

# Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή .....	3
1.1 Μαγνητισμός.....	3
1.1.1 Προέλευση μαγνητισμού .....	3
1.1.2 Μαγνήτιση και θεμελιώδη συναφή μεγέθη .....	7
1.1.3 Ποσοτικοποίηση μαγνητικών ιδιοτήτων υλικών .....	8
1.1.4 Κατηγοριοποίηση υλικών βάσει μαγνητικών ιδιοτήτων .....	10
1.2 Σιδηρομαγνητισμός.....	13
1.2.1 Προέλευση και δομή σιδηρομαγνητών .....	14
1.2.2 Μηχανισμοί και ιδιότητες μαγνήτισης των σιδηρομαγνητών.....	20
1.2.3 Μαγνητοσυστολή .....	25
1.3 Είδη σιδηρομαγνητικών υλικών.....	27
1.3.1 Μαλακοί και σκληροί σιδηρομαγνήτες .....	27
1.3.2 Είδη και ιδιότητες μαλακών σιδηρομαγνητών .....	29
1.4 Άμορφα σιδηρομαγνητικά υλικά .....	31
1.4.1 Γενικά στοιχεία.....	31
1.4.2 Μέθοδοι παρασκευής άμορφων, μαγνητικά μαλακών υλικών .....	32
1.4.3 Τεχνικές κατασκευής άμορφων, σιδηρομαγνητικών συρμάτων.....	35
2. Το φαινόμενο της Γιγαντιαίας Μαγνητοεμπέδησης (Giant-Magneto Impedance, GMI) ...	40
2.1 Γενικά.....	40
2.2 Προέλευση: Η δημιουργία δινορευμάτων και το επιδερμικό φαινόμενο .....	40
2.3 Βασικές σχέσεις και γραφήματα.....	44
2.4 Επεξήγηση φαινομένου GMI.....	49
2.5 Επίδραση συχνότητας στο φαινόμενο GMI .....	50
2.6 Θεωρητικά μοντέλα περιγραφής GMI συμπεριφοράς .....	53
2.7 Ιδιότητες υλικών για εκδήλωση συμπεριφοράς GMI .....	55
2.8 Μαλακά, σιδηρομαγνητικά σύρματα με συμπεριφορά GMI .....	56
2.8.1 Άμορφα σύρματα ταχείας ψύξης.....	57
2.8.2 Σύρματα ηλεκτροαπόθεσης (ηλεκτρόλυσης).....	58
2.8.3 Άλλα υλικά.....	59
2.9 Μαγνητική δομή και ιδιότητες άμορφων συρμάτων με συμπεριφορά GMI .....	60
2.9.1 Δομή μαγνητικών περιοχών.....	60

2.9.2 Μαγνητικές ιδιότητες: Βρόχοι υστέρησης, διαπερατότητα, μαγνήτιση .....	63
2.10 Υστέρηση στο φαινόμενο GMI .....	67
3. Πειραματικό μέρος.....	69
3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης .....	69
3.2 Πειραματικές μετρήσεις.....	71
4. Συμπεράσματα .....	110
4.1 Μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων .....	110
4.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων βάσει του φαινομένου GMI.....	111
4.3 Προοπτικές του φαινομένου GMI.....	112
Βιβλιογραφία .....	115

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Μαγνητισμός

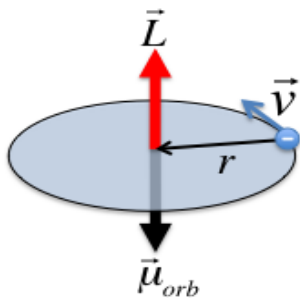
Οι μαγνητικές ιδιότητες της ύλης, ανέκαθεν, αποτελούσαν ένα από τα πλέον ενδιαφέροντα και χρήσιμα πεδία των φυσικών επιστημών. Τόσο η μαγνητοστατική όσο και ο ηλεκτρομαγνητισμός αποτελούν τα θεμέλια επιστημονικών και τεχνολογικών εφαρμογών τεράστιας σημασίας. Οι ηλεκτρικές μηχανές αποτελούν ένα τρανό παράδειγμα της παραπάνω θέσης, όπου συνδυάζεται η χρήση μόνιμων μαγνητικών υλικών και ηλεκτροφόρων αγωγών για σκοπούς ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας.

Ειδικότερα, η μαγνητοστατική αποτελεί τη βάση κάθε μελέτης σε συναφή θέματα. Κάποια από αυτά αξίζει να αναφερθούν έστω και ακροθιγώς στην εισαγωγή του παρόντος για μια ολοκληρωμένη εικόνα της θεωρητικής βάσης του αντικειμένου της παρούσας εργασίας.

### 1.1.1 Προέλευση μαγνητισμού

Η προέλευση του μαγνητισμού αποτελεί ένα κομμάτι της μαγνητοστατικής και εξηγείται με όρους κβαντομηχανικής και επιστήμης των υλικών.

Κάθε άτομο αποτελείται από ένα σύνολο στοιχειωδών μαγνητικών διπολικών ροπών οι οποίες οφείλονται στις περιστροφικές κινήσεις των ηλεκτρονίων του: πρώτα, της περιστροφικής κίνησης των σωματιδίων γύρω από τον πυρήνα του ατόμου και, ακολούθως, της ιδιοπεριστροφής κάθε σωματιδίου γύρω από τον άξονα του. Προφανώς, το διάνυσμα της στροφορμής κάθε ηλεκτρονίου αποτελείται, λοιπόν, από δύο-μη παράλληλες, εν γένει, συνιστώσες.



Σχήμα 1.1: Απεικόνιση της τροχικής μαγνητικής διπολικής ροπής. Παρατηρούμε ότι το διάνυσμα της στροφορμής είναι αντίθετης φοράς.

Θεωρώντας κάθε περιστρεφόμενο ηλεκτρόνιο σα μια στοιχειώδη ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος, είναι εύκολο να συνδεθεί σε τύπο η στροφορμή κάθε σωματιδίου με την αντίστοιχη συνεισφορά σε μαγνητική διπολική ροπή. Συνεπώς, όσον αφορά την τροχιακή μαγνητική διπολική ροπή, εάν θεωρηθεί ότι το ηλεκτρόνιο εκτελεί μια κυκλική κίνηση περί του ατομικού πυρήνα ακτίνας  $r$ , μπορεί να αντιστοιχισθεί προς μια στοιχειώδη ένταση ρεύματος ίση με:

$$I = -e \cdot (\omega / 2\pi),$$

όπου  $e$  : το στοιχειώδες αρνητικό ηλεκ. φορτίο.

Με μια μακροσκοπική θεώρηση, μπορεί να γίνει η σκέψη ότι αποτελεί ένα στοιχειώδη βρόχο ηλεκτρικού ρεύματος όπου εξ' ορισμού η μαγνητική διπολική ροπή είναι ίση με:

$$\mu = (I \cdot A) \eta,$$

όπου  $A$ : το εμβαδό του βρόχου και  $\eta$ : το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στο βρόχο με φορά σύμφωνη με τον κανόνα του δεξιόστροφου κοχλίου.

Με βάση τις δύο αυτές σχέσεις προκύπτει ότι:

$$\mu_o = -e \cdot (\omega \cdot r^2) / 2,$$

όπου orbital προέρχεται από την αγγλική απόδοση της λέξης τροχιακό.

Τέλος, αν συσχετιστεί η ως άνω σχέση με την τροχιακή στροφορμή  $L = m_e \cdot \omega \cdot r^2$ , προκύπτει ο τελικός τύπος:

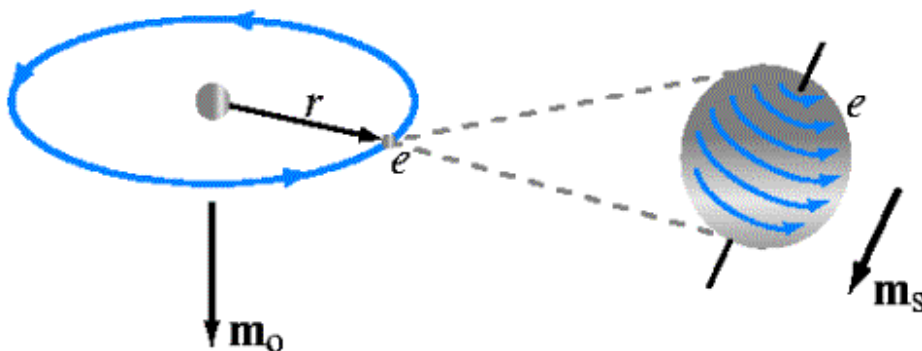
$$\mu_o = - (e / 2m_e) \cdot L = -\gamma \cdot L,$$

όπου  $\gamma$ : μια σταθερά γνωστή ως γυρομαγνητικός λόγος.

Με εντελώς όμοιο τρόπο, σχετίζεται η ιδιοστροφορμή  $S$  με τη μαγν. διπολική ροπή που συνεισφέρεται από την ιδιοπεριστροφή του ηλεκτρονίου και δίνεται από τη σχέση:

$$\mu_s = -\gamma \cdot S,$$

όπου  $S$ : η ιδιοστροφορμή.



Σχήμα 1.2: Η μαγνητική διπολική ροπή εξ ιδιοπεριστροφής σε αντιπαραβολή με τη αντίστοιχη συνεισφορά της περιστροφής γύρω από τον ατομικό πυρήνα.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να επισημανθούν τα εξής:

- Η μαγνητική διπολική ροπή αποτελεί είναι ένα στοιχειώδες μέγεθος το οποίο επεξηγεί τη συμπεριφορά των μαγνητικών υλικών σε μικροσκοπικό επίπεδο καθώς και διαδικασίες θεμελιώδους σημασίας όπως η μαγνήτιση ενός υλικού κ.α. Ο όρος ροπή αφορά στη συμπεριφορά ενός στοιχειώδους διπόλου -όπως είναι ένα ηλεκτρόνιο γύρω από τον ατομικό πυρήνα- να περιστρέφεται λόγω μιας υφιστάμενης ροπής όταν αυτό ευρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο έως ότου τελικά να τείνει να ευθυγραμμιστεί με αυτό.
- Τα μεγέθη της τροχιακής μαγνητικής διπολικής ροπής και της μαγν. διπολικής ροπής λόγω spin σχετίζονται άμεσα με δύο κβαντικούς αριθμούς, τον μαγνητικό κβαντικό αριθμό  $m_l$  και τον αριθμό μαγνητικού spin  $m_s$ . Οι δύο αυτοί αριθμοί συνδέονται μέσω τύπου με τα μεγέθη της στροφορμής  $L$  και ιδιοστροφορμής  $S$  και, συνεπώς, συσχετίζονται με τις στοιχειώδεις ποσότητες μαγνητισμού  $\mu_o$  και  $\mu_s$ . Οι αριθμοί έχουν διττό ρόλο καθώς, αφενός δίνουν την τιμή της στροφορμής -τροχιακής ο αριθμός  $m_l$  και ιδιοπεριστροφής spin ο αριθμός  $m_s$ - και, αφετέρου, αποτελούν τους δείκτες κβάντισης της μαγνητικής διπολικής ροπής. Ειδικότερα, ο μαγνητικός κβαντικός αριθμός συνδέεται με την τιμή της συνιστώσας της τροχιακής στροφορμής που κείται στην ίδια κατεύθυνση με ένα τυχόν εξωτερικό μαγνητικό πεδίο μέσω του τύπου:

$$L_z = m_l * \hbar,$$

όπου θεωρούμε την κατεύθυνση του εξωτ. πεδίου ταυτόσημη με τον άξονα  $z$  και  $\hbar$ : η ανηγμένη σταθερά του Planck.

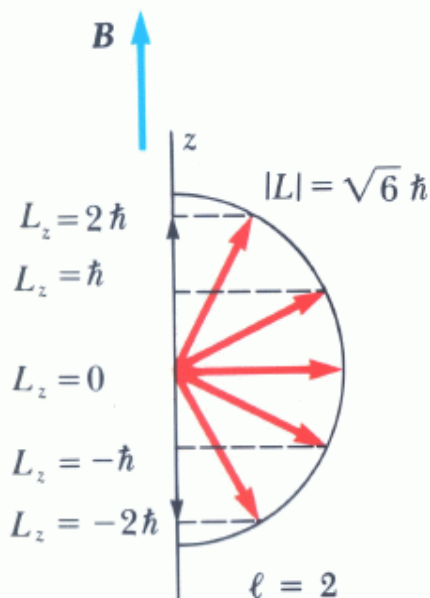
Συνεπώς, παρατηρείται μια κβάντιση στο διάνυσμα της τροχιακής στροφορμής του ηλεκτρονίου ώστε αυτό να μην καθίσταται δυνατό να ευθυγραμμιστεί πλήρως με ένα εξωτερικό μαγν. πεδίο. Η χωροκβάντωση αυτή υπαγορεύει ότι ένα στοιχειώδες μαγν. δίπολο όπως αυτό θα περιστραφεί έως ότου η συνιστώσα  $L_z$  γίνει μέγιστη αλλά πάντα μικρότερη της ολικής στροφορμής  $L$ .

Ομοίως, υφίσταται χωροκβάντωση ως προς την ιδιοστροφορμή και, συνεπώς, το μέγεθος  $\mu_s$ . Ο τύπος που ισχύει είναι ο εξής:

$$L_z^S = m_s * \hbar,$$

όπου  $L_z^S$ : η συνιστώσα της ιδιοστροφορμής στον άξονα  $z$  που ταυτίζεται, χωρίς βλάβη της γενικότητας, με την κατεύθυνση του εξωτ. πεδίου.

Παρατηρείται και εδώ μια χωροκβάντωση στο διάνυσμα της ιδιοστροφορμής και, μάλιστα, ακόμη αυστηρότερης αφού ο αριθμός  $m_s$  λαμβάνει μόνο τις τιμές  $\pm 1/2$ . Οπότε, η μέγιστη συνεισφορά της ιδιοστροφορμής που συσχετίζεται με την ανάπτυξη μαγνητικής διπολικής ροπής spin παράλληλα με ένα εξωτ. πεδίο είναι μειωμένη κατά ένα παράγοντα  $\sqrt{3}$  σε σχέση με τη μέγιστη τιμή της.



Σχήμα 1.3: Χωροκβάντωση διανύσματος στροφορμής λόγω τροχιακής περιστροφής. Το κόκκινο διάνυσμα είναι κάθετο στο επίπεδο της περιστροφής. Η περίπτωση αφορά σε τροχιακό τύπου  $d$  ( $l=2$ ).

- Σε ένα πραγματικό υλικό, ένα άτομο εμφανίζει συνολική μαγνητική διπολική ροπή η οποία, όμως, περιορίζεται ως προς τις συνεισφορές της με βάση τις εξής ιδιότητες:
  - Σε μια συμπληρωμένη υποστοιβάδα, η ύπαρξη τροχιακών με αντίθετο μαγνητικό κβαντικό αριθμό και ηλεκτρονίων με αντίθετο μαγνητικό αριθμό spin έχει ως αποτέλεσμα μια μηδενική συνισταμένη μαγνητική διπολική ροπή ως συνεισφορά.
  - Στα μέταλλα, τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στις εξωτερικές, μη συμπληρωμένες υποστοιβάδες βρίσκονται σε μια ενεργειακή ζώνη εκτός ατομικής επιρροής και ανήκουν σε όλη τη μάζα του υλικού. Εξ' αυτού, θεωρείται ότι η τροχιακή στροφορμή  $\mu_o$  καταστέλλεται και, γενικά, μελετάται η επίδραση της μόνο σε ειδικές περιπτώσεις.
  - Συνέπεια των παραπάνω είναι ότι ιδιαίτερη σημασία έχει η συνεισφορά της ιδιοπεριστροφής των ηλεκτρονίων σθένους στη μαγνητική διπολική ροπή που εμφανίζει ένα υλικό.
  
- Η μελέτη της μαγνητικής διπολικής ροπής σε ατομικό επίπεδο έχει αναδείξει την ελάχιστη ποσότητα μαγνήτισης που συναντάται στη φύση που ονομάζεται *μαγνητόνη του Bohr* και αντιστοιχεί στην  $\mu_s$  ενός και μόνου ηλεκτρονίου.

### 1.1.2 Μαγνήτιση και θεμελιώδη συναφή μεγέθη

Ο όρος μαγνήτιση επεξηγείται με βάση τα στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.1.1. Το μέγεθος ορίζεται ως η πυκνότητα μαγνητικής διπολικής ροπής ενός υλικού - ανά μονάδα όγκου. Εφόσον αποτελεί διανυσματικό μέγεθος, είναι προφανές ότι σχετίζεται άμεσα με εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγν. πεδίο το οποίο εφαρμόζεται σε τυχόν υλικό.

Ειδικότερα, η στοιχειώδης ποσότητα της ατομικής μαγνητική ροπής που συνεισφέρει στο ολικό διάνυσμα μαγνήτισης  $M$  είναι προϊόν της μετάπτωσης της προς το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο. Η τάση προς ευθυγράμμιση όλων των ατομικών διπόλων συντελεί στη μαγνήτιση του υλικού. Συνεπώς, ισχύει η σχέση:

$$M = \sum_i \mu_{\text{ατομ } i} / \Delta V,$$

όπου  $\mu_{\text{ατομ } i}$ : η ατομική μαγν. διπολική ροπή και  $\Delta V$ : ένα στοιχειώδης όγκος υλικού.

Πρόκειται για μια ξεκάθαρη σχέση αίτιου - αιτιατού που έχει και συγκεκριμένα αποτελέσματα σε μικροσκοπικό επίπεδο.

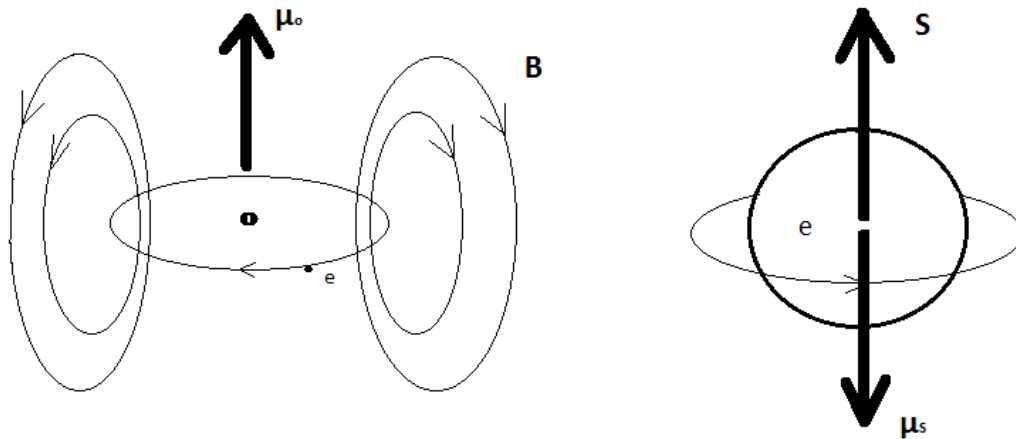
1. Ο παραλληλισμός των ατομικών διπόλων συντελεί στη δημιουργία επιφανειακών ρευμάτων στο εξωτερικό του υλικού.
2. Εντός του υλικού, το μαγνητικό πεδίου  $B$  έχει διαφορετική τιμή σε σχέση με το εξωτερικό. Ο λόγος είναι ότι εσωτερικά υπάρχει μια συνισταμένη μαγνητική διπολική ροπή. Έτσι, εντός του υλικού, το μαγνητικό πεδίο είναι ενισχυμένο κατά έναν παράγοντα ανάλογο της μαγνήτισης  $M$ . Ισχύει η σχέση:

$$B = B_{\text{εξωτ}} + \mu_0 * M,$$

όπου  $\mu_0$ : η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Ακόμη, καθίσταται προφανής ο διαχωρισμός μεταξύ της συνεισφοράς του εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου, για παράδειγμα από ένα σωληνοειδές το οποίο διαρρέεται από ηλεκ. ρεύμα δεδομένης έντασης, και της μαγνήτισης του ίδιου του υλικού.

Ο όρος  $B - \mu_0 * M$  αντιστοιχεί στην πρώτη συνεισφορά και συνδέεται άμεσα με το μέγεθος της έντασης του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου  $H$ , η οποία ισούται, κατά μέτρο, με την ανά μονάδα μήκους ένταση του ηλεκ. ρεύματος που τροφοδοτεί το σωληνοειδές που δόθηκε ως παράδειγμα παραπάνω. Συνεπώς, η μαγνητική επαγωγή είναι η απόκριση του μέσου στην επιβολή εξωτερικής διέγερσης την οποία αποτελεί το μαγνητικό πεδίο έντασης  $H$ .



Σχήμα 1.4: Απεικόνιση των περιστροφικών κινήσεων ενός ηλεκτρονίου. Η συμπεριφορά τους αυτή –τόσο στο τροχιακό όσο και στην ιδιοπεριστροφή- τους προσδίδει τα χαρακτηριστικά ενός στοιχειώδους δίπολου μαγνήτη. Ο βόρειος πόλος αντιστοιχεί στην αιχμή του βέλους του διανύσματος της διπολικής ροπής.

### 1.1.3 Ποσοτικοποίηση μαγνητικών ιδιοτήτων υλικών

Κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από δυο δείκτες, δηλαδή βαθμωτές ποσότητες που περιγράφουν τη συμπεριφορά του κατά την επιβολή ενός εξωτ. μαγνητικού πεδίου. Με άλλα λόγια, πρόκειται για μεγέθη που συσχετίζουν τις θεμελιώδεις παραμέτρους H, B και M στο εσωτερικό του υλικού.

Έτσι, ορίζονται οι εξής λόγοι:

$\mu = B/H$  : μαγνητική διαπερατότητα και

$\chi_m = M/H$  : μαγνητική επιδεκτικότητα του υλικού.\*

Ο δείκτης  $\mu$  αποτελεί ένα μέτρο του βαθμού διείσδυσης - διαπερατότητας ενός εξωτ. επιβαλλόμενου πεδίου στο εσωτερικό του υλικού, δηλαδή εκτιμά την απόκριση του υλικού ως προς την πυκνότητα μαγνητικής ροής που αναπτύσσεται εντός. Ένας εναλλακτικός τύπος ορίζει τη σχέση της μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu$  με τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_r$  ως εξής:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0.$$

Συνεπώς, η μαγν. διαπερατότητα εκτιμά το ποσοστό αύξησης αυτού σε σχέση με την τιμή στο κενό για την αυτή διέγερση.

Ο δείκτης της μαγν. επιδεκτικότητας αφορά, αποκλειστικά, την επίδραση ενός εξωτερικού πεδίου έντασης H στη μαγνήτιση M που παρουσιάζει το υλικό. Γρήγορη και έντονη



ανταπόκριση του υλικού συνεπάγεται υψηλών τιμών επιδεκτικότητας. Με βάση τη θεμελιώδη σχέση που συνδέει τα μεγέθη  $M$ ,  $H$  και  $B$  προκύπτει εύκολα και η σχέση μεταξύ του δείκτη της επιδεκτικότητας και της σχετικής διαπερατότητας  $\mu_r$ :

$$\mu_r = 1 + \chi_m.$$

Οι δύο βασικοί δείκτες εξαρτώνται άμεσα από τη φύση του υλικού, σε βαθμό που αποτελούν τα κριτήρια κατηγοριοποίησης των υλικών ως προς τις μαγνητικές τους ιδιότητες, και, εν γένει, δεν είναι σταθερές ποσότητες αλλά εξαρτώνται μη γραμμικά και από παράγοντες όπως η ένταση ενός εξωτ. μαγνητικού πεδίου, η θερμοκρασία κ.α.

Συνοψίζονται τις βασικά μεγέθη που διέπουν το φαινόμενο του μαγνητισμού:

Μέγεθος	Μονάδες	Σημασία
Μαγνητική επαγωγή $B$	Tesla ( $\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}$ )	Ορίζεται ως η πυκνότητα μαγν. ροής διαμέσου ενός υλικού. Βάσει της σχέσης Lorentz, δηλώνει την επενέργεια ενός μαγν. πεδίου σε κινούμενους φορείς ηλεκτρισμού.
Ένταση μαγνητικού πεδίου $H$	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	Βάσει ορισμού, σχετίζεται άμεσα με ρεύματα αγωγιμότητας που δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο. Λειτουργεί ως αίτιο της ύπαρξης μαγν. επαγωγής $B$ εντός υλικού.
Μαγνήτιση $M$	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ ( $=\text{A} \cdot \text{m}^2 / \text{m}^3$ )	Ορίζεται σαν πυκνότητα μαγν. διπολικής ροπής. Αποτελεί την αντίδραση του υλικού σε εξωτερική διέγερση έντασης $H$ και καθορίζει τη συνεισφορά του στη μαγν. επαγωγή $B$ στο εσωτερικό του.
Μαγνητική διαπερατότητα $\mu$	H (Henry)	Αποτελεί μέτρο του βαθμού που διεισδύει ένα μαγν. πεδίο έντασης $H$ ένα υλικό, δημιουργώντας επαγωγή $B$ .
Μαγνητική επιδεκτικότητα $\chi_m$	-	Αποτελεί μέτρο της απόκρισης του υλικού σε όρους μαγνήτισης, δηλαδή της τάσης των στοιχειωδών διπόλων του να ευθυγραμμίζονται με εξωτερικό πεδίο.
Διπολική μαγνητική ροπή $\mu_m$	$\text{A} \cdot \text{m}^2$	Αποτελεί ένα στοιχειώδες μέγεθος που καθορίζει πόσο ισχυρό είναι ένα μαγν. δίπολο (ζεύγος νότιου-βόρειου πόλου) που δημιουργείται από κίνηση ηλεκτρικών φορέων (π.χ. άτομο, μόριο)

Πίνακας 1.1: Βασικά μεγέθη μαγνητισμού

\* : Σημειώνεται ότι οι εν λόγω σχέσεις είναι δυνατόν να βασίζονται σε μεγέθη διαπερατότητας - επιδεκτικότητας υπό τη μορφή τανυστών. Αυτό σημαίνει ότι τα μεγέθη  $B$ ,  $H$  και  $M$  δεν είναι κατ' ανάγκη παράλληλα και ότι υπάρχει μια πολύπλοκη σχέση μεταξύ των συνιστωσών τους σε τυχόν, θεωρούμενο σύστημα συντεταγμένων.

### **1.1.4 Κατηγοριοποίηση υλικών βάσει μαγνητικών ιδιοτήτων**

Τα υλικά διακρίνονται σε πέντε κατηγορίες με βάση τη συμπεριφορά τους κατά τη προσπάθεια να μαγνητιστούν σε συγκεκριμένη κατεύθυνση αλλά και την εσωτερική δομή τους ως προς τη συνολική μαγνητική διπολική ροπή τους, σε κατάσταση ηρεμίας. Σε κάθε κατηγορία αντιστοιχούν δεδομένα εύρη τιμών για το δείκτη της μαγνητικής επιδεκτικότητας (και, συνακόλουθα των υπολοίπων μεγεθών).

- **Διαμαγνητισμός**

Υλικά που εμφανίζουν διαμαγνητική συμπεριφορά έχουν αρνητική και πολύ μικρή, κατ'απόλυτο τιμή, επιδεκτικότητα που δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. Με μια απλή ματιά, στις σχέσεις που δόθηκαν παραπάνω, συμπεραίνεται ότι μαγνητίζονται πολύ λίγο και με αντίθετη φορά από εκείνη του εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου. Εν ολίγοις, ανθίστανται στη διείσδυση της μαγνητικής επαγωγής  $B_{\text{εξωτ}}$  εντός του υλικού.

Σε κατάσταση ηρεμίας, δεν εμφανίζουν μόνιμη, συνισταμένη διπολική ροπή καθώς δεν περιέχουν στοιχειώδεις μαγνητικές διπολικές ροπές. Με βάση, τη θεωρία της ενότητας 1.1.1, καθίσταται προφανές ότι πρόκειται για υλικά με συμπληρωμένες στοιβάδες και υποστοιβάδες σε ατομικό επίπεδο. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι τα ευγενή αέρια, ομοιοπολικοί και ιοντικοί κρύσταλλοι, το νερό κ.α.

- **Παραμαγνητισμός**

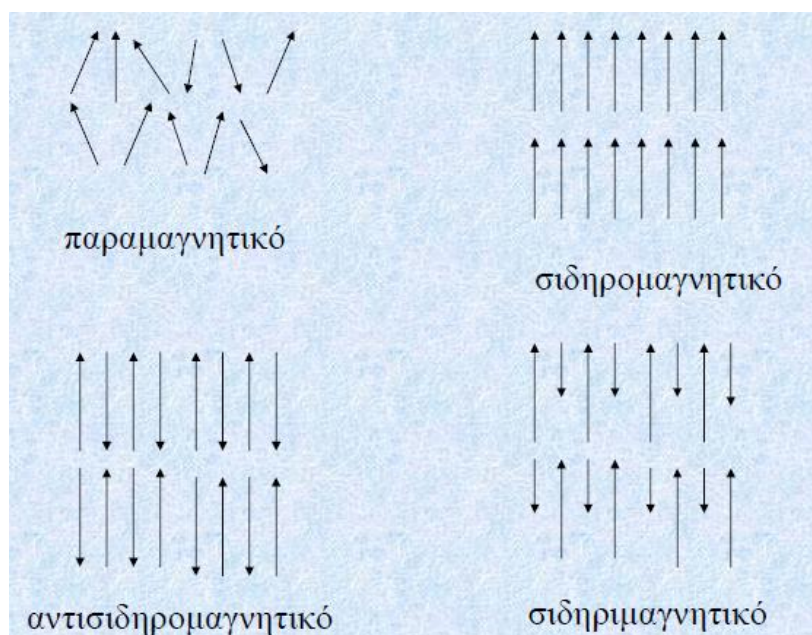
Η παραμαγνητική συμπεριφορά συνεπάγεται μικρής και θετικής επιδεκτικότητας, που είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας και μπορεί να φτάσει έως και την τιμή  $10^{-3}$ . Το συμπέρασμα είναι ότι, κατά τη μαγνήτιση, αυτά τα υλικά αποκτούν ένα συνισταμένο διάνυσμα  $M$ , το οποίο όμως είναι πολύ μικρότερο της έντασης του πεδίου  $H$ . Εν ολίγοις, το εξωτερικό πεδίο διεισδύει σε μικρό βαθμό εντός του υλικού.

Σε κατάσταση ηρεμίας, υπάρχουν μόνιμες, στοιχειώδεις μαγνητικές διπολικές ροπές που όμως αλληλοαναιρούνται λόγω τυχαίου προσανατολισμού δίνοντας συνισταμένη  $M=0$ . Παραμαγνητικά υλικά είναι κάποια μέταλλα όπως το μαγνήσιο καθώς και κάποια διατομικά στοιχεία όπως το οξυγόνο. Ακόμη, παραμαγνητική συμπεριφορά εμφανίζουν υλικά άλλων κατηγοριών πάνω από κάποιες θερμοκρασίες αναφοράς, για παράδειγμα το χρώμιο που είναι αντισηρομαγνητικό υλικό.

Διευκρινίζεται ότι στις επόμενες κατηγορίες ένα σημαντικό στοιχείο αποτελεί η ύπαρξη *μαγνητικής τάξης*. Ο όρος αυτός συνδέεται με την ύπαρξη μόνιμων στοιχειωδών διπολικών ροπών εντός του υλικού οι οποίες μάλιστα διατάσσονται αυθόρμητα σε παράλληλους ή αντιπαράλληλους σχηματισμούς δημιουργώντας χωρικά επαναλαμβανόμενες δομές διπόλων.

Η μαγνητική τάξη, επειδή ακριβώς συνδέεται με αυθόρμητη συμπεριφορά του υλικού, επηρεάζεται αποκλειστικά από τη θερμοκρασία. Εν συντομία, υπάρχει μια

Θερμοκρασία αναφοράς πάνω από την οποία, ανάλογα με την κατηγορία του υλικού, αυτό χάνει τη μαγνητική τάξη στο εσωτερικό του.



Σχήμα 1.5: Απεικόνιση μαγνητικής τάξης ανά κατηγορία μαγνητικού υλικού. Παρατηρείται εύκολα η απουσία μαγνητικής τάξης στην παραμαγνητική συμπεριφορά.

- Σιδηρομαγνητισμός (Φερρομαγνητισμός)

Η σιδηρομαγνητική συμπεριφορά συνεπάγεται αυθόρμητης μαγνήτισης, δηλαδή εντός του υλικού υπάρχει μαγνητική τάξη τέτοια ώστε να δημιουργείται συνιστάμενο, μη μηδενικό διάνυσμα μαγνήτισης, απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, χαρακτηρίζονται από θετική και πολύ μεγάλη (θεωρητικά άπειρη) επιδεκτικότητα. Επίσης, η διαπερατότητα των υλικών αυτών επηρεάζεται έντονα από τυχόν, επιβαλλόμενο εξωτερικό πεδίο και η βεβιασμένη μαγνήτιση τους αποτελεί ένα μη γραμμικό φαινόμενο.

Η δομή των σιδηρομαγνητικών υλικών και η συμπεριφορά υπό την επίδραση εξωτερικού πεδίου θα μελετηθεί αναλυτικά σε επόμενη ενότητα.

- Αντισιδηρομαγνητισμός

Όπως δηλώνει ο όρος, πρόκειται για μια οικογένεια υλικών που παρουσιάζουν μαγνητική τάξη τέτοια (όπως παρατηρείται και στο σχήμα 1.5) ώστε τα στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα που περιέχουν να έχουν τέτοιο, αυστηρά προκαθορισμένο

προσανατολισμό ώστε να αλληλοαναιρούνται. Έτσι, δεν παρουσιάζουν αυθόρμητη μαγνήτιση.

Σε συνθήκες πόλωσης από εξωτερικό πεδίο, τα υλικά εμφανίζουν μικρή, αλλά θετική μαγνητική επιδεκτικότητα. Έτσι, παρουσιάζουν μαγνήτιση που όμως είναι πολύ μικρή σε σχέση με το επιβαλλόμενο πεδίο.

Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι το χρώμιο (σε διάταξη BCC), το μαγγάνιο, οξειδία μεταβατικών μετάλλων όπως MnO, CoO, NiO κ.α.

- Σιδηριμαγνητισμός (Φερριμαγνητισμός)

Η συμπεριφορά των υλικών αυτής της κατηγορίας προσομοιάζει στο φερρομαγνητισμό, υπό την έννοια ότι παρουσιάζουν αυθόρμητη μαγνήτιση λόγω μαγνητικής τάξης, ενώ εμφανίζουν μεγάλη, θετική διαπερατότητα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5, η μαγνητική τάξη περιγράφεται από στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα δεδομένου, αντιπαράλληλου προσανατολισμού που, όμως, δεν αλληλοαναιρούνται εξαιτίας διπολικών ροπών διαφορετικού μέτρου.

Τα πιο διαδεδομένα υλικά σε αυτή την κατηγορία είναι οι φερρίτες Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

1																	2		
H	<input type="checkbox"/> Ferromagnetic <input type="checkbox"/> Antiferromagnetic																He		
3	4													5	6	7	8	9	10
Li	Be													B	C	N	O	F	Ne
11	12													13	14	15	16	17	18
Na	Mg													Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86		
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
87	88	89																	
Fr	Ra	Ac																	
			58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			

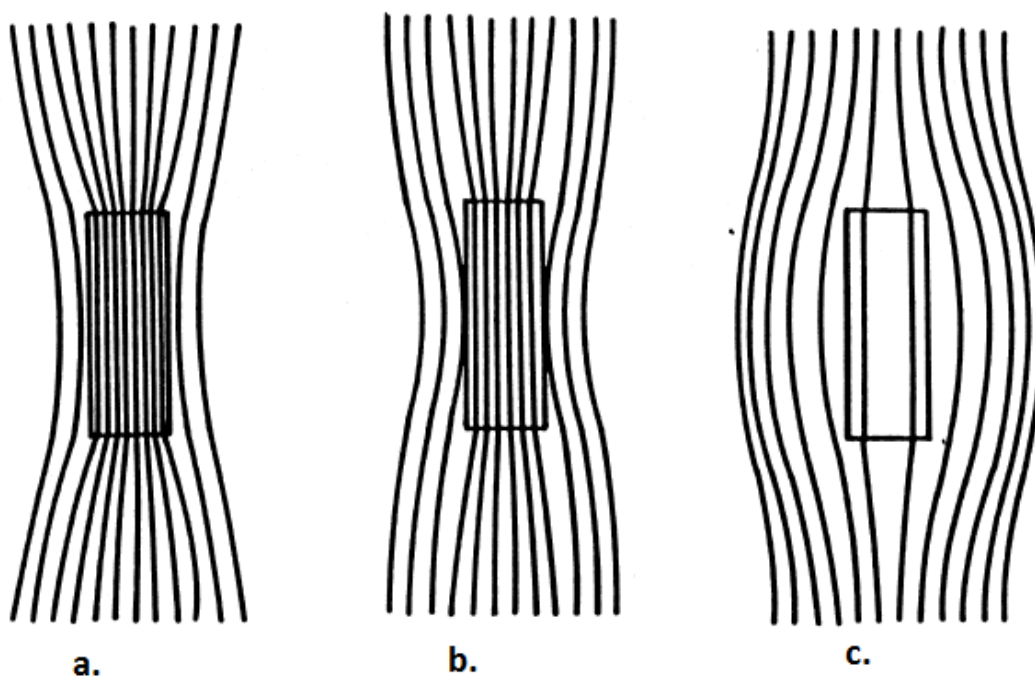
Σχήμα 1.6: Κατηγοριοποίηση στοιχείων περιοδικού πίνακα αναλόγως της μαγνητικής συμπεριφοράς τους. Το στοιχείο Gd, γαδολίνιο αναφέρεται στη βιβλιογραφία επίσης σαν ένας σιδηρομαγνήτης.

Όσον αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας στην τιμή της επιδεκτικότητας, συνεπώς, και της διαπερατότητας  $\mu_r$  και της μαγνήτισης  $M$  στις τρεις τελευταίες κατηγορίες, είναι σημαντικό να αναφέρουμε τα εξής:

- ο Υπάρχουν κρίσιμες τιμές θερμοκρασίας για τα σιδηρομαγνητικά-σιδηριμαγνητικά υλικά και αντισιδηρομαγνητικά υλικά, πάνω από τις οποίες χάνουν τη μαγνητική

τους τάξη και εμφανίζουν παραμαγνητική συμπεριφορά. Πρόκειται για τη θερμοκρασία Curie,  $T_c$  για τα πρώτα και τη θερμοκρασία Néel,  $T_N$  για τα δεύτερα.

- Αντίστοιχα, η εξάρτηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας, σε περίπτωση που επιβάλλεται και εξωτερικό πεδίο, από τη θερμοκρασία είναι αντιστρόφως ανάλογη για τιμές άνω των κρίσιμων και δείχνουν τη δυσκολία να μαγνητιστεί το υλικό από εξωτερική διέγερση.
- Η γενική ιδέα που διέπει την ως άνω συμπεριφορά είναι ότι με αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνονται και οι πλεγματικές ταλαντώσεις στο υλικό με συνέπεια την διαταραχή της μαγνητικής τάξης των στοιχειωδών μαγνητικών διπολικών ροπών και τη δυσκολία τους να αποκριθούν σε μια εξωτερική διέγερση.



Σχήμα 1.7: Απεικόνιση της διείσδυσης ενός μαγνητικού πεδίου μέσω δυναμικών γραμμών μαγνητικής επαγωγής  $B$  εντός *a)* σιδηρομαγνητικού, *b)* παραμαγνητικού και *c)* διαμαγνητικού υλικού.

## 1.2 Σιδηρομαγνητισμός

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούν τα πλέον διαδεδομένα μαγνητικά υλικά και βρίσκουν χρήση στις σημαντικότερες τεχνολογικές εφαρμογές όπως είναι η παραγωγή, διανομή και μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, σε συστήματα ηλεκτρικής κίνησης κ.α. Η βασική και πλέον χρήσιμη ιδιότητα τους είναι η μεγάλη διαπερατότητα τους που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μαγνητικής επαγωγής  $B$  μεγάλης τιμής ακόμη και με την επιβολή μαγνητικού πεδίου μικρής έντασης  $H$ . Όπως, είναι γνωστό η χρονική παράγωγος της επαγωγής  $B$ , δηλαδή της πυκνότητας μαγνητικής ροής, συνδέεται με τη δημιουργία ηλεκ. τάσης με

επαγωγή (νόμος Faraday). Συνεπώς, μεγάλες μεταβολές της επαγωγής συνεπάγονται και ανάπτυξη έντονης μαγνητικής ροής και ηλεκ. δυναμικού. Τα μαγνητικά κυκλώματα, λοιπόν, αποκτούν αξία ταυτόσημη με αυτή των ηλεκτρικών κυκλωμάτων σε συναφείς εφαρμογές όπως, επίσης, και η μελέτη τους.

Πέραν των ενεργειακών εφαρμογών, η παραπάνω ιδιότητα μαζί με αυτή της αυθόρμητης, παραμένουσας μαγνήτισης απουσία εξωτερικού πεδίου, αλλά και άλλων σχεδόν μοναδικών μαγνητικών ιδιοτήτων καθιστά τα υλικά αυτά κατάλληλα και για εφαρμογές αυτοματισμών, αισθητηρίων διατάξεων κ.α.

Θα δοθούν στις επόμενες ενότητες κάποια βασικά σημεία για την προέλευση της φερρομαγνητικής συμπεριφοράς και της δομής των υλικών που την παρουσιάζουν.

### **1.2.1 Προέλευση και δομή σιδηρομαγνητών**

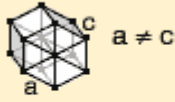


Η δομή ενός σιδηρομαγνητικού υλικού καθορίζεται από τέσσερις παράγοντες που έχουν άμεση σχέση με την θεμελιώδη έννοια της ελαχίστης ενεργειακής κατάστασης. Οι παράγοντες αναφέρονται ως εξής:

1. Η κβαντομηχανική έννοια της *ενέργειας αλληλεπίδρασης ανταλλαγής* συνιστά τη θεμελιώδη αρχή διάταξης των στοιχειωδών ατομικών, μαγνητικών δίπολων. Έτσι, περιγράφεται επαρκώς ο τρόπος που τα ηλεκτρόνια σθένους ενός σιδηρομαγνητικού υλικού διατάσσονται αυθόρμητα, δημιουργώντας παραμένουσα μαγνήτιση.
2. Το μέγεθος της μαγνητοστατικής ενέργειας και η ελαχιστοποίηση αυτού καθορίζει σε πιο μακροσκοπικό επίπεδο το σχηματισμό και τη διάταξη διακριτών περιοχών εντός του υλικού. Οι περιοχές διαφέρουν ως προς τη μόνιμη μαγνήτιση τους.
3. Μια ακόμη ενεργειακή συνεισφορά, αυτή της μαγνητοκρυσταλλικής ενέργειας καθορίζει τον τρόπο που συμπεριφέρεται μικροσκοπικά το υλικό τόσο στις διακριτές περιοχές τους όσο και στα όρια μεταξύ των.
4. Ο παράγοντας της μαγνητοσυστολικής ενέργειας αποτελεί μια πρόσθετη ενεργειακή συνεισφορά που περιγράφει την ελαστική συμπεριφορά του υλικού σε περίπτωση εξωτερικής επιβολής πεδίου.

Άμεσα, συνδέεται με την προέλευση του σιδηρομαγνητισμού και, κατ'επέκτασιν, της χαρακτηριστικής μαγνητικής τάξης αυτών των υλικών ο πρώτος παράγοντας. Ειδικότερα, στα σιδηρομαγνητικά, μεταβατικά μέταλλα σίδηρο Fe, κοβάλτιο Co και νικέλιο Ni υπάρχει μη συμπληρωμένη υποστοιβάδα 3d με πέντε τροχιακά. Ημισυμπληρωμένα είναι 4 τροχιακά σε ένα απομονωμένο άτομο σιδήρου, 3 τροχιακά σε άτομο κοβαλτίου και 2 σε άτομο νικελίου. Η συμπεριφορά αυτή υπάγεται στις γενικές κβαντομηχανικές αρχές του κανόνα του Hund και της απαγορευτικής αρχής του Pauli για την συμπλήρωση των τροχιακών μιας μη συμπληρωμένης υποστοιβάδας. Προφανώς, οι αρχές αυτές συνεπάγονται χαμηλότερης

ενεργειακής κατάστασης. Το συμπέρασμα, λοιπόν, είναι ότι το να διατάσσονται με τρόπο ώστε να έχουν διαφορετικό  $m_l$  (διαφορετικό τροχιακό), πρωτίστως συνεπάγεται μικρότερης ηλεκτροστατικής αλληλεπίδρασης των ηλεκτρονίων. Παρατηρείται δηλαδή μια εξάρτηση της μαγνητικής διπολικής ροπής τους με την αλληλεπίδραση Coulomb μεταξύ τους.

Στην περίπτωση των κρυσταλλικών υλικών, υπάρχει η ίδια ακριβώς αλληλεπίδραση που επιτάσσει τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας, πλέον, που κυκλοφορούν ελεύθερα στο υλικό να διατηρούν πρωτίστως παράλληλο spin καταλαμβάνοντας διαφορετικές κυματοσυναρτήσεις. Με αυτό τον τρόπο, μειώνεται η συνολική αλληλεπίδραση Coulomb μεταξύ των ηλεκτρονίων και των θετικών ιόντων.

<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Crystal Structure:</b> Hexagonal</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Electron Configuration:</b> <math>1s^2 2s^2 p^6 3s^2 p^6 d^7 4s^2</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Crystal Structure:</b> Cubic body centered</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Electron Configuration:</b> <math>1s^2 2s^2 p^6 3s^2 p^6 d^6 4s^2</math></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Crystal Structure:</b> Cubic face centered</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Electron Configuration:</b> <math>1s^2 2s^2 p^6 3s^2 p^6 d^8 4s^2</math></li> </ul>	<p>Σχήμα 1.8: Τρισδιάσταση κυψελοειδής δομή και ηλεκτρονιακή δομή των τριών μεταβατικών μετάλλων Fe, Co και Ni.</p>

Συνεπώς, είτε πρόκειται για μεμονωμένα είτε για κρυσταλλικώς διατεταγμένα άτομα, στα τρία προαναφερθέντα μέταλλα υπάρχει μια τάση για μόνιμη ευθυγράμμιση των στοιχειωδών μαγνητικών διπόλων τους και παραμένουσα μαγνήτιση. Παρ'όλα αυτά, προκύπτει το εξής ερώτημα: για ποιο λόγο άλλα μέταλλα π.χ. όπως το χρώμιο που διαθέτει μη συμπληρωμένη υποστοιβάδα 3d δεν εμφανίζει την ίδια συμπεριφορά;

Η απάντηση θα εξηγήσει στον αναγνώστη την έννοια της αλληλεπίδρασης ανταλλαγής που βασίζεται στις κβαντομηχανικές αρχές που δόθηκαν στις παραπάνω παραγράφους.

Η ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση ανταλλαγής μεταξύ ατόμων σε ένα κρυσταλλικό πλέγμα περιγράφεται ενεργειακά από μια σχέση της μορφής:

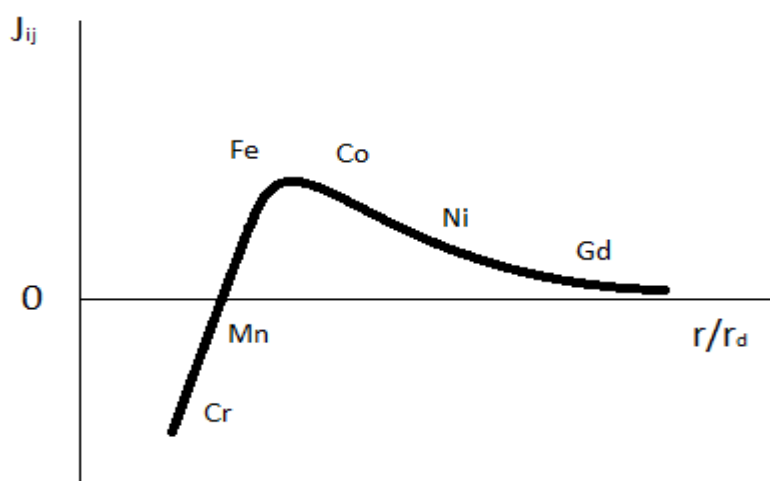
$$E_{ex} = -2 \sum_{ij} (J_{ij} * S_i * S_j),$$

όπου  $J_{ij}$  : ο συντελεστής ή ολοκλήρωμα ανταλλαγής το πρόσημο του οποίου καθορίζει τη συμπεριφορά του υλικού μικροσκοπικά.

Καθίσταται προφανές ότι για θετικές τιμές του ολοκληρώματος, γειτονικά ηλεκτρονιακά δίπολα με παράλληλη ιδιοπεριστροφή συνεπάγονται χαμηλής ενέργειας, ενώ για αρνητικές τιμές ευνοείται ενεργειακά η διάταξη των διπόλων με αντιπαράλληλη ιδιοπεριστροφή.

Ο συντελεστής περιγράφει πλήρως την ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση ανάλογα με το υλικό που αφορά. Η διαφοροποίηση έγκειται στη διατομική απόσταση, μια ιδιότητα που είναι μοναδική και χαρακτηριστική για κάθε υλικό. Έτσι, για το σίδηρο π.χ. ο συντελεστής έχει θετική τιμή, καθότι ο λόγος της ακτίνας του τροχιακού τύπου  $d$  όπου κινούνται τα ηλεκτρόνια σθένους προς τη διατομική απόσταση στο κρυσταλλικό πλέγμα έχει μια ορισμένη τιμή. Οι αντίστοιχοι λόγοι για το νικέλιο και το κοβάλτιο οδηγούν και πάλι σε θετικό συντελεστή. Εν αντιθέσει, η αντισιδηρομαγνητική συμπεριφορά που ορίζεται από μαγνητική τάξη αντιπαράλληλων spin διέπεται από αρνητικές τιμές του συντελεστή ανταλλαγής λόγω συγκεκριμένων λόγων ακτίνας τροχιακού  $d$  προς διατομική απόσταση.\*\*

Κατά συνέπεια, διακρίνονται η αλληλεπίδραση ανταλλαγής μεταξύ των ηλεκτρονίων του αυτού ατόμου, τη λεγόμενη ενδοατομική αλληλεπίδραση ανταλλαγής ή μικρής κλίμακας και την αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτρονίων γειτονικών ατόμων σε ένα κρύσταλλο που αναφέρεται ως διατομική αλληλεπίδραση ανταλλαγής ή μεγάλης κλίμακας.



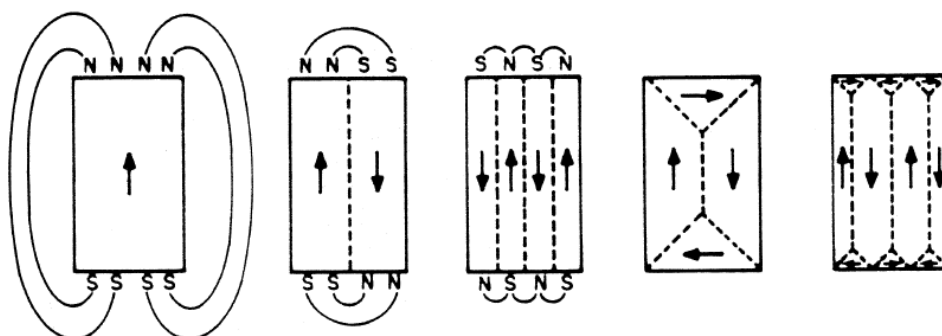
Σχήμα 1.9: Τιμή συντελεστή ανταλλαγής συναρτήσει αύξοντος λόγου ακτίνας τροχιακού  $d$  (f για το Gd) προς διατομική απόσταση. Καμπύλη Bethe-Slater. Επί της καμπύλης σημειώνονται οι χαρακτηριστικές θέσεις που αντιστοιχούν σε κάποια ενδιαφέροντα μέταλλα.

\*\* : Ο λόγος των δυο αυτών μεγεθών αποτελεί ένα μέτρο της διαφοροποίησης μεταξύ σιδηρομαγνητικών και μη υλικών. Επιλέον, υπάρχει το μοντέλο άκαμπτης ζώνης (rigid-band model) που συσχετίζει τη στάθμη Fermi, τη σχετική θέση αυτής ενεργειακά με τις ζώνες των υποστοιβάδων  $4s$ ,  $3d$  και το ατομικό βάρος κάθε μεταλλικού υλικού με την ενέργεια ανταλλαγής.



Ο παράγοντας της μαγνητοστατικής ενέργειας καθορίζει σε πιο μακροσκοπικό επίπεδο τη δομή των σιδηρομαγνητικών υλικών. Βασίζεται στη θεμελιώδη παραδοχή ότι κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό ικανών διαστάσεων διαιρείται εσωτερικά σε περιοχές που διατηρούν μόνιμη, παραμένουσα μαγνήτιση διαφορετικής κατεύθυνσης μεταξύ τους. Την ύπαρξη των περιοχών αυτών και των τοιχωμάτων που κείνται στα όρια τους ήταν ο Γάλλος φυσικός Pierre-Ernest Weiss. Ο Weiss πρότεινε τη θεωρία του μέσου πεδίου το 1907 προκειμένου να εξηγήσει το παραλληλισμό των στοιχειωδών μαγν. διπόλων μέσα σε έναν σιδηρομαγνήτη και, παράλληλα, θεμελίωσε την έννοια της μαγνητικής περιοχής. Αυτή ήταν και η κυριότερη συμβολή του καθώς όπως διαπιστώθηκε παραπάνω η έννοια της αλληλεπίδρασης ανταλλαγής ξεπέρασε τη θεωρία του.

