



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΛΟΓΩ**

**ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΗΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Η. ΤΖΑΜΟΥΡΑΝΗ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

Ευάγγελος Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2016**





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΛΟΓΩ  
ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΗΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Η. ΤΖΑΜΟΥΡΑΝΗ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΦΟΥΡΛΑΡΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΧΑΡΙΤΙΔΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2016**



# Πρόλογος - Ευχαριστίες

Για τη βοήθεια κατά την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Ευάγγελο Χριστοφόρου, Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ για την εμπιστοσύνη που έδειξε προς το πρόσωπό μου και την έμπνευση την οποία άντλησα από αυτόν για να ασχοληθώ με το θέμα των μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών. Τη διδάκτορα Ξένια Βουρνά, για τη συνδρομή και τις συμβουλές και το διδάκτορα Δημήτρη Κοσσυβάκη, για την παροχή συμβουλών σε ηλεκτρονικά και ηλεκτρολογικά θέματα. Τους υποψήφιους διδάκτορες Αγγελόπουλο Σπύρο, Στεφανή Χριστίνα, Μαγγιώρου Ελένη και Κούλη Μαριλίζα για τη συνεργασία που είχαμε σε καθημερινή βάση. Επιπλέον, το διδακτικό και τεχνικό προσωπικό των εργαστηρίων Δυναμικής Μηχανών και Κατεργασιών των Υλικών για τη βοήθειά τους στη χρήση του απαραίτητου για την εργασία εξοπλισμού.



# Περίληψη

Στην παρούσα πειραματική διπλωματική εργασία μελετάται το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής, της αλλαγής δηλαδή των διαστάσεων των υλικών εξαιτίας μαγνητικών πεδίων και των ταλαντώσεων που προκαλούνται σε σιδηρομαγνητικά υλικά όταν υπόκεινται σε μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία.

Στο θεωρητικό μέρος αναφέρονται αρχικά κάποια στοιχεία της θεωρίας του σιδηρομαγνητισμού και μαγνητικών περιοχών. Ακολούθως γίνεται μία εισαγωγή στο φαινόμενο της μαγνητοσυστολής και μελετάται η σχέση της συχνότητας ενός εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου με τη συχνότητα της μηχανικής ταλάντωσης που προκαλεί σε σιδηρομαγνητικό σώμα, με βάση τα διαγράμματα ( $\lambda$ - $H$ ) πολυκρυσταλλικών υλικών.

Στο πειραματικό μέρος περιγράφεται ο εργαστηριακός εξοπλισμός και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν και ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστηκαν ηλεκτρομαγνήτες από πυριτιούχο ηλεκτρικό χάλυβα, πηνία και ηλεκτρονικά κυκλώματα, απαραίτητα για τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

Στο κεφάλαιο 'σειρές μετρήσεων' καταγράφονται οι συνθήκες των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, οι μετρήσεις, κυρίως ηλεκτρικών μεγεθών και οι υπολογισμοί των μαγνητικών μεγεθών που ενδιέφεραν. Σε ορισμένες περιπτώσεις, γίνεται προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου στο χώρο γύρω από τα πηνία. Γίνεται ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων και η διερεύνησή τους.

Διαπιστώνεται η απότομη πτώση του συντελεστή αυτεπαγωγής πηνίου που φέρει ως πυρήνα ηλεκτρικό χάλυβα με την αύξηση της συχνότητας της τάσης. Γίνεται απόπειρα υπολογισμού της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού των ηλεκτρομαγνητών, όμως το αποτέλεσμα απέχει πολύ από το πραγματικό, κυρίως επειδή στο μαγνητικό κύκλωμα που χρησιμοποιείται υπάρχουν υψηλές σε ποσοστό ενεργειακές απώλειες. Επίσης, σε επόμενο πείραμα, εφαρμόζεται παλμικό πεδίο με τη βοήθεια πεταλοειδούς μαγνήτη σε δοκίμιο προκειμένου να ανιχνευθεί η τάση που επάγεται σε άλλο πηνίο που έχει τα τυλίγματά του γύρω από το δοκίμιο, λόγω αντίστροφου μαγνητοσυστολικού φαινομένου (ή φαινομένου Villari).

Η μέτρηση της επιτάχυνσης μέσω επιταχυνσιόμετρου οδηγεί στο συμπέρασμα πως το πλάτος της εξαναγκασμένης μηχανικής ταλάντωσης που προκαλείται λόγω της μαγνητοσυστολής εξαρτάται έντονα από τη συχνότητα του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Αυτό οφείλεται σε φαινόμενα συντονισμού. Η εισαγωγή ελαστικών τάσεων στο υπό εξέταση υλικό παραλλάσσει το πλάτος της επιτάχυνσης. Αν, επιπρόσθετα με το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, μαγνητοσυστολή στο δοκίμιο προκαλεί και ένα σταθερό στο χρόνο μαγνητικό πεδίο, τότε το πλάτος της ταλάντωσης είναι δυνατόν να αυξηθεί εντυπωσιακά σε πλάτος, περίπου 10 με 15 φορές, χωρίς να αποκλείεται ακόμα μεγαλύτερη αύξηση.

Λέξεις Κλειδιά:

μαγνητοσυστολή, αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο, ταλαντώσεις λόγω μαγνητοσυστολής, ηλεκτρικός χάλυβας



# Abstract

This thesis analyzes the phenomenon of magnetostriction, i.e. the change of material dimensions due to the magnetic field and the vibrations caused in ferromagnetic materials when subjected to varying magnetic fields.

In the theoretical part, some elements of the theory of ferromagnetism and magnetic regions are presented. There follows an introduction to the phenomenon of magnetostriction and a study of the relationship between the frequency of an alternating magnetic field and the frequency of the mechanical vibration that causes in a ferromagnetic body, which is based on ( $\lambda$ -H) diagrams of polycrystalline materials.

In the experimental part, there is a description of the laboratory equipment and instruments used and how electromagnets consisting of silicon electrical steel, coils and electronic circuits required for conducting measurements were made.

In the chapter 'measuring series' lists the conditions of the experiments carried out, measurements, mainly of electrical quantities and calculations of magnetic aggregates interested. In some cases, magnetic field is simulated in the space around the coils. Results are being discussed.

There is a sharp drop in the inductance factor of a coil that has electrical steel in its core, with increasing voltage frequency. Attempts to calculate the differential magnetic permeability of the electromagnets' material, but the result is far from true, mainly because the magnetic circuit has high rate of energy loss. Also, in the next experiment, pulsed field is applied by means of a horseshoe magnet in a specimen, in order to detect the voltage induced in coil having windings around the specimen, because of the inverse magnetostrictive phenomenon (or phenomenon Villari).

The measurement of acceleration by the accelerometer leads to the conclusion that the amplitude of forced mechanical vibration caused by the magnetostriction depends strongly on the frequency of the external magnetic field. This is due to resonance phenomena. The introduction of stress in elastic material under test varies the amplitude of acceleration. If, in addition to the alternating magnetic field, magnetostriction in the workpiece causes a constant magnetic field, the amplitude of oscillation may be increased dramatically in width, about 10 to 15 times without even greater increase excluded.

## **Keywords:**

magnetostriction, inverse magnetostrictive phenomenon, Villari phenomenon, oscillation due to magnetostriction, electrical steel



# Περιεχόμενα

1	Θεωρητικό μέρος .....	1
1.1	Στοιχεία σιδηρομαγνητισμού .....	1
1.2	Γενικά περί μαγνητοσυστολής .....	4
1.3	Μαγνητοσυστολή ισότροπου πολυκρυσταλλικού υλικού .....	5
2	Πειραματικό μέρος.....	11
2.1	Ηλεκτρομαγνήτες .....	11
2.2	Κατασκευή πυρήνα ηλεκτρομαγνήτη .....	12
2.3	Υδροκοπή .....	13
2.4	Λείανση σε εργαλειομηχανή ρεκτιφιέ .....	13
2.5	Συγκράτηση κομματιών και περιέλιξη πηνίου.....	14
2.6	Κινητό πηνίο .....	15
2.7	3D εκτύπωση .....	16
2.8	Περιέλιξη πηνίου.....	18
2.9	Έλεγχος ορθότητας προσομοίωσης .....	20
2.10	Αισθητήρας επιτάχυνσης .....	21
2.11	Παλμογράφοι.....	23
2.12	Γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος .....	24
2.13	Κύκλωμα για παλμικό ρεύμα .....	24
3	Σειρές πειραμάτων.....	29
3.1	Εναλλασσόμενο ρεύμα που δημιουργεί το πεδίο εντός του κινητού πηνίου .....	29
3.2	Μαγνητική διαπερατότητα υλικού πεταλοειδών μαγνητών.....	33
3.3	Διάταξη με βάση το αντίστροφο του μαγνητοσυστολικού φαινομένου .....	39
3.4	Ανάρτηση μάζας στο ελεύθερο άκρο πακτωμένης λάμας .....	43
3.5	Επίδραση σταθερού μαγνητικού πεδίου στην ταλάντωση της λάμας.....	60
4	Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	79
4.1	Συμπεράσματα .....	79
4.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	80
5	Βιβλιογραφία .....	83



# Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1: Βρόχοι υστέρησης που προκύπτουν κατά τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου με εναλλασσόμενο ρεύμα, για διάφορες πυκνότητες μαγνητικής ροής που προκύπτουν [3] .....	3
Σχήμα 2: Εύκολος και δύσκολος άξονας μαγνήτισης για το μαγνητίτη και αντίστοιχα διαγράμματα [4]. .....	4
Σχήμα 3: Εξάρτηση της μαγνητοσυστολής από το μαγνητικό πεδίο. Η κλίμακα στον άξονα των τετμημένων είναι λογαριθμική [2].....	5
Σχήμα 4: Η ανηγμένη μεταβολή του μήκους των τριών κοινών σιδηρομαγνητικών στοιχείων σε συνάρτηση με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο [5] .....	6
Σχήμα 5: Μεταβολή μήκους δοκιμίου Fe στο χρόνο, υπό χαμηλό εναλλασσόμενο πεδίο, 30 Oe .....	7
Σχήμα 6: Εξάρτηση της μαγνητοσυστολής διάφορων πολυκρυσταλλικών υλικών [6].....	8
Σχήμα 7: Μεταβολή μήκους δοκιμίου Fe στο χρόνο, υπό εναλλασσόμενο πεδίο, 220 Oe .....	9
Σχήμα 8: Σύγκριση μεταβολής μήκους δοκιμίου Fe στο χρόνο, υπό εναλλασσόμενο πεδίο με ακραίες τιμές 30 και 220 Oe .....	9
Σχήμα 9: Σκαρίφημα πυρήνα ηλεκτρομαγνήτη. Οι διαστάσεις σε mm. ....	11
Σχήμα 10: Ο ηλεκτρικός χάλυβας από τον οποίο παράγονται οι πυρήνες, το μπρούντζινο χρώμα οφείλεται στο μονωτικό στρώμα .....	12
Σχήμα 11: Λείανση των εδρών του πυρήνα στο ρεκτιφιέ. Η μέγγνη συγκρατείται με μαγνητικό τρόπο πάνω στο τραπέζι. Διακρίνονται ο λειαντικός τροχός και τα τεμάχια, ακριβώς από κάτω του. ....	14
Σχήμα 12: Όψη πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη.....	15
Σχήμα 13: Μηχανολογικό σχέδιο του εξαρτήματος περί του οποίου τυλίγεται το πηνίο. Οι διαστάσεις είναι σε χιλιοστά. ....	17
Σχήμα 14: Πηνίο 300 σπειρών τυλιγμένο στο μαύρου χρώματος εξάρτημα που απεικονίζεται στο προηγούμενο σχήμα. ....	18
Σχήμα 15: Μέτρο της πυκνότητα μαγνητικής ροής στην περιοχή πλησίον του κινητού πηνίου .....	19
Σχήμα 16: Κεφαλή επιταχυνσιόμετρου τριών διαστάσεων.....	22
Σχήμα 17: Σώμα συσκευής επιταχυνσιόμετρου. ....	23
Σχήμα 18: Η γεννήτρια HM 8350 της εταιρείας HAMEG instruments.....	24
Σχήμα 19: Σκαρίφημα της διάταξης για διέγερση του ηλεκτρομαγνήτη με παλμικό ρεύμα άνω του ενός A .....	25
Σχήμα 20: Πλακέτα τύπου Arduino Uno .....	26
Σχήμα 21: Το MOSFET συνδεδεμένο με μεταλλική θερμική καταβόθρα. Το γκρι χρώματος υλικό που διακρίνεται είναι καλός αγωγός της θερμότητας και κακός του ηλεκτρισμού. ....	27
Σχήμα 22: Εξάρτηση της έντασης ηλεκτρικού ρεύματος από τη συχνότητα της πηγής .....	30
Σχήμα 23: Διάγραμμα της μεταβολής του συντελεστή αυτεπαγωγής ως προς τη συχνότητα, με αμφότερες τις μεθόδους μέτρησης της ενεργού τιμής της έντασης .....	32
Σχήμα 24: Κύκλωμα διέγερσης του πρώτου πηνίου με εναλλασσόμενο ρεύμα από τη γεννήτρια και αποτύπωση της τάσης που επάγεται στο δεύτερο σε παλμογράφο .....	33
Σχήμα 25: Διάγραμμα μαγνητικής επαγωγής-μαγνητικού πεδίου πυριτιούχου χάλυβα για χαμηλές τιμές πεδίου .....	37
Σχήμα 26: Διάταξη για ποσοτικό προσδιορισμό της μαγνητοσυστολής με βάση το αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο .....	39
Σχήμα 27: Χαρακτηριστικό σήμα που λαμβάνεται από το πηνίο λήψης για παλμική διέγερση με διάρκεια παλμού περίπου 10μs και περίοδο 1ms .....	41
Σχήμα 28: Κατανομή της Z συνιστώσας του πεδίου στο δείγμα, για απόσταση πετάλου-δείγματος ίση με 5,5mm.....	42

Σχήμα 29: Η διάταξη για μέτρηση της ταλάντωσης για διάφορα φορτία, τα οποία τοποθετούνται στο ζυγό (διακρίνεται με ένα πρότυπο μάζας 20g στο δεξί άκρο της εικόνας. ....	43
Σχήμα 30: Κατανομή της συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου σε άξονα παράλληλο με λάμα από ηλεκτρικό χάλυβα SA1008 .....	49
Σχήμα 31: Ενδεικτική μείωση του μαγνητικού πεδίου με αύξηση της απόστασης από το κέντρο του (λαμβάνεται ρεύμα που διαρρέει τις σπείρες ίσο με 1A) .....	51
Σχήμα 32: Διάγραμμα μαγνητοσουστολής-μαγνητικού πεδίου σε στοιχειακό σίδηρο. ....	52
Σχήμα 33: Συσχέτιση της μάζας που αναρτάται με τη μέγιστη επιτάχυνση της ταλάντωσης .....	59
Σχήμα 34: Εξάρτηση της επιτάχυνσης από το ρεύμα DC που διαρρέει τα τυλίγματα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη ( $f=217\text{Hz}$ ) .....	62
Σχήμα 35: Εξάρτηση της μετατόπισης από το ρεύμα DC που διαρρέει τα τυλίγματα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη ( $f=217\text{Hz}$ ) .....	63
Σχήμα 36: Εξάρτηση της επιτάχυνσης από το ρεύμα DC που διαρρέει τα τυλίγματα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη ( $f=248\text{Hz}$ ) .....	65
Σχήμα 37: Διάταξη με τα πηνία και τον αισθητήρα επιτάχυνσης στις άκρες της λάμας πακτωμένης λάμας.....	65
Σχήμα 38: Στιγμιότυπο από την καταγραφή της επιτάχυνσης για ημιτονοειδή διέγερση 38 Hz (διάταξη 2).....	67
Σχήμα 39: Εξάρτηση της επιτάχυνσης από το ρεύμα DC που διαρρέει τα τυλίγματα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη ( $f=133\text{Hz}$ , διάταξη 2) .....	68
Σχήμα 40: Εξάρτηση της μετατόπισης από το ρεύμα DC που διαρρέει τα τυλίγματα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη ( $f=133\text{Hz}$ , διάταξη 2).....	69
Σχήμα 41: Εξάρτηση της επιτάχυνσης από το ρεύμα DC που διαρρέει τα τυλίγματα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη ( $f=266\text{Hz}$ , διάταξη 2) .....	71
Σχήμα 42: Εξάρτηση της μετατόπισης από το ρεύμα DC που διαρρέει τα τυλίγματα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη ( $f=266\text{Hz}$ , διάταξη 2).....	71
Σχήμα 43: Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου σε απόσταση $x$ από το κέντρο κυκλικού αγωγού ακτίνας $R$ .....	73
Σχήμα 44: Κατανομή μαγνητικού πεδίου εντός κυκλικού αγωγού ακτίνας $0,1\text{m}$ , ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα $1\text{ A}$ .....	76

# 1 Θεωρητικό μέρος

## 1.1 Στοιχεία σιδηρομαγνητισμού

Η πολύ υψηλή μαγνητική διαπερατότητα είναι η περισσότερο σημαντική ιδιότητα από τεχνολογικής απόψεως των σιδηρομαγνητικών υλικών. Η ανάγκη ερμηνείας του φαινομένου αυτού, δηλαδή της δημιουργίας μαγνήτισης εντός των υλικών που είναι πολλαπλάσια από το εξωτερικώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, οδήγησε στην ανάπτυξη αντίστοιχων θεωριών. Εξ αυτών, επικρατέστερη είναι η θεωρία μαγνητικών περιοχών κατά Weiss. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, οι σιδηρομαγνήτες έχουν μαγνητικές περιοχές. Σε κάθε μία από τις περιοχές αυτές, τα μαγνητικά δίπολα (πλήθους  $10^{12}$  ως  $10^{18}$ ) είναι προσανατολισμένα παράλληλα, έτσι ώστε η μαγνήτιση μέσα σ' αυτήν να φτάνει μέχρι τον κορεσμό [1].

Εξετάζεται πόσος είναι περίπου ο όγκος των μαγνητικών αυτών περιοχών, σε σχέση με τους κόκκους από τους οποίους αποτελείται το υλικό και διακρίνονται στις μικρογραφίες. Για την περίπτωση του σιδήρου, το πλέγμα του κρυστάλλου είναι κυβικό χωροκεντρωμένο και έχει ένα ολόκληρο άτομο και οχτώ όγδοα ατόμων ανά κυψελίδα, συνολικά δυο άτομα ανά κυψελίδα. Η κρυσταλλική αυτή μονάδα έχει όγκο:

$$V_{\text{κυψ}} = (2,87 * 10^{-10} \text{ m})^3 = 2,22 * 10^{-31} \text{ m}^3 \quad (1.1)$$

και έχει δυο μαγνητικά δίπολα.

Ένας κόκκος χάλυβα, για απλότητα υπολογισμού έστω κυβικού σχήματος και ακμής κύβου  $50 \mu\text{m}$  έχει, όπως προκύπτει από την απλή μέθοδο των τριών:

$$\text{Αριθμός ατόμων} = \frac{(50 \mu\text{m})^3}{\frac{V_{\text{κυψ}}}{2}} = \frac{2 * 1,25 * 10^{-13}}{2,22 * 10^{-31}} \cong 1,125 * 10^{18} \quad (1.2)$$

Συγκρίνοντας αυτόν τον αριθμό με το πλήθος των διπόλων ανά μαγνητική περιοχή, προκύπτει πως ένας τέτοιου μεγέθους κόκκος μπορεί να περιέχει από μία ως ένα εκατομμύριο μαγνητικές περιοχές. Αντίστοιχα, αν το υλικό είναι πιο λεπτόκοκκο, ενδέχεται μία και μόνο μαγνητική περιοχή να εκτείνεται σε άνω του ενός κόκκου.

Η διεύθυνση προσανατολισμού διαφέρει από περιοχή σε περιοχή με τυχαίο τρόπο, αν και τα δίπολα επιλέγουν να προσανατολίζονται σε διευθύνσεις κύριων κρυσταλλογραφικών αξόνων, όταν δεν υπάρχει εξωτερικό μαγνητικό πεδίο [2].

Τα άμεσα συμπεράσματα της θεωρίας είναι:

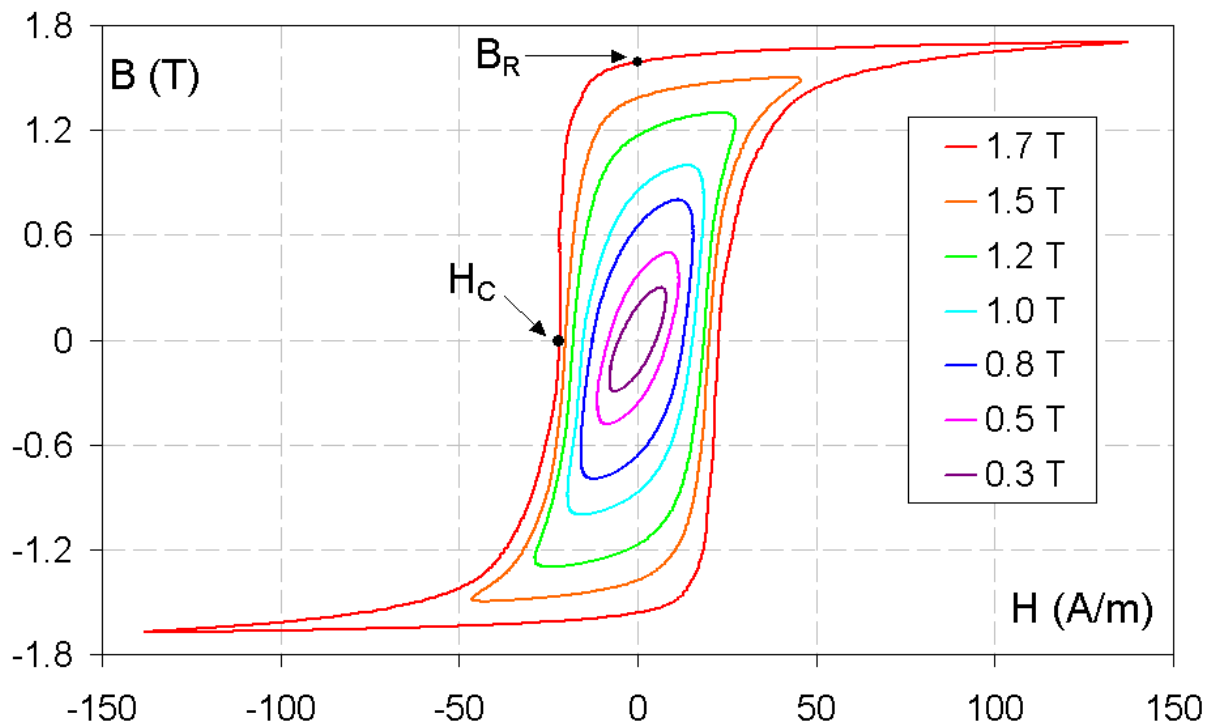
- Τα ατομικά μαγνητικά δίπολα υπάρχουν και δεν δημιουργούνται από το πεδίο,
- Τα δίπολα είναι μικροσκοπικώς παραλληλισμένα ακόμα και όταν το υλικό δεν έχει μαγνήτιση,
- Οι μαγνητικές περιοχές είναι αυτές που έχουν τυχαίες διευθύνσεις, όταν το υλικό δεν έχει μαγνήτιση,

- Κατά τη διαδικασία της μαγνήτισης επαναπροσανατολίζονται οι μαγνητικές περιοχές, έτσι ώστε είτε περισσότερες μαγνητικές περιοχές προσανατολίζονται προς το μαγνητικό πεδίο, είτε ο χώρος των μαγνητικών περιοχών που είναι προσανατολισμένες προς το πεδίο να είναι μεγαλύτερος από τον χώρο των περιοχών που αντιτίθενται στο πεδίο.

Η επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, τείνει να προσανατολίζει τις μαγνητικές περιοχές παράλληλα προς το επιβαλλόμενο πεδίο.

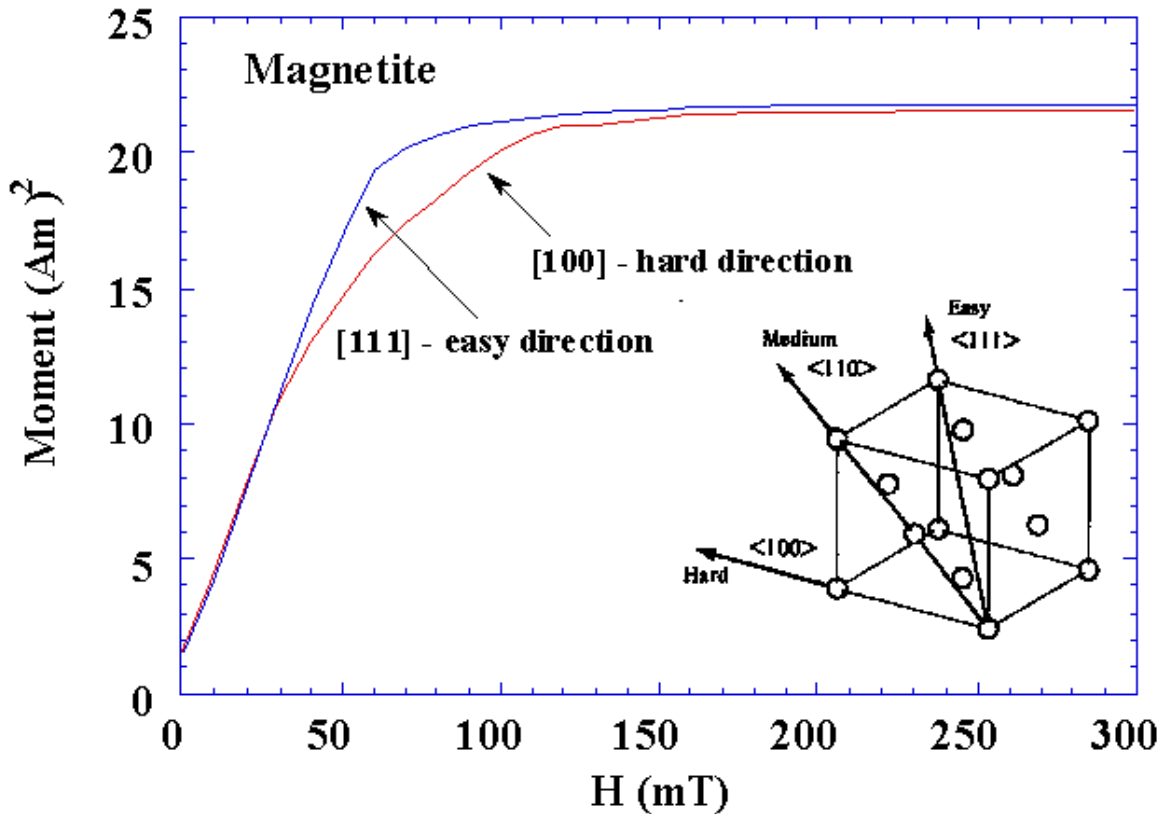
Συγκεκριμένα, οι μαγνητικές περιοχές (magnetic domains) των οποίων τα μαγνητικά δίπολα είναι ευνοϊκότερα προσανατολισμένα στο εξωτερικό πεδίο, επεκτείνονται σε βάρος των γειτονικών περιοχών με διαφορετικό προσανατολισμό μέσω της μετατόπισης των μαγνητικών τοιχωμάτων της μαγνητικής περιοχής. Στα πρώτα στάδια της μαγνήτισης, η μετακίνηση αυτή γίνεται με ιδιαίτερη δυσκολία και μπορεί να απαιτηθεί μεγάλη αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου προκειμένου να προκληθεί μια μικρή μαγνήτιση. Αυτό φαίνεται από τη μικρή κλίση της γραφικής παράστασης της μαγνητικής επαγωγής  $B$  συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $H$ , η οποία εκφράζει τη μαγνητική επιδεκτικότητα του σιδηρομαγνητικού υλικού. Στη συνέχεια, καθώς αυξάνεται η ένταση του πεδίου, η ανάπτυξη των περιοχών αυτών γίνεται ευκολότερα, οπότε και αυξάνεται η αντίστοιχη κλίση της γραφικής παράστασης και η μαγνητική επιδεκτικότητα. Όταν ολοκληρωθεί η ανάπτυξη των ευνοϊκά προσανατολισμένων περιοχών και αυξηθεί περαιτέρω η ένταση του εφαρμοζόμενου πεδίου, αρχίζει να λαμβάνει χώρα περιστροφή των μαγνητικών περιοχών, γεγονός που απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερη ενέργεια από αυτή για την ανάπτυξη των ευνοϊκά προσανατολισμένων μαγνητικών περιοχών, με αποτέλεσμα η κλίση της καμπύλης  $B$  ως προς  $H$  να μειώνεται. Αυτό συνεχίζεται ως ότου όλες σχεδόν οι περιοχές προσανατολιστούν παράλληλα προς το πεδίο, οπότε και το υλικό αποκτά μια μέγιστη μαγνητική επαγωγή  $B_s$  (saturation point), η οποία ονομάζεται μαγνητική επαγωγή κορεσμού.





Σχήμα 1: Βρόχοι υστέρησης που προκύπτουν κατά τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου με εναλλασσόμενο ρεύμα, για διάφορες πυκνότητες μαγνητικής ροής που προκύπτουν [3]

Από τη συμπεριφορά της μαγνήτισης ενός κρυστάλλου κατά διαφορετικούς κρυσταλλογραφικούς άξονες, διαπιστώνεται ότι υπάρχουν συγκεκριμένοι κρυσταλλογραφικοί άξονες κατά τους οποίους αυτή η μαγνήτιση πραγματοποιείται πολύ πιο εύκολα και κατά τους οποίους η μαγνήτιση κορεσμού επιτυγχάνεται σε μικρότερες τιμές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, σε σχέση με άλλους άξονες όπου αυτή επιτυγχάνεται σε υψηλότερες τιμές. Έτσι οι άξονες αυτοί ονομάζονται «άξονες εύκολης μαγνήτισης» και «άξονες δύσκολης μαγνήτισης». Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται οι καμπύλες μαγνήτισης για τον εύκολο και δύσκολο άξονα του μαγνητίτη ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Η διαφοροποίηση των καμπυλών ως προς με τους κρυσταλλογραφικούς άξονες του κάθε υλικού ονομάζεται «Μαγνητική ανισοτροπία».



Σχήμα 2: Εύκολος και δύσκολος άξονας μαγνήτισης για το μαγνητίτη και αντίστοιχα διαγράμματα [4].

Στο διάγραμμα, το μαγνητικό πεδίο δεν έχει τις συνήθεις μονάδες (A/m), αλλά μονάδες μαγνητικής επαγωγής (mT). Πρόκειται για τη μαγνητική επαγωγή που προκαλεί στο κενό το μαγνητικό πεδίο. Παρομοίως, ο κατακόρυφος άξονας έχει μονάδες μαγνητικής ροπής, που είναι μέτρο της μαγνήτισης που αποκτά ένα υλικό, αφού ισούται με το γινόμενο της μαγνήτισης επί τον όγκο του υλικού αυτού.

## 1.2 Γενικά περί μαγνητοσυστολής

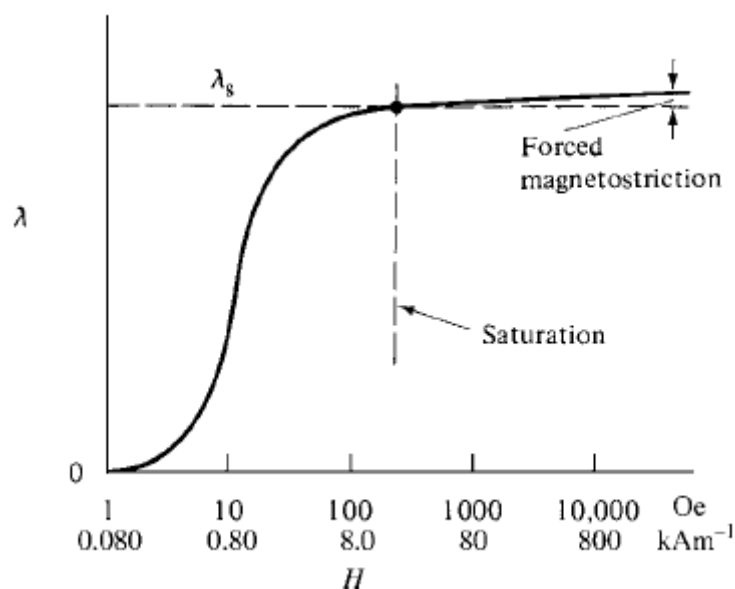
Το 1842, ο Joule εντόπισε τη μεταβολή του μήκους μιας ράβδου νικελίου, όταν αυτή εισήλθε σε μαγνητικό πεδίο και έγινε ο πρώτος που κατέγραψε το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής, δηλαδή της μεταβολής των διαστάσεων ενός υλικού όταν αυτό υπόκειται σε μαγνητικό πεδίο H. Υπάρχουν δυο είδη μαγνητοσυστολής:

- Η αυθόρμητη μαγνητοσυστολή, η οποία προκύπτει λόγω της τακτοποίησης των μαγνητικών ροπών σε μαγνητικές περιοχές. Αυτό συμβαίνει όταν το υλικό, ξεκινώντας από τήγμα, ψύχεται στη θερμοκρασία Curie. Σε αυτό το θερμοκρασιακό σημείο σχηματίζονται οι μαγνητικές περιοχές, τα δίπολα εντός των οποίων προσανατολίζονται σε κάποια κρυσταλλική διεύθυνση. Αυτό μάλιστα παραμορφώνει ελαφρά τις κρυσταλλικές μονάδες, με αποτέλεσμα ο σίδηρος, σε θερμοκρασία μικρότερη της θερμοκρασίας Curie να έχει ως κρυσταλλική μονάδα όχι ένα κύβο BCC αλλά ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με τετραγωνική βάση [1].
- Η επαγόμενη από, εξωτερικό του υλικού, μαγνητικό πεδίο μαγνητοσυστολή. Οι προηγούμενα αναφερθείσες μαγνητικές περιοχές επαναπροσανατολίζονται υπό το πεδίο αυτό [1].

Το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας εξετάζει τη δεύτερη περίπτωση. Για τα συνήθη σιδηρομαγνητικά υλικά η παραμόρφωση, δηλαδή η μεταβολή του μήκους προς το αρχικό μήκος είναι της τάξης του  $10^{-5}$ , όταν επέλθει μαγνητικός κορεσμός του υλικού. Η μαγνητοσυστολή παρατηρείται και σε μη σιδηρομαγνητικά υλικά, αλλά η ποσοστιαία παραμόρφωση είναι περίπου δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη και συνεπώς πιο δύσκολο να εντοπιστεί και να μετρηθεί και με μικρότερο τεχνολογικό ενδιαφέρον.

Όταν, υπό ένα αρκούντως ισχυρό πεδίο σε κάποια δεδομένη θερμοκρασία, μία και μόνη μαγνητική περιοχή έχει καταλάβει όλο τον όγκο του υλικού και έχει προσανατολισμό την κατεύθυνση του πεδίου αυτού, κάθε περαιτέρω αύξηση του πεδίου προκαλεί μια περαιτέρω μαγνητοσυστολή, η οποία ονομάζεται εξανγκασμένη και οφείλεται στην αύξηση του βαθμού διεύθυνσης των ιδιοπεριστροφών (spin) των ηλεκτρονίων.

Κατά τη διαδικασία της μαγνήτισης και πριν ένα υλικό φτάσει σε κορεσμό, υπάρχει μεταβολή του όγκου του, η οποία, σε σχέση με τον αρχικό όγκο του είναι πολύ μικρή, της τάξης του  $10^{-10}$  ανά Oe.

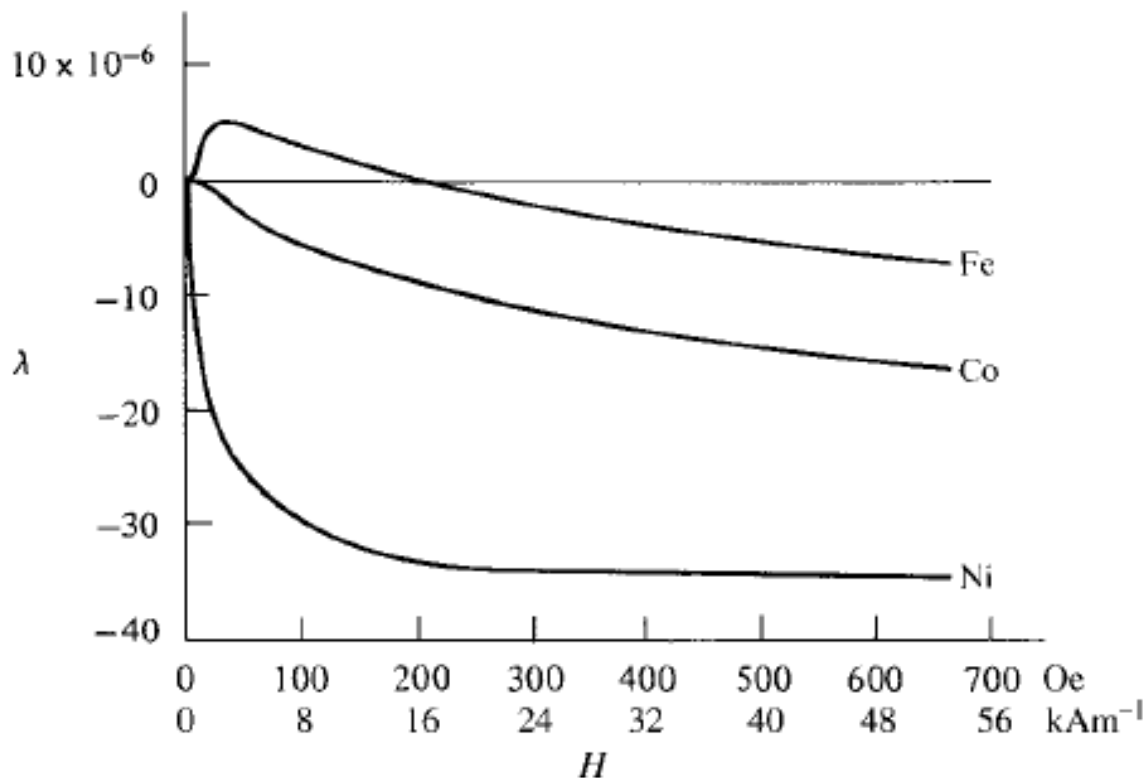


Σχήμα 3: Εξάρτηση της μαγνητοσυστολής από το μαγνητικό πεδίο. Η κλίμακα στον άξονα των τετμημένων είναι λογαριθμική [2]

### 1.3 Μαγνητοσυστολή ισότροπου πολυκρυσταλλικού υλικού

Τα στοιχεία μετάπτωσης του περιοδικού πίνακα που φέρουν σιδηρομαγνητικές ιδιότητες είναι ο σίδηρος (Fe), το νικέλιο (Ni) και το κοβάλτιο (Co). Για το σίδηρο, ο προσανατολισμός των μαγνητικών διπόλων στη διεύθυνσή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διάστασής του στη διεύθυνση αυτή. Μάλιστα, αυτό συμβαίνει μόνο μέχρι ορισμένη τιμή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Αν αυτή η τιμή ξεπεραστεί, ο σίδηρος, όπως και τα υπόλοιπα δύο σιδηρομαγνητικά μεταλλικά στοιχεία συστέλλεται

διεύθυνση αυτή. Η συμπεριφορά αυτή αποτυπώνεται στη μελέτη της μαγνητοσυστολής των σιδηρομαγνητικών υλικών ως προς το εφαρμοζόμενο πεδίο (Σχήμα 4).



