

ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ – ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ
HALL

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Του σπουδαστή: ΠΑΠΑΠΟΣΤΟΛΟΥ ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ
Υπ. Καθηγητής: ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	4
1.1	Εισαγωγή	5
1.2	Ιστορική Αναδρομή	7
1.3	Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου	10
1.3.1	Εισαγωγή	10
1.3.2	Μπλοκ Διαγράμματα (Block Diagrams)	10
1.3.3	Συναρτήσεις Μεταφοράς (Transfer Function)	11
1.3.4	Συστήματα Κλειστού Βρόγχου με Ανατροφοδότηση	12
1.3.5	Περιγραφή Εξαρτημάτων Συστήματος Κλειστού Βρόχου	13
1.4	Θεωρία των Αισθητήρων	16
1.4.1	Εισαγωγή	16
1.4.2	Συστήματα Αισθητήρων	17
1.4.3	Τύποι Αισθητήρων	17
1.4.4	Ορολογία Αισθητήρων	19
1.4.5	Χαρακτηριστικά Αισθητήρων	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HALL ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ	27
2.1	Μελέτη Φαινομένου Hall. Βασικές Αρχές	28
2.1.1	Εισαγωγή	28
2.1.2	Αισθητήρες Φαινομένου Hall	28
2.1.3	Θεωρία του Φαινομένου Hall	29
2.2	Χρήση του Φαινομένου στους Μετατροπείς	33
2.2.1	Αισθητήρες αναλογικής εξόδου	33
2.2.2	Αισθητήρες ψηφιακής εξόδου	36
2.3	Σχεδίαση Συστημάτων με χρήση του στοιχείου Hall	38
2.3.1	Εισαγωγή	38
2.3.2	Γενικός Σχεδιασμός Αισθητήριων Συσκευών	39
2.3.3	Σχεδίαση αισθητήριων συσκευών βάση του φαινομένου Hall	41
2.3.4	Καθορισμός Συστήματος	42
2.3.5	Γενικός Σχεδιασμός Συσκευών Διακριτής Εξόδου	43
2.3.6	Αισθητήρες συσκευές Hall ψηφιακής εξόδου	44
2.3.7	Σχεδίαση Εφαρμογών Ακριβείας	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ HALL	50
3.1	Μέτρηση Ρεύματος	51
3.1.1	Εισαγωγή	51
3.1.2	Αισθητήρες Ρεύματος	52
3.1.3	Πείραμα 1: Χρήση του στοιχείου Hall σε μετρήσεις ρεύματος	54
3.2	Μέτρηση περιστροφικής ταχύτητας	60
3.2.1	Αισθητήρας ταχύτητας τοποθετημένος στη μετάδοση	60
3.2.2	Θέση στροφάλου ή αισθητήρας ταχύτητας	60
3.2.3	Αισθητήρες Στροφών	60
3.2.4	Πείραμα 3: Χρήση του στοιχείου Hall για τη μέτρηση περιστροφικής ταχύτητας	62
3.3	Μετατροπή κίνησης σε τάση	66
3.3.1	Αισθητήρας θερμοκρασίας ή πίεσης	66
3.3.2	Αισθητήρας γωνίας γκαζιού	66
3.3.3	Πείραμα 2: Το στοιχείο Hall σαν μετατροπέας κίνησης σε τάση	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	70
4.1	ΘΕΩΡΙΑ	71
4.1.1	Θεωρία του Φαινομένου Hall	71
4.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	76
4.2.1	Πείραμα 1: Χρήση του στοιχείου Hall σε μετρήσεις ρεύματος	76

4.2.2 Πείραμα 2: Το στοιχείο Hall σαν μετατροπέας κίνησης σε τάση	80
4.2.3 Πείραμα 3: Χρήση του στοιχείου Hall για τη μέτρηση περιστροφικής ταχύτητας.....	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ
ΣΤΑ**

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

1.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα ελέγχου είναι παντού γύρω μας, ακόμα και μέσα μας. Πολλά περίπλοκα συστήματα ελέγχου περιλαμβάνονται στις λειτουργίες του ανθρώπινου σώματος. Ένα εξεζητημένο σύστημα ελέγχου που βρίσκεται στον υποθάλαμο του εγκεφάλου διατηρεί την θερμοκρασία του σώματος στους 37° Κελσίου παρά τις αλλαγές στην εξωτερική θερμοκρασία και την σωματική δραστηριότητα. Σ' ένα άλλο περίτεχνο σύστημα, το μάτι, η διάμετρος της κόρης ρυθμίζεται αυτόματα ώστε να ελέγξει το ποσό του φωτός που φτάνει στον αμφιβληστροειδή χιτώνα.

Η πράξη του ραφίματος και η οδήγηση ενός αυτοκινήτου είναι δυο τρόποι κατά τους οποίους το ανθρώπινο σώμα συμπεριφέρεται σαν ένας πολύ εξελιγμένος ελεγκτής. Τα μάτια είναι οι αισθητήρες που ανιχνεύουν την θέση της βελόνας και του νήματος, ή τη θέση του αυτοκινήτου όσον αφορά το κέντρο του δρόμου. Ένας περίπλοκος ελεγκτής, ο εγκέφαλος, συγκρίνει τις δυο θέσεις και καθορίζει τις ενέργειες που πρέπει να γίνουν για να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Το σώμα εκτελεί την κίνηση του ελέγχου απλά κουνώντας τη βελόνα ή στρέφοντας το τιμόνι του αυτοκινήτου. Ένας έμπειρος οδηγός θα είναι προετοιμασμένος για όλες τις μορφές διαταραχών που μπορεί να εμφανιστούν στο σύστημα όπως ένα κακό σημείο οδοστρώματος ή ένα όχημα που κινείται με χαμηλότερη ταχύτητα. Είναι εξαιρετικά δύσκολο να αναπαράγουμε με τη μορφή ενός συστήματος αυτόματου ελεγκτή τις τόσες πολλές κρίσεις και αποφάσεις που είναι σε θέση να λάβει το μέσο άτομο καθημερινά και ασυναίσθητα.



Εικόνα 1.1 Σύστημα Ελέγχου Εγκτάστασης.

Τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται για να ρυθμίζουν την θερμοκρασία σπιτιών, σχολικών και γενικά μεγάλων κτιρίων. Επηρεάζουν επίσης και την παραγωγή αγαθών και υπηρεσιών καθώς χρησιμοποιούνται για να διασφαλίσουν την αγνότητα και ομοιογένεια του φαγητού που τρώμε καθώς και διατηρώντας την ποιότητα προϊόντων που προέρχονται από χαρτοβιομηχανίες, βιομηχανίες σιδήρου, εργοστάσια χημικών, παραγωγής ενέργειας και άλλους τύπους εργοστασίων παραγωγής. Τα συστήματα ελέγχου βοηθούν στην προστασία του περιβάλλοντος ελαχιστοποιώντας τον όγκο των αποβλήτων που θα πρέπει να πεταχτούν, μειώνοντας έτσι τα κατασκευαστικά κόστη και ελαχιστοποιώντας το πρόβλημα απόρριψης των απορριμμάτων. Τα αποχετευτικά συστήματα και η διαχείριση των αποβλήτων είναι επίσης ένας τομέας ευρείας χρήσης των συστημάτων ελέγχου.

Ένα σύστημα ελέγχου είναι οποιαδήποτε ομάδα από εξαρτήματα η οποία πετυχαίνει ένα επιθυμητό αποτέλεσμα ή διατηρεί την τιμή μιας μεταβλητής σταθερή. Από τα προηγούμενα παραδείγματα είναι φανερό ότι μια μεγάλη γκάμα από εξαρτήματα/ συσκευές μπορεί να είναι μέρος ενός και μόνο συστήματος ελέγχου, είτε αυτά είναι ηλεκτρικά, ηλεκτρονικά, μηχανικά, υδραυλικά, πνευματικά, ανθρώπινα ή οποιοσδήποτε συνδυασμός αυτών. Το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι μια τιμή κάποιας μεταβλητής στο σύστημα. Για παράδειγμα, η κατεύθυνση ενός αυτοκινήτου, η θερμοκρασία ενός δωματίου, η στάθμη του υγρού σε μια δεξαμενή ή η πίεση του αέρα σε μια σωλήνα. Η μεταβλητή της οποίας η τιμή ελέγχεται ονομάζεται μεταβλητή ελέγχου (controlled variable).

Για να πετύχουμε τον έλεγχο, πρέπει να υπάρχει και άλλη μια μεταβλητή στο σύστημα η οποία να μπορεί να επηρεάσει την μεταβλητή ελέγχου. Τα περισσότερα συστήματα έχουν πολλές τέτοιες μεταβλητές. Το σύστημα ελέγχου διατηρεί το επιθυμητό αποτέλεσμα κατευθύνοντας την τιμή μίας από τις μεταβλητές αυτές. Η μεταβλητή που κατευθύνεται ονομάζεται κατευθυνόμενη μεταβλητή (manipulated variable). Το τιμόνι του αυτοκινήτου είναι ένα παράδειγμα κατευθυνόμενης μεταβλητής.

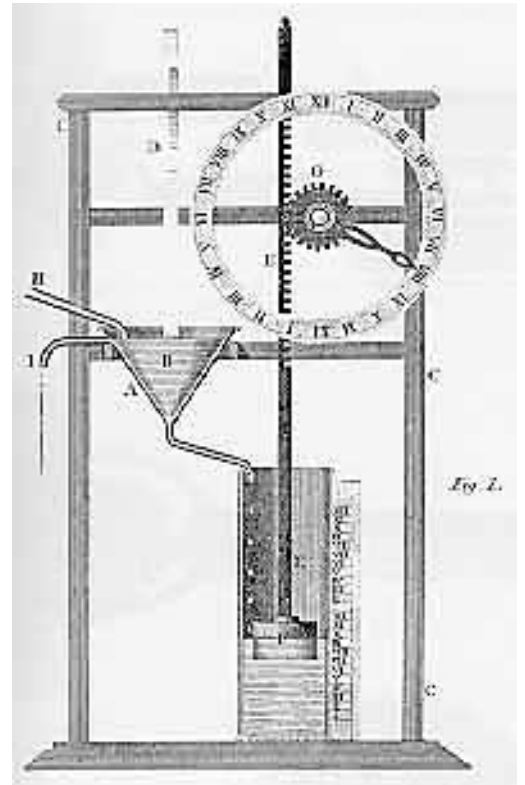
Ορισμός ενός Συστήματος Ελέγχου: Ένα σύστημα ελέγχου είναι ένα σύνολο από συσκευές που πετυχαίνουν ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα κατευθύνοντας την τιμή μιας άλλης μεταβλητής μέσα στο σύστημα.

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Παραδείγματα αναδρομικού ελέγχου (feedback control) εντοπίζονται από πολύ παλιά στην ιστορία. Τον 3^ο προ Χριστού αιώνα όταν ο Κτεσίβιος, ένας Έλληνας που ζούσε στην Αλεξάνδρεια, λέγεται ότι δημιούργησε μια αυτορυθμιζόμενη συσκευή ροής η οποία χρησιμοποιήθηκε στα ρολόγια νερού της εποχής. Ένα τέτοιο ρολόι χρησιμοποιεί ένα δείκτη στάθμης ώστε να σημειώνει το πέρασμα της ώρας. Η ακρίβειά του εξαρτάται από το πόσο σταθερή θα είναι η εισροή του νερού στη δεξαμενή. Ο ρυθμός της ροής μπορεί να αλλάξει αν αλλάξει και η πίεση του νερού. Ο Κτεσίβιος εισήγαγε μια δεύτερη δεξαμενή μ' ένα φλοτέρ και μια βαλβίδα σχεδιασμένα να ρυθμίζουν τη ροή του εισερχόμενου νερού στη δεύτερη δεξαμενή. Έτσι το νερό στη δεύτερη δεξαμενή μένει σταθερό και άρα η ροή στην κεντρική δεξαμενή του ρολογιού παρέμενε σταθερή. Αν υποθέσουμε ότι η ροή αυξάνεται, ανεβαίνει και η στάθμη στην δεύτερη δεξαμενή. Τότε, το φλοτέρ κλείνει την βαλβίδα και μειώνεται η εισροή στη δεύτερη δεξαμενή. Έτσι η στάθμη πέφτει ξανά και τότε η βαλβίδα ανοίγει πάλι. Με τον τρόπο αυτό κατάφερε να διατηρεί σταθερή τη ροή του νερού και άρα πέτυχε τη δημιουργία μιας σταθερής μονάδας μέτρησης του χρόνου.

Τα επόμενα 2000 χρόνια παρατηρήθηκε πολύ μικρή ανάπτυξη. Η άφιξη της εποχής των μηχανών συνοδεύτηκε από μια μεγάλη αύξηση στα σχέδια των συστημάτων ελέγχου. Η ανάπτυξη της ατμομηχανής δημιούργησε την ανάγκη για συσκευές ελέγχου της ταχύτητας ώστε αυτή να διατηρείται σταθερή παρά τις αλλαγές στο φορτίο ή την πίεση του ατμού. Το 1788, ο James Watt ανέπτυξε τον πλέον διάσημο ρυθμιστή ροής ατμού με χρήση βαριδιών για αυτό το σκοπό. Ο Watt πήρε την αρχή αίσθησης της ταχύτητας μέσω του φυγοκεντρικού εκκρεμούς του Thomas Mead και την χρησιμοποίησε στον βρόχο ανάδρασης μιας ατμομηχανής.

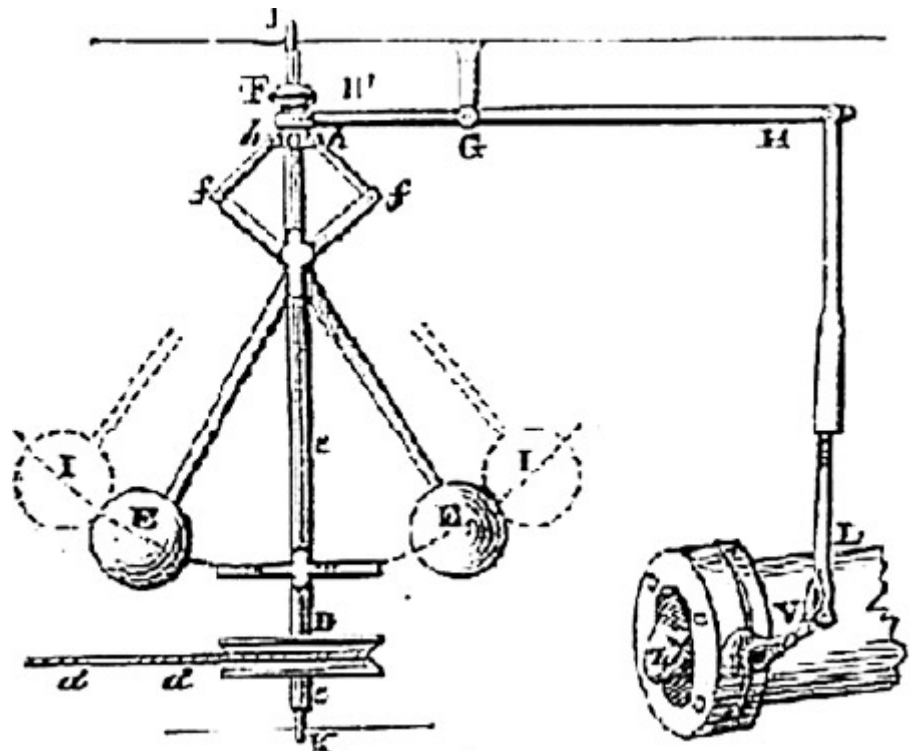
Καθώς η ταχύτητα της μηχανής αυξάνει, τα βαρίδια της μηχανής απομακρύνονται από το κέντρο και έτσι τραβούν και κλείνουν τη βαλβίδα ατμού. Κλείνοντας την βαλβίδα, η μηχανή ελαττώνει ταχύτητα. Αν η ταχύτητα της μηχανής είναι πολύ μικρή, η δύναμη του ελατηρίου σε συνδυασμό με το βάρος των βαριδιών ανοίγουν την βαλβίδα ατμού, η μηχανή δέχεται περισσότερο ατμό και άρα αυξάνει και πάλι την ταχύτητά της. Η επιθυμητή ταχύτητα επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση της σκληρότητας και της θέσης του ελατηρίου. Η αρχή του ρυθμιστή ταχύτητας με βαρίδια χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα σε εφαρμογές ελέγχου της ταχύτητας.



Εικόνα 1.2 Το ρολόι νερού του Κτεσίβιου!

Αναλυτικά εργαλεία για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα ελέγχου αρχικά αναπτύχθηκαν από τον J. C. Maxwell το 1868 για εφαρμογές όπως έλεγχος θέσης τηλεσκοπίων. Γενικότερη κατανόηση όμως της αρχής του ελέγχου μέσω ανάδρασης δεν αναπτύχθηκε ουσιαστικά μέχρι τον 20^ο αιώνα.

Από το 1900 έως το 1940 σημειώθηκαν σημαντικές αλλαγές σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές όπως παραγωγή ενέργειας, αεροναυπηγική, βιομηχανίες χημικών και ηλεκτρονικών. Η ανάπτυξη του ενισχυτή με λυχνίες κενού συγκεκριμένα είχε σαν αποτέλεσμα να αναπτυχθούν αναλυτικές τεχνικές για το σχεδιασμό συστημάτων ανάδρασης. Οι Black, Bode και Nyquist των εργαστηρίων Bell Telephone είναι υπεύθυνοι για πολλές από αυτές τις συνθήκες, ειδικά αυτές που αφορούν την απόκριση συχνότητας.



Εικόνα 1.3 Ο «κυβερνήτης» του Watt (ρυθμιστής πίεσης).

Ο ερχομός του Δευτέρου Παγκόσμιου Πολέμου έδωσε επιπλέον ώθηση στον σχεδιασμό νέου τύπου συστημάτων ελέγχου. Η ραγδαία αύξηση στις ταχύτητες των αεροπλάνων κατέστησε το χειροκίνητο αντιαεροπορικό πολυβόλο απαρχαιωμένο. Η τελειοποίηση του ελεγχόμενου από ραντάρ πολυβόλου ήταν μια μεγάλη τεχνολογική πρόοδος της περιόδου, καθώς αντιπροσώπευε την πρώτη εφαρμογή ενός μηχανικού συστήματος βασισμένο στις μαθηματικές μεθόδους που είχαν αναπτυχθεί για τους ηλεκτρονικούς ενισχυτές. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η θεωρία του ελέγχου σαν επιστήμη πρωτοεμφανίστηκε την εποχή εκείνη, καθώς ένα πλαίσιο από γενικές αρχές σχηματοποιήθηκε και το οποίο μπορούσε να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε τύπο συστήματος.

Ο Norbert Wiener, που βοήθησε στην ανάπτυξη του ελεγχόμενου από ραντάρ αντιαεροπορικού όπλου, συνεισέφερε σημαντικά στην τότε αναπτυσσόμενη επιστήμη με αναλυτικές τεχνικές καθώς και διευρύνοντας τις αρμοδιότητές του πέρα από τις μηχανές. Εισηγάγε τον όρο **Κυβερνητική Μηχανική (Cybernetics)** για να περιγράψει την επιστήμη του ελέγχου και της επικοινωνίας μέσω της σύγκρισης έμβιων όντων και μηχανών.

Ο όρος προέρχεται από την Ελληνική λέξη κυβερνήτης που σημαίνει το άτομο που κατευθύνει ένα πλοίο (ο ελεγκτής του πλοίου). Παρότι έχουμε περιγράψει τα συστήματα ελέγχου σαν ελεγκτές της ροής ενέργειας, η ιδέα μπορεί κάλλιστα να εφαρμοστεί σε συστήματα που έχουν να κάνουν με ροή πληροφοριών,



Εικόνα 1.4 Αντιαεροπορικό πυροβόλο ελεγχόμενο από Ραντάρ

χρημάτων, ή άλλες ποσότητες. Επίσης, ανάλυση συστημάτων ανατροφοδότησης και τεχνικές σχεδιασμού έχουν βρει εφαρμογή σε οικονομικά και κοινωνικά συστήματα.

Μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, τεχνικές σχεδιασμού συστημάτων εδραιώθηκαν κυρίως γύρω από τις μεθόδους συναρτήσεων μεταφοράς βασιζόμενες στον μετασχηματισμό Laplace. Σημαντική πρόοδος σημειώθηκε σε εφαρμογές όπως αεροναυπηγική, καθοδήγηση πυραυλικών συστημάτων και εργοστάσια πυρηνικής ενέργειας.

Με το τέλος της δεκαετίας του 1950, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής είχε αρχίσει να χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό συστημάτων ελέγχου καθώς και σαν στοιχείο ελέγχου. Ταυτόχρονα, επανήλθε στο προσκήνιο η μελέτη των συστημάτων αυτών με εξισώσεις χώρου – κατάστασης, η οποία είχε αρχικά αναπτυχθεί στα κλασικά μαθηματικά. Τη δεκαετία του 60' κυριάρχησαν θεωρητικές εφαρμογές που βασιζόνταν σ' αυτή την προσέγγιση. Αρχικά, αντιμετωπίστηκε μια δυσκολία στην εφαρμογή των ηλεκτρονικών υπολογιστών σαν ελεγκτές για πολλούς λόγους, και έτσι ο τυπικός υλικοτεχνικός εξοπλισμός κατά τη διάρκεια της δεκαετίας αποτελούνταν κυρίως από πνευματικές και υδραυλικές συσκευές καθώς και τελεστικούς ενισχυτές. Οι πιο σημαντικές εφαρμογές βρίσκονταν κυρίως στο διαστημικό πρόγραμμα.

