



## **Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**

**Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών**

**Ροή Η - Τεχνολογία Αισθητήρων και Μικροσυστημάτων**

### **Ονοματεπώνυμα:**

Αντώνης Αδαμίδης (03121816),

Ηρακλής Στιβακτάκης (03121849),

Χρήστος Χρηστάκης (03121173)

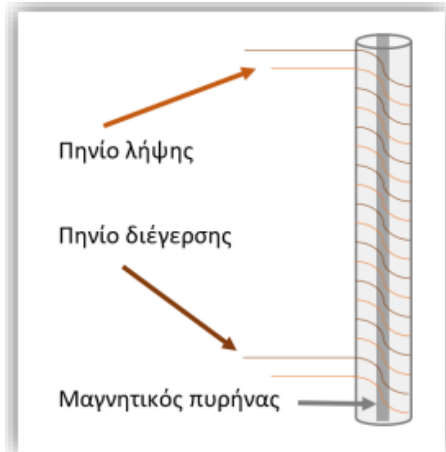
### **Εργαστηριακή Ομάδα: 2**

**Ακαδ. Έτος / Εξάμηνο: 2024-2025 / 8ο**

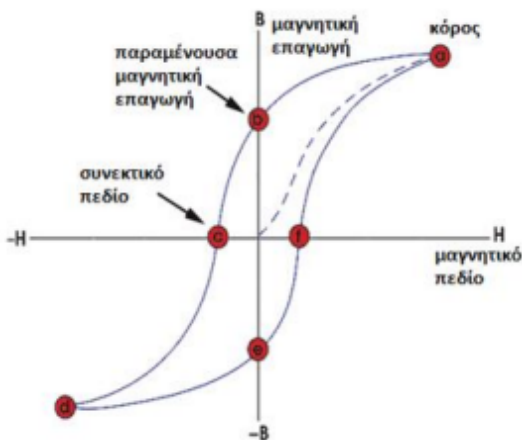
### **2η ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ - Fluxgate**

# 1. Θεωρητικό Μέρος

Στην παρούσα εργαστηριακή άσκηση γίνεται μελέτη του αισθητήρα fluxgate για την μέτρηση του πεδίου και της θέσης. Ένας αισθητήρας fluxgate όπως αυτός της εργαστηριακής μας άσκησης αποτελείται από έναν μαγνητικό πυρήνα και δύο πηνία (ένα πηνίο διέγερσης και ένα πηνίο λήψης) που περιελίσσονται το ένα πάνω στο άλλο γύρω από αυτόν.



Ο πυρήνας είναι συνήθως σε μορφή σύρματος ή ταινίας κατασκευασμένος από υλικά που παρουσιάζουν συμμετρικό βρόχο υστέρησης και φτάνουν στον κορεσμό για σχετικά μικρές τιμές μαγνητικού πεδίου. Τέτοια υλικά είναι για παράδειγμα CoFeSiB ή FeSiB . Η αρχή λειτουργίας των fluxgates είναι ο βρόχος υστέρησης του μαγνητικού πυρήνα, όπως φαίνεται ακολούθως:



## Μέτρηση εξωτερικού πεδίου

Ο πυρήνας του αισθητήρα fluxgate, βρίσκεται σε ένα μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ένα εναλλασσόμενο ρεύμα το οποίο περνά από τα πηνία του αισθητήρα. Ο πυρήνας μπορεί να προσεγγίσει ή να φτάσει σε κορεσμό μαγνητικής επαγωγής, ανάλογα με την ένταση και την κατεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου που το επηρεάζει.

Στην περίπτωση όπου δεν έχουμε εξωτερικώς επιβαλλόμενο πεδίο η χρονική μεταβολή  $\Delta t$ , μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων θα είναι μηδενική, αφού ο μαγνητικός πυρήνας θα φτάνει στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές μαγνήτισης σε ίσα χρονικά διαστήματα.

Ωστόσο, στην περίπτωση όπου επιβάλουμε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο ο μαγνητικό πυρήνας θα οδηγηθεί σε κορεσμό είτε πιο γρήγορα είτε πιο αργά και η χρονική διαφορά μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του σήματος εξόδου θα είναι διάφορη του μηδενός. Άρα, είναι δυνατή η συσχέτιση της χρονικής διαφοράς των μεγίστων και ελαχίστων του σήματος εξόδου με το μέτρο και την κατεύθυνση του αγνώστου εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

Συμπερασματικά, όταν το μαγνητικό πεδίο αλλάζει, προκαλεί μια επαγωγική τάση στο πηνίο λήψης, η οποία έχει σχέση με τη μεταβολή της μαγνητικής ροής στο πυρήνα. Η ένταση της επαγωγής εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου και τη συχνότητα του ρεύματος που ρέει στα πηνία. Η μέτρηση αυτής της επαγωγικής τάσης επιτρέπει τη μέτρηση του εξωτερικού πεδίου.

