



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

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ  
FLUXGATE ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΩΝ  
ΥΜΕΝΙΩΝ ΣΙΔΗΡΟΥ-ΝΙΚΕΛΙΟΥ ΩΣ ΠΥΡΗΝΕΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Μάριος Γ. Αρώνης

**Επιβλέπων :** Ιωάννης Ν. Αβαριτσιώτης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Απρίλιος 2005





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

# ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ FLUXGATE ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ ΣΙΔΗΡΟΥ-ΝΙΚΕΛΙΟΥ ΩΣ ΠΥΡΗΝΕΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μάριος Γ. Αρώνης

**Επιβλέπων :** Ιωάννης Ν. Αβαριτσιώτης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την..... Απριλίου του 2005

.....  
Ιωάννης Ν. Αβαριτσιώτης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Ελευθέριος Καγιάφας  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Βασίλειος Λούμος  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Απρίλιος 2005

.....  
Μάριος Γ. Αρώνης

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

Copyright © Μάριος Αρώνης, 2005

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας αποτελεί η υλοποίηση και βαθμονόμηση μίας στοιχειώδους διάταξης αισθητήρα fluxgate, καθώς και η ανάπτυξη και χαρακτηρισμός ηλεκτρολυτικών φιλμ σιδήρου-νικελίου, κατάλληλων για χρήση ως πυρήνες του αισθητήρα. Η δομή του αισθητήρα βασίζεται στα fluxgates παράλληλου τύπου και η αρχή λειτουργίας του παραπέμπει στα αντίστοιχα μαγνητόμετρα Θέσης – Παλμού. Τα υμένια σιδήρου – νικελίου παρασκευάστηκαν με την ιδιαίτερα δημοφιλή και ευέλικτη τεχνική της ηλεκτροεναπόθεσης, πάνω σε υποστρώματα χαλκού.

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στους βασικούς νόμους του μαγνητισμού, ενώ στο δεύτερο αναλύεται η μαγνήτιση της ύλης και αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της μεγέθη. Στο κεφάλαιο 3 αναφέρονται οι βασικές κατηγορίες και ιδιότητες μαγνητικών υλικών. Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφονται οι κυριότερες μαγνητικές ιδότητες όπως μαγνητική υστέρηση, μαγνητικός κορεσμός και μαγνητοελαστικότητα με έμφαση να δίνεται στα σιδηρομαγνητικά υλικά. Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο προσεγγίζεται το φαινόμενο της μαγνήτισης με βάση τη θεωρία των μαγνητικών περιοχών.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρονται οι βασικές αρχές και διαδικασίες παραγωγής για ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις και ιδιαίτερα για επικαλύψεις νικελίου και κραμάτων αυτού, όπως τα δημοφιλή ηλεκτρολυτικά φιλμ σιδήρου – νικελίου. Στο κεφάλαιο 7 περιγράφεται η διαδικασία παρασκευής υμενίων σιδήρου – νικελίου (permalloys) στο εργαστήριο.

Στο 8<sup>ο</sup> και 9<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφονται οι σημαντικότερες μέθοδοι μαγνητικών μετρήσεων, και εκτενέστερα οι αισθητήρες fluxgate. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα λειτουργικά χαρακτηριστικά των fluxgate τύπου Θέσης – Παλμού. Τέλος, στο κεφάλαιο 10 περιγράφονται τα δομικά χαρακτηριστικά και η διαδικασία κατασκευής του αισθητήρα. Επίσης αναλύεται το ηλεκτρονικό κύκλωμα που σχεδιάστηκε με βάση την αρχή λειτουργίας του αισθητήρα και παρατίθενται οι πίνακες μετρήσεων και τα αντίστοιχα διαγράμματα της συνάρτησης μεταφοράς του μαγνητομέτρου.

### Λέξεις – Κλειδιά

Αισθητήρες Fluxgate, fluxgates παράλληλου τύπου, fluxgates Θέσης Παλμού, ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις, ηλεκτροεναπόθεση, μαγνητική υστέρηση, μαγνητικός κορεσμός, μαγνητοελαστικότητα, επικαλύψεις σιδήρου – νικελίου, permalloys.

## **Abstract**

The scope of this thesis is the realization and calibration of an elementary fluxgate magnetometer arrangement, as well as the development and characterization of electroplated nickel – iron films, available for use as probe cores of the sensor. The arrangement of the sensor is based upon the parallel type (horizontal gated) fluxgates, while its basic operational principle resembles the operational principle of pulse – position type magnetometers. The nickel – iron films were developed using electro deposition techniques, over copper substrates.

In chapter 1, the fundamental laws of magnetism are being introduced, while in chapter 2 the magnetization of matter is being analyzed. The basic categories and properties of magnetic materials are introduced in chapter 3. In chapter 4, we describe the major magnetic properties i.e. magnetic hysteresis, magnetic saturation and magnetostriction, while emphasis is being given on ferromagnetic materials. The phenomenon of magnetization and related properties are being approached through the magnetic domains theory, in chapter 5.

Chapter 6 refers to the basic principles and fabrication procedures of electrolytic (electroplated) films, and especially of nickel and nickel – alloys' films. Moreover, the mechanical, electrical and magnetic properties of various nickel – iron alloys (permalloys) are being discussed. In chapter 7, we describe the experimental procedures for the development of thin nickel – iron films, which took place in the laboratory.

In chapters 8 and 9 the most important magnetic measurement methods are being discussed. The fundamental operational principles of pulse – position type fluxgate magnetometers are being stressed out. In chapter 10, we describe the properties and fabrication steps of the fluxgate magnetometer. The electronic circuit, which was developed on the basis of the sensor operational principle, is analyzed. Finally, the measurement charts and the transfer function diagrams are quoted.

### **Key-words**

Fluxgate sensors, parallel type fluxgates, pulse-position type fluxgates, electrolytic films, electrodeposition, electroplated films, permalloy, nickel – iron alloys, magnetic hysteresis, magnetic saturation, magnetostriction,

## Ευχαριστίες

Κατά τη διάρκεια των δώδεκα περίπου μηνών που διήρκησε η εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας, πολλοί άνθρωποι βοήθησαν σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό, προς την εκπλήρωση του επιθυμητού αποτελέσματος.

Με την ευκαιρία που μου δίνεται, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους υποψήφιους διδάκτορες του τμήματος Μεταλλουργών & Μηχανικών Μεταλλείων, κ. Πετρίδη Χρήστο, κ. Πέτρου Ιωάννη, κ. Κοσμά Κωνσταντίνο και κα. Κεραπτισόγλου Δέσποινα – Μαρία για την άριστη καθημερινή συνεργασία μας και καθοδήγηση σε σημαντικό μέρος της εργασίας αυτής. Επίσης τον Δρ. Αγαθοκλέους Παναγιώτη για την σημαντική συμβολή του σε ποικίλα εργαστηριακά θέματα.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Μεταλλουργών κ. Ευάγγελο Β. Χριστοφόρου για την φιλοξενία μου στο εργαστήριο μεταλλογνωσίας του τμήματος, και την γενναιόδωρη παροχή εξοπλισμού και πρώτων υλών.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω φυσικά τον τεχνικό του εργαστηρίου Αισθητήρων, κ. Ψαρρό Απόστολο, χωρίς τι ευφάνταστες ιδέες και συμβουλές του οποίου πολλά εμπόδια φάνταζαν ανυπέβλητα.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον υπεύθυνο καθηγητή κ. Αβαριτσιώτη Ιωάννη για την υπομονή, κατανόηση και καθοδήγησή του όλο αυτό το διάστημα, καθώς και την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου την εργασία αυτή.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένειά μου για την συμπαράσταση όλο αυτό το διάστημα και για την υποστήριξή τους σε όλα τα επίπεδα.

<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....</b>	<b>12</b>
-------------------------------	-----------

<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>13</b>
--------------------------------	-----------

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ**

1.1 Μαγνητικά Πεδία.....	15
1.1.1 Βασικοί Νόμοι Μαγνητικών Πεδίων – Ένταση Μ.Π.....	15
1.1.2 Μαγνητική Επαγωγή.....	16
1.1.3 Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή.....	17
1.2 Το Μαγνητικό Δίπολο – Μαγνητική Διπολική Ροπή.....	17
1.3 Ο νόμος του GAUSS.....	18
1.4 Οι εξισώσεις MAXWELL.....	19
1.4.1 Οι εξισώσεις Maxwell για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.....	19
1.4.2 Εναλλασσόμενα ή Χρονοεξαρτώμενα Μαγνητικά Πεδία.....	19
1.5 Υπολογισμοί σε Μαγνητικά Πεδία.....	20

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ**

2.1 Ορισμός της Μαγνήτισης.....	23
2.2 Σχέση μεταξύ Μαγνήτισης, Έντασης Μαγνητικού πεδίο και Μαγνητικής Επαγωγής.....	24
2.3 Μαγνήτιση Κορεσμού.....	24
2.4 Μαγνητική Διαπερατότητα – Μαγνητική Επιδεκτικότητα.....	24

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ**

3.1 Ταξινόμηση Μαγνητικών Υλικών.....	26
3.1.1 Διαμαγνητικά, Παραμαγνητικά και Φερρομαγνητικά Υλικά.....	26
3.1.2 Επιδεκτικότητα, Διαπερατοτητα σε Διαμαγνητικα και Παραμαγνητικά Υλικά.....	26
3.1.3 Τιμές του $\mu_r$ και $\chi$ σε διάφορα υλικά.....	27
3.1.4 Άλλοι τύποι Μαγνητικών Υλικών.....	28
3.2 Μαγνητικές ιδιότητες των Σιδηρομαγνητικών Υλικών.....	28
3.2.1 Μαγνητική Διαπερατότητα.....	28
3.2.2 Αντίσταση Απομαγνήτισης (Retentivity).....	29
3.2.3 Μαγνητική Υστέρηση.....	29
3.2.4 Μαγνήτιση Κορεσμού ( Saturation Magnetization).....	30
3.2.5 Παραμένουσα Μαγνήτιση (Remanence).....	30
3.2.6 Συνεκτικό Πεδίο (Coercivity – Coercive Force).....	31
3.2.7 Διαφορική Μαγνητική Διαπερατότητα.....	31
3.2.8 Θερμοκρασία Curie.....	32
3.3 Τύποι Σιδηρομαγνητικών Υλικών και οι εφαρμογές τους.....	32
3.3.1 Μαλακοί και Σκληροί Σιδηρομαγνήτες.....	32



3.3.2	Ηλεκτρομαγνήτες.....	33
3.3.3	Μετασχηματιστές.....	33
3.3.4	Υλικά Μαγνητικής Αποθήκευσης Δεδομένων.....	34
3.3.5	Μόνιμοι Μαγνήτες.....	34

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ**

4.1	Υστέρηση και σχετικές Ιδιότητες.....	35
4.1.1	Παραμετρικός Χαρακτηρισμός της Υστέρησης.....	35
4.1.2	Τα αίτια της Υστέρησης.....	36
4.1.3	Ανυστερητική Μαγνήτιση.....	36
4.1.4	Η σχέση Frohlich – Kennely.....	37
4.1.5	Συμπεριφορά χαμηλού πεδίου: Ο νόμος του Rayleigh.....	37
4.1.6	Συμπεριφορά υψηλού πεδίου: Πλησιάζοντας στον κορεσμό.....	39
4.2	Το φαινόμενο Barkhausen.....	39
4.2.1	Παρατήρηση του φαινομένου.....	39
4.2.2	Θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου.....	40
4.3	Μαγνητοελαστικότητα.....	40
4.3.1	Αυθόρμητη μαγνητοελαστικότητα σε ισοτροπικά υλικά.....	41
4.3.2	Μαγνητοελαστικότητα κορεσμού.....	41
4.3.3	Τεχνητός κορεσμός και εξαναγκασμένη μαγνητοελαστικότητα.....	41

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ**

5.1	Ανάπτυξη της θεωρίας μαγνητικών περιοχών.....	42
5.1.1	Ατομικές μαγνητικές διπολικές ροπές.....	42
5.1.2	Μαγνητική τάξη σε σιδηρομαγνητικά υλικά.....	42
5.1.3	Μαγνητική διαπερατότητα σε σιδηρομαγνήτες.....	43
5.1.4	Θεωρία μαγνητικών περιοχών Weiss.....	43
5.1.5	Απόδειξη ύπαρξης μαγνητικών περιοχών με πειραματικές μεθόδους.....	43
5.2	Διαδικασία μαγνήτισης και θεωρία μαγνητικών περιοχών.....	44
5.2.1	Επίδραση της μαγνήτισης στις μαγνητικές περιοχές.....	44
5.2.2	Τεχνητή μαγνήτιση κορεσμού.....	45
5.2.3	Περιστροφή περιοχών και ανισοτροπία.....	46

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ**

6.1	Γενικά.....	47
6.2	Βασικές αρχές ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων.....	47
6.2.1	Διατάξεις ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης.....	47
6.2.2	Παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρολυτική Επιμετάλλωση.....	48
6.3	Ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις νικελίου.....	50
6.3.1	Γενικά.....	50
6.3.2	Λουτρά ηλεκτρολυτικής επινικέλωσης.....	50
6.3.3	Προβλήματα που εμφανίζονται κατά την επινικέλωση.....	51

6.3.4	Φυσικές ιδιότητες επικαλύψεων νικελίου.....	53
6.4	Ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις με κράματα σιδήρου – νικελίου.....	53
6.4.1	Χρήσεις ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων σιδήρου – νικελίου...53	
6.4.2	Ιδιότητες κραμάτων Fe – Ni.....	54
6.4.3	Παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτροαπόθεση κραμάτων σιδήρου – νικελίου και τις ιδιότητες αυτών.....	54
6.4.4	Μαγνητοελαστικότητα σε ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις σιδήρου – νικελίου.....	58

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΩΝ ΦΙΑΜ FeNi ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ**

7.1	Εισαγωγή.....	62
7.2	Υλικά κατασκευής πυρήνων για αισθητήρες Fluxgate.....	62
7.3	Απαιτούμενος εργαστηριακός εξοπλισμός.....	62
7.4	Ηλεκτρόδια και ηλεκτρολυτική κυψελίδα.....	63
7.5	Το ηλεκτρολυτικό λουτρό.....	64
7.6	Αποτελέσματα.....	65

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ**

8.1	Φυσικά και τεχνητά μαγνητικά πεδία.....	69
8.2	Μέθοδοι μαγνητικών μετρήσεων.....	70
8.2.1	Μέθοδοι επαγωγής.....	70
8.2.2	Μέθοδοι μέτρησης δυνάμεων.....	70
8.2.3	Μέθοδοι που στηρίζονται στην μεταβολή των μαγνητικών ιδιοτήτων της ύλης.....	71
8.2.3.1	Αισθητήρες Hall.....	71
8.2.3.2	Αισθητήρες μαγνητοαντίστασης.....	72
8.2.3.3	Αισθητήρες Μαγνητοελαστικότητας.....	72
8.2.4	Αισθητήρες SQUID.....	72
8.3	Μαλακά και σκληρά μαγνητικά υλικά για αισθητήρες.....	72

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ FLUXGATE**

9.1	Εισαγωγή.....	75
9.2	Βασικές αρχές αισθητήρων Fluxgate.....	75
9.3	Αρχή λειτουργίας μαγνητομέτρων Fluxgate.....	77
9.4	Κατηγορίες αισθητήρων Fluxgate.....	78
9.4.1	Διατάξεις αισθητήρων Fluxgate.....	78
9.4.1.1	Fluxgates παράλληλου τύπου.....	78
9.4.1.2	Fluxgates ορθογώνιου τύπου.....	80
9.4.2	Ταξινόμηση αισθητήρων Fluxgate με βάση την αρχή λειτουργίας.....	81
9.4.2.1	Μαγνητόμετρα Fluxgate δεύτερης αρμονικής.....	81
(i)	Αρχή λειτουργίας.....	82
(ii)	Εύρεση συνάρτησης μεταφοράς.....	83
9.4.2.2	Αισθητήρες Fluxgate ύψους παλμού.....	84
9.4.2.3	Μαγνητόμετρα Fluxgate «Θέσης – Παλμού» (Pulse – position type magnetometers).....	85

(i)	Βασική αρχή λειτουργίας.....	85
(ii)	Ανάλυση του τρόπου λειτουργίας.....	86
(iii)	Εύρεση συνάρτησης μεταφοράς.....	87
(iv)	Σχεδίαση του κυκλώματος κωδικοποίησης Χρόνου.....	91

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 : ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ FLUXGATE –  
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ -  
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

10.1	Εισαγωγή.....	92
10.2	Δομή του αισθητήρα – κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.....	92
10.3	Αρχή λειτουργίας.....	93
10.4	Διαδικασία επιλογής των καταλληλότερων υμενίων FeNi.....	95
10.5	Το κύκλωμα λήψης – επεξεργασίας σήματος.....	97
10.6	Διαδικασία ματρήσεων – Προσδιορισμός συνάρτησης μεταφοράς – αποτελέσματα.....	100
10.7	Συμπεράσματα – Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.....	112

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>113</b>
--------------------------	------------

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

Πίνακας 3.1 : Επιδεκτικότητες και διαπερατότητες διαφόρων στοιχείων.....	28
Πίνακας 3.2 : Μαγνήτιση κορεσμού διαφόρων σιδηρομαγνητών.....	31
Πίνακας 3.3 : Θερμοκρασίες Curie διαφόρων υλικών.....	32
Πίνακας 3.4 : Συνεκτικό πεδίο και Permeability.....	33

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

Πίνακας 6.1 : Λουτρά ηλεκτρολυτικής επινικέλωσης.....	52
Πίνακας 6.2 : Μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες ηλεκτρολυτικών φιλμ NiFe και NiFeP.....	58
Πίνακας 6.3 : Σύσταση ηλεκτρολυτικών λουτρών για 80/20 Permalloy και Orthonol (50% Fe, 50% Ni).....	61

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7**

Πίνακας 7.1 : Τελικές συστάσεις και συνθήκες λουτρού.....	65
---	----

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8**

Πίνακας 8.1 : Σκληρά μαγνητικά υλικά κατά IEC.....	73
Πίνακας 8.2 : Μαλακά μαγνητικά υλικά κατά IEC.....	73
Πίνακας 8.3 : Μαγνητικά υλικά για αισθητήρες μαγνητικού πεδίου.....	74

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10**

Πίνακας 10.1 : Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 100mA RMS.....	101
Πίνακας 10.2 : Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 200mA RMS.....	101
Πίνακας 10.3 : Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 300mA RMS.....	102
Πίνακας 10.4 : Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 400mA RMS.....	103
Πίνακας 10.5 : Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 500mA RMS.....	104
Πίνακας 10.6 : Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 600mA RMS.....	104
Πίνακας 10.7 : Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 720mA RMS.....	105
Πίνακας 10.8 : Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 815mA RMS.....	105
Πίνακας 10.9 : Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 955mA RMS.....	106
Πίνακας 10.10 : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	112

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

Σχήμα 3.1 : Αρχική καμπύλη μαγνήτισης – μαγνητική διαπερατότητα κατά μήκος αυτής για ανοπτισμένο σίδηρο.....	27
Σχήμα 3.2 : Τυπικός βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού.....	29
Σχήμα 3.3 : Τυπικός βρόχος υστέρησης υλικού μαγνητικής Αποθήκευσης.....	34

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

Σχήμα 4.1 : Τυπικός σιγμοειδής βρόχος υστέρησης.....	35
Σχήμα 4.2 : Μή υστερητική καμπύλη μαγνήτισης.....	37
Σχήμα 4.3 : Βρόχος υστέρησης τύπου Rayleigh.....	38
Σχήμα 4.4 : Ασυνέχειες Barkhausen κατά μήκος της αρχικής καμπύλης μαγνήτισης.....	40

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

Σχήμα 5.1 : (α) μαγνητικές περιοχές στην επιφάνεια σιδήρου – μέθοδος Bitter (b) οι μαγνητικές περιοχές του (α) και η φορά των αυθόρμητων μαγνητίσεων κάθε περιοχής.....	44
Σχήμα 5.2 : Επίδραση της μαγνήτισης στις μαγνητικές περιοχές.....	45
Σχήμα 5.3 : Προσανατολισμός μεμονωμένων διπολικών ροπών.....	46

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

Σχήμα 6.1 : Μαγνήτιση κορεσμού σε κράματα Fe-Ni.....	55
Σχήμα 6.2 : Αρχική μαγνητική διαπερατότητα: 1= αργή επαναφορά 2 = τυπική κατεργασία permalloy.....	56
Σχήμα 6.3 : Ειδική ηλεκτρική αντίσταση κράματος Fe-Ni.....	56
Σχήμα 6.4 : Διαβάθμιση της περιεκτικότητας σε σίδηρο και της καθοδικής επάρκειας συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος για διαφορετικές συγκεντρώσεις προσθέτων.....	58
Σχήμα 6.5 : Εξάρτηση της μαγνητοελαστικότητας κραμάτων Fe-Ni από τη σύσταση τους και την ένταση μαγνητικού πεδίου.....	60
Σχήμα 6.6 : (α)Περιεκτικότητα σε σίδηρο συναρτήσει δυναμικού απόθεσης Για $\text{NiSO}_4 = 250\text{gr/lit}$ και $\text{FeSO}_4 = 4\text{gr/lit}$ ..... (β)Ευαισθησία σε τάσεις συναρτήσει δυναμικού απόθεσης για $\text{NiSO}_4 = 255\text{gr/lit}$ και $\text{FeSO}_4 = 4\text{gr/lit}$ .....	60

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8**

Σχήμα 8.1 : Το γήινο μαγνητικό πεδίο.....	69
Σχήμα 8.2 : Η βασική διάταξη αισθητήρα Hall.....	71

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9**

Σχήμα 9.1 : Στοιχειώδες σχέδιο αισθητήρα fluxgate.....	76
Σχήμα 9.2 : Χαρακτηριστικές μορφές καμπύλης μαγνήτισης.....	77
Σχήμα 9.3 : Αρχή Λειτουργίας Fluxgate.....	77
Σχήμα 9.4 : Double-rod fluxgate.....	79
Σχήμα 9.5 : Fluxgate διαμήκους πυρήνα τύπου Förster.....	79
Σχήμα 9.6 : Fluxgate δακτυλιοειδούς πυρήνα.....	80

Σχήμα 9.7 : Fluxgate ελλειψοειδούς πυρήνα.....	80
Σχήμα 9.8 : Fluxgates ορθογώνιου τύπου.....	81
Σχήμα 9.9 : Βασική αρχή λειτουργίας fluxgate δεύτερης αρμονικής.....	82
Σχήμα 9.10 : Αρχή λειτουργίας μαγνητομέτρου θέσης – παλμού.....	86

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

Σχήμα 10.1 : Σχηματική αναπαράσταση του αισθητήρα.....	93
Σχήμα 10.2 : Τυπική καμπύλη τάσης $V_1$ (υμένιο από διάλυμα 2 - πίνακας 7.1).....	95
Σχήμα 10.3 : Τυπική καμπύλη τάσης $V_1$ (υμένιο από διάλυμα 1 - πίνακας 7.1).....	97
Σχήμα 10.4 : Το κύκλωμα λήψης 99	
Σχήμα 10.5 : Καμπύλη μεταφοράς για $I_{EXC} = 100 \text{ mA RMS}$ .....	107
Σχήμα 10.6 : Καμπύλη μεταφοράς για $I_{EXC} = 200 \text{ mA RMS}$ .....	107
Σχήμα 10.7 : Καμπύλη μεταφοράς για $I_{EXC} = 300 \text{ mA RMS}$ .....	108
Σχήμα 10.8 : Καμπύλη μεταφοράς για $I_{EXC} = 400 \text{ mA RMS}$ .....	108
Σχήμα 10.9 : Καμπύλη μεταφοράς για $I_{EXC} = 500 \text{ mA RMS}$ .....	109
Σχήμα 10.10 : Καμπύλη μεταφοράς για $I_{EXC} = 600 \text{ mA RMS}$ .....	109
Σχήμα 10.11 : Καμπύλη μεταφοράς για $I_{EXC} = 720 \text{ mA RMS}$ .....	110
Σχήμα 10.12 : Καμπύλη μεταφοράς για $I_{EXC} = 815 \text{ mA RMS}$ .....	110
Σχήμα 10.13 : Καμπύλη μεταφοράς για $I_{EXC} = 955 \text{ mA RMS}$ .....	111
Σχήμα 10.14 : Σύγκριση των καμπυλών μεταφοράς.....	111

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ [1]

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν με όσο το δυνατόν συντομότερο αλλά και περιεκτικότερο τρόπο οι νόμοι και αρχές που διέπουν τη θεωρία των μαγνητικών πεδίων. Κύριος σκοπός της ενότητας αυτής αποτελεί η επεξήγηση των φαινομένων εκείνων, τα οποία αποτελούν τη βάση για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας ενός αισθητήρα μαγνητικού πεδίου. Για το λόγο αυτό θα δωθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στην ποιοτική περιγραφή των φαινομένων, παρά στην πολύπλοκη και δυσνόητη μαθηματική ανάλυση.

### 1.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ

Μία από τις βασικότερες αρχές που διέπουν την θεωρία του μαγνητισμού είναι η έννοια του μαγνητικού πεδίου. Όταν στο χώρο εγκαθίσταται μαγνητικό πεδίο, τότε ο χώρος αποκτά ιδιότητες που γίνονται εύκολα αντιληπτές, από την δύναμη που ασκεί το πεδίο σε ένα κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο, ή σε έναν αγωγό που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, ή ακόμη από την ροπή που εφαρμόζεται σε ένα μαγνητικό δίπολο, όπως είναι ο ραβδόμορφος μαγνήτης. Αντίστροφα, μαγνητικό πεδίο γεννάται, κατά την κίνηση ενός ηλεκτρικού φορτίου, ή φορτισμένου σωματιδίου, όπως κατά την διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος από έναν αγωγό. Επίσης, μαγνητικό πεδίο παράγεται από πηγές, χωρίς την προφανή παρουσία ηλεκτρικών ρευμάτων, όπως από μόνιμους μαγνήτες. Στην περίπτωση αυτή, οι τροχιακές κινήσεις των ηλεκτρονίων, καθώς και η ιδιοπεριστροφή αυτών (spin), προκαλούν την μαγνήτιση του υλικού και την δημιουργία πεδίου στο χώρο γύρω από αυτό.

#### 1.1.1 ΒΑΣΙΚΟΙ ΝΟΜΟΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ – ΕΝΤΑΣΗ Μ.Π.

##### Νόμος των Biot-Savart

Ο νόμος Biot-Savart, που αποτελεί έναν από τους θεμελιώδεις νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού, είναι προϊόν πειραματικής παρατήρησης παρά θεωρητικής πρόβλεψης. Μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίσουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}$ , που προκαλείται από ένα ηλεκτρικό ρεύμα. Στη συνήθη του μορφή, ο νόμος υπολογίζει τη συνεισφορά στο πεδίο, από ένα στοιχειώδες τμήμα αγωγού μήκους  $d\mathbf{l}$ , που διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως  $\mathbf{i}$ .

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi r^2} i d\vec{l} \times \vec{u} \quad (1.1)$$

όπου  $r$  η ακτινική απόσταση,  $\vec{u}$  το μοναδιαίο διάνυσμα στην ακτινική διεύθυνση και  $d\mathbf{H}$  η συνεισφορά στο πεδίο του στοιχειώδους τμήματος  $d\mathbf{l}$ . Πρέπει να επισημάνουμε ότι αν και η παραπάνω σχέση δεν επιδέχεται μαθηματικής απόδειξης, μπορεί να εξακριβωθεί με πειραματικές μετρήσεις.

Με χρήση του νόμου αυτού μπορούμε να υπολογίσουμε την ένταση του πεδίου στο κέντρο κυκλικού αγωγού ακτίνας  $a$  μέτρων, που διαρρέεται από ρεύμα  $i$ . Έτσι έχουμε  $\mathbf{H} = (i / 2a)$  με μονάδα το **Ampere / m**, και φορά που βρίσκεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού. Το  $\text{Am}^{-1}$  είναι η μονάδα που χρησιμοποιείται για την ένταση μαγνητικού πεδίου στο SI σύστημα.

## Νόμος του Ampere

Σύμφωνα με τον Ampere, όταν σε ένα κύκλωμα υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα, τότε στο γύρω χώρο εγκαθίσταται μαγνητικό πεδίο, το οποίο εξαρτάται από την τοπολογία του κυκλώματος, δηλαδή το μονοπάτι αγωγής, καθώς και την ένταση του ρεύματος. Υποθέτοντας ότι κάθε κύκλωμα αποτελείται από άπειρα στοιχειώδη ρεύματα κάθε ένα από τα οποία συνεισφέρει στο πεδίο, ο Ampere κατέληξε στην παρακάτω σχέση, που είναι γνωστή και ως νόμος του Ampere.

$$I = \oint_{\text{closed path}} \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (1.2)$$

δηλαδή το πεπλεγμένο σε μία κλειστή διαδρομή  $l$  ρεύμα  $I$ , ισούται με το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της εντάσεως του μαγνητικού πεδίου  $H$ , κατά μήκος της διαδρομής αυτής.

### 1.1.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ

Όπως είπαμε, η ύπαρξη ηλεκτρικών ρευμάτων δημιουργεί στο χώρο μαγνητικό πεδίο εντάσεως  $H$ . Ο χώρος στον οποίο εγκαθίσταται το μαγνητικό πεδίο μπορεί να είναι είτε το κενό, είτε οποιοδήποτε άλλο υλικό μέσο, και η απόκριση του μέσου αυτού στην εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου περιγράφεται από το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής  $B$ . Η μαγνητική επαγωγή, που είναι γνωστή και ως πυκνότητα μαγνητικής ροής (flux density), καθορίζει λοιπόν τον τρόπο με τον οποίο ένα υλικό (ή μη) μέσο αντιδρά όταν βρίσκεται σε χώρο που καταλαμβάνεται από μαγνητικό πεδίο. Το μέγεθος που παριστάνει τη σχέση μεταξύ έντασης μαγνητικού πεδίου και μαγνητικής επαγωγής καλείται μαγνητική διαπερατότητα του μέσου. Συμβολίζεται με  $\mu$  και μπορεί να είναι βαθμωτή συνάρτηση, ή πραγματική σταθερά. Ο τρόπος με τον οποίο συνδέεται η φύση κάθε υλικού με την μαγνητική του διαπερατότητα και τη μορφή της αντίστοιχης συνάρτησης θα μελετηθεί σε επόμενες παραγράφους.

Στη συνέχεια θα ορίσουμε την μαγνητική ροή  $\Phi$ . Για το λόγο αυτό επανερχόμαστε στον κυκλικό αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως  $i$ . Όπως αναφέρθηκε, το ρεύμα  $i$  δημιουργεί στο χώρο μαγνητικό πεδίο του οποίου η ένταση υπολογίζεται από το νόμο Biot-Savart. Η ενέργεια που δαπανάται για να εγκατασταθεί το πεδίο στο χώρο ισούται με την αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια στο πεδίο, και υπολογίζεται από τη σχέση  $E = (1/2) i \Phi$ , όπου  $\Phi$  το ποσό της μαγνητικής ροής που το ρεύμα  $i$  δημιουργεί στο χώρο. Η μαγνητική ροή που υπάρχει σε κάθε μαγνητικό πεδίο εγκατεστημένο στο χώρο μετρείται σε Weber, και ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται μπορεί να μετρηθεί μέσω της ηλεκτρεγερτικής δύναμης που αναπτύσσεται σε ένα αγωγίμο βρόχο, όταν η μαγνητική ροή διαπερνά την επιφάνεια που ο εν λόγω βρόχος ορίζει.

Ορίζοντας ως μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροής το Weber, μπορούμε εν συνεχεία να ορίσουμε ως μονάδα μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής το  $\mathbf{Wb/m^2}$ , μιας και η μαγνητική επαγωγή ορίστηκε ως πυκνότητα μαγνητικής ροής, (flux density), δηλαδή Weber ανά μονάδα επιφάνειας. Μαγνητική ροή τιμής  $1\text{Wb}$  ανά τετραγωνικό μέτρο ισοδυναμεί με μαγνητική επαγωγή τιμής  $1\text{Tesla}$ , το οποίο είναι και η αντίστοιχη μονάδα στο S.I.



Επανερχόμαστε στη συνέχεια στη σχέση μεταξύ έντασης μαγνητικού πεδίου και μαγνητικής επαγωγής. Ο σαφής διαχωρισμός μεταξύ των δύο εννοιών είναι πολύ κρίσιμος, ιδιαίτερα δε στη συνέχεια της εργασίας αυτής όπου θα αναφερθούμε σε βρόχους υστέρησης διαφόρων υλικών. Για την ώρα μπορούμε να αναφέρουμε απλά τις κατηγορίες υλικών στα οποία το  $B$  είναι γραμμική συνάρτηση του  $H$ . Ειδικότερα, για τον κενό χώρο, έχουμε  $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ , όπου το  $\mu_0$  είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και ισούται με  $4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ . Η μονάδα Henries/m ισοδυναμεί όπως εύκολα αποδεικνύεται με (volt second)/(amp meter). Η δεύτερη κατηγορία υλικών, η οποία θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα στην συνέχεια είναι τα φερρομαγνητικά και φερριμαγνητικά. Στα υλικά αυτά, το  $B$  παύει να είναι γραμμική συνάρτηση του  $H$ , για την ακρίβεια δεν είναι πλέον ούτε μία μονοσήμαντα συνάρτηση του  $H$ . Εδώ έγκειται η κρισιμότητα του διαχωρισμού ανάμεσα στα δύο αυτά μεγέθη και μία απλή χάραξη του βρόχου υστέρησης αρκεί για να γίνει αυτή προφανής. Η σχέση  $B = \mu H$  εξακολουθεί να ισχύει, όμως σε τέτοιου τύπου υλικά μέσα, η μαγνητική διαπερατότητα δεν είναι απαραίτητα σταθερή. Μάλιστα, αν και στα παραμαγνητικά και διαμαγνητικά υλικά το  $\mu$  παραμένει σταθερό για ένα μεγάλο εύρος τιμών του  $H$ , στα φερρομαγνητικά η διαπερατότητα εξαρτάται έντονα από την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

### 1.1.3 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ

Ένα πλήθος εφαρμογών της ηλεκτροτεχνίας και της τεχνολογίας αισθητήρων βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Όταν η μαγνητική ροή που εμπλέκει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα μεταβάλλεται, τότε στα άκρα του κυκλώματος επάγεται μία ηλεκτρεγερτική δύναμη που ονομάζεται τάση επαγωγής. Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, η επαγόμενη τάση είναι ευθέως ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της ροής που εμπλέκει το κύκλωμα. Ενώ σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz, η πολικότητα της επαγόμενης τάσης είναι τέτοια ώστε τα ρεύματα που προκαλούνται δημιουργούν πεδία που τείνουν να αναιρέσουν εκείνα τα οποία προκάλεσαν την μεταβολή της ροής. Οι δύο παραπάνω νόμοι εκφράζονται από την σχέση που ακολουθεί.

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.3)$$

όπου  $V$  είναι η επαγόμενη τάση και  $\Phi$  η ροή που διαπερνά πηνίο με  $N$  σπείρες. Αν στην (1.3) θέσουμε  $B = \Phi/A$ , τότε παίρνουμε μία εναλλακτική έκφραση του νόμου της επαγωγής,

$$V = -NA \frac{dB}{dt} \quad (1.4)$$

από την οποία φαίνεται πως χρονικά εξαρτώμενο μαγνητικό πεδίο μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση ηλεκτρικών ρευμάτων.

### 1.2 ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΔΙΠΟΛΟ – ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΠΟΛΙΚΗ ΡΟΠΗ

Σύμφωνα με τον νόμο του Ampere, όταν ένα κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα, τότε στον περιβάλλοντα χώρο εγκαθίσταται ηλεκτρικό πεδίο. Το απλούστερο κύκλωμα με το οποίο μπορούμε να προκαλέσουμε μαγνητικό πεδίο είναι ο αγωγίμος κυκλικός βρόχος. Ο βρόχος ρεύματος και το μαγνητικό δίπολο αποτελούν τις δύο στοιχειώδεις οντότητες του μαγνητισμού. Σε κάθε περίπτωση υπάρχει μία μαγνητική

διπολική ροπή  $\mathbf{m}$  που σχετίζεται με την στοιχειώδη οντότητα. Στον βρόχο ρεύματος η μαγνητική διπολική ροπή ισούται με το γινόμενο της έντασης  $i$  και της επιφάνειας που οριοθετεί ο βρόχος  $A$ . Στο μαγνητικό δίπολο, το οποίο βρίσκεται σε απόλυτη αντιστοιχία με το ηλεκτρικό δίπολο, η ροπή ισούται με το γινόμενο του «μαγνητικού φορτίου»  $p$  με την απόσταση μεταξύ των δύο πόλων  $l$ . Ο όρος μαγνητικό φορτίο είναι προφανώς μία αφηρημένη έννοια που δεν υφίσταται πραγματικά. Αν και στη φύση δεν έχει αποδειχθεί ακόμη ότι δύναται να υπάρξει μόνο βόρειος ή μόνο νότιος πόλος, χρησιμοποιούμε αυτή την έννοια για να δώσουμε την αντιστοιχία των μεγεθών με το ηλεκτρικό πεδίο. Αποτέλεσμα της παραπάνω πρότασης αποτελεί το γεγονός ότι οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι πάντα κλειστές, δηλαδή ξεκινούν από βόρειο και καταλήγουν σε νότιο πόλο. Σε αντίθεση, στο ηλεκτρικό πεδίο μπορούμε να έχουμε ακτινική για παράδειγμα κατανομή, με δυναμικές γραμμές που καταλήγουν στο άπειρο.

Η μηχανική ροπή που ασκείται σε μαγνητικό δίπολο ροπής  $m$  όταν αυτό βρεθεί σε πεδίο επαγωγής  $B$  δίνεται από την σχέση που ακολουθεί.

$$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B} \quad (1.5)$$

Επομένως στον κενό χώρο η ροπή αυτή θα είναι

$$\vec{\tau} = \mu_0 \vec{m} \times \vec{H} \quad (1.6)$$

Αυτό σημαίνει ότι το δίπολο τείνει να ευθυγραμμιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε η μαγνητική διπολική ροπή να είναι παράλληλη με την μαγνητική επαγωγή του πεδίου, ή εναλλακτικά, το πεδίο που ο βρόχος ρεύματος δημιουργεί, να είναι παράλληλο με αυτήν.

Αν δεν υπάρχουν εξωτερικές δυνάμεις να δρουν πάνω στο μαγνητικό δίπολο, τότε η δύναμη που ασκείται σε αυτό από το πεδίο είναι δατηρητική. Έτσι μπορούμε να εκφράσουμε την ενέργεια του διπόλου ως εξής.

$$E = -\vec{m} \cdot \vec{H} \quad (1.7)$$

Ο στοιχειώδης βρόχος ρεύματος είναι και αυτός γνωστός ως μαγνητικό δίπολο για ιστορικούς λόγους. Το πεδίο που δημιουργεί ένας τέτοιος βρόχος σε μεγάλη απόσταση είναι όμοιο με το πεδίο που θα δημιουργούσε μία υποθετική κατανομή δύο αντίθετων μαγνητικών πόλων  $p$  σε απόσταση  $l$  μεταξύ τους.

Σε επόμενα κεφάλαια θα γίνει προφανής η σημασία της θεώρησης των μαγνητικών διπόλων και μαγνητικής διπολικής ροπής. Θα δούμε ότι στα μαγνητικά υλικά το ηλεκτρικό ρεύμα που γεννά το πεδίο προέρχεται από την κίνηση ηλεκτρονίων μέσα στην ύλη, ιδιαίτερα μαλιστα, την ιδιοπεριστροφή ασύζευκτων ηλεκτρονίων που προκαλεί μαγνητική διπολική ροπή ακόμη και απόντως συμβατικού ηλεκτρικού ρεύματος.

### 1.3 Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ GAUSS

Όπως προαναφέρθηκε, οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου σχηματίζουν πάντα κλειστά μονοπάτια. Αυτό οφείλεται στην εμφάνιση μαγνητικών πόλων μόνο κατά ζεύγη στη φύση. Οι δυναμικές γραμμές είναι μία αφηρημένη γεωμετρική αναπαράσταση της διεύθυνσης και μέτρου του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής. Οι διάφοροι τύποι πεδίου μπορούν να οπτικοποιηθούν με χρήση μαγνητικής σκόνης ή ρινισμάτων σιδήρου. Κάτι τέτοιο επιβεβαιώνει τον προηγούμενο ισχυρισμό.

Ο νόμος του Gauss, στη γενική του μορφή, δίνει την ροή διανυσματικού μεγέθους μέσα από κλειστή επιφάνεια, σαν το επιφανειακό ολοκλήρωμα του διανύσματος αυτού. Λόγω της ανωτέρω ιδιότητας των δυναμικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου (για την οποία το πεδίο  $\vec{B}$  χαρακτηρίζεται και ως σωληνοειδές), η μαγνητική ροή που εισέρχεται σε μία κλειστή επιφάνεια ισούται με αυτήν που εξέρχεται. Έτσι ο νόμος του Gauss για την μαγνητική επαγωγή καταλήγει στη παρακάτω μορφή.

$$\oiint_{\text{closed surface}} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (1.8)$$

όπου  $d\vec{A} = dA \cdot \hat{A}$ , με  $dA$  το στοιχειώδες εμβαδό πάνω στην κλειστή επιφάνεια, και  $\hat{A}$  το μοναδιαίο διάνυσμα στη θέση του  $dA$ , κάθετο στην  $dA$ , με φορά προς τα έξω.

## 1.4 ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ MAXWELL

### 1.4.1 ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ MAXWELL ΓΙΑ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Μέχρι τώρα έχουμε μελετήσει την γενική μορφή των νόμων Ampere/Biot-Savart και Gauss. Στην πράξη, και σε μακροσκοπική κλίμακα, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία (που θα αναφέρονται χάρη συντομίας ως Η/Μ πεδία) μπορούν να περιγραφούν πλήρως από μία ομάδα τεσσάρων διαφορικών εξισώσεων που είναι γνωστές με την ονομασία Εξισώσεις Maxwell.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{νόμος Ampere}) \quad (1.9)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{νόμος του Faraday}) \quad (1.10)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{νόμος του Gauss για την μ.ροή}) \quad (1.11)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{νόμος του Gauss για την ηλ. ροή}) \quad (1.12)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις  $\vec{E}$  είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου,  $\vec{D}$  το διάνυσμα της διηλεκτρικής μετατόπισης (ή πυκνότητα ηλεκτρικής ροής) και  $\rho$  η πυκνότητα της χωρικής κατανομής ηλεκτρικού φορτίου. Με τις εξισώσεις αυτές γίνεται φανερό η αντιστοιχία μεγεθών ανάμεσα σε ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο.

## 1.4.2 ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ Η ΧΡΟΝΟΕΞΑΡΤΩΜΕΝΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ

Οι εξισώσεις Maxwell αποτελούν τη βάση για την περιγραφή οποιουδήποτε Η/Μ πεδίου. Ισχύουν δε τόσο σε περιπτώσεις σταθερών με τον χρόνο πεδίων όσο και όταν υπάρχει χρονική εξάρτηση. Εδώ ανακύπτουν δύο βασικά ερωτήματα. Πρώτον τι συμβαίνει σε συχνότητες αρκούντως χαμηλές (τυπικά  $<10^{14}$ Hz) όπου ο παράγοντας των ρευμάτων μετατόπισης είναι πρακτικά μηδέν. Στην περίπτωση αυτή η πρώτη εκ των εξισώσεων καταλήγει στον νόμο Ampere για στατικά με το χρόνο πεδία. Δεύτερον, παρουσία μαγνητικών υλικών, οι ιδιότητες των υλικών αυτών μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το βάθος διείσδυσης των πεδίων σε ένα ηλεκτρικά αγωγίμο μέσο. Η πιο οικεία περίπτωση είναι η δημιουργία ρευμάτων eddy (eddy currents) που επάγονται στον όγκο ηλεκτρικά αγωγίμου μέσου με αποτέλεσμα το μαγνητικό πεδίο στο υλικό να μεταβάλλεται σε σχέση με το βάθος διείσδυσης.

Ξεκινώντας από τις τέσσερις εξισώσεις Maxwell μπορούμε να καταλήξουμε σε μία περιγραφική σχέση για ένα χρονοεξαρτώμενο μαγνητικό πεδίο, σε μέσο ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $\sigma$ , και διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon$ .

$$\nabla^2 \vec{H} - \nabla \nabla \cdot \vec{H} = \sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (1.13)$$

Στην ειδική περίπτωση του κενού χώρου, λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση μεταξύ B και H, καθώς και τον νόμο του Gauss για την μαγνητική ροή έχουμε

$$\nabla^2 \vec{H} - \sigma \mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \epsilon \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.14)$$

Η παραπάνω εξίσωση για το μαγνητικό πεδίο αποτελεί εξίσωση κύματος και συμπεριλαμβάνει την απόσβεση που μπορεί να προκαλέσει η παρουσία αγωγίμου μέσου.

## 1.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ

Στην παράγραφο αυτή θα αναφέρουμε τις βασικότερες περιπτώσεις μαγνητικών πεδίων και τις σχέσεις υπολογισμού αυτών.

**(i) Πεδίο στο εσωτερικό λεπτού σωληνοειδούς με θεωρητικά άπειρο μήκος.**

$$H = ni \quad (1.15)$$

Το πεδίο είναι πρακτικά ομογενές, με διεύθυνση τον άξονα του σωληνοειδούς, και φορά που βρίσκεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού. Το μέτρο φαίνεται στη σχέση (1.15) όπου n είναι ο αριθμός σπειρών ανά μονάδα μήκους και i το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο. Στην πράξη, για να κατασκευάσουμε ένα «άπειρο» πηνίο δίνουμε στο πηνίο τοροειδές σχήμα. Έτσι το πεδίο θα είναι

$$H = \frac{N}{2\pi r} i \quad (1.16)$$

όπου N ο συνολικός αριθμός σπειρών και r η ακτίνα του τοροειδούς.

**(ii) Πεδίο κατά μήκος του άξονα αγωγίμου κυκλικού βρόχου**

$$H = \frac{ia^2}{2(a^2 + x^2)^{3/2}} \quad (1.17)$$

όπου  $a$  η ακτίνα του βρόχου και  $x$  η απόσταση από το κέντρο του κύκλου. Η φορά του πεδίου βρίσκεται και εδώ με τον κανόνα του δεξιού χεριού.

**(iii) Πεδίο από δύο ομοαξονικά, όμοια πηνία**

Συχνά, για να δημιουργήσουμε ένα ομογενές πεδίο σε μεγάλο όγκο, χρησιμοποιούμε ένα ζεύγος πηνίων Helmholtz. Η διάταξη αυτή (που θα βρει πειραματική εφαρμογή στη συνέχεια της εργασίας αυτής) αποτελείται από δύο όμοια και με ίδιο αριθμό σπειρών πηνία, με κοινό άξονα, συνδεδεμένα σε σειρά και με ίδια φορά περιέλιξης. Η απόσταση μεταξύ των πηνίων είναι ίση με την κοινή τους ακτίνα. Στην περίπτωση αυτή, η αξονική συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου στο μέσο της απόστασης δίνεται από τη σχέση

$$H = \frac{8Ni}{5^{3/2} R} \quad (1.18)$$

όπου  $R$  η κοινή ακτίνα και  $N$  ο αριθμός σπειρών κάθε πηνίου. Στην πράξη, μπορεί να αποδειχθεί ότι σε μία ευρεία περιοχή γύρω από τον άξονα το  $H$  παραμένει σταθερό, ενώ μεταβάλλεται ανεπαίσθητα καθώς μετακινούμαστε ελαφρά κατά μήκος του άξονα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ικανοποιητικά ομογενούς πεδίου, πράγμα που θα φανεί πολύ χρήσιμο στη συνέχεια, κατά τη διαδικασία των μετρήσεων.

