



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

*«Υπολογισμός παραμέτρων υλικών μέσω μοντελοποίησης
της μεθόδου δινορρευσμάτων (με έμφαση σε επίπεδα
δοκίμια)»*

Η Διπλωματική Εργασία υποβάλλεται στην εξεταστική επιτροπή του Τμήματος
από τον :

Φραγκιαδάκη Ιάσων

Αριθμός Μητρώου 2027

Επιβλέπων Καθηγητής:

Θεοδοουλίδης Θεόδωρος

Κοζάνη

Σεπτέμβριος 2020

Ευχαριστήρια

Η εργασία με τίτλο «Υπολογισμός παραμέτρων υλικών μέσω μοντελοποίησης της μεθόδου δινορρευσμάτων» εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας κατά την διάρκεια των ακαδημαϊκών ετών 2019-2020.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Πρύτανη και επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Θεοδουλίδη Θεόδωρο για την πολύτιμη καθοδήγηση του παρά τις πολλές ακαδημαϊκές του υποχρεώσεις.

Εξίσου θερμά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτωρ Αθανάσιο Κυργιάζογλου για την πολύτιμη και αμέριστη βοήθεια του κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, αλλά και για την καθοδήγηση του στο εργαστήριο του τμήματος.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το επιστημονικό προσωπικό του τμήματος που φοίτησα όλα αυτά τα χρόνια για τις γνώσεις που μου προσέφεραν.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον φίλο και συνάδελφο Ζαφειρούδα Ιωάννη για την συμπαράσταση και την ανταλλαγή πληροφοριών καθόλη την διάρκεια της πραγματοποίησης της διπλωματικής εργασίας.

Με εκτίμηση
Φραγκιαδάκης Ιάσων

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη σύγκριση θεωρητικών τιμών και πειραματικών μετρήσεων μέσω της μέτρησης της σύνθετης αντίστασης του πηνίου για τον υπολογισμό της αγωγιμότητας και του lift-off (ανύψωση κεφαλής πηνίου). Οι θεωρητικές τιμές υπολογίζονται μέσω κώδικα που κατασκευάστηκε σε περιβάλλον Matlab®.

Πιο συγκεκριμένα, ο κώδικας που αναπτύξαμε λαμβάνει δεδομένα για τα χαρακτηριστικά του πηνίου, την συχνότητα μέτρησης, την σχετική μαγνητική διαπερατότητα του δοκιμίου καθώς και το πάχος του. Έχοντας τα παραπάνω ως δεδομένα μπορούμε να υπολογίσουμε την σύνθετη αντίσταση του πηνίου στο δοκίμιο αλλά και στον αέρα. Έτσι, υπολογίζοντας την σύνθετη αντίσταση για τις ίδιες συχνότητες που έγιναν οι μετρήσεις, είμαστε σε θέση συγκρίνοντας τις θεωρητικές με τις πειραματικές τιμές, να υπολογίσουμε το ελάχιστο τετραγωνικό σφάλμα, την αγωγιμότητα του δοκιμίου και το lift-off (ανύψωση κεφαλής πηνίου).

Γίνεται μια ποσοτική σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα του κώδικα μέσω του υπολογισμού του σφάλματος σύμφωνα με διορθωτική μέθοδο για μη-ιδανικό πηνίο (RMS error, ϵ^2), για τη διερεύνηση της ταύτισης των θεωρητικών αποτελεσμάτων.

Ακολουθεί η ανάλυση του θεωρητικού υποβάθρου που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση του κώδικα, καθώς επίσης και η παρουσίαση του προγράμματος και των δυνατοτήτων του.

Τέλος, στο παράρτημα Α' του εγγράφου παρατίθενται επίσης όλοι οι κώδικες, που δημιουργήθηκαν κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Abstract

The aim of this diploma thesis is to compare theoretical values and experimental measurements by measuring the impedance of the coil for the calculation of conductivity and lift-off (lift of coil head). Theoretical values are calculated using code constructed in Matlab® environment.

More specifically, the code we produced receives data on the characteristics of the coil, measurement frequency, relative magnetic permeability of the specimen as also its thickness. Taking the above as our data, we can calculate the impedance of the coil in the specimen but also in air. Thus, calculating the impedance for the same frequencies as the measurements, we are able to compare theoretical with experimental values, to calculate the minimum square error, conductivity of the specimen and the lift-off (lift of the coil head).

A quantitative comparison of experimental results with code results is made by calculating the error according to a non-ideal coil correction method (RMS error, ϵ^2), to investigate the identification of theoretical results.

A presentation analysis of theoretical background follows, that is used to implement the code, as well as the presentation of the program and its capabilities.

Finally, Annex A of the document also lists all the codes created during the elaboration of this diploma thesis.

Περιεχόμενα

Ευχαριστήρια.....	2
Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Περιεχόμενα.....	5
Κατάλογος Σχημάτων-Εικόνων-Πινάκων.....	7
Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή στους Μη Καταστροφικούς Ελέγχους	9
1.1 Μέθοδος δινορρευσμάτων	10
1.2 Υλικά.....	14
Κεφάλαιο 2 : Ανάλυση υπολογισμού της σύνθετης αντίστασης.....	16
2.1 Κανονικοποίηση μεταβλητών.....	16
2.2 Πηνίο.....	17
Κεφάλαιο 3 : Ανάγκη μέτρησης παραμέτρων.....	20
3.1 Ανάγκη μέτρησης της αγωγιμότητας.....	20
3.1.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την μέτρηση της αγωγιμότητας.....	21
3.2 Ανάγκη μέτρησης του Lift-off.....	23
Κεφάλαιο 4 : Διάφορες αναλυτικές λύσεις της σύνθετης αντίστασης.....	24
4.1 Αναλυτική λύση σύνθετης αντίστασης πάνω από επίπεδη πλάκα και γύρω από ράβδο με την μέθοδο Dodd and Deeds.....	24
4.1.1 Δημιουργία κώδικα για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης με την μέθοδο Dodd and Deeds.....	28
4.1.2 Δημιουργία απλοποιημένου κώδικα με την μέθοδο Dodd and Deeds για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης.....	31
4.2 Αναλυτική λύση υπολογισμού της σύνθετης αντίστασης με τη χρήση σειρών.....	33
4.2.1 Δημιουργία κώδικα για τον υπολογισμό σύνθετης αντίστασης με τη χρήση σειρών.....	35
4.3 Υπολογισμός σφάλματος μεταξύ πειραματικών μετρήσεων και θεωρητικών υπολογισμών.....	36
4.3.1 Δημιουργία κώδικα για την μέτρηση σύνθετης αντίστασης του πηνίου επί επίπεδης πλάκας υπολογίζοντας αγωγιμότητα, ανύψωση (Lift-off) και σφάλμα.....	37

4.3.2 Δημιουργία κώδικα για την μέτρηση σύνθετης αντίστασης του πηνίου μέσα σε σωλήνα υπολογίζοντας αγωγιμότητα και σφάλμα....	38
Κεφάλαιο 5 : Μετρήσεις.....	39
5.1 Βαθμονόμηση.....	39
5.1.1 Βαθμονόμηση μηχανήματος.....	39
5.2 Γέφυρα μέτρησης της σύνθετης αντίστασης (Γέφυρα Wheatstone).....	40
5.3 Κατασκευή πηνίων ελέγχου.....	40
5.3.1 Πηνίο για πλάκα.....	40
5.3.2 Πηνίο για κύλινδρο-σωλήνα.....	42
5.4 Δοκίμιο πειραμάτων.....	43
5.5 Όργανα μέτρησης.....	44
5.5.1 Όργανο μέτρησης σύνθετης αντίστασης Agilent 4294A (Ψηφιακό).....	44
Κεφάλαιο 6 : Επεξεργασία αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα.....	46
6.1 Σύγκριση θεωρητικών – πειραματικών τιμών.....	46
6.1.1 Σκοπός.....	46
6.1.2 Ανάλυση δεδομένων και μεθοδολογίας.....	46
6.1.3 Σύγκριση τιμών ωμικής αντίστασης (R).....	49
6.1.4 Σύγκριση τιμών επαγωγικής αντίδρασης (L).....	51
6.1.5 Τρισδιάστατη απεικόνιση του τετραγωνικού σφάλματος.....	53
6.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	54
6.3 Δεδομένα για τα δοκίμια.....	56
6.4 Σύγκριση επιπέδων σύνθετης αντίστασης.....	57
6.5 Συμπεράσματα.....	60
6.5.1 Αγωγιμότητα.....	60
6.5.2 Lift-off.....	60
6.5.3 Τετραγωνικό σφάλμα.....	61
Βιβλιογραφία.....	63
Παράρτημα Α' Κώδικες Matlab.....	65

Κατάλογος Σχημάτων-Εικόνων-Πινάκων

Σχήμα 1 : Μη Καταστροφικός Έλεγχος σε αγωγό [16].....	9
Σχήμα 2 : Μηχανισμός λειτουργίας δινορρευμάτων [17].....	10
Σχήμα 3 : Πηνίο πάνω από αγωγίμη πλάκα.....	12
Σχήμα 4 : Πηνίο ελέγχου.....	17
Σχήμα 5 : Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης πριν και μετά την κανονικοποίηση.....	18
Σχήμα 6 : Ορθογωνικής διατομής πηνίο πάνω από δύο αγωγίμα επίπεδα.....	25
Σχήμα 7 : Ορθογωνικής διατομής πηνίο γύρω από ράβδο δύο υλικών.....	26
Σχήμα 8 : Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης για μία τιμή αγωγιμότητας από περιβάλλον Matlab.....	30
Σχήμα 9 : Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης για μία τιμή αγωγιμότητας από περιβάλλον TEDDY.....	30
Σχήμα 10 : Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης για διαφορετικές τιμές αγωγιμότητας από περιβάλλον Matlab.....	32
Σχήμα 11 : Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης για διαφορετικές τιμές αγωγιμότητας από περιβάλλον TEDDY.....	32
Σχήμα 12 : Κύκλωμα γέφυρας Wheatstone.....	40
Σχήμα 13 : Διάγραμμα σύγκρισης θεωρητικών και πειραματικών τιμών της ωμικής αντίστασης του πηνίου (πλάκα).....	49
Σχήμα 14 : Διάγραμμα σύγκρισης θεωρητικών και πειραματικών τιμών της ωμικής αντίστασης του πηνίου (σωλήνας).....	50
Σχήμα 15 : Διάγραμμα σύγκρισης θεωρητικών και πειραματικών τιμών της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου (πλάκα).....	51
Σχήμα 16 : : Διάγραμμα σύγκρισης θεωρητικών και πειραματικών τιμών της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου (σωλήνας).....	52
Σχήμα 17 : Τριοδιάστατη απεικόνιση τετραγωνικού σφάλματος σε σχέση με την αγωγιμότητα και το lift-off(πλάκα).....	53
Σχήμα 18 : Επίπεδο σύνθετης αντίστασης για τέσσερις τιμές της συχνότητας και $\sigma=17\text{MS/m}$, lift-off=0.4mm (Matlab, πλάκα).....	54
Σχήμα 19 : Επίπεδο σύνθετης αντίστασης για τέσσερις τιμές της συχνότητας και $\sigma=10.5\text{MS/m}$ (Matlab, σωλήνας).....	55
Σχήμα 20 : Επίπεδο σύνθετης αντίστασης για τέσσερις τιμές της συχνότητας και $\sigma=17\text{MS/m}$, lift-off=0.4mm (TEDDY, πλάκα).....	57
Σχήμα 21 : Επίπεδο σύνθετης αντίστασης για τέσσερις τιμές της συχνότητας και $\sigma=10.5\text{MS/m}$ (TEDDY, σωλήνας).....	58

Εικόνες

Εικόνα 1 : Χειροκίνητη περιέλιξη πηνίου για μέτρηση πλάκας.....	41
Εικόνα 2 : Τελική μορφή πηνίου συνδεδεμένο με ακροδέκτες.....	42
Εικόνα 3 : Χειροκίνητη περιέλιξη πηνίου για μέτρηση σωλήνα.....	42
Εικόνα 4 : Δοκίμιο πλάκας.....	43
Εικόνα 5 : Δοκίμιο σωλήνα.....	44
Εικόνα 6 : Όργανο μέτρησης σύνθετης αντίστασης Agilent 4294A.....	45

Πίνακες

Πίνακας 1 : Αποτελέσματα προγράμματος για τη μέτρηση πλάκας.....	54
Πίνακας 2 : Αποτελέσματα προγράμματος για τη μέτρηση σωλήνα	55
Πίνακας 3 : Τιμές αγωγιμότητας στην πλάκα.....	60
Πίνακας 4 : Τιμές αγωγιμότητας στο σωλήνα.....	60
Πίνακας 5 : Τιμές lift-off.....	61
Πίνακας 6 : Τιμές τετραγωνικού σφάλματος για τη μέτρηση πλάκας.....	61
Πίνακας 7: Τιμές τετραγωνικού σφάλματος για τη μέτρηση σωλήνα.....	61

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή στους Μη Καταστροφικούς Ελέγχους

Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι (Non Destructive Testing, NDT, Μ.Κ.Ε) ονομάζονται οι τεχνικές αυτές που έχουν στόχο να επιθεωρήσουν, να ελέγξουν και να αξιολογήσουν τη λειτουργικότητα ενός στοιχείου (κατασκευή υλικών), ώστε να διακριβωθεί η κατάσταση του, χωρίς όμως αυτό να καταστραφεί και να χάσει τη λειτουργικότητά του. Είναι τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε ένα πολύ μεγάλο εύρος της βιομηχανίας, από την αεροπορική και τη ναυτιλία έως την ενέργεια και τις κατασκευές.[9]

Οι ΜΚΕ χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ατελειών σε ένα υλικό, χωρίς αυτό να καταστρέφεται. Ο σκοπός των ΜΚΕ είναι η πρόληψη επέκτασης ρωγμών, ατελειών και να υπολογίζεται ο κίνδυνος αστοχίας των υλικών.

Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι, διενεργούνται συνήθως μετά την παραγωγική διαδικασία, κατά τη φάση συναρμολόγησης ή λειτουργίας αυτών. Σε αντίθεση με τους καταστροφικούς ελέγχους που διενεργούνται σε αντιπροσωπευτικό δείγμα υλικών, οι ΜΚΕ γίνονται όταν αυτό είναι εφικτό και απαραίτητο, σε κάθε κομμάτι υλικού που εξετάζεται. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως μικρές και φορητές με δυνατότητα επιτόπιας εξέτασης των υλικών.



Σχήμα 1: Μη Καταστροφικός Έλεγχος σε αγωγό [16]

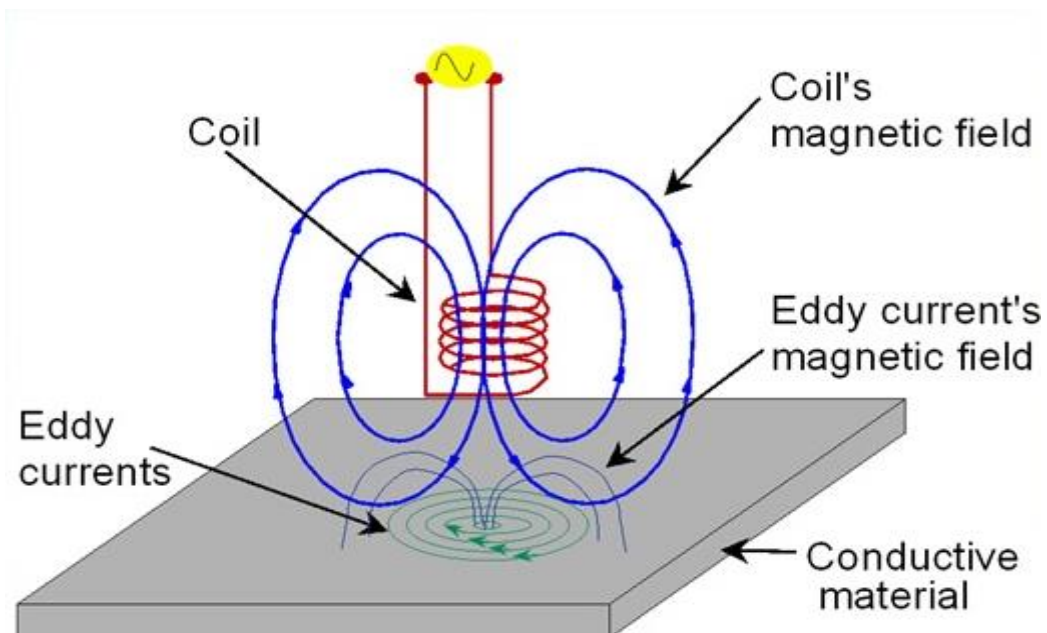
Οι πιο σημαντικές και δημοφιλέστερες μέθοδοι ΜΚΕ, που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι οι εξής:

- Οπτικός έλεγχος (Visual inspection)
- Διεσδυτικά υγρά (Liquid penetrant)
- Δινορρέυματα (Eddy current)
- Μαγνητικές μέθοδοι (Magnetic particle)
- Ραδιογραφία με ακτίνες Χ/γ (X/γ-Ray radiography)
- Υπέρηχοι (Ultrasonic)
- Ακουστική εκπομπή (Acoustic emission)
- Θερμογραφία (Infrared Thermography)

Στην περίπτωση μας, μας ενδιαφέρει ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος με τη μέθοδο των δινορρευμάτων.

1.1 Μέθοδος Δινορρευματών

Η μέθοδος των δινορρευμάτων είναι μια τεχνική μη καταστροφικών ελέγχων βασισμένη στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και χρησιμοποιείται κυρίως για την ανίχνευση επιφανειακών ή κοντά στην επιφάνεια ρωγμών και ατελειών σε αγωγίμα υλικά. Τα δινορρέυματα είναι μια πολύπλευρη τεχνική και χρησιμοποιείται κυρίως σε λεπτά υλικά.



Σχήμα 2: Μηχανισμός λειτουργίας δινορρευματών [17]

Τα δινορρεύματα δημιουργούνται από ηλεκτρομαγνητικά πηνία και επάγονται στο υλικό το οποίο εξετάζουμε. Πιο συγκεκριμένα, το εναλλασσόμενο ρεύμα που διέρχεται από τις σπείρες του πηνίου δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο είναι μεταβαλλόμενο και δημιουργεί ρεύματα στην επιφάνεια του δοκιμίου (επαγωγικό ρεύμα). Τα ρεύματα αυτά που ρέουν σε κλειστό βρόχο ονομάζονται δινορρεύματα (λέγονται δινορρεύματα λόγω της κυκλικής τους κίνησης, δίνη : περιστροφική κίνηση).

Τα δινορρεύματα παράγουν το δικό τους μαγνητικό πεδίο, το οποίο μπορεί να μετρηθεί και να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ατελειών, καθώς και για τον χαρακτηρισμό της αγωγιμότητας, της διαπερατότητας και των διαστάσεων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι ρωγμές ή οι ατέλειες του δοκιμίου πρέπει να διακόψουν τη ροή των δινορρευσμάτων στην επιφάνεια για να ανιχνευθούν. Οι ατέλειες που βρίσκονται παράλληλες στην πορεία των δινορρευσμάτων δεν θα προκαλέσουν σημαντική διακοπή και δεν μπορούν να ανιχνευθούν εύκολα .

Βασικός εξοπλισμός για την εφαρμογή της μεθόδου των δινορρευσμάτων :

- Εναλλασσόμενη πηγή ρεύματος
- Πηνίο συνδεδεμένο με την πηγή
- Βολτόμετρο για την μέτρηση των αλλαγών στο πηνίο

Στα δινορρεύματα υπάρχουν διάφορες επιδρώσες παράμετροι εκτός από τις ρωγμές ή τις ατέλειες που αλλάζουν τα αποτελέσματα. Η επιτυχής αξιολόγηση των ρωγμών είναι εφικτή εάν εξαλειφθούν ή σταθεροποιηθούν οι συγκεκριμένοι παράγοντες.

