



*Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*

*Δ.Π.Μ.Σ. Συστήματα Αυτοματισμού*

*Κατεύθυνση Β:*

*Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου και Ρομποτικής*

**Μεταπτυχιακό Μάθημα:**

***Αισθητήρες***

***Ομάδα 3***

***Πρώτη Εργαστηριακή Άσκηση***

***Διακρίβωση Μαγνητικού Αισθητήρα Hall***

**Μέλη Ομάδας – Α.Μ.:**

***Γεώργιος Κασσαβετάκης – 02121203***

***Γεώργιος Κρομμύδας – 02121208***

***Λάμπης Παπακώστας – 02121211***

ΑΘΗΝΑ

2023

## 1. Θεωρητικό μέρος

### 1.1. Εισαγωγή

Τα μαγνητόμετρα αποτελούν όργανα μέτρησης του μέτρου, ή και της κατεύθυνσης ενός επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Η χρήση των μαγνητομέτρων είναι απαραίτητη σε πολλές εφαρμογές. Αυτές καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος, που περιλαμβάνει τις επιστήμες, τις μεταφορές και τη βιομηχανία. Τα χρησιμοποιούμενα μαγνητόμετρα πρέπει να προσφέρουν την επιθυμητή ακρίβεια και επαναληψιμότητα στις μετρήσεις. Συνεπώς, πρέπει να εκτελούνται διεργασίες συντήρησης και βαθμονόμησής τους. Αυτές προϋποθέτουν την ύπαρξη κατάλληλου εξοπλισμού και τη χρήση ειδικών διατάξεων.

### 1.2. Διαδικασία Βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση ενός μαγνητικού αισθητήρα είναι δυνατή μέσω της επιβολής ενός μαγνητικού πεδίου γνωστής εντάσεως σε αυτόν. Προϋπόθεση για την ορθή βαθμονόμηση ενός μαγνητομέτρου είναι η εξάλειψη των εξωτερικώς επιβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων, κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Αυτό μπορεί να γίνει εφικτό μέσω της χρήσης διατάξεων μαγνητικής θωράκισης, οι οποίες είναι ικανές να εξαλείψουν ή να αντισταθμίσουν το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

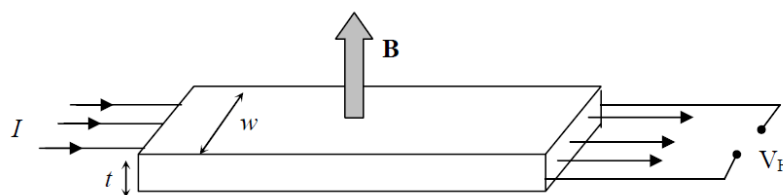
Η ελεγχόμενη επιβολή μαγνητικού πεδίου είναι εφικτή μέσω της χρήσης ενός σωληνοειδούς, στο μέσο του οποίου τοποθετείται το υπό εξέταση μαγνητόμετρο. Το σωληνοειδές, του οποίου τα χαρακτηριστικά είναι γνωστά, τροφοδοτείται με συνεχή τάση, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μαγνητικό πεδίο με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Λαμβάνοντας επαρκή αριθμό μετρήσεων, είναι δυνατή η δημιουργία της λεγόμενης καμπύλης βαθμονόμησης του αισθητήρα, η οποία εκφράζει την απόκρισή του για διάφορες τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου.

### 1.3. Ο αισθητήρας Hall

Οι αισθητήρες Hall αποτελούν μια πολύ διαδεδομένη κατηγορία μαγνητικών αισθητήρων, λόγω της εύκολης χρήσης τους, του μικρού μεγέθους τους και του χαμηλού

κόστους τους. Χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, όπως είναι τα αυτοκίνητα και τα κινητά τηλέφωνα.

Η λειτουργία του μαγνητικού αισθητήρα Hall βασίζεται στο ομώνυμο φαινόμενο. Βάσει αυτού, όταν ένα ρεύμα διαρρέει έναν αγωγό ή ημιαγωγό και ταυτοχρόνως στο υλικό εφαρμόζεται και ένα μαγνητικό πεδίο κάθετο στη διεύθυνση του ρεύματος, τότε κατά μήκος του υλικού εμφανίζεται μια τάση, η οποία είναι κάθετη τόσο στο ρεύμα, όσο και στο μαγνητικό πεδίο. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση Hall ( $V_H$ ).