**(iv) Πεδίο στο κέντρο πολυστρωματικού πηνίου πεπερασμένου μήκους**

Μία επίσης σημαντική πρακτική εφαρμογή παρουσιάζεται όταν χρειαζόμαστε αυξημένη ένταση μαγνητικού πεδίου σε σωληνοειδές σταθερού μήκους. Στην περίπτωση αυτή, είναι προτιμότερο να αυξηθεί ο αριθμός σπειρών ανά μονάδα μήκους, παρά η ένταση του ρεύματος στο πηνίο. Είναι γνωστό ότι η θερμότητα Joule σε αγωγό γνωστής ωμικής αντίστασης είναι ανάλογη του τετραγώνου του ρεύματος. Έτσι, διπλασιασμός του ρεύματος τετραπλασιάζει τις θερμικές απώλειες, ενώ διπλασιασμός του αριθμού σπειρών (άρα και της αντίστασης) τις διπλασιάζει. Για το λόγο αυτό, όταν υπάρχει απαίτηση υψηλής έντασης μαγνητικού πεδίου, κατασκευάζονται πηνία με πολλές στρώσεις περιελίξεων. Σε αυτά τα πηνία η εσωτερική και εξωτερική ακτίνα δεν μπορούν να θεωρηθούν ίσες και οι υπολογισμοί του πεδίου είναι αρκετά πολύπλοκοι. Συνοπτικά, το πεδίο στο κέντρο ενός τέτοιου πηνίου δίνεται από τις σχέσεις

$$H_0 = F(a, \beta) \cdot f(i, a_1, a_2) \quad (1.19)$$

$$F(a, \beta) = \beta[\arcsin h(a/\beta) - \arcsin h(1/\beta)] \quad (1.20)$$

$$f(i, a_1, a_2) = \frac{Ni}{L} \cdot \frac{a_1}{(a_2 - a_1)} \quad (1.21)$$

$$a = \frac{a_2}{a_1} \quad (1.22)$$

$$\beta = \frac{L}{2a_1} \quad (1.23)$$

όπου N:αριθμός σπειρών, i:ένταση ρεύματος, L:μήκος πηνίου,  $a_1$ :ακτίνα εσωτερικού τυλίγματος,  $a_2$ :ακτίνα εξωτερικού τυλίγματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ [1]

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε εν συντομία στον τρόπο με τον οποίο οι μαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού συνδέονται με την μαγνητική επαγωγή.

#### 2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες παραγράφους, η στοιχειώδης οντότητα του μαγνητισμού είναι το μαγνητικό δίπολο. Με τον όρο αυτό συμπεριλαμβάνουμε τόσο τους στοιχειώδεις βρόχους ρεύματος, όπως είναι αυτοί που προκαλούνται από την ιδιοπεριστροφή των ασύζευκτων ηλεκτρονίων, όσο και το μαγνητικό ισοδύναμο του ηλεκτρικού διπόλου. Το τελευταίο θα λέγαμε πως είναι μάλλον μία αφηρημένη μαθηματική προσέγγιση, η οποία όμως απλουστεύει πολύ τους θεωρητικούς υπολογισμούς. Σε κάθε περίπτωση πάντως, κύριο χαρακτηριστικό του διπόλου, είναι η μαγνητική διπολική ροπή την οποία ορίσαμε μέσω της μηχανικής ροπής που ασκείται σε ένα δίπολο όταν αυτό βρεθεί σε μαγνητικό πεδίο, από τη σχέση (1.5). Λόγω της μαγνητικής διπολικής ροπής, τα μαγνητικά δίπολα σε ένα υλικό τείνουν να προσανατολιστούν με τέτοιο τρόπο ώστε το παραγόμενο από αυτά πεδίο να είναι παράλληλο στο εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο.

Στο σημείο αυτό μπορούμε να ορίσουμε το μέγεθος της μαγνήτισης ως την μαγνητική διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου ενός υλικού μέσου.

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V} \quad (2.1)$$

Για να συσχετίσουμε την μαγνήτιση με το μέγεθος της μαγνητικής επαγωγής θα σκεφτούμε ως εξής. Έστω ραβδόμορφος μαγνήτης, μήκους  $l$  (θεωρούμε ότι οι δύο πόλοι του μαγνήτη είναι συγκεντρωμένοι στα άκρα του), με εμβαδό διατομής  $A$  και  $\Phi$  η μαγνητική ροή στο κέντρο του. Η μαγνητική ροπή τότε δίνεται από τη σχέση

$$\vec{m} = \frac{\Phi l}{\mu_0} \quad (2.2)$$

Από τις δύο παραπάνω σχέσεις καταλήγουμε στην εξής σχέση για τη μαγνήτιση

$$M = \frac{\Phi}{\mu_0 A} \quad (2.3)$$

Τέλος, λόγω του ορισμού της μαγνητικής επαγωγής ως πυκνότητα μαγνητικής ροής ή μαγνητικής ροής ανά μονάδα επιφάνειας καταλήγουμε

$$\vec{M} = \frac{B}{\mu_0} \quad (2.4)$$

Στην περίπτωση αυτή δεν λάβαμε υπόψη την ύπαρξη εξωτερικών συμβατικών ηλεκτρικών ρευμάτων που θα γεννούσαν μαγνητικό πεδίο. Έτσι, η μαγνητική επαγωγή δίνεται από τη σχέση  $B = \mu_0 M$ . Εδώ γίνεται προφανές ότι τόσο η μαγνήτιση, όσο και η παρουσία εξωτερικού πεδίου  $H$  συνεισφέρουν στη μαγνητική επαγωγή με παρόμοιο τρόπο.

## 2.2 ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ, ΕΝΤΑΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Στην προηγούμενη παράγραφο είδαμε ότι το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής περιλαμβάνει δύο συνεισφορές, μία από το εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο και μία από τη μαγνήτιση του υλικού. Η μαγνητική επαγωγή στο κενό είναι  $\mu_0 H$ , ενώ με την σύμβαση που ακολουθούμε η συνεισφορά από τη μαγνήτιση του υλικού είναι  $\mu_0 M$ . Η μαγνητική επαγωγή λοιπόν θα είναι απλά το διανυσματικό άθροισμα των δύο μεγεθών.

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.5)$$

όπου το  $B$  δίνεται σε Tesla, ενώ το  $M$  και  $H$  σε Ampere/m. Η παραπάνω εξίσωση είναι αληθής σε κάθε περίπτωση. Το μαγνητικό πεδίο  $H$  μπορεί να δημιουργηθεί από ηλεκτρικά ρεύματα έξω από το υλικό, ή από ένα σωληνοειδές ή από έναν ηλεκτρομαγνήτη, ή τέλος από έναν μόνιμο μαγνήτη. Η μαγνήτιση είναι αποτέλεσμα των μη αντισταθμισμένων spin και τροχιακών κινήσεων των ασύζευκτων ηλεκτρονίων στον όγκο του υλικού.

## 2.3 ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΕΣΜΟΥ

Έχοντας μελετήσει επαρκώς το μέγεθος της μαγνήτισης, εγείρεται το ερώτημα, κατά πόσον υπάρχει ένα άνω όριο στην μαγνήτιση που ένα δεδομένο υλικό μπορεί να φτάσει.

Υποθέτουμε ότι κάποιο υλικό διαθέτει  $n$  στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα ανά μονάδα όγκου, κάθε ένα εκ των οποίων παρουσιάζει μαγνητική διπολική ροπή  $m$ . Το υλικό θα παρουσιάσει μαγνήτιση κορεσμού όταν όλα τα στοιχειώδη δίπολα προσανατολιστούν παράλληλα μεταξύ τους, και προφανώς παράλληλα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Η μαγνήτιση κορεσμού λοιπόν θα ισούται με το γινόμενο  $n$  επί  $m$ . Για να κατανοήσουμε πλήρως τον μηχανισμό της μαγνήτισης θα πρέπει να αναπτύξουμε την θεωρία των μαγνητικών περιοχών (magnetic domain processes), κάτι που θα γίνει σε επόμενες ενότητες. Για την ώρα, αρκεί να αναφέρουμε ότι ένα υλικό θα φτάνει σε μαγνήτιση κόρου στην κατάσταση όπου θα αποτελείται από μία και μόνο μαγνητική περιοχή.

## 2.4 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ – ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε τα μεγέθη που καθορίζουν την απόκριση-αντίδραση μαγνητικών υλικών παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Τα μεγέθη αυτά είναι η μαγνητική διαπερατότητα (permeability) που ορίζεται ως εξής

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.6)$$

και η μαγνητική επιδεκτικότητα (susceptibility) η οποία δίνεται από την σχέση που ακολουθεί.

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2.7)$$

Επίσης ορίζουμε την διαφορική διαπερατότητα και επιδεκτικότητα από τις παρακάτω σχέσεις.



$$\mu' = \frac{dB}{dH} \quad (2.8)$$

$$\chi' = \frac{dM}{dH} \quad (2.9)$$

Εφόσον τα B και M δύνανται ή όχι να είναι γραμμικές συναρτήσεις του H, ανάλογα με τον τύπο του υλικού, συμπεραίνουμε ότι η διαπερατότητα και η επιδεκτικότητα δεν είναι απαραίτητα πραγματικές σταθερές.

Πολλές φορές στην πράξη συναντάμε τον όρο σχετική μαγνητική διαπερατότητα, που χρησιμοποιείται κυρίως στο S.I σύστημα και ορίζεται ως εξής

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.10)$$

όπου  $\mu_0$  είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του κενού είναι προφανώς ίση με 1. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα συνδέεται στενά με την μαγνητική επιδεκτικότητα και η ακόλουθη σχέση ισχύει σε κάθε περίπτωση.

$$\mu_r = \chi + 1 \quad (2.11)$$

Άλλα μεγέθη που συχνά χρησιμοποιούνται είναι η αρχική διαπερατότητα και η αρχική επιδεκτικότητα. Οι ποσότητες αυτές παριστάνουν τις τιμές των αντίστοιχων μεγεθών στην αρχή της καμπύλης μαγνήτισης του υλικού.

$$\mu_{in} = \left( \frac{dB}{dH} \right)_{B=0, H=0} = \left( \frac{B}{H} \right)_{B \rightarrow 0, H \rightarrow 0} \quad (2.12)$$

$$\chi_{in} = \left( \frac{dM}{dH} \right)_{M=0, H=0} = \left( \frac{M}{H} \right)_{M \rightarrow 0, H \rightarrow 0} \quad (2.13)$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ [1]

Έχοντας μελετήσει τη μακροσκοπική συμπεριφορά της ύλης παρουσία μαγνητικού πεδίου, είμαστε σε θέση να ταξινομήσουμε τα μαγνητικά υλικά βάσει των μαγνητικών ιδιοτήτων τους, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους που μέχρι τώρα ορίσαμε. Θα ασχοληθούμε ιδιαίτερα με την σημαντικότερη κατηγορία, τα σιδηρομαγνητικά υλικά, τις χρήσεις τους, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο οι μακροσκοπικές τους ιδιότητες καθορίζουν την καταλληλότητά τους για συγκεκριμένες εφαρμογές.

#### 3.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

##### 3.1.1 ΔΙΑΜΑΓΝΗΤΙΚΑ, ΠΑΡΑΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΦΕΡΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα μαγνητικά υλικά ταξινομούνται με βάση την επιδεκτικότητα που παρουσιάζουν. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει υλικά για τα οποία η επιδεκτικότητα είναι μικρή και αρνητική,  $\chi \approx -10^{-5}$ . Τα υλικά αυτά ονομάζονται διαμαγνητικά και η μαγνητική τους απόκριση αντιτίθεται στο εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Παραδείγματα αυτής της κατηγορίας αποτελούν ο χαλκός, ο άργυρος, το βισμούθιο και το βυρήλλιο. Οι υπεραγωγοί αποτελούν μία υποκατηγορία διαμαγνητικών υλικών με  $\chi \approx -1$ .

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει υλικά για τα οποία η επιδεκτικότητα είναι μικρή και θετική. Τα υλικά αυτά λέγονται παραμαγνητικά και η επιδεκτικότητά τους κυμαίνεται από  $10^{-3}$  έως  $10^{-5}$ . Η μαγνήτιση των παραμαγνητικών υλικών είναι ασθενής αλλά προσανατολισμένη παράλληλα με το μαγνητικό πεδίο. Το αλουμίνιο είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας.

Η σημαντικότερη κατηγορία μαγνητικών υλικών είναι τα σιδηρομαγνητικά (ferromagnetic-ferrimagnetic) των οποίων η επιδεκτικότητα είναι θετική, πολύ μεγαλύτερη της μονάδας, και τυπικά μπορεί να λάβει τιμές από 50 έως 10000. Τέτοια υλικά είναι ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο καθώς και κάποιες σπάνιες μεταλλικές γαίες με τα κράματά τους.

##### 3.1.2 ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ, ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΣΕ ΔΙΑΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Καθώς η θερμοκρασία παραμένει σταθερή, και για σχετικά χαμηλές τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου, η επιδεκτικότητα των διαμαγνητικών και παραμαγνητικών υλικών είναι επίσης σταθερή. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, τα υλικά χαρακτηρίζονται ως γραμμικά, δηλαδή η μαγνήτιση είναι ευθέως ανάλογη της έντασης μαγνητικού πεδίου. Επομένως μπορούμε να γράψουμε

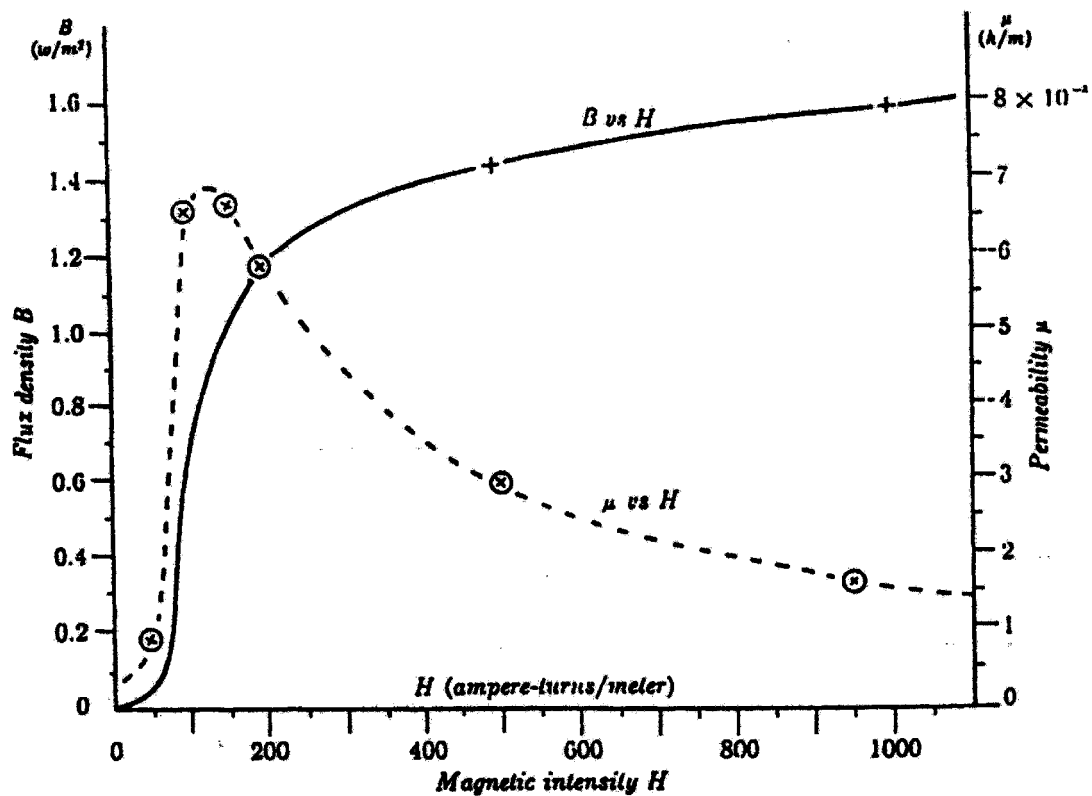
$$M = \chi \cdot H \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} B &= \mu_0(1 + \chi)H \\ &= \mu_0\mu_r H \\ &= \mu H \end{aligned} \quad (3.2)$$

Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_r$  είναι ελαφρώς μεγαλύτερη της μονάδας στα παραμαγνητικά και ελαφρώς μικρότερη της μονάδας στα διαμαγνητικά υλικά. Ταυτόχρονα, η επιδεκτικότητα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη του μηδέν στα παραμαγνητικά και ελαφρώς μικρότερη του μηδέν στα διαμαγνητικά. Η γραμμική σχέση που αναφέραμε μας επιτρέπει να γράψουμε μία σχέση αναλογίας ανάμεσα στα  $B$  και  $H$  για αυτά τα υλικά, και σε συνθήκες ασθενούς μαγνητικού πεδίου. Η γραμμική αυτή προσέγγιση παύει να ισχύει σε υψηλότερες τιμές μαγνητικού πεδίου, καθώς τα παραμαγνητικά υλικά παρουσιάζουν μαγνήτιση κορεσμού σε πολύ ισχυρά πεδία.

### 3.1.3 ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ $\mu_r$ ΚΑΙ $\chi$ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΛΙΚΑ

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, τόσο η επιδεκτικότητα όσο και η σχετική μαγνητική διαπερατότητα επηρεάζονται έντονα από το εξωτερικό πεδίο  $H$  καθώς και την προηγούμενη κατάσταση του υλικού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο ανοπτισμένος σίδηρος, του οποίου η διαπερατότητα κατά μήκος της αρχικής καμπύλης μαγνήτισης φαίνεται στο σχήμα 3.1. Στον πίνακα 3.1 παρατηρούμε τις τιμές επιδεκτικότητας και σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας διαφόρων διαμαγνητικών και παραμαγνητικών υλικών.



Σχήμα 3.1 Αρχική καμπύλη μαγνήτισης – μαγνητική διαπερατότητα κατά μήκος αυτής για ανοπτισμένο σίδηρο

**Πίνακας 3.1** Επιδεκτικότητες και διαπερατότητες διαφόρων στοιχείων

		$\chi$	$\mu_r$
<i>Diamagnets</i>	<b>Bi</b>	$- 1.31 \times 10^{-6}$	0.999 9987
	<b>Be</b>	$- 1.85 \times 10^{-6}$	0.999 9982
	<b>Ag</b>	$- 2.02 \times 10^{-6}$	0.999 9980
	<b>Au</b>	$- 2.74 \times 10^{-6}$	0.999 9973
	<b>Ge</b>	$- 0.56 \times 10^{-6}$	0.999 9994
	<b>Cu</b>	$- 0.77 \times 10^{-6}$	0.999 9992
<i>Paramagnets</i>	<b><math>\beta</math>-Sn</b>	$0.19 \times 10^{-6}$	1.000 0002
	<b>W</b>	$6.18 \times 10^{-6}$	1.000 0062
	<b>Al</b>	$1.65 \times 10^{-6}$	1.000 0016
	<b>Pt</b>	$21.04 \times 10^{-6}$	1.000 0210
	<b>Mn</b>	$66.10 \times 10^{-6}$	1.000 0660

### 3.1.4 ΑΛΛΟΙ ΤΥΠΟΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Για λόγους πληρότητας θα αναφέρουμε στην ενότητα αυτή κάποιες κατηγορίες υλικών οι οποίες δεν μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τις τρεις κατηγορίες που έως τώρα αναφέρθηκαν. Τα υλικά αυτά σχετίζονται άμεσα με τα σιδηρομαγνητικά, κυρίως λόγω των μικροσκοπικών ιδιοτήτων της δομής τους, και είναι τα φερριμαγνητικά, αντιφερρομαγνητικά, ελικομαγνητικά και υπερπαραμαγνητικά. Τα υλικά αυτά ανακαλύφθηκαν πολλά χρόνια μετά από τους σιδηρομαγνήτες. Μάλιστα, μετά από μετρήσεις των μακροσκοπικών μαγνητικών τους ιδιοτήτων τα φερριμαγνητικά συγγέονταν με τα σιδηρομαγνητικά ενώ τα αντιφερρομαγνητικά και ελικομαγνητικά με τα παραμαγνητικά.

## 3.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούν μακράν τη σημαντικότερη κλάση μαγνητικών υλικών. Αυτό μπορεί εύκολα να φανεί τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Απαντώνται σε ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών, χάρην κυρίως της υψηλής τους μαγνητικής διαπερατότητας, καθώς και στην ιδιότητά τους να διατηρούν τη μαγνήτισή τους, ακόμα και μετά την απομάκρυνση του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

### 3.2.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Το σημαντικότερο ίσως χαρακτηριστικό των σιδηρομαγνητών είναι η υψηλή τους σχετική μαγνητική διαπερατότητα. Η διαπερατότητα σε τέτοιου τύπου μέσα δεν είναι σταθερή σαν συνάρτηση της εντάσεως του μαγνητικού πεδίου, όπως στα παραμαγνητικά υλικά. Αντίθετα, για να μπορέσουμε να χαρακτηρίσουμε κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό ως προς τις μαγνητικές του ιδιότητες θα πρέπει να μετρήσουμε την μαγνητική επαγωγή συναρτήσει του  $H$ , σε μία ευρεία κλίμακα τιμών πεδίου, λαμβάνοντας έτσι την καμπύλη υστέρησης του υλικού.

Παρόλα αυτά, μπορούμε να πούμε ότι η διαπερατότητα σιδηρομαγνητικών υλικών κείται στο εύρος τιμών από 10 έως 100000. Τις μεγαλύτερες τιμές δίνουν

ειδικά κράματα, όπως το permalloy και το supermalloy, τα οποία είναι κράματα σιδήρου – νικελίου. Τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται μόνιμοι μαγνήτες έχουν χαμηλότερες μαγνητικές διαπερατότητες, όμως η αξιοποίησή τους βασίζεται στην ικανότητα να διατηρούν μεγάλα ποσοστά της μαγνήτισής τους, ακόμα και απουσία μαγνητικού πεδίου.

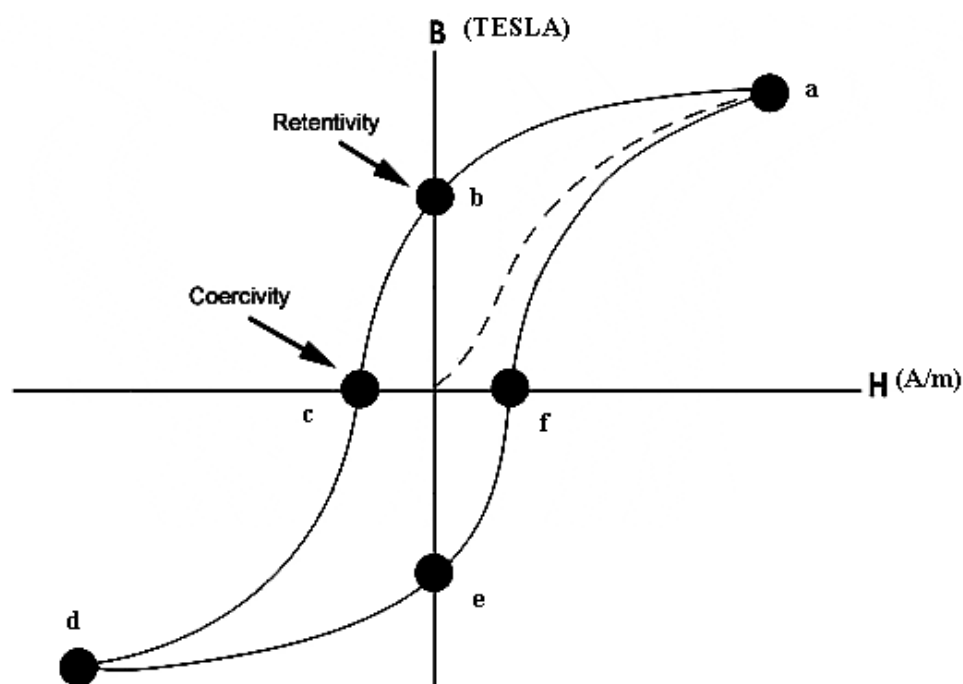
### 3.2.2 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ (RETENTIVITY)

Η πιο ευρέως γνωστή ιδιότητα των σιδηρομαγνητών είναι η ικανότητά τους να μαγνητίζονται, όταν βρεθούν μέσα σε μαγνητικό πεδίο, και να διατηρούν την μαγνήτισή τους, ακόμη και όταν το εξωτερικό πεδίο απομακρυνθεί. Η ικανότητά τους αυτή αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό που τους διαχωρίζει από τα παραμαγνητικά υλικά, τα οποία παραμένουν μαγνητισμένα, μόνο για όσο διάστημα βρίσκονται εντός μαγνητικού πεδίου.

### 3.2.3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗ

Οι μακροσκοπικές μαγνητικές ιδιότητες της ύλης μπορούν εύκολα να αναπαρασταθούν με χάραξη του διαγράμματος της μαγνητικής επαγωγής συναρτήσει της έντασης μαγνητικού πεδίου. Εναλλακτικά είναι δυνατή η χάραξη του αντίστοιχου διαγράμματος της μαγνήτισης, από το οποίο όμως παίρνουμε ακριβώς τις ίδιες πληροφορίες, όπως φαίνεται και από τη σχέση (2.5).

Το σχήμα 3.2 παρουσιάζει έναν τυπικό βρόχο υστέρησης που συχνά αναφέρεται και ως B-H loop. Ένας τέτοιος βρόχος παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες οι οποίες μπορούν να καθορίσουν αν κάποιο υλικό είναι κατάλληλο ή όχι, για μία δεδομένη εφαρμογή.



Σχήμα 3.2 Τυπικός βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού.

Ένα σιδηρομαγνητικό υλικό το οποίο δεν έχει ποτέ πριν μαγνητιστεί, ή που έχει απομαγνητιστεί πλήρως, ακολουθεί αρχικά την διακεκομμένη γραμμή του σχήματος 3.2, καθώς το εξωτερικό πεδίο αρχίζει να αυξάνεται. Είναι προφανές, ότι για ένα μεγάλο γενικά εύρος τιμών του  $H$ , το  $B$  συνεχίζει διαρκώς να αυξάνεται. Φτάνοντας στο σημείο  $a$ , περαιτέρω αύξηση του μαγνητικού πεδίου επηρεάζει ανεπαίσθητα την επαγωγή. Σε αυτό το σημείο λέμε ότι το υλικό έχει φτάσει τη μαγνήτιση κορεσμού (§ 3.2.4). Στη συνέχεια, καθώς το  $H$  αρχίζει σταδιακά να ελαττώνεται η καμπύλη μετακινείται από το σημείο  $a$  στο  $b$ . Σε αυτό το σημείο, αν και το εξωτερικό πεδίο έχει μηδενιστεί, η πυκνότητα μαγνητικής ροής δεν είναι μηδέν. Το σημείο  $b$  παριστάνει την αντίσταση απομαγνήτισης (retentivity) του υλικού. Στη συνέχεια, καθώς το πεδίο αρχίζει να λαμβάνει αρνητικές τιμές, δηλαδή να αυξάνεται με αντίστροφη πολικότητα, η μαγνητική επαγωγή ελαττώνεται, και στο σημείο  $c$  μηδενίζεται. Το σημείο αυτό δίνει πληροφορίες για το συνεκτικό πεδίο του υλικού, (coercivity), (§ 3.2.6). Καθώς το πεδίο εξακολουθεί να αυξάνεται αρνητικά, το υλικό θα φτάσει σε μαγνήτιση κόρου προς την αντίθετη φορά (σημείο  $d$ ). Στη συνέχεια, το εξωτερικό πεδίο ελαττώνεται και η καμπύλη περνάει από το σημείο  $e$  όπου αντιστοιχεί στην αντίσταση απομαγνήτισης της αντίστροφης φοράς. Παρατηρούμε ότι καθώς συνεχίζουμε να αυξάνουμε το  $H$ , η καμπύλη δεν θα περάσει ξανά από την αρχή των αξόνων, αλλά από το σημείο  $f$ , λόγω της παραμένουσας μαγνήτισης (remanence), (§ 3.2.5). Σε αυτό το σημείο, μπορούμε να κατανοήσουμε τη σημασία των μεγεθών  $\mu_{in}$  και  $\chi_{in}$  τα οποία ορίσαμε στις εξισώσεις (2.12), (2.13) τα οποία αντιστοιχούν στην κλίση της διακεκομμένης καμπύλης κοντά στην αρχή των αξόνων.

### 3.2.4 ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΕΣΜΟΥ (SATURATION MAGNETIZATION)

Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, το υλικό είναι αρχικά αμαγνήτιστο. Καθώς αυξάνουμε σταδιακά το μαγνητικό πεδίο, η μαγνήτιση θα φτάσει τελικά σε κάποια τιμή  $M_0$ . Η τιμή αυτή απεικονίζει την κατάσταση όπου όλα τα στοιχειώδη δίπολα στον όγκο του υλικού είναι ευθυγραμμισμένα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο, και ονομάζεται μαγνήτιση κορεσμού. Εξαρτάται δε, από την ατομική μαγνητική διπολική ροπή του υλικού και τον αριθμό ατόμων ανά μονάδα όγκου, με βάση την παρακάτω σχέση

$$M_0 = nm \quad (3.3)$$

Το  $M_0$  εξαρτάται μόνο από τον τύπο του υλικού και όχι από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δείγματος. Μερικές τυπικές τιμές της μαγνήτισης κόρου χαρακτηριστικών υλικών φαίνονται στον πίνακα 3.2.

### 3.2.5 ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ (REMANENCE)

Όπως ήδη αναφέρθηκε, όταν το εξωτερικό πεδίο απομακρύνεται, τότε η πυκνότητα μαγνητικής ροής δεν μηδενίζεται. Οι τιμές επαγωγής και μαγνήτισης που αντιστοιχούν σε αυτή την κατάσταση (σημεία  $b$  και  $e$  του βρόχου υστέρησης) καλούνται παραμένουσα επαγωγή και παραμένουσα μαγνήτιση (remanent induction, remanent magnetization). Η σχέση που τα συνδέει είναι

$$B_R = \mu_o M_R \quad (3.4)$$

**Πίνακας 3.2** Μαγνήτιση κορεσμού διαφόρων σιδηρομαγνητών

<i>Material</i>	$M_0$ ( $10^6$ A m <sup>-1</sup> )
Iron	1.71
Cobalt	1.42
Nickel	0.48
78 Permalloy (78% Ni, 22% Fe)	0.86
Supermalloy (80% Ni, 15% Fe, 5% Mo)	0.63
Metglas 2605 (Fe <sub>80</sub> B <sub>20</sub> )	1.27
Metglas 2615 (Fe <sub>80</sub> P <sub>16</sub> C <sub>3</sub> B <sub>1</sub> )	1.36
Permendur (50% Co, 50% Fe)	1.91

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει σαφής ο διαχωρισμός που υπάρχει ανάμεσα στους όρους remanence και remanent induction ή remanent magnetization, σε σημαντικό κομμάτι της βιβλιογραφίας. Με τον όρο remanence περιγράφουμε το ποσό της επαγωγής ή μαγνήτισης που το υλικό διατηρεί μετά την απομάκρυνσή του H, και αφού πρώτα το υλικό έχει φτάσει σε μαγνήτιση κορεσμού. Οι άλλοι δύο όροι αντιστοιχούν στην παραμένουσα επαγωγή ή μαγνήτιση, μετά την απομάκρυνση του H, το οποίο όμως δεν έχει οδηγήσει τον σιδηρομαγνήτη σε επίπεδα μαγνητικού κορεσμού. Με τον τρόπο αυτό, η ποσότητα remanence, αποτελεί το άνω φράγμα των ποσοτήτων remanent induction και remanent magnetization.

### 3.2.6 ΣΥΝΕΚΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ (COERCIVITY – COERCIVE FORCE)

Για να επαναφέρουμε έναν προηγούμενα μαγνητισμένο σιδηρομαγνήτη σε κατάσταση πλήρους απομαγνήτισης πρέπει να εφαρμόσουμε εξωτερικό πεδίο έντασης H<sub>c</sub>. Το πεδίο αυτό καλείται συνεκτικό πεδίο-coercive field, ή coercive force ή coercivity και αντιστοιχεί στις τιμές του H στα σημεία c και f της καμπύλης υστέρησης. Όπως και με την παραμένουσα μαγνήτιση, κάποιοι συγγραφείς αναφέρονται στον όρο coercivity ως το απαιτούμενο πεδίο για να απομαγνητιστεί ένα υλικό που προηγουμένως έχει οδηγηθεί σε μαγνητικό κορεσμό. Αντίστοιχα, ο όρος coercive force περιγράφει το πεδίο που απαιτείται για να απομαγνητιστεί ένα υλικό που δεν έχει προηγουμένως φτάσει σε μαγνήτιση κόρου.

### 3.2.7 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονίσουμε, ότι η μαγνητική διαπερατότητα ενός υλικού δεν είναι η παράμετρος που περιγράφει τις ιδιότητές του με απόλυτη ακρίβεια καθώς, λόγω της υστέρησης, κατά μήκος μίας καμπύλης μαγνήτισης-απομαγνήτισης μπορούμε να λάβουμε σχεδόν κάθε τιμή για την διαπερατότητα, συμπεριλαμβανομένης της  $\mu = \infty$  ( $B = B_R, H = 0$ ) και της  $\mu = 0$  ( $B = 0, H = H_c$ ).

Η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα που ορίζεται ως εξής

$$\mu' = \frac{dB}{dH}$$

είναι μία ποσότητα που μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη, αν και αυτή επίσης εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Η μέγιστη τιμή της, που λαμβάνεται όταν το  $H$  ισούται με το συνεκτικό πεδίο, και η αρχική διαφορική επιτρεπτότητα,  $\mu_{initial}$ , που είναι η κλίση της αρχικής καμπύλης μαγνήτισης στην αρχή των αξόνων, είναι δυνατό να συσχετιστούν ευκολότερα με πολλές από τις μικροσκοπικές μαγνητικές ιδιότητες της ύλης.

### 3.2.8 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ CURIE

Όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά, όταν θερμανθούν μέχρι μία κατάλληλη θερμοκρασία μετατρέπονται σε παραμαγνητικά. Η θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα η μετάβαση από σιδηρομαγνητική σε παραμαγνητική φύση, είναι γνωστή ως θερμοκρασία Curie. Σε αυτή τη θερμοκρασία, η μαγνητική διαπερατότητα παρουσιάζει δραματική μείωση, και έτσι τόσο η παραμένουσα μαγνήτιση όσο και το συνεκτικό πεδίο γίνονται μηδέν. Η μελέτη των μηχανισμών στους οποίους οφείλεται το φαινόμενο αυτό είναι πέρα από τους σκοπούς αυτής της εργασίας. Σε αυτό το στάδιο, θα αντιμετωπίσουμε το φαινόμενο σαν μία μακροσκοπική ιδιότητα, βασισμένη σε εμπειρικά αποτελέσματα και παρατηρήσεις. Στον πίνακα 3.3 παραθέτουμε τις θερμοκρασίες Curie κάποιων χαρακτηριστικών σιδηρομαγνητών.

**Πίνακας 3.3** Θερμοκρασίες Curie διαφόρων υλικών

<i>Material</i>	<i>Curie temperature (°C)</i>
<b>Iron</b>	<b>770</b>
<b>Nickel</b>	<b>358</b>
<b>Cobalt</b>	<b>1130</b>
<b>Gadolinium</b>	<b>20</b>
<b>Terfenol</b>	<b>380–430</b>
<b>Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B</b>	<b>312</b>
<b>Alnico</b>	<b>850</b>
<b>SmCo<sub>5</sub></b>	<b>720</b>
<b>Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub></b>	<b>810</b>
<b>Hard ferrites</b>	<b>400–700</b>
<b>Barium ferrite</b>	<b>450</b>

## 3.3 ΤΥΠΟΙ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει μία απλή αναφορά στους κυριότερους τύπους σιδηρομαγνητικών υλικών και τις τεχνολογικές εφαρμογές όπου αυτοί απαντώνται.

### 3.3.1 ΜΑΛΑΚΟΙ ΚΑΙ ΣΚΛΗΡΟΙ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΕΣ

Μία πρώτη ταξινόμηση των σιδηρομαγνητικών υλικών μπορεί να γίνει με βάση την τιμή του συνεκτικού τους πεδίου. Το συνεκτικό πεδίο είναι μία παράμετρος που εξαρτάται από τη δομή του υλικού. Δηλαδή μπορεί να μεταβληθεί αν το υλικό υποστεί κατάλληλη θερμική ή μηχανική κατεργασία. Στο παρελθόν παρατηρήθηκε

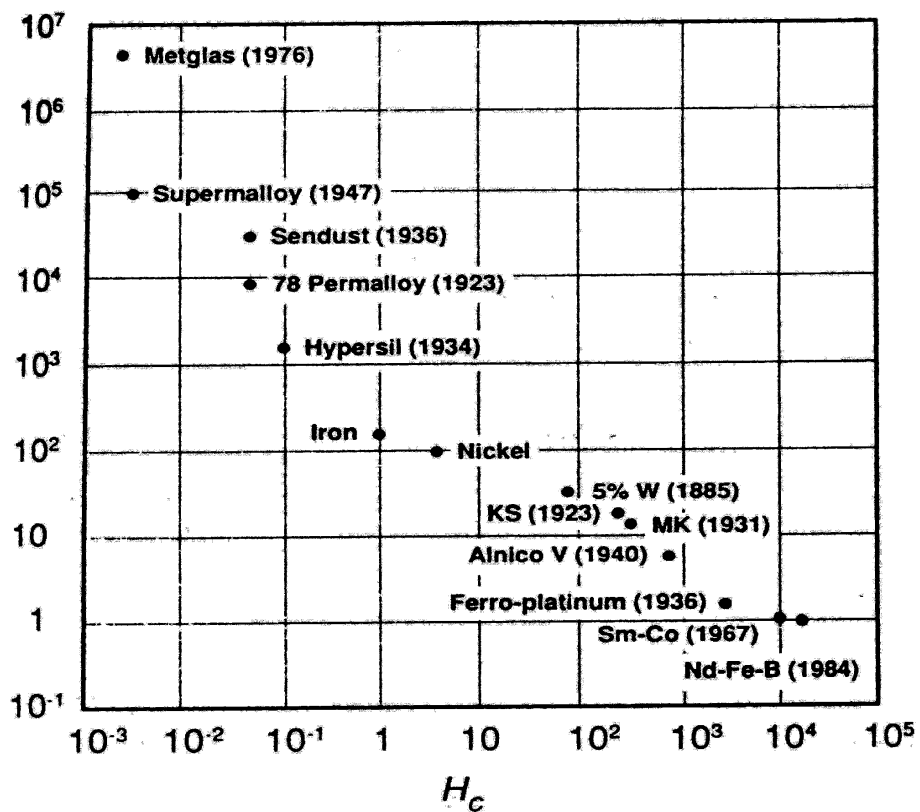


οτι δείγματα σιδήρου, ή ατσαλιού που είχαν υψηλή μηχανική σκληρότητα, παρουσίαζαν επίσης υψηλή τιμή συνεκτικού πεδίου. Το αντίθετο συνέβαινε με τα μαλακά υλικά. Για το λόγο αυτό, ο διαχωρισμός σε σκληρά και μαλακά μαγνητικά υλικά κατέληξε να αναφέρεται στην τιμή του συνεκτικού πεδίου. Έτσι, σκληρά χαρακτηρίζονται τα υλικά με συνεκτικό πεδίο μεγαλύτερο από 10 kA/m (125Oe), ενώ μαλακά είναι εκείνα με τιμή μικρότερη από 1kA/m (12.5Oe). Στον πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι τιμές συνεκτικού πεδίου και σχετικής διαπερατότητας κάποιων χαρακτηριστικών υλικών.

### 3.3.2 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΕΣ

Τα μαλακά μαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως ηλεκτρομαγνήτες, κινητήρες, μεταγωγείς και ηλεκτρομαγνητικά ρελέ. Η υψηλή διαπερατότητα, ώστε να επιτυγχάνεται υψηλή επαγωγή, καθώς και το ασθενές συνεκτικό πεδίο, ώστε να είναι εύκολη η αντιστροφή της επαγωγής, αποτελούν τα δύο βασικά κριτήρια για την επιλογή ενός υλικού ως πυρήνα σε κύκλωμα ηλεκτρομαγνήτη.

Πίνακας 3.4 Συνεκτικό πεδίο και permeability



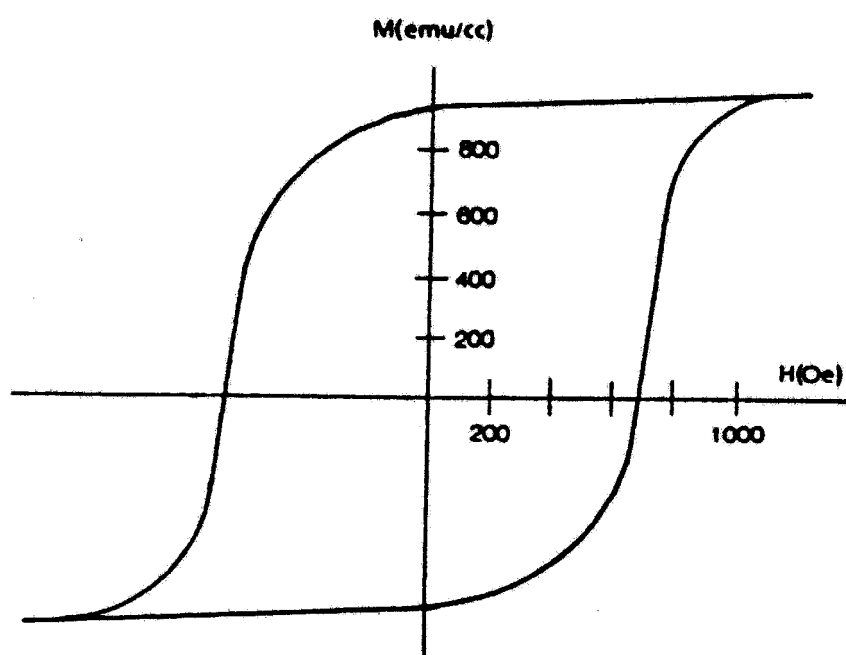
### 3.3.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτει κάποιο υλικό για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κύκλωμα μετασχηματιστή, είναι προφανώς η υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, αλλά και η χαμηλή αγωγιμότητα. Όπως γνωρίζουμε, οι μετασχηματιστές λειτουργούν με a.c. ρεύματα. Επομένως υψηλή αγωγιμότητα του μαγνητικού πυρήνα θα προκαλέσει μεγάλες απώλειες ισχύος λόγω ρευμάτων eddy.

Για το λόγο αυτό, η αγωγιμότητα υλικών που προορίζονται για χρήση σε μετασχηματιστές μειώνεται μετά από νόθευση με πυρίτιο.

### 3.3.4 ΥΛΙΚΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα υλικά μαγνητικής αποθήκευσης παρουσιάζουν ιδιότητες οι οποίες πλησιάζουν εκείνες των μόνιμων μαγνητών. Αυτά τα υλικά λοιπόν πρέπει να έχουν υψηλή τιμή συνεκτικού πεδίου, ώστε να αποφεύγεται ανεπιθύμητη απομαγνήτιση και απώλεια δεδομένων, καθώς και σχετικά υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό σε μέσα μαγνητικής αποθήκευσης είναι το  $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (γάμμα οξείδιο του σιδήρου), και το νοθευμένο με κοβάλτιο  $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Ο τυπικός βρόχος υστέρησης υλικών μαγνητικής αποθήκευσης είναι εν γένει τετραγωνικής μορφής και ένας τέτοιος βρόχος φαίνεται στο σχήμα 3.3



Σχήμα 3.3 Τυπικός βρόχος υστέρησης υλικού μαγνητικής Αποθήκευσης.

### 3.3.5 ΜΟΝΙΜΟΙ ΜΑΓΝΗΤΕΣ

Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες μαγνητικών υλικών. Οι χρήσεις στις οποίες βρίσκουν εφαρμογή είναι σε ηλεκτρικούς κινητήρες, γεννήτριες, ηχεία, τηλεοπτικές συσκευές κλπ. Οι απαιτήσεις κάθε εφαρμογής καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του υλικού, τα οποία στην περίπτωση των μόνιμων μαγνητών παριστάνονται από την καμπύλη απομαγνήτισης, δηλαδή στο τμήμα του βρόχου που βρίσκεται στο δεύτερο τεταρτημόριο του καρτεσιανού συστήματος. Είναι σημαντικό να τονίσουμε, ότι στους μόνιμους μαγνήτες όπως και στα περισσότερα μαγνητικά υλικά, οι τελικές ιδιότητες εξαρτώνται από την μεταλλουργική κατεργασία στην οποία το υλικό υποβάλλεται, και φυσικά στην χημική του σύσταση και στοιχειομετρία. Εκτός από το ισχυρό συνεκτικό πεδίο, ιδιαίτερη σημασία για τους μόνιμους μαγνήτες έχει και το μέγιστο ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο. Η παράμετρος αυτή καθορίζεται από τη μέγιστη τιμή του γινομένου  $|BH|$  κατά μήκος της καμπύλης απομαγνήτισης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ [1]

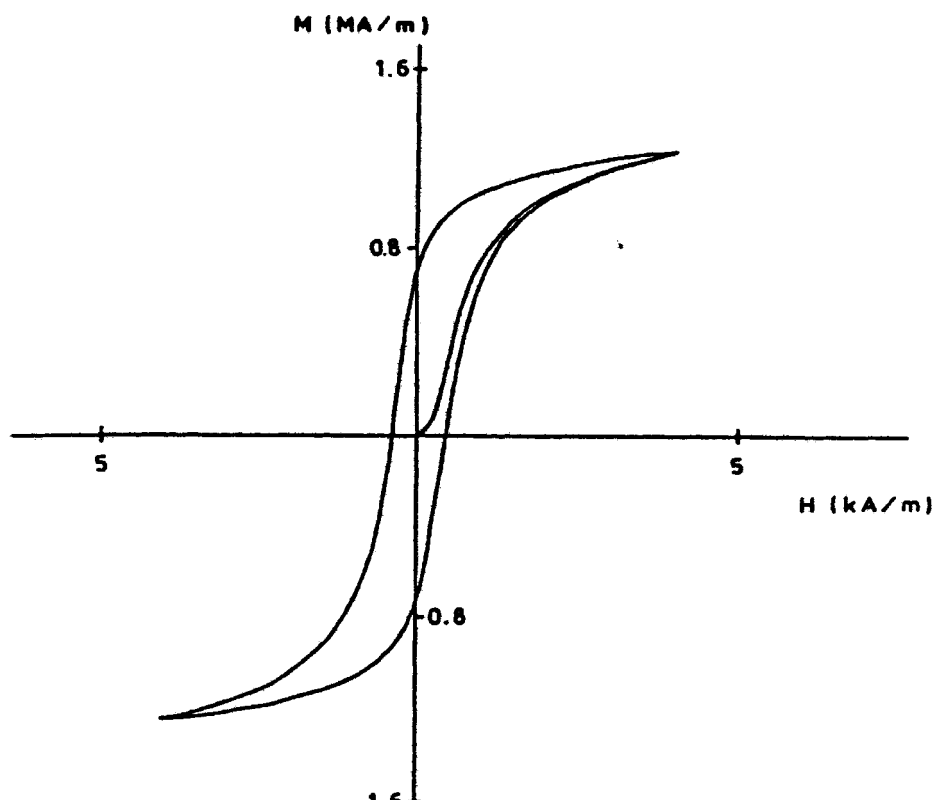
Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε τα αίτια της υστέρησης στα σιδηρομαγνητικά υλικά. Επίσης, θα δούμε τρόπους με τους οποίους μπορούμε να ποσοτικοποιήσουμε τη μαγνήτιση σε σχέση με το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στις ασυνέχειες Barkhausen καθώς και στο φαινόμενο της μαγνητοελαστικότητας.

#### 4.1 ΥΣΤΕΡΗΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

##### 4.1.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

Στο σχήμα 4.1 παρατηρούμε έναν τυπικό σιγμοειδή βρόχο υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού. Μία τέτοια καμπύλη παρέχει τις πληροφορίες εκείνες που είναι απαραίτητες για τον χαρακτηρισμό του υλικού. Πόσες όμως είναι οι παράμετροι που χρειάζονται για την πλήρη περιγραφή ενός βρόχου υστέρησης; Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα δεν είναι συγκεκριμένη. Γενικά, για βρόχο της μορφής του σχ. 4.1 μπορούμε να τις απαριθμήσουμε κάνοντας έτσι μια εκτίμηση.