Η ύπαρξη μαγνητικών περιοχών αυτομάτως θέτει θέμα ελαχιστοποίησης της μαγνητοστατικής ενέργειας για ένα κομμάτι μονοκρυσταλλικού, για παράδειγμα, σιδήρου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8, είναι απαραίτητη η αυθόρμητη διαίρεση του υλικού σε περισσότερες της μιας περιοχές ούτως ώστε το μαγνητικό πεδίο που προκαλεί το τεμάχιο του υλικού να εξαλειφθεί. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας διαδρομών μαγνητικής ροής εντός του υλικού. Έτσι, θα ελαχιστοποιηθεί και η δυναμική μαγνητική ή μαγνητοστατική ενέργεια.



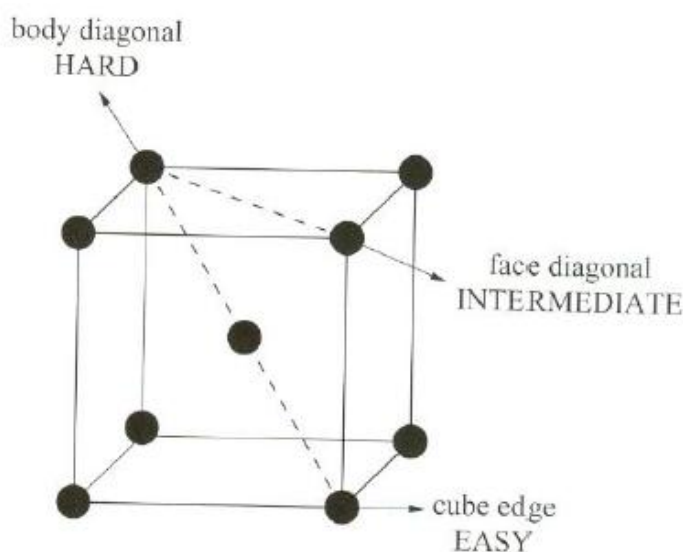
Σχήμα 1.10: Διαίρεση σιδηρομαγνητικού υλικού σε περιοχές Weiss διαφορετικής μαγνήτισης. Η τελευταία διάταξη είναι ενεργειακά προτιμητέα και μορφοποιείται αυθόρμητα.

Ο προσανατολισμός και η συνοχή των περιοχών είναι σχετικά απλοί. Αποτελούνται από ευρείες περιοχές αντιπαράλληλης μαγνήτισης στα όρια των οποίων υπάρχουν τοιχώματα, τα λεγόμενα τοιχώματα Bloch, όπου γίνεται με απειροελάχιστα βήματα η αντιστροφή της συνισταμένης μαγνήτισης. Ακριβώς, επειδή περιέχουν πλήρη αντιστροφή των στοιχειωδών ροπών σε ατομικό επίπεδο, λέγονται τοιχώματα  $180^\circ$ . Εκτός των περιοχών με συγγραμμική μαγνήτιση, υπάρχουν και περιοχές μικρότερων διαστάσεων με μαγνήτιση κάθετη των αρχικών. Οι περιοχές αυτές λέγονται περιοχές εγκλεισμού και, κατ'άναλογο τρόπο, συνδέονται με τις τις κύριες μέσω τοιχωμάτων  $90^\circ$ .

Εν γένει, αναλόγως του μεγέθους και του σχήματος του υλικού, η διαίρεση των περιοχών μπορεί να γίνει πολυπλοκότερη έως ότου επέλθει ελαχιστοποίηση της μαγνητοστατικής ενέργειας. Η συνολική μαγνήτιση ενός τέτοιου κρυσταλλικού υλικού είναι μηδέν. Σημειώνεται ότι σε περίπτωση πολύ μικρών διαστάσεων τεμαχίου ενεργειακά προτιμητέα είναι η διάταξη σε μια ενιαία μαγνητισμένη περιοχή (οπότε και προφανώς η ολική μαγνήτιση είναι μη μηδενική).

Ο τρίτος παράγοντας αφορά στην ενεργειακή συνεισφορά της *μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας*. Πρόκειται για έναν όρο που έχει βάση στο κβαντομηχανικό φαινόμενο της *σύζευξης spin-τροχιακού*.

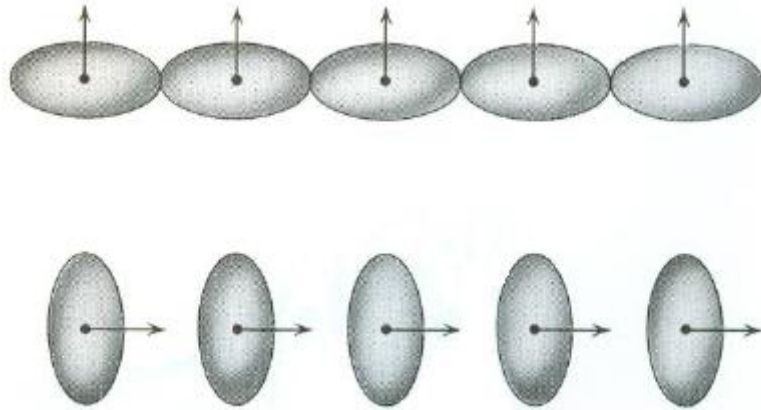
Η ανισοτροπία είναι ένας γενικός όρος που περιγράφει την χωρική εξάρτηση μιας ιδιότητας ενός υλικού μέσου. Στα μαγνητικά υλικά, περιγράφει την προτίμηση που δείχνουν τα σιδηρομαγνητικά υλικά να μαγνητίζονται σε συγκεκριμένους κρυσταλλογραφικούς άξονες. Αυτό σημαίνει ότι η αυθόρμητη μαγνήτιση τους κείται *πάντα* σε έναν από αυτούς τους άξονες (για παράδειγμα στο σίδηρο είναι οι άξονες της ομάδας <100>, δηλαδή παράλληλα με τις ακμές του κυβικού πλέγματος) ενώ κατά την βεβιασμένη μαγνήτιση τους απαιτείται πρόσθετη ενέργεια προκειμένου να μαγνητιστούν σε άξονες διαφορετικούς από τους προτιμητέους.



Σχήμα 1.11: Εύκολοι, μέσης δυσκολίας και δύσκολοι κρυσταλλογραφικοί άξονες μαγνήτισης στη κυβική κυψελίδα του σιδήρου.

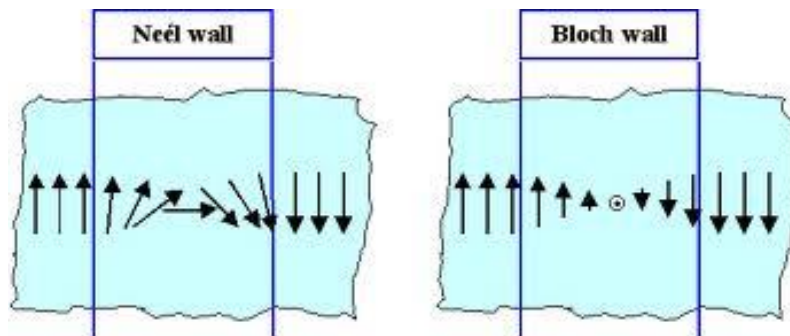
Η εξήγηση της συμπεριφοράς κείται στη σύζευξη spin - τροχιακού. Η καταστολή της τροχιακής στροφορμής εντός του κρυστάλλου δεν οδηγεί στην πλήρη εξάλειψη της. Έτσι, ένα διατεταγμένο άτομο διατηρεί ένα ποσό μαγνητικής διπολικής ροπής  $\mu$ . Προφανώς, η διπολική αυτή ροπή εξαρτάται άμεσα από την κατανομή των ηλεκτρονίων γύρω από τους ακίνητους πυρήνες. Η ελαχιστοποίηση αυτής ηλεκτροστατικής αλληλεπίδρασης δημιουργεί την εγγενή προτίμηση μαγνήτισης, αφού αναγκάζονται έτσι και οι βασικές στοιχειώδεις συνεισφορές ροπής από το spin των ηλεκτρονίων να λάβουν ορισμένες κατευθύνσεις.

Όμως και κατά την επιβολή εξωτ. πεδίου σε διεύθυνση μη προτιμητέα, η ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση από κοινού με την αλληλεπίδραση ανταλλαγής μεταβάλλεται. Προκαλείται επικάλυψη των γειτονικών τροχιακών και, έτσι, μια κατάσταση μη σταθερή ενεργειακά. Εξ'ού και απαιτείται πρόσθετη συνεισφορά ενέργειας κατά τη μαγνήτιση που καλείται και *ενέργεια μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας*.



*Σχήμα 1.12: Απεικόνιση σύζευξης spin-τροχιακού. Εν αντιθέσει με την ισότροπη συμπεριφορά της διπολικής ροπής  $\mu_s$ , η τροχιακή διπολική ροπή  $\mu_o$  προσδίδει ανισοτροπία στη συμπεριφορά του υλικού.*

Η απαίτηση ελαχιστοποίησης τόσο της ενέργειας αλληλεπίδρασης ανταλλαγής, που επιτάσσει η μεταβολή της μαγνήτισης εντός των ορίων των περιοχών να γίνεται όσο το δυνατόν πιο αργά με απειρολάχιστα διαφορά στη διεύθυνση της μαγνητικής διπολικής ροπής ανά ατομικό επίπεδο (απαίτηση παραλληλισμού της ροπής  $\mu_s$ ) όσο και της ενέργειας μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας, που επιτάσσει την εξάλειψη συνιστωσών μαγνήτισης πέραν των εύκολων αξόνων του υλικού, δημιουργεί μια κατάσταση εντός του υλικού που απαιτεί αμοιβαίο συμβιβασμό. Ο συμβιβασμός έγκειται στο πάχος των τοιχωμάτων μεταξύ των περιοχών που είναι τέτοιο ώστε να συμβιβάζει τις δυο τάσεις (μεγάλο πάχος - μείωση δυναμικής ενέργειας λόγω αλληλεπίδρασης ανταλλαγής, μικρό πάχος - μείωση δυναμικής ενέργειας λόγω ανισοτροπίας). Η τιμή του πάχους κυμαίνεται σε ένα εύρος γύρω στα 10  $\mu\text{m}$ .



Σχήμα 1.13: Είδη τοιχωμάτων 180°. Στην αριστερή πλευρά φαίνεται ένα τοίχωμα τύπου Néel όπου τα στοιχειώδη δίπολα περιστρέφονται με ελάχιστα βήματα σε άξονα κάθετο στο επίπεδο του υλικού. Στη δεξιά πλευρά, η περιστροφή γίνεται ως προς διαμήκη άξονα γεγονός που δημιουργεί μαγνήτιση στο επίπεδο, το κάθετο στη σελίδα. Αυτό είναι ανεπιθύμητο ειδικά σε υλικά υπό μορφή υμενίων.

### **1.2.2 Μηχανισμοί και ιδιότητες μαγνήτισης των σιδηρομαγνητών**

Η εμφάνιση συνισταμένης μαγνήτισης σε ένα μονοκρυσταλλο σιδηρομαγνήτη συνδέεται άμεσα με την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου  $H$ .

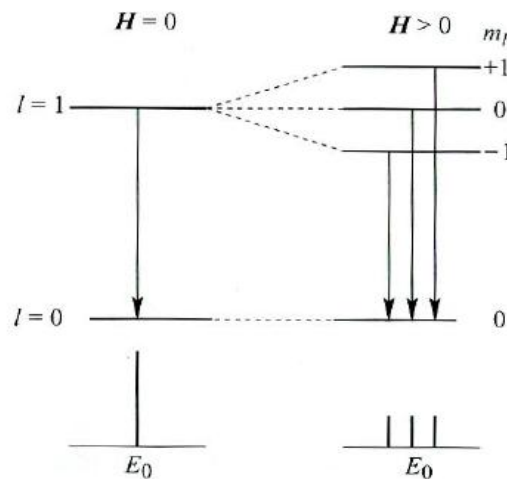
Κβαντομηχανικά, η επίδραση που έχει ένα εξωτερικό πεδίο στα ηλεκτρόνια ενός υλικού παρατηρήθηκε και περιγράφεται ως φαινόμενο *Zeeman*. Συνοπτικά, τα ατομικά τροχιακά, ακόμη και της ίδια υποστοιβάδας, διαχωρίζονται ενεργειακά. Η συνεισφορά του εξωτερικού πεδίου αλλά και της τροχιακής στροφορμής ενός τυχόντος ηλεκτρονίου στη μεταβολή της ενέργειας βασίζεται στην σχέση:

$$E = -\mu_o * m * H, \text{ όπου}$$

$m$ : μια στοιχειώδης διπολική ροπή και

$H$ : η ένταση του εξωτερικού πεδίου.

Επιπλέον, αναφέρεται και το *ανώμαλο φαινόμενο Zeeman* όπου ο διαχωρισμός των τροχιακών σε ενεργειακές ζώνες είναι πολύπλοκότερος εξαιτίας της σύζευξης spin-τροχιακού (π.χ. σιδηρομαγνήτες). Έτσι, με την επιβολή του εξωτερικού πεδίου δημιουργούνται περισσότερες των τριών ενεργειακών σταθμών σε σχέση με την απεικόνιση στο σχήμα 1.11.



Σχήμα 1.14: Φαινόμενο Zeeman. Διάσπαση ενός τροχιακού  $p$  σε τρεις ενεργειακές στάθμες αναλόγως του  $m_l$ . Η αρχή παρατήρησης του φαινομένου βασίζεται στις φασματικές γραμμές εκπομπής του υλικού.

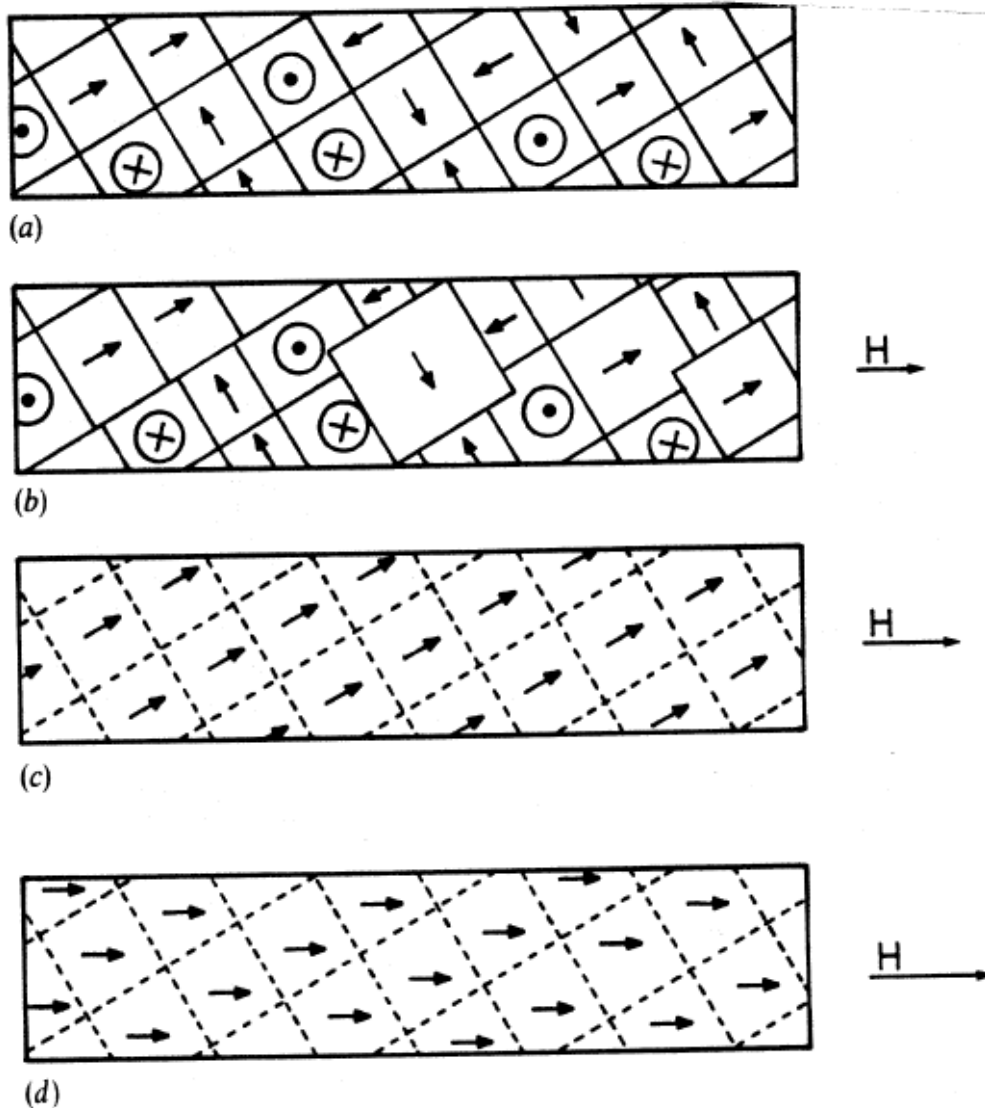
Σε πιο μακροσκοπική κλίμακα, οι μηχανισμοί μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού ακολουθούν μια καθορισμένη αλλά μη αντιστρεπτή αλληλουχία. Διακρίνονται από το φαινόμενο της υστέρησης και προκαλούν μεταβολές στην ελαστική συμπεριφορά του υλικού.

Με την επιβολή ενός εξωτερικού πεδίου τυχαίας διεύθυνσης (μη παράλληλης με τους άξονες εύκολης μαγνήτισης), αρχίζει να τελείται μια δυναμική διαδικασία κατά την οποία οι περιοχές με μαγνήτιση πλησιέστερη σε κατεύθυνση με το εξωτερικό πεδίο αρχίζουν να διευρύνονται σε βάρος των υπολοίπων περιοχών. Η επέκταση αυτή γίνεται μέσω της κίνησης των οριακών τοιχωμάτων προς την κατεύθυνση των συρρικνούμενων περιοχών. Με την ολίσθηση των ατομικών επιπέδων προς τα εκεί, σταδιακά αλλάζει η φορά μαγνήτισης των μαγνητικών διπόλων τους και απορροφώνται από τις κυρίαρχες περιοχές.

Ως ένα σημείο, η διαδικασία είναι αντιστρεπτή με την έννοια ότι, με ξαφνικό μηδενισμό του εξωτερικού πεδίου, επανέρχεται η προτέρα κατάσταση με συνισταμένη  $M=0$ . Από εκεί και πέρα, όμως, περαιτέρω συνέχιση του επιβαλλόμενου πεδίου προκαλεί μη αντιστρεπτές κινήσεις τοιχωμάτων και, συνακόλουθα, μεταβολές των διακριτών περιοχών. Αίτιο αυτής της συμπεριφοράς είναι οι ατέλειες που περιέχει το κρυσταλλικό πλέγμα (εγκλείσματα, διαταραχές πλέγματος από επεξεργασία κ.τ.λ.). Τα τοιχώματα τείνουν να "σκαλώνουν" στις ατέλειες καθώς, έτσι, δημιουργούνται συνθήκες ελαχιστοποίησης της δυναμικής ενέργειας. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των εγκλεισμάτων δημιουργούνται μονοπάτια μαγνητικής ροής, ενώ στις διαταραχές αποκαθίσταται ισορροπία μεταξύ παραμορφωτικών τάσεων (βλ. και μαγνητοσυστολή). Συνεπώς, περαιτέρω διάδοση των τοιχωμάτων απαιτεί επιπλέον συνεισφορά ενέργειας προκειμένου να προσπελαστεί το φράγμα δυναμικού. Η προσπέλαση αυτού του φράγματος ισοδυναμεί με ένα μικρό άλμα μαγνήτισης στο υλικό.

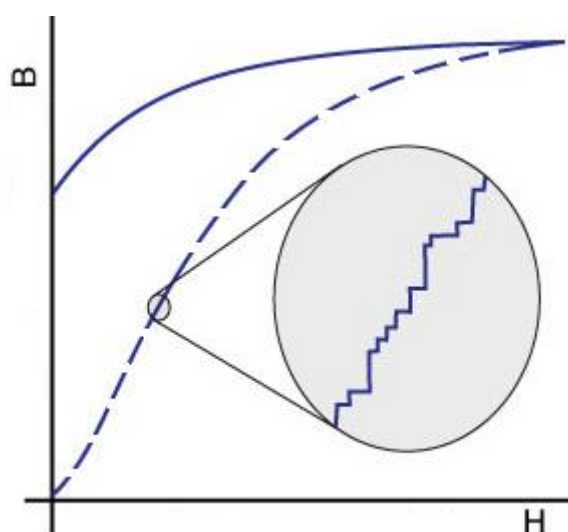
Επίσης, η κίνηση και το “αγκίλωση” των τοιχωμάτων σε δομικές ατέλειες προκαλούν απώλεια ενέργειας (λόγω παραμόρφωσης, δινορρευμάτων κ.α.).

Ο μηχανισμός συνεχίζει να λειτουργεί έως ότου η μαγνήτιση γίνει ενιαία και παράλληλα με τον κρυσταλλογραφικό άξονα εύκολης μαγνήτισης που είναι εγγύτερος στη φορά του εξωτερικού πεδίου. Ταύτιση της φοράς της μαγνήτισης του υλικού με το εξωτερικό πεδίο απαιτεί πρόσθετη ενέργεια που υπερνικά και το εμπόδιο της κρυσταλλικής ανισοτροπίας. Τότε, η μαγνήτιση κορέννεται σε μια ομοιόμορφη, χαρακτηριστική τιμή.



Σχήμα 1.15: Φάσεις σιδηρομαγνήτη κατά τη βεβιασμένη μαγνήτιση, α) αρχική κατάσταση, β) αντιστρεπτό τμήμα μαγνήτισης με μη προσπελασμένες τις ατέλειες, γ) κατάσταση μαγνήτισης κατά το τέλος του μη αντιστρεπτού μέρους, δ) ταύτιση μαγνήτισης με εξωτερικό πεδίο (αντιστρεπτό τμήμα).

Η απεικόνιση της διαδικασίας μαγνήτισης παριστάνεται γραφικά με διάγραμμα μαγνητικής επαγωγής  $B$  ή της μαγνήτισης  $M$ , εντός του υλικού, συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $H$ . Στο σχήμα 1.17, φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή η καμπύλη αρχικής μαγνήτισης μέχρι την τιμή κορεσμού, ενώ οι αριθμοί επ'αυτής αντιστοιχούν στις τέσσερις φάσεις της όπως έχουν ήδη περιγραφεί. Η καμπύλη είναι μη γραμμική και προφανώς αντιστοιχεί η κλίση της αντιστοιχεί στη μαγν. διαπερατότητα του σιδηρομαγνήτη που δέ μένει σταθερή. Ακόμη, λόγω των αλμάτων μαγνήτισης η καμπύλη έχει μια μορφή "σκάλας". Τα άλματα αυτά συνιστούν το φαινόμενο *Barkhausen* το οποίο είναι προφανές όταν η καμπύλη σχεδιάζεται σε υψηλή ανάλυση (σχήμα 1.16).



Σχήμα 1.16: Διακριτά βηματικά άλματα ενδεικτικά της συνεισφοράς στη μαγνήτιση που έχουν οι αλλεπάλληλες προσπελάσεις δομικών ατελειών από τα κινούμενα τοιχώματα.

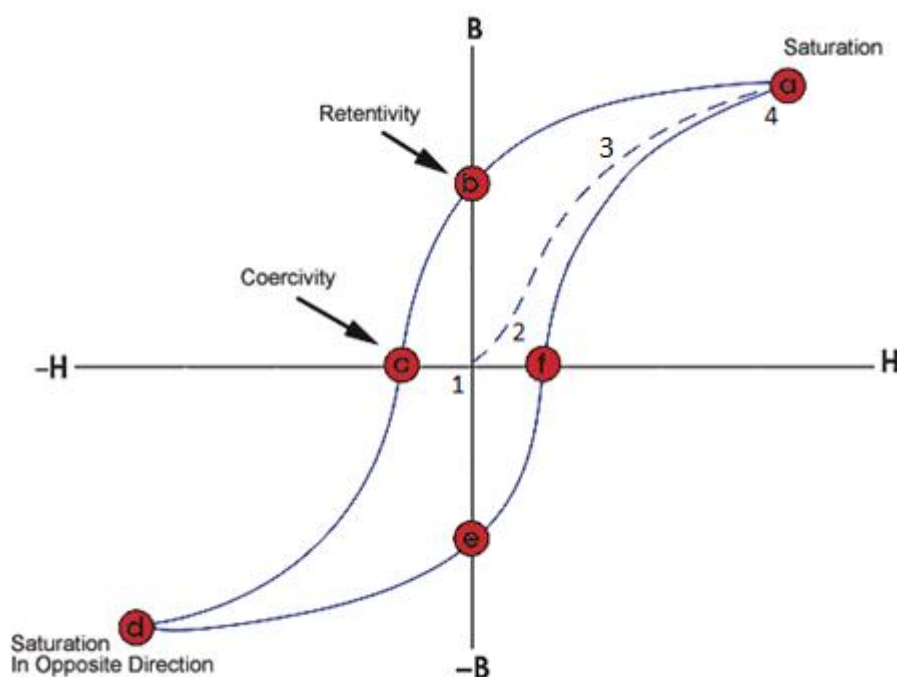
Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζεται, όμως, και κατά τη διαδικασία απομαγνήτισης του υλικού. Με μηδενισμό του εξωτερικού πεδίου, η μαγνήτιση του σιδηρομαγνήτη επιστρέφει στα επίπεδα της φάσης 3 (σημείο b). Σε εκείνο το σημείο, το υλικό εξακολουθεί να είναι μαγνητισμένο ομοιόμορφα εμφανίζοντας *παραμένουσα μαγνήτιση*. Είναι πιθανό, ήδη, να έχουν σχηματιστεί κάποιες περιοχές μικρών διαστάσεων με μαγνήτιση αντίθετη με την συνισταμένη.

Το μη αντιστρεπτό τμήμα μεταξύ 2-3 καθορίζει την εμφάνιση της ιδιότητας της *υστέρησης*. Ειδικότερα, οι απώλειες ενέργειας που έχουν συμβεί κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης του υλικού εξαιτίας της κίνησης των τοιχωμάτων δημιουργούν ένα "παρελθόν" για το υλικό που οδηγεί σε μια συγκεκριμένη τιμή μαγνήτισης (σημείο a) και, συνάμα, παραμένουσας μαγνήτισης (σημείο b). Όπως είναι λογικό, μια διαφορετική καμπύλη αρχικής μαγνήτισης (π.χ. χωρίς να φτάνει στον κορεσμό, με διαφορετικό ρυθμό πρόσδωσης ενέργειας κ.α.) αντιστοιχεί σε διαφορετικές τιμές κορεσμού και παραμένουσας μαγνητισμού. Συνεπώς, η μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού (που οφείλεται σε επιπλέον παράγοντες όπως π.χ. η κρυσταλλική ανισοτροπία) σε συνδυασμό με την ικανότητα του να διατηρεί τη μαγνήτιση

του (αυθόρμητη ή βεβιασμένη) συντελούν στο να μην έχει μια, μοναδική καμπύλη μαγνήτισης αλλά θεωρητικά άπειρες.

Μηδενισμός της μαγνήτισης  $M$ , απαιτεί την επιβολή πεδίου αντίστροφης έντασης  $H$  σε σχέση με αυτή που αντιστοιχούσε στην τιμή κορεσμού. Η τιμή αυτή αναφέρεται ως *συνεκτικό πεδίο*. Η καταστολή της παραμένουσας μαγνήτισης συνεπάγεται της διαμόρφωσης νέων μαγνητικών περιοχών με τυχαίες επιμέρους μαγνητίσεις. Συνεπώς, παρατηρείται άλλος ένας παράγοντας υστέρησης που δημιουργεί εξάρτηση της δομής του σιδηρομαγνήτη από το "μαγνητικό παρελθόν" του.

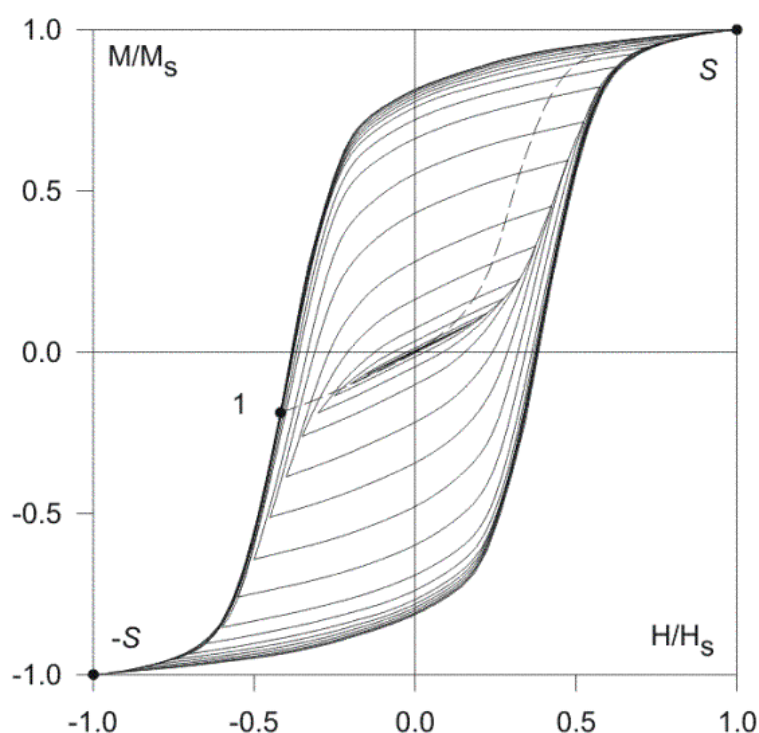
Η συνολική κλειστή καμπύλη, ο λεγόμενος *βρόχος υστέρησης* (σχήμα 1.17), ολοκληρώνεται με την την επίτευξη τιμής κορεσμού κατά την αντίθετη φορά (σημείο d), επαναφορά του εξωτερικού πεδίου στο μηδέν (σημείο e) και την καταστολή της παραμένουσας μαγνήτισης (με την αντίθετη φορά, σημείο f). Αυτός ο πλήρης κύκλος έχει μεγάλη σημασία καθότι αντιστοιχεί σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ηλεκτρικό ρεύμα περιοδικής φύσης, όπως τα εναλλασσόμενα, αρμονικά ρεύματα που βρίσκουν χρήση σε μια τεράστια γκάμα εφαρμογών.



Σχήμα 1.17: Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνήτη. Οι αριθμοί συμβολίζουν τις φάσεις της δομής του σιδηρομαγνήτη κατά την αρχική μαγνήτιση. Όπου *retentivity* : παραμένουσα μαγνήτιση, *coercivity* : πεδίο συνοχής, *saturation*: κορεσμός. Η συνολική επιφάνεια του βρόχου αντιστοιχεί στη συνολική συνεισφορά ενέργειας από το εξωτερικό πεδίο στο υλικό.



Αυτή, ακριβώς, η ιδιότητα της υστέρησης δημιουργεί μια σειρά βρόχων που αντιστοιχούν σε μια αλληλουχία κύκλων μαγνήτισης-απομαγνήτισης. Στο σχήμα 1.18, διακρίνονται οι ελλάσσονες βρόχοι που προκύπτουν όταν η μαγνήτιση δεν φτάνει τον κορεσμό. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαδικασία απομαγνήτισης ενός σιδηρομαγνήτη βασίζεται σε μια λογική διαδοχικών ελλάσσονων βρόχων έως την τελικό μηδενισμό του διανύσματος  $M$  ( $B$ ) χωρίς να χρειάζεται η παρουσία πεδίου ( $H=0$ ).



Σχήμα 1.18: Ελλάσσονες βρόχοι υστέρησης. Το διάγραμμα γίνεται με κανονικοποιημένες τιμές μαγνήτισης και έντασης πεδίου ως προς τις τιμές κόρου.

### **1.2.3 Μαγνητοσυστολή**

Από την παράγραφο 1.2.1, έχει ήδη αναφερθεί η έννοια της μαγνητοσυστολικής ενέργειας. Συνδέεται με το φαινόμενο της *μαγνητοσυστολής* που εκδηλώνεται κατά τη μαγνήτιση ενός σιδηρομαγνήτη. Πρόκειται για μια αλλαγή στις φυσικές διαστάσεις ενός μαγνητιζόμενου τεμαχίου που δημιουργεί μια πολύπλοκη κατανομή τάσεων παραμόρφωσης στο εσωτερικό του. Η ενεργειακή συνεισφορά γίνεται σε όρους ελαστικής δυναμικής ενέργειας.

Αίτιο του φαινομένου είναι η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία. Για παράδειγμα, η μαγνήτιση παράλληλα με ένα “δύσκολο” άξονα επιτάσσει την στροφή των στοιχειωδών διπόλων του υλικού και, συνάμα, την αλλαγή στην κατανομή του αρνητικού φορτίου.

Άμεση συνέπεια είναι η αλλαγή στις διατομικές αποστάσεις εντός του υλικού που έχει επίδραση και μακροσκοπικά, έστω σε μικρή κλίμακα της τάξης των ppm.

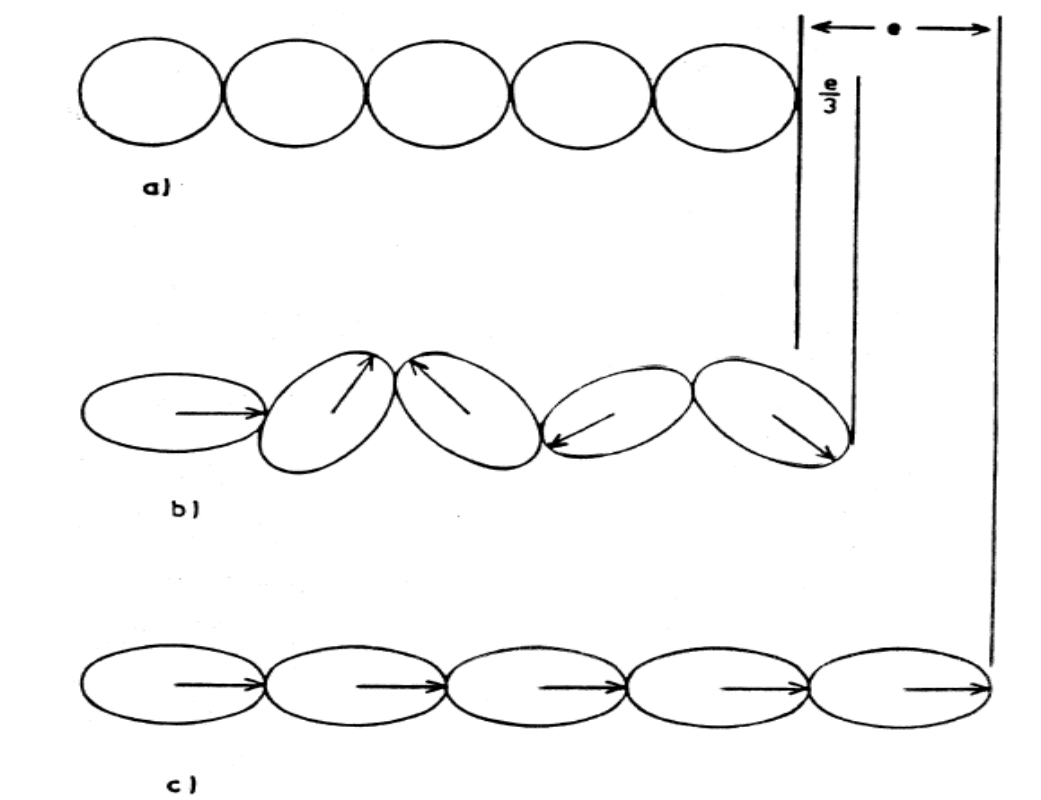
Όπως είναι προφανές, η αλλαγή στις διαστάσεις δεν είναι ομοιόμορφη. Με άλλα λόγια, αν το τυχόν υλικό συσταλλεί ως προς τον “δύσκολο” άξονα συνεπάγεται ότι, παράλληλα, θα διασταλλεί ως προς την κάθετο σε αυτόν διεύθυνση.

Η συστολή ή διαστολή αναλόγως της μαγνήτισης αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα για κάθε υλικό. Για παράδειγμα, το νικέλιο συστέλλεται στη διεύθυνση μαγνήτισης του (ανεξαρτήτως αν είναι συγγραμμική με “εύκολο” ή “δύσκολο” άξονα), ενώ ο σίδηρος διαστέλλεται σε μαγνήτιση παράλληλα με τους “εύκολους” άξονες του. Αναφέρεται ότι ο σίδηρος έχει θετική σταθερά μαγνητικής παραμορφωσης

$\lambda = \Delta l / l_{\text{αρχικό}}$ , όπου  $\Delta l$ : η μεταβολή στο μήκος,

ενώ το νικέλιο αρνητική. Η τιμή της σταθεράς  $\lambda$  είναι διαφορετική ανά άξονα μαγνήτισης.

Συνεπώς, σε ένα υλικό που αποτελείται από πολλές μαγνητικές περιοχές διαφορετικής μαγνήτισης, κατά την επιβολή εξωτ. πεδίου δημιουργείται μια πολύπλοκη κατανομή παραμορφωτικών τάσεων που συσσωρεύει ελαστική ενέργεια στα όρια μεταξύ των περιοχών. Ως αντίδραση δημιουργούνται επιπλέον, μικρές περιοχές Weiss οι οποίες μαγνητίζονται έτσι ώστε να διατηρήσουν το ισοζύγιο μαγνητοστατικής, μαγνητοκρυσταλλικής και μαγνητοσυστολικής ενέργειας.



Σχήμα 1.19: Εξέλιξη φαινομένου μαγνητοσυστολής από α) παραμαγνητική φάση υλικού σε b) φάση αυθόρμητης μαγνήτισης και c) βεβιασμένης μαγνήτισης, e: παραμόρφωση.

## 1.3 Είδη σιδηρομαγνητικών υλικών

### 1.3.1 Μαλακοί και σκληροί σιδηρομαγνήτες

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά κατηγοριοποιούνται με βάση τη συμπεριφορά σε συνθήκες εξωτερικής μαγνήτισης.

- Σιδηρομαγνήτες που παρουσιάζουν κόρο σε σχετικά μικρές τιμές εξωτερικού πεδίου, μικρή παραμένουσα μαγνήτιση και χαμηλή τιμή συνεκτικού πεδίου αναφέρονται ως *μαλακοί*. Ο βρόχος υστέρησης τους είναι στενός, απότομος και έχει μικρό εμβαδό.

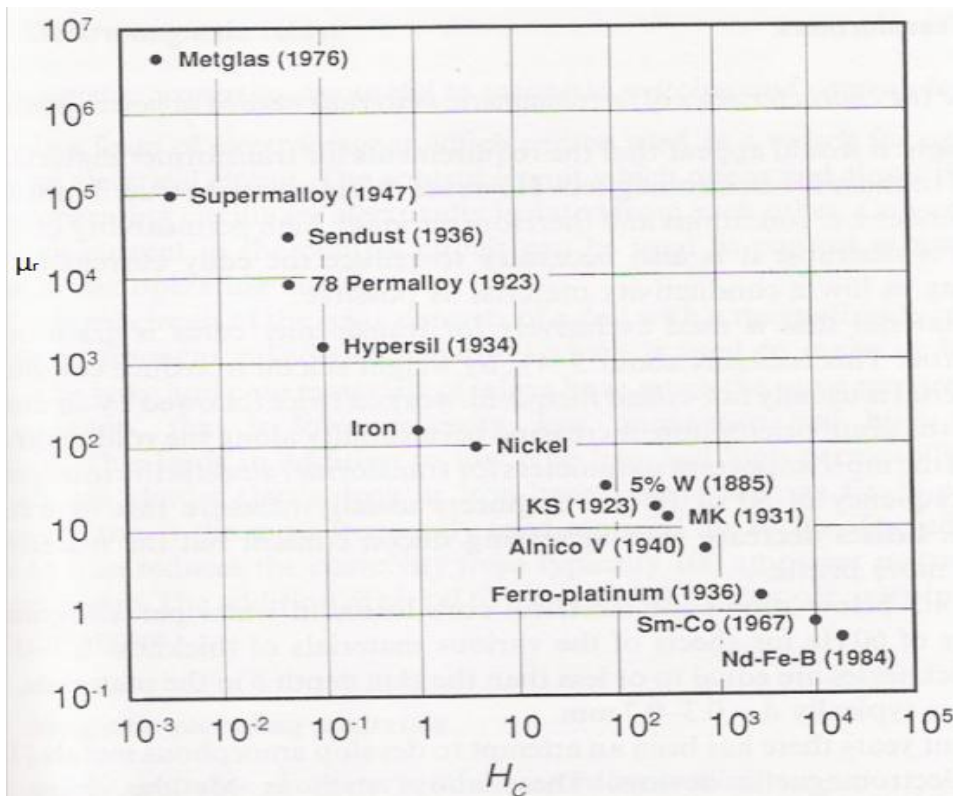
Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν ο σίδηρος με προσμίξεις έως 0.2%, ο πυριτικός σίδηρος με πρόσμιξη έως 4%, τα κράματα σιδήρου - νικελίου supermalloy και 78 permalloy, τα άμορφα (υαλώδη) μέταλλα σιδήρου - πυριτίου - βορίου και οι φερρίτες με πρόσμιξη μαγγανίου - ψευδάργυρου.

- Σιδηρομαγνήτες που φτάνουν σε κορεσμό για μεγάλες τιμές εξωτερικού πεδίου, εμφανίζουν μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση και τιμή συνεκτικού πεδίου χαρακτηρίζονται ως *σκληροί*. Ο βρόχος υστέρησης τους είναι ευρύς με μεγάλο εμβαδό.

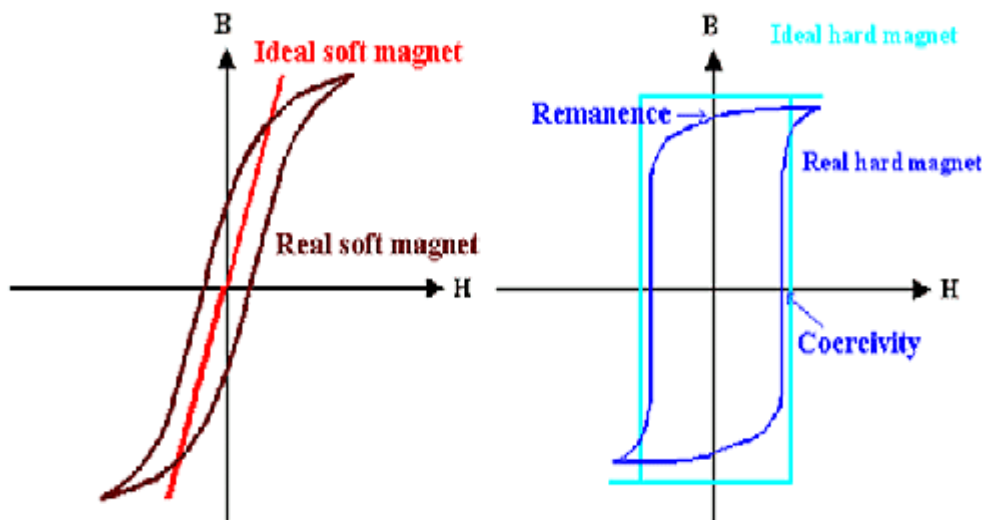
Οι πιο δημοφιλείς σκληροί μαγνήτες είναι οι φερρίτες - γ, ο φερρίτης στροντίου, κράματα αργιλίου - νικελίου - κοβαλτίου με συγκεκριμένη περιεκτικότητα και επιπλέον προσμίξεις (π.χ. χαλκού) και οι μαγνήτες νεόδμιου - σιδήρου - βορίου.

Επιπλέον, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διακύμανση της (σχετικής) μαγνητικής διαπερατότητας κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης στο πρώτο τεταρτημόριο του βρόχου. Ιδιαίτερη σημασία έχουν η μέγιστη και η αρχική μαγν. διαπερατότητα. Η αρχική διαπερατότητα αφορά αποκλειστικά στην αρχική καμπύλη μαγνήτισης του υλικού. Για τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά, οι τιμές είναι υψηλές, γενικά, όμως εμφανίζουν και έντονη διακύμανση.

Με βάση τα ως άνω, καθορίζεται και η χρήση των σιδηρομαγνητών. Οι μαλακοί σιδηρομαγνήτες αφορούν εφαρμογές ασθενών πεδίων με μικρές ενεργειακές απαιτήσεις, δηλαδή συστήματα τηλεπικοινωνιών, ηλεκτρονικά κυκλώματα, αισθητήρες αλλά και εφαρμογές που απαιτούν συνεχείς κύκλους μαγνήτισης - απομαγνήτισης με όσο δυνατό λιγότερες απώλειες ενέργειας, δηλαδή ηλεκτρικές μηχανές, μετασχηματιστές, επαγωγείς κ.τλ. Αντιθέτως, οι σκληροί σιδηρομαγνήτες βρίσκουν χρήση σε μόνιμοι μαγνήτες σε ειδικές εφαρμογές, ενώ λόγω της πολύ δύσκολης απομαγνήτισης τους αλλά και της αλλαγής της μαγνήτισης τους προς την αντίθετη φορά (πλήρης κύκλος στο βρόχο υστέρησης) είναι ιδανικά για την εγγραφή ψηφιακών δεδομένων με ασφάλεια και με αντοχή στη χρονική φθορά.



Σχήμα 1.20: Θέση σιδηρομαγνητικών υλικών σε διάγραμμα σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας - συνεκτικού πεδίου. Κάτω και δεξιά τοποθετούνται οι σκληροί μαγνήτες και πάνω, αριστερά οι μαλακοί.



Σχήμα 1.21: Χαρακτηριστικοί βρόχοι υστέρησης για μαλακούς και σκληρούς μαγνήτες. Η ιδανική συμπεριφορά αφορά στις γραμμικές καμπύλες, όπου για μαλακά υλικά: συνεκτικό πεδίο, παραμένουσα μαγνήτιση, απώλειες υστέρησης προσεγγίζουν το μηδέν και για σκληρά: συνεκτικό πεδίο, παραμένουσα μαγνήτιση, απώλειες έχουν μη μηδενικές, μεγάλες τιμές.

Η μελέτη στην επόμενη ενότητα θα επικεντρωθεί στους μαλακούς σιδηρομαγνήτες καθώς στην κατηγορία αυτή εντάσσεται το υλικό που απασχόλησε την παρούσα εργασία.

### **1.3.2 Είδη και ιδιότητες μαλακών σιδηρομαγνητών**

Αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.3.1 τα επιθυμητά χαρακτηριστικά για ένα μαλακό σιδηρομαγνήτη. Με βάση αυτές τις προδιαγραφές, καθορίζεται η κατεργασία και η, εν γένει, επεξεργασία των υλικών (π.χ. εισαγωγή προσμίξεων).

Η επιδίωξη της υψηλότερης δυνατής διαπερατότητας, ιδιαίτερως της αρχικής τιμής της συνδέεται άμεσα με μια χαμηλή τιμή συνεκτικού πεδίου. Επί παραδείγματι, μια τιμή που προσεγγίζει τα  $10^5$  H αντιστοιχεί σε τιμή πεδίου συνοχής 0,4 A/m ισχύει για το 78 permalloy. Γενικά, πάντως, τιμές συνεκτικού πεδίου κάτω των 1000 A/m θεωρούνται ως ενδεικτικές για ένα μαλακό σιδηρομαγνήτη.

Επιπλέον, το συνεκτικό πεδίο συνδέεται άμεσα και με το επίπεδο των απωλειών υστέρησης. Για αυτό το λόγο, πρέπει να διατηρείται σε χαμηλές τιμές.

Βέβαια, υπάρχει και ο παράγοντας των απωλειών λόγω αγωγιμότητας. Οι λεγόμενες *ηλεκτρικές απώλειες*, λοιπόν, πέραν των απωλειών υστέρησης αφορούν απώλειες λόγω αναπτυσσόμενων ρευμάτων εξ'επαγωγής (*δινορεύματα*) καθώς και ένα αστάθμητο, μη υπολογίσιμο αλλά μετρούμενο παράγοντα απωλειών. Γενικά, εξαρτώνται από τη συχνότητα του ρεύματος διέγερσης, την τιμή πλάτους της μαγνητικής επαγωγής εντός του υλικού, το πάχος του υλικού καθώς και της ειδικής αντίστασης του.

Συνεπώς, ισχύει μια σχέση της μορφής:

$$W_{ολ} = W_{υστερ} + W_{δινορ} + W_{ασταθμ}, \text{ όπου}$$

$W_{υστερ}$  ανάλογες της συχνότητας και χαρακτηριστικές κάθε υλικού και

$W_{δινορ}$  ανάλογες του τετραγώνου της συχνότητας, αντιστρόφως ανάλογες της ειδικής αντίστασης.

Απώτερος στόχος κάθε επεξεργασίας σιδηρομαγνητικού υλικού είναι και η αύξηση της ειδικής αντίστασης λοιπόν, πέραν της επίτευξης υψηλής διαπερατότητας.

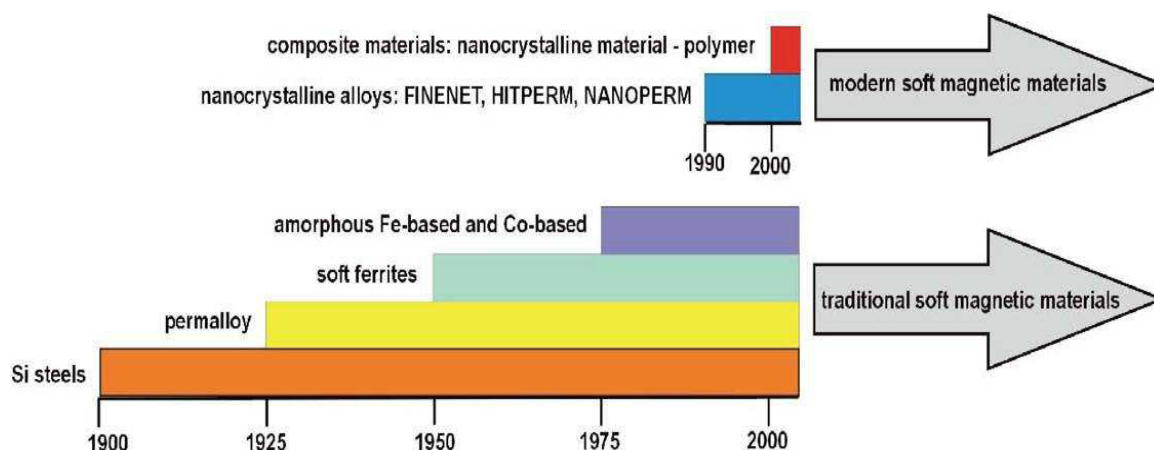
Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί ο σίδηρος που προσμιγνύεται σε πολύ μικρό ποσοστό με πυρίτιο προκειμένου να αυξηθεί η ειδική του αντίσταση. Τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σιδηρομαγνητικό υλικό ευρείας χρήσης σε ηλεκτρικές μηχανές και μετασχηματιστές.

Επιπλέον, τα κράματα σιδήρου - νικελίου (σε ποσοστά 77% - 22%) διατηρούν εξαιρετικές ιδιότητες ως μαλακοί σιδηρομαγνήτες διατηρώντας μάλιστα και υψηλή ειδική αντίσταση. Ακόμη, εμφανίζουν πολύ μικρό ποσό ενέργειας μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας μειώνοντας περαιτέρω τις απώλειες υστέρησης αφού η κίνηση των οριακών τοιχωμάτων

είναι πολύ εύκολη. Διάφορα εμπορικά κράματα περιέχουν και προσμίξεις σε πολύ μικρή ποσότητα χαλκού, χρωμίου και μολυβδύνιου.

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι επιθυμητές ιδιότητες απαιτούν και ειδική κατεργασία των σιδηρομαγνητών πέραν των προσμίξεων. Για παράδειγμα, τα κράματα σιδήρου - πυριτίου κατασκευάζονται υπό μορφή φύλλων όπου οι κόκκοι έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό και προφανώς τον επιθυμητό κρυσταλλικό άξονα μαγνήτισης μέσω θερμής και ψυχρής έλασης και ανόπτησης. Τα κράματα νικελίου - σιδήρου απαιτούν ψυχρή κατεργασία με έλαση για επίτευξη υψηλής διαπερατότητας.

Υπάρχουν και οι λεγόμενοι *μαλακοί φερριτες* που αποτελούν οξείδια μεταβατικών μετάλλων με βάση το σίδηρο, δηλαδή τη ρίζα  $Fe_2O_4$ . Τα οξείδια αυτά μπορεί να περιέχουν μαγγάνιο, ψευδάργυρο κ.α. Τα υλικά αυτά έχουν πολύ μεγάλη ειδική αντίσταση και μικρές απώλειες ανά κύκλο μαγνήτισης. Παρ'όλα αυτά, έχουν σχετικά μικρή μαγνήτιση κόρου και θερμοκρασία απομαγνήτισης ή Curie που περιορίζει αρκετά τα εύρη χρήσης των. Επίσης, οι ιδιότητες τους εμφανίζουν διακύμανση συναρτήσει της συχνότητας μαγνήτισης - απομαγνήτισης τους.



