τις μεθόδους χαρακτηρισμού απαιτούν επέμβαση η οποία καταστρέφει την υπό εξέταση δομή, ενώ παράλληλα τους διαφεύγουν ουσιώδη δεδομένα σχετικά με τις ιδιότητες του υλικού στο λειτουργικό του περιβάλλον. Τέτοια δεδομένα λαμβάνονται χρησιμοποιώντας τις μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου (ΜΚΕ). Οι όροι μη καταστροφικός έλεγχος (**NDI** - Nondestructive Inspection), μη καταστροφική δοκιμή (**NDT** - Nondestructive Testing) ή μη καταστροφική αξιολόγηση (**NDE** - Nondestructive Evaluation) αναφέρονται στη χρήση των ΜΚΕ, μιας κατηγορίας δηλαδή φυσικών δοκιμών ανίχνευσης και μέτρησης ιδιοτήτων των υλικών χωρίς να επεμβαίνουν στην λειτουργική χρήση της δομής [61].

Ο ΜΚΕ έχει γίνει αναπόσπαστο μέρος της μελέτης των υλικών διότι επιτρέπει τον προσδιορισμό των παραμέτρων του υλικού (όπως η μικροδομή και η μακροδομή, η μηχανική τάση, οι φυσικές ιδιότητες, και τα ελαττώματα ή οι βλάβες) σε σχεδόν οποιοδήποτε σημείο, γραμμή, επιφάνεια, ή όγκο ενδιαφέροντος και σε σχεδόν οποιαδήποτε κατάσταση κατά τη διάρκεια ζωής του υλικού. Ο μη καταστροφικός έλεγχος αναφέρεται σε πολλές διαφορετικές μεθόδους οι οποίες βασίζονται σε ελαστικά κύματα, διεισδύουσες ακτινοβολίες, φως, ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, χημικά αισθητήρια, κλπ. Η κάθε μέθοδος μπορεί να χωρίζεται σε διαφορετικές τεχνικές, οι οποίες έχουν κοινή φυσική βάση (π.χ. ακουστική, οπτική, μαγνητισμός, κλπ.), όμως διαφοροποιούνται ως προς την εφαρμογή τους σε εργαστηριακό επίπεδο ή στο πεδίο σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή κατά τη λειτουργία του εξαρτήματος ή της κατασκευής. Λόγω του μεγάλου αριθμού πιθανών μεθόδων και τεχνικών μη καταστροφικού χαρακτηρισμού και αξιολόγησης υλικών και δομών, οι ΜΚΕ δεν είναι ένα μεμονωμένο πεδίο, αλλά μια συνέργεια πολλών επιστημονικών και τεχνικών ειδικοτήτων [61].

1.4. State-of-the-Art

1.4.1. Γενικά

Η ανάλυση με την μέθοδο των μαγνητικών κυκλωμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει έναν τεράστιο αριθμό διατάξεων. Ως εκ τούτου, οι εφαρμογές οι οποίες προκύπτουν και περιγράφονται στην διεθνή βιβλιογραφία είναι διαφόρων κατηγοριών, οι κυριότερες των οποίων είναι:

- Ηλεκτρικές Μηχανές
- Συστήματα Φόρτισης – Συγκομιδή Ενέργειας
- Μαθηματικά Μοντέλα – Προσομοιώσεις
- Μαγνητική Αποτύπωση Δεδομένων
- Μετασχηματιστές
- Ασύρματη Μεταφορά Ισχύος
- Αισθητήρες
- Διάφορες άλλες εφαρμογές

Στις παρακάτω παραγράφους γίνεται μια ενδεικτική αναφορά κάποιων θεμάτων και διατάξεων της διεθνούς βιβλιογραφίας τα οποία και δείχνουν την χρησιμότητα των μαγνητικών κυκλωμάτων στις σύγχρονες τεχνολογίες. Στις περισσότερες από αυτές τις διατάξεις χρησιμοποιείται για την ανάλυση το ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα (**MEC** - Magnetic Equivalent Circuit) και η μαθηματική μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (**FEM** - Finite Elements Method) [62].

1.4.2. Ηλεκτρικές Μηχανές

Στο [63] αναλύονται οι γραμμικοί σύγχρονοι υπεραγώγιμοι κινητήρες διπλής όψης με πυρήνα αέρα (**DSAC-SLSM** - Double-Sided Air-Cored Superconducting Linear Synchronous Motors), καθώς παίζουν σημαντικό ρόλο στις σύγχρονες αμαξοστοιχίες μαγνητικής αιώρησης. Στο [64], προτείνεται ένας σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (**FIPMSM** -

Flux-Intensifying Permanent Magnet Synchronous Motor) και το μοντέλο του ισοδύναμου μαγνητικού κυκλώματος (MEC), για την λύση του οποίου χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος διατύπωσης ανάλυσης πλέγματος. Στο [65] περιγράφεται μια νέα μέθοδος ανάλυσης για μηχανές εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη (**IPM** – Internal Permanent Magnet) με προεξοχή, στις οποίες το αξονικό μήκος του ρότορα υπερβαίνει εκείνο του στάτη. Η υιοθέτηση μιας δομής προεξοχής διευκολύνει την επίτευξη υψηλής πυκνότητας ροπής σε σχέση με τον όγκο της μηχανής χωρίς αύξηση του μεγέθους του στάτη λόγω της πρόσθετης μαγνητικής ροής του δρομέα. Στο [66] αναλύεται η υβριδική μηχανή μαγνητικής μνήμης μεταβλητής ροής με υβριδικό μαγνητικό κύκλωμα 30 kW (**HMC-VFMM** - Hybrid-Magnetic-Circuit Variable Flux Hybrid Magnet Memory Machine) με διάταξη μαγνήτη τύπου δέλτα. Στο [67] προτείνεται μια σθεναρή μέθοδος βελτιστοποίησης για υβριδικές μηχανές μόνιμου μαγνήτη (**HPM** - Hybrid Permanent Magnet), με στόχο την εξάλειψη της επιρροής των ασύμμετρων αβεβαιοτήτων των μόνιμων μαγνητών. Στο [68] αναλύεται μια ακριβής μέθοδος για την ανίχνευση και τη διάκριση μεταξύ των διαφόρων τύπων σφαλμάτων σε σύγχρονες γεννήτριες με εξέχοντα πόλο (**SPSG** - Salient Pole Synchronous Generators). Οι διαδικασίες επιθεώρησης και συντήρησης σε SPSG είναι επίσης δαπανηρές και χρονοβόρες- επομένως, είναι ιδιαίτερα επιθυμητές αξιόπιστες μέθοδοι που μπορούν να ανιχνεύουν και να διακρίνουν μεταξύ διαφορετικών βλαβών χωρίς σύγκριση με την υγιή κατάσταση.

Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στα διάκενα αέρος (air gaps) έχει μεγάλη σημασία για το σχεδιασμό περιστροφικών μηχανών, και βάση αυτού στο [69] παρουσιάζεται μια αποτελεσματική αναλυτική μέθοδος, η οποία είναι ικανή να σχεδιάσει την κυματομορφή της πυκνότητας ροής στα διάκενα αέρα των μηχανών επαγωγής, λιγότερο χρονοβόρα από ό,τι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων. Στο [70] παρουσιάζεται τη δυναμική συμβολή των τμηματοποιημένων μαγνητικών κυκλωμάτων στάτη των περιστρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών μόνιμου μαγνήτη με ομόκεντρο τύλιγμα.

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορους τομείς λόγω των πλεονεκτημάτων της υψηλής πυκνότητας ισχύος, της υψηλής απόδοσης και της υψηλής αξιοπιστίας. Με βάση αυτό στο [71] αναλύεται η ροπή στρέψης των γεννητριών με διαφορετικό συντονισμό σχισμών και πόλων και επιλέγει τον βέλτιστο λόγο πόλων-σχισμών παίρνοντας ως παράδειγμα τον σχεδιασμό μιας μηχανής 12 MW.

Σύμφωνα με το [72] η ομοιοπολική μηχανή επαγωγής (**HIM** - Homopolar Inductor Machine) έχει προσελκύσει μεγάλη προσοχή στον τομέα του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με σφονδύλους (**FESS** - Flywheel Energy Storage System) λόγω των πλεονεκτημάτων του στιβαρού ρότορα, της διέγερσης χωρίς ψήκτρες και της υψηλής αξιοπιστίας. Με στόχο την επιρροή στην πραγματική ταχύτητα που προκαλείται από το επαγόμενο ρεύμα του δρομέα του τυλίγματος ανάρτησης ενός επαγωγικού κινητήρα χωρίς ρουλεμάν (**SBIM** - Squirrel-Cage Bearingless Induction Motor), στο [73] βλέπουμε την σχεδίαση ενός κινητήρα τριών ταχυτήτων με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα στάτη-ρότορα. Στο [74] παρουσιάζεται μια διπλή-τριφασική γεννήτρια εκκίνησης υψηλής ταχύτητας, υψηλής ισχύος, με σύγχρονο μαγνήτη υποβοηθούμενο από μόνιμο μαγνήτη (**PMaSynR SG** - Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Starter Generator) για αεροπορικές εφαρμογές.

Οι σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη μεταβλητής ροής (**PMSMs** - Permanent Magnet Synchronous Machines) οι οποίες χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες χαμηλού συνεκτικού πεδίου έχουν κερδίσει μεγάλη προσοχή ως εναλλακτική λύση προοπτικής στην εφαρμογή οδήγησης μεταβλητών ταχυτήτων για τα πλεονεκτήματά τους να λειτουργούν με βελτιωμένη απόδοση σε υψηλότερες ταχύτητες μέσω της προσαρμογής των καταστάσεων μαγνήτισης των PMSMs μεταβλητής ροής. Στο [75] διερευνάται μια μηχανή μεταβλητής ροής με υβριδικό μαγνήτη, η οποία διαθέτει μεταβλητό μαγνητικό κύκλωμα σειράς-παράλληλης ροής, ενώ στο [76], διερευνάται η δυνατότητα ανίχνευσης σφαλμάτων μόνιμων μαγνητών σε PMSM χρησιμοποιώντας ένα συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο (**CNN** - Convolutional Neural Network).

Ο ενεργός έλεγχος καύσης (**ACC** - Active Combustion Control) είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για την καταστολή των ταλαντώσεων πίεσης στους θαλάμους καύσης των αεροκινητήρων, οι οποίες θέτουν σε σοβαρό κίνδυνο την ασφάλεια των αεροσκαφών κατά την πτήση. Σύμφωνα με το [77], οι ενεργοποιητές ACC πρέπει να λειτουργούν ταυτόχρονα με εύρος ζώνης 1000 Hz και υψηλή πυκνότητα ισχύος. Έτσι, αναπτύχθηκε ένας πολυδιάστατος διακριτός μαγνητοσυστολικός ενεργοποιητής (**MDMA** - Multidimensional Discrete Magnetostrictive Actuator) με την υιοθέτηση της πολυδιάστατης διακριτής διαμόρφωσης.

Η γεννήτρια εξωτερικού δρομέα με διπλή περιέλιξη τύπου Vernier με μόνιμο μαγνήτη (**VPM** - Vernier Permanent Magnet), διαθέτει διφασικές περιελίξεις οι οποίες εισάγονται στον πυρήνα του στάτη με δύο επίπεδα σχισμών ρηγά και βαθιά και κορεσμένα δόντια με στενές περιοχές, έχει ήδη παρουσιαστεί και μελετηθεί για τις εφαρμογές κάμερας επιβολής της κυκλοφορίας. Οι διαδρομές των γραμμών ροής σε αυτή τη γεννήτρια VPM έχουν ένα πολύπλοκο μοτίβο λόγω των υφιστάμενων πόλων διαμόρφωσης ροής, των βαθιών σχισμών και των ροών κροσσών και διαρροής σε διάφορα μέρη. Ως εκ τούτου, η ακριβής αναλυτική μοντελοποίηση αυτής της ειδικής μηχανής απαιτεί μια προηγμένη μέθοδο και στο [78] προτείνεται το μοντέλο ισοδύναμου μαγνητικού δικτύου της γεννήτριας VPM συνδυάζοντας το μοντέλο δικτύου εμπέδησης και το μαγνητικό ισοδύναμο κύκλωμα.

Οι ιδιότητες μαγνήτισης των μόνιμων μαγνητών χαμηλού συνεκτικού πεδίου (**LCF** – Low Coercive Field), όπως η παραμένουσα πυκνότητα ροής, η συνεκτικότητα και οι κλίσεις της καμπύλης υστέρησης, συνδέονται στενά με τα χαρακτηριστικά μαγνήτισης της μηχανής μεταβλητής μνημονικής ροής (**VFMM** - Variable Flux Memory Machine). Στο [79] μελετάται η εγγενή σχέση μεταξύ των ιδιοτήτων των μόνιμων μαγνητών LCF και των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών των VFMM χρησιμοποιώντας μια συνδυασμένη λύση ενσωματωμένη με ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα και γραφικές μεθόδους. Στο [80], υπολογίζεται η απώλεια σιδήρου για τη μηχανή μόνιμου μαγνήτη εναλλαγής ροής με τροφοδοσία μετατροπέα εύρους παλμών (**PWM** – Pulse Width Modulation) με βάση τη γενική θεωρία διαμόρφωσης πεδίου για διάκενα αέρος (**GAFMT** - General Airgap Field Modulation Theory).

Η πτώση τάσης αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της ποιότητας ισχύος κατά τη λειτουργία των συστημάτων διανομής ρεύματος και προκαλείται από την ταυτόχρονη εκκίνηση των κινητήρων άντλησης νερού. Στο [81] διερευνάται ο μετριασμός της πτώσης τάσης σε ένα πραγματικό σύστημα διανομής στην Αίγυπτο με ταυτόχρονη εκκίνηση πολλών συνδεδεμένων κινητήρων άντλησης νερού με τη χρήση μονάδας υπεραγωγίσιμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας (**SMES** - Superconducting Magnetic Energy Storage).

Προκειμένου να προωθηθεί ο σχεδιασμός και ο έλεγχος ενός **FTS** (Fast Tool Servo) στο [82] προτείνεται ένα ολοκληρωμένο μοντέλο δυναμικής που βασίζεται στις αρχές των μαγνητικών ισοδύναμων κυκλωμάτων. Στο [83] παρουσιάζεται μια μηχανή στερεού ρότορα με διέγερση μόνιμου μαγνήτη στο στάτη (**SPE-SRM** - Stator PM Excitation Solid Rotor Machine) για **FESS** (Flywheel Energy Storage System).

Μια αμαξοστοιχία αιώρησης μπορεί να επιτύχει υψηλότερη ταχύτητα κίνησης εκμεταλλευόμενη το ισχυρό μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από υπεραγωγίσιμους μαγνήτες υψηλής θερμοκρασίας (**HTS** - High-Temperature Superconducting Magnets). Στο [84] βελτιώνεται η περιέλιξη του στάτη μεγάλου μήκους με την κλιμάκωση των πηνίων διπλής στρώσης. Στο [85] παρουσιάζεται ένας οδοντωτός κινητήρας γραμμικής υβριδικής εμπέδησης (**MLHRM** – Modular split-tooth Linear Hybrid Reluctance Motor) με ενσωματωμένους μόνιμους μαγνήτες για την επίτευξη βελτιωμένων επιδόσεων των γραμμικών κινητήρων μεταβαλλόμενης εμπέδησης (**LSRM** - Linear Switched Reluctance Motors). Στο [86] προτείνεται μια μέθοδος ελέγχου χειρισμού της κατάστασης μαγνήτισης (**MS** - Magnetization State) ενός **VFMM** (Variable Flux Memory Machine), όπου οι μεταβλητές χρονικές τροχιές ρεύματος μαγνήτισης μπορούν να ελεγχθούν προσαρμοστικά για να μειωθούν οι απώλειες της.

1.4.3. Συστήματα Φόρτισης – Συγκομιδή Ενέργειας

Η τεχνολογία επαγωγικής μεταφοράς ισχύος (**IPT** - Inductive Power Transfer) προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη λύση για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων (**EV** – Electric Vehicles) επιτρέποντας τα να φορτίζουν χρησιμοποιώντας μαγνητική σύζευξη μεταξύ επαγωγικών πηνίων. Η υλοποίηση της ασύρματης φόρτισης των EV θα μπορούσε να είναι: (i) στατική, κατά την οποία η φόρτιση πραγματοποιείται ενώ το EV βρίσκεται σε μακροχρόνια στάθμευση, (ii) δυναμική (εν κινήσει), η οποία συμβαίνει όταν το EV κινείται με υψηλή ταχύτητα ή (iii) ημι-δυναμική, η οποία μπορεί να συμβεί όταν το EV βρίσκεται σε παροδικές στάσεις ή κινείται με χαμηλή ταχύτητα. Στο [87] παρουσιάζεται μια εκτενής επισκόπηση για τα συστήματα IPT στη δυναμική φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Τα αυτοματοποιημένα καθοδηγούμενα οχήματα (**AGV** - Automated Guided Vehicles) τείνουν να περιλαμβάνουν όλο και περισσότερες συσκευές και άρα είναι απαραίτητο να

αναπτυχθεί ένας ευέλικτος φορτιστής με διαφορετικές διπλές εξόδους όπως το σύστημα επαγωγικής φόρτισης διπλού δέκτη το οποίο παρουσιάζεται στο [88]. Μέσω μιας καλά οργανωμένης δομής μαγνητικής σύζευξης, οι σχετικά ανεξάρτητες από το φορτίο εξοδοί μπορούν να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα από αυτούς τους δύο δέκτες. Επίσης, στο [89] προτείνεται ένας ημιενεργός τριφασικός μετατροπέας συντονισμού δευτερεύουσας πλευράς (**SS-SA3PI** - Secondary-Side Semiactive 3-Phase Interleaved) που χρησιμοποιεί ένα σχήμα διαμόρφωσης πολλαπλών τρόπων για εφαρμογές γρήγορων φορτιστών EV. Χρησιμοποιείται ένα σχήμα διαμόρφωσης πολλαπλών τρόπων για να διευρυνθεί το εύρος της τάσης εξόδου χωρίς προβλήματα δυναμικής μεταγωγής. Στο [90] προτείνεται μια διάταξη ενίσχυσης μαλακής μεταγωγής με ενδιάμεση εναλλαγή με ένα απλό βοηθητικό κύκλωμα, η οποία είναι κατάλληλη για αυτόνομα φορτία ή εφαρμογές δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε αυτή την τοπολογία, τα συζευγμένα πηνία και οι πυκνωτές συγχωνεύονται για να επιτευχθεί υψηλός λόγος μετατροπής τάσης. Στο [91] παρουσιάζεται μια θεωρητική και πειραματική διερεύνηση ενός μηχανισμού συγκομιδής τριβοηλεκτρικής ενέργειας, η οποία περιέχει φιμ με μοτίβο πλέγματος και έναν μαγνητικό δισταθή μηχανισμό για διπλή ενίσχυση της απόδοσης ισχύος με επίπεδη λειτουργία ολίσθησης. Ο δισταθής μηχανισμός έχει αποδειχθεί ότι μετατοπίζει τη ζώνη συχνοτήτων του μηχανισμού συγκομιδής σε τιμές χαμηλότερης συχνότητας, η οποία είναι σχεδόν διπλάσια από αυτή της ίδιας συγκομιδής χωρίς αυτόν τον μηχανισμό.

Το άρθρο [92] προτείνει ένα ψηφιακά ελεγχόμενο κύκλωμα διαχείρισης ισχύος (**PMC** - Power Management Circuit) για τη συλλογή ενέργειας από κραδασμούς σε ένα σύστημα ανάρτησης οχήματος. Το PMC ελέγχεται με έναν συλλέκτη ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που βασίζεται σε μηχανικό ανορθωτή κίνησης (**MMR** - Mechanical Motion Rectifier) ο οποίος μετατρέπει από αμφίδρομη δόνηση σε μονοκατευθυντική περιστροφή, με βελτιωμένη απόδοση στη συλλογή ενέργειας. Στο [93] σχεδιάζεται ένας ενσωματωμένος επαγωγέας για έναν συμπαγή ενσωματωμένο φορτιστή μπαταρίας. Χρησιμοποιείται τοπολογία buck μεταγωγής μηδενικής τάσης (**ZVS** - Zero-Voltage Switching) για την επίτευξη υψηλής πυκνότητας ισχύος. Στο [94] διερευνώνται τα χαρακτηριστικά απώλειας εναλλασσόμενου ρεύματος σε δείγματα πηνίων **HTS** (High Temperature Superconducting) υπό συνήθεις συνθήκες για συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος.

Η κατανομή τάσης στον μαγνήτη του υπεραγωγίμου συστήματος αποθήκευσης μαγνητικής ενέργειας (**SMES** - Superconducting Magnetic Energy Storage) είναι το αποτέλεσμα της συνδυασμένης επίδρασης της ζήτησης ισχύος του συστήματος, του ελέγχου λειτουργίας του συστήματος κατάστασης ισχύος (**PCS** - Power Condition System) και των παραμέτρων μαγνήτη. Σύμφωνα με το [95] είναι ένα βασικό ζήτημα που επηρεάζει τη σταθερότητα και ασφάλεια του μαγνήτη SMES. Για να μελετηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών εξαρτημάτων και των παραγόντων επιρροής στην κατανομή της τάσης στον μαγνήτη κατασκευάζεται το υβριδικό μοντέλο το οποίο ενσωματώνει τη δυναμική του συστήματος ισχύος, τη λεπτομερή περιγραφή της συσκευής PCS και το μεταβατικό μοντέλο μαγνήτη.

1.4.4. Μαθηματικά Μοντέλα - Προσομοιώσεις

Το σύστημα εξομοιωτή ηλεκτρικών μηχανών (**EME** - Electric Machine Emulator) έχει αναπτυχθεί για δοκιμή ηλεκτρονικών ισχύος. Η ακρίβεια του εξομοιωτή, ειδικά η ακρίβεια του μοντέλου κινητήρα, είναι ζωτικής σημασίας σε αυτό το σύστημα. Το παραδοσιακό μοντέλο σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (**PMSM** - Permanent-Magnet Synchronous Motor) αγνοεί τη μη γραμμικότητα, ενώ το μοντέλο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (**FEA** – Finite Elements Analysis) και η ανάλυση μαγνητικού κυκλώματος (**MEC** - Magnetic Circuit Analysis) δεν είναι κατάλληλα για συστήματα EME πραγματικού χρόνου. Στο [96] προτείνεται μια βελτιωμένη μέθοδος μοντελοποίησης PMSM κατανεμημένων παραμέτρων, η οποία ενσωματώνει τον μαγνητικό κορεσμό, τις χωρικές αρμονικές και τη διασταυρούμενη σύζευξη σε μια μαθηματική σχέση.

Στη γενική περίπτωση, συσκευές όπως ο μετασχηματιστής έχουν σχεδιαστεί με το διάκενο αέρος όσο το δυνατόν μικρότερο υποθέτοντας ότι η μαγνητική ροή σε αυτό δεν εξαπλώνεται και έτσι, είναι δυνατός ο υπολογισμός της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο αέρα του ηλεκτρομαγνήτη χρησιμοποιώντας την μέθοδο ανάλυσης μαγνητικού κυκλώματος. Ωστόσο, ορισμένες συσκευές απαιτούν μεγάλο διάκενο αέρα για τη χρήση του χωρικού μαγνητικού πεδίου και έτσι γίνεται δύσκολο να υπολογιστεί η μαγνητική του αντίσταση. Στο [97], οι συγγραφείς υποθέτουν ότι το ευρύ διάκενο αέρα ενός ηλεκτρομαγνήτη μπορεί να εξομοιωθεί από ένα σωληνοειδές απείρου μήκους μια ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα απεριόριστου μήκους με αντίστροφη μαγνητεγερτική δύναμη.

Τα επίπεδα (τύπου pancake) πηνία χωρίς μόνωση (**NI** – No-Insulation) από **REBCO** (Rare-Earth Barium Copper Oxide) έχουν προσελκύσει μεγάλη προσοχή λόγω της υψηλής θερμικής σταθερότητάς τους, ενώ αναμένεται να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή σύγχρονων κινητήρων για πρόωση πλοίων και αεροσκαφών. Οι απώλειες εναλλασσόμενου ρεύματος σε πηνία pancake NI REBCO που εκτίθενται σε μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία προσομοιώνονται στο [98] χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος μερικών στοιχείων (**PEEC** - Partial Element Equivalent Circuit). Με παρόμοιο τρόπο, στο [99] περιγράφεται μια τεχνολογία επίπεδου πηνίου REBCO τύπου pancake, χωρίς μόνωση (NI) για εφαρμογές σε ιατρικά κυκλοτρόνια και μαγνητική τομογραφία ολόκληρου του σώματος υψηλού πεδίου (high-field whole-body MRI).

Μια ανάλυση για έναν νέο τύπο αισθητήρων ανάλυσης θέσης ρότορα μεταβλητής εμπέδησης (VR-Resolvers) με τοροειδείς περιελίξεις με βάση τη μέθοδο του μαγνητικού ισοδύναμου κυκλώματος (**MEC** – Magnetic Equivalent Circuit) παρουσιάζεται στο [100]. Διαφορετικές περιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένων διαφόρων διαμορφώσεων περιελίξεων καθώς και διαφορετικών δομών ρότορα εξετάζονται προκειμένου να διερευνηθεί με ακρίβεια η απόδοση του αναλυτή θέσης.

Η μονάδα δοκιμών **DTT** (Divertor Tokamak Test) αποτελεί μέρος του προγράμματος Eurofusion για τη μελέτη εναλλακτικών λύσεων στο πρόβλημα θερμικού φορτίου. Το μαγνητικό σύστημα της DTT, το οποίο περιλαμβάνει υπεραγωγία πηνία, είναι ένα σημαντικό μέρος της εγκατάστασης. Αποτελείται από πολλά μέρη που συνδέονται αμοιβαία μεταξύ τους: έξι πηνία κεντρικού σωληνοειδούς (**CS** - Central Solenoid), έξι πηνία πολοειδούς πεδίου (**PF** - Poloidal Field), τις παθητικές δομές και το πλάσμα. Σύμφωνα με το [101] μια διακύμανση ρεύματος σε οποιοδήποτε πηνίο (CS ή PF) μπορεί να προκαλέσει σημαντική διακύμανση ρεύματος ή τάσης στα άλλα, καθώς και αλλαγή του ρεύματος πλάσματος. Ειδικότερα, κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης διακοπής του πλάσματος, η μαγνητική ροή στο Tokamak αλλάζει δημιουργώντας υπέρταση ή/και υπερβολικό ρεύμα σε κάθε πολοειδές πηνίο και μπορεί να είναι η αιτία σοβαρής βλάβης στα εξαρτήματα. Η εκτίμηση της υπέρτασης έχει πραγματοποιηθεί με ηλεκτρομαγνητική ανάλυση σε περιβάλλον *ANSYS* σε διαφορετικές αρχικές συνθήκες λαμβάνοντας υπόψη και προσομοιώνοντας δύο πιθανές ηλεκτρικές μεταβατικές καταστάσεις: ένα συμβάν Διάσπασης και μια σημαντική διακοπή του πλάσματος.

Η μαγνητική μέτρηση των σωληνοειδών βασίζεται σε διαφορετικές μεθόδους για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας του πεδίου και τον εντοπισμό του μαγνητικού άξονα. Στο [102] παρουσιάζεται μια ροομετρική μέθοδος για τη μέτρηση της εξάρτησης του ακτινικού πεδίου και του μαγνητικού άξονα με ένα μόνο όργανο. Ο μορφοτροπέας ηλεκτρομαγνητικού πεδίου βασίζεται σε μια διάταξη επαγωγικού πηνίου σε σχήμα δίσκου με ομόκεντρα πηνία και τμήματα τόξου 90 μοιρών τοποθετημένα σε μια βαθμίδα μεταφοράς. Αυτό επιτρέπει τη δειγματοληψία του μαγνήτη κατά μήκος του άξονά του και την εξαγωγή τόσο των στοιχείων του διαμήκους όσο και του εγκάρσιου πεδίου

Το άρθρο [103] προτείνει ένα νέο μοντέλο προσομοίωσης υψηλής πιστότητας κινητήρα επαγωγής (**IM** – Induction Motor). Το προτεινόμενο μοντέλο επιτρέπει γρήγορη και ακριβή προσομοίωση του IM με το μοντέλο του κυκλώματος μετατροπέα και τον αλγόριθμο ελέγχου. Το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να αντιπροσωπεύει μη ιδανικά χαρακτηριστικά του IM, όπως ο μαγνητικός κορεσμός, οι χωρικές αρμονικές, η απόκλιση από τον κύριο άξονα και η προκαλούμενη από τον κορεσμό υπεροχή με υψηλή ακρίβεια.

Στο [104] αναπτύσσεται ένα μη γραμμικό αναλυτικό μοντέλο (NAM) για την πρόβλεψη της απώλειας μαγνήτη των επιφανειακά τοποθετημένων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη (PM). Η αναλυτική έκφραση του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού στην περιοχή του PM προέρχεται από την εξίσωση για το διάκενο αέρα χωρίς σχισμή και, στη συνέχεια, επεκτείνεται για το διάκενο αέρα με σχισμή με βάση τη μέθοδο σύμμορφης χαρτογράφησης. Οι PM, η μη γραμμικότητα του σιδήρου και το ρεύμα περιέλιξης που συμβάλλουν στα δινορεύματα αντιπροσωπεύονται όλα με ισοδύναμο ρεύμα στο αναλυτικό μοντέλο. Στο [105] αναπτύσσεται ένα συμπαγές υπεραγώγιμο κυκλοτρόνιο υψηλής θερμοκρασίας (HTS), με το όνομα Skeleton Cyclotron, το οποίο μπορεί να επιταχύνει διάφορα σωματίδια και μεταβλητή ενέργεια για παραγωγή ραδιοϊσοτόπων (RI). Το σύστημα πηνίου του Skeleton Cyclotron αποτελείται από κυκλικά κύρια πηνία και πηνία μη κυκλικού τομέα τα οποία τυλίγονται με τεχνική περιέλιξης χωρίς μόνωση (NI) με ταινία REBCO για υψηλή πυκνότητα ρεύματος και θερμική σταθερότητα. Σε συνέχεια της ίδιας μελέτης στο [106] αναφέρεται ότι το Skeleton Cyclotron αποτελείται από κυκλικά κύρια πηνία για το ισόχρονο πεδίο και μη κυκλικά πηνία τομέα για το αζιμουθιακά μεταβαλλόμενο πεδίο (**AVF** - Azimuthally Varying Field). Προκειμένου να καθιερωθεί η τεχνολογία ανάπτυξης του συστήματος πολλαπλών πηνίων HTS, σχεδιάστηκε ένα μικρό

σύστημα πολλαπλών πηνίων με το μισό μέγεθος, με ρεύμα λειτουργίας 540 A, θερμοκρασία λειτουργίας 20 K και μαγνητικό πεδίο 1.6 T όταν η ακτίνα εξαγωγής είναι 0.2 m. Στο [107] κατασκευάστηκε ένα πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων το οποίο επιτρέπει μια λεπτομερή προσομοίωση των συμπεριφορών μεταφοράς των πηνίων NI. Κρίσιμα προβλήματα, συμπεριλαμβανομένων των συμπεριφορών κυκλοφορίας και ακτινικής ηλεκτρομαγνητικής μεταφοράς κατά τη διαδικασία διέγερσης με διαφορετικούς ρυθμούς ράμπας, η θερμική διάδοση σε συνθήκες υπερέντασης και η σχετιζόμενη προστασία απόσβεσης, αλλά και η επίδραση της παράλληλης περιέλιξης των ταινιών από ανοξείδωτο χάλυβα διερευνώνται χρησιμοποιώντας το προτεινόμενο μοντέλο.

Στο [108] παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για τη μοντελοποίηση 2-D μηχανών IPM με κυλινδρικά και μη κυλινδρικά πλαίσια ρότορα. Στην προτεινόμενη μεθοδολογία, οι εσωτερικοί μαγνήτες χαρτογραφούνται πρώτα στην επιφάνεια του σώματος του ρότορα χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο μοντέλο μαγνητικού κυκλώματος. Στο [109] παρουσιάζεται μια μέθοδος ελέγχου χωρίς αισθητήρα η οποία βασίζεται στην παρεμβολή σήματος μέσω ενός κυκλώματος υπεραυτού φίλτρου (**HPF** – High Pass Filter) για τον έλεγχο του μη-συμμετρικού δισταθούς πολυμαγνητικού κυκλώματος μόνιμου μαγνητικού ενεργοποιητή (unsymmetrical bistable multimagnetic circuit permanent magnetic actuator). Στο [110] ένας μαγνητοηλεκτρικός αισθητήρας στερεάς κατάστασης (ME) εφοδιασμένος με ενισχυτή φορτίου προτείνεται σε αυτή τη μελέτη ως παράδειγμα ανάλυσης χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα και προσομοίωσης αυτών των κυκλωμάτων χρησιμοποιώντας προσομοιωτές κυκλώματος που βασίζονται στο SPICE. Στο [111] προτείνεται ένα σχήμα ελέγχου κλειστού βρόχου μονής σύνδεσης ροής για επαφές που χρησιμοποιούν γρήγορο έλεγχο διέγερσης.

1.4.5. Μαγνητική Αποθήκευση Δεδομένων

Τα κράματα μετάλλων μετάπτωσης είναι απαραίτητα για τη μαγνητική εγγραφή, τη μνήμη και τις νέες εφαρμογές σχεδιασμού υλικών. Στο [112] προτείνεται μια μέθοδος για την κατασκευή πλήρων διαγραμμάτων μαγνήτισης κορεσμού για κράματα Co-Fe-Ni χρησιμοποιώντας μικροσκοπία σάρωσης Hall (**SHPM** - Scanning Hall Probe Microscopy). Η εξάρτηση της μαγνήτισης κορεσμού για τα δυαδικά κράματα ήταν σύμφωνη με τη

συμπεριφορά Slater-Pauling [113]. Χρησιμοποιώντας μια σημαντικά πυκνότερη κατανομή σημείων δεδομένων από ό,τι ήταν προηγουμένως διαθέσιμη, το μέγιστο της καμπύλης Slater-Pauling για τα κράματα Co-Fe προσδιορίστηκε σε ~ 32 % Co.

Η μαγνητική εγγραφή υποβοηθούμενη από μικροκύματα (**MAMR** - Microwave Assisted Magnetic Recording) είναι μία από τις βασικές υποψήφιες τεχνολογίες για μαγνητική εγγραφή κατηγορίας 10 Terabits. Στο [114] εξετάζεται η τεχνολογία MAMR και η εφαρμογή της στις κυψέλες σκληρών δίσκων (**HDD** – Hard Disk Drive) με τη σχετική ανάλυση, από άποψη Φυσικής, των φαινομένων εγγραφής. Οι φυσικές αρχές της MAMR βασίζονται στο φαινόμενο μεταγωγής με τη βοήθεια μικροκυμάτων (**MAS** - Microwave Assisted Switching) και στο φαινόμενο μεταγωγής μεταφοράς spin (STS). Το φαινόμενο MAS παρατηρείται σε πολλά πειράματα και οι αποτελεσματικές μελέτες πεδίου εγγραφής υποδεικνύουν υψηλές δυνατότητες εφαρμογής σε σκληρούς δίσκους.

Η μικρομαγνητική μοντελοποίηση παρέχει τη δυνατότητα αξιόπιστης προσομοίωσης μεγάλων μαγνητικών συστημάτων χωρίς τον περιορισμό του υπολογιστικού κόστους που επιβάλλει η ατομική μοντελοποίηση. Στο [115] παρουσιάζεται ένας μικρομαγνητικός κώδικας, ανοικτού τύπου και πολλαπλών χρονικών κλιμάκων ο οποίος είναι συνδυασμός των τριών βασικών επιλυτών Landau-Lifshitz-Gilbert. Αυτός ο κώδικας, που ονομάζεται **MARS** (Models of Advanced Recording Systems), είναι ικανός να προσομοιώνει με ακρίβεια τη δυναμική της μαγνήτισης σε μεγάλα και δομικά πολύπλοκα κοκκώδη συστήματα μιας και πολλαπλών στρώσεων, όπως φαίνεται από τη σύγκριση με τα καθιερωμένα αποτελέσματα ατομιστικής προσομοίωσης.

Τα νατουραλιστικά ερεθίσματα, όπως οι κινηματογραφικές ταινίες, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για τη χαρτογράφηση της λειτουργίας του εγκεφάλου λόγω της υψηλής οικολογικής εγκυρότητάς τους, δηλαδή, σύμφωνα με τις συμπεριφορικές επιστήμες, της συσχέτισης των μεταβλητών μιας δεδομένης μελέτης με τον πληθυσμό ο οποίος εξετάζεται [116]. Το λογισμικό studyforrest και άλλα προγράμματα νευροαπεικόνισης παρέχουν ελεύθερη πρόσβαση σε σύνολα δεδομένων λειτουργικής απεικόνισης μαγνητικού συντονισμού (**fMRI** - Functional Magnetic Resonance Imaging) κατά την παρακολούθηση ταινιών, ώστε να προτρέψουν την κοινότητα για φυσιολογικά πειραματικά παραδείγματα. Ωστόσο, τα αργά σήματα fMRI τα οποία εξαρτώνται από το

επίπεδο οξυγόνωσης του αίματος δεν είναι ικανά να επιλύσουν τη νευρωνική δραστηριότητα με τη χρονική ανάλυση στην οποία εκτυλίσσεται. Αντίθετα, η μαγνητοεγκεφαλογραφία (MEG) μετρά τις μεταβολές στο μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τη νευρωνική δραστηριότητα και είναι σε θέση να καταγράψει την πλούσια δυναμική του εγκεφάλου σε επίπεδο χιλιοστών του δευτερολέπτου κατά την παρακολούθηση νατουραλιστικών ταινιών. Στο [117] παρουσιάζεται το πρώτο δημόσιο σύνολο δεδομένων MEG που συλλέχθηκε από έντεκα συμμετέχοντες κατά την παρακολούθηση της οπτικοακουστικής κινηματογραφικής ταινίας *Forrest Gump* (1994) διάρκειας 2 ωρών.

Η χωρική πυκνότητα δεδομένων ήταν πάντα μια βασική μέτρηση στη μαγνητική εγγραφή. Η αύξηση των "bits ανά τετραγωνική ίντσα" επιτρέπει την ανάπτυξη προϊόντων μεγαλύτερης χωρητικότητας με παρόμοιο κόστος. Η χωρική πυκνότητα αυξανόταν με ρυθμό περίπου 100% ετησίως, αλλά μέχρι το 2010 οι ρυθμοί αυτοί είχαν μειωθεί σε ποσοστό περίπου 10%. Ως απάντηση σε αυτή την επιβράδυνση, διερευνήθηκαν πολλές άλλες δυνατότητες, συμπεριλαμβανομένης της αύξησης του αριθμού των δίσκων ανά πακέτο, το οποίο έγινε δυνατό με την έλευση των δίσκων με γέμισμα ηλίου. Παράλληλα με αυτές τις μηχανικές βελτιώσεις, έγιναν δύο σημαντικές καινοτομίες στις φυσικές διαδικασίες εγγραφής. Αυτές οι καινοτομίες ήταν η μαγνητική εγγραφή με κεραμοειδείς πλάκες (**SMR** - Shingled Magnetic Recording) και η μαγνητική εγγραφή δύο διαστάσεων (**TDMR** - Two Dimensional Magnetic Recording) [118]. Στο [119] διερευνάται η δυνατότητα μείωσης της καμπυλότητας μετάβασης στη μαγνητική εγγραφή με θερμική υποβοήθηση, χρησιμοποιώντας μια συμβατική κεφαλή εγγραφής, με τη διαμόρφωση του πεδίου εγγραφής ώστε να εξουδετερωθεί το κυκλικό προφίλ του θερμικού παλμού.

1.4.6. Μετασηματιστές

Σύμφωνα με το [120] ο μετατροπέας συντονισμού σειράς (**SRC** - Series Resonant Converter) για μετασηματιστή MHz συνεχούς ρεύματος (dcX) είναι ελκυστικός για τα καλά χαρακτηριστικά μαλακής μεταγωγής του, που είναι κατάλληλος για εφαρμογές υψηλής απόδοσης. Σύμφωνα με το [121], τα ηλιακά πάνελ και οι κυψέλες καυσίμου στα συστήματα παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έχουν χαμηλή τάση εξόδου, η οποία πρέπει να μετατραπεί σε τάση διαύλου συνεχούς ρεύματος 400 V ή υψηλότερη, και άρα ο μετατροπέας dc-dc υψηλού κέρδους παίζει βασικό ρόλο. Με τις προδιαγραφές του

μετατροπέα για χαμηλό κόστος και υψηλή απόδοση προτείνεται ένας τροποποιημένος μετατροπέας dc-dc (**MICC** - Modified Interleaved Capacitor Clamped) με μαλακή μεταγωγή χωρίς συντονισμό (**NRSS** - Non-Resonant Soft-Switching), στον οποίο χρησιμοποιείται μόνο ένας βοηθητικός επαγωγέας που λειτουργεί σε λειτουργία ασυνεχούς αγωγιμότητας με λίγα μH. Στο [122] μελετάται η απόδοση και η πυκνότητα ισχύος του ρυθμιστή τάσης **VRM** (Voltage Regulator Module), ενώ στο [123] οι συγγραφείς προτείνουν μια ενοποιημένη προσέγγιση μοντελοποίησης για την ανάλυση μετατροπέων με επαγωγικό κύκλωμα, έχοντας λάβει υπόψη την επαγωγή διαρροής, η οποία είναι εγγενής στις συζευγμένες μαγνητικές δομές, και τα σχετιζόμενά κυκλωματικά φαινόμενα κυκλώματος. Στο [124] προτείνεται ένας αισθητήρας ρεύματος ο οποίος βασίζεται στην ακύρωση εναλλασσόμενης μαγνητικής ροής μηδενίζοντας έτσι το DC offset σε έναν μετασχηματιστή, καθώς είναι ανεπιθύμητο για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία των μετατροπέων διπλής ενεργής γέφυρας (**DAB** - Dual-Active-Bridge). Στο [125] προτείνεται μια στρατηγική διαμόρφωσης χωρίς βοηθητικό κύκλωμα, προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα των αιχμών υψηλής τάσης στο δευτερεύον πηνίο του μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας όταν ο τριφασικός μετατροπέας απομονωμένου πίνακα υψηλής συχνότητας (**HFIMI** - High-Frequency Isolated Matrix Inverter) λειτουργεί σύμφωνα με τις συμβατικές στρατηγικές διαμόρφωσης. Στο [126] προτείνεται ένα βελτιωμένο μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος ευρυζωνικής σύνδεσης του συστήματος περιέλιξης ενός μετασχηματιστή μετατροπέα συνεχούς ρεύματος υπερυψηλής τάσης (**UHVDC** - Ultrahigh-Voltage Direct Current). Στο [127] προτείνεται ένα ισχυρό συζευγμένο μαγνητικό-δομικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ανάλυσης στην προσπάθεια να περιγραφεί το φαινόμενο ισχυρής σύζευξης του δομικού πεδίου και του μαγνητικού πεδίου διαρροής. Στο άρθρο [128] περιγράφεται η ανάπτυξη και την εφαρμογή ενός κρουγονικού μετατροπέα DC/DC για την παροχή ρεύματος διέγερσης συνεχούς ρεύματος 500 A για εφαρμογές υπεραγωγίων μαγνητών.

Στο σύστημα τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος υψηλής σταθερότητας το οποίο οδηγεί τον υδρόψυκτο μαγνήτη της εγκατάστασης σταθερού υψηλού μαγνητικού πεδίου (**SHMFF** - Steady High Magnetic Field Facility), η ισχύς εξόδου μπορεί να φτάσει έως και δεκάδες MW. Για την υλοποίηση του το κύκλωμα είναι συνήθως αυτό του ανορθωτή ελεγχόμενου πυριτίου συν LC φίλτρο. Για τη βελτίωση του κυματισμού (ripple) του ρεύματος μαγνήτισης,

στο [129] προτείνεται ένα ενεργό φίλτρο σειράς, το οποίο υιοθετεί τεχνολογία μεταγωγής υψηλής συχνότητας και χρησιμοποιεί τροφοδοτικό μεταγωγής αντί για τρανζίστορ ή μετασχηματιστή, σε σειρά στην έξοδο της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος. Επίσης, στο [130] παρουσιάζεται η ανάλυση και η υλοποίηση ενός δομικού στοιχείου διασυνδεδεμένου φίλτρου το οποίο λειτουργεί υπό διαμόρφωση μονού και πολλαπλών καναλιών (παράλληλα μπλοκ τριφασικών μετατροπέων) χωρίς απώλεια εξασθένησης σε οποιαδήποτε αρμονική συνιστώσα. Έμφαση δίνεται στη σχεδίαση συζευγμένου επαγωγέα (CI – Coupled Inductor) και επαγωγέα ενίσχυσης.

Οι απομονωμένοι μετατροπείς dc-dc υψηλής ισχύος προτιμώνται στα συστήματα παραγωγής φωτοβολταϊκών (PV) με κλιμακωτή γέφυρα H (CHB - Cascaded H-Bridge) μέσης τάσης λόγω της υψηλής πυκνότητας ισχύος και της γαλβανικής απομόνωσης. Ωστόσο, οι μετασχηματιστές υψηλής ισχύος σε μετατροπείς dc-dc μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλές απώλειες ισχύος και κακή απαγωγή θερμότητας λόγω των παχύρρευστων υλικών απομόνωσης. Ο τριφασικός μετατροπέας LLC (3P-LLC) θεωρείται κατάλληλος για εφαρμογές υψηλής ισχύος, καθώς σε σύγκριση με τον μονοφασικό αντίστοιχο, ο μετατροπέας 3P-LLC χρησιμοποιεί τρεις διακριτούς μετασχηματιστές, που οδηγούν σε μεγαλύτερη περιοχή πυρήνα για καλύτερη απαγωγή θερμότητας. Για περαιτέρω αύξηση της πυκνότητας ισχύος και της ικανότητας απαγωγής θερμότητας των μετατροπέων συντονισμού, στο [131] εξετάζεται η αύξηση του αριθμού φάσης και η ενσωμάτωση μαγνητικών στοιχείων.

Τα μαγνητικά στοιχεία είναι τα σημαντικά μέρη των μετατροπέων dc-dc, και αποτελούν περιορισμό για τη βελτίωση της πυκνότητας ισχύος των συστημάτων. Στο [132] προτείνεται μια δομή μαγνητικής ολοκλήρωσης για την ενσωμάτωση της επαγωγής μαγνήτισης και διαρροής για διαχωρισμένο μετασχηματιστή με κοινούς εμπορικούς πυρήνες σχήματος UI. Στο [133] ο συγγραφέας παρουσιάζει την συνέχεια της εργασίας του πάνω σε ένα μοντέλο τύπου «λευκού κουτιού» (white-box) μετασχηματιστή ισχύος για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών μεταβατικών φαινομένων. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα μειωμένο μοντέλο που επιτρέπει τη χρήση του με ATP-EMTP. Σύμφωνα με το [134] οι μετατροπείς διπλής ενεργής γέφυρας (DAB) χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και σε άλλους τομείς για τα εξαιρετικά χαρακτηριστικά τους. Παρά την ποικιλία των σχετικών μελετών για τη διαμόρφωση τριπλής μετατόπισης

(**TPS** – Triple Phase-Shift), οι υπάρχουσες έρευνες αποτυγχάνουν στην εφαρμογή μεταγωγής μηδενικής τάσης (ZVS) στο πεδίο τάσης και το πεδίο φορτίου, ειδικά στη διαδικασία μετάβασης μεταξύ διαφορετικών τρόπων λειτουργίας. Για την αντιμετώπιση της τρέχουσας κατάστασης της έρευνας, παρουσιάζεται μια μέθοδος σχεδιασμού μέγιστης μαγνητικής επαγωγής λαμβάνοντας υπόψη την τάση ρεύματος και τον λόγο στροφών του μετασχηματιστή.

Οι επαγωγείς με πυρήνα από σκόνη σιδήρου (PIC) απαιτούν ένα σημαντικό περιθώριο σχεδιασμού για την αποφυγή μαγνητικού κορεσμού, περιορίζοντας την πυκνότητα ισχύος τους. Στο άρθρο [135] διατυπώνεται μια μέθοδος στο πεδίο συχνότητας για την αξιολόγηση της επιρροής του κορεσμού και προτείνει ένα βέλτιστο σχήμα μεταβλητής συχνότητας μεταγωγής για να αντισταθμίσει την αύξηση των αρμονικών. Στο [136] παρουσιάζεται ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπαταριών (**BESS** - Battery Energy Storage System) 48 V, βασισμένο σε τριφασικό πλέγμα γαλλιονιτρίδιου (GaN) ισχύος 10 kW. Το BESS χρησιμοποιεί έναν μετατροπέα AC-DC διπλής ενεργής γέφυρας (DAB) με έλεγχο διπλής μετατόπισης φάσης (**DPS** - Dual-Phaseshift) και μεταβλητής συχνότητας (**VF** – Variable Frequency). Τρανζίστορ ισχύος GaN 600 και 80 V, καθώς και επίπεδα μαγνητικά, χρησιμοποιούνται για την επίτευξη απόδοσης 96.6 % και πυκνότητας ισχύος 50 W/in³.

1.4.7. Ασύρματη Μεταφορά Ισχύος

Στο [137] παρουσιάζεται ένα σύστημα ασύρματης μεταφοράς ισχύος (WPT) πολλαπλών πομπών (TX) 6.78 MHz και ενός προσαρμοστικού αθροιστή μαγνητικού πεδίου (**AMFA** - Adaptive Magnetic Field Adder) με σκοπό την μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος μέσω της προσαρμοστικής βελτιστοποίησης του πλάτους και της φάσης του ρεύματος σε κάθε πηνίο TX με βάση τον συντελεστή σύζευξης (k) μεταξύ κάθε πηνίου TX και του πηνίου του δέκτη (RX). Το ολοκληρωμένο κύκλωμα AMFA κατασκευάστηκε με διεργασία CMOS 0.18 μm με διατάξεις 1.8 V. Στο [138] προτείνεται ένα πηνίο κυλινδρικού σχήματος, το οποίο μπορεί να παράγει το ομοιογενές μαγνητικό πεδίο σε ένα επίπεδο. Το πηνίο αποτελείται από δύο ελικοειδείς περιελίξεις, οι οποίες είναι τυλιγμένες έτσι ώστε να οδηγούν το ρεύμα σε αντίθετες κατευθύνσεις.

Οι εργαστηριακοί ηλεκτρομαγνήτες είναι ένας τύπος επιστημονικού οργάνου που χρησιμοποιείται ευρέως για τη μελέτη φυσικών χαρακτηριστικών όπως οι ιδιότητες μαγνητοοπτικής, μαγνητικής υστέρησης και επιδεκτικότητας. Στους εργαστηριακούς ηλεκτρομαγνήτες, είναι σημαντικό να παράγεται σταθερά ένα υψηλό πεδίο και ταυτόχρονα να μειώνεται το βάρος. Αυτό μπορεί γενικά να επιτευχθεί με τη βελτίωση των μαγνητικών ιδιοτήτων του φερρομαγνητικού υλικού που χρησιμοποιείται για τον σιδερένιο ζυγό ή με την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος λειτουργίας του πηνίου διέγερσης. Τα υπεραγώγιμα πηνία υψηλής θερμοκρασίας (HTS) μπορούν να παράγουν υψηλότερα μαγνητικά πεδία με μικρότερους όγκους σε σύγκριση με τα χάλκινα πηνία που χρησιμοποιούνται στους συμβατικούς εργαστηριακούς ηλεκτρομαγνήτες, λόγω της υψηλής ικανότητας μεταφοράς ρεύματος. Το φορτίο μεταφοράς θερμότητας στο πηνίο HTS επιδεινώνει τη λειτουργική απόδοση και τη σταθερότητα του συστήματος ηλεκτρομαγνήτη. Για τον μετριασμό αυτού του προβλήματος, στο [139] προτείνεται μια επαγωγική σύνδεση για ασύρματη φόρτιση ρεύματος για εργαστηριακούς μαγνήτες HTS.

Το σύστημα ασύρματης φόρτισης (**WCS** – Wireless Charging System) επιτυγχάνει ευέλικτη μετάδοση ισχύος, υψηλές επιδόσεις λειτουργίας του συστήματος, όμως χρειάζεται ισχυρή ικανότητα αντισταθμιστικής ευθυγράμμισης και εξαιρετική δυνατότητα ελέγχου της φόρτισης. Ως εκ τούτου, στο [140] προτείνεται ένα λάθος ευθυγραμμισμένο WCS το οποίο διαθέτει διπλά κανάλια μετάδοσης με χρήση ημιγέφυρας, πηνία ελεγχόμενης μαγνητικής ροής (**MFCIs** - Magnetic Flux Controlled Inductors), μαγνητικούς συζεύκτες με υβριδικά πηνία (**HMC** - Magnetic Couplers with Hybrid Coils) και αντιστάθμιση σειράς-σειράς. Στο [141] προτείνεται μια σχεδίαση για έναν ασύρματο μετατροπέα μεταφοράς ισχύος η οποία χρησιμεύει ως βοηθητική παροχή ισχύος σε ένα βοηθητικό σύστημα μετατροπής μέσης τάσης, υψηλής dV/dt . Εφαρμόζεται μια τοπολογία κυκλώματος CLLC-CL για τη δημιουργία μιας τάσης εξόδου ανεξάρτητης από το φορτίο με συχνότητα συντονισμού ανεξάρτητη από το συντελεστή σύζευξης. Στο άρθρο [142] προτείνεται και υλοποιείται ένα βελτιστοποιημένο σύστημα ασύρματης μεταφοράς ισχύος (WPT) με κατανεμημένα πηνία πομπού. Στο [143] προτείνεται μια στρατηγική γραμμικού ελέγχου πρωτογενούς πλευράς για την υλοποίηση της φόρτισης σταθερού ρεύματος (CC) / τάσης (CV) για το σύστημα ασύρματης μεταφοράς ισχύος, με βάση τη μαγνητική ολοκλήρωση LCC-N και το κύκλωμα μη αντιστάθμισης.

1.4.8. Άλλες Εφαρμογές

Τα CubeSat είναι μια κατηγορία δορυφόρων περιορισμένων διαστάσεων οι οποίοι βασίζονται σε μια κατασκευαστική δομή η οποία αποτελείται από κύβους ακμής 10 cm [144]. Τα CubeSat έχουν μάζα όχι μεγαλύτερη από 2 Kg και συχνά χρησιμοποιούν κοινά εμπορικά εξαρτήματα (**COTS** - Commercial Off-The-Shelf) για τα ηλεκτρονικά και τη δομή τους. Κατά την κατασκευή τους ο ελεγκτής χρησιμοποιεί έναν ενεργοποιητή πηνίου φωνής (**VCA** - Voice Coil Actuator) για να ελέγχει με ακρίβεια την ταχύτητα διαχωρισμού των CubeSats με διαφορετικές μάζες. Στο προτείνεται [145] ένα νέο VCA με μια δομή διπλών μαγνητικών κυκλωμάτων για τη συγκέντρωση της μαγνητικής ροής στο διάκενο αέρα και την ανακούφιση του μαγνητικού κορεσμού στο yoke, όπως φαίνεται και στο ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα VCA το οποίο αναπτύχθηκε.

Στο [146] παρουσιάζεται ένας εξαιρετικά λεπτός απορροφητής για εφαρμογές χαμηλών μικροκυματικών συχνοτήτων. Η δομή έχει σχεδιαστεί χρησιμοποιώντας ένα λεπτό διηλεκτρικό υπόστρωμα και μαζί με ένα υπερστρώμα μαγνητικού φύλλου. Στο [147] εξετάζεται η κατασκευή πηνίων χωρίς μόνωση (NI) τυλίγοντας μεγάλα τμήματα υπεραγωγίων ταινιών υψηλής θερμοκρασίας (HTS) με ομοιόμορφες ηλεκτρικές ιδιότητες κατά μήκος. Αναφέρεται ότι ένα τέτοιο πηνίο NI μπορεί να λειτουργήσει σωστά ακόμη και με την παρουσία ελαττωματικών υπεραγωγίων περιοχών, με ελάχιστη πτώση απόδοσης σε σύγκριση με το αντίστοιχο «χωρίς ελαττώματα». Στο [148] εξετάζεται μια υβριδική διάταξη ασφάλειας διακοπής συνεχούς ρεύματος με συνδυασμό ενός υπεραγωγού και ενός διακόπτη κυκλώματος DC. Το πλεονέκτημα των αυτόματων διακοπών σε συνδυασμό με υπεραγωγία στοιχεία είναι ότι δεν προκαλούν απώλειες και περιορίζουν αποτελεσματικά το ρεύμα σφάλματος (fault current).

Οι κρυογονικές διατάξεις με την ονομασία *LQXFA/B* κατασκευάζονται για την αναβάθμιση του Large Hadron Collider (**LHC**) στο ερευνητικό κέντρο CERN από το πρόγραμμα αναβάθμισης υψηλής φωτεινότητας High-Luminosity Large Hadron Collider Accelerator Upgrade Project (**HL-LHC AUP**). Αυτά περιέχουν ένα ζεύγος τετραπολικών μαγνητών τύπου *MQXFA* συνδυασμένα ως ψυχρή μάζα μέσα σε δοχείο κενού, τα οποία πρόκειται να εγκατασταθούν στις περιοχές υπερύθρων του LHC [149]. Τα *LQXFA/B*

δοκιμάζονται στους 1.9 K για την αξιολόγηση της ευθυγράμμισης και της μαγνητικής απόδοσης στην οριζόντια μονάδα δοκιμών του Fermilab.

Ο πυρηνικός μαγνητικός συντονισμός (**NMR** - Nuclear Magnetic Resonance) είναι μια ευέλικτη μέθοδος για τη μη επεμβατική παρατήρηση των ατομικών και μοριακών πληροφοριών των δειγμάτων που περιέχουν πυρήνες μη μηδενικού spin [150]. Με την πρόοδο στη μικροηλεκτρονική, τα συστήματα NMR εξοπλισμένα με προσαρμοσμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα εμφανίστηκαν για να επιτύχουν τη σμίκρυνση του συστήματος με βελτίωση της απόδοσης. Στο [151] παρουσιάζεται μια επισκόπηση του εξοπλισμού για τον έλεγχο NMR σε επίπεδο συστήματος και εξετάζει τις τελευταίες εξελίξεις την τελευταία δεκαετία ενώ παράλληλα αναφέρονται και οι σχεδιαστικές εκτιμήσεις του για την εξέλιξη πομπού και δέκτη των συστημάτων micro-NMR.

