



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάπτυξη Αισθητήρα Μαγνητικού Χαρακτηρισμού Χαλύβων

Παναγιώτης Α. Κώτης

Επιβλέπων: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάπτυξη Αισθητήρα Μαγνητικού Χαρακτηρισμού Χαλύβων

Παναγιώτης Α. Κώτης

Επιβλέπων: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10η Ιουλίου 2024

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου

.....
Ιωάννης Γκόνοσ

.....
Κωνσταντίνος Πολιτόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2024

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

Copyright © Παναγιώτης Α. Κώτης, 2024

All rights reserved. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην σύγχρονη εποχή, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για αξιόπιστο έλεγχο της ποιότητας και της υγείας των μετάλλων (κυρίως φερρομαγνητικών υλικών) σε διάφορες βιομηχανικές χρήσεις τους, όπως μηχανές, μεταλλικά εξαρτήματα, υλικά κατασκευής, δομικά υλικά κ.α. Ο έλεγχος της ποιότητας τόσο κατά την παραγωγή όσο και κατά την συντήρηση, των εν λόγω υλικών, αποτελεί πολύ σημαντικό στοιχείο ως προς την αποφυγή παραγωγής συσκευών, οι οποίες αποτυγχάνουν να επιτύχουν τον σκοπό για τον οποίο δημιουργήθηκαν αλλά και επιδιόρθωσης της υγείας εκείνων, οι οποίες έχουν ήδη δημιουργηθεί και εγκατασταθεί στο, εν λόγω, προϊόν/έργο και απαιτούν την απαραίτητη συντήρηση προς αποφυγή κατάρρευσής του.

Οι μη καταστροφικοί αισθητήρες δοκιμών έχουν αποδειχθεί ότι είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος προσδιορισμού της ποιότητας, της δομής και της σύστασης των υλικών, αφού μπορούν να εντοπίσουν ανομοιογένειες, ελαττώματα και ατοπήματα, όχι μόνο κατά την κατασκευή τους αλλά επίσης κατά τη συντήρηση, χωρίς να παρεμποδίζουν ή να παρεμποδίζεται η χρήση τους.

Στην παρούσα εργασία, θα τονιστεί το πως, με την μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας σε ένα υλικό (μέταλλο), η οποία αποτελεί μη καταστροφική μέθοδο, μπορεί να εκτιμηθεί η ποιότητα και η υγεία ενός υλικού, σε όλο το εύρος του, συσχετίζοντας τις μαγνητικές του ιδιότητες με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την εκάστοτε μέτρηση.

Οι μετρήσεις και τα δεδομένα, τα οποία συλλέχθηκαν, απορρέουν από έναν αισθητήρα multiple hall effect sensor, ο οποίος αποτελείται από μόνιμους μαγνήτες για την διέγερση του και η έξοδος λαμβάνεται μέσω αισθητήρων Hall στο κάτω μέρος του αισθητήρα, περιέχει κομμάτια ηλεκτρικού χάλυβα και μια κοινή βίδα με παξιμάδι.

Λέξεις-κλειδιά: αισθητήρας μαγνητικής διαπερατότητας, ποιότητα-υγεία υλικού, μέταλλα, φερρομαγνητικά υλικά, αισθητήρες Hall, μόνιμοι μαγνήτες

ABSTRACT

In modern times, there is a great need for reliable control of the quality and condition of metals (mainly ferromagnetic materials) in their various industrial uses, such as machines, parts, construction materials etc. Quality control, both during production and maintenance, of the materials in question, is a very important element in terms of avoiding the production of devices that fail to achieve the purpose for which they were created, as well as repairing those that have already been created and installed in the product/project and require the necessary maintenance to avoid its collapse.

Non-destructive testing sensors have proven to be the most effective way to determine the quality, structure and composition of materials, as they can detect inhomogeneities, defects and misalignments, not only during manufacturing but also during maintenance, without interfering with or prevent their use.

In this work, the focus will be on how, by measuring the magnetic permeability in a material (metal), which is a non-destructive method, there can be an assessment of the quality and condition of a material, in its entire range, by relating its magnetic properties with the results received from each measurement.

The measurements and data collected are from a multiple hall effect sensor, which consists of permanent magnets for its excitation and the output is obtained through Hall sensors at the bottom of the sensor, it contains pieces of electrical steel and a common screw with a nut.

Keywords: magnetic permeability sensor, material condition and quality, metals, ferromagnetic materials, Hall sensors, permanent magnets

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, Κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου για την εμπιστοσύνη, την υπομονή και την βοήθεια, που μου πρόσφερε στην διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Κυρίους Χρόνη Παττακό και Σπύρο Αγγελόπουλο, που ενήργησαν ως επιβλέποντες της εργασίας μου, και ήταν ουσιαστικοί ως προς τις ενδείξεις τους, για την συγγραφή της εργασίας και των πειραμάτων, αλλά και το ευχάριστο κλίμα που δημιουργήθηκε στην συνεργασία μας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, οι οποίοι ήταν δίπλα μου σε κάθε δυσκολία στην διάρκεια των σπουδών μου, και τα αδέρφια μου, οι οποίοι κάθε μέρα, μου δείχνανε άμεσα την αυτοπεποίθησή τους και την πίστη τους σε έμένα και στον στόχο μου. Θα ήθελα, ακόμη, να ευχαριστήσω την συνάδελφο και πρώην κοπέλα μου, Ζωή, η οποία με βοήθησε ουσιαστικά, με ατελείωτες ώρες διαβάσματος παρέα, συζητήσεων επί των μαθημάτων και κοινή αναζήτηση λύσεων σε τυχόν απορίες, πάντοτε με κατανόηση και υποστήριξη.

Το μεγαλύτερο και βαθύτερο ευχαριστώ, οφείλω να το δώσω στους γονείς μου, Αναστάσιο και Ελένη, οι οποίοι πίστευαν σε μένα από την αρχή, με στήριξαν, με ενθάρρυναν και με υπέμειναν σε αυτή την πορεία μου, στα φοιτητικά μου χρόνια.

Σας ευχαριστώ πολύ όλους.

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract	vii
Ευχαριστίες	ix
1. Ηλεκτρομαγνητισμός	1
Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία	1
Εξισώσεις Maxwell, φως και ειδική θεωρία σχετικότητας	3
Μαγνητισμός	9
Ορισμοί	10
Νόμοι μαγνητισμού και Ιδιότητες	11
Μαγνητικό δίπολο	14
Μαγνητικά Υλικά	16
Μαγνητικά Υλικά σε Κατηγορίες	16
Φερρομαγνητικά Υλικά	16
Βρόχος Υστέρησης	19
Επιδερμικό Φαινόμενο και Δινορρεύματα	23
Θεωρητικό Υπόβαθρο	25
2. Μαγνητικά Κυκλώματα	25
Ορισμός και Περιγραφή	25
Νόμοι Μαγνητικών Κυκλωμάτων	26
Μαγνητεγερτική Δύναμη	29
Μαγνητικός Θόρυβος	30
Μοντελοποίηση	31
Μακροσκοπικά/Φαινομενολογικά Μοντέλα	32
Μοντέλο Stoner-Wohlfarth Συνεκτικής Περιστροφής	33
Ατομιστικά Μοντέλα	35
3. Μαγνητικοί Αισθητήρες	42
Αισθητήρας fluxgate	45
Αισθητήρες πεδίου	46
Αισθητήρας Θέσης	47
Αισθητήρας SQUID	49

Αισθητήρες επαγωγής	51
Αισθητήρας Hall	53
Αισθητήρας Μαγνητικής Διαπερατότητας	56
Πολυπαραμετρικοί Αισθητήρες.....	58
Αισθητήρες Μαγνητοελαστικού Στρες.....	59
Αισθητήρες Ασφαλείας	61
Έξυπνοι Αισθητήρες.....	64
Αισθητήρας Πολλαπλών Hall	66
4. Πειραματικό Μέρος.....	74
Περιγραφή της Διάταξης.....	74
Όργανα και Εξοπλισμός	84
Προς χρήση Δοκίμια	86
Πειραματική Διαδικασία	88
Μετρήσεις	89
Επεξεργασία Μετρήσεων	110
5. Συμπεράσματα.....	112
Σχετικά με το πείραμα	117
Μελλοντική εργασία.....	117
Βιβλιογραφία	120
Παράρτημα	124

1. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

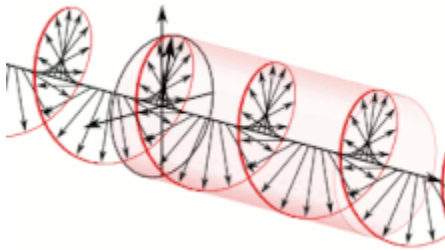
ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

Στη φυσική, ο **ηλεκτρομαγνητισμός** είναι μια αλληλεπίδραση που συμβαίνει, μεταξύ σωματιδίων με ηλεκτρικό φορτίο, μέσω ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη είναι μία από τις τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις της φύσης. Ο ηλεκτρομαγνητισμός μπορεί να θεωρηθεί, ως ένας συνδυασμός ηλεκτροστατικής και μαγνητισμού, δύο ξεχωριστών αλλά στενά αλληλένδετων φαινομένων. Οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις εμφανίζονται μεταξύ δύο οποιωνδήποτε φορτισμένων σωματιδίων, προκαλώντας έλξη μεταξύ σωματιδίων με αντίθετα φορτία και απώθηση μεταξύ σωματιδίων με το ίδιο φορτίο, ενώ ο μαγνητισμός είναι μια αλληλεπίδραση που συμβαίνει αποκλειστικά, μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων, σε σχετική κίνηση. Αυτά τα δύο φαινόμενα συνδυάζονται για να δημιουργήσουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία, κοντά σε σωματίδια με φορτίο, τα οποία μπορούν να επιταχύνουν άλλα φορτισμένα σωματίδια μέσω της δύναμης Lorentz [1].

Μόλις στα τέλη του 18^{ου} αιώνα, οι επιστήμονες άρχισαν να αναπτύσσουν μια μαθηματική βάση για την κατανόηση της φύσης των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων. Τον 18^ο και τον 19^ο αιώνα, εξέχοντες επιστήμονες και μαθηματικοί, όπως ο **Coulomb**, ο **Gauss** και ο **Faraday** ανέπτυξαν ομώνυμους νόμους που βοήθησαν στην εξήγηση του σχηματισμού και της αλληλεπίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Αυτή η διαδικασία κορυφώθηκε τη δεκαετία του 1860 με την ανακάλυψη των εξισώσεων του

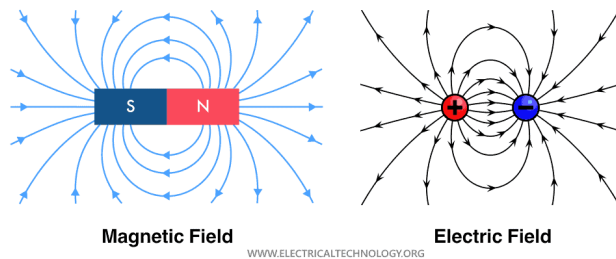
Maxwell, ενός συνόλου τεσσάρων μερικών διαφορικών εξισώσεων που παρέχουν μια πλήρη περιγραφή των κλασικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Οι εξισώσεις του Maxwell προέβλεψαν, επίσης, την ύπαρξη αυτοσυντηρούμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ο Maxwell, υπέθεσε ότι τέτοια κύματα συνθέτουν το ορατό φως, το οποίο αργότερα αποδείχθηκε ότι ήταν αληθινό [1].

Για την ιστορία, το μακρινό 1820, ο Hans Christian Ørsted παρατήρησε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα σύρμα, προκάλεσε την κίνηση μιας βελόνας σε μία πυξίδα. Αυτή η παρατήρηση οδήγησε στην δημιουργία του πρώτου γαλβανόμετρου, το οποίο χρησιμοποιείται για την μέτρηση ηλεκτρικού ρεύματος. Η ανακάλυψη του Ørsted αντιπροσώπευε, επίσης, ένα σημαντικό βήμα προς μια ενοποιημένη έννοια της ενέργειας [1].



ΕΙΚΟΝΑ 1: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ, ΕΝΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΥΚΛΙΚΑ ΠΟΛΩΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.

Magnetic Field vs. Electric Field



ΕΙΚΟΝΑ 2: ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΣΕ ΒΟΡΕΙΟ-ΝΟΤΙΟ ΠΟΛΟ ΜΑΓΝΗΤΗ ΚΑΙ ΣΕ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ, ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ.

ΕΙΣΩΣΕΙΣ MAXWELL, ΦΩΣ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Ο **James Clerk Maxwell** ήταν ένας Σκωτσέζος μαθηματικός και επιστήμονας, ο οποίος διατύπωσε τις περίφημες εξισώσεις Maxwell περιγράφοντας τον ηλεκτρομαγνητισμό. Οι εξισώσεις αυτές αναφέρονται παρακάτω ως εξής [2]:

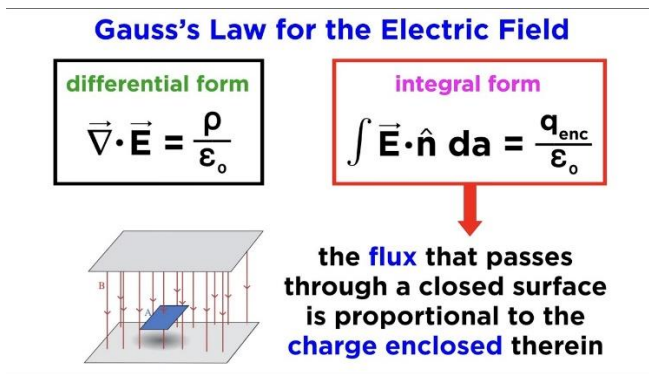
➤ **Νόμος του Gauss**

$$\oiint \tilde{\mathbf{D}} \cdot d\tilde{\mathbf{S}} = \iiint \rho dV \quad 1.1$$

Ολοκληρωτική μορφή Νόμου Gauss

$$\nabla \cdot \tilde{\mathbf{D}} = \rho \quad 1.2$$

Διαφορική μορφή Νόμου Gauss



ΕΙΚΟΝΑ 3: ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ GAUSS ΓΙΑ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ, Η ΡΟΗ ΠΕΔΙΟΥ ΠΟΥ ΔΙΑΠΕΡΝΑ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΜΙΑ ΚΛΕΙΣΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΕΙΝΑΙ ΑΝΑΛΟΓΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΠΟΥ ΥΠΑΡΧΕΙ ΣΕ ΑΥΤΗ.

Ο Νόμος του Γκάους είναι η εφαρμογή του γενικευμένου θεωρήματος της απόκλισης στην ηλεκτροστατική, δίνοντας τη σχέση ισοδυναμίας μεταξύ μιας οποιαδήποτε ροής, που ρέει έξω από μια οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια και το αποτέλεσμα των εσωτερικών πηγών, όπως το ηλεκτρικό φορτίο ή η μάζα, που περιέχονται στον όγκο που περικλείει η επιφάνεια. Ο νόμος αυτός αναλύει ότι οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές ξεκινούν από το θετικό φορτίο και διαδίδονται σφαιρικά προς τα έξω. Αντίστοιχα, για το αρνητικό, ότι οι δυναμικές γραμμές εισέρχονται σφαιρικά προς αυτό. Στην ολοκληρωτική του μορφή, ο νόμος αναλύει ότι το ολοκλήρωμα των προκείμενων ολοκληρωτικών γραμμών σε δεδομένη κλειστή επιφάνεια, ισούται με το φορτίο που η επιφάνεια περικλείει [2].

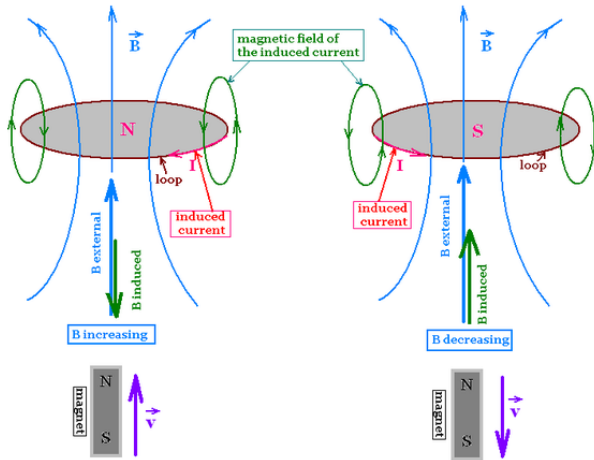
➤ Νόμος του Faraday

$$\oint \vec{\mathcal{E}} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \iint \vec{\mathcal{B}} \cdot d\vec{S} \quad 1.3$$

Ολοκληρωτική μορφή Νόμου Faraday

$$\nabla \times \vec{\mathcal{E}} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad 1.4$$

Διαφορική μορφή Νόμου Faraday



ΕΙΚΟΝΑ 4: ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ FARADAY, ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΦΟΡΑ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΙΑ ΚΛΕΙΣΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΠΟΥ ΚΑΘΟΡΙΖΕΙ ΤΗΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΥΤΗΣ, ΘΑ ΥΠΑΡΧΕΙ ΑΛΛΟΤΕ ΑΥΞΗΣΗ ΚΑΙ ΑΛΛΟΤΕ ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ.

Η εξίσωση Maxwell-Faraday περιγράφει μαθηματικά, το γεγονός ότι ένα στρόβιλο ηλεκτρικό πεδίο συνοδεύεται ή και παράγεται, πάντοτε, από ένα χρονικώς μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Σε περίπτωση, που το μαγνητικό πεδίο παραμένει σταθερό, το ηλεκτρικό πεδίο δε περιστρέφεται. Ο νόμος του Faraday δηλώνει ότι Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (ΗΕΔ), που μπορεί να ορισθεί ως το ηλεκτρομαγνητικό έργο που παράγεται πάνω σε ένα φορτίο, κατά τη διαδρομή, σε έναν αγωγίμο βρόγχο, δημιουργείται πάνω στον βρόγχο αυτό, όταν η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια που περικλείει ο βρόχος, μεταβάλλεται χρονικά. Αυτό σημαίνει ότι, αν υπάρξει μεταβολή του μαγνητικού πεδίου που διέρχεται απο μια επιφάνεια, λόγω της μεταβολής,

θα οδηγηθεί σε δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου στο σύνορο της επιφάνειας [2].

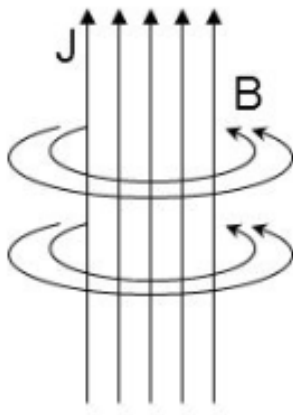
➤ **Νόμος του Ampere-Maxwell**

$$\oint \vec{\mathcal{H}} \cdot d\vec{l} = \int \vec{\mathcal{J}} \cdot d\vec{\mathcal{S}} + \frac{d}{dt} \iint \vec{\mathcal{D}} \cdot d\vec{\mathcal{S}} \quad 1.5$$

Ολοκληρωτική μορφή Νόμου Ampere-Maxwell

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathcal{H}} = \vec{\mathcal{J}} + \frac{d\vec{\mathcal{D}}}{dt} \quad 1.6$$

Διαφορική μορφή Νόμου Ampere-Maxwell



ΕΙΚΟΝΑ 5: ΝΟΜΟΣ AMPERE-MAXWELL, ΈΝΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΑΠΟ ΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΡΕΥΜΑ ΚΑΙ ΑΠΟ ΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΠΟΥ ΜΕΤΑΒΑΛΛΕΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ.

Αρχικά, ο νόμος του Αμπέρ συσχετίζει το μαγνητικό πεδίο, σε έναν κλειστό βρόγχο, με το ηλεκτρικό ρεύμα, που ρέει μέσα από το βρόγχο αυτό. Πρόκειται για το μαγνητικό ανάλογο του νόμου του Γκάους. Οι εξισώσεις περιγράφουν την επαγωγή του μαγνητικού πεδίου, λόγω τόσο της μεταβολής του ηλεκτρικού πεδίου, όσο και της ύπαρξης ηλεκτρικού ρεύματος. Σε περίπτωση σταθερού ηλεκτρικού πεδίου, το μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται γύρω από τοπικό ηλεκτρικό ρεύμα, εφόσον αυτό έχει δημιουργηθεί. Σε περίπτωση μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου, δημιουργείται συνιστώσα μαγνητικού πεδίου, που περιστρέφεται γύρω από τη μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου και υπερτίθεται στη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Το συνολικό μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται από την υπέρθεση αυτή. Στην ολοκληρωτική μορφή, όταν διέρχεται ρεύμα κάθετα σε επιφάνεια ή το ηλεκτρικό πεδίο που διέρχεται από αυτή μεταβάλλεται, τότε δημιουργείται μαγνητικό πεδίο στην άκρη της. Αυτός ο νόμος βοήθησε τον Maxwell στο να υποστηρίξει την αρχική του πρόβλεψη πως το φως είναι μια μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος [2, 3].

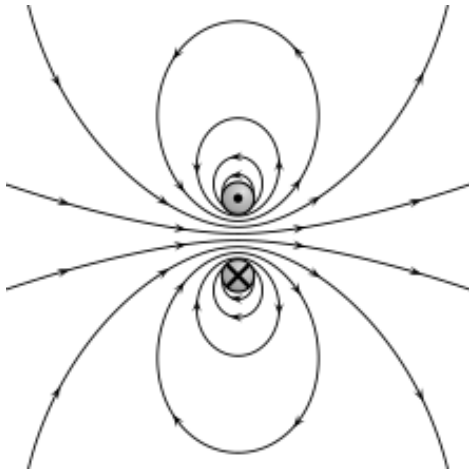
➤ **Νόμος του Gauss για το μαγνητικό πεδίο**

$$\oiint \tilde{\mathbf{B}} \cdot d\tilde{\mathbf{S}} = 0 \quad 1.7$$

Ολοκληρωτική μορφή Νόμου Gauss για το μαγνητικό πεδίο

$$\tilde{\nabla} \cdot \tilde{\mathbf{B}} = 0 \quad 1.8$$

Διαφορική μορφή Νόμου Gauss για το μαγνητικό πεδίο



ΕΙΚΟΝΑ 6: ΝΟΜΟΣ GAUSS ΓΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ, Η ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΡΟΗ ΟΠΟΙΑΣΔΗΠΟΤΕ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΕΙΝΑΙ ΙΣΗ ΜΕ ΜΗΔΕΝ. ΑΠΟΥΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ.

Ο νόμος του Gauss για το μαγνητισμό δηλώνει ότι δεν υπάρχουν «μαγνητικά φορτία», δηλαδή μαγνητικά μονόπολα, ανάλογα με τα ηλεκτρικά φορτία. Αυτό σημαίνει ότι η συνολική μαγνητική ροή είναι πάντα μηδέν, μέσω Γκαουσιανών επιφανειών. Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι πάντοτε κλειστές καμπύλες και αυτό συνεπάγεται ότι όσες φορές θα εισέρχονται σε μια κλειστή επιφάνεια, τόσες και θα εξέρχονται. Με άλλα λόγια, αυτή η εξίσωση δηλώνει ότι οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου δεν αρχίζουν, ούτε τελειώνουν, αλλά κάνουν βρόγχους ή επεκτείνονται στο άπειρο και γυρνάνε πάλι πίσω. Κάθε δυναμική γραμμή μαγνητικού πεδίου που εισέρχεται σε ένα δεδομένο όγκο, πρέπει από κάπου να βγει από αυτόν τον όγκο [3].

Σε αυτό το σημείο, αναφέρεται ότι όλα τα μεγέθη έχουν τις μονάδες μέτρησης που αντιστοιχούν στο σύστημα S.I.

$$\tilde{E}(\tilde{r}, t) = \text{Ένταση ηλεκτρικού πεδίου (V/m)}$$

$$\tilde{D}(\tilde{r}, t) = \text{Διηλεκτρική μετατόπιση (C/m}^2\text{)}$$

$\vec{H}(\vec{r}, t)$ = Ένταση μαγνητικού πεδίου (A/m)

$\vec{B}(\vec{r}, t)$ = Μαγνητική επαγωγή (T)

J = πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος (A/m²)

Συνδυάζοντας κατάλληλα τις εξισώσεις του Maxwell, συμπεραίνεται η δημιουργία κυμάτων ηλεκτρομαγνητικής φύσης. Αυτές οι κυματικές εξισώσεις, που λαμβάνονται για το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο, καταδεικνύουν ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν ταχύτητα ίση με αυτήν της ταχύτητας του φωτός. Αυτό ήταν και το πρώτο σημαντικό αποτέλεσμα, που οδήγησε στην θεμελίωση του συμπεράσματος, ότι το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Η ανάγκη εύρεσης ενός μετασχηματισμού που θα ικανοποιεί τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, οδήγησε στην εύρεση των λεγόμενων μετασχηματισμών Λόρεντζ ενώ στο ανώτατο όριο ταχύτητας του φωτός λήφθηκαν υπόψη οι αρχές της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας που έθεσε ο Άλμπερτ Αϊνστάιν [3].

ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

Μαγνητισμός, γενικότερα, χαρακτηρίζεται το φαινόμενο στο οποίο κάποια υλικά, λεγόμενα μαγνήτες, ασκούν ελκτικές ή απωστικές δυνάμεις σε άλλα υλικά, οφειλόμενες στην κίνηση ηλεκτρικών φορτίων. Οι ιδιότητες των μαγνητών αποδίδονται στη συσσώρευση της λεγόμενης μαγνητικής μάζας στους πόλους τους. Κάποια γνωστά υλικά, που παρουσιάζουν εύκολα ανιχνεύσιμες μαγνητικές ιδιότητες, είναι το νικέλιο, ο σίδηρος, μερικά είδη

ατσαλιού και άλλα, αν και όλα τα υλικά επηρεάζονται σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό από την παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου [4].

ΟΡΙΣΜΟΙ

Μαγνητικό πεδίο ονομάζεται, γενικά, ο χώρος, εντός του οποίου ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις σε κινούμενα ηλεκτρικά φορτία. Το μαγνητικό πεδίο περιβάλλει τον μαγνήτη και χαρακτηρίζεται ασθενές ή ισχυρό, και ομοιόμορφο ή ανομοιόμορφο, αν οι μαγνητικές γραμμές του είναι παράλληλες ή όχι. Μαγνητικό πεδίο δημιουργούν και τα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία και σχηματίζεται και γύρω από ρευματοφόρους αγωγούς [4]. Ουσιαστική διαφορά μεταξύ ηλεκτρικού φορτίου και μαγνητικού μονοπόλου είναι η εξής: ενώ μεμονωμένα ηλεκτρικά φορτία υπάρχουν (θετικά ή αρνητικά), μαγνητικά μονόπολα δεν υπάρχουν. Το μέγεθος που δείχνει, πόσο ισχυρό είναι το μαγνητικό πεδίο, ονομάζεται πυκνότητα μαγνητικής ροής ή μαγνητική επαγωγή και συμβολίζεται με B και μετριέται σε T (Tesla) [4].

Όταν ένα φορτίο, (q), κινείται με ταχύτητα, (u), μέσα σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο, τότε ασκείται σε αυτό μια δύναμη F για την οποία ισχύει:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{u} \times \vec{B} \quad 1.9$$

Υπάρχει και η έννοια της **έντασης του μαγνητικού πεδίου (H)**, η οποία είναι χαρακτηριστικό μέγεθος ενός μαγνήτη. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου μετριέται σε A/m [5]. Η μαγνητική επαγωγή με την ένταση του μαγνητικού πεδίου συσχετίζονται μεταξύ τους με την σχέση:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}) \quad 1.10$$

όπου **M είναι η μαγνήτιση**, δηλαδή η συνεισφορά του μέσου, μέσα στο οποίο έχει αναπτυχθεί το μαγνητικό πεδίο [5]. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου, γύρω από ρευματοφόρο αγωγό ρεύματος I και μήκους l, ορίζεται ως:

$$\oint H dl = I \quad 1.11$$

Μπορούν να οριστούν οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές, οι οποίες φέρονται προσανατολισμένες και δείχνουν τη φορά της έντασης του πεδίου. Αυτές δεν περιορίζονται μόνο εντός του μαγνήτη αλλά τον περιβάλλουν και εκτός αυτού, με αφετηρία το βόρειο μαγνητικό πόλο και κατάληξη στο νότιο μαγνητικό πόλο. Ο αριθμός των μαγνητικών δυναμικών γραμμών είναι ανάλογος της έντασης του μαγνητικού πεδίου, που σημαίνει ότι όσο περισσότερες δυναμικές γραμμές διέρχονται από ένα σημείο ενός μαγνητικού πεδίου, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ένταση του πεδίου στο σημείο αυτό. Η **μαγνητική ροή** μπορεί να οριστεί από το πλήθος των μαγνητικών γραμμών του πεδίου B σε μια επιφάνεια εμβαδού S, μέσω της σχέσης [5]:

$$\Phi = \tilde{B} \cdot S \quad 1.12$$

ΝΟΜΟΙ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

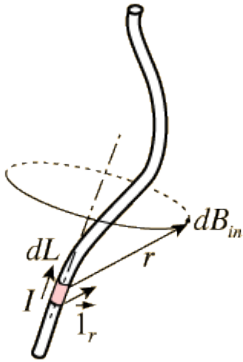
Έχουν εδραιωθεί κάποιοι νόμοι του μαγνητισμού μέσω των θεμελιωδών μεγεθών του μαγνητικού πεδίου. Αυτοί ορίζονται παρακάτω:

➤ **Νόμος Biot-Savart**

Ο νόμος των Μπιό-Σαβάρ είναι μια εξίσωση του ηλεκτρομαγνητισμού που περιγράφει το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής B , μέσω του μέτρου και της διεύθυνσης του ηλεκτρικού ρεύματος, της απόστασης από το ηλεκτρικό ρεύμα, και της μαγνητικής διαπερατότητας [5].

$$\tilde{B}(\tilde{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\tilde{J} \cdot d\tilde{l} \times \tilde{r}'}{|\tilde{r}'|^3} \quad 1.13$$

Μαθηματική σχέση νόμου Biot-Savart



ΕΙΚΟΝΑ 7: ΝΟΜΟΣ ΒΙΟΤ-ΣΑΒΑΡΤ, ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΙ ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΑΠΟ ΣΥΝΕΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΡΕΥΜΑ. ΣΥΣΧΕΤΙΖΕΙ ΤΟ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΠΕΔΙΟ ΜΕ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΡΕΥΜΑ ΠΟΥ ΤΟ ΠΑΡΑΓΕΙ ΩΣ ΠΡΟΣ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΕΣ ΤΟΥ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ (ΠΛΑΤΟΣ, ΦΟΡΑ, ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ, ΜΗΚΟΣ).

Στην παραπάνω σχέση, το μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, το $d\mathbf{l}$ είναι ένα διάνυσμα πάνω σε ένα μονοπάτι C , του οποίου το μέτρο είναι το μήκος της παραγωγού του υλικού του σύρματος στην κατεύθυνση του συμβατικού ρεύματος, \mathbf{l} είναι ένα σημείο πάνω στο μονοπάτι C και $\mathbf{r}' = \mathbf{r} - \mathbf{l}$ [5].

➤ **Νόμος Ampere**

Με βάση ότι αναφέρθηκε και προηγουμένως σχετικά με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, μπορεί να οριστεί, αντί για ένα ρευματοφόρο αγωγό, N τέτοιους αγωγούς που διαρρέονται από ρεύμα I και έτσι να συνεπάγεται η σχέση:

$$\oint H dl = NI \quad 1.14$$

Για την ολοκληρωμένη μελέτη του μαγνητισμού, πρέπει να δοθεί όρισμα σε μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες του μαγνητικού πεδίου, την **μαγνητική διαπερατότητα**.

Η μαγνητική διαπερατότητα μ , είναι ο λόγος της έντασης της μαγνητικής επαγωγής προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο του χώρου. Η μαγνητική διαπερατότητα είναι καθαρός αριθμός. Η μαγνητική διαπερατότητα χαρακτηρίζει τις μαγνητικές ιδιότητες των υλικών, τα οποία ανάλογα προς την τιμή αυτής προσδιορίζονται σε παραμαγνητικά, διαμαγνητικά και σιδηρομαγνητικά υλικά [5]. Σε συνθήκες κενού, αποδεικνύεται ότι η μαγνητική διαπερατότητα είναι ίση με:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad 1.15$$

H/m και η σχέση, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, που συνδέει την μαγνητική επαγωγή με την ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι:

$$\tilde{B} = \mu_0 \cdot \tilde{H} \quad 1.16$$

στο κενό. Σε κάθε άλλο χώρο και υλικό, θα ισχύει:

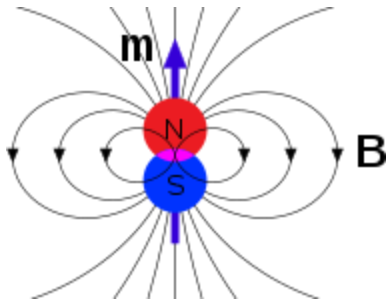
$$\tilde{B} = \mu \cdot \tilde{H} \quad 1.17$$

όπου μ_r είναι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του εκάστοτε υλικού/χώρου, στον οποίο βρίσκεται το μαγνητικό πεδίο και δεν είναι απαραίτητα στάθερο με την θέση και τον χρόνο [5]. Μπορεί να οριστεί και ως:

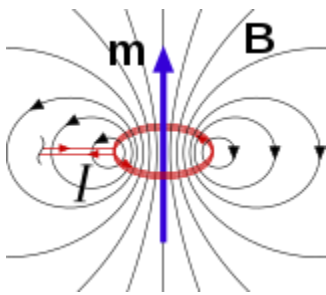
$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad 1.18$$

ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΔΙΠΟΛΟ

Μαγνητικό δίπολο είναι το όριο ενός ζεύγους ετερόνυμων μαγνητικών πόλων, ή ενός κλειστού βρόχου ηλεκτρικού ρεύματος, όταν οι διαστάσεις τους τείνουν προς το μηδέν, ενώ η μαγνητική ροπή τους παραμένει σταθερή. Επιπλέον, μια μορφή ροπής μαγνητικού διπόλου συνδέεται με μία θεμελιώδη κβαντομηχανική ιδιότητα: το σπιν των στοιχειωδών σωματιδίων. Το μαγνητικό πεδίο, γύρω από οποιαδήποτε πηγή μαγνητικών δυνάμεων, μοιάζει όλο και περισσότερο με το πεδίο ενός μαγνητικού διπόλου, καθώς η απόσταση από την πηγή μεγαλώνει [6].



ΕΙΚΟΝΑ 8: ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΔΙΠΟΛΟ ΑΠΟ ΜΑΓΝΗΤΗ ΚΑΙ ΔΙΠΟΛΙΚΗ ΡΟΠΗ Μ.



ΕΙΚΟΝΑ 9: ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΔΙΠΟΛΟ ΑΠΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΡΕΥΜΑ ΚΑΙ ΔΙΠΟΛΙΚΗ ΡΟΠΗ Μ.