Με την αρχή της δεκαετίας του 1970, είχε γίνει κοινή συνείδηση ότι η αποκαλούμενη μοντέρνα θεωρία ελέγχου, που βασιζόταν στην προσέγγιση εξισώσεων χώρου – κατάστασης, δεν μπορούσε να αντικαταστήσει εξ' ολοκλήρου την «κλασική» θεωρία, που βασιζόταν στην απόκριση συχνότητας και στο μετασχηματισμό Laplace. Ο μοντέρνος σχεδιαστής συστημάτων ελέγχου θα πρέπει να έχει στοιχειώδεις γνώσεις και των δυο θεωρήσεων. Από πλευράς υλικού, η δεκαετία αυτή είδε την ευρύτατη χρήση ψηφιακών ελεγκτών, πρώτα σαν μηχανές μεγάλου μεγέθους και προς το τέλος σαν μικροϋπολογιστές.

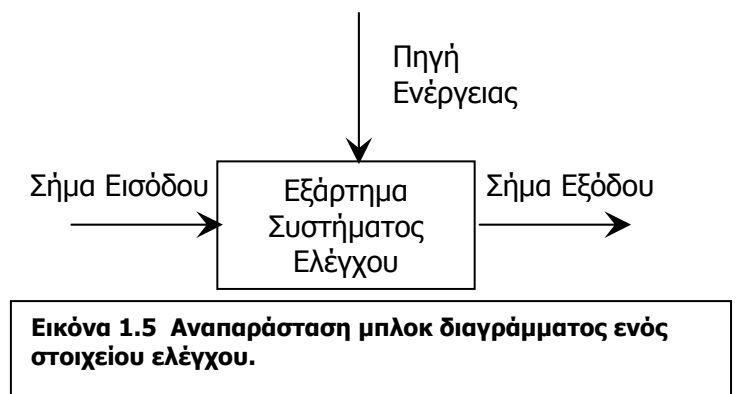
Η δεκαετία του 1980 έμελλε να δει περαιτέρω χρήση των μικροϋπολογιστών, οι οποίοι αντικαθιστούσαν άλλες συσκευές σαν στοιχεία ελέγχου, παρότι πάντα θα υπάρχει η ανάγκη για τελεστικούς ενισχυτές, πνευματικά και υδραυλικά συστήματα λόγω της απλότητας, της αξιοπιστίας και τις απαιτήσεις δύναμης και ροπής των κατασκευών. Αυξανόμενες απαιτήσεις για οικονομία καυσίμων θα απαιτούσαν βελτιωμένα συστήματα ελέγχου για τους κινητήρες αυτοκινήτων, αεροπλάνων καθώς και κάθε είδους εγκαταστάσεων εργοστασίων. Η «κλασική» θεωρία ελέγχου, με έμφαση στα συστήματα μονής εισόδου, μονής εξόδου δεν είναι ικανή να αντιμετωπίσει ευρείας κλίμακας εφαρμογές, λόγω της απαίτησης για επεξεργασία πολλών μεταβλητών.

Στο μέλλον, μπορούμε να περιμένουμε σημαντικές εφαρμογές συστημάτων αυτομάτου ελέγχου στα διαστημικά προγράμματα λόγω του μεγάλου κόστους που έχουν οι επανδρωμένες αποστολές. Η χρήση των ρομπότ σε αυτό τον τομέα καθώς και σε άλλους βιομηχανικούς τομείς θα γίνει περισσότερο διαδεδομένη. Η ρομποτική έχει πολλά να συνεισφέρει σε περιοχές όπου η εργασία είναι επικίνδυνη ή ανθυγιεινή. Υψηλής ταχύτητας συστήματα μεταφοράς σε στεριά, θάλασσα και αέρα θα απαιτούν καλύτερα συστήματα ελέγχου ώστε να παρέχεται στους επιβάτες επιπλέον άνεση και ασφάλεια. Επίσης, ελαφρύτερες κατασκευές θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αν εξελεγμένοι ελεγκτές είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα που δημιουργούνται από την ελαστικότητα τέτοιων κατασκευών. Μέσω πιο αυστηρών απαιτήσεων για ασφάλεια και αποδοτικότητα σε όλους τους τομείς, υπάρχει μεγάλη προοπτική ανάπτυξης μέσω της θεωρίας και της πρακτικής των συστημάτων ελέγχου με ανάδραση.

1.3 Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου

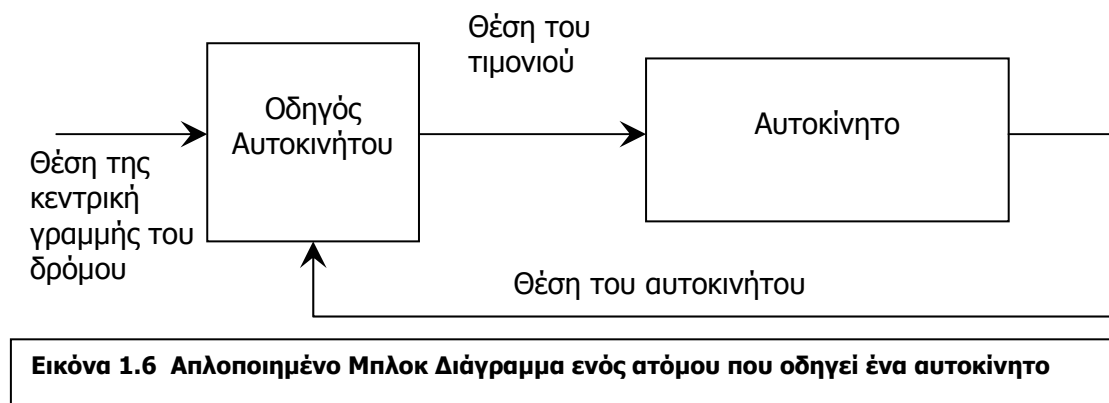
1.3.1 Εισαγωγή

Οποιοδήποτε σύστημα ελέγχου μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά του κάθε εξαρτήματος που περιλαμβάνει. Μια μεγάλη ποικιλία από προβλήματα ελέγχου τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν/ επηρεάζουν διαδικασίες, εργαλειομηχανές, σερβομηχανισμούς, διαστημόπλοια, συγκοινωνίες, οικονομικά και άλλα, μπορούν να αναλυθούν με τις ίδιες μαθηματικές μεθόδους. Το σημαντικό χαρακτηριστικό του κάθε εξαρτήματος είναι κατά πόσο αυτό επηρεάζει το σύστημα. Τα **Μπλοκ Διαγράμματα (Block Diagrams)** είναι μια μέθοδος αναπαράστασης ενός συστήματος ελέγχου η οποία επικεντρώνεται κυρίως σ' αυτό το γνώρισμα του κάθε εξαρτήματος. Γραμμές σημάτων αναπαριστούν τα σήματα εισόδου και εξόδου των εξαρτημάτων (εικόνα 1.5). Κάθε εξάρτημα λαμβάνει ένα σήμα εισόδου από κάποιο μέρος του συστήματος και παράγει το σήμα εξόδου για κάποιο άλλο μέρος του συστήματος. Τα σήματα μπορεί να είναι ηλεκτρικά, ρεύματος, τάσης, πίεσης αέρα, ροής υγρών, θερμοκρασίας, ταχύτητας, επιτάχυνσης, θέσης, κατεύθυνσης και άλλα, καθώς επίσης και οι διαδρομές που αυτά ακολουθούν μπορεί να είναι ηλεκτρικά καλώδια, υδραυλικοί σωλήνες, μηχανικοί σύνδεσμοι κλπ.



1.3.2 Μπλοκ Διαγράμματα (Block Diagrams)

Ένα μπλοκ διάγραμμα αποτελείται από ένα τετράγωνο που αντιπροσωπεύει το κάθε εξάρτημα σε ένα σύστημα ελέγχου και συνδέεται με γραμμές οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις διαδρομές των σημάτων. Το σχήμα της εικόνας 1.6 αναπαριστά ένα πολύ απλό μπλοκ διάγραμμα ενός ατόμου που οδηγεί ένα αυτοκίνητο. Η αίσθηση της όρασης του οδηγού μας δίνει τα δυο σήματα εισόδου: την θέση του αυτοκινήτου και την θέση του κέντρου του δρόμου. Ο οδηγός συγκρίνει αυτές τις δυο θέσεις και καθορίζει την θέση του τιμονιού το οποίο θα δώσει τη σωστή θέση στο όχημα.



Την εφαρμογή της απόφασης αναλαμβάνουν τα χέρια του οδηγού και κατευθύνουν το τιμόνι στη σωστή θέση. Το όχημα ανταποκρίνεται στην αλλαγή της θέσης του τιμονιού με την αντίστοιχη αλλαγή της κατεύθυνσής του. Αφού περάσεις ένα μικρό χρονικό διάστημα, η νέα κατεύθυνση μετακινεί το όχημα στη νέα του θέση. Έτσι διαπιστώνουμε ότι υπάρχει μια καθυστέρηση ανάμεσα στην αλλαγή της θέσης του τιμονιού και την θέση του αυτοκινήτου. Η καθυστέρηση αυτή περιλαμβάνεται στην μαθηματική εξίσωση του μπλοκ που αναπαριστά το αυτοκίνητο.

Η γραμμή που κλείνει τον κύκλο(loop) του σήματος στο μπλοκ διάγραμμα μαρτυρά μια θεμελιώδη έννοια ελέγχου. Η πραγματική θέση του αυτοκινήτου χρησιμοποιείται σαν σήμα εισόδου για να καθοριστεί η απαραίτητη διόρθωση ώστε να διατηρηθεί η επιθυμητή θέση. Η έννοια αυτή λέγεται **ανατροφοδότηση (feedback)**, και τα συστήματα ελέγχου με ανατροφοδότηση λέγονται και συστήματα ελέγχου κλειστού βρόγχου.

1.3.3 Συναρτήσεις Μεταφοράς (Transfer Function)

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός εξαρτήματος είναι η σχέση μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου. Η σχέση αυτή ερμηνεύεται από τη **Συνάρτηση Μεταφοράς (Transfer Function)** του εξαρτήματος, και ορίζεται ως ο λόγος του σήματος εξόδου προς το σήμα εισόδου. Η συνάρτηση μεταφοράς αποτελείται από δυο μέρη. Ένα μέρος είναι η σχέση μεγέθους μεταξύ της εισόδου και της εξόδου και το άλλο μέρος είναι η σχέση τους ως προς το χρόνο ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο. Για παράδειγμα, η σχέση μεγέθους μπορεί να είναι τέτοια ώστε η έξοδος να είναι διπλάσια της εισόδου και η σχέση χρόνου να είναι τέτοια ώστε να υπάρχει καθυστέρηση δυο δευτερολέπτων μεταξύ μιας αλλαγής στην είσοδο και της αντίστοιχης αλλαγής στην έξοδο.

Αν το εξάρτημα είναι γραμμικό και το σήμα εισόδου είναι ένα ημιτονοειδές σήμα, η σχέση μεγέθους μετριέται με το **κέρδος (gain)** και ο χρόνος με τη **διαφορά φάσης (phase difference)**. Το κέρδος του εξαρτήματος είναι ο λόγος του μεγέθους του σήματος εξόδου προς το μέγεθος του σήματος εισόδου. Η διαφορά φάσης του εξαρτήματος είναι η γωνία φάσης του σήματος εξόδου μείον τη γωνία φάσης του σήματος εισόδου.

Η πολική μορφή σύνθετων αριθμών είναι η πιο βολική μορφή για να περιγράψουμε τις τιμές της εισόδου της εξόδου και της συναρτήσεως μεταφοράς. Αν η είσοδος αναπαριστάται από τον αριθμό $A \angle \alpha$ και η έξοδος από τον $B \angle \beta$. Η συνάρτηση μεταφοράς G , έχει τη μορφή: $G = \frac{B \angle \beta}{A \angle \alpha} = \left(\frac{B}{A} \right) \angle \beta - \alpha$. Έτσι, η συνάρτηση μεταφοράς G , αναπαρίσταται από τον αριθμό του οποίου το μέγεθος είναι το κέρδος του εξαρτήματος B/A , και του οποίου η γωνία είναι η φάση της εξόδου μείον τη φάση της εισόδου. Συχνά, το κέρδος ενός εξαρτήματος εκφράζεται σαν ο λόγος της αλλαγής στο μέγεθος της εξόδου προς την ανταποκρινόμενη αλλαγή στο μέγεθος της εισόδου.

Το κέρδος ενός εξαρτήματος μας δίνει το μέγεθος των μονάδων εξόδου πάνω σ' αυτών της εισόδου. Για παράδειγμα, αν σε έναν ενισχυτή έχουμε 10V αύξηση για κάθε 1V εισόδου τότε αυτός έχει κέρδος 10V ανά Volt. Αν σε ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος έχουμε αύξηση 1000 στροφές το λεπτό για κάθε 1V αλλαγή στην είσοδο τότε αυτός έχει κέρδος 1000σαλ/volt.

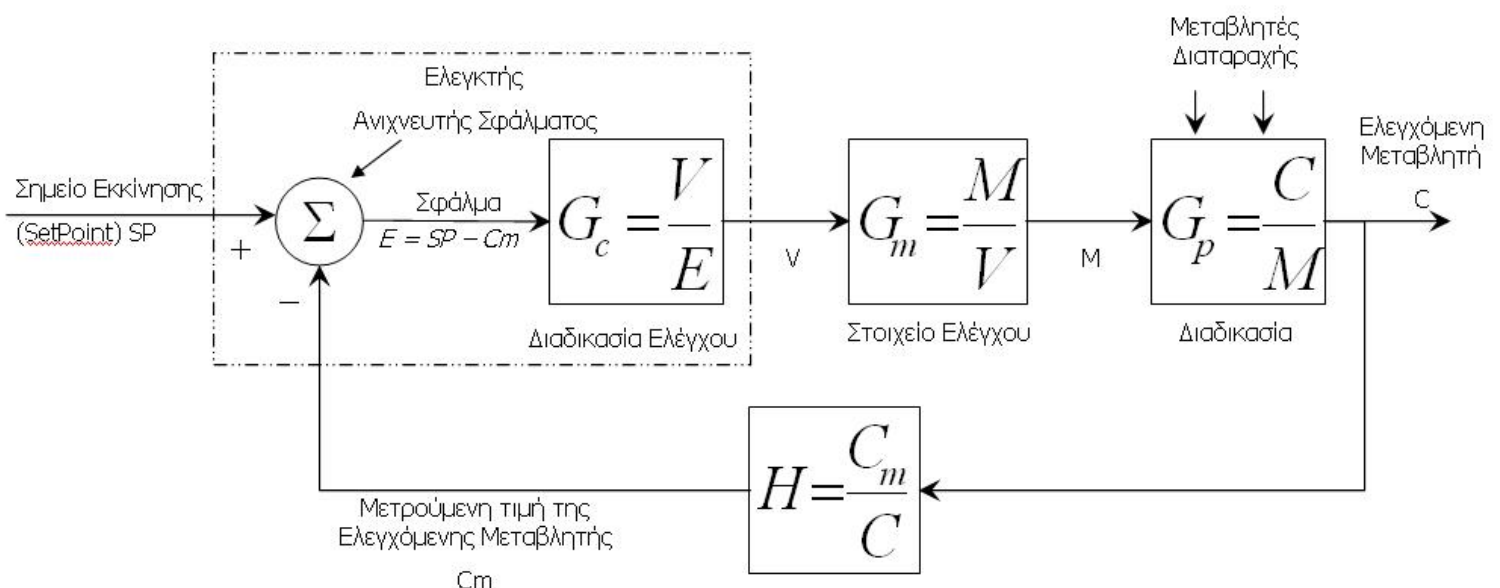
Το κέρδος και η διαφορά φάσης ενός εξαρτήματος για μια συγκεκριμένη συχνότητα αναφέρονται σαν **απόκριση συχνότητας (frequency response)** του εξαρτήματος σ' αυτή τη συχνότητα. Για παράδειγμα, για συχνότητα 1Hz, ένα συγκεκριμένο σύστημα ελέγχου έχει κέρδος 0.995 και διαφορά φάσης 5.71° ενώ για 100Hz το κέρδος είναι 0.0995 και η διαφορά φάσης 84.29° .

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός εξαρτήματος περιγράφει τη σχέση μεγέθους και χρόνου μεταξύ του σήματος εισόδου και εξόδου.

1.3.4 Συστήματα Κλειστού Βρόγχου με Ανατροφοδότηση

Ανατροφοδότηση είναι η πράξη της μέτρησης της διαφοράς ανάμεσα στο πραγματικό και στο επιθυμητό αποτέλεσμα και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας αυτή τη διαφορά η καθοδήγηση του συστήματος ώστε να πλησιάσουμε στην επιθυμητή τιμή της εξόδου. Ο όρος ανατροφοδότηση (feedback) προέρχεται από την κατεύθυνση στην οποία κινείται η μετρούμενη τιμή στο μπλοκ διάγραμμα. Το σήμα ξεκινάει από την έξοδο του υπό έλεγχο συστήματος και καταλήγει στην είσοδο του ελεγκτή. Η έξοδος του ελεγκτή είναι η είσοδος του υπό έλεγχο συστήματος. Έτσι, η μετρούμενη τιμή του σήματος που προέρχεται από την έξοδο του υπό έλεγχο συστήματος, τροφοδοτείται ξανά στην είσοδο. Ο όρος κλειστός βρόχος αναφέρεται στον βρόχο που δημιουργείται από τη διαδρομή της ανατροφοδότησης.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα μπλοκ διάγραμμα κλειστού βρόχου ενός συστήματος ελέγχου διαδικασιών. Θα πρέπει κανείς να είναι εξοικειωμένος με τέτοιους όρους καθώς και τις διεργασίες που ακολουθούν οι οποίες σχηματίζουν την βάση των συστημάτων ελέγχου με ανάδραση.



Εικόνα 1.7 Μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος ελέγχου διαδικασιών κλειστού βρόχου.

Λειτουργίες που εκτελούνται από ένα Σύστημα Ελέγχου με Ανατροφοδότηση

Μέτρηση: μέτρηση της τιμής της μεταβλητής ελέγχου (controlled variable)

Απόφαση: υπολογισμός του σφάλματος (επιθυμητή τιμή μείον την πραγματική) και χρήση του σφάλματος ώστε να σχηματιστεί μια πράξη ελέγχου.

Χειρισμός: χρήση της πράξης ελέγχου ώστε να χειραγωγηθούν κάποιες μεταβλητές στην διαδικασία με τέτοιο τρόπο ώστε θα τείνουν να μειώσουν το σφάλμα.

Στην εικόνα 1.7 το σημείο εκκίνησης (set point, είναι η τιμή που λέμε στο σύστημα ότι θα πρέπει να έχει, η αναφορά μας) είναι η είσοδος στο σύστημα ελέγχου διεργασιών, και η μεταβλητή ελέγχου (C) είναι η έξοδος. Η ροή της ανατροφοδότησης αποτελείται από ένα εξάρτημα, το αισθητήριο με συνάρτηση μεταφοράς (H). Η κανονική ροή αποτελείται από τρία εξαρτήματα (το εξάρτημα που διενεργεί τον έλεγχο, αυτό που κάνει το χειρισμό και αυτό της διεργασίας) με συναρτήσεις μεταφοράς G_c, G_m και G_p αντίστοιχα. Η συνολική συνάρτηση μεταφοράς της κανονικής ροής (G) είναι το γινόμενο των συναρτήσεων μεταφοράς των τριών αυτών εξαρτημάτων.

$$G = G_c G_m G_p$$

Η επίδοση ενός συστήματος ελέγχου βασίζεται συνήθως στη σύγκριση μεταξύ της τιμής εκκίνησης (set point) και της μετρούμενης τιμής της μεταβλητής ελέγχου (C_m , είναι η ελεγχόμενη μεταβλητή, manipulated). Ο λόγος που χρησιμοποιείται η C_m και όχι η C είναι ότι η C_m είναι μετρήσιμη και διαθέσιμη. Έτσι, η συνάρτηση μεταφοράς C_m/SP του συστήματος ελέγχου διεργασιών κλειστού βρόχου προκύπτει όπως φαίνεται παρακάτω:

Έχουμε: $E = SP - C_m$, $C = EG$, $C_m = CH$ και αντικαθιστώντας παίρνουμε:

$$C_m = EGH \Leftrightarrow C_m = (SP - C_m)GH \Leftrightarrow C_m + C_mGH = (SP)GH \Leftrightarrow C_m(1+GH) = (SP)GH \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{C_m}{SP} = \frac{GH}{1+GH} \quad (1)$$

Η εξίσωση (1) είναι η συνάρτηση μεταφοράς ενός συστήματος ελέγχου διεργασιών κλειστού βρόχου. Παρακάτω ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των εξαρτημάτων του συστήματος αυτού.