### **Μέτρηση θέσης**

Για την μέτρηση της θέσης αξιοποιούμε τη δυνατότητα μετακίνησης του πυρήνα με τρόπο έτσι ώστε να μην καλύπτεται σε όλο του το μήκος από τα πηνία. Όταν λοιπόν ο μαγνητικός πυρήνας μετατοπιστεί, ένα μέρος των μαγνητικών γραμμών θα σχηματίζουν βρόχους μέσω του αέρα και όχι μέσω του πυρήνα. Έτσι η ροή στον πυρήνα θα είναι μικρότερη και άρα και η επαγόμενη τάση στο πηνίο λήψης θα είναι μικρότερη. Όσο πιο μετατοπισμένος είναι ο πυρήνας τόσο λιγότερες μαγνητικές γραμμές εμπλέκει και τόσο μικρότερη είναι η τάση λήψης.

## **2. Πειραματικό Μέρος**

### **2.1 Αισθητήρας Πεδίου**

#### **2.1.1 Διεξαγωγή μετρήσεων**

Στο στάδιο της επεξεργασίας μετρήσεων του αισθητήρα πεδίου εφαρμόζουμε στο πηνίο διέγερσης μια ημιτονοειδή τάση πλάτους peak to peak των 5V και συχνοτήτων 1kHz και 5kHz, ενώ προσθέτουμε (μέσω ρύθμισης της γεννήτριας ) μια DC συνιστώσα προκειμένου να δημιουργηθεί ένα επιπλέον σταθερό μαγνητικό πεδίο.

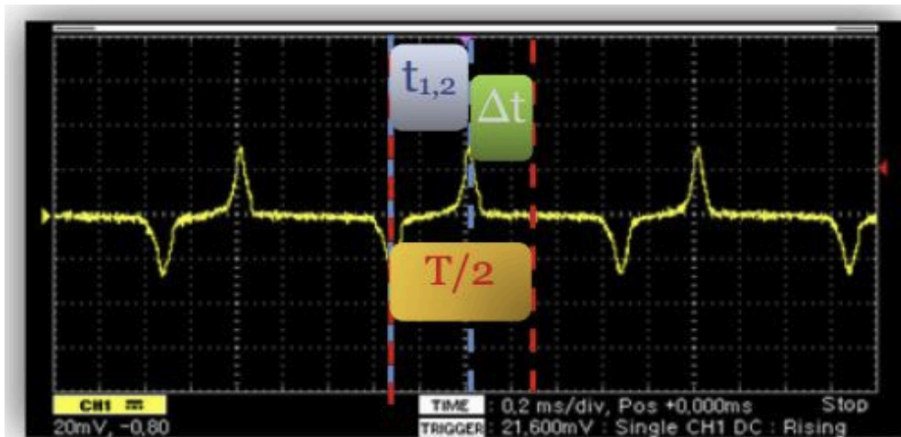
Το DC Offset κυμαίνεται από -2V έως 2V με βήμα 0,5V, ενώ τα πρόσημα των DC τάσεων αντιστοιχούν στις δύο φορές του DC μαγνητικού πεδίου. Μέσω του παλμογράφου βλέπουμε την έξοδο του πηνίου λήψης και υπολογίζουμε το χρόνο  $t_{1,2}$  , δηλαδή το χρόνο ανάμεσα σε ένα ελάχιστο και σε ένα μέγιστο. Από αυτούς τους υπολογισμούς προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας για τα  $t_{1,2}$  για  $f=1$  kHz και  $f=5$  kHz αντιστοίχα:

$t_{1,2}$		
Vdc (V)	f = 1 kHz	f = 5 kHz

-2	210 $\mu$ s	43 $\mu$ s
-1,5	280 $\mu$ s	58 $\mu$ s
-1	350 $\mu$ s	71 $\mu$ s
-0,5	420 $\mu$ s	84 $\mu$ s
0	500 $\mu$ s	100 $\mu$ s
0,5	570 $\mu$ s	118 $\mu$ s
1	640 $\mu$ s	135 $\mu$ s
1,5	720 $\mu$ s	148 $\mu$ s
2	800 $\mu$ s	166 $\mu$ s