Σχήμα 1.22: Χρήση μαλακών σιδηρομαγνητών με την πάροδο των ετών. Τα νανοκρυσταλλικά κράματα και πολυμερή δεν θα μελετηθούν στην παρούσα αναφορά.

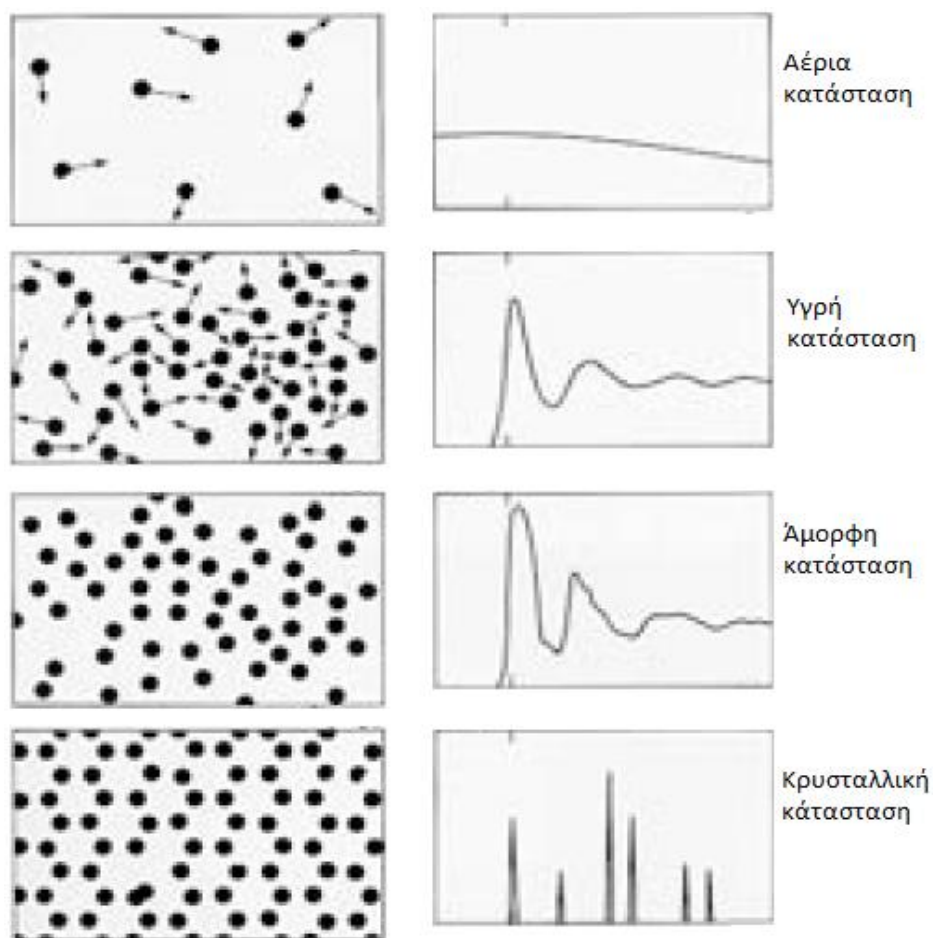
Στην επόμενη παράγραφο, θα γίνει ειδική μνεία στα άμορφα σιδηρομαγνητικά υλικά που βασίζονται στο σίδηρο και το κοβάλτιο. Σε αυτή τη κατηγορία, υπάγεται το υλικό που μελετήθηκε στα πλαίσια του πειραματικού μέρους της παρούσας εργασίας.

## 1.4 Άμορφα σιδηρομαγνητικά υλικά

### 1.4.1 Γενικά στοιχεία

Οι σιδηρομαγνήτες άμορφης κατάστασης παρουσιάζουν πολύ καλές μαγνητικές ιδιότητες ως μαλακά υλικά και βασίζονται στα μεταβατικά μέταλλα Fe, Co και Ni με προσμίξεις βορίου (B), πυριτίου (Si), άνθρακα (C) και φωσφόρου (P). Παρασκευάστηκαν για πρώτη φορά στα μέσα της δεκαετίας του 1970.

Η παρασκευή τους βασίζεται στη μέθοδο της απότομης ψύξης. Προκύπτουν λοιπόν υλικά χωρίς κρυσταλλική δομή με τάξη βραχείας έκτασης η οποία προσομοιάζεται σε μια κατανομή σφαιρών με τυχαία διάταξη. Η πρόσδοση των επιθυμητών χαρακτηριστικών, δηλαδή μεγάλη διαπερατότητα και χαμηλές τιμές πεδίου συνοχής, επιτυγχάνεται με ανόπτηση σε μέσες θερμοκρασίες και, όπου χρειαστεί, με την επιβολή μαγνητικού πεδίου. Παρ'όλα αυτά, διατηρούν ακόμη κάποια μειονεκτήματα όπως τη σχετικά χαμηλή μαγνήτιση κόρου και την ραγδαία αύξηση των απωλειών υστέρησης για υψηλές τιμές μαγνητικής επαγωγής.



Σχήμα 1.23: Δομή υλικών και εκπεμπόμενο φάσμα από περίθλαση ακτίνων X ανά κατάσταση. Προφανής η ομοιότητα της υγρής και άμορφης κατάστασης και φάσματος.

Επιπλέον, λόγω δομής, τα άμορφα υλικά δεν παρουσιάζουν ομοιογενή μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία (τυχαία διεύθυνσης) και, συνεπώς, δεν υφίσταται ενεργειακή συνεισφορά λόγω ανισοτροπίας. Όλες οι διευθύνσεις μαγνήτισης θεωρούνται εύκολες. Επίσης, απουσιάζουν οι ατέλειες λόγω κρυσταλλικών διαταραχών με συνέπεια την απρόσκοπτη κίνηση των τοιχωμάτων κατά τη μαγνήτιση. Άλλο μια καλή ιδιότητα είναι ότι εμφανίζουν υψηλή ειδική αντίσταση γεγονός που περιορίζει την ανάπτυξη δινορευμάτων.

Η χρήση των υλικών αφορά αποκλειστικά σε αισθητήρες μαγνητικού πεδίου και μετασχηματιστές χαμηλής ισχύος π.χ. τηλεπικοινωνιακών διατάξεων.

### **1.4.2 Μέθοδοι παρασκευής άμορφων, μαγνητικά μαλακών υλικών**

Τα άμορφα υλικά αναφέρονται και ως “παγωμένα υγρά” εξαιτίας τη δομής τους. Με άλλα λόγια, τα άτομα διατάσσονται τυχαία, μη περιοδικά στο χώρο και έχουν έλλειψη ευκινησίας ως στερεά. Είναι λογικό, λοιπόν, το γεγονός ότι προέρχονται από τήγματα μεταλλικών κραμάτων που έχουν ψυχθεί ταχέως.

Η κραματοποίηση αφορά τα σιδηρομαγνητικά μέταλλα Fe, Ni και Co. Το ρόλο του αμορφοποιητή παίζουν τα στοιχεία βόριο (B) και και φώσφορος (P). Τέλος, περιέχονται και προσμίξεις για πρόσδωση επιθυμητών ιδιοτήτων όπως πυριτίου (Si), ο άνθρακας (C), το μολυβδένιο (Mo) κ.α.

Υλικό	$B_s$ [T]	$H_c$ [A/m]	$\mu_{max}$ [ $10^3 \mu_0$ ]	$\rho$ [ $\mu\Omega \cdot m$ ]
<i>Κρυσταλλικά</i>				
Fe	2.16	3.2	88	0.01
Fe (3%Si, grain oriented)	2.01	6.8	75	0.50
Fe <sub>50</sub> Ni <sub>50</sub>	1.60	4.0	70	0.48
Fe <sub>49</sub> Co <sub>49</sub> V <sub>2</sub>	2.35	15.9	60	0.35
<i>Φερρίτες</i>				
MnZn	0.50		6	$2 \cdot 10^6$
NiZn	0.35		4	$10^{10}$
<i>Άμορφα</i>				
Fe <sub>80</sub> B <sub>20</sub>	1.61	8.0	80	1.40
Fe <sub>81</sub> B <sub>13</sub> Si <sub>4</sub> C <sub>2</sub>	1.61	6.4	100	1.25
Fe <sub>78</sub> B <sub>13</sub> Si <sub>9</sub>	1.58	3.5	100	1.37

Πίνακας 1.2: Χαρακτηριστικά μεγέθη ανά κατηγορία μαλακών σιδηρομαγνητών. Τα άμορφα υλικά παρουσιάζουν ένα καλό συνδυασμό ιδιοτήτων.



Οι βασικές τεχνικές στερεοποίησης είναι:

- Splat cooling/quenching
- Melt spinning
- Gas atomization.

Η δημοφιλέστερη μέθοδος είναι η δεύτερη.

Γενικά, η απότομη ψύξη συμβάλλει στη μη εκδήλωση της πυρηνοποίησης και ανάπτυξης κρυσταλλινών κατά τη διαδικασία στερεοποίησης ενός τήγματος. Έτσι, επιτυγχάνεται να μη μεταβεί το υλικό σε κρυσταλλική, στερεά κατάσταση (μετάβαση φάσης). Μεγάλες ταχύτητες ψύξης επιδρούν καταλυτικά στη δομή του υλικού. Το τήγμα συμπυκνώνεται γραμμικά έως μια κρίσιμη θερμοκρασία όπου τα άτομα παγώνουν στην τυχαία θέση που βρίσκονται δημιουργώντας ένα στερεό κράμα.

Κλειδί στην ως άνω διαδικασία είναι η ύπαρξη περιβάλλοντος που μπορεί να απορροφήσει με γρήγορο ρυθμό θερμότητα. Στον πίνακα 1.3, διακρίνονται οι ρυθμοί ψύξης ανά περιβάλλον

Μέθοδος	Ρυθμός [ $^{\circ}\text{C/s}$ ]
ψύξη στον αέρα	1 - 10
ψύξη σε υγρό	$10^2 - 10^3$
splat cooling	$10^5$
melt spinning	$10^6 - 10^8$

Πίνακας 1.3: Ρυθμός ψύξης ανά μέθοδο. Ευλογοφανής η υπεροχή του melt spinning.

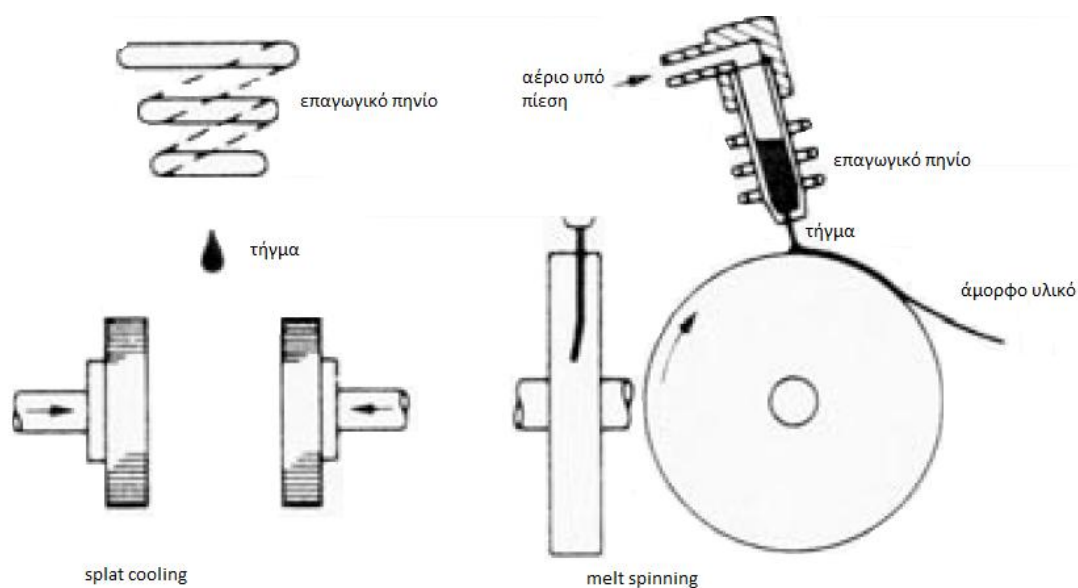
Στις μεθόδους splat cooling και melt spinning το τήγμα έρχεται άμεσα σε επαφή με μια μεταλλική επιφάνεια σε θερμοκρασία περιβάλλοντος π.χ. επιφάνεια χαλκού. Στην πρώτη, το τήγμα συμπιέζεται από δύο χάλκινα έμβολα και ψύχεται απότομα, ενώ στη δεύτερη παγώνει καθώς ρέει στην επιφάνεια (περιμετρικά) ενός περιστρεφόμενου τροχού. Αν το τήγμα ρέει πάνω στην περιμετρική επιφάνεια, απλά, προκύπτει μια λεπτή ταινία άμορφου υλικού, ενώ αν ρέει σε μια σχισμή που βρίσκεται περιμετρικά του τροχού προκύπτει λεπτό άμορφο σύρμα.

Η άμορφη κατάσταση αποτελεί μια τεχνητή κατάσταση της ύλης. Τα υλικά έχουν εγκλωβίσει ικανές ποσότητες ενέργειας και προσπαθούν να την αποβάλλουν για να μεταβούν στην κρυσταλλική κατάσταση. Υπάρχει λοιπόν η ανάγκη για την εισαγωγή στα άμορφα κράματα στοιχείων που θα προσδώσουν ευστάθεια στο υλικό, οι λεγόμενοι

αμορφοποιητές. Ένας αμορφοποιητής είναι π.χ. το βόριο (B). Ασφαλώς, η εισαγωγή ενός αμορφοποιητή θα πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τις επιθυμητές σιδηρομαγνητικές ιδιότητες του άμορφου υλικού. Έτσι, πρέπει να γίνει μελέτη του τρόπου που επηρεάζεται η θερμοκρασία Curie ή η μέση ατομική μαγνητική διπολική ροπή.

Επίσης, προσμίξεις τρίτων στοιχείων επιτελούν, εξίσου, σημαντικό ρόλο. Για παράδειγμα, προσμίξεις πυριτίου και νικελίου επιδρούν στη μαγνητοσυστολή των κραμάτων και αυξάνουν την ειδική τους αντίσταση, ενώ προσμίξεις μολυβδενίου και νιοβίου σταθεροποιούν ακόμη περισσότερο την άμορφη κατάσταση.

Τέλος, τα άμορφα κράματα υφίστανται και διάφορες θερμικές κατεργασίες με ή χωρίς επιβολή μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 1.24: Γενικές αρχές των διεργασιών *splat cooling* και *melt spinning*.

Πιο αναλυτική μελέτη ακολουθεί στην παράγραφο 1.4.3, η οποία αφορά τις εξειδικευμένες τεχνικές παραγωγής άμορφων συρμάτων. Άμορφο, σιδηρομαγνητικό σύρμα χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του πειραματικού μέρους της εργασίας.

### 1.4.3 Τεχνικές κατασκευής άμορφων, σιδηρομαγνητικών συρμάτων

#### 1. Melt spinning

Η τεχνική αυτή αφορά σε διαμέτρους σύρματος μεταξύ 1 και 300  $\mu\text{m}$ . Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 1.4.2, η βάση της τεχνικής αφορά στην υπό πίεση παροχή ροής τήγματος σε ψυχρό περιβάλλον, εν γένει, και απότομη στερεοποίηση του προτού σπάσει σε σταγονίδια. Συνεπώς, είναι αναγκαίο να τηρηθούν οι ακόλουθοι κανόνες:

- a) ψηλός ρυθμός ψύξης και επαρκής απόσταση από το σημείο της παροχής του τήγματος
- b) χρήση ψυκτικού μέσου όπως ένα ρευστό με μικρή τιμή ιξώδους και επιφανειακής τάσης
- c) σταθερή και μη τυρβώδης ροή του ρευστού.

Στην πραγματικότητα, υπάρχει δυσκολία στη διατήρηση της ικανότητας ψύξης της ροής τήγματος χωρίς την ανάπτυξη της κρυσταλλικής φάσης σε θερμοκρασιακό εύρος από τη θερμοκρασία τήξης έως την κρίσιμη τιμή σχηματισμού άμορφου στερεού. Συνεπώς, η εν λόγω τεχνική περιορίζεται σε κραματούχα μεταλλικά σύρματα που έχουν ευχέρεια στο να μεταβαίνουν σε κατάσταση με τάξη βραχείας κλίμακας.

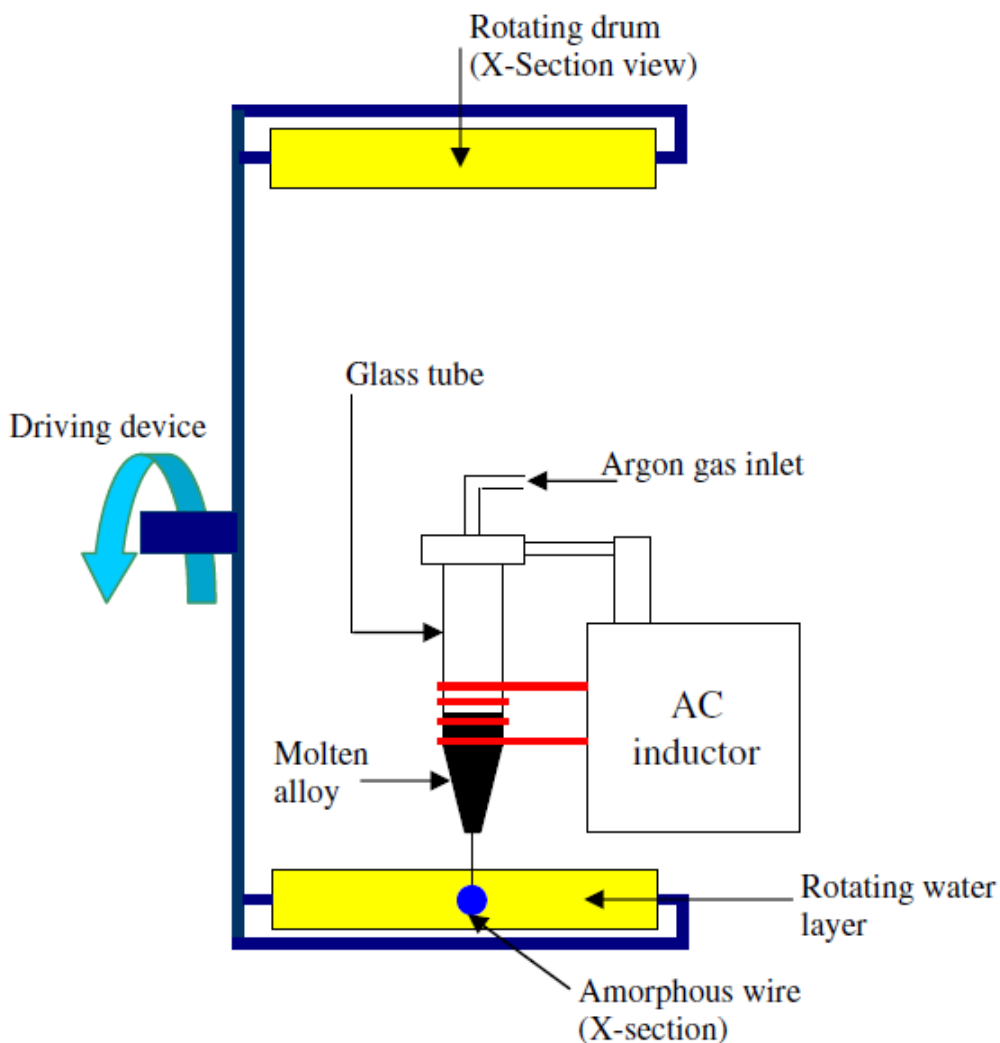
#### 2. In-rotating water spinning

Ο Ohnaka (1985) ανέπτυξε μια τεχνική με χρήση λουτρού προκειμένου να υπερκεραστεί η εν λόγω δυσκολία, που αναφέρεται ως *in-rotating water spinning*. Ουσιαστικά, το τήγμα παρέχεται εντός νερού που παρουσιάζει περιστροφική ροή.

Ειδικότερα, ένας πίδακας τήγματος μέσω ενός ακροφυσίου από χαλαζία, διαμέτρου 80 έως 200 mm, σε ένα στρώμα ψυκτικού υγρού που δημιουργείται από την κεντρομόλο δύναμη που ασκεί ένα περιστρεφόμενο τύμπανο (τροχός) διαμέτρου 400 έως 600 mm. Οι ταχύτητες παροχής τήγματος και περιστροφής του τυμπάνου είναι υπό πλήρη έλεγχο. Επιπλέον παράγοντες που πρέπει να ρυθμίζονται είναι η απόσταση του ακροφυσίου από το ψυκτικό υγρό, η γωνία εξόδου του τήγματος από το ακροφύσιο, η θερμοκρασία ψύξης κ.α.

Η τεχνική αυτή ευνοεί την παραγωγή συρμάτων μεγάλου μήκους, κυκλικής διατομής. Ο ρυθμός ψύξης ανέρχεται στους  $10^5$   $^{\circ}\text{K/s}$ . Παρέχονται άμορφα, φερρομαγνητικά σύρματα διαμέτρων από 80 έως 160  $\mu\text{m}$ .

Συνοψίζοντας το κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής είναι η παρασκευή άμορφων κραμάτων τέτοιας χημικής σύστασης που είναι δύσκολο να επιτευχθεί με τις συμβατικές τεχνικές.



Σχήμα 1.25: Μηχανισμός *in-rotating water spinning* σε τομή κατά πλάτος. Διακρίνεται παροχή AC και η εισδοχή αερίου αργού υπό πίεση.

### 3. Τεχνική Taylor

Ο Taylor (1924) εισήγαγε μια τεχνική παραγωγής λεπτών συρμάτων ομοιόμορφης διατομής. Μια φορτισμένη μεταλλική μάζα τοποθετείτο μέσα σε ένα γυάλινο σωλήνα όπου και έλιωνε με παροχή θερμότητας, επαγωγικά. Συνεπώς, ο γυάλινος σωλήνας μπορούσε να μαλακώσει λόγω επαφής με το μέταλλο και κατόπιν να επιμηκυνθεί. Δρα λοιπόν σαν ένα καλούπι που παρέχει ομοιογενές σχήμα στο σύρμα.

Το τελικό προϊόν έχει γυάλινο περίβλημα και συλλέγεται επί ενός περιστρεφόμενου τυμπάνου (με ταχύτητα περί τα 5 m/s). Η διάμετρος μπορεί κυμαίνεται μεταξύ 50 έως 2  $\mu\text{m}$ .

Η έρευνα επί της τεχνικής συνεχίζεται στο πεδίο της εύρεσης υλικού κατάλληλης σύστασης ως περίβλημα που θα γίνεται ελαστικό σε θερμοκρασία παραπλήσια με αυτή της τήξης του μετάλλου και δεν θα νοθεύει το άμορφο μεταλλικό υλικό. Πρόκειται για μια τεχνική που συνεχώς τελειοποιείται.

#### 4. Melt spinning με επικάλυψη υάλου

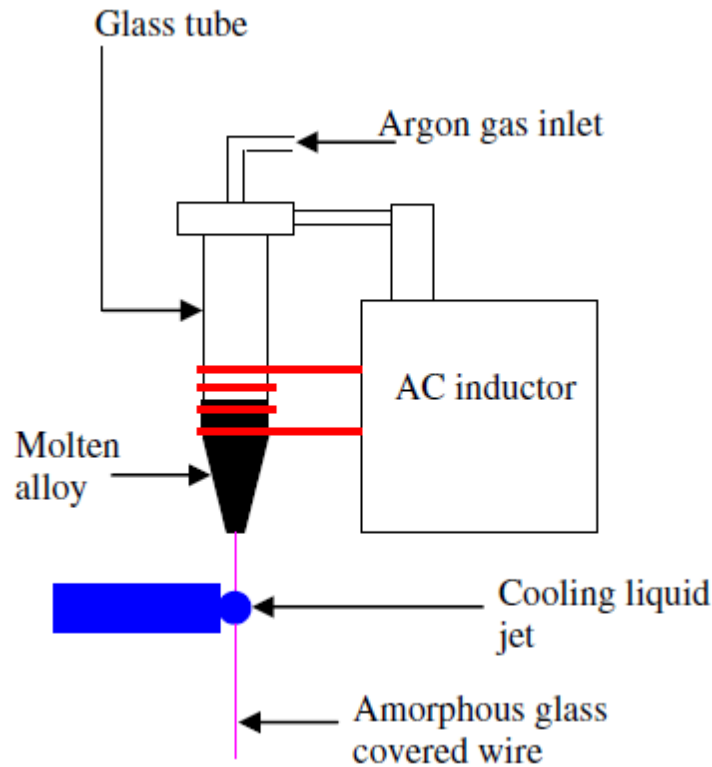
Η τεχνική αυτή αποτελεί μια τροποποίηση της τεχνικής Taylor και καθιστά εύκολη την παρασκευή συρμάτων από κράματα που παρουσιάζουν δυσκολία στο να σχηματίζουν τέτοια διάταξη. Η τάση του τήγματος να διασπάται σε σταγονίδια ανά τη επαφή με το ψυκτικό υγρό περιορίζεται δραστικά από την παρουσία της γυάλινης επικάλυψης. Σε σχέση με την τεχνική in-rotation water spinning, εμφανίζει υψηλότερους ρυθμούς ψύξης και πιο εύκολη παραγωγή σύρματος.

Η τεχνική εισήχθη από τους Wiesner και Schneider και αναπτύχθηκε περαιτέρω, αργότερα από τον Ulitovsky . Ειδικότερα, το τήγμα, καθώς ωθείται μέσω του γυάλινου σωλήνα στο ακροφύσιο της θερμαντικής συσκευής, περικλείεται από ελαστικό ύαλο τριχοειδούς υψής. Συνεπώς, αφού κομμάτια μετάλλου έχουν θερμανθεί μέσω επαγωγικού πηνίου εντός του γυάλινου σωλήνα, παρέχονται σαν συνεχής τηγμένη ροή με υαλώδες περίβλημα προς πίδακα νερού που ψύχει το υλικό δίνοντας το άμορφο σύρμα.

Για να προστατευθεί η διαδικασία από οξείδωση παρέχεται ατμόσφαιρα κενού ή περιβάλλον με αδρανές αέριο, π.χ. αργό. Η απόσταση του πίδακα από το ακροφύσιο θέρμανσης είναι 1 cm, ενώ ο ρυθμός ψύξης κυμαίνεται από  $10^4$  έως  $10^7$  K/s.

Γενικά, η τεχνική αυτή αφορά σε σύρματα διαμέτρου από 0,8 έως 30  $\mu\text{m}$  με γυάλινο περίβλημα πάχους 2 με 15  $\mu\text{m}$ . Η επίτευξη ακρίβειας στις διαδικασίες γίνεται με ταυτόχρονη χρήση οπτικού μικροσκοπίου υψηλής ανάλυσης.

Συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα της τεχνικής είναι η επαναληψιμότητα των ιδιοτήτων των συρμάτων σε μαζική παραγωγική διαδικασία και η μεγάλη ευχέρεια ως προς τα γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά των τεμαχίων (π.χ. υπάρχει δυνατότητα παραγωγής ομοιογενούς σύρματος μήκους 10 km). Έτσι, άμορφα σύρματα με βάση το σίδηρο και το κοβάλτιο παρασκευάζονται κατά κόρον με την εν λόγω τεχνική.



Σχήμα 1.26: Μηχανισμός melt spinning με επικάλυψη γυαλιού. Διακρίνεται παροχή AC και η εισδοχή αερίου αργού υπό πίεση.

##### 5. Ηλεκτροαπόθεση (electrodeposition)

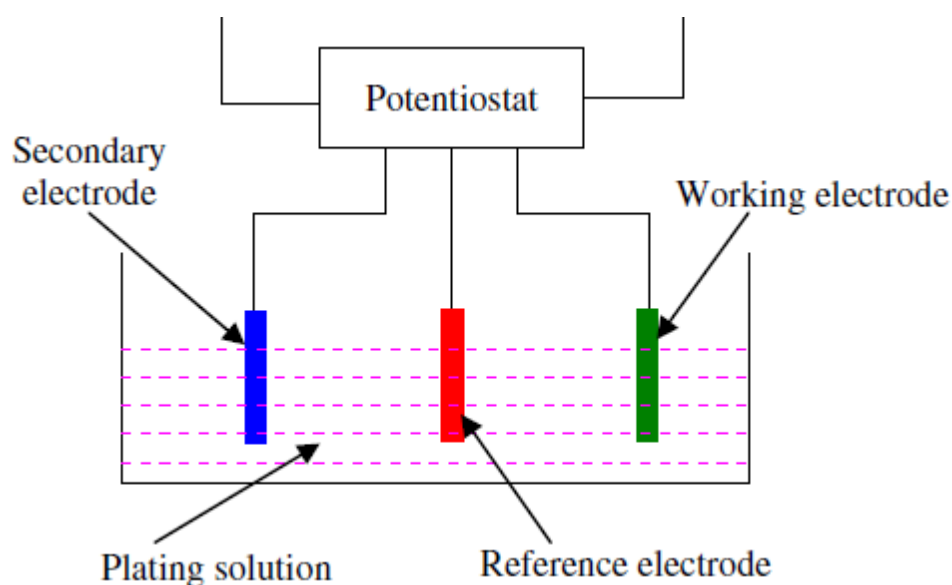
Η παρούσα τεχνική αποτελεί την πιο πρόσφατη επίτευξη στην Παρασκευή ομοιόμορφων συρμάτων. Χρησιμοποιήθηκε, αρχικά, για σύρματα μη μαγνητικού, αγωγίμου πυρήνα π.χ. από χαλκό ή βολφράμιο με επένδυση από μαγνητικό κράμα π.χ. FeNi. Εν γένει, η τεχνική αφορά σε παρασκευή μεταλλικών συρμάτων με όμοιο ή ανόμοιο στρώμα επιμετάλλωσης, συμπαγούς δομής που επιτυγχάνεται με χρήση ηλεκτρολυτικών λουτρών και ειδικών διεργασιών λείανσης.

Ειδικότερα, το σύρμα περνά από λουτρό ηλεκτρόλυσης προκειμένου να σχηματιστεί ένα στρώμα επένδυσης και, κατόπιν, περνά μέσα από περιστρεφόμενους κυλίνδρους που δίνουν ομοιομορφία στις περιφερειακές επιφάνειες του σύρματος και λειαίνουν την επίστρωση της επένδυσης. Τέλος, το σύρμα περνά και από δεύτερο λουτρό για να σχηματιστεί και δεύτερο στρώμα επένδυσης.

Κατά τη διεργασία της ηλεκτρόλυσης, η λεπτή μαγνητική επίστρωση σχηματίζεται γύρω από τον πυρήνα καθώς διατηρείται σταθερή πυκνότητα ρεύματος. Με σταθερή την ποσότητα αυτή, το πάχος της επίστρωσης ελέγχεται με βάση το χρόνο απόθεσης. Επίσης, η ηλεκτρόλυση γίνεται και ελεγχόμενα, παρουσία μαγνητικού πεδίου. Με αυτό τον τρόπο, ελέγχεται η σύσταση της επίστρωσης και βελτιώνεται η

ομοιομορφία της κατανομής των μαγνητικών ιδιοτήτων στην επιφάνεια του σύρματος.

Τέτοιου είδους σύρματα έχουν πυρήνα διαμέτρου περί τα 20 μm και επένδυση που κυμαίνεται μεταξύ 2 και 7 μm. Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής συνοψίζονται στα εξής: μεγάλο εύρος εφαρμογής ως προς τα υλικά, δυνατότητα συνεχούς παρασκευής αλλά και παρασκευής συρμάτων σε φουρνιές, δυνατότητα παρασκευής συρμάτων με διαφορετικά μεγέθη και σχήματα κόκκων και δυνατότητα παραγωγής υλικών με τη μέγιστη δυνατή πυκνότητα.



Σχήμα 1.27: Διαδικασία ηλεκτροαπόθεσης. Το σύρμα βυθίζεται στο ηλεκτρολυτικό διάλυμα για σχηματισμό επιμετάλλωσης.

#### Fabrication technologies and their product parameters

Technique	Product type	Typical dimensions (μm)	Typical cooling rate (K/s)
Melt spinning	Circular section wire	1–300 diameter	$10^4$ – $10^6$
In-rotating water spinning	Circular section wire	30–300 diameter	$10^5$ – $10^6$
Taylor-wire process	Circular section wire	2–100 diameter	$10^3$ – $10^6$
Glass-coated melt spinning	Wire/microwire with glass cover	3–50 diameter	$10^4$ – $10^7$
Electrodeposition	Wire with magnetic layer	20–1000 diameter	–

Πίνακας 1.4: Σύνοψη βασικών χαρακτηριστικών ανά μέθοδο παρασκευής άμορφων ή μη συρμάτων.

## **2. Το φαινόμενο της Γιγαντιαίας Μαγνητοεμπέδησης (Giant-Magneto Impedance, GMI)**

### **2.1 Γενικά**

Το φαινόμενο GMI αποτελεί ένα σχετικά καινούργιο πεδίο έρευνας πάνω στις μαγνητικές ιδιότητες των υλικών υπό την ευρεία έννοια. Μόλις το 1994 οι Mohri και Panina ανακοίνωσαν τα αποτελέσματα της έρευνας τους πάνω σε κράματα κοβαλτίου.

Σε γενικές γραμμές, η γιγαντιαία μαγνητοεμπέδηση συνιστά μια δραστική αλλαγή στην ολική εμπέδηση (κατά μέτρο) ενός σιδηρομαγνητικού αγωγμού υλικού όταν αυτό ευρίσκεται υπό την επιβολή συνεχούς, εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η συμπεριφορά της εμπέδησης που έχει την τυπική μορφή:

$$Z = R + j * X,$$

εξαρτάται από την τιμή του εξωτερικού πεδίου και τη συχνότητα του ρεύματος που διαρρέει το αγωγμό υλικό.

Το φαινόμενο GMI βρίσκεται στο κέντρο του ενδιαφέροντος από τη στιγμή που έχει διαπιστωθεί σε συγκεκριμένα άμορφα κράματα η εκδήλωση του και, μάλιστα, σε πολύ μεγάλες διαστάσεις. Έχουν αναφερθεί αλλαγές της τάξης έως και 800%. Αυτό το γεγονός σε συνδυασμό με τις χαμηλές απαιτήσεις ως προς το επιβαλλόμενο εξωτερικό πεδίο, την εκδήλωση του σε χαμηλές συχνότητες (έως κάποιες δεκάδες MHz) και σε υλικά ευρέως διαθέσιμα προσδίδουν ιδιαίτερη δυναμική στην έρευνα επί του GMI.

Στην επόμενη παράγραφο θα δοθούν κάποια βασικά στοιχεία για τα φαινόμενα που εκδηλώνονται εντός ενός αγωγμού, μαγνητικά πολωμένου υλικού τα οποία σχετίζονται άμεσα με το φαινόμενο GMI.

### **2.2 Προέλευση: Η δημιουργία δινορευμάτων και το επιδερμικό φαινόμενο**

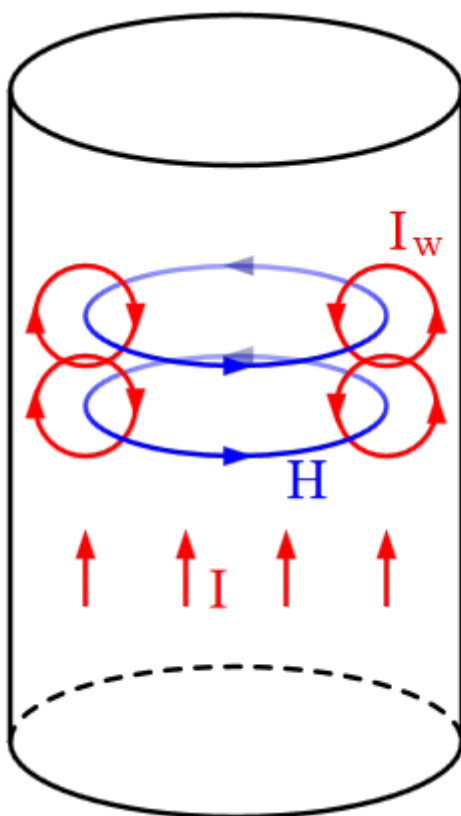
Η διέλευση εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω ενός κυλινδρικού αγωγού προκαλεί την εκδήλωση δινορευμάτων. Πρόκειται για κλειστούς βρόχους που σχηματίζονται από κίνηση ηλεκτρονίων εξαιτίας του φαινομένου Faraday.

Το εναλλασσόμενο ρεύμα δημιουργεί εγκάρσιο μαγνητικό πεδίο εναλλασσόμενης μορφής εντός του αγωγού. Σαν συνέπεια δημιουργείται μαγνητική ροή εγκάρσια στον αγωγό που, μάλιστα, μεταβάλλεται χρονικά. Το αποτέλεσμα είναι η ανάπτυξη αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ηλεκτρικού πεδίου) εξ'επαγωγής και η δημιουργία των δινορευμάτων, των λεγομένων *eddy currents*, που έχουν τέτοια φορά ώστε να αντιτίθενται στη μεταβολή της μαγνητικής ροής.



Διαφωτιστικό είναι το σχήμα 2.1 όπου η δημιουργία των κλειστών βρόχων επηρεάζει με ομοιόμορφο τρόπο την κατανομή του *συνολικού ρεύματος* εντός του αγωγού. Το ηλεκτρικό πεδίο *εξ'επαγωγής* είναι ισχυρότερο στο κέντρο του αγωγού με αποτέλεσμα τα αναπτυσσόμενα δινορεύματα να δρουν με αντίθετη φορά σε σχέση με το εναλλασσόμενο ρεύμα προς το κέντρο του αγωγού και να μειώνουν το συνολικό ρεύμα. Αντιθέτως, καθώς κινούμαστε προς την επιφάνεια, το φαινόμενο περιορίζεται και εκλείπει.

Το φαινόμενο πρωτοπαρατηρήθηκε από τον Horace Lamb το 1883 και μελετήθηκε από τον Heaviside. Αναφέρεται ως *επιδερμικό φαινόμενο*. Η κυριότερη παράμετρος που σχετίζεται με το επιδερμικό φαινόμενο είναι το *βάθος διείσδυσης*. Το βάθος διείσδυσης ορίζεται σαν την απόσταση εκείνη από την επιφάνεια της αγωγίσιμης επιφάνειας όπου η ένταση του ρεύματος έχει μειωθεί κατά τον παράγοντα  $e^{-1}$ . Αξίζει να αναφερθεί ότι σε περίπτωση συνεχούς ρεύματος το επιδερμικό φαινόμενο δεν εκδηλώνεται λόγω απουσίας μεταβλητής μαγνητικής ροής.



Σχήμα 2.1: Γραφική απεικόνιση των επαγόμενων δινορευμάτων το εσωτερικό ενός κυλινδρικού αγωγού που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα.

Σημειώνεται ότι η έννοια του επιδερμικού φαινομένου λόγω ανάπτυξης δινορευμάτων επεκτείνεται και σε κάθε περίπτωση μεταβολής μαγνητικής ροής που διαπερνά ένα αγωγίμο υλικό. Το υλικό αντιτίθεται στη μεταβολή αναπτύσσοντας δινορεύματα *εξ'επαγωγής* τα οποία είναι έντονα κοντά στην επιφάνεια του υλικού (που βρίσκεται και εγγύτερα στην πηγή του μαγνητικού πεδίου) και μειώνονται ραγδαία καθώς αυξάνεται το

βάθος παρατήρησης εντός του υλικού. Ισχύει λοιπόν ο ίδιος ακριβώς μηχανισμός (βλ. σχήμα 2.2).

Το βάθος διείσδυσης υπολογίζεται βάσει τύπου ως εξής:

$\delta = \sqrt{2\rho/\omega\mu}$ , όπου  $\rho$ : η ειδική αντίσταση του αγώγιμου υλικού,

$\omega$ : η κυκλική συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος και

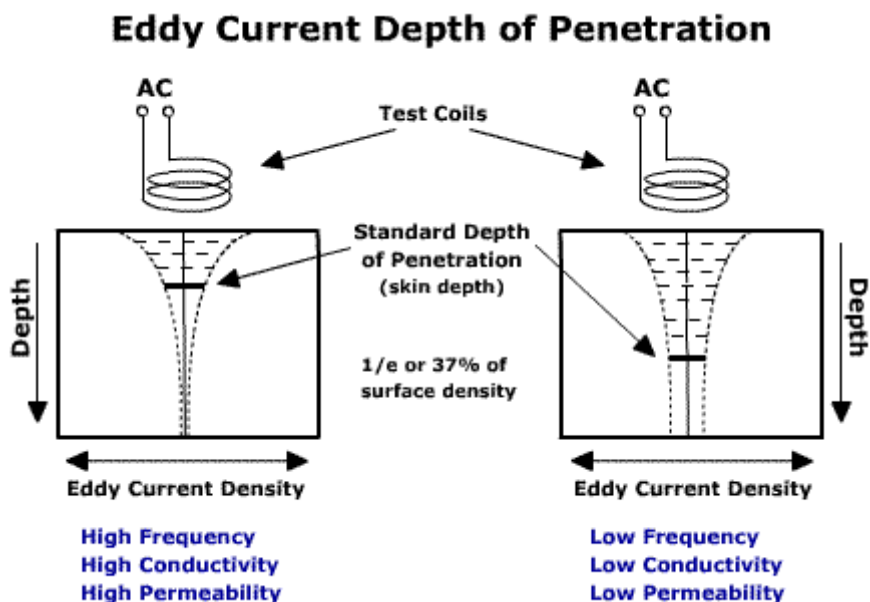
$\mu$ : η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού.

Μια άλλη πιο πρακτική μορφή του τύπου - που προκύπτει εύκολα - είναι η εξής:

$\delta = 1/\sqrt{\pi\sigma f\mu}$ , όπου  $\sigma$ : η ειδική αγωγιμότητα του υλικού και

$f$ : η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Παρατηρείται, συνεπώς, μια αύξηση του βάθους διείσδυσης, ήτοι περιορισμού του επιδερμικού φαινομένου, καθώς αυξάνεται η ειδική αντίσταση του αγωγού (μειώνεται η ειδική αγωγιμότητα του), μειώνεται η μαγνητική του διαπερατότητα και μειώνεται η συχνότητα του οδηγούμενου ρεύματος. Συνεπώς, το επιδερμικό φαινόμενο γίνεται εντονότερο με αύξηση της συχνότητας, δηλαδή του ενός από τους δυο κύριους παράγοντες επηρεασμού του φαινομένου GMI.



Σχήμα 2.2: Απεικόνιση επιδερμικού φαινομένου λόγω επαγωγής σε ένα αγώγιμο υλικό. Γίνεται κατανοητό πως μειώνεται το επιδερμικό φαινόμενο από αριστερά στα δεξιά με κατάλληλη μεταβολή των παραγόντων της ειδικής αγωγιμότητας, της διαπερατότητας και της ρευματικής συχνότητας.

Το επιδερμικό φαινόμενο θεωρείται η βασική συνιστώσα του φαινομένου GMI. Εν γένει, αποτελεί την αιτία που η αντίσταση ενός αγωγού υλικού μεταβάλλεται καθώς το ρεύμα που οδηγείται μέσω αυτού από συνεχές γίνεται εναλλασσόμενο με συχνότητα που βαίνει αυξητικά. Το επιδερμικό φαινόμενο γίνεται εντονότερο με αποτέλεσμα η ενεργός διατομή ενός κυλινδρικού αγωγού ή ενεργός επιφάνεια μιας αγωγίμης πλάκας (π.χ.ταινία) να μειώνεται. Συνεπώς, η αντίσταση στη ροή του ρεύματος αυξάνεται και ξεπερνά κατά πολύ την αντίσταση  $R$  που εμφανίζει το υλικό στην περίπτωση συνεχούς ρεύματος.

Για παράδειγμα, σε έναν κυλινδρικό αγωγό που εμφανίζει ένα βάθος διείσδυσης  $\delta$  που ταυτίζεται με καλή προσέγγιση με την ενεργό διατομή του και έχει ακτίνα  $a$  όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3, η αντίσταση δίνεται από προσεγγιστικό τύπο:

$$R = \frac{l}{\sigma(2\pi a \delta - \pi \delta^2)} \cong \frac{l}{\sigma 2\pi a \delta}$$



Σχήμα 2.3: Γεωμετρικά μεγέθη κυλινδρικού αγωγού. Σε περίπτωση που  $a \gg \delta$  ισχύει ο προσεγγιστικός τύπος.

Παρατηρείται ότι καθώς το  $\delta$  μειώνεται περαιτέρω τόσο απόλυτα όσο και σε σχέση με την ακτίνα  $a$ , η αντίσταση βαίνει αυξανόμενη. Αντιθέτως, αν το  $\delta$  αυξηθεί (λόγω μείωσης της συχνότητας του οδηγούμενου ρεύματος), ο προσεγγιστικός τύπος παύει να ισχύει. Η αντίσταση μειώνεται και, καθώς το βάθος  $\delta$  τείνει ή και ξεπερνά την ακτίνα  $a$ , ταυτίζεται με την τιμή της αντίστασης  $R_{DC}$  (για συνεχές ρεύμα). Τότε, έχουμε εξάλειψη του επιδερμικού φαινομένου.

Σημειώνεται ότι, σε περίπτωση ενός σιδηρομαγνητικού αγωγού, η ύπαρξη μεγάλης μαγνητικής διαπερατότητας καθιστά, εξαρχής, σε χαμηλά επίπεδα την τιμή του βάθους διείσδυσης και συντελεί στην εκδήλωση έντονου επιδερμικού φαινομένου.

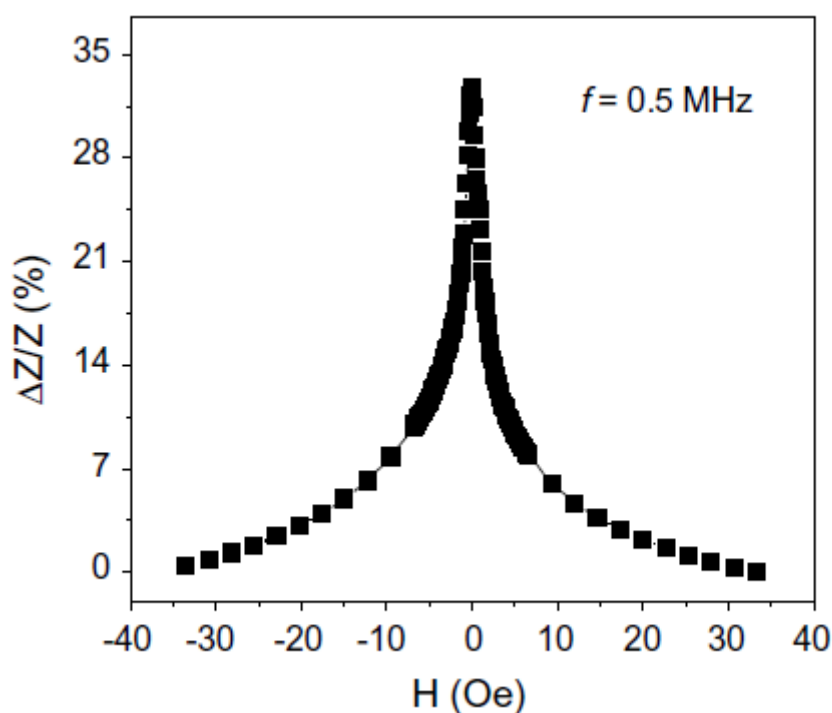
## 2.3 Βασικές σχέσεις και γραφήματα

Βασικό σημείο στη μελέτη του φαινομένου είναι η κεντρική σχέση μέσω της οποίας γίνεται αντιληπτό το φαινόμενο ποσοτικά και συνδέεται άμεσα με τους δύο κύριους παραγοντές που επιδρούν σε αυτό: τη συχνότητα του οδηγούμενου ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου πόλωσης. Η σχέση αυτή περιγράφεται ως εξής:

$\Delta Z/Z = 100\% * \{ Z(H) - Z(H_{max})/ Z(H_{max}) \}$ , όπου  $\Delta Z$ : η μεταβολή της σύνθετης εμπέδησης

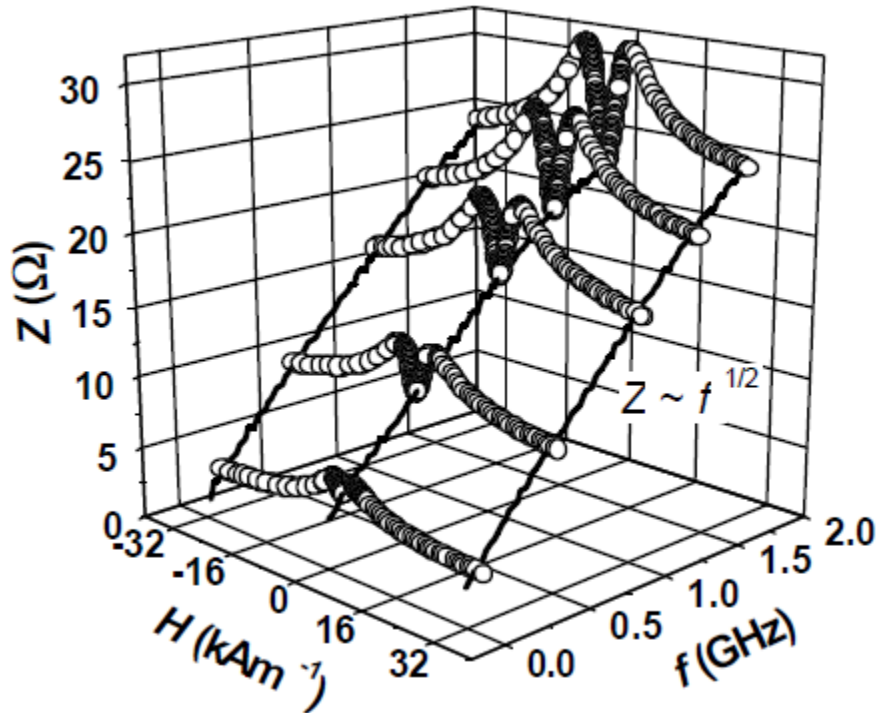
και  $H_{max}$ : η τιμή του εξωτερικού πεδίου για την οποία κορέννυται η τιμή της εμπέδησης.

Με βάση την ως άνω σχέση προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις που χαρακτηρίζουν το φαινόμενο GMI.



Σχήμα 2.4: Γραφική απεικόνιση του λεγόμενου GMI ratio, δηλαδή της σχετικής μεταβολής της εμπέδησης ενός μαγνητισμένου αγωγού, συναρτήσει του μαγνητικού πεδίου πόλωσης. Αφορά σε άμορφο κράμα με βάση το σίδηρο.

Ως παράμετρος στη γραφική απεικόνιση θεωρείται η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος. Συνεπώς, προκύπτει μια οικογένεια γραφικών παραστάσεων των οποίων η μορφή θα επεξηγηθεί άμεσα.



Σχήμα 2.5: Απεικόνιση ενδεικτική της μεταβολής του γραφήματος GMI ratio συναρτήσει του μαγνητικού πεδίου πόλωσης καθώς αυξάνεται η συχνότητα του οδηγούμενου ρεύματος. Παρατηρείται η εμφάνιση διπλής κορυφής καθώς αυξάνεται η συχνότητα.

Επιπλέον, παράμετροι που επιδρούν στο φαινόμενο GMI είναι η τιμή του οδηγούμενου εναλλασσόμενου ρεύματος καθώς και η θερμοκρασία. Ωστόσο, εφόσον το φαινόμενο GMI συνδέεται άμεσα με το επιδερμικό φαινόμενο - όπου επιδρούν καταλυτικά η συχνότητα (άμεσα) και το πεδίο πόλωσης (έμμεσα) - η μελέτη επικεντρώνεται στις δύο αυτές παραμέτρους.

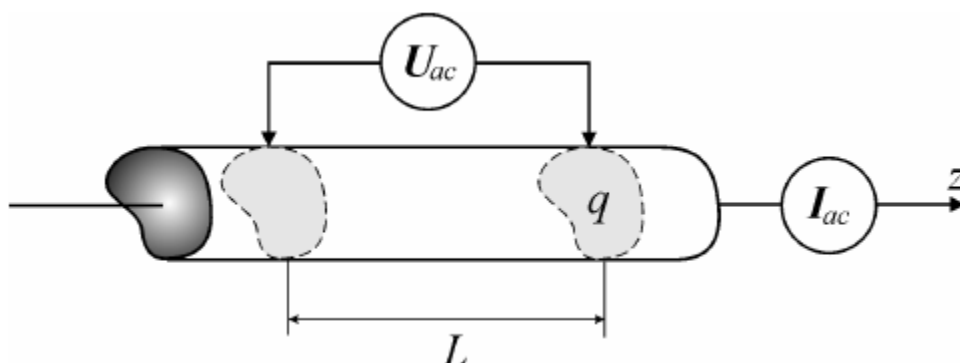
Το επιδερμικό φαινόμενο, που είναι υπεύθυνο για το φαινόμενο GMI στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες, περιγράφεται θεωρητικά σε όρους κλασσικής ηλεκτροδυναμικής με πρώτους εισηγητές τους Landau και Lifshitz.

