



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάπτυξη Ηλεκτρονικού Αισθητήρα**

**Επιτήρησης Υγείας Χάλυβα**

Μενέλαος Κ. Παπαϊωάννου

**Επιβλέπων** :Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2020





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάπτυξη Ηλεκτρονικού Αισθητήρα  
Επιτήρησης Υγείας Χάλυβα**

Μενέλαος Κ. Παπαϊωάννου

**Επιβλέπων** :Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 17η Ιουλίου 2020.

.....

Ευάγγελος Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Παύλος-Πέτρος Σωτηριάδης

Αν.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Παναγιώτης Τσαραμπάρης

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2020

.....  
Μενέλαος, Κ. Παπαϊωάννου

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

Copyright © Μενέλαος, Παπαϊωάννου, 2020.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. Allrightsreserved.

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

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



## Περίληψη

Τη σύγχρονη εποχή ο ηλεκτρικός χάλυβας κατέχει κομβικό ρόλο σε διάφορα πεδία της βιομηχανίας. Επομένως, η σημασία του ηλεκτρικού χάλυβα και οι πιθανώς καταστρεπτικές συνέπειες της αποτυχίας συσκευών που περιέχουν ηλεκτρικό χάλυβα επιτάσσουν τον ακριβή έλεγχο και χαρακτηρισμό του. Στη παρούσα εργασία παράχθηκε πλήθος δεδομένων με σκοπό τον ακριβή χαρακτηρισμό του προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα, μέσω της συσχέτισης των ενδογενών ιδιοτήτων του με τη μαγνητική διαπερατότητα του.

Οι ενδογενείς ιδιότητες του προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα που επιδιώκεται να συσχετισθούν με τη μαγνητική διαπερατότητα του, είναι το μέγεθος των συσσωματωμάτων του και η παραμόρφωση που έχει υποστεί. Η λήψη των δεδομένων έγινε με μαγνητικό αισθητήρα, ο οποίος ονομάζεται ελεγκτής μονής λωρίδας.

Λέξεις-κλειδιά : ηλεκτρικός χάλυβας, ελεγκτής μονής λωρίδας, μαγνητική διαπερατότητα, μη καταστροφικός έλεγχος



## **Abstract**

In modern times, electric steel plays a key role in various fields of industry. Therefore, the importance of electrical steel and the potentially devastating consequences of the failure of electrical steel appliances require its precise evaluation and characterization. In the present thesis, a number of data were produced in order to accurately characterize the oriented electric steel, through the correlation of its endogenous properties with its magnetic permeability.

The endogenous properties of oriented electric steel, that are sought to be related to its magnetic permeability, are the size of its grains and the strain it has undergone. The data were obtained with a magnetic sensor, which is called a single sheet tester.

Keywords: electrical steel, single sheet tester, magnetic permeability, non destructive evaluation





## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ως έργο, η διπλωματική εργασία κατέχει βαρύνουσα σημασία στην ολοκλήρωση των σπουδών ενός φοιτητή, ενεργώντας ως εφόδιο για τη μετέπειτα σταδιοδρομία του.

Υπό αυτό το πρίσμα θα ήθελα να ξεκινήσω τις ευχαριστίες μου από τον καθηγητή Ευάγγελο Χριστοφόρου, που μου παρείχε την ευκαιρία να ασχοληθώ ενεργά με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Οφείλω ακόμη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα της εργασίας μου Χρόνη Παττακό. Οι επεμβάσεις του προς την επιτυχημένη ολοκλήρωση της εργασίας μου ήταν ουσιαστικές, ενώ χάρη στην συνεχή ενθάρρυνση του η συνεργασία μας θεμελιώθηκε σε ένα ευχάριστο κλίμα. Στη συνέχεια θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους καθηγητές Παύλο-Πέτρο Σωτηριάδη και Παναγιώτη Τσαραμπάρη για την τιμή που μου έκαναν να αποτελέσουν μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου προς την οικογένεια μου και τους φίλους μου, που αποτέλεσαν "σταθερές" σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο κόσμο. Η παρουσία τους υπήρξε αναπόσπαστο κομμάτι των στιγμών ικανοποίησης μου, ενώ συνέτρεξαν ανιδιοτελώς σε κάθε δυσκολία που αντιμετώπισα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.



|  |           |
|--|-----------|
| Περίληψη.....  | i         |
| Abstract.....  | iii       |
| Ευχαριστίες.....   | v         |
| <br>   |           |
| <b>1. Βασικά στοιχεία ηλεκτρομαγνητισμού.....</b>              | <b>1</b>  |
| Απαρχές Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας .....                        | 1         |
| Εξισώσεις Maxwell.....   | 3         |
| Μαγνητική υστέρηση .....                                       | 8         |
| Μηχανισμοί μαγνήτισης.....                                     | 12        |
| Εξάρτηση της καμπύλης υστέρησης από τη συχνότητα .....         | 14        |
| Πηγές μαγνητικού πεδίου διέγερσης.....                         | 19        |
| Σωληνοειδές πηνίο .....  | 23        |
| Σύστημα πηνίων Helmholtz .....                                 | 25        |
| Μαγνητικός θόρυβος.....  | 27        |
| Ανισotropία λόγω σχήματος.....                                 | 28        |
| Προσδιορισμός Κατανομής Μαγνητικού Πεδίου.....                 | 30        |
| Μετρήσεις H, B σε φερρομαγνητικό δοκίμιο .....                 | 32        |
| Μετρήσεις σε ημιστατικό πεδίο.....                             | 39        |
| <br>   |           |
| <b>2. Μαγνητικοί Αισθητήρες.....</b>                           | <b>41</b> |
| Κατηγορίες μαγνητικών αισθητήρων.....                          | 41        |
| Αισθητήρες Επαγωγής.....                                       | 43        |
| Αισθητήρες πύλης-ροής .....                                    | 44        |
| Ταξινόμηση αισθητήρων πύλης-ροής.....                          | 46        |
| Θόρυβος .....  | 47        |
| Ελεγκτής μονής λωρίδας .....                                   | 48        |
| <br>   |           |
| <b>3. Ηλεκτρικός Χάλυβας.....</b>                              | <b>51</b> |
| Η σημασία Χάλυβα στη σύγχρονη εποχή.....                       | 51        |
| Ηλεκτρικός χάλυβας .....                                       | 53        |
| Τύποι υπολειπόμενης τάσης .....                                | 54        |
| Κλίμακες τάσης.....  | 56        |
| Τεχνικές ελέγχου.....  | 58        |
| Παραδείγματα καταστροφικών και ημικαταστροφικών τεχνικών ..... | 59        |

|  |            |
|--|------------|
| Παραδείγματα μη καταστροφικών τεχνικών .....                                     | 60         |
| Μαγνητικός μη καταστροφικός έλεγχος .....  | 61         |
| Έλεγχος μέσω μαγνητικών σωματιδίων .....   | 63         |
| Έλεγχος σκέδασης μαγνητικής ροής .....   | 66         |
| Μέθοδοι αναπλήρωσης μαγνητικών απωλειών κατά τη χρήση ελεγκτή μονής λωρίδας..... | 70         |
| <b>4. Πειραματικό μέρος .....</b>  | <b>75</b>  |
| Περιγραφή του αισθητήρα.....   | 75         |
| Δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά το πείραμα.....                               | 78         |
| Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας .....   | 79         |
| Πειραματικός εξοπλισμός .....  | 81         |
| Παρουσίαση μετρήσεων .....   | 83         |
| Παρουσίαση διαγραμμάτων .....  | 91         |
| Επεξεργασία μετρήσεων .....  | 115        |
| <b>5. Συμπεράσματα .....</b>   | <b>128</b> |
| <b>6. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....</b>                                    | <b>129</b> |
| <b>Βιβλιογραφία.....</b>   | <b>130</b> |



# 1. Βασικά στοιχεία ηλεκτρομαγνητισμού

## Απαρχές Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας

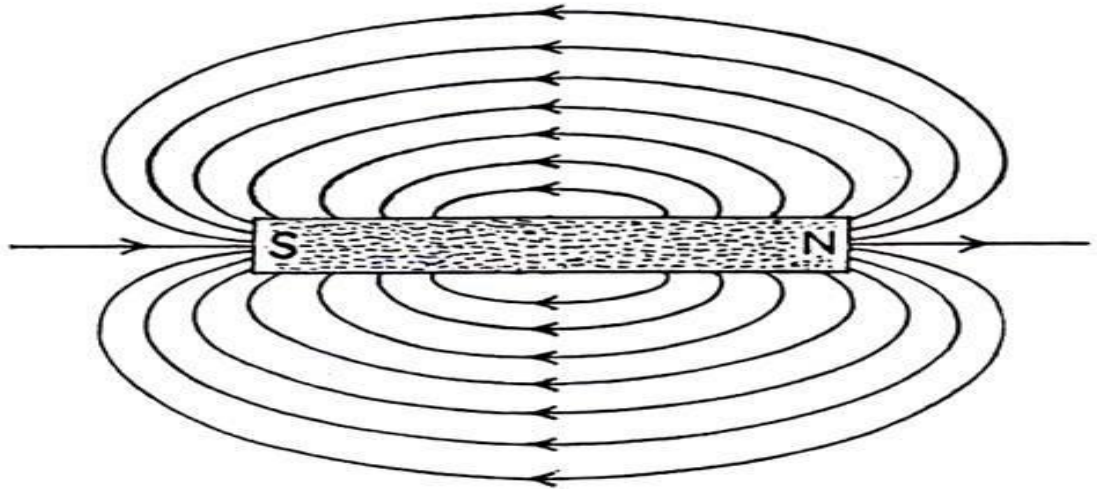
Το έναυσμα για τη διερεύνηση της συσχέτισης ηλεκτρισμού και μαγνητισμού έδωσε ένα πείραμα του Hans Christian Oersted. Κατά το πείραμα αυτό, που διεξήχθη το 1819 ο Oersted, ουσιαστικά, κράτησε ένα καλώδιο πάνω από μια πυξίδα και όταν αυτό διατρήθηκε από ρεύμα η βελόνα της πυξίδας κινήθηκε. Αργότερα, μέσω αυτής της παρατήρησης κατασκευάστηκε και το πρώτο γαλβανόμετρο, όργανο μέτρησης ηλεκτρικού ρεύματος. Το 1820 ο Andre Ampere κατασκεύασε μια μαθηματική θεωρία που περιέγραφε το πείραμα του Oersted και δημοσιοποίησε τη τελική εξίσωση το 1821 [1].

Παρ' όλ' αυτά, η πιο συστηματική μελέτη του ηλεκτρομαγνητισμού πριν τον James Clerk Maxwell, διεξήχθη από τον Michael Faraday. Ο Faraday μελέτησε εκτενώς ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα κατά τη περίοδο 1831 με 1855, ενώ παρήγαγε πάνω από 16000 οργανωμένες καταχωρήσεις στις εργαστηριακές του σημειώσεις [1].

Από τη πληθώρα των πειραμάτων του υπάρχουν δύο κατηγορίες με βαρύνουσα συνεισφορά για τη θεωρία του James Clerk Maxwell. Από τη πρώτη κατηγορία εκμαιεύεται η αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, ενώ από τη δεύτερη προκύπτει το φαινόμενο που ονομάζει "lines of force". Παρά ταύτα τα αποτελέσματα του Faraday δεν έλαβαν τη δέουσα προσοχή από την επιστημονική κοινότητα, καθώς δεν ήταν εφοδιασμένα με μαθηματική περιγραφή, γεγονός που τους στερούσε κύρος [1].

Ο Maxwell ασχολήθηκε για πρώτη φορά με τη θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού το 1855 δημοσιεύοντας μια ανάλυση του φαινομένου που παρατήρησε ο Faraday "lines of force". Αργότερα, το 1873, δημοσίευσε το "A treatise on Electricity and Magnetism", σε μια προσπάθεια να δημιουργήσει μια ολοκληρωμένη πραγματεία επί της ηλεκτρικής επιστήμης.

Το μέγεθος του έργου, αλλά και η ασαφής διατύπωση σε ορισμένα σημεία κατέστησαν το έργο δυσανάγνωστο, έτσι δεν έχαιρε αναγνώρισης από την επιστημονική κοινότητα [1].



Σχήμα 1: Δυναμικές γραμμές (lines of force), ©2017 engineering enotes

Στη διάδοση των ευρημάτων του Maxwell συνέβαλλαν δύο γεγονότα. Το 1881 ο Oliver Heaviside απλοποίησε τις εξισώσεις του Maxwell στις τέσσερις που χρησιμοποιούνται σήμερα [2]. Επιπλέον, το 1887 ο Heinrich Hertz απέδειξε πειραματικά την έννοια του πεδίου, που εισήγαγε ο Maxwell ανιχνεύοντας ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο κενό [3].



## Εξισώσεις Maxwell

Παρακάτω διατυπώνονται οι τέσσερις νόμοι του Maxwell, τόσο στη διαφορική, όσο και στην ισοδύναμη ολοκληρωτική τους μορφή. Οι νόμοι παρουσιάζονται στη μορφή που έχουν στο καθιερωμένο σύστημα S.I. [4]. Τα **μεγέθη** που ορίζονται μέσω των νόμων είναι:

$E$  η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου

$B$  η πυκνότητα μαγνητικής ροής

σε συνάρτηση με τα εξής μεγέθη:

$\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά στο κενό

$\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό

$\rho$  η χωρική πυκνότητα φορτίου

$J$  η πυκνότητα ρεύματος

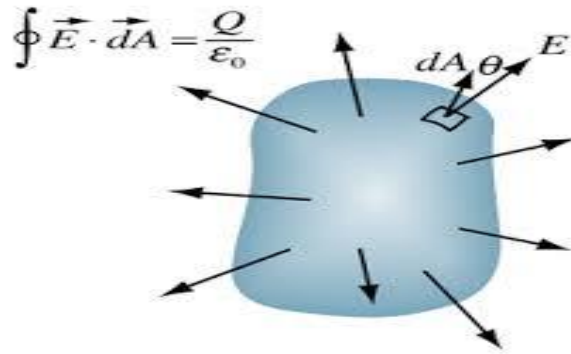
## Πρώτος Νόμος - Νόμος Gauss

Διαφορική μορφή :

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad 1.1$$

Ολοκληρωτική μορφή :

$$\oiint_{\partial\Omega} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint_{\Omega} \rho dV \quad 1.2$$



Σχήμα 2: Πρώτος Νόμος του Maxwell, ©georgia state university

Ο νόμος αυτός μπορεί να ερμηνευθεί αποδίδοντας στο θετικό φορτίο, ότι ξεκινούν από αυτό ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές, διαδιδόμενες σφαιρικά προς τα έξω. Αντίστοιχα, για το αρνητικό, ότι οι δυναμικές γραμμές εισέρχονται σφαιρικά προς αυτό.

Στην ολοκληρωτική του μορφή, ο νόμος υπαγορεύει ότι το ολοκλήρωμα των προκείμενων ολοκληρωτικών γραμμών σε δεδομένη κλειστή επιφάνεια, ισούται με το φορτίο που η επιφάνεια περικλείει διαιρούμενο με τη σταθερά της ηλεκτρικής διαπερατότητας στο κενό [4].

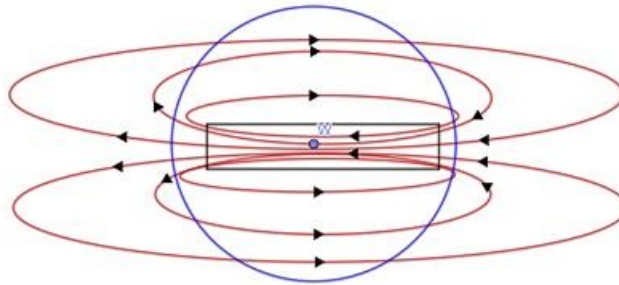
## Δεύτερος Νόμος - Νόμος Gauss για το μαγνητισμό

Διαφορική μορφή :

$$\nabla \cdot B = 0 \quad 1.3$$

Ολοκληρωτική μορφή :

$$\oiint_{\partial\Omega} B \cdot dS = 0 \quad 1.4$$



Σχήμα 3: Δεύτερος Νόμος του Maxwell, ©<https://study.com>

Ο δεύτερος νόμος του Maxwell είναι ανάλογος του πρώτου για το μαγνητικό πεδίο. Στην ολοκληρωτική του μορφή καθορίζει τη μαγνητική ροή που διέρχεται μέσα από μια κλειστή επιφάνεια. Σύμφωνα, με το δεύτερο νόμο του Maxwell σε αυτή τη περίπτωση η συνολική μαγνητική ροή είναι πάντα μηδέν, αποκλείοντας έτσι την ύπαρξη μαγνητικού μονοπόλου, το οποίο θα αντιστοιχούσε στο στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο. Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι πάντα κλειστές καμπύλες, με αποτέλεσμα κάθε δυναμική γραμμή να εξέρχεται όσες φορές εισέρχεται σε μια κλειστή επιφάνεια.

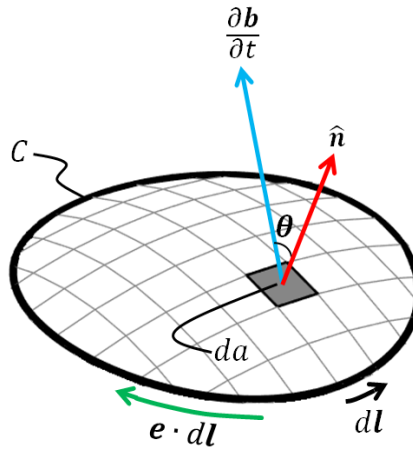
## Τρίτος Νόμος - Εξίσωση Maxwell-Faraday

Διαφορική μορφή :

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad 1.5$$

Ολοκληρωτική μορφή :

$$\oint_{\partial \Sigma} E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} B \cdot dS \quad 1.6$$



Σχήμα 4: Τρίτος νόμος του Maxwell, ©GeoSci, an open-source resource

Οι εξισώσεις περιγράφουν το τρόπο με τον οποίο ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει ηλεκτρικό πεδίο. Σε περίπτωση που το μαγνητικό πεδίο παραμένει σταθερό, το ηλεκτρικό πεδίο δε περιστρέφεται. Όμως, σε περίπτωση που το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται τοπικά, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο περιστρεφόμενο γύρω από τη μεταβολή.

Σε ολοκληρωτική μορφή, εφόσον υπάρξει μεταβολή του συνολικού μαγνητικού πεδίου που διέρχεται από μια επιφάνεια, εξ αιτίας της μεταβολής αυτής δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο στο σύνορο της επιφάνειας [4].

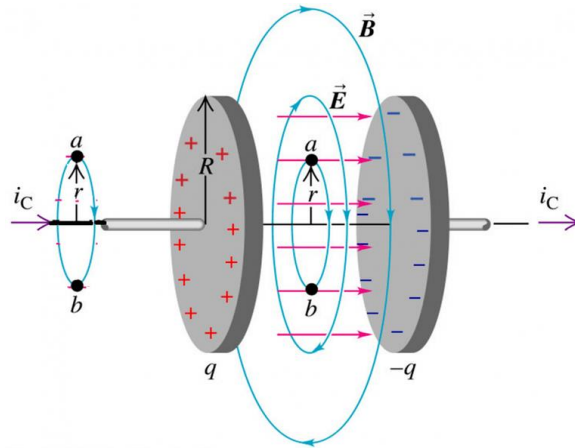
## Τέταρτος Νόμος - Νόμος Ampere με προσθήκη Maxwell

Διαφορική μορφή :

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_o \left( \mathbf{J} + \epsilon_o \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \quad 1.7$$

Ολοκληρωτική μορφή :

$$\oint_{\partial \Sigma} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_o \left( \iint_{\Sigma} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \epsilon_o \frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \right) \quad 1.8$$



Σχήμα 5: Τέταρτος νόμος του Maxwell, ©university of iowa

Οι εξισώσεις περιγράφουν την επαγωγή του μαγνητικού πεδίου εξ αιτίας 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 υπάρχει. 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 [4].

## Μαγνητική υστέρηση

Η μαγνητική υστέρηση είναι ένα φαινόμενο που παρουσιάζεται στα φερρομαγνητικά υλικά, ενώ παρέχει ουσιώδεις πληροφορίες προς το χαρακτηρισμό τους. Ως φαινόμενο λαμβάνει χώρα σε μικροσκοπικές διαστάσεις και για αυτό προς τη φυσική ερμηνεία του καθίσταται απαραίτητη η χρήση όρων, όπως η μαγνητική περιοχή (domain) και το μαγνητικό τοίχωμα (domain wall). Η περιγραφή του απλοποιείται στη κατανόηση, εφόσον γίνεται σε συνδυασμό με τη παράθεση ενός τυπικού διαγράμματος B-H (πυκνότητας μαγνητικής ροής - έντασης μαγνητικού πεδίου) στο οποίο φαίνεται τόσο η καμπύλη υστέρησης, όσο και η καμπύλη μαγνήτισης. Στο σχ.6 είναι σημειωμένες με  $a-f$  κάποιες κρίσιμες καταστάσεις [5].

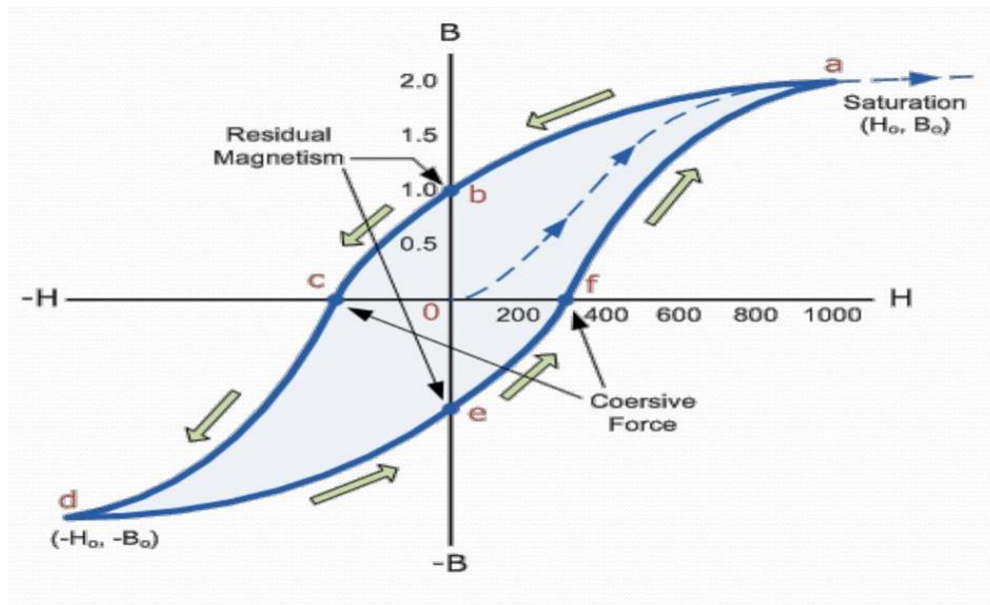
Η καμπύλη μαγνήτισης φαίνεται στο σχήμα ως το διακεκομμένο καμπυλόγραμμο τμήμα 0-a. Ένα φερρομαγνητικό υλικό ακόμα και σε περίπτωση, όπου δεν υπάρχει κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο μπορεί να έχει κάποια παραμένουσα μαγνήτιση. Στη περίπτωση όπου για μηδενικό πεδίο δεν υπάρχει παραμένουσα μαγνήτιση, τότε αναφερόμαστε σε αυτή τη κατάσταση ως πλήρη απομαγνήτιση.

Η καμπύλη μαγνήτισης δείχνει τις μεταβολές της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο υλικό ξεκινώντας από τη κατάσταση πλήρους απομαγνήτισης (κατάσταση 0) ως τη κατάσταση κατά την οποία η πυκνότητα μαγνητικής ροής έχει φτάσει σε κορεσμό (κατάσταση a). Όταν συμβεί αυτό, το φερρομαγνητικό υλικό έχει μαγνητιστεί σχεδόν στο έπακρον και για μεγάλες αυξήσεις του μαγνητικού πεδίου παρατηρούνται πολύ μικρές μεταβολές της πυκνότητας μαγνητικής ροής. Το πρώτο βήμα για τη λήψη της καμπύλης μαγνήτισης είναι, με κατάλληλη μέθοδο, να έρθει το υλικό στο οποίο αναφέρεται σε κατάσταση πλήρους απομαγνήτισης, καθώς πολύ σπάνια βρίσκεται από μόνο του σε αυτή τη κατάσταση. Το επόμενο και τελικό βήμα είναι η επιβολή σταδιακά αυξανόμενου μαγνητικού πεδίου, ωσότου φτάσει σε κατάσταση κορεσμού, λαμβάνοντας κάθε φορά τις τιμές πυκνότητας μαγνητικής ροής που αντιστοιχούν σε αυτό [5].

Η ανάλυση της καμπύλης υστέρησης ξεκινάει από το κατάσταση  $a$ , όπου έχουμε πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B_s$  και γίνεται για εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο και γίνεται για εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο σταθερής συχνότητας και σταθερού πλάτους ταλάντωσης, που αντιστοιχεί στη πυκνότητα μαγνητικής ροής κορεσμού [5].

Η τιμή του μαγνητικού πεδίου μειώνεται σταδιακά με σταθερό ρυθμό, μέχρι να μηδενιστεί (κατάσταση  $b$ ). Στη περίπτωση αυτή το φερρομαγνητικό υλικό δεν επιστρέφει στη κατάσταση πλήρους απομαγνήτισης, αλλά υπάρχει παραμένουσα μαγνήτιση, που φαίνεται στο σχήμα ως  $B_r$ .

Εφόσον, το μαγνητικό πεδίο αρχίζει να αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό, αλλά προς την αντίθετη κατεύθυνση πλέον, η πυκνότητα μαγνητικής ροής μειώνεται μέχρι το μηδενισμό της (κατάσταση  $c$ ). Η ένταση του μαγνητικού πεδίου που απαιτείται να επιβληθεί προς το μηδενισμό της πυκνότητας μαγνητικής ροής είναι ένα μέγεθος γνωστό ως συνεκτικό πεδίο  $H_c$  και είναι σημειωμένο στο σχήμα 6 [5].



Σχήμα 6: Μαγνητική καμπύλη υστέρησης, ©Ankit Makwana

Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι να φτάσει στη μέγιστη τιμή του (κατάσταση d). Στη μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου το φερρομαγνητικό υλικό βρίσκεται πάλι σε κορεσμό με πυκνότητα μαγνητικής ροής κορεσμού ίδιου μέτρου και αντίθετης κατεύθυνσης σε σχέση με τη πυκνότητα μαγνητικής ροής της κατάστασης a.

Πλέον, η ένταση του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου αρχίζει να μειώνεται, μέχρι το μηδενισμό της (κατάσταση e). Στο φερρομαγνητικό υλικό υπάρχει πάλι παραμένουσα μαγνήτιση ίδιου μέτρου και αντίθετης φοράς με της κατάστασης b [5].

Το μαγνητικό πεδίο αρχίζει πλέον να αυξάνεται προς την ίδια κατεύθυνση με αυτή της κατάστασης a, ωστόσο φτάσει σε τιμή τέτοια ώστε η πυκνότητα μαγνητικής ροής να μηδενίζεται (κατάσταση f). Η ένταση του μαγνητικού πεδίου συνεχίζει να αυξάνεται, μέχρι να φτάσουμε στη κατάσταση a. Η καμπύλη υστέρησης διέπεται από αντισυμμετρία [5].

Μέσω της καμπύλης υστέρησης εισήχθησαν τα μεγέθη του συνεκτικού πεδίου  $H_c$ , της πυκνότητας μαγνητικής ροής κορεσμού  $B_s$  και της παραμένουσας μαγνήτισης  $B_r$ , τα οποία είναι καθοριστικά για το διαχωρισμό των φερρομαγνητικών υλικών σε σκληρά και μαλακά. Όσον αφορά τα σκληρά μαγνητικά υλικά, είναι συμφέρον να χαρακτηρίζονται από αυξημένο συνεκτικό πεδίο και αυξημένη παραμένουσα μαγνήτιση, γιατί έχουν ως αποτέλεσμα αυξημένη αποθηκευμένη ενέργεια, η οποία συσχετίζεται με το γινόμενο  $(B H)_{\max}$  [5].

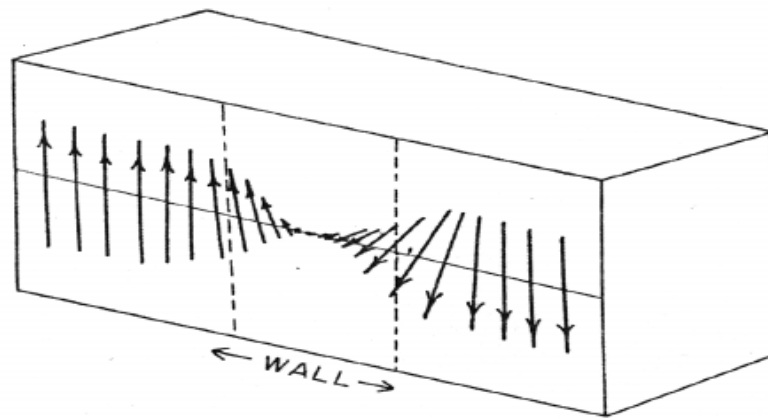


Η μαγνητική υστέρηση ως φαινόμενο δεν περιορίζεται σε περιπτώσεις, όπου η πυκνότητα μαγνητικής ροής φτάνει σε κορεσμό. Κάθε φορά η παραμένουσα μαγνήτιση και το συνεκτικό πεδίο εξαρτώνται από τη τιμή της μέγιστης έντασης του μαγνητικού πεδίου, ενώ τόσο η παραμένουσα μαγνήτιση, όσο και το συνεκτικό πεδίο λαμβάνουν μικρότερες τιμές, για μικρότερη μέγιστη ένταση του μαγνητικού πεδίου [5].

Ακόμα, το φαινόμενο υστέρησης συμβαίνει και μεταξύ έντασης μαγνητικού πεδίου και μαγνητικής πόλωσης, όπου έχουμε τη καμπύλη υστέρησης πόλωσης. Συνεπώς, υπάρχει και το συνεκτικό πεδίο για τη καμπύλη υστέρησης μεταξύ πόλωσης και μαγνητικού πεδίου, το οποίο ορίζεται ως η ένταση του μαγνητικού πεδίου που απαιτείται για το μηδενισμό της παραμένουσας πόλωσης, η οποία έχει μεγαλύτερη τιμή από τη τιμή του συνεκτικού πεδίου που αναφέρεται στη πυκνότητα της μαγνητικής ροής. Για την αποφυγή της σύγχυσης το συνεκτικό πεδίο αναφέρεται  $BH_c$  στη περίπτωση καμπύλης B-H και  $JH_c$  στη περίπτωση καμπύλης J-H (μαγνητική πόλωση – μαγνητικό πεδίο). Αυτό το πρόβλημα συνήθως δεν υφίσταται στη περίπτωση μαλακών μαγνητικών υλικών, όπου οι καμπύλες B-H και J-H είναι πρακτικά ίδιες, έτσι το συνεκτικό πεδίο αναφέρεται απλώς ως  $H_c$  [5].

## Μηχανισμοί μαγνήτισης

Η μαγνήτιση είναι ένα φαινόμενο που λαμβάνει χώρα σε μικροσκοπικές διαστάσεις. Η μικροσκοπική δομή των μαγνητικών υλικών είναι τέτοια ώστε να ελαχιστοποιείται η ελεύθερη ενέργεια προς το περιβάλλον. Συνεπώς, δημιουργούνται περιοχές, όπου το μαγνητικό πεδίο των στοιχειωδών μαγνητικών διπόλων της έχει ενιαία κατεύθυνση. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται στα αγγλικά domains. Η μεταβολή από περιοχή δε γίνεται ακαριαία, αλλά μεσολαβούν δομές που ονομάζονται μαγνητικά τοιχώματα (domain walls). Το τυπικό μέγεθος τοίχου περιοχής στον σίδηρο συνήθως δεν ξεπερνά τα 40 nm[6], ενώ ανεξαρτήτως υλικού συνήθως δεν ξεπερνά τα 10μm. Ο υπολογισμός των διαστάσεων γίνεται με βάση την αρχή ελαχιστοποίησης ενέργειας.



Σχήμα 7: Η μεταβολή της κατεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου κατά  $180^\circ$  εντός ενός τοίχου Bloch  $180^\circ$ , Mnyukh, Yuri. (2014). Magnetization of Ferromagnets. American Journal of Condensed Matter Physics. 2014. 78-85. 10.5923/j.ajcmp.20140404.03.

Οι τοίχοι μπορούν να διαχωρίζουν περιοχές με διαφορά φάσης  $180^\circ$ , όποτε ονομάζονται τοίχοι Bloch  $180^\circ$ , αλλά μπορούν να διαχωρίζουν και περιοχές με διαφορά φάσης  $90^\circ$ , με αυτήν να επηρεάζει ανάλογα το μήκος τους. Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου αλλάζει κατά το μήκος του τοίχου [6].

Οι έννοιες της περιοχής και του τοίχου περιοχής κατέχουν κυρίαρχο ρόλο στην επεξήγηση της μαγνήτισης και απομαγνήτισης ενός μαγνητικού υλικού. Η διαδικασία της μαγνήτισης διέπεται από δύο μηχανισμούς. Ο ένας είναι ο μηχανισμός της επαναδιάταξης των τοίχων περιοχών, που κυριαρχεί σε χαμηλές τιμές του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Καθώς η ένταση του μαγνητικού πεδίου αυξάνεται, οι περιοχές με κατεύθυνση μαγνητικού πεδίου παραπλήσια του επιβαλλόμενου αυξάνουν τις διαστάσεις τους εις βάρος των γειτονικών τους περιοχών. Το φαινόμενο αυτό κυριαρχεί, μέχρι τη μεγιστοποίηση της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού [6]. Σημαντικό υποπροϊόν του φαινομένου της αναδιάταξης είναι ο επονομαζόμενος *θόρυβος Barkhausen*. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις απότομες αλλαγές της θέσης των τοίχων περιοχών, με αποτέλεσμα μια αντίστοιχη απότομη μεταβολή της μαγνητικής ροής εντός του υλικού. Η κάθε απότομη αλλαγή μπορεί να ανιχνευτεί ως ηλεκτρικό σήμα, ενώ εξαρτάται από τη μικροδομή και την υπολειπόμενη μηχανική τάση του υλικού [7].

Ο δεύτερος μηχανισμός επικρατεί μετά τη μεγιστοποίηση της διαπερατότητας του υλικού. Ο προσανατολισμός του μαγνητικού πεδίου των περιοχών στρέφεται ώστε να ευθυγραμμιστεί με το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Οι αυξητικές μεταβολές της μαγνητικής ροής του υλικού είναι κατά πολύ μικρότερες από τις μεταβολές που συμβαίνουν στη περιοχή όπου επικρατεί ο πρώτος μηχανισμός, ενώ γίνονται σταδιακά ακόμα μικρότερες. Η πυκνότητα μαγνητικής ροής θα φτάσει στον κορεσμό. Όταν η τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου αρχίζει να μειώνεται, επικρατεί η διαδικασία που ονομάζεται *nucleation process* στην οποία δημιουργούνται νέες μαγνητικές περιοχές [6].

## Εξάρτηση της καμπύλης υστέρησης από τη συχνότητα

Η καμπύλη μαγνήτισης για δεδομένο φερρομαγνητικό δοκίμιο διαφέρει ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας, όπως φαίνεται και στο σχ.8. Παρατηρούμε, ότι η περικλειόμενη, από τη καμπύλη, περιοχή αυξάνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας. Το γεγονός αυτό δεν είναι τυχαίο, αλλά έχει αποδειχθεί, ότι οφείλεται στις αυξημένες απώλειες ενεργείας, οι οποίες αντιπροσωπεύονται από την αύξηση της περικλειόμενης περιοχής [5].

Για να ορίσουμε τις απώλειες ενέργειας ανά κύκλο λειτουργίας, είναι απαραίτητη η χρήση ενός φυσικού μεγέθους που ονομάζεται διάνυσμα Poynting και ορίζεται ως:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad 1.9$$

όπου:

$\vec{S}$  το διάνυσμα Poynting

$\vec{E}$  το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου

$\vec{H}$  το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου

Η στιγμιαία πυκνότητα ενέργειας που προσφέρεται σε όγκο υλικού έχει βρεθεί ως:

$$p = \int_V \sigma E^2 dV + \int_A \vec{S} d\vec{A} \quad 1.10$$

όπου:

p η στιγμιαία πυκνότητα ενεργείας

$\sigma$  η ειδική αγωγιμότητα

E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου

dV η στοιχειώδης διάφορα δυναμικού

S το διάνυσμα Poynting

dA το στοιχειώδες μαγνητικό δυναμικό

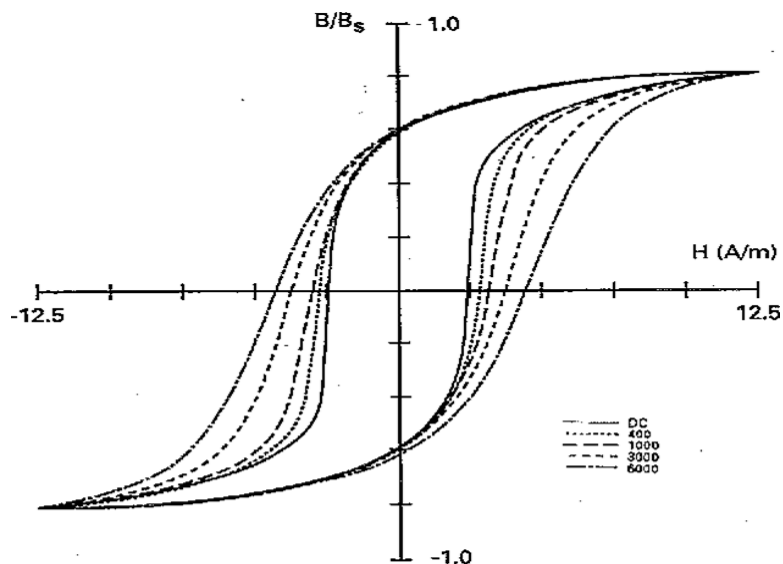
Ο πρώτος όρος της στιγμιαίας πυκνότητας ισχύος συσχετίζεται με τη διαχεόμενη ηλεκτρική ενέργεια, ενώ ο δεύτερος με τη ροή ενέργειας προς την επιφάνεια A. Για την ανάλυση απωλειών ενέργειας σε ηλεκτρικό χάλυβα λαμβάνεται υπόψιν συνήθως μόνο ο δεύτερος όρος και υπολογίζεται ανά κύκλο λειτουργίας ως:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \int_A \vec{S} d\vec{A} dt \quad 1.11$$

όπου:

- P     απώλειες ενέργειας
- T     διάρκεια κύκλου λειτουργίας
- S     διάνυσμα Poynting
- A     η επιφάνεια προς την οποία γίνεται ροή ενέργειας

Οι απώλειες ενέργειας ανά κύκλο λειτουργίας μπορούν να αναλυθούν ως άθροισμα τριών παραγόντων. Ο πρώτος παράγοντας είναι στατικές απώλειες ενέργειας, που οφείλονται στην απαραίτητη ενέργεια, ώστε να μαγνητίσουμε και να απομαγνητίσουμε το δοκίμιο και είναι παρών ανεξάρτητα της συχνότητας λειτουργίας. Ο δεύτερος παράγοντας οφείλεται στα δινορεύματα και η επίδραση του γίνεται αντιληπτή, καθώς αυξάνεται η συχνότητα. Το κλασσικό μοντέλο που εξηγούσε τις απώλειες ενέργειας περιλάμβανε μόνο τους δύο παράγοντες, όμως στη πράξη βρέθηκε ότι οι απώλειες ενέργειας που προέβλεπε το μοντέλο απέκλιναν με αυξανόμενο ρυθμό καθώς αυξανόταν η συχνότητα από τις προβλεπόμενες.



Σχήμα 8: Εξάρτηση καμπύλης υστέρησης από τη συχνότητα

Jiles, David. "Frequency dependence of hysteresis curves in conducting magnetic materials." *Journal of Applied Physics* 76 (1994): 5849-5855.