Η πρώτη παράμετρος είναι η μαγνήτιση κορεσμού,  $M_0$  που αποτελεί ένα άνω φράγμα της μαγνήτισης. Το εύρος του βρόχου κατά μήκος του άξονα  $H$  που ισούται με το διπλάσιο του  $H_c$  είναι επίσης μία ανεξάρτητη παράμετρος, καθώς δεν εξαρτάται από τη μαγνήτιση κόρου.



Σχήμα 4.1 Τυπικός σιγμοειδής βρόχος υστέρησης

Το ύψος του βρόχου κατά τον άξονα Β που ισούται με την παραμένουσα μαγνήτιση αποτελεί επίσης έναν βαθμό ελευθερίας καθώς είναι γενικά ανεξάρτητη των  $M_0$  και  $H_c$ . Επίσης, ο προσανατολισμός του βρόχου, δηλαδή η μέγιστη τιμή της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας μπορεί να μεταβληθεί ανεξάρτητα από τις προηγούμενες παραμέτρους. Οι απώλειες υστέρησης  $W_H$  όπως και η αρχική διαφορική διαπερατότητα μπορούν να είναι επίσης ανεξάρτητες παράμετροι. Τέλος, η καμπυλότητα των πλευρών του βρόχου, αν και δεν είναι προφανώς ανεξάρτητη παράμετρος, σίγουρα δεν εξαρτάται από παράγοντες όπως το συνεκτικό πεδίο ή η μέγιστη διαφορική διαπερατότητα.

Μετά από αυτά, μπορούμε να πούμε ότι οι μακροσκοπικές μαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού είναι δυνατόν να περιγραφούν πλήρως με πέντε ή έξι ανεξάρτητες παραμέτρους. Στη βιβλιογραφία, οι πίνακες μαγνητικών ιδιοτήτων υλικών περιλαμβάνουν τα εξής μεγέθη:  $H_c$ ,  $B_R$ ,  $W_H$ ,  $\mu_{in}$ ,  $\mu_{max}$  και  $M_0$ .

#### 4.1.2 ΤΑ ΑΙΤΙΑ ΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

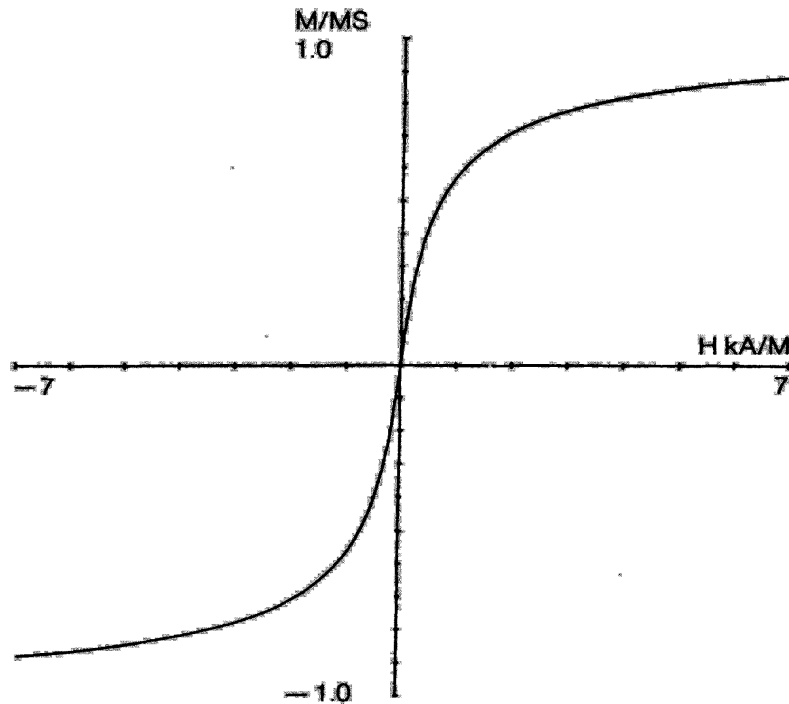
Είναι γνωστό ότι αν ένα δείγμα σιδήρου υποστεί ψυχρή κατεργασία, τότε οι απώλειες υστέρησης και το συνεκτικό του πεδίο αλλάζουν. Επίσης, η νόθευση σιδήρου με μή μαγνητικά στοιχεία, όπως άνθρακα κατά την κατασκευή χάλυβα επιφέρει στο δείγμα παρόμοια αποτελέσματα.

Οι εμπειρικές παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν ήταν γνωστές πολύ πριν αναπτυχθούν οι θεωρίες για την υστέρηση. Είχε αποδειχθεί ότι οι ατέλειες ενός υλικού, είτε σαν ανωμαλίες στην κρυσταλλική δομή, είτε σαν ύπαρξη ακαθαρσιών ή ουσιών εμπλουτισμού προκαλούσαν μία αύξηση στις απώλειες ενέργειας κατά τη διαδικασία της μαγνήτισης. Το φαινόμενο της υστέρησης οφείλεται σε αυτές ακριβώς τις ατέλειες.

Ένας άλλος μηχανισμός που ευνοεί την υστέρηση είναι η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία. Στα ανισοτροπικά στερεά, τα στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα, απουσία μαγνητικού πεδίου, προτιμούν να ευθυγραμμίζονται ως προς συγκεκριμένους κρυσταλλογραφικούς άξονες, καθώς αυτό οδηγεί σε κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας. Με την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, τα μαγνητικά δίπολα αποκλίνουν από τις αρχικές τους θέσεις και τείνουν να προσανατολιστούν παράλληλα με νέους, πλην όμως ισοδύναμους κρυσταλλογραφικά άξονες, οι οποίοι σχηματίζουν μικρότερες γωνίες με το εξωτερικό πεδίο. Αυτό προκαλεί την ασυνεχή και μή αναστρέψιμη περιστροφή των μαγνητικών διπολικών ροπών. Η διαδικασία αυτή θα μελετηθεί περαιτέρω στην ενότητα της θεωρίας των μαγνητικών περιοχών.

#### 4.1.3 ΑΝΥΣΤΕΡΗΤΙΚΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ

Αν κάνουμε την παραδοχή ότι κύριο αίτιο της υστέρησης είναι οι ατέλειες, ανεξάρτητα από την φύση αυτών, τότε, αγνοώντας τα αποτελέσματα της ανισοτροπίας και θεωρώντας δείγμα χωρίς ατέλειες, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η καμπύλη μαγνήτισης δεν θα παρουσιάζει υστέρηση. Αυτό σημαίνει ότι η μαγνητική επαγωγή είναι μία μονοσήμαντα ορισμένη συνάρτηση της έντασης του πεδίου και συνεπώς η καμπύλη μαγνήτισης είναι αναστρέψιμη. Το σχήμα 4.2 παρουσιάζει μία τυπική μορφή μη υστερητικής καμπύλης μαγνήτισης.



Σχήμα 4.2 Μή υστερητική καμπύλη μαγνήτισης

#### 4.1.4 Η ΣΧΕΣΗ FROHLICH-KENNELLY

Μία ποσοτική σχέση ανάμεσα στην μαγνήτιση και στην ένταση μαγνητικού πεδίου είναι προφανώς ιδιαίτερα χρήσιμη. Ο Frohlich πρώτος κατέληξε σε μία εμπειρική σχέση για την ανυστερητική μαγνήτιση και αργότερα ο Kennelly πρότεινε μία διαφορετική αλλά ισοδύναμη μορφή. Η εξίσωση του Frohlich για την ανυστερητική μαγνήτιση είναι

$$M = \frac{aH}{1 + \beta H} \quad (4.1)$$

όπου  $a / \beta = M_0$ , αφού όταν το  $H$  τείνει στο άπειρο, τότε η μαγνήτιση πρέπει να πλησιάζει στην τιμή κορεσμού. Ο Kennelly κατέληξε σε μία έκφραση για την επιδεκτικότητα σε υψηλές τιμές εντάσεως πεδίου, καθώς δηλαδή η μαγνήτιση πλησιάζει σε τιμή κορεσμού. Με προσαρμογή της εκφράσεως αυτής στο S.I. έχουμε

$$\frac{1}{\mu - \mu_0} = \alpha + bH \quad (4.2)$$

#### 4.1.5 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΧΑΜΗΛΟΥ ΠΕΔΙΟΥ: Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ RAYLEIGH

Στη συνέχεια θα μελετήσουμε την αρχική καμπύλη μαγνήτισης, δηλαδή τη μεταβολή της μαγνήτισης καθώς ένα συνεχές μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται σε έναν αρχικά αμαγνήτιστο σιδηρομαγνήτη. Ο Rayleigh παρατήρησε ότι για το κομμάτι της καμπύλης μαγνήτισης που αντιστοιχεί σε ασθενές πεδίο, η διαπερατότητα μπορούσε να προσεγγιστεί με μία σχέση της μορφής

$$\mu(H) = \mu(0) + \nu H \quad (4.3)$$

η οποία οδηγεί στην ακόλουθη παραβολική εξάρτηση του  $B$  από το  $H$  κατά μήκος της αρχικής καμπύλης μαγνήτισης

$$B(H) = \mu(0)H + \nu H^2 \quad (4.4)$$

Σύμφωνα με τον Rayleigh ο όρος  $\mu(0)H$  αντιστοιχεί στην αναστρέψιμη μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής ενώ ο όρος  $\nu H^2$  στην μή αναστρέψιμη. Ο Rayleigh ισχυρίστηκε ότι οι μικρού πλάτους βρόχοι υστέρησης μπορούν να παρασταθούν από παραβολικές καμπύλες οι οποίες έχουν μία αναστρέψιμη διαφορική διαπερατότητα στις «ακμές» του βρόχου, που είναι ίση με  $\mu(0)$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3. Από αυτή την υπόθεση καθώς και από τον νόμο Rayleigh μπορούμε να καταλήξουμε στην παρακάτω εξίσωση για καμπύλες μαγνήτισης σε ασθενή μαγνητικά πεδία.

$$B = [(\mu(0) + \nu H_m)]H \pm (\nu/2)(H_m^2 - H^2) \quad (4.5)$$

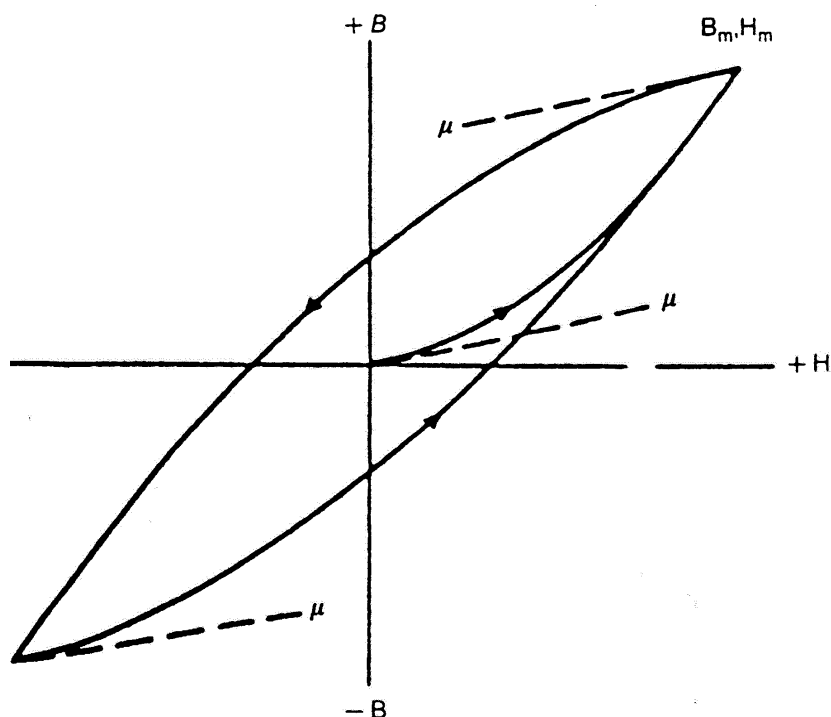
όπου  $H_m$  η μέγιστη τιμή εντάσεως του πεδίου, δηλαδή η τιμή του  $H$  στις «ακμές» του βρόχου. Τέτοιου τύπου βρόχοι ονομάζονται βρόχοι Rayleigh.

Από τα παραπάνω καταλήγουμε σε δύο σημαντικά αποτελέσματα για τις απώλειες υστέρησης και την παραμένουσα μαγνήτιση.

$$W_H = \int H \cdot dB = (4/3)\nu H_m^3 \quad (4.6)$$

$$B_R = (\nu/2)H_m^2 \quad (4.7)$$

Πρέπει εδώ να τονίσουμε ότι οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν μόνο για μικρές τιμές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Αν το  $H$  αρχίσει να αυξάνεται πέρα από κάποιο κατώφλι, τότε η παραβολική εξάρτηση παύει να ισχύει.



Σχήμα 4.3 Βρόχος υστέρησης τύπου Rayleigh

#### 4.1.6 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΨΗΛΟΥ ΠΕΔΙΟΥ: ΠΛΗΣΙΑΖΟΝΤΑΣ ΣΤΟΝ ΚΟΡΕΣΜΟ

Όταν το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο παίρνει υψηλές τιμές, τότε η μαγνήτιση πλησιάζει στην τιμή κορεσμού. Η πρώτη απόπειρα να δοθεί μία έκφραση για την οριακή αυτή κατάσταση οδήγησε στον νόμο του Lamont.

$$x' = \frac{dM}{dH} = \text{const} \tan t \times (M_0 - M) \quad (4.8)$$

που απλά δηλώνει ότι η διαφορική επιδεκτικότητα σε υψηλά πεδία είναι ανάλογη της διαφοράς  $M_0 - M$ . Μεταγενέστερες εργασίες έδειξαν ότι η συμπεριφορά υψηλού πεδίου μπορεί να μοντελοποιηθεί με βάση τη σχέση των Doring και Bozorth, η οποία δίνει σε μορφή σειράς

$$M = M_0 \left( 1 - \frac{\alpha}{H} - \frac{\beta}{H^2} - \dots \right) + kH \quad (4.9)$$

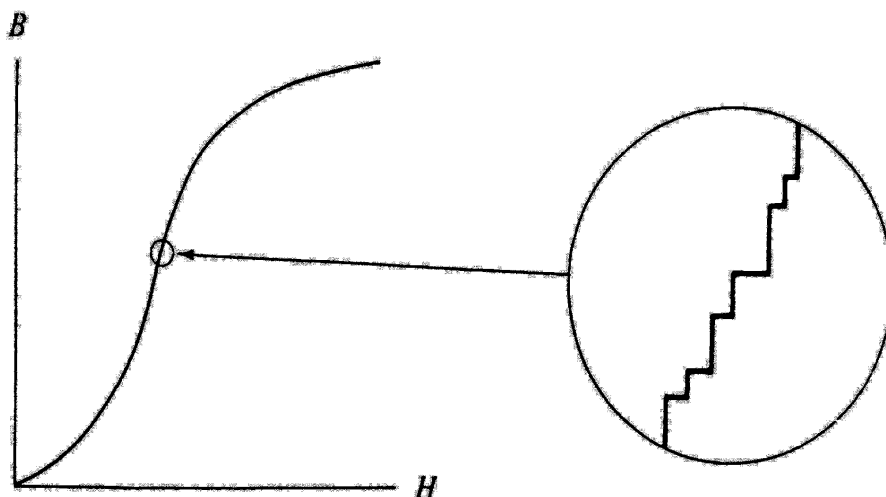
όπου ο τελικός όρος  $kH$  παριστάνει την εξαναγκασμένη μαγνήτιση, δηλαδή την εκ πεδίου επαγόμενη αύξηση στην αυθόρμητη μαγνήτιση του υλικού. Η συνεισφορά του όρου αυτού είναι γενικά αμελητέα, εξαιρουμένης της περίπτωσης που το  $H$  παίρνει μεγάλες τιμές, γενικά μεγαλύτερες από 100000Oe. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι αν αναλύσουμε τη σχέση Frohlich – Kennelly σε σειρά, θα πάρουμε ένα αποτέλεσμα σχεδόν όμοιο με αυτό της σχέσης 4.9. Αυτό εξηγείται εύκολα αφού σε υψηλά πεδία, ο άνω και κάτω κλάδος του βρόχου υστέρησης και η ανυστερητική μαγνήτιση πλησιάζουν ασυμπτωτικά.

## 4.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ BARKHAUSEN

### 4.2.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Σύμφωνα με το φαινόμενο Barkhausen, καθώς το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται με τρόπο συνεχή, υπάρχουν ασυνεχείς μεταβάσεις στην πυκνότητα μαγνητικής ροής στο εσωτερικό ενός σιδηρομαγνητικού υλικού. Αυτό παρατηρήθηκε αρχικά το 1919, όταν ένα πηνίο λήψης τυλιγμένο γύρω από ένα δείγμα σιδήρου συνδέθηκε με ενισχυτή και ηχείο. Καθώς το πεδίο  $H$  αυξανόταν ομοιόμορφα, το ηχείο παρήγαγε μία σειρά ασθενών κλικ, τα οποία οφείλονταν σε μικρού πλάτους παλμούς που επάγονταν στο πηνίο λήψης. Σε συμφωνία με το νόμο της επαγωγής, οι παλμοί αυτοί οφείλονταν σε μικρές αλλαγές της πυκνότητας μαγνητικής ροής δια μέσω του πηνίου που πήγαζαν από ασυνεχείς μεταβάσεις της μαγνήτισης και συνεπώς της μαγνητικής επαγωγής.

Αν η αρχική καμπύλη μαγνήτισης που μοιάζει συνεχής καθώς το  $H$  μεγαλώνει, μεγεθυνθεί σημαντικά, τότε οι ασυνεχείς μεταβάσεις που συνιστούν το φαινόμενο Barkhausen μπορούν να γίνουν άμεσα ορατές, όπως στο σχήμα 4.4. Αρχικά το φαινόμενο αποδόθηκε σε απότομες ασυνεχείς περιστροφές της φοράς μαγνήτισης μέσα σε κάθε μαγνητική περιοχή. Σήμερα είναι γνωστό ότι η κίνηση των συνόρων των μαγνητικών περιοχών είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που προκαλεί τις μεταβάσεις Barkhausen, μολονότι και οι δύο μηχανισμοί είναι υπαρκτοί και συνεισφέρουν στο φαινόμενο. Καθώς οι μεταβάσεις Barkhausen επηρεάζονται σημαντικά από την μεταβολή της μικροδομής του υλικού καθώς και από την επιβολή μηχανικών τάσεων, μετρήσεις του θορύβου Barkhausen είναι πολύ χρήσιμες στην εκτίμηση ιδιοτήτων των υλικών.



**Σχήμα 4.4** Ασυνέχειες Barkhausen κατά μήκος της αρχικής καμπύλης μαγνήτισης.

#### 4.2.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Η ποσοτική περιγραφή του φαινομένου έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα δύσκολη λόγω της τυχαίας φύσης του. Γενικά τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει βήματα προόδου προς την κατεύθυνση της μοντελοποίησης, κυρίως μέσω στοχαστικών μοντέλων και διαδικασιών. Σε τέτοιου είδους περιγραφές, οι ασυνεχείς μεταβάσεις οφείλονται στο «εσωτερικό δυναμικό» των μαγνητικών περιοχών που μεταβάλλεται καθώς αυτές κινούνται μέσα στο υλικό. Αν και αυτό το εσωτερικό δυναμικό έχει τυχαία φύση, το πλάτος και η περιοδικότητα των διακυμάνσεών του μπορούν να χαρακτηριστούν από μέσες τιμές, και αυτές οι δύο παράμετροι μπορούν να καθορίσουν την ένταση και τον αριθμό των ασυνεχών μεταβάσεων. Από τη λύση των αντίστοιχων μαθηματικών μοντέλων αποδύκνεται ότι για δεδομένο χρονικό διάστημα και δεδομένο ρυθμό μεταβολής του πεδίου, η δραστηριότητα Barkhausen σε ένα δεδομένο χρονικό παράθυρο εξαρτάται από εκείνη του προηγούμενου παραθύρου και μία ποσότητα που είναι εν γένει τυχαία. Η ποσότητα αυτή καθορίζει τη συσχέτιση των ασυνεχειών με την δραστηριότητα του προηγούμενου χρονικού παραθύρου. Μετά από πρόσφατες έρευνες έγινε γνωστό ότι το φαινόμενο μπορεί να περιγραφεί από δύο όρους. Ένα ντετερμινιστικό που μπορεί να αναπαραχθεί και εξαρτάται από τη διαφορική επιδεκτικότητα, και μία στοχαστική ή τυχαία διαδικασία.

#### 4.3 ΜΑΓΝΗΤΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Η μαγνήτιση ενός υλικού συνοδεύεται σχεδόν σε κάθε περίπτωση από μεταβολή των διαστάσεών του. Το φαινόμενο καλείται μαγνητοελαστικότητα και περιγράφεται από το μέγεθος  $\lambda$ . Γενικά, υπάρχουν δύο τύποι μαγνητοελαστικότητας: η αυθόρμητη μαγνητοελαστικότητα που οφείλεται στην αναδιάταξη των μαγνητικών διπολικών ροπών εντός μαγνητικών περιοχών στη θερμοκρασία Curie, και η εκ πεδίου προκαλούμενη. Σε κάθε περίπτωση η μαγνητοελαστικότητα ορίζεται ως η ποσοστιαία μεταβολή του μήκους σε κάποια διεύθυνση

$$L = dl/l \quad (4.10)$$



#### 4.3.1 ΑΥΘΟΡΜΗΤΗ ΜΑΓΝΗΤΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΙΣΟΤΡΟΠΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό ψύχεται από τη θερμοκρασία Curie, οι προηγούμενως ακανόνιστα διατεταγμένες μαγνητικές ροπές οι οποίες είχαν εντελώς τυχαίους προσανατολισμούς αναδιατάσσονται σε ομάδες ευθυγραμμισμένων ροπών κατά ομάδες που κάθε μία καταλαμβάνει συγκεκριμένο όγκο του υλικού. Μία τέτοια περιοχή περιέχει κατά κανόνα  $10^{12} - 10^{18}$  άτομα. Οι περιοχές αυτές στις οποίες όλα τα δίπολα είναι παράλληλα προς κοινή διεύθυνση, καλούνται μαγνητικές περιοχές-domains. Η φορά της αυθόρμητης μαγνήτισης ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή έτσι ώστε η συνολική μαγνήτιση του δείγματος να είναι μηδέν.

Κατά τη μετάβαση σε σιδηρομαγνητική φύση, η τάξη των μαγνητικών ατομικών ροπών είναι μεγάλης κλίμακας σε σχέση πάντα με τις ατομικές διαστάσεις, αλλά κάποιες τάξεις μεγέθους μικρότερη από εκείνη που υφίσταται όταν το δείγμα έρχεται σε μαγνητικό κορεσμό. Όταν ένα υλικό μετατρέπεται σε σιδηρομαγνητικό κάτω από τη θερμοκρασία Curie, η αυθόρμητη μαγνήτιση εντός μαγνητικών περιοχών λαμβάνει χώρα με ταυτόχρονη μαγνητοελαστικότητα  $\lambda_0$ , κατά μήκος ενός συγκεκριμένου άξονα. Στα ισοτροπικά υλικά, η αναδιάταξη των ροπών σε περιοχές γίνεται με την ίδια πιθανότητα για οποιαδήποτε κατεύθυνση. Επομένως, αν και το δείγμα υπόκειται σε μεταβολή των διατάσεων, η μεταβολή αυτή είναι ισοδύναμη προς κάθε κατεύθυνση, οπότε το σχήμα του δείγματος δεν αλλάζει.

#### 4.3.2 ΜΑΓΝΗΤΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΟΡΕΣΜΟΥ

Η μαγνητοελαστικότητα κορεσμού είναι η ποσοστιαία μεταβολή του μήκους ανάμεσα σε ένα αμαγνήτιστο σιδηρομαγνητικό δείγμα και στο ίδιο δείγμα σε μαγνητικό πεδίο ικανό να το φέρει σε κορεσμό κατά τον άξονα του. Στην περίπτωση αυτή, το σχήμα του δείγματος μεταβάλλεται καθώς το εφαρμοζόμενο πεδίο καθορίζει μία συγκεκριμένη κατεύθυνση κατά την οποία λαμβάνει χώρα η αναδιάταξη των ροπών.

#### 4.3.3 ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΜΑΓΝΗΤΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Τεχνητή μαγνήτιση κορεσμού προκαλείται όταν οι μαγνητικές περιοχές ενός δείγματος ευθυγραμμίζονται όλες προς την ίδια κατεύθυνση, δημιουργώντας έτσι μία περιοχή. Παρόλαυτα, αν το πεδίο αυξηθεί περαιτέρω, θα παρατηρηθεί μία ελαφριά αύξηση της μαγνήτισης του υλικού. Αυτή η διαδικασία καλείται εξαναγκασμένη μαγνήτιση.

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και με τη μαγνητοελαστικότητα. Τεχνητός κορεσμός προκαλείται όταν όλο το δείγμα μετατρέπεται σε μία περιοχή. Αν το εξωτερικό πεδίο αυξηθεί επιπλέον, παρατηρείται μία ανεπαίσθητη μεταβολή στην μαγνητοελαστικότητα και αυτό λέγεται εξαναγκασμένη μαγνητοελαστικότητα. Το φαινόμενο μπορεί να γίνει παρατηρήσιμο μόνο σε ισχυρά πεδία, της τάξης των 10000Oe. Τα αίτια του φαινομένου αυτού βρίσκονται στην περαιτέρω ευθυγράμμιση των ροπών μέσα σε κάθε μαγνητική περιοχή, και είναι ο ίδιος μηχανισμός που οφείλεται και για την εξαναγκασμένη μαγνήτιση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ [1]

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε τη θεωρία των μαγνητικών περιοχών – magnetic domains, η οποία περιγράφει σε μικροσκοπικό πλέον επίπεδο τους μηχανισμούς μαγνήτισης στα μαγνητικά υλικά.

#### 5.1 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Μιλώντας σε μακροσκοπική κλίμακα, η μαγνήτιση ενός υλικού οφείλεται καθαρά στην ύπαρξη μαγνητικού πεδίου. Για να κατανοήσουμε τις αντίστοιχες διαδικασίες σε μικροσκοπική κλίμακα πρέπει να μελετήσουμε τον τρόπο με τον οποίο ποικίλλει η μαγνήτιση μέσα στον όγκο ενός σιδηρομαγνήτη.

##### 5.1.1 ΑΤΟΜΙΚΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΔΙΠΟΛΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ

Καθώς το ελάχιστο δομικό στοιχείο της ύλης είναι το άτομο, είναι λογικό να υποθέσουμε ότι όταν ένα σιδηρομαγνητικό δείγμα είναι μαγνητισμένο υπάρχει μία μαγνητική διπολική ροπή ανά άτομο. Υπάρχουν δύο πιθανές θεωρήσεις για την ύπαρξη των μαγνητικών ροπών στους σιδηρομαγνήτες. Στην πρώτη περίπτωση, το υλικό μπορεί να έχει ήδη στον όγκο του ασθενείς ατομικές ροπές, οι οποίες είναι τυχαία προσανατολισμένες, και δίνουν μηδενικό διανυσματικό άθροισμα, ώστε η συνολική μαγνήτιση να είναι μηδέν στην κατάσταση απομαγνήτισης. Με την εφαρμογή πεδίου, οι ροπές αυτές ευθυγραμμίζονται κατά ομάδες, και έτσι το δείγμα αποκτά μαγνήτιση. Η εξήγηση αυτή αρχικά εκφράστηκε από τον Weber. Στη δεύτερη περίπτωση, οι ατομικές διπολικές ροπές δεν υπάρχουν στην κατάσταση απομαγνήτισης αλλά μπορούν να εμφανιστούν αν το δείγμα βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Αυτή είναι και η εξήγηση του Poisson.

Η ύπαρξη μαγνήτισης κορεσμού αλλά και παραμένουσας μαγνήτισης φαίνεται να επιβεβαιώνουν την ύπαρξη μόνιμων διπολικών ροπών στα σιδηρομαγνητικά υλικά, ανεξάρτητα από την παρουσία μαγνητικού πεδίου. Ο πρώτος που θεμελίωσε την ιδέα αυτή ήταν ο Ampere, ο οποίος υποστήριξε ότι οι ροπές στο εσωτερικό ενός υλικού οφείλονται στην συνεχή κυκλοφορία ηλεκτρικών ρευμάτων στο άτομο, αρκετά χρόνια μάλιστα πριν ανακαλυφθεί η ύπαρξη του ηλεκτρονίου.

##### 5.1.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΤΑΞΗ ΣΕ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τις ιδέες του Weber προσπάθησε να επεκτείνει αργότερα ο Ewing, με σκοπό να εξηγήσει τις διαφορές ανάμεσα σε ένα μαγνητισμένο και σε ένα πλήρως αμαγνήτιστο σιδηρομαγνήτη. Ισχυρίστηκε ότι οι ατομικές μαγνητικές ροπές (μοριακοί μαγνήτες όπως τότε αποκαλούνταν) είναι εντελώς τυχαία προσανατολισμένες στην κατάσταση απομαγνήτισης, αποκτούν όμως παράλληλη ευθυγράμμιση παρουσία εξωτερικού πεδίου. Ο Ewing ενδιαφέρθηκε κυρίως για την εξήγηση της υστέρησης με βάση την αλληλεπίδραση μεταξύ των ατομικών διπολικών ροπών. Η προσπάθειά του όμως απέτυχε καθώς δεν είχε συνειδητοποιήσει πως στον αμαγνήτιστο σίδηρο υπήρχε ήδη μία κατάσταση τάξης των διπολικών ροπών ανά ομάδες, δηλαδή μεγάλους αριθμούς ατόμων ευθυγραμμισμένων τοπικά προς κοινό άξονα.

### 5.1.3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΣΕ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΕΣ

Ένα από τα προβλήματα που επί χρόνια αναζητούσε εξήγηση είναι οι μεγάλες τιμές μαγνητικής διαπερατότητας και επιδεκτικότητας στα σιδηρομαγνητικά υλικά. Στην κατάσταση απομαγνήτισης, η συνολική μαγνήτιση του υλικού είναι μηδέν. Με την εφαρμογή όμως πεδίου οι σιδηρομαγνήτες αποκτούν μαγνητική πόλωση. Μάλιστα, η μαγνήτιση σε αυτά τα υλικά είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την ένταση του πεδίου που την προκάλεσε. Οι πιθανές εξηγήσεις είναι δύο. Είτε οι μαγνητικές ροπές είναι τυχαία προσανατολισμένες και το πεδίο σταδιακά τις ευθυγραμμίζει, όπως στα παραμαγνητικά υλικά, είτε οι ροπές είναι ευθυγραμμισμένες κατά ομάδες σε μεγάλους όγκους του υλικού, αλλά οι περιοχές αυτές είναι τυχαία προσανατολισμένες μεταξύ τους.

Οι ιδιότητες των σιδηρομαγνητών μπορούν να εξηγηθούν αν δεχθούμε την ύπαρξη μεγάλων περιοχών στις οποίες επικρατεί τάξη υπό τη έννοια του κοινού προσανατολισμού, κάθε μία από τις περιοχές αυτές όμως παρουσιάζει μαγνήτιση προς τυχαίες κατευθύνσεις έτσι ώστε η μαγνήτιση του υλικού να είναι μηδέν στην κατάσταση απομαγνήτισης. Τότε, η μαγνήτιση είναι απλά η διαδικασία αναδιάταξης ή επαναπροσανατολισμού των περιοχών αυτών ώστε οι επιμέρους μαγνήτισεις να ευθυγραμμιστούν μεταξύ τους. Σε αυτό το σημείο μπορούμε να εξηγήσουμε την διαφορά μεταξύ σιδηρομαγνητικών και παραμαγνητικών υλικών. Οι παραμαγνήτες δεν παρουσιάζουν εθυγράμμιση των ροπών σε μεγάλης κλίμακας περιοχές, όπως οι σιδηρομαγνήτες στην κατάσταση απομαγνήτισης. Μάλιστα, σε τέτοιες περιπτώσεις, οι μαγνητικές ροπές είναι τυχαία προσανατολισμένες σε όλο τον όγκο του υλικού λόγω της θερμικής ενέργειας, ή ενέργειας Boltzman

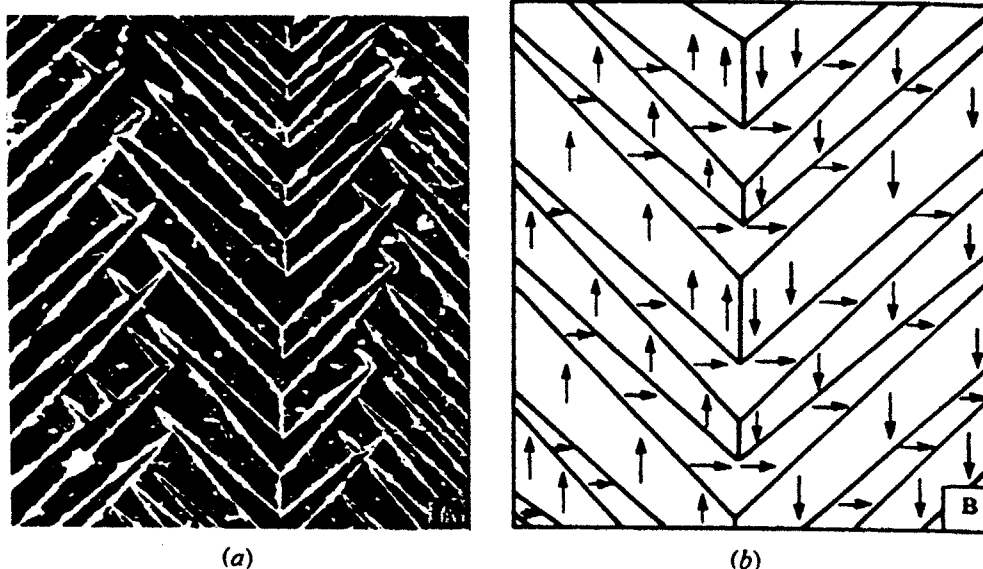
### 5.1.4 ΘΕΩΡΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ WEISS

Ο Weiss ήταν αυτός που συνόψισε τις υποθέσεις όλων των προγενέστερων ερευνών σε μία ενοποιημένη θεωρία. Κύριο χαρακτηριστικό της θεωρίας αυτής ήταν η παραδοχή ότι οι μαγνητικές περιοχές καταλαμβάνουν όγκο πολύ μεγαλύτερο από αυτό που οι μέχρι τότε ερευνητές υποπτεύονταν. Σε αυτούς τους όγκους τα άτομα ήταν με τέτοιο τρόπο προσανατολισμένα ώστε οι μαγνητικές τους ροπές να είναι προσανατολισμένες παράλληλα με κοινό άξονα έτσι ώστε οι περιοχές αυτές να παρουσιάζουν μαγνήτιση σχεδόν ίση με την τιμή κορεσμού. Παρόλαυτά, ο προσανατολισμός των μεμονομένων περιοχών είναι τυχαίος, αν και προτιμούνται συγκεκριμένοι κρυσταλλογραφικοί άξονες οι οποίοι στην περίπτωση απουσίας πεδίου είναι οι λεγόμενοι εύκολοι μαγνητικοί άξονες.

### 5.1.5 ΑΠΟΔΕΙΞΗ ΥΠΑΡΞΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Τα χρόνια που ακολούθησαν την θεωρία του Weiss έγιναν πολλές έρευνες που απέδειξαν σε πειραματικό επίπεδο την ισχύ της θεωρίας των μαγνητικών περιοχών. Η πρώτη επιβεβαίωση ήρθε με την μελέτη του φαινομένου Barkhausen, σύμφωνα με το οποίο η επαναοριοθέτηση των μαγνητικών περιοχών (δηλαδή η κίνηση των τοιχωμάτων τους) προκαλεί ασυνεχείς μεταβάσεις στην πυκνότητα μαγνητικής ροής. Οι μεταβάσεις αυτές προκαλούν άλματα ασυνέχειας και σε άλλες ιδιότητες των υλικών, όπως η μαγνητοαντίσταση, οι οποίες μπορούν να γίνουν ορατές με μετρήσεις υψηλής ανάλυσης. Η δεύτερη επιβεβαίωση ήρθε με την άμεση

παρατήρηση της μορφής των μαγνητικών περιοχών με τα πειράματα που διεξήγαγε ο Bitter σε σιδηρομαγνητικά υλικά. Ο Bitter με χρήση μικροσκοπίου παρατήρησε τον σχηματισμό μαγνητικών περιοχών στην επιφάνεια δειγμάτων με τη συγκέντρωση μαγνητικής σκόνης σε σημεία όπου η κλίση του μαγνητικού πεδίου είναι μεγαλύτερη. Αυτό σήμαινε ότι η μαγνητική σκόνη συγκεντρωνόταν σε σημεία όπου τα σύνορα των μαγνητικών περιοχών έτεμναν την επιφάνεια του δείγματος. Στο σχήμα 5.1 βλέπουμε μία τυπική απεικόνιση μαγνητικών περιοχών με χρήση της μεθόδου Bitter.



**Σχήμα 5.1** (α) μαγνητικές περιοχές στην επιφάνεια σιδήρου – μέθοδος Bitter  
(β) οι μαγνητικές περιοχές του (α) και η φορά των αυθόρμητων μαγνητίσεων κάθε περιοχής

## 5.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΩΡΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

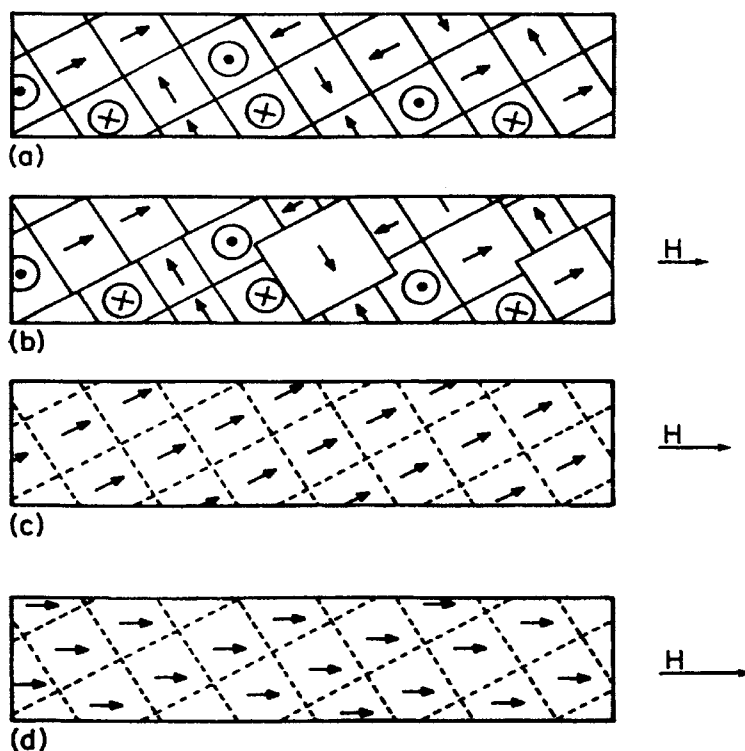
### 5.2.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ ΣΤΙΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Όπως έως τώρα αναφέρθηκε, η διαφορά ανάμεσα στις δύο πιθανές μαγνητικές καταστάσεις ενός σιδηρομαγνήτη οφείλεται στην διάταξη και τον προσανατολισμό των μαγνητικών περιοχών. Όταν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο σε ένα αρχικά αμαγνήτιστο σιδηρομαγνήτη, τότε οι μεταβολές της μαγνητικής επαγωγής συναρτήσει της έντασης πεδίου ακολουθούν την αρχική καμπύλη μαγνήτισης. Για ασθενή μαγνητικά πεδία, ο πρώτος μηχανισμός που τείνει να ευθυγραμμίσει τις ροπές των μαγνητικών περιοχών, οφείλεται στην τάση για ελαχιστοποίηση της αποθηκευμένης στο μαγνητικό πεδίο ενέργειας,  $E = -\mu_0 M_s H$ . Αυτό έχει σαν φυσικό επακόλουθο μία σχετική ελάττωση στο μέγεθος περιοχών που η ροπή τους αντιτίθεται στο εξωτερικό πεδίο. Μία τέτοια περίπτωση φαίνεται στο σχήμα 5.2.

Σε ενδιαμέσες τιμές πεδίου ένας άλλος μηχανισμός αρχίζει να αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Αυτός ο μηχανισμός είναι η περιστροφή μαγνητικών περιοχών, κατά τον οποίο οι ατομικές ροπές σε περιοχή που είναι προσανατολισμένη σε μη θεμιτή κατεύθυνση ξεπερνούν την ενέργεια ανισοτροπίας και περιστρέφονται έως ότου προσανατολιστούν παράλληλα με έναν ισοδύναμο εύκολο κρυσταλλογραφικό άξονα που σχηματίζει μικρότερη γωνία με το επιβαλλόμενο πεδίο.

Η τελική επίδραση του πεδίου στις μαγνητικές περιοχές εμφανίζεται σε ισχυρά πεδία. Κατά τη διαδικασία αυτή, οι μαγνητικές ροπές που έχουν

προσανατολιστεί παράλληλα με κάποιον εύκολο κρυσταλλογραφικό άξονα (που σχηματίζει μικρή γωνία με το πεδίο), αρχίζουν με την περαιτέρω αύξηση του πεδίου να αποκλίνουν σταδιακά τείνοντας να ευθυγραμμιστούν απόλυτα με το πεδίο. Έτσι το υλικό αποκτά μία μόνο μαγνητική περιοχή.

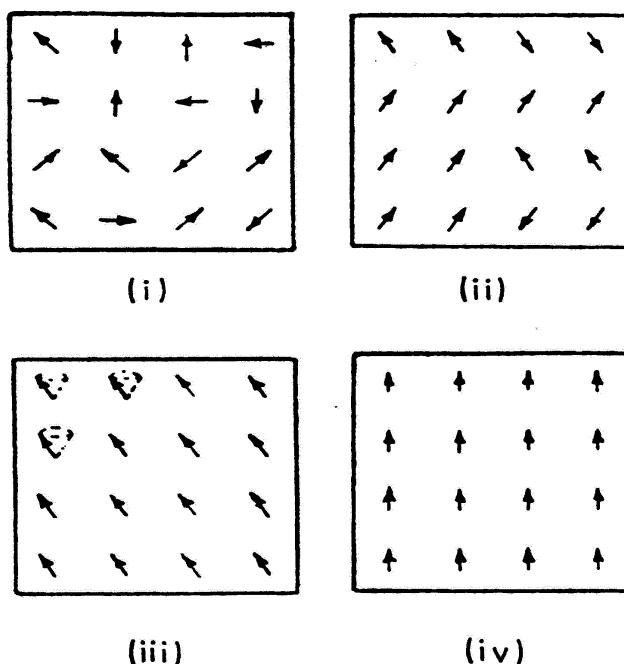


**Σχήμα 5.2** Επίδραση της μαγνήτισης στις μαγνητικές περιοχές.  
 (α) μερική μαγνήτιση, (β) κίνηση των τοιχωμάτων περιοχών από μερικής μαγνήτισης έως το γόνατο της καμπύλης  
 (c) μή αναστρέψιμη περιστροφή της μαγνήτισης περιοχών  
 (d) αναστρέψιμη περιστροφή

### 5.2.2 ΤΕΧΝΗΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΕΣΜΟΥ

Όταν όλες οι μαγνητικές περιοχές προσανατολιστούν με τέτοιο τρόπο ώστε η αυθόρμητη μαγνήτισή τους να ευθυγραμμιστεί με το μαγνητικό πεδίο το υλικό αποτελείται πλέον από μία μόνο μαγνητική περιοχή. Η κατάσταση αυτή καλείται τεχνητή μαγνήτιση κορεσμού. Αν το μαγνητικό πεδίο αυξηθεί πέρα από αυτή την τιμή, τότε η μαγνήτιση εξακολουθεί να αυξάνεται ανεπαίσθητα. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της αυθόρμητης μαγνήτισης εντός των περιοχών καθώς οι ατομικές ροπές που δεν είναι πλήρως ευθυγραμμισμένες με το πεδίο λόγω θερμικής δραστηριότητας, αποκτούν πλήρη συγγραμμικότητα με αυτό. Η αυθόρμητη μαγνήτιση εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Στους 0 K είναι ίση με τη μαγνήτιση κορεσμού αλλά πέφτει στο μηδέν καθώς προσεγγίζεται το σημείο Curie. Σε θερμοκρασίες πάνω από τους 0 K οι μεμονωμένες διπολικές ροπές έχουν θερμική ενέργεια που τις αναγκάζει να αποκλίνουν από την διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, και η απόκλιση γίνεται μεγαλύτερη όσο η θερμοκρασία αυξάνει. Το ίδιο φαινόμενο αναγκάζει την αυθόρμητη μαγνήτιση να είναι μικρότερη της μαγνήτισης κορεσμού. Το υλικό παρουσιάζει μαγνήτιση κορεσμού όταν όλες οι περιοχές προσανατολιστούν ως προς

τον άξονα του ισχυρού εξωτερικού πεδίου. Στο σχήμα 5.3 φαίνονται όλες οι φάσεις που αναφέρθηκαν.



**Σχήμα 5.3** Προσανατολισμός μεμονωμένων διπολικών ροπών

(i) πάνω από το σημείο Curie – τυχαίος προσανατολισμός

(ii) κάτω από το σημείο Curie

(iii) χαμηλές θερμοκρασίες, οι μεμονωμένες ροπές αποκλίνουν από τη διεύθυνση του πεδίου

(iv) τέλεια ευθυγράμμιση στους 0 K

### 5.2.3 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΚΑΙ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ

Μολονότι η ανάπτυξη των μαγνητικών περιοχών δεν επηρεάζεται άμεσα από την ανισοτροπία, τόσο η μή αναστρέψιμη όσο και η αναστρέψιμη περιστροφή εξαρτώνται άμεσα από την μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία. Η περιστροφή των περιοχών θα μπορούσε να θεωρηθεί σαν μία ανταγωνιστική δράση της ενέργειας ανισοτροπίας και της ενέργειας μαγνητικού πεδίου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ

Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούμε στις βασικές αρχές και διαδικασίες παραγωγής ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων. Στη συνέχεια θα επικεντρώσουμε την προσοχή μας στην ηλεκτροαπόθεση του νικελίου και των κραμάτων του, και πιο συγκεκριμένα των κραμάτων νικελίου-σιδήρου, τα οποία είναι γνωστά με την κοινή ονομασία **permalloys**.

#### 6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Με τον όρο ηλεκτρολυτική επικάλυψη εννοούμε την τεχνική με την οποία δημιουργείται ένα στρώμα μετάλλου πάνω σε μία επιφάνεια η οποία καλείται υπόστρωμα, με τη βοήθεια του φαινομένου της ηλεκτρόλυσης. Τα υποστρώματα είναι κυρίως μεταλλικές επιφάνειες οι οποίες πριν την επιμετάλλωση έχουν υποστεί κατάλληλη κατεργασία.

Η ηλεκτρολυτική επικάλυψη είναι μία από τις πιο διαδεδομένες και οικονομικές μεθόδους βιομηχανικής επιμετάλλωσης. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή κυρίως για τους εξής σκοπούς [7]:

- A) Για διακοσμητικούς λόγους, με σκοπό την βελτίωση της εμφάνισης διαφόρων μεταλλικών επιφανειών
- B) Για την προστασία μεταλλικών αντικειμένων από την χημική αλληλεπίδραση με το περιβάλλον (οξειδωση) και την μηχανική καταπόνηση που προκαλείται από την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των κινούμενων μερών διαφόρων συσκευών.
- Γ) Για ειδικούς σκοπούς όπως είναι η απόδοση στις επιφάνειες συγκεκριμένων μηχανικών, ηλεκτρικών ή μαγνητικών ιδιοτήτων.

