



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Ανάπτυξη λογισμικού για υπολογισμούς σύνθετης
αντίστασης με εφαρμογή σε μετρήσεις ηλεκτρικής
αγωγιμότητας υλικών**

Η Διπλωματική Εργασία

υποβάλλεται

στην εξεταστική επιτροπή του Τμήματος

από τον

Κορωνίδα Γεώργιο

Αριθμός Μητρώου 711

Επιβλέπων:

Καθηγητής

Θεοδουλίδης Θεόδωρος

Κοζάνη
Μάρτιος 2014

Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων	1
Πρόλογος	2
1. Μη Καταστροφικός Έλεγχος	3
1.1 Μη καταστροφικός έλεγχος με τη μέθοδο των δινορρευμάτων (Eddy current)	4
1.2 Αναλυτική λύση δινορρευμάτων για πηνίο πάνω από επίπεδη πλάκα	7
1.3 Υπολογισμός σύνθετης αντίστασης πηνίου	9
1.4 Διορθώσεις στον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης	12
1.5 Ανάπτυξη του μοντέλου Dodd and Deeds σε σειρές	15
2. Ανάπτυξη λογισμικού για υπολογισμούς σύνθετης αντίστασης	18
2.1 Παρουσίαση της εφαρμογής TEDDY V2	19
2.2 Δοκιμή και αποτελέσματα	25
2.3 Σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις	31
Παράρτημα Α' – Κώδικες MatLab	33
Παράρτημα Β' – Ευρετήριο Σχημάτων	39
Βιβλιογραφία	40

Πρόλογος

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός λογισμικού, για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης, με εφαρμογή σε μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας υλικών. Η ανάπτυξη του λογισμικού έγινε με χρήση της σουίτας προγραμματισμού MatLab® και αποτελεί εφαρμογή ανοιχτού κώδικα.

Η εφαρμογή TEDDY, που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της διπλωματικής αυτής εργασίας, σχεδιάστηκε για την προσομοίωση της επιθώρησης δινορρευμάτων (Eddy Current), που χρησιμοποιούνται κατά τους μη καταστροφικούς ελέγχους, υπολογίζοντας τη σύνθετη αντίσταση ενός πηνίου πάνω από πολύ-επίπεδες πλάκες. Η εφαρμογή αυτή είναι συμβατή με όλα τα νέα συστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών και οι δυνατότητες της θα αναλυθούν στο παρών δοκίμιο.

Παράλληλα, αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του Ιωάννη Μαρτίνου, μια δεύτερη βοηθητική εφαρμογή, με την ονομασία cTEDDY, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τους πειραματικούς υπολογισμούς στο εργαστήριο, με στόχο τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα θεωρητικά αποτελέσματα της εφαρμογής TEDDY.

Ακολουθεί η ανάλυση του θεωρητικού υποβάθρου που χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό της εφαρμογής, καθώς επίσης και η παρουσίαση της ίδιας της εφαρμογής και των δυνατοτήτων της. Στο τέλος του εγγράφου παρατίθεται επίσης ο βασικός κώδικας, που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς που πραγματοποιεί το λογισμικό που δημιουργήθηκε.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Θεοδουλίδη Θεόδωρο και τον Ιωάννη Μαρτίνο, για τη βοήθεια που μου παρείχαν για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1. Μη Καταστροφικός Έλεγχος

Μη Καταστροφικός Έλεγχος (ΜΚΕ) ονομάζεται ο έλεγχος που δεν επιφέρει αλλοιώσεις στο εξεταζόμενο αντικείμενο. Οι μέθοδοι ΜΚΕ είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία και συντήρηση κάθε εξαρτήματος και κατασκευής.

Οι ΜΚΕ χρησιμοποιούνται για να διαπιστώνεται η ύπαρξη και το μέγεθος των ατελειών σε μια κατασκευή, χωρίς όμως να καταστρέφεται, ούτε να επηρεάζεται η λειτουργικότητά της. Ο σκοπός των μεθόδων του ΜΚΕ είναι να προβλέπεται η επέκταση τυχόν ρωγμών και να υπολογίζεται ο κίνδυνος αστοχίας του υλικού και της κατασκευής.

Ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος δεν περιορίζεται όμως στην ανίχνευση ρωγμών, αλλά σε ένα ευρύτερα αναπτυσσόμενο πεδίο που ασχολείται με τις ιδιότητες των υλικών, όπως της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, αλλά και με τα χαρακτηριστικά μικροδομής.

Πολλές κατασκευές, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, χρειάζονται περιοδικούς ελέγχους ώστε να εντοπιστούν πιθανές ζημιές που δεν θα γίνονταν αντιληπτές με τους απλούς καθημερινούς τρόπους ελέγχου. Παραδείγματα τέτοιων κατασκευών είναι: ο σκελετός ή η επένδυση των αεροσκαφών, οι υπόγειες σωληνώσεις, οι κατασκευές από σκυρόδεμα και ο οπλισμός τους, τα πιεστικά δοχεία χημικών αντιδραστηρίων, τα συρματόσχοινα γεφυρών, κ.ά.



Σχήμα 1 – Μη Καταστροφικός Έλεγχος σε αγωγό [9]

Οι ΜΚΕ έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογής. Ο όρος *μέθοδος* αναφέρεται στο σύνολο των εξειδικευμένων διαδικασιών, τεχνικών και πειραματικού εξοπλισμού που σχετίζεται με κάθε τεστ μη καταστροφικού ελέγχου. Συνήθως υπάρχουν διάφορες τεχνικές ή διαδικασίες σχετιζόμενες με κάθε μέθοδο. Η αξία κάθε μεθόδου εξαρτάται από το είδος του προβλήματος. Μια μέθοδος ή τεχνική, λόγω της φύσης και της λειτουργίας της, μπορεί να είναι από ιδανική έως και εντελώς άχρηστη για την εφαρμογή που έχουμε υπ' όψιν μας. Για το λόγο αυτό η σωστή επιλογή είναι σημαντική για την τελική απόδοση του ΜΚΕ.

Ο οργανισμός «*The National Materials Advisory Board (NMAB) Ad Hoc Committee on Nondestructive Evaluation*» έχει υιοθετήσει ένα σύστημα το οποίο κατατάσσει τις μεθόδους ΜΚΕ σε **έξι κύριες κατηγορίες**:

- Οπτικές (Visual)
- Διεισδύουσας ακτινοβολίας (Penetrating radiation)
- Μαγνητικές - ηλεκτρικές (Magnetic-electrical)
- Μηχανικών ταλαντώσεων (Mechanical vibration)
- Θερμικές (Thermal)
- Χημικές - Ηλεκτροχημικές (Chemical-electrochemical)

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

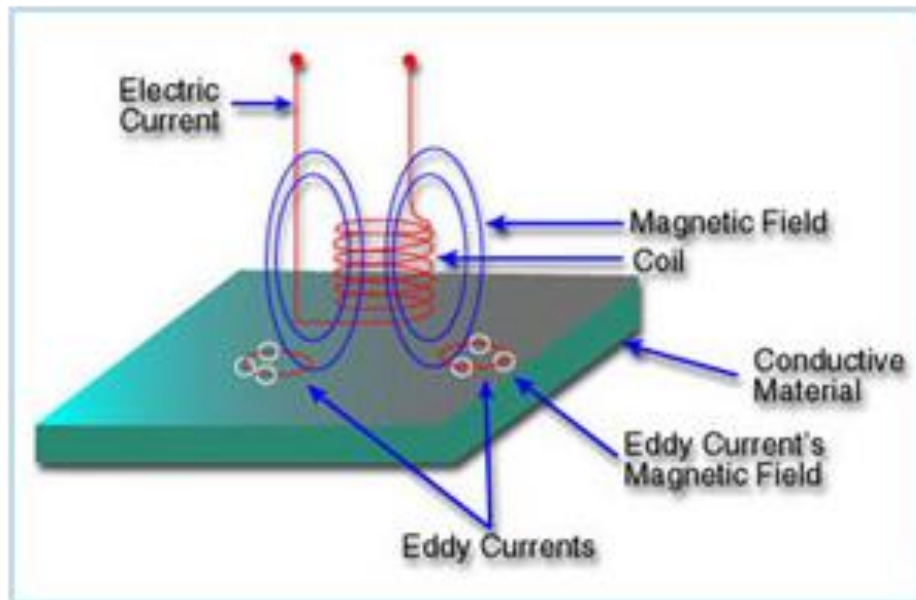
- Οπτικός έλεγχος (Visual inspection)
- Διεισδυτικά υγρά (Liquid penetrant)
- **Δινορρεύματα (Eddy current)**
- Μαγνητικές μέθοδοι (Magnetic particle)
- Ραδιογραφία με ακτίνες Χ/γ (X/γ-Ray radiography)
- Υπέρηχοι (Ultrasonic)
- Ακουστική εκπομπή (Acoustic emission)
- Θερμογραφία (Infrared Thermography)

Στην περίπτωση μας, μας ενδιαφέρει ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος με τη μέθοδο των Δινορρευμάτων, την οποία αναλύουμε παρακάτω.

1.1 Μη καταστροφικός έλεγχος με τη μέθοδο των δινορρευμάτων (Eddy current)

Η μέθοδος βασίζεται στην **ηλεκτρομαγνητική επαγωγή** και χρησιμοποιείται κυρίως για την ανίχνευση επιφανειακών ή κοντά στην επιφάνεια ρωγμών και ατελειών σε αγωγίμα υλικά (μέταλλα). Επίσης, χρησιμοποιείται για την κατάταξη των υλικών σε σχέση με την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα και την μαγνητική διαπερατότητα, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση του πάχους φύλλων μετάλλων και μη αγωγίμων επιστρώσεων (βαφή).

Το εναλλασσόμενο ρεύμα που διέρχεται από τις σπείρες του πηνίου δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο. Όταν το πηνίο τοποθετηθεί κοντά στο υπό εξέταση αγωγίμο υλικό, το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ρεύματα στην επιφάνεια του δοκιμίου (*επαγωγικά ρεύματα Foucault*). Αυτά τα ρεύματα ρέουν σε κλειστό βρόχο και ονομάζονται **δινορρεύματα**. 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.



Σχήμα 2 - Μηχανισμός παραγωγής δινορρευμάτων [10]

Στο μη καταστροφικό έλεγχο με τη μέθοδο των δινορρευμάτων, **το μετρούμενο μέγεθος είναι η σύνθετη αντίσταση του χρησιμοποιούμενου πηνίου διέγερσης**. Κατά τη διάρκεια μετρήσεων ακριβείας με σκοπό την επιβεβαίωση πολύπλοκων θεωρητικών μοντέλων προσομοίωσης της μεθόδου, σημαντικό ρόλο παίζει η ακριβής γνώση της **ηλεκτρικής αγωγιμότητας** του υλικού του εξεταζόμενου δοκιμίου, καθώς και η εξαιρετικά μικρή απόσταση μεταξύ πηνίου και δοκιμίου, γνωστή και ως **ανύψωση (Lift-off)**. Μια βασική διαδικασία υπολογισμού των μεγεθών αυτών, είναι μέσω μέτρησης της σύνθετης αντίστασης.

Η μέθοδος των δινορρευμάτων χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία, σε πλήθος εφαρμογών που, περιλαμβάνουν **ανιχνεύσεις ρωγμών** σε μεταλλικές κατασκευές, **ταυτοποίηση μετάλλων** και **έλεγχο επιφανειακών κατεργασιών**. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε τους ελέγχους ανίχνευσης ρωγμών σε ήλους συναρμογής αεροσκαφών, ελέγχους συγκολλήσεων σε αγωγούς μεταφοράς ρευστών, τη μέτρηση του πάχους των τοιχωμάτων, τους ελέγχους διαβρώσεων σε εναλλάκτες θερμότητας σε πετροχημικά εργοστάσια και σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, καθώς και μετρήσεις επιφανειακών επικαλύψεων (π.χ. πάχους βαφής), την ταξινόμηση των υλικών ανάλογα της αγωγιμότητας τους, έως ακόμη και την ταυτοποίηση κραμάτων.



Σχήμα 3 – Έλεγχος αγωγιμότητας σε νομίσματα

Όπως κάθε μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου, έτσι και η μέθοδος των δινορρευμάτων έχει το δικό της αποκλειστικό πεδίο εφαρμογών και στηρίζεται στο δικό της συγκεκριμένο φυσικό φαινόμενο. **Το φαινόμενο στο οποίο στηρίζεται είναι η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή** και μπορεί απλοποιημένα να περιγραφεί από τα παρακάτω βήματα [1]:

1. Ένα πηνίο που οδηγείται από εναλλασσόμενο ρεύμα δημιουργεί στον περιβάλλοντα χώρο του, εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Εάν το πηνίο προσεγγίσει κάποιο μεταλλικό αντικείμενο (καλό αγωγό του ηλεκτρισμού), θα δημιουργηθούν εντός του μεταλλικού αντικειμένου ρεύματα εξ' επαγωγής, τα οποία λόγω του σχήματος της πορείας που ακολουθούν ονομάζονται δινορρεύματα (γνωστά και ως ρεύματα Foucault).
2. Τα δινορρεύματα αυτά παράγουν με τη σειρά τους στον περιβάλλοντα χώρο ένα δευτερεύον μαγνητικό πεδίο, αποτέλεσμα του οποίου είναι η **μεταβολή της σύνθετης αντίστασης του πηνίου**. Επειδή **το μέγεθος και η πορεία των δινορρευμάτων εξαρτάται από τις ιδιότητες του μεταλλικού αντικειμένου** (αγωγιμότητα, πάχος, σχήμα, κλπ.) **μπορούν να εξαχθούν έμμεσα συμπεράσματα για τις ποσότητες αυτές, μέσω της μέτρησης της σύνθετης αντίστασης του πηνίου**.
3. Εάν εντός του μεταλλικού αντικειμένου υπάρχουν επικίνδυνες για τη λειτουργία του ασυνέχειες, όπως ρωγμές, η πορεία των δινορρευμάτων μεταβάλλεται καθώς αυτά δεν μπορούν να διαπεράσουν τις ασυνέχειες αυτές, οπότε αυτή η μεταβολή των δινορρευμάτων μεταφράζεται σε παραπέρα μεταβολή της σύνθετης αντίστασης του πηνίου. Παρακολουθώντας τη **μεταβολή της σύνθετης αντίστασης του πηνίου**, καθώς αυτό μετακινείται πάνω από το μεταλλικό αντικείμενο εξάγονται πληροφορίες για τη θέση, το σχήμα και το είδος της ασυνέχειας.

Η διαδικασία αυτή είναι πολύ διαδεδομένη στη βιομηχανία και καθορίζεται από πλήθος δημοσιευμένων προδιαγραφών (π.χ. *ASTM* ή για τα ελληνικά δεδομένα *ΕΛΟΤ*).

Συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου των δινορρευμάτων είναι τα εξής:

Πλεονεκτήματα

- ✓ Ανίχνευση επιφανειακών και μικρού βάθους ατελειών.
- ✓ Ευαισθησία σε μικρές ρωγμές και ελαττώματα .
- ✓ Δεν απαιτεί την επαφή των αισθητήρων με την υπό εξέταση κατασκευή.
- ✓ Είναι δυνατός ο έλεγχος πολύπλοκων σχημάτων και μεγεθών.
- ✓ Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραπάνω από μια ατέλεια ταυτόχρονα.
- ✓ Απαιτεί ελάχιστη προετοιμασία κατασκευής.
- ✓ Άνετη φορητότητα του απαραίτητου εξοπλισμού .