Σχήμα 1. Αρχές Λειτουργίας Αισθητήρα Hall

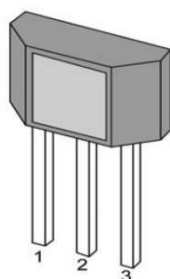
Η τάση Hall δίδεται από τον τύπο:

$$V_H = \frac{R_H \cdot I_x \cdot B_z}{t}$$

όπου:

- $R_H$  ο λεγόμενος συντελεστής Hall
- $I_x$  η ένταση του ρεύματος κατά τη διεύθυνση του άξονα x
- $B_z$  το μαγνητικό πεδίο κατά τη διεύθυνση του άξονα z
- $t$  το πάχος του ημιαγωγού

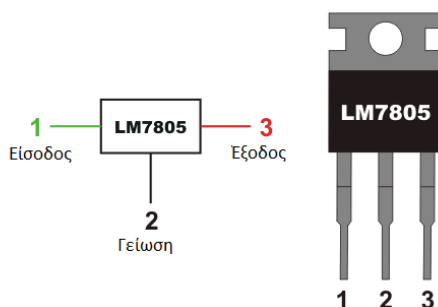
Παρακάτω δίδεται η συνδεσμολογία του αισθητήρα Hall (SS49E) που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη εργαστηριακή άσκηση.



- 1: Τροφοδοσία
- 2: Γείωση
- 3: Έξοδος

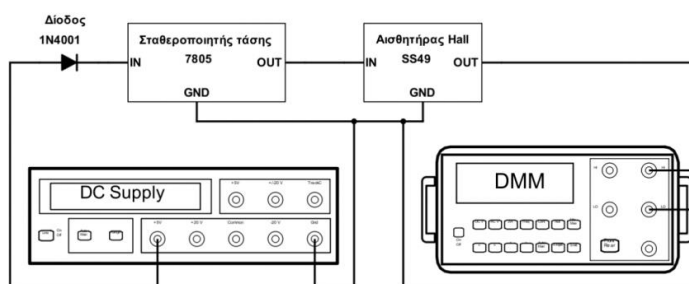
Σχήμα 2. Συνδεσμολογία του Αισθητήρα Hall

Για την προστασία του αισθητήρα Hall από την τροφοδοσία με τάση εκτός των ασφαλών ορίων, στη διάταξη μέτρησης έχουν προστεθεί δύο στοιχεία: μία δίοδος (1N4001) και ένας σταθεροποιητής τάσης (LM7805).

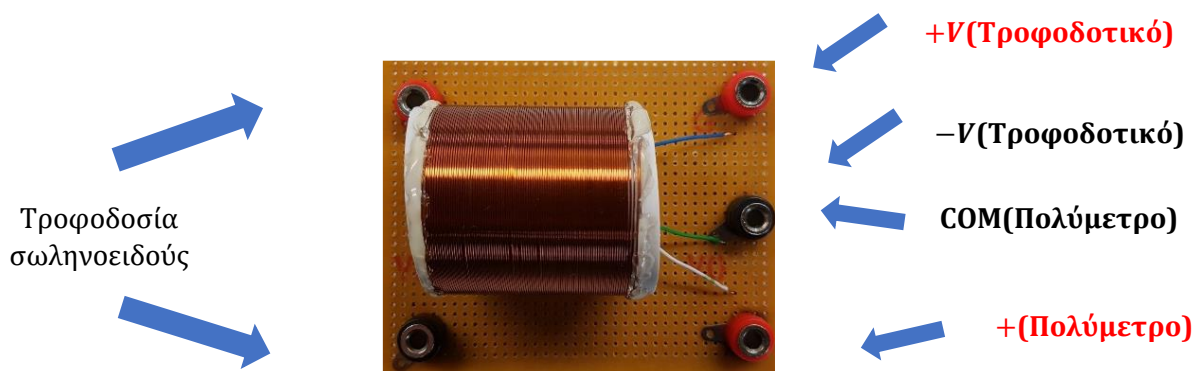


Σχήμα 3. Συνδεσμολογία του σταθεροποιητή τάσης LM7805

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η συνολική διάταξη:



Σχήμα 4. Συνολική Διάταξη Άσκησης



Σχήμα 5. Σύνδεση της Διάταξης

## 2. Πειραματικό Μέρος

### 2.1. Διεξαγωγή Μετρήσεων

Κατά την διεξαγωγή του πειράματος βρέθηκε αρχικά πως με την χρήση του πολυμέτρου μετρήθηκε η αντίσταση του σωληνοειδούς και έχει τιμή  $R_{\sigma\omega\lambda.} = 1.8 \Omega$ . Επίσης εφαρμόστηκε από το τροφοδοτικό τάση  $V_{in} = 7.44 V$ , ενώ στα άκρα του αισθητήρα Hall μετρήθηκε η τάση  $V_H = 2.54 V$ .

Εφαρμόζοντας τάση στο σωληνοειδές, μεταβάλλαμε την ένταση του ρεύματος από τα  $2.6 A$  στα  $0 A$  με βήμα  $0.2 A$  και μετρήθηκε με το πολύμετρο η τάση εξόδου του αισθητήρα Hall. Στον πίνακα 1 εμφανίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του πειράματος.

$I_{in} (A)$	$V_{τροφ} (V)$	$V_{out} (V)$
2.6	5.3	2.45
2.4	5.0	2.44
2.2	4.6	2.44
2.0	4.2	2.44
1.8	3.7	2.43
1.6	3.3	2.43
1.4	2.9	2.43
1.2	2.4	2.42
1.0	2.0	2.42
0.8	1.6	2.42
0.6	1.2	2.41
0.4	0.8	2.40
0.2	0.4	2.40

Πίνακας 1. Αποτελέσματα μετρήσεων τάξης εξόδου αισθητήρα Hall

Αυτό που παρατηρούμε κατά την μέτρηση και την αλλαγή της έντασης του ρεύματος στο σωληνοειδές είναι πως η τάση εξόδου που διαβάζει ο αισθητήρας Hall είναι σχεδόν ίδια

με κάποιες μικρές αποκλίσεις. Στην ουσία δεν αλλάζει πολύ η τάση που διαβάζουμε στο πολύμετρο.

Τέλος, αντιστρέψαμε την πολικότητα στο κανάλι της τροφοδοσίας και εκτελέσαμε το ίδιο πείραμα, με την μόνη διαφορά πως τώρα το ρεύμα που εφαρμόζουμε στον αισθητήρα αυξάνεται από τα 0.2 A στα 2.6 A με βήμα 0.2 A. Καταγράψαμε την κάθε τιμή της τάσης εξόδου του αισθητήρα Hall στον πίνακα 2.

$I_{in} (A)$	$V_{τροφ} (V)$	$V_{out} (V)$
0.2	0.6	2.38
0.4	0.8	2.38
0.6	1.2	2.36
0.8	1.5	2.36
1.0	1.9	2.35
1.2	2.2	2.34
1.4	2.7	2.32
1.6	3.0	2.32
1.8	3.5	2.31
2.0	3.9	2.31
2.2	4.3	2.30
2.4	4.8	2.29
2.6	5.2	2.29

Πίνακας 2. Αποτελέσματα μετρήσεων τάξης εξόδου αισθητήρα Hall

Κατά την εφαρμογή της τάσης και των ρευμάτων στο σωληνοειδές, αυτό που παρατηρούμε είναι πως η τάση εξόδου του αισθητήρα Hall δεν έχει τεράστια αλλαγή στην τιμή του. Ωστόσο, παρατηρούμε πως οι τιμές σε αυτό το πείραμα μειώνονται λίγο κατά την εφαρμογή μεγαλύτερων ρευμάτων συγκριτικά με το προηγούμενο πείραμα.