Σχήμα 4: Η ανηγμένη μεταβολή του μήκους των τριών κοινών σιδηρομαγνητικών στοιχείων σε συνάρτηση με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο [5]

Από την προσεκτική παρατήρηση του ανωτέρω διαγράμματος, προκύπτουν τα εξής:

- Αν ένα δοκίμιο σιδήρου, κοβαλτίου ή νικελίου βρίσκεται εξ ολοκλήρου εντός ενός ομογενούς στο χώρο και εναλλασσόμενου στο χρόνο μαγνητικού πεδίου μέγιστης έντασης 30 Oe, δηλαδή σε μονάδες SI:

$$H = 2400 * \sin(\omega_1 t + \varphi_1) = 2400 * \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) \quad (1.3)$$

Τότε το δοκίμιο εκτελεί περιοδική κίνηση με διπλάσια συχνότητα από τη συχνότητα διέγερσης. Η κίνηση δεν είναι ακριβώς ημιτονοειδής. Κάτι τέτοιο θα ίσχυε μόνο αν η μαγνητοσυστολή ήταν γραμμική συνάρτηση του μαγνητικού πεδίου, που όπως φαίνεται στο διάγραμμα, δεν ισχύει ακριβώς. Όμως με μια καλή προσέγγιση, μπορούμε να θεωρήσουμε πως ο λόγος του μήκους κάθε χρονική στιγμή προς το αρχικό μήκος του δοκιμίου (θεωρείται πως η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου είναι η διεύθυνση του μήκους) μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση:

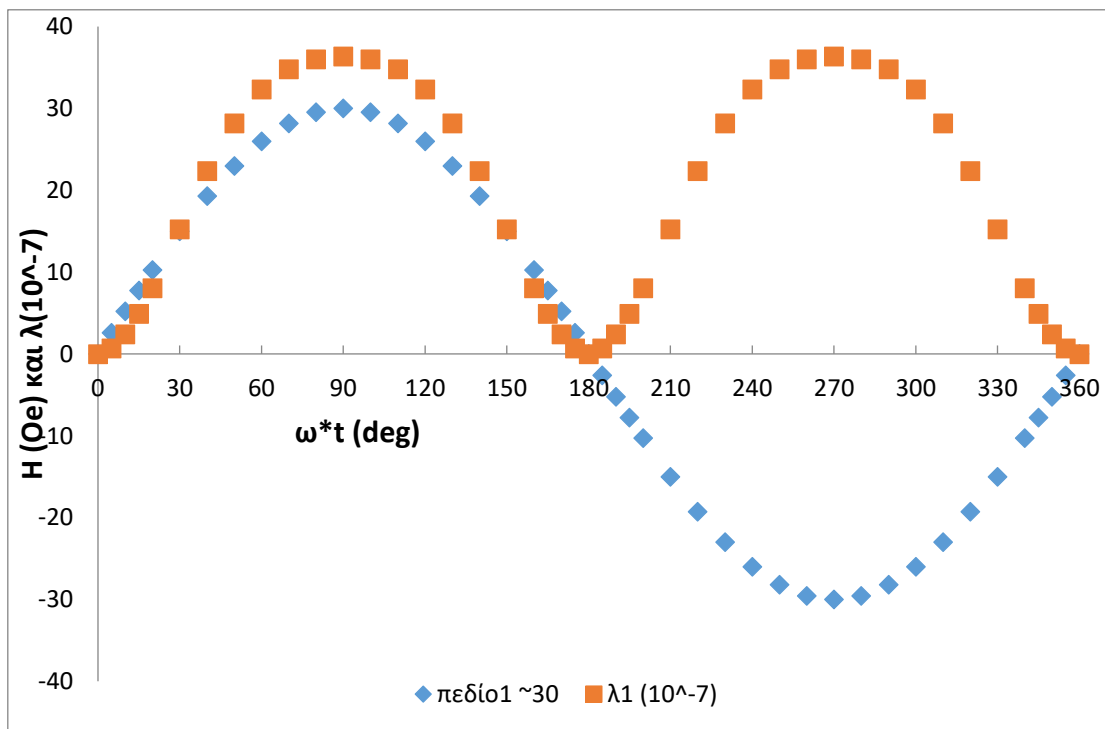
$$\frac{x(t)}{x_0} = A * \sin(2\omega_1 t + \varphi_2) = A * \sin(4\pi f_1 t + \varphi_2) \quad (1.4)$$

Είναι γνωστό, πως στη μαγνητοσυστολή, όπως και στη μαγνήτιση, παρατηρείται υστέρηση, δηλαδή υπάρχει παραμένουσα συστολή ή διαστολή εάν το πεδίο γίνει πάλι μηδενικό μετά από κάποια χρονική διάρκεια στην οποία ήταν μη μηδενικό. Αν τα φαινόμενα υστέρησης θεωρηθούν αμελητέα, πράγμα το οποίο δεν ισχύει για τα μεταλλικά στοιχεία του διαγράμματος Fe, Co και Ni, αλλά μπορεί να συμβαίνει για κάποια κράματα ή άμορφα μαγνητικά υλικά, τότε ισχύει:

$$\varphi_2 = \varphi_1 \quad (1.5)$$

Δηλαδή, η ταλάντωση του μαγνητικού πεδίου και η μηχανική ταλάντωση του δοκιμίου βρίσκονται σε φάση.

Ο λόγος είναι πως ανεξαρτήτως της φοράς του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου, το παράγωγο του μαγνητοσυστολικού φαινομένου είναι ίδιο. Δηλαδή μαγνητικό πεδίο 1000 A/m προκαλεί συγκεκριμένη παραμόρφωση, όπως αυτή εξάγεται από το διάγραμμα, ανεξαρτήτως της φοράς του.

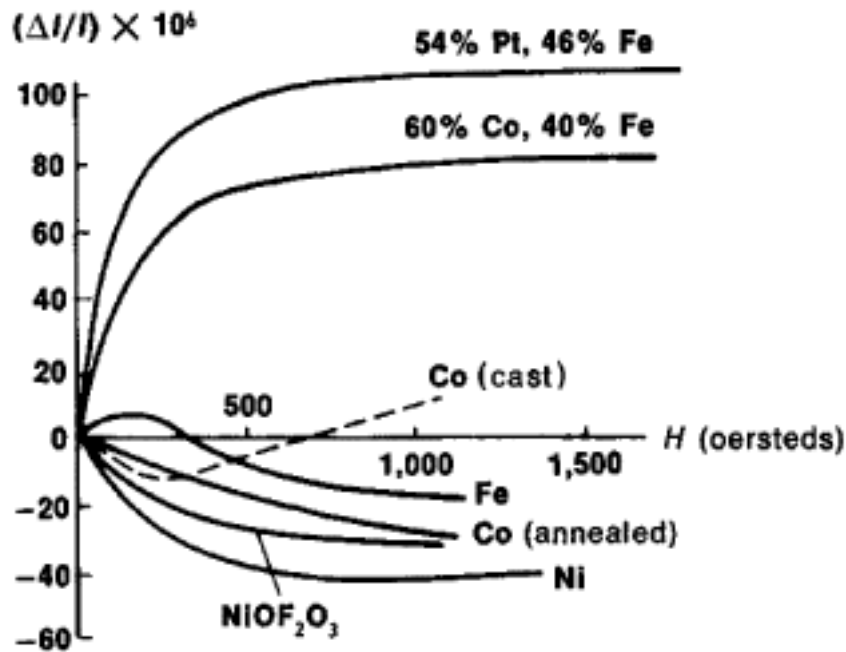


Σχήμα 5: Μεταβολή μήκους δοκιμίου Fe στο χρόνο, υπό χαμηλό εναλλασσόμενο πεδίο, 30 Oe

- Όμοια είναι η περίπτωση για δοκίμιο κοβαλτίου ή νικελίου που βρίσκεται εξ ολοκλήρου εντός ενός ομογενούς στο χώρο και εναλλασσόμενου στο χρόνο μαγνητικού πεδίου, οποιασδήποτε μεγίστης έντασης. Το δοκίμιο εκτελεί περιοδική κίνηση με διπλάσια συχνότητα από τη συχνότητα διέγερσης. Βέβαια αν το ημιτονοειδές μαγνητικό πεδίο είναι πολύ υψηλό, δηλαδή πάνω από περίπου 300 Oe για την περίπτωση του νικελίου, τότε η μηχανική ταλάντωση αποκλείει πολύ από την

ημιτονοειδή. Ισχύει, κατά τα προηγούμενα, η παρατήρηση για υλικά που δεν παρουσιάζουν υστέρηση. Δηλαδή, ανεξάρτητα του πεδίου οι δυο ταλαντώσεις θα βρίσκεται σε φάση.

- Η μορφή της μηχανικής ταλάντωσης διαφοροποιείται πολύ σε δοκίμιο σιδήρου, όσο το πεδίο προσεγγίζει την τιμή στην οποία αλλάζει πρόσημο η μαγνητοσυστολή, η οποία σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα είναι περίπου 220 Oe. Σύμφωνα με άλλες πηγές, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα η τιμή στην οποία υπάρχει αλλαγή του προσήμου είναι μεγαλύτερη, περίπου 300 Oe. Επίσης μεγαλύτερη κατ' απόλυτη τιμή είναι και η μαγνητοσυστολή.

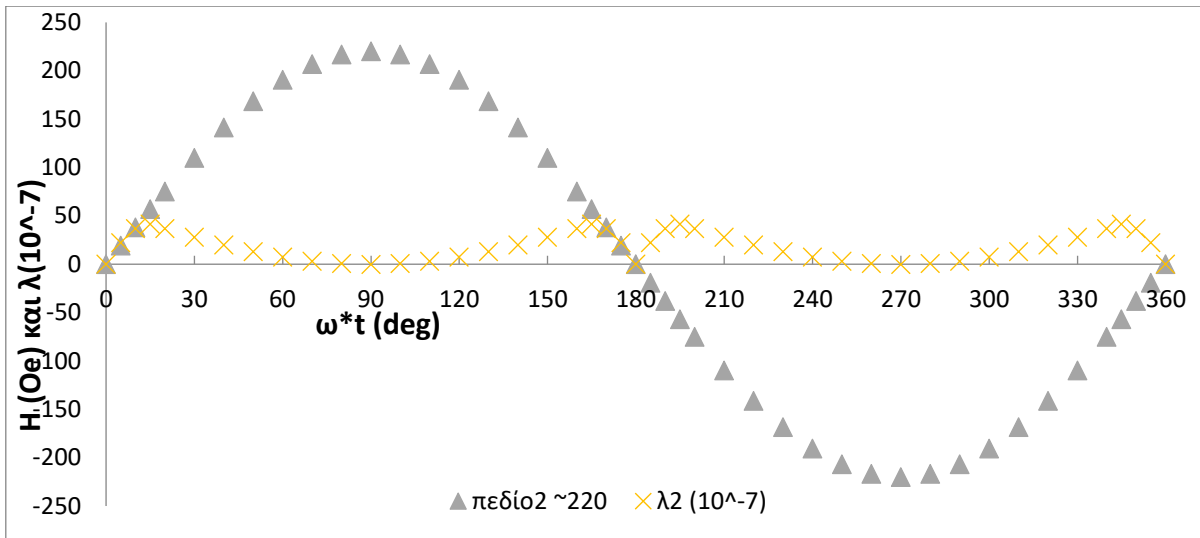


Σχήμα 6: Εξάρτηση της μαγνητοσυστολής διάφορων πολυκρυσταλλικών υλικών [6]

Έστω πως ισχύει η καμπύλη του πρώτου διαγράμματος και το πεδίο δίνεται από τη σχέση:

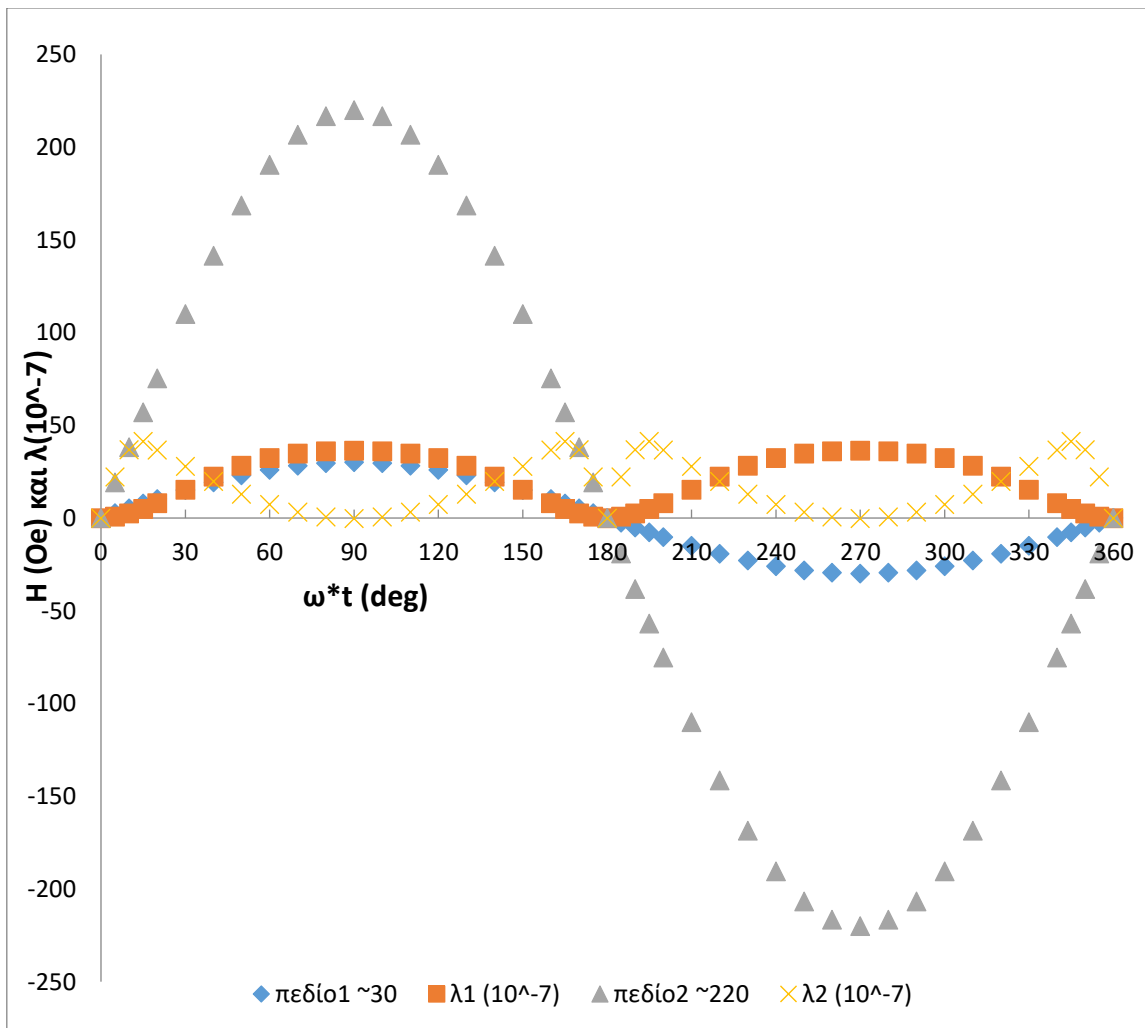
$$H = 220 * \sin(\omega_1 t + \varphi_1) = 220 * \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1), \text{ (μονάδες Oe)} \quad (1.6)$$

Τότε το δοκίμιο εκτελεί περιοδική κίνηση με τετραπλάσια συχνότητα από τη συχνότητα διέγερσης. Για την ακρίβεια η κίνηση δεν είναι ημιτονοειδής, αλλά σε χρόνο μίας περιόδου του πεδίου διέγερσης παρουσιάζει 4 (τέσσερα) μέγιστα, όπως φαίνεται και ακολούθως:



Σχήμα 7: Μεταβολή μήκους δοκιμίου Fe στο χρόνο, υπό εναλλασσόμενο πεδίο, 220 Oe

Στον κύκλο των 360 μοιρών, τα μέγιστα παρουσιάζονται για φάση 15, 165, 195 και 345 μοιρών. Τα δυο διαγράμματα συνοψίζονται στο ακόλουθο:



Σχήμα 8: Σύγκριση μεταβολής μήκους δοκιμίου Fe στο χρόνο, υπό εναλλασσόμενο πεδίο με ακραίες τιμές 30 και 220 Oe

Στα πολυκρυσταλλικά υλικά, αν οι κόκκοι είναι τυχαία προσανατολισμένοι, τότε η ανισοτροπία των επιμέρους κόκκων εξισορροπείται και το σώμα ως όλον δεν παρουσιάζει κρυσταλλική ανισοτροπία. Αν, από την άλλη πλευρά, οι κρύσταλλοι έχουν προτιμητέο προσανατολισμό, τότε το υλικό ως όλον θα έχει μια ανισοτροπία όπως αυτή υπαγορεύεται από το σταθμισμένο μέσο όρο των μεμονωμένων κρυστάλλων.

Το είδος του προτιμητέου προσανατολισμού σε ένα σώμα εξαρτάται από το σχήμα του και πώς αυτό προέκυψε. Ένα έλασμα που προέκυψε από έλαση έχει μία δομή, στην οποία ένα επίπεδο  $\{hkl\}$  τείνει να είναι παράλληλο με την επιφάνεια του ελάσματος και μια διεύθυνση που ανήκει στο επίπεδο αυτό τείνει να είναι παράλληλη με τη φορά έλασης του φύλλου. Τέτοιου τύπου δομές περιγράφονται από το συμβολισμό:  $\{επίπεδο έλασης\}$  <διεύθυνση έλασης>

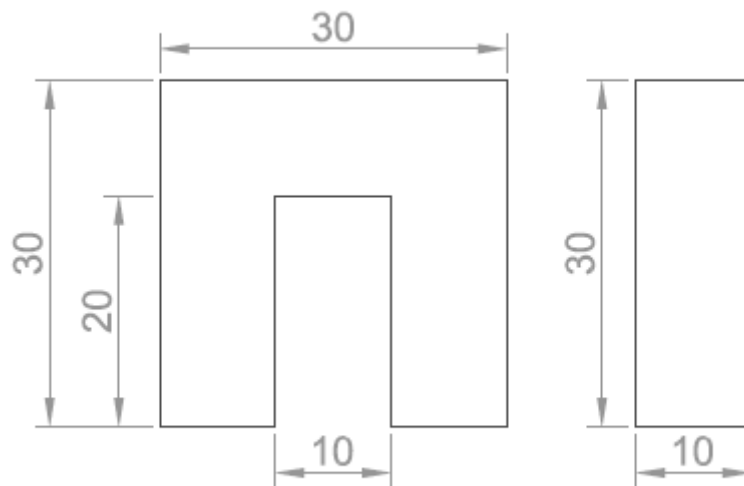


## 2 Πειραματικό μέρος

### 2.1 Ηλεκτρομαγνήτες

Για τις ανάγκες της πειραματικής διάταξης κατασκευάστηκε ηλεκτρομαγνήτης.

- Το σχήμα του πυρήνα του ηλεκτρομαγνήτη είναι πεταλοειδές, όπως το ελληνικό γράμμα 'Π'. Οι διαστάσεις του φαίνονται στο ακόλουθο σκαρίφημα.



Σχήμα 9: Σκαρίφημα πυρήνα ηλεκτρομαγνήτη. Οι διαστάσεις σε mm.

- Φέρει ένα πηνίο με εκατό σπείρες από χάλκινο σύρμα διαμέτρου 0,2mm και επικάλυψη εμαγιέ.
- Το υλικό του πυρήνα του ηλεκτρομαγνήτη είναι πυριτιούχος χάλυβας (1,6% Si-πυρίτιο κατ' όγκον). Η παρουσία του πυριτίου στο κράμα μειώνει την ηλεκτρική αγωγιμότητά του. Η μείωση της αγωγιμότητας είναι ευκατὰ στους χάλυβες των μετασχηματιστών, γιατί με αυτό τον τρόπο τα επαγόμενα ρεύματα μειώνονται, συνεπώς μειώνονται οι απώλειες ισχύος που δίνονται από το γινόμενο  $P_{\text{απωλειών δινορρευμάτων}}=I^2R$ , όπου  $I$  είναι η ενεργός τιμή της έντασης του επαγόμενου δινορρεύματος, σε ένα βρόχο εντός του υλικού που έχει αντίσταση  $R$ . Οι απώλειες λόγω δινορρευμάτων φθίνουν με την αύξηση της αντίστασης, γιατί αν και η ειδική αντίσταση αυξάνεται, το τετράγωνο του ρεύματος μειώνεται περισσότερο.
- Για τη συρρίκνωση των απωλειών λόγω δινορρευμάτων, ο πυρήνας αποτελείται από αλληλουχία όμοιων κομματιών χάλυβα, που είναι ηλεκτρικά απομονωμένα το ένα από το άλλο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλης επικάλυψης που φέρει το αρχικό φύλλο χάλυβα από το οποίο προέρχονται.
- Η συγκράτηση των όμοιων κομματιών γίνεται με μονωτική ταινία. Επίσης, η περιέλιξη του πηνίου γίνεται πάνω σε στρώμα μονωτικής ταινίας για να αποφευχθεί η

καταστροφή της μονωτικής προστασίας του χάλκινου καλωδίου από τις πιο σκληρές και αιχμηρές ακμές του χάλυβα.

## 2.2 Κατασκευή πυρήνα ηλεκτρομαγνήτη

Ο πυρήνας του ηλεκτρομαγνήτη κατασκευάζεται από μη προσανατολισμένο ηλεκτρικό χάλυβα που χρησιμοποιείται για πυρήνες μετασχηματιστών, από την εταιρεία Landis+Gyr, το ελληνικό τμήμα της οποίας εδρεύει στον Ισθμό της Κορίνθου. Έχει τη μορφή λεπτού ελάσματος, που προμηθεύεται η εταιρεία σε μορφή ρόλου. Λόγω της προηγούμενης μορφοποίησής του, έχει φορά έλασης κατά τη διάσταση του μήκους. Το πλάτος του φύλλου είναι 73mm και το πάχος του είναι 0,50mm και μαζί με την επικάλυψη είναι 0,54mm και το μήκος είναι περίπου 1800mm. Από το φύλλο αυτό αποκόπτονται τα δεκαεπτά (17) όμοια κομμάτια που συνιστούν τον πυρήνα του ηλεκτρομαγνήτη και έχουν το ίδιο σχήμα στις δύο από τις τρεις διαστάσεις με αυτόν.



*Σχήμα 10: Ο ηλεκτρικός χάλυβας από τον οποίο παράγονται οι πυρήνες, το μπρούντζινο χρώμα οφείλεται στο μονωτικό στρώμα*

Η κρυσταλλογραφική δομή είναι α-σίδηρος (κυβικό χωροκεντρωμένο πλέγμα BCC). Το υλικό, λόγω χημικής σύστασης και δομής έχει πολύ υψηλή μαγνητική διαπερατότητα. Επίσης, λόγω της πολύ χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα C (<0,1% κατά βάρος) και σε άλλα κραματικά στοιχεία, έχει χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό και εισέρχεται γρήγορα στην πλαστική περιοχή.

## 2.3 Υδροκοπή

Προκειμένου η δομή να μην αλλιωθεί από μετασχηματισμούς φάσης που είναι πιθανόν να συμβούν εάν η θερμοκρασία του υλικού κατά την κατεργασία του αυξηθεί πολύ, επιλέγεται ως μέθοδος κοπής των κομματιών η υδροκοπή. Η συγκεκριμένη εργασία εκτελέστηκε στην εταιρεία DIN που εδρεύει στον Πειραιά.

Το έλασμα τοποθετείται και πακτώνεται στην τράπεζα ενός παντογράφου υδροκοπής. Λόγω της μηχανικής πλαστικής παραμόρφωσης του ελάσματος, πριν γίνει ο σχισμός του από τη δέσμη νερού στην υδροκοπή, δημιουργείται ένα μικρό υπόλειμμα της κοπής πάνω στο προϊόν. Αυτό αφαιρείται χειρωνακτικά με λειαντικό χαρτί. Είναι απαραίτητο να προηγηθεί αυτή η διαδικασία για να έχουν τα κομμάτια την ίδια περίπου επιπεδότητα, γιατί έπεται η λείανση των εδρών του πυρήνα που εφάπτονται στον υπό εξέταση χάλυβα σε εργαλειομηχανή ρεκτιφιέ.

Το υλικό, μετά την υδροκοπή και την απομάκρυνση των αποβλίττων της υδροκοπής, έχει σε όλες τις έδρες που προκύψανε μεγάλη τραχύτητα και οξειδωμένη επιφάνεια. Αυτό είναι αναμενόμενο λόγω του μικρού πάχους του ελάσματος, το οποίο είναι εκτός των προδιαγραφών του παντογράφου υδροκοπής. Επίσης, στις άκρες του, λόγω και των παραμενουσών τάσεων στις περιοχές πλησίον της δέσμης νερού, είναι πιο έντονο το φαινόμενο της οξείδωσης.

## 2.4 Λείανση σε εργαλειομηχανή ρεκτιφιέ

Για να υπάρξει μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής μεταξύ του ηλεκτρομαγνήτη και του υπό εξέταση υλικού, είναι απαραίτητο να λειανθούν τα κομμάτια. Για λόγους ομοιομορφίας της γεωμετρίας που απαιτείται, επιλέγεται η συγκράτηση όλων των κομματιών που συνιστούν τον πυρήνα σε μια μέγγενη και η τοποθέτησή της πάνω στο τραπέζι εργαλειομηχανής κατάλληλης για λείανση επίπεδων -όχι καμπύλων- επιφανειών.

Η κατεργασία εκτελείται σε δυο φάσεις. Πρώτα λειαινεται η άνω πλευρά του 'ΠΙ' και κατόπιν οι πιο κρίσιμες έδρες των όμοιων κομματιών, οι οποίες είναι σε επαφή με το υπό εξέταση υλικό. Προηγείται η λείανση της άνω πλευράς προκειμένου πιθανές αποκλίσεις από την επιθυμητή γεωμετρία να διορθωθούν και να αποτελέσουν επιφάνεια αναφοράς, παράλληλα με την οποία θα γίνεται η κίνηση του τραπέζιού της εργαλειομηχανής. Με αυτόν τον τρόπο βελτιστοποιείται η ποιότητα της επιφάνειας, η τραχύτητα είναι ικανοποιητική και οι εξωτερικές διαστάσεις του πυρήνα μειώνονται λίγο.



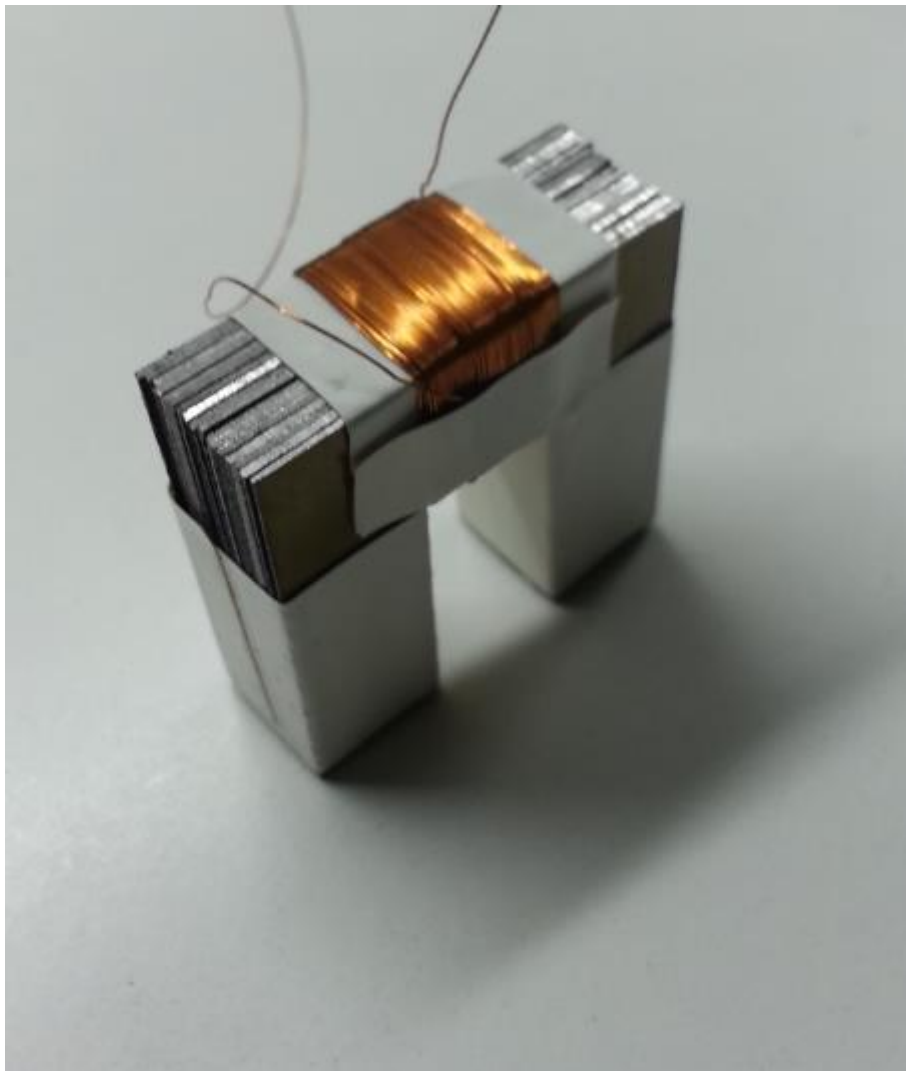
*Σχήμα 11: Λείανση των εδρών του πυρήνα στο ρεκτιφιέ. Η μέγγενη συγκρατείται με μαγνητικό τρόπο πάνω στο τραπέζι. Διακρίνονται ο λειαντικός τροχός και τα τεμάχια, ακριβώς από κάτω του.*

## 2.5 Συγκράτηση κομματιών και περιέλιξη πηνίου

Η συγκράτηση των κομματιών του χάλυβα γίνεται με μονωτική ταινία. Το πηνίο περιελίσσεται στην άνω πλευρά του 'ΠΙ' και η περιέλιξη του πηνίου γίνεται πάνω σε στρώμα μονωτικής ταινίας για να αποφευχθεί η καταστροφή της μονωτικής προστασίας του χάλκινου καλωδίου από τις πιο σκληρές και αιχμηρές ακμές του χάλυβα. Επειδή το σύρμα είναι λεπτό ( $\varnothing 0,2\text{mm}$ ) και υπάρχει περίπτωση καταστροφής των ακραίων τμημάτων του, γίνεται

συγκόλληση σύρματος μεγαλύτερης διαμέτρου και πλαστική μόνωση, το οποίο περιελίσσεται επίσης τρεις φορές.

Με τον παραπάνω τρόπο κατασκευάζονται δύο (2) όμοιοι ηλεκτρομαγνήτες.



Σχήμα 12: Όψη πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη

## 2.6 Κινητό πηνίο

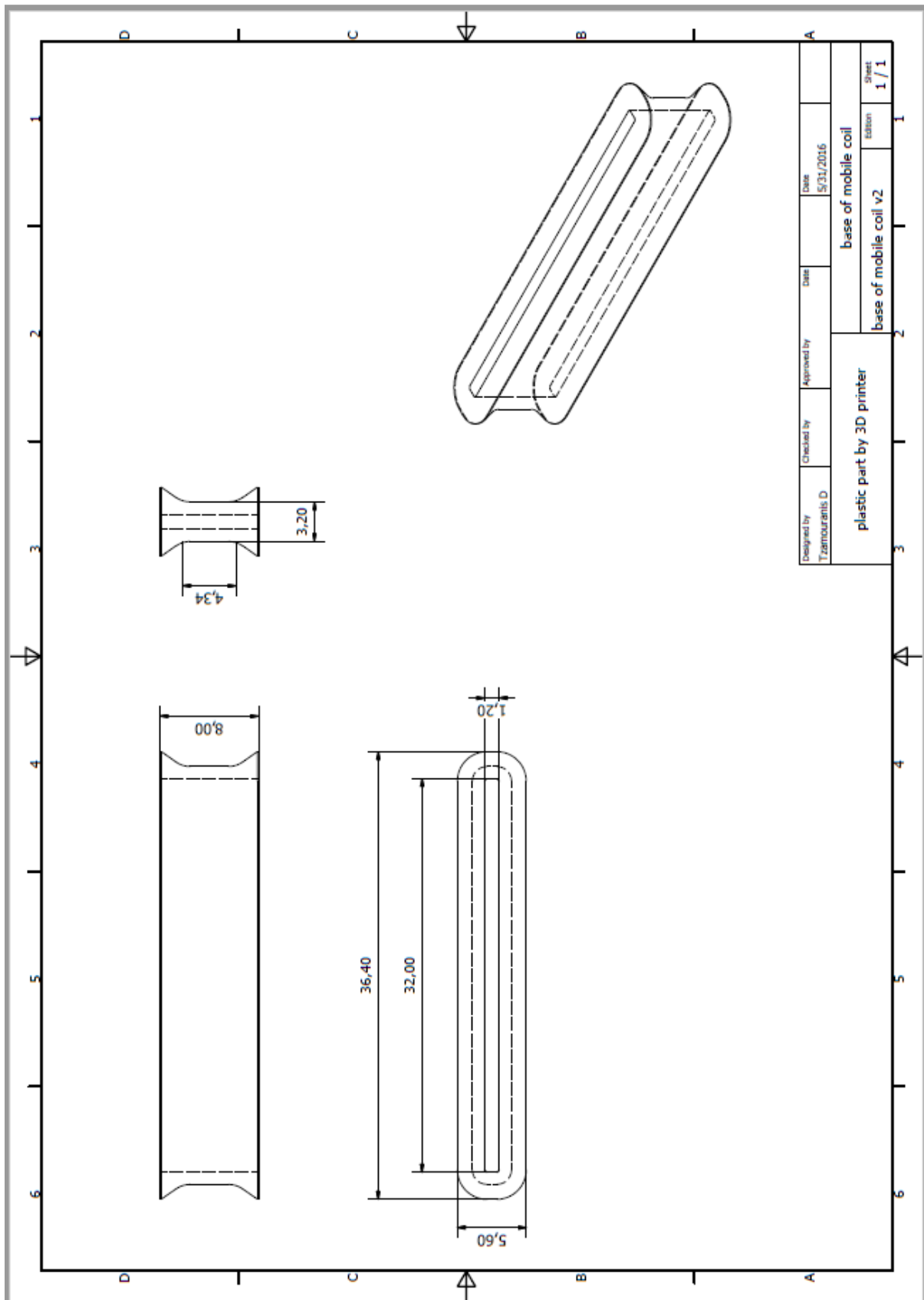
Για τις ανάγκες του πειράματος, κατασκευάστηκε επίσης ένα πηνίο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για διέγερση ή για λήψη με δυνατότητα ολίσθησης κατά μήκος του υπό εξέταση χάλυβα, ο οποίος έχει πάχος 0,5mm και πλάτος 30mm. Το πηνίο αυτό έχει  $N=300$  σπείρες από σύρμα διαμέτρου 0,1mm και περιελίσσεται πάνω σε κατάλληλο πλαστικό εξάρτημα και περιβάλλει το υπό εξέταση υλικό. Επιλέγεται ένα κοινό πλαστικό (ABS) ως υλικό του εξαρτήματος, προκειμένου να είναι αδιάφορο μαγνητικά, να έχει δηλαδή μαγνητική διαπερατότητα πρακτικά όση το κενό, εφόσον μόνη λειτουργία έχει τη στήριξη του κινητού πηνίου. Το πηνίο, προκειμένου να έχει σχετικά μικρό μήκος, έχει πολλές στρώσεις. Αυτό γίνεται επειδή υπάρχει δυσκολία στην περιέλιξη σύρματος μικρότερου του  $\varnothing 0,1\text{mm}$  λόγω μικρής αντοχής του σε εφελκυσμό και επειδή ακόμα μικρότερης διαμέτρου σύρμα επιφέρει αύξηση της αντίστασης ανά μονάδα μήκους του και άρα υψηλότερη θερμική καταπόνηση



κατά τη λειτουργία του, όπως υποδεικνύει ο νόμος του Joule για τη θερμότητα που εκλύεται από αγωγό που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

## 2.7 3D εκτύπωση

Ο πιο εύκολος τρόπος να κατασκευαστεί το εξάρτημα το οποίο θα στηρίζει το πηνίο και θα περικλείει τη διατομή του υπό εξέταση χάλυβα είναι να εκτυπωθεί σε 3D εκτυπωτή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε 3D εκτυπωτής του εργαστηρίου Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Το τρισδιάστατο σχέδιο υλοποιείται με χρήση του προγράμματος Inventor της Autodesk και διαμορφώνεται ένα αρχείο σε κατάλληλη μορφή. Μετά από κάποιες δοκιμές που περιλαμβάνουν αλλαγές στη μορφή και στις διαστάσεις, κυρίως για λόγους αδυναμίας του 3D εκτυπωτή στην ακρίβεια των διαστάσεων, εκτυπώνεται ένα αποδεκτό εξάρτημα. Το μηχανολογικό σχέδιό του παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 13: Μηχανολογικό σχέδιο του εξαρτήματος περί του οποίου τυλίγεται το πηνίο. Οι διαστάσεις είναι σε χιλιοστά.

