



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ  
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ  
ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ  
ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



**Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών**

**«ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ»**

**Ανίχνευση ρωγμών σε μη μαγνητικά αγωγίμα  
υλικά με τη μέθοδο των δινορευμάτων,  
χρησιμοποιώντας αισθητήρα GMR**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΉ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**της Άννας-Αικατερίνης Λιλή**

Ερευνητικός Επιβλέπων	Ακαδημαϊκός Επιβλέπων
Μιχάλης Πίσσας	Κωνσταντίνος Παρασκευαΐδης

**Οκτώβριος 2016**







### *Ευχαριστίες*

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Μιχάλη Πίσσα για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με την ανίχνευση ρωγμών, ανοίγοντάς μου αυτό το καινούριο πεδίο γνώσεων και δυνατοτήτων. Με την καθοδήγησή του και την καθοριστική συμβολή και βοήθεια που μου παρείχε διεκπεραίωσα την παρούσα διπλωματική.

Ακόμα ευχαριστώ το συνάδερφο και φίλο Γιώργο Ευταξία για τις πολύτιμες συμβουλές του και τη βοήθειά του, όποτε του ζητήθηκε, καθώς και τους Πατσατζή Δημήτρη και Κυριάκο Άγγελο για τη δική τους βοήθεια και συμβολή σε επιμέρους τμήματα της εργασίας.



Περιεχόμενα	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	17
Μη καταστροφικές μέθοδοι .....	17
1.1. Μη καταστροφικοί έλεγχοι υλικών (ΜΚΕ) – Non-destructive testing (NDT) 17	
1.1.1. Μέθοδοι βασισμένοι στην οπτική εκτίμηση.....	18
1.1.2. Μέθοδοι βασισμένοι στον Ηλεκτρομαγνητισμό (εκτός της μεθόδου των μαγνητικών σωματιδίων) .....	19
1.1.3. Μέθοδοι βασισμένοι στην ακτινοβολία .....	21
1.1.4. Μέθοδοι βασισμένοι στην Ακουστική .....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	23
Μέθοδοι δινορευμάτων.....	23
2.1. Βασικές αρχές.....	23
2.1.1. Επαγωγικό φαινόμενο.....	23
2.1.2. Επαγωγική τάση στο πηνίο.....	23
2.1.3. Ηλεκτρική εμπέδηση .....	25
2.2. Δινορεύματα .....	30
2.3. Βάθος διείσδυσης δινορευμάτων - Πυκνότητα .....	32
2.4. Υστέρηση φάσης των δινορευμάτων .....	35
2.5. Lift-off.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	38
Θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος .....	38
3.1. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων .....	38
3.2. FEMM.....	39
3.3. Χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο .....	40
3.4. Επίλυση του προβλήματος με το FEMM.....	42
3.5. Επίλυση του προβλήματος των δινορευμάτων.....	42
3.5.1. Εισαγωγή του προβλήματος.....	43

3.5.2. Σχεδιασμός της γεωμετρίας του προβλήματος .....	45
3.5.3. Εισαγωγή υλικών .....	47
3.5.4. Εισαγωγή κυκλώματος .....	50
3.5.5. Τοποθέτηση των στοιχείων της διάταξης .....	51
3.5.6. Συνοριακές συνθήκες.....	56
3.5.7. Διαίρεση του χώρου σε τομείς .....	58
3.5.8. Ανάλυση του προβλήματος.....	59
3.5.9.Κατασκευή διαγραμμάτων .....	62
3.5.10. Εισαγωγή ρωγμών στην προσομοίωση.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	80
LabView.....	80
4.1. Εισαγωγή στο LabView.....	80
4.2. Δομή του περιβάλλοντος LabView .....	81
4.3. Κατασκευή του προγράμματος συλλογής δεδομένων από τον μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.....	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	87
Αισθητήρες Γιγαντιαίας Μαγνητοαντίστασης GMR.....	87
5.1. Φαινόμενο μαγνητοαντίστασης .....	87
5.1.1. Ηλεκτρική Αντίσταση και Μαγνήτιση.....	87
5.1.2. Φαινόμενο γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης. ....	88
5.3. Λειτουργία του GMR.....	90
5.3.1. Σχεδιασμός των αισθητήρων GMR.....	93
5.4. Επεξεργασία σήματος.....	97
5.5. Αναλογικοί αισθητήρες AA και AB-series .....	98
5.6. Ανιχνευτές AA-series.....	101
5.6.1. Περιγραφή.....	101
5.6.2. Χαρακτηριστικά.....	101



5.6.3. Εφαρμογές .....	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	105
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	105
6.1. Κατασκευή πηνίου ανίχνευσης .....	105
6.2. Κατασκευή δειγμάτων ανίχνευσης ατελειών.....	109
6.3. Καταγραφή Μετρήσεων – Κατασκευή Διαγραμμάτων.....	110
6.4. Πειραματικά δεδομένα .....	111
6.4.1. Ανίχνευση ρωγμών σε πλάκες αλουμινίου .....	111
6.4.2. Ανίχνευση οπών στο εσωτερικό πλάκας αλουμινίου .....	120
Συμπεράσματα .....	127
Παράρτημα.....	129
Π.1. Controls και Indicators .....	129
Π.2. Συνηθισμένα εργαλεία στο Labview .....	129
Π.3. Παλέτες του Labview.....	132
Π.3.1. Controls Palette .....	132
Π.3.2. Tools Palette.....	133
Π.3.3. Functions Palette.....	135
Π.4. Shortcut Menus .....	136
Π.5. Menu pull-down.....	138
Π.6. Property dialog boxes.....	139
Π.7. Συναρτήσεις και Εργαλεία του Labview.....	140
Π.7.1. Numeric Function .....	141
Π.7.2. String Functions.....	143
Π.7.3. Numeric Controls and Indicators.....	144
Π.7.4. Boolean Controls/Indicators .....	145
Π.7.5. Boolean Functions .....	146
Π.7.6. Time Functions .....	147

Π.7.7. Array Functions .....	148
Π.7.8. Cluster, Class & Variant Vis and Functions .....	152
Π.7.9. Express Vis and Functions.....	154
Π.7.10. Signal Processing.....	161
Π.7.11. Graph and Chart Controls and Indicators .....	163
Π.7.12. Structures .....	164
Π.7.13. File I/O Vis and Functions.....	167
Π.7.14. Waveform Vis and Functions.....	169
Βιβλιογραφία .....	171





## *Περίληψη*

Αναπτύξαμε ένα σύστημα ανίχνευσης ρωγμών για μη μαγνητικά αντικείμενα χρησιμοποιώντας αισθητήρες γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR). Για την κατανόηση του προβλήματος των δινορευμάτων και του παραγόμενου από αυτά μαγνητικού πεδίου, σε μη αγώγιμα υλικά, παρουσία ασυνεχειών, κάναμε θεωρητικές προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα FEMM. Κατασκευάσαμε τις καμπύλες της κάθετης και παράλληλης συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια του υλικού καθώς και των δινορευμάτων που δημιουργούνται μέσα στο υλικό.

Το σύστημα ανίχνευσης που κατασκευάσαμε αποτελείται από ένα πηνίο που τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα, του οποίου η τάση και η συχνότητα ελεγχόταν από τροφοδοτικό εναλλασσόμενου ρεύματος. Στο κέντρο του συστήματος ανίχνευσης υπήρχε ο ανιχνευτής GMR. Το αναλογικό σήμα από τον αισθητήρα GMR ψηφιοποιούνταν με την βοήθεια της κάρτας συλλογής δεδομένων NI USB-6216 της National Instrument.

Στη συνέχεια με τη χρήση του προγράμματος Labview, κατασκευάσαμε ένα εικονικό περιβάλλον ελέγχου της πειραματικής διάταξης, καταγραφής των μετρήσεων και δημιουργίας γραφικών παραστάσεων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Το πρόγραμμα αυτό μέσω της κάρτας ψηφιοποίησης σήματος NI USB-6216 επικοινωνεί με τον ανιχνευτή και εμφανίζει στην οθόνη τα πειραματικά δεδομένα και τις γραφικές παραστάσεις, αποθηκεύοντάς τα παράλληλα.



### *Σκοπός της Διπλωματικής εργασίας*

Η μη καταστρεπτική ανίχνευση ατελειών σε εξαρτήματα και κατασκευές είναι πολύ σημαντική για την ασφάλειά τους. Είναι γνωστό ότι όταν εφαρμόσουμε ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο στην επιφάνεια αγωγίμου αντικειμένου, αναπτύσσονται επαγωγικά ρεύματα, τα δινορεύματα. Τα επαγωγικά ρεύματα αυτά ρέουν στο αντικείμενο με τέτοια φορά ώστε το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν να τείνει να εξαλείψει την εξωτερικά εφαρμοζόμενη μεταβολή. Αν στο υλικό υπάρχουν ασυνέχειες τότε οι γραμμές ροής του ηλεκτρικού ρεύματος αναγκάζονται να κινηθούν παράλληλα στην ασυνέχεια. Αυτή η παραμόρφωση της ροής του επαγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο στην επιφάνεια του δοκιμίου το οποίο είναι διαφορετικό από αυτό που θα είχαμε αν δεν υπήρχε η ατέλεια. Η ανίχνευση του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια του δοκιμίου μπορεί να γίνει με χρήση πηνίου ή αισθητήρων μαγνητικής επαγωγής. Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη μίας διάταξης και μιας μεθοδολογίας για την ανίχνευση ασυνεχειών σε αγωγίμα μη μαγνητικά υλικά με τη μέθοδο των δινορευμάτων. Τα δοκίμια που μελετήσαμε ήταν από αλουμίνιο που περιείχαν τεχνητές ατέλειες. Για την ανίχνευση του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιήσαμε τους αισθητήρες γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης GMR.





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Μη καταστροφικές μέθοδοι

### 1.1. Μη καταστροφικοί έλεγχοι υλικών (ΜΚΕ) - Non-destructive testing (NDT)

Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι ανήκουν στις πιο σημαντικές ομάδες μεθόδων ελέγχου ασφαλείας των κατασκευών και αποτελούν τεχνικές ανάλυσης και τεχνολογίες που επιτρέπουν την επιθεώρηση ενός υλικού, στοιχείου, ή συστήματος χωρίς την πρόκληση ζημιάς. Οι ΜΚΕ δημιουργήθηκαν για να ελέγχονται οι κατασκευές (ή έστω ορισμένα τμήματα ή στοιχεία τους) ακόμα και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, ώστε να εντοπίζεται έγκαιρα η ύπαρξη ή η δημιουργία απρόβλεπτων ανωμαλιών ή περιοχών συγκεντρώσεως των τάσεων που μπορούν να προκαλέσουν την αστοχία τους. Βασικός στόχος τους λοιπόν, είναι η εύρεση και ανάδειξη σφαλμάτων και ανομοιογενειών που είτε βρίσκονται εσωτερικά στα υλικά είτε είναι αδύνατον να εντοπιστούν με γυμνό μάτι.

Συνεπώς, οι ΜΚΕ μπορούν να παράσχουν σημαντικές πληροφορίες τόσο σχετικά με την ύπαρξη «επικίνδυνων σημείων» στα καταπονούμενα τμήματα των κατασκευών (σημεία συγκέντρωσης των τάσεων, όπως μικρορωγμές στο εσωτερικό ενός υλικού), όσο και σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών, οι οποίες είναι δυνατόν να μεταβάλλονται σαν αποτέλεσμα των συνθηκών και του χρόνου λειτουργίας των κατασκευών. Οι πληροφορίες αυτές συνάγονται χωρίς να απαιτείται καμία πρόσθετη καταπόνηση των υλικών. Έτσι γίνεται προφανές ότι οι ΜΚΕ αποκτούν ιδιαίτερη σημασία στις περιπτώσεις κατασκευών, ή μηχανών «υψηλού κινδύνου» για τον άνθρωπο, όπως πυρηνικοί αντιδραστήρες, ράγες τρένων, αεροπλάνα κλπ.

Οι πιο γνωστές μέθοδοι ΜΚΕ αποτελούν:

- Οπτικός έλεγχος
- Έλεγχος με υπερήχους
- Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά
- Έλεγχος της βιομηχανικής ακτινογραφίας
- Μαγνητικοί έλεγχοι
- Έλεγχος με τη χρήση δινορευμάτων
- Έλεγχος με τη μέθοδο της θερμογραφίας

- Έλεγχος με τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής

### Συνοπτική παρουσίαση εφαρμοσμένων μεθόδων ΜΚΕ

#### **1.1.1. Μέθοδοι βασισμένες στην οπτική εκτίμηση**

Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν μέθοδοι που βασίζονται κυρίως στην εκτίμηση μετά από εξωτερική εξέταση του δοκιμίου και στην απόφαση της καταλληλότητας ή μη αυτού. Η βασικότερη προϋπόθεση είναι η καλή λειτουργία της όρασης του ελεγκτή.

Οι τρεις πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι:

- Οπτικός έλεγχος

Η μέθοδος αυτή είναι σχετικά απλή και είναι η πρώτη που εντάσσεται στην παραγωγική διαδικασία, διότι τόσο η διαδικασία όσο και ο εξοπλισμός για την εφαρμογή της δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες απαιτήσεις. Τα πλεονεκτήματα του οπτικού ελέγχου σε σύγκριση με άλλες μεθόδους είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σχεδόν σε όλες τις επιφάνειες και μάλιστα στις περισσότερες περιπτώσεις χωρίς τη χρήση ακριβού εξοπλισμού, ενώ τα μειονεκτήματά του είναι ότι δεν μπορούμε να βρούμε ελαττώματα κάτω από την επιφάνεια όπως επίσης και πολύ λεπτές επιφανειακές ρωγμές.

- Με διεισδυτικά υγρά

Η μέθοδος αυτή είναι απλή και στηρίζεται στη χρήση ειδικών υγρών που αναδεικνύουν εύκολα τις επιφανειακές ρωγμές. Αφού καθαριστεί η επιφάνεια του υλικού καλά και απομακρυνθούν οι ακαθαρσίες από τις ρωγμές, εφαρμόζεται το διεισδυτικό υγρό για χρονικό διάστημα ικανό, ώστε να εισχωρήσει στις ρωγμές. Στη συνέχεια, αφαιρείται το πλεονάζον υγρό από την επιφάνεια και εφαρμόζεται ο εμφανιστής, ο οποίος τραβάει προς τα έξω το υγρό και εμφανίζει τις ρωγμές.

Τα διεισδυτικά υγρά που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι ευδιάκριτα, ή με έντονη διαφορά μεταξύ τους, ώστε να διευκολύνεται ο ελεγκτής στην αναγνώριση των ρωγμών. Έτσι, είτε τα υγρά είναι φθορίζοντα και οι ατέλειες αναδεικνύονται με UV λάμπα, είτε είναι κόκκινα και ο εμφανιστής λευκός.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου σε σύγκριση με άλλες είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα στερεά αντικείμενα, ανεξαρτήτως σχήματος και υλικού ενώ παράλληλα και τα αναλώσιμα που χρησιμοποιούνται για την ανάδειξη των σφαλμάτων είναι χαμηλού κόστους. Αντιθέτως τα μειονεκτήματά της είναι ότι η μέθοδος βασίζεται πολύ στη σωστή εφαρμογή από τον ελεγκτή, οι ρωγμές θα πρέπει να είναι καθαρές και

οι ποσότητες των υγρών θα πρέπει να είναι σε τέτοιο βαθμό ώστε το αποτέλεσμα να είναι ξεκάθαρο.

- Με μαγνητικά σωματίδια

Η μέθοδος χρησιμοποιείται σε μαγνητιζόμενα υλικά για να αναδείξει επιφανειακές ρωγμές που δε φαίνονται με γυμνό μάτι. Η λειτουργία της στηρίζεται στη μαγνήτιση του υλικού, με μαγνητικό πεδίο κάθετο στη ρωγμή, και ταυτόχρονη εφαρμογή κάποιου μέσου που περιέχει μαγνητικά σωματίδια. Συνεπώς, στην περιοχή της ρωγμής εμφανίζεται ένα έντονο μαγνητικό πεδίο που έλκει τα μαγνητικά σωματίδια και τα συγκεντρώνει κατά μήκος αυτής. Τα σωματίδια αυτά είναι που θα ανιχνεύσουμε, είτε θα περιέχονται σε υγρά με έντονη χρωματική αντίθεση ώστε να είναι ορατά στο φως της μέρας (γνωστή ως μέθοδος άσπρο-μαύρο), είτε θα είναι φθορίζοντα οπότε αναδεικνύονται με χρήση λάμπας UV.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου σε σύγκριση με άλλες είναι ότι δεν χρειάζεται κάποια ιδιαίτερη προετοιμασία –όπως καθαρισμού του αντικείμενου, οι ρωγμές αναδεικνύονται ευκρινώς και τα αποτελέσματα του ελέγχου είναι ξεκάθαρα και αναπαραγόμενα. Το κύριο μειονέκτημά της είναι ότι η εφαρμογή της είναι δυνατή μόνο στα μαγνητιζόμενα υλικά.

### **1.1.2. Μέθοδοι βασισμένες στον Ηλεκτρομαγνητισμό (εκτός της μεθόδου των μαγνητικών σωματιδίων)**

Σε αυτήν την κατηγορία είναι μέθοδοι που βασίζονται στην παρατήρηση και μέτρηση διαφόρων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων, που εμφανίζονται στα δοκίμια με τη χρήση διαφόρων συσκευών και αισθητήρων.

Οι τρεις πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι:

- Μέτρηση πάχους επικαλύψεων

Η μέθοδος αυτή χρησιμεύει στον προσδιορισμό του πάχους επικάλυψης πάνω σε μαγνητιζόμενα και μη μέταλλα, που αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την αντοχή του υλικού, μέσω σημαντικών φυσικών φαινομένων.

Υπάρχουν τρεις μέθοδοι μέτρησης του πάχους, ανάλογα τη φύση του υποστρώματος. Είναι:

- Διαδικασία Αποκόλλησης.

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε υλικά που το υπόστρωμα είναι σιδηρούχο. Η λειτουργία της στηρίζεται στη μέτρηση του μέτρου της δύναμης που χρειάζεται ώστε

να αποκολληθεί ένας μόνιμος μαγνήτης από την επικαλυμμένη επιφάνεια, που εξετάζεται, καθώς η δύναμη αυτή είναι αντιστρόφως ανάλογη του πάχους της επίστρωσης.

- Μέθοδος Μαγνητικής Επαγωγής.

Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του πάχους επικάλυψης σε υλικά τα οποία έχουν σιδηρούχο υπόστρωμα (που περιέχει σίδηρο). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη μέτρηση του επαγωγικού μαγνητικού πεδίου που εμφανίζεται στο υλικό, όταν εφαρμόσουμε τον αισθητήρα της συσκευής πάνω στο σημείο που θέλουμε να μελετήσουμε. Η μέθοδος αυτή είναι πιο ακριβής σε σχέση με τη διαδικασία αποκόλλησης και δίνει τη δυνατότητα κατασκευής αισθητήρων σε διάφορα σχήματα και με διαφορετικές γεωμετρίες, ώστε να επιτρέπεται η μελέτη δύσκολα προσβάσιμων επιφανειών, όπως εσωτερικά οπών και σωλήνες.

- Μέθοδος Δινορευμάτων.

Χρησιμοποιείται σε υλικά με μη σιδηρούχα υποστρώματα και είναι ιδιαίτερα ακριβής, όπως και η μέθοδος της Μαγνητικής Επαγωγής.

- Εύρεση επιφανειακών ατελειών με δινορεύματα

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό επιφανειακών και υποεπιφανειακών ατελειών, κυρίως ρωγμών. Η αρχή λειτουργίας της στηρίζεται στην εφαρμογή εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, που δημιουργεί εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό εφαρμόζεται κάθετα στην υπό εξέταση επιφάνεια και δημιουργεί δινορεύματα παράλληλα σε αυτήν. Τα δινορεύματα με τη σειρά τους δημιουργούν δικό τους μαγνητικό πεδίο, με φορά αντίθετη στο εφαρμοζόμενο με αποτέλεσμα να ανιχνεύεται μαγνητικό πεδίο μικρότερο του αρχικού. Όταν τα δινορεύματα συναντήσουν ρωγμή, την παρακάμπτουν και το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο (των δινορευμάτων) σε εκείνο το σημείο να αδυνατίζει. Το αποτέλεσμα αυτό ανιχνεύεται.

- Μέτρηση βάθους ρωγμής

Η μέθοδος αυτή μας δίνει τη δυνατότητα να μετρήσουμε το βάθος μιας ρωγμής σε ηλεκτροαγώγιμα υλικά, που έχει εντοπιστεί με κάποια από τις παραπάνω μεθόδους. Η διαδικασία αυτή γίνεται με την εφαρμογή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος (προτιμάται το εναλλασσόμενο, γιατί δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα) στο σημείο του υλικού που περιέχει τη ρωγμή καθώς και σε κάποιο άλλο σημείο χωρίς ελάττωμα. Στη συνέχεια με κατάλληλους αισθητήρες μετράται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο αυτών σημείων.

Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί απέναντι σε άλλες που χρησιμοποιούνται για να δώσουν το βάθος της ρωγμής (υπέρηχοι και δινορεύματα), επειδή έχει μεγαλύτερο εύρος (στα σιδηρούχα μέχρι και 100mm, στο αλουμίνιο και στο χαλκό μέχρι 12mm), πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια και μπορεί να δείξει αν η ρωγμή βρίσκεται κάθετα ή υπό γωνία με την επιφάνεια.

### 1.1.3. Μέθοδοι βασισμένες στην ακτινοβολία

Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στη λήψη ακτινογραφιών, όπως στην Ιατρική και το αποτέλεσμα αποτυπώνεται είτε σε φιλμ και ονομάζεται Ραδιογραφία, είτε σε άλλο μέσο αποτύπωσης, όπως σε οθόνη και ονομάζεται Ραδιοσκοπία. Υπάρχουν δύο ειδών μέθοδοι ακτινοβολίας, που διαφέρουν ως προς την πηγή που γεννά την ακτινοβολία:

- Έλεγχος με ακτινοβολία X (X-ray)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ατελειών και ελαττωμάτων, τόσο στην επιφάνεια όσο και στο εσωτερικό των αντικειμένων. Όσο μεγαλύτερη η ένταση της ακτινοβολίας που εφαρμόζουμε, τόσο βαθύτερα μπορεί αυτή να διεισδύσει στο υλικό. Έτσι για μεγάλου πάχους υλικά, χρησιμοποιούνται ισχυρότερες πηγές ακτινών X. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται ειδικές λυχνίες X-ray, κενές αέρος με θερμαινόμενη κάθοδο, απ' την οποία ξεκινάνε ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και προσκρούουν στην άνοδο, που είναι φτιαγμένη από βολφράμιο. Από αυτή την πρόσκρουση εκπέμπεται ακτινοβολία X, η οποία με κατάλληλα διαφράγματα κατευθύνεται στο προς εξέταση σημείο.

- Έλεγχος με ακτινοβολία  $\gamma$  (Gamma-ray)

Για την παραγωγή ακτινοβολίας  $\gamma$  χρησιμοποιούνται ραδιοϊσότοπα, με διαφορετική ένταση και χρόνο ημιζωής. Τα πιο συνηθισμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι: το Σελήνιο ( $Se_{75}$ ) με χρόνο ημιζωής 120 ημέρες, το Ιρίδιο ( $Ir_{192}$ ) με χρόνο ημιζωής 75 ημέρες και το Κοβάλτιο ( $Co_{60}$ ) με χρόνο ημιζωής 5,2 χρόνια. Το Σελήνιο έχει την ασθενέστερη ακτινοβολία, ενώ το Κοβάλτιο την ισχυρότερη που χρησιμοποιείται για μεγαλύτερου πάχους υλικά.

Οι μέθοδοι της ακτινοβολίας πλεονεκτούν καθώς μπορούν να αποδώσουν ξεκάθαρη εικόνα της κατάστασης του εξεταζόμενου αντικειμένου είτε αυτή είναι σε φιλμ, είτε σε κάποιο άλλο ψηφιακό μέσο. Η αποτύπωση αυτή γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να φαίνεται η ποιότητα της λήψης και οι συνθήκες στις οποίες έγινε. Το μεγάλο τους μειονέκτημα είναι ότι τόσο η ακτινοβολία X όσο και η ακτινοβολία  $\gamma$ , αποτελούν κίνδυνο για την υγεία του ελεγκτή και των εργαζομένων. Επίσης μπορούν να ανιχνεύσουν ρωγμές μέχρι κάποιο συγκεκριμένο όριο βάθους, ενώ δυσκολεύονται να δώσουν αποτελέσματα για ρωγμές παράλληλες στην ακτινοβολία.

### 1.1.4. Μέθοδοι βασισμένες στην Ακουστική

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί τους υπερήχους και εφαρμόζεται σε ηχοαγωγικά υλικά, παρέχοντας τη δυνατότητα μέτρησης, διάγνωσης και εύρεσης διαφόρων ατελειών που υπάρχουν στο μέσο. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται σε

ειδικούς αισθητήρες που εκπέμπουν και λαμβάνουν υπερήχους. Αυτοί οι αισθητήρες, εισάγουν παλμούς υπερήχων στο μέσο, οι παλμοί ταξιδεύουν μέχρις ότου συναντήσουν κάποιο εμπόδιο μη ηχοαγώγιο (οποιοδήποτε είδους ανωμαλία στο υλικό), ανακλώνται και επιστρέφουν, όπου καταγράφονται στον αισθητήρα, μετατρέπόμενοι σε ηλεκτρική ενέργεια. Γνωρίζοντας την ταχύτητα των υπερήχων στο μέσο και μετρώντας το χρόνο που χρειάστηκε ο παλμός για να επιστρέψει, μπορεί να υπολογιστεί το σημείο στο οποίο ανακλάστηκε, άρα η θέση του εμποδίου.

Χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών αισθητήρες, ανάλογα με την γωνία που στέλνουν τον παλμό και υπάρχουν οι αισθητήρες ευθείας δέσμης και οι γωνιακοί.

Οι μέθοδοι της ακουστικής, σε σχέση με άλλες μεθόδους, έχουν τα πλεονεκτήματα ότι δεν είναι επικίνδυνες για τους εργαζομένους και εφαρμόζονται σε υλικά με μεγάλο πάχος εντοπίζοντας ατέλειες όλων των ειδών. Από την άλλη παρουσιάζουν μεγάλη δυσκολία στην αποτύπωση και αποθήκευση αποτελεσμάτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Μέθοδοι δινορευμάτων

Ο έλεγχος με τη χρήση δινορευμάτων αποτελεί μια ευρείας χρήσης τεχνική για τον έλεγχο επιφανειακών και υποεπιφανειακών ασυνεχειών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα υλικά και κράματα, όπως το αλουμίνιο, ο χάλυβας και ο ανοξείδωτος χάλυβας.

#### 2.1. Βασικές αρχές

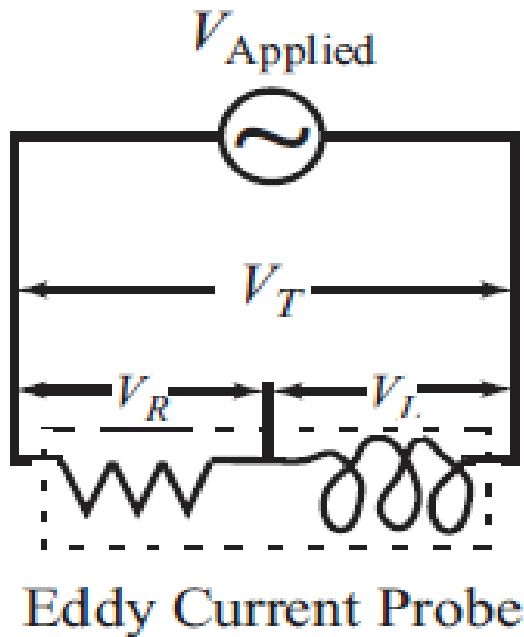
##### 2.1.1. Επαγωγικό φαινόμενο

Όταν εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ρεύμα σε έναν αγωγό, όπως το καλώδιο ενός πηνίου, τότε εμφανίζεται μέσα και γύρω από αυτόν ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, που αυξάνεται καθώς το εναλλασσόμενο ρεύμα αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη τιμή του και μειώνεται καθώς το εναλλασσόμενο ρεύμα πλησιάζει το μηδέν. Το μαγνητικό πεδίο είναι σε φάση με το εναλλασσόμενο ρεύμα. Μετά το μηδενισμό του, αλλάζει φορά και επαναλαμβάνει τη διαδικασία.

Αν πλησιάσουμε έναν αγωγό στο μαγνητικό πεδίο, τότε σε αυτόν θα εμφανιστεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος λόγω επαγωγής. Το ρεύμα αυτό θα δημιουργεί το δικό του μαγνητικό πεδίο, εξ επαγωγής, που θα έχει αντίθετη φορά με το αρχικό τείνοντας να το αναιρέσει.

##### 2.1.2. Επαγωγική τάση στο πηνίο

Θεωρούμε κλειστό κύκλωμα με πηνίο ωμικής αντίστασης  $R$  και αυτεπαγωγής  $L$ , που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας  $f$ , όπως φαίνεται στο σχήμα. Το πηνίο αυτό θα δημιουργήσει τα δινορεύματα.



*Εικόνα 1: Διάταξη κλειστού κυκλώματος με πηνίου που συνδέεται με πηγή εναλλασσόμενης τάσης. Πηγή: Nondestructive Evaluation Technics, Peter J. Shull*

Όταν τοποθετήσουμε ένα αγώγιμο καλώδιο μέσα σε μαγνητικό πεδίο, τότε στα άκρα του εμφανίζεται διαφορά δυναμικού και αν αυτό αποτελεί κλειστό κύκλωμα, τότε διαρρέεται από ρεύμα. Η ποσότητα του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής που εσωκλείεται στο βρόχο. Στην περίπτωση του πηνίου η μαγνητική ροή  $\Phi$ , δίνεται από τον τύπο.

$$\Phi = LI$$

όπου  $L$ , η αυτεπαγωγή του πηνίου, που περιέχει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του καλωδίου (σχήμα και μέγεθος βρόχου), τον αριθμό των σπειρών του πηνίου  $N$  και τη μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  και  $I$  το ρεύμα που το διαρρέει.

Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, η επαγωγική τάση που θα εμφανιστεί  $V_{emf}$  δίνεται από τον τύπο:

$$V_{emf} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Το αρνητικό πρόσημο στον παραπάνω τύπο, δείχνει ότι η επαγωγική τάση αντιστέκεται στη μεταβολή της μαγνητικής ροής.

Οπότε η επαγωγική τάση ισούται με:



$$V_{emf} = -L \frac{dI}{dt}$$

Αν το πηνίο το βάλουμε σε κλειστό κύκλωμα σε σειρά με πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, τότε η τάση που θα εφαρμόσουμε θα ισούται με:

$$V_{applied} = -V_{emf} \Rightarrow$$

$$V_{applied} = L \frac{dI}{dt}$$

### 2.1.3. Ηλεκτρική εμπέδηση

Καθώς το πηνίο διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, η ολική αντίστασή του στη ροή αυτή είναι η ηλεκτρική εμπέδηση (ή σύνθετη αντίσταση)  $Z$ . Στην εμπέδηση συμπεριλαμβάνονται δύο παράγοντες που αντιτάσσονται στο ρεύμα είναι: η ωμική αντίσταση  $R$  (που αντιτάσσεται στη ροή του ρεύματος και μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε θερμότητα, ή άλλης μορφής ενέργεια), η επαγωγική αντίσταση  $X_L$  (που αντιτάσσεται στη ροή του εναλλασσόμενου ρεύματος και είναι αποτέλεσμα της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του πηνίου) και η χωρική αντίσταση  $X_C$ . Η επαγωγική αντίσταση και η χωρική βρίσκονται σε διαφορά φάσης  $90^\circ$  με την ωμική αντίσταση, συνεπώς η ολική εμπέδηση, δε θα αποτελεί το αλγεβρικό άθροισμά τους. Επειδή τα περισσότερα πηνία, έχουν αμελητέα χωρική αντίσταση, μπορούμε να την παραλείψουμε, άρα μόνο η ωμική και η επαγωγική αντίσταση θα ληφθούν υπ' όψιν.

Ορίζουμε την εμπέδηση ως το λόγο:

$$Z = \frac{V}{I}$$

Και θεωρώντας εναλλασσόμενο ρεύμα ημιτονοειδούς σήματος να διαρρέει το κύκλωμα, της μορφής:

$$I = I_0 \sin \omega t$$

Αντικαθιστούμε στον τύπο της επαγωγικής τάσης:

$$V_{emf} = -L \frac{d(I_0 \sin \omega t)}{dt} \Rightarrow$$

$$V_{emf} = -LI_0 \omega \cos \omega t \Rightarrow$$

$$V_{emf} = -LI_0 \omega \sin(\omega t + 90^\circ)$$

Και η τάση στα άκρα του κυκλώματος:

$$V_L = LI_0\omega \cos \omega t$$

Έτσι ο τύπος της εμπέδησης δίνεται:

$$Z = \frac{V_L}{I} = \omega L \frac{I_0 \cos \omega t}{I_0 \sin \omega t} \Rightarrow$$

$$Z = \omega L \cot \omega t$$

Η έκφραση αυτή που δείχνει τη χρονική εξάρτηση της εμπέδησης, δε χρησιμοποιείται συχνά. Αντί αυτής, αντικαθιστώντας τις ενεργές τιμές της διαφοράς δυναμικού και του ρεύματος, παίρνουμε:

$$Z = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} = \frac{\omega LI_{rms}}{I_{rms}} \Rightarrow$$

$$Z = \omega L$$

Άλλος τρόπος να υπολογίσουμε την εμπέδηση είναι με την αναπαράσταση σε φάσορες. Γράφουμε τη διαφορά δυναμικού και το εναλλασσόμενο ρεύμα, ως εξής:

$$V_0 e^{j\omega t} = V_0 \cos \omega t + jV_0 \sin \omega t$$

$$I_0 e^{j\omega t} = I_0 \cos \omega t + jI_0 \sin \omega t$$

Όπου το δυναμικό στα άκρα του κυκλώματος και το εναλλασσόμενο ρεύμα που το διαρρέει αντιπροσωπεύονται από τα πραγματικά μέρη των εξισώσεων.

Για το επαγωγικό δυναμικό, έχουμε:

$$V_{emf} = -L \frac{dI}{dt} = -L \frac{d(I_0 e^{j\omega t})}{dt}$$

$$= -Lj\omega I_0 e^{j\omega t} = -j\omega LI_0 \cos \omega t + \omega LI_0 \sin \omega t$$

Παίρνοντας το πραγματικό μέρος της παραπάνω εξίσωσης, βρίσκουμε:

$$V_{emf} = \omega LI_0 \sin \omega t \Rightarrow$$

$$V_{emf} = -\omega LI_0 \cos(\omega t + 90^\circ)$$

$$V_L = \omega LI_0 \cos(\omega t + 90^\circ)$$

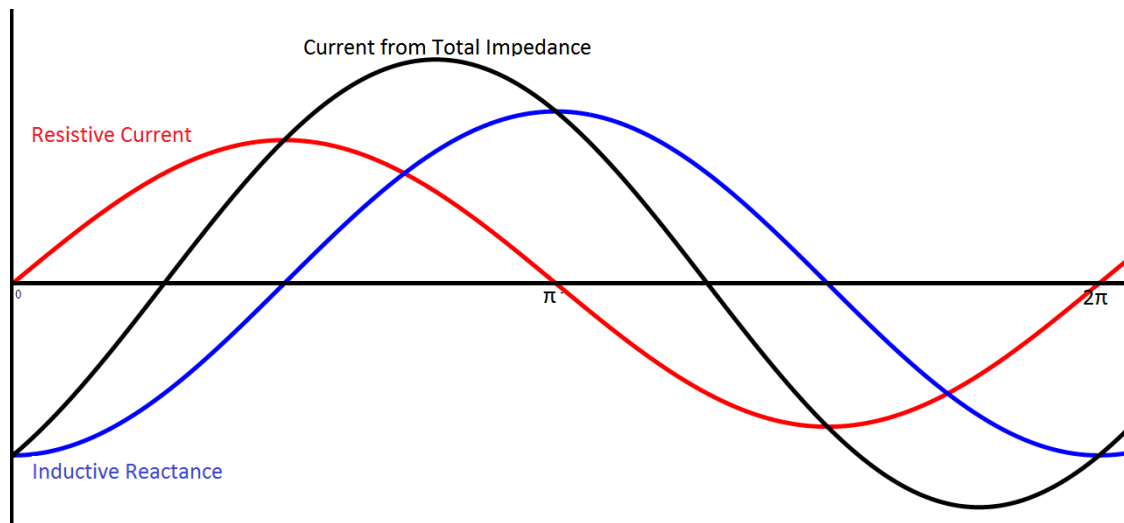
Παρατηρούμε ότι το επαγωγικό δυναμικό εμφανίζει διαφορά φάσης  $90^\circ$  με το ρεύμα. Ενώ το δυναμικό στα άκρα του αντιστάτη είναι σε φάση με το ρεύμα:

$$V_R = RI_0 \cos \omega t$$

Το ολικό δυναμικό, που αντιστοιχεί στο  $V_{applied}$ ,  $V_T$  ισούται με το άθροισμα των δυναμικών λόγω αντίστασης και λόγω επαγωγής.

$$V_T = V_R + V_L$$

Στο επόμενο γράφημα, σχεδιάζονται με κόκκινη γραμμή η διαφορά τάσης στα άκρα της ωμικής αντίστασης, με μπλε γραμμή και σε διαφορά φάσης  $90^\circ$ , η διαφορά τάσης λόγω επαγωγικής αντίστασης και με μαύρη γραμμή η ολική διαφορά τάσης, που σχετίζεται με την ολική εμπέδηση, με διαφορά φάσης μεταξύ  $0^\circ$ - $90^\circ$ .



Διάγραμμα 1: Διαφορά τάσης στα άκρα της ωμικής αντίστασης (με κόκκινο), η διαφορά τάσης λόγω επαγωγικής αντίστασης (με μπλε) και την ολική διαφορά τάσης (με μαύρο) (Graphmatica)

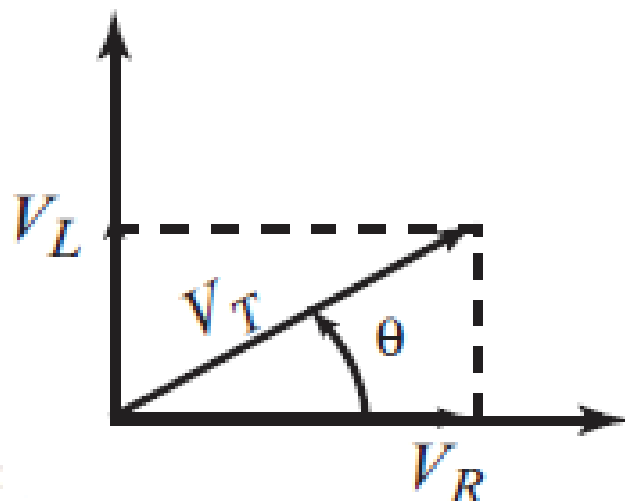
Όσο μεγαλύτερη είναι η ωμική από την επαγωγική αντίσταση, τόσο η καμπύλη του ολικού δυναμικού θα μετατοπίζεται προς τα αριστερά, στην κόκκινη γραμμή, με τη διαφορά φάσης να μειώνεται, ενώ αν η επαγωγική αντίσταση υπερτερεί της ωμικής, η καμπύλη της ολικής τάσης θα μετατοπιστεί προς τα δεξιά, με τη φάση να αυξάνεται.

Αντικαθιστώντας στον τύπο της ολικής διαφοράς δυναμικού τις επιμέρους τάσεις, παίρνουμε:

$$V_T = RI + L \frac{dI}{dt} \Rightarrow$$

$$V_T = RI + j\omega LI$$

Στο παρακάτω διάγραμμα, παριστάνονται τα περιστρεφόμενα διανύσματα φάσης των τριών δυναμικών.



*Διάγραμμα 2: Τα περιστρεφόμενα διανύσματα φάσης της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του πηνίου και στα άκρα της αντίστασης και το περιστρεφόμενο διάνυσμα φάσης της ολικής διαφοράς δυναμικού, που προκύπτει από το άθροισμά τους. Πηγή: Nondestructive Evaluation Technics, Peter J. Shull*

Έτσι αντικαθιστώντας το ολικό δυναμικό στον τύπο της εμπέδησης, βρίσκουμε:

$$Z = \frac{V_T}{I} \Rightarrow$$

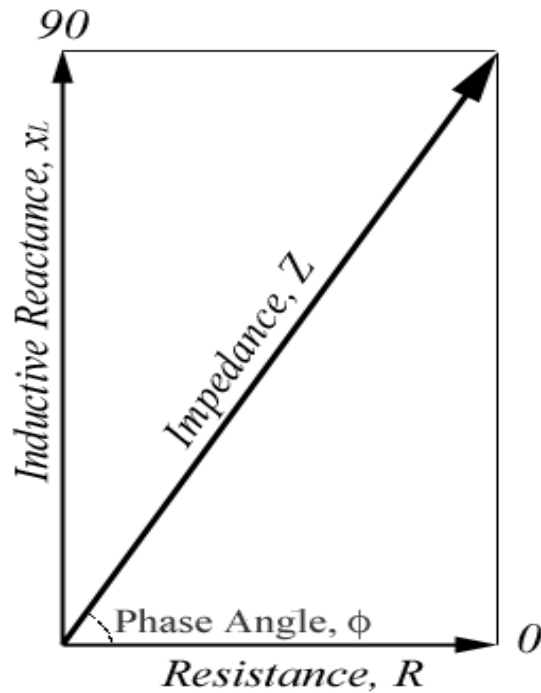
$$Z = R + j\omega L$$

Βάζοντας και την επαγωγική αντίσταση  $X_L$ :  $X_L = \omega L$

Η ολική εμπέδηση γίνεται:

$$Z = R + j X_L$$

Που αναπαριστάται στο μιγαδικό επίπεδο:



Διάγραμμα 3: Τα μιγαδικά διανύσματα της ωμικής αντίστασης  $R$ , της επαγωγικής αντίστασης  $X_L$  και της ολικής εμπέδησης  $Z$ , που προκύπτει από το άθροισμά τους.  
 Πηγή: NDT Course Material-Eddy Current Testing.

Και το μέτρο της εμπέδησης είναι:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

Όπου  $\omega$  η γωνιακή συχνότητα, που ισούται με:  $\omega = 2\pi f$  και  $f$  η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η γωνία  $\phi$ , στο μιγαδικό επίπεδο, αντιστοιχεί στη διαφορά φάσης των αντίστοιχων δυναμικών με το ρεύμα. Είναι προφανές ότι για τον αντιστάτη έχουμε  $\theta=0$ , ενώ για το πηνίο  $\theta=90^\circ$ . Για την ολική τάση, στα άκρα της εμπέδησης, έχουμε:  $0 \leq \theta \leq 90$ , που δίνεται από τον τύπο:

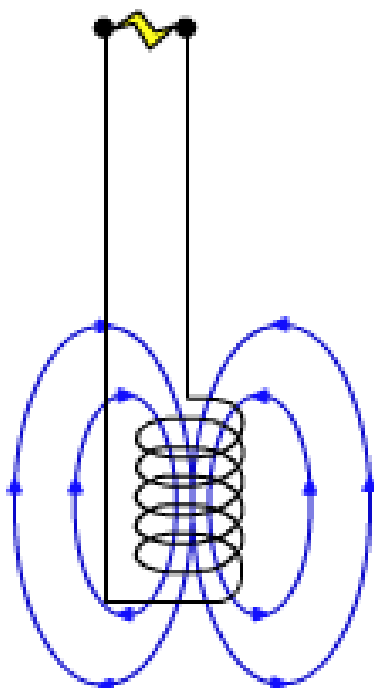
$$\tan \theta = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega L}{R} \Rightarrow$$

$$\theta = \arctan \frac{\omega L}{R}$$

## 2.2. Δινορεύματα

Τα δινορεύματα σχηματίζονται μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Είναι επαγωγικά ρεύματα, που ρέουν σε κυκλική διαδρομή και σχηματίζουν «δίνες».

Για τη διαδικασία του ΜΚΕ, χρησιμοποιούμε ένα πηνίο τυλιγμένο από αγωγό και τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα, κατάλληλης συχνότητας ανάλογα με τον έλεγχο που επιθυμούμε να κάνουμε. Έτσι εμφανίζεται χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, τόσο στο εσωτερικό του πηνίου όσο και έξω από αυτό, σε φάση με το εναλλασσόμενο ρεύμα, όπως περιγράψαμε παραπάνω. Το μαγνητικό πεδίο του πηνίου, θα αποτελέσει το «πρωτεύον» μαγνητικό πεδίο.

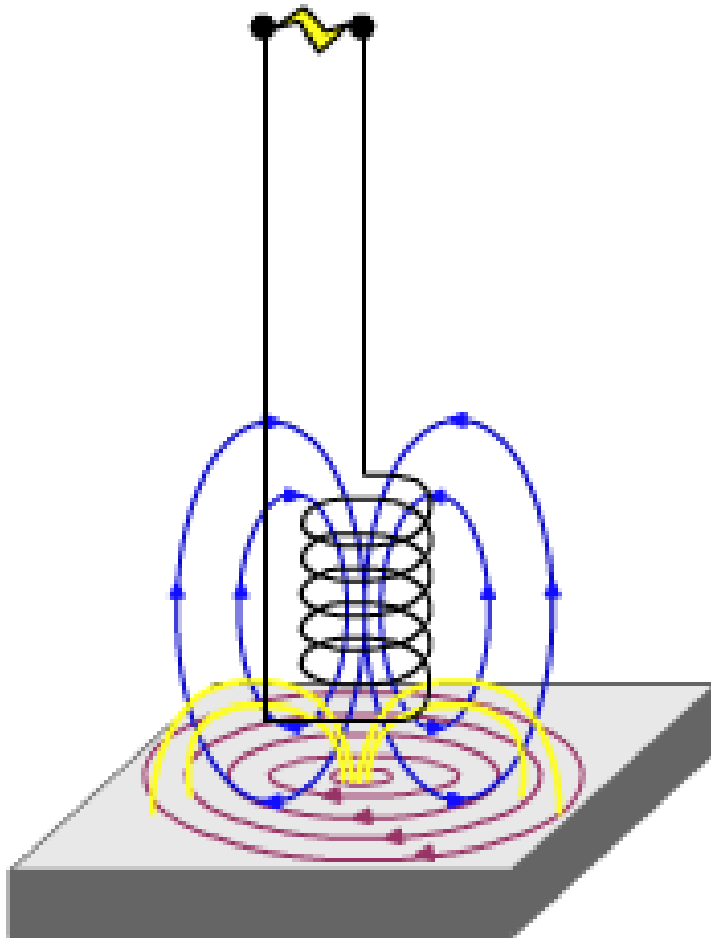


*Εικόνα 2: Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στο εσωτερικό και γύρω από πηνίο που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, είναι το πρωτεύον μαγνητικό πεδίο.  
Πηγή: NDT Course Material- EC Testing*

Αν πλησιάσουμε κάποιο ηλεκτρικά αγωγίμο υλικό κοντά στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου, τότε λόγω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, σε αυτό θα επαχθούν δινορεύματα, παράλληλα στην επιφάνεια του αγωγού.

Τα δινορεύματα με τη σειρά τους, θα δημιουργήσουν το δικό τους μαγνητικό πεδίο, που θα είναι αντίθετο στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου και θα αποτελεί το «δευτερεύον» μαγνητικό πεδίο, που θα τείνει να αναιρέσει το πρωτεύον. Αυτή η διαδικασία παραγωγής δινορευμάτων μπορεί να συμβεί, από μερικές εκατοντάδες έως

αρκετά εκατομμύρια φορές το δευτερόλεπτο, ανάλογα με τη συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος.



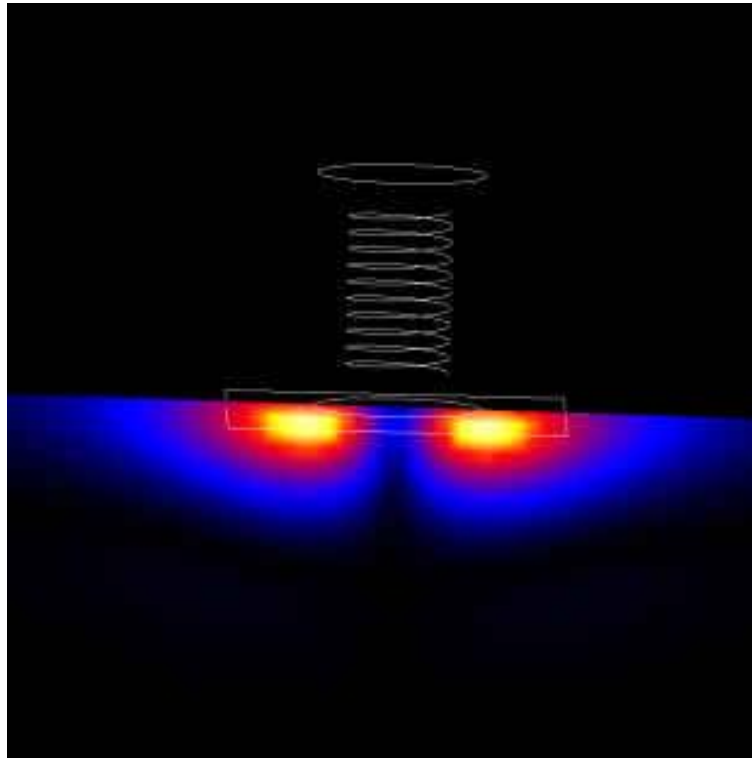
*Εικόνα 3: Στην επιφάνεια ηλεκτρικά αγωγίμου υλικού, επάγονται δινορεύματα, πλησιάζοντας το πηνίο εναλλασσόμενου ρεύματος. Τα δινορεύματα με τη σειρά τους δημιουργούν μαγνητικό πεδίο, αντίθετο στο πρωτεύον, που αποτελεί το δευτερεύον μαγνητικό πεδίο.  
Πηγή: NDT Course Material- EC Testing*

Όταν στο ηλεκτρικά αγωγίμο υλικό, υπάρχει κάποια ανωμαλία, τότε η ροή των δινορευμάτων διακόπτεται και αναγκάζονται να αλλάξουν πορεία. Έτσι το δευτερεύον μαγνητικό πεδίο που θα δημιουργήσουν δε θα έχει την ίδια μορφή με το προηγούμενο.

Με τον κατάλληλο ανιχνευτή (στο πείραμά μας GMR), μπορούμε να ανιχνεύσουμε αυτήν τη μεταβολή και άρα την ύπαρξη ανωμαλίας στο υλικό.

### 2.3. Βάθος διείσδυσης δινορευμάτων - Πυκνότητα

Τα δινορεύματα συγκεντρώνονται κοντά στην επιφάνεια του υλικού, δίπλα στο πηνίο διέγερσης και εκτείνονται τόσο βαθιά, όσο εισχωρεί το μαγνητικό πεδίο στο υλικό. Η πυκνότητα των δινορευμάτων μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από το πηνίο, πιο συγκεκριμένα πέφτει εκθετικά με το βάθος, το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως επιδερμικό φαινόμενο.



Εικόνα 4: Βάθος διείσδυσης δινορευμάτων μέσα στο υλικό.  
Πηγή: NDT Course Material- EC Testing

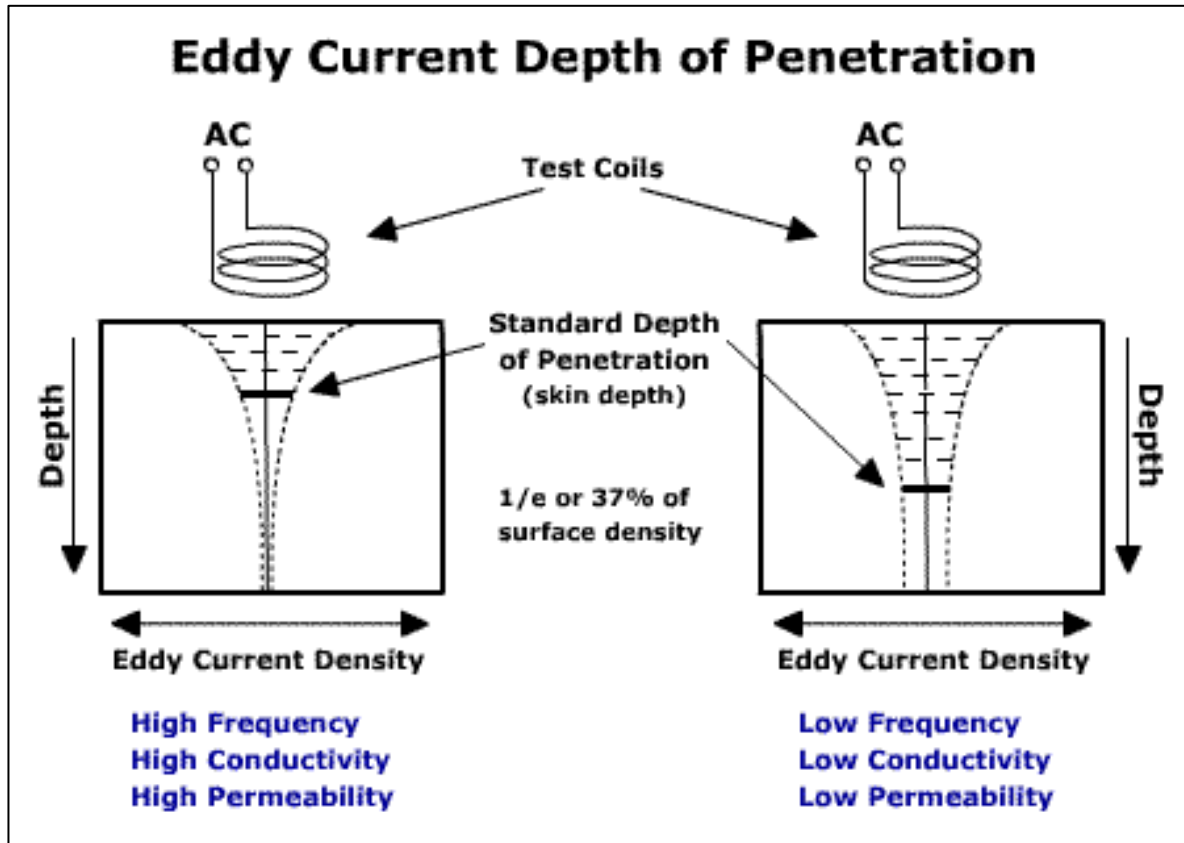
Το επιδερμικό φαινόμενο εμφανίζεται όταν σε ένα υλικό ρέουν δινορεύματα δημιουργώντας μαγνητικό πεδίο που αντιτίθεται στο πρωτεύον του πηνίου, σε οποιοδήποτε βάθος μέσα στο υλικό. Επιφέρει μείωση στη μαγνητική ροή και στη ροή των δινορευμάτων με το βάθος.

Το βάθος διείσδυσης των δινορευμάτων, επιδερμικό βάθος,  $\delta$ , είναι η απόσταση κάτω από την επιφάνεια ενός επίπεδου δοκιμίου στην οποία η πυκνότητα των δινορευμάτων μειώνεται στο  $1/e$  της τιμής που είχε στην επιφάνεια. Το βάθος αυτό εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος στο πηνίο, την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού και τη μαγνητική του διαπερατότητα. Η αντίστοιχη σχέση είναι:



$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu \sigma f}} \quad (\text{Πηγή: Ηλεκτρομαγνητισμός, Μιχάλης Πίσσας})$$

Όπου  $\mu$ : η μαγνητική διαπερατότητα σε H/mm,  $\sigma$ : η ηλεκτρική αγωγιμότητα σε % IACS και  $f$ : η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος σε Hz, ενώ το βάθος διείσδυσης θα υπολογίζεται σε mm.



Εικόνα 5: Βάθος διείσδυσης δινορευμάτων που επάγονται από εναλλασσόμενο ρεύμα διαφορετικών συχνοτήτων, σε δύο υλικά με διαφορετικές τιμές αγωγιμότητας και μαγνητικής διαπερατότητας. Το βάθος διείσδυσης αυξάνεται όταν το εναλλασσόμενο ρεύμα είναι μικρής συχνότητας και όταν το ηλεκτρικά αγωγίμο υλικό έχει μικρές τιμές αγωγιμότητας και μαγνητικής διαπερατότητας. Πηγή: NDT Course Material-EC Testing

Στο σχήμα φαίνεται η εκθετική μείωση της πυκνότητας των δινορευμάτων με το βάθος και το βάθος διείσδυσης σε δύο περιπτώσεις διαφορετικών συνθηκών. Αρχικά, για πηνίο που διαρρέεται από υψηλής συχνότητας εναλλασσόμενο ρεύμα και πλησιάζει υλικό υψηλής αγωγιμότητας και μαγνητικής διαπερατότητας και στη δεξιά εικόνα έχουμε χαμηλή συχνότητα εναλλασσόμενου ρεύματος και μικρές τιμές αγωγιμότητας και μαγνητικής διαπερατότητας.

Τα δινορεύματα φτάνουν σε βάθος μεγαλύτερο του βάθους διείσδυσης, όμως η πυκνότητά τους πέφτει απότομα με αποτέλεσμα σε βάθος  $4\delta$ , να έχει πέσει στο 2% της τιμής που είχε στην επιφάνεια.

Δεδομένου του ότι η ευαισθησία του ελέγχου με δινορεύματα, εξαρτάται από την πυκνότητα τους στο σημείο που υπάρχει κάποιο ελάττωμα (ρωγμή), είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε τη δύναμή τους στο σημείο αυτό. Έτσι όταν κάνουμε κάποιο έλεγχο για ένα ελάττωμα σε κάποιο συγκεκριμένο υλικό, δεδομένων των παραμέτρων της αγωγιμότητάς του και της μαγνητικής διαπερατότητάς του, ρυθμίζουμε τη συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος, έτσι ώστε το βάθος διείσδυσης των δινορευμάτων να εμπεριέχει το σημείο που περίπου εντοπίζεται το ελάττωμα.

## 2.4. Υστέρηση φάσης των δινορευμάτων

Η φάση των δινορευμάτων αλλάζει καθώς αυτά εισχωρούν κάτω από την επιφάνεια, γεγονός που μας δίνει τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε το βάθος στο οποίο βρίσκεται κάποια ασυνέχεια. Η υστέρηση φάσης αφορά τη χρονική μετατόπιση μεταξύ της ανταπόκρισης των δινορευμάτων όταν υπάρχει μια ανωμαλία στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού, σε σχέση με την απόκρισή τους όταν η ανωμαλία βρίσκεται σε κάποιο βάθος μέσα στο υλικό. Η δημιουργία των δινορευμάτων δεν γίνεται ταυτόχρονα σε όλα τα βάθη, αλλά είναι μια χρονοεξαρτώμενη διαδικασία. Τα δινορεύματα κάτω από την επιφάνεια χρειάζονται λίγο περισσότερο χρόνο για να δημιουργηθούν από ό,τι αυτά στην επιφάνεια. Συνεπώς διαταραχές μακριά από την επιφάνεια θα προκαλούν μεγαλύτερη υστέρηση φάσης από αυτές στην επιφάνεια. Αυτή η μετατόπιση φάσης θα εκφραστεί και σαν φάση τόσο στην τάση σήματος, όσο και στο ρεύμα.

Η φάση υστέρησης είναι σημαντική παράμετρος, στους ΜΚΕ με δινορεύματα, καθώς καθιστά δυνατό τον υπολογισμό του βάθους που βρίσκεται το ελάττωμα και με τη χρήση κατάλληλων δειγμάτων αναφοράς, μπορεί να καθοριστεί και το μέγεθος της τραχύτητας αυτού. Το σήμα που παράγεται κατά τον έλεγχο, εξαρτάται από το πλάτος και τη φάση των δινορευμάτων που διακόπηκαν. Έτσι αν και δύναται δύο διαφορετικές ανωμαλίες, μία μεγάλη επιφανειακή και μια μικρή σε κάποιο βάθος από την επιφάνεια, να δημιουργήσουν την ίδια εμπέδηση στο δοκιμαστικό πηνίο, ωστόσο λόγω της αυξανόμενης υστέρησης της φάσης με το βάθος, δημιουργείται μια διαφορά στο φορέα της εμπέδησης του δοκιμαστικού πηνίου.