Συνεπώς, το μοντέλο απωλειών ενέργειας διορθώθηκε, ώστε να περιλαμβάνει το τρίτο όρο απωλειών ενέργειας, που ονομάζονται πλεονάζουσες απώλειες (excess losses). Οι αυξημένες απώλειες αποδίδονται σε δυναμικά φαινόμενα, λόγω της κίνησης των μαγνητικών περιοχών (domain walls). Οι απώλειες ενέργειας μπορούν να γραφούν τελικά ως: [8]

$$P_{loss} = P_{hysteresis} + P_{eddy} + P_{excess} \quad 1.12$$

όπου:

|                  |                               |
|------------------|-------------------------------|
| $P_{loss}$       | οι απώλειες ενέργειας         |
| $P_{hysteresis}$ | οι απώλειες υστέρησης         |
| $P_{eddy}$       | οι απώλειες λόγω δινορευμάτων |
| $P_{excess}$     | οι πλεονάζουσες απώλειες      |

Η κάθε συνιστώσα εξαρτάται από τη συχνότητα με διαφορετικό τρόπο. Οι στατικές απώλειες υπολογίζονται ως:

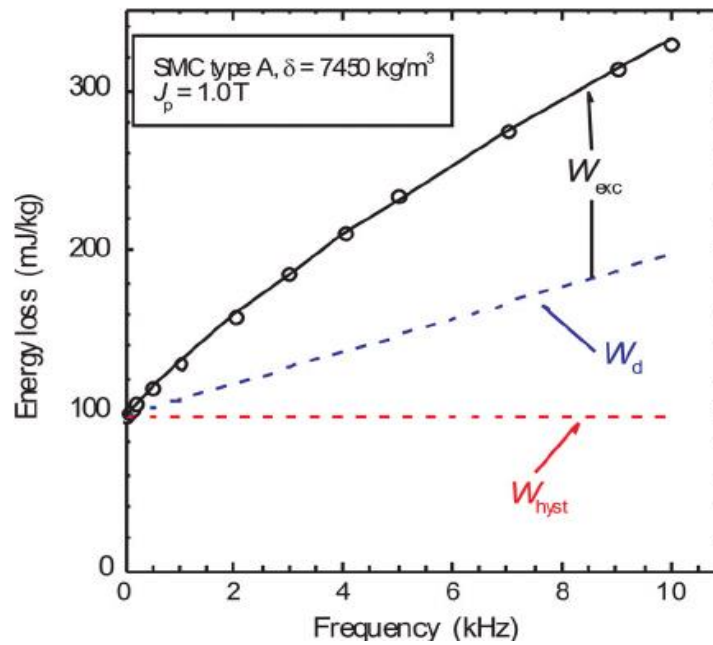
$$P_H = C_o B_m^2 f \quad 1.13$$

όπου :

$C_o$  τιμή χωρητικότητας πυκνωτή

$B_m$  πυκνότητα μαγνητικής ροής

$f$  η συχνότητα λειτουργίας



Σχήμα 9: Η μεταβολή κάθε συνιστώσας απώλειας ενέργειας ανάλογα με τη συχνότητα

de la Barrière, Olivier & Appino, Carlo & Fiorillo, Fausto & Ragusa, Carlo & Ben Ahmed, H. & Gabsi, Mohamed & Mazaleyrat, F. & Lobue, M.. (2011). Loss separation in soft magnetic composites. Journal of Applied Physics. 109.

Μεταβαίνοντας στο προσδιορισμό απωλειών ενέργειας λόγω δινορευμάτων έχουμε :

$$P_{eddy} = \frac{\pi^2 t^2}{6\rho} (B_m f)^2 \quad 1.14$$

όπου :

$t$  πάχος δοκιμίου

$\rho$  ειδική αντίσταση δοκιμίου

$B_m$  πυκνότητα μαγνητικής ροής

Τέλος, οι πλεονάζουσες απώλειες ορίζονται ως :

$$P_{excess} = C_1 B_m f^2 \quad 1.15$$

όπου :

$C_1$  τιμή χωρητικότητας πυκνωτή

Ο διαχωρισμός των συνιστωσών στις οποίες οφείλονται οι απώλειες, μπορεί να γίνει με βάση το διάγραμμα  $P \propto f$ , όπως φαίνεται στο σχ. 9 [8].



## Πηγές μαγνητικού πεδίου διέγερσης

Συνήθως, επιθυμούμε το μαγνητικό πεδίο διέγερσης να είναι ομοιόμορφο. Δύο διατάξεις που χρησιμοποιούνται ευρύτατα για δημιουργία ομοιόμορφου μαγνητικού πεδίου είναι τα πηνία Helmholtz και το σωληνοειδές πηνίο. Το μαγνητικό πεδίο που προκαλεί η κάθε διάταξη θα δοθεί αναλυτικά στη συνέχεια [9]. Προς το σκοπό αυτό, θα υπολογίσουμε αρχικά το μαγνητικό πεδίο ενός δακτυλίου, το οποίο θα αποτελέσει "σκαλοπάτι" προς τον υπολογισμό του πεδίου ενός μονοστρωματικού πηνίου, ώστε τελικά να υπολογιστεί το πεδίο για τη κάθε διάταξη [9].

Τα προαναφερθέντα μαγνητικά πεδία θα βρεθούν ως εφαρμογή του νόμου Biot-Savart, ο οποίος είναι ισοδύναμος του νόμου Ampere. Ο νόμος Biot-Savart υπολογίζει το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται σε στοιχειώδες ρευματοφόρο μήκος σε μια δεδομένη απόσταση από αυτό, [9] ως:

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi} I \frac{d\vec{l} \times \vec{v}}{a^2} \quad 1.16$$

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} I \int_c \frac{d\vec{l} \times \vec{v}}{a} \quad 1.17$$

όπου:

- $\vec{H}$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου
- $I$  η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το στοιχειώδες μήκος
- $d\vec{l}$  το στοιχειώδες μήκος
- $a$  η απόσταση από το στοιχειώδες μήκος του μετρούμενης έντασης
- $\vec{v}$  το μοναδιαίο διάνυσμα με κατεύθυνση από το στοιχειώδες μήκος προς το σημείο που μετράμε την ένταση

Αντικαθιστώντας το μέτρο του εξωτερικού γινομένου στο τύπο 1.16 έχουμε :

$$dH = \frac{I}{4\pi R^3} r_{\delta}^2 dl \quad 1.18$$

όπου:

$dH$  ένταση μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί το στοιχειώδες μήκος  
 $I$  ένταση του ρεύματος  
 $r_{\delta}$  ακτίνα του δακτυλίου  
 $R$  η απόσταση από το στοιχειώδες μήκος  
 $dl$  το στοιχειώδες μήκος

Τελικά, το μαγνητικό πεδίο προκύπτει με ολοκλήρωση του στοιχειώδους μαγνητικού πεδίου κατά μήκος του δακτυλίου ως:

$$H = \frac{1}{2} I \frac{r_{\delta}^2}{\sqrt{(r_{\delta}^2 + x^2)}^3} \quad 1.19$$

όπου:

$H$  ένταση μαγνητικού πεδίου  
 $r_{\delta}$  ακτίνα δακτυλίου  
 $x$  η απόσταση από το κέντρο του δακτυλίου

Ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου δακτυλίου μας επιτρέπει τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου πηνίου, με ορισμένο αριθμό σπειρών μιας στρώσης και με μήκος πολύ μεγαλύτερο από την ακτίνα του, το οποίο συνιστά μια υποπερίπτωση σωληνοειδούς πηνίου.

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο μπορεί να βρεθεί με τη βοήθεια της αρχής της υπέρθεσης, ως άθροισμα του μαγνητικού πεδίου της κάθε σπείρας, το μαγνητικό πεδίο της οποίας θεωρείτε στοιχειώδες και ισοδύναμο με του δακτυλίου [9]. Για τον κάθε δακτύλιο έχουμε:

$$H_{\delta} = \frac{1}{2} I_{\delta} \frac{r_{\delta}^2}{R^3} \quad 1.20$$

όπου:

$H_{\delta}$  το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο λόγω δακτυλίου

$I_{\delta}$  το ρεύμα που διαρρέει το δακτύλιο

$R$  η απόσταση από σημείο του δακτυλίου ως το σημείο στο οποίο μετράμε το πεδίο

Η σχέση που συνδέει το ρεύμα του στοιχειώδους δακτυλίου και το ρεύμα του πηνίου είναι η εξής:

$$I_{\delta} = \left( n \frac{dl}{2L} \right) I \quad 1.21$$

όπου:

$I$  το ρεύμα του πηνίου

$I_{\delta}$  το ρεύμα του δακτυλίου

$n$  ο αριθμός σπειρών

$2L$  το μήκος πηνίου

Επομένως, το στοιχειώδες μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί η κάθε σπείρα του πηνίου, αντικαθιστώντας το ρεύμα του δακτυλίου στον τύπο του μαγνητικού πεδίου του δακτυλίου εκφράζεται ως:

$$dH = \frac{nI}{4L} \frac{r_{\delta}^2}{R^3} dl \quad 1.22$$

Τελικά, με κατάλληλη ολοκλήρωση του μαγνητικού πεδίου στοιχειώδους δακτυλίου το μαγνητικό πεδίο προκύπτει:

$$H = \frac{nI}{4L} \left[ \frac{L+x}{\sqrt{r_\delta^2 + (L+x)^2}} + \frac{L-x}{\sqrt{r_\delta^2 + (L-x)^2}} \right] \quad 1.23$$

όπου:

H το μαγνητικό πεδίο του πηνίου

x η απόσταση από το γεωμετρικό κέντρο του πηνίου

## Σωληνοειδές πηνίο

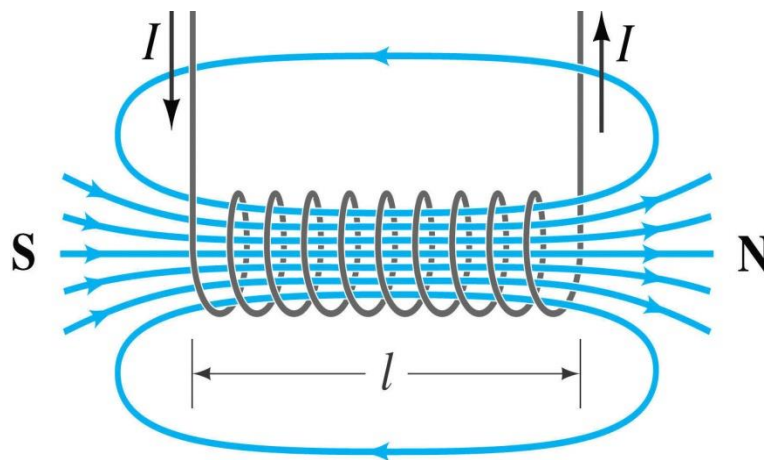
Το σωληνοειδές πηνίο χρησιμοποιείται συχνά ως πηγή μαγνητικού πεδίου. Διατάξεις στις οποίες συνήθως χρησιμοποιείται είναι διατάξεις έλεγχου με φερρομαγνητικό πυρήνα, αλλά και σε διατάξεις όπως τα ρελέ [9].

Στη γενική περίπτωση το σωληνοειδές πηνίο είναι πολυστρωματικό και το μαγνητικό του πεδίο υπολογίζεται κατά επέκταση του μαγνητικού πεδίου μονοστρωματικού σωληνοειδούς ως:

$$H = \frac{nl}{4L(r_2 - r_1)} \left[ (L + x) \ln \left( \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + (L + x)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (L + x)^2}} \right) + (L - x) \ln \left( \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + (L - x)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (L - x)^2}} \right) \right] \quad 1.24$$

όπου:

- H το μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου
- $2r_1$  η εσωτερική διάμετρος του πηνίου
- $2r_2$  η εξωτερική διάμετρος του πηνίου
- $2L$  το μήκος του σωληνοειδούς πηνίου



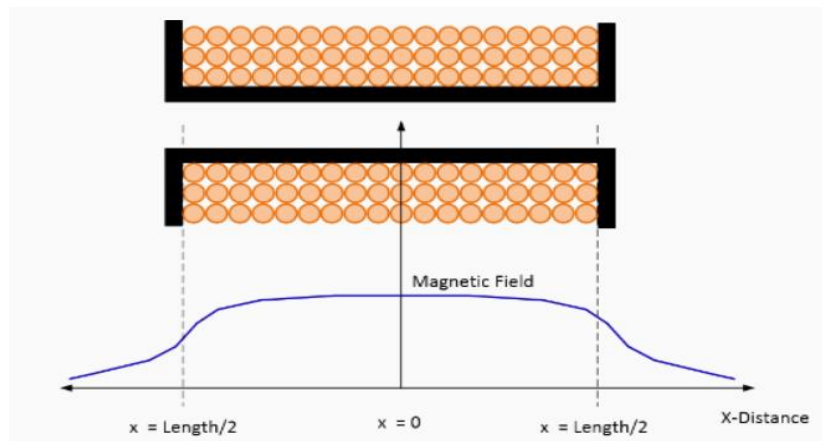
Σχήμα 10: Μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό σωληνοειδούς πηνίου

<https://www.miniphysics.com/ss-magnetic-field-due-to-current-in-a-solenoid.htm>

Το μαγνητικό πεδίο μεγιστοποιείται στο κέντρο του σωληνοειδούς, αρά η μεγίστη τιμή του προκύπτει ως:

$$H_{max} = H(x = 0) = \frac{nI}{2L} \quad 1.25$$

Το διάγραμμα εξάρτησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την απόσταση από το κέντρο του πηνίου φαίνεται στο σχ.11. Η σχηματική απεικόνιση της συνάρτησης του κανονικοποιημένου μαγνητικού πεδίου είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, αφού καθιστά άμεσα αναγνωρίσιμο το γεγονός της αργής χωρικής μεταβολής του μαγνητικού πεδίου σε περιοχή κοντά στο κέντρο του. Εκ του διαγράμματος γίνεται επίσης οπτικά αντιληπτό ότι υπάρχει έντονη πτώση της τιμής του μαγνητικού πεδίου σε περιοχή κοντά στα άκρα του [9].



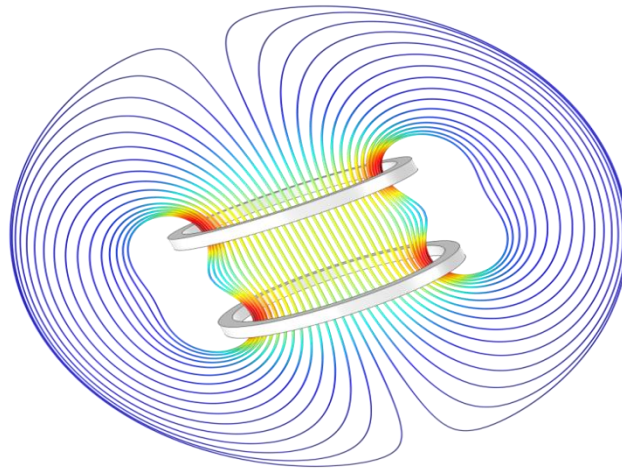
Σχήμα 11: Μεταβολή της έντασης του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος του σωληνοειδούς πηνίου

<https://www.accelinstruments.com/Magnetic/Magnetic-field-calculator.html>

Αν η απότομη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου κοντά στα άκρα του πηνίου καθίσταται πρόβλημα στη σωστή λειτουργία της διάταξης, τότε υπάρχουν μέθοδοι να αποφευχθεί, χωρίς να αλλάξει το μήκος του πηνίου. Ένας τρόπος να γίνει αυτό είναι με το πηνίο να έχει κάποιες επιπλέον στρώσεις κοντά στα άκρα, ενώ ένας άλλος είναι με μια ομαλή αυξητική μεταβολή των στρώσεων από το κέντρο προς τα άκρα [9].

## Σύστημα πηνίων Helmholtz

Μια εναλλακτική υλοποίηση πηγής ομοιόμορφου μαγνητικού πεδίου είναι τα πηνία Helmholtz. Η διάταξη χρησιμοποιεί δύο πανομοιότυπα σωληνοειδή πηνία σε μια καθορισμένη απόσταση μεταξύ τους. Το συνολικό μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται, με χρήση της αρχής υπέρθεσης, εκ του μαγνητικού πεδίου του καθενός πηνίου [5].



Σχήμα 12: Μαγνητικό πεδίο πηνίων Helmholtz

[www.comsol.com/blogs/wp-content/uploads/2014/04/Simulation-of-a-parallel-pair-of-identical-circular-coils.png](http://www.comsol.com/blogs/wp-content/uploads/2014/04/Simulation-of-a-parallel-pair-of-identical-circular-coils.png)

Στην ειδική περίπτωση, όπου το κάθε σωληνοειδές πηνίο είναι μονοστρωματικό, το μαγνητικό πεδίο μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$H = H_1 + H_2 = \frac{nlr^2}{2} \left( [r^2 + (\frac{L}{2} + x)^2]^{-\frac{3}{2}} + [r^2 + (\frac{L}{2} - x)^2]^{-\frac{3}{2}} \right) \quad 1.26$$

όπου:

H το συνολικό μαγνητικό πεδίο

H<sub>1</sub> η συνεισφορά στο μαγνητικό πεδίου του πρώτου πηνίου

H<sub>2</sub> η συνεισφορά στο μαγνητικό πεδίου του δεύτερου πηνίου

r η ακτίνα του κάθε πηνίου

L η απόσταση μεταξύ των πηνίων

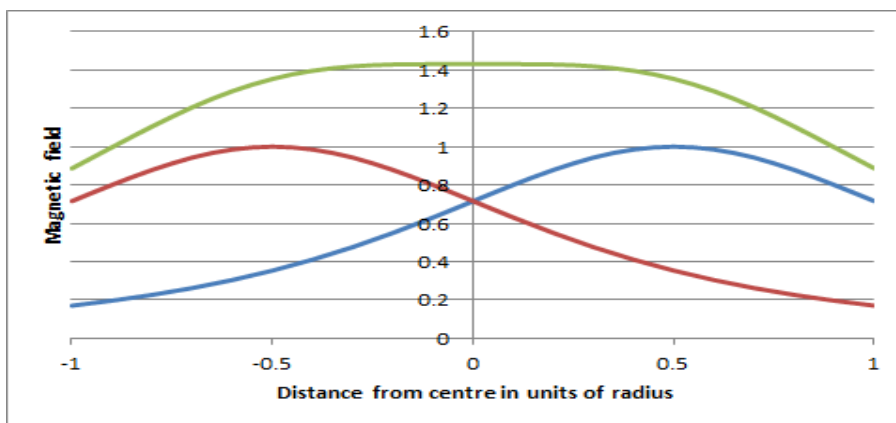
x η απόσταση του σημείου από το γεωμετρικό κέντρο της διάταξης

Η διάταξη έχει μελετηθεί εκτενώς και έχει βρεθεί ότι στη περίπτωση των μονοστρωματικών πηνίων η ομοιομορφία του μαγνητικού πεδίου επιτυγχάνεται με βέλτιστο τρόπο, όταν η απόσταση μεταξύ των πηνίων ισούται με την ακτίνα τους, δηλαδή  $r=L$ [5].

Το σχήμα 13 απεικονίζει τη συνεισφορά του κάθε πηνίου στο συνολικό πεδίο και το συνολικό πεδίο, ενώ φαίνεται ότι το μαγνητικό πεδίο λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του στο κέντρο του συστήματος. Η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου υπολογίζεται ως:

$$H_{max} = nlr^2(1,25)^{-\frac{3}{2}}r^{-3} = 0,7155 \frac{nl}{r} \quad 1.27$$

Στο διάγραμμα φαίνεται η πολύ μικρή μεταβολή του μαγνητικού πεδίου στη περιοχή ανάμεσα στα πηνία.



Σχήμα 13: Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου πηνίων Helmholtz σε σχέση με την απόσταση από το κέντρο

<https://homepages.abdn.ac.uk/j.s.reid/pages/Maxwell/Legacy/MaxCoil.html>

Για τη γενική περίπτωση, όπου τα σωληνοειδή πηνία είναι πολυστρωματικά, το μαγνητικό πεδίο μπορεί να υπολογιστεί πάλι με την αρχή της υπέρθεσης κατά ανάλογο τρόπο. Σε αυτή τη περίπτωση συμπεραίνεται ότι, όταν ικανοποιείται η συνθήκη  $r_{\mu}=L_{\mu}$ , όπου  $r_{\mu}$  η μέση ακτίνα και  $L_{\mu}$  το μέσο μήκος, τότε η ομοιομορφία του μαγνητικού πεδίου βελτιστοποιείται.



## Μαγνητικός θόρυβος

Ο μαγνητικός θόρυβος είναι στην ουσία το άθροισμα διαφόρων μαγνητικών πεδίων και όπως κάθε μορφή θορύβου είναι στοχαστικό φαινόμενο. Επομένως, δε μπορούμε να προβλέψουμε την ακριβή τιμή του σε δεδομένη χρονική στιγμή [5].

Ως φαινόμενο ο θόρυβος είναι ιδιαίτερα κρίσιμος, επιδρώντας αρνητικά, στη σωστή λειτουργία μιας διάταξης μέτρησης, για αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και να περιορίζεται κατά το δυνατόν. Ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος, εφόσον βρισκόμαστε σε βιομηχανικό ή αστικό περιβάλλον, οφείλεται σε δύο φαινόμενα. Το ένα οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο της Γης, το οποίο εξαρτάται από τις γεωγραφικές συντεταγμένες. Εν προκειμένω, στην Ευρώπη κυμαίνεται γύρω από τα 50μΤ. Το άλλο φαινόμενο οφείλεται στη χρήση ηλεκτρικών και ηλεκτρομαγνητικών συσκευών καθώς και του ρεύματος τροφοδοσίας [5].

Έτσι σε βιομηχανικές περιοχές, οι οποίες σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής τροφοδοσίας είναι μεσαίοι καταναλωτές και συνεπώς το ρεύμα που χρησιμοποιούν είναι υψηλότερης έντασης σε σχέση με αστικές περιοχές, η κύρια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου οφείλεται στο ρεύμα και επομένως έχει συχνότητα 50Hz ή 60Hz ανάλογα τη συχνότητα του ρεύματος. Παρά ταύτα, στη γενική περίπτωση ο θόρυβος μπορεί να περιλαμβάνει μεγάλο φάσμα συχνοτήτων από μηδενική συχνότητα (σταθερός ως προς τη συχνότητα) ως και πολύ υψηλές συχνότητες της τάξης των GHz [5].

Για τη καταπολέμηση του θορύβου χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές. Μια εξ αυτών είναι η λεγόμενη μαγνητική θωράκιση (magnetic shielding). Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού που χρησιμοποιείται για τη πραγματοποίηση της. Ο σωστός σχεδιασμός αυτής της μεθόδου θεωρείται σύνθετη διαδικασία [5].

## Ανισοτροπία λόγω σχήματος

Κάθε φορά που ένα φερρομαγνητικό υλικό μαγνητίζεται συμπεριφέρεται ως μαγνήτης με το δικό του μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο του φερρομαγνητικού υλικού αντιτίθεται στο εξωτερικό πεδίο και για αυτό αναφέρεται ως πεδίο απομαγνήτισης. Το πεδίο απομαγνήτισης είναι δύσκολο να υπολογισθεί, καθώς είναι μη ομοιόμορφο και εξαρτάται από το σχήμα του δοκιμίου αλλά γράφεται ως: [5]

$$H_d = N_d M \quad 1.28$$

όπου:

$H_d$  πεδίο απομαγνήτισης

$N_d$  παράγοντας απομαγνήτισης

$M$  μαγνήτιση

Επομένως, το συνολικό μαγνητικό πεδίο είναι μικρότερης έντασης σε σχέση με το αναμενόμενο και μη ομοιόμορφο. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ανισοτροπία λόγω σχήματος. Το συνολικό πεδίο υπολογίζεται ως: [5]

$$H_{internal} = H - N_d M \quad 1.29$$

όπου:

$H_{internal}$  το εσωτερικό μαγνητικό πεδίο

$H$  το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο

$N_d$  ο παράγοντας απομαγνήτισης

$M$  η μαγνήτιση

Η μόνη εξαίρεση, κατά την οποία το πεδίο απομαγνήτισης είναι ομοιόμορφο, είναι η περίπτωση ελλειψοειδούς σχήματος δοκιμίου. Το αλλοιωμένο μαγνητικό πεδίο οδηγεί σε διαφορετική μετρούμενη μαγνητική διαπερατότητα. Η μετρούμενη μαγνητική διαπερατότητα, που ονομάζεται φαινόμενη μαγνητική διαπερατότητα υπολογίζεται ως: [5]

$$\mu_c = \frac{\mu_r}{1 + N_d(\mu_r - 1)} \quad 1.30$$

όπου:

$\mu_c$  η φαινόμενη μαγνητική διαπερατότητα

$\mu_r$  η σχετική μαγνητική διαπερατότητα

$N_d$  ο παράγοντας απομαγνήτισης

Άμεση συνεπεία του τύπου της φαινόμενης μαγνητικής διαπερατότητας είναι ότι ενώ εξαρτάται τόσο από τη πραγματική μαγνητική διαπερατότητα, όσο και από το σχήμα, για πολύ υψηλές τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας εξαρτάται πρακτικά μόνο από το σχήμα του:

$$\mu_c = \frac{1}{N_d} \quad 1.31$$

όπου:

$\mu_c$  η φαινόμενη μαγνητική διαπερατότητα

$N_d$  ο παράγοντας απομαγνήτισης

Επομένως, σε υλικά υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας η επίδραση του φαινόμενου ανισορροπίας σχήματος γίνεται εντονότερη. Το φαινόμενο της μαγνητικής ανισορροπίας επηρεάζει ακόμα τη καμπύλη μαγνήτισης και τη καμπύλη υστέρησης, αφού αλλοιώνει το μαγνητικό πεδίο από το οποίο εξαρτώνται [5].

## Προσδιορισμός Κατανομής Μαγνητικού Πεδίου

Ο προσδιορισμός κατανομής μαγνητικού πεδίου στη περιοχή του δοκιμίου είναι ένα πρόβλημα που καλούνται συχνά να λύσουν οι επιστήμονες, καθώς από την επίλυση του απορρέουν χρήσιμα συμπεράσματα. Το εκάστοτε μαγνητικό πεδίο μπορεί να είναι είτε στατικό είτε μεταβαλλόμενο ανάλογα τη διάταξη, επομένως το συνολικό πεδίο μπορεί να είναι είτε μαγνητοστατικό είτε ηλεκτρομαγνητικό αντίστοιχα [5].

Το πρόβλημα του προσδιορισμού χαρακτηρίζεται και ως αντίστροφο πρόβλημα, όπου ως δεδομένα έχουμε τη πηγή, τις συνοριακές συνθήκες και τις παραμέτρους του υλικού. Η αναλυτική λύση του προβλήματος δε βρίσκει πρόσφορο έδαφος, καθώς το πρόβλημα χαρακτηρίζεται από αυξημένη πολυπλοκότητα, λόγω παραγόντων, όπως η υστέρηση και η μαγνητική ανισοτροπία[5].

Αντιθέτως, το μαγνητικό πεδίο αποτιμάται με αριθμητικές μεθόδους, οι οποίες περατώνονται με τη βοήθεια υπολογιστικών προγραμμάτων. Οι αριθμητικές μέθοδοι καθίστανται τη σύγχρονη εποχή δημοφιλείς, λόγω της πληθώρας προγραμμάτων που διατίθενται, τόσο επαγγελματικών, όσο και ανοιχτού κώδικα. Οι αριθμητικές μέθοδοι επιλύουν τις εξισώσεις Maxwell χρησιμοποιώντας αντί του μαγνητικού πεδίου και της πυκνότητας μαγνητικής ροής, το μαγνητικό δυναμικό, που ορίζεται ως:

$$\vec{B} = \nabla \chi \vec{A} \quad 1.32$$

όπου:

$\vec{B}$  το διάνυσμα της πυκνότητας μαγνητικής ροής

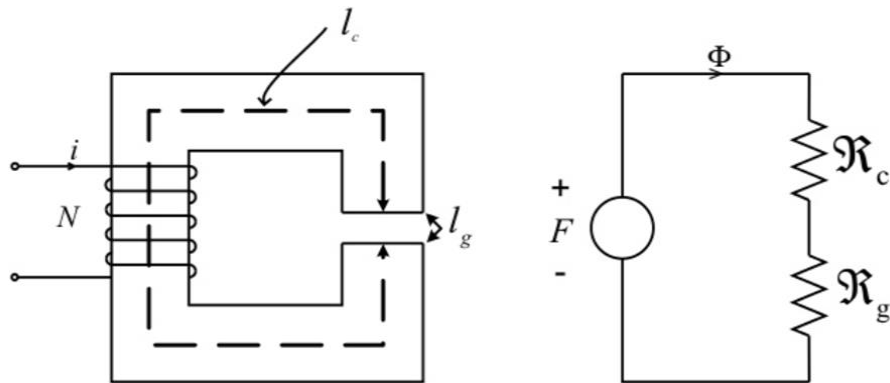
$\vec{A}$  το διανυσματικό δυναμικό

Η χρήση του μαγνητικού δυναμικού  $A$  απλοποιεί σημαντικά τη διαδικασία επίλυσης. Σε πρώτη φάση εισάγονται τα δεδομένα του προβλήματος, η γεωμετρία, η μαγνητική διαπερατότητα του δοκιμίου, οι συνοριακές συνθήκες και άλλα δεδομένα. Σε δεύτερη φάση, ο χώρος στον οποίο θέλουμε να προσδιορίσουμε τη μαγνητική ροή διαχωρίζεται σε στοιχειώδη χωρία δισδιάστατα ή τρισδιάστατα ανάλογα με τον τύπο του προβλήματος. Η αύξηση του αριθμού των στοιχειωδών χωρίων (meshes), με την αντίστοιχη μείωση των διαστάσεων τους, οδηγεί σε αυξημένη ακρίβεια της λύσης, με κόστος όμως την αυξημένη διάρκεια της επίλυσης του προβλήματος. Ακολουθεί η επίλυση του προβλήματος ανά στοιχειώδες χωρίο με χρήση αριθμητικών επαναληπτικών αλγορίθμων. Τη χρήση επαναληπτικών μεθόδων επιβάλλει η μη γραμμική φύση του προβλήματος, που αποτρέπει τη χρήση της αρχής της υπέρθεσης. Επιπλέον, οι αλγόριθμοι είναι προσεγγιστικοί, αφού η λύση των εξισώσεων Maxwell για κάθε χωρίο απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ.

Τρεις τυπικές υπολογιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στο παραπάνω τελικό βήμα είναι η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (f.d.m), η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (f.e.m) και η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (b.e.m.). Μεταξύ των τριών η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (f.d.m.) είναι λιγότερο αποτελεσματική με αποτέλεσμα να εφαρμόζεται κυρίως σε μικρότερης πολυπλοκότητας προβλήματα. Αν συγκρίνουμε τις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και συνοριακών στοιχείων, η τελευταία υπερτερεί στην ευκολία με την οποία υπολογίζει το μαγνητικό πεδίο στην επιφάνεια που ισχύουν οι συνοριακές συνθήκες και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με περαιτέρω επεξεργασία (post-processing) των δεδομένων που προκύπτουν για τον καθορισμό του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του δοκιμίου. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (f.e.m.) υπερτερεί συνολικά στον υπολογισμό του πεδίου και για αυτό χρησιμοποιείται ευρύτατα. Στην πράξη οι αριθμητικές μέθοδοι συμφωνούν καλύτερα στη περίπτωση του μη προσανατολισμένου χάλυβα, αφού στη περίπτωση του προσανατολισμένου το μαγνητικό πεδίο επηρεάζεται από τη δομή του συσσωματώματος (grain).

## Μετρήσεις $H$ , $B$ σε φερρομαγνητικό δοκίμιο

Τα δύο πιο συχνά μετρούμενα μεγέθη, προκείμενου να εξάγουμε τα απαραίτητα συμπεράσματα (μέσω της έμμεσης συσχέτισης με φυσικό φαινόμενο) είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου και η πυκνότητα μαγνητικής ροής. Οι μετρήσεις των δύο μεγεθών δεν είναι πότε απολύτως ακριβείς, τόσο λόγω του θορύβου, όσο και άλλων φαινομένων. Επομένως, σε περιπτώσεις όπου τα φαινόμενα αυτά είναι γνωστά και εφόσον αυτό είναι εφικτό, οι εμπλεκόμενες διατάξεις είναι σχεδιασμένες ανάλογα προς τη καταστολή τους [5].



Σχήμα 14: Αναλογία μεταξύ ηλεκτρικού και μαγνητικού κυκλώματος, ©JocelynMurphy

Πολλές περιπτώσεις στις οποίες οι μαγνητικοί αισθητήρες βρίσκουν εφαρμογή, είναι αυτές στις οποίες χρειάζεται ο χαρακτηρισμός φερρομαγνητικού δοκιμίου. Τα φερρομαγνητικά δοκίμια μπορούν να έχουν διάφορα σχήματα, όπως σχήμα ράβδου, δακτυλίου ή λωρίδας. Ανά περίπτωση, κατά αναλογία με τα ηλεκτρικά κυκλώματα, όταν το δοκίμιο μαγνητίζεται, προκύπτει ένα μαγνητικό κύκλωμα (σχ. 14).

Το μαγνητικό κύκλωμα προκύπτει κατά αναλογία με το ηλεκτρικό, αντιστοιχώντας: το ρεύμα στη μαγνητική ροή, την ηλεκτρεγερτική πηγή στην μαγνητεγερτική πηγή και το υλικό και το υλικό εντός του οποίου ρέει η μαγνητική ροή ως αντίσταση. Το κύκλωμα θεωρείται κλειστό, εφόσον η μαγνητική ροή ακολουθεί μια συγκεκριμένη κλειστή διαδρομή, όπως στην περίπτωση της λωρίδας.

Γενικά, η περίπτωση του κλειστού μαγνητικού κυκλώματος θεωρείται πιο αξιόπιστη για ακριβέστερες μετρήσεις. Συνεπώς, ακόμα και σε περιπτώσεις, όπου έχουμε ανοιχτό κύκλωμα, εφόσον μπορούμε, το μετατρέπουμε σε κλειστό κύκλωμα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση της λωρίδας, όπου τη κλείνουμε με τη βοήθεια yoke. Μεταξύ άλλων η περίπτωση του κλειστού κυκλώματος επιτρέπει υψηλότερες τιμές και βελτιωμένη ομοιομορφία της μαγνητικής ροής στο δοκίμιο [5].

Η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου διέγερσης  $H$  μπορεί να γίνει είτε με έμμεσο, είτε με άμεσο τρόπο. Η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου κατά έμμεσο τρόπο, στη περίπτωση του κλειστού κυκλώματος μπορεί να γίνει μέσω του τύπου:

$$H = n_1 I / l \quad 1.33$$

όπου:

- $H$  το πεδίο διέγερσης
- $n_1$  ο αριθμός των σπειρών του πηνίου διέγερσης
- $I$  το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο διέγερσης
- $l$  το μέσο μήκος μαγνητικού μονοπατιού

Έτσι τίθεται το πρόβλημα του προσδιορισμού του μέσου μήκους μονοπατιού. Ο υπολογισμός του μέσου μήκους μαγνητικού μονοπατιού γίνεται με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης, συνυπολογίζοντας την ανομοιομορφία της μαγνητικής ροής [5].

Στη περίπτωση υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου κατά άμεσο τρόπο μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες διατάξεις αισθητήρων μέτρησης. Πιθανές διατάξεις αισθητήρων είναι ο αισθητήρας Hall, ο αισθητήρας μαγνηταντίστασης, καθώς και αισθητήρας πηνίου, το οποίο μπορεί να είναι είτε πηνίο τύπου  $H$  (H-coil), είτε πηνίο Rogowski-Chattock (R.C.P.) [5].

Η μέτρηση της πυκνότητας μαγνητικής ροής B συνήθως πραγματοποιείται εφαρμόζοντας το νόμο του Faraday ως

$$B = -\frac{1}{An_2} \int v(t)dt \quad 1.34$$

όπου:

B η πυκνότητα μαγνητικής ροής

$n_2$  ο αριθμός σπειρών του πηνίου λήψης

A η επιφάνεια διατομής του δοκιμίου

$v(t)$  η τάση στα άκρα του πηνίου λήψης,

η οποία ολοκληρώνεται στη διάρκεια μιας περιόδου

Προαπαιτούμενο λοιπόν για τον υπολογισμό της πυκνότητας της μαγνητικής ροής είναι ο υπολογισμός της επιφάνειας διατομής. Ο υπολογισμός της επιφάνειας διατομής επιτυγχάνεται με αρκετά υψηλή ακρίβεια, γνωρίζοντας τη πυκνότητα και τη μάζα του δοκιμίου ως:

$$A = \frac{m}{l\rho} \quad 1.35$$

όπου:

A η επιφάνεια διατομής

m η μάζα του δοκιμίου

l το μήκος του δοκιμίου

$\rho$  η πυκνότητα μάζας ανά μονάδα επιφάνειας



Ο βέλτιστος τρόπος με τον οποίο τυλίγεται το πηνίο διέγερσης και το πηνίο λήψης στη περίπτωση διάταξης για το χαρακτηρισμό φερρομαγνητικών δοκιμίων είναι το πρώτο στο εξωτερικό, ενώ το δεύτερο στο εσωτερικό. Τη διάταξη αυτή επιβάλλει το λάθος που υπεισέρχεται στη μέτρηση της πυκνότητας μαγνητικής ροής, λόγω της απόστασης του πηνίου λήψης από το δοκίμιο [5].

Στην ουσία, όσο αυξάνεται η απόσταση των τυλιγμάτων του πηνίου λήψης από το δοκίμιο, αυξάνεται και η περιοχή μεταξύ τυλιγμάτων και δοκιμίου στην οποία υπάρχει επίσης μαγνητική ροή. Έτσι, η μετρούμενη μαγνητική ροή, οφείλεται τόσο στη μαγνητική ροή εντός του δοκιμίου, όσο και στη μαγνητική ροή μεταξύ δοκιμίου και πηνίου και μπορεί να γραφτεί ως:

$$\Phi = \Phi_{Fe} + \Phi_{gap} \quad 1.36$$

όπου:

- $\Phi$  η μετρούμενη μαγνητική ροή
- $\Phi_{Fe}$  η μαγνητική ροή εντός του δοκιμίου
- $\Phi_{gap}$  η μαγνητική στο διάκενο

Η συνιστώσα μαγνητικής ροής δοκιμίου υπολογίζεται ως

$$\Phi_{Fe} = nA_{Fe}B \quad 1.37$$

όπου:

- $\Phi_{Fe}$  η μαγνητική ροή εντός του δοκιμίου
- $n$  ο αριθμός σπειρών
- $A_{Fe}$  η επιφάνεια διατομής του δοκιμίου
- $B$  το μαγνητικό πεδίο

Η συνιστώσα μαγνητικής ροής του διακένου υπολογίζεται ως

$$\Phi_{gap} = nA_{gap}(\mu_0 H) \quad 1.38$$

όπου:

$\Phi_{gap}$  η μαγνητική ροή στο διάκενο  
 $n$  ο αριθμός των σπειρών του πηνίου λήψης  
 $A_{gap}$  η επιφάνεια διατομής του διακένου  
 $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού  
 $H$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο κενό

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο δοκίμιο υπολογίζεται ως

$$B = \frac{\Phi_{Fe}}{nA_{Fe}} \quad 1.39$$

όπου:

$\Phi_{Fe}$  η μαγνητική ροή εντός του δοκιμίου  
 $n$  ο αριθμός των σπειρών του πηνίου λήψης  
 $A_{Fe}$  η επιφάνεια διατομής του δοκιμίου

Επομένως, προκύπτει το σφάλμα μετρήσεων

$$\Delta B = \frac{\Phi_{gap}}{nA_{Fe}} \quad 1.40$$

όπου:

$\Delta B$  το σφάλμα μετρήσεων  
 $\Phi_{gap}$  η μαγνητική ροή στο διάκενο  
 $n$  ο αριθμός των σπειρών του πηνίου λήψης  
 $A_{Fe}$  η επιφάνεια διατομής του δοκιμίου

Διαφορετικά, με αντικατάσταση του τύπου της μαγνητικής ροής στο διάκενο και εκτελώντας τις κατάλληλες πράξεις

$$\Delta B = \left(\frac{A_c}{A_{Fe}} - 1\right)\mu_0 H \quad 1.41$$

όπου:

- $\Delta B$  το σφάλμα μετρήσεων
- $A_c$  η επιφάνεια διατομής του πηνίου
- $A_{Fe}$  η επιφάνεια διατομής του δοκιμίου
- $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού
- $H$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο κενό

Όσον αφορά το μήκος των πηνίων διέγερσης και λήψης, αυτό εξαρτάται από τη τοπικότητα των μετρήσεων. Στη περίπτωση, που θέλουμε να κάνουμε μετρήσεις σε μια κανονική επιφάνεια το μήκος των πηνίων θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο. Ειδικά για το πηνίο διέγερσης το μεγάλο μήκος του πηνίου είναι σημαντικό, ώστε να επάγει όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφο πεδίο. Το πηνίο λήψης είναι επίσης επιθυμητό να τυλίγεται σε όλο το μήκος του δοκιμίου, υπάρχουν όμως και περιπτώσεις, όπου τυλίγεται στο κέντρο του δοκιμίου [5].

