



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Εργαστηριακή Άσκηση

Μαγνητικοί αισθητήρες μέτρησης θέσης και πεδίου

Σπυρίδων Αγγελόπουλος

Αθήνα
2022

1 Θεωρητικό μέρος

Σκοπός αυτής της άσκησης είναι η μελέτη των μαγνητικών αισθητήρων πύλης-ροής (fluxgate) και η χρήση τους για τη μέτρηση θέσης και μαγνητικού πεδίου.

1.1 Αισθητήρες Fluxgate

Ένας αισθητήρας fluxgate μπορεί να αποτελείται από ένα ή περισσότερα πηνία, τα οποία αναλαμβάνουν τη διέγερση του μαγνητικού του πυρήνα και τη λήψη του τελικού σήματος. Μία τυπική διάταξη, όπως αυτή που χρησιμοποιείται στην εργαστηριακή άσκηση, περιλαμβάνει ένα πηνίο διέγερσης και ένα πηνίο λήψης. Το ένα πηνίο περιελίσσεται πάνω από το άλλο και στο εσωτερικό τους τοποθετείται ένας μαγνητικός πυρήνας σε μορφή σύρματος ή ταινίας.

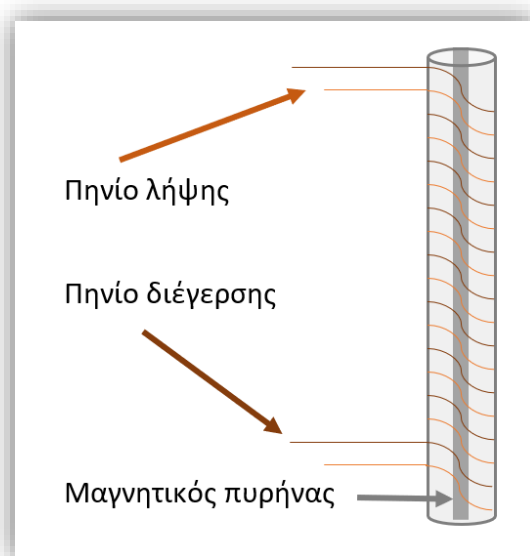
Η αρχή λειτουργίας των αισθητήρων fluxgate βασίζεται στα χαρακτηριστικά του βρόχου υστέρησης των μαγνητικών υλικών από τα οποία κατασκευάζεται ο μαγνητικός πυρήνας (π.χ. CoFeSiB ή FeSiB) και πιο συγκεκριμένα στο γεγονός ότι ο βρόχος τους είναι συμμετρικός, μη γραμμικός και φθάνει στον κορεσμό για σχετικά μικρά μαγνητικά πεδία.

Το πηνίο διέγερσης ενός αισθητήρα fluxgate τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση, με αποτέλεσμα να δημιουργεί εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό το πεδίο επηρεάζει τον μαγνητικό πυρήνα που βρίσκεται στο εσωτερικό του. Τελικά, το νέο μαγνητικό σήμα λαμβάνεται από το πηνίο λήψης και μετατρέπεται ξανά σε ηλεκτρικό. Βάσει αυτής της λογικής, μπορούν να δημιουργηθούν διαφορετικές αισθητήριες διατάξεις, οι οποίες θα είναι ικανές να μετρήσουν ποικίλα μεγέθη, όπως είναι η θέση/μετατόπιση ενός αντικειμένου ή το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

1.1.1 Αισθητήρας πεδίου

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται ένας τυπικός αισθητήρας fluxgate. Το πηνίο διέγερσης αποτελείται από $N_i = 1100$ σπείρες. Αντιστοίχως, το πηνίο λήψης αποτελείται από $N_o = 1100$ σπείρες. Και τα δύο πηνία είναι κατασκευασμένα με σύρμα χαλκού $\varnothing 0.1$ mm, έχουν μήκος $L = 70$ mm και είναι τυλιγμένα σε κύλινδρο διαμέτρου $D = 1$ mm.

Ο πυρήνας είναι άμορφη ταινία CoFeSiB με σχετική μαγνητική διαπερατότητα $\mu_r = 10000$.



Σχήμα 1: Τυπικός αισθητήρας fluxgate.