Η υστέρηση φάσης  $\theta$ , δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\theta = \frac{x}{\delta} \text{ (rad)}$$

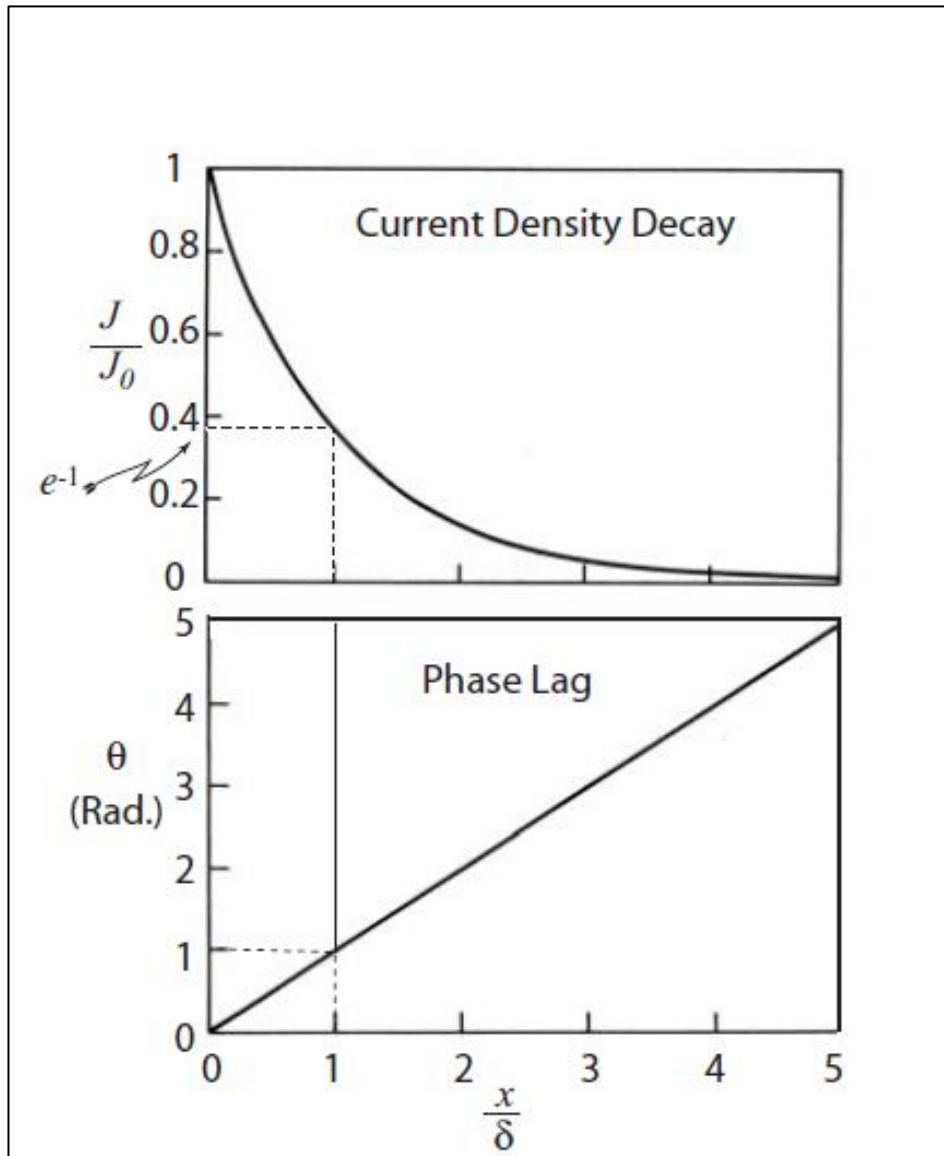
$$\theta = 57,3 \frac{x}{\delta} \text{ (degrees)} \text{ (Πηγή: "Nondestructive Evaluation", Peter J. Shull)}$$

Όπου  $\theta$ : η γωνία υστέρησης σε rad και μοίρες, αντίστοιχα,  $x$ : η απόσταση από την επιφάνεια και  $\delta$ : το βάθος διείσδυσης που μετριοούνται στις ίδιες μονάδες.

Έτσι φαίνεται ότι σε απόσταση από την επιφάνεια ίση με το βάθος διείσδυσης ( $x=\delta$ ), η υστέρηση φάσης θα είναι ίση με 1rad, ή 57,3°. Αυτό σημαίνει ότι τα ρεύματα που ρέουν στο συγκεκριμένο βάθος θα υστερούν κατά 1rad των αρχικών κ.ο.κ.

Συνεπώς, με την μέτρηση της καθυστέρησης φάσης ενός σήματος θα μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί το βάθος της ανωμαλίας.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η εκθετική μείωση της πυκνότητας των δινορευμάτων  $J$ , σε σχέση με την τιμή της στην επιφάνεια  $J_0$ , σε συνάρτηση με τον παράγοντα  $\frac{x}{\delta}$ . Έτσι σε βάθος ίσο με  $\delta$  ( $\frac{x}{\delta} = 1$ ) από την επιφάνεια, η πυκνότητα ρεύματος γίνεται ίση με  $J_0/e$  και η υστέρηση φάσης ίση με 1. Σε αντιστοιχία είναι το διάγραμμα της υστέρησης φάσης σε συνάρτηση με τον παράγοντα  $\frac{x}{\delta}$ .



Διάγραμμα 4: Η μεταβολή της πυκνότητας των δινορευμάτων:  $J/J_0$  και της υστέρησης φάσης, συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια του υλικού:  $x/\delta$ . Πηγή: *Nondestructive Evaluation Technics, Peter J. Shull*

## 2.5. Lift-off

Το lift-off περιγράφει την απόσταση μεταξύ του πηνίου και του υπό εξέταση υλικού. Όσο το lift-off αυξάνεται, τόσο μειώνεται η επαγωγική ζεύξη του πηνίου με το υλικό. Έτσι λιγότερο μαγνητικό πεδίο περνάει από το δείγμα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η επίδραση του στην εμπέδηση του πηνίου, η τιμή της οποίας πλησιάζει την τιμή  $\omega L_0$ , για το κενό.

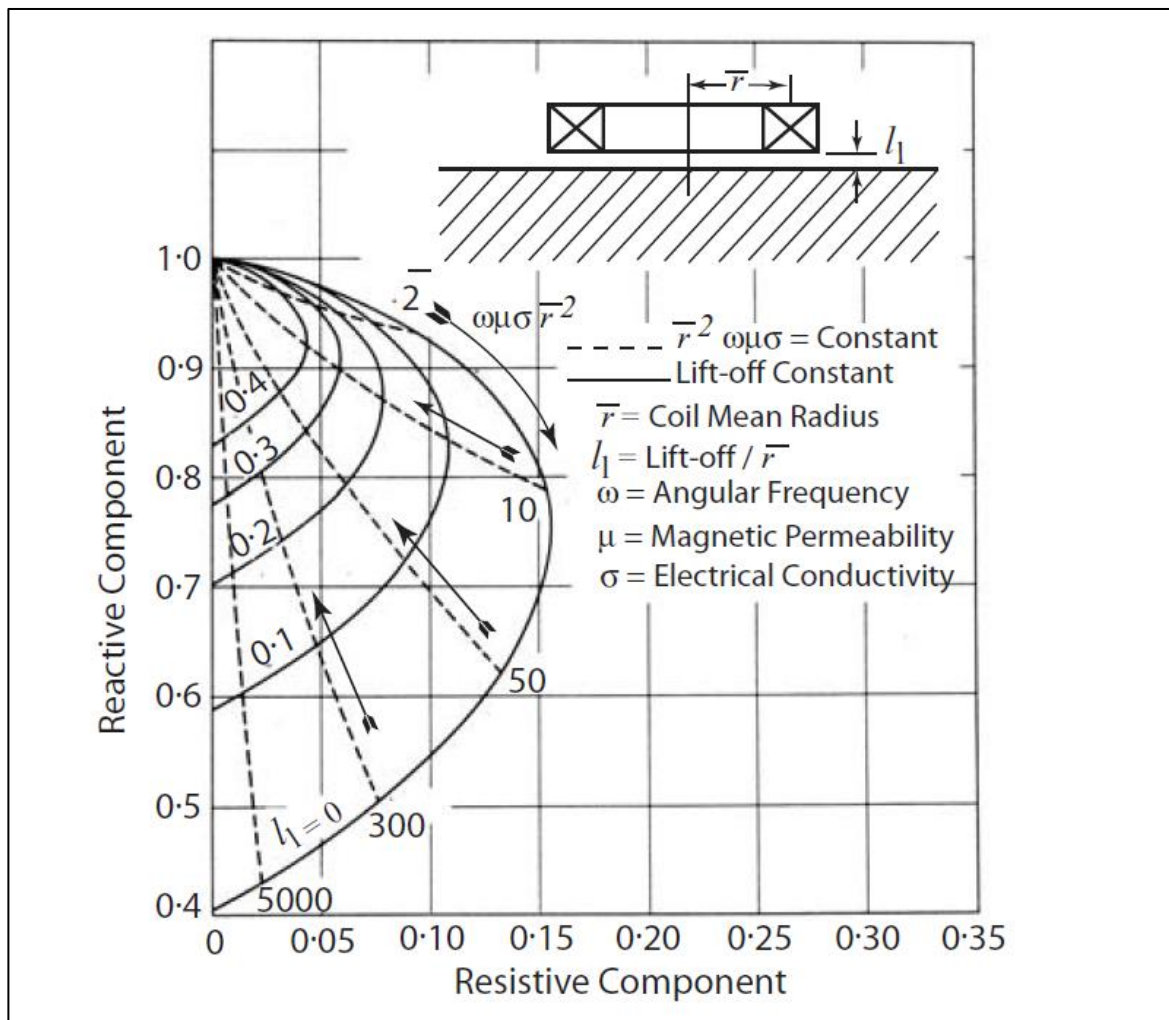
Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται η επίδραση του φαινομένου lift-off στην εμπέδηση του πηνίου. Το lift-off ( $l$ ) είναι κανονικοποιημένο στην κύρια διάμετρο,  $\bar{r}$ , του πηνίου και έχουμε:  $l_1 = l/\bar{r}$ , διότι για δεδομένη τιμή του lift-off, η απόκριση πηνίου μεγάλης ακτίνας, είναι

μικρότερη, από την αντίστοιχη για μικρότερης ακτίνας πηνίο. Με διακεκομμένες, σχεδιάζεται η τροχιά για μειούμενες τιμές lift-off, με δεδομένες τιμές του γινομένου:  $\bar{r}^2\omega\mu\sigma$ . Οι συνεχόμενες γραμμές αντιπροσωπεύουν σταθερές τιμές του lift-off καθώς η τιμή του γινομένου  $\bar{r}^2\omega\mu\sigma$  μεταβάλλεται απ' το 0 στο άπειρο.

Η μεγαλύτερη γραμμή αντιπροσωπεύει την 100% ζεύξη, με  $l_1 = 1$ , και αντιστοιχεί στην μέγιστη ευαισθησία για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων του υλικού. Η απόλυτη ακύρωση του αρχικού μαγνητικού πεδίου μπορεί μόνο να συμβεί στην περίπτωση  $l_1 = 1$ .

Αξίζει να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις, πάνω στο διάγραμμα αυτό:

- Η εμπέδηση αλλάζει πιο γρήγορα με το lift-off, όταν ο ανιχνευτής είναι κοντά στην επιφάνεια.
- Διακυμάνσεις του lift-off σε υλικά υψηλής αγωγιμότητας προκαλούν μεγάλες αλλαγές στην εμπέδηση.
- Περισσότερο ευαίσθητα στις αλλαγές του lift-off είναι τα πηνία μικρής διαμέτρου, από αυτά μεγαλύτερης.



Διάγραμμα 5: Οι συνεχόμενες καμπύλες αντιπροσωπεύουν τιμές του Lift-off, πάνω στις οποίες ο παράγοντας:  $\omega\mu\sigma\bar{r}^2$  παίρνει τιμές από το 0 έως το άπειρο. Ενώ οι διακεκομμένες καμπύλες αντιπροσωπεύουν σταθερές τιμές του παράγοντα  $\omega\mu\sigma\bar{r}^2$ , πάνω στις οποίες η τιμή του κανονικοποιημένου Lift-off,  $l_1$ , αυξάνεται. Πηγή: *Nondestructive Evaluation Technics, Peter J. Shull*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος

Στο κομμάτι αυτό της εργασίας, θα δούμε πως προσεγγίζεται η επίλυση του προβλήματος με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Το πρόβλημά μας αφορά χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, που δημιουργείται από πηνίο εναλλασσόμενου ρεύματος και επάγει δινορεύματα στην επιφάνεια ενός αγωγού. Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήσαμε είναι το FEMM (Finite Element Method Magnetics).

#### 3.1. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) είναι μια αριθμητική μέθοδος προσεγγιστικής επίλυσης προβλημάτων διαφορικών εξισώσεων με συνοριακές τιμές, που είναι γνωστή και σαν ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Η βασική αρχή της μεθόδου είναι η υποδιαίρεση ενός πολύπλοκου αντικείμενου σε μικρότερα και απλούστερα τμήματα που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Στον κάθε επιμέρους τομέα, η συνάρτηση του προβλήματος προσεγγίζεται από απλές συναρτήσεις μεταβολής. Αυτές οι απλές συναρτήσεις που μοντελοποιούν τα πεπερασμένα στοιχεία συναθροίζονται σε ένα μεγαλύτερο σύστημα εξισώσεων που μοντελοποιεί ολόκληρο το πρόβλημα. Έπειτα η ΜΠΣ, χρησιμοποιεί μεθόδους από τη θεωρία μεταβολών για να προσεγγίσει τη λύση και να ελαχιστοποιήσει τη συνάρτηση σφάλματος.

Μια τυπική διαδικασία της μεθόδου ακολουθεί τα εξής βήματα: αρχικά διαιρούμε ολόκληρο τον τομέα του προβλήματος σε υποτομείς, που ο καθένας θα αντιπροσωπεύεται από ένα σύνολο στοιχειωδών εξισώσεων του αρχικού προβλήματος. Στη συνέχεια γίνεται ένας συστηματικός ανα-συνδυασμός όλων των στοιχειωδών εξισώσεων σε ένα συνολικό σύστημα εξισώσεων με σκοπό την τελική επίλυση του προβλήματος. Το σύστημα αυτό έχει γνωστές τεχνικές επίλυσης που στηρίζονται στις αρχικές τιμές του αρχικού προβλήματος.

Το πλεονέκτημα της διαίρεσης του αρχικού χωρίου σε πολλά στοιχεία, είναι ότι το αρχικό πρόβλημα που είναι μικρό αλλά δύσκολο να επιλυθεί ανάγεται σε ένα μεγάλο αλλά σχετικά εύκολο πρόβλημα. Κατά τη διαδικασία της διακριτοποίησης, δημιουργείται ένα γραμμικό αλγεβρικό πρόβλημα με περίπου δέκα χιλιάδες αγνώστους, που επιλύεται σχετικά γρήγορα με κατάλληλους αλγορίθμους.

## 3.2. FEMM

Το πρόγραμμα FEMM 4.0 είναι μια αλληλουχία υποπρογραμμάτων για την επίλυση χαμηλής συχνότητας μαγνητικών προβλημάτων σε δισδιάστατο επίπεδο. Χωρίζεται σε τρία μέρη:

- **femm.exe**: Πρόκειται για ένα γραφικό περιβάλλον στο οποίο ο χρήστης υλοποιεί τη γεωμετρία του προβλήματος, καθορίζει τις ιδιότητες των υλικών και τις συνοριακές συνθήκες. Έτοιμα αρχεία σχεδίασης DFX μπορεί να εισαχθούν για διευκόλυνση του χρήστη. Επιπλέον απεικονίζει τα δημιουργούμενα πεδία του προβλήματος σε περιγεγραμμένα γραφήματα πυκνότητας σε όλο το χώρο επίλυσης. Επίσης επιτρέπει στον χρήστη να εξετάσει τον χώρο σε αυθαίρετα σημεία όπως και να εκτιμήσει διαφορετικές ποσότητες κατά μήκος της περιοχής που έχει ορίσει.

- **triangle.exe**: Σύμφωνα με αυτό το πρόγραμμα η περιοχή επίλυσης διαχωρίζεται σε ένα μεγάλο αριθμό τριγώνων, προσδιοριζόμενο από το χρήστη. Το πλεονέκτημα του κερματισμού του χώρου σε ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων είναι η μετατροπή του μικρού αλλά δύσκολου στη λύση προβλήματος σε ένα μεγάλο αριθμό προβλημάτων εύκολα στην επίλυση. Συγκεκριμένα, στο FEMM ο χώρος διαιρείται σε τριγωνικά στοιχεία, όπου η λύση προσεγγίζεται μέσω γραμμικής παρεμβολής των τιμών στις τρεις κορυφές του τριγώνου. (Το πρόβλημα της γραμμικής άλγεβρας μορφοποιείται ελαχιστοποιώντας το σφάλμα μεταξύ της ακριβούς διαφορικής εξίσωσης και της προσεγγιστικής διαφορικής εξίσωσης καθώς γράφεται σε σειρά γραμμικών συναρτήσεων.)

- **fkern.exe**: Το πρόγραμμα αυτό επιλύει τις εξισώσεις του Maxwell στα σημεία του χώρου του προβλήματος που σχεδιάστηκε στο femm.exe.

Το FEMM εκκινεί με τη δημιουργία και χρήση ενός αρχείου εισόδου (\*.fem) από τον χρήστη το οποίο περιέχει στοιχεία και παραμέτρους του εκάστοτε προβλήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με δυο τρόπους: είτε μέσω του γραφικού περιβάλλοντος που προσφέρει το FEMM είτε εισάγοντας τα δεδομένα στο αρχείο μέσω text περιβάλλοντος.

### Η γλώσσα LUA

Η γλώσσα εντολών προγραμματισμού LUA συνεργάζεται με το πρόγραμμα FEMM παρέχοντας στον χρήστη κάθε φορά τις τιμές των διαφόρων μεγεθών του πεδίου που διερευνά μέσω συγκεκριμένων εντολών. Δέχεται δεδομένα από την επίλυση του πεδίου που γίνεται στο FEMM. Στην νέα έκδοση της LUA είναι δυνατόν να δημιουργηθεί και η γεωμετρία του προβλήματος, δηλαδή συνδέει τη δημιουργία του προβλήματος, την ανάλυσή του και την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

### 3.3. Ηλεκτροδυναμική των δινορευμάτων

Γνωρίζουμε ότι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει στην επιφάνεια ενός αγωγού δινορεύματα. Οι εξισώσεις του Maxwell για το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο στο πρόβλημα αυτό δίνονται παρακάτω.

Το ηλεκτρικό πεδίο  $\vec{E}$  και η πυκνότητα του ρεύματος  $\vec{J}$ , ακολουθούν τη σχέση:

$$\vec{E} = \tau \vec{J} \Rightarrow$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1)$$

Όπου  $\sigma$ : η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου και  $\tau$ : η ειδική του αντίσταση, που συνδέονται με τη σχέση:

$$\sigma = \frac{1}{\tau}$$

Το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο συνδέεται με το μαγνητικό  $\vec{B}$  με τη σχέση:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

Και το μαγνητικό πεδίο συνδέεται με το διανυσματικό δυναμικό  $\vec{A}$ , με τη σχέση:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (3)$$

Και με την πυκνότητα ρεύματος, με τη σχέση:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu \vec{J} \quad (4)$$

Όπου  $\mu$ : η μαγνητική διαπερατότητα. Αντικαθιστώντας στην (3), έχουμε:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = \mu \vec{J} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = \vec{J} \quad (5)$$

για το οποίο ισχύει ότι η απόκλιση του είναι μηδέν (βαθμίδα Coulomb):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0 \quad (6)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την (3) και τη (4), για το διανυσματικό δυναμικό, θα πάρουμε ακόμη τη σχέση:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \vec{\nabla} \vec{\nabla} \cdot \vec{A} - \vec{\nabla}^2 \vec{A} = \mu \vec{J} \Rightarrow$$

$$-\vec{\nabla}^2 \vec{A} = \mu \vec{J} \quad (7)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (3) στην (2), έχουμε:



$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\vec{\nabla} \times \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \Rightarrow$$

$$\vec{\nabla} \times (\vec{E} + \dot{\vec{A}}) = 0$$

Επειδή ο στροβιλισμός της απόκλισης ενός βαθμωτού μεγέθους είναι μηδέν, έχουμε ότι:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{E} + \dot{\vec{A}}) = \vec{\nabla} \times \vec{\nabla} V \Rightarrow$$

$$\vec{E} = -\dot{\vec{A}} - \vec{\nabla} V \quad (8)$$

Πολλαπλασιάζουμε τη σχέση (8) με  $\sigma$  και αντικαθιστούμε την πυκνότητα ρεύματος από τη σχέση (1) και παίρνουμε:

$$\vec{J} = -\sigma \dot{\vec{A}} - \sigma \vec{\nabla} V \quad (9)$$

Όπου η απόκλιση του δυναμικού,  $\vec{\nabla} V$  είναι σταθερή ποσότητα πάνω από το αγωγίμο σώμα.

Αντικαθιστώντας στη σχέση (5) την πυκνότητα ρεύματος που βρήκαμε στη σχέση (9) και προσθέτοντας και το ρεύμα της πηγής  $J_\pi$ , έχουμε:

$$\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = -\sigma \dot{\vec{A}} - \sigma \vec{\nabla} V + J_\pi \quad (10)$$

Το Femm χρησιμοποιεί αυτή τη σταθερή ποσότητα της βαθμίδας του δυναμικού για να επιβάλλει περιορισμούς στη ροή του ρεύματος από τις αγωγίμες περιοχές. Στη συνέχεια επιλύει την εξίσωση (10) για την περίπτωση που το μαγνητικό πεδίο ταλαντώνεται σε μια συγκεκριμένη συχνότητα  $f = \omega / 2\pi$ .

Στην περίπτωση που έχουμε αρμονική χρονική εξάρτηση, τα μεγέθη του διανυσματικού δυναμικού, του μαγνητικού πεδίου, του ηλεκτρικού πεδίου και της πυκνότητας ρεύματος μετασχηματίζονται σε περιστρεφόμενα διανύσματα φάσης:

$$\vec{A}(t) = \text{Re} [a(\cos \omega t + i \sin \omega t)] = a' \cos(\omega t + \varphi_a)$$

$$\vec{B}(t) = \text{Re} [b(\cos \omega t + i \sin \omega t)] = b' \cos(\omega t + \varphi_b)$$

$$\vec{E}(t) = \text{Re} [e(\cos \omega t + i \sin \omega t)] = e' \cos(\omega t + \varphi_e)$$

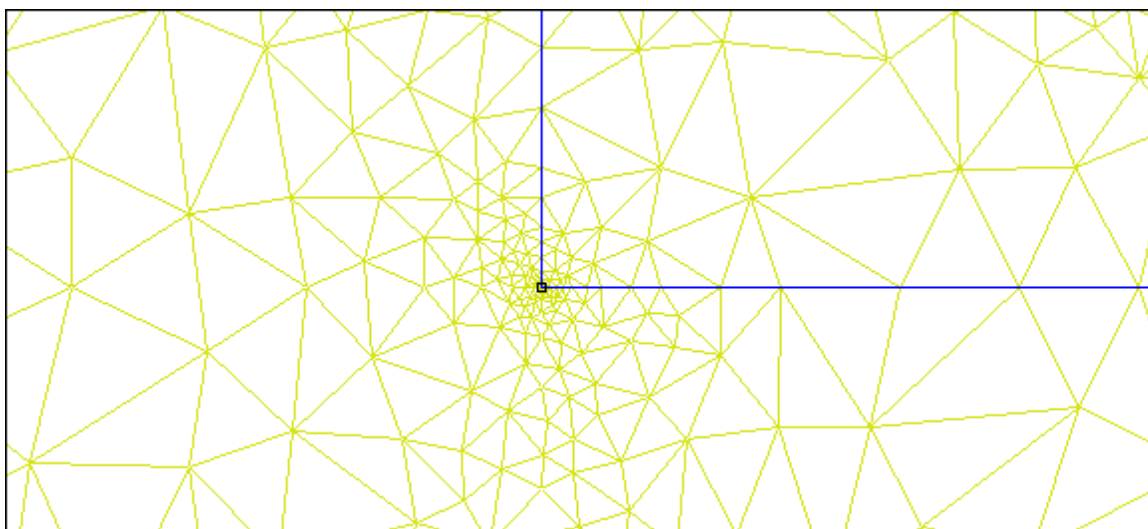
$$\vec{J}(t) = \text{Re} [j(\cos \omega t + i \sin \omega t)] = j' \cos(\omega t + \varphi_j)$$

Όπου τα μεγέθη  $a$ ,  $b$ ,  $e$ ,  $j$  είναι εν γένει μιγαδικοί αριθμοί ανεξάρτητοι από το χρόνο, που ονομάζονται περιστρεφόμενα διανύσματα φάσης.

### 3.4. Επίλυση του προβλήματος με το FEMM

Η αναλυτική επίλυση των παραπάνω διαφορικών εξισώσεων είναι δύσκολο να επιτευχθεί για οποιασδήποτε γεωμετρίας πρόβλημα, αν δεν είναι αρκετά απλή. Έτσι επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, σύμφωνα με την οποία η περιοχή του προβλήματος χωρίζεται σε επιμέρους περιοχές, απλής γεωμετρίας. Σε αυτές τις περιοχές η λύση του προβλήματος προσεγγίζεται από μια πολύ απλή συνάρτηση. Όσο περισσότερες είναι οι περιοχές που χωρίζεται το χωρίο του προβλήματος, τόσο ακριβέστερη είναι η επίλυση.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήσαμε το FEMM, για να επιλύσουμε τις διαφορικές εξισώσεις του μαγνητικού πεδίου και των ρευμάτων στο πρόβλημά μας. Το FEMM, χωρίζει το χωρίο του προβλήματος σε τριγωνικά στοιχεία, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Σε καθένα από αυτά η λύση προσεγγίζεται από μια γραμμική εισαγωγή των τιμών του δυναμικού στις κορυφές του τριγώνου. Το γραμμικό αλγεβρικό πρόβλημα σχηματίζεται με την ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ της ακριβούς διαφορικής εξίσωσης και της προσεγγιστικής που γράφεται σε όρους γραμμικών δοκιμαστικών εξισώσεων.



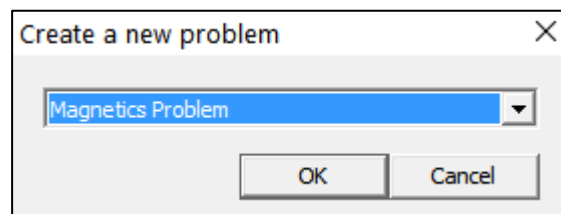
Εικόνα 6: Διαίρεση του χώρου σε τριγωνικά χωρία. (FEMM)

### 3.5. Επίλυση του προβλήματος των δινορευμάτων

Στην εργασία αυτή χρειάστηκε να επιλύσουμε το πρόβλημα των δινορευμάτων σε επιφάνεια αγωγού. Η διάταξη μας περιέχει ένα πηνίο εναλλασσόμενου ρεύματος και τον αγωγό μας, που έχει κάποια ανωμαλία (ρωγμή). Το πρόβλημα αυτό, το προσομοιάσαμε με τη βοήθεια του προγράμματος FEMM και βρήκαμε τις διαφορές που παρουσιάζει το μαγνητικό πεδίο και τα ρεύματα στην επιφάνεια του αγωγού (δινορεύματα), όταν σε διάφορα σημεία του υλικού υπάρχουν ρωγμές.

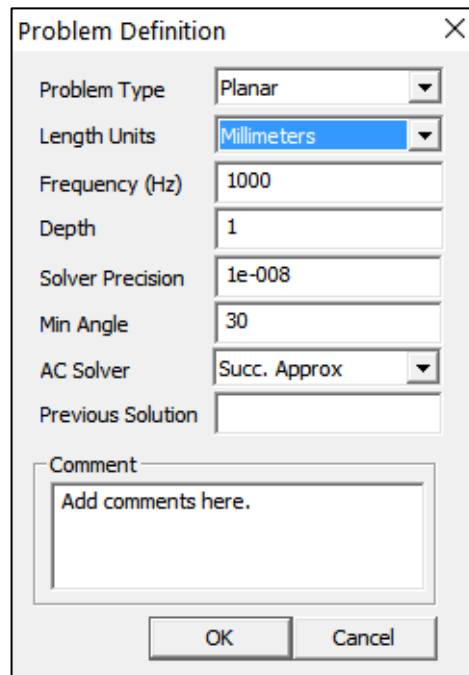
#### 3.5.1. Εισαγωγή του προβλήματος

Κατά την εκκίνηση του προγράμματος επιλέγουμε το είδος του προβλήματος που έχουμε να επιλύσουμε. Το δικό μας πρόβλημα είναι μαγνητικό κι έτσι έχουμε την ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 7: Παράθυρο στο FEMM, καθορίζει το είδος του προβλήματος. (FEMM)

Στη συνέχεια καθορίζουμε κάποια σταθερά χαρακτηριστικά του προβλήματός μας, «κλικάροντας» στην επιλογή του προβλήματος (Problem). Το πρόβλημά μας είναι συμμετρικό ως προς τον z άξονα, γι αυτό στον τύπο του προβλήματος επιλέξαμε το επίπεδο πρόβλημα (Planar). Οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούμε είναι mm και η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος 1000Hz. Έτσι το παράθυρο διαμορφώνεται ως εξής:

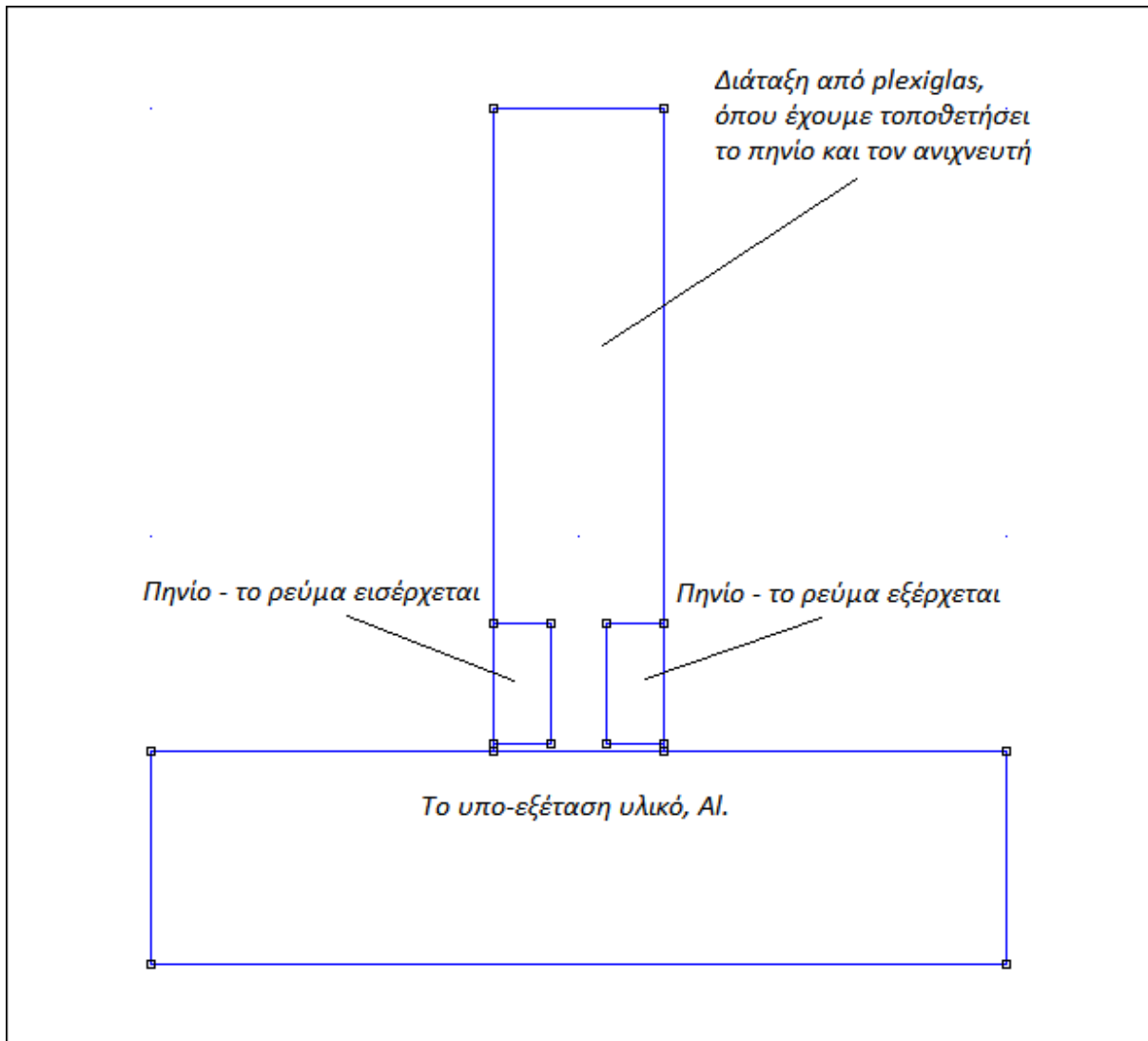


Εικόνα 8: Παράθυρο στο FEMM, ρυθμίζει τα βασικά στοιχεία του προβλήματος. (FEMM)

### 3.5.2. Σχεδιασμός της γεωμετρίας του προβλήματος

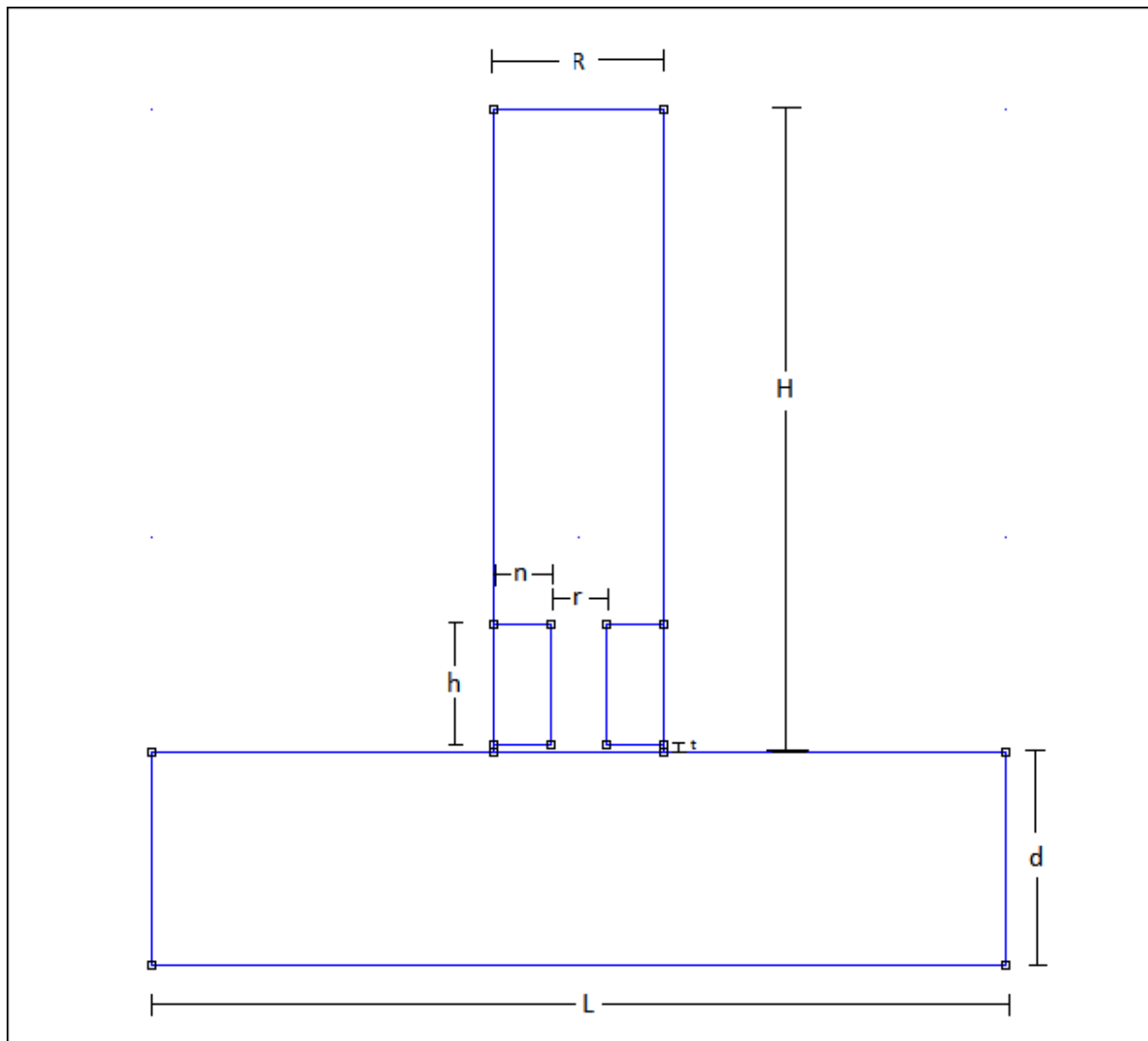
Στη συνέχεια διαμορφώνουμε τη γεωμετρία του προβλήματός μας, επιλέγοντας 'Operate on nodes' ώστε να τοποθετήσουμε σημεία-κόμβους και 'Operate on segments' για να δημιουργήσουμε ευθύγραμμα τμήματα, ενώνοντας τα σημεία.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η γεωμετρία του προβλήματός μας και το είδος του κάθε τμήματος.



Εικόνα 9: Η γεωμετρία του προβλήματος. (FEMM)

Οι διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο παραπάνω σχέδιο, φαίνονται στο επόμενο σχήμα και είναι:



Εικόνα 10: Διαστάσεις των στοιχείων του προβλήματος. (FEMM)

$$H = 150 \text{ mm} , \quad h = 28,5 \text{ mm}$$

$$R = 40 \text{ mm} , \quad r = 10 \text{ mm}$$

$$n = 13,5 \text{ mm} , \quad t = 1,5 \text{ mm}$$

$$L = 200 \text{ mm} , \quad d = 50 \text{ mm}$$

### 3.5.3. Εισαγωγή υλικών

Στο πρόβλημά μας χρησιμοποιήσαμε αλουμίνιο (το υπό εξέταση υλικό) και καλώδιο 31AWG για το πηνίο εναλλασσόμενου ρεύματος, που είναι τυλιγμένο σε plexiglas. Στο γύρω χώρο υπάρχει αέρας.

Το καλώδιο 31AWG και το Plexiglas, δεν υπάρχουν στη βιβλιοθήκη των υλικών του προγράμματος. Έτσι εισάγουμε τα υλικά αυτά με τα χαρακτηριστικά τους, επιλέγοντας τη βιβλιοθήκη υλικών (Material Library), στην επιλογή 'Properties' θα κάνουμε εισαγωγή νέου υλικού (με δεξί κλικ στο αριστερό κομμάτι του παραθύρου, 'Add new material'). Έτσι θα εμφανιστεί ένα παράθυρο, 'Block Property', στο οποίο θα εισάγουμε το όνομα και τα χαρακτηριστικά μεγέθη για κάθε ένα από τα δύο υλικά μας.

Για το καλώδιο 31 AWG, θα εισάγουμε την τιμή της ειδικής αγωγιμότητας  $\sigma$ :

$$\sigma = 58 \frac{MS}{m}$$

Στα ειδικά χαρακτηριστικά, 'Special Attributes', θα κλικάρουμε την επιλογή του μαγνητικού καλωδίου, 'Magnet Wire'.

Και θα διορθώσουμε τη διάμετρο του:

$$\text{Stand dia.} = 0,227 \text{ mm}$$

Το παράθυρο, λοιπόν θα διαμορφωθεί ως εξής:

Block Property

Name: 31 AWG

B-H Curve: Linear B-H Relationship

Linear Material Properties

Relative  $\mu_x$ : 1      Relative  $\mu_y$ : 1

$\phi_{hx}$ , deg: 0       $\phi_{hy}$ , deg: 0

Nonlinear Material Properties

Edit B-H Curve       $\phi_{hmax}$ , deg: 0

Coercivity

$H_c$ , A/m: 0

Electrical Conductivity

$\sigma$ , MS/m: 58

Source Current Density

$J$ , MA/m<sup>2</sup>: 0

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Magnet wire

Lam thickness, mm: 0      Lam fill factor: 1

Number of strands: 1      Strand dia, mm: 0.227

OK      Cancel

Εικόνα 11: Παράθυρο FEMM, εισαγωγής υλικών, εδώ το καλώδιο 31AWG. (FEMM)



Με την ίδια λογική εισάγουμε το Plexiglas, εισάγοντας στο παράθυρο Block Property, το όνομα και την ειδική του αγωγιμότητα, που ισούται με 0. Το παράθυρο που θα έχουμε είναι το επόμενο:

Block Property

Name: Plexiglas

B-H Curve: Linear B-H Relationship

Linear Material Properties

Relative  $\mu_x$ : 1

Relative  $\mu_y$ : 1

$\phi_{hx}$ , deg: 0

$\phi_{hy}$ , deg: 0

Nonlinear Material Properties

Edit B-H Curve

$\phi_{hmax}$ , deg: 0

Coercivity

$H_c$ , A/m: 0

Electrical Conductivity

$\sigma$ , MS/m: 0

Source Current Density

J, MA/m<sup>2</sup>: 0

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Not laminated or stranded

Lam thickness, mm: 0

Lam fill factor: 1

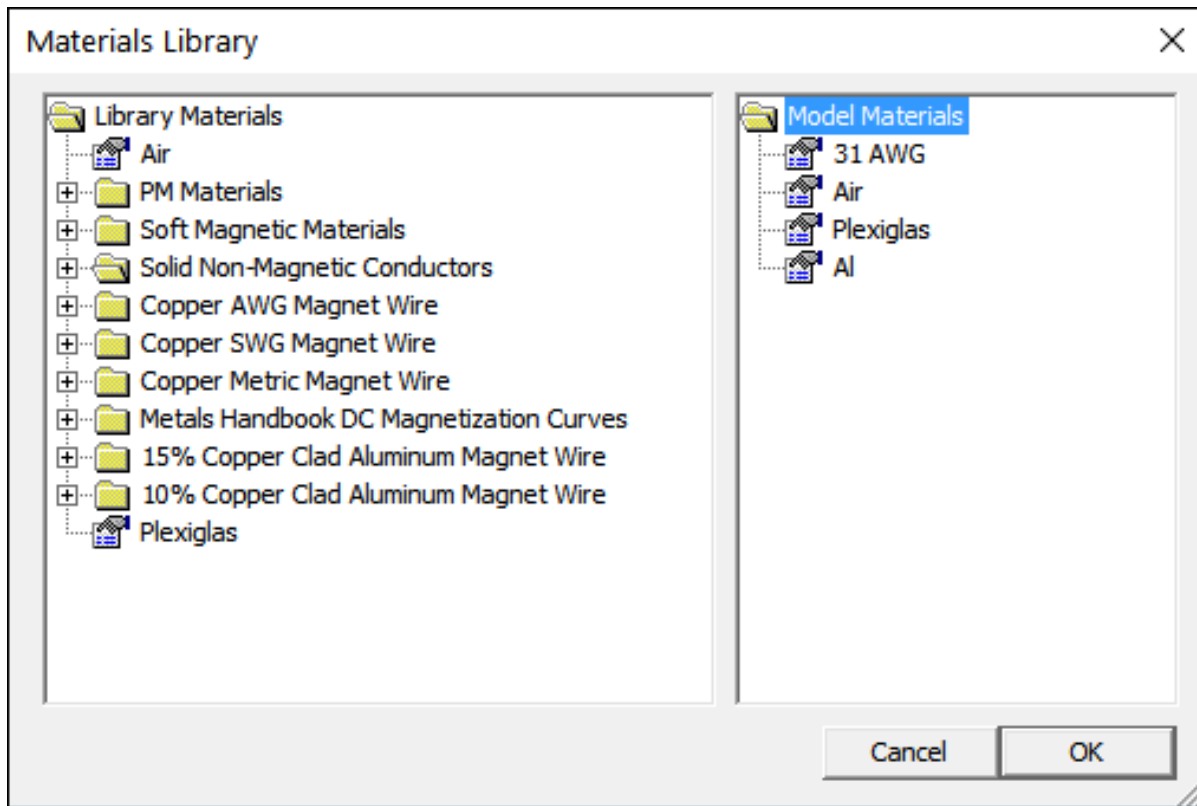
Number of strands: 0

Strand dia, mm: 0

OK Cancel

Εικόνα 12: Παράθυρο FEMM, εισαγωγής υλικών, εδώ το Plexiglas. (FEMM)

Στη συνέχεια επιλέγουμε από τη βιβλιοθήκη υλικών τα: 31AWG, Al, Plexiglas και Air και τα μεταφέρουμε στο δεξιά τμήμα του παραθύρου, 'Model Materials'. Και προκύπτει η ακόλουθη εικόνα:

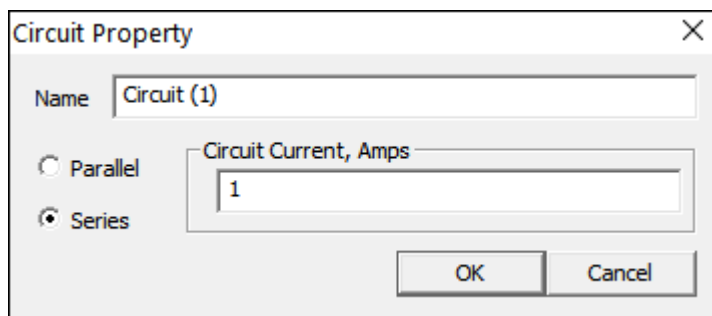


Εικόνα 13: Παράθυρο FEMM, Βιβλιοθήκη Υλικών. (FEMM)

### 3.5.4. Εισαγωγή κυκλώματος

Για να εισάγουμε το εναλλασσόμενο ρεύμα που διαρρέει το πηνίο μας, θα επιλέξουμε από το 'Properties' το κύκλωμα 'Circuit'. Αφού δώσουμε όνομα στο κύκλωμα ('Circuit (1)'), θα εμφανιστεί παράθυρο στο οποίο θα πρέπει να δώσουμε τις ρυθμίσεις σχετικά με αυτό. Επειδή το ρεύμα δε θέλουμε να είναι παράλληλο στο επίπεδο xy του προβλήματος, αλλά κάθετο σε αυτό, δηλαδή στη διεύθυνση του άξονα z, θα κλικάρουμε την επιλογή 'series'. Σαν ρεύμα θα βάλουμε το πλάτος του εναλλασσόμενου, ίσο με 1A.

Η εικόνα που προκύπτει είναι η ακόλουθη:



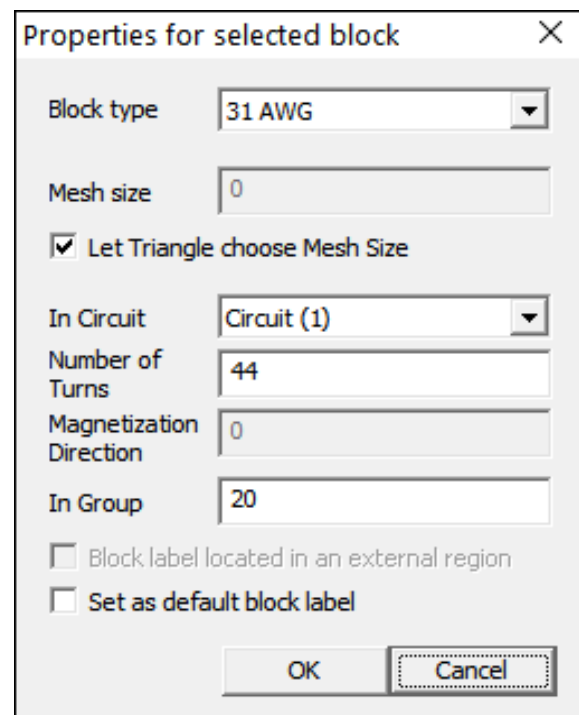
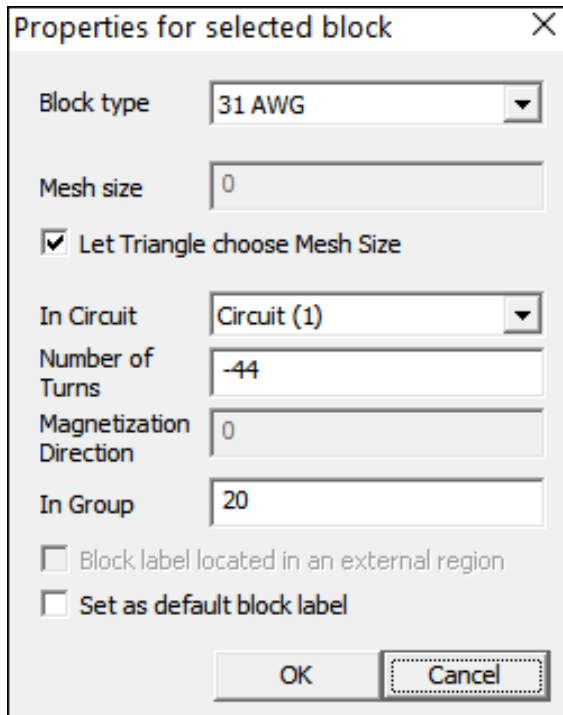
Εικόνα 14: Παράθυρο FEMM, Εισαγωγής Κυκλώματος. (FEMM)

### 3.5.5. Τοποθέτηση των στοιχείων της διάταξης

Για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, ρυθμίζουμε το είδος της κάθε περιοχής επιλέγοντας το εργαλείο 'Operate block labels'. Εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο θα καθορίσουμε την περιοχή αλλά και το μέγεθος των πλεγμάτων που επιθυμούμε στην αντίστοιχη περιοχή. Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να κάνει μόνο του αυτή τη ρύθμιση, με την επιλογή 'Let the triangle choose mesh size'. Είναι φανερό ότι όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των περιοχών, τόσο ακριβέστερη θα είναι η λύση του προβλήματος, αλλά ο χρόνος επεξεργασίας θα αυξηθεί.

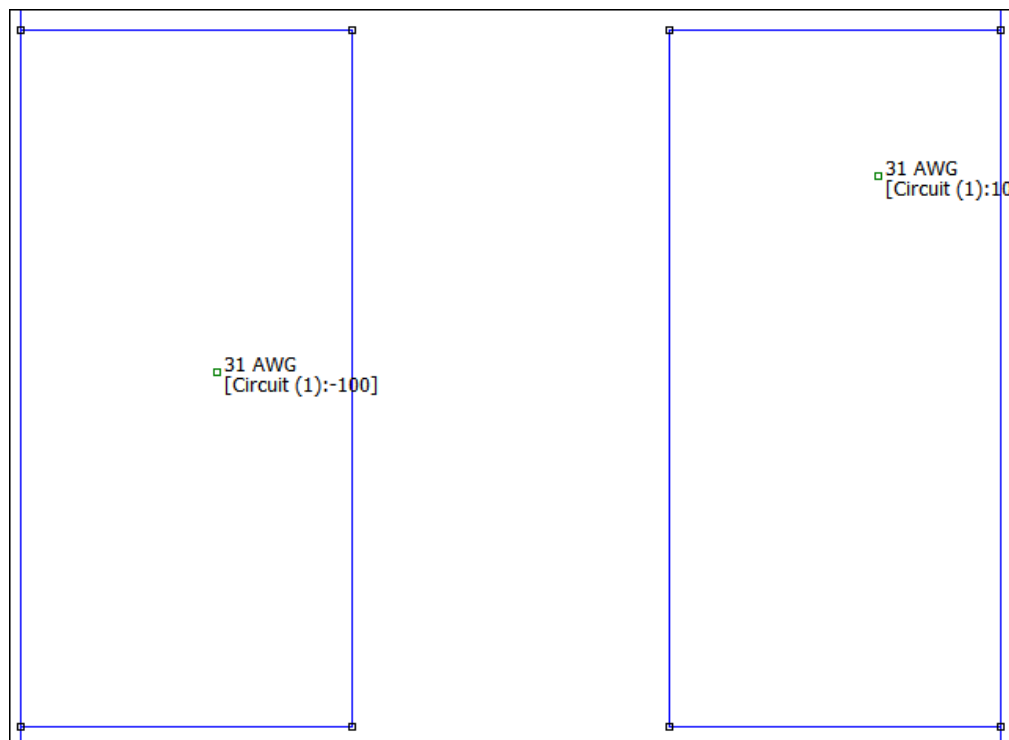
Για το πηνίο θα επιλέξουμε το 31AWG, που αντιστοιχεί στο καλώδιό μας. Δε χρειαζόμαστε ιδιαίτερα ακριβή επεξεργασία αυτών των περιοχών, οπότε δε θα αφήσουμε το πρόγραμμα να επιλέξει το μέγεθος των πλεγμάτων.

Ρυθμίζουμε τον αριθμό των σπειρών που αντιστοιχεί στην επιλογή 'Number of turns' και τον αριθμό των καλωδίων στον οριζόντιο άξονα που αντιστοιχεί στην επιλογή 'In group', σύμφωνα με το πηνίο που κατασκευάσαμε στο εργαστήριο. Έτσι έχουμε: 'Number of Turns: 44' και 'In Group: 20'. Για να εισάγουμε τη φορά του ρεύματος, στα δύο τμήμα του πηνίου, δεδομένου του ότι από το ένα θα εξέρχεται και από το άλλο θα εισέρχεται, σε ένα από τα δύο Number of Turns, θα βάλουμε πρόσημο (+), ενώ στο άλλο (-). Κι έτσι έχουμε τα παρακάτω παράθυρα για την αριστερή και τη δεξιά περιοχή του πηνίου.



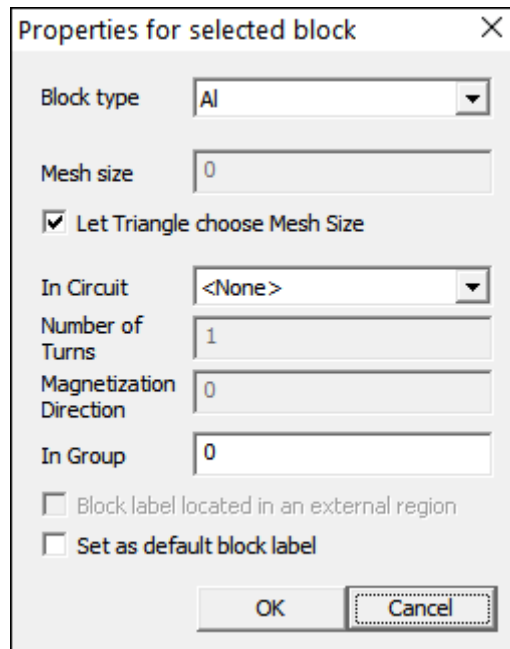
Εικόνα 15: Παράθυρο FEMM, τοποθέτησης υλικών στα στοιχεία της προσομοίωσης. Εδώ είναι τα καλώδια του πηνίου. (FEMM)

Και το πηνίο στην προσομοίωση της διάταξης, διαμορφώνεται ως εξής:



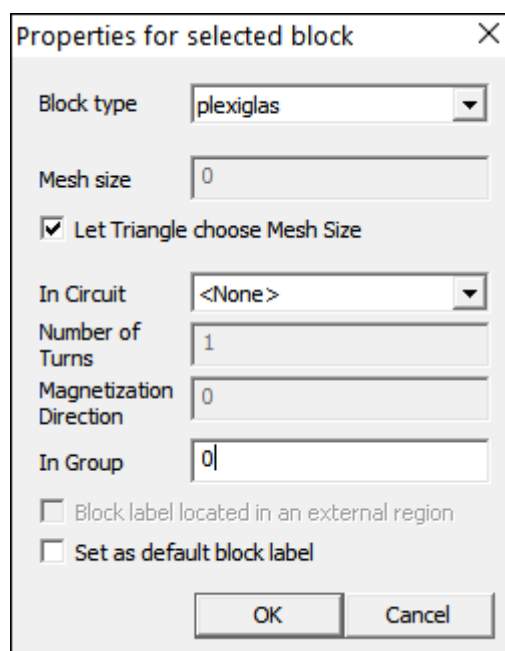
Εικόνα 16: Προσομοίωση του πηνίου. (FEMM)

Για το υπό εξέταση υλικό, που είναι το αλουμίνιο, θα επιλέξουμε το αντίστοιχο υλικό στην επιλογή 'Block type' και θα αφήσουμε το πρόγραμμα να επιλέξει το μέγεθος των πλεγμάτων. Έτσι το παράθυρο θα διαμορφωθεί ως εξής:



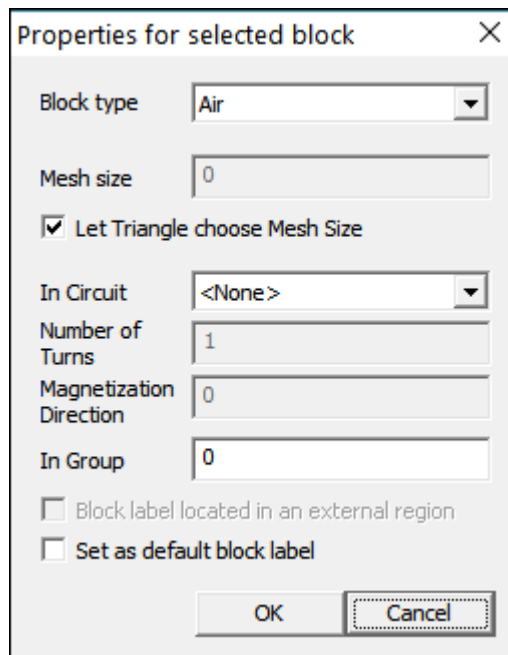
Εικόνα 17: Παράθυρο τοποθέτησης υλικών στα στοιχεία της προσομοίωσης. Εδώ είναι το αλουμίνιο, για την πλάκα αλουμινίου. (FEMM)

Με όμοιο τρόπο, για το Plexiglas, θα έχουμε:



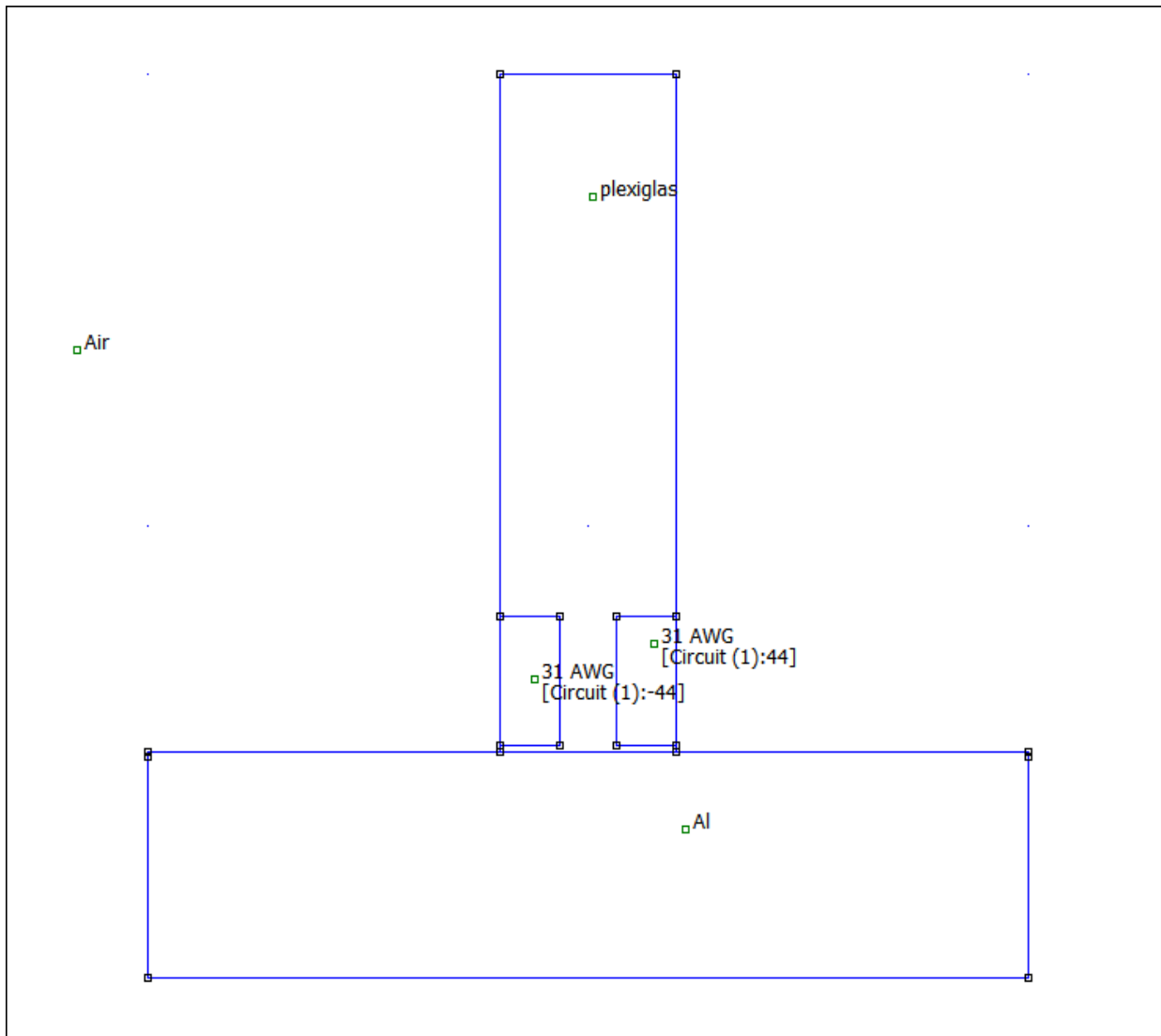
Εικόνα 18: Παράθυρο τοποθέτησης υλικών για τα στοιχεία της προσομοίωσης. Εδώ είναι το Plexiglas. (FEMM)

Και στο γύρω χώρο που έχουμε αέρα, θα είναι:



Εικόνα 19: Παράθυρο τοποθέτησης υλικών στα στοιχεία της προσομοίωσης. Εδώ είναι ο αέρας στο γύρω χώρο.(FEMM)

Και η εικόνα της προσομοίωσης της διάταξης μας, θα είναι η ακόλουθη:



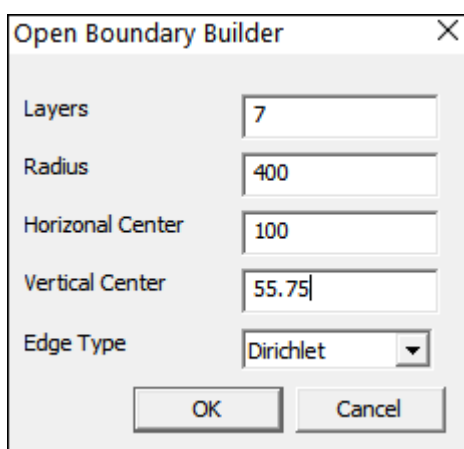
Εικόνα 20: Προσομοίωση της διάταξης με το υλικό του κάθε τμήματος. (FEMM)

Σε αυτό το σημείο θα προσθέσουμε στην προσομοίωσή μας δύο σημεία στα όρια της πλάκας του αλουμινίου, 1mm από την επιφάνειά της, τα οποία θα βοηθήσουν να χαράξουμε την καμπύλη των δινορευμάτων, στην επίλυση του προβλήματος. Τα σημεία αυτά έχουν συντεταγμένες: (0,49) και (200,49), έτσι ώστε η ευθεία που τα ενώνει να είναι λίγο κάτω από την επιφάνεια του αλουμινίου.