#### 6.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΜΕΤΑΛΛΩΣΕΩΝ

##### 6.2.1 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗΣ ΕΠΙΜΕΤΑΛΛΩΣΗΣ [7]

Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την ηλεκτρολυτική απόθεση μετάλλων αποτελούνται από ένα δοχείο (ηλεκτρολυτική κυψελίδα), το οποίο περιέχει το κατάλληλο ηλεκτρολυτικό λουτρό (μπάνιο), του οποίου η σύσταση εξαρτάται από το είδος της επιμετάλλωσης που πρόκειται να γίνει. Γενικά, τα λουτρά είναι συνήθως υδατικά διαλύματα αλάτων του μετάλλου που πρόκειται να αποθεθεί. Καθώς το άλας διίσταται στο νερό, εμφανίζεται στην κυψελίδα με τη μορφή θετικών ιόντων (κατιόντα) μετάλλου,  $M^{n+}$ , και αρνητικών ιόντων (ανιόντα)  $A^{n-}$ . Η διαδικασία αυτή περιγράφεται από την γενική **αντίδραση της ηλεκτρολυτικής διάστασης**.



Μέσα στο ηλεκτρολυτικό λουτρό είναι βυθισμένα τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου. Η άνοδος είναι συνδεδεμένη με τον θετικό πόλο μιας πηγής συνεχούς ρεύματος και η κάθοδος με τον αρνητικό. Η ροή ηλεκτρικού ρεύματος εξασφαλίζεται καθώς το κύκλωμα κλείνει μέσω των ιόντων που βρίσκονται μέσα στο ηλεκτρολυτικό διάλυμα. Με την εφαρμογή τάσης στους πόλους της διάταξης, τα κατιόντα μετάλλου μεταφέρονται μέσω του λουτρού προς την κάθοδο όπου

προσλαμβάνουν ηλεκτρόνια και αποφορτίζονται. Δηλαδή, λαμβάνουν  $n$  ηλεκτρόνια και μετατρέπονται σε ουδέτερα άτομα του μετάλλου, σύμφωνα με την **γενική ημιαντίδραση αναγωγής**.



Με τον τρόπο αυτό, τα άτομα του μετάλλου αποτίθενται στην επιφάνεια της καθόδου και την επικαλύπτουν.

Ταυτόχρονα, τα ανιόντα κινούνται λόγω της επίδρασης του ηλεκτρικού πεδίου προς την άνοδο όπου αποδίδουν τα  $n$  πλεονάζοντα ηλεκτρόνια τους και αποφορτίζονται (οξειδώνονται), σύμφωνα με την **γενική ημιαντίδραση οξείδωσης**.



Στις περισσότερες ηλεκτρολυτικές επιμεταλλώσεις, η άνοδος αποτελείται από το μέταλλο  $M$ , το οποίο πρόκειται να αποθεθεί. Στην περίπτωση αυτή, εκτός από την οξείδωση των ανιόντων, μπορεί να εκδηλωθεί και οξείδωση του μετάλλου  $M$  της ανόδου. Το μέταλλο μετατρέπεται έτσι σε κατιόντα και περνάει στο ηλεκτρολυτικό λουτρό, δηλαδή διαλυτοποιείται. Επομένως, σε ορισμένο αριθμό κατιόντων μετάλλου που αποφορτίζονται και αποτίθενται στην κάθοδο αντιστοιχεί ίσος αριθμός ατόμων μετάλλου που οξειδώνονται και διαλυτοποιούνται στην άνοδο, με αποτέλεσμα η συγκέντρωση ιόντων μετάλλου στο λουτρό να παραμένει σταθερή στην επιθημητή τιμή.

## 6.2.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗ ΕΠΙΜΕΤΑΛΛΩΣΗ [7], [8]

### (i) Εφαρμοζόμενη τάση

Για να γίνει ηλεκτρόλυση πρέπει στους πόλους της ηλεκτρολυτικής διάταξης να εφαρμοσθεί μία ηλεκτρική τάση ( $U$ ). Έχει αποδειχθεί ότι για να εκδηλωθεί το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης, η τάση  $U$  πρέπει να υπερβαίνει μία συγκεκριμένη τιμή, η οποία ονομάζεται τάση απόθεσης, ή τάση διάσπασης  $E$  ( deposition potential). Η τάση απόθεσης είναι διαφορετική για κάθε ηλεκτροχημική αντίδραση και συνεπώς εξαρτάται από το είδος της ηλεκτρόλυσης.

Με την εκδήλωση του φαινομένου, οι μικρές ποσότητες των υλικών που αρχίζουν να αποτίθενται στα δύο ηλεκτρόδια δημιουργούν γαλβανικό στοιχείο το οποίο εμφανίζει δυναμικό αντίθετο από την εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πόλωση των ηλεκτροδίων. Για να ξεκινήσει η ηλεκτρόλυση, θα πρέπει η τάση που εφαρμόζεται να είναι μεγαλύτερη από το δυναμικό του γαλβανικού στοιχείου που δημιουργείται.

Όταν αποκατασταθεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στην κυψελίδα, τότε μεταξύ των πόλων της ηλεκτρολυτικής διάταξης εμφανίζεται πτώση τάσης η οποία οφείλεται κυρίως στην πόλωση των ηλεκτροδίων λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης ιόντων στις περιοχές γύρω από τα ηλεκτρόδια, καθώς και στην ωμική πτώση τάσης που εμφανίζεται κατά τη δημιουργία αγωγίμων στρωμάτων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Κατά συνέπεια, η τάση  $U$  που εφαρμόζεται μεταξύ ανόδου και καθόδου θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με

$$U = E + \text{“πόλωση ηλεκτροδίων”} + I \cdot R$$

Όπου  $I$  είναι η ένταση του ρεύματος και  $R$  η ηλεκτρική αντίσταση του λουτρού.



Η διαφορά ανάμεσα στην θεωρητική τιμή της τάσης απόθεσης E και της τάσης που στη πράξη πρέπει να εφαρμοσθεί ονομάζεται υπέρταση. Η υπέρταση είναι συνήθως μεγαλύτερη όταν στα ηλεκτρόδια ελευθερώνονται αέριες ενώσεις. Η τιμή της εξαρτάται από το υλικό κατασκευής των ηλεκτροδίων καθώς και την πυκνότητα ρεύματος.

#### (ii) pH

Η ρύθμιση του pH στα ηλεκτρολυτικά λουτρά γίνεται με την προσθήκη των λεγόμενων ρυθμιστικών διαλυμάτων (Buffers). Αυτά είναι διαλύματα που δεν επιτρέπουν απότομες μεταβολές του pH κατά την διάρκεια μιας ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης. Περιέχουν συνήθως μικρές ποσότητες οξέων ή βάσεων. Έτσι κατά την ηλεκτρολυτική επινικέλωση στο λουτρό προστίθεται βορικό οξύ ως ρυθμιστικό. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η αύξηση του pH λόγω της αναγωγής των ιόντων υδρογόνου και κατά συνέπεια η δημιουργία ιζημάτων όπως του υδροξειδίου του νικελίου.

#### (iii) Πρόσθετα (additives)

Πρόσθετα ονομάζονται οι ουσίες εκείνες οι οποίες προστιθέμενες στα ηλεκτρολυτικά λουτρά επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά των επικαλύψεων. Είναι ανόργανες ή οργανικές ενώσεις και ανάλογα με τη δράση τους διακρίνονται σε

α) Λειαντικά

β) Στιλβωτικά

γ) Διαβρέκτες, οι οποίοι επηρεάζουν την επιφανειακή τάση του λουτρού και εμποδίζουν τον σχηματισμό βελονισμών (pitting) στις επικαλύψεις.

Τα πρόσθετα χρησιμοποιούνται σε μικρές αναλογικά ποσότητες και έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζουν τόσο τις φυσικές όσο και τις μηχανικές ιδιότητες των επικαλύψεων. Ο τρόπος με τον οποίο δρουν δεν έχει διευκρινισθεί πλήρως. Θεωρείται πολύ πιθανόν να προσροφόνται ή να εσωκλείονται στην επικάλυψη. Στην περίπτωση κάποιων στιλβωτικών έχει διαπιστωθεί ότι προσροφόνται εκλεκτικά στην μεταλλική επιφάνεια κατά την διάρκεια της ηλεκτρόλυσης και μειώνουν το μέγεθος των κρυστάλλων κάνοντας το μέταλλο μικροκρυσταλλικό και συνεπώς λείο.

#### (iv) Ηλεκτρόδια

Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται διαλυτές άνοδοι οι οποίες είναι κατασκευασμένες από το ίδιο μέταλλο που πρόκειται να αποτεθεί στην κάθοδο. Έτσι, διατηρείται σταθερή η συγκέντρωση των ιόντων του μετάλλου στο λουτρό. Σπανιότερα χρησιμοποιούνται αδρανείς άνοδοι οι οποίες δεν διαλύονται στο ηλεκτρολυτικό λουτρό.

Γενικά στη θέση της καθόδου χρησιμοποιούνται τα προς επιμετάλλωση αντικείμενα, και σε ορισμένες περιπτώσεις βοηθητικά ηλεκτρόδια.

## 6.3 ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΝΙΚΕΛΙΟΥ

### 6.3.1. ΓΕΝΙΚΑ

Το νικέλιο ως μέταλλο επικάλυψης συναντάται σε πάρα πολλές εφαρμογές και η ευρεία χρήση του έχει αποδοθεί στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του. Το νικέλιο διακρίνεται, για την ευκολία με την οποία αποτίθεται, την αντίστασή του στη διάβρωση, την αυξημένη σκληρότητα και την μεγάλη ποικιλία των επικαλύψεων που δίνει με απλές μεταβολές των συνθηκών της ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Η επινικέλωση χρησιμοποιείται για διακοσμητικούς σκοπούς, για αντιδιαβρωτική προστασία, για επισκευή φθαρμένων μηχανικών εξαρτημάτων κ.α. Επίσης, η οικογένεια ηλεκτρολυτικών κραμάτων νικελίου-σιδήρου βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην κατασκευή μέσων μαγνητικής αποθήκευσης, μαγνητικών κεφαλών εγγραφής σε σκληρούς δίσκους καθώς και σε μία μεγάλη γκάμα διατάξεων αισθητήρων μαγνητικού πεδίου. Για τις εφαρμογές των κραμάτων αυτών θα γίνει εκτενέστερη αναφορά σε επόμενη ενότητα.

Όπως αναφέρθηκε, το νικέλιο έχει τη δυνατότητα να δίνει ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις με φυσικές και μηχανικές ιδιότητες που ποικίλουν. Ο καθορισμός των ιδιοτήτων αυτών γίνεται με χρήση διαφορετικών κάθε φορά λουτρών. Έτσι, όταν είναι επιθυμητή η προστασία σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, χρησιμοποιούνται λουτρά τύπου Watts ή λουτρά σουλφαμικού νικελίου [7], ενώ για προστασία από απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές χρησιμοποιούνται λουτρά θειικού-χλωριούχου νικελίου.

Το νικέλιο είναι εν γένει ένα ακριβό υλικό. Για το λόγο αυτό γίνονται σήμερα στην βιομηχανία προσπάθειες μερικής ή ολικής αντικατάστασής του, ώστε να μειωθεί η κατανάλωσή του. Επίσης χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο κράματα νικελίου με άλλα φθηνότερα μέταλλα. Τέλος σε εγκαταστάσεις συνεχούς παραγωγής εφαρμόζονται τεχνικές ανάκτησης νικελίου από τα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρολυτικά διαλύματα.

### 6.3.2 ΛΟΥΤΡΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗΣ ΕΠΙΝΙΚΕΛΩΣΗΣ [7]

Κατά την επινικέλωση ως άνοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως πλάκες καθαρού νικελίου, οι οποίες όμως παθητικοποιούνται εύκολα, με αποτέλεσμα να μην διαλύονται ομοιόμορφα. Η συμπεριφορά των ανόδων από νικέλιο βελτιώνεται όταν θερμανθούν σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία ώστε να μεταβληθεί η κολονοειδής κρυσταλλογραφική δομή του μετάλλου.

Προκειμένου να βελτιωθούν οι μακροσκοπικές ιδιότητες των επικαλύψεων, δηλαδή να παρασκευασθούν λείες και στιλπνές επιφάνειες, είναι απαραίτητη η προσθήκη στα ηλεκτρολυτικά λουτρά ορισμένων οργανικών ή ανόργανων ενώσεων, τα οποία όπως προαναφέρθηκε διακρίνονται σε λειαντικές ουσίες, στιλβωτικές ουσίες και διαβρέκτες.

Οι λειαντικές ουσίες (leveling agents) περιορίζουν τις επιφανειακές ανωμαλίες της επικάλυψης και τα ίχνη μηχανικού καθαρισμού που έχει υποστεί το υπόστρωμα. Το πρόσθετο επικαλύπτει την επιφάνεια της καθόδου και προσροφάται επιλεκτικά στις αιχμές, ευνοώντας έτσι την απόθεση μετάλλου στις εσοχές και καθιστώντας το απόθεμα λείο. Η δράση των λειαντικών ενισχύεται με αύξηση του pH και της θερμοκρασίας. Έχει δε παρατηρηθεί ότι αυξάνουν την καθοδική υπέρταση κατά 100mV περίπου. Τα συνηθέστερα λειαντικά που απαντώνται στη βιομηχανία είναι η κουμαρίνη και οι ενώσεις ακετυλενικού τύπου όπως η βουτινο-2-διόλη.

Οι στιλβωτικές ουσίες (brightening agents) επιβάλλουν την παρασκευή στιλπνών επιφανειών. Η στιλπνότητα εξαρτάται από το μέγεθος των κρυσταλλινών του αποθέματος και τη δομή τους. Για να είναι επιτυχής η δράση τους πρέπει η επικάλυψη να έχει πάχος τουλάχιστον 25μm. Οι στιλβωτικές ουσίες διακρίνονται σε πρωτογενείς που δίνουν στιλπνές επικαλύψεις όταν το υπόστρωμα είναι λείο και δευτερογενείς που δίνουν στιλπνή επικάλυψη πάνω σε τραχύ υπόστρωμα. Συνηθέστερες πρωτογενείς στιλβωτικές ουσίες είναι η σακχαρίνη, το τριναφθαλενοσουλφονικό νάτριο και το παρατολουενο-σουλφοναμίδιο. Δευτερογενείς στιλβωτικές ουσίες είναι συνήθως ενώσεις που το μόριό τους περιέχει ακόρεστους δεσμούς C-C, C-N, C-O, C-S κλπ.

Σε εγκαταστάσεις συνεχούς παραγωγής οι λειαντικές και στιλβωτικές ουσίες αποτελούν σημαντικό παράγοντα κόστους. Για το λόγο αυτό σε αντικατάστασή τους εφαρμόζονται με επιτυχία οι τεχνικές του εναλλασσόμενου ρεύματος και κυρίως η τεχνική του παλμικού ρεύματος μεταβαλλόμενης φοράς.

Οι διαβρέκτες (wetting agents) τέλος είναι ουσίες που προστίθενται στο ηλεκτρολυτικό λουτρό προς αποφυγή σχηματισμού βελονισμών στην μεταλλική επιφάνεια, λόγω ταυτόχρονης απόθεσης της αέριας φάσης νικελίου.

Στον πίνακα 6.1 συνοψίζονται οι κυριότερες κατηγορίες λουτρών ηλεκτρολυτικής επινικέλωσης, μαζί με τα κυριότερα χαρακτηριστικά των αντίστοιχων αποθεμάτων και τυπικές για κάθε κατηγορία συστάσεις λουτρού.

### 6.3.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΜΦΑΝΙΖΟΝΤΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΝΙΚΕΛΩΣΗ

#### (i) Τραχύτητα

Η τραχύτητα μιας επικάλυψης νικελίου μπορεί γενικά να μειωθεί με απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών με συνεχή διήθηση, διατήρηση πολύ χαμηλού επιπέδου ακαθαρσιών, χρήση λείου υποστρώματος, καλή ανάδευση στο λουτρό.

#### (ii) Εμφάνιση Βελονισμών (pitting)

Οι βελονισμοί που παρατηρούνται στις επικαλύψεις νικελίου προκαλούνται από το αέριο υδρογόνο που ελευθερώνεται κατά την ηλεκτρόλυση. Γενικά, γιαυτό μπορεί να ευθύνεται η χαμηλή συγκέντρωση διαβρέκτη ή η υψηλή πυκνότητα ρεύματος. Επίσης, πρέπει να αποφεύγονται οι απότομες μεταβολές του pH και της θερμοκρασίας του ηλεκτρολυτικού λουτρού.

#### (iii) Χαμηλή ολκιμότητα (ductility)

Η έλλειψη ολκιμότητας μπορεί να οφείλεται στο χαμηλό pH, στη χρήση υπερβολικής ποσότητας υπεροξειδίου του υδρογόνου που χρησιμοποιείται ως διαβρέκτης, στη μικρή ποσότητα βορικού οξέως, ή στη μόλυνση του λουτρού από οργανικές ουσίες και στη χρήση υπερβολικής ποσότητας στιλβωτικών ουσιών.

#### (iv) Θαμπή επικάλυψη

Μπορεί να προκληθεί από κακή ρύθμιση του pH, της συγκέντρωσης στιλβωτικών και της θερμοκρασίας του λουτρού. Επίσης, δημιουργείται από οργανικές και μεταλλικές ακαθαρσίες, όπως από χαλκό, ψευδάργυρο, κάδμιο, οι οποίες απομακρύνονται με καταβύθιση-διήθηση.

#### (v) Μαυρισμένες επικαλύψεις

Οφείλονται σε υψηλή περιεκτικότητα του λουτρού σε μεταλλικές ακαθαρσίες, ή σε αραιό ηλεκτρολυτικό διάλυμα σε συνδυασμό με χαμηλή πυκνότητα ρεύματος και πολύ υψηλές τιμές pH.

#### (vi) Κακή πρόσφυση

Πίνακας 6.1 Λουτρά Ηλεκτρολυτικής Επινικέλωσης [7]

Λουτρά τύπου Watts	Λουτρά υψηλής Περεκτύκωσης σε νικέλιο (Woods Nickel)	Λουτρά σουλφωμικού νικελίου	Λουτρά φθοριοβορικού νικελίου	Λουτρά πυροφοσφορικών αλάτων
<p>Διευκολύνεται εφαρμογή, υψηλόν των πακώσεων, ρεψίματος, εδαλώση χρόνου παρασκευής, αυξημένη απόδοση σε αποθέματα λεία, παρασταζόντων βελονισμούς που εξαφανίζονται με χρήση υπεροξειδίου του υδρογόνου. Απαιτούνται υψηλές πακώσεις ρεψίματος. Τα λουτρά είναι αθάνατα σε αθάνατες οθήρες.</p>	<p>Υψηλά ρεψίματα, κατά τους λουτρού, ομοιόμορφη διάφορη αιώδου, αποθέματα λεία, παρασταζόντων βελονισμούς που εξαφανίζονται με χρήση υπεροξειδίου του υδρογόνου. Απαιτούνται υψηλές πακώσεις ρεψίματος. Τα λουτρά είναι αθάνατα σε αθάνατες οθήρες.</p>	<p>Υψηλά ρεψίματα, κατά τους λουτρού, ειδικά ελέγχου, κατά εφαρμογή. Επομένως, υψηλές σε υπερπέδες, αυξημένη οδαλώση, αθάνατα στη φθορά. Παρασκευή επακόλουθων μεγάλου πάχους.</p>	<p>Ιδιαίτερα οδαμα αποθέματα, αθάνατα στις κρούσεις.</p>	<p>Εν γένει κατά αποθέματα, εμφανίζονται ειδικά στην οδαλώση της αιώδου</p>
<p>@Γενικό νικέλιο Χλωριούχο νικέλιο Βορικό οξύ pH @επιμορφασία Πυκνότητα ρεύματος</p>	<p>240g/l 4.5g/l 30g/l 4.5-6 47-71°C 2-11 A/dm<sup>2</sup></p>	<p>Νικέλιο Υδροχλωρικό οξύ @επιμορφασία Πυκ. Ρεύματος Καθοδική απόδοση</p>	<p>Φθοριοβορικό νικέλιο Νικέλιο Φθοριοβορικό οξύ Βορικό οξύ pH @επιμορφασία Πυκ. Ρεύματος</p>	<p>Φθοριοβορικό νικέλιο Φθοριοβορικό οξύ Βορικό οξύ pH @επιμορφασία Πυκ. Ρεύματος</p>
	<p>~110g/l ~7.5g/l ~80°C ~5.5A/dm<sup>2</sup> ~85%</p>	<p>300g/l 75g/l 4-38g/l 30g/l 2-3.5 38-77°C 2,2-5,5 A/dm<sup>2</sup></p>	<p>300 75 4-38 2-3.5 38-77 2,2-5,5</p>	<p>Χα. Νικέλιο Πυροφοσφορικά Καρ. Αμμώνιο pH @επιμ. Απ. Πυκ. Ρεύμ. Δυναμικό Καθ. Απόδοση Απ. Απόδοση</p>
				<p>118,9 234,8 33,3 9,5 60°C 8 A/dm<sup>2</sup> 6 A/dm<sup>2</sup> 1,3-2,6 ~90% 97%</p>

Οφείλεται κυρίως σε διακοπές του ρεύματος, στην παρουσία μολύβδου, χρωμίου ή οργανικών ακαθαρσιών, αλλά περισσότερο στην ακατάλληλη επεξεργασία του υποστρώματος.

#### 6.3.4 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΝΙΚΕΛΙΟΥ

Οι περισσότερες από τις φυσικές ιδιότητες των επικαλύψεων νικελίου προσδιορίζονται με τη βοήθεια ειδικών οργάνων και τεχνικών.

Το πορώδες των αποθεμάτων προσδιορίζεται με παραμονή τους σε αέρια ή με απόθεση του νικελίου πάνω σε ραδιενεργό σίδηρο. Στην τελευταία περίπτωση, το πορώδες της επικάλυψης ελέγχεται με φωτογραφικό φιλμ, ειδικά προσαρμοσμένο πάνω στην επιφάνεια της επικάλυψης.

Η δομή των αποθεμάτων προσδιορίζεται με τις τεχνικές των ακτίνων -X. Τα αποθέματα είναι πολυκρυσταλλικά και οι κρύσταλλοι προσανατολίζονται προς ένα επιλεκτικό προσανατολισμό καθώς αναπτύσσεται το απόθεμα. Οι εσωτερικές τάσεις μπορούν να μειωθούν είτε με την προσθήκη οργανικών ενώσεων είτε με την επιβολή εναλλασσόμενου ρεύματος. Το ξεφλούδισμα των επικαλύψεων συνδέεται άμεσα με τις εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται και η συνηθέστερη αιτία που το προκαλεί είναι η προσρόφιση υδρογόνου κατά την ηλεκτρόλυση. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με την συνεχή ανάδευση και κυρίως με την προσθήκη ταση-ενεργών ουσιών στο λουτρό.

#### 6.4 ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΜΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΣΙΔΗΡΟΥ-ΝΙΚΕΛΙΟΥ

##### 6.4.1 ΧΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΣΙΔΗΡΟΥ-ΝΙΚΕΛΙΟΥ

Ένας μεγάλος αριθμός μαγνητικών αισθητήρων και ενεργοποιητών που κατασκευάζονται με τεχνικές μικρομηχανικής απαιτούν χρήση υλικών με συγκεκριμένες ιδιότητες όπως υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και πάχος που ποικίλει και μπορεί να φτάσει μέχρι αρκετές δεκάδες μικρά. Επίσης, υλικά με ιδιαίτερες ιδιότητες απαιτούνται για εφαρμογές μαγνητικής αποθήκευσης δεδομένων.

Η ανάπτυξη της μικρομηχανικής στον τομέα των μαγνητικών αισθητήρων και ενεργοποιητών βασίζεται μέχρι σήμερα στη χρήση των κραμάτων σιδήρου-νικελίου που είναι γνωστά με την ονομασία Permalloys. Η οικογένεια αυτή υλικών παρουσιάζει ικανοποιητικές μαγνητικές ιδιότητες όπως υψηλή διαπερατότητα, υψηλό παράγοντα μαγνητοαντίστασης, χαμηλή μαγνητοελαστικότητα και εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες.

Συσκευές όπως μικροκινητήρες, μικροαντλίες, διακόπτες, μικρορελέ κ.α. μπορούν να κατασκευαστούν με χρήση Permalloy. Μικροδομές από τέτοιου τύπου υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί για την βελτίωση της ευαισθησίας μαγνητομεταγωγών (magnetotransistors) και κυρίως ως σιδηρομαγνητικοί πυρήνες σε αισθητήρες fluxgate. Κύριο προτέρημα αυτών των δομών είναι η δυνατότητα ολοκλήρωσής τους με τεχνικές CMOS σε ψηφίδες πυριτίου και μάλιστα συνήθως στην ίδια ψηφίδα με το ηλεκτρονικό κύκλωμα [12].

Μέχρι τώρα, το Permalloy 80/20 (Ni-80% και Fe-20%) είναι το πιο διαδεδομένο ηλεκτροαποτιθέμενο υλικό για τις παραπάνω χρήσεις. Έχει αναφερθεί σε πολυάριθμες εργασίες επίτευξη σχετικής διαπερατότητας της τάξης του 500-1000 ενώ το συνεκτικό πεδίο κυμαίνεται μεταξύ 1-5 Oe [12].

#### 6.4.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ Fe-Ni [10]

Πολλές σημαντικές εφαρμογές επεξεργασίας σήματος και αισθητήρων/ ενεργοποιητών απαιτούν χρήση μαγνητικών υλικών με χαμηλή υστέρηση στο επίπεδο πυνότητας μαγνητικής ροής-έντασης μαγνητικού πεδίου (καμπύλη B-H). Τα υλικά που παρουσιάζουν τέτοια χαρακτηριστικά καλούνται μαλακά μαγνητικά υλικά. Ένα τέτοιο υλικό απαιτείται να έχει υψηλή μαγνήτιση κορεσμού για να προσδίδει μεγάλο εύρος λειτουργίας, και υψηλή μαγνητική διαπερατότητα για να παρουσιάζει υψηλή μαγνήτιση ακόμα και σε συνθήκες ασθενούς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Επίσης απαιτείται χαμηλή τιμή συνεκτικού πεδίου και παραμένουσας μαγνήτισης. Χαμηλή μαγνητοελαστικότητα και ανισοτροπία είναι επίσης επιθυμητά χαρακτηριστικά για σταθερή μαγνητική ανισοτροπία κατά την παραμόρφωση του μαγνητικού υλικού-δείγματος. Ο μικρός παράγων απομαγνήτισης είναι απαραίτητος για φιλμ που απαιτείται να αποκτούν μαγνητική ανισοτροπία σε συνθήκες ασθενούς μαγνητικού πεδίου, ούτως ώστε να υπάρχει επαρκής σχηματοποίηση και διαχωρισμός των μαγνητικών αξόνων. Τέλος, μηχανικές ιδιότητες όπως εσωτερικές μηχανικές τάσεις, σκληρότητα, αντίσταση στη διάβρωση, θερμική αγωγιμότητα και δυνατότητα πρόσφυσης αποτελούν σημαντικές παραμέτρους για μικρομηχανικούς ενεργοποιητές.

Για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων τα υλικά απαιτείται να έχουν υψηλή ειδική αντίσταση ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες λόγω ρευμάτων eddy. Αυτό μπορεί επίσης να επιτευχθεί με χρήση αλλεπάλληλων στρωμάτων από λεπτά φιλμ (laminated alloys).

Οι συνηθέστερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή κραμάτων σιδήρου-νικελίου είναι η εξάχνωση κενού, η εναπόθεση χημικών ατμών (CVD), RF/magneton sputtering, ιοντική εμφύτευση, screen printing και η ηλεκτροαπόθεση. Πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνικές παρουσιάζει η μέθοδος της ηλεκτροαπόθεσης καθώς δίνει τη δυνατότητα για φιλμ με πάχος μεγαλύτερο από 5μm, δίνει μεγάλους ρυθμούς εναπόθεσης, ενώ προτιμάται λόγω χαμηλού κόστους εξοπλισμού και συμβατότητας με τεχνικές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

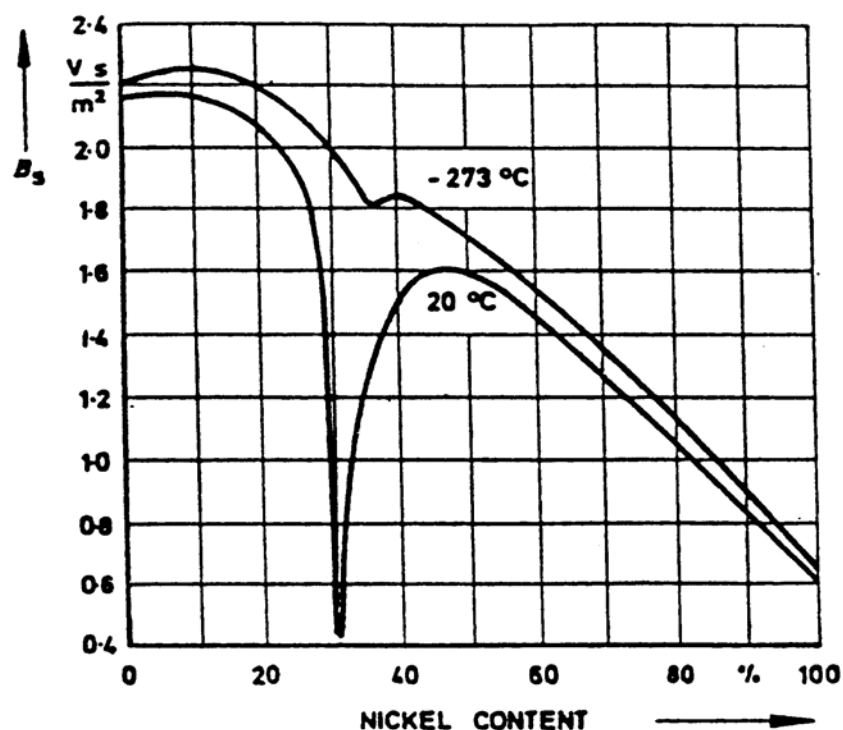
Για να εκτιμηθεί η καταλληλότητα κάποιου υλικού για συγκεκριμένη εφαρμογή θα πρέπει να εφαρμοσθούν τεχνικές προσδιορισμού των χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν. Πρέπει όμως να τονιστεί, ότι οι ιδιότητες ενός υλικού σε bulk μορφή μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από εκείνες των ηλεκτρολυτικά αποθεθέντων φιλμ. Για το λόγο αυτό, οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται στο υλικό στην τελική του μορφή (in situ measurements). Δείγματα για μετρήσεις συχνά παρασκευάζονται με τεχνικές επιφανειακής μικρομηχανικής.

#### 6.4.3 ΠΑΡΑΓΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΑΠΟΘΕΣΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΥ –ΝΙΚΕΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΥΤΩΝ

Η παγκοσμίως διαδεδομένη χρήση των κραμάτων σιδήρου-νικελίου σε μία πλειάδα εφαρμογών αποτελεί ένα μέτρο της λειτουργικής τους επάρκειας. Χαρή στην δυνατότητα αντικατάστασης έως 35% του νικελίου από σίδηρο τα κράματα αυτά μπορούν να κατασκευαστούν με κόστος πολύ χαμηλότερο από αυτό του καθαρού νικελίου. Αυτό σε συνδυασμό με τις πολύ καλές ιδιότητες που έχουν ήδη αναφερθεί,

αποτελεί τα αίτια του ιδιαίτερα μεγάλου αριθμού ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών στις οποίες χρησιμοποιούνται.

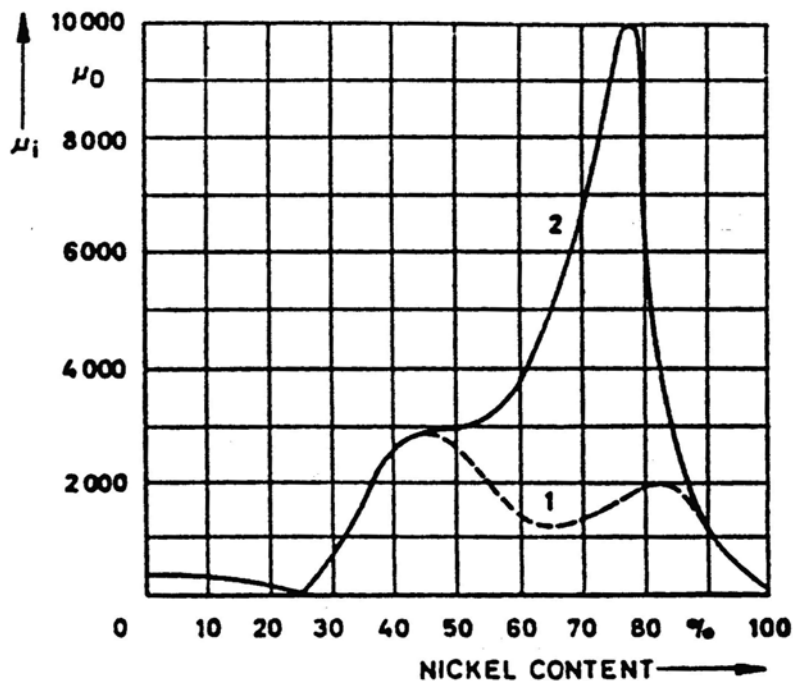
Οι μαγνητικές ιδιότητες των υλικών για τα οποία μιλάμε σχετίζονται με μικροσκοπικά χαρακτηριστικά. Έτσι, η μαγνήτιση κορεσμού και η θερμοκρασία Curie εξαρτώνται από τη σύσταση και τα δομικά χαρακτηριστικά. Το συνεκτικό πεδίο, η παραμένουσα μαγνήτιση και η διαπερατότητα επηρεάζονται από την κρυσταλλική δομή, το μέγεθος κόκκου, τον προτιμώμενο προσανατολισμό, τις εσωτερικές τάσεις και τις ατέλειες του υλικού [13]. Γενικά, στην πράξη συναντώνται κράματα των οποίων το ποσοστιαίο περιεχόμενο σε νικέλιο είναι κοντά στο 80%, στο 50%, ή στην περιοχή μεταξύ 30-40%. Η μαγνήτιση κορεσμού είναι μέγιστη στην περιοχή του 50% (σχήμα 6.1), η μαγνητική διαπερατότητα κοντά στο 80% (σχήμα 6.2) και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση στην περιοχή του 30% σε νικέλιο (σχήμα 6.3). Οι τρεις αυτές ιδιότητες αποτελούν ένα πρώτο και βασικό παράγοντα επιλογής υλικού για κάποια εφαρμογή [1].



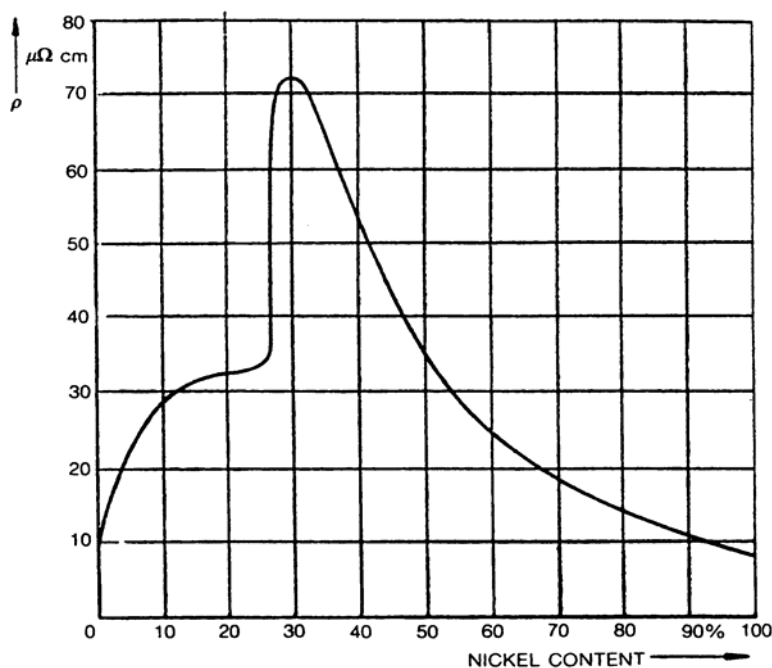
Σχήμα 6.1 Μαγνήτιση κορεσμού σε κράματα Fe-Ni [1]

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονίσουμε ότι ανάλογα με την εφαρμογή, επιλέγεται κάθε φορά κράμα του οποίου η σύσταση βρίσκεται κοντά στις τρεις κατηγορίες που αναφέρθηκαν. Στη συνέχεια, κάποιες από τις μαγνητικές ιδιότητές του, μπορούν να ενισχυθούν (ανάλογα με τις απαιτήσεις), εφαρμόζοντας κάποιες ιδιαίτερες τεχνικές κατεργασίας, όπως ανόπτιση, ψυχρή κατεργασία, και νόθευση. Έχει αποδειχθεί ότι οι μαγνητικές ιδιότητες μπορούν να βελτιωθούν δραματικά με τους παραπάνω τρόπους.

Η ταυτόχρονη ηλεκτροαπόθεση σιδήρου και νικελίου παρουσιάζει το φαινόμενο της ανώμαλης συνεναπόθεσης (anomalous codeposition) [11]. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ευνοείται η εναπόθεση του λιγότερο ευγενούς μετάλλου δηλαδή του σιδήρου, ενώ εμποδίζεται η εναπόθεση του νικελίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επηρεάζονται οι μερικές πυκνότητες ρεύματος, και κατά συνέπεια οι ρυθμοί εναπόθεσης, συγκρινόμενοι



Σχήμα 6.2 Αρχική μαγνητική διαπερατότητα: 1= αργή επαναφορά  
2 = τυπική κατεργασία permalloy [1]



Σχήμα 6.3 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση κράματος Fe-Ni [1]

με τους αντίστοιχους ρυθμούς με τους οποίους θα εναποτίθεντο το κάθε μέταλλο ξεχωριστά.

Η σύσταση και οι ιδιότητες των ηλεκτρολυτικών κραμάτων σιδήρου-νικελίου εξαρτώνται σημαντικά από τη σύσταση των ηλεκτρολυτικών λουτρών καθώς και από τις συνθήκες της απόθεσης. Η αλληλοεξάρτηση ανάμεσα στα εναποτιθέμενα συστατικά δεν έχει έως τώρα γίνει πλήρως κατανοητή. Η πιο αποδεκτή και διαδεδομένη θεωρία που αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960 από τους Dahms και Croll ισχυρίζεται ότι η ανώμαλη συνεναπόθεση εμφανίζεται όταν το επιφανειακό pH



είναι αρκετά υψηλό ώστε να προκαλείται ο σχηματισμός υδροξειδίου του σιδήρου που απορροφάται επιλεκτικά στο ηλεκτρόδιο της καθόδου εμποδίζοντας την απόθεση ιόντων νικελίου [11].

Λόγω έλλειψης βιβλιογραφίας για το συγκεκριμένο θέμα, τα περισσότερα από τα συμπεράσματα που σε αυτή την παράγραφο αναφέρονται, προέρχονται από εκτενείς αναφορές σε πειράματα που έχουν διεξαχθεί κυρίως από βιομηχανικούς οργανισμούς και ερευνητικούς φορείς. Σύμφωνα με τις αναφορές αυτές, το φαινόμενο της ανώμαλης συνεναπόθεσης επιδρά πάντα σε κάποιο βαθμό, έστω μικρό, κατά την διάρκεια ηλεκτρολυτικών επιμεταλλώσεων με κράματα σιδήρου-νικελίου. Αυτό είναι προφανές αν αναλογιστεί κανείς ότι λουτρά που θεωρητικά αναμένεται να δώσουν κράμα με 1.9% περιεκτικότητα σε σίδηρο (λαμβάνοντας υπόψη την σύσταση και τους μεμονωμένους ρυθμούς εναπόθεσης), στην πράξη δίνουν περιεκτικότητες από 5 έως 20% σε σίδηρο. Η ποικιλία αυτή του τελικού κράματος σε σίδηρο οφείλεται σε παράγοντες όπως η πυκνότητα ρεύματος κατά τη διάρκεια της ηλεκτρόλυσης, η συγκέντρωση ανιόντων, το pH, και την ύπαρξη οξέων [11].

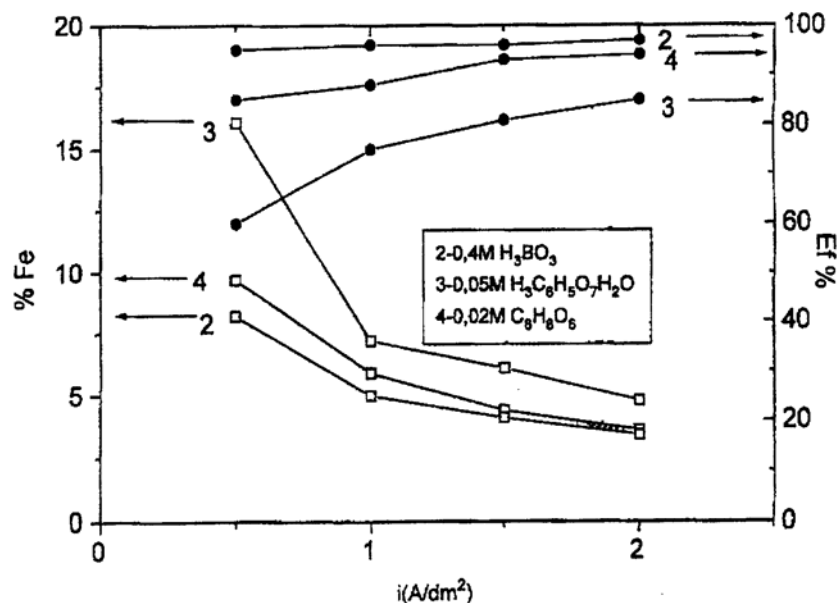
Τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι το περιεχόμενο ενός κράματος Fe-Ni σε σίδηρο πάντα μειώνεται όταν αυξάνεται η πυκνότητα ρεύματος. Σε αυτή την περίπτωση, αυξάνεται η καθοδική επάρκεια, με αποτέλεσμα να ελλατώνεται η έκλυση υδρογόνου. Κατά συνέπεια ευνοείται η απόθεση νικελίου ενώ ταυτόχρονα εμποδίζεται η απόθεση σιδήρου [11].

Η ύπαρξη ιόντων  $Cl^-$  ευνοεί τη δημιουργία αποθεμάτων με αυξημένη περιεκτικότητα σε σίδηρο και χαμηλότερη καθοδική επάρκεια. Από πειραματικά δεδομένα επίσης φαίνεται ότι ύπαρξη ιόντων χλωρίου μειώνει τις καθοδικές υπερτάσεις. Γενικά, φαίνεται ότι τα ιόντα χλωρίου αποτελούν καταλυτικό παράγοντα για την εναπόθεση, σχηματίζοντας κατά κάποιο τρόπο μία «ιοντική γέφυρα» ανάμεσα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου και του ιόντος που αποφορτίζεται. Αντίθετα, τα ιόντα  $SO_4^{2-}$  φαίνεται να δρουν με διαφορετικό τρόπο, δίνοντας αποθέματα με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε σίδηρο [11].

Ο ρόλος του βορικού οξέως, κυρίως σε διαλύματα που βασίζονται σε λουτρά τύπου Watts, είναι πως εμποδίζει τον σχηματισμό φιλμ υδροξειδίων με επιλεκτική απορρόφηση, είτε με τοπική ρύθμιση. Η παρουσία βορικού οξέως φαίνεται να οδηγεί σε αποθέματα με χαμηλότερες περιεκτικότητες σε σίδηρο και μεγαλύτερη καθοδική επάρκεια [11]. Πολλοί ερευνητές ισχυρίζονται ότι το βορικό οξύ δρα σαν μεμβράνη που επιλεκτικά επιτρέπει το πέρασμα ιόντων νικελίου, ενώ εμποδίζει τα ιόντα σιδήρου [16].

Τέλος, η περιεκτικότητα του αποθέματος σε σίδηρο φαίνεται να είναι φθίνουσα συνάρτηση της τιμής του pH, αντίθετα από την καθοδική επάρκεια. Χαμηλή τιμή του pH ευνοεί τη συγκέντρωση ιόντων  $H^+$  στην περιοχή του ηλεκτροδίου καθόδου, μειώνοντας την ωφέλιμη πυκνότητα ρεύματος και προκαλώντας την ανάπτυξη φιλμ υδροξειδίων [11].

Στο σχήμα 6.4 φαίνεται η εξάρτηση της περιεκτικότητας σε σίδηρο και της καθοδικής επάρκειας από την πυκνότητα ρεύματος. Στον πίνακα 6.2 παρουσιάζονται οι τιμές διαφόρων ιδιοτήτων για ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις σιδήρου-νικελίου πάχους 1μm.



**Σχήμα 6.4** Διαβάθμιση της περιεκτικότητας σε σίδηρο και της καθοδικής επάρκειας συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος για διαφορετικές συγκεντρώσεις προσθέτων [11].

**Πίνακας 6.2** Μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες ηλεκτρολυτικών φιλμ FeNi και NiFeP [1].

Properties	Ni <sub>81</sub> Fe <sub>19</sub>	New Ni <sub>79</sub> Fe <sub>21</sub>	NiFeP
$H_c$ (A/m)	72	152	144
$B_s$ (T)	1.0	1.1	1.2
$\mu$ (at 1 MHz)	2000	1300	–
$H_k$ (as-plated) (A/m)	400	800	–
Stability of heating (°C)	300	–	250
$\rho$ ( $\mu\Omega$ cm)	28	60	170
$\lambda_s \times 10^{-6}$ (–)	+1.0	–	+8
Structure	fcc	fcc	amorphous

#### 6.4.4 ΜΑΓΝΗΤΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΣΙΔΗΡΟΥ-ΝΙΚΕΛΙΟΥ [15]

Αν εξαιρέσουμε κάποιες περιπτώσεις εφαρμογών που εκμεταλλεύονται την μαγνητοελαστικότητα κάποιων υλικών, όπως για παράδειγμα οι αισθητήρες ροπής, είναι συχνά επιθυμητό, αν όχι απαραίτητο τα ηλεκτρολυτικά στρώματα να στερούνται μαγνητοελαστικότητας. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η πλήρης εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών τέτοιου τύπου υλικών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μαγνητοελαστικότητα είναι μία ιδιότητα που σχετίζεται με τη σύσταση του κράματος. Και καθώς η σύσταση είναι στενά συνδεδεμένη με τη σύσταση του ηλεκτρολυτικού λουτρού, η παραγωγή επιστρώσεων

χωρίς μαγνητοελαστικότητα απαιτεί εκτενή μελέτη των παραμέτρων ηλεκτροαπόθεσης.

Είναι γνωστό ότι τα υλικά του τύπου Permalloy εμφανίζουν τις βέλτιστες μαγνητικές ιδιότητες όταν παρουσιάζουν χαμηλή μαγνητοελαστικότητα. Επιπροσθέτως, όταν ένα υλικό είναι μαγνητοελαστικό τα χαρακτηριστικά του είναι ευαίσθητα σε μηχανικές τάσεις και παραμορφώσεις και ποικίλουν ανάλογα με την έκταση των παραγόντων αυτών. Συσκευές που χρησιμοποιούν μαγνητικά επιστρώματα είναι εξαιρετικά ευαίσθητες στους παράγοντες αυτούς. Τα επιστρώματα αυτά είναι συνήθως πολύ λεπτά, με αποτέλεσμα να έχουν ελάχιστο εμβαδό διατομής και κατά συνέπεια να παρουσιάζουν μεγάλη ακαμψία. Έτσι ακόμη και πολύ ασθενείς δυνάμεις μπορούν να προκαλέσουν απρόβλεπτες και σημαντικές μεταβολές στα μαγνητικά χαρακτηριστικά.