Το βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό που παράγεται από πεπερασμένη πηγή δυνάμεων, μπορεί πάντα να αναπαρασταθεί με μία πολυπολική ανάπτυξη. Ο κάθε όρος στην ανάπτυξη αυτή συνδέεται με μία χαρακτηριστική πολυπολική μαγνητική ροπή και ένα δυναμικό με χαρακτηριστικό ρυθμό μείωσης της απόσταση r από την πηγή. Οι διπολικές ροπές έχουν δυναμικό που μειώνεται με την αυξανόμενη απόσταση ως $1/r^2$, οι τετραπολικές ροπές έχουν δυναμικό που μειώνεται ως $1/r^3$, κ.ο.κ.. Για τον λόγο αυτό, από αρκετά μεγάλη απόσταση οποιαδήποτε πηγή μαγνητικού πεδίου, παράγει πεδίο σχεδόν ταυτόσημο με αυτό ενός διπόλου με την ίδια μαγνητική ροπή. Σε αυτή την περίπτωση, παρουσιάζονται διπολικά πεδία παραγόμενα από πεπερασμένες πηγές [7].

ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ

Τα μαγνητικά υλικά ταξινομούνται ανάλογα με την ευαισθησία τους σε διαμαγνητικά, παραμαγνητικά, σιδηρομαγνητικά και αντισιδηρομαγνητικά. Η ευαισθησία αυτή, έχει να κάνει με το σπιν των ηλεκτρονίων, γύρω από τον πυρήνα του ατόμου, καθώς και με την περιστροφή τους γύρω από αυτόν. Το γεγονός αυτό, επηρεάζει την μαγνήτιση του υλικού και έτσι το κατατάσσει σε μια από τις αναφερόμενες κατηγορίες [7].

Διαμαγνητικά είναι τα υλικά, τα οποία δεν ωθούνται από κανέναν από τους δύο πόλους ενός μαγνήτη. Η άπωση αυτή, είναι συνήθως μη-αισθητή και θεωρείται ότι δεν έχουν μαγνητικές ιδιότητες τα εν λόγω υλικά. Υπεραγωγοί και άλλα πολλά υλικά χαρακτηρίζονται ως διαμαγνητικά [8].

Παραμαγνητικά είναι τα υλικά, τα οποία ωθούνται και από τους δύο πόλους ενός μαγνήτη. Η ώθηση αυτή είναι συνήθως μη-αισθητή. Τα στοιχεία των ομάδων IA και IIA του περιοδικού πίνακα θεωρούνται παραμαγνητικά [8].

Φερρομαγνητικά ή σιδηρομαγνητικά είναι τα υλικά τα οποία παρουσιάζουν έντονες μαγνητικές ιδιότητες και συμπεριφορά [8].

Αντισιδηρομαγνητικά είναι τα υλικά, τα οποία προκύπτουν συνήθως μεταξύ των ενώσεων στοιχείων μετάπτωσης, ειδικά στα οξειδία και δεν έχουν μαγνητικές ιδιότητες [8].

ΦΕΡΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Ο φερρομαγνητισμός είναι μια ιδιότητα ορισμένων υλικών (όπως το αλουμίνιο, ο σίδηρος, ο χάλυβας, το κοβάλτιο, το νικέλιο, ο χαλκός κ.λπ.) που έχει ως αποτέλεσμα σημαντική, παρατηρήσιμη μαγνητική διαπερατότητα, που επιτρέπει στο υλικό να σχηματιστεί ένας μόνιμος μαγνήτης. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι γνωστά μέταλλα που έλκονται αισθητά από έναν μαγνήτη, ως συνέπεια της σημαντικής μαγνητικής διαπερατότητάς τους [9].

Μόνιμος μαγνήτης ονομάζεται ένα υλικό, το οποίο αποκτά και διατηρεί τις μαγνητικές του ιδιότητες με την απομάκρυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, το οποίο του προσέφερε αυτές τις ιδιότητες [9].

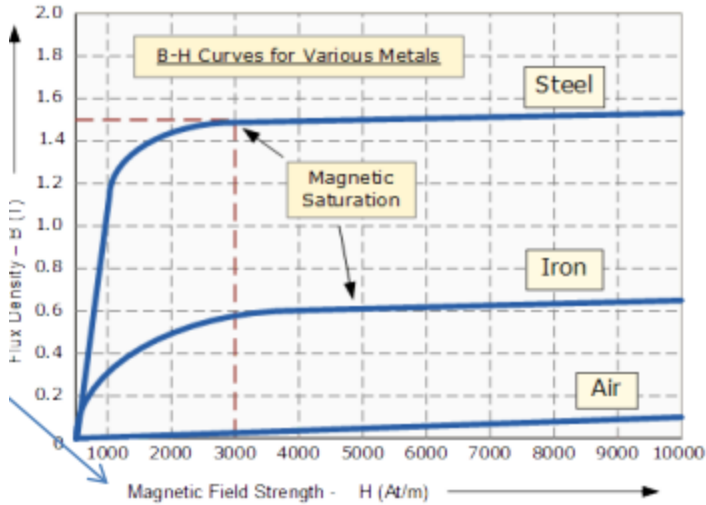
Ο σιδηρομαγνητισμός είναι ο ισχυρότερος τύπος και είναι υπεύθυνος για το κοινό φαινόμενο του μαγνητισμού, στους μαγνήτες που συναντώνται στην καθημερινή ζωή. Ένα καθημερινό παράδειγμα μόνιμου μαγνήτη που σχηματίζεται από σιδηρομαγνητικό υλικό, είναι ένας μαγνήτης ψυγείου, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται για τη συγκράτηση του χαρτιού σε μια πόρτα ψυγείου και τα μαγνητάκια τύπου σουβενίρ [9].

Ο σιδηρομαγνητισμός είναι μια ασυνήθιστη ιδιότητα που εμφανίζεται σε λίγα μόνο υλικά. Τα κοινά είναι τα μέταλλα μεταπτώσεως όπως σίδηρος, νικέλιο, κοβάλτιο, χαλκός και τα κράματά τους, και κράματα μετάλλων σπανίων γαιών. Είναι μια ιδιότητα που οφείλεται, όχι μόνο στην χημική σύνθεση ενός υλικού, αλλά στην κρυσταλλική δομή και στην μικροδομή του. Υπάρχουν κράματα σιδηρομαγνητικών μετάλλων, των οποίων τα συστατικά δεν είναι τα ίδια σιδηρομαγνητικά, που ονομάζονται κράματα Heusler. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά μπορούν να χωριστούν σε μαγνητικά μαλακά υλικά, που μπορούν να μαγνητιστούν αλλά δεν τείνουν να παραμείνουν μαγνητισμένα και σε μαγνητικά σκληρά υλικά, που παραμένουν μαγνητισμένα. Οι μόνιμοι μαγνήτες κατασκευάζονται από σκληρά

σιδηρομαγνητικά υλικά, όπως το αλνίκο και ο φερρίτης, που υποβάλλονται σε ειδική επεξεργασία σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο, κατά την κατασκευή, για να ευθυγραμμιστεί η εσωτερική μικροκρυσταλλική δομή τους, γεγονός που καθιστά δύσκολο τον απομαγνητισμό τους. Η συνολική ισχύς ενός μαγνήτη μετριέται από τη μαγνητική του ροπή ή τη συνολική μαγνητική ροή που παράγει. Η μαγνήτιση, ως συνάρτηση του εξωτερικού πεδίου, περιγράφεται από μια καμπύλη υστέρησης [9].

Διαφορά σιδηριμαγνητικών με σιδηρομαγνητικά υλικά

Τα σιδηριμαγνητικά υλικά κατέχουν ηλεκτρόνια που δεν παρουσιάζουν αλληλοαναιρούμενα spin και επομένως, έχουν μόνιμη μαγνητική ροπή, λόγω του ηλεκτρονικού spin. Ισχυρές δυνάμεις αλληλεπίδρασης δημιουργούν αντίρροπες μαγνητικές ροπές στα γειτονικά άτομα, οι οποίες είναι και αλληλοαναιρούμενες. Έτσι, δημιουργούνται και πάλι μαγνητικές περιοχές με μόνιμη μαγνήτιση, μικρότερη από ότι προηγουμένως, όπως και στα σιδηρομαγνητικά υλικά. Τα σιδηριμαγνητικά υλικά χάνουν την αυθόρμητη μαγνήτισή τους, όταν η θερμοκρασία υπερβεί μια κρίσιμη τιμή που ονομάζεται θερμοκρασία Curie [9].



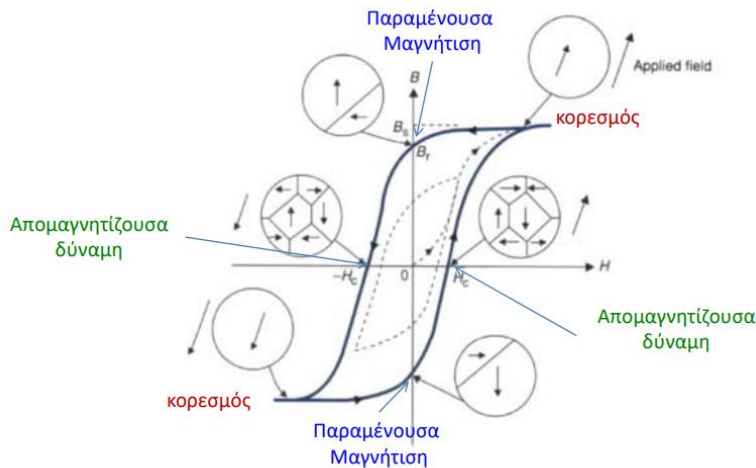
ΕΙΚΟΝΑ 10: ΜΕΤΡΗΣΗ B(H) ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ.

Οι εμπορικοί μαγνήτες είναι κατασκευασμένοι από «σκληρά» σιδηρομαγνητικά υλικά με πολύ μεγάλη μαγνητική ανισοτροπία, όπως το αλνίκο και οι φερρίτες, που έχουν πολύ έντονη τάση η μαγνήτιση να είναι στραμμένη κατά μήκος ενός άξονα του κρυστάλλου, του «εύκολου άξονα». Κατά τη διάρκεια της κατασκευής, τα υλικά υποβάλλονται σε διάφορες μεταλλουργικές διεργασίες σε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο, το οποίο ευθυγραμμίζει τους κρυσταλλικούς κόκκους, έτσι ώστε οι «εύκολοι» άξονες μαγνήτισής τους, να είναι όλοι προς την ίδια κατεύθυνση. Έτσι η μαγνήτιση, και το μαγνητικό πεδίο που προκύπτει, «ενσωματώνεται» στην κρυσταλλική δομή του υλικού, καθιστώντας πολύ δύσκολο τον απομαγνητισμό [9].

ΒΡΟΧΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

Ο **Βρόχος Υστέρησης** (Hysteresis loop) ενός μαγνητικού υλικού ονομάζεται η γραφική αναπαράσταση της μαγνητικής επαγωγής B ενός φερρομαγνητικού υλικού προς ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο έντασης H. Ο

λόγος για τον οποίο σχηματίζεται ο βρόχος υστέρησης είναι η παραμένουσα μαγνήτιση σε ένα τέτοιο υλικό σε συνδιασμό με το συνεκτικό πεδίο του. Ο βρόχος υστέρησης παρουσιάζεται παρακάτω [10].



ΕΙΚΟΝΑ 11: ΒΡΟΧΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ, ΣΕ ΦΕΡΡΟΜΑΓΝΗΡΙΚΟ ΥΛΙΚΟ.

Καθώς μπορεί να φανεί και από την σχετική εικόνα, ο βρόχος υστέρησης έχει κάποιες φάσεις, οι οποίες με βάση την μαγνήτιση του υλικού μπορούν να ερμηνευθούν και να χαρακτηρίσουν διαφορετικά κάθε φορά την κατάσταση, στην οποία βρίσκεται το υλικό, όσον αφορά την μαγνητίσή του [10, 11].

Η γραμμή έως τον κορεσμό αντιπροσωπεύει τη σχέση που προσδιορίζεται πειραματικά, όταν το υλικό μαγνητίζεται. Η νοητή εφαπτομένη που διέρχεται από την αρχή των αξόνων και τέμνει τα $\pm H_c$, σε αυτήν την αρχική καμπύλη μαγνήτισης ονομάζεται αρχική διαπερατότητα μ_i . Η περιοχή από τον κορεσμό προς την παραμένουσα μαγνήτιση B_r αντιπροσωπεύει τη μαγνήτιση με αναστρέψιμες και μη αναστρέψιμες περιστροφές του πεδίου από τη μια

εύκολη κατεύθυνση, στην άλλη ευθυγραμμισμένα ευνοϊκότερα, κατεύθυνση με το εφαρμοζόμενο πεδίο. Η τελευταία διεργασία απαιτεί υψηλές εντάσεις πεδίου, επειδή η μαγνήτιση εντός ενός τομέα περιστρέφεται έναντι του πεδίου ανισοτροπίας. Η μαγνήτιση εμποδίζεται από την πλήρη χαλάρωση στην κατάσταση του κορεσμού και ως εκ τούτου, για ένα μηδενικό πεδίο, υπάρχει μια παραμένουσα επαγωγή B_r . Για να μειωθεί η επαγωγή στο μηδέν, πρέπει να εφαρμοστεί ένα αντίστροφο πεδίο H_c . Το πεδίο καταναγκασμού H_c , εξαρτάται, εν μέρει, από την κρυσταλλική ανισοτροπία [11].

Καθώς το ρεύμα αυξάνεται σε ένα μαγνητικό υλικό, η κατάσταση $B = 0$, $H = 0$ αλλάζει και ακολουθεί τα βέλη, όπως φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα. Με αρκετά υψηλό ρεύμα, το B πρακτικά φτάνει στην τιμή κορεσμού B_s , στο πρώτο τεταρτημόριο. Σε αυτό το σημείο, το υλικό συμπεριφέρεται σαν μαγνήτης και ασκεί μέγιστη έλξη. Εάν το ρεύμα και η ένταση του πεδίου, μειωθούν στο μηδέν, οι μαγνητικές καταστάσεις ακολουθούν μια διαδρομή προς τα πίσω, διαφορετική από αυτή που διανύθηκε αρχικά, μέχρι να επιτευχθεί η τιμή B_r , γνωστή ως παραμένουσα επαγωγή. Το υλικό έχει μαγνητιστεί απουσία πεδίου H . Για περαιτέρω διερεύνηση της διαδικασίας μαγνήτισης, η πολικότητα του ρεύματος αντιστρέφεται. Οι μαγνητικές καταστάσεις, στο δεύτερο τεταρτημόριο, είναι προσβάσιμες έως ότου ο χάλυβας απομαγνητιστεί ($B = 0$) σε ένα μαγνητικό πεδίο $-H_c$, γνωστό ως πεδίο καταναγκασμού. Το υλικό δεν ασκεί δύναμη σε αυτό το σημείο. Περαιτέρω αύξηση του αντίστροφου ρεύματος προκαλεί κορεσμό της επαγωγής προς την αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή $-B_s$. Τέλος, καθώς το αντίστροφο ρεύμα μειώνεται πρώτα στο μηδέν, αλλάζει πίσω στην αρχική πολικότητα και μετά αυξάνεται, η μαγνητική διαδρομή προχωρά, από το τρίτο τεταρτημόριο, μέσω του τέταρτου, και πίσω στο πρώτο τεταρτημόριο για να ολοκληρώσει τον βρόγχο. Η περαιτέρω τρέχουσα ανακύκλωση αναπαράγει αυτόν τον λεγόμενο βρόγχο $B-H$ ή βρόγχο υστέρησης [11, 12].

Η αρχική κλίση της γραφικής παράστασης, B-H, είναι η μαγνητική διαπερατότητα. Για να ληφθεί η διαπερατότητα μ , το υλικό διαμορφώνεται σε δακτύλιο και μετατρέπεται σε επαγωγέα, τυλίγοντας πολλές στροφές σύρματος γύρω του. Με τη μέτρηση του εναλλασσόμενου ρεύματος, μέσω αυτού και της τάσης σε αυτό, λαμβάνεται η αρχική καμπύλη μαγνήτισης του εκάστοτε υλικού [11, 12]. Αυτό υποδηλώνει ότι η μαγνητική διαπερατότητα μ δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται με την σχέση:

$$\tilde{B} = \mu \cdot \tilde{H} \quad 1.19$$

$$\mu = \frac{\tilde{B}}{\tilde{H}} \quad 1.20$$

Μεταβάλλοντας τα B, H σε dB και dH, τότε λαμβάνεται μεταβλητό μ , για το οποίο είναι:

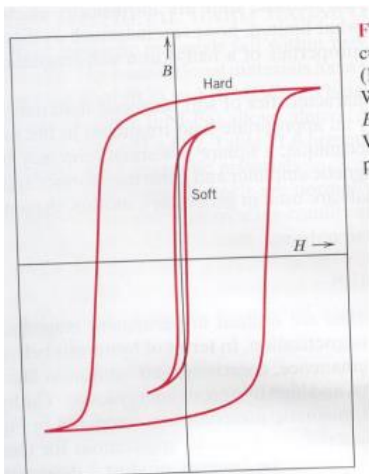
$$\mu_{\text{μεταβ}} = \frac{d\tilde{B}}{d\tilde{H}} \quad 1.21$$

Ορίζεται σαν την εφαπτομένη της γωνίας που σχηματίζει το dB με το dH, στο γράφημα του B-H. Στα σημεία, όπου η ένταση του πεδίου ισούται με το συνεκτικό πεδίο, η εφαπτομένη μπορεί να υπολογίσει την μέγιστη μαγνητική διαπερατότητα του σημείου, μ_{max} [13].

Η παραμένουσα μαγνήτιση M_r με την παραμένουσα επαγωγή B_r συνδέονται με παρόμοια σχέση:

$$\tilde{B}_r = \mu_0 \cdot \tilde{M}_r \quad 1.22$$

Το συνεκτικό πεδίο, που χρειάζεται για να απομαγνητίσει κάποιο υλικό, χαρακτηρίζει το υλικό σε σκληρό και μαλακό μαγνητικό υλικό. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά έχουν μικρή μαγνητική διαπερατότητα και υψηλό συνεκτικό πεδίο ενώ τα μαλακά έχουν μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα και χαμηλό συνεκτικό πεδίο απομαγνήτισης H_c [13].



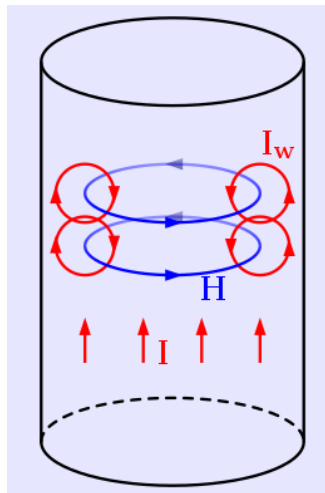
ΕΙΚΟΝΑ 12: ΜΑΛΑΚΑ ΚΑΙ ΣΚΛΗΡΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΒΡΟΓΧΟΥ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ.

ΕΠΙΔΕΡΜΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΑ

Τα **Δινορρεύματα** ορίζονται ως τα ηλεκτρικά ρεύματα που δημιουργούνται εντός ενός αγωγού, ως αποτέλεσμα του φαινομένου της επαγωγής. Τα δινορρεύματα δημιουργούν το δικό τους, δευτερεύον, μαγνητικό πεδίο. Τα δινορρεύματα και άρα το δευτερεύον μαγνητικό πεδίο, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά και τη γεωμετρία του δοκιμίου. Τα δινορρεύματα στηρίζονται

στον νόμο του Faraday για την μαγνητική επαγωγή και είναι κάθετα στο μαγνητικό πεδίο από το οποίο δημιουργούνται [14].

Το **επιδερμικό φαινόμενο** είναι η τάση ενός εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος που κατανέμεται μέσα σε έναν αγωγό, έτσι ώστε η πυκνότητα ρεύματος να είναι μεγαλύτερη κοντά στην επιφάνεια του αγωγού και να μειώνεται εκθετικά, σε μεγαλύτερη εμβάθυνση στον αγωγό. Ένα ρεύμα I που ρέει μέσω ενός αγωγού, προκαλεί ένα μαγνητικό πεδίο H . Εάν το ρεύμα αυξάνεται, η προκύπτουσα αύξηση στο H , προκαλεί κυκλοφορούντα ρεύματα που ακυρώνουν, μερικώς, την τρέχουσα ροή στο κέντρο και την ενισχύουν κοντά στην επιφάνεια [14]. Το αποτέλεσμα του φαινομένου είναι ότι, η αντίσταση ενός αγωγού, που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση του ίδιου αγωγού, όταν αυτός διαρρέεται από συνεχές ρεύμα. Η διαφορά αυτή, οφείλεται αποκλειστικά, στην διαφορετική κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος, επί της διατομής του αγωγού [15].



ΕΙΚΟΝΑ 13: ΕΠΙΔΕΡΜΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ, Η ΤΑΣΗ ΕΝΟΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΝΕΜΕΤΑΙ ΜΕΣΑ ΣΕ ΕΝΑΝ ΑΓΩΓΟ ΚΑΙ Η ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΙΝΑΙ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΚΑΙ ΜΕΙΩΝΕΤΑΙ ΕΚΘΕΤΙΚΑ ΣΕ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΑ ΒΑΘΗ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2. ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Ένα **μαγνητικό κύκλωμα** αποτελείται από ένα ή περισσότερα κλειστά κυκλώματα που περιέχουν μαγνητική ροή. Η ροή παράγεται συνήθως από μόνιμους μαγνήτες ή ηλεκτρομαγνήτες και περιορίζεται στη διαδρομή από μαγνητικούς πυρήνες που αποτελούνται από σιδηρομαγνητικά υλικά, όπως ο σίδηρος, αν και μπορεί να υπάρχουν διάκενα αέρα ή άλλα υλικά στη διαδρομή. Τα μαγνητικά κυκλώματα χρησιμοποιούνται για την αποτελεσματική διοχέτευση μαγνητικών πεδίων σε πολλές συσκευές όπως ηλεκτρικούς κινητήρες, γεννήτριες, μετασχηματιστές κ.α. [16].



ΕΙΚΟΝΑ 14: ΕΝΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟ ΜΙΑ ΠΗΓΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ(ΑΓΩΓΟΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΡΕΥΜΑ), ΔΗΛΑΔΗ ΠΗΝΙΟ ΚΑΙ ΕΝΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ.

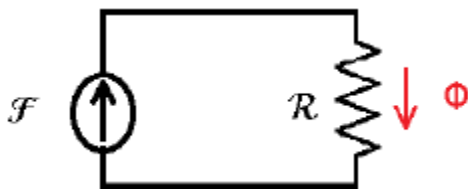
Στην παραπάνω εικόνα, παρατηρείται ένα μαγνητικό υλικό και ένας μαγνητικό πυρήνας περιεληγμένος από ένα πηνίο, με N στροφές γύρω του.

Το πηνίο τροφοδοτείται με ρεύμα I και ουσιαστικά δημιουργεί μαγνητικό πεδίο έντασης H στο εσωτερικό του. Το υλικό, όντας φερρομαγνητικό, διαχέει όλη την μαγνητική ροή εντός του σώματός του και έτσι εικονίζεται ένα κλειστό κύκλωμα (βρόχος), όπου ορίζει το μαγνητικό κύκλωμα [16].

Υπάρχουν διάφορες περιπτώσεις μαγνητικών κυκλωμάτων, είτε συνεχών, όπως το παραπάνω, είτε με την ύπαρξη διακένου, το οποίο διάκενο, δρα ως μαγνητική αντίσταση, στο μαγνητικό κύκλωμα, δυσκολεύοντας εν μέρη, την διέλευση των μαγνητικών γραμμών σε μεγάλο μέρος αυτού [16].

ΝΟΜΟΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

Ένα μαγνητικό κύκλωμα μπορεί να οριστεί ως η μαγνητεγερτική δύναμη του πηνίου ως πηγή, η μαγνητική ροή του κυκλώματος ως αποτέλεσμα και η μαγνητική αντίσταση, που μπορεί να είναι κάποιο διάκενο σε ένα μαγνητικό κύκλωμα. Ένα τέτοιο μαγνητικό κύκλωμα παρουσιάζεται παρακάτω [17].



ΕΙΚΟΝΑ 15: ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕ ΜΟΡΦΗ ΜΑΓΝΗΤΕΓΕΡΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.

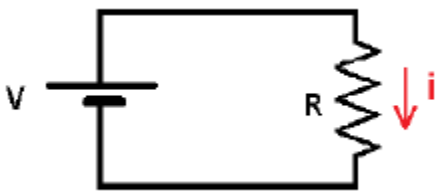
Σε ένα τέτοιο μαγνητικό κύκλωμα, και γενικότερα, ισχύει ο νόμος του **Rowland (ή Hopkinson)**, ο οποίος εκφράζει την μαγνητική ροή ως το πηλίκο της μαγνητεγερτικής δύναμης με την μαγνητική αντίσταση [17]. Δηλαδή:

$$\Phi = \frac{\tilde{F}}{R_m} \quad 2.1$$

Όπου Φ : μαγνητική ροή, F : μαγνητογενετική δύναμη και R_m : μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος [18].

Σε πλήρη ισοδυναμία με τα ηλεκτρικά κυκλώματα, αξίζει να αναφερθούν οι νόμοι του Kirchhoff, για τα μαγνητικά κυκλώματα, με τον πρώτο να είναι ότι η συνολική μαγνητική αντίσταση επιμέρους αντιστάσεων σε σειρά είναι ίση με το άθροισμά τους, σε αναλογία με τον νόμο τάσεων Kirchhoff των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Ο δεύτερος νόμος του Kirchhoff είναι ότι το άθροισμα των μαγνητικών ροών που εισέρχονται σε έναν κόμβο είναι ίσο με μηδέν, κατ' αναλογία με τον νόμο ρευμάτων Kirchhoff [18].

Επίσης, το μαγνητικό κύκλωμα, όπως και ο νόμος του Rowland που το εκφράζει, έρχονται σε αντιστοιχία με το ηλεκτρικό και τον θεμελιώδη νόμο του Ohm που συνδέει ηλεκτρικό ρεύμα, αντίσταση και ηλεκτρογενετική δύναμη [18].



ΕΙΚΟΝΑ 16: ΑΠΛΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕ ΠΗΓΗ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.

Ο νόμος του Ohm διατυπώνεται ως:

$$\mathcal{E} = \tilde{J} \cdot R \quad 2.2$$

Όπου I: το ηλεκτρικό ρεύμα, E: η ηλεκτρεγερτική δύναμη και R: η ωμική αντίσταση του κυκλώματος [18].

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΜΕΓΕΘΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ.

Σύγκριση Ηλεκτρικού με Μαγνητικό Κύκλωμα

Ηλεκτρικό Μέγεθος	Μαγνητικό Μέγεθος	Μονάδες
Τάση V	Μαγνητρεγερτική δύναμη \mathcal{F}	Amp-turns
Ρεύμα I	Μαγνητική ροή Φ	Wb
Αντίσταση R	Μαγνητική αντίσταση R	Amp-turns/Wb
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-turns/m

Κάποιες βασικές διαφορές έγκειται στο γεγονός ότι:

Οι γραμμές ηλεκτρικού πεδίου μετριούνται σε δύο διαστάσεις, ενώ οι γραμμές μαγνητικού πεδίου μετριούνται σε τρεις διαστάσεις. Η γραμμή ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί θετικό φορτίο και σβήνει σε αρνητικό φορτίο ενώ η γραμμή μαγνητικού πεδίου παράγει από έναν βόρειο πόλο και καταλήγει στον νότιο πόλο του μαγνήτη. Σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το

ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο στο μαγνητικό πεδίο, ενώ το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο προς ένα ηλεκτρικό πεδίο [19].

ΜΑΓΝΗΤΕΓΕΡΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ

Μαγνητεγερτική δύναμη ονομάζεται, η οποιαδήποτε αιτία που προκαλεί δυναμική ροή ενός μαγνήτη, που είναι χαρακτηριστική τόσο του μαγνήτη, όσο και του μαγνητικού κυκλώματος. Η μαγνητεγερτική δύναμη των πηνίων και των ηλεκτρομαγνητών είναι ανάλογη προς τον αριθμό των αμπεροστροφών ή και αλλιώς αμπεροτυλιγμάτων, δηλαδή ανάλογη του αριθμού των σπειρών (ή σπειρωμάτων) αυτών και της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που διέρχεται μέσω αυτών. Μονάδα μέτρησης της μαγνητεγερτικής δύναμης λαμβάνεται το γκίλμπερτ (προς τιμή του Άγγλου φυσικού Γουίλιαμ Γκίλμπερτ), που είναι η μαγνητεγερτική δύναμη μιας σπείρας που διαρρέεται από ρεύμα έντασης 0,8Α.

Η μαγνητεγερτική δύναμη μπορεί να οριστεί με βάση την προηγούμενη σχέση ως:

$$\tilde{\mathcal{F}} = \Phi \cdot R_m \quad 2.3$$

Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με το σχήμα, τις διαστάσεις και την μαγνητική ροή επάνω σε κάποιο υλικό με συγκεκριμένη μορφή, η μαγνητεγερτική δύναμη έχει διαφορετική μαθηματική έκφραση [19]. Για παράδειγμα σε κυλινδρικό πηνίο, η μαγνητεγερτική δύναμη, θα είναι:

$$\tilde{\mathcal{F}} = N \cdot \tilde{\mathcal{I}} \quad 2.4$$

Και επίσης ισχύει,

$$\tilde{F} = \tilde{H} \cdot L$$

2.5

Όπου N είναι ο αριθμός των αμπερ-ελιγμάτων, I είναι το ηλεκτρικό ρεύμα στην (2.4) και στην (2.5), H είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου ενώ L είναι το μήκος του κυλίνδρου [19].

Η μαγνητεγερτική δύναμη είναι η βασική δύναμη που ευθύνεται για φαινόμενα, όπως η δράση των ηλεκτρικών κινητήρων και η έλξη των μαγνητών για το σίδηρο. Η μαγνητική δύναμη μεταξύ δύο κινούμενων φορτίων μπορεί να περιγραφεί ως η επίδραση που ασκείται σε κάθε φορτίο από εκάστοτε μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το άλλο φορτίο κάθε φορά [19].

ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ

Ο **Μαγνητικός Θόρυβος**, γενικά, αναφέρεται στις αστάθειες του σήματος εξόδου υπό συνθήκες σταθερής λειτουργίας. Εξ' αιτίας του ότι, τα σήματα στους αισθητήρες είναι συνήθως αδύναμα, ο θόρυβος μπορεί να περιορίσει σοβαρά την ανάλυση του αισθητήρα. Ο θόρυβος που αποδίδεται στο μαγνητικό υλικό αποτελείται από διαφορετικές πηγές: **θερμικό θόρυβο**, **θόρυβο Barkhausen** ή **μαγνητικό θόρυβο**. Ο **θερμικός θόρυβος** οφείλεται στις θερμικές διακυμάνσεις των μαγνητικών ροπών. Αυτό μειώνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας ή την αύξηση του μαγνητικού όγκου.

Ο **θόρυβος Barkhausen** είναι ο θόρυβος που σχετίζεται με τα άλματα Barkhausen, τις ξαφνικές, ασυνεχείς αλλαγές στη μαγνήτιση. Σε αντίθεση με τον θερμικό θόρυβο, αυξάνεται με τη μαγνητική ένταση. Επομένως, πρέπει να γίνει συμβιβασμός, όσον αφορά το μέγεθος των κόκκων. Αυτός ο μαγνητικός θόρυβος, σχετίζεται επίσης, με τις ατέλειες των ορίων των κόκκων που επηρεάζουν τον τρόπο διάδοσης του τοιχώματος. Η κατάλληλη

επεξεργασία μπορεί να παρέχει λεπτότερα όρια κόκκων, καθώς και ευρύτερη γωνιακή κατανομή ανισοτροπιών, βελτιστοποιώντας έτσι τα επίπεδα μαγνητικού θορύβου. Ο θόρυβος Barkhausen είναι, γενικά, ανεπιθύμητος σε εφαρμογές ανίχνευσης [20].

Στην ειδική περίπτωση της μαγνητικής καταγραφής, το μέγεθος του κόκκου και το όριο επηρεάζουν το σχήμα και τη θέση των καταγεγραμμένων μεταβάσεων. Αυτός ο θόρυβος συνήθως, μειώνεται με λεπτότερους κόκκους και ασθενέστερη σύζευξη μεταξύ τους. Ωστόσο, στην καταγραφή εξαιρετικά υψηλής πυκνότητας, παρατηρείται μια συμβολή θορύβου DC, που σχετίζεται με το μη μαγνητικό υλικό μεταξύ των κόκκων [20].

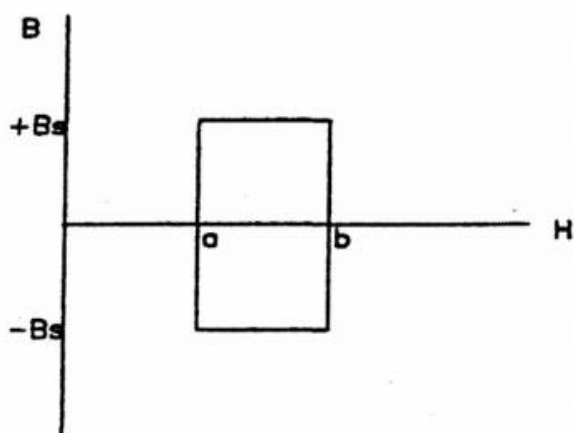
Η εξάρτηση από το θόρυβο $1/f$, σύμφωνα με την οποία, το επίπεδο θορύβου μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της συχνότητας, παρατηρείται σε πολλές διατάξεις αισθητήρων. Στα fluxgates, ο θόρυβος $1/f$ είναι ένας θόρυβος χαμηλής συχνότητας που εκτείνεται έως και αρκετές δεκάδες Hz. Σχετίζεται με την κίνηση του μαγνητικού τοιχώματος της περιοχής και με τη μικροδομή του υλικού. Τα υλικά ενός τομέα ή οι άμορφοι πυρήνες, με σχεδόν μηδενική μαγνητοσυστολή μειώνουν σημαντικά το επίπεδο θορύβου. Ο μαγνητικός θόρυβος είναι ικανός, σε γενικότερο πλαίσιο, να επηρεάζει, εξ' αιτίας του συνολικού μαγνητικού πεδίου της Γης, που επιδρά σε διατάξεις και κυκλώματα με συγκεκριμένες λειτουργίες, που σκόπιμα κατασκευάζονται με ανάλογη ευαισθησία από την βιομηχανία, έχοντας κάποιο συγκεκριμένο στόχο [20].

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Υπάρχει η ανάγκη για μοντελοποίηση και ανάπτυξη κάποιων προσεγγίσεων και μεθόδων, οι οποίες έχουν μια διαφορετική ερμηνεία και απόδοση στις έννοιες και σημασίες που αναφέρθηκαν.

ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΑ/ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Μακροσκοπικά μοντέλα μπορούν, επιγραμματικά, να ονομαστούν μοντέλα, όπως τα **Stoner-Wohlfarth**, **Jiles-Atherton** και **Preisach** τα οποία έχουν μια στατική προσέγγιση και έχουν προταθεί δυναμικές εκδοχές τους, χωρίς ευρεία αποδοχή. Το μοντέλο **Preisach** θεωρείται, από τους πλέον ακριβείς τρόπους, εξομοιώσεως του φαινομένου υστέρησης γενικά, κι όχι μόνον για τα μαγνητικά υλικά. Στην περίπτωση που το σύστημα είναι ένα μαγνητικό υλικό, ως διέγερση θεωρείται η πεδιακή ένταση H , ενώ ως απόκριση, η μαγνητική επαγωγή B . Σύμφωνα με τη μεθοδολογία κατά Preisach, το μαγνητικό υλικό απαρτίζεται από ένα πολύ μεγάλο αριθμό μαγνητικών δίπολων. Κάθε δίπολο έχει ένα στοιχειώδη ορθογώνιο βρόγχο υστέρησης, που αντιστοιχεί μόνον σε δύο καταστάσεις μαγνητίσεως, τη θετική και την αρνητική. Η συνολική μαγνήτιση του όλου δοκιμίου προκύπτει συσσωρευτικά από τη μαγνήτιση όλων των δίπολων, ή ισοδύναμα, προσδιορίζεται από την μαγνητική κατάσταση της πλειοψηφίας των δίπολων [21].



ΕΙΚΟΝΑ 17: ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΟΣ ΒΡΟΧΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΔΙΠΟΛΟΥ PREISACH.

Το μοντέλο **Jiles-Atherton** παρουσιάστηκε για να περιγράψει τα ιστροπικά πολυκρυσταλλικά υλικά, όπου η κύρια εξέλιξη μαγνήτισης είναι η αυξομείωση των περιοχών, μέσω μετακίνησης των συνόρων τους. Το μοντέλο είναι βασισμένο σε μια καμπύλη μέσης μαγνήτισης. Ουσιαστικά, το μοντέλο αυτό, λαμβάνει την ενέργεια ανά μονάδα όγκου, σε μια τυπική περιοχή με μαγνητικές ροπές και εσωτερικό μαγνητικό πεδίο και την αλληλεπίδραση μεταξύ τέτοιων περιοχών, με σκοπό να βρεθεί μια μαθηματική σχέση, η οποία να μπορεί να υπολογίσει την συνολική μαγνήτιση που προκύπτει δεδομένων των αλληλεπιδράσεων. Για αυτόν ακριβώς τον σκοπό, οι Jiles και Atherton παρουσίασαν την μαθηματική σχέση,

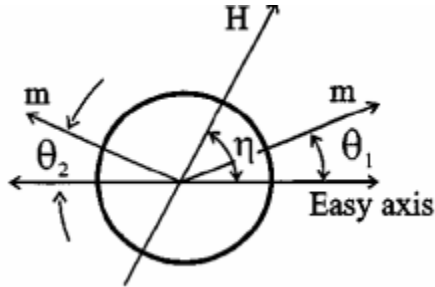
$$M_{an} = M_s \left(\coth \left(\frac{H_{eff}}{\alpha} \right) - \left(\frac{\alpha}{H_{eff}} \right) \right) \quad 2.6$$

Όπου α είναι μια σταθερά με τις διαστάσεις του μαγνητικού πεδίου και H_{eff} είναι το ενεργό μαγνητικό πεδίο, το οποίο θεωρείται ως συνάρτηση της μέσης μαγνήτισης [21].

ΜΟΝΤΕΛΟ STONER-WOHLFARTH ΣΥΝΕΚΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ

Το **μοντέλο Stoner-Wolhfarth** (S-W) περιγράφει τις καμπύλες μαγνήτισης ενός πολυκρυσταλλικού υλικού αποτελούμενο από την συναρμολόγηση, μη-αλληλεπιδρώντων σωματιδίων με μονοαξονική ανισοτροπία [21, 22]. Ας θεωρηθεί η περίπτωση ενός σωματιδίου S-W, όπως φαίνεται παρακάτω. Οι γωνίες θ και η , είναι οι γωνίες μεταξύ του διανύσματος μαγνήτισης m του σωματιδίου και του άξονα εύκολης μαγνήτισης και της έντασης, του εφαρμοσμένου πεδίου, H , αντίστοιχα. Η μαγνήτιση του σωματιδίου θεωρείται ότι έχει πάντα το ίδιο πλάτος, αλλά η κατεύθυνσή της μπορεί να διαφέρει. Η

ελάχιστη ενέργεια του σωματιδίου είναι το άθροισμα της μαγνητοκρυσταλλικής του ενέργειας και της μαγνητοστατικής ενέργειας :

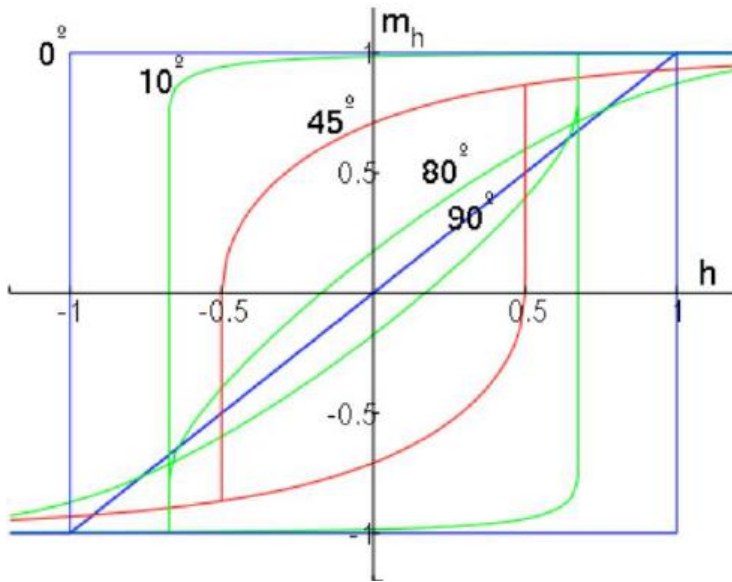


ΕΙΚΟΝΑ 18: ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ S-W

$$E = -\mu_0 M H \cos(\theta - \varphi) + K_u \sin^2 \varphi \quad 2.7$$

Ελάχιστη ενέργεια σωματιδίου S-W

όπου K_u είναι η μονοαξονική σταθερά ανισοτροπίας και μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού. Τόσο η αναστρέψιμη, όσο και η μη αναστρέψιμη μαγνήτιση μπορούν να περιγραφούν από την παραπάνω εξίσωση. Για να προσομοιωθεί, η συμπεριφορά ολόκληρου του υλικού, αθροίζεται η συνεισφορά ενός συνόλου από σωματίδια S-W. Παρακάτω, παρουσιάζεται ένας βρόχος υστέρησης, με χρήση του μοντέλου Stoner-Wohlfarth για διάφορες γωνίες θ [23].



ΕΙΚΟΝΑ 19: ΒΡΟΧΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ S-W ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΓΩΝΙΕΣ θ .

ΑΤΟΜΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Τα **ατομιστικά μοντέλα** αποτελούν την μελέτη των ατομιστικών μαγνητικών φαινομένων και της επίδρασής τους, σε μακροσκοπικές ποσότητες. Η ατομιστική προσομοίωση των μαγνητικών υλικών έχει πραγματοποιήσει μεγάλα βήματα μεταμόρφωσης, σε ένα σημαντικό εργαλείο για την κατανόηση των σύνθετων διαδικασιών που ελέγχουν τη σύνθετη συμπεριφορά των μαγνητικών νανοϋλικών [24].

ΕΞΙΣΩΣΗ LANDAU-LIFSHITZ-GILBERT

Σε έναν σιδηρομαγνήτη, το μέγεθος της μαγνήτισης M , σε κάθε σημείο ισούται με τη μαγνήτιση κορεσμού M_s . Η εξίσωση **Landau-Lifshitz-Gilbert**

προβλέπει την περιστροφή της μαγνήτισης, ως απόκριση στις ροπές. Η αρχική εξίσωση θεωρήθηκε από τους **Landau & Lifshitz** (1935) και ήταν:

$$\frac{dM}{dt} = -|\gamma|M \times H_{eff} - \lambda M \times (M \times H_{eff}) \quad 2.8$$

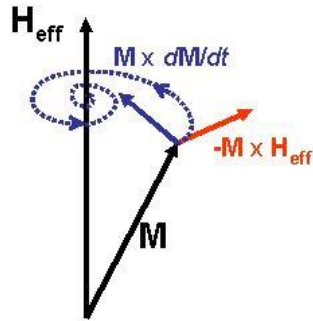
$$\lambda = \alpha \frac{|\gamma|}{M_s} \quad 2.9$$

όπου M είναι η μαγνήτιση, H_{eff} το ενεργό μαγνητικό πεδίο που δρα στη μαγνήτιση και ελαχιστοποιεί την ενεργειακή πυκνότητα του υλικού, ως προς τον προσανατολισμό της μαγνήτισης, γ είναι η γυρομαγνητική αναλογία του ηλεκτρονίου, δηλαδή η αναλογία της διπολικής μαγνητικής ροπής ως προς τη μηχανική γωνιακή ροπή του συστήματος, σε $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{T}^{-1}$, λ είναι φαινομενολογική παράμετρος απόσβεσης και α είναι αδιάστατος συντελεστής απόσβεσης, ο οποίος είναι συχνά σταθερός μεταξύ 0.1 και 1 [24].

Η περίφημη εξίσωση τροποποιήθηκε από τον **Gilbert** (1955) σε:

$$\frac{dM}{dt} = -\gamma(M \times H_{eff} - nM \times \frac{dM}{dt}) \quad 2.10$$

όπου γ είναι ο γυρομαγνητικός λόγος ηλεκτρονίων και n είναι η χαρακτηριστική παράμετρος απόσβεσης ενός υλικού που αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος σε κάθε υλικό. Το ενεργό πεδίο H_{eff} είναι ένας συνδυασμός του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, του μαγνητικού πεδίου λόγω μαγνήτισης και ορισμένων κβαντομηχανικών επιδράσεων [24, 25].



ΕΙΚΟΝΑ 20: ΟΙ ΟΡΟΙ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ LANDAU-LIFSHITZ-GILBERT: ΜΕΤΑΠΤΩΣΗ (ΚΟΚΚΙΝΟ) ΚΑΙ ΑΠΟΣΒΕΣΗ (ΜΠΛΕ). Η ΤΡΟΧΙΑ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ (ΣΤΙΓΜΕΝΗ ΣΠΕΙΡΑ) ΣΧΕΔΙΑΖΕΤΑΙ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΛΟΠΟΙΗΤΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ ΟΤΙ ΤΟ ΕΝΕΡΓΟ ΠΕΔΙΟ H_{eff} ΕΙΝΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟ.

ΜΙΚΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

Μικρομαγνητισμός ορίζεται ως η διαδικασία της μαγνήτισης, στα σιδηρομαγνητικά και σιδηριμαγνητικά υλικά και μελετάται στην ενδιάμεση κλίμακα, μεταξύ μαγνητικής περιοχής και κρυστάλλου. Το θεωρητικό πρότυπο του μικρομαγνητισμού, έχει ως στόχο την συσχέτιση μακροσκοπικών φαινομένων με μικροσκοπικούς μηχανισμούς που συνδέονται με την ατομική φύση της μαγνητικής ροπής. Η συνεχής **θεωρία του μικρομαγνητισμού** είχε ως στόχο να γεφυρώσει το χάσμα, μεταξύ της φαινομενολογικής θεωρίας του Maxwell για τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και της κβαντικής θεωρίας, που βασίζεται σε ατομικά υπόβαθρα. Στη θεωρία του Maxwell οι ιδιότητες των υλικών περιγράφονται από παγκόσμιες διαπερατότητες και επιδεκτικότητες που ισχύουν για μακροσκοπικές διαστάσεις. Από την άλλη πλευρά, η κβαντική θεωρία επιτρέπει την περιγραφή των μαγνητικών ιδιοτήτων σε ατομιστικό επίπεδο. Και οι δύο θεωρίες δεν είναι κατάλληλες για να περιγράψουν συνεργατικά και αλληλεπιδραστικά φαινόμενα, όπως μακροσκοπικές διεργασίες μαγνήτισης ή βρόγχους υστέρησης διατεταγμένων δομών

περιστροφής. Η απαίτηση να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ της θεωρίας του Maxwell και της κβαντικής θεωρίας έγινε πιο απαιτητική μετά το πείραμα του Barkhausen γνωστό, ως **άλματα του Barkhausen** και το πείραμα Sixtus και Tonks, σχετικά με την ταχύτητα του τοιχώματος των μαγνητικών περιοχών [24, 25, 26].

Στο μικρομαγνητισμό, η μαγνήτιση αποτυπώνεται σαν μια συνεχής συνάρτηση. Το ηλεκτρόνιο μπορεί να κινείται σε χώρο που δεν εντοπίζεται μόνο στα άτομα ενός στερεού σώματος. Στον μικρομαγνητισμό, υπάρχει σε μεγάλο βαθμό, η ανάγκη για διευκόλυνση και απλοποίηση του προβλήματος προς επίλυση, καθώς είναι υπερβολικά δύσκολο να περιγραφεί ένα στερεό, με βάση το ατομικό πρότυπο, και να προσδιορισθεί η μακροσκοπική συμπεριφορά του. Στον μικρομαγνητισμό, η μαθηματική απλοποίηση γίνεται μέσω της συνολικής ενέργειας. Υπάρχει η κατηγορία των τοπικών μηχανισμών, η οποία είναι οι πυκνότητες ενέργειας, οι οποίες εξαρτώνται από τις τοπικές διευθύνσεις μαγνήτισης. Η συνολική ενέργεια είναι η ολοκλήρωση αυτών, σε όλο τον χώρο του υλικού. Η ενέργεια **Zeeman** και η ενέργεια της μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας είναι τέτοιες. Η ενέργεια των αλληλεπιδράσεων δεν θεωρείται τοπικό φαινόμενο, όμως μπορεί να περιγραφεί με τοπικές παραμέτρους. Από την άλλη, η μαγνητοστατική ενέργεια είναι μηχανισμός που συνεισφέρει σε κάθε σημείο, το υλικό, και έτσι, η συνολική ενέργεια δεν μπορεί να οριστεί με ολοκλήρωση [26].

Κάποιον, από τους προαναφερόμενους μηχανισμούς, αποτελεί η **ενέργεια ανταλλαγής**. Εκφράζεται ως:

$$E_{ex} = -\frac{1}{2} \sum_{i,j} J_{ij} \cdot (\tilde{S}_i * \tilde{S}_j), [J] \quad 2.11$$

Όπου οι δείκτες i,j αποτελούν όλες τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σπιν στο υλικό.

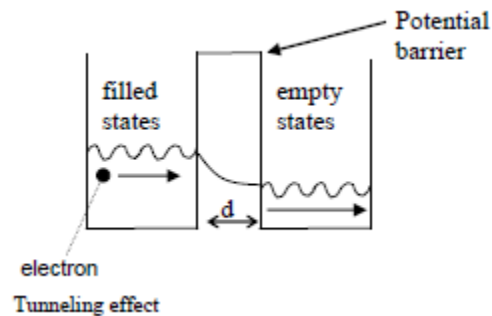
Τα σπιν, στα οποία οφείλονται οι σιδηρομαγνητικές ιδιότητες του υλικού εντοπίζονται στα άτομα. Οι ενδοατομικές αλληλεπιδράσεις είναι πολύ ισχυρές και δεν επηρεάζονται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Οι διατομικές αλληλεπιδράσεις περιορίζονται σε αποστάσεις πλησιέστερων γειτονικών ατόμων [25, 26].

ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΑΦΟΡΑ

Μαγνητομεταφορά ονοματίζεται το αποτέλεσμα ισχυρής σύζευξης μεταξύ του σπιν, του φορτίου, του πλέγματος και των τροχιακών βαθμών ελευθερίας, που οδηγούν σε σπιν εξαρτημένης σκέδασης, σήραγγα περιστροφής και καλάρωση περιστροφής. Ιδιότητες μαγνητομεταφοράς αναφέρονται στην εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από την αγωγιμότητα των σιδηρομαγνητών. Τα φαινόμενα μαγνητομεταφοράς είναι άμεση συνέπεια της κβαντομηχανικής φύσης του σιδηρομαγνητισμού. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ενέργεια της υψηλής πυκνότητας των καταστάσεων στο επίπεδο Fermi, υπάρχει ένας ανισόρροπος διαχωρισμός μεταξύ επάνω (φορείς της πλειοψηφίας) και κάτω (μειοψηφικοί φορείς) σπιν των καταστάσεων των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στην στοιβάδα d [26, 27].

Οι ζώνες σπιν είναι ανάλογες με τη μαγνητική ροπή ενός στοιχείου. Μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, μερικά από αυτά λειτουργούν ως φορείς, τα λεγόμενα ελεύθερα ηλεκτρόνια, που διέρχονται σήραγγες σε γειτονικά άτομα και προκαλούν ένα πολωμένο ρεύμα σπιν. Στην κλασική φυσική, για να εμφανιστεί ένα ηλεκτρόνιο στην άλλη πλευρά ενός φραγμού, πρέπει να έχει αρκετή ενέργεια ξεπεράσει το εμπόδιο. Στην κβαντομηχανική, εάν το φράγμα

είναι πολύ λεπτό, δηλαδή η απόσταση των δύο καταστάσεων (d) είναι μικρή, τα ηλεκτρόνια μπορούν να διέλθουν μέσω της σήραγγας, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει μεγάλος αριθμός διαθέσιμων ηλεκτρονίων για τη σήραγγα και μεγάλος αριθμός κενών καταστάσεων στο ίδιο ενεργειακό επίπεδο στην άλλη πλευρά, όπως φαίνεται παρακάτω [26, 27].



ΕΙΚΟΝΑ 21: ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΟΠΩΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ.

Οι σιδηρομαγνήτες εξαρτώνται από την πόλωση του σπιν τους και την πόλωση των καταστάσεων τους, στην άλλη πλευρά του φράγματος. Κατ' αρχήν, όλα τα σιδηρομαγνητικά μέταλλα, θα πρέπει να παρουσιάζουν ιδιότητες μαγνητομεταφοράς και η σκέδαση των ελεύθερων ηλεκτρονίων, θα πρέπει να προκαλεί μια αλλαγή, στην ειδική αντίσταση που εξαρτάται από το πεδίο. Ωστόσο, τα φαινόμενα μαγνητομεταφοράς είναι πιο εμφανή όταν η μέση ελεύθερη διαδρομή των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας, είναι πολύ μεγαλύτερη από το αντίστοιχο μήκος κύματος Fermi, καθώς και μεγαλύτερη από άλλα σχετικά μήκη, όπως η σταθερά πλέγματος, το μέγεθος κόκκου ή το πάχος της διεπαφής. Στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια μπορούν να ταξιδέψουν μέσα από πολλές ατομικές θέσεις, στρώματα ή κόκκους, χωρίς να χάσουν την πόλωση του σπιν τους, παρά την οποιαδήποτε σκέδαση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση των ιδιοτήτων μαγνητομεταφοράς, καθώς ο αριθμός των σκεδαστών, π.χ. επίπεδα και διεπαφές, αυξάνεται [28].

Συνολικά, μπορεί να ειπωθεί ότι σε ατομικό επίπεδο, αυτός ο εξαρτώμενος από το σπιν μηχανισμός σκέδασης, είναι υπεύθυνος για την αλλαγή της

αντίστασης σε έναν σιδηρομαγνήτη, ως συνάρτηση ενός εφαρμοζόμενου πεδίου [28].

Η μαγνητομεταφορά βρίσκεται επίσης, στη βάση της σπιντρονικής, του αναδυόμενου πεδίου της ηλεκτρονικής του σπιν. Αυτές οι συσκευές βασίζονται στις ιδιότητες αγωγιμότητας ηλεκτρονίων με ενέργεια πολύ υψηλότερη από τα επίπεδα ενέργειας Fermi, τα λεγόμενα θερμά ηλεκτρόνια που υφίστανται σκέδαση. Όταν τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται αδιαβατικά χωρίς σκέδαση, ονομάζονται βαλλιστικά ηλεκτρόνια. Εφέ μαγνητομεταφοράς είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αλληλεπίδραση μεταξύ της δυναμικής του σπιν, τροχιακού, πλέγματος και φορτίου, παρουσία μαγνητικών πεδίων, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται περιστροφικές σήραγγες, σκέδαση και απόσβεση. Τα αποτελέσματα που χρησιμοποιούνται σε αισθητήρες περιλαμβάνουν τη μαγνητοαντίσταση και γιγαντιαία μαγνητοαντίσταση, σήραγγα εξαρτώμενη από το σπιν και το εξαιρετικό φαινόμενο Hall [28].

Το πιο σημαντικό εφέ που χρησιμοποιείται κυρίως, σε αισθητήρες πεδίου και καταγραφής, είναι το φαινόμενο γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης. Η γιγάντια μαγνητοαντίσταση προσελκύει, επί του παρόντος, το ενδιαφέρον πολλών σχεδιαστών αισθητήρων, ενώ το φαινόμενο Hall βρίσκεται ακόμη υπό διερεύνηση για πιθανές δυνατότητες χρήσης του. Με αυτόν τον τρόπο, συνδέεται η αγωγιμότητα με το μαγνητικό πεδίο [28].

Με λίγα λόγια, το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης είναι η ποσοσιαία μεταβολή στην αντίσταση ενός σιδηρομαγνήτη, ανάλογα με το μέγεθος και την κατεύθυνση ενός εφαρμοζόμενου πεδίου. Παρατηρείται, κυρίως, σε μαγνητικά λεπτά φιλμ και η συνεχής ηλεκτρική αντίσταση του φιλμ μπορεί να αλλάξει έως 1-2% με το εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Το πιο σημαντικό φαινόμενο μαγνητοαντίστασης είναι η γιγαντιαία μαγνητοαντίσταση (GMR), με αλλαγές αντίστασης υψηλότερες από 10% σε θερμοκρασία δωματίου. Οι δομές γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης

περιλαμβάνουν πολυστρωματικές δομές, δομές η μια πάνω από την άλλη και κοκκώδεις μεμβράνες. Σε αντίθεση με τη συνηθισμένη μαγνητοαντίσταση που εξαρτάται από τη γωνία, μεταξύ της μαγνήτισης και της ροής του ρεύματος, το φαινόμενο GMR εξαρτάται, από τη γωνία μεταξύ της μαγνήτισης σε γειτονικά στρώματα και είναι, επομένως, ανεξάρτητο από την κατεύθυνση του αισθητηριακού ρεύματος. Η εξάρτηση από το σπιν σήραγγας, χρησιμοποιείται σε συσκευές μαγνητοαντίστασης, όπου η προκύπτουσα σκέδαση παρουσιάζει ενδιαφέρον, στη μικροσκοπία περιστρεφόμενης σήραγγας που επιτρέπει τον χειρισμό των ατόμων και τη μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων σε ατομικό επίπεδο ή σε μαγνητική σήραγγα διάχυσης και τρανζίστορ μαγνητικής σήραγγας ή τρανζίστορ περιστρεφόμενης βαλβίδας [29].

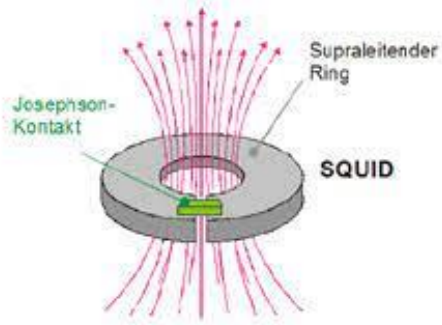
3. ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Η ανακάλυψη διαφόρων μαγνητικών φαινομένων και η ανάπτυξη ειδικών μαγνητικών υλικών επέτρεψαν την κατασκευή πολλών μαγνητικών αισθητήρων. Τα φαινόμενα, αυτά, γίνονται αντικείμενο εφαρμογής με διάφορους τρόπους. Σε πολύ άμεσες εφαρμογές, ο μαγνητικός αισθητήρας είναι, ουσιαστικά, ένα μαγνητόμετρο. Με αυτό τον τρόπο, ο μαγνητικός αισθητήρας χρησιμοποιείται στη μέτρηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου, όπως αυτό της Γης, ή το πεδίο που διαμορφώθηκε από μαγνητικό υλικό σε μαγνητικές ταινίες, δίσκους, πιστωτικές κάρτες κλπ. Σε πιο έμμεσες εφαρμογές, ο μαγνητικός αισθητήρας χρησιμοποιείται σαν ενδιάμεσος

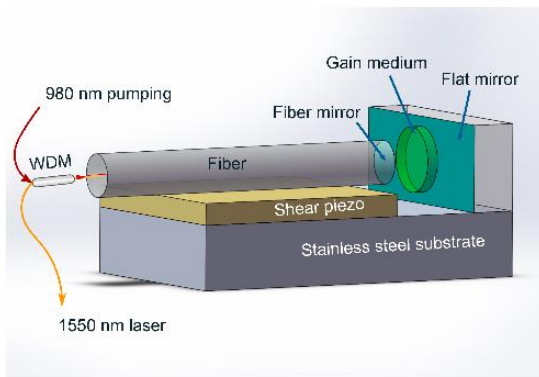
αισθητήρας στην ανίχνευση μαγνητικών σημάτων [30]. Παραδείγματα αισθητήρων έμμεσων εφαρμογών, είναι:

- Αισθητήρας γραμμικής και γωνιακής ανίχνευσης θέσης με χρήση φαινομένου Hall
- Αισθητήρας ανίχνευσης της πίεσης με χρήση του φαινομένου Hall
- Αισθητήρας ελέγχου κινητήρων DC χωρίς ψήκτρες
- Αισθητήρας ανίχνευσης ρεύματος χωρίς επαφή

Οι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου από ημιαγώγιμο υλικό είναι μικροαισθητήρες και εκμεταλλεύονται τα γαλβανομετρικά φαινόμενα, τα οποία οφείλονται στην δύναμη Lorentz, πάνω σε φορτισμένους φορείς, οι οποίοι κινούνται σε μαγνητικό πεδίο. Για παράδειγμα, οι ακουστικοί αισθητήρες εκμεταλλεύονται τα φαινόμενα μαγνητοσυστολής και τα μαγνητοελαστικά φαινόμενα σε λεπτά ή παχιά φιλμ. Ένα διαφορετικό είδος μικροαισθητήρα αποτελεί η Υπεραγώγιμη Κβαντική Συσκευή Συμβολής (Superconductive Quantum Interference Device, SQUID), η οποία δεν έχει πολλές ομοιότητες με τους άλλους αισθητήρες εξ' αιτίας της εξαιρετικά υψηλής ευαισθησίας της. Μια συσκευή SQUID, μπορεί να αναλύσει σήματα της τάξης του pico-tesla, τα οποία βρίσκονται στην βιομαγνητομετρία και είναι η πιο ευαίσθητη, διαθέσιμη, μαγνητική συσκευή [30, 31].



ΕΙΚΟΝΑ 22: ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ SQUID.



ΕΙΚΟΝΑ 23: ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΜΕ ΕΝΕΡΓΗ ΙΝΑ.

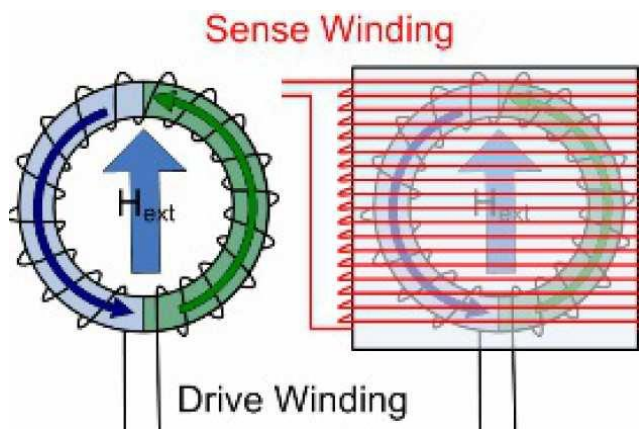
Ένας άλλος τρόπος χρησιμοποίησης των μαγνητικών αισθητήρων αποτελεί η δυναμική των μαγνητικών περιοχών. Σε πολλές περιπτώσεις, φερρομαγνητικά υλικά δεν παρουσιάζουν μαγνήτιση παρά μόνο αν τους εφαρμοστεί εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Υπάρχει σημαντική επίδραση του εξωτερικού πεδίου, επί των μαγνητικών περιοχών, του υλικού. Κάθε δυνατή χρήση της απόκρισης αυτών των φαινομένων, μπορεί να οδηγήσει και σε ένα καινούργιο αισθητήριο στοιχείο [30, 31].

Ένας μαγνητικός αισθητήρας αναφέρεται, συνήθως, σε έναν αισθητήρα που μετατρέπει το μέγεθος και τις παραλλαγές ενός μαγνητικού πεδίου σε ηλεκτρικά σήματα. Θα μπορούσε να θεωρηθεί αρκετό να βρεθεί η σχέση μεταξύ μαγνητικού πεδίου και σήματος εξόδου, ωστόσο για να θεωρηθεί ότι

οι μετρήσεις του αισθητήρα έχουν κάποια χρησιμότητα, είναι αναγκαίο να εξεταστούν διάφοροι παράγοντες, οι οποίοι χαρακτηρίζουν την λειτουργία του, με κάποιους από αυτούς να είναι ο θόρυβος, η σταθερότητα, η ευαισθησία, η συχνότητα λειτουργίας, το κόστος παραγωγής κ.α. [30, 31].

ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ FLUXGATE

Οι **αισθητήρες Fluxgate** είναι, τυπικά, δακτυλιοειδείς πυρήνες από ένα εξαιρετικά μαγνητικά διαπερατό κράμα, γύρω από το οποίο είναι τυλιγμένες δύο περιελίξεις πηνίου: η περιέλιξη διέγερσης και η περιέλιξη λήψης. Ορισμένοι αισθητήρες θα έχουν επίσης μια τρίτη περιέλιξη ανάδρασης, εάν ο αισθητήρας πρόκειται να λειτουργήσει σε κλειστό βρόγχο [32].



ΕΙΚΟΝΑ 24: ΜΟΡΦΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ FLUXGATE.

Είναι χρήσιμο να θεωρηθεί ο πυρήνας του δακτυλίου, ως δύο ξεχωριστοί μισοί πυρήνες, που φαίνονται με μπλε και πράσινο χρώμα στο σχήμα. Αυτός ο πυρήνας δακτυλίου έχει ρυθμιστεί για τη μέτρηση του πεδίου προς την κατεύθυνση H_{ext} . Καθώς το ρεύμα ρέει, διαμέσου της περιέλιξης της

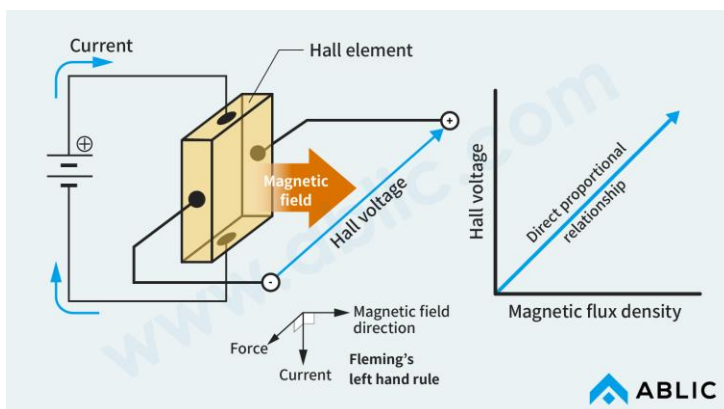
διέγερσης, ο ένας μισός πυρήνας θα δημιουργήσει ένα πεδίο με μια συνιστώσα, στην ίδια κατεύθυνση με το Hex₁, και ο άλλος θα δημιουργήσει ένα πεδίο με μια συνιστώσα, στην αντίθετη κατεύθυνση του Hex₁ [32].

Πριν από τον κορεσμό, το περιβάλλον πεδίο διοχετεύεται, μέσω του πυρήνα, παράγοντας υψηλή ροή, λόγω της υψηλής διαπερατότητάς του. Στο σημείο κορεσμού, η διαπερατότητα του πυρήνα πέφτει σε αυτήν του κενού, προκαλώντας την κατάρρευση της ροής. Κατά τη διάρκεια του επόμενου μισού κύκλου της κυματομορφής διέγερσης, ο πυρήνας ανακάμπτει από τον κορεσμό και η ροή, λόγω του περιβάλλοντος πεδίου, βρίσκεται και πάλι σε υψηλό επίπεδο, έως ότου ο πυρήνας κορεσθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αυτός ο κύκλος επαναλαμβάνεται. Παρά τις αντιστροφές της μαγνήτισης, λόγω της διέγερσης, η ροή, από το περιβάλλον πεδίο, λειτουργεί προς την ίδια κατεύθυνση καθ' όλη τη διάρκεια. Ένα πηνίο λήψης, που τοποθετείται γύρω από τον πυρήνα, θα λάβει αυτές τις αλλαγές της ροής και το πρόσημο της επαγόμενης τάσης, που υποδεικνύει κατάρρευση ή ανάκτηση ροής [32].

ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΕΔΙΟΥ

Οι **αισθητήρες πεδίου** βρίσκονται, πιθανότατα, σε κυρίαρχη θέση στην παγκόσμια αγορά των μαγνητικών αισθητήρων. Οι αισθητήρες πεδίου είναι συσκευές που ανιχνεύουν και μετρούν μαγνητικά πεδία, γύρω από μόνιμους μαγνήτες, αγωγούς ρεύματος και ηλεκτρικές συσκευές. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες πεδίου, είναι εκείνοι που χρησιμοποιούνται για μικρές διακυμάνσεις πεδίου ή ακόμη για ανίχνευση κάποιας μαγνητικής ανωμαλίας. Τα μαγνητικά υλικά, όπως τα σιδηρομαγνητικά αντιδρούν στην αλλαγή θερμοκρασίας ή τα μαγνητοελαστικά υλικά αντιδρούν σε μια μηχανική τάση, αντιδρούν στο μέσο, με το οποίο αλληλεπιδρούν. Οι

αισθητήρες πεδίου τύπου μαγνητοαντίστασης, με μορφή πολυστρωματικών υμενίων, χαρακτηρίζονται από την κάθετη μαγνητική ανισοτροπία των φερρομαγνητικών στρωμάτων. Η ευαισθησία και η αβεβαιότητά τους κυμαίνονται, σε σαφώς καλύτερα επίπεδα, απ' ό,τι στους αισθητήρες τύπου Hall, ως ενδεικτικές τιμές αναφέρονται οι 1 nT και 10 nT, αντίστοιχα. Το φαινόμενο της μαγνητο-εμπέδησης, σε άμορφα και ναοκρυσταλλικά σύρματα, επιτρέπει πολύ καλύτερα επίπεδα ευαισθησίας και αβεβαιότητας, της τάξης των 1-10 pT και 100 pT, αντίστοιχα. Παρά το γεγονός ότι, το κόστος αυτών των συσκευών είναι σχετικά υψηλό σε σύγκριση με τους αισθητήρες μαγνητο-αντίστασης, τα πολύ καλά χαρακτηριστικά τους, επιτρέπουν τη χρήση τους σε βιομηχανικές εφαρμογές και εφαρμογές αυτοματισμού. Το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής, έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη αισθητήρων πεδίου, για μη καταστρεπτικό έλεγχο μαγνητικών επιφανειών [33].