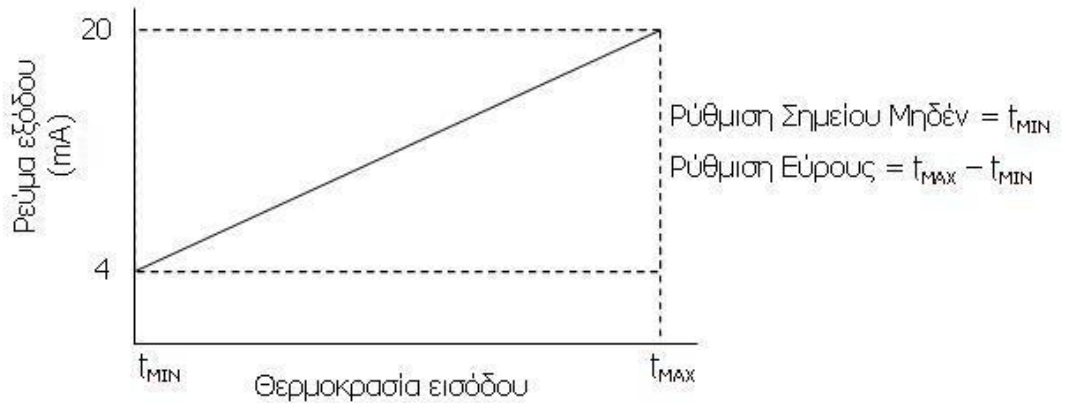
1.3.5 Περιγραφή Εξαρτημάτων Συστήματος Κλειστού Βρόχου

Διεργασία (Process)

Το μπλοκ διεργασίας στην εικόνα 1.7 αντιπροσωπεύει οτιδήποτε εκτελείται μέσα και από τον εξοπλισμό από τον οποίο μια μεταβλητή ελέγχεται. Η διεργασία περιλαμβάνει όλα όσα επηρεάζουν την μεταβλητή ελέγχου ή αλλιώς μεταβλητή διεργασίας εκτός από τον ελεγκτή και το τελικό στοιχείο ελέγχου.

Αισθητήριο (Measuring Transmitter)

Ο εκπομπός μετρήσεων ή αλλιώς αισθητήρας μετράει την τιμή της μεταβλητής ελέγχου και την μετατρέπει σε ένα εύχρηστο σήμα. Παρόλο που ο αισθητήρας θεωρείται ότι είναι ένα μπλοκ, συνήθως αποτελείται



Εικόνα 1.8 Γραφική παράσταση εισόδου/εξόδου ενός αισθητήρα μέτρησης θερμοκρασίας

από ένα αισθητήριο στοιχείο και έναν μετατροπέα σήματος. Η **εικόνα 1.8** δείχνει την καμπύλη εισόδου/εξόδου ενός αισθητήρα θερμοκρασίας. Το αισθητήριο στοιχείο μπορεί να είναι ένα θερμοζεύγος, μια αντίσταση ή ένα θερμίστορ. Ο μετατροπέας σήματος λαμβάνει την έξοδο του αισθητήριου στοιχείου και παράγει ένα σήμα ηλεκτρικού ρεύματος. Για παράδειγμα, ένα θερμοζεύγος μετατρέπει τη θερμοκρασία σε ένα ηλεκτρικό σήμα της τάξης των millivolt και ο μετατροπέας παίρνει αυτό το σήμα και το μετατρέπει σε ηλεκτρικό ρεύμα της τάξης των 4 – 20 mA.

Ελεγκτής (Controller)

Ο ελεγκτής περιλαμβάνει τον ανιχνευτή σφάλματος και μια μονάδα που εκτελεί τις διάφορες μορφές ελέγχου. Ο ανιχνευτής σφάλματος υπολογίζει τη διαφορά μεταξύ της μετρούμενης τιμής της μεταβλητής ελέγχου και την επιθυμητής τιμής (της ορισμένης τιμής, setpoint). Η διαφορά τους καλείται σφάλμα και υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Error} = \text{setpoint} - \text{measured value of controlled variable} \Leftrightarrow E = SP - C_m$$

Οι διάφορες μορφές ελέγχου μετατρέπουν το σφάλμα σε μια πράξη ελέγχου ή έξοδο του ελεγκτή η οποία θα τείνει να μειώσει το σφάλμα. Οι τρεις πιο γνωστές μορφές ελέγχου είναι ο αναλογικός (Proportional, P), ο ολοκληρωτικός (Integral, I) και ο παράγωγος (Derivative, D). Στην παρούσα φάση θα εξετάσουμε την λειτουργία των μορφών αυτών και όχι τα μαθηματικά τους μοντέλα.

Ο **Αναλογικός Έλεγχος** (P) είναι η πιο απλή μορφή ελέγχου. Παράγει μια ενέργεια ελέγχου η οποία είναι αναλογική ως προς το σφάλμα. Αν το σφάλμα είναι μικρό, τότε η αναλογική μορφή ελέγχου παράγει μια μικρή πράξη ελέγχου. Αν το σφάλμα είναι μεγάλο, αντίστοιχο θα είναι και το μέγεθος της πράξης ελέγχου. Η αναλογική μορφή επιτυγχάνεται απλά πολλαπλασιάζοντας το σφάλμα με μια σταθερά κέρδους, K.

Ο **Ολοκληρωτικός Έλεγχος** παράγει μια πράξη ελέγχου η οποία συνεχίζει να αυξάνει την διορθωτική της επίδραση για όσο χρονικό διάστημα το σφάλμα παραμένει. Αν το σφάλμα είναι μικρό, η ολοκληρωτική μορφή αυξάνει τη διόρθωση αργά. Αν το σφάλμα είναι μεγάλο, η ολοκληρωτική πράξη αυξάνει τη διόρθωση πιο γρήγορα. Για την ακρίβεια, ο ρυθμός με τον οποίο η διόρθωση αυξάνει είναι

ανάλογος του σήματος του σφάλματος. Μαθηματικά, η ολοκληρωτική πράξη ελέγχου επιτυγχάνεται σχηματίζοντας το ολοκλήρωμα του σήματος σφάλματος.

Τέλος, ο **Διαφορικός Έλεγχος** παράγει μια πράξη ελέγχου η οποία είναι ανάλογη του ρυθμού με τον οποίο το σφάλμα αλλάζει. Για παράδειγμα, αν το σφάλμα αυξάνεται απότομα, δεν θα περάσει πολύς χρόνος πριν να έχουμε να αντιμετωπίσουμε ένα πολύ μεγάλο σφάλμα. Αυτή η μορφή ελέγχου επιχειρεί να προλάβει αυτό το μελλοντικό σφάλμα παράγοντας μια διορθωτική ενέργεια αναλογική στο πόσο γρήγορα αλλάζει το σφάλμα. Ο παράγωγος έλεγχος είναι μια προσπάθεια να είμαστε προετοιμασμένοι για ένα μεγάλο σφάλμα και να το αποτρέπουμε με μια διορθωτική κίνηση βασιζόμενη στο πόσο γρήγορα αλλάζει το σφάλμα. Μαθηματικά, ο παράγωγος έλεγχος επιτυγχάνεται σχηματίζοντας την παράγωγο του σήματος του σφάλματος. Οι μορφές αυτές χρησιμοποιούνται με τους εξής τρόπους: P, PI, PD, PID.

Στοιχείο Χειρισμού (Manipulating Element)

Το στοιχείο χειρισμού χρησιμοποιεί την έξοδο του ελεγκτή ώστε να προσαρμόσει την χειριζόμενη μεταβλητή και συνήθως αποτελείται από δυο μέρη. Το πρώτο μέρος καλείται σκλανδαλιστής (actuator) και το δεύτερο καλείται τελικό στοιχείο ελέγχου. Ο σκλανδαλιστής μεταφράζει την έξοδο του ελεγκτή σε μια πράξη στο τελικό στοιχείο ελέγχου, και το τελικό στοιχείο ελέγχου απευθείας αλλάζει την τιμή της χειριζόμενης μεταβλητής. Βαλβίδες, πεταλούδες, ανεμιστήρες, αντλίες και στοιχεία θερμότητας είναι παραδείγματα στοιχείων χειρισμού. Η τιμή που ελέγχει τη ροή καυσίμου σε ένα οικιακό σύστημα θέρμανσης είναι άλλο ένα παράδειγμα ενός στοιχείου χειρισμού.

Ονόματα Μεταβλητών (Variable Names)

Η μεταβλητή ελέγχου (controlled variable, C) μιας διαδικασίας είναι η μεταβλητή εξόδου που είναι να ελεγχθεί. Σε ένα σύστημα ελέγχου διαδικασιών, η μεταβλητή ελέγχου είναι συνήθως μια μεταβλητή εξόδου που είναι μια καλή μέτρηση της ποιότητας του προϊόντος. Οι πιο συνηθισμένες μεταβλητές ελέγχου είναι η θέση, ταχύτητα, θερμοκρασία, πίεση, στάθμη και ροή.

Η αναφορά (setpoint, SP) είναι η επιθυμητή τιμή της μεταβλητής ελέγχου.

Η μετρούμενη μεταβλητή (C_m) είναι η μετρούμενη τιμή της μεταβλητής ελέγχου. Είναι η έξοδος των μετρούμενων μέσων και συνήθως διαφέρει κατά ένα πολύ μικρό ποσό από την πραγματική τιμή της μεταβλητής ελέγχου.

Το σφάλμα (E) είναι η διαφορά ανάμεσα στην αναφορά και την μετρούμενη τιμή της μεταβλητής ελέγχου. Υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση: $E = SP - C_m$.

Η έξοδος του ελεγκτή (V) είναι η πράξη ελέγχου που πρόκειται να οδηγήσει τη μετρούμενη τιμή της μεταβλητής ελέγχου προς την τιμή της αναφοράς. Η πράξη ελέγχου εξαρτάται από το σήμα του σφάλματος (E) και από τις μορφές ελέγχου που χρησιμοποιούνται στον ελεγκτή.

Η ελεγχόμενη μεταβλητή (manipulated variable, M) είναι η μεταβλητή που ρυθμίζεται από το τελικό στοιχείο ελέγχου ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή της μεταβλητής ελέγχου. Προφανώς, η ελεγχόμενη μεταβλητή θα πρέπει να είναι ικανή να επιτύχει μια αλλαγή στην μεταβλητή ελέγχου. Η ελεγχόμενη μεταβλητή είναι μια από τις τιμές εισόδου μιας διαδικασίας. Αλλαγές στο φορτίο μιας διαδικασίας

επιβάλλουν αλλαγές στην ελεγχόμενη μεταβλητή ώστε να διατηρηθεί η κατάσταση ισορροπίας του συστήματος. Γι' αυτό το λόγο, η τιμή της μεταβλητής αυτής χρησιμοποιείται σαν μέτρο του φορτίου μιας διαδικασίας.

Οι μεταβλητές διαταραχής (disturbance variable, D) είναι μεταβλητές εισόδου μιας διαδικασίας οι οποίες επηρεάζουν τη μεταβλητή ελέγχου όμως δεν ρυθμίζονται από το σύστημα ελέγχου. Οι μεταβλητές διαταραχής είναι ικανές να μεταβάλλουν το φορτίο μιας διαδικασίας και είναι ο κύριος λόγος που χρησιμοποιούμε συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου.

Το κυρίως πλεονέκτημα του ελέγχου κλειστού βρόχου είναι η δυνατότητα για πιο ακριβή έλεγχο μιας διαδικασίας. Υπάρχουν δυο μειονεκτήματα στον έλεγχο κλειστού βρόχου: 1. είναι πιο ακριβός απ' ό τι ο έλεγχος ανοικτού βρόχου, και 2. η λειτουργία ανατροφοδότησης ενός συστήματος κλειστού βρόχου είναι πιθανό να προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα. Ένα ασταθές σύστημα παράγει μια ταλάντωση στη μεταβλητή ελέγχου, συχνά σε πολύ μεγάλη κλίμακα.

Ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου (ή σύστημα ελέγχου με ανατροφοδότηση) μετράει τη διαφορά ανάμεσα στην πραγματική τιμή της μεταβλητής ελέγχου και την τιμή της επιθυμητής τιμής (η τιμής θέσης, setpoint) και χρησιμοποιεί τη διαφορά για να οδηγή την πραγματική τιμή προς το επιθυμητό αποτέλεσμα.

1.4 Θεωρία των Αισθητήρων

1.4.1 Εισαγωγή

Αισθητήρας είναι ένα είδος μετατροπέα ο οποίος χρησιμοποιεί μιας μορφής ενέργεια, ένα σήμα, και τη μετατρέπει σε μια ένδειξη για το σκοπό μιας μεταφοράς δεδομένων. Ένα θερμόμετρο υδραργύρου είναι ένα παράδειγμα ενός αισθητήρα που μετατρέπει τη συστολή και διαστολή του όγκου του υδραργύρου σε σχέση με την αλλαγή θερμοκρασίας (το σήμα), σε μια ένδειξη σε ένα ρυθμισμένο γυάλινο σωλήνα δίνοντας έτσι πληροφορίες για τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Άλλοι αισθητήρες, όπως ένα θερμοζεύγος, παράγουν μια τάση εξόδου ή άλλη ηλεκτρική έξοδο η οποία μπορεί να δοθεί ένα μετρητή για να ανιχνεύσει μια αλλαγή ή να μεταφραστεί από μια άλλη συσκευή σε σήμα μιας άλλης μορφής (όπως ένας υπολογιστής). Για ακρίβεια στην εφαρμογή είναι απαραίτητη η σωστή ρύθμιση (καλιμπράρισμα) του αισθητήρα και του σήματος εξόδου του.

Αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε καθημερινά αντικείμενα όπως κουμπιά αφής σε ανελκυστήρες και λάμπες οι οποίες αυξομειώνονται ακουμπώντας τη βάση του. Υπάρχουν επίσης αναρίθμητες εφαρμογές για αισθητήρες για τις οποίες οι περισσότεροι άνθρωποι δεν γνωρίζουν. Εφαρμογές που περιλαμβάνουν αυτοκίνητα, μηχανές, διαστημικές εφαρμογές, ιατρική, βιομηχανία και ρομποτική.

Οι όροι *αισθητήρας (sensor)* και *μετατροπέας (transducer)* έχουν παρόμοια, αλλά ελαφρά διαφορετική σημασία και συχνά προκαλείται σύγχυση ανάμεσα τους. Ο μετατροπέας είναι οποιαδήποτε

συσκευή που μετασχηματίζει μία μορφή ενέργειας σε μία άλλη. Επομένως ένας αισθητήρας είναι (συνήθως) ένας μετατροπέας, αλλά δεν είναι όλοι οι μετατροπείς οπωσδήποτε αισθητήρες.

1.4.2 Συστήματα Αισθητήρων

Υπάρχουν πολλές μορφές και ορισμοί των συστημάτων, αλλά για τους σκοπούς του βιβλίου θα θεωρήσουμε ένα βασικό σύστημα αισθητήρα ως κάτι που παράγει μία ποσοτική έξοδο από μία είσοδο διαφορετικής μορφής, με τη βοήθεια κάποιας διαδικασίας. Η εικόνα 1.9 εικονίζει ένα βασικό σύστημα με τη μορφή ενός διαγράμματος ροής. Όπως θα δείτε, τα διαγράμματα ροής αποτελούν μία χρήσιμη τεχνική για την περιγραφή όσων συμβαίνουν στα συστήματα μέτρησης.



Εικόνα 1.9 Ένα βασικό σύστημα

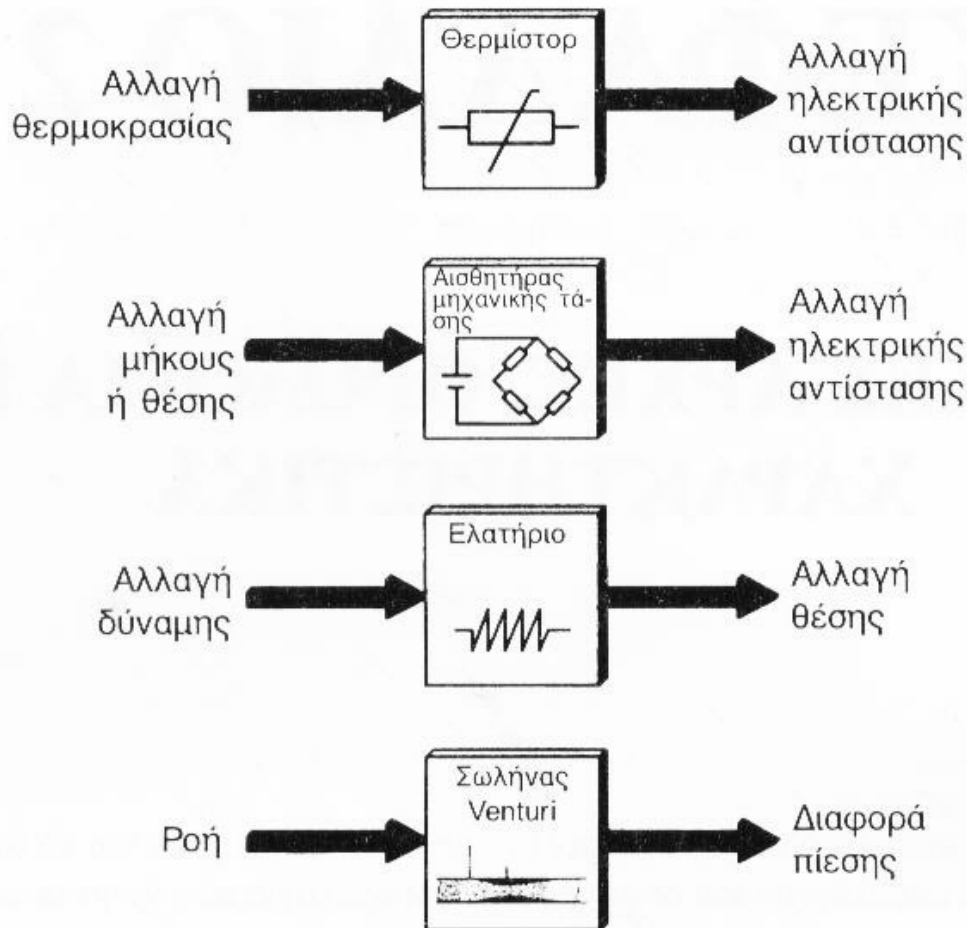
Μπορούμε συνήθως να κατατάξουμε τις εφαρμογές των αισθητήρων σε τρεις κατηγορίες συστημάτων. Αυτές είναι τα συστήματα μέτρησης, τα συστήματα ελέγχου ανοικτού βρόχου και τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου.

1.4.3 Τύποι Αισθητήρων

Οι αισθητήρες και τα συστήματα αισθητήρων μπορεί να είναι μηχανικά, ηλεκτρικά ή και τα δύο μαζί. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλούς τομείς, βιομηχανικούς, δημόσιους, στρατιωτικούς και οικιακούς. Εκτελούν εργασίες όπως είναι ο έλεγχος των διαστάσεων ενός αντικειμένου σε μία γραμμή παραγωγής, ο έλεγχος ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, ο έλεγχος της στάθμης του νερού στο οικιακό πλυντήριο και η απεικόνιση της ταχύτητας ενός αυτοκινήτου.

Οι αισθητήρες είναι ένα είδος μετατροπέα, μετατρέπουν δηλαδή, μια μορφή ενέργειας σε μια άλλη. Γι' αυτό το λόγο, οι αισθητήρες ταξινομούνται σύμφωνα με τον τύπο της μεταφοράς ενέργειας που ανιχνεύουν. Έτσι χωρίζονται σε:

- Θερμικούς
- Ηλεκτρομαγνητικούς
- Μηχανικούς
- Χημικούς
- Οπτικής ακτινοβολίας
- Ιονίζουσας ακτινοβολίας
- Ακουστικοί



Εικόνα 1.10 Παραδείγματα αισθητήρων

Συστήματα μέτρησης

Ένα σύστημα μέτρησης εμφανίζει ή καταγράφει μία ποσοτική έξοδο που αντιστοιχεί στη μεταβλητή που μετρά, η οποία αποτελεί την ποσότητα εισόδου. Τα συστήματα μέτρησης δεν αντιδρούν στην τιμή της ποσότητας εισόδου, παρά μόνο την εμφανίζουν με έναν τρόπο που είναι κατανοητός από το χρήστη. Πολλά συστήματα μέτρησης είναι πιο περίπλοκα και είναι χρήσιμο να τα ανάγουμε σε επιμέρους τμήματα, που είναι ο αισθητήρας, η μονάδα ρύθμισης σήματος και η μονάδα καταγραφής ή απεικόνισης.



Εικόνα 1.11 Λειτουργικά στοιχεία ενός συστήματος μέτρησης

Ο αισθητήρας μετατρέπει τη φυσική ποσότητα που μετρείται σε ένα σήμα που μπορεί, μετά από τροποποίηση, να εμφανιστεί στο χρήστη σε κατανοητή μορφή. Η μονάδα ρύθμισης του σήματος τροποποιεί το σήμα που δημιουργεί ο αισθητήρας σε ένα σήμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τη μονάδα εμφάνισης ή καταγραφής.