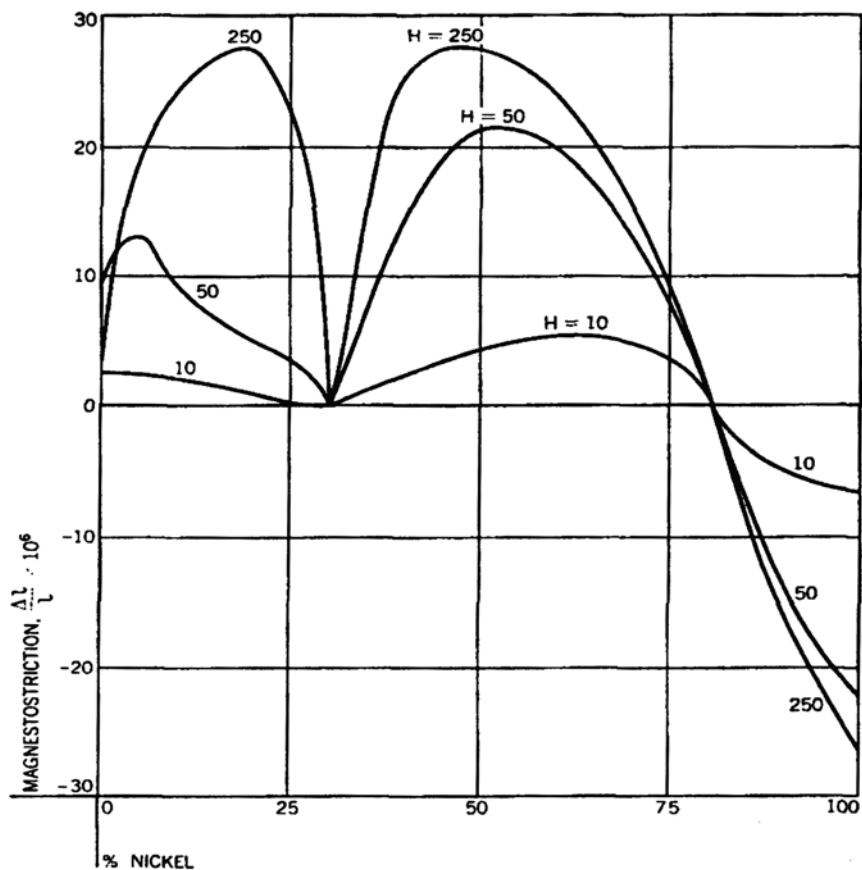
Μηχανικές τάσεις μπορούν να προκληθούν από εσωτερικές συνδέσεις ή καλωδιώσεις, από ανθρώπινο χειρισμό, ακόμη και από την επίδραση της θερμοκρασίας σε υλικά με διαφορετικές σταθερές διαστολής. Η αποφυγή τέτοιων φαινομένων βασίζεται σε επιλογή κατάλληλων υλικών σαν υποστρώματα και σε περίπλοκες και εξονυχιστικές κατασκευαστικές τεχνικές. Γενικά όμως, είναι σχεδόν αδύνατο να αποφευχθούν φαινόμενα που προκαλούν ή μπορούν να προκαλέσουν μηχανικές τάσεις. Επίσης, πολύ σημαντικός παράγοντας στα μαγνητοσυστολικά υλικά είναι η γήρανση, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι σε αυτά τα υλικά οι μαγνητικές ιδιότητες μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου. Κατά συνέπεια, είναι αναγκαία η παραγωγή ηλεκτρολυτικών κραμάτων μη μαγνητοσυστολικών.

Οι μέχρι σήμερα έρευνες αποδεικνύουν ότι από την οικογένεια των κραμάτων σιδήρου-νικελίου, εκείνο που παρουσιάζει πρακτικά μηδενική μαγνητοσυστολικότητα είναι το 81% νικέλιο, 19% σίδηρος. Όπως όμως φαίνεται και στο σχήμα 6.5, η καμπύλη μαγνητοσυστολής παρουσιάζει μεγάλη κλίση στην περιοχή που μας ενδιαφέρει. Έτσι, μία ανεπαίσθητη αλλαγή στην σύσταση του λουτρού ή στις συνθήκες ηλεκτρόλυσης μπορεί να προκαλέσει μεγάλη αύξηση της μαγνητοσυστολικότητας, καθώς η σύσταση του κράματος είναι πολύ ευαίσθητη σε τέτοιες αλλοιώσεις. Επομένως, για να γίνει δυνατή η παραγωγή επαναλήψιμων, μη μαγνητοσυστολικών επιστρώσεων πρέπει να μελετηθεί η επίδραση κάθε μίας από τις παρακάτω παραμέτρους ξεχωριστά.

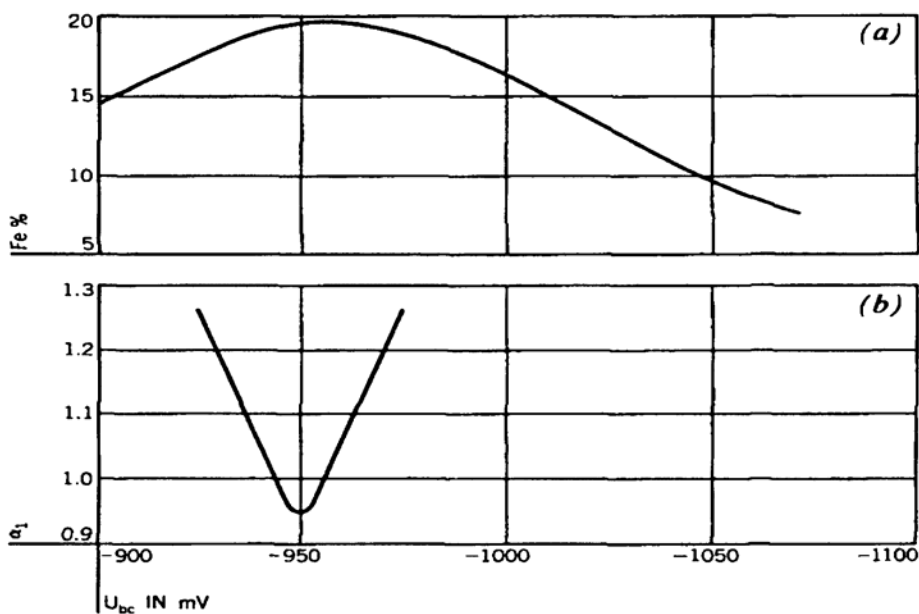
- (1) Χημική ανάλυση λουτρού ( περιεκτικότητα σε Ni και Fe)
- (2) Θερμοκρασία λουτρού
- (3) Βαθμός ανάδευσης
- (4) Πυκνότητα ρεύματος
- (5) Γεωμετρία ηλεκτροδίου καθόδου

Στο σχήμα 6.6 φαίνεται η εξάρτηση της περιεκτικότητας σε σίδηρο και της ευαισθησίας σε μηχανικές τάσεις από την τάση ηλεκτροαπόθεσης. Για τα αντίστοιχα λουτρά ισχύουν οι παρακάτω περιεκτικότητες:

- Βορικό οξύ ( $H_3BO_3$ )  $\rightarrow$  25gr/lit
- Ζαχαρίνη ( $C_4H_4CONHSO_2$ )  $\rightarrow$  0.8gr/lit



Σχήμα 6.5 Εξάρτηση της μαγνητοελαστικότητας κραμάτων Fe-Ni από τη σύσταση τους και την ένταση μαγνητικού πεδίου [15].



Σχήμα 6.6 (α) Περικεκτικότητα σε σίδηρο συναρτήσει δυναμικού απόθεσης  
Για  $\text{NiSO}_4 = 250\text{gr/l}$  και  $\text{FeSO}_4 = 4\text{gr/l}$   
(β) Ευαισθησία σε τάσεις συναρτήσει δυναμικού απόθεσης για  
 $\text{NiSO}_4 = 255\text{gr/l}$  και  $\text{FeSO}_4 = 4\text{gr/l}$  [15]

Στο σχήμα 6.8 φαίνονται οι τυπικές συστάσεις λουτρών εναπόθεσης για δύο διαφορετικής σύστασης κράματα. Ανάλογα με την εφαρμογή, σε αυτά τα διαλύματα μπορούν προαιρετικά να περιληφθούν και προσθετα για περιορισμό των εσωτερικών μηχανικών τάσεων.

Component	Ni (80%)–Fe (20%)	Ni (50%)–Fe (50%) <sup>a</sup>
NiSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O (g l <sup>-1</sup> )	200	168
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O (g l <sup>-1</sup> )	8	81
NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (g l <sup>-1</sup> )	5	135
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (g l <sup>-1</sup> )	25	50
Saccharin (g l <sup>-1</sup> )	3	3
pH	2.5–3.0	3.5–4.0
Temperature (°C)	25–30	55–60
Current density (mA cm <sup>-2</sup> )	13	30

**Πίνακας 6.3** Σύσταση ηλεκτρολυτικών λουτρών για 80/20 Permalloy και Orthonol (50% Fe, 50% Ni) [10].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.

### ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΩΝ ΦΙΛΜ FeNi ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

#### 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε αναλυτικά στην πρακτική εφαρμογή των συμπερασμάτων του κεφαλαίου 6. Σκοπός της εργαστηριακής αυτής διαδικασίας αποτελεί η παρασκευή μαγνητικών υμενίων σιδήρου - νικελίου πάνω σε υπόστρωμα χαλκού με τη μέθοδο της ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης ή ηλεκτροεναπόθεσης. Τα υμένια αυτά εν συνεχεία θα χρησιμοποιηθούν ως μαγνητικοί πυρήνες (probe cores) σε μία απλή διάταξη αισθητήρα fluxgate προκειμένου να κριθεί η καταλληλότητά τους για τέτοιου τύπου εφαρμογές. Η εκτίμηση των ιδιοτήτων των υμενίων – πέραν των άμεσα παρατηρήσιμων όπως των μηχανικών – θα γίνει έμμεσα από τα χαρακτηριστικά της αισθητήριας διάταξης. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούμε μόνο σε φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των ηλεκτρολυτικών κραμάτων. Τα πειράματα διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας του τμήματος Μεταλλουργών & Μηχανικών Μεταλλείων του ΕΜΠ.

#### 7.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΥΡΗΝΩΝ ΓΙΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ FLUXGATE

Για να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο οι μαγνητικές ιδιότητες ενός σιδηρομαγνητικού υλικού το καθιστούν κατάλληλο για χρήση ως πυρήνα σε μαγνητόμετρο Fluxgate, πρέπει κανείς να μελετήσει την αρχή λειτουργίας των συγκεκριμένων αισθητήρων. Επομένως, η μελέτη του κεφαλαίου 9 προηγείται χρονικά της πειραματικής διαδικασίας που εδώ περιγράφεται. Μάλιστα, γνώμονα για πολλές από τις επιλογές που στη συνέχεια θα αναφερθούν, αποτέλεσαν συμπεράσματα του κεφαλαίου 9. Για λόγους συνέχειας και ομοιομορφίας της εργασίας αυτής κρίθηκε σκόπιμο η αναφορά στα εν λόγω πειράματα να ακολουθήσει την ανάλυση των θεωρητικών αρχών που διέπουν τις ηλεκτρολυτικές επιμεταλλώσεις.

Οι κυριότερες παράμετροι που σήμερα θεωρείται ότι πρέπει να πληρούν τα υλικά κατασκευής πυρήνων fluxgate είναι οι ακόλουθες [9]:

- υψηλή μαγνητική διαπερατότητα
- χαμηλή ένταση συνεκτικού πεδίου
- χαμηλός συντελεστής μαγνητοσυστολής
- αναστροφή ροής με στροφή της μαγνήτισης αντί με κίνηση μαγνητικών τοιχωμάτων
- ομοιόμορφη διατομή σε όλο το μήκος του πυρήνα ή πολύ περιορισμένο τμήμα μειωμένης διατομής
- χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα

#### 7.3 ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Η τεχνική της ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης είναι γενικά στην πρακτική της εφαρμογή μία απλή διαδικασία. Παρά την εξάρτηση του τελικού αποτελέσματος από έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων και συνθηκών, καθώς και την μεγάλη προσοχή που απαιτείται στην τήρηση συγκεκριμένων κανόνων, μία διάταξη ηλεκτρολυτικής

επιμετάλλωσης μπορεί να υλοποιηθεί με εύκολο και οικονομικό τρόπο. Ο απαιτούμενος εξοπλισμός περιλαμβάνει:

- Γεννήτρια ρεύματος. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια συνεχούς ρεύματος με δυνατότητα τροφοδότησης έως 900 περίπου mA. Συχνά, χρησιμοποιούνται γεννήτριες εναλλασσόμενου παλμικού ρεύματος.
- Ζυγός ακριβείας, καθώς η ακριβής αναλογία συστατικών του ηλεκτρολυτικού διαλύματος είναι πολύ κρίσιμος παράγοντας για την παραγωγή επαναλήψιμων αποτελεσμάτων.
- Αμπερόμετρο.
- Πεχάμετρο.
- Θερμόμετρο ελάχιστης διακριτικής ικανότητας 1°C.
- Εστία θέρμανσης και ανάδευσης.
- Συσκευή υπερήχων για τον καθαρισμό των ηλεκτροδίων από οργανικές και άλλες ακαθαρσίες.
- Ποτήρια ζέσεως ή ογκομετρικοί σωλήνες διαφόρων μεγεθών.
- Προχοίδα για προσθήκη δραστικών οξέων (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) προς ρύθμιση του pH (αν αυτό απαιτείται)
- Μαγνητικοί αναδευτήρες

Πρέπει τέλος να τονίσουμε ότι ο χειρισμός των συστατικών του ηλεκτρολυτικού λουτρού πρέπει να γίνεται οπωσδήποτε με χρήση χειρουργικών γαντιών, ενώ η όλη διαδικασία λαμβάνει χώρα εντός απαγωγού αερίων, καθώς πολλά από τα συστατικά του λουτρού είναι υψηλά καρκινογόνα. Επίσης συνίσταται ο θάλαμος του απαγωγού να σφραγίζεται κατά την διεξαγωγή του πειράματος προκειμένου να αποφευχθεί η ελευθέρωση επικίνδυνων αναθυμιάσεων στην ατμόσφαιρα του εργαστηρίου.

#### 7.4 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗ ΚΥΨΕΛΙΔΑ

Όπως αναφέρθηκε στο έκτο κεφάλαιο, ως ηλεκτρόδιο καθόδου στις διατάξεις ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης χρησιμοποιείται το υπόστρωμα πάνω στο οποίο πρόκειται να γίνει η απόθεση του κράματος. Στην προκειμένη περίπτωση, η απόθεση του υμενίου FeNi έγινε σε τεμάχια από κοινές πλακέτες χαλκού που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τυπωμένων κυκλωμάτων. Οι πλακέτες κόπηκαν σε τεμάχια διαστάσεων 1cm επί 3,5 - 4,5cm. Ως άνοδος χρησιμοποιήθηκε φύλλο καθαρού νικελίου, ώστε η διαλυτοποίησή του να διατηρεί σταθερή τη σύσταση ιόντων νικελίου στο διάλυμα.

Κατά την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε στην τελική τους θέση να είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένα μεταξύ τους. Επίσης η απόστασή μεταξύ των ηλεκτροδίων καλό είναι να διατηρείται όσο το δυνατόν μικρότερη. Αν η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων για κάποιο λόγο δεν είναι ομοιόμορφη κατά τη διάρκεια της ηλεκτροεναπόθεσης, ή αν οι διαστάσεις των ηλεκτροδίων δεν είναι ακριβώς ίσες, τότε το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται ανάμεσά τους χάνει την ομοιομορφία του. Αποτέλεσμα αυτής της ανομοιογένειας του πεδίου είναι η παραγωγή ανομοιόμορφων υμενίων, με μεταβλητό πάχος. Για παράδειγμα, αν η άνοδος έχει μεγαλύτερες διαστάσεις από την κάθοδο, τότε το υμένιο που θα παραχθεί θα έχει αυξημένο πάχος περιμετρικά, αφού η πυκνότητα των γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στην κάθοδο, θα είναι μεγαλύτερη στην περιοχή αυτή.

Ως ηλεκτρολυτική κυψελίδα χρησιμοποιήθηκε ποτήρι ζέσεως χωρητικότητας 200ml. Ως διαλύτης τελικά προτιμήθηκε απιονισμένο και αποκαρβιδιωμένο νερό, καθώς με απλά απιονισμένο νερό οι επικαλύψεις σε πολλές περιπτώσεις προέκυψαν θαμπές. Τέλος, όσον αφορά την ανάδευση του λουτρού, αυτή θα πρέπει να έχει τέτοιο ρυθμό, ώστε να μην εμφανίζονται αναταράξεις στην επιφάνεια του λουτρού.

## 7.5 ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΟ ΛΟΥΤΡΟ

Η επικράτηση του permalloy 80/20 σαν υλικό για την κατασκευή σιδηρομαγνητικών πυρήνων για αισθητήρες fluxgate αποτελεί φυσικό επακόλουθο των πολύ καλών μαγνητικών του ιδιοτήτων οι οποίες ικανοποιούν στις περισσότερες περιπτώσεις τις απαιτήσεις για τέτοιου τύπου αισθητήρες. Οι περισσότερες δημοσιεύσεις που αφορούν πειράματα παρασκευής ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων με χρήση permalloy, αναφέρουν ως κατάλληλα τα ηλεκτρολυτικά λουτρά τύπου Watts τα οποία φαίνονται στον πίνακα 6.3 το οποίο για λόγους ευκολίας αναπαράγεται στη συνέχεια.

Component	Ni (80%)–Fe (20%)	Ni (50%)–Fe (50%) <sup>a</sup>
NiSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O (g l <sup>-1</sup> )	200	168
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O (g l <sup>-1</sup> )	8	81
NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (g l <sup>-1</sup> )	5	135
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (g l <sup>-1</sup> )	25	50
Saccharin (g l <sup>-1</sup> )	3	3
pH	2.5–3.0	3.5–4.0
Temperature (°C)	25–30	55–60
Current density (mA cm <sup>-2</sup> )	13	30

**Πίνακας 6.3** Σύσταση ηλεκτρολυτικών λουτρών για 80/20 Permalloy και Orthonol (50% Fe, 50% Ni).

Το παραπάνω διάλυμα αποτέλεσε την αρχή των πειραμάτων που διεξήχθησαν κατά τη διάρκεια της παρούσης εργασίας. Πρέπει εδώ να τονιστεί ότι οι ιδιότητες που παριστάνονται γραφικά στα σχήματα 6.1, 6.2 και 6.3, αφορούν περιπτώσεις υμενίων από permalloy τα οποία έχουν υποστεί κατάλληλη κατεργασία ώστε να βελτιωθούν σημαντικά οι μαγνητικές τους ιδιότητες. Διαδικασίες όπως θέρμανση και αργή επαναφορά, επιβολή μαγνητικού πεδίου κατά την διάρκεια της ηλεκτροεναπόθεσης, ή θέρμανση παρουσία ισχυρού εξωτερικού μαγνητικού πεδίου μπορούν να βελτιώσουν σε μεγάλο βαθμό την μαγνητική διαπερατότητα και την ένταση συνεκτικού πεδίου των αποθεμάτων. Ήταν λοιπόν αναμενόμενο, και αποδείχθηκε στη συνέχεια ότι το παραπάνω διάλυμα θα χρειαστεί κάποιες μεταβολές στη σύστασή του αλλά και τις συνθήκες εναπόθεσης, προκειμένου να παραχθούν υμένια με ικανοποιητικές ιδιότητες. Δεν πρέπει επιπλέον να ξεχνάμε, ότι κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, η εναπόθεση επηρεαζόταν άμεσα από το περιστρεφόμενο πεδίο της εστίας ανάδευσης, του οποίου η χρήση ήταν αδύνατο να αποφευχθεί καθώς απουσία ανάδευσης σχηματίζονται φυσαλίδες οι οποίες επιφέρουν καταστροφικά αποτελέσματα εμποδίζοντας εξολοκλήρου σε πολλές περιπτώσεις την επιμετάλλωση. Το περιστρεφόμενο αυτό πεδίο, αν και ασθενές, αποτελεί έναν επιπλέον παράγοντα που συμβάλλει στον τυχαίο προσανατολισμό των στοιχειωδών μαγνητικών ροπών, καθώς



αυτές λαμβάνουν τις τελικές τους θέσεις, με αποτέλεσμα να συρρικνώνονται οι μαγνητικές περιοχές (περιοχές όπου όλα τα δίπολα είναι ευθυγραμμισμένα και στην αμαγνήτιστη κατάσταση) και να ελλατώνεται η μαγνητική διαπερατότητα του υμενίου.

## 7.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το λουτρό που στην προηγούμενη παράγραφο αναφέρεται, αντίθετα με τα αποτελέσματα των δημοσιεύσεων που αποτέλεσαν πηγές πληροφοριών λόγω έλλειψης βιβλιογραφίας, έδωσε προβληματικά αποτελέσματα. Τα πρώτα δοκίμια που παρασκευάστηκαν παρουσίασαν βελονισμούς (pitting) σε μεγάλη έκταση. Μείωση της πυκνότητας ρεύματος έλυσε το πρόβλημα αυτό. Χωρίς άλλη μεταβολή στοιχειομετρίας ή συνθηκών ελήφθησαν επικαλύψεις με πολύ καλές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Η ευκολία εναπόθεσης σε υποστρώματα χαλκού βοήθησε στην παραγωγή επικαλύψεων με στιλπνή και λεία επιφάνεια, άριστη πρόσφυση, και ικανοποιητική σκληρότητα. Κάποιες περιπτώσεις εμφάνισης οργανικών ενώσεων στο τελικό αποτέλεσμα, ή ακαθαρσιών, εξαλήφθηκαν με σχολαστικό καθαρισμό των ηλεκτροδίων σε ακετόνη και περιβάλλον υπερήχων.

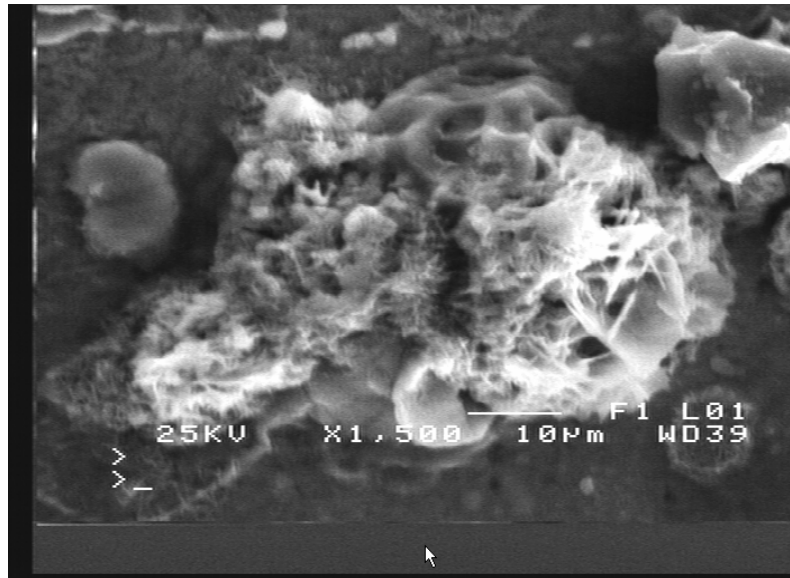
Οι αναλύσεις SEM έδειξαν μειωμένη περιεκτικότητα των αποθεμάτων σε νικέλιο όπως φαίνεται και στα διαγράμματα κορυφών που παραθέτουμε στο τέλος του κεφαλαίου. Τα εν λόγω δείγματα, όταν χρησιμοποιήθηκαν σαν πυρήνες σε στοιχειώδη διάταξη fluxgate αποδείχθηκαν ακατάλληλα, καθώς είτε λόγω χαμηλής διαπερατότητας είτε υψηλής έντασης συνεκτικού πεδίου δεν κατέστη δυνατή η εκμετάλλευση του μή γραμμικού τμήματος της καμπύλης μαγνήτισής των (βασική λειτουργική αρχή των fluxgates).

Στα πειράματα που ακολούθησαν δοκιμάστηκαν διαφορετικά λουτρά με αυξομειώσεις της συγκέντρωσης των μεταλλικών αλάτων, αυξομειώσεις του pH, της θερμοκρασίας και της πυκνότητας ρεύματος. Παρά το γεγονός ότι κάποια δείγματα παρουσίασαν ελαφρώς μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε νικέλιο, οι μαγνητικές τους ιδιότητες δεν βελτιώθηκαν. Για το λόγο αυτό είναι άσκοπη η αναλυτική αναφορά των πειραμάτων αυτών.

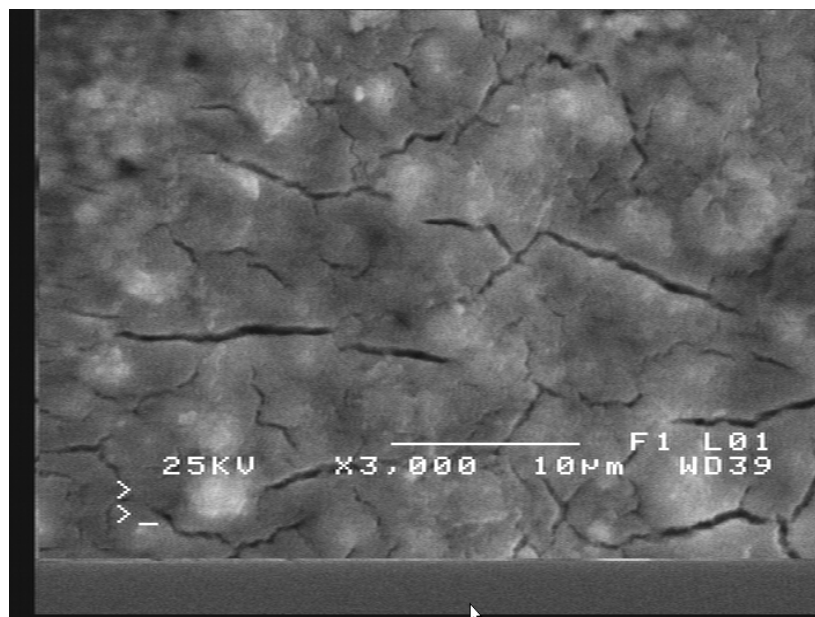
Αντίθετα, ο ρόλος του βορικού οξέως, (σε συνδυασμό με θερμοκρασία και πυκνότητα ρεύματος για βέλτιστες οπτικές και μηχανικές ιδιότητες) αποδείχθηκε πολύ κρίσιμος σε συμφωνία με τα λεγόμενα του κεφαλαίου 6. Τα διαλύματα που παρουσιάζονται στον πίνακα 7.1, και κυρίως το δεύτερο από αυτά, έδωσαν επικαλύψεις, με πολύ καλές φυσικές ιδιότητες αλλά ταυτόχρονα και ικανοποιητικές μαγνητικές ιδιότητες.

	<b>Διάλυμα 1</b>	<b>Διάλυμα 2</b>
<b>NiSO<sub>4</sub></b>	30gr/150ml	30gr/150ml
<b>FeSO<sub>4</sub></b>	3 gr/150ml	3 gr/150ml
<b>NiCl<sub>2</sub></b>	1,8 gr/150ml	1,8 gr/150ml
<b>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub></b>	9,38 gr/150ml	9,38 gr/150ml
<b>Saccharin</b>	1,2 gr/150ml	1,2 gr/150ml
<b>Πυκνότητα Ρεύματος</b>	5,5mA/cm <sup>2</sup>	5,97 mA/cm <sup>2</sup>
<b>Θερμοκρασία</b>	45°C - 50°C	45°C
<b>Χρόνος</b>	30'	30'
<b>Εμβαδό επικάλυψης</b>	4cm <sup>2</sup>	3,7 cm <sup>2</sup>

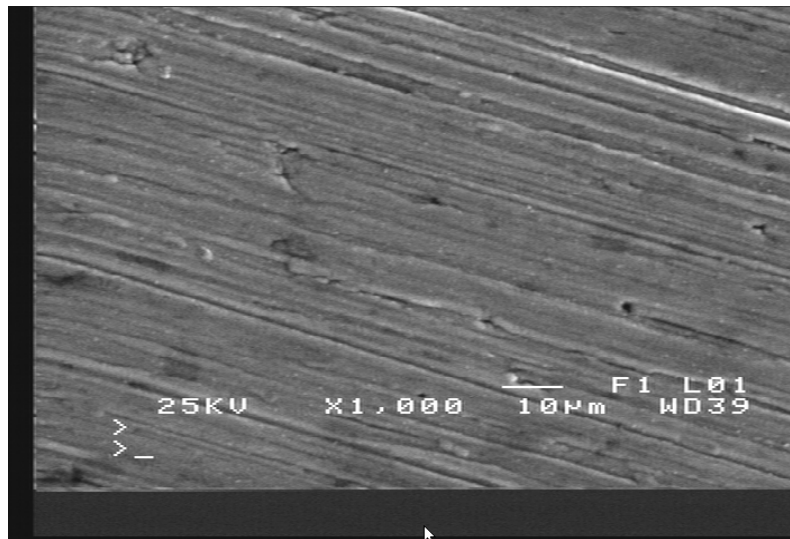
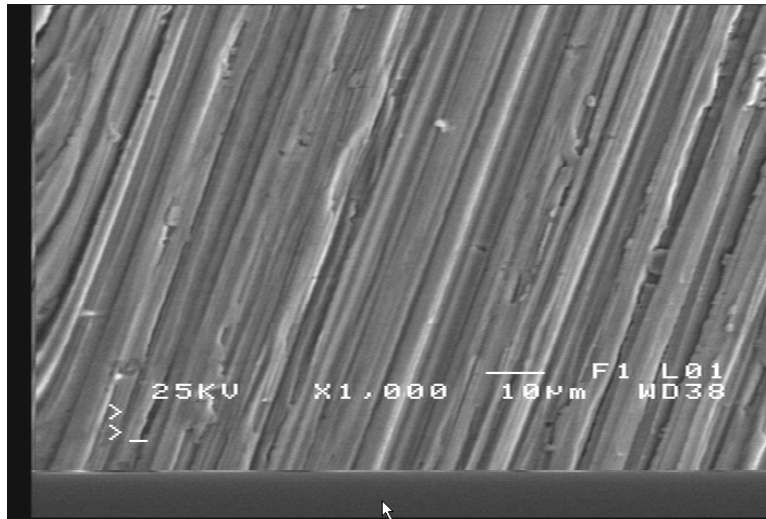
**Πίνακας 7.1** Τελικές Συστάσεις και συνθήκες λουτρού



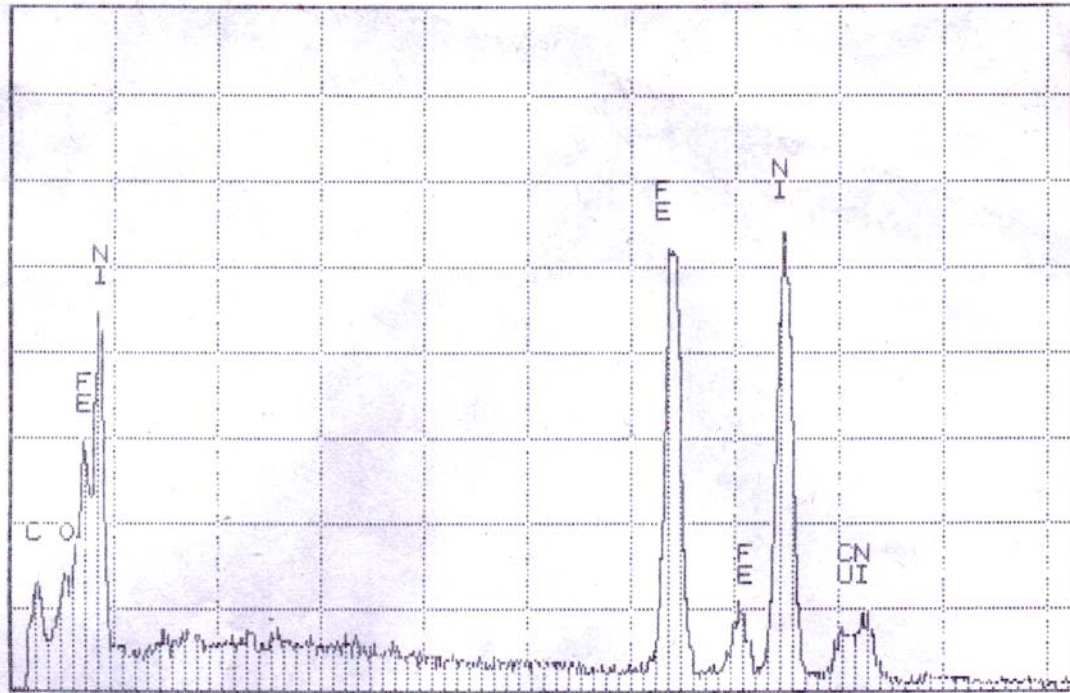
**Εμφάνιση ακαθαρσιών (ελλειπής καθαρισμός/μολυσμένο λουτρό)**



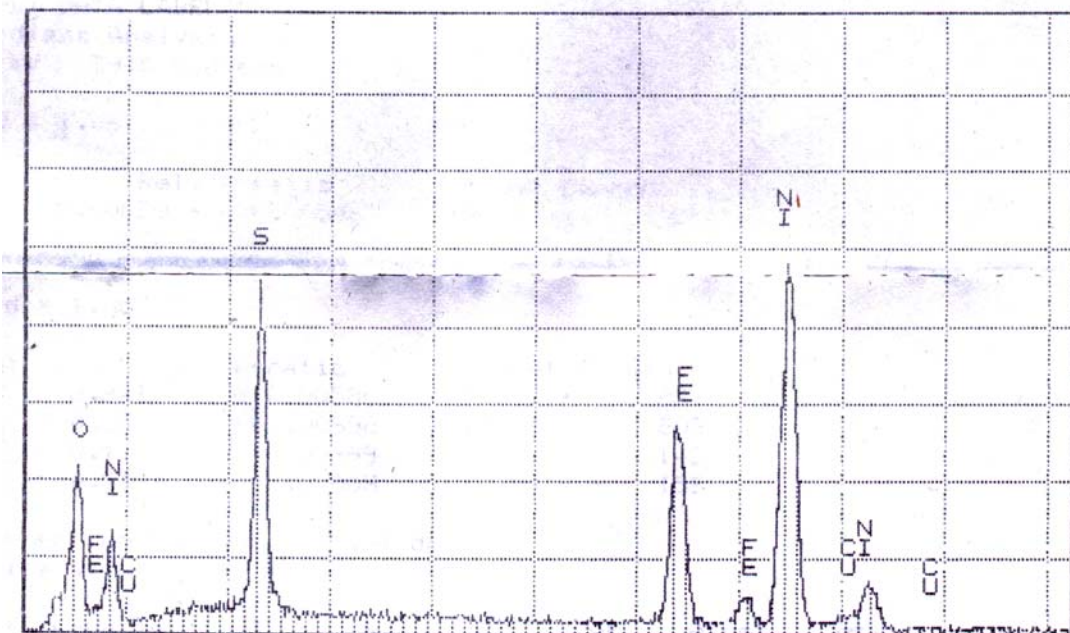
**Εμφάνιση ρωγμών (υψηλές εσωτερικές τάσεις)**



**Βελτιωμένες επικαλύψεις με μεταβολή συνθηκών και χρήση καλύτερης ποιότητας υποστρωμάτων**



Διάγραμμα Κορυφών δείγματος Με ~60% περιεκτικότητα σε Ni  
Παρατηρείται η ύπαρξη οξειδίων.



Διάγραμμα Κορυφών δείγματος Με ~70% περιεκτικότητα σε Ni  
Παρατηρείται η ύπαρξη ακαθαρσιών θείου.

Στα παραπάνω διαγράμματα η ύπαρξη κορυφών χαλκού οφείλεται προφανώς στο υπόστρωμα χαλκού του οποίου το πάχος είναι συγκρίσιμο με το πάχος του υμενίου.

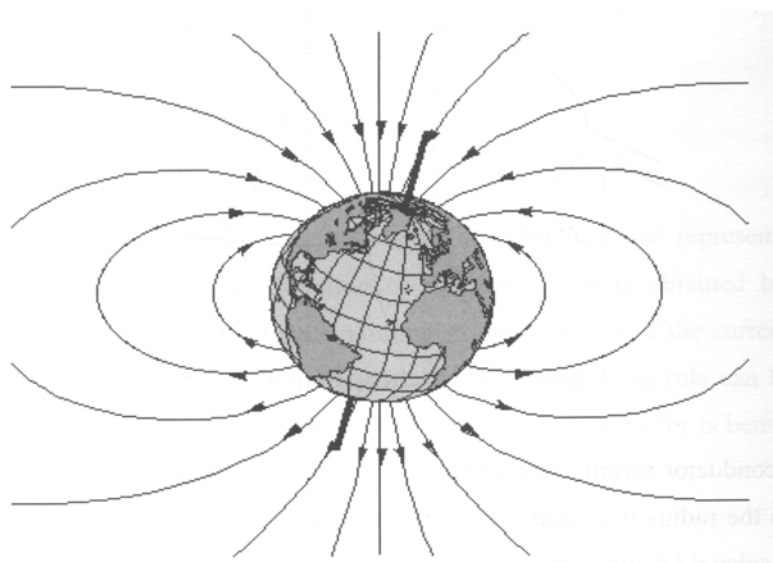
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8.

### ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε συνοπτικά στις κυριότερες μεθόδους μέτρησης της έντασης μαγνητικών πεδίων, της μαγνητικής επαγωγής και της μαγνήτισης. Θα δούμε τους σημαντικότερους τύπους αισθητήριων διατάξεων καθώς και τις εφαρμογές αυτών. Τέλος θα παρουσιαστούν τα διάφορα υλικά που σήμερα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μαγνητικών αισθητήρων, κατηγοριοποιημένα με βάση τον τύπο του αισθητήρα στον οποίο βρίσκουν εφαρμογή.

#### 8.1 ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ

Το πιο γνωστό μαγνητικό πεδίο που αδιάκοπα επηρεάζει κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα είναι το πεδίο της γης. Το γήινο μαγνητικό πεδίο σύμφωνα με τις σύγχρονες αντιλήψεις οφείλεται στην κυκλοφορία ηλεκτρικών ρευμάτων στον πυρήνα της γης. Οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου της γης μπορούν να προσεγγιστούν με το πεδίο ενός ραβδόμορφου μαγνήτη. Γενικά, οι πόλοι του γήινου μαγνητικού πεδίου δεν ταυτίζονται απόλυτα με του γεωγραφικούς πόλους της γης. Η γωνία ανάμεσα στον γεωγραφικό και τον μαγνητικό άξονα της γης ονομάζεται μαγνητική απόκλιση. Στο σχήμα 8.1 φαίνεται η σχηματική απεικόνιση των γραμμών του γήινου μαγνητικού πεδίου. Γενικά, σαν μέση τιμή του γήινου μαγνητικού πεδίου για μαθηματικούς υπολογισμούς λαμβάνεται η τιμή 56A/m [3].



Σχήμα 8.1 Το γήινο μαγνητικό πεδίο.

Δεύτερη σημαντική κατηγορία φυσικών μαγνητικών πεδίων αποτελούν τα βιομαγνητικά πεδία, τα οποία προέρχονται από την καρδιακή και εγκεφαλική λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού. Η ύπαρξη των ασθενών αυτών πεδίων αποτελεί την βάση για έναν μεγάλο αριθμό διαγνωστικών μεθόδων όπως το ηλεκτροκαρδιογράφημα. Η μέτρησή τους γίνεται με αισθητήρες υψηλής ευαισθησίας όπως fluxgates και SQUIDS. Η ένταση τέτοιων πεδίων κυμαίνεται στην περιοχή των pTesla.

Όσον αφορά τα τεχνητά μαγνητικά πεδία, αυτά κυρίως απαντώνται σε περιοχές κοντά σε μετασχηματιστές και ηλεκτρικούς κινητήρες. Επίσης ισχυρά μεγνητικά πεδία προκαλούνται από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης καθώς και από ηλεκτροδοτούμενες γραμμές τρένων, τραμ κλπ. Τέλος, στατικά τεχνητά πεδία προκαλούνται από μόνιμους μαγνήτες και ηλεκτρομαγνήτες. Η επίδραση των πεδίων αυτών με την μορφή παρεμβολών σε άλλες διατάξεις μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με χρήση κατάλληλης γεωμετρίας στη σχεδίαση των μαγνητικών πυρήνων και κυκλωμάτων.

## 8.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Γενικά οι τρόποι μέτρησης μαγνητικών πεδίων χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει μετρήσεις που στηρίζονται στο φαινόμενο της μαγνητικής επαγωγής. Η δεύτερη περιλαμβάνει μετρήσεις δυνάμεων που προκαλούνται από μαγνητικά πεδία και η τρίτη κατηγορία στηρίζεται στην μεταβολή των μαγνητικών ιδιοτήτων της ύλης παρουσία μαγνητικών πεδίων.

### 8.2.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Η ένταση μαγνητικού πεδίου μπορεί να μετρηθεί με βάση την ηλεκτρεγερτική δύναμη σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα η οποία οφείλεται στην μεταβολή της μαγνητικής ροής που εμπλέκει το κύκλωμα. Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday (παράγραφος 1.1.3) η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα ηλεκτρικού κυκλώματος ισούται με το ρυθμό μεταβολής της ροής που εμπλέκεται με αυτό. Οι μέθοδοι επαγωγής χωρίζονται στις μεθόδους σταθερού πηνίου, κινούμενου πηνίου και περιστρεφόμενου πηνίου [1].

Αισθητήρες τις πρώτης κατηγορίας μετράν το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής μέσω της επαγόμενης τάσης που εμφανίζεται στα άκρα ηλεκτρικού κυκλώματος. Χρησιμοποιούνται κυρίως για προσδιορισμό μαγνητικών ιδιοτήτων της ύλης. Παρουσιάζουν όμως το σημαντικό μειονέκτημα της ανάγκης για κύκλωμα ολοκληρωτή, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα ακόμη και παρουσία πολύ ασθενών συνεχών συνιστωσών (offset) της τάσης εξόδου.

Οι συσκευές κινητού πηνίου στηρίζονται στη σύγκριση του υπό μέτρηση πεδίου με κάποια γνωστή τιμή, η οποία είναι συνήθως το μηδέν. Η σύγκριση αυτή γίνεται με την μετακίνηση του πηνίου από την περιοχή ενδιαφέροντος σε σημείο μηδενικού πεδίου.

Τέλος, οι αισθητήρες περιστρεφόμενου πηνίου στηρίζονται στην παραγωγή μιας περιοδικής κυματομορφής τάσης, συχνότητας ίσης με τη συχνότητα περιστροφής και πλάτους που εξαρτάται από την ένταση του υπό μέτρηση πεδίου.

Η σημαντικότερη ίσως κατηγορία αισθητήρων που στηρίζονται στο φαινόμενο της επαγωγής είναι τα μαγνητόμετρα fluxgate. Τα fluxgates αξιοποιούν τη μή γραμμική καμπύλη μαγνήτισης των σιδηρομαγνητικών υλικών για τον προσδιορισμό της έντασης συνεχών (dc) ή σχεδόν συνεχών (quasi dc) μαγνητικών πεδίων. Η αρχή λειτουργίας τους αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

### 8.2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ

Στην κατηγορία αυτή υπάγονται τα μαγνητόμετρα ροπής (torque magnetometers) [1], [2]. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στην ροπή που ασκείται στα μαγνητικά δίπολα από εξωτερικά μαγνητικά πεδία. Χρησιμοποιούνται κυρίως για μετρήσεις μαγνητικής ανισοτροπίας σε δείγματα μαγνητικών υλικών. Γενικά, το

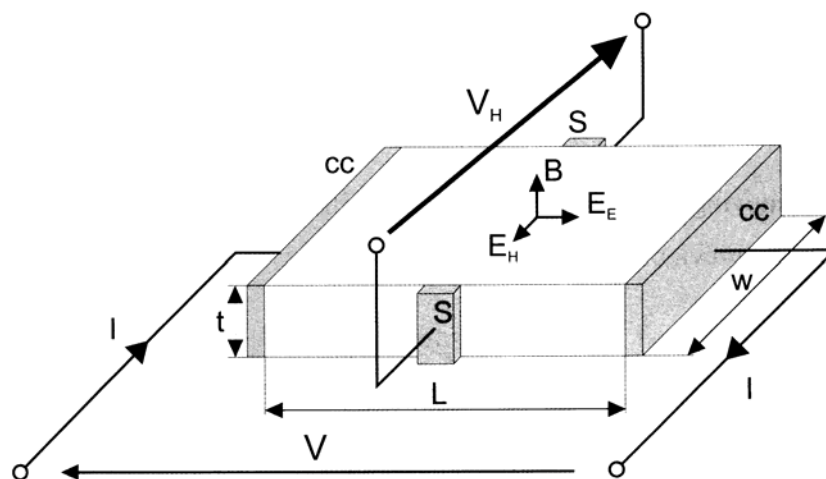
δείγμα υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου προσανατολίζεται προς κατεύθυνση τέτοια, ώστε η μαγνήτισή του να είναι παράλληλη προς το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Εν συνεχεία το δείγμα επαναφέρεται στην αρχική του θέση με την επίδραση εξωτερικής μηχανικής ροπής. Ανάλογα με τον τρόπο επιβολής της εξωτερικής ροπής υπολογίζεται η γωνία κατά την οποία στρέφεται το δείγμα υπό την επίδραση του πεδίου δίνοντας έτσι έναν τρόπο εκτίμησης της ανισοτροπίας του. Η βαθμονόμηση των αισθητήρων ροπής γίνεται με δείγματα γνωστής ανισοτροπίας.

### 8.2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΟΥ ΣΤΗΡΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΗΣ ΥΛΗΣ

Στην προηγούμενες παραγράφους είδαμε μεθόδους που αξιοποιούν την μεταβολή της μαγνητικής ροής διαμέσου ενός ηλεκτρικού κυκλώματος ή την επιβολή ροπής σε μαγνητικά δίπολα από εξωτερικά μαγνητικά πεδία. Στη συνέχεια θα αναφέρουμε εφαρμογές όπου αξιοποιούνται οι μεταβολές των μαγνητικών ιδιοτήτων της ύλης παρουσία πεδίου.

#### 8.2.3.1 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ HALL [1], [3]

Στο σχήμα 8.2 περιγράφεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα Hall. Κατά τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος από ένα αγώγιμο υλικό, εφαρμόζεται ένα εγκάρσιο μαγνητικό πεδίο όπως φαίνεται στο σχήμα. Κατά συνέπεια, οι φορείς ηλεκτρικού φορτίου εκτρέπονται λόγω της δύναμης Lorentz που ασκείται σε αυτούς από το πεδίο. Η γωνία εκτροπής εξαρτάται από την ένταση του εφαρμοζόμενου πεδίου, και την ένταση του διερχόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, (και κατά συνέπεια την ταχύτητα των φορέων). Αποτέλεσμα της δράσης της δύναμης Lorentz είναι η συγκέντρωση ηλεκτρονίων στο ένα άκρο του αγωγού και οπών στο άλλο. Καθώς η συγκέντρωση φορέων στα δύο άκρα αυξάνεται, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο που στο σχήμα συμβολίζεται με  $E_H$  και κατά συνέπεια είναι δυνατή η μέτρηση της τάσης Hall η οποία μπορεί να δώσει ένα μέτρο της τιμής του εφαρμοζόμενου πεδίου.



Σχήμα 8.2 Η βασική διάταξη αισθητήρα Hall

### 8.2.3.2 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΑΓΝΗΤΟΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Στα περισσότερα αγώγιμα μαγνητικά υλικά η επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου προκαλεί μεταβολή της ωμικής τους αντίστασης. Το φαινόμενο αυτό που είναι γνωστό ως μαγνητοαντίσταση μπορεί να αξιοποιηθεί για την μέτρηση μαγνητικών πεδίων, εφόσον είναι γνωστή η σχέση που συνδέει την ωμική αντίσταση με την ένταση του πεδίου. Γενικά η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη είναι μία αύξουσα μή γραμμική συνάρτηση. Ένα από τα μειονεκτήματα των αισθητήρων μαγνητοαντίστασης είναι η εξάρτηση της ωμικής αντίστασης από τη θερμοκρασία λειτουργίας. Παρόλαυτά, καθώς η μέτρηση της αντίστασης είναι μία γενικά απλή διαδικασία, οι αισθητήρες παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία μπορεί να ελέγχεται και να διατηρείται σταθερή.