## 2.8 Περιέλιξη πηνίου

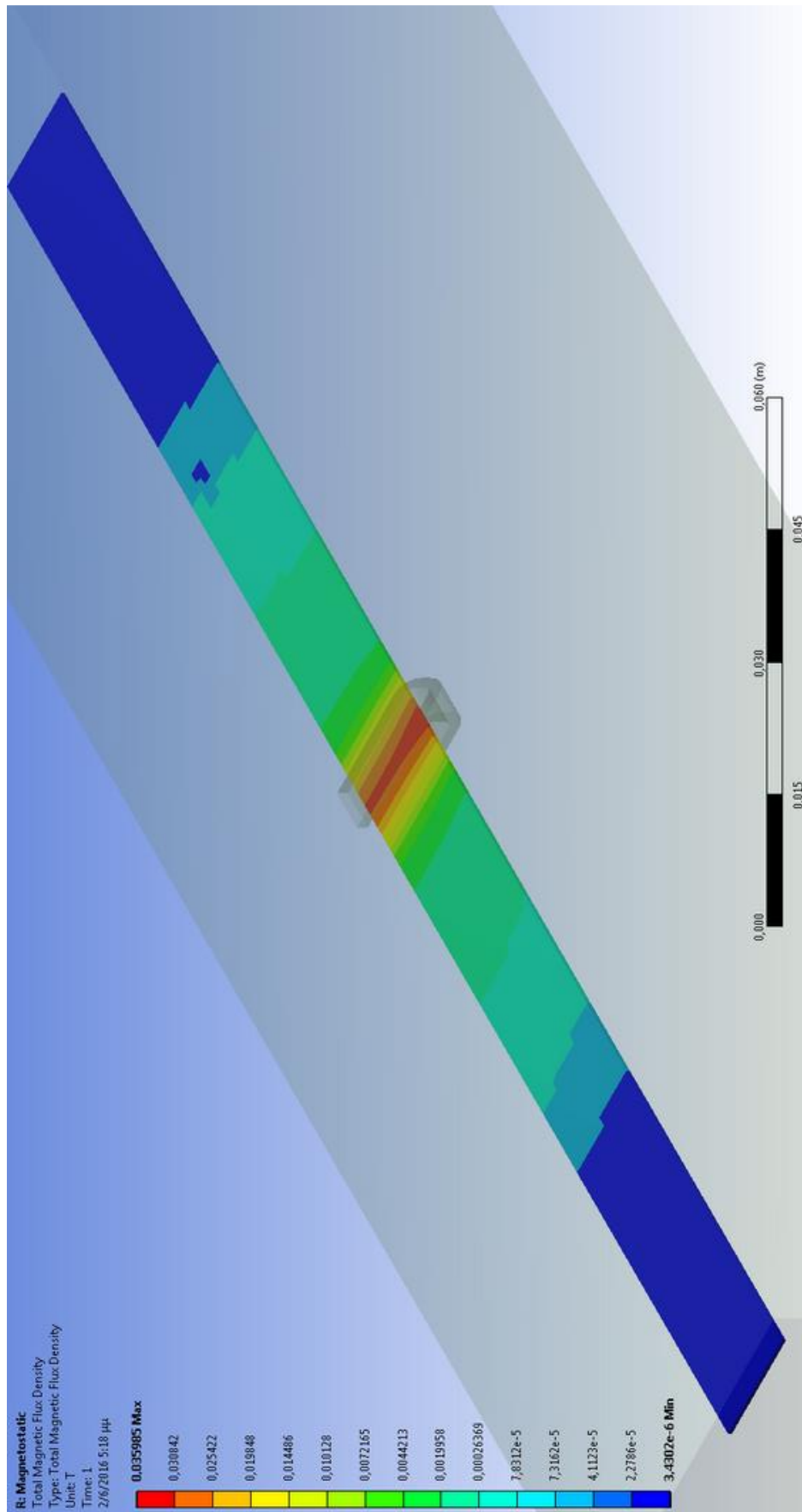
Το πηνίο 300 σπειρών έχει πολλές στρώσεις και μήκος περίπου 6 mm. Η εικόνα του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



*Σχήμα 14: Πηνίο 300 σπειρών τυλιγμένο στο μαύρου χρώματος εξάρτημα που απεικονίζεται στο προηγούμενο σχήμα.*

Στο σημείο αυτό γίνεται υπολογισμός του πεδίου που δημιουργεί στο εσωτερικό του αυτό το πηνίο. Λόγω της ιδιαίτερης γεωμετρίας που έχει, χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μέσω κατάλληλου λογισμικού προγράμματος, του ANSYS 2015. Σχεδιάζεται ένα μοντέλο του πηνίου και επιλέγεται από τη λίστα των υλικών ο χαλκός όπως και ο αριθμός των περιελίξεων, δηλαδή 300. Επίσης ένα μοντέλο της λάμας και επιλέγεται ο αέρας αντί κάποιου μετάλλου. Επιλέγεται σταθερό ρεύμα 1 A. Το τρισδιάστατο σχέδιο διχοτομείται και η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων δίνεται στο παρακάτω σχήμα.





Σχήμα 15: Μέτρο της πυκνότητας μαγνητικής ροής στην περιοχή πλησίον του κινητού πηνίου

Παρατηρείται πως, στην περιοχή του πηνίου, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής κυμαίνεται από  $3,084 \cdot 10^{-2} \text{ T}$  έως  $3,598 \cdot 10^{-2} \text{ T}$ . Από το νόμο του Biot-Savart, το πεδίο είναι ανάλογο του ηλεκτρικού ρεύματος που διέρχεται μέσα από τις σπείρες, δηλαδή:

$$\vec{H} = a * I \quad (2.1)$$

Αν λάβουμε ότι η πυκνότητα της μαγνητικής ροής είναι ο μέσος όρος των δυο προηγούμενων τιμών, δηλαδή  $3,341 \cdot 10^{-2} \text{ T}$ , τότε ο συντελεστής  $a$  δίνεται από τη σχέση:

$$a = \frac{B}{\mu_0 * I} \quad (2.2)$$

Άρα ο συντελεστής είναι:

$$a = 2,65 \cdot 10^4 \text{ (SI)} \quad (2.3)$$

## 2.9 Έλεγχος ορθότητας προσομοίωσης

Γίνεται ένας πρώτος έλεγχος της ορθότητας του αποτελέσματος με βάση αναλυτικό τύπο που χρησιμοποιείται για κυκλικό παχύ σωληνοειδές πηνίο πεπερασμένου μήκους. Υπολογίζουμε δηλαδή το πεδίο που δημιουργεί στο κέντρο του ένα πηνίο πιο απλής γεωμετρίας αλλά με παρόμοια μεγέθη όπως το πρωτότυπο, για να ελέγξουμε εάν οι τιμές που δίνει το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS 2015 είναι ορθές. Η εσωτερική διατομή αυτού του σωληνοειδούς επιλέγεται ίση με αυτή του πρωτότυπου πηνίου, η οποία είναι  $A = 32 \text{ mm} * 3.2 \text{ mm} = 102.4 \text{ mm}^2$ , άρα η διατομή του σωληνοειδούς προκύπτει από τον τύπο:

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} = 11,4 \text{ mm} \quad (2.4)$$

Ο αναλυτικός τύπος για τον υπολογισμό του πεδίου στο κέντρο για κυκλικό παχύ σωληνοειδές πηνίο πεπερασμένου μήκους και για εσωτερική ακτίνα περίπου όση και το πάχος του σωληνοειδούς, όπως δηλαδή συμβαίνει και στο σωληνοειδές που χρησιμοποιείται, είναι [7]:

$$\vec{H} = N * I * \frac{1}{\sqrt{4 * r^2 + L^2}} \quad (2.5)$$

Όπου  $N$  ο αριθμός των περιελίξεων,  $I$  το ρεύμα,  $r$  η εσωτερική ακτίνα και  $L$  το μήκος του πηνίου. Αντικαθιστώντας  $N=300$ ,  $I=1 \text{ A}$ ,  $r=0.0057 \text{ m}$  και  $L=0.0055 \text{ m}$  προκύπτει

$$\vec{H} = 300 * 1 * \frac{1}{\sqrt{4 * 0.0057^2 + 0.0055^2}} \quad (2.6)$$

$$H = 2,37 * 10^4 \text{ A/m} \quad (2.7)$$

Επίσης γίνεται ένας δεύτερος έλεγχος της ορθότητας του αποτελέσματος με βάση άλλο αναλυτικό τύπο που χρησιμοποιείται για κυκλικό αγωγό, το πεδίο στο κέντρο του οποίου δίδεται, με βάση το νόμο Biot-Savart από την απλή σχέση:

$$H = \frac{I}{D} \quad (2.8)$$

Όπου D η διάμετρος του αγωγού. Στη δεδομένη περίπτωση έχουμε 300 σπείρες και κάνοντας ξανά την προηγούμενη απλοποίηση για τη διάμετρο και λαμβάνοντας ένταση ρεύματος ίση με ένα αμπέρ, προκύπτει:

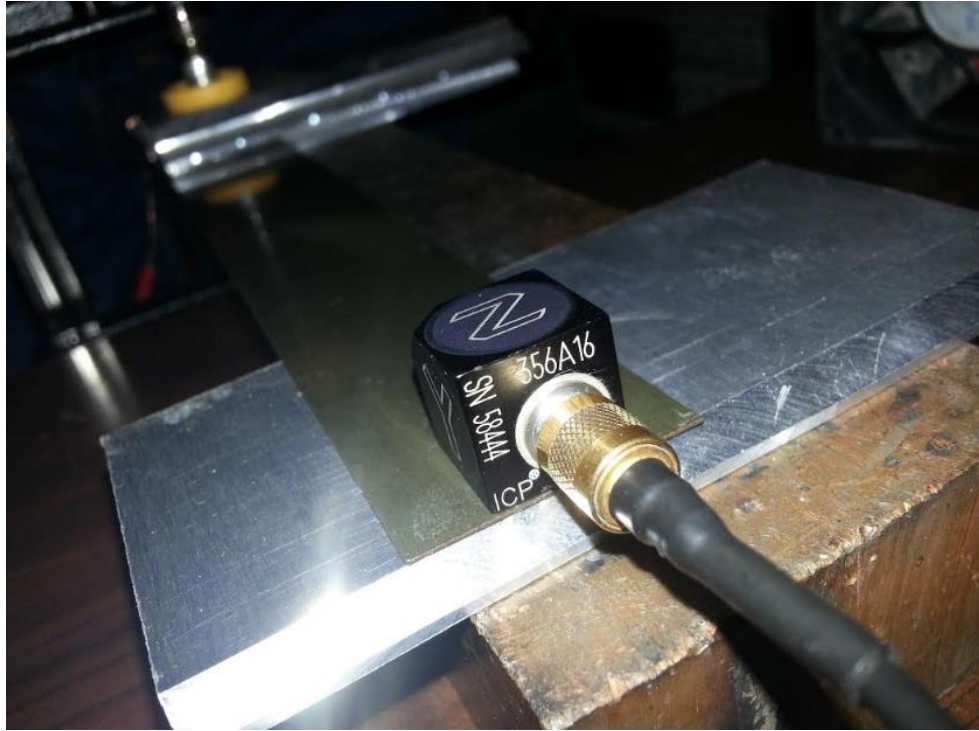
$$H = \frac{NI}{D} = \frac{300 * 1}{0.0114} = 2,63 * 10^4 \text{ A/m} \quad (2.9)$$

Συγκρίνοντας τις δυο τιμές που ορίζουν τη σχέση πεδίου και ρεύματος, δηλαδή την υπολογιστική  $2,65 * 10^4$  και τις προσεγγιστικές, αναλυτικές  $2,37 * 10^4$  και  $2,63 * 10^4$ , μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη η υπολογιστική λύση. Η απόκλιση είναι μικρότερη από 2% μεταξύ των τιμών  $2,65 * 10^4$  και  $2,63 * 10^4$ .

## 2.10 Αισθητήρας επιτάχυνσης

Χρησιμοποιείται επιταχυνσιόμετρο το οποίο αποδίδει την επιτάχυνση σε τρεις διαστάσεις ενός σημείου, το οποίο ανήκει στο εργαστήριο Δυναμικής Μηχανών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου επιταχυνσιόμετρου είναι το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή η εμφάνιση ηλεκτρικής τάσης σε κάποια υλικά όταν αυτά υπόκεινται σε μηχανική τάση. Η συσκευή αποτελείται από:

1. Μια κεφαλή κυβικού σχήματος, η οποία στερεώνεται με κερί (ή με ειδικό μαγνήτη που βιδώνεται πάνω στην κεφαλή) πάνω στο σημείο που μας ενδιαφέρει. Πάνω στην κεφαλή αναγράφονται οι άξονες X, Y και Z, στους οποίους γίνεται η καταγραφή της επιτάχυνσης.



*Σχήμα 16: Κεφαλή επιταχυνσιόμετρου τριών διαστάσεων*

2. Ένα καλώδιο που συνδέεται πάνω στην κεφαλή και καταλήγει σε τρεις αρσενικούς και αριθμημένους συνδέσμους τύπου BNC, έναν για κάθε άξονα στον οποίο μετράται η επιτάχυνση.
3. Το κύριο σώμα της συσκευής που φέρει τρεις (3) θηλυκές εισόδους και τρεις (3) θηλυκές εξόδους BNC, που διαμορφώνει το σήμα και δυναμικά το ενισχύει δέκα (10) ή εκατό (100) φορές.



Σχήμα 17: Σώμα συσκευής επιταχυνσιόμετρου.

Τα 100mV στην έξοδο της συσκευής αντιστοιχούν σε 1g επιτάχυνση ή αλλιώς 10,2mV αντιστοιχούν σε  $1\text{m/s}^2$ . Η συγκεκριμένη συσκευή παρέχει αξιόπιστες μετρήσεις για την υποηχητική και ηχητική περιοχή των ταλαντώσεων από 0,5Hz ως 5000Hz.

## 2.11 Παλμογράφοι

Χρησιμοποιούνται δυο παλμογράφοι του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας και Συγκολλήσεων της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών:

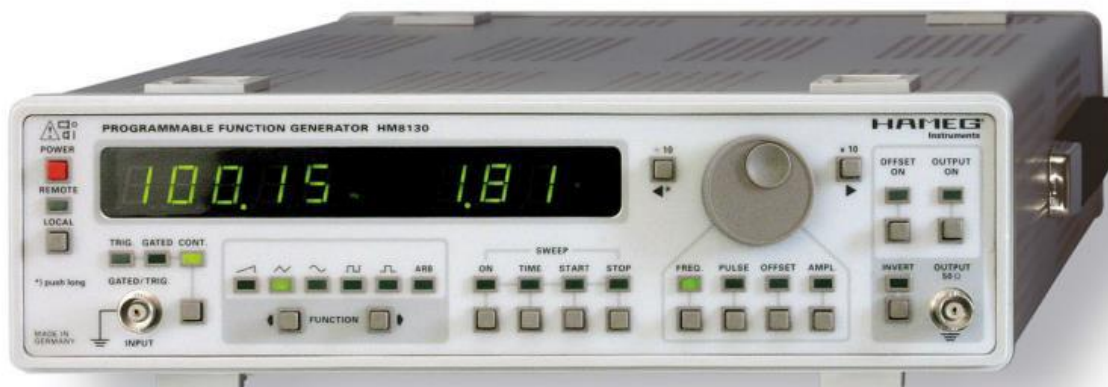
1. Ο παλμογράφος HM507, της εταιρείας HAMEG instruments.
2. Ο ψηφιακός παλμογράφος DS-1510, της εταιρείας EZ, ο οποίος προσφέρει και τη δυνατότητα αποθήκευσης των μετρήσεων σε μορφή εικόνων ή δεδομένων.

## 2.12 Γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος

Χρησιμοποιείται γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας και Συγκολλήσεων της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών. Συγκεκριμένα, είναι η γεννήτρια HM 8350 της εταιρείας HAMEG Instruments και έχει δυνατότητα παροχής διάφορων ειδών τάσεων:

- ημιτονοειδούς
- τετραγωνικής
- παλμικής
- τριγωνικής
- ράμπας

Επίσης έχει τη δυνατότητα προσθήκης μιας σταθερής συνιστώσας της τάσης, μέγιστης τιμής 7,5V.

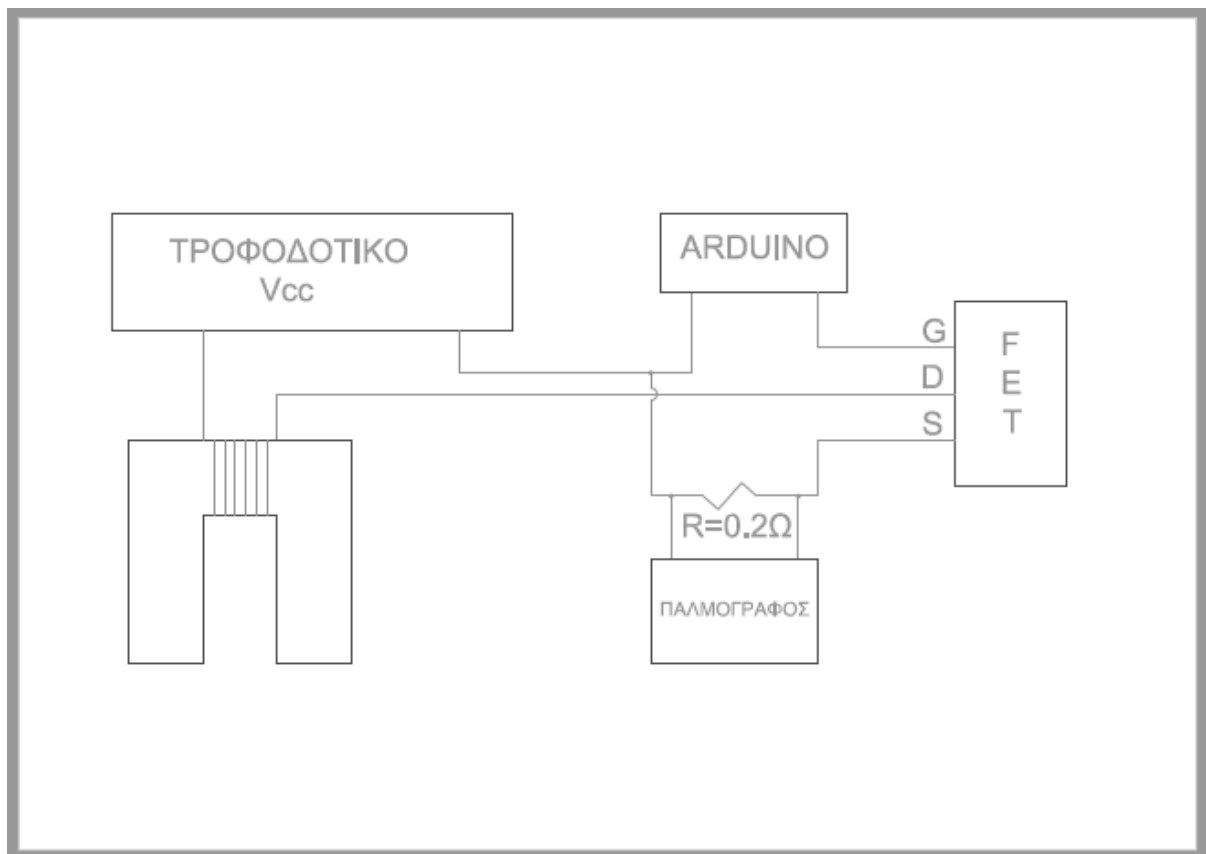


Σχήμα 18: Η γεννήτρια HM 8350 της εταιρείας HAMEG instruments

## 2.13 Κύκλωμα για παλμικό ρεύμα

Για τις ανάγκες του πειράματος κατασκευάστηκε ηλεκτρικό κύκλωμα για να επιτευχθεί παλμός με χαρακτηριστικά που δεν είναι δυνατόν να επιτευχθούν με τη χρήση της διαθέσιμης γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος. Συγκεκριμένα, γίνονται κάποιες δοκιμές με διάρκεια παλμού (duty cycle) της τάξης των 1-15  $\mu$ s και περίοδο 1 ms. Στόχος είναι ο παλμός να έχει κατά το δυνατόν μεγάλη ένταση, της τάξης των 10 A.

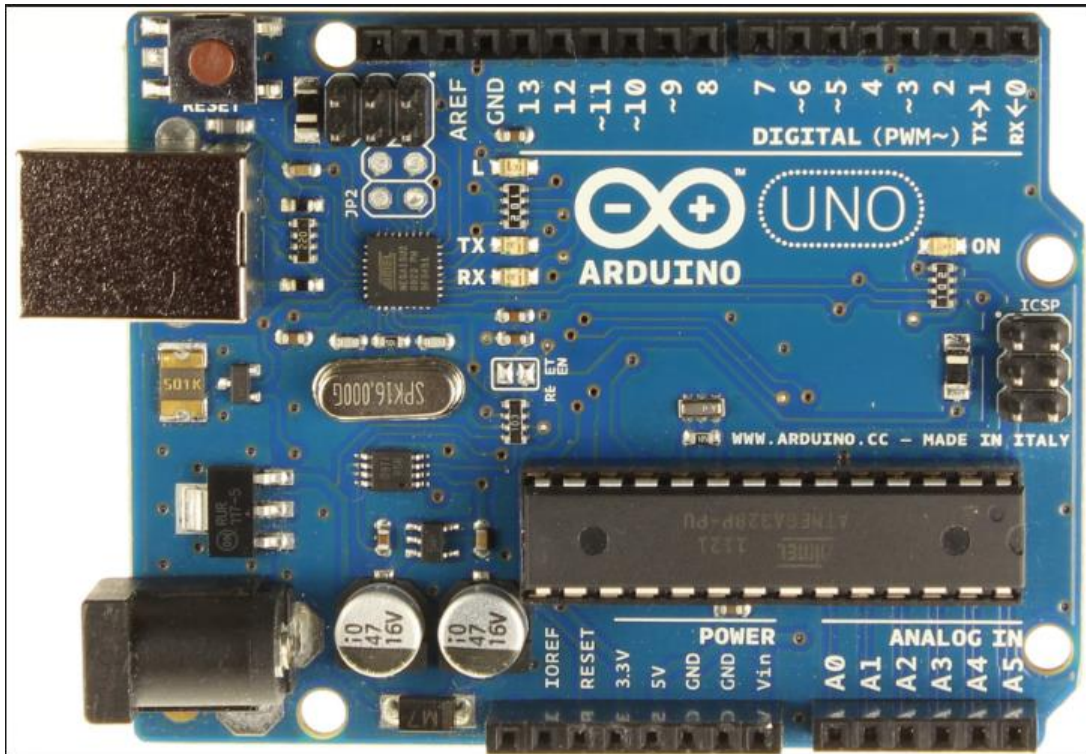
Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα τα παρακάτω στοιχεία:



Σχήμα 19: Σκαρίφημα της διάταξης για διέγερση του ηλεκτρομαγνήτη με παλμικό ρεύμα άνω του ενός A

Μια πλακέτα τύπου Arduino Uno, δηλαδή μια προγραμματιζόμενη πλακέτα που μέσω κατάλληλου λογισμικού της εταιρείας Arduino έχει, μεταξύ άλλων, τη δυνατότητα να παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα χαμηλής τάσης, έως 5 V με την επιθυμητή διάρκεια και ανά επιθυμητή περίοδο. Το σήμα λαμβάνεται από δύο από τους ακροδέκτες που φέρει η πλακέτα. Ο πρώτος από αυτούς βρίσκεται σε δυναμικό 0V ή +5V, ανάλογα με τον προγραμματισμό της πλακέτας, ο δεύτερος αποτελεί τη γείωση. Στο ακόλουθο σχήμα, διακρίνονται στο άνω μέρος οι αριθμημένες έξοδοι από 0 ως 14 και η γείωση, στο κάτω αριστερά μέρος η τροφοδοσία της πλακέτας με τάση από το δίκτυο και στο άνω αριστερά μέρος η θύρα που συνδέει την πλακέτα με Η/Υ, μέσω του οποίου γίνεται ο προγραμματισμός της.





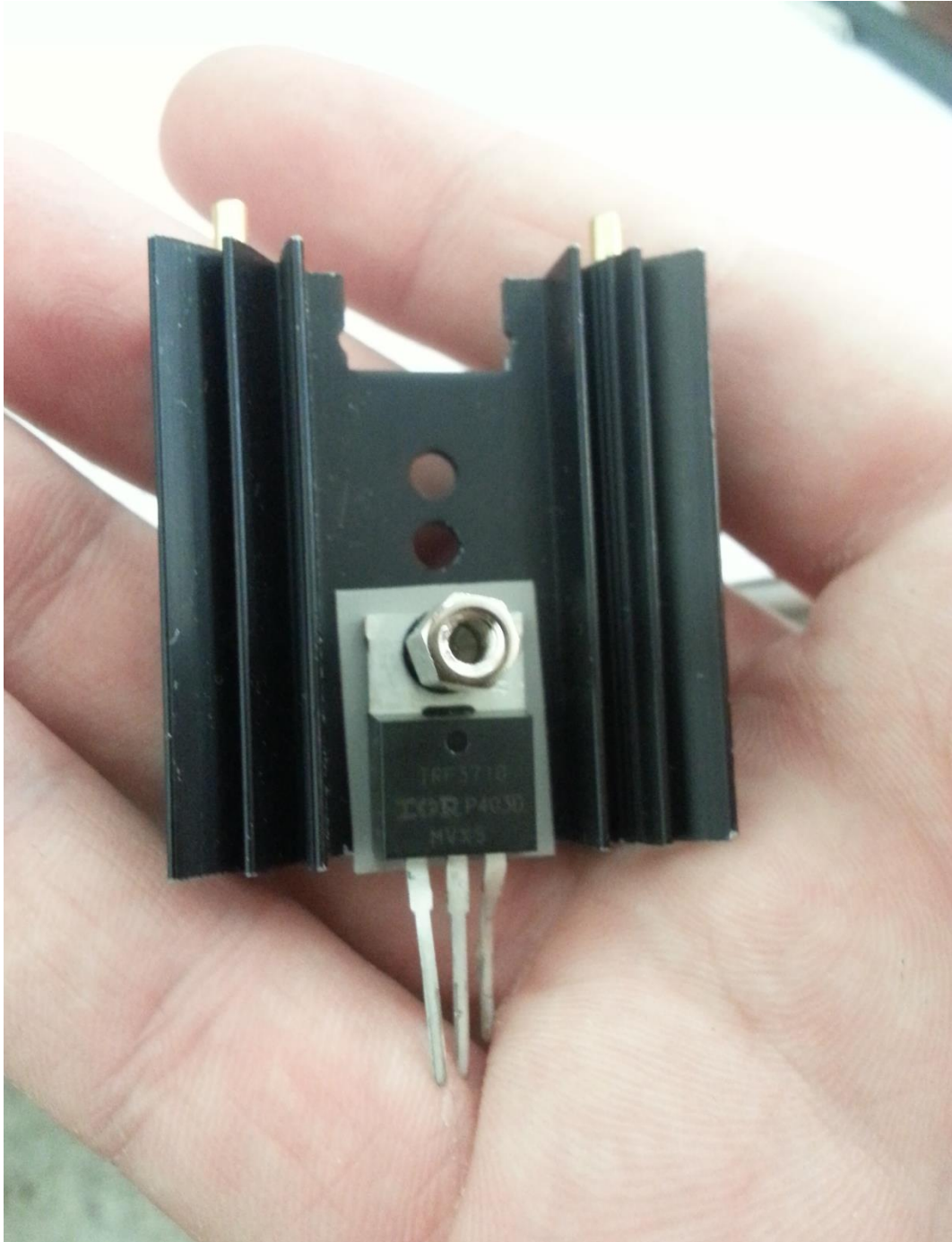
Σχήμα 20: Πλακέτα τύπου Arduino Uno

- Ένα τρανζίστορ τύπου n-MOSFET (negative type Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) , το οποίο εκτελεί την εξής απλή λειτουργία:
  1. Όταν το δυναμικό στον ακροδέκτη-πύλη με το γράμμα G (Gate) είναι πρακτικά μηδενικό σε σχέση με τον ακροδέκτη S (Source), τότε η αντίσταση μεταξύ του ακροδέκτη S (Source) και D (Drain) είναι πρακτικά άπειρη, στην πράξη, ανάλογα με τον τύπο του MOSFET, της τάξης του ενός εκατομμυρίου Ohm.
  2. Όταν το δυναμικό στον ακροδέκτη-πύλη με το γράμμα G (Gate) είναι σε σχέση με τον ακροδέκτη S (Source) μεγαλύτερο από μια τάση κατωφλίου που συνήθως έχει τιμή ανάμεσα στα 2,5 V και 4 V, τότε η αντίσταση μεταξύ του ακροδέκτη S (Source) και D (Drain) είναι πρακτικά μηδενική, στην πράξη, ανάλογα με τον τύπο του MOSFET, της τάξης των χιλιοστών του Ohm.

Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται το MOSFET της εταιρείας International Rectifier με κωδικό IRF3710. Αυτό το MOSFET έχει:

- a) αντίσταση  $R_{DS}=23m\Omega$  όταν είναι σε κατάσταση ON
- b) μέγιστη τάση που μπορεί να επιβληθεί χωρίς να καταστραφεί το MOSFET 100V
- c) μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διέλθει μέσα από το MOSFET 57A





Σχήμα 21: Το MOSFET συνδεδεμένο με μεταλλική θερμική καταβόθρα. Το γκρι χρώματος υλικό που διακρίνεται είναι καλός αγωγός της θερμότητας και κακός του ηλεκτρισμού.

- Το MOSFET είναι πιθανό να καταστραφεί με την αύξηση της θερμοκρασίας. Για το λόγο αυτό, γίνεται κοχλιωτή σύνδεσή του με θερμική καταβόθρα. Η θερμική καταβόθρα εφάπτεται πάνω σε λεπτό φύλλο μίκας (μαρμαρυγία), που είναι καλός αγωγός της θερμότητας και κακός του ηλεκτρισμού, και το φύλλο αυτό εφάπτεται στην οπίσθια πλευρά του MOSFET, που έχει ίδιο δυναμικό με το μεσαίο ακροδέκτη D.
- Ένα breadboard, πάνω στο οποίο συνδέονται τα διάφορα στοιχεία του κυκλώματος.



## 3 Σειρές πειραμάτων

### 3.1 Εναλλασσόμενο ρεύμα που δημιουργεί το πεδίο εντός του κινητού πηνίου

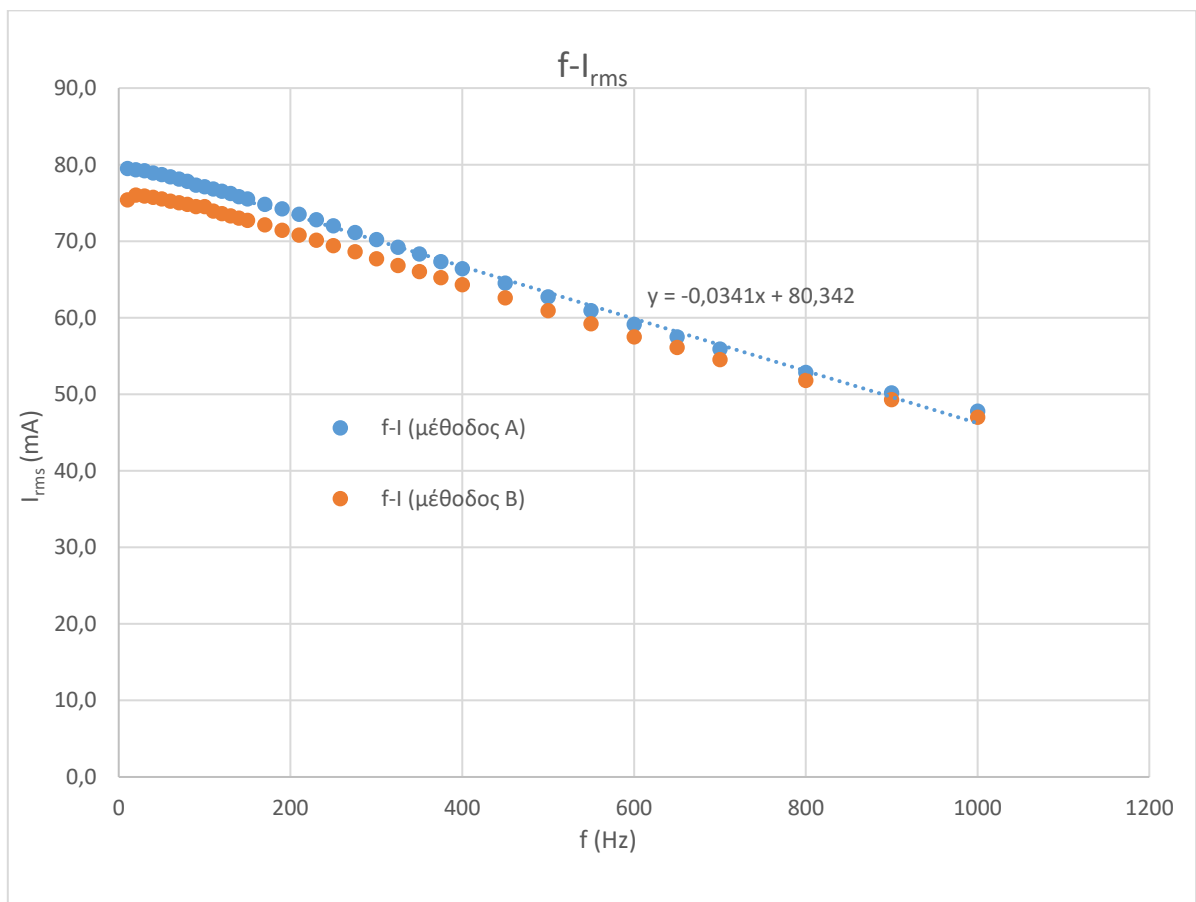
Όπως περιεγράφηκε παραπάνω, το πεδίο εντός του κινητού πηνίου είναι ανάλογο του ρεύματος διέγερσης και εξαρτάται από γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πηνίου. Η γεννήτρια παρέχει εναλλασσόμενη τάση ρυθμιζόμενου πλάτους και εφαρμόζεται απλή ημιτονοειδής τάση στην πηγή που είναι 20V peak to peak. Χρησιμοποιούνται δυο διαφορετικές μέθοδοι μέτρησης του ρεύματος, σε αμφότερες γίνεται χρήση του ψηφιακού πολύμετρου της εταιρείας FLUKE, μοντέλο 179 true RMS multimeter:

- A. Συνδέεται εν σειρά ψηφιακό αμπερόμετρο και το πηνίο που έχει αντίσταση R, η οποία μετρείται με το πολύμετρο ίση με 38 Ω και συντελεστή αυτεπαγωγής L. Η ενεργός τιμή της έντασης μετρήθηκε για διάφορες συχνότητες, τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.
- B. Συνδέεται εν σειρά με τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος, αντίσταση ενός Ω και μετρήθηκε η ενεργός τιμή της τάσης στα άκρα της, προκειμένου να γίνει έμμεσος υπολογισμός της έντασης. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στην τρίτη στήλη του ακόλουθου πίνακα.

*Πίνακας 1 Ρεύμα διέγερσης κινητού πηνίου και συντελεστής αυτεπαγωγής, για εναλλασσόμενη τάση 20V peak to peak και συχνότητες πηγής από 10 ως 1000 Hz*

Μέθοδος:	A	B	-	A	B	A	B
f (Hz)	$I_{rms}$ (mA)	$V_{rms}$ (mV)	$\omega$ (rad/s)	L(H)	L(H)	$I_{max}$ (mA)	$I_{max}$ (mA)
10	79,5	75,4	62,8	1,280	1,357	112,4	106,6
20	79,3	76,0	125,7	0,642	0,753	112,1	107,5
30	79,2	75,9	188,5	0,429	0,503	112,0	107,3
40	78,9	75,7	251,3	0,323	0,338	111,6	107,1
50	78,7	78,5	314,2	0,259	0,258	111,3	111,0
60	78,4	75,2	377,0	0,217	0,227	110,9	106,3
70	78,1	75,0	439,8	0,187	0,195	110,5	106,1
80	77,8	74,8	502,7	0,164	0,171	110,0	105,8
90	77,3	74,5	565,5	0,147	0,153	109,3	105,4
100	77,1	74,5	628,3	0,133	0,138	109,0	105,4
110	76,8	73,9	691,2	0,121	0,126	108,6	104,5
120	76,5	73,6	754,0	0,112	0,116	108,2	104,1
130	76,2	73,3	816,8	0,104	0,108	107,8	103,7
140	75,8	73,0	879,6	0,097	0,101	107,2	103,2
150	75,5	72,7	942,5	0,091	0,095	106,8	102,8
170	74,8	72,1	1068,1	0,081	0,084	105,8	102,0
190	74,2	71,4	1193,8	0,073	0,076	104,9	101,0
210	73,5	70,8	1319,5	0,067	0,070	103,9	100,1
230	72,8	70,1	1445,1	0,062	0,064	103,0	99,1
250	72,0	69,4	1570,8	0,058	0,060	101,8	98,1

275	71,1	68,6	1727,9	0,053	0,055	100,6	97,0
300	70,2	67,7	1885,0	0,049	0,051	99,3	95,7
325	69,2	66,8	2042,0	0,046	0,048	97,9	94,5
350	68,3	66,0	2199,1	0,044	0,045	96,6	93,3
375	67,3	65,2	2356,2	0,042	0,043	95,2	92,2
400	66,4	64,3	2513,3	0,040	0,041	93,9	90,9
450	64,5	62,6	2827,4	0,036	0,037	91,2	88,5
500	62,7	60,9	3141,6	0,034	0,035	88,7	86,1
550	60,9	59,2	3455,8	0,032	0,033	86,1	83,7
600	59,1	57,5	3769,9	0,030	0,031	83,6	81,3
650	57,5	56,1	4084,1	0,029	0,029	81,3	79,3
700	55,9	54,5	4398,2	0,027	0,028	79,1	77,1
800	52,85	51,8	5026,5	0,026	0,026	74,7	73,3
900	50,18	49,3	5654,9	0,024	0,024	71,0	69,7
1000	47,77	47,0	6283,2	0,023	0,023	67,6	66,5



Σχήμα 22: Εξάρτηση της έντασης ηλεκτρικού ρεύματος από τη συχνότητα της πηγής

Για την περιοχή συχνοτήτων από 10 έως 1000 Hz, το ρεύμα έχει μια κατά προσέγγιση γραμμική πτώση.