Μειονεκτήματα

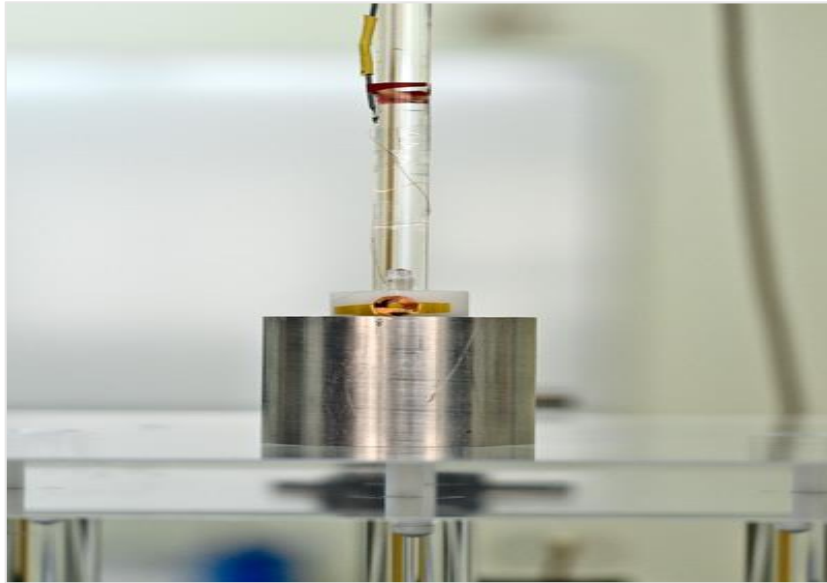
- Μπορούν να επιθεωρηθούν μόνο ηλεκτρικά αγωγιμα υλικά.
- Το βάθος της διεισδυτικότητας της μεθόδου είναι περιορισμένο.
- Ατέλειες με προσανατολισμό παράλληλο με το τύλιγμα του πηνίου, μπορεί να μην ανιχνευθούν.
- Η επιφανειακή τραχύτητα και το φινίρισμα των επιφανειών μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα της μεθόδου.
- Απαιτεί περισσότερη εκπαίδευση του προσωπικού σε σχέση με άλλες τεχνικές.

1.2 Αναλυτική λύση δινορρευμάτων για πηνίο πάνω από επίπεδη πλάκα

Τα προβλήματα ηλεκτρομαγνητισμού συνήθως χωρίζονται σε **τρεις βασικές κατηγορίες: χαμηλής, μέσης και υψηλής συχνότητας**. Τα προβλήματα επαγόμενων ρευμάτων (δινορρεύματα) προερχόμενα από πηνίο, εντάσσονται στην μεσαία κατηγορία. Για την αντιμετώπισή τους χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις **Maxwell**, από τις οποίες προκύπτουν οι διαφορικές εξισώσεις του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού. Εάν έχουμε τη λύση για το διανυσματικό δυναμικό, τότε μπορεί να υπολογιστεί οποιαδήποτε φυσικό ηλεκτρομαγνητικό μέγεθος, όπως η πυκνότητα των επαγόμενων ρευμάτων και η εμπέδηση του πηνίου [6].

Η επιστημονική έρευνα σχετικά με τη μέθοδο των δινορρευμάτων περιλαμβάνει την ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων προσομοίωσης της μεθόδου, με σκοπό τη βελτιστοποίηση των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων ελέγχου (π.χ. της χρησιμοποιούμενης συχνότητας για τη διέγερση του πηνίου). Περιλαμβάνονται είτε αριθμητικά μοντέλα, όπως η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων FEM και η μέθοδος οριακών στοιχείων BEM, είτε αναλυτικά ή ημι-αναλυτικά μοντέλα. Το σύνολο των μοντέλων αυτών στηρίζεται στη λύση των εξισώσεων του Maxwell σε χαμηλές συχνότητες, όπου κυριαρχεί το φαινόμενο της διάχυσης και όχι της διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Ο μόνος αξιόπιστος τρόπος για την αξιολόγηση και την επιβεβαίωση των μοντέλων αυτών, είναι η μέτρηση και το πειραματικό αποτέλεσμα. Μια τέτοια τυπική μέτρηση περιλαμβάνει τη **μετακίνηση του πηνίου πάνω από μια αγωγιμη πλάκα** (π.χ. αλουμινίου), με μια καλά διαστασιοποιημένη λεπτή εγκοπή που προσομοιώνει

τη ρωγμή. Κατά τη μετακίνηση του πηνίου λαμβάνονται **μετρήσεις της σύνθετης αντίστασης** του πηνίου, η μεταβολή της οποίας σχετίζεται με τη ρωγμή. Οι μετρήσεις (*παραγόμενα σήματα*) είναι αυτές που συγκρίνονται με τα θεωρητικά αποτελέσματα των μοντέλων προσομοίωσης.

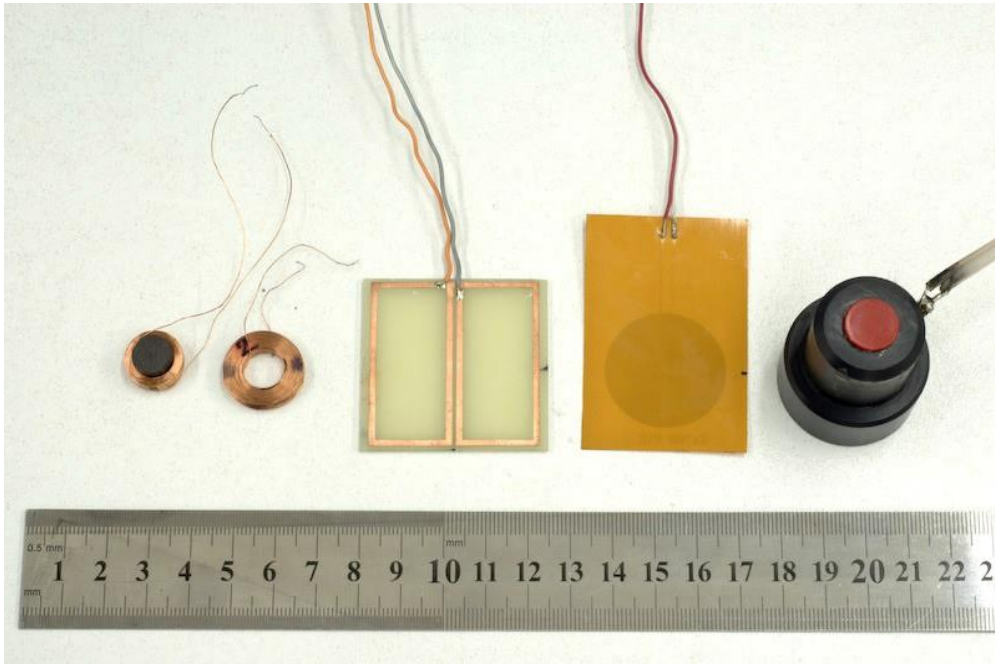


Σχήμα 4 – Μέτρηση σύνθετης αντίστασης με πηνίο πάνω από ρωγμή [11]

Όπως γίνεται κατανοητό, σημαντικό ρόλο στην περίπτωση αυτή παίζει η ακριβής γνώση των παραμέτρων του πειράματος, δηλαδή των διαστάσεων και τεχνικών χαρακτηριστικών πηνίου και δοκιμίου, οι αποστάσεις, οι διαστάσεις ρωγμής, η ηλεκτρική αγωγιμότητα δοκιμίου και η ανύψωση πηνίου. Ο κατασκευαστής του δοκιμίου συνήθως παρέχει ακριβείς διαστάσεις της εγκοπής, η οποία γίνεται με τη μέθοδο EDM (*ElectroDischarge Machining*), ώστε να επιτυγχάνεται πολύ μικρό άνοιγμα, δεν παρέχει όμως πιστοποιημένη τιμή για την αγωγιμότητα του δοκιμίου. Έτσι για τα μεγέθη της αγωγιμότητας, αλλά και της ανύψωσης του πηνίου, που είναι δύσκολο να μετρηθούν, εφαρμόζεται μια ειδική διαδικασία μέσω της εύρεσης της σύνθετης αντίστασης του πηνίου.

1.3 Υπολογισμός σύνθετης αντίστασης πηνίου

Στη μέθοδο των δινορρευμάτων χρησιμοποιείται πληθώρα πηνίων, ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Τυπικές σχεδιάσεις πηνίων φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5 - Πηνία εργαστηριακών μετρήσεων, από αριστερά προς τα δεξιά: Πηνίο με φερριτικό πυρήνα, σύνθετες κυκλικό πηνίο, διαφορικό ορθογωνικό πηνίο τυπωμένου κυκλώματος, εύκαμπτο φωτολιθογραφημένο κυκλικό πηνίο, κλειστό πηνίο περιελιγμένο σε φόρμα [1].

Εδώ και 45 χρόνια είναι γνωστή η ακριβής μαθηματική έκφραση της σύνθετης αντίστασης του κυκλικού πηνίου (δεύτερο στο Σχήμα 5), όταν αυτό είναι μόνο του στον αέρα και όταν βρίσκεται τοποθετημένο επί μιας αγωγίσιμης πλάκας (**Dodd and Deeds, 1968**). **Η σύνθετη αντίσταση έχει τη μορφή μιγαδικού αριθμού Z** και μπορεί να γραφεί ως το άθροισμα της σύνθετης αντίστασης του πηνίου Z_0 και της μεταβολής της ΔZ (1), λόγω της παρουσίας της αγωγίσιμης πλάκας και των επαγόμενων δινορρευμάτων:

$$Z = Z_0 + \Delta Z \quad (1)$$

Όπου:

$$Z_0 = j\omega L_0 = j\omega 2\pi\mu_0 n^2 \int_0^\infty \frac{\text{Int}^2(ar_1, ar_2)}{a^6} (al + e^{-al} - 1) da \quad (2)$$

$$\Delta Z = j\omega\pi\mu_0 n^2 \int_0^\infty \frac{\text{Int}^2(ar_1, ar_2)}{a^6} (e^{-az_1} - e^{-az_2})^2 \frac{a\mu_r - a_1}{a\mu_r + a_1} da \quad (3)$$

Όπου:

$$J(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} t j_1(t) dt \quad (4)$$

$$a_1 = \sqrt{a^2 + j\omega\mu_0\mu_r\sigma} \quad (5)$$

$$n = \frac{N}{(r_2 - r_1)l} \quad (6)$$

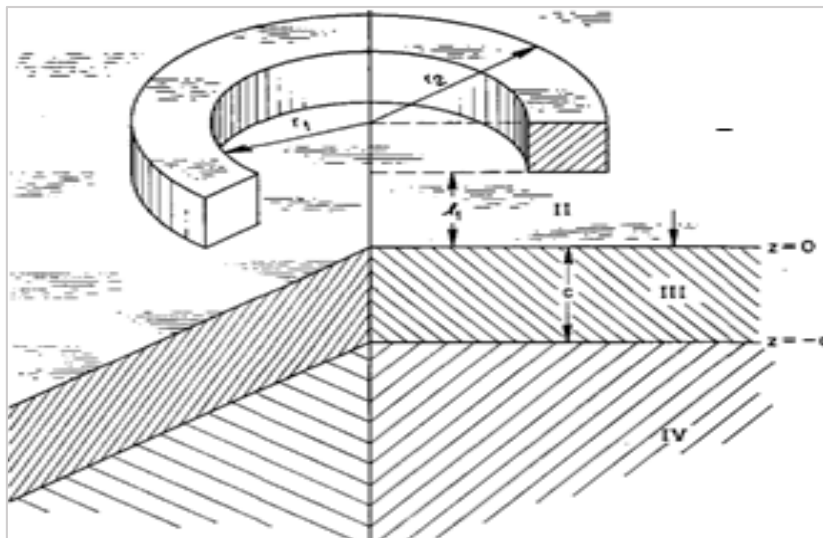
με τους παρακάτω ορισμούς:

- $\omega = 2\pi f$: γωνιακή συχνότητα και f συχνότητα σε Hz
- L_0 : αυτεπαγωγή του πηνίου στον αέρα
- μ_0 : μαγνητική διαπερατότητα του κενού/αέρα
- μ_r : σχετική μαγνητική διαπερατότητα του εξεταζόμενου δοκιμίου
- σ : ηλεκτρική αγωγιμότητα του εξεταζόμενου δοκιμίου
- n : πυκνότητα περιέλιξης
- N : αριθμός στροφών περιέλιξης
- r_1 : εσωτερική ακτίνα πηνίου
- r_2 : εξωτερική ακτίνα πηνίου
- l : ύψος πηνίου
- z_1 : ανύψωση, απόσταση πηνίου από επιφάνεια εξεταζόμενου δοκιμίου
- $z_2 = z_1 + l$

Το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης αντιστοιχεί στην ωμική αντίσταση και το φανταστικό μέρος αντιστοιχεί στην επαγωγική αντίδραση, που με τη σειρά της εξαρτάται από την αυτεπαγωγή του πηνίου:

$$Z = R + jX = R + j\omega L \quad (7)$$

Οι παραπάνω σχέσεις έχουν προκύψει υποθέτοντας συνεχή χωρική κατανομή της πυκνότητας ρεύματος του πηνίου. Όσο λεπτότερο είναι το σύρμα περιέλιξης, η υπόθεση αυτή γίνεται πιο σωστή. Να σημειωθεί επίσης, ότι στις παραπάνω σχέσεις δεν περιλαμβάνεται η τιμή της ωμικής αντίστασης του πηνίου-σύρματος. Αυτή είναι γνωστή και ως dc τιμή αντίστασης και αφαιρείται από τις μετρήσεις. Οι (2) και (3) είναι πολύ σημαντικές, καθώς χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση/προσαρμογή πειραματικών μετρήσεων και θεωρητικών αποτελεσμάτων. Από τη σύγκριση/προσαρμογή αυτή, εξάγονται οι τιμές της αγωγιμότητας του μεταλλικού αντικειμένου και της ανύψωσης [1].



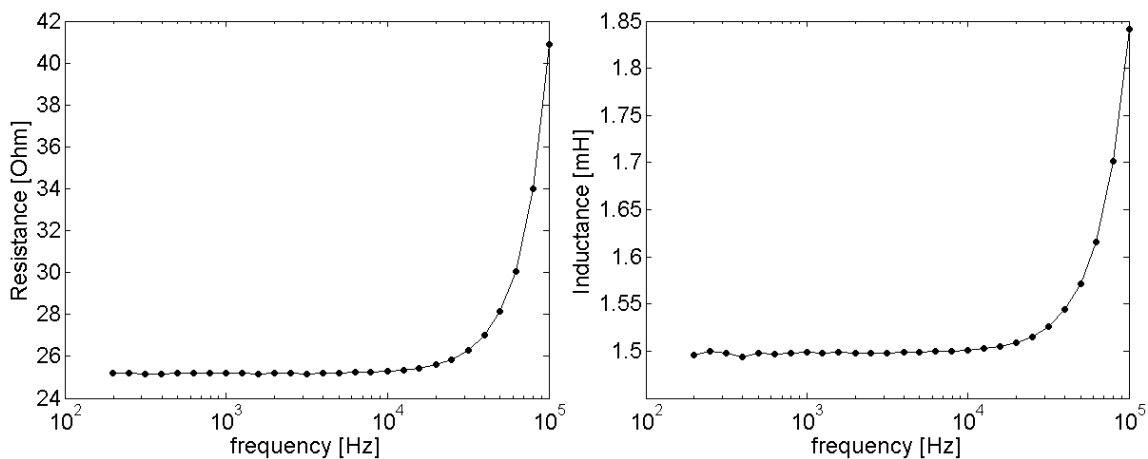
Σχήμα 6 - Πηνίο ορθογωνικής διατομής πάνω από δύο επίπεδες αγωγίμες πλάκες: I η περιοχή πάνω από το πηνίο, II η περιοχή μεταξύ του πηνίου και της πρώτης πλάκας, III η περιοχή της πρώτης πλάκας, IV η περιοχή της δεύτερης πλάκας [6].