Το σύστημα μαγνητικού χειρισμού μαλακών ή άκαμπτων μικρο-ρομπότ μέσω ενός ελεγχόμενου μαγνητικού πεδίου, το οποίο χρησιμοποιείται για να μετακινηθούν σε στενό ή κλειστό χώρο, έχει αποδείξει τις τεράστιες δυνατότητές του στην ιατρική επεμβατική χειρουργική και τη χορήγηση φαρμάκων. Στο [152] προτείνεται ένα βολικό σχήμα κίνησης πηνίων για την κλιμακούμενη συστοιχία ηλεκτρομαγνητών και παρουσιάζεται ένα αποτελεσματικό επίπεδο σύστημα μαγνητικής ενεργοποίησης χωρίς περιορισμένο χώρο εργασίας.

Αντικείμενο έρευνας για το [153] είναι η μαγνητική αιώρηση (**Mag-Lev** ή απλοποιημένα **maglev** – Magnetic Levitation) [154] με συγκεκριμένη εφαρμογή στην ηλεκτροδυναμική αμαξοστοιχία maglev τύπου *MLX01*. Με βάση τη θεωρία του μαγνητικού πεδίου και τη δυναμική αρχή του κυκλώματος, χρησιμοποιείται το μοντέλο δυναμικού κυκλώματος του τρένου maglev όπου μέσω της ενεργειακής μεθόδου επιλύονται οι δυνάμεις οι οποίες ασκούνται στον συρμό maglev σε διαφορετικές κατευθύνσεις.

Στο [155] περιγράφεται ένα σχέδιο ενός συστήματος κατακόρυφου δακτυλίου υψηλής κλίσης υπεραγωγίου μαγνητικού διαχωρισμού (**VHGMS** - Vertical-ring High Gradient Superconducting Magnetic Separation) για την ανάκτηση του μαγνητικού μεταλλεύματος και τον καθαρισμό των μη μεταλλικών ορυκτών. Σε σύγκριση με τον συμβατικό σχεδιασμό που χρησιμοποιεί χάλκινα σύρματα, η χρήση υπεραγωγίου μαγνήτη μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και στην αύξηση του μαγνητικού πεδίου. Στο [156]

παρουσιάζεται μια οικογένεια συστημάτων συνεχούς ρεύματος χαμηλής τάσης για εξαγωγή ενέργειας μέσω μεταγωγής (**EES** - Switching Energy Extraction), σχεδιασμένα για προστασία υπεραγωγίμων κυκλωμάτων μαγνητών στο CERN, η οποία είναι κατάλληλη και σε άλλες εφαρμογές.

Τα πηνία τυπωμένων κυκλωμάτων PCB χρησιμοποιούνται ευρέως και η κατασκευή τους μελετάται ευρέως για την βελτίωση της απόδοσης των εφαρμογών τους. Στο [157] προτείνεται μια μέθοδος για την κατασκευή πηνίων με σκοπό την ελάττωση του μεγέθους τους. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται με χρήση μαγνητικού πυρήνα ώστε να αποφεύγεται η μείωση της τιμής της επαγωγής τους και η πιθανή πολυπλοκότητα στη διαδικασία κατασκευής. Στο [158] προτείνεται μια βελτιωμένη εκδοχή του μονοδιάστατου μοντέλου απωλειών χαλκού ώστε να παρθεί υπόψη ο μεταβλητός αριθμός στροφών ανά στρώμα με σκοπό τη μείωση των απωλειών χαλκού η οποία είναι ένα από τα βασικά ζητήματα κατά την κατασκευή τους.

1.4.9. Αισθητήρες

Στο [159] προτείνεται ένας επαγωγικός αισθητήρας γωνίας για την ανίχνευση της θέσης επίπεδου ρουλεμάν τύπου YRT. Στο [160] αναλύεται ο πιεζομαγνητικός αισθητήρας δύναμης που χρησιμοποιείται στον ηλεκτροϋδραυλικό ανυψωτικό εξοπλισμό γεωργικών μηχανημάτων και προτείνεται ένας κατακόρυφος αισθητήρας εγκάρσιας δύναμης. Στο [161], κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού των ηλεκτρικών μηχανών, το φαινόμενο αιχμής και οι συνέπειές του μοντελοποιούνται για να ληφθούν υπόψη και να αξιολογηθούν τοπικά για τις μαγνητικές ιδιότητες του μη προσανατολισμένου (**NO** – Non Oriented) φύλλου ηλεκτρικού χάλυβα και την ευαισθησία του στις βιομηχανικές διαδικασίες κοπής.

Για να ελαχιστοποιηθεί η ζημιά από την εκσκαφή υπόγειων αγωγών στο [162] προτείνεται η παροχή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο στους χειριστές. Οι συγγραφείς προτείνουν ένα ειδικά σχεδιασμένο ασύρματο σύστημα αισθητήρων στον κάδο του εκσκαφέα για να αυξηθεί η ακρίβεια της εκτίμησης απόστασης σε πραγματικό χρόνο με αποτελεσματική ακύρωση της άγνωστης εξωτερικής μαγνητικής παρεμβολής (**EMI** - External Magnetic Interference). Στο [163] προτείνεται ένας ανιχνευτής δινορευμάτων (**ECT** - Eddy Current Testing) με αισθητήρες συστοιχίας μαγνητικής αντίστασης σήραγγας (**TMR**

- Tunnelling Magnetoresistance) υψηλής ανάλυσης για μέτρηση διανυσματικού μαγνητικού πεδίου.

1.5. Ερευνητικό Κίνητρο

Έχοντας υπόψη την βιβλιογραφική αυτή ανασκόπηση προκύπτει ότι η ανάλυση βάσει των μαγνητικών κυκλωμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλές εφαρμογές ερευνητικού και πρακτικού ενδιαφέροντος. Τέτοιες εφαρμογές μπορούν να προκύψουν από το συνδυασμό των προϋπάρχουσων προδιαγραφών του Μη Καταστροφικού Ελέγχου, ο οποίος αναφέρθηκε, με την τεχνολογική τάση η οποία περιγράφεται με τον γενικότερο όρο του Διαδικτύου των Αντικειμένων (IoT – Internet of Things) [164].

1.5.1. Διαδίκτυο των Αντικειμένων

Με τον όρο Διαδίκτυο των Αντικειμένων εννοούμε το δίκτυο επικοινωνίας μεταξύ ενός αριθμού συσκευών ή άλλων αντικειμένων ο οποίος ενσωματώνει ηλεκτρονικά μέσα, λογισμικό, αισθητήρες ώστε να επιτρέπεται η σύνδεση και η ανταλλαγή δεδομένων [165].

Οι κύριες εφαρμογές του IoT είναι οι εξής :

1. Καταναλωτικές εφαρμογές, όπως οικιακοί αυτοματισμοί, αυτοματισμοί χώρου εργασίας και ιδιωτικής χρήσης οχημάτων, παρακολούθηση ηλικιωμένων, βρεφών και κατοικίδιων και διαχείριση συσκευών εξ' αποστάσεως.

2. Εφαρμογές Δημοσίων αναγκών, όπως νοσοκομειακών και ιατρικών, μαζικής μεταφοράς , σύνδεσης οχημάτων με εξωτερικά δεδομένα (άλλα οχήματα, πεζοί και υποδομές) και αυτοματισμοί κτιρίων.

3. Βιομηχανικές εφαρμογές, όπως κατασκευή αγαθών και γεωργικές ανάγκες.

4. Εφαρμογές Υποδομών, όπως ανάπτυξη Μητροπόλεων, διαχείριση ενέργειας, περιβαλλοντικής προστασίας και συλλογής στατιστικών δεδομένων.

5. Στρατιωτικές εφαρμογές, όπως εφαρμογές πεδίου μάχης και συλλογής πληροφοριών αλλά και χαρτογράφησης χερσαίας, θαλάσσιας και υποθαλάσσιας περιοχής.

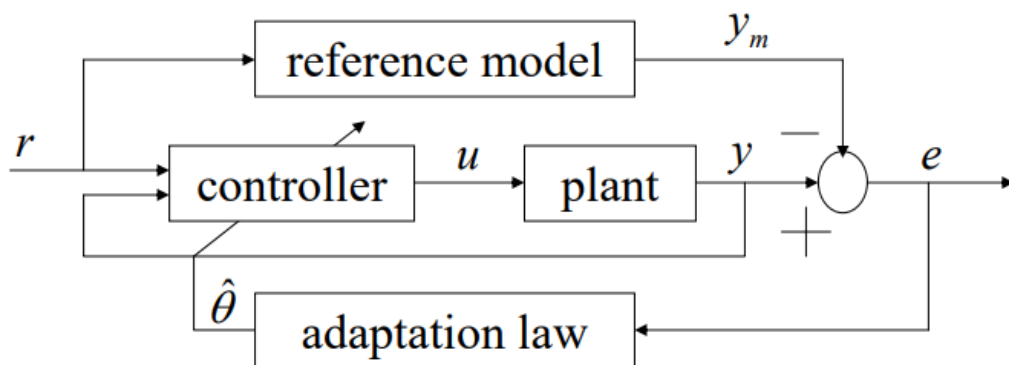
6. Ψηφιοποίηση προϊόντων, δηλαδή καταχώρησης της ύπαρξης και του ιστορικού οποιουδήποτε αντικειμένου.

Μελετώντας τα παραπάνω ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι εφαρμογές στη Βιομηχανία ή το Βιομηχανικό Διαδίκτυο Αντικειμένων (**IIoT** – Industrial Internet of Things), όπως ονομάζεται. Πιο συγκεκριμένα, Βιομηχανικό Διαδίκτυο Αντικειμένων ονομάζουμε το δίκτυο έξυπνων και μεγάλης συνδεσιμότητας συσκευών ή εξαρτημάτων τα οποία διατάσσονται με τρόπο που να επιτυγχάνει το μέγιστο δυνατό ρυθμό παραγωγής με όσο το δυνατό μειωμένο το κόστος λειτουργίας διαμέσου της παρακολούθησης πραγματικού χρόνου, αποδοτικής διαχείρισης και ελέγχου των βιομηχανικών διεργασιών, των υποδομών και του χρόνου λειτουργίας [166].

Το IIoT σε συνδυασμό με την Ψηφιοποίηση Προϊόντων (**DT** - Digital Transformation), συχνά αναφέρονται και ως Industry 4.0 ή ως Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση με σκοπό να αναδειχτεί η σπουδαιότητα την οποία έχουν μέσα στο γενικότερο πλαίσιο της Ιστορίας της Τεχνολογίας.

1.5.2. Αυτόματος Έλεγχος

Αναλύοντας το IIoT από την μεριά του Αυτόματου Ελέγχου θα μπορούσαμε να πούμε ότι στον πυρήνα του πρόκειται για ένα Σύστημα Προσαρμοστικού Ελέγχου με χρήση Μοντέλου Αναφοράς (**MRAC** - Model-Reference Adaptive Control), όπως αυτά περιγράφονται στον Ευφυή Έλεγχο [167]. Στην γενική του μορφή ένα τέτοιο σύστημα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 9. Σύστημα Προσαρμοστικού Ελέγχου με χρήση Μοντέλου Αναφοράς [167].

Η βασική ιδέα πίσω από ένα σύστημα τύπου MRAC είναι ότι υπάρχει ένα μοντέλο αναφοράς το οποίο θεωρούμε ότι λειτουργεί ιδανικά και ότι το πραγματικό σύστημα προσαρμόζεται σε αυτό σε πραγματικό χρόνο όταν αντιληφθεί ότι αποκλίνει. Η απόκλιση αυτή γίνεται αντιληπτή μέσω της εισροής πληροφοριών την οποία προσφέρουν ένα σύνολο αισθητήρων ή/και ελεγκτών.

Τα βασικά μέρη ενός τέτοιου συστήματος όπως αυτά απεικονίζονται στο Σχήμα 9 είναι τα εξής:

1. Plant είναι το σύστημα το οποίο θέλουμε να ελέγξουμε. Γενικά πρέπει, να έχει γνωστή δομή αλλά μπορούν κάποιες παράμετροι που το χαρακτηρίζουν να είναι άγνωστες. Η έξοδος του συστήματος περιγράφεται με y .
2. Reference model είναι το ιδανικό σύστημα το οποίο θεωρούμε εξ' αρχής ότι έχει ιδανική συμπεριφορά y_m σε μια εξωτερική διέγερση r .
3. Controller είναι ο παραμετροποιημένος ελεγκτής ο οποίος δίνει την δυνατότητα στο σύστημα να ακολουθήσει το ιδανικό μοντέλο.
4. Adaptation είναι ο Νόμος Προσαρμογής που χρησιμοποιείται για να μας δώσει τον επιθυμητό έλεγχο του συστήματος.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η διαφορά (συμβολίζεται με e) μεταξύ της ιδανικής εξόδου y_m και της πραγματικής y τροφοδοτείται μέσω του Νόμου Προσαρμογής ως πληροφορία στο Σύστημα. Στη συνέχεια, μέσω του ελεγκτή προσαρμόζει την είσοδο του συστήματος ώστε να εξαλειφθεί το e και άρα η πραγματική έξοδος να ταυτιστεί με την ιδανική.

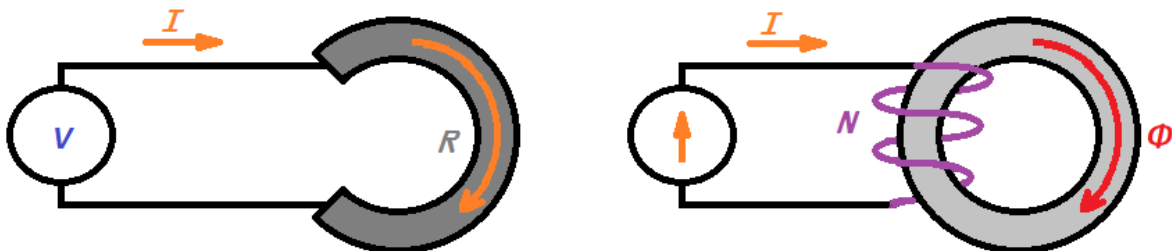
Το παραπάνω πρότυπο σύστημα δείχνει ότι οι Βιομηχανικές Εφαρμογές του Διαδικτύου των Αντικειμένων έχουν να επωφεληθούν κατά πολύ από την ανάπτυξη αισθητήρων οι οποίοι: α) να έχουν ακρίβεια και ευαισθησία η οποία να περιγράφει επακριβώς την απόκλιση από την ιδανική συμπεριφορά, β) να μπορούν να μεταδώσουν την πληροφορία την οποία συλλέξανε και γ) να μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα σε διάφορες συνθήκες βιομηχανικού περιβάλλοντος. Οι παραπάνω βιομηχανικές ανάγκες γίνεται μια προσπάθεια να καλυφθούν στην παρούσα Διατριβή με χρήση της ανάλυσης μαγνητικών κυκλωμάτων για την κατασκευή αυτόνομων μαγνητικών αισθητήρων.

2.

Σχεδίαση Μαγνητικών Κυκλωμάτων

2.1. Γενικά

Από την παραπάνω ανασκόπηση των τεχνολογιών αιχμής προκύπτει ότι ο σχεδιασμός και η ανάλυση μαγνητικών διατάξεων με την μέθοδο των μαγνητικών κυκλωμάτων είναι ιδιαίτερως χρήσιμη προκειμένου να κατασκευαστούν εξαρτήματα και προϊόντα με τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 1.1.3 ο τρόπος ανάλυσης των μαγνητικών κυκλωμάτων αναπτύχθηκε σε αναλογία με τα ηλεκτρικά κυκλώματα. Δυο τέτοιες ανάλογες διατάξεις ηλεκτρικού και μαγνητικού κυκλώματος φαίνονται στο Σχήμα 10 [168].



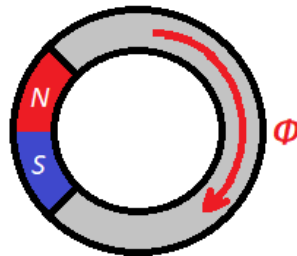
Σχήμα 10. Ηλεκτρικό κύκλωμα (αριστερά) και μαγνητικό κύκλωμα (δεξιά).

Το ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελείται από μια πηγή τάσης V η οποία στέλνει ρεύμα I μέσω ενός ηλεκτρικού φορτίου με αντίσταση R . Το ηλεκτρικό φορτίο αποτελείται από έναν αγωγό μήκους l , επιφάνειας διατομής A και ειδικής αντίστασης ρ . Στο μαγνητικό κύκλωμα

η κινητήρια δύναμη, σε αναλογία με την τάση, ονομάζεται μαγνητεγερτική δύναμη, και συμβολίζεται με F . Η μαγνητεγερτική δύναμη δημιουργείται τυλίγοντας N σπείρες σύρματος, που μεταφέρουν ρεύμα I , γύρω από έναν τοροειδή πυρήνα. Εξ ορισμού, η μαγνητεγερτική δύναμη είναι το γινόμενο του ρεύματος και των σπειρών, δηλαδή δίνεται από την Σχέση (2.1) [168].

$$F = N \cdot I \quad (2.1)$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη ονομάστηκε έτσι σε αναλογία με την ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ), η οποία δημιουργεί το ηλεκτρικό ρεύμα, χωρίς όμως, όπως προαναφέρθηκε, να είναι Δύναμη όπως αυτή ορίζεται στην Φυσική.

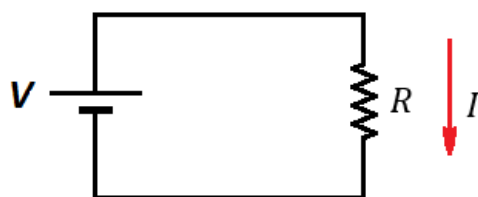


Σχήμα 11. Μαγνητικό Κύκλωμα με μόνιμο μαγνήτη.

Η μαγνητεγερτική δύναμη σε ένα μαγνητικό κύκλωμα μπορεί να προέρχεται και από μόνιμο μαγνήτη, όπως φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα 11. Σε αυτή την περίπτωση η τιμή της βρίσκεται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του μόνιμου μαγνήτη.

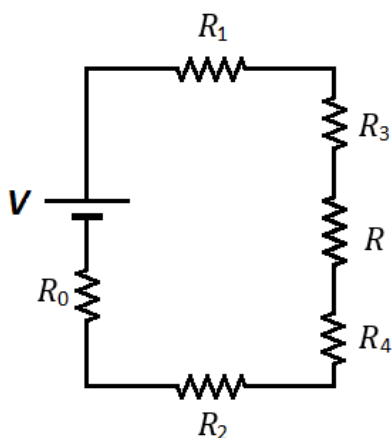
2.2. Αναλογίες με ηλεκτρικά κυκλώματα

Στο Σχήμα 7 είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι υπάρχει μια αντιστοιχία πηγής, μέσου ροής και αντίστασης με το πηνίο, τον πυρήνα και το διάκενο, αντίστοιχα, αν θεωρηθεί ότι η μαγνητική ροή λειτουργεί ως ανάλογο του ηλεκτρικού ρεύματος στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Ένα αντίστοιχο ηλεκτρικό κύκλωμα θα ήταν αυτό το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12. Ηλεκτρικό κύκλωμα ανάλογο μαγνητικού κυκλώματος

Το ηλεκτρικό κύκλωμα στο Σχήμα 12 είναι ανάλογο με το μαγνητικό κύκλωμα το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 7 αν θεωρηθεί ότι στον φερρομαγνητικό πυρήνα δεν υπάρχουν απώλειες μαγνητικής ροής, όπως και στους κλάδους του ηλεκτρικού κυκλώματος οι οποίοι δεν φέρουν στοιχεία τα οποία να προκαλούν πτώση τάσης. Στην πραγματικότητα οι απώλειες αυτές υπάρχουν και έτσι ένα πιο ακριβές σχήμα θα ήταν το παρακάτω (Σχήμα 13):



Σχήμα 13. Ανάλογο ηλεκτρικό κύκλωμα μαγνητικού κυκλώματος με απώλειες.

όπου R_1 , R_2 οι μαγνητικές αντιστάσεις οι οποίες αναλογούν στις απώλειες στα οριζόντια μέρη του πυρήνα, R_3 , R_4 οι αντίστοιχες αντιστάσεις για τα κάθετα μέρη του μέρους του πυρήνα με το διάκενο R και R_0 η αντίσταση η οποία αναλογεί στις απώλειες στο μέρος του πυρήνα με το σωληνοειδές, και εδώ παριστάνεται σαν εσωτερική αντίσταση της πηγής τάσης.

Η σύγκριση μαγνητικών και ηλεκτρικών κυκλωμάτων είναι περισσότερο μια μαθηματική αναλογία η οποία λειτουργεί σαν γενικός κανόνας και λιγότερο μια θεωρία που έχει βάση στον φυσικό κόσμο και έτσι έχει κάποιους περιορισμούς κατά την εφαρμογή της. Για παράδειγμα, ενώ το ηλεκτρικό ρεύμα δηλώνει κίνηση ηλεκτρονίων, το αντίστοιχό του που είναι η μαγνητική ροή, παρά το όνομά της, δεν σημαίνει κίνηση κάποιου φυσικού

σώματος. Αυτό σημαίνει ότι ενώ τα ηλεκτρικά κυκλώματα μεταφέρουν ισχύ, μέρος της οποίας χάνεται ως θερμότητα στις αντιστάσεις, στα μαγνητικά δεν παρατηρείται κάτι τέτοιο.

Ο παρακάτω Πίνακας 1 δείχνει τα ηλεκτρικά μεγέθη τα οποία σχετίζονται με μαγνητικά κατά την θεωρία των μαγνητικών κυκλωμάτων.

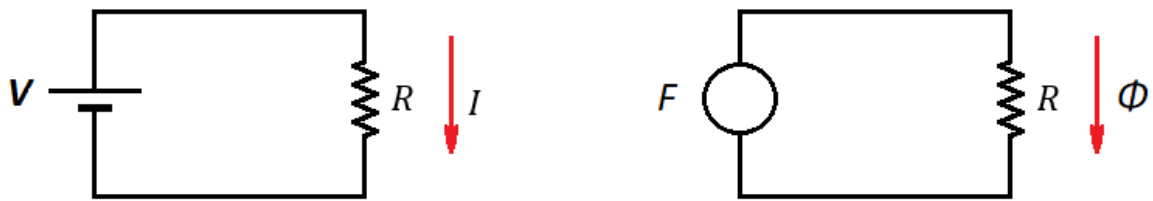
Πίνακας 1. Αναλογίες Μεγεθών μεταξύ Ηλεκτρικών και Μαγνητικών Κυκλωμάτων.

Ηλεκτρικό Μέγεθος	Μαγνητικό Μέγεθος	Μονάδες
Τάση V	Μαγνητεγερτική δύναμη F	Amp-turns
Ένταση ρεύματος I	Μαγνητική Ροή Φ	Wb (Webers)
Αντίσταση R	Μαγνητική Αντίσταση R	Amp-turns/Wb
Ειδική Αγωγιμότητα $1/\rho$	Διαπερατότητα μ	Wb/A-t-m
Πυκνότητα ρεύματος J	Μαγνητική Επαγωγή B	Wb/m ²
Ένταση ηλεκτρικού πεδίου E	Ένταση μαγνητικού πεδίου H	Amp-turn/m

Η αναλογία ηλεκτρικών και μαγνητικών κυκλωμάτων εμφανίζει αρκετούς περιορισμούς σε περαιτέρω ανάλυση. Η μεγαλύτερη διαφορά τους είναι ότι τα μαγνητικά κυκλώματα δεν είναι γραμμικά. Όπως αναφέρεται και στην Παράγραφο 1.1.2, σε υψηλές τιμές μαγνητικού πεδίου τα φερρομαγνητικά υλικά, όπως αυτό του πυρήνα σε ένα μαγνητικό κύκλωμα, παρουσιάζουν τα φαινόμενα του κορεσμού και της παραμένουσας μαγνήτισης. Αυτό προκαλεί στο κύκλωμα μια συμπεριφορά όπου οι μαγνητικές αντιστάσεις αυξάνουν τιμή απότομα ενώ το κύκλωμα φαίνεται να παρουσιάζει πηγή μαγνητικού πεδίου ακόμα και όταν το πηνίο του δεν τροφοδοτείται με ρεύμα.

2.3. Νόμοι Κυκλωμάτων

Στην απλή τους μορφή δυο ανάλογα μεταξύ τους κυκλώματα, ένα μαγνητικό και ένα ηλεκτρικό φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 14.



Σχήμα 14. Ηλεκτρικό και αντίστοιχο μαγνητικό κύκλωμα

Για τα μαγνητικά κυκλώματα ισχύει ο Νόμος του Rowland [Henry Augustus Rowland (1848 – 1901)] [5] ο οποίος φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση (2.2):

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (2.2)$$

όπου Φ η μαγνητική ροή του κυκλώματος, F η μαγνητεγερτική δύναμη του πηνίου και R_m η μαγνητική του αντίσταση.

Ο Νόμος αυτός είναι ανάλογος με τον Νόμο του Ohm [Georg Simon Ohm 1789 – 1854]], ο οποίος φαίνεται στη Σχέση (2.3):

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.3)$$

όπου I , V και R η ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, η ηλεκτρεγερτική δύναμη και η αντίσταση αντίστοιχα.

Λύνοντας την Σχέση (2.2) ως προς την μαγνητεγερτική δύναμη, ισχύει η Σχέση (2.4).

$$F = \Phi \cdot R_m \quad (2.4)$$

Για την περίπτωση κατά την οποία η μαγνητεγερτική δύναμη σε μαγνητικό κύκλωμα προέρχεται από σωληνοειδές πηνίο από τον Νόμο Ampere προκύπτει ότι ισχύει η Σχέση (2.5).

$$F = H \cdot l \quad (2.5)$$

όπου H η ένταση μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του και l το μέσο μήκος σωληνοειδούς πηνίου ή η περιφέρεια τοροειδούς.

Τα μαγνητικά κυκλώματα περιγράφονται από δυο νόμους οι οποίοι είναι ανάλογοι των δυο Νόμων του Kirchhoff [Gustav Robert Kirchhoff (1824 – 1887)]. Σαν συμπέρασμα του Νόμου Ampere μπορούμε να γράψουμε ότι η συνολική μαγνητική αντίσταση επιμέρους μαγνητικών αντιστάσεων τα οποία βρίσκονται σε σειρά σε έναν κλάδο είναι ίση με το

άθροισμά τους. Αυτό φαίνεται στη Σχέση (2.6) η οποία είναι ανάλογη του Νόμου Τάσεων Kirchhoff.

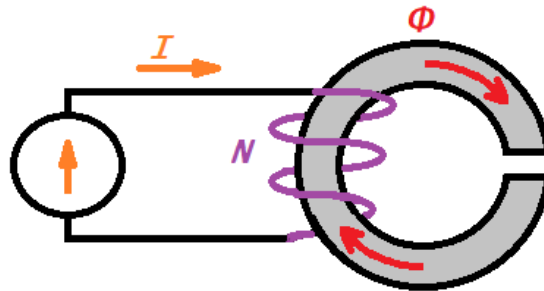
$$R_{mt} = R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + \dots \quad (2.6)$$

Ανάλογα, δε, με τον Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff και σαν συμπέρασμα του Νόμου του Gauss, το άθροισμα των μαγνητικών ροών που εισέρχονται σε ένα κόμβο είναι μηδέν όπως αυτό φαίνεται στην Σχέση (2.7) [5].

$$\Phi_t = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \dots \quad (2.7)$$

2.4. Μαγνητική Αντίσταση

Μαγνητική αντίσταση σε ένα μαγνητικό κύκλωμα είναι το μέγεθος το οποίο ορίζεται ως ο λόγος της μαγνητεγερτικής δύναμης στα άκρα ενός υλικού προς την τιμή της μαγνητικής ροής που το διατρέχει. Κατά την ανάλυση των μαγνητικών κυκλωμάτων είναι το μέγεθος το οποίο είναι ανάλογο με την αντίσταση στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Η πιο συνηθισμένη περίπτωση μαγνητικής αντίστασης είναι αυτή του διάκενου αέρος (air gap) όπως φαίνεται στο Σχήμα 15.



Σχήμα 15. Μαγνητική Αντίσταση με διάκενο αέρος (air gap).

Ο ορισμός της προκύπτει, συνεπώς, από τον Νόμο του Rowland μετασχηματισμένο στη μορφή της Σχέσης (2.8).

$$R_m = \frac{F}{\Phi} \quad (2.8)$$

Στα μαγνητικά κυκλώματα η μαγνητική ροή ακολουθεί την ελάχιστη μαγνητική αντίσταση με τον ίδιο τρόπο που στα ηλεκτρικά κυκλώματα το ρεύμα ακολουθεί την

μικρότερη ηλεκτρική αντίσταση. Για κάθε κλάδο μαγνητικού κυκλώματος ισχύει ότι έχει μαγνητική αντίσταση ίση που δίνεται από την Σχέση (2.9) [169].

$$R_m = \frac{L}{\mu \cdot A} \quad (2.9)$$

όπου L το μήκος του, μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού του και A η επιφάνεια της διατομής του.

Έτσι, παίρνοντας ως παράδειγμα το κύκλωμα του Σχήμα 7 και το ηλεκτρικό του ανάλογο το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 12, για να υπολογιστεί η ολική αντίστασή του χρησιμοποιώντας τις Σχέσεις (2.6) και (2.9) θα ισχύει:

$$R_{m,ολ} = \frac{L_{R1}}{\mu \cdot A} + \frac{L_{R2}}{\mu \cdot A} + \frac{L_{R3}}{\mu \cdot A} + \frac{L_{R4}}{\mu \cdot A} + \frac{L_R}{\mu_0 \cdot A} + \frac{L_{R0}}{\mu \cdot A} \Rightarrow \quad (2.10)$$

$$R_{m,ολ} = \frac{1}{\mu \cdot A} \cdot (2 \cdot L_{R1} + L_{R3} + L_{R4} + \mu_s \cdot L_R + L_r) \quad (2.11)$$

όπου $L_{R1} = L_{R2}$, το μήκος των οριζόντιων πλευρών του πυρήνα, L_{R3} , L_{R4} τα μήκη της κάθετης πλευράς που περιέχει το κενό αλλά υπάρχει φερρομαγνητικό υλικό, L_R το μήκος του κενού, L_{R0} το μήκος της κάθετης πλευράς που περιέχει το πηνίο, μ και μ_s η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού και η ειδική μαγνητική διαπερατότητα του αντίστοιχα, μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και A η επιφάνεια της διατομής του η οποία για το παράδειγμα αυτό θεωρείται σταθερή.

2.5. Μη Ιδανικοί Μετασηματιστές – Απώλειες Μαγνήτισης

2.5.1. Αυτεπαγωγή Πηνίου

Στο Σχήμα 10, υποθέτοντας για το μαγνητικό κύκλωμα ότι οι μαγνητικές γραμμές ακολουθούν αποκλειστικά την διαδρομή με την ελάχιστη αντίσταση, αντικαθιστώντας στη Σχέση (2.2) από την Σχέση (2.1) παίρνουμε την Σχέση (2.12).

$$\Phi = \frac{N \cdot I}{R_m} \quad (2.12)$$

Από τον Νόμο Faraday η μεταβολή της μαγνητικής ροής Φ στο εσωτερικό ενός πηνίου συνδέεται με την τάση στα άκρα του σύμφωνα με την Σχέση (2.13).

$$E = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.13)$$

Αντικαθιστώντας στην Σχέση (2.13) από την Σχέση (2.12) έχουμε:

$$E = N \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{N \cdot I}{R_m} \right) \Rightarrow \quad (2.14)$$

$$E = \frac{N^2}{R_m} \cdot \frac{dI}{dt} \quad (2.15)$$

Στην Σχέση (2.15) εισάγουμε και ορίζουμε την αυτεπαγωγή του πηνίου L ως:

$$L = \frac{N^2}{R_m}. \quad (2.16)$$

Μέσω της παραπάνω Σχέσης (2.16) παίρνουμε τελικά

$$E = L \cdot \frac{dI}{dt}. \quad (2.17)$$

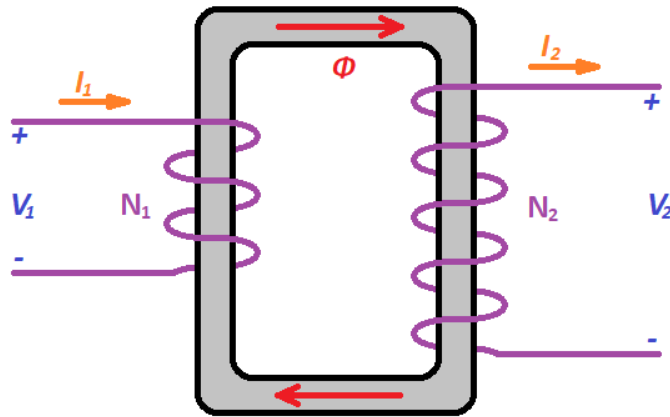
Η Σχέση (2.17) είναι πολύ κοινή στην ανάλυση ηλεκτρικών κυκλωμάτων καθώς συνδέει το ρεύμα το οποίο διαρρέει ένα πηνίο με την τάση στα άκρα του. Φαίνεται, ωστόσο, ότι βάσει του ορισμού της αυτεπαγωγής L , αυτή συνδέεται με την εσωτερική μαγνητική αντίσταση του πηνίου R_m .

2.5.2. Μετασηματιστές

2.5.2.1. Ιδανικοί Μετασηματιστές

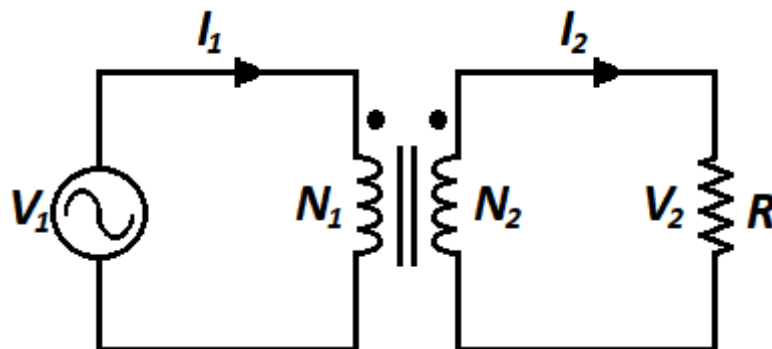
Ένα από τα πιο στοιχειώδη μαγνητικά κυκλώματα είναι αυτό του μετασηματιστή με την αρχή λειτουργίας του να συναντάται με κάποιες παραλλαγές στους περισσότερους αισθητήρες τους οποίους θα συναντήσουμε. Μια απλή διάταξη μετασηματιστή φαίνεται στο Σχήμα 16. Δύο πηνία τυλίγονται γύρω από έναν μαγνητικό πυρήνα με την κύρια πλευρά του μετασηματιστή να έχει N_1 στροφές σύρματος που φέρουν ρεύμα I_1 , ενώ η δευτερεύουσα πλευρά έχει N_2 στροφές που φέρουν I_2 . Εάν υποθέσουμε έναν ιδανικό

πυρήνα χωρίς διαρροή μαγνητικής ροής, τότε η μαγνητική ροή Φ που συνδέει τα πρωτεύοντα τυλίγματα είναι ίδια με τη ροή που συνδέει το δευτερεύον.



Σχήμα 16. Ιδανικός Μετασχηματιστής

Ένα τέτοιο κύκλωμα παριστάνεται στο Σχήμα 17, ενώ τελικά θα ισχύουν οι Σχέσεις (2.18).



Σχήμα 17. Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μετασχηματιστή.

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{V_1}{V_2} = I_1 \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (2.18)$$

2.5.2.2. Μη Ιδανικοί Μετασχηματιστές - Απώλειες Μαγνήτισης

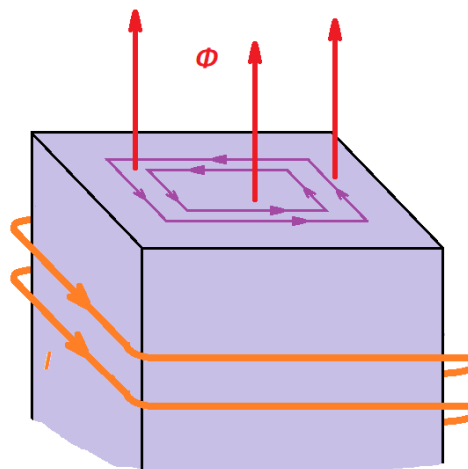
Στην πραγματικότητα ένας μετασχηματιστής έχει απώλειες οι οποίες επηρεάζουν την απόδοσή του. Για παράδειγμα, το σύρμα από το οποίο αποτελούνται οι περιελίξεις έχει ωμική αντίσταση έτσι ώστε όταν ρέει ρεύμα θα υπάρχουν απώλειες τάσης και ισχύος σε αυτό.

Υπάρχουν, επίσης, απώλειες που σχετίζονται με τη μαγνήτιση του πυρήνα. Τα φερρομαγνητικά μέταλλα έχουν μια κρυσταλλική δομή με όλα τα άτομα διατεταγμένα σε

ένα πλέγμα. Οι περιοχές στις οποίες τα άτομα είναι όλα τέλεια διατεταγμένα ονομάζονται μαγνητικές περιοχές. Μέσα σε κάθε μαγνητική περιοχή, όλα τα άτομα έχουν τους άξονες spin τους ευθυγραμμισμένους μεταξύ τους. Οι γειτονικές περιοχές, ωστόσο, μπορεί να έχουν τους άξονες περιστροφής τους διαφορετικά ευθυγραμμισμένους. Το αποτέλεσμα του τυχαίου προσανατολισμού περιοχών σε ένα μη μαγνητισμένο φερρομαγνητικό υλικό είναι ότι όλες οι μαγνητικές ροπές τους αλληλοακυρώνονται και μακροσκοπικά δεν φαίνεται να υπάρχει μαγνήτιση. Όταν επιβάλλεται εξωτερικό μαγνητικό πεδίο \mathbf{H} οι άξονες spin των μαγνητικών περιοχών αρχίζουν να ευθυγραμμίζονται με το επιβαλλόμενο πεδίο, φτάνοντας τελικά σε κορεσμό. Όταν η δύναμη μαγνήτισης \mathbf{H} εξαλειφθεί, οι περιοχές χαλαρώνουν, αλλά δεν επιστρέφουν στον αρχικό τυχαίο προσανατολισμό τους, αφήνοντας μια παραμένουσα ροή, ενώ το υλικό φαίνεται να συμπεριφέρεται προσωρινά σαν μόνιμος μαγνήτης. Η συμπεριφορά αυτή αποτυπώνεται στον Βρόχο Υστέρησης (Σχήμα 3), ο οποίος αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, και προκαλεί απώλειες οι οποίες είναι ανάλογες, παράγοντα αναλογίας k_1 , με την συχνότητα του ρεύματος στο πρωτεύον f (Σχέση (2.19)).

$$P_{Loss,1} = k_1 \cdot f \quad (2.19)$$

Μια άλλη πηγή απωλειών πυρήνα προκαλείται από μικρά ρεύματα, τα οποία ονομάζονται δινορεύματα (eddy currents), και σχηματίζονται μέσα στο φερρομαγνητικό υλικό λόγω της μορφής του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή [168], όπως φαίνεται στο Σχήμα 18.



Σχήμα 18. Δινορεύματα στο εσωτερικό πυρήνα πηνίου.

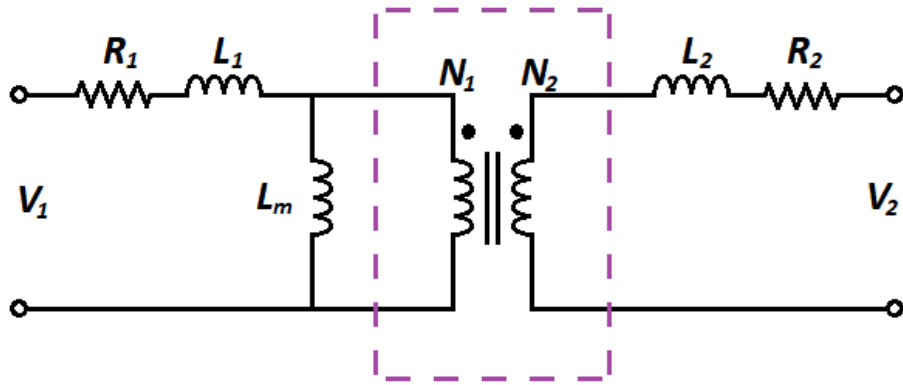
Η ισχύς απωλειών λόγω των δινορευμάτων υπολογίζεται τελικά ότι είναι ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας όπως φαίνεται στην Σχέση (2.20).

$$P_{Loss,2} = k_2 \cdot f^2 \quad (2.20)$$

Επίσης εξετάζονται οι αρμονικές σε κυκλώματα ισχύος, καθώς παρατηρείται ότι ορισμένα φορτία προκαλούν ρεύματα που αποτελούνται από πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας των 50 Hz. Οι αρμονικές αυτές υψηλότερης συχνότητας μπορούν να οδηγήσουν σε υπερβολική θέρμανση του πυρήνα του μετασχηματιστή λόγω της εξάρτησης του δινορευμάτων από το τετράγωνο της συχνότητας.

Οι απώλειες υστέρησης του μετασχηματιστή ελέγχονται χρησιμοποιώντας υλικά με το ελάχιστο δυνατό εμβαδόν Βρόχου Υστέρησης B–H. Οι απώλειες δινορευμάτων ελέγχονται με τη χρήση υλικών πυρήνα τα οποία έχουν υψηλή ειδική αντίσταση και την διαμόρφωσή τους σε λεπτά, μονωμένα φύλλα υλικού τα οποία στοιβάζονται το ένα δίπλα στο άλλο. Οι διαρροές μαγνητικής ροής ελαχιστοποιούνται με τη χρήση υλικών με υψηλή διαπερατότητα αλλά και με την περιέλιξη των πρωτεύοντων και δευτερευουσών περιελίξεων ακριβώς το ένα πάνω στο άλλο.

Ένας πραγματικός μετασχηματιστής μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας ένα κύκλωμα το οποίο αποτελείται από έναν ιδανικό μετασχηματιστή με πρόσθετες ιδανικές αντιστάσεις και επαγωγείς όπως φαίνεται στο Σχήμα 19. Οι αντιστάσεις R_1 και R_2 αντιπροσωπεύουν τις αντιστάσεις του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος. Τα L_1 και L_2 αντιπροσωπεύουν τα πηνία τα οποία σχετίζονται με πρωτογενείς και δευτερεύουσες διαρροές μαγνητικής ροής οι οποίες διέρχονται από τον αέρα αντί για το υλικό του πυρήνα. Η επαγωγή L_m , η επαγωγή μαγνήτισης, επιτρέπει στο μοντέλο να εμφανίζει ρεύμα στις πρωτεύουσες περιελίξεις ακόμα κι αν το δευτερεύον είναι ανοιχτό κύκλωμα χωρίς ρεύμα [168].



Σχήμα 19. Ισοδύναμο κύκλωμα μη ιδανικού μετασχηματιστή. Στο πλαίσιο βρίσκεται το μέρος του μετασχηματιστή το οποίο θεωρούμε ιδανικό.

3.

Συστήματα Μέτρησης Διαπερατότητας

3.1. Γενικά περί Μαγνητικής Διαπερατότητας

Κάθε μαγνητικό σώμα που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο έντασης \mathbf{H} αποκρίνεται δημιουργώντας στο εσωτερικό του μια μαγνητική επαγωγή \mathbf{B} . Τα δυο μεγέθη αυτά συνδέονται μέσω ενός τρίτου μεγέθους, που είναι ίδιον του σώματος αυτού, το οποίο ονομάζουμε μαγνητική διαπερατότητα μ . Η σχέση η οποία τα συνδέει είναι η (3.1).

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad (3.1)$$

Για το κενό ισχύει ότι έχει μαγνητική διαπερατότητα μ_0 η οποία αποτελεί παγκόσμια σταθερά ($\mu_0 = 1.256637 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$) και ισχύει η σχέση (3.2).

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{H} \quad (3.2)$$

Η μαγνητική διαπερατότητα μ ενός υλικού δεν είναι απαραίτητα ένα σταθερό μέγεθος ενώ σε πολλές περιπτώσεις είναι χρήσιμο να αντικατασταθεί γράφοντάς την σε σχέση με αυτήν του κενού όπως φαίνεται στην σχέση (3.3).

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (3.3)$$

όπου το μ_r είναι καθαρός αριθμός και λέγεται **σχετική μαγνητική διαπερατότητα**.

Σε αυτή την περίπτωση η παραπάνω σχέση (3.1) γράφεται στη μορφή της σχέσης (3.4).

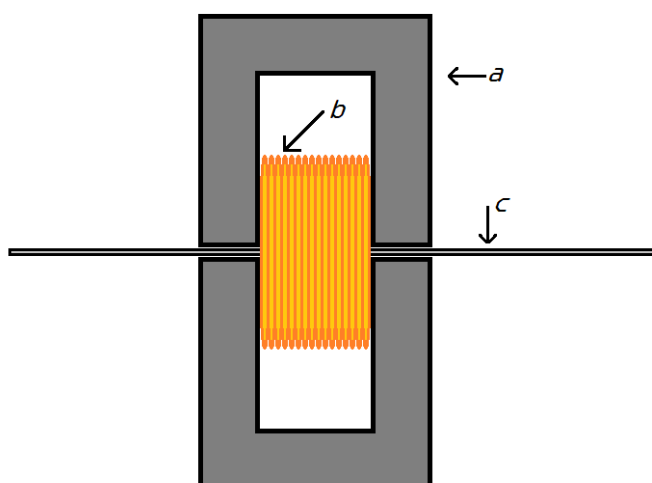
$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \quad (3.4)$$

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν κάποια συστήματα τα οποία αναπτύχθηκαν με σκοπό την μέτρηση της Μαγνητικής Διαπερατότητας και οι εφαρμογές τους.

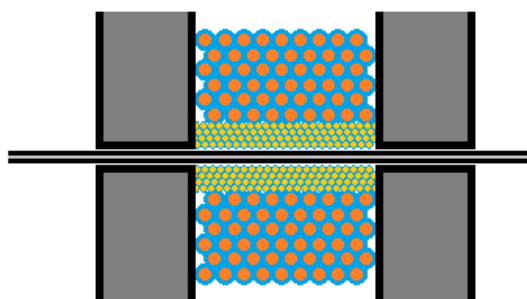
3.2. Single Sheet Tester

3.2.1. Περιγραφή

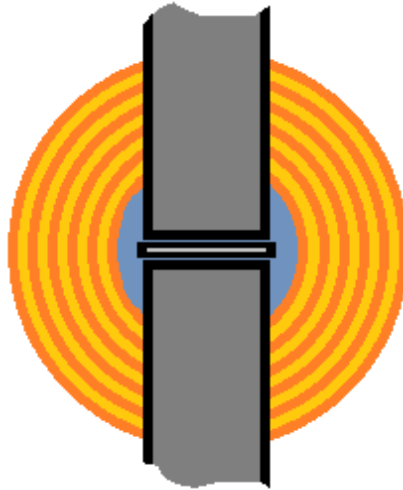
Στο παρακάτω Σχήμα 20 φαίνεται η διάταξη του αισθητήρα Single Sheet Tester. Η διάταξη αποτελείται από δυο πηνία τυλιγμένα πάνω στην ίδια μπομπίνα (Σχήμα 21) η οποία στο κέντρο της σχηματίζει και μια σχισμή από την οποία περνάει το υπό μέτρηση δοκίμιο (Σχήμα 22).



Σχήμα 20. Διάταξη Βασικής Αρχής Λειτουργίας Single Sheet Tester (πρόσοψη).

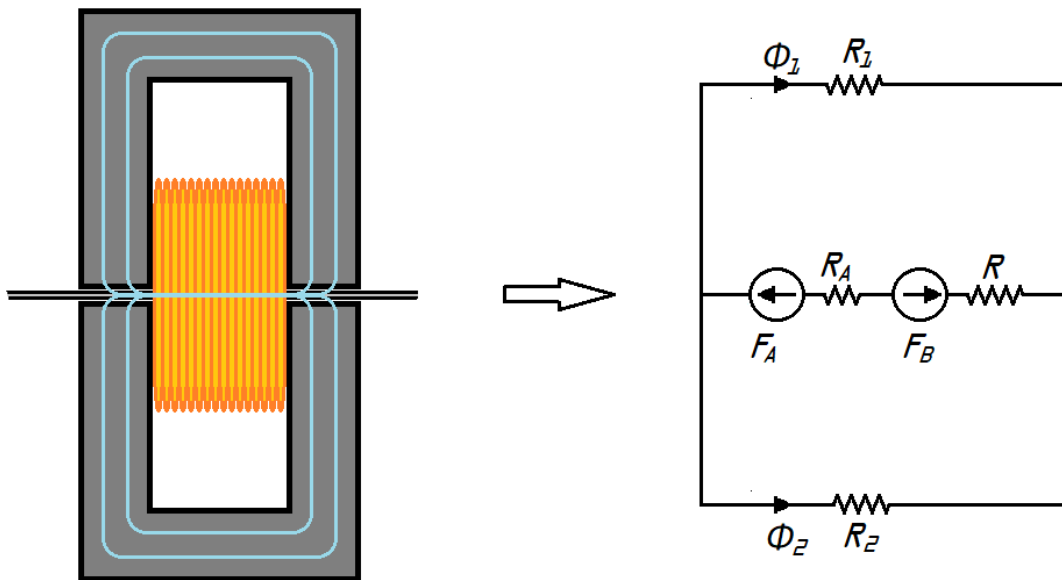


Σχήμα 21. Πρωτεύον και δευτερεύον πηνίο Single Sheet Tester.



Σχήμα 22. Σχισμή εισόδου δοκίμιου (πλάγια όψη).

Η διάταξη σχηματίζει μαγνητικό κύκλωμα όπου το εξωτερικό πηνίο λειτουργεί σαν πηγή μαγνητικής ροής, δηλαδή σαν μαγνητεγερτική δύναμη ανάλογη, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, της ηλεκτρεγερτικής δύναμης. Το δοκίμιο και τα διάκενα τα οποία σχηματίζονται ανάμεσα στα γοκε και το δοκίμιο αποτελούν τις μαγνητικές αντιστάσεις του κυκλώματος, ενώ το εσωτερικό πηνίο λειτουργεί σαν δέκτης της μαγνητικής ροής η οποία προκύπτει, ανάλογο ενός ηλεκτρικού αμπερομέτρου σε ηλεκτρικό κύκλωμα (Σχήμα 23).



Σχήμα 23. Μαγνητικό κύκλωμα (αριστερά) και ανάλογο ηλεκτρικό (δεξιά).

Στο παραπάνω σχήμα, Φ_1 , R_1 και Φ_2 , R_2 ονομάζονται οι μαγνητικές ροές και αντιστάσεις των γοκε, ενώ F_A είναι η μαγνητεγερτική δύναμη του εξωτερικού πηνίου και

ως εσωτερική αντίσταση R_A συμβολίζουμε την μαγνητική αντίσταση η οποία δημιουργείται στα διάκενα. Τέλος, R είναι η μαγνητική αντίσταση του υπό μέτρηση δοκιμίου και F_B εμφανίζεται ως καταναλωτής μαγνητικής ροής το δευτερεύον πηνίο το οποίο λειτουργεί σαν έξοδος του μαγνητικού κυκλώματος και από όπου παίρνουμε την μέτρηση του αισθητήρα. Περαιτέρω μαθηματική ανάλυση ενός τέτοιου μαγνητικού κυκλώματος αισθητήρα γίνεται σε επόμενη Παράγραφο 3.3.1.

Ο αισθητήρας Single Sheet Tester είναι κατασκευασμένος έχοντας κατά νου δείγματα όπως αυτά που φαίνονται στο Σχήμα 24. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει περιορισμός λόγω σχήματος στο πλάτος και στο πάχος των δοκιμίων τα οποία μπορεί να μετρήσει, καθώς αυτά πρέπει να περάσουν από την σχισμή η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στα δυο γοκε και μέσα από τα πηνία. Στα προτερήματά του είναι ότι δεν υπάρχει περιορισμός μήκους του δοκιμίου, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι είναι ιδανικό για την μέτρηση υλικών σχήματος κορδέλας κατά την κατασκευή τους.

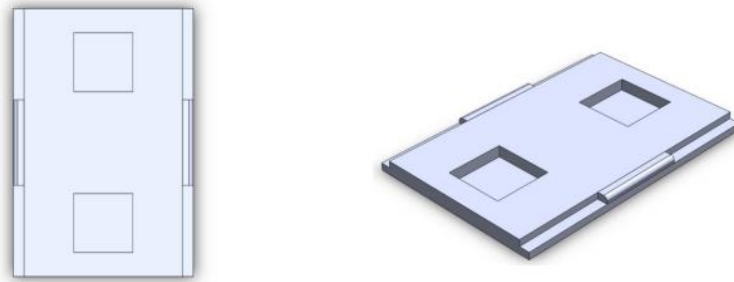


Σχήμα 24. Εργαστηριακά δοκίμια χάλυβα.

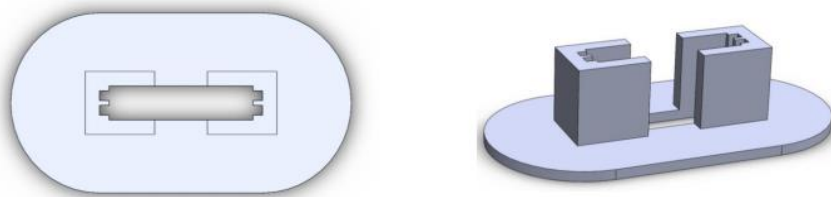
3.2.2. Κατασκευή

Για την κατασκευή του Single Sheet Tester (SST) πρέπει να σχεδιαστεί ειδικό εξάρτημα το οποίο να λειτουργεί σαν σκελετός της όλης διάταξης. Ο σκοπός του είναι πολλαπλός καθώς α) σχηματίζει την σχισμή μέσα από την οποία περνάει το υλικό, β) αποτελεί την βάση πάνω στην οποία στηρίζονται τα δυο γοκε και γ) σχηματίζει τις μπομπίνες στις οποίες θα τυλιχθούν τα πηνία. Ο σκελετός αυτός σχεδιάστηκε και εκτυπώθηκε σε 3D εκτυπωτή σε

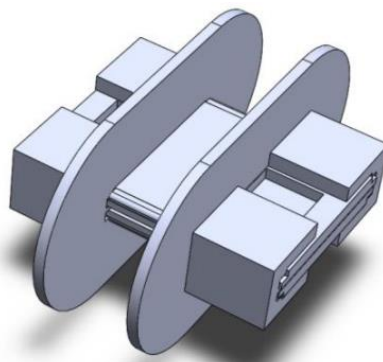
κομμάτια προκειμένου να επιτευχθούν με ακρίβεια όλες οι χρήσεις του. Τελικά, δύο επίπεδες επιφάνειες κατασκευάστηκαν για να σχηματίζουν τη σχισμή και να αποτελούν τις βάσεις των γοκε (Σχήμα 25). Σε αυτές τις επιφάνειες, δύο άλλα μέρη προσαρτήθηκαν προκειμένου να τις στηρίξουν αλλά και για να σχηματίσουν τις πλευρές των μπομπινών των πηνίων (Σχήμα 26). Ο πλήρης σκελετός όταν συναρμολογηθεί φαίνεται στο Σχήμα 27.



Σχήμα 25. Επίπεδες επιφάνειες.

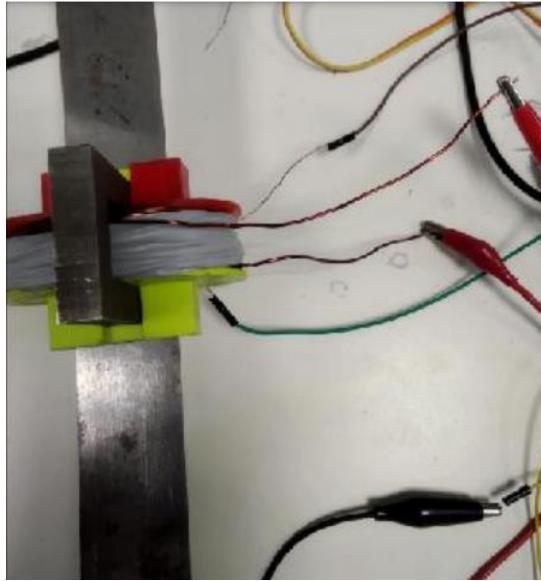


Σχήμα 26. Πλευρές των μπομπινών.



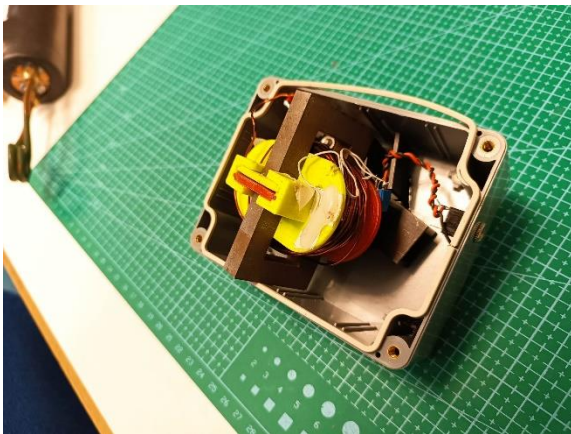
Σχήμα 27. Βάση του SST συναρμολογημένη.

Έχοντας συναρμολογήσει τον σκελετό και τοποθετήσει τα γοκε, η διάταξη με το δοκίμιο να διέρχεται της σχισμής φαίνεται στο Σχήμα 28. Ο τελικός SST πριν την συσκευασία του φαίνεται στο Σχήμα 29.

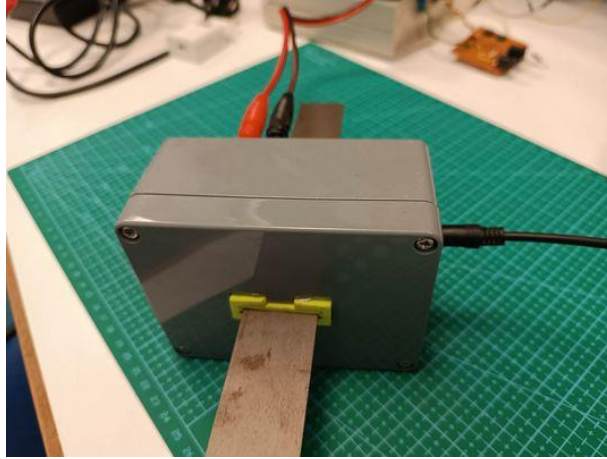


Σχήμα 28. Τελική διάταξη Single Sheet Tester.

