

Μετρήσεις Μαγνητικού Πεδίου στην Περιοχή nanoTesla για Μη-Καταστροφικό Χαρακτηρισμό με τη Βοήθεια Δινορρευμάτων

N. Πουλάκης

Τμ. Ηλεκτρολογίας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΤΕΙ Δυτ. Μακεδονίας, Κοζάνη
poulakis@kozani.teiko.gr

Θ. Θεοδουλίδης

Τμ. Μηχανικών Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων, Παν. Δυτ. Μακεδονίας, Κοζάνη.
theodoul@uowm.gr

Περίληψη – Σε αυτή την εργασία, περιγράφεται η χρήση ενός υπεραγώγιμου μαγνητόμετρου SQUID (Superconductive QUantum Interference Device) για ποσοτικές μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου (ΜΠ) των δινορρευμάτων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια και το εσωτερικό αγώγιμων πλακών σε πειράματα Μη-Καταστροφικού Ελέγχου (ΜΚΕ). Με μια σπάνια διαδικασία βαθμονόμησης, το SQUID χρησιμοποιείται για μετρήσεις της απόλυτης τιμής του ΜΠ και τα αποτελέσματα των μετρήσεων συγκρίνονται με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Οι μετρήσεις έγιναν σε περιβάλλον μη-θωρακισμένο μαγνητικά. Για τη διέγερση των δινορρευμάτων στις αγώγιμες πλάκες χρησιμοποιήθηκε ένα πηνίο τυπωμένου κυκλώματος, σχήματος διπλού ορθογώνιου. Τα πειράματα αφορούν μετρήσεις του ΜΠ του πηνίου στον αέρα και πάνω από πλάκα Αλουμινίου με ή χωρίς ατέλεια. Η ατέλεια είναι στη μορφή μιας μακριάς εγκάρσιας διαμπερούς σχισμής. Η συμφωνία μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων είναι πολύ καλή δείχνοντας ότι οι αναλυτικοί θεωρητικοί υπολογισμοί του ΜΠ αλλά και η δυνατότητα και βελτιστοποίηση της ακρίβειας των απόλυτων μετρήσεων του SQUID είναι εφικτοί στόχοι.

Λέξεις κλειδιά: SQUID, Μη-Καταστροφικός Έλεγχος, Μέτρηση Μαγνητικού Πεδίου, Πηνίο Τυπωμένου Κυκλώματος.

Keywords: SQUID, eddy current testing, magnetic field measurement, PCB coil.

1 Εισαγωγή

Υπάρχουν δύο γενικές μέθοδοι μέτρησης των δινορρευμάτων σε ένα αγώγιμο σώμα σε μια διαδικασία ΜΚΕ: (α) η άμεση μέθοδος, κατά την οποία χρησιμοποιούμε πηνία σε επαφή με την επιφάνεια του αγώγιμου σώματος και μετρούμε τη μεταβολή της σύνθετης αντίστασης των πηνίων και (β) η έμμεση μέθοδος, στην οποία χρησιμοποιούμε πηνία για τη διέγερση των δινορρευμάτων στο αγώγιμο σώμα και μετράμε το προκύπτον ΜΠ με τη βοήθεια αισθητήρων, όπως ο αισθητήρας Hall, ο αισθητήρας GMR (Giant Magnetoresistance) και τα SQUIDs.

Παραδοσιακά, ο ΜΚΕ με δινορρεύματα βασίζεται στην πρώτη μέθοδο, δηλαδή, στην ανίχνευση των μεταβολών της σύνθετης αντίστασης ενός πηνίου ενώ αυτό κινείται και σαρώνει την επιφάνεια του επιθεωρούμενου δοκιμίου. Όμως, για να ανιχνευτούν ατέλειες βαθειά μέσα στα αγώγιμα σώματα, απαιτούνται εξαιρετικά χαμηλές συχνότητες διέγερσης, ώστε να έχουμε μεγάλο βάθος διείσδυσης. Επειδή, όμως, η ευαισθησία των συνηθισμένων πηνίων είναι ανάλογη της συχνότητας διέγερσης, η μέθοδος αυτή είναι ανεπαρκής για ανίχνευση βαθειών υποεπιφανειακών ατελειών, καθιστώντας την τεχνική των δινορρευμάτων μια κατ' ουσίαν επιφανειακή τεχνική. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι προτιμότερη η δεύτερη μέθοδος, να μετράμε, δηλαδή, άμεσα το ΜΠ παρά τον χρονικά ρυθμό μεταβολής του (μεταβολή σύνθετης αντίστασης πηνίου). Μεταξύ των διαθέσιμων αισθητήρων ΜΠ, το SQUID είναι μακράν ο πιο ευαίσθητος και με την μεγαλύτερη δυναμική περιοχή λειτουργίας και γι' αυτό ιδανικός για τη μέτρηση των ασθενών διαταραχών του ΜΠ που οφείλονται σε βαθειά κείμενες ατέλειες [1-3]. Άλλα

χαρακτηριστικά του SQUID είναι η εξαιρετική ευαισθησία τους ($<100 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$) ακόμη και σε χαμηλές συχνότητες του 1 Hz, η υψηλή χωρική ανάλυση, η μεγάλη γραμμικότητα και τα σχετικά υψηλά πεδία λειτουργίας τους ως 1 mT.