Οι υπολογισμοί αυτοί περιλαμβάνουν αριθμητικές ολοκληρώσεις, όμως μπορούν να τελεστούν με μεγάλη ακρίβεια, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτόματες ρουτίνες ολοκλήρωσης. **Με βάση λοιπόν αυτές τις ρουτίνες, πραγματοποιούνται και οι υπολογισμοί του προγράμματος TEDDY**, το οποίο είναι το αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

1.4 Διορθώσεις στον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης

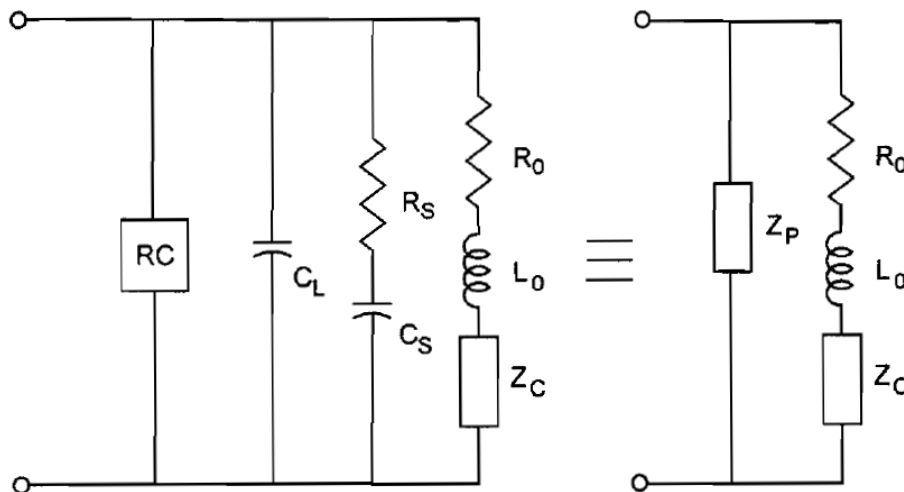
Μέτρηση σύνθετης αντίστασης πηνίου στον αέρα.

Τα πηνία συνήθως κατασκευάζονται από αυτόματη μηχανή περιέλιξης και όταν αγοράζονται από εξειδικευμένο κατασκευαστή, συνοδεύονται από πιστοποιητικό με τις ακριβείς τους διαστάσεις και αριθμό στροφών τους. Σε μια πρώτη μέτρηση το πηνίο είναι στον αέρα, ώστε να γίνει σαφές κατά πόσο η προβλεπόμενη από τη θεωρία τιμή συμβαδίζει με τη μέτρηση, για να αξιολογηθεί έτσι η κατασκευή του πηνίου. Η μέτρηση της σύνθετης αντίστασης του πηνίου στον αέρα γίνεται σε ένα εύρος συχνοτήτων, ενώ μια χαρακτηριστική καμπύλη σε λογαριθμική κλίμακα συχνότητας φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 7 - Μεταβολή της σύνθετης αντίστασης (αντίσταση και αυτεπαγωγή) με το πηνίο στον αέρα σε ένα εύρος συχνοτήτων [1].

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι υπάρχει ραγδαία μεταβολή της σύνθετης αντίστασης με τη συχνότητα, που οφείλεται στο ότι το πηνίο δεν συμπεριφέρεται ιδεατά, αλλά παρουσιάζει κάποια εσωτερική αντίσταση και χωρητικότητα. Επίσης, στη χωρητικότητα συμβάλλουν και οι ακροδέκτες. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα που περιλαμβάνει τα παρασιτικά αυτά στοιχεία φαίνεται στο Σχήμα 8. R_s και C_s είναι η εσωτερική αντίσταση και η εσωτερική χωρητικότητα του πηνίου, ενώ C_L είναι η χωρητικότητα των ακροδεκτών. Το στοιχείο RC αναπαριστά οποιαδήποτε άλλη αποκλίνουσα συμπεριφορά. Όλα τα παρασιτικά στοιχεία μπορούν να συγκεντρωθούν στο παράλληλο στοιχείο Z_p . Στο ίδιο κύκλωμα R_0 και L_0 είναι η dc αντίσταση και αυτεπαγωγή του πηνίου και Z_C είναι η μεταβολή από τα επαγόμενα δινορρεύματα στο εξεταζόμενο δοκίμιο. Το στοιχείο Z_p είναι υπεύθυνο για τη συμπεριφορά που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7, ενώ το πηνίο είναι στον αέρα. Οι τιμές R_0 και L_0 προκύπτουν από το Σχήμα 7, καθώς η συχνότητα τείνει στο 0.



Σχήμα 8 - Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα πηνίου [1]

Η πρώτη σύγκριση που γίνεται είναι μεταξύ της αντίδρασης του πηνίου στον αέρα L_0 και της τιμής που προκύπτει από τη (2). Για καλά περιελιγμένα πηνία η **διαφορά είναι της τάξης του 0.5% με 1%**. Η διαφορά αυτή οφείλεται συνήθως στη **μη τέλεια περιέλιξη**, καθώς η πραγματική εναπόθεση σπειρών απέχει από τη συνεχή πυκνότητα ρεύματος, που υποτίθεται από το θεωρητικό μοντέλο. Στην περίπτωση αυτή είτε δεν γίνεται καμία διόρθωση, επειδή όλες οι περαιτέρω μετρήσεις θα υπολογιστούν **κανονικοποιημένες** ως προς την αντίδραση του πηνίου, είτε μειώνεται η ενεργός ακτίνα του πηνίου κοντά στη διάμετρο του λεπτού σύρματος, που χρησιμοποιείται για την περιέλιξη του πηνίου, έως ότου οι δύο τιμές (θεωρητική και μετρούμενη) συμπέσουν [1].

Μέτρηση σύνθετης αντίστασης πηνίου επί επιπέδου δοκιμίου

Στη συνέχεια, το πηνίο τοποθετείται επί αγωγικής πλάκας, οπότε προκύπτει το ζήτημα της ακριβούς μέτρησης της αγωγιμότητας της πλάκας και της ανύψωσης του πηνίου. Και στην περίπτωση αυτή λαμβάνονται μετρήσεις της σύνθετης αντίστασης του πηνίου σε ένα κατάλληλο εύρος συχνοτήτων και γίνεται σύγκριση με το θεωρητικό μοντέλο (2) και (3).

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.

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\Delta R_{\text{EXP}(i)} - \Delta R_{\text{CALC}(i)}}{\Delta R_{\text{EXP}(i)}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta L_{\text{EXP}(i)} - \Delta L_{\text{CALC}(i)}}{\Delta L_{\text{EXP}(i)}} \right]^2 \quad (8)$$

Σε κάθε περίπτωση, το σφάλμα έχει καλώς καθορισμένο ελάχιστο, το οποίο συνήθως κυμαίνεται γύρω στο 0,05%. Επίσης, είναι αρκετά ευαίσθητο στις μεταβολές των παραμέτρων (αγωγιμότητα, ανύψωση).

Με τον τρόπο αυτό και οι δύο παράμετροι μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα, διαφορετικά μπορεί να γίνει χρήση της γνωστής τιμής της αγωγιμότητας (εάν διατίθεται από τον

κατασκευαστή ή αν έχει μετρηθεί με κάποιο εναλλακτικό τρόπο) και να μετρηθεί μόνο η τιμή της ανύψωσης.

Είναι σημαντικό να τονιστεί, ότι στις πειραματικές μετρήσεις στην παραπάνω σχέση, θα πρέπει να εφαρμοστεί διαδικασία διόρθωσης εάν το εύρος συχνοτήτων είναι τέτοιο που τα παρασιτικά στοιχεία του Σχήματος 8 παίζουν σημαντικό ρόλο. Εάν η χρησιμοποιούμενη συχνότητα είναι μεγαλύτερη από το 1/10 της συχνότητας συντονισμού του πηνίου, τότε εφαρμόζεται η παρακάτω διαδικασία διόρθωσης:

Από τις τιμές R_0 και L_0 υπολογίζεται η **ιδανική σύνθετη αγωγιμότητα** του πηνίου:

$$Y_0 = 1/Z_0 = 1/(R_0 + j\omega L_0) \quad (9)$$

Αυτή αφαιρείται από τη **σύνθετη αγωγιμότητα** του πηνίου **στον αέρα**:

$$Y_A = 1/Z_A \quad (10)$$

ώστε να πάρουμε τη **σύνθετη αγωγιμότητα του ισοδύναμου** παράλληλου κλάδου:

$$Y_P = Y_A - Y_0 \quad (11)$$

Προκειμένου να διορθωθεί η μθεωρηθείσα σύνθετη αντίσταση Z_U , η σύνθετη αγωγιμότητα του παράλληλου κλάδου αφαιρείται από τη σύνθετη αγωγιμότητα Y_U :

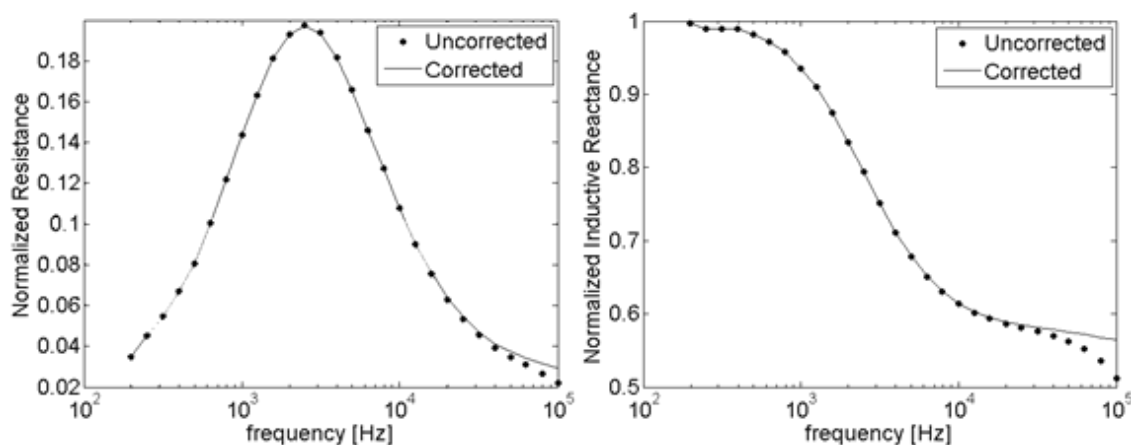
$$Z_U^{\text{CORR}} = 1/(Y_U - Y_P) \quad (12)$$

Οπότε, τελικά η διορθωμένη μεταβολή της σύνθετη αντίστασης, λόγω του μεταλλικού εξεταζόμενου δοκιμίου, είναι:

$$\Delta Z_U^{\text{CORR}} = Z_U^{\text{CORR}} - Z_0 \quad (13)$$

Στο Σχήμα 9 απεικονίζονται οι **κανονικοποιημένες τιμές της σύνθετης αντίστασης** χωρίς διόρθωση και με διόρθωση (12). Όπως είναι φανερό, προκύπτει διαφορά για την περιοχή υψηλών συχνοτήτων. Η **κανονικοποίηση** έχει γίνει στα διαγράμματα με την αντίδραση του πηνίου στον αέρα:

$$X_0 = \omega L_0 \quad (14)$$



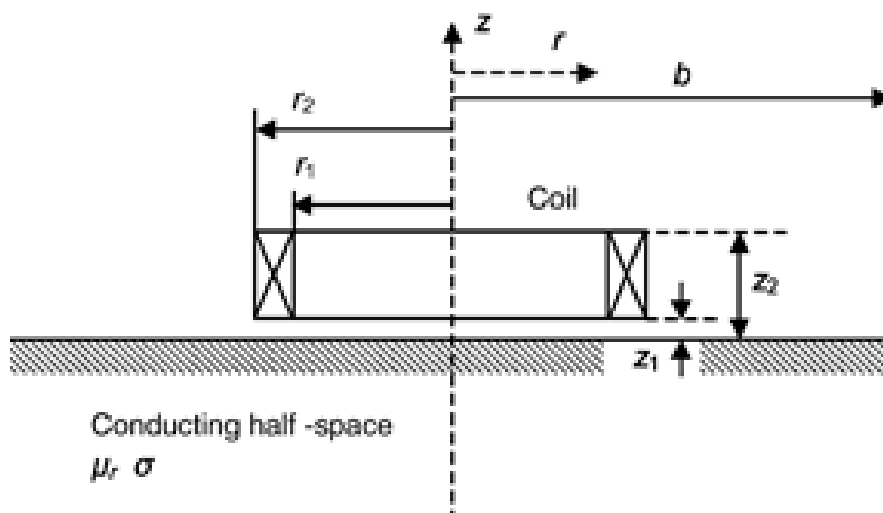
Σχήμα 9 - Μεταβολή της κανονικοποιημένης σύνθετης αντίστασης (αντίσταση και επαγωγική αντίδραση) σε ένα εύρος συχνοτήτων με το πηνίο επί του αγωγίμου δοκιμίου [1].

Συμπεραίνουμε πως η χρήση της θεωρίας είναι απαραίτητη για την προσαρμογή των θεωρητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων, ώστε να υπολογιστούν οι ακριβείς τιμές. Η παρουσιασθείσα θεωρία για τη σύνθετη αντίσταση πηνίου περιορίζεται στην περίπτωση κυκλικών πηνίων κλασσικού τύπου. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται άλλες σχεδιάσεις (π.χ. ορθογωνικά πηνία) είναι απαραίτητη η χρήση/ανάπτυξη θεωρητικών μοντέλων και για αυτές τις περιπτώσεις (Theodoulidis and Kriezis, 2006).

1.5 Ανάπτυξη του μοντέλου Dodd and Deeds σε σειρές

Τα καθιερωμένα μοντέλα **Dodd and Deeds** που χρησιμοποιούνται ευρέως στη μέθοδο των δινορρευμάτων για το ΜΚΕ και αναλύθηκαν παραπάνω, έχουν αναδιατυπωθεί από τους Θεοδουλίδη - Κριεζή. Συγκεκριμένα, οι ολοκληρωτικές εκφράσεις για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και τη σύνθετη αντίσταση, αντικαθίστανται από ανάπτυξη σε σειρά. Έτσι, ο χρόνος υπολογισμού μειώνεται σημαντικά, η σύγκλιση κι η ακρίβεια ελέγχεται καλύτερα και η εφαρμογή τους στον ηλεκτρονικό υπολογιστή απλοποιείται.

Οι σειρές αυτές χρησιμοποιούνται από το λογισμικό (TEDDY) που αναπτύσσεται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η ανάλυση γίνεται για μία αξονοσυμμετρική γεωμετρία, μεγάλης σημαντικότητας για τους ΜΚΕ: **κυλινδρικό πηνίο ορθογωνικής διατομής, πάνω από αγώγιμη ημιάπειρη πλάκα** (Σχήμα 10).