Για τη μέτρηση της πυκνότητας μαγνητικής ροής δε χρησιμοποιείται πάντα πηνίο λήψης. Σε περίπτωση όπου θέλουμε να πραγματοποιήσουμε τοπικές μετρήσεις ο υπολογισμός της πυκνότητας μαγνητικής ροής καθίσταται αρκετά δυσκολότερος. Σε αυτή τη περίπτωση για τη μέτρηση της μαγνητικής ροής εφαρμόζονται ως λύσεις η εμφύτευση πηνίου μέσω διάνοιξης μικρών τρυπών (hole drilling) στην επιφάνεια του δοκιμίου και η μέθοδος μέτρησης με χρήση ακίδας (needle-probe).

Η μέθοδος μέτρησης με χρήση ακίδας προτιμάται πολλές φορές έναντι της πρότερης, καθότι μη καταστροφική. Στις τοπικές μετρήσεις η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου διέγερσης είναι απαραίτητο να γίνει κατά άμεσο τρόπο, αφού ο άμεσος υπολογίζει το μαγνητικό πεδίο σε όλο το μήκος του πηνίου, για αυτό χρησιμοποιείται πηνίο τύπου Η (H-coil) [5].

Οι διατάξεις που περιγράφηκαν δεν είναι δυνατόν να προσδιορίσουν το υλικό αυτό καθαυτό, αλλά σε συνάρτηση με το σχήμα του. Αυτό συμβαίνει λόγω του πεδίου απομαγνήτισης. Η κάθε διάταξη μπορεί να επιλεγεί με βάση τα πλεονεκτήματά της, αλλά πολλές φορές η επιλογή μιας συγκεκριμένης διάταξης μπορεί να είναι μονόδρομος με βάση το σχήμα του δοκιμίου. Ο περιορισμός της επιλογής διάταξης γίνεται κατανοητός, αν αναλογιστούμε τη περίπτωση λεπτού υμενίου, στο οποίο είναι αδύνατο να εφαρμοστεί διάταξη κλειστού μαγνητικού κυκλώματος [5].

## Μετρήσεις σε ημιστατικό πεδίο

Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει στατικές μαγνητικές ιδιότητες είναι ο έλεγχος του δείγματος σε μαγνητικό ημιστατικό πεδίο. Με τον όρο μαγνητικό ημιστατικό πεδίο εννοούμε τη περίπτωση, όπου το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται σε αρκετά χαμηλή συχνότητα, ώστε να μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για τη μαθηματική περιγραφή του προσεγγίσεις των εξισώσεων Maxwell. Ο προσδιορισμός του μαγνητικού πεδίου ως ημιστατικό υποδηλώνει ότι βρισκόμαστε σε μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ μεταβαλλόμενου και στατικού πεδίου [10]. Στην ουσία, ο έλεγχος σε μαγνητικό ημιστατικό πεδίο ταυτίζεται ως διάταξη, με αυτή που χρησιμοποιείται στη κλασική μέθοδο ελέγχου, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται σε πολύ χαμηλές συχνότητες. Έτσι, περιορίζεται δραματικά η επίδραση των δινορευμάτων και των φαινομένων που τα συνοδεύουν, αφού τα δινορεύματα εξαρτώνται από τη συχνότητα, η οποία είναι εξαιρετικά χαμηλή [5].

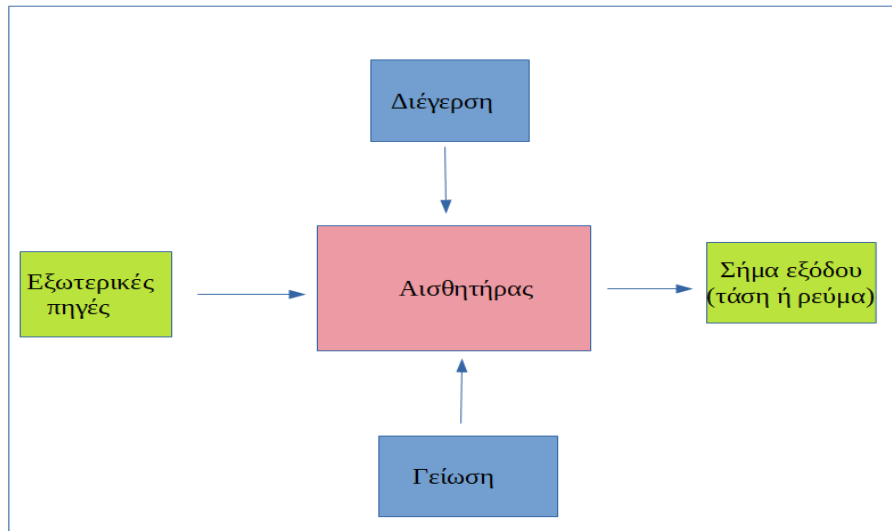
Η εξάρτηση από τη συχνότητα φαίνεται άμεσα από τα σχήματα 8 και 9, καθώς και από τους τύπους 1.12, 1.13, 1.14 και 1.15. Επομένως, η συχνότητα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, δηλαδή το πεδίο διέγερσης να μεταβάλλεται αργά. Αναφορικά με άλλες μεθόδους στατικών μετρήσεων η ημιστατική μέθοδος διαθέτει το πλεονέκτημα ότι η διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για χαμηλές ή μέτριες συχνότητες με σκοπό το περαιτέρω χαρακτηρισμό του εκάστοτε δοκιμίου [5].



## 2. Μαγνητικοί Αισθητήρες

### Κατηγορίες μαγνητικών αισθητήρων

Ως αισθητήρες ορίζονται οι συσκευές που υπολογίζουν φυσικές οντότητες κατά έμμεσο τρόπο μετατρέποντας αυτές σε ηλεκτρικά σήματα στην έξοδο τους. Οι μαγνητικοί αισθητήρες είναι υποκατηγορία αισθητήρων, οι οποίοι ανιχνεύουν μεγέθη χρησιμοποιώντας μαγνητικά φαινόμενα και για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούν συνήθως φερρομαγνητικά υλικά, τα οποία μεταβάλλουν τις ιδιότητες τους κατά τη παρουσία μαγνητικού πεδίου [11].



Σχήμα 15: Σχηματικό διάγραμμα αισθητήρα

Το σήμα εξόδου έχει συνήθως τη μορφή τάσης ( $V_{out}$ ) και μπορεί να περιγραφεί από τη γενική εξίσωση [[11]] :

$$V_{out} = g(f[x_1, x_2, \dots, x_n]) \quad 2.1$$

όπου:

$x_1, x_2, \dots, x_n$  οι φυσικές οντότητες που επηρεάζουν την έξοδο

$f$  συνάρτηση που συσχετίζει τις φυσικές οντότητες με μαγνητικές παραμέτρους

$g$  συνάρτηση που συσχετίζει τις μαγνητικές παραμέτρους με το σήμα εξόδου

Ο στόχος ενός επιτυχημένου αισθητήρα είναι το σήμα εξόδου να αποτελεί μονοτονική συνάρτηση των φυσικών οντοτήτων και η επίδραση του καθενός να μπορεί να αποπλεχθεί από του άλλου. Εφόσον, αυτό δεν είναι δυνατόν θα πρέπει να υπάρχει έλεγχος των επιμέρους παραμέτρων [11].

Οι μαγνητικοί αισθητήρες μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορα κριτήρια. Με βάση το κριτήριο της αρχής λειτουργίας, λαμβάνουμε ως κατηγορίες τους επαγωγικούς αισθητήρες, τους αισθητήρες μαγνητοσυστολής και τους μαγνητοηλεκτρικούς (magnetotransport) αισθητήρες. Από την άλλη αν χρησιμοποιήσουμε ως κριτήριο το μετρούμενο μέγεθος έχουμε ως κατηγορίες τους αισθητήρες μαγνητικού πεδίου (μαγνητόμετρα), τους αισθητήρες θέσης και τους αισθητήρες μηχανικής τάσης [11].



## Αισθητήρες Επαγωγής

Οι αισθητήρες επαγωγής περιγράφονται από το νόμο επαγωγής (ή νόμος του Faraday), κατά τον οποίο η μεταβολή μαγνητικής ροής επάγει τάση. Εφόσον, η μεταβολή ανιχνεύεται από πηνίο λήψης, τότε ο νόμος μπορεί να γραφτεί ως:[12]

$$V_i = NA\mu_o\mu_r \frac{dH}{dt} + N\mu_o\mu_r H \frac{dA}{dt} + NA\mu_o H \frac{d\mu_r}{dt} \quad 2.2$$

όπου:

$V_i$  η επαγόμενη τάση

$N$  ο αριθμός σπειρών του πηνίου λήψης

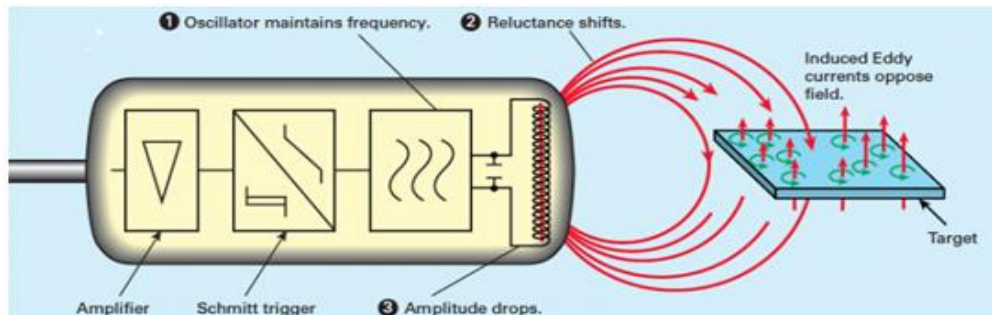
$A$  η κάθετη διατομή του πηνίου

$\mu_o$  η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό

$\mu_r$  η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα του αισθητήρα

$H$  το μαγνητικό πεδίο στον πυρήνα του αισθητήρα

Η υλοποίηση και το είδος του αισθητήρα επαγωγής εξαρτώνται από το μέγεθος του οποίου τη μεταβολή θέλουμε να ανιχνεύσουμε. Έτσι, στα πηνία ανίχνευσης η μεταβολή του πρώτου όρου είναι το κρίσιμο μέγεθος, στα περιστρεφόμενα πηνία η μεταβολή του δεύτερου όρου είναι το κρίσιμο μέγεθος και στους αισθητήρες πύλης-ροής η μεταβολή του τρίτου όρου είναι το κρίσιμο μέγεθος [[11].



Σχήμα 16: Παράδειγμα επαγωγικού αισθητήρα, ©machinedesign.com

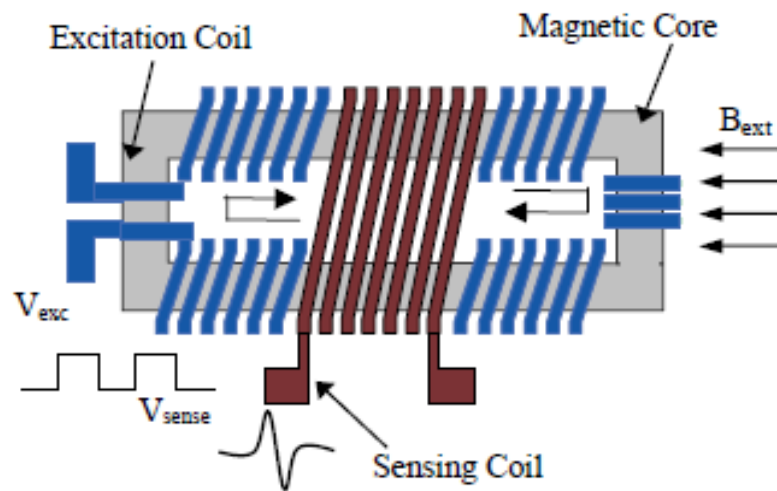
## Αισθητήρες πύλης-ροής

Σε πρώτη φάση για τους αισθητήρες πύλης-ροής μπορεί να ειπωθεί ότι είναι συσκευές στερεού τύπου χωρίς κινούμενα μέρη. Οι αισθητήρες πύλης-ροής ανιχνεύουν τη μεταβολή της μαγνητικής ροής, κατά έμμεσο τρόπο, αφού πρώτα ανιχνεύσουν τη μεταβολή του μέτρου και της έντασης του μαγνητικού πεδίου [12].

Συγκριτικά με άλλες συσκευές χαρακτηρίζονται από υψηλή ευαισθησία, η οποία τυπικά λαμβάνει τιμές της τάξης των  $10^{-4}$  T, ενώ μπορεί να φτάσει και τα  $10^{-10}$  T. Κατά κανόνα η ευαισθησία τους είναι κατά πέντε τάξεις μεγαλύτερη σε σύγκριση με άλλες συσκευές στερεάς κατάστασης, όπως οι μαγνηταντιστάσεις και οι αισθητήρες φαινομένου Hall. Σε σύγκριση με μαγνητόμετρα οπτικού τύπου επίσης υπερέχουν σε ομαλή λειτουργία παρά τις επιρροές του περιβάλλοντος, αφού η ευαισθησία τους δεν επηρεάζεται από δονήσεις και θερμοκρασιακές μεταβολές. Αξιοσημείωτο αποτελεί το γεγονός ότι είναι συγχρόνως φθηνότερα και μεγαλύτερης ευαισθησίας από τα μαγνητόμετρα SQUIDS [12].

Όπως προαναφέρθηκε οι αισθητήρες πύλης-ροής βασίζονται στο νόμο επαγωγής. Το πηνίο διέγερσης δημιουργεί αντίστοιχο πεδίο διέγερσης το οποίο διέρχεται από πυρήνα φερρομαγνητικού υλικού. Ως υλικό ο πυρήνας είναι μαλακού τύπου, το οποίο μεταφράζεται στο γεγονός ότι η μαγνητική διαπερατότητα του δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με δύο παράγοντες. Ο πρώτος παράγοντας είναι οι προηγούμενες τιμές της, ενώ ο δεύτερος η μαγνητική ροή που διέρχεται από αυτό [12].

Η χαρακτηριστική καμπύλη  $B - H$  του μαλακού μαγνητικού υλικού του πυρήνα έχει τη μορφή βρόχου υστέρησης, έτσι συνάγεται ότι η μαγνητική διαπερατότητα αυξάνεται μέχρι μια μέγιστη τιμή. Σε αυτή τη περίπτωση ο πυρήνας βρίσκεται σε κορεσμό. Όταν ο πυρήνας φτάνει σε κορεσμό, η μαγνητική ροή διέγερσης φτάνει σε μια μέγιστη τιμή την οποία δε μπορεί να ξεπεράσει. Με βάση αυτό το γεγονός, του ανώτερου ορίου που τίθεται στη μαγνητική ροή λόγω κορεσμού, έλαβαν το όνομα τους και οι αισθητήρες [12].



Σχήμα 17: Τυπικός αισθητήρας πύλης-ροής, ©physicsopenlab

## Ταξινόμηση αισθητήρων πύλης-ροής

Όταν αναφερόμαστε σε αισθητήρες πύλης-ροής, μπορούμε να αναφερόμαστε σε διάφορα είδη, ανάλογα με το κριτήριο διαχωρισμού. Συχνό κριτήριο η διεύθυνση του μετρούμενου πεδίου εν συγκρίσει με τη διεύθυνση του μετρούμενου πεδίου. Έτσι, μπορούμε να έχουμε παράλληλου τύπου, εφόσον τα δύο πεδία είναι παράλληλα, ορθογωνίου τύπου, εφόσον τα δύο πεδία είναι κάθετα μεταξύ τους, αλλά και μεικτού τύπου ως συνδυασμού των δύο παραπάνω περιπτώσεων. Εκ των τριών, ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος τύπος αισθητήρα είναι παράλληλου τύπου [12].

Όσον αφορά, τη διαδρομή μαγνητικής ροής, οι αισθητήρες μπορούν να χαρακτηριστούν κλειστού ή ανοιχτού μονοπατιού, ανάλογα με το αν το μαγνητικό κύκλωμα είναι κλειστό ή όχι. Σημαντικό κριτήριο ταξινόμησης αποτελεί και ο τρόπος κατασκευής του αισθητήρα. Εν συμφωνία με το προαναφερθέν κριτήριο μπορούμε να έχουμε αισθητήρες bulk τύπου, τεχνολογίας CMOS ή και τεχνολογίας MEMS. Η κάθε υλοποίηση χαρακτηρίζεται από τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της, τα οποία πρέπει να λάβουμε υπόψιν [[13].

## Θόρυβος

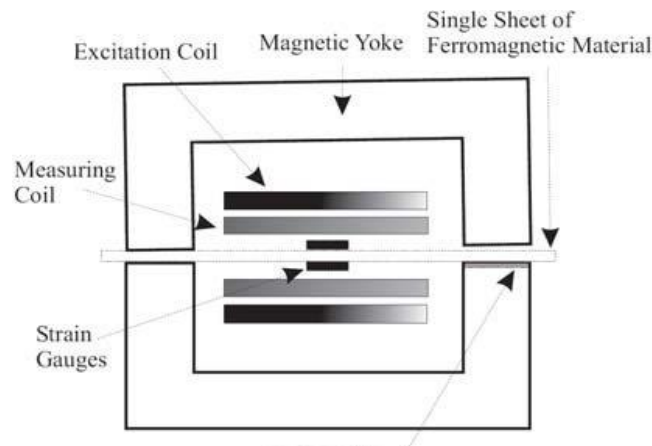
Ο θόρυβος των αισθητήρων πύλης-ροής που οφείλεται εγγενώς σε αυτούς είναι δύσκολο να μετρηθεί επακριβώς, ενώ επιδέχεται στατιστικών λαθών λόγω του ηλεκτρονικού κυκλώματός τους. Η αιτία είναι ο λευκός θόρυβος που υπεισέρχεται στο κύκλωμα και μάλιστα ενισχύεται, λόγω του ενισχυτή του κυκλώματος, ενώ υπάρχει και ο λευκός θόρυβος του ανιχνευτή φάσης. Τυπικά, ο θόρυβος σε αισθητήρες πύλης-ροής λαμβάνει τιμές της τάξης των  $10\text{pTrms Hz}^{(-0.5)}$  μετρούμενος σε συχνότητα του 1Hz, ενώ έχουν υλοποιηθεί και αισθητήρες χαμηλότερου θορύβου στα  $2\text{--}3\text{pTrms Hz}^{(-0.5)}$  στο 1Hz [[13]].

Ο λόγος που ο μετρούμενος θόρυβος στους αισθητήρες πύλης-ροής γίνεται με αναφορά το 1Hz, είναι ο θόρυβος σε αυτούς τους αισθητήρες παρουσιάζει γενικά  $1/f$  συμπεριφορά. Επομένως το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο  $P(f)$ , με βάση το φάσμα θορύβου του 1Hz ( $P(1\text{Hz})$ ) μπορεί να παρασταθεί ως:  $P(f) = P(1)/f$ . Οι αιτίες θορύβου στους αισθητήρες πύλης-ροής οφείλονται στα εξής τρία φαινόμενα: το θόρυβο Barkhausen, το λευκό θερμικό θόρυβο και έναν υπερτιθέμενο θόρυβο χαμηλής έντασης [[13]].

## Ελεγκτής μονής λωρίδας

Η διάταξη ελεγκτή μονής λωρίδας (s.s.t.) έλαβε το όνομα της από το σχήμα του φερρομαγνητικού δοκιμίου που πιο συχνά εξετάζει. Μπορεί να πραγματοποιήσει τόσο dc όσο και ac μετρήσεις. Παρά ταύτα αναφέρεται με αυτό το όνομα κυρίως στη περίπτωση των ac μετρήσεων, όπου το δοκίμιο είναι σε μορφή λωρίδας. Στη περίπτωση των dc μετρήσεων, ο ελεγκτής μονής λωρίδας (s.s.t.) αναφέρεται συχνότερα ως μετρητής μαγνητικής διαπερατότητας (permeameter), ενώ τα δοκίμια που εξετάζει συχνότερα είναι ράβδοι, μπάρες ή κύλινδροι, παρά λωρίδες [5].

Ως διάταξη είναι κλειστού τύπου, αφού κλείνει μαγνητικό κύκλωμα με τη βοήθεια yoke. Επιπλέον, αφού χρειάζεται να μαγνητίζει το δοκίμιο αλλά και να μετράει τη μαγνητική ροή μπορεί να ελέγχει μόνο μαλακά μαγνητικά υλικά. Για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιεί πηνίο διέγερσης, το οποίο είναι συνήθως σωληνοειδές πηνίο που περιγράφηκε στην ενότητα "Σωληνοειδές πηνίο". Για τη μέτρηση της μαγνητικής ροής χρησιμοποιείται αισθητήρας μέτρησης πεδίου, ο οποίος μπορεί να είναι είτε της μορφής πηνίου λήψης, είτε αισθητήρας  $m_T$ , είτε αισθητήρας Hall [5].



Σχήμα 18: Τυπική διάταξη αισθητήρα ελεγκτή μονής λωρίδας, © SetarehGorjiGhalamestani

Για τη καλύτερη κατανόηση της διάταξης ακολουθεί περιγραφή και σύγκριση δύο τύπων ελεγκτή μονής λωρίδας για dc μετρήσεις, τύπου A και τύπου B. Στον τύπο A, ο οποίος βασίζεται σε μετρητή μαγνητικής διαπερατότητας (permeameter) που είχε κατασκευασθεί στο παρελθόν από τον Hopkinson, το πηνίο διέγερσης τοποθετείται γύρω από το δοκίμιο και ως αισθητήρας μέτρησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί flux-sensing πηνίο, tangential πηνίο, αισθητήρας  $m_x$  ή αισθητήρας Hall. Ο μετρητής μαγνητικής διαπερατότητας (permeameter) τύπου B βασίζεται επίσης σε παλαιότερη διάταξη πραγματοποιημένη από τον Neumann. Σε αυτή, το πηνίο διέγερσης τυλίγεται γύρω από το yoke, ενώ ως αισθητήρας λήψης μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε flux-sensing coil, είτε Rogowski-Chattock coil [5].

Συγκρίνοντας τους δύο τύπους παρατηρούμε ότι το πηνίο διέγερσης μπορεί να τοποθετηθεί είτε γύρω από το δοκίμιο, είτε γύρω από το yoke. Παράλληλα, φαίνεται ότι υπάρχει μια ποικιλία αισθητήρων μέτρησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Κριτήριο για την επιλογή του τύπου του αισθητήρα μέτρησης είναι η επιλογή μεταξύ έμμεσης και άμεσης μέτρησης του μαγνητικού πεδίου και των πλεονεκτημάτων που συνοδεύουν τη κάθε επιλογή [5].

Για την άμεση μέτρηση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί πηνίο τύπου H (H-coil). Με την επιλογή αυτής της μεθόδου αποφεύγουμε το πρόβλημα καθορισμού του μήκους μαγνητικού μονοπατιού. Η βελτίωση της ομοιομορφίας μαγνήτισης επίσης επιτυγχάνεται, εφόσον τοποθετήσουμε το πηνίο τύπου H (H-coil) στο κέντρο του δοκιμίου. Από τη μέθοδο με πηνίο τύπου H (H-coil) δεν εκλείπουν τα μειονεκτήματα, έτσι καθώς το σήμα είναι μικρό και εξαρτάται από τη παράγωγο της μαγνητικής ροής με το χρόνο έπεται η ανάγκη χρήσης ενισχυτή ολοκληρωτή. Επιπλέον, το αποτέλεσμα εξαρτάται από την απόσταση του πηνίου από την επιφάνεια του δοκιμίου. Στη περίπτωση της έμμεσης μέτρησης, το πεδίο H υπολογίζεται από το ρεύμα μαγνήτισης [5].

Ορισμένα από τα προβλήματα που προκύπτουν με τη κάθε μέθοδο είναι επιλύσιμα. Το πρόβλημα της εξάρτησης του αποτελέσματος, από την απόσταση του πηνίου από την επιφάνεια μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας δύο ή περισσότερα πηνία τύπου H (H-coils) και κάνοντας προέκταση (extrapolation) του αποτελέσματος προς την επιφάνεια του δοκιμίου. Από την άλλη το πρόβλημα του καθορισμού του μήκους του μαγνητικού μονοπατιού που προκύπτει με τη χρήση έμμεσου υπολογισμού επιλύεται με τη μέθοδο αναπλήρωσης [5].

Όσον αφορά τη χρήση yoke, το κύκλωμα μπορεί να κλείνει είτε με ένα yoke, είτε με δύο, και συνεπώς χαρακτηρίζεται αντίστοιχα μη συμμετρικό ή συμμετρικό. Η χρήση ενός μόνο yoke καθιστά τη διάταξη απλούστερη και επιτρέπει την ευκολότερη πρόσβαση στο δοκίμιο. Καταδικαστική για την ευρεία εφαρμογή της στέκεται η πολύ χαμηλή ακρίβεια που τη χαρακτηρίζει. Έτσι, χρησιμοποιείται ορισμένες φορές μόνο, όπου η πρόσβαση στο δοκίμιο κρίνεται απαραίτητη και η ακρίβεια μετρήσεων δευτερεύουσας σημασίας [5].

Με τη χρήση δύο yoke αντικείμενων μεταξύ τους επιτυγχάνεται υψηλότερη ακρίβεια μετρήσεων αφού τα δινορεύματα (eddy currents) που επάγονται σε κάθε μισό του yoke αλληλοεξουδετερώνονται. Η βελτίωση που επέρχεται με τη χρήση συμμετρικών yoke γίνεται ιδιαίτερα αισθητή στο φαινόμενο overhang, όπου το δοκίμιο είναι μακρύτερο από το yoke και κατά το οποίο τα δινορεύματα είναι αυξημένα [5].



### 3. Ηλεκτρικός Χάλυβας

#### Η σημασία Χάλυβα στη σύγχρονη εποχή

Τη σύγχρονη εποχή ο ηλεκτρικός χάλυβας χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορα πεδία της βιομηχανίας, ανάλογα με τον τύπο του. Ο προσανατολισμένος ηλεκτρικός χάλυβας βρίσκει εφαρμογές, όπως η κατασκευή μετασχηματιστών και ο μαγνητικός ενισχυτής, μια ηλεκτρομαγνητική συσκευή που ενισχύει ηλεκτρικά σήματα.

Από την άλλη ο μη προσανατολισμένος ηλεκτρικός χάλυβας χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές που αφορούν περιστρεφόμενες μηχανές. Στη κατηγορία περιστρεφόμενων μηχανών εμπίπτουν οι κινητήρες, οι γεννήτριες και οι μετατροπείς μηχανικής σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η ομαλή λειτουργία των κατασκευών που χρησιμοποιούν χάλυβα τίθεται συχνά σε κίνδυνο, τόσο από εξωτερικούς παράγοντες (διάβρωση, μηχανική καταπόνηση), όσο και από παράγοντες οφειλόμενους στον τρόπο κατασκευής του. Επομένως, για τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του κρίνεται αναγκαίος ο έλεγχος και επιδιόρθωση, εφόσον είναι δυνατή των αρνητικών προς την υγεία του παραγόντων [14]. Όσον αφορά την εξωτερική καταπόνηση, αυτή είναι συνήθως εύκολο να υπολογιστεί μέσω σύγχρονων αναλυτικών τεχνικών.

Πάρα την, κατά κανόνα, προβλέψιμη επίδραση των εξωτερικών παραγόντων υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις κατά τις οποίες είχε συμβεί μη αναμενόμενη αδυναμία λειτουργίας του χάλυβα. Αυτή η αδυναμία λειτουργίας οφείλεται στη κόπωση του χάλυβα, κυρία συνιστώσα της οποίας είναι η υπολειπόμενη τάση.

Η υπολειπόμενη τάση υπεισέρχεται κατά τη διαδικασία κατασκευής του χάλυβα, η οποία περιλαμβάνει διάφορα στάδια. Στα στάδια κατασκευής περιλαμβάνονται συνήθως τα εξής: χύτευση (casting), εξέλαση (rolling), καλούπωμα (molding), κάμψη (bending), συγκόλληση (welding) και θερμική επεξεργασία (heat treatment), το καθένα από τα οποία επάγει υπολειπόμενη τάση [14].

Από τα προαναφερθέντα στάδια κυρίαρχο ρόλο στη τελική διαμόρφωση της υπολειπόμενης τάσης καταλαμβάνει η συγκόλληση (welding) και θα περιγραφεί περιληπτικά παρακάτω. Παρότι η υπολειπόμενη τάση δρα συνήθως αρνητικά στην υγεία του χάλυβα, ανάλογα τη φύση της μπορεί να είναι ευεργετική [14].

## Ηλεκτρικός χάλυβας

Ο ηλεκτρικός χάλυβας ως μαγνητικό υλικό υπάγεται στα μαλακά μαγνητικά υλικά. Επίσης, κατέχει πρωτεύοντα ρόλο στην αγορά μαλακών μαγνητικών υλικών. Μάλιστα, το 80% της συγκεκριμένης αγοράς καταλαμβάνει ο ηλεκτρικός χάλυβας τύπου SiFe. Η κατάταξη του ως μαλακό μαγνητικό υλικό εξηγείται από τη χαμηλή συνεκτικότητα (coercivity) από την οποία διέπεται.

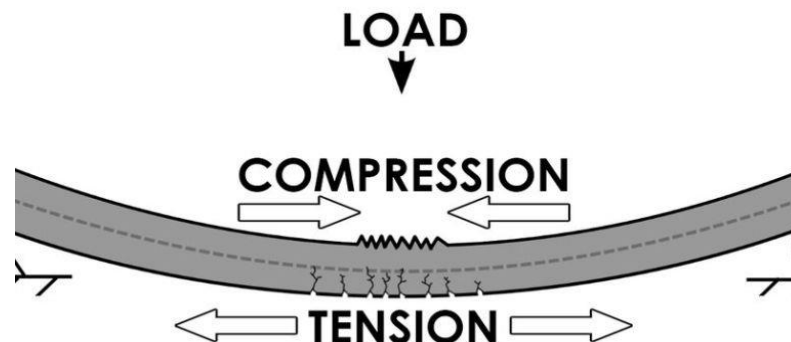
Η χρήση του σε διάφορες εφαρμογές ενδείκνυται ή αντενδείκνυται ανάλογα με τις ιδιότητες που απαιτούνται. Έτσι, δεν ενδείκνυται η χρήση του σε ηλεκτρικές συσκευές, αφού παρά το ότι πληρεί το κριτήριο της υψηλής πόλωσης κορεσμού (high saturation polarization), παρουσιάζει υψηλές απώλειες ενέργειας στις υψηλές συχνότητες λειτουργίας των ηλεκτρικών συσκευών. Στη περίπτωση που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για μαγνητική θωράκιση (magnetic shielding), κύριο κριτήριο για τη χρησιμοποίησή του είναι η μαγνητική διαπερατότητά του [5].

Σε μια άμεση σύγκριση με τον σίδηρο που είναι επίσης μαγνητικό υλικό, ο ηλεκτρικός χάλυβας υστερεί στις μαγνητικές ιδιότητες. Ο καθαρός σίδηρος παρουσιάζει υψηλή πόλωση κορεσμού, χαμηλή συνεκτικότητα (coercivity) και υψηλή μέγιστη μαγνητική διαπερατότητα. Η επικράτηση του ηλεκτρικού χάλυβα οφείλεται σε διάφορες αιτίες. Καταρχήν, το κόστος του είναι πολύ χαμηλότερο από του καθαρού σιδήρου. Αυτό συμβαίνει αφενός λόγω της απότομης πτώσης ορισμένων μαγνητικών παραμέτρων του σιδήρου όταν έχει προσμίξεις, αφετέρου λόγω της δυσκολίας εύρεσης καθαρού σιδήρου στη φύση. Επιπλέον, ο καθαρός σίδηρος χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλή ειδική αντίσταση, γεγονός που συνεπάγεται αυξημένες απώλειες σε συχνотικές εφαρμογές. Κατά ανάγκη λοιπόν, ο καθαρός σίδηρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως σε μορφή σκόνης, όπου τα παραπάνω προβλήματα επιλύονται. Ο χάλυβας υπερτερεί ως υλικό για έναν ακόμα λόγο: η προσθήκη άνθρακα σε χαμηλό ποσοστό στο σίδηρο, παρότι χειροτερεύει τις μαγνητικές ιδιότητες, έχει ως αποτέλεσμα καλές μηχανικές ιδιότητες.

## Τύποι υπολειπόμενης τάσης

Ως υπολειπόμενη τάση ορίζουμε το αποτέλεσμα ενσωματωμένων παραμορφώσεων σε υλικά, οι οποίες παραμένουν, εν τη απουσία ή μετά την απομάκρυνση, μηχανικού ή θερμικού φορτίου. Επομένως, η υπολειπόμενη τάση δεν επηρεάζει την ισορροπία του σώματος με το περιβάλλον του και για αυτό μπορεί να παραμείνει. Ουσιαστικά, η υπολειπόμενη τάση είναι προϊόν πλευρικών ανωμαλιών και εκτοπισμών σωματιδίων (dislocations) που σχετίζονται τόσο με τη σύνθεση του υλικού, όσο και με το ιστορικό του [14].

Ανάλογα με τη συρρίκνωση ή μεγέθυνση του υλικού η τάση εμπίπτει στις εξής δύο κατηγορίες: η εφελκτική τάση (tensile stress) και η θλιπτική τάση (compressive stress). Η ισορροπία των δύο τύπων τάσης καθορίζει σε συνδυασμό με άλλους παράγοντες την απόδοση του υλικού. Η εφελκτική τάση πιστεύεται ότι είναι επιβλαβής για το υλικό, ενώ η θλιπτική, για τιμές εντός του εύρους της πλαστικής παραμόρφωσης, ευεργετική. Συγκεκριμένα, υπάρχουν ενδείξεις ότι η εφελκτική τάση αυξάνει τη πιθανότητα ρήγματος, ενώ η θλιπτική τάση αυξάνει την αντοχή προς το φθορά (wear) και διάβρωση (corrosion) [14].



Σχήμα 19: Αποτέλεσμα εφελκτικής τάσης και η θλιπτικής τάσης σε υλικό, ©civilengineeringforum.me

Προκειμένου να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται κρίνεται σκόπιμο να περιγράψει η φάση της συγκόλλησης (welding). Η συγκόλληση αποτελείται από δύο επιμέρους διαδικασίες. Κατά τη πρώτη διαδικασία το υλικό θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες και εν συνεχεία κατά τη δεύτερη διαδικασία το υλικό ψύχεται. Αποτέλεσμα των παραπάνω διαδικασιών είναι το υλικό να υποβάλλεται σε μια διαδοχική εναλλαγή φάσεων, η οποία όμως δε συμβαίνει με τον ίδιο τρόπο στο σώμα του υλικού και έτσι δημιουργείται υπολειπόμενη τάση. Επιπλέον το σώμα του υλικού μπορεί να διακριθεί σε τρεις επιμέρους ζώνες ανάλογα με το πόσο επηρεάστηκαν από τη συγκόλληση (welding), η κάθε μια έχει διαφορετική ένταση υπολειπόμενης τάσης [14].

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η υπολειπόμενη τάση που δημιουργείται κατά τη συγκόλληση είναι θερμικού τύπου. Παρά όλα αυτά, η υπολειπόμενη τάση δεν οφείλεται πάντα σε θερμικού αίτιες, αλλά και σε ελαστικού τύπου αναντιστοιχίω (mismatch) και άλλες αιτίες. Μια εναλλακτική κατηγοριοποίηση της τάσης μπορεί να γίνει με βάση το μέγεθος του όγκου στο οποίο οι επιμέρους τάσεις αλληλοαναιρούνται, ώστε η συνολική τάση να είναι μηδενική. Το μέγεθος του όγκου στο οποίο οι επιμέρους τάσεις αλληλοαναιρούνται αναφέρεται παρακάτω ως κλίμακα αυτοεξισορρόπησης [14].

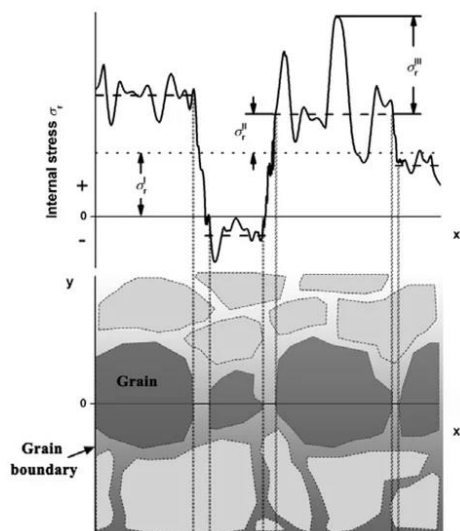
## Κλίμακες τάσης

Η γνώση του τύπου τάσης που θέλουμε να μετρήσουμε, ανάλογα με τη κλίμακα αυτοεξισορρόπησης του κατέχει κομβικό ρόλο στη επιλογή της κατάλληλης μεθόδου μετρήσεων. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο μπορούμε να έχουμε τάση τύπου I, τύπου II και τύπου III. Ως τύπου I, ορίζεται η τάση που αυτοεξισορροπείται σε μακροσκοπικές διαστάσεις. Η τάση τύπου I συχνά οφείλεται σε οφείλεται σε μια ανομοιόμορφη πλαστική παραμόρφωση ή σε απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές [15].

Ως τύπου II, ορίζεται η τάση που δημιουργείται στα σύνορα κόκκων. Η τάση τύπου II, σε πολυκρυσταλλικά υλικά συμβαίνει λόγω διαφορετικού προσανατολισμού συνορευόντων κόκκων, οπότε σε αυτή τη περίπτωση είναι χαμηλής έντασης. Στην περίπτωση που η τάση τύπου II οφείλεται στο ότι η μικροδομή του υλικού έχει διαφορετικές φάσεις, τότε συγκριτικά η τάση είναι υψηλότερης έντασης [15].

Τέλος, η τάση τύπου III συμβαίνει σε ατομικό επίπεδο. Ισοδύναμα, για τη τάση τύπου III και τη τάση τύπου II μπορεί να διατυπωθεί ότι συμβαίνουν σε μικροσκοπικές και υπομικροσκοπικές διαστάσεις [15].

Επιπλέον παράμετρος που χαρακτηρίζει τους εξεταζόμενους τύπους τάσης είναι ο χαρακτηριστικός όγκος  $V_0$ . Ο όγκος  $V_0$  ορίζεται ως ο όγκος πάνω από τον οποίο η τιμή του τύπου τάσης στον οποίο αναφέρεται τείνει στο μηδέν. Ο χαρακτηριστικός όγκος  $V_0$  είναι ανάλογος του κύβου του χαρακτηριστικού μήκους  $l_0$ :  $V_0 \propto l_0^3$ , ενώ συνοδεύεται από δείκτη ο οποίος υποδηλώνει το τύπο τάσης στον οποίο ο όγκος αναφέρεται. Παραδείγματος χάριν, για το τύπο II γράφεται ως  $V_{(0,II)}$  [15].



Σχήμα 20: Διακύμανση της τάσης σε συνάρτηση με τη μικροσκοπική δομή, ©<https://www.mdpi.com>

Η κρισιμότητα του χαρακτηριστικού όγκου έγκειται στο ότι καθορίζει το κατάλληλο μέγεθος δειγματικού όγκου σε σχέση με τον επιθυμούμενο προς μέτρηση τύπο τάσης. Στην πράξη παρατηρούμε ότι οι περισσότερες τεχνικές αφαίρεσης υλικού αφαιρούν περιοχές μακροσκοπικών διαστάσεων, όποτε μπορούν να μετρήσουν μόνο τάση τύπου I [15].

Αυτομάτως, λοιπόν αυτές οι τεχνικές κρίνονται ακατάλληλες σε περιπτώσεις όπου θέλουμε να μετρήσουμε τάση μικροσκοπικών διαστάσεων. Αντιθέτως, αυτού του είδους οι τεχνικές ενδείκνυνται για περιπτώσεις όπου η τάση τύπου I έχει καίριο ρόλο, όπως οι μεταλλικές κατασκευές. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως η μέτρηση τάσης σε σύνθετα υλικά, θα πρέπει να επιλεγεί άλλη τεχνική αφού σε αυτές κυρίαρχο ρόλο έχει η τάση τύπου II [15].

Η κατανόηση, τόσο της αιτίας, όσο και της κλίμακας της τάσης επιτρέπει τόσο τη κατάλληλη επιλογή του τρόπου μέτρησης του όσο και την αποτελεσματικότερη σχεδίαση συστημάτων. Όπως προαναφέρθηκε στη περίπτωση μας αντιμετωπίζουμε τάση τύπου I.

## Τεχνικές ελέγχου

Για τον έλεγχο και καθορισμό των υπολειπόμενων τάσεων έχει αναπτυχθεί πληθώρα τεχνικών, όπως η τεχνική σκέδασης μαγνητικής ροής, η μέθοδος θορύβου Barkhausen, υπερηχητικές τεχνικές και μη γραμμικές ακουστικές τεχνικές. Οι τεχνικές διακρίνονται τόσο από την αβεβαιότητα των μετρήσεων τους, όσο και από τη τοποθεσία στην οποία λειτουργούν, αλλά και από άλλες παραμέτρους [16].