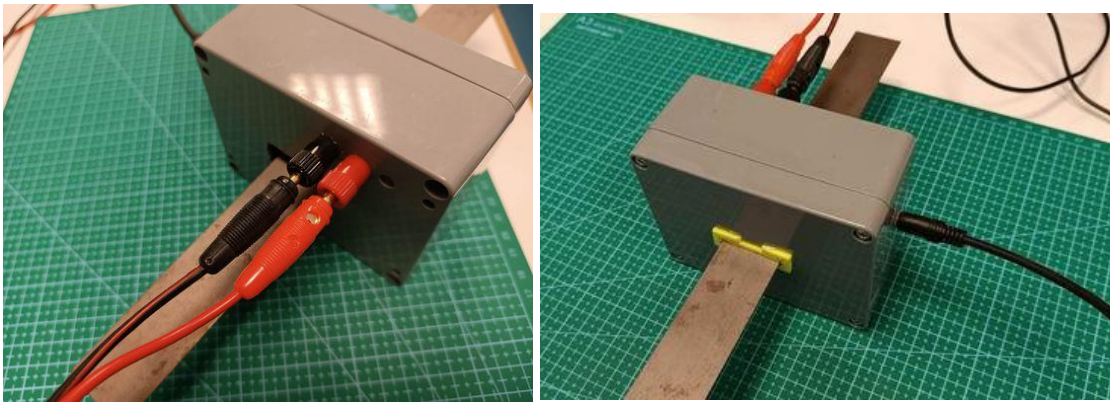
Η παραπάνω διάταξη τελικά τοποθετήθηκε σε κουτί όπως φαίνεται στο Σχήμα 30. Στο κουτί αυτό τοποθετήθηκαν μπόρνες για την είσοδο τροφοδοσίας του πρωτεύοντος πηνίου και θύρα τύπου jack 3.5 mm για το σήμα εξόδου (Σχήμα 31).



Σχήμα 29. SST κατά την συσκευασία του.



Σχήμα 30. Είσοδος δοκιμίου.

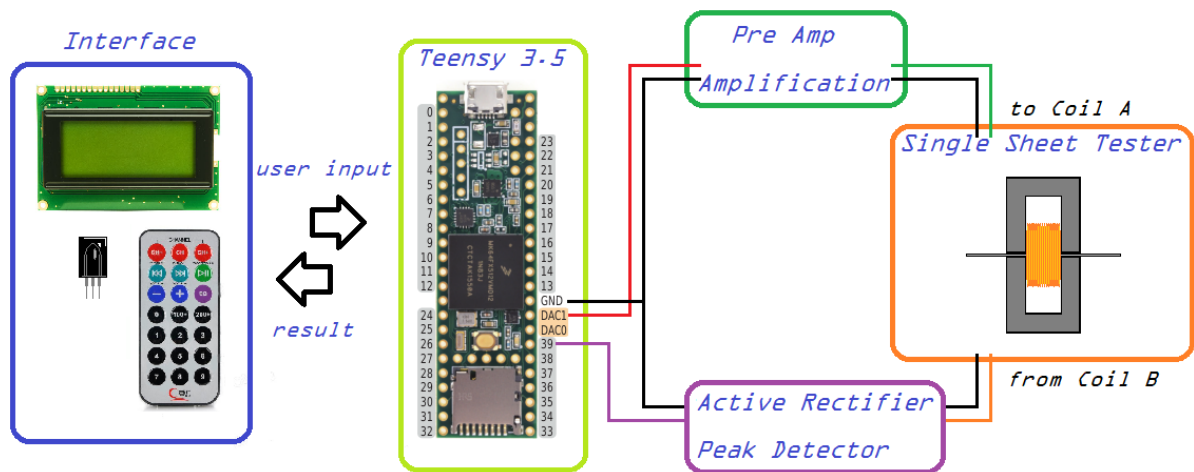


Σχήμα 31. Τροφοδοσία πρωτεύοντος πηνίου (αριστερά) και έξοδος σήματος (δεξιά).

3.2.3. Πειραματική Διάταξη - Αποτελέσματα

3.2.3.1. Περιγραφή της διάταξης

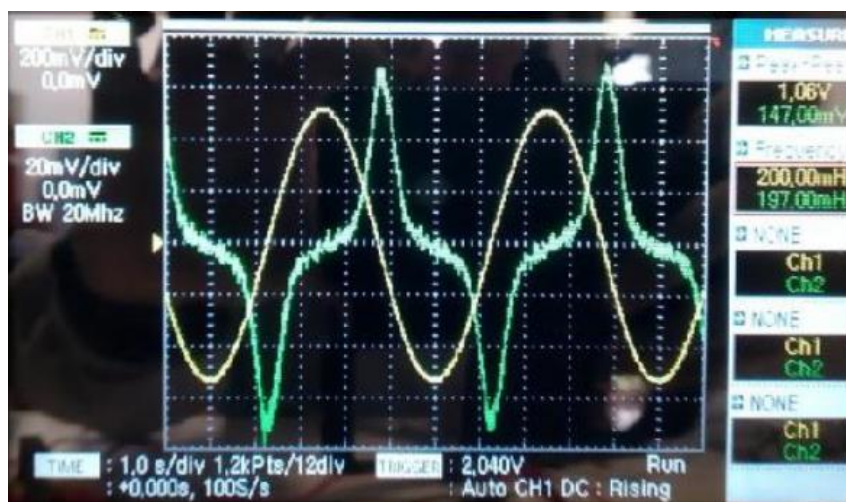
Η πειραματική διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε κατά την μέτρηση των δοκιμών φαίνεται στο Σχήμα 32. Τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ήταν παρόμοια κατασκευής με αυτά του πειράματος της Παραγράφου 3.3.1.4.



Σχήμα 32. Ολοκληρωμένο διάγραμμα συστήματος Single Sheet Tester.

Βάση του όλου συστήματος είναι ένας μικροελεγκτής τύπου *Teensy 3.5* [170]. Ο συγκεκριμένος επιλέχθηκε επειδή έχει αναλογικές εξόδους οι οποίες μπορούν να δώσουν στο σύστημα ημιτονοειδή τάση σήματος χωρίς να χρησιμοποιούν την τεχνική PWM όπως άλλοι μικροελεγκτές. Το σήμα αυτό περνάει σε ένα κύκλωμα προενίσχυσης (preamp), για να εξαλειφθεί η DC συνιστώσα του και να ελεγχθεί το πλάτος του. Η ενίσχυση του σήματος αυτού γίνεται τελικά με έναν εξωτερικό εργαστηριακό ενισχυτή ισχύος (*KEPCO BOP 50-2D*) [171].

Το ενισχυμένο σήμα τροφοδοτείται στο πρωτεύον πηνίο του SST ενώ στο δευτερεύον παίρνουμε την έξοδο του. Η γενική μορφή των δυο αυτών σημάτων εισόδου-εξόδου φαίνεται στο Σχήμα 33.



Σχήμα 33. Είσοδος – έξοδος SST.

Στην συνέχεια το σήμα εξόδου περνάει από δυο κυκλώματα πριν οδηγηθεί στον μικροελεγκτή για ανάγνωση: το ένα είναι κύκλωμα ανόρθωσης (active rectifier) και το άλλο είναι κύκλωμα εύρεσης κορυφής (peak detector). Το κύκλωμα ανόρθωσης βοηθάει ώστε να αποτραπεί η είσοδος αρνητικών τάσεων στην αναλογική είσοδο του μικροελεγκτή ενώ το κύκλωμα εύρεσης κορυφής βοηθάει στη μέτρηση της αντίστοιχης παραμέτρου, δηλαδή του πλάτους του σήματος. [Τα κυκλώματα *preamp*, *active rectifier* και *peak detector* παρατίθενται στο Παράρτημα.]

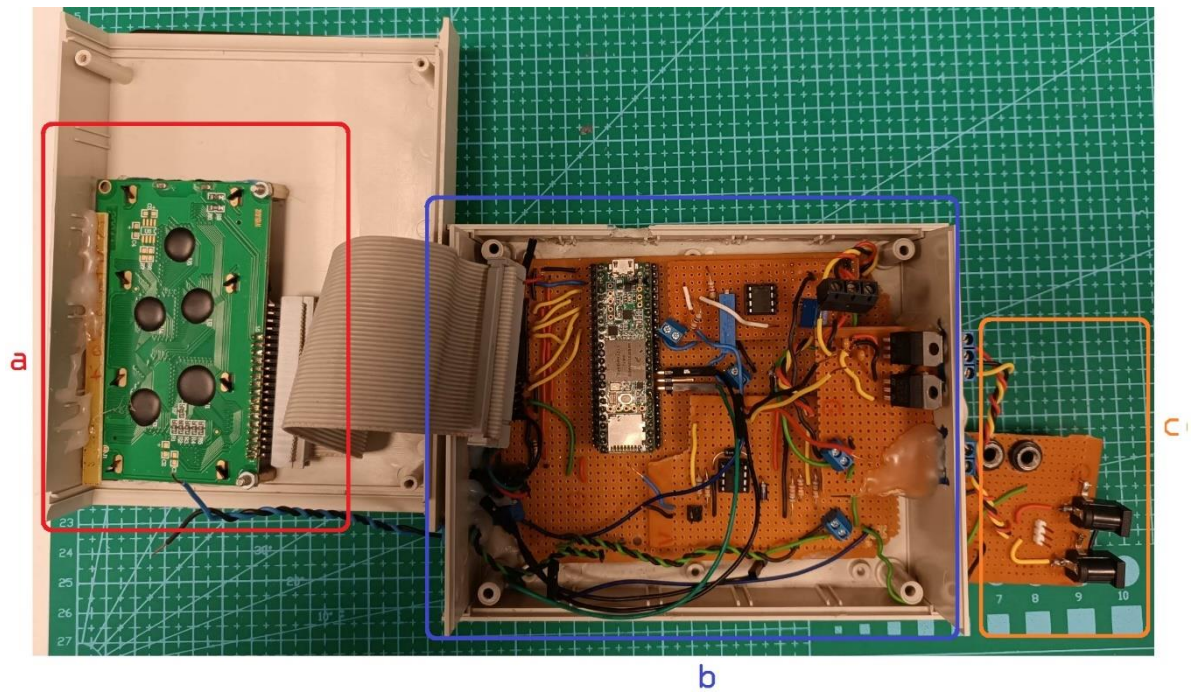
Με την ένδειξη Interface στο παραπάνω Σχήμα 32 είναι η οθόνη LCD, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την ανάγνωση της κατάστασης του συστήματος, και το τηλεχειριστήριο μαζί με τον αισθητήρα υπερύθρων με τα οποία ο χρήστης έδινε εντολές σε αυτό. Ο χειρισμός με τηλεχειριστήριο επιλέχθηκε καθώς με αυτόν τον τρόπο μπορούν να αποδοθούν πολλαπλές εντολές στα κουμπιά του κάνοντας χρήση μόνο ενός pin στον μικροελεγκτή, αυτό του δέκτη IR. Με αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης μπορούσε να ελέγχει την συχνότητα λειτουργίας, ενώ υπάρχει άμεση και εύκολη ανάγνωση των αποτελεσμάτων [Ο κώδικας *Arduino IDE* με τον οποίο προγραμματίστηκε το *Teensy* βρίσκεται στο Παράρτημα.].

Τα παραπάνω μέρη του συστήματος (εκτός του εξωτερικού ενισχυτή και του ίδιου του αισθητήρα SST) συγκεντρώθηκαν στην μονάδα ελέγχου/ανάγνωσης σήματος η οποία φαίνεται στο Σχήμα 34.



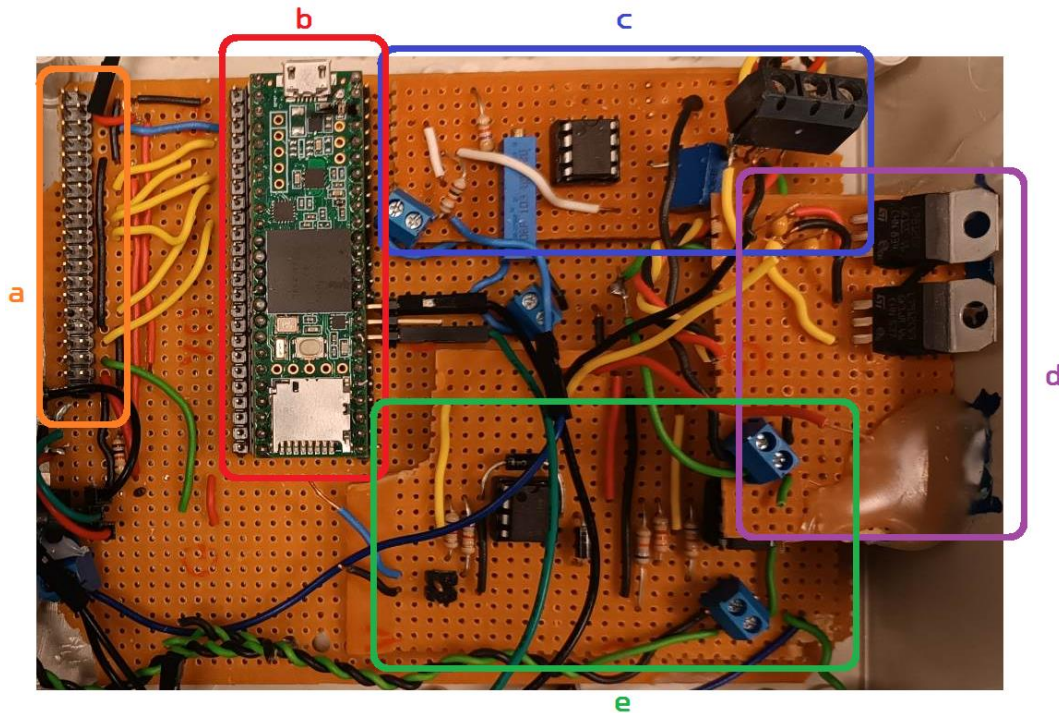
Σχήμα 34. Μονάδα ελέγχου/ανάγνωσης σήματος.

Τα επιμέρους μέρη τα οποία απαρτίζουν την μονάδα ελέγχου φαίνονται στο Σχήμα 35.



Σχήμα 35. Επιμέρους μέρη που απαρτίζουν την μονάδα ελέγχου. Φαίνονται: α) Οθόνη – αισθητήρας IR, β) κυρίως κύκλωμα και γ) υποδοχή εξωτερικής τροφοδοσίας.

Το κύκλωμα στο οποίο συνδέεται ο μικροεπεξεργαστής φαίνεται στο Σχήμα 36. Στο σχήμα αυτό, το κύκλωμα peak detector δεν είναι ορατό καθώς αποτελείται από δυο μόνο στοιχεία τα οποία βρίσκονται κάτω από το κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης εξωτερικής τροφοδοσίας.



Σχήμα 36. Πρωτότυπο κύκλωμα ελέγχου Single Sheet Tester. Φαίνονται: a) Υποδοχή σύνδεσης οθόνης – αισθητήρα IR, b) Teensy 3.5, c) κύκλωμα preamp, d) σταθεροποίηση τάσης εξωτερικής τροφοδοσίας και e) κύκλωμα active rectifier και peak detector.

Στο Σχήμα 37 φαίνεται η ένδειξη της οθόνης LCD ενώ ο Single Sheet Tester βρίσκεται σε λειτουργία.



Σχήμα 37. Ένδειξη οθόνης Single Sheet Tester σε λειτουργία.

3.2.3.2. Πειραματική Διαδικασία

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω διάταξη έγινε μια σειρά από μετρήσεις οι οποίες παρουσιάζονται και περιγράφονται εκτενώς στο [172]. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα είχαν χρησιμοποιηθεί σε παλαιότερη μελέτη [173] για να είναι γνωστός ο τρόπος κατασκευής τους και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους, ενώ προήλθαν από μεγαλύτερο δείγμα ηλεκτρικού χάλυβα ψυχρής εξέλασης, με κοπή του σε

λωρίδες διαστάσεων $300 \cdot 30 \text{ mm}^2$, όπως αυτά που φαίνονται στο Σχήμα 24. Τα δοκίμια είναι κατασκευασμένα από πυριτιούχο κράμα σιδήρου με χαμηλή περιεκτικότητα άνθρακα γνωστό ως Non-Oriented Electrical Steel (**NOES**). Οι μετρήσεις έγιναν στα δείγματα της σειράς TS και της σειράς RX.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά εργαστηριακών δειγμάτων.

TS - Series	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6	TS7	TS8	TS9
True strain (%)	29	24	19	12	10	7	3	2	0
Thickness (μm)	510	540	560	600	620	640	660	670	680

RX - series	RX1	RX2	RX3	RX4	RX5	RX6	RX7
Grain size (μm)	148	119	82	67	54	31	27
Thickness (μm)	511	501	488	475	451	400	343

GG - series	GG1	GG2	GG3	GG4	GG5	GG6
Grain size (μm)	11	17	57	62	66	27
Thickness (μm)	540	540	540	540	540	540
Annealing (C/h)	600/2	680/2	850/4	850/8	850/12	680/2

Τα δείγματα της σειράς TS διαφέρουν σε πραγματική παραμόρφωση (true strain), η οποία κυμαίνεται από 0% έως 29%, και έχουν διαφορετικό πάχος μεταξύ τους. Στα δείγματα της σειράς RX έχει γίνει ανόπτηση στη θερμοκρασία των $760 \text{ }^\circ\text{C}$ προκειμένου να αναπτυχθούν διαφορετικά μεγέθη συσσωματώματων (grains), μέσω της ανακρυστάλλωσης. Τα δοκίμια της σειράς RX έχουν επίσης μεταβαλλόμενο πάχος.

Ο Πίνακας 3 και ο Πίνακας 4 δείχνουν ενδεικτικά τις τιμές των μετρήσεων οι οποίες έγιναν με τον αισθητήρα στα δείγματα της σειράς RX για τις συχνότητες 0.1 και 1 Hz. Η τάση εισόδου έλαβε τιμές από 360mV έως 1420mV αυξανόμενη με βήμα 120mV. Στο κάθε δοκίμιο πάρθηκαν δυο μετρήσεις, μια στην άκρη και μια στο κέντρο του.

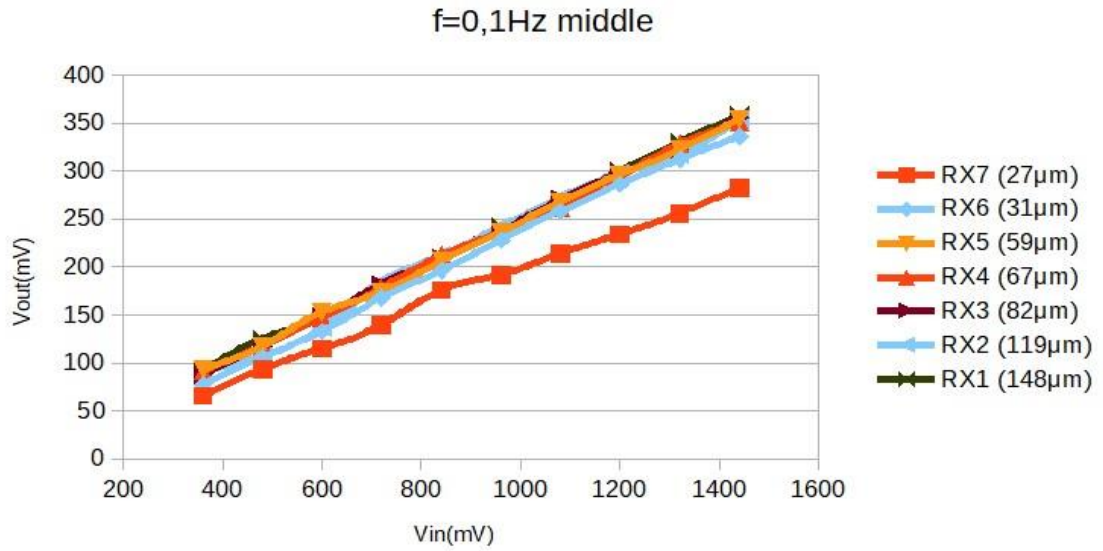
Πίνακας 3. Μετρήσεις δειγμάτων σειράς RX σε συχνότητα 0.1 Hz.

RX1 (148μm)		RX2 (119μm)		RX3 (82μm)		RX4 (67μm)		RX5 (59μm)		RX6 (31μm)		RX7 (27μm)	
edge	middle	edge	middle	edge	middle	edge	middle	edge	middle	edge	middle	edge	middle
77,6	91	80	91,2	72,6	88	76,8	91,2	76	93,6	82,4	76,8	55,6	66
102	125,6	108	107	99,2	118	104	117,6	100	117,6	105,6	106,2	76,8	93,6
124	147	132	136	123,2	148	128	146,4	128,6	152,8	129,6	132,8	93,6	115,2
154	182	164	184	149,6	182	150	178	156	174	153,6	168	114,4	139,2
184	208	184	212	176	210	190	212	180	206	180	196	131,2	176
206	242	222	242	198	238	212	236	208	236	202	228	152	192
230	270	246	272	224	270	238	262	232	268	228	258	172	214
252	300	268	298	252	298	262	294	254	296	258	286	192	234
284	330	292	316	274	322	288	328	288	322	284	312	212	256
306	358	318	354	306	356	314	350	310	354	310	336	236	282

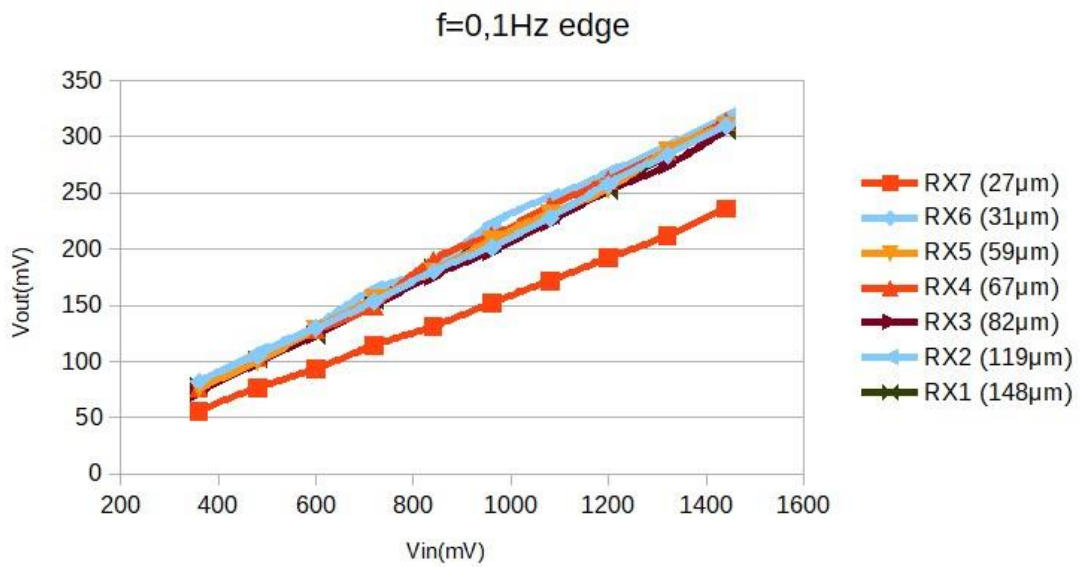
Πίνακας 4. Μετρήσεις δειγμάτων σειράς RX σε συχνότητα 1 Hz.

RX1 (148μm)		RX2 (119μm)		RX3 (82μm)		RX4 (67μm)		RX5 (59μm)		RX6 (31μm)		RX7 (27μm)	
edge	mid	edge	mid	edge	mid	edge	mid	edge	mid	edge	mid	edge	middle
792	888	800	888	752	872	776	856	744	880	752	832	536	672
1020	1190	1050	1180	984	1170	1008	1144	976	1160	960	1088	732	896
1240	1460	1300	1420	1200	1430	1248	1400	1216	1432	1200	1344	904	1104
1480	1740	1540	1740	1420	1720	1480	1660	1440	1700	1432	1600	1096	1336
1740	2020	1780	2000	1660	1980	1720	1960	1680	1980	1680	1780	1264	1536
1920	2260	2000	2240	1880	2220	1960	2160	1902	2200	1900	2040	1432	1740
2120	2520	2240	2480	2100	2460	2160	2360	2120	2460	2100	2220	1560	1920
2340	2760	2420	2740	2260	2720	2380	2660	2360	2660	2320	2480	1740	2080
2520	3000	2600	2960	2480	2960	2560	2860	2540	2900	2520	2700	1880	2220
2740	3200	2780	3180	2640	3180	2800	3040	2720	3100	2700	2900	2020	2420

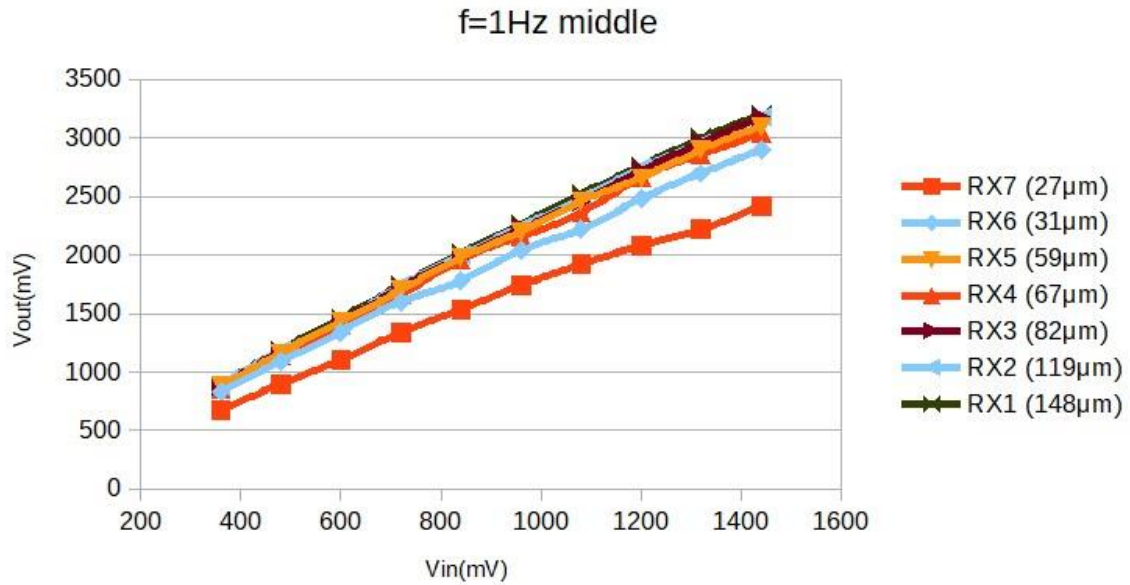
Τα διαγράμματα τάσης εισόδου – εξόδου για τις παραπάνω μετρήσεις φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



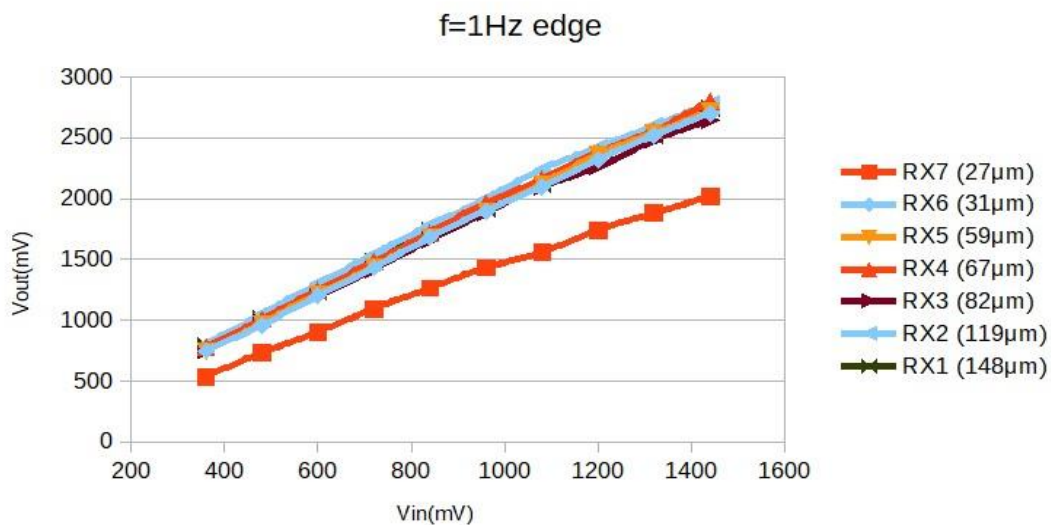
Σχήμα 38. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, σειρά δοκιμών RX, συχνότητα 0.1 Hz, μέση του δοκιμίου [172].



Σχήμα 39. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, σειρά δοκιμών RX, συχνότητα 0.1 Hz, άκρη του δοκιμίου [172].



Σχήμα 40. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, σειρά δοκιμών RX, συχνότητα 1 Hz, μέση του δοκιμίου [172].



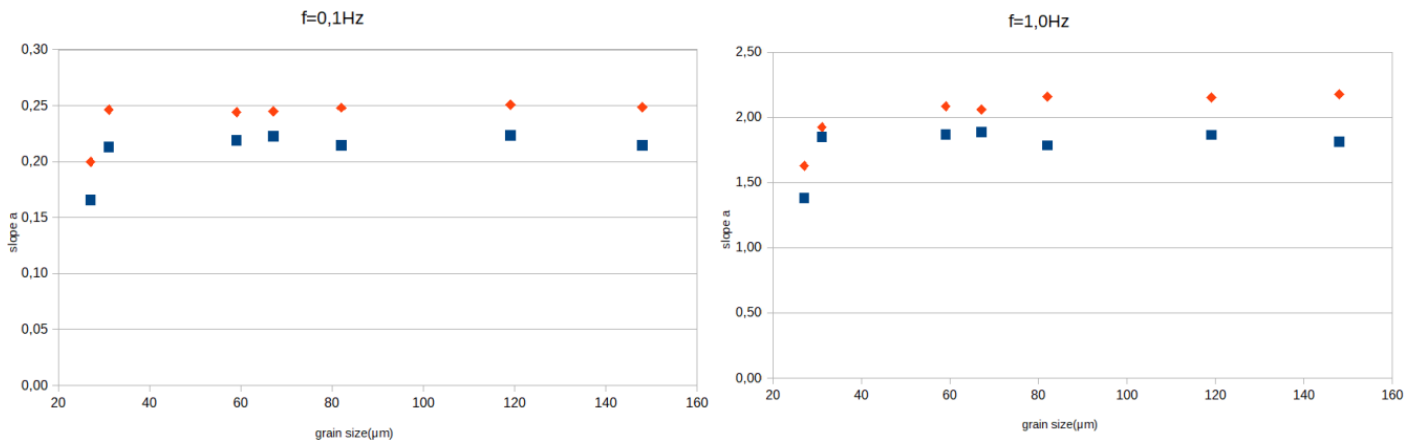
Σχήμα 41. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, σειρά δοκιμών RX, συχνότητα 1 Hz, άκρη του δοκιμίου [172].

Για τις παραπάνω μετρήσεις μπορούμε να υπολογίσουμε τη σχέση που συνδέει τη τάση εισόδου με τη τάση εξόδου, σύμφωνα με την Σχέση (3.6) [172].

$$V_{out} = a \cdot V_{in} + b \quad (3.5)$$

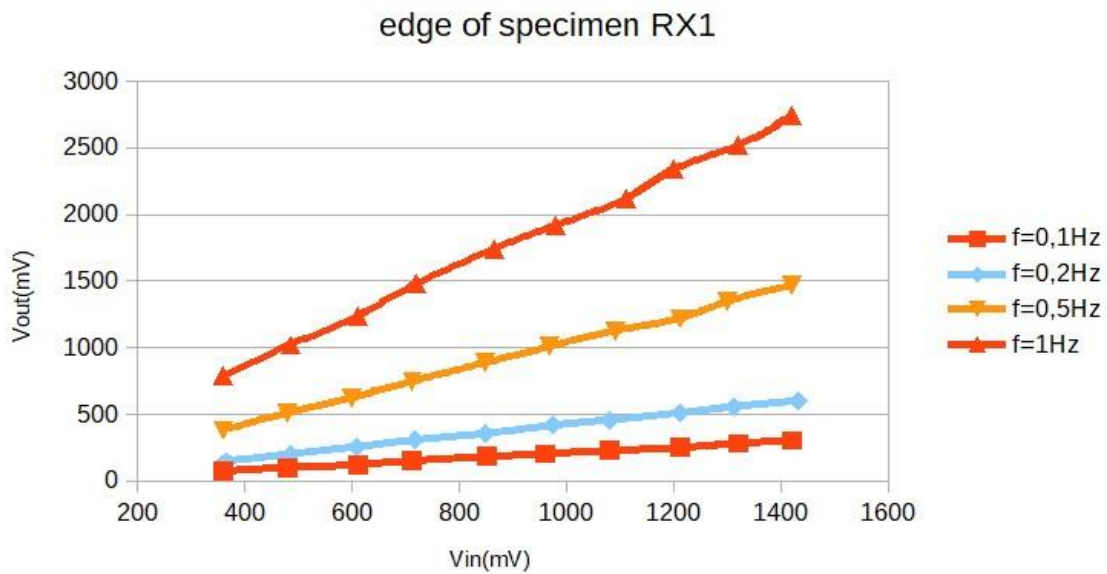
Για τα δείγματα της σειράς RX η κλίση (slope) a του διαγράμματος τάσης εισόδου – τάσης εξόδου σε σχέση με το μέγεθος του συσσωματώματος, φαίνεται στο Σχήμα 42. Η απόκλιση του δείγματος RX7 είχε παρατηρηθεί και στην μελέτη του [173] και τελικά είχε

αποδοθεί σε ελάττωμα του ίδιου του δείγματος, γεγονός το οποίο, τελικά, αποτελεί ένδειξη για την σωστή λειτουργία του SST.

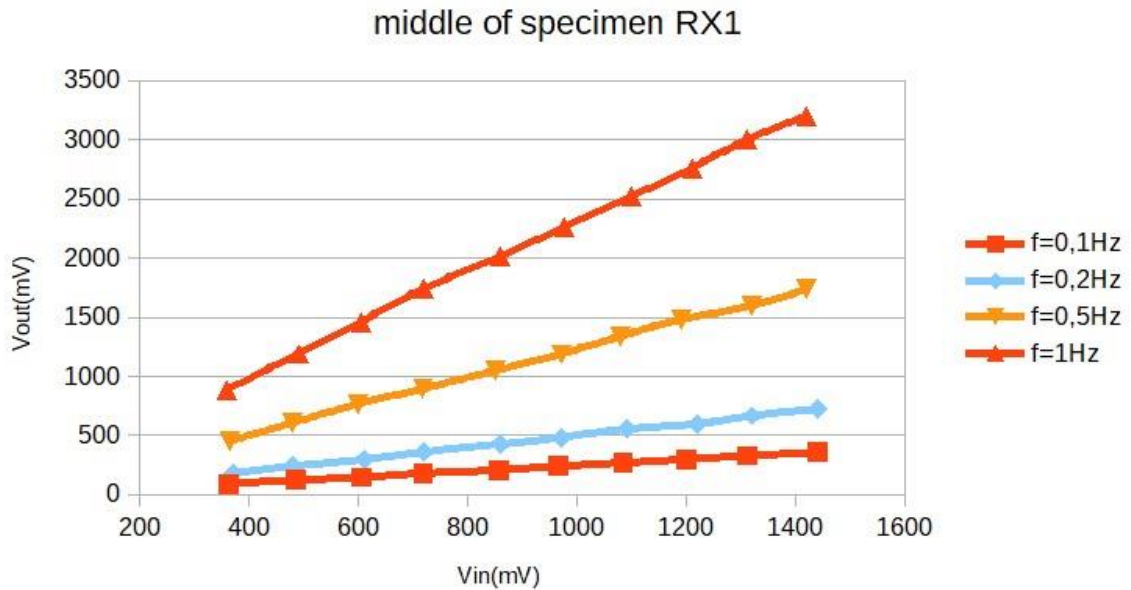


Σχήμα 42. Κλίση (slope a) του διαγράμματος τάσης εισόδου – τάσης εξόδου σε σχέση με το συσσωμάτωμα του υλικού (grain) στην άκρη (μπλε) και στη μέση (πορτοκαλί) [172].

Ενδεικτικά, για το δείγμα RX1 στην μέση και στην άκρη του, και σε διάφορες συχνότητες τα διαγράμματα εισόδου - εξόδου φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 43. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, δοκίμιο RX1, άκρη του δοκιμίου [172].



Σχήμα 44. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, δοκίμιο RX1, μέση του δοκιμίου [172].

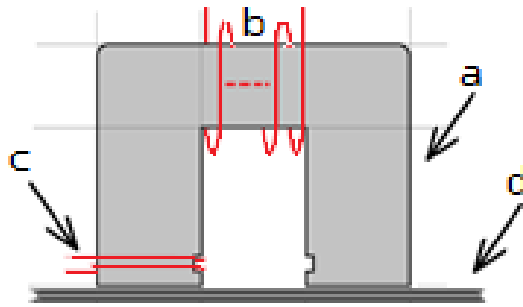
Σύμφωνα με το [172], το σύνολο των μετρήσεων ανήκουν στη γραμμική περιοχή της καμπύλης υστέρησης, δηλαδή η πυκνότητα μαγνητικής ροής μεταβάλλεται κατά προσέγγιση γραμμικά σε μεταβολές του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

3.3. Υοκε με πηνίο διέγερσης

3.3.1. Αισθητήρας Μαγνητικής Διαπερατότητας με Πυρήνα Υοκε

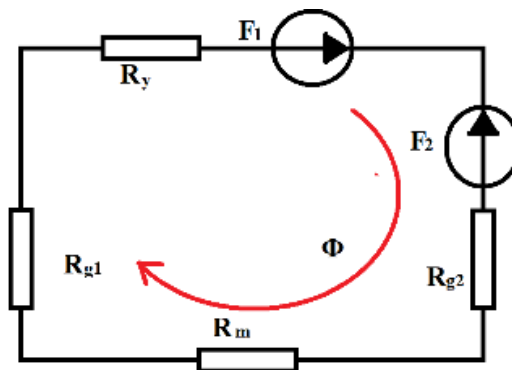
3.3.1.1. Περιγραφή

Ο Αισθητήρας Μαγνητικής Διαπερατότητας με πυρήνα σε σχήμα «π» (yoke) φαίνεται στο Σχήμα 45. Ο Αισθητήρας μαζί με το προς μέτρηση υλικό φαίνονται να συμπληρώνουν ένα μαγνητικό κύκλωμα με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που είδαμε στο Single Sheet Tester. Η διάταξη διαφοροποιείται στο ότι στον αισθητήρα αυτόν υπάρχει ένας πυρήνας σχήματος yoke αντί για δυο, ενώ τα πηνία είναι τυλιγμένα πάνω του. Έτσι, το δοκίμιο το οποίο εξετάζεται παύει να έχει περιορισμό στο πλάτος και το πάχος και άρα η βασική Αρχή αυτής της διάταξης μπορεί να βρει εφαρμογή σε πολύ περισσότερους ελέγχους μη καταστροφικής φύσης.



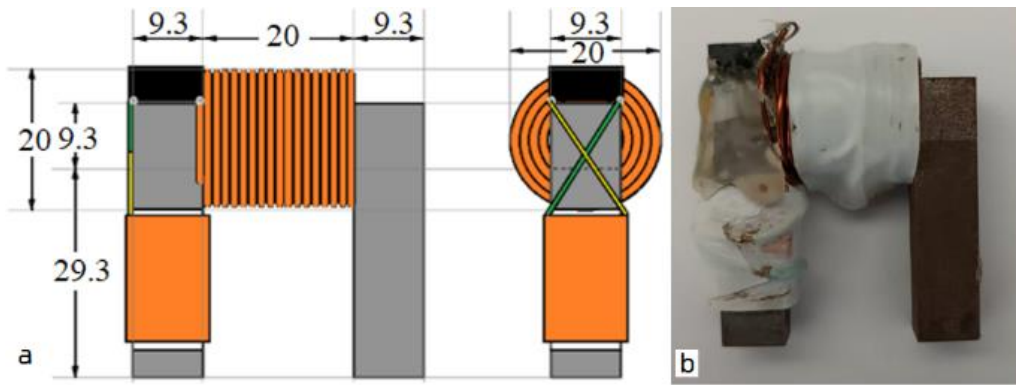
Σχήμα 45. Αισθητήρας μαγνητικής διαπερατότητας.

Ο αισθητήρας έχει 3 βασικά μέρη: a) ο πυρήνας σε σχήμα γοκε ο οποίος είναι κατασκευασμένος από ηλεκτρικό χάλυβα, b) το πρωτεύον πηνίο (πηνίο A) το οποίο είναι η πηγή της μαγνητικής ροής c) το δευτερεύον πηνίο το οποίο λειτουργεί ως δέκτης μαγνητικής επαγωγής (πηνίο B). Στο Σχήμα 45 σημειώνεται με d) το υπό μέτρηση υλικό. Επίσης φαίνονται τα κενά, μεταξύ του υλικού και του αισθητήρα, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη. Το ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα φαίνεται στο Σχήμα 46.



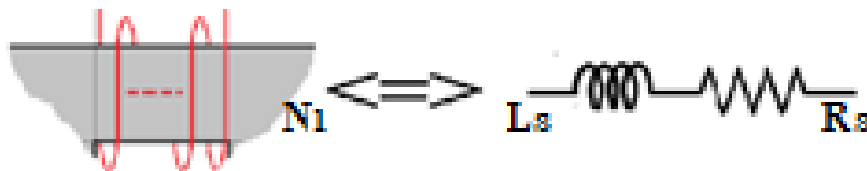
Σχήμα 46. Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα Αισθητήρα Μαγνητικής Διαπερατότητας.

όπου, F_1 και F_2 είναι οι μαγνητογερετικές δυνάμεις των πηνίων A και B, αντίστοιχα, R_{g1} και R_{g2} είναι οι μαγνητικές αντιστάσεις των κενών ανάμεσα από τον αισθητήρα και το προς μέτρηση υλικό, R_y η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα σχήματος γοκε, R_m η μαγνητική αντίσταση του προς μέτρηση υλικού και Φ η μαγνητική ροή του κυκλώματος.



Σχήμα 47. Μηχανολογικό σχέδιο αισθητήρα (αριστερά-διαστάσεις σε mm), αισθητήρας μαγνητικής διαπερατότητας (δεξιά).

Ο πυρήνας σχήματος γοκε είναι κατασκευασμένος από ηλεκτρικό χάλυβα, ο οποίος χρησιμοποιείται συνήθως σε μετασχηματιστές. Για το πηνίο A, μήκους 2 cm, χρησιμοποιήθηκε μονωμένο καλώδιο $\varnothing 1$ mm. Αποτελείται από 4 στρώσεις σύρματος με 17 στροφές ανά στρώση. Το πηνίο B είναι κατασκευασμένο από μονωμένο σύρμα $\varnothing 0.1$ mm και έχει μήκος 1.8 cm, 15 στρώσεις και 10 στροφές ανά στρώση. Πάνω στον πυρήνα έχει προσκολληθεί μια βάση ολοκληρωμένου κυκλώματος των 8 pin ως υποδοχή για το καλώδιο το οποίο το συνδέει με το υπόλοιπο κύκλωμα. Ο τελικός αισθητήρας φαίνεται στο Σχήμα 47. Τα πηνία A και B θεωρούνται ως ένα ιδανικό πηνίο L_S σε σειρά με ιδανική αντίσταση R_S . Ο Πίνακας 5 περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά τους.



Σχήμα 48. Ισοδύναμο κύκλωμα πηνίου.

Πίνακας 5. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πηνίων A και B.

	L_S	R_S
Πηνίο A	318 μ H	0.15 Ω
Πηνίο B	2.11 mH	16.37 Ω

Κάθε πείραμα είναι σημαντικό να μπορεί να επαναληφθεί. Για το λόγο αυτό, ένας δεύτερος αισθητήρας κατασκευάστηκε με τα ίδια φυσικά χαρακτηριστικά του πρώτου. Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει τα ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά.

Πίνακας 6. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πηνίων A και B του Αισθητήρα II.

	L_s	R_s
Πηνίο A	298 μH	0.09 Ω
Πηνίο B	1.98 mH	16.88 Ω

Οι δυο αισθητήρες, οι οποίοι στο εξής θα αναφέρονται ως Αισθητήρας I και Αισθητήρας II, πέρασαν μια διαδικασία διακρίβωσης πριν το πείραμα για να μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματά τους.

3.3.1.2. Κυκλωματική ανάλυση

Σύμφωνα με τη Σχέση (3.6), το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου H θα είναι:

$$H = \frac{N_1}{Z_1 \cdot l_1} \cdot V_1 \quad (3.6)$$

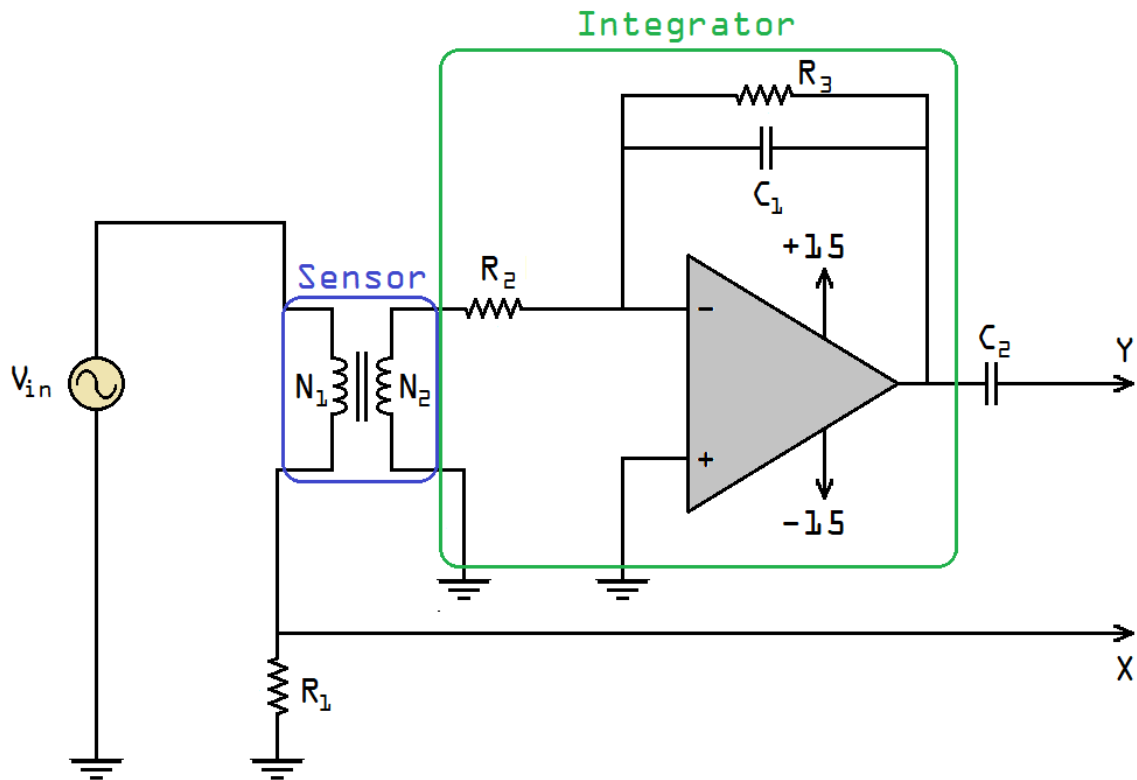
όπου N_1 , Z_1 , l_1 , και V_1 συμβολίζουν τον αριθμό των στροφών του πηνίου A, την εμπέδησή του, το μήκος του και την διαφορά δυναμικού στα άκρα του, αντίστοιχα.

Το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής B του πεδίου θα δίνεται από την Σχέση (3.7)

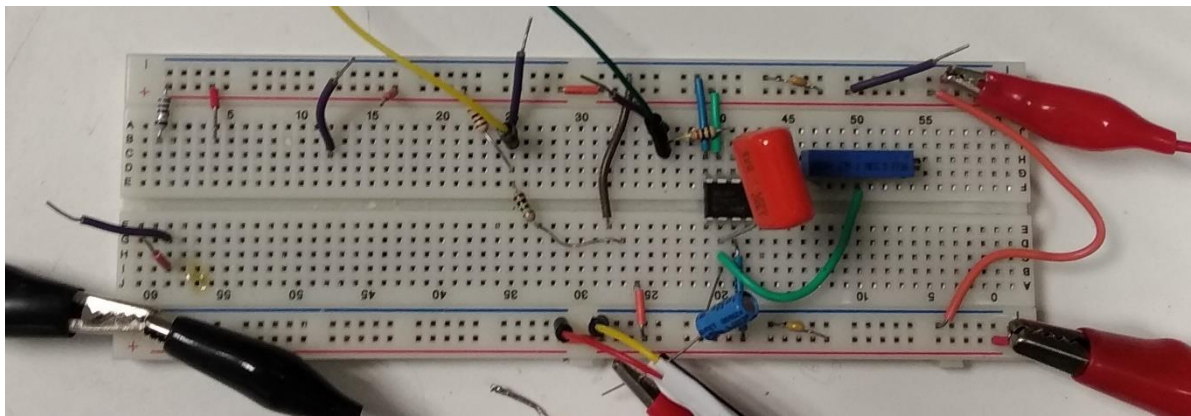
$$B = \frac{1}{N_2 \cdot S} \cdot \int V_2 \cdot dt \quad (3.7)$$

όπου N_2 , S , και V_2 συμβολίζουν τον αριθμό των στροφών του πηνίου B, το εμβαδό της διατομής του και την διαφορά δυναμικού στα άκρα του, αντίστοιχα.

Στη Σχέση (3.7) το B είναι ανάλογο του ολοκληρώματος της εξόδου V_2 και άρα θα πρέπει αυτή να περάσει από κύκλωμα ολοκληρωτή προκειμένου να εμφανιστεί ο Βρόχος Υστέρησης στον παλμογράφο. Το τελικό κύκλωμα φαίνεται στο Σχήμα 49, ενώ η υλοποίησή του σε breadboard φαίνεται στο Σχήμα 50.



Σχήμα 49. Κύκλωμα μέτρησης με ολοκληρωτή.



Σχήμα 50. Υλοποίηση κυκλώματος σε breadboard.

Για το κύκλωμα του ολοκληρωτή ισχύει ότι η συχνότητα crossover όπου το κέρδος είναι 0 dB σύμφωνα με το [174] δίνεται από την Σχέση (3.8).

$$f_b = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_1} \quad (3.8)$$

Ομοίως, η ελάχιστη συχνότητα λειτουργίας δίνεται από την Σχέση (3.9).

$$f_a = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_3 \cdot C_1} \quad (3.9)$$

Στο κύκλωμα αυτό οι τιμές των διαφόρων ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων επιλέχθηκαν να είναι: $C_1 = 2.2 \mu\text{F}$, $C_2 = 1 \mu\text{F}$, $R_1 = 0.1 \Omega$, 10 W (αντίσταση ισχύος), $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ και $R_3 = 1 \text{ M}\Omega$. Με αυτές τις τιμές οι Σχέσεις (3.8) και (3.9) μας δίνουν:

$$f_b = 72 \text{ Hz} \quad (3.10)$$

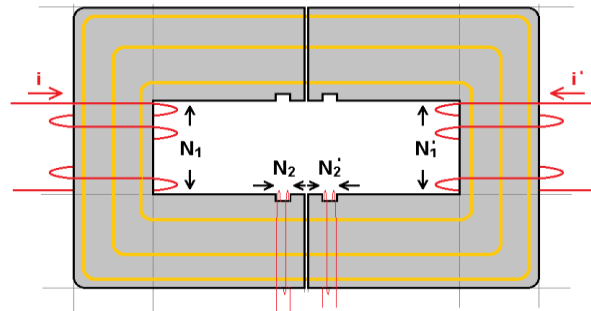
$$f_a = 0.072 \text{ Hz}. \quad (3.11)$$

Οι τιμές αυτές είναι ικανοποιητικές για την λειτουργία του αισθητήρα. Η τιμή του , C_2 είναι τυπική για την αποκοπή της συνιστώσας DC του σήματος, ενώ η R_1 τοποθετήθηκε για την μέτρηση του ρεύματος πηνίου εισόδου στο πρωτεύον πηνίο.

3.3.1.3. Διαδικασία Διακρίβωσης

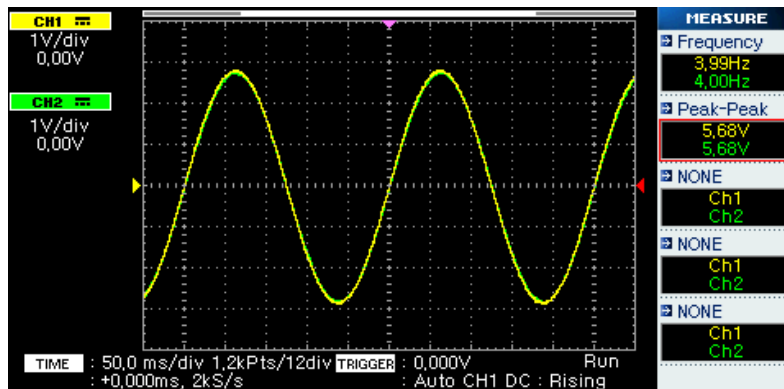
Προκειμένου να γίνει η διακρίβωση του δεύτερου αισθητήρα σύμφωνα με τον πρώτο ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

1. Αρχικά, οι δυο αισθητήρες τοποθετούνται σε θέση τέτοια που να συμπληρώνουν μαγνητικό κύκλωμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 51.

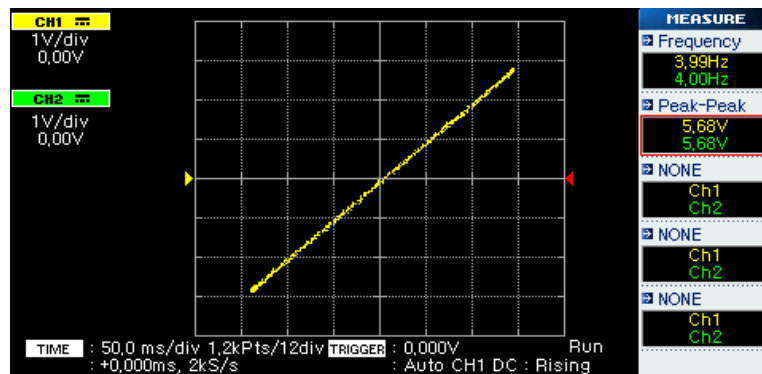


Σχήμα 51. Θέση διακρίβωσης.

2. Εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 4 Hz επιβάλλεται στο Πηνίο A του Αισθητήρα I, ενώ ο Αισθητήρας II χρησιμοποιείται σαν έξοδος, χωρίς την χρήση του κυκλώματος ολοκλήρωσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 52 και το Σχήμα 53.



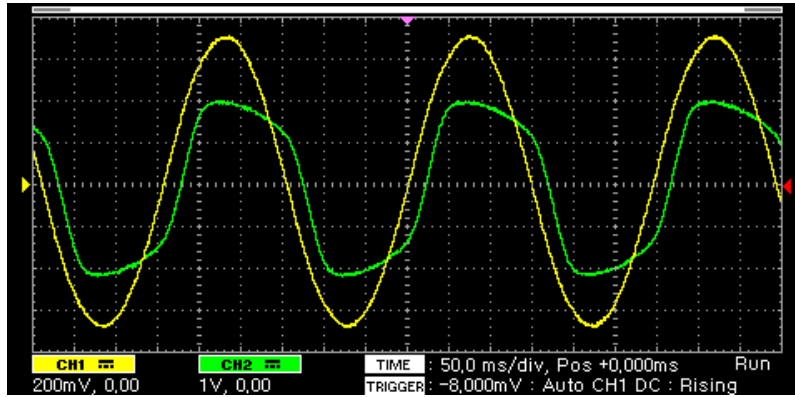
Σχήμα 52. Απεικόνιση Υ-Τ. Αισθητήρας I ως είσοδος, Αισθητήρας II ως έξοδος.



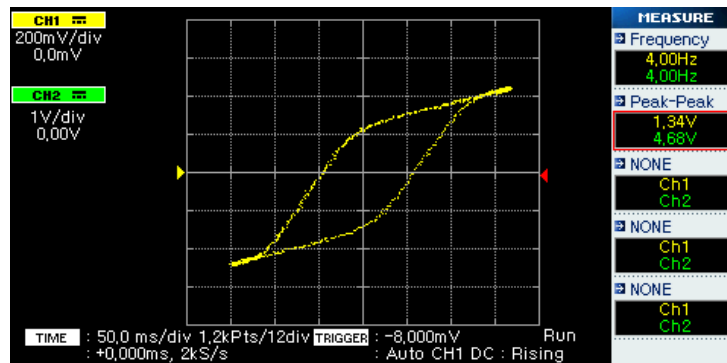
Σχήμα 53. Απεικόνιση Χ-Υ. Αισθητήρας I ως είσοδος, Αισθητήρας II ως έξοδος.

Όπως μπορούμε να δούμε από τις παραπάνω απεικονίσεις, τα σήματα εισόδου και εξόδου είναι ακριβώς ίδια σε σημείο να ταυτίζονται πλήρως στο Σχήμα 52. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται στη συνέχεια αντιστρέφοντας τους ρόλους των δυο αισθητήρων, δηλαδή με τον Αισθητήρα II σαν είσοδο και τον Αισθητήρα I σαν έξοδο. Τα αποτελέσματα είναι ίδια με αυτά στο Σχήμα 52 και Σχήμα 53 και έτσι παραλείπονται.

3. Το κύκλωμα του ολοκληρωτή συνδέεται στο Πηνίο Β του Αισθητήρα II, το οποίο χρησιμοποιείται σαν έξοδος, και εισάγεται εναλλασσόμενο ρεύμα εισόδου, συχνότητας 4 Hz, στο Πηνίο Α του Αισθητήρα I. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 54 και το Σχήμα 55.

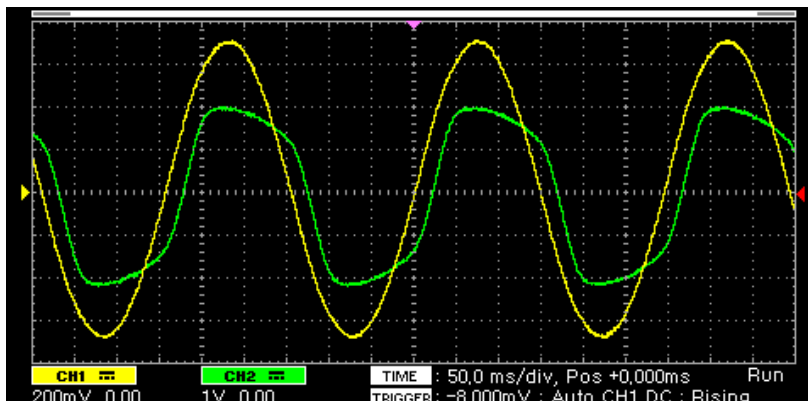


Σχήμα 54. Απεικόνιση Υ-Τ. Πηνίο Α Αισθητήρα I ως είσοδος, πηνίο Β Αισθητήρα II ως έξοδος.