Οι κύριοι παράγοντες είναι :

1. Αγωγιμότητα υλικού

Η αγωγιμότητα ενός υλικού έχει άμεση επίδραση στη ροή των δινορρευσμάτων. Όσο μεγαλύτερη η αγωγιμότητα ενός υλικού, τόσο μεγαλύτερη η ροή των δινορρευσμάτων στο δοκίμιο. Η αγωγιμότητα μετριέται με τεχνική δινορρευσμάτων και μπορούν να εξαχθούν πολλά συμπεράσματα για τους διάφορους παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στην αγωγιμότητα, όπως η σύνθεση του υλικού, η θερμική επεξεργασία και η μέθοδος σκλήρυνσης .

2. Συχνότητα που επιλέγεται

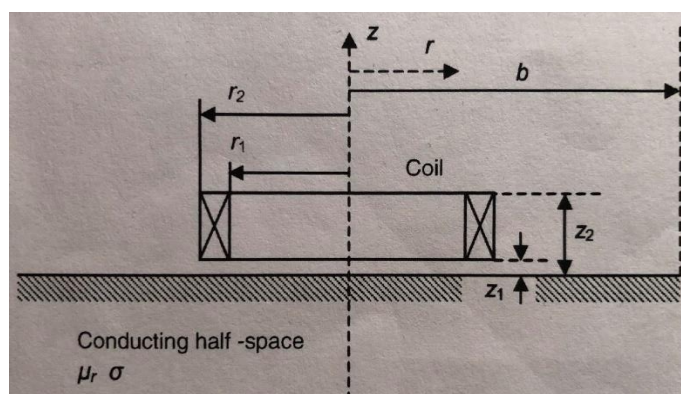
Η συχνότητα επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα δινορρέυματα, η οποία είναι παράγοντας που εύκολα ρυθμίζεται. Κατά την επιθεώρηση ενός δοκιμίου επιλέγονται συνήθως δύο ή περισσότερες συχνότητες για να αναγνωριστούν με ακρίβεια οι ασυνέχειες. Μεταβάλλουμε την συχνότητα για να γίνει κατανοητό επίσης αν υπάρχει ασυνέχεια ή απλώς ανιχνεύουμε την επίδραση άλλου παράγοντα.

3. Μαγνητική διαπερατότητα υλικού

Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα είναι ένα μέτρο της ευκολίας με την οποία οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου διαπερνούν ένα υλικό (μ_r). Συνήθως είναι μικρότερη της μονάδας ($\mu_r < 1$) και για το κενό $\mu_r = 1$. Ορίζεται ως ο λόγος την μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού προς την μαγνητική διαπερατότητα του κενού. Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού είναι $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N s}^2 / \text{C}^2$.

4. Ανύψωση κεφαλής (Lift-off)

Το lift-off (ανύψωση κεφαλής) είναι μια από τις καθοριστικές παραμέτρους που λαμβάνουμε υπόψιν μας. Η επίδραση που έχει η επιφάνεια που εξετάζουμε στο πηνίο μεγαλώνει όσο πλησιάζουμε στην κεφαλή. Αυτό έχει ως συνέπεια την μείωση της ευαισθησίας του πηνίου καθώς η απόσταση αυξάνεται.



Σχήμα 3 : Πηνίο πάνω από αγώγιμη πλάκα

Στο Σχήμα 3 φαίνεται ένα πηνίο το οποίο βρίσκεται πάνω από μια επίπεδη πλάκα. Το lift-off στο Σχήμα 3 είναι η μεταβλητή z_1 , δηλαδή η απόσταση που έχει το πηνίο από την εξεταζόμενη πλάκα. Ο παράγοντας του lift-off είναι συνήθως μεταβαλλόμενος.

5. Γεωμετρία δοκιμίου

Σε ένα δοκίμιο το οποίο έχει ανωμαλίες στην επιφάνεια (δεν είναι επίπεδο) ή δεν έχει άπειρο μέγεθος, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα όπως η κυρτότητα, οι άκρες, τα αυλάκια κλπ. θα υπάρχουν και θα επηρεάσουν τα αποτελέσματα των δινορρευσμάτων.

6. Βάθος διείσδυσης

Το βάθος διείσδυσης σε ένα υλικό εξαρτάται από την ηλεκτρική αγωγιμότητα, την μαγνητική διαπερατότητα και την συχνότητα που επιλέγεται. Δίνεται από τον τύπο :

$$\delta = 50(\rho/\mu_r)^{1/2}, \text{ mm} \quad (1)$$

ρ = η ειδική αντίσταση (mΩcm)

f = συχνότητα σε Hz

μ_r = η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, για μη σιδηρομαγνητικό = 1.

Επιπλέον, η πυκνότητα των δινορρευσμάτων μεταβάλλεται ανάλογα με το βάθος του υλικού. Στην επιφάνεια η πυκνότητα είναι στα μέγιστα επίπεδα και μειώνεται εκθετικά ανάλογα με το βάθος (skin effect).

Όπως όλοι οι έλεγχοι με Μη Καταστροφικούς Ελέγχους έτσι και τα δινορρεύματα έχουν μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα που παρουσιάζονται παρακάτω.

Πλεονεκτήματα των δινορρευσμάτων:

1. Πληθώρα εφαρμογών (έλεγχος χυτών, σφυρήλατων, συγκολλήσεων, σωλήνων).
2. Αποτελούν την πλέον ιδανική μέθοδο για των έλεγχο σωλήνων/τούμπο μικρού πάχους.
3. Δυνατότητα ελέγχου σε δοκίμια με επικάλυψη ή βαφή.
4. Δυνατότητα μέτρησης επικάλυψης.
5. Δυνατότητα ελέγχου ποιότητας θερμικής κατεργασίας.
6. Ευαίσθητη και γρήγορη μέθοδος.
7. Δυνατότητα διαλογής υλικών.

Μειονεκτήματα των δινορρευσμάτων:

1. Σχετικά υψηλό κόστος εξοπλισμού.
2. Μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε αγωγίμα υλικά.
3. Απαιτείται προσωπικό υψηλών δεξιοτήτων.

1.2 Υλικά

Όταν ένα υλικό βρεθεί σε μαγνητικό πεδίο επηρεάζεται διαφορετικά και διαχωρίζεται αναλόγως με τη μαγνητική διαπερατότητά του. Οι μαγνητικές ιδιότητες των υλικών, ανάλογα προς την τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας διακρίνονται σε:

- **Διαμαγνητικά** είναι τα υλικά που όταν τοποθετηθούν σε μαγνητικό πεδίο αυτό συνεπάγεται την ελάττωση της έντασής του, οι δυναμικές γραμμές της μαγνητικής επαγωγής αραιώνουν σε ένα διαμαγνητικό υλικό. Αυτά τα υλικά έχουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα μικρότερη της μονάδας π.χ. ο Άνθρακας (C) και ο Χαλκός (Cu). Εμφανίζονται με μικρή ή μηδενική μαγνητική ευαισθησία και απωθούνται ελαφρά, δηλαδή έχουν αντίθετη κατεύθυνση από το εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο.

- **Παραμαγνητικά** είναι τα υλικά που η τοποθέτηση τους σε ένα μαγνητικό πεδίο συνεπάγεται της σχετικά μικρής αύξησης της έντασής του. Οι δυναμικές γραμμές της μαγνητικής επαγωγής σε ένα παραμαγνητικό υλικό είναι λίγο περισσότερες από ότι στην εξωτερική μαγνητική επαγωγή. Αυτά τα υλικά έχουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα λίγο μεγαλύτερη της μονάδας π.χ. το Αργίλιο (Al) και το Χρώμιο (Cr).
- Τα **Σιδηρομαγνητικά** υλικά όταν βρεθούν σε ένα μαγνητικό πεδίο συνεπάγεται πολύ μεγάλη αύξηση της έντασής του, μαγνητίζονται έντονα και διατηρούν το μαγνητισμό τους και μετά την απομάκρυνση του πεδίου. Οι δυναμικές γραμμές της μαγνητικής επαγωγής συγκεντρώνονται ισχυρά από ένα σιδηρομαγνητικό υλικό. Με θέρμανση πάνω από μια κρίσιμη θερμοκρασία (θερμοκρασία Curie) χάνει τις σιδηρομαγνητικές του ικανότητες και γίνεται παραμαγνητικό. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του σιδήρου (Fe), του Νικελίου (Ni) και του Κοβαλτίου (Co) και όλων των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι πολύ μεγαλύτερη της μονάδας .

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση υπολογισμού σύνθετης αντίστασης

Όλη η πληροφορία που αφορά ένα δοκίμιο αποκτάται από τις αλλαγές των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του πηνίου που το εξετάζει. Η σύνθετη αντίσταση του πηνίου Z , είναι η συνολική αντίσταση στη ροή του ρεύματος, πρόκειται δηλαδή για συνδυασμό της ωμικής αντίστασης και της επαγωγικής αντίδρασης, και δίνεται από την εξίσωση:

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

Η σύνθετη αντίσταση του πηνίου χαρακτηρίζεται από ένα πραγματικό μέρος και ένα φανταστικό. Το πραγματικό μέρος είναι η ωμική αντίσταση R (resistance) και το φανταστικό, η επαγωγική αντίδραση X (inductive reactance).

$$Z = R + j X \quad (3)$$

Συγκεκριμένα, μελετάμε την μιγαδική μορφή της.

2.1 Κανονικοποίηση μεταβλητών

Για να μελετήσουμε την συμπεριφορά της σύνθετης αντίστασης χωρίς να χρειάζεται να σχεδιάζουμε διαγράμματα για κάθε πηνίο ξεχωριστά κανονικοποιούμε τα μέρη από τα οποία αποτελείται η σύνθετη αντίσταση. Έτσι μπορούμε να μελετήσουμε την επίδραση του δοκιμίου ανεξάρτητα από τις ιδιότητες του πηνίου.

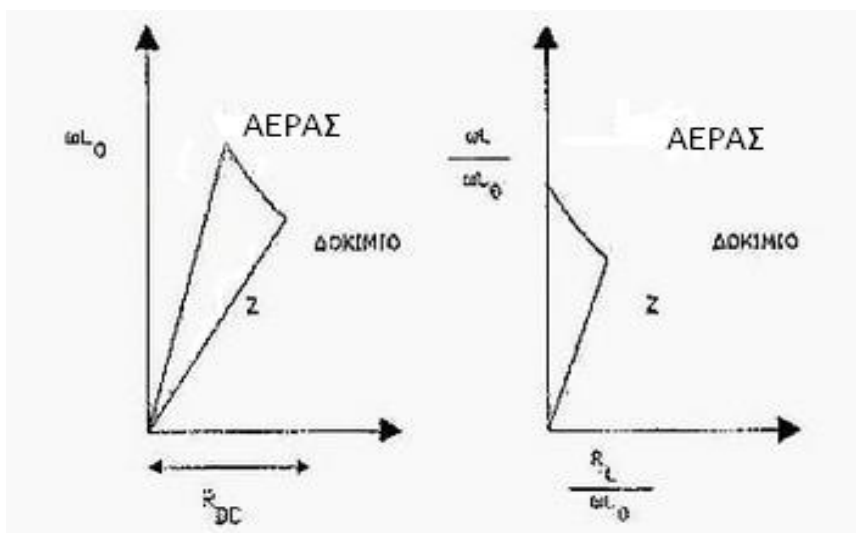
Η επαγωγική αντίδραση κανονικοποιείται διαιρώντας με το γινόμενο της κυκλικής συχνότητας και της αυτεπαγωγής όταν το πηνίο βρίσκεται στον αέρα (ωL_0), και δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{X_L}{X_{L0}} = \frac{\omega L}{\omega L_0} \quad (4)$$

Το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης (R_L) κανονικοποιείται από τον τύπο :

$$\frac{R_L}{X_{L0}} \quad (5)$$

R_L : ωμικό φορτίο λόγω δινορρευσμάτων που δημιουργούνται στο υλικό.



Σχήμα 4 : Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης πριν και μετά την κανονικοποίηση

Στο σχήμα 4 απεικονίζεται το διάγραμμα της σύνθετης αντίστασης πριν και μετά την κανονικοποίηση. Γίνεται αντιληπτό ότι το διάγραμμα απλοποιείται και είναι πιο εύκολο να συλλέξουμε δεδομένα.

2.2 Πηνίο

Σημαντικό ρόλο στην μέτρηση της σύνθετης αντίστασης διαδραματίζει το πηνίο ελέγχου. Το σχήμα του πηνίου ελέγχου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από το σκοπό της επιθεώρησης και το σχήμα του αντικειμένου που επιθεωρείται. Το πηνίο είναι συνήθως καλώδιο από χαλκό τυλιγμένο κατάλληλα και προσαρμοσμένο στην κεφαλή ελέγχου. Το μήκος του καλωδίου, ο αριθμός στροφών και οι διαστάσεις του πηνίου είναι μεταβλητές που πρέπει να καθοριστούν για να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα κατά την διάρκεια του ελέγχου.

Γενικά έχουμε τους εξής τύπους μετρητικών κεφαλών :

- Κεφαλές μονού πηνίου (absolute): Αυτές αποτελούνται από έναν ενισχυτή που τροφοδοτεί ένα μονό πηνίο μέσω ενός αντιστάτη. Η μεταβολή στην τάση παρακολουθείται με ενισχυτή ενός άκρου. Έχουν το πλεονέκτημα να ανιχνεύουν και απότομες (τμηματική διάβρωση, πορώδεις) και βαθμιαίες μεταβολές (ομοιόμορφη διάβρωση, μείωση πάχους), με μία απλή επισκόπηση να διαχωρίζονται τα συνδυασμένα σήματα και να δείχνουν το συνολικό μήκος της ατέλειας. Είναι όμως ευαίσθητες σε μεταβολές της θερμοκρασίας και στον κλυδωνισμό.
- Διαφορικές κεφαλές (differential): Το σήμα προκύπτει από την αφαίρεση της τάσης του ενός πηνίου από το άλλο. Έχουν το πλεονέκτημα να μην επηρεάζονται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας και από τον κλυδωνισμό αλλά δεν ανιχνεύουν βαθμιαίες μεταβολές, βλέπουν μόνο την αρχή και το τέλος των ελαττωμάτων μεγάλου μήκους και παράγουν μερικές φορές δύσκολα στην ερμηνεία σήματα.
- Κεφαλές εκπομπής-λήψης ή ανάκλασης (pickup ή send-receive): Εδώ ο μετατροπέας με τον αισθητήρα συνδέονται μέσω μαγνητικού πεδίου. Οι αισθητήρες μπορεί να είναι πηνία ή Hall ή GiantMagnetoresistance(GMR).
- Διαφορικές κεφαλές εκπομπής-λήψης: Συνδυασμός των δύο παραπάνω.

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πηνίου :

- Εξωτερική διάμετρος D
- Εσωτερική διάμετρος d
- Αριθμός στροφών N
- Ύψος h
- Πάχος σύρματος dw



Σχήμα 5 : Πηνίο ελέγχου

Με λίγα λόγια το πηνίο και οι μεταβλητές που το χαρακτηρίζουν είναι ένα από τα βασικότερα στοιχεία που επηρεάζουν την εγκυρότητα της μέτρησης στην μέθοδο των δινορρευσμάτων.

Κεφάλαιο 3. Ανάγκη μέτρησης παραμέτρων

3.1 Ανάγκη μέτρησης της αγωγιμότητας

Η μέθοδος των δινορρευσμάτων είναι ιδανική για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υλικών. Μετρώντας λοιπόν την ηλεκτρική εμπέδηση του πηνίου πάνω από ένα υλικό μπορούμε να υπολογίσουμε την ηλεκτρική του αγωγιμότητα.

Η μέτρηση της αγωγιμότητας εφαρμόζεται συχνότερα στα κράματα αλουμινίου. Αυτή η εφαρμογή προκύπτει από την εκτεταμένη χρήση κραμάτων αλουμινίου στην αεροδιαστημική βιομηχανία και την ευρεία διακύμανση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και των μηχανικών ιδιοτήτων μεταξύ διαφορετικών κραμάτων και θερμικής επεξεργασίας. Για τα περισσότερα κράματα αλουμινίου για κοινή χρήση, έχουν καθοριστεί συγκεκριμένα εύρη αγωγιμότητας. Εάν μια μετρούμενη τιμή αγωγιμότητας για κράμα αλουμινίου και σκληρότητα είναι εκτός του ισχύοντος εύρους, οι μηχανικές του ιδιότητες πρέπει να θεωρηθούν ύποπτες. Η μέτρηση των τιμών αγωγιμότητας πρέπει να είναι σύμφωνη με τα κατάλληλα πρότυπα. Η σχέση μεταξύ της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της κατάστασης θερμικής επεξεργασίας έχει επιτρέψει τη χρήση δινορρευσμάτων για τον έλεγχο της επάρκειας της θερμικής αντοχής σε κράματα αλουμινίου.

Μια κοινή εφαρμογή μέτρησης αγωγιμότητας σε εφαρμογές πεδίου είναι ο **προσδιορισμός της ζημίας λόγω θερμότητας** σε κατασκευές αεροσκαφών. Λόγω της εκτεταμένης χρήσης κραμάτων αλουμινίου για κατασκευές αεροσκαφών και της ευαισθησίας τους σε απώλειες μηχανικών ιδιοτήτων σε ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες, έχει δημιουργηθεί μεγάλη τεχνογνωσία για αυτά τα υλικά. Ζημία λόγω αυξημένης θερμοκρασίας σε άλλα μέταλλα μπορεί να ανιχνευθεί εάν οι θερμοκρασίες γίνουν αρκετά υψηλές για να επηρεάσουν την αγωγιμότητα, τη διαπερατότητα και τις μηχανικές ιδιότητες. **Η ζημιά ανιχνεύεται στα κράματα αλουμινίου ως αλλαγή στην αγωγιμότητα.** Ο έλεγχος σκληρότητας και η μέτρηση της αγωγιμότητας δίνουν μια καλή ένδειξη της ζημιάς.

Επιπλέον, η μέτρηση της αγωγιμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον **διαχωρισμό υλικών** ακόμα και δύο ή περισσότερων κραμάτων. Ο διαχωρισμός είναι δυνατός όταν η ηλεκτρική αγωγιμότητα κάθε κράματος είναι σαφώς διαφορετική. Η διαλογή γίνεται χρησιμοποιώντας την ανάλυση του επιπέδου εμπέδησης

δινορρευμάτων. Η διαδικασία διαχωρισμού μπορεί να επιτευχθεί με ένα όργανο βαθμονομημένο σε % IACS.

3.1.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την μέτρηση της αγωγιμότητας

Διακυμάνσεις αγωγιμότητας μπορεί να υπάρχουν σε μέταλλα ως αποτέλεσμα ακατάλληλης θερμικής επεξεργασίας ή ως αποτέλεσμα της έκθεσης σε υπερβολικές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της συντήρησης. Αυτές είναι οι συνθήκες για τις οποίες συνήθως πραγματοποιείται επιθεώρηση με δινορρεύματα. Οι παραλλαγές της αγωγιμότητας μπορούν να προέλθουν και από διαφορετικές πηγές.

Μερικοί από τους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την μέτρηση της αγωγιμότητας είναι :

- Κυρτότητα

Η μεταβολή του lift-off που προκαλείται από την κυρτότητα της επιφάνειας προκαλεί σφάλμα στη μέτρηση της αγωγιμότητας. Σε καμπύλες επιφάνειες, ο μικρότερος πρακτικός ανιχνευτής πρέπει να χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση των επιδράσεων ανύψωσης (lift-off).