### 8.2.3.3 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΑΓΝΗΤΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης συνδέεται στενά με την μαγνητοελαστικότητα, που όπως έχει ήδη αναφερθεί συναντάται κυρίως σε σιδηρομαγνητικά υλικά. Η ποσοστιαία μεταβολή των διαστάσεων ενός σιδηρομαγνητικού δείγματος μπορεί να αποτελέσει μέτρο της έντασης του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, αν είναι γνωστή η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη.

### 8.2.4 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ SQUID [1], [2], [3]

Το μαγνητόμετρο SQUID είναι το πιο ευαίσθητο μαγνητόμετρο με διακριτική ικανότητα μαγνητικής επαγωγής μερικών fT. Κατά συνέπεια, τα SQUID είναι ικανά να μετρήσουν εξαιρετικά ασθενή μαγνητικά πεδία όπως εκείνα που παράγονται από την ανθρώπινη καρδιά ή τον εγκέφαλο (~nT). Ένα SQUID αποτελείται από μία δακτυλιοειδή κατασκευή από υπεραγώγιμο υλικό (π.χ.  $\text{Yb}_2\text{Cu}_3\text{O}_{(7-x)}$  με κρίσιμη θερμοκρασία  $T_c$  90° K), η οποία διακόπτεται είτε από μία (R.F. SQUID) είτε από δύο (D.C. SQUID) επαφές Josephson. Τα SQUID μαγνητόμετρα χρησιμοποιούν το φαινόμενο Josephson, που παρατηρείται σε επαφές μετάλλου-μονωτή-μέταλλου σε κρυογενική θερμοκρασία (~3° K) που επιτυγχάνεται με εξάτμιση υγρού He. Η ανάλυση της λειτουργίας αισθητήρων SQUID ξεπερνά τους σκοπούς της παρούσης εργασίας. Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης παραπέμπεται στην βιβλιογραφία.

### 8.3 ΜΑΛΑΚΑ ΚΑΙ ΣΚΛΗΡΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ [2]

Η συντριπτική πλειοψηφία μαγνητικών αισθητήρων συμπεριλαμβάνει τη χρήση κάποιου μαγνητικού υλικού με τη μορφή εναργητικού ή παθητικού εξαρτήματος. Μάλιστα, ο τύπος του υλικού αυτού καθορίζει σε μέγιστο βαθμό την αρχή λειτουργίας, την δομή αλλά και την ευαισθησία του αισθητήρα. Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα κυριότερα μαγνητικά υλικά που σήμερα χρησιμοποιούνται, με βάση την κατάταξη σύμφωνα με το σύστημα IEC σε μαλακά και σκληρά. (πίνακες 8.1 και 8.2). Τα υλικά των πινάκων αυτών σχετίζονται στενά με τις βασικές κλάσεις μαγνητικών αισθητήρων, όπως φαίνεται στον πίνακα 8.3.



**Πίνακας 8.1** Σκληρά μαγνητικά υλικά κατά IEC

Group	Code	
Crystalline metals	R1 <sup>1)</sup>	Alloys of AlNiCo-type
	R2	Platinum-cobalt alloys
	R3	Iron-cobalt-vanadium (Chromium) alloys
	R6	Chromium-iron-cobalt alloys
	R5 <sup>1)</sup>	Rare earth cobalt alloys
	R7 <sup>1)</sup>	Rare earth iron alloys
	Amorphous metals	- <sup>1)</sup>
Oxides	Sl	Hard ferrites as Ba- and Sr-ferrites
	T	Other hard magnetic materials, e.g., magnetically semi-hard metals

**Πίνακας 8.2** Μαλακά μαγνητικά υλικά κατά IEC

Group	Code	
Crystalline metals	A	Irons
	B	Low carbon mild steel
	C	Silicon steel, mainly with 3% Si
	D	Other steels
	E	Nickel-iron alloys (5 groups E1 ... E5 with 30% ... 83% Ni)
	F	Iron-cobalt alloys (3 groups F1 ... F3 with 23% ... 50% Co)
	G	Other alloys as AlSiFe-alloys

**Πίνακας 8.3** Μαγνητικά υλικά για αισθητήρες μαγνητικού πεδίου

Sensor class	magnetically soft		magnetically hard	
	material	useful for	material	useful for
magnetogalvanic	C, E	slotted cores yokes	R1, R5, R7	magnetic circuits
magnetoelastic	D E1, I  C, E1	shafts, surface layers for shafts, laminated core packages, pot-cores	–	–
fluxgate	E1, H, I	strips and rods, toroidal cores	–	–
inductive, eddy-current	C, E2, E3  H	rods, yokes, laminated cores pot cores, rods	R1, R5, R7, S1	parts
Wiegand, pulse-wire	F, special alloys	wires	R6	magnets as rods for switching
magneto-resistive	E1, I NiCo, NiFeCo	resistors	R2, R5, CoCr	pre-magnetizing layers

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9.

### ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ FLUXGATE

#### 9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αισθητήρες fluxgate που είναι γνωστοί και με την ονομασία «μαγνητόμετρα κορεσμένου πυρήνα» αναπτύχθηκαν αρχικά την δεκαετία του 1930 για την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου της γης. Στην συνέχεια και κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου χρησιμοποιήθηκαν για ανθυποβρυχιακό πόλεμο, αλλά και από υποβρύχια προς εντοπισμό χαμηλά ιπτάμενων αεροσκαφών. Μετέπειτα η χρήση τους διευρύνθηκε και σε διαστημικές αποστολές σε γήινη τροχιά και στη σελήνη.

Τα μαγνητόμετρα fluxgate είναι κατάλληλα για μέτρηση της απόλυτης τιμής της έντασης μαγνητικού πεδίου, καθώς και για τη μέτρηση της διαφοράς μεταξύ δύο σημείων εντός μαγνητικού πεδίου. Μπορούν να μετρήσουν εντάσεις ασθενούς μαγνητικού πεδίου της τάξης από  $10^{-1}$  έως  $10^6$  nT [2] με διακριτική ικανότητα που μπορεί να πλησιάσει τα 100pT [3]. Το εύρος λειτουργίας τους και η διακριτική τους ικανότητα καλύπτουν το κενό ανάμεσα στους φθηνούς αισθητήρες μαγνητοαντίστασης, ή αισθητήρες Hall, και στα ακριβά μαγνητόμετρα που βασίζονται σε κβαντικά φαινόμενα όπως τα SQUIDS.

Σύμφωνα με την αρχή που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του σήματος, τα fluxgates μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

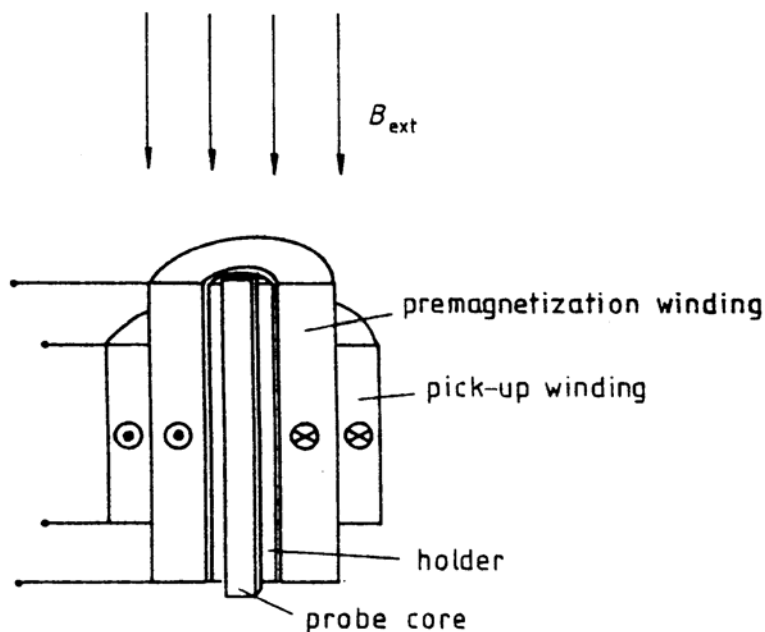
- αισθητήρες δεύτερης αρμονικής
- αισθητήρες πλάτους παλμού
- αισθητήρες θέσης παλμού.

Αν και μέχρι σήμερα παρατηρείται ιδιαίτερη πρόοδος σε εναλλακτικές τεχνολογίες, οι αισθητήρες fluxgate εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται εκτεταμένα λόγω της υψηλής τους γραμμικότητας, σταθερότητας, υψηλής ευαισθησίας, σχετικής απλότητας και οικονομικής λειτουργίας. Οι σύγχρονες εφαρμογές τους περιλαμβάνουν γεωμαγνητικές παρατηρήσεις, αναζήτηση ορυκτών, μετρήσεις στο εξώτερο διάστημα, ανίχνευση υποβρυχίων, μαγνητική προστασία πλοίων κλπ. Τέλος πρέπει να αναφέρουμε ιδιαίτερες διατάξεις fluxgate με δυνατότητα μέτρησης περισσότερων από μία συνιστωσών μαγνητικού πεδίου, καθώς και εφαρμογές σε μεταλλογραφικές συσκευές προς ανίχνευση ανωμαλιών ή δομικών κενών σε μεταλλικά υλικά.

#### 9.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ FLUXGATE

Για να μετατρέψουμε την πυκνότητα μαγνητικής ροής σε ένα πεδίο σε μετρήσιμο ηλεκτρικό σήμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μία άμεση μέθοδο, κατά την οποία είσοδος του συστήματος είναι η απόλυτη τιμή της μαγνητικής επαγωγής και έξοδος το προς μέτρηση σήμα. Μία τέτοια μέθοδος θα υπερτερούσε λόγω ευκολίας στην κατανόηση και απλότητας της εφαρμογής. Όμως σε περιπτώσεις ασθενών μαγνητικών πεδίων (για τις οποίες άλλωστε αναπτύχθηκαν οι αισθητήρες fluxgate) η μέθοδος αυτή μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό τα fluxgates δεν χρησιμοποιούν τέτοιου τύπου αρχές αλλά αντ'αυτού απαιτούν την ύπαρξη ενός πεδίου αναφοράς με το οποίο συγκρίνεται το προς μέτρηση πεδίο.

Το πεδίο αναφοράς είναι συνήθως ένα εναλλασσόμενο ημιτονικό, τετραγωνικό ή τριγωνικό σήμα το οποίο επιβάλλεται σε έναν πυρήνα σιδηρομαγνητικού υλικού (probe core) με χρήση ενός πηνίου προμαγνήτισης και οδηγεί περιοδικά τον πυρήνα σε κορεσμό. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης που βασίζεται στην μαγνητική επαγωγή στον σιδηρομαγνητικό πυρήνα εκτιμάται μέσω του πηνίου λήψης που τυλίγεται γύρω από τον πυρήνα. Έτσι, το αισθητήριο τμήμα ενός fluxgate περιλαμβάνει συνήθως ένα πυρήνα σιδηρομαγνητικού υλικού υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας και χαμηλού συνεκτικού πεδίου, γύρω από το οποίο τυλίγονται δύο τουλάχιστον πηνία, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.1. [2]



**Σχήμα 9.1** Στοιχειώδες σχέδιο αισθητήρα fluxgate.

Οι διάφορες αρχές μέτρησης βασίζονται στους διάφορους τύπους καμπύλης μαγνήτισης που μπορούν να παραχθούν με συγκεκριμένη κατεργασία όπως ανόπτηση, σύμφωνα πάντα με τις επιθυμητές κάθε φορά ιδιότητες. Στο σχήμα 9.2 [2] παρατηρούμε δύο τύπους καμπύλης μαγνήτισης. Η α είναι καμπύλη χαρακτηριστικών  $Z$  ενώ η β είναι καμπύλη χαρακτηριστικών  $F$ . Τα χαρακτηριστικά μίας τέτοιας καμπύλης που πρέπει να συζητηθούν προκειμένου να κριθεί η καταλληλότητά της για κάποιο τύπο fluxgate είναι:

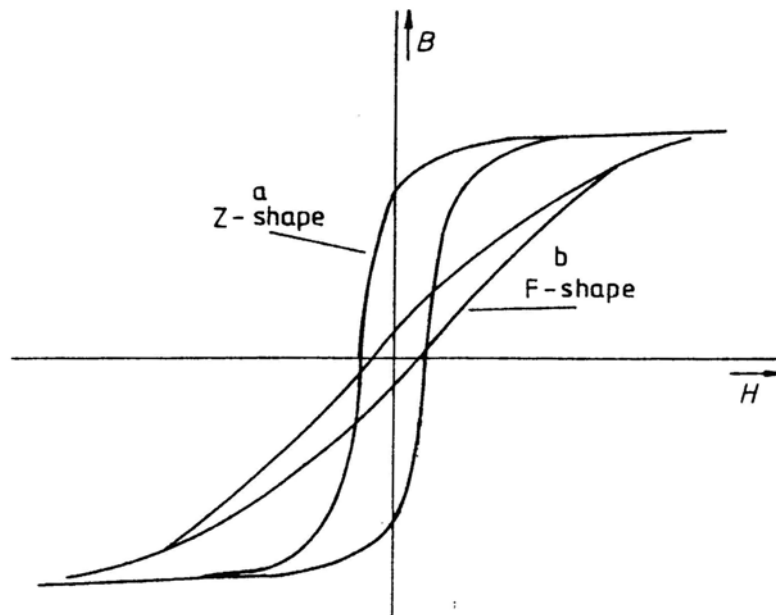
- σχήμα
- συμμετρία
- συμπεριφορά μηδενικού σημείου
- συμπεριφορά κορεσμού

Διαφορετικές μαθηματικές προσεγγίσεις για την καμπύλη μαγνήτισης σε συμφωνία με την λειτουργική αρχή και τη μορφή του πεδίου διεγέρσεως χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση της λειτουργίας των μαγνητόμετρων fluxgate. Οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται είναι

- πολυωνυμική παρεμβολή
- παρεμβολή με τμηματικά γραμμικές συναρτήσεις
- τριγωνομετρική προσέγγιση.

Οι πρώτες δύο χρησιμοποιούνται για καμπύλες τύπου  $Z$  και εξαγωγή σήματος βασισμένη στην αρχή δεύτερης αρμονικής, καθώς και ημιτονική ή παλμική

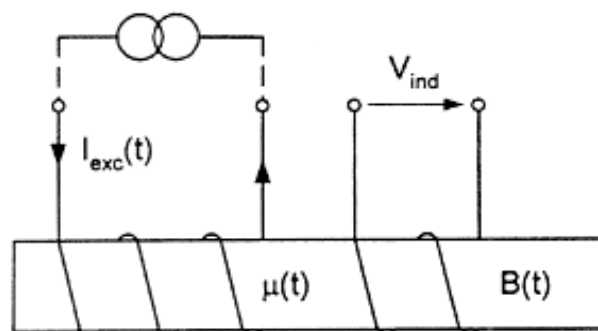
(τετραγωνική) διέγερση, ενώ η τρίτη αντιστοιχεί σε προσέγγιση καμπύλης μαγνήτισης τύπου F, τριγωνικής διέγερσης και αρχή θέσης παλμού για την εξαγωγή του σήματος (Pulse position principle)[2].



Σχήμα 9.2 Χαρακτηριστικές μορφές καμπύλης μαγνήτισης

### 9.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΩΝ FLUXGATE

Οι αισθητήρες fluxgate μετρούν στατικά ή χαμηλής συχνότητας μαγνητικά πεδία. Είναι διανυσματικές συσκευές ευαίσθητες τόσο στην απόλυτη τιμή του πλάτους του πεδίου, όσο και στην διεύθυνσή του. Μπορούν να μετρήσουν πεδία μέχρι 1mT με διακριτική ικανότητα που μπορεί να φτάσει τα 100pT. Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας, ένα εναλλασσόμενο ρεύμα διαμέσου του πηνίου διέγερσης προκαλεί ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο οδηγεί περιοδικά σε κορεσμό τον πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό (σχήμα 9.3 [3]).



Σχήμα 9.3 Αρχή Λειτουργίας Fluxgate

Καθώς ο πυρήνας εισέρχεται στον κορεσμό, η μαγνητική του διαπερατότητα πάυει να αυξάνεται. Κατά συνέπεια, η μαγνητική ροή που σχετίζεται με το υπό μέτρηση πεδίο σταθεροποιείται. Ο περιορισμός αυτός της πυκνότητας μαγνητικής ροής διαμέσου του σιδηρομαγνητικού πυρήνα που λαμβάνει χώρα όταν ο πυρήνας οδηγείται σε μαγνητικό κορεσμό καλείται “gating effect” και από αυτόν τον όρο προέρχεται η ονομασία fluxgate. Παρουσία εξωτερικού πεδίου  $H_0$ , η τάση που

επάγεται στο τύλιγμα λήψης περιέχει συνιστώσες στην δεύτερη αλλά και σε υψηλότερες άρτιες αρμονικές της συχνότητας διέγερσης. Τα πλάτη των αρμονικών αυτών της επαγόμενης τάσης εξαρτώνται από το πεδίο  $H_0$  και συναποτελούν το σήμα εξόδου του αισθητήρα [2]. Για την ακρίβεια, ο περιοδικός κορεσμός του πυρήνα διαμορφώνει το πλάτος της δεύτερης αρμονικής (amplitude modulation) του σήματος εξόδου με την τιμή της έντασης της μετρούμενης συνιστώσας του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου[9]. Παρόλαυτά, υπάρχουν και διατάξεις fluxgate οι οποίες λειτουργούν με μέτρηση του ηλεκτρικού ρεύματος στο πηνίο λήψης. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει το μειονέκτημα της απαίτησης για χαμηλής ωμικής αντίσταση δευτερεύον πηνίο, και κατά συνέπεια μειωμένο αριθμό σπειρών.

## 9.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ FLUXGATE

Στις δύο ενότητες που ακολουθούν θα αναφερθούμε στους διάφορους τύπους αισθητήρων fluxgate που χρησιμοποιούνται σήμερα. Ο διαχωρισμός των αισθητήρων θα γίνει αρχικά με βάση τον τρόπο κατασκευής της αισθητήριας διάταξης ενώ στη συνέχεια θα αναφερθούμε στις κατηγορίες αισθητήρων ανάλογα με τον τρόπο εξαγωγής και αξιοποίησης του σήματος.

### 9.4.1 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ FLUXGATE

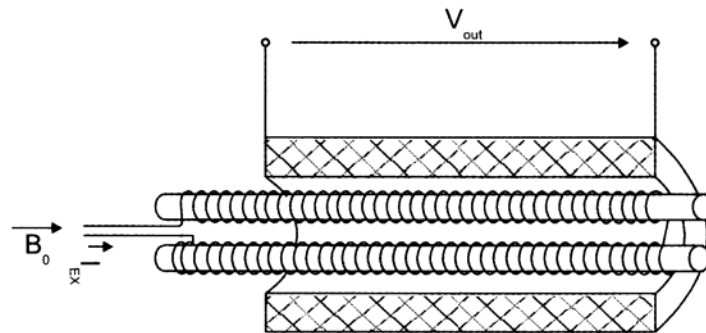
#### 9.4.1.1 FLUXGATES ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΥ ΤΥΠΟΥ

Ως fluxgates παράλληλου τύπου ορίζονται οι αισθητήρες εκείνοι στους οποίους το πεδίο διέγερσης είναι παράλληλο με την προς μέτρηση συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου.

Η απλούστερη διάταξη αισθητήρα fluxgate είναι ο αισθητήρας διαμήκους πυρήνα που φαίνεται στο σχήμα 9.3. Όπως αναφέρθηκε, στη διάταξη αυτή το εναλλασσόμενο πεδίο διέγερσης οδηγεί περιοδικά τον σιδηρομαγνητικό πυρήνα σε κορεσμό. Απουσία εξωτερικού πεδίου, ο πυρήνας έρχεται σε κορεσμό (ή πλησιάζει στον κορεσμό) για τιμές της έντασης μαγνητικού πεδίου που αντιστοιχούν στα μέγιστα και στα ελάχιστα της διεγείρουσας κυματομορφής. Επίσης, η αναστροφή της πολικότητας της μαγνήτισης λαμβάνει χώρα για τιμές του πεδίου που αντιστοιχούν στο συνεκτικό πεδίο του σιδηρομαγνητικού πυρήνα. Έτσι, η καμπύλη μαγνήτισης στην περίπτωση αυτή τοποθετείται συμμετρικά γύρω από το σημείο 0, και οι δύο ακραίες φάσεις (θετική και αρνητική μαγνήτιση κορεσμού) απέχουν ακριβώς μισή περίοδο.

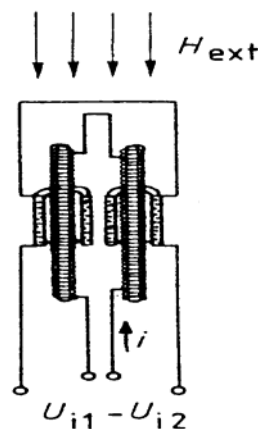
Αν τώρα ο σιδηρομαγνητικός πυρήνας βρεθεί εντός πεδίου με διεύθυνση παράλληλη με τον άξονα του πυρήνα, η παραπάνω συμμετρία διαταράσσεται. Στη θετική (ως προς το εξωτερικό πεδίο) ημιπερίοδο του κύκλου μαγνήτισης, ο κορεσμός θα υφίσταται λίγο νωρίτερα, καθώς αυτός εξαρτάται από το συνολικό πεδίο, που στην περίπτωση αυτή είναι η υπέρθεση του πεδίου διέγερσης και του εξωτερικού πεδίου, που είναι ομόρροπα. Στην αρνητική ημιπερίοδο, ο κορεσμός θα υφίσταται λίγο αργότερα αφού πλέον το συνολικό πεδίο είναι η υπέρθεση δύο αντίρροπων μαγνητικών πεδίων. Βλέπουμε λοιπόν ότι η εφαρμογή εξωτερικού πεδίου προκαλεί μεταβολή στην χρονική απόσταση μεταξύ της εμφάνισης δύο διαδοχικών καταστάσεων κορεσμού αντίθετης πολικότητας. Η ιδιότητα αυτή αποτελεί τη βάση για τη λειτουργία του fluxgate διαμήκους πυρήνα. Περαιτέρω διαχωρισμός γίνεται με βάση του τρόπου αξιοποίησης της ιδιότητας αυτής, δηλαδή του τρόπου λήψης και επεξεργασίας του σήματος (παράγραφος 9.4.2)

Το σημαντικότερο πρόβλημα που εγείρεται στην απλή διάταξη αισθητήρα μονού διαμήκου πυρήνα (single-rod-sensor) είναι το μεγάλο πλάτος της συνιστώσας που αντιστοιχεί στη συχνότητα διέγερσης και είναι παρούσα στο τύλιγμα λήψης, καθώς η διάταξη δρα ως μετασχηματιστής. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με την διάταξη που φαίνεται στο σχήμα 9.4[3].



**Σχήμα 9.4** Double-rod fluxgate

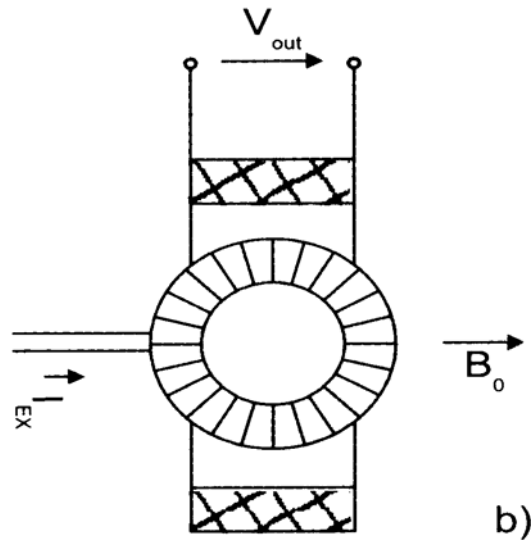
Στην παραπάνω διάταξη χρησιμοποιούνται δύο όμοιοι σιδηρομαγνητικοί πυρήνες, τοποθετημένοι παράλληλα σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Το πηνίο λήψης (δευτερεύον) τυλίγεται γύρω από τους δύο πυρήνες ενώ το πηνίο διέγερσης (πρωτεύον) τυλίγεται με τέτοιο τρόπο ώστε τα πεδία διέγερσης των σιδηρομαγνητών να έχουν διαφορά φάσης  $180^\circ$ . Αυτό μπορεί να επιτευχθεί επίσης και με χρήση δύο πηνίων διέγερσης είτε με ανάστροφη περιέλιξη, είτε όμοια αλλά τροφοδοτούμενα από αντίρροπα ρεύματα. Απουσία μαγνητικού πεδίου το δευτερεύον πηνίο δίνει πάντα μηδενική έξοδο καθώς η συνολική μαγνητική ροή διαμέσου αυτού είναι μηδέν. Αν όμως εφαρμοσθεί πεδίο παράλληλα με τον άξονα των σιδηρομαγνητικών πυρήνων τότε ενισχύεται η μαγνητική επαγωγή προς τη μία κατεύθυνση και έτσι στο πηνίο λήψης επάγεται μετρήσιμη τάση που είναι ανάλογη προς την ένταση  $H$  του εξωτερικού πεδίου. Παραλλαγή της διάταξης αυτής αποτελεί η υλοποίηση του αισθητήρα με δύο εν σειρά συνδεδεμένα πηνία λήψης, ένα για κάθε πυρήνα, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.5[2]. Πλεονέκτημα αυτής της μορφής αποτελεί ο εύκολος μηδενισμός των offset των οργάνων με κίνηση των πυρήνων εντός των δευτερευόντων πηνίων [9].



**Σχήμα 9.5** Fluxgate διαμήκου πυρήνα τύπου Förster

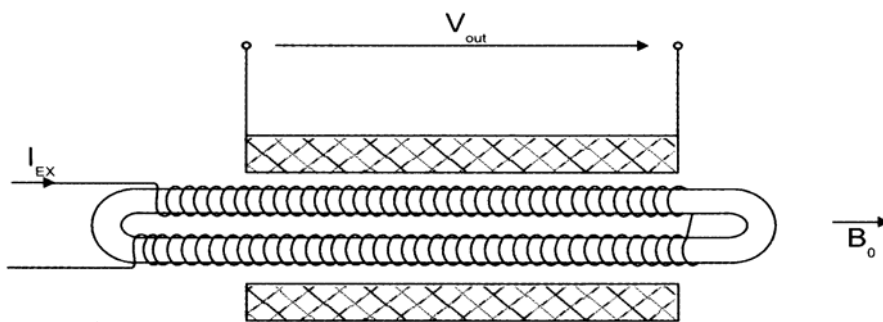
Μία επίσης σημαντική κατηγορία fluxgate παράλληλου τύπου είναι οι διατάξεις δακτυλιοειδούς πυρήνα. Σε αυτή την υλοποίηση όπως φαίνεται στο σχήμα

9.6 [3], το πηνίο διέγερσης τυλίγεται τοροειδώς γύρω από τον δακτυλιοειδή πυρήνα ο οποίος έχει προσανατολισμό τέτοιο ώστε το προς μέτρηση πεδίο να κείται παράλληλα με μία διάμετρο του δακτυλίου. Στο μισό δακτύλιο το πεδίο λόγω του ρεύματος διέγερσης είναι παράλληλο με το εξωτερικό πεδίο, και στο άλλο μισό αντιπαράλληλο. Ο πυρήνας συνήθως κατασκευάζεται από πολλές αλληπάλληλες σπείρες λεπτής ταινίας από μαλακό μαγνητικό υλικό. Το πηνίο λήψης είναι ένα απλό σωληνοειδές με άξονα παράλληλο στο προς μέτρηση πεδίο.



Σχήμα 9.6 Fluxgate δακτυλιοειδούς πυρήνα

Μία παραλλαγή των αισθητήρων δακτυλιοειδούς πυρήνα αποτελούν οι αισθητήρες ελλειψοειδούς πυρήνα (race-track sensors). Ένας τυπικός αισθητήρας της μορφής αυτής φαίνεται στο σχήμα 9.7 [3].



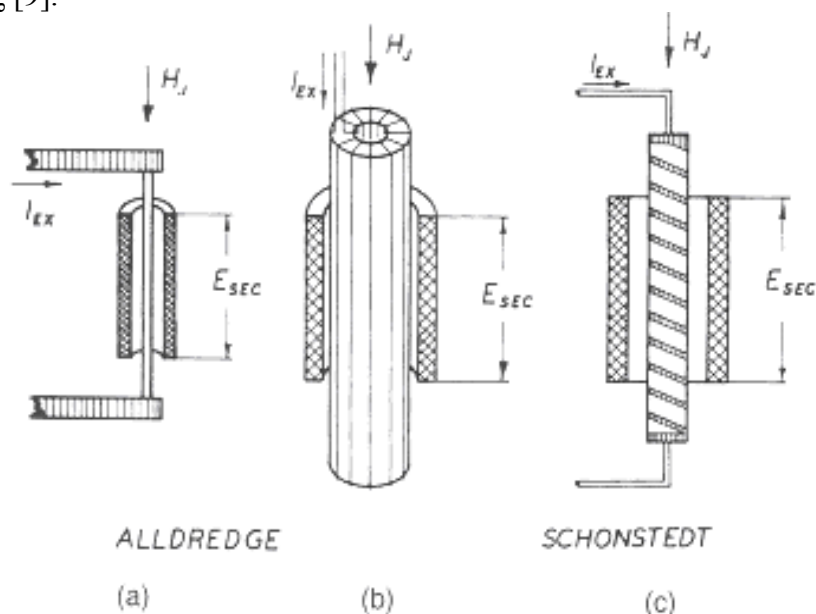
Σχήμα 9.7 Fluxgate ελλειψοειδούς πυρήνα

#### 9.4.1.2 FLUXGATES ΟΡΘΟΓΩΝΙΟΥ ΤΥΠΟΥ

Τέτοιου τύπου μαγνητόμετρα παρουσιάζονται στο σχήμα 9.8. Ως τέτοια ορίζονται τα όργανα στα οποία το πεδίο διέγερσης είναι κάθετο ως προς την μετρούμενη συνιστώσα μαγνητικού πεδίου. Στο σχήμα το (α) είναι ένας αισθητήρας που περιλαμβάνει πυρήνα με ελικοειδή ανισοτροπία και διεγείρεται με ρεύμα, που διαρρέει τον πυρήνα και παράγει εφαπτομενικό μαγνητικό πεδίο διέγερσης. Στο σχήμα (b) παρουσιάζεται αισθητήρας με κυλινδρικό πυρήνα, που διεγείρεται με πηνίο. Στο σχήμα (c) παρουσιάζεται fluxgate με πυρήνα από φερρομαγνητική ταινία μονοαξονικής ανισοτροπίας τυλιγμένη πέριξ μη μαγνητικού



αγώγιμου υλικού με ελικοειδή τρόπο. Η διέγερση επιτυγχάνεται με το εφαπτομενικό πεδίο, που παράγει ρεύμα, που διαρρέει το μη μαγνητικό υλικό. Οι αισθητήρες ορθογωνίου τύπου έχουν το βασικό πλεονέκτημα, ότι δεν χρειάζονται πηνίο διέγερσης [9].



**Σχήμα 9.8** Fluxgates ορθογωνίου τύπου.

#### 9.4.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΩΝ FLUXGATE ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η λειτουργία ενός αισθητήρα μαγνητικού πεδίου και κατ'επέκτασιν ενός μαγνητομέτρου (στην προκειμένη περίπτωση fluxgate) βασίζεται στην χρήση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του πεδίου αναφοράς. Τα μαγνητόμετρα που χρησιμοποιούν ημιτονοειδές πεδίο αναφοράς, συνήθως αξιοποιούν την ασυμμετρία του σήματος εξόδου του αισθητήρα που οφείλεται στην μή γραμμική καμπύλη μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού πυρήνα και το υπερτιθέμενο εξωτερικό πεδίο. Οι αρχές της δεύτερης αρμονικής και του ύψους παλμού αποτελούν τη βάση για τη σχεδίαση μαγνητομέτρων που αξιοποιούν αυτή την ασυμμετρία.

##### 9.4.2.1 ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΑ FLUXGATE ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ

Αποτελούν ένα από τους πιο δημοφιλείς τύπους Fluxgate. Η ανάπτυξή τους άρχισε τη δεκαετία του 1940 και από τότε πολλές παραλλαγές έχουν μελετηθεί. Τα fluxgates δεύτερης αρμονικής είναι απολύτως συμβατά με σχεδίαση αναλογικών ηλεκτρονικών και υπερτερούν στα παρακάτω χαρακτηριστικά

- ανθεκτικότητα
- μικρές διαστάσεις
- μεγάλη ευαισθησία
- επαρκής σταθερότητα
- αξιοπιστία
- οικονομικότητα

Μάλιστα, ειδικές διατάξεις fluxgate μαγνητομέτρων δεύτερης αρμονικής έχουν επιτύχει την μέγιστη ευαισθησία και χαμηλότερο θόρυβο μεταξύ όλων των

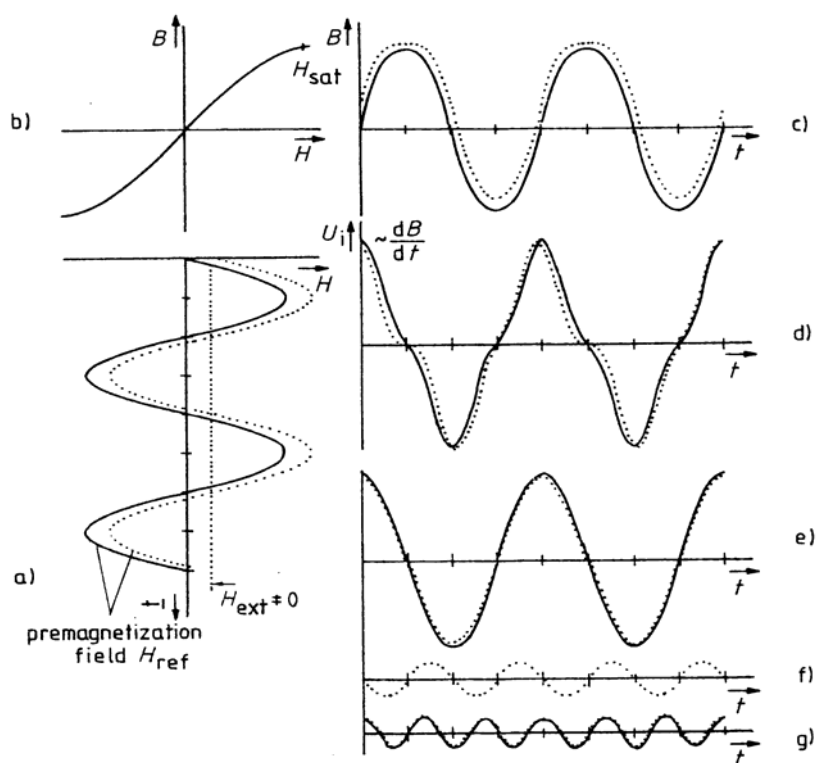
τύπων fluxgate. Μέχρι σήμερα, τρεις τύποι τέτοιου τύπου μαγνητομέτρων έχουν μελετηθεί:

- μονού διαμήκους πυρήνα με ηλεκτρονικό φιλτράρισμα της δεύτερης αρμονικής
- διπλού πυρήνα με μαγνητικό φιλτράρισμα των άρτιων αρμονικών
- δακτυλιοειδούς πυρήνα με μαγνητικό φιλτράρισμα των άρτιων αρμονικών

Χάρην στο μεγάλο σφάλμα γραμμικότητας που παρουσιάζουν τα fluxgates δεύτερης αρμονικής, σε πολλές περιπτώσεις εφαρμόζεται τεχνική ηλεκτρονικής ανατροφοδότησης.

#### 9.4.2.1 (i) ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η βασική αρχή λειτουργίας στηρίζεται στην απλή διάταξη που περιλαμβάνει ένα σιδηρομαγνητικό πυρήνα με υψηλή μαγνήτιση κορεσμού και δύο τουλάχιστον πηνία. Το πηνίο λήψης μετρά συνεχές ή χαμηλής συχνότητας συνιστώσες του εξωτερικού πεδίου ενώ το πηνίο διέγερσης ή προμαγνήτισης χρησιμοποιείται για δημιουργία του πεδίου αναφοράς. Στο σχήμα 9.9 [2] παρουσιάζεται γραφικά η αρχή λειτουργίας των fluxgate δεύτερης αρμονικής.



**Σχήμα 9.9** Βασική αρχή λειτουργίας fluxgate δεύτερης αρμονικής

Όταν δεν υπάρχει εξωτερικό πεδίο, η μαγνητική επαγωγή στον πυρήνα δεν είναι πλέον ημιτονοειδής αλλά παρατηρείται μία καταπίεση των μεγίστων της κυματομορφής (σχήμα 9.9 – c). Η τάση εξόδου είναι ανάλογη της χρονικής παραγώγου της πυκνότητας μαγνητικής ροής στον πυρήνα (σχήμα 9.9 – d). Με μία πρώτη ματιά μοιάζει με ένα συνημίτονο, αλλά στην πράξη περιλαμβάνει και άλλες συνιστώσες. Μία ανάλυση κατά Fourier θα δείξει ότι παρούσες είναι μόνο συνιστώσες περιττής τάξης, δηλαδή η πρώτη και η τρίτη αρμονική. Καθώς υπερτίθεται το προς μέτρηση εξωτερικό πεδίο παράλληλα με το πεδίο αναφοράς, προκαλείται μία επιπλέον μη γραμμικότητα της πυκνότητας μαγνητικής ροής στον

πυρήνα. Τώρα τα μέγιστα της καμπύλης της τάσης εξόδου διευρύνονται χρονικά ενώ τα κομμάτια της καμπύλης γύρω από το μηδέν πλησιάζουν περισσότερο στην ημιτονοειδή καμπύλη όπως φαίνεται από τις διακεκομμένες γραμμές των σχημάτων 9.9 c και d. Η ανάλυση Fourier πλέον αποδεικνύει την παρουσία και άρτιων συνιστωσών (σχήματα 9.9 – e, f, g). Το πλάτος της δεύτερης αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου εξαρτάται από το εξωτερικό πεδίο. Έτσι, το μέγεθος αυτό μπορεί να αποτελέσει ένα μέτρο του εξωτερικά εφαρμοζόμενου πεδίου.

#### 9.4.2.1 (ii) ΕΥΡΕΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ [2]

Ο υπολογισμός της συνάρτησης μεταφοράς του μαγνητομέτρου fluxgate δεύτερης αρμονικής απλοποιείται σημαντικά αν η καμπύλη μαγνήτισης προσεγγιστεί μέσω πολυωνμικής παρεμβολής ενώ το αποτέλεσμα είναι περισσότερο πολύπλοκο αν γίνει προσέγγιση με τριγωνομετρικές συναρτήσεις. Εκφράζοντας το πεδίο αναφοράς ως εξής

$$H_{REF} = H_{REF\ max} \times \sin \omega t \quad (9.1)$$

τότε αν το εξωτερικό πεδίο είναι  $H_{EXT}$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα θα είναι

$$H_{INT} = \frac{H_{EXT} + H_{REF\ max} \times \sin \omega t}{1 + N(\mu_r - 1)} \quad (9.2)$$

όπου  $N$  είναι ο παράγων απομαγνήτισης για γραμμικό πυρήνα. Για να υπολογίσουμε την μαγνητική επαγωγή διαμέσου του πυρήνα μπορούμε προς διευκόλυνση να κανονικοποιήσουμε την ένταση του πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα ως προς την ποσότητα

$$H_0 = \frac{2}{\pi} \times \frac{B_{sat} [1 + N(\mu_{rn} - 1)]}{\mu_{rn}} \quad (9.3)$$

όπου  $B_{sat}$  είναι η μαγνητική επαγωγή κορεσμού.

Η κανονικοποιημένη ένταση εκφράζεται ως  $h_{int} = h_{ext} + h_{REF\ max} \times \sin \omega t$  (9.4)

Η καμπύλη μαγνήτισης προσεγγίζεται από πολυωνμική συνάρτηση τρίτης τάξης της μορφής

$$b(h) = a_1 h - a_3 h^3 \quad (9.5)$$

όπου  $b$  είναι η κανονικοποιημένη πυκνότητα μαγνητικής ροής  $b = B/B_0$ , με  $B_0 = 2B_{sat}/\pi$ . Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται τόσο για το θετικό όσο και για τον αρνητικό κλάδο της καμπύλης μαγνήτισης. Η κανονικοποιημένη μαγνητική επαγωγή θα είναι

$$b = a_1 h_{ext} + a_1 h_{REF\ max} \sin \omega t - a_3 (h_{ext} + h_{REF\ max} \sin \omega t)^3 \quad (9.6)$$

Αναλύοντας τον όρο της παρένθεσης εύκολα φαίνεται ότι το πλάτος της δεύτερης αρμονικής συνιστώσας είναι ανάλογο της χρονικής παραγώγου της μαγνητικής επαγωγής στον πυρήνα. Αν θεωρήσουμε τύλιγμα λήψης που αποτελείται από  $N$

σπείρες και έχει εμβαδό διατομής  $A$ , τότε καταλήγουμε στην έκφραση που δίνει την δεύτερη αρμονική συνιστώσα της τάσης εξόδου ως εξής:

$$U_{\text{out 2Harmonic}} = -3 B_0 N A \omega a_3 h_{\text{ext}} (h_{\text{REF max}})^2 \sin 2\omega t \quad (9.7)$$

$$\text{ή} \quad U_{\text{out 2Harmonic}} = h_{\text{ext}} K \sin 2\omega t \quad (9.8)$$

όπου ο συντελεστής  $K$  είναι μία σταθερά που εξαρτάται από τον παράγοντα απομαγνήτισης, το πλάτος του ρεύματος προμαγνήτισης, το σχήμα του πυρήνα, την πολυωνυμική σταθερά  $a_3$ , και την μαγνητική επαγωγή κορεσμού του πυρήνα. Προφανώς το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται γραμμικά από την ένταση του εξωτερικού πεδίου και την συχνότητα.

Μπορεί επίσης να αποδειχθεί [Greiner] ότι με χρήση προσέγγισης τόξου-εφαπτομένης η δεύτερη αρμονική της τάσης εξόδου είναι αντιστρόφως ανάλογη με την μαγνητική διαπερατότητα του σιδηρομαγνητικού πυρήνα.

Το φιλτράρισμα της δεύτερης αρμονικής μπορεί να γίνει είτε ηλεκτρονικά, είτε μαγνητικά. Στην πρώτη περίπτωση επαρκεί ένας πυρήνας και ο παράγων μεταφοράς είναι σταθερός

$$K_s = U_{\text{OUT 2H}} / H_{\text{ext}} \quad (9.9)$$

Ενώ στην περίπτωση μαγνητικού φιλτραρίσματος απαιτούνται δύο πυρήνες και δύο πηνία λήψης με ανάστροφη περιέλιξη ώστε να λαμβάνεται διαφορική μέτρηση. Ο παράγων μεταφοράς γίνεται στη περίπτωση αυτή

$$K_s = U_{\text{OUT 2H}} / (H_{\text{ext1}} - H_{\text{ext2}}) \quad (9.10)$$

Πρέπει σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι στα μαγνητόμετρα δεύτερης αρμονικής που χρησιμοποιείται μαγνητικό φιλτράρισμα, άρα η διάταξη περιλαμβάνει δύο διακριτά μαγνητικά στοιχεία, εμφανίζεται η απαίτηση για απόλυτο ταίριασμα (matching) των πυρήνων όσον αφορά τις διαστάσεις, την μαγνητική συμπεριφορά και το σχήμα. Καθώς αυτό το ταίριασμα είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί, οι δύο πυρήνες συνήθως αντικαθίστανται από έναν ομοιόμορφο δακτυλιοειδή πυρήνα και έτσι αποφεύγεται η διαδικασία ταιριάσματος. Η έλλειψη κατευθυντικής ευαισθησίας που παρουσιάζουν οι δακτυλιοειδείς πυρήνες αντιμετωπίζεται με χρήση ελλειψοειδών πυρήνων (race-track cores).

#### 9.4.2.2 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ FLUXGATE ΥΨΟΥΣ ΠΑΛΜΟΥ[2]

Μία εναλλακτική μέθοδος προσδιορισμού του εξωτερικού πεδίου είναι μέσω της εκτίμησης των μέγιστων και ελάχιστων τιμών της επαγόμενης στο πηνίο λήψης τάσης. Στην περίπτωση αυτή σαφώς απαιτείται υψηλή μαγνητική διαπερατότητα του υλικού του πυρήνα, αλλά επιπλέον απαίτηση αποτελεί η μορφής  $Z$  καμπύλη μαγνήτισης (σχήμα 9.2) και η χρήση ημιτονοειδούς διέγερσης η οποία οδηγεί τον σιδηρομαγνητικό πυρήνα **πολύ βαθιά στον κορεσμό**. Αυτό φυσικά σημαίνει ότι τέτοιου τύπου αισθητήρες χρειάζονται αρκετά ισχυρό πεδίο αναφοράς, και κατά συνέπεια ισχυρό ρεύμα διέγερσης.

Η προσέγγιση της καμπύλης μαγνήτισης γίνεται με τμηματικά γραμμικές συναρτήσεις. Μπορεί να αποδειχθεί ότι η μαγνητική επαγωγή εντός του πυρήνα καθώς και η επαγόμενη τάση στο δευτερεύον είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα

του χρόνου. Επιπλέον, οι θετικές και αρνητικές κορυφές της τάσης ( $U_{\text{ipositive}}$ ,  $U_{\text{inegative}}$ ) είναι κατ' απόλυτη τιμή ίσες.

Με την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου πάνω στο πεδίο προμαγνήτισης το σημείο λειτουργίας εντός της καμπύλης μαγνήτισης μετατοπίζεται και τα χρονικά χαρακτηριστικά της μαγνητικής επαγωγής και επαγόμενης τάσης παύουν να είναι συμμετρικά. Οι τιμές των κορυφών των θετικών και αρνητικών ημιπεριόδων δεν είναι πλέον ίσες κατά πλάτος. Η πιο συνήθης διαδικασία εκτιμά την διαφορά

$$\Delta U_i = U_{\text{ipositive}} - U_{\text{inegative}} \quad (9.11)$$

σαν μέτρο της έντασης του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Ο δείκτης  $i$  δείχνει ότι πρόκειται για εξ επαγωγής τάσεις (field induced).

Οι τιμές των κορυφών της τάσης γενικά μπορούν να εξαχθούν με ανιχνευτές κορυφών (peak detectors). Πρέπει να τονιστεί ότι ευσταθής λειτουργία εξασφαλίζεται αυστηρά για πυρήνες με καμπύλη μαγνήτισης τύπου  $Z$  και ημιτονοειδές πεδίο προμαγνήτισης.

#### 9.4.2.3 ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΑ FLUXGATE ΤΥΠΟΥ «ΘΕΣΗΣ – ΠΑΛΜΟΥ» (PULSE – POSITION TYPE MAGNETOMETERS)[2]

Ένας από τους πιο σύγχρονους τύπους μαγνητόμετρων Fluxgate είναι τα fluxgates τύπου θέσης – παλμού. Τα μαγνητόμετρα αυτού του τύπου αναπτύχθηκαν ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η άμεση χρονική κωδικοποίηση των υπό μέτρηση συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου. Βασικό τους πλεονέκτημα αποτελεί η μορφή του σήματος εξόδου το οποίο μπορεί απλά να μετατραπεί σε δυαδική ακολουθία ψηφίων, η οποία στη συνέχεια μπορεί να γίνει κατανοητή αλλά και να υποστεί επεξεργασία από μικροεπεξεργαστές. Ο αισθητήρας θέσης – παλμού σε συνδυασμό με μικροεπεξεργαστή χαρακτηρίζεται σαν «έξυπνος αισθητήρας», καθώς η αρχή λειτουργίας του είναι απόλυτα συμβατή με τις απαιτήσεις για ψηφιακή εκτίμηση σημάτων. Επιπλέον πλεονεκτήματα είναι:

- υψηλή γραμμικότητα, δεν απαιτείται ανατροφοδότηση
- κατασκευαστική απλότητα
- ανθεκτικότητα
- μικρές διαστάσεις
- μεγάλη ευαισθησία με επαρκή γραμμικότητα
- χαμηλό κόστος

#### 9.4.2.3 (i) ΒΑΣΙΚΗ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ[2]

Η βασική λειτουργική αρχή αυτού του τύπου μαγνητομέτρου μπορεί εν γένει να περιγραφεί με έναν συγκριτή ο οποίος συγκρίνει το υπό μέτρηση μαγνητικό πεδίο με ένα πεδίο αναφοράς. Το ρεύμα διέγερσης συνήθως παράγεται από γεννήτρια η οποία αποτελεί η ίδια τμήμα του όλου συστήματος. Το πεδίο αναφοράς μπορεί να είναι είτε τριγωνική είτε ημιτονοειδής κυματομορφή. Η συχνότητά του δε θα πρέπει να είναι τέτοια ούτως ώστε το υπό μέτρηση πεδίο να είναι πρακτικά συνεχές ως προς την αναφορά.