Παρατήρηση: Η δεύτερη καμπύλη έχει χαμηλότερες τιμές, γιατί στο κύκλωμα έχει προστεθεί εν σειρά μια αντίσταση 1 Ω.

Στην τέταρτη στήλη καταγράφεται η γωνιακή συχνότητα σε rad/s της διέγερσης.

Και στις δυο μεθόδους προσδιορισμού της ενεργού τιμής της έντασης, το κύκλωμα έχει εν σειρά R και L συνδεδεμένα σε πηγή ac τάσης. Επιλύεται με τη βοήθεια πρωτοβάθμιας διαφορικής εξίσωσης και επειδή δεν ενδιαφέρει η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και έντασης, μας αρκεί ο υπολογισμός του μέτρου της ενεργού τιμής της έντασης. Ο τύπος είναι:

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad (3.1)$$

Αναμένεται δηλαδή η πτώση της  $I_{rms}$  όσο αυξάνεται η συχνότητα. Όμως, επειδή η μέτρηση πραγματοποιείται με τον υπό εξέταση χάλυβα εντός του πηνίου, η αυτεπαγωγή ως φαινόμενο είναι πιο έντονη και ο συντελεστής αυτεπαγωγής είναι μεγαλύτερος και κυρίως δεν είναι σταθερός. Η αιτία της μεταβολής του συντελεστή αυτεπαγωγής είναι πως το πεδίο που αναπτύσσεται είναι κοντά στο πεδίο στο οποίο επέρχεται μαγνητικός κορεσμός στο σίδηρο. Αυτό φαίνεται στην πέμπτη και την έκτη στήλη όπου η ανωτέρω σχέση επιλύεται ως προς L και οι τιμές του συντελεστή αυτεπαγωγής έχουν μεγάλη διακύμανση.

Για παράδειγμα, για συχνότητα διέγερσης 10Hz προκύπτει:

$$I_{max} = I_{rms} * \sqrt{2} = 112.4 \text{ mA} \quad (3.2)$$

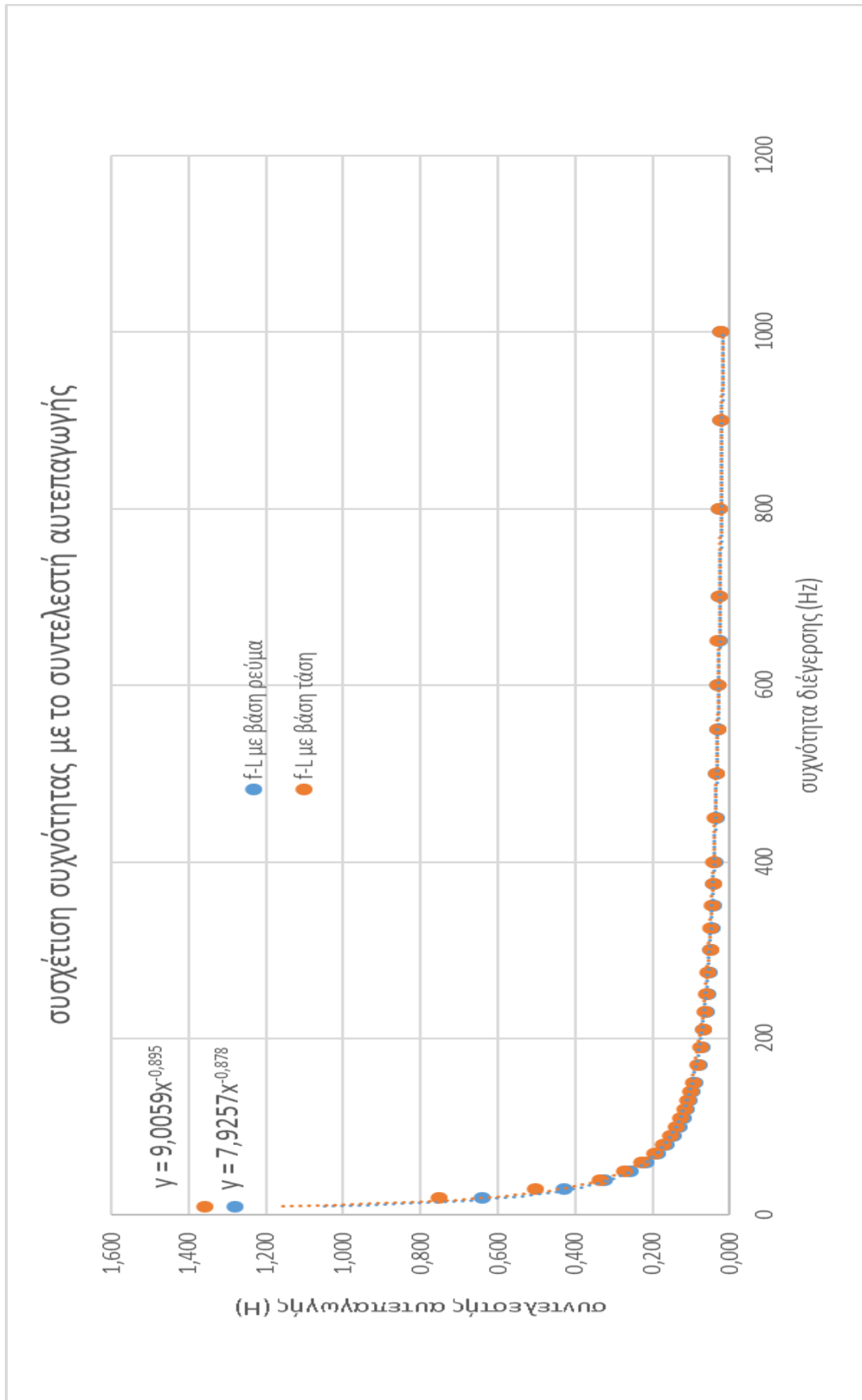
Οπότε:

$$H_{max} = a * I_{max} = 2.65 * 10^4 * 0.1124 = 2.979 * 10^3 \text{ A/m} \quad (3.3)$$

Αυτή η τιμή του πεδίου δε μειώνεται πάνω από 10%, ακόμα και αν η συχνότητα γίνει 250 Hz. Συγκρινόμενη δε με το πεδίο απομαγνήτισης του μαλακού σιδήρου, το οποίο είναι στην τάξη μεγέθους του ενός Oe ή 80 A/m, προκύπτει πως είναι πολύ υψηλότερη, άρα είναι αναμενόμενο να μην είναι σταθερός ο συντελεστής αυτεπαγωγής. Δίδεται από τη σχέση, όπως αυτή προκύπτει επιλύοντας την σχέση για το  $I_{rms}$  ως προς L. Δηλαδή:

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{V_{max}^2}{2 * I_{rms}^2} - R^2} \quad (3.4)$$

Ακολουθεί το διάγραμμα της μεταβολής του συντελεστή αυτεπαγωγής ως προς τη συχνότητα, με αμφότερες τις μεθόδους μέτρησης της ενεργού τιμής της έντασης:

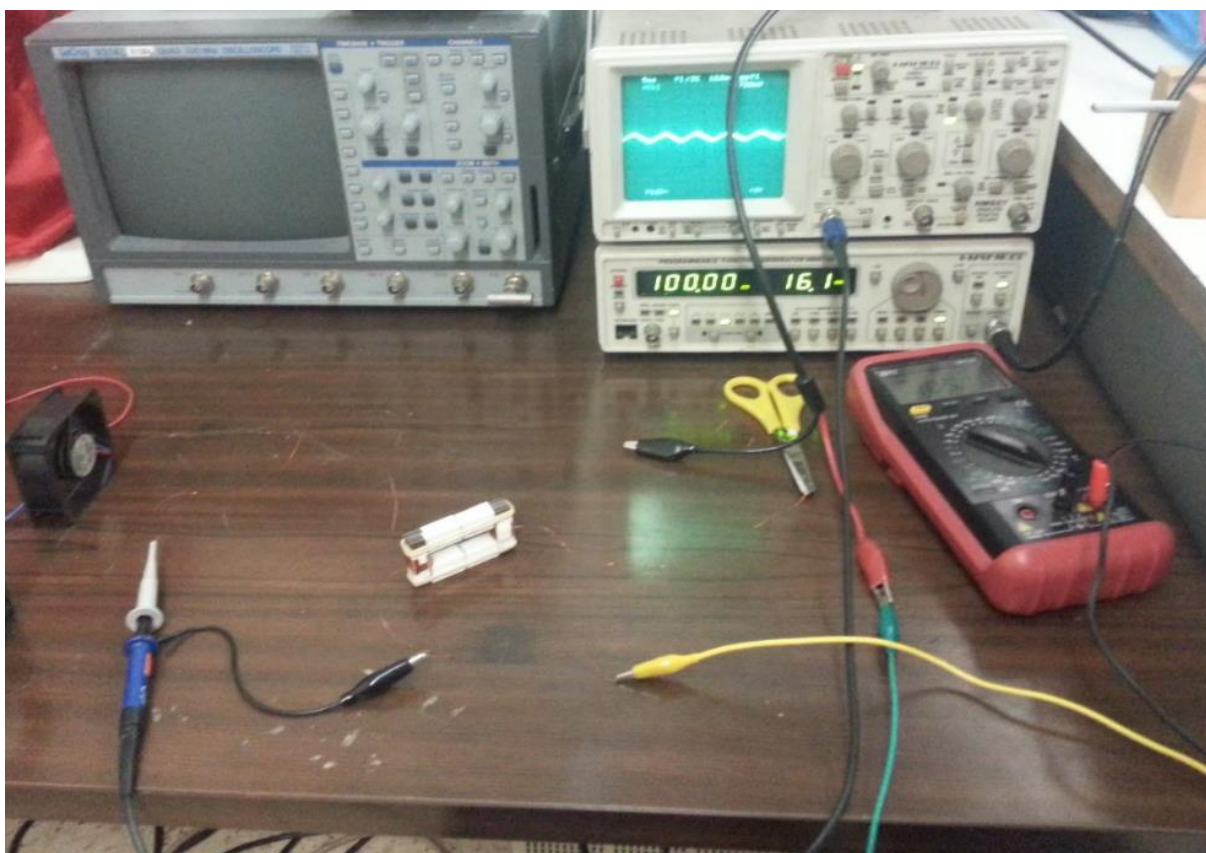


Σχήμα 23: Διάγραμμα της μεταβολής του συντελεστή αυτεπαγωγής ως προς τη συχνότητα, με αμφότερες τις μεθόδους μέτρησης της ενεργού τιμής της έντασης

Οι μαθηματικές εξισώσεις στο διάγραμμα είναι οι εξισώσεις των γραμμών που κατά βέλτιστο τρόπο προσεγγίζουν την κατανομή των πειραματικών δεδομένων.

### 3.2 Μαγνητική διαπερατότητα υλικού πεταλοειδών μαγνητών

Οι δυο πεταλοειδείς μαγνήτες τοποθετούνται έτσι ώστε οι βάσεις των σκελών τους να βρίσκονται σε επαφή, σχηματίζοντας έτσι ένα βρόχο, όμοιο με αυτόν που υπάρχει στους μονοφασικούς μετασχηματιστές. Οι ακροδέκτες του πρώτου πηνίου συνδέονται με τη γεννήτρια και με αμπερόμετρο εν σειρά, το οποίο καταγράφει την ενεργό τιμή του ρεύματος. Επιλέγεται ημιτονοειδής συνάρτηση τάσης στα άκρα τα γεννήτριας. Οι ακροδέκτες του δεύτερου πηνίου συνδέονται με παλμογράφο, προκειμένου να λάβουμε την τάση η οποία επάγεται στο πηνίο λόγω της μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται από τις σπείρες του δεύτερου πηνίου. Το κύκλωμα φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



Σχήμα 24: Κύκλωμα διέγερσης του πρώτου πηνίου με εναλλασσόμενο ρεύμα από τη γεννήτρια και αποτύπωση της τάσης που επάγεται στο δεύτερο σε παλμογράφο

Η τάση εξόδου που λαμβάνεται στο δεύτερο πηνίο από τον τύπο:

$$V_{out} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.5)$$

Όπου:

- $N_2$  είναι ο αριθμός των σπειρών του δεύτερου πηνίου και
- $\Phi$  είναι η μαγνητική ροή που διέρχεται εντός των σπειρών.

Επομένως

$$V_{out} = -N_2 \frac{d(A * B)}{dt} = -N_2 A \frac{dB}{dt} = -N_2 A \frac{dB}{dH} \frac{dH}{dt} \propto N_2 A \frac{dB}{dH} \frac{dI_{in}}{dt} = N_2 A \frac{dB}{dH} \frac{d(I_{max} \sin(2\pi ft + \varphi_0))}{dt} \quad (3.6)$$

Όπου:

- Α το εμβαδό της διατομής του πυρήνα σε επίπεδο κάθετο με τις δυναμικές μαγνητικές γραμμές,
- Β η πυκνότητα μαγνητικής ροής,
- Η το μαγνητικό πεδίο
- $\frac{dB}{dH} = \mu'(H)$  είναι η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα και είναι συνάρτηση του μαγνητικού πεδίου Η, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα των βρόχων υστέρησης, όπου η εφαπτόμενη της καμπύλης διαφοροποιείται με το μαγνητικό πεδίο
- $I_{in}$  είναι το ρεύμα διέγερσης, αν θεωρηθεί πως το υλικό του ηλεκτρομαγνήτη έχει πολύ μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα σε σχέση με τον αέρα που το περιβάλλει

Σε αυτήν την περίπτωση, το ρεύμα είναι ημιτονοειδές και δίνεται από τη σχέση:

$$I_{in} = I_{max} \sin(2\pi ft + \varphi_0) \quad (3.7)$$

Όπου f είναι η συχνότητα που επιλέγεται στη γεννήτρια.

Προχωρώντας την ανωτέρω εξίσωση προκύπτει πως:

$$V_{out} \propto N_2 A \mu' \frac{d(I_{max} \sin(2\pi ft + \varphi_0))}{dt} = N_2 A \mu' I_{max} 2\pi f \cos(2\pi ft + \varphi_0) \quad (3.8)$$

Το σύστημα των δυο πεταλοειδών μαγνητών μπορεί να θεωρηθεί ένα μαγνητικό κύκλωμα, στο οποίο πηγή μαγνητεγερτικής δύναμης είναι το γινόμενο  $N_1 * I_{in}$  και το μαγνητικό πεδίο δίνεται από τη σχέση:

$$H = \frac{N_1 I_{in}}{L} \quad (3.9)$$

Όπου L είναι το μέσο μήκος των δυναμικών γραμμών που αναπαριστούν το μαγνητικό πεδίο. Συνεπώς προκύπτει:

$$V_{out} = -N_2 \frac{d(A * B)}{dt} = -N_2 A \frac{dB}{dt} = -N_2 A \frac{dB}{dH} \frac{dH}{dt} = -N_1 N_2 \frac{A}{L} \mu'(H(t)) I_{max} 2\pi f \cos(2\pi ft + \varphi_0) \quad (3.10)$$

Στην παραπάνω σχέση, όλα τα μεγέθη στο δεύτερο μέλος εκτός από διαφορική μαγνητική διαπερατότητα είναι γνωστά, αφού χωρίς βλάβη της γενικότητας μπορούμε να θεωρήσουμε πως η αρχική φάση είναι είτε 0, είτε 90 μοίρες.



Από τη σχέση αυτή μπορεί να υπολογιστεί η συνάρτηση διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας. Είναι το πηλίκο της συνάρτησης εξόδου προς το συνημίτονο που εμφανίζεται στο δεύτερο μέλος της εξίσωσης. Αρκεί δε να υπολογιστεί για χρόνο ίσο με το ήμισυ μιας περιόδου της συνάρτησης διέγερσης, αφού ο βρόχος υστέρησης έχει συμμετρία ως προς την αρχή των αξόνων.

Άλλος τρόπος υπολογισμού της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας είναι ο εξής: Συνδέεται στο πρωτεύον κύκλωμα αντίσταση εν σειρά με το πηνίο και στα άκρα αυτής ακροδέκτες. Η τάση στα άκρα της είναι ανάλογη του μαγνητικού πεδίου και σε κατάλληλο κύκλωμα το σήμα αυτό αποτελεί την είσοδο. Το κύκλωμα είναι σχεδιασμένο με τρόπο ώστε να δίδει ως έξοδο την παράγωγο της συνάρτησης εισόδου. Έτσι, αξιοποιώντας από τη μία πλευρά την τάση εξόδου του δεύτερου πηνίου και από την άλλη την παράγωγο του μαγνητικού πεδίου, προκύπτει διαιρώντας (με τη βοήθεια υπολογιστή με ADC και κατάλληλου προγράμματος) και πολλαπλασιάζοντας με κατάλληλο συντελεστή που εξαρτάται από τα πλήθη των σπειρών, τη διατομή και το μήκος της μέσης διαδρομής, προκύπτει η συνάρτηση της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας.

Αντικαθίστανται οι τιμές :

- $N_1 = N_2 = 100$
- $A = 0.01 * 0.01 = 10^{-4} \text{ m}^2$
- $L = 2 * (25 + 20 + 25) \text{ cm} = 0.14 \text{ m}$

Άρα η τιμή της τάσης εξόδου μεταβάλλεται από μία μέγιστη θετική ως μία ίσου μέτρου αλλά αρνητική τιμή, λόγω του παράγοντα του συνημιτόνου. Δεν έχει ακριβώς ημιτονοειδή μορφή γιατί η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα μεταβάλλεται. Η τάση της εξόδου μπορεί να θεωρηθεί ακριβώς ημιτονοειδής μόνο αν το υλικό έχει ανυστερητική και γραμμική συμπεριφορά (δηλαδή ο βρόχος υστέρησης είναι στενός και εκφυλίζεται σε μια γραμμή), όπως συμβαίνει στο κενό ή στον αέρα.

Επιλέγονται συχνότητες διέγερσης σε μια περιοχή από 75 ως 8000Hz και τάση peak to peak από 5 ως 15 V. Έτσι, προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές των μετρήσεων. Με βάση το αναμενόμενο αποτέλεσμα και προσεγγίζοντας τη συνάρτηση της τάσης με ημιτονοειδή, προκύπτουν οι εξής προσεγγίσεις για μία μέση τιμή της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας.

f (Hz)	V <sub>in</sub> (V)	I <sub>rms</sub> (mA)	I <sub>max,in</sub> (mA)	H <sub>max</sub> (A/m)	V <sub>out</sub> (mV)	Προσέγγιση μ'
75	5	31,2	44,1	31,5	185	0,000623
100	5	31,1	44,0	31,4	242	0,000613
500	5	28,4	40,2	28,7	1020	0,000566
750	5	26,4	37,3	26,7	1350	0,000537
1000	5	24,6	34,8	24,8	1530	0,000490

2000	5	19,6	27,7	19,8	1980	0,000398
4000	5	14,9	21,1	15,1	2260	0,000299
8000	5	10,9	15,4	11,0	2290	0,000207
75	10	62,8	88,8	63,4	402	0,000672
100	10	62,5	88,4	63,1	534	0,000673
500	10	56,6	80,0	57,2	2200	0,000612
750	10	52,6	74,4	53,1	2870	0,000573
1000	10	48,9	69,2	49,4	3360	0,000541
2000	10	38,9	55,0	39,3	4260	0,000431
4000	10	29,8	42,1	30,1	4760	0,000315
8000	10	22,2	31,4	22,4	4840	0,000215
75	15	94,0	132,9	95,0	640	0,000715
100	15	93,5	132,2	94,4	850	0,000716
500	15	84,4	119,4	85,3	3380	0,000631
750	15	78,2	110,6	79,0	4420	0,000594
1000	15	72,7	102,8	73,4	5150	0,000558
2000	15	57,8	81,7	58,4	6540	0,000446
4000	15	44,3	62,6	44,7	7310	0,000325
8000	15	33,3	47,1	33,6	7420	0,000219

Στην πρώτη στήλη αναγράφεται η συχνότητα του ρεύματος στο πρωτεύον κύκλωμα και στη δεύτερη η τάση της γεννήτριας.

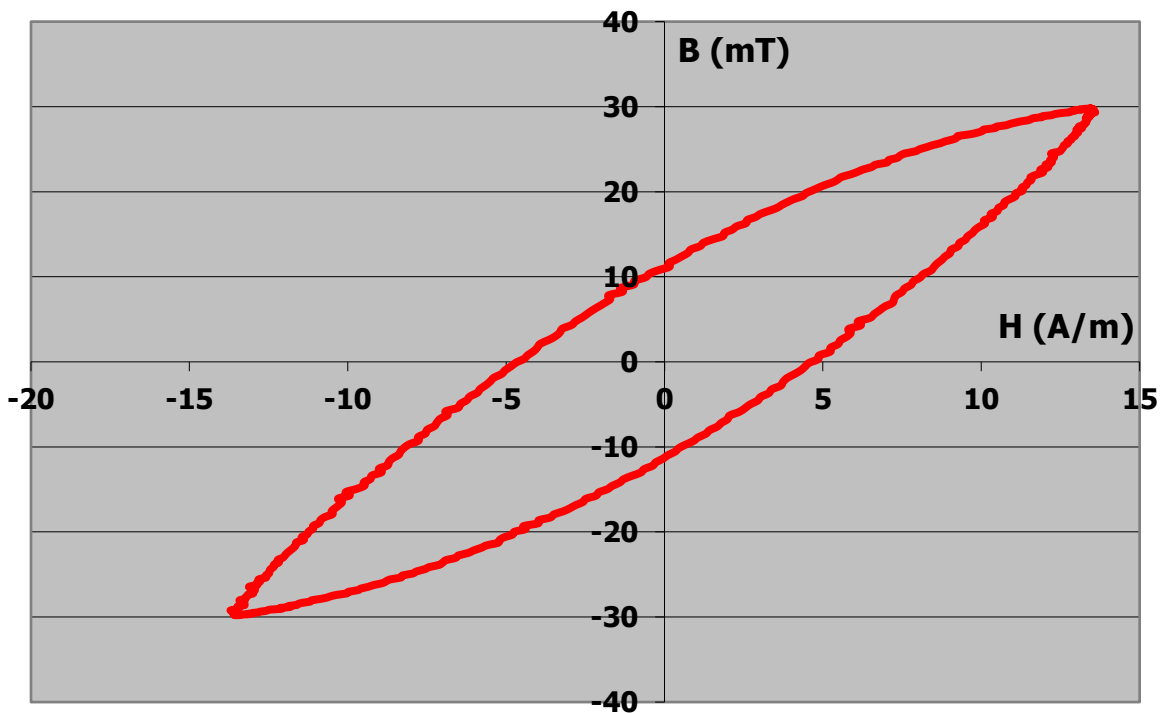
Στην τρίτη στήλη παρουσιάζεται η ένδειξη του αμπερόμετρου, οπότε στην τέταρτη καταγράφεται η μέγιστη τιμή του εναλλασσόμενου ρεύματος πολλαπλασιάζοντας με  $\sqrt{2}$ .

Στην πέμπτη στήλη εμφανίζεται το μέγιστο πεδίο που αντιστοιχεί στο μέγιστο ρεύμα και δίνεται από τον τύπο  $H = \frac{N_1 I_{in}}{L}$ .

Στην έκτη στήλη καταγράφεται το διπλάσιο της μέγιστης τιμής της τάσης που επάγεται στο δευτερεύον πηνίο.

Στην έβδομη και τελευταία στήλη προσεγγίζεται μία μέση τιμή της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας με βάση την προηγούμενη μαθηματική σχέση και αντικατάσταση του ρεύματος διέγερσης με την ενεργό τιμή του ρεύματος διέγερσης και ομοίως την τάση εξόδου με την ενεργό τιμή της τάσης εξόδου.

Όμως, η προκύπτουσα τιμή είναι καταφανέστατα λάθος, συγκεκριμένα είναι πάνω από μία τάξη μεγέθους μικρότερη της πραγματικής, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα μαγνητικής επαγωγής-μαγνητικού πεδίου που ακολουθούν.



Σχήμα 25: Διάγραμμα μαγνητικής επαγωγής-μαγνητικού πεδίου πυριτιούχου χάλυβα για χαμηλές τιμές πεδίου

Παρατηρείται πως η επαπτόμενη έχει μία μέση τιμή ίση περίπου με

$$\frac{30mT - (-30mT)}{13A/m - (-13A/m)} = 0.00231H/m \quad (3.11)$$

Δηλαδή περίπου 10 φορές μεγαλύτερη από την τιμή που αντιστοιχεί σε αυτό το πεδίο στον ανωτέρω πίνακα. Οι τιμές για συχνότητα διέγερσης 4000 και 8000 Hz και τάση 5V είναι περίπου από 0,0002 ως 0,0003. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από τα αντίστοιχα διαγράμματα α

Επίσης, αν και ο λόγος των σπειρών των δυο πηνίων (του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος) είναι ίσος με τη μονάδα, οι τάσεις εισόδου και εξόδου σε κενό φορτίο είναι πολύ διαφορετικές. Αυτό σημαίνει πως η μαγνητική ροή που διαρρέει το μαγνητικό κύκλωμα είναι πολύ μικρότερη από όση λήφθηκε υπόψιν στους υπολογισμούς. Συγκεκριμένα, η επαφή των δυο μαγνητών αγνοήθηκε. Όμως, λόγω της υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας,

το μικρό κενό το οποίο υπάρχει μεταξύ των εδρών που είναι σε επαφή έχει μεγαλύτερη μαγνητική αντίσταση (magnetic reluctance) από όλη την υπόλοιπη μέση διαδρομή των μαγνητικών γραμμών. Ο τύπος που δίνει τη μαγνητική αντίσταση είναι:

$$R_m = \frac{l}{\mu * A} \quad (3.12)$$

Οπότε η μαγνητική αντίσταση για διαδρομή 14cm και υλικό διαπερατότητας 0,00231 H/m είναι

$$R_m = \frac{0,14}{0,00231 * A} = \frac{60,6}{A} \quad (3.13)$$

Ενώ η μαγνητική αντίσταση για διαδρομή 0,5mm και υλικό διαπερατότητας  $4\pi * 0,0000001$  H/m είναι

$$R_m = \frac{0,0005}{4\pi * 10^{-7} * A} = \frac{397,9}{A} \quad (3.14)$$

Επιλέχθηκε κενό 0,5 mm γιατί οι επαφή γίνεται σε δυο έδρες και κάθε μία από αυτές τις έδρες φέρει στρώμα οξειδίων που έχει πάχος ορισμένων μικρομέτρων.

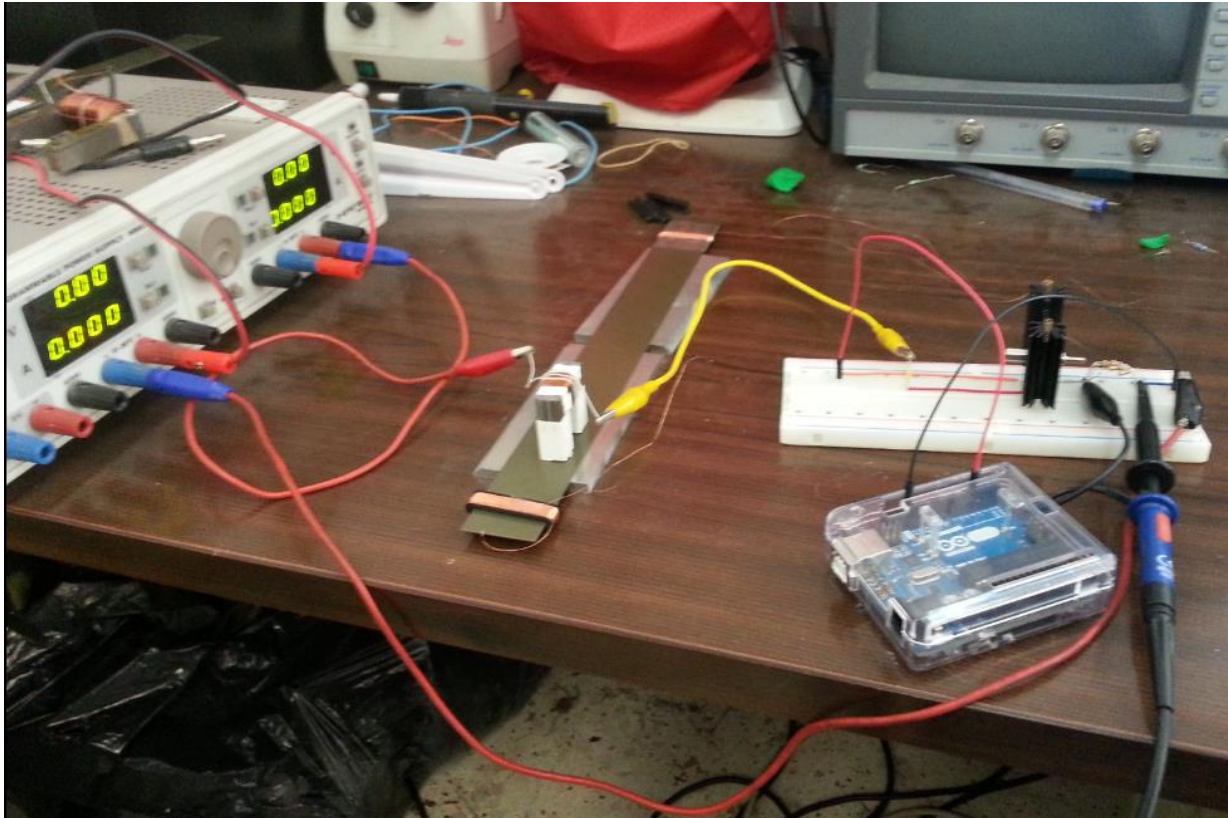
Επιπλέον στο κύκλωμα υπάρχει πτώση τάσης λόγω της αντίστασης του πηνίου, η οποία μετριέται ίση με 3,5Ω και της εσωτερικής αντίστασης της πηγής, όμως οι απώλειες ενέργειας που οφείλονται σε αυτό είναι μικρές.

Μεγαλύτερες είναι οι απώλειες που οφείλονται στη μαγνητική ροή σκέδασης, δηλαδή δημιουργούνται μαγνητικές γραμμές στο πρώτο πηνίο οι οποίες δε διέρχονται από το δεύτερο πηνίο, αντίθετα ένα τμήμα τους κείται στο κενό και άρα δε συνεισφέρουν στη μαγνητική ροή, η μεταβολή της οποίας επάγει τάση στο δεύτερο πηνίο.

Επίσης, ενεργειακές απώλειες υπάρχουν και λόγω της μηχανικής ταλάντωσης που προκαλεί η μαγνητοσυστολή και σε κάθε κύκλο, υπάρχουν απώλειες ίσες με το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης στο διάγραμμα B-H επί τον όγκο του ηλεκτρικού χάλυβα και απώλειες λόγω δινορρευμάτων (ή ρευμάτων Foucault).

Άρα, με τη μέθοδο αυτή δεν είναι δυνατόν να προσδιορισθεί η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα. Απαιτείται κλειστός βρόχος του μαγνητικού υλικού και προσδιορισμός των απωλειών χαλκού (ηλεκτρικές απώλειες) και ηλεκτρικά όργανα όπως αυτομετασχηματιστής για να διατηρείται ημιτονοειδής η τάση διέγερσης και βατόμετρο για προσδιορισμό των απωλειών πυρήνα.

### 3.3 Διάταξη με βάση το αντίστροφο του μαγνητοσυστολικού φαινομένου



Σχήμα 26: Διάταξη για ποσοτικό προσδιορισμό της μαγνητοσυστολής με βάση το αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο

Υλοποιείται διάταξη η οποία είναι παρόμοια με αυτήν που χρησιμοποιείται στις μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης. Μέσω του πεταλοειδούς μαγνήτη δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο σε μία μεταλλική λάμα-δείγμα, με παλμικό ρεύμα διέγερσης. Στο δείγμα υπό την επίδραση του πεδίου αυτού, γεννάται ένας παλμός, ο οποίος διαδίδεται στο υλικό με την ταχύτητα του ήχου, η οποία εξαρτάται μόνο από το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και την πυκνότητά του και δίνεται από τη σχέση:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cong \sqrt{\frac{205 * 10^9 Pa}{7850 \frac{kg}{m^3}}} \cong 5.1 * 10^3 m/s \quad (3.15)$$

Εδώ σημειώνεται η πρώτη σημαντική διαφορά που υπάρχει μεταξύ της διάταξης που χρησιμοποιείται και των μαγνητοσυστολικών γραμμών υστέρησης. Στις τελευταίες, ως μαγνητοσυστολικό υλικό χρησιμοποιείται είτε λεπτό σύρμα είτε λεπτή κορδέλα υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας (κυρίως άμορφο) και λόγω των μικρών διαστάσεων της διατομής

του σύρματος μπορεί να θεωρηθεί πως ο παλμός διαδίδεται μόνο κατά τον άξονα (ή την κύρια διεύθυνση) του σύρματος (ή της κορδέλας). Όμως, στη διάταξη αυτού του πειράματος όπου το δείγμα έχει πλάτος 30mm και πάχος 0,5mm ο ήχος διαδίδεται και σε εγκάρσιες κατευθύνσεις, γεγονός που διαφοροποιεί τα αποτελέσματα.

Ο μηχανικός παλμός είναι δυνατόν να ανιχνευθεί, ως παλμικό ηλεκτρικό σήμα (διαφορά δυναμικού), σε πηνίο λήψης το οποίο περιτυλίσσεται στο δείγμα. Αυτό συμβαίνει επειδή η διαδιδόμενη παλμική παραμόρφωση επάγει εσωτερικές τάσεις οι οποίες είναι μικρές σε μέγεθος μεν, δημιουργούν όμως ένα μαγνητικό πεδίο εντός του δείγματος. Αν η παραμόρφωση που διαδίδεται αφιχθεί στο σημείο που κείται το πηνίο λήψης, προκαλεί μια μεταβολή της μαγνητικής ροής λόγω του μαγνητικού πεδίου που 'φέρει'. Κατά τα γνωστά, η μεταβολή της μαγνητικής ροής επάγει τάση στο πηνίο.