Η τοποθεσία λειτουργίας της τεχνικής καθορίζεται σε συσχέτιση και με την αβεβαιότητα των μετρήσεων. Τυπικό παράδειγμα που επαληθεύει την παραπάνω πρόταση αποτελούν δύο χρησιμοποιούμενες τεχνικές ανάκλασης. Η τεχνική ανάκλασης νετρονίων έχει τη μικρότερη αβεβαιότητα από όλες τις τεχνικές όταν εφαρμόζονται για ανίχνευση ατελειών σε όλο το σώμα του υλικού, ενώ η τεχνική ανάκλασης ακτίνων X έχει τη μικρότερη αβεβαιότητα για επιφανειακές μετρήσεις [16].

Ανάλογα το μέγεθος της ζημιάς που προκαλείται στο υλικό, εξαιτίας της τεχνικής που επιλέγουμε, οι τεχνικές έλεγχου διαχωρίζονται σε καταστροφικές, ημικαταστροφικές και μη καταστροφικές. Οι δύο πρώτες κατηγορίες απομακρύνουν ένα μικρό μέρος του υλικού που θέλουμε να μετρήσουμε επιδιώκοντας να μετρήσουν τη τάση, που απελευθερώνεται κατά την απομάκρυνση. Φυσικό επακόλουθο της παραπάνω διαδικασίας είναι το τελικό προφίλ της τάσης να διαφέρει από το αρχικό. Από την άλλη, οι τεχνικές μη καταστροφικού έλεγχου δεν επηρεάζουν το προφίλ της τάσης του υλικού, ούτε και προκαλούν ζημιές στο υλικό, αφού μετρούν παραμέτρους του υλικού που συσχετίζονται με τη τάση [16].

| Μη καταστροφικός έλεγχος                  | Καταστροφικός έλεγχος                              |
|---|--|
| Χρησιμοποιείται για ανίχνευση ατελειών    | Χρησιμοποιείται για ανίχνευση ιδιοτήτων του υλικού |
| Δε προκαλούνται ζημιές στο υλικό          | Προκαλούνται ζημιές στο υλικό                      |
| Δεν έχει υψηλό κόστος                     | Έχει υψηλό κόστος                                  |
| Συγκριτικά απαιτείται μικρότερη δεξιοτήτα | Απαιτείται δεξιοτήτα για τη πραγματοποίηση του     |

Σχήμα 21: Διαφορές μεταξύ καταστροφικού και μη καταστροφικού ελέγχου



## Παραδείγματα καταστροφικών και ημικαταστροφικών τεχνικών

Ένα παράδειγμα καταστροφικού ελέγχου είναι η τεχνική της τμήσεως (sectioning). Κατά την τεχνική τμήσεως γίνεται τομή στο υλικό. Η τεχνική αυτή δεν εισάγει πλαστικότητα (plasticity) στο υλικό. Όσο διαρκεί η διαδικασία τομής απελευθερώνεται τάση η οποία μετριέται με πιεζοαντιστάσεις (strain gauges). Η τεχνική ημικαταστροφικού ελέγχου διέπεται από την ίδια αρχή [16].

Μια τεχνική ημικαταστροφικού ελέγχου είναι η σταδιακή διάνοιξη μικρών τρυπών (incremental hole-drilling). Στη τεχνική αυτή γίνεται μια μικρή τρύπα στο υλικό που αυξάνεται σταδιακά σε βήματα, μέχρι να συμπληρωθεί ένας καθορισμένος αριθμός βημάτων. Η τάση που απελευθερώνεται μετριέται με διατάξεις πιεζοαντιστάσεων (strain gauge rosettes) στην επιφάνεια. Μια από τις εφαρμογές αυτής της μεθόδου είναι και η μέτρηση τάσης σε γέφυρες [16][17].

## Παραδείγματα μη καταστροφικών τεχνικών

Χαρακτηριστικά παραδείγματα τεχνικών μη καταστροφικού ελέγχου αποτελούν οι τεχνικές ανάκλασης ακτίνων X και ανάκλασης νετρονίων. Οι δύο τεχνικές μετράνε την απόσταση ατομικών επιπέδων με τη μέτρηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που προκύπτει κατά τη πρόσπτωση τους στο υλικό [16].

Η χρήση ακτίνων X έχει τη χαμηλότερη αβεβαιότητα για μέτρηση επιφανειακής τάσης. Περιορισμό για τη χρήση αυτής της μεθόδου αποτελεί η γεωμετρία του δοκιμίου καθώς η ακτίνα X πρέπει να προσκρούσει στο υλικό αλλά και να ανακλαστεί από αυτό χωρίς τη παρεμβολή άλλου υλικού. Η χρήση ακτίνων νετρονίων έχει το πλεονέκτημα της χαμηλότερης αβεβαιότητας σε μεγαλύτερα βάθη, αφού η ακτίνα έχει μεγαλύτερη διεισδυτικότητα. Παρά όλα αυτά, ο έλεγχος υλικού με χρήση της μεθόδου ακτίνων νετρονίων κοστίζει περισσότερο σε σχέση με έλεγχο μέσω ακτίνων X [16].

## Μαγνητικός μη καταστροφικός έλεγχος

Η δυνατότητα μη καταστροφικού ελέγχου σε δοκίμια εκμεταλλευόμενοι ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα είναι εφικτή, αφού έχει αποδειχθεί η συσχέτιση διάφορων μαγνητικών παραμέτρων με τη μικροδομή του υλικού. Προς εκμετάλλευση αυτής της συσχέτισης έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες, που βασίζονται σε φαινόμενα όπως ο μαγνητικός θόρυβος Barkhausen, η μαγνητακουστική εκπομπή και η μαγνητική μνήμη ή τεχνολογίες όπως η μέθοδος μαγνητικής προσαρμογής (magnetic adaptive method) [18].

Ορισμένες από τις τεχνολογίες βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο, ενώ άλλες έχουν προχωρήσει σε εμπορικό επίπεδο. Συχνοί περιορισμοί προς την εμπορική εφαρμογή των μαγνητικών μεθόδων είναι η εξάρτησή τους από τη πειραματική διάταξη, τα υψηλά επίπεδα αβεβαιότητας που παρουσιάζουν καθώς και η έλλειψη κατάλληλων μεθόδων βαθμονόμησης.

Το ξεκίνημα της χρήσης μαγνητικών μεθόδων για τη διαπίστωση τυχόν ατελειών σε ένα υλικό εντοπίζεται στο 1868 από τον M.Saxby [19]. Παρά όλα αυτά, έπρεπε να μεσολαβήσει μια τυχαία ανακάλυψη για να ακολουθήσει η συστηματική ανάπτυξη μεθόδων [18][20].

Το 1918 ο W. E. Hoke παρατήρησε ότι σε γειωμένους χάλυβες σκληρού τύπου, ρινίσματα σιδήρου συγκεντρώνονταν γύρω από τις ατέλειες του υλικού [20]. Η ανακάλυψη οδήγησε στην ανάπτυξη της τεχνικής ελέγχου μέσω μαγνητικών σωματιδίων (m.p.i) από τους Deforest και Doane [21][22].

Η τεχνολογία ελέγχου μέσω μαγνητικών σωματιδίων εν τέλει απέκτησε ένα πιο ποσοτικό χαρακτήρα, ενώ εκκολάφτηκαν νέες εναλλακτικές τεχνολογίες. Μια από αυτές τις τεχνολογίες, η ονομαζόμενη "έλεγχος σκέδασης μαγνητικής ροής" (magnetic flux leakage), προήλθε ουσιαστικά από την μέθοδο ελέγχου μέσω μαγνητικών σωματιδίων. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι η μια τελικά βασίζεται σε μαγνητική σκόνη ή ταινία [24] [25], ενώ η δεύτερη στη χρήση μαγνητόμετρου για την ανίχνευση ατέλειας. Ο έλεγχος δινορευμάτων (eddy current inspection) είναι μία από τις κύριες τεχνολογίες μαγνητικής μεθόδου, ο οποίος όμως διαφέρει από τις προηγούμενες [18].

Η τακτικότερη χρήση των αισθητήρων εισήγαγε την ανάγκη σχετικής έρευνας. Κυρίαρχη ανάγκη αποτέλεσε η συσχέτιση της σκέδασης μαγνητικής ροής με το τύπο της ατέλειας από την οποία προέρχεται [18].

## Έλεγχος μέσω μαγνητικών σωματιδίων

Κοινό προαπαιτούμενο των μεθόδων ελέγχου μέσω μαγνητικών σωματιδίων αποτελεί η ανάπτυξη επαρκούς μαγνητικού πεδίου κατά την επιθυμητή κατεύθυνση. Ωστόσο, ενώ είναι εφικτή η εφαρμογή της μεθόδου ελέγχου μέσω μαγνητικών σωματιδίων σε αμαγνήτιστα υλικά μόνο με τη χρήση της παραμένουσας μαγνήτισης τους και του συνεκτικού τους πεδίου, τα αποτελέσματα είναι μη αξιοποιήσιμα. Αυτό συμβαίνει διότι η ένταση και ο προσανατολισμός του πεδίου δεν είναι γνωστά, ούτε ελέγξιμα, καθώς και για άλλους λόγους. Επομένως, στις καθορισμένες διαδικασίες χρησιμοποιούνται δύο τρόποι για την εφαρμογή ελέγξιμου μαγνητικού πεδίου στο υπό εξέταση υλικό [18].

Ο ένας τρόπος είναι με χρήση μαγνητικού γοκέ, στο οποίο έχει τυλιχθεί πηνίο διέγερσης. Ο εταίρος πραγματοποιείται με χρήση ηλεκτροδίων επαφής (prods), τα οποία διαρρέονται από υψηλό ρεύμα, έτσι δημιουργείται κυκλικό μαγνητικό πεδίο [18].

Αμφότερες, οι μέθοδοι διέπονται από αξιοπιστία ως προς τον εντοπισμό ατελειών στην επιφάνεια του υπό εξέταση υλικού. Ακόμα, το μέγεθος και σχήμα του εξεταζόμενου υλικού, συνήθως δε προβάλλουν εμπόδια στην εφαρμογή της τεχνολογίας, με εξαίρεση πολύπλοκες γεωμετρικές διατάξεις [18].



Σχήμα 22: Χρήση της μεθόδου ελέγχου μέσω μαγνητικών σωματιδίων, ©TÜV Rheinland

## Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα

Η τεχνολογία ελέγχου μέσω μαγνητικών σωματιδίων παρότι δεν περιορίζεται από το σχήμα και το είδος του υλικού δεν παύει να έχει περιορισμούς. Καταρχάς, δύναται να εφαρμοστεί μόνο σε φερρομαγνητικά υλικά. Επιπλέον, λόγω του τρόπου ανίχνευσης των ατελειών, το μαγνητικό πεδίο πρέπει να είναι κάθετο στη μεγαλύτερη διάσταση της ατέλειας προς ανίχνευση. Άμεση συνέπεια της παραπάνω προϋπόθεσης είναι ότι ο λανθασμένος προσανατολισμός του πεδίου μπορεί να οδηγήσει στη παράβλεψη ορισμένων ατελειών του υλικού. Το ίδιο γεγονός θέτει επιπλέον το περιορισμό στον ακριβή προσδιορισμό των μη κυρίαρχων διαστάσεων της ατέλειας, όπως το βάθος της [18].

## Ερευνητικές Προσπάθειες

Μέρος της έρευνας προς βελτίωση της τεχνολογίας ελέγχου μέσω μαγνητικών σωματιδίων έχει διεξαχθεί προς καθιέρωση τυποποιημένων διαδικασιών και συνθηκών που θα πρέπει να ακολουθούνται. Όσον αφορά την εξέταση κραμάτων (welds) εκτεταμένη έρευνα έχει διεξαχθεί από τον G.Massa. Εκ των παραμέτρων που προσπάθησε να καθορίσει είναι η επαρκής μαγνήτιση του υλικού, για το σκοπό αυτό κατασκεύασε πίνακες, όπου ανάλογα με τη καθορισμένη γεωμετρία προτεινόταν η κρίσιμη τιμή του μαγνητικού πεδίου  $H$ .

Συγκεκριμένες διαδικασίες όπου προτείνεται η κρίσιμη τιμή του μαγνητικού πεδίου έχουν προταθεί στη Μ. Βρετανία, πάρα όλα αυτά δεν έχουν αποδειχθεί ακριβείς. Στη προσπάθεια για το καθορισμό του επαρκούς πεδίου έχει γίνει και η απόπειρα συσχετισμού του με τη μέγιστη μαγνητική διαπερατότητα του προς εξέταση μαγνητικού υλικού. Η θέση αυτή καταρρίφθηκε από τους Oehl και Swartzendruber.

Προς μελλοντική ανάπτυξη της μεθόδου ελέγχου μέσω μαγνητικών σωματιδίων καθίσταται χρήσιμη η μετάγχιση της ανθρώπινης τεχνογνωσίας, των ειδικών σε εξέταση ατελειών, στα συστήματα υπολογιστών που ελέγχουν τους αισθητήρες. Επιθυμητή είναι η ικανότητα των έμπειρων τεχνικών να υποπτεύονται εκ των προτέρων που είναι η πιθανές ατέλειες και να εστιάζουν τις προσπάθειές τους σε αυτά τα σημεία [18].

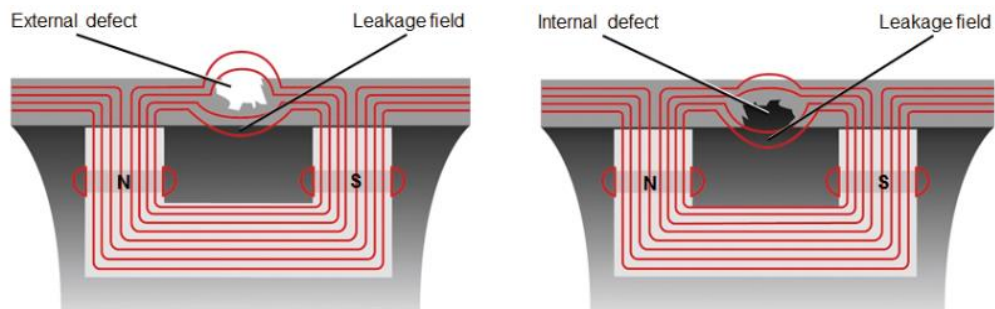
## Έλεγχος σκέδασης μαγνητικής ροής

Η μέθοδος ελέγχου σκέδασης μαγνητικής ροής προέκυψε ως παραλλαγή του ελέγχου μέσω μαγνητικών σωματιδίων. Κοινό χαρακτηριστικό των δύο μεθόδων είναι η ανίχνευση ατελειών κοντά στην επιφάνεια φερρομαγνητικού υλικού λόγω της σκέδασης της μαγνητικής ροής. Η ειδοποιός διάφορα τους εντοπίζεται στο τρόπο ανίχνευσης της διαστρέβλωσης, όπου η μέθοδος ελέγχου μέσω μαγνητικών σωματιδίων απαιτεί χρήση μαγνητικής σκόνης ή ταινίας [24][25], ενώ η μέθοδος ελέγχου σκέδασης μαγνητικής ροής απαιτεί χρήση μαγνητόμετρου.

Η χρήση μαγνητόμετρου πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Zuschlag [26]. Παρά όλα αυτά η μέθοδος ελέγχου σκέδασης μαγνητικής ροής δεν είχε μεγάλη απήχηση, έως ότου κατασκευασθεί το πρώτο πρακτικό σύστημα από τον C.Hastings [18][27].

Το σύστημα του C.Hastings είχε ως δυνατό του σημείο ότι μπορούσε να ανιχνεύσει ατέλειες σε σωλήνες, μια εφαρμογή μη καταστροφικού ελέγχου, για την οποία δεν ενδεικνυόταν ο έλεγχος μέσω μαγνητικών σωματιδίων [18].

Η μέθοδος ελέγχου σκέδασης μαγνητικής ροής μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όχι μόνο για τον εντοπισμό, αλλά και για τον χαρακτηρισμό των ατελειών. Στα συστήματα ελέγχου σκέδασης μαγνητικής ροής ως μαγνητόμετρο συνήθως χρησιμοποιείται αισθητήρας Hall ή πηνίο λήψης [18].



Σχήμα 23: Διαστρέβλωση μαγνητικής ροής i) λόγω εξωτερικής ατέλειας ii) λόγω εσωτερικής ατέλειας, ©rosen-group



## Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα

Ως απόρροια της μεθόδου ελέγχου μέσω μαγνητικών σωματιδίων, η μέθοδος ελέγχου σκέδασης μαγνητικής ροής μοιράζεται μαζί της βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Κοινός περιορισμός των μεθόδων είναι ότι δύναται να μετρήσουν μόνο φερρομαγνητικό υλικό. Επιπλέον και στις δύο μεθόδους σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η επιλογή του τρόπου επιβολής μαγνητικού πεδίου, ενώ το ληφθέν σήμα επηρεάζεται από το επίπεδο μαγνήτισης του εξεταζόμενου υλικού [18].

Σε μια άμεση σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων προκύπτει το πλεονέκτημα της μεθόδου ελέγχου μέσω μαγνητικών σωματιδίων στη ταχύτητα εξέτασης μεγάλων επιφανειών. Από την άλλη η μέθοδος ελέγχου σκέδασης μαγνητικής ροής επιτρέπει την προσεκτικότερη εξέταση μιας επιφάνειας. Η μέθοδος ελέγχου σκέδασης μαγνητικής ροής υπερτερεί και στην εξέταση επιφανειών όπου δεν είναι δυνατή η οπτική εξέταση [18].

## Ερευνητικές Προσπάθειες

Η δυνατότητα μέτρησης και των τριών συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου επέφερε την επιθυμία για συσχέτιση του μαγνητικού πεδίου διαρροής με το είδος της ατέλειας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο μεθοδολογίες: α) η προσπάθεια αναλυτικής λύσης μέσω προσέγγισης και β) η αριθμητική λύση, κυρίως μέσω της χρήσης της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

Η προσπάθεια υπολογισμού του πεδίου διαρροής για συγκεκριμένο τύπο ατέλειας αποτελεί ένα αρκετά πολύπλοκο έως αδύνατο πρόβλημα. Έτσι, χρησιμοποιείται συχνά η προσέγγιση της ατέλειας ως δίπολο. Από τους πρώτους που χρησιμοποίησαν αυτή τη μέθοδο ήταν οι Shcherbinin και Zatsepin [28] [29]. Οι δύο επιστήμονες υπολόγισαν τις κανονικές και εφαπτομενικές συνιστώσες για δίπολα σημείου, γραμμής και λωρίδας. Κρίσιμος περιορισμός για την πρακτική εφαρμογή αυτών των πρώιμων δημοσιεύσεων στάθηκε η μη συσχέτιση του πεδίου διαρροής με το πεδίο εντός του υλικού [18].

Οι Shcherbinin και Pashagin επανήλθαν στο θέμα έχοντας ένα πιο πρακτικό προσανατολισμό, αφού προσπάθησαν να δοκιμάσουν το προαναφερθέν μοντέλο στη πράξη. Για την επιθυμητή προσομοίωση εισήγαγαν τεχνητές ατέλειες σε δοκίμιο. Έτσι, κατέληξαν σε ορισμένα ποιοτικά συμπεράσματα [30] [31] [32]. Αρκετά αργότερα, οι Edwards και Palmer ασχολήθηκαν με τη μοντελοποίηση του πεδίου ατελειών, όπου προσέγγισαν μια ατέλεια τύπου σχισμής ως ημιελλειπτικού σχήματος θήκη [18] [33].

Η χρήση της αριθμητικής μεθόδου άργησε αρκετά να εφαρμοστεί σε σύγκριση με την αναλυτική μέθοδο, με κύρια αιτία την ανεπαρκή υπολογιστική ικανότητα της τεχνολογίας. Η πρώτη προσπάθεια χρήσης αριθμητικής μεθόδου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων έγινε από τους Lord και Hwang. Η προσπάθεια αποτέλεσε ορόσημο στον ερευνητικό τομέα του υπολογισμού πεδίου διαρροής, καθώς επέτρεψε τον υπολογισμό του πεδίου διαρροής εκ του προϋπάρχοντος πεδίου και της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού.

Η δημοσίευση των Lord και Hwang αφορούσε τον υπολογισμό πεδίου διαρροής παραλληλόγραμης θήκης, ο οποίος αποδείχθηκε επιτυχημένος, αφού συμφωνούσε με τα πρακτικά αποτελέσματα. Ακόμα, από τη πρώτη κιόλας δημοσίευση έγινε φανερό η αποτελεσματικότητα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων για άλλου τύπου ατέλειες, γεγονός που της προσέδωσε ισχυρή δυναμική [18] [34].

Οι Lord και Hwang επέκτειναν τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων προς υπολογισμό πολυπλοκότερων σχημάτων. Από τις δημοσιεύσεις προέκυψε και η εξάρτηση του βάθους ατέλειας από τη κορυφή προς κορυφή τιμή της μαγνητικής ροής και του πλάτους από το οριζόντιο διάστημα μεταξύ κορυφών [18] [35].

Για την αποτελεσματικότερη εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων κρίνεται απαραίτητη η επίλυση επιμέρους προβλημάτων, όπως η ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου για την αλληλεπίδραση μαγνητικού πεδίου και ατελειών. Άλλο πρόβλημα είναι η μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών υστέρησης του μετρούμενου υλικού. Ακόμα, με μια μελλοντική σκοπιά κρίνεται μεγάλης αξίας, η διεύρυνση της μεθόδου σε τρισδιάστατη για τον ακριβέστερο χαρακτηρισμό πραγματικών ατελειών [18].

Γενικά, η αναλυτική μέθοδος χωριά σε σύγκριση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Καταρχάς, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα. Το παραπάνω γεγονός ενισχύεται από την αδυναμία λύσης, αναλυτικής ή κλειστής μορφής, σε ορισμένες περιπτώσεις. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων συχνότερα συμφωνούν καλύτερα με τα πειραματικά αποτελέσματα. Παρά ταύτα, η προσπάθεια εύρεσης αναλυτικής λύσης για διάφορους τύπους ατελειών δεν έχει εγκαταλειφθεί, αφού προσφέρει το ταχύτερο υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου, ενώ η λύση μπορεί να διαφοριστεί, ώστε να βρεθούν οι δυνάμεις που ασκούνται στα σωματίδια. Γενικά, έχει αποδειχθεί δύσκολος ο ποσοτικός υπολογισμός των ατελειών. Αντιθέτως, τα ποιοτικά συμπεράσματα τυγχάνουν μεγαλύτερης επιτυχίας [18].

## Μέθοδοι αναπλήρωσης μαγνητικών απωλειών κατά τη χρήση ελεγκτή μονής λωρίδας

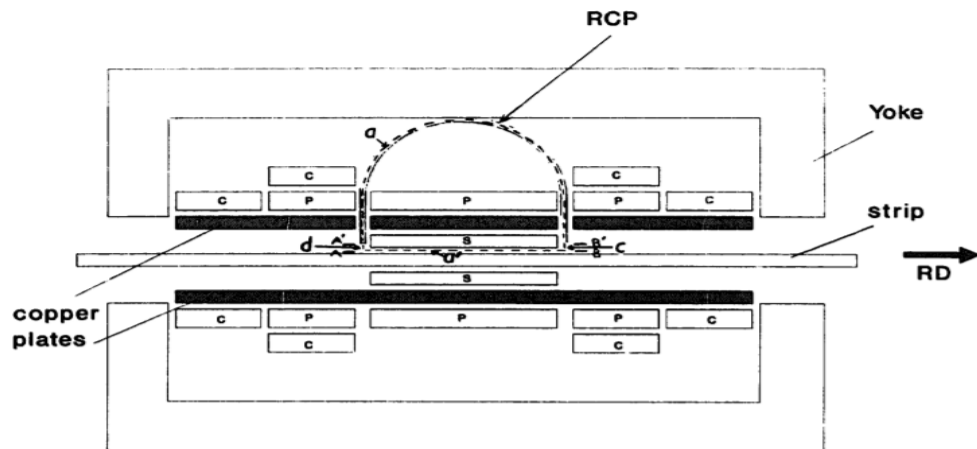
Η μέθοδος ελεγκτή μονής λωρίδας προτιμάτε πολλές φορές έναντι άλλων μεθόδων χαρακτηρισμού μαγνητικών υλικών, χάριν πλεονεκτημάτων της, όπως η απλότητα της. Παρά ταύτα μπορεί να είναι ανακριβής κατά την εφαρμογή της σε υλικά υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας. Αυτό συμβαίνει γιατί η απώλεια μαγνητεγερτικής δύναμης που επηρεάζει αρνητικά την ακρίβεια των μετρήσεων χαρακτηρισμού είναι εντονότερη σε αυτή τη περίπτωση [36].

Συγκεκριμένα, ο τρόπος με τον οποίο η απώλεια μαγνητεγερτικής δύναμης επιδρά αρνητικά στα αποτελέσματα συνίσταται στο ότι οδηγεί στην υπερτίμηση του μαγνητικού πεδίου. Οι απώλειες μαγνητεγερτικής δύναμης συμβαίνουν τόσο κατά μήκος του δοκιμίου, όσο και στο μήκος των yoke που χρησιμοποιούνται για το κλείσιμο του μαγνητικού κυκλώματος, με το τρόπο κατασκευής τους να επηρεάζει την αποτελεσματικότητα του αισθητήρα [36].

## Μέθοδος αναπλήρωσης με ποτενσιόμετρο Rogowski-Chattock

Ο έλεγχος του ηλεκτρικού χάλυβα μπορεί να γίνει όχι μόνο στατικά, αλλά και on-line. Μάλιστα, ο on-line έλεγχος σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ιδιαίτερα χρήσιμος και επιθυμητός, αφού επιτρέπει τον έλεγχο λωρίδας χάλυβα σε όλο το μήκος της. Η καθιερωμένη μέθοδος ελέγχου χάλυβα με πλαίσιο Epstein δε μπορεί να εφαρμοσθεί για on-line έλεγχο. Αντιθέτως, η μέθοδος ελεγκτική μονής λωρίδας (single sheet tester) δύναται να εφαρμοσθεί και σε περίπτωση on-line ελέγχου [37][38].

Εφόσον χρησιμοποιηθεί η μέθοδος ελεγκτική μονής λωρίδας για on-line έλεγχο προκύπτουν νέα προβλήματα σε σχέση με το στατικό έλεγχο, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά το σχεδιασμό του αισθητήρα. Ίσως το κυριότερο εκ των προβλημάτων είναι η διακύμανση του μήκους των διακένων αέρα μεταξύ του χάλυβα και του yoke, στα οποία χάνεται μαγνητεγερτική δύναμη. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να επιλυθεί με μέθοδο αναπλήρωσης της μαγνητεγερτικής δύναμης. Η μέθοδος αναπλήρωσης με ποτενσιόμετρο Rogowski-Chattock έχει αποδειχθεί κατάλληλη για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων του αισθητήρα. Αυτή χρησιμοποιεί ως διάταξη πηνίο διέγερσης (στο σχήμα 17 σημειώνεται ως P) το οποίο χωρίζεται σε τρία μέρη, πηνίο λήψης (στο σχήμα 17 σημειώνεται ως S), πηνίο αναπλήρωσης (στο σχήμα 17 σημειώνεται ως C) το οποίο χωρίζεται σε δύο μέρη, ποτενσιόμετρο Rogowski-Chattock (στο σχήμα 17 σημειώνεται με RCP) και συμμετρικά yoke (στο σχήμα 17 σημειώνεται ως yoke) [37][38].



Σχήμα 24: Διάταξη του αισθητήρα, ©Iranmanesh

Εφόσον το πηνίο διέγερσης διαρρέεται από ρεύμα  $I$  και το κεντρικό τμήμα του έχει  $N$  τυλίγματα, τότε μπορεί να γραφτεί η εξίσωση

$$NI = \oint Hdl = \int_A^B Hdl + \int_B^{B'} Hdl + \int_{A'}^A Hdl + \int_{A'}^{B'} Hdl \quad 3.1$$

όπου:

$A, B$  : τα σημεία επί του δοκιμίου

$A', B'$  : τα σημεία των άκρων του ποτενσιόμετρου

Το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο λήψης τίθεται σε τιμή τέτοια ώστε να μηδενίζει το τμήμα της μαγνητεγερτικής δύναμης που διαρρέει το ποτενσιόμετρο Rogowski-Chattock. Ιδανικά, θα θέλαμε ο δεύτερος και ο τρίτος όρος της εξίσωσης να είναι επίσης μηδέν, ώστε ο μέσος όρος της έντασης του μαγνητικού πεδίου να μπορεί να καθοριστεί ακριβώς ως:

$$H_{av} = \frac{NI}{l} \quad 3.2$$

Ο μηδενισμός του δεύτερου και του τρίτου όρου συμβαίνει μόνο στη περίπτωση που τα άκρα του ποτενσιόμετρου εφάπτονται στη λωρίδα χάλυβα. Δυστυχώς, αυτό δε μπορεί να συμβεί γιατί σε περίπτωση που η λωρίδα χάλυβα είναι ατελής, το ποτενσιόμετρο RC θα μπορούσε να υποστεί ζημιά. Πάντως, η επίδραση του δευτέρου και του τρίτου όρου είναι αρκετά μικρή ως και αμελητέα, καθώς αλληλοεξουδετερώνονται σε μεγάλο βαθμό. Με τη μέθοδο που περιγράφηκε επιτυγχάνεται ακριβής προσδιορισμός της έντασης του μαγνητικού πεδίου στη μετρούμενη περιοχή [37][38].

## Νέα μέθοδος

Σύμφωνα με έρευνα που δημοσιεύτηκε το 2016 προτείνεται μια νέα μέθοδος αναπλήρωσης των απωλειών μαγνητεγερτικής δύναμης. Κατά τους ερευνητές, η νέα αυτή μέθοδος είναι απλή και αποτελεσματικότερη της μεθόδου Chattock [36].

Σε σύγκριση με τη μέθοδο Chattock το σήμα προς διαχείριση για την αναπλήρωση απωλειών είναι μεγαλύτερο σε σχέση με της μεθόδου Chattock και έτσι λιγότερο ευάλωτο σε θόρυβο. Επιπλέον, σε αντίθεση με τη μέθοδο Chattock δε δημιουργείται γεωμετρική ασυνέχεια στα μαγνητικά τυλίγματα. Στη προκείμενη μέθοδο το άνω yoke χρησιμοποιείται ως ενδείκτης μηδενικής μαγνητικής ροής, ενώ το κάτω yoke ως κύκλωμα αναπλήρωσης. Για να επιτευχθεί μηδενική μαγνητική ροή στο άνω yoke χρησιμοποιείται πηνίο, το οποίο τυλίγεται γύρω από αυτό και έτσι λαμβάνουμε τάση στα άκρα του, η οποία είναι ανάλογη της παραγωγής της μαγνητικής ροής. Το σήμα που υπερτίθεται με στόχο το μηδενισμό της μαγνητικής ροής στο άνω yoke δημιουργείται από πηνίο που έχει τυλιχθεί στο κάτω yoke ύστερα από κατάλληλο έλεγχο του με χρήση ελεγκτή PID[36].

Συνεπώς, η μαγνητική ροή υπάρχει εξ ολοκλήρου στο κάτω yoke, με παράπλευρο όφελος την εξάλειψη της επίδρασης του άνω yoke στις απώλειες μαγνητεγερτικής δύναμης. Η εγκυρότητα αυτής της μεθόδου πιστοποιήθηκε ύστερα από σύγκριση των μετρήσεων μέσω αυτής της μεθόδου με μετρήσεις υψηλής ακρίβειας που είχαν παρθεί με τη μέθοδο εφαπτόμενου πηνίου τύπου H (tangential H-coil).

Συγκεκριμένα, έγιναν μετρήσεις τόσο σε προσανατολισμένο, όσο και σε μη προσανατολισμένο χάλυβα των ακολούθων τριών μεγεθών: των απωλειών ενέργειας, της φαινόμενης ενέργειας και της καμπύλης υστέρησης [36].

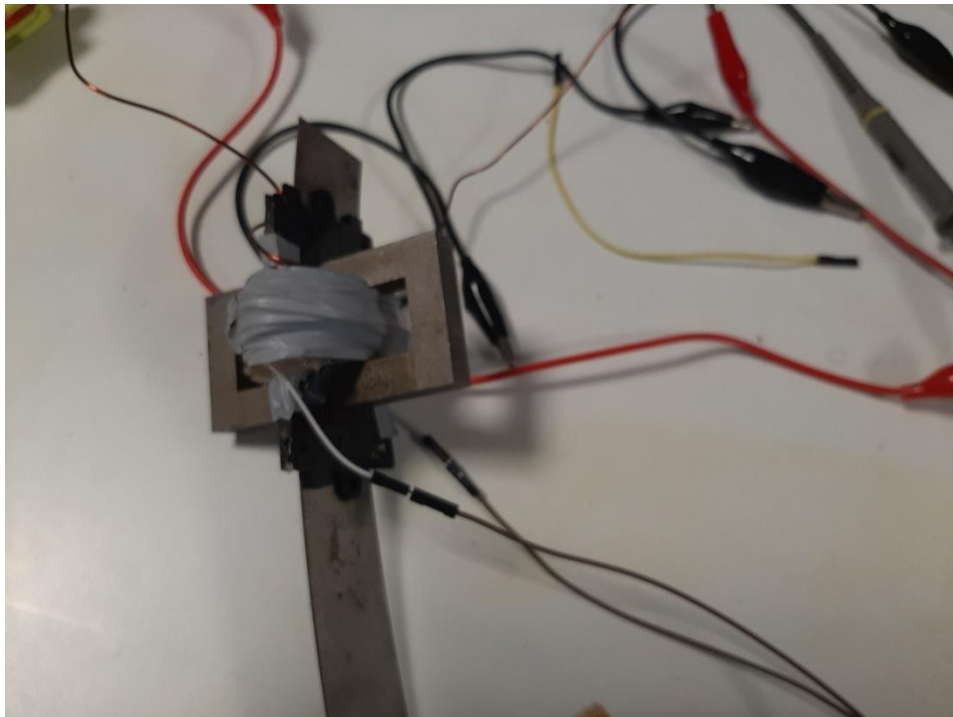




## 4. Πειραματικό μέρος

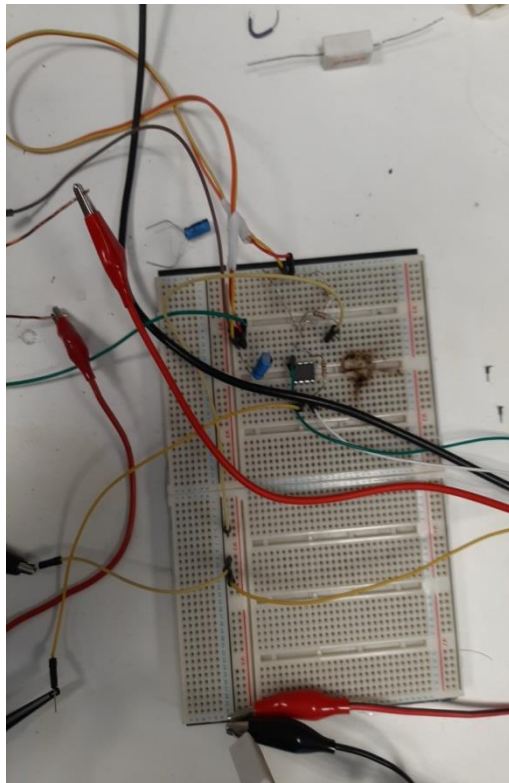
### Περιγραφή του αισθητήρα

Ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων ανήκει στη κατηγορία αισθητήρων τύπου ελεγκτή μονής λωρίδας (single sheet tester). Η περιγραφή του αισθητήρα καθίσταται πιο εύκολη, εφόσον γίνει ανά υποκύκλωμα του αισθητήρα, με τον αισθητήρα να διαχωρίζεται σε μαγνητικό και ηλεκτρικό κύκλωμα.



Σχήμα 25: Το μαγνητικό κύκλωμα του αισθητήρα

Όσον αφορά το μαγνητικό κύκλωμα του αισθητήρα, αυτό αποτελείται από: δύο γοκε, δύο πηνία και το δοκίμιο. Τα δύο πηνία λαμβάνουν το ρόλο του πηνίου διέγερσης και του πηνίου λήψης, ενώ κατασκευάστηκαν χειροποίητα στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας. Το μεν πηνίο διέγερσης έχει κατασκευασθεί με σύρμα πάχους 1 mm, το δε πηνίο λήψης έχει κατασκευασθεί με σύρμα πάχους 0,1 mm. Η διάταξη των δύο πηνίων έγινε με τρόπο τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα μετρήσεων σύμφωνα με τη θεωρία όπως αυτή περιγράφηκε στην ενότητα "Μετρήσεις  $H$ ,  $B$  σε φερρομαγνητικό δοκίμιο". Κατά τη θεωρία λοιπόν το πηνίο διέγερσης τυλίχθηκε εξωτερικά, ενώ το πηνίο λήψης εσωτερικά, ώστε να ελαχιστοποιείται το διάκενο μεταξύ δοκιμίου και πηνίου λήψης. Η χρησιμοποίηση δύο αντικείμενων γοκε έγινε πάλι σύμφωνα με τη θεωρία, αφού χάρη σε αυτή τη διάταξη γίνεται μερική εξάλειψη των δινορευμάτων και αυξάνεται η ομοιομορφία του μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 26: Το ηλεκτρικό κύκλωμα του αισθητήρα

Η συνολική διάταξη ισοδυναμεί με κλειστό μαγνητικό κύκλωμα, όπου το πηνίο διέγερσης ισοδυναμεί με ηλεκτρεγερτική δύναμη, το πηνίο λήψης μας επιτρέπει να μετράμε το ρεύμα, ενώ τα γοκε, τα διάκενα μεταξύ γοκε και του δοκιμίου, και το δοκίμιο ισοδυναμούν με αντιστάσεις. Το αντίστοιχο ηλεκτρικό κύκλωμα φαίνεται στο σχ. 26.

Το ηλεκτρικό κύκλωμα του αισθητήρα συνδέεται στα άκρα του πηνίου λήψης, επιτελώντας τις εξής λειτουργίες: την ενίσχυση του σήματος του αισθητήρα λήψης και την αποκοπή πρόσθετου θορύβου. Ουσιαστικά το κύκλωμα ισοδυναμεί με διαφορικό ενισχυτή, χρησιμοποιώντας ηλεκτρικές αντιστάσεις και τελεστικό ενισχυτή. Οι τιμές των αντιστάσεων επιλέχθηκαν με κριτήριο τη βέλτιστη ενίσχυση σε χαμηλές συχνότητες.

## Δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά το πείραμα

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα είχαν χρησιμοποιηθεί σε παλαιότερη μελέτη που διεξήχθη το έτος 2014 και ως εκ τούτου είναι γνωστός ο τρόπος κατασκευής τους και διάφορες παράμετροι τους. Στην έρευνα του έτους 2014 είχαν χρησιμοποιηθεί τρεις σειρές δειγμάτων, ενώ αυτή τη φορά χρησιμοποιήθηκαν δύο σειρές δοκιμίων. Τα δείγματα κάθε σειράς προήλθαν από δείγμα ηλεκτρικού χάλυβα ψυχρής εξέλασης, με τη κοπή του λωρίδες διαστάσεων 300x30 mm<sup>2</sup>. Οι μετρήσεις έγιναν στα δείγματα της σειράς TS και της σειράς RX[38].

| Sample           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>TS-series</b> | <b>TS1</b> | <b>TS2</b> | <b>TS3</b> | <b>TS4</b> | <b>TS5</b> | <b>TS6</b> | <b>TS7</b> | <b>TS8</b> | <b>TS9</b> |
| True strain (%)  | 29         | 24         | 19         | 12         | 10         | 7          | 3          | 2          | 0          |
| Thickness (μm)   | 510        | 540        | 560        | 600        | 620        | 640        | 660        | 670        | 680        |
| <b>RX-series</b> | <b>RX1</b> | <b>RX2</b> | <b>RX3</b> | <b>RX4</b> | <b>RX5</b> | <b>RX6</b> | <b>RX7</b> |            |            |
| Grain size (μm)  | 148        | 119        | 82         | 67         | 54         | 31         | 27         |            |            |
| Thickness (μm)   | 511        | 501        | 488        | 475        | 451        | 400        | 343        |            |            |
| <b>GG-series</b> | <b>GG1</b> | <b>GG2</b> | <b>GG3</b> | <b>GG4</b> | <b>GG5</b> | <b>GG6</b> |            |            |            |
| Grain size (μm)  | 11         | 17         | 57         | 62         | 66         | 27         |            |            |            |
| Thickness (μm)   | 540        | 540        | 540        | 540        | 540        | 540        |            |            |            |
| Annealing (°C/h) | 600/2      | 680/2      | 850/4      | 850/8      | 850/12     | 680/2      |            |            |            |

Σχήμα 27: Πίνακας με τα στοιχεία των δοκιμίων

Τα δείγματα της σειράς TS διαφέρουν σε πραγματική παραμόρφωση (true strain), η οποία κυμαίνεται από 0% έως 29%, ενώ ακόμα έχουν διαφορετικό πάχος μεταξύ τους. Στα δείγματα της σειράς RX έχει γίνει ανόπτηση στη θερμοκρασία των 760 °C προκειμένου να αναπτυχθούν διαφορετικά μεγέθη συσσωματώματων (grains), μέσω της ανακρυστάλλωσης. Τα δοκίμια της σειράς RX έχουν επίσης μεταβαλλόμενο πάχος. Περισσότερες λεπτομέρειες για το κάθε δείγμα δίνονται στον παραπάνω πίνακα.

## Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων ακολουθήθηκε μια σειρά από βήματα. Καταρχάς, αφού έγινε η σύνδεση του αισθητήρα με τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, δόθηκε προσοχή σε φαινομενικά ασήμαντες λεπτομέρειες, οι οποίες όμως θα μπορούσαν να επηρεάσουν σημαντικά τις μετρήσεις εισάγοντας σφάλματα. Έτσι, απομακρύνθηκαν ηλεκτρονικές συσκευές, όπως κινητά τηλέφωνα, οι οποίες θα μπορούσαν να δημιουργήσουν παρεμβολές στο μαγνητικό πεδίο διέγερσης. Ακόμα, η επιφάνεια στην οποία βρίσκονταν οι αισθητήρες ήταν σταθερή, ώστε να μην υπεισέρχονται σφάλματα στις μετρήσεις λόγω μηχανικών ταλαντώσεων του δοκιμίου, οι οποίες θα μετέβαλλαν τις αποστάσεις μεταξύ πηνίου και yoke.

Κατόπιν, οι παράμετροι του ηλεκτρονικού εξοπλισμού ρυθμίστηκαν κατάλληλα. Η τάση πόλωσης του τελεστικού ενισχυτή ήταν αρκετά μεγάλη, ώστε να μην παραμορφώνεται το σήμα κατά την ενίσχυση του. Η παλμογεννήτρια ρυθμίστηκε, ώστε να παράγει σήμα ημιτονικής μορφής κατάλληλου πλάτους και συχνότητας. Έπειτα σε κάθε δοκίμιο έγιναν σε δύο σημεία του, στη μια άκρη του και τη μέση του. Με σταθερή τη συχνότητα λήφθηκαν δέκα μετρήσεις για τιμές τάσης στην έξοδο της γεννήτριας κυματομορφής από 300mV έως 1200mV, με βήμα 100mV. Η τάση μετρήθηκε και στα άκρα της αντίστασης ισχύος του κυκλώματος, όπου έλαβε τιμές από 360mV έως 1420mV αυξανόμενη με βήμα 120mV αντίστοιχα. Η διαδικασία έγινε για τιμές συχνότητας 0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1Hz.

Με σκοπό τη βέλτιστη λήψη των μετρήσεων η τελική καταγραφή της τιμής του σήματος λήψης έγινε σε συνάρτηση με την εικονιζόμενη κυματομορφή του ηλεκτρονικού οργάνου, ώστε να διασφαλισθεί ότι η τιμή του σήματος λήψης δεν επηρεάστηκε από κορυφές θορύβου. Συνεργατικά, προς τη ποιότητα των μετρήσεων επιλέχθηκε ακόμα να μεσολαβεί από τη μια λήψη προς την επόμενη επαρκές χρονικό διάστημα, κατά το οποίο ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός είναι ανενεργός, ώστε σε περίπτωση που οι ηλεκτρικές αντιστάσεις υπερθερμανθούν να

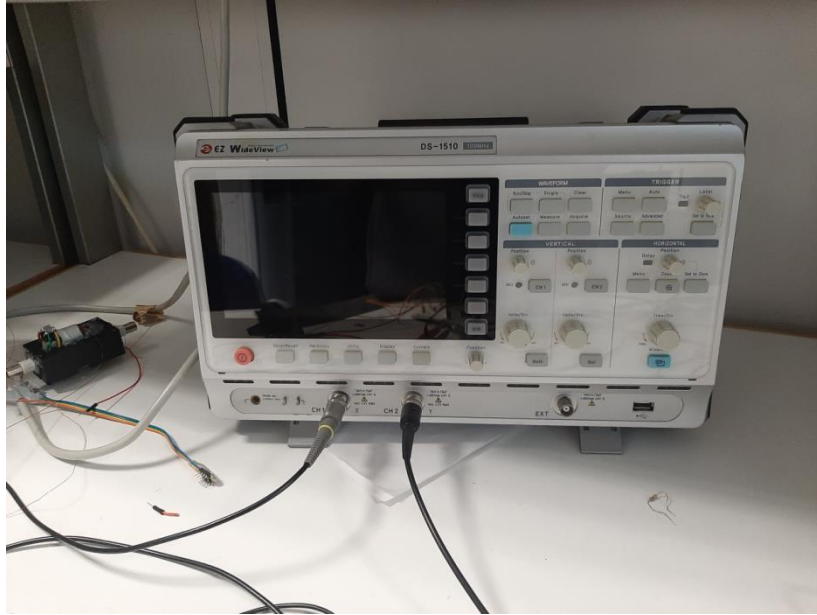
επανέρχονται σε θερμοκρασία δωματίου και όσο το δυνατόν να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις από θερμικό θόρυβο.

Ιδιαίτερη καταπόνηση, σε σχέση με τις υπόλοιπες αντιστάσεις, δέχεται η αντίσταση σε σειρά με το πηνίο διέγερσης, αφού τις προσφέρεται υψηλή ισχύς, για αυτό το λόγο και επιλέχθηκε να τοποθετηθεί ειδική αντίσταση σε αυτό το σημείο, που ονομάζεται αντίσταση ισχύος.

Οι χαμηλές συχνότητες, στις οποίες διεξήχθησαν οι μετρήσεις, επέτρεψαν στη διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις εγγενής ιδιότητες του υλικού, αφού το φαινόμενο των δινορευμάτων είναι πρακτικά αμελητέο σε τόσο χαμηλές συχνότητες. Επιπλέον, οι χαμηλές τάσεις μας επέτρεψαν να λάβουμε μετρήσεις σε γραμμική περιοχή της καμπύλης υστέρησης.

## Πειραματικός εξοπλισμός

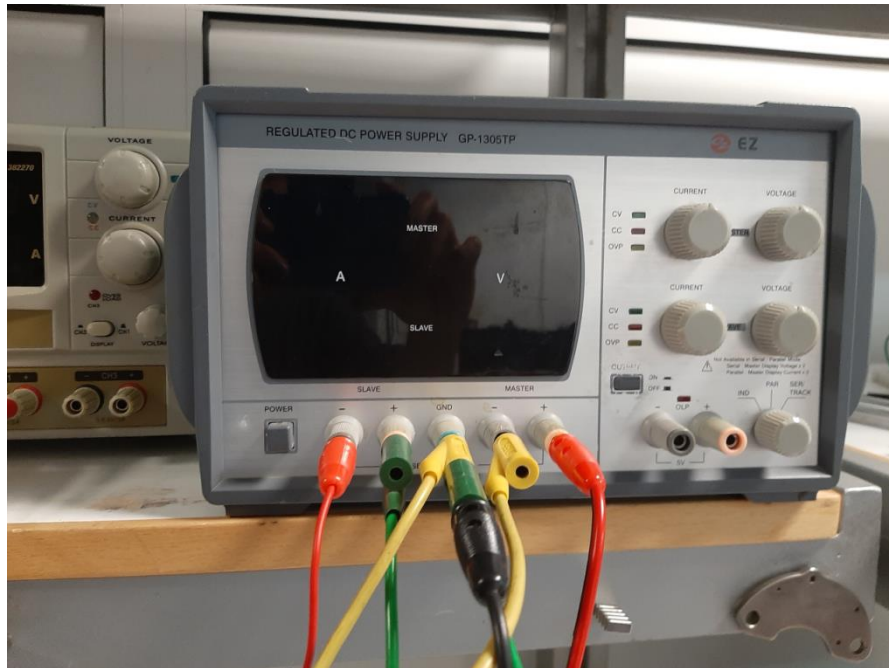
Παρακάτω φαίνεται ο πειραματικός εξοπλισμός :



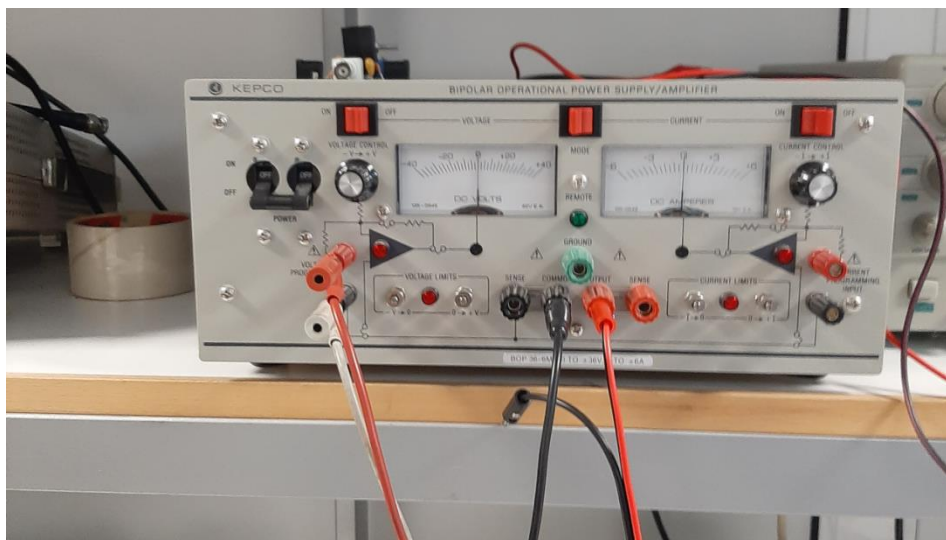
Σχήμα 28: Παλμογράφος EZ Wideview DS-1510



Σχήμα 29: Γεννήτρια κυματομορφής LXI Agilent 33220A



Σχήμα 30: Τροφοδοτικό ολοκληρωτή εξόδου EZGP-1305TP



Σχήμα 31: Ενισχυτής ρεύματος KEPCO



## Παρουσίαση μετρήσεων

| f=0,1Hz     |          |             |          |            |          |            |          |
|-------------|----------|-------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| RX1 (148μm) |          | RX2 (119μm) |          | RX3 (82μm) |          | RX4 (67μm) |          |
| edge        | middle   | edge        | middle   | edge       | middle   | edge       | middle   |
| Vout(mV)    | Vout(mV) | Vout(mV)    | Vout(mV) | Vout(mV)   | Vout(mV) | Vout(mV)   | Vout(mV) |
| 77,6        | 91       | 80          | 91,2     | 72,6       | 88       | 76,8       | 91,2     |
| 102         | 125,6    | 108         | 107      | 99,2       | 118      | 104        | 117,6    |
| 124         | 147      | 132         | 136      | 123,2      | 148      | 128        | 146,4    |
| 154         | 182      | 164         | 184      | 149,6      | 182      | 150        | 178      |
| 184         | 208      | 184         | 212      | 176        | 210      | 190        | 212      |
| 206         | 242      | 222         | 242      | 198        | 238      | 212        | 236      |
| 230         | 270      | 246         | 272      | 224        | 270      | 238        | 262      |
| 252         | 300      | 268         | 298      | 252        | 298      | 262        | 294      |
| 284         | 330      | 292         | 316      | 274        | 322      | 288        | 328      |
| 306         | 358      | 318         | 354      | 306        | 356      | 314        | 350      |

Σχήμα 32: Σειρά δοκίμιων RX, δοκίμια RX1-RX4, συχνότητα 0,1 Hz

| f=0,1Hz    |          |            |          |            |          |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| RX5 (59μm) |          | RX6 (31μm) |          | RX7 (27μm) |          |
| edge       | middle   | edge       | middle   | edge       | middle   |
| Vout(mV)   | Vout(mV) | Vout(mV)   | Vout(mV) | Vout(mV)   | Vout(mV) |
| 76         | 93,6     | 82,4       | 76,8     | 55,6       | 66       |
| 100        | 117,6    | 105,6      | 106,2    | 76,8       | 93,6     |
| 128,6      | 152,8    | 129,6      | 132,8    | 93,6       | 115,2    |
| 156        | 174      | 153,6      | 168      | 114,4      | 139,2    |
| 180        | 206      | 180        | 196      | 131,2      | 176      |
| 208        | 236      | 202        | 228      | 152        | 192      |
| 232        | 268      | 228        | 258      | 172        | 214      |
| 254        | 296      | 258        | 286      | 192        | 234      |
| 288        | 322      | 284        | 312      | 212        | 256      |
| 310        | 354      | 310        | 336      | 236        | 282      |

Σχήμα 33: Σειρά δοκίμιων RX, δοκίμια RX5-RX7, συχνότητα 0,1 Hz

| f=0,2Hz     |          |             |          |            |          |            |          |
|-------------|----------|-------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| RX1 (148μm) |          | RX2 (119μm) |          | RX3 (82μm) |          | RX4 (67μm) |          |
| edge        | middle   | edge        | middle   | edge       | middle   | edge       | middle   |
| Vout(mV)    | Vout(mV) | Vout(mV)    | Vout(mV) | Vout(mV)   | Vout(mV) | Vout(mV)   | Vout(mV) |
| 150         | 180      | 160         | 172      | 148        | 180      | 156        | 172      |
| 204         | 242      | 214         | 240      | 196        | 240      | 210        | 234      |
| 258         | 300      | 268         | 304      | 246        | 300      | 258        | 292      |
| 310         | 362      | 322         | 360      | 304        | 360      | 312        | 350      |
| 358         | 428      | 374         | 424      | 344        | 428      | 366        | 412      |
| 420         | 484      | 436         | 480      | 396        | 480      | 416        | 460      |
| 460         | 556      | 488         | 544      | 464        | 540      | 468        | 528      |
| 512         | 600      | 536         | 604      | 500        | 600      | 520        | 596      |
| 560         | 668      | 592         | 660      | 540        | 660      | 576        | 640      |
| 604         | 724      | 644         | 712      | 588        | 716      | 616        | 708      |

Σχήμα 34: Σειρά δοκιμίων RX, δοκίμια RX1-RX4, συχνότητα 0,2Hz

| f=0,2Hz    |          |            |          |            |          |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| RX5 (59μm) |          | RX6 (31μm) |          | RX7 (27μm) |          |
| edge       | middle   | edge       | middle   | edge       | middle   |
| Vout(mV)   | Vout(mV) | Vout(mV)   | Vout(mV) | Vout(mV)   | Vout(mV) |
| 151,2      | 174      | 148,8      | 170      | 112        | 134,4    |
| 204        | 230      | 200        | 222      | 147,2      | 182      |
| 252        | 296      | 246        | 276      | 192        | 226      |
| 306        | 352      | 300        | 334      | 230        | 276      |
| 358        | 416      | 356        | 384      | 262        | 324      |
| 412        | 480      | 404        | 444      | 302        | 366      |
| 456        | 532      | 456        | 504      | 336        | 432      |
| 508        | 596      | 500        | 564      | 370        | 472      |
| 568        | 648      | 552        | 616      | 416        | 520      |
| 608        | 708      | 596        | 664      | 444        | 564      |

Σχήμα 35: Σειρά δοκιμίων RX, δοκίμια RX5-RX7, συχνότητα 0,2Hz

| f=0,5Hz     |          |             |          |            |          |            |          |
|-------------|----------|-------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| RX1 (148μm) |          | RX2 (119μm) |          | RX3 (82μm) |          | RX4 (67μm) |          |
| edge        | middle   | edge        | middle   | edge       | middle   | edge       | middle   |
| Vout(mV)    | Vout(mV) | Vout(mV)    | Vout(mV) | Vout(mV)   | Vout(mV) | Vout(mV)   | Vout(mV) |
| 384         | 456      | 400         | 440      | 380        | 444      | 392        | 436      |
| 512         | 608      | 528         | 596      | 496        | 596      | 520        | 584      |
| 628         | 768      | 656         | 748      | 624        | 736      | 640        | 720      |
| 748         | 896      | 780         | 904      | 736        | 880      | 776        | 864      |
| 888         | 1050     | 920         | 1032     | 848        | 1030     | 896        | 1000     |
| 1010        | 1190     | 1060        | 1180     | 968        | 1180     | 1032       | 1144     |
| 1130        | 1340     | 1180        | 1310     | 1080       | 1300     | 1152       | 1280     |
| 1220        | 1480     | 1290        | 1452     | 1200       | 1450     | 1256       | 1416     |
| 1350        | 1600     | 1420        | 1620     | 1320       | 1580     | 1392       | 1560     |
| 1470        | 1740     | 1540        | 1720     | 1410       | 1720     | 1488       | 1680     |

Σχήμα 36: Σειρά δοκιμίων RX, δοκίμια RX1-RX4, συχνότητα 0,5Hz

| f=0,5Hz    |          |            |          |            |          |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| RX5 (59μm) |          | RX6 (31μm) |          | RX7 (27μm) |          |
| edge       | middle   | edge       | middle   | edge       | middle   |
| Vout(mV)   | Vout(mV) | Vout(mV)   | Vout(mV) | Vout(mV)   | Vout(mV) |
| 380        | 440      | 372        | 420      | 272        | 348      |
| 512        | 592      | 480        | 552      | 368        | 464      |
| 636        | 736      | 608        | 692      | 468        | 576      |
| 760        | 880      | 736        | 840      | 536        | 696      |
| 880        | 1024     | 856        | 968      | 644        | 816      |
| 1000       | 1168     | 976        | 1104     | 744        | 920      |
| 1128       | 1304     | 1088       | 1214     | 832        | 1024     |
| 1240       | 1448     | 1224       | 1336     | 904        | 1136     |
| 1352       | 1578     | 1328       | 1472     | 1008       | 1232     |
| 1480       | 1720     | 1440       | 1580     | 1096       | 1344     |

Σχήμα 37: Σειρά δοκιμίων RX, δοκίμια RX5-RX7, συχνότητα 0,5Hz

| f=1,0Hz     |          |             |          |            |          |            |          |
|-------------|----------|-------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| RX1 (148μm) |          | RX2 (119μm) |          | RX3 (82μm) |          | RX4 (67μm) |          |
| edge        | middle   | edge        | middle   | edge       | middle   | edge       | middle   |
| Vout(mV)    | Vout(mV) | Vout(mV)    | Vout(mV) | Vout(mV)   | Vout(mV) | Vout(mV)   | Vout(mV) |
| 792         | 888      | 800         | 888      | 752        | 872      | 776        | 856      |
| 1020        | 1190     | 1050        | 1180     | 984        | 1170     | 1008       | 1144     |
| 1240        | 1460     | 1300        | 1420     | 1200       | 1430     | 1248       | 1400     |
| 1480        | 1740     | 1540        | 1740     | 1420       | 1720     | 1480       | 1660     |
| 1740        | 2020     | 1780        | 2000     | 1660       | 1980     | 1720       | 1960     |
| 1920        | 2260     | 2000        | 2240     | 1880       | 2220     | 1960       | 2160     |
| 2120        | 2520     | 2240        | 2480     | 2100       | 2460     | 2160       | 2360     |
| 2340        | 2760     | 2420        | 2740     | 2260       | 2720     | 2380       | 2660     |
| 2520        | 3000     | 2600        | 2960     | 2480       | 2960     | 2560       | 2860     |
| 2740        | 3200     | 2780        | 3180     | 2640       | 3180     | 2800       | 3040     |

Σχήμα 38: Σειρά δοκιμίων RX, δοκίμια RX1-RX4, συχνότητα 1,0Hz

| f=1,0Hz    |          |            |          |            |          |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| RX5 (59μm) |          | RX6 (31μm) |          | RX7 (27μm) |          |
| edge       | middle   | edge       | middle   | edge       | middle   |
| Vout(mV)   | Vout(mV) | Vout(mV)   | Vout(mV) | Vout(mV)   | Vout(mV) |
| 744        | 880      | 752        | 832      | 536        | 672      |
| 976        | 1160     | 960        | 1088     | 732        | 896      |
| 1216       | 1432     | 1200       | 1344     | 904        | 1104     |
| 1440       | 1700     | 1432       | 1600     | 1096       | 1336     |
| 1680       | 1980     | 1680       | 1780     | 1264       | 1536     |
| 1902       | 2200     | 1900       | 2040     | 1432       | 1740     |
| 2120       | 2460     | 2100       | 2220     | 1560       | 1920     |
| 2360       | 2660     | 2320       | 2480     | 1740       | 2080     |
| 2540       | 2900     | 2520       | 2700     | 1880       | 2220     |
| 2720       | 3100     | 2700       | 2900     | 2020       | 2420     |

Σχήμα 39: Σειρά δοκιμίων RX, δοκίμια RX5-RX7, συχνότητα 1,0Hz

| f=0,1Hz   |          |           |          |           |          |           |          |           |          |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| TS1 (29%) |          | TS2 (24%) |          | TS3 (19%) |          | TS4 (12%) |          | TS5 (10%) |          |
| edge      | middle   | edge      | middle   | edge      | middle   | edge      | middle   | edge      | middle   |
| Vout(mV)  | Vout(mV) | Vout(mV)  | Vout(mV) | Vout(mV)  | Vout(mV) | Vout(mV)  | Vout(mV) | Vout(mV)  | Vout(mV) |
| 53,2      | 55,6     | 42        | 49,2     | 39,2      | 45,2     | 42        | 41,6     | 46,8      | 50       |
| 76,8      | 69,2     | 57,2      | 64       | 53,6      | 60,4     | 53,6      | 58       | 62,4      | 66       |
| 92,8      | 96       | 72,8      | 77,6     | 71,2      | 80       | 68        | 79,2     | 80        | 84,8     |
| 112       | 102,4    | 86,4      | 95,2     | 81,6      | 93,6     | 85,6      | 95,2     | 96,8      | 105,4    |
| 129,6     | 127,2    | 99,2      | 108,8    | 101,6     | 113,6    | 96,8      | 111,2    | 112       | 120      |
| 148       | 144,8    | 118,4     | 124,8    | 112,8     | 128,8    | 107,2     | 126,4    | 126,4     | 142      |
| 178       | 156,8    | 132,8     | 138,4    | 131,2     | 143,2    | 122,4     | 140      | 146       | 160      |
| 194       | 188      | 150       | 162      | 140,8     | 164      | 142       | 160      | 164       | 176      |
| 212       | 206      | 166       | 172      | 154       | 178      | 150       | 182      | 182       | 198      |
| 228       | 222      | 178       | 190      | 170       | 198      | 164       | 196      | 200       | 214      |

Σχήμα 40: Σειρά δοκιμίων TS, δοκίμια TS1-TS5, συχνότητα 0,1Hz

| f=0,1Hz  |          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| TS6 (7%) |          | TS7 (3%) |          | TS8 (2%) |          | TS9 (0%) |          |
| edge     | middle   | edge     | middle   | edge     | middle   | edge     | middle   |
| Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) |
| 48       | 128      | 51,2     | 61,6     | 52       | 68       | 72       | 128      |
| 61,6     | 164      | 69,6     | 82,4     | 67,2     | 82,4     | 88       | 164      |
| 82,4     | 196      | 92,8     | 95,2     | 83,2     | 110,4    | 108      | 196      |
| 98       | 236      | 104      | 123      | 95       | 125      | 128      | 236      |
| 112,8    | 276      | 117,6    | 131      | 116,8    | 150      | 144      | 276      |
| 131      | 312      | 128      | 162      | 132      | 172      | 164      | 312      |
| 148      | 348      | 150,4    | 190      | 148      | 196      | 180      | 348      |
| 168      | 372      | 180      | 208      | 172      | 214      | 204      | 372      |
| 188      | 416      | 190      | 226      | 186      | 228      | 216      | 416      |
| 196      | 444      | 202      | 250      | 236      | 246      | 236      | 444      |

Σχήμα 41: Σειρά δοκιμίων TS, δοκίμια TS6-TS9, συχνότητα 0,1Hz

| f=0,2Hz   |          |           |          |           |          |           |          |           |          |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| TS1 (29%) |          | TS2 (24%) |          | TS3 (19%) |          | TS4 (12%) |          | TS5 (10%) |          |
| edge      | middle   | edge      | middle   | edge      | middle   | edge      | middle   | edge      | middle   |
| Vout(mV)  | Vout(mV) | Vout(mV)  | Vout(mV) | Vout(mV)  | Vout(mV) | Vout(mV)  | Vout(mV) | Vout(mV)  | Vout(mV) |
| 110,4     | 108      | 84,8      | 88,8     | 81,6      | 92       | 75,2      | 92,8     | 93,6      | 99,2     |
| 148       | 145,6    | 114,4     | 122,4    | 109,6     | 121,6    | 110,4     | 129,2    | 125       | 132,8    |
| 188       | 190      | 138,4     | 149,6    | 140,8     | 160      | 134,6     | 164      | 160       | 180      |
| 222       | 216      | 176       | 188      | 170       | 190      | 170       | 196      | 192       | 216      |
| 258       | 254      | 200       | 210      | 194       | 224      | 196       | 228      | 226       | 244      |
| 290       | 292      | 232       | 246      | 224       | 258      | 226       | 266      | 256       | 282      |
| 330       | 322      | 260       | 282      | 252       | 288      | 250       | 298      | 294       | 318      |
| 370       | 360      | 286       | 314      | 282       | 322      | 280       | 328      | 330       | 356      |
| 404       | 386      | 324       | 344      | 312       | 348      | 308       | 358      | 352       | 392      |
| 432       | 432      | 344       | 374      | 342       | 396      | 330       | 412      | 378       | 428      |

Σχήμα 42: Σειρά δοκιμίων TS, δοκίμια TS1-TS5, συχνότητα 0,2Hz

| f=0,2Hz  |          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| TS6 (7%) |          | TS7 (3%) |          | TS8 (2%) |          | TS9 (0%) |          |
| edge     | middle   | edge     | middle   | edge     | middle   | edge     | middle   |
| Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) |
| 96       | 113      | 98,4     | 116      | 98,4     | 111      | 128      | 134      |
| 128      | 142      | 138,4    | 162      | 128,8    | 160      | 164      | 176      |
| 164      | 192      | 164      | 202      | 174      | 202      | 196      | 210      |
| 202      | 226      | 196      | 246      | 204      | 248      | 236      | 248      |
| 228      | 264      | 226      | 286      | 226      | 290      | 276      | 312      |
| 258      | 302      | 264      | 328      | 264      | 324      | 312      | 354      |
| 286      | 338      | 294      | 372      | 294      | 366      | 348      | 402      |
| 328      | 378      | 322      | 416      | 330      | 416      | 372      | 444      |
| 356      | 412      | 352      | 456      | 356      | 460      | 416      | 482      |
| 388      | 456      | 400      | 504      | 408      | 500      | 444      | 532      |

Σχήμα 43: Σειρά δοκιμίων TS, δοκίμια TS6-TS9, συχνότητα 0,2Hz

| f=0,5Hz   |          |           |          |           |          |           |          |           |          |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| TS1 (29%) |          | TS2 (24%) |          | TS3 (19%) |          | TS4 (12%) |          | TS5 (10%) |          |
| edge      | middle   | edge      | middle   | edge      | middle   | edge      | middle   | edge      | middle   |
| Vout(mV)  | Vout(mV) | Vout(mV)  | Vout(mV) | Vout(mV)  | Vout(mV) | Vout(mV)  | Vout(mV) | Vout(mV)  | Vout(mV) |
| 274       | 268      | 208       | 220      | 202       | 224      | 206       | 230      | 230       | 254      |
| 354       | 354      | 286       | 300      | 272       | 304      | 278       | 318      | 314       | 340      |
| 452       | 440      | 348       | 382      | 344       | 396      | 344       | 412      | 404       | 436      |
| 536       | 540      | 424       | 468      | 430       | 476      | 428       | 484      | 484       | 536      |
| 616       | 620      | 500       | 544      | 488       | 556      | 480       | 564      | 564       | 616      |
| 692       | 700      | 564       | 616      | 556       | 632      | 548       | 624      | 632       | 700      |
| 772       | 808      | 640       | 696      | 624       | 704      | 624       | 700      | 712       | 800      |
| 872       | 880      | 700       | 768      | 700       | 808      | 692       | 808      | 776       | 864      |
| 936       | 968      | 776       | 832      | 760       | 864      | 748       | 848      | 864       | 960      |
| 1016      | 1032     | 832       | 888      | 816       | 936      | 816       | 928      | 928       | 1040     |

Σχήμα 44: Σειρά δοκιμίων TS, δοκίμια TS1-TS5, συχνότητα 0,5Hz

| f=0,5Hz  |          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| TS6 (7%) |          | TS7 (3%) |          | TS8 (2%) |          | TS9 (0%) |          |
| edge     | middle   | edge     | middle   | edge     | middle   | edge     | middle   |
| Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) |
| 234      | 270      | 234      | 292      | 242      | 324      | 284      | 324      |
| 312      | 366      | 316      | 400      | 320      | 432      | 368      | 432      |
| 400      | 468      | 412      | 504      | 420      | 556      | 464      | 556      |
| 472      | 560      | 480      | 600      | 484      | 660      | 564      | 660      |
| 552      | 648      | 548      | 696      | 560      | 768      | 644      | 768      |
| 628      | 736      | 632      | 808      | 636      | 888      | 736      | 888      |
| 700      | 840      | 692      | 888      | 724      | 976      | 820      | 976      |
| 792      | 936      | 800      | 1000     | 808      | 1100     | 904      | 1100     |
| 856      | 1020     | 880      | 1090     | 888      | 1180     | 992      | 1180     |
| 920      | 1100     | 944      | 1170     | 976      | 1290     | 1080     | 1290     |

Σχήμα 45: Σειρά δοκιμίων TS, δοκίμια TS6-TS9, συχνότητα 0,5Hz

| f=1,0Hz   |          |           |          |           |          |           |          |           |          |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| TS1 (29%) |          | TS2 (24%) |          | TS3 (19%) |          | TS4 (12%) |          | TS5 (10%) |          |
| edge      | middle   | edge      | middle   | edge      | middle   | edge      | middle   | edge      | middle   |
| Vout(mV)  | Vout(mV) | Vout(mV)  | Vout(mV) | Vout(mV)  | Vout(mV) | Vout(mV)  | Vout(mV) | Vout(mV)  | Vout(mV) |
| 508       | 516      | 404       | 448      | 408       | 440      | 404       | 464      | 484       | 500      |
| 684       | 700      | 544       | 600      | 540       | 596      | 536       | 616      | 628       | 680      |
| 864       | 872      | 688       | 760      | 680       | 776      | 676       | 784      | 792       | 872      |
| 1024      | 1032     | 840       | 896      | 832       | 904      | 832       | 920      | 960       | 1030     |
| 1192      | 1200     | 952       | 1048     | 944       | 1072     | 936       | 1080     | 1110      | 1200     |
| 1320      | 1352     | 1112      | 1192     | 1060      | 1208     | 1060      | 1240     | 1260      | 1360     |
| 1496      | 1512     | 1248      | 1336     | 1208      | 1336     | 1200      | 1390     | 1410      | 1520     |
| 1620      | 1660     | 1376      | 1488     | 1360      | 1560     | 1340      | 1520     | 1600      | 1680     |
| 1780      | 1780     | 1504      | 1620     | 1472      | 1620     | 1430      | 1640     | 1720      | 1820     |
| 1900      | 1940     | 1620      | 1740     | 1580      | 1740     | 1600      | 1800     | 1800      | 1980     |

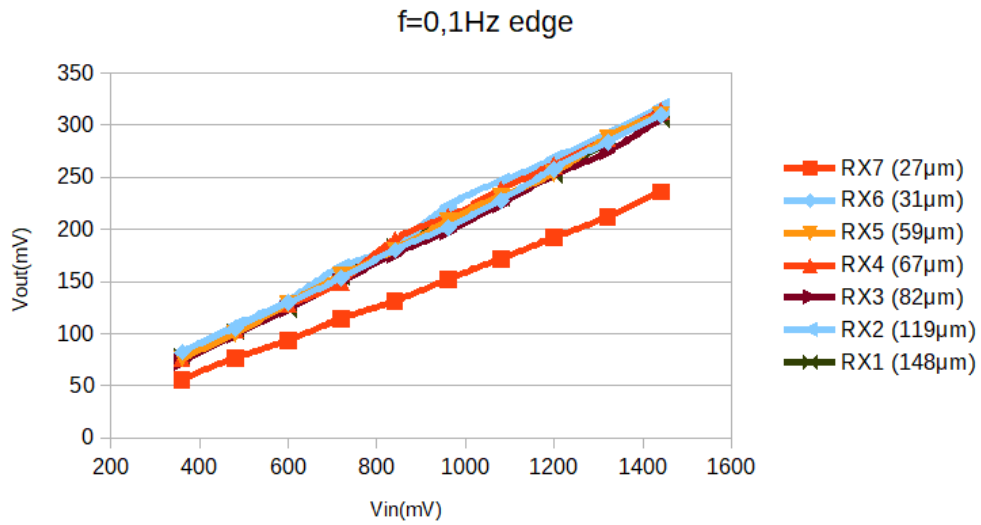
Σχήμα 46: Σειρά δοκιμίων TS, δοκίμια TS1-TS5, συχνότητα 1,0Hz

| f=1,0Hz  |          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| TS6 (7%) |          | TS7 (3%) |          | TS8 (2%) |          | TS9 (0%) |          |
| edge     | middle   | edge     | middle   | edge     | middle   | edge     | middle   |
| Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) | Vout(mV) |
| 456      | 528      | 472      | 580      | 472      | 592      | 544      | 656      |
| 616      | 708      | 620      | 792      | 636      | 808      | 724      | 888      |
| 776      | 904      | 800      | 984      | 808      | 1010     | 904      | 1090     |
| 936      | 1080     | 960      | 1190     | 976      | 1200     | 1090     | 1290     |
| 1090     | 1260     | 1070     | 1360     | 1110     | 1380     | 1260     | 1500     |
| 1230     | 1420     | 1220     | 1560     | 1260     | 1560     | 1430     | 1700     |
| 1380     | 1640     | 1400     | 1760     | 1420     | 1720     | 1620     | 1920     |
| 1520     | 1780     | 1580     | 1920     | 1620     | 1900     | 1800     | 2100     |
| 1700     | 1920     | 1700     | 2060     | 1700     | 2080     | 1940     | 2300     |
| 1800     | 2120     | 1860     | 2280     | 1860     | 2260     | 2100     | 2500     |

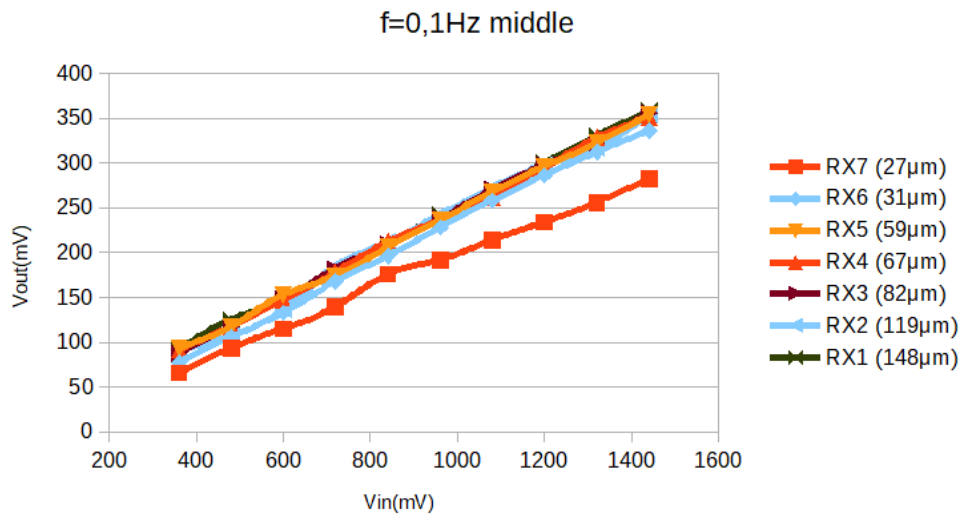
Σχήμα 47: Σειρά δοκιμίων TS, δοκίμια TS6-TS9, συχνότητα 1,0Hz



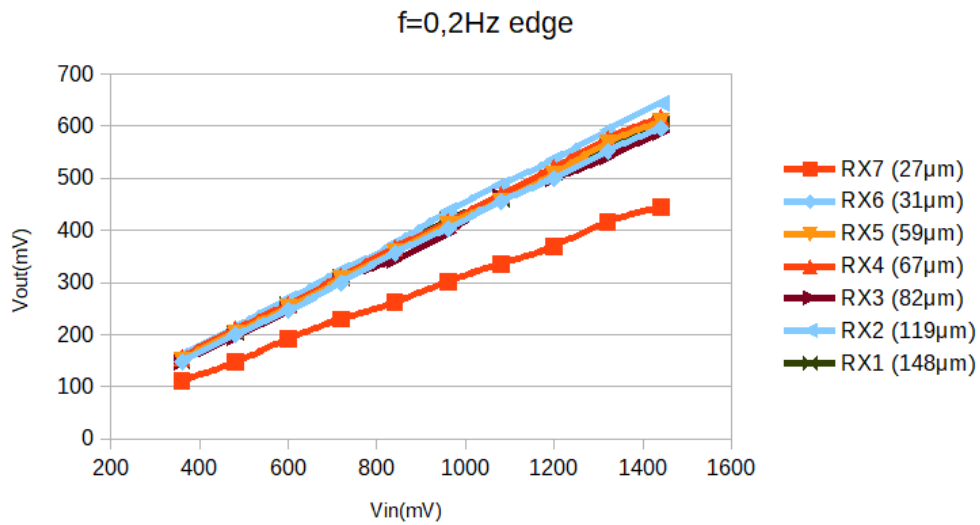
## Παρουσίαση Διαγραμμάτων



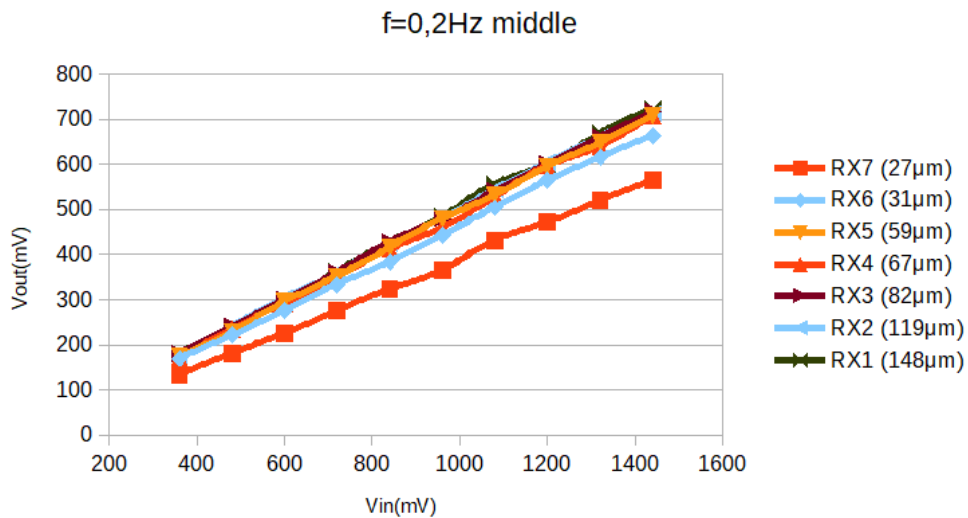
Σχήμα 48: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, σειρά δοκιμίων RX, συχνότητα 0,1 Hz, άκρη του δοκιμίου



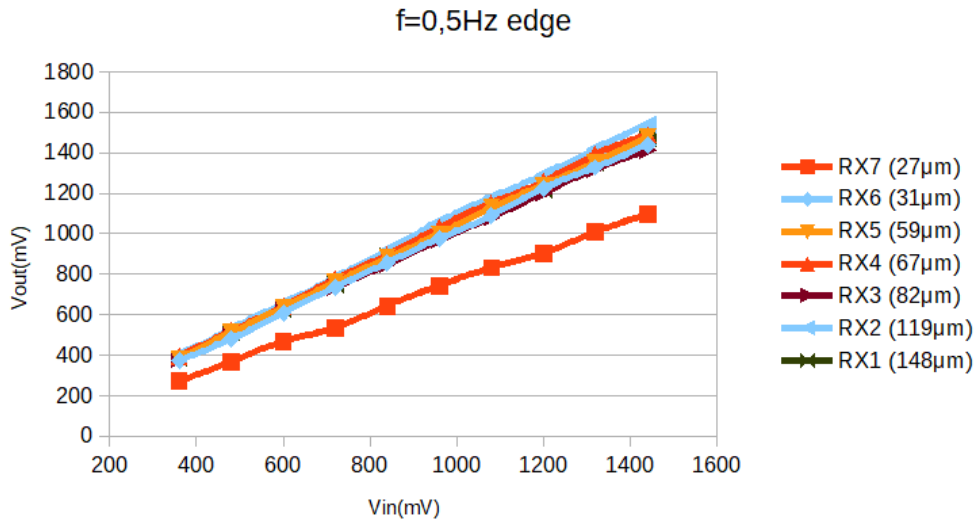
Σχήμα 49: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, σειρά δοκιμίων RX, συχνότητα 0,1 Hz, μέση του δοκιμίου