Εάν στα άκρα του πηνίου διέγερσης εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση, τότε στα άκρα του πηνίου λήψης, σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, επάγεται τάση ίση με:

$$V_{out}(t) = -N_0 \frac{d\Phi}{dt} = -N_0 A \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

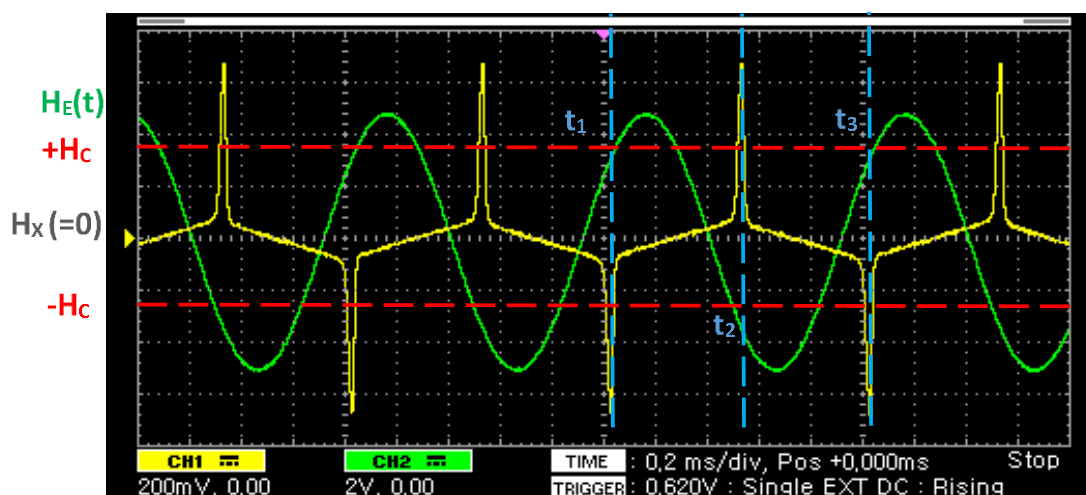
όπου Φ είναι η μαγνητική ροή, B η μαγνητική επαγωγή και A το εμβαδόν διατομής του πηνίου.

Από την παραπάνω σχέση γίνεται αντιληπτό ότι η τάση εξόδου του αισθητήρα είναι ίση με έναν γνωστό παράγοντα (δηλ. τη διατομή του πηνίου επί τον αριθμό των σπειρών του) επί την παράγωγο της μαγνητικής επαγωγής ως προς τον χρόνο.

Τελικά, η μέτρηση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιώντας μία διάταξη όμοια με την προηγούμενη, μπορεί να βασιστεί στη μέτρηση της χρονικής μεταβολής Δt μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του σήματος εξόδου. Ο μαγνητικός πυρήνας αποτελείται από τις λεγόμενες μαγνητικές περιοχές, τα όρια των οποίων ονομάζονται μαγνητικά τοιχώματα. Χαρακτηριστική ιδιότητα των μαγνητικών περιοχών είναι ότι τείνουν να προσανατολίζονται στη φορά του εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, μέσω της μετακίνησης των

μαγνητικών τους τοιχωμάτων. Όταν το σύνολο των μαγνητικών περιοχών ενός υλικού έχει προσανατολιστεί πλήρως ως προς το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, τότε το υλικό λέγεται ότι έχει φθάσει στον μαγνητικό κορεσμό.

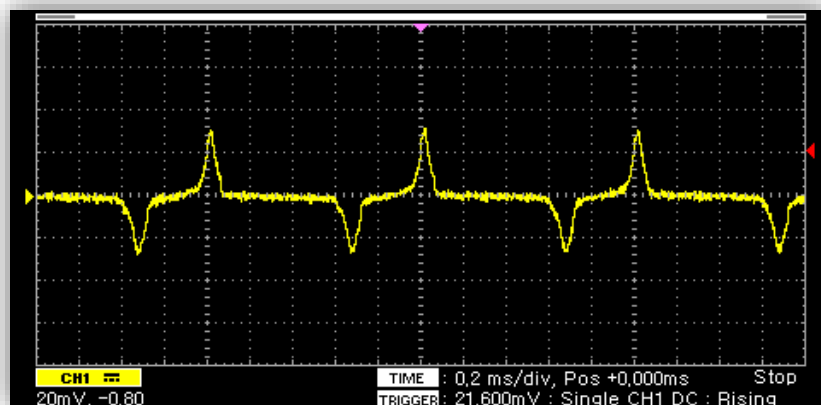
Συνεπώς, εάν το πηνίο διέγερσης τροφοδοτηθεί με κατάλληλο σήμα (π.χ. ημιτονοειδές, συχνότητας 1 kHz και πλάτους 2.5 V), ο μαγνητικός πυρήνας του αισθητήρα θα οδηγείται σε κορεσμό σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και το σήμα του πηνίου λήψης θα είναι όπως αυτό του Σχήματος 2.