### 3.5.6. Συνοριακές συνθήκες

Στο πρόβλημά μας θα χρησιμοποιήσουμε μια μέθοδο ανοιχτών συνοριακών συνθηκών, που ονομάζονται: Αυτοσχέδιες Ασυμπτωτικές Συνοριακές Συνθήκες (Improvised Asymptotic Boundary Conditions-IABCs). Οι ασυμπτωτικές συνοριακές (ABCs), είναι οι συνοριακές συνθήκες που προσομοιάζουν την αντίσταση ενός ανοιχτού χώρου για χαμηλής τάξης αρμονικές, σε ένα κοντινό όριο. Με τον ίδιο τρόπο δουλεύουν και οι αυτοσχέδιες συνοριακές συνθήκες (IABCs), αναπαράγουν την αντίσταση ενός ανοιχτού χώρου για χαμηλής τάξης αρμονικές. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με την κατασκευή μιας σειράς ομόκεντρων δακτυλίων με κατάλληλα καθορισμένες ιδιότητες υλικών, σε ένα κυκλικό υπολογιστικό σύνορο. Ο αριθμός αυτών των δακτυλίων αποτελούν τα στρώματα στην IABC.

Για να τις εφαρμόσουμε στο πρόβλημά μας, κλικάρουμε πάνω στην επιλογή 'Create IABC Open Boundary'. Έτσι εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο 'Open Boundary Builder', στο οποίο ρυθμίζουμε τα στρώματα της IABC: Layers=7, την ακτίνα από το κέντρο της διάταξης μας Radius=400 τις συνιστώσες του κέντρου της διάταξης μας το οποίο εκτιμάται στο σημείο όπου βρίσκεται ο ανιχνευτής: στον οριζόντιο άξονα, Horizontal Center=100 και στον κάθετο, Vertical Center=55,75. Τέλος ορίζουμε τον τύπο των συνοριακών συνθηκών που θα χρησιμοποιήσουμε. Στο πρόβλημά μας, θεωρούμε το δυναμικό γειωμένο στο άπειρο (δηλαδή παίρνει τιμή 0), άρα θα χρησιμοποιήσουμε συνθήκες Dirichlet: 'Edge Type: Dirichlet'. Έτσι προκύπτει το παράθυρο που φαίνεται στην επόμενη εικόνα.

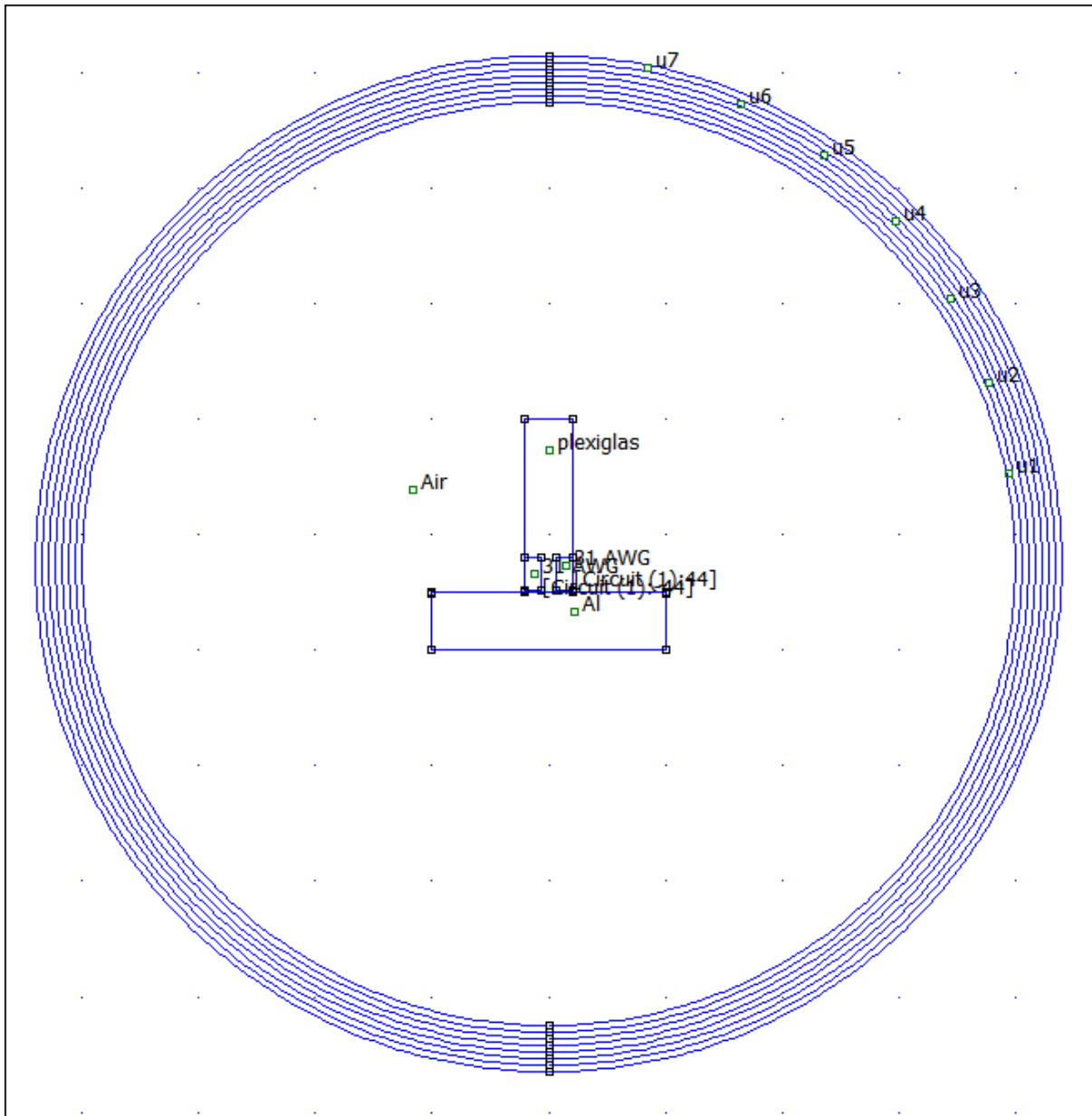


Εικόνα 21: Παράθυρο κατασκευής ανοιχτών συνοριακών συνθηκών. (FEMM)

Έτσι εμφανίζεται στην οθόνη μας η επόμενη εικόνα, στην οποία φαίνονται 7 ομόκεντροι κύκλοι, που αντιστοιχούν στις χωρικές αρμονικές του μαγνητικού πεδίου.



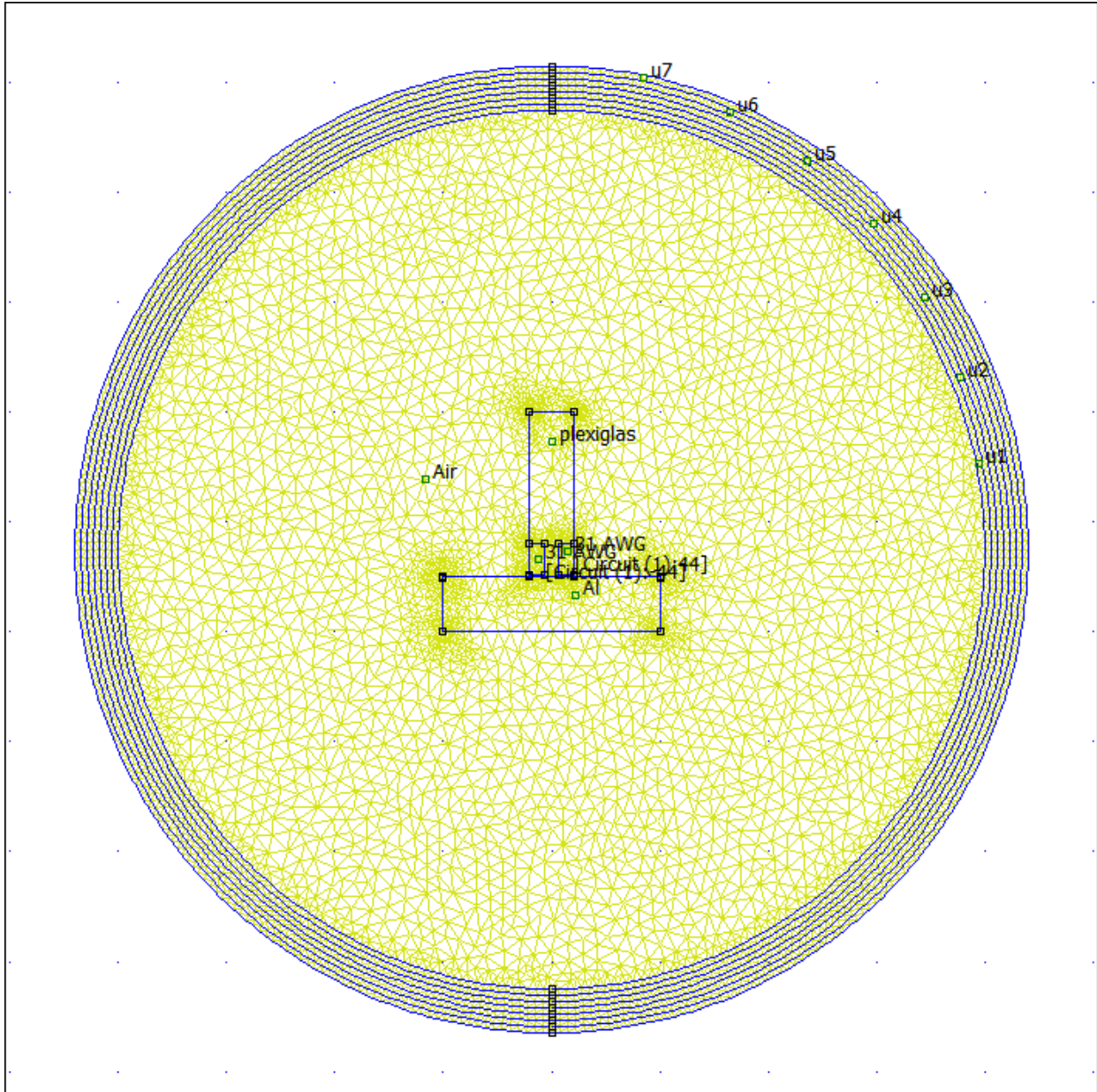
Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το αποτέλεσμα.



Εικόνα 22: Προσομοίωση διάταξης με ανοιχτές συνοριακές συνθήκες IABCs τύπου Dirichlet. (FEMM)

### 3.5.7. Διαίρεση του χώρου σε τομείς

Για την επίλυση του προβλήματός μας χρειάζεται να διαιρέσουμε το χώρο σε τομείς, πλέγματα. Έτσι θα επιλέξουμε από το 'Mesh' το 'Create Mesh'. Έτσι το πρόγραμμα θα δημιουργήσει στο χώρο ένα πλέγμα, που φαίνεται στην επόμενη εικόνα.

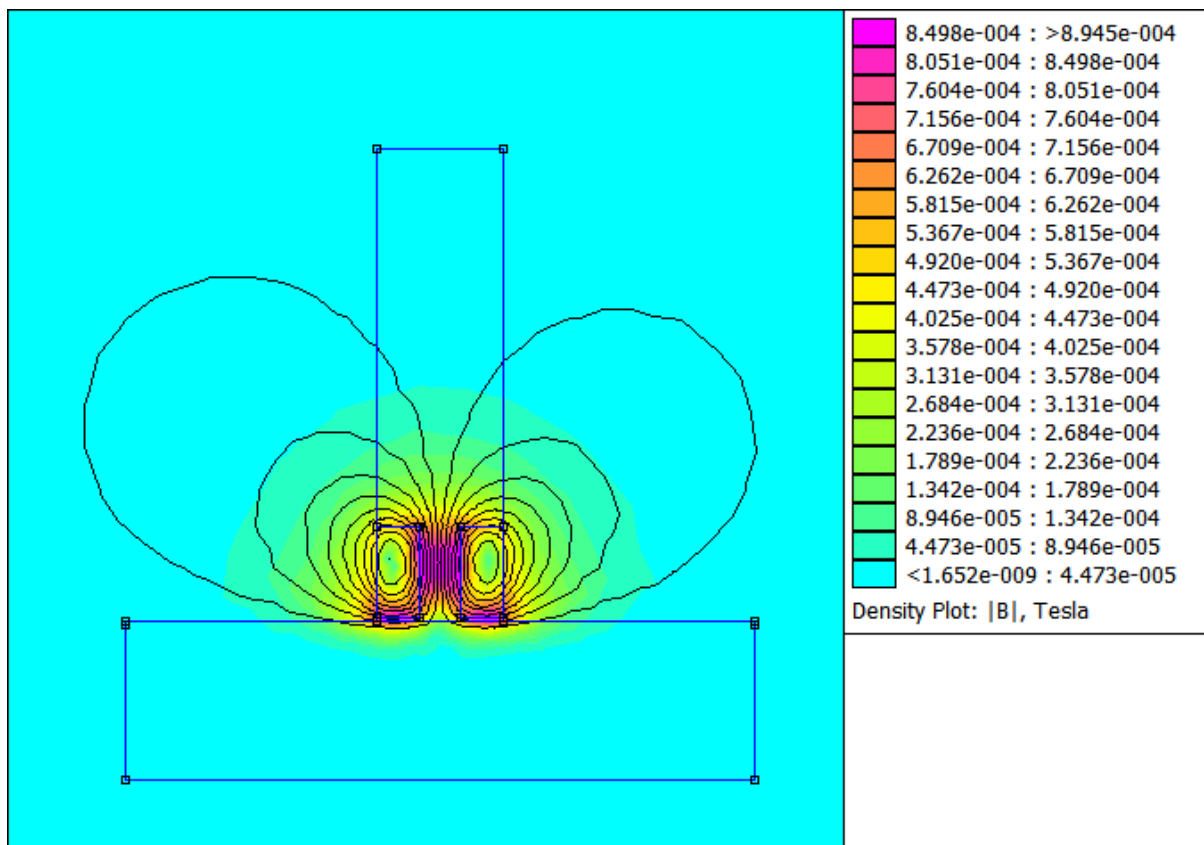


Εικόνα 23: Κατασκευή τριγωνικού πλέγματος στο χώρο. (FEMM)

### 3.5.8. Ανάλυση του προβλήματος

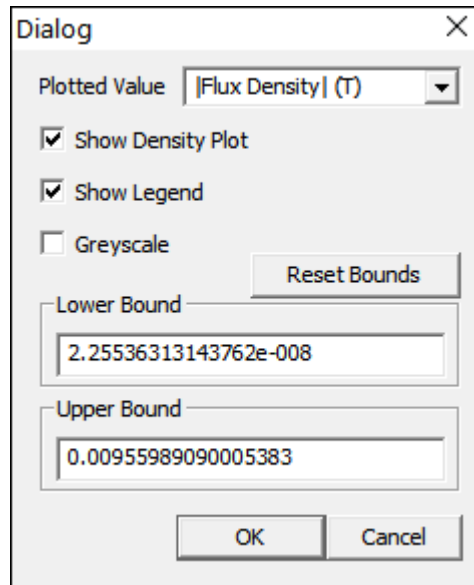
Στη συνέχεια για να επιλυθεί το πρόβλημα, επιλέγουμε από το 'Analysis' την επιλογή 'Analyze' και το πρόγραμμα λύνει τις διαφορικές εξισώσεις του προβλήματός μας με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Για να δούμε τα αποτελέσματα, επιλέγουμε από το 'Analysis' το 'View Results'. Κι έτσι έχουμε την επόμενη εικόνα:



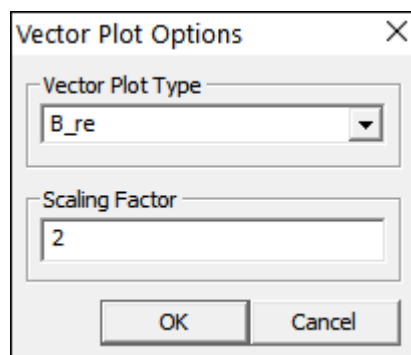
Εικόνα 24: Ανάλυση του προβλήματός. Είναι σχεδιασμένη η πραγματική συνιστώσα του βαθμωτού δυναμικού  $A$  και με χρωματική κλίμακα η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου  $|B|$ . (FEMM)

Όπου είναι σχεδιασμένη η πραγματική συνιστώσα του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού  $\mathbf{A}$ , και με χρωματική κλίμακα η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου  $|B|$  (Tesla), επιλέγοντας από το 'View' το 'Density Plot' και στο μέγεθος που επιθυμούμε να σχεδιαστεί 'Plotted Value: |Flux Density|(T)'. Το παράθυρο αυτό φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



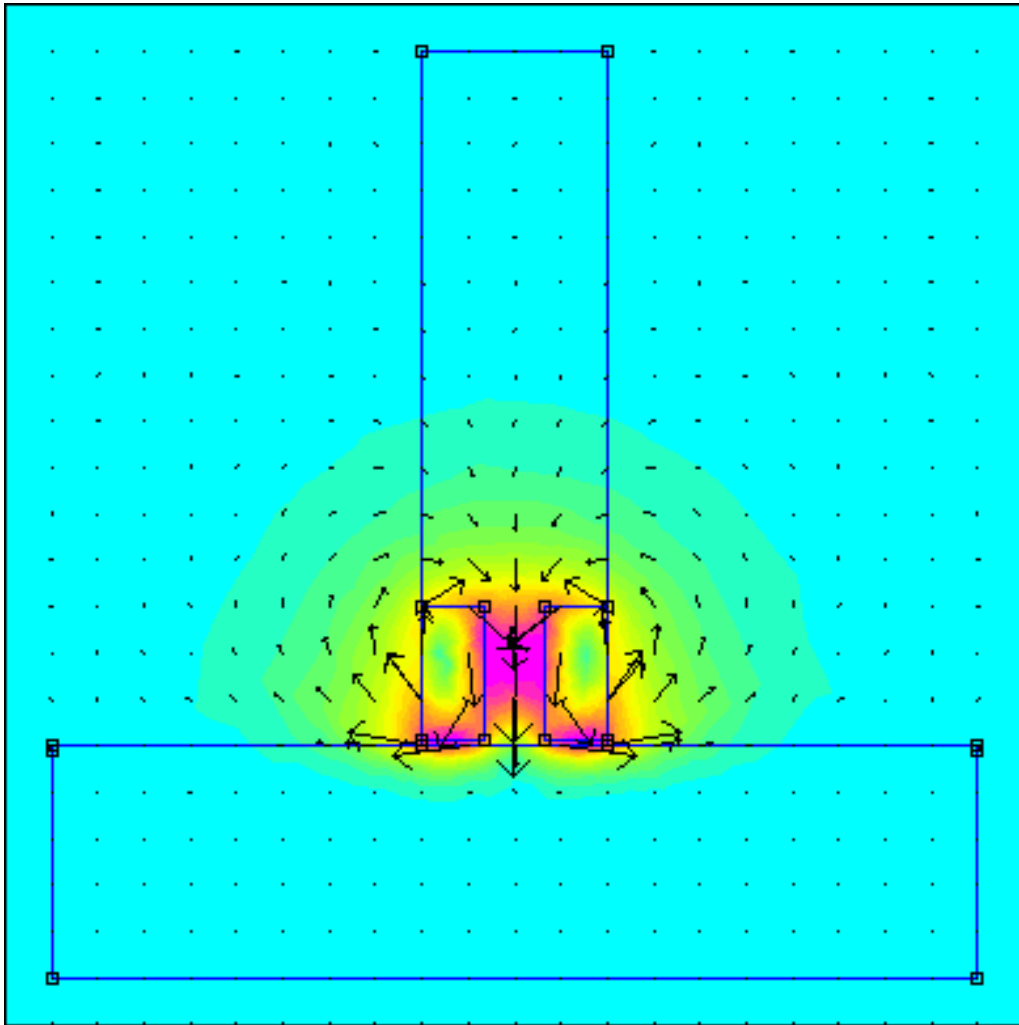
Εικόνα 26: Παράθυρο FEMM κατασκευής χρωματικής κλίμακας, εδώ σχεδιάζεται η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου. (FEMM)

Στη συνέχεια, για να έχουμε καλύτερη εποπτεία του προβλήματος, σχεδιάζουμε τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Στο 'View' επιλέγουμε 'Vector Plot' και εμφανίζεται η παρακάτω εικόνα που στον τύπο του διανύσματος που θέλουμε να σχεδιαστεί, επιλέγουμε την πραγματική συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου B: 'Vector Plot Type: B\_re'. Για να ρυθμίσουμε το μέγεθος των διανυσμάτων που θα σχεδιαστούν, έχουμε: 'Scaling Factor:2'. Έτσι προκύπτει το παράθυρο της επόμενης εικόνας.



Εικόνα 27: Παράθυρο FEMM, εμφάνισης διανυσμάτων, εδώ της πραγματικής συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου. (FEMM)

Και το μαγνητικό πεδίο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

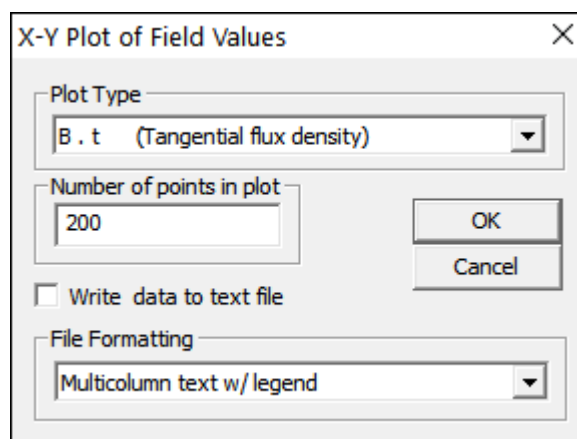


Εικόνα 28: Διανύσματα του μαγνητικού πεδίου. (FEMM)

Φαίνεται ότι το πηνίο, λειτουργεί σαν μαγνήτης εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου.

### 3.5.9.Κατασκευή διαγραμμάτων

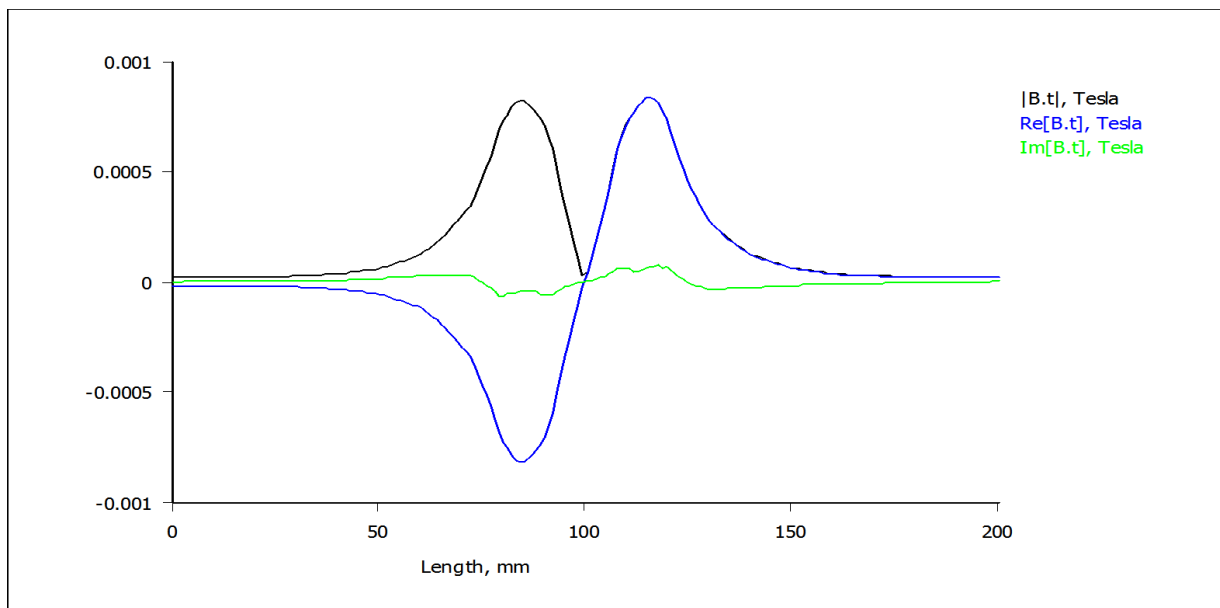
Τα αποτελέσματα της επίλυσης του προβλήματος, θα φανούν με την κατασκευή διαγραμμάτων της οριζόντιας και της κάθετης συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια του αλουμινίου και της πυκνότητας των δινορευμάτων σε απόσταση ενός χιλιοστού από την επιφάνεια του αλουμινίου. Σε αυτό το σημείο θα ενώσουμε τα δύο σημεία δεξιά κι αριστερά της διάταξης μας με το εργαλείο 'Operate segments', κατασκευάζοντας δύο διαφορετικές ευθείες: μία στην επιφάνεια του αλουμινίου και μία 1mm κάτω από την επιφάνειά του. Πάνω σε αυτήν την ευθεία θα επιλέξουμε να χαραχτούν οι γραφικές παραστάσεις  $B_t(x)$ ,  $B_n(x)$  και  $J_{Eddy}(x)$ . Έτσι κλικάρουμε στο 'Plot X-Y' και επιλέγουμε διαδοχικά: 'Plot Type: B , t|, Tangential Flux Density', 'Plot Type: B , n|, Normal Flux Density' και 'Plot Type: J\_eddy, Eddy Current Density'. Στον αριθμό των σημείων που επιθυμούμε να σχεδιαστεί το γράφημα, βάζουμε και στις δύο περιπτώσεις 200: 'Number of points in plot:200'. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το αντίστοιχο παράθυρο για την οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 29: Παράθυρο FEMM, κατασκευής γραφικών παραστάσεων, εδώ της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου. (FEMM)

Οι γραφικές παραστάσεις φαίνονται στην επόμενη σελίδα.

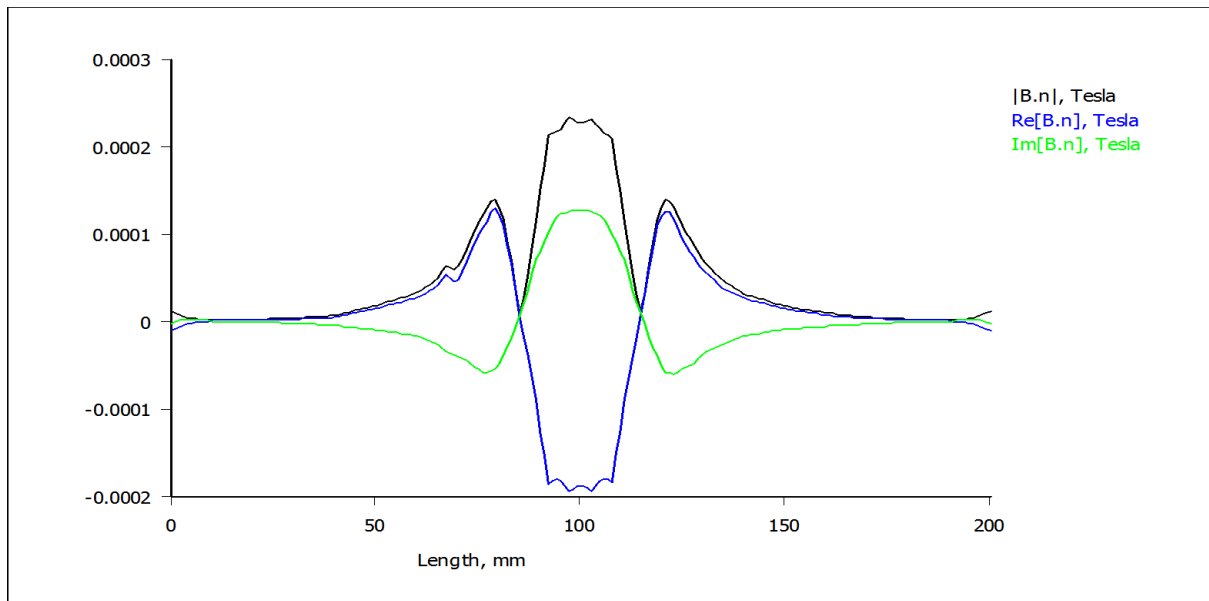
Για την οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου, έχουμε το ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 6: Η οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης, στην επιφάνεια της πλάκας αλουμινίου. (FEMM)

Βλέπουμε ότι σχηματίζονται δύο ισοϋψή μέγιστα, που οφείλονται στο αριστερό και στο δεξιό κομμάτι της κάθετης τομής του πηνίου στην προσομοίωσή μας. Φαίνεται και στην εικόνα 28, ότι στα σημεία αυτά το μαγνητικό πεδίο είναι παράλληλο στο επίπεδο της πλάκας. Ανάμεσά τους υπάρχει ένα ελάχιστο, που βρίσκεται κάτω από το κέντρο του πηνίου, στο σημείο όπου το μαγνητικό πεδίο γίνεται κάθετο στο επίπεδο της πλάκας. Η καμπύλη αυτή είναι συμμετρική ως προς το κέντρο του πηνίου, καθώς συμμετρική είναι και η διάταξή μας.

Για την κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου, έχουμε το επόμενο διάγραμμα:

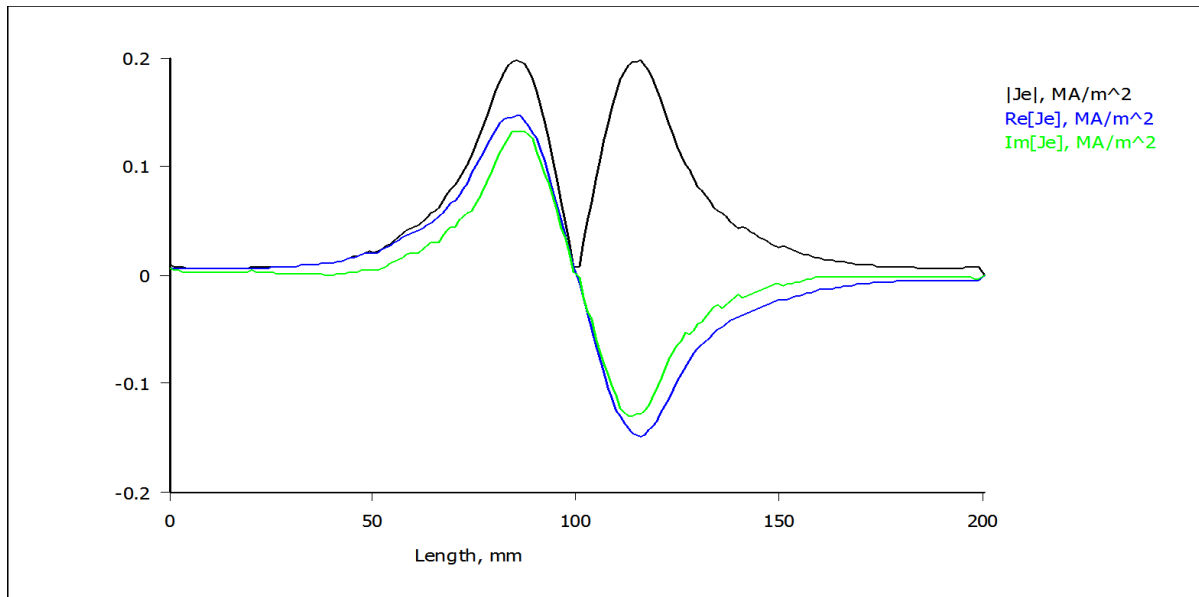


Διάγραμμα 7: Η κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης στην επιφάνεια του αλουμινίου. (FEMM)

Βλέπουμε ότι η κάθετη συνιστώσα παρουσιάζει ένα ολικό μέγιστο κάτω από το κέντρο του πηνίου, όπου το μαγνητικό πεδίο έχει μόνο κάθετη συνιστώσα, όπως φάνηκε και στην εικόνα 28. Ενώ τα δύο ελάχιστα στα σημεία κάτω από τις κάθετες τομές του μαγνητικού πεδίου, οφείλονται στο γεγονός ότι εκεί το μαγνητικό πεδίο έχει μόνο οριζόντια συνιστώσα. Τα μικρότερα ισοϋψή μέγιστα που εμφανίζονται είναι αποτέλεσμα της μεγιστοποίησης της κάθετης συνιστώσας λίγο έξω από το πηνίο, που φαίνεται και στην εικόνα 28. Και αυτή η καμπύλη παρουσιάζει συμμετρία.



Για την πυκνότητα των δινορευμάτων, έχουμε:



Διάγραμμα 8: Η Πυκνότητα των δινορευμάτων συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης, 1mm από την επιφάνεια του αλουμινίου. (FEMM)

Η καμπύλη της πυκνότητας των δινορευμάτων (με το μαύρο), εμφανίζει συμμετρία με δύο διαδοχικά μέγιστα κάτω από τα τμήματα του πηνίου και ένα ελάχιστο στο κέντρο του.

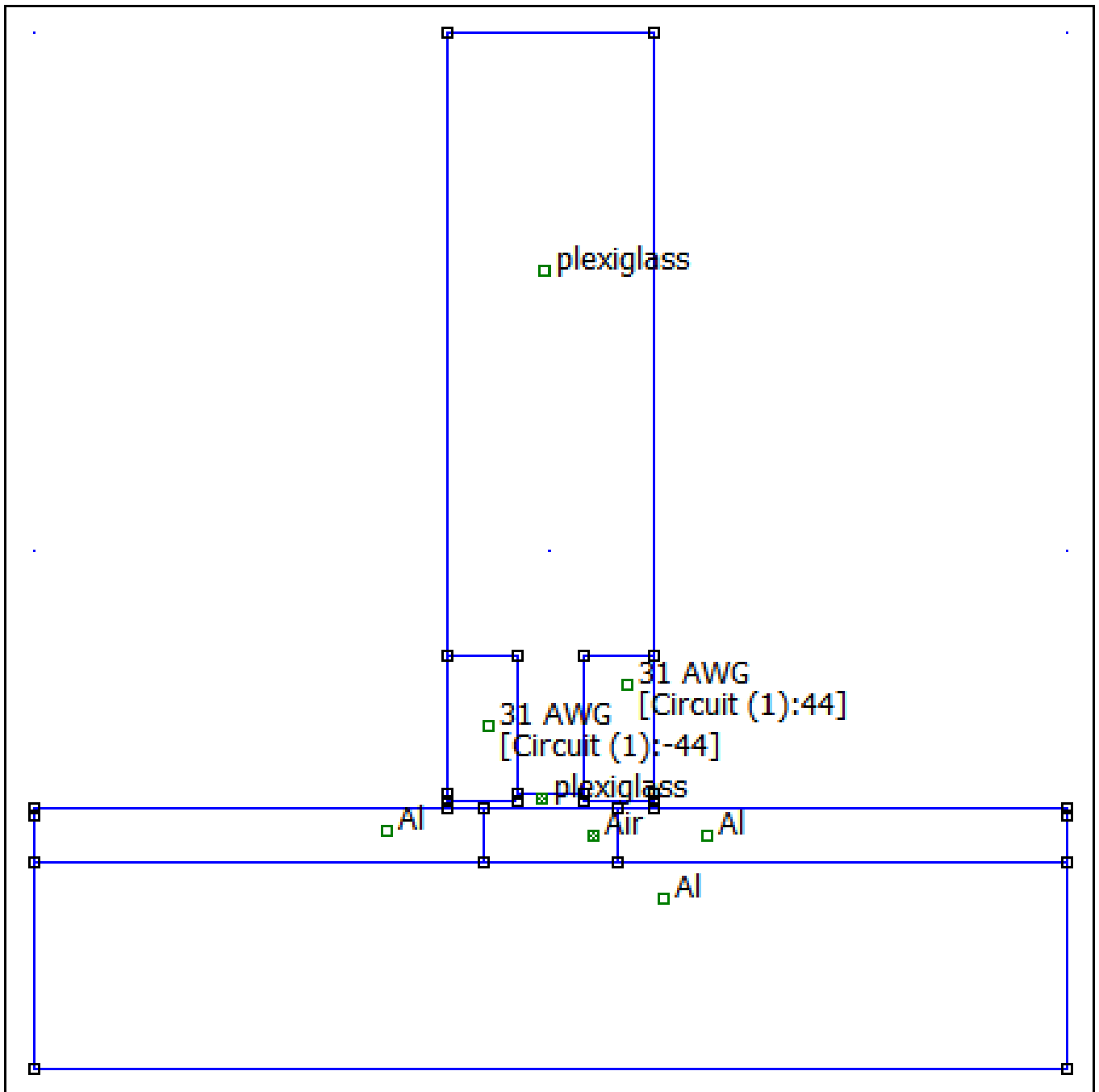
### 3.5.10. Εισαγωγή ρωγμών στην προσομοίωση

Σε αυτό το κομμάτι θα προσομοιώσουμε την περίπτωση ύπαρξης ρωγμών στο αλουμίνιο και στη συνέχεια θα χαράξουμε τις αντίστοιχες καμπύλες της πυκνότητας του μαγνητικού πεδίου και των δινορευμάτων. Θα βάλουμε στην παραπάνω διάταξη τέσσερις ρωγμές πλάτους 26mm και βάθους 10mm, με την πρώτη να είναι στο κέντρο της πλάκας του αλουμινίου, ακριβώς κάτω από το πηνίο και τις τρεις επόμενες κατά 5mm αριστερά. Με αυτόν τον τρόπο προσομοιάσουμε τη μετατόπιση του πηνίου προς τα δεξιά κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Για να επιτευχθεί αυτό, στο κομμάτι αυτό της προσομοίωσης θα προσθέσουμε στη διάταξη της προηγούμενης παραγράφου μια ρωγμή στο κέντρο της πλάκας του αλουμινίου. Έτσι προσθέτουμε τα σημεία: (87, 50), (113, 50), (87, 40), (113, 40) με το εργαλείο 'Operate on nodes'. Στη συνέχεια ενώνουμε τα σημεία, ώστε να κατασκευαστεί ένα ορθογώνιο σχήματος χωρίο στην επιφάνεια της πλάκας αλουμινίου. Καθώς το χωρίο αυτό αναπαριστά τη ρωγμή, στο εσωτερικό του θα επιλέξουμε να έχει αέρα, με την ρύθμιση 'Operate on block labels'. Στο παράθυρο αυτό, θα διορθώσουμε ακόμα το μέγεθος των χωρίων που θα τμηθεί το κομμάτι αυτό, κατά την επίλυση του προβλήματος. Αυτή η ρύθμιση χρειάζεται σε αυτό το βήμα, καθώς θέλουμε να χωριστεί σε περισσότερα τμήματα η ρωγμή, ώστε να έχουμε ακριβέστερη λύση. Έτσι θα ρυθμίσουμε: 'Mesh size:0.05'.

Για να λυθεί το πρόβλημα με μεγαλύτερη ακρίβεια, θα τοποθετήσουμε ένα χωρίο μικρών διαστάσεων ακριβώς πάνω από τη ρωγμή, μέσα στο Plexiglas και τον αέρα, στο οποίο θα επιλέξουμε να έχει Plexiglas, ή αέρα (ανάλογα με τη θέση της ρωγμής) και να χωριστεί σε περισσότερα χωρία απ' ό,τι τα υπόλοιπα τμήματα του προβλήματος. Έτσι στην επιλογή 'Mesh size' θα βάλουμε την τιμή 0,05. Ένα αντίστοιχο χωρίο θα δημιουργηθεί και μέσα στο αλουμίνιο, για τον ίδιο σκοπό. Το χωρίο αυτό θα βρίσκεται κοντά στην επιφάνειά του και σε βάθος ίσο με το βάθος της ρωγμής. Το Mesh size θα ρυθμιστεί στην τιμή 1. Ενώ μέσα στη ρωγμή, θα δώσουμε την τιμή 'Mesh size: 0.05'.

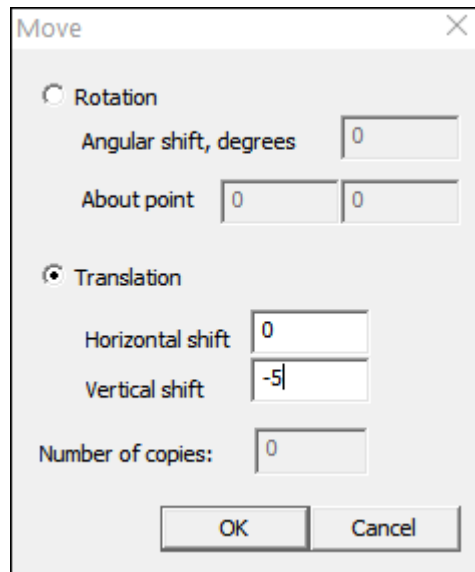
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η ρωγμή και το χωρία που περιγράψαμε.



Εικόνα 30: Προσομοίωση διάταξης με ρωγμή πλάτους 26mm και βάθους 10mm από την επιφάνεια της πλάκας του αλουμινίου.

Στη συνέχεια μεταφέρουμε τη ρωγμή αυτή κατά 5mm, 10mm και 15mm αριστερά. Η διαδικασία αυτή, μπορεί να επιταχυνθεί με την εξής διαδικασία: έχοντας τη λειτουργία στα σημεία: 'Operate on nodes', επιλέγουμε τα οχτώ σημεία που ορίζουν τη ρωγμή και το χωρίο, με το εργαλείο: 'Select a group of entities using the mouse' και τα μεταφέρουμε 5mm αριστερά με την επιλογή 'Move/Rotate selected objects', επιλέγουμε το 'Translation' και βάζουμε στην οριζόντια μετατόπιση την τιμή -5: 'Vertical Shift:-5',

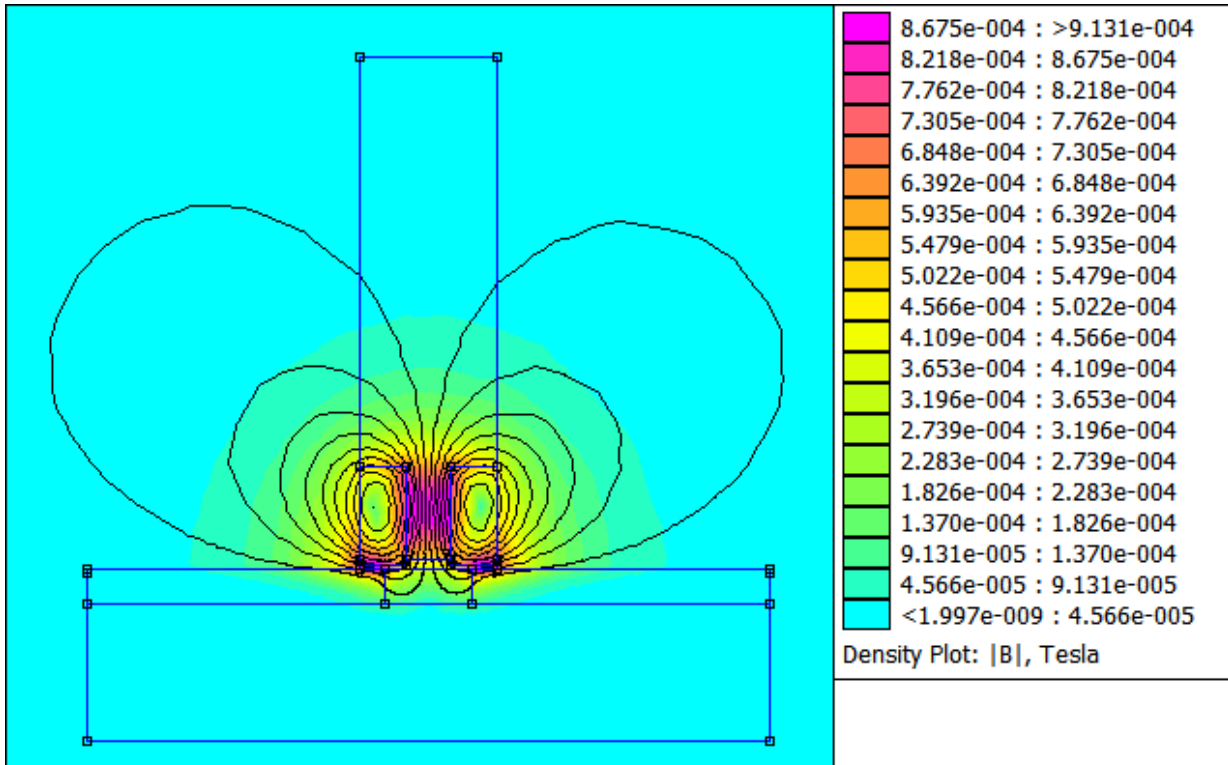
το μείον ορίζει την προς τα αριστερά κατεύθυνση της μετατόπισης. Έτσι έχουμε το ακόλουθο παράθυρο:



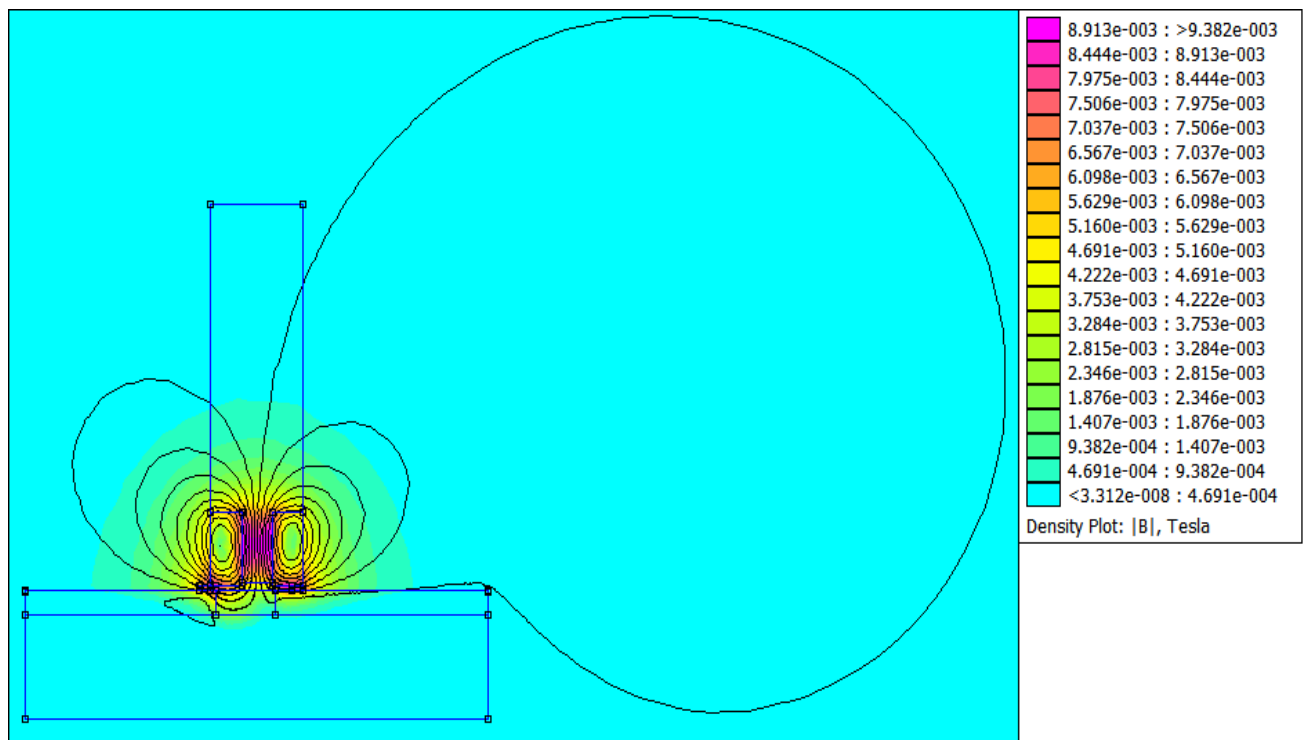
Εικόνα 31: Παράθυρο FEMM, μετακίνησης και περιστροφής αντικειμένων. (FEMM)

Στη συνέχεια επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία, εισάγουμε συνοριακές συνθήκες Dirichlet, όμοιες με πριν, διαιρούμε το χώρο σε τμήματα και λύνουμε το πρόβλημα.

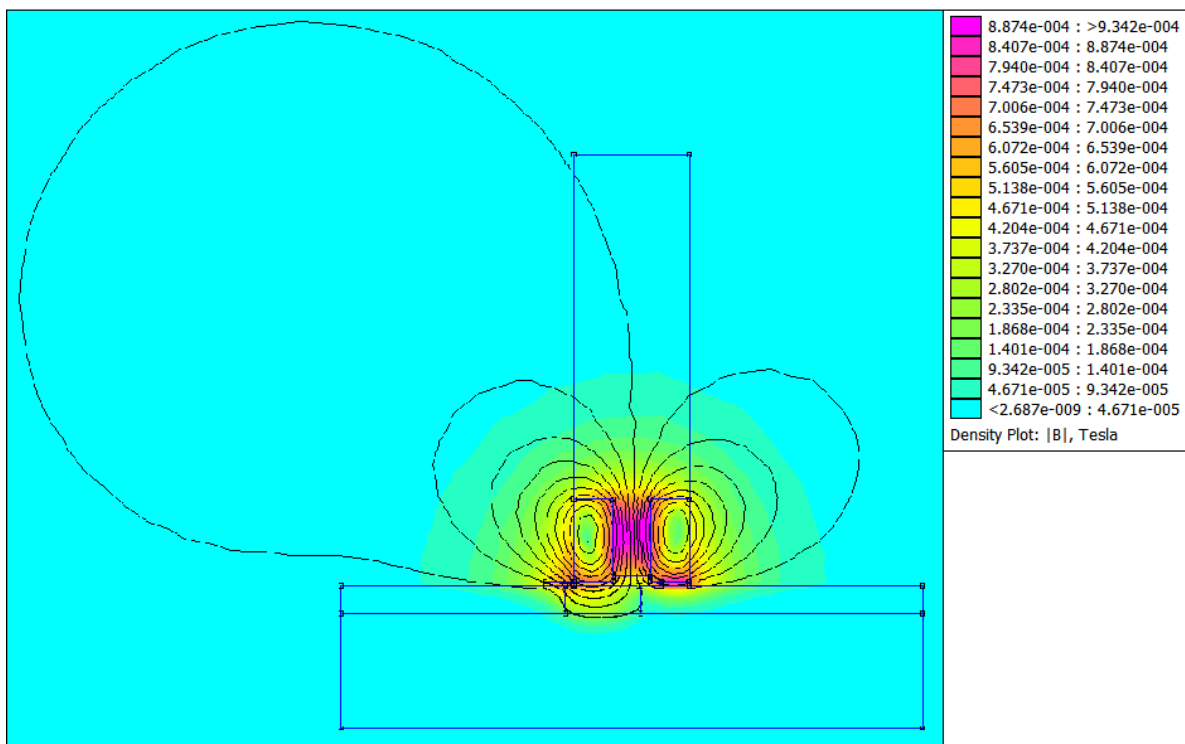
Έτσι, προκύπτουν οι ακόλουθες εικόνες για την πραγματική συνιστώσα του διανυσματικού δυναμικού  $A$ , καθώς και η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου  $|B|$ , σε χρωματική κλίμακα, για τις διαφορετικές θέσεις της ρωγμής, που φαίνονται στις επόμενες σελίδες.



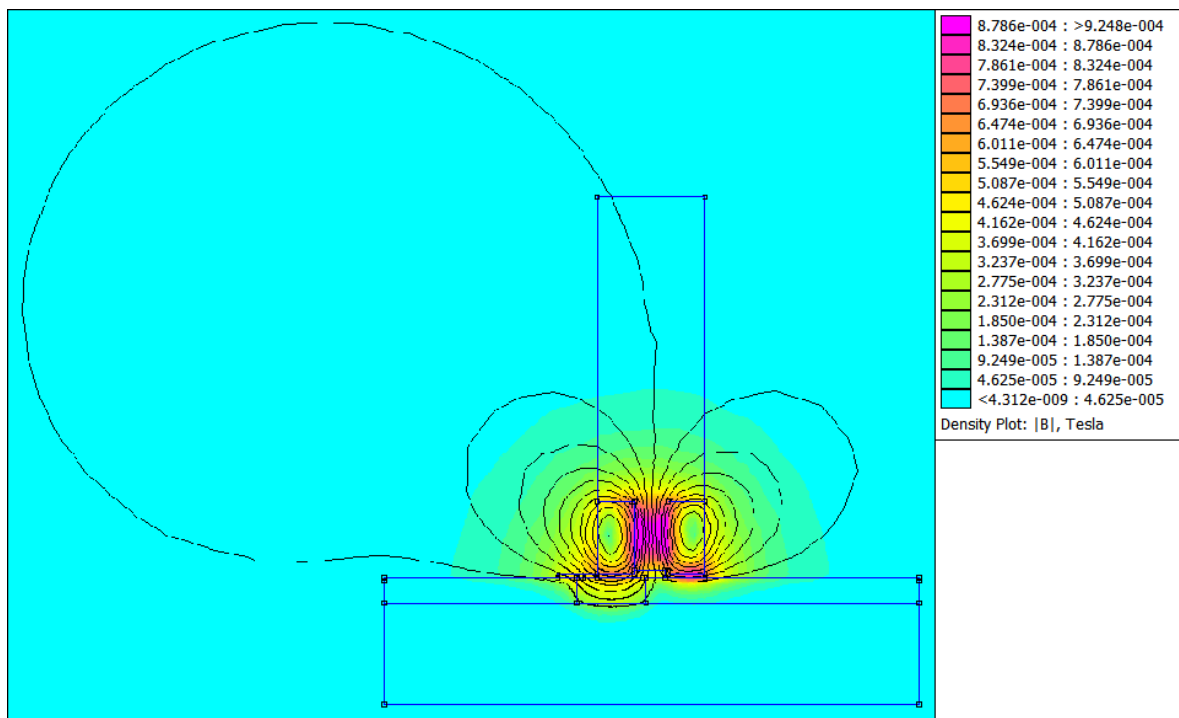
Εικόνα 32: Ανάλυση του προβλήματος, για ρωγμή στο κέντρο της πλάκας αλουμινίου. Είναι σχεδιασμένη η πραγματική συνιστώσα του διανυσματικού δυναμικού  $A$  και με χρωματική κλίμακα η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου  $|B|$ . (FEMM)



Εικόνα 33: Ανάλυση του προβλήματος, για ρωγμή 5mm αριστερά από το κέντρο της πλάκας αλουμινίου. Είναι σχεδιασμένη η πραγματική συνιστώσα του διανυσματικού δυναμικού  $A$  και με χρωματική κλίμακα η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου  $|B|$ . (FEMM)



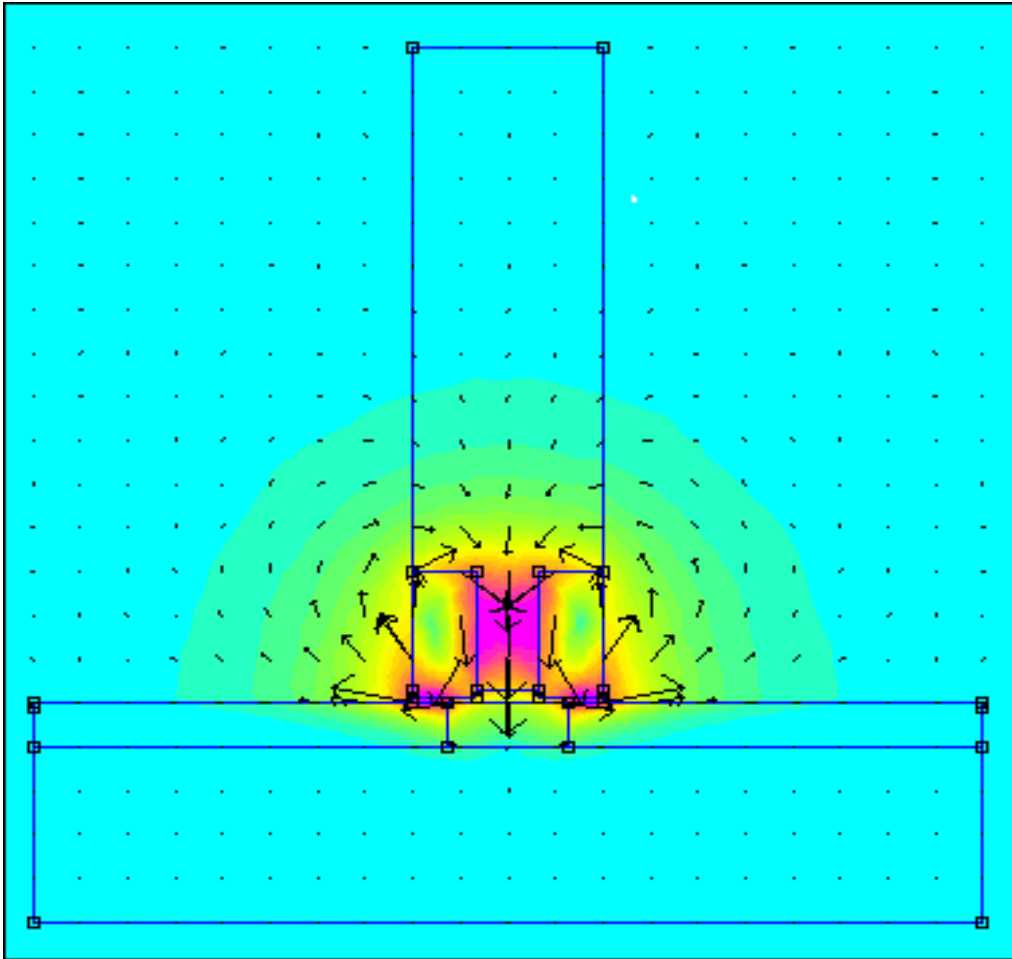
Εικόνα 34: Ανάλυση του προβλήματος, για ρωγή 10mm αριστερά από το κέντρο της πλάκας αλουμινίου. Είναι σχεδιασμένη η πραγματική συνιστώσα του διανυσματικού δυναμικού  $A$  και με χρωματική κλίμακα η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου  $|B|$ . (FEMM)



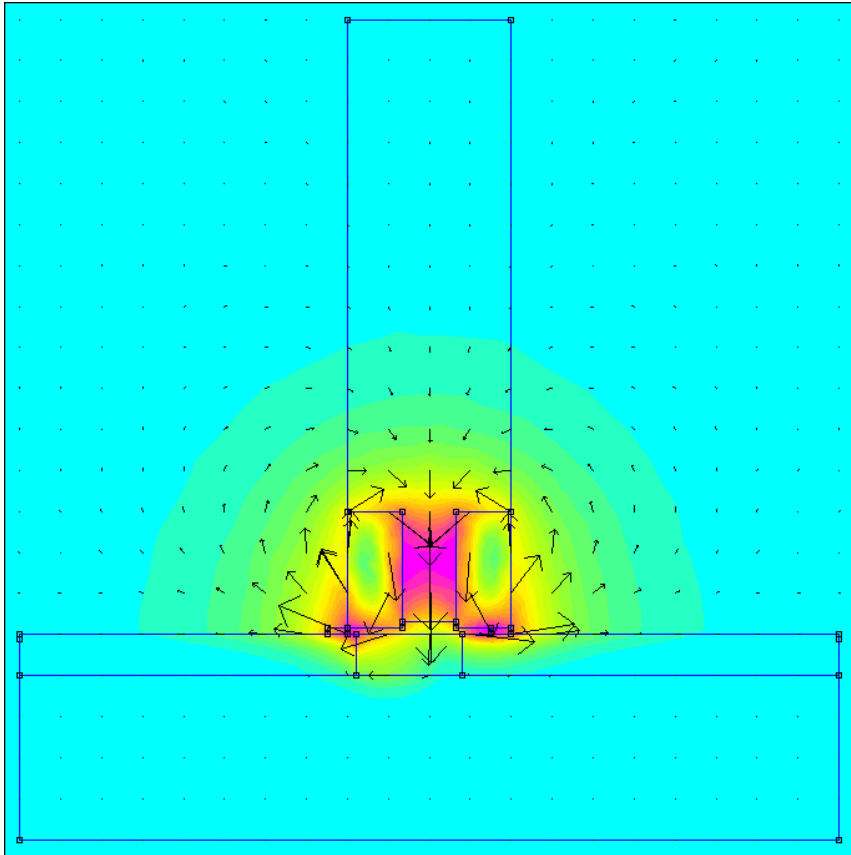
Εικόνα 35: Ανάλυση του προβλήματος, για ρωγή 15mm αριστερά από το κέντρο της πλάκας αλουμινίου. Είναι σχεδιασμένη η πραγματική συνιστώσα του διανυσματικού δυναμικού  $A$  και με χρωματική κλίμακα η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου  $|B|$ . (FEMM)

Η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου χάνει τη συμμετρία της, καθώς το μαγνητικό πεδίο εισέρχεται βαθύτερα στο υλικό μέσω της ρωγμής. Ως αποτέλεσμα αυτού, παρατηρούμε ότι το διανυσματικό δυναμικό  $A$  καμπυλώνεται στο τμήμα της ρωγμής.