### 2.1.2 Επεξεργασία μετρήσεων

Έπειτα θα υπολογίσουμε τη χρονική διαφορά  $\Delta t = T/2 - t_{1,2}$  όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω:



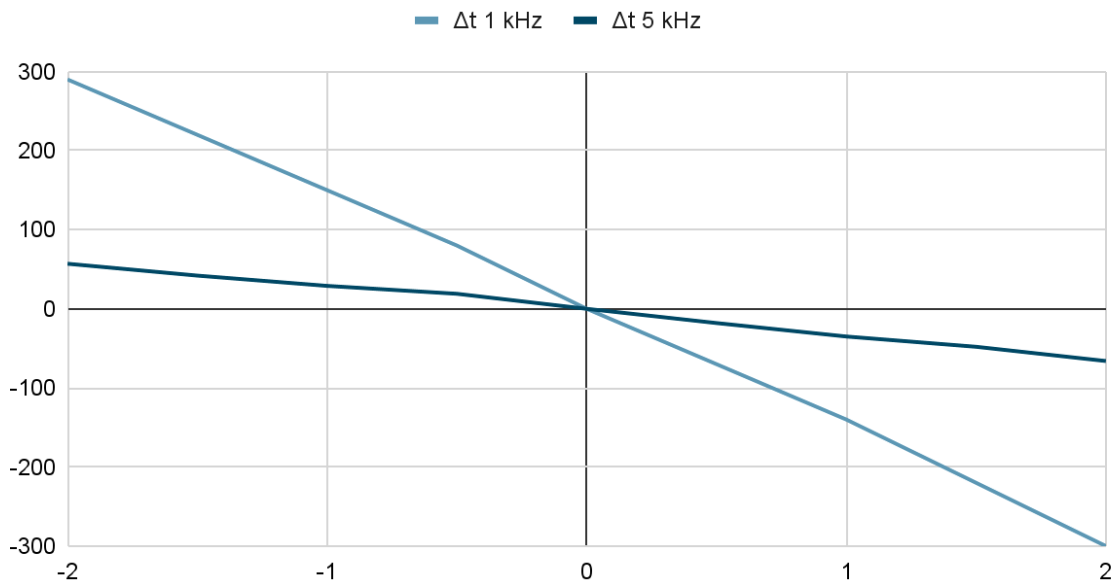
Λαμβάνοντας υπόψη πως για  $f=1$  kHz έχουμε  $T=1$ ms και  $T/2 = 0.5$  ms, ενώ για  $f=5$ kHz έχουμε  $T=0.2$ ms και  $T/2 = 0.1$ ms.

$\Delta t$		
Vdc (V)	f = 1 kHz	f = 5 kHz
-2	290 $\mu$ s	57 $\mu$ s
-1,5	220 $\mu$ s	42 $\mu$ s
-1	150 $\mu$ s	29 $\mu$ s
-0,5	80 $\mu$ s	19 $\mu$ s
0	0 $\mu$ s	0 $\mu$ s
0,5	-70 $\mu$ s	-18 $\mu$ s
1	-140 $\mu$ s	-35 $\mu$ s

1,5	-220 $\mu\text{s}$	-48 $\mu\text{s}$
2	-300 $\mu\text{s}$	-66 $\mu\text{s}$

Το κοινό διάγραμμα  $\Delta t(VDC)$  για τις καμπύλες που προκύπτουν για τις δύο συχνότητες είναι το ακόλουθο:

$V_{dc} (V) - \Delta t (\mu\text{s})$



### Παρατηρήσεις:

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πως οι δύο καμπύλες είναι φθίνουσες και έχουν σχετική συμμετρία γύρω από το 0. Όταν  $V_{dc} = 0$  τότε και  $\Delta t = 0$ , γεγονός που επαληθεύεται και από τη θεωρία που αναπτύχθηκε παραπάνω καθώς τότε  $t_{1,2} = T/2$ .

Επιπλέον, παρατηρούμε ότι για μικρότερη συχνότητα, μεταβάλλοντας την DC συνιστώσα τάσης, έχουμε μεγαλύτερες αλλαγές στο  $\Delta t$ . Άρα η καμπύλη για 1kHz έχει μεγαλύτερη κλίση αφού οι αντίστοιχοι χρόνοι είναι πιο μεγάλοι.