- Αγωγή ή μη-αγωγή επικάλυψη

Η επένδυση θα επηρεάσει τη μετρούμενη αγωγιμότητα του βασικού μετάλλου. Ο βαθμός στον οποίο η επένδυση θα επηρεάσει την ληφθείσα τιμή εξαρτάται από την αγωγιμότητα της επένδυσης, το πάχος της επένδυσης και τη συχνότητα λειτουργίας.

- Μαγνητική διαπερατότητα

Μία ακριβής μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας εφαρμόζεται σε μη μαγνητικά υλικά με σχετική μαγνητική διαπερατότητα ένα ή σχεδόν ένα. Εάν η μαγνητική διαπερατότητα υπερβαίνει τη μονάδα, θα προκαλέσει ανισορροπία στο σύστημα μετρητών που δεν μπορεί να διαχωριστεί από τη μέτρηση της αγωγιμότητας και θα ληφθούν λανθασμένες αναγνώσεις. Για το λόγο αυτό, η αγωγιμότητα χάλυβα, νικελίου και άλλων μαγνητικών υλικών δεν μπορεί να προσδιοριστεί με συμβατικούς μετρητές αγωγιμότητας ρεύματος.

- Γεωμετρία

Οποιαδήποτε αλλαγή στη γεωμετρία που επηρεάζει τη διανομή ή τη διείσδυση του ρεύματος και θα έχει ως αποτέλεσμα εσφαλμένες μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

- Πάχος υλικού

Η πυκνότητα των δινορρευμάτων μειώνεται εκθετικά με το βάθος (δηλαδή, απόσταση από την επιφάνεια του μετάλλου). Το βάθος στο οποίο η πυκνότητα είναι περίπου 37% ($1/e$) της τιμής του στην επιφάνεια ονομάζεται τυπικό βάθος διείσδυσης δ . Αν το πάχος του υλικού είναι μικρότερο από το βάθος διείσδυσης των δινορρευμάτων η μέτρηση της αγωγιμότητας θα διαφέρει αισθητά από την πραγματική τιμή της. Είναι σημαντικό να προσδιοριστεί η συχνότητα λειτουργίας του οργάνου. Η συχνότητα λειτουργίας πρέπει να επιλέγεται ανάλογα ώστε το βάθος διείσδυσης των δινορρευμάτων να μην υπερβαίνει το πραγματικό βάθος διείσδυσης του υπό δοκιμή υλικού.

- Συχνότητα

Η συχνότητα επηρεάζει την κατανομή των ρευμάτων εντός του δοκιμίου. Οι υψηλότερες συχνότητες επιτρέπουν τη μέτρηση λεπτότερων μετάλλων χωρίς αντιστάθμιση πάχους. Οι υψηλές συχνότητες επηρεάζονται από αγωγίμες επικαλύψεις και επενδύσεις των υλικών ή του πηνίου και δεν είναι κατάλληλες για την μέτρηση της αγωγιμότητας.

- Ανύψωση πηνίου (Lift-off)

Το lift-off συνήθως καθορίζεται κατά την βαθμονόμηση των οργάνων επιθεώρησης. Με το πέρασμα του χρόνου ο ανιχνευτής φθείρεται και τα ηλεκτρικά εξαρτήματα του οργάνου αλλάζουν, η ρύθμιση του lift-off μπορεί να αλλάξει. Επομένως, όταν οι μετρήσεις αγωγιμότητας είναι ανάγκη να εκτελούνται σε τραχιές επιφάνειες ή πάνω από λεπτές μη αγωγίμες επικαλύψεις, η ρύθμιση ανύψωσης πρέπει να ελέγχεται πριν από την εκτέλεση των μετρήσεων. Μετά τη βαθμονόμηση ενός οργάνου με βάση τα πρότυπα αγωγιμότητας, πρέπει να ελεγχθεί η προσαρμογή ανύψωσης έναντι δείγματος με αγωγιμότητα αντιπροσωπευτική του εξαρτήματος δοκιμής. Σφάλμα στην ανάγνωση της αγωγιμότητας θα

έχουμε αν το lift-off είναι μεγαλύτερο από την τιμή που είχε η προκαθορισμένη ρύθμιση.

- **Θερμοκρασία**

Η υψηλή θερμοκρασία αυξάνει τη θερμική δραστηριότητα των ατόμων στο μεταλλικό πλέγμα του υλικού. Η θερμική δραστηριότητα αναγκάζει τα άτομα να δονούνται σε μεγάλο πλάτος σχετικά με τη θέση τους στο πλέγμα. Αυτή η θερμική δόνηση των ατόμων αυξάνει τις πιθανότητες σύγκρουσης με ηλεκτρόνια στο υλικό. Αυτό με τη σειρά του αυξάνει την αντίσταση στη ροή ηλεκτρονίων, μειώνοντας έτσι την αγωγιμότητα του μετάλλου. Αντίθετα οι χαμηλές θερμοκρασίες μειώνουν τη θερμική ταλάντωση των ατόμων με αποτέλεσμα να έχουμε αυξημένη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η αγωγιμότητα των προτύπων καθορίζεται συνήθως σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Συνήθως, χρησιμοποιείται θερμοκρασία 20°C.

3.2 Ανάγκη μέτρησης του Lift-off

Η ευαισθησία του πηνίου είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασής του από την επιφάνεια του υλικού. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των μαγνητικών γραμμών του πηνίου που διέρχεται από το υλικό τόσο πιο μικρή είναι η απόσταση από αυτό. Κατά συνέπεια, όσο πιο κοντά βρισκόμαστε στο δοκίμιο τόσο περισσότερες μαγνητικές γραμμές από τα δινορρεύματα επηρεάζουν το πηνίο άρα και την σύνθετη αντίσταση.

Συνήθως, σκοπεύουμε να εξαλείψουμε την ανύψωση του πηνίου διότι είναι μία παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά την σύνθετη αντίσταση. Κατά την μέτρηση με σκοπό την ανίχνευση ασυνεχειών η παρουσία του lift-off υπερκαλύπτει τα σήματα που προσδιορίζουν την ανίχνευση των ατελειών.

Παρόλο που η ανύψωση μπορεί να προκαλεί προβλήματα σε πολλές εφαρμογές, μπορεί επίσης να είναι και χρήσιμη. Για παράδειγμα, με τη χρήση της επίδρασης ανύψωσης, τα όργανα δινορρευσμάτων είναι άριστα για την μέτρηση του πάχους μη αγωγικών επικαλύψεων, όπως χρωμάτων και επικαλύψεων για τα μέταλλα.

Κεφάλαιο 4. Διάφορες αναλυτικές λύσεις της σύνθετης αντίστασης

4.1 Αναλυτική λύση σύνθετης αντίστασης πάνω από επίπεδη πλάκα και γύρω από σωλήνα με την μέθοδο Dodd and Deeds.

Τα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες : χαμηλής, μέσης, υψηλής συχνότητας. Τα δινορρεύματα που προέρχονται από πηνίο ανήκουν στα προβλήματα μέσης συχνότητας. Για την αντιμετώπισή τους χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις Maxwell, από τις οποίες προκύπτουν οι διαφορικές εξισώσεις του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού.

Η ανάλυση που γίνεται στο άρθρο των Dodd and Deeds αφορά πηνία τα οποία βρίσκονται πάνω από μία αγώγιμη επιφάνεια, θεωρώντας ότι τα πηνία είναι μαγνητικά δίπολα. Οι Dodd and Deeds ασχολήθηκαν με τον υπολογισμό του δυναμικού διανύσματος του πηνίου με πεπερασμένη διατομή.

Εάν έχουμε τη λύση για το διανυσματικό δυναμικό, τότε μπορεί να υπολογιστεί οποιοδήποτε φυσικό ηλεκτρομαγνητικό μέγεθος, όπως η πυκνότητα των επαγόμενων ρευμάτων και η εμπέδηση του πηνίου (σύνθετη αντίσταση). Οι λύσεις που προκύπτουν αφορούν δύο διαφορετικές γεωμετρίες : ένα ορθογωνικής διατομής πηνίο πάνω από ένα αγώγιμο επίπεδο και ένα πηνίο ορθογωνικής διατομής που περιβάλλει μια αγώγιμη ράβδο.

Πιο συγκεκριμένα, στο άρθρο λύνονται τα προβλήματα που αφορούν :

- Ένα πηνίο πάνω από δύο αγώγιμες πλάκες
- Ένα πηνίο που περικλείει μια ράβδο δύο αγώγιμων υλικών

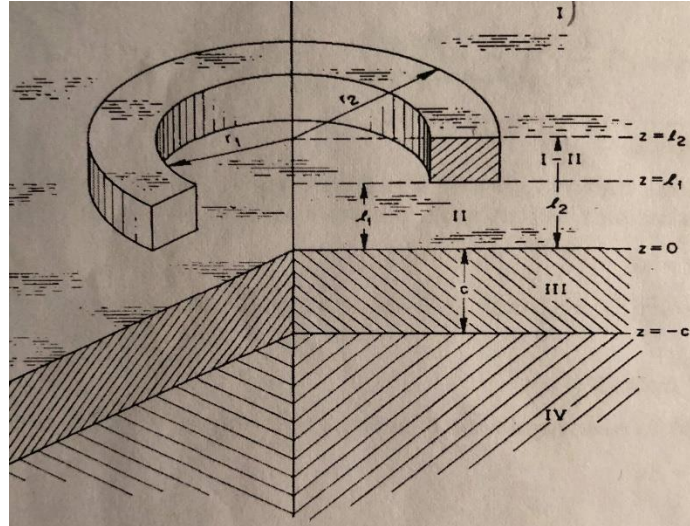
Οι υπολογισμοί που γίνονται αρχικά στο άρθρο αφορούν πηνία άπειρου μεγέθους (δ -function coils) και μετέπειτα γίνεται μελέτη για πεπερασμένου μήκους πηνία βασισμένη στα θεωρητικά δεδομένα.

Πηνίο πάνω από δύο αγώγιμες πλάκες

Το πηνίο πάνω από δύο πλάκες φαίνεται στο σχήμα 6. Για να γίνει ευκολότερη η μελέτη του προβλήματος, χωρίστηκε σε τέσσερις περιοχές.

- I. Αέρας (εξωτερικός)
- II. Αέρας (ανάμεσα στο πηνίο και το επίπεδο)
- III. Περιοχή της πρώτης αγωγίμης πλάκας
- IV. Περιοχή της δεύτερης αγωγίμης πλάκας

Η περιοχή της δεύτερης αγωγίμης πλάκας θεωρείται άπειρη.



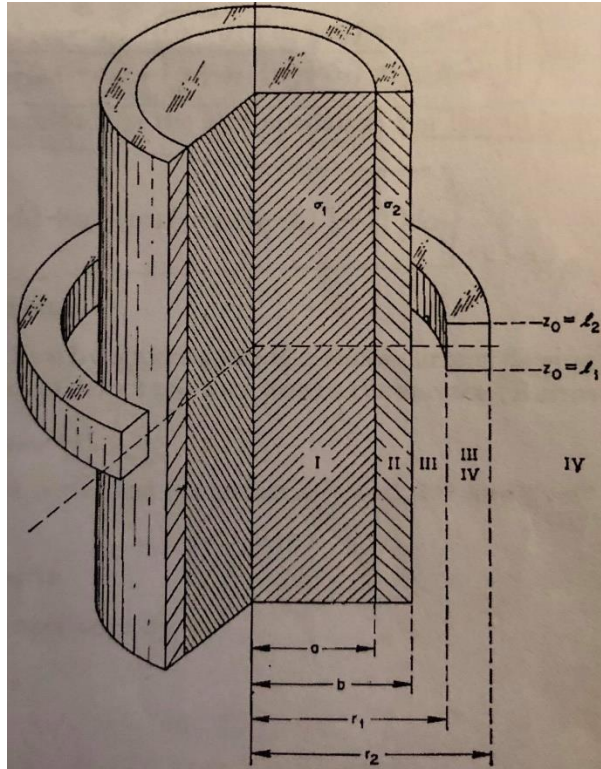
Σχήμα 6 : Ορθογωνικής διατομής πηνίο πάνω από δύο αγωγίμα επίπεδα.

Με διαφορετικές εξισώσεις για την κάθε μια περιοχή επιλύεται το συγκεκριμένο πρόβλημα. Προκύπτει ότι η τελική λύση είναι ένα ολοκλήρωμα όλων των λύσεων από κάθε περιοχή . Έτσι, καταλήγουμε και βρίσκουμε το διανυσματικό δυναμικό σε κάθε περιοχή.

Πηνίο γύρω από ράβδο δύο υλικών

Θεωρώντας ότι η ράβδος έχει άπειρο μήκος και έχοντας χωριστεί σε περιοχές η μελέτη όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, βρίσκουμε το διανυσματικό δυναμικό της κάθε περιοχής χρησιμοποιώντας διαφορετικές εξισώσεις.

- I. Περιοχή εσωτερικού αγωγίμου υλικού
- II. Περιοχή εξωτερικού αγωγίμου υλικού
- III. Αέρας ανάμεσα στη ράβδο και το πηνίο
- IV. Αέρας εξωτερικά του πηνίου και της ράβδου



Σχήμα 7 : Ορθογωνικής διατομής πηνίο γύρω από ράβδο δύο υλικών.

Το άρθρο καταλήγει στον υπολογισμό της ηλεκτρικής εμπέδησης (ή σύνθετης αντίστασης) με την χρήση ολοκληρωμάτων. Η σύνθετη αντίσταση του πηνίου υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$\begin{aligned}
 Z = & \frac{j\omega\pi\mu n^2 \bar{r}}{(l_2 - l_1)^2 (r_2 - r_1)^2} \int_0^\infty \frac{1}{a^5} I^2(r_2, r_1) \left(2(l_2 - l_1) \right. \\
 & + a^{-1} \left\{ 2 \exp[-a(l_2 - l_1)] - 2 \right. \\
 & + \{ \exp(-2al_2) + \exp(-2al_1) \\
 & - 2 \exp[-a(l_2 \\
 & + l_1)] \} \left[\frac{(a + a_1)(a_1 - a_2) + (a - a_1)(a_2 + a_1) \exp(2a_1 c)}{(a - a_1)(a_1 - a_2) + (a + a_1)(a_2 + a_1) \exp(2a_1 c)} \right] \Bigg) da. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Η σύνθετη αντίσταση του πηνίου στον αέρα δίνεται από την εξίσωση :

$$Z = \frac{2\omega\pi\mu n^2 \bar{r}}{(l_2 - l_1)^2 (r_2 - r_1)^2} \int_0^\infty \frac{1}{a^5} I^2(r_2, r_1) ((l_2 - l_1) + a^{-1} \{\exp[-a(l_2 - l_1)] - 1\}) da. \quad (7)$$

Όπου :

$$a_i = (a^2 + j\omega\mu\sigma_i)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

σ_i : ηλεκτρική αγωγιμότητα των εξεταζόμενων δοκιμίων (σ_1, σ_2)

α_i : α_1, α_2 για το κάθε υλικό αντιστοιχα

$$I(x_1, x_2) = \frac{\pi}{2} [x_1 \{J_0(x_1)H_1(x_1) - J_1(x_1)H_0(x_1)\} - x_2 \{J_0(x_2)H_1(x_2) - J_1(x_2)H_0(x_2)\}] \quad (9)$$

$I(x_1, x_2)$: ακτινικό ολοκλήρωμα

Με J_n να είναι συναρτήσεις Bessel πρώτου βαθμού της τάξης n και H_n οι συναρτήσεις Struve της τάξης n .

Η κάθε μεταβλητή αναλύεται παρακάτω :

1. ω : γωνιακή συχνότητα και f συχνότητα σε Hz ($=2\pi f$)
2. n : πυκνότητα περιέλιξης
3. r_1 : εσωτερική ακτίνα πηνίου
4. r_2 : εξωτερική ακτίνα πηνίου
5. μ : μαγνητική διαπερατότητα
6. l_1 : ανύψωση, απόσταση πηνίου από επιφάνεια εξεταζόμενου δοκιμίου
7. $l_2 - l_1$: ύψος πηνίου

4.1.1 Δημιουργία κώδικα για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης με την μέθοδο Dodd and Deeds (μόνο για την πλάκα).

Κατά την διάρκεια διεξαγωγής του προγραμματισμού χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή TEDDY ως επαλήθευση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τον κώδικα μας.

Το TEDDY είναι μια εφαρμογή που συντάχθηκε από τον καθηγητή του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας κ.Θεοδουλίδη Θεόδωρο. Η εφαρμογή προσομοιώνει την επιθεώρηση με την μέθοδο των δινορρευσμάτων και είναι κατάλληλη για την εξαγωγή διαγραμμάτων σύνθετης αντίστασης. Επίσης, είναι συμβατή με όλα τα νέα αλλά και παλαιότερα συστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών, ενώ η λειτουργία της είναι φιλική προς τον χρήστη.

Αρχικά δημιουργήθηκε ένας κώδικας σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης.

Η επιλογή του MatLab® για την ανάπτυξη του προγράμματος, έγινε διότι το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει όλα τα απαραίτητα εργαλεία που χρειάζονταν για τις ανάγκες μας, ενώ είναι εύκολο στη χρήση και στην εκμάθηση. Παράλληλα, η ταχύτητα εκτέλεσης των υπολογισμών είναι ένα ακόμα πλεονέκτημα του συγκεκριμένου λογισμικού.

Ο υπολογισμός της σύνθετης αντίστασης του πηνίου πάνω από υλικό έγινε χρησιμοποιώντας την εξίσωση (6). Η σύνθετη αντίσταση του πηνίου στον αέρα υπολογίστηκε από την εξίσωση (7). Στις εξισώσεις (6), (7) χρησιμοποιείται ολοκλήρωμα σύμφωνα με το άρθρο των Dodd and Deeds. Στο πρόγραμμα που δημιουργήθηκε αρχικά τα ολοκληρώματα αντικαταστάθηκαν από άθροισμα σε μεγάλο εύρος τιμών (1-10000).

Ξεκινώντας, στον κώδικα ορίζουμε τα χαρακτηριστικά του πηνίου, την συχνότητα μέτρησης, την αγωγιμότητα και την μαγνητική διαπερατότητα των δύο υλικών. Μιλώντας για μη μαγνητικά υλικά η σχετική μαγνητική διαπερατότητα είναι μονάδα. Επιπλέον ορίζουμε την ανύψωση του πηνίου (lift-off) και τον συντελεστή α. Ο συντελεστής α παίρνει τιμές από 1 έως 10000, τα όρια του οποίου τα ορίζουμε εμείς, ανάλογα με την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Παρατηρούμε ότι μετά τον ορισμό 10000 ως το πάνω όριο τα αποτελέσματα είναι σταθερά.