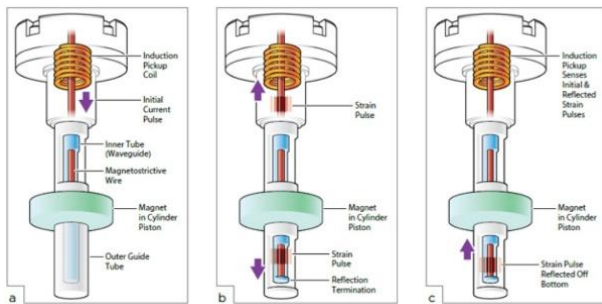
ΕΙΚΟΝΑ 25: ΜΟΡΦΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΕΔΙΟΥ.

ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΘΕΣΗΣ

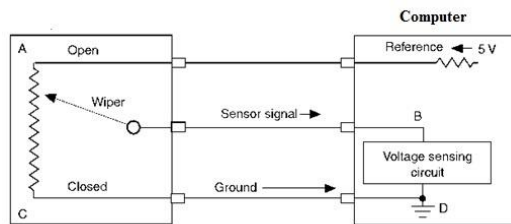
Ως **αισθητήρας θέσης** μπορεί να οριστεί ένας αισθητήρας, ο οποίος μετρά μια μετατόπιση, ανιχνεύει την κίνηση, ή υπολογίζει την θέση ενός

αντικειμένου. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας γειννίασης μετρά την απόσταση δύο αντικειμένων στον χώρο και ταξινομείται ως αισθητήρας θέσης. Οι αισθητήρες θέσης μπορούν να διακριθούν σε αισθητήρες επαφής ή μη, με βάση τη φύση της αισθητήριας αρχής λειτουργίας τους. Για παράδειγμα, αισθητήριες μέθοδοι επαφής μπορεί να απαιτούν την μηχανική πρόσδεση ενός αισθητήριου άξονα στο σημείο μέτρησης. Η θέση, γραμμική ή γωνιακή, του αισθητήριου άξονα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Οι αισθητήρες μετατόπισης επαφής βασίζονται, συνήθως, σε αρχές αντίστασης (π.χ γραμμικό ποτενσιόμετρο), χωρητικότητας (π.χ πιεζοηλεκτρικοί), επαγωγικές (π.χ LVDT, αναλυτές, συγχρονιστές και κωδικοποιητές), μαγνητικές (π.χ φαινόμενο Hall και κωδικοποιητές) και σε οπτικές αρχές (π.χ κωδικοποιητές). Αντιθέτως, οι αισθητήριες μέθοδοι μη επαφής, εκτελούν την ακριβώς ίδια διεργασία και βασίζονται, συνήθως σε, χωρητικές, επαγωγικές ή μαγνητικές τεχνικές, ή κυκλώματα συντονισμού με laser, υπέρυθρες δέσμες, δέσμες μικροκυμάτων και υπερηχητικά κύματα. Οι αισθητήρες θέσης είναι θεμελιώδεις, στην γενική πρακτική της μηχανικής, αφού χρησιμοποιούνται σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, στην οποία οι διαστάσεις ή οι ανοχές, πρέπει να προσδιοριστούν και να διατηρηθούν. Μετρήσεις μετατοπίσεων, μικρότερων από νανόμετρα, μπορεί να απαιτούν την χρήση συμβολόμετρου με ακτίνες X, ενώ στην τάξη των μικρόμετρων μπορούν να γίνουν με την χρήση συμβολόμετρου με laser. Στην κλίμακα του χιλιοστού, η ανίχνευση της μετατόπισης γίνεται με πολλούς συνηθισμένους τύπους αισθητήρων θέσης, ενώ οι μετρήσεις σε κλίμακα μέτρου, απαιτούν συσκευή μικροκυμάτων βραχέων μηκών κύματος και σε περίπτωση ανίχνευσης χιλιομέτρων, χρησιμοποιούνται μεγάλα μήκη κύματος (ραντάρ). Ένας διακόπτης μπορεί να θεωρηθεί ως ένας απλός αισθητήρας θέσης. Οι αισθητήρες θέσης, χρησιμοποιούνται ευρέως στους σηματοδότες κυκλοφορίας, στους αντικλεπτικούς συναγερμούς, στα συστήματα αυτοκίνησης, στα ρομπότ, στην ιατρική. Στις περισσότερες από τις παραπάνω

περιπτώσεις, ο αισθητήρας θέσης χρησιμοποιείται ως συσκευή ελέγχου. Μια ακόμη περιοχή εφαρμογών αισθητήρων θέσης, αποτελεί αυτή που βασίζεται σε ανοικτό ή κλειστό βρόγχο κυκλώματος ελέγχου. Μια τέτοια περίπτωση αποτελούν, οι οπτικοί κωδικοποιητές που χρησιμοποιούνται, συνήθως, στην μέτρηση θέσης ενός ενεργοποιητή ή ενός οδηγού άξονα [33].



ΕΙΚΟΝΑ 26: ΜΟΡΦΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΘΕΣΗΣ.

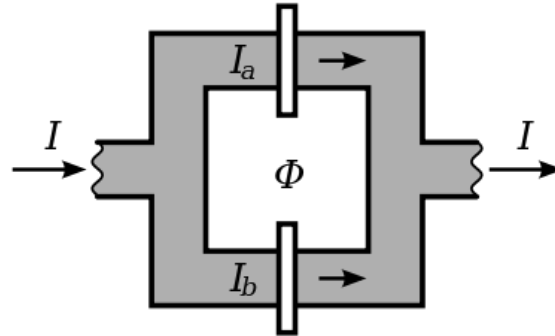


ΕΙΚΟΝΑ 27: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΘΕΣΗΣ.

ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ SQUID

Η **συσκευή SQUID** (Superconductive Quantum Interference Device) είναι το πιο ευαίσθητο μαγνητόμετρο με διακριτική ικανότητα μαγνητικής επαγωγής μερικών fT. Αυτό έχει ως συνέπεια, οι συσκευές SQUID να είναι ικανές να μετρήσουν εξαιρετικά ασθενή μαγνητικά πεδία, όπως εκείνα που παράγονται από την καρδιά και τον εγκέφαλο του ανθρώπου. Μια συσκευή SQUID, αποτελείται από μια δακτυλοειδή κατασκευή από υπεραγώγιμο

υλικό, η οποία διακόπτεται είτε από μια, είτε από δύο επαφές Josephson [34].



ΕΙΚΟΝΑ 28: ΒΑΣΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ SQUID, ΜΕ ΕΠΑΦΕΣ JOSEPHSON.

Στο παραπάνω σχήμα, παρουσιάζεται η βασική διαμόρφωση μιας συσκευής SQUID. Διοχετεύεται ένα ρεύμα I , το οποίο είναι ρεύμα πόλωσης. Το ρεύμα αυτό, χωρίζεται σε δύο ρεύματα I_a και I_b , τα οποία ρέουν διαμέσω των δύο επαφών, όπως φαίνεται στο σχήμα. Οι επαφές αυτές (Josephson) σχηματίζουν ασθενείς συνδέσεις στο μαγνητικό βρόγχο. Μαθηματικά, η σχέση που περιγράφει την λειτουργία μιας συσκευής SQUID βασίζεται στην μαγνητική ροή. Με την απουσία ασθενών συνδέσεων, η πυκνότητα ροής Φ_{ext} , μέσα στον βρόγχο, σχετίζεται με το ολοκλήρωμα της πυκνότητας, της εξωτερικής μαγνητικής πυκνότητας ροής B_{ext} γύρω από την επιφάνεια A που περικλείει τον βρόγχο:

$$\Phi_{ext} = \oint \tilde{B}_{ext} dA \quad 3.1$$

Η μαγνητική πυκνότητα ροής Φ_{in} μέσα στο υπεραγώγιμο βρόγχο, πρέπει να εκφραστεί ως πολλαπλάσιο της κβαντικής πυκνότητας ροής Φ_0 , όπου

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} \quad 3.2$$

Συνεπώς, η εξωτερική πυκνότητα ροής αντισταθμίζεται εσωτερικά σε μονάδες της Φ_0 , με μια πυκνότητα ροής αυτεπαγωγής Φ_s , όπου

$$2\pi\Phi_{int} = 2\pi n\Phi_0 \quad 3.3$$

$$\Phi_s = LI_{cc} \quad 3.4$$

όπου με L συμβολίζεται την αυτεπαγωγή του δακτυλίου και I_{cc} είναι το ρεύμα θωράκισης. Γενικότερα, μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό, ότι η ευαισθησία του εν λόγω αισθητήρα, ξεπερνά κατά πολύ, όλους τους άλλους τύπους αισθητήρων παρόμοιας λειτουργίας [34].

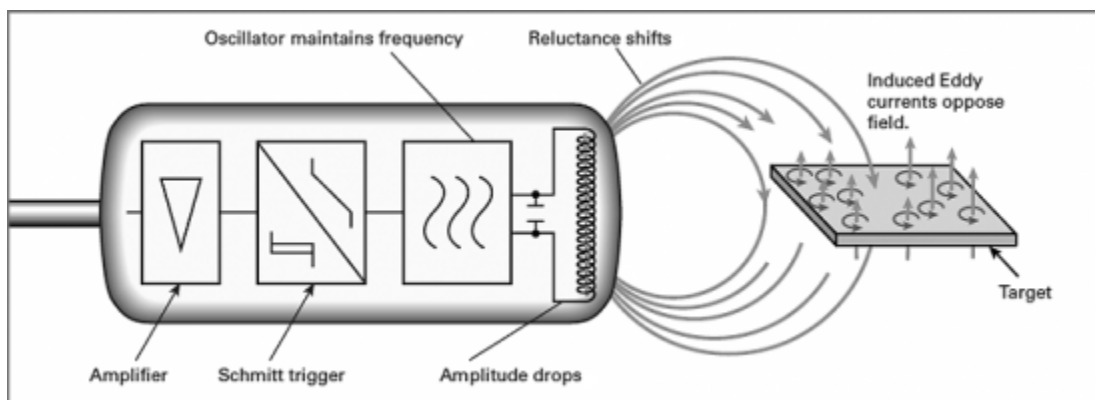
ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Ένας **αισθητήρας επαγωγής** είναι μια συσκευή που χρησιμοποιεί την αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής για την ανίχνευση ή τη μέτρηση αντικειμένων. Ένας επαγωγέας αναπτύσσει ένα μαγνητικό πεδίο, όταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα από αυτό. Εναλλακτικά, ένα ρεύμα θα ρέει μέσα από ένα κύκλωμα που περιέχει έναν επαγωγέα, όταν αλλάξει το μαγνητικό πεδίο, μέσω αυτού. Αυτή η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση μεταλλικών αντικειμένων που αλληλεπιδρούν με ένα μαγνητικό πεδίο. Ο αισθητήρας επαγωγής έχει βασιστεί στον νόμο επαγωγής του Faraday. Οι χρονικές διακυμάνσεις της μαγνητικής ροής Φ , μέσω ενός πηνίου με N ελίγματα, θα προκαλέσουν μια τάση (e), η οποία ακολουθεί:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad 3.5$$

$$e = -N \times S \frac{d\tilde{B}}{dt} \quad 3.6$$

υποθέτοντας ότι το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο B είναι ομογενές σε ένα τμήμα S. Μια μορφή επαγωγικού αισθητήρα, οδηγεί ένα πηνίο με έναν ταλαντωτή. Ένα μεταλλικό αντικείμενο που πλησιάζει το πηνίο, θα αλλάξει την αυτεπαγωγή του πηνίου, προκαλώντας μια αλλαγή στη συχνότητα ή μια αλλαγή στο ρεύμα του πηνίου. Αυτές οι αλλαγές μπορούν να ανιχνευθούν, να ενισχυθούν, να συγκριθούν, με μια τιμή κατωφλίου και να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο ενός εξωτερικού κυκλώματος. Το πηνίο μπορεί να έχει σιδηρομαγνητικό πυρήνα για να κάνει το μαγνητικό πεδίο πιο έντονο και να αυξάνει την ευαισθησία της συσκευής. Μια άλλη μορφή επαγωγικού αισθητήρα, χρησιμοποιεί ένα πηνίο για να παράγει ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και ένα δεύτερο πηνίο για να ανιχνεύσει τις αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο, που προκαλούνται από ένα αντικείμενο, για παράδειγμα, λόγω των δινορευμάτων που επάγονται σε ένα μεταλλικό αντικείμενο [35].



ΕΙΚΟΝΑ 29: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ.

ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ HALL

Οι **μαγνητικοί αισθητήρες Hall** αποτελούν εφαρμογή του φαινομένου Hall. Το φαινόμενο Hall, με λίγα λόγια, περιγράφει ότι όταν ένα ηλεκτρόνιο κινείται μέσα σε ένα μέταλλο παρουσία μαγνητικής ροής πυκνότητας B , τότε δρα, σε αυτό, μια μαγνητική δύναμη. Αυτή η δύναμη, είναι η δύναμη Lorentz και δρα κάθετα στην κίνηση του ηλεκτρονίου και δίνεται από την σχέση:

$$\tilde{\mathcal{F}} = e(\tilde{u} \otimes \tilde{B}) \quad 3.7$$

Όπου u είναι η μέση ταχύτητα των ηλεκτρονίων. Η δύναμη αυτή περιστρέφει τις γραμμές ροής ρεύματος κατά μια γωνία θ_H , η οποία ονομάζεται γωνία Hall. Η εκτροπή αυτή των ηλεκτρονίων, δημιουργεί ένα θετικό φορτίο στην μία πλευρά του αγώγιμου υλικού και ένα αρνητικό φορτίο στην άλλη πλευρά. Το προκύπτον πεδίο, το πεδίο Hall E_H , αντιτίθεται στην δύναμη Lorentz και έτσι ισχύει:

$$\tilde{\mathcal{E}}_{Hy} = +\tilde{u}_x \tilde{B}_z \quad 3.8$$

Σε έναν, τώρα, αισθητήρα Hall, η τάση V_H (τάση Hall), στην πλάκα του αισθητήρα, υπολογίζεται από την θεωρία μεταφοράς ως:

$$V_H = \tilde{\mathcal{E}}_H w = +\tilde{u}_x \tilde{B}_z w \quad 3.9$$

Όπου w το πλάτος της πλάκας Hall. Η συσχέτιση της μέσης ταχύτητας μετατόπισης u_x με το ρεύμα I_x , είναι:

$$V_H = \left[-\frac{1}{ne} \right] \frac{I_x \tilde{B}_z}{d} = R_H \frac{I_x \tilde{B}_z}{d} \quad 3.10$$

Όπου n η πυκνότητα των ηλεκτρονίων, d το πάχος της πλάκας και R_H ο συντελεστής Hall. Η παραπάνω σχέση αποτελεί την ιδανική τάση Hall. Συνδέοντας τα προηγούμενα, συνεπάγεται ότι η τάση, η γωνία και ο συντελεστής Hall εκφράζονται μεταξύ τους ως εξής:

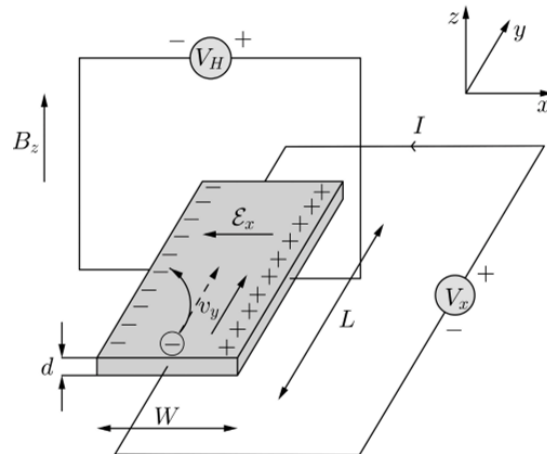
$$\tan \theta_H = \frac{\tilde{\xi}_y}{\tilde{\xi}_x} = R_H \tilde{B}_z \sigma \quad 3.11$$

Όπου σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού. Παρατηρείται, το πόρισμα, ότι οι καλύτερες συσκευές αισθητήρα Hall, κατασκευάζονται από λεπτή πλάκα, με χαμηλή αγωγιμότητα και προσεγμένη επιλογή της γεωμετρίας μέσω της σχέσης:

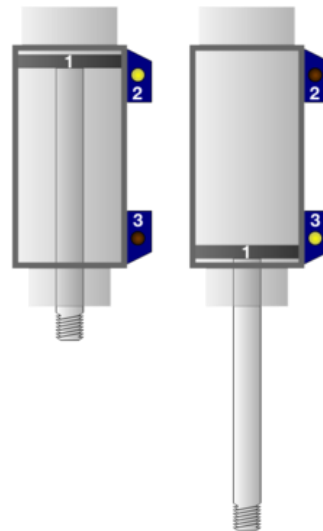
$$V_H = -\frac{r_n k_g I_x \tilde{B}_z}{ne d} \quad 3.12$$

Όπου r_n καθορίζεται από την δομή της ζώνης ενέργειας και την επεξεργασία σκέδασης (τύπου n) και k_g είναι ο γεωμετρικός διορθωτικός παράγοντας, που εμφανίζεται, επειδή η πλάκα δεν είναι απείρου μήκους και έτσι, οι επαφές του ηλεκτροδίου παραμορφώνουν τις γραμμές του ρεύματος. Η παραπάνω σχέση δίνει το συμπέρασμα για λεπτότερη πλάκα, χαμηλότερη αγωγιμότητα και προσεκτική επιλογή γεωμετρίας για καλύτερη εφικτή κατασκευή του αισθητήρα. Οι αισθητήρες Hall χρησιμοποιούνται, συνήθως, για τη χρονομέτρηση της ταχύτητας των τροχών και των αξόνων, όπως για το

χρονισμό ανάφλεξης του κινητήρα εσωτερικής καύσης, τα ταχύμετρα και τα συστήματα αντιμπλοκαρίσματος πέδησης. Χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες, για την ανίχνευση της θέσης του μόνιμου μαγνήτη [35, 36].



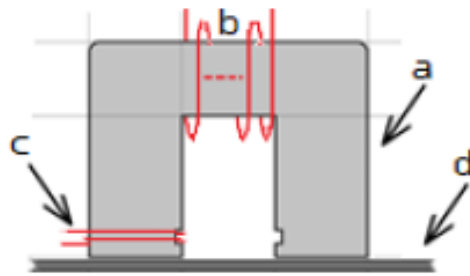
ΕΙΚΟΝΑ 30: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΛΑΚΑΣ HALL.



ΕΙΚΟΝΑ 31: ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΕΜΒΟΛΟ (1) ΣΕ ΑΥΤΟΝ ΤΟΝ ΚΥΛΙΝΔΡΟ ΘΑ ΠΡΟΚΑΛΕΣΕΙ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ HALL (2 ΚΑΙ 3) ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΟΙ ΣΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑ ΟΤΑΝ ΑΝΑΣΥΡΘΕΙ Η ΕΚΤΑΘΕΙ ΠΛΗΡΩΣ.

ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

Ο **αισθητήρας μαγνητικής διαπερατότητας** είναι βασισμένος στην δημιουργία ενός μαγνητικού κυκλώματος, τα μέρη του οποίου, να είναι ο αισθητήρας και το προς μέτρηση υλικό. Ουσιαστικά, ο αισθητήρας στηρίζεται σε έναν πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό, σε τύπο yoke. Ο χώρος, πάνω στον πυρήνα του αισθητήρα, καταναίμεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί επάνω σε αυτόν το δοκίμιο αλλά και να υπάρχει το απαραίτητο μαγνητικό κύκλωμα που αποσκοπεί στην λειτουργία του αισθητήρα. Χρησιμοποιούνται δύο πηνία (διέγερσης και λήψης) για είσοδο και έξοδο του αισθητήρα. Τα δυο αυτά πηνία τυλίγονται στον σιδηροπυρήνα και λειτουργούν ως στοιχεία (πηγή και καταναλωτής) του μαγνητικού κυκλώματος [37].

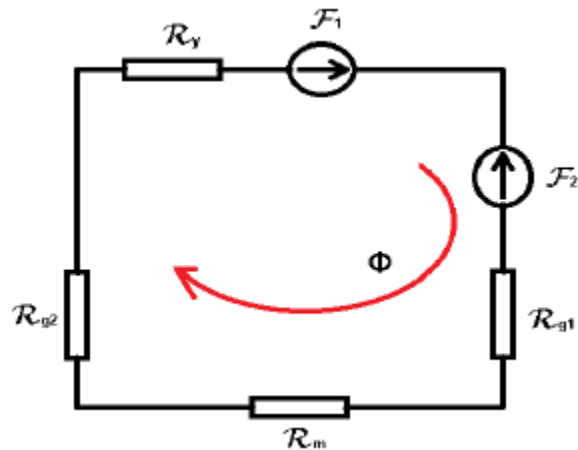


ΕΙΚΟΝΑ 32: ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ.

Ως προς την κατασκευή, τα δυο πηνία του αισθητήρα μπορούν να διαφέρουν στην γεωμετρία τους και τα χαρακτηριστικά τους, ανάλογα με τον σκοπό για τον οποίο προορίζεται να λειτουργήσει ο αισθητήρας.

Το πηνίο διέγερσης τροφοδοτείται με ρεύμα και έτσι δημιουργεί μαγνητικό πεδίο έντασης \mathbf{H} και μαγνητικής ροής Φ , στο εσωτερικό του. Αυτό με την

σειρά του μεταφέρεται σε όλο τον πυρήνα. Η μαγνητική ροή που παράγεται, ανάλογα με το αν ο αισθητήρας λειτουργεί εν κενώ ή με φορτίο, σκεδάζεται ή συμπυκνώνεται, αντίστοιχα. Αυτό επηρεάζει το πεδίο μέσα στο πηνίο λήψης μεταβάλλοντας την τάση στα άκρα του. Η τάση που θα μετρηθεί τελικά στην έξοδο του αισθητήρα, είναι και αυτή που θα δώσει την μαγνητική διαπερατότητα του υλικού [37, 38].



ΕΙΚΟΝΑ 33: ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΜΕ ΔΥΟ ΜΑΓΝΗΤΕΓΕΡΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ.

Στην πράξη, περιληπτικά, μέσω των πηνίων λήψης και διέγερσης και των νόμων που διέπουν τα μαγνητικά και ηλεκτρικά κυκλώματα, αλλά και κάποιες εύλογες προσεγγίσεις, μπορεί να δημιουργηθεί μια μαθηματική σχέση, η οποία να υπολογίζει την μαγνητική διαπερατότητα συναρτήσει των χαρακτηριστικών και της γεωμετρίας των δύο πηνίων. Ουσιαστικά, μέσω των νόμων που αναφέρθηκαν, δομείται η σχέση:

$$\mu = - \frac{R_1 \cdot l_1 \cdot \int V_2 dt}{S \cdot N_1 \cdot V_1} \quad 3.13$$

Όπου R_1 , l_1 , N_1 , V_1 είναι η αντίσταση, το μήκος, οι σπείρες και η τάση στα άκρα του πηνίο διέγερσης, αντίστοιχα, V_2 είναι η τάση στα άκρα του πηνίου λήψης και S είναι το εμβαδό του πηρύνα του αισθητήρα. Προφανώς, το μ αντιπροσωπεύει την μαγνητική διαπερατότητα [37, 38].

ΠΟΛΥΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

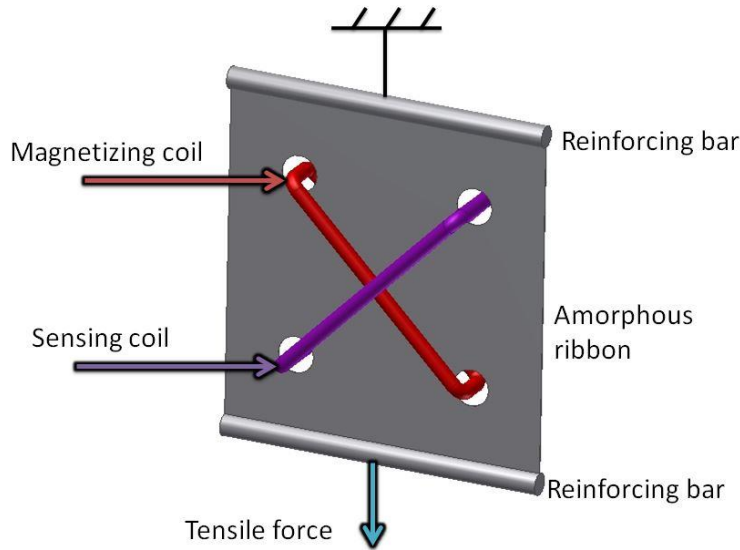
Αυτοί οι αισθητήρες, προσδιορίζουν την ομάδα των αποκαλούμενων «έξυπνων» αισθητήρων, στην οποία συμπεριλαμβάνονται δύο υποκατηγορίες. Πρόκειται για τους πολυπαραμετρικούς και τους αυτοδιορθούμενους αισθητήρες. Οι αισθητήρες πολλαπλών παραμέτρων (multi-parameter) είναι ικανοί να ανιχνεύουν περισσότερα από ένα φυσικά μεγέθη. Παράδειγμα τέτοιου αισθητήρα είναι μια μαγνητο-ελαστική διάταξη που να ανιχνεύει πεδίο και τάση ταυτόχρονα. Κάτι τέτοιο, συμβαίνει, επειδή η παλμική έξοδος του αισθητήρα είναι ρυθμισμένη, σε μεγάλο εύρος, εξαιτίας του περιβάλλοντος πεδίου, ενώ το πλάτος παλμού ρυθμίζεται μόνο από τις εφελκυστικές τάσεις. Οι αυτοδιορθούμενοι (reacting) αισθητήρες, είναι ολοκληρωμένα ηλεκτρομηχανικά συστήματα, που «αισθάνονται» και αντιδρούν, ανάλογα με τη μέτρηση. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας οδήγησης πυραύλου, περιλαμβάνει έναν ακριβή αισθητήρα πεδίου για πλοήγηση, ο οποίος μετρά την διεύθυνση της κίνησης του πυραύλου και ένα σύστημα αντίδρασης, το οποίο αλλάζει τη διεύθυνση του πυραύλου, ανάλογα με μια προεπιλεγμένη εντολή. Παράδειγμα αισθητήρων πολλαπλών παραμέτρων, περιλαμβάνουν αυτούς για ταυτόχρονη μέτρηση pH και θερμοκρασίας, οξυγόνου και θερμοκρασίας, καθώς και για ταυτόχρονη μέτρηση 4 παραμέτρων (οξυγόνο, θερμοκρασία, pH και διοξείδιο του άνθρακα) [39].

ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΑΓΝΗΤΟΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΣΤΡΕΣ

Οι **αισθητήρες τάσης** χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: τις κυψέλες φορτίου, τους αισθητήρες πίεσης και τους μετρητές ροπής, έχοντας τους μετρητές ροής και τους μετρητές ροής μάζας ως εφαρμογή ανίχνευσης παραγώνων. Όλες αυτές οι συσκευές μπορούν να βασίζονται σε αισθητήρες θέσης ή καταπόνησης που ανιχνεύουν έμμεσα την εφαρμοζόμενη τάση. Οι αισθητήρες τάσης που μετρούν απευθείας την τάση εφελκυσμού βασίζονται κυρίως σε επαγωγικές διατάξεις που χρησιμοποιούν ως σιδηρομαγνητικό πυρήνα, ένα υλικό ευαίσθητο στην τάση εφελκυσμού. Ένας τέτοιος πυρήνας είναι συνήθως ένα θετικό μαγνητοσυσταλτικό υλικό. Η διαπερατότητα μειώνεται δραματικά με την καταπόνηση, έτσι ώστε η έξοδος του πηνίου να μειώνεται, αντίστοιχα. Η ευαισθησία αυτών των συσκευών, είναι πολύ μεγαλύτερη από την ευαισθησία των μετρητών καταπόνησης, ακόμη και χωρίς καμία προσπάθεια ρύθμισης του σήματος. Στην περίπτωση αρνητικών μαγνητοσυστολικών υλικών, η διαπερατότητα τείνει να αυξάνεται με χαμηλότερη αναλογία, σε σύγκριση με θετικά μαγνητοσυστολικά υλικά. Χρησιμοποιώντας την ίδια αρχή, έχουν αναπτυχθεί, επίσης, κυψέλες φορτίου και μετρητές ροπής. Οι κυψέλες φόρτισης μετατρέπουν το φορτίο που εφαρμόζεται σε μια δοκό σε εφελκυστική ή θλιπτική τάση, στο μαγνητοελαστικό αισθητήριο στοιχείο, ενώ οι αισθητήρες ροπής χρησιμοποιούν το σχέδιο τύπου Shevron. Σύμφωνα με αυτή τη διάταξη, η ροπή, σε έναν άξονα, οδηγεί σε εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις, σε κάθετα διατεταγμένες μαγνητοελαστικές λωρίδες, επιτρέποντας, έτσι, τον προσδιορισμό της ροπής και της κατεύθυνσης της ροπής. Σύμφωνα με την κύρια αρχή λειτουργίας αυτής της συσκευής, δύο αισθητήρες μαγνητικού πεδίου συνδέονται σε σειρά, ανιχνεύοντας έτσι, την κλίση της αλλαγής της μαγνήτισης, λόγω της στρέψης, που εφαρμόζεται σε έναν σιδηρομαγνητικό-

μαγνητοελαστικό άξονα ή έναν μη σιδηρομαγνητικό άξονα, που καλύπτεται με σιδηρομαγνητική, μαγνητοελαστική μεμβράνη. Η ευαισθησία και η επαναληψιμότητα αυτής της συσκευής, φαίνεται να είναι εξαιρετικά καλή, επιτρέποντας τη χρήση αυτού του αισθητήρα ροπής στην αυτοκινητοβιομηχανία [39].

Ένας τύπος αισθητήρων δυναμικής τάσης, μπορεί να βασίζεται σε αισθητήρες μετατόπισης, οι οποίοι χρησιμοποιούν, επιπλέον, μέσα για τη μετατροπή της τάσης σε μετατόπιση. Οι κλασικοί αισθητήρες τάσης μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο δυναμικής τάσης. Αυτό γίνεται αντιληπτό με συνεχή μέτρηση της τάσης και στη συνέχεια υπολογισμό της δυναμικής τάσης, χρησιμοποιώντας το κύκλωμα και το λογισμικό ελέγχου ρύθμισης σήματος [39]. Ο πιο προηγμένος τύπος αισθητήρων δυναμικής τάσης είναι αυτός, που δεν χρησιμοποιεί μέσα διέγερσης. Με αυτόν τον τρόπο, η διακύμανση της μαγνήτισης, λόγω της μαγνητοσυστολής ή μαγνητοδιαστολής, μπορεί να ανιχνευθεί επαγωγικά, αγωγικά ή μαγνητοοπτικά [39].



ΕΙΚΟΝΑ 34: ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΜΑΓΝΗΤΟΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΣΤΡΕΣ (ΤΑΣΗΣ) ΚΑΙ Ο ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ.

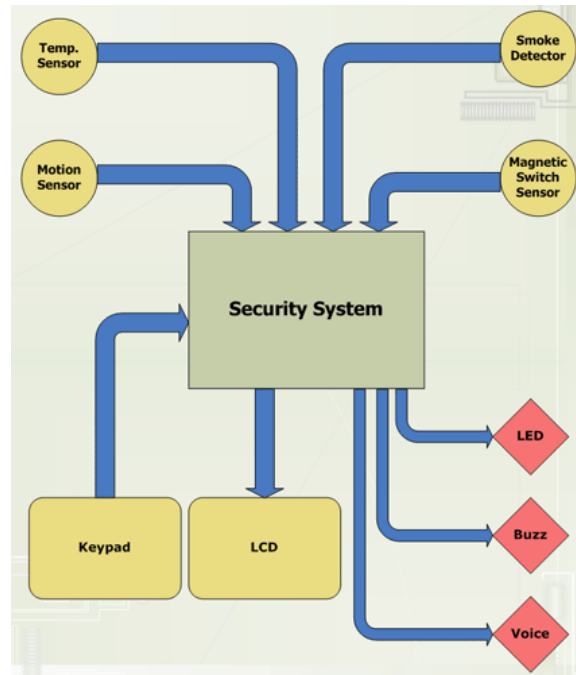
ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Οι **αισθητήρες ασφαλείας** βασίζονται στον συνδυασμό διαφορετικών μαγνητικών ιδιοτήτων, για παράδειγμα διαφορετικών βρόγχων υστέρησης υλικών, προκειμένου να δημιουργηθεί ένας κώδικας που βασίζεται σε μια σειρά μαγνητικών υπογραφών, ο οποίος επιτρέπει την αναγνώριση ενός αντικειμένου, χωρίς άμεση οπτική παρατήρηση. Διάφορες μαγνητικές τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί για συστήματα μαγνητικής ασφαλείας ή συστήματα μαγνητικής υπογραφής. Η πιο γνωστή τεχνική είναι αυτή, που συνδυάζει τις ιδιότητες πολύ μαλακών μαγνητικών υλικών, με τη μορφή ταχέως σβησμένων ταινιών και την αρχή των δινορρευμάτων. Ένα πηνίο ή ένα ζεύγος πηνίων, που συνδέονται σε σειρά, χρησιμοποιείται ως μέσο διέγερσης, ενώ το πηνίο λήψης ή ένα ζεύγος πηνίων, χρησιμοποιείται για την ανίχνευση σήματος. Το πηνίο τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο έχει ως

αποτέλεσμα, το πεδίο που δημιουργείται από το εναλλασσόμενο ρεύμα, να είναι κατακόρυφο στο επίπεδο του πηνίου. Το πηνίο λήψης έχει ρυθμιστεί, με τέτοιο τρόπο ώστε να ανιχνεύει το σήμα απόκρισης, που αντιστοιχεί στην περιοχή, όπου μεταδίδεται εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Με απουσία οποιουδήποτε μαγνητικού υλικού μπροστά από το πηνίο διέγερσης ή μεταξύ των δύο πηνίων διέγερσης, η τάση εξόδου του πηνίου λήψης είναι κάτω από ένα ορισμένο όριο. Εάν ένα μαγνητικό υλικό που χρησιμοποιείται, μετά από μια ειδική διαδικασία επεξεργασίας και προσαρμογής, βρίσκεται μεταξύ του πηνίου ή του ζεύγους πηνίων, προκαλείται μια παλμική τάση στο πηνίο λήψης. Αυτό το σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε συστήματα ασφαλείας σε εμπορικά καταστήματα. Ένας άλλος τύπος αισθητήρων ασφαλείας, είναι οι μαγνητικές ταινίες για κάρτες ή εισιτήρια κ.λπ. Ένα ειδικό μαγνητικό υλικό, πιθανότατα, ένα ημίσκληρο μαγνητικό υλικό με τη μορφή σωματιδιακού μέσου, εναποτίθεται στην πλαστική κάρτα ή στην επιφάνεια χαρτιού με πλαστική επικάλυψη. Στη συνέχεια, ένας μαγνητικός κώδικας γράφεται σε αυτήν την επιφάνεια: οι μαγνητικές κεφαλές εκπέμπουν ή όχι, μαγνητικό πεδίο πάνω από τη μαγνητική επιφάνεια εγγραφής, δημιουργώντας, έτσι, μια ακολουθία από μαγνητικά «μηδενικά» και «ένα». Στη συνέχεια, μια κεφαλή εγγραφής, μπορεί να διαβάσει τις πληροφορίες που είναι αποθηκευμένες σε αυτήν την επιφάνεια [39].