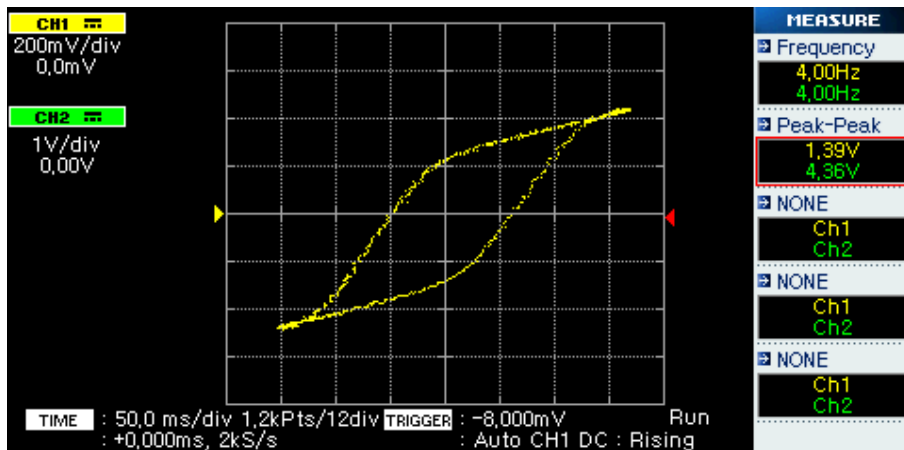


Σχήμα 55. Απεικόνιση Χ-Υ. Πηνίο Α Αισθητήρα I ως είσοδος, πηνίο Β Αισθητήρα II ως έξοδος (Βρόχος Υστέρησης).

Όπως και στο βήμα 2, αντιστρέφοντας τους ρόλους των δυο αισθητήρων, χρησιμοποιώντας, δηλαδή, το Πηνίο Α του Αισθητήρα II σαν είσοδο και το Πηνίο Β του Αισθητήρα I σαν έξοδο οι μετρήσεις επαναλαμβάνονται. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 56 και το Σχήμα 57.



Σχήμα 56. Απεικόνιση Υ-Τ. Πηνίο Α Αισθητήρα II ως είσοδος, πηνίο Β Αισθητήρα I ως έξοδος

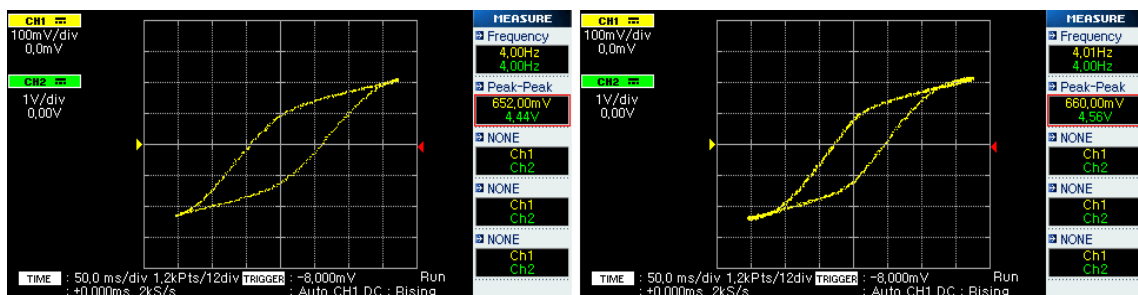


Σχήμα 57. Απεικόνιση Χ-Υ. Πηνίο Α Αισθητήρα II ως είσοδος, πηνίο Β Αισθητήρα I ως έξοδος (Βρόχος Υστέρησης).

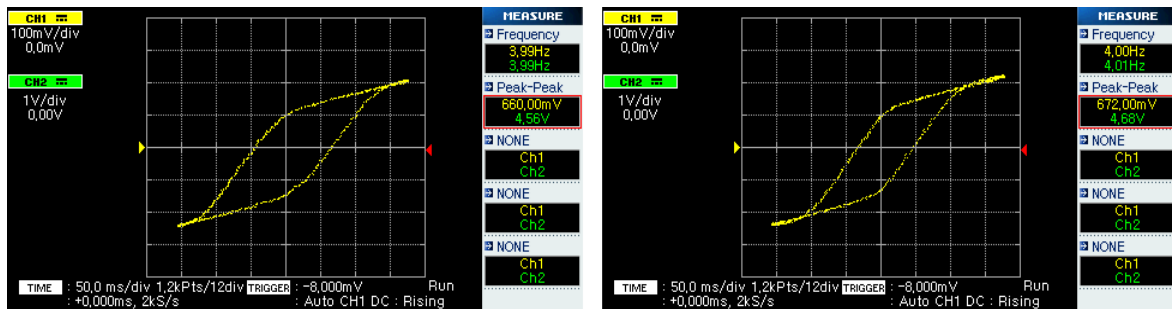
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 54 και το Σχήμα 55 με αυτά στο Σχήμα 56 και το Σχήμα 57, μπορούμε να συμπεράνουμε με ασφάλεια ότι οι δυο αισθητήρες είναι σωστά διακριβωμένοι μεταξύ τους. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα των μετρήσεων οι οποίες ακολουθούν.

3.3.1.4. Τυπικές Μετρήσεις

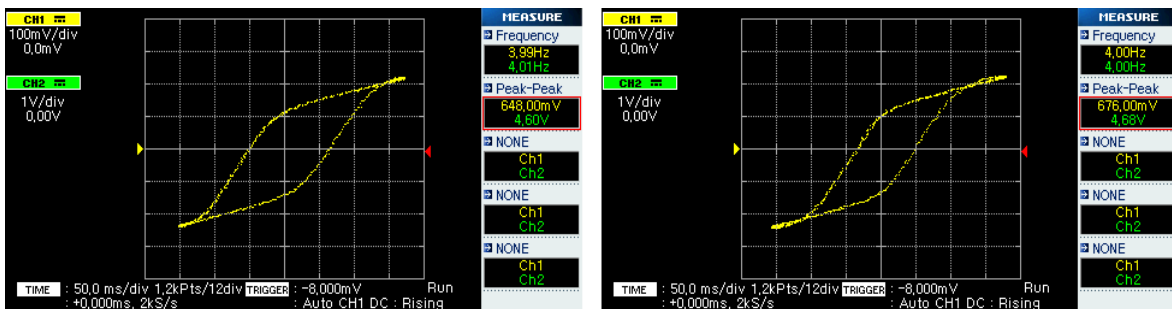
Η λειτουργικότητα του αισθητήρα μαγνητικής διαπερατότητας δοκιμάστηκε με διάφορα δείγματα. Προκειμένου να ελεγχθεί επίσης η διακρίβωση, χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο Αισθητήρες I και II και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί για σύγκριση (Σχήμα 58, Σχήμα 59 και Σχήμα 60, Αισθητήρας I (αριστερά) και II (δεξιά)).



Σχήμα 58. Βρόχοι Υστέρησης Δείγματος Α.



Σχήμα 59. Βρόχοι Υστέρησης Δείγματος Β.



Σχήμα 60. Βρόχοι Υστέρησης Δείγματος Γ.

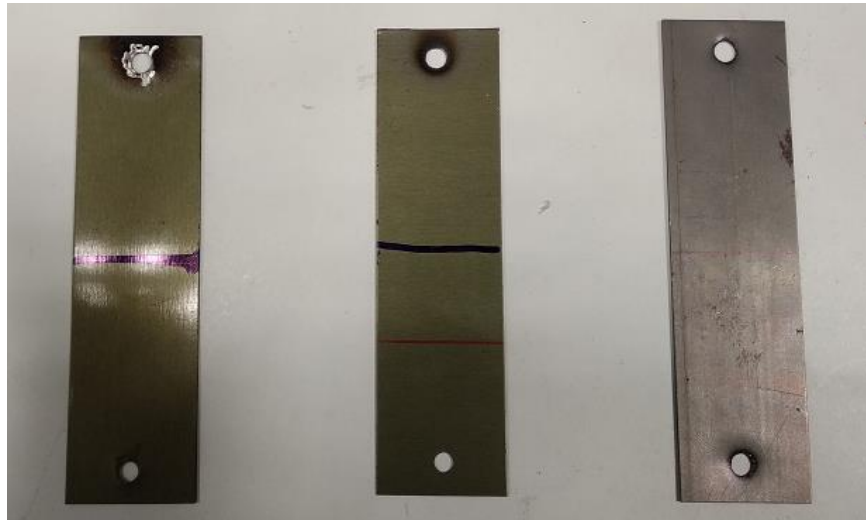
Ως ενδεικτικές για τη μαγνητική διαπερατότητα των δειγμάτων, μετρήθηκαν οι τιμές κορυφής προς κορυφή με ψηφιακό παλμογράφο (peak-to-peak) και οι τιμές RMS με εργαστηριακό πολύμετρο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7, ενώ τα δοκίμια αναφοράς του πειράματος, τα οποία αναφέρονται ως Δείγματα Α, Β και Γ φαίνονται στο Σχήμα 61. Μετρήσεις επίσης πάρθηκαν και για την χάλκινη ράβδο που φαίνεται στο Σχήμα 62.

Πίνακας 7. Αποτελέσματα μετρήσεων.

	Αισθητήρας	Peak-to-Peak	RMS
Αέρας	I	560 mV	65 mV
	II	792 mV	46 mV
Δείγμα Χάλυβα Α	I	4.44 V	1.586 V
	II	4.56 V	1.628 V
Δείγμα Χάλυβα Β	I	4.56 V	1.628 V
	II	4.68 V	1.671 V
Δείγμα Χάλυβα Γ	I	4.60 V	1.643 V
	II	4.68 V	1.671 V
Χάλκινη ράβδος	I	744 mV	128 mV
	II	776 mV	141 mV

Παρατηρείται εύκολα (τόσο στα Σχήματα όσο και στις τιμές του παραπάνω Πίνακα) ότι υπάρχει μια μικρή διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών των δύο αισθητήρων. Ωστόσο, όπως παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο, αυτό επηρεάζει μόνο την τιμή εκκίνησης (offset)

τους και όχι την ικανότητα τους να μετράνε μηχανική τάση.



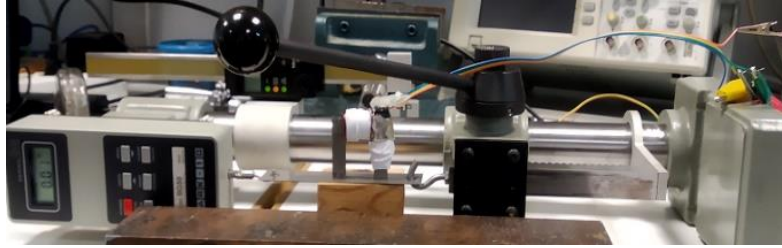
Σχήμα 61. Δείγματα χάλυβα Α, Β και Γ.



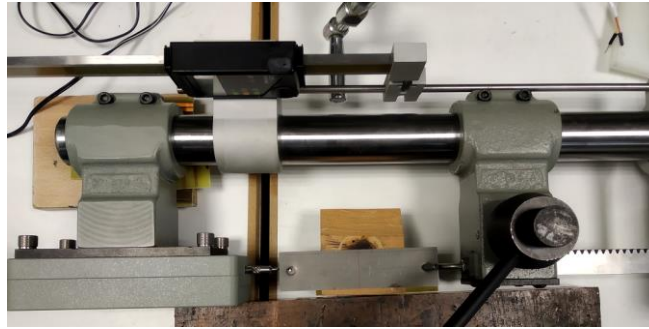
Σχήμα 62. Χάλκινη ράβδος.

3.3.1.5. Μετρήσεις Μηχανικής Τάσης

Για αυτό το μέρος του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η διάταξη που απεικονίζεται στο Σχήμα 63 και στο Σχήμα 64. Αποτελείται από ένα δυναμόμετρο, το οποίο μπορεί να εφαρμόσει θλιπτική ή εφελκυστική τάση, και τον αισθητήρα. Το δείγμα συνδέεται με το μηχανήμα και τον μετρητή δύναμης, ενώ ο αισθητήρας τοποθετείται στο δείγμα. Χρησιμοποιήθηκαν τα τρία χαλύβδινα δείγματα των προηγούμενων πειραμάτων και έγιναν μετρήσεις και με τους δύο αισθητήρες. Οι τιμές RMS προτιμήθηκαν λόγω της υψηλής ακρίβειας του πολυμέτρου πάγκου, η οποία είναι απαραίτητη για την ανίχνευση των διακυμάνσεων της εφαρμοζόμενης δύναμης.



Σχήμα 63. Διάταξη μέτρησης τάσεων (πρόσοψη).



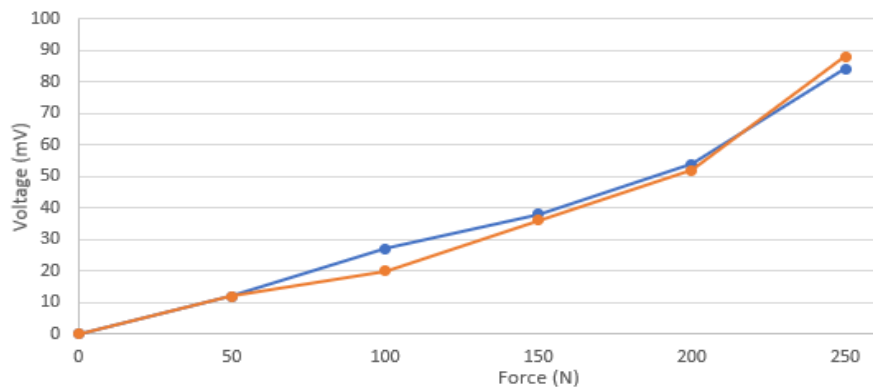
Σχήμα 64. Διάταξη μέτρησης τάσεων (κάτοψη).

Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει τις μετρούμενες τιμές RMS για το Δείγμα A σε σχέση με την επιβαλλόμενη δύναμη. Σε παρένθεση φαίνονται οι τιμές εκκίνησης (offset) κατά την μέτρηση με μηδενική δύναμη.

Πίνακας 8. Μετρήσεις Δείγματος A.

N	Αισθητήρας I	Αισθητήρας II
0	0 (+1,583 V)	0 (+1,628 V)
50	0.012 V	0.012 V
100	0.027 V	0.020 V
150	0.038 V	0.036 V
200	0.054 V	0.052 V
250	0.084 V	0.088 V

Από τις τιμές αυτές παίρνουμε το διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 65.



Σχήμα 65. Διάγραμμα Μετρήσεων Δείγματος Α.

Όπου με μπλε γραμμή είναι οι μετρήσεις με τον Αισθητήρα I και με πορτοκαλί οι μετρήσεις με τον Αισθητήρα II.

Αντίστοιχα, για τα Δείγματα Β και Γ, λαμβάνονται οι μετρήσεις οι οποίες φαίνονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 9 και Πίνακας 10).

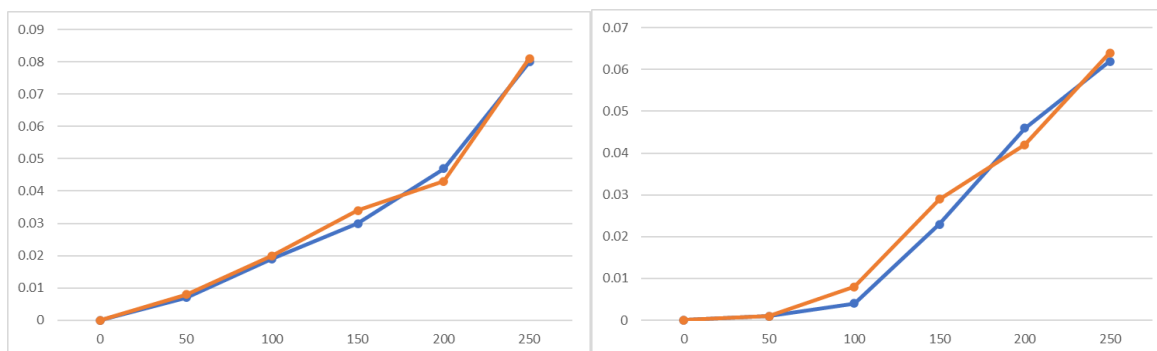
Πίνακας 9. Μετρήσεις Δείγματος Β.

N	Αισθητήρας I	Αισθητήρας II
0	0 (+1.628 V)	0 (+1.671 V)
50	0.007 V	0.008 V
100	0.019 V	0.020 V
150	0.030 V	0.034 V
200	0.047 V	0.043 V
250	0.080 V	0.081 V

Πίνακας 10. Μετρήσεις Δείγματος Γ.

N	Αισθητήρας I	Αισθητήρας II
0	0 (+1.643 V)	0 (+1.671 V)
50	0.001 V	0.001 V
100	0.004 V	0.008 V
150	0.023 V	0.029 V
200	0.046 V	0.042 V
250	0.062 V	0.064 V

Από τις μετρήσεις αυτές προκύπτουν τα διαγράμματα τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 66.



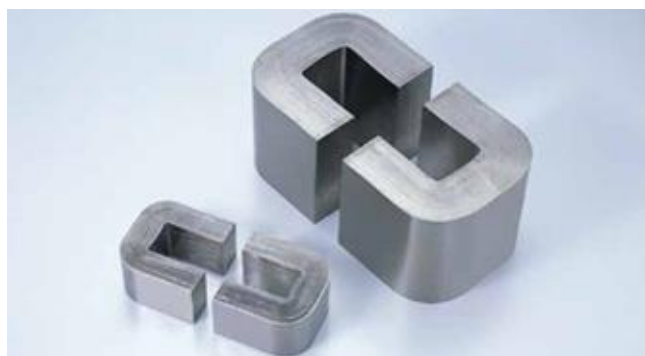
Σχήμα 66. Διαγράμματα Μετρήσεων Τάσης (σε V, άξονας y) προς Δύναμη (σε N, άξονας x) Δειγμάτων Β (αριστερά) και Γ (δεξιά).

Παρατηρούμε ότι, *i*) υπάρχει ξεκάθαρη απόκριση του αισθητήρα στην πίεση που ασκείται στο εκάστοτε δοκίμιο και *ii*) το εύρος τιμών του αισθητήρα για τις παραπάνω μετρήσεις είναι της τάξης των 100 mV, το οποίο είναι ικανοποιητικό για την λειτουργία του αισθητήρα.

3.3.2. Αισθητήρας Μαγνητικής Διαπερατότητας με Πυρήνα *Metglas*

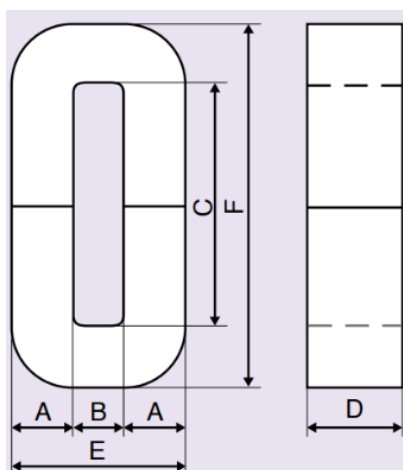
3.3.2.1. Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Στην προσπάθεια να περιοριστούν οι απώλειες διαρροής και δινορευμάτων στο γοκε και άρα να βελτιωθεί η απόδοση του αισθητήρα, κατασκευάστηκε ένας νέος αισθητήρας με διαφορετικά υλικά και χαρακτηριστικά. Αντί του αρχικού πυρήνα από ηλεκτρικό χάλυβα σε σχήμα γοκε, χρησιμοποιήθηκε ένας νέος πυρήνας από υλικό το οποίο φέρει την εμπορική ονομασία *Metglas*. Το *Metglas* είναι ένα άμορφο μεταλλικό κράμα, με μη κρυσταλλική δομή που του προσδίδει ιδιαίτερες φυσικές και μαγνητικές ιδιότητες. Αυτές οι ιδιότητες συνδυάζουν υψηλή διαπερατότητα, αντοχή και σκληρότητα μαζί με ευελιξία και ανθεκτικότητα. Πρόκειται για ένα υλικό το οποίο αποτελείται από λεπτές ταινίες (ribbons) άμορφου μεταλλικού κράματος το οποίο παράγεται με τη χρήση διαδικασίας ταχείας στερεοποίησης με ταχύτητα περίπου 10^6 K/s. Αυτή η ταχεία στερεοποίηση δημιουργεί μοναδικές φερρομαγνητικές ιδιότητες που επιτρέπουν στις ταινίες να μαγνητίζονται και να απομαγνητίζονται γρήγορα και αποτελεσματικά με πολύ χαμηλές απώλειες πυρήνα περίπου 5 mW/kg στα 60 Hz και μέγιστη σχετική διαπερατότητα περίπου 10^6 [175].



Σχήμα 67. Πυρήνες από Metglas διαφόρων μεγεθών [175].

Το συγκεκριμένο εξάρτημα αναφέρεται στα data sheets του κατασκευαστή *Hitachi Metals, Ltd*, με τον κωδικό *AMCC-16B*. Τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά φαίνονται στο μηχανολογικό σχέδιο του Σχήμα 68 [175].



Σχήμα 68. Μηχανολογικό σχέδιο πυρήνα Metglas [175].

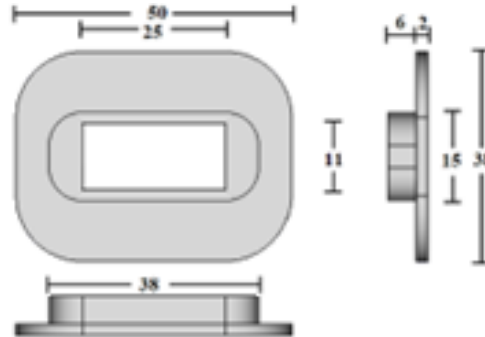
Πίνακας 11. Διαστάσεις του AMCC-16B (όλες οι διαστάσεις σε mm εκτός από αυτές που υποδεικνύονται) [175].

Part Name	A	B	C	D	E	F	Mass (g)
AMCC-16B	11	13	50	25	35	72	281

Το εξάρτημα αυτό διατίθεται από τον κατασκευαστή σε ζεύγη έτσι ώστε να σχηματίζουν μεταξύ τους τον πυρήνα ενός μετασχηματιστή, η οποία είναι και η πιο συνήθης χρήση τους, ωστόσο για την συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιείται μόνο το ένα από τα δυο.

Λόγω του συγκεκριμένου σχήματος γοκε του πυρήνα, τα πηνία δεν είναι δυνατόν να τυλιχτούν απευθείας πάνω του. Για το λόγο αυτό έπρεπε να σχεδιαστούν και να εκτυπωθούν τρισδιάστατα ένα σετ από μπομπίνες, έτσι ώστε τα πηνία να μπορούν να

τυλιχθούν γύρω τους και στη συνέχεια να τοποθετηθούν στο γοκε. Τα μέρη της μπομπίνας δημιουργήθηκαν σε ζεύγη και στη συνέχεια κολλήθηκαν μεταξύ τους για να δημιουργηθεί η τελική μπομπίνα (Σχήμα 69).

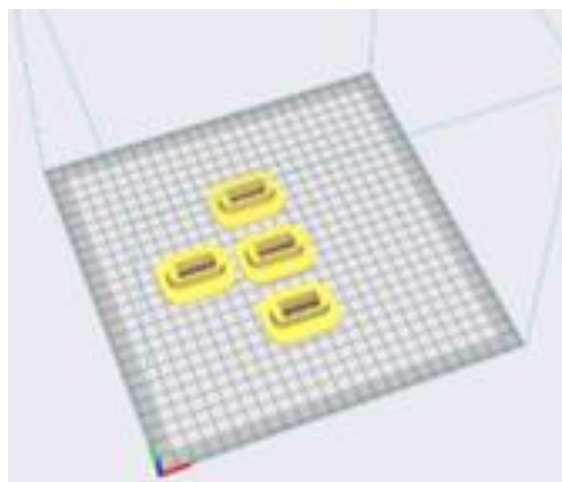


Σχήμα 69. Μηχανολογικό σχέδιο μπομπίνας. (όλες οι διαστάσεις σε mm). [Created with FreeCAD 0.19 software].



Σχήμα 70. Τελική μπομπίνα [Created with FreeCAD 0.19 software].

Προκειμένου να εκτυπωθεί τρισδιάστατα το σχέδιο του εξαρτήματος, έπρεπε πρώτα να δημιουργηθεί ένα μοντέλο στρώσεων του υλικού (slicer model). Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 71, όπου και τα τέσσερα μέρη ενός ζεύγους μπομπινών έχουν τοποθετηθεί για εκτύπωση στην ίδια παρτίδα.



Σχήμα 71. Εικόνα 3D Slicer. [created with Creality Slicer 4.8 software].

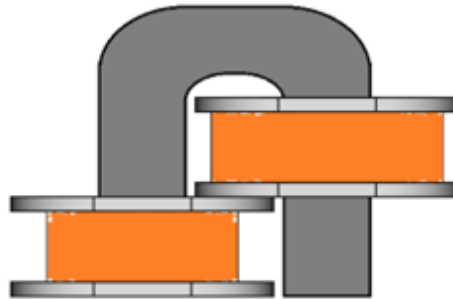
Τα νέα πηνία κατασκευάστηκαν με στόχο ο αισθητήρας να λειτουργεί με χαμηλό ρεύμα

και να ταιριάζει στη γεωμετρία του νέου πυρήνα. Τα χαρακτηριστικά των πηνίων που προέκυψαν παρουσιάζει ο Πίνακας 12.

Πίνακας 12. Χαρακτηριστικά πηνίων αισθητήρα.

	Πηνίο A	Πηνίο B
Gauge	0.5mm	0.2mm
Turns	130	1000
Ls	1.7mH	156mH
Rs	1.4Ω	71Ω

Τέλος, τα τελικά πηνία τοποθετήθηκαν στον πυρήνα. Λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας του πυρήνα *Metglas* σε σχέση με τον πυρήνα απλού ηλεκτρικού χάλυβα, οι δύο μπομπίνες έπρεπε να τοποθετηθούν η καθεμία καταλαμβάνοντας ένα πόδι του. Λόγω κατασκευαστικών περιορισμών, ο πυρήνας *Metglas* έχει ένα πιο καμπυλωτό μεσαίο τμήμα, οπότε η τοποθέτηση ενός πηνίου σε αυτό το τμήμα δεν ήταν δυνατή. Το μηχανολογικό σχέδιο του τελικού αισθητήρα φαίνεται στο Σχήμα 72.



Σχήμα 72. Μηχανολογικό σχέδιο αισθητήρα.

Στο Σχήμα 73 φαίνεται ο τελικός αισθητήρας μετά το τέλος της κατασκευής του.



Σχήμα 73. Τελικός αισθητήρας.

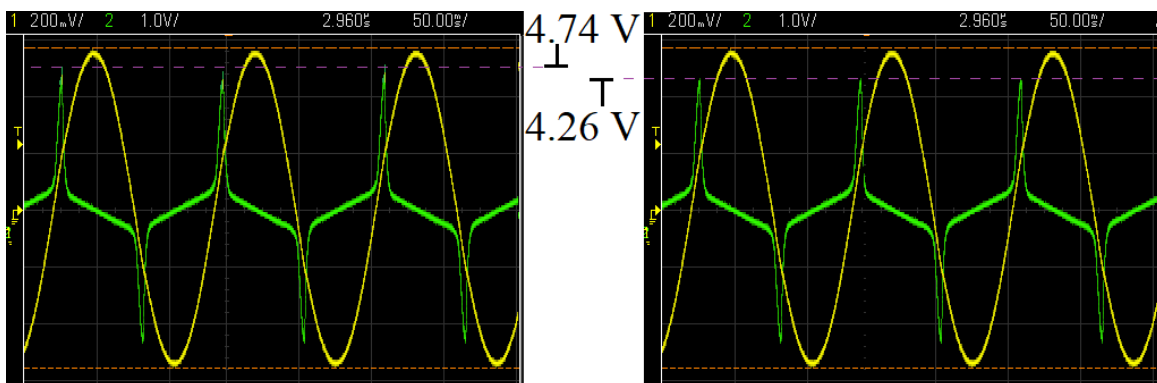


Σχήμα 74. Γενική άποψη αισθητήρα.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για υλικά των οποίων οι μαγνητικές ιδιότητες είναι μη γραμμικές, είναι χρησιμότερο να μετρηθεί η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα μ_D και έτσι χρησιμοποιώντας τον ορισμό της (Σχέση (1.19), και τις Σχέσεις (3.6) και (3.7) παίρνουμε την Σχέση (3.12).

$$\mu_D := \frac{dB}{dH} = \frac{Z_1 \cdot l_1}{N_1 \cdot N_2 \cdot S} \cdot \frac{V_2}{dV_1/dt} \quad (3.12)$$

Όπως φαίνεται στην Σχέση (3.12), το μ_D είναι ανάλογο της εξόδου V_2 . Κάνοντας χρήση του νέου αισθητήρα, οι μετρήσεις σε ένα δοκίμιο με ένα άψογο και ένα φθαρμένο μέρος παρουσιάζονται στο Σχήμα 75. Εδώ, εφαρμόζοντας μια είσοδο πλάτους 0.57 V στα 9 Hz, παρατηρείται μια πολύ σαφής διαφορά στην έξοδο. Χρησιμοποιώντας τιμές peak-to-peak, το άψογο εξάρτημα είχε έξοδο 4.74 V σε σύγκριση με 4.26 V για το φθαρμένο μέρος.



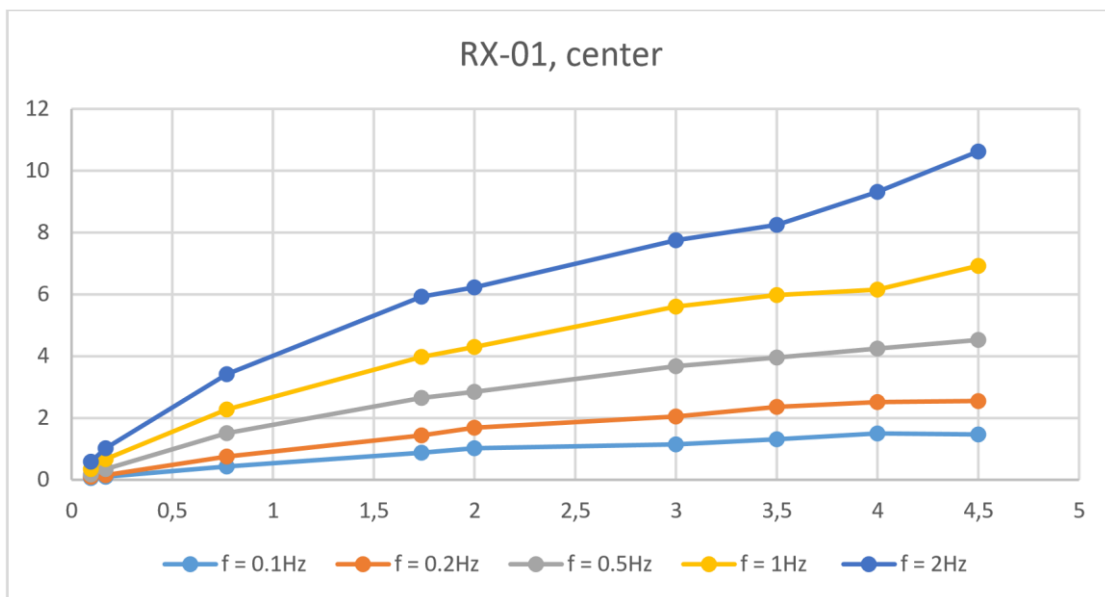
Σχήμα 75. Έξοδος του αισθητήρα για το άψογο (αριστερά) και το φθαρμένο μέρος (δεξιά) του δείγματος.

3.3.2.2. Πειραματικές Μετρήσεις

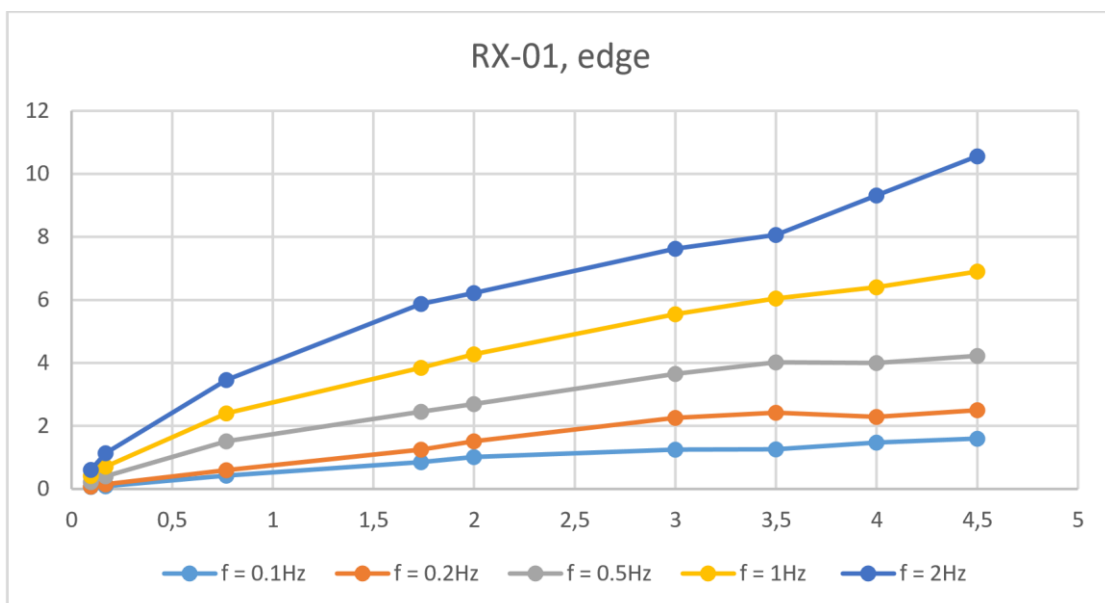
Για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του αισθητήρα στο [176] παρουσιάστηκε και αναλύθηκε μια σειρά μετρήσεων στις οποίες χρησιμοποιήθηκε. Ο αισθητήρας τροφοδοτήθηκε στο πηνίο εισόδου του από εξωτερικό εργαστηριακό ενισχυτή ισχύος (KEPCO BOP 50-2D) με ημιτονοειδές σήμα το οποίο μεταβαλλόταν από την εσωτερική

γεννήτρια σήματος του εργαστηριακού παλμογράφου (*Keysight EDUX 1002G [177]*). Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες συχνότητες, με τιμές 0.1, 0.2, 0.5 και 0.1 Hz, ενώ μεταβλητό ήταν και το πλάτος του σήματος εισόδου το οποίο έπαιρνε τιμές 95.75 mV, 170 mV, 770 mV, 1.737 V, 2 V, 3 V, 3.5 V, 4 V και 4.5 V. Ως δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια με αυτά τα οποία περιγράφονται στην Παράγραφο 3.2.3.2.

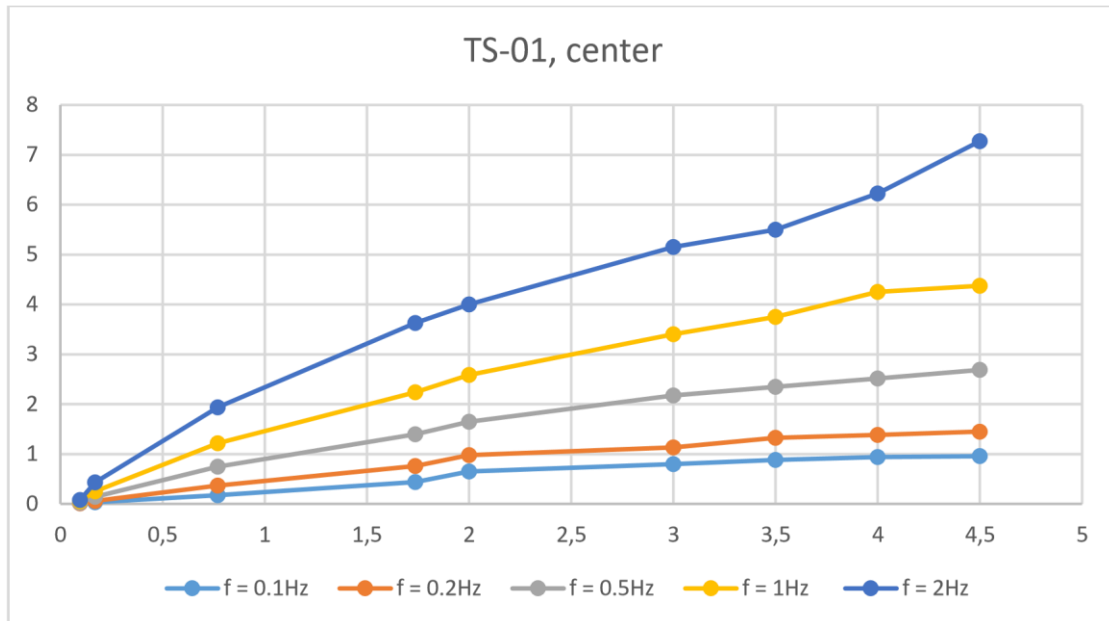
Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τα διαγράμματα τα οποία προκύπτουν από τις μετρήσεις που πάρθηκαν με την συγκεκριμένη διάταξη για τα δοκίμια RX1 και TS1.



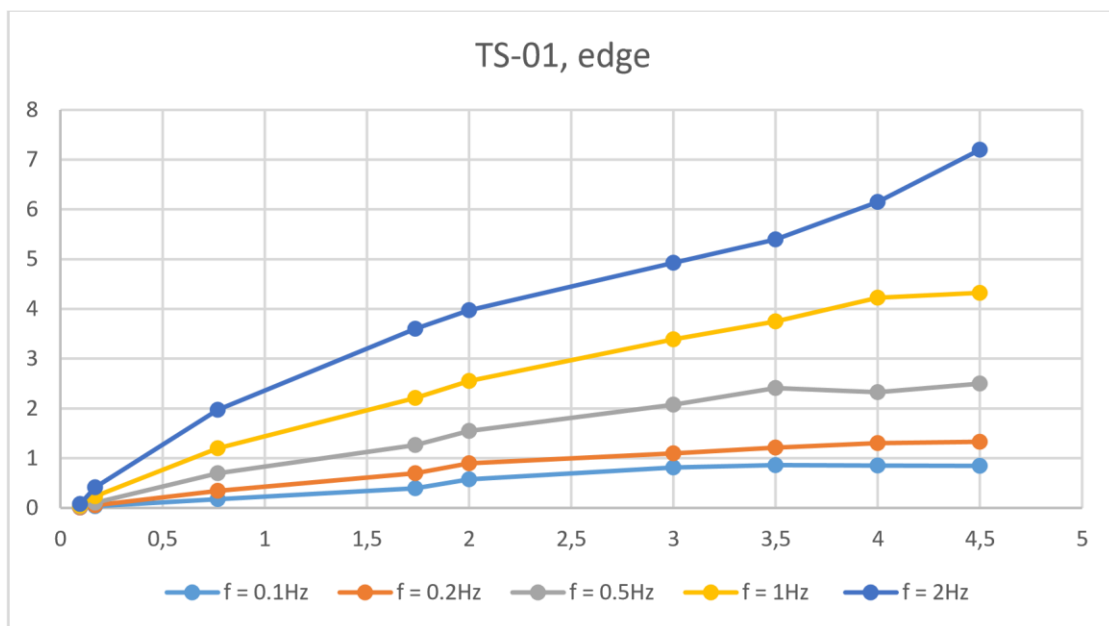
Σχήμα 76. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, δοκίμιο RX1, μέση του δοκιμίου [176].



Σχήμα 77. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, δοκίμιο RX1, μέση του δοκιμίου [176].



Σχήμα 78. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, δοκίμιο TS1, μέση του δοκιμίου [176]



Σχήμα 79. Διάγραμμα τάσης εισόδου – τάσης εξόδου, δοκίμιο TS1, μέση του δοκιμίου [176].

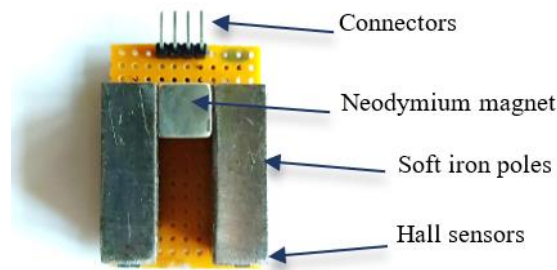
Οι μετρήσεις για όλα τα δοκίμια των σειρών TX, RX και GG επεξεργάστηκαν αναλυτικά στο [176].

3.4. Υοκε με Μόνιμο Μαγνήτη

3.4.1. Συσσκευή Παρακολούθησης Υγείας Χαλύβων με Αισθητήρα Hall

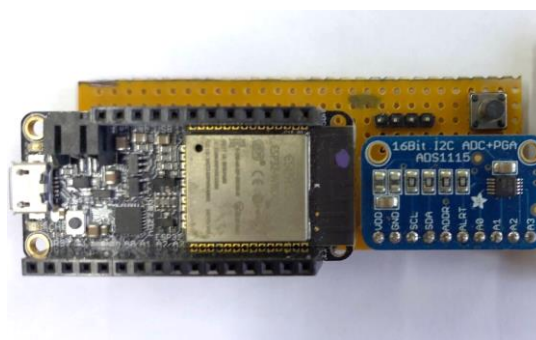
3.4.1.1. Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά

Για την διάταξη του πειράματος αυτού χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας του οποίου η αρχή λειτουργίας μπορεί να βρεθεί στο [178]. Το αισθητήριό του αποτελείται από δυο πόλους από φερρομαγνητικό υλικό και ένα μόνιμο μαγνήτη από Νεοδύμιο τα οποία σχηματίζουν ένα γοκε, όπως φαίνεται στο Σχήμα 80. Κάτω από το ελεύθερο άκρο κάθε πόλου τοποθετείται ένας αισθητήρας Hall τύπου *SS49E* [179].



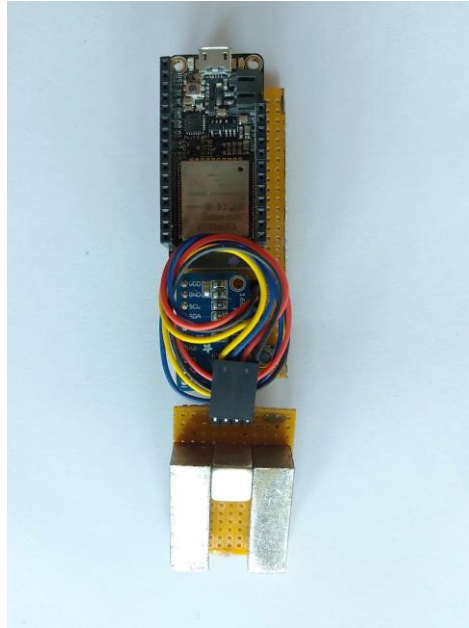
Σχήμα 80. Διάταξη αισθητήριου με μόνιμο μαγνήτη, φερρομαγνητικούς πόλους και δυο αισθητήρες Hall [178].

Το Σχήμα 81 δείχνει την ηλεκτρονική πλακέτα του αισθητήρα. Η πλακέτα περιλαμβάνει έναν μικροελεγκτή *ESP32* [180] και ένα εξωτερικό ADC 16 bit τύπου *ADS1115* [181]. Οι δυο συσκευές αυτές επικοινωνούν μέσω του πρωτοκόλλου *I²C* [182].



Σχήμα 81. Πλακέτα ηλεκτρονικών με μικροελεγκτή και εξωτερικό ADC [178].

Η ολοκληρωμένη διάταξη με όλα τα ηλεκτρονικά αλλά και το αισθητήριο γοκε φαίνεται στο Σχήμα 82.



Σχήμα 82. Ολοκληρωμένη διάταξη [178].

Η τελική συσκευή με όλα τα μέρη της τοποθετημένα σε συσκευασία παρουσιάζεται στο Σχήμα 83.



Σχήμα 83. Τελική μορφή του αισθητήρα μόνιμου μαγνήτη συνδεδεμένου με υπολογιστή μέσω USB [178].

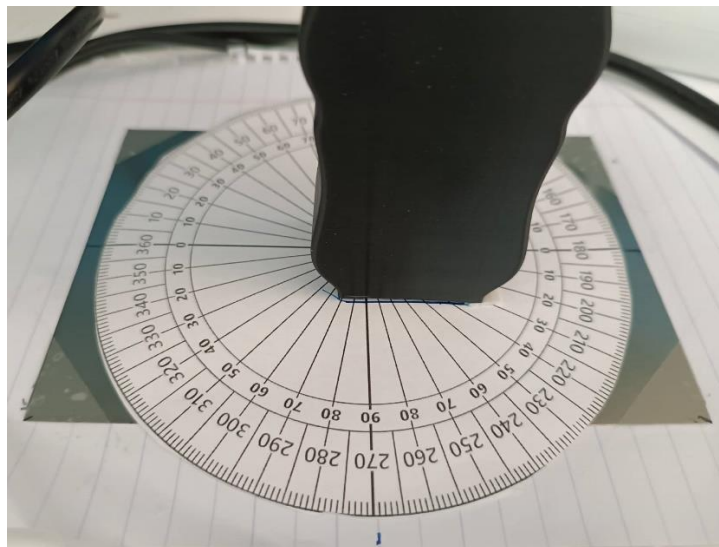
3.4.1.2. Πειραματική Διάταξη - Μετρήσεις

Προκειμένου να ελεγχθεί η συμπεριφορά του αισθητήρα, σχεδιάστηκε ένα πείραμα όπου ένα δείγμα ηλεκτρικού χάλυβα δοκιμάστηκε πρώτα χωρίς να έχει ατέλειες και έπειτα αφού δημιουργήθηκε τεχνητά ένα μικρό επιφανειακό ελάττωμα. Η φθορά έγινε στο κέντρο του δείγματος για να διευκολυνθεί η διεξαγωγή των μετρήσεων [183]. Το δοκίμιο πριν και μετά την προσθήκη της ατέλειας φαίνεται στο Σχήμα 84.



Σχήμα 84. Το δοκίμιο πριν (αριστερά) και μετά την προσθήκη της ατέλειας στο κέντρο (δεξιά) [183].

Η συσκευή του αισθητήρα τοποθετήθηκε στο δείγμα με τον έναν από τους δύο αισθητήρες Hall να βρίσκεται ακριβώς πάνω από το κέντρο. Ένα χάρτινο μοιρογνωμόνιο ήταν επίσης προσαρτημένο στη συσκευή για αναφορά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 85.

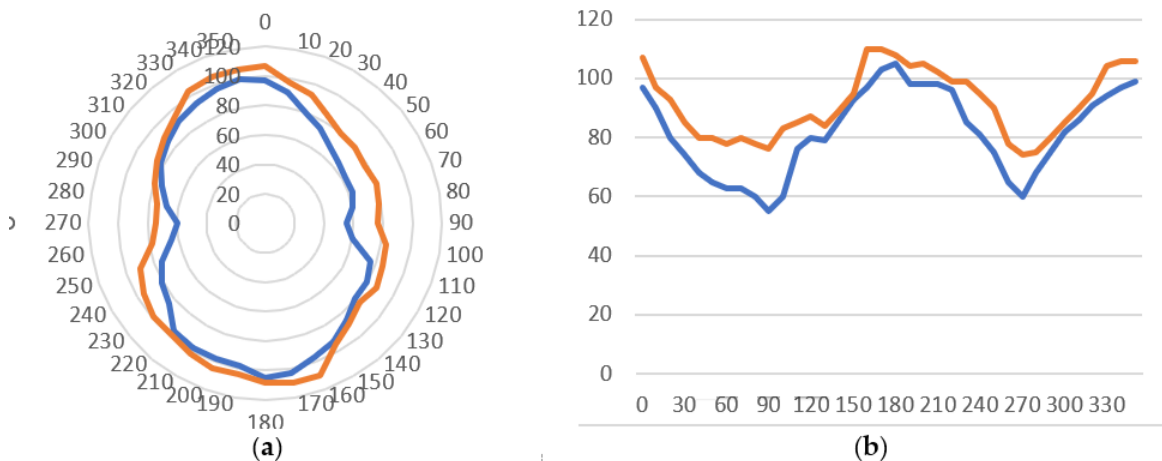


Σχήμα 85. Πειραματική διάταξη [183].

Μετρώντας τη μαγνητική ροή η οποία περνάει από το δείγμα σε διαφορετικές κατευθύνσεις μπορεί να ληφθεί το προφίλ μαγνητικής ανισοτροπίας του υπό δοκιμή υλικού [5].

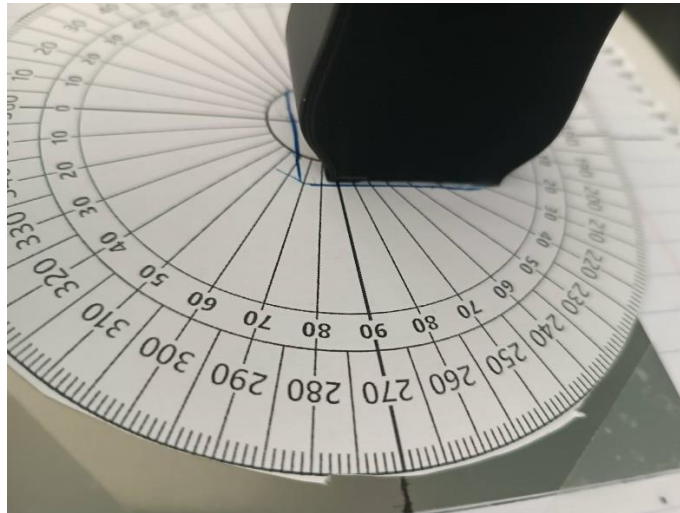
Στη συγκεκριμένη περίπτωση σκοπός ήταν να ελεγχθεί η συσχέτιση μεταξύ της γωνίας της συσκευής παρακολούθησης με το δείγμα και του μαγνητικού πεδίου που μετρά ο αισθητήρας Hall. Για το λόγο αυτό κάθε φορά η συσκευή παρακολούθησης στρεφόταν χειροκίνητα κατά 5 μοίρες. Ο άξονας περιστροφής ήταν κάθετος στο επίπεδο του δοκιμίου και περνούσε από το κέντρο του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 85.

Στο [183] παρουσιάζονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο δοκίμιο πριν και μετά την προσθήκη του ελαττώματος. Είναι σαφές ότι η ανισοτροπική συμπεριφορά μπορεί να ανιχνευθεί παρόλο που υπάρχει αλλαγή στις κορυφές και το εύρος των μετρήσεων. Αξίζει, δε, να αναφέρουμε ότι για το συγκεκριμένο δοκίμιο ισχύει ότι έχει γίνει πιο ισοτροπικό το οποίο πιθανότατα οφείλεται στην χαλάρωση των μηχανικών τάσεων στην περιοχή.



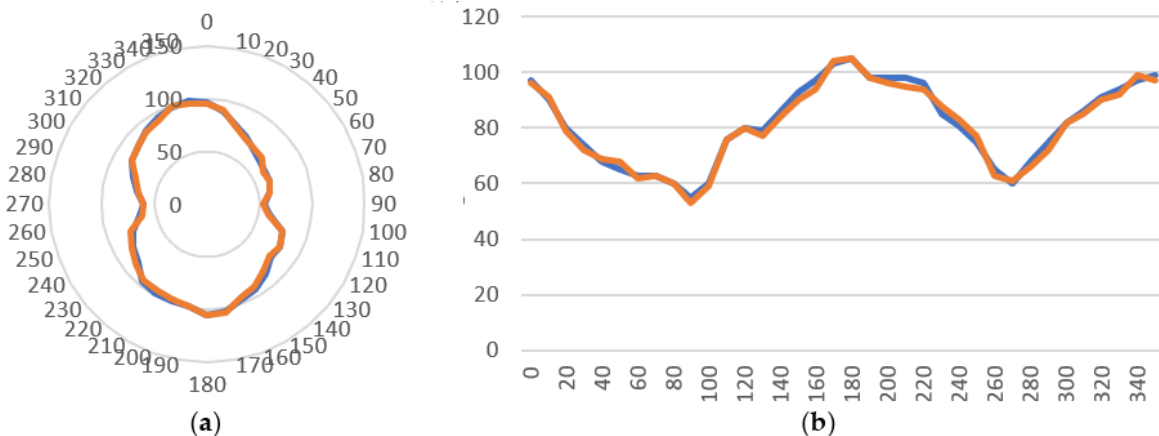
Σχήμα 86. Ανισοτροπική συμπεριφορά του δείγματος. Η μπλε γραμμή και η πορτοκαλί γραμμές υποδηλώνουν αντίστοιχα την μέτρηση πριν και μετά την προσθήκη της ατέλειας: (a) Πολικό διάγραμμα, (b) καρτεσιανό διάγραμμα [183].

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μια ακόμη σειρά μετρήσεων, αυτή τη φορά με μετατόπιση του άξονα περιστροφής της συσκευής παρακολούθησης κατά 5 mm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 87.

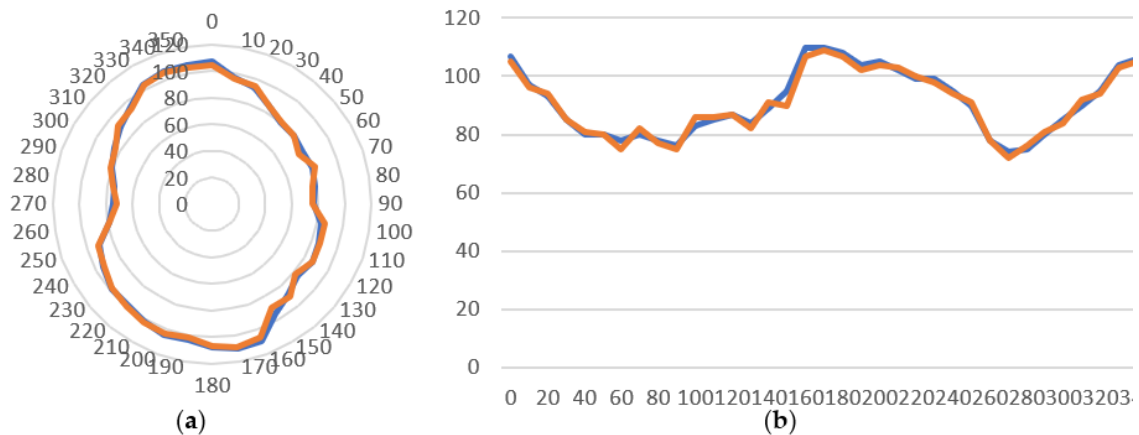


Σχήμα 87. Πειραματική διάταξη με μετατόπιση 5 mm. Η προηγούμενη θέση φαίνεται με μπλε περίγραμμα [183].

Αυτή η μετατόπιση είχε ως αποτέλεσμα μια σειρά μετρήσεων γύρω από το σημείο εξέτασης αντί για ακριβώς πάνω από αυτό. Οι δύο σειρές μετρήσεων, πριν και μετά το ελάττωμα, παρουσιάζονται στο Σχήμα 88 και το Σχήμα 89, αντίστοιχα [183].



Σχήμα 88. Ανισοτροπική συμπεριφορά πριν την ατέλεια. Μέτρηση πάνω στο σημείο (πορτοκαλί) και μέτρηση με 5 mm offset (μπλε): (a) Πολικό διάγραμμα, (b) καρτεσιανό διάγραμμα [183].



Σχήμα 89. Ανιστροπική συμπεριφορά μετά την ατέλεια. Μέτρηση πάνω στο σημείο (πορτοκαλί) και μέτρηση με 5 mm offset (μπλε): (α) Πολικό διάγραμμα, (β) καρτεσιανό διάγραμμα [183].

Από τα παραπάνω σχήματα βλέπουμε ότι, κατά τη σύγκριση των δύο συνόλων μετρήσεων, υπάρχει μικρή απόκλιση μεταξύ των μετρήσεων οι οποίες έγιναν πάνω από και των μετρήσεων οι οποίες έγιναν γύρω από το σημείο το οποίο εξετάζεται.

3.4.2. Συσκευή Παρακολούθησης Υγείας Χαλύβων με Πολλαπλούς

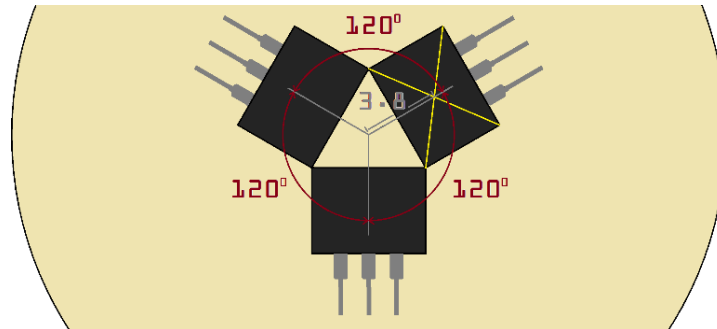
Αισθητήρες Hall

3.4.2.1. Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά

Τα κύρια συμπεράσματα του παραπάνω πειράματος είναι ότι κάνοντας χρήση της διάταξης αυτής είναι σχετικά εύκολο να ανιχνευτεί η ανιστροπική συμπεριφορά του υπό εξέταση υλικού και ότι μπορούν να παρθούν, με ικανοποιητική ακρίβεια, μετρήσεις γύρω από το υπό εξέταση σημείο όταν η απόκλιση δεν ξεπερνάει τα 5 mm. Το αρνητικό σημείο μιας τέτοιας διάταξης, ωστόσο, είναι ότι για να παρθούν οι μετρήσεις αυτές ο αισθητήρας πρέπει να περιστρέφεται, πράγμα το οποίο μπορεί να δημιουργήσει αποκλίσεις και σφάλματα κατά την διεξαγωγή του πειράματος. Έχοντας σαν δεδομένα τα παραπάνω, σχεδιάστηκε ένας νέος αισθητήρας ο οποίος μπορεί να λαμβάνει αυτές τις μετρήσεις ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας μια διάταξη πολλαπλών αισθητήρων Hall.

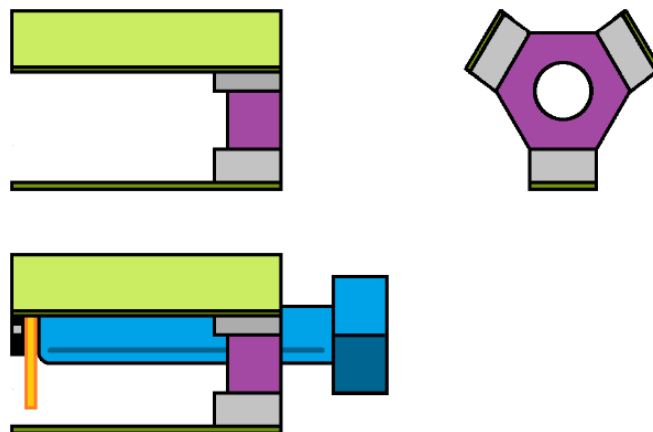
Στο πείραμα της προηγούμενης παραγράφου, οι μετρήσεις πάρθηκαν περιστρέφοντας τον αισθητήρα κατά 5° την φορά αποδίδοντας, τελικά, 72 μετρήσεις ανά κύκλο. Για την κατασκευή του Αισθητήρα Πολλαπλών Hall επιλέχθηκε να κατασκευαστεί πρώτα μια πιο απλή διάταξη με σκοπό να ελεγχθεί η δυνατότητά του να παίρνει ανεξάρτητες μετρήσεις. Έτσι επιλέχθηκε να κατασκευαστεί μια διάταξη αισθητήρα τριών ανεξάρτητων Hall

τοποθετημένων σε γωνία 120° μεταξύ τους ως η πιο απλή περίπτωση ενός τέτοιου αισθητήριου στοιχείου. Στο Σχήμα 90 φαίνονται οι τρεις αισθητήρες Hall τύπου *SS49E*, όπου καθώς το πλάτος του καθενός είναι 4 mm, μπορεί να υπολογιστεί ότι η απόκλιση από το κανονικό σημείο μέτρησης είναι 3.8 mm και άρα μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική.