Ένα κοινό χαρακτηριστικό όλων των τεχνικών μέτρησης του ΜΠ είναι ότι τα μαγνητόμετρα χρησιμοποιούνται σε διαφορικό (συγκριτικό) τρόπο λειτουργίας, δηλαδή, μετρούν τη σχετική τιμή του μαγνητικού πεδίου ως προς μια τιμή υποβάθρου. Αυτό κυρίως οφείλεται στην έλλειψη γνώσης της συνάρτησης μεταφοράς (συνάρτηση μεταφοράς = η τάση εξόδου του μαγνητόμετρου σαν συνάρτηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου) που είναι ένα εγγενές πρόβλημα των αισθητήρων ΜΠ. Η βαθμονόμηση της τάσης εξόδου των αισθητήρων ΜΠ χρειάζεται την ύπαρξη πρότυπων διατάξεων ΜΠ γνωστής έντασης οι οποίες ούτε εύκολες στην υλοποίησή τους είναι ούτε πρακτικές. Απ' αυτή την άποψη, οι αισθητήρες SQUID έχουν το μοναδικό χαρακτηριστικό ότι η τάση εξόδου τους είναι περιοδική συνάρτηση του κβάντου μαγνητικής ροής, $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb}$, που αποτελεί μια φυσική σταθερά. Χρησιμοποιώντας αυτή την ιδιότητα του SQUID, μπορούμε άμεσα και με ακρίβεια να το βαθμονομήσουμε μετρώντας την τάση εξόδου ανά Φ_0 .

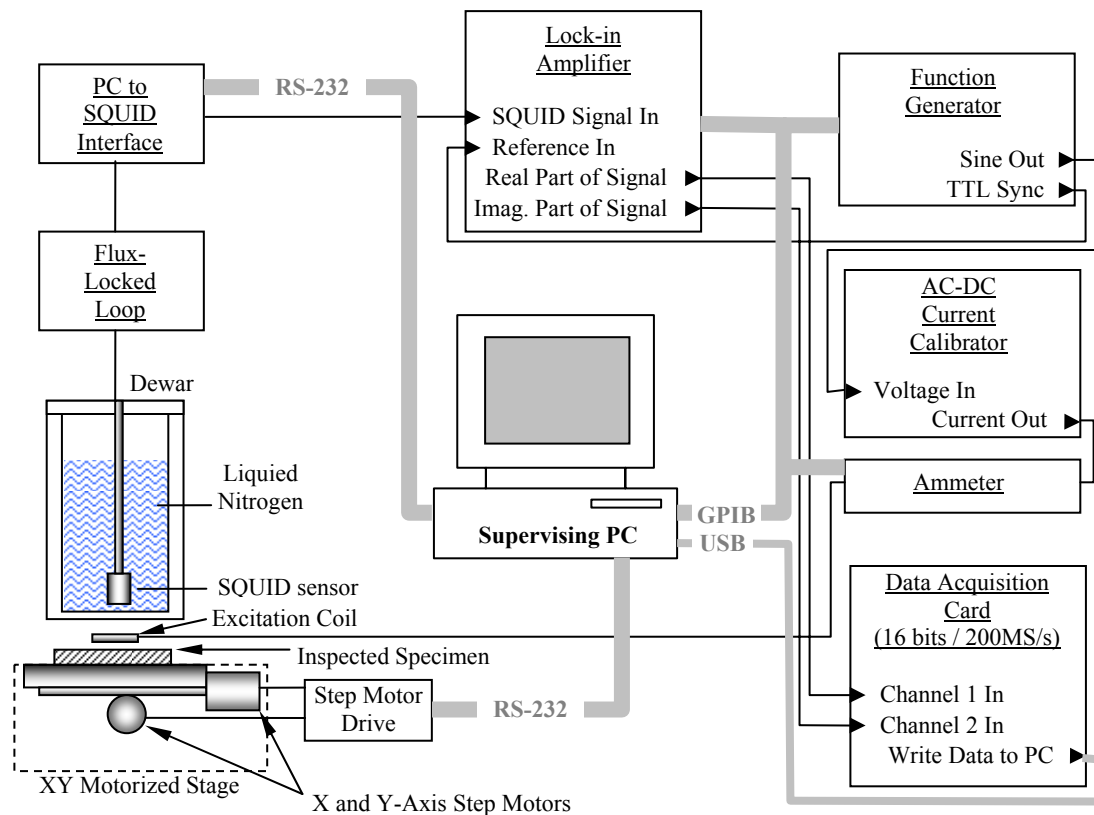
Σε αυτή την εργασία, χρησιμοποιήσαμε ένα βαθμονομημένο μαγνητόμετρο SQUID σε απόλυτο τρόπο λειτουργίας για να συγκρίνουμε άμεσα τις πειραματικές μετρήσεις του ΜΠ με τα θεωρητικά μοντέλα. Σε εργασίες, που έχουν δημοσιευτεί στο παρελθόν, έχει γίνει χρήση της θεωρίας για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων μέτρησης του ΜΠ με SQUID, παραμέτρων όπως η σχετική θέση του πηνίου και του αισθητήρα, η γεωμετρία του πηνίου, το πλάτος του ρεύματος διέγερσης στο πηνίο, κ.α. Αυτές οι εργασίες περιελάμβαναν εμπειρικά μοντέλα ή τη χρήση της χρονοβόρας μεθόδου FEM [4], υπεραπλουστευμένες γεωμετρίες πηνίων διέγερσης στην μορφή απλών κυκλικών βρόχων [5-6], μοντελοποίηση πηνίων σχήματος διπλού-D [7] και επίσης αριθμητικές μεθόδους για την προσομοίωση ατελειών στα επιθεωρούμενα αγωγία δοκίμια [8]. Τέλος, η εγγενής πολυπλοκότητα της μοντελοποίησης τρισδιάστατων προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικού πεδίου έχει οδηγήσει διάφορους ερευνητές στην υιοθέτηση υπεραπλουστευμένων μοντέλων όπως ταινίες ρεύματος άπειρου μήκους για την προσέγγιση τρισδιάστατων πραγματικών καταστάσεων [9].

Στην επόμενη παράγραφο, περιγράφουμε σε συντομία τη πειραματική διάταξη και τη διαδικασία βαθμονόμησης του μαγνητόμετρου SQUID και στη συνέχεια παρουσιάζουμε τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα για μια διέγερση στη μορφή ενός πηνίου τυπωμένου κυκλώματος διπλού ορθογώνιου. Ορισμένα προκαταρκτικά αποτελέσματα με το ίδιο SQUID παρουσιάστηκαν στις εργασίες [10] and [11] για διέγερση της μορφής ενός κυκλικού πρότυπου πηνίου.