Ένα άλλο ενδιαφέρον σύστημα ασφαλείας είναι η μαγνητική υπογραφή του οχήματος. Μέχρι αυτή τη στιγμή, αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται ευρέως σε στρατιωτικές εφαρμογές, ειδικά στην αναγνώριση πλοίων, αλλά επί του παρόντος γίνονται προσπάθειες προκειμένου να χρησιμοποιηθεί, ένα είδος τέτοιου συστήματος σε οικιακές εφαρμογές, όπως οι εφαρμογές αυτοκινήτων και σιδηροδρόμων. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική, ένα μεγάλο πηνίο διέγερσης τοποθετείται στο κάτω μέρος ενός πλοίου, με την προϋπόθεση ότι το πλοίο έχει μεταλλικό «κορμό» (μαλακό χάλυβα) και στη συνέχεια μεταδίδει

εναλλασσόμενο ρεύμα στο πηνίο διέγερσης. Ο σιδηρομαγνητικός «κορμός» του πλοίου μαγνητίζεται, μεταδίδοντας έναν ειδικό κωδικό, μέσω του διεγερμένου πηνίου. Ένας αισθητήρας πεδίου, έξω από το πλοίο, μπορεί να διαβάσει την αντίστοιχη διαδικασία μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού «κορμού» του πλοίου, που είναι η μαγνητική του υπογραφή [39].



ΕΙΚΟΝΑ 35: ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ, ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ.

ΈΞΥΠΝΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

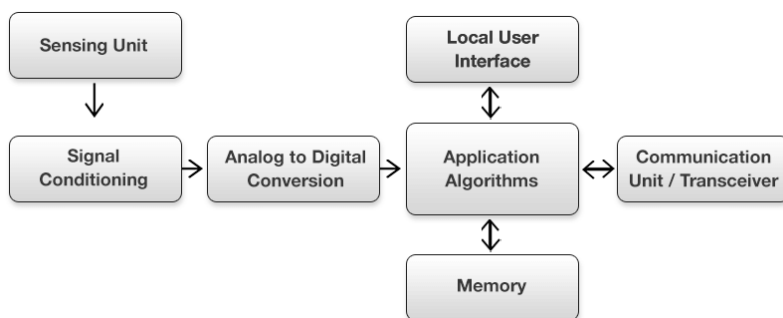
Η επιτυχής εφαρμογή πολλών τύπων αισθητήρων στερεάς κατάστασης είχε θετικό αντίκτυπο στην αγορά και οδήγησε σε ζήτηση για αισθητήρες, είτε με χαμηλότερο κόστος μονάδας, είτε με αυξημένη λειτουργικότητα, ώστε να βελτιωθεί η ανταγωνιστικότητά τους. Οι διαφορετικοί τύποι ενός έξυπνου αισθητήρα, καθορίζονται με έναν προεπεξεργαστή και μία κύρια μονάδα επεξεργασίας. Ο προεπεξεργαστής σήματος εκτελεί χαμηλού επιπέδου καθήκοντα όπως η ενίσχυση, το φιλτράρισμα ή μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα [41].

Έξυπνος αισθητήρας ορίζεται η συσκευή, πάνω στην οποία έχει ολοκληρωθεί τουλάχιστον ένα αισθητήριο στοιχείο και ένα κύκλωμα επεξεργασίας σήματος. Υπάρχει μια μικρή σύγχυση γύρω από τον ορισμό του έξυπνου αισθητήρα, διότι όλοι οι έξυπνοι αισθητήρες πρέπει να είναι ολοκληρωμένοι και ευφυείς, ενώ κάθε αισθητήρας που έχει σημαντική ευφυΐα, αλλά δεν είναι πλήρως ενσωματωμένος μπορεί να ονομαστεί ευφυής αισθητήρας. Ένας έξυπνος αισθητήρας, πρέπει να κάτεχει ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω τρία χαρακτηριστικά:

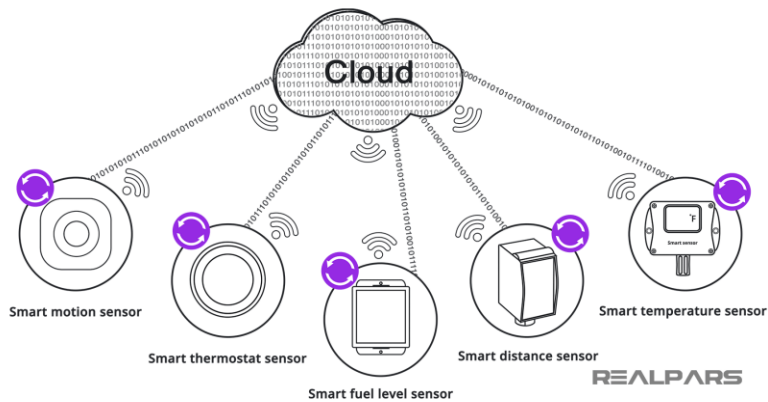
- Εκτέλεση λογικής λειτουργίας
- Επικοινωνία με μία ή περισσότερες άλλες συσκευές
- Λήψη απόφασης με τη χρήση σαφών ή ασαφών δεδομένων.

Στον ρόλο της κύριας μονάδας επεξεργασίας, που αναφέρθηκε προηγουμένως, μπορεί να είναι ένας μικροαισθητήρας, αλλά θα μπορούσε να είναι και κάποιος τύπος προγραμματιζόμενης λογικής συσκευής. Η ολοκλήρωση της μονάδας επεξεργασίας με τον αισθητήρα, με σκοπό την

κατασκευή ενός έξυπνου αισθητήρα απαιτεί μία σημαντική προσπάθεια ηλεκτρονικού σχεδιασμού. Ένας έξυπνος αισθητήρας μπορεί να είναι ικανός να επικοινωνεί με τον χειριστή του και να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τα, εν λόγω, προβλήματα για τα οποία χρησιμοποιείται. Εναλλακτικά, μπορεί να επικοινωνεί με μία άλλη συσκευή και να τροποποιεί την ίδια του την λειτουργία. Οι έξυπνοι αισθητήρες μπορούν να παρέχουν ένα καλό επίπεδο ελέγχου, όπως μπορεί να γίνει διαμέσου ενός ψηφιακού ρυθμιστή PID (Proportional–Integral–Derivative). Οι έξυπνοι αισθητήρες μπορούν να έχουν κάποιο είδος υψηλού επιπέδου προσαρμοσμένης στρατηγικής ρύθμισης, η οποία επιτρέπει, οι παράμετροι ρύθμισης να αναπροσαρμόζονται, αυτόματα με τον χρόνο. Η κατασκευή ενός αισθητήρα, ο οποίος μπορεί να προειδοποιήσει τον χρήστη, ή να προσαρμοστεί στις συνθήκες περιβάλλοντος, απαιτεί κάποια ικανότητα λήψης αποφάσεων. Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούν παραμετρικά δεδομένα στην λήψη αποφάσεων. Ωστόσο, είναι εύλογο να αναμένεται στο κοντινό μέλλον, τέτοιου τύπου ευφυείς αισθητήρες, να χρησιμοποιούν μη παραμετρικές μεθόδους, όπως τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα ή συστήματα, τα οποία βασίζονται σε ασαφή δεδομένα [41].



ΕΙΚΟΝΑ 36: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΞΥΠΝΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ.

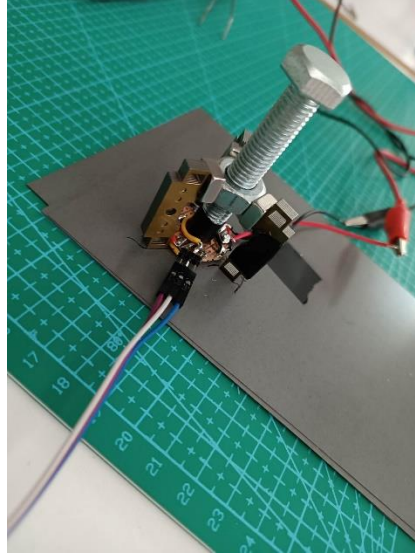


ΕΙΚΟΝΑ 37: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΈΞΥΠΝΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.

ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ HALL

Ο **Αισθητήρας Πολλαπλών Hall** αποτελεί τον αισθητήρα, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε, στο πειραματικό μέρος, με σκοπό τον έλεγχο της υγείας των υλικών, μέσω της μέτρησης, της μαγνητικής τους διαπερατότητας, με χρήση μη καταστροφικού ελέγχου. Αυτή η ιδέα έχει ως βάση, τη λήψη μετρήσεων, σε διαφορετικές κατευθύνσεις, στην σύσταση του υλικού, αντί μιας ενιαίας μέτρησης, για κάθε σημείο του υλικού. Αυτό γίνεται για να συνυπολογισθεί, η ανισοτροπία του υλικού στις διακυμάνσεις της μέτρησης, η οποία αγνοήθηκε σε μεγάλο βαθμό σε προηγούμενες μεθόδους. Με αυτή τη διάταξη, το σύστημα αισθητήρων είναι ικανό να παρακολουθεί τις παραμένουσες τάσεις σε διαφορετικούς προσανατολισμούς του χάλυβα, ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα να υποδεικνύει μια χαρτογράφηση της ανισοτροπίας των υπολειμματικών τάσεων, στην επιφάνεια και την υποεπιφάνεια των χάλυβα [42].

Παρακάτω, παρουσιάζεται ο, εν λόγω, αισθητήρας πολλαπλών Hall.



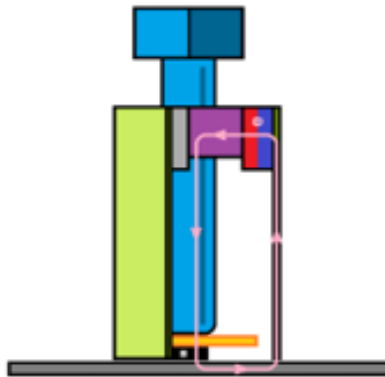
ΕΙΚΟΝΑ 38: ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ HALL.

Το σύστημα αισθητήρων, που παρουσιάζεται στην εικόνα, χρησιμοποιεί τρεις αισθητήρες διατεταγμένους στις 120° , ενώ σε κάθε αισθητήρα έχει εκχωρηθεί ένας μόνιμος μαγνήτης, που πολώνει και μεταδίδει μαγνητικό πεδίο προς την επιφάνεια του, υπό δοκιμή, χάλυβα, η διαπερατότητα του οποίου, καθορίζει τον προσανατολισμό των μαγνητικών γραμμών που διεισδύουν στην επιφάνειά του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η έξοδος, που παράγεται, σε κάθε αισθητήρα Hall, να εξαρτάται από τη διαπερατότητα της καλύβδινης επιφάνειας, στην αντίστοιχη περιοχή του αισθητήρα Hall. Το πλάτος, κάθε αισθητήρα, είναι 4 mm [42].

Οι αισθητήρες, με σκοπό να λειτουργούν αποτελεσματικά και να δέχονται τις μετρήσεις που αναζητούνται, απαιτείται να αποτελούν μέρος ενός κλειστού μαγνητικού κυκλώματος. Αυτό το μαγνητικό κύκλωμα, πρέπει να περιλαμβάνει έναν μόνιμο μαγνήτη ως πηγή μαγνητικού πεδίου, τον, υπό

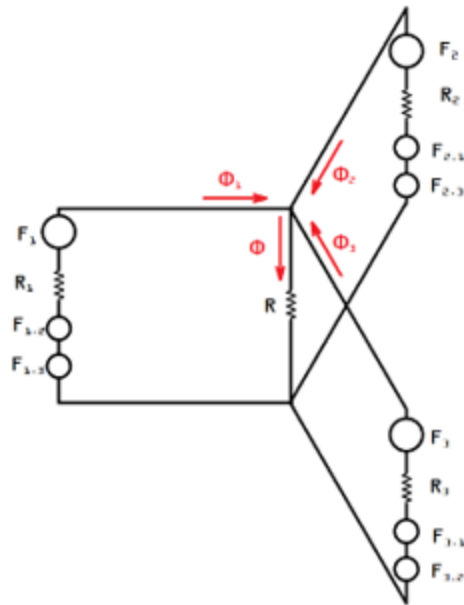
δοκιμή, χάλυβα και κάποιο είδος σιδηρομαγνητικής διαδρομής, μέσω σιδηρομαγνητικού υλικού (πυρήνα), ώστε να ρέει το μαγνητικό πεδίο. Για την κατασκευή του αισθητήρα, χρησιμοποιήθηκε ένα απλό εξαγωνικό βιομηχανικό παξιμάδι από μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό. Το παξιμάδι έχει 10 mm μήκος σε κάθε πλευρά και διάμετρο οπής ίση με 8 mm. Σε τρεις από τις πλευρές του, τοποθετούνται 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, τα οποία λειτουργούν ως ένας μηχανισμός στήριξης του αισθητήρα σε όρθια θέση [42].

Η συνολική διάταξη μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συνδυασμός τριών ξεχωριστών μαγνητικών κυκλωμάτων, το καθένα παρόμοιο με αυτό του αρχικού αισθητήρα Hall [42].



ΕΙΚΟΝΑ 39: ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ Φ ΜΕΣΑ ΣΤΗΝ ΔΙΑΤΑΞΗ.

Το ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του αισθητήρα παρουσιάζεται παρακάτω.



ΕΙΚΟΝΑ 40: ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ.

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 μαγνητοκινητικές δυνάμεις, καθενός από τους μόνιμους μαγνήτες. Οι υπόλοιπες μαγνητοκινητικές δυνάμεις που υποδεικνύονται με ένα ζεύγος αριθμών αντιπροσωπεύουν την επίδραση του μόνιμου μαγνήτη, του δεύτερου αριθμού, στην πλευρά του πρώτου αριθμού. Έτσι, για παράδειγμα, το $F_{2,3}$ είναι η μαγνητοκινητική δύναμη του μόνιμου μαγνήτη 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. Σύμφωνα με την ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος, ο νόμος του Ampere μπορεί να εφαρμοστεί δίνοντας τις ακόλουθες εξισώσεις

που είναι ανάλογες με τον νόμο τάσης του Kirchhoff για κάθε πλευρά του κυκλώματος [42]:

$$\mathcal{F}_1 + \Phi_1 \cdot R_1 + \Phi \cdot R + \mathcal{F}_{1.2} + \mathcal{F}_{1.3} = 0 \quad 3.14$$

$$\mathcal{F}_2 + \Phi_2 \cdot R_2 + \Phi \cdot R + \mathcal{F}_{2.1} + \mathcal{F}_{2.3} = 0 \quad 3.15$$

$$\mathcal{F}_3 + \Phi_3 \cdot R_3 + \Phi \cdot R + \mathcal{F}_{3.1} + \mathcal{F}_{3.2} = 0 \quad 3.16$$

Επίσης,

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 - \Phi = 0 \quad 3.17$$

Ακόμα, λόγω ομοιότητας των μόνιμων μαγνητών, θα ισχύει η απλοποίηση:

$$\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_2 = \mathcal{F}_3 = \mathcal{F} \quad 3.18$$

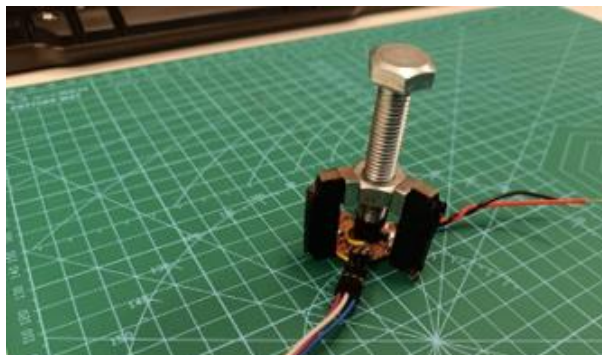
Στην παρακάτω εικόνα, η βάση που συμπληρώνει τις εξωτερικές πλευρές του μαγνητικού κυκλώματος, φαίνεται με το κεντρικό μπουλόνι που βοηθά στην καθοδήγηση των μαγνητικών γραμμών, μέσω των αισθητήρων Hall. Τα πόδια είναι κατασκευασμένα από πλαστικοποιημένο ηλεκτρικό χάλυβα. Επίσης, φαίνονται και οι τρεις μόνιμοι μαγνήτες, μεταξύ των ποδιών και του παξιμαδιού [42].



ΕΙΚΟΝΑ 41: ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ ΒΑΣΗ (ΤΡΙΠΟΔΟ) ΜΕ ΠΑΞΙΜΑΔΙ.



ΕΙΚΟΝΑ 42: ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ (3 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ HALL) ΣΤΟ ΚΑΤΩ ΜΕΡΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.



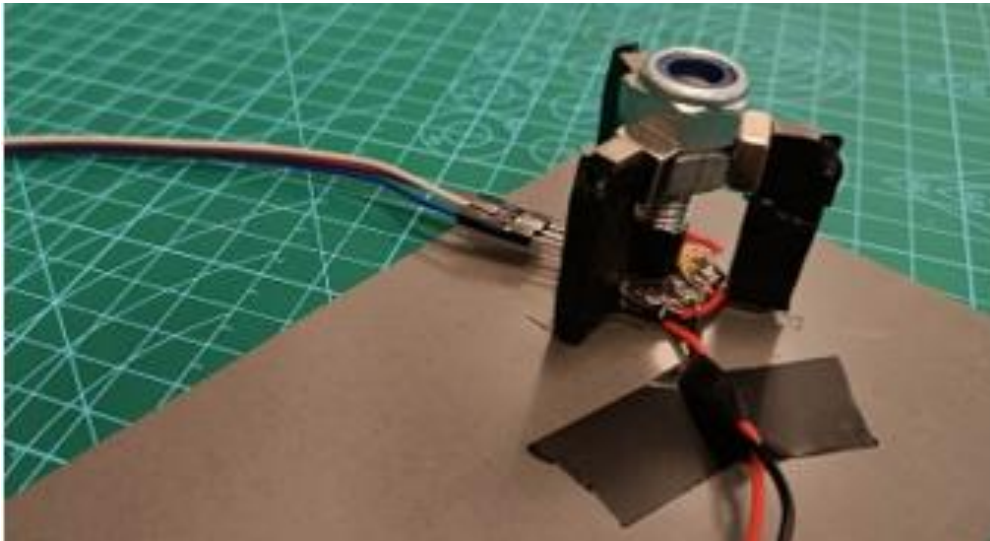
ΕΙΚΟΝΑ 43: ΤΕΛΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΟΛΛΑΠΩΝ HALL.

Το σχήμα 43 δείχνει τον ολοκληρωμένο αισθητήρα που ελέγχεται από ηλεκτρονικά, που βασίζονται στην πλακέτα διακοπής ESP32 WeMos Lolin32. Η πλακέτα εξυπηρετεί πολλούς ρόλους, καθώς μπορεί να διαβάσει τις μετρήσεις των αισθητήρων Hall, να τους τροφοδοτήσει σε έναν υπολογιστή και επίσης, να τροφοδοτήσει τον αισθητήρα, εξαλείφοντας την ανάγκη για εξωτερική παροχή ρεύματος. Επιπλέον, η πλακέτα esp32 έχει ένα ενσωματωμένο τσιπ Wi-Fi που καθιστά δυνατή τη μετάδοση των δεδομένων που συλλέγονται, για να επεκτείνει περαιτέρω τις δυνατότητές του, ως συσκευή παρακολούθησης IoT (Internet of Things). Επίσης, η επιλογή χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος και η λειτουργία βαθύ ύπνου, υποδηλώνουν ότι είναι δυνατό να συνδεθεί με σύστημα συλλογής ενέργειας και να χρησιμοποιηθεί ως αυτόνομη συσκευή παρακολούθησης [42].

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

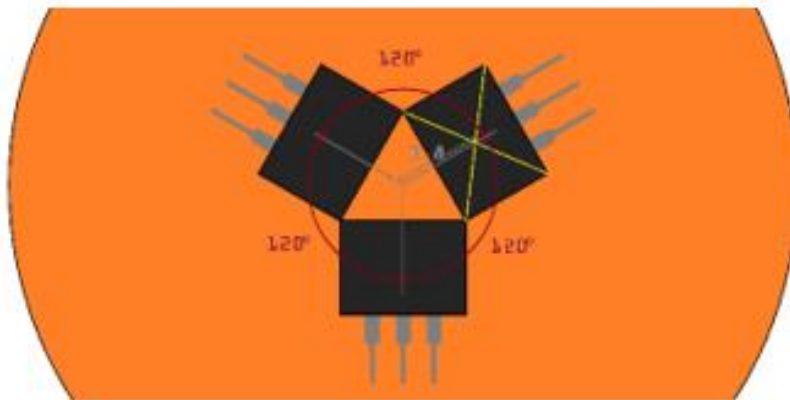
Ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις έχει κατασκευαστεί στο εργαστήριο αισθητήρων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Πρόκειται για έναν αισθητήρα που αποτελείται από τρεις (3) αισθητήρες Hall, από κομμάτια ηλεκτρικού κάλυβα, 3 μόνιμους μαγνήτες και μια κοινή βίδα με παξιμάδι, η οποία λειτουργεί ως μηχανισμός στήριξης του αισθητήρα [42].



ΕΙΚΟΝΑ 44: ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ HALL ΣΤΟΝ ΧΩΡΟ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ.

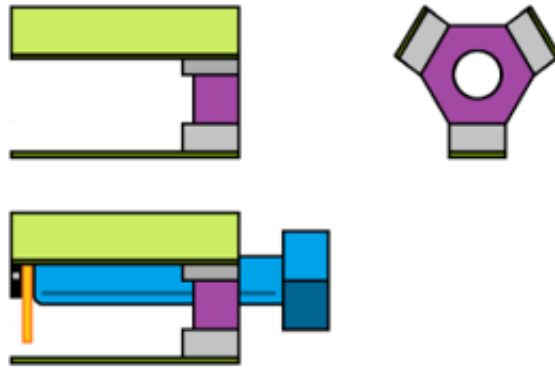
Με σκοπό να ληφθούν οι μετρήσεις, χρησιμοποιώντας τον παραπάνω αισθητήρα, θα έπρεπε για μετρήσεις προς όλες τις κατευθύνσεις να γίνει περιστροφή του αισθητήρα, ως προς τον άξονά του, κατά 5° την φορά. Αυτή η διαδικασία θα είχε ως αποτέλεσμα να γίνουν 72 μετρήσεις, συνεπώς, θα χρειαζόνταν 72 αισθητήρες Hall. Ο στόχος είναι να ληφθούν ανεξάρτητες

μετρήσεις, στον ίδιο χρόνο, και να αναλυθούν με ανάλογο τρόπο. Η τελική διάταξη κατέληξε να έχει μόνο τρεις (3) αισθητήρες Hall που έχουν τοποθετηθεί με γωνία 120° μεταξύ τους. Το πλάτος κάθε αισθητήρα Hall είναι ίσο με 4 mm έχοντας ένα offset από το σημείο εξέτασης ίσο με 3.8 mm, που είναι λιγότερο από 5 mm, που υπήρχε σε προηγούμενα πειράματα, και άρα μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτό.



ΕΙΚΟΝΑ 45: ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ HALL ΣΤΟ ΚΑΤΩ ΜΕΡΟΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ.

Για να λειτουργήσει η παραπάνω διάταξη, το μαγνητικό κύκλωμα πρέπει να δημιουργείται και να είναι κλειστό. Θα πρέπει να αποτελείται από μια πηγή του μαγνητικού πεδίου (μόνιμος μαγνήτης), ένα δοκίμιο προς μέτρηση (μαγνητικές λαμαρίνες) και ένα φερρομαγνητικό μονοπάτι ώστε να ρέει η μαγνητική ροή.



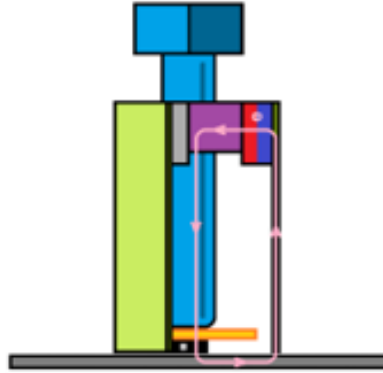
ΕΙΚΟΝΑ 46: ΤΑ ΜΕΡΗ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΜΕ ΔΙΑΚΡΙΤΟ ΤΡΟΠΟ (ΧΡΩΜΑΤΑ) ΣΕ ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ.

Στο παραπάνω σχήμα, παρατηρείται με **μωβ** χρώμα το παξιμάδι, με **γκρι** χρώμα οι μόνιμοι μαγνήτες, η βίδα με **μπλε** χρώμα, οι στηρίξεις από ηλεκτρικό κάλυβα με **πράσινο** και η διάταξη των αισθητήρων με χρώμα **πορτοκαλί/μαύρο**.

Η εξαγωνική γεωμετρία του παξιμαδιού, φτιαγμένου από μαλακό φερρομαγνητικό υλικό, δίνει μεγάλο πλεονέκτημα στην διάταξη. Κάθε πλευρά του είναι 10 mm και η διάμετρος της τρύπας είναι 8 mm. Στις τρεις πλευρές του, μόνιμοι μαγνήτες νεοδυμίου τοποθετούνται με τους βόρειους πόλους τους, να κοιτάζουν το κέντρο του παξιμαδιού. Η διάταξη των αισθητήρων τοποθετείται στην άκρη της βίδας, η οποία περνάει μέσα από το παξιμάδι. Στον νότιο πόλο κάθε μόνιμου μαγνήτη, τοποθετείται ένα κομμάτι ηλεκτρικού κάλυβα και οι τρεις μαζί αποτελούν έναν μηχανισμό στήριξης του αισθητήρα, σε μορφή τρίποδου, πάνω από το σημείο εξέτασης δοκιμίου [42].

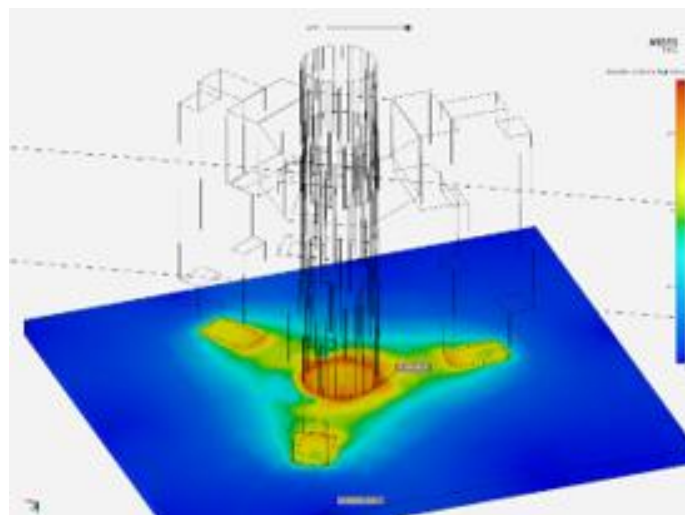
Η συνολική διάταξη μπορεί να θεωρηθεί ως ο συνδιασμός τριών ξεχωριστών μαγνητικών κυκλωμάτων, το καθένα από τα οποία, μοιάζουν με εκείνο του αισθητήρα Hall. Σε καθένα από αυτά τα μαγνητικά κυκλώματα, η ροή Φ

ακολουθεί το μονοπάτι: μόνιμος μαγνήτης → παξιμάδι → βίδα → αισθητήρας Hall → δοκίμιο προς εξέταση → ηλεκτρικός χάλυβας [42].

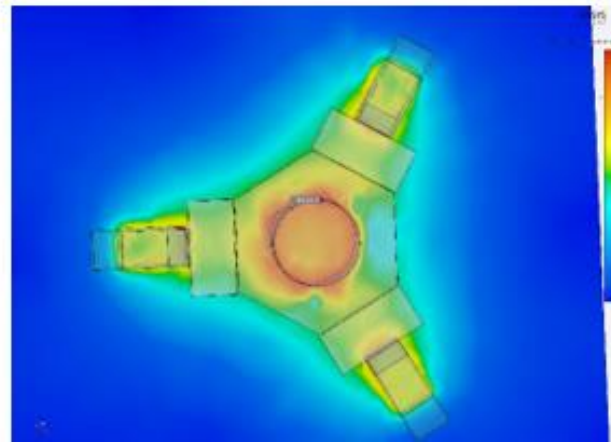


ΕΙΚΟΝΑ 47: Ο ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ HALL ΚΑΙ Η ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΡΟΗ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΕΙΤΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ.

Παραπάνω, φαίνεται η μαγνητική ροή Φ , όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Οι κόκκινες και μπλέ περιοχές αναπαριστούν τον βόρειο και νότιο πόλο του μόνιμου μαγνήτη, αντίστοιχα [42].

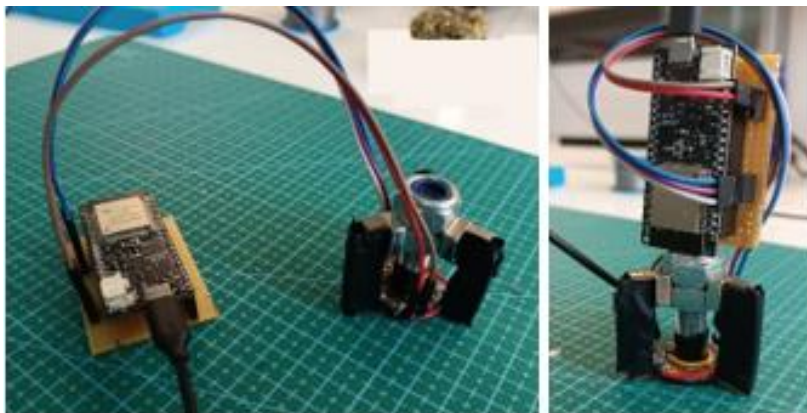


ΕΙΚΟΝΑ 48: ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΟΣ ΚΑΘΕΤΑ, ΑΠΟ ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ.



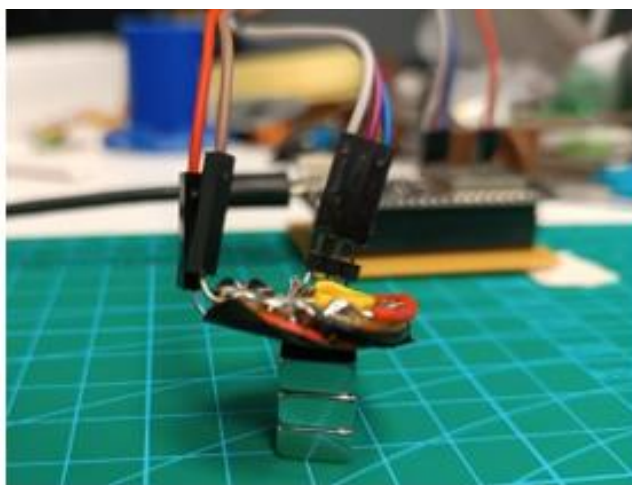
ΕΙΚΟΝΑ 49: ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΟΣ ΚΑΘΕΤΑ, ΣΕ ΚΑΤΟΨΗ.

Ο ολοκληρωμένος αισθητήρας ελέγχεται ηλεκτρονικά, βασιζόμενος στην πλακέτα ESP32 WeMos LOLIN32 [43]. Η πλακέτα εξυπηρετεί πολλούς ρόλους καθώς μπορεί να διαβάσει τις μετρήσεις των αισθητήρων Hall, να τους τροφοδοτήσει σε έναν υπολογιστή και επίσης, να τροφοδοτήσει τον αισθητήρα, εξαλείφοντας την ανάγκη για εξωτερική παροχή ρεύματος. Επιπλέον, ο αισθητήρας, έχει ένα ενσωματωμένο τσιπ Wi-Fi που καθιστά δυνατή τη μετάδοση των δεδομένων που συλλέγονται, για να επεκτείνει περαιτέρω τις δυνατότητές του ως συσκευή παρακολούθησης IoT. Επίσης, η επιλογή χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος και η λειτουργία βαθύ ύπνου υποδηλώνουν ότι είναι δυνατό να συνδεθεί με σύστημα συλλογής ενέργειας και να χρησιμοποιηθεί ως αυτόνομη συσκευή παρακολούθησης, όπως και με τους προηγούμενους αισθητήρες των προαναφερθέντων εγγράφων.



ΕΙΚΟΝΑ 50: Ο ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΛΑΚΕΤΑ ESP32 ΠΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ Ο ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΛΑΚΕΤΑ ESP32 ΟΤΑΝ ΑΥΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΕΙΤΑΙ ΠΑΝΩ ΣΤΟΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ (ΔΕΞΙΑ).

Τα πειραματικά δεδομένα στάλθηκαν σε έναν υπολογιστή συνδεδεόντάς τον, μέσω της θύρας USB. Με την αφαίρεση των μόνιμων μαγνητών, και οι τρεις αισθητήρες έδειξαν μέτρηση 1650 mV ενώ η μεμονωμένη μέτρηση των τριών μόνιμων μαγνητών σε σειρά, ήταν περίπου 2550 mV.

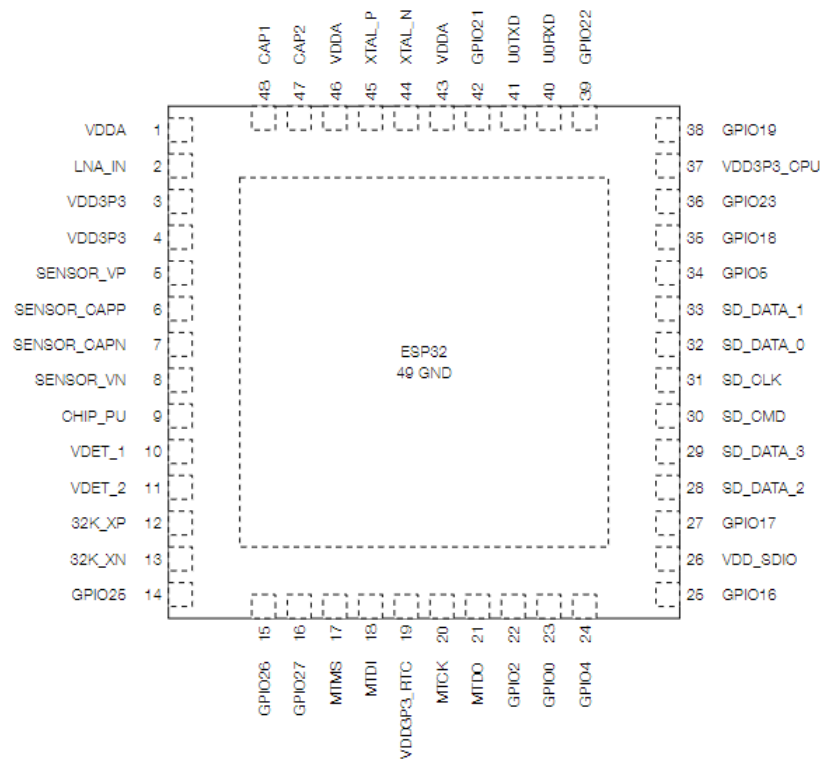


ΕΙΚΟΝΑ 51: ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ.