## 2.2. Επεξεργασία Μετρήσεων

1. Το σωληνοειδές το οποίο μας δόθηκε έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Διάμετρος πυρήνα χαλκού $d \text{ (mm)}$	Ακτίνα σωληνοειδούς $r \text{ (mm)}$	Μήκος σωληνοειδούς $L \text{ (mm)}$
0.4	22	38

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά Σωληνοειδούς

Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά και την τιμή της αντίστασης που μετρήθηκε από το πολύμετρο, θα υπολογιστεί το μήκος  $l$  του σύρματος που χρησιμοποιήθηκε. Οπότε έχουμε:

$$R_{\sigma\omega\lambda} = \rho_{copper} \frac{l}{S_{copper}} \quad (1)$$

Αρχικά, γνωρίζουμε πως η σπείρα του σωληνοειδούς φτιάχνεται από χαλκό. Επομένως η ειδική αντίσταση του χαλκού είναι  $\rho = 0.0175 \mu\Omega \text{ m}$ . Επιπλέον, η διατομή του πυρήνα του χαλκού θα είναι

$$S_{copper} = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi (0.2 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2 = 0.04\pi \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Οπότε, θα αντικαταστήσουμε στην σχέση (1) για να βρούμε το μήκος του σύρματος του σωληνοειδούς:

$$l = R_{\sigma\omega\lambda} \frac{S_{copper}}{\rho_{copper}} = 1.8 \Omega \frac{0.04\pi \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{0.0175 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}} = 1.8 \frac{0.04\pi}{0.0175} \text{ m} = 13 \text{ m}$$

$$\Rightarrow l = 13 \text{ m}$$

2. Καθώς έχουμε υπολογίσει το μήκος του σύρματος του σωληνοειδούς, τότε θα υπολογίσουμε τον αριθμό των σπειρών στο πηνίο:

$$l = 2\pi r N \Rightarrow N = \left\lceil \frac{l}{2\pi r} \right\rceil = \left\lceil \frac{13 \text{ m}}{2\pi \cdot 22 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \right\rceil = \lceil 188,09220547 \rceil = 189$$

$$\Rightarrow N = 189$$

3. Το επόμενο βήμα είναι να υπολογίσουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται ανάλογα με την τιμή του ρεύματος που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα. Επίσης, στη συνέχεια, θα υπολογιστεί και η μαγνητική επαγωγή που δημιουργείται.

3.1. Γνωρίζουμε πως η ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$  στο κέντρο του σωληνοειδούς υπολογίζεται με βάσει τον τύπο:

$$H = \frac{N}{2\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + r^2}} I \quad (2)$$

Θα υπολογίσουμε αρχικά τον συντελεστή που συνδέει τις δύο μεταβλητές. Άρα έχουμε ότι:

$$k = \frac{N}{2\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + r^2}} = \frac{189}{2\sqrt{\left(\frac{38 \text{ mm}}{2}\right)^2 + (22 \text{ mm})^2}} = \frac{189}{2\sqrt{361 + 484}} \frac{1}{m} = \frac{189}{2\sqrt{845}} \frac{1}{m}$$

$$\Rightarrow k \cong 3.2485 \text{ m}^{-1}$$

Επομένως η σχέση (2) θα γίνει  $H = 3.2485I$ . Άρα στον παρακάτω πίνακα μπορούμε να δούμε για τις τιμές του ρεύματος την ένταση που δημιουργείται στο κέντρο του σωληνοειδούς.

$V_{out} \text{ (V)}$	$I_{in} \text{ (A)}$	$H \text{ (A/m)}$
2.40	0.2	0.6497
2.40	0.4	1.2994
2.41	0.6	1.9491
2.42	0.8	2.5988
2.42	1.0	3.2485
2.42	1.2	3.8982
2.43	1.4	4.5479
2.43	1.6	5.1976
2.43	1.8	5.8473
2.44	2.0	6.4970
2.44	2.2	7.1467
2.44	2.4	7.7964
2.45	2.6	8.4461

Πίνακας 3. Αποτελέσματα έντασης μαγνητικού πεδίου με θετική φορά



Αντίστοιχα προκύπτει ο πίνακας με την αρνητική φορά μαγνητικού πεδίου

$V_{out}$ (V)	$I_{in}$ (A)	$H$ (A/m)
2.38	0.2	0.6497
2.38	0.4	1.2994
2.36	0.6	1.9491
2.36	0.8	2.5988
2.35	1.0	3.2485
2.34	1.2	3.8982
2.32	1.4	4.5479
2.32	1.6	5.1976
2.31	1.8	5.8473
2.31	2.0	6.4970
2.30	2.2	7.1467
2.29	2.4	7.7964
2.29	2.6	8.4461