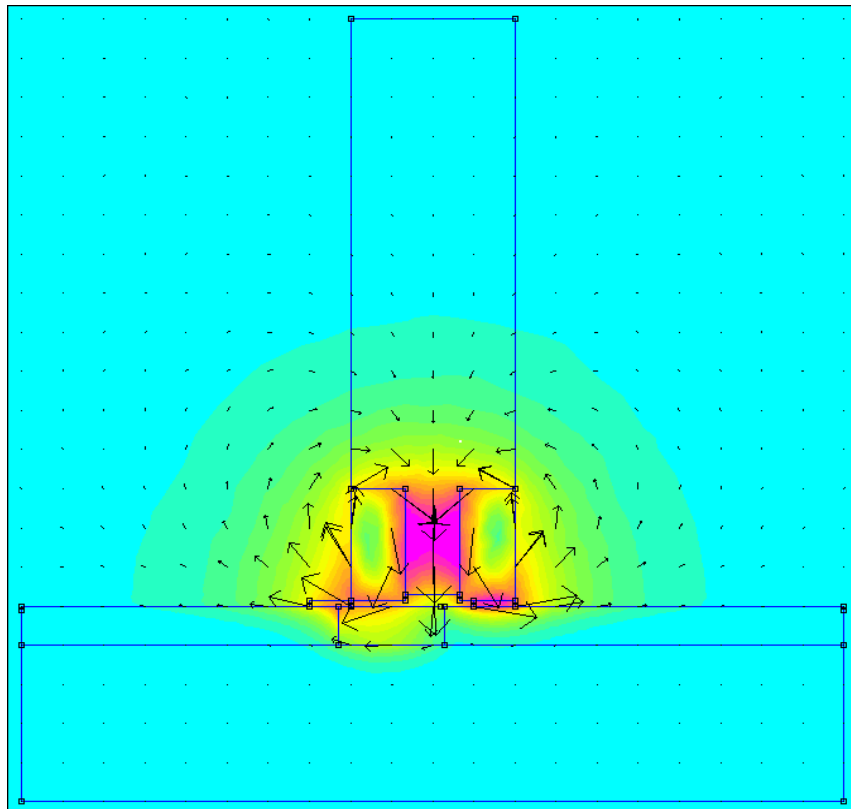
Στις επόμενες εικόνες φαίνονται και τα διανύσματα του μαγνητικού πεδίου, στις διάφορες περιπτώσεις των ρωγμών..



Εικόνα 36: Διανύσματα του μαγνητικού πεδίου, για τη ρωγμή στο κέντρο της πλάκας του αλουμινίου. (FEMM)

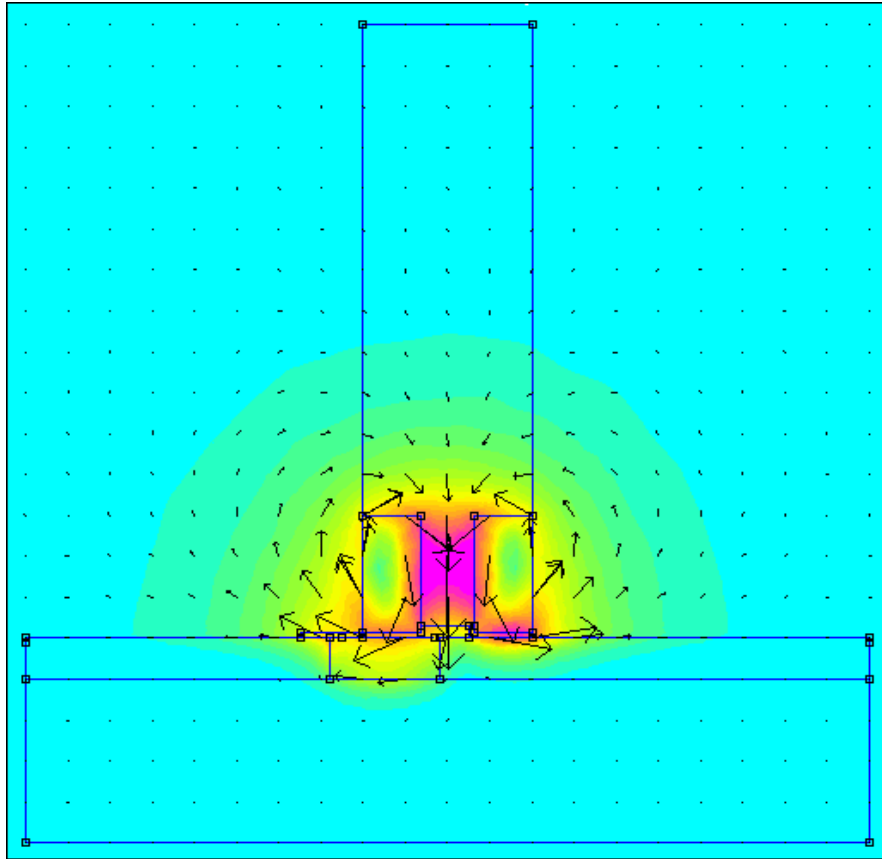


Εικόνα 37: Διανύσματα του μαγνητικού πεδίου, για τη ρωγμή 5mm αριστερά από το κέντρο της πλάκας του αλουμινίου. (FEMM)



Εικόνα 38: Διανύσματα του μαγνητικού πεδίου, για τη ρωγμή 10mm αριστερά από το κέντρο της πλάκας του αλουμινίου. (FEMM)



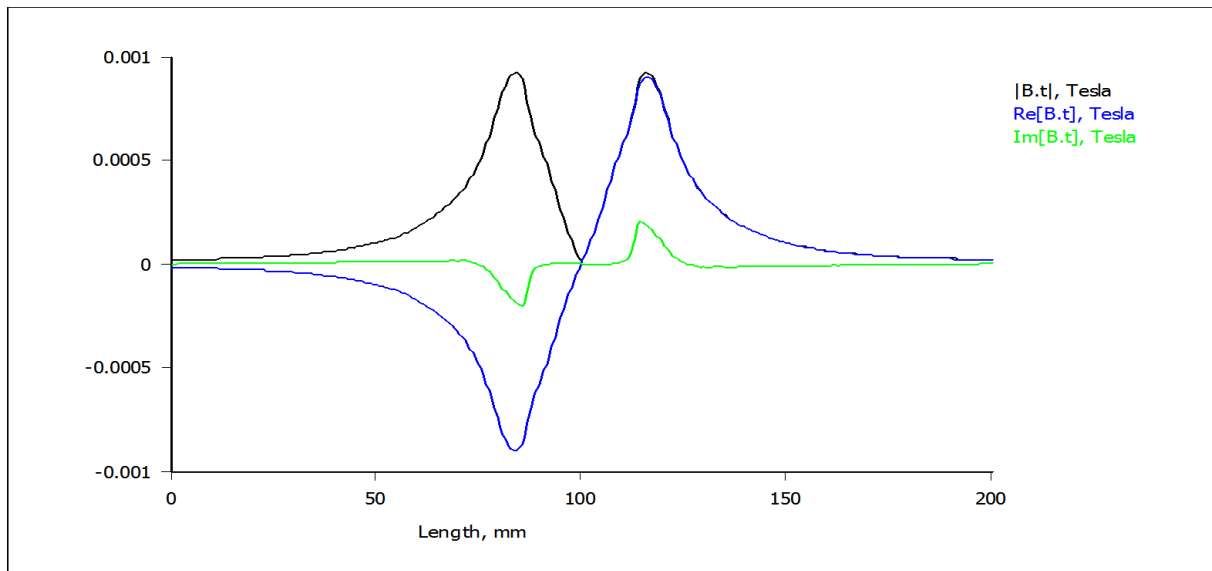


Εικόνα 39: Διανύσματα του μαγνητικού πεδίου, για τη ρωγμή 15mm αριστερά από το κέντρο της πλάκας του αλουμινίου. (FEMM)

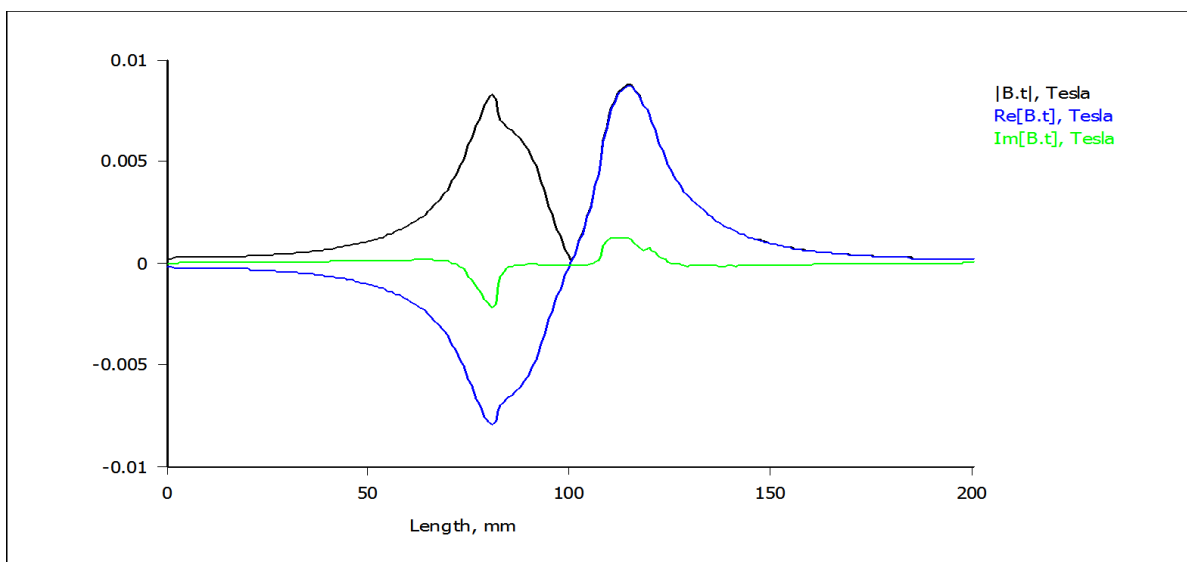
Παρατηρούμε στις εικόνες τη μεταβολή των διανυσμάτων του μαγνητικού πεδίου καθώς αυτό εισέρχεται στη ρωγμή. Τις μεταβολές αυτές θα τις παρατηρήσουμε και στα διαγράμματα της κάθετης και οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου που βρίσκονται παρακάτω, για τις τέσσερις περιπτώσεις των ρωγμών.

Στη συνέχεια, με τη διαδικασία που αναφέραμε πριν κατασκευάζουμε τα διαγράμματα  $B_t(x)$ ,  $B_n(x)$  και  $J_{Eddy}(x)$ .

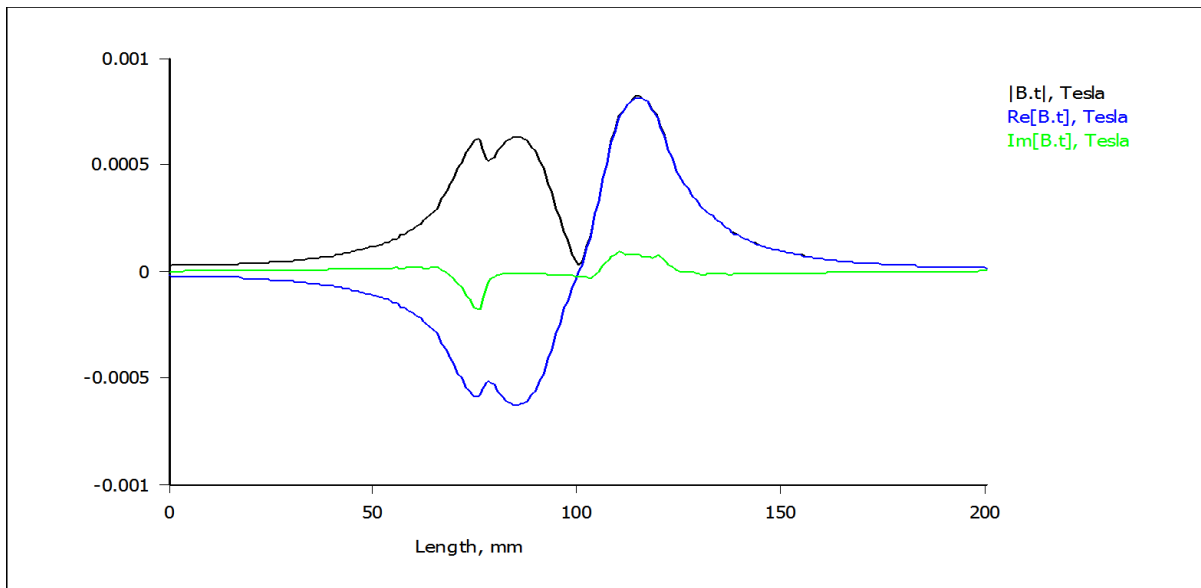
Για την οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου, έχουμε:



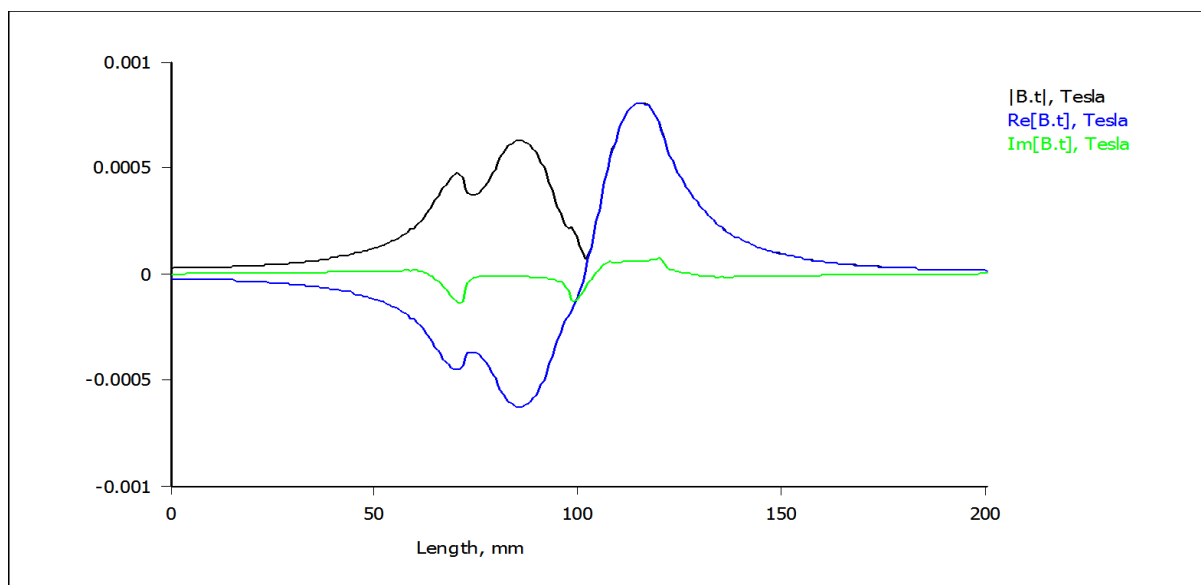
Διάγραμμα 9: Η οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης, για τη ρωγμή που βρίσκεται στο κέντρο της πλάκας αλουμινίου, στην επιφάνειά της. (FEMM)



Διάγραμμα 10: Η οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης, για τη ρωγμή που βρίσκεται 5mm αριστερά από το κέντρο της πλάκας αλουμινίου, στην επιφάνειά της. (FEMM)



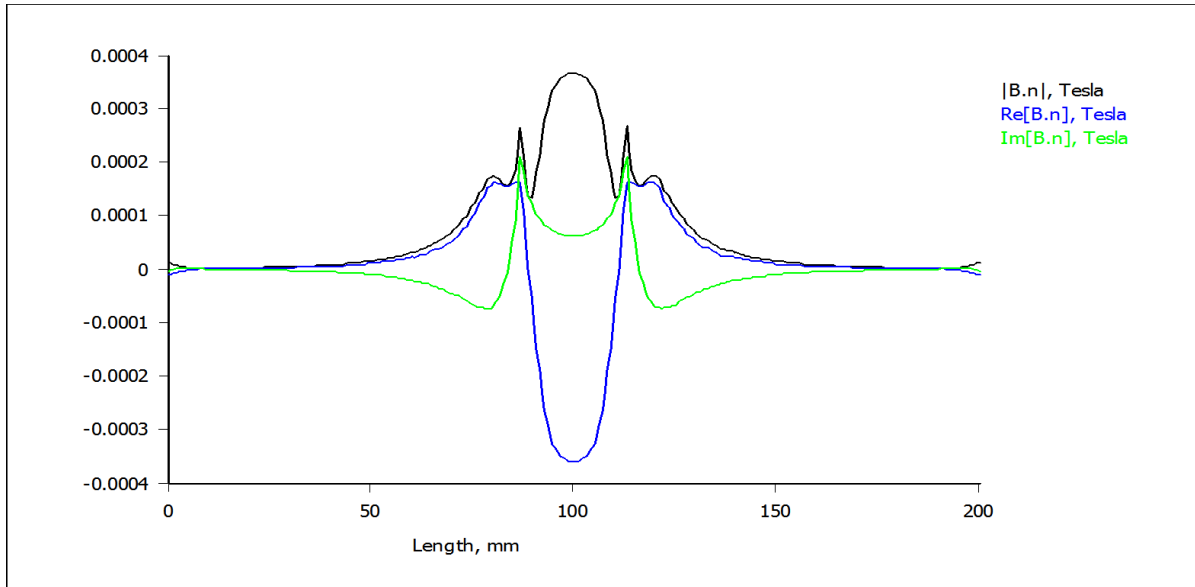
Διάγραμμα 11: Η οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης, για τη ρωγμή που βρίσκεται 10mm αριστερά από το κέντρο της πλάκας αλουμινίου, στην επιφάνειά της. (FEMM)



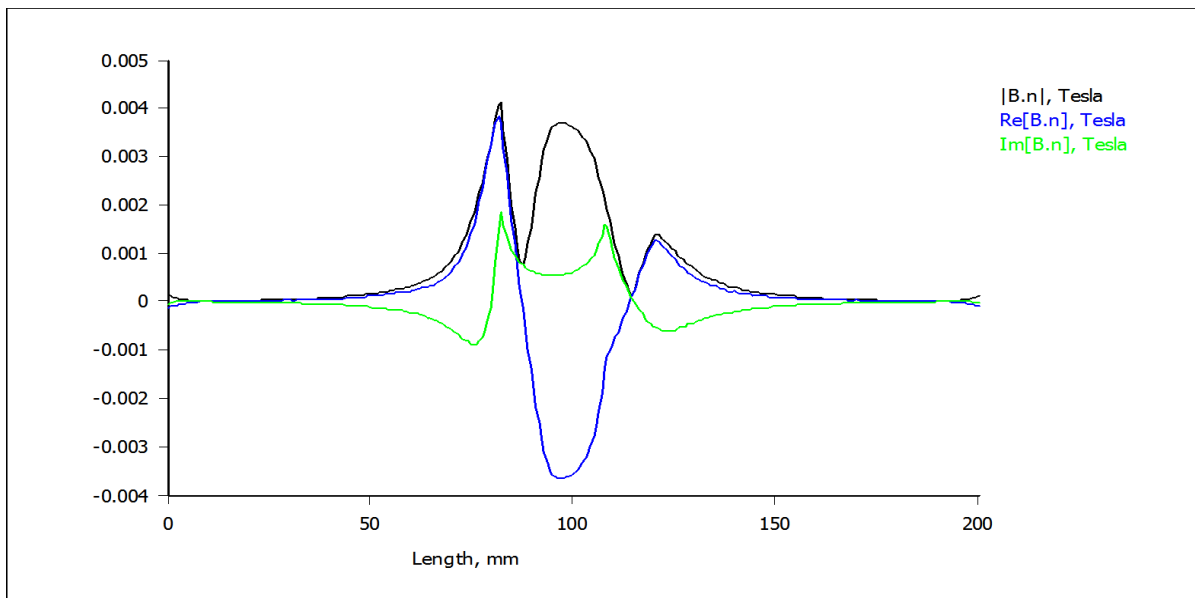
Διάγραμμα 12: Η οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης, για τη ρωγμή που βρίσκεται 15mm αριστερά από το κέντρο της πλάκας αλουμινίου, στην επιφάνειά της. (FEMM)

Παρατηρούμε ότι όσο η ρωγμή μετακινείται αριστερά του κέντρου το αριστερό μέγιστο της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου παρουσιάζει ανωμαλία και μειώνεται η τιμή του, σαν συνέπεια αυτού η συμμετρία της καμπύλης παύει. Η μεταβολή αυτή φαινόταν κι από τις εικόνες του διανυσματικού δυναμικού στα παραπάνω σχήματα.

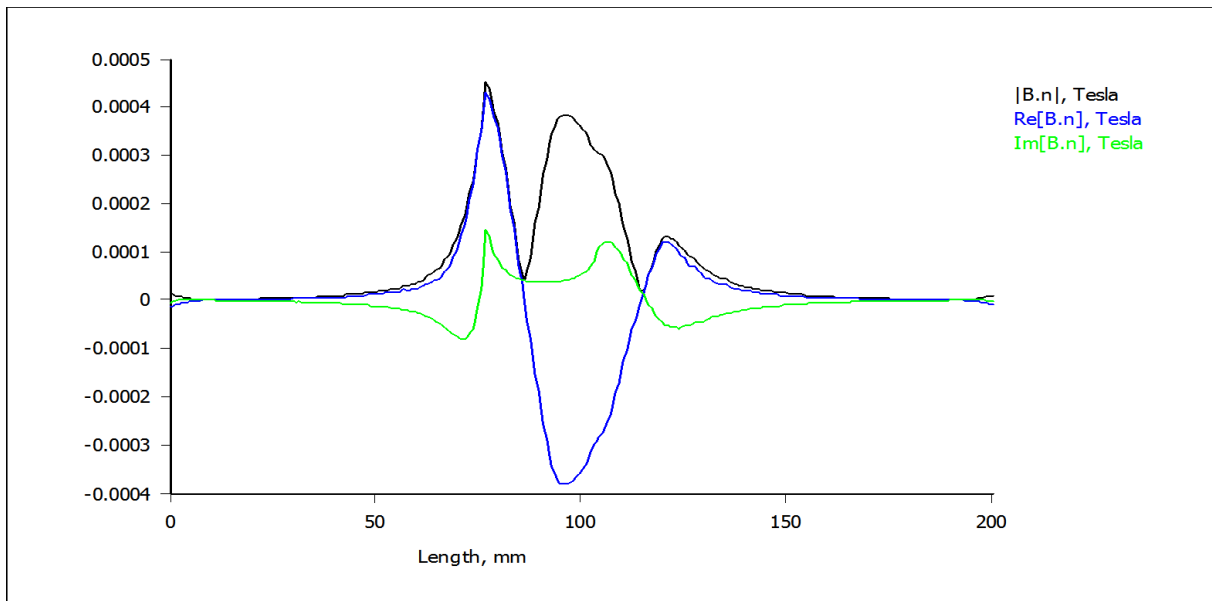
Για την κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου, έχουμε:



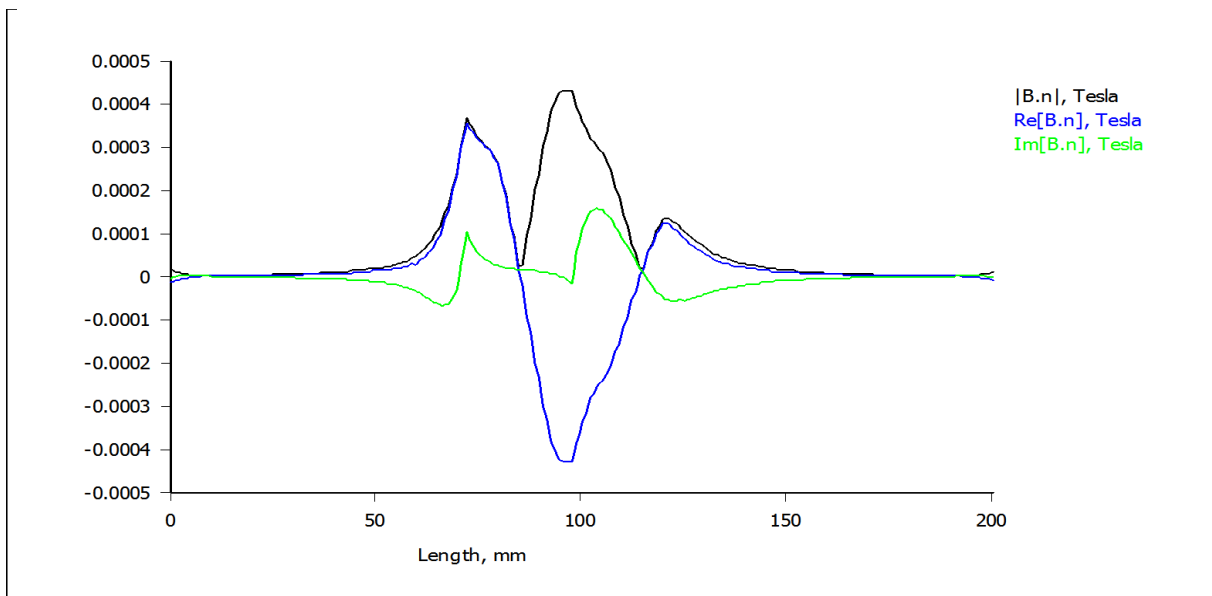
Διάγραμμα 13: Η κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης, για τη ρωγμή στο κέντρο της πλάκας αλουμινίου, στην επιφάνειά της. (FEMM)



Διάγραμμα 14: Η κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης, για τη ρωγμή 5mm αριστερά από το κέντρο της πλάκας αλουμινίου, στην επιφάνειά της. (FEMM)



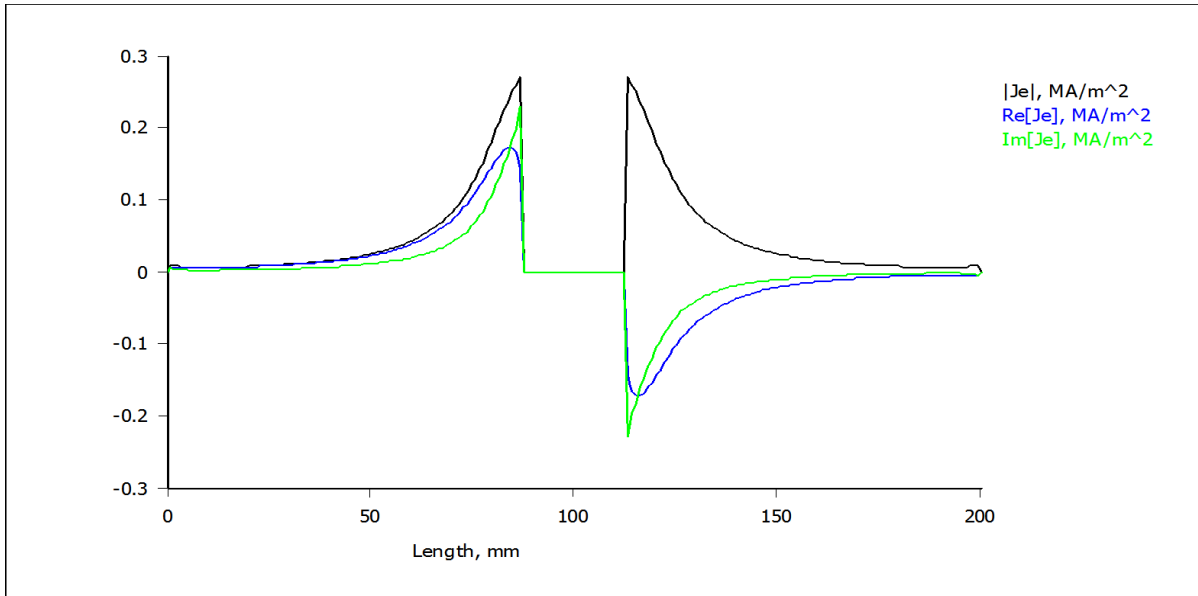
Διάγραμμα 15: Η κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης, για τη ρωγμή 10mm αριστερά από στο κέντρο της πλάκας αλουμινίου, στην επιφάνειά της. (FEMM)



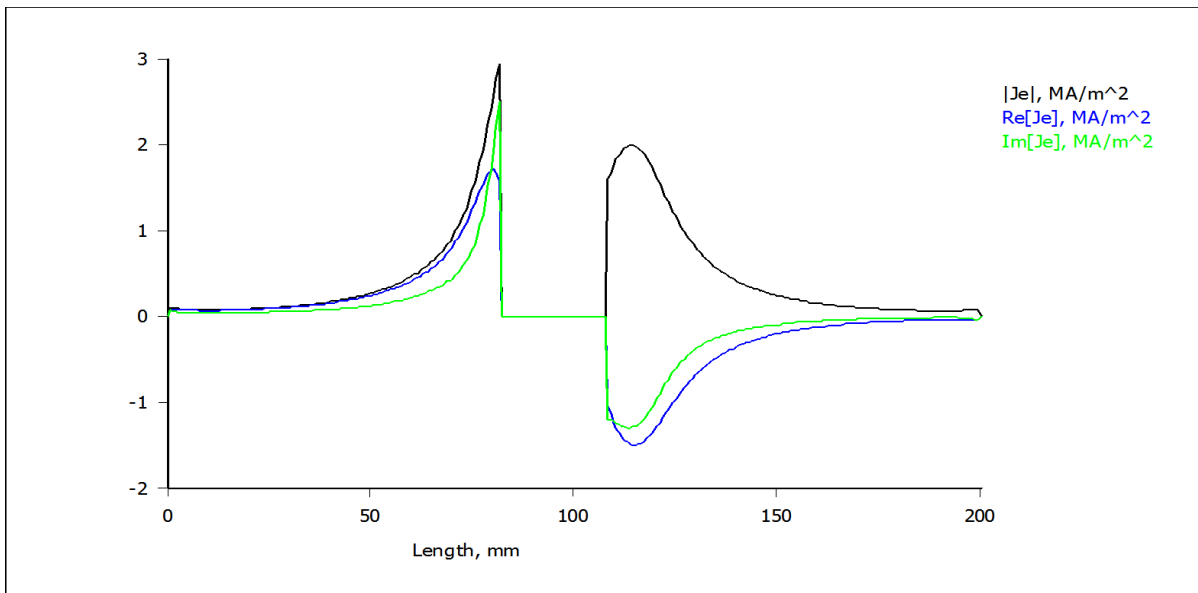
Διάγραμμα 16: Η κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης, για τη ρωγμή 15mm αριστερά από το κέντρο της πλάκας αλουμινίου, στην επιφάνειά της. (FEMM)

Όπως και στην περίπτωση της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου, έτσι και η κάθετη συνιστώσα παρουσιάζει ανωμαλία στο αριστερό τμήμα της, καθώς η ρωγμή μετατοπίζεται προς τα δεξιά του πηνίου. Το αριστερό τοπικό μέγιστο, καθώς αυξάνεται η κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου, όπως φαίνεται στην εικόνα των διανυσμάτων του μαγνητικού πεδίου.

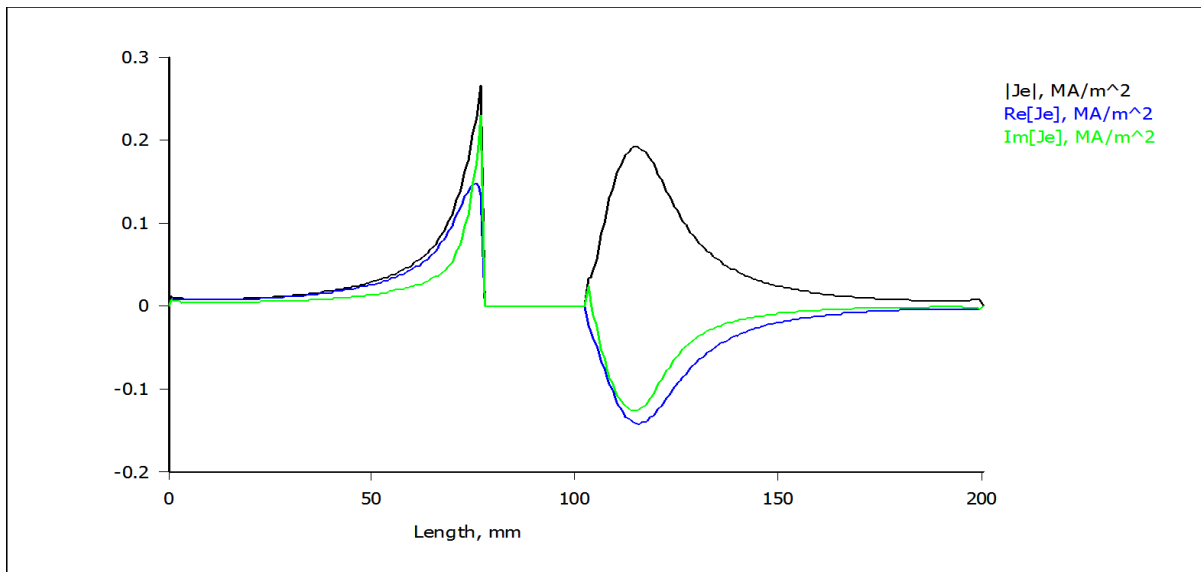
Για την περίπτωση των δινορευμάτων, έχουμε τις επόμενες γραφικές παραστάσεις σε απόσταση 1mm από την επιφάνεια του αλουμινίου.



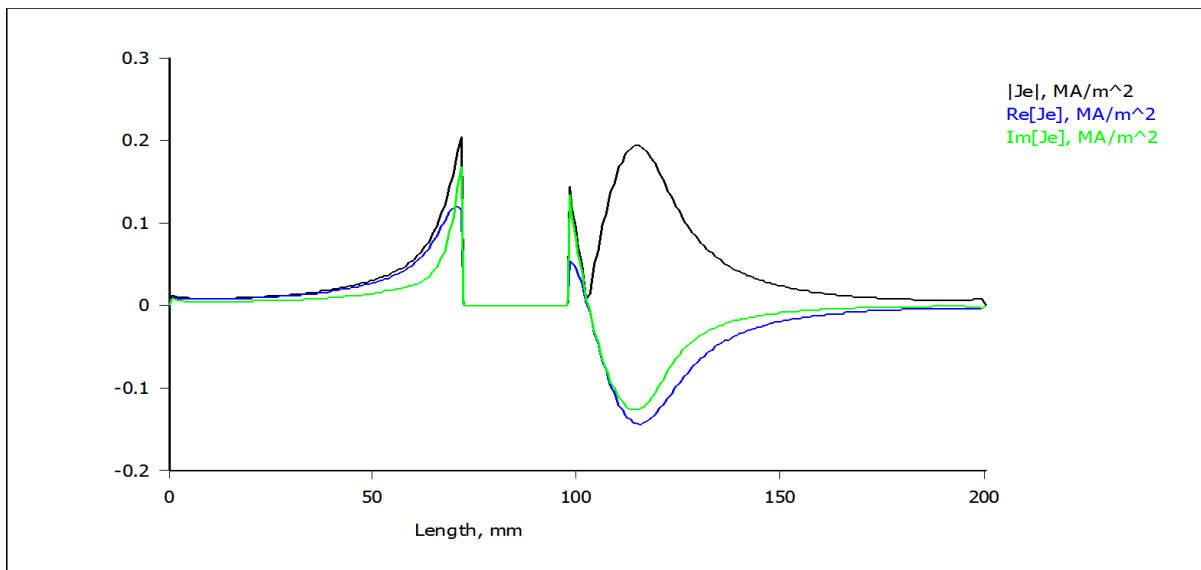
Διάγραμμα 17: Η Πυκνότητα των δινορευμάτων συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης για τη ρωγμή στο κέντρο της πλάκας αλουμινίου, σε βάθος 1mm από την επιφάνειά της. (FEMM)



Διάγραμμα 18: Η Πυκνότητα των δινορευμάτων συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης για τη ρωγμή 5mm αριστερά από το κέντρο της πλάκας αλουμινίου, σε βάθος 1mm από την επιφάνειά της. (FEMM)



Διάγραμμα 19: Η Πυκνότητα των δινορευμάτων συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης για τη ρωγή 10mm αριστερά από το κέντρο της πλάκας αλουμινίου, σε βάθος 1mm από την επιφάνειά της. (FEMM)



Διάγραμμα 20: Η Πυκνότητα των δινορευμάτων συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης για τη ρωγή 15mm αριστερά από το κέντρο της πλάκας αλουμινίου, σε βάθος 1mm από την επιφάνειά της. (FEMM)

Παρατηρούμε ότι στο τμήμα που υπάρχει η ρωγή η πυκνότητα των δινορευμάτων μηδενίζεται απότομα, με το τμήμα μηδενισμού της να μετακινείται ανάλογα με τη θέση της ρωγής, προς τα δεξιά. Αριστερά από το τμήμα μηδενισμού της καμπύλης εμφανίζονται μέγιστα που διαφέρουν μεταξύ τους, γεγονός που οφείλεται στη θέση της κάθε ρωγής σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί το πηνίο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### LabView

#### 4.1. Εισαγωγή στο LabView

Το LabView (Laboratory Instrument Engineering Workbench) είναι ένα ισχυρό και ευέλικτο περιβάλλον προγραμματισμού που έχει την ικανότητα συλλογής, επεξεργασίας, προσομοίωσης, ανάλυσης και παρουσίασης μετρήσεων, καθώς και χρήσης και ελέγχου επιστημονικών οργάνων. Παράγεται από την εταιρία National Instruments και είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί στο περιβάλλον των Microsoft Windows και των Macintosh της Apple.

Η λειτουργία του στηρίζεται στον γραφικό προγραμματισμό μέσω αντικειμένων και αποτελεί ένα καλό παράδειγμα του «αντικειμενοστραφή προγραμματισμού» (object oriented programming). Αυτός ο όρος χρησιμοποιείται στην πληροφορική σε αντιδιαστολή με τον λεγόμενο «προγραμματισμό διαδικασιών», όπου ο προγραμματιστής γράφει κώδικα εντολών που εκτελούνται με γραμμική διαδοχή. Στο γραφικό περιβάλλον του LabView ο προγραμματιστής δεν χειρίζεται κώδικα, αλλά γραφικά αντικείμενα, που λέγονται «εικονικά όργανα» (Virtual Instruments ή VIs), όπως κουμπιά, δείκτες, οθόνες ή τετραγωνίδια που παριστάνουν συναρτήσεις ή εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες με τη μορφή υπορουτινών, αυτή γραφική γλώσσα προγραμματισμού ονομάζεται 'G'. Τα εικονίδια έχουν εισόδους και εξόδους και επιδέχονται προγραμματισμό των ιδιοτήτων τους.

Τα προγράμματα LabView ονομάζονται εικονικά όργανα, επειδή η εμφάνιση και η λειτουργία τους έχει ως πρότυπο πραγματικά όργανα και γι αυτό έχουν την κατάληξη '.vi'. Επίσης, μια ολοκληρωμένη εφαρμογή είναι δυνατόν να αποτελείται από πολλά αρχεία με κατάληξη '.vi', όπου το ένα καλεί το άλλο σαν υπορουτίνα. Για λόγους ευχρηστίας όλα αυτά τα επιμέρους αρχεία μπορούν να κλειστούν μέσα σε μια βιβλιοθήκη-αρχείο με κατάληξη '.LLB'. Τα Vis έχουν μια διαλογική διασύνδεση χρήστη (front panel) και έναν ισοδύναμο πηγαίο κώδικα (block diagram), ανάμεσα στα οποία μπορούμε να περνάμε στοιχεία.

Το Labview έχει εκτεταμένες βιβλιοθήκες από συναρτήσεις και υποπρογράμματα, κάνοντας τον προγραμματισμό ευκολότερο. Επίσης περιλαμβάνει επιπλέον εξειδικευμένες βιβλιοθήκες για συλλογή και επεξεργασία μετρήσεων, GRIP(IEEE-488) και σειριακό (Serial) έλεγχο επιστημονικών οργάνων, ανάλυση, παρουσίαση και αποθήκευση δεδομένων.

Το πρόγραμμα αυτό, περιλαμβάνει εργαλεία ανάπτυξης προγραμματισμού με τα οποία μπορούμε να καθορίζουμε τα σημεία διακοπής ενός προγράμματος, την εκτέλεση ενός προγράμματος ανά εντολή και να ξαναθέτουμε σε λειτουργία το πρόγραμμα, με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να παρακολουθούμε τη ροή των δεδομένων. Λόγω του γραφικού τρόπου προγραμματισμού με τα εργαλεία συλλογής, επεξεργασίας, ανάλυσης και παρουσίασης



μετρήσεων αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα ανάπτυξης εφαρμογών. Κάθε δυνατότητα υπολογισμού σε μια καθιερωμένη γλώσσα προγραμματισμού είναι εφικτή χρησιμοποιώντας το LabView.

## 4.2. Δομή του περιβάλλοντος LabView

Το Labview έχει τα εξής τρία μέρη: το εμπρόσθιο πλαίσιο (front panel), το δομικό διάγραμμα (block diagram) και ο κοννέκτορας (connector pane, ή icon/connector).

- Front panel

Είναι το τμήμα προγράμματος επικοινωνίας με το χρήστη, παράθυρο διεπαφής με το χρήστη, όταν εκτελείται το πρόγραμμα. Μοιάζει με το μπροστινό μέρος ενός οργάνου μέτρησης, καθώς περιέχει κουμπιά, διακόπτες, οθόνες γραφικών παραστάσεων και άλλα controls. Ακόμα περιέχει δείκτες που επιτρέπουν στο χρήστη να εισάγει δεδομένα με το πληκτρολόγιο, ή το ποντίκι. Τα αποτελέσματα που εξάγει εμφανίζονται στην οθόνη του υπολογιστή.

Στο front panel υπάρχουν οι παλέτες εργαλείων και ελέγχου. Ανάμεσα στα εργαλεία έχουμε το δείκτη που χρησιμεύει για τη μετακίνηση και την αλλαγή μεγέθους των αντικειμένων, το εργαλείο λειτουργίας (operate value) για την εισαγωγή δεδομένων και τη μεταβολή τιμών των μεταβλητών και το εργαλείο connector wire για τη σύνδεση των στοιχείων του δομικού προγράμματος. Στην παλέτα ελέγχου περιέχονται τα εικονίδια όπως οθόνες απεικόνισης, περιστροφείς, κουμπιά, ενδεικτικές λυχνίες, διακόπτες, οθόνες γραφικών.

- Block diagram

Είναι το τμήμα του προγράμματος που εισάγονται οι εντολές, δηλαδή που γράφεται το πρόγραμμα στη γραφική γλώσσά G και υπάρχει πάντα μαζί με το front panel. Είναι ο πηγαίος κώδικας του VI και αποτελεί εικονογραφική λύση του προβλήματος. Κάθε στοιχείο του block diagram παριστάνεται με ένα εικονίδιο. Κάθε συνάρτηση και κάθε ολοκληρωμένη λειτουργία έχει το δικό της εικονίδιο.

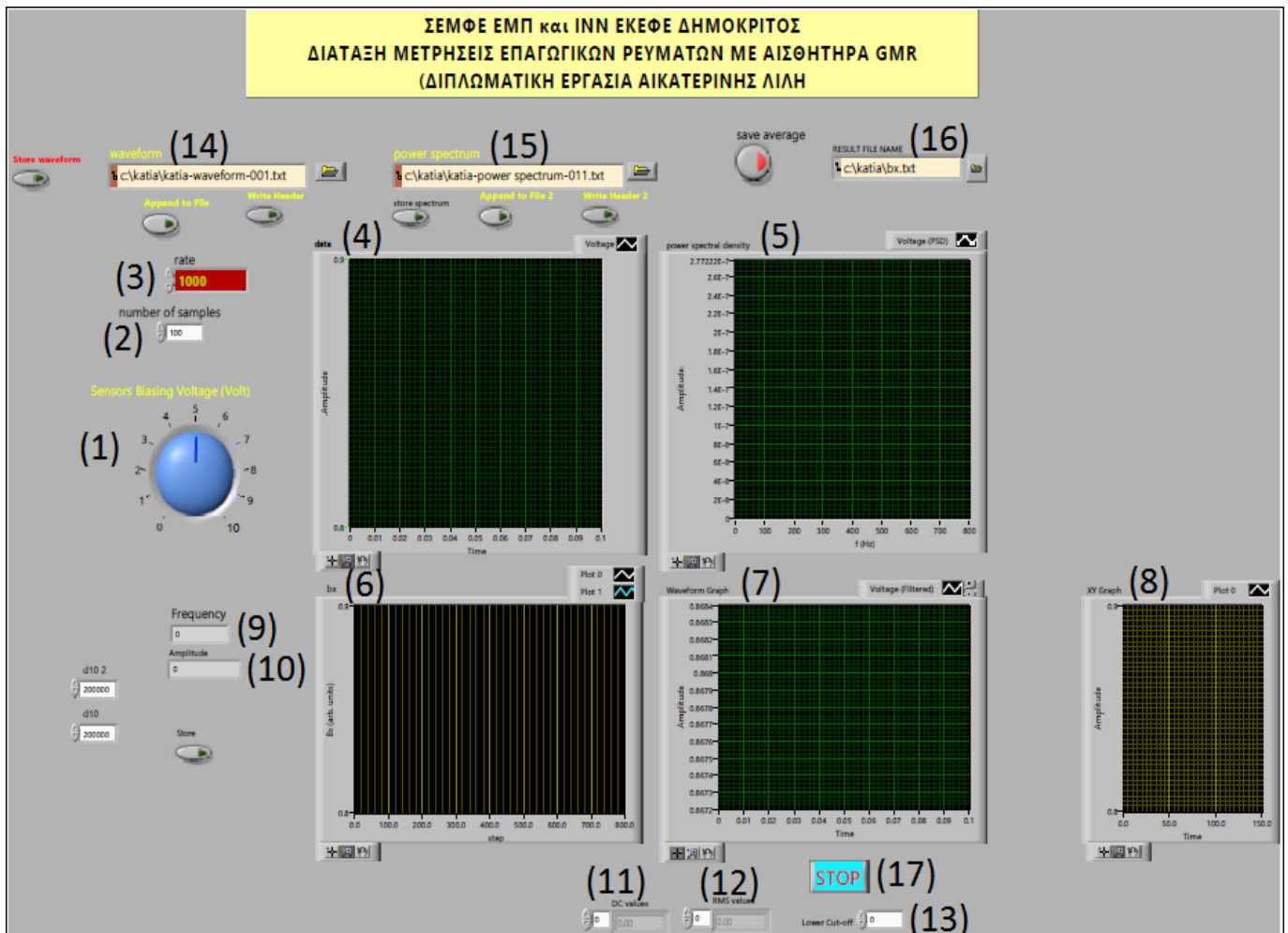
- Connector pane

Βρίσκεται στο πάνω δεξί άκρο του front panel. Μέσω αυτού μπορούμε να εισάγουμε δεδομένα από και προς τα αντικείμενα controls και indicators ενός sub VI. Τα VIs μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μόνα τους ως πρόγραμμα τα, ή στο εσωτερικό άλλων προγραμμάτων ή υποπρογραμμάτων ως υποπρογράμματα, που αποτελούν τα subVIs. Συνεπώς ένα VI μπορεί να τρέχει είτε σαν πρόγραμμα με το front panel να χρησιμοποιείται σαν user interface, είτε να ρίχνεται σαν node σε ένα block diagram άλλου VI, όπου το front panel θα καθορίζει τις εισόδους και τις εξόδους για το node μέσω του connector pane.

### 4.3. Κατασκευή του προγράμματος συλλογής δεδομένων από τον μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό

Χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις και τα εργαλεία του LabView (πληροφορίες για τα εργαλεία που χρησιμοποιήσαμε υπάρχουν αναλυτικά στο παράρτημα), κατασκευάσαμε το πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε στη διάρκεια των πειραμάτων μας. Το πρόγραμμα αυτό επικοινωνούσε με τη συσκευή συλλογής δεδομένων, της εταιρίας National Instrument με κωδικό NI USB-6216 ο οποίος ουσιαστικά είναι ένας μετατροπέας από αναλογικό σήμα σε ψηφιακό. Επιπρόσθετα, η συσκευή έλεγχε την τάση πόλωσης του ανιχνευτή GMR. Τα ψηφιοποιημένα δεδομένα τα κατέγραφε, τα απεικόνιζε και τα επεξεργαζόταν το λογισμικό που αναπτύξαμε. Με τη χρήση των γραφημάτων ανιχνεύσαμε την ύπαρξη ανωμαλιών/ ρωγμών στα πειράματά μας.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η επιφάνεια διεπαφής με το χρήστη (front panel) του προγράμματος LabView.



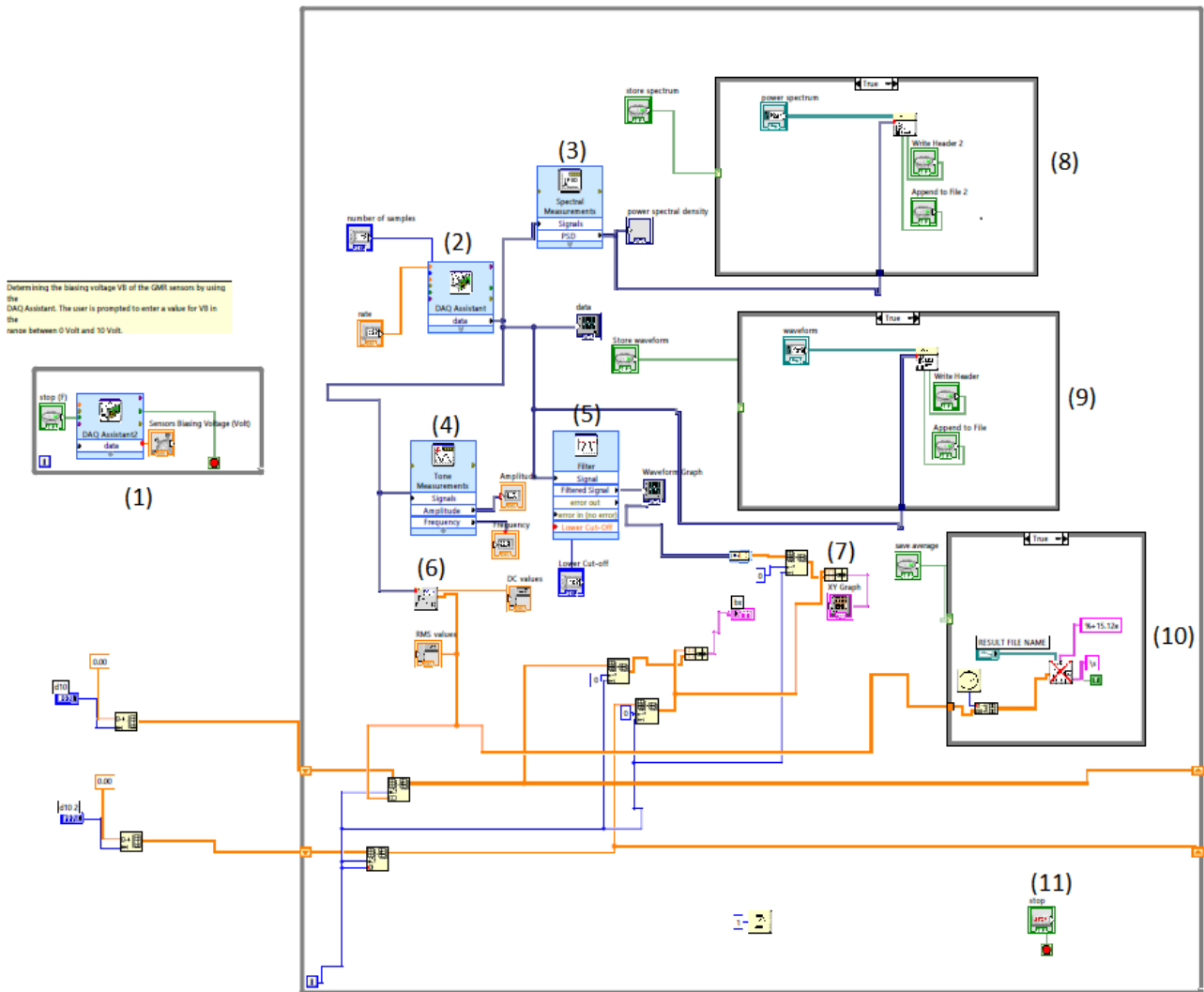
Εικόνα 40: Η δομή της επιφάνειας διεπαφής με το χρήστη (front panel) του προγράμματος LabView. (LabView)

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το παράθυρο διεπαφής με το χρήστη (front panel) του προγράμματος LabView, με αριθμημένα τα διάφορα τμήματά του, τη λειτουργία των οποίων θα εξηγήσουμε στη συνέχεια.

- (1) Sensor Biasing Voltage (Volt): Αυτό το εργαλείο αποτελεί έναν εικονικό διακόπτη που ρυθμίζει την τάση πόλωσης του ανιχνευτή GMR.
- (2) Number of Samples: Σε αυτό το παράθυρο καθορίζεται ο αριθμός δειγμάτων που καταγράφει η κάρτα ψηφιοποίησης σήματος σε χρονικό διάστημα ίσο με το πηλίκο του αριθμού των δειγμάτων προς το ρυθμό καταγραφής τους, που καθορίζεται από την τιμή στο παράθυρο Samples Rate (3).
- (3) Samples Rate: Στο παράθυρο αυτό καθορίζεται ο ρυθμός καταγραφής των μετρήσεων, στο πρόγραμμα LabView.
- (4) Στο γράφημα με τίτλο data, φαίνεται η διαφορά δυναμικού στα άκρα του αισθητήρα GMR, σε συνάρτηση με το χρόνο.
- (5) Στο γράφημα Power Spectral Density φαίνεται η φασματική πυκνότητα του σήματος συναρτήσει της συχνότητας.
- (6) Στο γράφημα με τίτλο bx, καταγράφεται η μέση τιμή - RMS της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του αισθητήρα GMR, σε συνάρτηση με τον αριθμό των βημάτων. Γνωρίζοντας ότι η τιμή της τάσης εξόδου του ανιχνευτή είναι ανάλογη με την οριζόντια συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής στη θέση του αισθητήρα στη συχνότητα του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου, θεωρούμε ότι το διάγραμμα δίνει τη μέση τιμή - RMS του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου σε ένα διάστημα ίσο με το πηλίκο του αριθμού των δειγμάτων ως προς την απόσταση.
- (7) Στο διάγραμμα (7) με τίτλο Waveform Graph φαίνεται η διαφορά δυναμικού στα άκρα του αισθητήρα GMR φιλτραρισμένη με συχνότητα αποκοπής που ρυθμίζεται στο παράθυρο Lower Cut-off (13).
- (8) Το διάγραμμα με τίτλο XY Graph, ήταν απλά βοηθητικό κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.
- (9) Το παράθυρο Frequency δίνει τη συχνότητα στην οποία το πλάτος της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του αισθητήρα GMR γίνεται μέγιστο, με την τιμή του αυτή να καταγράφεται στο παράθυρο Amplitude (10)

- (10) Το παράθυρο Amplitude δίνει τη μέγιστη τιμή του πλάτους της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του αισθητήρα.
- (11) Στο παράθυρο DC Value δίνεται η μέση τιμή της διαφοράς δυναμικού .
- (12) Στο παράθυρο RMS Value δίνεται η RMS τιμή της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του αισθητήρα.
- (13) Στο παράθυρο Lower Cut-off καθορίζεται η συχνότητα αποκοπής του φιλτραρισμένου σήματος, που φαίνεται στο γράφημα (7).
- (14), (15), (16): Στα παράθυρα αυτά με τίτλους Waveform, Power Spectrum και Result File Name, δίνονται οι διευθύνσεις των αρχείων, στα οποία καταγράφονται τα δεδομένα των γραφημάτων (4), (5), και (6) αντίστοιχα. Με τους εικονικούς διακόπτες Store, Append to file και Write Header καθορίζεται η διαδικασία της αποθήκευσης.
- (17) Με το διακόπτη STOP, διακόπτεται η διαδικασία μέτρησης του πειράματός μας.

Παράλληλα με την επιφάνεια διεπαφής με το χρήστη στο πρόγραμμα LabView υπάρχει και το Block Diagram, στο οποίο βρίσκονται οι συναρτήσεις και οι εντολές του προγράμματος. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το Block Diagram που κατασκευάσαμε στο πείραμά μας.