Σχήμα 90. Διάταξη αισθητήριου στοιχείου τριπλού Hall

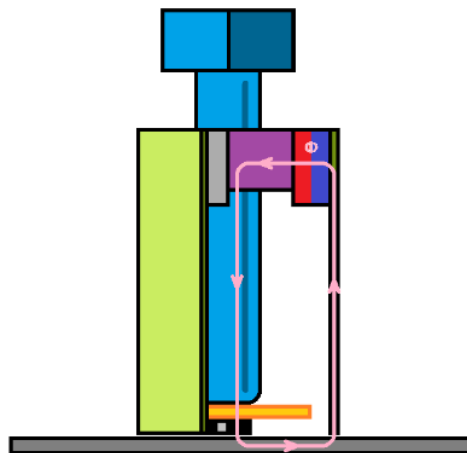
Ακολουθώντας τη σχεδίαση του προηγούμενου πειράματος, για να μπορούν οι αισθητήρες να λαμβάνουν μετρήσεις, πρέπει ο καθένας τους να αποτελεί μέρος ενός κλειστού μαγνητικού κυκλώματος. Αυτό το μαγνητικό κύκλωμα πρέπει να περιλαμβάνει έναν μόνιμο μαγνήτη ως πηγή μαγνητικού πεδίου, τον υπό εξέταση χάλυβα και κάποιο είδος φερρομαγνητικής διαδρομής για να ρέει το μαγνητικό πεδίο. Η γεωμετρία η οποία προτάθηκε φαίνεται στο Σχήμα 91.



Σχήμα 91. Γεωμετρία Αισθητήρα Τριπλού Hall.

Για την κατασκευή του αισθητήρα, εκμεταλλευόμαστε τη γεωμετρία ενός απλού εξαγωνικού βιομηχανικού παξιμαδιού από μαλακό φερρομαγνητικό υλικό. Κάθε πλευρά του παξιμαδιού είναι 10 mm και η διάμετρος της οπής είναι 8 mm. Σε τρεις από τις πλευρές του, είναι τοποθετημένοι μόνιμοι μαγνήτες νεοδυμίου με τους Βόρειους πόλους τους

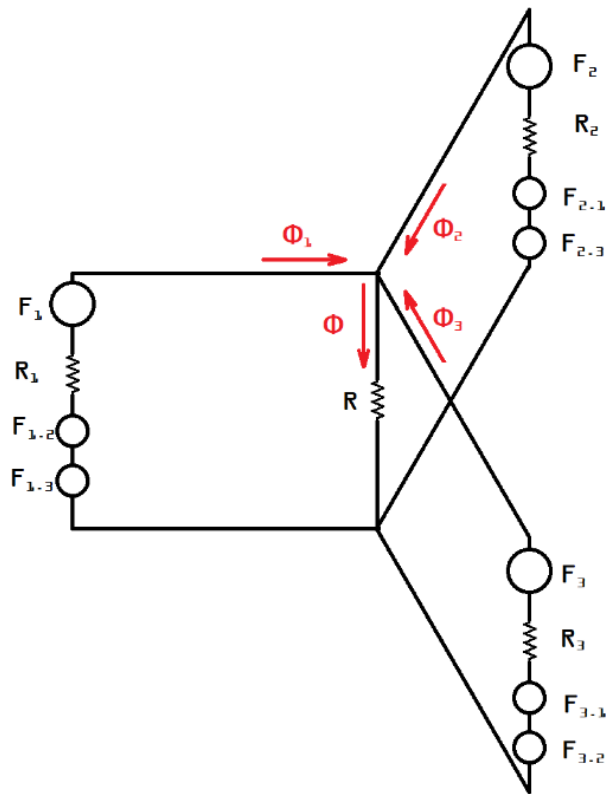
στραμμένους προς το κέντρο του παξιμαδιού. Η διάταξη του αισθητήρα τοποθετείται στο άκρο του μπουλονιού που περνά μέσα από το παξιμάδι. Στο νότιο πόλο κάθε μόνιμου μαγνήτη (PM) είναι προσαρτημένο ένα κομμάτι ηλεκτρικού χάλυβα και τα τρία λειτουργούν ως τρίποδο που συγκρατεί τον αισθητήρα σε όρθια θέση πάνω από το σημείο εξέτασης. Η όλη διάταξη μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συνδυασμός τριών ξεχωριστών μαγνητικών κυκλωμάτων, το καθένα παρόμοιο με αυτό του αρχικού αισθητήρα Hall. Σε καθένα από αυτά τα κυκλώματα η μαγνητική ροή Φ ακολουθεί τη διαδρομή: PM → παξιμάδι → μπουλόνι → αισθητήρας Hall → υπό εξέταση χάλυβας → ηλεκτρικός χάλυβας → PM, όπως φαίνεται στο Σχήμα 92.



Σχήμα 92. Μαγνητική διαδρομή.

3.4.2.2. Ανάλυση μαγνητικού κυκλώματος.

Στο Σχήμα 93 μπορούμε να δούμε το ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του αισθητήρα Τριπλού Hall. Στο εν λόγω σχήμα, το R αντιπροσωπεύει τη μαγνητική αντίσταση του μπουλονιού ενώ τα R_1 , R_2 και R_3 αντιπροσωπεύουν τις μαγνητικές αντιστάσεις για κάθε μία από τις τρεις πλευρές του αισθητήρα. Τα F_1 , F_2 και F_3 αντιπροσωπεύουν τις μαγνητεγερτικές δυνάμεις καθενός από τα PM. Οι υπόλοιπες μαγνητεγερτικές δυνάμεις, οι οποίες υποδεικνύονται με ένα ζεύγος αριθμών, αντιπροσωπεύουν την επίδραση του PM του δεύτερου αριθμού στην πλευρά του πρώτου αριθμού. Έτσι, για παράδειγμα, το $F_{2,3}$ είναι η μαγνητεγερτική δύναμη του PM από την πλευρά 3 καθώς επηρεάζει την πλευρά 2. Τα Φ_1 , Φ_2 και Φ_3 αντιπροσωπεύουν τις μαγνητικές ροές στις αντίστοιχες πλευρές του κυκλώματος.



Σχήμα 93. Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του Αισθητήρα Τριπλού Hall.

Σύμφωνα με την ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος, ο νόμος του Ampère μπορεί να εφαρμοστεί δίνοντας τις ακόλουθες εξισώσεις που είναι ανάλογες με τον νόμο τάσης του Kirchhoff για κάθε πλευρά του κυκλώματος:

$$F_1 + \Phi_1 \cdot R_1 + \Phi \cdot R + F_{1.2} + F_{1.3} = 0 \quad (3.13)$$

$$F_2 + \Phi_2 \cdot R_2 + \Phi \cdot R + F_{2.1} + F_{2.3} = 0 \quad (3.14)$$

$$F_3 + \Phi_3 \cdot R_3 + \Phi \cdot R + F_{3.1} + F_{3.2} = 0 \quad (3.15)$$

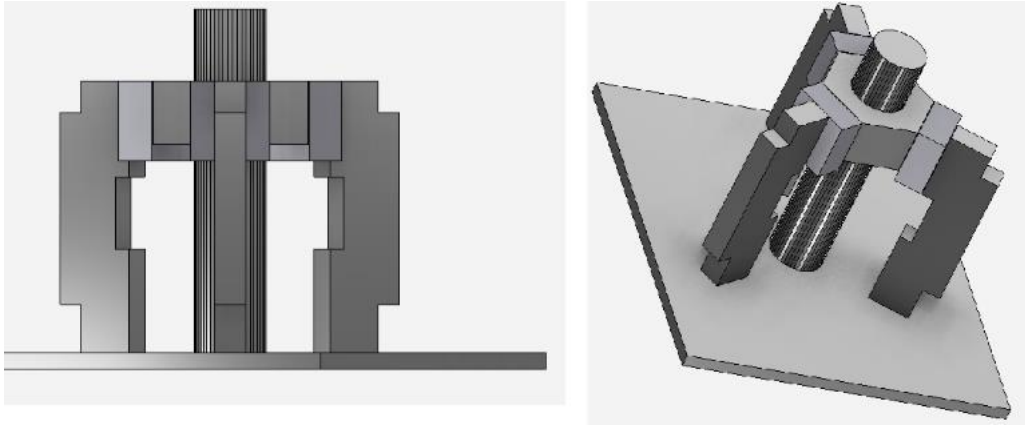
Ενώ επίσης θα ισχύει και η σχέση:

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 - \Phi = 0 \quad (3.16)$$

3.4.2.3. Προσομοίωση.

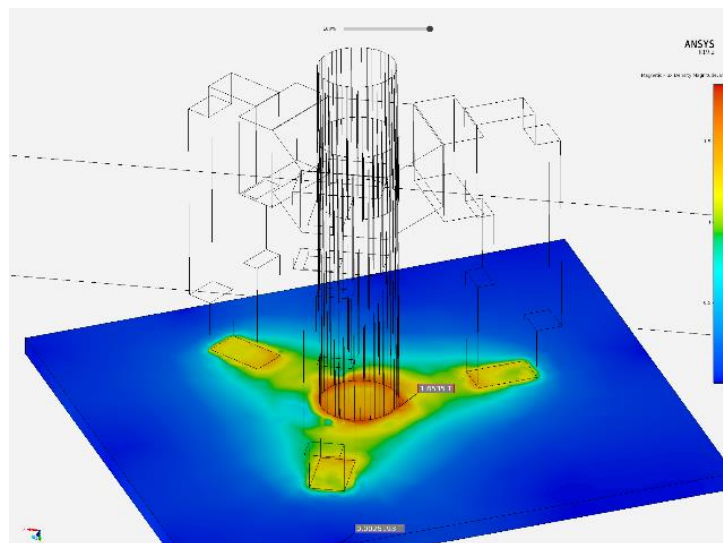
Στο Σχήμα 94 βλέπουμε τον αισθητήρα όπως προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας το λογισμικό ANSYS R19.2. Το σχήμα των ποδιών στο τρίποδο έχει τροποποιηθεί από τα προηγούμενα σχήματα για να μοιάζει με τα πραγματικά εργαστηριακά πόδια από

ηλεκτρικό χάλυβα, όπως φαίνεται στα επόμενα σχήματα. Για καλύτερα αποτελέσματα, οι αισθητήρες Hall έχουν παραλειφθεί.

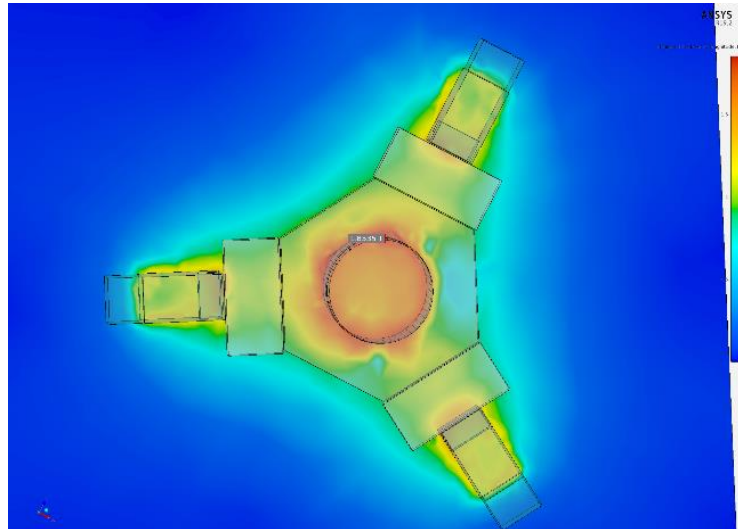


Σχήμα 94. Προσομοίωση Αισθητήρα Τριπλού Hall.

Το Σχήμα 95 και το Σχήμα 96 δείχνουν το μαγνητικό πεδίο το οποίο σχηματίζεται στην επιφάνεια του υπό εξέταση χάλυβα από τον αισθητήρα. Η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής υπολογίζεται και στα δύο σχήματα ως $B = 1.8535 \text{ T}$, ενώ η ελάχιστη είναι $B = 0,002519 \text{ T}$.

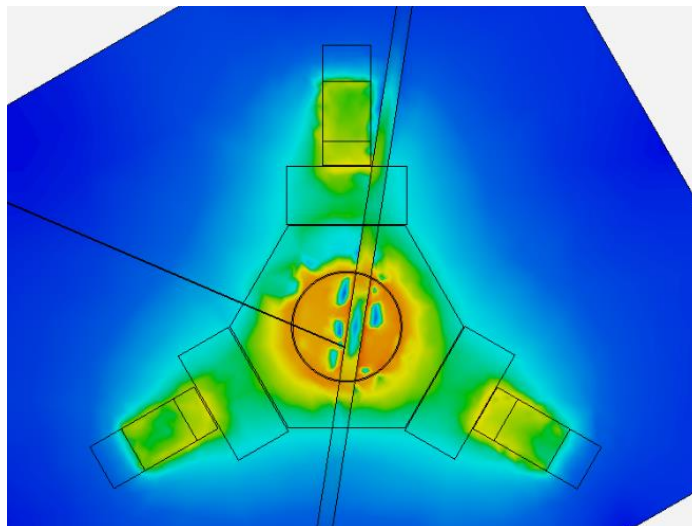


Σχήμα 95. Μαγνητικό πεδίο υπό-εξέταση υλικού (γενική όψη - created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).



Σχήμα 96. Μαγνητικό πεδίο υπό-εξέταση υλικού (κάτοψη όψη - created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).

Από την προσομοίωση βλέπουμε ότι οι μαγνητικές γραμμές ακολουθούν τη διαδρομή που προτείνεται προηγουμένως στο Σχήμα 92. Ωστόσο, το υπό εξέταση υλικό το οποίο παρέχεται από το ANSYS R19.2 δεν έχει ανισοτροπική συμπεριφορά, καθώς δεν παρέχεται επιλογή στην φορά των κόκκων, επομένως το μαγνητικό σχέδιο είναι, ως επί το πλείστον, συμμετρικό. Η προσθήκη ενός τυχαίου ελαττώματος 0.5 mm στο υπό εξέταση υλικό αυτής της προσομοίωσης έχει ως αποτέλεσμα την εικόνα όπως φαίνεται στο Σχήμα 97.



Σχήμα 97. Μαγνητικό πεδίο υπό-εξέταση υλικού με ατέλεια (κάτοψη - created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).

Σε αυτή την προσομοίωση το μαγνητικό πεδίο έχει σαφώς αλλάξει δείχνοντας επίσης ένα μέγιστο $B = 2,1415 \text{ T}$ στο σημείο που σημειώνεται με μαύρη γραμμή στο Σχήμα 97.

Επίσης, οι μετρήσεις στα σημεία όπου θα ήταν οι τρεις αισθητήρες Hall είναι $B = 1.223 \text{ T}$ και $B = 1.221 \text{ T}$ για τους κάτω δύο αισθητήρες Hall (αριστερά και δεξιά αντίστοιχα), και $B = 0,9437 \text{ T}$ για τον επάνω, που δείχνει μια σαφή αλλαγή στην ανισοτροπική συμπεριφορά του υπό εξέταση υλικού.

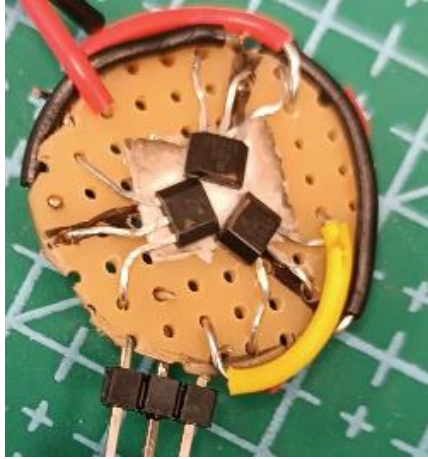
3.4.2.4. Κατασκευή Αισθητήρα.

Στο Σχήμα 98 το τρίποδο που συμπληρώνει τις εξωτερικές πλευρές του μαγνητικού κυκλώματος φαίνεται με (αριστερά) και χωρίς (δεξιά) το κεντρικό μπουλόνι. Τα πόδια είναι κατασκευασμένα από ηλεκτρικό χάλυβα. Επίσης ορατοί στο σχήμα είναι οι τρεις PM μεταξύ των ποδιών και του παξιμαδιού.



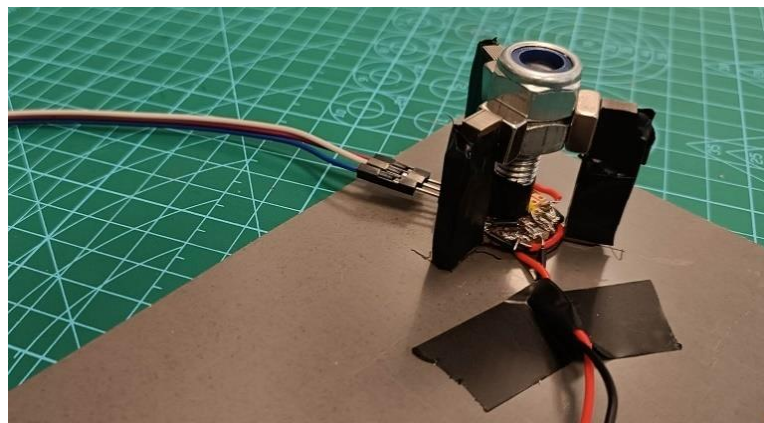
Σχήμα 98. Τρίποδο μαγνητικού κυκλώματος.

Το αισθητήριο στοιχείο, το οποίο αποτελείται από τους τρεις αισθητήρες Hall, φαίνεται στο Σχήμα 99. Οι αισθητήρες έχουν τοποθετηθεί σε γωνία περίπου 120° , με κοινή τροφοδοσία 3.3 V . Επίσης ορατές είναι οι τρεις ακίδες εξόδου που θα χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεσή τους με τα ηλεκτρονικά. Το αισθητήριο στοιχείο στη συνέχεια καλύφθηκε με μονωτική ταινία, έτσι ώστε οι ακίδες των τριών αισθητήρων Hall να μην βραχυκυκλώνονται μέσω του υπό μέτρηση χάλυβα.



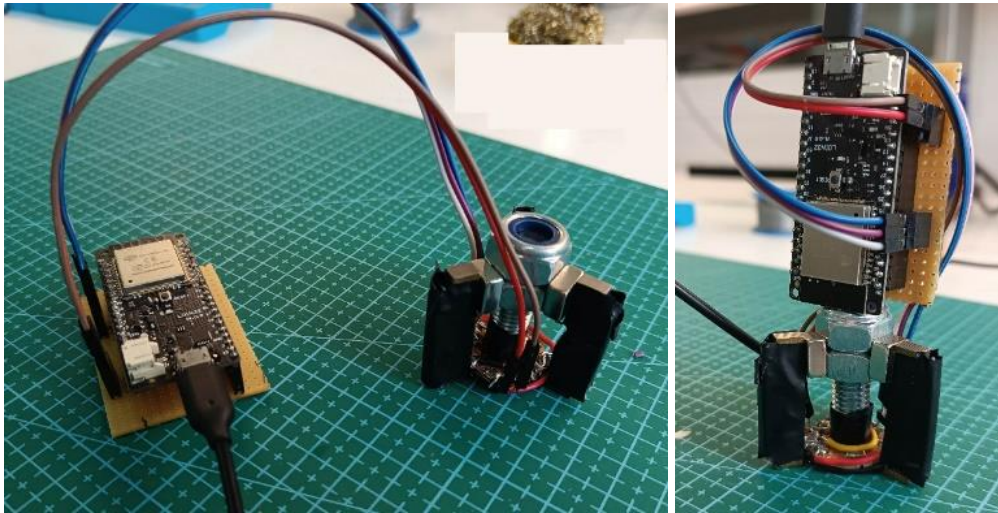
Σχήμα 99. Αισθητήριο στοιχείο τριπλού Hall.

Έχοντας κόψει και αφαιρέσει το πάνω μέρος του μπουλονιού το τελικό μαγνητικό μέρος του αισθητήρα φαίνεται στο Σχήμα 100.



Σχήμα 100. Τελικό μαγνητικό μέρος του αισθητήρα.

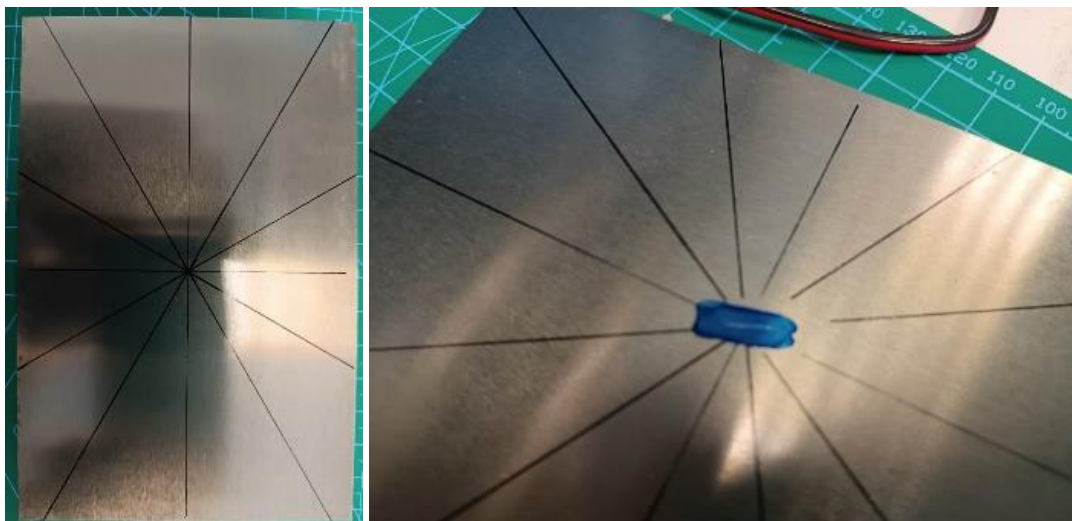
Το Σχήμα 101 δείχνει τον ολοκληρωμένο αισθητήρα ο οποίος ελέγχεται από ηλεκτρονικά, τα οποία βασίζονται στον μικροελεγκτή *ESP32 WeMos LOLIN32* [180]. Η πλακέτα εξυπηρετεί πολλούς ρόλους καθώς μπορεί να διαβάσει τις μετρήσεις των αισθητήρων Hall, να τους τροφοδοτήσει σε έναν υπολογιστή και επίσης να τους τροφοδοτήσει εξαλείφοντας την ανάγκη για εξωτερική παροχή ρεύματος. Επιπλέον, έχει ενσωματωμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα Wi-Fi το οποίο καθιστά δυνατή τη μετάδοση των δεδομένων που συλλέγονται, για να επεκτείνει περαιτέρω τις δυνατότητές του ως συσκευή παρακολούθησης IoT.



Σχήμα 101. Αισθητήρας συνδεδεμένος με τα ηλεκτρονικά του μέρη.

3.4.2.5. Πειραματική Διάταξη - Μετρήσεις

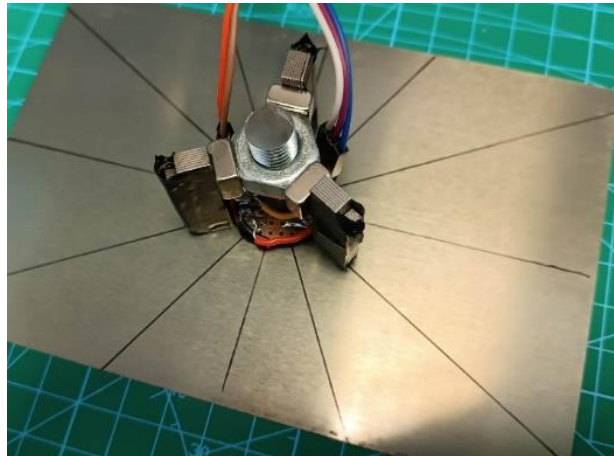
Προκειμένου να διεξαχθεί το ακόλουθο πείραμα επιλέχθηκε ένα φύλλο ηλεκτρικού χάλυβα ως δείγμα υπό-εξέταση χάλυβα. Οι μετρήσεις έγιναν πριν και μετά την προσθήκη ενός ελαττώματος στο κέντρο του (Σχήμα 102). Γύρω από το κέντρο, προστέθηκαν γραμμές για να υποδείξουν γωνίες για κάθε 30 μοίρες.



Σχήμα 102. Υπό-εξέταση δοκίμιο πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την προσθήκη της φθοράς (τονισμένη με μπλε).

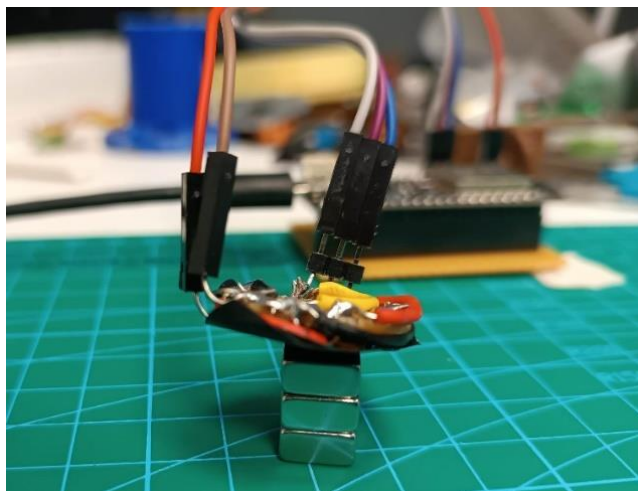
Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε στο κέντρο με τα τρία του πόδια στις γωνίες 0° , -120° και 120° μετρώντας από την γραμμή η οποία είναι κάθετη στο πλάτος του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 104. Στη συνέχεια, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν περιστρέφοντας τον αισθητήρα κατά 30° κάθε φορά. Σκοπός αυτής της περιστροφής είναι να δειχτεί ότι οι τρεις αισθητήρες παρατηρούν την ίδια ανισοτροπική συμπεριφορά ανεξάρτητα ο ένας από τον

άλλο και όχι για να χρησιμοποιηθεί, τελικά, ο αισθητήρας κατά αυτόν τον τρόπο.



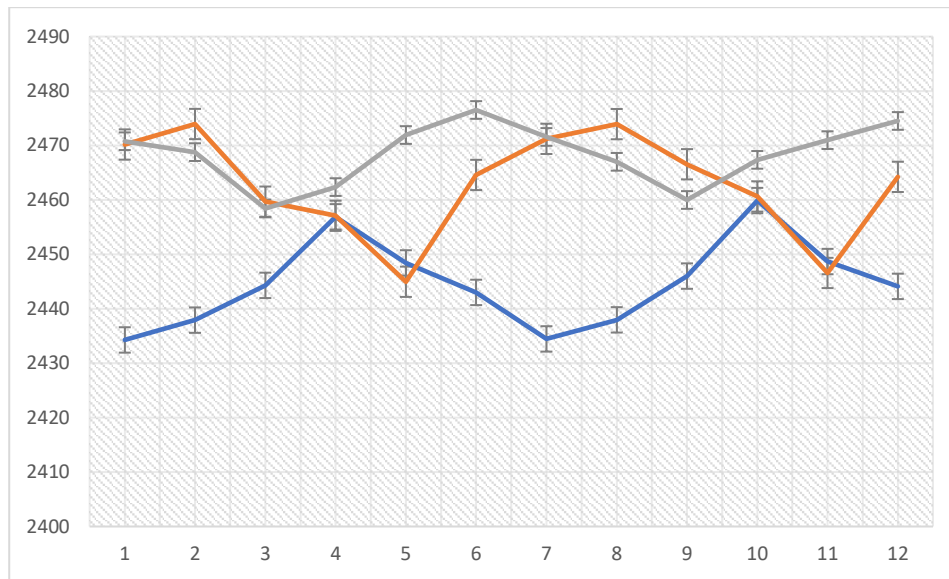
Σχήμα 103. Πειραματική διάταξη. Τα πόδια του αισθητήρα βρίσκονται στις -120° (αριστερά), 0° (κέντρο) και 120° (δεξιά).

Τα πειραματικά δεδομένα στάλθηκαν σε έναν υπολογιστή συνδέοντάς τον μέσω της θύρας USB. Με την αφαίρεση των PM και χωρίς άλλο κοντινό μαγνητικό πεδίο, ο κάθε ένας από τους τρεις αισθητήρες έδειξε μέτρηση 1650 mV ενώ η μέτρηση των τριών PMs σε σειρά χωρίς το υπόλοιπο μαγνητικό κύκλωμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 104 ήταν περίπου 2550 mV.



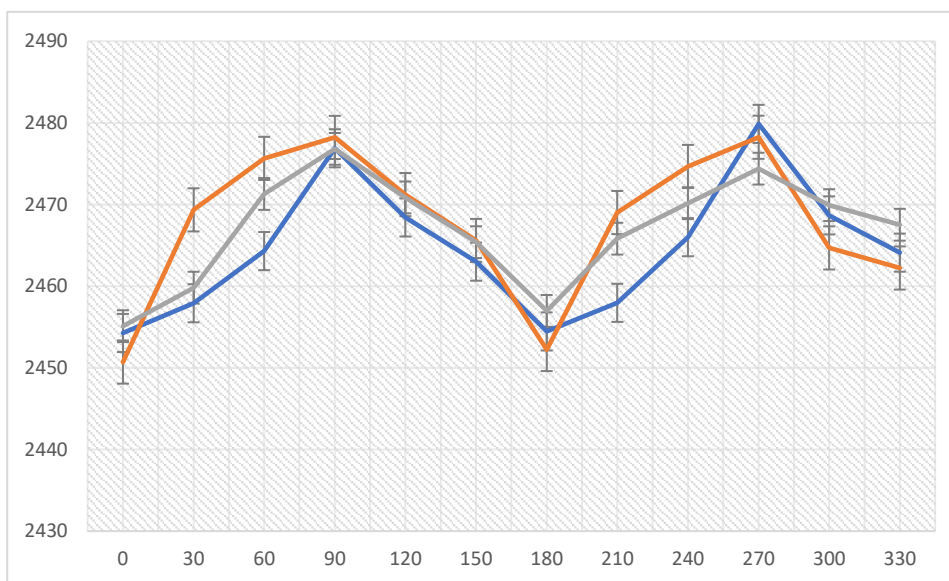
Σχήμα 104. Μέτρηση του πεδίου των τριών PM σε σειρά.

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω πειραματική διάταξη πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο Σχήμα 105. Κάθε σημείο του σχήματος είναι ο μέσος όρος έξι μοναδικών μετρήσεων οι οποίες παρουσιάζονται στο Παράρτημα.



Σχήμα 105. Μετρήσεις Αισθητήρα Πολλαπλών Hall.

Προσαρμόζοντας τα παραπάνω δεδομένα ως προς την γωνία, το πλάτος και την απόκλιση από το μηδέν παίρνουμε το Σχήμα 106.



Σχήμα 106. Προσαρμοσμένες μετρήσεις Αισθητήρα Πολλαπλών Hall.

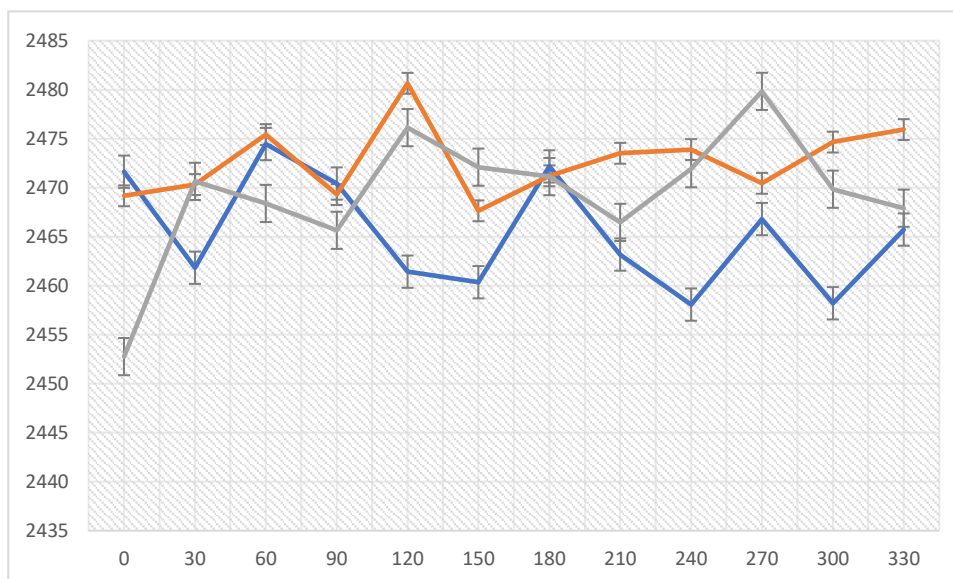
Οι μετρήσεις προσαρμόστηκαν σύμφωνα με τις σχέσεις (3.17), (3.18) και (3.19) όπου S_1 , S_2 και S_3 οι πραγματικές μετρήσεις και Sa_1 , Sa_2 και Sa_3 οι προσαρμοσμένες, ενώ τοποθετήθηκαν ώστε να συμπίπτουν και οι γωνίες τους.

$$Sa_1 = S_1 + 20 \quad (3.17)$$

$$Sa_2 = S_2 * 0.95 + 128 \quad (3.18)$$

$$Sa_3 = S_3 * 1.2 - 495 \quad (3.19)$$

Στη συνέχεια, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία μετά την προθήκη της ατέλειας. Στο Σχήμα 107 φαίνονται οι νέες μετρήσεις αφού έχουν προσαρμοστεί για την γωνία, το πλάτος και την απόκλιση από το μηδέν.



Σχήμα 107. Προσαρμοσμένες μετρήσεις Αισθητήρα Πολλαπλών Hall μετά την προσθήκη της ατέλειας.

Συγκρίνοντας το Σχήμα 106 και το Σχήμα 107, συμπεραίνουμε ότι ο νέος αισθητήρας είναι σε θέση να απεικονίσει ποσοτικά την επίδραση την οποία είχε το επιφανειακό ελάττωμα στο ανισοτροπικό προφίλ του υλικού.

4.

Συγκομιδή Ενέργειας – Εφαρμογές Αυτόνομων Αισθητήρων

4.1. Γενικά

Η συνεχιζόμενη ανάπτυξη ηλεκτρονικών συσκευών μικρού ισχύος έχει οδηγήσει σε αύξηση της ζήτησης για αυτόνομες εφαρμογές με εναλλακτικές πηγές ενέργειας, καθώς οι χημικές μπαταρίες αποδεικνύονται αναποτελεσματικές λόγω του μεγέθους τους, της περιορισμένης αντοχής τους και των περιβαλλοντικών ανησυχιών που προκαλούν. Λόγω της αφθονίας και της υψηλής ενεργειακής πυκνότητάς της, η ενέργεια η οποία προέρχεται από δονήσεις του περιβάλλοντος έχει προταθεί ως βιώσιμη λύση, ενώ ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους τα συστήματα συγκομιδής κατηγοριοποιούνται σε πιεζοηλεκτρικά [184], ηλεκτροστατικά και ηλεκτρομαγνητικά [185].

Η σημασία της συλλογής ενέργειας γίνεται σαφής όταν εξετάζουμε μηχανικά συστήματα, όπως κινητήρες αεροσκαφών, όπου η παρακολούθηση υλικού κατά τη λειτουργία είναι υποχρεωτική, καθώς οποιαδήποτε δυσλειτουργία μπορεί να αποδειχθεί καταστροφική [186], ή συστήματα όπως ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (**WSN** – Wireless Sensor Networks), μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (**MEMS** – Micro-Electromechanical Systems) και μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα, τα οποία είναι σχεδιασμένα να

λειτουργούν σε δύσκολα περιβάλλοντα [187] και οι αντικαταστάσεις μπαταριών δεν αποτελούν επιλογή.

Μια άλλη ευρέως χρησιμοποιούμενη αρχή συγκομιδής είναι αυτή όπου οι μαγνητοσυστολικές ιδιότητες των υλικών χρησιμοποιούνται για την απόκτηση τάσης και επομένως ηλεκτρικής ισχύος. Ωστόσο, όταν χρησιμοποιούνται αυτού του είδους οι μηχανές συγκομιδής, είναι δύσκολο να αντιστοιχίσουν τη δική τους συχνότητα συντονισμού με την περιβαλλοντική δόνηση του περιβάλλοντος και, ως εκ τούτου, η ισχύς που συγκομίζεται θα είναι συχνά κάτω από το επίπεδο mW [188]. Παρακάτω αναλύεται η μεθοδολογία σχεδίασης, η κατασκευή και η λειτουργία κάποιων συστημάτων συγκομιδής ενέργειας τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη συστημάτων αυτόνομων αισθητήρων μέτρησης.

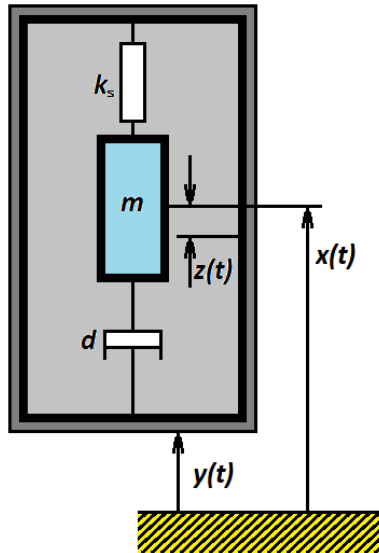
4.2. Σύστημα Συγκομιδής Ενέργειας

4.2.1. Μεθοδολογία Σχεδίασης

4.2.1.1. Υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος

Το Σχήμα 108 αναπαριστά μια γραμμική αδρανειακή ηλεκτρική γεννήτρια. Μια αδρανειακή μάζα m βρίσκεται μέσα σε ένα μεγαλύτερο κέλυφος, το οποίο δέχεται δονήσεις από μια πηγή δόνησης. Η μάζα είναι αναρτημένη μέσα στο κέλυφος από ένα ελατήριο με σταθερά k_s . Ένας αποσβεστήρας με σταθερά d , ο οποίος ενσωματώνει τυχόν παρασιτικές μηχανικές και αεροδυναμικές απώλειες απόσβεσης, τον ηλεκτρομηχανικό μορφοτροπέα και το ηλεκτρικό φορτίο, αντιπροσωπεύει την εξαγωγή ενέργειας από το σύστημα. Θεωρείται ότι η μάζα της πηγής δόνησης είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτήν της γεννήτριας ώστε να μπορεί να αναπαρασταθεί ως άπειρη πηγή ενέργειας. Ομοίως, η κίνηση της πηγής δεν επηρεάζεται από την ενέργεια που εξάγεται από τη γεννήτρια.

Η είσοδος στο σύστημα είναι η απόλυτη μετατόπιση λόγω της δόνησης που εφαρμόζεται στο κέλυφος, $y(t)$, η οποία παράγει απόλυτη κίνηση της μάζας, $x(t)$.



Σχήμα 108. Μηχανικό σύστημα αδρανειακής μάζας μέσα σε κέλυφος.

Η εξίσωση κίνησης (4.1) για το σύστημα προκύπτει από την ισορροπία δυνάμεων οι οποίες ασκούνται στη μάζα [189].

$$m \cdot \ddot{x}(t) + d \cdot [\dot{x}(t) - \dot{y}(t)] + k_s \cdot [x(t) - y(t)] = 0 \quad (4.1)$$

Λόγω της σχετικής κίνησης των δυο μαζών (κέλυφος και αδρανειακή μάζα) μπορούμε γράψουμε ότι η σχετική μετατόπιση $z(t)$ της μάζας δίνεται από την Σχέση (4.2).

$$z(t) = x(t) - y(t) \quad (4.2)$$

Αντικαθιστώντας στην Σχέση (4.1) έχουμε:

$$m \cdot \ddot{z}(t) + d \cdot \dot{z}(t) + k_s \cdot z(t) = -m \cdot \ddot{y}(t) \quad (4.3)$$

Η Σχέση (4.3) μας δίνει την εξάρτηση της σχετικής κίνησης της αδρανειακής μάζας (αριστερό μέλος) από την ολική εξωτερική δύναμη η οποία ασκείται στο κέλυφος (περικλείεται στον όρο $m \cdot \ddot{y}(t)$). Η ισοδύναμη σχέση μετά από μετασχηματισμό Laplace θα είναι:

$$-m \cdot s^2 \cdot Y(s) = s \cdot Z(s) \cdot \left[m \cdot s + d + \frac{k_s}{s} \right] \quad (4.4)$$

Η παραπάνω Σχέση (4.4) μπορούμε να πούμε ότι περιγράφει το μηχανικό ανάλογο ενός παράλληλου ηλεκτρικού κυκλώματος RLC το οποίο περιγράφεται από την Σχέση (4.5).

$$-I_1(s) = E(s) \cdot \left[s \cdot C + \frac{1}{R} + \frac{1}{s \cdot L} \right] \quad (4.5)$$

Σε αυτή την Σχέση I_1 ονομάζουμε το ρεύμα εισόδου του κυκλώματος και $E(s)$ την επαγόμενη τάση στην έξοδό του. Οι σχέσεις οι οποίες συνδέουν τα ηλεκτρικά εξαρτήματα του κυκλώματος με τα μηχανικά τους ισοδύναμα είναι οι (4.6) έως (4.10).

$$I_1(s) = \frac{m}{k_e} \cdot s^2 \cdot Y(s) \quad (4.6)$$

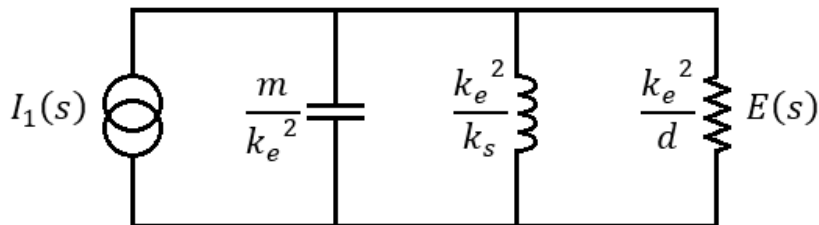
$$E(s) = k_e \cdot s \cdot Z(s) \quad (4.7)$$

$$C = \frac{m}{k_e^2} \quad (4.8)$$

$$R = \frac{k_e^2}{d} \quad (4.9)$$

$$L = \frac{k_e^2}{k_s} \quad (4.10)$$

Με k_e έχουμε συμβολίσει την ηλεκτρομαγνητική σταθερά του ισοδύναμου κυκλώματος αυτού, το οποίο και φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 109.



Σχήμα 109. Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η ενέργεια η οποία απορροφάται στον αποσβεστήρα θα δίνεται από την Σχέση (4.11).

$$P_d(s) = \frac{E(s)^2}{R} = \frac{d \cdot m^2 \cdot Y(s)^2 \cdot s^6}{[m \cdot s^2 + d \cdot s + k_s]^2} \quad (4.11)$$

Για ημιτονοειδή είσοδο τύπου $y(t) = Y_0 \cdot \cos(\omega t)$, η Σχέση (4.11) μπορεί να γραφτεί:

$$p_d(\omega) = \frac{d \cdot m^2 \cdot Y_0^2 \cdot \omega^6}{[k_s - m \cdot \omega^2]^2 + [\omega \cdot d]^2} \quad (4.12)$$

Για την συχνότητα συντονισμού ω_n και με συντελεστή απόσβεσης ζ θα ισχύουν οι σχέσεις:

$$\omega_n^2 = \frac{k_s}{m} = \frac{1}{L \cdot C} \quad (4.13)$$

$$\zeta = \frac{d}{2 \cdot \sqrt{m \cdot k_s}} = \frac{1}{2 \cdot R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.14)$$

Με αντικατάσταση στην Σχέση (4.12) παίρνουμε τελικά την γενική έκφραση για την ενέργεια η οποία απορροφάται στον αποσβεστήρα για πλάτος ταλάντωσης εισόδου Y_0 .

$$p_d(\omega) = \frac{2 \cdot m \cdot \zeta \cdot Y_0^2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3 \cdot \omega^3}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2 \cdot \zeta \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2} \quad (4.15)$$

Η Σχέση (4.15) ισχύει για οποιαδήποτε γραμμική αδρανειακή γεννήτρια, ανεξάρτητα από τη μορφή του ηλεκτρομηχανικού μετατροπέα ο οποίος χρησιμοποιείται. Η ισχύς της δόνησης της πηγής είναι μεγαλύτερη όταν ο ρυθμός μεταβολής της επιτάχυνσης της πηγής δόνησης είναι μεγαλύτερος. Η συχνότητα στην οποία συμβαίνει αυτό ορίζεται ως η κυρίαρχη συχνότητα δόνησης πηγής ω_s για την οποία ισχύει ότι η ισχύς της δόνησης είναι ανάλογη του παράγοντα $Y_0 \cdot \omega_s^3$.

Προφανώς, όταν σχεδιάσουμε την γεννήτρια θα θέλουμε η συχνότητα συντονισμού της ω_n να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην ω_s ώστε να υπάρχει η μεγαλύτερη δυνατή συγκομιδή ενέργειας. Για την συχνότητα συντονισμού και για μέγιστη μετατόπιση Z_0 της μάζας, η Σχέση (4.15) μας δίνει ότι:

$$P_n(\omega_n) = \frac{m \cdot Z_0^2 \cdot \omega_n^3}{2 \cdot \zeta} \quad (4.16)$$

Από την Σχέση (4.16) παίρνουμε ότι η ποσότητα της παραγόμενης ισχύος στην συχνότητα συντονισμού είναι ανάλογη με το τετράγωνο της μέγιστης μετατόπισης της μάζας.

4.2.1.2. Υπολογισμός της ισχύος στο φορτίο

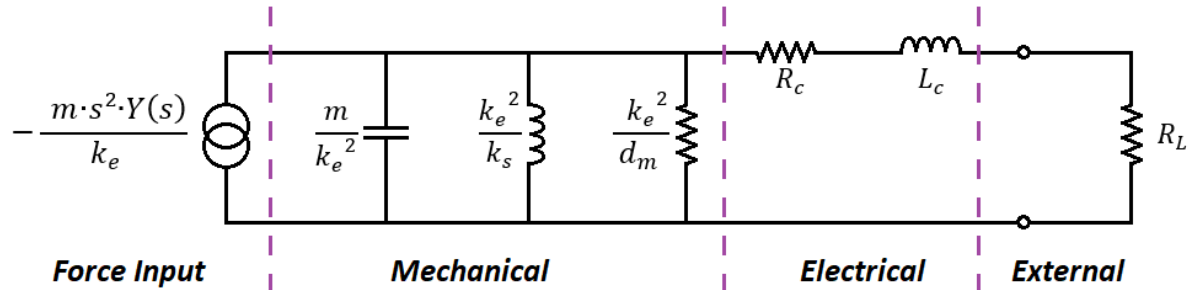
Η προτεινόμενη τοπολογία η οποία βασίζεται στο παραπάνω σύστημα (Σχήμα 108) αποτελείται από έναν μόνιμο μαγνήτη ως αδρανειακή μάζα και ένα πηνίο τυλιγμένο γύρω από το κέλυφος. Μια τάση, e_c επάγεται στο πηνίο από τη σχετική κίνηση της μάζας $z(t)$ και δίνεται από την (4.17).

$$e_c(t) = k_e \cdot \dot{z}(t), \quad (4.17)$$

όπου, k_e , είναι η ηλεκτρομαγνητική σταθερά του συστήματος. Η δύναμη, $f_c(t)$, στον μαγνήτη λόγω του ρεύματος, $I_c(t)$, στο πηνίο λαμβάνεται ομοίως από:

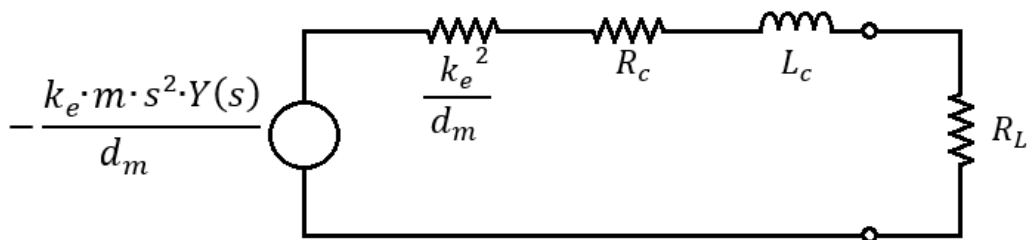
$$f_c(t) = k_e \cdot I_c(t) \quad (4.18)$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα το οποίο προκύπτει αποτελείται από την ωμική αντίσταση του πηνίου, R_c , την αυτεπαγωγή του πηνίου, L_c , και το εξωτερικό φορτίο, R_L , και συνδυάζεται με το ισοδύναμο του μηχανικού συστήματος για να ληφθεί το ισοδύναμο κύκλωμα πλήρους συστήματος, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 110. Εδώ ο όρος απόσβεσης, d_m , αντιπροσωπεύει τη μηχανική απόσβεση και τις ηλεκτρομαγνητικές απώλειες σιδήρου και δινορευμάτων [189].



Σχήμα 110. Ηλεκτρικό κύκλωμα ισοδύναμο του Microgenerator.

Όπου m η αδρανειακή μάζα της γεννήτριας, $Y(s)$ η ταλάντωση η οποία προκαλείται από εξωτερικά εφαρμοζόμενη δύναμη και k_s ο συντελεστής ελαστικών ιδιοτήτων του συστήματος.



Σχήμα 111. Ισοδύναμο κύκλωμα κατά τον συντονισμό.

Η μέγιστη ισχύς παράγεται από τη γεννήτρια κατά τον συντονισμό, η οποία είναι η κατάσταση που ενδιαφέρει περισσότερο. Στον συντονισμό, οι παράλληλες σύνθετες αντιστάσεις οι οποίες αντιστοιχούν στη μάζα και στο ελατήριο (στο μηχανικό ισοδύναμο) τείνουν στο άπειρο. Μετατρέποντας το μηχανικό ισοδύναμο κύκλωμα Norton το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 110 σε ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin, όπως φαίνεται στο Σχήμα 111, η ισχύς η οποία παρέχεται στο φορτίο σε κατάσταση συντονισμού υπολογίζεται από την ισχύ εξόδου της γεννήτριας, όπως περιγράφεται στην Σχέση (4.16), συναρτήσει της Y_0 ως $P_L(\omega_n) = P_d(\omega_n) \cdot \frac{R_L}{Z_t}$, όπου Z_t η συνολική εμπέδηση του ισοδύναμου κυκλώματος, και δίνεται τελικά από την (4.19).

$$P_L(\omega_n) = \frac{k_e^2 \cdot m^2 \cdot Y_0^2 \cdot \omega_n^3}{d_m^2} \cdot \frac{R_L}{\left[\left(R_C + R_L + \frac{k_e^2}{d_m} \right)^2 + (\omega_n \cdot L_C)^2 \right]^{1/2}} \quad (4.19)$$

Σύμφωνα με την (4.19) η παραγόμενη μπορεί να μεγιστοποιηθεί κάνοντας την εσωτερική αντίσταση του πηνίου R_C πολύ μικρότερη από την αντίσταση φορτίου R_L . Μέγιστη μεταφορά ισχύος συμβαίνει όταν η αντίσταση του φορτίου είναι ίση με την ισοδύναμη αντίσταση Thevenin του συστήματος. Για αμελητέα σύνθετη αντίσταση πηνίου $Z = R_C + j \cdot \omega_n \cdot L_C$ (που όμως δεν μπορεί να προκύψει εύκολα όταν ω_n είναι μεγάλη), η σύνθετη αντίσταση του φορτίου πρέπει να προσεγγίζει την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση της μηχανικής απόσβεσης και άρα:

$$k_e = \sqrt{R_L \cdot d_m} \quad (4.20)$$

οπότε η ισχύς που παρέχεται στο φορτίο είναι:

$$P_L(\omega_n) = \frac{R_L \cdot m \cdot Y_0^2 \cdot \omega_n^2}{4 \cdot \zeta_m} \quad (4.21)$$

Όπου ζ_m είναι ο συντελεστής μηχανικής απόσβεσης.

Για την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης ακολουθήθηκαν έξι συνθήκες σχεδιασμού, οι οποίες προκύπτουν από την ανάλυση του κυκλώματος στο παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα [189]:

- i. Η αδρανειακή μάζα του μαγνήτη, m , πρέπει να είναι η μεγαλύτερη δυνατή.

ii. Το σύστημα πρέπει να κατασκευάζεται με συντελεστή ελαστικότητάς k_s , τέτοιο ώστε η συχνότητα συντονισμού της αδρανειακής μάζας η οποία προκύπτει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στη συχνότητα της εξωτερικής ταλάντωσης.

iii. Η γεωμετρία της γεννήτριας πρέπει να προβλέπει αρκετό χώρο για την ταλάντωση της αδρανειακής μάζας.

iv. Η ωμική αντίσταση του πηνίου της μικρογεννήτριας R_c πρέπει να είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους μικρότερη από εκείνη του φορτίου.

v. Η μηχανική απόσβεση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.

vi. Η ηλεκτρομαγνητική σταθερά, k_e , πρέπει να είναι τέτοια ώστε η ολική αντίσταση της γεννήτριας να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην αντίσταση του φορτίου ($R_L \approx k_e^2/d_m$).

4.2.2. Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

4.2.2.1. Γεννήτρια

Ο συλλέκτης ενέργειας ο οποίος χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από τη γεννήτρια και το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία συνδέονται μέσω ενός κυκλώματος διαχείρισης ισχύος όπως αυτό περιγράφεται στο [190]. Στη συγκεκριμένη γεννήτρια, μια αδρανειακή μάζα μόνιμων μαγνητών τοποθετείται μέσα σε ένα σωλήνα όπου γύρω από τον οποίο είναι τυλιγμένο σε ένα πηνίο. Η μάζα αφήνεται να αιωρείται μέσα στο σωλήνα τοποθετώντας δύο μαγνήτες αντίθετης πολικότητας σε κάθε πλευρά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 112.



Σχήμα 112. 3D μοντέλο (αριστερά) και τελική μορφή μικρογεννήτριας (δεξιά) [191].

Όταν εφαρμόζονται οι εξωτερικές δονήσεις, οι μαγνήτες αρχίζουν να ταλαντώνονται στο εσωτερικό του σωλήνα, δημιουργώντας ένα διαφορικό μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του πηνίου, το οποίο οδηγεί σε εναλλασσόμενη τάση στα άκρα του πηνίου [189].

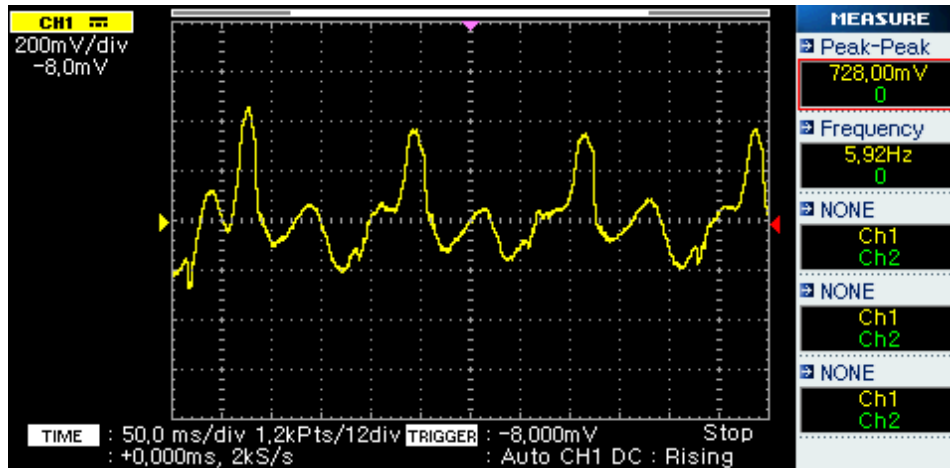
Τελικά, χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα τριών μικρογεννητριών σε σειρά, προκειμένου να αξιοποιηθεί ένα ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων ταλάντωσης [190]. Το σύστημα τριών γεννητριών φαίνεται στο Σχήμα 113 και η έξοδός του σε διάφορες συχνότητες φαίνονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 115, Σχήμα 116, Σχήμα 117 και Σχήμα 118). Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, εξωτερικές δονήσεις παρείχε μια γεννήτρια ταλαντώσεων η οποία φαίνεται στο Σχήμα 114.



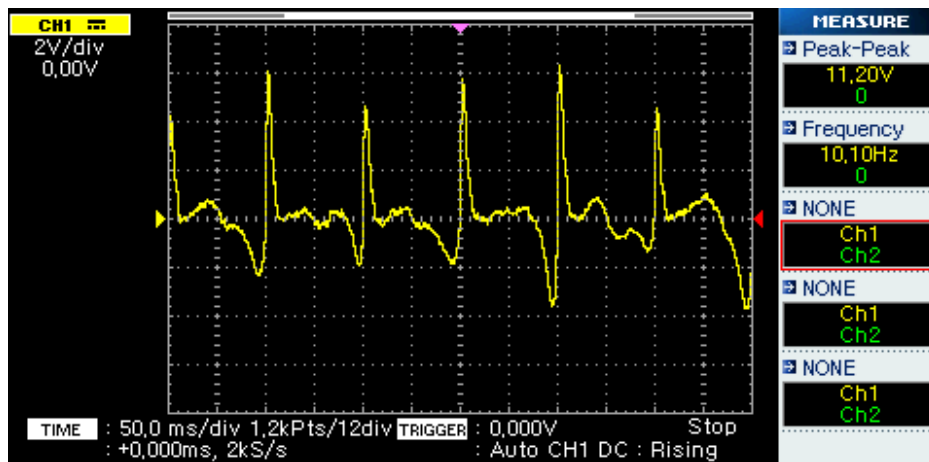
Σχήμα 113. Σύστημα τριών γεννητριών [190].