### Εφαρμογές:

Οι αισθητήρες fluxgate για μέτρηση πεδίου μπορούν να εφαρμοστούν σε πυξίδες για ηλεκτρονικές συσκευές, σε όργανα μέτρησης ρεύματος, αλλά και σε δορυφόρους όπου με βάση το μαγνητικό πεδίο της γης να ελέγχουν τον προσανατολισμό τους. Επιπλέον, είναι χρήσιμοι για τη μέτρηση μικρών μαγνητικών πεδίων όπως σε κάποιο εγκεφαλογράφημα.

## 2.2 Αισθητήρας Θέσης

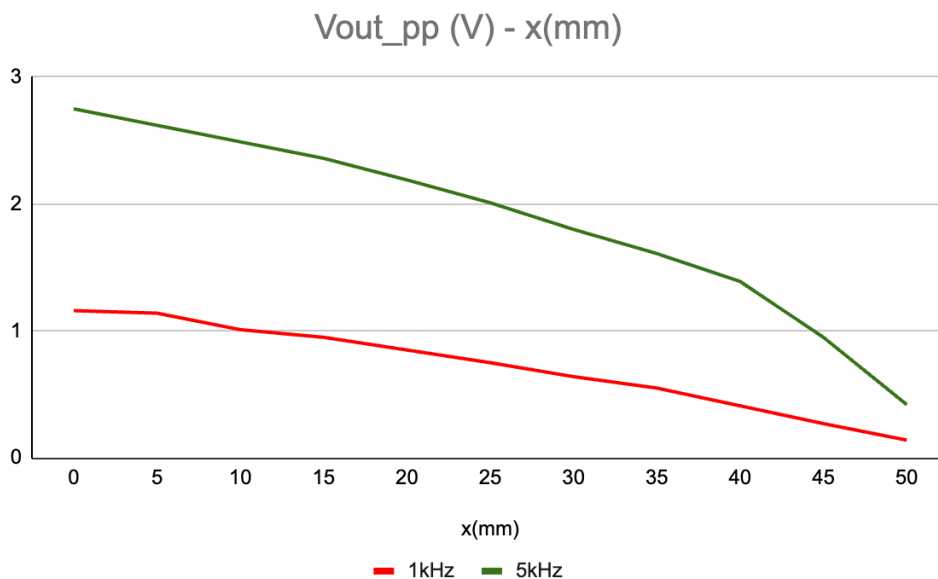
### 2.2.1 Διεξαγωγή μετρήσεων

Για την μέτρηση θέσης μέσω του αισθητήρα fluxgate τροφοδοτούμε το πηνίο διέγερσης με ημιτονοειδή τάση πλάτους peak to peak 5V και συχνοτήτων 1kHz και 5kHz, όπως και προηγουμένως. Ωστόσο εδώ αφαιρούμε σταδιακά τον μαγνητικό πυρήνα μέχρι την απόσταση  $x=50\text{mm}$  με βήμα 5mm και καταγράφουμε με τον παλμογράφο την τάση peak to peak της τάσης εξόδου του πηνίου λήψης. Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται οι μετρήσεις:

$x(\text{mm})$	$V_{out\_pp}$ (V) με $f = 1 \text{ kHz}$	$V_{out\_pp}$ (V) με $f = 5 \text{ kHz}$
0	1.16	2.75
5	1.14	2.62
10	1.01	2.49
15	0.95	2.36
20	0.85	2.19
25	0.75	2.01
30	0.64	1.80
35	0.55	1.61
40	0.41	1.39
45	0.27	0.95
50	0.14	0.42

### 2.2.2 Επεξεργασία μετρήσεων

Το κοινό διάγραμμα  $V_{out\_pp}(x)$  με τις καμπύλες που προκύπτουν για τις δύο συχνότητες είναι το εξής:



### Παρατηρήσεις:

Στο παραπάνω διάγραμμα οι καμπύλες είναι φθίνουσες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην αρχική θέση (0 mm) τα πηνία καλύπτουν όλο το μέγεθος του πυρήνα, οπότε η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη. Όσο ο πυρήνας εξέρχεται από τα πηνία η αυτεπαγωγή σκέδασης αυξάνεται (λιγότερες μαγνητικές γραμμές περνάνε από τον πυρήνα) και έτσι η τάση εξόδου μειώνεται.

Στη συχνότητα των 5 kHz η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη συχνότητα 1 kHz. Γνωρίζουμε από θεωρία τον τύπο,  $V = -N (d\Phi/dt)$ , όπου η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη της πρώτης παραγώγου της ροής  $\Phi$ , όπου  $\Phi = B \cdot A \cdot \cos\theta$ . Επίσης η χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής ( $d\Phi/dt$ ) είναι ανάλογη με το γινόμενο της γωνιακής συχνότητας  $\omega$  και της ίδιας της ροής  $\Phi$ . Επομένως με αύξηση της συχνότητας θα έχουμε και αύξηση της τάσης.

