



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

2<sup>η</sup> Εργαστηριακή Αναφορά-Μαγνητικοί Αισθητήρες Μέτρησης Θέσης  
και Πεδίου

στο μάθημα «**Τεχνολογία Αισθητήρων και  
Μικροσυστημάτων**»

των φοιτητών

Σκόρδα Στεφανία, Α.Μ: 03118852

Ράτσα Ηλίας, Α.Μ: 03118817

Σερλής Εμμανουήλ-Αναστάσιος, Α.Μ: 03118125

8<sup>ο</sup> Εξάμηνο

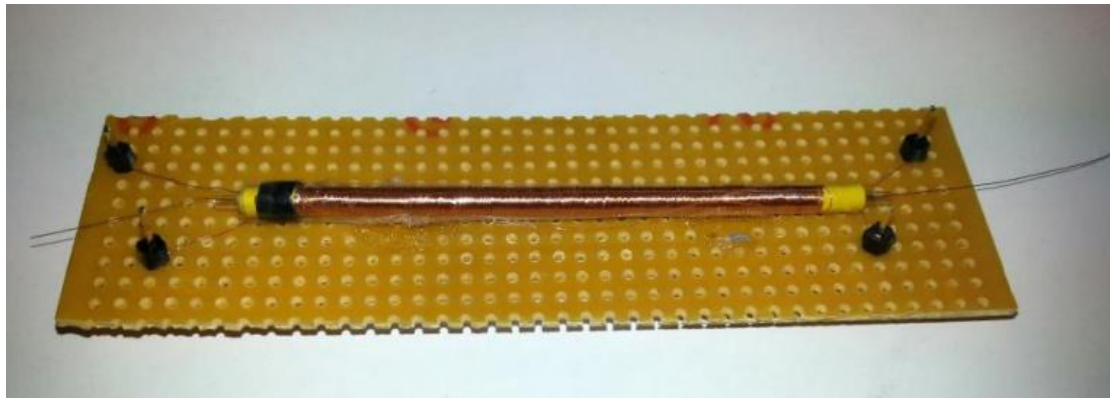
Ιούνιος 2022

## Σκοπός της εργασίας:

Σκοπός της συγκεκριμένης εργαστηριακής άσκησης αποτελεί η μελέτη και η χρήση μαγνητικών αισθητήρων μέτρησης θέσης και πεδίου (fluxgate sensors). Πιο συγκεκριμένα, αυτές οι δύο λειτουργίες (μέτρηση θέσης και πεδίου) μελετήθηκαν και λήφθηκαν μετρήσεις ξεχωριστά για την σχεδίαση χαρακτηριστικών γραφικών παραστάσεων του αισθητήρα.

## Αισθητήρας fluxgate

Ο αισθητήρας fluxgate αποτελείται από ένα ή περισσότερα πηνία, τα οποία είναι υπεύθυνα για την διέγερση του μαγνητικού του πυρήνα καθώς και για τη λήψη του τελικού σήματος. Στην συγκεκριμένη εργαστηριακή άσκηση, χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας fluxgate με ένα πηνίο διέγερσης και ένα πηνίο λήψης περιελιγμένα το ένα πάνω στο άλλο έχοντας στο εσωτερικό τους έναν μαγνητικό πυρήνα. Ο αισθητήρας fluxgate που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται παρακάτω:



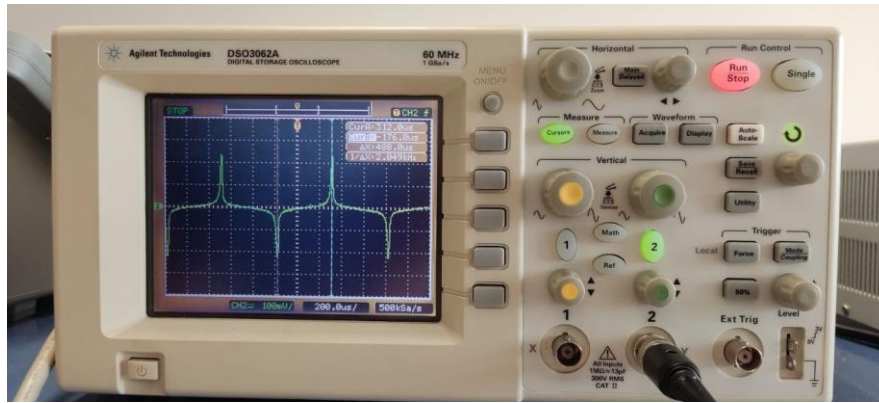
## Πειραματικό Μέρος:

### 2.1 Αισθητήρας Πεδίου

Αρχικά χρησιμοποιήσαμε τον αισθητήρα fluxgate ως αισθητήρα πεδίου. Διεγείροντας με ημιτονοειδές σήμα στο πηνίο διέγερσης, προκαλέστηκε μαγνητική ροή στον εσωτερικό του πυρήνα σύμφωνα με τον νόμο του Faraday:

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

Όπου  $\Phi$  η μαγνητική ροή,  $B$  η μαγνητική επαγωγή,  $N_o$  ο αριθμός των σπειρών του πηνίου λήψης και  $A$  το εμβαδόν διατομής του πηνίου. Οι κυματομορφές που λήφθηκαν ήταν της εξής μορφής:



Παρατηρούμε ότι καθώς δεν υπάρχουν εξωτερικά πεδία, ο πυρήνας φτάνει σε μέγιστο και ελάχιστο κορεσμό ανά ίσα χρονικά διαστήματα, διότι ο πυρήνας θα επηρεάζεται μόνο από το ημιτονικό σήμα στην είσοδο.

Στο πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

- Ένας Αισθητήρας fluxgate
- Μία γεννήτρια συχνοτήτων
- Ένας παλμογράφος

### 2.1.1 Διεξαγωγή Μετρήσεων

#### Ερώτημα 4:

Τροφοδοτώντας το πηνίο διέγερσης με ημιτονοειδές σήμα τάσης  $V_{in\_pp} = 5V$  και συχνότητας  $f = 1kHz$ , πήραμε τις εξής μετρήσεις για τη διαφορά  $t_{1,2}$  μεταξύ ενός ελαχίστου και ενός διαδοχικού μεγίστου της εκάστοτε εμφανιζόμενης κυματομορφής.

$V_{DC}$	$t_{1,2}(us)$
-2,5	168
-2	184
-1,5	280
-1	352
-0,5	424
0	488
0,5	560
1	616
1,5	696
2	784
2,5	912

### Ερώτημα 5:

Για  $f=5\text{kHz}$  πήραμε τις εξής μετρήσεις:

$V_{DC}$	$t_{1,2}(\mu\text{s})$
-2,5	28
-2	34
-1,5	56
-1	70
-0,5	84
0	98
0,5	110
1	124
1,5	140
2	158
2,5	170

### 2.1.2 Επεξεργασία Μετρήσεων

#### Ερώτημα 1:

Οι μετρήσεις της χρονικής διαφοράς μεταξύ ελαχίστου και μεγίστου λήφθηκαν από τον παλμογράφο, ενώ η περίοδος υπολογίζεται για κάθε συχνότητα ως  $\frac{1}{f}$ . Η χρονική διαφορά  $\Delta t$  υπολογίζεται ως  $\frac{T}{2} - t_{1,2}$ . Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

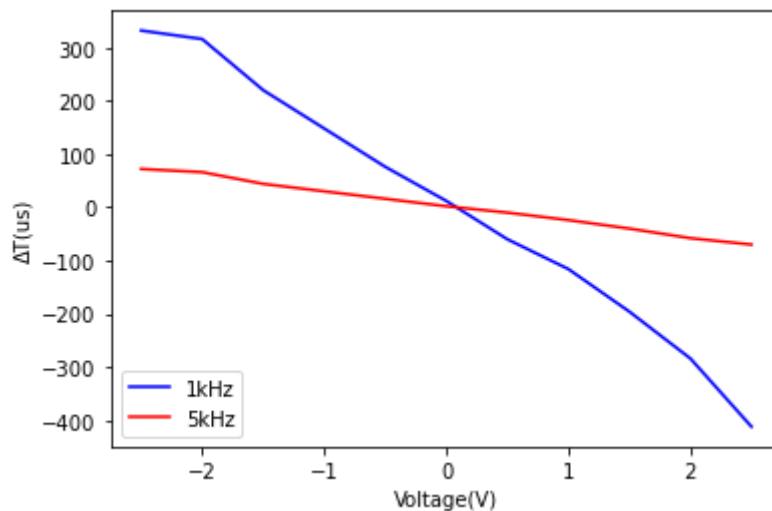
Για  $f=1\text{kHz}$ ,  $T/2 = 500\mu\text{s}$

$V_{DC}$	$T/2-t_{1,2}(\mu\text{s})$
-2.5	332
-2	316
-1.5	220
-1	148
-0.5	76
0	12
0.5	-60
1	-116
1.5	-196
2	-284
2.5	-412

Για  $f=5\text{kHz}$ ,  $T/2 = 100\mu\text{s}$

$V_{DC}$	$T/2-t_{1,2}(\mu\text{s})$
-2,5	72
-2	63
-1,5	44
-1	30
-0,5	16
0	2
0,5	-10
1	-24
1,5	-40
2	-58
2,5	-70

### Ερώτημα 2:



### Ερώτημα 3:

Παρατηρούμε ότι γραμμική αύξηση του DC offset προκαλεί τη γραμμική μείωση της χρονικής διαφοράς  $\Delta t$ . Για συχνότητα  $f=5\text{kHz}$  έχουμε μικρότερες τάσεις, οπότε με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνουμε calibration και σωστή βαθμονόμηση. Επίσης, για μεγαλύτερη συχνότητα έχουμε μικρότερη διαφορά  $\Delta t$ .

### Ερώτημα 4:

Οι fluxgate αισθητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως για την μέτρηση αλλαγής μαγνητικού πεδίου όταν αυτή επιβάλλεται κοντά τους. Έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως περιγράφονται παρακάτω:

- Χρήση σε διαστημικές εφαρμογές όπως η ανάλυση, χαρτογράφηση και παρακολούθηση των μαγνητικών πεδίων της γης και από άλλους πλανήτες.
- Ανίχνευση καρδιακών παλμών μέσω του μαγνητικού πεδίου που εκπέμπουν.
- Μέτρηση των στροφών ενός κινητήρα (ανίχνευση πόλων του δρομέα).
- Χρήση σε μετεωρολογικές εφαρμογές, όπως η ανίχνευση ηλιακών καταιγίδων μέσω της ανίχνευσης αλλαγής μαγνητικού πεδίου της Γης.

## 2.2 Αισθητήρας Θέσης

### 2.2.1 Διεξαγωγή Μετρήσεων

#### Ερώτημα 1:

Χρησιμοποιούμε την ίδια συνδεσμολογία της προηγούμενης διάταξης (έχοντας όμως θέσει DC offset = 0 V).

#### Ερώτημα 2:

Στην συνέχεια τροφοδοτούμε το πηνίο διέγερσης με ημιτονοειδές σήμα τάσης  $V_{in\_pp} = 5\text{V}$  και συχνότητας  $f = 1\text{kHz}$ .

### Ερώτημα 3:

Στις συνθήκες στις οποίες βρισκόμαστε, αφαιρέσαμε σταδιακά τον μαγνητικό πυρήνα του αισθητήρα μέχρι την απόσταση  $x=50\text{ mm}$  με βήμα  $5\text{ mm}$  και με τη βοήθεια του παλμογράφου πήραμε τις εξής μετρήσεις για την τάση εξόδου  $V_{out\_pp}$  για κάθε θέση:

$x(\text{cm})$	$V_{out\_pp}\text{ (mV)}$
0	496
5	456
10	424
15	368
20	320
25	276
30	220
35	172
40	132
45	80
50	54,4

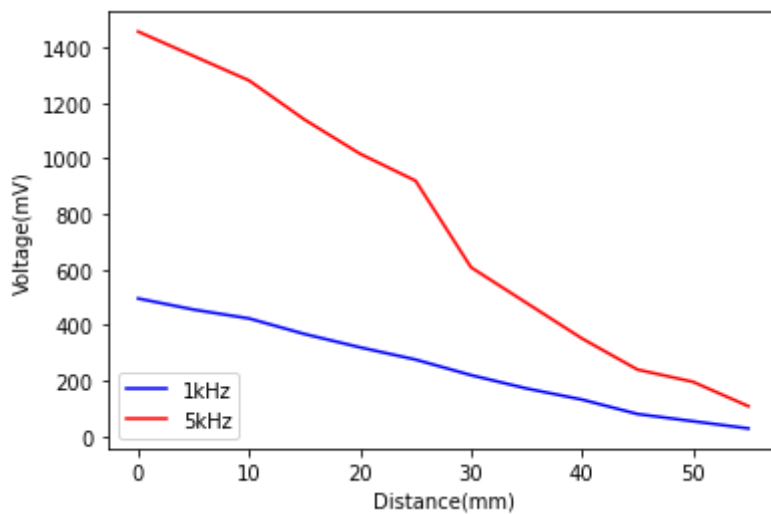
### Ερώτημα 4:

Στην συνέχεια επαναλαμβάνουμε τις μετρήσεις του προηγούμενου ερωτήματος, αλλά για σήμα διέγερσης με συχνότητα  $f=5\text{ kHz}$ .

$x(\text{cm})$	$V_{p-p}\text{ (mV)}$
0	1457
5	1369
10	1281
15	1160
20	1017
25	920
30	608
35	480
40	352
45	240
50	196

### 2.2.2 Επεξεργασία Μετρήσεων

#### Ερώτημα 1:



#### Ερώτημα 2:

Καθώς αφαιρούμε τον μαγνητικό πυρήνα από τα πηνία λήψης και διέγερσης, παρατηρείται η μείωση της τάσης από άκρο σε άκρο στην έξοδο του αισθητήρα. Αυτό συμβαδίζει με τα αναμενόμενα αποτελέσματα, καθώς λιγότερες σπείρες αλληλοεπιδρούν με τον μαγνητικό πυρήνα και άρα μικρότερη η μαγνητική ροή που επάγεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα και η ΗΕΔ να είναι μικρότερη στο πηνίο λήψης. Μαθηματικά, η παραπάνω θεωρία αποτυπώνεται ως εξής:

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

Τέλος, παρατηρείται πως για μικρές μετατοπίσεις, η παραπάνω μαθηματική σχέση γίνεται σχεδόν γραμμική.

#### Ερώτημα 3:

Ένας αισθητήρας fluxgate ως αισθητήρας θέσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπως:

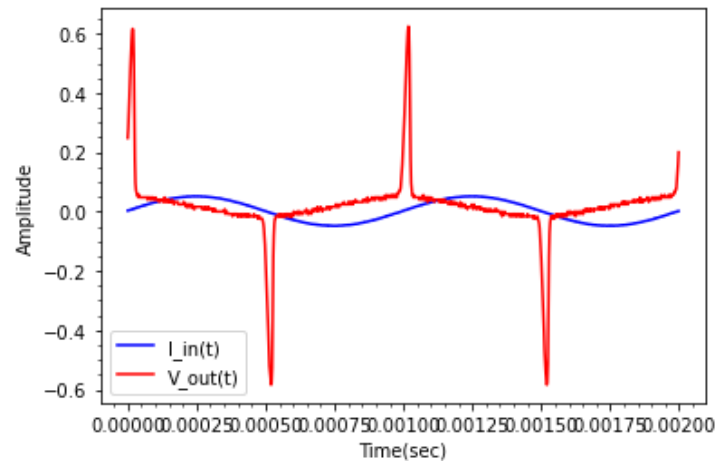
- Ανίχνευση και πρόβλεψη σεισμών
- Ανίχνευση κραδασμών
- Ανίχνευση ατελειών σε μαγνητικά υλικά (flux leakage)

## 2.3 Βρόχος Υστέρησης

### 2.3.1 Επεξεργασία Μετρήσεων

#### Ερώτημα 1:

Από τα δοθέντα δεδομένα που δόθηκαν σε μορφή excel, σχεδιάστηκε η ζητούμενη γραφική παράσταση  $I_{in}(t)$  και  $V_{out}(t)$  του αισθητήρα με συνολική αντίσταση πηνίου  $R = 100\Omega$  η οποία φαίνεται παρακάτω:



#### Ερώτημα 2:

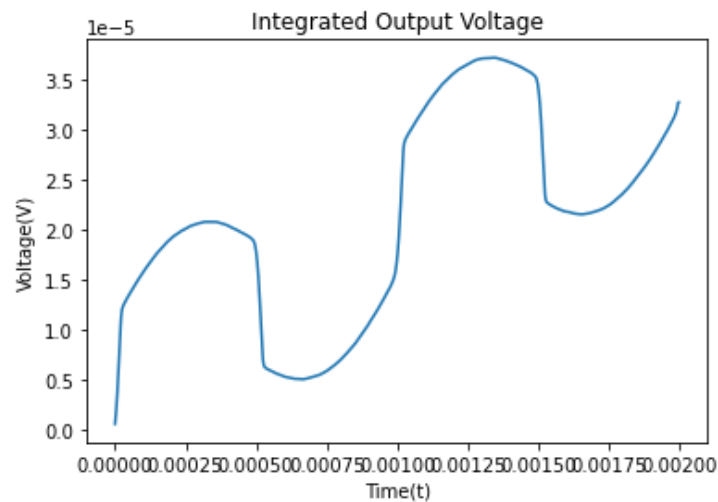
Παρατηρούμε από την τάση εξόδου, ότι ο μαγνητικός πυρήνας εναλλάσσει την κατάσταση του από τον θετικό στον αρνητικό κορεσμό και ανάποδα. Η γραφική παράσταση παρουσιάζει θετικά και μέγιστα άκρα απότομα, λόγω της κατάρρευσης της μαγνητικής ροής και της μείωσης της μαγνητικής διαπερατότητας.

#### Ερώτημα 3:

Με χρήση της γλώσσας python και της εντολής `cumtrapz()` της `scipy` βρίσκουμε το ολοκλήρωμα της τάσης εξόδου η οποία αντιστοιχεί στην μαγνητική επαγωγή  $B$  που επιβάλλεται στον μαγνητικό πυρήνα. Η αντίστοιχη γραφική παράσταση παρατίθεται παρακάτω:

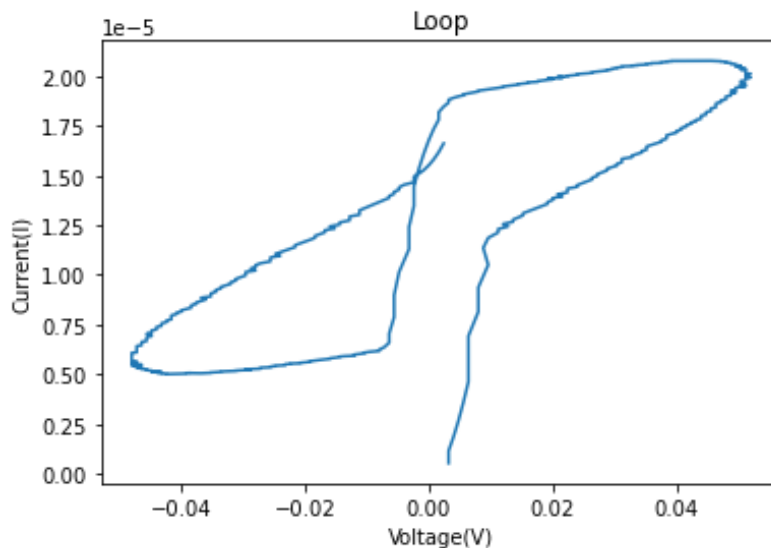


B



#### Ερώτημα 4:

Αρχικά, η μαγνητική επαγωγή B υπολογίζεται ως το ολοκλήρωμα της τάσης εξόδου και η μαγνητική διέγερση H υπολογίζεται ως η τάση εισόδου του αισθητήρα fluxgate. Για να σχεδιαστεί ο ζητούμενος βρόχος υστέρησης, χρειαζόμαστε τις παραπάνω παραμέτρους. Οπότε, το διάγραμμα του βρόχου υστέρησης υπολογίζεται ως εξής:



Παρατηρούμε, ότι ο αισθητήρας fluxgate έχει καμπύλη υστέρησης όμοια με εκείνη του σιδηρομαγνητικού υλικού, λόγω του πυρήνα ο οποίος είναι κατασκευασμένος από CoFeSiB. Η παραπάνω καμπύλη τείνει να μετακινηθεί προς τα πάνω επειδή οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην αρχική λειτουργία του αισθητήρα.