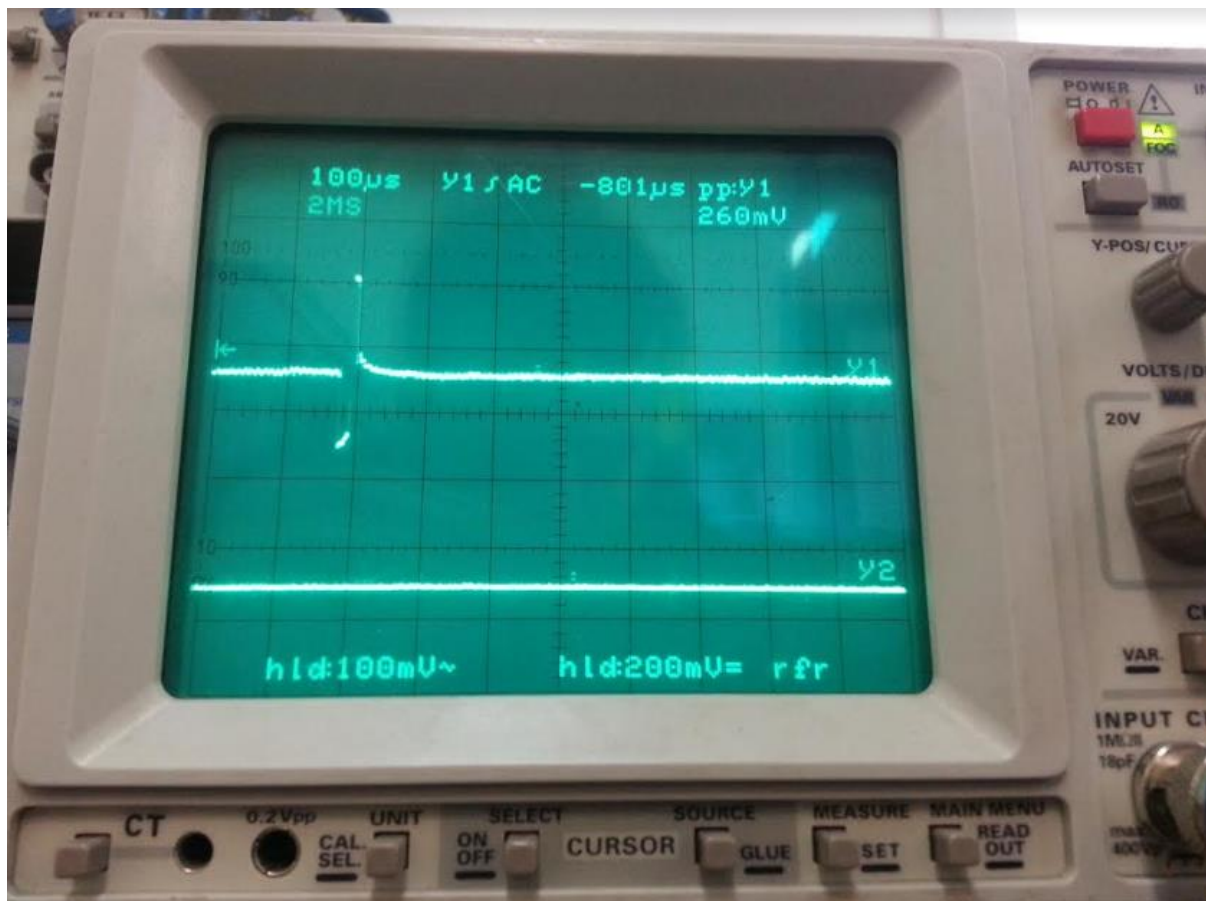
Η διαφορά δυναμικού αυτή που αποτελεί και την έξοδο του συστήματος, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως:

- το εμβαδόν της διατομής του υλικού  $S$ ,
- τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού για το σταθερό πεδίο που υπάρχει στο χώρο που δημιουργείται ο μηχανικός παλμός  $\mu(H_{or})$ ,
- τον αριθμό των σπειρών του σημείου λήψης  $N$ ,
- τη σταθερά αναλογίας μεταξύ του πεδίου που δημιουργείται λόγω των εσωτερικών τάσεων και της μαγνητοσυστολής  $a$
- την κλίση του διαγράμματος  $\lambda$ - $H$  του υλικού
- τη χρονική συνάρτηση του μεταβαλλόμενου μέρους του μαγνητικού πεδίου στο σημείο εντοπισμού, η οποία είναι  $H_e(t) = H_e(t) * f(t)$

Ο μαθηματικός τύπος που αποδίδει αυτή τη φορά δυναμικού είναι [8]:

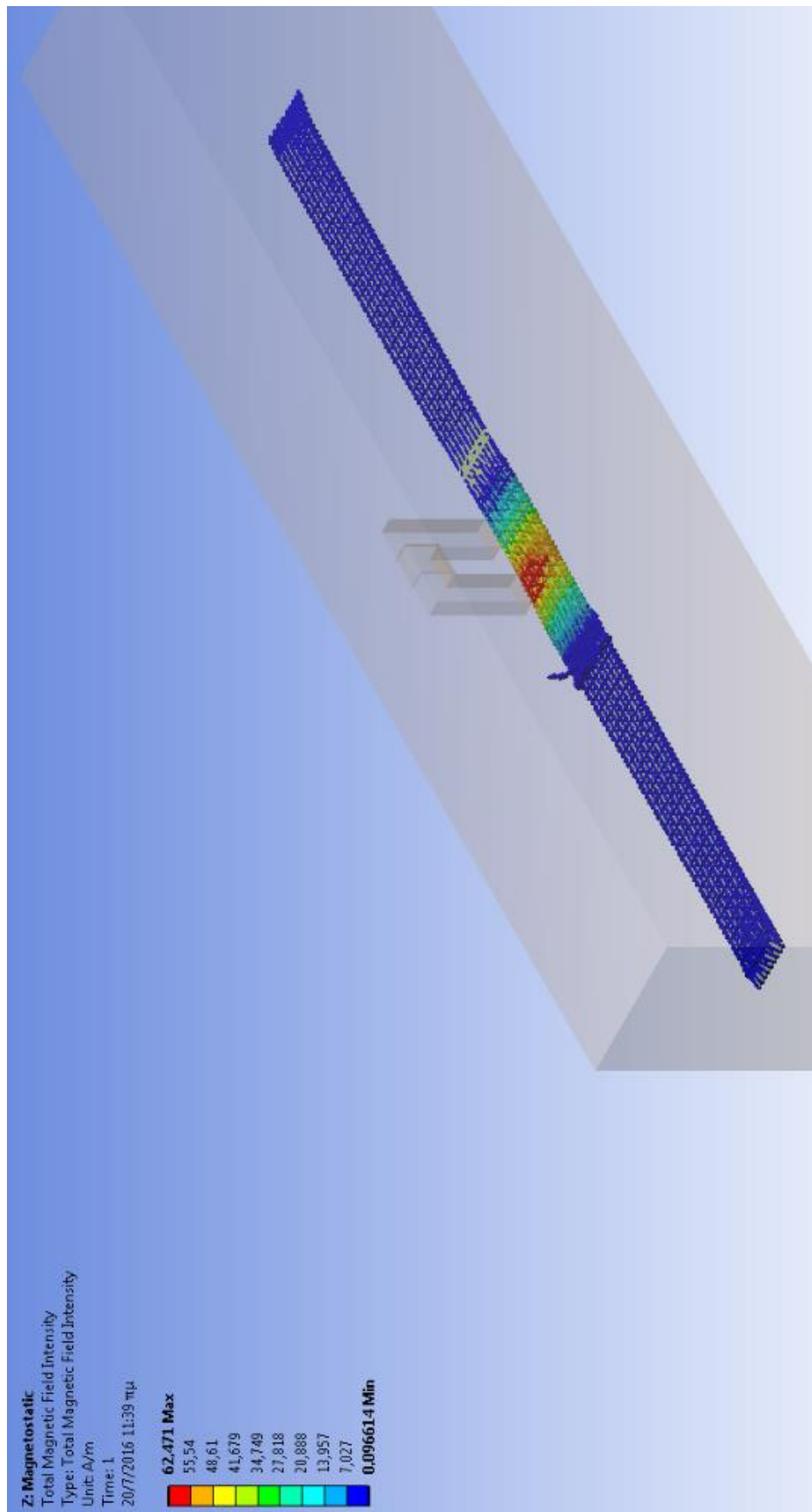
$$V_0 = -NSa\mu(H_{or}) \frac{d\lambda}{dH} H_e \frac{df}{dt} \quad (3.16)$$

Ο τύπος προκύπτει μετά από κάποιες παραδοχές. Η πρώτη εξ αυτών είναι πως η μαγνητική διαπερατότητα είναι πρακτικά αμετάβλητη σε μία περιοχή μαγνητικών πεδίων πλησίον του σταθερού πεδίου που υπάρχει στο χώρο που δημιουργείται ο μηχανικός παλμός. Η δεύτερη, η οποία εκτιμάται ως σημαντικότερη στην περίπτωση που μελετάται, είναι πως η μεταβολή της μαγνητικής ροής στο πηνίο λήψης δεν εξαρτάται μόνον από τη μεταβολή που επιφέρει η άφιξη του μηχανικού παλμού. Αντίθετα, μαγνητικές γραμμές οι οποίες δημιουργούνται στο πηνίο διέγερσης, διέρχονται από το χώρο εντός του σημείου λήψης, αλλοιώνοντας το αποτέλεσμα. Επιπλέον, το πηνίο διέγερσης έχει επίσης μεταβλητές διαστάσεις, αφού και το ίδιο υπόκειται σε μαγνητοσυστολή. Αυτή η δύναμη που οφείλεται στην ταλάντωση μεταφέρεται μέσω της τριβής και στο υπό εξέταση υλικό. Η διάδοση του μηχανικού παλμού εμπεριέχει και φαινόμενα απόσβεσης, τα οποία δε μπορούν να αγνοηθούν.



Σχήμα 27: Χαρακτηριστικό σήμα που λαμβάνεται από το πηνίο λήψης για παλμική διέγερση με διάρκεια παλμού περίπου 10µs και περίοδο 1ms

Άρα, είναι προτιμότερο το πηνίο διέγερσης να μην είναι σε επαφή με το υπό εξέταση υλικό. Σε μια τέτοια περίπτωση, η κατανομή της συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου που ενδιαφέρει φαίνεται ποιοτικά στην ακόλουθη εικόνα, που προκύπτει από πρόγραμμα προσομοίωσης:



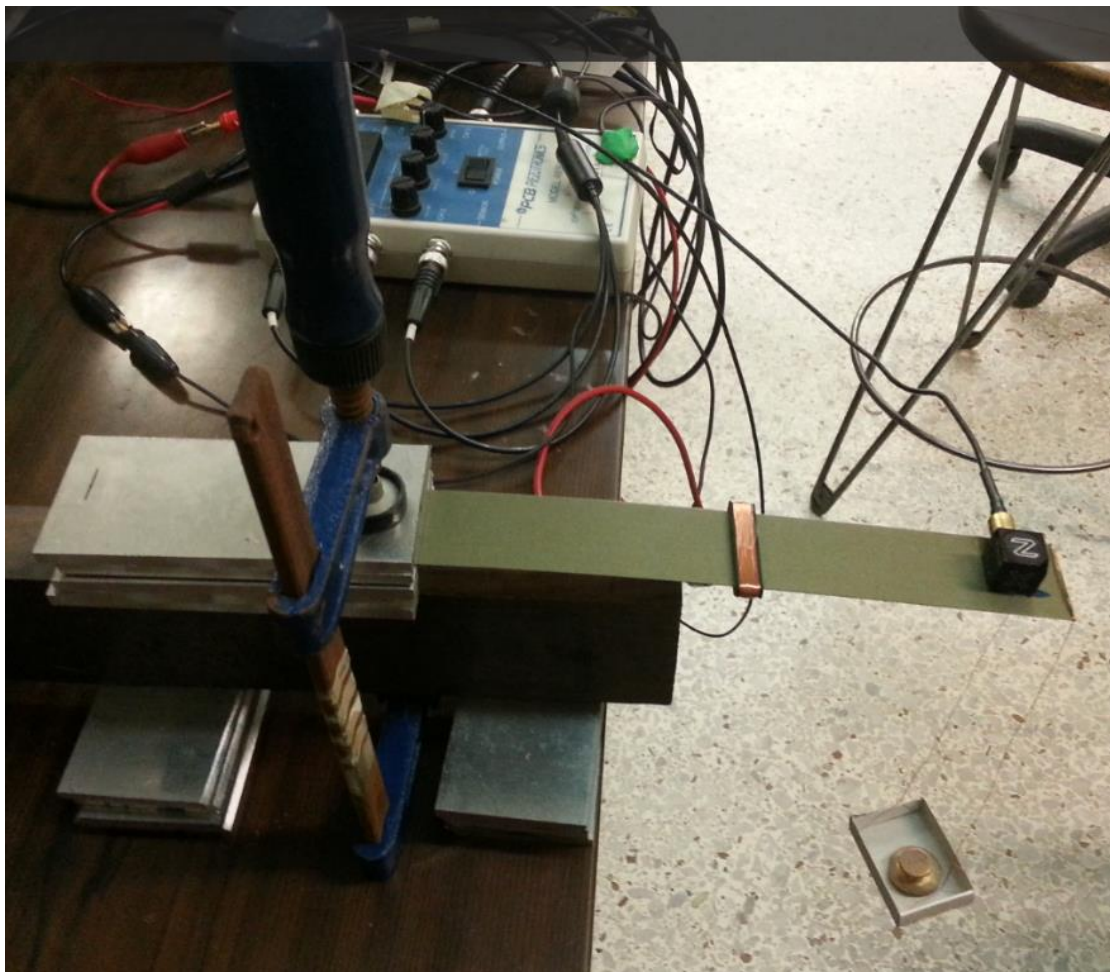
Σχήμα 28: Κατανομή της Z συνιστώσας του πεδίου στο δείγμα, για απόσταση πετάλου-δείγματος ίση με 5,5mm



### 3.4 Ανάρτηση μάζας στο ελεύθερο άκρο πακτωμένης λάμας

Μελετάται η συσχέτιση των εσωτερικών τάσεων με τη μαγνητοσυστολή. Συγκεκριμένα, υλοποιείται η εξής διάταξη:

Πακτώνεται η λάμα μήκους 300mm στη μία άκρη της, ανάμεσα σε λάμες αλουμινίου και με χρήση σφιγκτήρα. Το ελεύθερο μήκος το οποίο έχει η λάμα είναι 202mm. Στο μέσο του μήκους αυτού, δηλαδή 101mm από το ελεύθερο άκρο τοποθετείται το κινητό πηνίο ως πηνίο διέγερσης. Ο αισθητήρας τοποθετείται σε απόσταση 20mm από το ελεύθερο άκρο και στερεώνεται. Επίσης, σε απόσταση 1mm τοποθετείται αυτοσχέδιο ζυγός. Εντός του ζυγού μπορούν να τοποθετούνται πρότυπα βάρη, που προκαλούν εσωτερικές τάσεις λόγω κάμψης σε όλο το ελεύθερο μήκος της λάμας.



Σχήμα 29: Η διάταξη για μέτρηση της ταλάντωσης για διάφορα φορτία, τα οποία τοποθετούνται στο ζυγό (διακρίνεται με ένα πρότυπο μάζας 20g στο δεξί άκρο της εικόνας).

Αν αγνοήσουμε τα βάρη του κινητού πηνίου και του ίδιου του αισθητήρα και το ίδιο βάρος της λάμας, η καμπτική ροπή η οποία αναπτύσσεται εντός της λάμας έχει μια γραμμική κατανομή και είναι μέγιστη στο σημείο της πάκτωσης και μηδενική στο ελεύθερο άκρο. Αντιστοίχως κατανέμονται και οι εφελκυστικές και οι θλιπτικές τάσεις, το μέτρο των οποίων μειώνεται όσο πλησιάζουμε προς το ελεύθερο άκρο. Κατά τη διεύθυνση του πάχους,

θεωρώντας πως η λάμα υπόκειται σε καθαρή κάμψη, η κατανομή των τάσεων είναι γραμμική και συμμετρική ως προς το ουδέτερο επίπεδο.

Με το κλείσιμο του κυκλώματος, το πηνίο διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο προκαλεί ένα εναλλασσόμενο πεδίο στο χώρο. Η τάση που παρέχει η γεννήτρια είναι 20V. Λόγω του μαγνητοσυστολικού φαινομένου, το πεδίο προκαλεί μια παραμόρφωση και άρα μια ταλάντωση του υπό εξέταση χάλυβα και μια περιοδική κίνηση όλης της λάμας. Στις περιοχές που βρίσκονται πλησίον του πηνίου, η μαγνητοσυστολή είναι εντονότερη και ο χάλυβας παραμορφώνεται περισσότερο, ενώ στις πιο απομακρυσμένες από αυτό περιοχές η μαγνητοσυστολή είναι ασθενέστερη.

Αρχικά, γίνεται ένας εντοπισμός όλων των συχνοτήτων στις οποίες παρουσιάζει τοπικό μέγιστο η συνάρτηση της επιτάχυνσης κατά τη διεύθυνση του μήκους της λάμας. Το εύρος των συχνοτήτων του ηλεκτρικού ρεύματος, δηλαδή των συχνοτήτων διέγερσης που εξετάζουμε είναι από 0 Hz έως 5000 Hz. Ο λόγος είναι πως, επειδή η συχνότητα ταλάντωσης του χάλυβα θα είναι η ίδια ή διπλάσια ή γενικά ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας διέγερσης, δεν έχει νόημα να εξετάσουμε το δείγμα σε υψηλότερες συχνότητες, αφού το επιταχυνσιόμετρο δεν παρέχει αξιόπιστες μετρήσεις για συχνότητες υψηλότερες των 5000 Hz. Με αργό και προοδευτικό τρόπο, αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης από τον αντίστοιχο διακόπτη της γεννήτριας και παράλληλα παρατηρείται στον παλμογράφο το εύρος και τα χαρακτηριστικά του μετρούμενου σήματος, το οποίο έχει μονάδες τάσης. Προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

*Πίνακας 2: Συχνότητες για τις οποίες μεγιστοποιείται η ταλάντωση, άνευ φορτίου*

A/A	f Διέγ (Hz)	T (ms)	$\omega$ (rad/s)	Πλάτος, p-p (mV)	f Απόκ/ f Διέγ	f Απόκ (Hz)	a max (m/s <sup>2</sup> )
1	78,70	12,71	494,49	26	4	314,80	1,275
2	87,16	11,47	547,64	26	2	174,32	1,275
3	157,55	6,35	989,92	90	2	315,10	4,412
4	174,00	5,75	1093,27	64	1	174,00	3,137
5	277,62	3,60	1744,34	45	2	555,24	2,206
6	314,24	3,18	1974,43	52	1	314,24	2,549
7	394,22	2,54	2476,96	60	2	788,44	2,941
8	555,42	1,80	3489,81	68	1	555,42	3,333
9	778,00	1,29	4888,32	50	2	1556,00	2,451
10	3993,00	0,25	25088,76	25	1	3993,00	1,225

Στην πρώτη στήλη είναι ο αύξων αριθμός της συχνότητας στην οποία προκύπτει τοπικό μέγιστο.

Στη δεύτερη στήλη καταγράφεται η συχνότητα αυτή.

Στην τρίτη στήλη υπολογίζεται το αντίστροφο της συχνότητας, δηλαδή η περίοδος του ηλεκτρικού σήματος.

Στην τέταρτη στήλη υπολογίζεται η γωνιακή ταχύτητα του σήματος.

Στην πέμπτη στήλη καταγράφεται το πλάτος του σήματος από κορυφή σε κορυφή (peak to peak), μετρούμενο σε mV.

Στην έκτη στήλη, παρατηρώντας τη μορφή του σήματος του παλμογράφου, καταγράφεται η συχνότητα της ταλάντωσης, με βάση το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα σε δυο διαδοχικά μέγιστα της ταλάντωσης, προς τη συχνότητα της ηλεκτρικής διέγερσης.

Στην έβδομη στήλη υπολογίζεται η συχνότητα της απόκρισης.

Στην όγδοη στήλη υπολογίζεται η μέγιστη απόλυτη τιμή της επιτάχυνσης, με βάση τη αντιστοιχία: 100mV αντιστοιχούν σε 1g επιτάχυνση ή αλλιώς 10,2mV αντιστοιχούν σε 1m/s<sup>2</sup>

Σχόλια:

- Όσο διαρκεί η διέγερση του πηνίου, παράγεται ένας ήχος που γίνεται (έστω και με δυσκολία) αντιληπτός από το ανθρώπινο αυτί, του οποίου η ένταση διαφέρει όταν αλλάζει η συχνότητα της διέγερσης.
- Επίσης, όπως αναμένεται, αν η τάση μειωθεί κάτω από τα 20V, μειώνεται και η ένταση του ήχου μέχρι σημείου που δεν γίνεται αντιληπτός όπως και η επιτάχυνση, όπως καταγράφεται στον παλμογράφο.
- Επιπλέον, με την πτώση της παρεχόμενης τάσης παρατηρείται και αλλαγή της κυματομορφής, όταν αυτή δεν είναι ημιτονοειδής, αλλά έχει άλλη μορφή. Όταν είναι ημιτονοειδής, απλά μειώνεται το πλάτος της ταλάντωσης.
- Μικρές μεταβολές στη θέση του αισθητήρα ή του πηνίου ή στη δύναμη που ασκεί ο σφινγκτήρας στη λάμα επιφέρουν μεταβολή των συχνοτήτων για τις οποίες παρουσιάζεται μέγιστο. Αυτό πιθανόν σχετίζεται με την αλλαγή της ιδιοσυχνότητας της κατασκευής.
- Υπάρχει μια περιοχή περίξ της καταγεγραμμένης τιμής της συχνότητας διέγερσης, στην οποία η επιτάχυνση έχει σχεδόν ίδιο πλάτος.
- Παρατηρώντας τη δεύτερη στήλη, προκύπτουν κάποιες αναλογίες των συχνοτήτων στις οποίες παρατηρείται τοπικό μέγιστο στην επιτάχυνση. Συγκεκριμένα:

$f_1/f_3/f_6=1/2/4$
$f_2/f_4=1/2$
$f_5/f_8=1/2$
$f_7/f_9=1/2$

Επίσης, οι συχνότητες διέγερσης της πρώτης, δεύτερης και τρίτης γραμμής του παραπάνω πίνακα αντιστοιχούν σε ταλάντωση περίπου 315Hz, περίπου 174Hz και περίπου 555Hz αντίστοιχα. Ελέγχονται ακολούθως οι ιδιοσυχνότητες που αναμένονται θεωρητικά για την αξονική ταλάντωση φορέα. Η διαφορική εξίσωση που διέπει το φαινόμενο είναι η ακόλουθη [9]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( EA(x) \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right) + F(x, t) = m(x) \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} \quad (3.17)$$

Όπου:

- το E είναι το μέτρο ελαστικότητας,
- A(x) είναι η διατομή στη θέση x, δηλαδή στην περίπτωσή μας μπορεί να αντικατασταθεί από A, αφού η διατομή του χάλυβα είναι σταθερή

- $u(x,t)$  είναι η μετατόπιση της διατομής στη θέση  $x$ , τη χρονική στιγμή  $t$
- $F(x,t)$  το αξονικό εξωτερικό κατανεμημένο φορτίο, που στην περίπτωση μας είναι μηδενικό, αφού αναζητούμε τις ιδιοσυχνότητες
- $m(x)$  η συνάρτηση κατανομής μάζας, που στην περίπτωση μας είναι σταθερή και ίση με τη συνολική μάζα της λάμας προς το συνολικό μήκος της

Άρα η διαφορική εξίσωση απλοποιείται και παίρνει τη μορφή:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.18)$$

Όπου  $c$  είναι ταχύτητα διάδοσης του ήχου εντός του μετάλλου. Η ταχύτητα συναρτάται μόνο από την πυκνότητα ( $\rho=7850\text{kg/m}^3$ ) και το μέτρο ελαστικότητας ( $E=210\text{GPa}$ ) του υλικού και είναι:

$$c = c(E, \rho) = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 5172 \text{ m/s} \quad (3.19)$$

Η λύση της διαφορικής εξίσωσης είναι:

$$u(x, t) = \left( A \cos\left(\frac{\omega x}{c}\right) + B \sin\left(\frac{\omega x}{c}\right) \right) \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.20)$$

Όπου οι σταθερές  $A, B, \varphi$  προσδιορίζονται από τις αρχικές συνθήκες.

Επειδή στο άκρο της λάμας έχουμε πάκτωση, λαμβάνουμε ως αρχικές συνθήκες του προβλήματος τη μη μεταβολή της θέσης στο πακτωμένο άκρο της λάμας και τη μηδενική εσωτερική δύναμη που ασκείται στο ελεύθερο άκρο της λάμας, οπότε:

$$u(0, t) = 0 \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}(L, t) = 0 \quad (3.22)$$

Από την πρώτη αρχική συνθήκη, με αντικατάσταση προκύπτει  $A=0$ .

Από τη δεύτερη αρχική συνθήκη, προκύπτει πως

$$\cos\left(\frac{\omega L}{c}\right) = 0 \quad (3.23)$$

Ή ισοδύναμα:

$$\omega_n = \left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi c}{L} \quad (3.24)$$

Όπου  $n=1,2,3\dots$  Για  $n=1$  έχουμε τη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Αντικαθιστώντας  $c=5172$  και  $L=0.202$  (σε μονάδες SI), προκύπτει πως η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα είναι:

$$\omega_1 = 4.022 * 10^4 \quad (3.25)$$

Το αποτέλεσμα είναι σε rad/s, οπότε η αντίστοιχη συχνότητα σε Hz είναι:

$$f_1 = 6.401 * 10^3 \quad (3.26)$$

Και προφανώς οι επόμενες ιδιοσυχνότητες είναι ακόμη μεγαλύτερες.

Το αποτέλεσμα αυτό αν συγκριθεί με τις συχνότητες ταλάντωσης στις οποίες μεγιστοποιείται η επιτάχυνση, είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερο.

Κάνοντας μια δεύτερη προσέγγιση της ιδιοσυχνότητας, θεωρούμε πως υπάρχει σημειακή μάζα στην άκρη της λάμας, η οποία είναι η μάζα του αισθητήρα. Τότε αποδεικνύεται πως οι ιδιοσυχνότητες ικανοποιούν την εξίσωση:

$$\frac{\omega_n L}{c} \tan\left(\frac{\omega_n L}{c}\right) = \frac{M}{m} \quad (3.27)$$

Όπου:

- $M$  η μάζα της λάμας 23.55g και
- $m$  η μάζα του αισθητήρα 7.4g

Με δοκιμές βρίσκουμε πως η πρώτη συχνότητα που ικανοποιεί την παραπάνω εξίσωση είναι

$$f_1 = 5.525 * 10^3 \quad (3.28)$$

Αν υπολογίσουμε την ιδιοσυχνότητα της ταλάντωσης υπό αξονικό φορτίο όλης της λάμας, χωρίς καμιά δύναμη στα δυο άκρα της, με ανάλογους συλλογισμούς όπως προηγούμενα, προκύπτει πως οι αρχικές συνθήκες είναι:

$$\frac{\partial u}{\partial x}(0, t) = 0 \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}(L, t) = 0 \quad (3.30)$$

Και με αντικατάσταση στη σχέση:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\omega}{c} \left( -A \sin\left(\frac{\omega x}{c}\right) + B \cos\left(\frac{\omega x}{c}\right) \right) \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.31)$$

Προκύπτει πως οι ιδιοσυχνότητες δίνονται από τη σχέση:

$$\omega_n = \frac{n\pi c}{L_{ολικό}} \quad (3.32)$$

Όπου  $L_{ολικό}$  είναι 0,3m και  $n=1,2,3,\dots$  Άρα:

$$\omega_1 = 5.416 * 10^4 \quad (3.33)$$

Το αποτέλεσμα είναι σε rad/s, οπότε η αντίστοιχη συχνότητα σε Hz είναι:

$$f_1 = 8.620 * 10^3 \quad (3.34)$$

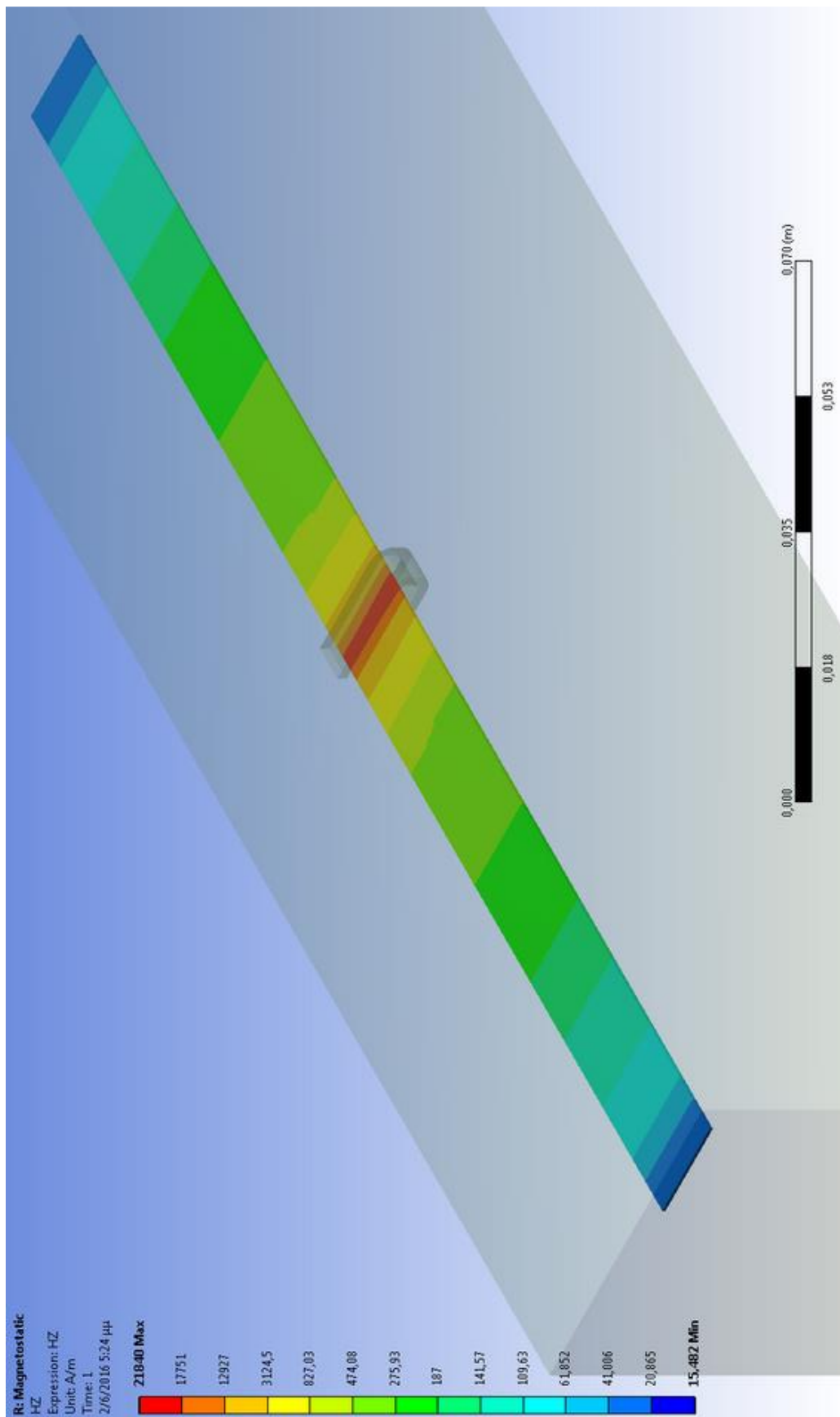
**Από όλες τις εκτιμήσεις της ιδιοσυχνότητας ή της τάξης μεγέθους της, προκύπτει πως είναι πάνω από μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από τις συχνότητες στις οποίες είχαμε τοπικό μέγιστο επιτάχυνσης.**

Γίνεται υπολογισμός του πεδίου που δημιουργεί την ταλάντωση. Αφορά κυρίως η συνιστώσα κατά το μήκος της λάμας. Είναι εναλλασσόμενο, σε φάση με το ηλεκτρικό ρεύμα που το δημιουργεί και εξαρτάται από τη συχνότητα της πηγής. Γίνεται χρήση του τύπου που προκύπτει από το πρόγραμμα προσομοίωσης, όπου τη θέση του όρου 'ένταση ηλεκτρικού ρεύματος' λαμβάνει ο όρος  $\sqrt{2} * I_{rms}$ . Η ενεργός τιμή του ρεύματος λαμβάνεται από την εξίσωση της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων. Το μαγνητικό πεδίο είναι συνάρτηση δυο μεταβλητών, του χρόνου και της θέσης. Με αυτόν το τρόπο υπολογίζεται η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου στη θέση στην οποία η έντασή του είναι μέγιστη, δηλαδή στο κέντρο της διατομής, στο μέσο του μήκους του κινητού πηνίου. Προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

*Πίνακας 3: Τιμές μέγιστου μαγνητικού πεδίου και πλάτους ταλαντώσεων, για συχνότητες που το τελευταίο μεγιστοποιείται*

A/A	f Διέγ (Hz)	f Απόκ (Hz)	$x_{max}$ (μm)	$I_{rms}$ (mA)	$H_{max}$ (A/m)
1	78,70	314,80	0,3258	77,658	2910
2	87,16	174,32	1,0624	77,370	2899
3	157,55	315,10	1,1255	74,970	2809
4	174,00	174,00	2,6248	74,409	2788
5	277,62	555,24	0,1812	70,875	2656
6	314,24	314,24	0,6539	69,626	2609
7	394,22	788,44	0,1198	66,899	2507
8	555,42	555,42	0,2737	61,402	2301
9	778,00	1556,00	0,0256	53,812	2016

Από το σχήμα προκύπτει πως για τις υπολογισθείσες τιμές μαγνητικού πεδίου, ο καθαρός σίδηρος έχει μαγνητοσυστολή (θετική, άρα πρόκειται για διαστολή) 5μm ανά m. Επειδή όμως το μαγνητικό πεδίο φθίνει όσο η απόσταση από το κινητό πηνίο μεγαλώνει, όπως αναμένεται από τη θεωρία και φαίνεται στην παρακάτω προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου που σχηματίζεται στην περιοχή του κινητού πηνίου, συνακόλουθα φθίνει και το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής.



Σχήμα 30: Κατανομή της συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου σε άξονα παράλληλο με λάμα από ηλεκτρικό χάλυβα SA1008

Παρατηρώντας τις τιμές της συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου σε άξονα παράλληλο με λάμα, που βέβαια είναι η κύρια συνιστώσα που ευθύνεται για την ανιχνεύσιμη μαγνητοσουστολή που ενδιαφέρει, διαπιστώνεται πως είναι περίπου 1400 φορές μεγαλύτερες στην περιοχή πλησίον του πηνίου σε σχέση με την άκρη της λάμας, αφού ισχύει πως  $21840/15,842=1379$ .

Συνεπώς, η παραμόρφωση δεν είναι ίδια σε όλο το μήκος της λάμας. Αντίθετα είναι μεγαλύτερη πλησίον του πηνίου και μειώνεται όσο μεγαλώνει η απόσταση της λάμας από αυτό. Στην περίπτωση αυτή, το τμήμα της λάμας που υπόκειται σε διαστολή είναι πολύ μικρότερο. Κατά προσέγγιση, μπορούμε να υποθέσουμε πως η μείωση του μαγνητικού πεδίου σε άξονα κάθετο με τα επίπεδα των σπειρών είναι ανάλογη του κύβου της απόστασης από το κέντρο του πηνίου. Ο μαθηματικός τύπος που δίνει το μαγνητικό πεδίο είναι:

$$H_x = \frac{Ni\alpha^2}{2(x^2 + \alpha^2)^{3/2}} \quad (3.35)$$

Όπου:

- $H_x$  είναι το μαγνητικό πεδίο
- $N$  το πλήθος των σπειρών
- $i$  είναι η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τις σπείρες
- $x$  η απόσταση από το κέντρο του πηνίου
- $\alpha$  η ακτίνα του πηνίου

Όλα τα μεγέθη στο System International. Λόγω συμμετρίας, θεωρείται πως το πεδίο έχει τη διεύθυνση της διάστασης του μήκους της λάμας. Αντικαθιστώντας  $N=300$  και όπως προηγούμενα  $\alpha=0,0057$  m και διαιρώντας το αποτέλεσμα με 79,5775 προκύπτει το πεδίο ως συνάρτηση ρεύματος και απόστασης σε μονάδες Oe

$$H_x = \frac{300 * (0.0057)^2}{2 * 79.58 * (x^2 + 0.0057^2)^{3/2}} i = \frac{6.124 * 10^{-5}}{(x^2 + 0.0057^2)^{3/2}} i \quad (3.36)$$

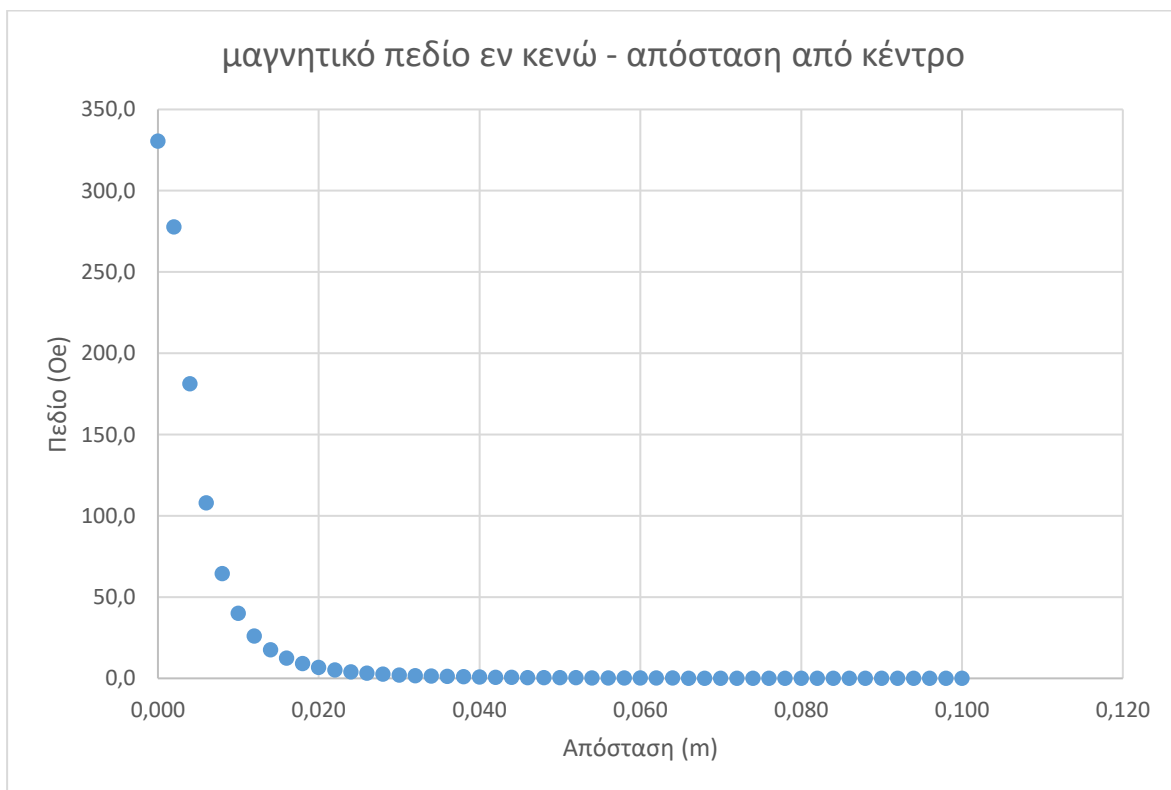
Η ανωτέρω συνάρτηση δείχνει πως όταν η απόσταση  $x$  είναι αρκετά μεγαλύτερη των διαστάσεων του πηνίου, το πεδίο μειώνεται με την τρίτη δύναμη της απόστασης. Για τιμή ρεύματος ίση με ένα αμπερ, προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

Πίνακας 4: Μείωση του μαγνητικού πεδίου με αύξηση της απόστασης από το κέντρο του (λαμβάνεται ρεύμα που διαρρέει τις σπείρες ίσο με 1A)

Απόσταση (m)	Πεδίο (Oe)	Απόσταση (m)	Πεδίο (Oe)
0,000	330,7		
0,002	277,8	0,052	0,4
0,004	181,4	0,054	0,4
0,006	108,0	0,056	0,3
0,008	64,6	0,058	0,3
0,010	40,2	0,060	0,3
0,012	26,1	0,062	0,3
0,014	17,7	0,064	0,2
0,016	12,5	0,066	0,2

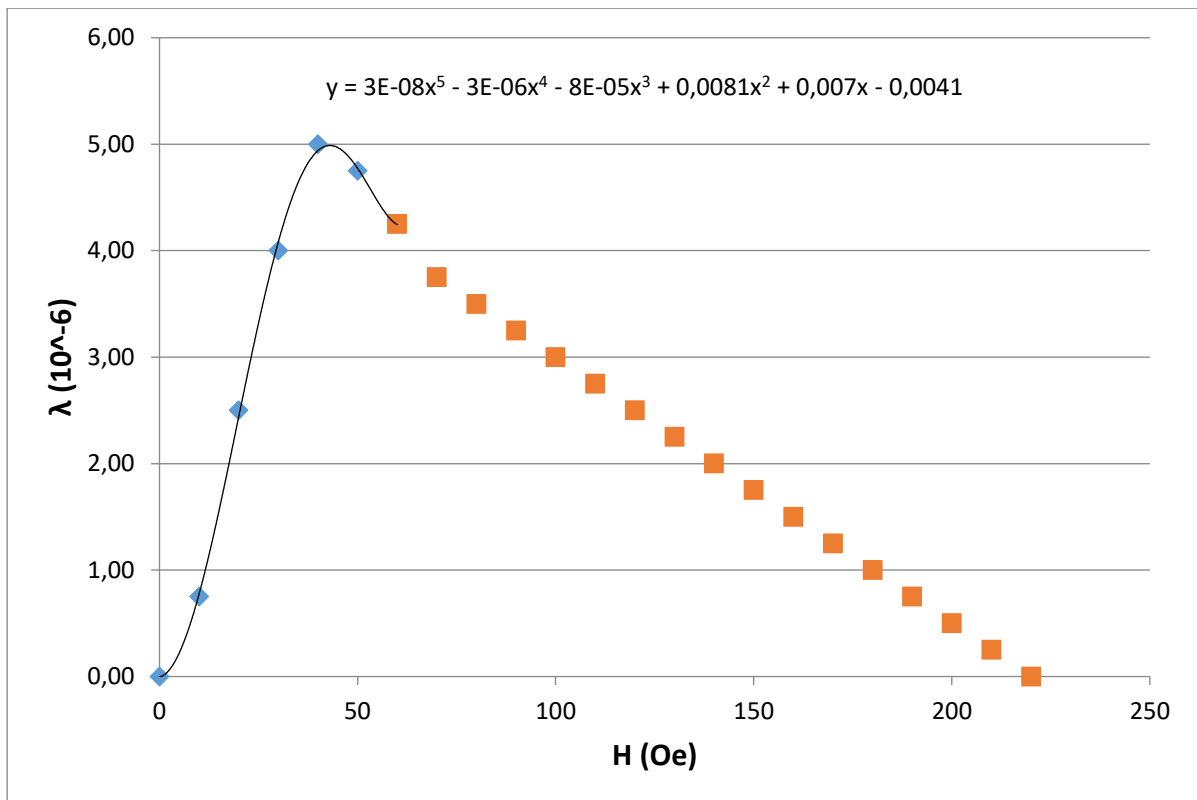


0,018	9,1	0,068	0,2
0,020	6,8	0,070	0,2
0,022	5,2	0,072	0,2
0,024	4,1	0,074	0,1
0,026	3,2	0,076	0,1
0,028	2,6	0,078	0,1
0,030	2,2	0,080	0,1
0,032	1,8	0,082	0,1
0,034	1,5	0,084	0,1
0,036	1,3	0,086	0,1
0,038	1,1	0,088	0,1
0,040	0,9	0,090	0,1
0,042	0,8	0,092	0,1
0,044	0,7	0,094	0,1
0,046	0,6	0,096	0,1
0,048	0,5	0,098	0,1
0,050	0,5	0,100	0,1



Σχήμα 31: Ενδεικτική μείωση του μαγνητικού πεδίου με αύξηση της απόστασης από το κέντρο του (λαμβάνεται ρεύμα που διαρρέει τις σπείρες ίσο με 1A)

Μεταφέροντας το σχήμα σε πρόγραμμα Excel και προσεγγίζοντας το πρώτο τμήμα της καμπύλης με πολυώνυμο 5<sup>ου</sup> βαθμού, προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα. Η εξίσωση της καμπύλης αναγράφεται πάνω στο διάγραμμα:



Σχήμα 32: Διάγραμμα μαγνητοσυστολής-μαγνητικού πεδίου σε στοιχειακό σίδηρο.