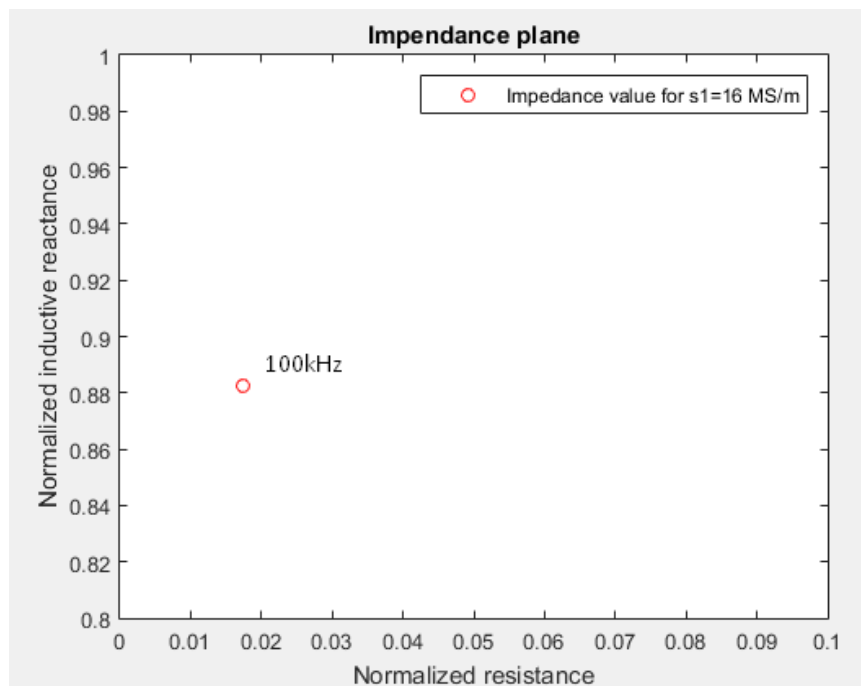
Χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις Besselj, StruveH0 και StruveH1 υπολογίζουμε το ακτινικό ολοκλήρωμα I.

Συνθέτοντας όλα τα δεδομένα υπολογίζουμε την σύνθετη αντίσταση του πηνίου στο υλικό και στον αέρα με τις εξισώσεις (6) και (7) αντίστοιχα. Κανονικοποιούμε την αντίσταση και την επαγωγική αντίδραση του πηνίου και τις παραθέτουμε σε ένα διάγραμμα.

Ορισμός μεταβλητών σε περιβάλλον Matlab :

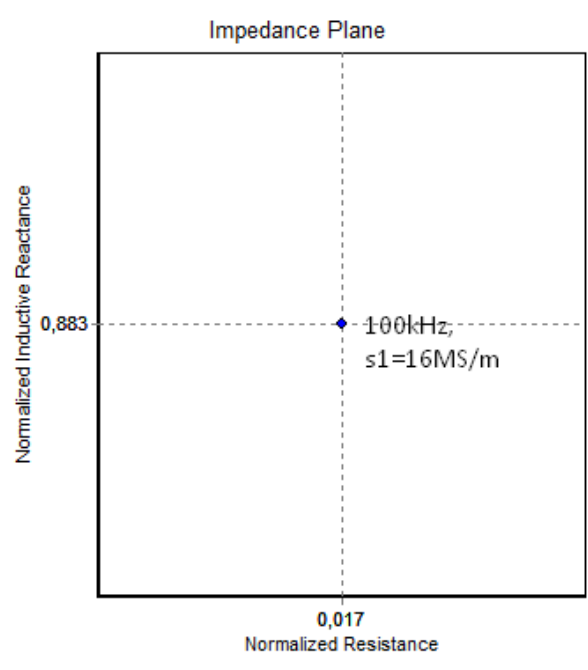
```
r1=2*mm;  
r2=4*mm;  
rm=(r1+r2)/2;  
n=200; %number of turns  
f=100*kHz; %frequency  
mo=4*pi*10^(-7); %magnetic permeability of air  
m=mo;  
mr=m/mo; %% relative magnetic permeability  
w=2*pi*f; %%wmega  
l1=1*mm; %%lift off  
l2=5*mm; %%l1+coil height  
s1=16*MSm; % conductivity1  
s2=0; % conductivity2
```

Απεικόνιση αποτελεσμάτων σε διάγραμμα :



Σχήμα 8 : Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης για μια τιμή αγωγιμότητας από περιβάλλον Matlab.

Διάγραμμα με λογισμικό TEDDY για τα ίδια δεδομένα :



Σχήμα 9 : Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης για μια τιμή αγωγιμότητας από περιβάλλον TEDDY.

Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα καταλήγουμε ότι το πρόγραμμά μας είναι ακριβές.

Ο παραπάνω κώδικας παρατίθεται στο παράρτημα Α' με όνομα αρχείου Dd2.m.

4.1.2 Δημιουργία απλοποιημένου κώδικα με την μέθοδο Dodd and Deeds για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης (πλάκα).

Στη προσπάθεια να βελτιώσουμε τον παραπάνω κώδικα δημιουργήθηκε κώδικας χρησιμοποιώντας ολοκληρώματα. Ο κώδικας τμηματοποιήθηκε και δημιουργήθηκαν δύο συναρτήσεις: η μία για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης του πηνίου σε υλικό και η άλλη για τον υπολογισμό της αντίστασης του πηνίου στον αέρα. Η τμηματοποίηση είχε σκοπό την ευκολότερη αφομοίωση του κώδικα αλλά και την απλοποίηση του ώστε να βελτιστοποιηθεί.

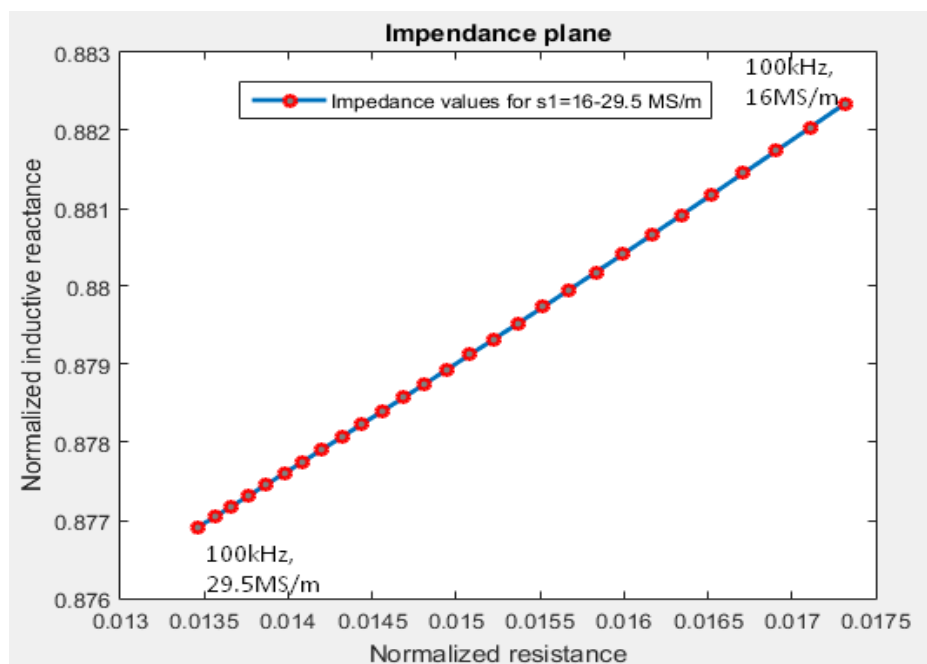
Ένα επιπλέον στοιχείο που προστέθηκε στον κώδικα ήταν η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Μεταβάλλοντας την αγωγιμότητα διαφοροποιείται η σύνθετη αντίσταση του πηνίου. Στο Σχήμα 10 βλέπουμε την διαφοροποίηση της σύνθετης αντίστασης σε σχέση με την ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Οι τιμές της αγωγιμότητας που χρησιμοποιήθηκαν :

1^η τιμή: $\sigma_1=16 \text{ MS/m}$

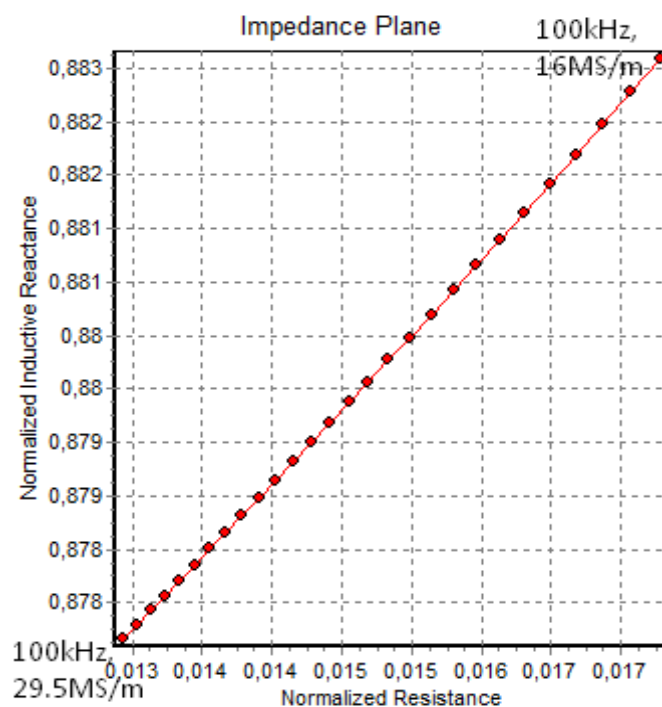
28^η τιμή: $\sigma_1=29.5 \text{ MS/m}$

Βήμα: 0.5 MS/m



Σχήμα 10 : Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης για διαφορετικές τιμές αγωγιμότητας από περιβάλλον Matlab.

Διάγραμμα με λογισμικό TEDDY για τα ίδια δεδομένα :



Σχήμα 11 : Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης για διαφορετικές τιμές αγωγιμότητας από περιβάλλον TEDDY.

Το σχήμα 11 με το σχήμα 10 είναι πανομοιότυπα και οι τιμές δεν αποκλίνουν αισθητά αντιθέτως τείνουν προς σύγκλιση. Αυτό καθιστά το πρόγραμμα ακριβές. Ο κώδικας παρατίθεται στο παράρτημα Α' με όνομα Fragg.m.

4.2 Αναλυτική λύση υπολογισμού της σύνθετης αντίστασης με τη χρήση σειρών.

Λόγω της πολυπλοκότητας των ολοκληρωμάτων του υπολογισμού της σύνθετης αντίστασης, δημιουργήθηκε η ανάγκη απλοποίησης της μεθόδου. Στα μοντέλα Dodd and Deeds τα όρια του ολοκληρώματος είναι ορισμένα στο άπειρο, που έχει ως αποτέλεσμα την χρήση εξισώσεων Fourier-Bessel. Στο άρθρο αναλύεται η μετατροπή των ολοκληρωμάτων σε σειρές ορίζοντας πεπερασμένο χώρο μελέτης. Αυτόματα η μελέτη απλοποιείται και οι χρόνοι υπολογισμού μειώνονται αισθητά.

Πιο συγκεκριμένα, στο άρθρο αναλύονται τα προβλήματα που αφορούν :

- Ένα πηνίο πάνω από μια αγωγίμη πλάκα
- Ένα πηνίο που εισέρχεται σε μία αγωγίμη σωλήνα

Πηνίο πάνω από πλάκα

Η εξίσωση για την σύνθετη αντίσταση του πηνίου πάνω από πλάκα με την χρήση σειρών είναι η εξής :

$$\Delta Z = \frac{j\omega 2\pi\mu_0 N^2}{(r_2 - r_1)^2 (z_2 - z_1)^2} x \sum_{i=1}^{\infty} \text{Int}^2(q_i r_1, q_i r_2) x \frac{[\exp(-q_i z_1) - \exp(-q_i z_2)]^2 q_i \mu_r - p_i}{[(q_i b) J_0(q_i b)]^2 q_i^5} \frac{q_i \mu_r - p_i}{q_i \mu_r + p_i} \quad (10)$$

Όπου :

$$p = \sqrt{(q^2 + j\omega\mu_r\mu_0\sigma)} \quad (11)$$

$$q_i = \frac{x_i}{b} \quad (12)$$

$$Int(x1, x2) = \int_{x1}^{x2} x J_1(x) dx \quad (13)$$

Η σύνθετη αντίσταση του πηνίου στον αέρα :

$$Z_0 = \frac{j\omega 2\pi\mu_0 N^2}{(r_2 - r_1)^2 (z_2 - z_1)^2} \sum_{i=1}^{\infty} Int^2(q_i r_1, q_i r_2) x \frac{2[q_i(z_2 - z_1) - 1 + \exp[q_i(z_1 - z_2)]]}{[(q_i b)J_0(q_i b)]^2 q_i^5} \quad (14)$$

Με J_0, J_1 η εξίσωση Bessel μηδενικής τάξης και πρώτης αντίστοιχα.

N : αριθμός στροφών σύρματος

μ_0 : μαγνητική διαπερατότητα του αέρα ($4\pi 10^{-7}$ MS/m)

μ_r : σχετική μαγνητική διαπερατότητα

b : πεπερασμένη περιοχή μελέτης δινορρευσμάτων (περίπου $50r_2$)

z_1 : ανύψωση, απόσταση πηνίου από επιφάνεια εξεταζόμενου δοκιμίου

$z_2 - z_1$: ύψος πηνίου

Πηνίο μέσα σε σωλήνα

Η δεύτερη γεωμετρία που μελετήθηκε αφορά πηνίο μέσα σε αγωγίμη σωλήνα. Η εξίσωση για την σύνθετη αντίσταση του πηνίου στην σωλήνα :

$$\Delta Z = \frac{j\omega 4\pi\mu_0 N^2}{h(r_2 - r_1)^2 (z_2 - z_1)^2} x \sum_{i=1}^{\infty} Int^2(q_i r_1, q_i r_2) x \frac{[\sin(q_i z_1) - \sin(q_i z_2)]^2}{q_i^6} x \frac{q_i K_0(q_i b) K_1(p_i b) - p_i K_1(q_i b) K_0(p_i b)}{q_i I_0(q_i b) K_1(p_i b) - p_i I_1(q_i b) K_0(p_i b)} \quad (15)$$

Με K_0, K_1 εξισώσεις Besselk μηδενικής και πρώτης αντίστοιχα. Όπου I_0 εξίσωση BessellI μηδενικής τάξης και I_1 BessellI πρώτης τάξης.

Όπου τώρα :

$$Int(x1, x2) = \int_{x1}^{x2} x I_1(x) dx \quad (16)$$

Επίσης το q_i υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$\sin(q_i h) = 0 \Rightarrow q_i = \frac{i\pi}{h} \quad (17)$$

h : πεπερασμένη περιοχή μελέτης δινορρευσμάτων

b : εσωτερική διάμετρος σωλήνα

Συμπερασματικά αναφέρουμε, ότι οι μέθοδοι σειράς ευνοούν την ταχύτητα υπολογισμού και τον έλεγχο σύγκλισης των αποτελεσμάτων, χωρίς καμία θυσία όσον αφορά την ακρίβεια. Έτσι, χωρίς την ύπαρξη διακριτών μειονεκτημάτων, αποτελούν ένα καλό εργαλείο για την απλούστερη υλοποίηση εφαρμογών σε υπολογιστή και δίνουν τη δυνατότητα για περαιτέρω επέκταση των δυνατοτήτων της ανάλυσης .[3]

4.2.1 Δημιουργία κώδικα για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης με την χρήση σειρών (πλάκα).

Ακολουθώντας την μεθοδολογία του άρθρου των Θεοδοουλίδη και Κριεζή δημιουργήθηκε πρόγραμμα σε περιβάλλον Matlab που υπολογίζει την σύνθετη αντίσταση του πηνίου σε αγωγίμη πλάκα με την χρήση αθροίσματος.

Στο παράρτημα Α' παρατίθεται ο κώδικας που περιέχει τις εντολές που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς με όνομα `calc_z_series.m`.

4.3 Υπολογισμός σφάλματος μεταξύ πειραματικών μετρήσεων και θεωρητικών υπολογισμών.

Τα προβλήματα Benchmark βασίζονται σε προσεκτικές μετρήσεις της σύνθετης αντίστασης του πηνίου ως συνάρτηση της συχνότητας και της θέσης του. Τοποθετώντας το πηνίο επί αγωγίμης πλάκας προκύπτει το ζήτημα της ακριβούς μέτρησης της αγωγιμότητας της πλάκας και της ανύψωσης του πηνίου. Στην περίπτωση αυτή λαμβάνονται μετρήσεις της σύνθετης αντίστασης του πηνίου σε ένα κατάλληλο εύρος συχνοτήτων και γίνεται σύγκριση με το θεωρητικό μοντέλο. Οι τιμές της αγωγιμότητας και της ανύψωσης καθορίζονται από την ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος ε , μεταξύ των μετρούμενων τιμών και των θεωρητικών υπολογισμών του πραγματικού (αντίσταση) και του φανταστικού μέρους (αντίδραση, αυτεπαγωγή) της σύνθετης αντίστασης.

Ο τύπος του RMS (Root Mean Square) σφάλματος :

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{[\Delta R_{exp}(i) - \Delta R_{calc}(i)]^2}{[\Delta R_{exp}(i)]^2} + \frac{[\Delta L_{exp}(i) - \Delta L_{calc}(i)]^2}{[\Delta L_{exp}(i)]^2} \quad (18)$$

N : τιμές της συχνότητας

ΔR_{exp} : η αντίσταση του πηνίου από τις μετρήσεις

ΔL_{exp} : η επαγωγική αντίδραση του πηνίου από τις μετρήσεις

ΔR_{calc} : η αντίσταση του πηνίου που υπολογίζεται

ΔL_{calc} : η επαγωγική αντίδραση του πηνίου που υπολογίζεται

Επίσης, το σφάλμα είναι αρκετά ευαίσθητο στις μεταβολές της αγωγιμότητας και της ανύψωσης (lift-off). Με τον υπολογισμό του σφάλματος οι παράμετροι (αγωγιμότητα, lift-off) μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα. Διαφορετικά μπορεί να γίνει μόνο η μέτρηση της αγωγιμότητας θεωρώντας την ανύψωση του πηνίου μηδενική.

4.3.1 Δημιουργία κώδικα για την μέτρηση σύνθετης αντίστασης του πηνίου επί επίπεδης πλάκας υπολογίζοντας αγωγιμότητα, ανύψωση (lift-off) και σφάλμα.

Το κυρίως πρόγραμμα αφορά την εύρεση αγωγιμότητας, ανύψωσης (Lift-off) και ελάχιστου σφάλματος μέσω της μέτρησης της σύνθετης αντίστασης. Η σύνθετη αντίσταση του πηνίου υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$\Delta Z = \frac{j\omega 2\pi\mu_0 N^2}{(r_2 - r_1)^2 (z_2 - z_1)^2} x \sum_{i=1}^{\infty} \text{Int}^2(q_i r_1, q_i r_2) x \frac{[\exp(-q_i z_1) - \exp(-q_i z_2)]^2}{[(q_i b) J_0(q_i b)]^2 q_i^5} x \frac{[(q_i \mu_r)^2 - p_i^2] (1 - \exp(-2p_i d))}{(q_i \mu_r + p_i)^2 - (q_i \mu_r - p_i)^2 \exp(-2p_i d)} \quad (19)$$

d : πάχος πλάκας

Η εξίσωση (19) προκύπτει από τον συνδυασμό της εξίσωσης (10) και της παρακάτω :

$$\Gamma = \frac{[(\kappa\mu_r)^2 - \gamma^2] (1 - \exp(-2\gamma d))}{(\kappa\mu_r + \gamma)^2 - (\kappa\mu_r - \gamma)^2 \exp(-2\gamma d)} \quad (20)$$

Όπου κ βάλαμε το q_i από την εξίσωση (12) και στην θέση του γ το p_i που περιγράφεται από την (11).

Για να προσομοιώσουμε πλάκα (και όχι άπειρο ημιχώρο), το τελευταίο κλάσμα στην εξίσωση (10) από το υποκεφάλαιο 4.2 που αναφέρεται στο άρθρο [3] το αντικαταστήσαμε με το κλάσμα στην εξίσωση (20). Ενώ, η σύνθετη αντίσταση του πηνίου στον αέρα υπολογίστηκε από την εξίσωση (14).