Πίνακας 4. Αποτελέσματα έντασης μαγνητικού πεδίου με αρνητική φορά

3.2. Καθώς έχουμε υπολογίσει την ένταση του μαγνητικού πεδίου, το επόμενο βήμα είναι να υπολογίσουμε την μαγνητική επαγωγή  $B$ . Θα χρησιμοποιηθεί ο τύπος:

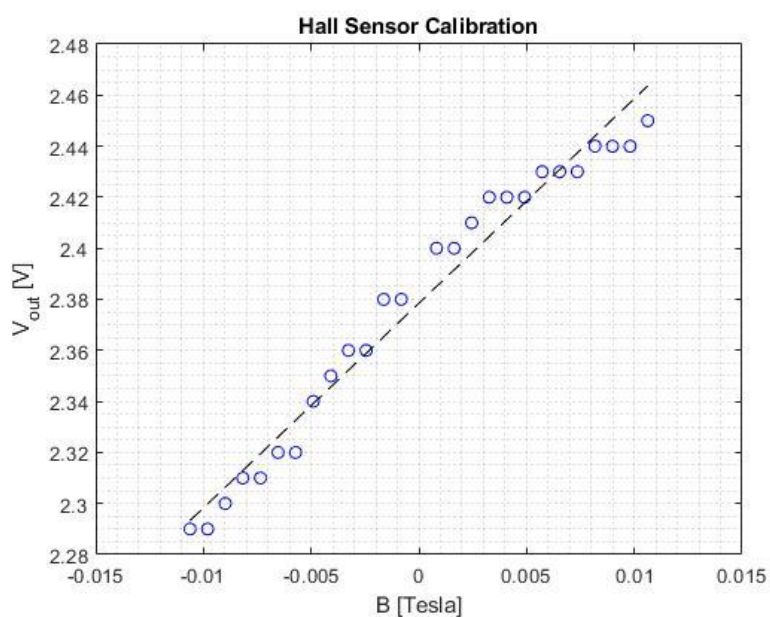
$$B = \mu H \quad (3)$$

όπου το  $\mu$  είναι η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα. Στις συνθήκες του εργαστηρίου που έχουμε πίεση  $P = 1 \text{ atm}$  και θερμοκρασία περίπου  $\theta = 20^\circ\text{C}$ , η μαγνητική διαπερατότητα είναι, με βάση την βιβλιογραφία,  $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$ . Επομένως, η σχέση (3) θα γίνει  $B = 4\pi \cdot 10^{-7} H$ . Άρα στον παρακάτω πίνακα θα δούμε τις τιμές της μαγνητικής επαγωγής που δημιουργείται σε αντιστοιχία με την τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $H$ .

$H \text{ (A/m)}$	$B \text{ (Gauss)}$
0.6497	$8.16437098814916e - 03$
1.2994	$1.63287419762983e - 02$
1.9491	$2.44931129644475e - 02$
2.5988	$3.26574839525966e - 02$
3.2485	$4.08218549407458e - 02$
3.8982	$4.89862259288949e - 02$
4.5479	$5.71505969170441e - 02$
5.1976	$6.53149679051932e - 02$
5.8473	$7.34793388933424e - 02$
6.4970	$8.16437098814916e - 02$
7.1467	$8.98080808696407e - 02$
7.7964	$9.79724518577898e - 02$
8.4461	$1.06136822845939e - 01$

Πίνακας 5. Αποτελέσματα Μαγνητικής Επαγωγής Πεδίου

4. Με βάση τους Πίνακες των προηγούμενων ερωτημάτων και την χρήση της ευθείας των ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει η καμπύλη βαθμονόμησης του Σχήματος 6. Η ευθεία που παρουσιάζεται θα μπορούσε να υπολογιστεί και με χρήση άλλων τεχνικών όπως τον ορισμό των μέγιστων και ελάχιστων τιμών αλλά επιλέχθηκε η γραμμική παλινδρόμηση μέσω των ελαχίστων τετραγώνων ως η ιδανική για αυτήν την εφαρμογή.