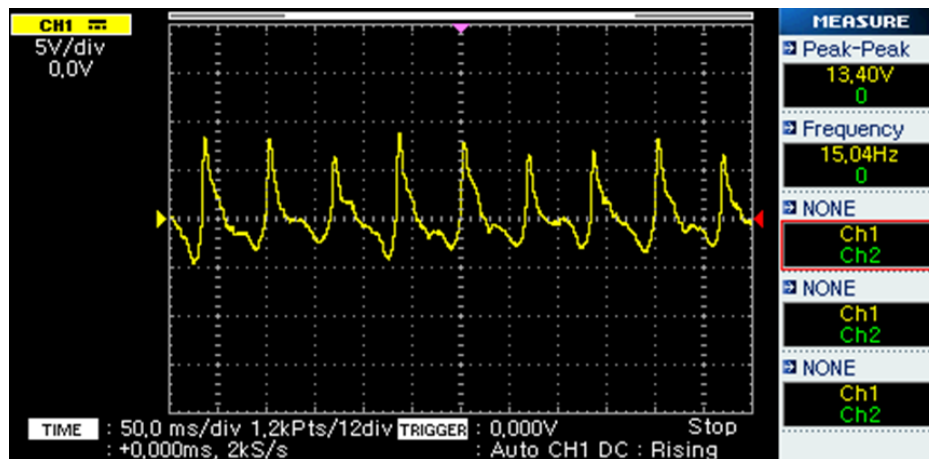
Σχήμα 114. Γεννήτρια ταλαντώσεων.



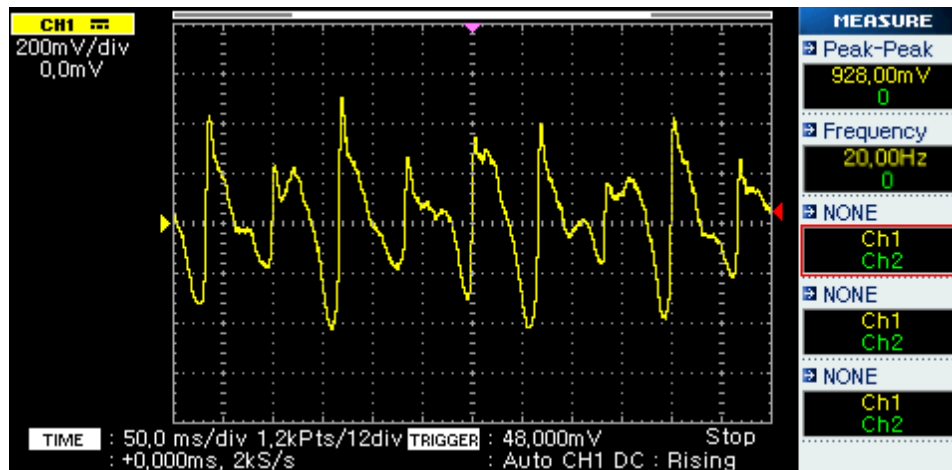
Σχήμα 115. Έξοδος συστήματος τριών γεννητριών στα 5 Hz [190].



Σχήμα 116. Έξοδος συστήματος τριών γεννητριών στα 10 Hz [190].



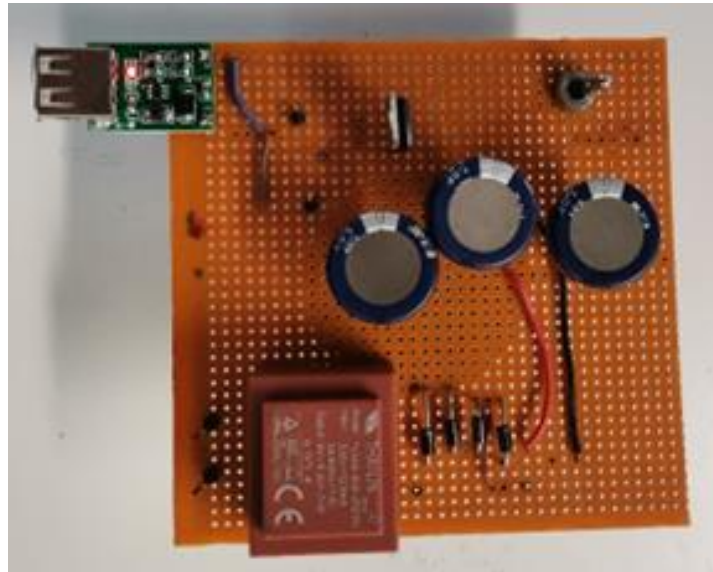
Σχήμα 117. Έξοδος συστήματος τριών γεννητριών στα 15 Hz [190].



Σχήμα 118. Έξοδος συστήματος τριών γεννητριών στα 20 Hz [190].

4.2.2.2. Κύκλωμα διαχείρισης, αποθήκευσης και απόδοσης

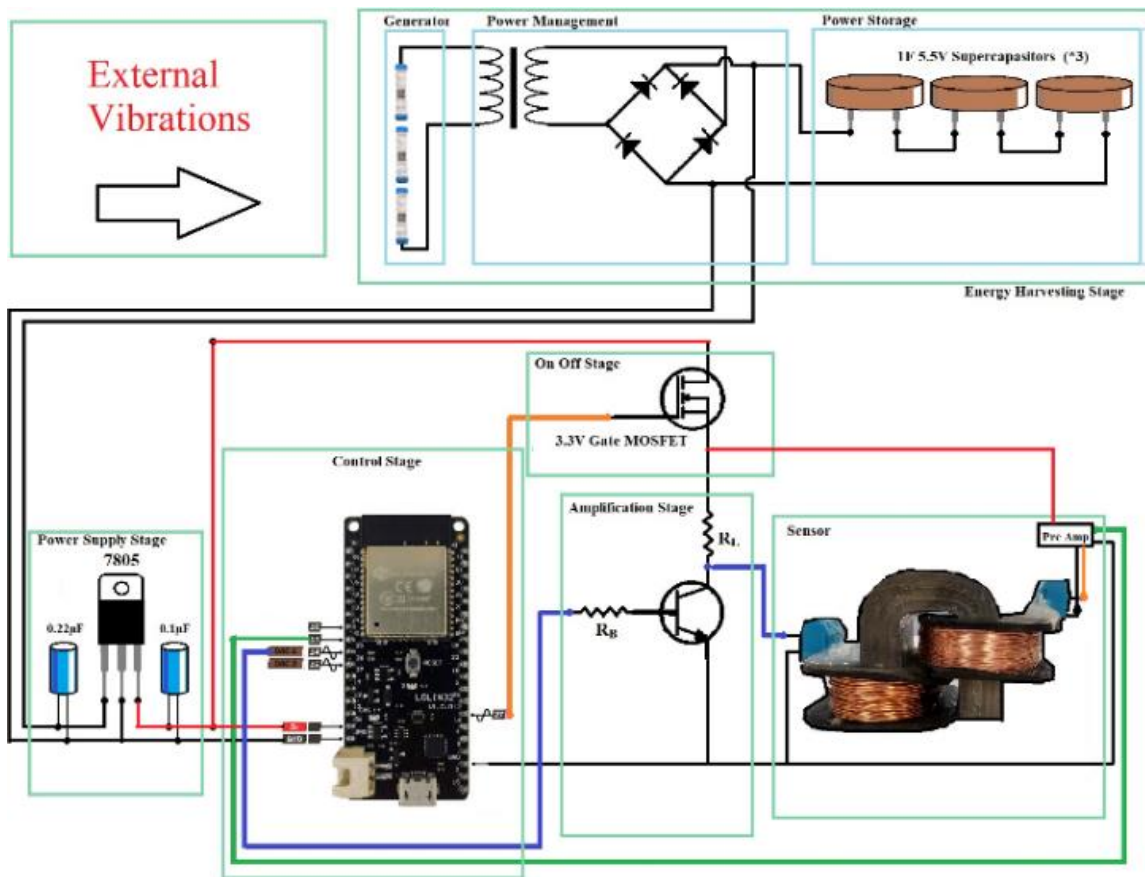
Προκειμένου η ενέργεια η οποία συλλέγεται να αποθηκευτεί, πρέπει πρώτα να ανορθωθεί. Σε γενικές γραμμές, οι δίοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται στους ανορθωτές μπορεί να έχουν σημαντική πτώση τάσης, οπότε, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επίδρασή τους, είναι πρώτα απαραίτητο να αυξηθεί η εναλλασσόμενη τάση μέσω ενός μετασχηματιστή. Η ενέργεια αποθηκεύεται με τη χρήση 3 υπερπυκνωτών 1 F, 5.5 V συνδεδεμένων σε σειρά (Σχήμα 119). Αυτό ισοδυναμεί με έναν πυκνωτή 1/3 F, 16.5 V και η ονομαστική συνολική ενέργεια η οποία μπορεί να αποθηκευτεί είναι $E = 43.5 \text{ J}$ (χρησιμοποιώντας την $E = C \cdot V^2/2$). Κατά τη διάρκεια του πειράματος οι πυκνωτές έφτασαν τα 14 V, οπότε το αποθηκεύσιμο φορτίο είναι 4.7 C και η πραγματική αποθηκευμένη ενέργεια είναι 32.6 J. Τα πειραματικά δεδομένα του [190] δείχνουν ότι 20 λεπτά είναι αρκετά για να υπάρξει τέτοια ενέργεια με τη μορφή φορτίου, έχοντας εντελώς άδειους πυκνωτές στην αρχή.



Σχήμα 119. Πρότυπο κύκλωμα διαχείρισης, αποθήκευσης και απόδοσης ηλεκτρικής ισχύος [190].

4.3. Αυτόνομος Αισθητήρας Μαγνητικής Διαπερατότητας

Στο Σχήμα 120 φαίνεται το ολοκληρωμένο σύστημα Αυτόνομου Αισθητήρα Μαγνητικής Διαπερατότητας (Autonomous Magnetic Permeability Sensor) [191]. Στην βάση του, το σύστημα αυτό, αποτελείται από τον συνδυασμό του μονοδιάστατου συστήματος συγκομιδής ενέργειας της Παραγράφου 4.2.2 και του Αισθητήρα Μαγνητικής Διαπερατότητας της Παραγράφου 3.3.1. Ένα σύνολο τέτοιων αισθητήρων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί συνδεδεμένο σε κλειστό δίκτυο ή ως μέρος ενός μεγαλύτερου συστήματος για την συλλογή πληροφοριών μιας βιομηχανικής διάταξης [192].



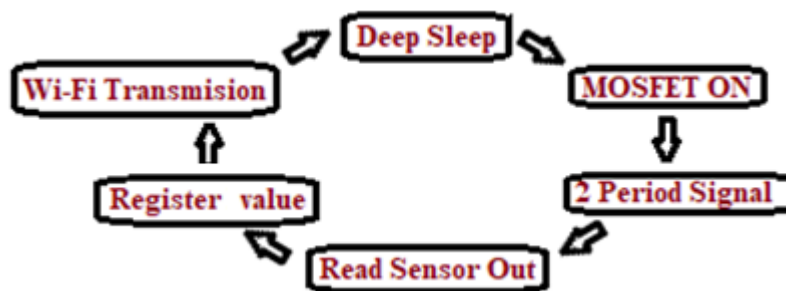
Σχήμα 120. Ολοκληρωμένο Σύστημα Αυτόνομου Αισθητήρα Μαγνητικής Διαπερατότητας [191].

Εκτός από τα χαρακτηριστικά που παρουσιάστηκαν παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε ένας μικροελεγκτής *ESP32* [180] για τον έλεγχο της εφαρμογής, συνδεδεμένος με ένα MOSFET για έλεγχο On-Off. Ο μικροελεγκτής αυτός κατά την λειτουργία του δημιουργεί ένα σήμα το οποίο στη συνέχεια ενισχύεται και αποστέλλεται στον αισθητήρα. Το *ESP32* επιλέχθηκε για το ενσωματωμένο Wi-Fi, τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και την ικανότητά του να μεταβαίνει σε λειτουργία Deep Sleep. Αυτή η συγκεκριμένη έκδοση είναι η πλακέτα (breakout board) *ESP32 WeMos LOLIN 32* η οποία έχει την επιπλέον δυνατότητα παρακολούθησης μπαταρίας.

Το *ESP32* έχει ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας 10 μA κατά τη διάρκεια του Deep Sleep και 260 mA κατά την κανονική λειτουργία με τάση τροφοδοσίας 3.7 V, επομένως μπορεί να υπολογιστεί ότι ένας πλήρης κύκλος 10 λεπτών με μόνο 0.5 sec λειτουργίας δεν καταναλώνει περισσότερο από 0.5 J. Ομοίως, όταν ο αισθητήρας λειτουργεί για 0.5 sec έχει κατανάλωση περίπου 0.16 J. Η υπόλοιπη κατανάλωση ενέργειας του κυκλώματος που περιλαμβάνει το MOSFET, το τρανζίστορ ενίσχυσης και τον προενισχυτή που βασίζεται στο

του NE5534 [193] μαζί με την απαγωγή θερμότητας στις αντιστάσεις μπορεί επίσης να υπολογιστεί σε λιγότερο από 2 J λόγω της πολύ μικρής περιόδου λειτουργίας.

Στο Σχήμα 121 φαίνεται ο κύκλος λειτουργίας του Αυτόνομου Αισθητήρα Μαγνητικής Διαπερατότητας. Στο μεγαλύτερο κομμάτι της διάρκειας του κύκλου αυτού ο αισθητήρας βρίσκεται σε Deep Sleep και έτσι δίνεται η δυνατότητα στο energy harvester να φορτίσει τους πυκνωτές του. Όταν ο αισθητήρας λειτουργεί κανονικά ανοίγει το MOSFET το οποίο και τροφοδοτεί το στάδιο ενίσχυσης και άρα το σήμα το οποίο παράγεται από το ESP32 ενισχύεται και τροφοδοτεί το πρωτεύον πηνίο του γοκε για χρόνο 2 περιόδων. Στο δευτερεύον έχουμε το σήμα εξόδου το οποίο διαβάζεται από το ESP32, καταχωρείται και αποστέλλεται στο δίκτυο μέσω του ενσωματωμένου Wi-Fi. Τέλος, ο αισθητήρας επιστρέφει στην κατάσταση Deep Sleep.



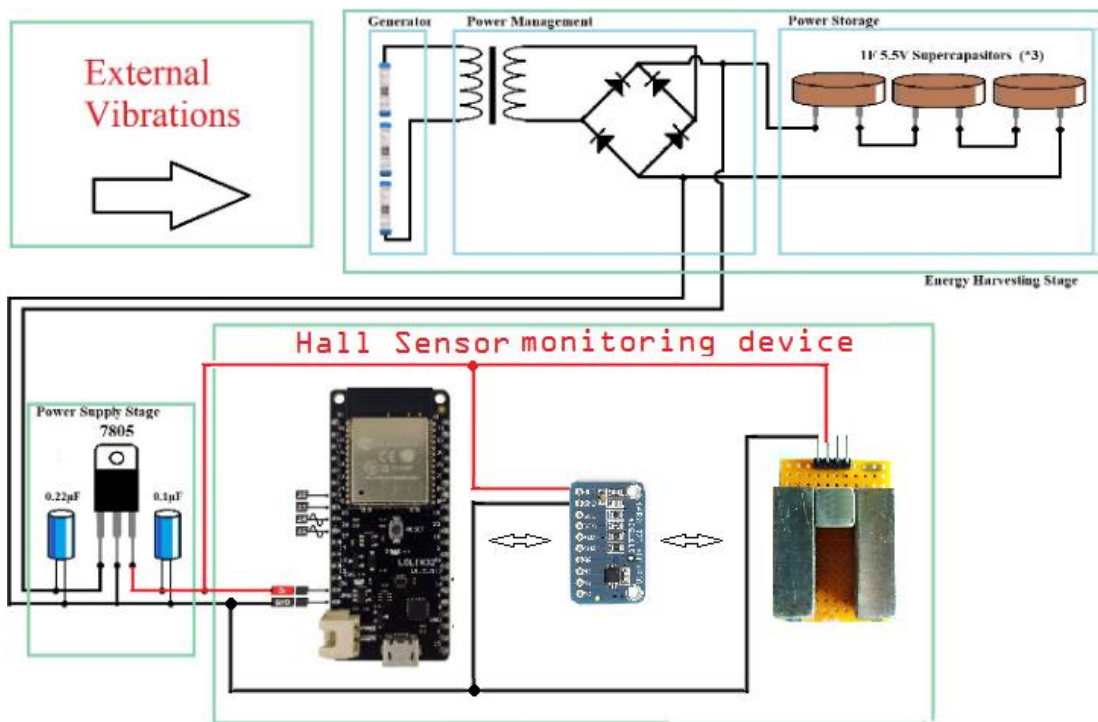
Σχήμα 121. Κύκλος λειτουργίας Αυτόνομου Αισθητήρα Μαγνητικής Διαπερατότητας.

Συνολικά, κάθε κύκλος 10 λεπτών έχει μέγιστη κατανάλωση ενέργειας μικρότερη από 2.7 J. Δεδομένου ότι η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια είναι 32.6 J και ο χρόνος πλήρους φόρτισης ήταν 20 λεπτά, συμπεραίνεται ότι το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα. Η λειτουργία του αυτή επαληθεύτηκε και πειραματικά καθώς ο αισθητήρας χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις οι οποίες περιγράφονται στο [176].

4.4. Αυτόνομος Αισθητήρας Hall

Στο παρακάτω Σχήμα 122 φαίνεται ο Αυτόνομος Αισθητήρας Παρακολούθησης Υγείας Χαλύβων βασισμένος σε μετρήσεις από αισθητήρες φαινομένου Hall (Autonomous Steel Health Monitoring System Based on Hall Effect Measurements) όπως αυτός παρουσιάστηκε στο [183]. Όπως και στον προηγούμενο αισθητήρα, το σύστημα αυτό, αποτελείται από τον

συνδυασμό του μονοδιάστατου συστήματος συγκομιδής ενέργειας της Παραγράφου 4.2.2 και του Αισθητήρα Yoke με Μόνιμο Μαγνήτη της Παραγράφου 3.4.



Σχήμα 122. Ολοκληρωμένο Σύστημα Αυτόνομου Αισθητήρα Hall Μελέτης Ανισοτροπίας [183].

Οι τιμές για τα ονομαστικά ρεύματα λειτουργίας του *ESP32* είναι αυτές της προηγούμενης παραγράφου και άρα για έναν πλήρη κύκλο λειτουργίας 10 λεπτών με μόνο 0.5 sec λειτουργίας, μπορεί να υπολογιστεί ότι καταναλώνει λιγότερο από 0.5 J. Κατά τη διάρκεια των 0.5 sec της λειτουργίας του, η κατανάλωση ενέργειας είναι δεν ξεπερνά τα 0.16 J.

Λόγω της πολύ μικρής περιόδου λειτουργίας, ο μετατροπέας *ADS1115* και οι δύο αισθητήρες Hall έχουν ασήμαντη κατανάλωση ενέργειας. Τέτοια μικρή κατανάλωση (ονομαστικά μικρότερη από 0.2 J) οδηγεί σε συνολική κατανάλωση μικρότερη από 0.4 J για έναν κύκλο λειτουργίας 10 λεπτών. Για πλήρη χρόνο φόρτισης 20 λεπτών, που έχει ως αποτέλεσμα ονομαστική ποσότητα ενέργειας η οποία αποθηκεύεται ίση με 32.6 J, είναι ασφαλές να πούμε ότι το σύστημα μπορεί να επιτύχει αυτόνομη λειτουργία.

5.

Συμπεράσματα – Μελλοντική Εργασία

5.1. Γενικά

Όπως προαναφέρθηκε, οι τρεις διατάξεις που αναπτύχθηκαν, αφού εξελιχθούν, διακριβωθούν και αναπτυχθούν σε επαγγελματικές συσκευές θα στηρίξουν την Διαπίστευση του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ και του ΕΠΙΣΕΥ σύμφωνα με το πρότυπο ISO 17025 & ISO 17020 για την μέτρηση της κατανομής της μαγνητικής διαπερατότητας και κατά συνέπεια την μέτρηση της κατανομής των παραμενουσών τάσεων σε χάλυβες.

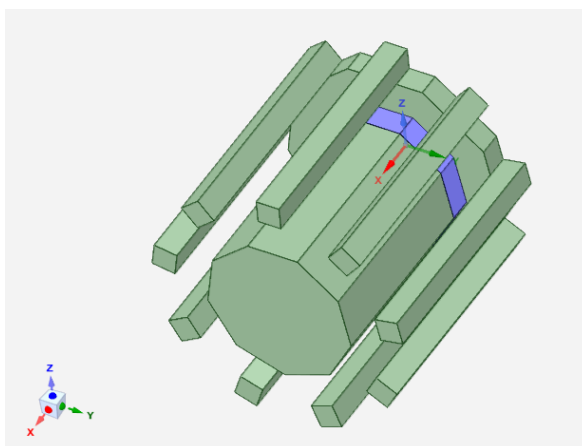
Οι πειραματικές διατάξεις οι οποίες παρουσιάστηκαν είχαν σαν στόχο την παρακολούθηση και τον Μη Καταστροφικό Έλεγχο υλικών και εξαρτημάτων μέσω των μαγνητικών ιδιοτήτων τους. Στα πλαίσια αυτά έγινε μια προσπάθεια να κατασκευαστούν αισθητήρες οι οποίοι να παρέχουν την ακρίβεια η οποία χρειάζεται, αλλά και να εξασφαλίζεται η λειτουργία τους σε ιδιαίτερες συνθήκες όπως αυτές που συναντώνται σε βιομηχανικά εργοστάσια όπου δεν είναι εύκολη η τροφοδοσία τους με ηλεκτρική ενέργεια και άρα η αυτονομία τους είναι απαραίτητη.

Μελετώντας τους αισθητήρες αυτούς έγινε σαφές ότι η θεωρητική ανάλυσή τους ως μαγνητικά κυκλώματα βοηθάει στην καλύτερη κατανόηση των φαινομένων τα οποία επηρεάζουν την λειτουργία και την απόδοσή τους. Στην συνέχεια παρουσιάζονται κάποια θέματα τα οποία προέκυψαν ως μελλοντική εργασία κατά την παρούσα ανάλυση.

5.2. Βελτιωμένος Αισθητήρας Πολλαπλών Hall

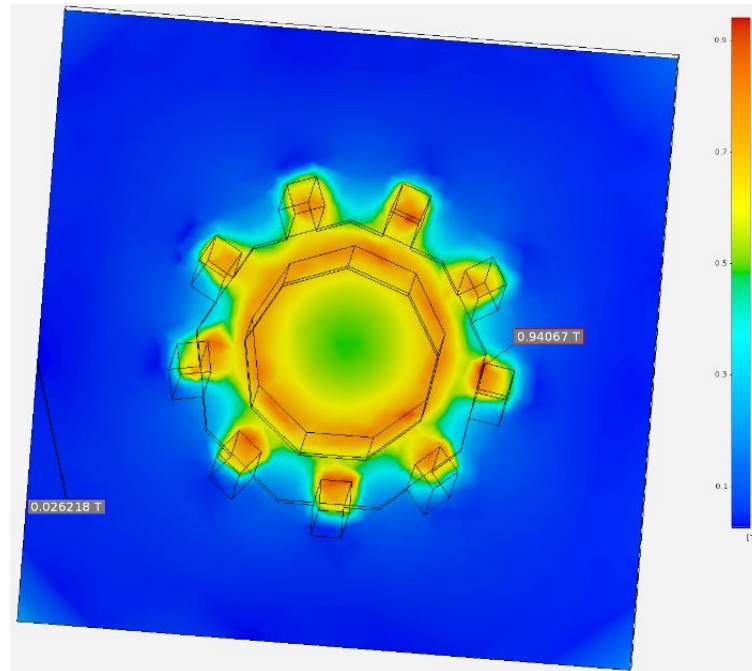
5.2.1. Περιγραφή

Με βάση τις μετρήσεις οι οποίες συλλεχθήκαν με την πειραματική διάταξη της Παραγράφου 3.4.2 φαίνεται ότι είναι δυνατό να εκτελεστούν ανεξάρτητες μετρήσεις ταυτόχρονα και επομένως να παρακολουθούνται οι αλλαγές στην ανισοτροπία του υπό εξέταση δείγματος. Ωστόσο, παρατηρείται επίσης ότι οι τρεις αισθητήρες είναι πολύ λίγοι για να δώσουν μια ικανοποιητική εικόνα αυτών των αλλαγών, καθώς υπάρχει μεγάλο περιθώριο σφάλματος κατά τη λήψη μετρήσεων, ειδικά με υλικά που δεν είναι τόσο επεξεργασμένα όσο το υπό εξέταση δείγμα αυτού του πειράματος. Ως εκ τούτου, φαίνεται ότι μια τοπολογία περισσότερων αισθητήρων Hall θα παράγει καλύτερα αποτελέσματα για τη μέτρηση της υγείας των χαλύβων. Στο Σχήμα 123 βλέπουμε μια τέτοια τοπολογία η οποία βασίζεται σε εννέα αισθητήρες Hall SS49E διατεταγμένους σε κύκλο. Ως βέλτιστος αριθμός προτείνονται εννέα αισθητήρες ώστε τα κέντρα τους να είναι κοντά στο υπό εξέταση σημείο, ώστε η μέτρηση να θεωρείται ακριβής. Οι αισθητήρες δεν είναι ορατοί στο σχήμα, αλλά θα τοποθετηθούν ένας για κάθε σκέλος της τοπολογίας, σε γωνία 40° σε σχέση με αυτούς που βρίσκονται δίπλα τους. Με μπλε χρώμα, υποδεικνύεται ένας μόνιμος μαγνήτης. Η προτεινόμενη τοπολογία χωράει σε έναν κύλινδρο με διάμετρο μικρότερη από 30 mm.



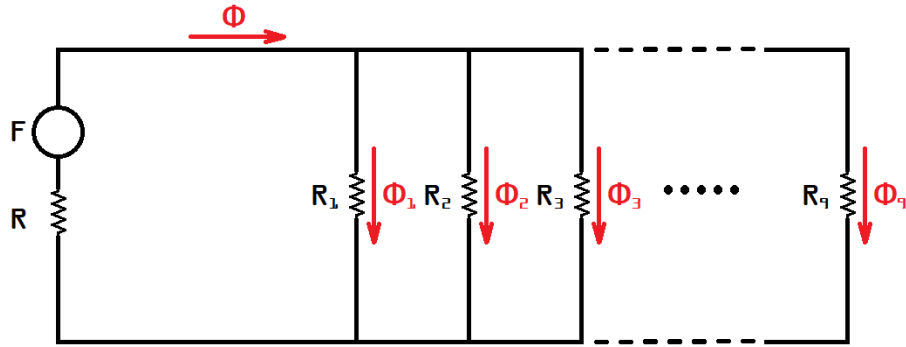
Σχήμα 123. Τοπολογία αισθητήρα με εννέα Hall SS49E (created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).

Επίσης, μια επιπλέον βελτίωση αυτής της τοπολογίας θα ήταν να γίνει ο αισθητήρας αρκετά μικρότερος έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες οι οποίες σχετίζονται με το μήκος μεταξύ του εσωτερικού πόλου ο οποίος συγκρατεί τον μόνιμο μαγνήτη και των εξωτερικών σκελών τα οποία ολοκληρώνουν το μαγνητικό κύκλωμα. Το προσομοιωμένο σχέδιο του μαγνητικού κυκλώματος το οποίο προκύπτει φαίνεται στο Σχήμα 124.



Σχήμα 124. Προσομοίωση μαγνητικού πεδίου αισθητήρα με εννέα Hall SS49E (created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA)

Η μέγιστη μέτρηση δίνεται από το λογισμικό ως $B = 0.94 \text{ T}$ κοντά στα σκέλη του αισθητήρα, ενώ στο σημείο όπου θα βρίσκονται οι αισθητήρες Hall μετριέται σε $B = 0.81 \text{ T}$. Η προσομοίωση δείχνει ένα σαφώς συμμετρικό μοτίβο για το μαγνητικό πεδίο και τη ροή του, ενώ το μαγνητικό κύκλωμα είναι καλά καθορισμένο, σε μεγάλο βαθμό λόγω των μικρότερων διαστάσεων του. Επιπλέον, η χρήση ενός μόνο μόνιμου μαγνήτη τοποθετημένου στο κέντρο του αισθητήρα θα απλοποιούσε τόσο το μαγνητικό κύκλωμα (Σχήμα 125) όσο και τις εξισώσεις (5.1) έως (5.4) οι οποίες το περιγράφουν.



Σχήμα 125. Μαγνητικό κύκλωμα αισθητήρα με εννέα Hall SS49E.

$$F + \Phi_1 \cdot R_1 + \Phi \cdot R = 0 \quad (5.1)$$

$$F + \Phi_2 \cdot R_2 + \Phi \cdot R = 0 \quad (5.2)$$

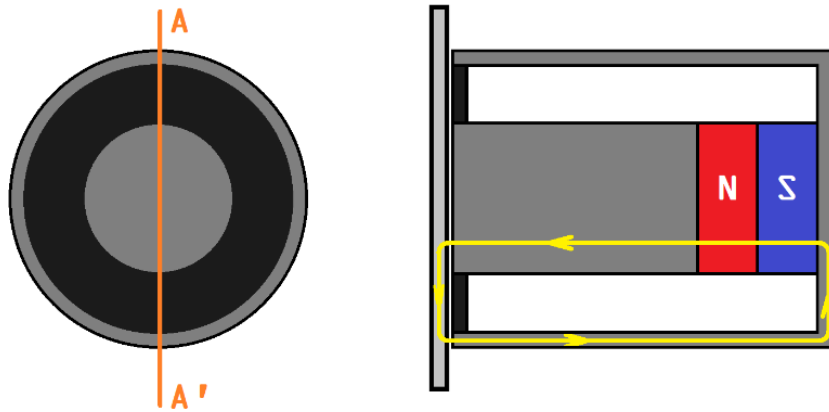
...

$$F + \Phi_9 \cdot R_9 + \Phi \cdot R = 0 \quad (5.3)$$

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \dots + \Phi_9 \quad (5.4)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, τα R_1 έως R_9 υποδεικνύουν τη συνδυασμένη μαγνητική αντίσταση κάθε σκέλους και το αντίστοιχο τμήμα του υπό δοκιμή χάλυβα. F είναι η μαγνητεγερτική δύναμη του μόνιμου μαγνήτη, R και Φ η μαγνητική αντίσταση του κεντρικού πόλου και η πυκνότητα της μαγνητικής ροής του αντίστοιχα, και Φ_1 έως Φ_9 είναι οι πυκνότητες μαγνητικής ροής για κάθε σκέλος.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα βελτίωση στη σχεδίαση αυτού του είδους αισθητήρα θα ήταν η απομάκρυνση από τους περιορισμούς στις διαστάσεις οι οποίοι προκύπτουν από τη χρήση των αισθητήρων Hall SS49E. Χρησιμοποιώντας τη σημερινή τεχνολογία, θα ήταν αρκετά απλό να σχεδιάσουμε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) το οποίο θα περιλαμβάνει πολλούς αισθητήρες Hall και θα παρέχει τις μετρήσεις τους ως εξόδους. Αυτό το IC θα μπορούσε να τοποθετηθεί ως μέρος ενός κυλινδρικού αισθητήρα όχι μεγαλύτερου από $\varnothing 5$ mm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 126. Ο αριθμός των αισθητήρων Hall που περιλαμβάνονται στο IC θα καθορισθεί από πειραματικά δεδομένα και επίσης από τις κατασκευαστικές δυνατότητες του παρόχου των IC.



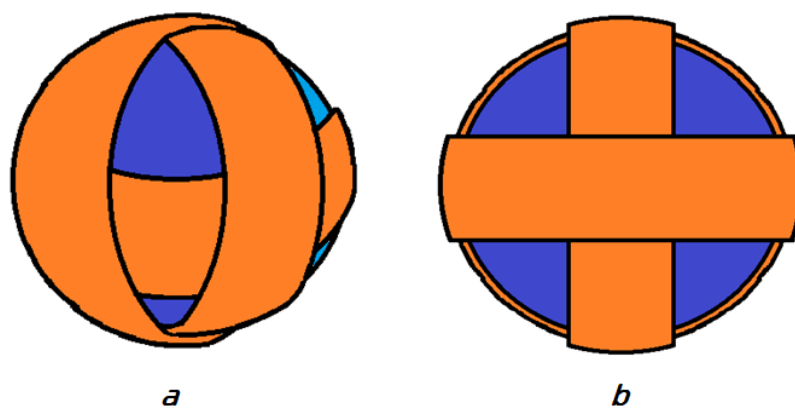
Σχήμα 126. Κυλινδρικός αισθητήρας ολοκληρωμένου πολλαπλών Hall.

Στο Σχήμα 126, η μαύρη περιοχή υποδεικνύει το IC πολλαπλών αισθητήρων Hall. Επίσης, η κλειστή κίτρινη γραμμή υποδεικνύει τη διαδρομή της μαγνητικής ροής για κάθε έναν από τους συμπεριλαμβανόμενους αισθητήρες Hall. Οι κόκκινες και μπλε περιοχές υποδεικνύουν τον Βόρειο και τον Νότιο πόλο ενός PM αντίστοιχα, το σκούρο γκρι υποδηλώνει το φερρομαγνητικό υλικό του αισθητήρα που σχηματίζει το μαγνητικό κύκλωμα, ενώ το ανοιχτό γκρι δείχνει το υπό εξέταση υλικό.

5.3. Γεννήτρια Συγκομιδής Ενέργειας 3D

5.3.1. Γενικά

Εξετάζοντας σε βάθος την λειτουργία της γεννήτριας συγκομιδής ενέργειας της Παραγράφου 4.2.2 φαίνεται ότι, αν και ικανοποιεί τις ενεργειακές απαιτήσεις αυτής της εφαρμογής, η απόδοσή της θα μπορούσε να βελτιωθεί επανεξετάζοντας το σχεδιασμό της. Αυτό συμβαίνει επειδή α) η αδρανειακή μάζα μέσα στη μικρογεννήτρια υπόκειται σε εσωτερική τριβή η οποία είναι η αιτία απώλειας ενέργειας και β) εξωτερικοί παράγοντες, όπως το ναυτικό περιβάλλον το οποίο αναφέρθηκε παραπάνω, στο οποίο υπάρχουν ταλαντώσεις σε περισσότερες από μία διαστάσεις που είναι η κινητική ενέργεια η οποία θα μπορούσε επίσης να γίνει εκμεταλλεύσιμη. Για να ληφθούν υπόψη και οι δύο αυτοί λόγοι, προτείνεται ένας σφαιρικός σχεδιασμός όπως φαίνεται στο Σχήμα 127.



Σχήμα 127. Σχέδιο γεννήτριας συγκομιδής ενέργειας τριών διαστάσεων: a) πλάγια όψη, b) πρόσοψη.

Με αυτόν τον προτεινόμενο σχεδιασμό, ο κυλινδρικός σωλήνας της γεννήτριας συγκομιδής ενέργειας αντικαθίσταται με μια σφαίρα με τρία πηνία τυλιγμένα γύρω του για να ληφθούν υπόψη και οι τρεις χωρικές διαστάσεις. Λειτουργώντας ως αδρανειακή μάζα, ένα σύνολο μόνιμων μαγνητών, παρόμοιο με την αρχική γεννήτρια, μόνο που αντί να αιωρούνται θα επικαλύπτονταν με ελαστικό υλικό το οποίο θα επέτρεπε την αναπήδηση στα εσωτερικά τοιχώματα της σφαίρας μέσω ελαστικής κρούσης.

Προχωρώντας αυτόν τον σχεδιασμό και δεδομένου ότι η συχνότητα της εξωτερικής δόνησης θα ήταν τυπικά διαφορετική σε κάθε χωρική διεύθυνση, το σφαιρικό σχήμα θα μπορούσε να αντικατασταθεί με ένα ελλειψοειδές. Το μήκος του ελλειψοειδούς σε κάθε διεύθυνση θα πρέπει να προσδιοριστεί πειραματικά, για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση, λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος της αδρανειακής μάζας, το μήκος κάθε πηνίου και την εξωτερική συχνότητα της ταλάντωσης.

Βιβλιογραφία

- [1] E. M. Purcell, *Electricity and Magnetism*, New York City: Mc Graw-Hill, 1985.
- [2] R. P. Feynman, R. B. Leighton και M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics. Vol. 2*, Los Angeles: California Institute of Technology, 1963.
- [3] M. Kimball και J. Schwinger, *Electromagnetic Radiation: Variational Methods, Waveguides and Accelerators*, Berlin: Springer Science & Business Media, 2006.
- [4] E. Hristoforou, *Magnetic Effects in Sensing Applications, lecture notes*, Athens: National Technical University of Athens, unpublished.
- [5] S. Chikazumi, *Physics of ferromagnetism*, Oxford: Oxford University Press, 2009.
- [6] Π. Παττακός, *Ανάπτυξη Αισθητήρα Μαγνητικής Διαπερατότητας, Μεταπτυχιακή Εργασία*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2019.
- [7] A. Ktena, M. Hasicic, F. J. G. Landgraf, E. Moudilou, S. Angelopoulos και E. Hristoforou, «On the use of differential permeability and magnetic Barkhausen Noise Measurements for Magnetic NDT Applications.,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 546, 168898, 2022.
- [8] D. K. Rao και V. Kuptsov, «Effective Use of Magnetization Data in the Design of Electric Machines with Overfluxed Regions.,» *IEEE Trans. Magn.*, 51, p. 1–9, 2015.
- [9] R. Ewning, *Properties of Materials: Anisotropy, Symmetry, Structure*, Oxford University Press, 2005.
- [10] E. Hristoforou, A. Ktena και S. Gong, «Magnetic Sensors: Taxonomy, Applications, and New Trends,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 55, αρ. 7, July 2019.
- [11] C. A. Grimes, E. C. Dickey και M. V. Pishko, *Επιμ., Encyclopedia of Sensors*, Stevenson Ranch, California: American Scientific Publishers, 2005.

- [12] R. D. Popovic, S. Dimitrijevic, S. Spacic και R. S. Popovic, «High-accuracy teslameter with thin high-resolution three-axis Hall probe,» *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, αρ. 98, pp. 407-413, 2017.
- [13] J. E. Lenz, «A Review of Magnetic Sensors,» *Proceedings of the IEEE*, τόμ. 78, αρ. 6, pp. 973-989, 1990.
- [14] H. Chiriac, E. Hristoforou, M. Neagu, M. Pieptanariu και F. G. Castano, «Linear Variable Differential Transformer Sensor using Fe-rich Amorphous Wires as Active Core,» *J. Appl. Phys.*, 87, pp. 5344-5346, 2000.
- [15] A. Stupakov, O. Perevertov και V. Zablotskii, «Dynamical properties of magnetic barkhausen noise in a soft microalloyed steel,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(1), 7029211, 2015.
- [16] E. Hristoforou και A. Ktena, «Magnetostriction and magnetostrictive materials for sensing applications,» *J. Magn. Magn. Mater.*, τόμ. 316, pp. 372-378, 2007.
- [17] Y. Ghen , J. E. Snyder, C. R. Schwichtenberg και K. W. Dennis, «Metalbonded Co-Ferrite Composites for Magnetostrictive Torque Sensor Applications,» *IEEE Transactions on Magnetics*, pp. 3652-3654, 1999.
- [18] H. N. Berntram, «Linear Signal Analysis of Shielded AMR and Spin Valve Heads,» *IEEE Trans. Magn.*, αρ. 31(6), pp. 2573-2578, 1995.
- [19] J. M. Daughton και Y. J. Chen, «GMR Materials for Low Field Applications,» *IEEE Trans. Magn.*, 29(6), , pp. 2705-2710, 1993.
- [20] L. V. Panina, K. Mohri, T. Uchiyama, M. Noda και K. Bu, «Giant Magneto-Impedance in Co-Rich Amorphous Wires and Films,» *IEEE Trans. Magn.*, 31(2), pp. 1249-1260, 1995.
- [21] L. P. Shen, T. Uchiyama, K. Mohri και E. Kita, «Sensitive stress-impedance micro sensor using amorphous magnetostrictive wire,» *IEEE Trans. Magn.*, 33(5), pp. 3355-3357, 1997.

- [22] D. E. Heim, J. Tsang, V. S. Speriosu, B. A. Gurney, M. L. Williams και R. E. Fontana, «Design and Operation of Spin Valve Sensors,» *IEEE Transactions on Magnetics* 30, pp. 316-321, 1994.
- [23] A. V. Svalov, I. R. Aseguinolaza, A. Garcia - Arribas, I. Orue, J. M. Barandiaran, J. Alonso, M. L. Fernandez - Gubieda και G. V. Kurlyandskaya, «Structure and magnetic properties of thin permalloy films near the transcritical state,» *IEEE Transactions on Magnetics*, pp. 333-336, 2010.
- [24] N. D. Papadopoulos, H. S. Karayianni, P. E. Tsakiridis, M. Perraki, E. Sarantopoulou και E. Hristoforou, «MOCVD Cobalt Oxide Deposition from Inclusion Complexes: Decomposition Mechanism, Structure, and Properties, p. 5-13,» *Journal of the Electrochemical Society*, 158, pp. 5-13, 2011.
- [25] L. Mädler, H. K. Kammler, R. Mueller και S. Pratsini, «Controlled synthesis of nanostructured particles by flame spray pyrolysis,» *Journal of Aerosol Science* 33(2), pp. 369-389, 2002.
- [26] H. Liu και P. D. Ye, «MoS₂ dual-gate MOSFET with atomic-layer-deposited Al₂O₃ as top-gate dielectric,» *IEEE Electron Device Letters* 33(4), 6163344, pp. 546-548, 2012.
- [27] E. Aivazoglou, E. Metaxa και E. Hristoforou, «Microwave-assisted synthesis of iron oxide nanoparticles in biocompatible organic environment,» *AIP Advances*, 8(4), 048201, 2018.
- [28] J. M. Barandiaran, M. Vazquez, A. Hernando, G. Rivero και J. Gonzalez, «Distribution of the magnetic anisotropy in amorphous alloys ribbons,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 25(5), pp. 3330-3332, 1989.
- [29] L. Kraus, J. Bydžovský και P. Švec, «Continuous stress annealing of amorphous ribbons for strain sensing applications,» *Sensors and Actuators, A: Physical*, 106(1-3), pp. 117-120, 2003.
- [30] H. Chiriac, T.-A. Óvári και C.-S. Marinescu, «Comparative study of the giant magneto-impedance effect in cofesib glass-covered and coldrawn amorphous wires,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 33(5), pp. 3352-3354, 1997.

- [31] V. Zhukova, V. Rodionova, L. Fetisov, A. Grunin, A. Goikhman, A. Torcunov, A. Aronin, G. Abrosimova, A. Kiselev, N. Perov, A. Granovsky, T. Ryba, S. Michalik, R. Varga και A. Zhukov, «Magnetic properties of Heusler-type microwires and thin films,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 50 (11), p. 2014.
- [32] H. Chiriac και T.-A. Óvári, «Amorphous glass-covered magnetic wires: Preparation, properties, applications,,» *Progress in Materials Science*, 40(5), pp. 333-407, 1996.
- [33] S. Corodeanu, H. Chiriac, N. Lupu και T.-A. Óvári, «Magnetic characterization of submicron wires and nanowires using digital integration techniques,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(10), pp. 3513-3515, 2011.
- [34] E. Hristoforou και R. Reilly, «Nonuniformity in Amorphous Ribbon Delay Lines After Stress and Current Annealing,» *J. Appl. Phys.*, 69, pp. 5008-5010, 1991.
- [35] X. Zhuang, M. Lam Chok Sing και C. Dolabdjian, «Investigation of the near-carrier noise for strain-driven ME laminates by using crosscorrelation techniques,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(1), pp. 120-123, 2013.
- [36] E. Hristoforou, H. Hauser και P. D. Dimitropoulos, «On a New Principle of Smart Multi-Sensor Based on Magnetic Effects,» *IEEE Sensors*, 6, pp. 372-379, 2006.
- [37] P. Ripka, M. Pribil, V. Schaffer και M. Snoeij, «Flugate Sensor with Pulse Feedback,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(5), 7398030, 2016.
- [38] M. Butta και I. Sasada, «Orthogonal fluxgate with annealed wire core,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(1), 6392355, pp. 62-65, 2013.
- [39] C. Petridis, P. D. Dimitropoulos και E. Hristoforou, «New Magnetic Field Sensor Based on Combined Flux-Gate/Hall-Effect Arrangement,» *IEEE Sensors Journal*, 9, pp. 128-134, 2009.
- [40] M. Vázquez, D. X. Chen, A. Hernando και C. Gómez-Polo, «Magnetic Bistability of Amorphous Wires and Sensor Applications,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 30(2), pp. 907-912, 1994.

- [41] P. D. Dimitropoulos, J. N. Avaritsiotis και E. Hristoforou, «A novel micro-Fluxgate sensor based on the AMR effect of ferromagnetic film resistors,» *Sensors and Actuators A*, 107, pp. 238-247, 2003.
- [42] L. Baril, M. Nichols και A. Wallash, «Degradation of GMR and TMR recording heads using very-short-duration ESD transients,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 38(5), pp. 2283-2285, 2002.
- [43] K. Mohri, T. Uchiyama, L. P. Shen, C. M. Cai, L. V. Panina, Y. Honkura και M. Yamamoto, «Amorphous wire and CMOS IC-based sensitive micromagnetic sensors utilizing magnetoimpedance (MI) and stressimpedance (SI) effects,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 38, pp. 3063-3068, 2002.
- [44] J. Gutierrez, A. Lasheras, J. M. Barandiaran, R. Goncalves, P. Martins και S. Lanceros-Mendez, «Induced magnetoelectric effect driven by magnetization in BaFe₁₂O₁₉-P(VDF-TrFE) Composites,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11), 2015.
- [45] M. Yoshikawa, E. Kitagawa, T. Nagase, T. Daibou, M. Nagamine, K. Nishiyama, T. Kishi και H. Yoda, «Tunnel magnetoresistance over 100% in MgO-based magnetic tunnel junction films with perpendicular magnetic L10-FePt electrodes,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(11), pp. 2573-2576, 2008.
- [46] [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.mitutoyo/product-4906-594220.html>.
- [47] E. Hristoforou, «Magnetostrictive Delay Lines: Engineering Theory and Sensing Applications,» *Meas. Sci. & Technol.*, 14, pp. R15-R47, 2003.
- [48] E. Hristoforou και D. Niarchos, «Amorphous Wires in Displacement Sensing Techniques,» *J. Magn. Magn. Mat.*, 116, pp. 177-188, 1992.
- [49] E. Hristoforou και R. E. Reilly, «Displacement Sensors using Soft Magnetostrictive Alloys,» *IEEE Trans. Mag.*, 30, pp. 2728-2733, 1994.
- [50] E. Hristoforou, «New Position Sensor Based on the Magnetostrictive Delay Line Principle,» *Sensor Letters*, 7, pp. 303-309, 2009.

- [51] E. Hristoforou και R. E. Reilly, «A Digitiser Based on Reflections in Delay Lines,» *J. Appl. Phys.*, 70, pp. 4577-4580, 1991.
- [52] Y. Kano, S. Hasebe, C. Huang, T. Yamada και M. Inubuse, «Linear Position Detector with Rod Shape Electromagnet,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 26(5), pp. 2023-2025, 1990.
- [53] B. Augustyniak, L. Piotrowski, M. Chmielewski, K. Kosmas και E. Hristoforou, «Barkhausen noise properties measured by different methods for deformed armco samples,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(2), 5393170, pp. 544-547, 2010.
- [54] P. Vourna, A. Ktena, P. Tsarabaris και E. Hristoforou, «Magnetic residual stress monitoring technique for ferromagnetic steels,» *Metals*, 8(8), 592, 2018.
- [55] L. Piotrowski, B. Augustyniak, M. Chmielewski, E. Hristoforou και K. Kosmas, «Evaluation of barkhausen noise and magnetoacoustic emission signals properties for plastically deformed armco iron,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(2), 5393171, pp. 239-242, 2010.
- [56] Y. Takahashi, C. Matsumoto και S. Wakao, «Large-scale and fast nonlinear magnetostatic field analysis by the magnetic moment method with the adaptive cross approximation,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(4), pp. 1277-1280, 2007.
- [57] J. Bydžovský, M. Kollár, L. Kraus και P. Švec, «Linearization of two-coil magnetoelastic sensor transfer characteristic,» *Journal of Electrical Engineering*, 55(10), pp. 62-65, 2005.
- [58] E. Hristoforu, H. Chririac, M. Neagu και I. Darie, «New Load Cells and Torque Meters Based on Soft Magnetic Amorphous Alloy Wires,» *Sensors and Actuators A*, 68, pp. 307-315, 1998.
- [59] A. Malec, G. Kokkinis, C. Haiden και I. Giouroudi, «Biosensing system for concentration quantification of magnetically labeled e. Coli in water samples,» *Sensors* 18(7), p. 2250, 2018.

- [60] G. Herzer, «Soft magnetic nanocrystalline materials,,» *Scripta Metallurgica et Materiala*, 33(10-11), pp. 1741-1756, 1995.
- [61] Θ. Ματίκας και Δ. Αγγέλης, Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι, ΑΘΗΝΑ: ISBN: 978-960-603-120-5 ΣΕΑΒ, 2015.
- [62] J. R. Thomas, The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis., Hoboken, New Jersey, U.S.A.: Prentice-Hall, 1987.
- [63] Q. Ge, B. Kou, Y. Zhang, Z. Zhang, X. Du, J. Luo και L. Zhang, «3-D Electromagnetic Force Characteristics and Modeling of Double-Sided Air-Cored Superconducting Linear Synchronous Motor for EDS Train,» *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, pp. 3411-3426, 2022.
- [64] X. Zhao, B. Kou, C. Huang και L. Zhang, «A flux-intensifying permanent magnet synchronous motor and its magnetic equivalent circuit model,» *Energy Reports, Volume 8, Supplement 13*, pp. 798-806, 2022.
- [65] J. Seo, «A Novel Analysis Method for Flatted Single-Layer Interior Permanent Magnet Machines Having Overhang Structure,» *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 8, pp. 1-7, 2022.
- [66] H. Yang, W. Liu, H. Zheng, H. Lin, Z. Q. Zhu, F. Peng, Y. Li, S. Lyu και X. Huang, «A Novel Delta-Type Hybrid-Magnetic-Circuit Variable Flux Memory Machine for Electrified Vehicle Applications,» *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 3, pp. 3512-3523, 2022.
- [67] J. Wu, X. Zhu, D. Fan, Z. Xiang, L. Xu και L. Quan, «A Robust Optimization Design Approach for Hybrid PM Machine Considering Asymmetric Uncertainties of PMs,» *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 8, pp. 1-7, 2022.
- [68] H. Ehya, A. Nysveen και J. A. Antonino-Daviu, «Advanced Fault Detection of Synchronous Generators Using Stray Magnetic Field,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 11, pp. 11675-11685, 2022.

- [69] J. Liu, C. Di και X. Bao, «An Efficient Air-Gap Flux Density Analysis Method for the Design of Induction Machines,» *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 8, pp. 1-6, 2022.
- [70] A. Rebhaoui, S. A. Randi, C. Demian και J. P. Lecoïnte, «Analysis of Flux Density and Iron Loss Distributions in Segmented Magnetic Circuits Made With Mixed Electrical Steel Grades,» *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 8, pp. 1-11, 2022.
- [71] J. Xing, W. Yu, Y. Song, Y. Zhang και Z. Dai, «Design and analysis of 12 MW offshore wind turbine,» *Energy Reports*, Volume 8, Supplement 10, pp. 375-383, 2022.
- [72] J. Yang, Q. Li, S. Huang, C. Ye, P. Liu, B. Ma και L. Wang, «Design and Analysis of a Novel Permanent Magnet Homopolar Inductor Machine With Mechanical Flux Modulator for Flywheel Energy Storage System,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.69. no. 8, pp. 7744-7755, 2022.
- [73] Z. Yang, Q. Ding, X. Sun και C. Lu, «Design and Analysis of a Three-Speed Wound Bearingless Induction Motor,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 12529-12539, 2022.
- [74] H. Guo, X. He, J. Xu, W. Tian, G. Sun, L. Ju και D. Dehong Li, «Design of an Aviation Dual-Three-Phase High-Power High-Speed Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Starter-Generator With Antishort-Circuit Ability,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 10, pp. 12619-12635, 2022.
- [75] G. Qiao, P. Zheng, M. Wang, F. Liu και Y. Liu, «Design, modelling and analysis of a hybrid-magnet variable-flux PMSM with variable series-parallel magnetic circuit,» *Energy Reports*, Volume 8, Supplement 5, pp. 1200-1209, 2022.
- [76] M. Skowron, T. Orłowska-Kowalska και C. T. Kowalski, «Detection of Permanent Magnet Damage of PMSM Drive Based on Direct Analysis of the Stator Phase Currents Using Convolutional Neural Network,» in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 136650-13675, 2022.

- [77] L. Chen, Y. Zhu, J. Ling και M. Zhang, «Development and Characteristic Investigation of a Multidimensional Discrete Magnetostrictive Actuator,» *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 27, no. 4, pp. 2071-2079, 2022.
- [78] M. Ghods, H. Gorginpour, M. A. Bazrafshan και M. S. Toulabi, «Equivalent Magnetic Network Modeling of Dual-Winding Outer-Rotor Vernier Permanent Magnet Machine Considering Pentagonal Meshing in the Air-Gap,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 12587-12599, 2022.
- [79] W. Liu, H. Yang, H. Lin και X. Liu, «Influence of Low-Coercive-Force Magnet Property on Electromagnetic Performance of Variable Flux Memory Machine,» *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 8, pp. 1-6, 2022.
- [80] J. Wang, M. Cheng, W. Tian και Y. Jiang, «Iron Loss Calculation for FSPM Machine With the PWM Inverter Supply Based on General Airgap Field Modulation Theory,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 12517-12528, 2022.
- [81] M. Hashem, M. Abdel-Salam, M. Nayel και M. El-Mohandes, «Mitigation of voltage sag in a distribution system during start-up of water-pumping motors using superconducting magnetic energy storage: A case study,» *Journal of Energy Storage*, Vol. 55, part A., 2022.
- [82] W. -W. Huang, L. Li, Z. Zhu και L. -M. Zhu, «Modeling, design and control of normal-stressed electromagnetic actuated fast tool servos,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 178, 2022.
- [83] C. Ye, D. Yu, K. Liu, Y. Dai, C. Deng, J. Yang και J. Zhang, «Research of a Stator PM Excitation Solid Rotor Machine for Flywheel Energy Storage System,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 12140-12151, 2022.
- [84] J. Zhang, Z. Huang, F. Dong και X. Xu, «Strategies for improving the force performance of a superconducting linear synchronous motor,» *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Volume 601, 2022.
- [85] M. Vatani, A. Ghaffarpour, M. A. J. Kondelaji και M. Mirsalim, «Study of a Modular Toothed Linear Hybrid Reluctance Motor With Permanent Magnets in Translator

Slots,» *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 3, pp. 3554-3567, 2022.

- [86] Y. Zhong, H. Lin, J. Wang, R. Tu, H. Yang, S. Lyu και X. Liu, «Variable Time Magnetization Current Trajectory Control Method for Variable Flux Memory Machines,» *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no.3, pp. 3100-3110, 2022.
- [87] A. A. S. Mohamed, A. A. Shaier, H. Metwally και S. I. Selem, «An Overview of Dynamic Inductive Charging for Electric Vehicles.,» *Energies*, 15, 5613,, 2022.
- [88] H. Wang και K. W. E. Cheng, «A Dual-Receiver Inductive Charging System for Automated Guided Vehicles.,» *IEEE Trans. Magn.*, 58, pp. 1–5,, 2022.
- [89] Z. Shi, Y. Tang, Y. Zhang, Y. Guo, H. Sun και L. Jiang, «A Secondary-Side Semiactive 3-Phase Interleaved Resonant Converter Employing Multimode Modulation Scheme for Fast EV Charger Applications.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37, p. 13385–13397, 2022.
- [90] R. R. Khorasani, H. M. Jazi, N. R. Chaudhuri, A. Khoshkbar-Sadigh, M. Shaneh, E. Adib και P. Wheeler, «An Interleaved Soft Switched High Step-up Boost Converter with High Power Density for Renewable Energy Applications.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37, pp. 13782-139798, 2022.
- [91] H. Zhao και H. Ouyang, «A vibro-impact triboelectric energy harvester with a magnetic bistable mechanism and grating-patterned films for dual power enhancement.,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 178, 109318, 2022.
- [92] H. Jung, Y. Sharma και L. Zuo, «Digitally Controlled Power Management Circuit with Dual-Functioned Single-Stage Power Converter for Vibration Energy Harvesting.,» *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 10, p. 3873–3882, 2022.
- [93] B. Sanusi και Z. Ouyang, «Integrated Inductor Design for a Highly Compact Embedded Battery Charger.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37, p. 8873–8885, 2022.
- [94] W. Funakoshi, T. Hirayama και S. Kawabata, «Measurement of AC Loss Characteristics of HTS Sample Coils under the Conditions Assumed for Use in Power Electronics Devices.,» *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, p. 1–4, 2022.

- [95] J. Shi, D. Lin, M. Liao, W. Yang, Z. Zhang, X. Zou, Y. Xu και L. Ren, «The Influence of SMES Magnet Operation Parameters on Voltage Distribution Characteristic.,» *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, p. 1–5, 2022.
- [96] M. Wang, «A Novel Mathematical Nonlinear PMSM Realization Method for Electric Machine Emulator.,» *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 10, p. 4171–4181, 2022.
- [97] H. Xu, H. Kamada, S. Nomura, H. Chikaraishi, H. Tsutsui και T. Isobe, «A Simple Calculation Method for Center Magnetic Flux Density of a Magnetic Core Electromagnet with a Wide Air Gap.,» *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, pp. 1-6, 2022.
- [98] K. Daiho, A. Ishiyama και S. Noguchi, «AC Loss Evaluation of NI REBCO Pancake Coils in External Low-Frequency Magnetic Field.,» *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, p. 1–5, 2022.
- [99] U. Nemoto, K. Tsuyoshi, M. Kitamura, A. Ishiyama και S. Noguchi, «Numerical Evaluation of Electromagnetic Behavior of Multi-Stacked No-Insulation REBCO Coil System for Whole-Body MRIs and Medical Cyclotrons.,» *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, p. 1–5, 2022.
- [100] P. Naderi και R. Ghandehari, «Comprehensive Analysis on a New Type VR-Resolver with Toroidal Windings under Healthy and Eccentric Cases.,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 69, p. 13754–13762, 2022.
- [101] G. Messina, L. Morici, A. Di Zenobio, L. Muzzi, S. Turtu και G. Ramogida, «Electromagnetic Analysis of DTT Poloidal Field Coils during an Electrical Transient.,» *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, p. 1–5, 2022.
- [102] C. Petrone, S. Sorti, E. Dalane, B. Mehl και S. Russenschuck, «Induction-Coil Measurement System for Normal- and Superconducting Solenoids.,» *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, p. 1–5, 2022.
- [103] J.-H. Lee, Y.-C. Kwon και S.-K. Sul, «High-Fidelity Induction Motor Simulation Model Based on Finite Element Analysis.,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 69, p. 9872–9883, 2022.