Ως δεδομένα για τα χαρακτηριστικά του πηνίου πάρθηκαν οι διαστάσεις του πηνίου που κατασκευάσαμε στο εργαστήριο του τμήματος. Οι τιμές της συχνότητας που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι τιμές που λήφθηκαν από το εργαστήριο. Έχοντας λοιπόν μετρήσει την σύνθετη αντίσταση του πηνίου μας για ένα εύρος συχνοτήτων, μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε στο πρόγραμμα που κατασκευάσαμε έτσι ώστε

να τις συγκρίνουμε με τις θεωρητικές. Συγκρίνοντας, τις θεωρητικές και πειραματικές τιμές της σύνθετης αντίστασης εξάγουμε αποτελέσματα για την αγωγιμότητα του υλικού που εξετάζουμε, αλλά και για το lift-off που έγινε η μέτρηση. Ωστόσο, υπολογίζουμε και το ελάχιστο τετραγωνικό σφάλμα (RMS error) με την εξίσωση (18).

Βρίσκοντας το ελάχιστο σφάλμα υπολογίζουμε την αγωγιμότητα του δοκιμίου όπου μετρήσαμε και το lift-off (ανύψωση κεφαλής) του πηνίου.

Στο παράρτημα Α' παρατίθεται ο κώδικας που περιγράφεται παραπάνω με όνομα plate_con_liftoff_3_10_20.m.

4.3.2 Δημιουργία κώδικα για την μέτρηση σύνθετης αντίστασης του πηνίου μέσα σε σωλήνα υπολογίζοντας αγωγιμότητα και σφάλμα.

Στο πρόγραμμα που κατασκευάστηκε υπολογίστηκε η σύνθετη αντίσταση του πηνίου μέσα στο σωλήνα από τον παρακάτω τύπο :

$$\Delta Z = \frac{j\omega 4\pi\mu_0 N^2}{h(r_2 - r_1)^2(z_2 - z_1)^2} \quad (15)$$

$$x \sum_{i=1}^{\infty} \text{Int}^2(q_i r_1, q_i r_2) x \frac{[\sin(q_i z_1) - \sin(q_i z_2)]^2}{q_i^6} x \frac{q_i K_0(q_i b) K_1(p_i b) - p_i K_1(q_i b) K_0(p_i b)}{q_i I_0(q_i b) K_1(p_i b) - p_i I_1(q_i b) K_0(p_i b)}$$

Οι μεταβλητές Int, q_i υπολογίζονται σύμφωνα με τους τύπους (16) και (17). Οι υπόλοιποι παράμετροι μένουν ως έχουν αναλυθεί στο 4.2.

Στο πρόγραμμα που κατασκευάσαμε χρησιμοποιήσαμε τις πειραματικές μετρήσεις και τιμές που πάρθηκαν από το πηνίο για σωλήνα που οι ίδιοι παράξαμε. Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με την παράγραφο 4.3.1 για τον υπολογισμό του σφάλματος και της αγωγιμότητας. Με την διαφορά ότι, χρησιμοποιήθηκε ο τύπος (15) για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης αντί του (19). Ο κώδικας με τον υπολογισμό του σφάλματος και της αγωγιμότητας δίνεται στο παράρτημα Α' με το όνομα test17_9.m.

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις

Μέτρηση είναι η σύγκριση κάποιου μεγέθους με κάποιο πρότυπο ή με κάποιο ομοειδές μέγεθος. Κάνοντας την μέτρηση της σύνθετης αντίστασης του πηνίου σε ένα υλικό τη συγκρίνουμε με ένα πρότυπο υλικό που γνωρίζουμε όλα τα χαρακτηριστικά του. Αυτό το υλικό θα μας βοηθήσει να βαθμονομήσουμε το υλικό μας. Η μεθοδολογία της βαθμονόμησης εξηγείται στα 5.1 και 5.1.1.

Οι μετρήσεις πάρθηκαν στο εργαστήριο μη καταστροφικών ελέγχων του τμήματος, τηρώντας όλα τα απαιτούμενα μέτρα που έχει επιβάλλει η κυβέρνηση λόγω της διασποράς του κορονοϊού (χρήση μάσκας, συχνή απολύμανση χεριών).

5.1 Βαθμονόμηση

Βαθμονόμηση είναι η καταγραφή και τεκμηρίωση της απόκλισης ενός οργάνου μέτρησης σε σύγκριση με άλλο, ανιχνεύσιμο όργανο με μεγαλύτερη ακρίβεια, υπό καθορισμένες συνθήκες. Αυτό το όργανο περιγράφεται ως το πρότυπο.[15]

Η βαθμονόμηση ενός οργάνου γίνεται πριν από μία μέτρηση για να εξασφαλιστεί με ορθότητα η σωστή ένδειξη του μετρούμενου μεγέθους. Συνήθως, η βαθμονόμηση συμπεριλαμβάνει μέτρηση μιας πρότυπης τιμής με κατάλληλα πρότυπα και χρησιμεύει για τη βαθμονόμηση του μετρητικού οργάνου.

Η βαθμονόμηση γίνεται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή του οργάνου. Αυτές θα πρέπει να συμφωνούν απόλυτα με τις διαδικασίες βαθμονόμησης που καθορίζει το πρότυπο.

5.1.1 Βαθμονόμηση μηχανήματος

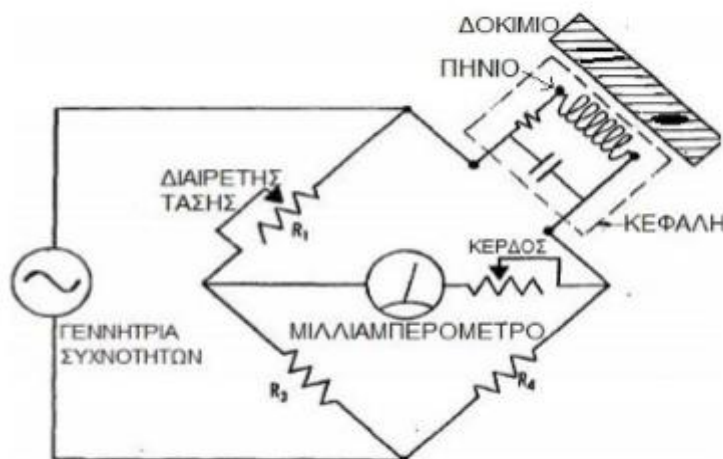
Η βαθμονόμηση του Agilent 4294A έγινε σε δύο βήματα :

1. Μέτρηση με ελεύθερους ακροδέκτες
2. Μέτρηση με ενωμένους ακροδέκτες

Έπειτα από την βαθμονόμηση του μηχανήματος είμασταν έτοιμοι για να πάρουμε τις μετρήσεις με την εγκυρότητα που μας προσφέρει η βαθμονόμηση.

5.2 Γέφυρα μέτρησης της σύνθετης αντίστασης (Γέφυρα Wheatstone)

Ο τρόπος λειτουργίας του μηχανήματος που χρησιμοποιήσαμε στις μετρήσεις βασίζεται στο κύκλωμα γέφυρας. Το κύκλωμα γέφυρας λειτουργεί ως ζεύγος



Σχήμα 12 : Κύκλωμα γέφυρας Wheatstone

διαιρετών τάσης συνδεδεμένων με εναλλασσόμενη πηγή τάσης, η μια άγνωστη σύνθετη αντίσταση είναι του πηνίου και η άλλη είναι μια μεταβλητή σύνθετη αντίσταση (Σχήμα 9).

Τροφοδοτούμε το κύκλωμα και ρυθμίζουμε τη μεταβλητή σύνθετη αντίσταση ώστε η ένδειξη του μιλιαμπερομέτρου να μηδενιστεί (κατάσταση ισορροπίας). Από τις τιμές της μεταβλητής σύνθετης αντίστασης (Z) παίρνουμε την επαγωγική αντίδραση (X) και την αντίσταση (R).

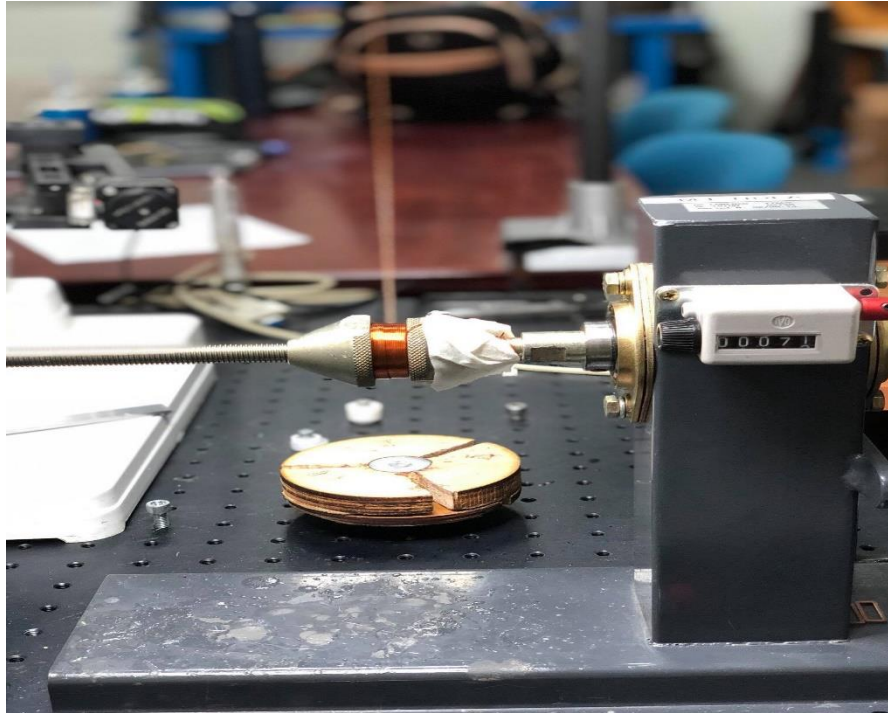
5.3 Κατασκευή πηνίων ελέγχου

5.3.1 Πηνίο για πλάκα

Το πηνίο που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις το κατασκευάσαμε εμείς στα εργαστήρια του τμήματος. Αρχικά, για την δημιουργία της εσωτερικής διαμέτρου του πηνίου κατασκευάστηκε πυρήνας με την χρήση μηχανουργικού τόρνου. Μετά την κατασκευή του πυρήνα επιλέχθηκε το πάχος του σύρματος που χρησιμοποιήθηκε ($dw = 0.5 \text{ mm}$).

Έπειτα κάναμε την περιέλιξη με την χειροκίνητη συσκευή. Η περιέλιξη έγινε με πολύ προσοχή ώστε οι σπείρες να μην βρεθούν η μία πάνω από την άλλη. Δόθηκε

προσοχή σε αυτό το κομμάτι διότι αν συνέβαινε κάτι τέτοιο τα αποτελέσματα δεν θα ήταν ακριβή. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής του πηνίου.



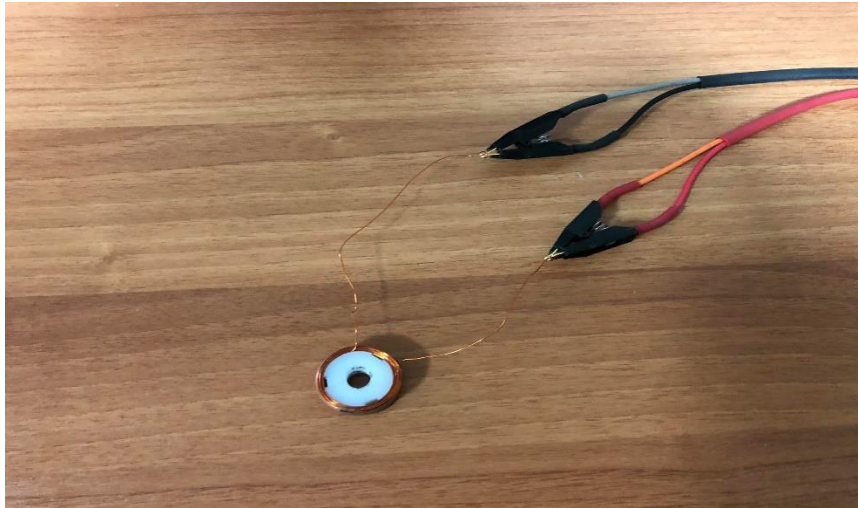
Εικόνα 1 : Χειροκίνητη περιέλιξη πηνίου για μέτρηση πλάκας

Κατά την περιέλιξη του πηνίου χρησιμοποιήθηκε κόλλα ώστε να μην υπάρχει κενό ανάμεσα στις σπείρες.

Όταν ολοκληρώσαμε την κατασκευή του πηνίου καταγράψαμε τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

1. Εσωτερική διάμετρο $d = 24 \text{ mm}$
2. Εξωτερική διάμετρο $D = 29 \text{ mm}$
3. Ύψος πηνίου $h_t = 10 \text{ mm}$
4. Πάχος σύρματος $d_w = 0.5 \text{ mm}$
5. Αριθμός στροφών $N = 128$ στρόφες

Η τελική μορφή του πηνίου για την μέτρηση της πλάκας απεικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 2 : Τελική μορφή πηνίου συνδεδεμένο με ακροδέκτες

5.3.2 Πηνίο για κύλινδρο – σωλήνα

Η κατασκευή του πηνίου για την μέτρηση σε σωλήνα διαφέρει ελάχιστα με την παραπάνω περιγραφή. Μολαταύτα, δόθηκε προσοχή στην εξωτερική διάμετρο του πηνίου ώστε να μπορέσει να εισχωρήσει με ευκολία στον υπό εξέταση σωλήνα.



Εικόνα 3 : Χειροκίνητη περιέλιξη πηνίου για μέτρηση σωλήνα.

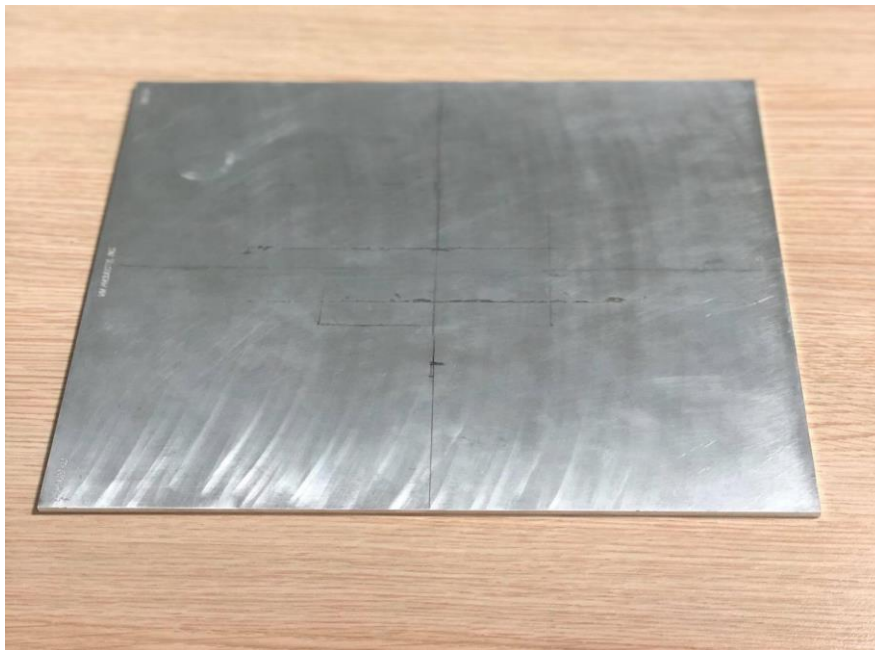
Μετά την κατασκευή του πηνίου καταγράφηκαν τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

1. Εσωτερική διάμετρο $d = 17.9 \text{ mm}$
2. Εξωτερική διάμετρο $D = 21.3 \text{ mm}$
3. Ύψος πηνίου $h_t = 5 \text{ mm}$
4. Πάχος σύρματος $d_w = 0.5 \text{ mm}$
5. Αριθμός στροφών $N = 45$ σπείρες

$\pm(1) \text{ mm}$ περίπου σε όλες τιμές που μετρήθηκαν. Λόγω απόκλισης του παχυμέτρου.

5.4 Δοκίμια πειραμάτων

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις ήταν δυο και παρουσιάζονται παρακάτω :



Εικόνα 4 : Δοκίμιο πλάκας

Υλικό : Αλουμίνιο με άγνωστη αγωγιμότητα

Πάχος πλάκας : 5 mm



Εικόνα 5 : Δοκίμιο σωλήνα

Υλικό : Ορείχαλκος με άγνωστη αγωγιμότητα

Εσωτερική διάμετρος σωλήνα : 11.20 mm

5.5 Όργανα μέτρησης

Τα όργανα μέτρησης των δινορρευσμάτων χωρίζονται σε δυο γενικές κατηγορίες: τα ψηφιακά και τα αναλογικά. Τα ψηφιακά όργανα μέτρησης είναι συνήθως σχεδιασμένα για να εξετάσουν ένα ειδικό χαρακτηριστικό ενός δοκιμίου, όπως η αγωγιμότητα ή το πάχος μη αγωγίμης επικάλυψης. Αυτά τα όργανα έχουν συνήθως μεγαλύτερη ακρίβεια από τις αναλογικές συσκευές. Τα αναλογικά όργανα μέτρησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολλές διαφορετικές εφαρμογές ελέγχου, όπως ανίχνευση ρωγμής, μέτρηση του πάχους του υλικού, μετρήσεις αγωγίμων ή μη αγωγίμων επικαλύψεων.

5.5.1 Όργανο μέτρησης σύνθετης αντίστασης Agilent 4294A (Ψηφιακό)

Το Agilent 4294A είναι το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις με τα δύο πηνία που κατασκευάσαμε. Το Agilent 4294A διαθέτει ειδικούς ακροδέκτες για τη σύνδεση του μετρούμενου σήματος του πηνίου με την είσοδό του. Σκοπός των ακροδεκτών είναι να μεταφέρουν το σήμα στο όργανο με τη μικρότερη δυνατή παραμόρφωση σε όλες τις συχνότητες.



Εικόνα 6 : Όργανο μέτρησης σύνθετης αντίστασης Agilent 4294A

Πιο συγκεκριμένα, το μηχανήμα βαθμονομήθηκε σύμφωνα με το υποκεφάλαιο 5.1.1.

Οι τιμές της συχνότητας που πήραμε ήταν :

Πηνίο για πλάκα στον αέρα : 1, 2, 10, 100, 200, 300, 500 kHz και 1 MHz.

Πηνίο για πλάκα στο δοκίμιο : 1, 2, 10, 100, 200, 300, 500 kHz και 1 MHz.

Πηνίο για κύλινδρο στον αέρα : 1, 2, 10, 100, 200, 300, 500 kHz και 1 MHz.

Πηνίο για κύλινδρο στον σωλήνα : 1, 2, 10, 100, 200, 300, 500 kHz και 1 MHz.

Για κάθε τιμή της συχνότητας που μετρήθηκε καταγράψαμε την ωμική αντίσταση (R) και την επαγωγική αντίδραση (X). Αφού μετρήσαμε τα δοκίμια καταχωρίσαμε τις τιμές που πάρθηκαν σε αρχεία .txt. Στη συνέχεια επειδή μετρήθηκε η επαγωγική αντίδραση, διαιρέθηκε με την γωνιακή συχνότητα ($\omega=2\pi f$) ώστε να υπολογίσουμε την αυτεπαγωγή του πηνίου L. Υπολογίζουμε το L διότι το πρόγραμμα που κατασκευάσαμε κάνει την σύγκριση για τον υπολογισμό του σφάλματος με την χρήση της αυτεπαγωγής (L) σύμφωνα με τη σχέση (18).

Κεφάλαιο 6. Επεξεργασία αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα.

6.1 Σύγκριση θεωρητικών – πειραματικών τιμών

6.1.1 Σκοπός

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι η σύγκριση των θεωρητικών τιμών που υπολογίζουμε από το πρόγραμμα που δημιουργήσαμε με τις πειραματικές μετρήσεις που λάβαμε από το εργαστήριο. Αυτή η σύγκριση έχει ως στόχο τον υπολογισμό της αγωγιμότητας του δοκιμίου και του lift-off της κεφαλής μέσω της ελαχιστοποίησης του σφάλματος.