2 Η Διάταξη Μέτρησης SQUID

Το σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης του μαγνητόμετρου SQUID που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα ΜΚΕ με δινορρεύματα φαίνεται στην Εικόνα 1. Η περιγραφή της διάταξης δίνεται, επίσης, στην αναφορά [10]. Ο αισθητήρας SQUID είναι κατασκευασμένος από υπεραγωγό υψηλών θερμοκρασιών (HTS), τοποθετημένος μέσα σε πλαστικό δοχείο dewar ενισχυμένο με ανθρακονήματα και ψυχόμενος με υγρό άζωτο. Οι μονάδες ηλεκτρονικού ελέγχου του αισθητήρα SQUID και επικοινωνίας με τον υπολογιστή (Flux Locked Loop, PC to SQUID Interface), καθώς και το λογισμικό ελέγχου έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία STAR Cryoelectronics [12]. Το σήμα εξόδου του μαγνητόμετρου οδηγείται σε έναν ενισχυτή lock-in. Σαν σήμα αναφοράς στον lock-in χρησιμοποιείται η TTL SYNC έξοδος μιας γεννήτριας σήματος υψηλής ποιότητας (SRS DS340). Η τάση εξόδου της γεννήτριας χρησιμοποιείται για την ημιτονοειδή διέγερση μιας πηγής σταθεροποιημένου ρεύματος (AC- Εικ.1

Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης του μαγνητόμετρου SQUID που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα ΜΚΕ με δινορρεύματα. Οι λεπτές μαύρες γραμμές συμβολίζουν την πορεία του σήματος του SQUID και του ρεύματος στο πηνίο διέγερσης. Οι παχιές γκρι γραμμές συμβολίζουν τα κανάλια ελέγχου (control buses) των οργάνων από το PC.



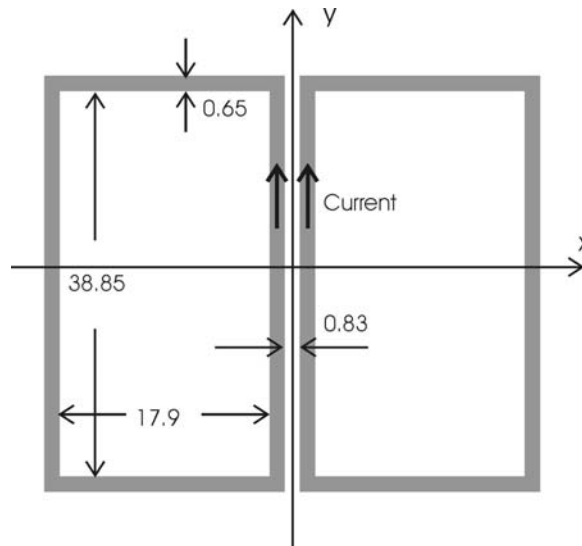
DC Current Calibrator) της οποίας η έξοδος οδηγείται, μέσω ενός αμπερόμετρου, στο πηνίο διέγερσης. Σε κάθε συχνότητα, γίνεται μηδενισμός με ακρίβεια 0.1° της διαφοράς φάσης μεταξύ του σήματος αναφοράς στον lock-in και του ρεύματος στο πηνίο λόγω του επαγωγικού χαρακτήρα της αντίστασης του πηνίου. Μ' αυτόν τον τρόπο, το σήμα αναφοράς στον lock-in είναι πάντα σε φάση με το ρεύμα του πηνίου (δηλαδή, σε φάση με το μαγνητικό πεδίο του πηνίου) και τα αποτελέσματα άμεσα συγκρίσιμα προς τους θεωρητικούς υπολογισμούς. Οι δύο συνιστώσες του σήματος εξόδου του SQUID, η συνιστώσα που είναι σε φάση με το σήμα αναφοράς (πραγματικό μέρος του ΜΠ) και η συνιστώσα που είναι σε διαφορά φάσης 90° ως προς το σήμα αναφοράς (φανταστικό μέρος του ΜΠ), μαζί με την ένταση του ρεύματος του πηνίου (μετρημένη από το αμπερόμετρο με ακρίβεια $4 \frac{1}{2}$ ψηφίων) καταγράφονται στο υπολογιστή, μέσω μιας ηλεκτρονικής κάρτας (Data Acquisition Card), πολλαπλασιάζονται με την τιμή της συνάρτησης μεταφοράς και το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται σε nT ανά mA ρεύματος διέγερσης.

Σε ότι αφορά στη βαθμονόμηση ενός αισθητήρα SQUID, απαιτούνται μια πηγή συνεχούς τάσης, ένα αμπερόμετρο, ένας παλμογράφος καθώς και ένα δοχείο υψηλής μαγνητικής θωράκισης. Στην περίπτωση μας, χρησιμοποιήθηκε ένα διπλότοιχο δοχείο από μ -metal, ένα υλικό πολύ μεγάλης μαγνητικής διαπερατότητας. Το SQUID τοποθετείται μέσα στο δοχείο μαγνητικής θωράκισης για να αποφυγούμε όλες τις εξωτερικές πηγές μαγνητικού πεδίου, όπως γραμμές ρεύματος, κ.λ.π. Με την πηγή τάσης, τροφοδοτούμε με μια μικρή συνεχή τάση το πηνίο διαμόρφωσης (modulation coil) που βρίσκεται ενσωματωμένο σε κάθε αισθητήρα SQUID και μετράμε το ρεύμα με το αμπερόμετρο. Η μαγνητική ροή Φ που δημιουργεί το ρεύμα του πηνίου μέσα από το SQUID έχει σαν αποτέλεσμα μια τάση στην έξοδο του SQUID την οποία παρατηρούμε με τον παλμογράφο. Αυξάνοντας βαθμιαία το ρεύμα του πηνίου, αυξάνεται ανάλογα η τάση εξόδου του SQUID. Για κάποια τιμή του ρεύματος, η τάση εξόδου γίνεται