Σχήμα 10 - Πηνίο πάνω από αγώγιμη ημιάπειρη πλάκα [4]

Το πηνίο έχει **αγωγιμότητα σ** και **σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ** . Ένα βασικό χαρακτηριστικό της ανάλυσης **Dodd and Deeds**, είναι ότι σε τυπικές συχνότητες δινορρευμάτων, ένα πολυστροφικό πηνίο περιελιγμένο με μονωμένο σύρμα, προσεγγίζεται με ένα μεταλικό φύλλο και το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο λαμβάνεται από την υπέρθεση. Η

σύνθετη αντίσταση του πηνίου υπολογίζεται από την ακόλουθη έκφραση, η οποία εμπεριέχει την περίπτωση της αξονικής συμμετρίας:

$$Z = \frac{j\omega 2\pi}{I} \frac{N}{\text{cross-sectional area}} \iint_{\text{cross-sectional area}} r A_\phi dr dz \quad (15)$$

Όπου,

- ω : η γωνιακή ταχύτητα
- N : ο αριθμός στροφών περιέλιξης
- I : το ρεύμα διέγερσης
- A_ϕ : αξιμουθιακή συνιστώσα του μαγνητικού δυναμικού

Η σύνθετη αντίσταση του πηνίου μπορεί να γραφτεί, ως το άθροισμα της σύνθετης αντίστασης στον αέρα Z_0 και της μεταβολής της σύνθετης αντίστασης ΔZ , που παράγεται από τα δινορρεύματα που προκαλούνται από το αγωγήμο ημι-επίπεδο:

$$Z_0 = \frac{j\omega 2\pi \mu_0 N^2}{(r_2 - r_1)^2 (z_2 - z_1)^2} \int_0^\infty \frac{\text{Int}^2(qr_1, qr_2)}{q^5} \times \left\{ (z_2 - z_1) + \frac{\exp[-q(z_2 - z_1)] - 1}{q} \right\} dq \quad (16)$$

$$\Delta Z = \frac{j\omega 2\pi \mu_0 N^2}{(r_2 - r_1)^2 (z_2 - z_1)^2} \int_0^\infty \text{Int}^2(qr_1, qr_2) \times \frac{[\exp(-qz_1) - \exp(-qz_2)]^2}{q^6} \frac{q\mu_r - p}{q\mu_r + p} dq \quad (17)$$

Όπου,

$$\text{Int}(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} x J_1(x) dx \quad (18)$$

$$p = \sqrt{q^2 + j\omega \mu_r \mu_0 \sigma} \quad (19)$$

ενώ $J_1(x)$ η συνάρτηση Bessel πρώτης τάξης.

Έως τώρα η αντιμετώπιση του προβλήματος έγινε με αναλυτικό τρόπο, θεωρώντας άπειρη την περιοχή λύσης στην ακτινική κατεύθυνση ($b \rightarrow \infty$), όπως φαίνεται στο Σχήμα 10. Για να γίνει ανάπτυξη σε σειρά, θα θεωρηθεί μία πεπερασμένη περιοχή λύσης ($0 \leq r \leq b$), θα γίνει διαχωρισμός των μεταβλητών και επιβολή ομογενούς Dirichlet για μαγνητικό πεδίο στο $r = b$. Η γενική έκφραση για την **αξιμουθιακή συνιστώσα του μαγνητικού δυναμικού** γίνεται:

$$A_\phi(r, z) = \sum_{i=1}^{\infty} J_1(q_i r) [C_i \exp(-p_i z) + D_i \exp(p_i z)] \quad (20)$$

Όπου,

$$p_i = \sqrt{q_i^2 + j\omega \mu_r \mu_0 \sigma} \quad (21)$$

ενώ οι τιμές του q_i μπορούν να υπολογιστούν από την λύση των ιδιοτιμών της εξίσωσης $J_1(x_i) = 0$, με

$$q_i = x_i / b \quad (22)$$

Οι άγνωστοι συντελεστές επέκτασης C_i και D_i υπολογίζονται με την εφαρμογή των συνθηκών διεπιφάνειας, μεταξύ των υποπεριοχών της γεωμετρίας του προβλήματος και χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες ορθογωνικότητας της συνάρτησης Bessel. Αφού έχει υπολογιστεί η αζιμουθιακή συνιστώσα του μαγνητικού δυναμικού, η **σύνθετη αντίσταση** του πηνίου υπολογίζεται και πάλι από τη (15) και οι τελικές εκφράσεις για τα Z_0 και ΔZ έχουν ως εξής:

$$Z_0 = \frac{j\omega 2\pi\mu_0 N^2}{(r_2 - r_1)^2 (z_2 - z_1)^2} \sum_{i=1}^{\infty} \text{Int}^2(q_i r_1, q_i r_2) \times \frac{2[q_i(z_2 - z_1) - 1 + \exp[q_i(z_1 - z_2)]]}{[(q_i b)J_0(q_i b)]^2 q_i^5} \quad (23)$$

$$\Delta Z = \frac{j\omega 2\pi\mu_0 N^2}{(r_2 - r_1)^2 (z_2 - z_1)^2} \sum_{i=1}^{\infty} \text{Int}^2(q_i r_1, q_i r_2) \times \frac{[\exp(-q_i z_1) - \exp(-q_i z_2)]^2 q_i \mu_r - p_i}{[(q_i b)J_0(q_i b)]^2 q_i^5} \frac{q_i \mu_r - p_i}{q_i \mu_r + p_i} \quad (24)$$

Το πλεονέκτημα των (23), (24), έναντι των (16), (17), είναι ότι χρειάζεται να επιλεγεί μόνο το b (Σχήμα 10). Έτσι, ο πιο απαιτητικός όρος που πρέπει να υπολογιστεί είναι το ολοκλήρωμα $\text{Int}(x_1, x_2)$. Σε μια παραμετρική μελέτη με συγκεκριμένο πηνίο για παράδειγμα, ο όρος αυτός μπορεί να υπολογιστεί γνωρίζοντας μόνο από τα r_1 και r_2 . Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλος αριθμός τιμών της σύνθετης αντίστασης, που δημιουργούνται π.χ. από διαφορετικές συχνότητες.

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 [4].

2. Ανάπτυξη λογισμικού για υπολογισμούς σύνθετης αντίστασης

Όπως προαναφέρθηκε κατά τη διπλωματική αυτή εργασία αναπτύχθηκε το λογισμικό **TEDDY**, για την πραγματοποίηση υπολογισμών που αφορούν τη σύνθετη αντίσταση πηνίων. Η εφαρμογή προσφέρει ένα σύγχρονο περιβάλλον χρήσης, είναι συμβατή με όλα τα νέα – αλλά και τα παλιότερα – συστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών, ενώ η λειτουργία του είναι φιλική προς το χρήστη.

Η ανάπτυξη της εφαρμογής έγινε με χρησιμοποιώντας το λογισμικό **MatLab®**, της MathWorks™, και διατίθεται δωρεάν για χρήση στην επιστημονική κοινότητα. Για να τρέξει η εφαρμογή απαραίτητη είναι η ύπαρξη του εν λόγω λογισμικού (MatLab®), καθώς δεν έχει δημιουργηθεί για την ώρα αυτόνομη έκδοση. Το TEDDY V2 αποτελεί μια εφαρμογή ανοιχτού κώδικα κι έτσι μπορεί ο καθένας να την προσαρμόσει ανάλογα με τις ανάγκες του, επεκτείνοντας τις δυνατότητες της.

Η επιλογή του MatLab® για την ανάπτυξη της εφαρμογής εκτός των παραπάνω, 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.

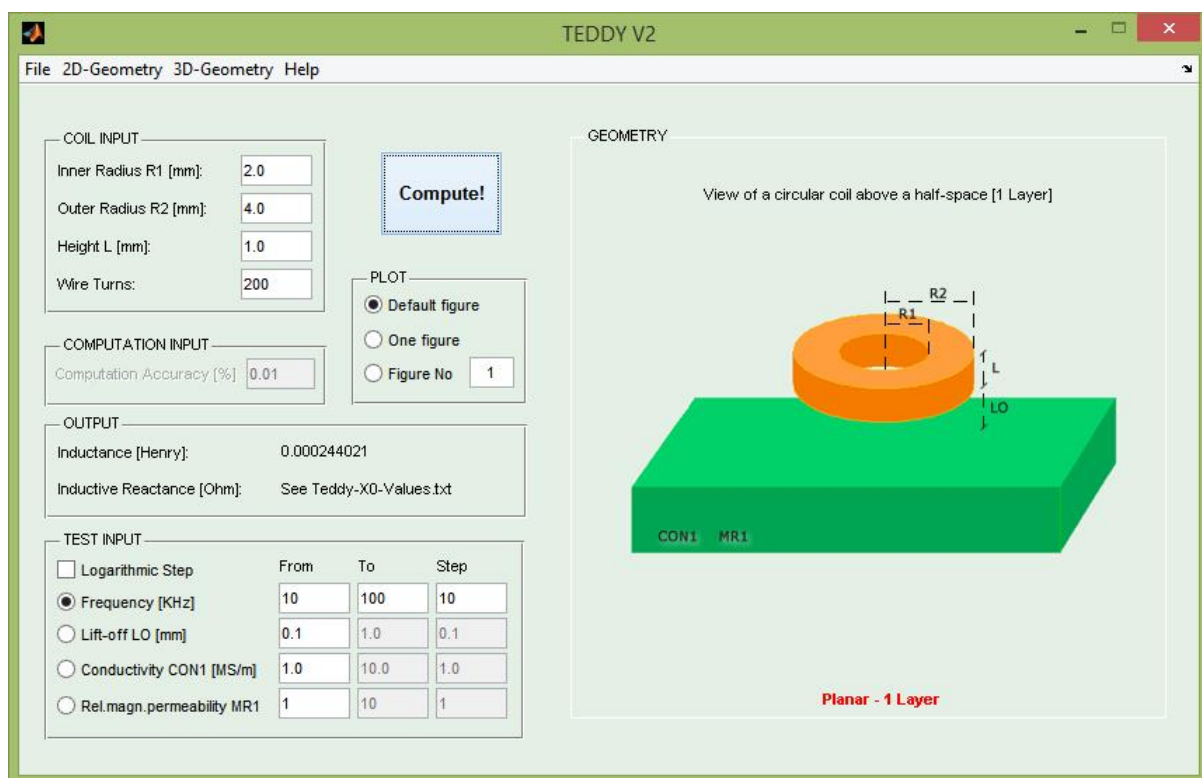
Η εφαρμογή TEDDY V2 υποστηρίζει την ανάλυση των χαρακτηριστικών της σύνθετης αντίστασης ενός πηνίου, πάνω από μία και δύο επίπεδες πλάκες. Έχει γίνει επίσης η διαμόρφωση για την υποστήριξη και άλλων τύπων γεωμετρίας, όπως για παράδειγμα πηνίο γύρω από πολύ-επίπεδη κυλινδρική ή σφαιρική δομή, όμως δεν έγινε η ανάπτυξή τους καθώς ξέφευγε από τα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Οι υπολογισμοί που πραγματοποιεί η εφαρμογή, ακολουθούν το θεωρητικό υπόβαθρο που αναλύθηκε παραπάνω. Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται η αναδιατύπωση σε σειρές (των Θεοδουλίδη – Κριεζή) του προτύπου **Dodd and Deeds**, όπως περιγράφεται στην **παράγραφο 1.5** του παρόντος δοκιμίου, διασφαλίζοντας έτσι την εξαιρετική ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Στο **Παράρτημα Α'** υπάρχουν οι βασικές ρουτίνες σε κώδικα MatLab®, που χρησιμοποιήθηκαν για την διενέργεια των υπολογισμών βάση των παραπάνω συναρτήσεων.

2.1 Παρουσίαση της εφαρμογής TEDDY V2

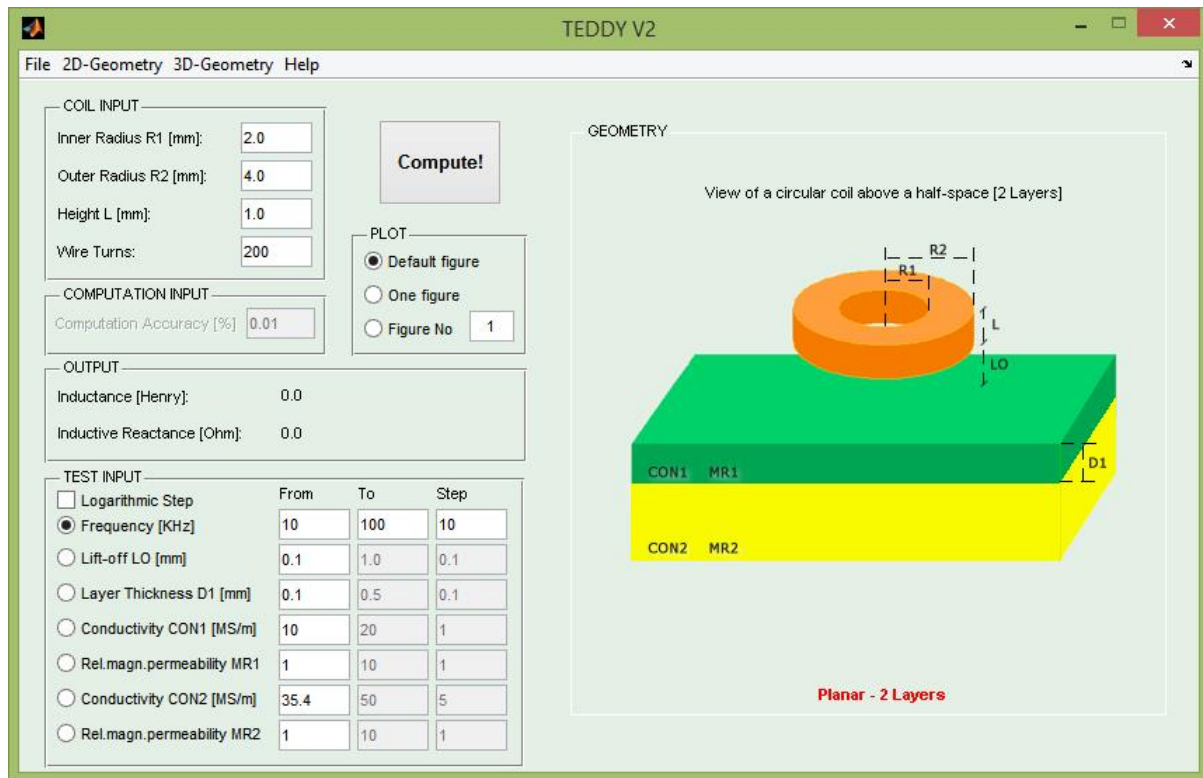
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η εφαρμογή TEDDY V2 που αναπτύχθηκε, καθώς και οι οδηγίες χρήσης της.

Η κεντρική κονσόλα της εφαρμογής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Στο αριστερό τμήμα της, υπάρχουν οι παράμετροι τις οποίες εισάγει ο χρήστης ανάλογα με τις ανάγκες του, ενώ στο δεξιό τμήμα φαίνεται η γεωμετρία που αναλύεται με τις χαρακτηριστικές της παραμέτρους. Πατώντας το κουμπί “Compute!” γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί και προβάλλονται τα αντίστοιχα διαγράμματα. Παράλληλα, στο πάνω μέρος υπάρχει το κεντρικό μενού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε κυλινδρικό πηνίο πάνω από επίπεδη αγωγίμη πλάκα.