6.1.2 Ανάλυση δεδομένων και μεθοδολογίας

Για την ευκολότερη κατανόηση, χωρίσαμε την σύνθετη αντίσταση σε δύο μέρη :

1. Την ωμική αντίσταση R
2. Την επαγωγική αντίδραση L

Συγκρίναμε λοιπόν και απεικονίσαμε το κάθε μέρος ξεχωριστά.

➤ Πλάκα

Τα συνολικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στους θεωρητικούς υπολογισμούς είναι :

Δεδομένα πηνίου :

- Εσωτερική ακτίνα : 12 mm
- Εξωτερική ακτίνα : 14.5 mm
- Ύψος πηνίου : 10 mm
- Αριθμός στροφών : 128

Δεδομένα για αγωγιμότητα πλάκας :

Η αγωγιμότητα στην περίπτωση μας είναι η παράμετρος η οποία μετράμε άρα θα είναι διανυσματικό μέγεθος.

σ_1 = Από 10 έως 29 MS/m με βήμα 0.5.

Δεδομένα για lift-off :

Lift-off = Από 0 έως 1 mm με βήμα 0.1.

Πάχος πλάκας : $d = 5 \text{ mm}$.

Σχετική μαγνητική διαπερατότητα του δοκιμίου :

Για το δοκίμιο της πλάκας αναφερόμαστε σε κράμα αλουμινίου που ανήκει στην κατηγορία των παραμαγνητικών υλικών. Συνεπώς, η σχετική μαγνητική διαπερατότητα είναι κοντά στην μονάδα.

$$\mu_r = 1 \text{ (καθαρός αριθμός) , σύμφωνα με τον τύπο : } \mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (22)$$

Όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού και μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

➤ Σωλήνας

Δεδομένα πηνίου :

- Εσωτερική ακτίνα : 8.9 mm
- Εξωτερική ακτίνα : 10.65 mm
- Ύψος πηνίου : 4 mm → από 5 mm που είχε το πηνίο που κατασκευάσαμε, το αλλάξαμε στα 4 mm για καλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων.
- Αριθμός στροφών : 45

Δεδομένα για αγωγιμότητα πλάκας :

Η αγωγιμότητα μεταβάλλεται όπως και στην πλάκα.

σ_1 = Από 10 έως 20 MS/m με βήμα 0.5.

Δεδομένα για lift-off :

Lift-off = 0 mm.

Δεδομένη ακτίνα σωλήνα :

$b = 11.08 \text{ mm}$

Σχετική μαγνητική διαπερατότητα του δοκιμίου :

Για το δοκίμιο του κυλίνδρου αναφερόμαστε σε ορείχαλκο που ανήκει στην κατηγορία των παραμαγνητικών υλικών. Συνεπώς, η σχετική μαγνητική διαπερατότητα είναι κοντά στην μονάδα.

$$\mu_r = 1$$

Οι συχνότητες που πήραμε από το εργαστήριο χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένο για να γίνει η ακριβής σύγκριση των τιμών. Από τις οκτώ τιμές που μετρήθηκαν επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε τις πρώτες τέσσερις δηλαδή : 1, 2, 10 και 100 kHz, διότι οι υπόλοιπες τέσσερις : 200, 300, 500 kHz και 1MHz ήταν πολύ αποκλίνουσες κατά την σύγκριση που πραγματοποιήσαμε.

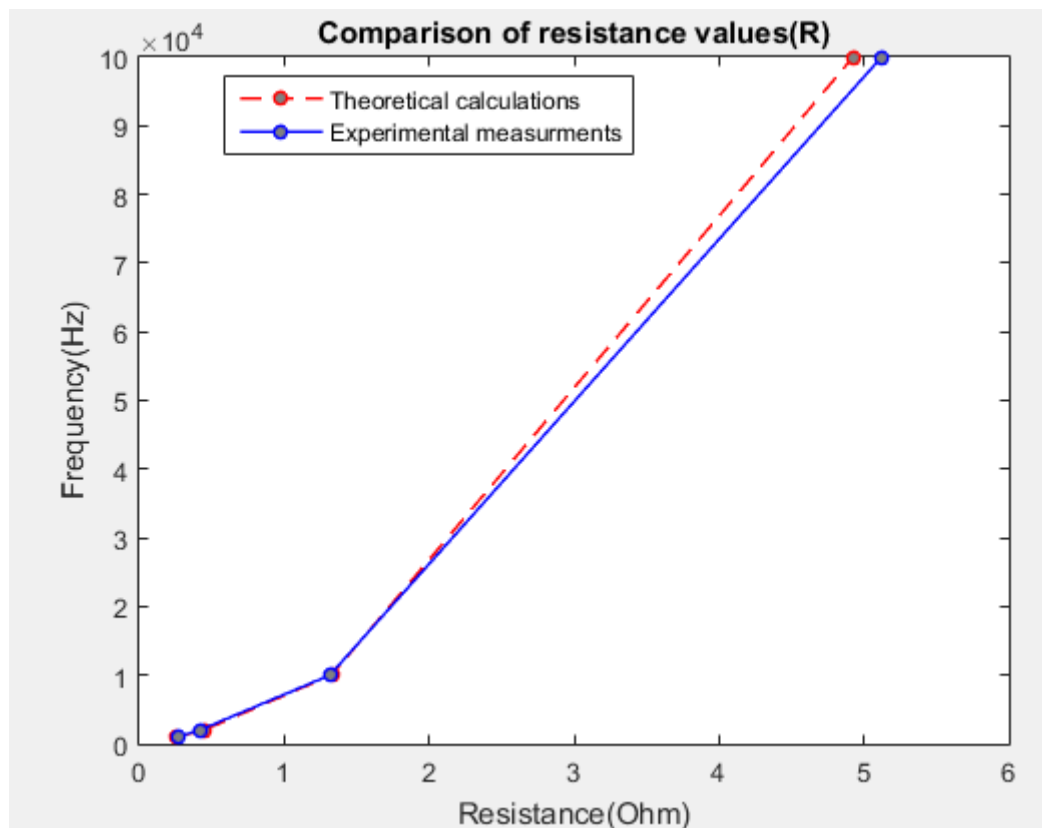
Παρόλο που το δείγμα των μετρήσεων είναι μικρό, οι τιμές τείνουν να συγκλίνουν όπως φαίνεται στα σχήματα στα υποκεφάλαια 6.1.3 και 6.1.4 αντίστοιχα.

Έχοντας τα παραπάνω ως δεδομένα, προκύπτουν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο υποκεφάλαιο 6.2.

6.1.3 Σύγκριση τιμών ωμικής αντίστασης (R)

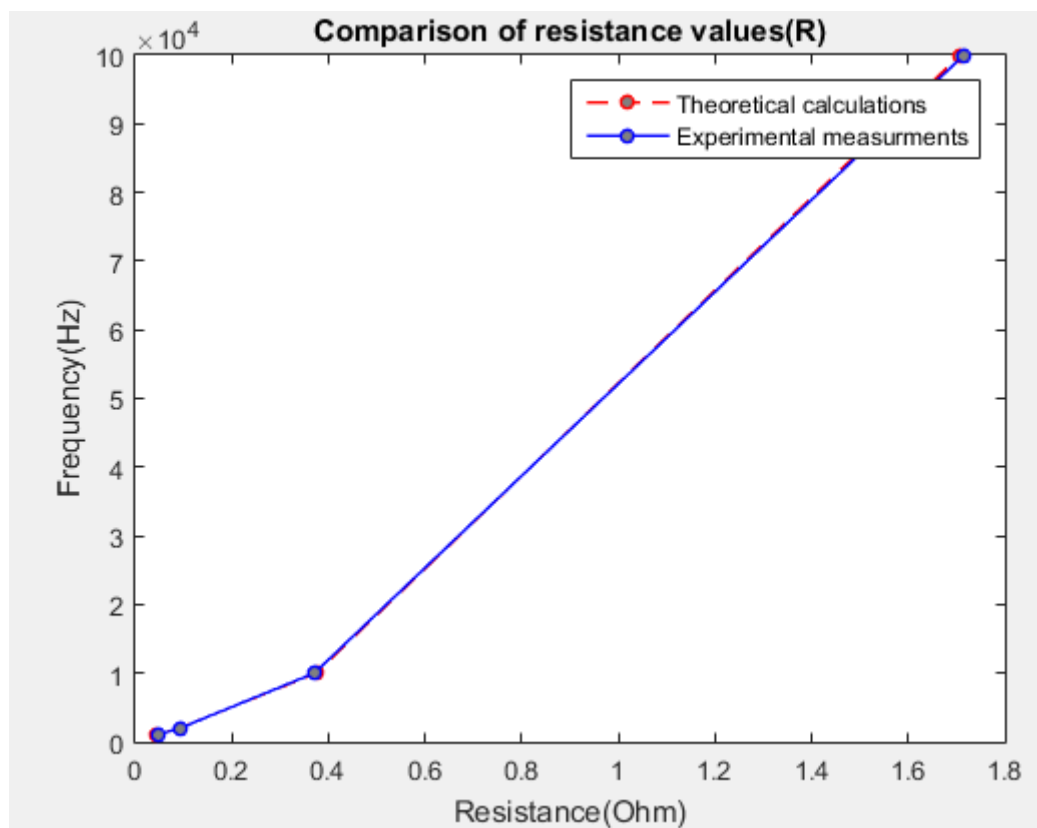
Στα παρακάτω σχήματα παρατίθενται τα διάγραμματα των τιμών της αντίστασης του πηνίου, που πάρθηκαν από τις μετρήσεις με μπλε χρώμα και των θεωρητικών υπολογισμών με κόκκινο. Οι τιμές της αντίστασης προβάλλονται στα δύο διάγραμμα ως προς την συχνότητα μέτρησης (άξονας y).

Τιμές (R) για την πλάκα :



Σχήμα 13 : Διάγραμμα σύγκρισης θεωρητικών και πειραματικών τιμών της ωμικής αντίστασης του πηνίου (πλάκα).

Τιμές (R) για το σωλήνα :

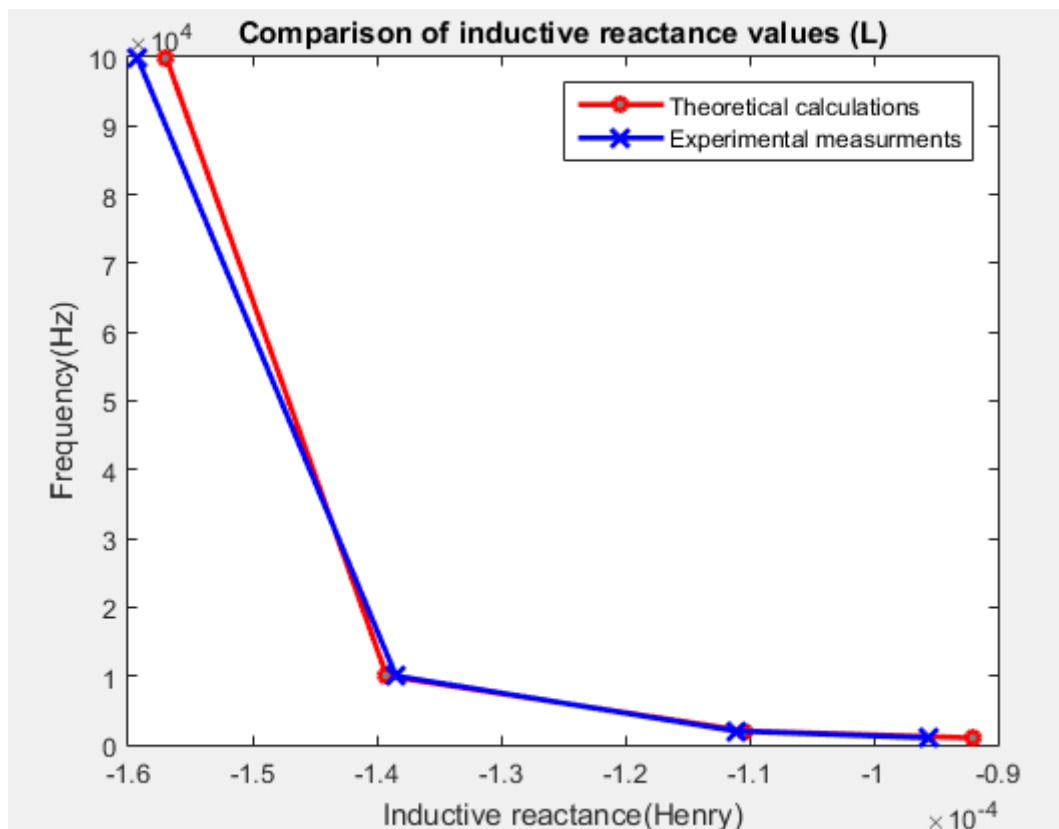


Σχήμα 14 : Διάγραμμα σύγκρισης θεωρητικών και πειραματικών τιμών της ωμικής αντίστασης του πηνίου (σωλήνας).

6.1.4 Σύγκριση τιμών επαγωγικής αντίδρασης (L)

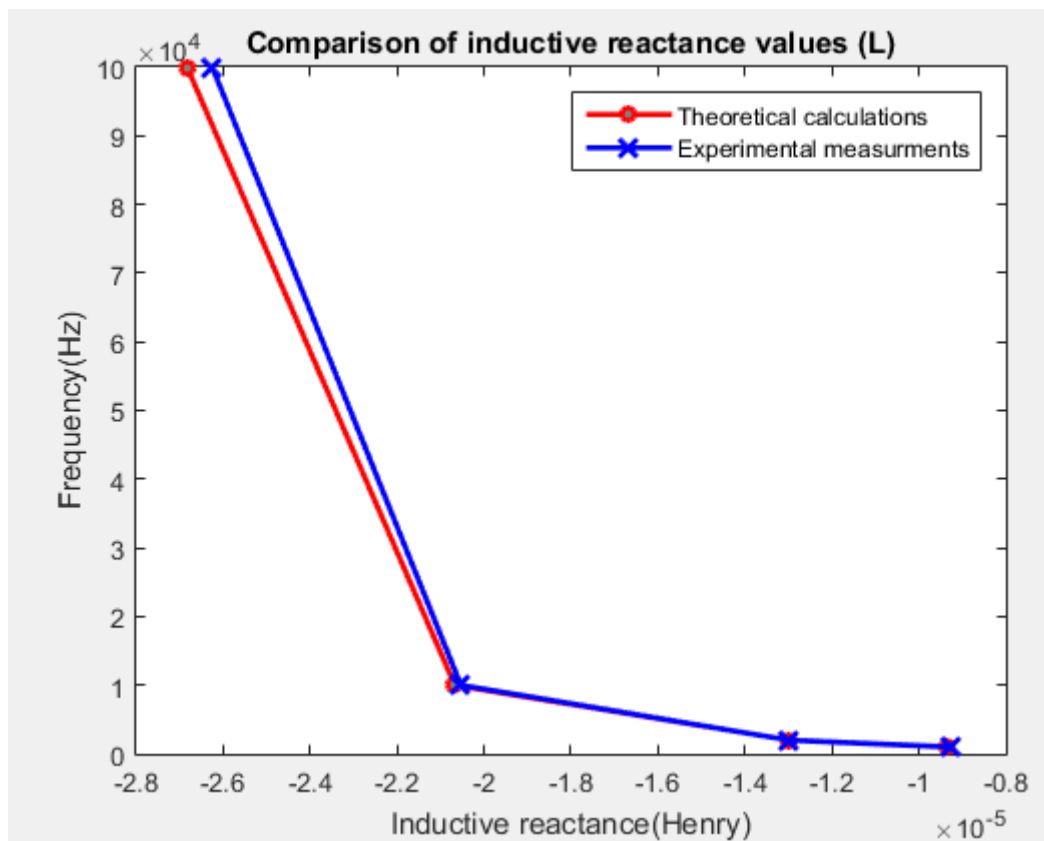
Στα δύο διαγράμματα απεικονίζονται οι θεωρητικές και πειραματικές τιμές της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου σε σχέση με την συχνότητα ελέγχου. Οι θεωρητικές περιγράφονται με κόκκινο χρώμα ενώ οι πειραματικές με μπλε.

Τιμές (L) για την πλάκα :



Σχήμα 15 : Διάγραμμα σύγκρισης θεωρητικών και πειραματικών τιμών της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου (πλάκα).

Τιμές (L) για το σωλήνα :

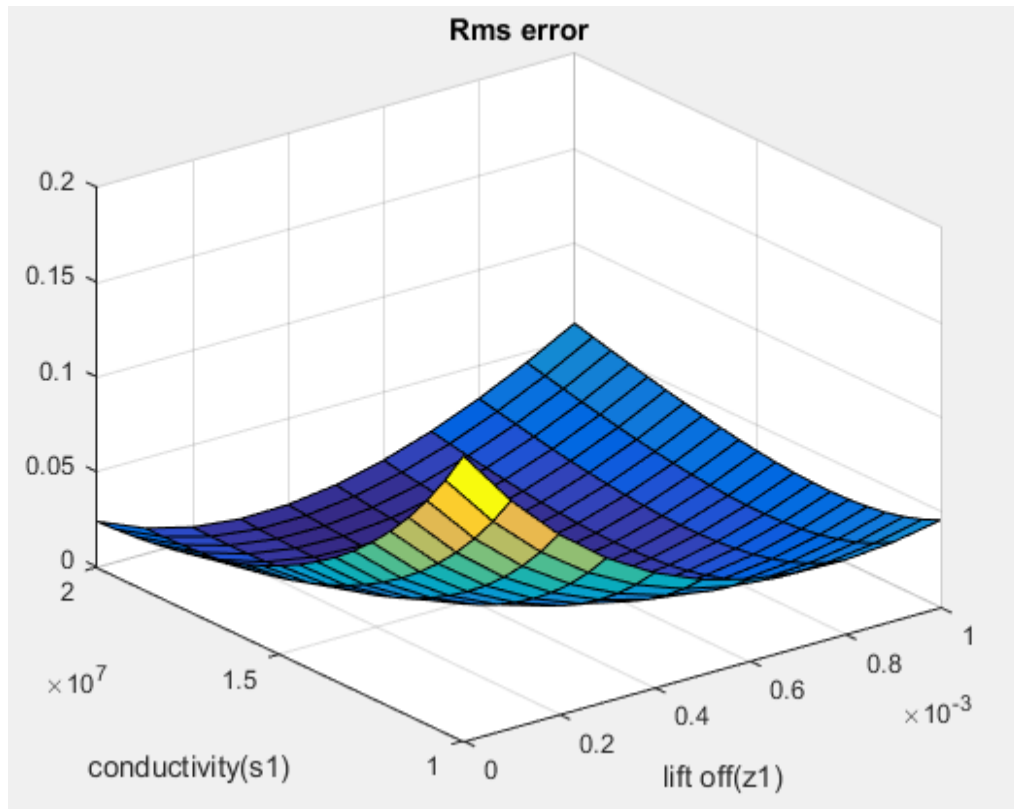


Σχήμα 16 : Διάγραμμα σύγκρισης θεωρητικών και πειραματικών τιμών της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου (σωλήνας).

6.1.5 Τρισδιάστατη απεικόνιση του τετραγωνικού σφάλματος (RMS error)

❖ Πλάκα

Το RMS σφάλμα υπολογίζεται για όλες τις τιμές της αγωγιμότητας και του lift-off που δόθηκαν στο πρόγραμμα μας. Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα το πιο σκούρο μέρος της τρισδιάστατης επιφάνειας του σφάλματος αφορά το ελάχιστο σφάλμα.