Εικόνα 41: Η δομή Block Diagram του προγράμματος LabView. (LabView)

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η δομή του Block Diagram του προγράμματος LabView, που κατασκευάσαμε με αριθμημένα τα διάφορα τμήματά του, τη λειτουργία των οποίων θα εξηγήσουμε στη συνέχεια.

- (1) Με έναν διακόπτη Sensor Biasing Voltage (Volt) που συνδέεται με το εργαλείο Daq Assistant ρυθμίζουμε την τάση πόλωσης του ανιχνευτή GMR.
- (2) Με το εργαλείο Daq Assistant συλλέγονται τα δεδομένα της διαφοράς τάσης στα άκρα του ανιχνευτή και κατασκευάζεται το γράφημα της συναρτήσε του χρόνου.

- (3) Με τη συνάρτηση Spectral Measurements κατασκευάζεται το γράφημα της φασματικής πυκνότητας του σήματος συναρτήσει της συχνότητας.
- (4) Με τη συνάρτηση Tone Measurements υπολογίζεται η μέγιστη τιμή του πλάτους της διαφοράς δυναμικού καθώς και η συχνότητα στην οποία αυτό εμφανίζεται.
- (5) Με το εργαλείο Filter κατασκευάζεται το γράφημα της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του αισθητήρα φιλτραρισμένη με συχνότητα αποκοπής Lower Cut-off, συναρτήσει του χρόνου.
- (6) Με το εργαλείο Basic Averaged DC-RMS, υπολογίζεται η μέση τιμή (DC) και η RMS τιμή της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του αισθητήρα GMR.
- (7) Με κατάλληλες μήτρες πινάκων κατασκευάζεται το γράφημα bx της μέση τιμής - RMS της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του αισθητήρα συναρτήσει του αριθμού των βημάτων, η οποία με κατάλληλη βαθμονόμηση θεωρούμε ότι αντιστοιχεί στη μέση τιμή- RMS του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύει ο ανιχνευτής GMR.
- (8) (9) (10) Με τις υπορουτίνες μέσα στις δομές υπόθεσης αποθηκεύονται τα δεδομένα της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του αισθητήρα GMR συναρτήσει του χρόνου, η φασματική πυκνότητα σήματος συναρτήσει της συχνότητας και η μέση τιμή - RMS της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του αισθητήρα συναρτήσει του βήματος που αντιστοιχεί με κατάλληλη βαθμονόμηση στο μαγνητικό πεδίο.
- (11) Ο διακόπτης STOP τερματίζει τη διαδικασία του πειράματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Αισθητήρες Γιγαντιαίας Μαγνητοαντίστασης GMR

#### 5.1. Φαινόμενο μαγνητοαντίστασης

Το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης (MR) είναι η αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση ενός υλικού (αγωγού), όταν αυτό βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Στην περίπτωση των κλασικών σιδηρομαγνητικών υλικών, η μεταβολή της αντίστασης με την επιβολή μαγνητικού πεδίου ισούται με:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)}$$

##### 5.1.1. Ηλεκτρική Αντίσταση και Μαγνήτιση

Είναι γνωστό ότι τα ηλεκτρόνια εμφανίζουν μαγνητική ροπή, εξ αιτίας του spin τους. Η προβολή του spin σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο μπορεί να λάβει τις τιμές  $\pm \frac{1}{2} \hbar/2\pi$ .



Εικόνα 42: Τα αντιπαράλληλα spin των ηλεκτρονίων  $+1/2$  και  $-1/2$ . Πηγή: «Περιοδική ενημερωτική έκδοση της Γενικής Γραμματείας Έρευνας & Ανάπτυξης (ΓΓΕΑ)/Υπουργείο Ανάπτυξης», Τεύχος 29, Νοέμβρης/Δεκέμβρης 2007.

Σε ένα μαγνητικό υλικό τα περισσότερα spin είναι προς την ίδια κατεύθυνση, ενώ λίγα είναι προς την αντίθετη, έτσι το υλικό εμφανίζει μαγνητική ροπή  $P$ , ίση με:

$$P = \frac{N_{\uparrow} - N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_{\downarrow}}$$

Ενώ σε ένα μη-μαγνητικό υλικό που οι πληθυσμοί των spins είναι ίσοι, η μαγνητική του ροπή, είναι μηδέν.

Η διαφορά στους πληθυσμούς των spins είναι υπεύθυνη για τη μαγνήτιση του υλικού, αλλά και για την αντίσταση που αυτό εμφανίζει (λόγω σκεδάσεων των ηλεκτρονίων) όταν διαρρέεται από ρεύμα. Στα μαγνητικά υλικά, η σκέδαση των ηλεκτρονίων εξαρτάται από την κατεύθυνση της μαγνήτισης. Έτσι στη διάρκεια ροής του ηλεκτρικού ρεύματος στο μαγνητικό υλικό, θα σκεδάζονται τα ηλεκτρόνια που έχουν αντιπαράλληλο spin, με αυτό του μαγνητικού υλικού.

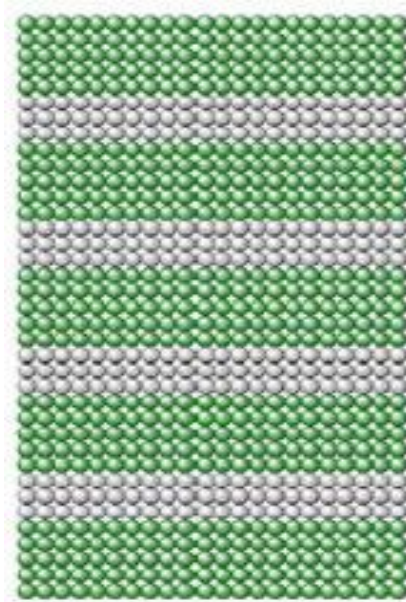
Όταν σε ένα μαγνητικό υλικό εφαρμόζουμε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, τότε περισσότερα ηλεκτρόνια θα προσανατολίζονται προς τα παράλληλα με αυτό, έτσι η μαγνήτιση του υλικού αυξάνεται. Αν τώρα το υλικό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, τότε θα εμφανίζει μεγαλύτερη αντίσταση, λόγω των περισσότερων σκεδάσεων με τα ηλεκτρόνια που είναι αντιπαράλληλα στη μαγνήτιση του.

### 5.1.2. Φαινόμενο γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης.

Δεν είναι ιδιότητα ενός υλικού, αλλά συνδυασμού υλικών. Πρόκειται για μια πολυστρωματική κατασκευή. Η μεταβολή στη μαγνήτιση των στρωμάτων με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου έχει ως συνέπεια την επίτευξη της μαγνητοαντίστασης μεγαλύτερης του 80%.

Τα υλικά αυτά είναι πολυστρωματικά υμένα, που αποτελούνται από δύο υλικά, ένα μαγνητικό και ένα μη-μαγνητικό, που επαναλαμβάνονται από μία έως εκατοντάδες φορές, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



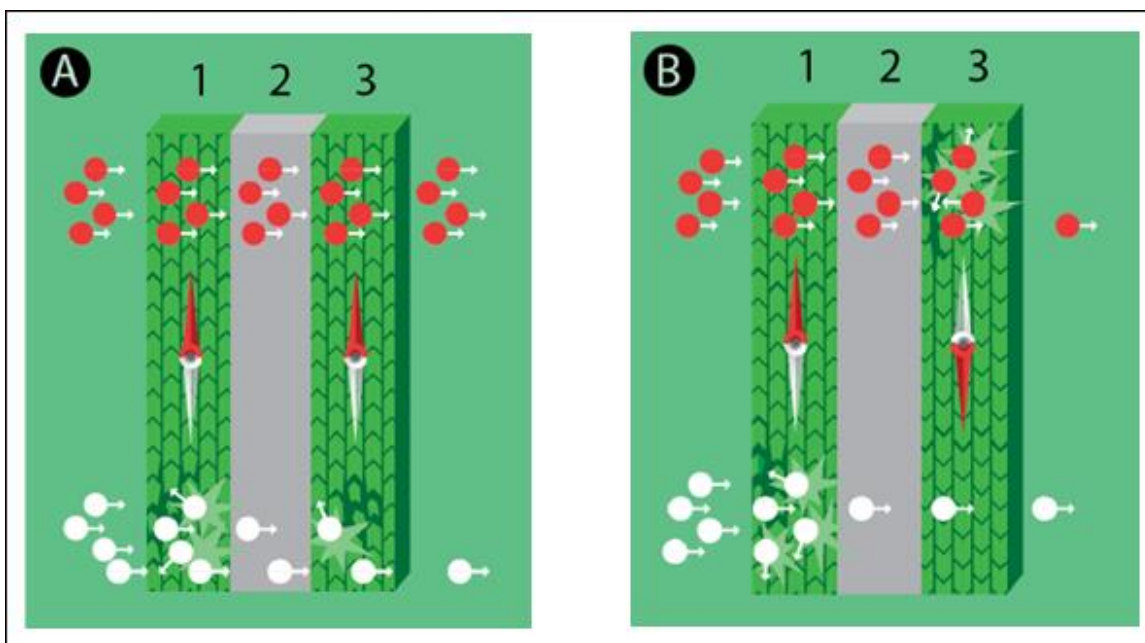


*Εικόνα 43 Πολυστρωματικό υμένιο από δύο υλικά που επαναλαμβάνονται.*

*Πηγή: «Περιοδική ενημερωτική έκδοση της Γενικής Γραμματείας Έρευνας & Ανάπτυξης (ΓΓΕΑ)/Υπουργείο Ανάπτυξης», Τεύχος 29, Νοέμβρης/Δεκέμβρης 2007.*

Τα υλικά αυτά, ανάλογα με την μαγνήτιση των μαγνητικών περιοχών τους, μπορούν να σκεδάζουν με διαφορετικούς τρόπους τα ηλεκτρόνια, όταν διαρρέονται από ρεύμα. Έτσι εμφανίζουν αντίσταση με τιμή μικρή, έως πολύ μεγάλη.

Εστιάζοντας σε μία περιοχή, του υλικού βλέπουμε τη διαφορά που εμφανίζεται στην αντίσταση του υλικού σε δύο περιπτώσεως. Στο παρακάτω σχήμα, έχουμε με πράσινο τις μαγνητικές περιοχές και με γκρι τη μη-μαγνητική περιοχή. Τα διερχόμενα ηλεκτρόνια, κόκκινα και άσπρα έχουν αντιπαράλληλο spin. Στην εικόνα (Α), που οι μαγνητικές περιοχές έχουν παράλληλη μαγνήτιση, τα ηλεκτρόνια που σκεδάζουν θα είναι μόνα αυτά με αντιπαράλληλο spin, ως προς τη μαγνήτιση των περιοχών. Ενώ, στο δεύτερο σχήμα (Β), οι δύο μαγνητικές περιοχές έχουν αντιπαράλληλες μαγνητίσεις, συνεπώς σκεδάζουν τα ηλεκτρόνια και των δύο μαγνητικών ροπών. Άρα η αντίσταση που θα εμφανίζει το υλικό στο σχήμα (Β), θα είναι μεγαλύτερη από αυτή στο σχήμα (Α).



Εικόνα 44: : Πολυστρωματικά υμένα που μεταβάλλουν την αντίστασή τους. Στην αριστερή εικόνα το υλικό (A) έχει μικρή αντίσταση, καθώς οι δύο μαγνητικές περιοχές του έχουν παράλληλες μαγνητίσεις και σκεδάζουν μόνο τα ηλεκτρόνια με αντιπαράλληλο προς αυτές σπιν. Στη δεξιά εικόνα το υλικό (B) έχει πολύ μεγάλη αντίσταση, καθώς οι μαγνητικές περιοχές του έχουν αντιπαράλληλη μαγνήτιση, σκεδάζοντας η καθεμία τα ηλεκτρόνια με αντιπαράλληλο ως προς αυτήν σπιν. Πηγή: «Περιοδική ενημερωτική έκδοση της Γενικής Γραμματείας Έρευνας & Ανάπτυξης (ΓΓΕΑ)/Υπουργείο Ανάπτυξης», Τεύχος 29, Νοέμβρης/Δεκέμβρης 2007.

### 5.3. Λειτουργία του GMR

Οι αισθητήρες GMR ανακαλύφθηκαν το 1988 ανεξάρτητα από τις ομάδες των Albert Fert του πανεπιστημίου του Paris-Sud, της Γαλλίας, και Peter Grünberg του Forschungszentrum Julich, της Γερμανίας. το 2007 ο Fert και ο Grünberg βραβεύτηκαν με Nobel Φυσικής για την πρακτική σημασία πειραματική ανακάλυψή τους.

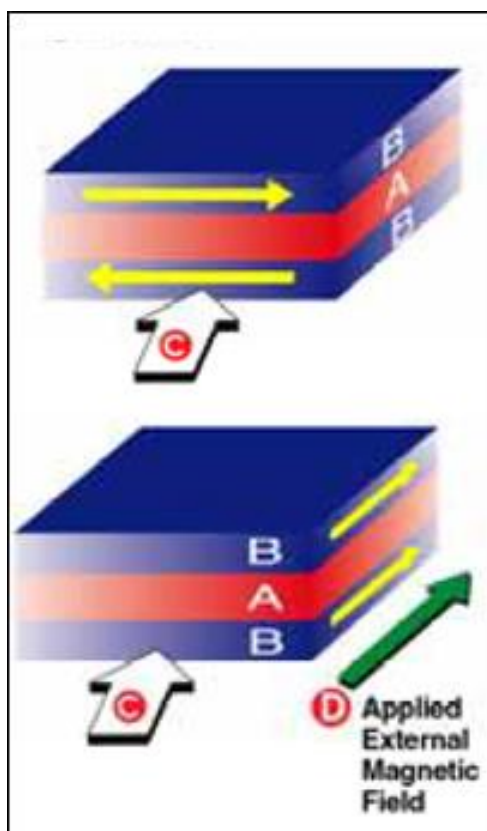
Η λειτουργία του αισθητήρα GMR, στηρίζεται στη μεγάλη αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασης που εμφανίζεται όταν στοιβαγμένα επίπεδα στρώματα σιδηρομαγνητικών και μη-μαγνητικών υλικών εκτίθενται σε μαγνητικό πεδίο, το φαινόμενο της «Γιγαντιαίας Μαγνητοαντίστασης».

Ο ανιχνευτής αποτελείται από υλικά που βασίζονται στο νικέλιο, σίδηρο, κοβάλτιο και χαλκό. Διάφορα κράματα αυτών των υλικών εναποτίθενται σε λεπτά επίπεδα που κυμαίνονται από 15 Angstroms, δηλαδή πέντε ατομικά επίπεδα, έως 18 μικρά.

Στα επόμενα σχήματα φαίνεται πώς επιδρά το φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης στον ανιχνευτή.

Στην πρώτη εικόνα τα επίπεδα B, είναι σιδηρομαγνητικά υλικά αντίθετων μαγνητίσεων, λόγω αντισιδηρομαγνητικής ζεύξης. Το παρεμβαλλόμενο υλικό A, είναι αγωγίμο και μη-μαγνητικό. C είναι το ρεύμα που διαρρέει τη διάταξη. Καθώς οι μαγνητικές περιοχές είναι αντιπαράλληλες, το ρεύμα που θα τις διαρρέει θα βρίσκει μεγάλη αντίσταση.

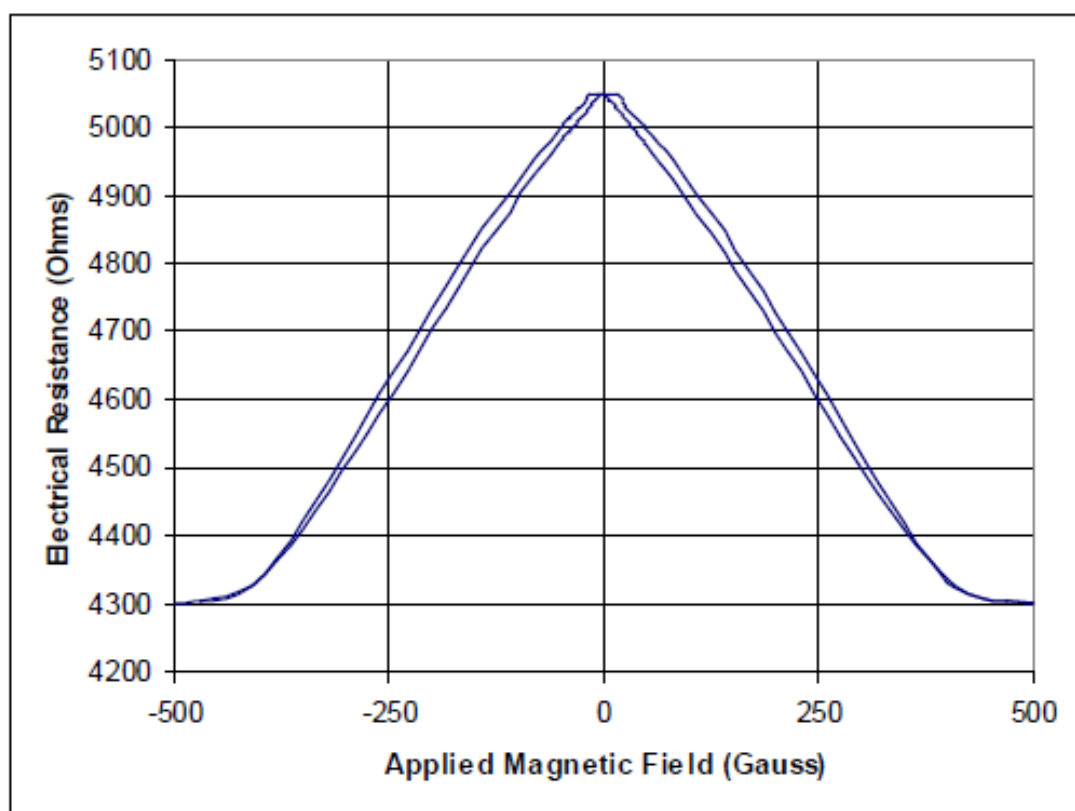
Στη δεύτερη περίπτωση εφαρμόζουμε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (D), το οποίο υπερνικά την αντισιδηρομαγνητική ζεύξη και προσανατολίζει τις μαγνητικές περιοχές παράλληλα σε αυτό. Έτσι η αντίσταση μειώνεται κατά πολύ, της τάξης του 10%-15% της αρχικής.



Εικόνα 45: Ανιχνευτής GMR, που διαρρέεται από ρεύμα. Στην πάνω εικόνα στον ανιχνευτή δεν εφαρμόζεται εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, με τα σιδηρομαγνητικά υλικά (B) να είναι αντιπαράλληλα, ενώ στην κάτω εικόνα παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου οι περιοχές (B), προσανατολίζονται παράλληλα μεταξύ τους και με το εξωτερικό πεδίο.  
Πηγή: GMR sensor catalog, NVE corporation

Στους αισθητήρες αυτούς, χρειάζεται να χρησιμοποιούμε υλικά, ή κράματα που να αντέχουν τα υψηλά μαγνητικά πεδία. Ακόμα, οι GMR ανιχνευτές συνήθως στηρίζονται, στο να κρατάνε τη μία μαγνητική περιοχή, μόνιμα μαγνητισμένη σε σταθερή κατεύθυνση, «καρφωμένη» και να αφήνουν την δεύτερη να περιστρέφεται. Έτσι θα πρέπει τα υλικά που χρησιμοποιούνται να μην διαταράσσουν την κατεύθυνση του «καρφωμένου» μαγνητικού επιπέδου, κατά τη διάρκεια της εφαρμογής μαγνητικού πεδίου. Από την άλλη, χρειάζονται υλικά κατάλληλα ώστε μετά την κατάργηση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου να επιστρέφουν στη φυσική διαδικασία της αντι-φερρομαγνητικής ζεύξης.

Στο επόμενο σχήμα, φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη των αισθητήρων GMR:



Διάγραμμα 211: Η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης, παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Πηγή: GMR sensor catalog, NVE corporation.

Παρατηρούμε ότι η έξοδος είναι πολυπολική, δηλαδή το υλικό δημιουργεί την ίδια αλλαγή στην αντίσταση είτε το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο έχει θετική κατεύθυνση, είτε αρνητική.

Η κύρια εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες GMR είναι για την ανάγνωση δεδομένων από σκληρούς δίσκους, σε βιοαισθητήρες, σε μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS), και άλλες συσκευές. Οι GMR με πολυστρωματικές δομές χρησιμοποιούνται επίσης σε μνήμες μαγνητοαντίστασης τυχαίας προσπέλασης (MRAM) ως κύτταρα που αποθηκεύουν ένα bit πληροφορίας.

### 5.3.1. Σχεδιασμός των αισθητήρων GMR

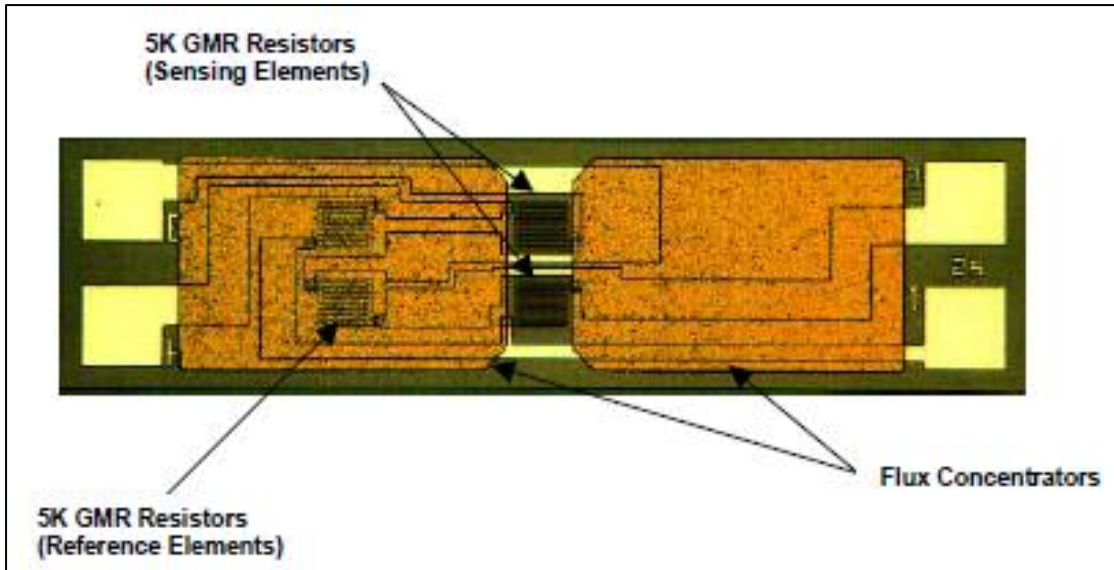
Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι ανιχνευτών:

- Τα μαγνητόμετρα, που ανιχνεύουν την ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.
- Τα βαθμιδόμετρα, ή διαφορικοί αισθητήρες, που ανιχνεύουν τη διαφορά του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου σε δύο διακριτά σημεία του αισθητήρα.
- Οι αισθητήρες spin, που δίνουν στην έξοδο τη γωνιακή διαφορά μεταξύ του «καρφωμένου» μαγνητικού επιπέδου και του σταθερού, όταν ο αισθητήρας τοποθετείται σε κορεσμένο μαγνητικό πεδίο.

#### 5.3.1.1. Μαγνητόμετρα

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται ένα μαγνητόμετρο, με πραγματικές διαστάσεις περίπου  $350\mu\text{m} \times 1400\mu\text{m}$ . Ο αισθητήρας έχει ρυθμιστεί σε γέφυρα Wheatstone. Οι δύο οφιοειδούς σχήματος δομές στο κέντρο της μήτρας και αριστερά, είναι αντιστάτες  $5\text{k}\Omega$ .

Οι δύο επιμεταλλωμένες δομές αποτελούν συλλέκτες ροών και έχουν διπλό σκοπό. Από τη μία καλύπτοντας τους δύο απ' τους τέσσερις αντιστάτες στη γέφυρα Wheatstone, δρουν σαν ασπίδα αυτών των αντιστατών, αποτρέποντας το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο να τους φτάσει. Έτσι όταν το μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται στους δύο αντιστάτες στο κέντρο της μήτρας, αυτοί μειώνουν την αντίστασή τους, ενώ οι άλλοι δύο στα αριστερά, που δε νιώθουν το μαγνητικό πεδίο, δεν παρουσιάζουν μεταβολή στην αντίσταση. Αυτή η ανισορροπία οδηγεί στο αποτέλεσμα της γέφυρας. Ακόμα ο συλλέκτης ροών έχει την ικανότητα να μεταβάλλει την ευαισθησία του αισθητήρα από προϊόν σε προϊόν.



Εικόνα 46: Μαγνητόμετρο GMR. Σημειώνονται οι τέσσερις αντιστάτες στο κέντρο της μήτρας και αριστερά και ο συλλέκτης ροής. Πηγή: GMR sensor catalog, NVE corporation.

Οι συλλέκτες ροών ακολουθούν τον κανόνα:

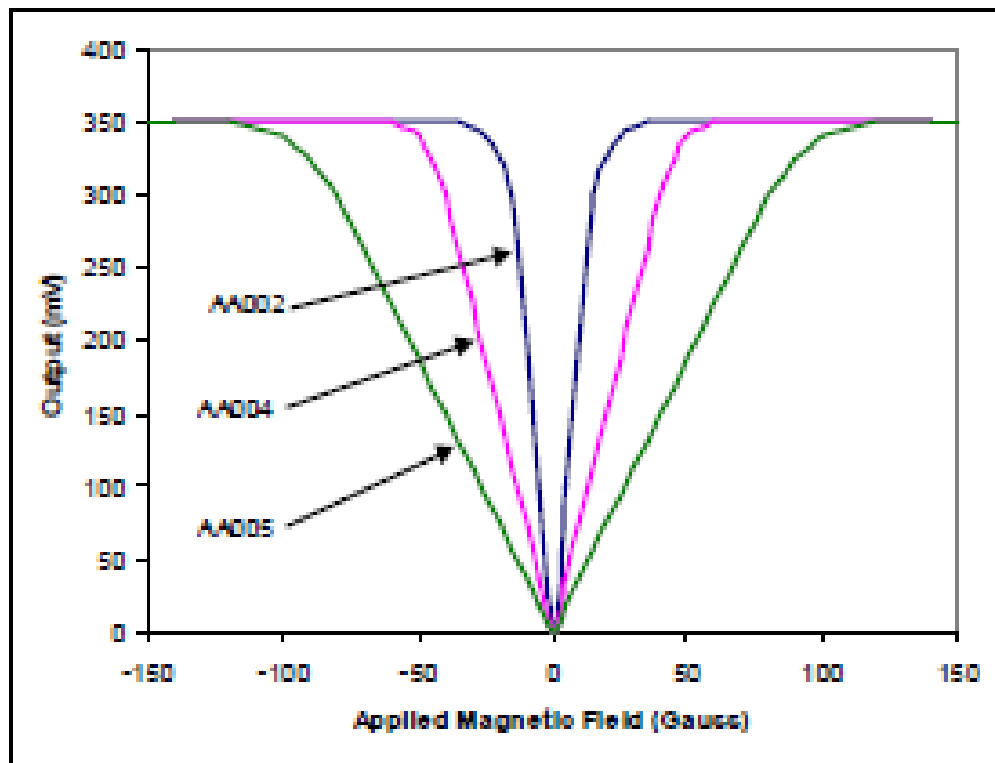
Πεδίο στον αισθητήρα

$$\cong \text{Εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο (60\%)} \frac{\text{μήκος του συλλέκτη}}{\text{κενό μεταξύ των συλλεκτών}}$$

Έτσι, για παράδειγμα, στον αισθητήρα της προηγούμενης εικόνας, ο κάθε ένας συλλέκτης ροής έχει μήκος 400μm και το κενό μεταξύ των δύο συλλεκτών είναι 100μm. Για εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο έντασης 10Gauss, το πραγματικό πεδίο στο στοιχείο του αισθητήρα θα είναι, βάσει του παραπάνω τύπου 24Gauss.

Οι αισθητήρες GMR μπορούν να εμφανίζουν διαφορετική ευαισθησία σε διαφορετικές τιμές του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Στο παρακάτω διαγραμμα, φαίνεται η ευαισθησία διαφόρων τύπων αισθητήρων GMR, η οποία δίνεται από την κλίση της καμπύλης, σε κάθε περίπτωση.

Το μέγιστο σήμα στην έξοδο αυτού του κάθε αισθητήρα είναι 350mV για εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο 100Gauss, με τροφοδοτικό 5mV.



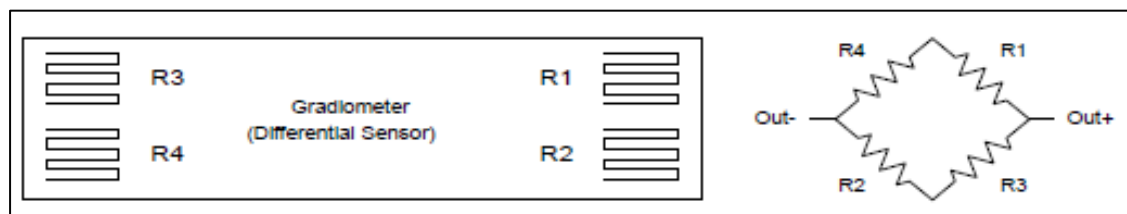
Διάγραμμα 222: Η τάση στην έξοδο του ανιχνευτή σαν συνάρτηση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου, για διάφορους τύπους μαγνητόμετρων. Πηγή: GMR sensor catalog, NVE corporation.

Ο ανιχνευτής που χρησιμοποιήσαμε στην πειραματική διάταξη είναι μαγνητόμετρο με εμπορικό κωδικό AA002.

### 5.3.1.2. Βαθμιδόμετρα – Διαφορικοί αισθητήρες

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το βαθμιδόμετρο με του τέσσερις αντιστάτες και τις δύο εξόδους του ανιχνευτή. Σε αντίθεση με το μαγνητόμετρο, εδώ δεν υπάρχει συλλέκτης ροής. Τα βαθμιδόμετρα είναι συνήθως σχεδιασμένα με δύο γεφυρωτές αντιστάσεις στη μία έξοδο και άλλες δύο στην άλλη. Η απόσταση μεταξύ των δύο σειρών ( $R_1 - R_4$  και  $R_2 - R_3$ ), σε συνδυασμό με τη βαθμίδα του μαγνητικού πεδίου, καθορίζουν την έξοδο του σήματος στον αισθητήρα.

Η λειτουργία των βαθμιδόμετρων στηρίζεται στη βαθμίδα του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος του ανιχνευτή, που μετρείται στην έξοδο. Έτσι αν εφαρμόσουμε ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο, τότε στην έξοδο του ανιχνευτή το δυναμικό θα είναι μηδέν, επειδή και οι τέσσερις αντιστάτες θα βρεθούν εκτεθειμένοι στο ίδιο μαγνητικό πεδίο, χωρίς θωράκιση από το συλλέκτη ροής.



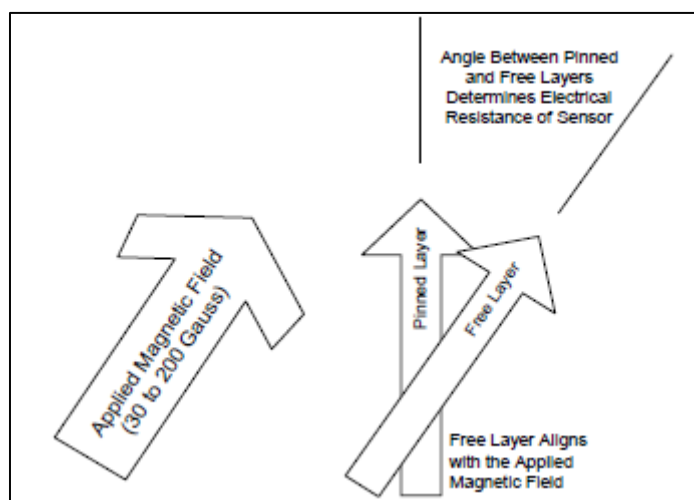
Εικόνα 47: Βαθμιδόμετρο/Διαφορικός αισθητήρας. Στη δεξιά εικόνα φαίνεται το κύκλωμα των τεσσάρων αντιστάσεων. Πηγή: GMR sensor catalog, NVE corporation.

Καθώς και οι τέσσερις αντιστάσεις συμβάλλουν στην έξοδο του αισθητήρα, στη μέγιστη απόκλιση του μαγνητικού πεδίου το βαθμιδόμετρο παρέχει διπλό σήμα στην έξοδο, περίπου 700mV σε τροφοδοτικό 5mV. Όμως επειδή τα βαθμωτά πεδία δεν είναι τόσο ισχυρά ώστε να δώσουν αυτό το μέγιστο σήμα, τα επίπεδα του σήματος κυμαίνονται από 50mV έως 200mV.



### 5.3.1.3. Αισθητήρες spin

Στους αισθητήρες αυτούς, το «καρφωμένο» μαγνητικό επίπεδο, σταθερής μαγνήτισης, είναι πολύ ισχυρό και δε μπορεί να διαταραχθεί, ενώ το ελεύθερο μαγνητικό επίπεδο αλλάζει τη μαγνήτισή του ανάλογα με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, που κυμαίνεται από 30Gauss έως 200Gauss. Η έξοδος του αισθητήρα διαφέρει ανάλογα με το συνημίτονο της γωνίας που σχηματίζουν η μαγνήτιση του «καρφωμένου» μαγνητικού επιπέδου (που βρίσκεται σε κορεσμένο μαγνητικό πεδίο) και του ελεύθερου (που είναι ακολουθεί το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο). Η γωνία μεταξύ των δύο επιπέδων καθορίζει τη μαγνητική αντίσταση του αισθητήρα. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 48: Αισθητήρας spin. Το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο προσανατολίζει στη διεύθυνσή του το ελεύθερο μαγνητικό πεδίο, ενώ το καρφωμένο μαγνητικό πεδίο παραμένει αδιατάραχτο. Η γωνία που θα σχηματίσουν, καθορίζει τη μαγνητική αντίσταση του αισθητήρα. Πηγή: GMR sensor catalog, NVE corporation.

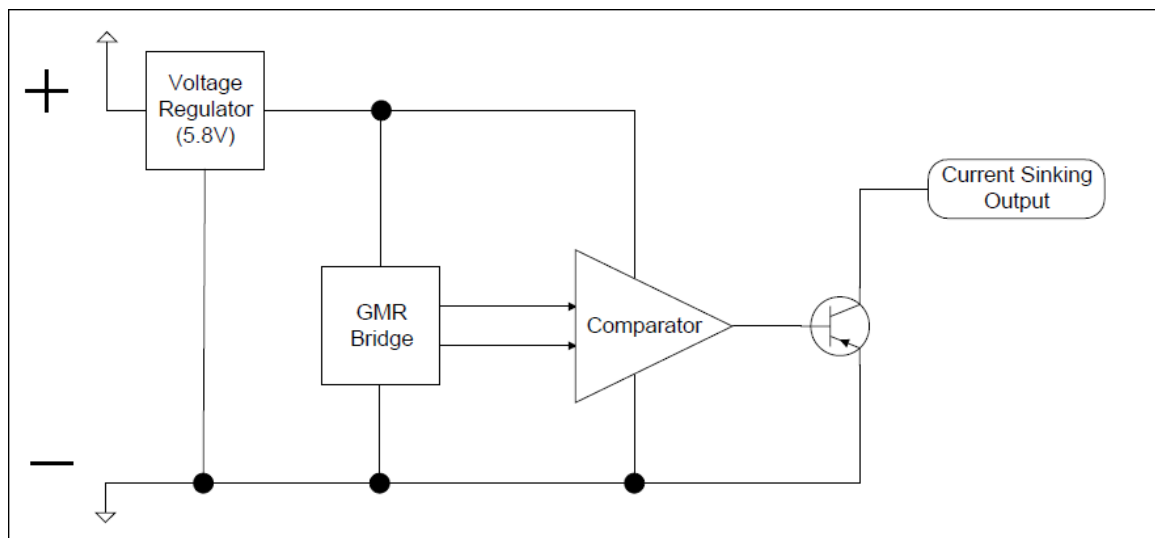
Το ποσοστό μεταβολής της αντίστασης που είναι δυνατή με τη μέθοδο αυτή είναι 5%. Η έξοδος είναι συνημιτονοειδής συνάρτηση της γωνίας μεταξύ του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και του κορεσμένου

## 5.4. Επεξεργασία σήματος

Στο βασικό στοιχείο του αισθητήρα GMR, προστίθεται ηλεκτρονική διάταξη επεξεργασίας σήματος, που βελτιώνει τη λειτουργικότητά του. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, στο οποίο έχει χρησιμοποιηθεί τελεστικός ενισχυτής σύγκρισης τάσεων και ένα τρανζίστορ εξόδου. Το αποτέλεσμα είναι η

δημιουργία ενός ψηφιακού μαγνητικού αισθητήρα μεγάλης ακρίβειας. Σε αυτό το κύκλωμα δε χρειάζεται καμία ενίσχυση στο σήμα εξόδου.

Το μεγάλο σήμα εξόδου του αισθητήρα GMR σημαίνει μικρότερο κύκλωμα, μικρότερο σφάλμα στο σήμα εξόδου, λιγότερο drift καθώς καλύτερη σταθερότητα στη θερμοκρασία.



Εικόνα 49: Κύκλωμα επεξεργασίας σήματος GMR. Πηγή: GMR sensor catalog, NVE corporation.

## 5.5. Αναλογικοί αισθητήρες AA και AB-series

Υπάρχουν δύο είδη αναλογικών αισθητήρων οι AA-series που είναι μαγνητόμετρα και οι AB-series που είναι βαθμιδόμετρα ή διαφορικοί αισθητήρες. Και οι δύο αυτοί τύποι αισθητήρων προσφέρουν μεγάλες δυνατότητες ανίχνευσης, καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλή ευαισθησία στα εφαρμοζόμενα μαγνητικά πεδία, μεγάλη σταθερότητα στη θερμοκρασία, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μικρό μέγεθος. Αυτά τους τα χαρακτηριστικά τους καθιστούν κατάλληλους για χρήση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από τη βαριά βιομηχανία/βιομηχανία αυτοκινήτων που χρησιμοποιούνται σε ανιχνευτές ρεύματος μέχρι σε φορητά όργανα και εμφυτεύσιμες ιατρικές συσκευές που χρησιμοποιούνται σε ανιχνευτές χαμηλών τάσεων που τροφοδοτούνται από μπαταρία.

Οι αισθητήρες AA-series είναι μαγνητόμετρα και χρησιμοποιούν υλικά και συλλέκτες ρών που είναι τοποθετημένοι πάνω σε ένα τσιπάκι. Παρέχουν ένα κατευθυντικό ευαίσθητο σήμα εξόδου, με την ευαισθησία τους να είναι μέγιστη σε μία

διεύθυνση στο επίπεδο του ρεύματος και να ελαττώνεται συνημιτονοειδώς καθώς ο αισθητήρας στρέφεται από τη διεύθυνση αυτή. Επίσης οι συσκευές αυτές έχουν την ίδια έξοδο για μαγνητικά πεδία στην αρνητική και τη θετική διεύθυνση (πολυπολική έξοδος). Τέλος οι αισθητήρες AA-series έχουν σχεδιαστεί σε μορφή γέφυρας Wheatstone, ώστε να παρέχουν αντιστάθμιση της θερμοκρασίας.

Υπάρχουν τρεις οικογένειες ανιχνευτών με βασικό αισθητήρα τύπου AA-series: οι πρότυποι AA-series, οι AAH-series και οι AAL-series, που οι διαφορές τους έγκεινται στο διαφορετικό υλικό που χρησιμοποιείται στον GMR. Κάθε υλικό έχει τα δικά του χαρακτηριστικά που αφορούν την ευαισθησία του στα εφαρμοζόμενα μαγνητικά πεδία, το εύρος του πεδίου λειτουργίας, την υστέρηση και το εύρος των θερμοκρασιών. Στον παρακάτω συγκριτικό πίνακα φαίνονται οι διαφορές των τριών αισθητήρων GMR.

Parameter	AA Series	AAH Series	AAL Series
Sensitivity to Applied Fields	High	Very High	High
Field Range of Operation	High	Low	Medium
Hysteresis	Medium	High	Low
Temperature Range	High	Very High	Very High

*Πίνακας 1: : Τα χαρακτηριστικά για τους διάφορους τύπους ανιχνευτών AA-series. Πηγή: GMR sensor catalog, NVE corporation*

Οι αισθητήρες AB-series είναι διαφορικοί αισθητήρες, ή βαθμιδόμετρα και επωφελούνται από τα υψηλής απόδοσης χαρακτηριστικά των υλικών του GMR. Υπάρχουν δύο οικογένειες ανιχνευτών με βασικό αισθητήρα τύπου AB-series: οι πρότυποι AB-series και οι ABH-series. Έχουν λειτουργικά χαρακτηριστικά παρόμοια με των AA και AAH αισθητήρων που φαίνονται στον προηγούμενο πίνακα, με τη διαφορά όμως ότι έχουν τα διπολικά γραμμικά χαρακτηριστικά εξόδου ενός διαφορικού αισθητήρα.

Στους παρακάτω συγκριτικούς πίνακες φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας για τους δύο τύπους αναλογικών ανιχνευτών AA και AB-series. Τα χαρακτηριστικά αφορούν το εύρος του μαγνητικού πεδίου (Linear Range) σε 0e, την ευαισθησία (Sensitivity) σε mV/V, την απόσταση των αντιστατών (Resistor spacing) σε mm, τη μέγιστη μη-γραμμικότητα (Maximum Non-Linearity) σε μονοπολική λειτουργία, τη μέγιστη υστέρηση (Maximum Hysteresis) σε μονοπολική λειτουργία, τη μέγιστη θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί ο ανιχνευτής (Maximum Operating Temperature) σε °C και την τυπική αντίσταση (Typical Resistance) σε Ohms. Η μονοπολική λειτουργία αναφέρεται σε έκθεση του ανιχνευτή σε μαγνητικό πεδίο σταθερής πολικότητας: θετικό (από 0 σε 30 Gauss) ή αρνητικό (από -3 σε -14 Gauss), ενώ στη διπολική λειτουργία έχουμε αλλαγή στην πολικότητα του μαγνητικού πεδίου (από -6 σε 7 Gauss). Στη διπολική λειτουργία μειώνεται η γραμμική περιοχή του ανιχνευτή και αυξάνεται η υστέρησή του.

<b>Magnetometers:</b>								
Part Number	Linear Range ( Oe  )		Sensitivity (mV/V-Oe )		Maximum Non-linearity (% Uni. )	Maximum Hyster-esis (% Uni. )	Maximum Operating Temp (°C)	Typical Resis-tance (Ohms)
	Min	Max	Min	Max				
AA002-02	1.5	10.5	3.0	4.2	2	4	125	5K
AA003-02	2.0	14	2	3.2	2	4	125	5K
AA004-00	5.0	35	0.9	1.3	2	4	125	5K
AA004-02	5.0	35	0.9	1.3	2	4	125	5K
AA005-02	10.0	70	0.45	0.65	2	4	125	5K
AA006-00	5.0	35	0.9	1.3	2	4	125	30K
AA006-02	5.0	35	0.9	1.3	2	4	125	30K
AAH002-02	0.6	3.0	11.0	18.0	6	15	150	2K
AAH004-00	1.5	7.5	3.2	4.8	4	15	150	2K
AAL002-02	1.5	10.5	3.0	4.2	2	2	150	5.5K

Πίνακας 2: Ειδικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των ανιχνευτών AA-series. Πηγή: GMR sensor catalog, NVE corporation.

<b>Gradiometers:</b>							
Part Number	Linear Range ( Oe  )		Resistor Spacing (mm)	Maximum Non-linearity (% Uni. )	Maximum Hyster-esis (% Uni. )	Maximum Operating Temp (°C)	Typical Resis-tance (Ohms)
	Min	Max					
AB001-02	20	200	0.5	2	4	125	2.5K
AB001-00	20	200	0.5	2	4	125	2.5K
ABH001-00	5	40	0.5	4	15	150	1.2K

Πίνακας 3: Ειδικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των ανιχνευτών AB-series. Πηγή: GMR sensor catalog, NVE corporation.

Ο αισθητήρας που χρησιμοποιήσαμε στις μετρήσεις μας είναι τύπου AA-series, γι' αυτό θα δώσουμε μερικές λεπτομέρειες για την λειτουργία του στην επόμενη παράγραφο.

## 5.6. Ανιχνευτές AA-series

### 5.6.1. Περιγραφή

Οι αισθητήρες AA-series GMR είναι γενικής χρήσης μαγνητόμετρα που βρίσκουν εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα. Επιδεικνύουν εξαιρετική γραμμικότητα, μεγάλο σήμα εξόδου στα εφαρμοζόμενα μαγνητικά πεδία, σταθερά γραμμικά χαρακτηριστικά στη θερμοκρασία και μια καθαρά αναλογική έξοδο. Επειδή οι αισθητήρες αυτοί είναι λογομετρικές συσκευές, μπορούν να λειτουργούν κανονικά σε εξαιρετικά χαμηλές τιμές της τάσης τροφοδοσίας και το σήμα εξόδου είναι ανάλογο της τάσης αυτής. Το μέγιστο εύρος της τάσης περιορίζεται από την απώλεια ισχύος και τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του αισθητήρα.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται αυτού του τύπου ο ανιχνευτής GMR στον άξονα ευαισθησίας του, εικόνα αριστερά και το κύκλωμα του μαγνητόμετρου μέσα σε αυτό, εικόνα δεξιά.



Εικόνα 50: Στην αριστερή εικόνα φαίνεται η κεφαλή του ανιχνευτή στον άξονα ευαισθησίας του, η παροχή τάσης και οι έξοδοι του. Στην αριστερή εικόνα φαίνεται το κύκλωμα μέσα στον ανιχνευτή. Πηγή: GMR sensor catalog, NVE corporation.

### 5.6.2. Χαρακτηριστικά

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των AA-series ανιχνευτών είναι τα ακόλουθα:

- Είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι τα εφαρμοζόμενα μαγνητικά πεδία.
- Έχουν αναλογική έξοδο με γέφυρα Wheatstone.
- Η θερμοκρασία λειτουργίας φτάνει στους 125°C.

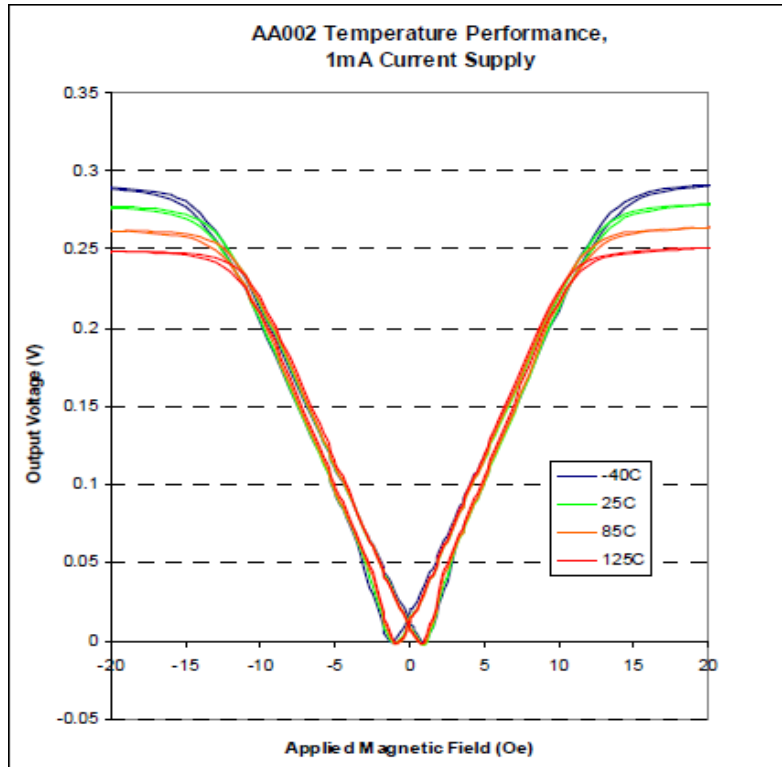
- Παρέχουν ευρύ γραμμικό εύρος λειτουργίας.
- Έχουν τάση λειτουργίας κοντά στο μηδέν.
- Η συχνότητα απόκρισής τους κυμαίνεται από DC (0Hz) μέχρι τιμές μεγαλύτερες του 1MHz.

Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται οι τιμές για τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους.

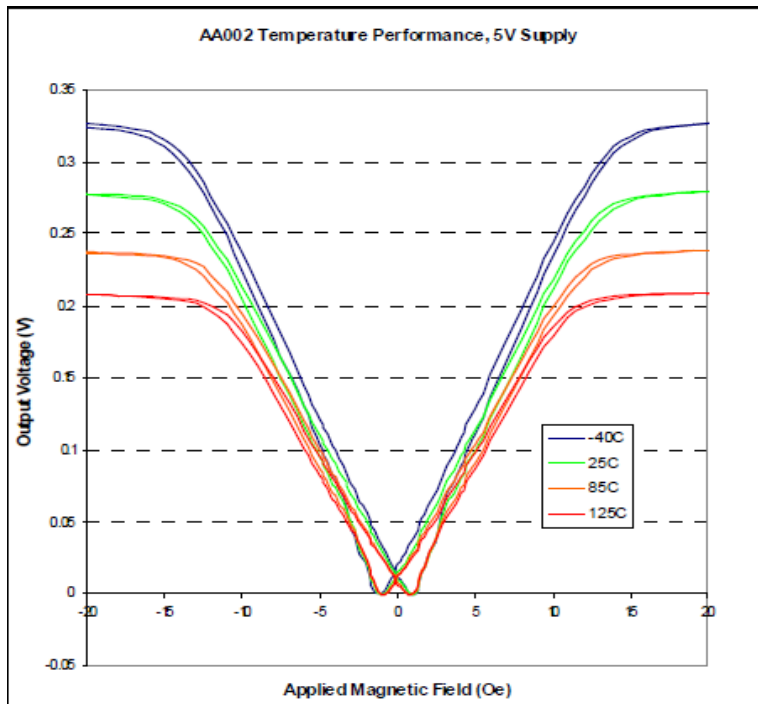
Αρχικά δίνονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές για το εύρος της τάσης εισόδου (input voltage range), η συχνότητα λειτουργίας (operating frequency), το εύρος της θερμοκρασίας που λειτουργεί κανονικά (operating temperature range) και η γέφυρα ηλεκτρικής μετατόπισης (bridge electrical offset) καθώς και οι μέγιστες τιμές πάνω από τις οποίες το σήμα παύει να είναι γραμμικό και εμφανίζει υστέρηση, για μονοπολική λειτουργία.

Ακόμα αναφέρονται οι τυπικές τιμές των παρακάτω μεγεθών:

- TCR: αφορά την μεταβολή της αντίστασης με τη θερμοκρασία, χωρίς εφαρμογή εξωτερικού πεδίου.
- TCOI: αφορά τη μεταβολή του σήματος εξόδου με τη θερμοκρασία, τροφοδοτώντας τον ανιχνευτή με πηγή σταθερού ρεύματος. Το επόμενο διάγραμμα δείχνει για τον ανιχνευτή AA002, τη μεταβολή του σήματος εξόδου συναρτήσει του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου για σταθερή παροχή ρεύματος ίση με 1mA.
- TCOV: αφορά τη μεταβολή του σήματος εξόδου με τη θερμοκρασία, τροφοδοτώντας τον ανιχνευτή με πηγή σταθερής τάσης.



Διάγραμμα 23: Μεταβολή στο σήμα εξόδου συναρτήσει του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου για σταθερή τιμή ρεύματος 1mA. Πηγή: GMR sensor catalog, NVE corporation.



Διάγραμμα 24: Μεταβολή στο σήμα εξόδου συναρτήσει του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου για σταθερή τάση 5V. Πηγή: GMR sensor catalog, NVE corporation.

Στη συνέχεια δίνεται η απομάκρυνση από τον κύριο άξονα που ισούται με το συνημίτονο της γωνίας απόκλισης από τον άξονα ευαισθησίας και τέλος η τιμή αντοχής στην ηλεκτρική εκκένωση

Parameter	Min	Typical	Max	Unit
Input Voltage Range	<1		24	Volts
Operating Frequency	DC		>1	MHz
Operating Temperature Range	-50		125	°C
Bridge Electrical Offset	-4		+4	mV/V
Signal Output at Max. Field		60		mV/V
Nonlinearity			2	% (unipolar)
Hysteresis			4	% (unipolar)
TCR		+0.14		% / °C <sup>6</sup>
TCOI		+0.03		% / °C <sup>6</sup>
TCOV		-0.1		% / °C <sup>6</sup>
Off Axis Characteristic		Cos β		
ESD Tolerance		400		V pin-to-pin HBM

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικές τιμές λειτουργίας των ανιχνευτών AA-series. Πηγή: GMR sensor catalog, NVE corporation.

### 5.6.3. Εφαρμογές

Οι GMR AA-series αισθητήρες βρίσκουν εφαρμογές στους παρακάτω τομείς:

- Γενικά στην κίνηση: αισθητήρες ταχύτητας και θέσης
- Σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος και τάσης
- Ανίχνευση χαμηλών πεδίων
- Ανίχνευση ρεύματος



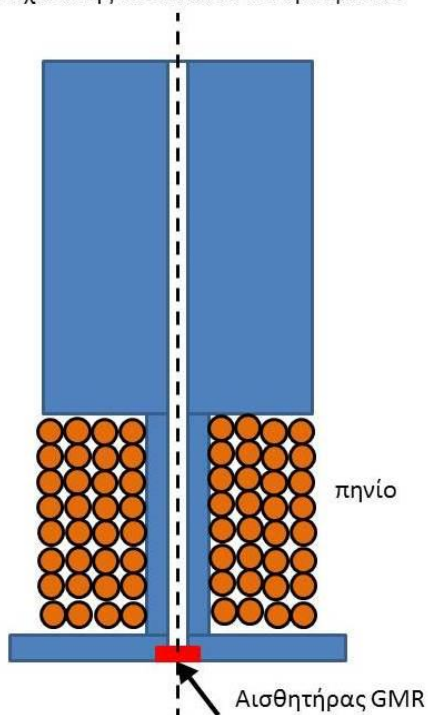
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

#### 6.1. Κατασκευή πηνίου ανίχνευσης.

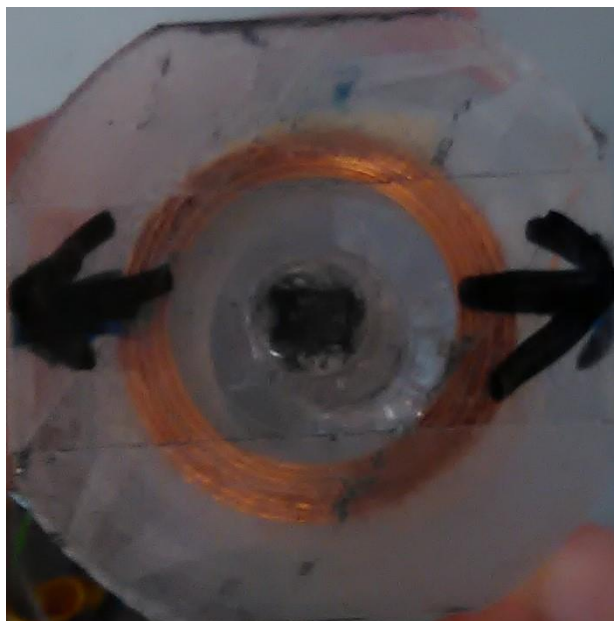
Για την εκτέλεση των μετρήσεων κατασκευάσαμε μία διάταξη εφαρμογής του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου και ανίχνευσης του μαγνητικού πεδίου των δινορευμάτων (probe). Η διάταξη αποτελούταν από ένα κυλινδρικό κομμάτι Plexiglas το οποίο είχε μορφοποιηθεί κατάλληλα για το τύλιγμα του πηνίου, δημιουργίας του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου. Στο κάτω μέρος του κυλινδρικού τεμαχίου από Plexiglas πάνω στον άξονα του κυλίνδρου τοποθετήθηκε ο αισθητήρας GMR με κωδικό AA002. Το πηνίο κατασκευάστηκε από καλώδιο χαλκού τύπου 31AWG (διαμέτρου 0,227mm) σε 20 στρώσεις των 44, περίπου σπειρών. Η κατασκευή φαίνεται στην επόμενη εικόνα.

Τομή της διάταξης επιβολής του μαγνητικού πεδίου και ανίχνευσης του πεδίου δινορευμάτων



Εικόνα 51: Το πηνίο της πειραματική διάταξης.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η κάτω επιφάνεια της διάταξης. Τα μαύρα βέλη δείχνουν την διεύθυνση μέγιστου σήματος του αισθητήρα GMR.



*Εικόνα 52: Κάτοψη του πηνίου με τον ανιχνευτή GMR στο κέντρο του. Με βέλη είναι σημειωμένες οι κατευθύνσεις κίνησης του πηνίου, ώστε να αυτή να γίνεται στον άξονα ευαισθησίας του ανιχνευτή.*

Το πηνίο τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση, ελεγχόμενης συχνότητας και πλάτους από το τροφοδοτικό του επόμενου σχήματος.



*Εικόνα 53: Το τροφοδοτικό εναλλασσόμενης τάσης, της πειραματικής διάταξης.*

Τον αισθητήρα GMR τον συνδέσουμε με την κάρτα συλλογής δεδομένων της National Instrument με κωδικό NI USB-6216 που μετατρέπει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό σήμα. Η κάρτα ελέγχεται από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η κάρτα διαθέτει επίσης μία έξοδο μεταβλητής αναλογικής τάσης την οποία χρησιμοποιήσαμε για την πόλωση του αισθητήρα GMR. Τόσο ο καθορισμός της τάσης λειτουργίας, του αριθμού των μετρήσεων (number of samples) και του ρυθμού των μετρήσεων (samples rate), όσο και η συλλογή των δεδομένων, έγινε με το λογισμικό LabView. Η κάρτα NI USB-6216 φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 54: Η κάρτα ψηφιοποίησης σήματος NI USB-6216 της πειραματικής διάταξης.

## 6.2. Κατασκευή δειγμάτων ανίχνευσης ατελειών

Για την εκτέλεση των μετρήσεών μας κατασκευάσαμε δύο οικογένειες τεχνητών ατελειών σε τεμάχια αλουμινίου. Στην πρώτη οικογένεια δημιουργήσαμε μία εσοχή στη μία πλευρά ορθογώνιας πλάκας αλουμινίου, βάθους 50μm και μήκους 2cm καθώς και μια εσοχή στην πλευρά όμοιας πλάκας αλουμινίου, βάθους 20μm και μήκους 4,5cm. Οι πλάκες και οι εγκοπές χαραχτήκαν με το μηχάνημα κοπής (φρέζα) στο μηχανουργείο. Στο επόμενο σχήμα φαίνονται οι δύο πλάκες.



*Εικόνα 55: Οι πλάκες αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν στην ανίχνευση των ρωγμών. Αριστερά η πλάκα με εγκοπή πάχους 50μm στη μία πλευρά της και στα δεξιά η πλάκα με την εγκοπή πάχους 20μm στη μία πλευρά της.*

Στο δεύτερο κομμάτι των πειραμάτων, χρησιμοποιήσαμε μια ράβδο ορθογώνιας διατομής. Κάθετα στην μεγάλη πλευρά της ράβδου ανοίξαμε διαμερείς κυλινδρικές οπές, των οποίων οι άξονες απείχαν 2mm, 5mm 3mm και 1 mm από την επιφάνεια της ράβδου (δες σχήμα 97).