μέγιστη (και μεταπίπτει ξαφνικά στην αντίθετη τιμή). Η μέγιστη αυτή τιμή της τάσης αντιστοιχεί σε ένα κβάντο ροής Φ_0 . Με αυτόν τον τρόπο εξάγουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του συγκεκριμένου αισθητήρα SQUID σε Φ_0/Volts . Από αυτό το σημείο, απαιτείται μόνον η γνώση της σχέσης nT/Φ_0 του αισθητήρα που σχετίζεται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του και κυρίως το εμβαδόν της επιφάνειάς του. Η σχέση αυτή, συνήθως, δίνεται από τον κατασκευαστή του αισθητήρα. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου SQUID, που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία, η συνάρτηση μεταφοράς είναι $(1.71 \Phi_0/\text{Volt}) \times (8.78 \text{ nT}/\Phi_0) = 15.01 \text{ nT/Volt}$. Η διαδικασία βαθμονόμησης περιγράφεται, επίσης, στην εργασία [10].

Σε ένα πείραμα ΜΚΕ με δινορρεύματα υπάρχει η υπέρθεση δύο μαγνητικών πεδίων. Το πρώτο είναι το προσπίπτον μαγνητικό πεδίο $B_{\text{excitation}}$ της διέγερσης (το μαγνητικό πεδίο του πηνίου διέγερσης) και το δεύτερο είναι το πεδίο που σχετίζεται με το επαγόμενο δινορρέυμα στο ελεγχόμενο αγωγίμο δοκίμιο. Η κατανομή των δινορρευμάτων σε ένα μέταλλο (και το σχετιζόμενο με αυτά μαγνητικό πεδίο B_{eddy}) διαταράσσεται όταν τα δινορρεύματα κυλούν σε μια περιοχή στην οποία υπάρχει μια οποιαδήποτε ατέλεια (π.χ., μια ρωγμή). Η ύπαρξη της ατέλειας ανιχνεύεται μετρώντας τη μεταβολή στο B_{eddy} καθώς ο αισθητήρας κινείται από μια περιοχή χωρίς ατέλειες προς την περιοχή που έχει την ατέλεια. Επειδή το πλάτος των μεταβολών στο B_{eddy} , ιδιαίτερα για ατέλειες βαθειά μέσα στο δοκίμιο, είναι αρκετά μικρό συγκρινόμενο με το μαγνητικό θόρυβο του περιβάλλοντος (ηλεκτρική εγκατάσταση δικτύου, διερχόμενα οχήματα, παντός είδους τροφοδοτικά ηλεκτρικών-ηλεκτρονικών συσκευών, κ.λ.π.), απαιτείται συχνά η χρήση υψηλών ρευμάτων στα πηνία διέγερσης για την ενίσχυση του B_{eddy} . Ενίσχυση, όμως, του B_{eddy} συνεπάγεται και ανάλογη ενίσχυση του πολύ ισχυρού προσπίπτοντος μαγνητικού πεδίου $B_{\text{excitation}}$ του πηνίου διέγερσης, γεγονός που οδηγεί σε κορεσμό τον ευαίσθητο αισθητήρα SQUID.

Ένας τρόπος να λύσουμε αυτό το πρόβλημα είναι με τη χρήση πηνίων σχήματος διπλού-D (double-D), των οποίων η περιέλιξη, αντί κυκλική, έχει μορφή δύο D σε καταπληκτική συμμετρία μεταξύ τους με τα ευθύγραμμα τμήματά τους να διαρρέονται από ομόροπα ρεύματα παράλληλα μεταξύ τους (Εικ. 2). Η κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου $B_{\text{excitation}}$ είναι μηδενική στον κάθετο άξονα από το κέντρο μεταξύ των δύο D ενός τέτοιου πηνίου ανεξάρτητα από την ένταση του ρεύματος διέγερσης που χρησιμοποιούμε. Επίσης, η κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου B_{eddy} είναι μηδέν στον ίδιο άξονα όταν κάτω από το πηνίο η αγωγή είναι χωρίς ατέλειες. Η συμμετρία αυτή και ο μηδενισμός του B_{eddy} διαταράσσεται όταν το πηνίο διέρχεται πάνω από μια περιοχή με ατέλεια με αποτέλεσμα να παρατηρείται μη μηδενικό πεδίο.



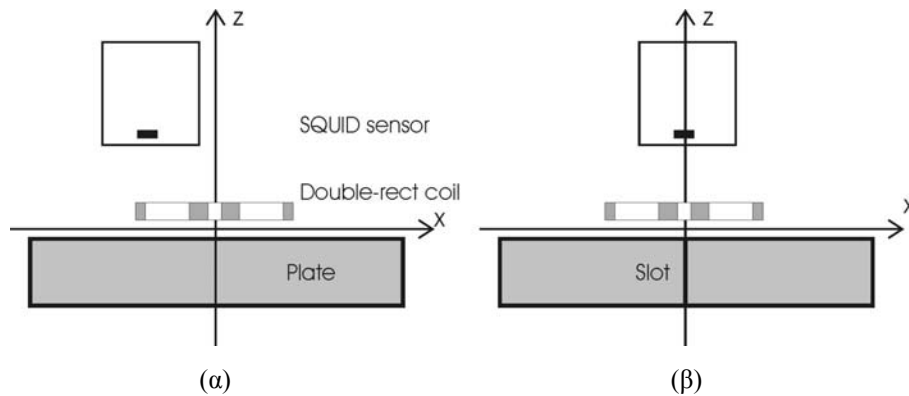
Εικ.2 Αποψη του πηνίου τυπωμένου κυκλώματος διπλού ορθογώνιου που χρησιμοποιήθηκε για τη διέγερση των δινορρευμάτων. Το πάχος των γραμμών χαλκού είναι $30\mu\text{m}$.

