ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΗΣ ΣΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΡΟΠΗΣ

Γ. Τζανής-Κοντομίχαλος[1], Α. Κτενά[1,2], Χ. Μανασής[1], Β. Τσιάντος[3], Π. Βουρνά[2], Ευ. Χριστοφόρου[2]
[1]Εργαστήριο Ενεργειακών Συστημάτων, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ. ΤΕ, ΤΕΙΣΤΕ, Εύβοια
[2]Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Ζωγράφου
[3]Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΤΕ, ΤΕΙ Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης
e-mail: manasis@teiste.gr

Περίληψη

Στην εργασία αυτή εξετάζονται δυο διατάξεις μαγνητοσυστολικών αισθητήρων για μέτρηση ροπής. Η πρώτη διάταξη αφορά στην αξιοποίηση των μαγνητοσυστολικών ιδιοτήτων υμενίου NiFe, υψηλής περιεκτικότητας σε Ni, που έχει ηλεκτροαποτεθεί σε κυλινδρική ράβδο ωστενιτικού χάλυβα στην οποία εφαρμόζεται στατική ροπή. Η απόκριση του αισθητήρα λαμβάνεται ως τάση στα άκρα ενός πηνίου λήψης που περιβάλλει το αισθητήριο υλικό και είναι το αποτέλεσμα της υπέρθεσης του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου κι ενός ενεργού πεδίου H_T που οφείλεται στην εφαρμοζόμενη ροπή T. Προτείνεται ένας τρόπος ποσοτικής συσχέτισης του πεδίου H_T με την ροπή T μέσω μηχανικών και μαγνητικών ιδιοτήτων του αισθητηρίου υλικού και του μη μαγνητικού υποστρώματος. Το πεδίο διέγερσης, σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα αλλά και τους θεωρητικούς υπολογισμούς, προκαλεί κάθετη μετατόπιση της απόκρισης, ενώ η εφαρμοζόμενη ροπή μεταβάλει την κλίση της καμπύλης. Η δεύτερη διάταξη στηρίζεται στο αντίστροφο φαινόμενο Wiedemann σύμφωνα με το οποίο η περιστροφή ενός μαγνητοσυστολικού σύρματος FeSiB που διαρρέεται από ρεύμα AC επάγει τάση στα άκρα ενός σωληνοειδούς που περιβάλλει το σύρμα. Η διάταξη επιτρέπει την διέγερση του σύρματος με ρεύμα που προκαλεί περιφερειακό μαγνητικό πεδίο, την ελεγχόμενη περιστροφή του σύρματος από 0^o έως $\pm 230^o$, και την καταγραφή της τάσης στα άκρα του πηνίου λήψης. Η απόκριση του αισθητήρα έχει μετρηθεί για διάφορες συχνότητες και ρεύματα διέγερσης. Η τάση εξόδου είναι της τάξης δεκάδων mV, λόγω της υψηλής συχνότητας, και μεταβάλλεται γραμμικά για μεγάλο εύρος γωνιών περιστροφής, με ικανοποιητική ευαισθησία της τάξης των 30mV/rad, ενώ η υστέρηση που παρατηρείται στη γραμμική περιοχή είναι αμελητέα.

Abstract

Two magnetostrictive sensor devices for torque measurement are examined in this paper. The first arrangement concerns the utilization of the Ni-rich NiFe thin films electrodeposited on austenitic stainless steel cylindrical rods to which static torque is applied. The sensor response is taken as a voltage at the ends of a receiving coil surrounding the sensing material and is the result of the superposition of the applied magnetic field and an effective H_T field which is due to the applied torque T. A way of quantifying the dependence of the H_T field on the torque T through the mechanical and magnetic properties of the sensing material and the non-magnetic substrate is proposed. The excitation field, according to both experimental results and the theoretical calculations, causes a vertical displacement of the response, while the applied torque changes the slope of the curve. The second arrangement is based on the inverse Wiedemann effect according to which the rotation of a FeSiB magnetostrictive wire which

flows through AC current induces a voltage at the ends of a solenoid surrounding the wire. The device allows for the excitation of the wire with a circumferential magnetic field, the controlled rotation of the wire from 0º to 230º and the recording of the output voltage at the ends of the receiving coil. The sensor response has been measured for various frequencies and excitation currents. The output voltage is in the order of tens of mV, due to the high frequency, and behaves linearly for a wide range of angles of rotation, with a satisfactory sensitivity of the order of 30mV / rad, while the hysteresis observed in the linear region is negligible.