Θεωρώντας έναν άπειρο, ευθύ και ομοιόμορφο αγωγό με τυχούσα διατομή  $q$ , εφαρμόζεται στα άκρα του μια εναλλασσόμενη τάση  $V$  και διαρρέεται από ένα ρεύμα έντασης  $I$ . Η εμπέδηση του δίνεται από τον εξής τύπο:

$$Z = V/I = \int_L [e_z(s) \cdot dz] / \iint_q [j_z \cdot dq], \text{ όπου}$$

η τάση  $V$  αποτελεί το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της διαμήκους συνιστώσας της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε μια καμπύλη διαμήκως του αγωγού ανάμεσα σε δυο τυχόντα σημεία και το ρεύμα έντασης  $I$  είναι το επιφανειακό ολοκλήρωμα της πυκνότητας ρεύματος  $j$  επί

τυχούσας διατομής του αγωγού μεταξύ των δυο σημείων. Το γράμμα S δηλώνει την επιφάνεια του αγωγού.



Σχήμα 2.6: Τμήμα αγωγού απείρου μήκους διατομής  $q$  όπου θεωρούνται δυο τυχόντα σημεία σε απόσταση  $L$  μεταξύ τους.

Χρησιμοποιώντας το νόμο του Ohm προκύπτει η εξής μορφή:

$$Z = \rho^* \int_L [j_z(s) * dz] / \iint_q [j_z * dq]$$

και θεωρώντας ότι η πυκνότητα ρεύματος  $j_z$  είναι ομοιόμορφη κατά το διαμήκη άξονα προκύπτει:

$$Z = \rho^* L * j_z(s) / \langle j_z \rangle * q, \text{ όπου } \langle j_z \rangle \text{ είναι η μέση τιμή της πυκνότητας που διαρρέει μέσω μιας τυχούσας διατομής.}$$

Συνεπώς, σημειώνοντας ότι  $R_{DC} = \rho^* L / q$ , προκύπτει ο τελικός τύπος:

$$Z / R_{DC} = j_z(s) / \langle j_z \rangle.$$

Συνεπώς, η σχετική μεταβολή της εμπέδησης ενός αγωγού προς την αντίσταση του υπό συνθήκες σταθερού ρεύματος ισούται με το λόγο της πυκνότητας ρεύματος στην επιφάνεια του αγωγού (που διαφέρει αναλόγως της συχνότητας του ρεύματος) προς εκείνη που διαρρέει τη συνολική εγκάρσια διατομή του.

Ένας εξίσου χρηστικός τύπος προκύπτει από τη βασική σχέση αν εφαρμόσουμε το νόμο του Ampere. Με βάση το σύστημα σχέσεων:

$$| Z = V / I$$

$$| I = c * H_\phi$$

$$| \mathbf{e}_{total} = \zeta (\mathbf{n} \times \mathbf{H}_{total})$$

όπου  $c$ : η περιφέρεια του κύκλου,  $H_\phi$ : η εφαπτομενική επιφανειακά συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου λόγω του ρεύματος  $I$ ,  $\mathbf{e}_{total}$ : το συνιστάμενο ηλεκτρικό πεδίο στην

επιφάνεια του αγωγού,  $\mathbf{H}_{\text{total}}$ : το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο στην επιφάνεια του αγωγού,  $\mathbf{n}$  το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα στην επιφάνεια του αγωγού και  $\zeta$ : ο διδιάστατος τανυστής της εμπέδησης στην επιφάνεια του αγωγού, επίσης.

Χρησιμοποιώντας τις ως άνω σχέσεις και λαμβάνοντας για τον τανυστή μια μορφή:

$$\zeta = \begin{pmatrix} \zeta_{zz} & \zeta_{z\phi} \\ \zeta_{\phi z} & \zeta_{\phi\phi} \end{pmatrix}$$

προκύπτει η σχέση:

$$Z = L/c \cdot \{ \zeta_{zz} - \zeta_{z\phi} H_z/H_\phi \}.$$

Η σχέση αυτή έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για έναν αγωγίμο σιδηρομαγνήτη. Συσχετίζονται άμεσα οι δυο συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου (αξονική και περιφερειακή) με την επιφανειακή εμπέδηση και τη μαγνητική διαπερατότητα του σιδηρομαγνήτη.

Οι δυο κεντρικές σχέσεις είναι ισοδύναμες αν και εμπεριέχουν κάποιες παραδοχές που ίσως εισάγουν σφάλματα στον υπολογισμό της συνολικής εμπέδησης. Αυτές είναι οι εξής:

- Η πυκνότητα του ρεύματος δεν είναι πάντοτε ανεξάρτητη της θέσης - διατομής που αναφέρεται δηλαδή δεν είναι ομοιόμορφη κατά το διαμήκη άξονα
- Στην εμπέδηση δεν περιέχεται η επίδραση της αυτεπαγωγής καθώς θεωρήθηκε αγωγός απείρου μήκους.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εντός του αγωγού γίνεται εφαρμογή των νόμων της κλασσικής ηλεκτροδυναμικής. Για την ανάκτηση των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου ή της πυκνότητας ρεύματος επιφανειακά και συνολικά, απαιτείται η εφαρμογή της παράγωγης εξίσωσης του Maxwell:

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \frac{\mu_0}{\rho} \dot{\mathbf{H}} = \frac{\mu}{\rho} \dot{\mathbf{M}} - \text{grad div } \mathbf{M}$$

και της εξίσωσης κατά Landau - Lifshitz:

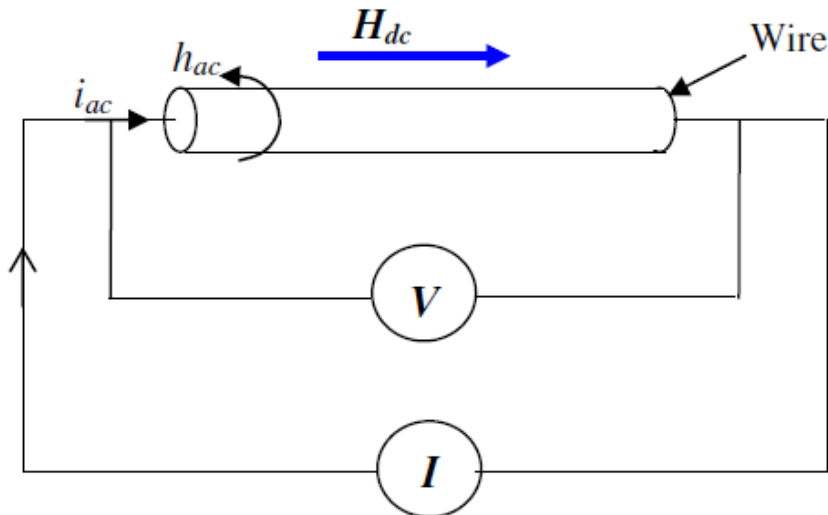
$$\dot{\mathbf{M}} = \gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} - \frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \dot{\mathbf{M}} - \frac{1}{\tau} (\mathbf{M} - \mathbf{M}_0)$$

όπου  $\gamma$ : ο γυρομαγνητικός λόγος,  $\mathbf{M}$ : η συνολική μαγνήτιση του αγωγού που οφείλεται είτε στο οδηγούμενο ρεύμα είτε σε τυχόν συνεχές πεδίο πόλωσης,  $\mathbf{H}$ : η ένταση του μαγνητικού πεδίου εντός του αγωγού είτε λόγω του οδηγούμενου ρεύματος είτε λόγω ενός εξωτερικού πεδίου πόλωσης,  $\alpha$ : η παράμετρος απόσβεσης κατά Gilbert και  $\mathbf{H}_{\text{eff}}$ : το μαγνητικό πεδίο

όπου περιλαμβάνονται όλες οι συνιστώσες της μαγνητικής ενέργειας σε μικροσκοπική και μακροσκοπική κλίμακα και δίνεται από τον τύπο:

$$H_{eff} = H + H_a + \frac{2A}{\mu_0 M_s} \nabla^2 M$$

όπου  $H_a$ : η ένταση του πεδίου ανισοτροπίας και  $A$ : η σταθερά αλληλεπίδρασης ανταλλαγής.



Σχήμα 2.7: Γενική περίπτωση μαγνητικού αγωγού που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα και είναι μαγνητικά πολωμένο από ένα συνεχές πεδίο  $H_{dc}$ .

Οι βασικοί αυτοί νόμοι οδηγούν στην εύρεση των τιμών της εμπέδησης βάσει τύπου αλλά απαιτούν δύσκολους υπολογισμούς. Αν υποθεθεί ότι η σχέση που συνδέει τη μαγνητική επαγωγή εντός του αγωγού με την ένταση του μαγν. πεδίου, τότε η επίλυση των ως άνω εξισώσεων καθίσταται δυνατή και οδηγεί σε συγκεκριμένα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, σε έναν κυλινδρικό μαγνητικό αγωγό η εμπέδηση δίνεται από τον τύπο:

$$Z = R_{DC} * kt * J_0(kt) / 2 * J_1(kt), \text{ όπου}$$

$J_{0,1}$ : οι συναρτήσεις Bessel μηδενικής και πρώτης τάξης,  $t$ : η ακτίνα του αγωγού και  $k$ : ο μιγαδικός παράγοντας που εισάγει το βάθος διείσδυσης  $\delta$  στη σχέση.

Ειδικότερα,  $k = (1+j) / \delta$ .

Το βάθος διείσδυσης συνδέεται άμεσα με την μαγνητική διαπερατότητα ως προς την εγκάρσια, εφαπτομενική διεύθυνση του αγωγού  $\mu_\phi$  και δίνεται βάσει τύπου:

$$\delta = c_0 / (\sqrt{4\pi^2 f \sigma \mu_\phi}), \text{ όπου } c_0: \text{ η ταχύτητα του φωτός.}$$

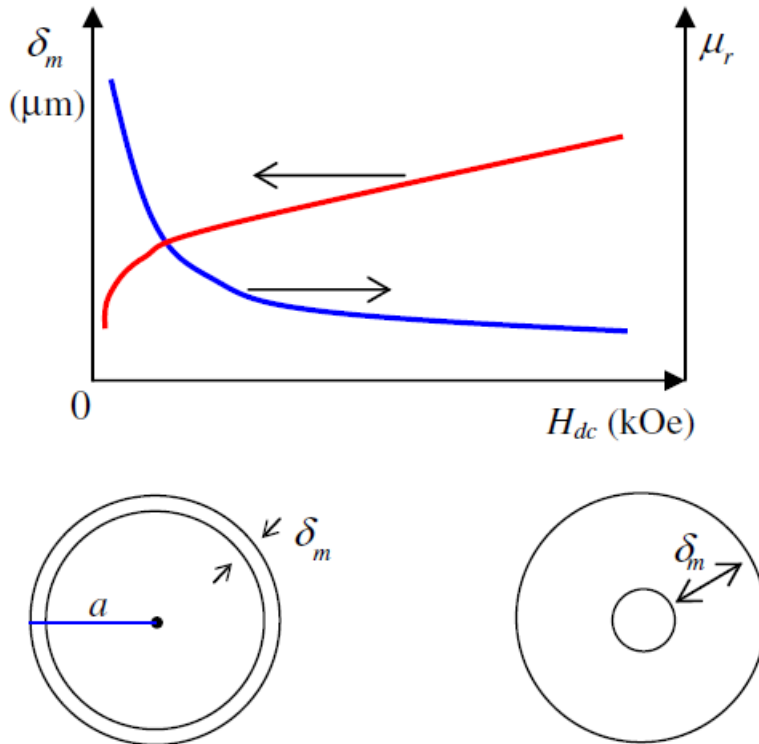


Είναι ξεκάθαρη η ομοιότητα του τελευταίου τύπου με τον κλασικό, γενικό τύπο για το βάθος διείσδυσης. Εξάλλου, το επιδερμικό φαινόμενο σχετίζεται άμεσα, όπως σημειώθηκε στην παράγραφο 2.2, με το μαγνητικό πεδίο λόγω του οδηγούμενου ρεύματος που αναφέρεται στην αυτή διεύθυνση με τη μαγν. διαπερατότητα  $\mu_{\phi}$ .

## **2.4 Επεξήγηση φαινομένου GMI**

Μετά την αναλυτική θεώρηση των νόμων και σχέσεων που διέπουν τη συμπεριφορά ενός μαγνητικού αγωγού που εκδηλώνει γιγαντιαία μαγνητοεμπέδηση, είναι πλέον εύληπτα τα εξής στοιχεία:

- Η εκδήλωση του φαινομένου GMI απαιτεί την ύπαρξη ενός στατικού μαγνητικού πεδίου που θα επιδράσει στην μαγνητική διαπερατότητα ως προς το μαγνητικό πεδίο AC του οδηγούμενου ρεύματος  $\mu_{\phi}$ , στο επιδερμικό φαινόμενο και, εν τέλει, στην τιμή της εμπέδησης.
- Οι υψηλές τιμές μαγνητοεμπέδησης προϋποθέτουν τη χρήση υλικού μεγάλης μαγνητικής διαπερατότητας (μαλακού σιδηρομαγνήτη), επειδή με αυτό τον τρόπο το βάθος διείσδυσης διατηρείται - ανεξαρτήτως της συχνότητας - σε χαμηλές τιμές και το επιδερμικό φαινόμενο εντείνεται.
- Η επίδραση της αύξησης του επιβαλλόμενου στατικού πεδίου στον αγωγό δρα αυξητικά στο βάθος διείσδυσης καθώς μειώνει τη διαπερατότητα  $\mu_{\phi}$  (περιορισμός επιδερμικού φαινομένου).
- Η συχνότητα επιδρά περιοριστικά στο βάθος διείσδυσης καθώς βαίνει αύξουσα. Έτσι, το επιδερμικό φαινόμενο εντείνεται. Παρατηρείται, λοιπόν, μια *σχέση αντίθεσης μεταξύ της επίδρασης της συχνότητας του οδηγούμενου ρεύματος και αυτής του στατικού πεδίου πόλωσης καθώς βαίνουν αυξητικά*. Αυτή η διευκρίνιση επεξηγεί το σχήμα 2.5 όπου η αύξηση συχνότητας, για τις αυτές τιμές στατικού πεδίου, μετατοπίζει την καμπύλη της εμπέδησης προς τα πάνω.



Σχήμα 2.8: Γραφική απεικόνιση της επίδρασης της αύξησης του στατικού πεδίου στο βάθος διείσδυσης και τη μαγνητική διαπερατότητα ενός αγωγού.

## **2.5 Επίδραση συχνότητας στο φαινόμενο GMI**

Η επίδραση της συχνότητας του οδηγούμενου ρεύματος στο φαινόμενο είναι διαφορετική ανά το εύρος που αυτή υπάγεται. Διακρίνονται οι περιοχές των πολύ χαμηλών, χαμηλών, μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων.

- Στην περιοχή των πολύ χαμηλών συχνοτήτων, δηλαδή από 1 έως 10 KHz, το επιδερμικό φαινόμενο είναι πολύ ασθενές. Συνεπώς, αν γίνει δεκτό ότι το επιδερμικό φαινόμενο είναι η γενεσιουργός αιτία του φαινομένου GMI, δεν υπάρχει εκδήλωση του φαινομένου.

Η αλλαγή στην τιμή της εμπέδησης, πάντως, είναι υπαρκτή αλλά περιορισμένη σε κλίμακα και απαιτεί την ύπαρξη οδηγούμενου ρεύματος μεγάλης τιμής. Το φαινόμενο αυτό είναι μη γραμμικό.

Αίτιο της αύξησης της εμπέδησης - σε σχέση με την τιμή της για συνεχές ρεύμα - είναι το φαινόμενο της επαγωγής, αναφερόμενο ως *magnetoinductive effect* κατά Mohri. Με άλλα λόγια, οφείλεται στην ανάπτυξη αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης από επαγωγή εξαιτίας του εγκάρσιου, εφαπτομενικού πεδίου που παράγει το

οδηγούμενο ρεύμα. Η τάση αυτή είναι ανάλογη της αυτεπαγωγής του αγωγού και εισάγει μια πρόσθετη συνιστώσα επαγωγικής φύσης στην συνολική τάση στα άκρα του αγωγού και στην τιμή της ολικής εμπέδησης. Ισχύει, λοιπόν, μια σχέση της μορφής:

$$V_{total} = V_R + jV_{ind} = R_{DC}I + j\omega L * I \Rightarrow Z = V_{total}/I = R_{DC} + j\omega L, \text{ όπου}$$

L: η αυτεπαγωγή του αγωγού, I: το οδηγούμενο ρεύμα,  $V_{ind}$ : η τάση εξ'επαγωγής και  $V_R$ : η πτώση τάσης λόγω ωμικής αντίστασης του αγωγού.

Η εξάρτηση του φαινομένου από το μαγνητικό πεδίο πόλωσης έγκειται στην επίδραση που αυτό ασκεί την τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu_\phi$  που με τη σειρά της επηρεάζει την τιμή της αυτεπαγωγής L.

Σημειώνεται ότι η μορφή της τάσης εξ'επαγωγής δεν είναι αρμονική καθώς αναπτύσσεται με βάση τη χρονική παράγωγο της μαγνητικής επαγωγής εντός του αγωγού που είναι μια βηματική συνάρτηση λόγω των αλμάτων Barkhausen. Συνεπώς, η μορφή της έχει κρουστικές διακυμάνσεις.

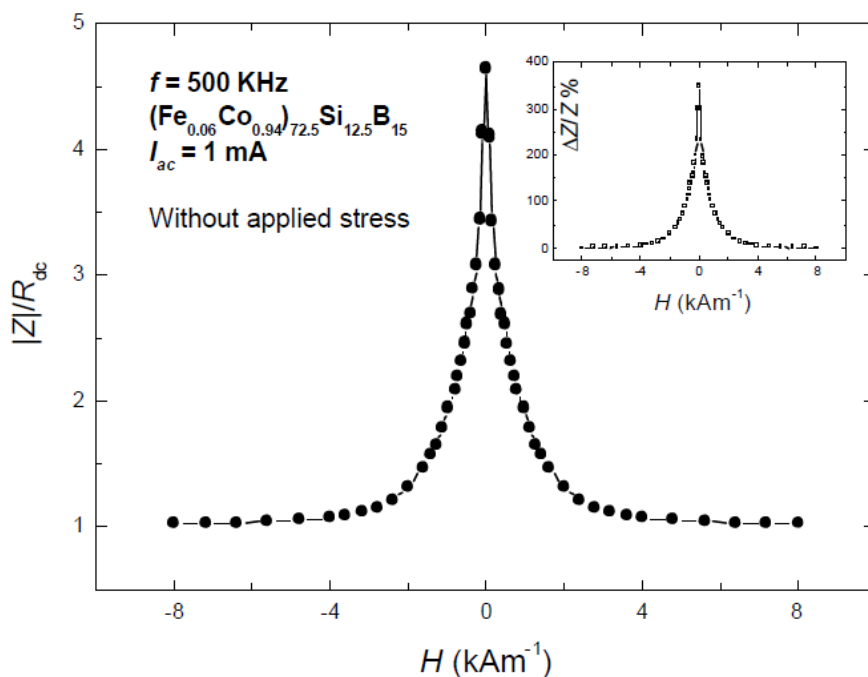
- Στην περιοχή των χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων, δηλαδή των ζωνών 10 έως 1 MHz και 1 MHz έως 1 GHz, υπάρχει πλήρης εκδήλωση του φαινομένου GMI που συνδέεται με το επιδερμικό φαινόμενο. Συνεπώς, η γιγαντιαία μαγνητοεμπέδηση επηρεάζεται έντονα από την τιμή του στατικού πεδίου πόλωσης καθώς αυτό αλλάζει τη διαπερατότητα του μαγνητισμένου αγωγού.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η μαγνητική διαπερατότητα σε ένα μαγνητισμένο αγωγό δεν είναι ένα βαθμωτό μέγεθος αλλά ένας τανυστής που εκφράζει την, σαφώς, πιο περίπλοκη σχέση μεταξύ της έντασης του μαγνητικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής εντός του αγωγού. Πρόκειται για την μαγνητική διαπερατότητα AC, όπως σημειώθηκε στην παράγραφο 2.4.

Ειδικότερα, στις δυο αυτές ζώνες συχνοτήτων η μαγνητική διαπερατότητα διακρίνεται σε δυο βασικές συνιστώσες: τη συνιστώσα της κίνησης των οριακών τοιχωμάτων και τη συνιστώσα της περιστροφής κατά τη μαγνήτιση (σαν να επρόκειτο για μαγνήτιση υλικού που αποτελείται από μοναδική μαγνητική περιοχή, *single domain*). Το μαγνητικό υλικό εξακολουθεί να διατηρεί τη δομή των μαγνητικών περιοχών αφού οι τιμές του στατικού πεδίου - προκειμένου να εκδηλωθεί το GMI – διατηρούνται, ακόμη, σε χαμηλά επίπεδα. Έτσι, η διαπερατότητα αντιμετωπίζεται, φORMALISτικά, σαν ένα μιγαδικό μέγεθος.

Η διαφοροποίηση μεταξύ των δύο ζωνών έγκειται στον περιορισμό της συνιστώσας λόγω κίνησης των οριακών τοιχωμάτων καθώς η συχνότητα μεταβαίνει στη ζώνη των μεσαίων. Αυτό συμβαίνει διότι αναπτύσσονται δινορεύματα μεγάλης έντασης που περιορίζουν τη διάδοση των τοιχωμάτων κατά το μαγνητισμό.

Ένα τυπικό γράφημα που αναφέρεται σε αυτό το εύρος συχνοτήτων δίνεται στο σχήμα 2.9. Παρατηρείται η μεγάλη διακύμανση της εμπέδησης που αγγίζει και το 360% σε σχέση με την αντίσταση συνεχούς ρεύματος  $R_{DC}$ . Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στις μικρές απαιτήσεις στατικού πεδίου για σχεδόν κατακόρυφη μείωση της εμπέδησης, γεγονός που καθιστά το φαινόμενο πολύ ενδιαφέρον. Σημειώνεται ότι μεγαλύτερη συνεισφορά στην ραγδαία μεταβολή έχει το πραγματικό μέρος της εμπέδησης καθώς η επαγωγική συνιστώσα διατηρείται χαμηλά λόγω συχνότητας.



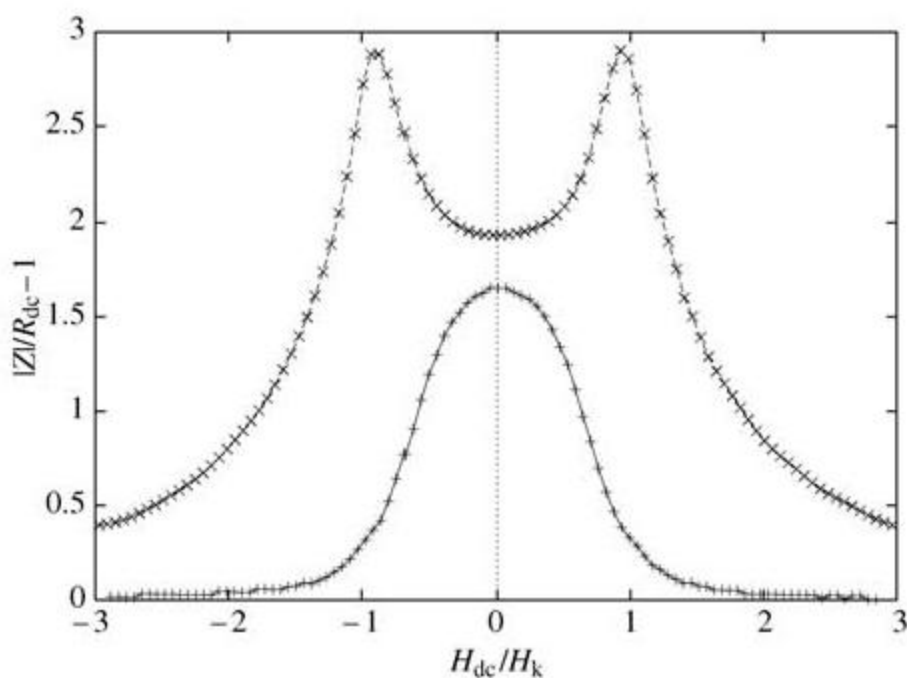
Σχήμα 2.9: Μεταβολή GMI ratio συναρτήσεως στατικού μαγνητικού πεδίου για μαγνητικό σύρμα FeCoSiB με οδηγούμενο ρεύμα 1mA και συχνότητας 500KHz.

- Στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων, δηλαδή για τιμές από 1 GHz και πάνω, το φαινόμενο GMI συνδέεται άμεσα με το γυρομαγνητικό φαινόμενο και το φαινόμενο FMR. Τα μέγιστα στα γραφήματα του GMI ratio συναρτήσεως του στατικού πεδίου μετατοπίζονται προς μεγαλύτερες τιμές πεδίου δημιουργώντας διπλή κορυφή στο γράφημα. Υφίστανται ευρείες μεταβολές και στην εκδήλωση του επιδερμικού φαινομένου.

Δεν θα γίνει εκτενέστερη αναφορά σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων καθώς δεν αφορά το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Τελειώνοντας την παράγραφο, ειδική αναφορά πρέπει να γίνει στην εμφάνιση μονής ή διπλής κορυφής στα γραφήματα του GMI συναρτήσεως του στατικού πεδίου. Γενικά, σε περιοχές χαμηλών συχνοτήτων η μέγιστη τιμή του λόγου GMI είναι μονή και τοποθετείται πλησίον του μηδενικού στατικού πεδίου. Καθώς η συχνότητα αυξάνεται, η κορυφή γίνεται διπλή καθώς μεταβαίνει σε υψηλότερες τιμές πεδίου και αντιστοιχεί κοντά στην τιμή του πεδίου ανισοτροπίας  $H_k$ . Το πεδίο  $H_k$  αντιστοιχεί στο γόνατο της καμπύλης μαγνήτισης του υλικού και αποτελεί εκδήλωση της τάσης του υλικού να παραμείνει μαγνητισμένο στον εύκολο άξονα του χωρίς να περιστραφεί ομοίμορφα προς το στατικό πεδίο. Γενικά, το πεδίο ανισοτροπίας τείνει να αυξάνεται καθώς μεγαλώνει η συχνότητα του οδηγούμενου ρεύματος. Έτσι, από μια μικρή τιμή για χαμηλές συχνότητες μεταβαίνει σε μια υπολογίσιμη τιμή για υψηλότερες συχνότητες.

Ενδεικτικό είναι το σχήμα 2.10 όπου φαίνεται η διαφοροποίηση των γραφημάτων ανά συχνοτικό εύρος.



Σχήμα 2.10: Γραφήματα μονής ή διπλής κορυφής συναρτήσεως στατικού πεδίου κανονικοποιημένου ως προς το πεδίο ανισοτροπίας. Όσο πιο διακριτή είναι ανισοτροπία ως προς δεδομένη διεύθυνση τόσο οξύτερες είναι οι κορυφές των μεγίστων.

## **2.6 Θεωρητικά μοντέλα περιγραφής GMI συμπεριφοράς**

Τα θεωρητικά μοντέλα όπου βασίζονται οι μελέτες του φαινομένου GMI ανά ζώνη συχνοτήτων είναι αρκετά, αν και τα περισσότερα αποτυγχάνουν να έχουν την ίδια

αποτελεσματικότητα σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Θα γίνει εκτενής αναφορά μόνο στα μοντέλα που αφορούν χαμηλές και μεσαίες συχνότητες αφού σε αυτή την περιοχή κινείται και το πειραματικό μέρος της εργασίας.

- Quasistatic model (Οιωνεί στατικό μοντέλο): Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε υποθέσεις που ισχύουν μόνο στην περίπτωση χαμηλών συχνοτήτων οδηγούμενου ρεύματος και, γενικά, αποτυγχάνει να περιγράψει επαρκώς την εξάρτηση του φαινομένου GMI από τη συχνότητα στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες.
- Ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο: Το μοντέλο αφορά την περιοχή των υψηλών συχνοτήτων (άνω του 1 MHz). Μελετά το φαινόμενο FMR και βασίζεται στην υπόθεση ότι στη διαμόρφωση της μαγνητικής διαπερατότητας συνεισφέρει μόνο η περιστροφή του διανύσματος μαγνήτισης.
- Μοντέλο δινορευμάτων (Eddy current model): Το μοντέλο αυτό εισήχθη από τους Panina et al. προκειμένου να υπολογιστεί η εγκάρσια, εφαιπτομενική διαπερατότητα για σύρματα με δομή μαγνητικών περιοχών που μοιάζει με φυτό μπαμπού. Μάλιστα, έχει επεκταθεί και σε περίπτωση ανομοιογενούς μαγνήτισης που σχετίζεται με παρόμοιες δομές αμνητικών περιοχών.

Τα δινορεύματα παράγονται από την κίνηση των οριακών τοιχωμάτων και αναλογούν στην κλίμακα των τοιχωμάτων. Έτσι, προκύπτει η εξάρτηση της διαπερατότητας από τη συχνότητα των ρευμάτων αυτών. Γενικά, η συχνότητα συνδέεται με την ατόνηση της κίνησης των οριακών τοιχωμάτων μέσω του όρου της *συχνότητας ηρεμίας*  $\omega_{dw}$ .

Με όμοιο τρόπο, καθώς στη μαγνήτιση συνεισφέρει και η περιστροφή των μαγνητικών διπόλων λόγω spin, εισάγεται και μια δεύτερη συχνότητα ηρεμίας  $\omega_{rot}$ . Οι δυο αυτές χαρακτηριστικές τιμές καθορίζουν τη συμπεριφορά του αγωγού ανά συχνότητα οδηγούμενου ρεύματος. Ειδικότερα, η εκτόνωση της περιστροφής των διπόλων λόγω spin είναι ένα ταχύτερο φαινόμενο από την εκτόνωση της κίνησης των οριακών τοιχωμάτων (ο όρος *εκτόνωση* συνδέεται με την ανάπτυξη απωλειών που ατονούν το φαινόμενο). Έτσι, ισχύει:

$$\omega_{dw} \ll \omega_{rot}$$

Για παράδειγμα, για συχνότητες μικρότερες της  $\omega_{dw}$ , η μείωση της διαπερατότητας με τη συχνότητα σχετίζεται με την ατόνηση της κίνησης των οριακών τοιχωμάτων. Όσον αφορά μεγαλύτερες συχνότητες, δηλαδή μικρό βάθος διείσδυσης και συχνότητα μεγαλύτερη της  $\omega_{dw}$ , η εμπέδηση Z είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του γινομένου  $\omega^* \mu_\phi$ . Γενικά, σε αγωγούς υπό τη μορφή σύρματος με κυκλική συμμετρία στη δομή των μαγνητικών περιοχών, οι απώλειες ενέργειας λόγω δινορευμάτων είναι μικρές, γι'αυτό και η διαπερατότητα διατηρείται σε παραπλήσιες τιμές.

Τέλος, για υψηλές συχνότητες άνω της  $\omega_{rot}$ , η εμπέδηση βαίνει επίσης αύξουσα. Σε αυτή την περίπτωση πάντως, η εμπέδηση γίνεται ανεξάρτητη του στατικού πεδίου αφού η μαγνητική διαπερατότητα παύει να επηρεάζεται από αυτό.

Το μοντέλο δινορευμάτων εξηγεί τα πειραματικά δεδομένα σε ένα εύρος συχνότητων από 100 KHz έως 30 MHz.

- Μοντέλο αγωγιμότητας ανταλλαγής (Exchange-conductivity model): Το μοντέλο αυτό αφορά σε μια ευρύτερη συχνοτήτων σε σχέση με το ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο. Παρ'όλα αυτά, όπως το τελευταίο, αποτυγχάνει να εξηγήσει το φαινόμενο GMI στην ολότητα του εξαιτίας της αδυναμίας του να αναλύσει επιτυχημένα την επίδραση της περίπλοκης, μαγνητικής δομής ενός πραγματικού αγωγού και των υφισταμένων υποθέσεων του.
- Μοντέλο μαγνητικής περιοχής (Domain model): Το μοντέλο αυτό αποτελεί την πιο αυστηρή θεώρηση του φαινομένου GMI, συνολικά, για έναν μαγνητικό αγωγό υπό μορφή σύρματος περιοδικής, κυκλικής μαγνητικής δομής. Μπόρεσε να περιγράψει, εξαρχής (Chen et al.), πειραματικά δεδομένα και τη μορφή των γραφημάτων συναρτήσεως του στατικού πεδίου. Μολαταύτα, χρειάστηκαν νέες παρεμβάσεις ώστε να βελτιωθεί η συμπεριφορά του μοντέλου ως προς την εκτίμηση της μαγνητικής διαπερατότητας.

Οι Betancourt et al. εισήγαγαν τον παράγοντα της συχνότητας και εξισώσεις της εμπέδησης, συνολικά, ώστε να εκτιμήσουν τις μεταβολές της μαγν. διαπερατότητας  $\mu$ . Όμως, το μοντέλο αδυνατούσε και πάλι να εξηγήσει τη διασπορά της εκτόνωσης της διαπερατότητας φασματικά. Έτσι, οι Kim et al. πρότειναν την ύπαρξη των ξεχωριστών μηχανισμών της κίνησης των οριακών τοιχωμάτων και της περιστροφής της μαγνήτισης σε ένα μαλακό, μαγνητικό, άμορφο υλικό που επηρεάζουν τη διαπερατότητα, υπό συνθήκες χαμηλού στατικού πεδίου.

Το μοντέλο αυτό είναι επαρκές για συχνότητες κάτω των 100 MHz, αλλά μη αποδοτικό για συχνότητες που ανήκουν στο εύρος των υψηλών.

- Άλλα μοντέλα: Έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς επιπλέον μοντέλα προκειμένου να διευθετηθούν θεωρητικά θέματα επί του φαινομένου GMI όπως η διατήρηση ενέργειας του στους σιδηρομαγνήτες, η επίδραση της μαγνητοαντίστασης (MR) στην εμφάνιση της γιγαντιαίας εμπέδησης κ.α. Παρ'όλα αυτά, τα εν λόγω μοντέλα είναι αντικειμενοστραφή και, γενικά, δεν προορίζονται για πλήρη περιγραφή του φαινομένου.

## **2.7 Ιδιότητες υλικών για εκδήλωση συμπεριφοράς GMI**

Στην παρούσα παράγραφο καταγράφονται οι επιθυμητές ιδιότητες ενός σιδηρομαγνητικού υλικού ούτως ώστε να επιτρέπει την εκδήλωση του φαινομένου GMI.

- Ο σιδηρομαγνήτης πρέπει να είναι ένα μαλακό υλικό. Χαρακτηριστικό του είναι ένας στενός βρόχος υστέρησης μεγάλης κλίσης. Πλεονέκτημα αποτελούν οι

χαμηλές απώλειες ανά κύκλο μαγνήτισης, ειδικά σε περιπτώσεις υψηλών συχνοτήτων.

- Το υλικό θα πρέπει να έχει καλά ορισμένους άξονες μαγνήτισης εξαιτίας της ανισοτροπίας. Παράλληλα, όμως, η τιμή του πεδίου ανισοτροπίας πρέπει να διατηρείται κατά το δυνατό χαμηλή (μερικά Oersted). Ο λόγος του πεδίου ανισοτροπίας προς το συνεκτικό πεδίο πρέπει να είναι κοντά στο 20.
- Εφόσον το συνεκτικό πεδίο καθώς και όλος ο βρόχος υστέρησης μεταβάλλονται συναρτησί της διεύθυνσης του στατικού πεδίου σε σχέση με τους “εύκολους” άξονες, πρέπει γενικά να τηρούνται οι κανόνες: χαμηλό πεδίο συνοχής, στενός και απότομος βρόχος υστέρησης.
- Το οδηγούμενο, εναλλασσόμενο ρεύμα πρέπει να διαρρέει το μαγνητικό υλικό κάθετα προς τον (τους) άξονα (ες) εύκολης μαγνήτισης. Ακόμη, το πεδίο που δημιουργεί πρέπει να είναι μικρό σε σχέση με το πεδίο ανισοτροπίας.
- Το υλικό πρέπει να εμφανίζει ειδική αντίσταση μικρότερη των  $100\mu\Omega\cdot\text{cm}$ . Τα άμορφα μαγνητικά υλικά αποτελούν μια καλή λύση ως προς αυτή την προϋπόθεση.
- Ο σιδηρομαγνήτης πρέπει να παρουσιάζει μεγάλη μαγνήτιση κόρου ώστε να υπάρχει έντονη αλληλεπίδραση με το στατικό πεδίο.
- Η υψηλή διαπερατότητα που συνεπάγεται των παραπάνω χαρακτηριστικών αντιστοιχεί σε μεγάλη σχετική διαπερατότητα της τάξης μερικών χιλιάδων.
- Το σιδηρομαγνητικό υλικό θα πρέπει να έχει μικρή σταθερά μαγνητοσυστολής ώστε η ανάπτυξη τάσεων κατά τη μαγνήτιση να διατηρείται χαμηλά. Σε περίπτωση έντονων παραμορφωτικών τάσεων μεταβάλλεται η κατανομή της ανισοτροπίας εντός του υλικού μετατοπίζοντας τους “εύκολους” άξονες σε σχέση με τη διεύθυνση του οδηγούμενου ρεύματος. Συνεπώς, επιδρά έμμεσα στο φαινόμενο GMI μειώνοντας την τελική τιμή της εμπέδησης.

## **2.8 Μαλακά, σιδηρομαγνητικά σύρματα με συμπεριφορά**

### **GMI**

Γενικά, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης τόσο κρυσταλλικών όσο και άμορφων υλικών για μελέτη και εφαρμοσμένη χρήση του φαινομένου GMI. Τα άμορφα τείνουν να κυριαρχήσουν σε αυτό το πεδίο καθώς εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά σε μαλακά υλικά, δηλαδή μεγαλύτερη διαπερατότητα και μαγνήτιση κορεσμού, ενώ απουσιάζει η ιδιότητα της ανισοτροπίας, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο. Εξάλλου, μέσω ειδικών θερμικών και άλλης φύσεως κατεργασιών, βελτιώνεται η συμπεριφορά τους τόσο ως προς το φαινόμενο GMI όσο και την ευαισθησία τους προς εξωτερικό πεδίο μαγνήτισης.

Συνεπώς, η ανάλυση στην παρούσα παράγραφο αφορά, κυρίως, στα άμορφα σιδηρομαγνητικά υλικά που εκδηλώνουν το GMI και, όπως θα γίνει αντιληπτό, παρασκευάζονται ειδικά για τέτοιες εφαρμογές. Επιπλέον, διευκρινίζεται ότι η μελέτη αφορά αποκλειστικά στην εκδήλωση GMI σε μαγνητικά υλικά υπό μορφή συρμάτων.



### **2.8.1 Άμορφα σύρματα ταχείας ψύξης**

Τα σύρματα αυτά διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες: των συρμάτων με βάση το κοβάλτιο (Co) και αυτών με βάση το νικέλιο (Ni).

- Σύρματα με βάση το κοβάλτιο: Τα σύρματα αυτά διακρίνονται από μεγάλη διαπερατότητα  $\mu_\phi$ . Αυτή η ιδιότητα οφείλεται στη δομή των μαγνητικών τους περιοχών που χαρακτηρίζεται από περιφερειακή, εφαπτομενικά, ανισοτροπία. Χαρακτηρίζονται από αρνητική μαγνητοσυστολή.

Ειδικότερα, το κράμα Co-Fe-Si-B παρουσιάζει μηδενική περίπου μαγνητοσυστολή, τάξης μεγέθους περί  $10^{-8}$  με αρνητικό πρόσημο. Η ιδιότητα αυτή προέρχεται από την κραμάτωση δύο ξεχωριστών συνιστωσών, του αρνητικής μαγνητοσυστολής Co-Si-B και του θετικής μαγνητοσυστολής Fe-Si-B. Σε άμορφο κράμα αυτού του τύπου, δεδομένης σύστασης έχει καταγραφεί η τιμή-ρεκόρ του 1200% GMI ratio στα 14,2 MHz. Επίσης, έχει καταγραφεί και υψηλή ευαισθησία ως προς το στατικό πεδίο της τάξης των 500 %/Oe.

Επίσης, έγιναν προσπάθειες παρασκευής τέτοιων συρμάτων για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων. Έχει καταγραφεί κράμα δεδομένης σύστασης τύπου Co-Mn-Si-B, με σχεδόν μηδενική μαγνητοσυστολή, που παρουσίασε GMI ratio 153% και ευαισθησία της τάξης 65%/Oe στα 30MHz. Επίσης, υπάρχουν αναφορές για επιτυχημένη απόδοση σε συχνοτικό εύρος μεταξύ 100 MHz και 6 GHz.

Συνοψίζοντας, τα σύρματα με βάση το κοβάλτιο αποτελούν μια αξιόπιστη επιλογή για εκδήλωση και εφαρμογή του φαινομένου GMI. Διατίθενται με ή χωρίς επικάλυψη υάλου, σε μορφή συρμάτων ή μικροσυρμάτων (*microwire*) και αφορούν σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Μάλιστα, η απόδοση τους μπορεί να βελτιωθεί με διαδικασίες σκλήρυνσης (“ψήσιμο”) υπό επιβαλλόμενο πεδίο, επιβαλλόμενη μηχανική τάση κ.α.

- Σύρματα με βάση το σίδηρο: Εν γένει, τα άμορφα σύρματα με βάση Fe παρουσιάζουν μικρό έως και μηδενικό φαινόμενο MI (magneto-impedance) εξαιτίας της σχετικά χαμηλής διαπερατότητας τους που οφείλεται στη δομή των μαγνητικών περιοχών στο κέλυφος τους. Ένας σημαντικός παράγοντας είναι και η υψηλή, θετική μαγνητοσυστολή που συνδέεται άμεσα με την περιορισμένη εκδήλωση του φαινομένου.

Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα είναι το κράμα Fe-Si-B. Βελτίωση της απόδοσης του προέκυψε με καθίζηση κράματος Fe-Si σε νανοκρυσταλλική φάση<sup>\*\*\*</sup>. Η κρυστάλλωση προκαλεί μείωση της μαγνητοσυστολής και σε συνδυασμό με προσμίξεις Nb και Cu, που συντελούν στη δημιουργία δομών bcc σε νανοκλίμακα, προσδίδουν στα κράματα τις επιθυμητές ιδιότητες ενός πολύ μαλακού σιδηρομαγνήτη. Ο ρόλος των προσμίξεων είναι να αυξάνουν την πυκνότητα των κρυσταλλικών μονάδων και να επιβραδύνουν την αύξηση των κόκκων σε μέγεθος.

Ένα κράμα Fe-Si-B-Nb-Cu, δεδομένης σύστασης, υπό μορφή σύρματος παρουσίασε αυξημένη απόδοση MI και, με περαιτέρω μελέτη, διαπιστώθηκε GMI συμπεριφορά με λόγο GMI 200% στα 500 KHz. Επιπλέον, με πειραματικές βελτιώσεις, όπως η μερική αντικατάσταση σιδήρου με χρώμιο, η εκδήλωση του φαινομένου GMI έγινε λιγότερο υστερητική σε μεταβολές του στατικού πεδίου.

Συμπεριφορά GMI έχει καταγραφεί και σε νανοκρυσταλλικά σύρματα με επικάλυψη υάλου και μικροσύρματα σε συχνότητες που ανέρχονται σε τιμές GHz. Γενικά, πάντως, η επικάλυψη υάλου τείνει να περιορίζει την απόδοση των συρμάτων. Εν κατακλείδι, τα σιδηρούχα σύρματα έχουν χαμηλότερη απόδοση ως προς τη GMI συμπεριφορά σε σχέση με τα κοβαλτιούχα.

### **2.8.2 Σύρματα ηλεκτροαπόθεσης (ηλεκτρόλυσης)**

Τα σύρματα αυτά, αν και αποτελούνται από μη μαγνητικό πυρήνα (π.χ. από χαλκό ή άργυρο) και, μόνο, ένα λεπτό φιλμ μαγνητικού υλικού περί αυτού (κράματα νικελίου, κοβαλτίου και σιδήρου με προσμίξεις), εκδηλώνουν εξαιρετικά το φαινόμενο GMI. Η δομή των μαγνητικών περιοχών του φιλμ είναι είτε με ακτινική είτε με εγκάρσια, εφαπτομενικά μαγνήτιση.

Η αντίληψη ότι τα σύρματα αυτής της τεχνικής είναι αποτελεσματικά προήλθε από έρευνα των Uson et al. που προέβλεπε ότι έναν σύνθετος αγωγός με πυρήνα μεγαλύτερης αγωγιμότητας σε σχέση με το περίβλημα του θα επεδείκνυε σημαντική συμπεριφορά GMI.

Γενικά, σύρματα με ακτινική διάταξη μαγνητικών περιοχών στο περίβλημα τους δεν εκδηλώνουν το φαινόμενο GMI. Στην περίπτωση αυτών των συρμάτων, όμως, αύξηση του πάχους του περιβλήματος συνδέεται με τόνωση του φαινομένου GMI. Η παρατήρηση αυτή εξηγείται από την κατανομή του ρεύματος στη διατομή του αγωγού που ρυθμίζεται με βάση τις διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες πυρήνα-περιβλήματος και τα χαρακτηριστικά μετάδοσης. Έτσι, οι Phan et al. έκαναν τις απαραίτητες βελτιώσεις σε ένα τυπικό σύρμα Co-P/Cu και μέτρησαν GMI ratio της τάξης του 534% με ευαισθησία πεδίου στο 21%/Oe στα 10,7 MHz.

Σε αυτό το σημείο, αναφέρεται η σημαντική επίδραση που έχουν στην εκδήλωση του φαινομένου παράγοντες όπως ο χρόνος απόθεσης κατά την ηλεκτρόλυση, η πυκνότητα του ρεύματος, ο κύκλος λειτουργίας, το pH, το επιβαλλόμενο πεδίο κ.α.

Ρυθμίζοντας τις παραπάνω παραμέτρους έχουν επιτευχθεί με διάφορα υλικά όπως Fe-Ni-Co/Cu-Be και Ni-Fe/Cu τιμές λόγου GMI έως και 1200% στα 4 MHz.

Καινοτομίες όπως η εισαγωγή μονωτικού φιλμ μεταξύ του πυρήνα και του περιβλήματος βελτιώνουν επιπλέον την απόδοση της διάταξης. Για παράδειγμα, η προσθήκη μονωτή στο σύρμα Cu-Be/Ni-Fe-B αυξάνει το GMI ratio κατά 227 εκατοστιαίες μονάδες σε συχνότητα 1 MHz. Η εξήγηση της εν λόγω βελτίωσης έχει προταθεί ως μοντέλο από τους Buznikon et al. που υπογραμίζει την αύξηση της διαπερατότητας στο μαγνητικό περίβλημα βάσει στατικού

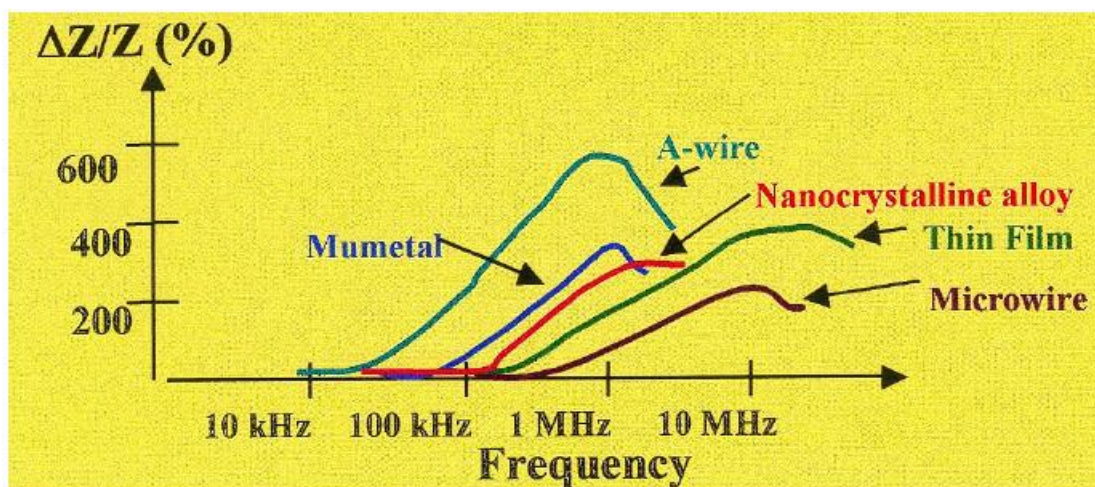
πέδιου που επηρεάζει την κατανομή των δινερευμάτων. Ο μονωτής συμβάλλει στην αύξηση της διαπερατότητας στις υψηλές συχνότητες τόσο στη διαγώνια όσο και στη μη διαγώνια συνιστώσα της.

Συνοψίζοντας, τα σύρματα ηλεκτρόλυσης αποτελούν μια καλή και την, πλέον, υποσχόμενη λύση για εφαρμογές GMI σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.

### **2.8.3 Άλλα υλικά**

Μια πρόσφατη εξέλιξη αποτελεί η καινοτομία των Phan et al., οι οποίοι προκειμένου μειώσουν τη συνολική αντίσταση, εφήυραν τη διάταξη ενός σύνθετου υλικού που αποτελείται από άμορφα μικροσύρματα ενσωματωμένα σε μήτρα πολυμερούς. Τα άμορφα σύρματα τοποθετούνται παράλληλα. Η εκδήλωση του φαινομένου GMI γίνεται εντονότερη με την αύξηση του αριθμού των συρμάτων. Ο λόγος GMI φτάνει έως και το 447% στα 10 MHz με ευαισθησία πείτ το 43%/Oe.

Η συσχέτιση της μείωσης της αντίστασης με την τόνωση της συμπεριφοράς GMI επιβεβαιώθηκε καθώς με μείωση του μήκους των συρμάτων παρατηρήθηκαν μεγαλύτεροι λόγοι GMI, ενώ συνδυάστηκαν και με βελτίωση της μαγνητικής απόκρισης. Οι μειωμένες διαστάσεις συνιστούν ένα σοβαρό πλεονέκτημα στις εφαρμογές του φαινομένου.



Σχήμα 2.11: Εξέλιξη χρήσης των GMI υλικών, χρονολογικά. Mu - metal είναι ένα συγκεκριμένο κράμα σιδήρου - νικελίου.

\*\*\*: Η νανοκρυσταλλικά κράματα αποτελούνται, συνήθως, από δυο φάσεις. Τη σιδηρομαγνητική νανοκρυσταλλική φάση και μια υπολειπόμενη άμορφη φάση στις διεπιφάνειες των κρυσταλλιτών. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη ειδική αντίσταση, μικρή ανισοτροπία και αυξημένη αντοχή.

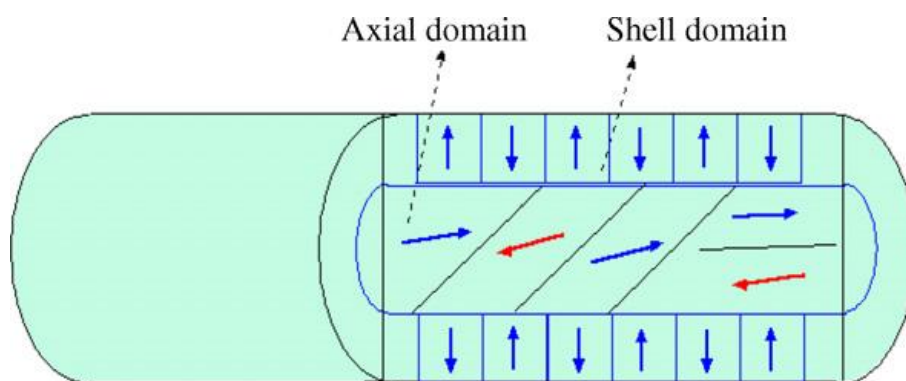
## 2.9 Μαγνητική δομή και ιδιότητες άμορφων συρμάτων με συμπεριφορά GMI

### 2.9.1 Δομή μαγνητικών περιοχών

Η δομή των μαγνητικών περιοχών στα υλικά ταχείας ψύξης καθορίζεται από τη σύζευξη μεταξύ των παραμέτρων της μαγνητοσυστολής και της κατανομής των εσωτερικών μηχανικών τάσης τη στιγμή της στερεοποίησης, κατά την διαδικασία κατασκευής του υλικού. Η γνώση της δομής των μαγνητικών περιοχών είναι σημαντική στον έλεγχο των μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών.

Στα υλικά ταχείας ψύξης η περίπλοκη ακτινική κατανομή της εσωτερικής τάσης με τις αξονικές, ακτινικές και κυκλικές συνιστώσες δημιουργείται από τους διαφορετικούς ρυθμούς ψύξεως μεταξύ της επιφάνειας και του εσωτερικού του σύρματος. Το πρόσημο και το μέγεθος της σταθεράς μαγνητοσυστολής ( $\lambda$ ) καθορίζει τον τύπο της δομής των μαγνητικών περιοχών στα σύρματα.

Στα άμορφα σύρματα με θετική μαγνητοσυστολή (π.χ. σύρματα βασιζόμενα στο Fe) η κατανομή των παραμενουσών τάσεων, μετά τη στερεοποίηση, είναι διαφορετική στο εσωτερικό του σύρματος (διαμήκης "εύκολος" άξονας) και στο εξωτερικό του σύρματος (ακτινικός "εύκολος" άξονας). Στο σχήμα 2.12 φαίνεται η κατανομή των μαγνητικών περιοχών σε ένα κοινό σύρμα.