Η περιέλιξη, όμως, ενός τελείως συμμετρικού πηνίου διπλού-D είναι δύσκολο να επιτευχθεί τεχνικά και αυτός είναι ο λόγος που χρησιμοποιούνται πηνία τυπωμένου κυκλώματος στα οποία μπορούμε να επιτύχουμε μεγάλη ακρίβεια στις διαστάσεις και το σχήμα. Τέλος, για να διευκολύνουμε τη μοντελοποίηση των πειραματικών μετρήσεών μας, χρησιμοποιήσαμε, αντί για πηνία διπλού-D, πηνία τυπωμένου κυκλώματος σχήματος διπλού ορθογώνιου, όπως δείχνεται στην Εικ. 2.

Τελευταία, υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τη χρήση διπλών ορθογώνιων σπειροειδών πηνίων για ΜΚΕ με δινορρεύματα, κυρίως, εξ'αιτίας της υψηλής ευαισθησίας τους στις ρωγμές λόγω της μικρής απόστασης από την ελεγχόμενη επιφάνεια που επιτρέπει το επίπεδο σχήμα τους, της ευκολίας κατασκευής τους χρησιμοποιώντας τεχνολογία PCB και της ευκολίας προσαρμογής τους σε οποιαδήποτε ελεγχόμενη επιφάνεια [14-15].

3 Αποτελέσματα και Συζήτηση

Σε αυτήν την παράγραφο, παρουσιάζουμε τα πειραματικά αποτελέσματα και τη σύγκρισή τους με τα θεωρητικά αποτελέσματα για το πηνίο διπλού ορθογώνιου της Εικ. 2. Σχηματικά διαγράμματα της θέσης και της κίνησης πηνίου-αισθητήρα-πλάκας στα πειράματα με την πλάκα με και χωρίς σχισμή φαίνονται στην Εικ. 3. Προηγούμενες πειραματικές μετρήσεις και θεωρητικά αποτελέσματα για την περίπτωση ενός κυκλικού πηνίου στον αέρα (μαγνητικό πεδίο σαν συνάρτηση της θέσης), πάνω από αγωγίμη πλάκα (μαγνητικό πεδίο σαν συνάρτηση της συχνότητας διέγερσης) ή κινούμενου πάνω από μακριά σχισμή σε λεπτή αγωγίμη πλάκα δίνονται αναφορά [11].

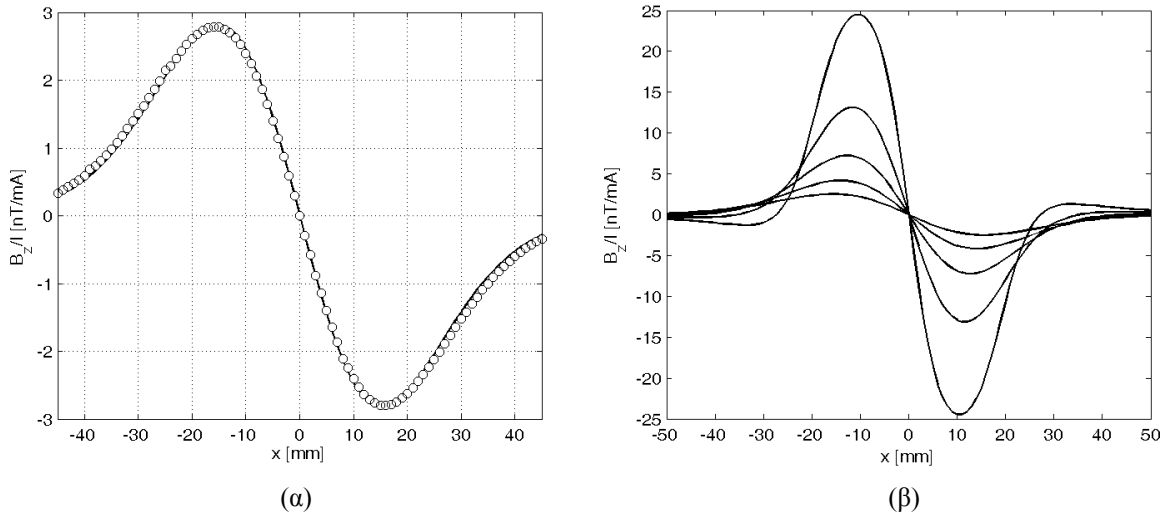


Εικ.3 Μετρήσεις μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα SQUID: (α) με το πηνίο διέγερσης στον αέρα ή πάνω από αγωγίμη πλάκα χωρίς ατέλεια, μόνο ο αισθητήρας SQUID κινείται (β) με το πηνίο πάνω από αγωγίμη πλάκα με ατέλεια (σχισμή), το SQUID και το πηνίο κινούνται μαζί.

3.1 Απομονωμένο πηνίο στον αέρα

Πρώτα, μετρήθηκε το μαγνητικό πεδίο του πηνίου στον αέρα μακριά από κάθε αγωγίμη επιφάνεια (απομονωμένο πηνίο). Σε αυτή τη μέτρηση, το SQUID εκκινείτο οριζόντια, παράλληλα προς την επιφάνεια του πηνίου (x -διεύθυνση) σε ύψος 28.9mm πάνω από το πηνίο. Λόγω απουσίας δινορρευσμάτων, το μαγνητικό πεδίο είναι σε φάση με το ρεύμα διέγερσης του πηνίου και, έτσι, μόνο το πραγματικό του μέρος μετράται. Στην Εικ. 4α φαίνεται η μεταβολή του B_z (συνιστώσα του ΜΠ κάθετη προς το επίπεδο του πηνίου, z -διεύθυνση) σαν συνάρτηση της οριζόντιας θέσης x από το κέντρο του πηνίου. Όπως αναμένεται, το πεδίο έχει περιττή συμμετρία και στη θέση $x = 0$ μηδενίζεται. Η θεωρητική προσομοίωση παρήχθη χρησιμοποιώντας ένα υπάρχον μοντέλο για ορθογώνια πηνία [13]. Η συμφωνία με το πείραμα είναι εξαιρετική. Επιπλέον θεωρητικές καμπύλες, βλ. Εικ. 4β, παρήχθησαν για διάφορα ύψη z από το επίπεδο του πηνίου. Από τις τιμές του μεγίστου αυτών των καμπυλών προέκυψε το ενδιαφέρον

συμπέρασμα ότι το μαγνητικό πεδίο σαν συνάρτηση του ύψους έχει την εκθετική μορφή $z^{-2.7}$, πολύ κοντά στην γνωστή θεωρητική σχέση $z^{-2.5}$ ενός μαγνητικού διπόλου.