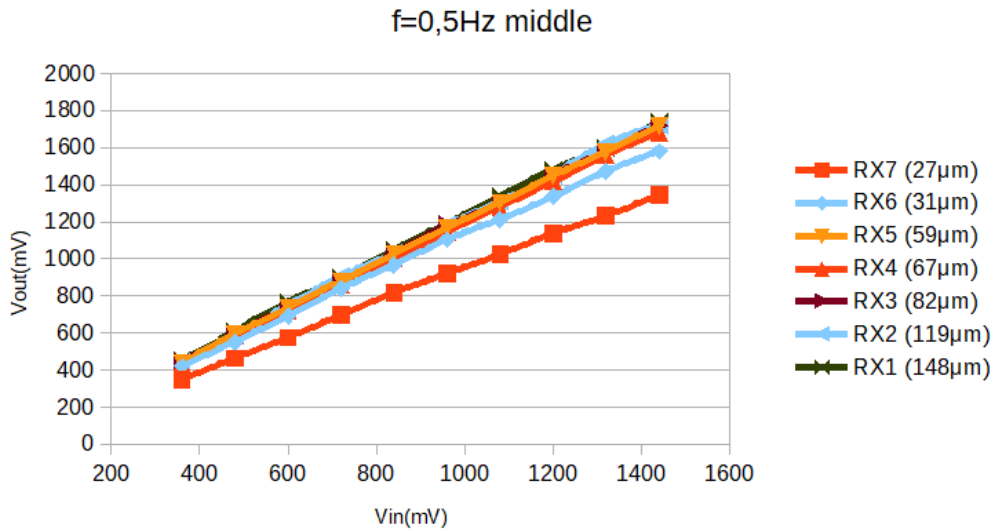
Σχήμα 50: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, σειρά δοκιμίων RX, συχνότητα 0,2 Hz, άκρη του δοκιμίου



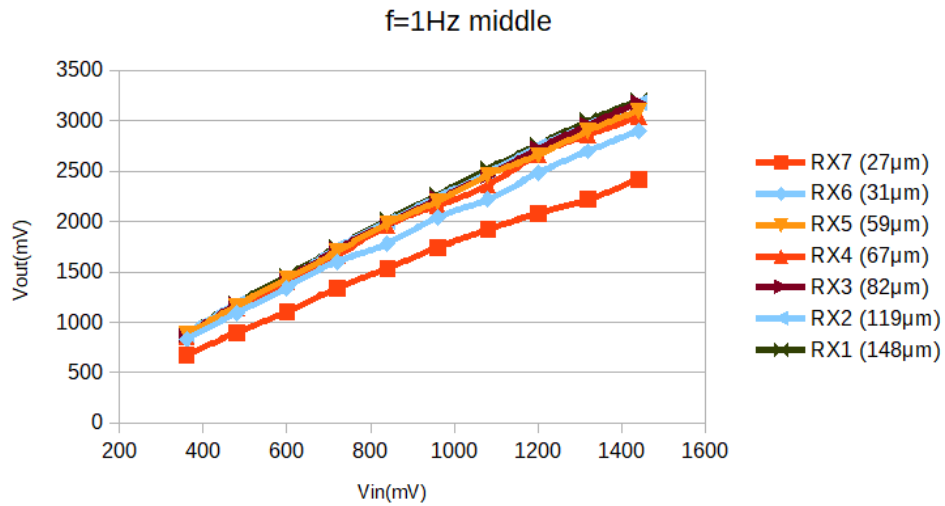
Σχήμα 51: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, σειρά δοκιμίων RX, συχνότητα 0,2 Hz, μέση του δοκιμίου



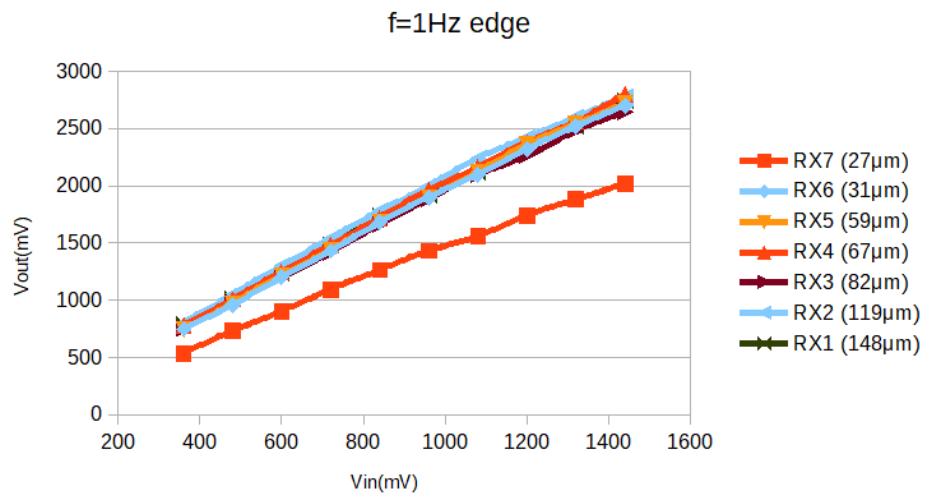
Σχήμα 52: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, σειρά δοκιμίων RX, συχνότητα 0,5 Hz, άκρη του δοκιμίου



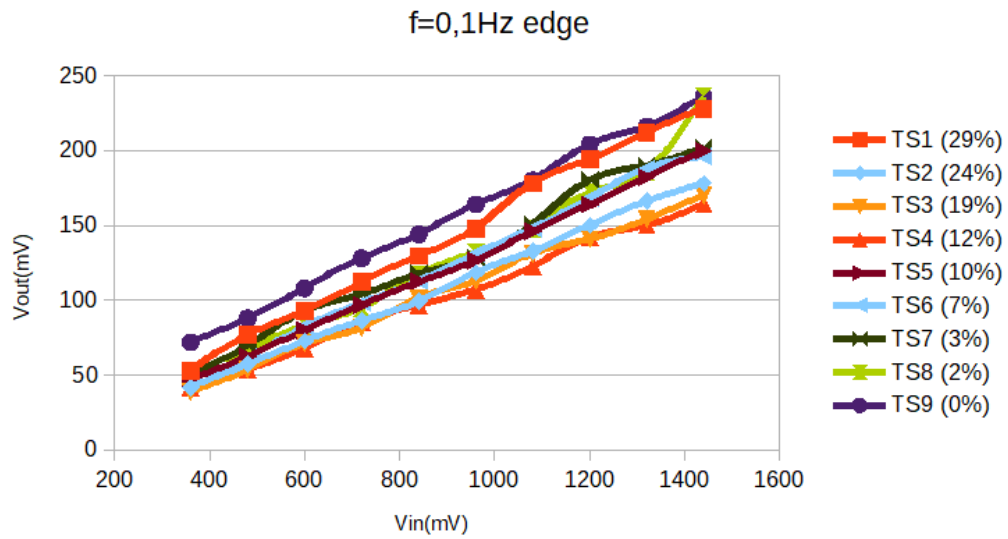
Σχήμα 53: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, σειρά δοκιμίων RX, συχνότητα 0,5 Hz, μέση του δοκιμίου



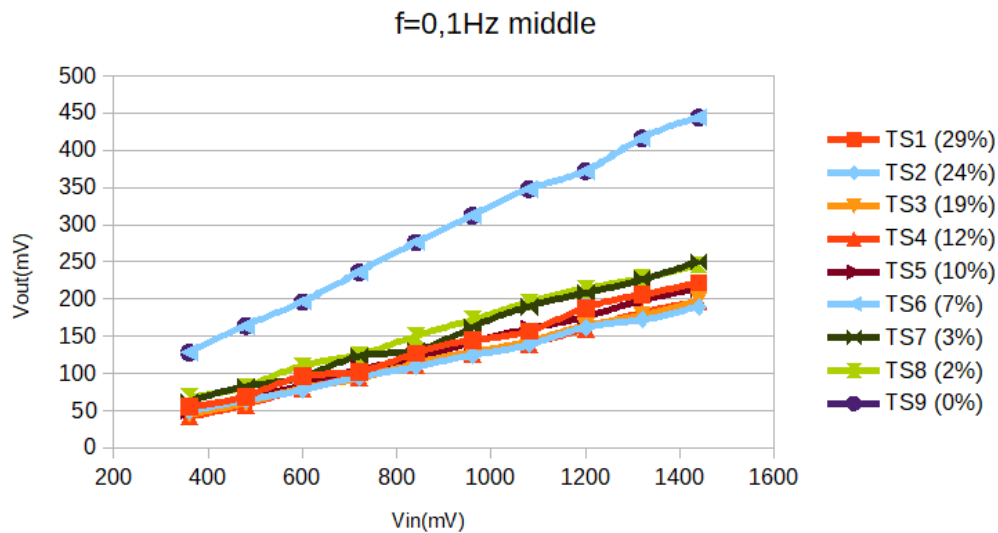
Σχήμα 54: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, σειρά δοκιμίων RX, συχνότητα 1,0 Hz, άκρη του δοκιμίου



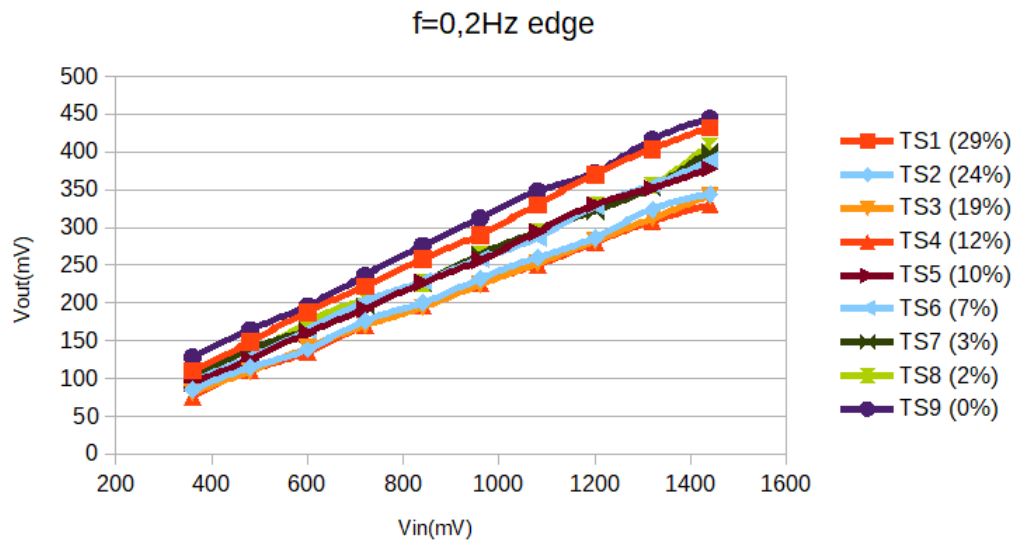
Σχήμα 55: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, σειρά δοκιμίων RX, συχνότητα 1,0 Hz, μέση του δοκιμίου



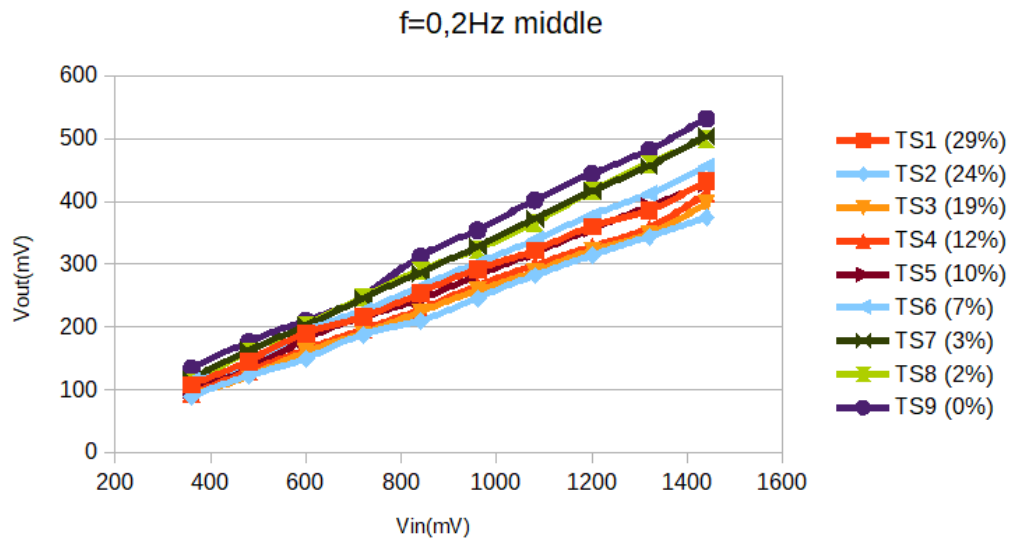
Σχήμα 56: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, σειρά δοκιμίων TS, συχνότητα 0,1 Hz, άκρη του δοκιμίου



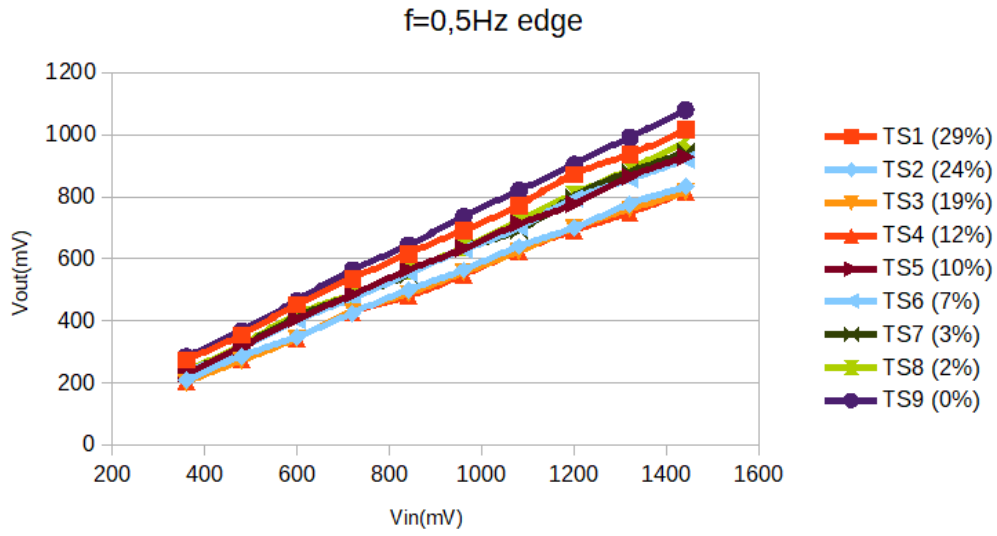
Σχήμα 57: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, σειρά δοκιμίων RX, συχνότητα 0,1 Hz, μέση του δοκιμίου



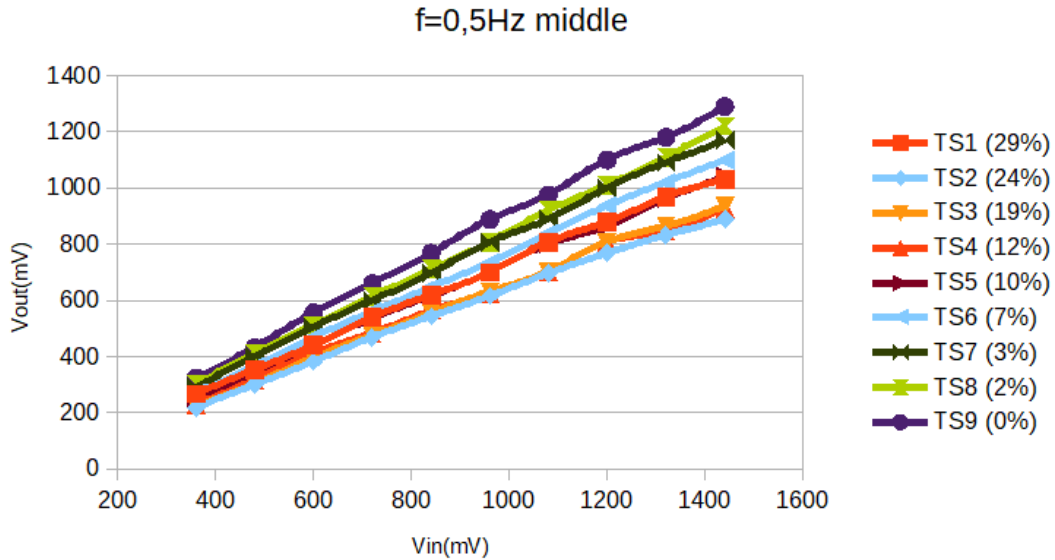
Σχήμα 58: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, σειρά δοκιμίων TS, συχνότητα 0,2 Hz, άκρη του δοκιμίου



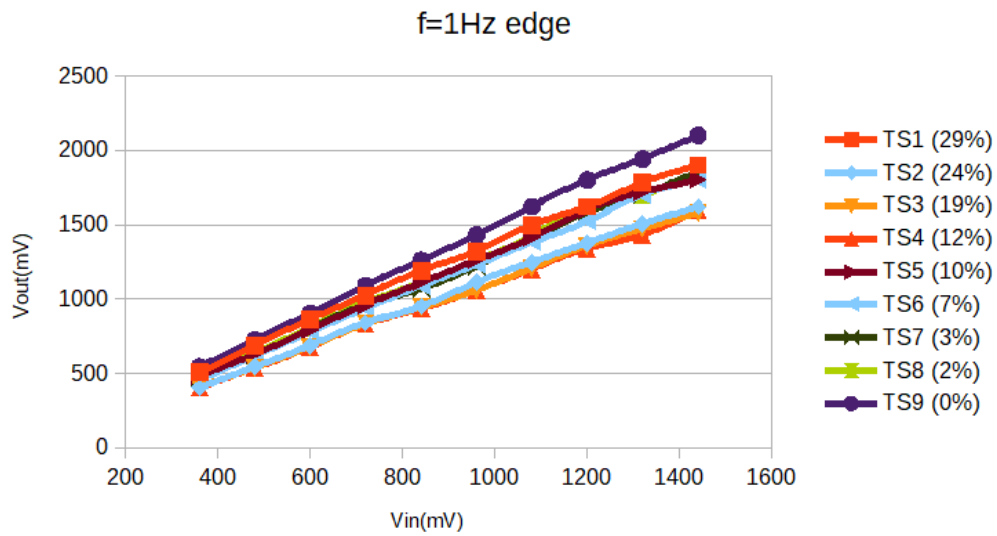
Σχήμα 59: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, σειρά δοκιμίων TS, συχνότητα 0,2 Hz, μέση του δοκιμίου



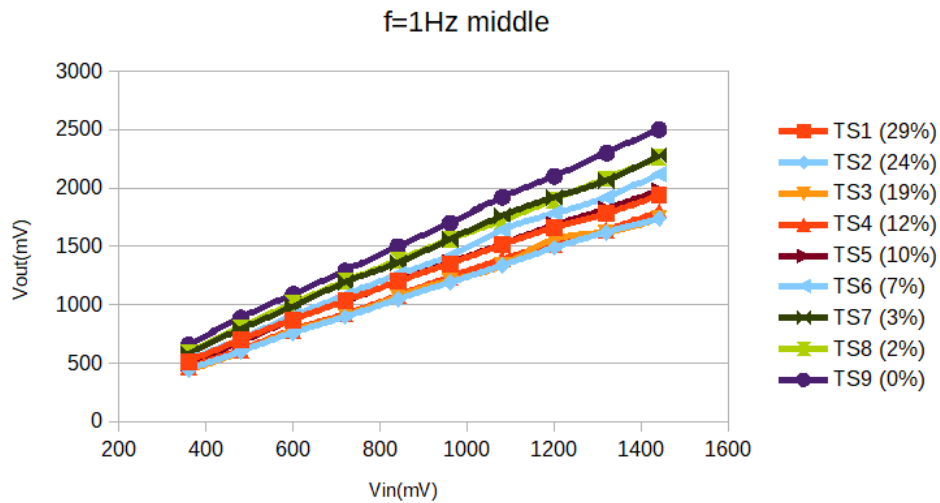
Σχήμα 60: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, σειρά δοκιμίων TS, συχνότητα 0,5 Hz, άκρη του δοκιμίου



Σχήμα 61: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, σειρά δοκιμίων TS, συχνότητα 0,5Hz, μέση του δοκιμίου

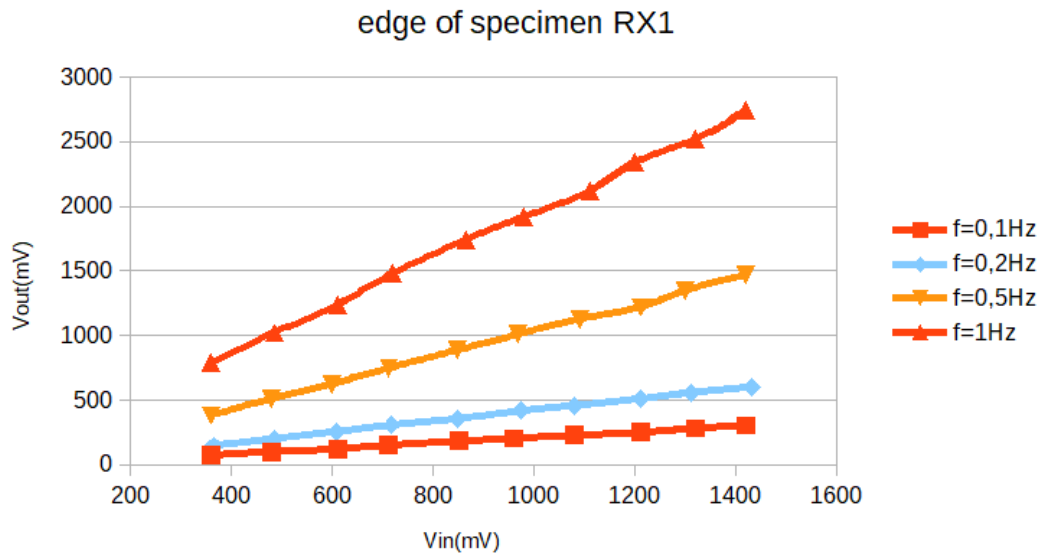


Σχήμα 62: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, σειρά δοκιμίων TS, συχνότητα 1,0Hz, άκρη του δοκιμίου

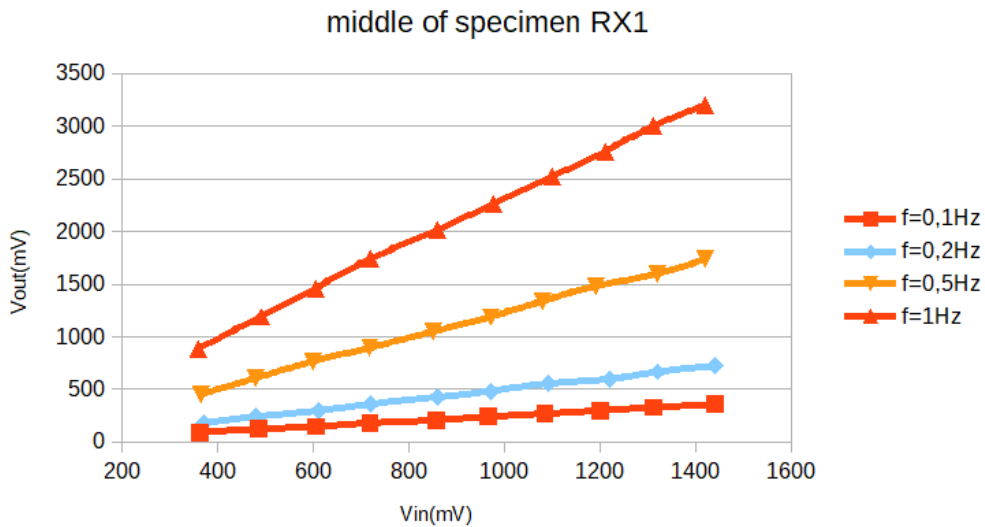


Σχήμα 63: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, σειρά δοκιμίων TS, συχνότητα 1,0 Hz, μέση του δοκιμίου

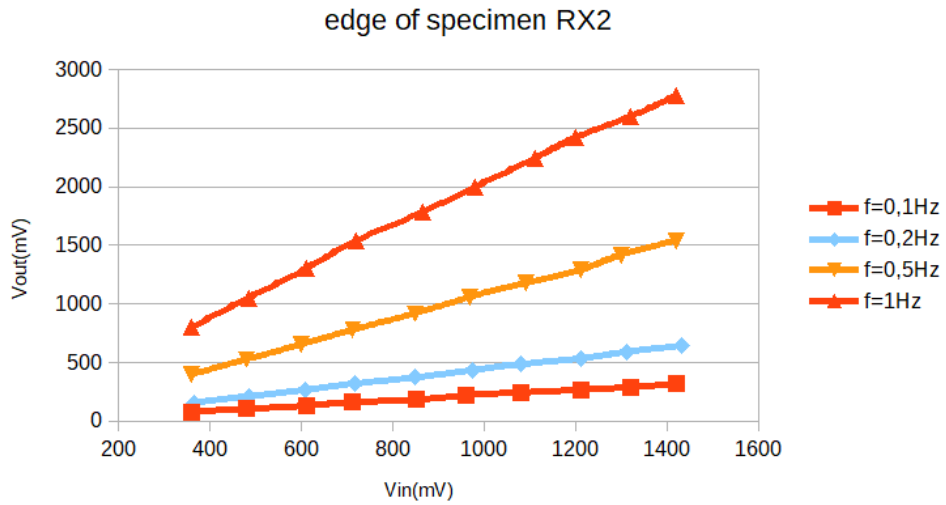




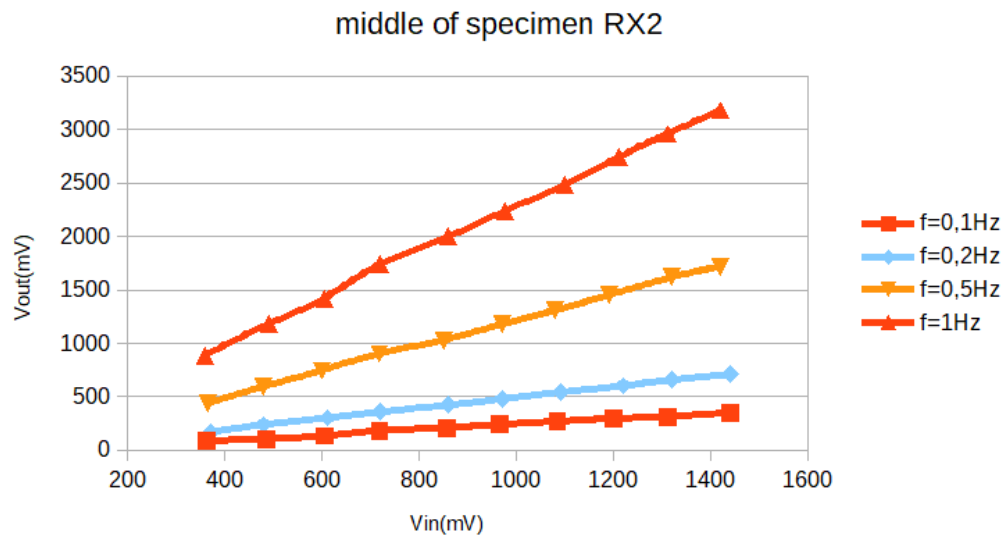
Σχήμα 64: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο RX1, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



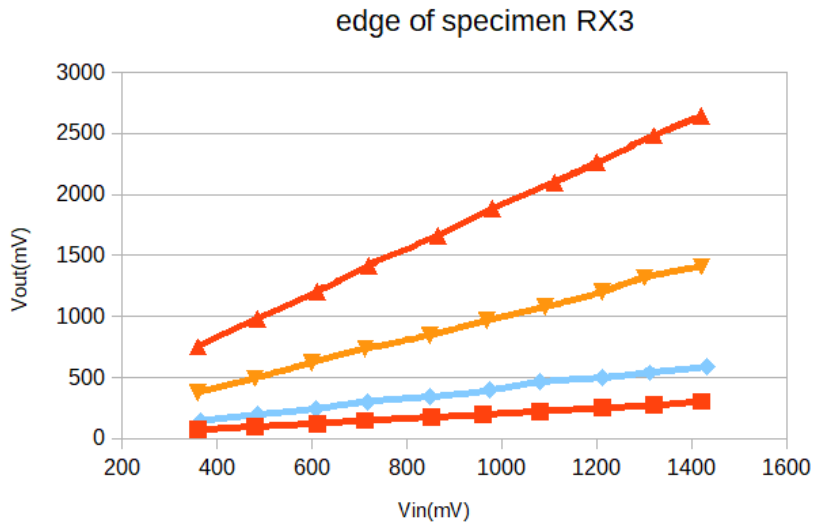
Σχήμα 65: : Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο RX1, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



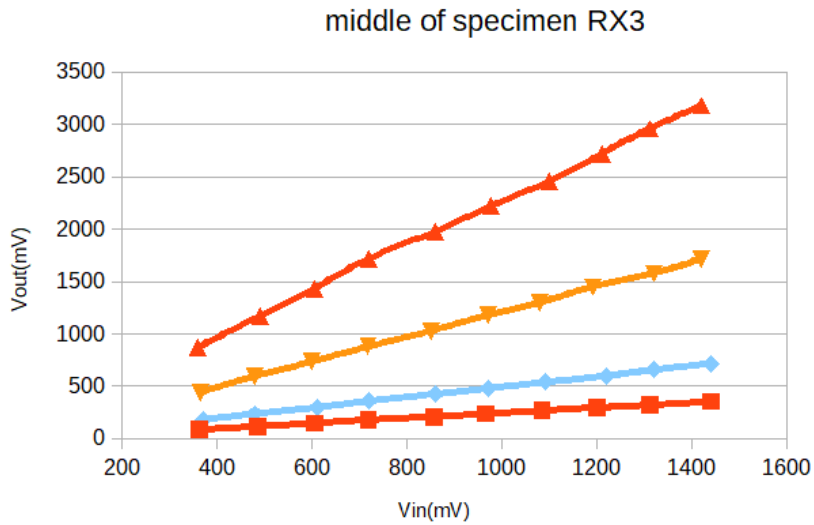
Σχήμα 66: : Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο RX2, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



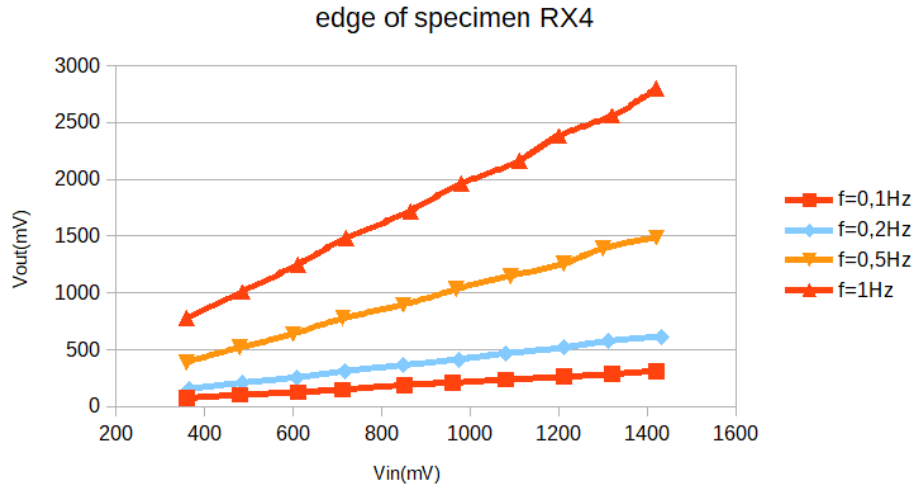
Σχήμα 67: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο RX2, μέση του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



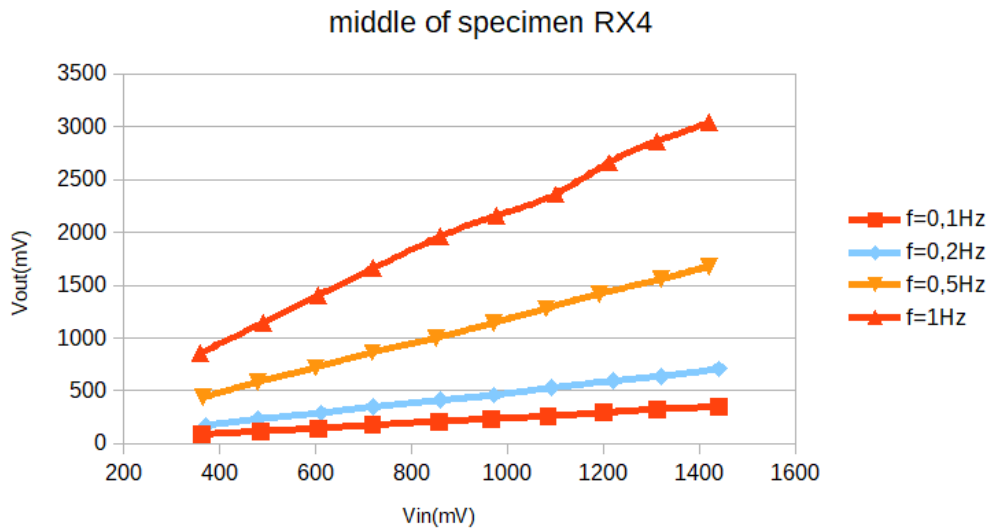
Σχήμα 68: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο RX3, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



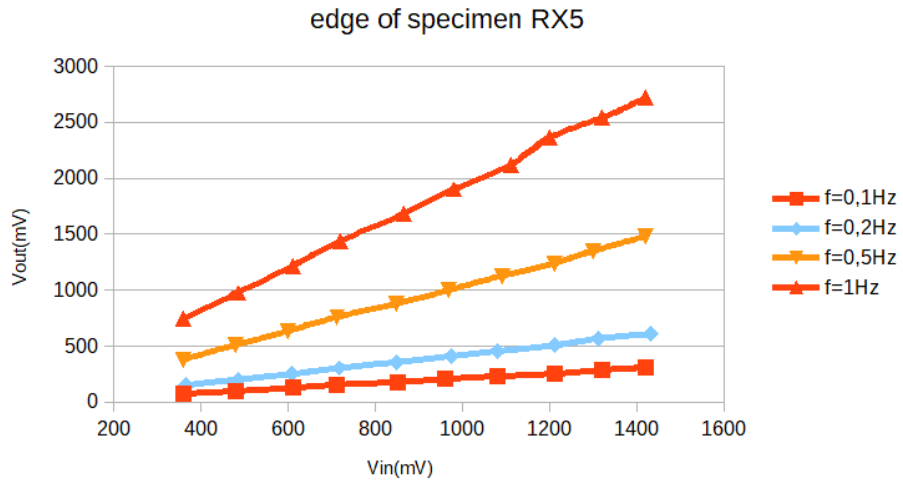
Σχήμα 69: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο RX3, μέση του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



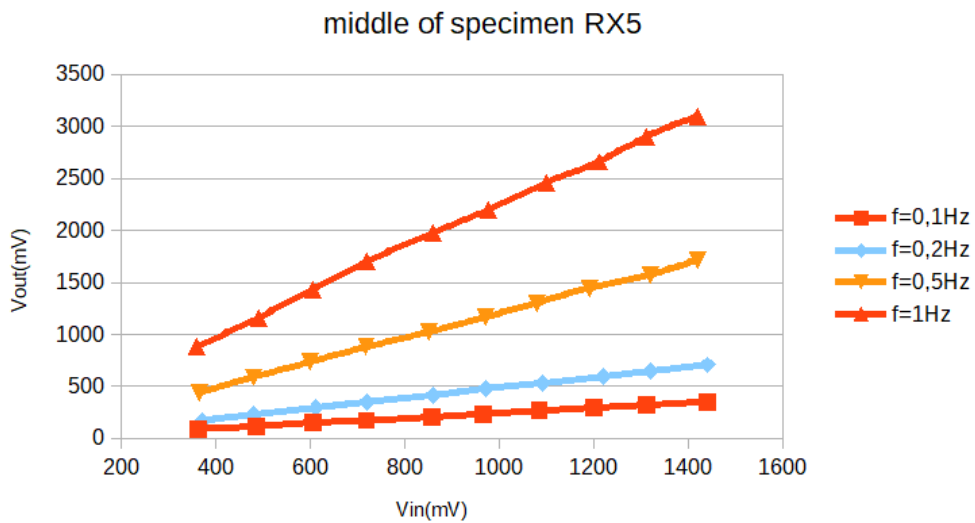
Σχήμα 70: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο RX4, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



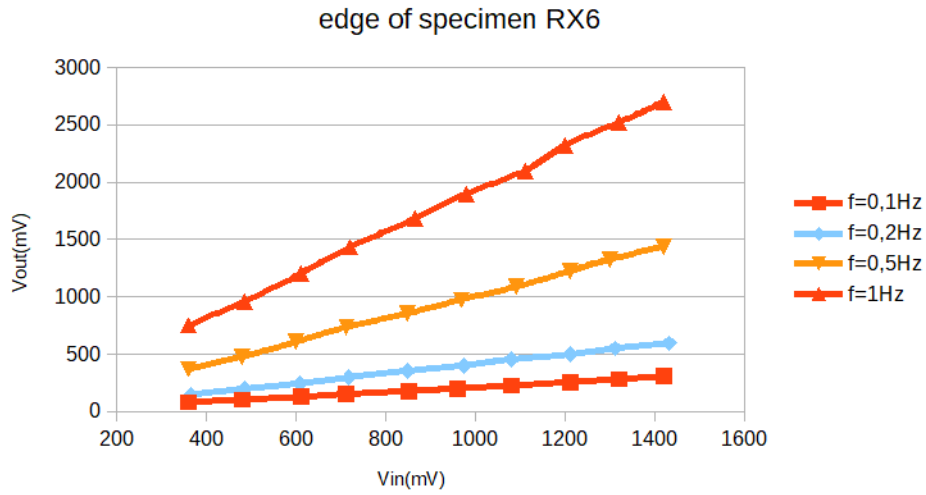
Σχήμα 71: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο RX4, μέση του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



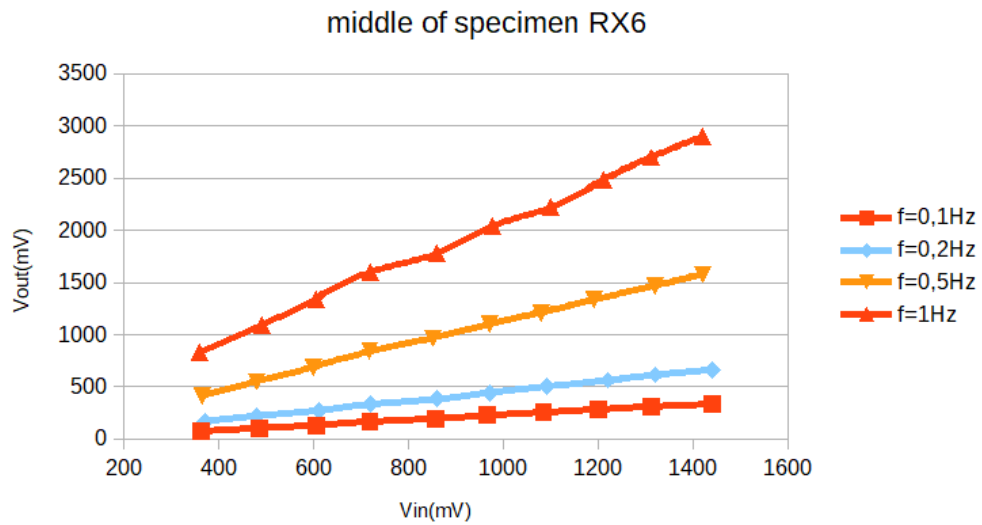
Σχήμα 72: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο RX5, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