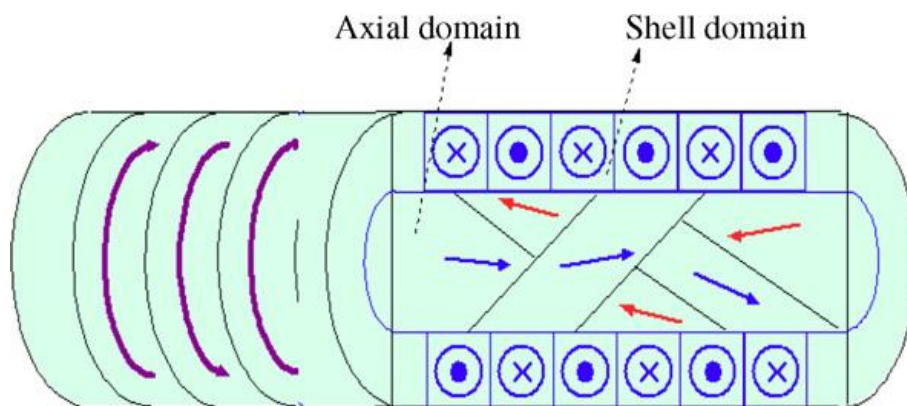


Σχήμα 2.12: Η κατανομή των μαγνητικών περιοχών σε άμορφα σύρματα με θετική μαγνητοσυστολή (π.χ. σύρματα βασιζόμενα στο Fe).

Στο εσωτερικό της κυλινδρικής μαγνητικής περιοχής - που καταλαμβάνει το 70% του συνολικού όγκου - υπάρχει μια διαμήκης μαγνήτιση ενώ στην εξωτερική επιφάνεια του σύρματος η μαγνήτιση είναι ακτινική. Αυτή η δομή είναι υπεύθυνη για τα έντονα φαινόμενα Barkhausen που λαμβάνει χώρα αξονικά.

Για σύρματα με μικρότερη μαγνητοσυστολή, με μήκος περί των 4 mm, το εσωτερικό του σύρματος έχει μια πολυπλοκότερη δομή χωρίς τέτοια κανονικότητα.

Στα άμορφα σύρματα με αρνητική μαγνητοσυστολή (π.χ. σύρματα Co-Si-B) η κατανομή των παραμενουσών τάσεων, μετά τη στερεοποίηση, προκαλεί μια κυκλική ανισοτροπία στην επιφάνεια του σύρματος, ενώ, στο εσωτερικό του, μια ανισοτροπία κάθετη στον άξονα του σύρματος. Ενδεικτικό αυτής της δομής είναι το σχήμα 2.13.



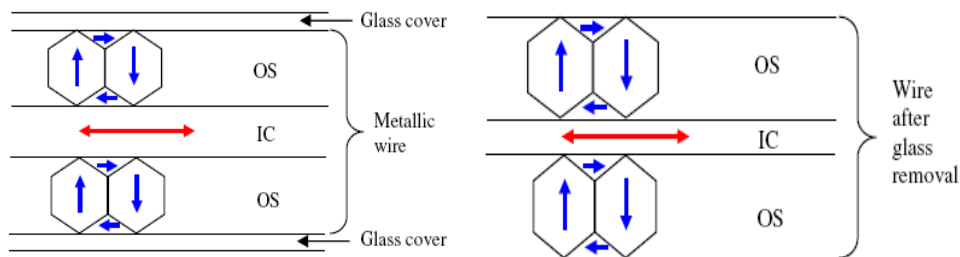
Σχήμα 2.13: Η κατανομή των μαγνητικών περιοχών σε άμορφα σύρματα με αρνητική μαγνητοσυστολή (π.χ. σύρματα βασισόμενα στο Co-Si-B).

Παρατηρείται ότι στο εσωτερικό παρουσιάζεται μια κυκλική ανισοτροπία και στο εξωτερικό μια αξονική ανισοτροπία. Η σύζευξη μεταξύ της συνιστώσας των θλιπτικών τάσεων και αυτής της αρνητικής μαγνητοσυστολής προκαλεί την ευθυγράμμιση των διανυσμάτων μαγνήτισης στην περιφερειακή διεύθυνση.

Η κυριότερη διαφορά μεταξύ των άμορφων με θετική και αρνητική μαγνητοσυστολή είναι ότι η εύκολη διεύθυνση της μαγνήτισης στην εξωτερική επιφάνεια είναι ακτινική για τα, μεν, σύρματα με θετική μαγνητοσυστολή (σύρματα βασισόμενα στο Fe), ενώ είναι κυκλική για τα, δε, σύρματα με αρνητική μαγνητοσυστολή (σύρματα βασισόμενα στο Co). Αυτός είναι και ο λόγος των διαφορετικών μαγνητικών συμπεριφορών στα σύρματα που βασίζονται στο Fe και στο Co.

Στα άμορφα σύρματα με αρνητική και κοντά στο μηδέν μαγνητοσυστολή (π.χ. σύρματα Co-Fe-Si-B), ανισοτροπίες άλλων ειδών είναι πιθανό να υποσκελίζουν την ανισοτροπία λόγω κατανομής παραμενουσών τάσεων με αποτέλεσμα η δομή τους να μην είναι καλά καθορισμένη. Πρακτικά, η δομή τους θεωρείται εκείνη των συρμάτων με αρνητική μαγνητοσυστολή. Επιπλέον, θερμικές και μηχανικές διεργασίες μπορούν να επηρεάσουν στο επιθυμητό τη δομή τους.

Στο σχήμα 2.14, παρουσιάζεται η δομή των μαγνητικών περιοχών και οι εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται όταν αφαιρεθεί το περίβλημα υάλου σε ένα άμορφο σύρμα με θετική μαγνητοσυστολή.

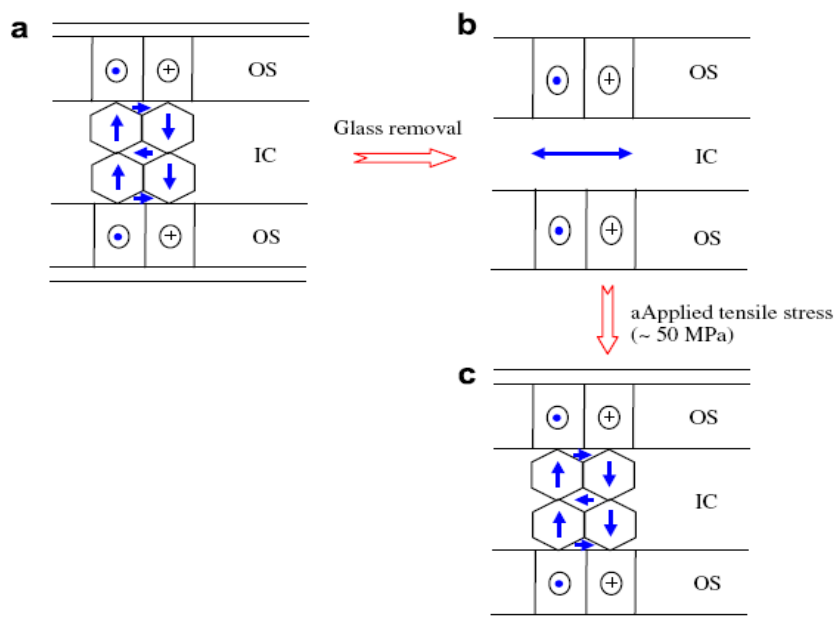


Σχήμα 2.14: Η αφαίρεση της επικάλυψης υάλου προκαλεί την αύξηση του όγκου του περιβλήματος και τη μείωση του όγκου του πυρήνα του σύρματος. Ως αποτέλεσμα διατηρείται αναλλοίωτη η κατανομή των μαγνητικών περιοχών και τάσεων. OC: outer shell, IC: inner core.

Στην περίπτωση άμορφων συρμάτων με περίβλημα υάλου και θετική μαγνητοσυστολή, η αφαίρεση του γυάλινο περιβλήματος οδηγεί στην διόγκωση των εξωτερικών μαγνητικών περιοχών και στην ταυτόχρονη μείωση των εσωτερικών με αποτέλεσμα το η συνολική διάταξη να είναι αφόρτιστη. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αξονική εφελκυστική τάση των συρμάτων χωρίς περίβλημα υάλου είναι 50% μικρότερη από αυτή των συρμάτων με περίβλημα υάλου, γεγονός που ενισχύει τη διεξαγωγή ερευνών γύρω από τη βελτίωση της μαλακής, μαγνητικής συμπεριφοράς των συρμάτων αλλά και τη βελτίωση του φαινομένου GMI, όταν από τα σύρματα αφαιρεθεί το περίβλημα.

Στην περίπτωση άμορφων συρμάτων με περίβλημα υάλου και αρνητική μαγνητοσυστολή, η αφαίρεση του γυάλινο περιβλήματος οδηγεί σε αλλαγή του "εύκολου" άξονα των μαγνητικών περιοχών στο εσωτερικό του σύρματος από ακτινικό σε αξονικό χωρίς, όμως, να αλλάζει η δομή των επιφανειακών μαγνητικών περιοχών (εκτός από μια αύξηση στον όγκο τους). Η δομή τους χωρίς περίβλημα υάλου μοιάζει με αυτή του σχήματος 2.15, αλλά όταν εφαρμοστεί εφελκυστική τάση σε αυτά (περί των 50MPa), τότε υπάρχει περίπτωση να επιστρέψει το εσωτερικό τους στην αρχική του δομή.

Επιπλέον, μελέτες γύρω από την επίδραση του εφελκυσμού και της ανόπτησης στα άμορφα σύρματα έχουν δείξει ότι η ανόπτηση υπό την επίδραση εφελκυσμού ή μαγνητικού πεδίου εισάγει μαγνητικές ανισοτροπίες που είναι υπεύθυνες για τη διαμόρφωση της δομής των μαγνητικών περιοχών.



Σχήμα 2.15: Η κατανομή των μαγνητικών περιοχών και η εσωτερική τάση σε άμορφα σύρματα με αρνητική μαγνητοσυστολή με και χωρίς περίβλημα.

Τέλος, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στα μαγνητικά σύρματα με ηλεκτρόλυση, οι μαγνητικές περιοχές στην εξωτερική επιφάνεια έχουν είτε ακτινική είτε κυκλική ανισοτροπία αλλά το εσωτερικό του σύρματος είναι ένας μη μαγνητικός αγωγός.

## **2.9.2 Μαγνητικές ιδιότητες: Βρόχοι υστέρησης, διαπερατότητα,**

### **μαγνήτιση**

#### Βρόχοι υστέρησης

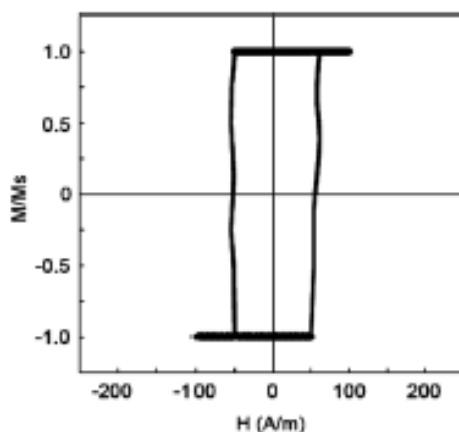
Οι βρόχοι υστέρησης προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για τις μαγνητικές ιδιότητες των μαγνητικών υλικών. Λόγω της διαφοράς σύζευξης μεταξύ της κατανομής των εσωτερικών τάσεων και της μαγνητοσυστολής μπορούν να παρατηρηθούν διαφορετικής μορφής βρόχοι υστέρησης για υλικά με θετική, αρνητική ή κοντά στο μηδέν, αλλά αρνητική μαγνητοσυστολή.

Τα άμορφα σύρματα με θετική μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου παρουσιάζουν έναν ορθογώνιο βρόχο υστέρησης στον οποίο παρουσιάζονται μεγάλα αξονικά άλματα Barkhausen λόγω της εσωτερικής αξονικής δομής των μαγνητικών περιοχών. Όταν αφαιρεθεί το περίβλημα, τότε ο βρόχος υστέρησης γίνεται μικρότερος και τα άλματα Barkhausen μειώνονται καθώς, όπως αναφέρθηκε, μικραίνει η περιοχή της εσωτερικής αξονικής μαγνητικής περιοχής του σύρματος.

Τα άλματα Barkhausen μπορούν να παρατηρηθούν και σε άμορφα σύρματα με θετική μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου με πολύ μικρό μήκος (περίπου 1 - 2mm), καθώς ο

μικρός λόγος της διαμέτρου προς το μήκος του σύρματος έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται ο παράγοντας απομαγνήτισης.

Έχει βρεθεί επίσης ότι άμορφα σύρματα με θετική μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου, που βασίζονται στο Fe, γίνονται νανοκρυσταλλικά υπό θερμική κατεργασία με αποτέλεσμα ο βρόχος υστέρησης από ορθογώνιος να γίνει ομαλός χωρίς άλματα Barkhausen.



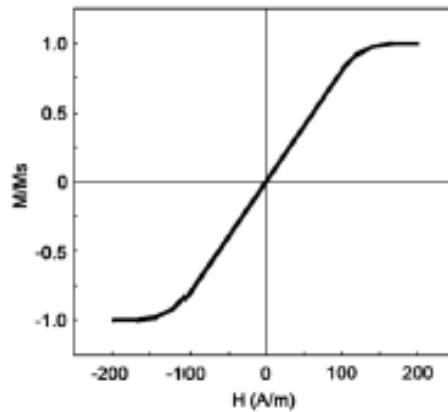
Σχήμα 2.16: Ο βρόχος υστέρησης για άμορφα σύρματα με θετική μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου.

Στα άμορφα σύρματα με αρνητική μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου (π.χ. σύρματα Co-Si-B), λόγω της μηχανικής τάσης ο εύκολος άξονας είναι κάθετος στον άξονα του σύρματος με αποτέλεσμα οι μαγνητικές ροπές να προσανατολιστούν σε κάθετη διεύθυνση ως προς τον άξονα του σύρματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όταν εφαρμοστεί μαγνητικό πεδίο, ο βρόχος υστέρησης να είναι μικρός. Στα σύρματα αυτά δεν εμφανίζονται άλματα Barkhausen εξαιτίας της απουσίας εσωτερικής αξονικής δομής των μαγνητικών περιοχών.

Όταν αφαιρεθεί το περίβλημα υάλου αυξάνεται η αξονική ανισοτροπία και εμφανίζεται αξονική δομή στις εσωτερικές μαγνητικές περιοχές. Με την εφαρμογή εφελκυστικής τάσης (περί των 50MPa), στο σύρμα θα εμφανιστούν άλματα Barkhausen, αφού επανεμφανίζεται η ακτινική δομή στις εσωτερικές μαγνητικές περιοχές.

Το διαφορετικό μέγεθος της τάσης μεταξύ των συρμάτων με και χωρίς περίβλημα υάλου με αρνητική μαγνητοσυστολή ( $\lambda < 0$ ), το οποίο οφείλεται στη διαφορετική δομή των εσωτερικών μαγνητικών περιοχών, οδηγεί σε διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες των υλικών αυτών.

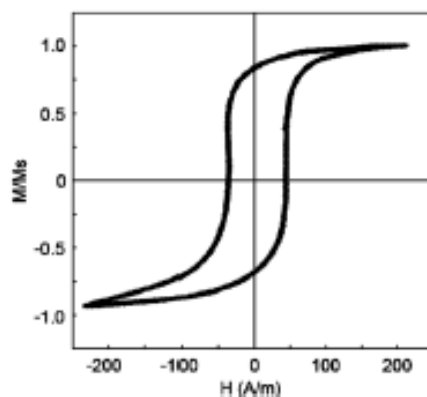




Σχήμα 2.17: Ο βρόχος υστέρησης για άμορφα σύρματα με αρνητική μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου.

Στα άμορφα σύρματα με περίβλημα υάλου με αρνητική και κοντά στο μηδέν μαγνητοσυστολή (π.χ. σύρματα Co–Fe–Si–B), λόγω της διακύμανσης μαγνητοσυστολικών και μαγνητοελαστικών ενεργειακών συνεισφορών, εισάγονται ανισοτροπίες με αποτέλεσμα ο βρόχος υστέρησης να είναι κανονικός και να μην εμφανίζονται άλματα Barkhausen.

Όταν αφαιρεθεί το περίβλημα και εφαρμοστεί εφελκυστική τάση ( περί των 30MPa) τότε εμφανίζονται άλματα Barkhausen. Η μικρότερη τιμή της εφελκυστικής τάσης στην περίπτωση των άμορφων συρμάτων με περίβλημα υάλου με αρνητική και κοντά στο μηδέν μαγνητοσυστολή από εκείνη των άμορφων συρμάτων με αρνητική μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου αποδίδεται στη μικρή τιμή της σταθεράς μαγνητοσυστολής τους.



Σχήμα 2.18: Ο βρόχος υστέρησης για άμορφα σύρματα με αρνητική ή κοντά στο μηδέν μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου.

### Διαπερατότητα

Η μαγνητική διαπερατότητα είναι μια παράμετρος που σχετίζεται με τη δομή των μαγνητικών περιοχών και εξαρτάται από τη γεωμετρία του, την κατανομή των τάσεων στο

υλικό καθώς και την εσωτερική κατανομή της μαγνήτισης η οποία μπορεί να εξαρτάται από τη συχνότητα. Κρίνεται λοιπόν αναγκαίο να συσχετιστεί με το εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο και την μηχανική τάση.

Τα άμορφα μαγνητικά σύρματα με μηδενική μαγνητοσυστολή (π.χ. Co-Fe-Si-B) έχουν τη μεγαλύτερη τιμή στη διαπερατότητα. Αυτά τα σύρματα είναι τα κατάλληλα για τη μελέτη του GMI φαινομένου.

Τα άμορφα σύρματα με θετική ή αρνητική μαγνητοσυστολή έχουν μικρή διαπερατότητα. Μολαταύτα, αν τους αφαιρεθεί το περίβλημα υάλου, εφόσον τους μειώνεται η εσωτερική τάση, η σχετική διαπερατότητα αυξάνεται και, εν συνεχεία, αν τους εφαρμοστεί εφελκυστική τάση, αυξάνεται περισσότερο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δε μπορεί να ασκηθεί μεγάλη εφελκυστική τάση καθώς σε αυτή την περίπτωση η σχετική διαπερατότητα μειώνεται και δεν αυξάνεται.

Όταν εφαρμοστεί μαγνητικό πεδίο κάθετο στον άξονα του σύρματος ή σε κυκλική διεύθυνση, αυξάνεται η μετατόπιση της μαγνητικής περιοχής ή ο προσανατολισμός των συνιστωσών μαγνήτισης στην κυκλική διεύθυνση και, κατ' επέκταση, η εγκάρσια, εφαιπτομενική συνιστώσα της διαπερατότητας. Όσο το μαγνητικό πεδίο είναι μικρότερο του πεδίου ανισοτροπίας, η σχετική διαπερατότητα αυξάνεται και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της όταν είναι κοντά στο πεδίο ανισοτροπίας, ενώ μειώνεται στην αντίθετη περίπτωση.

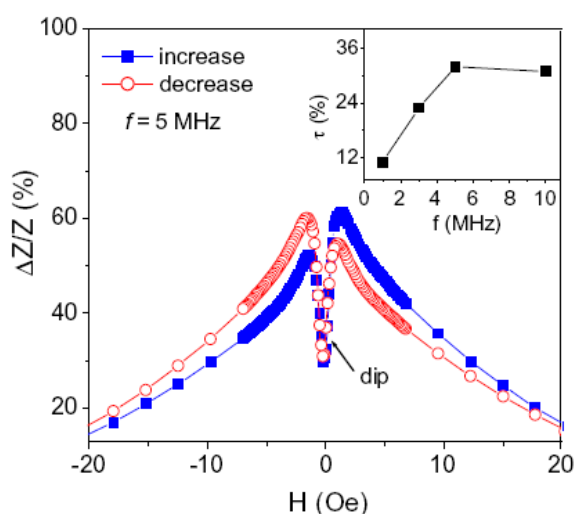
#### Διαδικασία μαγνήτισης

Στα άμορφα σύρματα αρνητικής (π.χ. Co-Si-B) ή μηδενικής μαγνητοσυστολής (π.χ. Co-Fe-Si-B) όταν εφαρμοστεί μαγνητικό πεδίο κάθετο στον άξονα του σύρματος, η μετατόπιση των μαγνητικών περιοχών και ο προσανατολισμός των μαγνητικών ροπών εξαρτώνται από το μέγεθος του πεδίου, και αλλάζουν την κυκλική συνιστώσα της μαγνήτισης. Αν το μαγνητικό πεδίο εφαρμοστεί κατά τον άξονα του σύρματος η κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων και η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών εμποδίζεται γιατί εφαρμόζεται στο δύσκολο άξονα. Το διάμηκες μαγνητικό πεδίο μεταβάλλει το βρόχο υστέρησης από τετραγωνικό σε γραμμικό. Η αλλαγή της κυκλικής συνιστώσας της μαγνήτισης σχετίζεται με την εμπέδηση και συνεπώς το GMI είναι παρατηρήσιμο καθώς το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλει τη συνιστώσα της μαγνήτισης.

Τα άμορφα σύρματα με θετική μαγνητοσυστολή (σύρματα βασιζόμενα στο Fe) εμφανίζουν μικρό GMI ratio λόγω της ακτινικής δομής της εξωτερικής επιφάνειας του σύρματος, καθώς δεν είναι η κατάλληλη για αν μπορούν αν μετακινηθούν οι μαγνητικές περιοχές στην εγκάρσια διεύθυνση. Έχει παρατηρηθεί ότι, όταν το μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται κατά μήκος του άξονα, οι μαγνητικές περιοχές που βρίσκονται στα δύο άκρα διογκώνονται προς το εσωτερικό του σύρματος. Καθώς προσεγγίζεται το πεδίο ανισοτροπίας, το οριακό τοίχωμα μεταξύ των δυο διακριτών δομών απαγκιστρώνεται και κινείται προς το άλλο άκρο μη αντιστρεπτά, προκαλώντας μια μεγάλη μεταβολή στη συνολική μαγνήτιση.

## 2.10 Υστέρηση στο φαινόμενο GMI

Ένα παράδειγμα της υστέρησης που παρουσιάζει το GMI, καθώς μεταβάλλεται το μαγνητικό πεδίο, φαίνεται στο σχήμα 2.19. Παρατηρούνται δύο κορυφές στην καμπύλη και μία πτώση της για σχεδόν μηδενικό πεδίο σε συχνότητες μεγαλύτερες του 1MHz. Αυξάνοντας τη συχνότητα, η επί τοις εκατό πτώση,  $\tau$  (%), και η υστέρηση αυξάνεται έως τα 5MHz και μειώνεται ομαλά για μεγαλύτερες συχνότητες. Η αύξηση της πτώσης σημαίνει αύξησης της ανισοτροπίας στη διαμήκη διεύθυνση με την αύξηση της συχνότητας. Επιπλέον, η υστέρηση παρατηρείται στα dc μαγνητικά πεδία κάτω από το πεδίο ανισοτροπίας και σχετίζεται με τη μετακίνηση των μαγνητικών περιοχών και τη διαδικασία της μαγνήτισης.



Σχήμα 2.19: Ενδεικτικό γράφημα της υστέρησης στο φαινόμενο GMI ανάλογα με τη φορά μεταβολής του στατικού μαγνητικού πεδίου.

Έχει γίνει εύληπτο ότι δρουν δύο τύποι μαγνητικών πεδίων (ή δύο μαγνητικές ανισοτροπίες) όταν γίνονται μετρήσεις GMI. Όταν το δείγμα φτάσει στον κορεσμό, το συνεχές, στατικό πεδίο καθορίζει τη μαγνήτιση και το πεδίο AC, που οφείλεται στο οδηγούμενο ρεύμα, παίζει ελάχιστο ρόλο στον προσανατολισμό του διανύσματος της μαγνήτισης. Όταν μειώνεται το στατικό μαγνητικό πεδίο, η μαγνήτιση αρχίζει να αντιλαμβάνεται την παρουσία του μαγνητικού πεδίου AC και το διάνυσμά της μαγνήτισης περιστρέφεται αυξάνοντας τη διαπερατότητα και, κατ' επέκταση, και την εμπέδηση.

Όταν το στατικό πεδίο φτάσει στην τιμή του πεδίου ανισοτροπίας, τότε η μαγνήτιση περιστρέφεται υπό την επίδραση του μαγνητικού πεδίου AC. Η εγκάρσια διαπερατότητα  $\mu_{\phi}$  λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της και το GMI φτάνει την πρώτη κορυφή. Όταν το στατικό πεδίο συνεχίσει να μειώνεται, αρχίζει μια αμετάκλητη πορεία για τα μαγνητικά τοιχώματα που επιδρά στην εγκάρσια μαγνήτιση με αποτέλεσμα να εμφανιστεί υστέρηση στο φαινόμενο GMI.

Η προέλευση της υστέρησης στο φαινόμενο GMI, λοιπόν, οφείλεται στην υστέρηση της διαδικασίας μαγνήτισης και της χωρικής κατανομής της μαγνητικής ανισοτροπίας, η οποία καθορίζει τη μαγνητική διαπερατότητα.

Η υστέρηση είναι μικρή για ομογενή μαγνητικά υλικά και μπορεί να μηδενιστεί με ανόπτηση άμορφων συρμάτων, όπως παρήχθησαν, υπό την επίδραση εξωτερικής τάσης ή/και μαγνητικού πεδίου.

### 3. Πειραματικό μέρος

#### 3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Το προς μέτρηση σύρμα είναι άμορφο σύστασης Co-Fe-Si-B, έχει παρασκευαστεί με διαδικασία ταχείας ψύξεως και δεν έχει περίβλημα υάλου. Έχει διάμετρο 0,1 mm και σε συνθήκες δωματίου η ειδική του αντίσταση ανέρχεται στα  $\rho = 1,22 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$  (σε συνθήκες δωματίου). Συνεπώς, βάσει του γνωστού τύπου, εφόσον χρησιμοποιήθηκε σύρμα μήκους 37 mm, η αντίσταση του αναμένεται:

$$R = \rho \cdot (l / s) = \rho \cdot (l / \pi \cdot r^2) = 1,22 \cdot 10^{-6} \cdot (37 \cdot 10^{-3} / \pi \cdot 25 \cdot 10^{-10}) \approx 5,75 \Omega.$$

Με βάση τη μέτρηση με πολύμετρο, η αντίσταση ανήλθε στην πραγματική τιμή των 5,5 Ω. Η απόκλιση οφείλεται, κυρίως, την ελαφρά απόκλιση της θεωρητικής ειδικής αντίστασης από την πραγματική αλλά και από τη ραγδαία αλλαγή της πραγματικής αντίστασης σε περίπτωση που το σύρμα λυγίζε ή άλλαζε γενικά το σχήμα του, έστω και πολύ λίγο, κατά τη διάρκεια της μέτρησης.



Σχήμα 3.1: Άμορφο σύρμα Co-Fe-Si-B χωρίς επικάλυψη υάλου.

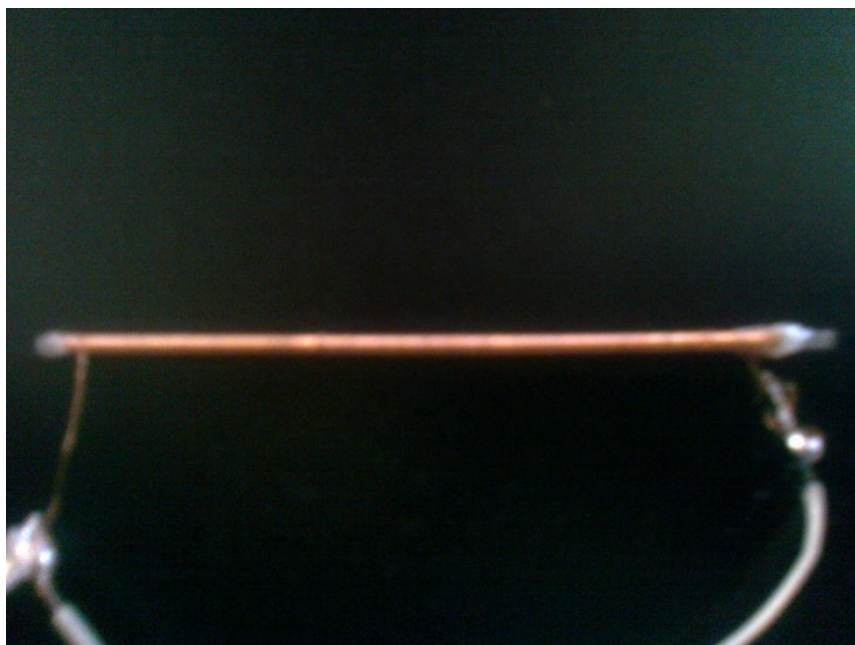
Η πειραματική διάταξη αποτελείτο από μια γέφυρα Wheatstone. Το σύρμα αποτελούσε τη μία εκ των τεσσάρων αντιστάσεων. Οι υπόλοιπες διατάχθηκαν με βάση την τιμή της αντίστασης του σύρματος ώστε η γέφυρα να ισορροπεί σε ηρεμία. Καθεμία αποτελείτο από

τον παράλληλο συνδυασμό μιας αντίστασης των 10 και μιας των 12 Ω. Έτσι, η αντίσταση του ανέρχεται περίπου στα 5,46 Ω περίπου, τιμή παραπλήσια με αυτή του σύρματος.

Η γενική ιδέα της πειραματικής διάταξης είναι η εξής:

- Η γέφυρα τροφοδοτείται με αρμονική τάση διαφόρων συχνοτήτων στο εύρος που ενδιαφέρει, δηλαδή εν προκειμένω στις χαμηλές και μεσαίες συχνότητες (από 1 KHz έως 1MHz)
- Το σύρμα βρίσκεται εντός πηνίου που δημιουργεί ομογενές, στατικό μαγνητικό πεδίο καθώς τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς ρεύματος.
- Η αλλαγή στην εμπέδηση διαταράσσει την ισορροπία της γέφυρας με αποτέλεσμα τη λήψη χρονικού σήματος στα δύο ενδιάμεσα άκρα μεταξύ του τετραγώνου των αντιστάσεων.
- Το χρονικό σήμα αποτελεί το στοιχείο που θα αναλυθεί ώστε να μελετηθεί το φαινόμενο της μαγνητοεμπέδησης τόσο συναρτήσει του μαγνητικού πεδίου όσο και της συχνότητας του ρεύματος τροφοδοσίας.
- Οι μετρήσεις αφορούσαν τη ζώνη συχνοτήτων που έχει ήδη αναφερθεί και επαναλήφθηκαν τρεις φορές για τρεις διαφορετικές συνθήκες μαγνητικής πόλωσης του σύρματος.

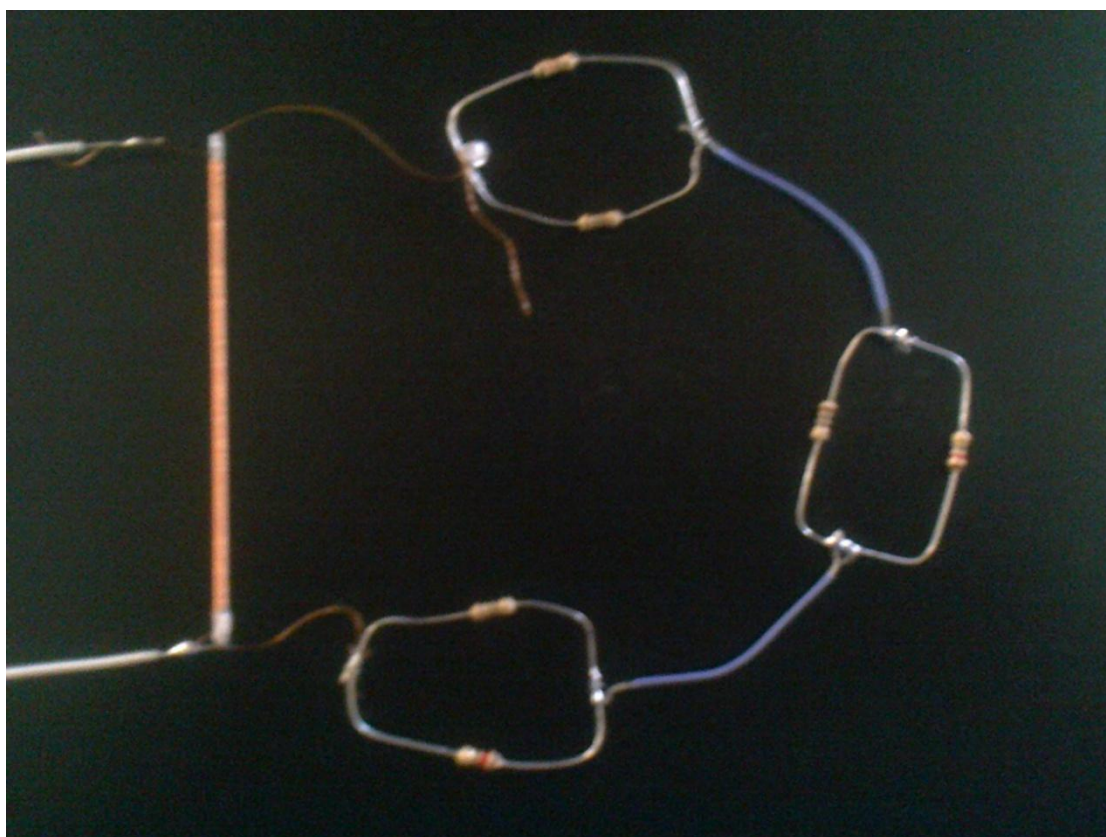
Η γέφυρα Wheatstone χρησιμοποιείται προκειμένου να εξαλείψει την επίδραση της θερμοκρασίας στην ευαισθησία της διάταξης. Με αυτό τον τρόπο, επιδιώκεται η αλληλοαναιρέση των μεταβολών που προκαλεί η θερμοκρασία στα στοιχεία αντίστασης.



Σχήμα3.2: Πηνίο τυλιγμένο χειρωνακτικά γύρω από εύκαμπτο σωλήνα. Εντός του πηνίου τοποθετήθηκε το σύρμα Fe-Co-Si-B.

Αντικειμενικός σκοπός είναι:

- ✓ Η μελέτη του ληφθέντος χρονικού σήματος ως προς τη μορφή, το πλάτος, τη συχνότητα και το φασματικό του περιεχόμενο μέσω ανάλυσης Fourier.
- ✓ Η διασύνδεση των ως άνω παραμέτρων με την εκδήλωση του φαινομένου GMI και η επίδραση των παραμέτρων της συχνότητας του ρεύματος τροφοδοσίας και του επιβαλλόμενου στατικού πεδίου.
- ✓ Η αξιολόγηση της διάταξης ως προς τη λειτουργικότητα και αξιοπιστία των μετρήσεων.

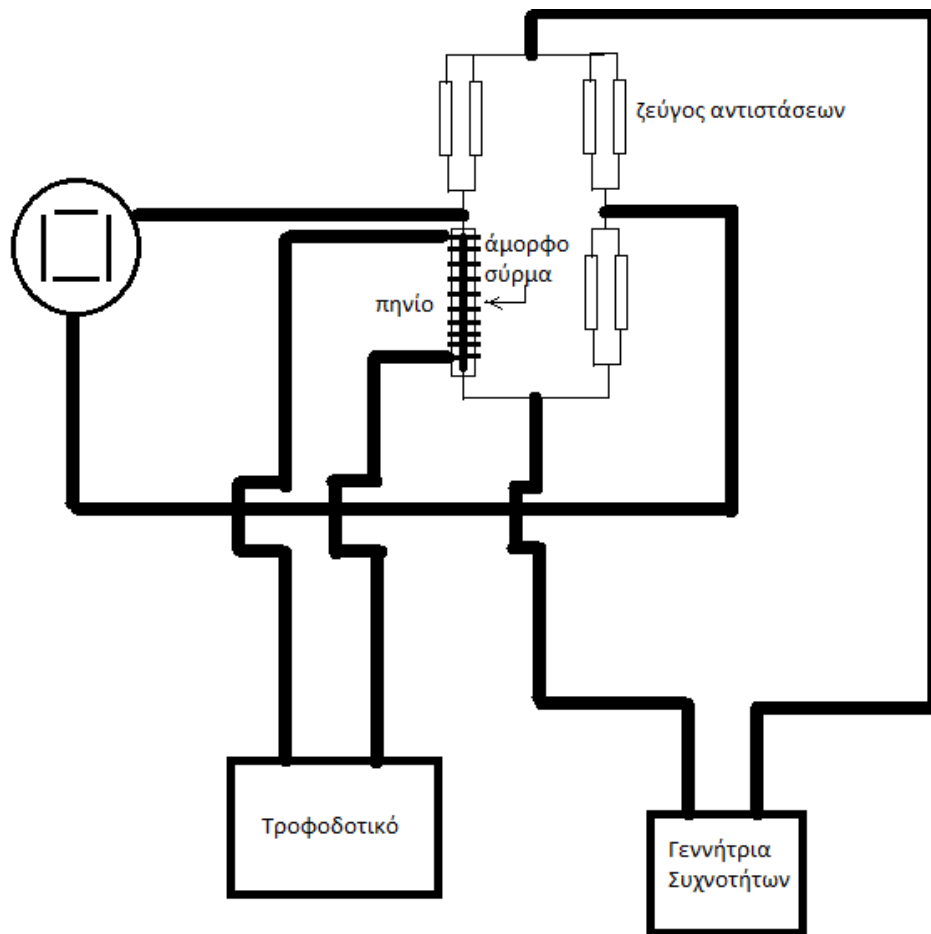


Σχήμα 3.3: Γέφυρα Wheatstone με τρία ζεύγη παράλληλων αντιστάσεων εμπορίου και το σύρμα που βρίσκεται εντός του πηνίου. Η σύνδεση με τα υπόλοιπα στοιχεία γίνεται μέσω χάλκινων συρμάτων που έχουν συγκολληθεί στα εκατέρωθεν άκρα του άμορφου υλικού που βρίσκεται εξ'ολοκλήρου εντός του πηνίου.

### **3.2 Πειραματικές μετρήσεις**

Οι μετρήσεις αποθηκεύτηκαν σε ψηφιακή μορφή από τον παλμογράφο και ανακτήθηκαν μέσω MATLAB. Ταυτόχρονα, ανακτήθηκε το φάσμα τους κατά Fourier και φιλτραρίστηκαν

ώστε να εξαλειφθεί ο υψίσυχνος θόρυβος που επιβαρύνει το καθαρό σήμα. Στο σχήμα 3.4 δίνεται το πλήρες κύκλωμα της πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 3.4: Πειραματική διάταξη με γέφυρα Wheatstone.

Στον πίνακα 3.1, γίνεται η σύνοψη των βασικών στοιχείων των τριών σειρών μετρήσεων A,B και Γ. Δίνονται τα βασικά μεγέθη τροφοδοσίας και οι συχνότητες στις οποίες αναφέρονται τα πειραματικά αποτελέσματα ανά τιμή στατικού πεδίου η οποία αλλάζει για καθεμία σειρά μετρήσεων. Ο αύξων αριθμός (A/A) αντιστοιχεί σε μια και μοναδική κυματομορφή, συγκεκριμένης συχνότητας, όπως αυτή ελήφθη στον παλμογράφο, το αντίστοιχο φάσμα της και την ίδια κυματομορφή μετά από φιλτράρισμα μέσω MATLAB. Αντίστοιχα, το γράμμα (A, B, Γ) αντιστοιχεί στην σειρά μέτρησης κατά την οποία ελήφθη η κυματομορφή.



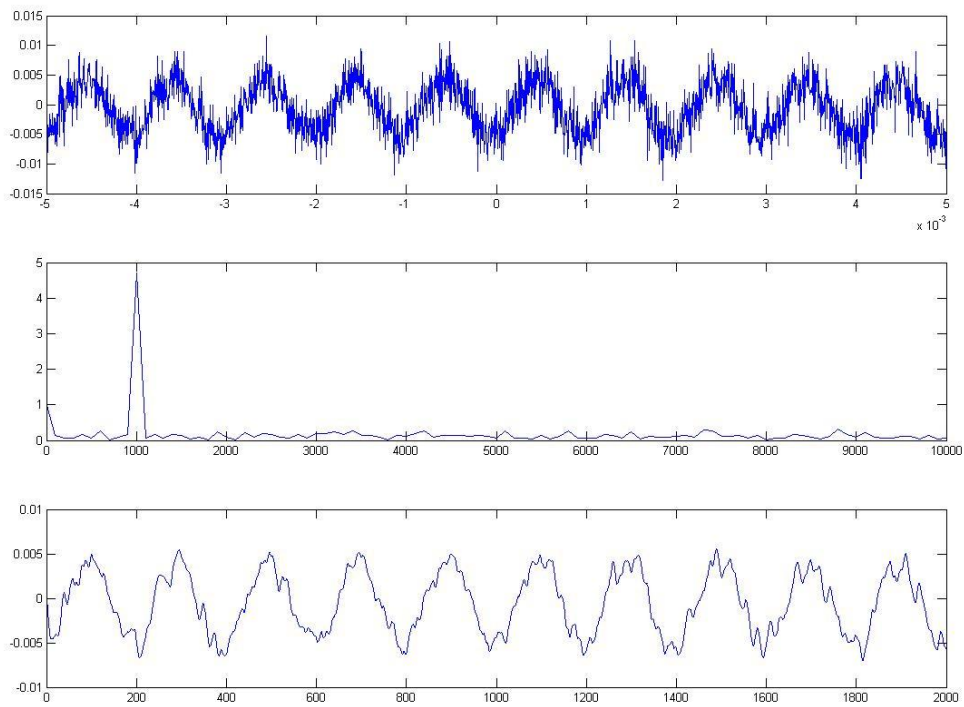
<b>Σειρά μετρήσεων Α</b> $V_{AC}=2V_{p-p}$ , $V_{DC}=0V$ , $I_{DC}=0A$							
<b>Σειρά μετρήσεων Β</b> $V_{AC}=2V_{p-p}$ , $V_{DC}=2,28V$ , $I_{DC}=0,25A$							
<b>Σειρά μετρήσεων Γ</b> $V_{AC}=2V_{p-p}$ , $V_{DC}=1,5V$ , $I_{DC}=0,19A$							
A/A	f(KHz)	V/div(mV)	Time/div(μs)	A/A	f(KHz)	V/div(mV)	Time/div(μs)
1	1	5	500	13	50	5	10
2	2	5	500	14	60	5	10
3	3	5	500	15	70	5	10
4	4	5	500	16	80	5	10
5	5	5	200	17	90	5	10
6	6	5	200	18	100	5	5
7	7	5	200	19	200	5	2
8	8	5	200	20	300	5	2
9	9	5	200	21	400	5	2
10	10	5	200	22	500	5	2
11	20	5	50	23	1000	5	0,5
12	30	5	50				

Πίνακας 3.1: Βασικά στοιχεία των τριών σειρών μετρήσεων.

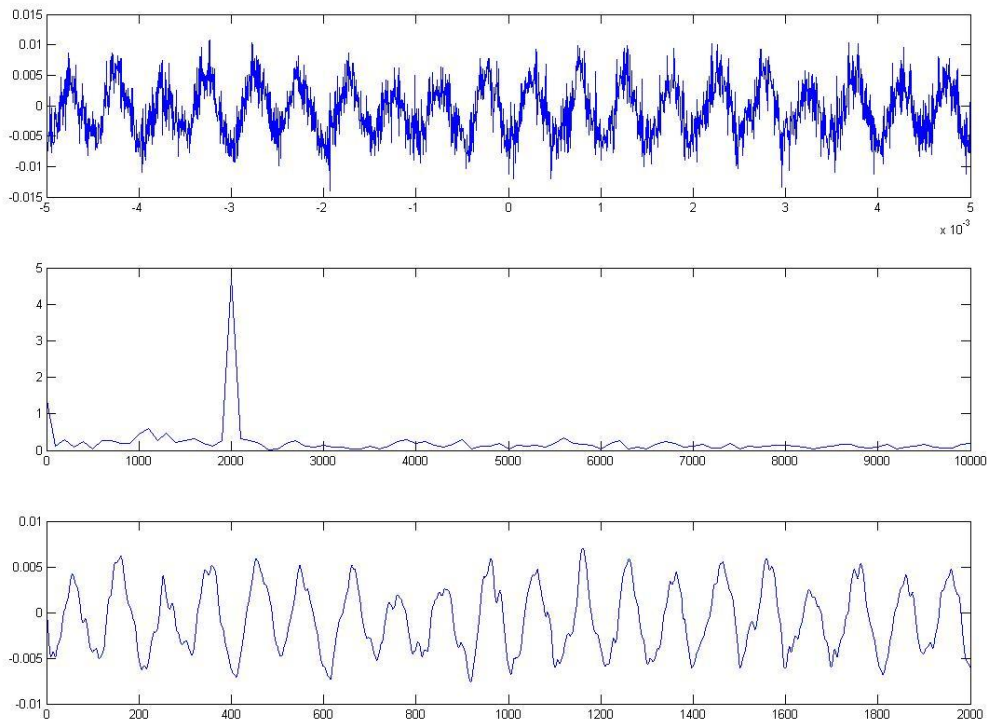
Με βάση την παραπάνω κωδικοποίηση των μετρήσεων και τη βοήθεια του MATLAB, δίνονται στις επόμενες σελίδες τα γραφήματα του πειράματος.

**Σειρά μετρήσεων Α:**

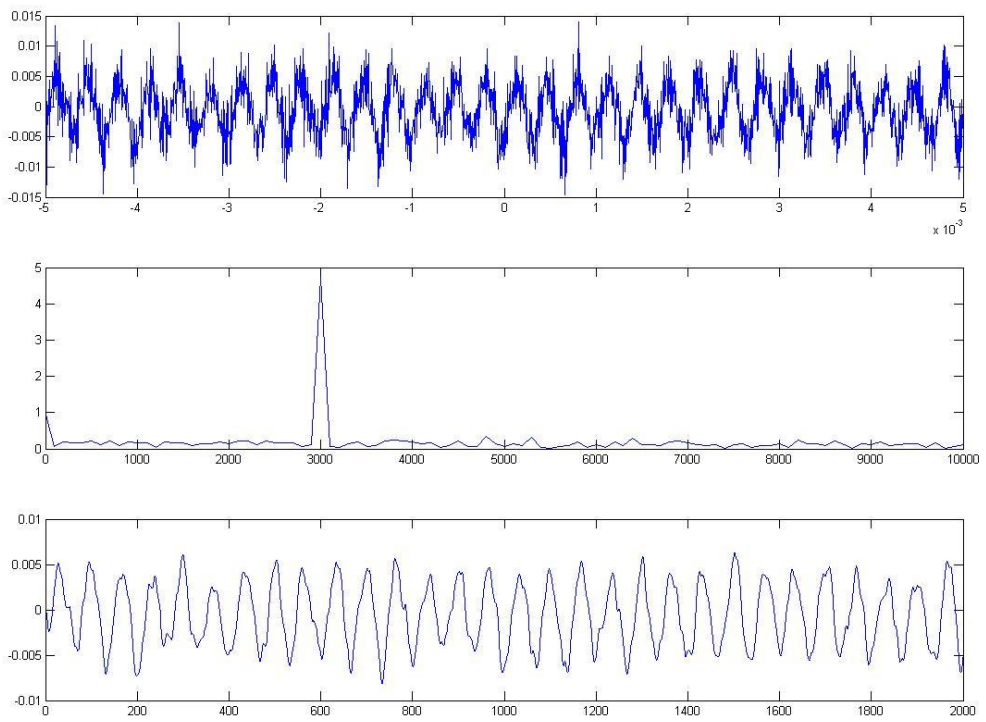
$V_{AC}=2V_{p-p}$ ,  $V_{DC}=0V$ ,  $I_{DC}=0A$  .