Εικ.4 Πηνίο στον αέρα. (α) Μεταβολή του B_z σαν συνάρτηση της οριζόντιας θέσης x παράλληλα προς το πηνίο σε κατακόρυφη απόσταση 28.9mm από αυτό. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις μετρήσεις και η ευθεία γραμμή τους θεωρητικούς υπολογισμούς. (β) Οι ίδιοι θεωρητικοί υπολογισμοί για διάφορα ύψη από το πηνίο μεταξύ $z=10\text{mm}$ και 30mm με βήμα 5mm.

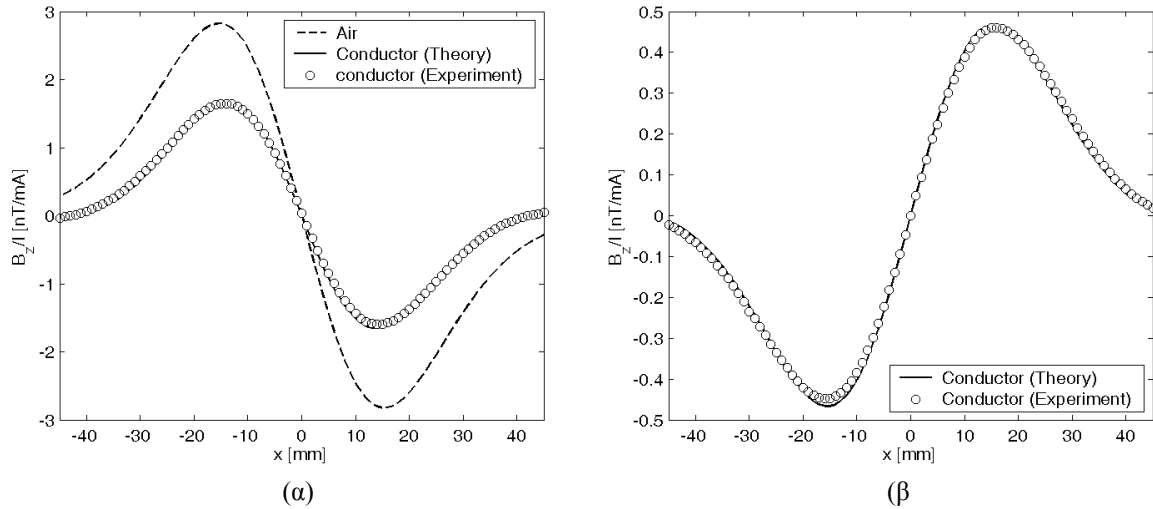
3.2 Πηνίο πάνω από μια ακέραια αγώγιμη πλάκα

Η αγώγιμη πλάκα σε αυτήν την περίπτωση ήταν Αλουμίνιο αγωγιμότητας $\sigma = 17 \text{ MS/m}$ και η απόσταση του πηνίου από την πλάκα (lift-off) ήταν 2mm. Η αγωγιμότητα της πλάκας μετρήθηκε με το όργανο δινορρευμάτων GE Phasec2D χρησιμοποιώντας την κατάλληλη κεφαλή. Τόσο το πραγματικό όσο και το φανταστικό μέρος του μαγνητικού πεδίου παρουσιάζονται στην Εικ. 5. Σε αυτήν την περίπτωση, επίσης, το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο ακριβώς πάνω από το κέντρο του πηνίου (θέση $x = 0$) είναι μηδενικό. Το SQUID κινήθηκε σε σχέση με το πηνίο, όπως δείχνεται στην Εικ. 3(α). Πολύ καλή συμφωνία παρατηρείται μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων [13].

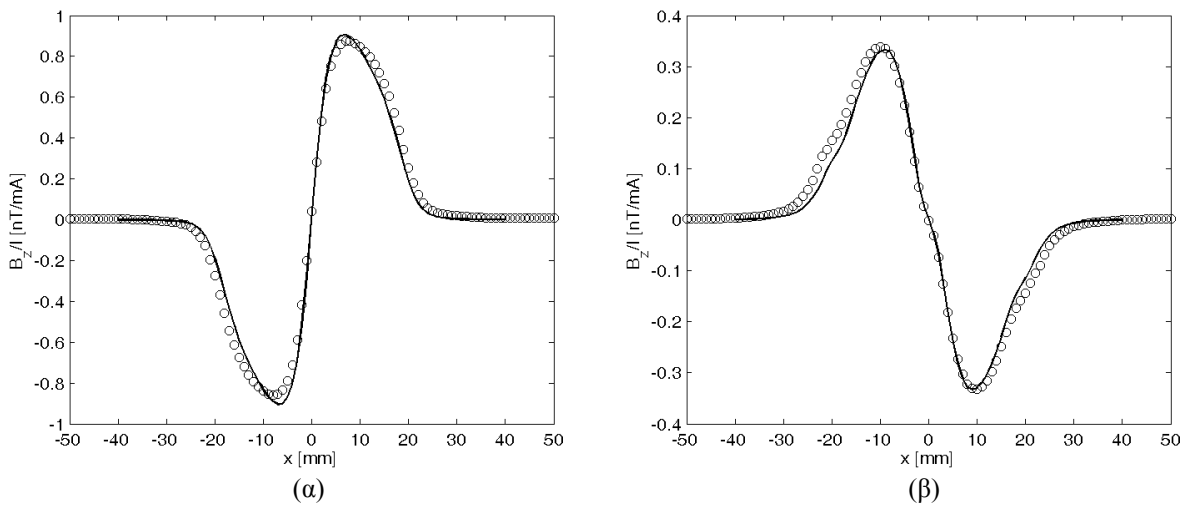
3.3 Πηνίο πάνω από πλάκα με σχισμή σε όλο το μήκος της