Ακόμα παρατηρούμε ότι στα 5 kHz η ακρίβεια του αισθητήρα μειώνεται σημαντικά σε σχέση με την συχνότητα στο 1 kHz.

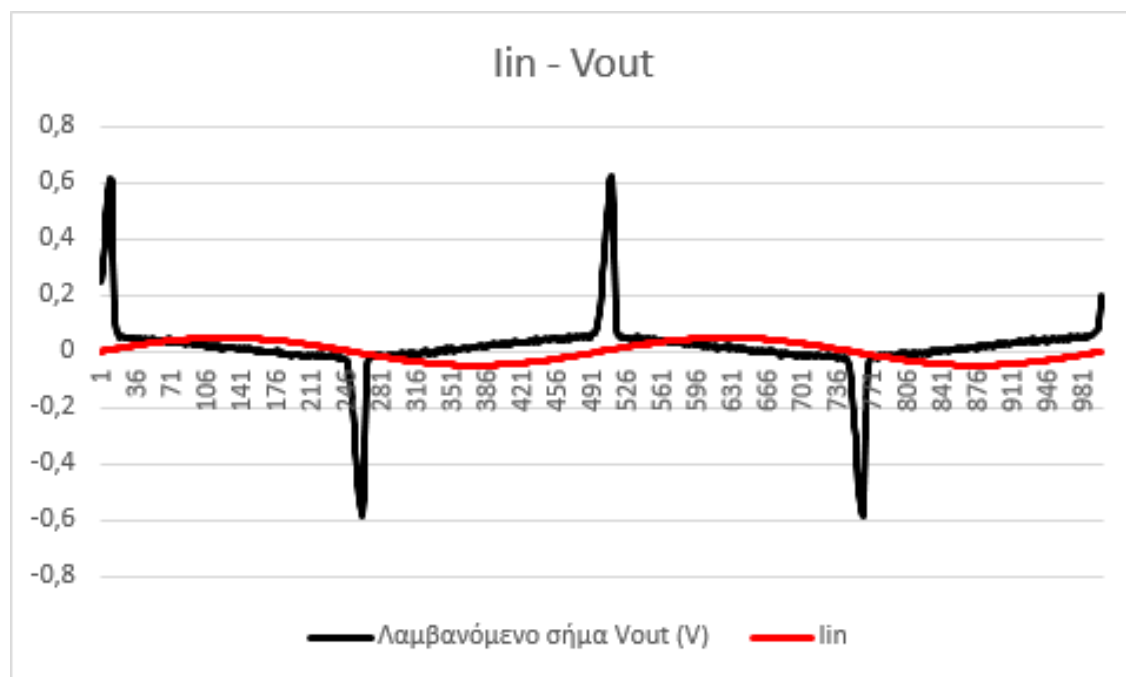
### Εφαρμογές:

Λόγω της ακρίβειάς τους, οι αισθητήρες θέσης χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως η ρομποτική, η αυτοκινητοβιομηχανία και οι ιατρικές συσκευές, όπου απαιτείται ακριβής εντοπισμός και έλεγχος κινήσεων.

## **2.3 Βρόχος Υστέρησης**

Η γραφική παράσταση των  $V_{in}(t)$  και  $V_{out}(t)$  του αισθητήρα παρατίθεται παρακάτω:

Η συνολική αντίσταση του πηνίου διέγερσης δίνεται ότι είναι  $R = 100 \Omega$ , επομένως  $I_{in} = \frac{V_{in}}{100}$



### Παρατηρήσεις:

- Το διάγραμμα δείχνει ότι ο μαγνητικός πυρήνας περνά από αρνητικό σε θετικό κορεσμό και το αντίστροφο, ακολουθώντας την πορεία της μαγνητικής ροής που δημιουργείται από την εναλλασσόμενη τάση στην είσοδο.
- Αξιοσημείωτη είναι η εμφάνιση απότομων κορυφών (μεγίστων και ελαχίστων) στη γραφική παράσταση της εξόδου. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην κατάρρευση της μαγνητικής ροής όταν φτάνει σε υψηλά επίπεδα, καθώς η μαγνητική διαπερατότητα μειώνεται σημαντικά πέρα από το σημείο κορεσμού, ιδιαίτερα όταν η ροή περνά από το κενό.
- Ο ζητούμενος βρόχος υστέρησης μέσω του Excel παρουσιάζεται παρακάτω:

