

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΠΗΝΙΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ

Θεόδωρος Θεοδουλίδης¹ και Νικόλαος Πουλάκης²

¹Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 50100 Κοζάνη

²ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Ηλεκτρολογίας, 50100 Κοΐλα, Κοζάνη

Περίληψη

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. Στην παρούσα εργασία περιγράφεται μια βασική διαδικασία υπολογισμού της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του δοκιμίου και της ανύψωσης του πηνίου μέσω μετρήσεων της σύνθετης αντίστασης σε ένα εύρος συχνοτήτων και προσαρμογής των μετρήσεων αυτών σε θεωρητικά αποτελέσματα.

Μη καταστροφικός έλεγχος, μέθοδος δινορρευμάτων, σύνθετη αντίσταση πηνίου, μέτρηση αγωγιμότητας, μέτρηση ανύψωσης

Abstract

In the eddy current method of nondestructive testing, the measured quantity is the impedance of the excitation coil. During precision measurements for the validation of theoretical models for simulating the method, it is very important to know exactly the value of the testpiece electrical conductivity as well as the value of the small distance between the testpiece and the coil, also known as lift-off. In this work, a basic procedure is described for the evaluation of the electrical conductivity and the coil lift-off through the measurement of the coil impedance over a frequency range and its matching with theoretical results.

Nondestructive testing, eddy current method, coil impedance, conductivity measurement, lift-off measurement

1. Εισαγωγή

Η ερευνητική ομάδα με την ονομασία MEANDER (Magnetic and Electric Analysis for Non Destructive Research) έχει αναπτύξει εργαστηριακές υποδομές για τη διενέργεια Μη Καταστροφικών Ελέγχων (ΜΚΕ) με τη μέθοδο των δινορρευμάτων. Σκοπός της ομάδας είναι αφενός η διενέργεια εργαστηριακών μετρήσεων και θεωρητικών προσομοιώσεων και αφετέρου η παροχή υπηρεσιών ΜΚΕ στην Ελληνική Βιομηχανία. Η ομάδα διαθέτει όργανα μέτρησης σύνθετης αντίστασης σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων (Precision LCR meter, Impedance Analyzer) που συνδυάζονται με σαρωτές ακριβείας και αυτοματοποιημένο έλεγχο μέσω λογισμικού LabView. Διαθέτει επίσης όργανα δινορρευμάτων βιομηχανικού τύπου (Olympus NDT, General Electric) εξοπλισμένα με πληθώρα κεφαλών (probes), Θεόδωρος Θεοδουλίδης, Νικόλαος Πουλάκης, Πανεπιστήμιο και ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας. Μετρήσεις σύνθετης αντίστασης πηνίων και εφαρμογή τους στο μη καταστροφικό έλεγχο με τη μέθοδο των δινορρευμάτων.

λογισμικό λήψης και ανάλυσης δεδομένων καθώς και ανώτατη πιστοποίηση προσωπικού ASNT-NDT Level III για τη διενέργεια ελέγχων ΜΚΕ με τη μέθοδο των δινορρευμάτων. Ένας από τους στόχους που έχουν τεθεί είναι και η παραγωγή πρότυπων μετρήσεων σε καλά περιγεγραμμένες διατάξεις ώστε να είναι δυνατή η αξιολόγηση και η επιβεβαίωση των πολύπλοκων θεωρητικών μοντέλων που αναπτύσσονται διεθνώς για την προσομοίωση της μεθόδου των δινορρευμάτων. Οι πρότυπες αυτές μετρήσεις διατίθενται σε ερευνητικά εργαστήρια του εξωτερικού που δραστηριοποιούνται στον τομέα των προσομοιώσεων αλλά και της ανάπτυξης σχετικού λογισμικού. Να σημειωθεί ότι παραγωγή τέτοιων αξιόπιστων πειραματικών μετρήσεων γίνεται από ελάχιστα εργαστήρια στον κόσμο.

Από την πληθώρα διαδικασιών και τεχνικών μέτρησης που ακολουθούνται, στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια πολύ βασική διαδικασία για την παραγωγή προτύπων μετρήσεων στη μέθοδο των δινορρευμάτων, που στηρίζεται στις μετρήσεις σύνθετης αντίστασης. Μέσω αυτής της διαδικασίας επιτυγχάνεται ο ακριβής υπολογισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εξεταζόμενου δοκιμίου καθώς και της ανύψωσης του χρησιμοποιούμενου πηνίου.

1.1 Μη καταστροφικός έλεγχος με τη μέθοδο των δινορρευμάτων

Η μέθοδος των δινορρευμάτων είναι μία από τις δέκα αναγνωρισμένες μεθόδους μη καταστροφικών ελέγχων. Χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία, σε πλήθος εφαρμογών που, περιλαμβάνουν ανιχνεύσεις ρωγμών σε μεταλλικές κατασκευές, ταυτοποίηση μετάλλων και έλεγχο επιφανειακών κατεργασιών. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε τους ελέγχους ανιχνεύσης ρωγμών σε ήλους συναρμογής αεροσκαφών, ελέγχους συγκολλήσεων σε αγωγούς μεταφοράς ρευστών, ελέγχους διαβρώσεων σε εναλλάκτες θερμότητας σε πετροχημικά εργοστάσια και σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας καθώς και μετρήσεις επιφανειακών επικαλύψεων έως ακόμη και ταυτοποίηση κερμάτων. 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) Ένα πηνίο που οδηγείται από εναλλασσόμενο ρεύμα δημιουργεί στον περιβάλλοντα χώρο του εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο.

(2) 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).

(3) 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 χρησιμοποιούμενου πηνίου.

(4) Εάν τώρα εντός του μεταλλικού αντικειμένου υπάρχουν και επικίνδυνες για τη λειτουργία του ασυνέχειες, π.χ. ρωγμές, η πορεία των δινορρευμάτων μεταβάλλεται καθώς αυτά δεν μπορούν να διαπεράσουν τις ασυνέχειες αυτές, οπότε αυτή η μεταβολή

Θεόδωρος Θεοδουλίδης, Νικόλαος Πουλιάκης, Παντεπιστήμιο και ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας.

Μετρήσεις σύνθετης αντίστασης πηνίων και εφαρμογή τους στο μη καταστροφικό έλεγχο με τη μέθοδο των δινορρευμάτων.

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.

Η επιστημονική έρευνα σχετικά με τη μέθοδο των δινορρευμάτων κινείται γύρω από:

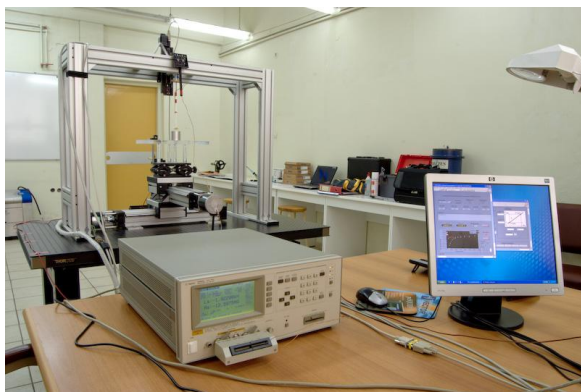
(1) την ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων προσομοίωσης της μεθόδου με σκοπό τη βελτιστοποίηση των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων ελέγχου, π.χ. της χρησιμοποιούμενης συχνότητας για τη διέγερση του πηνίου

(2) την αυτόματη ερμηνεία των λαμβανόμενων σημάτων και την προσπάθεια εξάλειψης του ανθρώπινου παράγοντα

(3) τη σχεδίαση νέων διατάξεων ανίχνευσης, π.χ. κατάλληλων πηνίων

(4) την αναζήτηση νέων εφαρμογών.

Σε κάθε περίπτωση το (1) είναι μια πολύ βασική διαδικασία και η διεξαγόμενη έρευνα περιλαμβάνει αριθμητικά μοντέλα (μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων FEM, 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 αγωγίμη πλάκα (π.χ. αλουμινίου) με μια καλά διαστασιολογημένη 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. Μια τυπική διάταξη μέτρησης φαίνεται στο Σχήμα 1.



(α)



(β)

Σχήμα 1. (α) Τυπική διάταξη μέτρησης που περιλαμβάνει το δοκίμιο, το πηνίο, τον ελεγχόμενο από λογισμικό σαρωτή και το όργανο μέτρησης σύνθετης αντίστασης. (β) Πηνίο μετακινούμενο πάνω από ρωγμή παράλληλη με την ακμή στο άκρο του δοκιμίου.

Όπως γίνεται κατανοητό, σημαντικό ρόλο παίζει στην περίπτωση αυτή η ακριβής γνώση των παραμέτρων του πειράματος, δηλαδή διαστάσεις και τεχνικά χαρακτηριστικά πηνίου και δοκιμίου, αποστάσεις, διαστάσεις ρωγμής, ηλεκτρική αγωγιμότητα δοκιμίου και Θεόδωρος Θεοδουλίδης, Νικόλαος Πουλιάκης, Παντεπιστήμιο και ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας.

Μετρήσεις σύνθετης αντίστασης πηνίων και εφαρμογή τους στο μη καταστροφικό έλεγχο με τη μέθοδο των δινορρευμάτων.

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 ειδική διαδικασία που παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

2. Μέτρηση σύνθετης αντίστασης

Προκειμένου να μετρηθεί η σύνθετη αντίσταση ενός πηνίου χρησιμοποιούμε εναλλακτικά δύο όργανα ακριβείας τα οποία διαθέτει το εργαστήριό μας:

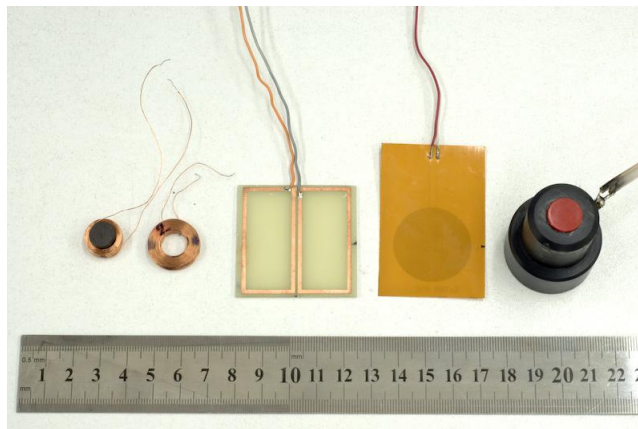
(1) Γέφυρα μέτρησης Agilent 4284A, Precision LCR meter με δυνατότητα μέτρησης σε εύρος συχνοτήτων 20Hz - 1MHz και ακρίβεια 0,05%.

(2) Αναλυτής σύνθετης αντίστασης Agilent 4294A, Precision Impedance Analyzer με δυνατότητα μέτρησης σε εύρος συχνοτήτων 40Hz - 110MHz και ακρίβεια 0,08%.

Με το πρώτο όργανο η μέτρηση λαμβάνει χώρα σε μία συχνότητα και ο χρήστης θα πρέπει να τη μεταβάλλει κάθε φορά, ενώ με το δεύτερο όργανο η μέτρηση γίνεται αυτομάτως στο εύρος συχνοτήτων το οποίο έχει καθοριστεί.

2.1 Υπολογισμός σύνθετης αντίστασης πηνίου

Στη μέθοδο των δινορρευμάτων χρησιμοποιείται πληθώρα πηνίων ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Τυπικές σχεδιάσεις πηνίων φαίνονται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Πηνία εργαστηριακών μετρήσεων, από αριστερά προς τα δεξιά: Πηνίο με φερριτικό πυρήνα, σύνηθες κυκλικό πηνίο, διαφορικό ορθογωνικό πηνίο τυπωμένου κυκλώματος, εύκαμπτο φωτολιθογραφημένο κυκλικό πηνίο, κλειστό πηνίο περιελιγμένο σε φόρμα.

Εδώ και 44 χρόνια είναι γνωστή η ακριβής μαθηματική έκφραση της σύνθετης αντίστασης του συνήθως χρησιμοποιούμενου κυκλικού πηνίου (δεύτερο στο Σχήμα 2) όταν αυτό είναι μόνο του στον αέρα και όταν βρίσκεται τοποθετημένο επί μιας αγωγικής 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

Θεόδωρος Θεοδουλίδης, Νικόλαος Πουλάκης, Πανπεπιστήμιο και ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας.

Μετρήσεις σύνθετης αντίστασης πηνίων και εφαρμογή τους στο μη καταστροφικό έλεγχο με τη μέθοδο των δινορρευμάτων.

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

μεταβολής της ΔZ λόγω της παρουσίας της αγώγιμης πλάκας και των επαγόμενων δινορρευμάτων:

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

όπου

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

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

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

Οι παραπάνω σχέσεις έχουν προκύψει υποθέτοντας συνεχή χωρική κατανομή της πυκνότητας ρεύματος του πηνίου. Η υπόθεση αυτή γίνεται σωστότερη όσο λεπτότερο είναι το σύρμα περιέλιξης. Να σημειωθεί επίσης ότι στις παραπάνω σχέσεις δεν περιλαμβάνεται η τιμή της ωμικής αντίστασης του πηνιο-σύρματος. Αυτή είναι γνωστή και ως dc τιμή αντίστασης και αφαιρείται από τις μετρήσεις. Οι σχέσεις (2) και (3) είναι πολύ σημαντικές καθώς χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση/προσαρμογή πειραματικών μετρήσεων και θεωρητικών αποτελεσμάτων και από τη σύγκριση/προσαρμογή αυτή εξάγονται οι τιμές της αγωγιμότητας του μεταλλικού αντικειμένου και της ανύψωσης. Οι υπολογισμοί περιλαμβάνουν αριθμητικές ολοκληρώσεις, εντούτοις μπορούν να τελεστούν με μεγάλη ακρίβεια καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτόματες ρουτίνες ολοκλήρωσης που διατίθενται πλέον με τα περισσότερα μαθηματικά εργαλεία/πακέτα.

Θεόδωρος Θεοδουλίδης, Νικόλαος Πουλάκης, Παντεπιστήμιο και ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας.

Μετρήσεις σύνθετης αντίστασης πηνίων και εφαρμογή τους στο μη καταστροφικό έλεγχο με τη μέθοδο των δινορρευμάτων.

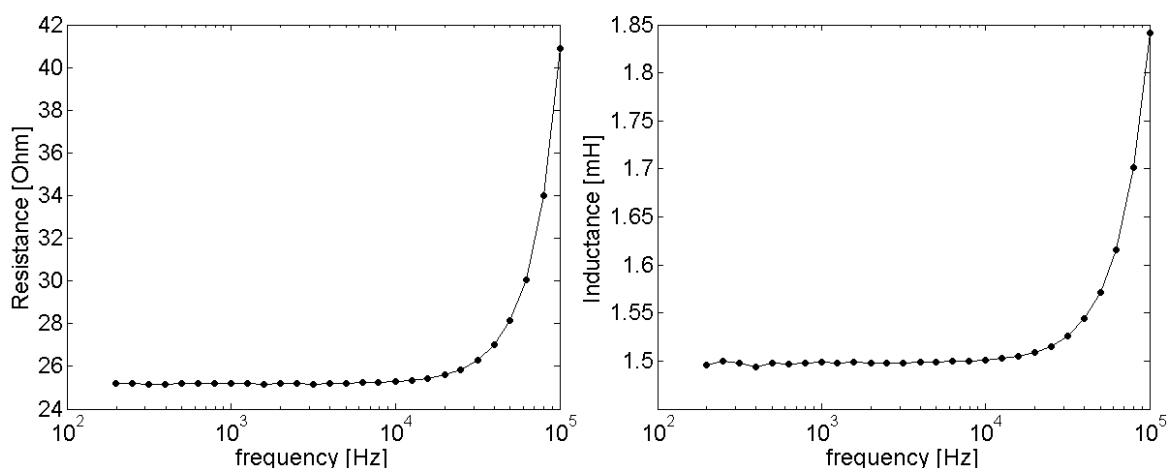
4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

2.2 Μέτρηση σύνθετης αντίστασης πηνίου στον αέρα

Τα πηνία τα οποία χρησιμοποιούνται είναι πολύ καλά χαρακτηρισμένα, συνήθως κατασκευάζονται από αυτόματη μηχανή περιέλιξης και όταν αγοράζονται από εξειδικευμένο κατασκευαστή συνοδεύονται από πιστοποιητικό με τις ακριβείς τους διαστάσεις και αριθμό στροφών τους. Η πρώτη λοιπόν μέτρηση που γίνεται είναι με τα πηνία στον αέρα ώστε να γίνει σαφές κατά πόσο η προβλεπόμενη από τη θεωρία τιμή τους συμβαδίζει με τη μέτρηση και να γίνει έτσι αξιολόγηση της ίδιας της κατασκευής του πηνίου. Η μέτρηση της σύνθετης αντίστασης του πηνίου στον αέρα γίνεται σε ένα εύρος συχνοτήτων και μια χαρακτηριστική καμπύλη σε λογαριθμική κλίμακα συχνότητας φαίνεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Μεταβολή της σύνθετης αντίστασης (αντίσταση και αυτεπαγωγή) με το πηνίο στον αέρα σε ένα εύρος συχνοτήτων.

Από το Σχήμα 3 φαίνεται ότι υπάρχει ραγδαία μεταβολή της σύνθετης αντίστασης με τη συχνότητα, που οφείλεται στο ότι το πηνίο δεν συμπεριφέρεται ιδεατά αλλά παρουσιάζει και κάποια εσωτερική αντίσταση και χωρητικότητα. Επίσης στη χωρητικότητα συμβάλλουν και οι ακροδέκτες. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα που περιλαμβάνει τα παρασιτικά αυτά στοιχεία φαίνεται στο Σχήμα 4. R_S και C_S είναι η εσωτερική αντίσταση και εσωτερική χωρητικότητα του πηνίου και 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 3 ενώ το πηνίο είναι στον αέρα. Οι τιμές R_0 και L_0 προκύπτουν από το Σχήμα 3 καθώς η συχνότητα τείνει στο 0.

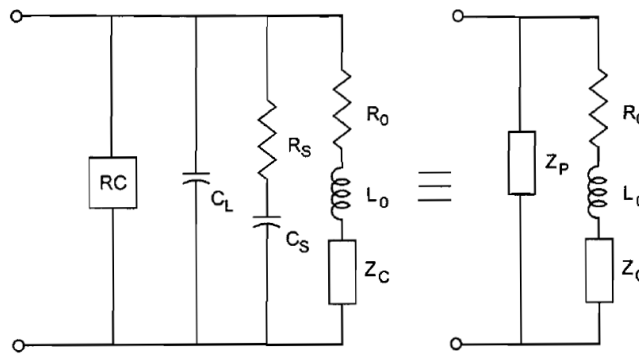
Θεόδωρος Θεοδουλίδης, Νικόλαος Πουλάκης, Παντεπιστήμιο και ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας.

Μετρήσεις σύνθετης αντίστασης πηνίων και εφαρμογή τους στο μη καταστροφικό έλεγχο με τη μέθοδο των δινορρευμάτων.

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012



Σχήμα 4. Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα πηνίου

Η πρώτη σύγκριση που γίνεται είναι μεταξύ της αντίδρασης του πηνίου στον αέρα L_0 και της τιμής που προκύπτει από τη σχέση (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 τιμή κοντά στη διάμετρο του λεπτού σύρματος που χρησιμοποιείται για την περιέλιξη του πηνίου έως ότου οι δύο τιμές (θεωρητική και μετρούμενη) συμπίψουν.

2.2 Μέτρηση σύνθετης αντίστασης πηνίου επί επιπέδου δοκιμίου

Στη συνέχεια τοποθετείται το πηνίο επί της αγωγίμης 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, σχέσεις (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.

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\Delta R_{EXP}(i) - \Delta R_{CALC}(i)}{\Delta R_{EXP}(i)} \right]^2 + \left[\frac{\Delta L_{EXP}(i) - \Delta L_{CALC}(i)}{\Delta L_{EXP}(i)} \right]^2 \quad (7)$$

Σε κάθε περίπτωση, το σφάλμα έχει καλώς καθορισμένο ελάχιστο το οποίο συνήθως κυμαίνεται γύρω στο 0,05%. Είναι δε 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 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 4 παίζουν σημαντικό ρόλο. Εάν η χρησιμοποιούμενη

Θεόδωρος Θεοδουλίδης, Νικόλαος Πουλάκης, Πανπεπιστήμιο και ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας.

Μετρήσεις σύνθετης αντίστασης πηνίων και εφαρμογή τους στο μη καταστροφικό έλεγχο με τη μέθοδο των δινορρευμάτων.

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

$$Y_0 = 1/Z_0 = 1/(R_0 + j\omega L_0) \quad (8)$$

Αυτή αφαιρείται από τη σύνθετη αγωγιμότητα του πηνίου στον αέρα

$$Y_A = 1/Z_A \quad (9)$$

ώστε να πάρουμε τη σύνθετη αγωγιμότητα του ισοδύναμου παράλληλου κλάδου

$$Y_P = Y_A - Y_0 \quad (10)$$

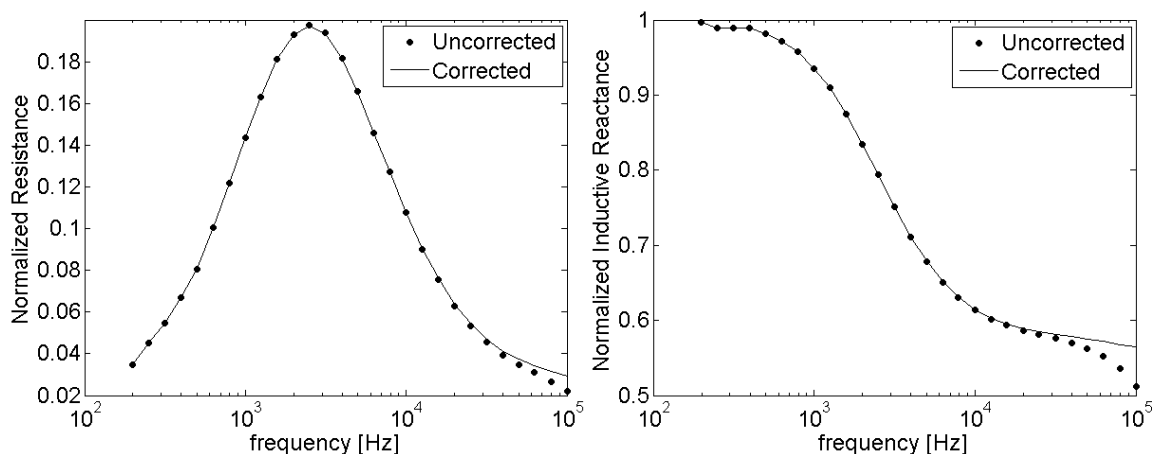
Προκειμένου τώρα να διορθωθεί η μετρηθείσα σύνθετη αντίσταση Z_U , η σύνθετη αγωγιμότητα του παράλληλου κλάδου αφαιρείται από τη σύνθετη αγωγιμότητα Y_U

$$Z_U^{CORR} = 1/(Y_U - Y_P) \quad (11)$$

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

$$\Delta Z_U^{CORR} = Z_U^{CORR} - Z_0 \quad (12)$$

Στο Σχήμα 5 απεικονίζονται οι κανονικοποιημένες τιμές της σύνθετης αντίστασης χωρίς διόρθωση και με διόρθωση, σχέση (11). Όπως είναι φανερό, προκύπτει διαφορά για την περιοχή υψηλών συχνοτήτων. Η κανονικοποίηση έχει γίνει στα διαγράμματα με την αντίδραση του πηνίου στον αέρα $X_0 = \omega L_0$.