Τοποθετώντας μια λεπτή μονωτική (πλαστική) λωρίδα μεταξύ των ακμών δύο παχιών πλακών αλουμινίου προσομοιάσαμε την περίπτωση μιας μακριάς διαμπερούς σχισμής σε πλάκα. Το πάχος της σχισμής (δηλαδή, το πάχος της μονωτικής λωρίδας που χρησιμοποιήθηκε) ήταν 0.120 mm. Σ' αυτήν την περίπτωση, το πηνίο τοποθετήθηκε με ακρίβεια κάτω από το κέντρο του SQUID έτσι ώστε το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο του στο αέρα (δηλαδή, πριν πλησιάσουμε την πλάκα) να είναι μηδέν. Η απόσταση πηνίου - SQUID ήταν 28.7 mm. Το σύστημα πηνίου-SQUID κινήθηκε τότε μαζί οριζόντια (x -διεύθυνση) και σάρωσε την επιφάνεια της πλάκας κάθετα προς τη σχισμή, όπως δείχνεται στην Εικ. 3(β). Η απόσταση πλάκας-πηνίου ήταν 2.5mm. Μετρήσεις πάρθηκαν σε διάφορες συχνότητες διέγερσης. Στην Εικ. 6 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ της μέτρησης σε συχνότητα 3.225 kHz και του θεωρητικού αποτελέσματος. Το τελευταίο παρήχθη χρησιμοποιώντας μια ημι-αναλυτική μέθοδο γνωστή σαν μέθοδο

Truncated Region Eigenfunction Expansion (TREE) η οποία επιτρέπει τη λύση παρόμοιων κανονικών προβλημάτων σε ελάχιστο χρόνο χωρίς καμμία θυσία στην ακρίβεια [16-17].



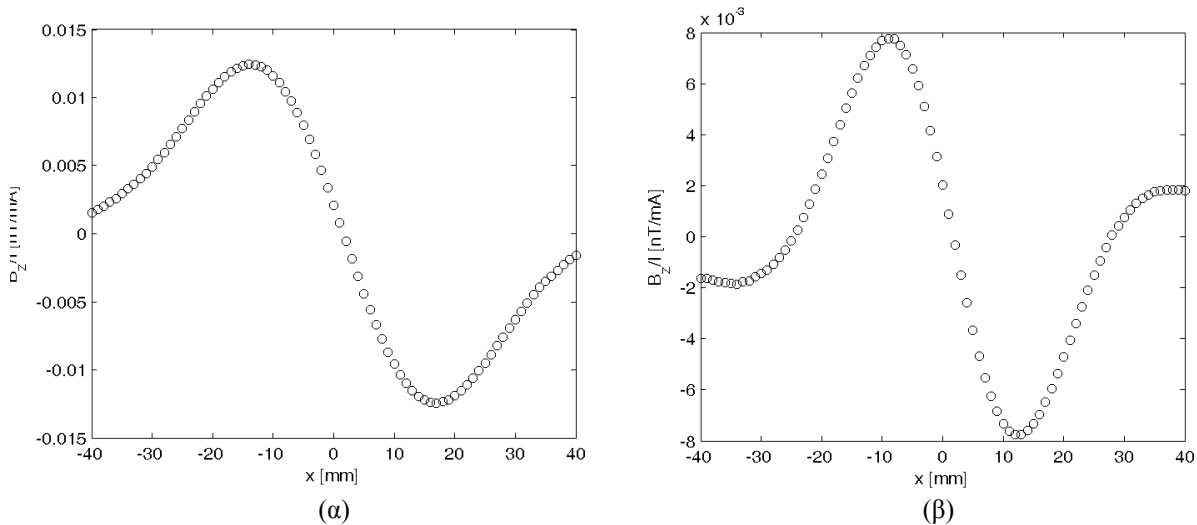
Εικ.5 Πηνίο στον αέρα και πάνω από αγωγίμη πλάκα. Η μεταβολή του B_z σαν συνάρτηση της οριζόντιας θέσης x σε κατακόρυφη απόσταση 28.9mm από το πηνίο. (α) Πραγματικό μέρος και (β) φανταστικό μέρος του ολικού μαγνητικού πεδίου. Οι κύκλοι είναι οι μετρήσεις και οι ευθείες γραμμές τα θεωρητικά αποτελέσματα. Ας σημειωθεί η μείωση του πεδίου λόγω της αγωγίμης πλάκας.



Εικ.6 Πηνίο και αισθητήρας πάνω από μια μακριά διαμερή σχισμή σε αγωγίμη πλάκα. Μεταβολή του B_z σαν συνάρτηση της θέσης x ως προς τη σχισμή. (α) Πραγματικό μέρος και (β) φανταστικό μέρος. Κύκλοι και συνεχείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τα πειραματικά και τα θεωρητικά αποτελέσματα, αντίστοιχα.

3.4 Πηνίο πάνω από μια υποεπιφανειακή μακριά σχισμή

Μια παρόμοια μέτρηση έγινε με τη σχισμή να βρίσκεται σε βάθος 10mm κάτω από την επιφάνεια της αγωγίμης πλάκας αλουμινίου (βλ. Εικ.7). Αυτή η διάταξη επετεύχθη τοποθετώντας μια πλάκα αλουμινίου πάχους 10mm πάνω από τη διάταξη που εξετάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο 3.3. Δεν υπάρχουν θεωρητικά αποτελέσματα ακόμη γι' αυτήν τη διάταξη. Σε αυτήν τη μέτρηση, χρησιμοποιήθηκε χαμηλή συχνότητα 120 Hz ώστε να επιτύχουμε επαρκές βάθος διείσδυσης του μαγνητικού πεδίου διέγερσης. Μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ακόμη χαμηλότερη συχνότητα. Μειώνοντας, όμως, τη συχνότητα, το σήμα από τις ατέλειες γίνεται ασθενέστερο και έτσι πρέπει να αυξήσουμε το ρεύμα διέγερσης.