Η προσέγγιση της καμπύλης με πολυώνυμο εμπεριέχει σφάλμα. Για σίδηρο ο οποίος δεν έχει προηγούμενα μαγνητιστεί, για μηδενικό πεδίο έχει μηδενική μαγνητοσυστολή, άρα αντικαθιστώντας  $x=0$ , το αποτέλεσμα θα έπρεπε να είναι  $y=0$  και όχι  $y=-0.0041$ . Το αρνητικό πρόσθετο στον όρο μηδενικής τάξης, οδηγεί σε σφάλμα σε υπολογισμούς που ακολουθούν. Με καλή προσέγγιση, μπορούμε να θεωρήσουμε πως η μαγνητοσυστολή είναι μια συνεχής συνάρτηση του πεδίου που φθίνει λόγω της απόστασης, οπότε ορθότερα η επιμήκυνση τμήματος λάμας, μεταξύ των σημείων  $x_1$  και  $x_2$ , δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta l = \int_{x_1}^{x_2} \lambda(H(x)) dx \quad (3.37)$$

Για λάμα 30cm, ως άκρα στην ολοκλήρωση λαμβάνονται  $x_1=0m$  και  $x_2=0,15m$ , η δε συνάρτηση μαγνητοσυστολής από το πολυώνυμο πέμπτης τάξης και το πεδίο από την ανωτέρω σχέση. Έστω για τιμή ρεύματος 77,658mA, το πεδίο δίνεται ως συνάρτηση της απόστασης από τη σχέση:

$$H_x = \frac{6.124 * 10^{-5}}{(x^2 + 0.00572)^{3/2}} i = \frac{4.756 * 10^{-6}}{(x^2 + 0.00572)^{3/2}} \quad (3.38)$$

Το αποτέλεσμα δίδεται σε Oe.

Ακολούθως, η μαγνητοσυστολή δίδεται σε θέση  $x$  από τη σχέση:

$$\begin{aligned}
\lambda(x) = & 3 * 10^{-8} * \left( \frac{4.756 * 10^{-6}}{(x^2 + 0.00572)^{3/2}} \right)^5 - 3 * 10^{-6} \\
& * \left( \frac{4.756 * 10^{-6}}{(x^2 + 0.00572)^{3/2}} \right)^4 - 8 * 10^{-5} * \left( \frac{4.756 * 10^{-6}}{(x^2 + 0.00572)^{3/2}} \right)^3 \\
& + 0.0081 * \left( \frac{4.756 * 10^{-6}}{(x^2 + 0.00572)^{3/2}} \right)^2 + 0.007 \\
& * \left( \frac{4.756 * 10^{-6}}{(x^2 + 0.00572)^{3/2}} \right)^1 - 0.0041
\end{aligned} \tag{3.39}$$

Το αποτέλεσμα είναι σε εκατομμυριοστά, εφόσον το μαγνητικό πεδίο είναι σε Oe, όπως φαίνεται και παρακάτω.

Το ολοκλήρωμα υπολογίζεται για ευκολία μέσω του προγράμματος Mathematica και της ιστοσελίδας <http://www.wolframalpha.com>.

Εισάγονται αρχικά οι δυο πρώτοι όροι (πέμπτης και τέταρτης δύναμης) με το ακόλουθο αποτέλεσμα:

$$\int_0^{0.15} \left( \frac{3 \left( \frac{4.756}{10^6 (x^2 + 0.00572)^{3/2}} \right)^5}{10^8} - \frac{3 \left( \frac{4.756}{10^6 (x^2 + 0.00572)^{3/2}} \right)^4}{10^6} \right) dx = -0.00222395$$

Εισάγονται κατόπιν οι τέσσερις τελευταίοι όροι (τρίτης, δεύτερης, πρώτης και μηδενικής δύναμης) και τέταρτης δύναμης, με το ακόλουθο αποτέλεσμα:

$$\begin{aligned}
\int_0^{0.15} \left( - \frac{8 \left( \frac{4.756}{10^6 (x^2 + 0.00572)^{3/2}} \right)^3}{10^5} + 0.0081 \left( \frac{4.756}{10^6 (x^2 + 0.00572)^{3/2}} \right)^2 + \right. \\
\left. 0.007 \left( \frac{4.756}{10^6 (x^2 + 0.00572)^{3/2}} \right)^1 - 0.0041 \right) dx = 0.014815
\end{aligned}$$

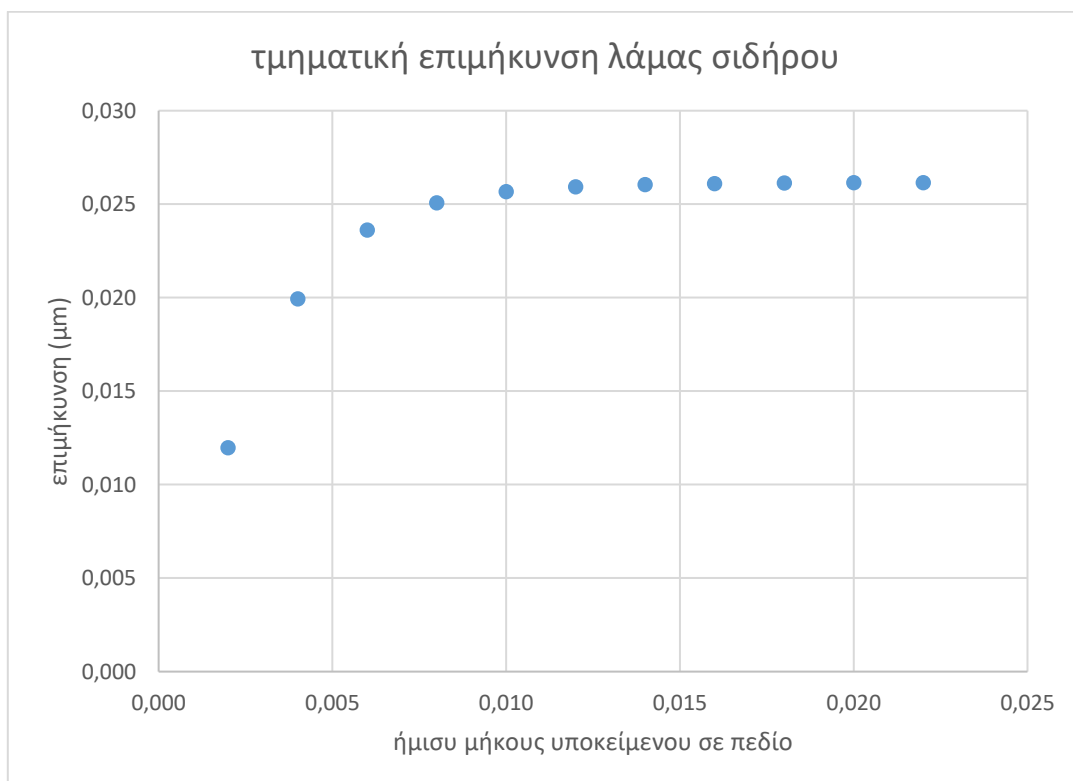
Άρα η επιμήκυνση λάμας 30cm στοιχειακού σιδήρου είναι, λόγω συμμετρίας:

$$2 * \Delta l = 2 * 0.000001 * (-0.002224 + 0.014815) = 2.518 * 10^{-8} m \tag{3.40}$$

Παρατηρείται δηλαδή μία επιμήκυνση περίπου 25nm. Αυτή είναι και η **μέγιστη** επιμήκυνση που αναμένεται για στοιχειακό σίδηρο που υπόκειται σε πεδίο που προκαλεί το πηνίο, όταν αυτό διαρρέεται από τα διάφορα ρεύματα της παρούσας σειράς πειραμάτων, αφού οι υπόλοιπες τιμές ρεύματος είναι χαμηλότερες και προκαλούν πεδίο μικρότερο από 37 Oe. Η συνάρτηση λ(H) είναι αύξουσα στην περιοχή από 0 Oe έως 45 Oe για στοιχειακό σίδηρο, οπότε η επιμήκυνση είναι μικρότερη.

Έχοντας υπόψιν την απότομη μείωση του πεδίου όπως παριστάνεται στο σχήμα, ελέγχουμε την επιμήκυνση σε μικρότερο μήκος εκατέρωθεν του κέντρου του πηνίου. Αυτό γίνεται με χρήση διαφορετικών ορίων στην ολοκλήρωση. Επιλέγεται ένα βήμα της τάξης των δυο χιλιοστών και προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Άνω όριο (m)	2*Δl (μm)
0,002	0,011976
0,004	0,019930
0,006	0,023612
0,008	0,025078
0,010	0,025670
0,012	0,025928
0,014	0,026050
0,016	0,026110
0,018	0,026138
0,020	0,026152
0,022	0,026156
0,024	0,026154
0,026	0,026148
0,028	0,026138
0,030	0,026128



Η μέγιστη τιμή επιμήκυνσης σύμφωνα με τα αποτελέσματα του παρόντος πίνακα είναι 26 περίπου νανόμετρα. Το αποτέλεσμα φαίνεται ασύμβατο με τον προηγούμενο υπολογισμό, όμως είναι ορθότερο. Ο λόγος είναι πως η προσέγγιση εμπεριέχει σφάλμα και

για πολύ μικρές τιμές πεδίου η τιμή της μαγνητοσυστολή προκύπτει λανθασμένα αρνητική. Επειδή το πεδίο με την αύξηση της απόστασης μειώνεται, το ορισμένο ολοκλήρωμα της επιμήκυνσης με κάτω όριο ολοκλήρωσης μεγαλύτερο του 0,022m έχει αρνητική τιμή.

Ως άνω όριο ολοκλήρωσης λαμβάνεται η τιμή 0,022m επειδή η τιμή του μαγνητικού πεδίου είναι χαμηλότερη από το 2% της τιμής στο κέντρο του πηνίου.

Εισάγονται αρχικά οι δυο πρώτοι όροι (πέμπτης και τέταρτης δύναμης) με το ακόλουθο αποτέλεσμα:

$$\int_0^{0.022} \left( \frac{3 \left( \frac{4.756}{10^6 (x^2 + 0.0057^2)^{3/2}} \right)^5}{10^8} - \frac{3 \left( \frac{4.756}{10^6 (x^2 + 0.0057^2)^{3/2}} \right)^4}{10^6} \right) dx = -0.00222395$$

Εισάγονται κατόπιν οι τέσσερις τελευταίοι όροι (τρίτης, δεύτερης, πρώτης και μηδενικής δύναμης) και τέταρτης δύναμης, με το ακόλουθο αποτέλεσμα:

$$\int_0^{0.022} \left( -\frac{8 \left( \frac{4.756}{10^6 (x^2 + 0.0057^2)^{3/2}} \right)^3}{10^5} + 0.0081 \left( \frac{4.756}{10^6 (x^2 + 0.0057^2)^{3/2}} \right)^2 + \right. \\ \left. 0.007 \left( \frac{4.756}{10^6 (x^2 + 0.0057^2)^{3/2}} \right)^1 - 0.0041 \right) dx = 0.0153016$$

Άρα η επιμήκυνση λάμας 4,4cm στοιχειακού σιδήρου είναι, λόγω συμμετρίας:

$$2 * \Delta l = 2 * 0.000001 * (-0.002224 + 0.014815) = 2.518 * 10^{-8} m \quad (3.41)$$

Από την κλίση της καμπύλης, θεωρείται πως η αύξηση της επιμήκυνσης είναι πολύ μικρή για το τμήμα πέραν των 16 mm. Συγκεκριμένα, για την περιοχή από 16mm ως 22mm, η επιμήκυνση είναι 0,026156 - 0,026110 = 0,000046 μm και αντιστοιχεί σε μήκος 12mm.

Προκύπτει πως για μήκος 30cm-4.4cm=25,6cm η επιμήκυνση είναι 0.000046\*256/12=0.000981μm δηλαδή λιγότερο από ένα νανόμετρο, συγκριτικά μικρό σε σχέση με τα 26 νανόμετρα επιμήκυνσης στην κεντρική περιοχή 4,4cm.

**Συμπερασματικά, άνω του 95% της επιμήκυνσης λάμας 30cm οφείλεται στην επιμήκυνση περιοχής περίπου 4,4cm πλησίον του κέντρου του πηνίου.**

Συγκρίνοντας την τιμή αυτή των 26nm με τα 326nm που υπολογίζεται ως μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης, η διαφορά είναι μεγαλύτερη από μία τάξη μεγέθους. Περαιτέρω υπολογισμοί της επιμήκυνσης της λάμας για μικρότερες τιμές ρεύματος οδηγούν σε ακόμα μικρότερα μεγέθη επιμήκυνσης, ενώ αντίθετα το μέγιστο πλάτος των ταλαντώσεων, όπως καταγράφεται στο πίνακα 5, μπορεί να είναι ακόμα μεγαλύτερο, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση διέγερσης με 174 Hz, όπου το πλάτος της ταλάντωσης είναι πάνω από 100 φορές μεγαλύτερο της επιμήκυνσης που θα είχε ίδια λάμα από πολυκρυσταλλικό, στοιχειακό σίδηρο, αν σε αυτή ασκείτο το ίδιο πεδίο.

Αυτή η μεγάλη απόκλιση στις τιμές αποδίδεται σε δύο λόγους:

- Όπως παρατηρήθηκε, σε συγκεκριμένες συχνότητες η λάμα συντονίζεται, πράγμα το οποίο οδηγεί την ταλάντωση σε μεγαλύτερα πλάτη από αυτά που αναμένονται σε σχέση με την απλή επιμήκυνση.
- Η καμπύλη  $\lambda(H)$  του συγκεκριμένου υλικού είναι διαφορετική από την αντίστοιχη του στοιχειακού σιδήρου.

Δεδομένου πως η διαφορά είναι πολύ μεγάλη, επικρατέστερος λόγος πιθανότατα είναι ο συντονισμός της λάμας. Άλλωστε, για συχνότητες διέγερσης πλησίον όσων αναφέρονται στον πίνακα 6, η ταλάντωση έχει πολύ μικρότερο πλάτος.

Θεωρώντας πως το μήκος που παραμορφώνεται είναι 4,4 cm, για στοιχειακό σίδηρο και πολύ χαμηλό ρυθμό επιβολής μαγνητικού πεδίου έχουμε:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{26nm}{44000000nm} = 5.91 * 10^{-7} \quad (3.42)$$

Η τιμή αυτή της παραμόρφωσης είναι σχετικά χαμηλή. Ο ηλεκτρικός χάλυβας είναι σχετικά μαλακό υλικό και μία τέτοια παραμόρφωση βρίσκεται στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης.

Με βάση το πείραμα και τους ακόλουθους του πειράματος υπολογισμούς, προκύπτει:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{326nm}{44000000nm} = 7.41 * 10^{-6} \quad (3.43)$$

Η τιμή αυτή της παραμόρφωσης είναι επίσης χαμηλή. Ισχύει και πάλι το προηγούμενο σχόλιο.

Ακολουθως, εξετάζουμε τώρα την επίδραση των μηχανικών τάσεων στην επιτάχυνση που καταγράφει το όργανο. Επιλέγουμε αρχικά την χαμηλότερη συχνότητα διέγερσης, δηλαδή 79,18Hz. Τα αποτελέσματα αναγράφονται στον ακόλουθο πίνακα:

*Πίνακας 5 επίδραση της ανάρτησης μάζας στην ταλάντωση, συχνότητα 79,18 Hz*

	Μάζα (g)	Πλάτος, p-p (mV)	f Απόκ/ f Διέγ	f Απόκ (Hz)	a max (m/s <sup>2</sup> )	x max (μm)
1	0,00	26	4	316,72	1,275	0,3218
2	10,00	5	4	316,72	0,245	0,0619
3	20,00	5	4	316,72	0,245	0,0619
4	30,00	4	4	316,72	0,196	0,0495
5	40,00	5	4	316,72	0,245	0,0619
6	50,00	3	4	316,72	0,147	0,0371
7	60,00	3	4	316,72	0,147	0,0371
8	70,00	3	4	316,72	0,147	0,0371

Στην τελευταία στήλη αναγράφεται η μέγιστη μετατόπιση κατά την ταλάντωση, αν θεωρήσουμε πως με ικανοποιητική προσέγγιση η ταλάντωση είναι ημιτονοειδής. Κατά τα

γνωστά, όταν έχουμε ημιτονοειδή ταλάντωση, η μέγιστη ταχύτητα δίνεται από η σχέση  $V_{\max}=\omega \cdot \chi_{\max}$  και η μέγιστη επιτάχυνση από τη σχέση  $a_{\max}=\omega^2 \cdot \chi_{\max}$  οπότε από την τελευταία αυτή σχέση προκύπτει η σχέση που δίνει τη μέγιστη απομάκρυνση στην τελευταία στήλη.

Οι υπόλοιποι πίνακες, για τις άλλες συχνότητες παρατίθενται αμέσως μετά:

*Πίνακας 6 επίδραση της ανάρτησης μάζας στην ταλάντωση, συχνότητα 87,40 Hz*

	Μάζα (g)	Πλάτος, p-p (mV)	f Απόκ/ f Διέγ	f Απόκ (Hz)	a max (m/s <sup>2</sup> )	x max (μm)
1	0,00	26	2	174,80	1,275	1,057
2	10,00	14	2	174,80	0,686	0,569
3	20,00	4	2	174,80	0,196	0,163
4	30,00	4	2	174,80	0,196	0,163
5	40,00	6	2	174,80	0,294	0,244
6	50,00	4	2	174,80	0,196	0,163
7	60,00	3	2	174,80	0,147	0,122
8	70,00	3	2	174,80	0,147	0,122

*Πίνακας 7 επίδραση της ανάρτησης μάζας στην ταλάντωση, συχνότητα 158,00 Hz*

	Μάζα (g)	Πλάτος, p-p (mV)	f Απόκ/ f Διέγ	f Απόκ (Hz)	a max (m/s <sup>2</sup> )	x max (μm)
1	0,00	76	2	316,00	3,725	0,945
2	10,00	14	2	316,00	0,686	0,174
3	20,00	21	2	316,00	1,029	0,261
4	30,00	42	2	316,00	2,059	0,522
5	40,00	25	2	316,00	1,225	0,311
6	50,00	28	2	316,00	1,373	0,348
7	60,00	28	2	316,00	1,373	0,348
8	70,00	17	2	316,00	0,833	0,211

*Πίνακας 8 επίδραση της ανάρτησης μάζας στην ταλάντωση, συχνότητα 279,89 Hz*

	Μάζα (g)	Πλάτος, p-p (mV)	f Απόκ/ f Διέγ	f Απόκ (Hz)	a max (m/s <sup>2</sup> )	x max (μm)
1	0,00	31	2	279,00	1,520	0,494
2	10,00	5	2	279,00	0,245	0,080
3	20,00	5	2	279,00	0,245	0,080
4	30,00	5	2	279,00	0,245	0,080
5	40,00	4	2	279,00	0,196	0,064
6	50,00	3	2	279,00	0,147	0,048
7	60,00	3	2	279,00	0,147	0,048
8	70,00	3	2	279,00	0,147	0,048

Πίνακας 9 επίδραση της ανάρτησης μάζας στην ταλάντωση, συχνότητα 317,03 Hz

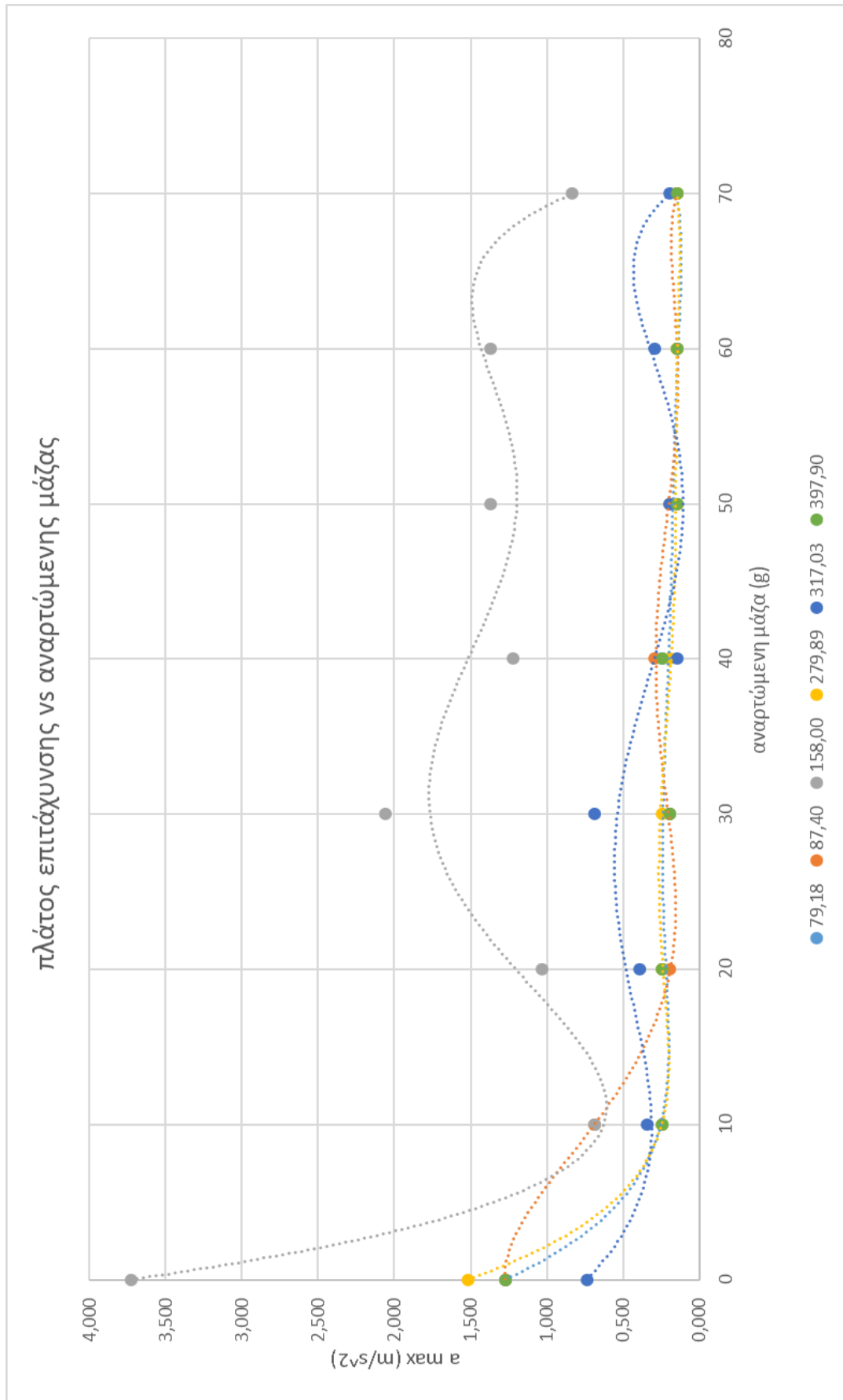
	Μάζα (g)	Πλάτος, p-p (mV)	f Απόκ/ f Διέγ	f Απόκ (Hz)	a max (m/s <sup>2</sup> )	x max (μm)
1	0,00	15	1	317,03	0,735	0,185
2	10,00	7	1	317,03	0,343	0,086
3	20,00	8	1	317,03	0,392	0,099
4	30,00	14	1	317,03	0,686	0,173
5	40,00	3	1	317,03	0,147	0,037
6	50,00	4	1	317,03	0,196	0,049
7	60,00	6	1	317,03	0,294	0,074
8	70,00	4	1	317,03	0,196	0,049

Πίνακας 70 επίδραση της ανάρτησης μάζας στην ταλάντωση, συχνότητα 397,90 Hz

	Μάζα (g)	Πλάτος, p-p (mV)	f Απόκ/ f Διέγ	f Απόκ (Hz)	a max (m/s <sup>2</sup> )	x max (μm)
1	0,00	55	2	795,80	2,696	0,108
2	10,00	15	2	795,80	0,735	0,029
3	20,00	20	2	795,80	0,980	0,039
4	30,00	14	2	795,80	0,686	0,027
5	40,00	14	2	795,80	0,686	0,027
6	50,00	16	2	795,80	0,784	0,031
7	60,00	18	2	795,80	0,882	0,035
8	70,00	18	2	795,80	0,882	0,035

Συγκεντρώνοντας τη συσχέτιση της μέγιστης επιτάχυνσης και της μάζας που αναρτάται, προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα:





Σχήμα 33: Συσχέτιση της μάζας που αναρτάται με τη μέγιστη επιτάχυνση της ταλάντωσης

Είναι φανερό, σε όλες τις περιπτώσεις, πως ακόμα και η ανάρτηση μιας σχετικά μικρού μεγέθους μάζας προκαλεί απότομη μείωση της επιτάχυνσης.

Αν, ενώ έχει αναρτηθεί η μάζα, εξεταστεί η περιοχή συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα της διέγερσης, παρατηρούμε πως σε μια κοντινή συχνότητα, διαφορετική από όσες αναφέρονται στο σχετικό πίνακα παρατηρείται ένα μέγιστο της επιτάχυνσης.

Για παράδειγμα, στη δεύτερη μικρότερη συχνότητα στην οποία έχουμε τοπικό μέγιστο και η οποία είναι στην περιοχή των 87 με 87,5 Hz, όταν αναρτηθεί μάζα 10g, παρουσιάζεται νέο μέγιστο στη συχνότητα 89,94 Hz. Άρα δηλαδή η ανάρτηση της μάζας, όπως και άλλες μικρές αλλαγές, όπως ήδη αναφέρθηκε στα σχόλια αυτής της σειράς μετρήσεων, αλλάζουν κατά πολύ την απόκριση του συστήματος. **Άρα, με αυτήν την πειραματική διαδικασία, δεν είναι δυνατόν να συσχετίσουμε τις εσωτερικές μηχανικές τάσεις που αναπτύσσονται εντός του χάλυβα με μεταβολή της μαγνητοσυστολής.**

Η υψηλότερη τιμή επιτάχυνσης που κατεγράφη σε αυτή τη σειρά πειραμάτων είναι περίπου  $4,4\text{m/s}^2$ , για μηδενικό φορτίο στο ελεύθερο άκρο και συχνότητα διέγερσης 157Hz, δηλαδή τιμή που αντιστοιχεί περίπου στο 45% της επιτάχυνσης της βαρύτητας.

Επιπλέον, η υψηλότερη τιμή της απομάκρυνσης είναι λίγο περισσότερο από 1μm, που αντιστοιχεί σε μηδενικό φορτίο στο ελεύθερο άκρο και συχνότητα διέγερσης 87,40Hz.

### 3.5 Επίδραση σταθερού μαγνητικού πεδίου στην ταλάντωση της λάμας

Μελετάται η επίδραση που έχει η επιβολή σταθερού μαγνητικού πεδίου στη λάμα ως επιπρόσθετο στο εναλλασσόμενο πεδίο το οποίο προέρχεται από το κινητό πηνίο. Πηγή του πεδίου αυτού είναι ο πεταλοειδής ηλεκτρομαγνήτης που περιγράφηκε στην αρχή του πειραματικού μέρους, ο οποίος τοποθετείται πάνω στη λάμα, έτσι ώστε να είναι στο μέσο του πλάτους της λάμας, για λόγους συμμετρίας. Η προβολή του κέντρου βάρους του στο επίπεδο της λάμας απέχει 20mm από την πάκτωση, κατά τα άλλα η γεωμετρία της διάταξης και το ρεύμα παραμένουν ίδια όπως στα προηγούμενα.

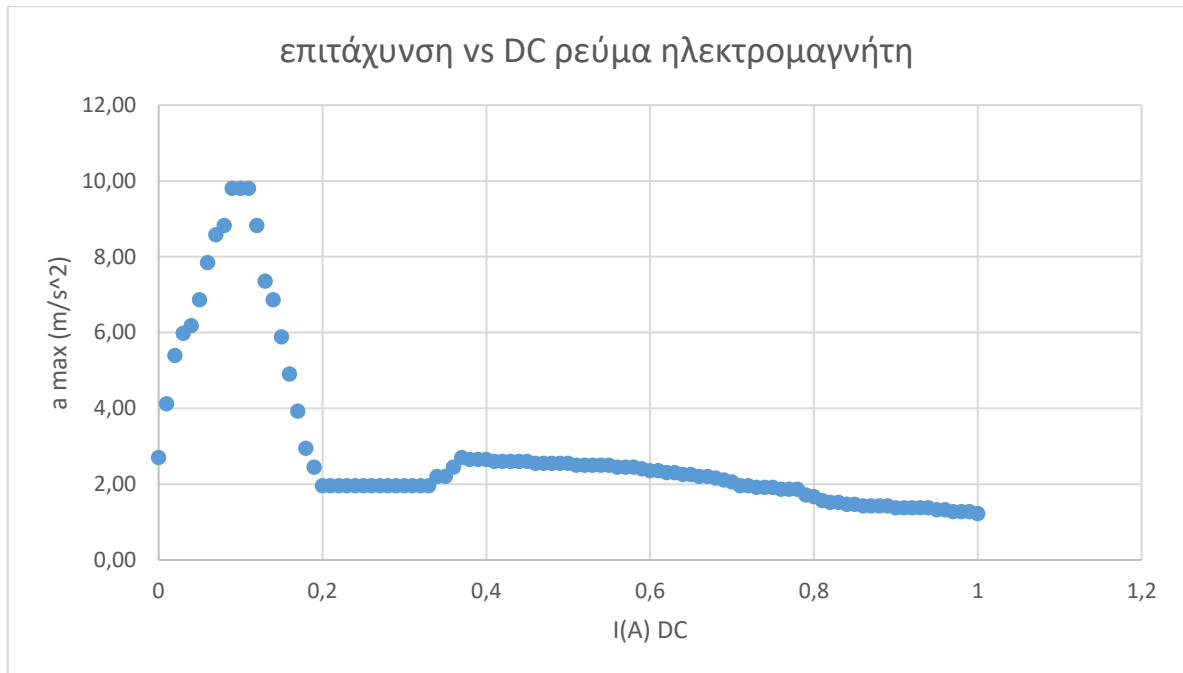
Μια από τις πρώτες συχνότητες διέγερσης για τις οποίες η επιτάχυνση παρουσιάζει τοπικό μέγιστο είναι 217,43Hz. Σημειώνουμε πως η συχνότητα αυτή δε βρίσκεται κοντά σε κάποια από τις συχνότητες του πίνακα 1, γιατί η μάζα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη διαφοροποιεί το σύστημα που ταλαντώνεται, με ανάλογο τρόπο όπως η ανάρτηση μάζας στο ελεύθερο άκρο στην προηγούμενη σειρά μετρήσεων. Σημειώνεται πως η συχνότητα της ταλάντωσης ταυτίζεται με τη συχνότητα της διέγερσης στην περίπτωση αυτή. Ο επόμενος πίνακας δείχνει τη συσχέτιση μεταξύ του ρεύματος στα τυλίγματα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη και της ένδειξης του παλμογράφου, συνεπώς και της επιτάχυνσης.