1. Εισαγωγή

Το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής, δηλαδή η παραμόρφωση ενός μαγνητικού υλικού κατά τη διεύθυνση της μαγνήτισής του, οφείλεται στη ζεύξη και αλληλεπίδραση των μαγνητικών και μηχανικών ιδιοτήτων ορισμένων υλικών και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται για ποικιλία διατάξεων αισθητηρίων και ενεργοποιητών (Χριστοφόρου και Κτενά 2007). Το φαινόμενο είναι συνυφασμένο με τη διαδικασία της μαγνήτισης καθώς το υλικό, στην προσπάθειά του να απορροφήσει την ενέργεια του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και να προσανατολιστεί με αυτό για να ελαχιστοποιήσει την εσωτερική του ενέργεια, υφίσταται αλλαγές στον προσανατολισμό των spin που οδηγούν σε μικροπαραμορφώσεις καταρχήν στο ατομικό επίπεδο που σε ορισμένα υλικά είναι μετρήσιμες σε μακροσκοπικό επίπεδο και μπορεί είναι από 10 έως 10000 ppm. Τυπικά μαγνητοσυστολικά υλικά είναι ο σίδηρος, το νικέλιο και διάφορα κράματά τους. Για τη μέτρηση μηχανικών μεγεθών, όπως δύναμη, πίεση, ροπή, χρησιμοποιείται το αντίστροφο φαινόμενο της μαγνητοσυστολής, δηλαδή η αλλαγή της μαγνήτισης του υλικού εξαιτίας της μηχανικής φόρτισης ή παραμόρφωσης.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζουμε δυο διαφορετικές διατάξεις αισθητήρων με διαφορετικά μαγνητοσυστολικά υλικά για τη μέτρηση της ροπής. Η πρώτη διάταξη αφορά τη μέτρηση ροπής σε κυλινδρικούς άξονες πάνω στους οποίους τοποθετείται με κάποιο τρόπο ένα μαγνητοσυστολικό υλικό. Σε αυτήν την κατηγορία αισθητήρων η εφαρμοζόμενη ροπή στον άξονα μεταβάλει τη μαγνητική επαγωγή του υπό μαγνητική διέγερση μαγνητοσυστολικού υλικού που τον επικαλύπτει και επάγει μια τάση σε κάποιο σύστημα πηνίων λήψης (Harada et al. 1982, Rombach and Langheinrich 1995, Umbach et al. 2002), Εναλλακτικά στον άξονα προσαρμόζεται δακτύλιος από μαγνητοσυστολικό χάλυβα του οποίου η μαγνήτιση μεταβάλλεται με τη ροπή (Garshelis 1992, Pinkerton et al. 2002). Τα μέχρι τώρα προταθέντα υλικά είτε δεν αντέχουν τη μηχανική καταπόνηση οπότε περιορίζεται το εύρος εφαρμογών τους είτε, προκειμένου να έχουν υψηλό πιεζομαγνητικό συντελεστή ώστε να παρέχουν την απαραίτητη ευαισθησία στη μέτρηση αλλά και υψηλή αντοχή στη μηχανική καταπόνηση, πρόκειται για κράματα $SmFe_2$/Fe και $Tb_{1-x}Dy_xFe_2$/Fe [5] τα οποία όμως ανεβάζουν το κόστος λόγω της περιεκτικότητας τους σε σπάνιες γαίες (Sm, Tb). Στην προτεινόμενη διάταξη χρησιμοποιούνται κράματα NiFe τα οποία εναποτίθενται με κατάλληλες τεχνικές σε μη μαγνητικό κυλινδρικό υπόστρωμα, όπως είναι ο ευρέως χρησιμοποιούμενος ωστενιτικός χάλυβας.

Η δεύτερη διάταξη χρησιμοποιεί το αντίστροφο φαινόμενο Wiedemann για τη μέτρηση ροπής σε ένα μαγνητοσυστολικό σύρμα FeSiB. Το φαινόμενο Wiedemann αναφέρεται στη ροπή που αναπτύσσεται σε μια μαγνητοσυστολική ράβδο, όπως ένα σύρμα ή μια ταινία, όταν εφαρμόζονται σε αυτό ταυτόχρονα ένα αξονικό, H_z, κι ένα περιφερειακό μαγνητικό πεδίο, H_φ, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη της εφαπτομενικής συνιστώσας της μαγνήτισης, M_φ. Το αξονικό πεδίο δύναται να εφαρμοστεί με τη χρήση ενός

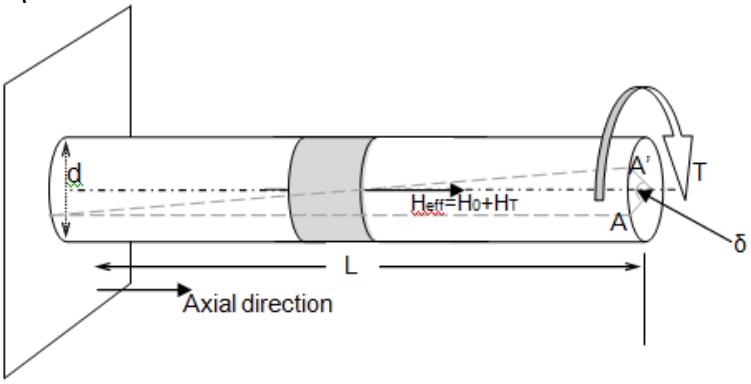
σωληνοειδούς που περιβάλλει το υλικό σε όλο του το μήκος ενώ το εφαπτομενικό πεδίο είναι αποτέλεσμα ρεύματος πυκνότητας *J* που διαρρέει το υλικό. Λόγω της μαγνητοσυστολής το υλικό τείνει να στραφεί προς τη συνισταμένη της μαγνήτισης για να ελαχιστοποιήσει την ενέργειά του και η γωνία περιστροφής είναι ανάλογη της πυκνότητας ρεύματος *J* και της μαγνητοσυστολικής σταθεράς *λ* του υλικού κατά μήκος του άξονά του και αντιστρόφως ανάλογη του μέτρου ακαμψίας του *G*.