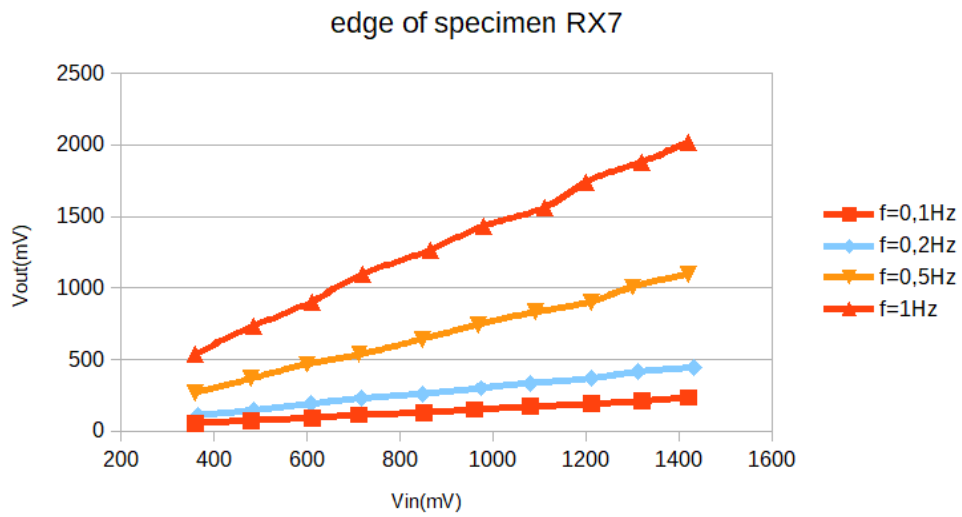
Σχήμα 73: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο RX5, μέση του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



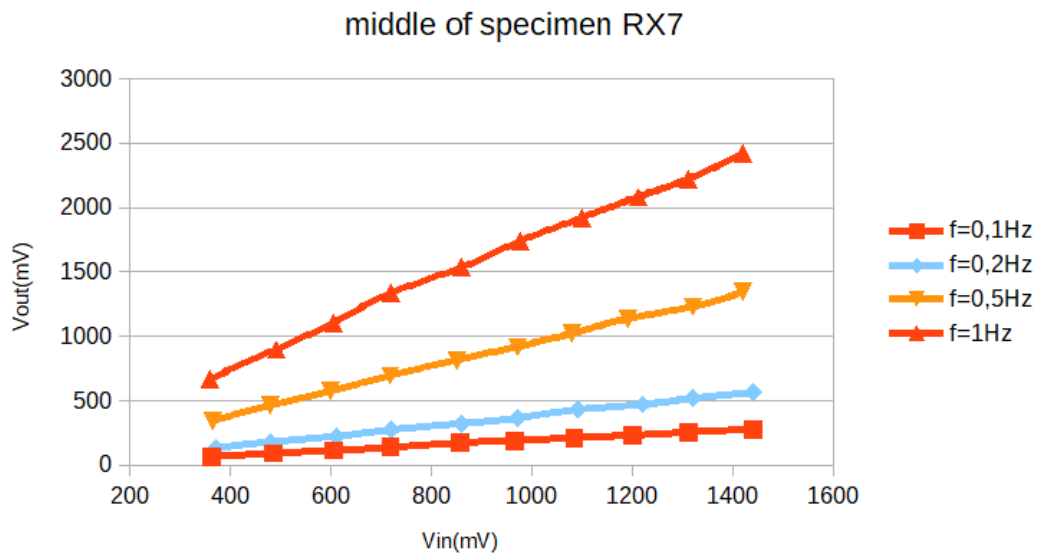
Σχήμα 74: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο RX6, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



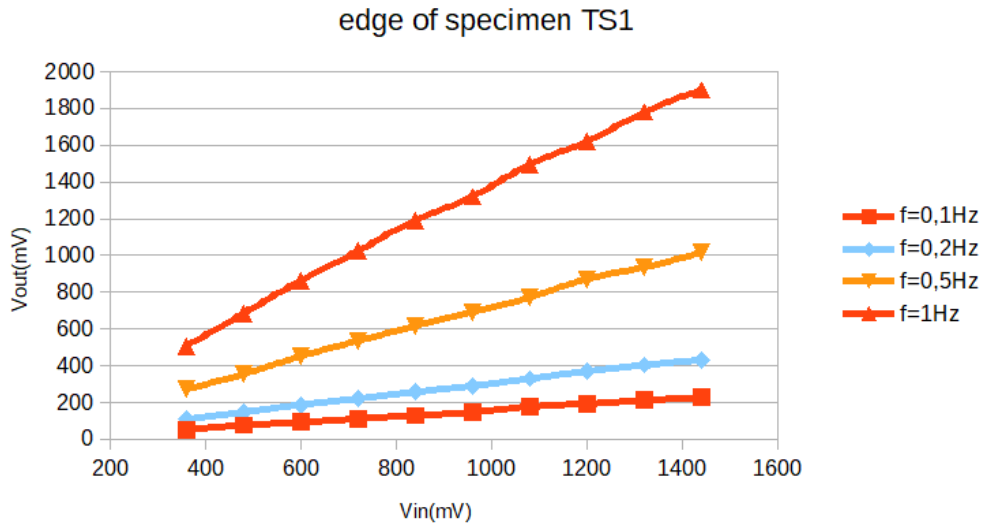
Σχήμα 75: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο RX6, μέση του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



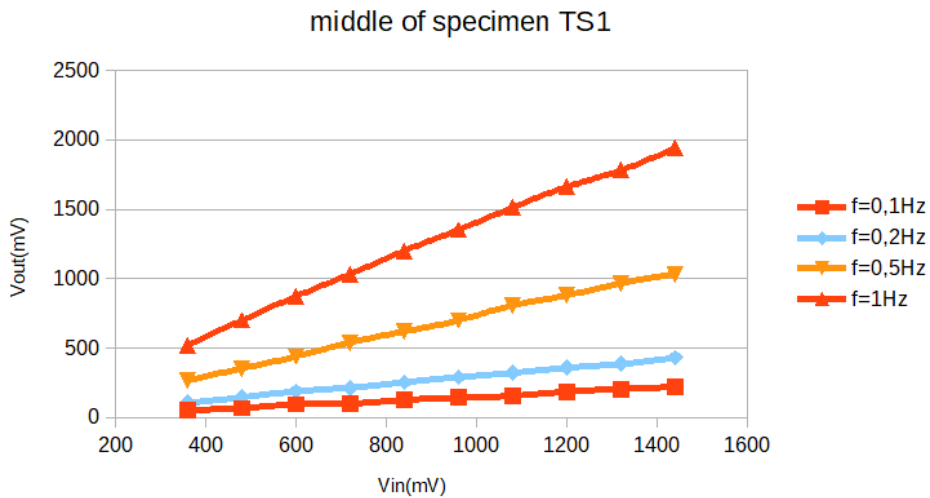
Σχήμα 76: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο RX7, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



Σχήμα 77: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο RX7, μέση του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες

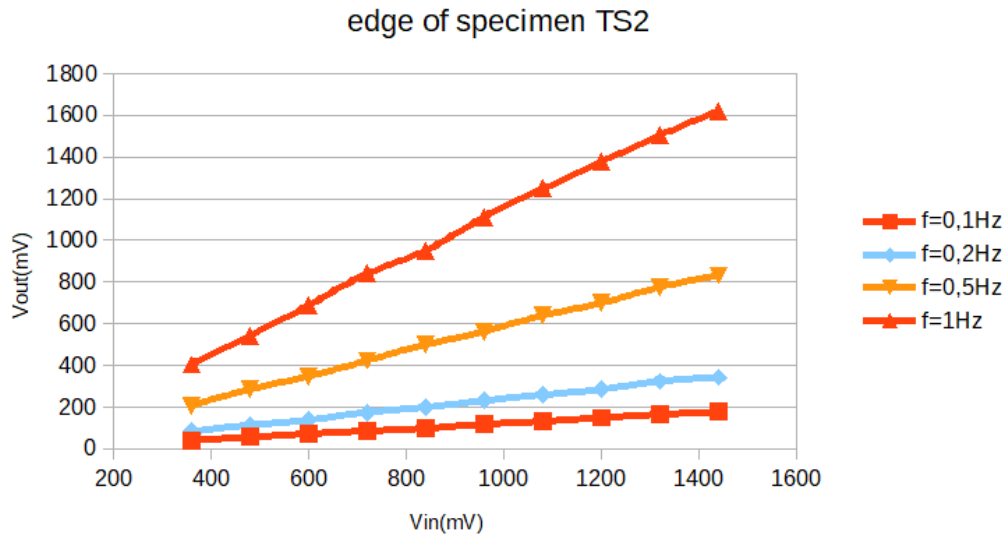


Σχήμα 78: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS1, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες

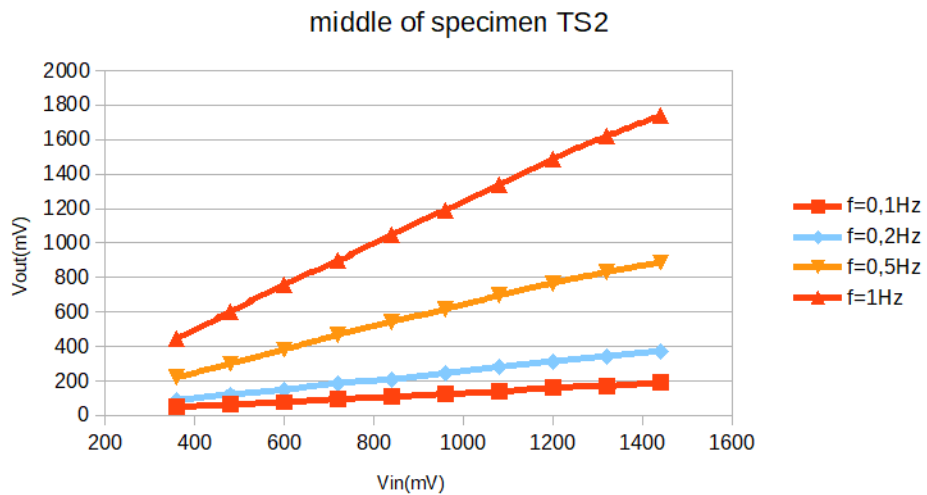


Σχήμα 79: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS1, μέση του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες

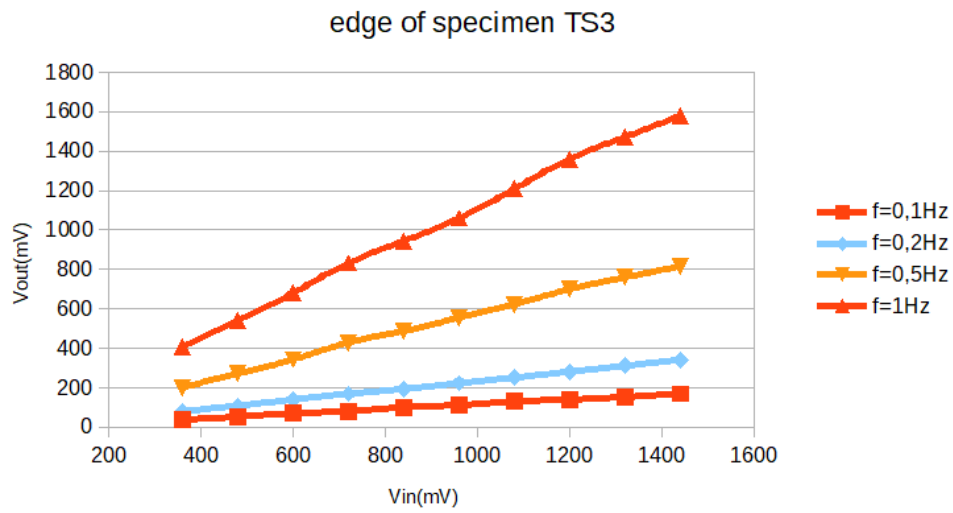




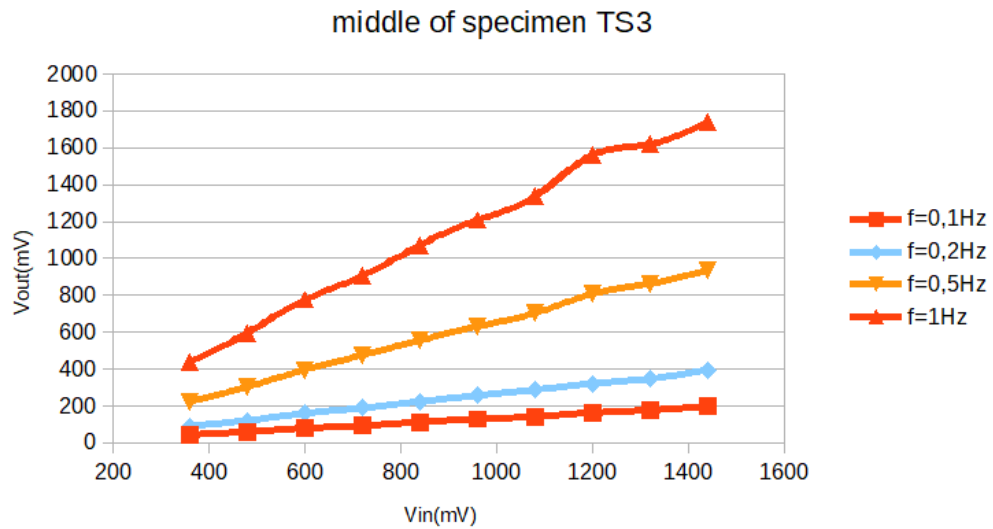
Σχήμα 80: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS2, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



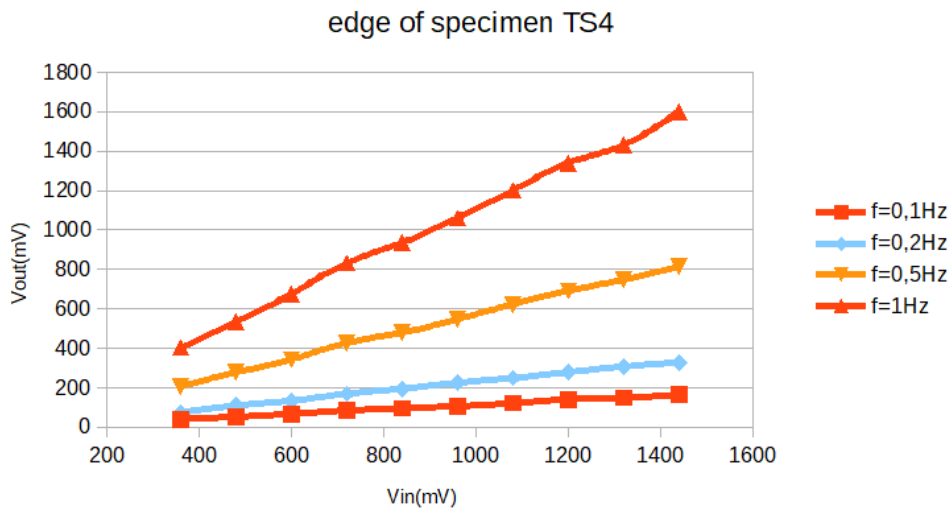
Σχήμα 81: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS2, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



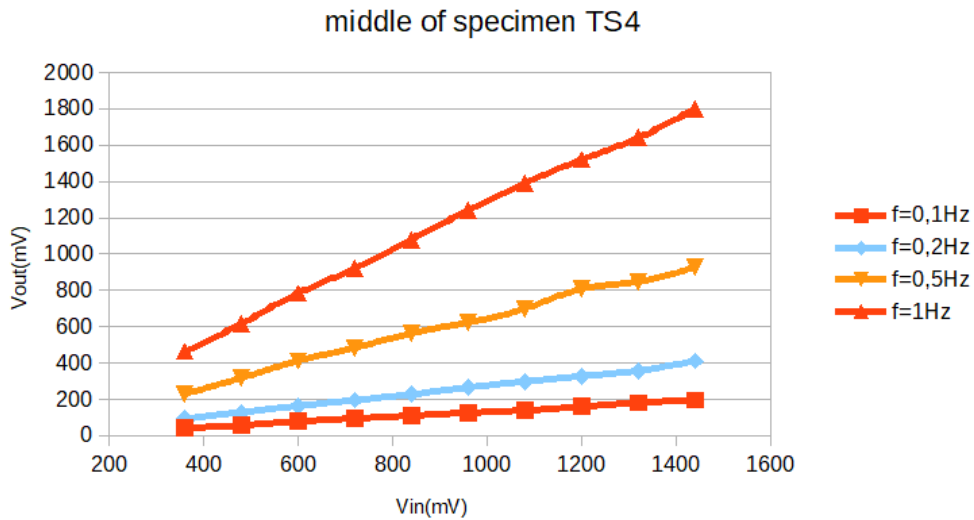
Σχήμα 82 Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS3, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



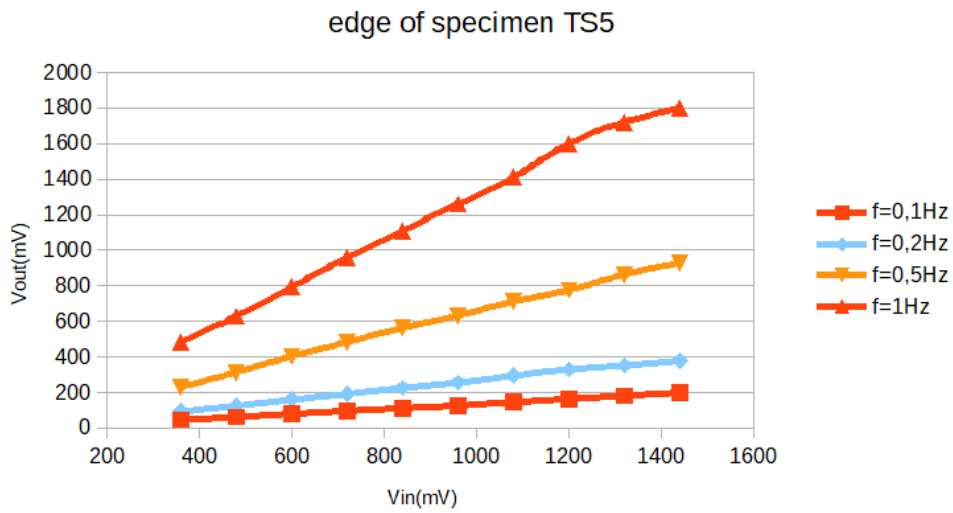
Σχήμα 83: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS2, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



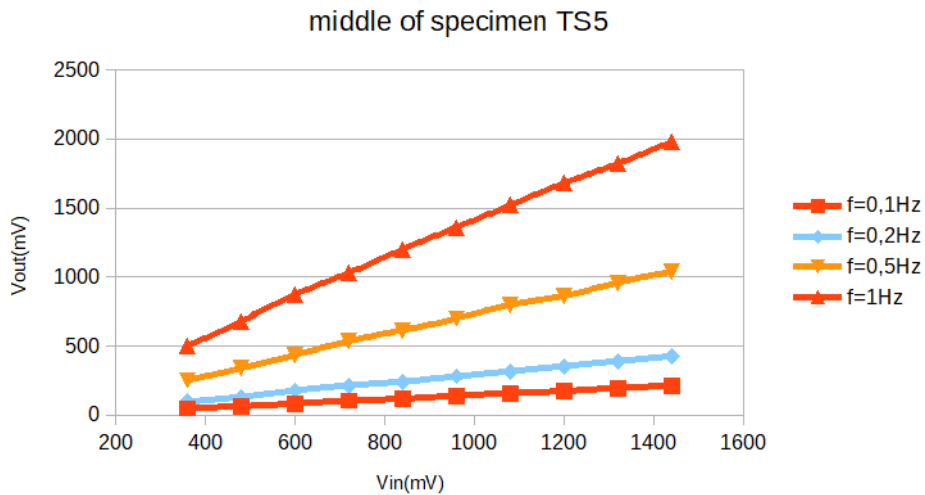
Σχήμα 84: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS4, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



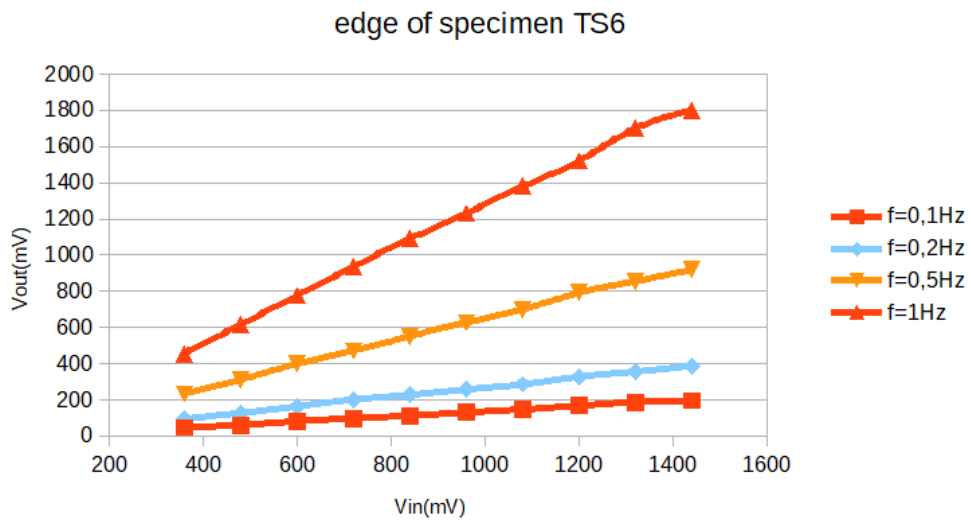
Σχήμα 85: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS2, μέση του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



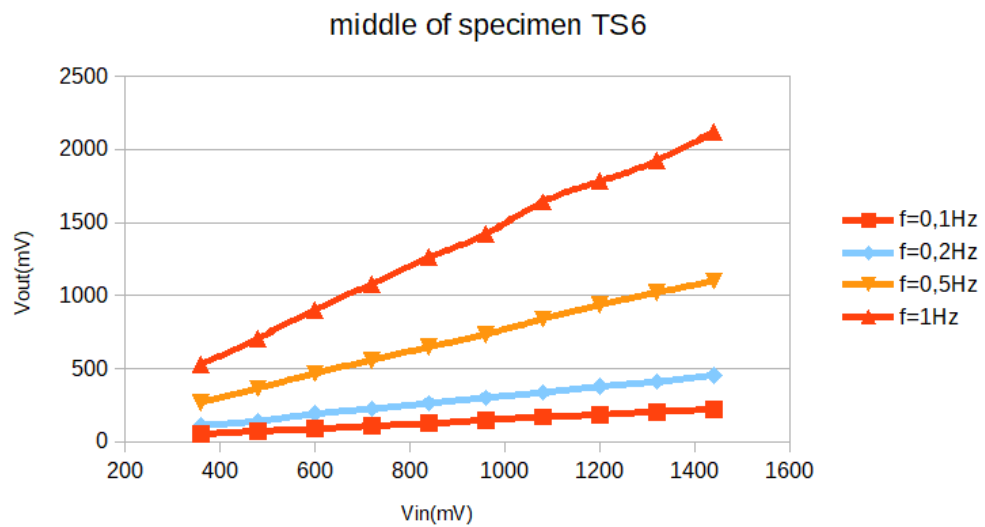
Σχήμα 86: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS5, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



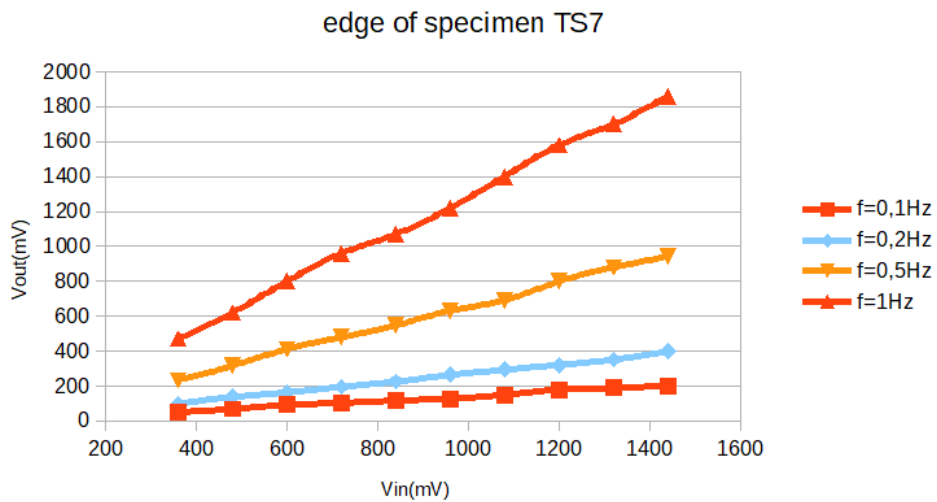
Σχήμα 87: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS5, μέση του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



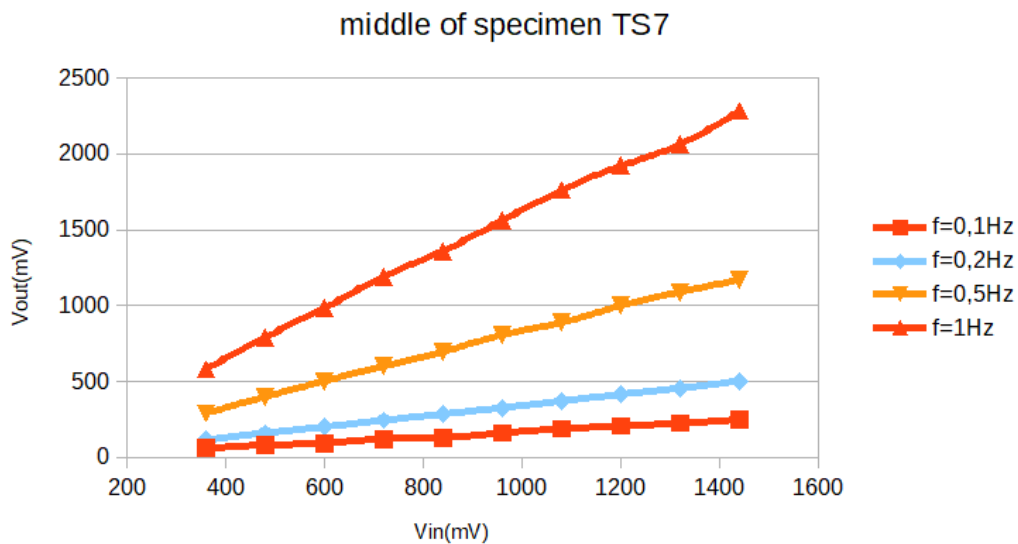
Σχήμα 88: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS6, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



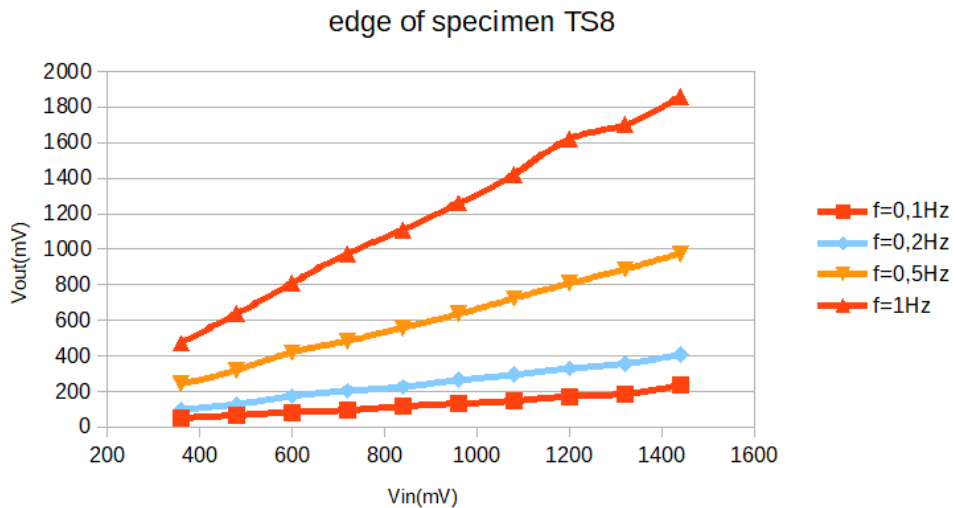
Σχήμα 89: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS6, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



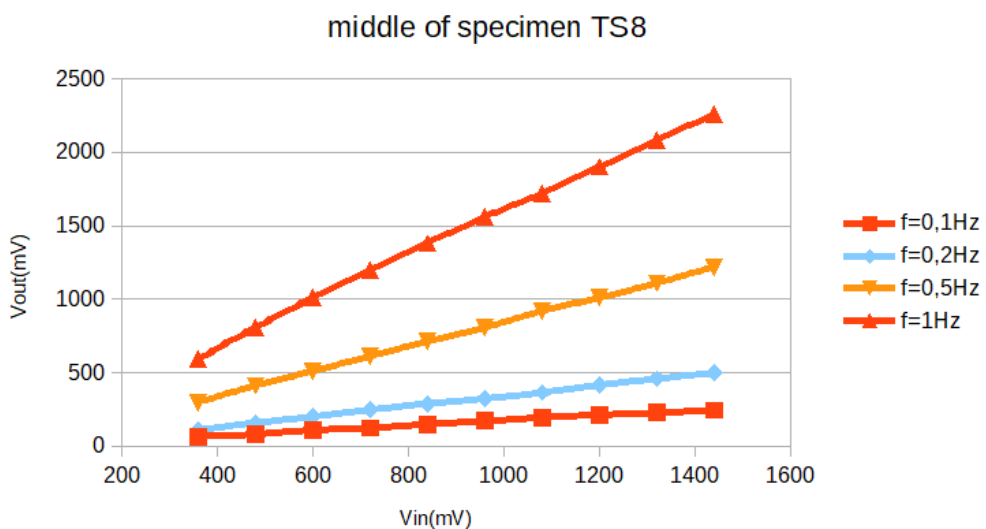
Σχήμα 90: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS7, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



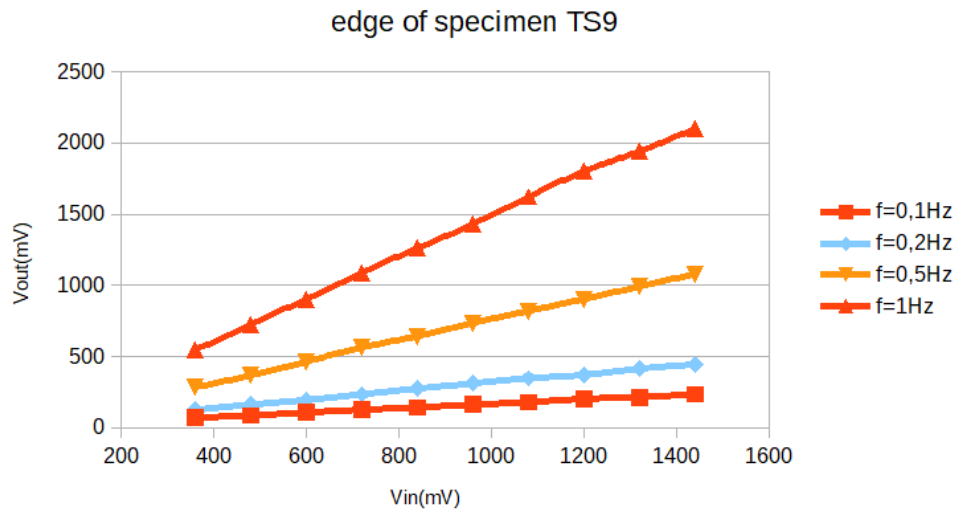
Σχήμα 91: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS7, μέση του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



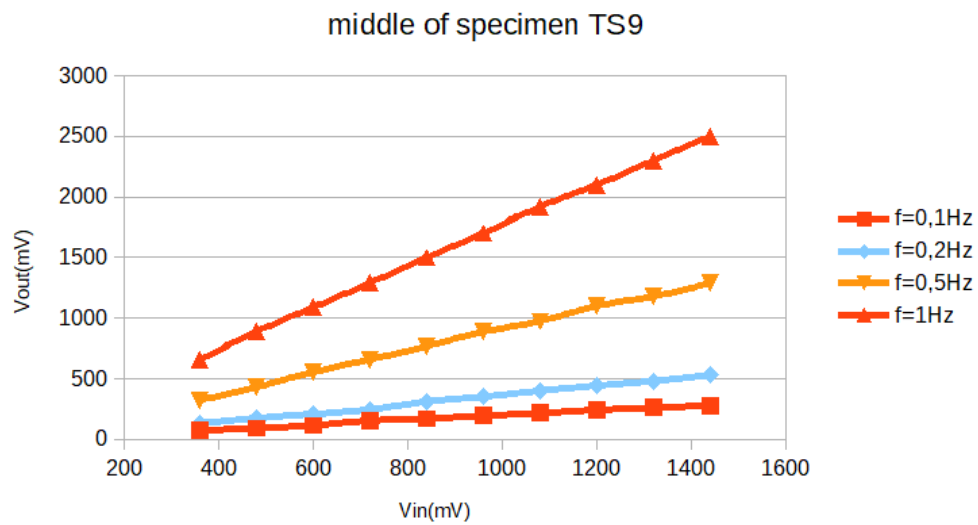
Σχήμα 92: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS8, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



Σχήμα 93: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS8, μέση του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



Σχήμα 94: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS9, άκρη του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



Σχήμα 95: Διάγραμμα τάσης εισόδου - τάσης εξόδου, δοκίμιο TS9, μέση του δοκιμίου, όλες οι συχνότητες



## Επεξεργασία μετρήσεων

Ο αισθητήρας με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις δεν ανέπτυξε επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο υψηλής έντασης. Έτσι, το σύνολο των μετρήσεων ανήκουν στη γραμμική περιοχή της καμπύλης υστέρησης. Ισοδύναμα μπορεί να λεχθεί ότι: η πυκνότητα μαγνητικής ροής μεταβάλλεται κατά προσέγγιση γραμμικά σε μεταβολές του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Αντίστοιχα, η τάση εξόδου μεταβάλλεται κατά προσέγγιση γραμμικά σε σχέση με τη τάση εισόδου. Επομένως, μπορούμε να υπολογίσουμε τη σχέση που συνδέει τη τάση εισόδου με τη τάση εξόδου:

$$V_{out} = a V_{in} + b \quad 4.1$$

Ο συντελεστής  $a$  έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς συνδέεται άμεσα με τη μαγνητική διαπερατότητα της γραμμικής περιοχής και θα μας βοηθήσει να εξάγουμε ποιοτικά συμπεράσματα για τη σύνδεση της μαγνητικής διαπερατότητας με τη μικροδομή του υλικού.

Παρακάτω παρουσιάζονται σε πίνακες οι συντελεστές  $a$ ,  $b$  που αντιστοιχούν στην άκρη ή στο κέντρο συγκεκριμένου δοκιμίου και για συγκεκριμένη συχνότητα. Οι συντελεστές  $a$  είναι, είτε τοποθετημένοι σε κελί με πράσινο υπόβαθρο, εφόσον πρόκειται για την άκρη του δοκιμίου, είτε τοποθετημένοι σε κελί με πορτοκαλί υπόβαθρο, εφόσον πρόκειται για τη μέση του δοκιμίου. Όσον αφορά τους συντελεστές  $b$ , είναι τοποθετημένοι σε κελί με γκρι υπόβαθρο, εφόσον πρόκειται για την άκρη του δοκιμίου, είτε τοποθετημένοι σε κελί με κίτρινο υπόβαθρο, εφόσον πρόκειται για τη μέση του δοκιμίου.

|     | f=0,1Hz   |          | f=0,2Hz  |           |
|-----|-----------|----------|----------|-----------|
|     | edge      | middle   | edge     | middle    |
| TS1 | 0,16374   | 0,15636  | 0,30063  | 0,29317   |
|     | -4,92364  | -3,92727 | 4,67364  | 6,70545   |
| TS2 | 0,12778   | 0,13085  | 0,24354  | 0,26556   |
|     | -4,72000  | 0,43636  | -3,22182 | -7,12000  |
| TS3 | 0,12061   | 0,14053  | 0,23952  | 0,27570   |
|     | -2,94545  | -5,99273 | -4,76364 | -8,16727  |
| TS4 | 0,11432   | 0,14198  | 0,23603  | 0,28477   |
|     | 0,26909   | -8,82182 | -4,40727 | -9,09091  |
| TS5 | 0,14131   | 0,15363  | 0,26942  | 0,30291   |
|     | -5,54182  | -6,64364 | -1,82182 | -7,81818  |
| TS6 | 0,14207   | 0,15836  | 0,26899  | 0,31722   |
|     | -4,48364  | -4,00727 | 1,30909  | -3,20000  |
| TS7 | 0,14069   | 0,17661  | 0,26927  | 0,35556   |
|     | 1,94182   | -6,02545 | 3,13455  | -11,20000 |
| TS8 | 0,15686   | 0,17041  | 0,27600  | 0,35652   |
|     | -12,35273 | 5,80727  | -0,08000 | -13,16364 |
| TS9 | 0,15293   | 0,19596  | 0,29596  | 0,37364   |
|     | 16,36364  | 4,83636  | 22,83636 | -6,87273  |

Σχήμα 96: Πίνακας συντελεστών a, b, σειρά δοκιμών TS, συχνότητες 0,1 Hz, 0,2 Hz

|     | f=0,5Hz  |          | f=1,0Hz  |          |
|-----|----------|----------|----------|----------|
|     | edge     | middle   | edge     | middle   |
| TS1 | 0,68869  | 0,72010  | 1,28909  | 1,30848  |
|     | 32,18182 | 12,90909 | 78,61818 | 78,76364 |
| TS2 | 0,58172  | 0,62737  | 1,35758  | 1,20566  |
|     | 4,25455  | 6,76364  | 6,61818  | 27,70909 |
| TS3 | 0,57434  | 0,66404  | 1,09677  | 1,22323  |
|     | 2,29091  | -7,36364 | 21,30909 | 24,29029 |
| TS4 | 0,56444  | 0,64040  | 1,08939  | 1,23444  |
|     | 8,40000  | 15,23636 | 20,94545 | 34,40000 |
| TS5 | 0,64364  | 0,72879  | 1,26404  | 1,36212  |
|     | 11,52720 | -1,30909 | 38,76364 | 38,29091 |
| TS6 | 0,64152  | 0,77354  | 1,25636  | 1,46626  |
|     | 9,23636  | -1,78182 | 19,67273 | 16,36364 |
| TS7 | 0,65646  | 0,81758  | 1,28394  | 1,55384  |
|     | 2,98182  | 8,98182  | 12,65455 | 50,14555 |
| TS8 | 0,67263  | 0,84222  | 1,28697  | 1,52051  |
|     | 0,43636  | 3,60000  | 27,92727 | 82,54545 |
| TS9 | 0,73697  | 0,89485  | 1,45232  | 1,69798  |
|     | 22,32727 | 12,03636 | 34,10909 | 66,21818 |

Σχήμα 97: Πίνακας συντελεστών a, b, σειρά δοκιμών TS, συχνότητες 0,5 Hz, 1,0 Hz

|     | f=0,1Hz  |           | f=0,2Hz   |           |
|-----|----------|-----------|-----------|-----------|
|     | edge     | middle    | edge      | middle    |
| RX1 | 0,21470  | 0,24880   | 0,42699   | 0,50639   |
|     | -1,27222 | 0,85655   | -1,88249  | -5,50450  |
| RX2 | 0,22356  | 0,25081   | 0,45451   | 0,501065  |
|     | 0,19275  | -5,05671  | -6,93516  | -5,06739  |
| RX3 | 0,21435  | 0,24818   | 0,41715   | 0,49840   |
|     | -5,45211 | -0,90920  | -4,00520  | -2,24485  |
| RX4 | 0,22294  | 0,24478   | 0,43550   | 0,49396   |
|     | -4,36400 | 0,67951   | -3,36536  | -9,41526  |
| RX5 | 0,21902  | 0,24410   | 0,43105   | 0,49745   |
|     | -3,85816 | 1,77505   | -6,83135  | -8,58829  |
| RX6 | 0,21290  | 0,24608   | 0,42252   | 0,46586   |
|     | 1,71295  | -12,03371 | -12,03371 | -5,29522  |
| RX7 | 0,16556  | 0,19992   | 0,31229   | 0,40307   |
|     | -5,44478 | -2,89786  | -0,81658  | -16,43049 |

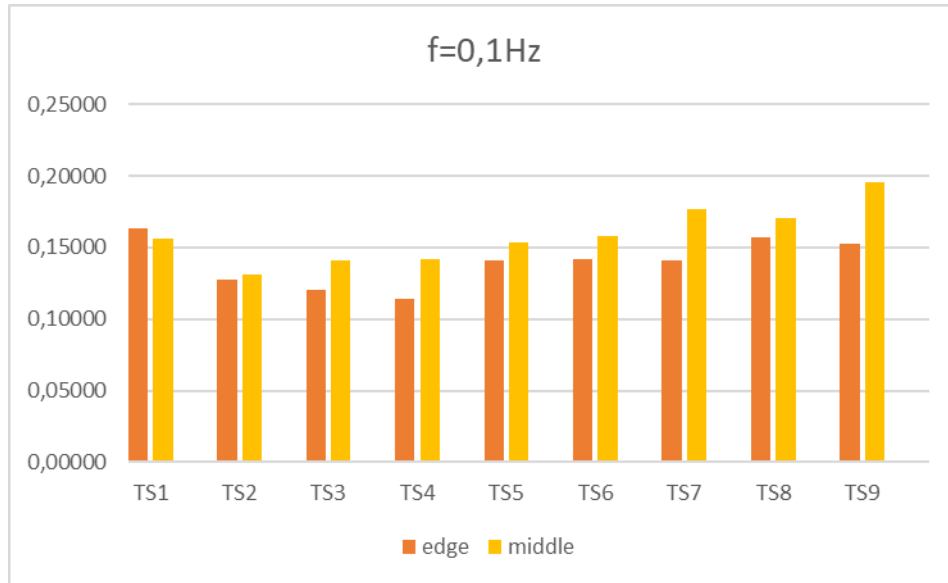
Σχήμα 98: Πίνακας συντελεστών a, b, σειρά δοκιμίων RX, συχνότητες 0,1 Hz 0,2 Hz

|     | f=0,5Hz  |          | f=1,0Hz   |           |
|-----|----------|----------|-----------|-----------|
|     | edge     | middle   | edge      | middle    |
| RX1 | 1,01404  | 1,20401  | 1,81440   | 2,17539   |
|     | 22,58219 | 30,15695 | 145,90258 | 135,07151 |
| RX2 | 1,07256  | 1,20637  | 1,86528   | 2,15410   |
|     | 13,37903 | 15,42905 | 159,56449 | 133,34122 |
| RX3 | 0,97306  | 1,19486  | 1,78472   | 2,15672   |
|     | 31,61757 | 17,18026 | 119,21229 | 119,37244 |
| RX4 | 1,03663  | 1,17169  | 1,88488   | 2,05846   |
|     | 22,67613 | 14,81939 | 99,99406  | 147,09518 |
| RX5 | 1,02186  | 1,19708  | 1,86961   | 2,08583   |
|     | 18,35595 | 12,58907 | 74,43604  | 159,52585 |
| RX6 | 1,01070  | 1,09319  | 1,84752   | 1,92479   |
|     | 2,38814  | 34,80347 | 81,06973  | 156,46189 |
| RX7 | 0,76869  | 0,93273  | 1,38181   | 1,62821   |
|     | -3,69691 | 16,89141 | 63,36481  | 118,86643 |

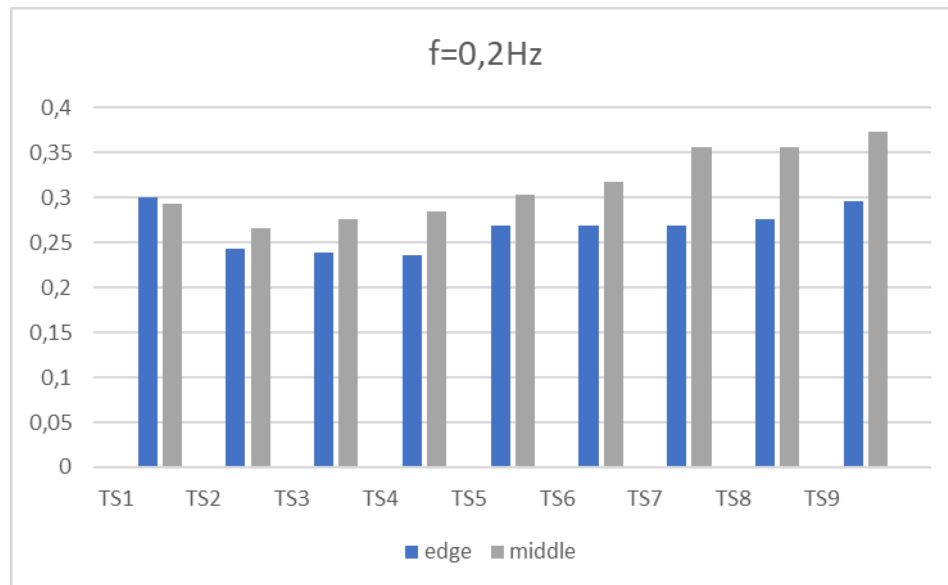
Σχήμα 99: Πίνακας συντελεστών a, b, σειρά δοκιμίων RX, συχνότητες 0,5 Hz 1,0 Hz

Αφού έχουμε υπολογίσει πλέον τους συντελεστές  $a$ , γίνεται επιτρεπτή η δημιουργία των διαγραμμάτων που δείχνουν πως μεταβάλλεται ο συντελεστής καθόλη τη σειρά TS και RX για συγκεκριμένη συχνότητα και τοποθεσία μετρήσεων (μέση, ακρή). Κρίθηκε μη απαραίτητο να γίνουν τα διαγράμματα για τους συντελεστές  $a$  ανά συγκεκριμένο δοκίμιο και για μεταβολή της συχνότητας, αφού η αύξηση του συντελεστή  $a$  με αύξηση της συχνότητας είναι ευδιάκριτη από τη σειρά γραφημάτων (-).