1.4.4 Ορολογία Αισθητήρων

Απόλυτες μετρήσεις

Η απόλυτη μέτρηση (absolute measurement) χρησιμοποιεί κλίμακες μέτρησης που βασίζονται στις βασικές μονάδες ενός συστήματος. Σχετίζεται με την κατάσταση, στην οποία ένα σύστημα δεν περιέχει καμία από τις μεταβλητές που μετρούνται. Η έννοια αυτή ευρίσκεται σε αντίθεση με την έννοια των αυθαίρετων κλιμάκων (arbitrary scales), στις οποίες οι τιμές αναφέρονται σε μία προκαθορισμένη αριθμητική τιμή. Για παράδειγμα, όταν περιγράφουμε τη μέτρηση της θερμοκρασίας αναφερόμαστε στις κλίμακες θερμοκρασίας Κελσίου και Κέλβιν. Η κλίμακα Κέλβιν είναι απόλυτη, επειδή σχετίζει την υπάρχουσα θερμοκρασία με την κατάσταση όπου η θερμοκρασία μίας ουσίας είναι μηδέν, ενώ η κλίμακα Κελσίου είναι αυθαίρετη, επειδή σε αυτήν οι τιμές της θερμοκρασίας σχετίζονται με τη θερμοκρασία πήξης του νερού, που ορίζεται αυθαίρετα ως μηδέν βαθμοί Κελσίου.

Ρυθμισμένο σήμα

Ένα ρυθμισμένο σήμα (conditioned signal) είναι η έξοδος ενός αισθητήρα, η οποία έχει υποστεί κατάλληλη τροποποίηση ώστε να μπορεί να γίνει κατανοητή από μία συσκευή απεικόνισης ή καταγραφής, μία συσκευή ελέγχου ή οποιαδήποτε άλλη συσκευή.

Έλεγχος

Αναφορικά με τα συστήματα μέτρησης, έλεγχος είναι ο χειρισμός ή η λειτουργία ενός συστήματος ή μίας συσκευής.

Διασύνδεση

Η σύνδεση δύο ηλεκτρονικών συσκευών με τη σχεδίαση ή προσαρμογή των εισόδων και εξόδων τους, ώστε να συνεργάζονται, ονομάζεται διασύνδεση (interfacing).

Τοπική ένδειξη

Όταν ένας αισθητήρας παρέχει ένδειξη κοντά στο σημείο μέτρησης τότε λέμε ότι λαμβάνουμε μία τοπική ένδειξη (local reading) της εξόδου του αισθητήρα.

Μετρούμενη ποσότητα

Μετρούμενη ποσότητα (measurand) ονομάζεται η είσοδος του συστήματος μέτρησης, δηλαδή η ποσότητα ή παράμετρος που πρόκειται να μετρηθεί. Για παράδειγμα, ένα θερμόμετρο μετρά θερμοκρασίες, και επομένως η μετρούμενη ποσότητα ενός θερμομέτρου είναι η θερμοκρασία. Στις μετρούμενες ποσότητες που καλύπτονται από το παρόν βιβλίο περιλαμβάνονται η θέση, ταχύτητα, εγγύτητα, επιτάχυνση, στάθμη, ύψος, βάρος, όγκος, ροή ρευστού, θερμοκρασία και πίεση.

Ηλεκτρικός θόρυβος

Ηλεκτρικός θόρυβος ονομάζεται η παρουσία ανεπιθύμητων ηλεκτρικών σημάτων. Αυτά μπορούν να αποκρύψουν ή να αλλοιώσουν το σήμα το οποίο μεταφέρει χρήσιμη πληροφορία, όπως είναι η έξοδος ενός αισθητήρα ή το σήμα σφάλματος.

Παράμετρος

Παράμετρος ονομάζεται μία μεταβλητή ποσότητα με καθορισμένα όρια.

Ακροδέκτης μέτρησης

Ακροδέκτης μέτρησης (probe) ονομάζεται μία συσκευή, η οποία ενώνει έναν αισθητήρα ή οθόνη εμφάνισης με τη μετρούμενη ποσότητα ή ένα ηλεκτρικό κύκλωμα.

Ένδειξη από απόσταση

Όταν η ένδειξη ενός αισθητήρα μπορεί να αναγνωσθεί από απόσταση, δηλαδή όταν το σημείο ανάγνωσης είναι μακριά από το σημείο μέτρησης, τότε λέμε ότι η ένδειξη που παρέχεται είναι από απόσταση (remote reading).

Προδιαγραφές

Οι προδιαγραφές (specifications) μίας συσκευής είναι η τεχνική περιγραφή των χαρακτηριστικών, της κατασκευής και της απόδοσης της, καθώς και κάθε άλλης σχετικής πληροφορίας. Στο παρόν βιβλίο παρουσιάζονται πολλά σύνολα προδιαγραφών για διάφορα είδη αισθητήρων.

Μεταβλητή

Στο πεδίο των αισθητήρων και των συστημάτων μέτρησης, ως μεταβλητή (variable) μπορεί να θεωρηθεί οτιδήποτε, συνήθως μία φυσική ή μία μετρούμενη ποσότητα, που μπορεί να λάβει διαφορετικές τιμές.

1.4.5 Χαρακτηριστικά Αισθητήρων

Η επιλογή κάποιου αισθητήρα για ένα σύστημα μέτρησης ή ελέγχου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι το κόστος, η διαθεσιμότητα και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες. Όταν επιλέγουμε έναν αισθητήρα είναι σημαντικό να προσαρμόζονται τα χαρακτηριστικά του στην ποιότητα της εξόδου που απαιτούμε να λαμβάνουμε. Υπάρχουν, για παράδειγμα, πολλά είδη αισθητήρων που μπορούν να μετρούν τη θερμοκρασία, αλλά δεν είναι όλα κατάλληλα για να δείχνουν τη θερμοκρασία του αέρα σε έναν κηπουρό. Μερικά είδη δεν θα μπορούσαν να μετρήσουν το εύρος των θερμοκρασιών του αέρα, άλλα θα ήταν πολύ ακριβά και άλλα απαιτούν επιπρόσθετη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ακρίβεια

Η ακρίβεια (accuracy) μιας συσκευής ή ενός συστήματος είναι ο βαθμός στον οποίο η τιμή την οποία δημιουργεί μπορεί να είναι εσφαλμένη, ή αλλιώς το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να παράγει. Στην περίπτωση ενός αισθητήρα είναι η εγγύτητα της τιμής εξόδου προς τη μετρούμενη τιμή. Στην πράξη, κάθε συσκευή παράγει κάποιο σφάλμα, οσοδήποτε μικρό, και έχει κάποιον πεπερασμένο βαθμό ακρίβειας. Αυτή μπορεί να εκφραστεί ως προς τις μονάδες της μετρούμενης ποσότητας, και έτσι για παράδειγμα έχουμε θερμομέτρα με ακρίβεια $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$. Αυτό σημαίνει ότι εάν λάβουμε μια μέτρηση θερμοκρασίας με το θερμομέτρο αυτό και δούμε ότι η τιμή που προκύπτει είναι 20.10°C , τότε η πραγματική θερμοκρασία θα ευρίσκεται κάπου μεταξύ των τιμών 19.9 και 20.3°C . Με άλλο τρόπο, η ακρίβεια μπορεί να εκφραστεί ως το επί τοις εκατό σφάλμα ως προς το εύρος μέτρησης της συσκευής.

Βαθμονόμηση

Η έννοια της βαθμονόμησης (calibration) μιας συσκευής αναφέρεται στις μονάδες, στις οποίες βαθμολογείται η κλίμακα εμφάνισης ή καταγραφής ενός οργάνου. Για παράδειγμα, ένα είδος αισθητήρα που μετρά την ταχύτητα ενός οχήματος παράγει μία ηλεκτρική έξοδο. Το μέγεθος της τάσης είναι ανάλογο της ταχύτητας του οχήματος. Ο δείκτης του ταχυμέτρου κινείται ανάλογα με την τάση που εφαρμόζεται σε αυτόν, αλλά η θέση του χαρακτηρίζεται από κάποια τιμή ταχύτητας και όχι κάποια τιμή τάσης. Άρα λέμε ότι το ταχύμετρο βαθμονομείται ως προς την ταχύτητα.

Νεκρή ζώνη

Όταν οι προδιαγραφές αναφέρονται σε μία νεκρή ζώνη (dead-zone, dead-band), αυτή δηλώνει το μέγιστο ποσό αλλαγής της μετρούμενης ποσότητας που δεν προκαλεί αλλαγή στην έξοδο, ή αλλιώς το εύρος τιμών εισόδου που δεν προκαλεί εμφάνιση κάποιας εξόδου. Οι νεκρές ζώνες προκύπτουν λόγω στατικής τριβής ή υστέρησης (που θα εξηγηθεί στη συνέχεια). Δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει νεκρή

ζώνη καθ' όλο το εύρος ενός οργάνου και συχνά οι υπολογίσιμες νεκρές ζώνες εμφανίζονται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Ένα κοινό παράδειγμα νεκρής ζώνης υπάρχει στο διακόπτη ρύθμισης της έντασης ενός οικιακού φωτιστικού σώματος. Συχνά, όταν ο διακόπτης μεταφέρεται στην τιμή μηδέν και στη συνέχεια στραφεί για να ξεκινήσει ο φωτισμός, δεν υπάρχει άμεση απόκριση, δηλαδή η λάμπα δεν φωτίζει αμέσως. Στην περίπτωση αυτή η νεκρή ζώνη εκτείνεται από το σημείο μηδέν έως το σημείο όπου η λάμπα φωτίζει για πρώτη φορά.

Διαστάσεις

Οι διαστάσεις ενός αισθητήρα ή συστήματος μέτρησης είναι το μέτρο του φυσικού του μεγέθους και αναγράφονται σχεδόν πάντοτε στις προδιαγραφές του.

Ολίσθηση

Ολίσθηση (drift) ονομάζεται η φυσική τάση μίας συσκευής ή συστήματος να μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του με το χρόνο και λόγω περιβαλλοντικών μεταβολών. Εμφανίζεται τότε μεταβολή στην έξοδο που παρέχει το σύστημα, ενώ η είσοδος παραμένει αμετάβλητη, και έτσι επηρεάζεται η ακρίβεια. Η ολίσθηση λαμβάνει χώρα σε διάφορες χρονικές κλίμακες και για διάφορους λόγους. Ένα από τα πιο συνηθισμένα αλλά και σημαντικά αίτια ολίσθησης είναι η αλλαγή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Για το λόγο αυτό στις προδιαγραφές των αισθητήρων αναφέρεται η επίδραση της θερμοκρασίας στα διάφορα χαρακτηριστικά της συσκευής. Σε μία παλαιότερη συσκευή μπορεί να εμφανιστεί επιπρόσθετη ολίσθηση λόγω γήρανσης των υλικών κατασκευής, όπως είναι η οξείδωση κάποιων μεταλλικών μερών της. Ολίσθηση μπορεί επίσης να προκληθεί από μηχανική διάβρωση ή ιδιοθέρμανση κάποιων τμημάτων της συσκευής.

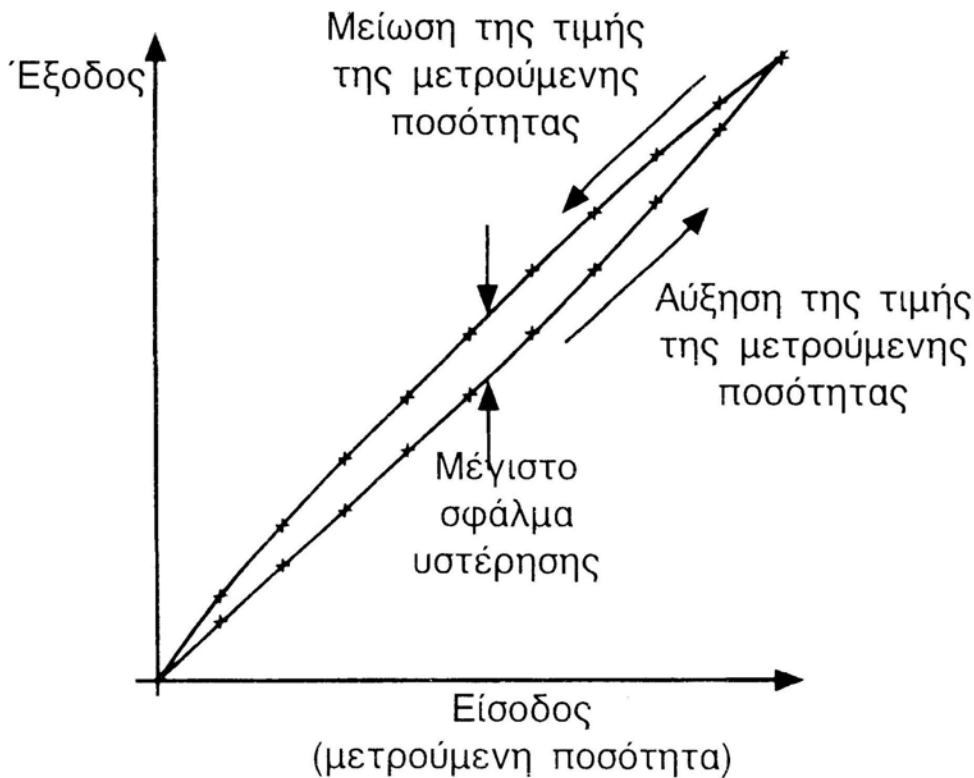
Σφάλμα

Το σφάλμα ισούται με τη διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη τιμή και την πραγματική τιμή μίας ποσότητας. Για παράδειγμα, ένας χάρακας χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του πλάτους της σελίδας ενός βιβλίου, και αυτό βρίσκεται ίσο, π.χ. με 210.5 mm. Εντούτοις, το πραγματικό μέγεθος της σελίδας είναι 209.9 mm, και επομένως η μέτρηση έχει σφάλμα ίσο με $210.5 \text{ mm} - 209.9 \text{ mm} = 0.6 \text{ mm}$. Τα σφάλματα μπορούν συχνά να εκφράζονται επί τοις εκατό, οπότε τότε αντιπροσωπεύουν την ακρίβεια του συστήματος.

Υστέρηση

Η υστέρηση προκαλεί διαφορές στην έξοδο που δίνει ένας αισθητήρας, όταν η κατεύθυνση μεταβολής της εισόδου αντιστραφεί. Με τον τρόπο αυτό παράγεται σφάλμα και επηρεάζεται η ακρίβεια της συσκευής. Η εικόνα 1.12 παρουσιάζει την επίδραση της υστέρησης με τη βοήθεια μίας γραφικής παράστασης. Η είσοδος του αισθητήρα, δηλαδή η μετρούμενη ποσότητα, αυξάνει με σταθερό βήμα. Όταν φτάσει τη μέγιστη δυνατή τιμή, μειώνεται με το ίδιο σταθερό βήμα έως ότου λάβει ξανά την τιμή μηδέν. Η γραφική παράσταση δείχνει τη διαφορά που υπάρχει στην έξοδο του αισθητήρα όταν η μετρούμενη ποσότητα αυξάνει ή μειώνεται. Αυτό το γεγονός ονομάζεται υστέρηση (hysteresis) του συστήματος.

Δεν εμφανίζουν υστέρηση όλοι οι αισθητήρες και τα συστήματα μέτρησης. Η υστέρηση προκαλείται από διάφορους παράγοντες, ειδικότερα τη μηχανική τάση και την τριβή. Η χαλάρωση των συστημάτων γραναζιών και ο "τζόγος" σε συστήματα κοχλιών αποτελούν επίσης σημαντικά αίτια. Επομένως τα συστήματα μέτρησης που είναι πιθανό να εμφανίσουν υστέρηση πρέπει να περιέχουν μηχανικά γρανάζια, ρουλεμάν και άλλα κινητά μέρη, τα οποία να τείνουν να είναι ελαστικά, όπως είναι το λάστιχο, τα πλαστικά και κάποια μέταλλα.



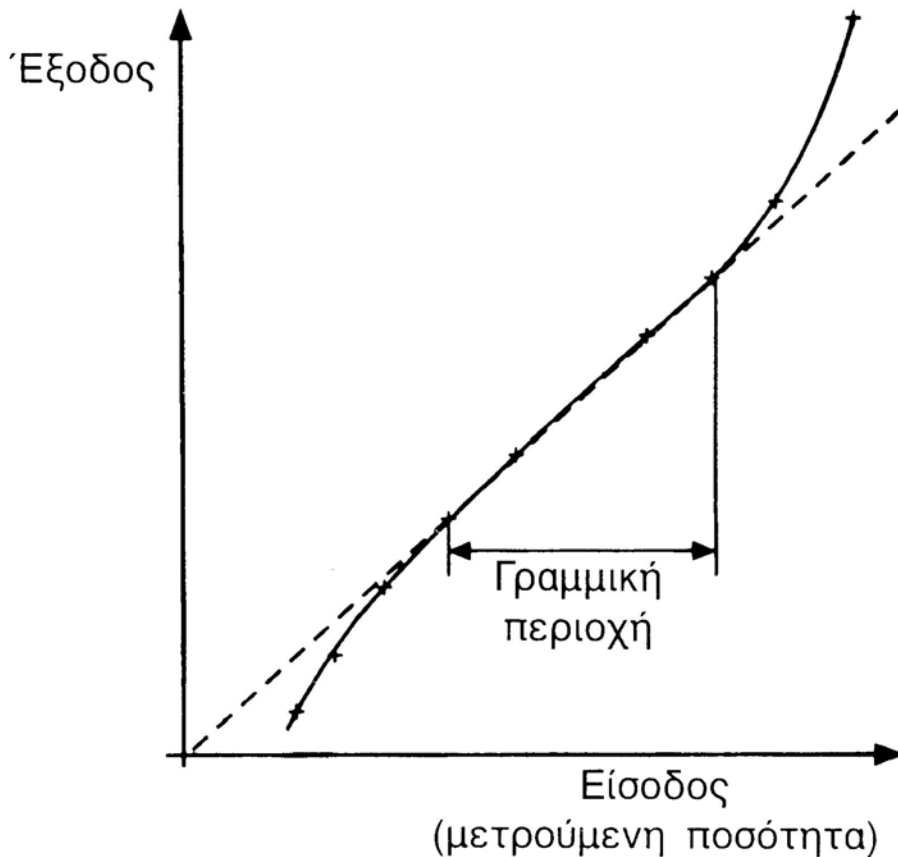
Εικόνα 1.12 Γραφική παράσταση του φαινομένου της υστέρησης

Καθυστέρηση

Καθυστέρηση (lag) ονομάζεται η καθυστέρηση της αλλαγής της τιμής εξόδου ενός αισθητήρα ως προς την αλλαγή της εισόδου του. Μετριέται σε δευτερόλεπτα (ή συννηθέστερα σε κλάσματα του δευτερολέπτου). Σε μερικές εφαρμογές, όπως είναι ο έλεγχος, η καθυστέρηση μπορεί να επηρεάζει αποφασιστικά την απόδοση.

Γραμμικότητα

Η γραμμικότητα (linearity) ενός αισθητήρα αποτελεί το βαθμό, στον οποίο η γραφική παράσταση της εξόδου ως προς την είσοδο του αισθητήρα προσεγγίζει μία ευθεία γραμμή. Ένας αισθητήρας μπορεί να είναι γραμμικός σε μία περιοχή τιμών εισόδου, όπως εικονίζεται στην εικόνα 1.13. Επίσης, η γραμμικότητα μπορεί να εκφράζεται ως προς το μέγιστο βαθμό απόκλισης από την ευθεία γραμμή, σε όλο το εύρος τιμών εισόδου, και τότε αναφέρεται ως ποσοστό επί του εύρους λειτουργίας



Εικόνα 1.13 Γραμμικότητα

Χρόνος λειτουργίας

Ο ωφέλιμος χρόνος λειτουργίας (operating life) ενός αισθητήρα αποτελεί ένδειξη του χρόνου, κατά τον οποίο αυτός αναμένεται να λειτουργεί στα πλαίσια των προδιαγραφών του. Εκφράζεται σε μονάδες χρόνου ή με τον αριθμό των λειτουργιών ή κύκλων λειτουργίας που μπορεί να διεκπεραιώσει με επιτυχία.

Επαναληψιμότητα

Η επαναληψιμότητα μίας συσκευής είναι ο βαθμός στον οποίο αυτή παράγει το ίδιο αποτέλεσμα όταν, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, τροφοδοτείται με ακριβώς την ίδια είσοδο. Στα αγγλικά αποδίδεται με τη λέξη *repeatability*, η οποία συχνά συγχέεται με την καθημερινή έννοια της ακρίβειας (*accuracy*). Εντούτοις, στην ορολογία των συστημάτων μέτρησης, ένας αισθητήρας μπορεί να έχει υψηλή επαναληψιμότητα, και να δίνει παρόμοια έξοδο όταν μετρά πολλές φορές μία συγκεκριμένη είσοδο, αλλά, εάν υπάρχει σημαντικό σφάλμα στην έξοδο, τότε η έξοδος δεν είναι ακριβής. Στις προδιαγραφές των συσκευών η επαναληψιμότητα ορίζεται με γενικούς όρους (όπως ότι το όργανο διαθέτει υψηλή ακρίβεια, *high-precision*), αλλά και με τους ειδικούς όρους *repeatability* και *reproducibility*.