Στη διάταξη που παρουσιάζουμε εδώ, χρησιμοποιούμε το αντίστροφο φαινόμενο Wiedemann (IWE) κατά το οποίο μια στρεφόμενη ράβδος που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα επάγει στα άκρα ενός σωληνοειδούς που είναι τυλιγμένο γύρω της μια τάση ίδιας συχνότητας της οποίας το πλάτος είναι ανάλογο της γωνίας περιστροφής. Το ενδιαφέρον για το φαινόμενο αυτό που είναι γνωστό από δεκαετίες, έχει ανανεωθεί εξαιτίας νέων υλικών, όπως κράματα Fe – Ga και Fe – Al (Li 2010, Bobes-Limenes 2012), που εμφανίζουν ιδιαίτερα ελκυστικές ιδιότητες για την αξιοποίησή του, όπως μαγνητοσυστολή της τάξης των μερικών χιλιάδων ppm.

Και στις δυο περιπτώσεις που εξετάζουμε, η μαγνήτιση του υλικού μεταβάλλεται με την επιβαλλόμενη ροπή και η μεταβολή αυτή επάγει μια τάση στα άκρα ενός πηνίου λήψης που περιβάλλει το αισθητήριο υλικό, σύμφωνα με τον νόμο του Faraday. Κατ' αυτήν την έννοια και οι δυο αισθητήρες χρησιμοποιούν το φαινόμενο της επαγωγής για την ανάγνωση του σήματος εξόδου, ωστόσο για να διακρίνουμε τους δυο αισθητήρες μεταξύ τους, ονομάζουμε τον πρώτο επαγωγικό αισθητήρα ροπής και τον δεύτερο αισθητήρα IWE.

2. Επαγωγικός αισθητήρας ροπής

Ο προτεινόμενος επαγωγικός αισθητήρας ροπής (σχήμα 1) αποτελεί μια χαμηλού κόστους διάταξη τόσο ως προς το υλικά που χρησιμοποιούνται όσο και ως προς τη διαδικασία κατασκευής του. Αποτελείται από υμένια NiFe πάχους μερικών μικρών κι μήκους 5mm που αναπτύσσονται με ηλεκτροαπόθεση (Giouroudi et al. 2003) πάνω σε μη μαγνητικό μεταλλικό κυλινδρικό υπόστρωμα από ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα 316L (USA AISI) διαμέτρου 10mm και μήκους 0.30 m long. Το Ni συνεισφέρει στην ευαισθησία του αισθητηρίου λόγω της μαγνητοσυστολής του που είναι της τάξης μερικών δεκάδων ppm και της αμελητέας υστέρησής του, ενώ ο σίδηρος, που εμφανίζει περίπου τη μισή μαγνητοσυστολή, με τη υψηλή τιμή επιδεκτικότητάς του. Έχουν διερευνηθεί διάφορες στοιχειομετρίες NiFe (Ktena et al. 2013) προκειμένου να προκριθούν ως καταλληλότερες για την εφαρμογή οι $Ni_{60}Fe_{40}$ και $Ni_{70}Fe_{30}$. Στην εργασία αυτή παρατίθενται αποτελέσματα για τη $Ni_{60}Fe_{40}$.



Σχήμα 1: Η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα

Στην προτεινόμενη διάταξη, το υμένιο NiFe πολώνεται κατά την αξονική διεύθυνση σε μια τιμή μαγνήτισης που βρίσκεται στη οιωνεί γραμμική περιοχή της καμπύλης M(H) και μετράμε τη μεταβολή της αξονικής επιδεκτικότητας του κατά την εφαρμογή ροπής, *T*, η οποία λειτουργεί ως πρόσθετο ενεργό μαγνητικό πεδίο που δρα υπό γωνία μικρότερη των 45^o ως προς τον άξονα του κυλίνδρου και οδηγεί σε αύξηση της μετρούμενης διαφορικής επιδεκτικότητας χ_{diff}. Παρακάτω περιγράφεται η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα και η πειραματική διάταξη που βασίστηκε σε αυτήν.

2.1 Αρχή λειτουργίας

Η επιφανειακή παραμόρφωση, *ε*, που αναπτύσσεται στον άξονα λόγω της επιβαλλόμενης ροπής είναι ανάλογη της διαμέτρου του d και της γωνιακής μετατόπισης δ και αντιστρόφως ανάλογη του μήκους του, L:

$$\varepsilon = \frac{d\delta}{2L} \quad (1)$$

Εάν *G* είναι το μέτρο ακαμψίας του άξονα, η επιφανειακή διατμητική τάση σ είναι ανάλογη της παραμόρφωσης *ε*:

$$\sigma = G\varepsilon = G\frac{d\delta}{2L} \quad (2)$$

Αλλά,

$$\sigma = Td/2J \quad (3)$$

όπου *J* είναι η πολική ροπή αδρανείας του άξονα. Δεδομένου ότι για κυλινδρικό άξονα $J = \frac{\pi d^4}{32}$ προκύπτει ότι η τάση *σ* συνδέεται με τη ροπή *T* μέσω της σχέσης:

$$\sigma = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (4)$$

Η αναπτυσσόμενη επιφανειακή τάση επάγει στο υμένιο NiFe ανισοτροπία K_u, ανάλογη της μαγνητοσυστολικής σταθεράς του *λ*, με διεύθυνση περίπου 45^o ως προς τον άξονα του κυλίνδρου:

$$K_u = \frac{3}{2}\lambda\sigma = \frac{48}{\pi d^3}\frac{G_{NiFe}}{G_{steel}}\lambda T \quad (5)$$

όπου G_{NiFe} και G_{steel} τα μέτρα ακαμψίας του υμενίου και του χαλύβδινου άξονα αντίστοιχα, και η οποία προσδίδει ενέργεια:

$$E_K = K_u sin^2\theta \quad (6)$$

όπου θ είναι η γωνία που σχηματίζει η μαγνήτιση *M* με τον εύκολο άξονα που οφείλεται στην K_u.