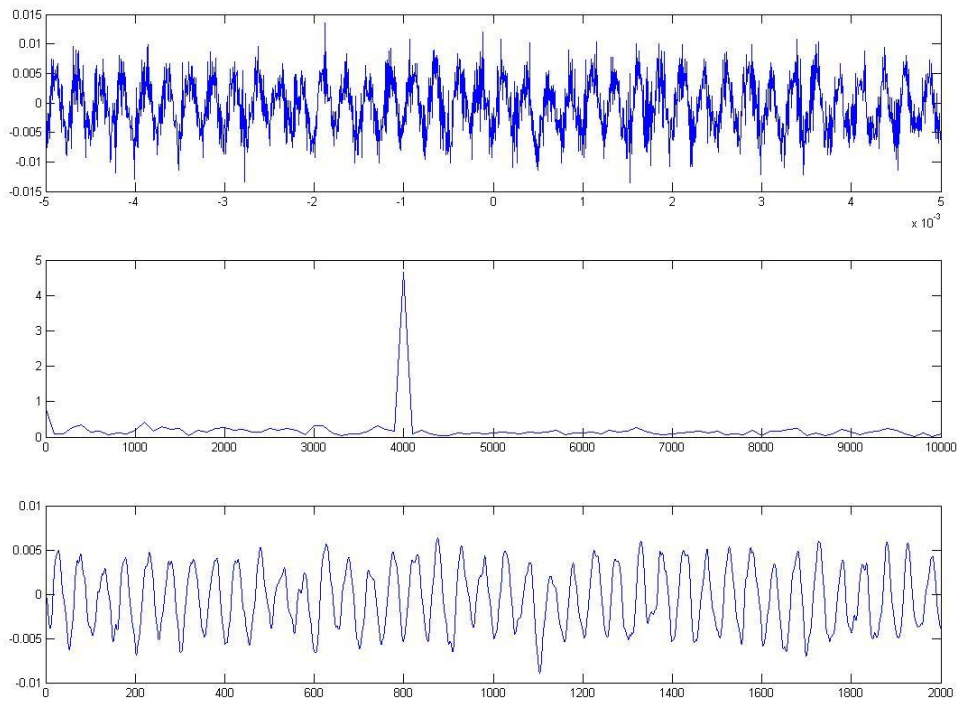
*Κυματομορφή 1A, ( $f = 1KHz$ )*



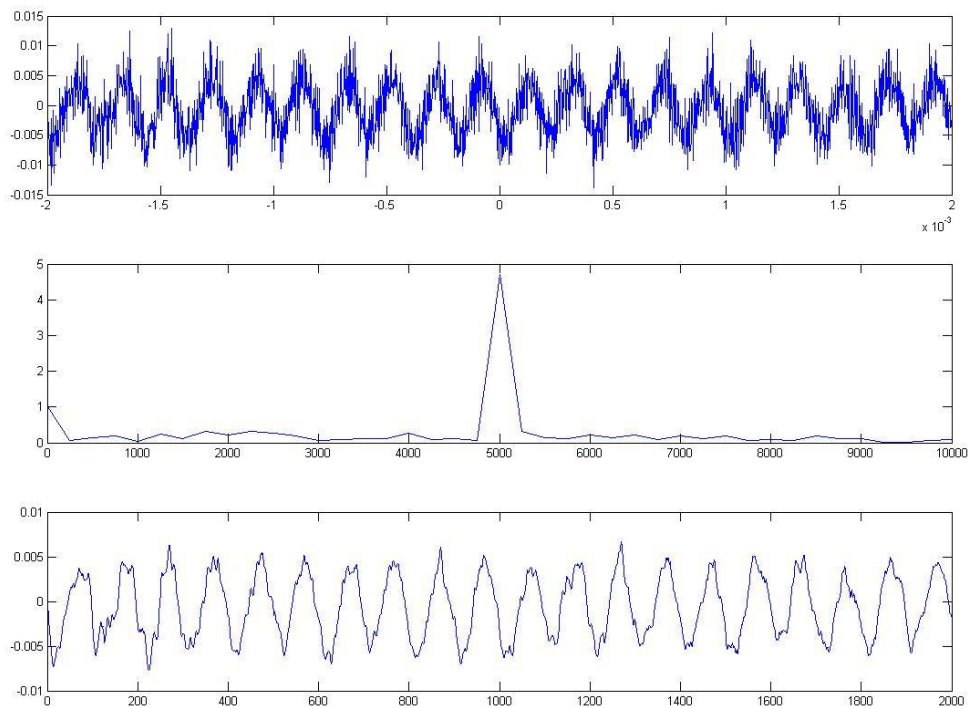
*Κυματομορφή 2A, ( $f = 2$  KHz)*



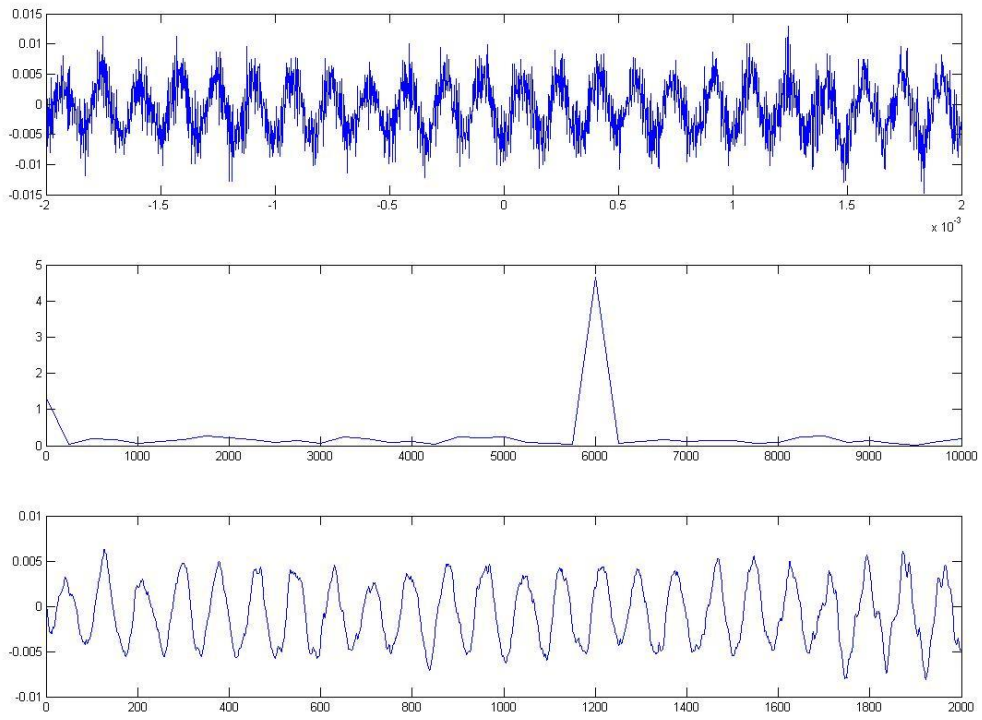
*Κυματομορφή 3A, ( $f = 3$  KHz)*



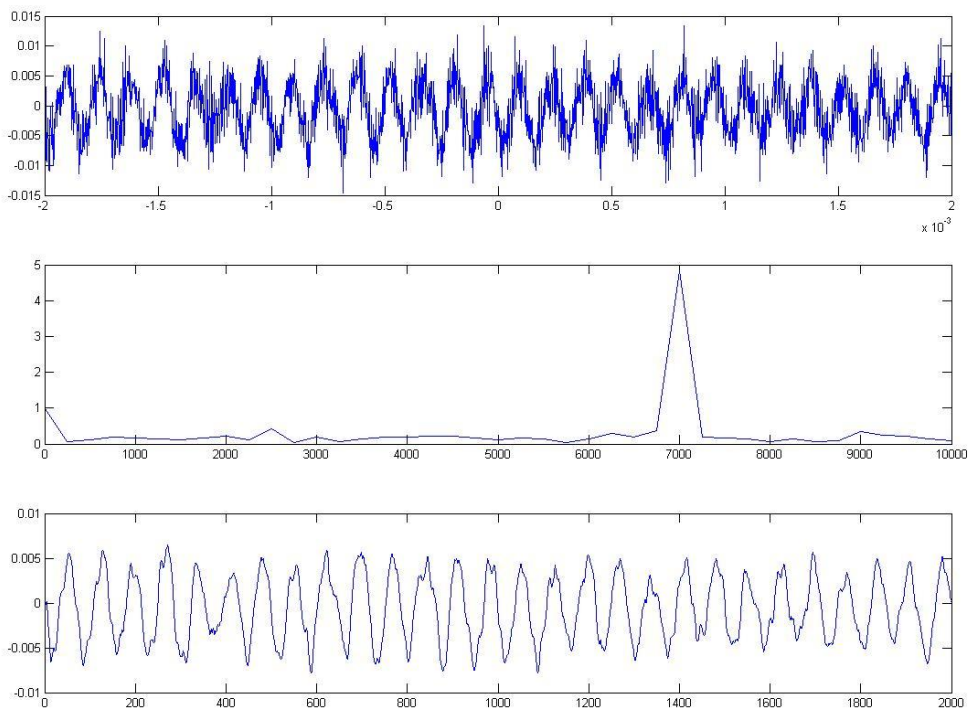
*Κυματομορφή 4A, ( $f = 4$  KHz)*



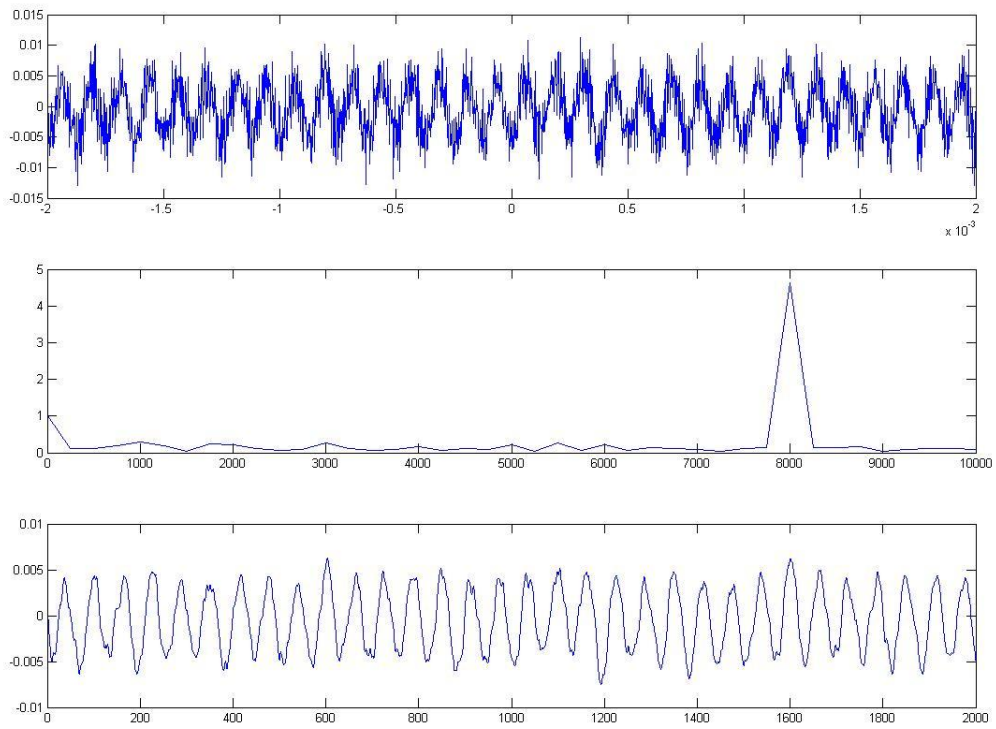
*Κυματομορφή 5A, ( $f = 5$  KHz)*



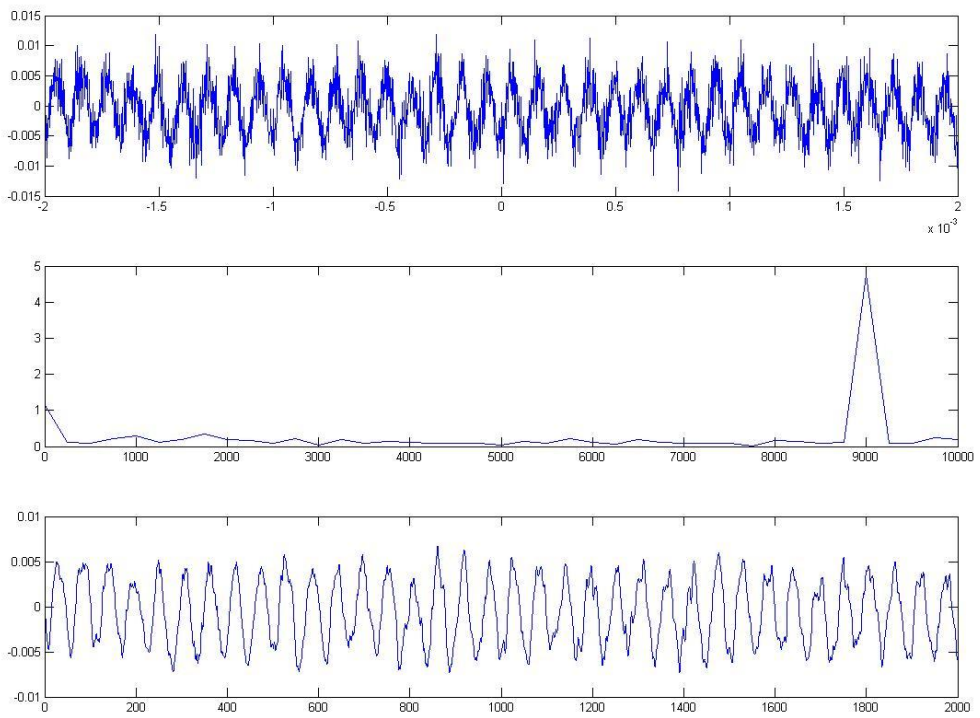
*Κυματομορφή 6A, ( $f = 6$  KHz)*



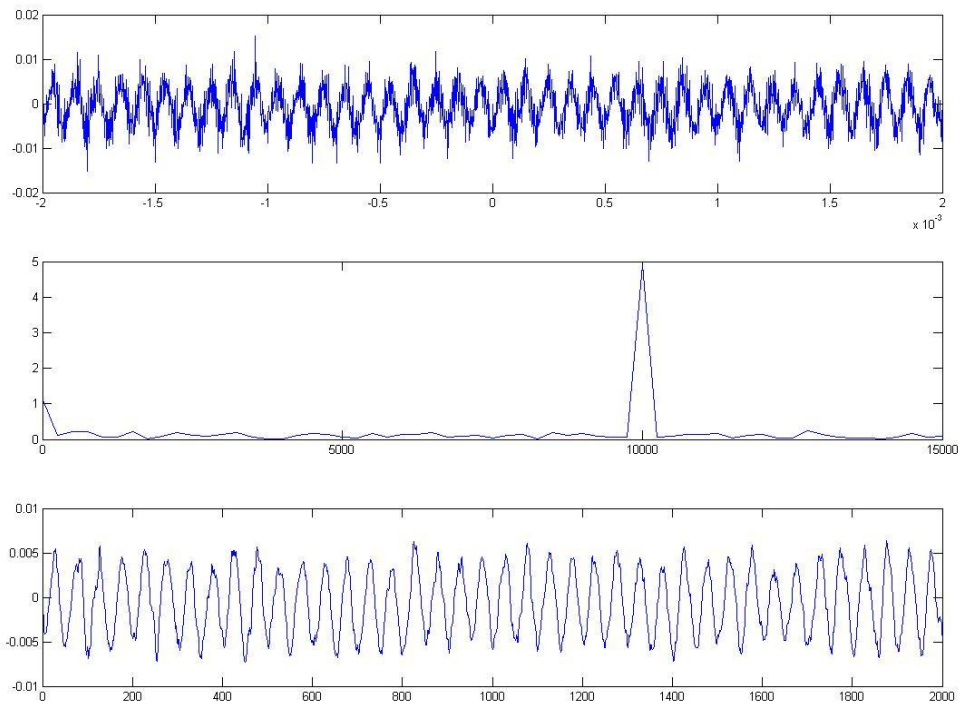
*Κυματομορφή 7A, ( $f = 7$  KHz)*



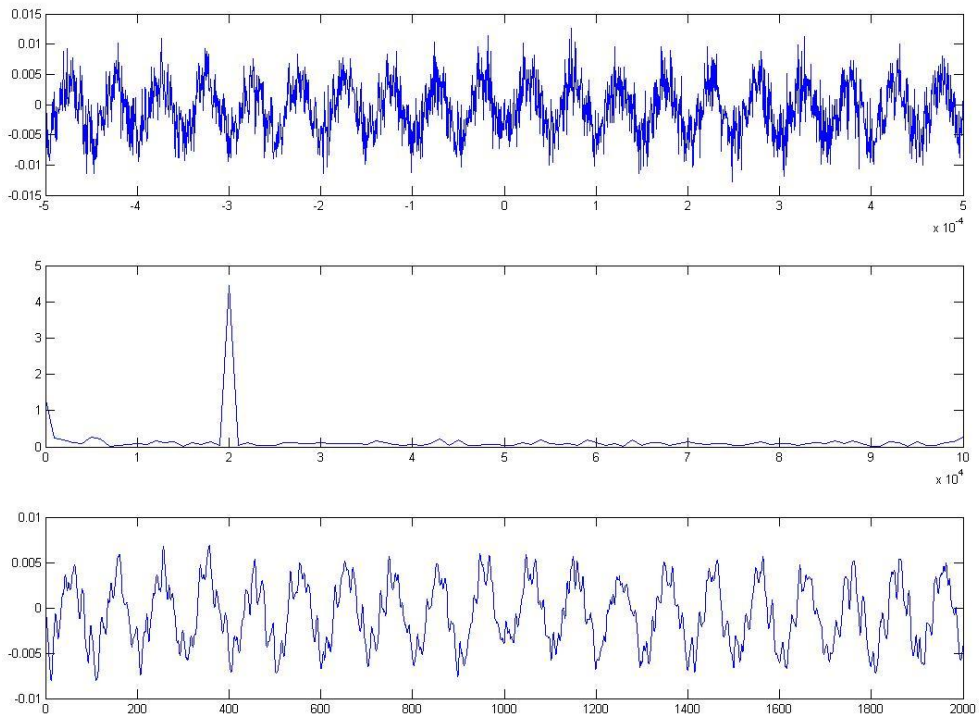
*Κυματομορφή 8A, ( $f = 8 \text{ KHz}$ )*



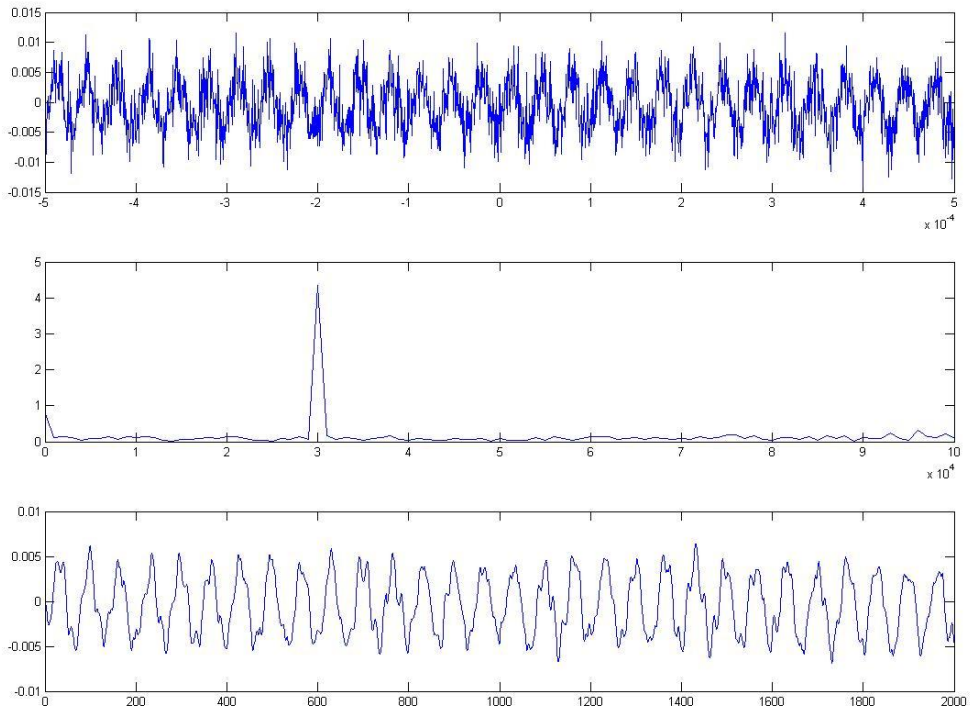
*Κυματομορφή 9A, ( $f = 9 \text{ KHz}$ )*



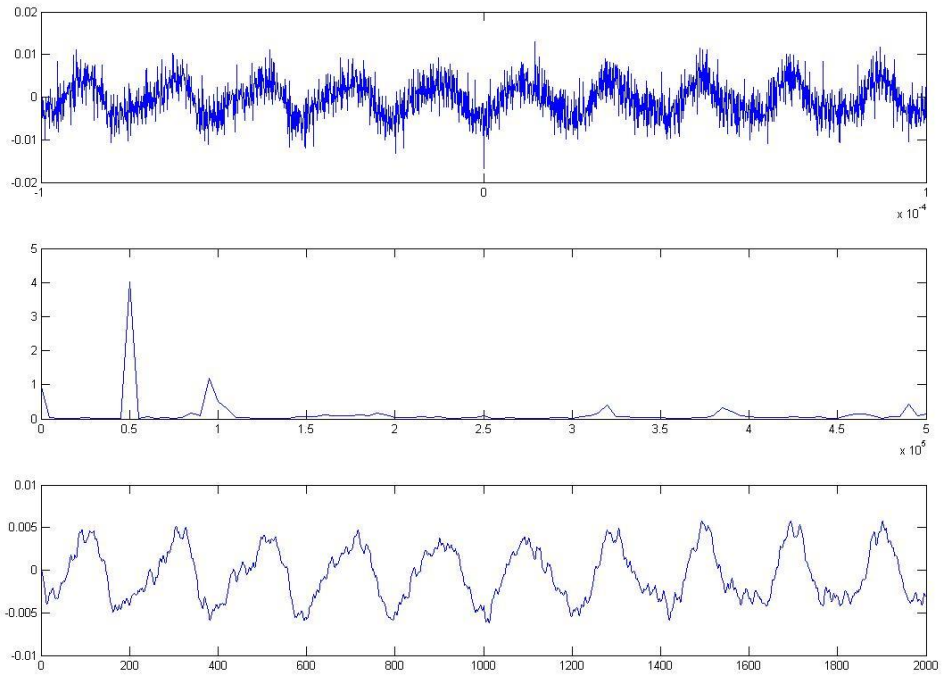
*Κυματομορφή 10Α, ( $f = 10$  KHz)*



*Κυματομορφή 11Α, ( $f = 20$  KHz)*

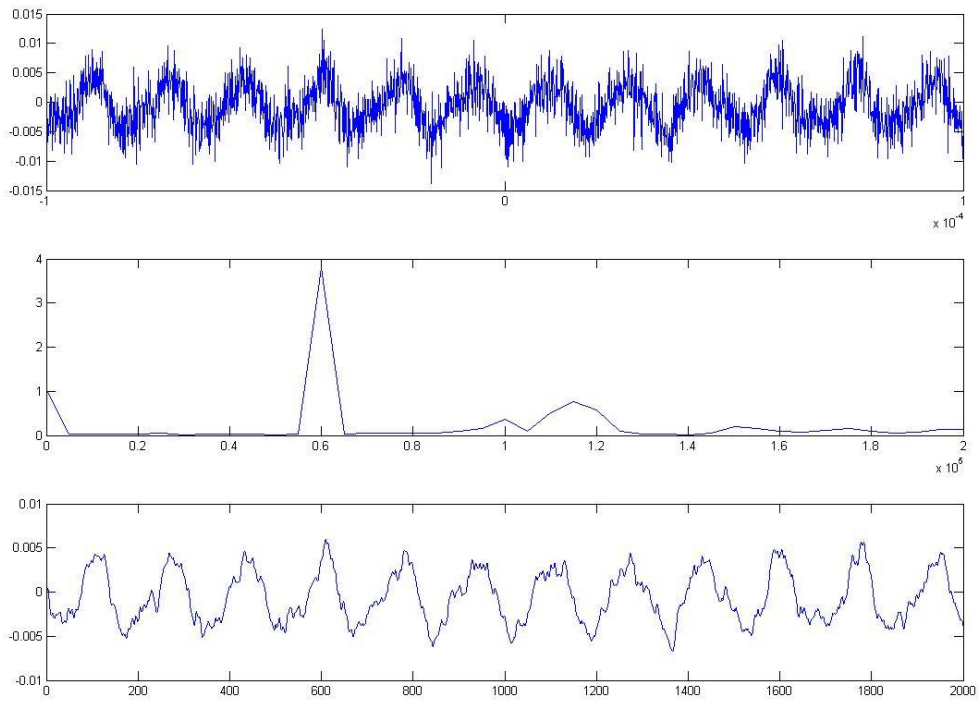


*Κυματομορφή 12A, ( $f = 30 \text{ KHz}$ )*

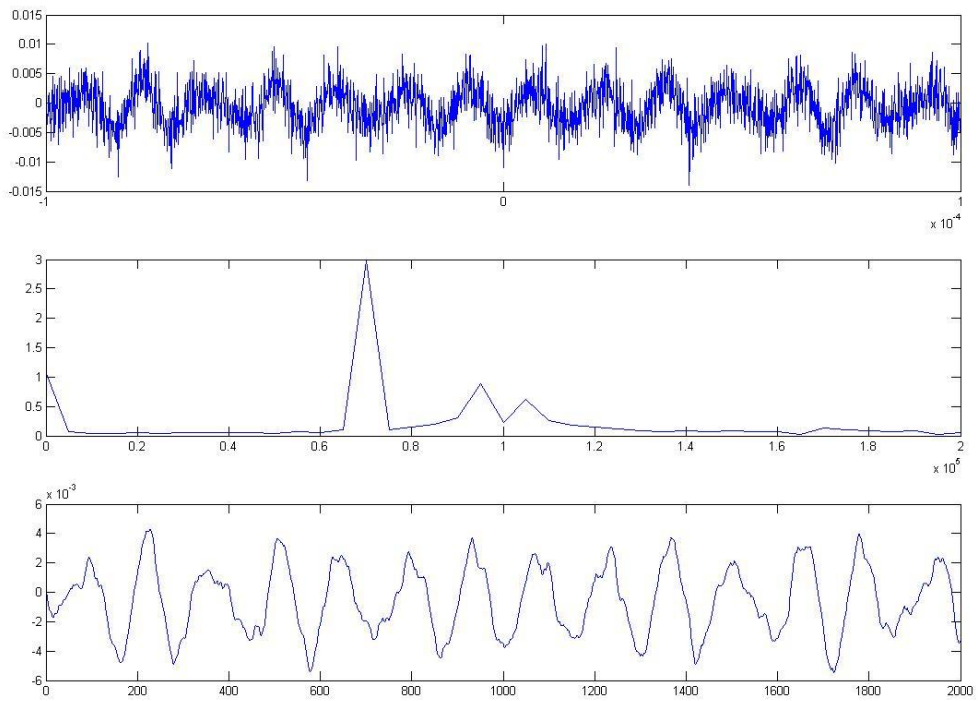


*Κυματομορφή 13A, ( $f = 50 \text{ KHz}$ )*

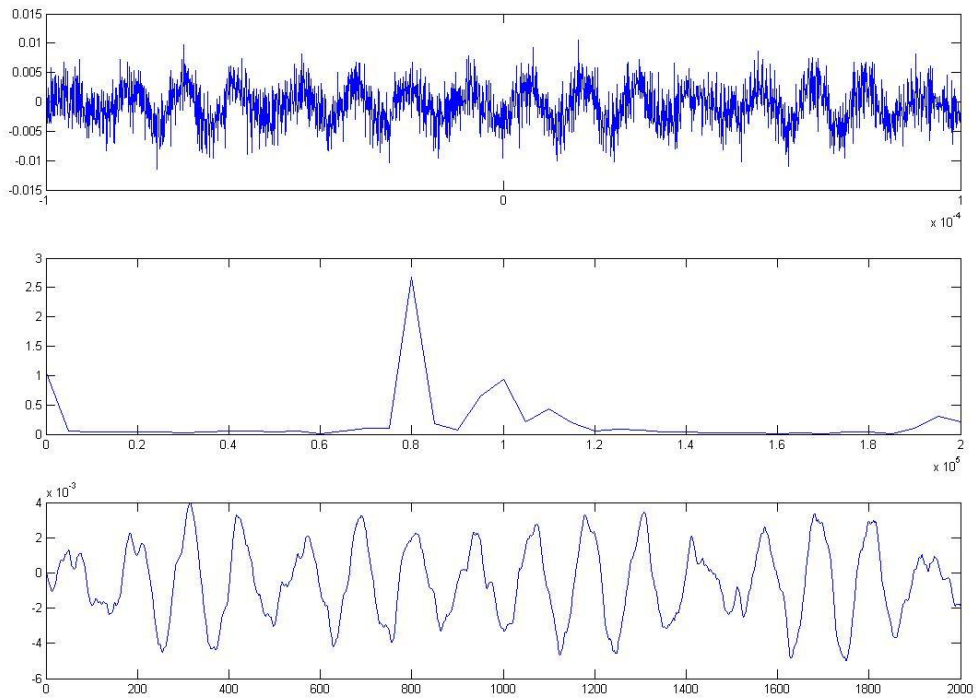




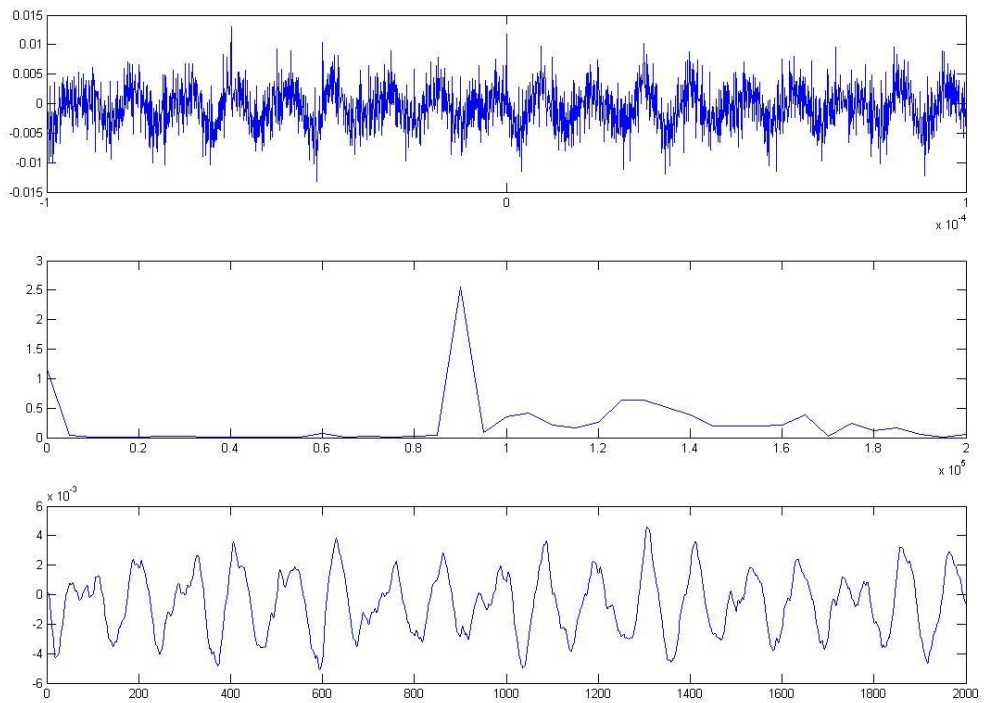
*Κυματομορφή 14A, ( $f = 60$  KHz)*



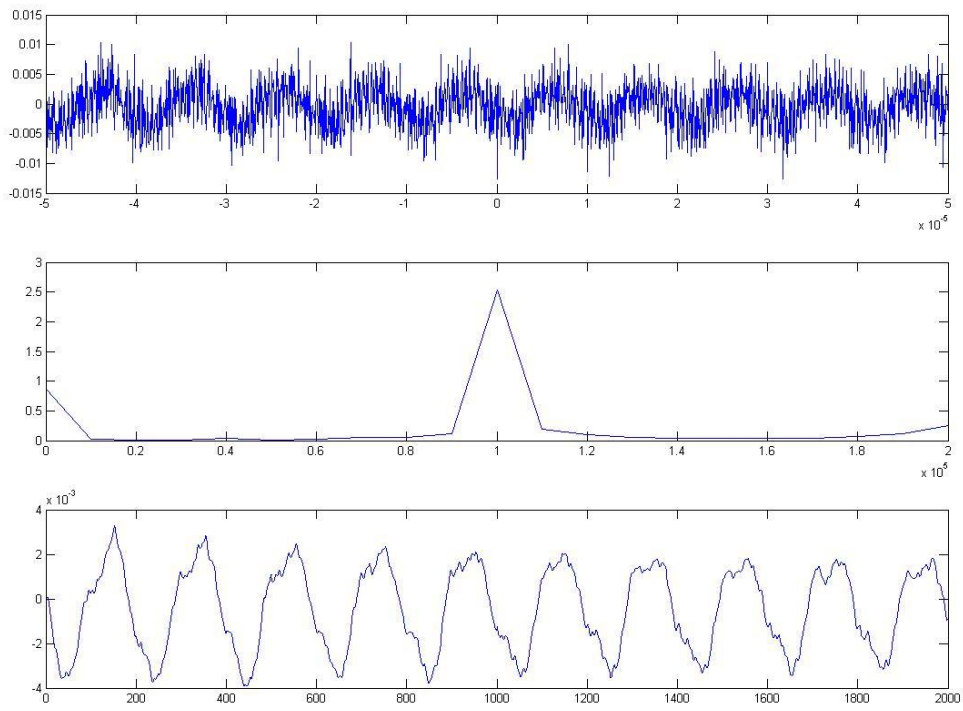
*Κυματομορφή 15A, ( $f = 70$  KHz)*



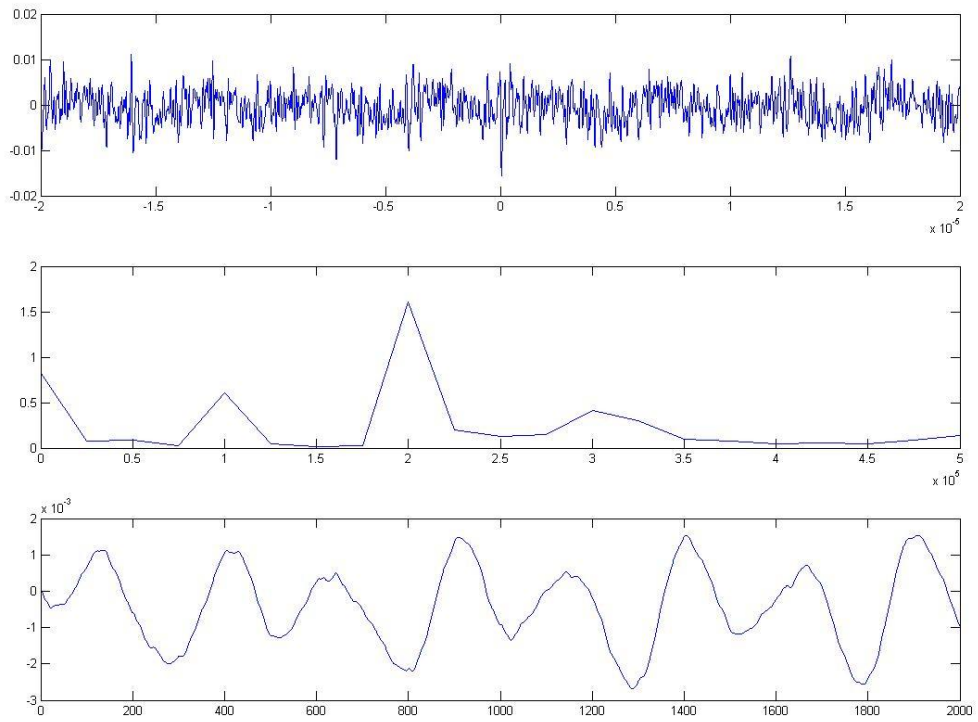
*Κυματομορφή 16A, ( $f = 80$  KHz)*



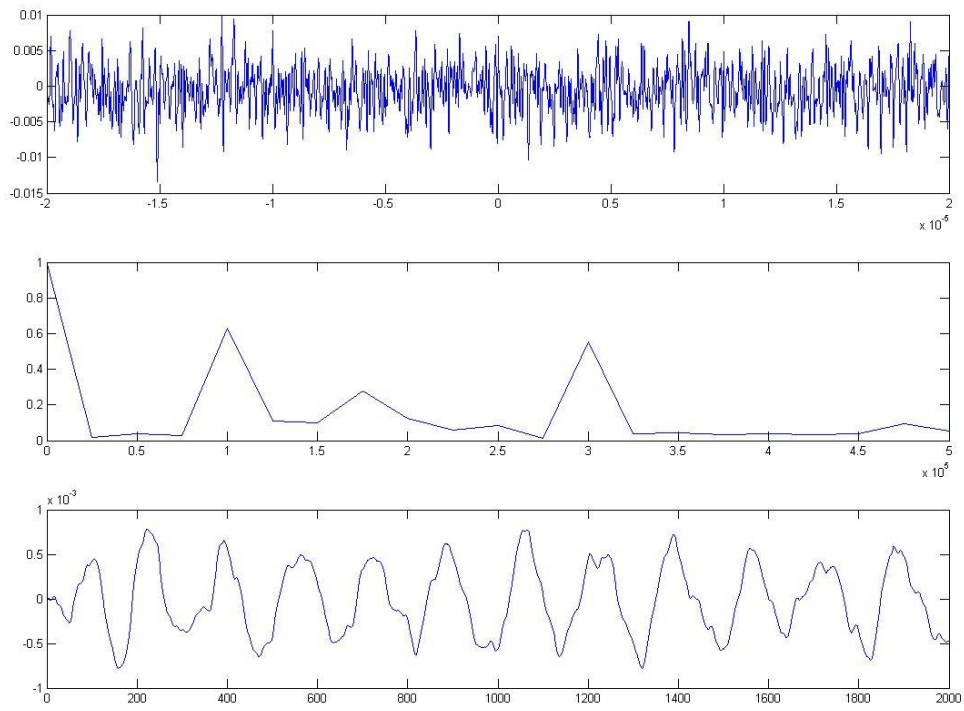
*Κυματομορφή 17A, ( $f = 90$  KHz)*



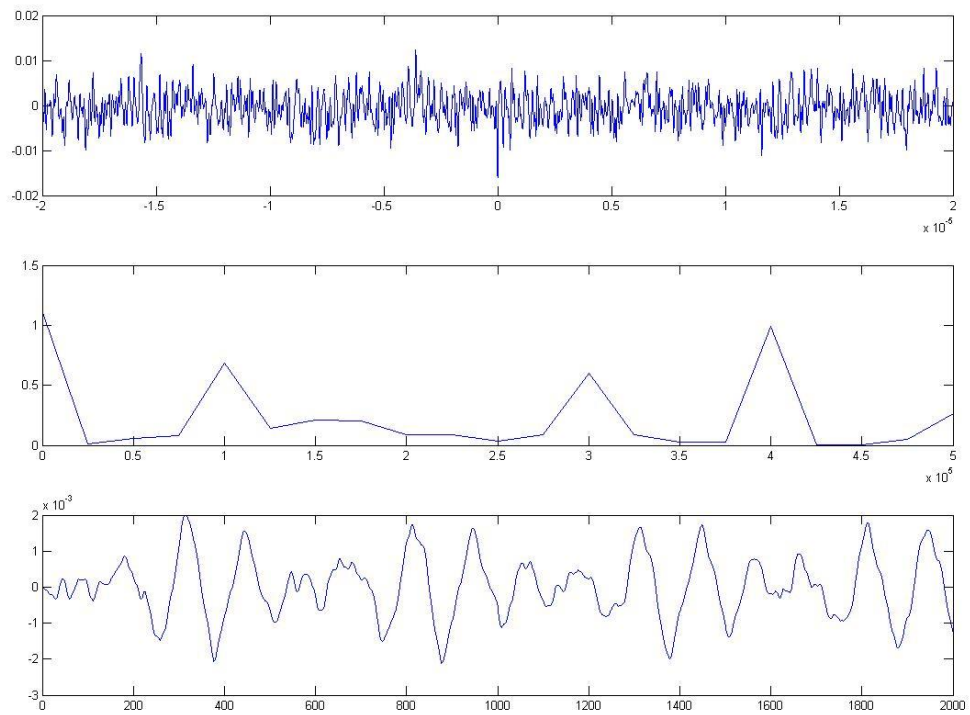
*Κυματομορφή 18A, ( $f = 100 \text{ KHz}$ )*



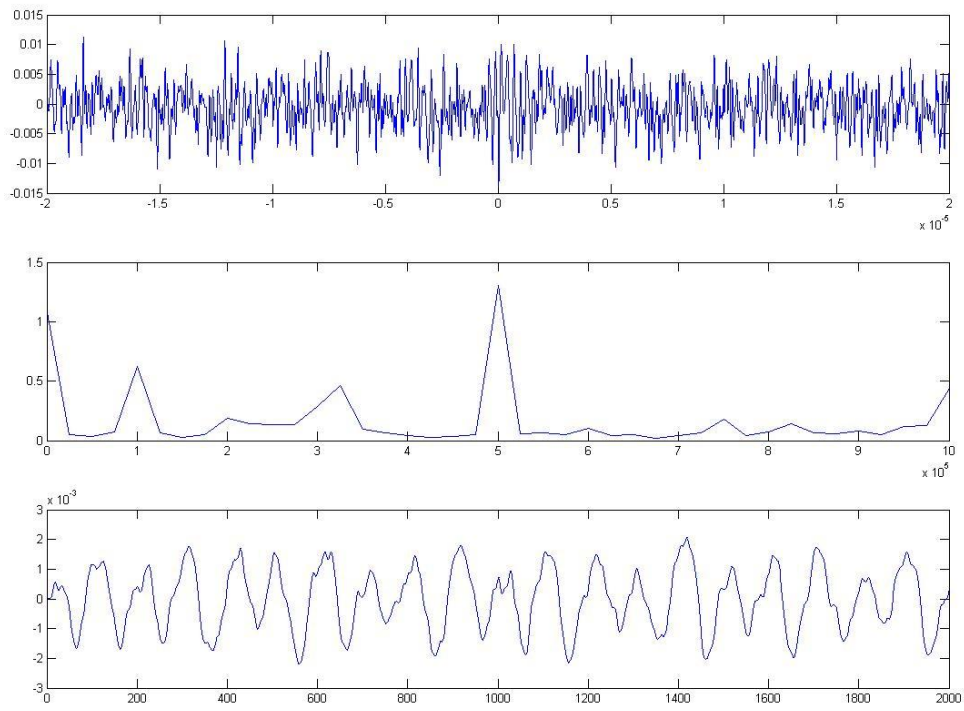
*Κυματομορφή 19A, ( $f = 200 \text{ KHz}$ )*



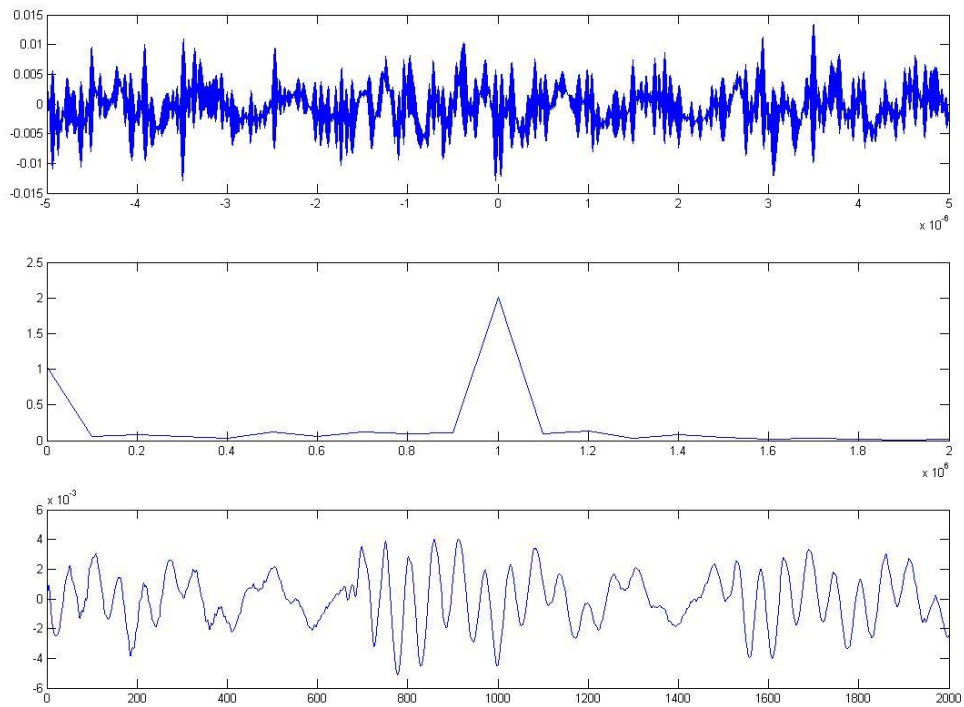
*Κυματομορφή 20A, ( $f = 300 \text{ KHz}$ )*



*Κυματομορφή 21A, ( $f = 400 \text{ KHz}$ )*



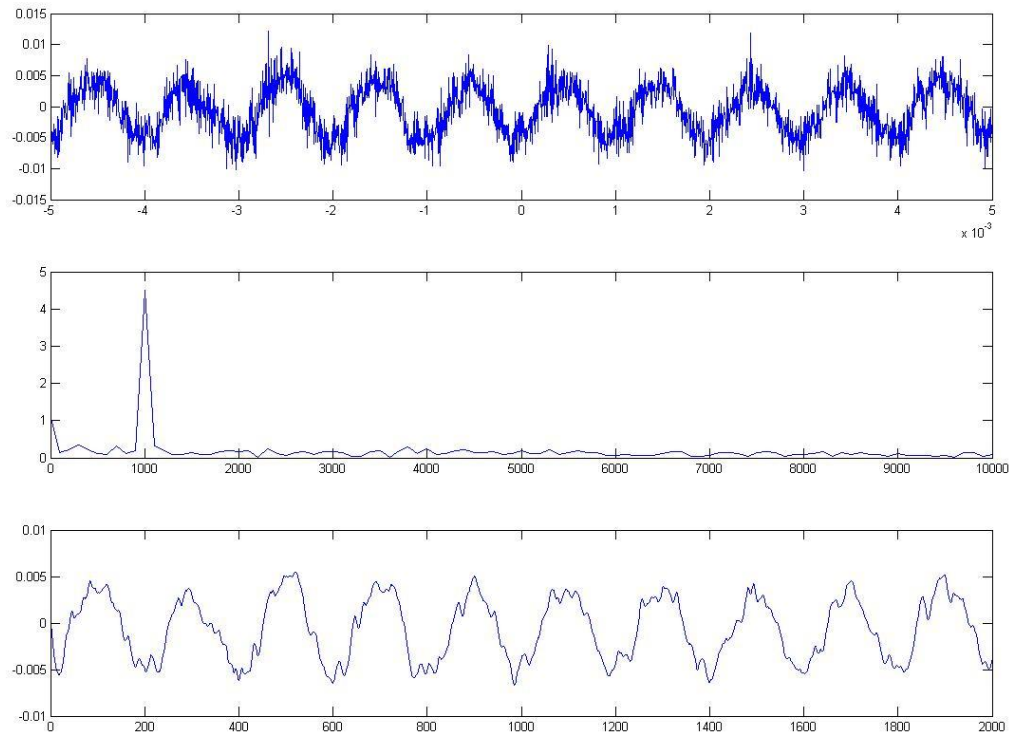
*Κυματομορφή 22A, ( $f = 500$  KHz)*



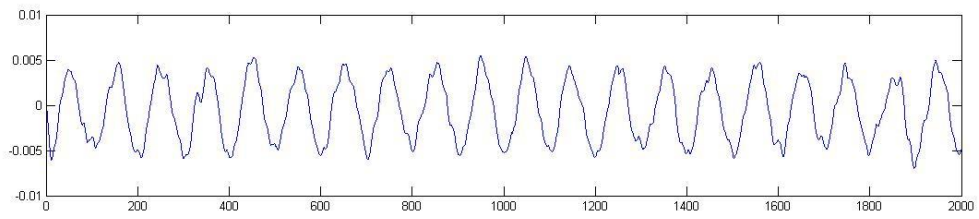
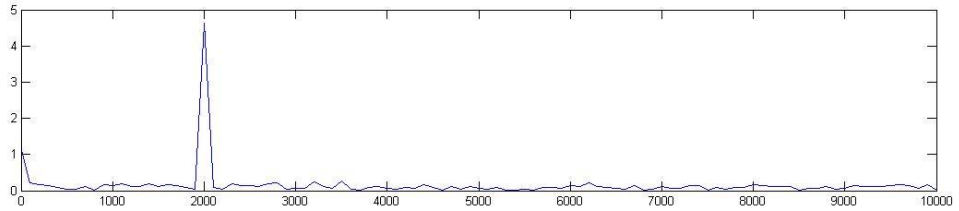
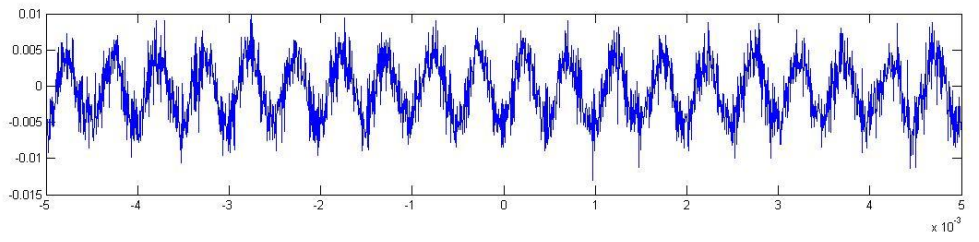
*Κυματομορφή 23A, ( $f = 1000$  KHz)*

**Σειρά μετρήσεων Β:**

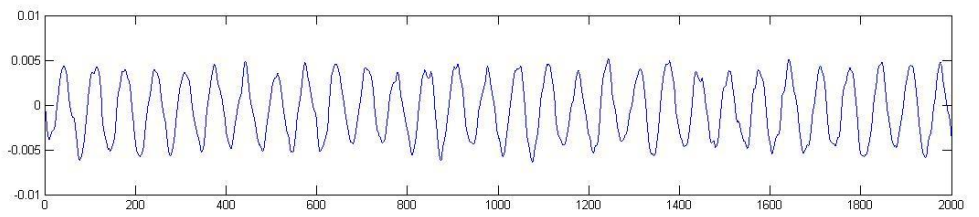
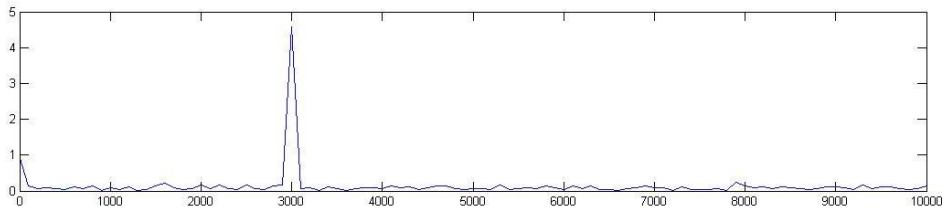
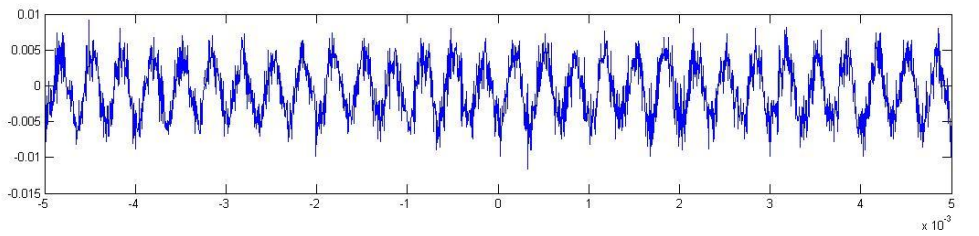
**$V_{AC}=2V_{p-p}$ ,  $V_{DC}=2,28V$ ,  $I_{DC}=0,25A$ .**



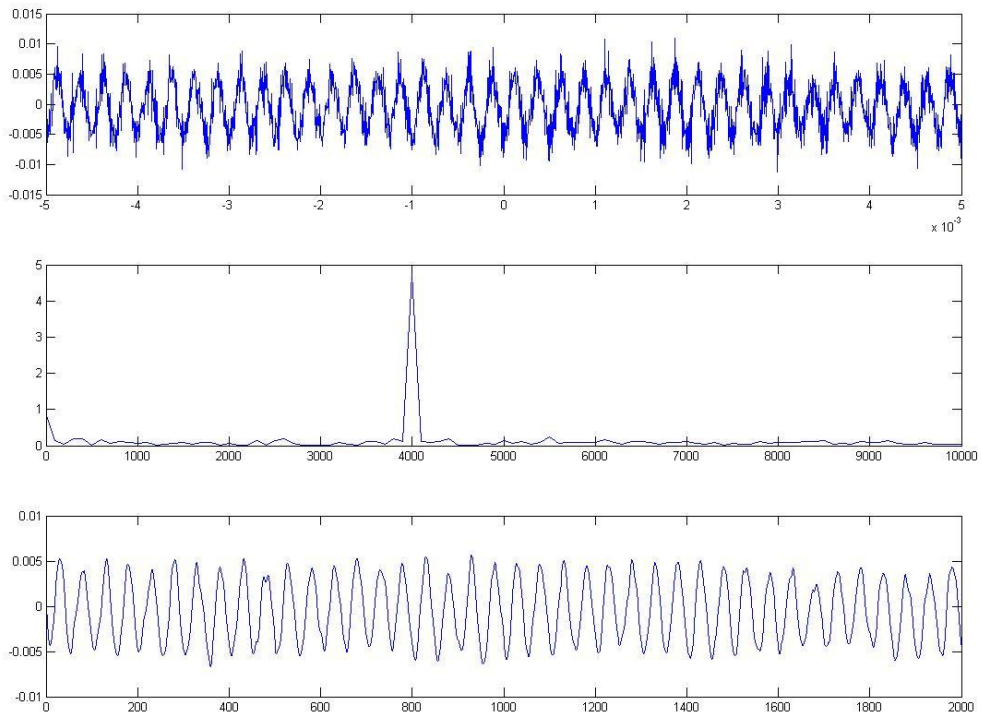
*Κυματομορφή 1B ( $f = 1 \text{ KHz}$ )*