Σχήμα 2: Πράσινο χρώμα: Σήμα πηνίου διέγερσης, Κόκκινο χρώμα: Συνεκτικό πεδίο, Κίτρινο χρώμα: Σήμα πηνίου λήψης.

Κατά την απουσία εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, ο μαγνητικός πυρήνας θα φθάνει στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές μαγνήτισης σε ίσα χρονικά διαστήματα, αφού θα επηρεάζεται μόνο από το εναλλασσόμενο σήμα που τροφοδοτεί το πηνίο διέγερσης. Άρα, η χρονική μεταβολή Δt , μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων θα είναι μηδενική, όπως είναι και στο Σχήμα 2.

Αντίθετα, η επιβολή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου που θα επιδρά στον μαγνητικό πυρήνα ταυτόχρονα με το σήμα διέγερσης, θα οδηγήσει πιο γρήγορα ή πιο αργά (αναλόγως της φοράς αυτού του πεδίου) τον μαγνητικό πυρήνα σε κορεσμό. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να μεταβληθεί και η χρονική διαφορά μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του σήματος εξόδου, η οποία πλέον θα είναι διάφορη του μηδενός, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Σήμα πηνίου λήψης κατά την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Επομένως, διεξάγοντας την κατάλληλη βαθμονόμηση, είναι δυνατή η συσχέτιση της χρονικής διαφοράς των μεγίστων και ελαχίστων του σήματος εξόδου με το μέτρο και την κατεύθυνση του άγνωστου εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

1.1.2 Αισθητήρας θέσης

Όπως είναι εμφανές, ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα χαρακτηριστικά και την απόδοση ενός αισθητήρα fluxgate, είναι ο μαγνητικός του πυρήνας. Έστω όμως ότι ο πυρήνας δεν καλύπτει όλο το μήκος των πηνίων διέγερσης και λήψης. Σε αυτήν την περίπτωση, μέρος των πηνίων θα αλληλεπιδρά με τον αέρα και όχι με τον μαγνητικό πυρήνα, με αποτέλεσμα να μειώνεται αντίστοιχα και το πλάτος του σήματος που λαμβάνεται από το πηνίο λήψης.

Συνεπώς, η τοποθέτηση ή απομάκρυνση του μαγνητικού πυρήνα προκαλεί την αύξηση ή μείωση, αντιστοίχως, του πλάτους εξόδου. Επομένως, μετά από κατάλληλη βαθμονόμηση, είναι δυνατός ο συσχετισμός της τάσης εξόδου που λαμβάνεται από το πηνίο λήψης με τη θέση του μαγνητικού πυρήνα σε σχέση με τον αισθητήρα.