- [104] Z. Li, X. Huang, X. Xu, Z. Chen, Z. Jiang, L. Wu, T. Shi και J. Zhang, «Nonlinear Analytical Model for Predicting Magnet Loss in Surface-Mounted Permanent-Magnet Motors.,» *IEEE Trans. Magn.*, 58, p. 1–5, 2022.
- [105] Y. Miyake, Y. Nakai, R. Inoue, S. Kim, H. Ueda, S. Noguchi, T. Watanabe, S. Nagaya, M. Fukuda και A. Ishiyama, «Numerical Evaluation on Mechanical Behavior of No-Insulation REBCO Pancake Coils in Small-Scale Model of Skeleton Cyclotron.,» *IEEE Trans. Appl. Suoercond.*, 32, pp. 1-5, 2022.
- [106] Y. Nakai, Y. Miyake, R. Inoue, S. Kim, H. Ueda, S. Noguchi, T. Watanabe, S. Nagaya, M. Fukuda και A. Ishiyama, «Numerical Evaluation on Quench Behavior of No-Insulation REBCO Coil System in Small-Scale Model of Skeleton Cyclotron.,» *IEEE Trans. Appl. Supercond*, 32, pp. 1-5, 2022.
- [107] W. Zhao, Y. Lu, D. Zhou, C. Bai, Q. Li και C. Cai, «Numerical Study on Thermal Stability of No-Insulation Coils Using a Three-Dimensional Finite-Element Model.,» *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, p. 1–10, 2022.
- [108] V. Z. Faradonbeh και E. Amiri, «Open-Circuit Electromagnetic Analysis of Interior Permanent Magnet Machines with Arbitrary Rotor Frame Using a 2-D Analytical Model.,» *IEEE Trans. Magn.*, 58, p. 1–12, 2022.
- [109] G. Zeng, Y. Xiangyu, Y. Haoyong, Y. Jing, S. Zhao, J. Cao, Q. Chen, M. Gao και Z. Zhang, «Sensorless Control for Unsymmetrical Bistable Multimagnetic Circuit Permanent Magnet Actuator Based on High-Frequency Signal Injection and High-Pass Filter Circuit.,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 69, pp. 10859-10869, 2022.
- [110] Y. Sindler και S. Lineykin, «Static, Dynamic, and Signal-to-Noise Analysis of a Solid-State Magnetoelectric (Me) Sensor with a Spice-Based Circuit Simulator.,» *Sensors (Basel)*, 22, p. 5514, 2022.
- [111] L. Tang, W. Chen και Z. Xu, «The Self-Correcting Control Strategy of a Single Flux Linkage Closed Loop for a Contactor.,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 69, p. 11521–11530, 2022.

- [112] S. Girfan, Z. Peng, B. Sreenivas, Z. Ji-Cheng και B. Nadgorny, «Magnetization–structure–composition phase diagram mapping in Co-Fe-Ni alloys using diffusion multiples and scanning Hall probe microscopy.,» *Scientific Reports*. 12., 2022.
- [113] C. Kittel, Introduction to Solid State Physics: International Edition; 8th ed., Brisbane, QLD, Australia,: John Wiley and Sons (WIE), 2005.
- [114] M. Takagishi, N. Narita, Y. Nakagawa, T. Nagasawa, R. Osamura, T. Maeda και K. Yamada, «Microwave Assisted Magnetic Recording: Physics and Application to Hard Disk Drives.,» *J. Magn. Magn. Mater.*, 563, 169859, 2022.
- [115] S. E. Rannala, A. Meo, S. Ruta, W. Pantasri, R. W. Chantrell, P. Chureemart και J. Chureemart, «Models of Advanced Recording Systems: A Multi-Timescale Micromagnetic Code for Granular Thin Film Magnetic Recording Systems.,» *Comput. Phys. Commun.*, 279, 2022.
- [116] S. Kieffer, «ECOVAL: Ecological Validity of Cues and Representative Design in User Experience Evaluations,» *AIS Transactions on Human-Computer Interaction*. 9 (2), p. 149–172, 2017.
- [117] X. Liu, Y. Dai και H. Xie, «A studyforrest extension, MEG recordings while watching the audio-visual movie Forrest Gump,» *Sci Data* 9, 206, 2022.
- [118] R. Wood, «Shingled Magnetic Recording (SMR) and Two-Dimensional Magnetic Recording (TDMR).,» *J. Magn. Magn. Mater.*, 561, 169670, 2022.
- [119] G. Wautischer, C. Abert, F. Bruckner, F. Slanovc και D. Suess, «Topology Optimization of a Heat-Assisted Magnetic Recording Write Head to Reduce Transition Curvature Using a Binary Optimization Algorithm Utilizing the Adjoint Method.,» *Sci. Rep.*, 12, 13986, 2022.
- [120] G. Li και X. Wu, «A 98.4% Efficiency 380V-12V DCX With 1.3kW/In3 Power Density Using Low NFoM Devices and Resonant Drive Transformer,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 37, NO. 10*, pp. 12346-12356, 2022.

- [121] H. Li, H. Du, Y. Zeng, Z. Qiu, X. Jiang και Z. Chen, «A Modified Interleaved Capacitor Clamped DC–DC Converter with Non-Resonant Soft Switching.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37, p. 12221–12236, 2022.
- [122] F. Li, L. Wang και L. Yu, «A Novel Integrated Matrix Magnetics for Isolated Single-Stage DC–DC Converter.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37, p. 12380–12390, 2022.
- [123] J. Yao, K. Li, K. Zheng και A. Abramovitz, «A Unified Modeling Approach to Tapped Inductor Converters Accounting for the Leakage Inductance Effects.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37, p. 13047–13059, 2022.
- [124] G. Qiu, L. Ran, H. Feng, H. Jiang, H. Mao και J. Wei, «A High-Precision Sensor Based on AC Flux Cancellation for DC Bias Detection in Dual Active Bridge Converters.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37, p. 13513–13524, 2022.
- [125] H. Liu, Y. Wang, P. Wheeler, X. Zhou και K. Zhu, «A Voltage Spike Suppression Strategy Based on DE-Re-Coupling Idea for the Three-Phase High-Frequency Isolated Matrix-Type Inverter.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37, p. 9024–9034, 2022.
- [126] S. He, J. Li και Y. Wang, «Analysis of Electromagnetic Transient Characteristics on the Winding of UHVDC Converter Transformers Based on an Improved Broadband Model.,» *IEEE Trans. Magn.*, 58, p. 1–5, 2022.
- [127] M. Jin, W. Chen, Y. Zhao, T. Wen, J. Wu, X. Wu και Q. Zhang, «Coupled Magnetic-Structural Modeling of Power Transformer for Axial Vibration Analysis under Short-Circuit Condition.,» *IEEE Trans. Magn.*, 58, p. 1–9, 2022.
- [128] A. Elwakeel, N. McNeill, R. Pena-Alzola, M. Zhang και W. Yuan, «Cryogenic DC/DC Converter for Superconducting Magnet Application.,» *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, p. 1–5, 2022.
- [129] M. Song, W. Fei, C. Wang και X. Liu, «Design and Study of a Series Active Filter for the 10MW-Level High Power and High Stability DC Power Supply.,» *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, p. 1–5, 2022.

- [130] R. Phukan, D. Nam, S. Ohn, G. Mondal, S. Nielebock, D. Dong και R. Burgos, «Design of an Indirectly Coupled Filter Building Block for Modular Interleaved AC–DC Converters.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37, p. 13343–13357, 2022.
- [131] J. Wang, J. Hu, W. Pei, Z. Yang, J. Zhuang και X. Zhang, «In-Depth Design and Multiobjective Optimization of an Integrated Transformer for Five-Phase LLC Resonant Converters.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37, p. 13538–13553, 2022.
- [132] X. Chen, G. Xu, Q. Shen, Y. Sun και M. Su, «Magnetizing and Leakage Inductance Integration for Split Transformers with Standard UI Cores.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37, p. 12980–12985, 2022.
- [133] E. E. Mombello, «New Compact White-Box Transformer Model for the Calculation of Electromagnetic Transients.,» *IEEE trans. power deliv.*, 37, p. 2921–2931, 2022.
- [134] D. Chen, J. Deng, M. Li και Z. Wang, «Simplified Closed-Form Optimized Trajectories Control for a Dual Active Bridge Converter with ZVS Implementation over Whole Domain.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37,, p. 11749–11761, 2022.
- [135] J. Zhang, Y. Zhang, J. Liu, Y. Gao και X. Gao, «Variable Switching Frequency Scheme Minimizing Inductor Saturation Margin for Totem-Pole Rectifier Based on Frequency-Domain Ripple Analysis.,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 69, p. 12632–12640, 2022.
- [136] T. Chen, R. Yu και A. Q. Huang, «Variable-Switching-Frequency Single-Stage Bidirectional GaN AC–DC Converter for the Grid-Tied Battery Energy Storage System.,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 69, p. 10776–10786, 2022.
- [137] H. Qiu, T. Sakurai και M. Takamiya, «A 6.78-MHz Multiple-Transmitter Wireless Power Transfer System with Efficiency Maximization by Adaptive Magnetic Field Adder IC.,» *IEEE J. Solid-State Circuits*, 57, p. 2390–2403, 2022.
- [138] N. Ha-Van, Y. Liu, P. Jayathurathnage, C. R. Simovski και S. A. Tretyakov, «Cylindrical Transmitting Coil for Two-Dimensional Omnidirectional Wireless Power Transfer.,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 69, p. 10045–10054, 2022.

- [139] Y. J. Hwang και J. Y. Jang, «Design and Characteristic Analysis of an Inductive Link for Wireless Current Charging of a HTS Magnet,» *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, p. 1–5, 2022.
- [140] Z. Li, H. Liu, Y. Huo, J. He, Y. Tian και J. Liu, «High-Misalignment Tolerance Wireless Charging System for Constant Power Output Using Dual Transmission Channels with Magnetic Flux Controlled Inductors.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37, p. 13930–13945, 2022.
- [141] K. Sun, J. Wang, R. Burgos, D. Boroyevich, J. Stewart και N. Yan, «Design and Multiobjective Optimization of an Auxiliary Wireless Power Transfer Converter in Medium-Voltage Modular Conversion Systems.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37, p. 9944–9958, 2022.
- [142] X. Tian, K. T. Chau, W. Liu, H. Pang και C. H. T. Lee, «Maximum Power Tracking for Magnetic Field Editing-Based Omnidirectional Wireless Power Transfer.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37, p. 12901–12912, 2022.
- [143] Z. Liu, L. Wang, Y. Guo και S. Li, «Primary-Side Linear Control for Constant Current/Voltage Charging of the Wireless Power Transfer System Based on the LCC-N Compensation Topology.,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 69, p. 8895–8904, 2022.
- [144] «CubeSat Design Specification Rev. 13,» The CubeSat Program, Cal Poly SLO, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf. [Πρόσβαση 28 Δεκέμβριος 2022].
- [145] Y. Zhao, H. Yue, F. Yang και J. Zhu, «A High Thrust Density Voice Coil Actuator with a New Structure of Double Magnetic Circuits for CubeSat Deployers.,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 69, p. 13305–13315, 2022.
- [146] K. R. Jha, Z. A. P. Jibrán και S. K. Sharma, «Absorption Peak Controlled Low-Frequency Wideband Flexible FSS Absorber.,» *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 64, pp. 975–986,, 2022.

- [147] A. Musso, J. Bang, U. Bong, M. Breschi, C. Im, G. Kim, J. Kim, J. H. Park και S. Hahn, «Analysis of a No-Insulation HTS Pancake Coil Including Multiple Resistive Joints.,» *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32,, p. 1–5, 2022.
- [148] G.-W. Kim και H.-S. Choi, «Comparison and Analysis of Impedance According to the Winding Method of Superconducting Element Connected to DC Circuit Breaker.,» *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, p. 1–5, 2022.
- [149] J. DiMarco, P. Akella, G. Ambrosio, D. Assell, M. Baldini, G. Chlachidze, S. Feher, W. Ghiorso, J. Nogiec και V. Nikolic, «Magnetic Measurements of HL-LHC AUP Cryo-Assemblies at Fermilab.,» *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, p. 1–7, 2022.
- [150] D. I. Hoult και B. Bhakar, «NMR Signal Reception: Virtual Photons and Coherent Spontaneous Emission.,» *Concepts Magn. Reson.*, 9, p. 277–297, 1997.
- [151] S. Fan, Q. Zhou, K. -M. Lei, P. -I. Mak και R. P. Martins, «Miniaturization of a Nuclear Magnetic Resonance System: Architecture and Design Considerations of Transceiver Integrated Circuits.,» *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, 69,, p. 3049–3060, 2022.
- [152] X. Li, C. Lu, Z. Song, W. Ding και X. -P. Zhang, «Planar Magnetic Actuation for Soft and Rigid Robots Using a Scalable Electromagnet Array.,» *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 7, p. 9264–9270, 2022.
- [153] W. Xiaonong και H. Jingyu, «Research on Electromagnetic Relationship and Passive Electromagnetic Damping Characteristics of Superconducting Electrodynamic Maglev Train.,» *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, p. 1–18, 2022.
- [154] M. S. Mahmoud, Control Design of Electromechanical Systems. In *Advanced Control Design with Application to Electromechanical Systems.*, Amsterdam: Elsevier, 2018.
- [155] H. Zheng, Y. Song, M. Liu, F. Wang, L. Xu, L. Wang και L. Li, «Superconducting Magnet Design for a Vertical-Ring High Gradient Magnetic Separation System.,» *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, p. 1–5, 2022.
- [156] P. Borkowski, M. Bartosik, M. Rodak, A. Sienicki, F. Wojcik, B. Panev, F. Rodriguez-Mateos και A. Siemko, «Ultrafast, Redundant, and Unpolarized DC Energy Extraction

Systems for the Protection of Superconducting Magnet Circuits.,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 69, pp. 9895-9904, 2022.

- [157] Y. Wu και H. Yu, «A Low-Cost Novel Method to Fabricate Integrated Magnetic Core Inductor Embedded in Organic Substrate.,» *IEEE Trans. Magn.*, 58,, p. 1–5, 2022.
- [158] Z. Yu, X. Yang, G. Wei, Y. Zhou, Y. Xiao, M. Qin, J. Wu, K. Wang, W. Chen και L. Wang, «A Novel Pyramid Winding for PCB Planar Inductors with Fewer Copper Layers and Lower AC Copper Loss.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37, p. 11461–11468, 2022.
- [159] Y. Wang, Y. Qin, X. Chen, Q. Tang, T. Zhang και L. Wu, «Absolute Inductive Angular Displacement Sensor for Position Detection of YRT Turntable Bearing.,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 69, p. 10644–10655, 2022.
- [160] R. Li, X. Ding, Q. Liu και J. Liu, «Design and Research of Vertical Cross Force Sensor.,» *IEEE Sens. J.*, 22,, p. 15865–15875, 2022.
- [161] N. Leuning, B. Schauerte, S. Schwestern και K. Hameyer, «Loss Parameter Identification after Cutting for Different Non-Oriented Electrical Steel Grades.,» *IEEE Trans. Magn.*, 58, p. 1–5, 2022.
- [162] J. Kim, Y. Ham και H. Park, «Underground Metal Pipeline Localization Using Low-Cost Wireless Magnetic Sensors Mounted on an Excavator.,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 69,, p. 10674–10683, 2022.
- [163] K. Sun, P. Qi, X. Tao, W. Zhao και C. Ye, «Vector Magnetic Field Imaging with High-Resolution TMR Sensor Arrays for Metal Structure Inspection.,» *IEEE Sens. J.*, 22,, p. 14513–14521, 2022.
- [164] D. P. Acharjya και M. K. Geetha, *Internet of Things: Novel Advances and Envisioned Applications.*, Springer International Publishing., 2017.
- [165] L. K. Aidasani, H. Bhadkamkar και A. K. Kashyap, «IoT: The Kernel of Smart Cities.,» *In ProceedingsThird International Conference on Science Technology Engineering & Management (ICONSTEM), IEEE,, 2017.*

- [166] W. Z. Khan, M. H. Rehman, H. M. Zangoti, M. K. Afzal, N. Armi και K. Salah, «Industrial Internet of Things: Recent Advances, Enabling Technologies and Open Challenges.,» *Comput. Electr. Eng.*, pp. 81, 106522, 2020.
- [167] K. J. Kyriakopoulos, *Intelligent Control Systems & Robotics.*, Lecture Notes.
- [168] G. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems.*, Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2004.
- [169] M. M. Radmanesh, *The Gateway to Understanding: Electrons to Waves and Beyond*, Bloomington, Indiana: AuthorHouse, 2005.
- [170] T. 3.5, «PJRC,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.pjrc.com/store/teensy35.html>. [Πρόσβαση 19 Ιανουάριος 2023].
- [171] I. Kepco, «Dc Power Supplies/Dc Power Supply: Bipolar, Operational Amplifier, Rack Mount or Bench, Gpib Scpi Analog Programmable, Digital, Linear - Series Bop,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.kepcopower.com/bop.htm>. [Πρόσβαση 19 Ιανουάριος 2023].
- [172] Μ. Κ. Παπαϊωάννου, «Ανάπτυξη Ηλεκτρονικού Αισθητήρα Επιτήρησης Υγείας Χάλυβα. Διπλωματική Εργασία.,» Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο., Αθήνα., 2020.
- [173] A. Ktena, E. Hristoforou, G. J. L. Gerhardt, F. P. Missell, F. J. G. Landgraf, D. L. Rodrigues και M. Alberteris-Campos, «Barkhausen noise as a microstructure characterization tool.,» *Physica B: Condensed Matter*, 435, p. 109–112, 2014.
- [174] I. Texas Instruments, «Integrator circuit Analog Engineer’s Circuit: Amplifiers,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.ti.com/lit/an/sboa275a/sboa275a.pdf?ts=1674730476184&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [Πρόσβαση 27 Ιανουάριος 2023].
- [175] «Hitachi Metals, Ltd., Metglas® AMCC Series Cut Core, Power Electronics Components Catalog,» 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.hitachimetals.com/materials-products/amorphous->

nanocrystalline/powerlite-c-cores/documents/AMCC-F3CC-series-Cut-Cores_hl-fm27-c.pdf. [Πρόσβαση 20 June 2022].

- [176] Δ. Παπαγγελής, «Χαρακτηρισμός δοκιμίων χάλυβα με χρήση μαγνητικού αισθητήρα. Μεταπτυχιακή εργασία.,» 2022..
- [177] «www.keysight.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-05520/data-sheets/5992-1965.pdf>. [Πρόσβαση 8 Φεβρουάριος 2023].
- [178] S. Angelopoulos, D. Misiaris, G. Banis, K. Liang, P. Tsarabaris, A. Ktena και E. Hristoforou, «Steel health monitoring device based on Hall sensors.,» *J. Magn. Magn. Mater.*, pp. 515, 167304, 2020.
- [179] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://docs.rs-online.com/11cc/A700000008414540.pdf>. [Πρόσβαση 31 Ιανουάριος 2023].
- [180] R. Mischianti, «ESP32 WeMos LOLIN32 High Resolution Pinout and Specs.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.mischianti.org/2021/02/21/esp32-wemos-lolin32-high-resolution-pinout-and-specs/>. [Πρόσβαση 30 Νοέμβριος 2022].
- [181] Texas Instruments, «ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I 2 C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs with Internal Reference, Oscillator, and Pro-programmable Comparator.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>. [Πρόσβαση 30 Νοέμβριος 2022].
- [182] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://web.archive.org/web/20210813122132/https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf> . [Πρόσβαση 11 Ιανουάριος 2023].
- [183] P. Pattakos, S. Angelopoulos, A. Katsoulas, A. Ktena και E. Hristoforou, «Magnetic Harvester for an Autonomous Steel Health Monitoring System Based on Hall Effect Measurements.,» *Micromachines*, 14, 28., 2023.

- [184] L. Wang, K. Sun και R. Burgos, «Planar Piezoelectric Transformer-Based High Step-down Voltage-Ratio DC–DC Converter.,» *IEEE Trans. Power Electron.*, 37, p. 10833–10848, 2022.
- [185] T. Ma, Y. Ding, X. Wu, N. Chen και M. Yin, «Research on Piezoelectric Vibration Energy Harvester with Variable Section Circular Beam.,» *Low Freq. Noise Vibr.*, 40,, p. 753–771, 2021.
- [186] H. Liu, W. Dong, X. Sun, S. Wang και W. Li, «Performance of Fe–Ga Alloy Rotational Vibration Energy Harvester with Centrifugal Softening.,» *Smart Mater. Struct.*, 31, 065008,, 2022.
- [187] J. Wang, L. Geng, S. Zhou, Z. Zhang, Z. Lai και D. Yurchenko, «Design, Modeling and Experiments of Broadband Tristable Galloping Piezoelectric Energy Harvester.,» *Acta Mech. Sin.*, 36, p. 592–605, 2020.
- [188] H. Liu, L. Zhao, Y. Chang, G. Shan και Y. Gao, «Parameter Optimization of Magnetostrictive Bistable Vibration Harvester with Displacement Amplifier.,» *Int. J. Mech. Sci.*, 223, 107291, 2022.
- [189] C. B. Williams, C. Shearwood, M. A. Harradine, P. H. Mellor, T. S. Birch και R. B. Yates, «Development of an electromagnetic micro-generator.,» *IEEE Proceedings - Circuits Devices and Systems*, 2002.
- [190] A. Katsoulas, «Development of a Magnetic System for Energy Harvesting from Vibrations in Ships.,» *Master’s Thesis, Depart. Of Electrical and Computer Engineering, National Technical Univ. of Athens*, 2022.
- [191] P. Pattakos, A. Katsoulas, S. Angelopoulos, A. Ktena, P. Tsarabaris και E. Hristoforou, «Development of an Autonomous Magnetic Permeability Sensor.,» *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 59, no. 2, pp. 1-4, Φεβρουάριος 2023.
- [192] W. W. Dargie και C. Poellabauer, *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*, Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 2010.

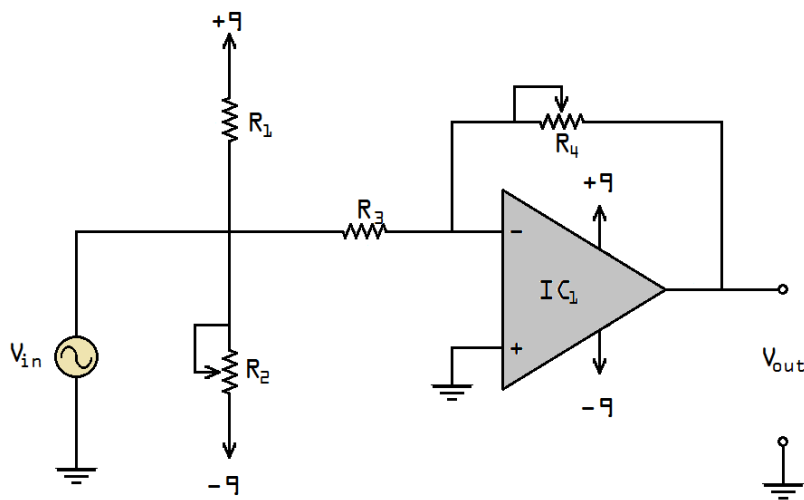
- [193] Philips [NXP Semiconductors], «Dual and single low noise op amp NE5533/5533A/NE/SA/SE5534/5534A datasheet.,» 1994.
- [194] I. Texas Instruments, «LM741 Operational Amplifier,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>. [Πρόσβαση 2 Φεβρουάριος 2023].
- [195] «Diodes,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds12019.pdf>. [Πρόσβαση 2 Φεβρουάριος 2023].
- [196] I. Texas Instruments, «C.-M.I.R. Industry-Standard Dual Operational,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358.pdf?ts=1675324643658&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM358. [Πρόσβαση 2 Φεβρουάριος 2023].

Παράρτημα

1.1. Κυκλώματα

1.1.1. Κύκλωμα Preamp

Στο Σχήμα 128 φαίνεται το κύκλωμα προενίσχυσης το οποίο χρησιμοποιήθηκε.



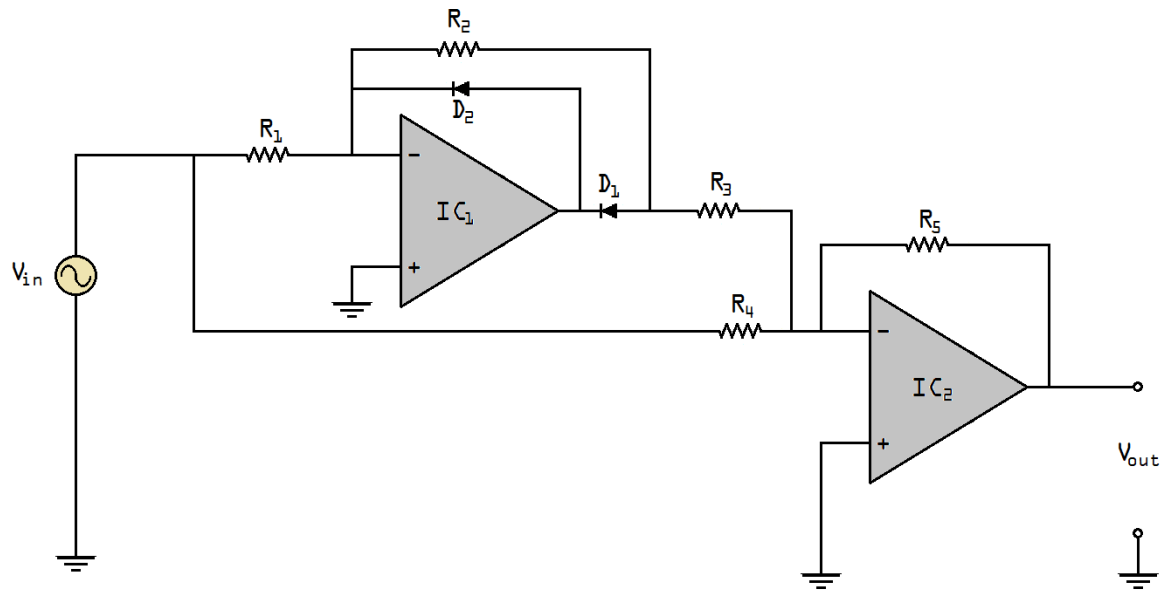
Σχήμα 128. Κύκλωμα προενίσχυσης.

Οι τιμές των αντιστάσεων είναι $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ και $R_4 = 50 \text{ k}\Omega$.

Το ολοκληρωμένο IC_1 είναι τελεστικός ενισχυτής τύπου LM741 [194].

1.1.2. Active rectifier

Στο Σχήμα 129 φαίνεται το κύκλωμα ανόρθωσης το οποίο χρησιμοποιήθηκε.

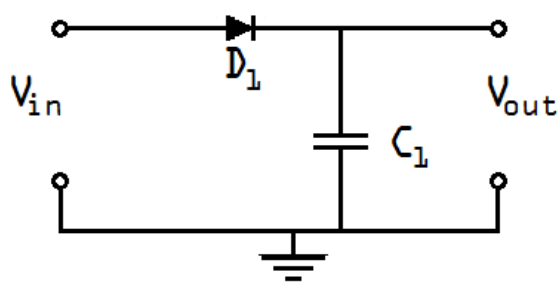


Σχήμα 129. Κύκλωμα Full Wave Active Rectifier.

Οι τιμές των αντιστάσεων είναι $R_1 = R_2 = R_4 = R_5 = 6.8 \text{ k}\Omega$ και $R_3 = 3.4 \text{ k}\Omega$. Οι δίοδοι D_1 και D_2 είναι τύπου 1N4148 [195]. Τα ολοκληρωμένα IC_1 και IC_2 είναι τελεστικοί ενισχυτές τύπου LM358D [196].

1.1.3. Κύκλωμα Peak detector

Στο Σχήμα 130 φαίνεται το κύκλωμα εύρεσης κορυφής το οποίο χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 130. Κύκλωμα εύρεσης κορυφής.

Η τιμή του πυκνωτή είναι $C_1 = 220 \mu\text{F}$. Η δίοδος D_1 είναι τύπου 1N4148.

1.2. *Arduino IDE sketch code*

1.2.1. *Single Sheet Tester*

```
#include <IRremote.h>
#include <LiquidCrystal.h>

float phase = 0.0;
float twopi = 3.14159 * 2;
float freq = 1;
float on = 0;
elapsedMicros usec = 0;
int outputPin = A5;
int value = 0;
int newValue;
float voltValue;

const int RECV_PIN = 1; //LCD and remote control.
LiquidCrystal lcd(7, 6, 5, 4, 3, 2);
IRrecv irrecv(RECV_PIN);
decode_results results;
unsigned long key_value = 0;

//int halfPeriod = 2500; //half period in msec
int calValue;
bool showCal; //whether to show calibration

int zeroPoint = 1550;

void setup() {

  analogWriteResolution(12); //teensy resolution

  //Serial.begin(9600);
  irrecv.enableIRIn();
  //irrecv.blinkLED(true);
  lcd.begin(20, 4);
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("*SingleSheetTester*");
  // print the number of seconds since reset:
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("IR testing          "); delay(400);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("IR testing.          "); delay(400);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("IR testing..         "); delay(400);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("IR testing...        "); delay(400);
```

```

    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("                "); delay(800);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Sensor Standby");

    // initialize the digital pin as an output.
    //pinMode(led, OUTPUT); // initialize the digital pin as an
output.
    //digitalWrite(led, LOW); // turn led off
    //ledOn = false;
    showCal = false;
    // start delay
    //ledDelay.start(2500); //ChronisNote: set period in msecs
}

void loop(){
    //calValue = analogRead(A1);
    lcd.setCursor(0, 3);
    float val = on * (sin(phase * freq) * 1000.0) + zeroPoint;
    analogWrite(A22, val);
    phase = phase + 0.0002;
    if (phase >= twopi) phase = 0;
    while (usec < 320 * freq) ; // wait
    usec = usec - 320 ;

    newValue = analogRead(outputPin);
    if (newValue > value){
        value = newValue;
        voltValue = value*(1000/3069.0);
        lcd.setCursor(0, 3);
        lcd.print("                ");
        lcd.setCursor(0, 3);
        lcd.print("out: ");
        lcd.print( voltValue);
        lcd.print(" mV.        ");
    }
    if (newValue == 1023){
        value = newValue;
        lcd.setCursor(0, 3);
        lcd.print("error                ");
    }
    if (phase == 0){
        value = 0;
    }
    /* if (showCal == true){
        lcd.setCursor(0, 3);
        lcd.print("                ");
        lcd.print(calValue);
        if (calValue < 60){
            lcd.setCursor(0, 3);
            lcd.print("Calibration Done!");
            lcd.setCursor(0, 2);
        }
    }
}

```



```

        lcd.print("                ");
        ledDelay.stop();
    }
} else {
    lcd.print("Peak:___ ");
}*/

/* if (ledDelay.justFinished()) {
    ledDelay.repeat(); // start delay again without drift
    // toggle the led
    ledOn = !ledOn;
    if (ledOn) {
        digitalWrite(led, HIGH); // turn led on
    } else {
        digitalWrite(led, LOW); // turn led off
    }
}*/

if (irrecv.decode(&results)){
    if (results.value == 0xFFFFFFFF)
        results.value = key_value;
    lcd.setCursor(0, 0);
    //lcd.clear();

    switch(results.value){
        case 0xFFA25D: // "CH-" key
            on = 0;
            value = 0;
            //digitalWrite(led, LOW);
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print(" Sensor Stopped ");
            lcd.setCursor(0, 2);
            lcd.print("                ");
            break;

        case 0xFFB29D: // "CH" key
            showCal = false;
            value = 0;
            on = 1;
            freq = 1;
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print("Sensor Operating");
            lcd.setCursor(0, 2);
            lcd.print("Frequency: 100mHz");
            break;
        /*
        case 0xFFE21D:
            lcd.print("CH+");
            break;*/
        case 0xFF22DD:
            //lcd.print("I<<");
            on = on - 0.1;
    }
}

```

```

break;
case 0xFF02FD:
//lcd.print(">>|");
on = on + 0.1;
break ;
/* case 0xFFC23D:
lcd.print(">|");
break ; */
case 0xFFA857: // "+" key
lcd.setCursor(19, 3);
lcd.print("+");
zeroPoint = zeroPoint + 20;
break ;
case 0xFFE01F: // "-" key
zeroPoint = zeroPoint - 20;
lcd.setCursor(19, 3);
lcd.print("-");
break ;
/* case 0xFF906F:
lcd.print("EQ");
break ;
case 0xFF6897:
lcd.print("0");
break ;
case 0xFF9867:
lcd.print("100+");
break ;
case 0xFFB04F:
lcd.print("200+");
break ;*/
case 0xFF30CF: // "1" key
on = 1;
freq = 1;
value = 0;
// showCal = false;
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Sensor Operating");
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("Frequency: 100mHz");
break ;

case 0xFF18E7: // "2" key
on = 1;
freq = 2;
value = 0;
// showCal = false;
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Sensor Operating");
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("Frequency: 200mHz");
break ;

case 0xFF7A85: //// "3" key

```

```

    on = 1;
    freq = 5;
    value = 0;
    showCal = false;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Sensor Operating");
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("Frequency: 500mHz");
    break ;

    case 0xFF10EF: //// "4" key
    on = 1;
    freq = 10;
    value = 0;
//    showCal = false;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Sensor Operating");
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("Frequency: 1Hz  ");
    break ;

/*    case 0xFF38C7: // "5" key
    on = 1;
    freq = 50;
    value = 0;
    showCal = true;
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("Calibration      ");

    lcd.setCursor(0, 3);

    break ;
*/

    case 0xFF5AA5:
    lcd.print("6");
    break ;
    case 0xFF42BD:
    lcd.print("7");
    break ;
    case 0xFF4AB5:
    lcd.print("8");
    break ;
    case 0xFF52AD:
    lcd.print("I'm Batman!");
    break ;*/
}
key_value = results.value;
irrecv.resume();
}
}

```

1.3. Μετρήσεις Αισθητήρα Πολλαπλών Hall

Ο Πίνακας 13 και ο Πίνακας 14 δείχνουν τις μετρήσεις οι οποίες πάρθηκαν με τον Αισθητήρα Πολλαπλών Hall. Οι μετρήσεις είναι ταυτόχρονες για τους αισθητήρες A, B, C.

Πίνακας 13. Μετρήσεις Αισθητήρα Πολλαπλών Hall πριν την ατέλεια.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	2435.02	2432.44	2444.02	2454.86	2442.77	2437.91	2441.3	2433.11	2440.36	2451.38	2461.64	2433.33
B	2470.17	2462.44	2464.86	2466.61	2432.11	2457.42	2469.83	2471.3	2454.86	2474.67	2446.47	2461.78
C	2465.47	2474.67	2459.83	2469.36	2465.33	2476.94	2463.06	2467.42	2459.36	2459.69	2478.22	2469.36
	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
A	2436.8	2436	2440.3	2456	2447.61	2436.33	2430.36	2448.41	2437.94	2470.5	2451.97	2433.91
B	2471.78	2478.22	2454.05	2454.53	2449.03	2452.58	2478.22	2476.47	2479.03	2441.64	2448.89	2466.61
C	2472.05	2474.19	2449.22	2466.14	2474.19	2481.45	2465.33	2464.19	2461.78	2470.97	2463.72	2473.39
	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
A	2425.19	2431.49	2442.77	2468.89	2438.75	2437.94	2429.88	2433.11	2441.16	2456	2448.75	2440.02
B	2476.61	2475	2457.61	2481.45	2434.05	2464.53	2461.78	2472.11	2473.39	2454.53	2449.69	2468.55
C	2474.19	2462.92	2452.11	2463.06	2490.31	2473.39	2494.34	2469.03	2451.3	2471.78	2478.22	2482.58
	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
A	2448.55	2451.64	2443.91	2461.64	2443.58	2449	2438.72	2435.85	2458.89	2458.41	2447.91	2450.05
B	2464.53	2474.05	2462.11	2436.8	2445.33	2487.89	2466.61	2466.47	2465.33	2460.17	2437.61	2470.17
C	2474.19	2469.36	2464.19	2466.14	2465.33	2479.03	2465.81	2463.72	2451.78	2471.78	2458.08	2473.39
	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
A	2421.97	2441.16	2452	2456	2458.08	2450.83	2432.44	2439.55	2450.83	2467.28	2431.02	2451.66
B	2472.58	2476.47	2465.33	2458.22	2459.83	2464.53	2472.58	2476.94	2465.33	2453.72	2442.25	2454.53
C	2464.53	2457.28	2456.94	2458.55	2469.36	2474.19	2474.19	2466.94	2482.25	2456.47	2473.39	2479.69
	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
A	2438.08	2434.72	2442.77	2443.91	2459.69	2446	2434.05	2437.72	2446.8	2455.66	2450.72	2455.66
B	2465.33	2477.42	2454.05	2444.86	2449.36	2460.5	2478.22	2480.17	2461.3	2479.03	2454.53	2463.72
C	2474.19	2474.19	2468.22	2450.83	2466.94	2474.05	2466.61	2470.64	2453.39	2473.39	2474.19	2468.55

Πίνακας 14. Μετρήσεις Αισθητήρα Πολλαπλών Hall μετά την ατέλεια.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	2458.08	2437.94	2438.75	2444.38	2452.44	2431.49	2452.44	2439.55	2432.3	2438.75	2442.77	2454.86
B	2462.92	2462.11	2486.28	2487.89	2457.28	2465.33	2475.81	2466.94	2463.72	2457.28	2463.72	2469.36
C	2479.03	2462.11	2460.5	2479.03	2462.11	2468.55	2481.45	2471.78	2454.05	2457.28	2471.78	2472.58
	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
A	2445.19	2425.05	2449.22	2459.69	2452.44	2429.88	2469.36	2436.33	2435.52	2452.44	2429.08	2434.72
B	2462.11	2471.78	2465.33	2463.72	2475.81	2462.92	2478.22	2464.53	2469.36	2466.14	2464.53	2456.47
C	2471.78	2476.61	2461.3	2468.55	2474.19	2472.58	2475	2475	2478.22	2476.61	2473.39	2481.45
	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
A	2448.41	2433.91	2457.28	2446.8	2423.44	2442.77	2470.17	2442.77	2447.61	2436.33	2439.55	2450.02
B	2478.22	2453.25	2475.81	2461.3	2464.53	2464.53	2477.42	2471.78	2470.17	2456.47	2463.72	2471.78
C	2464.53	2463.72	2449.22	2474.19	2466.14	2466.14	2462.92	2474.19	2483.06	2469.36	2471.78	2476.61
	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
A	2442.77	2441.97	2459.69	2449.22	2441.97	2457.28	2454.86	2448.41	2441.97	2451.64	2442.77	2422.63
B	2475.81	2466.94	2464.53	2464.53	2464.53	2464.53	2451.64	2454.05	2481.45	2478.22	2464.53	2471.78
C	2474.19	2457.28	2458.89	2466.14	2477.42	2474.19	2477.42	2468.55	2459.69	2459.69	2455.66	2480.64
	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
A	2455.66	2452.44	2460.5	2467.75	2435.52	2437.94	2433.91	2446	2437.13	2447.61	2433.91	2457.28
B	2457.28	2465.33	2466.94	2469.36	2444.38	2464.53	2478.22	2470.17	2469.36	2464.53	2486.28	2476.61
C	2477.42	2475.81	2453.25	2474.19	2470.17	2456.47	2479.03	2473.39	2482.25	2470.17	2481.45	2484.67
	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
A	2459.69	2459.69	2461.3	2434.72	2442.77	2442.77	2432.3	2446	2433.91	2454.05	2441.16	2454.86
B	2479.83	2475	2462.11	2482.25	2479.83	2471.78	2464.53	2459.69	2504.81	2454.05	2456.47	2467.75
C	2457.28	2479.03	2455.66	2466.14	2466.94	2465.33	2479.83	2472.58	2473.39	2474.19	2480.64	2478.22

Ο Πίνακας 15 και ο Πίνακας 16 δείχνουν τους μέσους όρους των προηγούμενων μετρήσεων, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στα αντίστοιχα διαγράμματα.

Πίνακας 15. Μέσοι όροι μετρήσεων πριν την ατέλεια.

	A	B	C
1	2434.268333	2470.167	2470.77
2	2437.908333	2473.933	2468.768
3	2444.295	2459.668	2458.418
4	2456.883333	2457.078	2462.347
5	2448.413333	2444.952	2471.91
6	2443.001667	2464.575	2476.508
7	2434.458333	2471.207	2471.557
8	2437.958333	2473.91	2466.99
9	2445.996667	2466.54	2459.977
10	2459.871667	2460.627	2467.347
11	2448.668333	2446.573	2470.97
12	2444.105	2464.227	2474.493

Πίνακας 16. Μέσοι όροι μετρήσεων μετά την ατέλεια.

	A	B	C
1	2451.633333	2469.362	2470.705
2	2441.833333	2465.735	2469.093

3	2454.456667	2470.167	2456.47
4	2450.426667	2471.508	2471.373
5	2441.43	2464.393	2469.495
6	2440.355	2465.603	2467.21
7	2452.173333	2470.973	2475.942
8	2443.176667	2464.527	2472.582
9	2438.073333	2476.478	2471.777
10	2446.803333	2462.782	2467.883
11	2438.206667	2466.542	2472.45
12	2445.728333	2468.958	2479.028

Extended Abstract

1.1. Introduction

1.1.1. Basic Concepts

Magnetic permeability μ is defined as the ratio of the magnetic flux density \mathbf{B} inside a given material and the total magnetic field \mathbf{H} experienced by it. This is shown in (0.1):

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad (0.1)$$

The magnetic permeability of ferromagnetic materials is not constant. This is mainly because a) the magnetization of such materials reaches a point of saturation, and b) said magnetization depends on the material's previous state. The dependence of B on H is known as B - H curve or major hysteresis loop. A typical such loop is depicted in Figure 1.

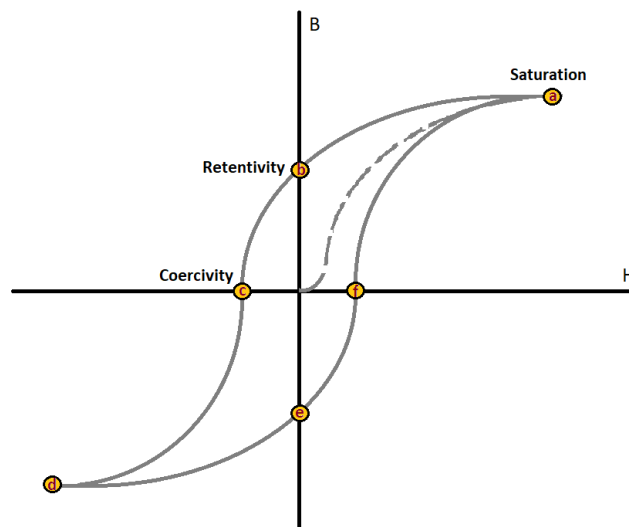


Figure 1. Hysteresis Loop

1.2. Magnetic Circuits

1.2.1. Introduction

Magnetic phenomena are described using a fairly large number of terms that are often, at first, somewhat difficult to keep track of. One approach that may help is to refer to analogies between electrical circuits, which are more commonly used, and corresponding magnetic circuits. Consider the electrical circuit and the analogous magnetic circuit shown in Figure 2. The electrical circuit consists of a voltage source, V , sending current I through an electrical load with resistance R . The electrical load consists of a long wire of length l , cross-sectional area A , and conductance ρ [168].

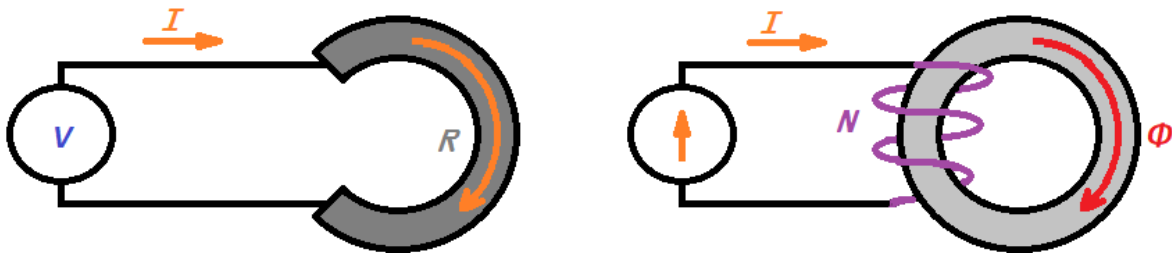


Figure 2. Basic electric (left) and magnetic (right) circuits.

In the magnetic circuit of Fig. 1.20b, the driving force, analogous to voltage, is called the magnetomotive force (MMF), designated by F . The magnetomotive force may be created by wrapping N turns of wire, carrying current I , around a toroidal core. By definition, the magnetomotive force is the product of current \times turns, and has units of ampere-turns.

The magnetic flux Φ is proportional to the MMF driving force F and inversely proportional to a quantity called reluctance R_m , which is analogous to the electrical resistance (Figure 3), resulting in the “Ohm’s law” of magnetic circuits given (0.2).

$$F = \Phi \cdot R_m \quad (0.2)$$

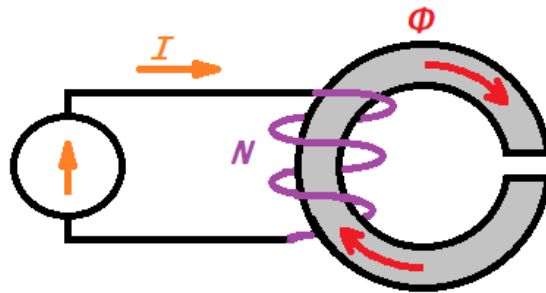


Figure 3. Air gap as magnetic resistance.

Analogous quantities between simple electrical circuits and magnetic circuits are shown in Table 1.

Table 1. Analogous Electrical and Magnetic Circuit Quantities.

Ηλεκτρικό Μέγεθος	Μαγνητικό Μέγεθος	Μονάδες
Voltage V	Magnetomotive Force F	Amp-turns
Current I	Magnetic Flux Φ	Wb (Webers)
Resistance R	Reluctance R	Amp-turns/Wb
Conductivity $1/\rho$	Permeability μ	Wb/A-t-m
Current Density J	Magnetic flux density B	Wb/m ² = T
Electric field E	Magnetic field intensity H	Amp-turn/m

1.2.2. State-Of-The-Art

Various State-the-Art applications are presented in an effort to illustrate the importance of technologies based on the magnetic circuit analysis method. The main categories of such technologies are:

- Charging Systems and Energy Harvesters
- Motors
- Recording

- Wireless Power Transmission
- Transformers – Converters
- Sensors
- Mathematical Models – Simulations
- Various other applications

1.3. Magnetic Permeability Sensor with Coil Excitation

1.3.1. Single Sheet Tester

1.3.1.1. Description

The Single Sheet Sensor is a device that is used to measure the magnetic properties of specimen of specific dimensions. Its configuration comprises of 2 coils wrapped around the same bobbin, which also has a slot for the specimen to pass through, and two yoke shaped cores that help form a magnetic circuit, as seen in Figure 4 and Figure 5.

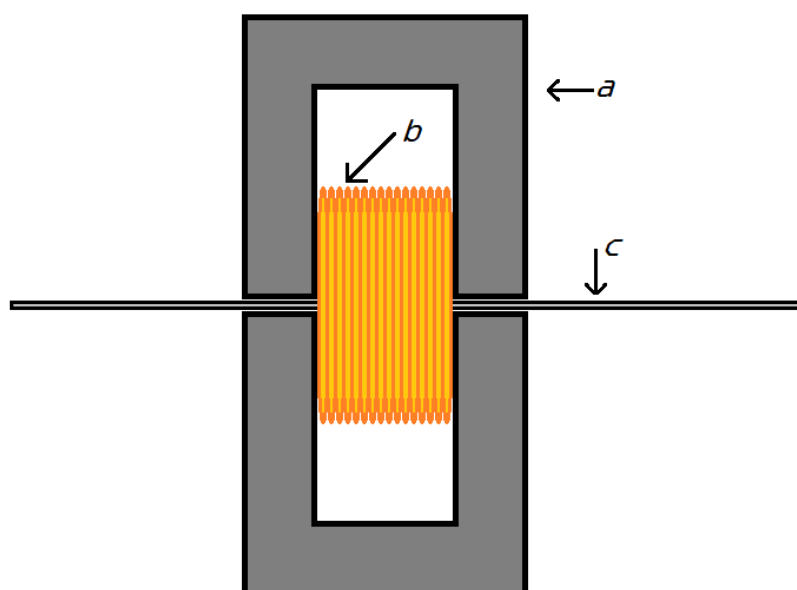


Figure 4. Basic principle of Single Sheet Tester.

In Figure 5 the sensing element is seen while in use after it is placed in its enclosure. Connections to the two coils are also visible.

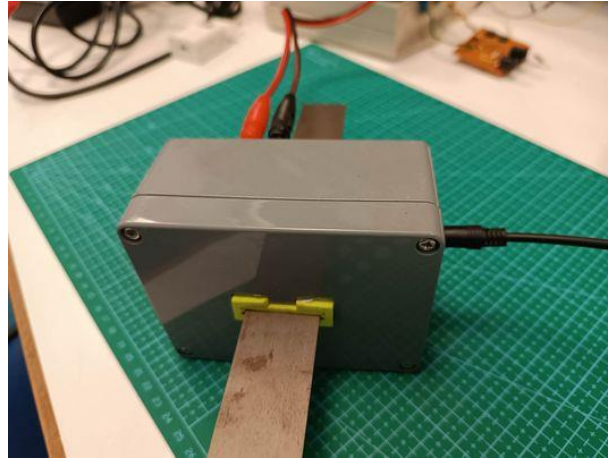


Figure 5. SST with specimen in slot.

By providing current to the primary coil of the sensor it acts as a source of magnetic flux and thus a magnetic circuit is formed. The specimen acts as a magnetic resistance for the circuit while the secondary coil is used to measure the magnetic flux (acting analogous to an amperemeter in an electrical circuit, Figure 6). The voltage that is created in the secondary coil is used as the sensor's output.

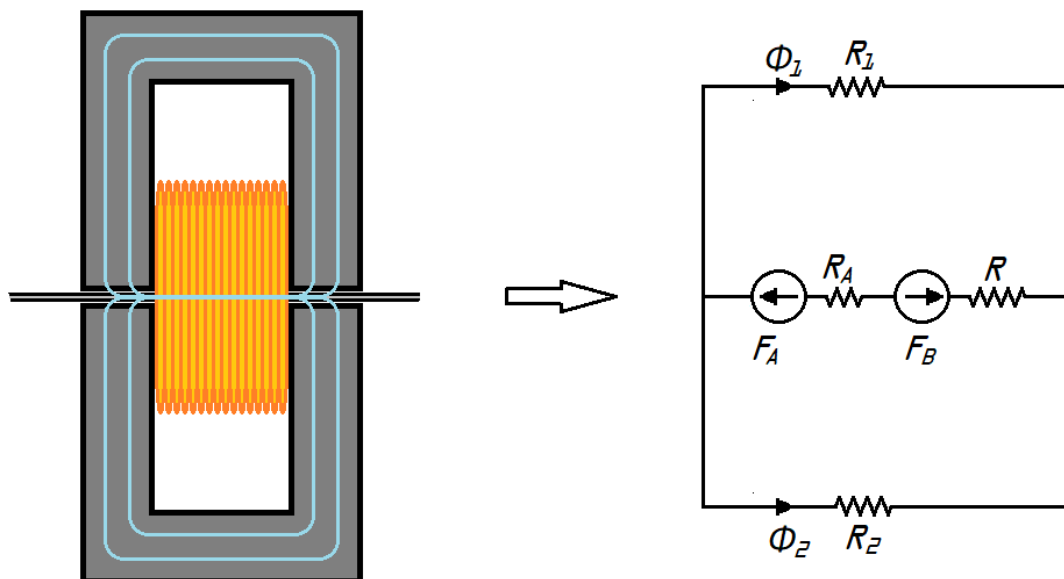


Figure 6. Magnetic circuit of Single Sheet Sensor.

In the above circuit, Φ_1 , R_1 and Φ_2 , R_2 are the magnetic flux and magnetic resistance of each yoke, respectively, F_A is the Magnetomotive Force of the primary coil, R_A is the magnetic resistance of the air gaps and R is the magnetic resistance of the specimen that is to be measured. Finally, F_B is the Magnetomotive Force of the secondary coil denoted here as a consumer of power.

The general overview of the SST system can be seen in Figure 7. The system is built around a *Teensy 3.5* microcontroller [170].

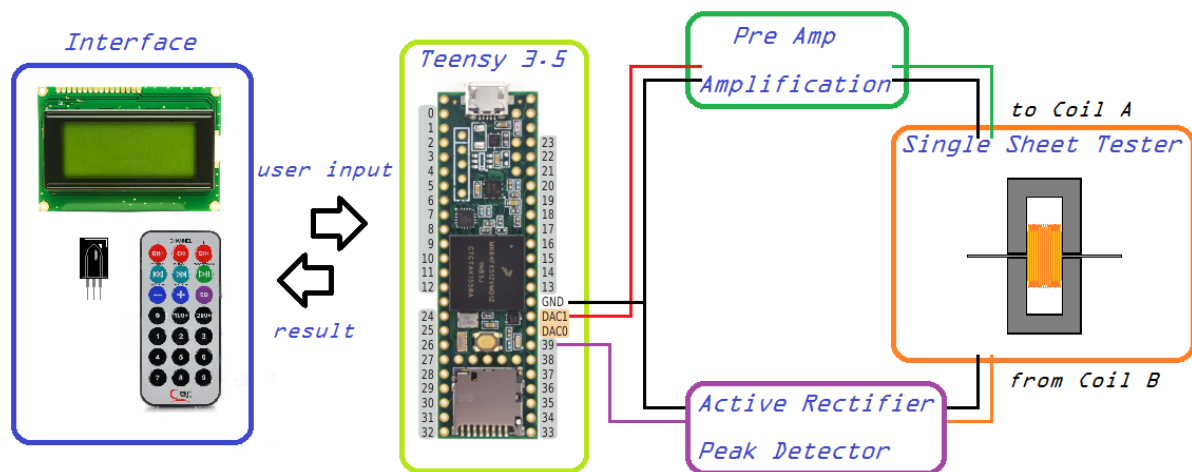


Figure 7. Overview of Single Sheet Tester system.

The *Teensy 3.5* microcontroller was chosen because of its in-built DAC which can be used to provide a sinusoidal signal to the primary coil (Coil A). The signal passes through a pre-amplifier to eliminate the DC-bias and control its amplitude. The sensor's output signal (voltage of Coil B) is rectified and then passed through a peak detector before it is read by the Teensy through a digital input pin. In Figure 8 we see the Sensors input and output signals as seen in the oscilloscope.

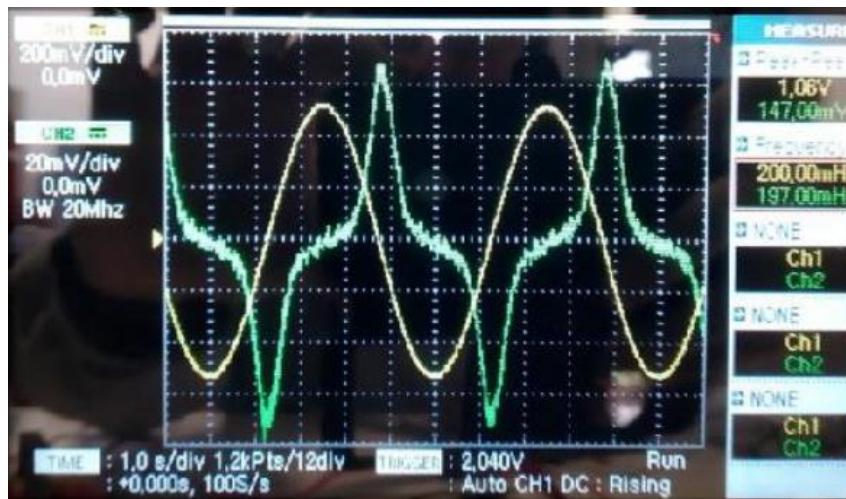


Figure 8. SST input (yellow) and output (green) signals.

1.3.1.2. Measurements

Using the SST, measurements were taken that were extensively presented in [172]. Laboratory specimens (Figure 9), formerly used in [173], were used so that their magnetic characteristics are known.



Figure 9. Electrical steel laboratory specimens.

Figure 10 shows a few indicative input-output measurements. These were taken for 0.1 Hz in the middle of each specimen for the RX series specimens.

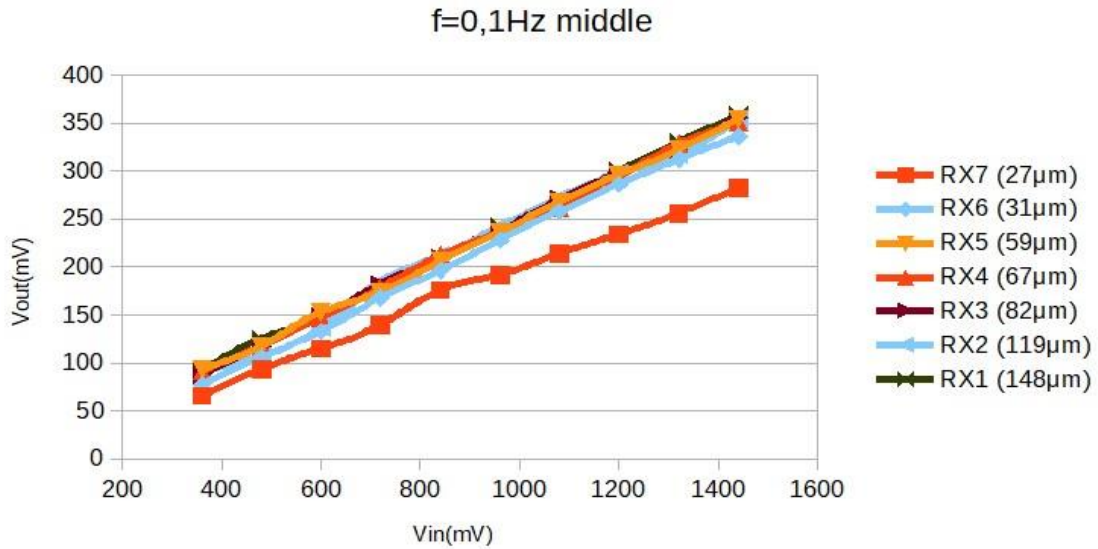


Figure 10. Input-output for RX series specimens [172].

1.3.2. Yoke Sensor

1.3.2.1. Description

The magnetic permeability sensor is shown in Figure 11. The sensor along with the material to be measured can be seen as completing a magnetic circuit. There are 3 main parts to the sensor: A core with the shape of a yoke and made of electrical steel (a), the primary coil which is the source of magnetic flux for the magnetic circuit (b), and also a secondary coil (c) which acts as a receiver of the magnetic density.

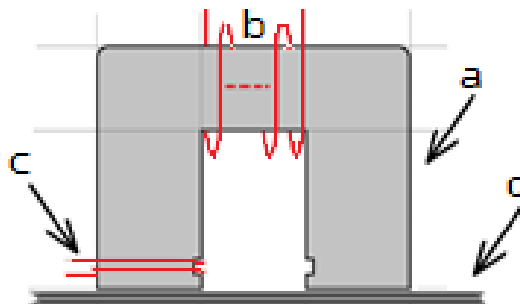


Figure 11. Magnetic permeability sensor.

The constructed sensor, along with the cable that is used to connect it to the circuitry, appears in Figure 12.

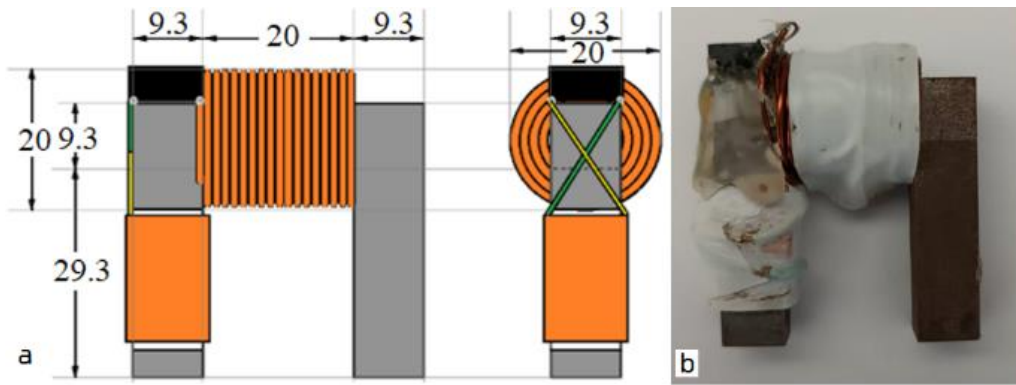


Figure 12. a) Mechanical schematic diagram (dimensions in mm) and b) actual image of the magnetic permeability sensor.

1.3.2.2. Calibration

As with any experiment, it is important that its results can be replicated. With that in mind, a second sensor was constructed with the same physical properties as the first. In order to calibrate the second sensor according to the first, the two sensors are placed in a position where they complete a magnetic circuit, as shown in Figure 13 and an alternating current of 4 Hz is supplied to the input coil of the first sensor, while the input and output coils the second sensor is used as an output. The process is then reversed.

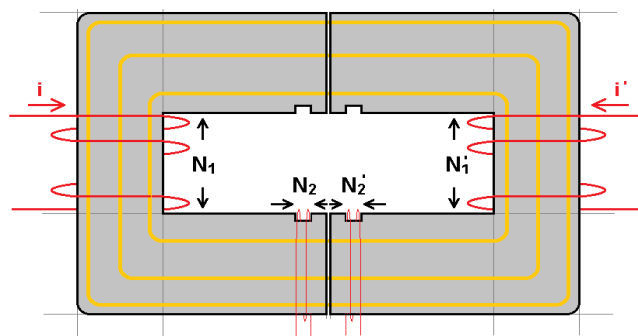


Figure 13. Calibration position.

1.3.2.3. Measurements

The magnetic field H and the magnetic flux density B are given as:

$$H = \frac{N_1}{Z_1 \cdot l_1} \cdot V_1 \quad (0.3)$$

$$B = \frac{1}{N_2 \cdot S} \cdot \int V_2 \cdot dt \quad (0.4)$$

where N_1 , Z_1 , l_1 , and V_1 represent the number of turns, impedance, length and electric potential difference of the input coil and N_2 , S , V_2 represent the number of turns, area of the cross and electric potential difference of the output coil respectively. In order to account for the integral of V_2 in (0.4), an integrator circuit must be implemented in the output, so that the Hysteresis Loop can be formed on the oscilloscope. The full circuit that was used is shown in Figure 14:

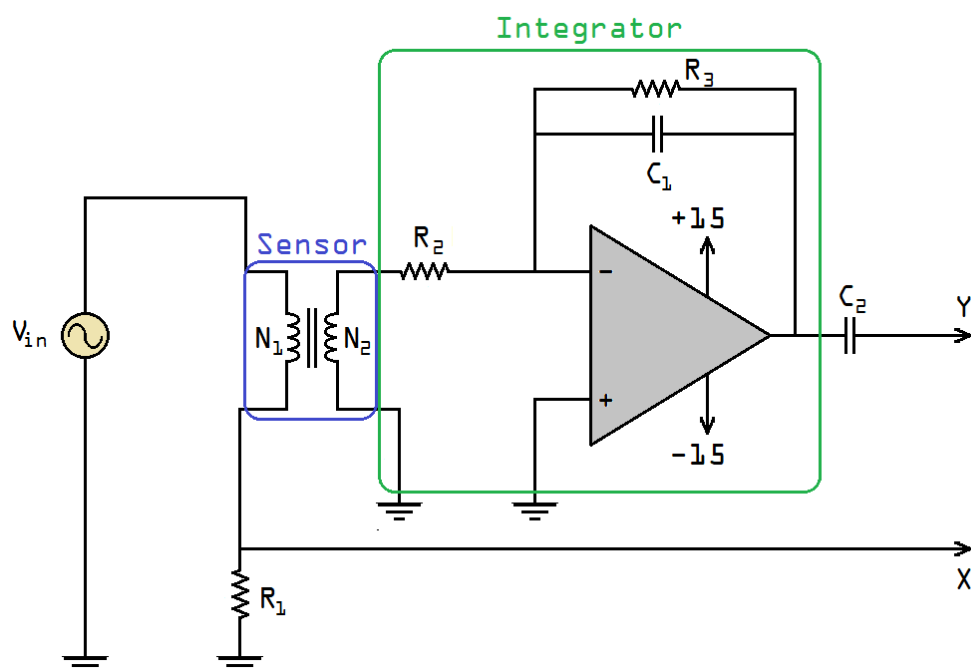


Figure 14. Measurements' circuit.

The values for the electrical components are as follows $C_1 = 2.2 \mu\text{F}$, $C_2 = 1 \mu\text{F}$, $R_1 = 0.1 \Omega$, 10 W , $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ και $R_3 = 1 \text{ M}\Omega$.

The magnetic permeability sensor's functionality was tested with variety of samples. In order to also test for calibration, both sensors were used and their results are shown together for comparison.

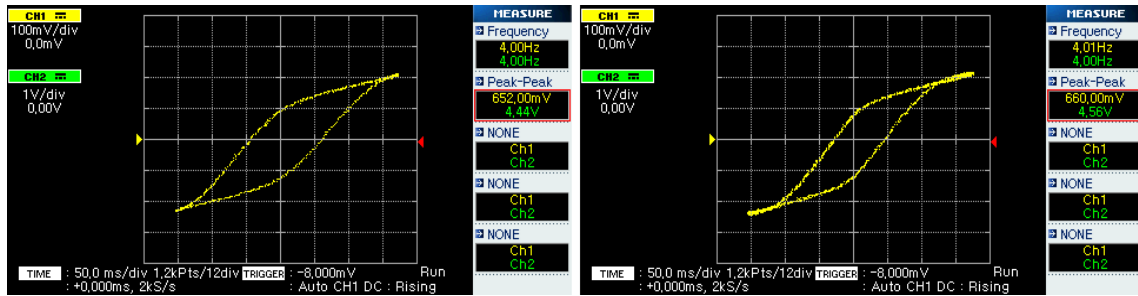


Figure 15. Hysteresis Loops formed using the two sensors.

Using the setup of Figure 16 (which consists of a force gauge meter, a machine that can apply compressive or tensile stress, and the developed sensor), stress measurements were conducted and indicative results are shown in Figure 17.

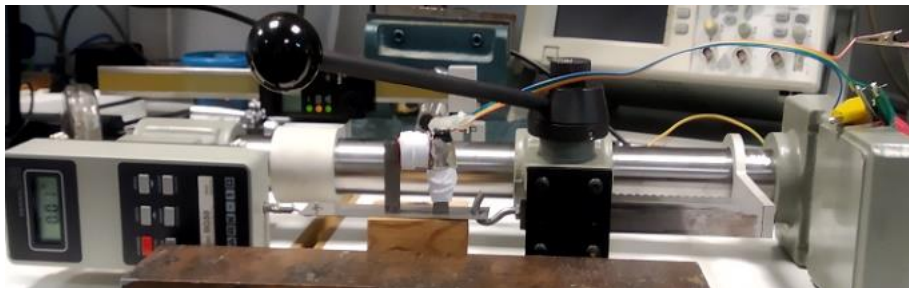


Figure 16. Stress measurements set-up.

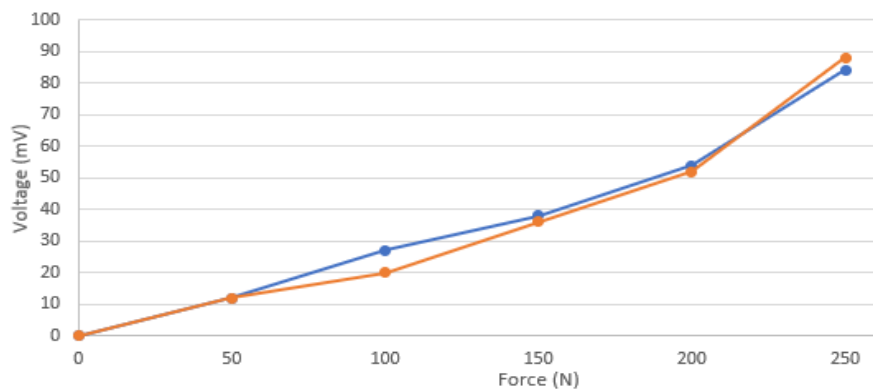


Figure 17. Stress measurements diagram for the two sensors.

By conducting multitude of stress measurements like the ones mentioned above it can be concluded that a sensor like this can accurately measure stress.

1.3.3. Yoke Sensor with *Metglas* core

1.3.3.1. Description

A new sensor had to be designed in order to meet new specifications so instead of the original yoke-shaped, electrical steel core, a new core made of a material called *Metglas*, was used. *Metglas* is a metallic glass alloy, with a non-crystalline structure which gives it unique physical and magnetic properties like high permeability, strength and hardness along with flexibility and toughness [175].



Figure 18. *Metglas* cores of various sizes [175].

The part is registered by its manufacturer, *Hitachi Metals, Ltd*, with the code *AMCC-16B*.

Figure 19 shows a picture of the new sensor once its construction is completed.



Figure 19. General view of sensor.

1.3.3.2. Measurements

For these measurements of nonlinear magnetic materials, the differential magnetic permeability μ_D is more useful to consider and so by definition (0.5), and through (0.3) and (0.4) we get:

$$\mu_D := \frac{dB}{dH} = \frac{Z_1 \cdot l_1}{N_1 \cdot N_2 \cdot S} \cdot \frac{V_2}{dV_1/dt} \quad (0.5)$$

As seen in (0.5), μ_D is proportional to the output V_2 . Using the new sensor, measurements on a specimen with a flawless and a damaged part are shown in (Fig.8). Here, by applying an input of 0.57 V amplitude at a frequency of 9 Hz, a very clear difference in output is noted. Using peak-to-peak values, the flawless part had an output of 4.74 V compared to 4.26 V for the flawed part.

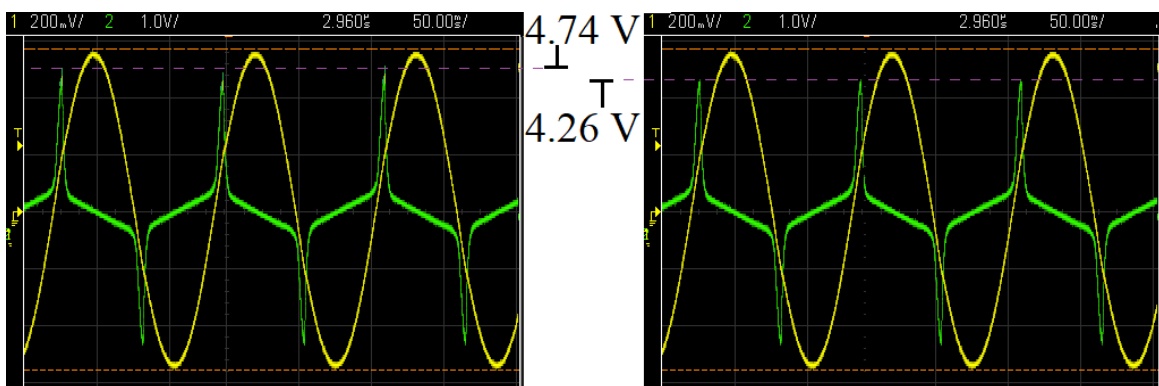


Figure 20. Sensor input (yellow) and output (green) for flawless (left) and flawed (right) part of the specimen.

1.4. Magnetic Permeability Sensor with Permanent Magnet

1.4.1. Permanent Magnet with Hall Sensor

1.4.1.1. Description

The sensing arrangement that was used, consists of two ferromagnetic poles and a cubic neodymium permanent magnet, forming a yoke, as shown in Figure 21. At the free end of each pole, a Hall sensor is placed under the free end of each pole. A detailed description of the operating principle of the arrangement can be found in [178].

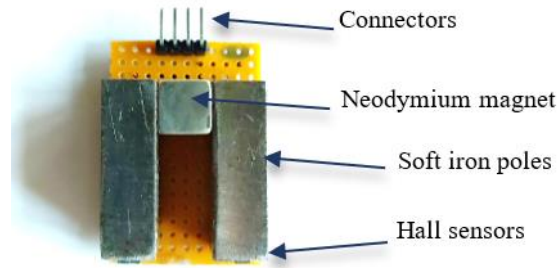


Figure 21. PM sensing element with two Hall sensors [178].

Figure 22 shows the electronics board that was used to operate the sensor in the experiment. The development board that was used includes an *ESP32* [180] microcontroller and integrated USB, Wi-Fi and Bluetooth connectivity. Moreover, the ESP32 microcontroller includes deep sleep modes enabling its low-power operation. However, the 12-bit resolution of the embedded ADC was found insufficient for the specific application. As a result, an external 16-bit ADC, *ADS1115* [181], was added. This is also a low-power device, which offers 4 analog inputs with adjustable gain and communicates via the I²C protocol [182].

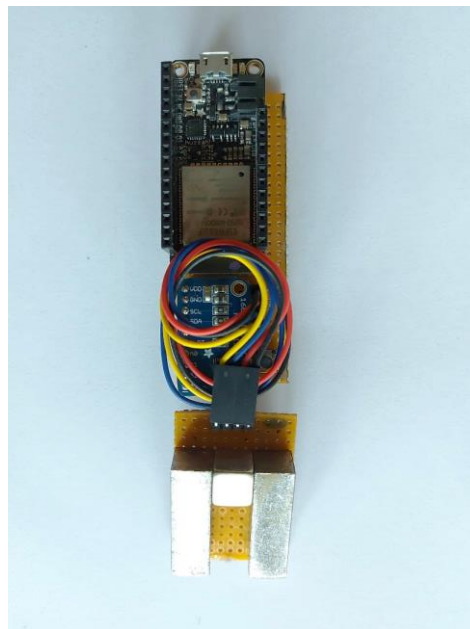


Figure 22. Completed sensor and electronics system [178].

The final device is shown in Figure 23.

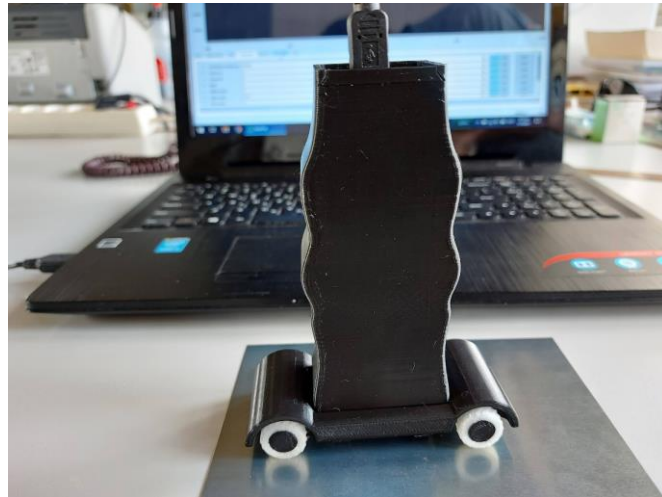


Figure 23. The final device in its 3D-printed packaging, connected to a laptop via a USB cable [178].

1.4.1.2. Measurements

In order to test the behavior of the sensor, an experiment was designed where the same electrical steel specimen was tested as flawless and after it was scratched to create a small surface flaw. The scratch was made on the specimen's center to ease the conduction of the measurements. The specimen before and after the scratch was added can be seen in Figure 24.

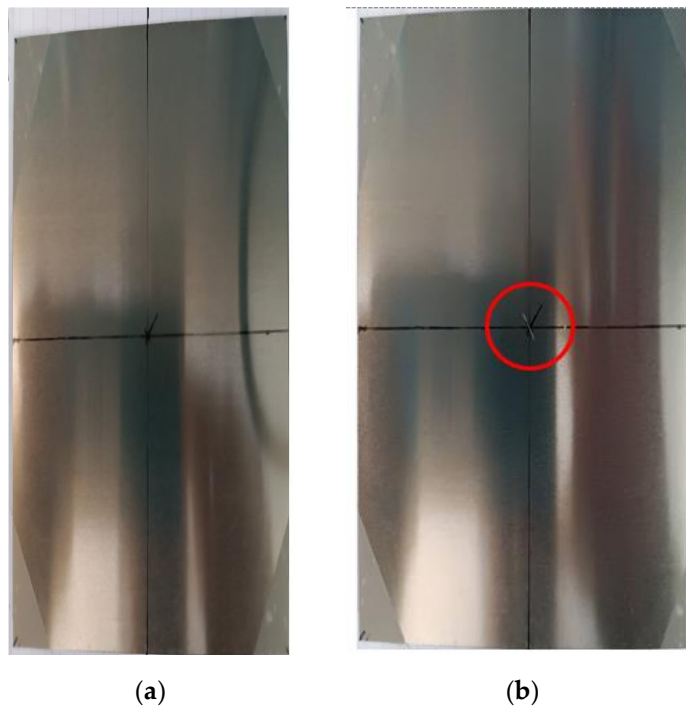


Figure 24. Image of specimen: (a) Being flawless; (b) With a flaw at its center [183].

The monitoring device was placed on the specimen with one of its two Hall sensors placed directly above the center. A paper protractor was also attached to the device for reference, as seen in Figure 25.



Figure 25. Experimental configuration [183].

By measuring the magnetic flux emanating from the sample at different directions the magnetic anisotropy profile of the under-test material may be obtained. The term anisotropy is used to explain any preference a material's property may exhibit, macroscopically, for a given direction or directions. In the case of magnetic materials, anisotropy reflects the tendency of the magnetization vector to lie along one specific direction. In this particular case we wanted to test whether or not there is any correlation between the angle of the monitoring device to the specimen and the magnetic field measured by the Hall sensor. Measurements were taken every 5 minutes each time turning the monitoring device manually by 5 degrees. The axis of rotation was perpendicular to the plane of the specimen and passing through its center as shown in Figure 25. The 5 minutes time was enough to recharge the capacitors of the energy harvester, as predicted. During the measurements, external vibrations were provided by an oscillation generator.

Figure 26 shows the measurements performed on the specimen before and after the flaw was added. It is clear that the anisotropic behavior can still be detected although there is a change in its peaks and also in its range.

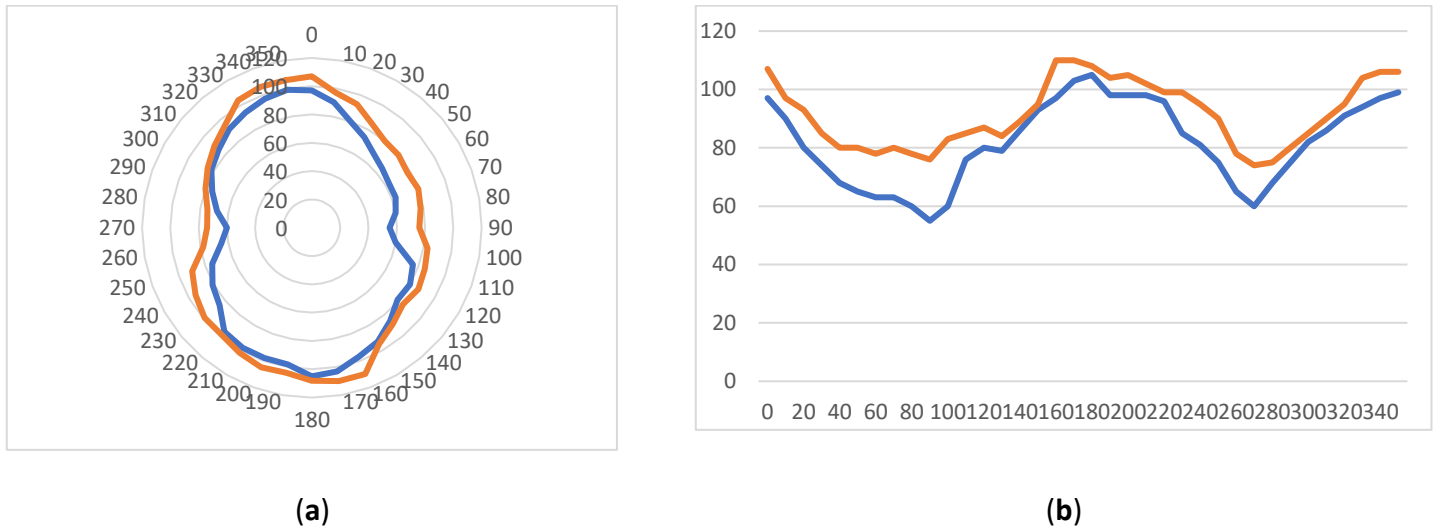


Figure 26. Anisotropic behavior of specimen; blue line indicates before and orange after the flaw was added: (a) Polar diagram; (b) Linear diagram [183].

Another set of measurements was performed, this time by offsetting the rotation axis of the monitoring device by 5 mm, as shown in Figure 27.

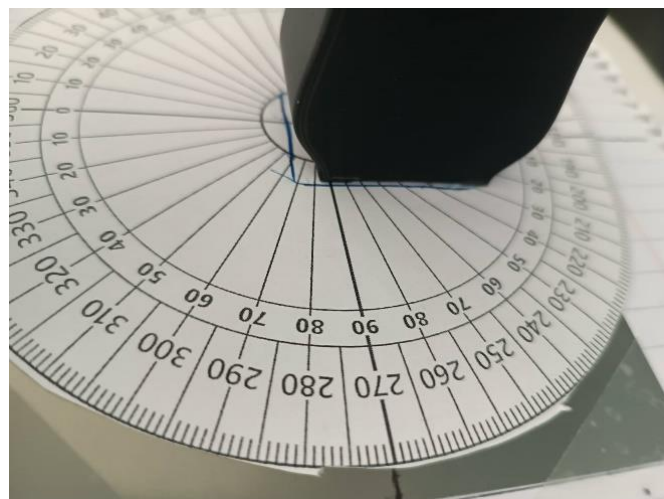
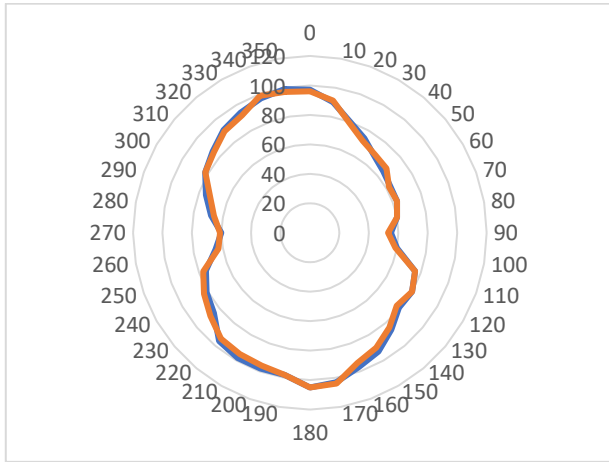
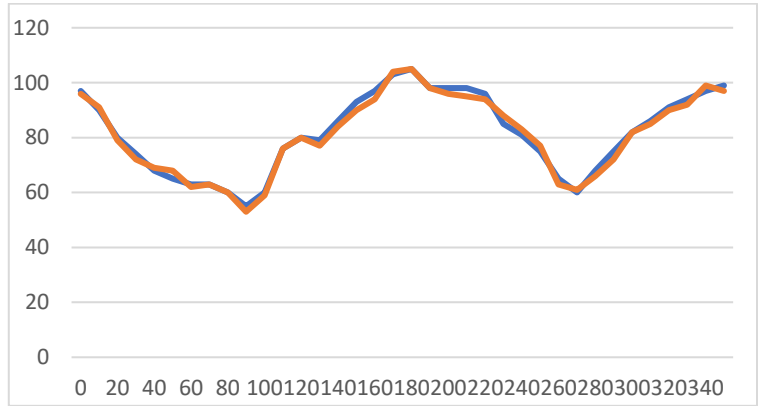


Figure 27. Experimental configuration offset by 5 mm; previous position marked by blue outline [183].

This offset resulted in a set of measurement taken around the point of examination instead of directly above it. The two sets of measurements, before and after the flaw, are shown in Figure 28 and Figure 29, respectively.

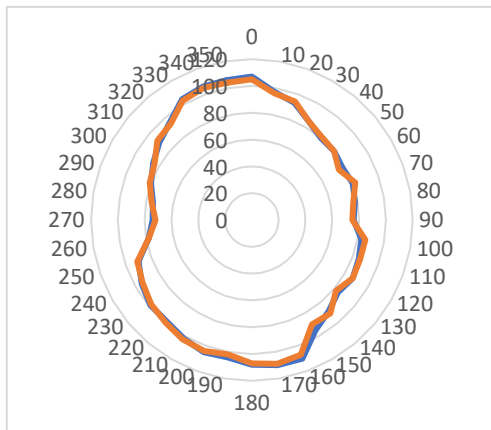


(a)

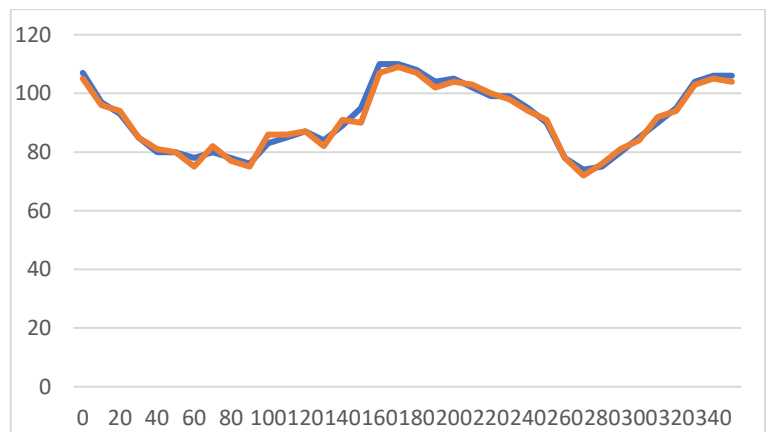


(b)

Figure 28. Anisotropic behavior of specimen before the flaw; orange line indicates measurement on point and blue with a 5 mm offset: (a) Polar diagram; (b) Linear diagram [183].



(a)



(b)

Figure 29. Anisotropic behavior of specimen after the flaw was added; orange line indicates measurement on point and blue with a 5 mm offset: (a) Polar diagram; (b) Linear diagram [183].

We can see from the above figures that when the two sets are compared there is a little deviation between the measurements taken above and the measurements taken around the point that is examined.

1.4.2. Permanent Magnets with Multiple Hall Sensors

1.4.2.1. Description

As a proof-of-concept of multiple sensors taking anisotropic measurements, a prototype was built where independent measurements can be taken simultaneously and analyzed accordingly. The arrangement comprised of three Hall sensors arranged at an 120° angle to each other, as shown in Figure 30. In order to build the sensor, a simple hexagonal industrial nut of soft ferromagnetic material was used, taking advantage of its geometry (Figure 31 - right).

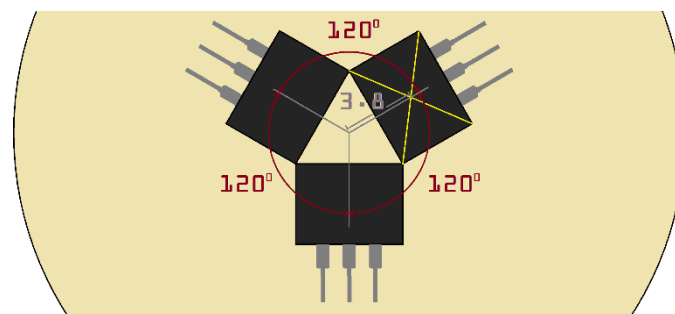


Figure 30. Three Hall sensor arrangement (dimension in mm).

Following the design of the previous experiment, each sensor belongs to a magnetic circuit which includes a permanent magnet as the source of the magnetic flux, the steel under-test (SU-T) and a ferromagnetic path to guide the flux. The proposed geometry can be seen in Figure 31 (left).

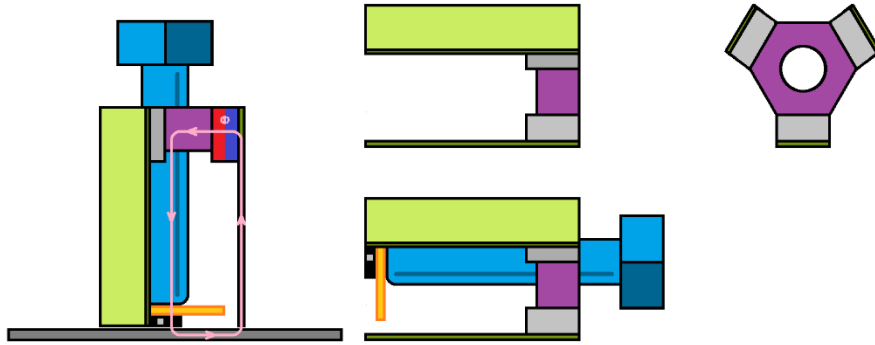


Figure 31. Proposed geometry of sensor.

The equivalent magnetic circuit can be seen in Figure 32. Magnetic reluctances are represented as R for the bolt and R_1 , R_2 and R_3 for each of the three sides of the sensor. Each of the PMs has a magnetomotive force represented as F_1 , F_2 and F_3 , respectively. Magnetomotive forces $F_{i,j}$ represent the effect of the PM of the j -th leg on the i -th leg. So, for example, $F_{2,3}$ is the magnetomotive force of the PM of the third leg as it effects leg 2. Φ_1 , Φ_2 and Φ_3 represent the magnetic flux on the respective sides of the circuit.

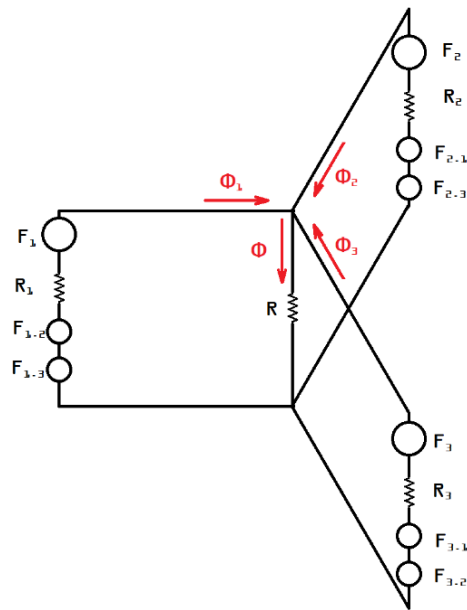


Figure 32. Sensor magnetic circuit.

1.4.2.2. Simulation

In Figure 33 we see the sensor simulated by ANSYS R19.2 (licensed to the NTUA).

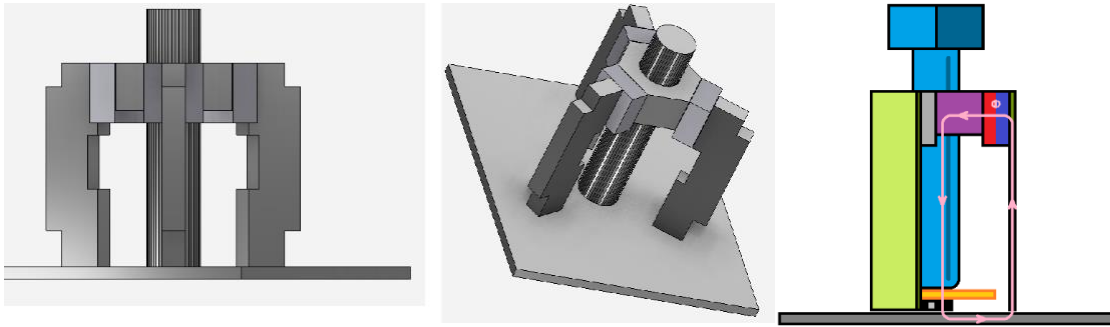


Figure 33. Sensor simulation (created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).

The left side of Figure 34 shows the magnetic pattern formed on the surface of the SU-T by the sensor. The maximum magnetic flux density is calculated in both cases to be $B = 1.8535$ T, while the minimum is $B = 0.0025$ T. Adding a random defect of 0.5 mm in the SU-T of this simulation results in the pattern of the right side of Figure 34.

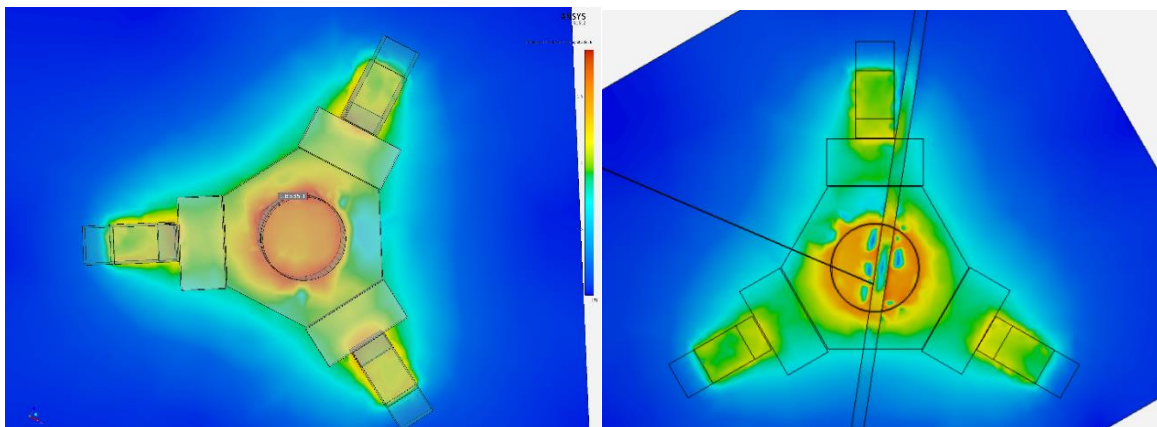


Figure 34. Sensor simulation without (left) and with (right) defect. Defect shown in parallel diagonal lines (created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).

The pattern of the simulated magnetic field pattern shown a clear change in the SU-T's anisotropic behavior. Measurements show a maximum of $B = 2.1415$ T at the point marked by a black line, while the three Hall sensors measure $B = 1.223$ T (bottom left), $B = 1.221$ T (bottom right), and $B = 0.9437$ T (top).

1.4.2.3. Construction

Figure 35 shows the tripod that completes the magnetic circuit, with (center) and without (left) the central bolt, and the sensing element (right) with sensors arranged at

approximately 120°. Visible are the legs of the tripod, which are made of laminated electrical steel, and the three PMs between the legs and the nut.



Figure 35. Sensor tripod without (left) and with (center) bolt. Sensing element (right).

The completed sensor, shown in Figure 36 is controlled by electronics based on the *ESP32 WeMos LOLIN32* [180] breakout board. The *ESP32* board is programmed to read the Hall sensors' measurements and feed them into a computer through a USB cable (or possibly a built-in Wi-Fi chip), and also power them through a 3.3V port.

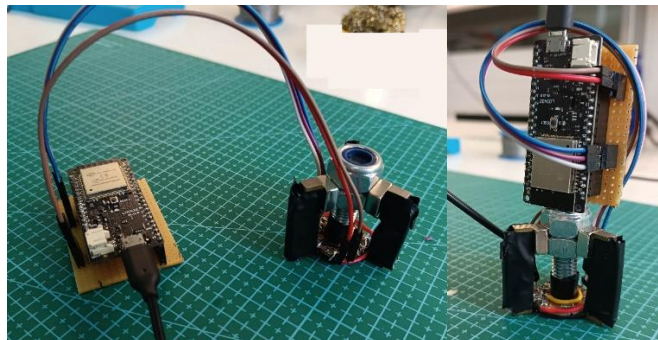


Figure 36. Sensor with electronics.

1.4.2.4. Experimental configuration - measurements

Measurements were taken on a sheet of electrical steel, which was chosen as a specimen of SU-T, before and after the addition of a defect at its center. Around the center, lines were added to indicate angles for every 30 degrees, according to which the sensor was rotated to take measurements with all 3 Hall sensors. The purpose of this rotation is to show

that all three sensors measure the same anisotropic behavior independently and is not intended for the sensor to be used in such way.

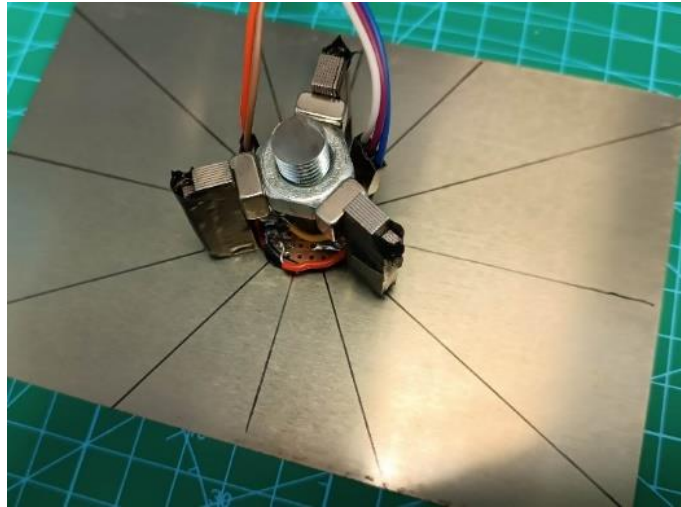


Figure 37. Experimental configuration. Sensor's legs are at -120° (left), 0° (center) and 120° (right).

The sensor was placed at the center of the SU-T, as shown in Figure 37. Measurements were then taken by rotating the sensor by 30° at a time. Each of the three sensors measured 1650 mV without the PMs, and approximately 2550 mV for the three PMs in series. The results of the above experimental configuration shown in Figure 38 after being adjusted for angle, offset and amplitude. Each point on the graph is the average of six unique readings.



Figure 38. Experimental measurements for flawless SU-T (above) and with added defect (below), (S_1 -blue, S_2 -orange, S_3 -gray).

By comparing the two graphs of Figure 38, we conclude that the new sensor is able to depict quantitatively the effect the surface defect had on the material's anisotropic profile.

1.5. Energy Harvesting

1.5.1. Single Dimension Energy Harvester

1.5.1.1. Description

Following the methodology described in [189], a system of microgenerators was developed in [190], seen in Figure 39 and Figure 40. This microgenerator system was then connected to a power management circuit (Figure 41) for energy storage, to create an energy harvester system.



Figure 39. 3D model (left) and constructed microgenerator (right) [191].



Figure 40. Three microgenerator system [190].

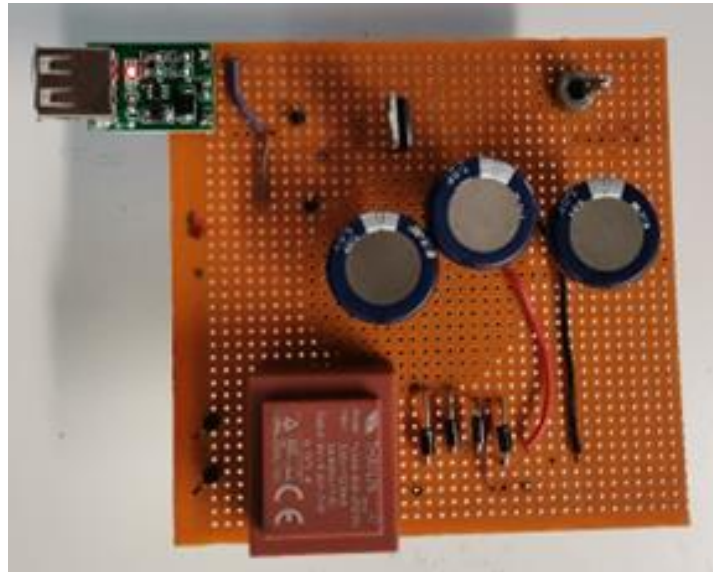


Figure 41. Energy management system prototype.

Measurements taken with this energy harvester are presented in [183] and [191]. This harvester was used to power the Autonomous Applications of the following paragraphs.

1.6. Autonomous Applications

1.6.1. Autonomous Magnetic Permeability Sensor

1.6.1.1. System Overview

The Autonomous Magnetic Permeability Sensor system can be seen in the following diagram.

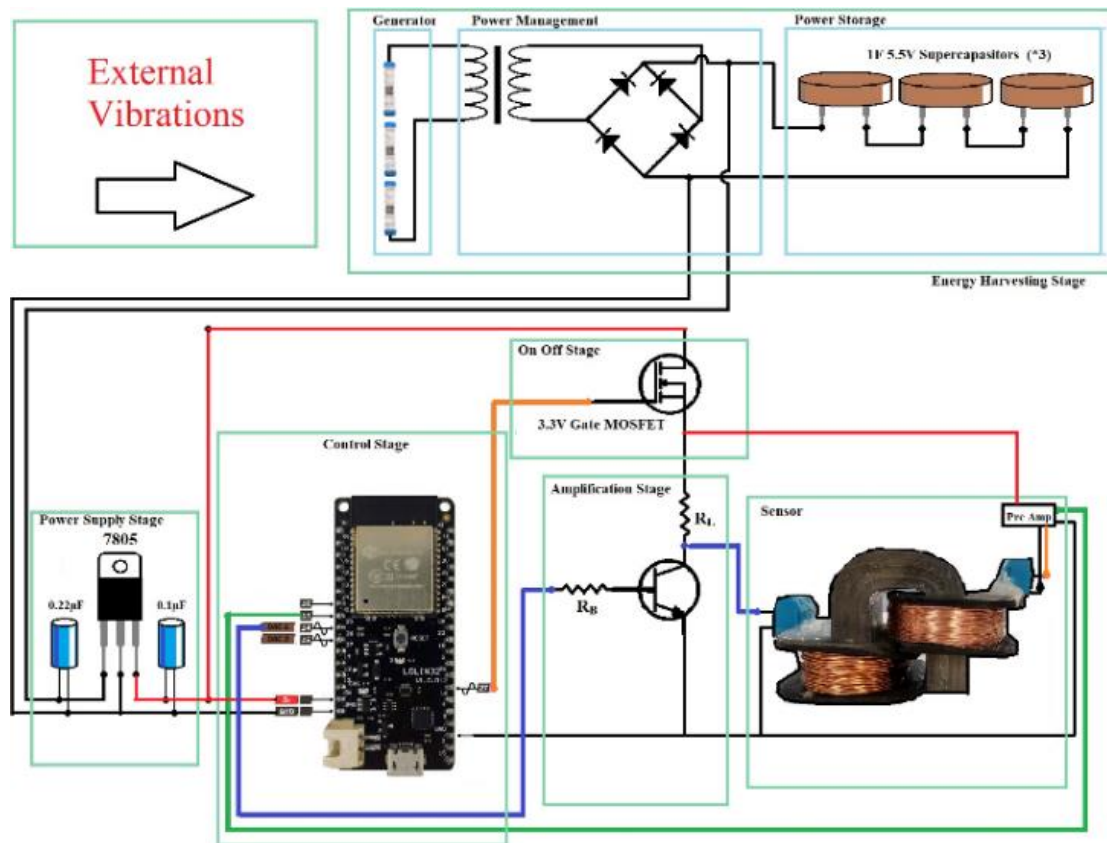


Figure 42. Autonomous Magnetic Permeability Sensor system overview [191].

An ESP32 Microcontroller was used to control the application, connected to a MOSFET for On-Off control and also creating a signal which is then amplified and send to the sensor. The *ESP32* was chosen for its in-built Wi-Fi chip, its low power consumption and its ability to switch to Deep Sleep mode. This particular version is the *ESP32 WeMos LOLIN 32* breakout board which comes with the extra feature of battery monitoring.

The *ESP32* has nominal operating currents of $10 \mu\text{A}$ during Deep Sleep and 260 mA during normal operation at 3.7 V , so it can be calculated that a full cycle of 10 min with only 0.5 sec of operation consumes no more than 0.5 J. Likewise, having the sensor operate for 0.5 sec has a consumption of 0.16 J. The rest of the circuit's energy consumption which includes the MOSFET, the amplification transistor, and the preamp which is based on the *NE5534* chip along with the heat dissipation on the resistors can also be calculated to less than 2 J due to the very small period of operation. In total, each 10-minute cycle has a

maximum energy consumption of less than 2.7 J. Given that the total amount of energy stored is 32.6 J and the full charging time was 20 minutes it is shown that the system can work autonomously.

1.6.2. Autonomous Steel Health Monitoring System Based on Hall Effect Measurements

1.6.2.1. System Overview

In Figure 43 an overview of the completed autonomous Hall effect sensor system is presented.

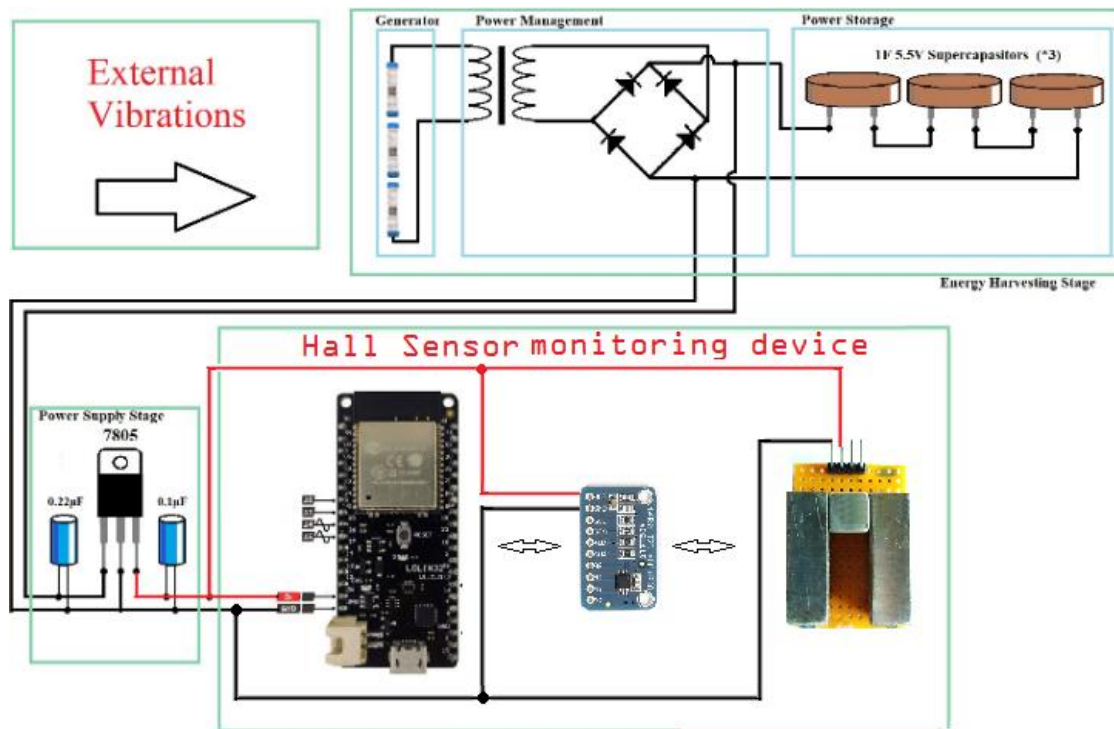


Figure 43. Autonomous Steel Health Monitoring System Based on Hall Effect Measurements system overview.

The nominal operating currents of the ESP32 are 10 μA during Deep Sleep and 260 mA during normal operation at 3.7 V. For a full cycle of 10 min with only 0.5 sec of operation, it

can be calculated that it consumes less than 0.5 J. During its 0.5 sec operation the energy consumption is close to 0.16 J.

Because of the very small period of operation, the *ADS1115* converter and the two Hall sensors have an insignificant energy consumption. Such small consumption (nominally less than 0.2 J) results in a total consumption of less than 0.4 J for a 10-minute operating cycle. For a full charging time of 20 minutes which results in a nominal amount of energy stored equal to 32.6 J, it is safe to say that the system can achieve autonomous operation.

1.7. Conclusions – Future Work

1.7.1. General Conclusions

As mentioned above, the three devices developed, after they are developed, calibrated and developed into professional devices, will support the Accreditation of the Laboratory of Electronic Sensors of the School of Electrical and Computer Engineering of NTUA and EPISEY according to the ISO 17025 & ISO 17020 standard for measurement of the distribution of the magnetic permeability and consequently the measurement of the distribution of residual stresses in steels.

The experimental devices that were presented were aimed at monitoring and Non-Destructive Testing of materials and components through their magnetic properties. In this context, an attempt was made to manufacture sensors that would provide the precision needed, but also to ensure their operation in special conditions such as those found in industrial construction sites where it is not easy to supply them with electricity and therefore autonomy is necessary.

By studying these sensors, it became clear that their theoretical analysis as magnetic circuits helps to better understand the phenomena that affect their operation and performance. In the following, some issues that emerged as future work during this analysis are presented.

1.7.2. Proposed Multiple Hall Sensors Sensing Element

By examining the measurements of the experiment of 1.4.2 we find that independent measurements can be executed simultaneously in order to monitor any change in the SU-T's anisotropy. It is also suggested that the three sensors are too few to give satisfactory portrayal of these changes, so a topology with a greater number of Hall sensors is found preferable. Figure 44 shows one such topology of nine *SS49E* Hall sensors, which is the optimum number so that their centers are close to the examination point and the measurement can be considered accurate. The sensors which are omitted from the figure, would be placed one for each leg of the topology. In blue, a single permanent magnet is indicated. The suggested topology fits in a cylinder of less than 30 mm in diameter.

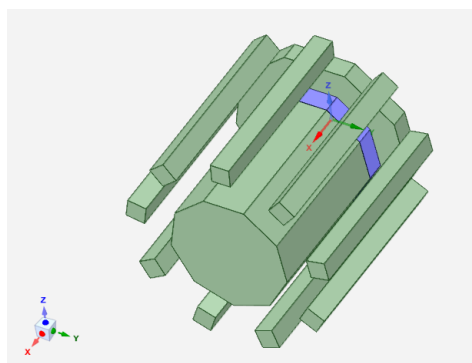


Figure 44. Suggested topology of Multiple Hall Sensor with 9 Hall sensors (created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).

Figure 45 shows the simulated pattern of the resulting magnetic circuit.

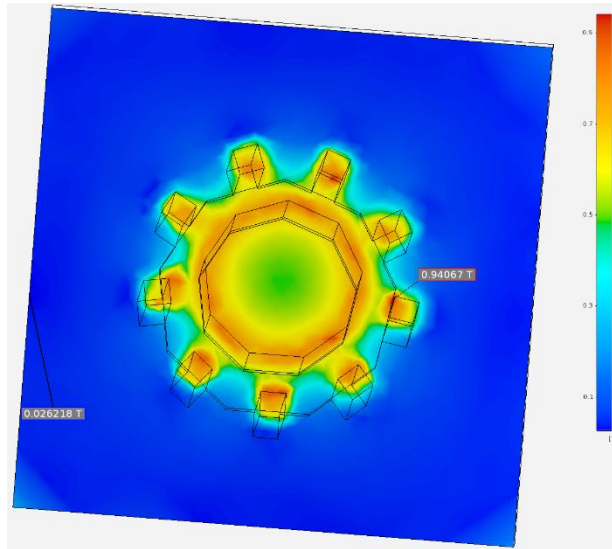


Figure 45. Simulation of magnetic field pattern of steel under test (created with ANSYS R19.2, licensed to the NTUA).

The circuit's maximum measurement is near the legs of the sensor, $B = 0.94 \text{ T}$, while for the location of the Hall sensors it is measured at $B = 0.81 \text{ T}$. Due to the smaller dimensions of the magnetic circuit, the simulation shows a more clearly symmetrical pattern for the magnetic field of the magnetic circuit. Also, by using a single PM, both the magnetic circuit (Figure 46) and the equations (0.6) to (0.9) that describe it, are simplified.

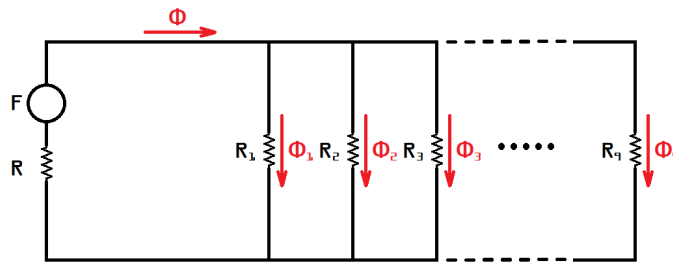


Figure 46. Multiple Hall sensor magnetic circuit.

$$F + \Phi_1 \cdot R_1 + \Phi \cdot R = 0 \quad (0.6)$$

$$F + \Phi_2 \cdot R_2 + \Phi \cdot R = 0 \quad (0.7)$$

...

$$F + \Phi_9 \cdot R_9 + \Phi \cdot R = 0 \quad (0.8)$$

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \dots + \Phi_9 \quad (0.9)$$

Where, R_1 to R_9 indicate the combined magnetic resistance of each leg and the

corresponding part of the steel under-test; F is the magnetomotive force of the PM; R and Φ the magnetic resistance of the central pole and its magnetic flux density respectively; and Φ_1 to Φ_9 are the magnetic flux densities for each leg.

Design for a sensor device such as this could also be improved by not using the *SS49E* Hall sensors and instead, designing a single integrated circuit (IC) that would include multiple Hall sensors whose number would be determined by experimental data and also the manufacturing capabilities of the IC provider. This IC could be placed as part of a cylindrical sensor of no more than $\varnothing 5$ mm, as shown in Figure 47.

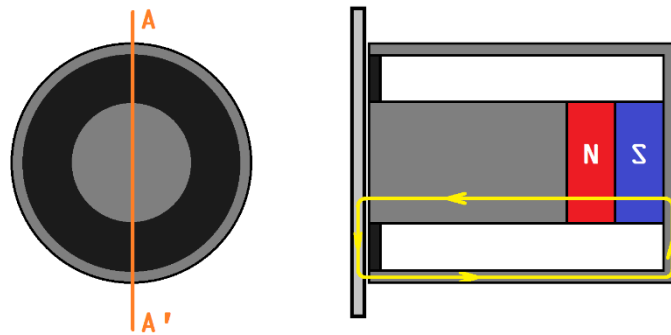


Figure 47. Cylinder-shaped Multiple Hall effect sensor. Bottom view (left) and side view of the AA' section (right).

In Figure 47 the black area which indicates the multiple Hall sensor IC. Also, the closed yellow line indicates the path of magnetic flux for each of the included Hall sensors. Red and blue areas indicate the North and South poles of a PM respectively, dark grey indicates the sensor's ferromagnetic material which forms the magnetic circuit, while light grey indicates the SU-T.

Furthermore, a number of these devices could be connected in an array type configuration so that data could be exchanged and transmitted in an Internet of Things compatible arrangement.

1.7.3. Proposed Three-dimensional harvester

Examination of the harvester's operation shows that although it meets the energy demands of this application its sufficiency could be improved by rethinking its design. This

is because a) the inertial mass inside the microgenerator is subject to internal friction that is the cause for energy loss and b) external settings, like the naval environment mentioned above, usually have oscillations in more than one dimension which is kinetic energy that could also be harvested. To account for both of these reasons a spherical design is proposed as seen in Figure 48.

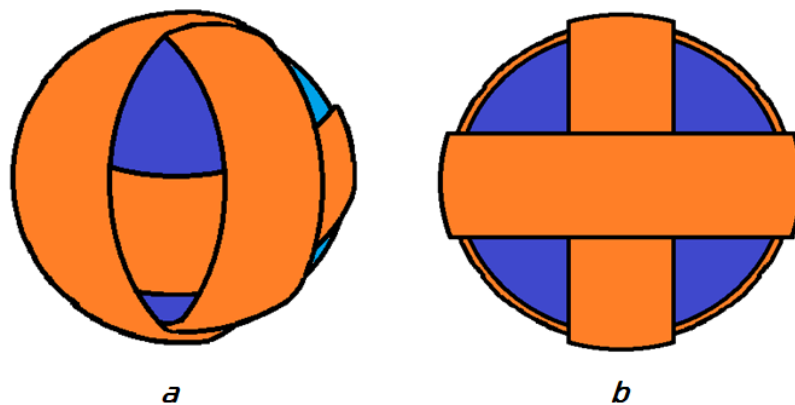


Figure 48. 3D design of future work configuration for a 3-dimensional harvester: (a) side view; (b) front view.

In this proposed design, the harvester's cylindrical tube is replaced with a sphere with three coils wrapped around it to account for all three spatial dimensions. Acting as inertial mass, a set of permanent magnets, similar to the original generator, only instead of levitating they would be coated in rubber that would allow bouncing of the sphere's internal walls through elastic collision.

Expanding on this design, since the frequency of the external vibration would typically be different in each direction, the spherical shape could be replaced with an ellipsoid. The length of the ellipsoid in each direction would have to be determined experimentally, to achieve the maximum efficiency, accounting for the size of the inertial mass, the length of each coil and the external frequency of the oscillation.

Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Περιοδικά

1. Pattakos, P.; Katsoulas, A.; Angelopoulos, S.; Ktena, A.; Tsarabaris P.; Hristoforou, E. "Development of an Autonomous Magnetic Permeability Sensor," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 59, no. 2, pp. 1-4, Feb. 2023, Art no. 6000104, doi: 10.1109/TMAG.2022.3205106.
2. Pattakos, P.; Angelopoulos, S.; Katsoulas, A.; Ktena, A.; Hristoforou, E. Magnetic Harvester for an Autonomous Steel Health Monitoring System Based on Hall Effect Measurements. Micromachines 2023, 14, 28. <https://doi.org/10.3390/mi14010028>.
3. Pattakos, P.; Angelopoulos, S.; Ktena, A.; Hristoforou, E. "Multiple Hall Sensors Device for In-Plane Anisotropy Measurements in Ferrous Steels," in IEEE Transactions on Magnetics, 2023, submitted for publication.

Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Συνέδρια

1. P. Pattakos, A. Katsoulas, S. Angelopoulos, A. Ktena and E. Hristoforou, "Magnetic harvester for autonomous steel health monitoring sensors," 2022 7th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM), 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/SEEDA-CECNSM57760.2022.9933000.