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι υπάρχουν διάφοροι ορισμοί της επαναληψιμότητας. Στο βιβλίο θα χρησιμοποιήσουμε τον ορισμό που αναφέρεται παραπάνω. Εντούτοις, σε κάποιες προδιαγραφές ή άλλα κείμενα, η επαναληψιμότητα μπορεί να αναφέρεται ως διακριτική ικανότητα (*resolution*)

Η επαναληψιμότητα εκφράζεται ως ένα (\pm) μέγιστο ποσοστό επί της ένδειξης, ή ως τα όρια ακρίβειας (\pm) κάθε ένδειξης.

Εύρος

Το εύρος λειτουργίας (operating range) μίας συσκευής ισούται με τα όρια, στα οποία μπορεί η συσκευή να λειτουργεί αξιόπιστα. Το εύρος λειτουργίας ενός αισθητήρα εκφράζεται συνήθως με την ελάχιστη και μέγιστη τιμή που είναι ικανός να μετρά. Άλλες έννοιες του εύρους που αναγράφονται συχνά στις προδιαγραφές είναι το θερμοκρασιακό εύρος, δηλαδή η περιοχή θερμοκρασιών στην οποία μπορεί να λειτουργεί ο αισθητήρας. Συχνά αναφέρονται επίσης το εύρος τιμών πίεσης και το εύρος τιμών υγρασίας. Είναι σημαντικό ο αισθητήρας να εμπίπτει στο εύρος λειτουργίας που καθορίζεται, ώστε όχι μόνο να εκτελεί σωστές μετρήσεις, αλλά και για να μην καταστραφούν ή αλλοιωθούν κάποια ευαίσθητα τμήματα του, και κατ' επέκταση να μην αποτελέσει εν δυνάμει κίνδυνο για την υγεία και ασφάλεια των ανθρώπων που βρίσκονται κοντά του.

Ονομαστική τιμή

Η ονομαστική τιμή (rating) μίας συσκευής αποτελεί το σύνολο των βέλτιστων συνθηκών, ηλεκτρικών, μηχανικών κ.ά., υπό τις οποίες αυτή θα λειτουργεί με επιτυχία και ασφάλεια. Συνήθως δίνεται μία περιγραφή των ονομαστικών τιμών, όπως είναι η μέγιστη τιμή θερμοκρασίας και η μέση τιμή φόρτισης.

Αξιοπιστία

Η αξιοπιστία (reliability) μίας συσκευής είναι συγγενής έννοια με το χρόνο λειτουργίας της, και συχνά μπορεί να αναφέρεται αντί για αυτόν, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Η αξιοπιστία είναι η ικανότητα της συσκευής να λειτουργεί κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες για μία δεδομένη χρονική περίοδο ή ένα δεδομένο αριθμό κύκλων λειτουργίας, παραμένοντας πάντοτε στα πλαίσια των προδιαγραφών.

Απόκριση

Η απόκριση (response) μίας συσκευής ισούται με το χρόνο που απαιτεί για να λάβει την τελική τιμή εξόδου της για μία δεδομένη είσοδο. Μπορεί να εκφραστεί σε δευτερόλεπτα ή κλάσματα του δευτερολέπτου, ή κάποιες φορές ως ποσοστό επί της τελικής τιμής εξόδου. Για παράδειγμα, εάν οι προδιαγραφές ορίζουν ότι ο χρόνος απόκρισης 95% είναι 3 ξεε, αυτό σημαίνει ότι η συσκευή χρειάζεται 3 δεε για να λάβει η έξοδος της το 95% της τελικής τιμής.

Διακριτική ικανότητα

Η διακριτική ικανότητα (resolution) με την οποία μία συσκευή ή ένας αισθητήρας ανιχνεύει ή εμφανίζει μία τιμή, αναφέρεται στην μικρότερη είσοδο ή αλλαγή εισόδου που μπορεί αυτός να ανιχνεύσει. Εκφράζεται συνήθως ως προς το μικρότερο διάστημα που μπορεί να ανιχνευθεί ή μετρηθεί, "Όσο μεγαλύτερη είναι η διακριτική ικανότητα ενός ενδείκτη, τόσο μικρότερο είναι το βήμα που μπορεί ο αισθητήρας να μετρήσει. Για παράδειγμα, ένας ψηφιακός ενδείκτης πέντε ψηφίων μπορεί να εμφανίσει τιμές έως το 0.00001 της μονάδας μέτρησης, και έχει μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα από έναν ενδείκτη

τεσσάρων ψηφίων, η οποία μπορεί να εμφανίσει ενδείξεις έως το 0.0001 της μονάδας μέτρησης. Συνήθως εκφράζεται επί τοις εκατό.

Ευαισθησία

Η ευαισθησία (sensitivity) εκφράζει τη σχέση ανάμεσα στην αλλαγή της εξόδου και την αντίστοιχη αλλαγή της εισόδου, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Η ευαισθησία ενός αισθητήρα είναι ίση με τη διαφορά των τιμών εξόδου προς τη διαφορά των αντίστοιχων τιμών της εισόδου, δηλαδή της μετρούμενης ποσότητας. Άρα είναι:

$$\text{Ευαισθησία} = \frac{\text{μέγιστη τιμή εξόδου} - \text{ελάχιστη τιμή εξόδου}}{\text{μέγιστη τιμή εισόδου} - \text{ελάχιστη τιμή εισόδου}}$$

Οι μονάδες στις οποίες μετριέται η ευαισθησία ορίζονται από την παραπάνω εξίσωση και επομένως διαφέρουν, ανάλογα με τη φύση του αισθητήρα και τη μετρούμενη ποσότητα. Για παράδειγμα, όπως θα δούμε στη συνέχεια, υπάρχουν αισθητήρες που μετρούν μικρές αποστάσεις όπου κινείται κάποιο αντικείμενο και παρέχουν τάση. Στην περίπτωση αυτή η ευαισθησία θα εκφράζεται σε volt ανά mm. Εάν η σχέση ανάμεσα στη μετρούμενη ποσότητα και την έξοδο είναι γραμμική, η ευαισθησία μπορεί να εκφράζεται ως προς το όλο εύρος. Εάν δεν είναι γραμμική, τότε η ευαισθησία της συσκευής θα διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και θα αναφέρεται ως προς συγκεκριμένες περιοχές τιμών εισόδου.

Ευστάθεια

Η ευστάθεια (stability) αποτελεί το μέτρο της μεταβολής της εξόδου μίας συσκευής, όταν η είσοδος και οι συνθήκες παραμένουν σταθερά, κατά τη διάρκεια μίας μεγάλης χρονικής περιόδου.

Στατικό σφάλμα

Το στατικό σφάλμα (static error) είναι ένα σταθερό σφάλμα που υπεισέρχεται καθ' όλο το εύρος τιμών εισόδου μίας συσκευής. Εάν αυτό το σφάλμα είναι γνωστό, τότε μπορεί να αντισταθμιστεί χωρίς να υπάρξει υποβάθμιση της ακρίβειας του συστήματος.

Ανοχή

Η ανοχή (tolerance) μίας συσκευής είναι το μέγιστο ποσό σφάλματος που μπορεί να υπάρξει κατά τη διάρκεια λειτουργίας της. Ανάλογα με τη φύση της συσκευής, μπορεί συχνά να αναφέρεται η ανοχή αντί της ακρίβειας στις προδιαγραφές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HALL

ΚΑΙ

Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ

2.1 Μελέτη Φαινομένου Hall. Βασικές Αρχές.

2.1.1 Εισαγωγή

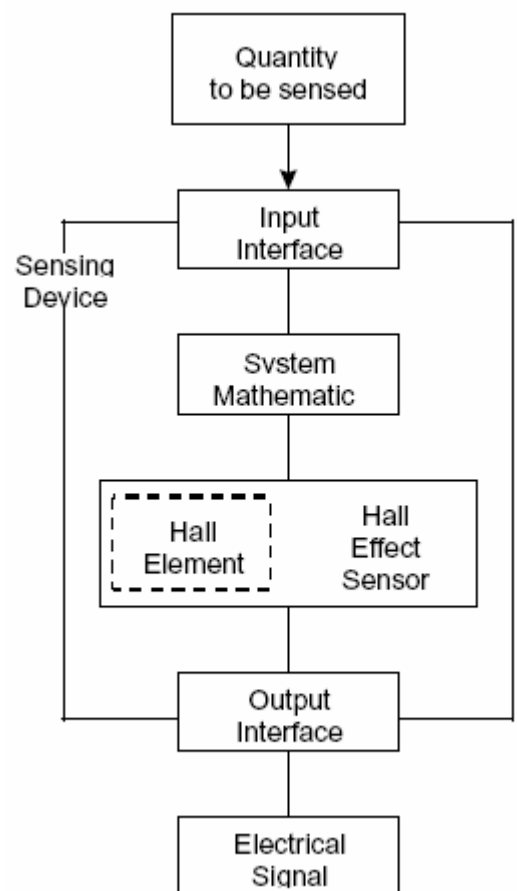
Το φαινόμενο Hall είναι γνωστό για πάνω από 100 χρόνια. Παρόλα αυτά η αξιοποίησή του έχει γίνει πραγματικότητα τις τελευταίες τρεις δεκαετίες. Η πρώτη πρακτική εφαρμογή του συναντάται τη δεκαετία του 50' με τη μορφή ενός αισθητήρα ισχύος μικροκυμάτων. Με τη μαζική παραγωγή ημιαγωγών, έγινε εφικτή η χρήση του φαινομένου Hall σε ένα μεγάλο φάσμα προϊόντων. Σήμερα, συσκευές που χρησιμοποιούν το φαινόμενο Hall περιλαμβάνονται σε πολλά προϊόντα, από υπολογιστές μέχρι μηχανές κοπής αντικειμένων, αυτοκίνητα μέχρι αεροπλάνα, καθώς εργαλειομηχανές και ιατρικό εξοπλισμό.

2.1.2 Αισθητήρες Φαινομένου Hall

Το φαινόμενο Hall αποτελεί ιδανική τεχνολογία όσον αφορά τα αισθητήρια. Το στοιχείο Hall κατασκευάζεται από ένα λεπτό φύλλο αγωγίμου υλικού με συνδέσεις εξόδου κάθετες στην κατεύθυνση της ροής του ρεύματος. Όταν υποβάλλεται σ' ένα μαγνητικό πεδίο, ανταποκρίνεται δημιουργώντας μια τάση ανάλογη με την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Η παραγόμενη τάση είναι πολύ μικρή (μV) και προϋποθέτει χρήση επιπλέον ηλεκτρονικών διατάξεων ώστε να παραχθούν ωφέλιμα επίπεδα τάσης. Όταν το στοιχείο Hall συνδυάζεται με τις απαραίτητες ηλεκτρονικές διατάξεις, σχηματίζουν έναν αισθητήρα Hall.

Παρόλο που ο αισθητήρας Hall είναι αισθητήρας μαγνητικού πεδίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βασικό εξάρτημα σε πολλών ειδών αισθητήρες (αισθητήρια ρεύματος, θερμοκρασίας, πίεσης, θέσης, κλπ.). Οι αισθητήρες αυτοί βρίσκουν εφαρμογή σε πολλών ειδών συσκευές. Αν στη μετρούμενη ποσότητα περιλαμβάνεται ή μπορεί να ενσωματωθεί μαγνητικό πεδίο, ένας αισθητήρας Hall θα εκτελέσει την εργασία. Η εικόνα 2.1 δείχνει ένα μπλοκ διάγραμμα μιας αισθητήριας συσκευής η οποία κάνει χρήση του φαινομένου Hall.

Σ' αυτή την γενικευμένη συσκευή το στοιχείο Hall ανιχνεύει το πεδίο που δημιουργείται από το μαγνητικό σύστημα. Το μαγνητικό σύστημα ανταποκρίνεται στην φυσική ποσότητα που πρόκειται να «διαβάσει» (θερμοκρασία, πίεση, θέση, κλπ.) μέσω της διάταξης εισόδου. Η διάταξη εξόδου μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε ένα σήμα εξόδου τέτοιο που να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της εφαρμογής.



Εικόνα 2.1 Γενική μορφή αισθητήρα με βάση το φαινόμενο Hall

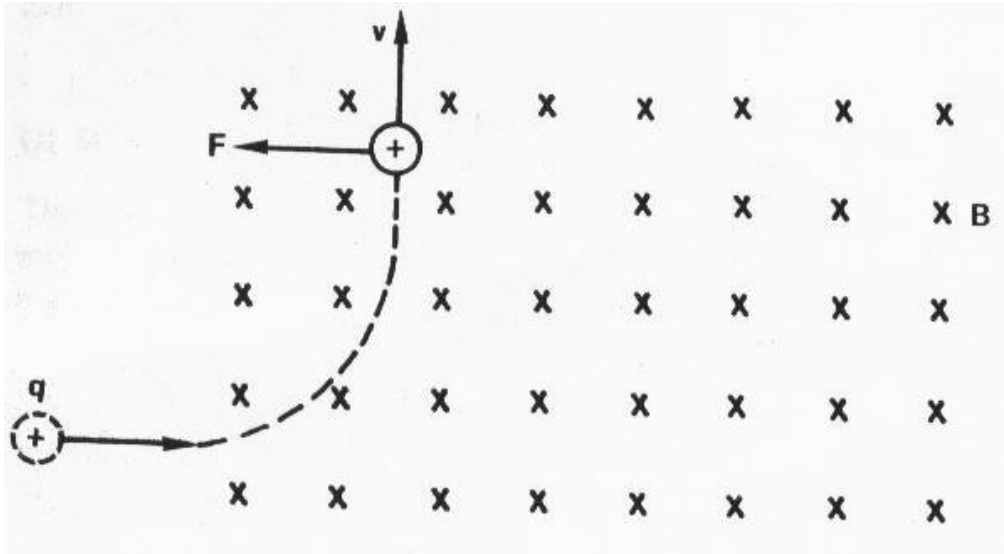
2.1.3 Θεωρία του Φαινομένου Hall

Εισαγωγή

Το φαινόμενο Hall είναι ένα φυσικό φαινόμενο που βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε βιομηχανικά όργανα. Βασίζεται στην αρχή της κίνησης ηλεκτρικών φορτίων μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο και των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτά.

Συμπεριφορά Ηλεκτρικών Φορτίων μέσα σε Ομογενές Μαγνητικό Πεδίο

Οι δυνάμεις που ασκούνται σε ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια που κινούνται σ' ένα μαγνητικό πεδίο εξετάζονται σε κεφάλαια φυσικής που καλύπτουν θέματα ιόντων και ηλεκτρονίων.

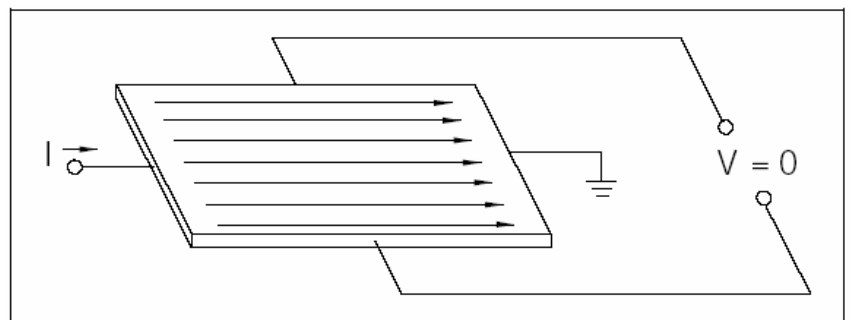


Εικόνα 2.2

Στην εικόνα 2.2 φαίνεται ένα μαγνητικό πεδίο με ροή έντασης B . Όταν το θετικά φορτισμένο ($+q$) σωματίδιο εισέρχεται στο μαγνητικό πεδίο μια δύναμη Lorentz ασκείται πάνω του. Το μέγεθος της δύναμής υπολογίζεται από τη σχέση $\mathbf{F} = \mathbf{B}q\mathbf{V}$.

Η διεύθυνση της δύναμης που ασκείται στο σωματίδιο είναι κάθετη στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας όπως φαίνεται στην εικόνα. Αφού αυτή η δύναμη που ασκείται κάθετα στη διεύθυνση της ταχύτητας, είναι μια κεντρομόλος δύναμη, θα αναγκάσει το σωματίδιο να κινηθεί σε ένα κυκλικό δρόμο και να αποκλίνει από την ευθεία τροχιά.

Το φαινόμενο Hall προκύπτει λόγω της φύσης του ρεύματος που ρεεί μέσα σε έναν αγωγό. Το ρεύμα αποτελείται από την κίνηση πολλών μικρών φορτισμένων «σωματιδίων» (τυπικά, αλλά όχι πάντα, ηλεκτρόνια). Αυτά τα σωματίδια δέχονται μια δύναμη, που καλείται η δύναμη Lorentz, όταν υπάρχει μαγνητικό πεδίο το οποίο δεν είναι παράλληλο με τη διεύθυνση της κίνησής τους.



Εικόνα 2.3 Απουσία μαγνητικού πεδίου

Όταν ένα τέτοιο μαγνητικό πεδίο απουσιάζει, τα φορτισμένα σωματίδια ακολουθούν μια σχεδόν ίσια διαδρομή. Παρόλα αυτά, όταν ένα κάθετο μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται, η διαδρομή τους μετατρέπεται σε καμπύλη έτσι ώστε τα κινούμενα φορτία να συγκεντρώνονται στη μια πλευρά του υλικού. Αυτό αφήνει ίσης ποσότητας και αντίθετης πολικότητας φορτία εκτεθειμένα στην άλλη πλευρά, όπου υπάρχει έλλειψη από κινούμενα φορτία. Το αποτέλεσμα είναι μια ασύμμετρη κατανομή πυκνότητας φορτίου κατά μήκος του στοιχείου Hall το οποίο είναι κάθετο και στην ίσια διαδρομή αλλά και στο εφαρμοσμένο μαγνητικό πεδίο. Ο διαχωρισμός των φορτίων δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο το οποίο αντιτίθεται στη μετακίνηση περαιτέρω φόρτισης, έτσι δημιουργείται μια σταθερή διαφορά δυναμικού καθ' όλη τη διάρκεια ροής του ρεύματος.

Βασικές Αρχές Φαινομένου Hall

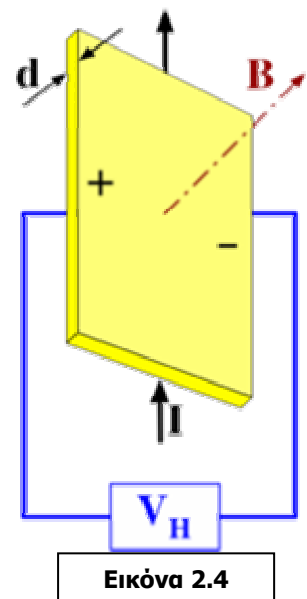
Για ένα απλό μέταλλο όπου υπάρχει μόνο ένας τύπος φορέων φορτίου (ηλεκτρόνια) η τάση Hall V_H δίνεται από την εξίσωση:

$$V_H = \frac{-IB/d}{ne}$$

και η σταθερά Hall υπολογίζεται:

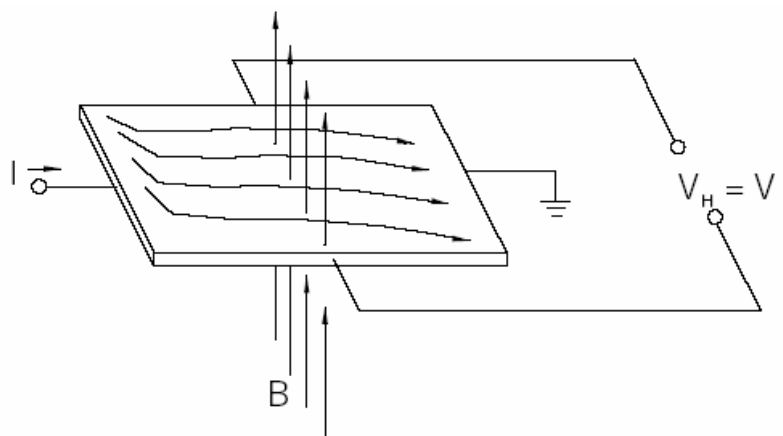
$$R_H = \frac{V_H}{IB/d} = -\frac{1}{ne}$$

όπου I είναι το ρεύμα κατά μήκος της πλάκας, B η μαγνητική πυκνότητα ροής, d είναι το πάχος της πλάκας, e είναι το φορτίο των ηλεκτρονίων και n είναι η πυκνότητα φορτίου των ηλεκτρονίων.