Σχήμα 17 : Τρισδιάστατη απεικόνιση τετραγωνικού σφάλματος σε σχέση με την αγωγιμότητα και το lift-off (πλάκα).

❖ Σωλήνας

Η αναπαράσταση του σφάλματος σε τρισδιάστατο επίπεδο στην περίπτωση του σωλήνα δεν είναι δυνατή διότι η μεταβλητή του lift-off είναι μηδέν. Επίσης δεν θεωρείται απαραίτητη.

6.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

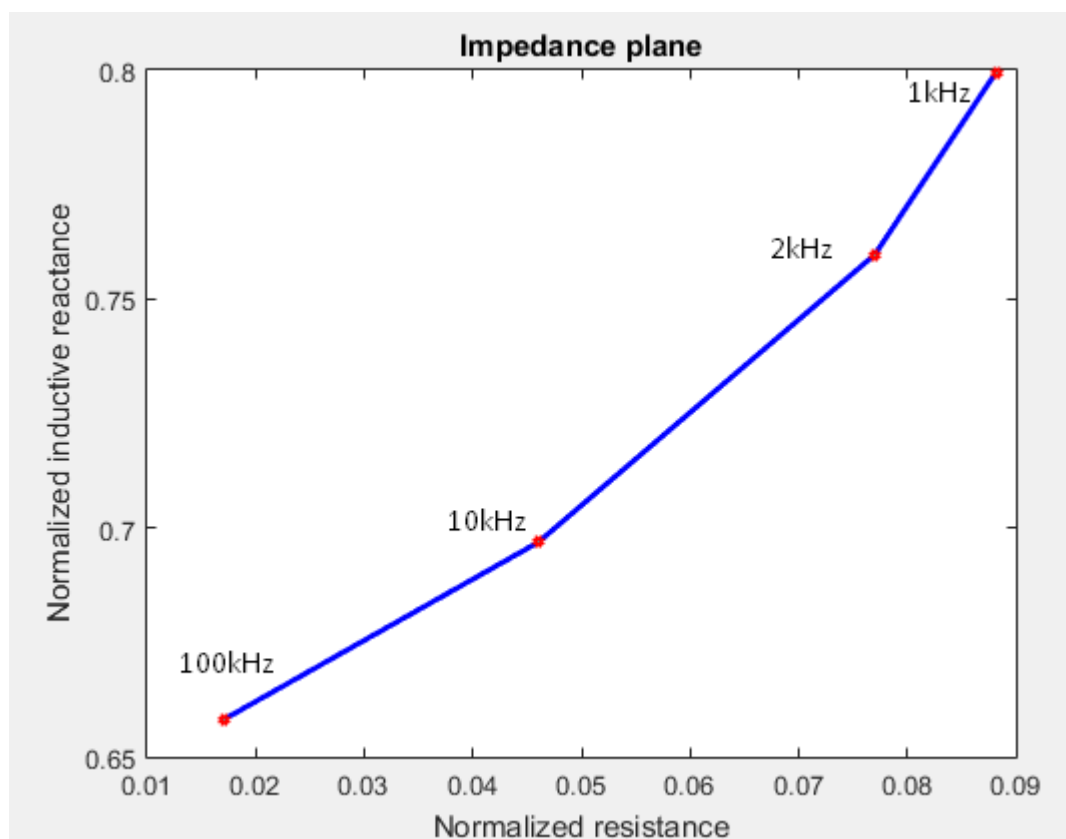
➤ Πλάκα

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 : Αποτελέσματα προγράμματος για τη μέτρηση πλάκας

Αγωγιμότητα	17 MS/m
Lift-off	0.4 mm
Ελάχιστο σφάλμα	0.001053

Στο σχήμα 18 βλέπουμε την καμπύλη της σύνθετης αντίστασης για τέσσερις τιμές συχνότητας, αγωγιμότητα 17 MS/m και lift-off 0.4 mm.



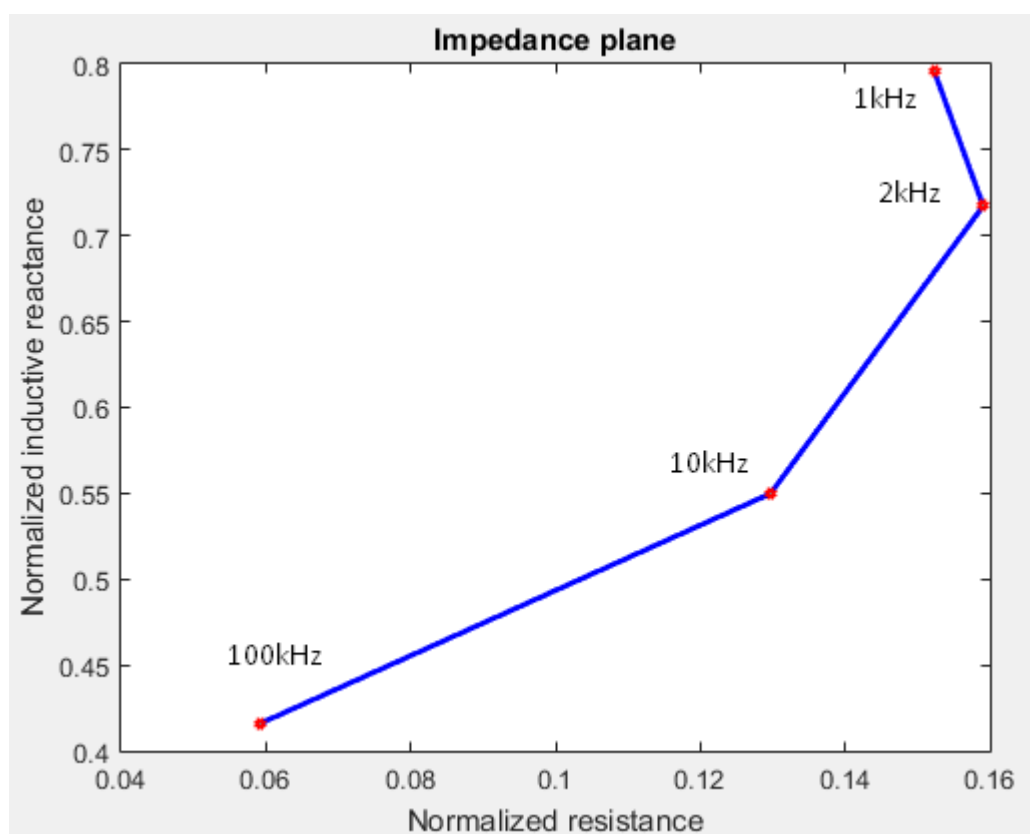
Σχήμα 18 : Επίπεδο σύνθετης αντίστασης για τέσσερις τιμές συχνότητας και $\sigma=17\text{MS/m}$, lift-off=0.4mm (Matlab, πλάκα).

➤ Σωλήνας

Πίνακας 2 : Αποτελέσματα προγράμματος για τη μέτρηση σωλήνα

Αγωγιμότητα	10.5 MS/m
Lift-off	0 mm
Layer radius	11.08 mm
Ελάχιστο σφάλμα	0.000552

Στο σχήμα 19 βλέπουμε την καμπύλη της σύνθετης αντίστασης για τέσσερις τιμές συχνότητας, αγωγιμότητα 10.5 MS/m και lift-off 0 mm.



Σχήμα 19 : Επίπεδο σύνθετης αντίστασης για τέσσερις τιμές συχνότητας και $\sigma=10.5\text{MS/m}$ (Matlab, σωλήνας).

6.3 Δεδομένα για τα δοκίμια

➤ Πλάκα

Η πλάκα που αποτέλεσε το δοκίμιο του πειράματος είχε δεδομένη αγωγιμότητα που μετρήθηκε στο εργαστήριο και είναι ίση με 17 MS/m.

Το lift-off είναι μια παράμετρος η οποία μεταβάλλεται συνεχώς αν το πηνίο δεν είναι τελείως σταθερό. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων κρατήθηκε σε σταθερά επίπεδα κοντά στο 0.1 mm.

➤ Σωλήνας

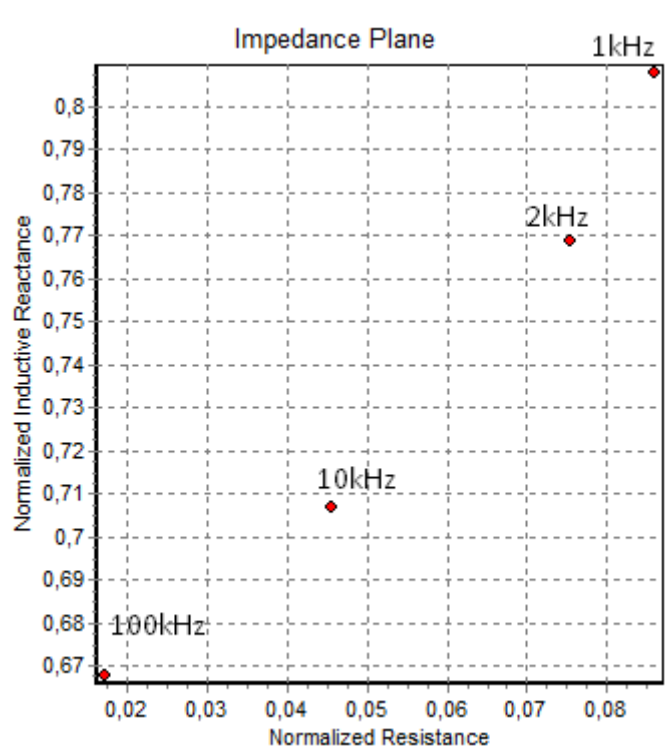
Η αγωγιμότητα του σωλήνα με μετρήσεις από το εργαστήριο είναι 12.5 MS/m.

Το lift-off είναι μηδενικό διότι το πηνίο εισέρχεται ακριβώς στο σωλήνα.

6.4 Σύγκριση επιπέδων σύνθετης αντίστασης

Το TEDDY όπως προαναφέρθηκε στο 4.1.1 είναι η εφαρμογή που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων. Στο σχήμα 20 παρουσιάζεται το επίπεδο της σύνθετης αντίστασης για την αγωγιμότητα και το lift-off που υπολογίσαμε, στην εφαρμογή TEDDY.

➤ Πλάκα



Σχήμα 20 : Επίπεδο σύνθετης αντίστασης για τέσσερις τιμές συχνότητας και $\sigma=17\text{MS/m}$, lift-off=0.4mm (TEDDY, πλάκα).

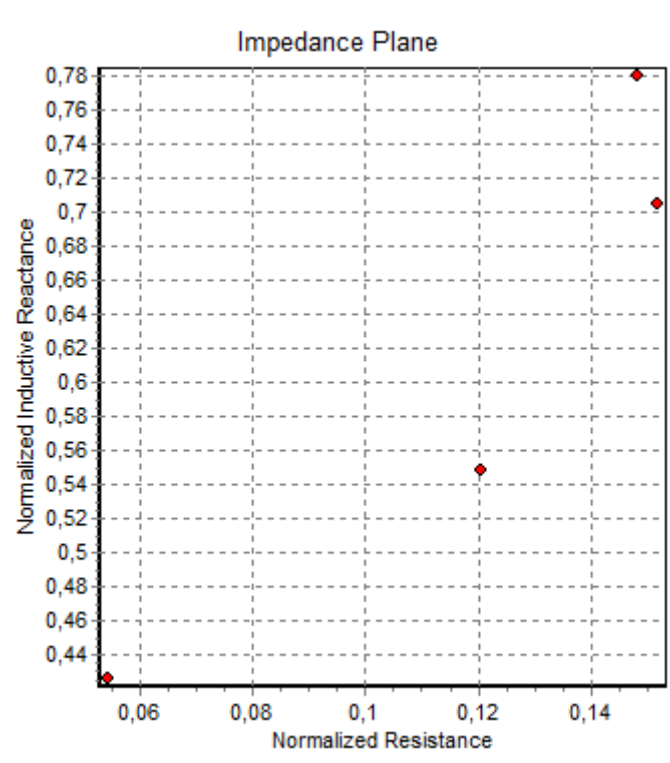
Δεδομένα στην εφαρμογή TEDDY για την πλάκα :

COIL INPUT			
Inner radius R1 [mm] :	12		
Outer radius R2 [mm] :	14,5		
Height L [mm] :	10		
Wire turns N :	128		

<input type="radio"/> Lift-off LO [mm]	0,4	0,4	0
<input checked="" type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	17	17	0
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	1	1	0

Οι τιμές που αναπαρίστανται στο επίπεδο της σύνθετης αντίστασης στα σχήματα 18, 20 είναι πανομοιότυπες και μπορούν να χαρακτηριστούν πολύ κοντινές. Συνεπώς, η καμπύλη της σύνθετης αντίστασης στο σχήμα 18 θεωρείται ακριβής άρα και τα αποτελέσματα μας είναι αξιόπιστα.

➤ Σωλήνας



Σχήμα 21 : Επίπεδο σύνθετης αντίστασης για τέσσερις τιμές συχνότητας και $\sigma=10.5\text{MS/m}$ (TEDDY, σωλήνας).

Δεδομένα στην εφαρμογή TEDDY για το σωλήνα :

COIL INPUT			
Inner radius R1 [mm] :	8,9		
Outer radius R2 [mm] :	10,65		
Height L [mm] :	4		
Wire turns N :	45		
<input type="radio"/> Layer radius B1 [mm]	11,08	11,08	0
<input checked="" type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	10,5	10,5	0
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	1	1	0

Οι τιμές που αναπαρίστανται στο επίπεδο της σύνθετης αντίστασης στα σχήματα 19, 21 δεν είναι κοντινές π.χ. στο σχήμα 19 για τα 100kHz έχουμε $n.i.r=0.43$, $n.r=0.059$ και στο σχήμα 21 $n.i.r=0.575$, $n.r=0.035$.

- $n.i.r$ = Normalized inductive reactance.
- $n.r$ = Normalized resistance.

Γενικά, παρατηρούμε ότι οι κλίσεις των δύο καμπυλών είναι παρόμοιες και οι τιμές είναι σε λογικά επίπεδα.

6.5 Συμπεράσματα

6.5.1 Αγωγιμότητα

❖ Πλάκα

Η δεδομένη αγωγιμότητα του δοκιμίου είναι ταυτόσημη με αυτή που υπολογίσαμε στο θεωρητικό μας μοντέλο. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι το πρόγραμμα που κατασκευάσαμε είναι ακριβές στην εύρεση αγωγιμότητας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό αγωγιμότητας σε οποιαδήποτε εφαρμογή.

Πίνακας 3 : Τιμές αγωγιμότητας στην πλάκα

Τιμή μέτρησης	Τιμή θεωρητικού μοντέλου
17 MS/m	17 MS/m

❖ Σωλήνας

Η τιμή που υπολογίσαμε με το θεωρητικό μας μοντέλο είναι κατά 2 MS/m μικρότερη από την πραγματική. Τα 2 MS/m είναι σχετικά μικρή διαφορά, αλλά το αποτέλεσμα μας δεν μπορεί να θεωρηθεί έγκυρο.

Πίνακας 4 : Τιμές αγωγιμότητας στο σωλήνα

Τιμή μέτρησης	Τιμή θεωρητικού μοντέλου
12.7 MS/m	10.5 MS/m

6.5.2 Lift-off

❖ Πλάκα

Η παράμετρος του lift-off παρατηρούμε ότι αποκλίνει ελάχιστα από αυτό των μετρήσεων, αλλά ξέρουμε ότι δεν είναι εύκολο να διατηρηθεί σταθερή καθώς κάθε

κίνηση μας κατά την μέτρηση μπορεί να μεταβάλλει την τιμή της. Η διαφορά των 0.3 mm μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα λόγω της ευαισθησίας της παραμέτρου.

Πίνακας 5 : Τιμές lift-off

Τιμή μέτρησης	Τιμή θεωρητικού μοντέλου
0.1 mm	0.4 mm

❖ Σωλήνας

Θωρήθηκε μηδενικό lift-off.

6.5.3 Τετραγωνικό σφάλμα

Το τετραγωνικό σφάλμα υπολογίστηκε στο πρόγραμμα μέσω της εξίσωσης (18) και σύμφωνα με το άρθρο που αφορά τα προβλήματα Benchmark [2] πρέπει να είναι της τάξεως του 0.05%.

❖ Πλάκα

Πίνακας 6 : Τιμές τετραγωνικού σφάλματος για την μέτρηση πλάκας

Επιθυμητή τιμή	Υπολογισμένη τιμή
0.0005	0.001053

Η τιμή του σφάλματος που υπολογίστηκε δεν είναι η επιθυμητή αλλά είναι αρκετά κοντά, οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε έγκυρο το αποτέλεσμα μας.

❖ Σωλήνας

Πίνακας 7 : Τιμές τετραγωνικού σφάλματος για την μέτρηση σωλήνα

Επιθυμητή τιμή	Υπολογισμένη τιμή
0.0005	0.000552

Η τιμή του σφάλματος σε αυτή την περίπτωση είναι η επιθυμητή αλλά δεν καταλήγουμε σε σωστή τιμή όσο αφορά την αγωγιμότητα. Συνεπώς, το πρόγραμμα για τον σωλήνα χρήζει επεξεργασία.