Στη δεδομένη διάταξη, η ενέργεια απομαγνήτισης μπορεί να αμεληθεί δεδομένου ότι το υμένιο είναι πολύ μικρότερων διαστάσεων από το πηνίο διέγερσης και είναι τοποθετημένο στο κέντρο του πεδίου μαγνήτισης, ενώ το πηνίο λήψης είναι μικρότερου μήκους από το υμένιο και περιβάλει το κέντρο του. Συνεπώς, η μόνη επιπλέον ενεργειακή συνεισφορά οφείλεται στο επιβαλλόμενο πεδίο:

$$E_H = -\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{H_0} = -MH_0cos(\varphi-\theta) \quad (7)$$

όπου φ είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του επιβαλλόμενου πεδίου και του επαγόμενου εύκολου άξονα.

Η ελαχιστοποίηση της ολικής ενέργειας ως προς θ οδηγεί στη σχέση:

$$\frac{dE}{d\theta} = -MHsin(\varphi-\theta) + 2K_u sin\theta cos\theta \quad (8)$$

η λύση της οποίας αντιστοιχεί στο συνεκτικό μηχανισμό περιστροφής που περιγράφεται από το μοντέλο Stoner-Wohlfarth.

Ορίζοντας ως ενεργό πεδίο H_{eff} το πεδίο που ικανοποιεί τη σχέση:

$$-MH_0 sin(\varphi - \theta) + 2K_u sin\theta cos\theta = -MH_{eff} sin(\varphi - \theta) \quad (9)$$

Όπου $H_{eff}=H_0+H_T$, το πεδίο που επάγεται από τη ροπή υπολογίζεται ως:

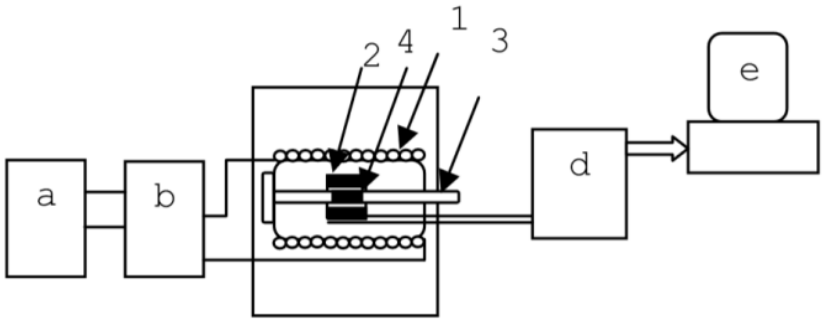
$$H_T = \frac{K_u sin2\theta}{M(cos\varphi sin\theta - sin\varphi cos\theta)} \quad (10)$$

Επομένως, το H_T εξαρτάται από τη γωνία φ που σχηματίζεται από το επιβαλλόμενο πεδίο H_0 και τον από την επιβαλλόμενη ροπή επαγόμενο εύκολο άξονα και είναι ανάλογο προς την επαγόμενη ανισοτροπία K_u η οποία σύμφωνα με την (5) είναι ανάλογη της ροπής T. Όταν $\varphi=0$, *το* H_T λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του, το οποίο συνάδει με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αισθητήρες βασισμένους στη μέγιστη περιστροφή της μαγνήτισης M (Harada et al. 1982, Rombach and Langheinrich 1995, Umbach et al. 2002, Garshelis 1992, Pinkerton et al. 2002). Σε κατάσταση ηρεμίας $T=0$, $H_T=0$ και $H_{eff}= H_0$.

2.2 Πειραματική διάταξη

Για την πειραματική διερεύνηση των δυνατοτήτων αισθητήρα που βασίζεται στην παραπάνω αρχή λειτουργίας, κατασκευάστηκε η διάταξη του σχήματος 2. Ο άξονας είναι πακτωμένος στο ένα άκρο του ενώ κάθετα στο ελεύθερο άκρο του έχει προσαρμοστεί βραχίονας μήκους 0.5m, στο ελεύθερο άκρο του οποίου αναρτώνται τυποποιημένα βάρη. Ένα πηνίο διέγερσης τοποθετείται γύρω από τον άξονα με τρόπο τέτοιο ώστε η περιοχή που έχει καλυφθεί από το υμένιο NiFe να βρίσκεται στο κέντρο του πηνίου διέγερσης. Το πηνίο λήψης περιβάλλει ολόκληρο το υμένιο και συνοδεύεται από 2 πηνία αντιστάθμισης εκατέρωθεν αυτού. Σύμφωνα με τα όσα αναλύονται στην παραπάνω ενότητα, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η εφαρμοζόμενη ροπή επάγει έναν εύκολο άξονα ανισοτροπίας γωνίας φ = - 45^o ως προς τον άξονα. Έτσι, το συνολικό πεδίο H που εφαρμόζεται κατά μήκος του είναι:

$$H_{eff} = H_0 + \frac{K_u sin2\theta}{\frac{\sqrt{2}}{2}M(cos\theta - sin\theta)} \quad (11)$$



Σχήμα 2 – Πειραματική διάταξη (a) γεννήτρια ημιτονοειδούς διέγερσης (b) ενισχυτής (c) μαγνητόμετρο αποτελούμενο από: (1) πηνίο διέγερσης (2) πηνίο λήψης (3) κυλινδρικό δοκίμιο (4) υμένιο NiFe (d) κάρτα λήψης δεδομένων (e) H/Y