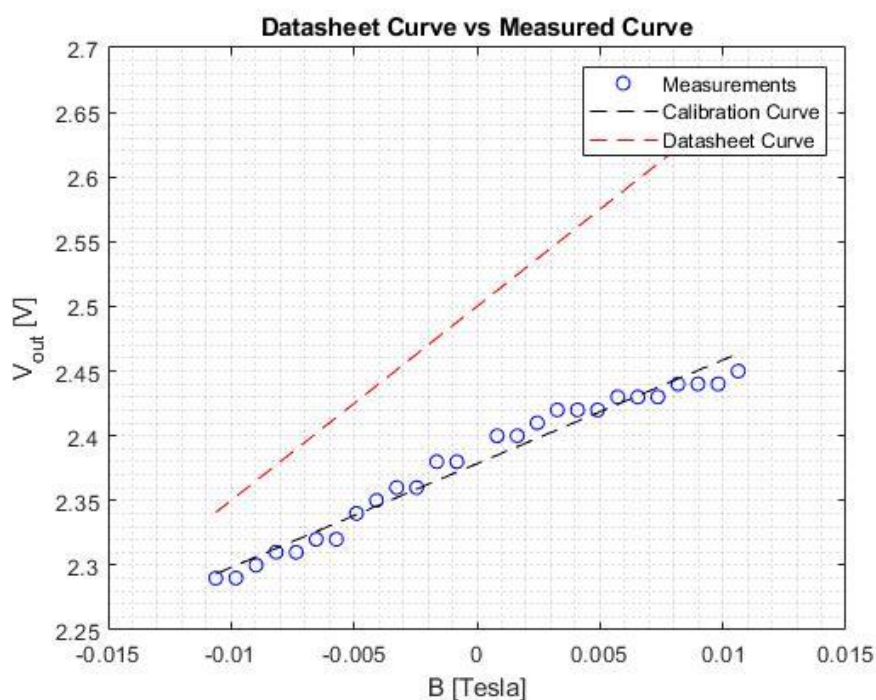


Σχήμα 6. Αποτέλεσμα Βαθμονόμησης

5. Με την χρήση MATLAB, γίνεται επιπλέον ο προσδιορισμός της κλίσης της ευθείας βαθμονόμησης. Η κλίσης της ευθείας προκύπτει να είναι ίση με την τιμή 8.0176. Έτσι, χρησιμοποιώντας και την μέση τιμή των μετρήσεων (2.3785 V) προκύπτει και η αναλυτική μορφή της ευθείας που αντιστοιχεί στις μετρήσεις του πειράματος. Η ευθεία αυτή, με μετρούμενο πεδίο B σε Tesla, έχει εξίσωση:

$$V_{out} = 2.3785 + 8.0176B \text{ [Volt]}$$

6. Η καμπύλη που δίνεται στο datasheet από τον κατασκευαστή του αισθητήρα συγκρίνεται με τα αποτελέσματα του πειράματος στο Σχήμα 7. Εδώ γίνεται εμφανής η ανάγκη βαθμονόμησης του αισθητήρα, καθώς οι μετρήσεις απέχουν αρκετά από την δοσμένη καμπύλη.



Σχήμα 7. Σύγκριση Μέτρησης & καμπύλης datasheet

7. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η διερεύνηση της αιτίας των αποτελεσμάτων του προηγούμενου ερωτήματος. Μία πρώτη και βασική αιτία της απόκλισης των μετρούμενων τάσεων είναι το γεγονός ότι η καμπύλη που παρέχει το datasheet παρουσιάζει την μέση τιμή των παραγόμενων αισθητήρων. Ο κατασκευαστής παρέχει την αναμενόμενη απόκριση του αισθητήρα, η οποία όμως στην πράξη μπορεί να διαφέρει αρκετά. Ακόμα ένα αίτιο απόκλισης είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Η απόκριση ενός αισθητήρα διαφέρει ανάλογα με περιβαλλοντικές συνθήκες όπως την θερμοκρασία και

την υγρασία. Επιπλέον, οι συνθήκες αυτές επηρεάζουν και μεγέθη όπως την σταθερά μαγνητικής διαπερατότητας, προσθέτοντας επιπλέον σφάλματα. Τέλος, σημαντικό ρόλο παίζουν και οι ανακρίβειες των οργάνων μέτρησης και παροχής.

Τα παραπάνω αυτά αίτια λειτουργούν αθροιστικά και οδηγούν τον αισθητήρα στην απόκλιση που εμφανίζεται στο Σχήμα 7. Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η απόκριση του αισθητήρα επηρεάζεται από την κατασκευή του, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις ακρίβειες των οργάνων που χρησιμοποιούνται για την βαθμονόμηση.