*Εικόνα 56: Η διάταξη με τις διαπερατές τρύπες που χρησιμοποιήσαμε στο πείραμα. Μελετήθηκαν οι (2) και η (4).*

Από τις παραπάνω οπές, εμείς μελετήσαμε τη μεγάλη (2) διαμέτρου  $\sim 6,5\text{mm}$  σε απόσταση από την κάτω επιφάνεια (όπως φαίνεται στην εικόνα)  $\sim 2\text{mm}$  και τη μικρή (4) διαμέτρου  $\sim 3\text{mm}$  σε απόσταση από την πάνω επιφάνεια (όπως φαίνεται στην εικόνα)  $\sim 1\text{mm}$ . Οι διαστάσεις του αισθητήρα είναι της τάξης του  $1\text{mm}$ , ενώ οι διαστάσεις των οπών είναι της τάξης του  $1\mu\text{m}$

### **6.3. Καταγραφή Μετρήσεων – Κατασκευή Διαγραμμάτων**

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στην «επιφάνεια διεπαφής με το χρήστη» (front panel) του λογισμικού (σε κώδικα Labview) εμφανιζόταν (α) η διαφορά δυναμικού στα άκρα του αισθητήρα GMR συναρτήσει του χρόνου, (β) η φασματική πυκνότητα του σήματος συναρτήσει της συχνότητας και (γ) η μέση τετραγωνική τιμή σήματος (RMS) συναρτήσει του χρόνου. Η μέση τιμή RMS του σήματος ήταν ο μέσος όρος της διαφοράς δυναμικού σε ένα χρονικό διάστημα ίσο με το πηλίκο του αριθμού των δειγμάτων (samples) της κάρτας ψηφιοποίησης σήματος, προς το ρυθμό συλλογής δεδομένων (sample rate). Θα πρέπει να τονίσουμε ότι η μέση τιμή RMS του σήματος είναι ανάλογη με την οριζόντια συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής στη θέση του αισθητήρα στη συχνότητα του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου.

Το μαγνητικό πεδίο που προκαλείται από το πηνίο θα είναι εναλλασσόμενο με συχνότητα ταλάντωσης όση του ρεύματος που διέρχεται από αυτό. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η κυρίαρχη συνιστώσα του συγκεκριμένου μαγνητικού πεδίου στον



άξονα του πηνίου θα έχει κατεύθυνση παράλληλη με τον άξονα του πηνίου. Άρα, επειδή ο αισθητήρας μετρά την συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής που είναι κάθετη στον άξονα του πηνίου το σήμα από αυτό το μαγνητικό πεδίο θα είναι πολύ μικρό. Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο του πηνίου επάγει δινορεύματα στην πλάκα αλουμινίου τα οποία ταλαντώνονται στην ίδια συχνότητα αυτή του μαγνητικού πεδίου του πηνίου. Προφανώς η φάση των δινορευμάτων θα εξαρτάται από βάθος που αυτά ρέουν μέσα στην πλάκα. Οι γραμμές ροής των δινορευμάτων θα είναι κύκλοι στην περίπτωση που έχουμε μία άπειρη πλάκα. Το μαγνητικό πεδίο των δινορευμάτων σ' αυτή την περίπτωση θα είναι παράλληλο με τον άξονα του πηνίου. Όταν όμως συναντήσουν μία ασυνέχεια τότε τα δινορεύματα αναγκάζονται να κινηθούν παράλληλα στην ασυνέχεια. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση οριζόντιας συνιστώσας στο μαγνητικό πεδίο που προκαλούν τα δινορεύματα. Αυτή ακριβώς την συνιστώσα ανιχνεύει ο αισθητήρας GMR και κατά συνέπεια την ασυνέχεια.

Στις μετρήσεις μας καταγράψαμε την μέση τιμή RMS του σήματος από τον αισθητήρα GMR συναρτήσει της θέσης του. Τα αποτελέσματα τα απεικονίζαμε στην διεπιφάνεια υπολογιστή-χρήστη. Είχαμε επίσης την δυνατότητα να τα αποθηκεύσουμε σε ένα αρχείο.

Στη συνέχεια όπου αναφερόμαστε στο διάγραμμα του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου, θα εννοούμε τη τιμή RMS αυτού, που καταγράφεται στα αρχεία .txt.

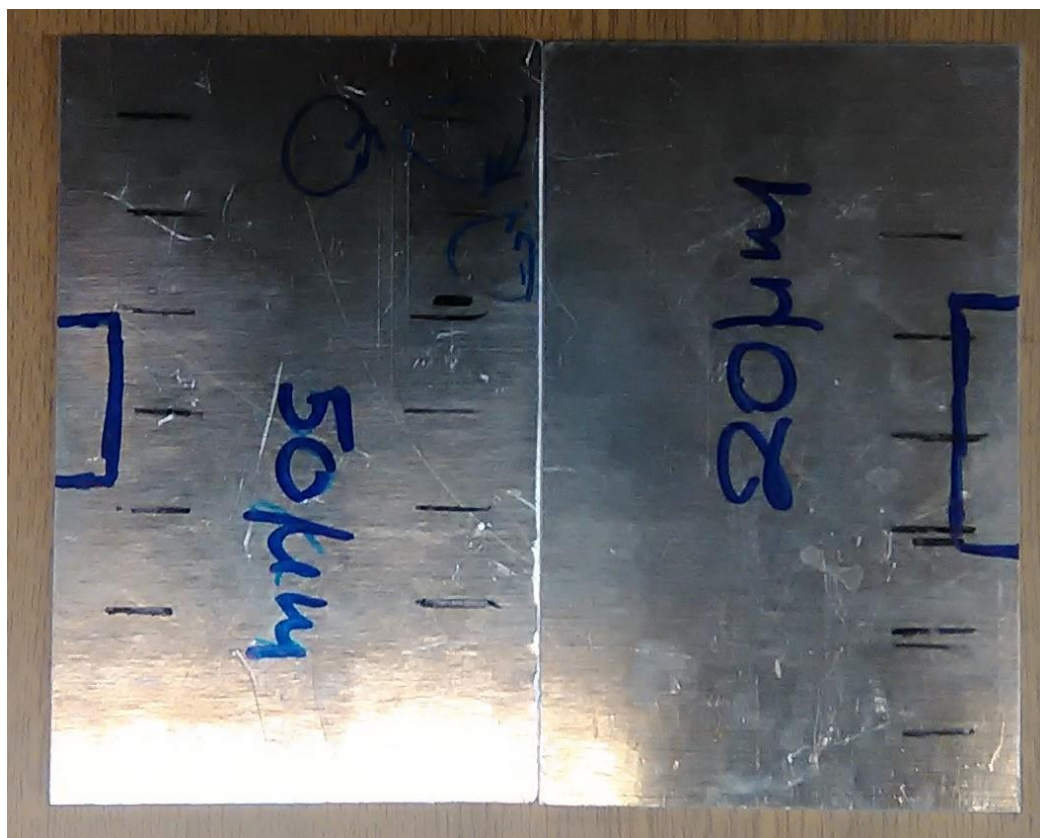
## **6.4. Πειραματικά δεδομένα**

### **6.4.1. Ανίχνευση ρωγμών σε πλάκες αλουμινίου**

Στο κομμάτι αυτό του πειράματος προσομοιάσαμε την ανίχνευση ρωγμών, διαφορετικού πάχους, στο αλουμίνιο. Έτσι το πείραμά μας χωρίζεται σε τρία διαφορετικά μέρη: ανίχνευση ρωγμής απειροστού πάχους, πάχους 20μm και 50μm.

#### **6.4.1.1. Μέτρηση με πηνίο που δε διαρρέεται από ρεύμα**

Στην αρχή των πειραμάτων πήραμε μια μέτρηση, φέρνοντας τις πλάκες αλουμινίου σε επαφή στις άθικτες πλευρές τους, όπως δείχνει το επόμενο σχήμα, χωρίς το πηνίο να διαρρέεται από ρεύμα.

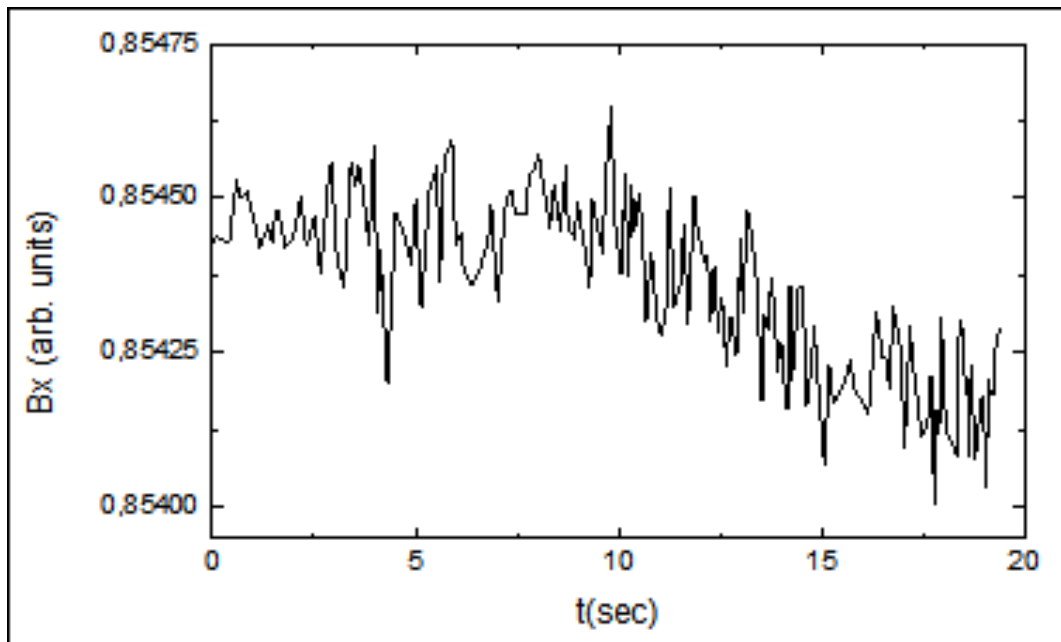


Εικόνα 57: Οι πλάκες αλουμινίου σε επαφή στις άθικτες πλευρές τους.

Για αυτήν την μέτρηση, στο Labview βάλαμε τις εξής τιμές: για τον αριθμό των μετρήσεων που παίρνει ο ανιχνευτής:  $\text{samples}=100$  και για τον αντίστοιχο ρυθμό:  $\text{rate}=1000$ , ενώ για την τάση αποκοπής, που διαμορφώνει το διάγραμμα  $V(t)$ , χωρίς θόρυβο:  $\text{lower cut-off}=50\text{Hz}$ .

Σε αυτή τη μέτρηση δεν περιμένουμε να δείξει τίποτα ο ανιχνευτής, καθώς δε δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Άρα η αναμενόμενη καμπύλη είναι μια ευθεία παράλληλη στον άξονα της θέσης, στην ένδειξη 0.85 περίπου, που μετράει ο ανιχνευτής για μηδενικό εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση του δεύτερου δείγματος της μακρόστενης ράβδου ορθογώνιας διατομής με τις διαμπερείς οπές. Έτσι κρατάμε τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της μετατόπισης  $B(x)$  και τις μεταφέρουμε σε ένα διάγραμμα που έχει την παρακάτω μορφή:





Διάγραμμα 25:  $B=f(t)$ , όταν το πηνίο δε διαρρέεται από ρεύμα (Origin).

Βλέπουμε ότι δεν υπάρχει καμία διαφορά στην καμπύλη την ώρα που ο ανιχνευτής διέρχεται εγκάρσια στην ευθεία επαφής των δύο πλακών. Η μορφή της καμπύλης  $B(x)$ , που δε είναι σταθερή αλλά έχει μια διακύμανση γύρω από την τιμή 0.85425 Gauss του μαγνητικού πεδίου, που οφείλεται μόνο στο θόρυβο.

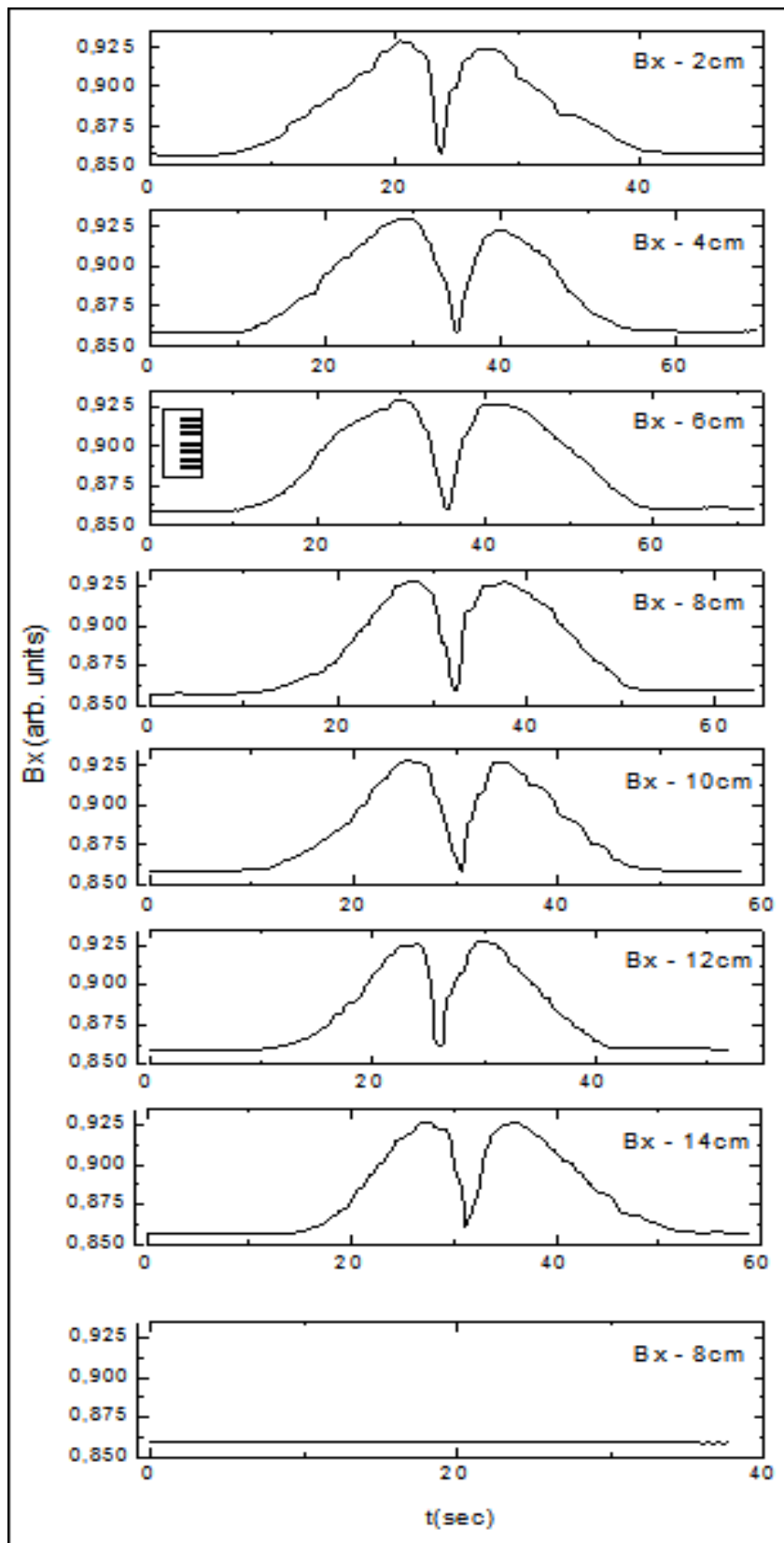
#### 6.4.1.2. Ανίχνευση ρωγμής απειροστού πάχους

Για να πετύχουμε την προσομοίωση ρωγμής απειροστού πάχους, ακουμπήσαμε τις πλάκες αλουμινίου στις άθικτες πλευρές τους, όπως στη μέτρηση της προηγούμενης παραγράφου και περάσαμε τον ανιχνευτή με το πηνίο κάθετα στη ρωγμή κατά μήκος του άξονα ευαισθησίας του, σε εφτά διαφορετικές αποστάσεις κατά μήκος της ρωγμής: 2cm, 4cm, 6cm, 8cm, 10cm, 12cm, 14cm. Τέλος πήραμε μία μέτρηση περνώντας των ανιχνευτή από τη ρωγμή με τον άξονα ευαισθησίας του παράλληλα στη ρωγμή, στην απόσταση των 8cm.

Αρχικά ρυθμίζουμε το τροφοδοτικό να παρέχει στο πηνίο εναλλασσόμενο ρεύμα πλάτους  $I=10A$  και συχνότητας  $f=700Hz$ , στην οποία το σήμα του ανιχνευτή γίνεται μέγιστο.

Έπειτα ρυθμίζουμε τον αριθμό των μετρήσεων και τον ρυθμό τους, ακολουθώντας τον κανόνα:  $f_{samples} \geq 2f_i$ , δηλαδή για να είναι σωστό το διάγραμμα πρέπει ο ρυθμός των μετρήσεων (sample rate) να είναι τουλάχιστον διπλάσιος από τη συχνότητα του ρεύματος. Έτσι έχουμε: samples=500 και rate=2000 samples/s. Η συχνότητα αποκοπής, μένει σταθερή στα 50Hz.

Τα διαγράμματα είναι κατά τη σειρά στην επόμενη σελίδα.



Διάγραμμα 26: Ρωγμή απειροστού πάχους,  $B=f(t)$ . Στις πρώτες έξι καμπύλες φαίνεται η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύεται, όταν ο ανιχνευτής διέρχεται με τον άξονα ευαισθησίας του κάθετα στη ρωγμή, σε εφτά διαφορετικές αποστάσεις κατά μήκος της ρωγμής, ανά 2cm. Στην τελευταία καμπύλη, ο ανιχνευτής διέρχεται με τον άξονα ευαισθησίας του παράλληλα στη ρωγμή, όπου δεν ανιχνεύεται η ρωγμή. (Origin)

Βλέπουμε ότι πριν και μετά τη ρωγμή η γραφική παράσταση παρουσιάζει δύο μέγιστα. Το σημείο ελαχίστου ανάμεσα σε αυτά, ταυτίζεται με το σημείο στο οποίο ο ανιχνευτής διέρχεται ακριβώς πάνω από τη ρωγμή.

Οι καμπύλες που ανιχνεύουν τη ρωγμή, έχουν όλες την ίδια μορφή, καθώς η ρωγμή έχει σταθερό βάθος και περίπου το ίδιο πλάτος (με μικρές ανωμαλίες που έχουν να κάνουν με την κατασκευή των πλακών). Οι μικρές διακυμάνσεις των καμπυλών όσον αφορά το πάχος των μεγίστων, οφείλονται στο γεγονός ότι οι μετρήσεις πάρθηκαν χειροκίνητα, συνεπώς υπήρχαν μικρές μεταβολές τόσο στην κίνηση του χεριού όσο και στην ταχύτητα των μετρήσεων, αλλά και στο θόρυβο.

Η τελευταία καμπύλη που δείχνει το μαγνητικό πεδίο που ανιχνεύεται όταν ο ανιχνευτής διέρχεται από τη ρωγμή με τον άξονα ευαισθησίας του παράλληλα σε αυτή, είναι περίπου ευθεία, με διακυμάνσεις που οφείλονται στο θόρυβο, αλλά και σε σφάλματα λόγω της κίνησης του χεριού. Όπως αναμενόταν η ρωγμή, δεν ανιχνεύεται με αυτόν τον τρόπο.

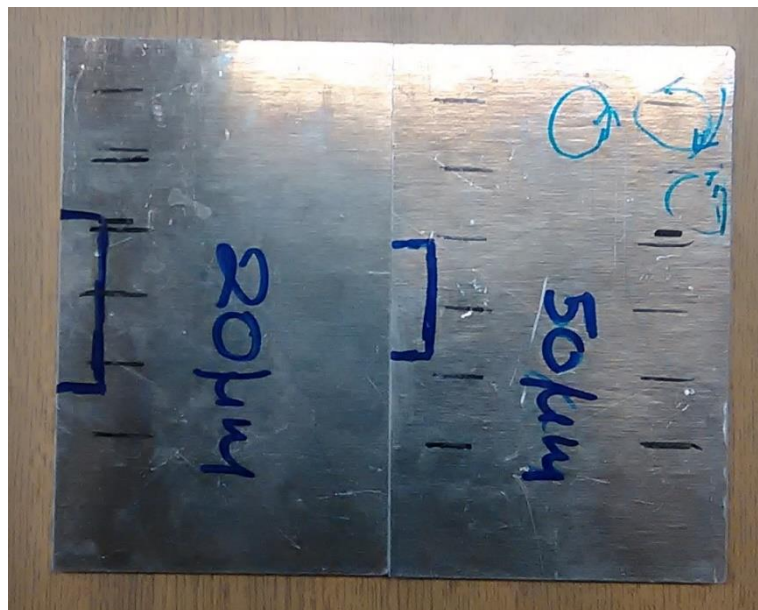
### 6.4.1.3. Ανίχνευση ρωγμών πάχους 20 $\mu\text{m}$ και 50 $\mu\text{m}$

Σε αυτό το κομμάτι του πειράματος για να κατασκευάσουμε τη ρωγμή πάχους 20 $\mu\text{m}$ , φέρνουμε σε επαφή το τμήμα της μιας πλάκας αλουμινίου με την εγκοπή των 20 $\mu\text{m}$  με μία από τις άθικτες πλευρές της δεύτερης πλάκας, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 58: Ρωγμή πάχους 20 $\mu\text{m}$ .

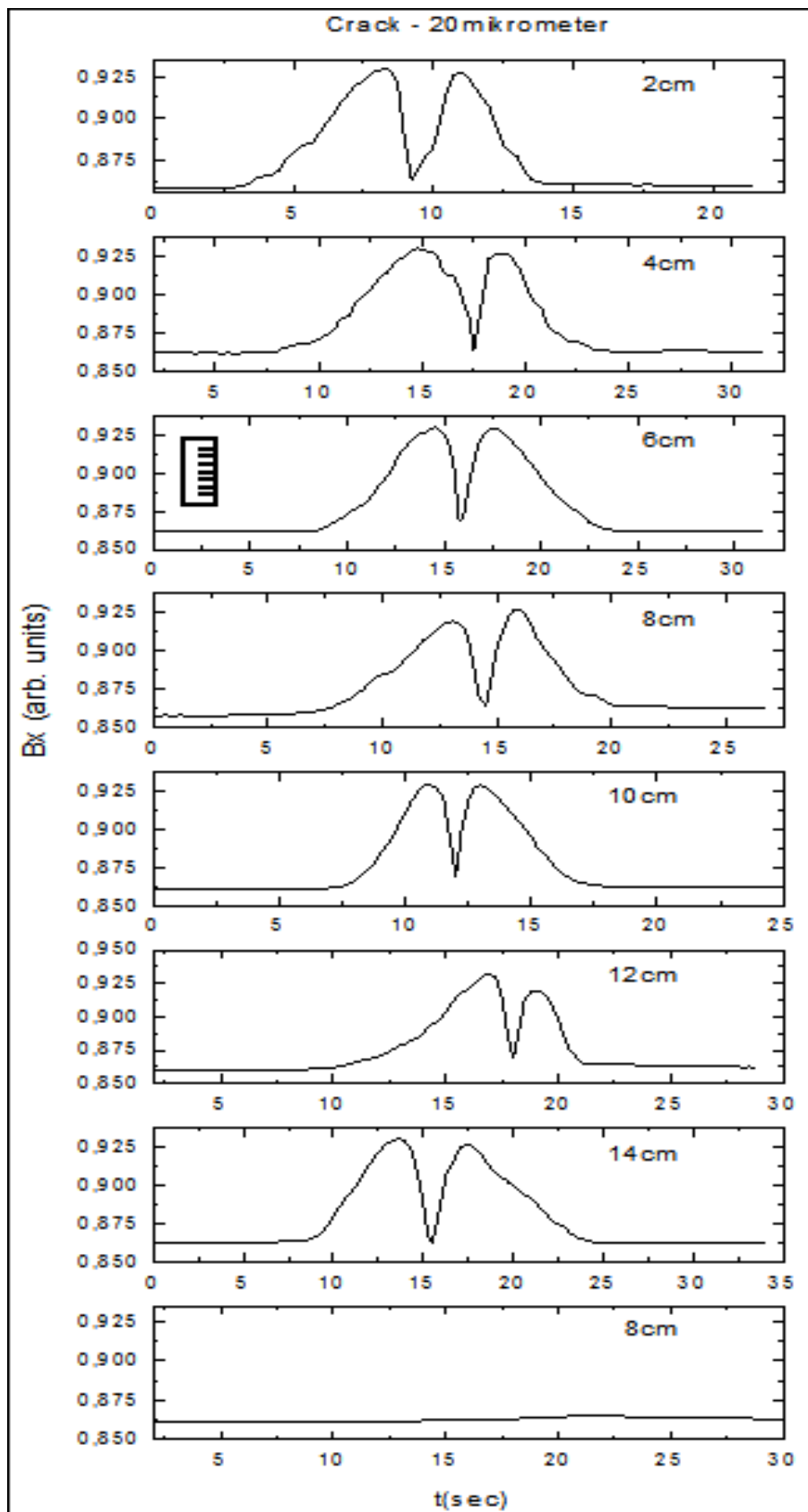
Αντίστοιχα, φτιάχνουμε τη ρωγμή πάχους 50 $\mu\text{m}$ , φέρνοντας την πλευρά της πλάκας με την εγκοπή των 50 $\mu\text{m}$  σε επαφή με μία από τις άθικτες πλευρές της άλλης πλάκας, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



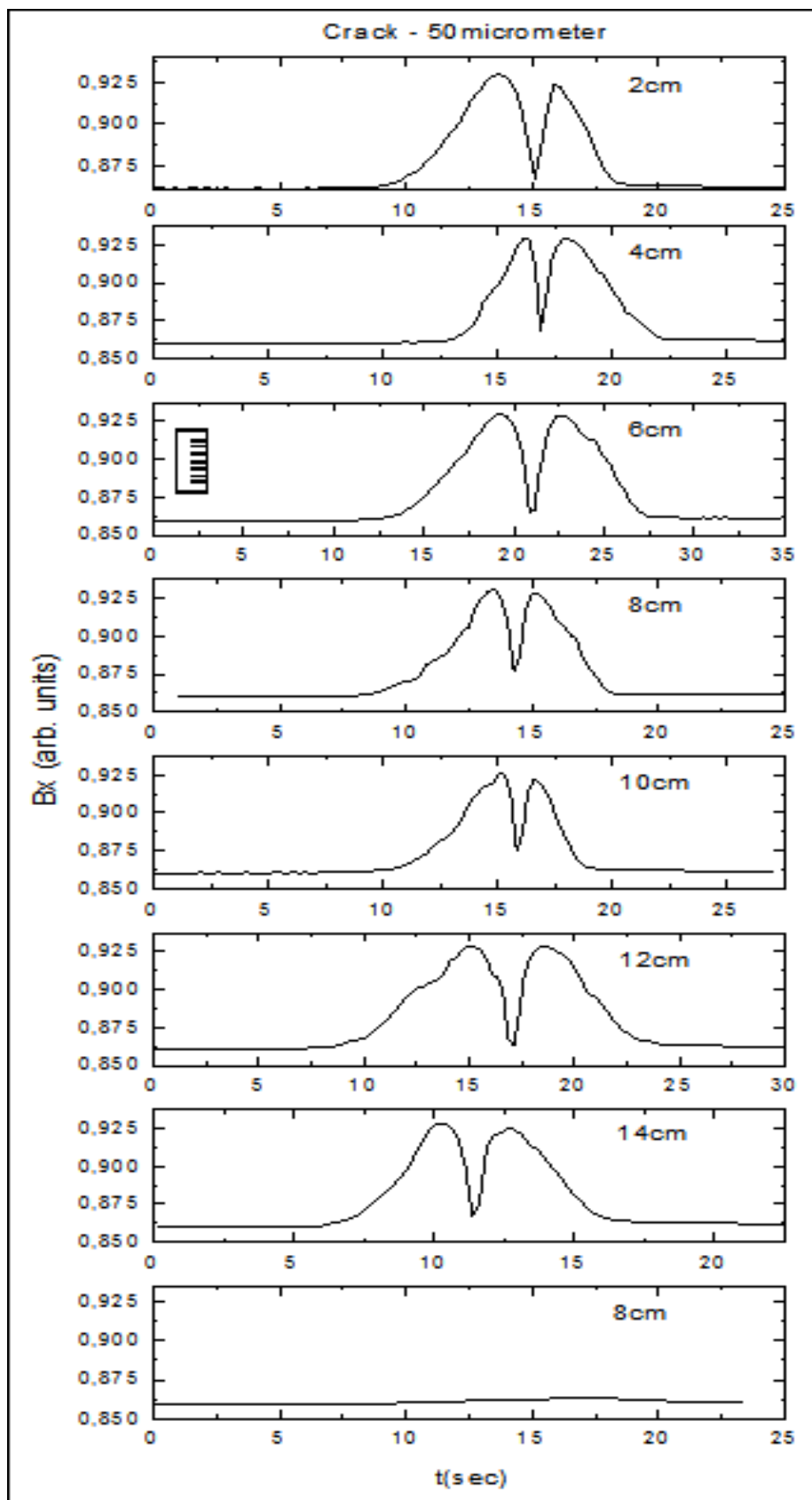
Εικόνα 59: Ρωγμή πάχους 1 $\mu\text{m}$

Στη συνέχεια επαναλάβαμε τις μετρήσεις της προηγούμενης παραγράφου. Κρατώντας τις τιμές για το ρεύμα και τη συχνότητά των τιμών samples, rate και lower cut-off στο Labview, σταθερές, περάσαμε τον ανιχνευτή με το πηνίο κάθετα στη ρωγμή των 20μm με τον άξονα ευαισθησίας του κάθετα στη ρωγμή, σε εφτά διαφορετικές αποστάσεις κατά μήκος της ρωγμής: 2cm, 4cm, 6cm, 8cm, 10cm, 12cm, 14cm. Τέλος πήραμε μία μέτρηση περνώντας των ανιχνευτή από τη ρωγμή με τον άξονα ευαισθησίας του παράλληλα στη ρωγμή, στην απόσταση των 8cm.

Έπειτα συλλέξαμε όμοιες μετρήσεις για τη ρωγμή των 50μm. Τα διαγράμματα φαίνονται στις επόμενες σελίδες και έχουν την ίδια μορφή με τα διαγράμματα της ρωγμής απειροστού πάχους, εμφανίζουν δύο μέγιστα δεξιά και αριστερά από το σημείο της ρωγμής και ένα ελάχιστο πάνω από τη ρωγμή.



Διάγραμμα 2723: Ρωγμή πάχους 20μm,  $B=f(t)$ . Στις πρώτες έξι καμπύλες φαίνεται η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύεται, όταν ο ανιχνευτής διέρχεται με τον άξονα ευαισθησίας του κάθετα στη ρωγμή, σε εφτά διαφορετικές αποστάσεις κατά μήκος της ρωγμής, ανά 2cm. Στην τελευταία καμπύλη, ο ανιχνευτής διέρχεται με τον άξονα ευαισθησίας του παράλληλα στη ρωγμή, όπου δεν ανιχνεύεται η ρωγμή. (Origin)



Διάγραμμα 28: Ρωγμή πάχους 50μm,  $B=f(t)$ . Στις πρώτες έξι καμπύλες φαίνεται η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύεται, όταν ο ανιχνευτής διέρχεται με τον άξονα ευαισθησίας του παράλληλα με τη ρωγμή, σε εφτά διαφορετικές αποστάσεις κατά μήκος της ρωγμής, ανά 2cm. Στην τελευταία καμπύλη, ο ανιχνευτής διέρχεται με τον άξονα ευαισθησίας του κάθετα στη ρωγμή, όπου δεν ανιχνεύεται η ρωγμή. (Origin)

#### 6.4.1.4. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στα παραπάνω γραφήματα  $B(t)$ , στα οποία καταγράφεται η μέση τιμή RMS του μαγνητικού πεδίου, που προκύπτει από το άθροισμα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου, σε σχέση με το χρόνο, φαίνεται καθαρά ότι στα σημεία του υλικού που δεν υπάρχει κάποια ανωμαλία, το μαγνητικό πεδίο παραμένει σταθερό και η καμπύλη παράλληλη στον άξονα του χρόνου. Δεξιά και αριστερά της ρωγμής, η καμπύλη παρουσιάζει δύο συμμετρικά μέγιστα, ενώ πάνω στο σημείο της ρωγμής καταγράφεται ένα ελάχιστο. Βλέπουμε ότι με αυτήν τη μέθοδο, μπορούμε να ανιχνεύσουμε ρωγμές απειροστού πάχους.

Η μορφή των μεγίστων και του ελαχίστου (ύψος και εύρος) οφείλεται στο πάχος των διαφορετικών ρωγμών και στην ταχύτητα της μέτρησης. Ενώ αναμενόταν, σε θεωρητικό επίπεδο το ύψος των μεγίστων να αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάχος της ρωγμής, βλέπουμε ότι είναι περίπου σταθερό καθώς οι μετρήσεις δε γίνονται με σταθερή ταχύτητα για να μπορέσει να καταγραφεί η διαφορά αυτή.

### 6.4.2. Ανίχνευση οπών στο εσωτερικό πλάκας αλουμινίου

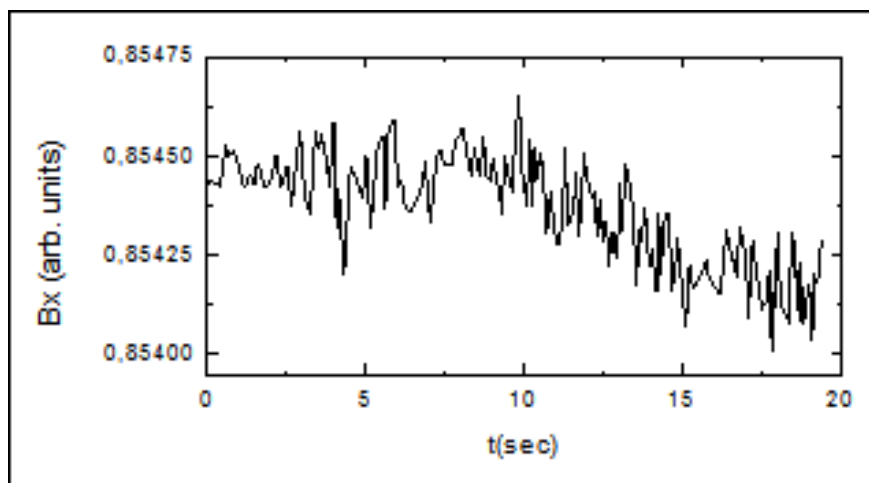
Στο τμήμα αυτό του πειράματος χρησιμοποιήσαμε το κομμάτι του αλουμινίου με τις διαπερατές οπές, στην επιφάνεια του οποίου περάσαμε τον ανιχνευτή και καταγράψαμε, όπως και προηγούμενα την καμπύλη  $B(t)$ . Το πείραμα χωρίζεται σε δύο μέρη, αρχικά ανιχνεύσαμε την μικρή οπή κι έπειτα τη μεγαλύτερη.

#### 6.4.2.1. Μέτρηση με πηνίο που δε διαρρέεται από ρεύμα

Στην αρχή πήραμε μια μέτρηση περνώντας το πηνίο στην επιφάνεια του κομματιού του αλουμινίου πάνω από τις οπές του χωρίς αυτό να διαρρέεται από ρεύμα. Στο Labview βάλαμε τις εξής τιμές: samples=100, rate=1000 και lower cut-off=50Hz.

Η καμπύλη  $B(t)$  φαίνεται στο επόμενο διαγραμμα.



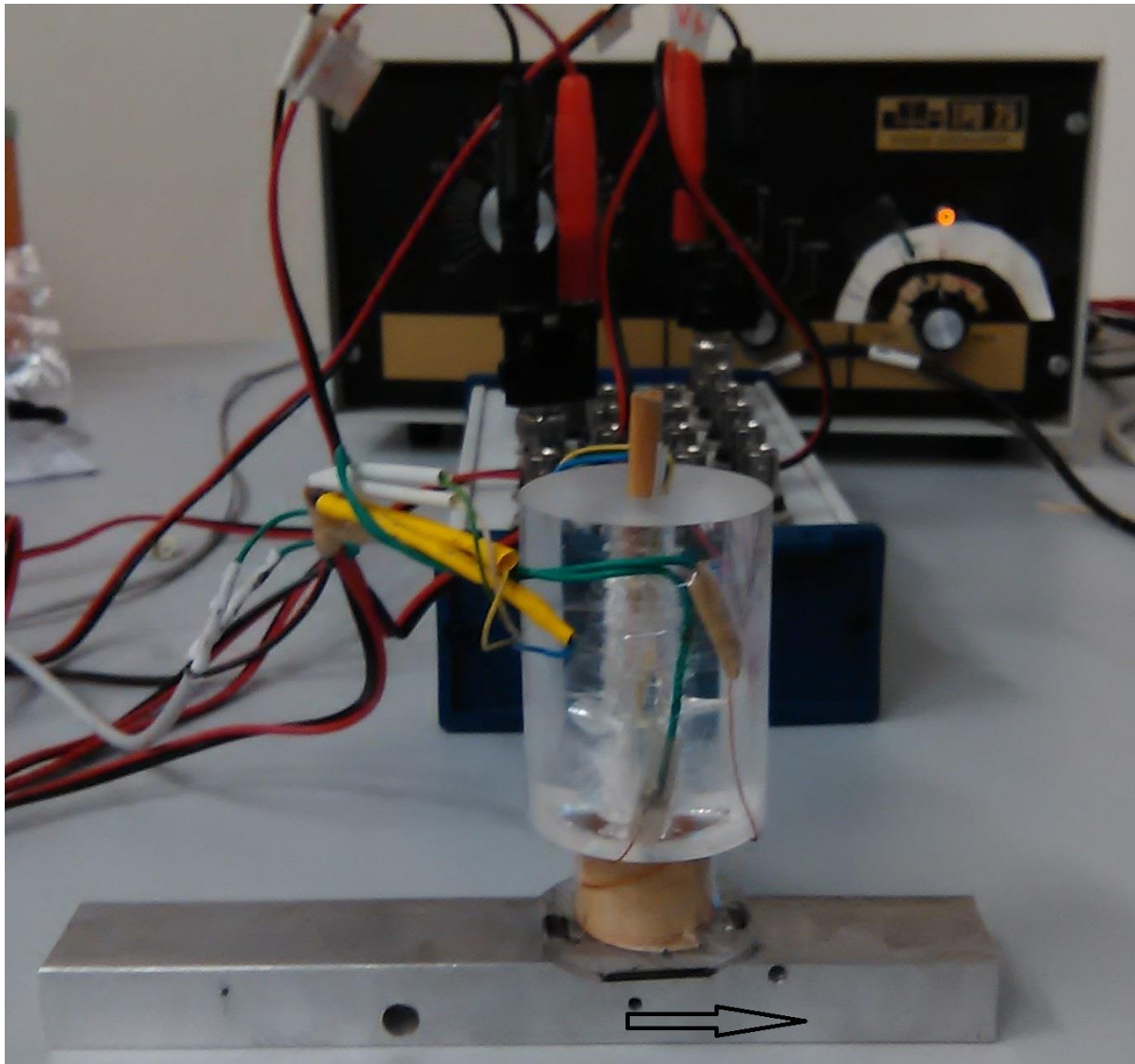


Διάγραμμα 29:  $B=f(t)$ , όταν το πηνίο δε διαρρέεται από ρεύμα (Origin).

Βλέπουμε ότι (όπως και στο αντίστοιχο της παραγράφου 4.1.1.) ο ανιχνευτής δεν καταγράφει τίποτα καθώς διέρχεται πάνω από τις οπές, παρά το θόρυβο. Έτσι οι μετρήσεις παρουσιάζουν μία διακύμανση γύρω από την τιμή 0,85425Gauss.

#### 6.4.2.2. Ανίχνευση μικρής οπής

Στην ανίχνευση της μικρής οπής, περάσαμε τον ανιχνευτή στην επιφάνεια του αλουμινίου πάνω από τη μικρή οπή, με τον άξονα ευαισθησίας του τη μία φορά παράλληλο με τη διεύθυνση της κίνησης και την άλλη φορά κάθετο. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η διαδικασία της μέτρησης.

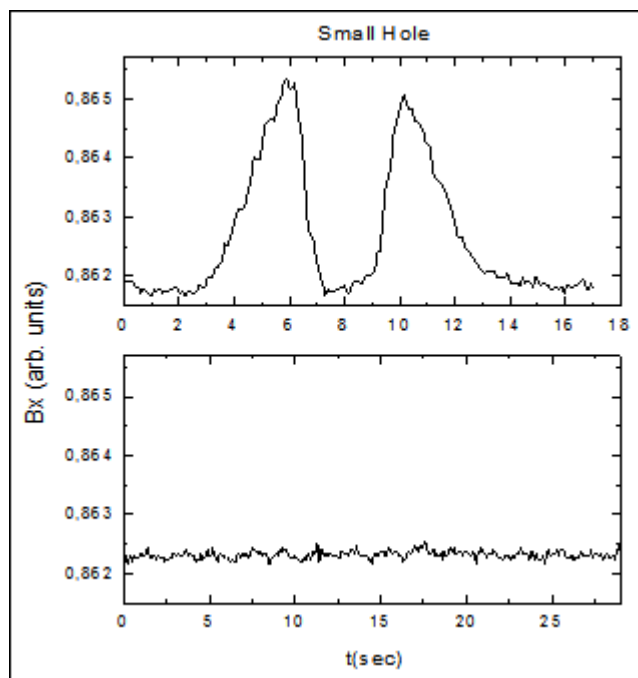


Εικόνα 60: Ανίχνευση μικρής οπής.

Αρχικά ρυθμίζουμε το τροφοδοτικό να παρέχει στο πηνίο εναλλασσόμενο ρεύμα πλάτους  $I=10A$  και συχνότητας  $f=750Hz$ , στην οποία το σήμα του ανιχνευτή για την μικρή οπή γίνεται μέγιστο.

Στο Labview ρυθμίζουμε τις τιμές: samples=200, rate=2000 και lower cut-off=50Hz.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στα επόμενα διαγράμματα, όπου στο πρώτο ο ανιχνευτής περνάει πάνω από την οπή με τον άξονα ευαισθησίας του παράλληλο στη φορά της κίνησης και στο δεύτερο με τον άξονα ευαισθησίας του κάθετο στη φορά κίνησης.



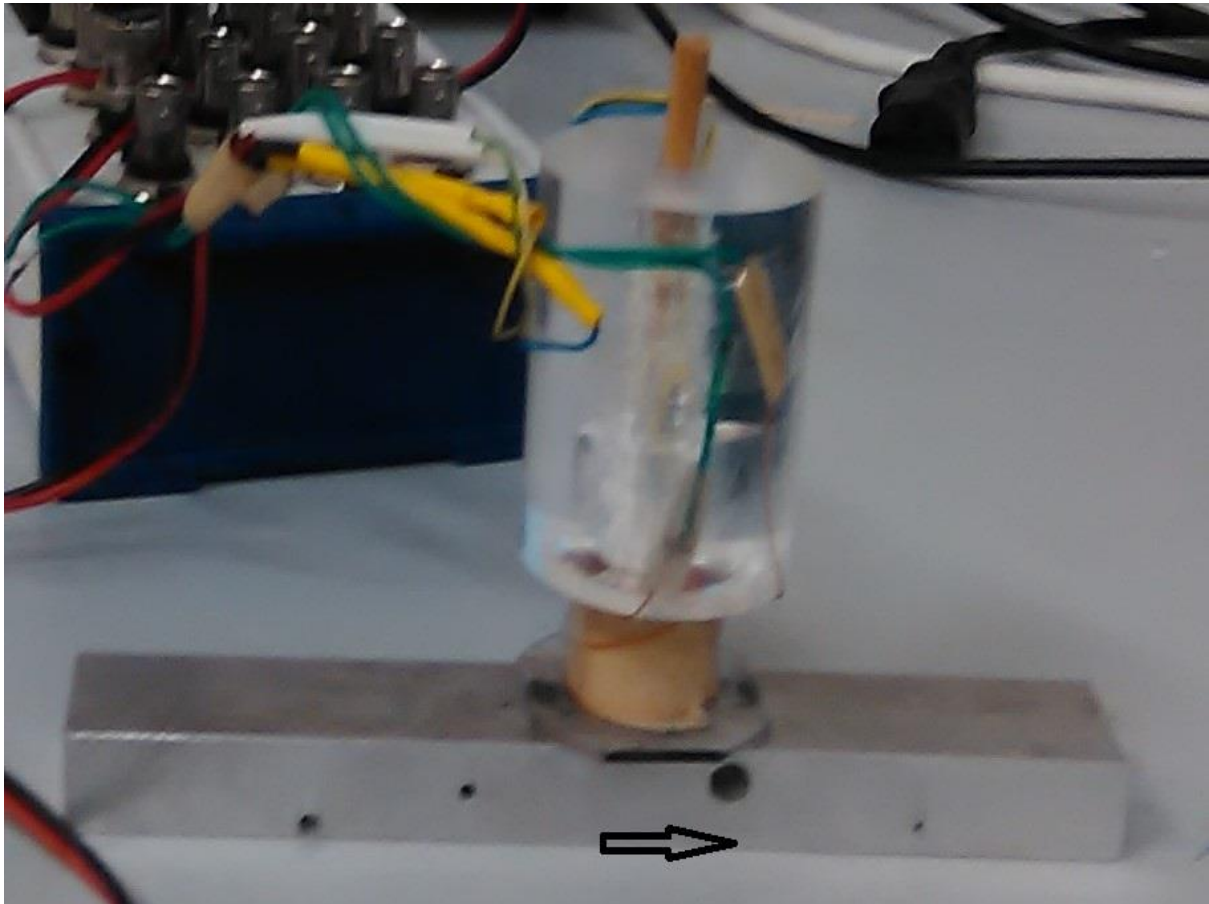
Διάγραμμα 240:  $B(t)$ , για την μικρή οπή. Στο πάνω διάγραμμα ο ανιχνευτής διέρχεται από την οπή με τον άξονα ευαισθησίας του παράλληλα στη φορά κίνησης. Στο κάτω διάγραμμα ο ανιχνευτής διέρχεται από την οπή με τον άξονα ευαισθησίας του κάθετα στη φορά κίνησης. (Origin)

Όταν ο ανιχνευτής διέρχεται παράλληλα στην φορά κίνησής του πάνω από την οπή, παρατηρούμε ότι πριν και μετά την οπή, η καμπύλη παρουσιάζει δύο μέγιστα, ενώ πάνω από το σημείο της οπής εμφανίζει ελάχιστο. Όταν διέρχεται κάθετα, βλέπουμε ότι η καμπύλη είναι μια ευθεία παράλληλη στον άξονα του χρόνου, αφού ο ανιχνευτής διέρχεται με τον άξονα ευαισθησίας του κάθετα στην φορά της κίνησης του, άρα δεν μπορεί να καταγράψει τίποτα.

Οι διακυμάνσεις στα δύο διαγράμματα οφείλονται στην κίνηση του χεριού κατά τη διάρκεια της μέτρησης, η οποία δεν είναι σταθερή και αυξάνει το σφάλμα όταν πλησιάζει τα όρια του αλουμινίου και στο θόρυβο.

#### 6.4.2.3. Ανίχνευση μεγάλης οπής

Επαναλάβαμε τη διαδικασία της παραπάνω παραγράφου, περνώντας τώρα τον ανιχνευτή πάνω από τη μεγάλη οπή, μία φορά με τον άξονά του παράλληλο στη φορά κίνησης και μία κάθετο. Η διαδικασία της μέτρησης, φαίνεται στην επόμενη εικόνα.

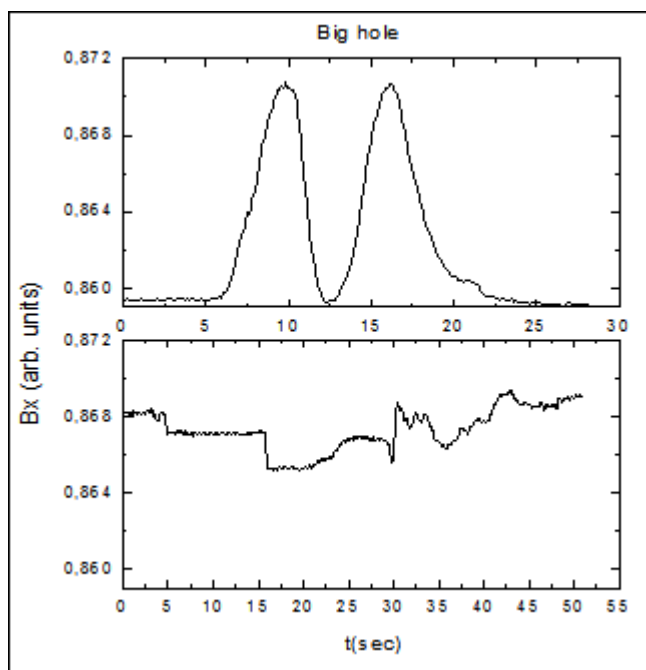


*Εικόνα 61: Ανίχνευση μεγάλης οπής.*

Για τη μέτρηση αυτή, ρυθμίσαμε το τροφοδοτικό να παρέχει στο πηνίο μας εναλλασσόμενο ρεύμα πλάτους  $I=10A$  και συχνότητας  $f=550Hz$ , στην οποία το σήμα του ανιχνευτή είναι μέγιστο.

Στο Labview κάνουμε τις εξής ρυθμίσεις:  $samples=150$ ,  $rate=1500$  και  $lower\ cut-off=50Hz$ .

Έτσι έχουμε τα παρακάτω διαγράμματα, για τις περιπτώσεις που ο ανιχνευτής διέρχεται με τον άξονα ευαισθησίας του παράλληλα στη φορά κίνησης και κάθετα, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 31:  $B(t)$ , για την μεγάλη οπή. Στο πάνω διάγραμμα ο ανιχνευτής διέρχεται από την οπή με τον άξονα ευαισθησίας του παράλληλα στη φορά κίνησης. Στο κάτω διάγραμμα ο ανιχνευτής διέρχεται από την οπή με τον άξονα ευαισθησίας του κάθετα στη φορά κίνησης. (Origin)

Στην πρώτη περίπτωση που ο ανιχνευτής διέρχεται με τον άξονα ευαισθησίας του παράλληλα στη φορά κίνησης, παρατηρούμε τα δύο μέγιστα πριν και μετά το σημείο της οπής και το ελάχιστο πάνω από την οπή. Στη δεύτερη περίπτωση, όπου ο ανιχνευτής διέρχεται με τον άξονα ευαισθησίας του κάθετα πάνω από την οπή, δεν καταγράφει τίποτα, παρά μόνο κάποιες διακυμάνσεις που οφείλονται στην ασταθή κίνηση του χεριού που εντείνει το σφάλμα όταν πλησιάζει τα όρια της πλάκας αλουμινίου και στο θόρυβο.

#### 6.4.2.4. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στην περίπτωση ανίχνευσης οπών, όπως και στην περίπτωση της ανίχνευσης ρωγμών, παρατηρούμε ότι καθώς το πηνίο με τον ανιχνευτή διέρχονται με τον άξονα ευαισθησίας του πηνίου παράλληλα στη φορά κίνησης πάνω από μία οπή, στο διάγραμμα  $B(t)$  εμφανίζονται δύο διαδοχικά μέγιστα πριν και μετά την οπή και ένα ελάχιστο πάνω από αυτήν.

Η μορφή των μεγίστων και του ελαχίστου (ύψος και εύρος) οφείλεται στην ακτίνα των οπών, την απόστασή τους από την επιφάνεια του υλικού αλλά και από την ταχύτητα της κίνησης του ανιχνευτή. Θεωρητικά αναμενόταν η μεγαλύτερης ακτίνας οπή να έχει μεγαλύτερο μέγιστο, για την ίδια συχνότητα εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε αυτήν την περίπτωση, όμως έχουμε τις οπές να βρίσκονται σε διαφορετικό βάθος και να σαρώνονται με διαφορετική ταχύτητα κατά τη διαδικασία μέτρησης. Επιπρόσθετα οι μετρήσεις στις δύο περιπτώσεις λαμβάνονται σε διαφορετικές συχνότητες εναλλασσόμενου ρεύματος (στο οποίο η καθεμία εμφάνιζε καλύτερο σήμα), οπότε τα αποτελέσματα δεν είναι συγκρίσιμα.

## Συμπεράσματα

Στην διάρκεια της παρούσας εργασίας μελετήσαμε την ανίχνευση ασυνεχειών στην επιφάνεια και στο εσωτερικό αγώγιμων μη μαγνητικών υλικών, με μη καταστροφικές μεθόδους. Η ανίχνευση πραγματοποιήθηκε σε ρωγμές στην επιφάνεια αλουμινίου και σε οπές στο εσωτερικό του, με αισθητήρα Γιγαντιαίας Μαγνητοαντίστασης GMR.

Η θεωρητική προσέγγιση του προβλήματός μας, έγινε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα FEMM. Στην οιονεί στατική προσέγγιση υπολογίστηκε το διανυσματικό δυναμικό  $\mathbf{A}$ , το μαγνητικό πεδίο και η μορφή των δυναμικών γραμμών του, στην επιφάνεια πλάκας αλουμινίου παρουσία ασυνεχειών. Από την αριθμητική λύση του προβλήματος κατασκευάσαμε το γράφημα της κάθετης και της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου, στην επιφάνεια της πλάκας και της πυκνότητας των δινορευμάτων 1mm κάτω από την επιφάνεια του αλουμινίου, συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης. Μελετώντας τα, φαίνεται ότι τόσο η οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου όσο και η κάθετη, εμφανίζουν ασυμμετρία δεξιά και αριστερά της ασυνέχειας. Αυτή η ασυμμετρία οφείλεται στη διακοπή των δινορευμάτων, λόγω των ρωγμών.

Στο πειραματικό κομμάτι της εργασίας, για την ανίχνευση των ασυνεχειών στην επιφάνεια και στο εσωτερικό του αλουμινίου, κατασκευάσαμε πηνίο εναλλασσόμενου ρεύματος, του οποίου η τάση και η συχνότητα ρυθμιζόταν από τροφοδοτικό εναλλασσόμενης τάσης. Έτσι στο πηνίο εμφανίζεται εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο (πρωτεύον), που επάγει δινορεύματα στην πλάκα του αλουμινίου και τα οποία με τη σειρά τους δημιουργούν επαγόμενο μαγνητικό πεδίο (δευτερεύον) που τείνει να αναιρέσει το πρωτεύον. Το μαγνητικό πεδίο που εν τέλει εμφανίζεται στην επιφάνεια του αλουμινίου, αποτελεί άθροισμα των δύο μαγνητικών πεδίων, πρωτεύοντος και δευτερεύοντος και ανιχνεύεται με τη χρήση αισθητήρα GMR που τοποθετείται στο κέντρο του πηνίου.

Ο ανιχνευτής GMR συνδέεται μέσω μιας κάρτας ψηφιοποίησης σήματος (της National Instrument με κωδικό NI USB-6216), με τον υπολογιστή, όπου επικοινωνεί με τον χρήστη με ένα εικονικό περιβάλλον ελέγχου της πειραματικής διάταξης, που κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας την γλώσσα προγραμματισμού LabView. Το πρόγραμμα αυτό, ελέγχει τον ανιχνευτή GMR και καταγράφει τα δεδομένα της διαφοράς τάσης στα άκρα του ανιχνευτή κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης. Τα δεδομένα αυτά τα επεξεργάζεται, εμφανίζοντάς τα σε γραφήματα ενώ είχε τη δυνατότητα αποθήκευσης σε ψηφιακό αρχείο.

Με τα δεδομένα που αποθηκεύτηκαν με το πρόγραμμα LabView, κατασκευάσαμε τις γραφικές παραστάσεις της μέσης τιμής RMS του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου, στο πρόγραμμα Origin. Η μελέτη των γραφημάτων δείχνει ότι πριν και μετά το σημείο που υπάρχει η ανιχνεύσιμη ατέλεια (ρωγμή/ οπή), το μαγνητικό πεδίο εμφανίζει δύο ισοϋψή μέγιστα, ενώ πάνω από το σημείο της ατέλειας εμφανίζει ελάχιστο.

Συνεπώς, με τη χρήση της διάταξης που κατασκευάσαμε, μπορούμε να ανιχνεύουμε ρωγμές στην επιφάνεια αγώγιμων μη μαγνητικών υλικών πάχους μερικών μικρομέτρων που δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι, καθώς και ασυνέχειες στο εσωτερικό αυτών.



# Παράρτημα

## Π.1. Controls και Indicators

Control ονομάζεται κάθε τύπος στοιχείου προγραμματισμού που εισάγει δεδομένα στον κώδικα. Τα controls χρησιμοποιούνται ως είσοδοι, για να ρυθμίζουμε κάποια τάση, τον αριθμό των μετρήσεων, να κάνουμε on/off έναν διακόπτη ή να σταματάμε ένα πρόγραμμα, στη διαδικασία εκτέλεσης του προγράμματος, στο front panel.

Indicator ονομάζεται κάθε τύπος στοιχείου που απεικονίζει δεδομένα εξόδου τα οποία το VI τα αποκτά ή τα παράγει μόνο του. Τα indicators χρησιμοποιούνται σαν έξοδοι. Θερμόμετρα, όργανα ένδειξης τάσεων/ ρευμάτων, και άλλοι indicators εμφανίζουν τις τιμές εξόδου του προγράμματος, όταν αυτό εκτελείται στο front panel. Αυτές οι τιμές περιλαμβάνουν δεδομένα, καταστάσεις του προγράμματος και άλλη πληροφορία.

Κάθε control ή indicator του front panel έχει ένα αντίστοιχο τερματικό στο block diagram. Όταν ένα VI τρέχει, τιμές από τα controls ρέουν μέσα στο block diagram όπου αυτές χρησιμοποιούνται σε functions που υπάρχουν εκεί και τα αποτελέσματα περνάνε μέσα σε άλλες functions ή indicators μέσω συνδετικών γραμμών.

## Π.2. Συνηθισμένα εργαλεία στο Labview

### 1.1. Γραμμές εργαλείων στο Front panel και Block diagram

Υπάρχουν εργαλεία που είναι κοινά στο Front panel και στο Block diagram και κάποια που είναι μόνο στο Front panel, ή μόνο στο Block diagram.

#### i. Κοινά εργαλεία στο Front panel και στο Block diagram


- Πλήκτρο Run:

Είναι το εργαλείο εκκίνησης λειτουργίας του προγράμματος VI.



Όταν το VI τρέχει το εικονίδιο αυτό γίνεται:



Όταν το VI δεν μπορεί να τρέξει λόγω σφαλμάτων το εικονίδιο  γίνεται:

- Πλήκτρο συνεχούς λειτουργίας (Run Continuously):



Το εργαλείο αυτό εκτελεί το VI συνέχεια.

- Πλήκτρο τερματισμού (Stop)



Το εργαλείο αυτό εμφανίζεται όταν εκτελείται το VI και τερματίζει το πρόγραμμα.

- Πλήκτρο προσωρινής διακοπής (Pause)

Το εργαλείο αυτό σταματά την εκτέλεση του προγράμματος VI προσωρινά και την συνεχίζει με δεύτερο πάτημα.



- Επιλογή γραμματοσειράς

Με το εργαλείο αυτό ρυθμίζουμε τα χαρακτηριστικά της γραμματοσειράς: τύπος, μέγεθος, στυλ και χρώμα.



- Επιλογή ευθυγράμμισης



- Επιλογή αντιστοίχισης αντικειμένων



- Επιλογή τοποθέτησης αντικειμένων σε επίπεδα χώρου



- Η επιλογή για εμφάνιση του παραθύρου Help



- Πλήκτρο Enter

Η επιλογή αυτή εμφανίζεται για να υπενθυμίσει ότι μια νέα τιμή είναι διαθέσιμη να αντικαταστήσει μια παλιά. Όταν πατηθεί εξαφανίζεται.



## ii. Εργαλεία που υπάρχουν μόνο στο Front panel

Το παράθυρο της γραμμής εργαλείων στο front panel, φαίνεται παρακάτω.



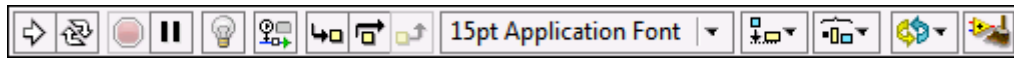
Ένα πλήκτρο δεν ανήκει στα κοινά με το block diagram:

- Επιλογή επαναδιαστασιολόγησης αντικειμένων



iii. Εργαλεία που υπάρχουν μόνο στο Block diagram

Το παράθυρο της γραμμής εργαλείων στο block diagram, φαίνεται παρακάτω.



Όσα πλήκτρα δεν είναι κοινά με το front panel, αναφέρονται συνοπτικά:

- Πλήκτρο αργής κίνησης

Με τη χρήση αυτού του εργαλείου μπορούμε να παρακολουθήσουμε τη ροή δεδομένων μεταξύ των κόμβων σε αργή κίνηση.