Σχήμα 5. Μεταβολή της κανονικοποιημένης σύνθετης αντίστασης (αντίσταση και επαγωγική αντίδραση) σε ένα εύρος συχνοτήτων με το πηνίο επί του αγώγιμου δοκιμίου.

2.3 Εναλλακτική μέτρηση αγωγιμότητας

Στην προηγούμενη παράγραφο αναφέρθηκε ότι μέτρηση της αγωγιμότητας μπορεί να γίνει και με εναλλακτικό τρόπο ούτως ώστε να απαιτείται χρήση της προτεινόμενης διαδικασίας μόνο για τον υπολογισμό της ανύψωσης. Μια γενική διαδικασία μέτρησης της αγωγιμότητας περιγράφεται σε υπάρχουσα προδιαγραφή (ASTM 2002).

Στο εργαστήριό μας, η προδιαγραφή εφαρμόζεται με χρήση κατάλληλου αγωγιμόμετρου και συγκεκριμένα του GE Phasec 2D εξοπλισμένου με την κεφαλή Hocking 47P001 που λειτουργεί αποκλειστικά στα 60kHz. Η μέτρηση αυτή έχει ακρίβεια της τάξης του 0,5% IACS (100% IACS = 58MS/m) και στηρίζεται και αυτή στη μέθοδο των δινορρευμάτων.

Θεόδωρος Θεοδουλίδης, Νικόλαος Πουλιάκης, Παντεπιστήμιο και ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας.

Μετρήσεις σύνθετης αντίστασης πηνίων και εφαρμογή τους στο μη καταστροφικό έλεγχο με τη μέθοδο των δινορρευμάτων.

Η μέτρηση είναι απολύτως συγκριτική και απαιτεί πρότυπα δοκίμια αγωγιμότητας. Δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε λεπτά δοκίμια είτε σε κυλινδρικά δοκίμια καθώς οι μετρήσεις επηρεάζονται από το πάχος ή την καμπυλότητα των εξεταζόμενων δοκιμίων.

Συμπεράσματα

Περιγράφηκε η μέθοδος μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας δοκιμίου καθώς και της ανύψωσης πηνίου σε εργαστηριακές μετρήσεις ακριβείας με τη μέθοδο των δινορρευμάτων. 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).

Βιβλιογραφία

- Bowler N. and Huang Y., "*Electrical conductivity measurement of metal plates using broadband eddy-current and four-point methods*", Measurement Science and Technology, 16, pp.2193-2200, 2005.
- Dodd C.V. and Deeds W.E., "*Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems*", Measurement Science and Technology, 16, pp.2193-2200, 2005.
- Harrison D.J., Jones L.D. and Burke S.K., "*Benchmark problems for defect size and shape determination in eddy-current nondestructive evaluation*", Journal of Nondestructive Evaluation, 15, pp.21-34, 1996.
- Theodoulidis T.P. and Kriezis E.E., "*Eddy current canonical problems (with applications to nondestructive evaluation)*", 2006, TechScience Press.
- ASTM International, Standard E 1004-02, "*Standard practice for determining electrical conductivity using the electromagnetic (eddy-current) method*", Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.03, 2002.

Θεόδωρος Θεοδουλίδης, Νικόλαος Πουλάκης, Πανπεπιστήμιο και ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας.
Μετρήσεις σύνθετης αντίστασης πηνίων και εφαρμογή τους στο μη καταστροφικό έλεγχο με τη μέθοδο των δινορρευμάτων.

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012