Σχήμα 11 – Κονσόλα TEDDY V2 για πηνίο πάνω από επίπεδη πλάκα

Στην περίπτωση πηνίου πάνω από δύο επίπεδες αγωγίμες πλάκες, η κονσόλα του προγράμματος έχει την ίδια διάταξη, με την ακόλουθη μορφή:



Σχήμα 12 – Κοσόλα TEDDY V2 για πηνίο πάνω από δύο επίπεδες πλάκες

Κάνοντας μια λεπτομερέστερη επισκόπηση των επιλογών του προγράμματος, βλέπουμε στο Σχήμα 13, τη διάταξη εισαγωγής των παραμέτρων του πηνίου (**Coil Input**). Αναλυτικά έχουμε τις εξής επιλογές:

- R1 : η εσωτερική ακτίνα του πηνίου σε mm
- R2 : η εξωτερική ακτίνα του πηνίου σε mm
- L : το ύψος του πηνίου σε mm
- Wire Turns : ο αριθμός των στροφών του περιελιγμένου σύρματος του πηνίου

Το **Computation Input** είναι ανενεργό στην παρούσα έκδοση του TEDDY, καθώς η ακρίβεια των υπολογισμών είναι προκαθορισμένη, ενώ στο πεδίο **Output** εμφανίζονται τα αποτελέσματα της **αυτεπαγωγής** και της **επαγωγικής αντίδρασης** που υπολογίστηκαν. Η δεύτερη αποτελεί και τον **παράγοντα κανονικοποίησης** για τους υπολογισμούς μας. Σε περίπτωση μεταβλητής συχνότητας, μεταβάλλεται και η επαγωγική αντίδραση, η προβολή της οποίας γίνεται σε πίνακα που αποθηκεύεται σε αρχείο txt.

The image shows the TEDDY V2 software interface with the following sections:

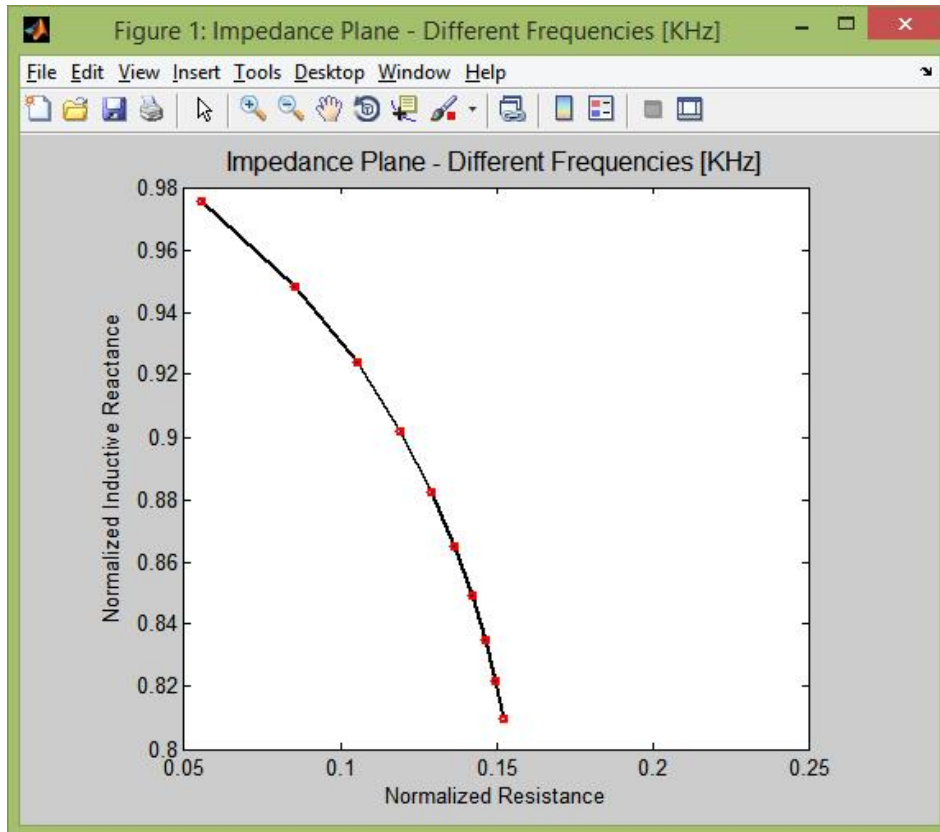
- COIL INPUT:**
 - Inner Radius R1 [mm]: 2.0
 - Outer Radius R2 [mm]: 4.0
 - Height L [mm]: 1.0
 - Wire Turns: 200
- COMPUTATION INPUT:**
 - Computation Accuracy [%]: 0.01
- OUTPUT:**
 - Inductance [Henry]: 0.0
 - Inductive Reactance [Ohm]: 0.0
- PLOT:**
 - Default figure
 - One figure
 - Figure No: 1
- Buttons:** A large "Compute!" button is located to the right of the input fields.

Σχήμα 13 – Κονσόλα TEDDY V2: Εισαγωγή παραμέτρων πηνίου, επιλογή διαγράμματος και προβολή αποτελεσμάτων αυτεπαγωγής και επαγωγικής αντίδρασης.

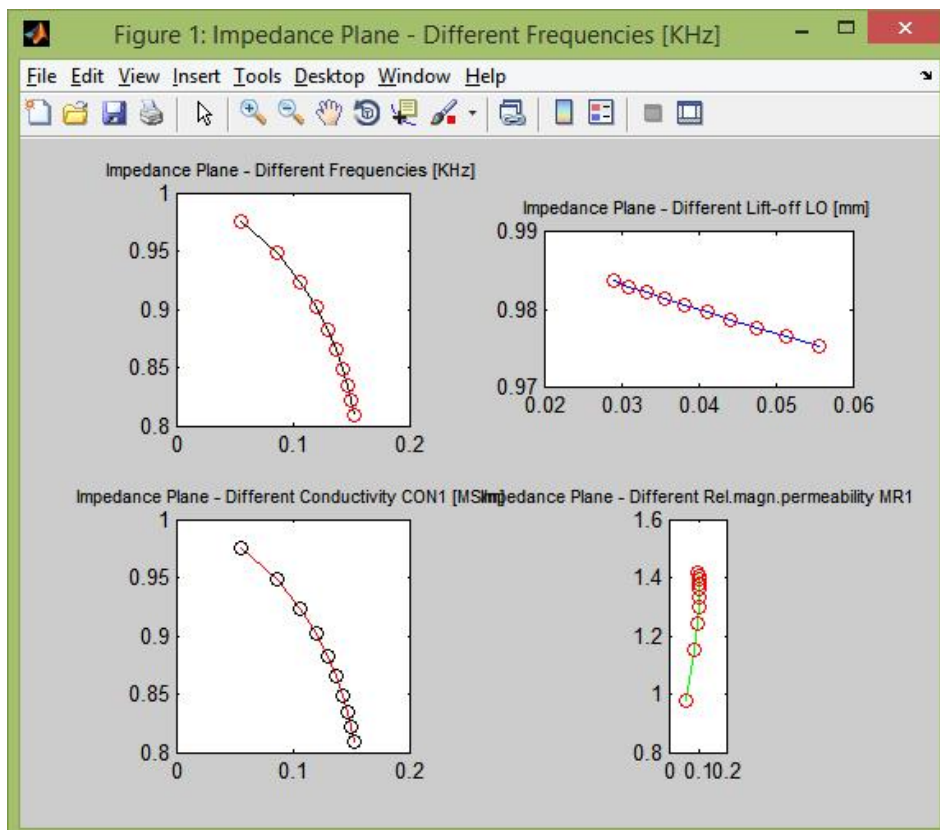
Στο πεδίο **Plot** (Σχήμα 13) γίνεται η επιλογή προβολής των διαγραμμάτων. Υπάρχουν οι εξής επιλογές:

- **Default figure** : Το κάθε διάγραμμα εμφανίζεται σε νέο παράθυρο (Σχήμα 14)
- **One figure** : Όλα τα διαγράμματα εμφανίζονται στο ίδιο παράθυρο (Σχήμα 15)
- **Figure No** : Το κάθε διάγραμμα εμφανίζεται στο παράθυρο που επιλέγει ο χρήστης

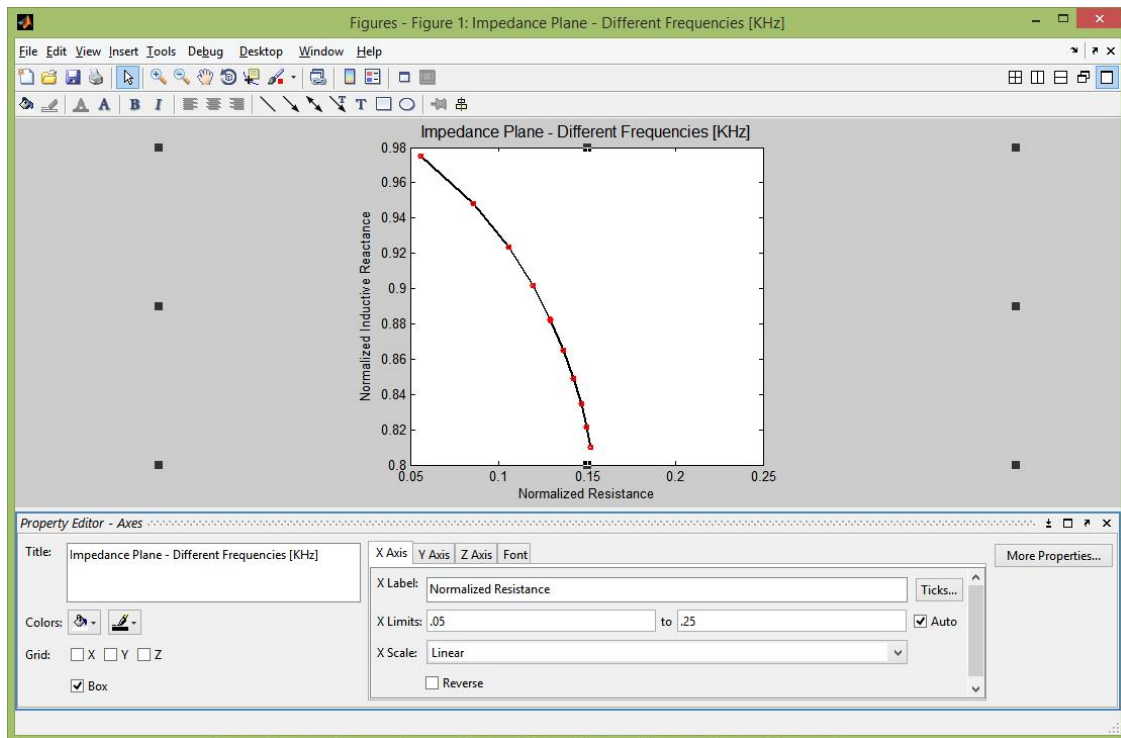
Στο πάνω μέρος του παραθύρου, όπου εμφανίζεται το **διάγραμμα** (Σχήμα 14), υπάρχουν τα όλα εργαλεία χειρισμού και τροποποίησης του διαγράμματος, όπως αλλαγή χρώματος, ζουμ, περιστροφή, τροποποίηση των αξόνων, αποθήκευση, εξαγωγή σε αρχείο εικόνας, εκτύπωση και άλλα πολλά. Ακόμα περισσότερες επιλογές εμφανίζονται στο πλήρες παράθυρο γραφήματος (Σχήμα 14), επιλέγοντας από το μενού **Edit** κάποιο από τα **Properties**, όπως **Axies Properties** όπου μπορεί ο χρήστης να αλλάξει την κλίμακα των αξόνων και να τροποποιήσει τις γραμμές τους. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να έχει τον πλήρη έλεγχο των γραφημάτων που παράγονται.



Σχήμα 14 – Παράθυρο διαγράμματος



Σχήμα 15 – Πολλά διαγράμματα σε ένα παράθυρο



Σχήμα 16 –Πλήρες παράθυρο επεξεργασίας διαγράμματος

Η επιλογή των παραμέτρων για την προσομοίωση των χαρακτηριστικών, γίνεται στο πεδίο **Test Input** και φαίνονται στο Σχήμα 17. Αναλυτικά έχουμε:

- Frequency : η συχνότητα σε KHz
- Lift-off LO : η απόσταση του πηνίου από την πλάκα σε mm
- Layer Thickness D1 : το πάχος της πρώτης πλάκας (σε περίπτωση δύο πλακών) σε mm
- Conductivity CON1 : η αγωγιμότητα της πρώτης πλάκας σε MS/m
- Rel. magn. permeability MR1 : η σχετική μαγνητική διαπερατότητα της πρώτης πλάκας
- Conductivity CON2 : η αγωγιμότητα της δεύτερης πλάκας σε MS/m
- Rel. magn. permeability MR2 : η σχετική μαγνητική διαπερατότητα της δεύτερης πλάκας

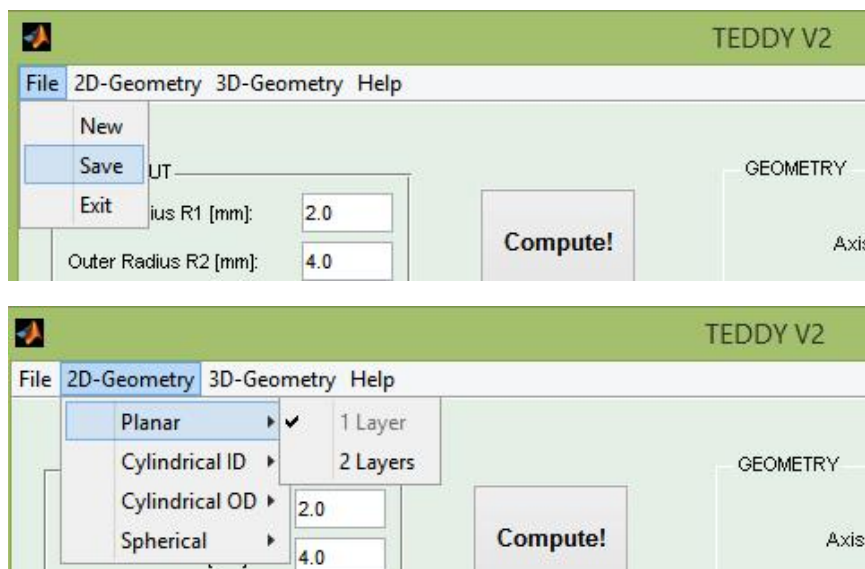
Η λειτουργία των επιλογών αυτών έχει ως εξής:

Στο πεδίο **“From”** μπαίνουν οι αρχικές τιμές των παραμέτρων, ενώ στο **“To”** οι τελικές. Το **“Step”** αποτελεί το βήμα για τη μετάβαση από την αρχική στην τελική τιμή, βάση του οποίου υπολογίζονται και τα σημεία στα διαγράμματα. Στην περίπτωση επιλογής του **Logarithmic Step**, ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών γίνεται λογαριθμικός, ενώ το Step μετατρέπεται σε **Step No** και αποτελεί τον αριθμό των σημείων που θέλουμε να πάρουμε. Οι δοκιμές διεξάγονται για το εύρος των τιμών της επιλεγμένης παραμέτρου, ενώ για τις υπόλοιπες λαμβάνεται μόνο η αρχική τιμή.

TEST INPUT			
	From	To	Step
<input type="checkbox"/> Logarithmic Step			
<input checked="" type="radio"/> Frequency [KHz]	10	100	10
<input type="radio"/> Lift-off LO [mm]	0.1	1.0	0.1
<input type="radio"/> Layer Thickness D1 [mm]	0.1	0.5	0.1
<input type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	10	20	1
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	1	10	1
<input type="radio"/> Conductivity CON2 [MS/m]	35.4	50	5
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR2	1	10	1

Σχήμα 17 – Κονσόλα TEDDY V2: Εισαγωγή παραμέτρων δοκιμών

Από το **κεντρικό μενού** (Σχήμα 18) ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τη γεωμετρία που επιθυμεί (στην παρούσα έκδοση είναι ενεργές μόνο οι περιπτώσεις μίας και δύο επίπεδων πλακών), την αποθήκευση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων σε αρχείο txt, το εκ νέου άνοιγμα της εφαρμογής, την έξοδο ή την προβολή βοήθειας.