Το πλάτος του επιβαλλόμενου πεδίου H_0, που καθορίζει το σημείο λειτουργίας του αισθητήρα στη γραμμική περιοχή της καμπύλης M(H), οφείλεται σε εναλλασσόμενη τάση

125Hz που εφαρμόζεται στα άκρα του πηνίου διέγερσης και είναι ανάλογο του πλάτους του ρεύματος που το διαρρέει. Η μεταβολή της επιδεκτικότητας $\chi_{diff} = dM/dH_{eff}$ του NiFe λόγω του (11) επάγει μια τάση V_{out} στα άκρα του πηνίου λήψης σύμφωνα με το Νόμο του Faraday. Τόσο η τάση διέγερσης και η τάση εξόδου του πηνίου λήψης μετράται μέσω μιας κάρτας NI6251.

Η κορυφή της τάξης εξόδου V_{peak} αντιστοιχεί στη μέγιστη κλίση της καμπύλης υστέρησης $M(H)$ του υμενίου:

$$V_{peak} \propto max\left(\chi_{diff}(H) = \frac{dM}{dH}\right) \qquad (12)$$

Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων: (α) με μεταβλητή ροπή T, υπό σταθερό πεδίο H_0 (β) με μεταβλητό H_0 υπό σταθερή T.

Σύμφωνα με την (11), όταν επιβάλλεται ροπή T, το ενεργό πεδίο H_{eff} που επιβάλλεται κατά μήκος του άξονα είναι το άθροισμα του επιβαλλόμενου πεδίου H_0 και της από τη ροπή επαγόμενης αξονικής συνιστώσας του H_T.

2.3 Αποτελέσματα

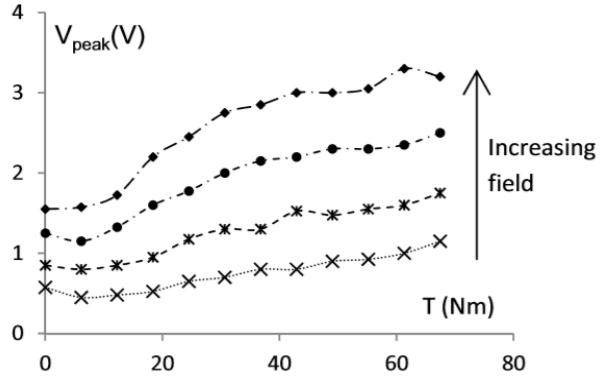
Τα σχήματα 3 και 4 παρουσιάζουν την απόκριση V_{peak} για το $Ni_{60}Fe_{40}$. Οι τιμές του μαγνητικού πεδίου εμφανίζονται σε (au) γιατί το μαγνητόμετρο δεν είναι διακριβωμένο.

Για επιβαλλόμενο πεδίο H_0 που πολώνει το NiFe στη γραμμική περιοχή της $M(H)$, η εξάρτηση της διαφορικής επιδεκτικότητας χ_{diff} από το πεδίο μπορεί να θεωρηθεί σταθερή: $M(H_0)=\chi_{diff} H_0$ και η προκύπτουσα V_{peak} δύναται να περιγραφεί από τη σχέση (σχήμα 3):

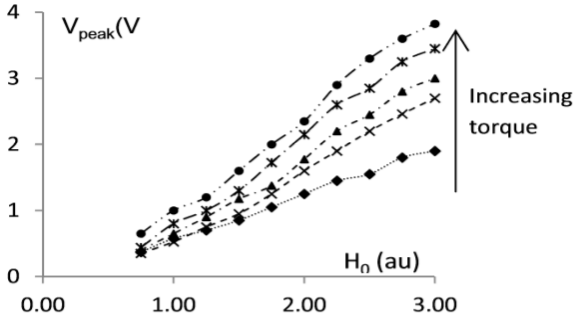
$$V_{peak}(T) = V(H_0)+k_1 T \qquad (13)$$

Όπου k_1 σταθερά εξαρτώμενη από την καμπύλη μαγνήτισης και εκφράζει την ευαισθησία του αισθητήριου υμενίου στο σημείο λειτουργίας.

Η κάθετη μετατόπιση που παρατηρείται στο σχήμα 3 οφείλεται στην τιμή της $V(H_0)$ που εξαρτάται από τη μαγνήτιση πόλωσης $M(H_0)$ για μηδενική ροπή και είναι ανάλογη της $V(H_0) = \alpha\ \chi_{diff}$ όπου α μια σταθερά που εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πηνίου διέγερσης.



Σχήμα 3: Μέγιστη τιμή τάσης εξόδου, V_{peak}, ως προς την εφαρμοζόμενη ροπή T για διάφορες τιμές επιβαλλόμενου πεδίου.



Σχήμα 4: Μέγιστη τιμή τάσης εξόδου, V_{peak}, συναρτήσει του επιβαλλόμενου πεδίου για διάφορες τιμές της εφαρμοζόμενης ροπής T.