Οι μετρήσεις τοποθετούνται μεταξύ των ορίων 1650 mV ως κάτω όριο και 2550 mV ως άνω όριο, δηλαδή $1650 \leq \text{μετρήσεις} \leq 2550 \text{ mV}$. Αυτό συμβαίνει, διότι η μέτρηση των αισθητήρων Hall στο κενό, είναι 1650 mV, που το καθιστά ελάχιστη τιμή και η μέτρηση των αισθητήρων με τους μόνιμους μαγνητές σε σειρά, όπως προαναφέρθηκε, είναι 2550 mV, που το καθιστά ως μέγιστη τιμή. Συνεπώς, οι μετρήσεις που θα λάβουν χώρα, θα είναι κάπου ανάμεσα.

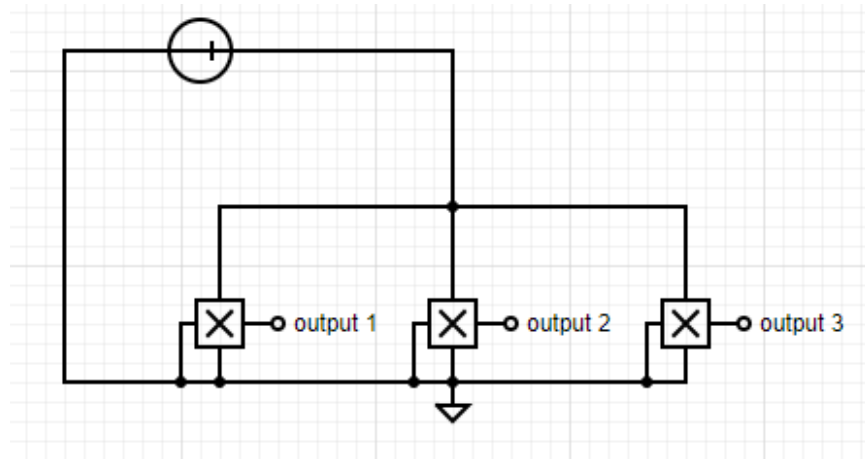
Η κάθε τελική μέτρηση θα λαμβάνεται ως ο μέσος όρος των μετρήσεων, του κάθε, εκ των τριών αισθητήρων Hall, ξεχωριστά, για κάθε δοκίμιο.

Το **ESP32** είναι μια σειρά από συστήματα χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης, σε μικροελεγκτές τσιπ με ενσωματωμένο Wi-Fi και Bluetooth διπλής λειτουργίας. Η σειρά ESP32 χρησιμοποιεί, είτε έναν μικροεπεξεργαστή Tensilica Xtensa LX6 σε παραλλαγές διπλού πυρήνα και ενός πυρήνα, μικροεπεξεργαστή διπλού πυρήνα Xtensa LX7 ή μικροεπεξεργαστή RISC-V ενός πυρήνα και περιλαμβάνει ενσωματωμένους διακόπτες κεραίας, RF balun, ενισχυτή ισχύος, φίλτρο χαμηλού θορύβου, ενισχυτή λήψεων φίλτρου χαμηλού θορύβου και ενισχυτή ισχύος [43].



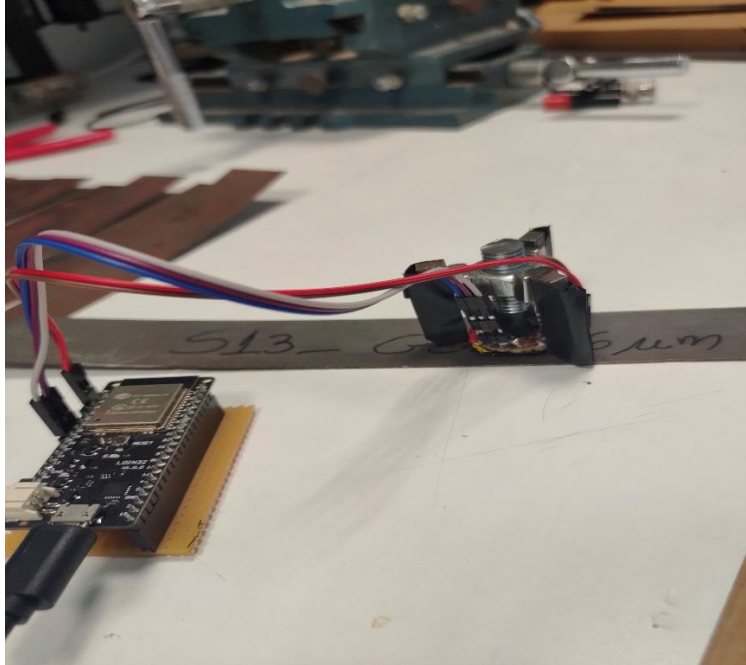
ΕΙΚΟΝΑ 52: ESP32 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΙΣΟΔΩΝ.

Η διάταξη, του κάθε ένα, εκ των τριών αισθητήρων Hall, έχει ως εξής: στον πρώτο ακροδέκτη, δέχεται την τάση εισόδου ίση με 3.3V από την πλακέρα eps32, στον δεύτερο ακροδέκτη, δέχεται την γείωση και στον τρίτο ακροδέκτη, υπάρχει η έξοδος του κάθε αισθητήρα. Ένα σχηματικό είναι, όπως αυτό που ακολουθεί [44].

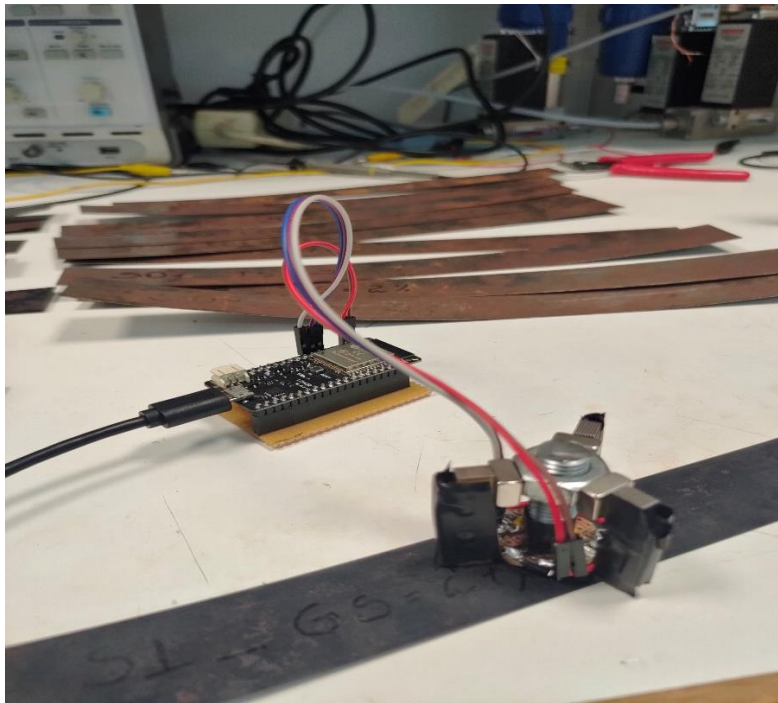


ΕΙΚΟΝΑ 53: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΛΗΨΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΟΛΛΑΠΩΝ HALL ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ.

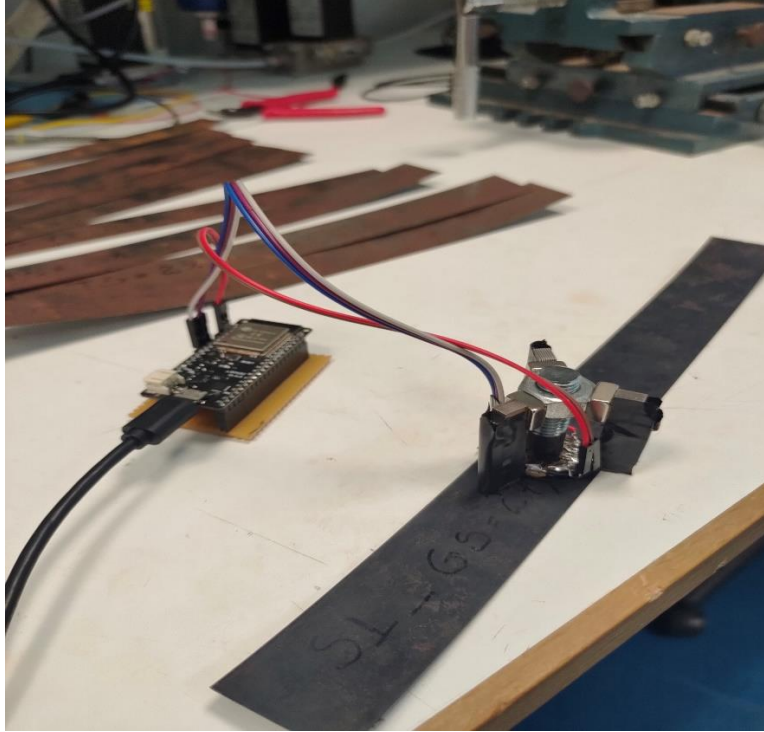
Στο σχήμα 53, παρατηρείται ότι υπάρχουν τρεις αισθητήρες Hall, η σταθερή τάση τροφοδοσίας, μέσω esp32, και οι τρεις έξοδοι, που δίνουν τις μετρήσεις του δοκιμίου. Η τελική διάταξη έχει την παραπάνω μορφή μαζί με ένα δοκίμιο, στις εξόδους των αισθητήρων προς μέτρηση. Αυτό φαίνεται, στην συνέχεια, σε πραγματική απεικόνιση του πειράματος.



ΕΙΚΟΝΑ 54: Ο ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ, ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΛΑΚΕΤΑ ESP32 ΚΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΟΣ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ, ΠΡΟΣ ΛΗΨΗ ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ, ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ HALL, ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΤΟΥ.



ΕΙΚΟΝΑ 55: Ο ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ, ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΛΑΚΕΤΑ ESP32 ΚΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΟΣ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ, ΠΡΟΣ ΛΗΨΗ ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ, ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ HALL, ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΤΟΥ.

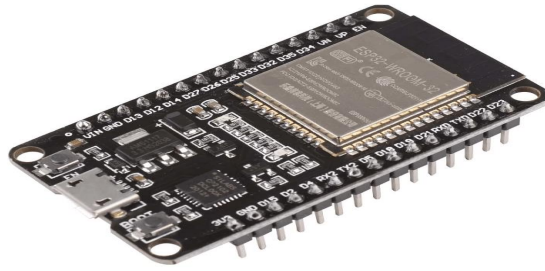


ΕΙΚΟΝΑ 56: Ο ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ, ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΛΑΚΕΤΑ ESP32 ΚΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΟΣ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ, ΠΡΟΣ ΛΗΨΗ ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ, ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ HALL, ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΤΟΥ.

ΌΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

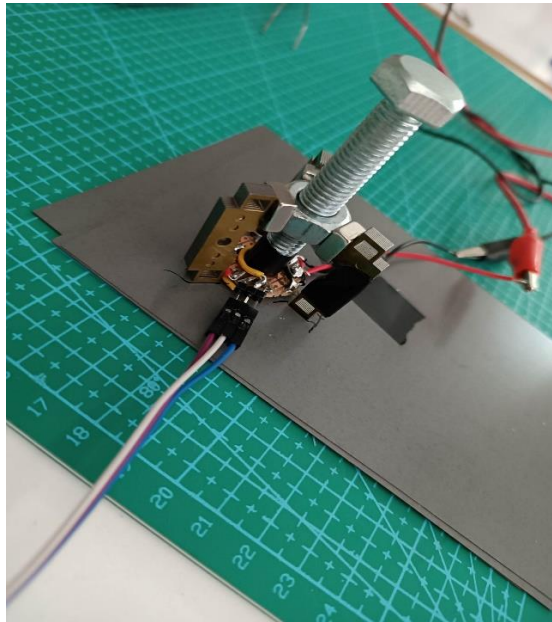
Για τις μετρήσεις και το συνολικό πείραμα, χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

- Υπολογιστής (Laptop).
- Πλακέτα esp32.



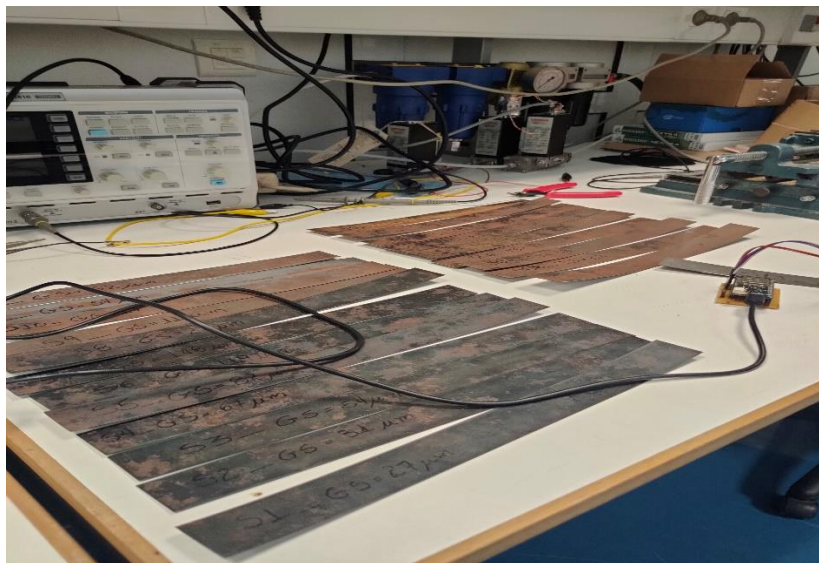
ΕΙΚΟΝΑ 57: ΠΛΑΚΕΤΑ EPS32.

- Αισθητήρας πολλαπλών Hall [42].



ΕΙΚΟΝΑ 58: ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ HALL.

- Λαμαρίνες ως δοκίμια.



ΕΙΚΟΝΑ 59: ΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΠΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ.

Απο τις οποίες λαμαρίνες, υπήρχαν δοκίμια με γνωστό το μέγεθος των κόκκων (grain size, GS) και άλλες με γνωστή την πίεση της τάσης (true stress, TS).

ΠΡΟΣ ΧΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΑ

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια ηλεκτρικού χάλυβα ψυχρής έλασης με διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως αναφέρθηκε. Στην συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν τρία είδη δοκιμίων, τα οποία έχουν εξεταστεί ξανά, το έτος 2022, ως προς τις ιδιότητες τους και ορισμένες από αυτές έχουν γίνει γνωστές. Οι διαστάσεις των δοκιμίων είναι 300x30 mm². Παρατίθεται πίνακες με βασικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων.

TS	Παραμόρφωση (%)	Πάχος (μm)
01	29	511
02	24	540
03	19	560
04	12	600
05	10	620
06	7	640
07	3	660
08	2	670
09	0	680

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ TS.

RX	Μέγεθος κόκκου (μm)	Πάχος (μm)
01	148	511
02	119	501
03	82	488
04	67	475
05	54	451
06	31	400
07	27	343

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ RX.

GG	Μέγεθος κόκκου (μm)	Πάχος (μm)	Ανόπτηση (°C/h)
01	11	540	600/2
02	17	540	680/2
03	57	540	850/4
04	62	540	850/8
05	66	540	850/12
06	27	540	680/2

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ GG.

Τα δείγματα της σειράς TS εμφανίζουν μια διαφοροποίηση όσον αφορά την πραγματική παραμόρφωση, η οποία μπορεί να φτάσει έως και 29%, έχοντας και διαφορετικό πάχος μεταξύ τους. Στα δείγματα της σειράς RX έχει πραγματοποιηθεί ανόπτηση στη θερμοκρασία των 760°C, με σκοπό να αναπτυχθούν διαφορετικά μεγέθη συσσωματωμάτων (κόκκων), μέσω της

ανακρυστάλλωσης. Τα δοκίμια της σειράς RX έχουν, επίσης, μεταβαλλόμενο πάχος. Τα δοκίμια είναι κατασκευασμένα από ένα εμπορικό πυριτιούχο κράμα σιδήρου με χαμηλή περιεκτικότητα άνθρακα γνωστό ως Non-Oriented Electrical Steel (NOES). Το κράμα αυτό, έχει ιδιαίτερα θεμιτές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές του καθαρού σιδήρου, υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, μαγνητική επαγωγή και χαμηλό συνεκτικό πεδίο. Οι πυριτιούχοι χάλυβες εμφανίζουν μικρότερες απώλειες εξαιτίας δινορευμάτων, η παραγωγική του διαδικασία όμως, απαιτεί την περιεκτικότητα σε ποσοστά μικρότερα του 3.5% για την παραγωγή λεπτών ελασμάτων πάχους μικρότερου των 0.3 mm. Η σειρά GG αποτελείται από δοκίμια που έχουν υποστεί ανόπτηση σε διαφορετικές θερμοκρασίες και για διαφορετικές χρονικές διάρκειες, τα αποτελέσματα της οποίας, είναι το μέγεθος κόκκων τους.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Για την διεξαγωγή του πειράματος, χρησιμοποιήθηκε κάποια σειρά βημάτων προς προετοιμασία της προαναφερθείσας διάταξης, χρησιμοποιώντας τον παραπάνω εξοπλισμό. Αρχικά, συνδέθηκε ο υπολογιστής (laptop) με την συσκευή esp32, μέσω καλωδίου USB. Στην συνέχεια, μέσω του λογισμικού Arduino IDE [45], ρυθμίστηκε και προγραμματίστηκε η πλακέτα esp32, ώστε να λαμβάνονται οι μετρήσεις που χρειάζεται και να υπάρχει η εμφάνιση αυτών, ως έξοδος της διάταξης, στον υπολογιστή. Ύστερα, η πλακέτα esp32, με την σειρά της, συνδέθηκε μέσω καλωδίων, με τον αισθητήρα πολλαπλών Hall, ο οποίος τοποθετούνταν πάνω στα δοκίμια. Με την τοποθέτηση του αισθητήρα, επιτυχανόταν η δημιουργία κλειστού κυκλώματος, η οποία έδινε και τις μετρήσεις, πάνω στις οποίες, αποσκοπεί η συγκεκριμένη εργασία. Η τοποθέτηση γινόταν, αρχικά, στην μία άκρη του δοκιμίου, και ύστερα στην άλλη άκρη του, κάνοντας την παραδοχή, λόγω ομοιογένειας των δοκιμίων,

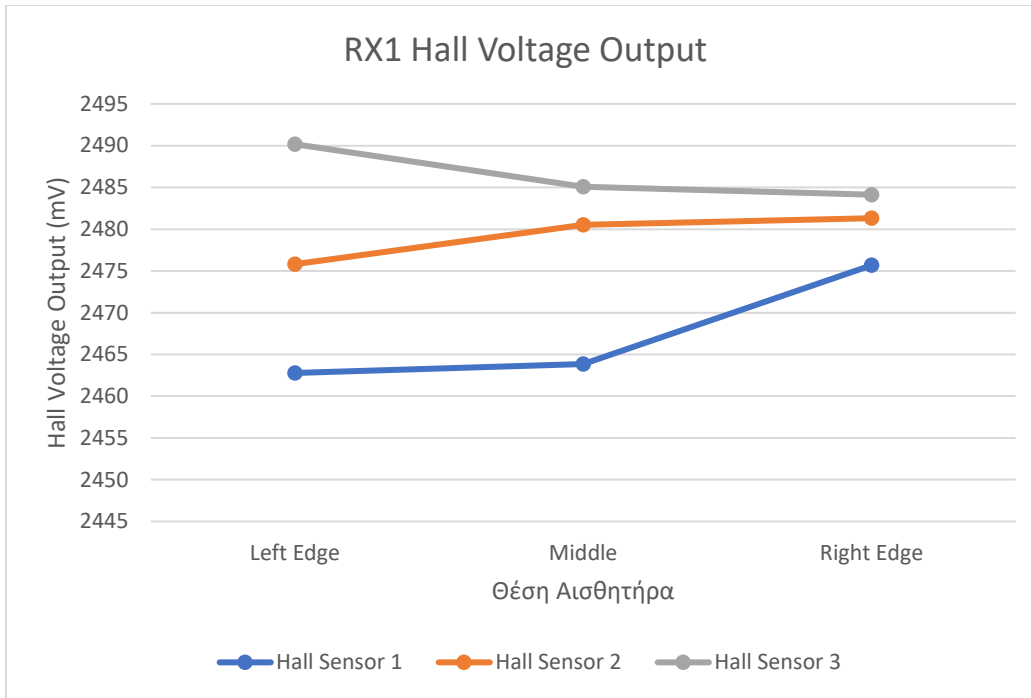
ότι θα παρουσιαστεί παρόμοια μέτρηση σε οποιοδήποτε, εκ των δύο ακραίων σημείων του. Οι μετρήσεις που λήφθηκαν είναι: στις άκρες του δοκιμίου με την αρχική (τυχαία) τοποθέτηση του αισθητήρα και ύστερα με περιστροφή κατά 60° στα ίδια σημεία. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε για την μέτρηση στο κέντρο του δοκιμίου με, αρχική τυχαία τοποθέτηση, του αισθητήρα και εν συνέχεια περιστροφής του κατά 60° , πάνω στο δοκίμιο, επί του ίδιου σημείου. Οι τοποθετήσεις του αισθητήρα πραγματοποιήθηκαν, χωρίς εξωτερική δύναμη, πέρα από τη βαρύτητα και την ελκτική δύναμη του ίδιου του αισθητήρα και του δοκιμίου, εξαιτίας των μαγνητικών δυνάμεων. Αποδείχθηκε ότι παράγοντες, όπως μη ισχυρά μαγνητικά πεδία από μικρές ηλεκτρονικές συσκευές, σε μικρές αποστάσεις, σε σχέση με την τοποθεσία πραγματοποίησης του πειράματος δεν επηρέασαν, σε σημαντικό βαθμό, την πειραματική διαδικασία. Η πλακέτα esp32, ουσιαστικά, λάμβανε τα αποτελέσματα των μετρήσεων των τριών αισθητήρων Hall και τα παρουσίαζε στο λογισμικό Arduino, στην οθόνη του υπολογιστή. Οι μετρήσεις, μέσω της ρύθμισης της πλακέτας, λαμβάνουν τιμές μεταξύ 1.65 V και 2.55 V ελάχιστο και μέγιστο όριο τάσης, ορισμένο από την πλακέτα, αντίστοιχα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε σταθερή συχνότητα, μετρώντας κάθε φορά τάση Hall προς μελέτη της μαγνητικής διαπερατότητας, στο εκάστοτε σημείο μέτρησης του δοκιμίου, μέσω του αισθητήρα.

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

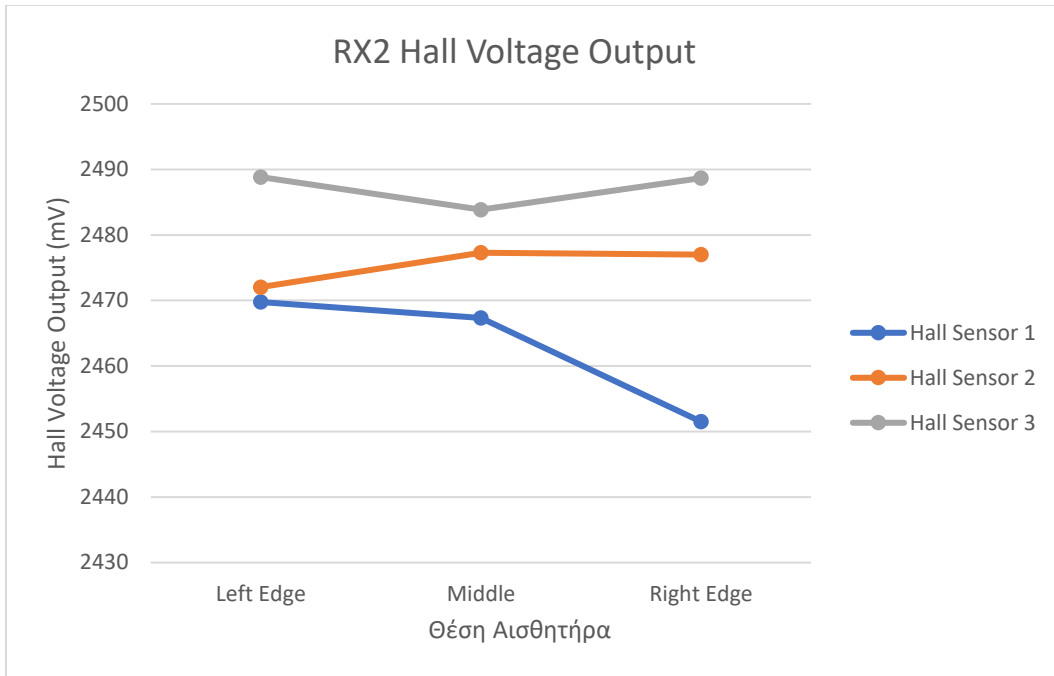
Για τις μετρήσεις, σε κάθε δοκίμιο και σε κάθε τοποθέτηση του αισθητήρα, λήφθηκαν αρκετές, σε μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό σημαίνει ότι ο κάθε αισθητήρας, παρείχε στην έξοδο διάφορες τιμές τάσης. Για τον λόγο αυτό, θα γίνει αποδεκτή η παραδοχή της αποδοχής της μέσης τιμής αυτών των τάσεων,

για κάθε ένα από τους αισθητήρες, ώστε να λαμβάνεται μία τελική έξοδο (τάση), την οποία θα αποδώσει ο κάθε αισθητήρας Hall.

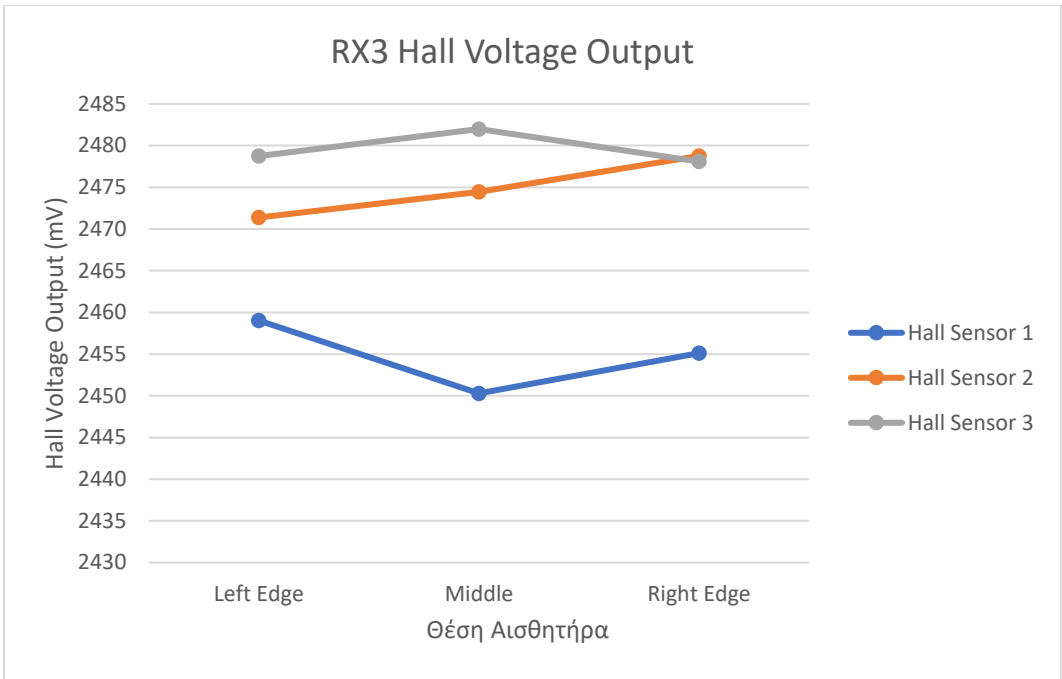
Παρακάτω, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μετρήσεων των τάσεων εξόδου, του κάθε αισθητήρα Hall, του συνολικού αισθητήρα πολλαπλών Hall συναρτήσει της θέσης του αισθητήρα, σε άκρες και μέση, του εκάστοτε δοκιμίου, κάθε φορά. Αξιίζει να σημειωθεί, ότι οι περιστροφικές κινήσεις, κατά 60° , του αισθητήρα, επί του σημείου τοποθέτησης, στα άκρα ή στο μέσο του δοκιμίου, όπως πειγράφεται στην πειραματική διαδικασία, λήφθηκαν, ως ένας μέσος όρος, ως προς την τοποθέτηση του αισθητήρα στο σημείο αυτό. Με άλλα λόγια, υπολογίστηκε ο μέσος όρος της τάσης εξόδου της τοποθέτησης στα άκρα, για κάθε αισθητήρα Hall, ανάμεσα στις αρκετές μετρήσεις που λήφθηκαν για το κάθε σημείο. Με τον ίδιο τρόπο, υπολογίστηκε και για την τοποθέτηση στο μέσο. Αυτό συνέβη, ώστε να ληφθεί μία τιμή, από κάθε αισθητήρα Hall, για τοποθέτηση του αισθητήρα, στο κάθε άκρο και μία, για τοποθέτησή του, στο μέσο αντί για περισσότερες τιμές σε κάθε σημείο.



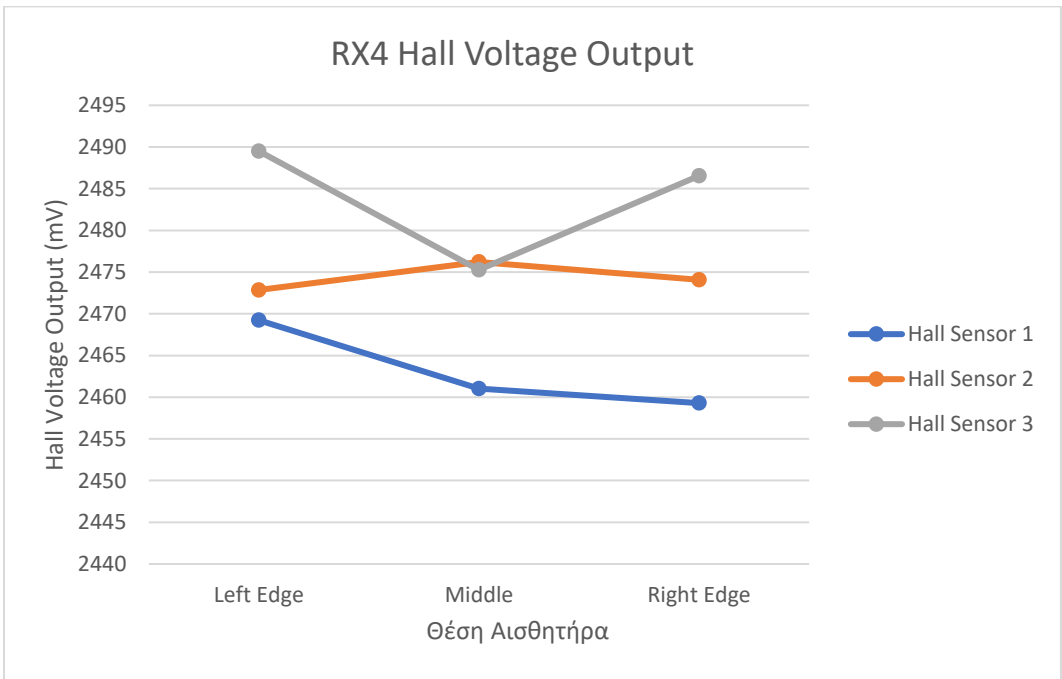
ΣΧΗΜΑ 1: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ RX1 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



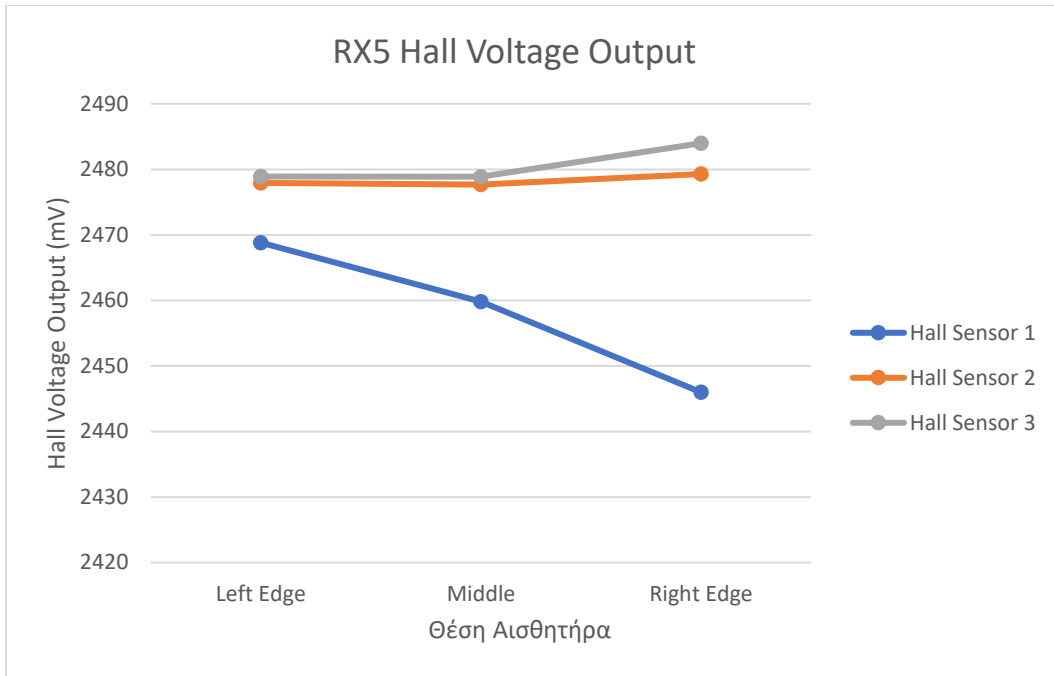
ΣΧΗΜΑ 2: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ RX2 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