Αν τοποθετήσουμε έναν αγωγό ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σ' ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο μια δύναμη θα ασκηθεί στα κινούμενα ηλεκτρόνια. Σαν αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια θα αποκλίνουν από την αρχικά ευθύγραμμη τροχιά τους, αλλά τα φυσικά όρια του αγωγού θα περιορίσουν αυτή την απόκλιση της τροχιάς των ηλεκτρονίων. Στη δύναμη αυτή αντιτίθεται μια άλλη δύναμη που οφείλεται στο ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει στην επιφάνεια του αγωγού. Η φορά της δύναμης αυτής είναι αντίθετη μ' αυτήν που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο.

Το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να εξαχθεί από την παρακάτω εξίσωση που εκφράζει την ισορροπία μαγνητικής και ηλεκτρικής δύναμης πάνω στο φορτίο q .



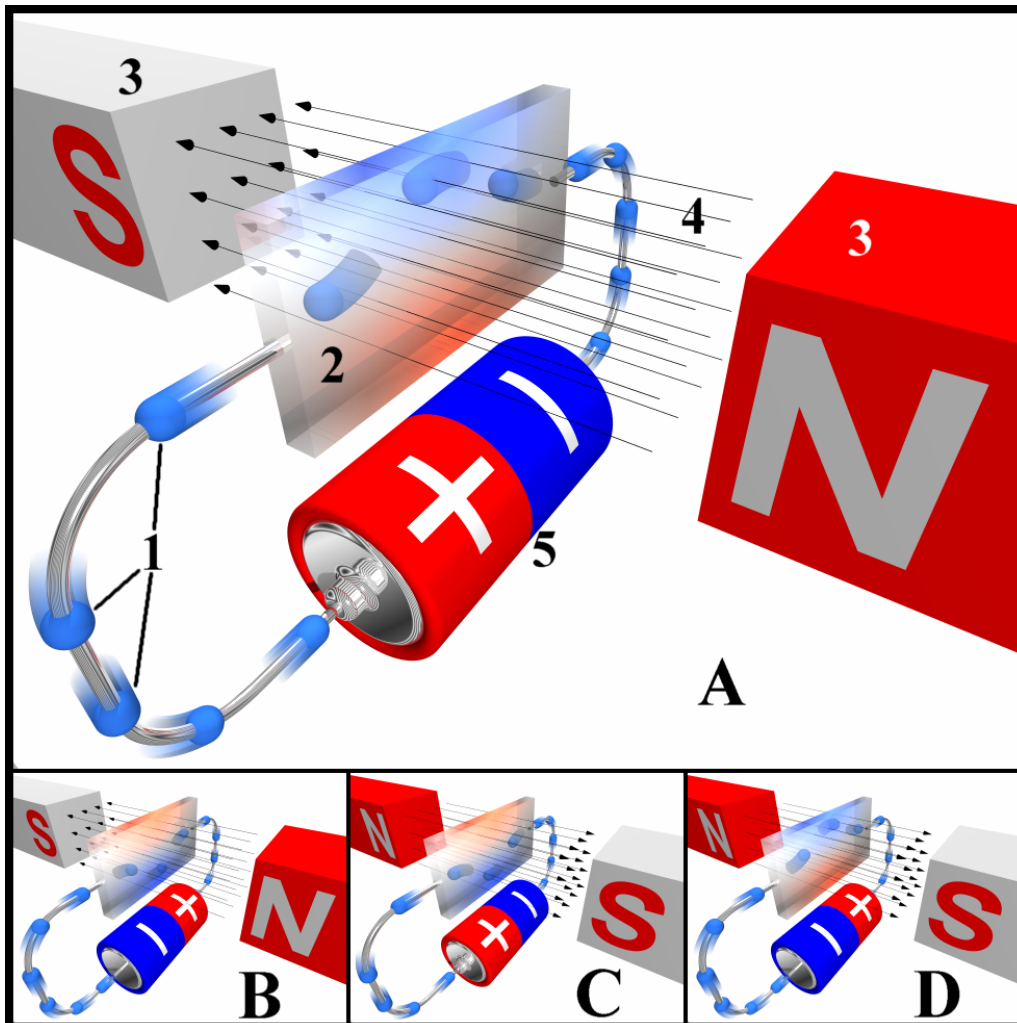
$$\mathbf{E}_q = \mathbf{B}q\mathbf{V} \Leftrightarrow \mathbf{E} = \mathbf{V}\mathbf{B}$$

Έτσι, Όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα τοποθετείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, μια κατακόρυφη τάση θα αναπτυχθεί σε σχέση με το ρεύμα και το μαγνητικό πεδίο. Αυτή η αρχή είναι γνωστή σαν φαινόμενο Hall. Η εικόνα 2.3 δείχνει αυτή τη βασική αρχή. Δείχνει ένα λεπτό φύλλο ημιαγωγίου υλικού (στοιχείο Hall) το οποίο διαρρέεται από ρεύμα. Οι συνδέσεις εξόδου είναι κάθετες στην κατεύθυνση του ρεύματος. Όταν δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο, η διανομή του ρεύματος είναι ομοιόμορφη και δεν διαπιστώνεται διαφορά τάσης στην έξοδο. Όταν εφαρμόζεται ένα κάθετο μαγνητικό πεδίο, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5, μια δύναμη Lorentz ασκείται στο ρεύμα. Αυτή η δύναμη διαταράσσει τη διανομή του ρεύματος, δημιουργώντας μια διαφορά τάσης στην έξοδο. Αυτή η τάση ονομάζεται τάση Hall (V_H). Η μορφή της εξίσωσης που δείχνει την αλληλεπίδραση του μαγνητικού πεδίου και του ρεύματος φαίνεται στην εξίσωση 2.1

$$V_H \propto \mathbf{I} \times \mathbf{B}$$

Εξίσωση 2.1

Η τάση Hall είναι ανάλογη της συνέλιξης του ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου. Είναι της μορφής $7\mu\text{V}/\text{Vs}/\text{gauss}$ στη σιλικόνη και έτσι απαιτείται ενίσχυση για συγκεκριμένες εφαρμογές.



Εικόνα 2.6

Συμπεράσματα

Επομένως, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι συνάρτηση της μαγνητικής επαγωγής του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.

Μπορούμε λοιπόν να συμπεράνουμε ότι όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα τοποθετηθεί σ' ένα μαγνητικό πεδίο τότε θα ασκηθεί πάνω του μια αντιμαγνητική δύναμη κάθετη αμοιβαία στο μαγνητικό πεδίο και το ρεύμα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **Φαινόμενο HALL** και μπορεί κατάλληλα να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση μεταβολών της μαγνητικής επαγωγής.

Το στοιχείο HALL που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Το κύκλωμα αυτό μετρά την αντιμαγνητική δύναμη που εξασκείται πάνω σ' ένα αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα και βρίσκεται στο χώρο ενός μαγνητικού πεδίου. Στη συνέχεια και υπό μορφή σήματος την ενισχύει. Αυτή η ενίσχυση μας επιτρέπει να μετρήσουμε μικρές μεταβολές στην μαγνητική επαγωγή.

Για τα πειράματα θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω διατάξεις Hall:

Συσκευή No1 (λευκή τελεία): Το στοιχείο μόνο του χωρίς επιπρόσθετα μέρη.

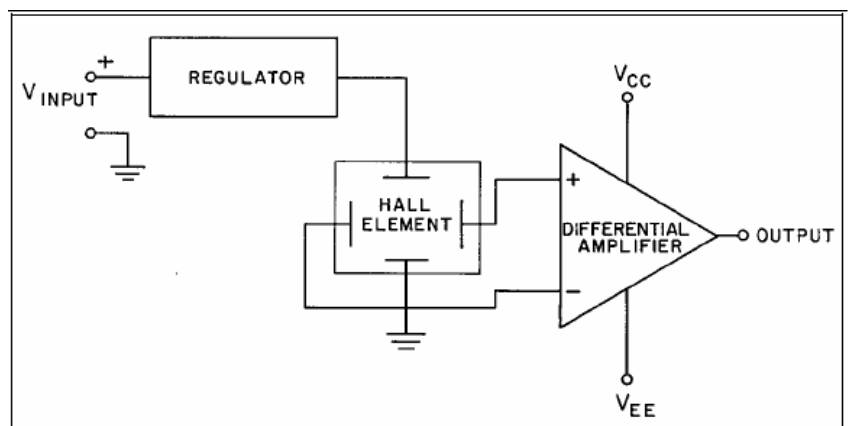
Συσκευή No2 (κίτρινη τελεία): Το στοιχείο μ' ένα κομμάτι μετάλλου.

Συσκευή No3 (κόκκινη τελεία): Το στοιχείο μ' ένα μαγνήτη.

Σαν αποτέλεσμα, το φαινόμενο Hall είναι ένα πολύ χρήσιμο μέσο για να μετράμε την πυκνότητα των φορέων καθώς και το μαγνητικό πεδίο. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του φαινομένου Hall είναι ότι συμπεριφέρεται διαφορετικά μεταξύ θετικών φορτίων που κινούνται προς μια κατεύθυνση και αρνητικών κινούμενων προς την αντίθετη. Το φαινόμενο Hall μας έδωσε την πρώτη αληθινή απόδειξη ότι τα ηλεκτρικά ρεύματα στα μέταλλα μεταφέρονται από κινούμενα ηλεκτρόνια και όχι από πρωτόνια. Το φαινόμενο Hall επίσης μας έδειξε ότι σε μερικές ουσίες (ειδικά στους ημιαγωγούς), είναι πιο σωστό να θεωρούμε το ρεύμα σαν θετικές οπές που κινούνται παρά σαν αρνητικά ηλεκτρόνια.

Βασικοί Αισθητήρες Hall

Το στοιχείο Hall είναι το βασικό αισθητήριο μαγνητικού πεδίου. Στις περισσότερες εφαρμογές απαιτείται ρύθμιση του σήματος ώστε το σήμα εξόδου να είναι εύχρηστο. Οι ηλεκτρονικές διατάξεις που απαιτούνται γι' αυτή τη διαδικασία αποτελούνται από μια ενισχυτική βαθμίδα και από αντισταθμιστές θερμοκρασίας. Η εικόνα 2.7 μας δείχνει έναν βασικό αισθητήρα Hall. Αν η τάση Hall μετρηθεί κατά τη διάρκεια απουσίας μαγνητικού πεδίου, τότε η έξοδος θα είναι μηδέν. Παρόλα αυτά, αν η τάση σε κάθε έξοδο μετρηθεί με αναφορά τη γείωση, μια μη μηδενική τάση θα εμφανιστεί. Αυτή λέγεται κοινού τύπου τάση (Common Mode Voltage CMV) και είναι η ίδια σε κάθε ακροδέκτη εξόδου. Μηδέν είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών. Η ενισχυτική βαθμίδα



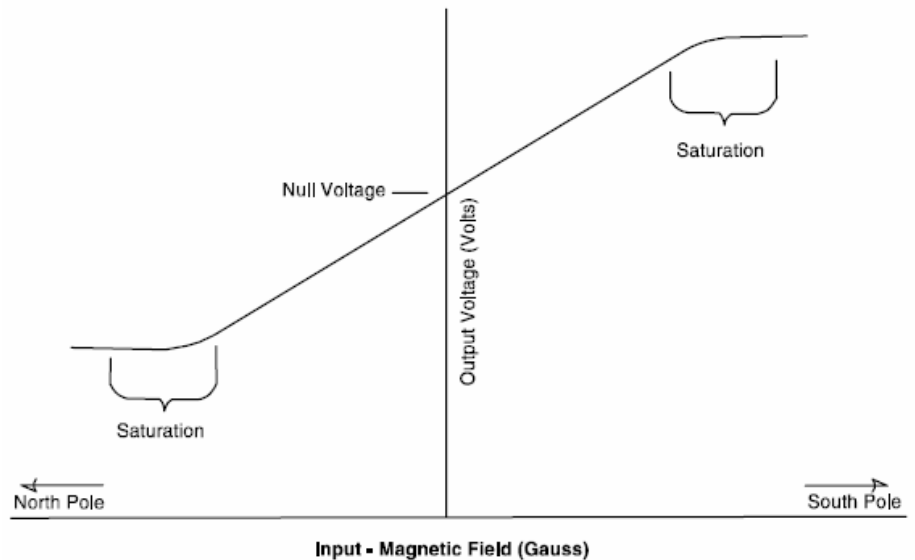
Εικόνα 2.7 Βασικός αισθητήρας Hall

που φαίνεται στην εικόνα 2.7 αποτελείται από διαφορικό ενισχυτή έτσι ώστε να ενισχύει τη διαφορά δυναμικού, δηλαδή την τάση Hall. Η τάση Hall είναι ένα χαμηλής ισχύος σήμα της τάξης των 30mV κατά την παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου 1 gauss. Αυτή η χαμηλής ισχύος έξοδος απαιτεί ένα ενισχυτή με μικρό θόρυβο, υψηλή αντίσταση εισόδου και ρυθμιζόμενο κέρδος. Ένας διαφορικός ενισχυτής με τέτοια χαρακτηριστικά μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί με ένα στοιχείο Hall χρησιμοποιώντας τεχνολογία διπολικών τρανζίστορ. Καθώς φαίνεται από την εξίσωση 2.1, η τάση Hall είναι συνάρτηση του ρεύματος εισόδου. Ο σκοπός του ρυθμιστή στην εικόνα 2.7 είναι να διατηρεί αυτό το ρεύμα σταθερό έτσι ώστε η έξοδος του αισθητήρα να αντικατοπτρίζει μόνο την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

2.2 Χρήση του Φαινομένου στους Μετατροπείς.

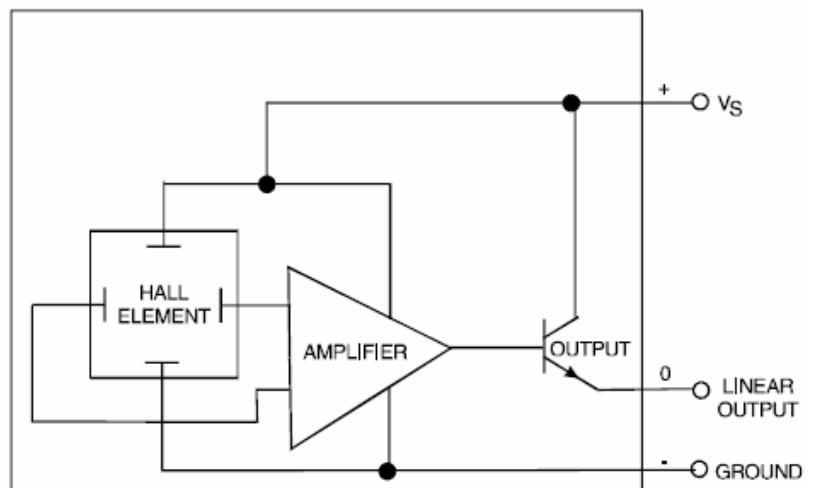
2.2.1 Αισθητήρες αναλογικής εξόδου

Ο αισθητήρας που περιγράφηκε στην εικόνα 2.7 είναι μια βασική συσκευή αναλογικής εξόδου. Οι αναλογικοί αισθητήρες παρέχουν μια τάση εξόδου η οποία είναι ανάλογη του μαγνητικού πεδίου στο οποίο εκτίθενται. Παρόλο που είναι μια ολοκληρωμένη συσκευή, επιπλέον λειτουργίες κυκλωμάτων προστέθηκαν ώστε να απλοποιηθεί η εφαρμογή. Το μαγνητικό πεδίο που θα διαβάσει ο αισθητήρας μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό. Ως αποτέλεσμα, η έξοδος του ενισχυτή θα οδηγηθεί είτε θετικά, είτε αρνητικά, απαιτώντας έτσι



Εικόνα 2.8 Η αρχή της μηδενικής τάσης

τροφοδοσία και στη θετική και στην αρνητική είσοδο. Για να αποφευχθεί η απαίτηση για διπλή τροφοδοσία χρησιμοποιείται είτε μια σταθερή αντιστάθμιση είτε πόλωση του διαφορικού ενισχυτή. Η τιμή της πόλωσης εμφανίζεται στην έξοδο όταν δεν παρίσταται μαγνητικό πεδίο και αναφέρεται ως μηδενική τάση (null voltage). Όταν διαβάσει ένα θετικό μαγνητικό πεδίο, η έξοδος αυξάνεται πάνω από αυτή τη μηδενική τάση. Αντίστοιχα, για αρνητικό μαγνητικό πεδίο, η έξοδος μειώνεται κάτω από τη μηδενική



Εικόνα 2.9 Απλός αισθητήρας αναλογικής εξόδου

τάση, παραμένοντας όμως θετική. Αυτή η αρχή φαίνεται στην εικόνα 2.8.

Η έξοδος του ενισχυτή δεν μπορεί να υπερβεί τα όρια που επιβάλλει η πηγή τροφοδοσίας. Για την ακρίβεια, ο ενισχυτής θα φτάσει γρηγορότερα στο σημείο κορεσμού απ' ό,τι η πηγή τροφοδοσίας τα όριά της. Το σημείο κορεσμού φαίνεται στην εικόνα 2.8. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι αυτός ο κορεσμός συμβαίνει μέσα στο ενισχυτή και όχι στο στοιχείο Hall. Έτσι, ισχυρά μαγνητικά πεδία δεν θα καταστρέψουν τους αισθητήρες Hall, αλλά θα τους οδηγήσουν σε κορεσμό.

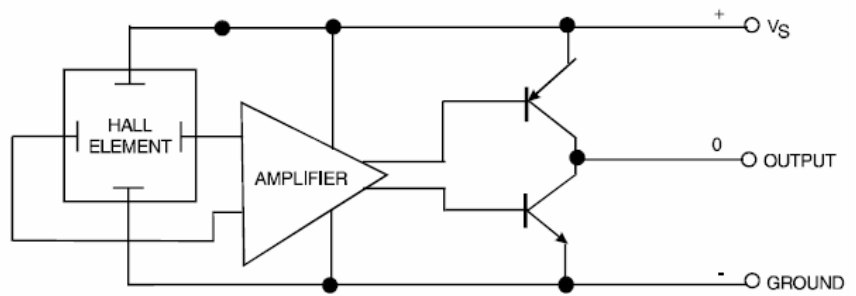
Για να γίνει πιο ευρύ το φάσμα χρήσης της συσκευής, ένα ανοιχτού εκπομπού, ανοιχτού συλλέκτη ή push – pull τρανζίστορ προστίθεται στην έξοδο του διαφορικού ενισχυτή. Η εικόνα 2.9 δείχνει ένα πλήρη αισθητήρα Hall αναλογικής εξόδου που ενσωματώνει όλες τις λειτουργίες που συζητήθηκαν παραπάνω.

Αντιπαράθεση χαρακτηριστικών εισόδου/ εξόδου.

Οι αισθητήρες αναλογικής εξόδου είναι διαθέσιμοι σε ένα φάσμα τάσεων από 4,5 – 10,5, 4,5 – 12, ή 6,6 – 12,6 V_{DC} και συνήθως απαιτούν μια ρυθμιζόμενη τάση τροφοδοσίας για να λειτουργήσουν με ακρίβεια. Η έξοδος τους είναι συνήθως τύπου push – pull και είναι ανάλογη της τάσης τροφοδοσίας υπολογίζοντας πάντα και την αντιστάθμιση καθώς και το κέρδος. Η εικόνα 2.10 δείχνει ένα αναλογικό αισθητήρα που λειτουργεί με

ρυθμιζόμενη τάση από 4,5 μέχρι 10,5V.

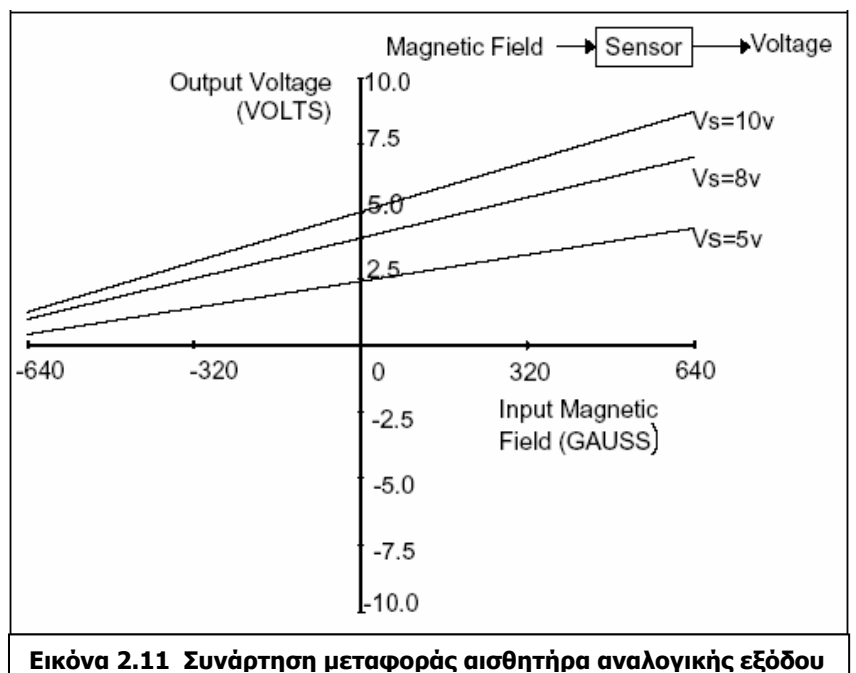
Αυτός ο αισθητήρας έχει ευαισθησία και αντιστάθμιση ανάλογη με την τάση τροφοδοσίας. Η λειτουργία της συσκευής αυτής ονομάζεται "rail to rail", αυτό σημαίνει ότι η τάση εξόδου έχει εύρος από σχεδόν μηδέν (0,2V) έως σχεδόν την τάση τροφοδοσίας ($V_S - 0.2V$).