Από τη σχέσεις (5) και (11) προκύπτει ότι:

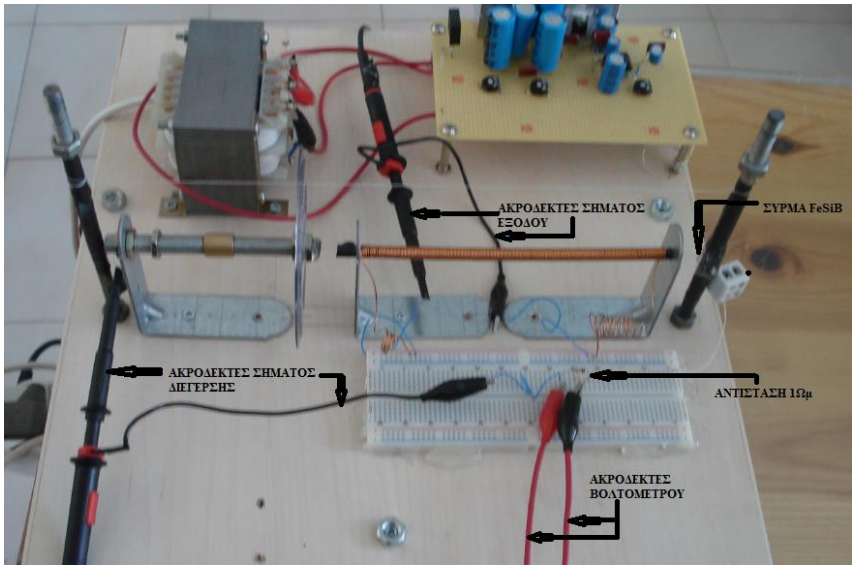
$$k_1 \propto \frac{48}{\pi d^3}\frac{G_{NiFe}}{G_{steel}}\lambda_{NiFe}\frac{sin2\theta}{\frac{\sqrt{2}}{2}V(H_0)\,(cos\theta - sin\theta)} \qquad (14)$$

Για σταθερή ροπή T και μεταβαλλόμενο πεδίο H_0 (σχήμα 4):

$$V_{peak}(H_0) = k_1 T\, H_0 \qquad (15)$$

3. Αισθητήρας IWE

Η διάταξη μέτρησης ροπής που βασίζεται στο αντίστροφο φαινόμενο Wiedemann (IWE) αποτελείται (Εικόνα 1) από α) μια γεννήτρια συχνοτήτων για το ρεύμα διέγερσης β) το αισθητήριο που είναι ένα μαγνητοσυστολικό άμορφο σύρμα FeSiB διαμέτρου 110μm γ) μια μηχανική διάταξη για την ελεγχόμενη περιστροφή του σύρματος γύρω από τον άξονά του δ) ένα πηνίο λήψης γύρω από το σύρμα, τυλιγμένο πάνω σε σωλήνα από πολυπροπυλένιο μήκους 180mm και διαμέτρου 5mm, με αγωγό χαλκού 0.6mm αντίστασης 0.06310 Ω/m, 200 σπειρών και συνολικής αντίστασης R=0.09465Ω ε) σύστημα λήψης και καταγραφής δεδομένων που αποτελείται από κάρτα παλμογράφου TP 801 PCI για τη μέτρηση της τάσης εξόδου και πολύμετρο για τη μέτρηση της RMS τιμής του ρεύματος που διαρρέει το σύρμα. Το σύρμα διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα που έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη εφαπτομενικής συνιστώσας μαγνήτισης η οποία μεταβάλλεται περιοδικά με τη συχνότητα διέγερσης. Το πηνίο λήψης που είναι τοποθετημένο γύρω από το σύρμα σε όλο του το μήκος εμφανίζει τάση εξ επαγωγής V_{out} στα άκρα του εξαιτίας της μεταβολής της μαγνητικής ροής του υλικού στο εσωτερικό του. Συνεπώς, η V_{out} εξαρτάται μόνο από την αξονική συνιστώσα της μαγνήτισης και είναι ανάλογη της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας $\mu_{diff}=dB/dH$ κατά μήκος του σύρματος. Το πλάτος της V_{out} αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της μ_{diff} και είναι η κλίση του βρόχου υστέρησης του υλικού όταν η μαγνήτιση αλλάζει πρόσημο. Σε συνθήκες μηδενικής ροπής, αν το σύρμα έχει προσανατολίσει όλους τους μαγνητικούς τομείς του στη διεύθυνση του περιφερειακού πεδίου, η τιμή αυτή τείνει στο μηδέν. Όταν το σύρμα περιστραφεί, η μαγνητική δομή αναπροσαρμόζεται για να απορροφήσει την ενέργεια της εφαρμοζόμενης δύναμης και ενισχύεται η αξονική συνιστώσα της μαγνήτισης.