- Πλήκτρο Retain wire values

Όταν ενεργοποιείται το εργαλείο αυτό, το Labview σώζει τις τιμές σε κάθε σημείο της ροής εκτέλεσης, έτσι ώστε όταν τοποθετηθεί μια σύνδεση (κόμβος) σε μια γραμμή διασύνδεσης αντικειμένων, φαίνεται η πιο πρόσφατη τιμή των δεδομένων που περνούν από αυτήν.



- Πλήκτρο εκτροπής

Με τη χρήση αυτού του εργαλείου, μπορούμε να τρέξουμε το πρόγραμμα από κόμβο σε κόμβο.



- Πλήκτρο βήματος μετάβασης

Με τη χρήση αυτού του εργαλείου μπορούμε να εισχωρήσουμε σε έναν κόμβο και να παρακολουθήσουμε τη λειτουργία του βήμα-βήμα.



- Πλήκτρο βήματος υπέρβασης

Με τη χρήση αυτού του εργαλείου, μπορούμε αφού έχουμε εισέλθει σε έναν κόμβο και παρακολουθούμε τη λειτουργία του, να εξέλθουμε και να μεταβούμε στον επόμενο.



- Ένδειξη προειδοποίησης

Εμφανίζεται αν ένα VI περιλαμβάνει μια προειδοποίηση και τοποθετηθεί ένα checkmark στο Show Warnings checkbox στο παράθυρο Error List.



- Clean up diagram

Με το εργαλείο αυτό γίνεται αυτόματη αναδρομολόγηση όλων των καλωδίων στο block diagram και αναδιάταξη όλων των αντικειμένων, ώστε να δημιουργηθεί μια πιο τακτοποιημένη διάταξη.

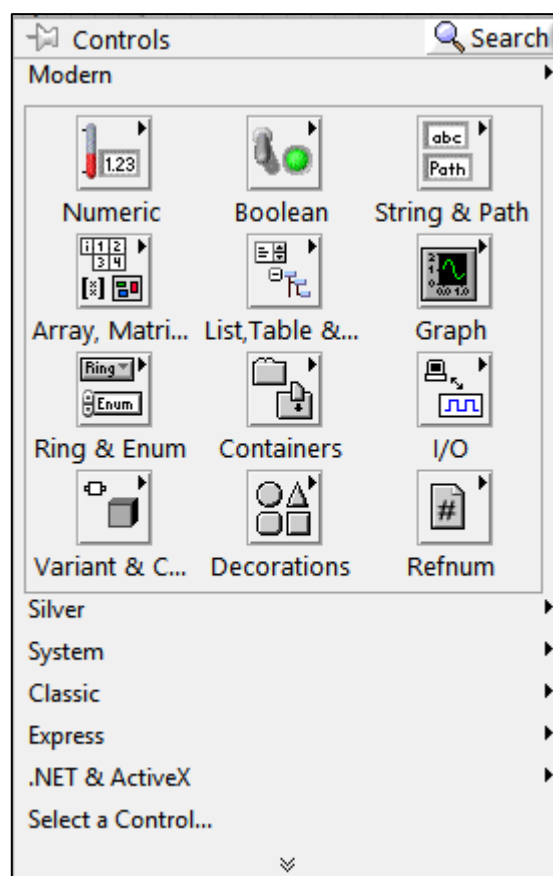


## Π.3. Παλέτες του Labview

Το Labview διαθέτει τρεις γραφικές παλέτες: Tools Palette, Controls Palette, Functions Palette.

### Π.3.1. Controls Palette

Η παλέτα αντικειμένων, Controls palette βρίσκεται στο front panel και περιέχει controls, indicators, γραφήματα και άλλα εργαλεία που μπορούν να τοποθετηθούν στο παράθυρο αυτό.



Εικόνα 623: Η παλέτα αντικειμένων, Controls στο front panel. (Labview)

### Π.3.2. Tools Palette

Η παλέτα εργαλείων, Tools Palette, που φαίνεται στην επόμενη εικόνα, περιέχει εργαλεία που μας βοηθούν να σχεδιάσουμε VIs.



Εικόνα 634: Tools Palette. (Labview)

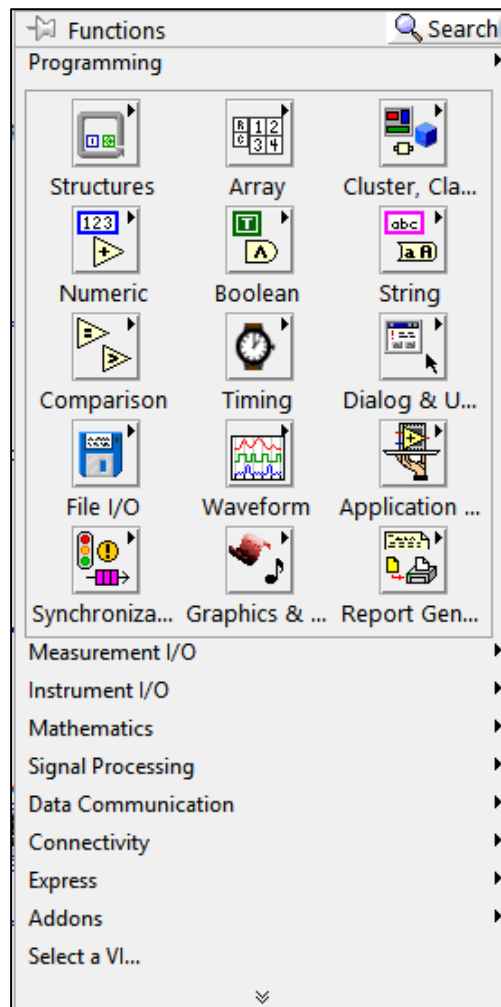
Η παλέτα εργαλείων περιέχει:

- Automatic tool selection: όταν επιλέγεται το εργαλείο αυτό, το Labview επιλέγει αυτόματα ένα εργαλείο, από τα παρακάτω, με βάση την τοποθεσία του κέρσορα. Μπορείτε να απενεργοποιήσετε την αυτόματη επιλογή εργαλείου απενεργοποιώντας το στοιχείο ή επιλέγοντας κάποιο άλλο στοιχείο στην παλέτα.
- Operate tool: με αυτό το εργαλείο μπορούμε να αλλάξουμε τιμές στα controls και indicators και να χειριστούμε διακόπτες και κουμπιά στο front panel.
- Position/Size/Select: αυτό το εργαλείο το χρησιμοποιούμε για να επιλέξουμε, να μετακινήσουμε και να αλλάξουμε το μέγεθος των αντικειμένων στο front panel και στο block diagram.
- Edit text: με το οποίο γράφουμε κείμενο.
- Connect wire: με αυτό το εργαλείο συνδέουμε ακροδέκτες στο block diagram.
- Object shortcut menu: με την ενεργοποίηση αυτού του εργαλείου μπορούμε να δούμε το sort cut menu κάποιου αντικειμένου επιλέξουμε.
- Scroll window: το εργαλείο αυτό μετακινεί το παράθυρο.

- Set/Clear breakpoint: με την ενεργοποίηση αυτού του εργαλείου μπορούμε να σταματήσουμε τη λειτουργία κάποιου αντικειμένου, διακόπτοντας έτσι την εκτέλεση του VI.
- Probe data: με το εργαλείο αυτό μπορούμε να δημιουργήσουμε ανιχνευτές στα σύρματα στο block diagram και να ελέγξουμε ενδιάμεσες τιμές σε ένα VI που παράγει αμφισβητήσιμα ή μη αναμενόμενα αποτελέσματα.
- Get color: με την ενεργοποίηση αυτού του εργαλείου αντιγράφεται το χρώμα, που έχουμε επιλέξει με το παρακάτω εργαλείο, στο background του front panel, ή σε κάποιο αντικείμενο.
- Set color: με το εργαλείο αυτό επιλέγεται το χρώμα που θα χρησιμοποιηθεί με το get color.

### Π.3.3. Functions Palette

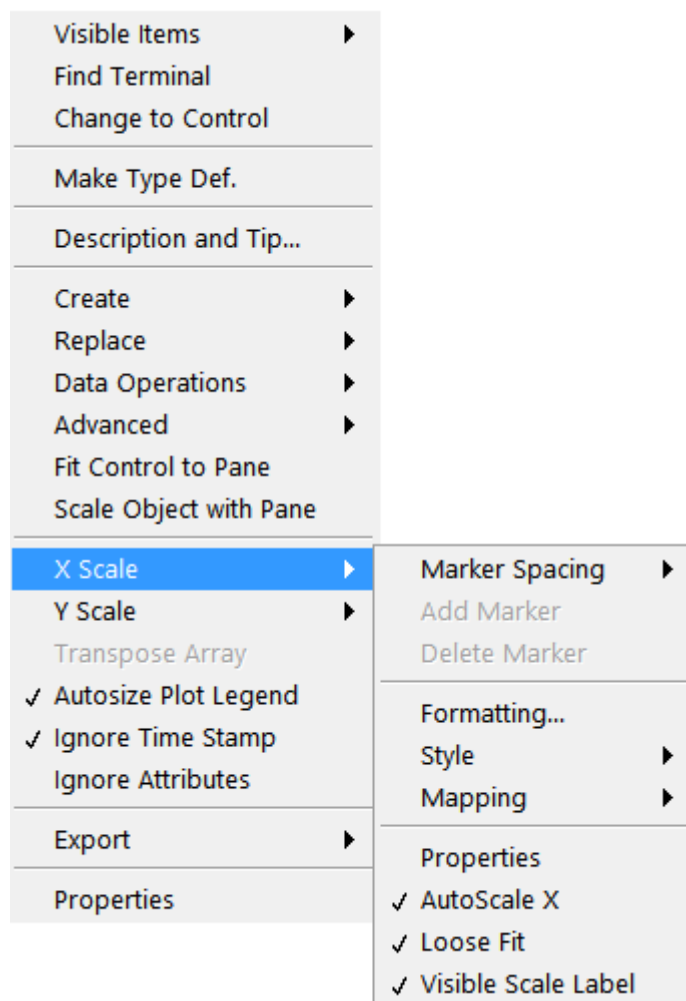
Η παλέτα συναρτήσεων, functions palette βρίσκεται στο block diagram και αποτελείται από επιμέρους υποπαλέτες που περιέχουν διάφορους τύπους από προγραμματισμένα αντικείμενα – εικόνες. Χρησιμοποιώντας τα αντικείμενα και τα subVIs των υποπαλετών κατασκευάζουμε στο block diagram το VI για την επιθυμητή εφαρμογή. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η functions palette.



Εικόνα 65: Η παλέτα συναρτήσεων, Functions, που βρίσκεται στο block diagram. (Labview)

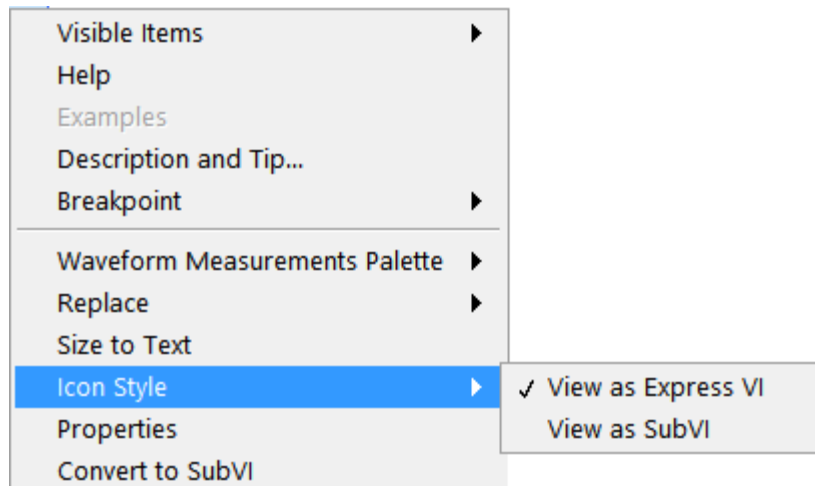
## Π.4. Shortcut Menus

Όλα τα αντικείμενα Labview σχετίζονται με τα αντίστοιχα μενού συντόμευσης, shortcut menus ή pop-up menus. Κατά τη δημιουργία ενός VI, τα στοιχεία των shortcut menus χρησιμεύουν στην αλλαγή της εμφάνισης ή της συμπεριφοράς των αντικειμένων του front panel και του block diagram. Η πρόσβαση στο μενού συντόμευσης γίνεται εύκολα με δεξί κλικ στο αντικείμενο, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα για το αντικείμενο Waveform Graph, που αποτυπώνει γραφικές παραστάσεις.



Εικόνα 66: Το Shortcut menu του αντικειμένου Waveform Graph, στο front panel. (Labview)

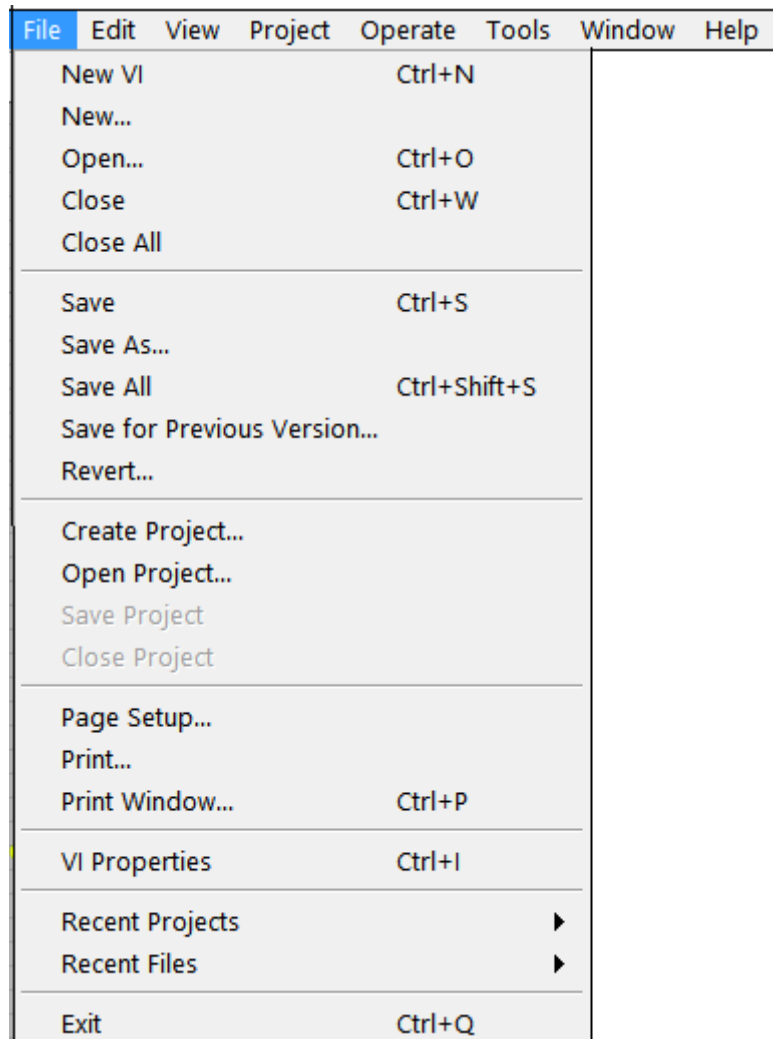




*Εικόνα 67: Το Shortcut menu του αντικειμένου Spectral Measurements στο block diagram. (Labview)*

## Π.5. Menu pull-down

Τα menu pull down βρίσκονται στην κορυφή του παραθύρου του front panel ή του block διαγράμματος ενός VI. Όταν επιλέξουμε κάποιο μενού από αυτά εμφανίζεται μια σειρά από επιλογές, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.

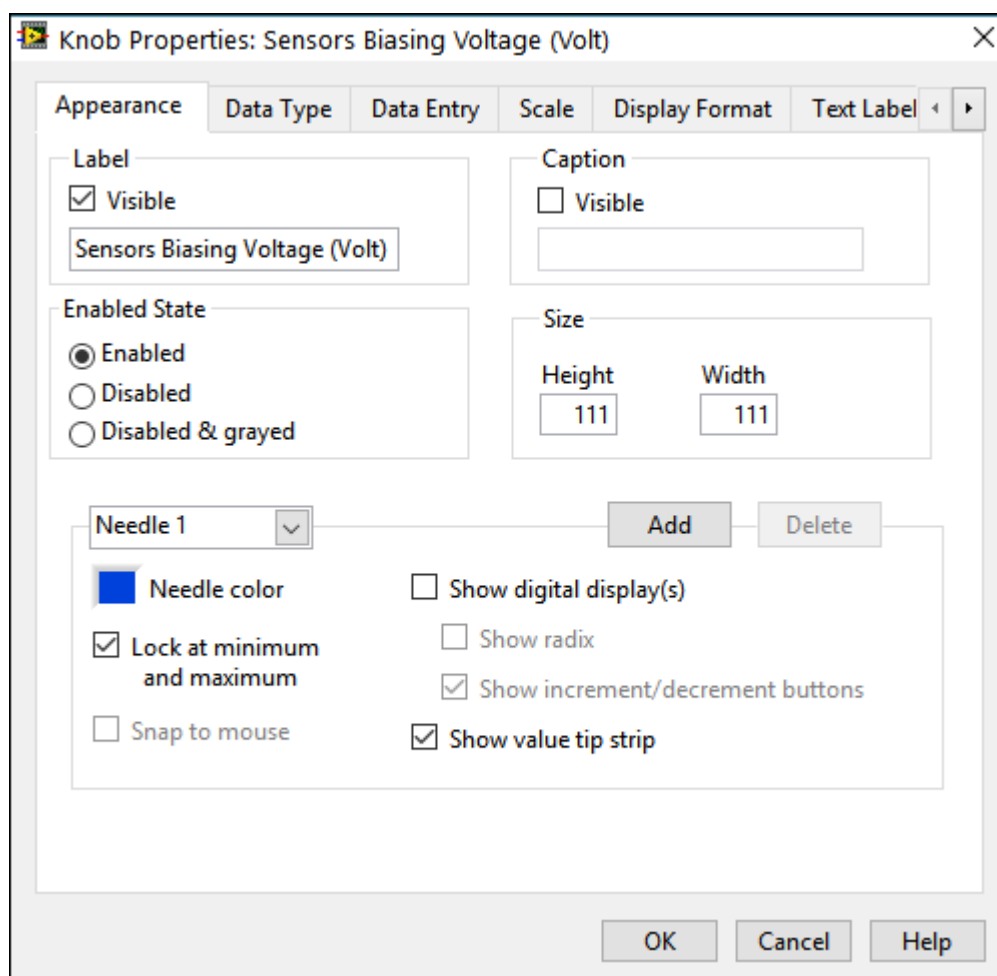


Εικόνα 68: Menu pull-down στα παράθυρα front panel και block diagram. (Labview)

## Π.6. Property dialog boxes

Τα αντικείμενα στο front panel διαθέτουν παράθυρα ιδιοτήτων, τα Property dialog boxes τα οποία εμφανίζονται στο shortcut menu του κάθε αντικειμένου επιλέγοντας το Properties. Στο παράθυρο αυτό, υπάρχουν ρυθμίσεις για την μορφή και τη συμπεριφορά των αντικειμένων.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το παράθυρο ιδιοτήτων για το Knob: Sensor Biasing Voltage, που ρυθμίζει την τάση πόλωσης του αισθητήρα.



Εικόνα 69: Property Dialog Box για το αντικείμενο knob, στο οποίο ρυθμίζεται η μορφή και οι ιδιότητές του. (Labview)

Περισσότερα από ένα αντικείμενα, που μοιράζονται κοινές ιδιότητες, μπορούν να επιλεγούν με το εργαλείο Positioning Tool, ή με τη χρήση του κουμπιού Shift και με το παράθυρο ιδιοτήτων, να επεξεργαστούμε τις κοινές του ιδιότητες.

## Π.7. Συναρτήσεις και Εργαλεία του Labview

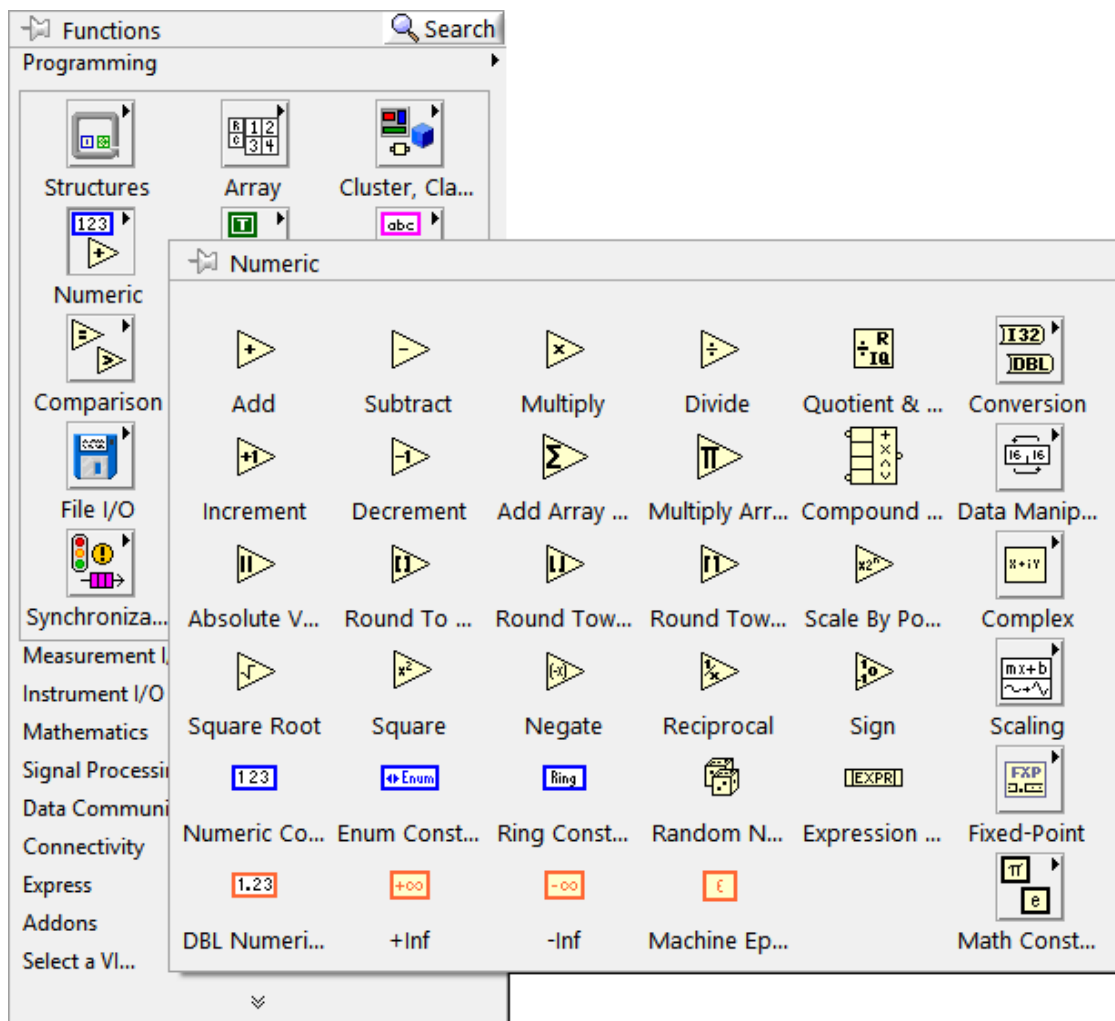
Στο πείραμά μας, κατασκευάσαμε ένα πρόγραμμα στο Labview, που επικοινωνώντας με την κάρτα ψηφιοποίησης σήματος NI USB-6212, ρύθμιζε την τάση του ανιχνευτή GMR και συλλέγοντας τα δεδομένα κατασκεύαζε τα διαγράμματα της τάσης εξόδου του ανιχνευτή συναρτήσει του χρόνου  $V(t)$ , του φάσματος και της σταθερής τάσης DC του μαγνητικού πεδίου γύρω από την οποία ταλαντώνεται συναρτήσει της απόστασης  $B(x)$  και τα αποθήκευε σε αρχεία .txt.

Για την κατασκευή αυτού του προγράμματος, χρησιμοποιήσαμε μια σειρά συναρτήσεων και εργαλείων του Labview, που θα εξηγήσουμε περιληπτικά τη λειτουργία τους, στις επόμενες σελίδες.

## Π.7.1. Numeric Function

Οι αριθμητικές συναρτήσεις, Numeric Functions, που βρίσκονται στο block diagram, χρησιμοποιούνται για να εισάγουμε αριθμούς, να μετατρέψουμε αριθμούς από έναν τύπο δεδομένων σε ένα άλλο, να κάνουμε αριθμητικές και μιγαδικές πράξεις και να κατασκευάσουμε συναρτήσεις.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το εικονίδιο των αριθμητικών συναρτήσεων στο block diagram, με τις επιλογές του.



Εικόνα 70: Numeric Functions στο Block diagram. (Labview)

Από αυτές τις συναρτήσεις, εμείς χρησιμοποιήσαμε τους παρακάτω αριθμητικούς τύπους:

- DBL: Είναι διπλής ακρίβειας με κινητή υποδιαστολή. Στο δίσκο καταλαμβάνει χώρο αποθήκευσης 64bits. Παίρνει τιμές στα ακόλουθα

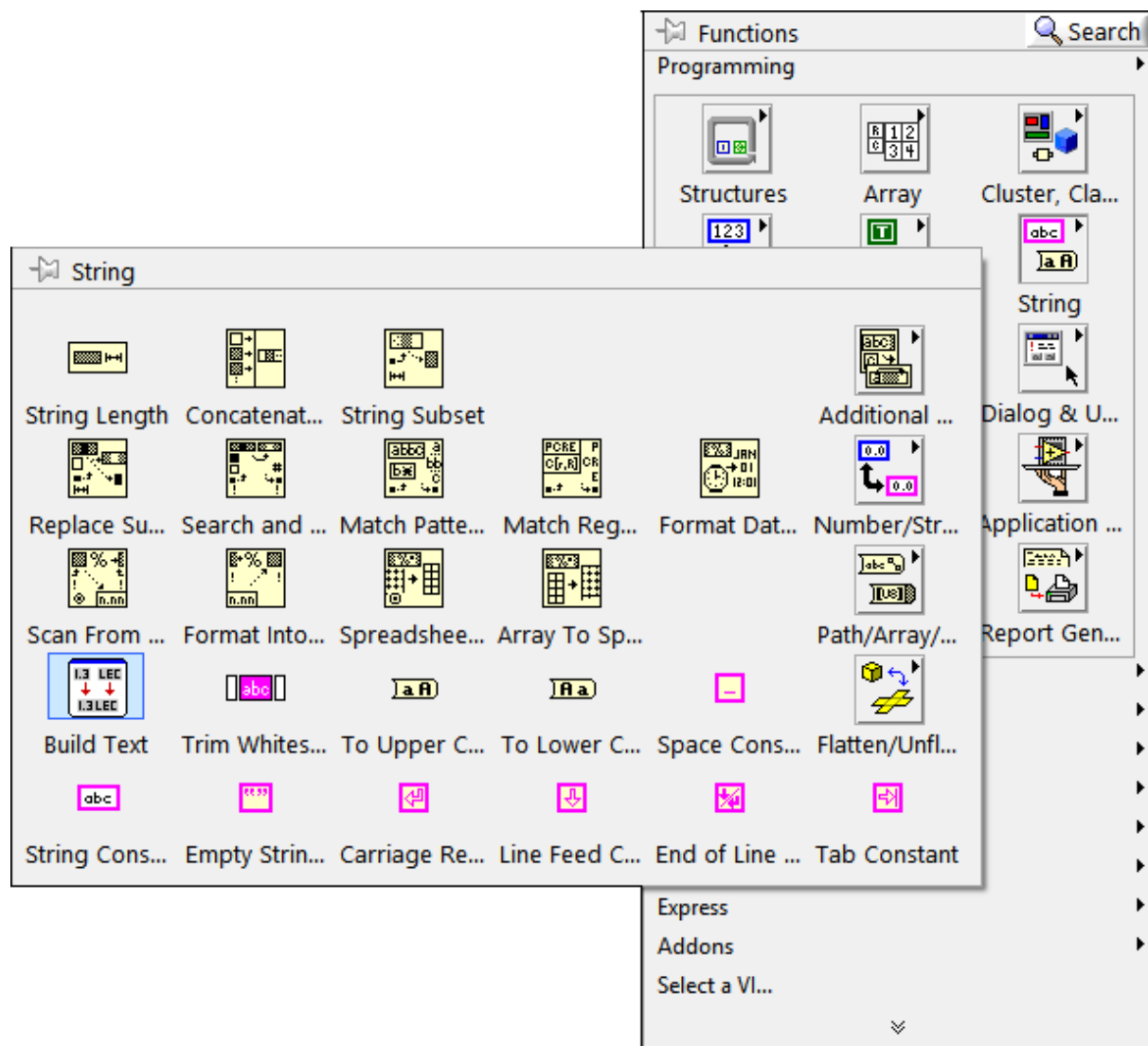
διαστήματα: στους θετικούς:  $\min=4,94 \times 10^{-324}$ ,  $\max=1,79 \times 10^{308}$  ,  
στοις αρνητικούς:  $\min=-4,94 \times 10^{-324}$ ,  $\max=-1,79 \times 10^{308}$  .

- I32: Είναι μεγάλος ακέραιος αριθμός. Στο δίσκο καταλαμβάνει χώρο αποθήκευσης 32bits και παίρνει τιμές στο διάστημα: -2.147.483.648 - 2.147.483.647.

## Π.7.2. String Functions

Οι συναρτήσεις συμβολοσειρών, String Functions, που βρίσκονται στο block diagram, χρησιμοποιούνται για να ενώσουν δύο ή περισσότερες συμβολοσειρές, να εξάγουν ένα υποσύνολο συμβολοσειρών από μία συμβολοσειρά, να μετατρέπουν δεδομένα σε συμβολοσειρές και να μορφοποιούν μια συμβολοσειρά για χρήση σε μια εφαρμογή επεξεργασίας κειμένου ή κάποιο υπολογιστικό φύλλο.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το εικονίδιο των συναρτήσεων των συμβολοσειρών με τις αντίστοιχες επιλογές του.



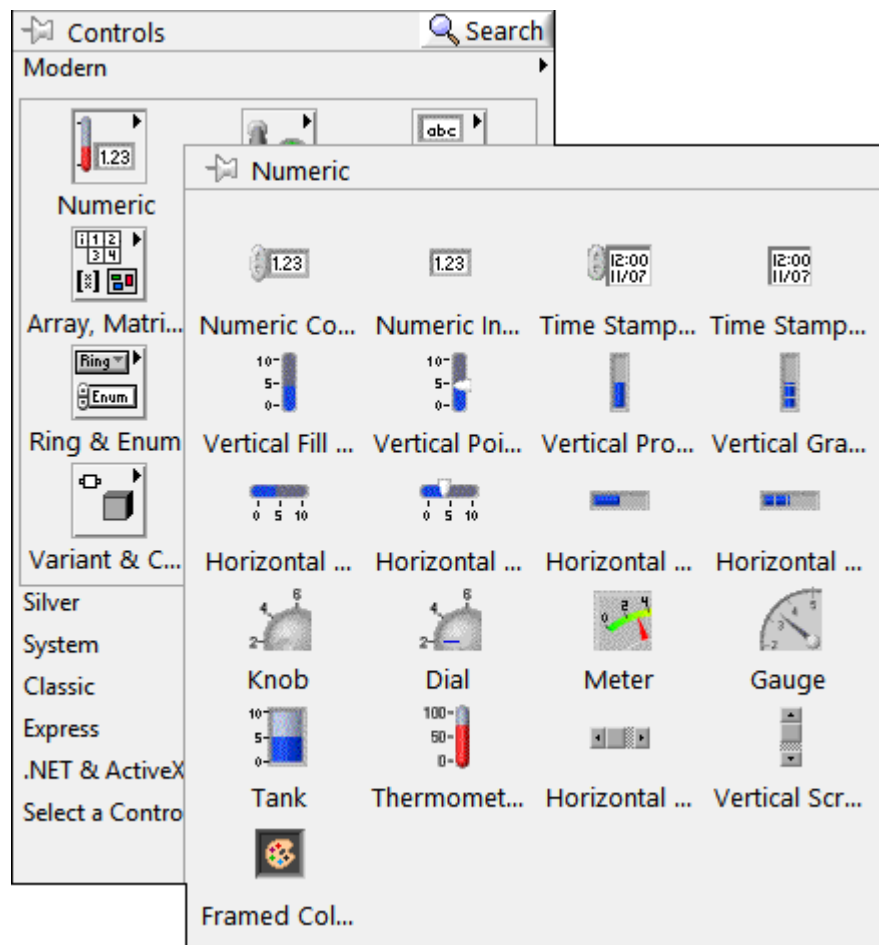
Εικόνα 71: String Functions στο Block diagram.  
(Labview)

Από αυτές τις συναρτήσεις χρησιμοποιήσαμε την abc. Είναι η σταθερή συμβολοσειρά και χρησιμοποιείται για να προμηθεύσει το block diagram με ένα σταθερό κείμενο συμβολοσειρών.

### Π.7.3. Numeric Controls and Indicators

Τα αριθμητικά αντικείμενα, Numeric Controls and Indicators, που βρίσκονται στο front panel, χρησιμοποιούνται για να εισέλθουν και να εμφανιστούν αριθμητικά δεδομένα. Το μέγεθός τους μπορεί να αλλάξει ώστε να εμφανίζονται περισσότερα ψηφία.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το εικονίδιο για το Numeric Controls, στο front panel.



Εικόνα 72: Numeric Controls στο Front panel. (Labview)

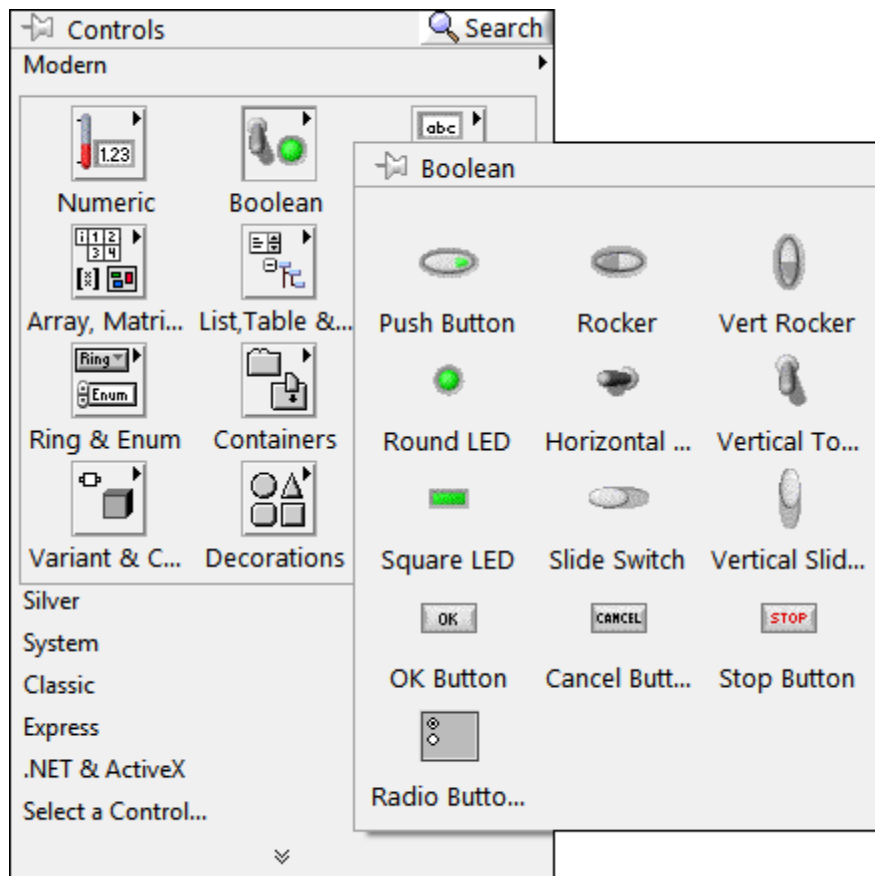
Από τα παραπάνω εργαλεία χρησιμοποιήσαμε το knob, για να ρυθμίσουμε την τάση πόλωσης του ανιχνευτή.



#### Π.7.4. Boolean Controls/Indicators

Τα εργαλεία Boolean που βρίσκονται στην παλέτα εργαλεία του front panel, χρησιμοποιούνται για να εισάγουμε τις TRUE/FALSE τιμές με αντικείμενα όπως διακόπτες, κουμπιά ή φώτα Led.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το εικονίδιο των Boolean στο front panel, με τις αντίστοιχες επιλογές του.



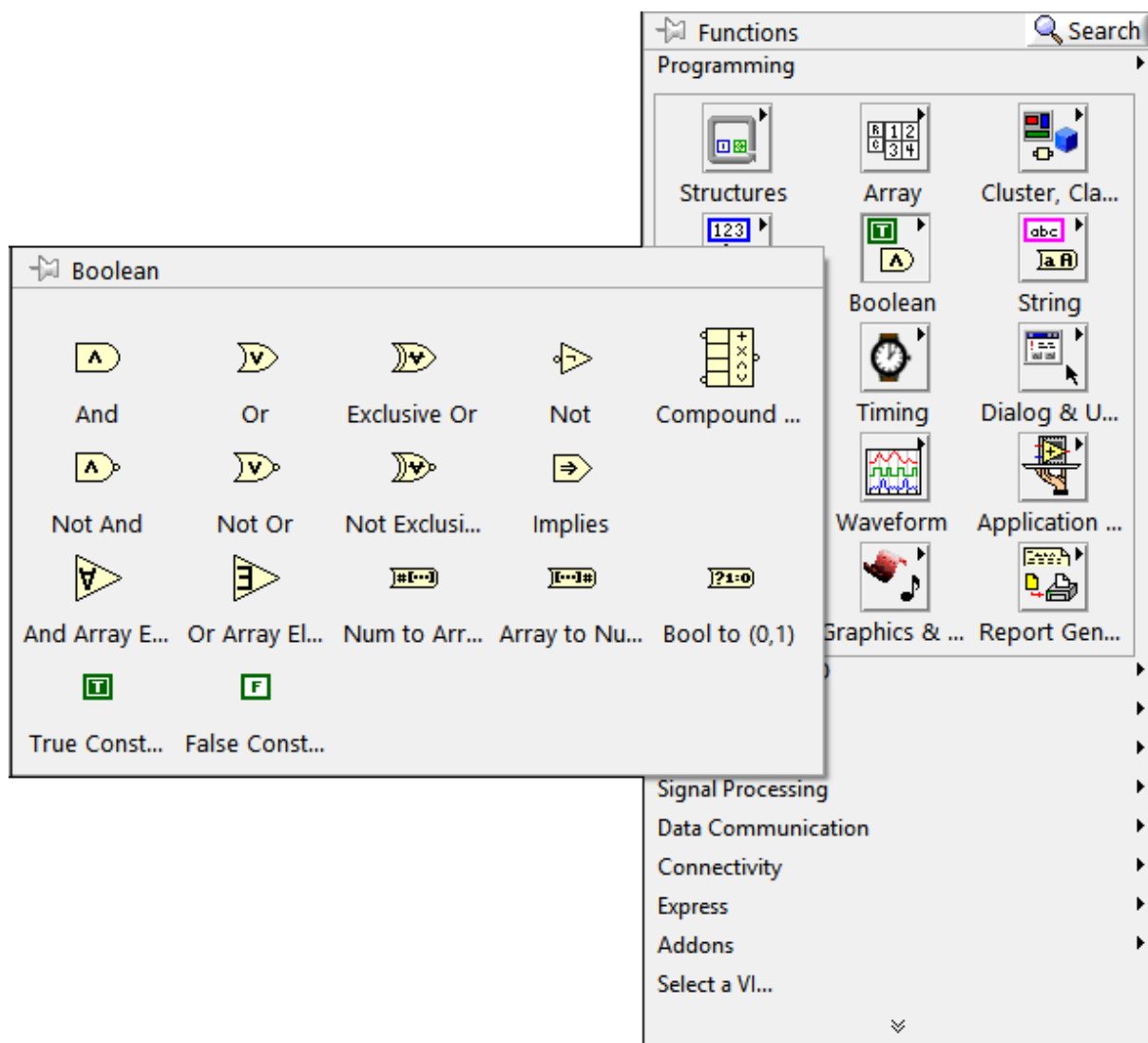
Εικόνα 73: Το εικονίδιο Boolean στο Front panel. (Labview)

Από αυτά τα εργαλεία χρησιμοποιήσαμε τα κουμπιά: Push Button και Stop Button.

## Π.7.5. Boolean Functions

Οι δυαδικές συναρτήσεις, Boolean Functions, που βρίσκονται στο block diagram, χρησιμοποιούνται στην εκτέλεση πράξεων σε μεμονωμένες δυαδικές τιμές ή σε συστοιχίες δυαδικών τιμών.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το εικονίδιο των δυαδικών συναρτήσεων στο block diagram με τις αντίστοιχες επιλογές του.



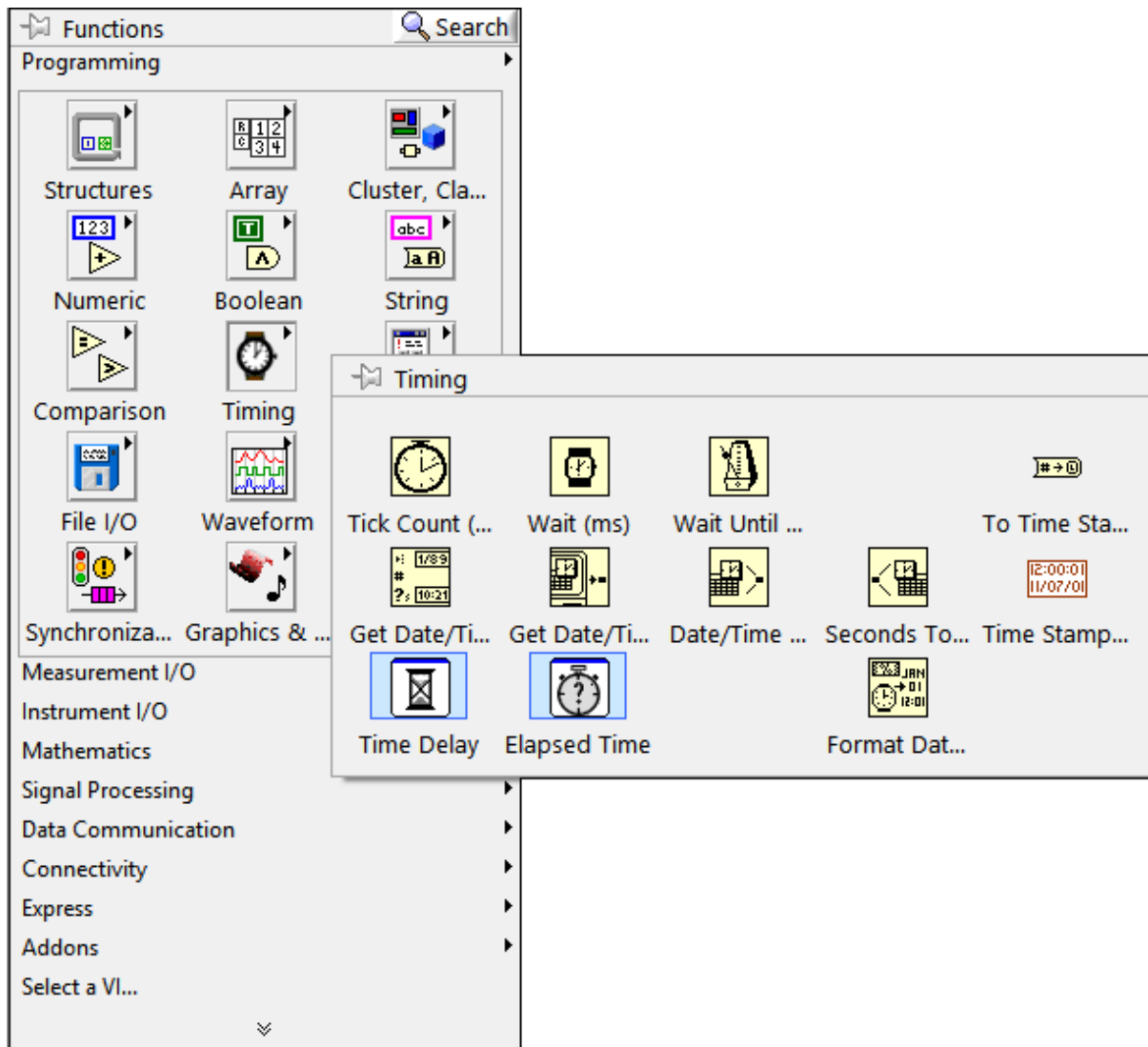
Εικόνα 644: Boolean Function στο Block diagram. (Labview)

Από τις παραπάνω συναρτήσεις, εμείς θα χρησιμοποιήσουμε την True Constant, για να δώσουμε την τιμή True στο block diagram.

## Π.7.6. Time Functions

Οι χρονικές συναρτήσεις, Time Functions, που βρίσκονται στο block diagram, χρησιμοποιούνται για να χειριστούν την ταχύτητα που εκτελείται μια λειτουργία και να ανακτήσουμε πληροφορίες ημερομηνίας και ώρα από το ρολόι του υπολογιστή.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το εικονίδιο των χρονικών συναρτήσεων στο block diagram.



Εικόνα 75: Timing Functions στο Block diagram. (Labview)

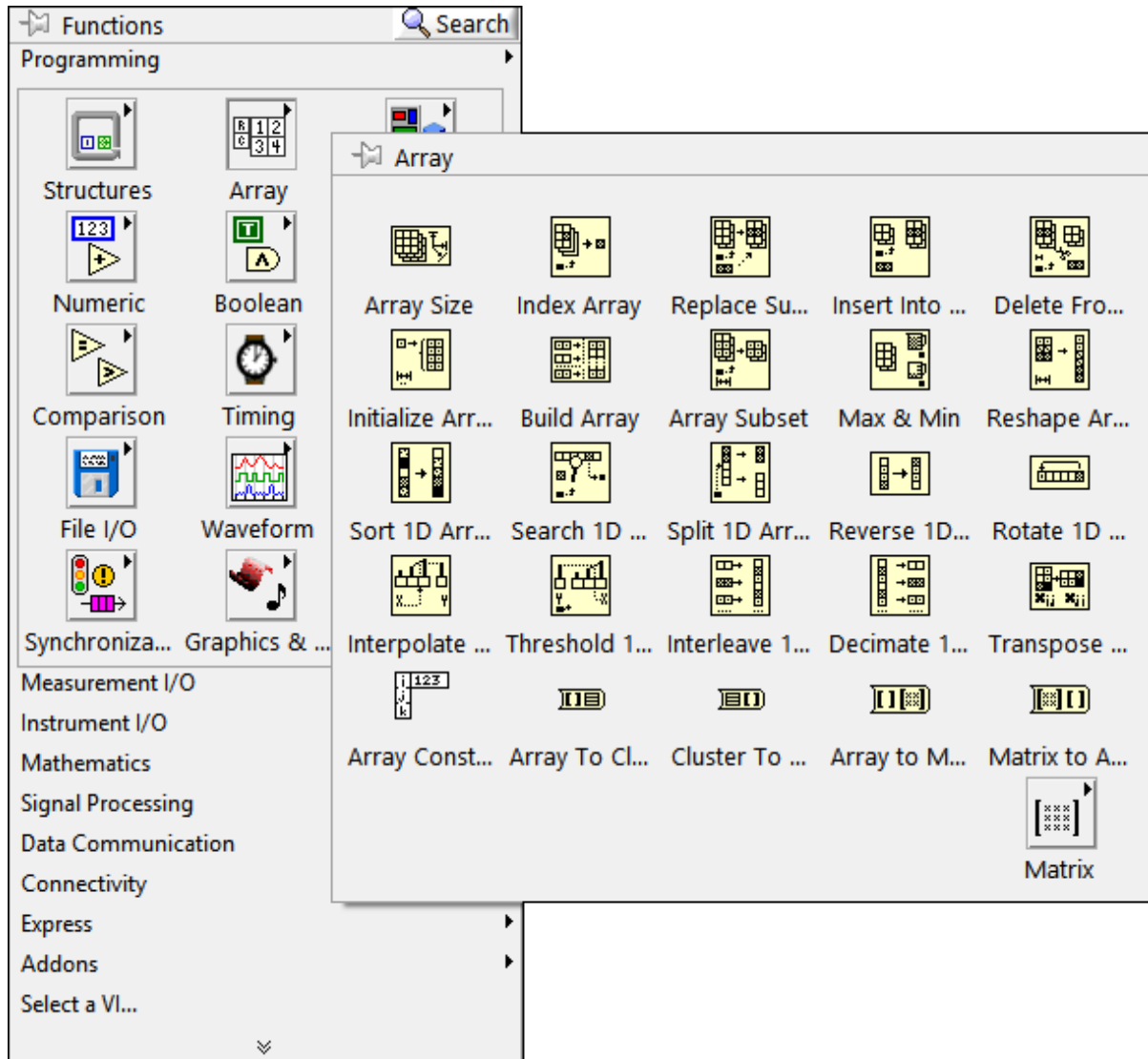
Από αυτές τις συναρτήσεις, εμείς χρησιμοποιήσαμε τις ακόλουθες:

- Tick count (ms): επιστρέφει την τιμή του χρονομέτρου ms.
- Wait (ms): περιμένει έναν ορισμένο αριθμό χιλιοστών του δευτερολέπτου, τον οποίο καθορίζουμε εμείς και επιστρέφει την τιμή του χρονομέτρου ms.

## Π.7.7. Array Functions

Οι συναρτήσεις πινάκων, Array Functions, που βρίσκονται στο block diagram, χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία και το χειρισμό πινάκων.

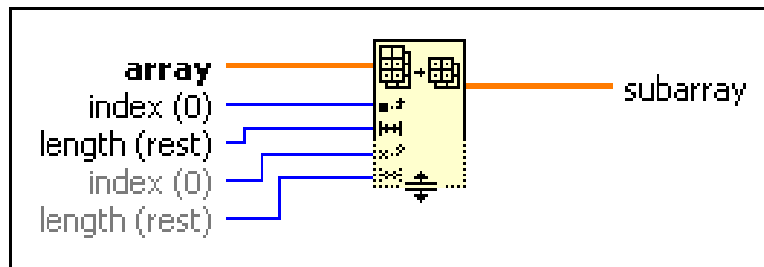
Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το εικονίδιο των πινάκων στο block diagram.



Εικόνα 65: Array Functions στο Block diagram. (Labview)

Από αυτές τις συναρτήσεις, εμείς χρησιμοποιήσαμε τις ακόλουθες:

- Array Subset function: η συνάρτηση αυτή επιστρέφει ένα τμήμα ενός πίνακα, ξεκινάει με τους δείκτες και περιέχει στοιχεία μήκους.



Εικόνα 66: Array subset στο Block diagram. (Labview)

**Array:** ο πίνακας που εισάγεται μπορεί να είναι ένας οποιοσδήποτε ν-διαστατος πίνακας.

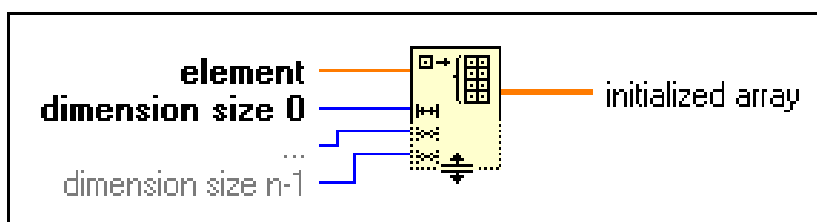
**Index:** ο δείκτης καθορίζει το πρώτο στοιχείο, σειρά, κελί ή σελίδα που εισάγει στο πρώτο τμήμα του πίνακα το οποίο επιστρέφει η συνάρτηση.

**Length:** το μήκος καθορίζει τον αριθμό των στοιχείων, σειρών, κελιών ή σελίδων που εισάγει στο πρώτο τμήμα του πίνακα το οποίο επιστρέφει η συνάρτηση.

**Subarray:** ο υποπίνακας που προκύπτει είναι ίδιου τύπου με τον πίνακα που εισήχθη.

Αν εισαχθεί ένας πίνακας σε αυτήν την συνάρτηση, τότε αυτή αλλάζει αυτόματα μέγεθος για να εμφανίσει τις εισόδους του δείκτη για κάθε διάσταση του πίνακα. Έτσι, αν καλωδιωθεί ένα μονοδιάστατος πίνακας, τότε η συνάρτηση εμφανίζει δείκτη εισόδου για ένα στοιχείο. Αν ο πίνακας είναι δισδιάστατος, τότε εμφανίζει εισόδους του δείκτη για μια σειρά και μια στήλη, αντίστοιχα. Ενώ εάν ο πίνακας είναι τρισδιάστατος, τότε εμφανίζει εισόδους του δείκτη για μια σελίδα.

- **Initialize Array function:** η συνάρτηση αυτή δημιουργεί έναν ν-διάστατο πίνακα στον οποίο κάθε στοιχείο του αρχικοποιείται με την τιμή του στοιχείου.



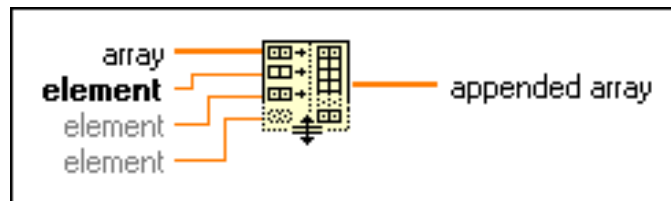
Εικόνα 67: Initialize Array στο Block diagram. (Labview)

**Element:** είναι οι τιμές που χρησιμοποιούνται για να αρχικοποιηθούν τα στοιχεία στον παραγόμενο πίνακα, Initialized array.

**Dimension size (0-n-1):** είναι αριθμός και πρέπει τα τερματικά του dimension size να ισούνται με τον αριθμό των διαστάσεων.

**Initialized array:** είναι ίδιου τύπου με το στοιχείο που καλωδιώσαμε στο element.

- **Build Array function:** η συνάρτηση αυτή συνενώνει πολλούς πίνακες ή επισυνάπτει στοιχεία σε έναν  $n$ -διάστατο πίνακα. Για την τροποποίηση ενός πίνακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η συνάρτηση **Replace Array Subset**. Στο connector pane εμφανίζονται οι προεπιλεγμένοι τύποι δεδομένων γι' αυτή την πολυμορφική συνάρτηση.



Εικόνα 79: Build Array στο Block diagram. (Labview)

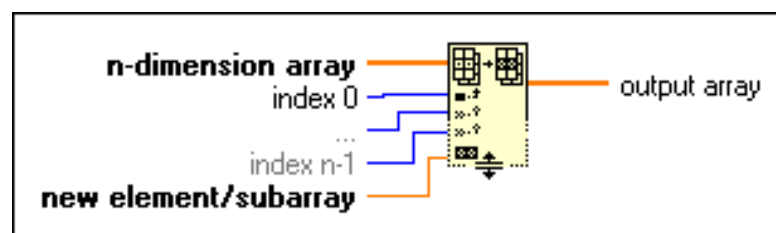
**Array ή Element:** μπορεί να είναι οποιοσδήποτε  $n$ -διάστατος πίνακας ή βαθμωτό στοιχείο. Όλες οι εισοδοί μπορεί να είναι είτε στοιχεία και μονοδιάστατοι πίνακες, ή  $n$ -διάστατοι και  $(n-1)$ διάστατοι πίνακες.

**Appended array:** ο επισυναπτόμενος πίνακας είναι ο προκύπτων.

Η συνάρτηση **Build array** λειτουργεί με δύο διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με το αν έχει επιλεγεί το **Concatenate Inputs** από το **Shortcut menu**. Εάν επιλεγεί το **Concatenate Inputs** η συνάρτηση επισυνάπτει τις εισόδους με σκοπό να δημιουργηθεί ένας πίνακας στην έξοδο, διάστασης ίση με τη μέγιστη διάσταση των πινάκων στην είσοδο. Αν δεν επιλεγεί τότε η συνάρτηση σχηματίζει στην έξοδο έναν πίνακα μίας διάστασης μεγαλύτερο από την διάσταση των εισόδων της. Οι εισόδοι πρέπει να είναι ίδιων διαστάσεων. Η συνάρτηση επισυνάπτει κάθε εισόδο της με σκοπό τη δημιουργία ενός υποπίνακα, στοιχείου, σειράς ή σελίδας του πίνακα εξόδου.

- **Replace Array Subset:** αντικαθιστά ένα στοιχείο ή έναν υποπίνακα στον πίνακα της εισόδου στο σημείο που καθορίζεται από τον δείκτη.

Όταν στην είσοδο της συνάρτησης καλωδιώνεται πίνακας, τότε αυτή αλλάζει μέγεθος αυτόματα, ώστε να εμφανίσει δείκτες εισόδου κάθε διάσταση του πίνακα. Στο connector pane εμφανίζονται οι προεπιλεγμένοι τύποι δεδομένων γι' αυτήν την πολυμορφική συνάρτηση.



Εικόνα 80: Replace Array Subset στο Block diagram. (Labview)

N-dimension array: είναι ο πίνακας στον οποίο θέλουμε να αντικαταστήσουμε στοιχεία, σειρές, στήλες ή σελίδες.

Index (0-n-1): καθορίζει το στοιχείο, σειρά, στήλη ή σελίδα που θα αντικατασταθεί. Αν δεν καλωδιώσουμε αυτήν την είσοδο, τότε η διάσταση του new element/subarray που είναι στην είσοδο, καθορίζει τον αριθμό των στοιχείων του n-διάστατου πίνακα που θα αντικαταστήσει η συνάρτηση, ξεκινώντας από το 0.

New element/subarray: είναι ο πίνακας ή το στοιχείο που αντικαθιστά το στοιχείο, τη σειρά, τη στήλη ή τη σελίδα στον πίνακα της εισόδου: n-dimension array.

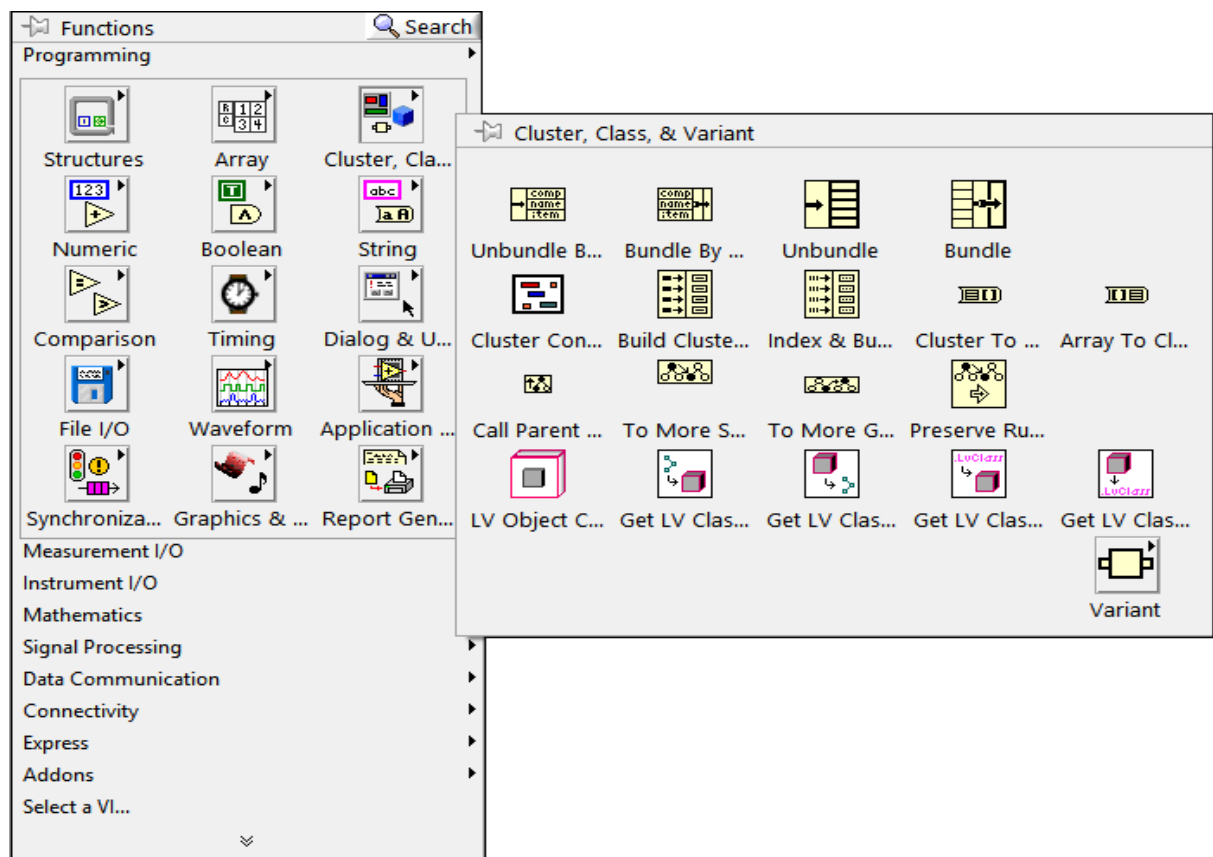
Output Array: είναι ο πίνακας που αυτή η συνάρτηση επιστρέφει με τα αντικατεστημένα στοιχεία, σειρές, στήλες ή σελίδες.