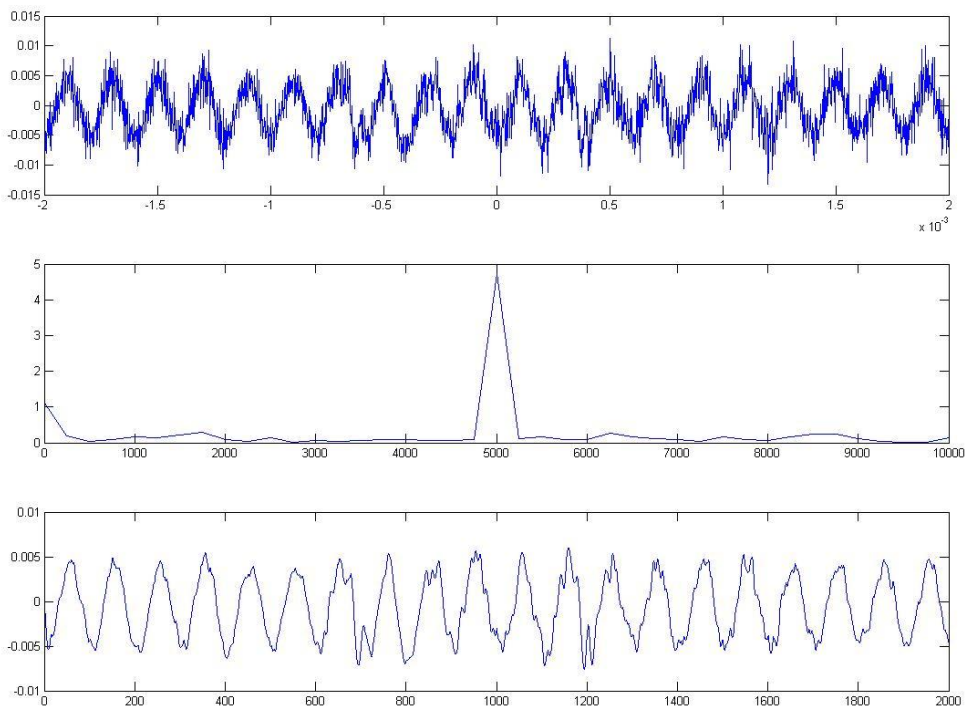
*Κυματομορφή 2B ( $f = 2$  KHz)*



*Κυματομορφή 3B ( $f = 3$  KHz)*

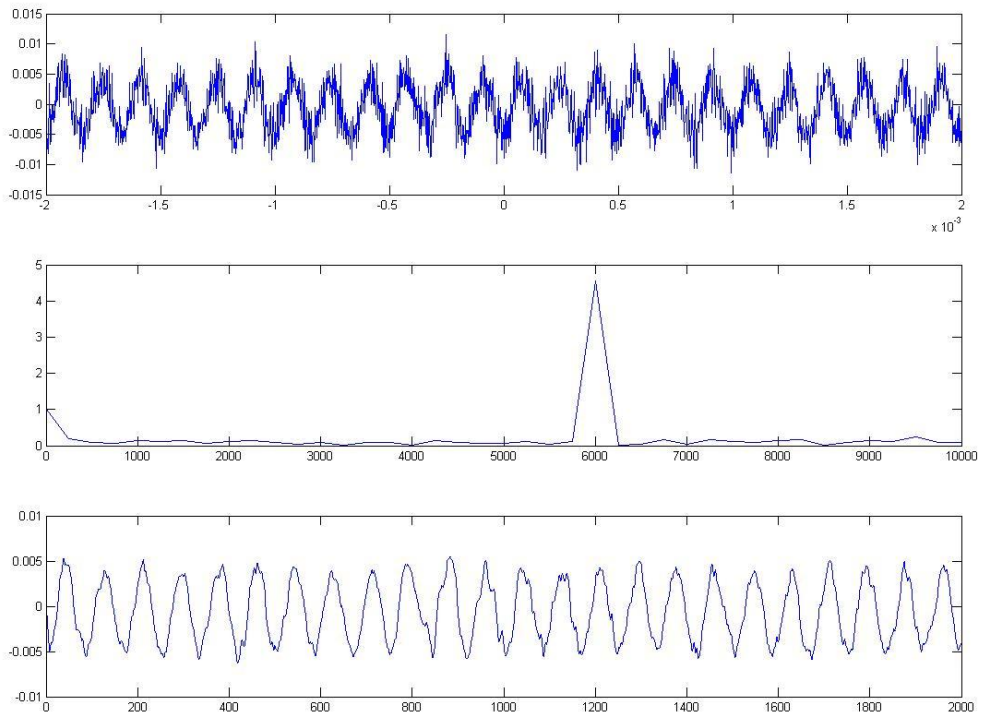


*Κυματομορφή 4B ( $f = 4$  KHz)*

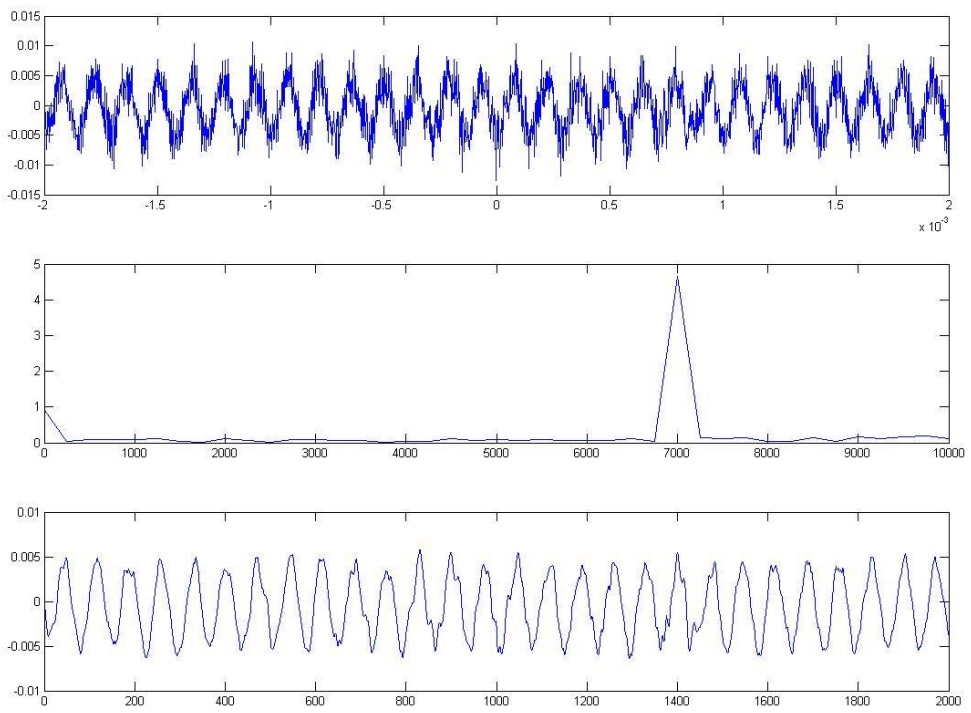


*Κυματομορφή 5B ( $f = 5$  KHz)*

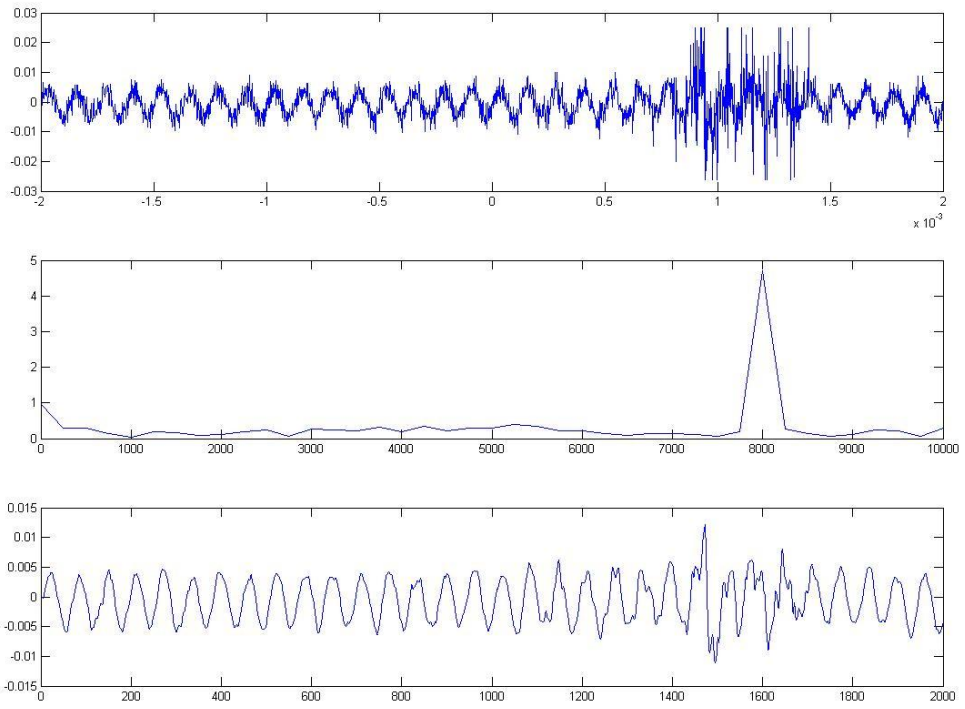




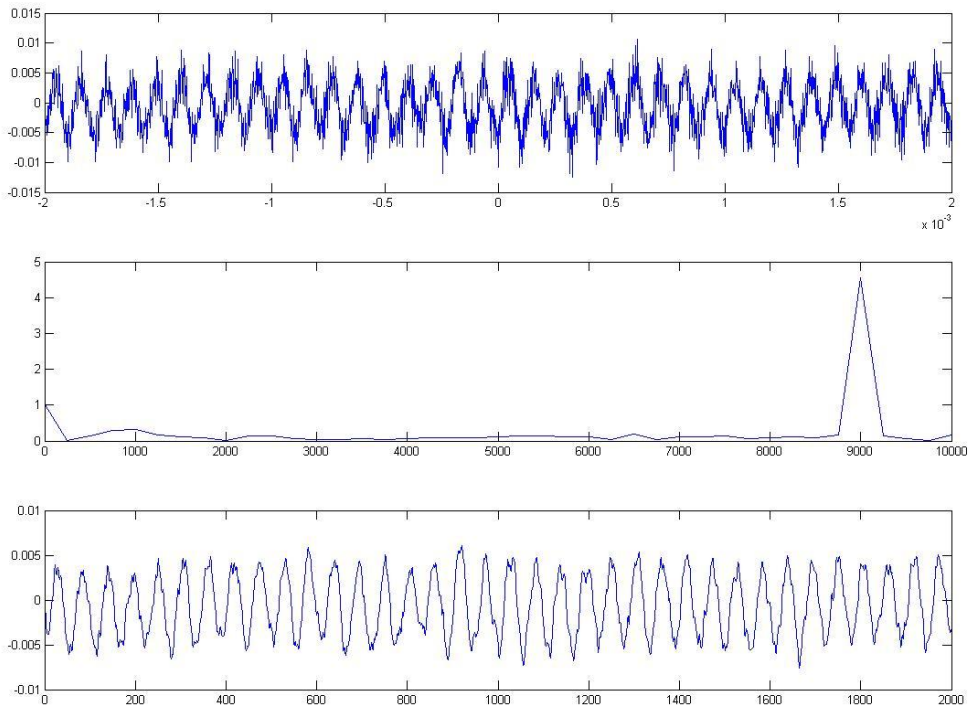
*Κυματομορφή 6B ( $f = 6$  KHz)*



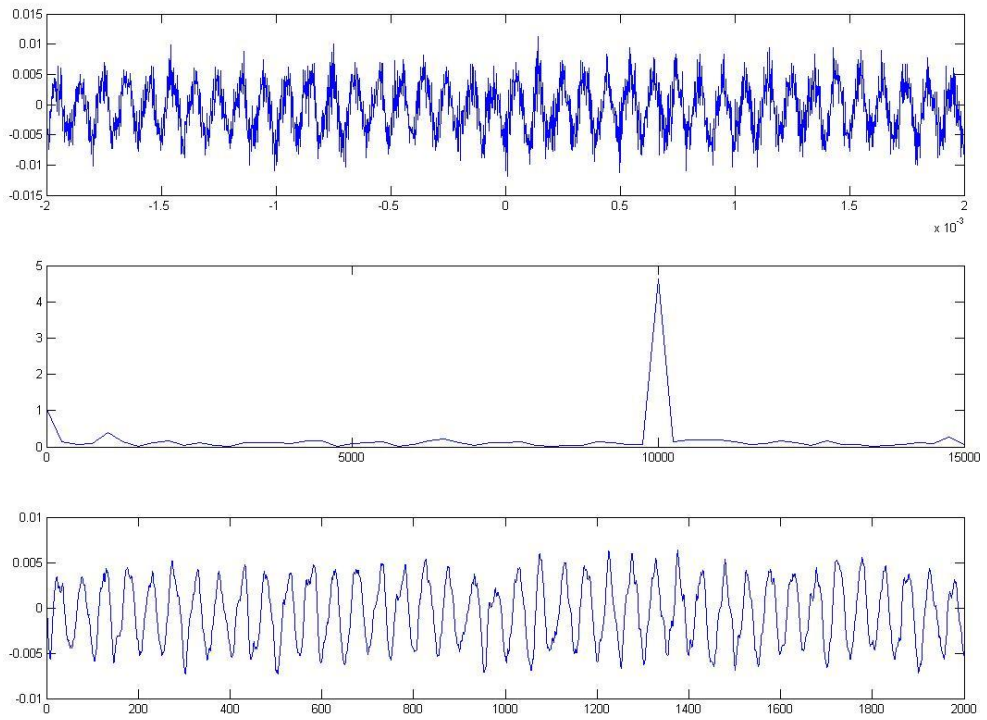
*Κυματομορφή 7B ( $f = 7$  KHz)*



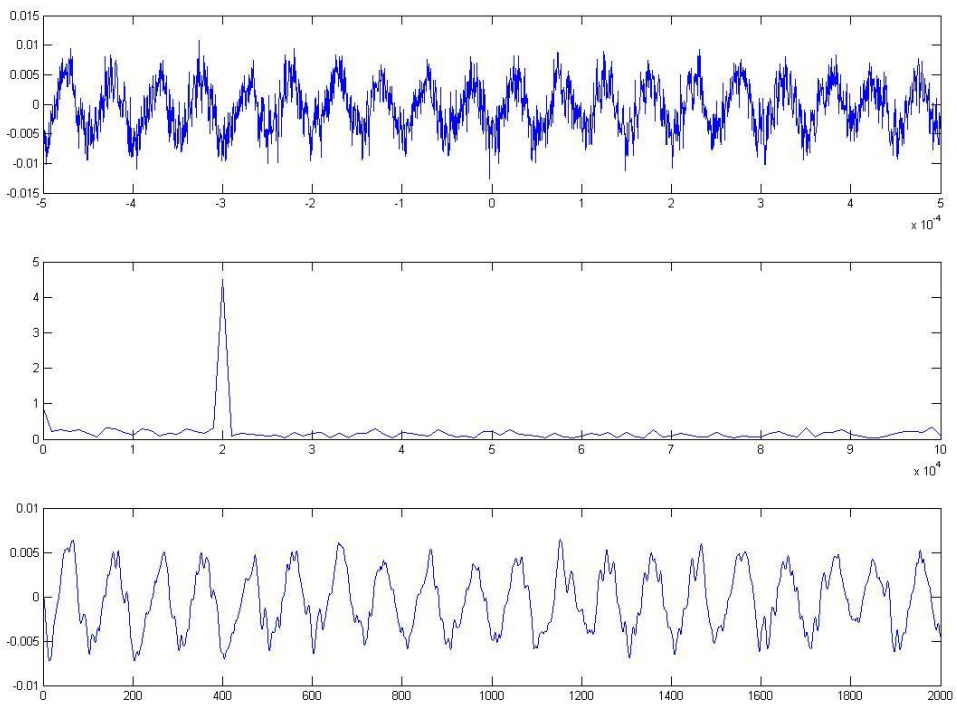
*Κυματομορφή 8B ( $f = 8$  KHz)*



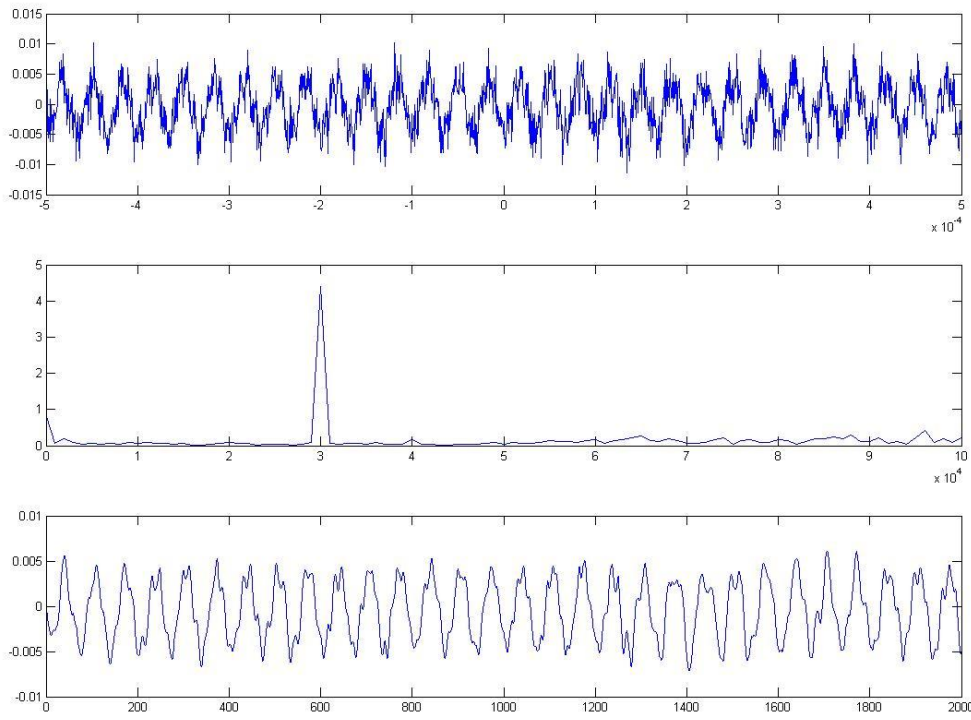
*Κυματομορφή 9B ( $f = 9$  KHz)*



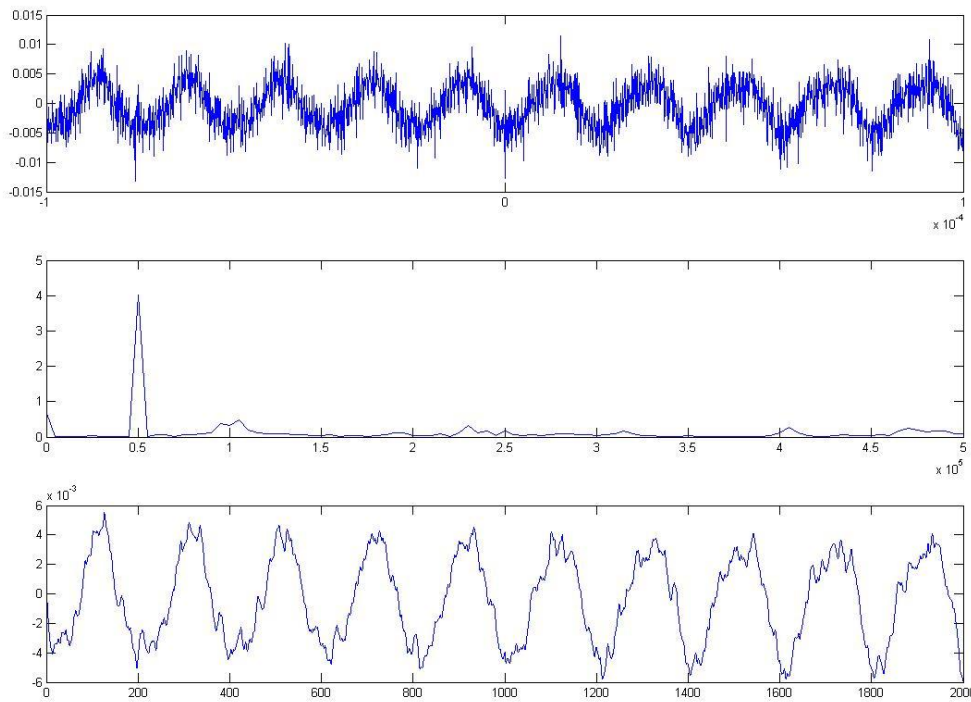
*Κυματομορφή 10B ( $f = 10 \text{ KHz}$ )*



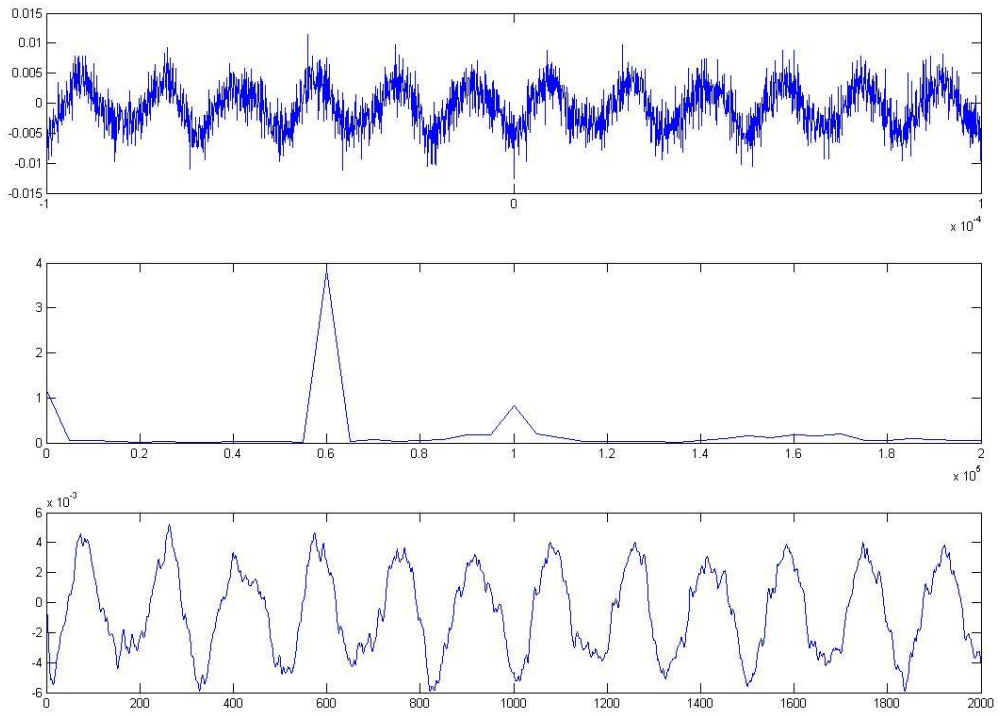
*Κυματομορφή 11B ( $f = 20 \text{ KHz}$ )*



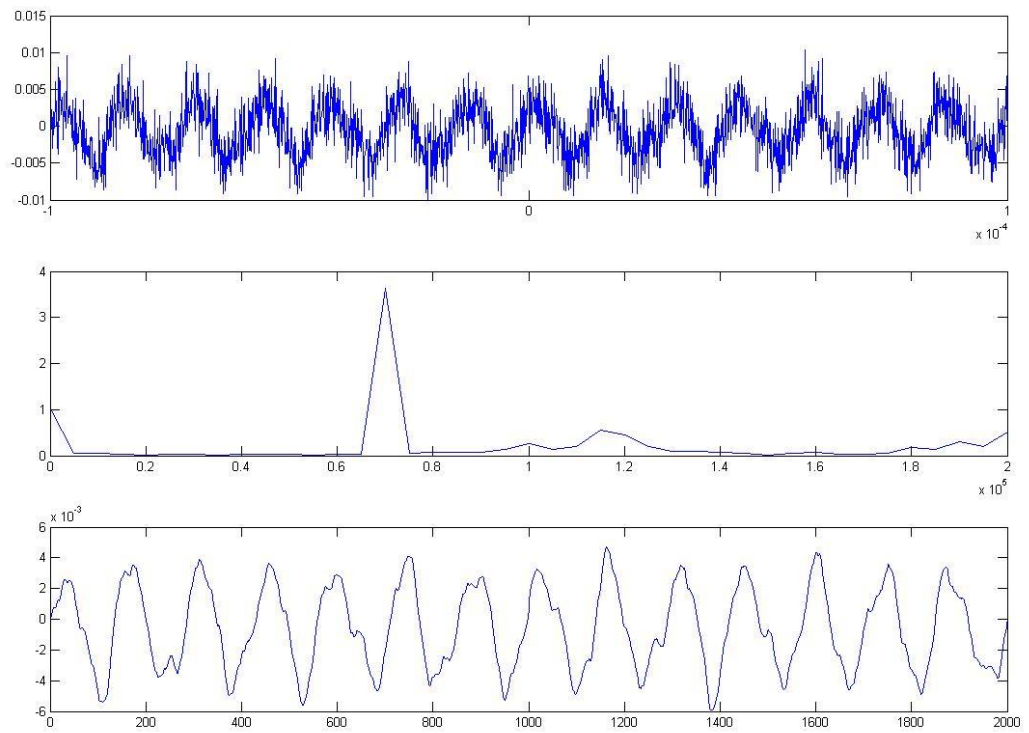
*Κυματομορφή 12B ( $f = 30$  KHz)*



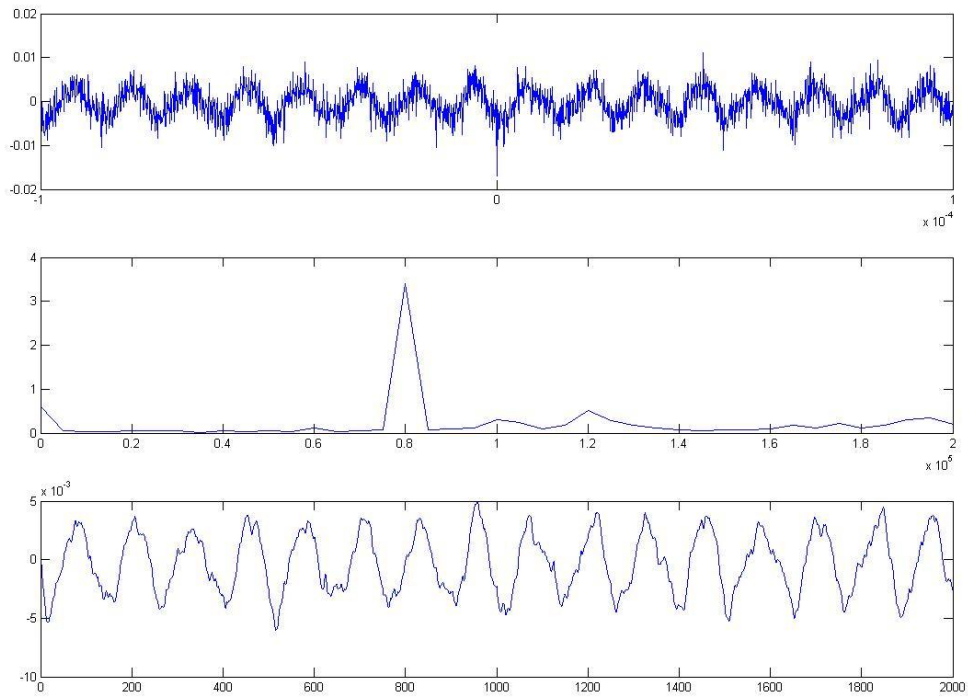
*Κυματομορφή 13B ( $f = 50$  KHz)*



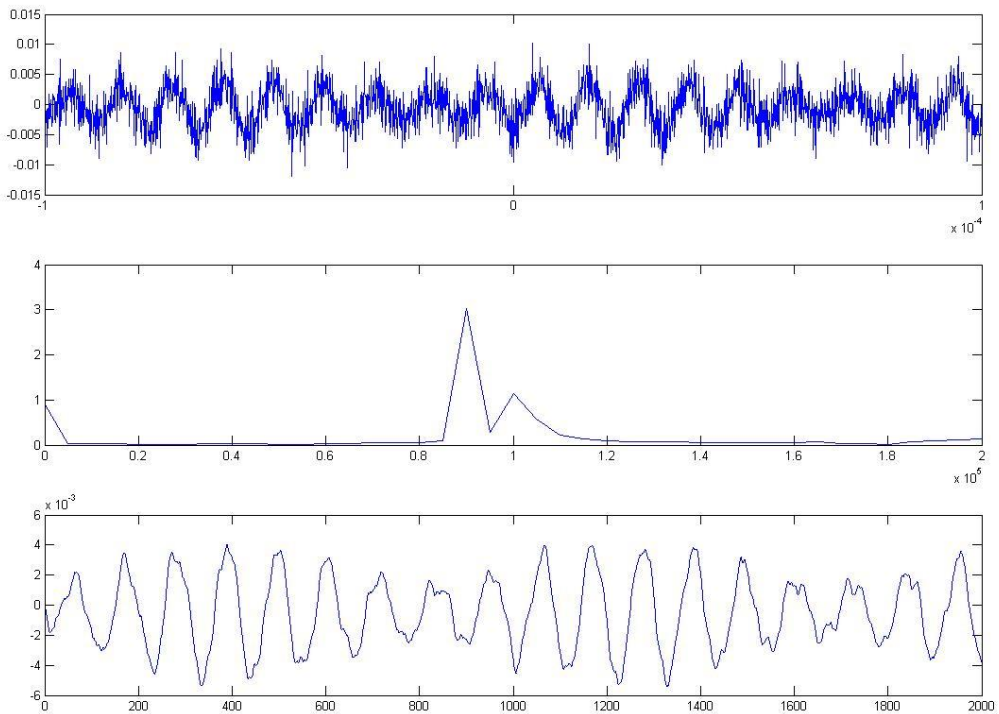
*Κυματομορφή 14B ( $f = 60 \text{ KHz}$ )*



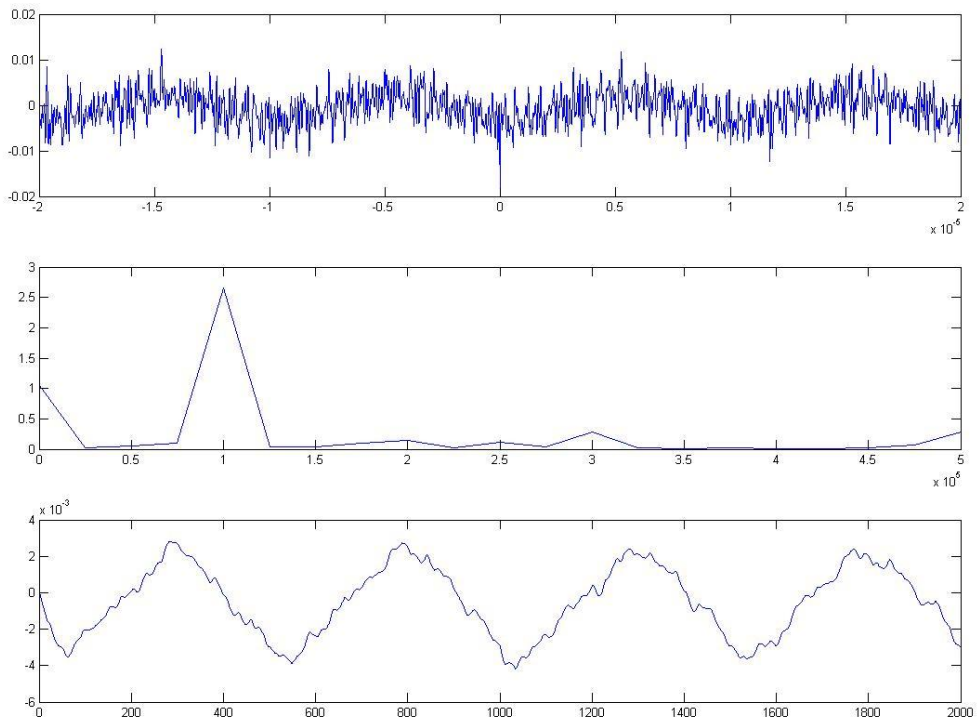
*Κυματομορφή 15B ( $f = 70 \text{ KHz}$ )*



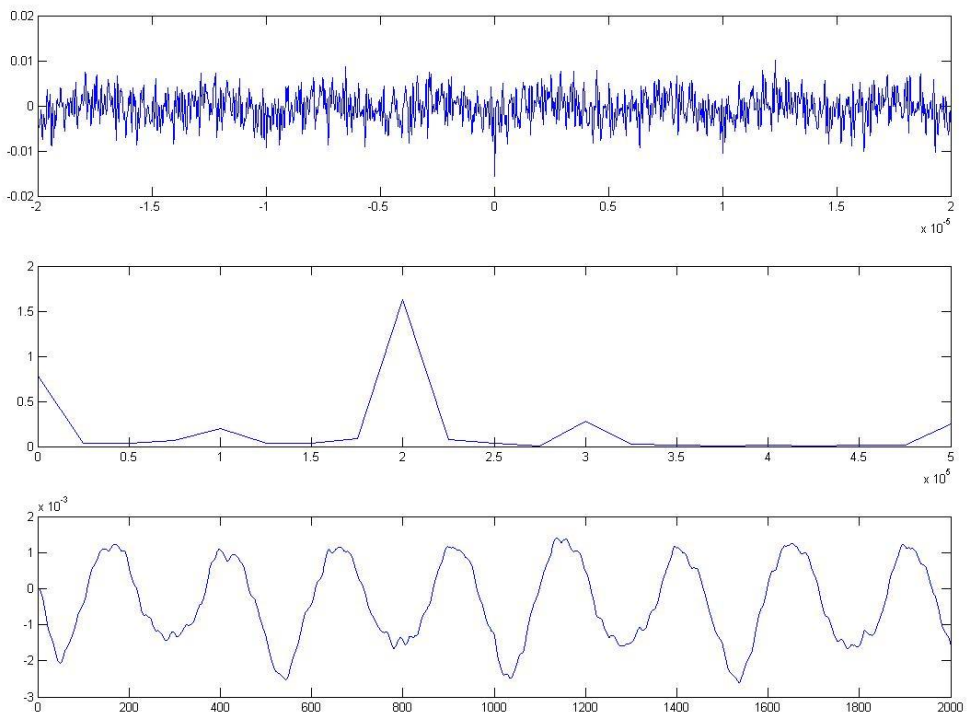
*Κυματομορφή 16B ( $f = 80$  KHz)*



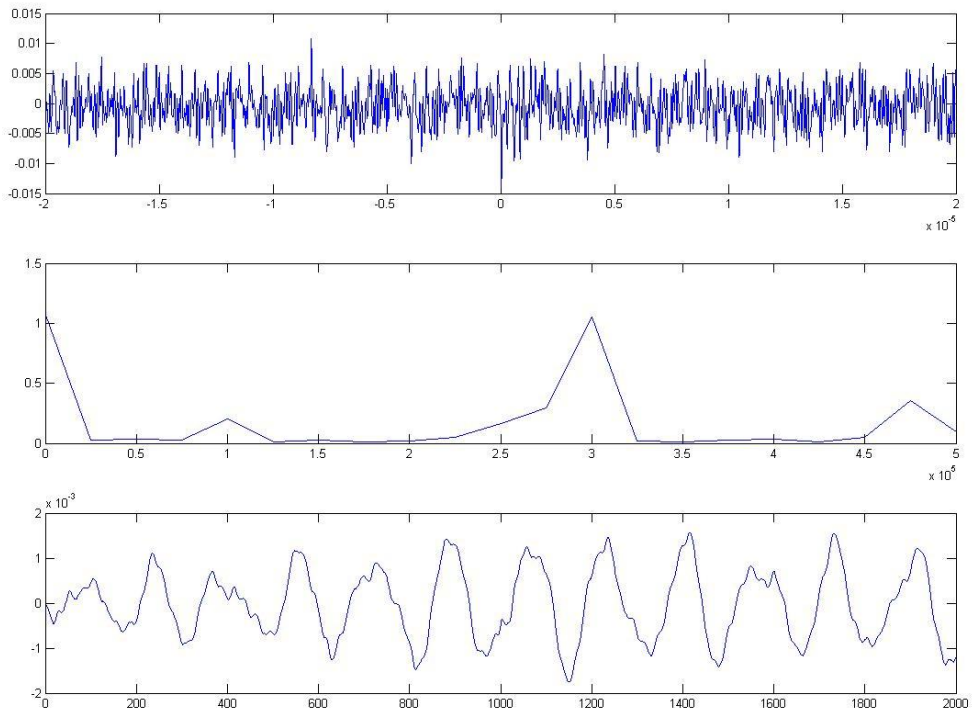
*Κυματομορφή 17B ( $f = 90$  KHz)*



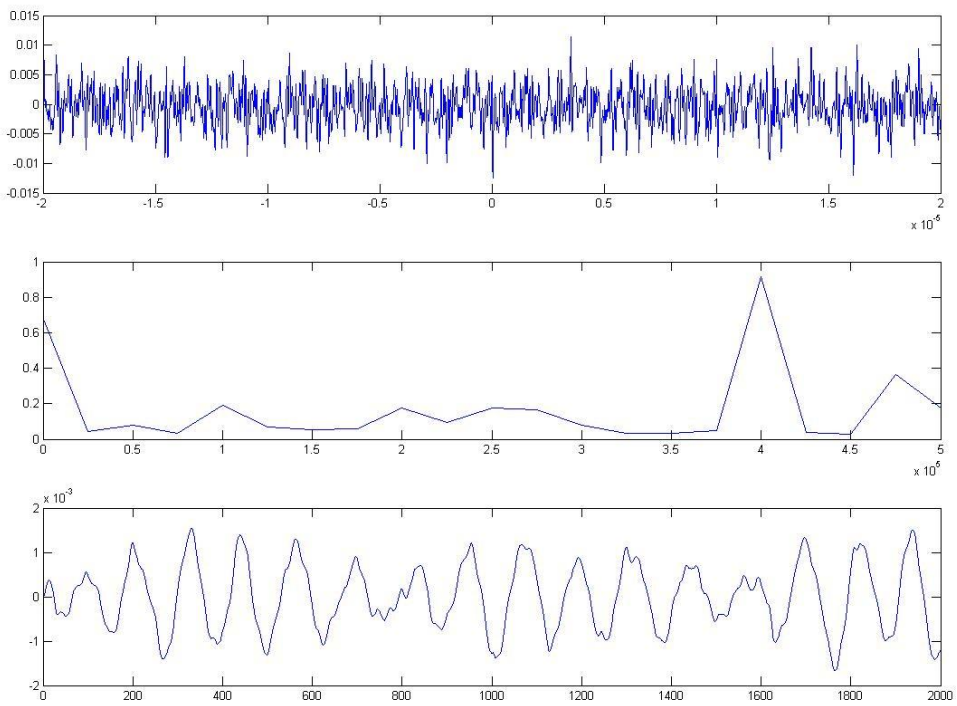
*Κυματομορφή 18B ( $f = 100$  KHz)*



*Κυματομορφή 19B ( $f = 200$  KHz)*

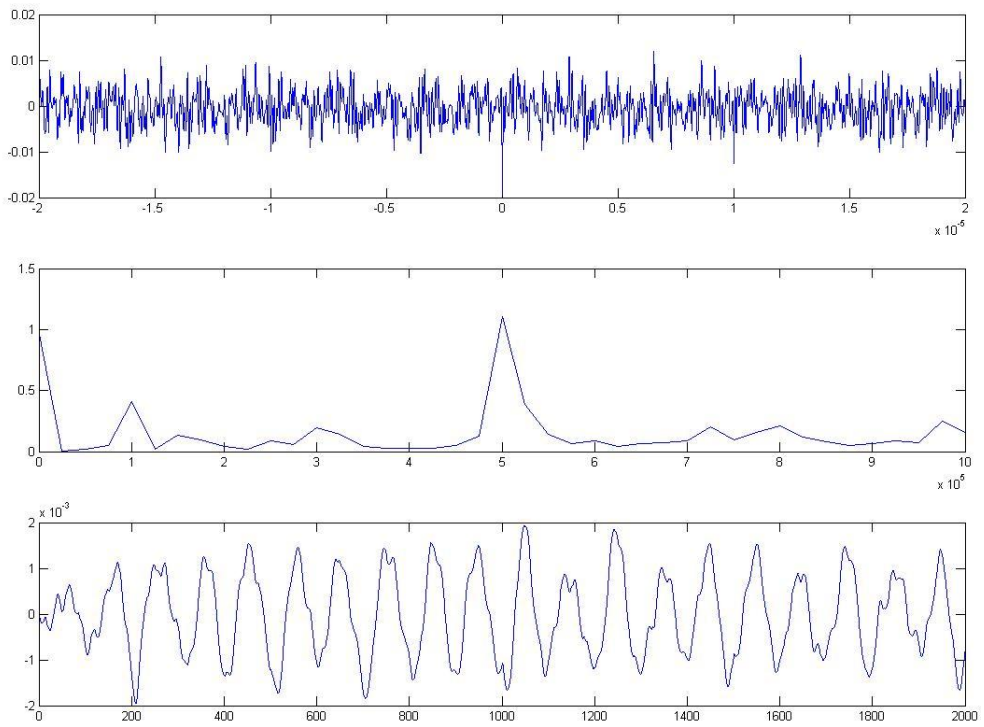


*Κυματομορφή 20B ( $f = 300$  KHz)*

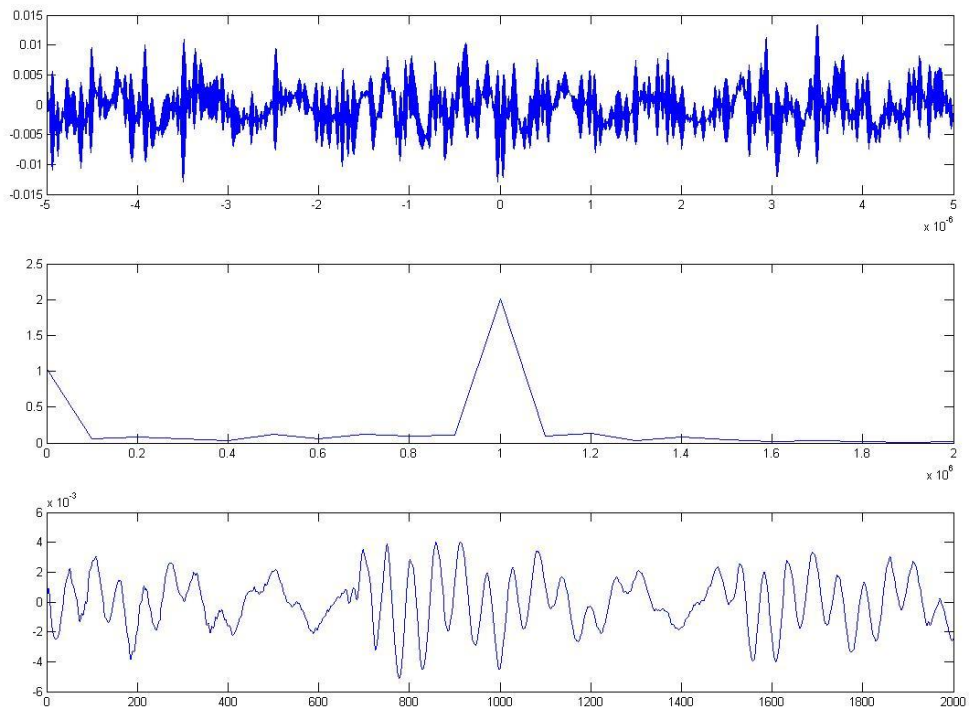


*Κυματομορφή 21B ( $f = 400$  KHz)*





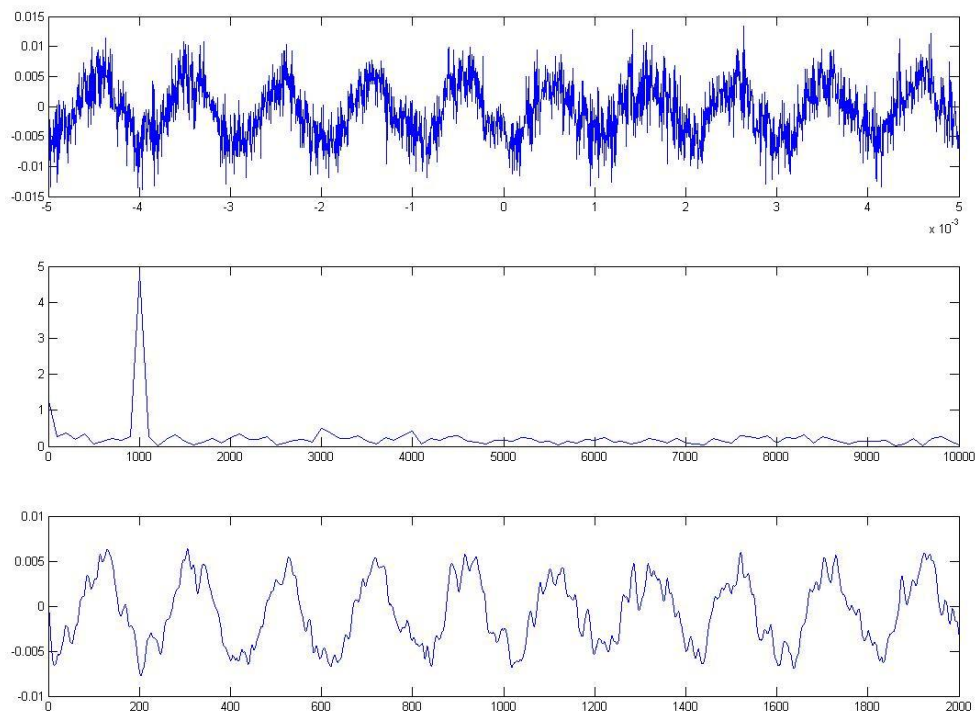
*Κυματομορφή 22B (  $f = 500$  KHz)*



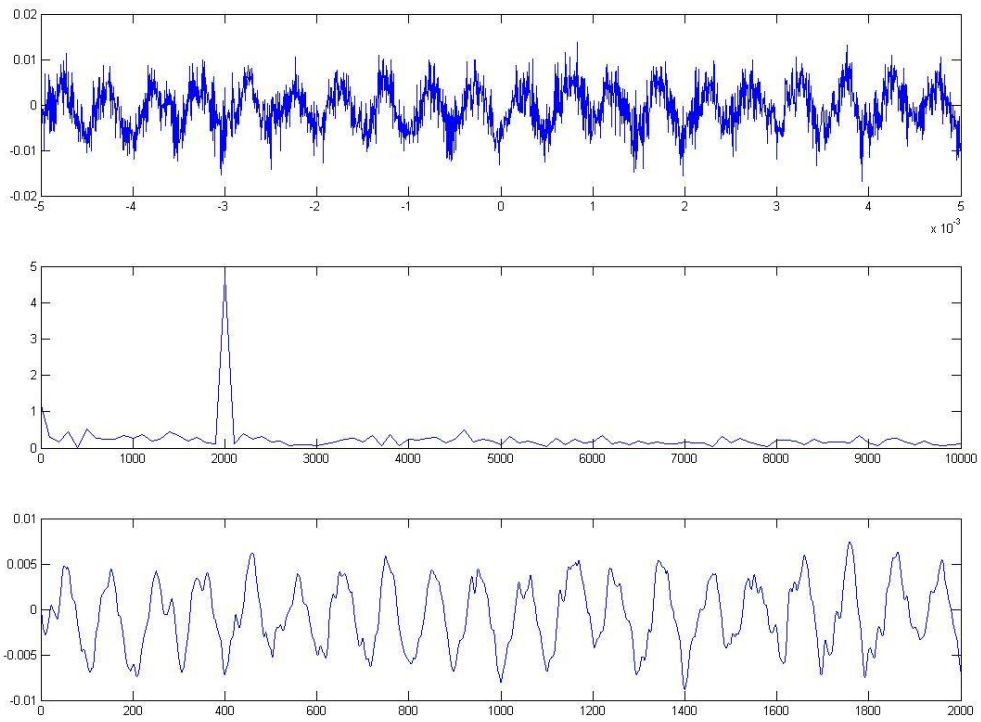
*Κυματομορφή 23B (  $f = 1000$  KHz)*

**Σειρά μετρήσεων Γ:**

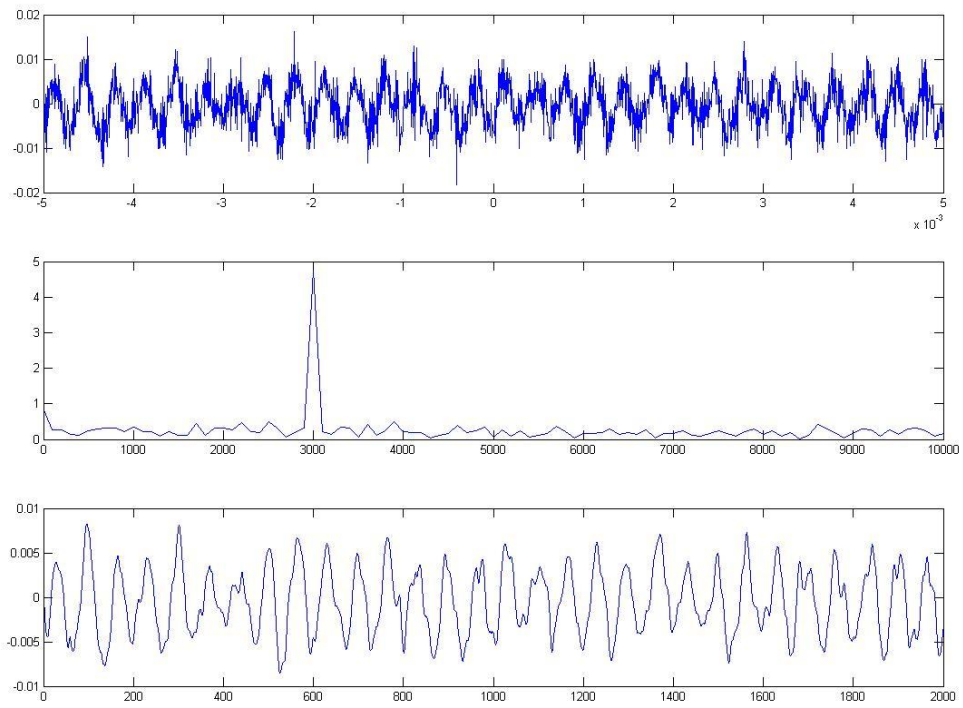
**$V_{AC}=2V_{p-p}$ ,  $V_{DC}=1,5V$ ,  $I_{DC}=0,19A$ .**



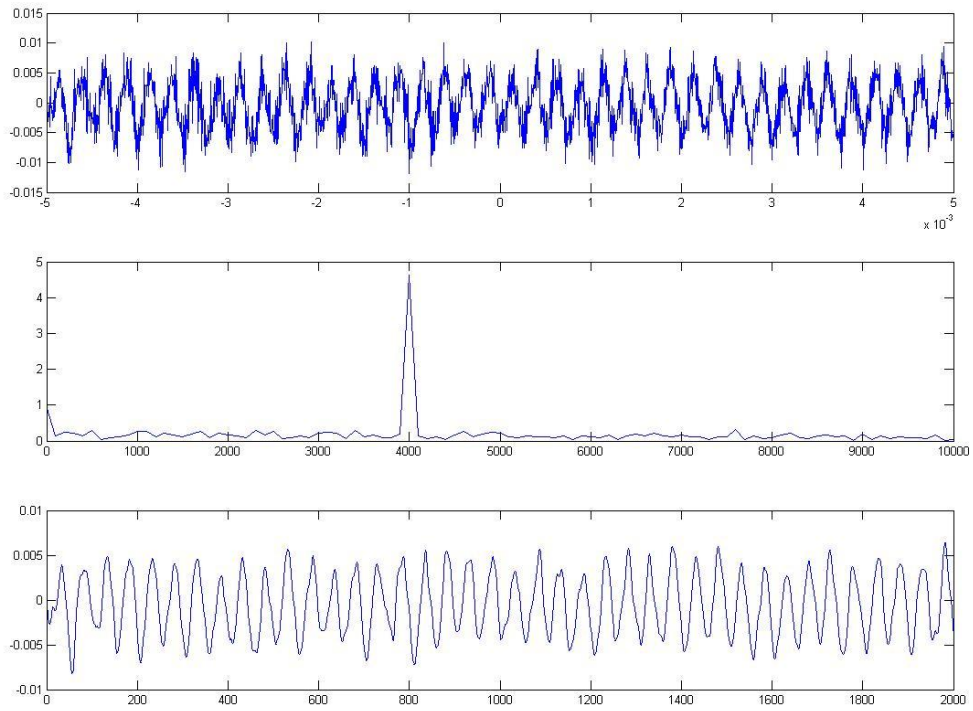
*Κυματομορφή 1Γ ( $f = 1 \text{ KHz}$ )*