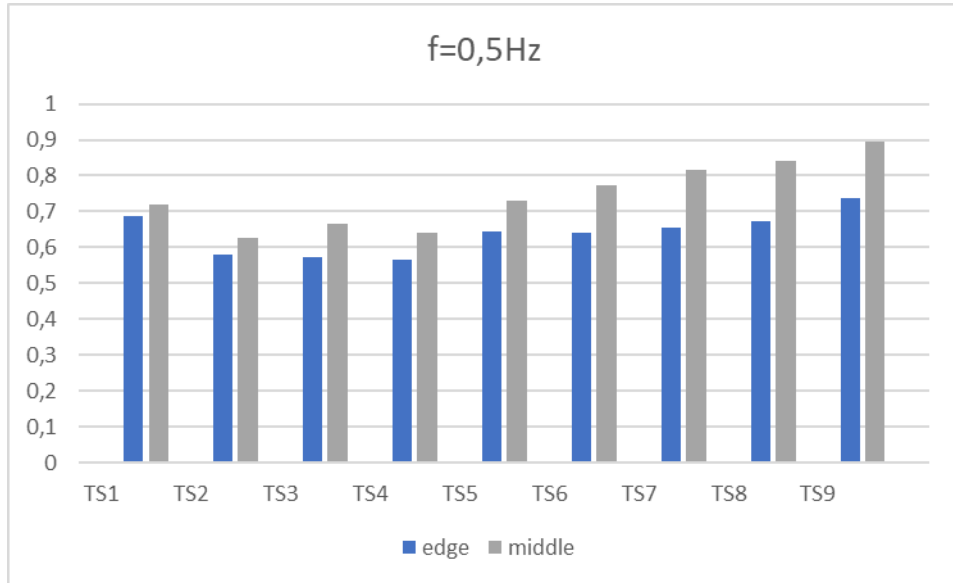
Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα:



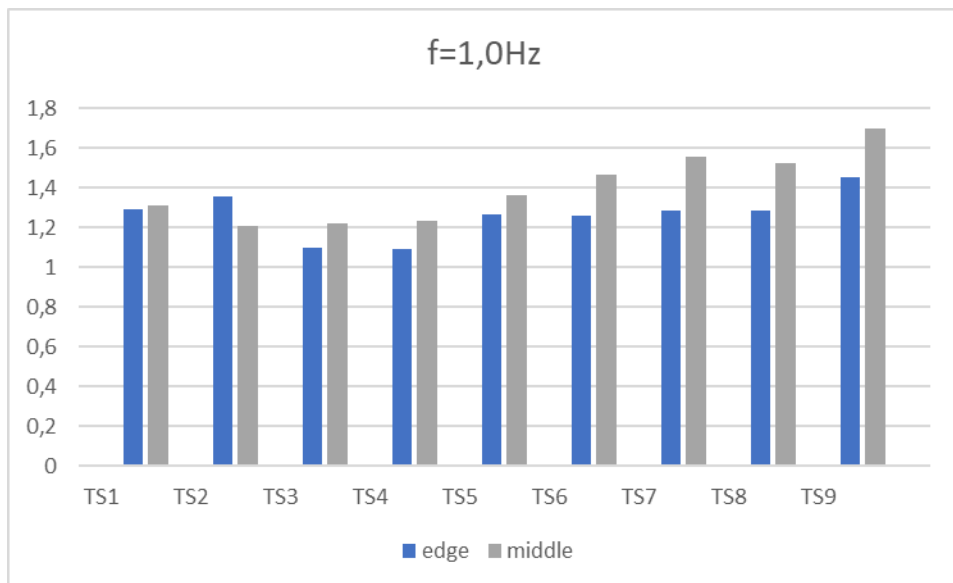
Σχήμα 100: Διάγραμμα συντελεστών  $\alpha$ , σειρά δοκιμών TS, συχνότητα 0,1 Hz



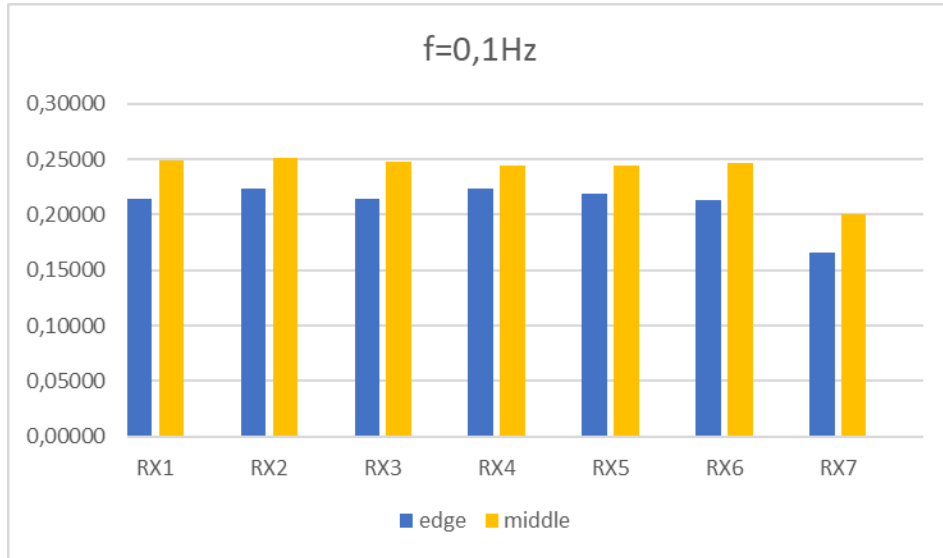
Σχήμα 101: Διάγραμμα συντελεστών  $\alpha$ , σειρά δοκιμών TS, συχνότητα 0,2 Hz



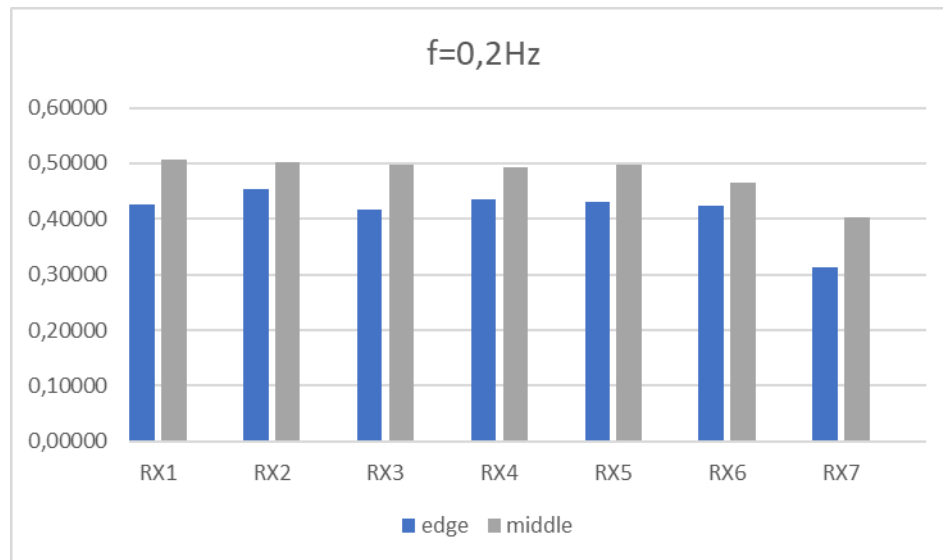
Σχήμα 102: Διάγραμμα συντελεστών  $a$ , σειρά δοκιμίων TS, συχνότητα 0,5 Hz



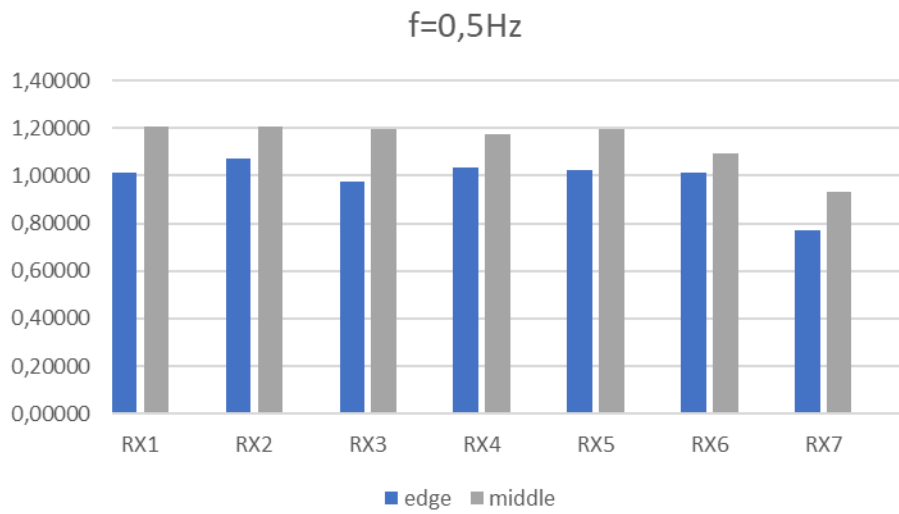
Σχήμα 103: Διάγραμμα συντελεστών  $a$ , σειρά δοκιμίων TS, συχνότητα 1,0 Hz



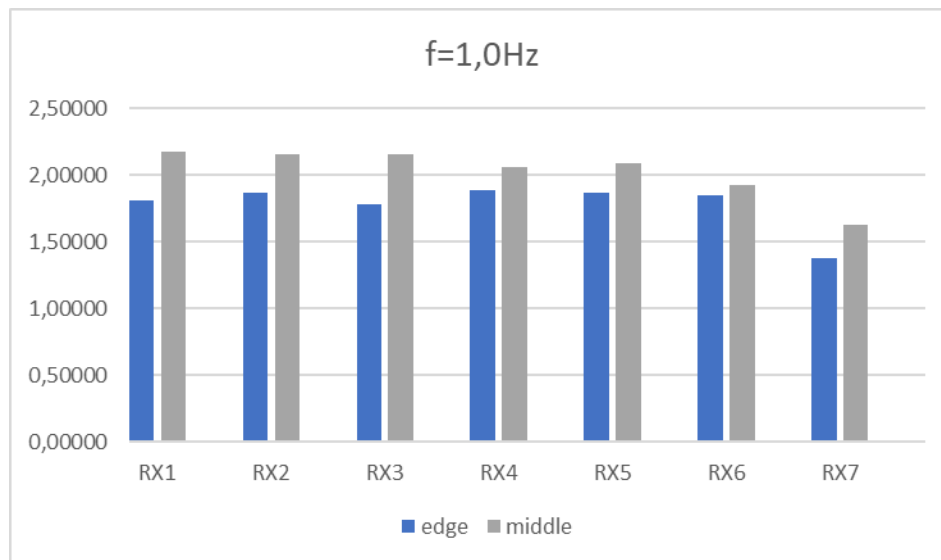
Σχήμα 104: Διάγραμμα συντελεστών  $a$ , σειρά δοκιμών RX, συχνότητα 0,1 Hz



Σχήμα 105: Διάγραμμα συντελεστών  $a$ , σειρά δοκιμών RX, συχνότητα 0,2 Hz

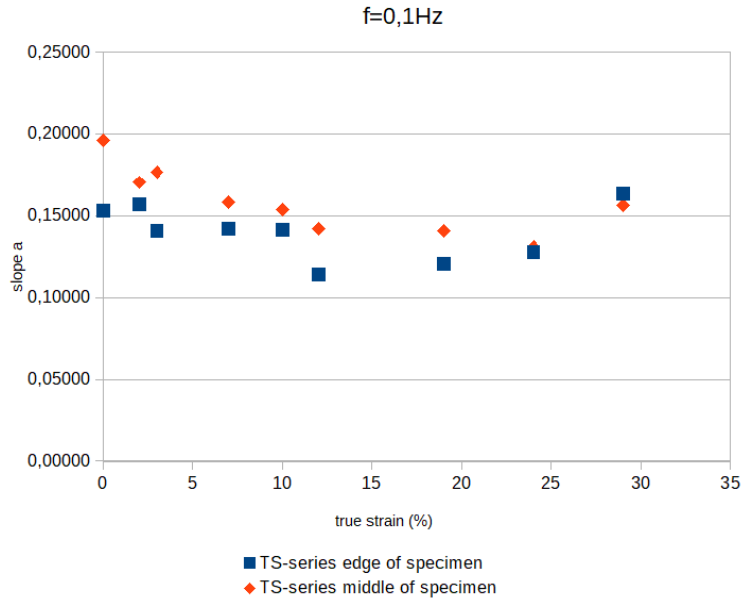


Σχήμα 106: Διάγραμμα συντελεστών  $a$ , σειρά δοκιμών RX, συχνότητα 0,5 Hz

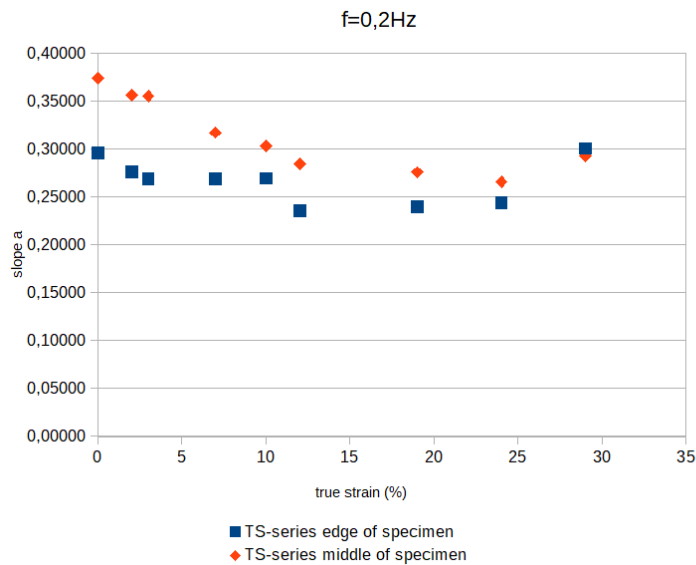


Σχήμα 107: Διάγραμμα συντελεστών  $a$ , σειρά δοκιμών RX, συχνότητα 1,0 Hz

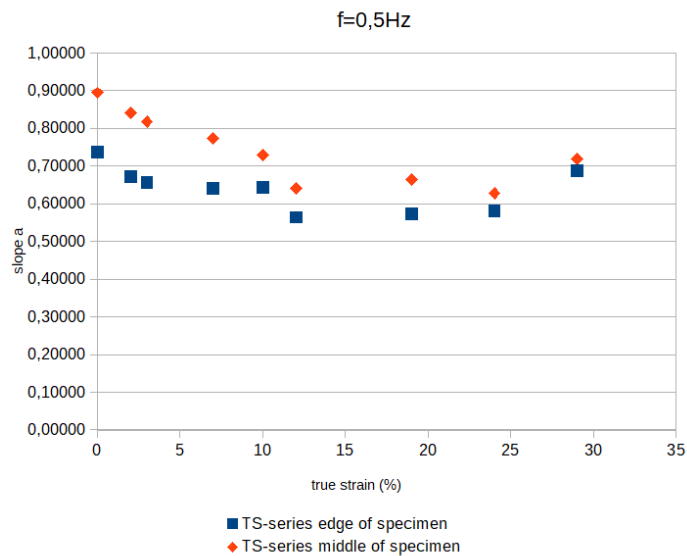




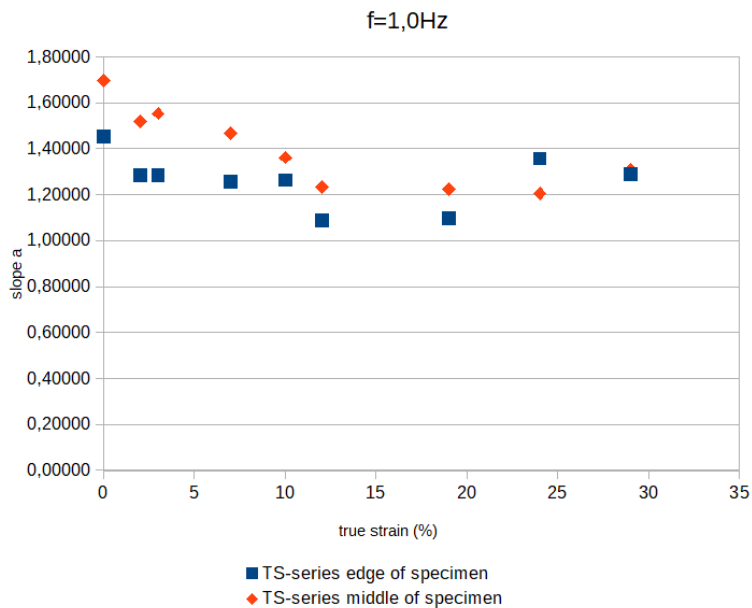
Σχήμα 108: Διάγραμμα συντελεστών  $a$  σε σχέση με τη πραγματική παραμόρφωση, σειρά δοκιμίων TS, συχνότητα 0,1 Hz



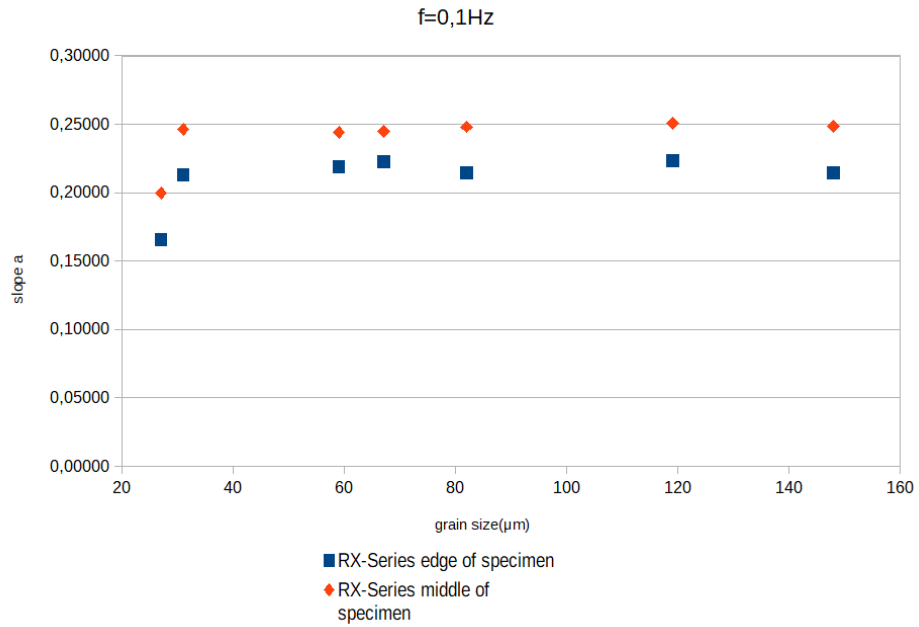
Σχήμα 109: Διάγραμμα συντελεστών  $a$  σε σχέση με τη πραγματική παραμόρφωση, σειρά δοκιμίων TS, συχνότητα 0,2 Hz



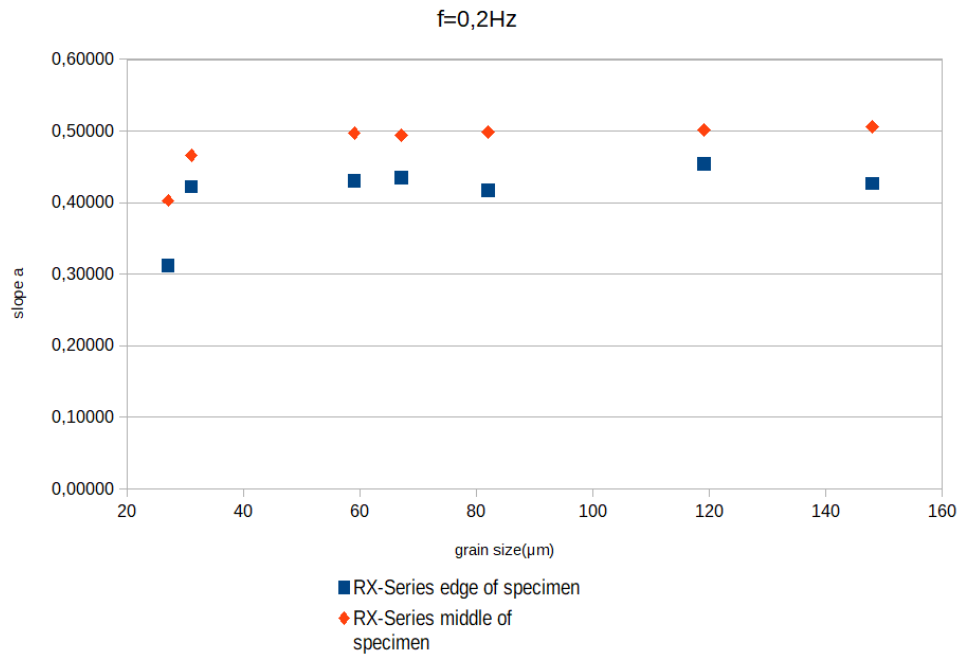
Σχήμα 110: Διάγραμμα συντελεστών  $a$  σε σχέση με τη πραγματική παραμόρφωση, σειρά δοκιμών TS, συχνότητα 0,5 Hz



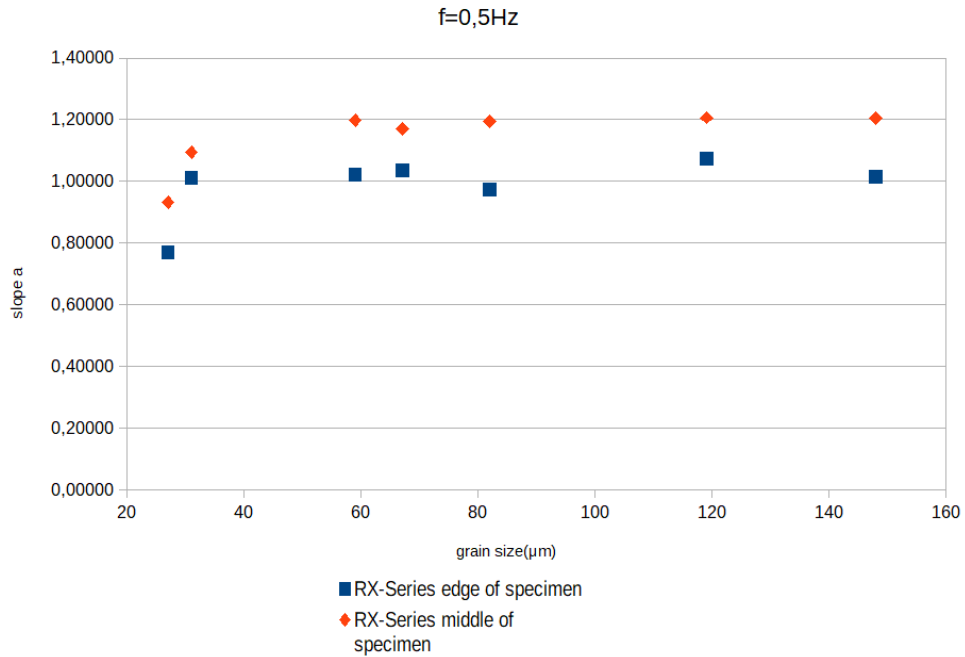
Σχήμα 111: Διάγραμμα συντελεστών  $a$  σε σχέση με τη πραγματική παραμόρφωση, σειρά δοκιμών TS, συχνότητα 1,0 Hz



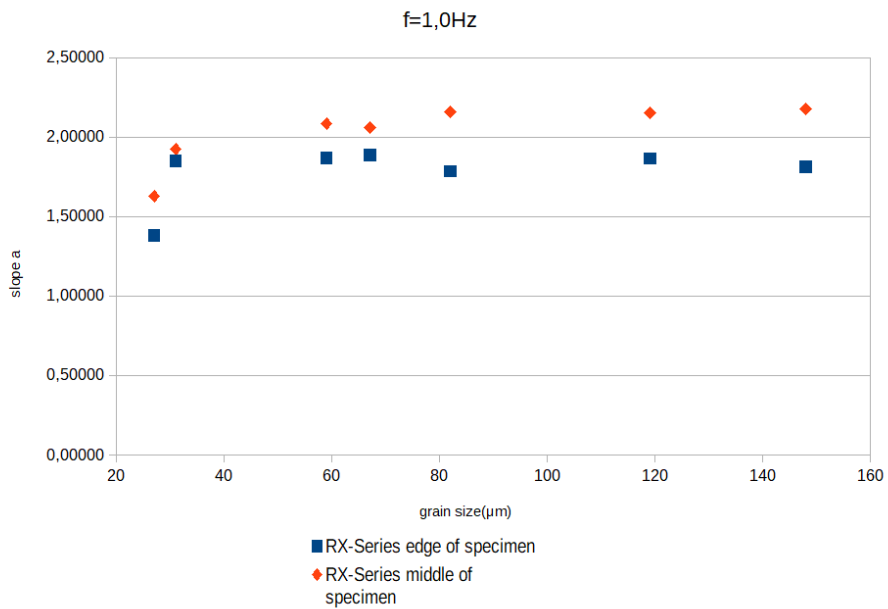
Σχήμα 112: Διάγραμμα συντελεστών  $a$  σε σχέση με το μέγεθος συσσωματώματος, σειρά δοκιμίων RX, συχνότητα 0,1 Hz



Σχήμα 113: Διάγραμμα συντελεστών  $a$  σε σχέση με το μέγεθος συσσωματώματος, σειρά δοκιμίων RX, συχνότητα 0,2 Hz



Σχήμα 114: Διάγραμμα συντελεστών  $a$  σε σχέση με το μέγεθος συσσωματώματος, σειρά δοκιμίων RX, συχνότητα 0,5 Hz



Σχήμα 115: Διάγραμμα συντελεστών  $a$  σε σχέση με το μέγεθος συσσωματώματος, σειρά δοκιμίων RX, συχνότητα 1,0 Hz



## 5. Συμπεράσματα

Η μεταβολή του συντελεστή  $a$  και κατά συνέπεια της μαγνητικής διαπερατότητας εξετάζεται τόσο ως προς τη μεταβολή της συχνότητας, όσο και ως προς τη μεταβολή των ενδογενών χαρακτηριστικών των φερρομαγνητικών δοκιμίων.

Από τα διαγράμματα που συσχετίζουν τον συντελεστή  $a$  με το βαθμό παραμόρφωσης στα δοκίμια για σταθερή συχνότητα και τόπο μέτρησης φαίνεται μια τάση αύξησης του συντελεστή  $a$  με την αύξηση παραμόρφωσης. Η τάση αυτή παρατηρείται με συνέπεια από το δοκίμιο TS3 προς το δοκίμιο TS9. Τα δοκίμια TS1, TS2 λειτουργούν αντίθετα με την τάση που παρατηρείται. Μια πιθανή εξήγηση για αυτή την ανωμαλία είναι η ενδεχόμενη αλλοίωση που υπέστησαν τα δύο πρώτα δοκίμια σε εντονότερο βαθμό σε σχέση με τα υπόλοιπα με την πάροδο του χρόνου. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι ο θόρυβος Barkhausen, όπως έχει βρεθεί στην προηγούμενη έρευνα που χρησιμοποιήθηκαν τα δοκίμια αυξάνεται με το ποσοστό παραμόρφωσης. Επομένως, τα δύο πρώτα δοκίμια επηρεάστηκαν περισσότερο από το δυσμενές αυτό φαινόμενο. Επιπλέον, καθώς το πάχος των δοκιμίων ήταν επίσης μεταβαλλόμενο, η ανοδική τάση του συντελεστή  $a$ , καθώς και η αντίθετη συμπεριφορά των δύο πρώτων δοκιμίων δε μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στην αύξηση της παραμόρφωσης, αλλά πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η αύξηση του πάχους από το δοκίμιο TS1 προς το TS9.

Όσον αφορά τη σειρά RX, δε φαίνεται να υπάρχει συσχέτιση του συντελεστή  $a$  με τη μείωση μεγέθους συσσωματώματος για σταθερή συχνότητα και τόπο μέτρησης. Η μόνη ξεκάθαρη αλλαγή του συντελεστή  $a$  προκύπτει από το δοκίμιο RX6 προς το δοκίμιο RX7. Με βάση αυτή την αλλαγή θα μπορούσε να γίνει η υπόθεση ότι ο συντελεστής  $a$  μειώνεται ανεπαίσθητα από το δοκίμιο RX1 προς το δοκίμιο RX6, όμως ο αισθητήρας δεν διαθέτει την ευκρίνεια να εντοπίσει τέτοιες αλλαγές. Τα δοκίμια της σειράς RX έχουν επίσης μεταβαλλόμενο πάχος που επηρεάζει τα αποτελέσματα. Στη περίπτωση της σειράς RX, ο θόρυβος Barkhausen επιδρά δυσμενέστερα στα δοκίμια με μεγαλύτερο μέγεθος συσσωματώματος, επηρεάζοντας τις μετρήσεις.

## 6. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Από τη παρούσα εργασία παράχθηκε πλήθος δεδομένων, τα οποία μια μελλοντική εργασία θα μπορούσε να αξιοποιήσει κατάλληλα. Ένας τρόπος που θα μπορούσε να επιτευχθεί αυτό θα ήταν να παραχθούν περισσότερα σχετικά δεδομένα τα οποία θα μπορούν να συγκριθούν με τα υπάρχοντα, με σκοπό την εξαγωγή επιπλέον συμπερασμάτων.

Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η λήψη μετρήσεων και στη περιοχή του κορεσμού των φερρομαγνητικών δοκιμίων. Η διαδικασία μαγνήτισης είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο και οι επιπλέον μετρήσεις στη περιοχή του κορεσμού θα οδηγούσαν σε πληρέστερα συμπεράσματα.

Μια εναλλακτική κατεύθυνση μελλοντικής εργασίας θα ήταν η προσπάθεια βελτίωσης του ίδιου του αισθητήρα με τη μεταβολή, μίας ή παραπάνω από τις επιμέρους παραμέτρους του.

## Βιβλιογραφία

- [1] D. O. Forfar, *James Clark Maxwell: Maker of Waves.*, Victorian Web, 1995.
- [2] P. J. Nahin, "Maxwell's grand unification", *IEEE Spectrum*, 29, 3, 45, 1992.
- [3] A. A. Huurdeman, *The Worldwide History of Telecommunications*, Wiley, 2003.
- [4] E. M. Purcell, *Electricity and Magnetism*, Mc Graw-Hill Inc., 1985.
- [5] S. Tumanski, *Handbook of magnetic measurements*, CRC Press, 2011
- [6] D. C. Jiles, *Introduction to magnetism and magnetic materials*, Chapman and Hall, 1991.
- [7]. H. Barkhausen, "Two phenomena uncovered with the help of the new amplifier", *Z.Phys.*, 20, pp. 401-403, 1919.
- [8] J. E. L. Bishop, "Enhanced eddy current loss due to domain displacement", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 49, Issue 3, pp. 241-249, April 1985.
- [9] F. Fiorillo, *Measurement and Characterization of Magnetic Materials*, Elsevier, 2004.
- [10] H. A. Haus, and J. R. Melcher, "Electromagnetic Fields and Energy". (Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare). <http://ocw.mit.edu> (accessed [01/06/2020]). License: Creative Commons Attribution-NonCommercial-Share Alike, 1989.



- [11] E. Hristoforou, A. Ktena, S. Gong, "Magnetic Sensors: Taxonomy, Applications, and New Trends", IEEE Transactions on Magnetics, volume 55, Issue 7, pp. 1-14 ,2019.
- [12] P. Ripka, "Review of fluxgate sensors, Sensors and Actuators A: Physical", Volume 33, Issue 3, pp. 129-141, 1992.
- [13] M. Janosek, "Parallel Fluxgate Magnetometers, Smart Sensors", Measurement and Instrumentation, pp. 41-61, 2017.
- [14] P. Vourna, A. Ktena, P. Tsarabaris, and E. Hristoforou, "Magnetic Residual Stress Monitoring Technique for Ferromagnetic Steels", Metals, Volume 8,8, pp. 592, 2018.
- [15] P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia, "Residual stress. Part 1 - Measurement techniques", Materials, Science and Technology, 17, 4, pp. 355-365, 2001.
- [16] N. S. Rossini, M. Dassisti, K. Y. Benyounis, and A. G. Olabi, "Methods of measuring residual stresses in components", Materials & Design, 35, 572-588, 2012.
- [17] E. Van Puymbroeck, W. Nagy, K. Schotte, Z. Ul-Abdin and H. De Backer, "Determination of Residual Welding Stresses in a Steel Bridge Component by Finite Element Modeling of the Incremental Hole-Drilling Method", Applied Sciences, 9, 3, p 536, 2019.
- [18] D. C. Jiles, "Review of magnetic methods for nondestructive evaluation (Part 2)", NDT International, Volume 23, Issue 2, pp. 83-92, April 1990.
- [19] S. M. Saxby, "Magnetic testing of iron", Engineering, 5, p 297,1868.

[20] C. E. Betz, "Principles of Magnetic Particle Testing", Magnaflux Corporation, p 48,1967.

[21] A. V. deForest, "Magnetic testing of iron and steel", Iron & Steel ,9, p 170,1932.

[22] F. B. Doane, "Magnaflux inspection for cracks and seams", Iron Age ,1933.

[23] W. Stumm, "Magnetic stray flux techniques in nondestructive testing - theory, applications, new developments", Br J NDT, 21, p 193, 1979.

[24] W. Stumm, "Inservice nondestructive inspection of heavy loaded structures, in particular underwater structures, with leakage flux methods", Br J NDT, 25, p 124,1983.

[25] T. Zuschlag, "Method and apparatus for testing rails or the like", US Patent1,896,737, πατεντια, 1933.

[26] C. H. Hastings, "A new type of magnetic flaw detector", ASTM Proc,47, p 651 ,1947.

[27] N. N. Zatsepin, and V. E. Sheherbieia, "Calculation of the magnetic field of surface defects. I. Field topography of defect models", Soy J NDT ,2, p. 50, 1966.

[28] V. E. Shcherbinin and N. N. Zatsepin, "Calculation of the magnetostatic field of surface defects, II. Experimental verification of the principal theoretical relationships", Soy J NDT, 2, p. 59, 1966.

[29] V. E. Shcherbinin, and A. I. Pashagin, "Influence of the extension of a defect on the magnitude of its magnetic field", Soy J NDT ,8, p 441,1972

- [30] V. E. Shcherbinin, and A. I. Pashagin, "On the volume polarization of cracks", *Soy J NDT* , 10, p 460, 1974.
- [31] V. E. Shcherbinin, and A. I. Pashagin, "Fields of defects on the inner and outer surfaces of a tube during circular magnetization", *Soy J NDT* , 8, p 134, 1972.
- [32] C. Edwards, and S. B. Palmer, "The magnetic leakage field of surface breaking cracks", *J Phys D: Appl Phys*, 19, p 657, 1986.
- [33] J. H. Hwang, and W. Lord, "Finite element modelling of magnetic field-defect interactions", *J Test & Eval* , 3, p 2, 1975.
- [34] W. Lord, and J. H. Hwang, "Defect characterization from magnetic leakage fields" , *Br J NDT*, 19, p 14, 1977.
- [35] O. de la Barrière, C. Ragusa, M. Khan, C. Appino, F. Fiorillo, and F. Mazaleyrat, "A Simple Compensation Method for the Accurate Measurement of Magnetic Losses with a Single Strip Tester", in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 5, pp. 1-4, May 2016.
- [36] V. Havlíek and M. Mikulec, "On-line testing device using the compensation method.", *Phys. Scr.*, 39, 4, p. 513, 1989.
- [37] H. Iranmanesh, B. Tahouri, A.J. Moses, and P. Beckley, "A computerised Rogowski-Chattock Potentiometer (RCP) compensated on-line power-loss measuring system for use on grain-oriented electrical steel production lines.", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 112, pp. 99-102, 1992.
- [38] Ktena, A., Hristoforou, E., Gerhardt, G. J. L., Missell, F. P., Landgraf, F. J. G., Rodrigues, D. L., & Alberteris-Campos, M., Barkhausen noise as a microstructure characterization tool, *Physica B: Condensed Matter*, 435, 109-112, 2014.