Ο συγκριτής εναλλάσσει την έξοδό του κάθε φορά που τα δύο πεδία είναι ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς, ώστε η υπέρθεσή τους να δίνει αποτέλεσμα μηδέν. Κατά συνέπεια, κάθε μεταβολή στο πλάτος του εξωτερικού πεδίου προκαλεί

μεταβολή στο duty cycle του παλμού στην έξοδο του οργάνου. Επομένως, η έξοδος του αισθητήρα είναι ένας τετραγωνικός παλμός του οποίου η διάρκεια διαμορφώνεται από τις μεταβολές του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Το στοιχείο σύγκρισης του αισθητήρα είναι μία διάταξη που περιλαμβάνει ένα γραμμικό πυρήνα με υψηλή μαγνητική διαπερατότητα. Η σύγκριση και κατ'επέκταση η εναλλαγή του σήματος εξόδου λαμβάνει χώρα όταν η μαγνητική επαγωγή εντός του πυρήνα είναι μηδέν. Δηλαδή όταν το υπό μέτρηση πεδίο είναι ίσο με το πεδίο διέγερσης – αναφοράς.

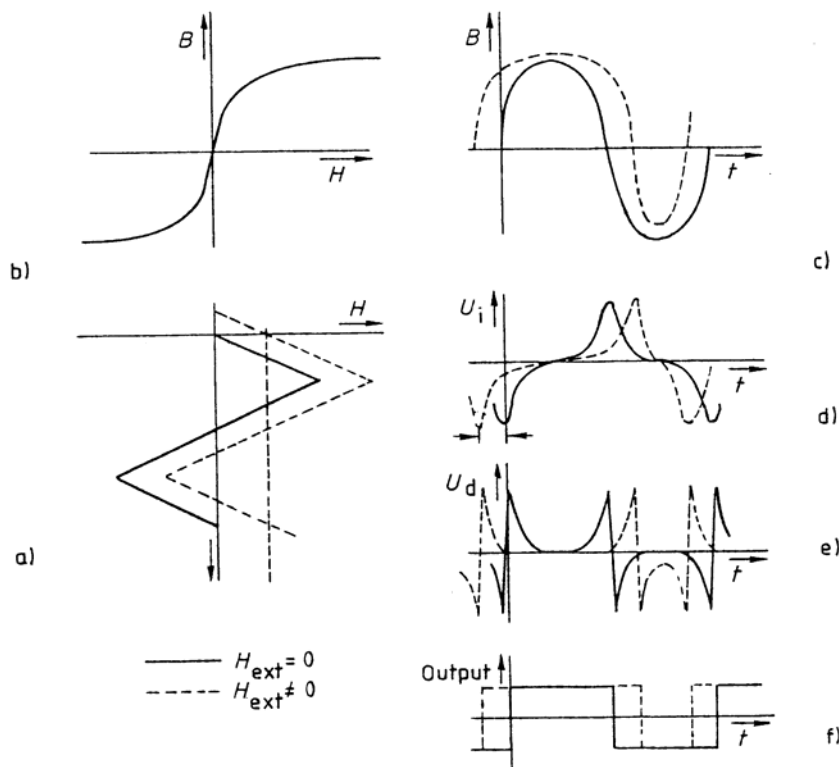
#### 9.4.2.3 (ii) ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι δομικές μονάδες ενός μαγνητομέτρου «θέσης – παλμού» είναι οι εξής:

- flux gate probe (πυρήνας & πηνία λήψης – διέγερσης)
- γεννήτρια ρεύματος προμαγνήτισης
- κύκλωμα διαφόρισης
- συγκριτής τάσης

Η γεννήτρια προμαγνήτισης παράγει το τριγωνικό ή ημιτονικό ρεύμα που οδηγείται στο πρωτεύον πηνίο και σπρώχνει περιοδικά τον πυρήνα σε κορεσμό. Το σήμα εξόδου του πηνίου λήψης οδηγείται στο παθητικό διαφορικό στοιχείο και εν συνεχεία στον συγκριτή τάσης ο οποίος αναζητά μεταβάσεις του διαφορισμένου σήματος από το μηδέν.

Η λειτουργία του μαγνητομέτρου και η παραπάνω διαδικασία μέτρησης φαίνεται στο σχήμα 9.10[2]. Εδώ σαν πεδίο διέγερσης λαμβάνεται τριγωνική κυματομορφή ενώ για απλούστευση της περιγραφής η καμπύλη μαγνήτισης έχει αντικατασταθεί από την μέση καμπύλη αγνοώντας την υστέρηση.



Σχήμα 9.10 Αρχή λειτουργίας μαγνητομέτρου θέσης – παλμού.

Στο σχήμα 9.10 – α φαίνεται το τριγωνικού τύπου πεδίο διέγερσης και το εξωτερικό DC πεδίο που υπερτίθεται ομόρροπα με το πεδίο διέγερσης. Το DC πεδίο δρα αθροιστικά με αποτέλεσμα η τριγωνική κυματομορφή να μετατοπίζεται κατακόρυφα. Αν γίνει προβολή της συνάρτησης που προκύπτει πάνω στην καμπύλη μαγνήτισης, τότε λαμβάνεται η μαγνητική επαγωγή εντός του φερρομαγνητικού πυρήνα (σχήμα 9.10 – c).

Απουσία DC πεδίου, η κυματομορφή που προκύπτει από την προβολή του πεδίου διέγερσης πάνω στην καμπύλη μαγνήτισης είναι συμμετρική προς τον άξονα του χρόνου. Η τάση που επάγεται στο δευτερεύον τύλιγμα είναι ανάλογη της χρονικής παραγώγου της μαγνητικής επαγωγής (σχήμα 9.10 – d). Τα ακρότατα της επαγόμενης τάσης εμφανίζονται όταν η μαγνητική επαγωγή μεταβαίνει από θετικές σε αρνητικές τιμές. Αν η επαγόμενη τάση διαφοριστεί εκ νέου, τότε τα ακρότατα μεταπίπτουν σε μηδενικές μεταβάσεις (σχήμα 9.10 – e). Αν τέλος το σήμα που προκύπτει οδηγηθεί σε συγκριτή τάσης του οποίου η άλλη είσοδος είναι γειωμένη, τότε το κύκλωμα θα αναζητήσει τις μηδενικές μεταβάσεις της εισόδου του και θα προκύψει στην έξοδο μία τετραγωνική κυματομορφή τάσης.

Η εφαρμογή εξωτερικού DC πεδίου προκαλεί μετατόπιση του σημείου λειτουργίας πάνω στην καμπύλη μαγνήτισης καθώς και μετατόπιση των χρονικών παραθύρων στα οποία συμβαίνουν οι μηδενικές μεταβάσεις της μαγνητικής επαγωγής εντός του πυρήνα. Επομένως τα ακρότατα της επαγόμενης στο δευτερεύον τύλιγμα τάσης μετατοπίζονται και κατά συνέπεια το ίδιο συμβαίνει με τα μηδενικά της παραγώγου αυτής και τις ακμές του τετραγωνικού παλμού εξόδου του συγκριτή. Έτσι, η διάρκεια του παλμού εξόδου μπορεί να αποτελέσει μέτρο του εφαρμοζόμενου DC πεδίου.

#### 9.4.2.3 (iii) ΕΥΡΕΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ[2]

Ο υπολογισμός της συνάρτησης μεταφοράς θα γίνει με χρήση προσέγγισης τόξου εφαπτομένης για την καμπύλη μαγνήτισης. Θα επιλεγεί τριγωνική κυματομορφή διέγερσης με την οποία μπορεί να επιτευχθεί καλή γραμμικότητα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση πυρήνα με μειωμένο εμβαδό διατομής στο κέντρο του καθώς έτσι αυξάνεται η ευαισθησία του αισθητήρα.

#### Ένταση Μαγνητικού πεδίου εντός του πυρήνα

Η ένταση του πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα εξαρτάται από το σχήμα αυτού και το εμβαδό διατομής. Αν ο πυρήνας έχει το ίδιο εμβαδό διατομής σε όλο το μήκος του, τότε η σχέση ανάμεσα στο εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο και το πεδίο στο εσωτερικό του πυρήνα δίνεται από τον τύπο που ακολουθεί.

$$H_{\text{int}} = \frac{H_{\text{ext}}}{(1 + N(\mu_r - 1))} \quad (9.11)$$

όπου  $N$  είναι ο παράγων απομαγνήτισης. Η σύγκριση του DC πεδίου με την αναφορά λαμβάνει χώρα όταν η μαγνητική επαγωγή στον πυρήνα μηδενίζεται. Σε αυτό το σημείο, λόγω της απότομης αύξησης της μαγνητικής διαπερατότητας, η σχετική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_r$  αντικαθίσταται από τον όρο  $\mu_d$ .

$$H_{int} = \frac{H_{ext}}{(1 + N(\mu_d - 1))} \quad (9.12)$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει στην περίπτωση πυρήνα με ομοιόμορφο εμβαδό διατομής σε όλο του το μήκος. Σε αντίθετη περίπτωση, και αν υποθέσουμε ότι η διαπερατότητα είναι υψηλή και ότι όλη η μαγνητική ροή ταξιδεύει μέσα από τον πυρήνα, τότε οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου καθορίζονται από το σχήμα του μαγνητικού κυκλώματος, δηλαδή του πυρήνα. Η σχέση που συνδέει την ένταση στο τμήμα μειωμένης διατομής με την ένταση στο υπόλοιπο κομμάτι του πυρήνα είναι η ακόλουθη

$$\frac{H_{REDUCED}}{H_{NREDUCED}} = \frac{A_{REDUCED}}{A_{NREDUCED}} = k_2 \quad (9.13)$$

όπου  $k_2$  είναι σταθερά και οι όροι του δεύτερου κλάσματος τα εμβαδά διατομής. Αν δεχτούμε ότι το τμήμα με μειωμένη διατομή είναι ένα πολύ μικρό κομμάτι του πυρήνα και ότι το υπόλοιπο τμήμα είναι ομοιόμορφο σε όλο του το μήκος τότε η μέση τιμή του πεδίου εντός του πυρήνα μπορεί να προσεγγιστεί από την τιμή  $H_{NREDUCED}$ . Επομένως, το πεδίο στο τμήμα μειωμένης διατομής θα δίνεται από τη σχέση

$$H_{int} = \frac{H_{ext}}{k_2 [1 + N(\mu_d - 1)]} \quad (9.14)$$

Από αυτό το σημείο θα θεωρήσουμε την περίπτωση πυρήνων μειωμένης διατομής. Οι αντίστοιχοι υπολογισμοί για ομοιόμορφους πυρήνες γίνονται προφανώς αν θέσουμε την σταθερά  $k_2$  ίση με ένα.

### **Κανονικοποιημένη ένταση πεδίου και πυκνότητα μαγνητικής ροής.**

Όπως προαναφέρθηκε, η σύγκριση του DC πεδίου με το πεδίο αναφοράς γίνεται όταν τα δύο πεδία είναι ίσα κατ' απόλυτο τιμή και αντίθετης πολικότητας. Για να μπορεί να συμβεί αυτό πρέπει προφανώς το υπό μέτρηση πεδίο να είναι απολύτως ασθενέστερο από το πεδίο αναφοράς.

$$|H_{ext}| \leq |H_{reference}| \quad (9.15)$$

Για να εξαχθεί η κανονικοποιημένη τιμή του πεδίου στον πυρήνα αυτό πρέπει να διαιρεθεί με την αντίστοιχη τιμή του κατά τις μεταβάσεις της καμπύλης μαγνήτισης από το μηδέν.

$$h = \frac{H_{int}}{H_0} = \frac{H_{ext} + H_{ref}}{H_0 k_2 [1 + N(\mu_d - 1)]} \quad (9.16)$$



Χρησιμοποιώντας τώρα την τριγωνομετρική προσέγγιση για την καμπύλη μαγνήτισης μπορούμε να εξάγουμε την σχέση που δίνει την κανονικοποιημένη τιμή της μαγνητικής επαγωγής.

$$B = B_0 \arctan \frac{H_{ext} + H_{ref}}{H_0 k_2 [1 + N(\mu_d - 1)]} \quad (9.17)$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω εισάγοντας την σταθερά

$$k_1 = 1 + N(\mu_d - 1) \quad (9.18)$$

και αντικαθιστώντας επίσης

$$h_{ext} = \frac{H_{ext}}{H_0 k_1 k_2} \quad (9.19) \quad \text{και}$$

$$h_{ref} = \frac{H_{ref}}{H_0 k_1 k_2} \quad (9.20)$$

#### Σήμα εξόδου τυλίγματος λήψης με τριγωνικής μορφής πεδίο διέγερσης.

Θα θεωρήσουμε τριγωνική κυματομορφή διέγερσης με περίοδο  $T$  και για ευκολία θα τοποθετήσουμε το μέγιστο της κυματομορφής στην αρχή του συστήματος συντεταγμένων. Οι ακόλουθες εκφράσεις εξάγονται πλέον εύκολα.

$$\text{Για } -\frac{T}{2} \leq t \leq 0: \quad h_{ref}(t) = h_{ref \max} \left( \frac{4t}{T} + 1 \right) + h_{ext} \quad (9.21)$$

$$\text{Για } 0 \leq t \leq \frac{T}{2}: \quad h_{ref}(t) = h_{ref \max} \left( -\frac{4t}{T} + 1 \right) + h_{ext} \quad (9.22)$$

Στη συνέχεια θα γίνουν υπολογισμοί μόνο για το πρώτο μισό της περιόδου καθώς οι υπολογισμοί για το υπόλοιπο μισό είναι πανομοιότυποι.

Η μαγνητική επαγωγή στην πρώτη ημιπερίοδο είναι

$$B = B_0 \arctan \left( 4h_{ref \max} \frac{t}{T} + h_{ref \max} + h_{ext} \right) \quad (9.23)$$

Η μαγνητική ροή διαμέσου του σιδηρομαγνητικού πυρήνα θε δίνεται από τη σχέση

$$\Phi = BA = B_0 A \arctan \left( 4h_{ref \max} \frac{t}{T} + h_{ref \max} + h_{ext} \right) \quad (9.24)$$

και επομένως η επαγόμενη τάση θα υπολογίζεται ως η χρονική παράγωγος της ροής ως εξής:

$$U_i = -\frac{Nd\phi}{dt} = -NAB_0 \frac{\frac{4h_{ref\ max}}{T}}{\left(1 + \frac{4h_{ref\ max}t}{T} + h_{ref\ max} + h_{ext}\right)^2} \quad (9.25)$$

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί η δεύτερη χρονική παράγωγος της μαγνητικής ροής και θα αναζητηθούν τα σημεία μηδενισμού αυτής, τα οποία αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές που λαμβάνει χώρα η σύγκριση του εξωτερικού πεδίου με την αναφορά. Η λύση των αντίστοιχων εξισώσεων δίνει τις δύο χρονικές στιγμές για την πρώτη και τη δεύτερη ημιπερίοδο αντίστοιχα:

$$t_1 = -\frac{h_{ref\ max} + h_{ext}}{4h_{ref\ max}} T \quad (9.26)$$

$$t_2 = \frac{h_{ref\ max} + h_{ext}}{4h_{ref\ max}} T \quad (9.27)$$

Η διαφορά των δύο παραπάνω τιμών ισούται με την διάρκεια του παλμού εξόδου. Χρησιμοποιώντας και τις σχέσεις 9.19 και 9.20 καταλήγουμε:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{T}{2} + \frac{TH_{ext}}{2H_{ref\ max}} \quad (9.28)$$

### Ευαισθησία

Η ευαισθησία του μαγνητομέτρου θα οριστεί ως το πηλίκο μίας στοιχειώδους μεταβολής της διάρκειας του παλμού, δηλαδή της εξόδου του αισθητήρα προς την αντίστοιχη μεταβολή της εισόδου δηλαδή του DC επιβαλλόμενου πεδίου.

Η γενική μορφή της σχέσης για την ευαισθησία θα είναι:

$$S = \frac{T}{2H_{ref\ max}} \quad (9.29)$$

η οποία μπορεί να γραφτεί στη μορφή

$$S = \frac{\mu_0 \mu_d \pi \Gamma}{4k_2 [1 + N(\mu_d - 1)] B_{sat} h_{ref\ max}} \quad (9.30)$$

Η τελευταία μπορεί να απλοποιηθεί αν σκεφτούμε ότι στα κοινά μαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται ως πυρήνες σε τέτοιου τύπου fluxgates ισχύουν τα εξής:

$$N \gg 1 / (\mu_d - 1) \quad (9.31) \quad \text{και} \quad \mu_d \gg 1 \quad (9.32)$$

Έτσι η σχέση 9.30 καταλήγει στην:

$$S = \frac{\pi}{4} \mu_0 \frac{A_{nreduced}}{A_{reduced}} \frac{T}{NB_{sat} h_{ref \max}} \quad (9.33)$$

Η σχέση 9.33 παρέχει ένα πάρα πολύ ενδιαφέρον και ταυτόχρονα σημαντικό συμπέρασμα. Η ευαισθησία του μαγνητομέτρου fluxgate τύπου «θέσης – παλμού» είναι ανεξάρτητη από τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μαγνητικού πυρήνα. Αυτό σημαίνει ότι ελαφρές μηχανικές τάσεις που μπορεί να ασκούνται στον πυρήνα όπως και μεταβολές της θερμοκρασίας – παράγοντες που σαφώς επηρεάζουν την τιμή της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας – δεν μπορούν να αλλοιώσουν την ευαισθησία του μαγνητομέτρου. Παρόλα αυτά, οι παράμετροι αυτοί θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν καθορισμένες καθώς μπορούν να αυξήσουν τα επίπεδα θορύβου του αισθητήρα.

#### 9.4.2.3 (iv) ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ

Ο παλμός εξόδου του τυλίγματος λήψης διαμορφώνεται κατά μήκος από την τιμή του DC πεδίου προς μέτρηση. Το σήμα αυτό μπορεί να μετατραπεί σε δυαδικό κώδικα μέσω ενός μετατροπέα κωδικών ώστε να γίνει εκμεταλλεύσιμο από κάποιο κύκλωμα μικροεπεξεργαστή.

Ο μετατροπέας αυτός, στην απλούστερή του μορφή, μπορεί να υλοποιηθεί με έναν ψηφιακό μετρητή, που θα μετρά την διάρκεια του παλμού εξόδου, υπό την έννοια χρονικών μεταβάσεων που θα παράγονται από μία υψίσυχνη γεννήτρια. Ο αριθμός των χρονικών μεταβάσεων εντός μίας περιόδου του σήματος αναφοράς θα είναι τότε ανάλογος με το πλάτος του συνεχούς πεδίου προς μέτρηση.[2]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

### ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ FLUXGATE: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 10.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

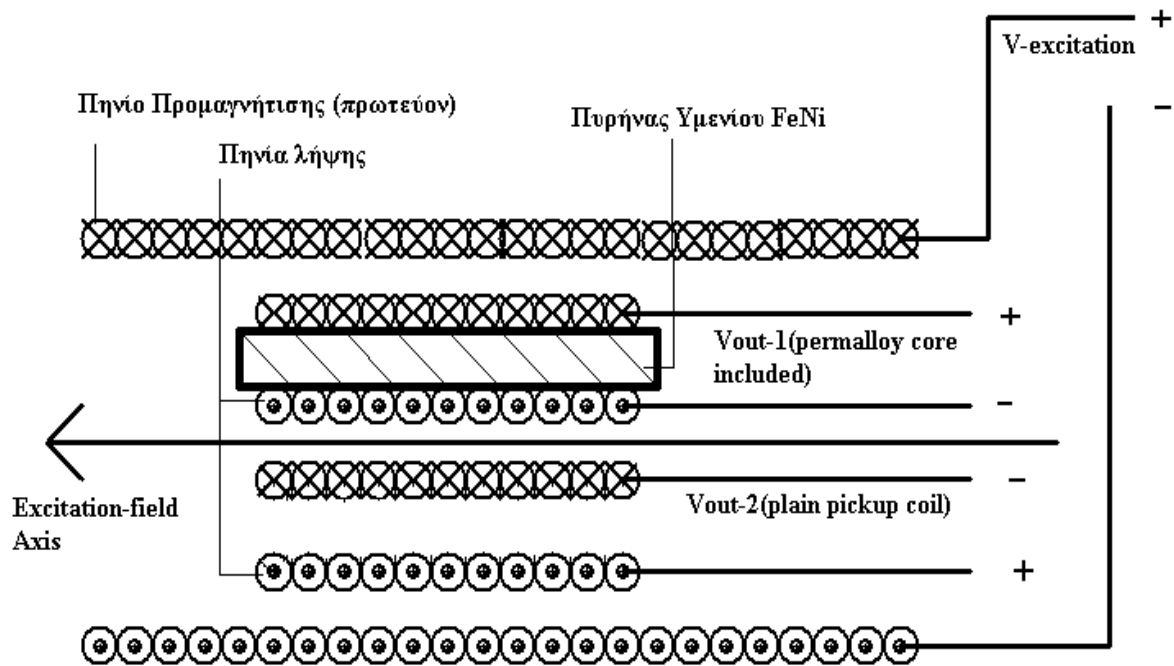
Το δεύτερο κατά σειρά εργαστηριακό κομμάτι της διπλωματικής αυτής εργασίας περιλαμβάνει την υλοποίηση μιας απλής διάταξης αισθητήρα τύπου fluxgate και την βαθμονόμηση αυτής. Ως υλικό πυρήνα του αισθητήρα θα χρησιμοποιηθεί ηλεκτρολυτικό υμένιο σιδήρου – νικελίου, το οποίο παρασκευάστηκε με τις συνθήκες που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 7. Η διαδικασία επιλογής του καταλληλότερου, μεταξύ των πολυάριθμων φιλμ που αναπτύχθηκαν στο εργαστήριο, θα αναλυθεί κατόπιν αναφοράς στη δομή και την αρχή λειτουργίας του εν λόγω αισθητήρα.

#### 10.2 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Ο αισθητήρας που υλοποιήθηκε βασίζεται δομικά στους αισθητήρες fluxgate παράλληλου τύπου με χρήση μονού διαμήκους πυρήνα. Κατά συνέπεια, παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού μίας συνιστώσας DC ή χαμηλής συχνότητας (της τάξης των μερικών Herz) μαγνητικού πεδίου. Η συνιστώσα υπό μέτρηση είναι σε κάθε περίπτωση συγγραμμική με το πεδίο διέγερσης του αισθητήρα, δηλαδή συγγραμμική με τον άξονα του σωληνωειδούς διέγερσης.

Ο αισθητήρας αποτελείται όπως φαίνεται στο σχήμα 10.1 από τρία πηνία. Το πρωτεύον πηνίο ή πηνίο προμαγνήτισης έχει τη μορφή πολυστρωματικού σωληνωειδούς. Σε τέτοιου τύπου πηνία επιτυγχάνεται αυξημένη ένταση μαγνητικού πεδίου με την αύξηση του αριθμού περιελίξεων, παρά με την αύξηση του ρεύματος διέγερσης, προκειμένου να αποφευχθούν υψηλές ωμικές απώλειες με τη μορφή θερμότητας. Η ένταση μαγνητικού πεδίου για αυτό το πηνίο υπολογίζεται με βάση τις σχέσεις 1.19 έως 1.23. Πρέπει να τονίσουμε όμως, ότι, όπως πρακτικά αποδεικνύεται, οι σχέσεις αυτές δίνουν ορθά αποτελέσματα σε κυλινδρική περιοχή κατά τον άξονα του πηνίου, ελάχιστης ακτίνας, και τοποθετημένης συμμετρικά ως προς τα δύο άκρα του πηνίου. Για να είμαστε βέβαιοι ότι τα πηνία λήψης βρίσκονται σε περιοχή με ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο αρκεί να εξασφαλίσουμε ότι η απόσταση των άκρων τους από τα άκρα του πρωτεύοντος είναι μεγαλύτερη από το διπλάσιο της διαμέτρου αυτού εκατέρωθεν. Το πηνίο προμαγνήτισης αποτελείται από 1845 σπείρες και έχει εσωτερική και εξωτερική διάμετρο 4 και 5,7cm αντίστοιχα. Το δε μήκος του είναι περίπου 20cm.

Τα πηνία λήψης αποτέλεσαν ένα αρκετά απαιτητικό κομμάτι της διαδικασίας υλοποίησης. Για επίτευξη μέγιστης ευκρίνειας της τάσης εξόδου, αλλά και ευαισθησίας συνολικά του αισθητήρα, επιβάλλεται η χρήση μεγάλου αριθμού περιελίξεων. Το μέγεθος επίσης αποτελεί πολύ κρίσιμο παράγοντα. Οι διαστάσεις θα πρέπει να διατηρηθούν αρκετά μικρές ούτως ώστε ολόκληρο το πηνίο να βρίσκεται σε ομοιόμορφο πεδίο. Αυτό σημαίνει ότι η πυκνότητα μαγνητικών γραμμών που διέρχονται κάθετα από την διατομή του πηνίου είναι σταθερή. Επίσης το σχήμα και οι διαστάσεις του πηνίου λήψης 1 (δηλαδή του πηνίου που περιέχει τον πυρήνα, όπως



Σχήμα 10.1 Σχηματική αναπαράσταση του αισθητήρα

φαίνεται στο σχήμα) πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να περιέχεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια του μαγνητικού υμενίου, με ελάχιστο εμβαδό διατομής του πηνίου λήψης ώστε να εξασφαλίζεται η ομοιομορφία που αναφέραμε παραπάνω. Οι απαιτήσεις αυτές οδήγησαν στην επιλογή ορθογώνιας διατομής για την υλοποίηση των τυλιγμάτων λήψης. Με βάση τις διαστάσεις των επικαλύψεων (και φυσικά και των υποστρωμάτων πάνω στα οποία αναπτύχθηκαν) οι διαστάσεις των πηνίων καθορίστηκαν ως εξής:

- μήκος: 3cm
- εμβαδό διατομής:  $(12\text{mm}) \times (4\text{mm}) = 48\text{mm}^2$
- χρησιμοποιήθηκε σύρμα διαμέτρου  $\Phi = 0.1\text{mm}$
- αριθμός σπειρών = 600

Τα δύο πηνία λήψης πρέπει θεωρητικά να είναι πανομοιότυπα, για λόγους που θα εξηγηθούν στη συνέχεια. Καθώς μόνο το ένα από τα δύο περιέχει μαγνητικό υλικό, η τάση που επάγεται στο πηνίο 1 θα εξαρτάται από την πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  στο εσωτερικό του πυρήνα (σχέση 2.5) και κατά συνέπεια από τη μαγνήτιση του πυρήνα, ενώ η τάση που επάγεται στο πηνίο 2 θα εξαρτάται μόνο από την ένταση του μαγνητικού πεδίου διέγερσης. Πρέπει να σημειώσουμε ότι για λόγους ευκρίνειας, οι διαστάσεις του σχήματος 10.1 δεν ανταποκρίνονται στις πραγματικές διαστάσεις της διάταξης.

### 10.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

Όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η δομή του αισθητήρα ανταποκρίνεται σε fluxgate παράλληλου τύπου, με χρήση μονού διαμήκους πυρήνα. Η τεχνική αξιοποίησης της μη γραμμικότητας της καμπύλης μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού πυρήνα παραπέμπει στα μαγνητόμετρα fluxgate τύπου «Θέσης Παλμού» των οποίων η αρχή λειτουργίας περιγράφηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 9. Συνεπώς, το σήμα εξόδου του αισθητήρα είναι ένας τετραγωνικός παλμός του οποίου η διάρκεια – ή στην προκειμένη περίπτωση – ο duty factor, διαμορφώνεται από την

ένταση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου, παρέχοντας με τον τρόπο αυτό ένα μέτρο της έντασης αυτής. Παρά το γεγονός ότι ο τρόπος αξιοποίησης της μή γραμμικής καμπύλης μαγνήτισης των υμενίων FeNi ταυτίζεται με τα Pulse Position Type fluxgates, η λήψη και επεξεργασία του σήματος και κατά συνέπεια η υλοποίηση του κυκλώματος λήψης, διαφέρει. Υπενθυμίζουμε ότι βάσει του σχήματος 9.10, η κλαστική υλοποίηση του κυκλώματος λήψης περιλαμβάνει την διαφορίση του σήματος εξόδου του δευτερεύοντος πηνίου, δηλαδή τον υπολογισμό της δεύτερης παραγώγου της μαγνητικής ροής. Στη συνέχεια το σήμα οδηγείται σε συγκριτή τάσης που αναζητά μηδενικές μεταβάσεις, δίνοντας στην έξοδό του τον τετραγωνικό παλμό. Ο παλμός αυτός μεταβαίνει από την τιμή 0 σε κάποια καθορισμένη θετική τιμή, ή αντίστροφα, κάθε φορά που ο συγκριτής εντοπίζει ένα μηδενισμό.

Στο μαγνητόμετρο που υλοποιήθηκε στο εργαστήριο υπάρχουν δύο πηνία λήψης. Το πρώτο πηνίο δίνει στην έξοδό του τάση που είναι ανάλογη με την χρονική παράγωγο της πυκνότητας μαγνητικής ροής στον πυρήνα. Με τον τρόπο αυτό, συνεκτιμάται η συνεισφορά στο πεδίο της μαγνήτισης. Το δεύτερο πηνίο δίνει τάση ανάλογη της παραγώγου της έντασης του πεδίου διέγερσης. Έτσι μπορούμε να γράψουμε τις παρακάτω σχέσεις:

$$V_1 = \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} = \frac{\partial B_1 A}{\partial t} = \mu_0 A \frac{\partial (H + M)}{\partial t} = \mu_0 A \left[ \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial t} \right] \quad (10.1)$$

$$V_2 = \frac{\partial \Phi_2}{\partial t} = \frac{\partial B_2 A}{\partial t} = \mu_0 A \frac{\partial (H)}{\partial t} = \mu_0 A \left[ \frac{\partial H}{\partial t} \right] \quad (10.2)$$

Όπου  $A$  είναι το εμβαδό διατομής των πηνίων λήψης (τα οποία υποθέτουμε ότι είναι πανομοιότυπα). Επίσης θεωρούμε ότι το μέγεθος των πηνίων λήψης είναι αρκετά μικρό ώστε να βρίσκονται σε κοινή ένταση μαγνητικού πεδίου  $H$ . Εύκολα παρατηρούμε ότι το άθροισμα  $V_1 - V_2$  περιλαμβάνει μόνο την χρονική παράγωγο της μαγνήτισης του υμενίου FeNi. Δηλαδή:

$$V_1 - V_2 = \mu_0 A \frac{\partial M}{\partial t} \quad (10.3)$$

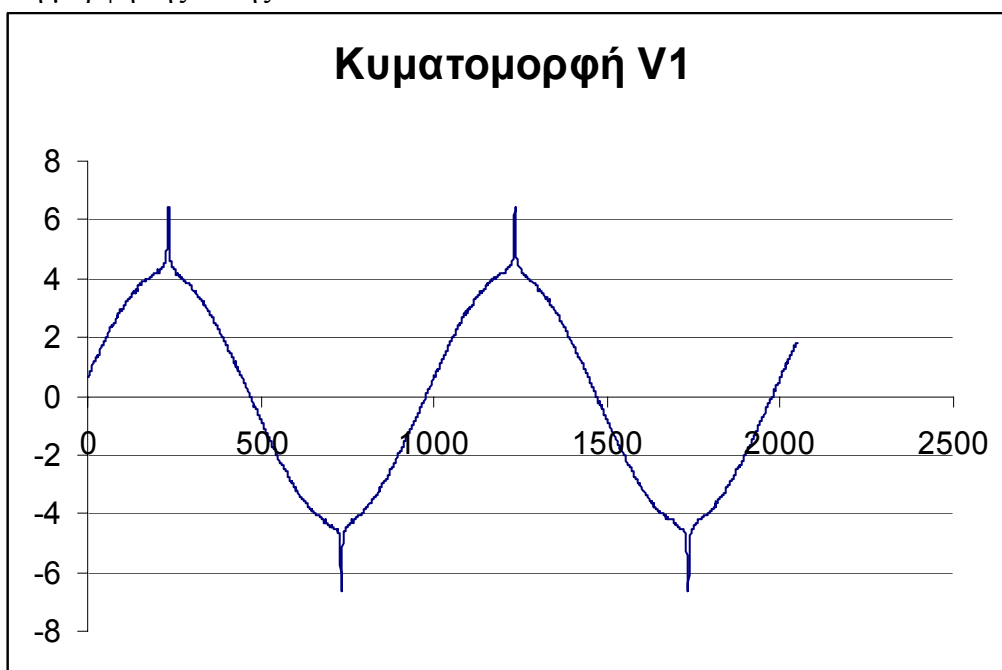
Στο σχήμα 4.2 είδαμε μία τυπική μή υστερητική καμπύλη μαγνήτισης. Μπορούμε για απλοποίηση της ανάλυσης σε αυτό το σημείο να αγνοήσουμε την υστέρηση. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να λάβουμε την παράγωγο της μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού πυρήνα για μία περίοδο της κυματομορφής διέγερσης. Παρατηρούμε ότι η τυπική καμπύλη μαγνήτισης χαρακτηρίζεται από δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα αποτελείται από το σταθερής κλίσης γραμμικό κομμάτι της καμπύλης. Το δεύτερο τμήμα αποτελείται από τους δύο κλάδους που αντιστοιχούν στην θετική και αρνητική μαγνήτιση κορεσμού, δηλαδή τα ακρότατα της καμπύλης μαγνήτισης. Διαφορίζοντας την καμπύλη μαγνήτισης σε μία περίοδο της κυματομορφής διέγερσης, και πολλαπλασιάζοντας επί  $\mu_0 A$ , σύμφωνα με τον τύπο 10.3 θα πάρουμε την τάση  $V_1 - V_2$ . Απουσία εξωτερικού πεδίου, οι τάσεις  $V_1$  και  $V_2$  είναι συμμετρικά τοποθετημένες ως προς τον άξονα των χρόνων. Έτσι, η τάση  $V_1 - V_2$ , που όπως είπαμε είναι ο όρος που αντιστοιχεί στην χρονική παράγωγο της ροής

από τον πυρήνα που προκαλείται από την μαγνήτισή αυτού, αποτελείται από κρουστικά τμήματα που είναι τοποθετημένα στα χρονικά παράθυρα που αντιστοιχούν στα μέγιστα και τα ελάχιστα της κυματομορφής διέγερσης. Το συμπέρασμα αυτό εξάγεται εύκολα αν παρατηρήσουμε τις κλίσεις των τριών τμημάτων της καμπύλης μαγνήτισης σε άξονες H – M. Το γραμμικό κομμάτι έχει σταθερή κλίση και συνεπώς μηδενική παράγωγο, ενώ τα τμήματα κορεσμού έχουν κλίση 90 μοίρες και συνεπώς η παράγωγός τους είναι κρουστικές ασυνέχειες.

Ως ρεύμα διέγερσης χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδής κυματομορφή. Έτσι οι κρουστικές μεταβολές τοποθετούνται στις θέσεις  $\pi/4$  και  $3\pi/4$  εντός μίας περιόδου, δηλαδή απέχουν σταθερή χρονική απόσταση ίση με μία ημιπερίοδο. Πρέπει να σημειώσουμε ότι για  $t = \pi/4$  έχουμε απότομη αύξηση της τάσης ενώ για  $t = 3\pi/4$  έχουμε απότομη ελάττωση. Αν στη συνέχεια η τάση  $V_1 - V_2$  υποστεί χρονική ολοκλήρωση, τότε θα προκύψει τετραγωνικός παλμός συμμετρικά τοποθετημένος ως προς τον άξονα των χρόνων. Απουσία DC πεδίου, ο duty factor του παλμού θα είναι 50%. Αν τώρα επιπλέον του πεδίου διέγερσης εφαρμοσθεί και ένα συνεχές ή χαμηλής συχνότητας ασθενές πεδίο, τότε η καμπύλη μαγνήτισης δεν θα είναι πλέον συμμετρική, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 9.4.1.1. Αποτέλεσμα αυτής της μής συμμετρίας αποτελεί η χρονική μετατόπιση των κρουστικών μεταβολών της τάσης  $V_1 - V_2$  και κατά συνέπεια η μεταβολή του duty factor του παλμού που προκύπτει με ολοκλήρωση αυτής. Η τιμή του duty factor του παλμού μπορεί να αποτελέσει ένα μέτρο για την ένταση της συνιστώσας του DC πεδίου που εφαρμόζεται παράλληλα με το πεδίο προμαγνήτισης του πυρήνα.

#### 10.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΕΡΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ FeNi

Όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, η λειτουργία του αισθητήρα βασίζεται στην μετατόπιση των κρουστικών μεταβάσεων της κυματομορφής  $V_1 - V_2$  που προκαλούνται από την υπέρθεση ενός DC συγγραμμικού με τη διέγερση πεδίου. Για να απλοποιηθεί η περιγραφή που ακολουθεί παραθέτουμε στο σχήμα 10.2 μία τυπική μορφή της τάσης  $V_1$ .



Σχήμα 10.2 Τυπική καμπύλη τάσης  $V_1$  (υμνίο από διάλυμα 2 - πίνακας 7.1)

Για να επιλέξουμε το καταλληλότερο υμένιο σιδήρου – νικελίου πρέπει αρχικά να αποφανθούμε ποιο είναι το χαρακτηριστικό του που καθορίζει την συμπεριφορά του μαγνητομέτρου. Στην παραπάνω καμπύλη, ο κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει την τάση εξ επαγωγής στο πηνίο λήψης 1. Είναι προφανές, ότι αυτό που αρχικά περιγράφηκε ως κρουστικές μεταβάσεις, είναι στην πράξη πεπερασμένης τιμής «κρουστικού τύπου» ασυνέχειες. Μάλιστα το ύψος των «κρουστικών» αυτών παλμών εξαρτάται από το πόσο βαθιά σε κορεσμό έχει περιέλθει το σιδηρομαγνητικό δείγμα που χρησιμοποιείται ως πυρήνας.

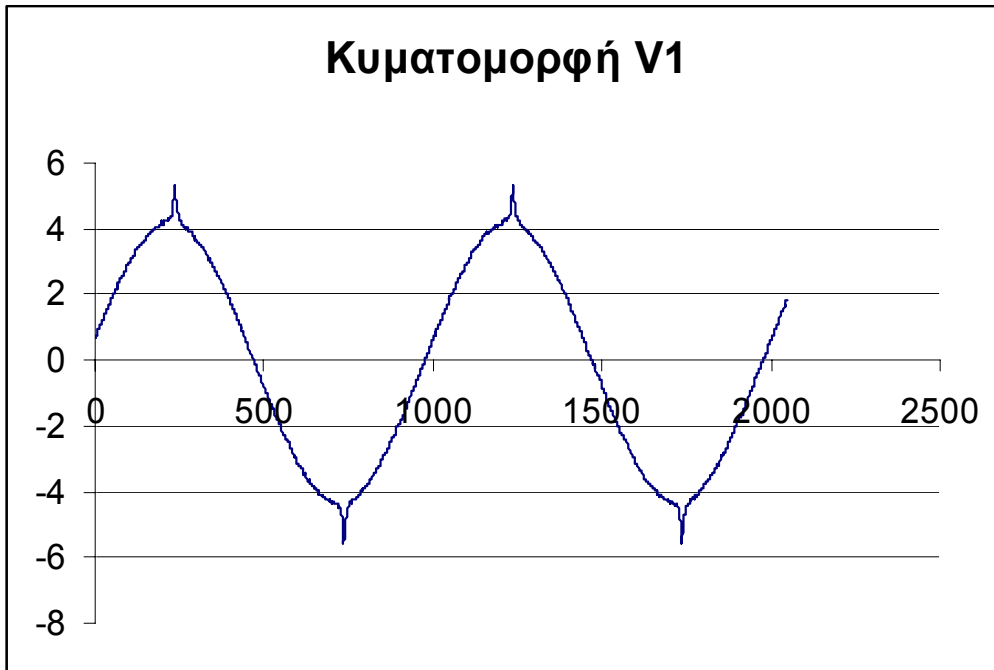
Η αρχή λειτουργίας που περιγράφηκε προηγούμενα, καταδεικνύει ορισμένους περιορισμούς. Ο πρώτος περιορισμός αφορά την ευαισθησία του αισθητήρα. Καθώς η λειτουργία του αισθητήρα στηρίζεται στην «αλλοίωση» ενός εναλλασσόμενου σήματος από την υπέρθεση σε αυτό μίας ασθενούς DC συνιστώσας, γίνεται προφανές ότι όσο το σήμα αναφοράς γίνεται ισχυρότερο, τότε η επίδραση της DC συνιστώσας θα γίνεται αναπόφευκτα περισσότερο ανεπαίσθητη. Επομένως, για να αυξήσουμε την ευαισθησία του μαγνητομέτρου, πρέπει να διατηρήσουμε σε όσο το δυνατόν χαμηλότερες τιμές την ένταση του μαγνητικού πεδίου διέγερσης – αναφοράς. Ο δεύτερος περιορισμός αφορά το εύρος λειτουργίας του αισθητήρα και μπορεί να εκφρασθεί θεωρητικά μέσω της σχέσης 9.15:

$$|H_{ext}| \leq |H_{reference}| \quad (9.15)$$

Ο αισθητήρας δηλαδή δεν μπορεί να προσδιορίσει DC συνιστώσες με τιμή μεγαλύτερη από το μέτρο του πεδίου διέγερσης. Στην πράξη, η μέγιστη τιμή που μπορεί να μετρηθεί είναι αρκετά μικρότερη από αυτήν που προβλέπει ο τύπος 9.15.

Με βάση τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι μπορεί θεωρητικά να οριστεί ένα άνω και ένα κάτω φράγμα για το μέτρο του πεδίου προμαγνήτισης. Το πεδίο αυτό πρέπει να είναι αρκετά μικρό, ούτως ώστε η ευαισθησία να βρίσκεται σε ανεκτές τιμές. Επίσης, η τιμή του πρέπει να είναι ταυτόχρονα αρκετά μεγάλη, ώστε οι κορυφές (δηλαδή οι κρουστικού τύπου ασυνέχειες) που φαίνονται στο σχήμα 10.2 να έχουν αρκετό εύρος ώστε να μην «πνίγονται» υπό την επίδραση του DC πεδίου. Με βάση τα παραπάνω η επιλογή του καταλληλότερου φιλμ εναπόκειται στην σύγκριση του εύρους των κρουστικών μεταβάσεων που παρουσιάζει κάθε ένα από αυτά, με τις ίδιες συνθήκες διέγερσης. Στο σχήμα 10.2 βλέπουμε την τάση στο πηνίο 1 για πυρήνα που αναπτύχθηκε ηλεκτρολυτικά από το διάλυμα 2 του πίνακα 7.1. Το ρεύμα διέγερσης στο πρωτεύον έχει RMS τιμή 900mA και συχνότητα 1kHz. Στο σχήμα 10.3 βλέπουμε την τάση στο πηνίο 1 όταν ο πυρήνας προέρχεται από το διάλυμα 1 του πίνακα 7.1. Οι συνθήκες διέγερσης παραμένουν ίδιες. Με απλή παρατήρηση των δύο διαγραμμάτων φαίνεται ότι το υμένιο που αντιστοιχεί στο σχήμα 10.2, δηλαδή στο διάλυμα 2 του πίνακα 7.1 προκαλεί στην τάση εξόδου, λόγω της μαγνήτισης του, μία κρουστικής μορφής μετάβαση, διπλάσιου περίπου πλάτους από αυτήν του υμενίου που αντιστοιχεί στο διάλυμα 1. Αυτό σημαίνει ότι για ίδιο πεδίο διέγερσης το πρώτο φιλμ έρχεται βαθύτερα σε κατάσταση κορεσμού. Επιλέγοντας λοιπόν το υμένιο αυτό, μπορούμε να ελλατώσουμε την ένταση του πεδίου διέγερσης, ώστε να πετύχουμε καλύτερη ευαισθησία, αλλά ταυτόχρονα το εύρος των ασυνεχών μεταβάσεων της τάσης  $V_1 - V_2$  θα είναι αρκετά μεγάλο (ακόμη και υπό την επίδραση μίας DC συνιστώσας πεδίου) ώστε η ολοκλήρωσή της να δίνει έναν καθαρό τετραγωνικής μορφής παλμό, του οποίου εύκολα θα μπορεί να μετρηθεί ο duty factor.





**Σχήμα 10.3** Τυπική καμπύλη τάσης  $V_1$  (υμνίο από διάλυμα 1 - πίνακας 7.1)

#### 10.5 ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΛΗΨΗΣ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

Όπως προκύπτει από την ανάλυση της αρχής λειτουργίας του αισθητήρα, το κύκλωμα που απαιτείται για την λήψη του σήματος και την εξαγωγή του τετραγωνικού παλμού είναι θεωρητικά αρκετά απλό. Τα ελάχιστα δομικά στοιχεία με τα οποία μπορεί να υλοποιηθεί το κύκλωμα αυτό είναι ένα διπλό διαφορικό στάδιο εισόδου, ένας αθροιστής και ένας ολοκληρωτής Miller. Το κάθε σκέλος του σταδίου λήψης είναι στην ουσία ένας ενισχυτής οργάνου μέτρησης[4], ο οποίος ενισχύει το διαφορικό σήμα της εισόδου του (το οποίο είναι η τάση εξόδου στο κάθε πηνίο λήψης) και στη συνέχεια μέσω ενός τελεστικού ενισχυτή σε συνδεσμολογία απομονωτή δίνει το αποτέλεσμα της διαφορικής ενίσχυσης σε έναν ακροδέκτη. Ο αθροιστής λαμβάνοντας σαν εισόδους τις δύο ενισχυμένες τάσεις με πολικότητα όπως φαίνεται στο σχήμα 10.1 ουσιαστικά εκτελεί την πράξη  $V_1 - V_2$  αφαιρώντας από το προς ολοκλήρωση σήμα την άχρηστη ημιτονοειδή συνιστώσα, και αφήνοντας μόνο το ωφέλιμο σήμα.

Μέχρι αυτό το σημείο, η ανάλυση που έχει γίνει στηρίζεται στην παραδοχή ορισμένων υποθέσεων ως ιδανικές. Υποθέσαμε ότι τα πηνία λήψης είναι ακριβώς ίδια σε διαστάσεις και ότι αποτελούνται από τον ίδιο ακριβώς αριθμό σπειρών. Επίσης δεχτήκαμε ότι διεγείρονται από την ίδια ακριβώς ένταση μαγνητικού πεδίου. Στην πραγματικότητα καμία από αυτές τις παραδοχές δεν είναι απόλυτα αληθής. Η κατασκευή δύο πανομοιότυπων τυλιγμάτων σε αυτές τις διαστάσεις είναι πρακτικά αδύνατη. Έτσι και οι διαστάσεις αλλά και ο αριθμός περιελίξεων θα παρουσιάζει μία απόκλιση, έστω μικρή, ανάμεσα στα δύο πηνία λήψης. Επίσης, η τοποθέτηση των πηνίων είναι προβληματική, καθώς μία έστω ανεπαίσθητη απόκλιση από τον άξονα του τυλίγματος διέγερσης (είτε μία παράλληλη μετατόπιση είτε μία γωνιακή απόκλιση) έχει σαν αποτέλεσμα από αυτά να διέρχονται κάθετα μαγνητικές δυναμικές γραμμές με διαφορετική πυκνότητα.