Σχήμα 18 – Κονσόλα TEDDY V2: Μενού

Σημειώσεις

- Οι αριθμοί που εισάγονται στις διάφορες παραμέτρους, πρέπει να είναι **θετικοί**.
- Το σημείο υποδιαστολής είναι η **τελεία**.
- Σε περίπτωση που το βήμα είναι μηδενικό, ή πραγματοποιείται μία μόνο επανάληψη, λαμβάνεται στο διάγραμμα ένα μόνο σημείο.

- Το TEDDY δεν ελέγχει την ορθότητα των στοιχείων που εισήχθησαν. Ο χρήστης είναι υπεύθυνος για τη σωστή συμπλήρωση των πεδίων τιμών.
- **Τα διαγράμματα προβάλλουν την κανονικοποιημένη αντίσταση συναρτήσει της κανονικοποιημένης επαγωγικής αντίδρασης.** Αυτός είναι ο αποδεκτός τρόπος παρουσίασης της μεθόδου των δινορρευμάτων σε ΜΚΕ. Ο παράγοντας κανονικοποίησης είναι η επαγωγική αντίδραση του πηνίου σε ελεύθερο χώρο.

2.2 Δοκιμή και αποτελέσματα

Δοκιμάζοντας τη λειτουργία του TEDDY V2, τρέχουμε το πρόγραμμα για πηνίο πάνω από μία επίπεδη πλάκα, με τις παρακάτω τιμές:

R1 = 2.0
 R2 = 4.0
 L = 1.0
 Wire Turns = 200.0
 Frequency [Hz] = 10.0
 Lift-off [mm] = 0.1
 Conductivity [MS/m] = 1.0
 Rel.magn.permeability = 1.0

Τα αποτελέσματα που μας δίνονται στο Output για σταθερή συχνότητα είναι τα εξής:

Inductance = 0.000244021
 Inductive Reactance = 15.332320616

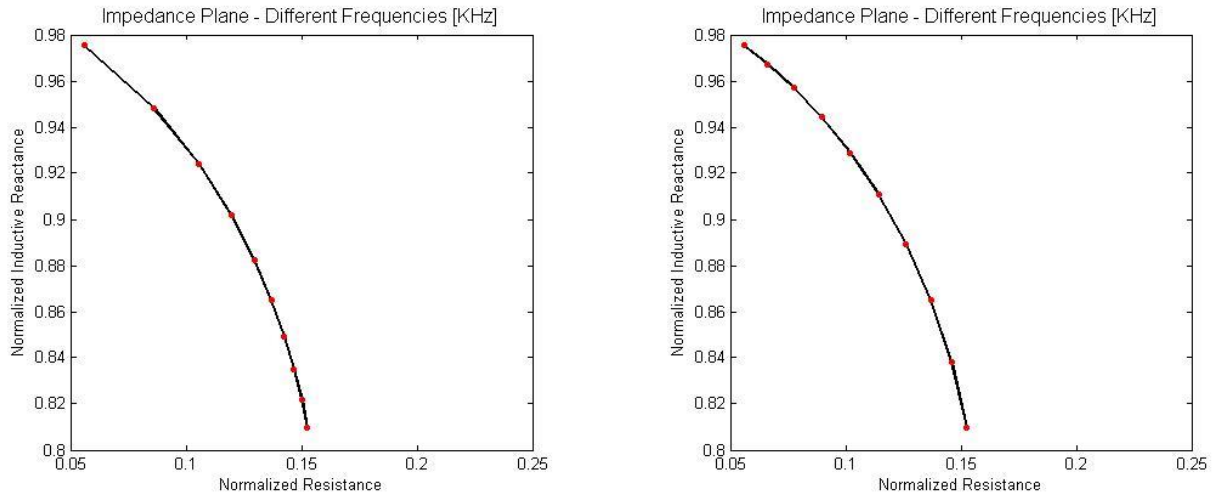
Αποθηκεύοντας τα αποτελέσματα για μεταβολή του Lift-off από 0.1 σε 1.0 με βήμα 0.1, παίρνουμε τους εξής πίνακες τιμών από το αρχείο Teddy-Values.txt που δημιουργήθηκε:

Impedance = Real-part-Z0 Imag-part-Z0 = 0.000000 15.332321

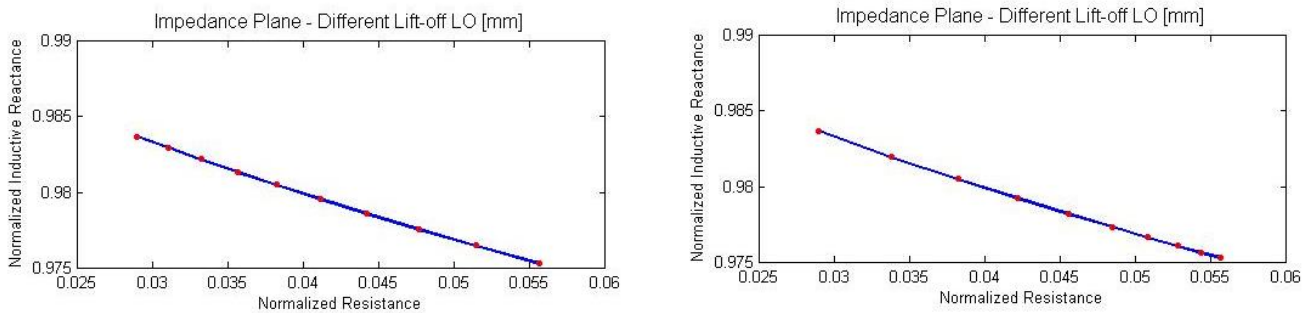
LO [m]	DR	DX	Rn	Xn
0.000100	0.852208	-0.378634	0.055582	0.975305
0.000200	0.788487	-0.360610	0.051426	0.976480
0.000300	0.730637	-0.343707	0.047653	0.977583
0.000400	0.678010	-0.327836	0.044221	0.978618
0.000500	0.630045	-0.312922	0.041093	0.979591
0.000600	0.586251	-0.298891	0.038236	0.980506
0.000700	0.546196	-0.285678	0.035624	0.981368
0.000800	0.509504	-0.273226	0.033231	0.982180
0.000900	0.475840	-0.261479	0.031035	0.982946
0.001000	0.444909	-0.250388	0.029018	0.983669

Αντίστοιχοι πίνακες δημιουργούνται και για τις μεταβολές των υπόλοιπων παραμέτρων.

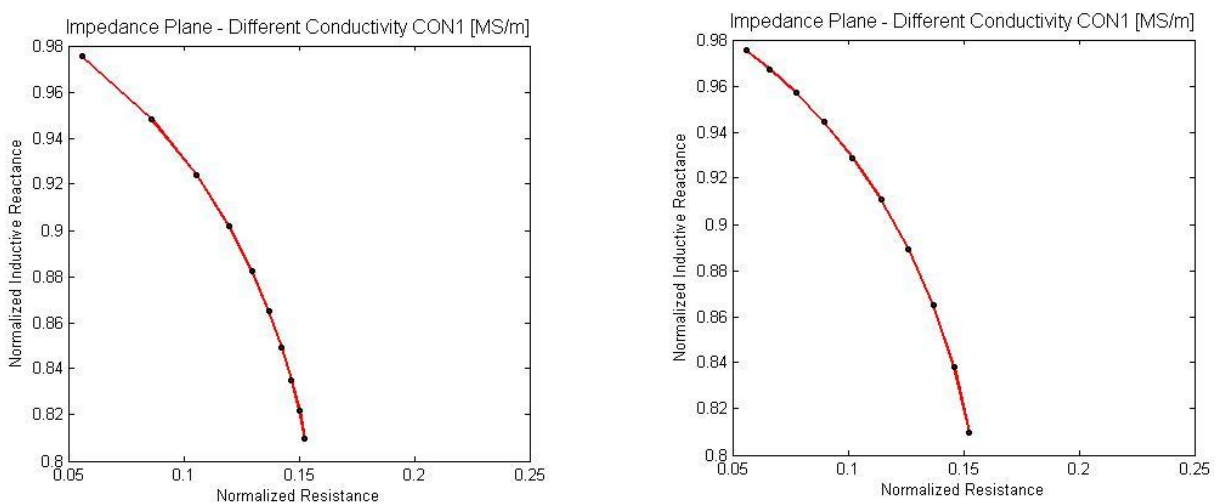
Ακολουθούν τα διαγράμματα που παρήχθησαν έχοντας γραμμικό και λογαριθμικό βήμα για κάθε παράμετρο (αριστερά και δεξιά αντίστοιχα). Διακρίνονται τα σημεία που επισημαίνονται για καθεμιά από τις δύο περιπτώσεις. Διαπιστώνουμε ότι η λογαριθμική κατανομή των σημείων είναι καλύτερη, καθώς έχει μεγαλύτερη και πιο ομοιόμορφη διασπορά.



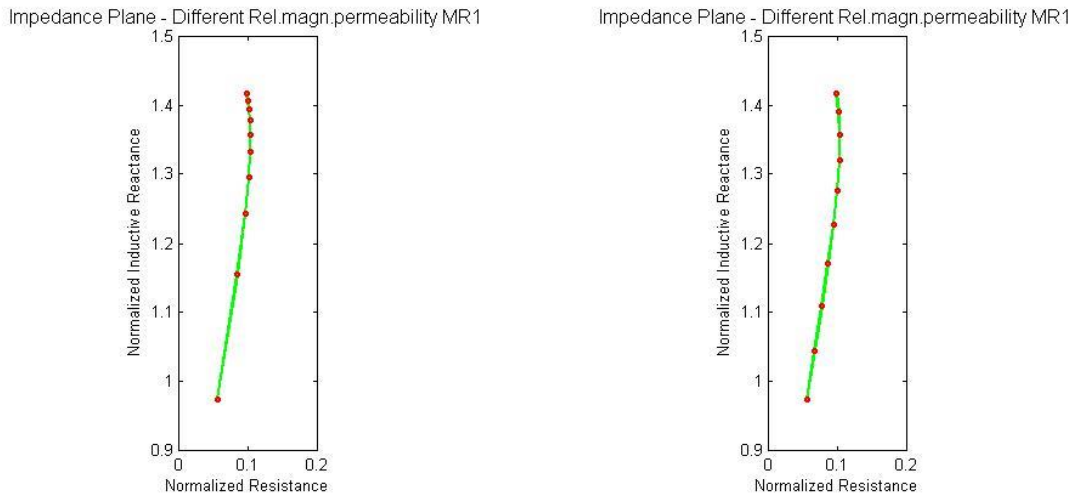
Σχήμα 19 – Μεταβολή της συχνότητας



Σχήμα 20 – Μεταβολή του Lift-off



Σχήμα 21 – Μεταβολή της αγωγιμότητας



Σχήμα 22 - Μεταβολή της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας

Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία για πηνίο πάνω από δύο επίπεδες πλάκες. Διατηρούμε τα ίδια χαρακτηριστικά πηνίου κι έτσι η αυτεπαγωγή του παραμένει ίδια με πριν. Οι επιπλέον παράμετροι που έχουμε τώρα είναι το πάχος της πρώτης πλάκας, η αγωγιμότητα και σχετική μαγνητική διαπερατότητα της δεύτερης πλάκας. Έχουμε λοιπόν:

Layer Thickness [mm] = 0.1
 Conductivity [MS/m] = 10.0
 Rel.magn.permeability = 1.0
 Conductivity 2 [MS/m] = 35.40
 Rel.magn.permeability 2 = 1.0

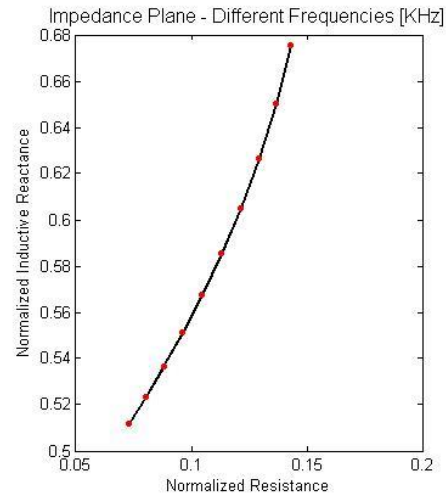
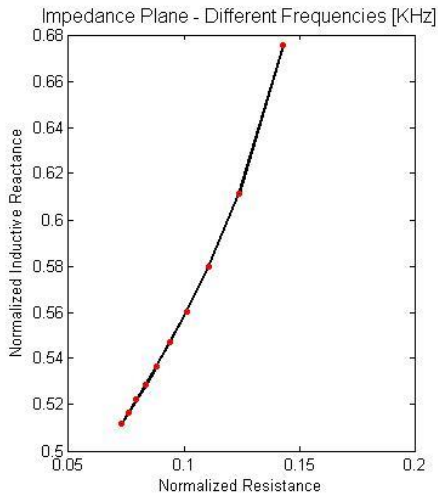
Αποθηκεύουμε και πάλι τα αποτελέσματα για την ίδια μεταβολή του Lift-off και παίρνουμε τους εξής πίνακες τιμών από το αρχείο Teddy-Values.txt που δημιουργήθηκε:

Inductive Reactance = 15.332320616

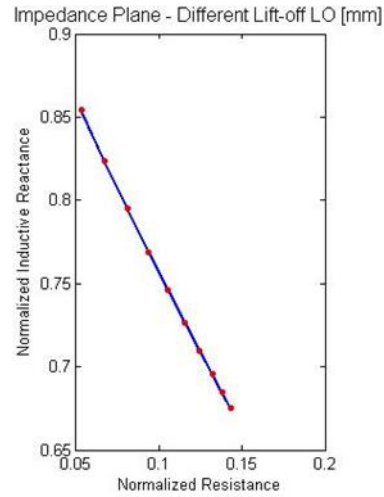
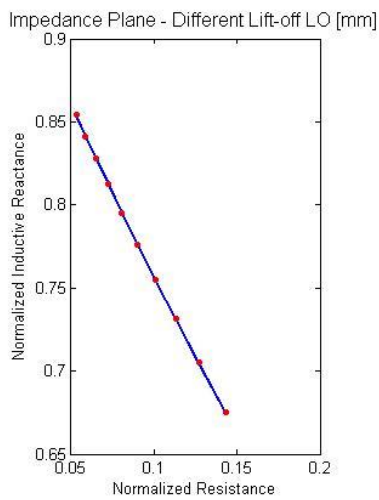
Impedance = Real-part-Z0 Imag-part-Z0 = 0.000000 15.332321

LO [m]	DR	DX	Rn	Xn
0.000100	2.191555	-4.974722	0.142937	0.675540
0.000200	1.945587	-4.520710	0.126894	0.705152
0.000300	1.731774	-4.115873	0.112949	0.731556
0.000400	1.545208	-3.754083	0.100781	0.755152
0.000500	1.381865	-3.430085	0.090128	0.776284
0.000600	1.238420	-3.139354	0.080772	0.795246
0.000700	1.112098	-2.877982	0.072533	0.812293
0.000800	1.000574	-2.642578	0.065259	0.827647
0.000900	0.901882	-2.430191	0.058822	0.841499
0.001000	0.814355	-2.238249	0.053114	0.854018

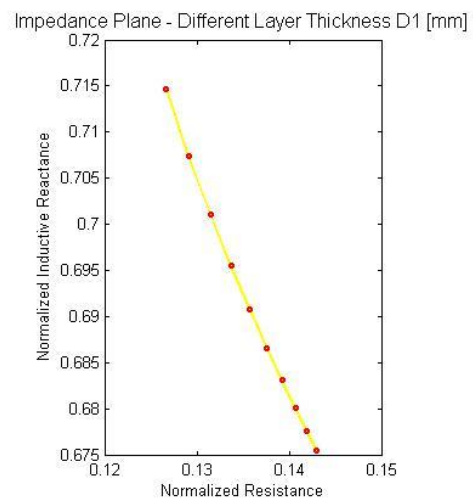
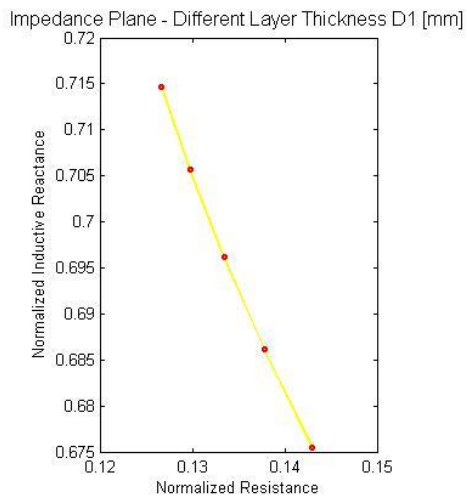
Αντίστοιχοι πίνακες δημιουργούνται και για τις μεταβολές των υπόλοιπων παραμέτρων. Ακολουθούν, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, τα διαγράμματα που παρήχθησαν έχοντας γραμμικό και λογαριθμικό βήμα για κάθε παράμετρο (αριστερά και δεξιά αντίστοιχα).