2 Πειραματικό Μέρος

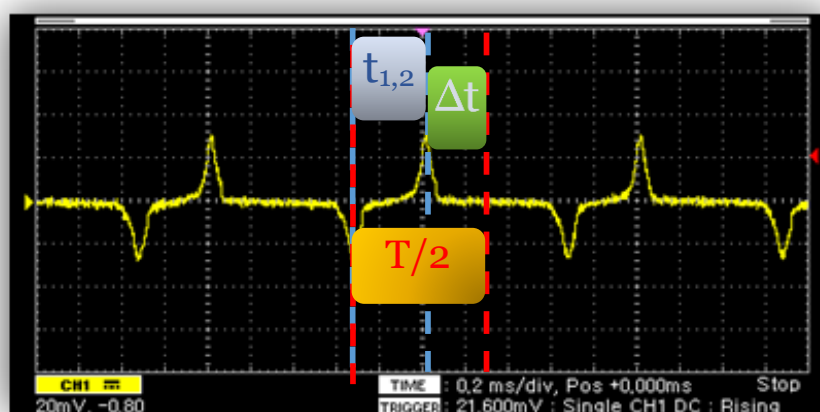
2.1 Αισθητήρας Πεδίου

2.1.1 Διεξαγωγή μετρήσεων

1. Συνδέστε το πηνίο διέγερσης του αισθητήρα με τη γεννήτρια συχνοτήτων.
2. Συνδέστε το πηνίο λήψης του αισθητήρα με τον παλμογράφο.
3. Τροφοδοτήστε το πηνίο διέγερσης με **ημιτονοειδές** σήμα τάσης $V_{in_pp} = 5\text{ V}$ και συχνότητας $f = 1\text{ kHz}$.
4. Προσθέστε στο σήμα διέγερσης μια συνεχή συνιστώσα V_{DC} με τιμές από **-2 V** έως **2 V** με βήμα **0.5 V**, μέσω της λειτουργίας “**DC Offset**” της γεννήτριας συχνοτήτων. Για κάθε τιμή, μετρήστε με τη βοήθεια του παλμογράφου τη χρονική διαφορά $t_{1,2}$ μεταξύ **ενός ελαχίστου και ενός διαδοχικού μεγίστου** της εμφανιζόμενης κυματομορφής.
5. Επαναλάβετε τις μετρήσεις του προηγούμενου βήματος για σήμα διέγερσης με συχνότητα $f = 5\text{ kHz}$.

2.1.2 Επεξεργασία μετρήσεων

1. Για κάθε μέτρηση, υπολογίστε τη χρονική διαφορά Δt βάσει της σχέσης $\Delta t = \frac{T}{2} - t_{1,2}$, όπου T η περίοδος του αντίστοιχου σήματος διέγερσης (βλ. Σχήμα 5).



Σχήμα 5: Υπολογισμός χρονικής διαφοράς Δt .

2. Σχεδιάστε σε ένα κοινό διάγραμμα $\Delta t(V_{DC})$ τις καμπύλες που προκύπτουν για τις δύο συχνότητες.
3. Εξηγήστε τα παραπάνω διαγράμματα.
4. Αναφέρετε εφαρμογές του παραπάνω αισθητήρα.

2.2 Αισθητήρας Θέσης

2.2.1 Διεξαγωγή μετρήσεων

1. Διατηρήστε τη συνδεσμολογία της προηγούμενης διάταξης (έχοντας όμως θέσει DC offset = 0 V).
2. Τροφοδοτήστε το πηνίο διέγερσης με **ημιτονοειδές** σήμα τάσης $V_{in_pp} = 5\text{ V}$ και συχνότητας $f = 1\text{ kHz}$.
3. Αφαιρέστε σταδιακά τον μαγνητικό πυρήνα του αισθητήρα μέχρι την απόσταση $x = 50\text{ mm}$ με βήμα 5 mm και καταγράψτε με τη βοήθεια του παλμογράφου την τάση εξόδου V_{out_pp} για κάθε θέση.
4. Επαναλάβετε τις μετρήσεις του προηγούμενου βήματος για σήμα διέγερσης με συχνότητα $f = 5\text{ kHz}$.

2.2.2 Επεξεργασία μετρήσεων

1. Σχεδιάστε σε ένα κοινό διάγραμμα $V_{out_pp}(x)$ τις καμπύλες που προκύπτουν για τις δύο συχνότητες.
2. Εξηγήστε τα παραπάνω διαγράμματα.
3. Αναφέρετε εφαρμογές του παραπάνω αισθητήρα.

2.3 Βρόχος Υστέρησης

2.3.1 Επεξεργασία μετρήσεων

Με δεδομένο ότι η συνολική αντίσταση του πηνίου διέγερσης ήταν $R = 100\ \Omega$:

1. Χρησιμοποιήστε το συνημμένο αρχείο δεδομένων και δημιουργήστε σε ένα κοινό διάγραμμα τις καμπύλες $I_{in}(t)$ και $V_{out}(t)$ του αισθητήρα.
2. Σχολιάστε το παραπάνω αποτέλεσμα.
3. Χρησιμοποιώντας κάποιο λογισμικό μαθηματικής ανάλυσης δεδομένων (π.χ. Origin, Matlab, Octave κ.λπ.), υπολογίστε το ολοκλήρωμα των τιμών της τάσης εξόδου.
4. Σχεδιάστε την καμπύλη που αντιστοιχεί στον βρόχο υστέρησης, έχοντας στον οριζόντιο άξονα την ένταση του ρεύματος διέγερσης και στον κατακόρυφο άξονα τις τιμές που υπολογίσατε στο προηγούμενο βήμα.