Πίνακας 11: Καταγραφή επιτάχυνσης από τη βηματική αύξηση του ρεύματος DC από 0 ως 1 A, με βήμα 0,01A ( $f=217\text{Hz}$ )

I (A)	Πλάτος, p-p (mV)	a max (m/s <sup>2</sup> )	I (A)	Πλάτος, p-p (mV)	a max (m/s <sup>2</sup> )
0	55	2,70			
0,01	84	4,12	0,51	51	2,50
0,02	110	5,39	0,52	51	2,50

0,03	122	5,98	0,53	51	2,50
0,04	126	6,18	0,54	51	2,50
0,05	140	6,86	0,55	51	2,50
0,06	160	7,84	0,56	50	2,45
0,07	175	8,58	0,57	50	2,45
0,08	180	8,82	0,58	50	2,45
0,09	200	9,80	0,59	49	2,40
0,10	200	9,80	0,60	48	2,35
0,11	200	9,80	0,61	48	2,35
0,12	180	8,82	0,62	47	2,30
0,13	150	7,35	0,63	47	2,30
0,14	140	6,86	0,64	46	2,25
0,15	120	5,88	0,65	46	2,25
0,16	100	4,90	0,66	45	2,21
0,17	80	3,92	0,67	45	2,21
0,18	60	2,94	0,68	44	2,16
0,19	50	2,45	0,69	43	2,11
0,20	40	1,96	0,70	42	2,06
0,21	40	1,96	0,71	40	1,96
0,22	40	1,96	0,72	40	1,96
0,23	40	1,96	0,73	39	1,91
0,24	40	1,96	0,74	39	1,91
0,25	40	1,96	0,75	39	1,91
0,26	40	1,96	0,76	38	1,86
0,27	40	1,96	0,77	38	1,86
0,28	40	1,96	0,78	38	1,86
0,29	40	1,96	0,79	35	1,72
0,30	40	1,96	0,80	34	1,67
0,31	40	1,96	0,81	32	1,57
0,32	40	1,96	0,82	31	1,52
0,33	40	1,96	0,83	31	1,52
0,34	45	2,21	0,84	30	1,47
0,35	45	2,21	0,85	30	1,47
0,36	50	2,45	0,86	29	1,42
0,37	55	2,70	0,87	29	1,42
0,38	54	2,65	0,88	29	1,42
0,39	54	2,65	0,89	29	1,42
0,40	54	2,65	0,90	28	1,37
0,41	53	2,60	0,91	28	1,37
0,42	53	2,60	0,92	28	1,37
0,43	53	2,60	0,93	28	1,37
0,44	53	2,60	0,94	28	1,37
0,45	53	2,60	0,95	27	1,32
0,46	52	2,55	0,96	27	1,32
0,47	52	2,55	0,97	26	1,27

0,48	52	2,55	0,98	26	1,27
0,49	52	2,55	0,99	26	1,27
0,50	52	2,55	1,00	25	1,23

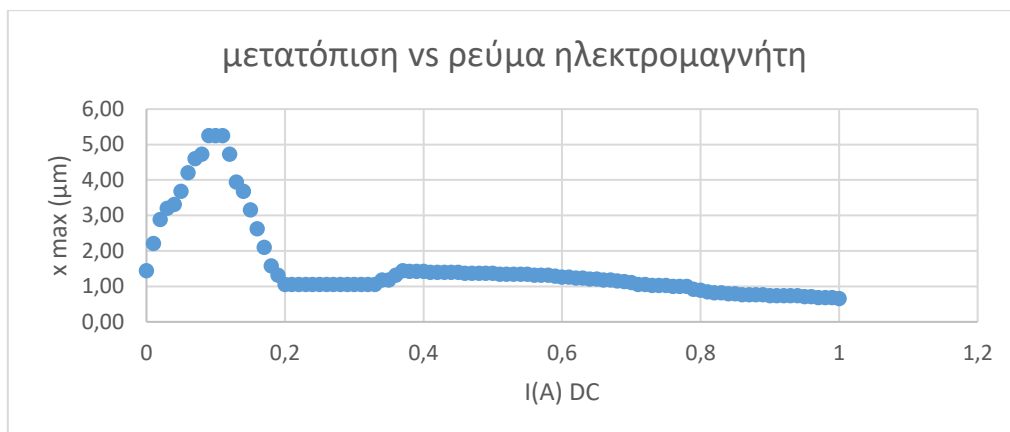


Σχήμα 34: Εξάρτηση της επιτάχυνσης από το ρεύμα DC που διαρρέει τα τυλίγματα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη ( $f=217\text{Hz}$ )

Παρατηρήσεις:

- Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης φτάνει τα  $9,8\text{m/s}^2$  (για ρεύμα από 0,08A έως 0,10A) δηλαδή όσο και η βαρυτική επιτάχυνση, περισσότερο από 4 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή για μηδενικό ρεύμα.
- Όσο αυξάνεται περαιτέρω το ρεύμα, η επιτάχυνση μειώνεται, μέχρι σημείου να ελαττώνεται περισσότερο και από την αρχική της τιμή.
- Η συχνότητα στην οποία παρουσιάζεται το τοπικό μέγιστο παραμένει αμετάβλητη, ανεξάρτητα από την αύξηση του ρεύματος
- Η ταλάντωση, ειδικά όταν μεγιστοποιείται γίνεται πολύ εύκολα αντιληπτή με απλή επαφή του χεριού στις κάθετες έδρες της λάμας
- Θεωρώντας απλή ημιτονοειδή ταλάντωση, το αντίστοιχο γράφημα της μετατόπισης σε σχέση με το ρεύμα DC έχει ακριβώς όμοια μορφή όπως το προηγούμενο και η μέγιστη μετατόπιση είναι:

$$x_{max} = a_{max} / (4 * \pi^2 * (217,43)^2) \quad (3.44)$$



Σχήμα 35: Εξάρτηση της μετατόπισης από το ρεύμα DC που διαρρέει τα τυλίγματα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη ( $f=217\text{Hz}$ )

Για ρεύμα 0,1 A προκύπτει ταλάντωση πλάτους 5,25  $\mu\text{m}$ . Η τιμή αυτή είναι σημαντικά αυξημένη σε σχέση με αυτή για ρεύμα 0 A.

Σε παραλλαγή της παραπάνω διάταξης με ελάχιστες διαφοροποιήσεις, προκύπτουν τελείως άλλα αποτελέσματα. Έτσι, σε σχέση με την αρχική διάταξη αλλάζει θέση μόνο ο αισθητήρας κατά 1mm (9mm από την άκρη της λάμας) και ο πεταλοειδής ηλεκτρομαγνήτης. Οι νέες δυο πρώτες συχνότητες διέγερσης στις οποίες παρουσιάζεται μέγιστο είναι οι 124Hz και 248Hz περίπου. Για συχνότητα διέγερσης 124Hz, η συχνότητα ταλάντωσης είναι 248 Hz, δηλαδή διπλάσια της διέγερσης και παρατηρείται πτώση του πλάτους της επιτάχυνσης για αύξηση του DC ρεύματος.

Αντίθετα, για συχνότητα διέγερσης 248Hz η συχνότητα ταλάντωσης είναι 248 Hz και καταγράφονται οι παρακάτω τιμές:

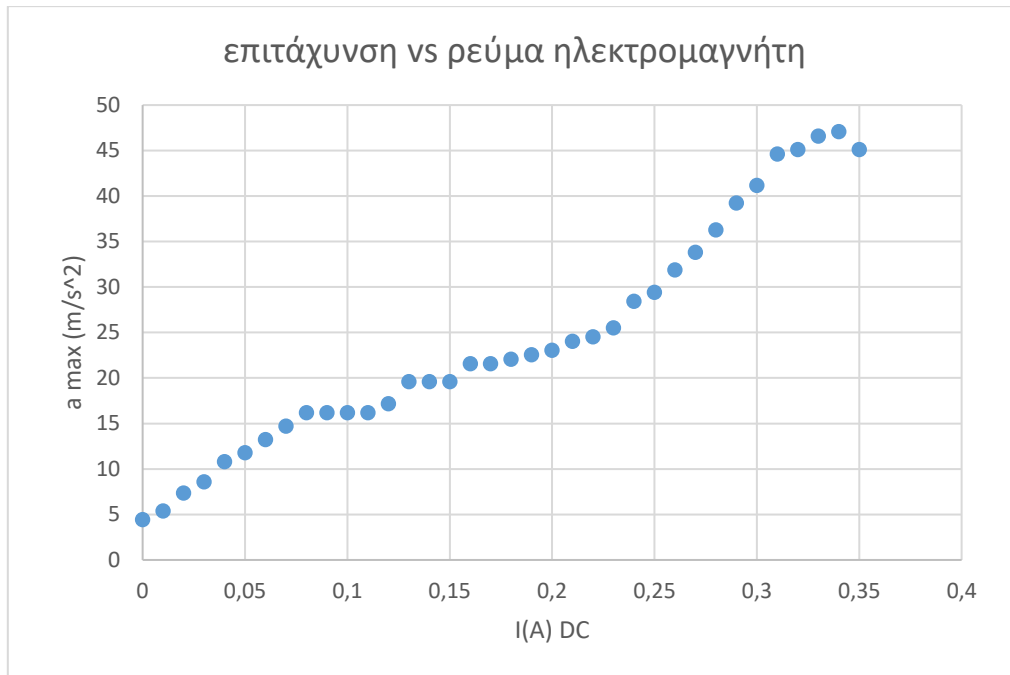
Πίνακας 12: Καταγραφή επιτάχυνσης από τη βηματική αύξηση του ρεύματος DC από 0 ως 0,35 A, με βήμα 0,01A ( $f=248\text{Hz}$ )

I (A)	Πλάτος, p-p (mV)	a max ( $\text{m/s}^2$ )	x max ( $\mu\text{m}$ )
0	90	4,41	1,82
0,01	110	5,39	2,22
0,02	150	7,35	3,03
0,03	175	8,58	3,53
0,04	220	10,78	4,44
0,05	240	11,76	4,85
0,06	270	13,24	5,45
0,07	300	14,71	6,06
0,08	330	16,18	6,66
0,09	330	16,18	6,66
0,10	330	16,18	6,66
0,11	330	16,18	6,66
0,12	350	17,16	7,07
0,13	400	19,61	8,08
0,14	400	19,61	8,08

0,15	400	19,61	8,08
0,16	440	21,57	8,88
0,17	440	21,57	8,88
0,18	450	22,06	9,08
0,19	460	22,55	9,29
0,20	470	23,04	9,49
0,21	490	24,02	9,89
0,22	500	24,51	10,09
0,23	520	25,49	10,50
0,24	580	28,43	11,71
0,25	600	29,41	12,11
0,26	650	31,86	13,12
0,27	690	33,82	13,93
0,28	740	36,27	14,94
0,29	800	39,22	16,15
0,30	840	41,18	16,96
0,31	910	44,61	18,37
0,32	920	45,10	18,57
0,33	950	46,57	19,18
0,34	960	47,06	19,38
0,35	920	45,10	18,57

Παρατηρήσεις:

- Η μέγιστη επιτάχυνση είναι περίπου 5 φορές μεγαλύτερη από ότι στο προηγούμενο παράδειγμα, αν και οι συχνότητες διέγερσης διαφέρουν λίγο, ακόμα δε λιγότερο διαφέρει η γεωμετρία.
- Ανάλογο είναι και το αποτέλεσμα για τη μετατόπιση, περίπου 20μm δηλαδή 4 φορές μεγαλύτερη.
- Μετά την τιμή DC ρεύματος 0,34 A παρατηρείται μείωση του πλάτους της ταλάντωσης.
- Κατά τη μείωση του DC ρεύματος αλλάζουν τα αποτελέσματα της καταγραφόμενης επιτάχυνσης.



Σχήμα 36: Εξάρτηση της επιτάχυνσης από το ρεύμα DC που διαρρέει τα τυλίγματα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη ( $f=248\text{Hz}$ )



Σχήμα 37: Διάταξη με τα πηνία και τον αισθητήρα επιτάχυνσης στις άκρες της λάμας πακτωμένης λάμας

Στο ανωτέρω σχήμα απεικονίζεται μια διαφορετική διάταξη των πηνίων. Συγκεκριμένα, το κινητό πηνίο βρίσκεται μεταξύ των σκελών του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη. Άρα οι μαγνητικές γραμμές που οφείλονται στο σταθερό μαγνητικό πεδίο διέρχονται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό τους από την εσωτερική διατομή του κινητού πηνίου. Άρα, σε σχέση με προηγουμένως, στην περιοχή του υπό εξέταση υλικού που υπόκειται σε μεγαλύτερου πλάτους ταλάντωση που οφείλεται στο εναλλασσόμενο ρεύμα, δηλαδή στην περιοχή εντός του κινητού πηνίου υπάρχει πιο υψηλό σταθερό πεδίο, αν εξετάζονται περιπτώσεις με ίσα ρεύματα και διαφορετικές διατάξεις.

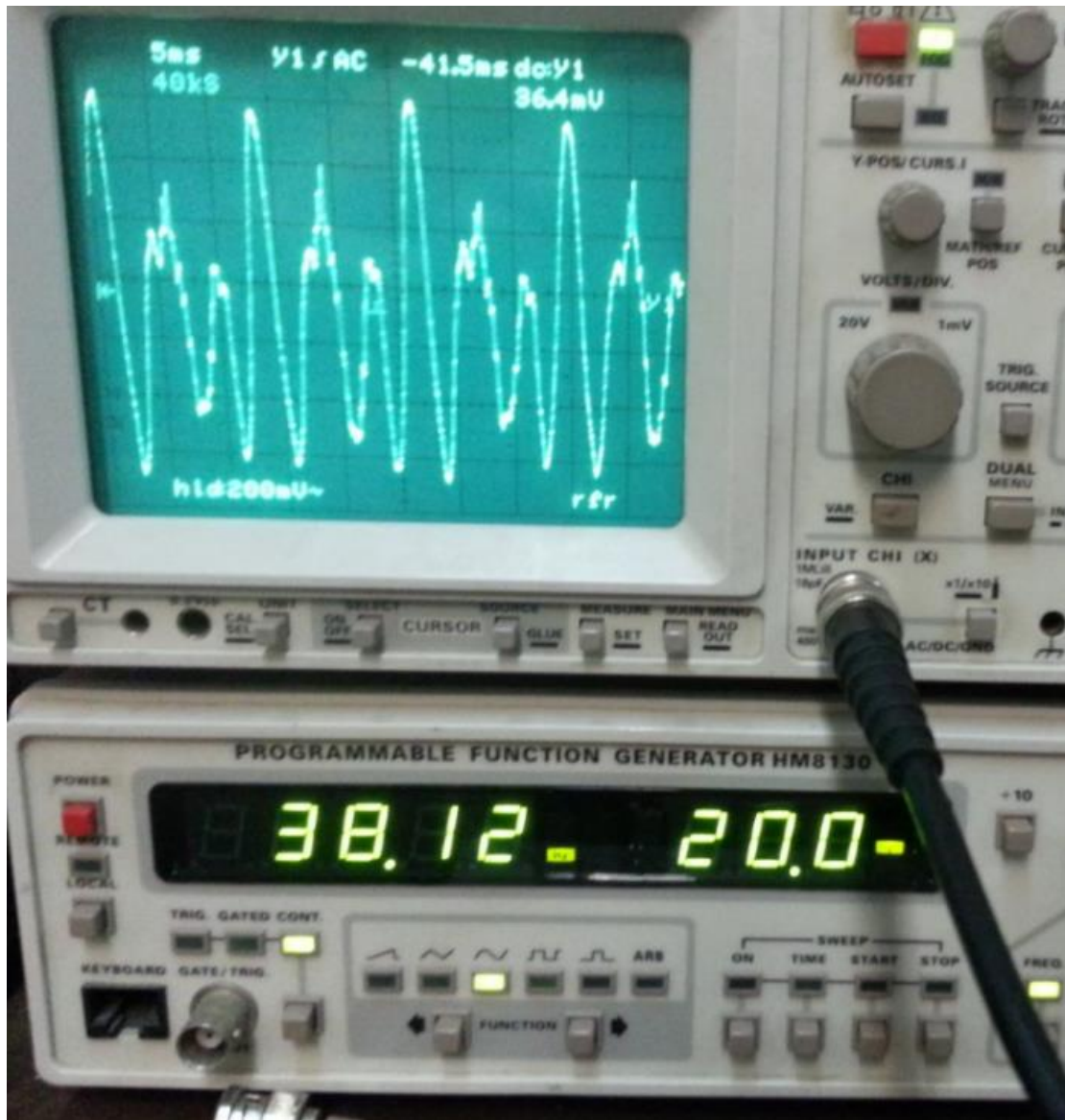
Στο φάσμα συχνοτήτων από 0 έως 2000 Hz, στις ακόλουθες παρατηρείται τοπικό μέγιστο:

*Πίνακας 83: Συχνότητες για τις οποίες μεγιστοποιείται η ταλάντωση, άνευ φορτίου, διάταξη σχήματος 23*

A/A	f Διέγ (Hz)	T (ms)	$\omega$ (rad/s)	Πλάτος, p-p (mV)	f Απόκ/ f Διέγ	f Απόκ (Hz)	a max (m/s <sup>2</sup> )	x max (μm)
1	26,35	37,95	165,6	100	4	105,4	4,90	11,2
2	39,00	25,64	245,0	1300	6	234,0	63,73	29,5
3	57,50	17,39	361,3	250	4	230,0	12,25	5,9
4	114,30	8,75	718,2	550	2	228,6	26,96	13,1
5	133,00	7,52	835,7	1000	2	266,0	49,02	17,5
6	266,00	3,76	1671,3	500	1	266,0	24,51	8,8
7	699,00	1,43	4391,9	200	1	699,0	9,80	0,5
8	1777,00	0,56	11165,2	500	1	1777,0	24,51	0,2

Παρατηρείται πολύ μεγαλύτερη επιτάχυνση σε σχέση με τις προηγούμενες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με διαφορετική διάταξη. Ενδεικτικά, παρατίθεται η ακόλουθη εικόνα από τον παλμογράφο που αντιστοιχεί στη δεύτερη κατά σειρά μέτρηση του παραπάνω πίνακα. Κάθε καρέ της οθόνης του παλμογράφου αντιστοιχεί σε 5ms (κατά τον άξονα x) και σε 200 mV (κατά τον άξονα y). Σε χρονικό διάστημα μιας περιόδου της συνάρτησης διέγερσης παρατηρείται επανάληψη της μορφής του σήματος δυο φορές και σε κάθε μία από αυτές η επιτάχυνση παρουσιάζει τρία τοπικά μέγιστα και τρία ελάχιστα. Για αυτό το λόγο, η συχνότητα απόκρισης είναι εξαπλάσια της συχνότητας διέγερσης. Βέβαια τα τοπικά μέγιστα δεν είναι ίδιου ύψους και ούτε ίδιας μορφής.





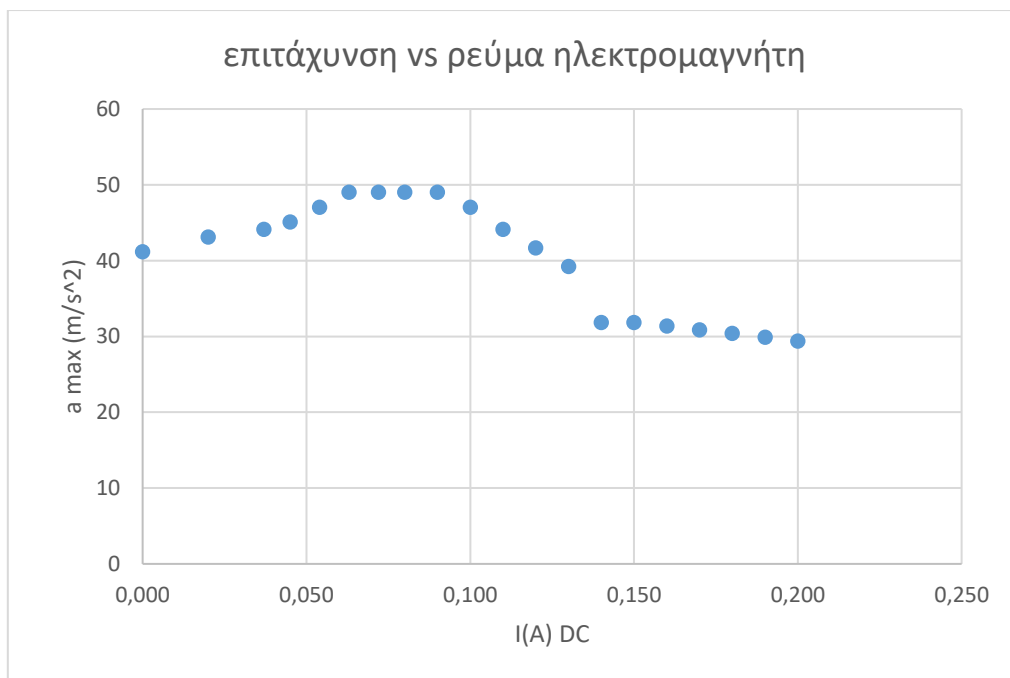
Σχήμα 38: Στιγμιότυπο από την καταγραφή της επιτάχυνσης για ημιτονοειδή διέγερση 38 Hz (διάταξη 2)

Παρατηρείται επίσης πως, για χαμηλές συχνότητες διέγερσης, έχουμε δυο διαφορετικές συχνότητες απόκρισης, συγκεκριμένα η πρώτη βρίσκεται στην περιοχή περίπου 231 Hz και η δεύτερη 266 Hz. Για τη δεύτερη γίνονται δοκιμές της επίδρασης της σταθερής συνιστώσας του ρεύματος. Ο επόμενος πίνακας δείχνει τη συσχέτιση μεταξύ του ρεύματος στα τυλίγματα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη και της ένδειξης του παλμογράφου, συνεπώς και της επιτάχυνσης και της απομάκρυνσης.

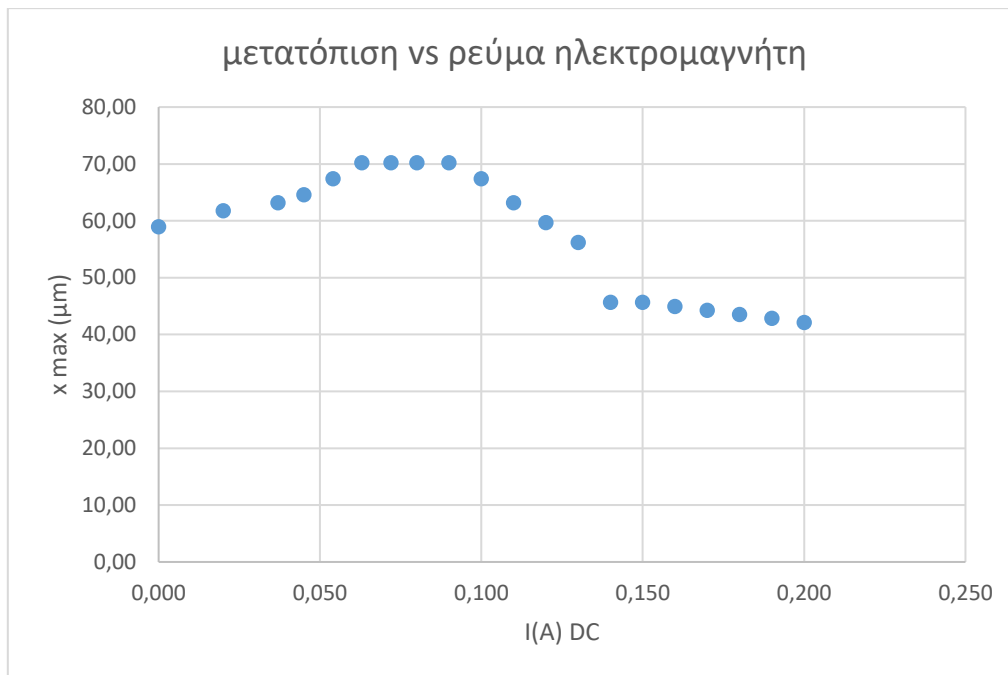
Πίνακας 94: Καταγραφή επιτάχυνσης και απομάκρυνσης με αύξηση του ρεύματος DC από 0 ως 0,2 A ( $f=133\text{Hz}$ , διάταξη 2)

I (A)	Πλάτος, p-p (mV)	a max (m/s <sup>2</sup> )	x max (μm)
0,000	840	41	58,96
0,020	880	43	61,77
0,037	900	44	63,18

0,045	920	45	64,58
0,054	960	47	67,39
0,063	1000	49	70,20
0,072	1000	49	70,20
0,080	1000	49	70,20
0,090	1000	49	70,20
0,100	960	47	67,39
0,110	900	44	63,18
0,120	850	42	59,67
0,130	800	39	56,16
0,140	650	32	45,63
0,150	650	32	45,63
0,160	640	31	44,92
0,170	630	31	44,22
0,180	620	30	43,52
0,190	610	30	42,82
0,200	600	29	42,12



Σχήμα 39: Εξάρτηση της επιτάχυνσης από το ρεύμα DC που διαρρέει τα τυλίγματα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη ( $f=133\text{Hz}$ , διάταξη 2)



Σχήμα 40: Εξάρτηση της μετατόπισης από το ρεύμα DC που διαρρέει τα τυλίγματα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη ( $f=133\text{Hz}$ , διάταξη 2)

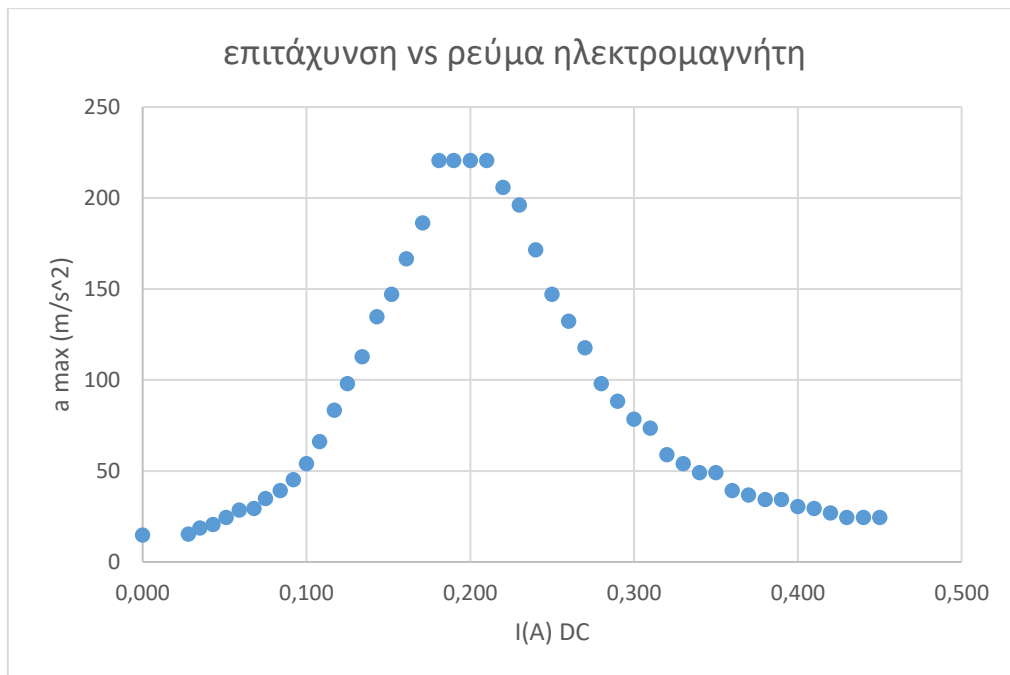
Παρατηρήσεις:

- Η αύξηση της επιτάχυνσης και της μετατόπισης είναι σε σχέση με προηγούμενες μετρήσεις μικρή, ποσοστιαία είναι περίπου 16%
- Η μέγιστη τιμή επιτάχυνσης και μετατόπισης παρουσιάζεται για τιμή DC ρεύματος μεταξύ 0,06 και 0,09A.
- Κατόπιν παρατηρείται μείωση του πλάτους της ταλάντωσης.

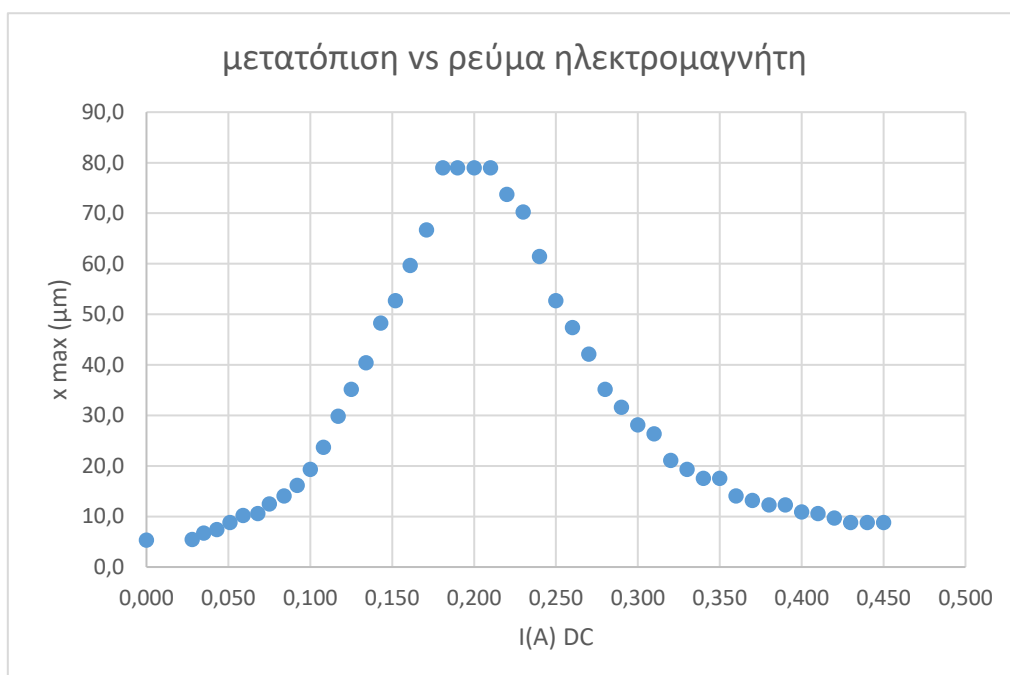
Πίνακας 15: Καταγραφή επιτάχυνσης και απομάκρυνσης με αύξηση του ρεύματος DC από 0 ως 0,2 A ( $f=266\text{Hz}$ , διάταξη 2)

I (A)	Πλάτος, p-p (mV)	a max (m/s <sup>2</sup> )	x max (μm)
0,000	300	15	5,3
0,028	310	15	5,4
0,035	380	19	6,7
0,043	420	21	7,4
0,051	500	25	8,8
0,059	580	28	10,2
0,068	600	29	10,5
0,075	710	35	12,5
0,084	800	39	14,0
0,092	920	45	16,1
0,100	1100	54	19,3
0,108	1350	66	23,7
0,117	1700	83	29,8
0,125	2000	98	35,1

0,134	2300	113	40,4
0,143	2750	135	48,3
0,152	3000	147	52,6
0,161	3400	167	59,7
0,171	3800	186	66,7
0,181	4500	221	79,0
0,190	4500	221	79,0
0,200	4500	221	79,0
0,210	4500	221	79,0
0,220	4200	206	73,7
0,230	4000	196	70,2
0,240	3500	172	61,4
0,250	3000	147	52,6
0,260	2700	132	47,4
0,270	2400	118	42,1
0,280	2000	98	35,1
0,290	1800	88	31,6
0,300	1600	78	28,1
0,310	1500	74	26,3
0,320	1200	59	21,1
0,330	1100	54	19,3
0,340	1000	49	17,5
0,350	1000	49	17,5
0,360	800	39	14,0
0,370	750	37	13,2
0,380	700	34	12,3
0,390	700	34	12,3
0,400	620	30	10,9
0,410	600	29	10,5
0,420	550	27	9,7
0,430	500	25	8,8
0,440	500	25	8,8
0,450	500	25	8,8



Σχήμα 41: Εξάρτηση της επιτάχυνσης από το ρεύμα DC που διαρρέει τα τυλίγματα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη ( $f=266\text{Hz}$ , διάταξη 2)



Σχήμα 42: Εξάρτηση της μετατόπισης από το ρεύμα DC που διαρρέει τα τυλίγματα του πεταλοειδούς ηλεκτρομαγνήτη ( $f=266\text{Hz}$ , διάταξη 2)

Παρατηρήσεις:

- Η αύξηση της επιτάχυνσης και της μετατόπισης είναι σε σχέση με προηγούμενες μετρήσεις πάρα πολύ μεγάλη, ποσοστιαία είναι περίπου 1400%

- Η μέγιστη τιμή επιτάχυνσης (22,5g) και μετατόπισης (80 μm) παρουσιάζεται για τιμή DC ρεύματος μεταξύ 0,18 και 0,21A. Η ταλάντωση είναι πολύ έντονη, γίνεται άμεσα αντιληπτή με την ακοή και την αφή.
- Η παραμόρφωση (strain) που αντιστοιχεί σε μεγέθυνση 80 μm της λάμας, αν θεωρηθεί πως όλο το μήκος της υφίσταται επιμήκυνση είναι:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{80}{300000} = 2.67 * 10^{-4} \text{ ή } 0,0267\% \quad (3.45)$$

Αν, αντίθετα, θεωρηθεί πως μόνο το μήκος μεταξύ επιταχυνσιόμετρου και κινητού πηνίου υπόκειται σε ταλάντωση, τότε η παραμόρφωση είναι

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{80}{(202 - 15 - 20) * 1000} = 4,79 * 10^{-4} \text{ ή } 0,0479\% \quad (3.46)$$

Σε αμφότερες τις περιπτώσεις, η παραμόρφωση είναι στην ελαστική περιοχή του χάλυβα, θεωρώντας πως η πλαστική περιοχή αρχίζει στο σημείο στο οποίο η μόνιμη παραμόρφωση γίνεται ίση με 0,2%. Αυτή η τιμή της μόνιμης παραμόρφωσης είναι σημαντικά υψηλότερη (περίπου από 4 έως 8 φορές) από τις τιμές που υπολογίστηκαν παραπάνω και άρα είναι αδύνατον ένα υλικό με τόσο χαμηλή παραμόρφωση να υποστεί μόνιμη παραμόρφωση. Λαμβάνεται υπόψιν πως το υλικό είναι μαλακός χάλυβας.

- Αν θεωρηθεί σύμφωνα με τα προηγούμενα το μήκος που υφίσταται επιμήκυνση είναι 4,4mm πλησίον:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{80}{44000} = 1,818 * 10^{-3} \text{ ή } 0,182\% \quad (3.47)$$

Η τιμή αυτή της παραμόρφωσης είναι πολύ υψηλή. Ο ηλεκτρικός χάλυβας είναι σχετικά μαλακό υλικό και με μία τέτοια παραμόρφωση εισέρχεται στην πλαστική περιοχή. Σε μία τέτοια περίπτωση ο νόμος του Hooke παύει να ισχύει και η εσωτερική τάση γίνεται ίση με:

$$\sigma = E\varepsilon^n \quad (3.48)$$

Αυτή η τιμή παραμόρφωσης είναι πάνω από το όριο διαρροής για πολλούς μαλακούς χάλυβες. Για παράδειγμα, ένας από τους πλέον διαδεδομένους χάλυβες κατασκευών, ο χάλυβας St37 έχει όριο διαρροής τα 235MPa.

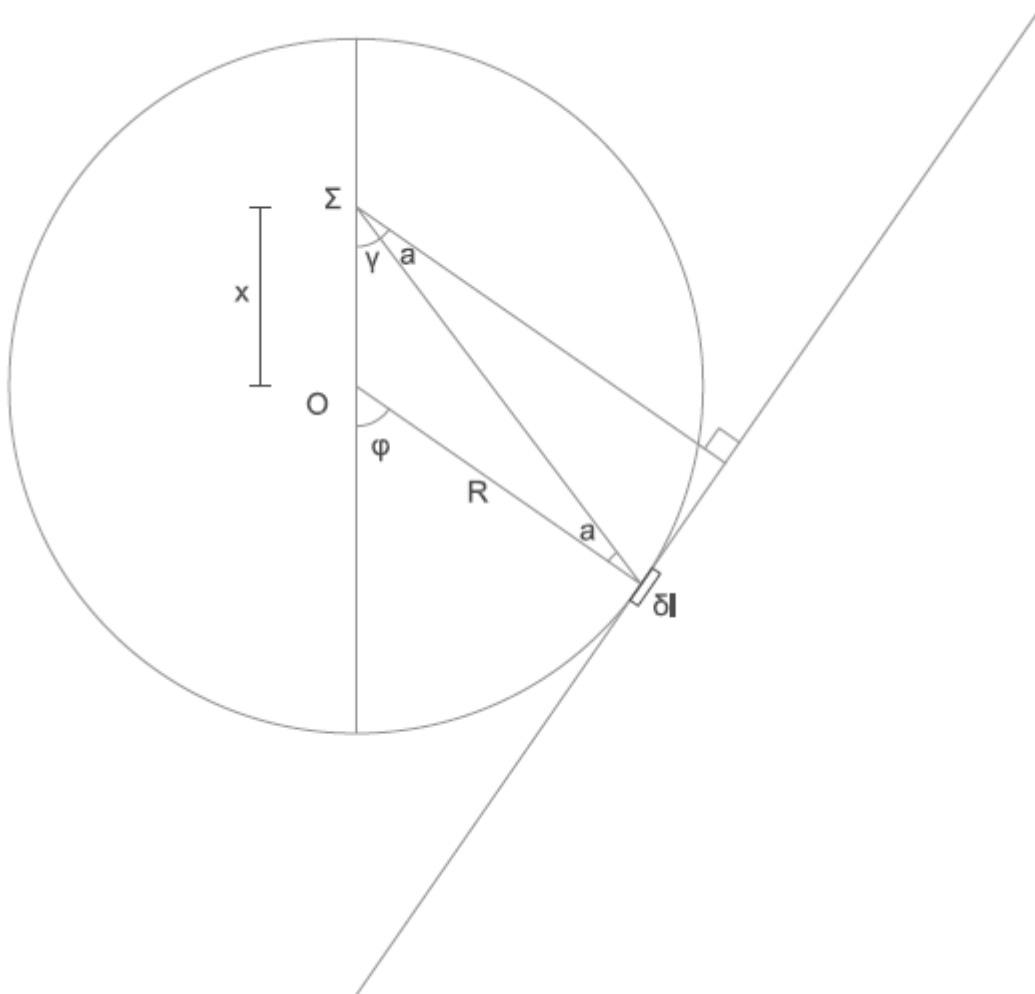
Ο υψηλός ρυθμός με τον οποίο παραμορφώνεται το υλικό συμβάλλει περαιτέρω στη μόνιμη παραμόρφωση του υλικού.

Προκύπτει το ακόλουθο ενδιαφέρον συμπέρασμα. Με τον παρακάτω τρόπο είναι δυνατόν να επιτευχθεί τοπική σκλήρυνση σε όλο τον όγκο (bulk) ενός σιδηρομαγνητικού υλικού και όχι μόνο επιφανειακά, χωρίς να αυξηθεί η θερμοκρασία του.

Έστω ένα χαλύβδινο αντικείμενο, για απλότητα έστω κυκλικής διατομής που κατασκευάζεται από μαλακό χάλυβα. Αν για κάποιο λόγο είναι σκόπιμο το αντικείμενο αυτό να είναι σκληρότερο σε μία περιοχή του (και όχι σε όλη την έκτασή του) και στη συγκεκριμένη περιοχή σε όλο το βάθος και όχι μόνο επιφανειακά, τότε μπορεί να γίνει δοκιμή της μεθόδου

που ακολουθήθηκε παραπάνω. Δηλαδή μέσω ενός κατάλληλου πηνίου και γεννήτριας ηλεκτρικού ρεύματος δημιουργούμε κατάλληλο μαγνητικό πεδίο στην περιοχή που ενδιαφέρει.