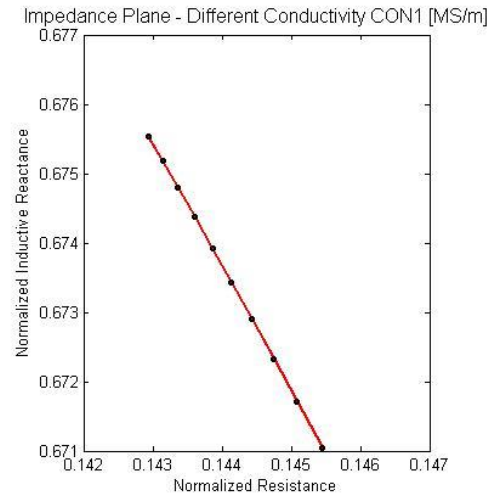
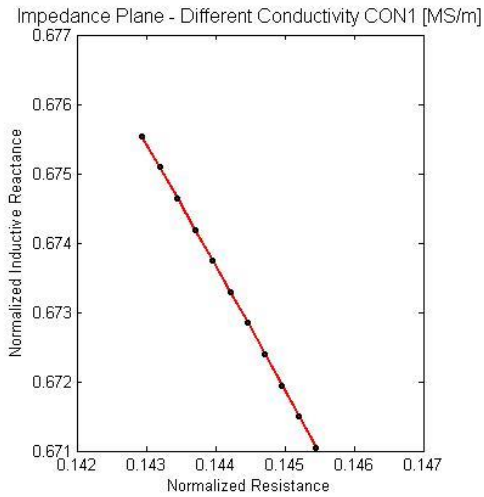
Σχήμα 23 - Μεταβολή της συχνότητας



Σχήμα 24 - Μεταβολή του Lift-off

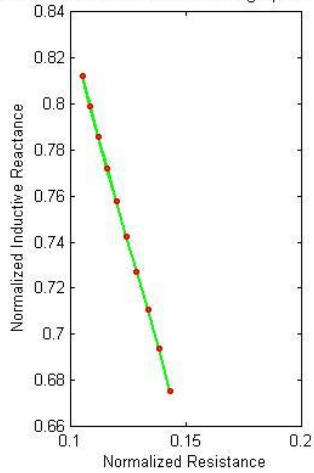


Σχήμα 25 - Μεταβολή του πάχους της πρώτης πλάκας

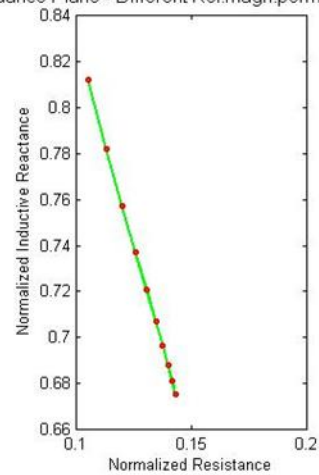


Σχήμα 26 - Μεταβολή της αγωγιμότητας της 1ης πλάκας

Impedance Plane - Different Rel.magn.permeability MR1

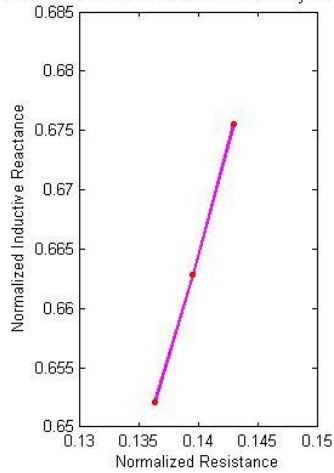


Impedance Plane - Different Rel.magn.permeability MR1

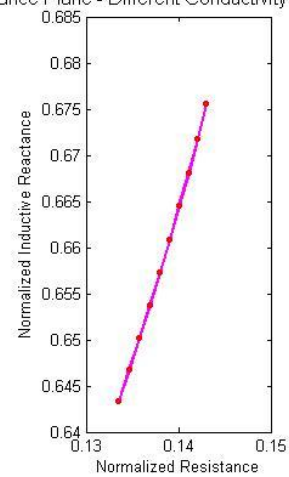


Σχήμα 27 - Μεταβολή της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας της 1ης πλάκας

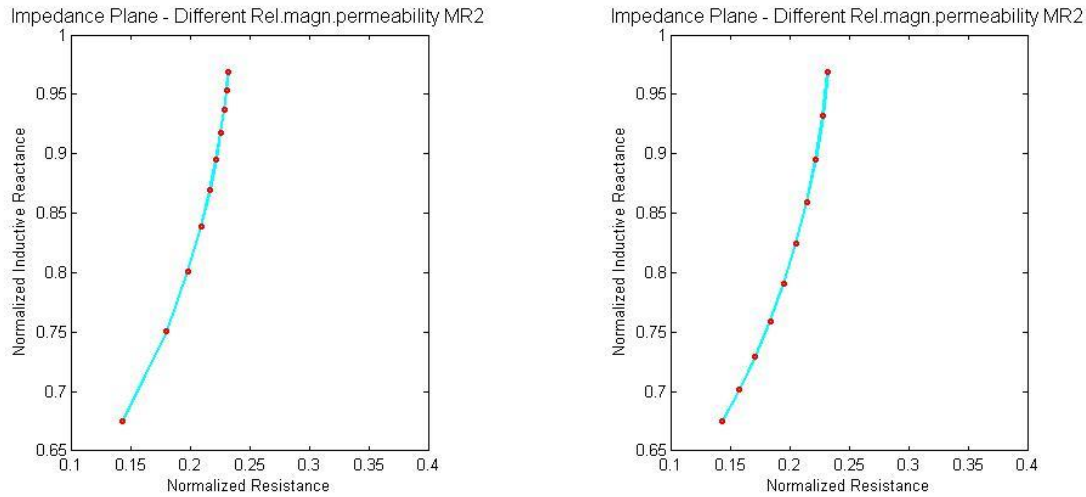
Impedance Plane - Different Conductivity CON2 [MS/m]



Impedance Plane - Different Conductivity CON2 [MS/m]



Σχήμα 28 - Μεταβολή της αγωγιμότητας της 2ης πλάκας



Σχήμα 29 - Μεταβολή της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας της 2ης πλάκας

Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα και διαγράμματα, διαπιστώνουμε πως η παρουσία δεύτερης επίπεδης πλάκας επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την κανονικοποιημένη σύνθετη αντίσταση. Επίσης, το πάχος της πρώτης πλάκας έχει αρκετή επιρροή, ενώ η συχνότητα έχει τη μεγαλύτερη επίδραση, καθώς μεταβάλλει και τον ίδιο τον παράγοντα κανονικοποίησης.

Συμπερασματικά, το TEDDY μπορεί να βοηθήσει στη γρήγορη επίλυση προσομοιώσεων και να δώσει χρήσιμες πληροφορίες, που μπορούν να αξιοποιηθούν κατά τους μη καταστροφικούς ελέγχους.

2.3 Σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις

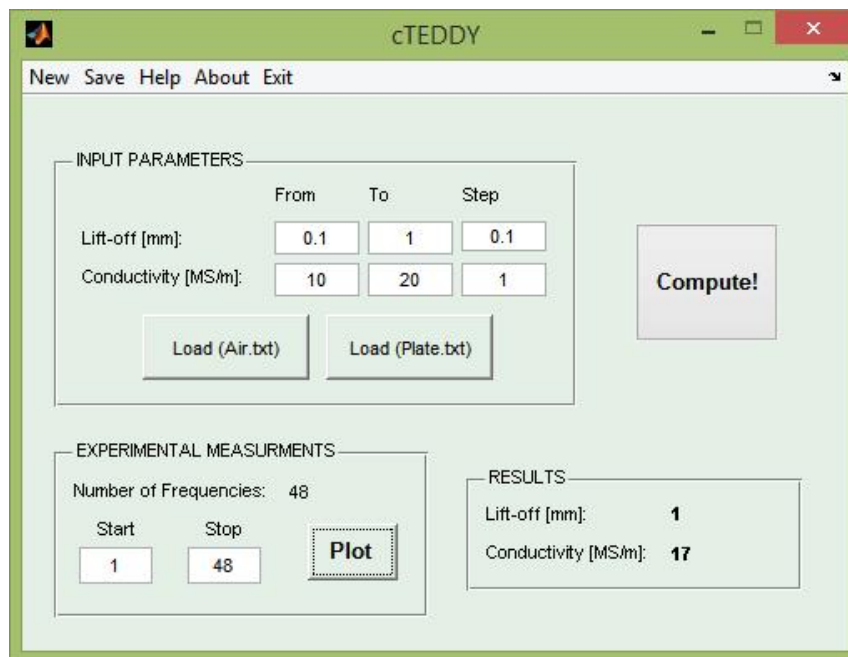
Για την εξακρίβωση της ορθότητας των αποτελεσμάτων του προγράμματος TEDDY V2, διενεργήθηκαν πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο ηλεκτρομηχανολογικών εφαρμογών, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Παράλληλα έγινε η ανάπτυξη της εφαρμογής **cTEDDY** για τη διευκόλυνση της σύγκρισης των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα θεωρητικά αποτελέσματα της εφαρμογής **TEDDY**.

Οι ενέργειες αυτές έγιναν με τη βοήθεια του κ. Ιωάννη Μαρτίνου.

Οι μετρήσεις έγιναν σε κυλινδρικό πηνίο, το οποίο βρισκόταν είτε στον αέρα, είτε πάνω σε επίπεδη πλάκα. Χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός του εργαστηρίου και συγκεκριμένα το όργανο *Impedance Analyzer 4294A*, με διαφορετικές τιμές συχνοτήτων. Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύτηκαν σε δύο αρχεία txt, ένα για κάθε περίπτωση (*αέρας/πλάκα*).

Η εφαρμογή **cTEDDY** (Σχήμα 30) αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού MatLab®, όπως και η αρχική μας εφαρμογή. Χρησιμοποιείται το ίδιο υπολογιστικό υπόβαθρο, δηλαδή η αναδιατύπωση σειρών του προτύπου **Dodd and Deeds**.

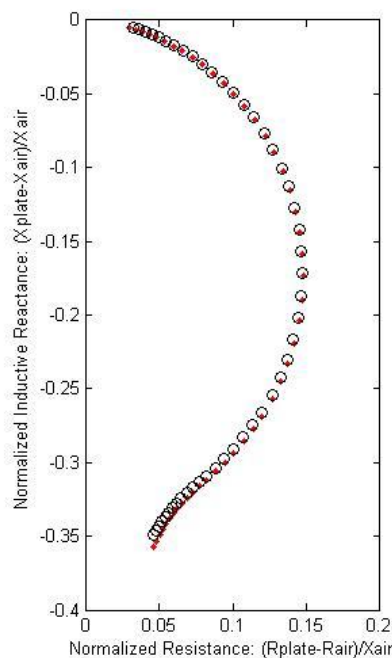


Σχήμα 30 – Κονσόλα εφαρμογής cTEDDY

Κατά την εκτέλεση της εφαρμογής εισάγουμε από το περιβάλλον εργασίας της, τα δύο αρχεία που δημιουργήσαμε κατά τις πειραματικές μετρήσεις. Στη συνέχεια ορίζουμε την απόσταση του πηνίου από την πλάκα (*Lift-off*) και την αγωγιμότητα (*Conductivity*) της πλάκας, καθώς και το βήμα με το οποίο μεταβάλλονται. Η εφαρμογή μας εμφανίζει την απόσταση από την πλάκα και την αγωγιμότητα, όπου έχουμε καλύτερη σύγκλιση με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Έτσι, μπορούμε να επικεντρώσουμε τους υπολογισμούς μας σε αυτή την περιοχή τιμών, βελτιώνοντας την ακρίβεια των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων μας.

Εκτελούμε τους υπολογισμούς και λαμβάνουμε το διάγραμμα σύγκρισης των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων, για την κανονικοποιημένη αντίσταση συναρτήσει της κανονικοποιημένης επαγωγικής αντίδρασης (Σχήμα 31). Στο διάγραμμα απεικονίζεται μόνο η μεταβολή λόγω της πλάκας και όχι η συνολική, γι' αυτό έχουμε αρνητικές τιμές της κανονικοποιημένης επαγωγικής αντίδρασης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 31, όπου τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων απεικονίζονται με κόκκινη τελεία, ενώ τα θεωρητικά με μαύρο κύκλο, υπάρχει πλήρης ταύτιση, με μια πολύ μικρή απόκλιση στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων. Πράγμα λογικό, καθώς η μέθοδος των δινορρευμάτων, όπως έχουμε προαναφέρει, αφορά κυρίως τη μεσαία κλίμακα συχνοτήτων.



Σχήμα 31 - Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν την ακρίβεια των υπολογισμών που διενεργεί η εφαρμογή μας. Έτσι, τα θεωρητικά αποτελέσματα της εφαρμογής **TEDDY** κρίνονται **ακριβή** και **αξιόπιστα** για εφαρμογή σε εργαστηριακές μελέτες και ΜΚΕ.