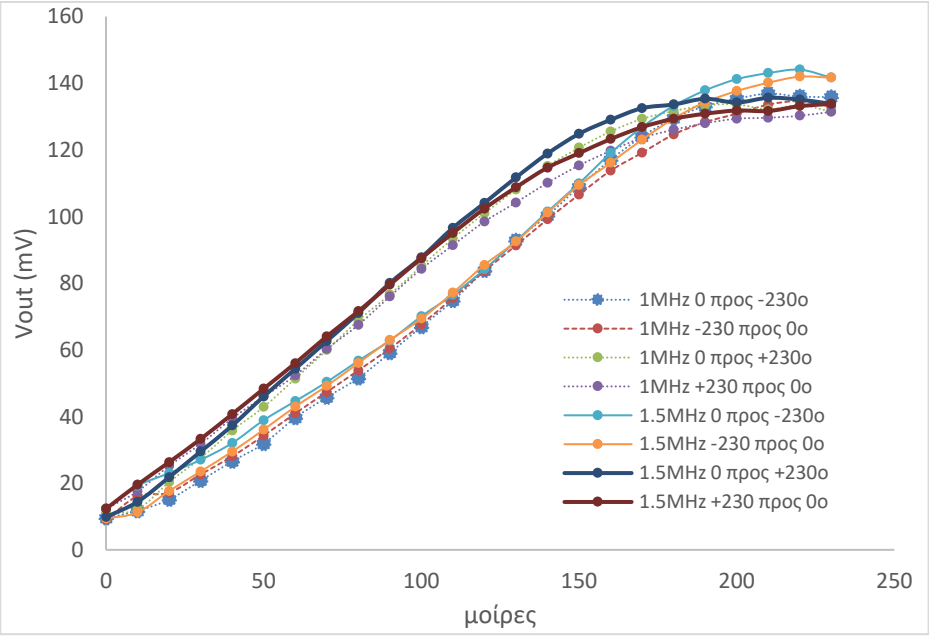
Εικόνα 1: Η διάταξη του αισθητήρα IWE

Για τον προσδιορισμό του εύρους της βέλτιστης περιοχής λειτουργίας του αισθητήρα, αρχικά πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με συχνότητες διέγερσης από 200 kHz έως 2 MHz.

Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του αισθητήρα μετρήθηκε η απόκρισή του σε σχέση με το πλάτος V_{in} και τη συχνότητα f του σήματος διέγερσης για γωνίες περιστροφής από 0 έως ±230^o. Για κάθε ζεύγος τιμών (V_{in}, f), περιστρέφουμε βηματικά το σύρμα ανά 10^o από την ηρεμία 0 ^{o} έως τις +230^o (δεξιόστροφα), επιστρέφουμε με το ίδιο βήμα στις 0^o, περιστρέφουμε ανά 10^o έως τις -230^o κι επιστρέφουμε με το ίδιο βήμα στην αρχική θέση. Κάθε φορά καταγράφουμε το ρεύμα I που διαρρέει το σύρμα, το πλάτος V_{out} και τη συχνότητα f του σήματος εξόδου. Για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία της στιγμιαίας επαναλαμβανόμενης μέτρησης της κάρτας παλμογράφου, λαμβάνοντας 256 μετρήσεις για κάθε σημείο.

3.1 Αποτελέσματα

Το Σχήμα 5 αποτυπώνει την απόκριση του αισθητήρα για ρεύμα διέγερσης 14mA και συχνότητες 1MHz και 1.5MHz. Γενικά, η τάση εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά για ένα εύρος τιμών έως τις 150^o περίπου και δεν παρουσιάζει υστέρηση από και προς το σημείο 0^o όπου όμως παρουσιάζει μια κάθετη μετατόπιση περίπου 10mV. Η απόκριση ωστόσο διαφοροποιείται σημαντικά με τη φορά περιστροφής. Η αριστερόστροφη καμπύλη έχει μεγαλύτερο γραμμικό εύρος ενώ η δεξιόστροφη εμφανίζει μια κάθετη μετατόπιση της τάξης των +15mV σε σχέση με την πρώτη. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση σχετικά με τη φορά περιστροφής παρατηρείται σε αυτές ακριβώς τις συχνότητες. Στις συχνότητες f=0.2 και f=0.5 MHz η κάθετη μετατόπιση της δεξιόστροφης ως προς την αριστερόστροφη καμπύλη είναι της τάξης των +5mV ενώ στα 2MHz οι διαφοροποιήσεις είναι στα πλαίσια του στατιστικού σφάλματος.



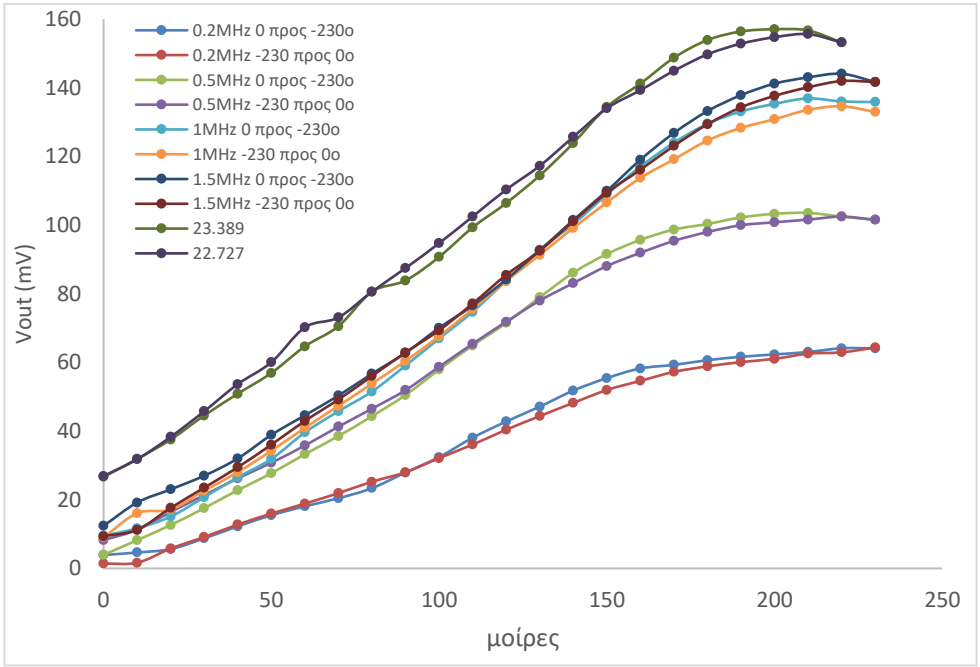
Σχήμα 5. Απόκριση αισθητήρα για f=1MHz (εστιγμένη γραμμή) και f=1.5MHz (συνεχής γραμμή) για ρεύμα διέγερσης 14mA.

Το σχήμα 6 δείχνει τις αριστερόστροφες καμπύλες για τις συχνότητες f=0.2, 0.5, 1.0, 1.5

και 2.0 MHz. Η ευαισθησία της απόκρισης αυξάνει με τη συχνότητα από 0.2 έως 1 MHz και παραμένει σταθερή στα 35 mV/rad για f>1MHz. Η καμπύλη των 2MHz εμφανίζει μια κάθετη μετατόπιση +15mV.

Η ευαισθησία του αισθητήρα είναι πολύ καλύτερη από αυτή που αναφέρεται στη (P. Bobes-Limenes, 2012) για ταινία Fe-Al με ιδιαίτερα μεγάλη μαγνητοσυστολή περίπου 19% όπου έχουν χρησιμοποιηθεί συχνότητες διέγερσης έως 10kHz και ένταση ρεύματος διέγερσης 50-400mA. Αντίθετα, στις μετρήσεις μας η ένταση του ρεύματος δεν ξεπέρασε τα 14mA ενώ η απόκριση ήταν μετρήσιμη για f>0.2MHz. Αυτό εξηγείται εάν θεωρήσουμε ότι στο φαινόμενο Wiedemann συνεισφέρουν κυρίως οι επιφανειακοί ελικοειδείς μαγνητικοί τομείς (Li et al. 2010).

Ωστόσο τόσο η εξάρτηση της απόκρισης από τη συχνότητα όσο και από το ρεύμα διέγερσης που ορίζει το μέγεθος του ελάσσονος βρόχου που διατρέχει η μαγνήτιση του υλικού κατά τον άξονά του, απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση. Δεδομένου ότι όλες οι μετρήσεις έγιναν με το ίδιο δείγμα, η επαναληψιμότητα των μετρήσεων απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση για να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της κυκλικής φόρτισης. Τέλος, θα εξεταστεί και η απόκριση άλλων υλικών τόσο θετικής όσο και αρνητικής μαγνητοσυστολής με απώτερο σκοπό την αξιοποίηση του φαινομένου IWE για τη μέτρηση ιξώδους.



Σχήμα 6. Απόκριση αισθητήρα για συχνότητες f=0.2, 0.5, 1.0, 1.5 και 2.0 MHz (αριστερή περιστροφή)

4. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα που παρουσιάσθηκαν υποδεικνύουν ότι με την αξιοποίηση του φαινομένου της μαγνητοσυστολής είναι δυνατή η κατασκευή αισθητήρων ροπής με τη χρήση υλικών χαμηλού κόστους, όπως υμένια NiFe ή σύρματα FeSiB. Και οι δύο προτεινόμενες διατάξεις προσφέρουν ικανοποιητική ευαισθησία, και απλότητα κατασκευής ενώ συνεισφέρουν στην καλύτερη κατανόηση των φαινομένων της

μαγνητομηχανικής σύζευξης.

***Acknowledgements**: This research has been co-financed by the European Union (European Social Fund – ESF) and Greek national funds through the Operational Program "Education and Lifelong Learning" of the National Strategic Reference Framework (NSRF) - Research Funding Program: ARCHIMEDES III. Investing in knowledge society through the European Social Fund.*

5. Βιβλιογραφία

P. Bobes-Limenes, J. A. García, J. Carrizo, M. Rivas, J. C. Martínez-García, *"Inverse Wiedemann effect in Fe–Al alloys for torque sensing applications",* Sensors and Actuators A:Physical, 180, pp. 45-48 (2012) https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.03.041

I.J. Garshelis, *"A torque transducer utilizing a circularly polarized ring",* IEEE Transactions on Magnetics, 28 (5), pp 2202-2204 (1992).

I. Giouroudi, C. Orfanidou, E. Hristoforou, "*Circumferentially oriented NI cylindrical thin films for torque sensor applications"*, Sensors and Actuators A, 106, pp. 179-18 (2003)

K. Harada, I. Sasada, T. Kawajiri, M. Inoue, "*A new torque transducer using stress sensitive amorphous ribbons", IEEE Transactions on Magnetics*, 18 (6), pp. 1767-1769 (1982)

Evangelos Hristoforou, Aphrodite Ktena, "*Magnetostriction and magnetostrictive materials for sensing applications"*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 316 (2), pp. 372-378 (2007)

Aphrodite Ktena, Christos Manasis, Petros Tsakiridis, "*Design and Characterization of a Magnetostrictive Torque Sensor", Sensor Letters*, 11, pp. 184–186 (2013)

J.H. Li, X.X. Gao, T. Xia, L. Cheng, X.Q. Bao and J. Zhu, "*Textured Fe–Ga magnetostrictive wires with large Wiedemann twist",* Scripta Materialia, 63, 28-31, (2010)

F.E. Pinkerton, J.F. Herbst, C.H. Olk, M.S. Meyer, J.J. Moleski, "$Tb_{1-x}Dy_xFe_2/Fe$ *composites: compositional effects on torque response",* Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 241, pp. 162–172 (2002)

Pirmin Rombach, Werner Langheinrich, "*Modelling of a micromachined torque sensor",* Sensors and Actuators A, 46, pp. 294-297 (1995)

Frank Umbach, Heinrich Acker, Johannes von Kluge, *"Contactless measurement of torque"*, Mechatronics, 12, pp. 1023–1033 (2002)