Βιβλιογραφία

- [1] C. V. Dodd και W. E. Deeds, “Analytical Solutions to Eddy-Current Probe-Coil Problems” Journal of Applied Physics, Vol. 39, no. 6, pp. 2829-2838, 1968.
- [2] D. Harrison, L. Jones and S. Burke, “Benchmark Problems for Defect Size and Shape Determination in Eddy-Current Nondestructive Evaluation”, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 15, No. 1, 1996.
- [3] T. Theodoulidis and E. Kriezis, “Series expansions in eddy current nondestructive evaluation models,” Journal of Materials Processing Technology, No. 161, pp. 343-347, 2005.
- [4] T. Theodoulidis, “Developments in Calculating the Transient Eddy-Current Response From a Conductive Plate” IEEE Transactions on magnetics Vol. 44, No. 7, July 2008
- [5] Standard Practice for Determining Electrical Conductivity Using the Electromagnetic (Eddy-Current) Method.
- [6] Cecco, V. S., Drunem G. & Sharp, F. L. (1987). Current Testing. Atomic Energy of Canada Limited.
- [7] Θ.Ματίκας, Δ.Αγγέλης (2015). Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι.
- [8] Δ. Γκάμπτζας, Χρήση πεπερασμένων Στοιχείων σε Μη-Καταστρεπτικούς Ελέγχους με Δινορρεύματα, ΠΔΜ (2008).
- [9] <https://www.ivepe.gr/el/professional-certification/428-ndt>
- [10] <https://www.tinker.af.mil/Portals/106/Documents/Technical%20Orders/AFD-101516-33B-1-1.pdf>
- [11] <https://www.nde-ed.org>
- [12] file:///C:/Users/dell/AppData/Local/Temp/2009_Bookmatter_OmnidirectionalInductivePoweri.pdf
- [13] https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/WELD118/NDT_Intro.pdf
- [14] www.mathworks.com

- [15] <https://voultherm.gr/img/PDF/testo-factsheet-calibration-GR.pdf>
- [16] <https://russindo.co.id/ndt-inspection-service/>
- [17] <https://www.merrickgroupinc.com/articles/what-is-eddy-current-testing/>

Παράρτημα Α' Κώδικες Matlab®

Dd2.m

```
%rm: coil radius(mesh)
%r1: inner radius of the coil
%r2: outer radius of the coil

clc
clear

mm=1e-3; kHz=1e3; MSm=1e6; m0=pi*4e-7; mH=1e-3; Hz=1;
microohm=1e-6;
r1=2*mm;
r2=4*mm;
rm=(r1+r2)/2;
n=200; %number of turns
f=100*kHz;%frequency
mo=4*pi*10^(-7);%magnetic permeability of air
m=mo;
mr=m/mo; %% relative magnetic permeability
w=2*pi*f; %%wmega
l1=1*mm; %%lift off se m
l2=5*mm; %%l1+coil height s
s1=16*MSm; % conductivity1
s2=0; % conductivity2
l=4*mm; %coil length

a=1:1:10000;

J01=besselj(0,a.*r1);
J02=besselj(0,a.*r2);
J11=besselj(1,a.*r1);
J12=besselj(1,a.*r2);
H01=StruveH0(a.*r1);
H02=StruveH0(a.*r2);
H11=StruveH1(a.*r1);
H12=StruveH1(a.*r2);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
I=(pi/2).*((a.*r2).*((J12.*H02)-(J02.*H12)))-((a.*r1).*((J11.*H01)-(J01.*H11))));
```

```

a1=sqrt(a.^2+1j*w.*m.*s1);
a2=sqrt(a.^2+1j*w.*m.*s2);
c=1;%thickness
Zconst=(1j*w*pi*m*(n^2))/(((l2-l1).^2)*(r2-r1)^2) ;
in1=I.^2./a.^5;
in2=exp(-2*a.*l2)+exp(-2*a.*l1)-2*exp(-a.*(l2+l1));
in3=(a+a1).*(a1-a2).*exp(-2*a1.*c)+(a-a1).*(a2+a1);
in4=(a-a1).*(a1-a2).*exp(-2*a1.*c)+(a+a1).*(a2+a1);
q=2*exp(-a.*(l2-l1));
integral=in1.*(2*(l2-l1)+a.^-1.*(q-2+in2.*in3./in4));
In=sum(integral)*1;
Z= Zconst*In
% z air
Zairconst=(2*pi*w*m*n^2)/((l2-l1).^2*(r2-r1)^2);
integair=in1.*((l2-l1)+a.^-1.*(exp(-a.*(l2-l1))-1));
In2 = sum(integair)*1;
Zair= Zairconst*In2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Lo=Zair/w;
Xo=w*Lo;
normres=real(Z)/Xo %normalized resistance, R/Xo
normind=imag(Z)/Xo%normalized inductive reactance, X/Xo
figure
plot(normres,normind,'r o')
title('Impedance plane')
xlabel('Normalized resistance')
ylabel('Normalized inductive reactance')
xlim([0 0.1])
ylim([0.8 1])

```

Fragg.m

```

clc
clear
% dodd and deeds paper: Analytical Solutions to Eddy-Current Probe-
Coil
% work assigned by jason
% 29 March 2020
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%
% Input data

```

```

mm=1e-3; kHz=1e3; MSm=1e6; m0=pi*4e-7;
r1=2*mm; %r1: inner coil radius [mm]
r2=4*mm; %r2: outer coil radius [mm]
nv=10; %number of values
l1=1*mm; %coil lift off [mm]
l=4*mm; % coil height
l2=l1+l;
%
wt=200; %number of turns
n=wt/(r2-r1)/(l); %current density
%
f=100*kHz;%frequency [Hz]
w=2*pi.*f;%angular frequency [rad/sec]
%
mr=1; %relative magnetic permeability
m=mr.*m0; %magnetic permeability
%
s1=(16:0.5:29.5)*MSm; % conductivity_1 [MS/m]
s2=(0)*MSm; % conductivity_1 [MS/m]
c=2*mm; % plate thickness [mm]
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%
% Z in air
coef=2*pi*w.*m.*n.^2;
qw1=@(a) fun11(a,l2,l1,r1,r2);
ss=integral(qw1,1,3000,'ArrayValued',true);
Zair=times(coef,ss);
coef=2*pi*w.*m.*n.^2;
Lo=Zair/w;
Xo=w*Lo;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%
% Z change
coef2=1j*w.*pi.*m.*n.^2;
qw2=@(a) fun22(a,r1,r2,l2,l1,s1,s2,w,m,c);
in=integral(qw2,1,3000,'ArrayValued',true);
Z=times(coef2,in);
normres=real(Z)./Xo %normalized resistance
normind=imag(Z)./Xo %normalized inductive reactance
plot(normres,normind,'-o',...
      'LineWidth',2,...

```

```

        'MarkerSize',5,...
        'MarkerEdgeColor','r',...
        'MarkerFaceColor',[0.5,0.5,0.5]);
title('Impedance plane,Conductivity')
xlabel('Normalized resistance')
ylabel('Normalized inductive reactance')

```

Συνάρτηση fun11

Υπολογισμός της σύνθετης αντίστασης του πηνίου στον αέρα :

```

%calculation of Zair
function [Zair]=fun11(a,z2,z1,r1,r2)

ar1=a*r1;
ar2=a*r2;
I=Int_J1x(ar1,ar2);
in1=I.^2./a.^5;
Zair=in1.*((z2-z1)+a.^-1.*(exp(-a.*(z2-z1))-1));

end

```

Συνάρτηση fun22

Υπολογισμός της σύνθετης αντίστασης του πηνίου Z :

```

function [ Z ]= fun22(a,r1,r2,z2,z1,s1,s2,w,m,c)
sf1=size(s1,2);
sf2=size(s2,2);
ar1=a*r1;
ar2=a*r2;
s1=repmat(s1,sf1,1);
s2=repmat(s2,sf1,1);
z1=repmat(z1,sf1,1);
z2=repmat(z2,sf1,1);
w1=repmat(w,sf1,1);
w2=repmat(w,sf1,1);
I=Int_J1x(ar1,ar2); % computes the integral of J1(x)*x
a1=sqrt(a.^2+1j.*w1(1,:).'*m.*s1(1,:));
a2=sqrt(a.^2+1j.*w2(1,:).'*m.*s2(1,:));
a2=repmat(a2,sf1,1);
k11= I.^2./a.^5;
k1= 2*exp(-a.*(z2-z1))-2;

```

```

k2=(exp(-2.*a.*z2)+exp(-2.*a.*z1)-2*exp(-a.*(z2+z1)));
k3=((a+a1).*(a1-a2)+(a-a1).*(a2+a1).*exp(2.*a1.*c));
k4= ((a-a1).*(a1-a2)+(a+a1).*(a2+a1).*exp(2.*a1.*c));
Z= k11.*(2.*(z2-z1)+a.^-1.*(k1+k2.*k3./k4));
end

```

Συνάρτηση Int_J1x

Υπολογισμός του ακτινικού ολοκληρώματος I :

```

function [ I ] = Int_J1x( ar1,ar2 )

J01= besselj(0,ar1);
J02= besselj(0,ar2);
J11= besselj(1,ar1);
J12= besselj(1,ar2);
H01= StruveH0(ar1);
H02= StruveH0(ar2);
H11= StruveH1(ar1);
H12= StruveH1(ar2);

I= (pi/2).*((ar2).*((J12.*H02)-(J02.*H12)))-(ar1).*((J11.*H01)-
(J01.*H11));

End

```

calc_z_series.m

```

clc
clear
format long
% Paper: Series expansions in eddy current nondestructive evaluation
models
% work assigned by theodoulidis
% 15 April 2020
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%
mm=1e-3; kHz=1e3; MSm=1e6; m0=pi*4e-7; mH=1e-3;
load 'Air_EV2.txt'
load 'Plate_EV2.txt'

```

```

air=Air_EV2;
plate=Plate_EV2;
vof1=size(plate,1);%values of frequencies
vof2=size(air,1);
r1=3.015*mm; % inner coil radius
r2=5.46*mm; % outer coil radius
z1=1.32*mm;
z2=4.26*mm;
lift=2*mm;
wt=900; % number of turns
s1=16.45*MSm; % conductivity_1 [MS/m]
n=wt/(r2-r1)/(z2-z1); % current density
%
ns=160;
    %values of frequencies
f=air(:,1)';
f=repmat(f,ns,1);
%
w=2*pi*f; % angular frequency
%
mr=1; % relative magnetic permeability
m=85; % magnetic permeability
L=3.008*mH;
%-----bessel-----
ns=160;
b=50*r2;
q=besselzero(1,ns,1)/b;
q2=repmat(q,1,vof1);
for i=1:1:ns
    for j=1:1:vof1
p(i,j)=sqrt(q2(i,j).^2+1j*w(j)*m*s1);
    end
end

coef=1j*w*2*pi*m0*n^2;
qr1=q2.*r1;
qr2=q2.*r2;
Is=Int_J1x(qr1,qr2); % excitation current
%-----Zair-----

```

```

c1=2*(q2.*(z2-z1)-1+exp(q2.*(z1-z2)));
c2=((q2.*b).*besselj(0,q2.*b)).^2.*q2.^5;
Sair= sum(Is.^2.*(c1./c2));
Zair=coef(1,:).*Sair;

%-----dZ-----
k1=(exp(-q2.*z1)-exp(-q2.*z2)).^2;
k2=((q2.*b).*besselj(0,q2.*b)).^2.*q2.^5;
ddz=sum(Is.^2.*(k1).*(q2.*mr-p)./((k2).*(q2.*mr+p)));
dZ=coef(1,:).*ddz

```

plate_con_liftoff_3_10_20.m.

```

%%plaka
%Final code
clc
clear all
mm=1e-3; kHz=1e3; MSm=1e6; m0=pi*4e-7; mH=1e-3; Hz=1;
microohm=1e-6;
%-----load files-----
load 'air.txt'
load 'pl.txt'
air=air;
plate=pl;
%-----parameters-----
r1=12*mm; % inner coil radius
r2=14.5*mm; % outer coil radius
ns=160;
lift=(0:0.1:1)*mm; %dianisma
z1=lift;
height=10;
z2=lift+height*mm;
wt=128; % number of turns
s1=(10:0.5:29)*MSm;% conductivity_1 [MS/m]
s2=0*MSm;
d=5*mm; % thickness
n=wt/(r2-r1)./(z2-z1); % current density
f=air(:,1) '*Hz;
f= repmat(f,ns,1);
vof1=size(f,2); % values of frequencies
w=2*pi.*f; % angular frequency
mr=1; % relative magnetic permeability
m=m0*mr; % magnetic permeability
%-----bessel-----
b=50*r2;
q=besselzero(1,ns,1)/b;
q2=repmat(q,1,vof1);
qr1=q2.*r1;
qr2=q2.*r2;
Is=Int_J1x(qr1,qr2);% excitation current
tic;
for i=1:1:size(s1,2)
    p=sqrt(q2.^2+1j.*w.*m.*s1(i));
    for j=1:1:size(z1,2)

```

```

        coef=1j*w(1,:)*2*pi*m0*n(j).^2;
%-----Zair-----
        c1=2*(q2.*(z2(j)-z1(j))-1+exp(q2.*(z1(j)-z2(j)))));
        c2=((q2.*b).*besselj(0,q2.*b)).^2.*q2.^5;
        Sair= sum(Is.^2.*(c1./c2));
        Zair=coef(1,:).*Sair;
        Lair=imag(Zair)./w(1,:);
        Xo=w(1,:).*Lair;
%-----dZ-----
        %equation 8 replacement with gama
        k1=(exp(-q2.*z1(j))-exp(-q2.*z2(j))).^2;
        k2=((q2.*b).*besselj(0,q2.*b)).^2.*q2.^5;
        gama1=((q2.*mr).^2-p.^2).*(1-exp(-2.*p.*d));
        gama2=((q2.*mr+p).^2-(q2.*mr-p).^2.*exp(-2.*p.*d));
        ddz=sum(Is.^2.*(k1).*(gama1)./((k2).*(gama2)));
        dZ=coef(1,:).*ddz;
        L1=imag(dZ)./w(1,:);
        ecoef1=1/vof1;
        L1=imag(dZ)./w(1,:);
        insum1=(plate(:,2) '-air(:,2) '-real(dZ)).^2./((plate(:,2) '-
air(:,2) ').^2)...
                +(plate(:,3) '-air(:,3) '-L1).^2./((plate(:,3) '-
air(:,3) ').^2);
        e21(i,j)=ecoef1.*sum(insum1);

    end
end
toc;
for i=1:1:size(s1,2)
    p=sqrt(q2.^2+1j.*w.*m.*s1(i));
    for j=1:1:size(z1,2)
        if min(min(e21))==e21(i,j)
            row=i;
            column=j;
            coef=1j*w*2*pi*m0*n(j).^2;
            k1=(exp(-q2.*z1(j))-exp(-q2.*z2(j))).^2;
            k2=((q2.*b).*besselj(0,q2.*b)).^2.*q2.^5;
            ddz=sum(Is.^2.*(k1).*(q2.*mr-p)./((k2).*(q2.*mr+p)));
            dZ=coef(1,:).*ddz;
        end
    end
end

end

minerror=min(min(e21));
fprintf('conductivity : %f.\n',s1(row)/10^6)
fprintf('lift-off : %f.\n',z1(column)*10^3)
fprintf('minimum error : %f.\n',minerror)
figure (1)
plot(real(dZ),f,'b--o',...
      'LineWidth',1,...
      'Color',[1 0 0],...
      'MarkerSize',5,...
      'MarkerEdgeColor','r',...
      'MarkerFaceColor',[0.5,0.5,0.5]);
title('Comparison of resistance values(R)')
hold on
plot(plate(:,2)-air(:,2),f,'-o',...
      'LineWidth',1,...
      'Color',[0 0 1],...

```



```

        'MarkerSize',5,...
        'MarkerEdgeColor','b',...
        'MarkerFaceColor',[0.5,0.5,0.5]);
xlabel('Resistance(Ohm)')
ylabel('Frequency(Hz)')
legend('Theoretical calculations (red,--)', 'Experimental measurments
(blue)')
figure (2)

plot(imag(dZ)./w(1,:),f,'-o',...
     'LineWidth',2,...
     'Color',[1 0 0],...
     'MarkerSize',5,...
     'MarkerEdgeColor','r',...
     'MarkerFaceColor',[0.5,0.5,0.5]);
title('Comparison of inductive reactance values (L)')

hold on
plot(plate(:,3)-air(:,3),f,'-x',...
     'LineWidth',2,...
     'Color',[0 0 1],...
     'MarkerSize',8,...
     'MarkerEdgeColor','b',...
     'MarkerFaceColor',[0.5,0.5,0.5]);

xlabel('Inductive reactance(Henry)')
ylabel('Frequency(Hz)')
legend('Theoritcal calculations(red)', 'Experimental measurments
(blue, x)')

figure (3)

z11=repmat(z1,size(s1,2),1);
s11=repmat(s1,size(z1,2),1);
surf(z11,s11,e21)
title('Rms error')
xlabel('lift off(z1)')
ylabel('conductivity(s1)')

figure (4)

norm_z=real(dZ)./imag(Zair);
norm_l=1+imag(dZ)./imag(Zair);
plot(norm_z,norm_l,'-o',...
     'LineWidth',2,...
     'Color',[0 0 1],...
     'MarkerSize',3,...
     'MarkerEdgeColor','r',...
     'MarkerFaceColor',[0.5,0.5,0.5])
title('Impedance plane')
xlabel('Normalized resistance')
ylabel('Normalized inductive reactance')

```

test17_9.m

```

%coil for tube
%fragkiadakis iason
%17/9/2020
%load files
clc
clear all
mm=1e-3; kHz=1e3; MSm=1e6; m0=pi*4e-7; mH=1e-3; Hz=1;
microohm=1e-6;
format long
load 'Tube_coil_encircling.txt'
load 'Air_coil_encircling.txt'
tube=Tube_coil_encircling;
air=Air_coil_encircling;
%-----coil characteristics-----
r1=8.9*mm;
r2=10.65*mm;
ht=4*mm;
wt=45;
h=15.*r2;
%-----
ns=160;
lift=(0)*mm; %dianisma
z1=h/2-ht/2;
z2=h/2+ht/2;
s1=(10:0.5:20)*MSm; % conductivity_1 [MS/m]
n=wt/(r2-r1)./(z2-z1); % current density
%
f=air(:,1)'*kHz;
f=repmat(f,ns,1);
vof1=size(f,2);
%
w=2*pi.*f; % angular frequency
%
mr=1; % relative magnetic permeability
m=m0*mr; % magnetic permability
%-----bessel-----
b=11.09*mm;
q=(1:ns)*pi./h';
q2=repmat(q,1,vof1);
qr1=q2.*r1;
qr2=q2.*r2;
Is=Integral_I1x(qr1,qr2); % excitation current
% Isair=Int_J1x(qr1,qr2);
for i=1:1:size(s1,2)
    p=sqrt(q2.^2+1j.*w.*m.*s1(i));
    coef=(1j*w(1,:)*4*pi*m0*n.^2)./h;
%-----dZ-----
    %equation 8 replacement with gama
    k1=((sin(q2.*z1)-sin(q2.*z2)).^2)./q2.^6;
    k2=q2.*besselk(0,q2.*b).*besselk(1,p.*b)-
    p.*besselk(1,q2.*b).*besselk(0,p.*b);

k3=q2.*besseli(0,q2.*b).*besselk(1,p.*b)+p.*besseli(1,q2.*b).*besselk
(0,p.*b);
    ddz=sum(Is.^2.*(k1).*((k2)./(k3)));
    dZ=coef(1,:).*ddz;
    L1=imag(dZ)./w(1,:);
    ecoef1=1/vof1;
    L1=imag(dZ)./w(1,:);
    insum1=(tube(:,2)'-air(:,2)'-real(dZ)).^2./((tube(:,2) '-
air(:,2)')).^2)...

```

```

        +(tube(:,3) '-air(:,3) '-L1).^2./(tube(:,3) '-
air(:,3) ').^2;
        e21(i)=ecoeff1.*sum(insum1);

end

for i=1:1:size(s1,2)
    p=sqrt(q2.^2+1j.*w.*m.*s1(i));
    if min(min(e21))==e21(i)
        row=i;
        coef=1j*w*4*pi*m0*n.^2./h;
        k1=(sin(q2.*z1)-sin(q2.*z2)).^2./q2.^6;
        k2=q2.*besselk(0,q2.*b).*besselk(1,p.*b)-
p.*besselk(1,q2.*b).*besselk(0,p.*b);

k3=q2.*besseli(0,q2.*b).*besselk(1,p.*b)+p.*besseli(1,q2.*b).*besselk
(0,p.*b);
        ddz=sum(Is.^2.*(k1).*((k2)./(k3)));
        dZ=coef(1,:).*ddz;
    end
end

minerror=min(min(e21));
fprintf('conductivity : %f.\n',s1(row)/10^6)
fprintf('minimum error : %f.\n',minerror)

figure (1)
plot(real(dZ),f,'b--o',...
'LineWidth',1,...
'Color',[1 0 0],...
'MarkerSize',5,...
'MarkerEdgeColor','r',...
'MarkerFaceColor',[0.5,0.5,0.5]);
title('Comparison of resistance values(R)')
hold on
plot(tube(:,2)-air(:,2),f,'-o',...
'LineWidth',1,...
'Color',[0 0 1],...
'MarkerSize',5,...
'MarkerEdgeColor','b',...
'MarkerFaceColor',[0.5,0.5,0.5]);
xlabel('Resistance(Ohm)')
ylabel('Frequency(Hz)')
legend('Theoretical calculations (red,--)', 'Experimental measurments
(blue)')
figure (2)

plot(imag(dZ)./w(1,:),f,'-o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[1 0 0],...
'MarkerSize',5,...
'MarkerEdgeColor','r',...
'MarkerFaceColor',[0.5,0.5,0.5]);
title('Comparison of inductive reactance values (L)')

hold on
plot(tube(:,3)-air(:,3),f,'-x',...
'LineWidth',2,...

```

```

        'Color',[0 0 1],...
        'MarkerSize',8,...
        'MarkerEdgeColor','b',...
        'MarkerFaceColor',[0.5,0.5,0.5]);

xlabel('Inductive reactance(Henry)')
ylabel('Frequency(Hz)')
legend('Theoretical calculations(red)','Experimental measurments
(blue, x)')

```