Παράρτημα Α' – Κώδικες MatLab

Παρατίθενται τα βασικά σημεία του κώδικα MatLab, τα οποία περιέχουν τις εξισώσεις βάση των οποίων γίνονται οι υπολογισμοί του προγράμματος TEDDY. Οι συναρτήσεις αυτές έχουν δημιουργηθεί, όπως έχει προαναφερθεί από τον κύριο Θεοδουλίδη Θεόδωρο.

```
%DEVELOPED BY GEORGIOS S. KORONIDIS
% Δημιουργία πινάκων

if (get(handles.logarithmic,'Value') ~= get(handles.logarithmic,'Max'))
% Επιλογή μη Λογαριθμικού Βήματος
F=f:f_step:f2;
Lo=lo1:lo_step:lo2;
Con=con1:con_step:con2;
Mr=mr1:mr_step:mr2;
D1=D1_1:D1_step:D1_2;
Con2=con2_1:con2_step:con2_2;
Mr2=mr2_1:mr2_step:mr2_2;
else % Λογαριθμικό Βήμα
Y1 = log10(f);
Y2 = log10(f2);
F=logspace(Y1,Y2,f_step);
Y1 = log10(lo1);
Y2 = log10(lo2);
Lo=logspace(Y1,Y2,lo_step);
Y1 = log10(con1);
Y2 = log10(con2);
Con=logspace(Y1,Y2,con_step);
Y1 = log10(mr1);
Y2 = log10(mr2);
Mr=logspace(Y1,Y2,mr_step);
Y1 = log10(D1_1);
Y2 = log10(D1_2);
D1=logspace(Y1,Y2,D1_step);
Y1 = log10(con2_1);
Y2 = log10(con2_2);
Con2=logspace(Y1,Y2,con2_step);
Y1 = log10(mr2_1);
Y2 = log10(mr2_2);
Mr2=logspace(Y1,Y2,mr2_step);
End

% Τέλος Δημιουργίας πινάκων
```

```

%DEVELOPED BY GEORGIOS S. KORONIDIS
L0=L0_gk(r1,r2,l,wt);

% Για όλες τις τιμές του F
if (get(handles.check_f,'Value') == get(handles.check_f,'Max'))
global X0; X0=(2*pi*f)*L0;
global Z0; Z0=i*X0;
DZ=F*0;
for j=1:1:length(F)
    DZ(j)=DZpr1_gk(r1,r2,l,wt,lo1,con1,mr1,F(j));
End

global X0; global Z0;
X0=(2*pi*f)*L0; Z0=i*X0;
DZ=f*0;
% Για όλες τις τιμές του LO
    for j=1:1:length(Lo)
        DZ(j)=DZpr1_gk(r1,r2,l,wt,Lo(j),con1,mr1,f);
    end
% Για όλες τις τιμές του CON1
    for j=1:1:length(Con)
DZ(j)=DZpr1_gk(r1,r2,l,wt,lo1,Con(j),mr1,f);
    end
% Για όλες τις τιμές του MR1
    for j=1:1:length(Mr)
        DZ(j)=DZpr1_gk(r1,r2,l,wt,lo1,con1,Mr(j),f);
    end
% Για όλες τις τιμές του D1
    for j=1:1:length(D1)
DZ(j)=DZpr2_gk(r1,r2,l,wt,lo1,con1,con2_1,mr1,mr2_1,D1(j),f);
    end
% Για όλες τις τιμές του CON2
    for j=1:1:length(Con2)
DZ(j)=DZpr2_gk(r1,r2,l,wt,lo1,con1,Con2(j),mr1,mr2_1,D1_1,f);
    end
% Για όλες τις τιμές του MR2
    for j=1:1:length(Mr2)
DZ(j)=DZpr2_gk(r1,r2,l,wt,lo1,con1,con2_1,mr1,Mr2(j),D1_1,f);
    end

```

```

function fun = f_DZpr1_gk(kappa,r1,r2,z1,z2,k2,mr)
% f_DZpr1_gk is the integrand of DZpr1
% Author: Dr Theodoros P. Theodoulidis
% Date : 11 March 2011
%
chi=intJ1x(kappa*r1,kappa*r2);
lambda=sqrt(kappa.^2+k2);
R=(kappa*mr-lambda)/(kappa*mr+lambda);
fun=chi.^2.*(exp(-kappa*z1)-exp(-kappa*z2)).^2./kappa.^6.*R;

```

```

function fun = f_LO_gk(kappa,r1,r2,l)
% f_LO_gk is the integrand of LO_gk
% Author: Dr Theodoros P. Theodoulidis
% Date : 9 December 2008
%
chi=intJ1x(kappa*r1,kappa*r2);
fun=chi.^2.*(kappa*l+exp(-kappa*l)-1)./kappa.^6;

```

```

function fun = LO_gk(r1,r2,l,wt)
% LO_gk calculates the inductance of a cylindrical coil LO
% using Gauss-Kronrod quadratures.
% The impedance of the coil Z0=j*X0=j*(2*pi*f)*LO
% Author : Dr Theodoros P. Theodoulidis
% Date : 9 December 2008
% Revised: 5 November 2011
% r1 : inner coil radius [m]
% r2 : outer coil radius [m]
% l : coil height [m]
% wt : coil wire turns
%
n=wt/(r2-r1)/l;
fun1 = quadgk(@(kappa)f_LO_gk(kappa,r1,r2,l),0,10/r2);
fun2 = quadgk(@(kappa)f_LO_gk(kappa,r1,r2,l),10/r2,+Inf);
fun=fun1+fun2;
%
m0=pi*4e-7;
fun=fun*n^2*(2*pi*m0);
%

```

```

function fun = DZpr1_gk(r1,r2,l,wt,lo,con,mr,f)
%
% DZpr1_gk calculates the impedance change of a cylindrical coil
% located above a conductive/magnetic half-space  $DZ=DR+j*DX$ 
% using Gauss-Kronrod quadratures
%
% Author : Dr Theodoros P. Theodoulidis
% Date : 11 March 2011
% Revised: 5 November 2011
%
% r1 : inner coil radius [m]
% r2 : outer coil radius [m]
% l : coil height [m]
% wt : coil wire turns
% lo : coil lift-off [m]
% con: conductivity [S/m]
% mr : relative magnetic permeability
% f : excitation frequency
%
m0=pi*4e-7;
n=wt/(r2-r1)/l;
omega=2*pi*f;
k2=1i*omega*m0*mr*con;
z1=lo;
z2=l+lo;
fun1 = quadgk(@(kappa)f_DZpr1_gk(kappa,r1,r2,z1,z2,k2,mr),0,10/r2);
fun2 = quadgk(@(kappa)f_DZpr1_gk(kappa,r1,r2,z1,z2,k2,mr),10/r2,+Inf);
fun=fun1+fun2;
%
m0=pi*4e-7;
fun=fun*n^2*(pi*m0)*(i*omega);
%

```

```

function fun=intJ1x(xa,xb)
% intJ0.m calculates the integral of J0(x) from x1 to x2.
% Author: Dr Theodoros P. Theodoulidis
% Date : 25 July 2008
%
x1=reshape(xa,1,size(xa,1)*size(xa,2));
x2=reshape(xb,1,size(xb,1)*size(xb,2));
%
ak4 = [4.0 5.333333161 3.199997842 1.015860606 0.197492634 0.025791036 0.002362211
0.000133718];
ak48= [0.124611058 0.031280848 0.023644978 0.022007499 0.016236617 0.007390830
0.001496119];
bk48= [0.797848790 0.049635633 0.023664841 0.018255209 0.012422640 0.005434851
0.001076103];
ak8 = [0.0623347304 0.0040403539 0.0010089872 0.0005366169 0.0003992825 0.0002755037
0.0001270039 0.0000268482];
bk8 = [0.7978845600 0.0125642405 0.0017870944 0.0006740148 0.0004100676 0.0002543955
0.0001107299 0.0000226238];
%
k4 =0:1:7;
k48=0:1:6;
k8 =0:1:7;
%
% Upper limit
px2=find(x2<4); px48=find(x2>=4 & x2<=8); p8=find(x2>8);
x4 =x2(px2) ; x48 =x2(px48) ; x8=x2(p8) ;
Mx2=x2; Mx4=[]; Cx48=[]; Cx8=[];
if (isempty(x4 )==0),[Mx4 ,Mk4 ]=meshgrid(x4 ,k4 ); Mx4 =(-1).^Mk4 .*(Mx4 /4).^(-2*Mk4 +1); Mx4
=ak4 *Mx4;,end
if (isempty(x48)==0),[Mx48,Mk48]=meshgrid(x48,k48); Ax48=(-1).^Mk48.*(Mx48/4).^(-2*Mk48-1);
Ax48=ak48*Ax48;
Bx48=(-1).^Mk48.*(Mx48/4).^(-2*Mk48 ); Bx48=bk48*Bx48;
Cx48=real((Ax48+i*Bx48).*exp(i*(x48-pi/4))./sqrt(x48));,end
if (isempty(x8 )==0),[Mx8 ,Mk8 ]=meshgrid(x8 ,k8 ); Ax8 =(-1).^Mk8 .*(Mx8 /8).^(-2*Mk8 -1); Ax8
=ak8 *Ax8 ;
Bx8 =(-1).^Mk8 .*(Mx8 /8).^(-2*Mk8 ); Bx8 =bk8 *Bx8;
Cx8 =real((Ax8 +i*Bx8 ).*exp(i*(x8-pi/4))./sqrt(x8 ));,end
Mx2([px2 px48 p8])=[Mx4 1-Cx48 1-Cx8];
%

```

```

% Lower limit
px2=find(x1<4); px48=find(x1>=4 & x1<=8); p8=find(x1>8);
x4 =x1(px2) ; x48 =x1(px48) ; x8=x1(p8) ;
Mx1=x1; Mx4=[]; Cx48=[]; Cx8=[];
if (isempty(x4 )==0),[Mx4 ,Mk4 ]=meshgrid(x4 ,k4 ); Mx4 =(-1).^Mk4 .*(Mx4 /4).^ ( 2*Mk4 +1);
Mx4 =ak4 *Mx4;,end
if (isempty(x48)==0),[Mx48,Mk48]=meshgrid(x48,k48); Ax48=(-1).^Mk48.*(Mx48/4).^(-
2*Mk48-1); Ax48=ak48*Ax48;
Bx48=(-1).^Mk48.*(Mx48/4).^(-2*Mk48 ); Bx48=bk48*Bx48;
Cx48=real((Ax48+i*Bx48).*exp(i*(x48-pi/4))./sqrt(x48));,end
if (isempty(x8 )==0),[Mx8 ,Mk8 ]=meshgrid(x8 ,k8 ); Ax8 =(-1).^Mk8 .*(Mx8 /8).^(-2*Mk8 -1);
Ax8 =ak8 *Ax8 ;
Bx8 =(-1).^Mk8 .*(Mx8 /8).^(-2*Mk8 ); Bx8 =bk8 *Bx8;
Cx8 =real((Ax8 +i*Bx8 ).*exp(i*(x8-pi/4))./sqrt(x8 ));,end
Mx1([px2 px48 p8])=[Mx4 1-Cx48 1-Cx8];
%
% The integral of J0(x)
fun=Mx2-Mx1;
% The integral of x*J1(x)
fun=fun-(x2.*besselj(0,x2)-x1.*besselj(0,x1));
%
fun=reshape(fun,size(xa,1),size(xa,2));

```

```

%Plot the impedance change in complex plane diagram (real vs imaginary)
figure('Name','Impedance Plane - Different Frequencies [KHz]');
plot(real(Zn),imag(Zn),'-o','Color','black','LineWidth',2,'MarkerSize',4,'MarkerEdgeColor','r');
hold on; daspect([1 1 1]);
title('Impedance Plane - Different Frequencies [KHz]','FontSize',12);
xlabel('Normalized Resistance','FontSize',10); ylabel('Normalized Inductive
Reactance','FontSize',10);

```

Παράρτημα Β' – Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1 – Μη Καταστροφικός Έλεγχος σε αγωγό [9].....	3
Σχήμα 2 - Μηχανισμός παραγωγής δινορρευμάτων [10]	5
Σχήμα 3 – Έλεγχος αγωγιμότητας σε νομίσματα.....	6
Σχήμα 4 – Μέτρηση σύνθετης αντίστασης με πηνίο πάνω από ρωγμή. [11]	8
Σχήμα 5 - Πηνία εργαστηριακών μετρήσεων	9
Σχήμα 6 - Πηνίο ορθογωνικής διατομής πάνω από δύο επίπεδες αγώγιμες πλάκες.....	11
Σχήμα 7 - Μεταβολή της σύνθετης αντίστασης (αντίσταση και αυτεπαγωγή).....	12
Σχήμα 8 - Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα πηνίου [1]	13
Σχήμα 9 - Μεταβολή της κανονικοποιημένης σύνθετης αντίστασης (αντίσταση και	14
Σχήμα 10 - Πηνίο πάνω από αγωγή ημιάπειρη πλάκα [4]	15
Σχήμα 11 – Κονσόλα TEDDY V2 για πηνίο πάνω από επίπεδη πλάκα	19
Σχήμα 12 – Κονσόλα TEDDY V2 για πηνίο πάνω από δύο επίπεδες πλάκες.....	20
Σχήμα 13 – Κονσόλα TEDDY V2: Εισαγωγή παραμέτρων πηνίου.....	21
Σχήμα 14 – Παράθυρο διαγράμματος	22
Σχήμα 15 – Πολλά διαγράμματα σε ένα παράθυρο.....	22
Σχήμα 16 – Πλήρες παράθυρο επεξεργασίας διαγράμματος	23
Σχήμα 17 – Κονσόλα TEDDY V2: Εισαγωγή παραμέτρων δοκιμών	24
Σχήμα 18 – Κονσόλα TEDDY V2: Μενού.....	24
Σχήμα 19 – Μεταβολή της συχνότητας.....	26
Σχήμα 20 – Μεταβολή του Lift-off	26
Σχήμα 21 - Μεταβολή της αγωγιμότητας	26
Σχήμα 22 - Μεταβολή της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας.....	27
Σχήμα 23 - Μεταβολή της συχνότητας	28
Σχήμα 24 - Μεταβολή του Lift-off	28
Σχήμα 25 – Μεταβολή του πάχους της πρώτης πλάκας.....	28
Σχήμα 26 - Μεταβολή της αγωγιμότητας της 1ης πλάκας	29
Σχήμα 27 - Μεταβολή της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας της 1ης πλάκας.....	29
Σχήμα 28 - Μεταβολή της αγωγιμότητας της 2ης πλάκας	29
Σχήμα 29 - Μεταβολή της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας της 2ης πλάκας.....	30
Σχήμα 30 – Κονσόλα εφαρμογής cTEDDY	31
Σχήμα 31 - Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων.....	32

Βιβλιογραφία

- [1] Θ. Θεοδουλίδης και Ν. Πουλάκης, “Μετρήσεις σύνθετης αντίστασης πηνίων και εφαρμογή τους στο μη καταστροφικό έλεγχο με τη μέθοδο των δινορρευμάτων”, 4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, 3-4/2/2012.
- [2] Ι. Παππούς, “Εντοπισμός θέσης ακουστικής εκπομπής με συστοιχία πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων”, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πατρών, Διπλωματική Εργασία, σελ. 9-17, 2012.
- [3] Ν. Μαγουλάς, “Αναλυτική και αριθμητική επίλυση ειδικών προβλημάτων δινορρευμάτων”, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών Ε.Μ.Π., Διπλωματική Εργασία, σελ. 1-23, 2011.
- [4] T. Theodoulidis and E. Kriezis, “Series expansions in eddy current nondestructive evaluation models,” *Journal of Materials Processing Technology*, No. 161, pp. 343-347, 2005.
- [5] A. Kolyshkin, T. Kübarsepp, O. Märtens and A. Pokatilov, “Determination of electrical conductivity of metal plates using planar spiral coils”, *Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on SYSTEMS*, pp. 545-550.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] www.mathworks.com
- [9] www.inspecta.com/en/Our-Services/Testing/Non-Destructive-Testing
- [10] www.uniwest.com/Principles-of-Eddy-Current-C61.aspx
- [11] http://meander.uowm.gr/lab_facilities.html