Εικόνα 2.10 Γραμμικός αισθητήρας αναλογικής εξόδου

Συνάρτηση Μεταφοράς

Η συνάρτηση μεταφοράς μιας συσκευής περιγράφει την έξοδο αναφορικά με την είσοδο. Η συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να εκφραστεί σαν εξίσωση ή σαν γράφημα. Για τους αισθητήρες Hall αναλογικής εξόδου η συνάρτηση μεταφοράς περιγράφει τη σχέση μεταξύ ενός μαγνητικού πεδίου (είσοδος) και μιας τάσης (εξόδου). Η συνάρτηση μεταφοράς για ένα τυπικό αισθητήρα φαίνεται στην εικόνα 2.11. Η



Εικόνα 2.11 Συνάρτηση μεταφοράς αισθητήρα αναλογικής εξόδου

εξίσωση 2.2 είναι μια προσέγγιση της μεταφοράς του

$$V_{\text{out}} (\text{Volts}) = (6.25 \times 10^{-4} \times V_s)B + (0.5 \times V_s)$$
$$-640 < B(\text{Gauss}) < +640$$

αναλογική συνάρτησης αισθητήρα.

Εξίσωση 2.2

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός αναλογικού αισθητήρα χαρακτηρίζεται από την ευαισθησία, την αντιστάθμιση κενού και το εύρος της εξόδου. Ευαισθησία ορίζεται η αλλαγή στην έξοδο που προκαλείται από μια αλλαγή στην είσοδο. Η καμπύλη της συνάρτησης μεταφοράς που φαίνεται στην εικόνα 2.11 ανταποκρίνεται στην ευαισθησία του αισθητήρα. Ο παράγοντας $B \{B (6.25 \times 10^{-4} \times V_s)\}$ στην εξίσωση 2.2 εκφράζει και αυτός την ευαισθησία αυτού του αισθητήρα.

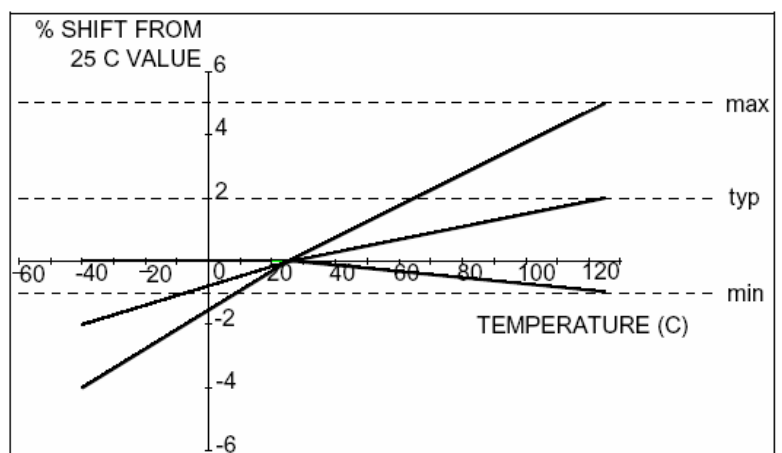
Αντιστάθμιση κενού (null offset) είναι η έξοδος ενός αισθητήρα με μηδενική μαγνητική διέγερση. Στην περίπτωση της συνάρτησης μεταφοράς της εικόνας 2.11, μηδενική αντιστάθμιση είναι η τάση εξόδου στα 0 gauss για μια σταθερή τάση τροφοδοσίας. Ο δεύτερος όρος στην εξίσωση 2.2 ($(0.5 \times V_s)$) εκφράζει αυτή την μηδενική αντιστάθμιση.

Το εύρος εξόδου (span) καθορίζει το εύρος ενός αισθητήρα αναλογικής εξόδου. Εύρος είναι η διαφορά μεταξύ των τάσεων εξόδου όταν η είσοδος μεταβάλλεται από τα αρνητικά στα θετικά. Με τη μορφή εξίσωσης:

$$\text{Span} = V_{\text{OUT}} @ (+) \text{ gauss} - V_{\text{OUT}} @ (-) \text{ gauss}$$

Εξίσωση 2.3

Παρόλο που ένας αισθητήρας αναλογικής εξόδου θεωρείται πως είναι γραμμικός σε όλο το εύρος του, στην πραγματικότητα, κανένας αισθητήρας δεν είναι απόλυτα γραμμικός. Το χαρακτηριστικό «γραμμικότητα» καθορίζει το μέγιστο σφάλμα που προκύπτει από την υπόθεση πως η συνάρτηση μεταφοράς είναι ευθεία γραμμή. Γί αυτές τις συσκευές, η γραμμικότητα μετριέται σαν η διαφορά μεταξύ της πραγματικής εξόδου και της τέλει ευθείας γραμμής ανάμεσα στα τελικά σημεία (end points). Δίνεται σαν ένα ποσοστό του εύρους. Η βασική συσκευή Hall είναι ευαίσθητη σε μεταβολές της θερμοκρασίας. Ηλεκτρονικές ρυθμιστικές διατάξεις ενσωματώνονται στους αισθητήρες Hall ώστε να αντισταθμίσουν αυτά τα φαινόμενα. Η εικόνα 2.12 δείχνει την αλλαγή ευαισθησίας λόγω θερμοκρασίας για ένα μικροσκοπικό γραμμικό αισθητήρα Hall.



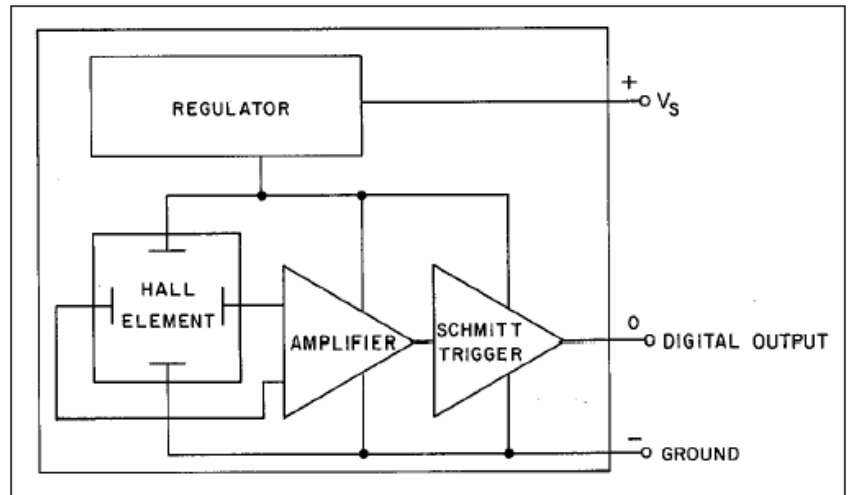
Εικόνα 2.12 Μεταβολή της ευαισθησίας σε σχέση με την αλλαγή θερμοκρασίας

2.2.2 Αισθητήρες ψηφιακής εξόδου

Ο αισθητήρας αυτός έχει στην έξοδό του δυο καταστάσεις, ON ή OFF. Η βασική συσκευή αναλογικής εξόδου που είδαμε στην εικόνα 2.7 μπορεί να μετατραπεί σε αισθητήρα ψηφιακής εξόδου με την προσθήκη ενός κυκλώματος σκανδαλιστή Schmitt. Η εικόνα 2.13 δείχνει ένα τυπικό, εσωτερικά ρυθμιζόμενο αισθητήρα Hall ψηφιακής εξόδου.

Ο σκανδαλιστής Schmitt συγκρίνει την έξοδο του διαφορικού ενισχυτή

(εικόνα 2.13) με την παρούσα τάση αναφοράς. Όταν η έξοδος του ενισχυτή ξεπεράσει την αναφορά, ο σκανδαλιστής Schmitt ενεργοποιείται. Αντίστοιχα, όταν η έξοδος του ενισχυτή πέσει κάτω από το σημείο αναφοράς, η έξοδος του σκανδαλιστή γίνεται OFF. Στο κύκλωμα Schmitt εισάγεται υστέρηση για καλύτερη συμπεριφορά σε τυχόν σπινθήρες που μπορεί να παρουσιαστούν στο κύκλωμα. Η υστέρηση προκύπτει λόγω των δυο διαφορετικών τιμών αναφοράς, από τις οποίες εξαρτάται το άνοιγμα και το κλείσιμο του διακόπτη Schmitt.

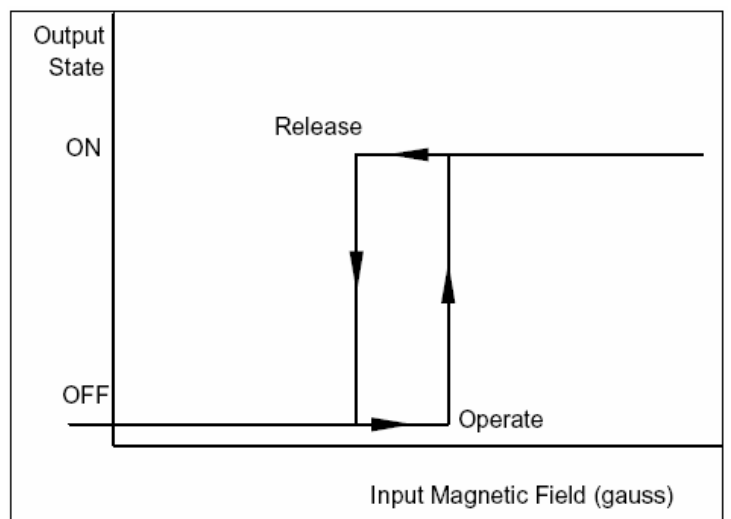


Εικόνα 2.13 Αισθητήρας Hall ψηφιακής εξόδου

Συνάρτηση Μεταφοράς

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός αισθητήρα Hall ψηφιακής εξόδου που περιλαμβάνει υστέρηση φαίνεται στην εικόνα 2.14. Τα βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία εισόδου/ εξόδου είναι το σημείο λειτουργίας, το σημείο απελευθέρωσης και η διαφορά μεταξύ αυτών.

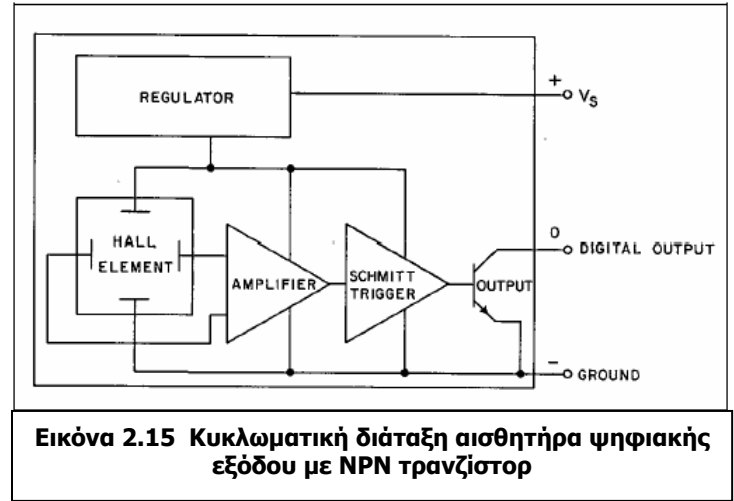
Καθώς το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται, καμία αλλαγή δεν θα συμβεί στην έξοδο του αισθητήρα μέχρι να φτάσει στο σημείο λειτουργίας. Μόλις φτάσουμε το σημείο λειτουργίας, ο αισθητήρας θα αλλάξει κατάσταση. Περαιτέρω αύξηση στην είσοδο πέρα από το σημείο λειτουργίας δεν θα έχει καμία επίδραση στη λειτουργία του αισθητήρα. Αν το μαγνητικό πεδίο μειωθεί κάτω από το σημείο λειτουργίας, η έξοδος θα παραμείνει σταθερή μέχρι να φτάσουμε στο σημείο απελευθέρωσης. Σ' αυτό το σημείο, η έξοδος του αισθητήρα θα επιστρέψει στην αρχική της κατάσταση (OFF). Ο σκοπός της διαφοράς μεταξύ του σημείου λειτουργίας και του σημείου



Εικόνα 2.14 Συνάρτηση μεταφοράς όπου φαίνεται η υστέρηση ενός αισθητήρα ψηφιακής εξόδου

απελευθέρωσης (υστέρηση) είναι να αποκλειστεί η περίπτωση λάθος πυροδότησης η οποία μπορεί να προκληθεί από μικρές μεταβολές της εισόδου.

Όπως και με τους αισθητήρες Hall αναλογικής εξόδου, ένα τρανζίστορ εξόδου προστίθεται ώστε να αυξήσει την ευελιξία της εφαρμογής. Αυτό το τρανζίστορ συνήθως είναι τύπου NPN (καταβόθρα ρεύματος, current sinking) (εικόνα 2.15).



Εικόνα 2.15 Κυκλωματική διάταξη αισθητήρα ψηφιακής εξόδου με NPN τρανζίστορ

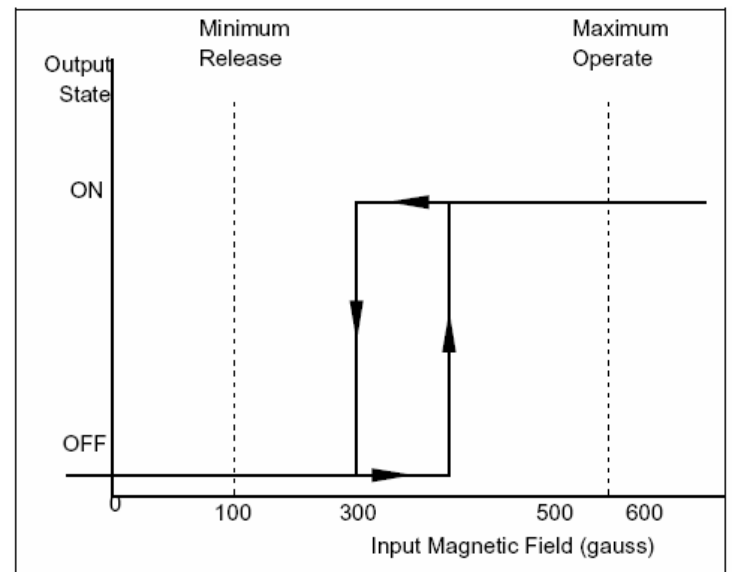
Χαρακτηριστικά Τροφοδοσίας

Οι αισθητήρες ψηφιακής εξόδου διατίθενται σε δυο ειδών διατάξεις τροφοδοσίας. Ρυθμιζόμενοι και μη ρυθμιζόμενοι. Οι περισσότεροι αισθητήρες Hall ψηφιακής εξόδου είναι ρυθμιζόμενοι και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με πηγές τροφοδοσίας από 3,8 μέχρι 24V_{DC}. Οι μη ρυθμιζόμενοι χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις. Για τη λειτουργία τους απαιτείται μια ρυθμιζόμενη DC πηγή από 4,5 μέχρι 5,5V ($5 \pm 0.5V$). Οι αισθητήρες που περιλαμβάνουν εσωτερικούς ρυθμιστές προορίζονται για εφαρμογές γενικής χρήσης. Οι μη ρυθμιζόμενοι αισθητήρες θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε συνεργασία με λογικά κυκλώματα όπου είναι διαθέσιμη ρυθμιζόμενη πηγή τροφοδοσίας 5V.

Χαρακτηριστικά Εισόδου

Τα χαρακτηριστικά εισόδου ενός αισθητήρα ψηφιακής εξόδου καθορίζονται αναφορικά με το σημείο λειτουργίας, το σημείο απελευθέρωσης και τη διαφορά δυναμικού (differential). Καθώς αυτά τα χαρακτηριστικά μεταβάλλονται ανάλογα με τη θερμοκρασία καθώς και από αισθητήρα σε αισθητήρα, καθορίζονται σαν μέγιστες και ελάχιστες τιμές.

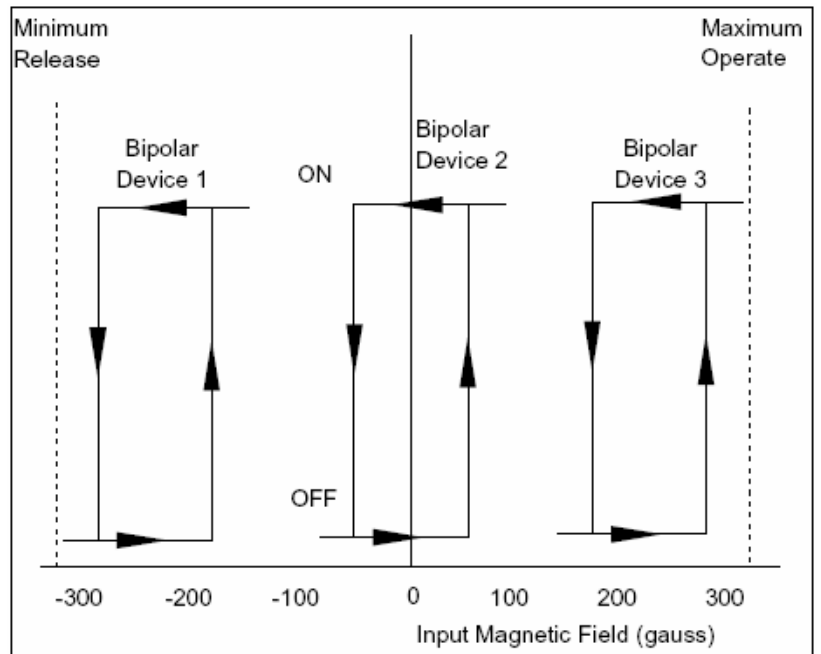
Το Μέγιστο Σημείο Λειτουργίας αναφέρεται στο επίπεδο του μαγνητικού πεδίου το οποίο μπορεί να εξασφαλίσει ότι ο αισθητήρας ψηφιακής εξόδου θα γίνει ON κάτω από οποιαδήποτε σχετική συνθήκη. Το Ελάχιστο Σημείο Απελευθέρωσης αναφέρεται στο επίπεδο του μαγνητικού πεδίου που εξασφαλίζει ότι ο αισθητήρας θα γίνει OFF. Η εικόνα 2.16 δείχνει τα χαρακτηριστικά εισόδου για ένα τυπικό μονοπολικό αισθητήρα ψηφιακής εξόδου. Ο αισθητήρας που φαίνεται καλείται



Εικόνα 2.16 Χαρακτηριστικά εισόδου μονοπολικού αισθητήρα ψηφιακής εξόδου

μονοπολικός αφού και το μέγιστο σημείο λειτουργίας αλλά και το ελάχιστο σημείο απελευθέρωσης είναι θετικά (π.χ. νότιος πόλος του μαγνητικού πεδίου).

Ένας διπολικός αισθητήρας έχει θετικό μέγιστο σημείο λειτουργίας (νότιος πόλος) και αρνητικό ελάχιστο σημείο απελευθέρωσης (βόρειος πόλος). Οι συναρτήσεις μεταφοράς φαίνονται στην εικόνα 2.17. Σημειώστε ότι υπάρχουν τρεις πιθανοί συνδυασμοί πρακτικών σημείων λειτουργίας και απελευθέρωσης με έναν διπολικό αισθητήρα.



Εικόνα 2.17 Χαρακτηριστικά εισόδου διπολικού αισθητήρα ψηφιακής εξόδου

Χαρακτηριστικά Εξόδου

Τα χαρακτηριστικά εξόδου ενός αισθητήρα ψηφιακής εξόδου καθορίζονται ως τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του τρανζίστορ εξόδου. Αυτά περιλαμβάνουν τύπο, μέγιστο ρεύμα, τάση κατάρρευσης, και χρόνο μανδάλωσης.

2.3 Σχεδίαση Συστημάτων με χρήση του στοιχείου Hall

2.3.1 Εισαγωγή

Οι συσκευές αισθητήρων Hall μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανίχνευση πολλών φυσικών παραμέτρων, που εκτείνονται από απ' ευθείας μέτρηση ενός μαγνητικού πεδίου μέχρι και την ανίχνευση ωκεάνιων ρευμάτων. Παρόλο που αυτές οι εφαρμογές ποικίλουν στην φύση τους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίδια σχεδιαστική προσέγγιση. Στην αρχή αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζονται γενικές στρατηγικές σχεδιασμού. Ξεκινάει με την ανάγκη ανίχνευσης κάποιας ποσότητας μέσω μιας βασικής αρχής.