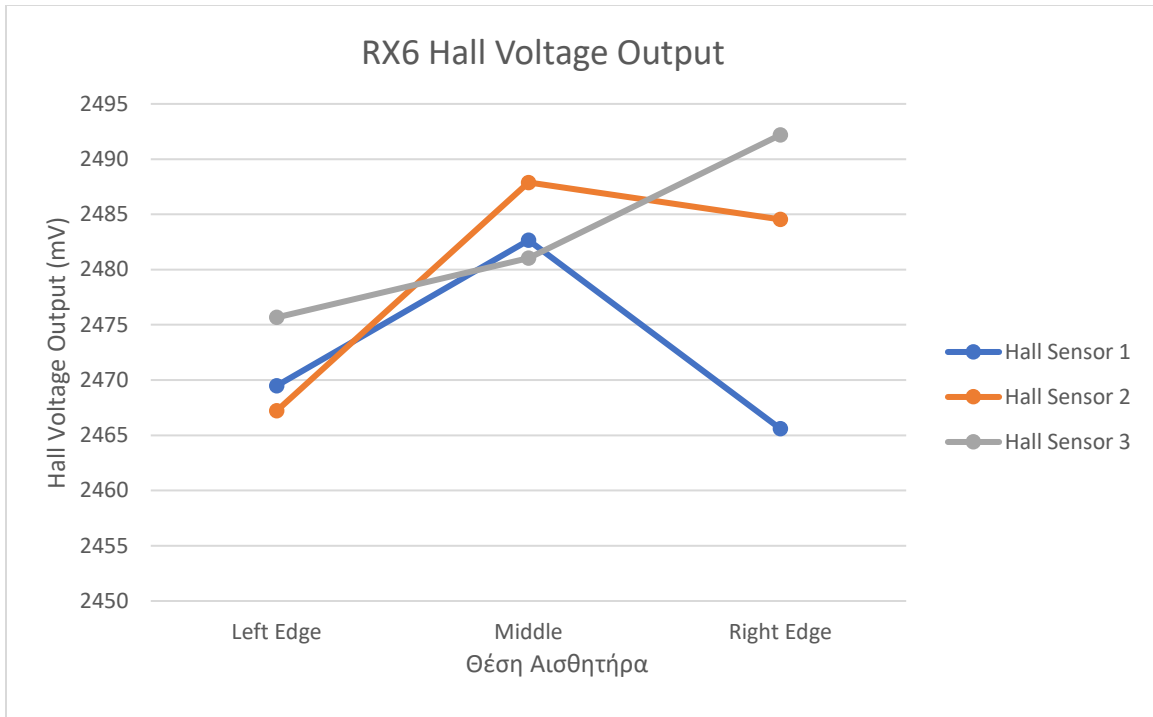
ΣΧΗΜΑ 3: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ RX3 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



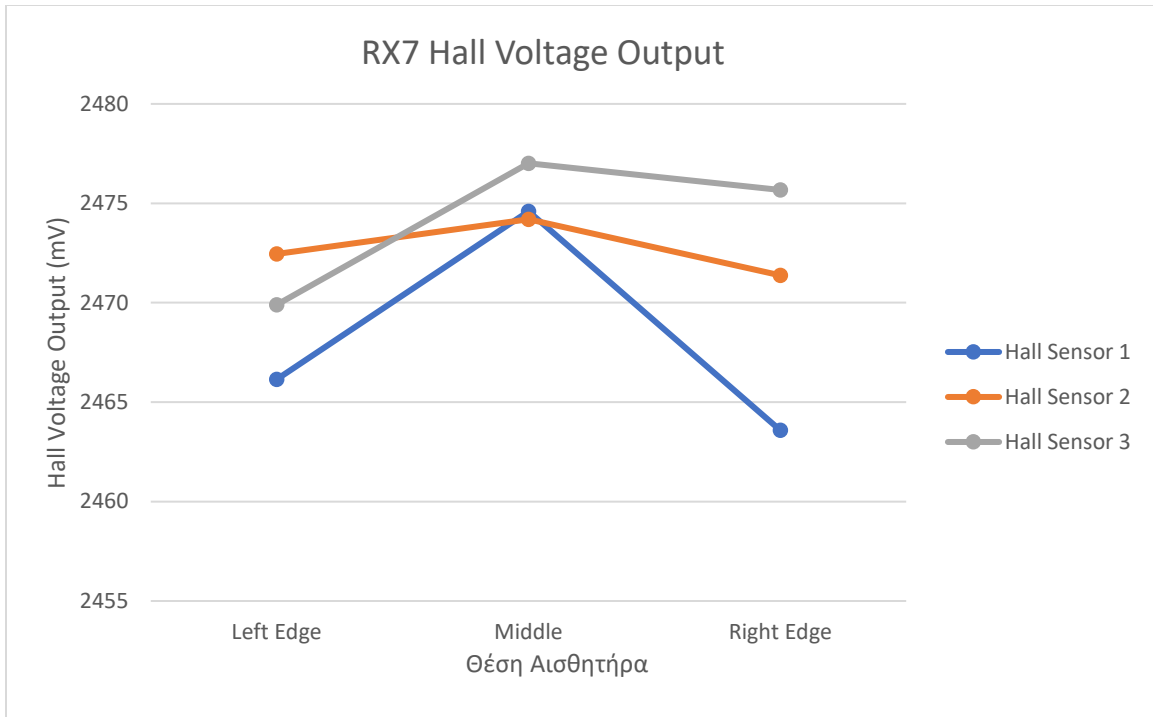
ΣΧΗΜΑ 4: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ RX4 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



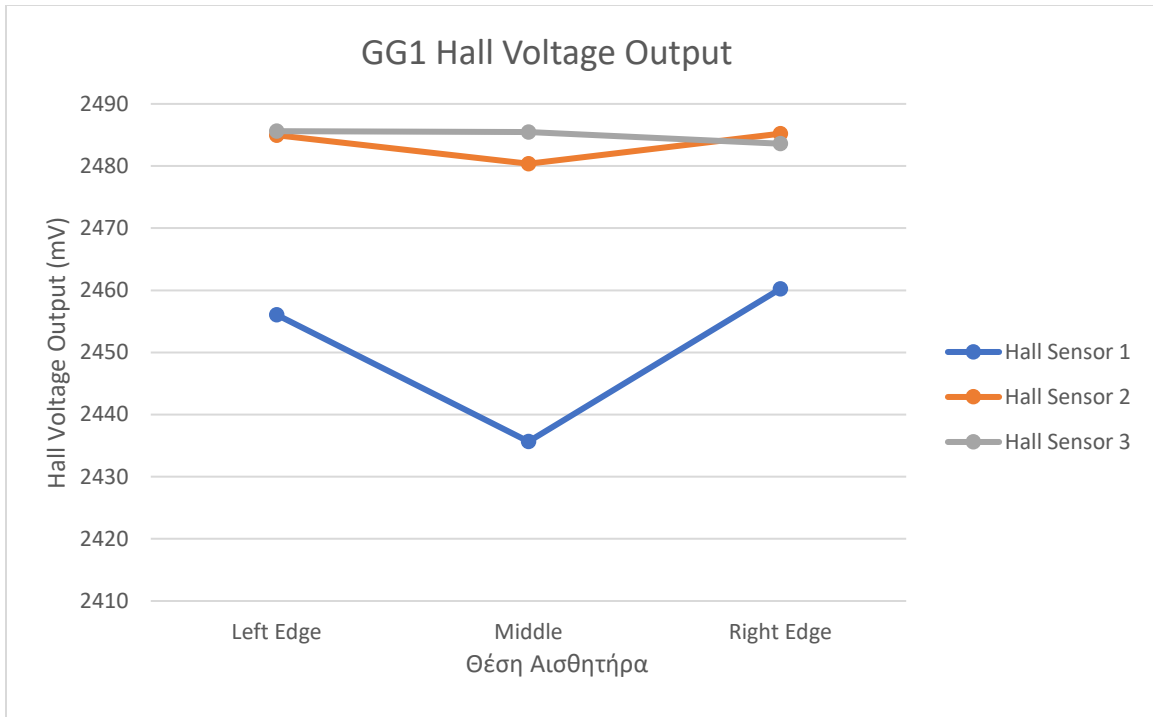
ΣΧΗΜΑ 5: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ RX5 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



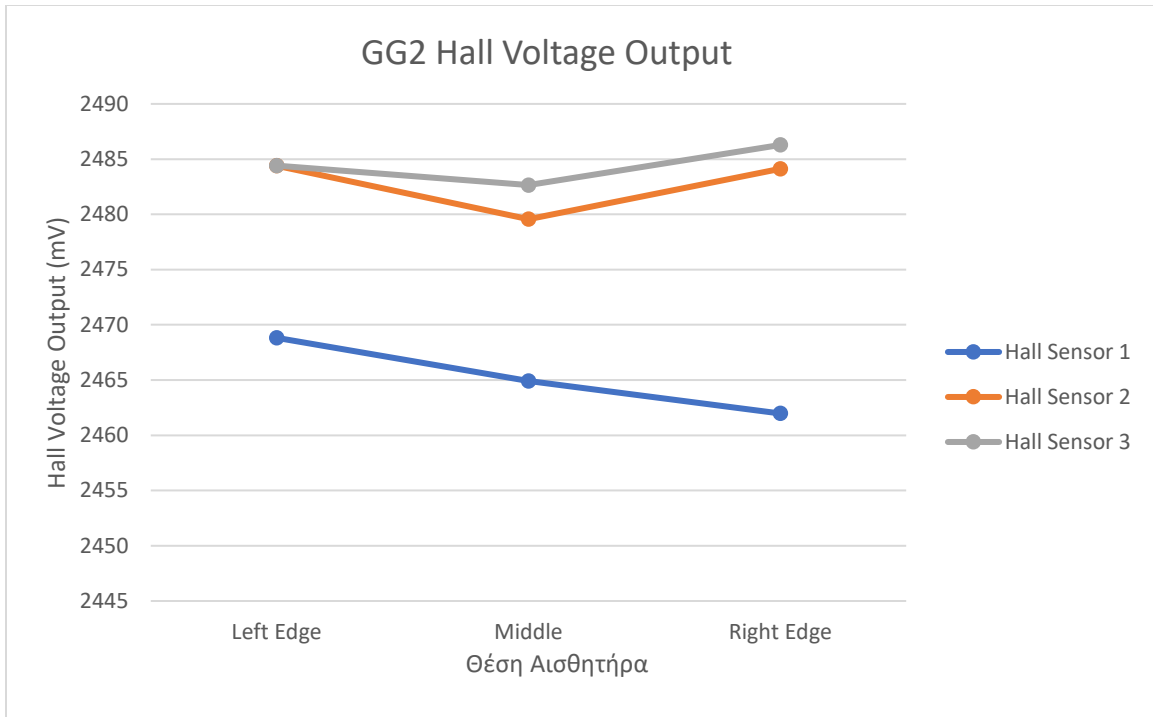
ΣΧΗΜΑ 6: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ RX6 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



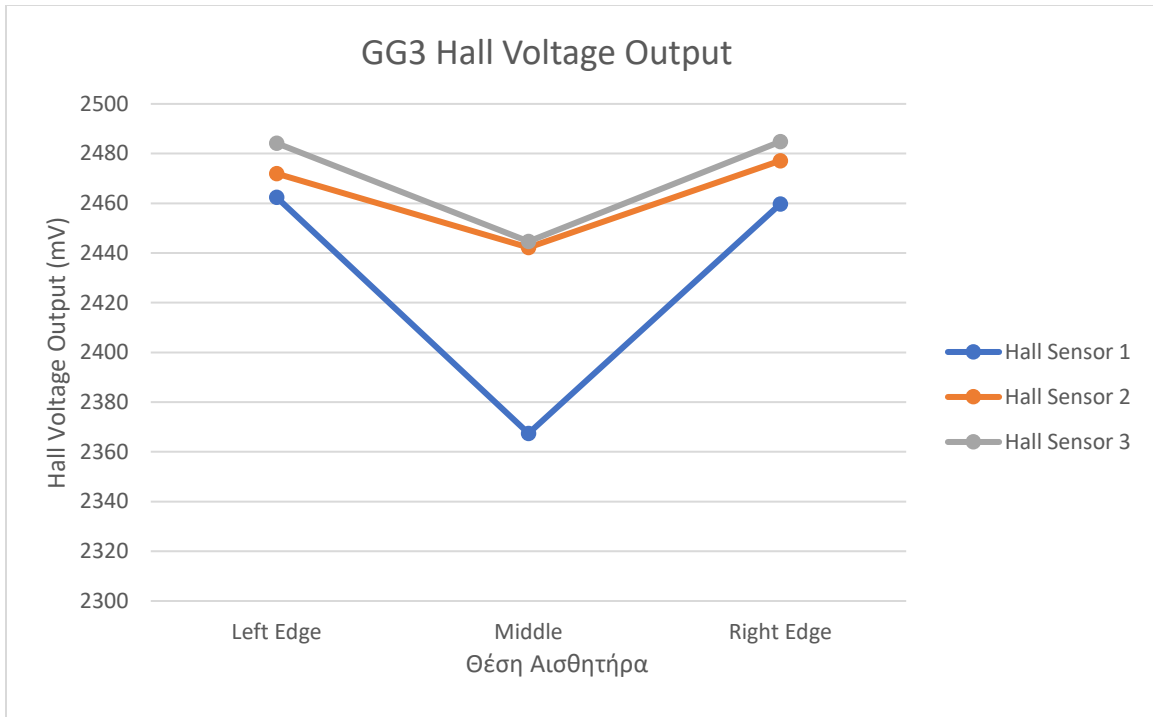
ΣΧΗΜΑ 7: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ RX7 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



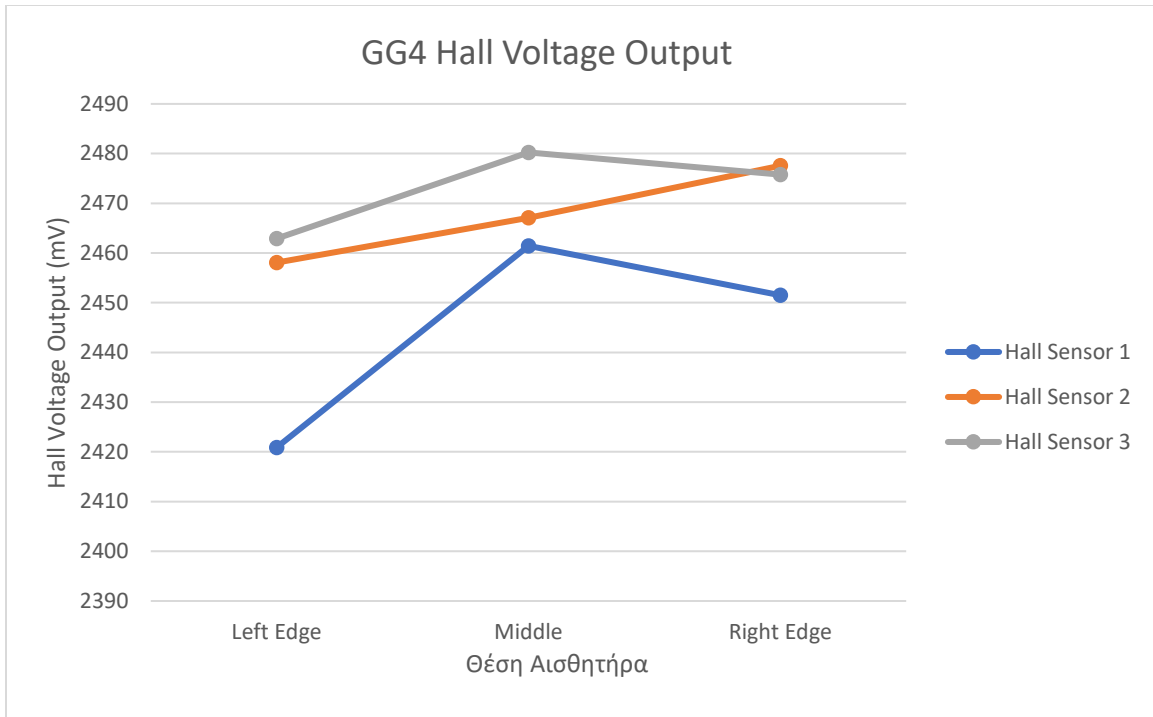
ΣΧΗΜΑ 8: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ GG1 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



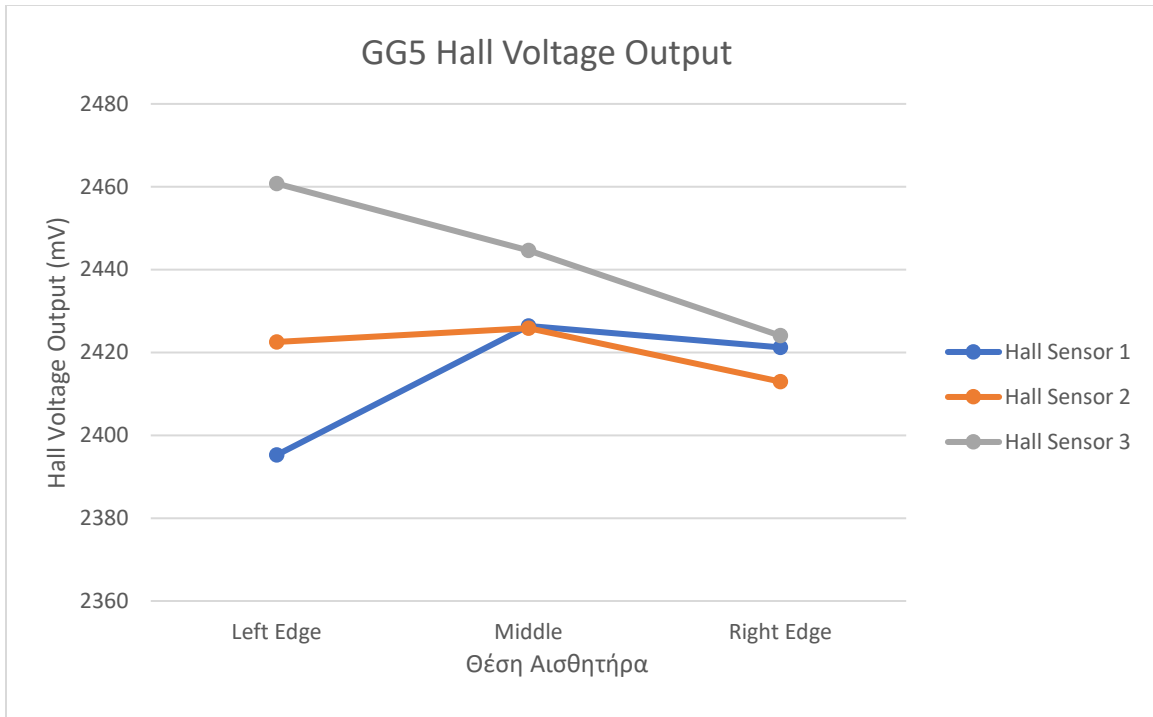
ΣΧΗΜΑ 9: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ GG2 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



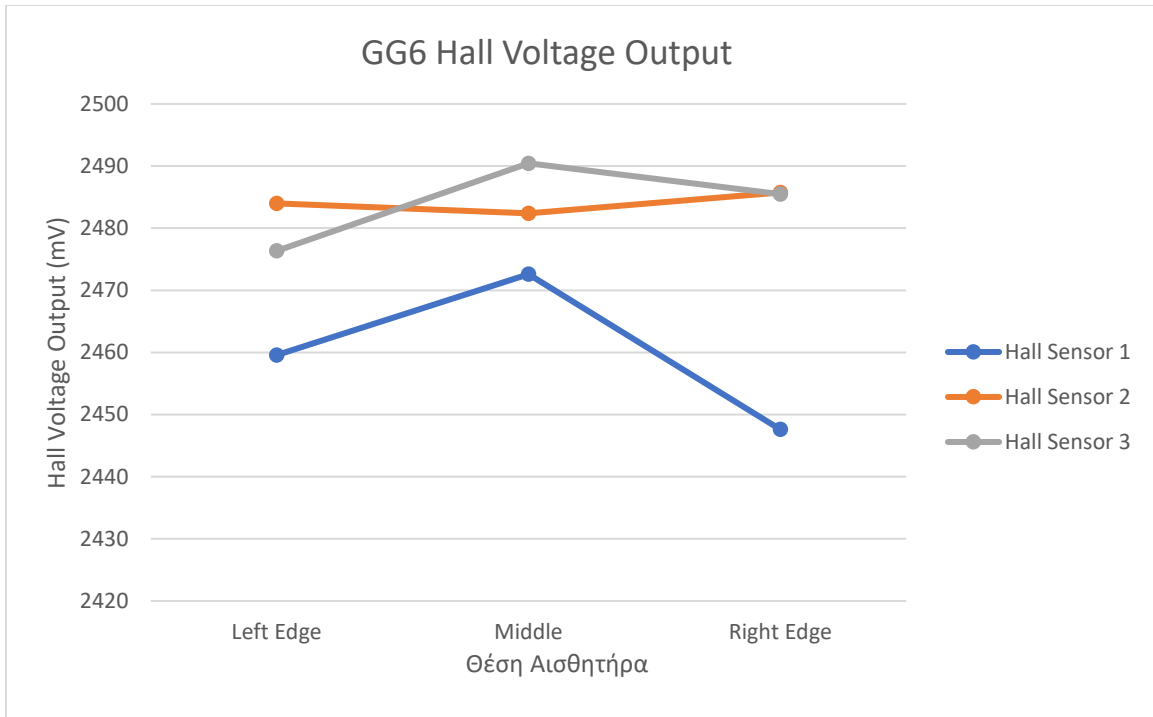
ΣΧΗΜΑ 10: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ GG3 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



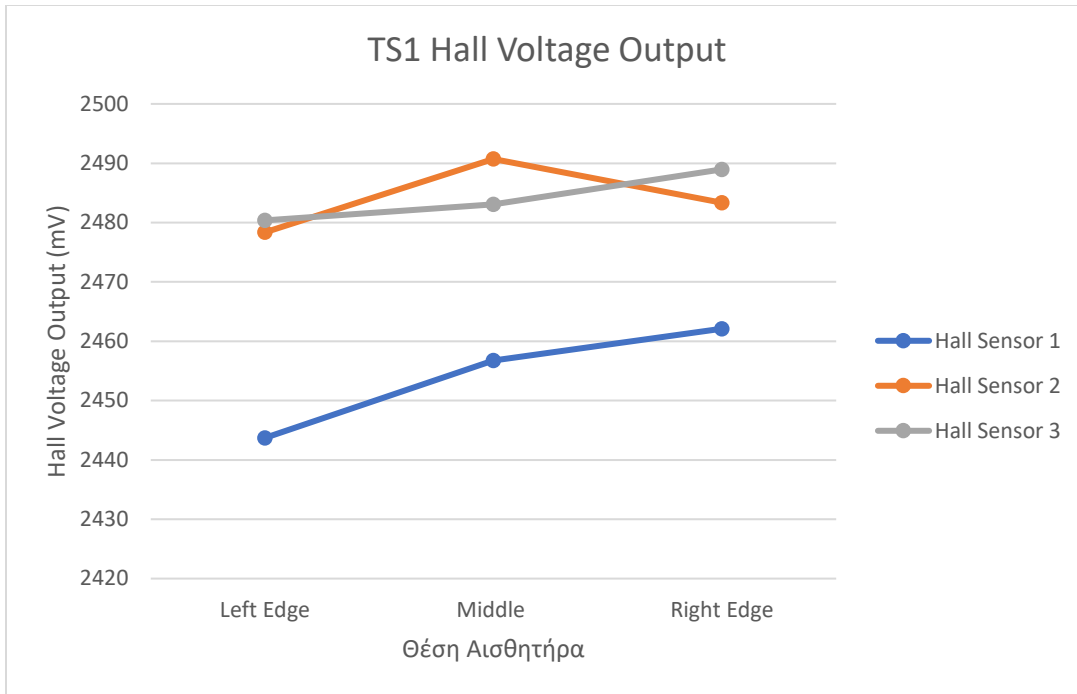
ΣΧΗΜΑ 11: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ GG4 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



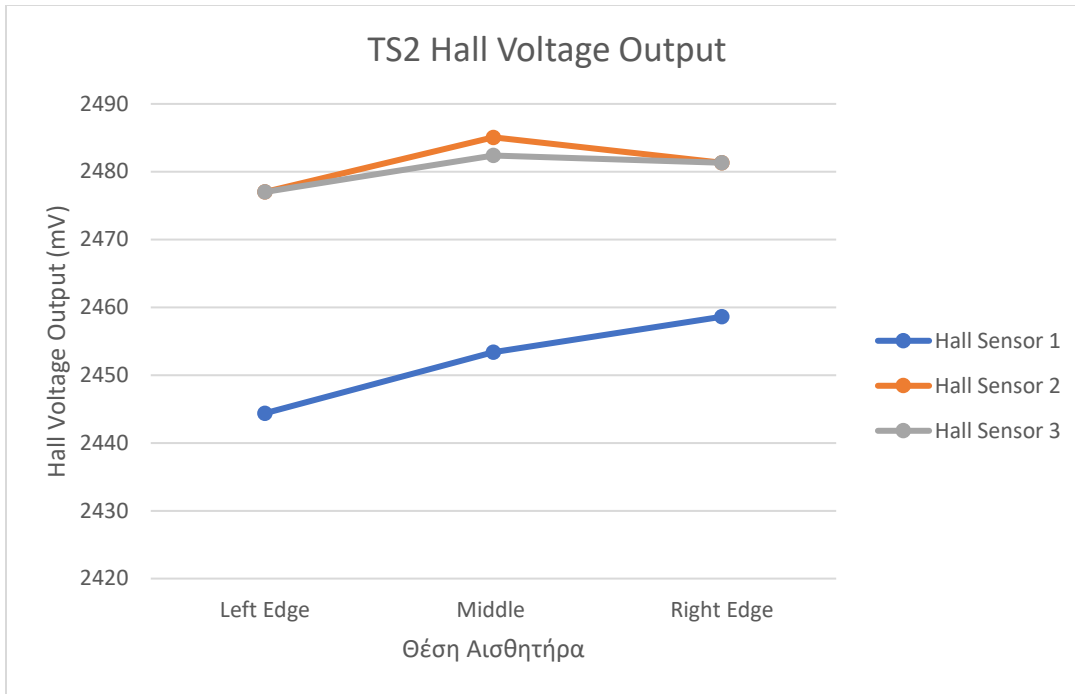
ΣΧΗΜΑ 12: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ GG5 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



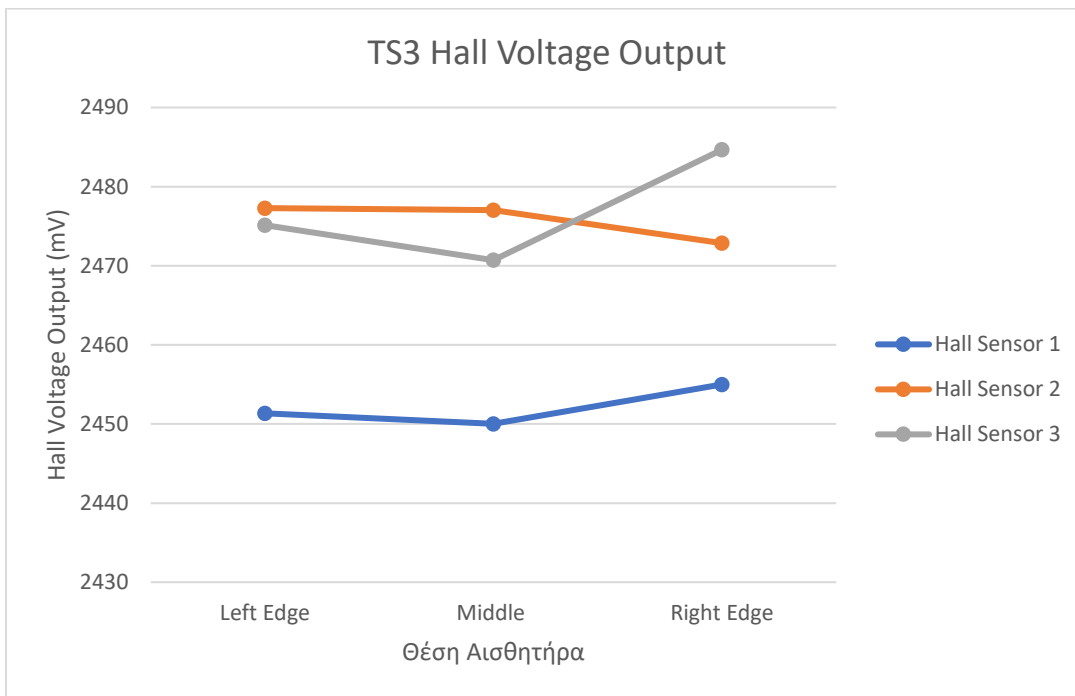
ΣΧΗΜΑ 13: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ GG6 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



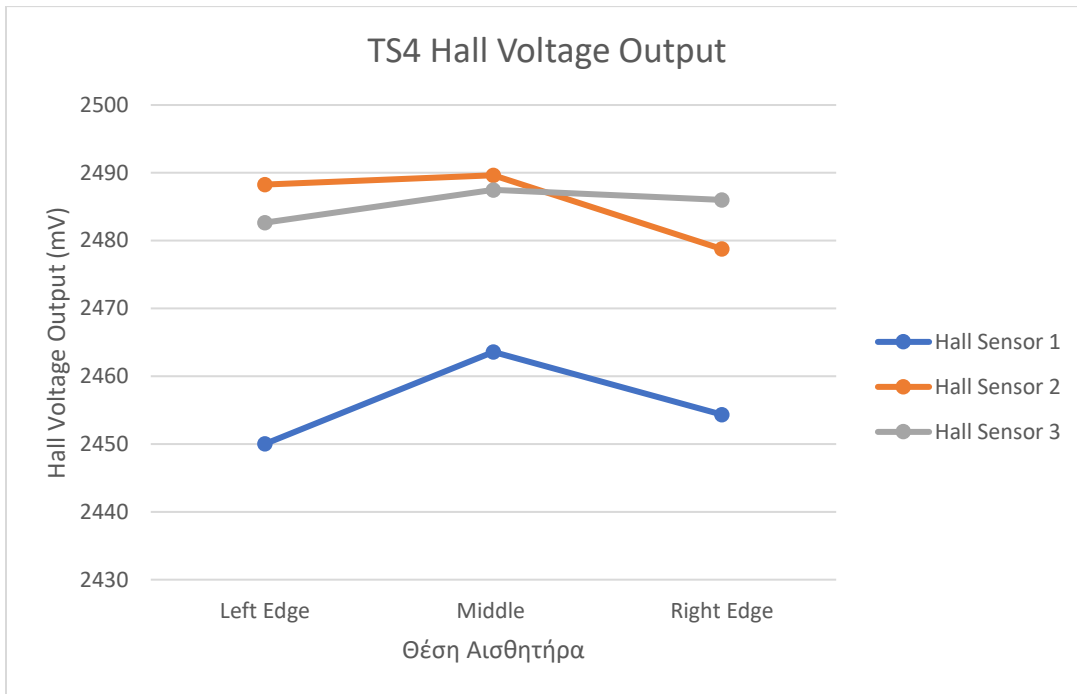
ΣΧΗΜΑ 14: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ TS1 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



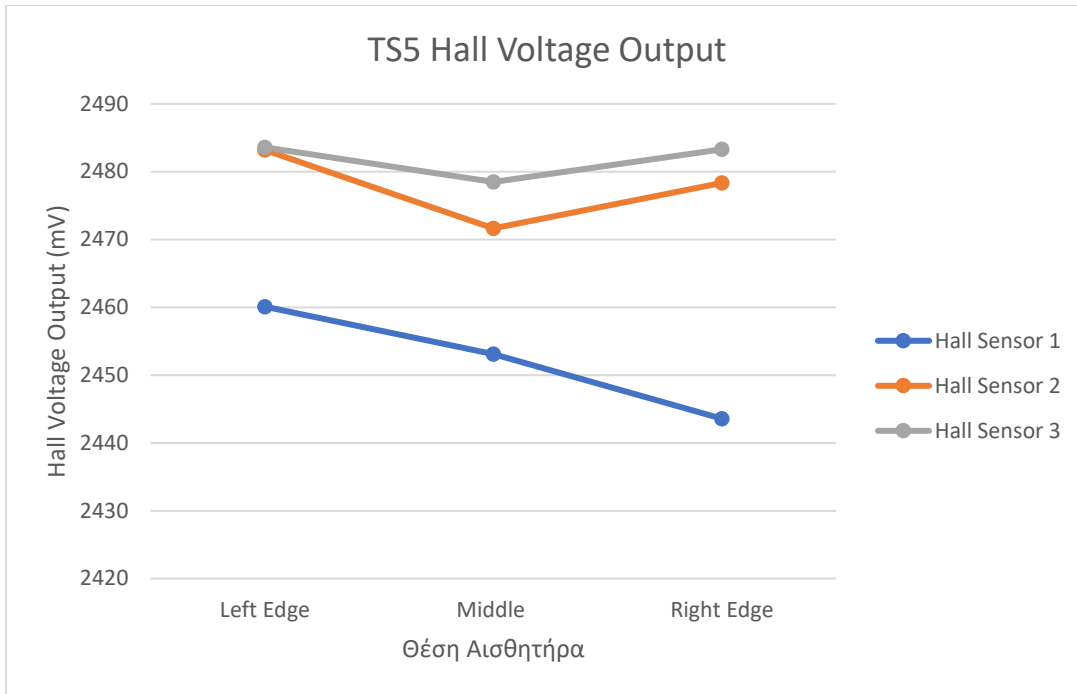
ΣΧΗΜΑ 15: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ TS2 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



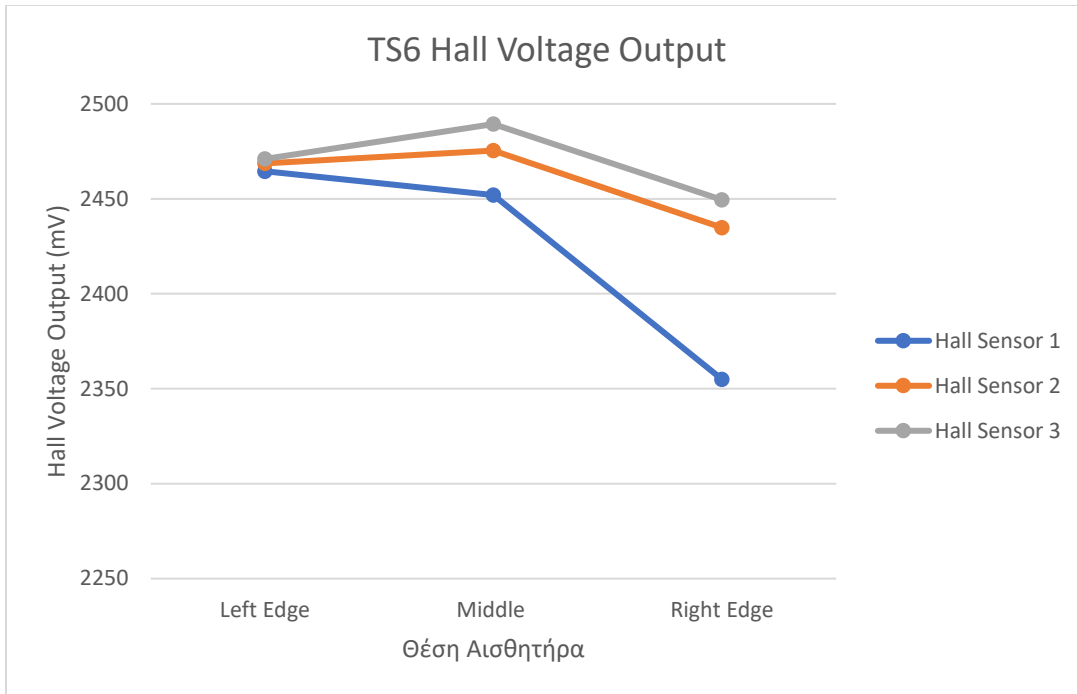
ΣΧΗΜΑ 16: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ TS3 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