Για παράδειγμα, έστω ότι το πηνίο εκφυλίζεται σε απλό κυκλικό αγωγό, δηλαδή έχει μόνο μία σπείρα, το κέντρο του βρίσκεται επί του άξονα του κυλίνδρου και σε επίπεδο κάθετο στον άξονα αυτό.



Σχήμα 43: Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου σε απόσταση  $x$  από το κέντρο κυκλικού αγωγού ακτίνας  $R$

Επισημαίνεται πως το πεδίο δεν είναι ομογενές. Αντίθετα, είναι πιο υψηλό όσο αυξάνεται η απόσταση από τον άξονα του κυλίνδρου. Αποδεικνύεται με βάση το νόμο των Biot και Savart πως σε σημείο που απέχει απόσταση  $x$  από το κέντρο κυκλικού αγωγού ακτίνας  $R$  και βρίσκεται στο επίπεδο του αγωγού, το μαγνητικό πεδίο έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο και μέτρο που δίδεται από το παρακάτω ολοκλήρωμα:

$$H(x) = \frac{R * i}{2\pi} \int_0^{\pi} \left( \frac{R}{r^3} + \frac{x * \cos\varphi}{r^3} \right) d\varphi \quad (3.49)$$

Όπου:

- $i$  η ένταση του ρεύματος
- $R$  η ακτίνα του κυκλικού αγωγού
- $\varphi$  είναι η γωνία που σχηματίζει το στοιχειώδες τμήμα του αγωγού με την ευθεία που συνδέει το κέντρο του κύκλου με το σημείο στο οποίο υπολογίζεται το μαγνητικό πεδίο
- $r$  είναι η απόσταση του στοιχειώδους τμήματος  $dl$  του αγωγού από το σημείο  $\Sigma$ , στο οποίο υπολογίζεται το μαγνητικό πεδίο
- $x$  ή  $(O\Sigma)$  είναι η απόσταση του σημείου  $\Sigma$  από το κέντρο του κύκλου

Η απόδειξη της παραπάνω σχέσης είναι η ακόλουθη:

Η απόσταση  $r$  δίνεται από τη σχέση:

$$r^2 = x^2 + R^2 - 2xR\cos\varphi \quad (3.50)$$

Όπως προκύπτει από το νόμο των συνημιτόνων για τα τρίγωνα. Άρα το  $r$  εκφράζεται ως συνάρτηση του  $x$  και της γωνίας  $\varphi$ .

Στην αρχική κατώτατη θέση, ισχύει πως το εσωτερικό γινόμενο  $\vec{dl} \times \vec{u}$  έχει μέτρο  $dl$  και κατεύθυνση από το κείμενο προς τον αναγνώστη, επειδή  $\vec{dl} \perp \vec{u}$ . Σε τυχαία θέση  $\Sigma$ , η μεν κατεύθυνση είναι η ίδια, αλλά το μέτρο ισούται με  $dl \cdot \cos\alpha$ . Το συνημίτονο της γωνίας  $\alpha$  εκφράζεται επίσης ως συνάρτηση του  $x$  και της γωνίας  $\varphi$ .

Για το ίδιο τρίγωνο, από το νόμο των ημιτόνων, προκύπτει πως:

$$\frac{x}{\sin\alpha} = \frac{R}{\sin\gamma} = \frac{r}{\sin(180 - \varphi)} = \frac{r}{\sin\varphi}, \text{ άρα}$$
$$\sin\alpha = \frac{x}{r} * \sin\varphi \quad (3.51)$$

Η γωνία  $\alpha$  είναι οξεία οπότε το συνημίτονό της έχει θετική τιμή, άρα:

$$\cos\alpha = \sqrt{1 - \left(\frac{x}{r} * \sin\varphi\right)^2} \quad (3.52)$$

Και αντικαθιστώντας το  $r^2$

$$\cos\alpha = \sqrt{1 - \frac{x^2 \sin^2\varphi}{x^2 + R^2 - 2xR\cos\varphi}} \quad (3.53)$$

Άρα εκφράζεται το στοιχειώδες πεδίο ως συνάρτηση του  $x$  και της γωνίας  $\varphi$ ,  $\delta H = \delta H(x, \varphi)$

Ο νόμος των Jean Baptiste Biot και Felix Savart ορίζει πως το στοιχειώδες πεδίο δίνεται από τη σχέση [10]:

$$\vec{\delta H} = \frac{1}{4\pi r^2} * i * \vec{dl} \times \vec{u} \quad (3.54)$$



Άρα για λόγους συμμετρίας, είναι:

$$H = 2 \int_0^{\pi R} \cos\alpha * \frac{1}{4\pi r^2} * i * dl \quad (3.55)$$

Γίνεται αλλαγή διαφορικού, οπότε:

$$\frac{dl}{\pi R} = \frac{d\varphi}{\pi} \quad (3.56)$$

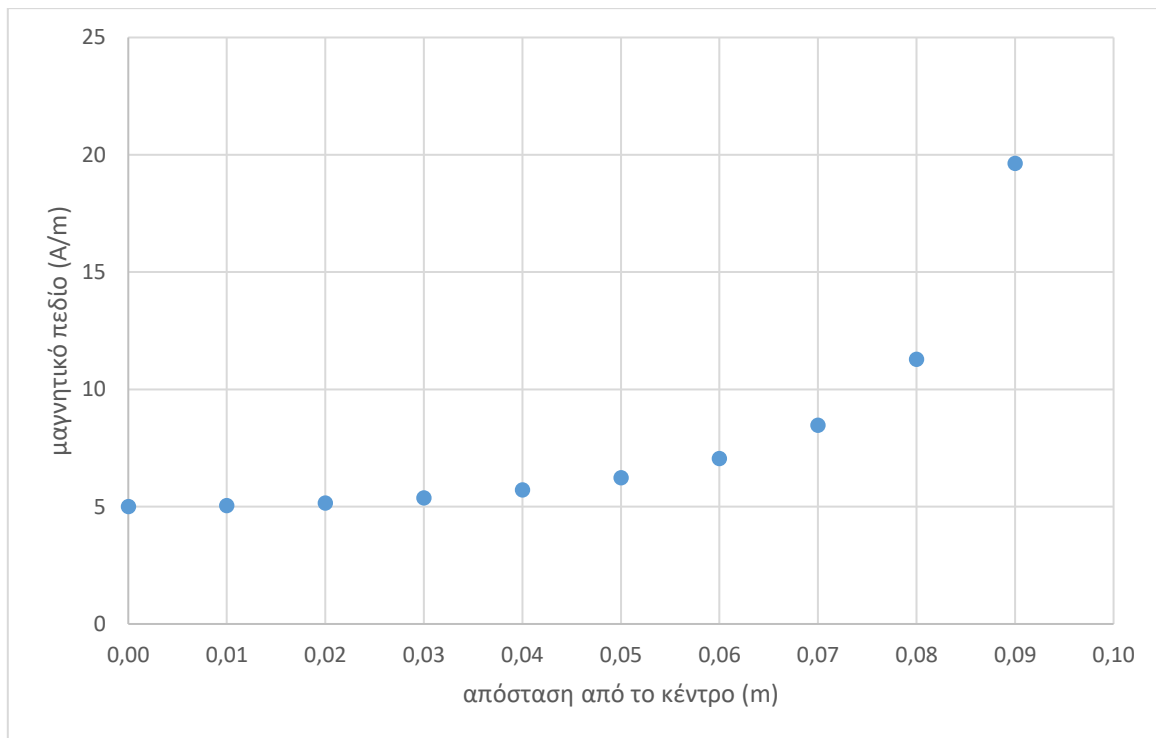
Άρα  $dl=d\varphi * R$  και αλλάζει και το άνω όριο ολοκλήρωσης από  $\pi R$  σε  $\pi$ . Άρα:

$$\begin{aligned} H(x) &= 2i \int_0^{\pi} \frac{1}{4\pi r^2} \sqrt{\frac{x^2 \cos^2 \varphi + R^2 - 2xR \cos \varphi}{x^2 + R^2 - 2xR \cos \varphi}} d\varphi \\ &= \frac{R * i}{2\pi} \int_0^{\pi} \left( \frac{R}{r^3} + \frac{x * \cos \varphi}{r^3} \right) d\varphi \end{aligned} \quad (3.57)$$

Το ολοκλήρωμα υπολογίζεται, για ευκολία, ως άθροισμα των δυο ολοκληρωμάτων μέσω του προγράμματος Mathematica και της ιστοσελίδας <http://www.wolframalpha.com>.

Προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

R (m)	x (m)	I (A)	σταθερός όρος (A*m)	1ος όρος (m <sup>-2</sup> )	2ος όρος (m <sup>-2</sup> )	πεδίο (A/m)
0,1	0,000	1	0,01592	314,2	0,0	5,000
0,1	0,010	1	0,01592	321,3	-4,8	5,038
0,1	0,020	1	0,01592	344,3	-20,4	5,156
0,1	0,030	1	0,01592	388,0	-50,6	5,369
0,1	0,040	1	0,01592	463,2	-104,7	5,707
0,1	0,050	1	0,01592	594,0	-202,7	6,228
0,1	0,060	1	0,01592	837,7	-394,6	7,053
0,1	0,070	1	0,01592	1361,0	-829,4	8,461
0,1	0,080	1	0,01592	2830,9	-2121,8	11,285
0,1	0,090	1	0,01592	10582,2	-9348,9	19,629
0,1	0,099	1	0,01592	1005100,0	-994767,0	164,455



Σχήμα 44: Κατανομή μαγνητικού πεδίου εντός κυκλικού αγωγού ακτίνας 0,1m, ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα 1 A

Επιλέγοντας ενδεικτικά ορισμένες τιμές για τα μεγέθη ( $R=0.1m$ ,  $i=1A$ ) που εμπλέκονται στην παραπάνω σχέση, προκύπτει η καμπύλη για το μαγνητικό πεδίο  $H$  σε απόσταση  $x$  από το κέντρο του αγωγού. Παρατηρείται πως το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται σημαντικά, δηλαδή σε απόσταση ίση με  $0,9R$  είναι περίπου τετραπλάσιο από το κέντρο του αγωγού, κατά συνέπεια και η μαγνητοσυστολή μεταβάλλεται σημαντικά. Όμως, σε ένα κύκλο ακτίνας ίσο με  $0,2R$  το πεδίο είναι με καλή προσέγγιση ομογενές, δηλαδή η μέγιστη από την ελάχιστη τιμή του πεδίου διαφέρουν κατά 3%, κατά συνέπεια και η μαγνητοσυστολή είναι περίπου σταθερή.

Προκειμένου να προκληθεί ταλάντωση λόγω μαγνητοσυστολικού φαινομένου, το πεδίο οφείλει να είναι περιοδικό (ημιτονοειδές, τριγωνικό, παλμικό ή και άλλης μορφής). Κατόπιν, με εξέταση του φάσματος των συχνοτήτων, εντοπίζονται οι συχνότητες στις οποίες η ταλάντωση γίνεται μέγιστη. Το σάρωμα αυτό των συχνοτήτων μπορεί να γίνει επιλέγοντας χαμηλή ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, προκειμένου οι όποιες παραμορφώσεις να είναι στην ελαστική περιοχή. Στις συχνότητες μεγιστοποίησης της ταλάντωσης, αυξάνουμε το ρεύμα διέγερσης. Αυτή είναι και η κύρια διαδικασία της σκλήρυνσης του υλικού. Παράμετροι αυτής της διαδικασίας είναι ο αριθμός των κύκλων μαγνήτισης και απομαγνήτισης που εκτελούνται, η συχνότητα και το είδος της ταλάντωσης (στην οποία πρέπει να παρατηρείται συντονισμός), το ηλεκτρικό ρεύμα και ο τρόπος απομάκρυνσής του. Συνοπτικά δηλαδή η παράμετρος είναι η συνάρτηση του ρεύματος διέγερσης του πηνίου. Το πλάτος της ταλάντωσης αυξάνει και το χαλύβδινο αντικείμενο εισέρχεται στην πλαστική περιοχή. Υπό κάποιες προϋποθέσεις, μεταλλικό (εν προκειμένω σιδηρομαγνητικό) υλικό που εισέρχεται στην πλαστική περιοχή υφίσταται ενδοτράχυνση ή εργοσκλήρυνση (work hardening), όπως χαρακτηριστικά συμβαίνει σε υλικά που διαμορφώνονται μέσω έλασης. Η απομάκρυνση του

μαγνητικού πεδίου επιφέρει μια τοπική παραμένουσα παραμόρφωση και μια παραμένουσα μαγνήτιση. Ο ρυθμός και άρα η ταχύτητα της παραμόρφωσης του υλικού σχετίζεται με τη σκληρότητα που αυτό αποκτά.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

- Η αύξηση της σκληρότητας μπορεί να επιτευχθεί μόνο στην περιοχή που ενδιαφέρει το μελετητή/σχεδιαστή του αντικειμένου.
- Η διαδικασία γίνεται σε θερμοκρασία δωματίου.
- Η αύξηση της σκληρότητας δεν αφορά βάθος της τάξης των εκατοντάδων μικρομέτρων ή λιγότερο, αλλά όλη τη διατομή του αντικειμένου.

Με τον ίδιο τρόπο, μπορεί να γίνει δοκιμή για απομάκρυνση εσωτερικών τάσεων μέσα από τον όγκο ενός σιδηρομαγνητικού υλικού. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εναλλασσόμενης φόρτισης του δοκιμίου, με φορτία που είναι αρκετά μικρότερα από αυτά που προκαλούν μόνιμη παραμόρφωση, χωρίς να ανέρχεται η θερμοκρασία του υλικού έως το σημείο ανόπτησης.

Πιθανώς οι δυο μέθοδοι να μπορούν να συνδυαστούν, δηλαδή να μεταβάλλεται η θερμοκρασία του υλικού και παράλληλα να υφίσταται εναλλασσόμενη καταπόνηση, προκειμένου να βελτιστοποιείται το αποτέλεσμα ως προς το χρόνο που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η διαδικασία και ως προς την ενέργεια που καταναλώνεται προκειμένου να ανέλθει το δοκίμιο στην επιθυμητή θερμοκρασία.

Η ενέργεια της ταλάντωσης μπορεί να υπολογιστεί, λόγω της απλής γεωμετρίας του ταλαντούμενου σώματος, από την παρακάτω σχέση:

$$E_{MHX} = \frac{1}{2} \frac{EA}{l_0} x_{max}^2 \quad (3.58)$$

Όπου:

$E_{MHX}$  η ενέργεια της ταλάντωσης

$E$  το μέτρο ελαστικότητας του σιδήρου, 210 GPa

$A$  το εμβαδόν της διατομής της λάμας,  $A = 0,5 * 30 = 15 \text{ mm}^2$

$l_0$  το αρχικό μήκος της που παραμορφώνεται, όπως παραπάνω λαμβάνεται ίσο με 167mm

$x_{max}$  το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης, 80μm

Μια πρώτη εκτίμηση που προκύπτει με αντικατάσταση είναι πως η ενέργεια της εξαναγκασμένης ταλάντωσης που εκτελεί η λάμα είναι περίπου 0,0604 J.

Επειδή όμως το μαγνητικό πεδίο φθίνει όσο η απόσταση από το κινητό πηνίο μεγαλώνει, όπως αναμένεται από τη θεωρία και φαίνεται στην παρακάτω προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου που σχηματίζεται στην περιοχή του κινητού πηνίου, συνακόλουθα φθίνει και το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής. Συνεπώς, η παραμόρφωση δεν είναι ίδια σε όλο το μήκος της λάμας. Αντίθετα είναι μεγαλύτερη πλησίον του πηνίου και μειώνεται όσο μεγαλώνει η

απόσταση της λάμας από αυτό. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, άνω του 95% της επιμήκυνσης οφείλεται στην παραμόρφωση μιας περιοχής μήκους 4,4cm.

Άρα, μια ασφαλέστερη εκτίμηση της ενέργειας της ταλάντωσης είναι:

$$E_{MHX} = \frac{1}{2} \frac{EA}{l_0} x_{max}^2 = \frac{210 * 10^9 * 0.03 * 0.0005}{2 * 44 * 10^{-3}} (80 * 10^{-6})^2 = 0.229 J \quad (3.59)$$

Άρα η ενέργεια της ταλάντωσης είναι υψηλότερη, εφόσον ο παρονομαστής του κλάσματος είναι μειωμένος.

## 4 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

### 4.1 Συμπεράσματα

Όταν δοκίμιο από νικέλιο ή κοβάλτιο κείται εντός μαγνητικού πεδίου, το οποίο είναι εναλλασσόμενο και έχει χαμηλή συχνότητα, τότε το μήκος του μεταβάλλεται με συχνότητα διπλάσια από τη συχνότητα διέγερσης. Όταν το δοκίμιο είναι από σίδηρο, η συχνότητα μπορεί να είναι είτε διπλάσια είτε τετραπλάσια από τη συχνότητα διέγερσης και αυτό εξαρτάται από το μέγεθος του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Το ηλεκτρικό ρεύμα μειώνεται περίπου γραμμικά, για πηνίο που φέρει ως πυρήνα ηλεκτρικό χάλυβα, με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης για πεδίο συχνοτήτων από 0 Hz έως 1kHz. Ο συντελεστής αυτεπαγωγής πηνίου, μεταβάλλεται έντονα με το πλάτος του ηλεκτρικού ρεύματος, στην περίπτωση της ημιτονοειδούς διέγερσής του.

Συγκρίνουμε δυο μαγνητικά κυκλώματα, το μεν πρώτο συνίσταται σε κλειστό βρόχο από υλικό υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, το δε δεύτερο από δυο τμήματα του ίδιου υλικού, τα οποία είναι σε επαφή μεταξύ τους. Αν τα μαγνητικά κυκλώματα χρησιμοποιούνται ως πυρήνας μονοφασικού μετασχηματιστή, οι ενεργειακές απώλειες και συγκεκριμένα οι απώλειες πυρήνα είναι στη δεύτερη περίπτωση πολύ υψηλές και άνω του 50%. Για το λόγο αυτό, η μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού δε μπορεί να γίνει μέσω μέτρησης της τάσης εξόδου που αποδίδει ο μετασχηματιστής, με κενό φορτίο.

Το πλάτος της εξαναγκασμένης μηχανικής ταλάντωσης που εκτελεί σιδηρομαγνητικό σώμα και προκαλείται λόγω της μαγνητοσυστολής εξαρτάται έντονα από τη συχνότητα του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Αυτό οφείλεται σε φαινόμενα συντονισμού, δηλαδή η ιδιοσυχνότητα ενός συστήματος που εξαρτάται από τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας, δηλαδή από εγγενή χαρακτηριστικά του, ταυτίζεται με τη συχνότητα της διέγερσης ή με κάποιο πολλαπλάσιό της, στις περισσότερες περιπτώσεις με το διπλάσιο ή το τετραπλάσιό της. Εξάιρεση αποτελεί μία περίπτωση όπου η απόκριση είχε εξαπλάσια συχνότητα από τη διέγερση.

Λόγω του απλού σχήματος των δοκιμίων, γίνανε υπολογισμοί της ιδιοσυχνότητας, όμως προκύπτει πως είναι πάνω από μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από τις συχνότητες στις οποίες είχαμε τα πρώτα τοπικά μέγιστα στη συνάρτηση επιτάχυνσης-συχνοτήτων.

Όταν το μαγνητικό πεδίο οφείλεται σε κυκλικό αγωγό ή σε σωληνοειδές μικρού μήκους (οπότε μπορεί να θεωρηθεί ως επάλληλοι κυκλικοί αγωγοί) και εντός του αγωγού υπάρχει επίμηκες σιδηρομαγνητικό αντικείμενο με τη μεγαλύτερη διάστασή του κάθετη στο επίπεδο του κυκλικού αγωγού, τότε το πεδίο φθίνει πολύ απότομα και συγκεκριμένα με τον κύβο της απόστασης από το κέντρο του αγωγού ή των αγωγών. Σχεδόν το ίδιο απότομα φθίνει και η μαγνητοσυστολή, με προϋπόθεση που επισημαίνεται για την περίπτωση του σιδήρου, η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου να μην υπερβαίνει την

τιμή για την οποία μεγιστοποιείται η μαγνητοσυστολή, δηλαδή περίπου 2500 A/m. Άρα η μαγνητοσυστολή ως φαινόμενο δε συμβαίνει σε όλο το μήκος του σιδηρομαγνητικού αντικειμένου, αλλά μόνον σε μια μικρή περιοχή εκατέρωθεν του αγωγού ή του σωληνοειδούς. Το μήκος αυτής της περιοχής εξαρτάται από την ακτίνα του αγωγού.

Αν σε σιδηρομαγνητικό υλικό εισάγουμε εσωτερικές τάσεις, για παράδειγμα με ανάρτηση βάρους στο άκρο πακτωμένου προβόλου, στις συχνότητες συντονισμού μεταβάλλεται το πλάτος της ταλάντωσης, τις περισσότερες δε φορές μειώνεται. Ο πιο πιθανός λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι η αλλαγή της συχνότητας συντονισμού που είναι συνέπεια της αλλαγής στα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας του συστήματος.

Αντίθετα, αν η συχνότητα της διέγερσης δεν προκαλεί συντονισμό, τότε η μικρή αλλαγή στην ιδιοσυχνότητα που επιφέρει η ανάρτηση βάρους είναι δυνατόν να προκαλέσει αύξηση του πλάτους, λόγω μεγαλύτερης εγγύτητας της συχνότητας διέγερσης με τη νέα ιδιοσυχνότητα.

Αν, επιπρόσθετα με το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, μαγνητοσυστολή στο δοκίμιο προκαλεί και ένα σταθερό στο χρόνο μαγνητικό πεδίο, είτε από μόνιμο μαγνήτη είτε από ηλεκτρομαγνήτη είτε ρυθμίζοντας την τάση της πηγής ώστε αυτή να έχει και μια σταθερή συνιστώσα, πέραν της εναλλασσόμενης, τότε τα πειραματικά αποτελέσματα διαφέρουν πολύ. Η ταλάντωση είναι δυνατόν να αυξηθεί εντυπωσιακά σε πλάτος. Ενδεικτικά, σε συχνότητα συντονισμού 266 Hz, το πλάτος της επιτάχυνσης που κατεγράφη με σταθερό ρεύμα σε πεταλοειδή μαγνήτη 0A ήταν  $15\text{m/s}^2$  ενώ με σταθερό ρεύμα 0,2A ήταν  $221\text{m/s}^2$ , δηλαδή περίπου 15 φορές μεγαλύτερη. Το ίδιο μπορεί να υποθεθεί πως συμβαίνει και με το πλάτος της μετατόπισης, το οποίο με το συγκεκριμένο πεδίο έχει τιμή 80μm.

## 4.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- Το περισσότερο ενδιαφέρον από όσα προκύψανε ως αποτελέσματα στην εργασία αυτή είναι η δυνατότητα να προκαλείται σχετικά μεγάλη παραμόρφωση σε χάλυβα ή και σε άλλο σιδηρομαγνητικό υλικό μέσω του συντονισμού, χωρίς να βρίσκεται σε επαφή με άλλο αντικείμενο, μόνο λόγω του πεδίου. Πρέπει να διερευνηθεί με νέες σειρές πειραμάτων και άλλα όργανα μέτρησης θέσης, για παράδειγμα κάμερα με δυνατότητα λήψης  $10^5$  φωτογραφιών ανά δευτερόλεπτο, η ταλάντωση και το εύρος της, όπως και η μεταβολή του μήκους μετά την απομάκρυνση του πεδίου. Αν το εύρος της ταλάντωσης είναι μεγάλο, τότε δίνει τη δυνατότητα για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, μεταξύ άλλων και για εισαγωγή ή απομάκρυνση τάσεων σε σιδηρομαγνητικά εξαρτήματα μηχανών χωρίς αύξηση της θερμοκρασίας τους και σε συγκεκριμένα σημεία που ενδιαφέρουν και όχι σε όλο τον όγκο τους.
- Σκόπιμο είναι να διερευνηθεί για ποιο λόγο συγκεκριμένες συχνότητες διέγερσης προκαλούν μεγάλες ταλαντώσεις, όταν για συχνότητες πλησίον αυτών στο φάσμα συχνοτήτων, η ταλάντωση έχει πολύ μικρότερο εύρος. Το ιδιαίτερο εδώ είναι ότι το

σύστημα που ταλαντώνεται δεν δέχεται δυνάμεις ή ροπές από περιβάλλοντα στοιχεία μηχανών, αλλά εγγενώς.

- Τέλος, είναι σκόπιμο να διερευνηθεί αν και ποια είναι η μεταβολή στη σκληρότητα του υλικού το οποίο έχει υποστεί αυτήν την εναλλασσόμενη ή κυμαινόμενη καταπόνηση.





## 5 Βιβλιογραφία

- [1] “Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Third Edition,” *CRC Press*, 16-Sep-2015. [Online]. Available: <https://www.crcpress.com/Introduction-to-Magnetism-and-Magnetic-Materials-Third-Edition/Jiles/p/book/9781482238877>.
- [2] “Wiley: Introduction to Magnetic Materials, 2nd Edition - B. D. Cullity, C. D. Graham.” [Online]. Available: <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471477419.html>.
- [3] “Theory.” [Online]. Available: [http://mxp.physics.umn.edu/s07/projects/s07\\_magnetite/theory.htm](http://mxp.physics.umn.edu/s07/projects/s07_magnetite/theory.htm).
- [4] “Magnetic Anisotropy.” [Online]. Available: [http://www.irm.umn.edu/hg2m/hg2m\\_c/hg2m\\_c.html](http://www.irm.umn.edu/hg2m/hg2m_c/hg2m_c.html).
- [5] E. W. Lee, “Magnetostriction and Magnetomechanical Effects,” *Rep. Prog. Phys.*, vol. 18, no. 1, p. 184, 1955.
- [6] “Magnetostrictive effect,” *TheFreeDictionary.com*. [Online]. Available: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Magnetostrictive+effect>.
- [7] V. I. Danilov and M. Ianovici, “Magnetic field of thick finite dc solenoids,” *Nucl. Instrum. Methods*, vol. 94, no. 3, pp. 541–550, Jul. 1971.
- [8] E. Hristoforou and P. Dimitropoulos, “A new method for M–H and  $\lambda$ –H determination using the magnetostrictive delay line technique,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 304, no. 2, pp. 164–167, Sep. 2006.
- [9] Β.-Α. Α. Ζάννα, “Φάσματα Απόκρισης Συνεχών Συστημάτων για Πλήγματα Διαφόρων Μορφών,” Mar. 2012.
- [10] “Biot–Savart law,” *Wikipedia*.
- [11] E. Hristoforou, K. Kosmas, and M. Kollar, “SURFACE MAGNETIC NON DESTRUCTIVE EVALUATION USING A PERMEABILITY SENSOR BASED ON THE MDL TECHNIQUE,” *ResearchGate*, vol. 59, no. 7s, pp. 90–93, Dec. 2008.
- [12] E. Hristoforou, “Magnetostrictive delay lines: engineering theory and sensing applications,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 2, p. R15, 2003.
- [13] E. Hristoforou and R. E. Reilly, “Tensile stress distribution sensors based on amorphous alloys,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 119, no. 3, pp. 247–253, Feb. 1993.
- [14] E. Hristoforou, “Magnetostrictive delay lines and their applications,” *Sens. Actuators Phys.*, vol. 59, no. 1, pp. 183–191, Apr. 1997.
- [15] E. Hristoforou, “New magnetostrictive delay line arrangements for sensor applications,” *Sens. Actuators Phys.*, vol. 81, no. 1–3, pp. 142–146, Apr. 2000.
- [16] E. Hristoforou, “Amorphous magnetostrictive wires used in delay lines for sensing applications,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 249, no. 1–2, pp. 387–392, Aug. 2002.

- [17] “Amorphous wires in displacement sensing techniques - Documents,” *documentslide.com*. [Online]. Available: <http://documentslide.com/documents/amorphous-wires-in-displacement-sensing-techniques.html>.
- [18] E. Hristoforou, D. Niarchos, H. Chiriach, and M. Neagu, “Non-destructive evaluation distribution sensors based on magnetostrictive delay lines,” *Sens. Actuators Phys.*, vol. 92, no. 1–3, pp. 132–136, Aug. 2001.
- [19] Π. Π. Βουρνά, “Αισθητήρας μαγνητικού πεδίου βασισμένος στο φαινόμενο της μαγνητοεμπέδησης,” *Magnetic Sensor based on MI effect*, Oct. 2010.
- [20] Ά. Τσούτσιας, “Μελέτη ανοπτημένου άξονα πλοίου με μαγνητικές μη-καταστροφικές τεχνικές,” Apr. 2015.
- [21] M. Kollár and E. Hristoforou, “Semi-empirical magnetostrictive delay line modelling,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 320, pp. e1057–e1060, 2008.
- [22] Ε. Κ. Ιωακειμίδης, “Σχέση μικροδομής, μηχανικών και μαγνητικών ιδιοτήτων σε χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (Low Carbon Steel). – Μελέτη της επίδρασης ηλεκτροχημικής και χημικής διάβρωσης στη μηχανική και μαγνητική συμπεριφορά του μαλακού χάλυβα τύπου ARMCO,” Feb. 2014.
- [23] Ε.-Χ. Σταθάρας, “Συσχέτιση μαγνητικών ιδιοτήτων με τη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες φερρομαγνητικών συγκολλημένων χαλύβων,” Mar. 2015.
- [24] Σ. Αγγελόπουλος, “Ανάπτυξη μαγνητικού αισθητήρα Barkhausen,” Mar. 2015.
- [25] Χ. Στεφανή, “Προσομοίωση διαδικασίας μαγνήτισης με τεχνικές μικρομαγνητισμού,” Jul. 2015.
- [26] “Hugh D. Young-Πανεπιστημιακή Φυσική,” *Scribd*. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/doc/65515010/Hugh-D-Young-%CE%A0%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CF%80%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BC%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE-%CE%A6%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AE>.
- [27] D. Wakabayashi, T. Todaka, and M. Enokizono, “Measurement of Three-Dimensional Magnetostriction on Grain-Oriented Electrical Steel Sheet,” *J. Electr. Eng.*, vol. 62, no. 3, Jan. 2011.
- [28] D. C. Jiles, “The effect of compressive plastic deformation on the magnetic properties of AISI 4130 steels with various microstructures,” *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 21, no. 7, p. 1196, 1988.
- [29] J. Pal’a, O. Stupakov, J. Bydžovský, I. Tomáš, and V. Novák, “Magnetic behaviour of low-carbon steel in parallel and perpendicular directions to tensile deformation,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 310, no. 1, pp. 57–62, Mar. 2007.
- [30] O. Stupakov, J. Pal’a, I. Tomáš, J. Bydžovský, and V. Novák, “Investigation of magnetic response to plastic deformation of low-carbon steel,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 462, no. 1–2, pp. 351–354, Jul. 2007.
- [31] J. M. D. Coey, *Magnetism and Magnetic Materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [32] R. Grössinger, H. Sassik, D. Holzer, and N. Pillmayr, “ACCURATE MEASUREMENT OF THE MAGNETOSTRICTION OF SOFT MAGNETIC MATERIALS,” *ResearchGate*.

- [33] “Jackson - Classical Electrodynamics 3rd edition.pdf — Departamento de Física.” [Online]. Available: <http://www.fisica.unlp.edu.ar/materias/electromagnetismo-licenciatura-en-fisica-medica/electromagnetismo-material-adicional/Jackson%20-%20Classical%20Electrodynamics%203rd%20edition.pdf/view>.
- [34] “IRLB8743PBF Datasheet(PDF) - International Rectifier.” [Online]. Available: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/311646/IRF/IRLB8743PBF.html>.
- [35] “Wiley: Materials Science and Engineering: An Introduction, 9th Edition - William D. Callister, David G. Rethwisch.” [Online]. Available: <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-EHEP002505.html>.
- [36] “Physics of Ferromagnetism (International Series of Monographs on Physics): Soshin Chikazumi, C. D. Graham: 9780198517764: Amazon.com: Books.” [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Physics-Ferromagnetism-International-Monographs/dp/0198517769>.
- [37] K. Kosmas, C. Sargentis, D. Tsamakis, and E. Hristoforou, “Non-destructive evaluation of magnetic metallic materials using Hall sensors,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 161, no. 1–2, pp. 359–362, Apr. 2005.
- [38] “Hysteresis in Magnetism, 1st Edition | Giorgio Bertotti | ISBN 9780120932702.” [Online]. Available: <http://store.elsevier.com/Hysteresis-in-Magnetism/Giorgio-Bertotti/isbn-9780120932702/>.
- [39] “Magnetic Domains - The Analysis of Magnetic Microstructures | Alex Hubert | Springer.” [Online]. Available: <http://www.springer.com/us/book/9783540641087>.
- [40] E. Callen and H. B. Callen, “Magnetostriction, Forced Magnetostriction, and Anomalous Thermal Expansion in Ferromagnets,” *Phys. Rev.*, vol. 139, no. 2A, pp. A455–A471, Jul. 1965.
- [41] B. Westerstrand, P. Nordblad, and L. Nordborg, “The Magnetocrystalline Anisotropy Constants of Iron and Iron-silicon Alloys,” *Phys. Scr.*, vol. 11, no. 6, p. 383, 1975.

## ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

**ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:** Τζαμουράνης Δημήτρης

**ΕΙΔΙΚΟΤΗΤΑ:** ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

**ΠΑΤΡΩΝΥΜΟ:** Ηλίας

**ΜΗΤΡΩΝΥΜΟ:** Μαρία

**ΕΤΟΣ ΓΕΝΝΗΣΗΣ:** 1984

**ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ:** Βεντούρη 25 Χολαργός

**ΤΗΛΕΦΩΝΟ:** 6945923660 και 2106549465

**E-MAIL:** dimitris\_tzamouranis@yahoo.com

**ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΕΣ ΥΠΟΧΡΕΩΣΕΙΣ:** εκπληρωμένες (9/2009-9/2010)

**ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ:** άγαμος

### ΣΠΟΥΔΕΣ:

10/2014-10/2016: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο-

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών:

‘Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών’

10/2002-7/2009: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο-Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

βαθμός διπλώματος 7,73 (λίαν καλώς)

κατεύθυνση σπουδών κατασκευαστή

διπλωματική εργασία

με θέμα ‘ηλεκτροδιάβρωση σκληρομετάλλων’ (βαθμός 10)

6/2002: απολυτήριο λυκείου με βαθμό 18,5

### ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ:

03/2011-05/2015: Μηχανολόγος Μηχανικός στη βιομηχανία Cerametal s.a., σχεδιαστικό τμήμα. Αντικείμενο της εταιρείας η κατασκευή διμεταλλικών ελασμάτων και μηχανολογικών εξαρτημάτων από το υλικό αυτό, με εξαιρετικά υψηλή αντοχή στη φθορά λόγω τριβής.

02/2010-12/2010: μελέτες και αποτύπωση εγκαταστάσεων συστημάτων θέρμανσης, με χρήση φυσικού αερίου και πετρελαίου, τεχνικό γραφείο ‘Ηλίας Τζαμουράνης’

09/2007-09/2009: Περιστασιακή εργασία ως βοηθός μηχανολόγου μηχανικού, μελέτες και επιβλέψεις βιομηχανικών έργων, τεχνικό γραφείο ‘Ηλίας Τζαμουράνης’

## **ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΕΣ ΑΔΕΙΕΣ:**

13/1/2010: Γενική άδεια εκτέλεσης ηλεκτρικών εγκαταστάσεων όλων των ειδικοτήτων και κατηγοριών και Εγγραφή στο βιβλίο διπλωματούχων ανώτατων τεχνικών σχολών ειδικότητας μηχανολόγου

19/10/2009: Μέλος Τ.Ε.Ε. αριθμός μητρώου 122781

## **ΞΕΝΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ:**

Γερμανικά: Άριστη γνώση (πτυχίο γλωσσομάθειας C1 και παρακολούθηση μαθημάτων επιπέδου C2)

Αγγλικά: Πολύ καλή γνώση (Certificate in Advanced English, University of Cambridge)

## **ΔΙΑΚΡΙΣΕΙΣ/ ΒΡΑΒΕΙΑ:**

2003-2004: υποτροφία από το ΙΚΥ λόγω άριστης ακαδημαϊκής επίδοσης κατά το 2<sup>ο</sup> έτος σπουδών

2002-2003: βραβείο Χρίστου Παπακυριακόπουλου λόγω επίδοσης στα μαθηματικά κατά το 1<sup>ο</sup> έτος, ΕΜΠ

2002-2003: υποτροφία στη μνήμη του καθηγητή 'Νικολάου Κρητικού', Ε.Μ.Π.

2002: γ' βραβείο για την επίδοση στην 19<sup>η</sup> εθνική μαθηματική ολυμπιάδα 'Ο Αρχιμήδης' (διοργάνωση Ελληνική Μαθηματική Εταιρεία)

2001-2002: αριστείο προόδου Γ' τάξη ενιαίου λυκείου

2001: έπαινος στον 61<sup>ο</sup> πανελλήνιο μαθητικό διαγωνισμό στα μαθηματικά 'Ο Ευκλείδης' (διοργάνωση Ελληνική Μαθηματική Εταιρεία)

2000-2001: αριστείο προόδου Β' τάξη ενιαίου λυκείου

## **ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ:**

10/2011: D. Tzamouranis, N. M. Vaxevanidis, N. I. Galanis, D. E. Manolagos, 'ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

OF TUNGSTEN CARBIDES', 4th International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN), At Thessaloniki, Greece

## **ΆΛΛΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ:**

Κάτοχος διπλώματος οδήγησης ΙΧ αυτοκινήτου και μηχανής.

Άριστη γνώση και χρήση προγραμμάτων autocad και autocad mechanical, inventor, excel, word. Εξοικείωση με τα προγράμματα matlab, ansys.

## **ΣΥΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΟΛΕΣ:**

Διαθέσιμες εφόσον ζητηθούν.

## **ΠΡΟΣΩΠΙΚΑ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΑ**

Σκακιστής, μέλος του Γυμναστικού Αθλητικού Συλλόγου Χολαργού.