Εικ.7 Πηνίο και SQUID πάνω από μακριά υποεπιφανειακή σχισμή σε αγωγίμη πλάκα. (α) Πραγματικό μέρος και (β) φανταστικό μέρος των πειραματικών μετρήσεων του B_z σαν συνάρτηση του x .

4 Συμπεράσματα

Πολύ καλή συμφωνία παρατηρείται μεταξύ θεωρητικών αποτελεσμάτων και πειραματικών μετρήσεων για ένα σύστημα SQUID που μετράει μαγνητικό πεδίο σε εφαρμογές ΜΚΕ. Αυτό δείχνει τη δυνατότητα του SQUID να κάνει ακριβείς μετρήσεις απόλυτης τιμής μαγνητικού πεδίου ακόμη και σε μαγνητικά μη-θωρακισμένο περιβάλλον και, επίσης, δείχνει ότι η θεωρητική μοντελοποίηση μπορεί να χρησιμεύσει στην βελτιστοποίηση των πηνίων διέγερσης και της απόδοσης του συστήματος. Περαιτέρω εργασία σχεδιάζεται στο μέλλον σε παρόμοιες ποσοτικές μετρήσεις χρησιμοποιώντας όργανα μέτρησης βαθμίδας μαγνητικού πεδίου (gradiometers) και στη θεωρητική προσομοίωση εναλλακτικών μορφών πηνίων και τύπων ατελειών.

Ευχαριστίες

Αυτή η εργασία έχει χρηματοδοτηθεί από το Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων μέσα στα πλαίσια του προγράμματος «ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ II - Ενίσχυση ερευνητικών ομάδων στα ΤΕΙ». Μεγάλο μέρος των πειραματικών μετρήσεων που παρουσιάζονται σε αυτήν την εργασία, πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις του Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας, στη Σίνδο Θεσσαλονίκης, προς το οποίο θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας.

Αναφορές

- [1] Gallop J.C., *SQUIDS, the Josephson Effect and Superconducting Electronics*, Taylor & Francis, 1991.
- [2] Weinstock H. and Nisenoff M., *Non-destructive evaluation of metallic structures using a SQUID gradiometer*, SQUID '85, Proc. 3rd International Conference on Superconducting Quantum Devices, Hahlbohm H.D. and Lubbig H., Eds., 843--847, de Gruyter, Berlin, 1985; See also, *SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Application*, H. Weinstock (ed.), NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences, 329, Kluwer, 1995.
- [3] Tavrín Y., Krause H.-J., Wolf W., Glyantsev V., Schubert J., Zander W., Bousack H., *Eddy current technique with high temperature SQUID for non-destructive evaluation of non-magnetic metallic structures*, *Cryogenics*, 36:83--86, 1996.
- [4] Kreuzbruck M.v., Allweins K., Ruhl T., Muck M., Heiden C., Krause H.-J., Hohmann R., *Defect detection and classification using a SQUID based multiple frequency eddy current NDE system*, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 11(1):1032--1037, 2001.
- [5] Claycomb J.R., Tralshawala N., Cho H.-M., Boyd M., Zou Z., *Simulation and design of a superconducting eddy current probe for nondestructive testing*, *Review of Scientific Instruments*, 69(2):499--506, 1998.
- [6] Claycomb J.R., Tralshawala N., Miller J.H., *Theoretical investigation of eddy-current induction for nondestructive evaluation by superconducting quantum interference devices*, *IEEE Transactions on Magnetics*, 36(1):292-298, 2000.
- [7] Morgan L.N.C., Carr C., Cochran A., McKirdy D.McA. and Donaldson G.B., *Electromagnetic non-destructive evaluation with simple HTS SQUIDS: Measurement and modelling*, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 5:3127--3130, 1995.
- [8] Ruosi A., Valentino M., Pepe G., Monebhurrún V., Lesselier D. and Duchene B., *High Tc SQUIDS and eddy-current NDE: a comprehensive investigation from real data to modelling*, *Meas. Sci. Technol.*, 11:1639--1648, 2000.
- [9] Pattabiraman M., Nagedran R. and Janawadkar M.P., *Rapid flaw depth estimation from SQUID-based eddy current nondestructive evaluation*, *NDT&E International*, 40:289--293, 2007.
- [10] Poulakis N., Theodoulidis T. and Liarokapis E., "SQUID magnetometer in eddy current non-destructive testing applications", 5th NC NDT-HSNT, 2005.
- [11] Poulakis N. and Theodoulidis T., *The use of a SQUID for quantitative magnetic field measurements in the nanoTesla region for eddy current NDE*, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Portland, 2006.
- [12] *pcSQUID™ User's Manual*, STAR Cryoelectronics, www.starcryo.com.
- [13] Theodoulidis T. and Kriezis E., *Impedance evaluation of rectangular coils for eddy current testing of planar media*, *NDT&E International*, 35:407--414, 2002.
- [14] Ditchburn R.J. and Burke S.K., *Planar rectangular spiral coils in eddy-current nondestructive inspection*, *NDT&E International*, 38:690--700, 2005.
- [15] Fava J.O. and Ruch M.C., *Calculation and simulation of impedance diagrams of planar rectangular spiral coils for eddy current testing*, *NDT&E International*, 39:414--424, 2006.
- [16] Bowler J.R. and Theodoulidis T., *Coil impedance variation due to induced current at the edge of a conductive plate*, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39:2862--2868, 2006.
- [17] Theodoulidis T. and Kriezis E., *Eddy current canonical problems (with applications to nondestructive evaluation)*, Techscience Press, 2006.