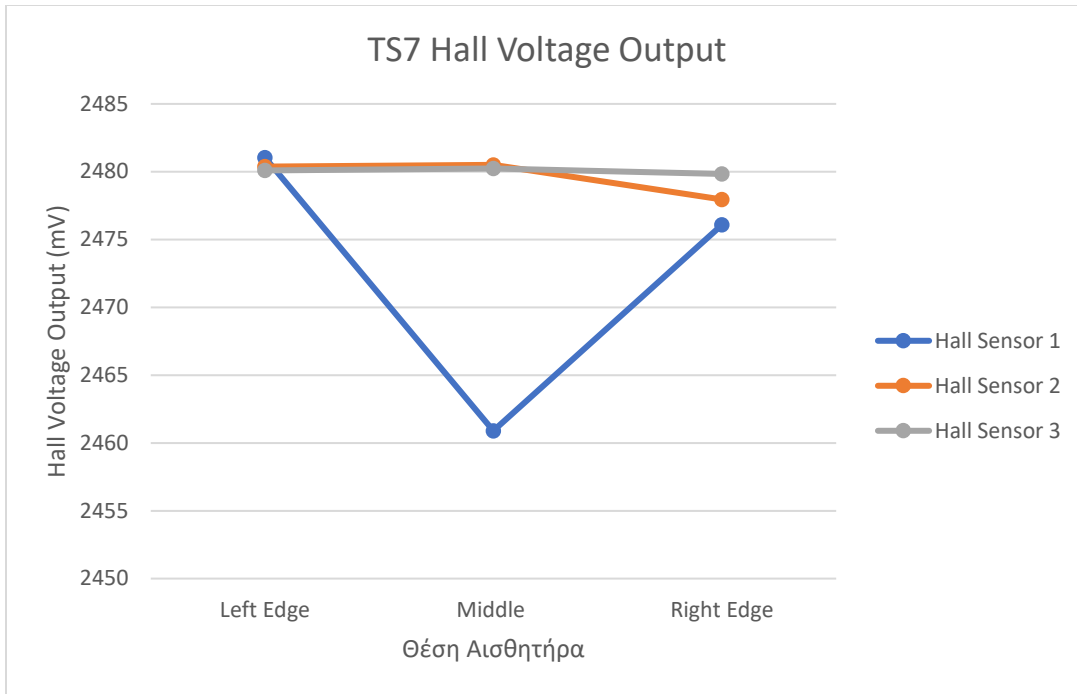
ΣΧΗΜΑ 17: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ TS4 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



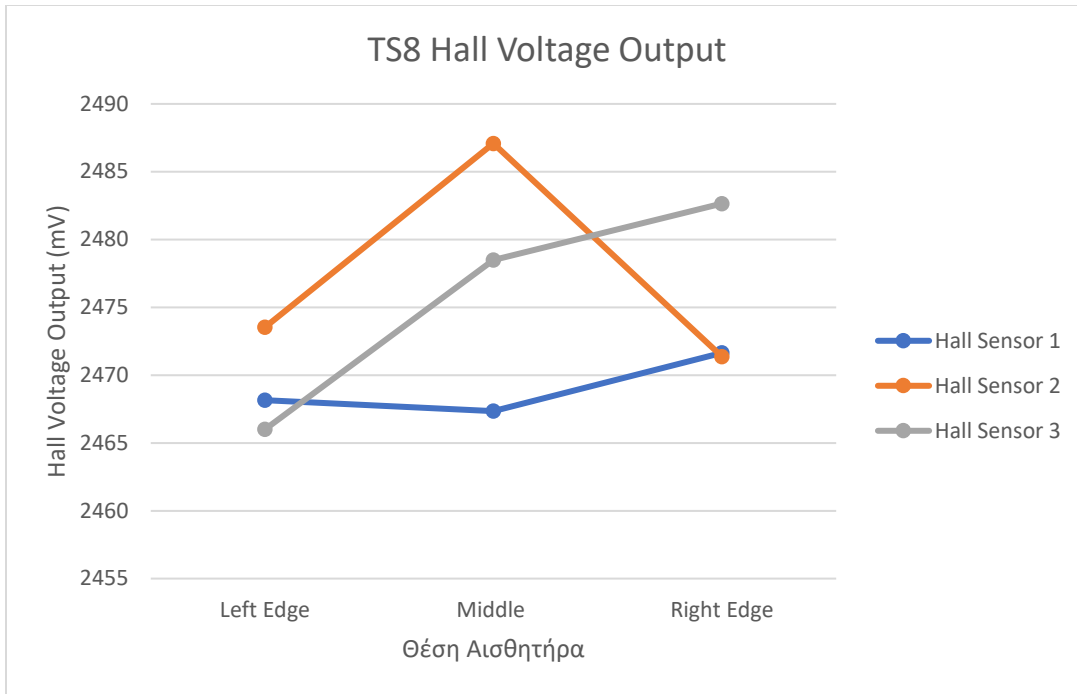
ΣΧΗΜΑ 18: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ TS5 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



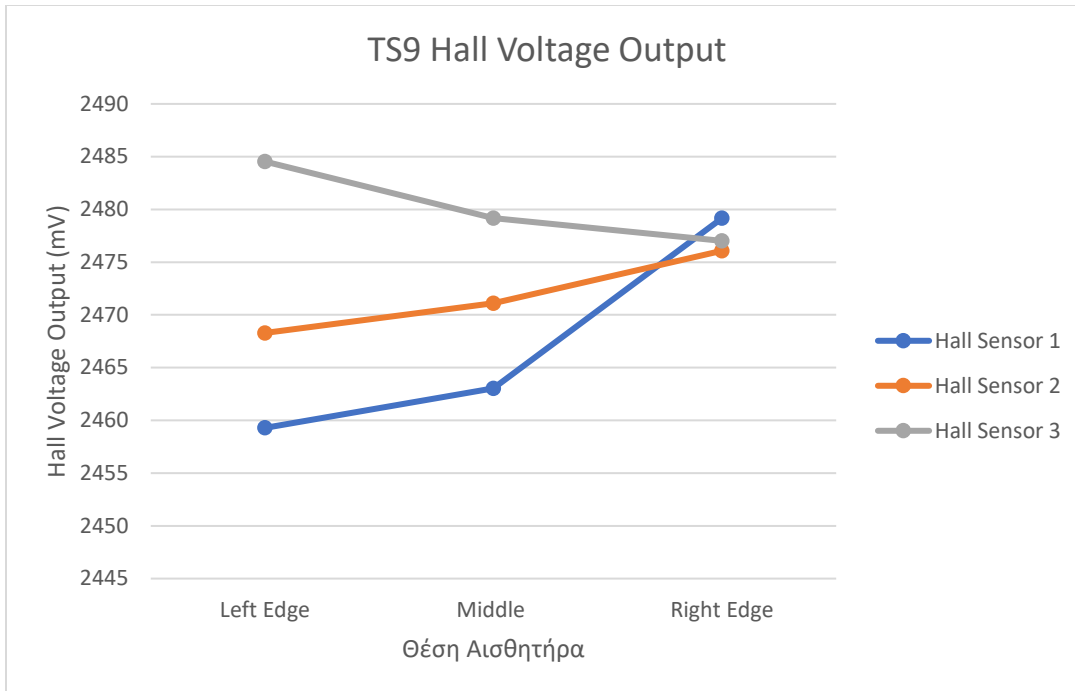
ΣΧΗΜΑ 19: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ TS6 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



ΣΧΗΜΑ 20: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ TS7 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



ΣΧΗΜΑ 21: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ TS8 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.



ΣΧΗΜΑ 22: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL, ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΟ TS9 ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ.

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Ο αισθητήρας, με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις, δεν είχε επιρροή από κάποιο επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Για να επιτευχθεί πόρισμα, σχετικά με την μαγνητική διαπερατότητα, θα συσχετιστεί η τάση εξόδου των αισθητήρων Hall, του συνολικού αισθητήρα, με την μαγνητική επαγωγή B , μέσω του datasheet των αισθητήρων Hall. Ύστερα, μέσω της μαγνητικής επαγωγής B , υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής συμπεράσματος για την μαγνητική διαπερατότητα, μέσω της σχέσης:

$$B = \mu \cdot H \quad 4.1$$

Αυτό σημαίνει ότι η μαγνητική διαπερατότητα μ είναι ανάλογη με την μαγνητική επαγωγή B και αντιστρόφως ανάλογη με την ένταση του

μαγνητικού πεδίου H . Συνεπώς, από το datasheet του αισθητήρα Hall [46], παρατηρείται η εξής συσχέτιση της τάσης εξόδου με την μαγνητική επαγωγή B :

Η μαγνητική επαγωγή B , για το εύρος τιμών που μπορεί να λάβει η τάση Hall στην έξοδο του αισθητήρα, λαμβάνει τιμές από -60 έως 60 mT, για ελάχιστη και μέγιστη ένδειξη μαγνητικής επαγωγής, αντίστοιχα.

Η συσχέτιση που υπάρχει είναι γραμμική, όπως φαίνεται και στο datasheet του αισθητήρα Hall [46]. Η ελάχιστη τιμή μαγνητικής επαγωγής αντιστοιχεί σε τάση εξόδου Hall ίση με 1 V ενώ η μέγιστη αντιστοιχεί σε τάση εξόδου Hall ίση με 4 V. Με παρόμοιο τρόπο, υπολογίζονται οι μαγνητικές επαγωγές, για τις τάσεις Hall εξόδου, που λαμβάνονται στις μετρήσεις, του συνολικού αισθητήρα.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό και λόγω του datasheet των αισθητήρων Hall, [46], αλλά και μέσω της γραμμικής σχέσης που συνδέει την μαγνητική επαγωγή και κατά συνέπεια την μαγνητική διαπερατότητα, με την τάση Hall, ότι τα τα διαγράμματα μαγνητικής διαπερατότητας θα παρουσιάζονται με ακριβώς την ίδια μορφή με αυτά των τάσεων Hall, με διαφορετικές τιμές. Μια εξίσωση, που τονίζει, την αναλογική σχέση μεταξύ της τάσης Hall με την μαγνητική επαγωγή και μαγνητική διαπερατότητα, πέραν του datasheet, είναι η εξής:

$$V_H = \frac{I \cdot B}{n \cdot q \cdot e} \quad 4.2$$

όπου V_H είναι η τάση Hall, I το ρεύμα, B η μαγνητική επαγωγή, n είναι η πυκνότητα του φορτίου φορέα, q το φορτίο του φορέα και e το πάχος του αγωγού.

Συνεπώς, εξ' αιτίας των παραπάνω, δεν χρειάζεται η σχεδίαση των διαγραμμάτων της μαγνητικής επαγωγής διότι θα παρουσιάζονται ακριβώς ίδια με αυτά των τάσεων Hall.

Ο υπολογισμός, αυτών των μαγνητικών επαγωγών, λήφθηκε, όπως φαίνεται και παραπάνω, μέσω συσχέτισης τάσης εξόδου Hall, με την μαγνητική επαγωγή του κάθε αισθητήρα, όπως αναγράφεται και στο datasheet του αισθητήρα Hall [46].

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η συμπεριφορά της μαγνητικής επαγωγής και, συνεπώς, της μαγνητικής διαπερατότητας, σε μεταβολές που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων από ηλεκτρικό χάλυβα (NOES), τα οποία έχουν ήδη δεχτεί επεξεργασία, ως προς τις μαγνητικές τους ιδιότητες, κάτι το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να παρουσιάσουν αλλοιωμένα χαρακτηριστικά όταν τεθούν υπό επεξεργασία εξ' αιτίας των χρόνιων καταπονήσεών τους. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί, πως εξ' αιτίας της γραμμικής σχέσης της τάσης Hall με την μαγνητική διαπερατότητα στον αισθητήρα, τα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν ανάλογα, και για, αλλά και από την τάση Hall [46]. Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί ότι, η ένταση του μαγνητικού πεδίου H , θεωρείται σταθερή. Επιπρόσθετα, η μαγνητική διαπερατότητα αυξάνεται με το μέγεθος κόκκων, με ρυθμό D^6 , όπου D είναι η διάμετρος μεγέθους των κόκκων έως τα 100-200 nm διαμέτρου και μειώνεται με ρυθμό D^{-1} ($\frac{1}{D}$), πέρα από τα μεγέθη διαμέτρου κόκκων αυτά. Η ανόπτηση σε θερμοκρασίες $\frac{1}{3}$ έως και $\frac{2}{5}$ της θερμοκρασίας τήξεως του υλικού, σε αδρανή ατμόσφαιρα, μειώνει τις παραμένουσες τάσεις και αυξάνει την μαγνητική διαπερατότητα. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, αναμένεται μείωση της διαπερατότητας.

Γνωρίζοντας, λοιπόν, τα παραπάνω, όσον αφορά την σειρά δοκιμίων RX, με βάση την θεωρία, είναι γνωστό πως αναμένεται αύξηση της μαγνητικής επαγωγής και κατ' επέκταση της μαγνητικής διαπερατότητας, όσο αυξάνεται το μέγεθος κόκκων των δοκιμίων. Με άλλα λόγια, παρουσιάζεται μείωση της μαγνητικής επαγωγής και άρα και της μαγνητικής διαπερατότητας, δεδομένου στάθερης έντασης πεδίου, όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του κόκκου. Στα δοκίμια της σειράς RX, όλα τα δοκίμια έχουν μεγαλύτερη διάμετρο μεγέθους κόκκων από τα 100-200 nm, συνεπώς, πρέπει να μειώνεται η μαγνητική διαπερατότητα με ρυθμό D^{-1} . Αυτό συμβαίνει επειδή τα μεγαλύτερα μεγέθη κόκκων, οδηγούν σε μικρότερο ρυθμό μείωσης μαγνητικής διαπερατότητας ενώ τα μικρότερα μεγέθη κόκκων οδηγούν σε μεγαλύτερο. Συνεπώς, φαίνεται ότι στο δοκίμιο RX1, το οποίο και έχει το μέγιστο πάχος και μέγεθος κόκκων της σειράς, δεν έχει την μέγιστη μαγνητική διαπερατότητα, εκ των δοκιμίων. Ωστόσο, παρουσιάζει αρκετά μεγάλη τιμή διαπερατότητας, κάτι το οποίο μπορεί να οφείλεται στο πάχος του, καθώς το πάχος του υλικού μεταβάλλει την μαγνητική διαπερατότητα, εξαρτώμενο από διάφορους παράγοντες, όπως η κατανομή μαγνητικών περιοχών, οι απώλειες δινορευμάτων και ο μαγνητικός κορεσμός του υλικού. Τα δοκίμια RX2, RX3, RX5 και RX7 παρουσιάζουν αναμενόμενο αποτέλεσμα, καθώς παρουσιάζουν αρκετά υψηλές μαγνητικές διαπερατότητες, με βάση τα χαρακτηριστικά τους, δηλαδή καθώς μειώνεται το μέγεθος κόκκων, αυξάνεται ο ρυθμός μείωσης της μαγνητικής διαπερατότητας και κατά συνέπεια, μειώνεται η μαγνητική διαπερατότητα των δοκιμίων. Τα δοκίμια RX4 και RX6 αποτελούν ανομοιομορφίες της σειράς, όσον αφορά την συμπεριφορά τους, ως προς την μαγνητική διαπερατότητα καθώς το RX6, με μεγαλύτερο ρυθμό μείωσης διαπερατότητας και μικρότερο μέγεθος κόκκων, παρουσιάζει την μέγιστη διαπερατότητα της σειράς στο δεξιό του άκρο ενώ το RX4 παρουσιάζει μικρότερη διαπερατότητα του RX6 και μεγαλύτερη του RX3. Επίσης, παρατηρείται ότι, σε πλειοψηφία,

τα δοκίμια της σειράς RX παρουσιάζουν μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα στα άκρα τους, παρά στο κέντρο τους, πέραν των RX3 και RX7 που συμβαίνει το αντίθετο. Σημειώνεται ότι ο θόρυβος Barkhausen, που χρησιμοποιήθηκε σε προηγούμενες μελέτες, επηρεάζει σημαντικά τα δοκίμια με μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων και για αυτόν τον λόγο, υπάρχουν κάποια δοκίμια που μπορεί να έχουν μικρή μαγνητική διαπερατότητα, δεδομένου αρκετά μεγάλου μεγέθους κόκκων, αλλά ταυτόχρονα και εξ' αιτίας της καταπόνησής τους.

Για την σειρά GG, παρατηρείται ότι έχουν το ίδιο πάχος ίσο με 540 μm . Το δοκίμιο GG5 είναι αυτό, το οποίο έχει και το μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων και δεν παρουσιάζει την μέγιστη μαγνητική διαπερατότητα αλλά την μικρότερη, εκ των δοκιμίων σειράς GG, κάτι το οποίο οφείλεται στις καταπονήσεις που προαναφέρθηκαν αλλά και στο γεγονός, ότι τα δοκίμια, αυτά, έχουν δεχτεί ανόπτηση. Τα δοκίμια είναι κατασκευασμένα από ηλεκτρικό κάλυβα με θερμοκρασία τήξης περίπου 1539°C. Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση της μαγνητικής διαπερατότητας αναμένεται να παρατηρηθεί για θερμοκρασίες ανόπτησης από 513°C έως 616°C. Εξάγεται το συμπέρασμα, ότι όσο μεγαλύτερη θερμοκρασία και διάρκεια, έχει η διαδικασία της ανόπτησης που έχει υποστεί το δοκίμιο, μακριά από τις παραπάνω θερμοκρασίες, τόσο μικρότερη μαγνητική διαπερατότητα θα έχει αυτό. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και από το γεγονός, ότι όλα τα δοκίμια έχουν μεγαλύτερη τιμή μαγνητικής διαπερατότητας από το GG5. Τα δοκίμια GG2 και GG6, έχουν δεχτεί ίδιας διάρκειας και θερμοκρασίας ανόπτηση, με το πρώτο να έχει μικρότερο μέγεθος κόκκων, άρα μεγαλύτερο ρυθμό μείωσης της διαπερατότητας, συνεπώς, μικρότερη μαγνητική διαπερατότητα, καθώς το GG6 παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή μαγνητικής διαπερατότητας της σειράς. Τα GG3 και GG4, παρουσιάζουν μια εικόνα, πιο κοντά στο αρχικό συμπέρασμα και έχουν μια ομαλότερη μορφή αφού το GG4, με μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων αλλά και διάρκεια και θερμοκρασία ανόπτησης,

παρουσιάζει μικρότερη μαγνητική διαπερατότητα από εκείνη του GG3. Το GG1, ακόμη, ακολουθεί το αρχικό συμπέρασμα, καθώς παρατηρείται ότι με χαμηλή διάρκεια και θερμοκρασία ανόπτησης, εντός των ορίων θερμοκρασιών που προαναφέρθηκαν, σχετικά με τα υπόλοιπα δοκίμια της σειράς, παρουσιάζει υψηλή τιμή μαγνητικής διαπερατότητας. Προφανώς και ισχύει η ίδια συνθήκη με τον θόρυβο Barkhausen να επιδρά σημαντικά, στις μετρήσεις των δοκιμίων με μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων και να κάνει πιο δύσκολη την λήψη ακριβέστερων μετρήσεων. Στην GG σειρά, αξίζει να σημειωθεί, ότι στα δοκίμια με μικρότερο μέγεθος κόκκων, μετράται μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα, από ότι σε αυτά με μεγαλύτερο, με το GG6 να παρουσιάζει την μέγιστη εξ' αυτών. Αυτό είναι ένα συμπέρασμα που λήφθηκε και κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προηγούμενης σειράς δοκιμίων. Επίσης, σε αυτή την σειρά, παρατηρείται καλύτερη ανταπόκριση, σε σχέση με την RX, όσον αφορά την «υγεία» των δοκιμίων. Ακόμη, πέραν των GG4 και GG6, τα υπόλοιπα δοκίμια, παρουσιάζουν μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα στα άκρα τους παρά στο κέντρο τους.

Για την σειρά TS, παρατηρείται ότι με αύξηση του πάχους και μείωση της παραμόρφωσης, υπάρχει, κυρίως, αύξηση και στην μαγνητική διαπερατότητα. Λαμβάνεται υπόψιν, ότι ο θόρυβος Barkhausen, αυξάνεται με την αύξηση της παραμόρφωσης. Επίσης, για μεγάλες παραμορφώσεις (άνω του 3%), υπάρχει μη μονοτονική συμπεριφορά της διαπερατότητας που οφείλεται σε ύπαρξη ενεργών πεδίων απομαγνήτισης λόγω των τασικών πεδίων που δημιουργούνται στα δοκίμια. Συνεπώς, παρατηρείται στο δοκίμιο TS1, η μέγιστη μαγνητική διαπερατότητα των δοκιμίων της σειράς ενώ παρουσιάζει το μικρότερο πάχος και μεγαλύτερη παραμόρφωση. Στα TS2, TS5 και TS7 ευκολά φαίνεται ότι υπάρχει ανομοιομορφία, καθώς μειώνοντας την παραμόρφωση και αυξάνοντας το πάχος, λαμβάνεται, σχετικά με τα υπόλοιπα δοκίμια, μικρή μαγνητική διαπερατότητα. Επίσης, το TS2

παρουσιάζει μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα από τα άλλα δύο, με χαρακτηριστικά μικρότερου πάχους και μεγαλύτερης παραμόρφωσης. Τα δοκίμια TS3, TS4, TS6 και TS8, παρουσιάζουν μια ομοιομορφία που ακολουθεί το αρχικό συμπέρασμα, με τις τιμές των μαγνητικών διαπερατοτήτων να αυξάνονται, με την μείωση της παραμόρφωσης και την αύξηση του πάχους των δοκιμίων. Ωστόσο, παρατηρείται ότι, στο TS9, παρουσιάζεται η μικρότερη τιμή μαγνητικής διαπερατότητας, σε σχέση με τα προαναφερθέντα δοκίμια, δηλαδή τα TS3, TS4, TS6 και TS8, κάτι το οποίο επαληθεύει το αρχικό πόρισμα. Ακόμη, παρατηρείται ότι στα TS9, TS8 και TS7, με παραμορφώσεις από 0-3%, αντίστοιχα, επαληθεύεται ξανά το αρχικό συμπέρασμα καθώς η μαγνητική διαπερατότητα έχει φθίνουσα μονοτονική συμπεριφορά ενώ, από εκεί και ύστερα, παρουσιάζει μη μονοτονική συμπεριφορά. Η συντριπτική πλειοψηφία των δοκιμίων αυτής της σειράς, παρουσιάζουν αρκετά υψηλές τιμές μαγνητικής διαπερατότητας. Τα φαινόμενα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ως προς τις ανομοιομορφίες και μη αναμενόμενες παρατηρήσεις στα δοκίμια, παράγονται και από το γεγονός ότι, υπάρχει σημαντική αλλοίωση των χαρακτηριστικών των δοκιμίων, έπειτα από διάφορες καταπονήσεις και επεξεργασίες που έχουν δεχτεί, όπως προαναφέρθηκε. Επίσης, τα δοκίμια αυτής της σειράς, που παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές μαγνητικής διαπερατότητας, κυρίως στο κέντρο τους, είναι τα δοκίμια: TS1, TS2, TS4, TS6 και TS8. Τα υπόλοιπα παρουσιάζουν στα άκρα τους. Οι τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας ακολουθούν μια ομαλή, σχετικά, μεταβολή. Τα δοκίμια TS, παρουσιάζουν μια, εν μέρει, ανομοιομορφία, με μη αναμενόμενες μεταβολές της μαγνητικής διαπερατότητας, με την αύξηση του πάχους και την μείωση της παραμόρφωσης, οι οποίες δημιουργούνται λόγω χρόνιων καταπονήσεων των δοκιμίων αλλά και της επίδρασης του θορύβου Barkhausen, που αναφέρθηκε και προηγουμένως. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι, σε κάθε σειρά δοκιμίων, ο αισθητήρας Hall 1, του συνολικού αισθητήρα, παρουσιάζει τις

μικρότερες τιμές τάσεων εξόδου ενώ οι αισθητήρες Hall 2 και 3 του συνολικού αισθητήρα, παρουσιάζουν τις πιο υψηλές τιμές, με τον δεύτερο να εμφανίζεται περισσότερο στις μεγάλες τιμές τάσεων εξόδου, ανεξάρτητα σειράς δοκιμών.

ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ

Οι μετρήσεις, που λήφθηκαν στο παρόν πείραμα, έδειξαν ότι τα δοκίμια έχουν υποστεί αρκετή προεργασία και επεξεργασία από προηγούμενες μελέτες και έρευνες. Ακόμη, παρατηρήθηκε ότι ο αισθητήρας πολλαπλών Hall, με τον οποίο πραγματοποιήθηκε το πείραμα, λειτουργεί με ικανοποιητική ακρίβεια και μπορεί να ανιχνεύσει τις τάσεις Hall, που επιδρούν στα δοκίμια, καθώς και να παρέχει την δυνατότητα εύκολης και γρήγορης τροποποίησης, μέσω του λογισμικού Arduino, όπως και της πλακέτας esp32. Επίσης, παρέχει την απαραίτητη ευαισθησία, ώστε οι μετρήσεις να είναι ακριβέστερες και να λαμβάνονται υπόψιν, τόσο οι αλλαγές στις μαγνητικές ιδιότητες των δοκιμών, όσο και το περιβάλλον, στο οποίο λειτουργεί ο αισθητήρας.

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Από την συγκεκριμένη μελέτη, εξάχθηκαν κάποια συμπεράσματα και αρκετές πληροφορίες. Αυτές οι πληροφορίες θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμες σε επόμενο ερευνητή, ο οποίος προτείνεται να επαναλάβει τις μετρήσεις στα δοκίμια, ώστε να αποφανθεί προς την «υγεία» των δοκιμών σε σχέση με παλαιότερες μελέτες, όπως η παρούσα. Θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον να συγκριθούν οι μετρήσεις και να συνταχθούν, εκ νέου, πληρέστερα συμπεράσματα, σχετικά με το προαναφερόμενο πείραμα και την υγεία των υλικών ανά τα έτη.

Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η ανάπτυξη του αισθητήρα πολλαπλών Hall, με περισσότερους εκ των τριών αισθητήρων, και επανάληψη των μετρήσεων με σκοπό της εξαγωγής συμπερασμάτων, σχετικά με την λειτουργικότητα του αισθητήρα, την ακρίβεια στις μετρήσεις του αλλά και την ταχύτητα με την οποία λαμβάνονται. Αυτή η διαφοροποίηση, θα μπορούσε να δώσει πιο καθαρά την εικόνα των ανωμαλιών των δοκιμίων, των καταπονήσεων που έχουν δεχτεί αλλά και τις δυνατότητες του αισθητήρα.

Μια ακόμη πρόταση για μελλοντική εργασία, είναι η επανάληψη των μετρήσεων, με περισσότερες παραμέτρους, όπως η επιβολή εξωτερικού ισχυρού μαγνητικού πεδίου στο περιβάλλον του πειράματος. Η απόφαση, του πως και πόσο, μπορεί κάτι τέτοιο να επηρεάσει τα τελικά αποτελέσματα, τα δοκίμια, αλλά και τις ενδείξεις του αισθητήρα, καθώς και να ελεγχθεί η αποδοτικότητα του τελευταίου, ως προς την ευαισθησία και ακεραιότητά του, φαίνεται να είναι κάτι αρκετά ενδιαφέρον.

Τέλος, θα μπορούσε κανείς με την χρήση του αισθητήρα πολλαπλών Hall, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, να αποφανθεί για άλλου είδους δοκίμια, που θα μπορούσαν να είναι κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για άλλες βιομηχανικές κατασκευές και ενέργειες. Τέτοια υλικά είναι οι φερρίτες, το νεοδύμιο, το alnico, το κοβάλτιο, το καουτσούκ. Θα ήταν αρκετά ενδιαφέρον, να ελεγχθεί, να ερευνηθεί και να μοντελοποιηθεί, το πως συμπεριφέρονται τέτοια υλικά, υπο παρόμοιες συνθήκες, και να αναλυθούν τα αποτελέσματα που θα παρείχαν ως προς μελλοντικές χρήσεις, εν μέσω του αισθητήρα πολλαπλών Hall.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] B. S. Guru και H. R. Hizioglu, *Electromagnetic Field Theory Fundamentals*, Cambridge University Press, 2004.
- [2] R. Fitzpatrick, *Maxwell's Equations and the Principles of Electromagnetism*, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014.
- [3] J. A. Stratton, *Electromagnetic Theory*, McGraw Hill Education, 2007.
- [4] D. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, CRC Press, 1998.
- [5] J. M. D. Coey, *Magnetism and Magnetic Materials*, Cambridge University Press, 2010.
- [6] K. Buschow και F. de Boer, *Physics of Magnetism and Magnetic Materials*, Springer, 2003.
- [7] P. Lorrain και D. R. Corson, *Electromagnetism: Principles and Applications*, W. H. Freeman, 1990.
- [8] R. C. O'Handley, *Modern Magnetic Materials: Principles and Applications*, Wiley, 2000.
- [9] R. M. Bozorth, *Ferromagnetism*, Institute of Physics Publishing, 1993.
- [10] G. Bertotti, *Hysteresis in Magnetism: For Physicists, Materials Scientists, and Engineers*, Academic Press, 1998.
- [11] G. C. Hadjipanayis, *Magnetic Hysteresis in Novel Magnetic Materials*, Springer, 2012.
- [12] E. Glytsis, «Electromagnetic Fields B,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://users.ntua.gr/eglytsis/EM_Fields_B.htm. [Πρόσβαση 2023].
- [13] N. A. Spaldin, *Magnetic Materials: Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press, 2010.
- [14] J. C. Slonczewski και P. R. Weiss, *Magnetism in Metals and Metallic Compounds*, Oxford University Press, 2017.
- [15] R. J. D. Tilley, *Understanding Solids: The Science of Materials*, Wiley, 2013.

- [16] MIT department of Electrical Engineering, Magnetic Circuits and Transformers: A First Course for Power and Communication Engineers, MIT Press, 1977.
- [17] M. N. O. Sadiku, Elements of Electromagnetics, Oxford University Press, 2006.
- [18] B. Crowell, Electricity and Magnetism, Light and Matter, 2007.
- [19] A. Hubert και R. Schäfer, Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures, Springer, 1998.
- [20] H. A. Haus, Electromagnetic Noise and Quantum Optical Measurements, Springer, 2000.
- [21] R. Skomski, Simple Models of Magnetism, Oxford University Press, 2008.
- [22] T.-C. Toh, Electromagnetic Theory for Electromagnetic Compatibility Engineers, CRC Press, 2016.
- [23] «Stoner–Wohlfarth Model,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-72233-x>. [Πρόσβαση 2023].
- [24] U. O. Aigbe, K. E. Ukhurebor και R. B. Onyancha, Magnetic Nanomaterials: Synthesis, Characterization and Applications, Springer, 2023.
- [25] O. Kahn, Magnetism: A Supramolecular Function, Springer, 2010.
- [26] H. Kronmüller, Micromagnetism and the Microstructure of Ferromagnetic Solids, Cambridge University Press, 2009.
- [27] R. Perez, Handbook of Electromagnetic Compatibility, Academic Press, 2013.
- [28] B. Frois και I. Sick, Modern Topics In Electron Scattering, World Scientific Publishing Company, 1991.
- [29] A. Barman και J. Sinha, Spin Dynamics and Damping in Ferromagnetic Thin Films and Nanostructures, Springer, 2018.
- [30] K. Kuang, Magnetic Sensors: Principles and Applications, IntechOpen, 2012.
- [31] P. Ripka, Magnetic Sensors and Magnetometers, Artech House Publishers, 2001.
- [32] E. Hristoforou, A. Ktena και S. Gong, «Magnetic Sensors: Taxonomy, Applications, and New Trends,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 55, αρ. 7, pp. 1-14, 2019.

- [33] J. W. Gardner, *Microsensors Principles and Applications*, McGraw-Hill Education, 2007.
- [34] H. Weinstock, *SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications*, Springer, 2012.
- [35] J. Lenz και A. Edelstein, «Magnetic Sensors and Their Applications,» *IEEE Sensors*, τόμ. 6, αρ. 78, pp. 973-989, 2006.
- [36] R. S. Popovic, *Hall Effect Devices*, CRC Press, 2003.
- [37] P. Pattakos, A. Katsoulas, S. Angelopoulos, A. Ktena , P. Tsarabaris και E. Hristoforou, «Development of an Autonomous Magnetic Permeability Sensor,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 59, αρ. 2, 2023.
- [38] P. Pattakos, A. Katsoulas, S. Angelopoulos, A. Ktena και E. Hristoforou, «Magnetic Harvester for Autonomous Steel Health Monitoring Sensors,» pp. 1-5, 2023.
- [39] M. A. Khan, «Magnetic sensors - A Review and Recent Technologies,» *Eng. Res. Express*, pp. 2-18, 2021.
- [40] «Academic Library,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ebrary.net/>.
- [41] D.-P. R. S και A. Tamilarasu, «Smart Sensing Technology,» σε *Smart Systems for Industrial Applications*, Scrivener Publishing, 2022, pp. 333-400.
- [42] P. Pattakos, S. Angelopoulos , A. Ktena και E. Hristoforou, «Multiple Hall Sensor for In-Plane Anisotropy Measurements in Ferrous Steels,» *IEEE*, pp. 23-150, 2015.
- [43] «Esp32 WeMos Lolin32 datasheet,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://megma.ma>. [Πρόσβαση 2023].
- [44] «Electroschematics,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.electroschematics.com/>.
- [45] «Arduino,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.arduino.cc>. [Πρόσβαση 2023].
- [46] «Hall Effect Sensor Datasheet,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.alfaelecs.com>. [Πρόσβαση 2023].

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

```
const byte Hall1_pin = 32;

const byte Hall2_pin = 33;

const byte Hall3_pin = 34;

const int Hall1_offset = -125;

const int Hall2_offset = -131;

const int Hall3_offset = -143;

void setup() {

Serial.begin(115200);

}

void loop() {

int Hall1_value = analogRead(Hall1_pin) - Hall1_offset;

int Hall2_value = analogRead(Hall2_pin) - Hall2_offset;

int Hall3_value = analogRead(Hall3_pin) - Hall3_offset;

float Hall1_VoltageValue = Hall1_value * 3300.0 / 4096.0;

float Hall2_VoltageValue = Hall2_value * 3300.0 / 4096.0;

float Hall3_VoltageValue = Hall3_value * 3300.0 / 4096.0;
```

```
// Serial.println(Hall1_value);  
  
// Serial.println(Hall2_value);  
  
// Serial.println(Hall3_value);  
  
// Serial.println("====");  
  
Serial.println(Hall1_VoltageValue);  
  
Serial.println(Hall2_VoltageValue);  
  
Serial.println(Hall3_VoltageValue);  
  
Serial.println("====");  
  
delay(100);  
  
}
```