Η ύπαρξη αυτών των ανομοιομορφιών προκαλεί τα ακόλουθα προβλήματα. Οι τάσεις που επάγονται στα δύο πηνία λήψης έχουν διαφορετικό μέτρο, καθώς

διαφέρει ο αριθμός σπειρών αλλά ίσως και το πεδίο διέγερσης. Επίσης, τα δύο σήματα παρουσιάζουν διαφορά φάσης όχι ακριβώς 180 μοιρών όπως είναι το επιθυμητό. Έτσι, αν χρησιμοποιήσουμε την απλούστερη μορφή του κυκλώματος λήψης που αναφέρθηκε παραπάνω, καθώς στην είσοδο του αθροιστή θα εισέρχονται σήματα διαφορετικού πλάτους και όχι απόλυτα συγχρονισμένα ( $\Delta\Phi \neq 180^\circ$ ), η έξοδος του θα είναι ένα σήμα ακανόνιστο και μή προβλέψιμο. Συνεπώς, στην πράξη απαιτείται τροποποίηση του κυκλώματος λήψης, προκειμένου να επιτευχθεί ορθή λειτουργία.

Στο σχήμα 10.4 βλέπουμε το τελικό κύκλωμα λήψης το οποίο περιλαμβάνει τις απαραίτητες τροποποιήσεις. Αυτές συνοψίζονται στη χρήση σταδίων διαφορικής ενίσχυσης με μεταβλητό κέρδος, και την παρεμβολή κυκλωμάτων μετατόπισης φάσης πριν την οδήγηση των δύο σημάτων στον αθροιστή. Έτσι, με προσεκτική ρύθμιση των αντίστοιχων ποτενσιομέτρων μπορούμε να ρυθμίσουμε τα δύο σήματα στην είσοδο του αθροιστή, ώστε να γίνει σωστά η πράξη και να πάρουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα στη έξοδο.

Στη συνέχεια παραθέτουμε τις τιμές των στοιχείων του κυκλώματος.

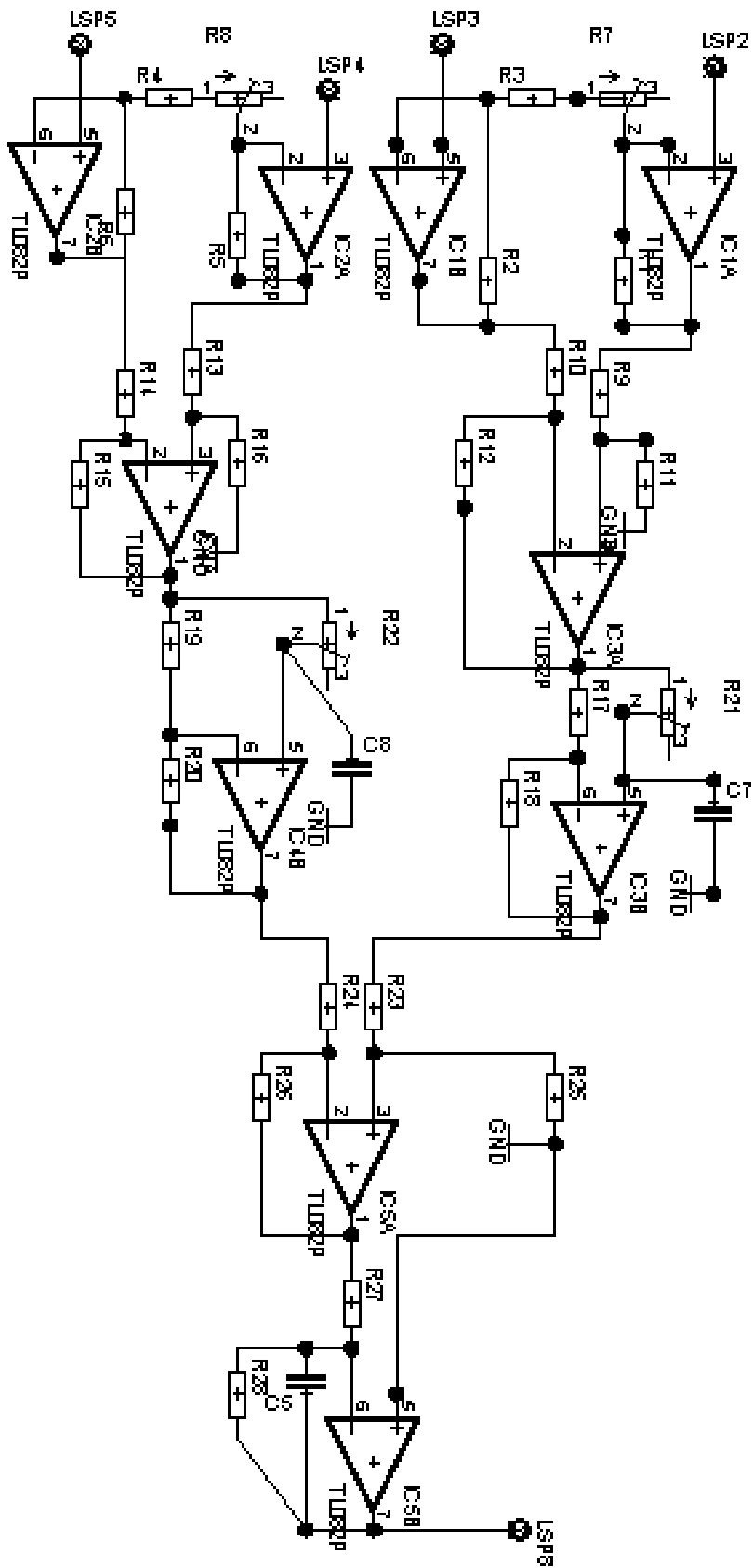
- $R_3 = R_4 = 2k\Omega$
- $R_7 = R_8 = 50k\Omega$  (trimmers)
- $R_9 = R_{10} = R_{11} = R_{12} = R_{13} = R_{14} = R_{15} = R_{16} = 10k\Omega$
- $R_{17} = R_{18} = R_{19} = R_{20} = 10k\Omega$
- $R_{23} = R_{24} = R_{25} = R_{26} = 10k\Omega$
- $R_{21} = R_{22} = 50k\Omega$  (trimmers)
- $R_{27} = 1k\Omega$
  
- $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_6 = 0,1\mu F$
- $C_7 = C_8 = 0,47\mu F$

Για τον ολοκληρωτή Miller, οι τιμές:

- $R_1 = 1k\Omega$
- $R_2 = 100k\Omega$
- $C_5 = 0,16\mu F$ ,

εξασφαλίζουν συχνότητα μοναδιαίου κέρδους ίση με 1kHz, που είναι και η επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας.

- Ακροδέκτες LSP2 & LSP3 :  $V_1$
- Ακροδέκτες LSP4 & LSP5 :  $V_2$
- Ακροδέκτης LSP8 :  $V_{out}$



Σχήμα 10.4 Το κύκλωμα λήψης

## 10.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η διαδικασία των μετρήσεων που διεξήχθησαν στο εργαστήριο περιλαμβάνει τον πειραματικό προσδιορισμό της συνάρτησης μεταφοράς του μαγνητομέτρου καθώς και τον προσδιορισμό της βέλτιστης έντασης μαγνητικού πεδίου διέγερσης, προκειμένου ο αισθητήρας να λειτουργεί υπό τις καλύτερες συνθήκες ευαισθησίας – γραμμικότητας – ωφέλιμου εύρους. Ως συνάρτηση μεταφοράς ορίζουμε το λόγο της χρονικής διάρκειας  $t_{HIGH}$  (ή του duty factor) του παλμού εξόδου, προς την ένταση του υπό μέτρηση DC πεδίου. Στην περίπτωση μας, αφού η συχνότητα λειτουργίας είναι 1kHz, και κατά συνέπεια η περίοδος ισούται με 1msec, τότε το  $t_{HIGH}$  δοσμένο σε msec ισοδυναμεί με το duty cycle κανονικοποιημένο στη μονάδα. Μπορούμε με βάση τα όσα έχουν έως τώρα αναφερθεί να προβλέψουμε την συμπεριφορά των τριών αυτών παραμέτρων, για διαφορετικές τιμές έντασης του μαγνητικού πεδίου αναφοράς. Όπως ήδη εξηγήθηκε, η ευαισθησία αποτελεί φθίνουσα συνάρτηση της έντασης  $H_{REFERENCE}$ . Αντίστροφα, το εύρος λειτουργίας αυξάνεται με αντίστοιχη αύξηση της έντασης αυτής, όπως προκύπτει από τη σχέση 9.15. Το ίδιο συμβαίνει και με το βαθμό γραμμικότητας της καμπύλης μεταφοράς.

Η διαδικασία των μετρήσεων που διεξήχθησαν αποτελεί ουσιαστικά μία βαθμονόμηση του αισθητήρα Fluxgate που υλοποιήθηκε. Η εφαρμογή της συνεχούς συνιστώσας μαγνητικού πεδίου έγινε με χρήση ζεύγους πηνίων Helmholtz, ούτως ώστε να εξασφαλίσουμε την ύπαρξη ομογενούς DC πεδίου σε όλο τον όγκο που καταλαμβάνουν τα πηνία λήψης. Η ακτίνα των πηνίων Helmholtz που χρησιμοποιήθηκαν είναι 10cm και αποτελούνται από 1000 σπείρες ανά τύλιγμα. Η ένταση δε του μαγνητικού πεδίου στο μέσο της απόστασής των δύο πηνίων δίνεται από τη σχέση 1.18.

Ακολουθούν οι πίνακες μετρήσεων που περιλαμβάνουν τις τιμές του  $t_{HIGH}$  του παλμού εξόδου σε σχέση με το ρεύμα τροφοδοσίας των πηνίων Helmholtz και την αντίστοιχη ένταση μαγνητικού πεδίου. Πρέπει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιήθηκε DC τροφοδοτικό με δυνατότητα παροχής έως 300 περίπου mA. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί (με βάση τα χαρακτηριστικά του ζεύγους Helmholtz) σε πεδίο δεκάδες φορές ισχυρότερο από τη μέση τιμή εντάσεως του πεδίου της γης (χρησιμοποιώντας τη σχέση 1.18 και λαμβάνοντας σαν μέση τιμή της έντασης μαγνητικού πεδίου της γης τα 56A/m, προκύπτει αντίστοιχο ρεύμα της τάξης των 5,5mA). Στους πίνακες που ακολουθούν, το πρόσημο - υποδεικνύει εφαρμογή πεδίου σε διεύθυνση αντίρροπη από το πεδίο διέγερσης. Όλες οι μετρήσεις έλαβαν χώρα με πεδίο διέγερσης συχνότητας 1kHz.

**Πίνακας 10.1** Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 100mA  
RMS

<b>i – DC (mA)</b>	<b>H – DC (A/m)</b>	<b>t – High (msec)</b>
-120	-1226.64	0.266
-110	-1124.42	0.274
-100	-1022.2	0.298
-90	-919.98	0.314
-80	-817.76	0.338
-70	-715.54	0.354
-60	-613.32	0.378
-50	-511.1	0.402
-40	-408.88	0.426
-30	-306.66	0.44
-20	-204.44	0.456
-15	-153.33	0.472
-5	-51.11	0.48
0	0	0.496
5	51.11	0.512
15	153.33	0.52
20	204.44	0.536
30	306.66	0.552
40	408.88	0.568
50	511.1	0.592
60	613.32	0.616
70	715.54	0.64
80	817.76	0.656
90	919.98	0.68
100	1022.2	0.696
110	1124.42	0.72
120	1226.64	0.728

**Πίνακας 10.2** Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 200mA  
RMS

<b>i – DC (mA)</b>	<b>H – DC (A/m)</b>	<b>t – High (msec)</b>
-255	-2606.61	0.232
-240	-2453.28	0.248
-225	-2299.95	0.264
-210	-2146.62	0.28
-195	-1993.29	0.296
-180	-1839.96	0.312
-165	-1686.63	0.328
-150	-1533.3	0.344
-135	-1379.97	0.36
-120	-1226.64	0.376
-105	-1073.31	0.392
-90	-919.98	0.408
-75	-766.65	0.424

-60	-613.32	0.44
-45	-459.99	0.448
-30	-306.66	0.464
-10	-102.22	0.48
-5	-51.11	0.488
0	0	0.496
5	51.11	0.504
10	102.22	0.512
30	306.66	0.528
45	459.99	0.544
60	613.32	0.552
75	766.65	0.568
90	919.98	0.576
105	1073.31	0.592
120	1226.64	0.608
135	1379.97	0.624
150	1533.3	0.632
165	1686.63	0.648
180	1839.96	0.664
195	1993.29	0.68
210	2146.62	0.696
225	2299.95	0.72
240	2453.28	0.736
255	2606.61	0.752

**Πίνακας 10.3** Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 300mA RMS

<b>i – DC (mA)</b>	<b>H – DC (A/m)</b>	<b>t – High (msec)</b>
-295,5	-3020.6	0.322
-280	-2862.16	0.338
-260	-2657.72	0.346
-240	-2453.28	0.358
-220.5	-2253.95	0.366
-200.5	-2049.51	0.378
-180	-1839.96	0.388
-160	-1635.52	0.394
-140.5	-1436.19	0.404
-120.5	-1231.75	0.42
-100	-1022.2	0.436
-80	-817.76	0.444
-60	-613.32	0.456
-40	-408.88	0.468
-20	-204.44	0.48
-10	-102.22	0.488
0	0	0.496
10	102.22	0.504
20	204.44	0.512

40	408.88	0.524
60	613.32	0.536
80	817.76	0.544
100	1022.2	0.552
120.5	1231.751	0.568
140.5	1436.191	0.584
160	1635.52	0.594
180	1839.96	0.6
200.5	2049.511	0.616
220.5	2253.951	0.630
240	2453.28	0.64
260	2657.72	0.656
280	2862.16	0.672
295.5	3020.601	0.678

**Πίνακας 10.4** Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 400mA RMS

<b>i – DC (mA)</b>	<b>H – DC (A/m)</b>	<b>t – High (msec)</b>
-295	-3015.49	0.354
-280	-2862.16	0.362
-260	-2657.72	0.370
-240	-2453.28	0.382
-220	-2248.84	0.394
-200	-2044.4	0.402
-180	-1839.96	0.41
-160	-1635.52	0.416
-140	-1431.08	0.426
-120	-1226.64	0.438
-90	-919.98	0.45
-70.5	-720.651	0.464
-50	-511.1	0.472
-10	-102.22	0.484
0	0	0.496
10	102.22	0.508
50	511.1	0.52
70.5	720.651	0.524
90	919.98	0.532
120	1226.64	0.544
140	1431.08	0.56
160	1635.52	0.57
180	1839.96	0.576
200	2044.4	0.584
220	2248.84	0.592
240	2453.28	0.604
260	2657.72	0.616
280	2862.16	0.624
295	3015.49	0.63

**Πίνακας 10.5** Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 500mA  
RMS

<b>i – DC (mA)</b>	<b>H – DC (A/m)</b>	<b>t – High (msec)</b>
-295	-3015.49	0.392
-275	-2811.05	0.4
-250	-2555.5	0.41
-220	-2248.84	0.422
-190	-1942.18	0.432
-165	-1686.63	0.44
-135	-1379.97	0.448
-100	-1022.2	0.458
-85	-868.87	0.466
-50	-511.1	0.472
-35	-357.77	0.48
-10	-102.22	0.488
0	0	0.496
10	102.22	0.504
35	357.77	0.512
50	511.1	0.52
85	868.87	0.526
100	1022.2	0.534
135	1379.97	0.544
165	1686.63	0.552
190	1942.18	0.56
220	2248.84	0.57
250	2555.5	0.582
275	2811.05	0.592
295	3015.49	0.6

**Πίνακας 10.6** Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 600mA  
RMS

<b>i – DC (mA)</b>	<b>H – DC (A/m)</b>	<b>t – High (msec)</b>
-295	-3015.49	0.404
-290	-2964.38	0.416
-257	-2627.05	0.424
-207	-2115.95	0.432
-155	-1584.41	0.448
-116	-1185.75	0.464
-86	-879.092	0.472
-66	-674.652	0.48
0	0	0.496
66.4	678.7408	0.512
86	879.092	0.52
116	1185.752	0.528
155	1584.41	0.544



207	2115.954	0.56
257	2627.054	0.568
290	2964.38	0.576
295	3015.49	0.58

**Πίνακας 10.7** Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 720mA RMS

<b>i – DC (mA)</b>	<b>H – DC (A/m)</b>	<b>t – High (msec)</b>
-295	-3015.49	0.432
-271	-2770.16	0.44
-188	-1921.74	0.448
-140	-1431.08	0.464
-120	-1226.64	0.472
-83	-848.426	0.48
-11	-112.442	0.488
0	0	0.496
11	112.442	0.504
83	848.426	0.512
120	1226.64	0.52
140	1431.08	0.528
188	1921.736	0.544
271	2770.162	0.552
295	3015.49	0.56

**Πίνακας 10.8** Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 815mA RMS

<b>i – DC (mA)</b>	<b>H – DC (A/m)</b>	<b>t – High (msec)</b>
-295	-3015.49	0.424
-259	-2647.5	0.432
-242	-2473.72	0.44
-200	-2044.4	0.448
-163	-1666.19	0.456
-120	-1226.64	0.464
-96	-981.312	0.472
-52	-531.544	0.48
0	0	0.496
52	531.544	0.512
96	981.312	0.52
120	1226.64	0.528
163	1666.186	0.536
200	2044.4	0.544
242	2473.724	0.552
259	2647.498	0.56
295	3015.49	0.568

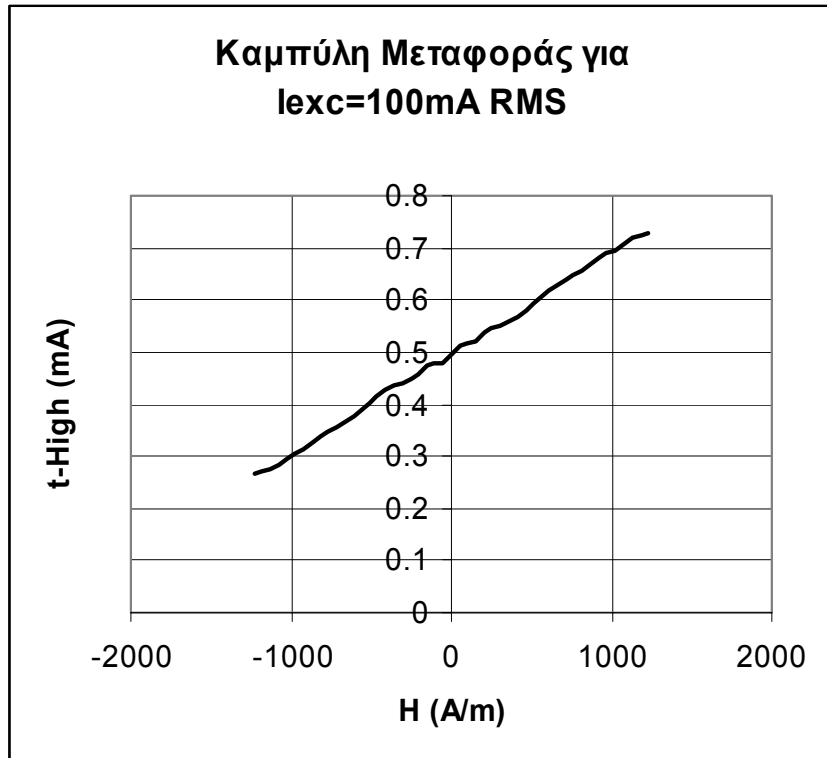
**Πίνακας 10.9** Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα διέγερσης 955mA RMS

<b>i – DC (mA)</b>	<b>H – DC (A/m)</b>	<b>t – High (msec)</b>
-287	-2933.71	0.44
-231	-2361.28	0.448
-210	-2146.62	0.456
-161	-1645.74	0.464
-83	-848.426	0.472
0	0	0.496
83	848.426	0.52
161	1645.742	0.528
210	2146.62	0.536
231	2361.282	0.544
287	2933.714	0.552

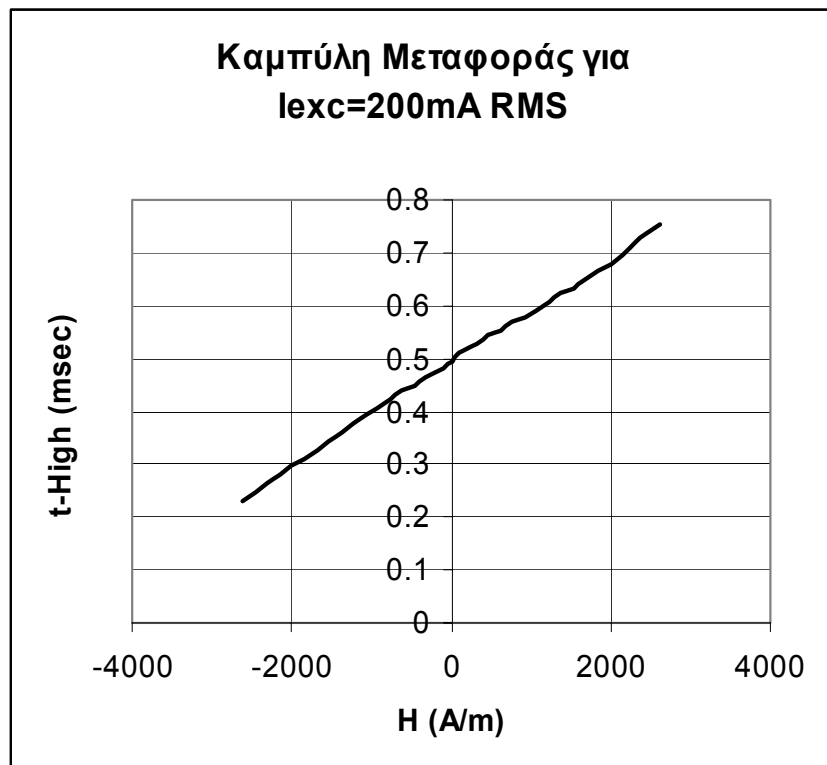
Στη συνέχεια παραθέτουμε τις καμπύλες μεταφοράς για διάφορες τιμές του πεδίου διέγερσης. (Σχήματα 10.5 έως 10.13). Στο σχήμα 10.14 συμπεριλαμβάνονται όλες οι καμπύλες μεταφοράς για λόγους σύγκρισης. Με απλή παρατήρηση συμπεραίνουμε εύκολα την εξάρτηση της ευαισθησία και του εύρους λειτουργίας. Το αποτέλεσμα συμφωνεί απόλυτα με τα θεωρητικώς αναμενόμενα. Μάλιστα, με χρήση μεγαλύτερου DC τροφοδοτικού η εξάρτηση του εύρους λειτουργίας θα γινόταν περισσότερο προφανής, καθώς για ρεύμα διέγερσης μεγαλύτερο ή ίσο με 500mA RMS, ο αισθητήρας καλύπτει εύρος που περιλαμβάνει την μέγιστη ένταση DC πεδίου που λαμβάνουμε όταν  $I_{DC} \approx 300mA$ . Όσον αφορά τη γραμμικότητα, παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά παραμένει σε μεγάλο βαθμό γραμμική καθώς όλες οι καμπύλες μεταφοράς μπορούν να προσεγγιστούν πολύ ικανοποιητικά από ευθείες των οποίων η κλίση θα ισούται με τη μέση κλίση κάθε καμπύλης. Ο πίνακας 10.10 περιλαμβάνει συγκεντρωτικά τις τιμές ευαισθησίας, εύρους λειτουργίας και μέγιστης τιμής μή γραμμικότητας για κάθε περίπτωση. Εφόσον, ο οριζόντιος άξονας των διαγραμμάτων δεν είναι κανονικοποιημένος, για να βρούμε την μέγιστη τιμή μή γραμμικότητας σε ποσοστό % του full scale deflection, θα υπολογίσουμε την μέγιστη κατακόρυφη απόσταση της πραγματικής καμπύλης από ευθεία με κλίση ίση με την ευαισθησία του αισθητήρα για κάθε περίπτωση διέγερσης. Αν  $S$  η ευαισθησία, τότε σε κάθε περίπτωση θα ισχύει η σχέση:

$$t_{HIGH} = 0.496 + S \cdot H_{DC} \quad (10.4)$$

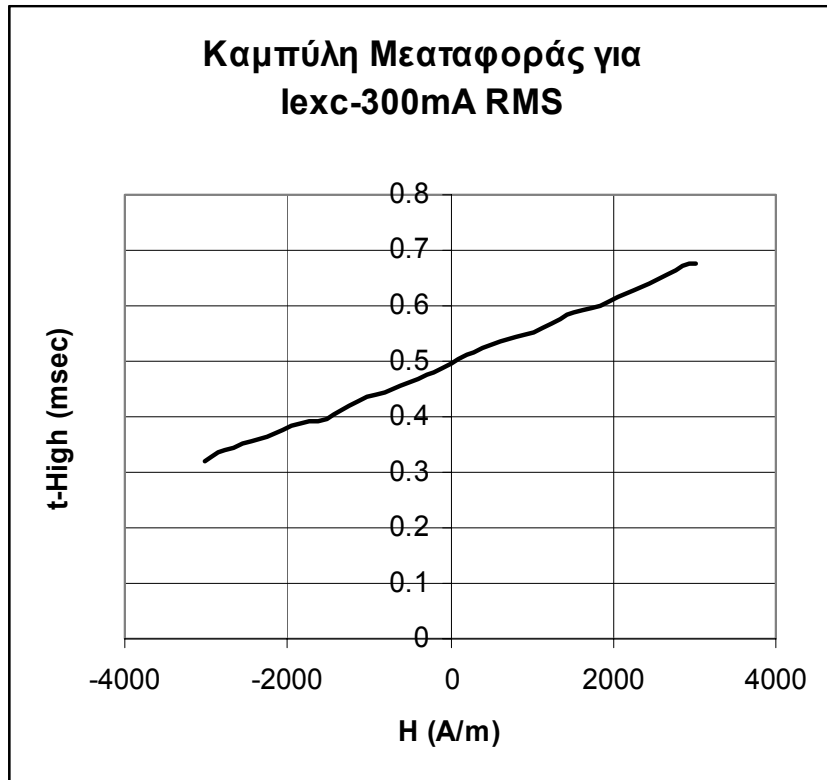
όπου στην τιμή του  $H$  λαμβάνουμε υπόψην τη φορά του DC πεδίου σε σχέση με τη διέγερση.



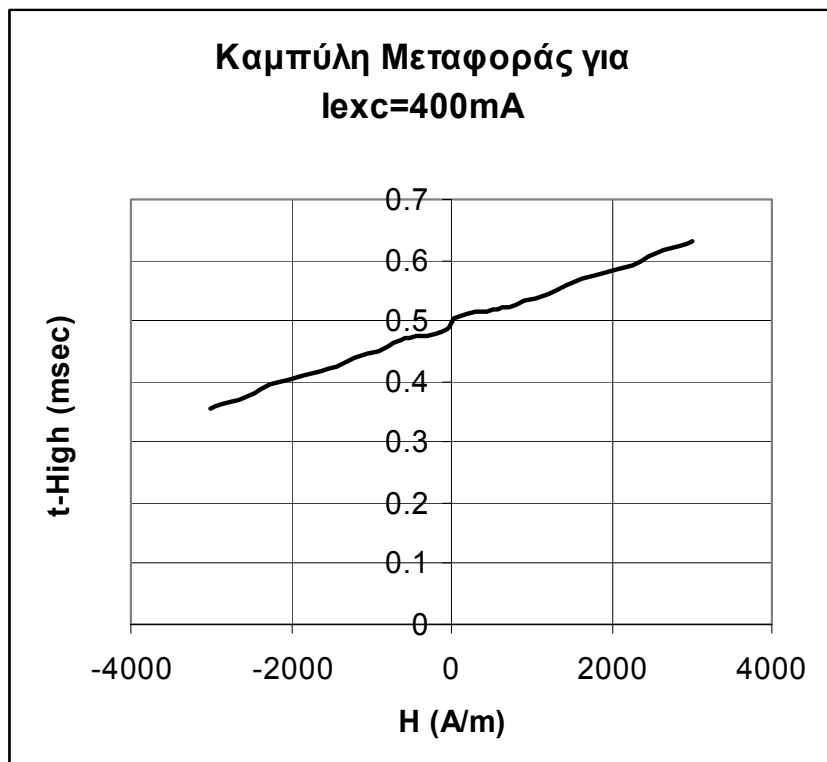
Σχήμα 10.5



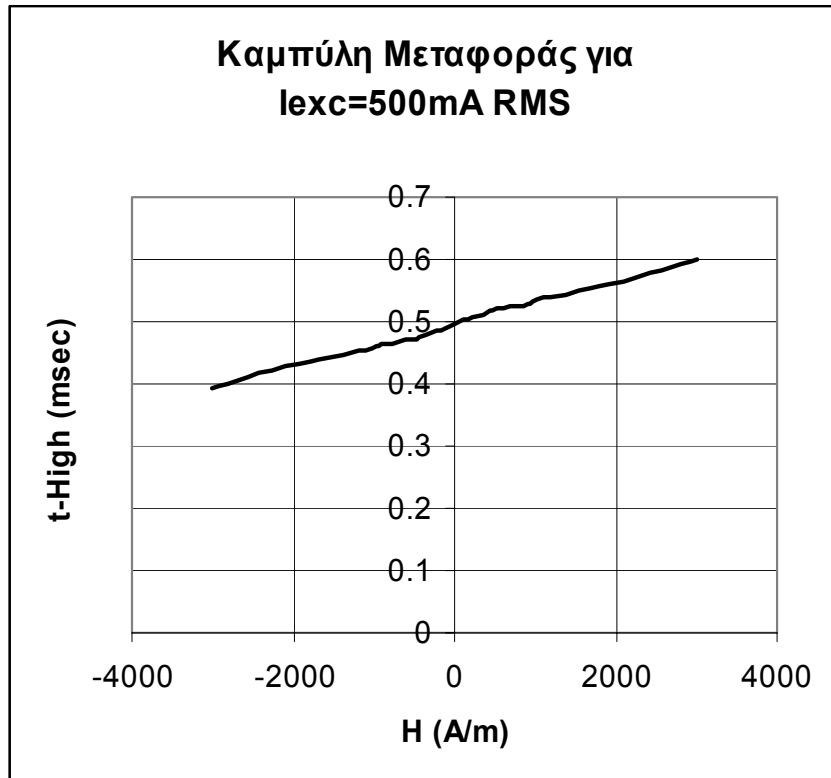
Σχήμα 10.6



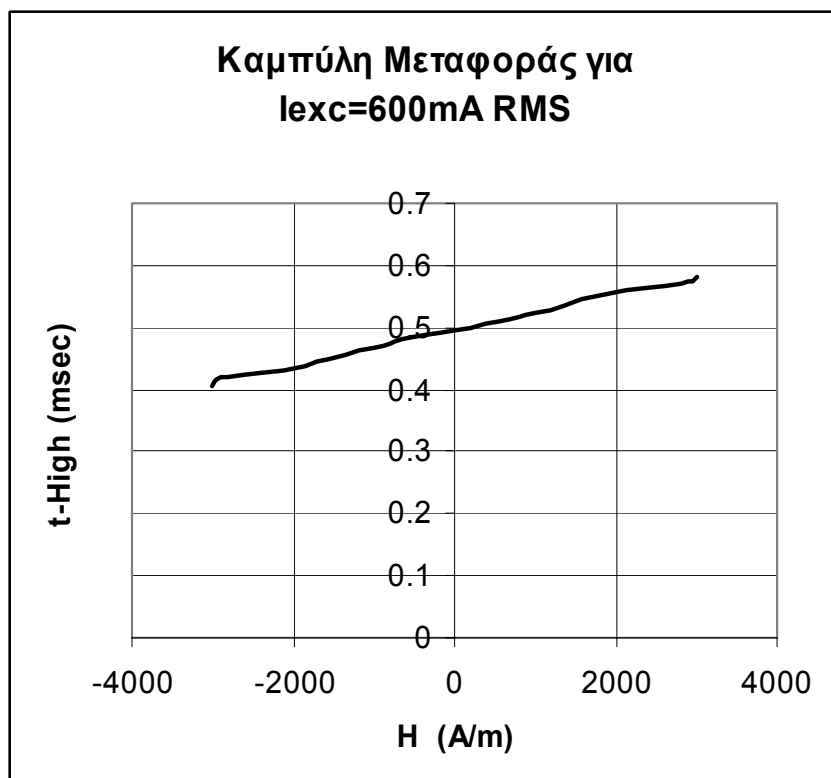
Σχήμα 10.7



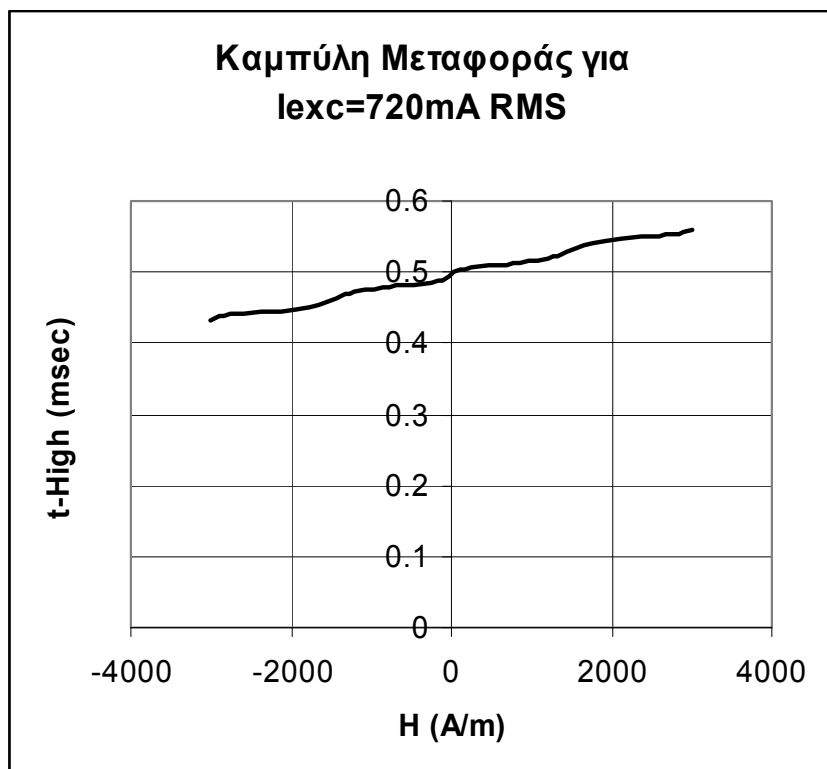
Σχήμα 10.8



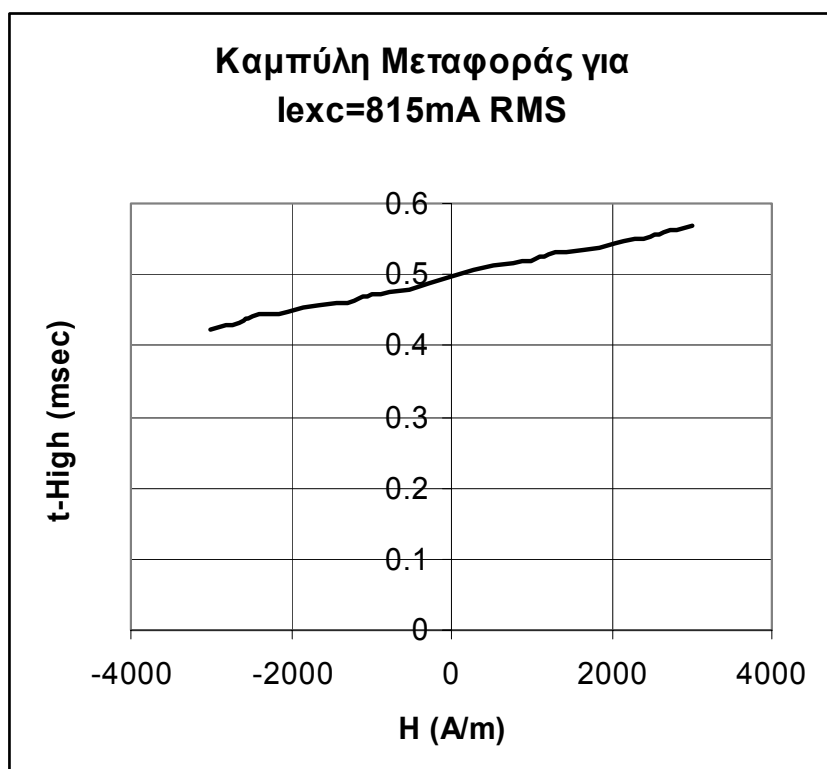
Σχήμα 10.9



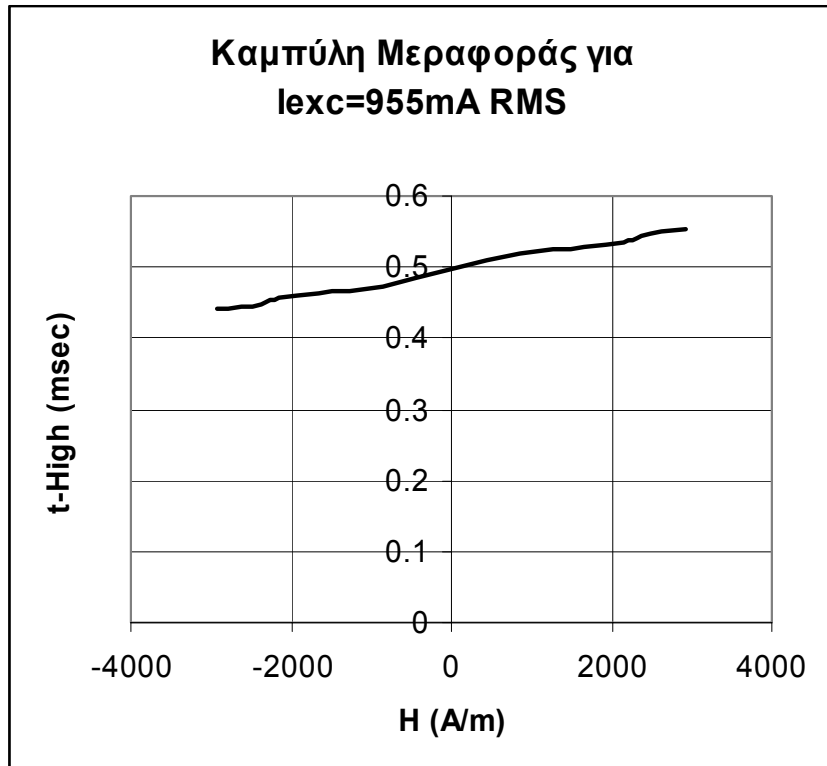
Σχήμα 10.10



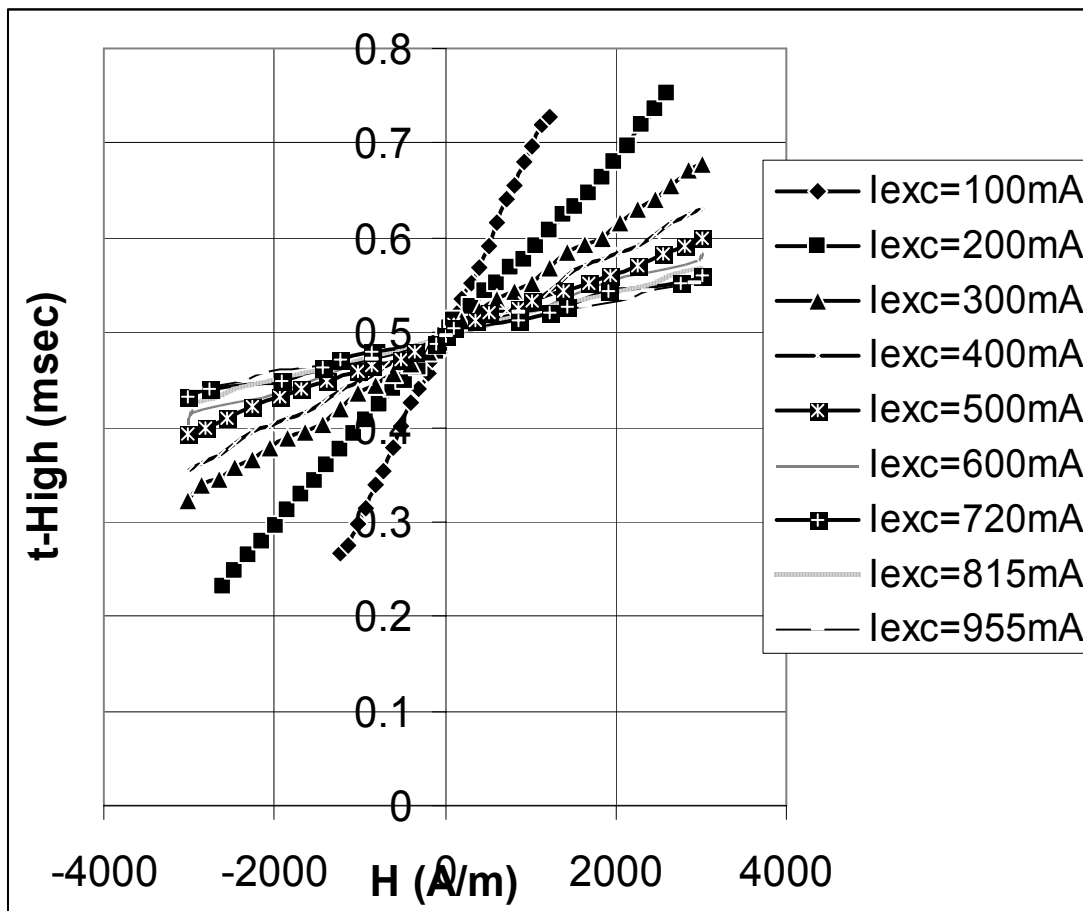
Σχήμα 10.11



Σχήμα 10.12



Σχήμα 10.13



Σχήμα 10.14

**Πίνακας 10.10** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

<b>I<sub>EXC</sub> RMS (mA)</b>	<b>Ευαισθησία S (μsec/(A/m))</b>	<b>Μέγιστη τιμή μή γραμμικότητας (% του f.s.d)</b>	<b>Εύρος Λειτουργίας</b>
100	0.188	0.48	H ≤  1226,64  A/m
200	0.099	0.26	H ≤  2606.6  A/m
300	0.059	0.32	H ≥  3020.6  A/m
400	0.046	0.73	H ≥  3020.6  A/m
500	0.034	0.32	H ≥  3020.6  A/m
600	0.029	0.21	H ≥  3020.6  A/m
720	0.021	0.76	H ≥  3020.6  A/m
815	0.0238	0.29	H ≥  3020.6  A/m
955	0.019	0.78	H ≥  3020.6  A/m

## 10.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

Όπως φάνηκε από τις εργαστηριακές μετρήσεις που έλαβαν χώρα, ο αισθητήρας fluxgate που υλοποιήθηκε είναι κατάλληλος για μονοδιάστατες μετρήσεις DC ασθενών μαγνητικών πεδίων. Με βάση τον παραπάνω πίνακα κρίνεται ως καταλληλότερη η διέγερση του σιδηρομαγνητικού πυρήνα με ρεύμα RMS τιμής 100 ή 200mA, καθώς με τις τιμές αυτές επιτυγχάνεται ο βέλτιστος συνδυασμός μεταξύ ευαισθησίας και γραμμικότητας. Σε περίπτωση ανάγκης προσδιορισμού ισχυρότερων πεδίων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ρεύματα διέγερσης μεγαλύτερα, με σημαντική υποβάθμιση όμως της ούτως ή άλλως σχετικά χαμηλής ευαισθησίας (σε σχέση με Fluxgates που χρησιμοποιούν ως πυρήνα άμορφα μαγνητικά υλικά ή παρόμοια κατεργασμένα ηλεκτρολυτικά κράματα).

Προς την κατεύθυνση της βελτίωσης των χαρακτηριστικών του μαγνητομέτρου, μπορεί να προταθεί η ανάπτυξη υμενίων FeNi από τα λουτρά που προτάθηκαν, πάνω σε ανθεκτικά υποστρώματα (ή σε λεπτά ελάσματα καθαρού χαλκού) ώστε να καταστεί δυνατή η θερμική κατεργασία τους με σκοπό την βελτίωση των μαγνητικών τους ιδιοτήτων. Προτείνεται επίσης διάταξη ηλεκτροαπόθεσης με δυνατότητα ταυτόχρονης εφαρμογής ισχυρού συνεχούς μαγνητικού πεδίου για αύξηση της μαγνητικής ανισοτροπίας των επικαλύψεων.

Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε ότι η ακρίβεια των μετρήσεων του αισθητήρα εξαρτάται από την ταχύτητα του κυκλώματος κωδικοποίησης χρόνου. Σαν παράδειγμα αναφέρουμε ότι στην περίπτωση που το κύκλωμα μέτρησης της διάρκειας των παλμών μπορεί να μετρήσει χωρίς σφάλματα χρόνους της τάξης των μερικών δεκάδων nsec, τότε το μαγνητόμετρο προσδιορίζει πεδία με τιμή κοντά στο μέσο γήινο μαγνητικό πεδίο, με μέγιστο σφάλμα περίπου 5%.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] David Jiles: Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Second Edition, Chapman & Hall
- [2] W. Göpel, J. Hesse, J.N. Zemel: Sensors, A Comprehensive Survey, Volume 5: Magnetic Sensors, VCH
- [3] P. Ripka, A. Tipek: Master Book On Sensors, Part B/Modular Courses On Modern Sensors, Leonardo Da Vinci Project CZ/PP – 134026/ BEN Technical Literature
- [4] Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith: Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα, 3<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- [5] Raymond A. Serway, Clement J. Moses, Curt A. Moyer: Σύγχρονη Φυσική, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης
- [6] Ιωάννης Ν. Αβαριτσιώτης: Τεχνολογία Αισθητήρων & Μικροσυστημάτων με Εργαστηριακές Ασκήσεις, Αθήνα 2003
- [7] Νικολάου Σ. Σπυρρέλη: Τεχνολογία Επιμεταλλώσεων, Αθήνα 1997
- [8] Γιουρούδη Ιωάννα: Πτυχιακή Εργασία: Ανάπτυξη Διάταξης Ηλεκτροαπόθεσης, Χαλκίδα 2002
- [9] Παναγιώτης Δ. Δημητρόπουλος: Διδακτορική Διατριβή: Μικροαισθητήρες Fluxgate
- [10] J. Y. Park & M. G. Allen: Development of magnetic materials and processing techniques applicable to integrated micromagnetic devices, J. Micromech. Microeng. 8(1998) 307 – 316
- [11] Virginia Costa Kieling: Parameters Influencing the electrodeposition of Ni-Fe alloys. Surface & Coatings Technology, 96(1997) 135 – 139
- [12] William P. Taylor, Michael Schneider, Henry Baltes, Mark G. Allen: A NiFeMo electroplating bath for micromachined structures. Electrochemical and Solid State letters. 2(12) 624 – 626 (1999)
- [13] N. V. Myung, D. Y. Park, M. Schwartz, K. Nobe, H. Yang, C.k. Yang, J.W. Judy: Electrodeposited Hard Magnetic Thin Films for MEMS Applications, Sixth International Symposium of Magnetic Materials, Processes and Devices, Proc. Electrochem. Soc. PV2000 - 29(2000)
- [14] J.G. Deak, R.H. Koch: A Dynamic Calculation of the responsivity of monodomain fluxgate magnetometers. IBM T.J. Watson Research Center
- [15] C. LeMéhauté, E. Rocher: Electrodeposition of stress-insensitive NiFe and NiFeCu Magnetic Alloys, IBM Journal, March 1965
- [16] N. Zech, D. Landolt: The influence of boric acid and sulfate ions on the hydrogen formation in Ni-Fe plating electrolytes, Electrochimica Acta 45(2000) 3461 - 3471/ PERGAMON
- [17] P. C. Andricacos, N. Robertson: Future Direction In electroplated materials for thin film recording heads, IBM Journal of Research and Development, Vol. 42, Number 5, 1998: Electrochemical Microfabrication
- [18] Tetsuya Osaka: Recent developments of magnetic recording head-core materials by plating method, Electrochimica Acta 44(1999) 3885 – 3890/PERGAMON
- [19] Animesh Jain: Overview of magnetic measurements techniques. US Particle Accelerator School on Superconducting Accelerator Magnets, California, Santa Barbara, June 23 – 27, 2003