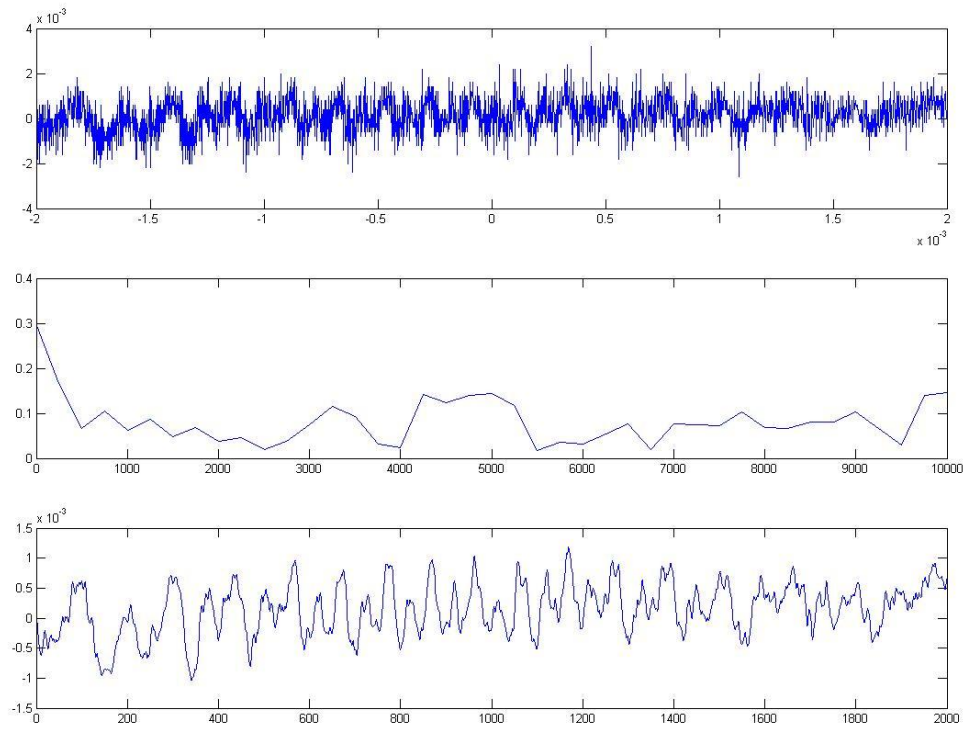
*Κυματομορφή 2Γ ( $f = 2$  KHz)*



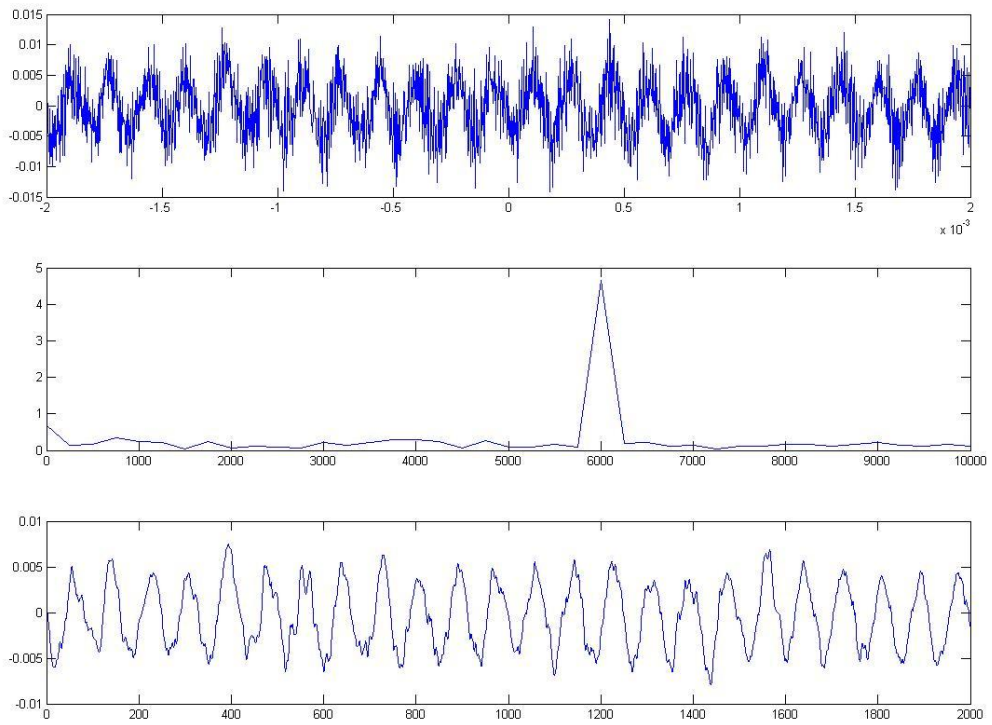
*Κυματομορφή 3Γ ( $f = 3$  KHz)*



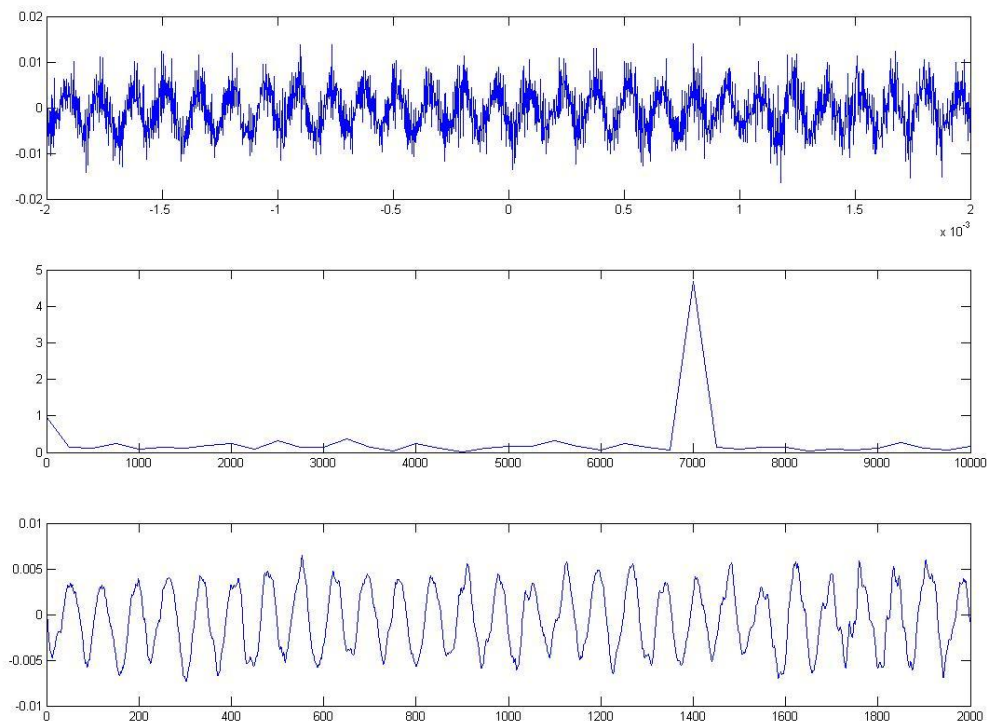
*Κυματομορφή 4Γ ( $f = 4$  KHz)*



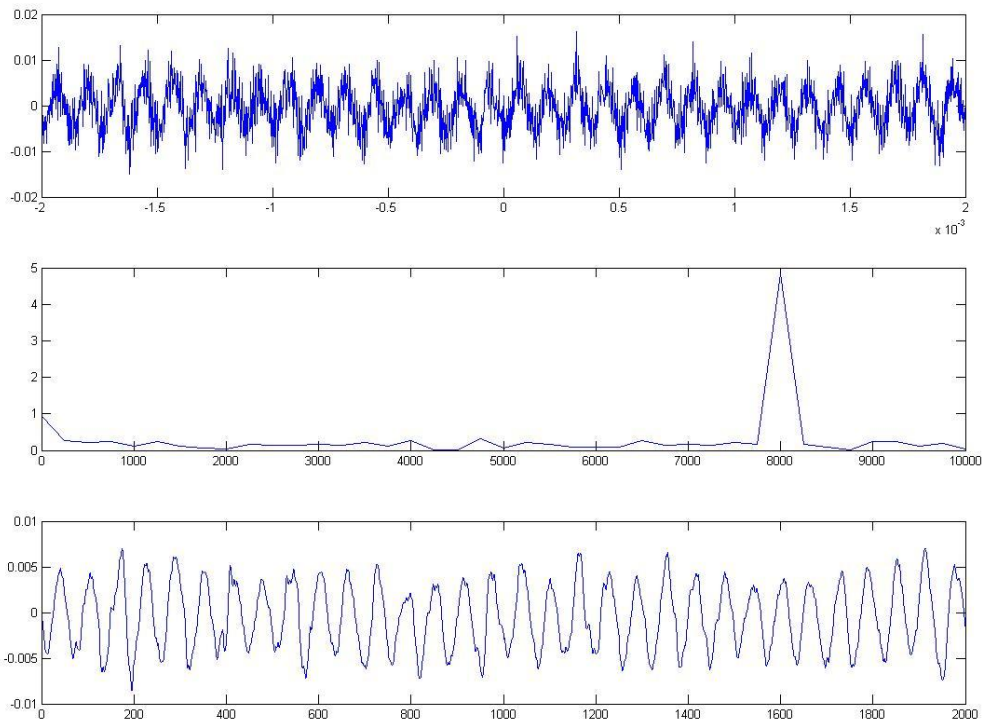
*Κυματομορφή 5Γ ( $f = 5$  KHz)*



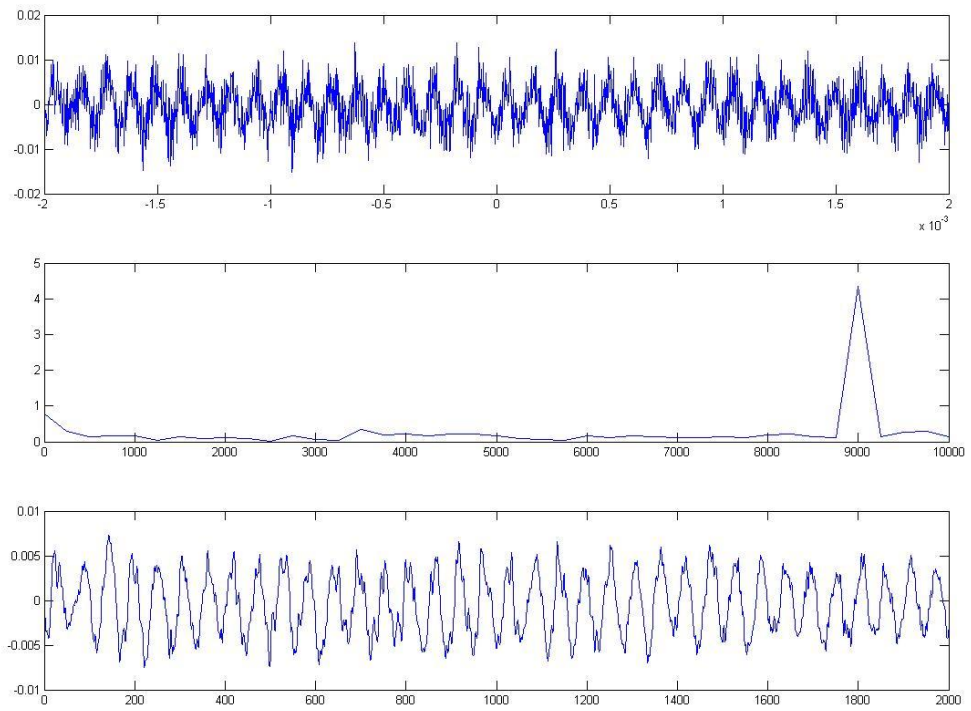
*Κυματομορφή 6Γ ( $f = 6$  KHz)*



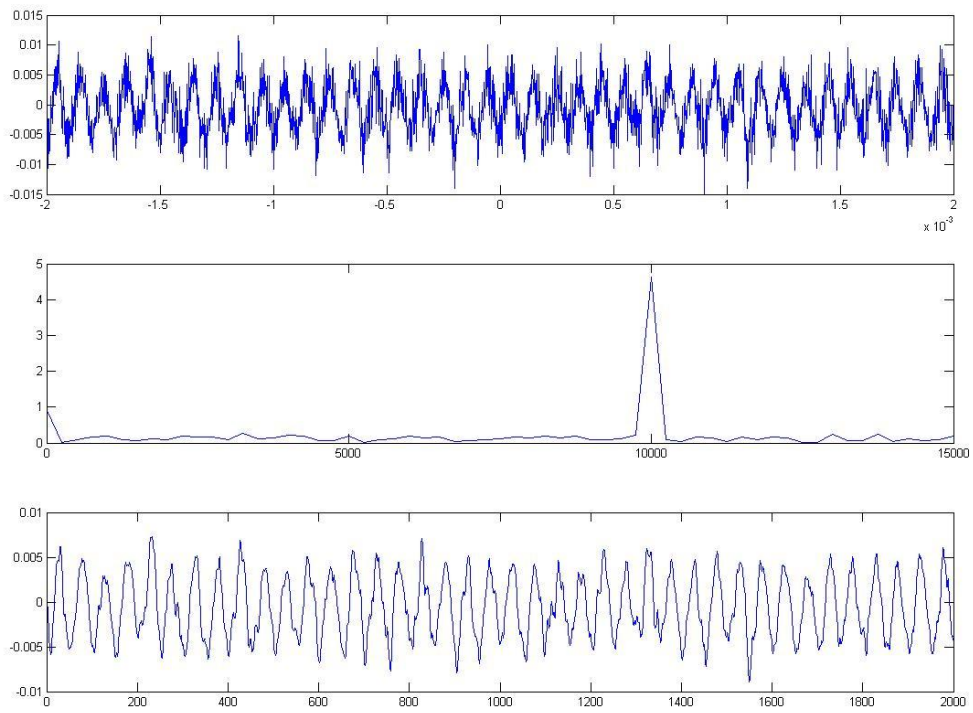
*Κυματομορφή 7Γ ( $f = 7$  KHz)*



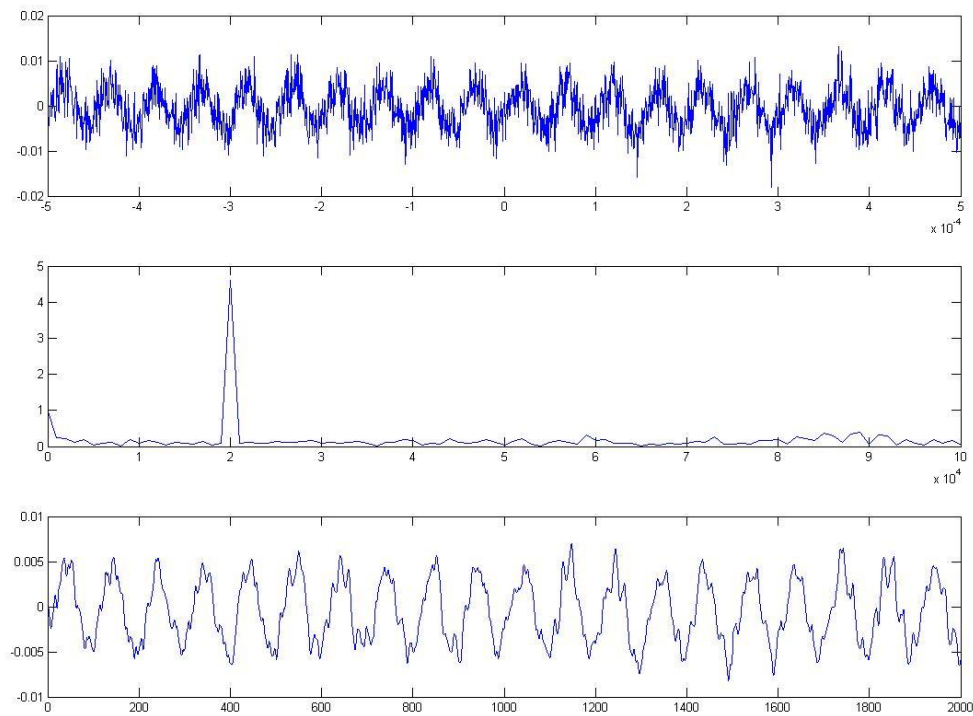
*Κυματομορφή 8Γ ( $f = 8 \text{ KHz}$ )*



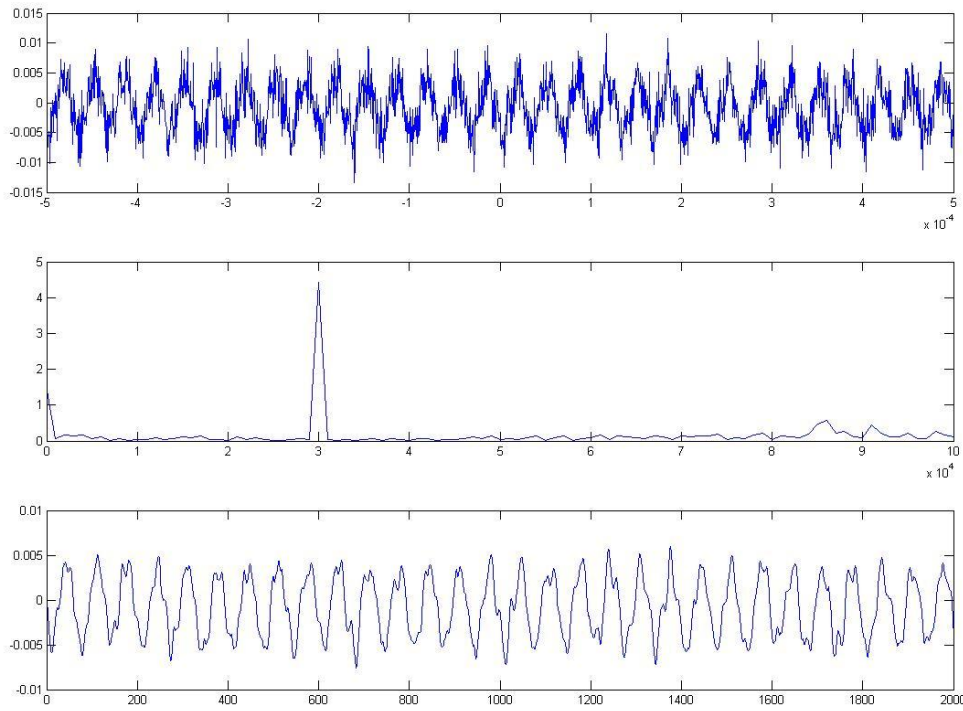
*Κυματομορφή 9Γ ( $f = 9 \text{ KHz}$ )*



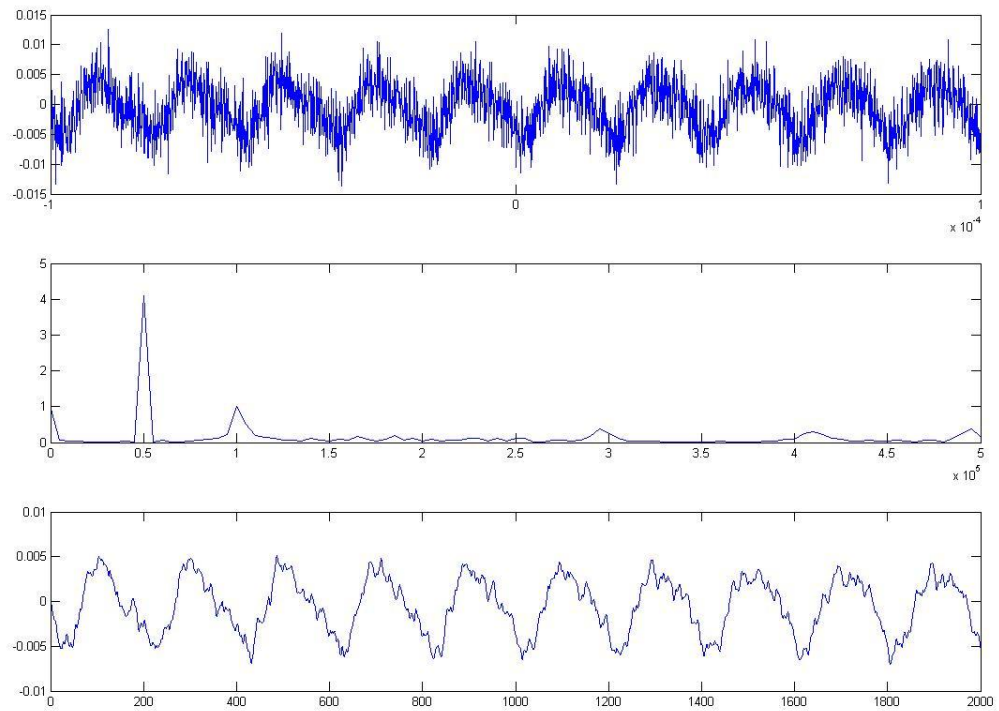
*Κυματομορφή 10Γ ( $f = 10$  KHz)*



*Κυματομορφή 11Γ ( $f = 20$  KHz)*

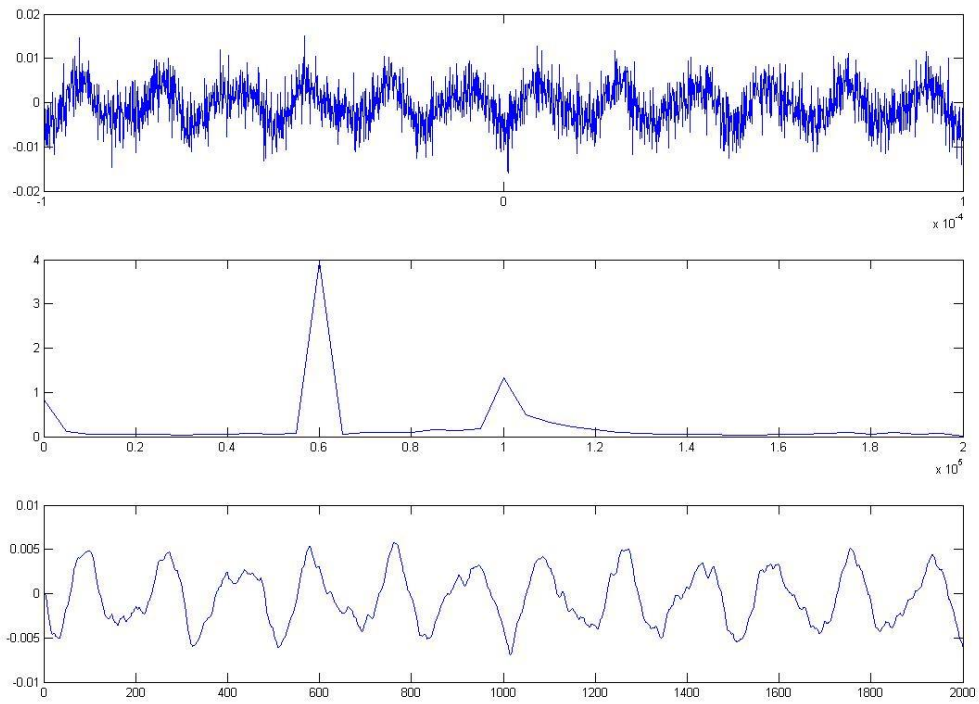


*Κυματομορφή 12Γ ( $f = 30$  KHz)*

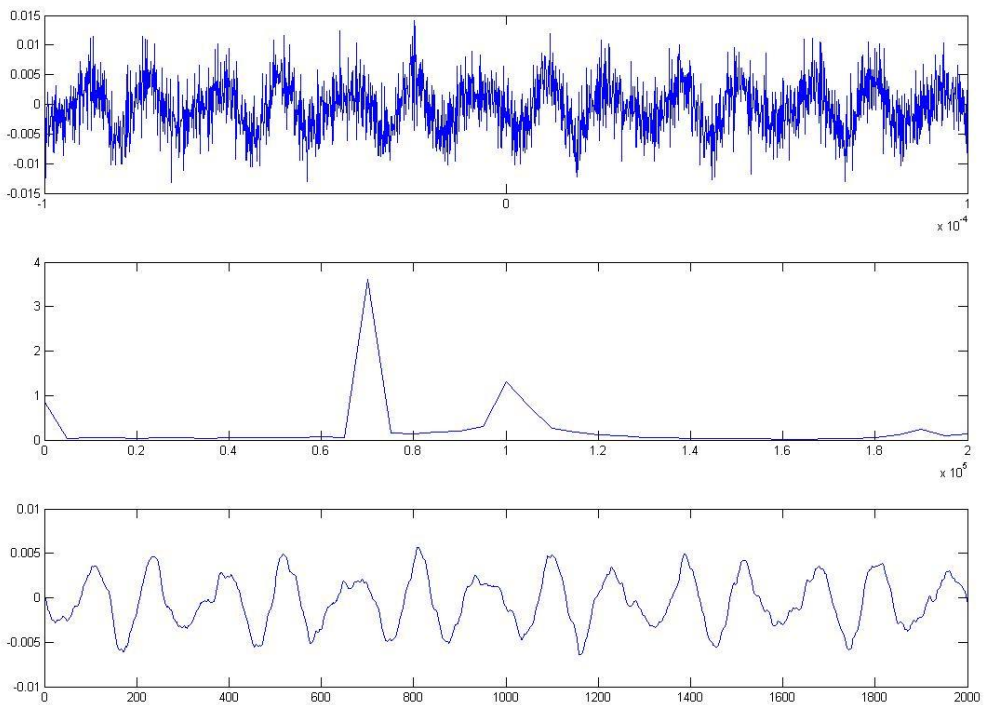


*Κυματομορφή 13Γ ( $f = 50$  KHz)*

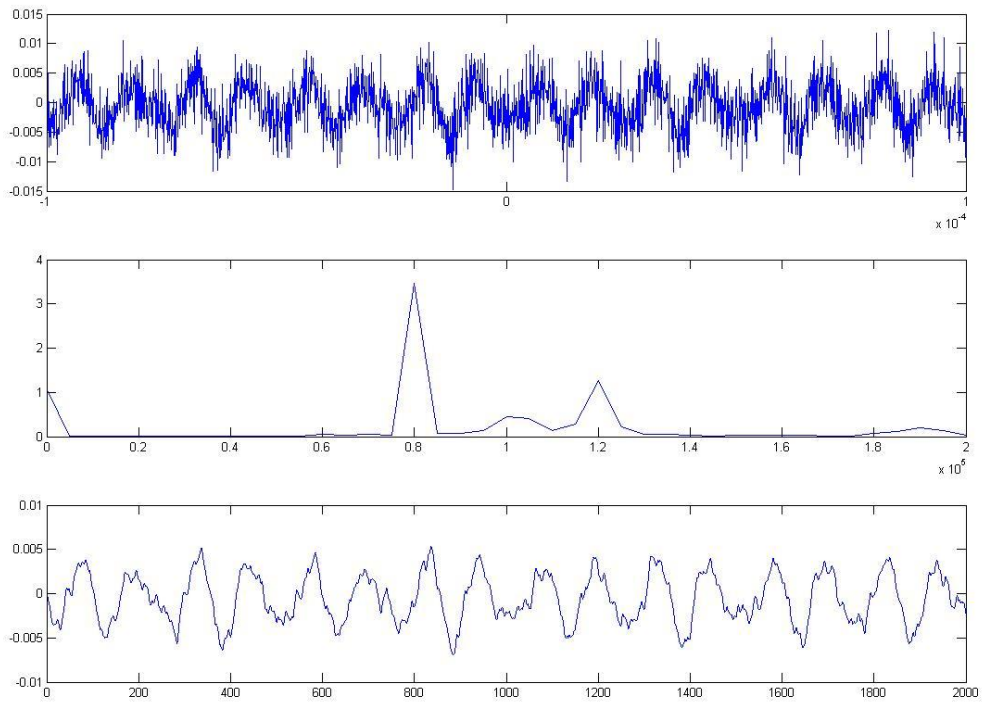




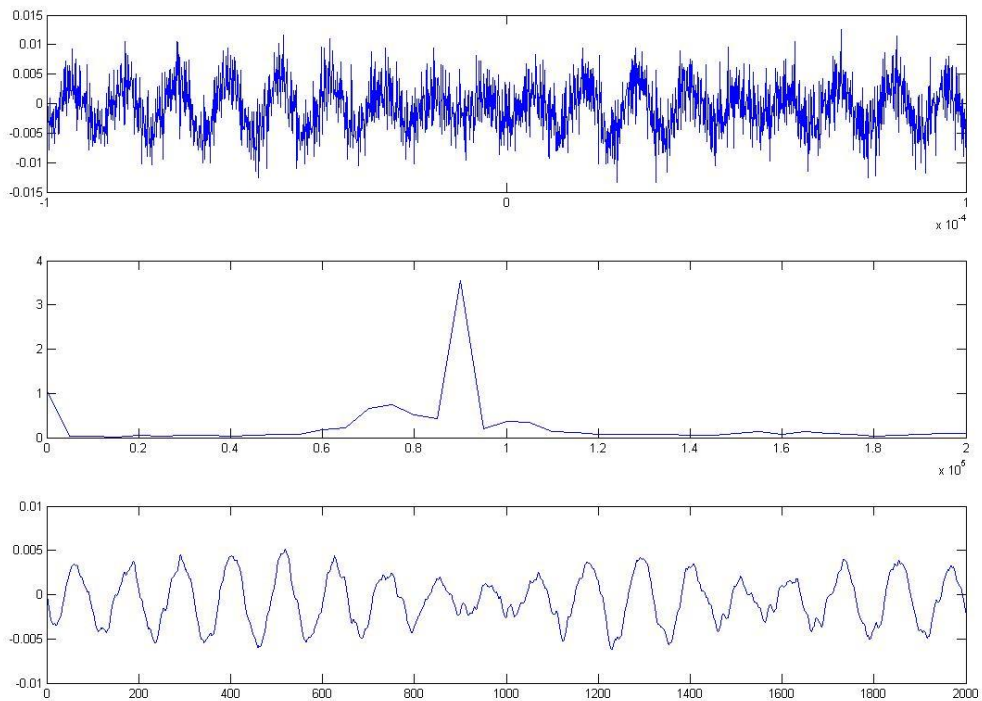
*Κυματομορφή 14Γ ( $f = 60 \text{ KHz}$ )*



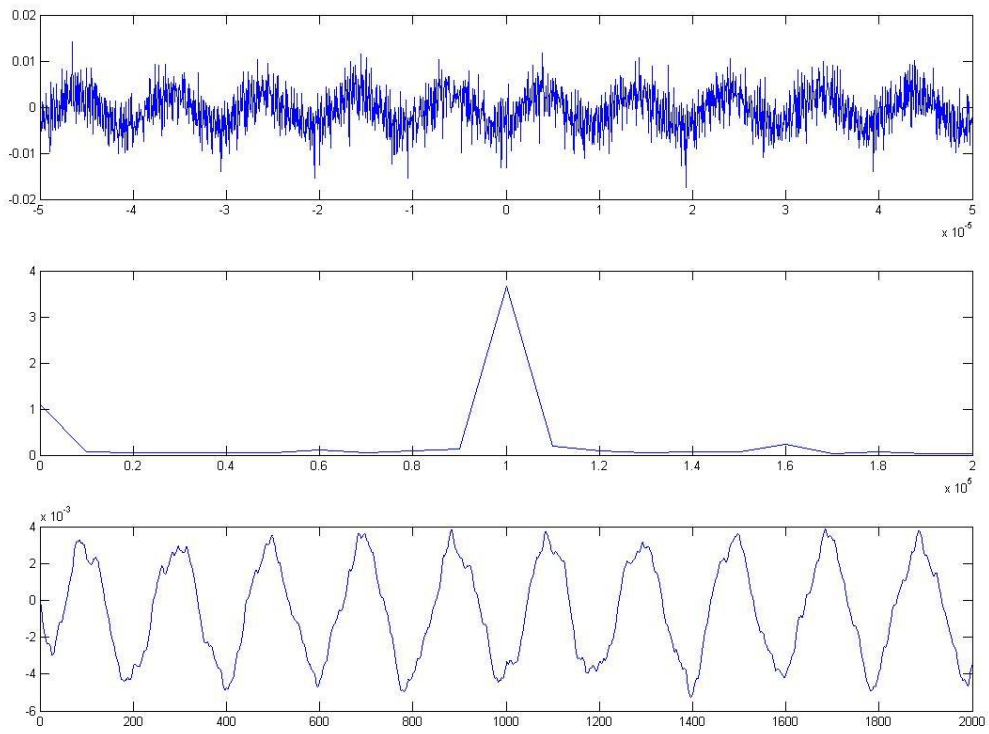
*Κυματομορφή 15Γ ( $f = 70 \text{ KHz}$ )*



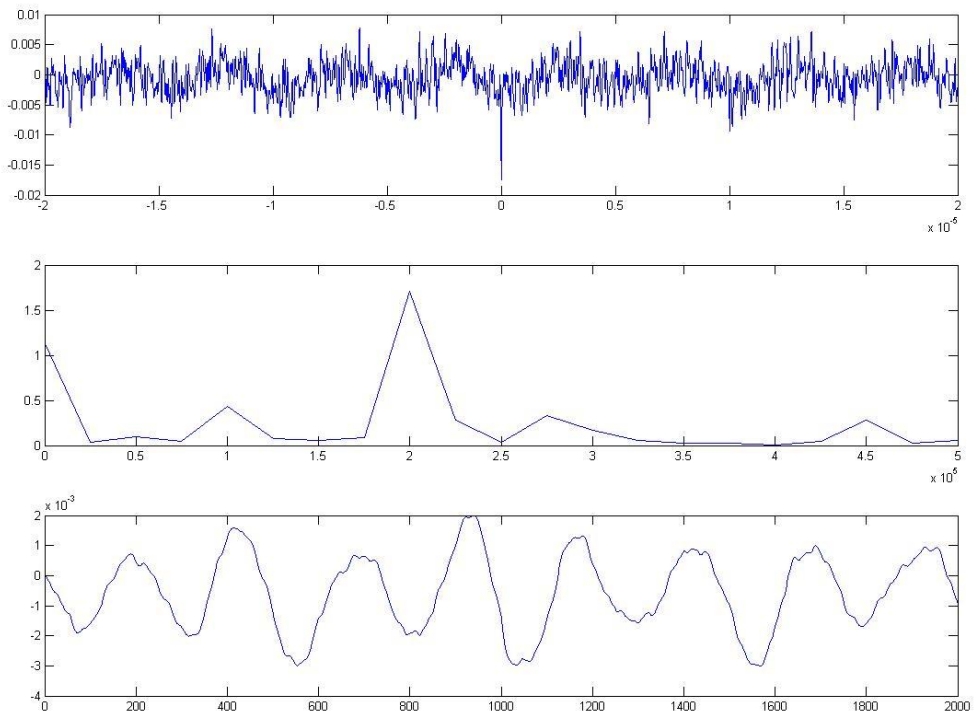
*Κυματομορφή 16Γ ( $f = 80 \text{ KHz}$ )*



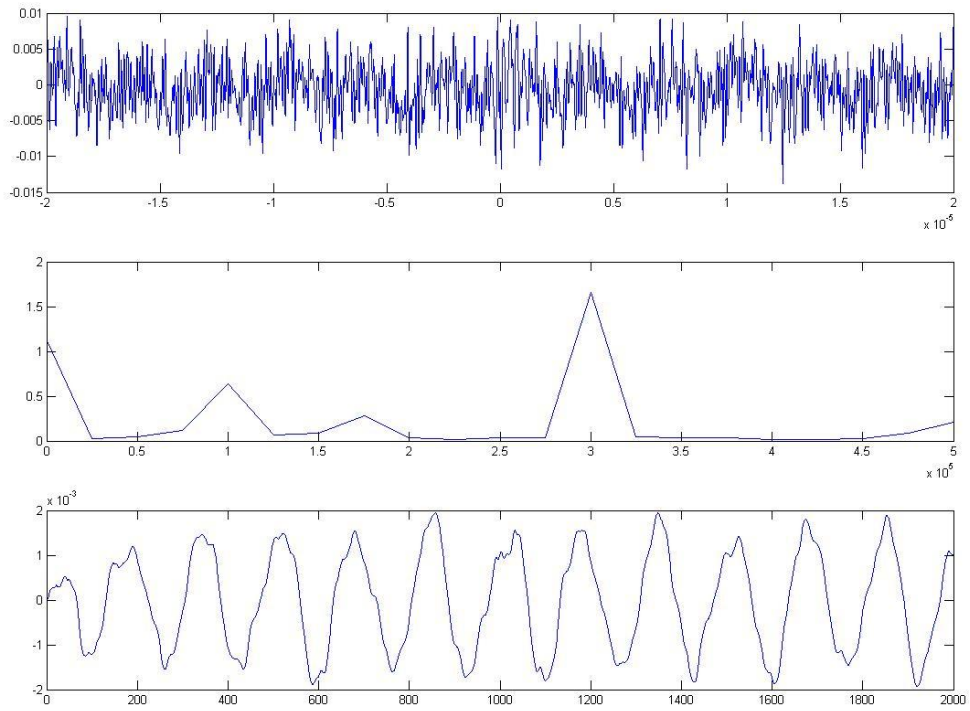
*Κυματομορφή 17Γ ( $f = 90 \text{ KHz}$ )*



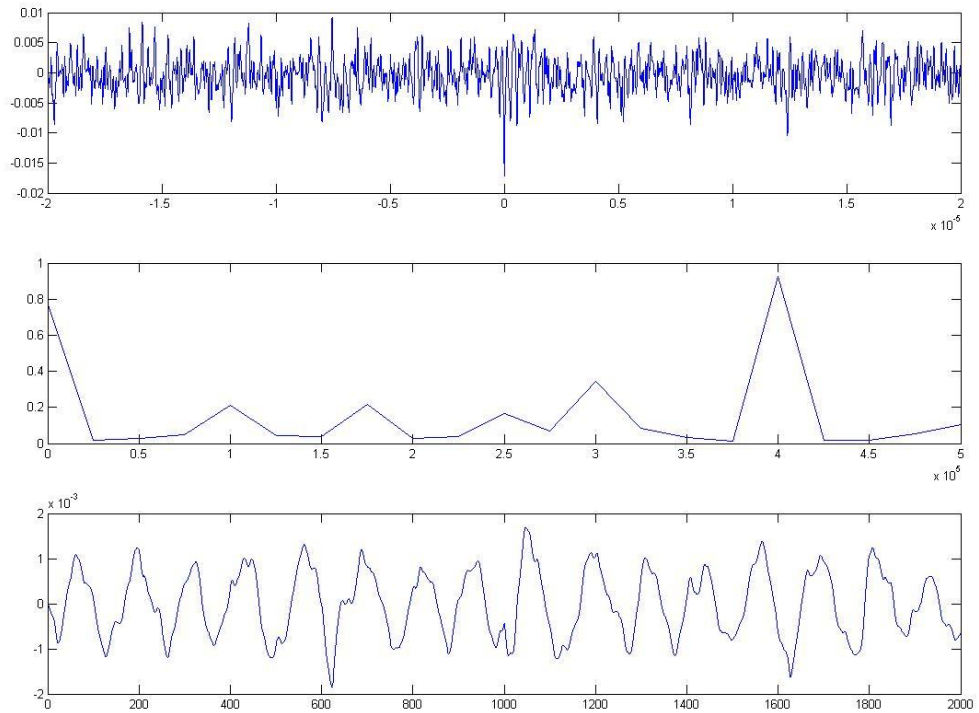
*Κυματομορφή 18Γ ( $f = 100$  KHz)*



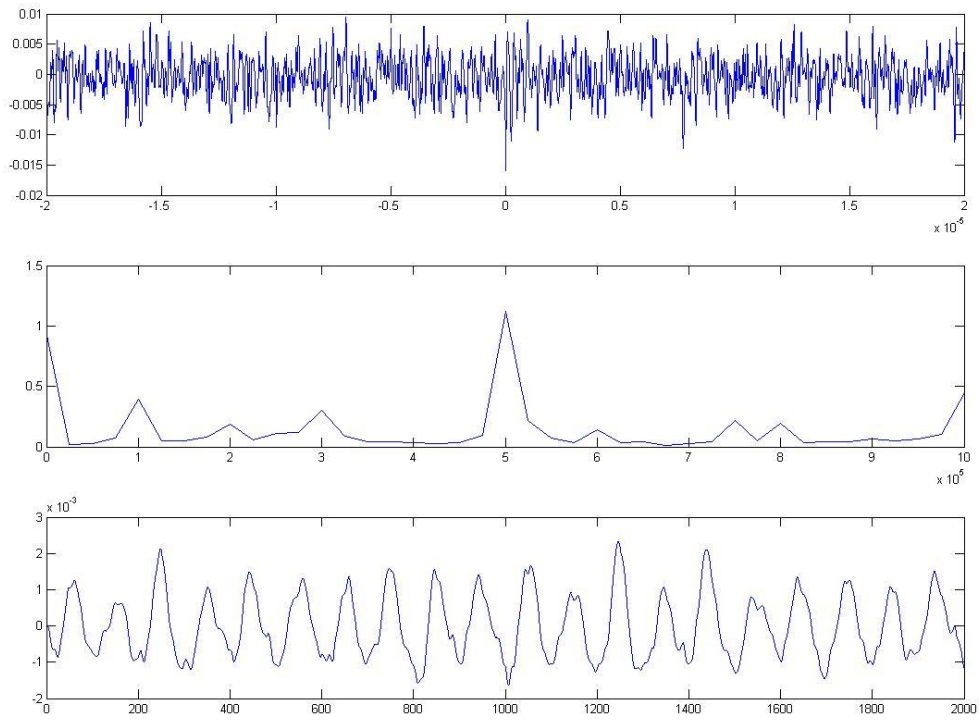
*Κυματομορφή 19Γ ( $f = 200$  KHz)*



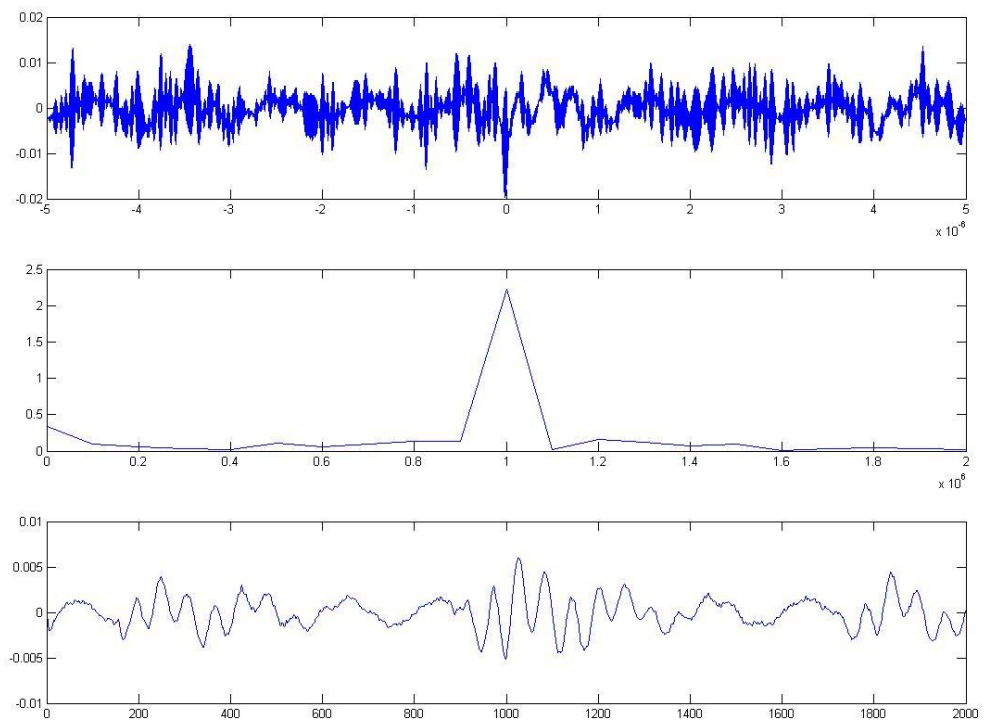
*Κυματομορφή 20Γ ( $f = 300 \text{ KHz}$ )*



*Κυματομορφή 21Γ ( $f = 400 \text{ KHz}$ )*



*Κυματομορφή 22Γ (f = 500 KHz)*



*Κυματομορφή 23Γ (f = 1000 KHz)*

## **4. Συμπεράσματα**

### **4.1 Μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων**

Με βάση τα δεδομένα του τρίτου μέρους της εργασίας, μπορούμε να εξάγουμε τα εξής ποσοτικά και ποιοτικά στοιχεία:

- Και στις τρεις σειρές μετρήσεων, το πλάτος των κυματομορφών, είτε πριν (όπου είναι δυσδιάκριτο) είτε μετά από το φιλτράρισμα (όπου η κυματομορφή φαίνεται πιο καθαρή), αρχικά, διατηρείται σταθερό μέχρι περίπου τα 90 KHz και, κατόπιν, βαίνει μειούμενο με αύξηση της συχνότητας έως το 1 MHz.
- Στην συντριπτική πλειονότητα των ληφθεισών σημάτων, η κύρια φασματική συνιστώσα κατά Fourier ταυτίζεται ως προς τη συχνότητα με το αρμονικό σήμα με το οποίο τροφοδοτείται η γέφυρα.
- Η ύπαρξη παρασιτικών φασματικών συνιστωσών ενισχύεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα τροφοδοσίας. Επίσης, η σειρά μετρήσεων Γ αποδίδει φάσματα με περισσότερο θόρυβο και παρασιτικές συνιστώσες σε σχέση με τη σειρά Β που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη τιμή στατικού πεδίου πόλωσης.
- Τα ληφθέντα σήματα έχουν αρμονική κυματομορφή με οξυμένες κορυφές στα μέγιστα τουλάχιστο έως τα 100 KHz. Από αυτή τη συχνότητα και ως το 1MHz, οι κυματομορφές αλλάζουν και απεικονίζονται σαν υπερθέσεις περισσότερων συχνοτήτων (παρασιτικών και μη).
- Η φασματική απόκριση των ληφθέντων σημάτων ταλαιπωρείται τόσο από θόρυβο ομοιογενώς κατανεμημένο όσο και από συνιστώσες κρουστικής φύσης (που αντιστοιχούν σε κρουστικούς παλμούς ή σε αρμονικά σήματα), οι οποίες αυξάνονται ραγδαία σε πλάτος καθώς αυξάνεται η συχνότητα τροφοδοσίας.

## **4.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων βάσει του φαινομένου GMI**

Οι παρατηρήσεις της παραγράφου 4.2 είναι αναγκαίο να εξηγηθούν και αξιολογηθούν, εν γένει, σε όρους θεωρίας του φαινομένου GMI. Επίσης, είναι απαραίτητη και η διασύνδεση των αποτελεσμάτων με την πειραματική διάταξη.

Συνεπώς, γίνονται οι παρακάτω επισημάνσεις:

- ✓ Η μορφή των ληφθέντων χρονικών σημάτων δεν είναι αρμονική.

Ειδικότερα, στις πολύ χαμηλές και χαμηλές συχνότητες έως τα 100 ΚHz, οι κυματομορφές προσομοιάζουν σε αρμονικές συναρτήσεις που έχουν οξυμένες κορυφές στα μέγιστα τους. Αυτό το χαρακτηριστικό συνδέεται με την ύπαρξη του συρμάτινου, μαγνητικά πολωμένου αγωγού. Η μη γραμμικότητα που διέπει τη σχέση μεταξύ της μαγνητικής διαπερατότητας του σύρματος και της έντασης του στατικού πεδίου πόλωσης οδηγεί σε παλμούς εξόδου αυτής της μορφής. Προφανώς, απουσία του σύρματος θα σήμαινε εξάλειψη αυτών των οξείων κορυφών και αρμονική έξοδο στη γέφυρα.

Στις μεσαίες συχνότητες που φτάνουν ως το 1MHz, παρατηρείται αλλοίωση των παλμοσειρών που οφείλεται στην εισαγωγή παρασιτικών αρμονικών συνιστωσών που κυκλοφορούν στη μη - ισορροπούσα γέφυρα.

- ✓ Το πλάτος των χρονικών σημάτων μεταβάλλεται με την αλλαγή της συχνότητας και του στατικού πεδίου.

Τόσο μεταξύ των σειρών μέτρησης - οπότε και αλλάζει η τιμή του στατικού πεδίου - όσο και για διαφορετικές τιμές συχνότητας, το πλάτος των παλμών μεταβάλλεται. Αυτή η αλλαγή δείχνει ότι η εμπέδηση του σύρματος μεταβάλλεται, δηλαδή έχουμε εκδήλωση του φαινομένου GMI.

Παρόλα αυτά, είναι αδύνατο να γίνει αντιστοίχιση των μεταβολών με τις θεωρητικά αναμενόμενες. Για παράδειγμα, θεωρητικά αναμένεται ότι υπό συνθήκες μηδενικού πεδίου η γέφυρα ισορροπεί. Συνεπώς, το σήμα στην έξοδο πρέπει να είναι μηδενικό, ενώ με αύξηση της συχνότητας το σήμα αρχίζει να υφίσταται. Όμως, εξαιτίας μια σειράς από παράγοντες, δεν είναι εφικτό να ισορροπεί αρχικώς πλήρως η γέφυρα. Έτσι, μεταβολές στην εμπέδηση του σύρματος μπορεί να οδηγούν τη διάταξη είτε σε περισσότερη ανισορροπία είτε σε ισορροπία.

Οι παράγοντες είναι οι εξής:

- Οι αντιστάσεις του εμπορίου που χρησιμοποιήθηκαν έχουν κάποια συγκεκριμένη ανοχή σε σφάλμα ως προς την ενδεικνύμενη τιμή τους

- Η θερμοκρασία επιδρά διαφορετικά στο σύρμα που βρίσκεται εντός του πηνίου (επί του οποίου παράγεται θερμότητα) σε σχέση με τις αντιστάσεις.
  - Εξαρχής, οι αντιστάσεις είχαν κάποια μικρή διαφορά με την αντίσταση του σύρματος, ενώ εισάγονται και τα σφάλματα του πολυμέτρου και του μετρητή κατά τη μέτρηση της αντίστασης του σύρματος.
- ✓ Η φασματική ανάλυση των ληφθέντων σημάτων επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία της γέφυρας Wheatstone αλλά, παράλληλα, καταδεικνύει το ότι είναι ευάλωτη ως προς παρασιτικές αρμονικές συνιστώσες.

Η συχνότητες των ληφθέντων σημάτων είναι οι αναμενόμενες. Στις συχνότητες κάτω των 100 KHz η ανάλυση κατά Fourier δείχνει ότι υπάρχει θόρυβος στις μετρήσεις που όμως είναι ομοιογενώς κατανομημένος συχνοτικά.

Παρόλα αυτά, στις μεσαίες συχνότητες διακρίνεται η ύπαρξη σημαντικών φασματικών συνιστωσών τόσο σε υψηλότερες τιμές αλλά και DC. Η γέφυρα, γενικά, επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους ως προς την ισορροπία της οι οποίες προκαλούν την ύπαρξη παρασίτων. Για παράδειγμα, εξωτερικά μαγνητικά πεδία είναι πιθανό να επηρεάζουν την απόδοση της διάταξης.

## **4.3 Προοπτικές του φαινομένου GMI**

### **4.3.1 Γενικά**

Το φαινόμενο GMI αποτελεί ένα από τα πιο ενδιαφέροντα πεδία για μελέτη και έρευνα όσον αφορά την εφαρμοσμένη χρήση μαγνητικών φαινομένων.

Όπως έχει γίνει κατανοητό από τη δεύτερη ενότητα, η επίτευξη μεγάλων GMI ratio για δεδομένα, πολύ μικρές τιμές πεδίου, γεγονός που αντιστοιχεί σε μια καμπύλη μεγάλης κλίσης, αποτελεί έναν πολύ ενθαρρυντικό παράγοντα για την παγίωση του φαινομένου GMI στην κατασκευή αισθητήρων μαγνητικού πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο μπορεί να είναι στατικό ή χρονικά μεταβαλλόμενο. Συνεπώς, ένας αισθητήρας που χρησιμοποιεί ένα υλικό GMI είναι εφικτό να μετρήσει τόσο ένα συνεχές πεδίο αν πολωθεί από αυτό (οπότε και το αντίστοιχο ρεύμα αγωγιμότητας που διαρρέει τυχόν πηνίο) είτε ένα εναλλασσόμενο ανομοιογενές πεδίο ( οπότε και το ρεύμα που διαρρέει το ίδιο το υλικό GMI). Ένα παράδειγμα τέτοιου αισθητήρα κατασκευάστηκε από τους Valensuela et al. με βάση ένα άμορφο σύρμα Co-Fe-Si-B. Μετρητέο μέγεθος ήταν το συνεχές ρεύμα που διέρρεε το σωληνοειδές που περικλείει το σύρμα μέσω της μελέτης της μεταβολής της εμπέδησής του.

Πλεονεκτήματα της χρήσης του φαινομένου GMI σε τέτοιους αισθητήρες είναι οι χαμηλές απαιτήσεις σε ενέργεια, η ανιχνευσιμότητα πολύ χαμηλών τιμών πεδίου και οι μικρές απαιτήσεις σε χώρο. Π.χ. αρκούν 2 με 3 mm σύρματος για τη διάταξη του αισθητήρα.



Επιπλέον, οι ολοένα περισσότερες και ποιοτικότερες λύσεις ως προς τη χρήση υλικών είτε ταχείας ψύξης είτε ηλεκτρόλυσης καθιστούν επιτεύξιμους στόχους όπως ακόμη μεγαλύτεροι λόγοι GMI, καλύτερες σιδηρομαγνητικές ιδιότητες, χαμηλότερο κόστος παραγωγής κ.α.

Πεδίο έρευνας μπορεί να αποτελέσει η εξάρτηση του φαινομένου από το πλάτος του οδηγούμενου ρεύματος, τη θερμοκρασία, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σύρματος, η εφαρμογή εξωτερικών μηχανικών τάσεων κ.α. Επίσης, ένας ελκυστικός στόχος θα ήταν η παγίωση μιας ενιαίας θεωρητικής μοντελοποίησης του φαινομένου σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.

Τέλος, με περαιτέρω έρευνα επί του φαινομένου GMI είναι δυνατό να επιτευχθεί πρόοδος πάνω στη μελέτη των μαλακών σιδηρομαγνητών, των πάσης φύσης ανισοτροπιών, της μαγνητοελαστικής συμπεριφοράς και άλλων μαγνητικών ιδιοτήτων.

Sensor Principle	Head length (m)	Resolution / Full scale ( $A\cdot m^{-1}$ )	Response speed (Hz)	Power consumption (W)
Hall	$10\sim 100 \times 10^{-6}$	$40 / \pm 8 \times 10^4$	$10^6$	$10^{-2}$
Magnetoresistance (MR)	$10\sim 100 \times 10^{-6}$	$8 / \pm 8 \times 10^3$	$10^6$	$10^{-2}$
Giant Magnetoresistance (GMR)	$10\sim 100 \times 10^{-6}$	$0.8 / \pm 1.6 \times 10^3$	$10^6$	$10^{-2}$
Fluxgate	$10\sim 20 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-5} / \pm 2.4 \times 10^2$	$5 \times 10^3$	1
SQUID	$10\sim 20 \times 10^{-3}$	$50 \times 10^{-12} / \pm 1 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^3$	-
Magnetoimpedance	$1\sim 2 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-5} / \pm 2.4 \times 10^2$	$10^6$	$5 \times 10^{-3}$

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρων μαγνητικού πεδίου.

#### **4.3.2 Χρήση γέφυρας και φαινόμενο GMI**

Ο λόγος GMI συνδέεται με το μέγεθος της εμπέδησης και, μέσω της χρήσης του σε διάταξη γέφυρας, με το πλάτος ενός ηλεκτρικού σήματος. Καθορίζεται, όπως έγινε αντιληπτό μέσω των πειραμάτων, από τη συχνότητα και το στατικό πεδίο που επιβάλλεται στο σύρμα.

Επίσης, υπάρχει ενδιαφέρον και ως προς τη συχνότητα του οδηγούμενου ρεύματος. Η συχνότητα συνδέεται με την κυματομορφή του ληφθέντος σήματος και μπορεί να αποδειχθεί ευρέως χρήσιμη η μελέτη των οξυμένων κορυφών που παρουσιάζει. Σε μεγαλύτερες συχνότητες οι μονές κορυφές παύουν να υφίστανται και η χρησιμότητα αυτή εκλείπει.

Όσον αφορά τη μελέτη και εφαρμοσμένη χρήση του φαινομένου σε διάταξη γέφυρας, οι προκλήσεις για βελτίωση των επιδόσεων και εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων είναι:

- η κατά το δυνατό μέγιστη ακρίβεια στην επίτευξη ισορροπίας στην κατάσταση ηρεμίας του σύρματος
- η χρήση γέφυρας που αφορά σε σύνθετες αντιστάσεις και όχι καθαρά ωμικές
- η κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση της επίδρασης της θερμοκρασίας
- η χρήση αντιστάσεων με χαμηλή ανοχή και θερμοκρασιακή εξάρτηση (π.χ. wound wire resistance).

## **Βιβλιογραφία**

- [1] Αρχές ηλεκτρονικών υλικών και διατάξεων, S. O. Kasap, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2004.
- [2] Modern magnetic materials: Principles and applications, R. C. O’Handley, Wiley, 2000.
- [3] Magnetic materials: Fundamentals and applications, N. A. Spaldin, Cambridge, 2010.
- [4] Introduction to Magnetic Materials, B. D. Cullity, C. D. Graham, Wiley, 2009.
- [5] Σημειώσεις για το μάθημα “Μαγνητικά υλικά και εφαρμογές”, Σ. Σακκόπουλος, Ε. Βιτωράτος, Πανεπιστήμιο Πατρών/Τμήμα Φυσικής, 2010.
- [6] Giant magneto-impedance and applications, C. Tannous, J. Gieraltowski, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [7] Giant magntoimpedance, M. Knobel, M. Vazquez, L. Kraus, 2002.
- [8] Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications, Manh-Huong Phan, Hua-Xin Peng, Sciencedirect/ELSEVIER, 2007.
- [9] Αισθητήρας μαγνητικού πεδίου βασισμένος στο φαινόμενο της μαγνητοεμπέδησης, Π. Βουρνά, Μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π., 2010.
- [10] Ιστοσελίδες:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Skin\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect), [http://en.wikipedia.org/wiki/Eddy\\_current](http://en.wikipedia.org/wiki/Eddy_current).