Αλλάζοντας το μέγεθος αυτής της συνάρτησης, μπορούν να αντικατασταθούν πολλά στοιχεία ή υποσύνολα πινάκων στον ίδιο χρόνο. Η λειτουργία της συνάρτησης Replace array subset, δεν επηρεάζει τη μορφή του αρχικού πίνακα. Αυτή η συνάρτηση περικόπτει όποιον υποπίνακα είναι πολύ μεγάλος για να ταιριάξει ως σειρά, στήλη ή σελίδα στον πίνακα εισόδου.

## Π.7.8. Cluster, Class & Variant Vis and Functions

Οι συναρτήσεις Cluster, Class & Variant, που βρίσκονται στην παλέτα συναρτήσεων στο block diagram, χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία και το χειρισμό συμπλεγμάτων (Clusters) και τάξεων στο Labview, για τη μετατροπή δεδομένων Labview σε μια μορφή που μπορούμε να χειριστούμε ανεξάρτητα με τον τύπο των δεδομένων, για την προσθήκη χαρακτηριστικών στα δεδομένα και για την μετατροπή των Variant data σε Labview data.

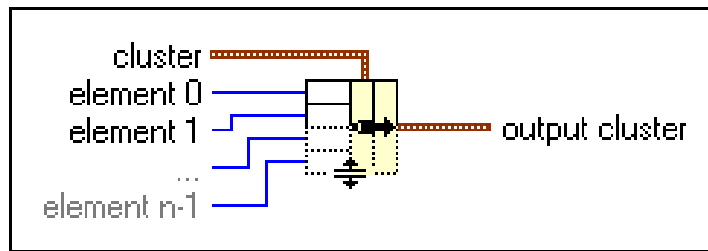
Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το εικονίδιο των Cluster, Class & Variant Vis and Functions στο block diagram, με τις επιλογές του.



Εικόνα 681: Cluster, Class & Variant Vis and Functions στο Block diagram. (Labview)

Από τις παραπάνω συναρτήσεις εμείς χρησιμοποιήσαμε τη Bundle Function. Η Bundle function χρησιμοποιείται για να συγκεντρώσει μια συστάδα από επιμέρους στοιχεία. Ακόμα μπορεί να αλλάξει τις τιμές επιμέρους στοιχείων μιας υπάρχουσας συστάδας χωρίς να χρειάζεται να προσδιοριστούν νέες τιμές για όλα της τα στοιχεία. Για τη λειτουργία αυτή, η συστάδα (cluster) καλωδιώνεται στο μεσαίο τερματικό της συνάρτησης. Όταν γίνει αυτό η συνάρτηση αλλάζει αυτόματα μέγεθος για να εμφανίσει εισόδους για το κάθε στοιχείο της συστάδας. Στο connector pane εμφανίζονται οι προεπιλεγμένοι τύποι δεδομένων γι' αυτή την πολυμορφική συνάρτηση.





Εικόνα 69: Bundle Function στο Block diagram. (Labview)

Cluster: είναι η συστάδας της οποίας την τιμή θέλουμε να αλλάξουμε. Η συνάρτηση αντικαθιστά τα στοιχεία της συστάδας με τα στοιχεία (0 - n-1). Τα τερματικά εισόδου πρέπει να είναι ίσα με τον αριθμό των στοιχείων της συστάδας στην είσοδο. Αν δεν καλωδιωθεί αυτή η είσοδος, τότε η συνάρτηση κατασκευάζει μια συστάδα,

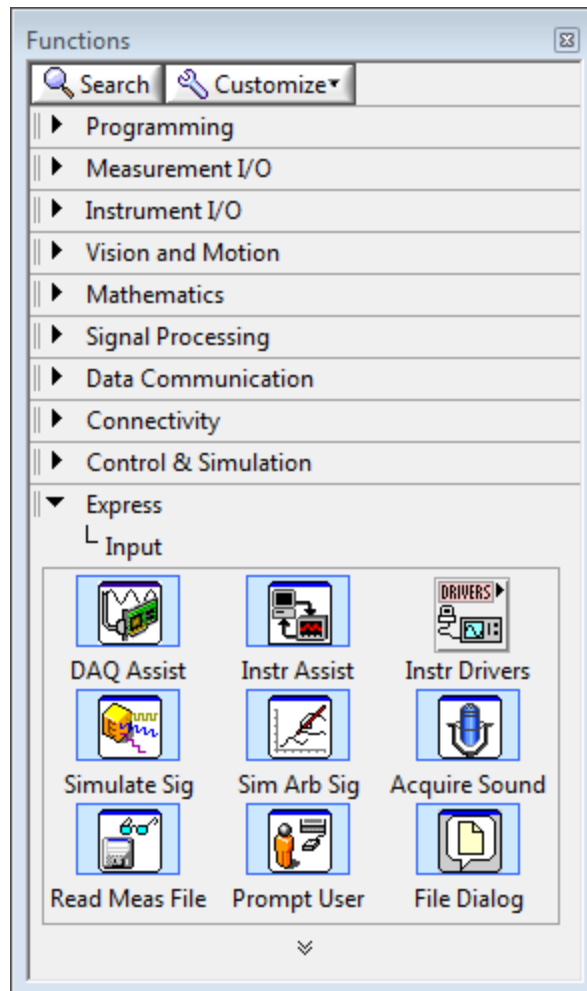
Element (0 - n-1): τα στοιχεία αυτά δέχονται οποιοδήποτε τύπο δεδομένων.

Output Cluster: είναι η προκύπτουσα συστάδα.

### Π.7.9. Express Vis and Functions

Οι συναρτήσεις Express, που βρίσκονται στην παλέτα συναρτήσεων στο Block diagram, χρησιμοποιούνται για την οικοδόμηση κοινών εργασιών μέτρησης.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το εικονίδιο της συνάρτησης Express στο diagram, με τις επιλογές του.



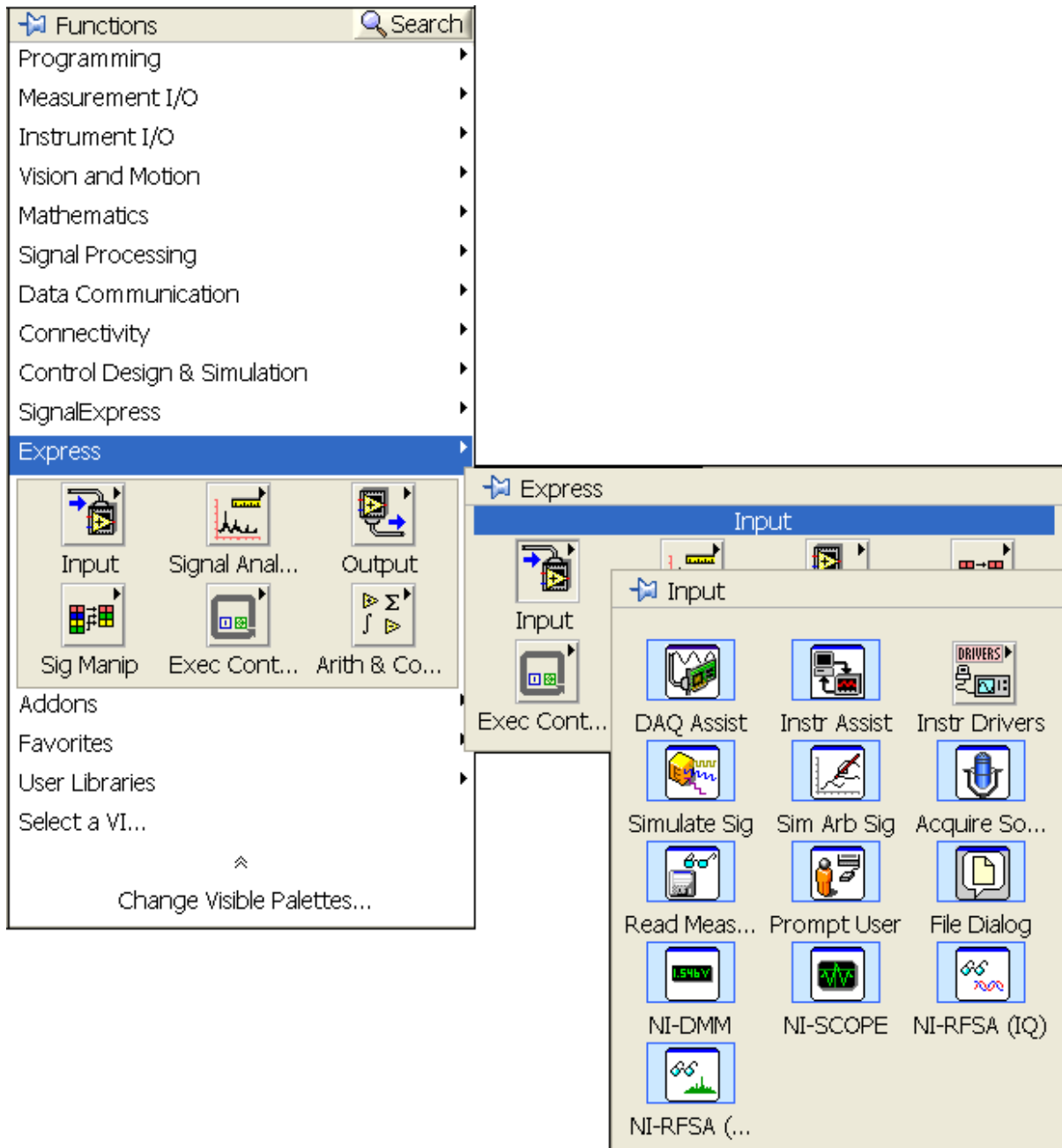
Εικόνα 83: Express Vis and Functions στο Block diagram. (Labview)

Από αυτές τις συναρτήσεις εμείς χρησιμοποιήσαμε τις Input Functions και Signal Analysis.

### Π.7.9.1. Input Function

Input Function: τη συνάρτηση εισόδου, που χρησιμεύει για τη συλλογή δεδομένων, την απόκτηση και προσομοίωση σημάτων.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η συνάρτηση εισόδου στο block diagram.

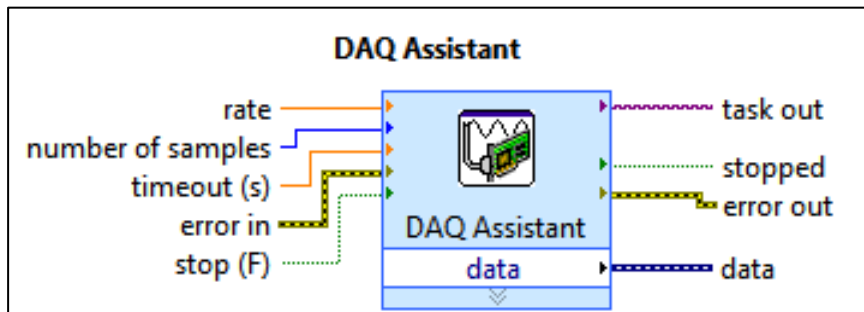


Εικόνα 84: Input Function στο Block diagram. (Labview)

Από τα εργαλεία της συνάρτησης Input Function χρησιμοποιήσαμε το DAQ Assistant (Data Acquisition). Το εργαλείο αυτό είναι ένα γραφικό περιβάλλον που

χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση βασικών εργασιών μέτρησης, καναλιών μέτρησης και κλιμάκων μέτρησης. Με το Daq Assistant μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα μέτρησης ή εργασίας για χρήση στο Labview, στο Signal Express, στο Labview Window/CVI και σε Measurement Studio.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το εικονίδιο του Daq Assistant VI.



Εικόνα 705: Το εργαλείο DAQ Assistant στο Block diagram. (Labview)

Rate: είναι ο ρυθμός δειγματοληψίας σε δείγματα ανά κανάλι ανά δευτερόλεπτο.

Number of samples: είναι ο αριθμός των δειγμάτων/μετρήσεων που συλλέγονται οι δημιουργούνται σε κάθε κανάλι.

Timeout (s): καθορίζει το χρόνο σε δευτερόλεπτα που χρειάζεται αυτό το VI για να διαβάσει ή να γράψει όλα τα δείγματα. Εάν ο χρόνος αυτός παρέλθει το VI επιστρέφει σφάλμα. Σε λειτουργίες εισόδου το VI επιστρέφει όσα δείγματα έχουν διαβαστεί πριν το πέρασμα αυτού του χρονικού διαστήματος. Το προεπιλεγμένο χρονικό όριο είναι στα 10sec. Εάν οριστεί ο χρόνος ίσος με -1, τότε το VI θα περιμένει επ' άοριστον. Ενώ αν ορίσουμε χρονικό όριο ίσο με 0, τότε το VI προσπαθεί μια φορά να διαβάσει ή να γράψει τα δείγματα και αν δεν το πετύχει επιστρέφει σφάλμα.

Error in: περιγράφει τις συνθήκες σφάλματος που εμφανίζονται πριν τελειώσει αυτό το VI.

Stop: ορίζει το τέλος της εργασίας και την απελευθέρωση των πόρων της συσκευής όταν το VI ολοκληρώσει την εκτέλεσή του. Για συνεχόμενες εργασίες αυτή η είσοδος είναι ψευδής (False) και η διαδικασία συνεχίζει να τρέχει μέχρι να σταματήσει η εφαρμογή. Για πεπερασμένες εργασίες η είσοδος είναι προεπιλεγμένη αληθής (True) και η εργασία σταματά όταν ληφθούν όλες οι μετρήσεις.

Task out: περιέχει αναφορά στην εργασία, όταν το Vi ολοκληρωθεί.

Stopped: υποδεικνύει εάν η εργασία σταμάτησε. Η εργασία σταματά, αν η είσοδος stop είναι αληθής, ή αν προκύψει κάποιο σφάλμα.

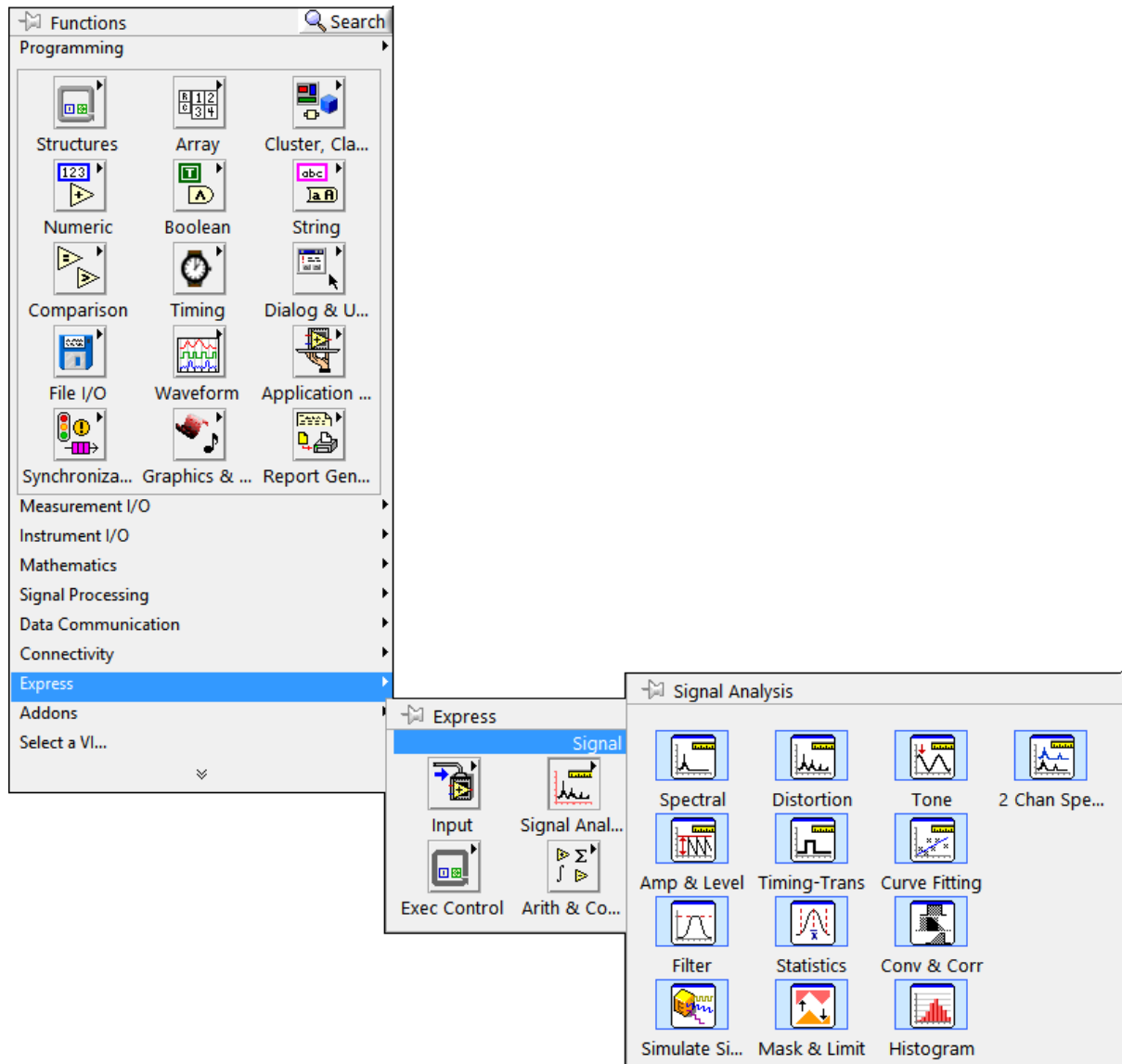
Error out: περιέχει πληροφορίες σφάλματος. Αν η είσοδος error in δείχνει ότι υπάρχει κάποιο σφάλμα πριν τρέξει το VI, τότε η έξοδος error out περιέχει την ίδια πληροφορία σφάλματος. Αλλιώς περιγράφει την πληροφορία του σφάλματος που παράγει αυτό το VI.

Data: περιέχει δείγματα που διαβάζονται από την εργασία. Είναι έξοδος για εργασίες μετρήσεων και είσοδος για αναλογικές και ψηφιακές εργασίες εξόδου.

### Π.7.9.2. Signal Analysis

Signal Analysis: η ανάλυση σήματος χρησιμοποιείται στην εκτέλεση μετρήσεων κυματομορφών, στη δημιουργία κυματομορφών και στην επεξεργασία σήματος.

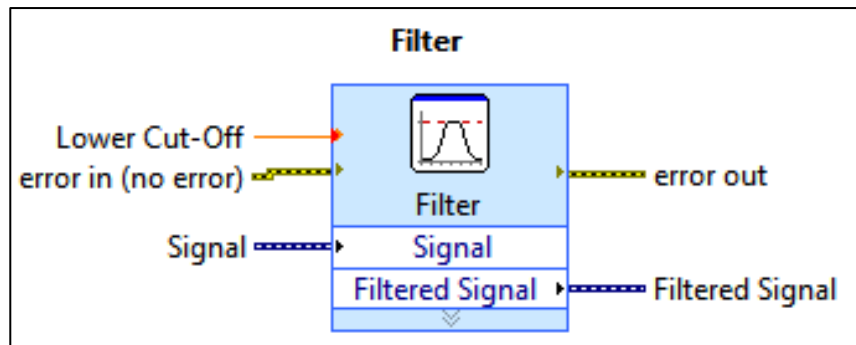
Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το εικονίδιο της ανάλυσης σήματος στο block diagram.



Εικόνα 716: Signal Analysis στο Block diagram. (Labview)

Από τα εργαλεία της ανάλυσης σήματος, θα χρησιμοποιήσουμε τα ακόλουθα:

1. Filter, το οποίο επεξεργάζεται σήματα περνώντας τα μέσα από φίλτρα και παράθυρα.



Εικόνα 87: Το εργαλείο Filter στο Block diagram. (Labview)

Lower cut-off: καθορίζει τη χαμηλή συχνότητα αποκοπής του φίλτρου. Η προεπιλεγμένη τιμή του είναι 100.

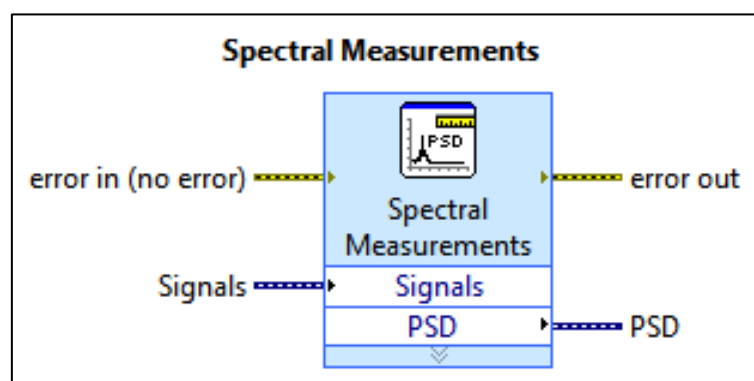
Error in: περιγράφει τις συνθήκες σφάλματος που εμφανίζονται πριν τελειώσει η διαδικασία.

Signal: καθορίζει το σήμα εισόδου και μπορεί να είναι μια κυματομορφή, ένας πραγματικός ή ένας μιγαδικός πίνακας.

Error out: περιέχει πληροφορίες σφάλματος.

Filtered signal: το φιλτραρισμένο σήμα που επιστρέφεται.

2. Spectral Measurement: αποδίδει φασματικές μετρήσεις βασισμένες στη μέθοδο Fast Fourier Transform-FFT.



Εικόνα 88: Το εργαλείο Spectral Measurements στο Block diagram. (Labview)

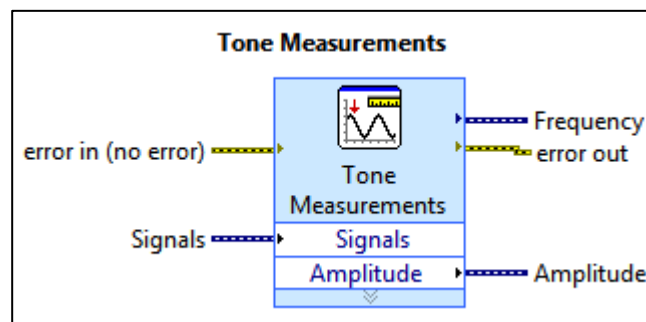
Error in: περιγράφει σφάλματα που εμφανίζονται πριν ξεκινήσει να τρέχει το VI.

Signals: περιέχει το σήμα ή τα σήματα εισόδου.

Error out: επιστρέφει πληροφορίες σφαλμάτων.

PSD: επιστρέφει το διαγραμμα φασματικής πυκνότητας ισχύος με τη μέθοδο FFT και εμφανίζει τα αποτελέσματα της RMS τιμής του μεγέθους ανά συχνότητα (Hz).

3. Tone Measurement: βρίσκει το σημείο με το μεγαλύτερο πλάτος, ή αναζητά ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων για να βρει το σημείο με το μέγιστο πλάτος. Ακόμα δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού της συχνότητας και της φάσης στο συγκεκριμένο σημείο.



Εικόνα 72: Εργαλείο Tone Measurement στο Block diagram. (Labview)

Error in: περιγράφει τις συνθήκες του σφάλματος που εμφανίζονται πριν τρέξει το VI.

Signals: Περιέχει το σήμα ή τα σήματα εισόδου.

Frequency: επιστρέφει τη συχνότητα του εντοπισμένου σημείου του μεγίστου.

Error out: περιέχει πληροφορίες σφάλματος.

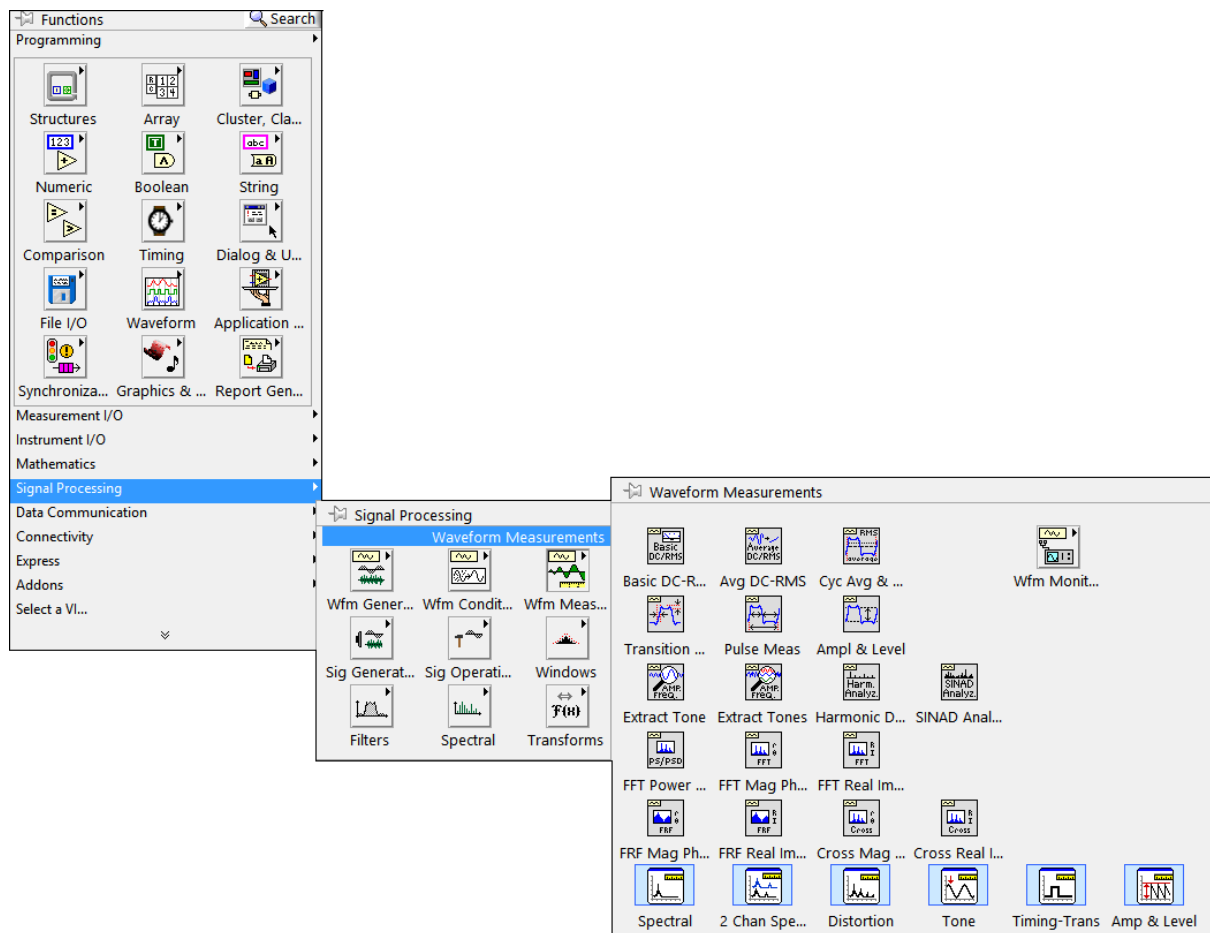
Amplitude: επιστρέφει το πλάτος του εντοπισμένου σημείου σε Volts.



## Π.7.10. Signal Processing

Η συνάρτηση επεξεργασίας σήματος, Signal Processing, που βρίσκεται στο block diagram χρησιμοποιείται για τη δημιουργία σήματος, ψηφιακό φίλτράρισμα, δημιουργία παράθυρων δεδομένων και ανάλυση φάσματος.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το εικονίδιο της συνάρτησης Signal Processing στο block diagram, με τις επιλογές της.



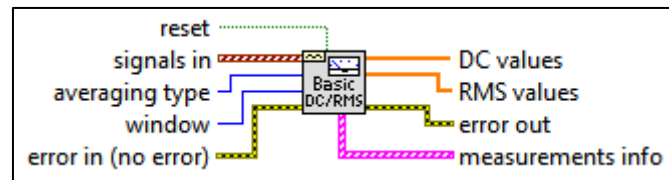
Εικόνα 90: Signal Processing στο Block diagram. (Labview)

Από αυτές τις συναρτήσεις εμείς χρησιμοποιήσαμε τη Waveform measurements VI. Τα Vis αυτά χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση κοινών μετρήσεων στο πεδίο του χρόνου και των συχνοτήτων όπως DC, RMS, συχνότητα/πλάτος/φάση σ' ένα σημείο, αρμονική παραμόρφωση, SINAD.

Στην προηγούμενη εικόνα φαίνεται το εικονίδιο των Waveform Vis, με τα εργαλεία του. Από τα εργαλεία αυτά εμείς χρησιμοποιήσαμε το Basic Averaged DC-RMS VI. Το εργαλείο αυτό υπολογίζει τις τιμές DC και RMS μιας κυματομορφής, ή ενός πίνακα κυματομορφών.

Στην περίπτωση που στην είσοδο έχουμε πολυκαναλικό πίνακα κυματομορφών, αυτός προέρχεται από πολυκαναλική συλλογή, όπου κάθε στοιχείο του πίνακα κυματομορφών είναι ένα ξεχωριστό κανάλι δεδομένων.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το εργαλείο Basic Averaged DC-RMS VI, στο block diagram.



Εικόνα 91: Το εργαλείο Basic Averaged DC-RMS VI στο Block diagram. (Labview)

Reset: επαναφέρει το ιστορικό του χρονικού σήματος.

Signals in: είναι η κυματομορφή, ή ο πίνακας κυματομορφών στην είσοδο.

Averaging type: είναι ο τύπος του μέσου όρου που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Window: το παράθυρο που θα εμφανιστεί στη διάρκεια καταγραφής, πριν τον υπολογισμό των τιμών DC/RMS.

Error in: περιγράφει τις συνθήκες σφάλματος που εμφανίζονται πριν τελειώσει το VI.

DC values: είναι η μετρούμενη τιμή DC σε Volts, αν το σήμα είναι σε Volt.

RMS value: είναι η μετρούμενη τιμή RMS σε Volt, αν το σήμα είναι σε Volt.

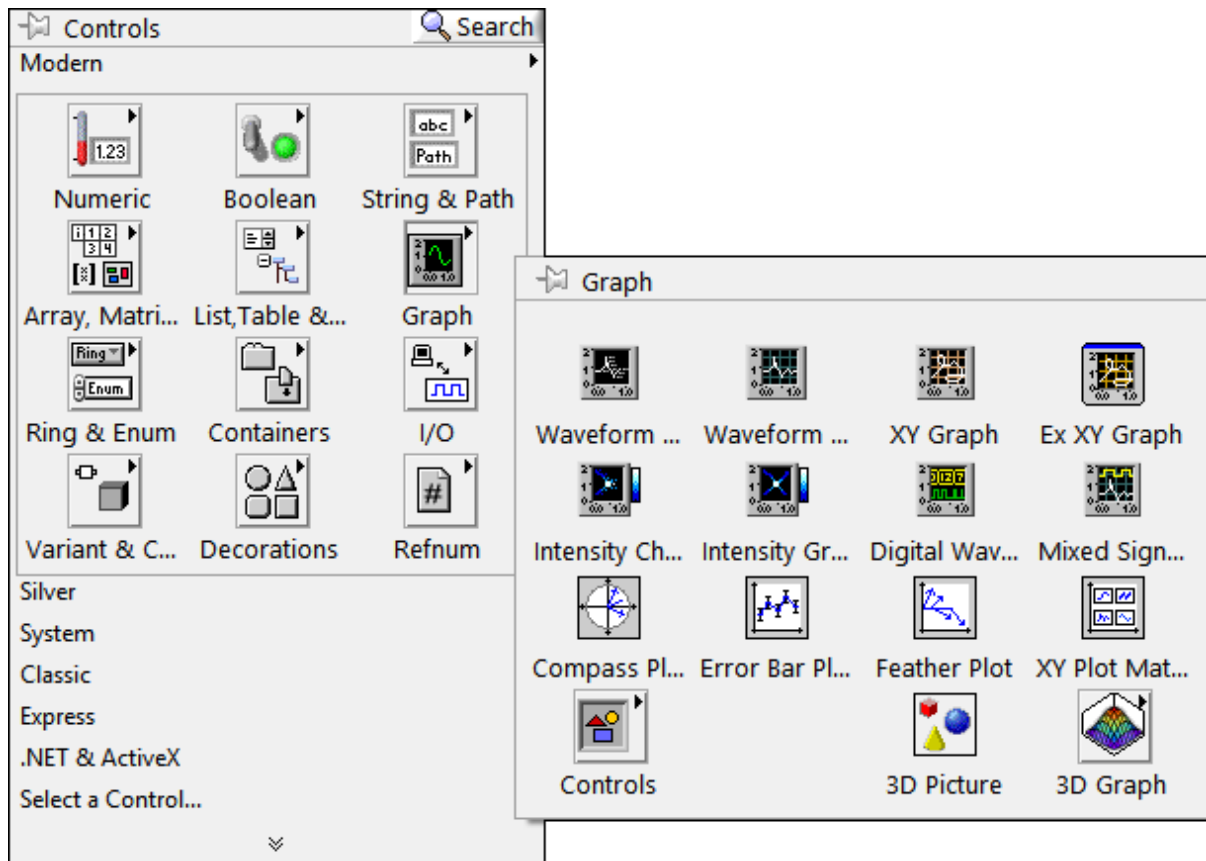
Error out: περιέχει πληροφορίες σφάλματος.

Measurements info: επιστρέφει πληροφορίες για τις μετρήσεις, κυρίως ασυνέπειες του σήματος εισόδου.

## Π.7.11. Graph and Chart Controls and Indicators

Το εργαλείο της γραφικής παράστασης, Graph Control, που βρίσκεται στο front panel, χρησιμοποιείται για την απεικόνιση δεδομένων σε ένα γράφημα, ή διαγράμμα.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το εικονίδιο του Graph Control στο front panel.



Εικόνα 73: Graph Controls στο Front panel.  
(Labview)

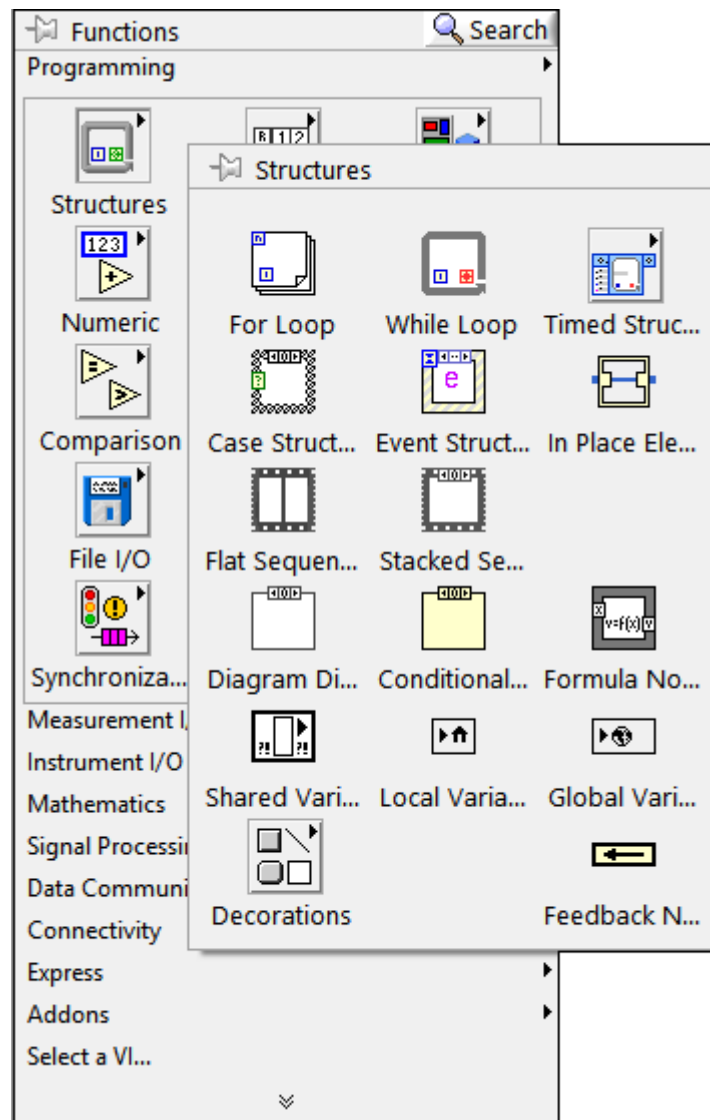
Από τα παραπάνω γραφήματα, εμείς χρησιμοποιήσαμε τα ακόλουθα:

- Waveform Graph: απεικονίζει δεδομένα που συνήθως αποκτώνται με σταθερό ρυθμό.
- XY Graph: απεικονίζει δεδομένα που αποκτώνται με μη σταθερό ρυθμό και δεδομένα από συναρτήσεις πολλών τιμών.

### Π.7.12. Structures

Οι συναρτήσεις δομών, Structures, που βρίσκονται στο block diagram, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή προγραμμάτων VI.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το εικονίδιο των Structures στο block diagram.

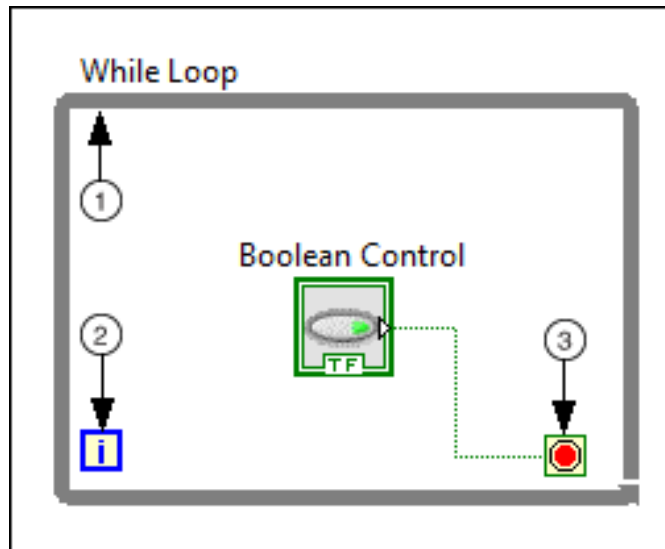


Εικόνα 74: Structures στο Block diagram. (Labview)

Από τις παραπάνω δομές εμείς χρησιμοποιήσαμε τις ακόλουθες:

- While Loop: επαναλαμβάνει τον κώδικα που βρίσκεται στο πλαίσió του, μέχρι να συμβεί μια συγκεκριμένη κατάσταση. Η δομή αυτή εκτελείται τουλάχιστον μία φορά.

Στην επόμενη εικόνα φαίνονται τα συστατικά της While Loop.

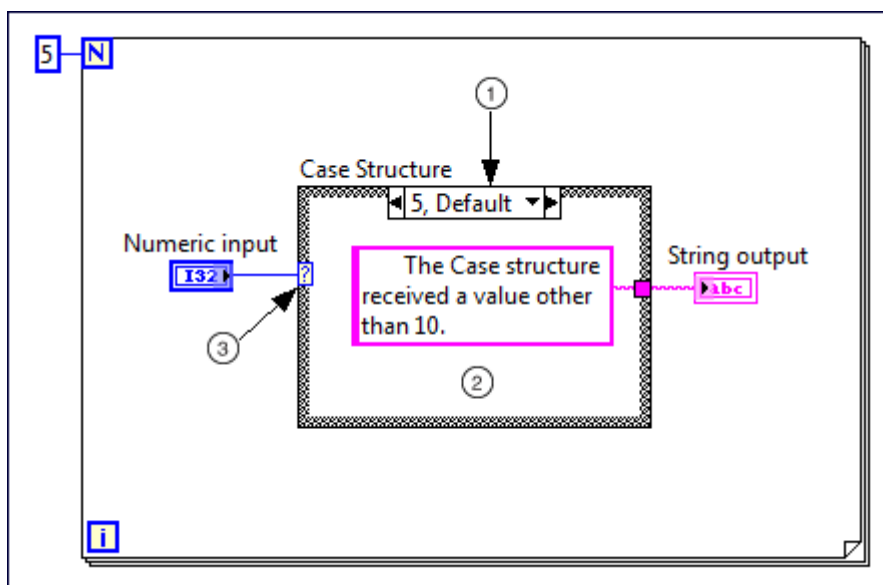
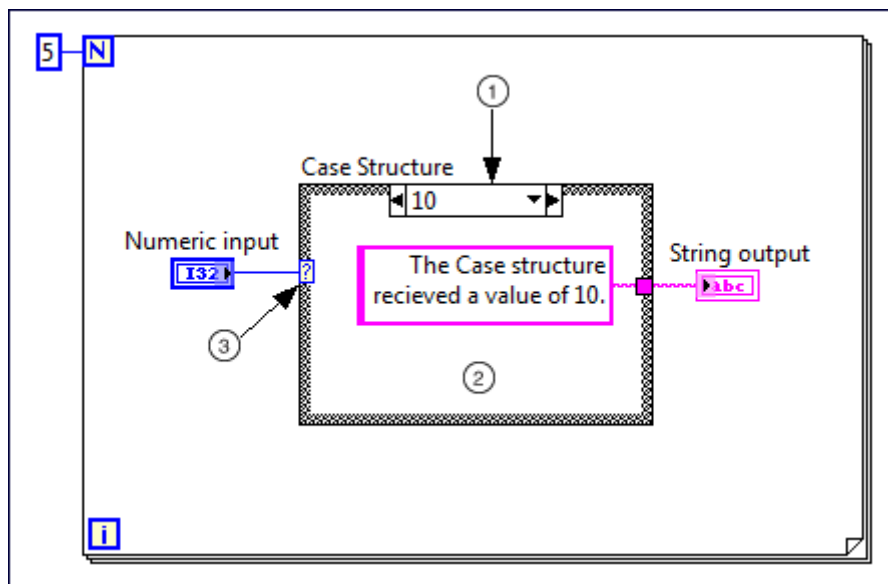


Εικόνα 75: While Loop στο Block diagram. (Labview)

- (1) Sub diagram: περιέχει τον κώδικα, τον οποίο η While Loop εκτελεί μία φορά ανά επανάληψη.
- (2) Iteration Terminal (i): παρέχει την τρέχουσα μέτρηση του βρόχου επανάληψης. Ο αριθμός του βρόχου ξεκινά τη μέτρηση από το μηδέν, που αντιστοιχεί στην πρώτη επανάληψη.
- (3) Conditional Terminal: με τη σύνδεση με μια δυαδική (Boolean) τιμή εισόδου, καθορίζει εάν θα συνεχιστεί η εκτέλεση του βρόχου While.

- Case Structure: περιέχει ένα ή περισσότερα υποδιαγράμματα (subdiagrams), ή υποθέσεις, ακριβώς ένα από τα οποία εκτελεί, όταν η δομή εκτελείται. Η τιμή που καλωδιώνεται στο τερματικό του επιλογέα (Selector terminal), καθορίζει ποια περίπτωση θα εκτελεστεί.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η Case Structure στο block diagram.



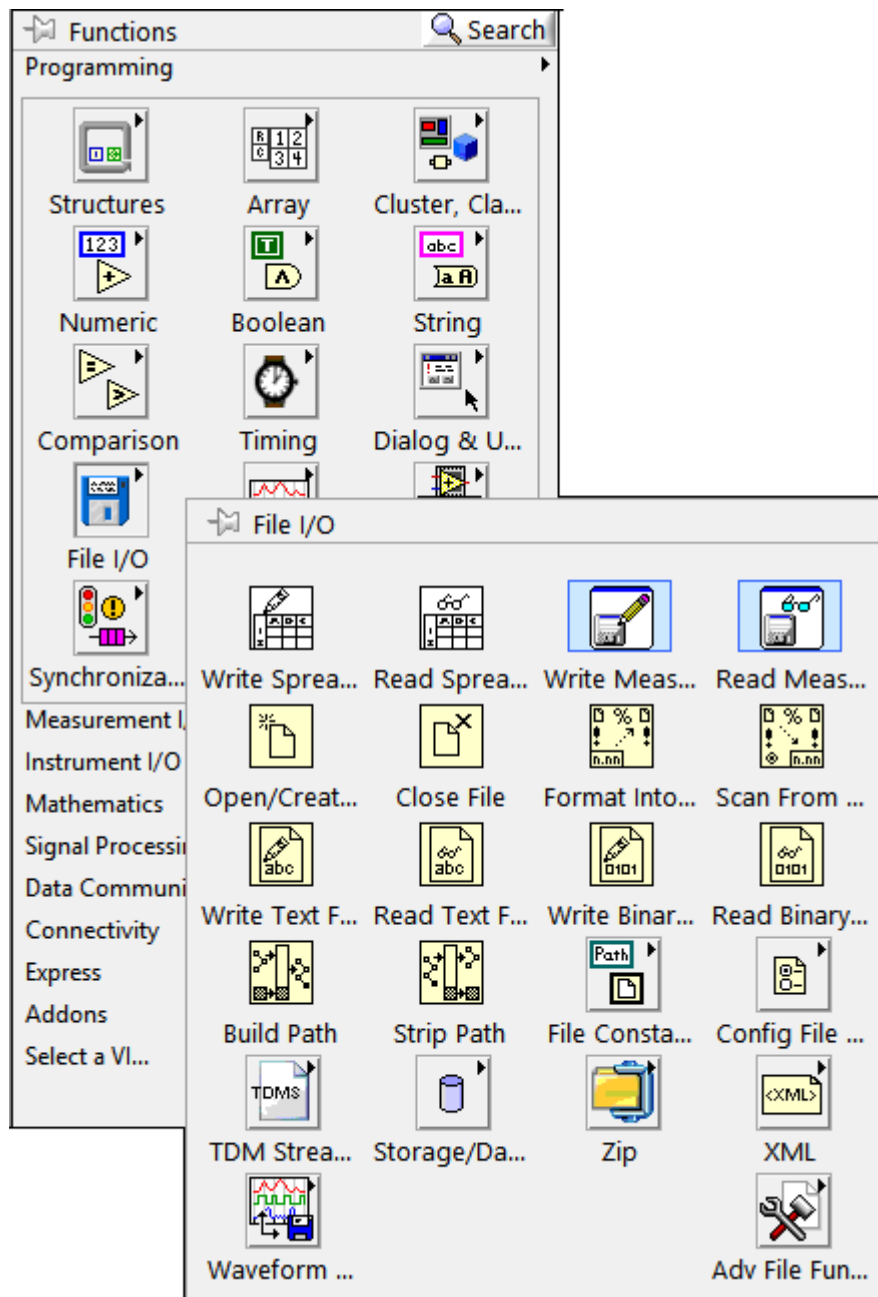
Εικόνα 76: Case Structure στο Block diagram. (Labview)

- (1) Case selector label: εμφανίζει την τιμή, ή τις τιμές για τις οποίες εκτελείται η σχετική υπόθεση. Μπορεί να ορισθεί μία τιμή, ή ένα εύρος τιμών. Ακόμα με την ετικέτα του επιλογέα, καθορίζεται η προεπιλεγμένη τιμή της υπόθεσης.
- (2) Subdiagram (case): περιέχει τον κώδικα που εκτελείται όταν η τιμή που καλωδιώνεται στο τερματικό του επιλογέα (Case selector) ταιριάζει με την τιμή που εμφανίζεται στην ετικέτα του επιλογέα.
- (3) Selector terminal: επιλέγει ποια περίπτωση να εκτελέσει με βάση τις τιμές των δεδομένων εισόδου.

### Π.7.13. File I/O Vis and Functions

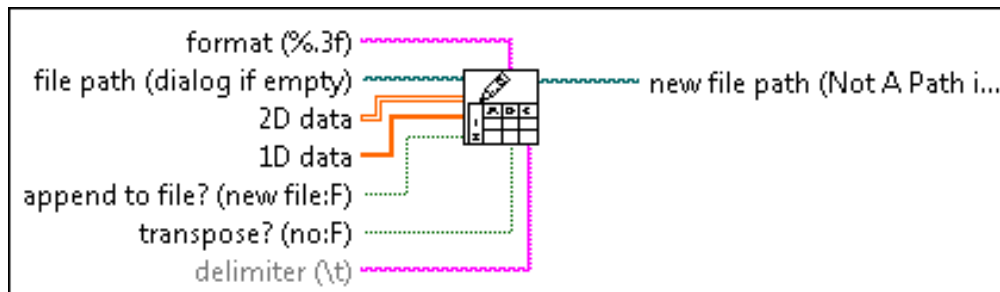
Τα File Vis and functions, που βρίσκονται στο Block diagram, χρησιμοποιούνται για το άνοιγμα και το κλείσιμο αρχείων, το διάβασμα από αρχεία και το γράψιμο σε αρχεία, τη δημιουργία καταλόγων και αρχείων, την ανάκτηση πληροφοριών καταλόγου και τη καταγραφή, συμβολοσειρών, αριθμών, πινάκων και clusters σε αρχεία.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το εικονίδιο του File I/O στο block diagram, με τις επιλογές του.



Εικόνα 77: File I/O Vis and Functions στο Block diagram. (Labview)

Από τις παραπάνω εντολές εμείς χρησιμοποιήσαμε τη Write to Spreadsheet File, η οποία μετατρέπει μονοδιάστατους ή δισδιάστατους πίνακες συμβολοσειρών, ακεραίων ή αριθμών διπλής ακρίβειας σε μια συμβολοσειρά κειμένου και γράφει τη συμβολοσειρά σε ένα νέο αρχείο ροής, ή την προσαρτά σε ένα υπάρχον αρχείο.



Εικόνα 78: Η εντολή Write to Spreadsheet File στο Block diagram. (Labview)

Format: καθορίζει τον τρόπο μετατροπής των αριθμών σε χαρακτήρες.

File path: είναι το όνομα της διαδρομής του αρχείου.

2D data: περιέχει τα δεδομένα που γράφει το VI στο αρχείο, αν το 1D data δεν είναι καλωδιωμένο, ή είναι άδειο.

1D data: περιέχει τα δεδομένα που γράφει το VI στο αρχείο, αν αυτή η είσοδος δεν είναι άδεια. Το VI μετατρέπει τον μονοδιάστατο πίνακα σε δισδιάστατο πριν προχωρήσει η διαδικασία. Εάν το transpose? είναι στο False (που αποτελεί προεπιλογή), τότε κάθε φορά που καλείται αυτό το VI δημιουργεί μια νέα γραμμή ή σειρά στο αρχείο.

Transpose?: εάν είναι στο True, μεταφέρει τα δεδομένα αφού μετατραπούν σε συμβολοσειρές. Η προεπιλογή είναι False.

Delimiter: είναι ο χαρακτήρας, ή η συμβολοσειρά των χαρακτήρων που χρησιμοποιείται για να διαχωριστούν τα πεδία στο αρχείο υπολογιστικού φύλλου.

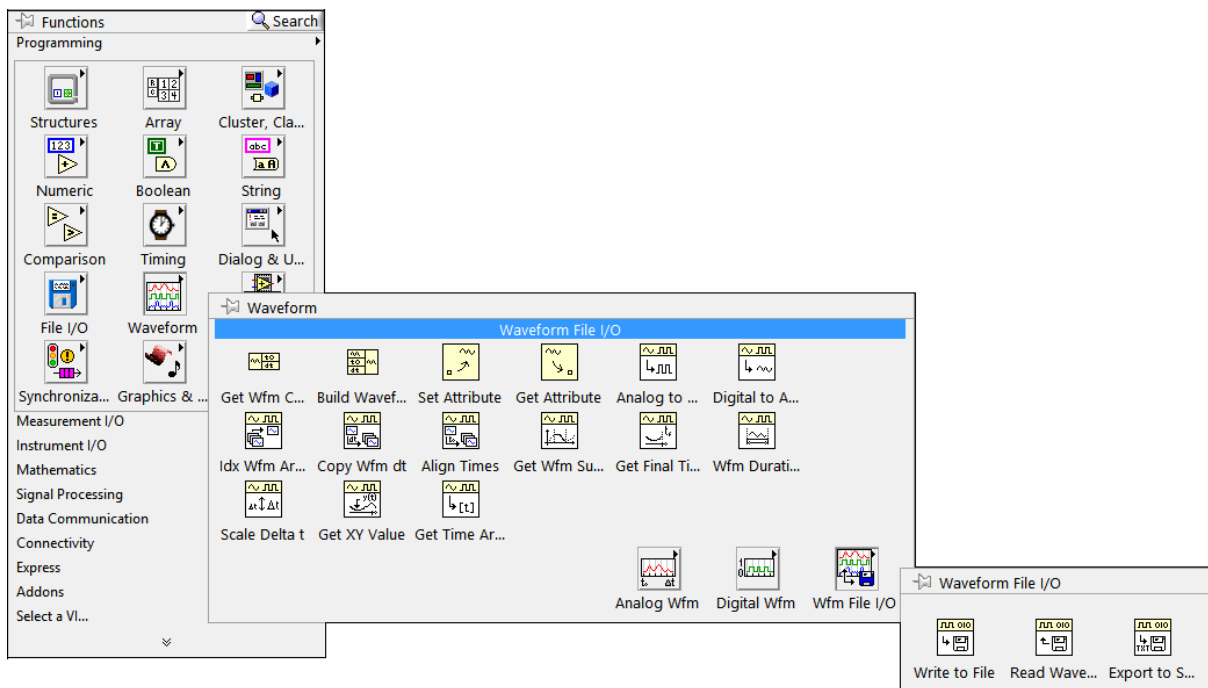
New file path: επιστρέφει τη διαδρομή προς το αρχείο.



## Π.7.14. Waveform Vis and Functions

Οι συναρτήσεις και τα Vis κυματομορφών, Waveform Vis and Functions, που βρίσκεται στο Block diagram, χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία κυματομορφών που περιέχουν τιμές κυματομορφών, πληροφορίες χρόνου και καναλιών και για τον ορισμό και την ανάκτηση χαρακτηριστικών και συστατικών της κυματομορφής.

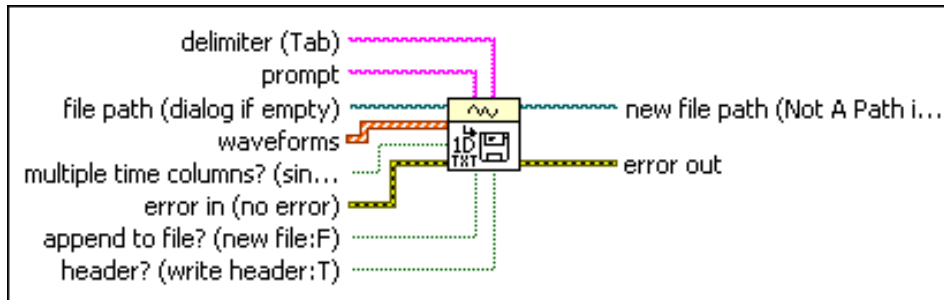
Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το εικονίδιο των Waveform Vis and Functions στο block diagram, με τις επιλογές του.



Εικόνα 79: Waveform Vis and Functions στο Block diagram. (Labview)

Από αυτά τα εργαλεία εμείς χρησιμοποιήσαμε το Waveform File I/O, που φαίνεται στην εικόνα. Με το εργαλείο αυτό γράφονται δεδομένα κυματομορφών σε αρχεία και διαβάζονται δεδομένα κυματομορφών από αρχεία.

Από τις εντολές που περιέχει το Waveforms File I/O, χρησιμοποιήσαμε το Export Waveforms to Spreadsheet File. Η εντολή αυτή μετατρέπει την κυματομορφή σε συμβολοσειρά κειμένου και γράφει τη συμβολοσειρά σε ένα νέο αρχείο ροής, ή την προσαρτά σε ένα υπάρχον αρχείο.



Εικόνα 80: Η εντολή *Export Waveforms to Spreadsheet File* στο Block diagram. (Labview)

Delimiter: είναι ο χαρακτήρας ή η συμβολοσειρά χαρακτήρων που χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό πεδίων στο αρχείο υπολογιστικού φύλλου.

Prompt:

File path: είναι το όνομα της διαδρομής του αρχείου.

Waveforms: είναι οι κυματομορφές που εξάγονται στο αρχείο υπολογιστικού φύλλου.

Multiple time columns?: εάν είναι στο TRUE, το VI γράφει ξεχωριστές στήλες χρόνου για κάθε διαφορετικό κανάλι. Αν είναι στο False (που είναι η προεπιλογή), ένα μόνο κελί χρόνου αντιπροσωπεύει το ίδιο εύρος του χρόνου για όλες τις κυματομορφές που γράφονται στο αρχείο.

Error in: περιγράφει τα σφάλματα που εμφανίζονται πριν αρχίσει ο κόμβος να τρέχει.

Append to file?: αν είναι στο TRUE, προσαρτά τα δεδομένα σε υπάρχον αρχείο. Αν είναι στο FALSE (που είναι η προεπιλογή), το VI αντικαθιστά τα δεδομένα σε ένα υπάρχον αρχείο. Αν δεν υπάρχει αυτό το αρχείο, το VI δημιουργεί ένα νέο.

Header?: εάν είναι στο TRUE (που είναι η προεπιλογή) το VI τυπώνει επικεφαλίδες στις στήλες και στις σειρές που περιέχουν πληροφορίες για το χρόνο και την ημερομηνία και ετικέτες για τα δεδομένα. Αν είναι στο FALSE το VI δεν τυπώνει επικεφαλίδες στις στήλες και στις σειρές.

New file path: είναι ο διαδρομή του αρχείου στο οποίο το VI γράφει τα δεδομένα. Αυτή η έξοδος χρησιμοποιείται για να καθοριστεί η διαδρομή η οποία ανοίγει χρησιμοποιώντας το dialog box. Αν ακυρωθεί το dialog box, η επιλογή αυτή γίνεται 'Not a path'.

Error out: περιέχει πληροφορίες σφάλματος.

## Βιβλιογραφία

### *Βιβλία*

“Ηλεκτρομαγνητισμός”, Μιχάλης Πίσσας

“Nondestructive Evaluation”, Peter J. Shull, Marcel Dekker, Inc.

“Finite Element Method Magnetics - Version 4.2 User’s Manual”, David Meeker

“LabVIEW Signal Processing Course Manual”, National Instruments Corporation

“Classical Electrodynamics-Third Edition”, John David Jackson, John Wiley & Sons, INC

“GMR Sensor Catalog”, NVE Corporation

### *Άρθρα*

«Improvised Asymptotic Boundary Conditions for Electrostatic Finite Elements», David Meeker, *Member, IEEE*

“GMR Magnetic Sensor Arrays for NDE – Eddy-Current Testing”, C. H. Smith, R. W. Schneider1, T. Dogaru, and S. T. Smith

“Giant magnetoresistance-based eddy-current sensor”, Teodor Dogaru and Stuart T. Smith

“Design and Analysis of a GMR Eddy Current probe for NDT”, R. W. Porto, V. J. Brusamarello, R. Azambuja and O. Frison Jr.

“A Justification of Eddy Currents Model for the Maxwell Equations”, H. Ammari, A. Buffa and J.-C. Nedelec

«Advanced eddy-current methods for quantitative NDE», Cheng-Chi Tai

### *Διαδικτυακές Πηγές*

<http://www.ni.com/labview/>

[https://www.nde-ed.org/index\\_flash.htm](https://www.nde-ed.org/index_flash.htm)

<http://scada.manikasdesign.eu/>

<http://www.femm.info/wiki/HomePage>

<http://www.ndt.net/article/v10n06/mandache/mandache.htm>

<http://www.image.ece.ntua.gr/old/vlabs/kladas/introduction.htm>

<http://www.femm.info/wiki/OpenBoundaryExample>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Giant magnetoresistance](https://en.wikipedia.org/wiki/Giant_magnetoresistance)