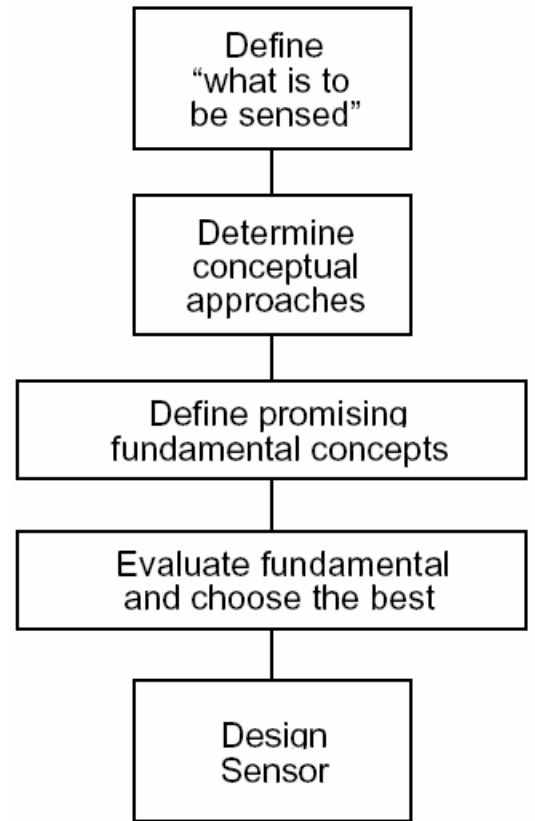
Το υπόλοιπο του κεφαλαίου καλύπτει το φαινόμενο Hall σαν την ιδιαίτερη τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Περιγράφει τις διάφορες σχεδιαστικές προσεγγίσεις, διαδικασίες, εναλλακτικές λύσεις και τους παράγοντες που θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού αισθητήρων συσκευών που κάνουν χρήση του φαινομένου Hall. Η είσοδος, η έξοδος και τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα Hall, συγκεντρώνονται και καθορίζονται.

2.3.2 Γενικός Σχεδιασμός Αισθητήριων Συσκευών

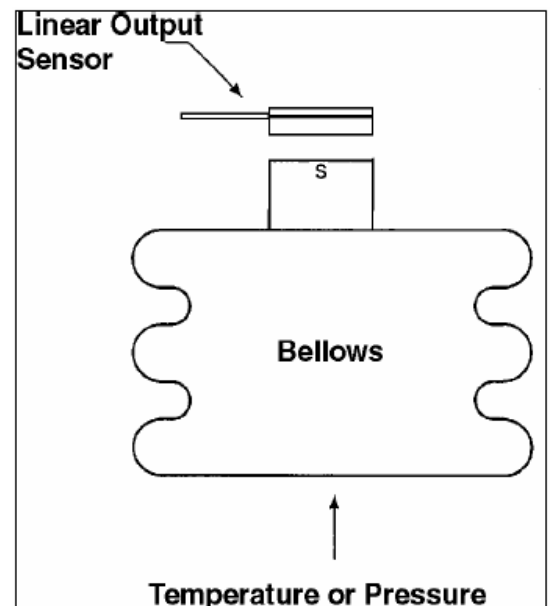
Η εικόνα 2.18 δείχνει τη διαδικασία σχεδιασμού αισθητήριων συσκευών. Το πρώτο βήμα είναι ο καθορισμός του μεγέθους που πρόκειται να μετρηθεί. Η ταυτοποίηση της φυσικής παραμέτρου (ποσότητας) που πρόκειται να μετρηθεί δεν είναι πάντα προφανής. Η μέτρηση τη περιστροφής ενός στροφείου λεπίδων (έλικα) είναι μια προσέγγιση στην κατασκευή ενός μετρητή ροής. Σ' αυτή την περίπτωση, θα ήταν εύκολο να υποθέσουμε ότι αυτό που πρόκειται να μετρηθεί είναι οι στροφές του έλικα. Στην πραγματικότητα, η ροή υγρών είναι η ποσότητα που θέλουμε να μετρήσουμε. Η περιοριστική ταυτοποίηση της κίνησης του στροφείου ως μετρούμενη ποσότητα, μειώνει τις πιθανές σχεδιαστικές προσεγγίσεις και διαθέσιμες τεχνολογίες που έχει ο σχεδιαστής.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, μπορούν να προσδιοριστούν πολλές μέθοδοι μέτρησης μιας φυσικής παραμέτρου. Κάθε μια απ' αυτές τις μεθόδους θα αποτελείται από την θεωρητική προσέγγιση και την σχετική τεχνολογία. Η θεωρητική προσέγγιση περιγράφει πως μπορεί να ενσωματωθεί η μετρητική λειτουργία χωρίς να λαμβάνουμε υπ' όψη μας τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες και τα χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων. Σ' αυτό το επίπεδο λεπτομέρειας, κάποιες θεωρητικές προσεγγίσεις μπορούν αμέσως να απορριφθούν λόγω κόστους, πολυπλοκότητας κλπ. Πάρτε, για παράδειγμα, μια απλή εφαρμογή ταχυμέτρου. Παρόλο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα Laser – gyro για να ανιχνεύσει την περιστροφική κίνηση, θα απορρίπτονταν αμέσως λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητάς του.

Είναι σημαντικό ο σχεδιαστής να μην περιορίζει την μέθοδο μέτρησης μιας φυσικής παραμέτρου μόνο στα προφανή. Οι φυσικές παράμετροι μπορούν συχνά να μετρηθούν χρησιμοποιώντας έμμεσες μεθόδους. Για παράδειγμα, η ανάγκη να μετρήσουμε θερμοκρασία αλλάζει. Μια προφανής προσέγγιση θα ήταν να χρησιμοποιήσουμε ένα θερμοζεύγος από τη στιγμή που αυτό είναι ένα αισθητήριο θερμοκρασίας. Μια εναλλακτική μέθοδος μέτρησης θερμοκρασίας παρουσιάζεται στην εικόνα 2.19. Σ' αυτό το παράδειγμα, μια αύξηση ή μείωση στην θερμοκρασία κάνει τη φυσούνα να διαστέλλεται ή να συστέλλεται, μετακινώντας τον συνδεδεμένο



Εικόνα 2.18 Σχεδιαστική προσέγγιση γενικευμένης αισθητήριας συσκευής



Εικόνα 2.19 Αισθητήρας θερμοκρασίας με στοιχείο Hall

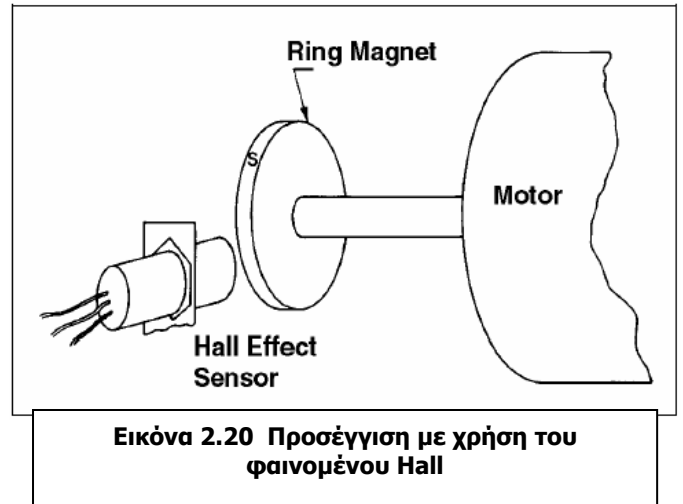
μαγνήτη. Η μεταβολή στο μαγνητικό πεδίο που προκαλείται από την κίνηση του μαγνήτη μετρείται από τον αισθητήρα Hall. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η μετατροπή της θερμοκρασίας εισόδου σε μετρήσιμο ηλεκτρικό πεδίο.

Μόλις καθοριστούν οι πιο υποσχόμενες τεχνικές μέτρησης, πρέπει να παρθεί μια απόφαση σχετικά με το σχέδιο που θα ακολουθηθεί. Για να παρθεί αυτή η απόφαση, η θεωρητική προσέγγιση πρέπει να μετατραπεί σε μια βασική ιδέα (εικόνα 2.18). Η βασική ιδέα περιλαμβάνει τις απαιτήσεις της εισόδου και της εξόδου, τα βασικά εξαρτήματα μετρήσεων της συσκευής και τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Έχοντας όλες τις προδιαγραφές διαθέσιμες, η βασική ιδέα μπορεί να αναλυθεί. Το αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης θα είναι η επιλογή του σχεδίου για περαιτέρω ανάπτυξη.

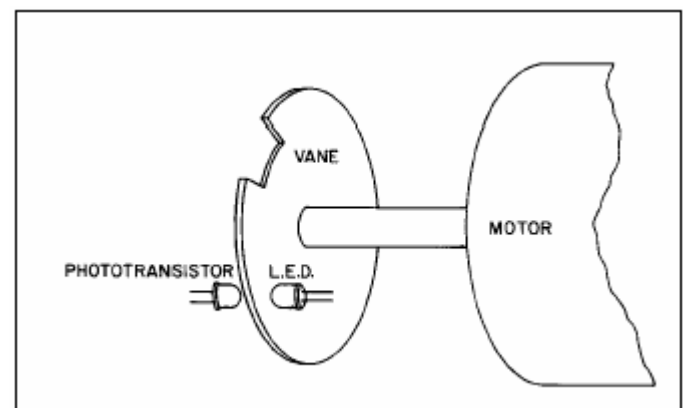
Σκεφτείτε μια απλή εφαρμογή ταχυμέτρου όπου κάθε περιστροφή του άξονα του κινητήρα θα πρέπει να ανιχνευθεί. Δυο διαδοχικές προσεγγίσεις φαίνονται στις εικόνες 2.20 και 2.21. Η προσέγγιση της εικόνας 2.20 αποτελείται από έναν μαγνήτη δαχτυλίδι πάνω στον άξονα του κινητήρα και ένα ακτινικά τοποθετημένο αισθητήρα Hall ψηφιακής εξόδου. Καθώς ο μαγνήτης περιστρέφεται μαζί με τον κινητήρα, ο νότιος πόλος του περνάει την επιφάνεια ανίχνευσης του αισθητήρα Hall με κάθε περιστροφή. Ο αισθητήρας ενεργοποιείται όταν ο νότιος πόλος του μαγνήτη πλησιάζει τον αισθητήρα και απενεργοποιείται όταν αυτός απομακρύνεται. Έτσι, ένας μονός ψηφιακός παλμός θα παράγεται με κάθε περιστροφή.

Η θεωρητική προσέγγιση που φαίνεται στην εικόνα 2.21 αποτελείται από ένα δίσκο με μία εγκοπή που περιστρέφεται μαζί με τον άξονα του κινητήρα ο οποίος φέρει ένα ζευγάρι led τοποθετημένα παράλληλα σ' αυτόν. Καθώς ο δίσκος περιστρέφεται μαζί με τον κινητήρα, η εγκοπή του δίσκου περνάει ανάμεσα από το led και το φωτοτρανζίστορ, επιτρέποντας στο φως να περάσει. Το φωτοτρανζίστορ γίνεται ON για κάθε περιστροφή, έτσι και εδώ, με κάθε περιστροφή παράγεται ένας παλμός.

Οι λεπτομέρειες που δίνονται στα δυο προηγούμενα παραδείγματα είναι ανεπαρκείς για να καθορίσουν τον πιο σωστό τρόπο προς ανάπτυξη. Πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι απαιτήσεις εισόδου και εξόδου. Για παράδειγμα, ποια είναι τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του παλμού εξόδου που απαιτείται για την εφαρμογή (ρεύμα, τάση, χρόνος ανύψωσης, χρόνος καθόδου κλπ.); Τα βασικά εξαρτήματα στην αισθητήρια συσκευή θα πρέπει να ταυτοποιηθούν. Αν τα απαιτούμενα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά δεν πληρούνται στην έξοδο του φωτοτρανζίστορ, τι επιπλέον κυκλώματα θα χρειαστούν; Οι απαιτήσεις του



Εικόνα 2.20 Προσέγγιση με χρήση του φαινομένου Hall



Εικόνα 2.21 Προσέγγιση με χρήση οπτοηλεκτρονικών

περιβάλλοντος θα πρέπει επίσης να ταυτοποιηθούν. Για παράδειγμα, αν η αισθητήρια συσκευή πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλον όπου ο αέρας έχει υψηλή πυκνότητα σε λάδι, η οπτική προσέγγιση θα απορριφθεί.

Δεν υπάρχουν γενικές βήμα – βήμα διαδικασίες οι οποίες μπορούν να ακολουθηθούν στην επιλογή μιας συγκεκριμένης βασικής ιδέας. Πρέπει να χρησιμοποιηθεί μηχανολογική κρίση και να ζυγιστούν οι θετικές και αρνητικές πλευρές της κάθε προσέγγισης. Τα χαρακτηριστικά και τα οφέλη κάθε τεχνολογίας πρέπει να εκτιμηθούν με βάση την εφαρμογή. Κατά τη διαδικασία λήψης των αποφάσεων αυτών είναι σημαντικό να ληφθούν υπ' όψιν όλες οι σημαντικές πληροφορίες. Μερικές από τις οποίες είναι:

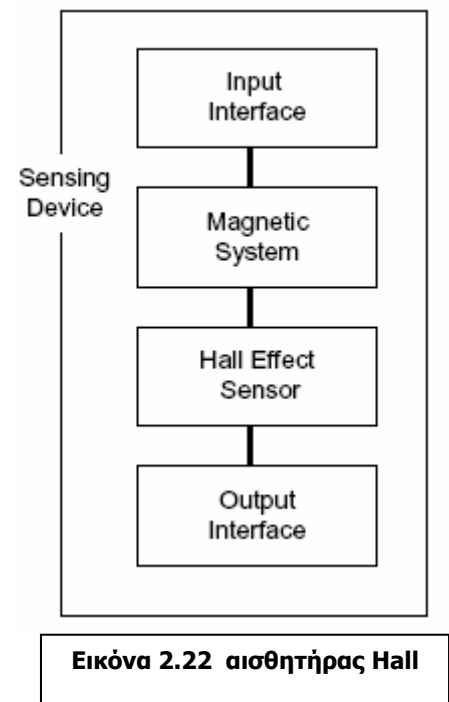
- Γενικό κόστος
- Τι ικανότητα υπάρχει όσον αφορά την παραγωγή ποσοτήτων
- Διαθεσιμότητα εξαρτημάτων
- Πολυπλοκότητα
- Ανοχή από εξάρτημα σε εξάρτημα
- Συμβατότητα με εξαρτήματα άλλων συστημάτων
- Αξιοπιστία
- Ικανότητα συντήρησης
- Περιβαλλοντικοί περιορισμοί

Παρόλο που αρκετοί από αυτούς τους παράγοντες δεν μπορούν να εκφραστούν ποσοτικά μέχρις ότου να δημιουργηθεί ένα λεπτομερές σχέδιο πρέπει να γίνει έστω μια εκτίμηση σε αυτό το σημείο. Μόλις επιλεγθεί η βασική ιδέα, μπορεί να ξεκινήσει το λεπτομερές σχέδιο της αισθητήριας συσκευής.

2.3.3 Σχεδίαση αισθητήριων συσκευών βάση του φαινομένου Hall

Η εικόνα 2.22 δείχνει τα λειτουργικά μπλοκ τα οποία πρέπει να ληφθούν υπ' όψη κατά τη διάρκεια σχεδιασμού αισθητήριων συσκευών που χρησιμοποιούν το φαινόμενο Hall.

Ο σχεδιασμός οποιασδήποτε τέτοιας συσκευής απαιτεί ένα μαγνητικό σύστημα ικανό να ανταποκρίνεται στις φυσικές παραμέτρους που διαβάζονται μέσω της διασυνδετικής διάταξης εισόδου. Η διάταξη αυτή της εισόδου μπορεί να είναι μηχανική (πλειονότητα των αισθητήριων συσκευών) ή ηλεκτρική (συσκευές μέτρησης ρεύματος). Ο αισθητήρας Hall διαβάζει το μαγνητικό πεδίο και παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα. Η διάταξη εξόδου μετατρέπει αυτό το ηλεκτρικό σήμα σε σήμα το οποίο να συναντά τις απαιτήσεις του συστήματος (εφαρμογής). Σκοπός της φάσης σχεδιασμού είναι να καθοριστεί κάθε ένα από τα τέσσερα μπλοκ που περιέχει η αισθητήρια συσκευή της εικόνας 2.22. Κατόπιν να καθοριστούν όλα τα εξαρτήματα, τα χαρακτηριστικά, η τοποθέτηση και η διασύνδεση των μπλοκ μεταξύ τους και με το σύστημα.



Δεν απαιτούν όλοι οι αισθητήρες Hall και τα τέσσερα λειτουργικά μπλοκ. Ένας αισθητήρας μαγνητικού πεδίου για παράδειγμα, δεν απαιτεί ένα μαγνητικό σύστημα ή διάταξη εισόδου. Άλλες αισθητήριες συσκευές έχουν το μαγνητικό σύστημα ήδη σχεδιασμένο και ενσωματωμένο στο ίδιο πακέτο με το ολοκληρωμένο κύκλωμα του αισθητήρα. Η φάση σχεδιασμού είναι κάπως απλοποιημένη σε αυτές τις περιπτώσεις, ο στόχος όμως παραμένει ο ίδιος.

Η φάση σχεδιασμού ξεκινάει με την επιλογή της βασικής ιδέας. Στη συνέχεια, ορίζονται οι λεπτομερείς προδιαγραφές (διάταξη, χαρακτηριστικά, απαιτήσεις) για την εφαρμογή. Αυτή είναι η φάση προσδιορισμού του συστήματος. Οι αρχικές διατάξεις και προδιαγραφές για την αισθητήρια συσκευή οριστικοποιούνται. Διακριτές αισθητήριες συσκευές και αισθητήρια πακέτα θα διαμορφωθούν ξεχωριστά, ξεκινώντας με τον ορισμό της ιδέας. Η τελική φάση είναι η λεπτομερής σχεδίαση. Η προσέγγιση στην λεπτομερή σχεδίαση χωρίζεται σε ψηφιακή και γραμμική.

2.3.4 Καθορισμός Συστήματος

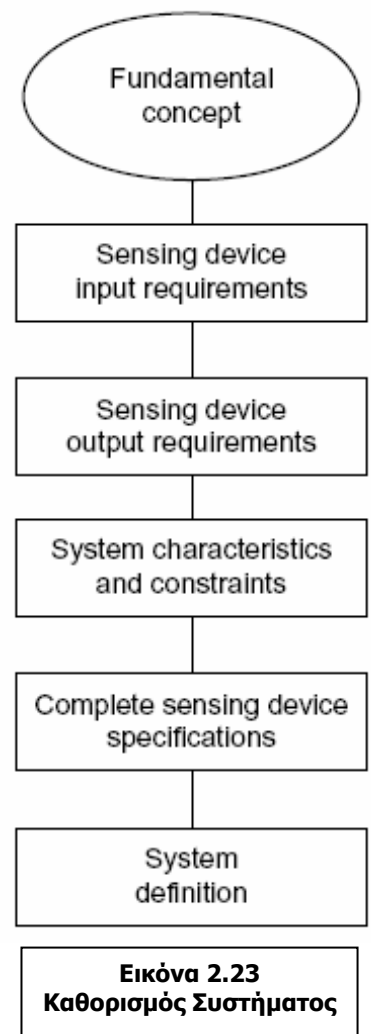
Μόλις επιλεγεί η βασική ιδέα, ξεκινάει ο καθορισμός του συστήματος. Καθορισμός συστήματος είναι η διαδικασία κατά την οποία συγκεντρώνονται λεπτομερείς πληροφορίες για την εφαρμογή. Οι πληροφορίες αυτές περιλαμβάνουν διαμόρφωση, χαρακτηριστικά και απαιτήσεις της εφαρμογής όπως αυτά σχετίζονται με την αισθητήρια συσκευή. Η εικόνα 2.23 δείχνει τα κύρια βήματα στον καθορισμό συστήματος.

Πρώτα, πρέπει να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά εισόδου του αισθητήρα. Αυτά περιλαμβάνουν:

- Εύρος τιμών εισόδου
- Ελάχιστο και μέγιστο ρυθμό αλλαγής των τιμών εισόδου
- Παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές εισόδου όπως χρόνος, θερμοκρασία κλπ.
- Παράγοντες ασφαλείας
- Πηγές σφαλμάτων
- Ανοχές συστήματος καθώς αυτές επηρεάζουν την είσοδο
- Περιβαλλοντικές συνθήκες

Έπειτα, πρέπει να καθοριστούν οι απαιτήσεις εξόδου της συσκευής αισθητήρα. Αυτές περιλαμβάνουν:

- Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά . . . ρεύμα, τάση, κλπ.
- Έξοδος . . . λογικό επίπεδο, παλμοσειρές, άθροισμα παλμών, κλπ.
- Ορισμός των λογικών επιπέδων. . τι τάση αναπαριστά ένα λογικό



- Απαιτήσεις για NPN ή PNP έξοδο.
- Επίπεδο εξόδου όταν η αισθητήρια συσκευή είναι OFF
- Τύπος φορτίου . . . ωμικό, επαγωγικό, κλπ.
- Τύπος διασύνδεσης μεταξύ της αισθητήριας συσκευής και του συστήματος, συμπεριλαμβανομένου του μήκους των καλωδίων, τους τύπους των συνδέσεων, κλπ.
- Χαρακτηριστικά και περιορισμοί του συστήματος πρέπει επίσης να καθοριστούν. Αυτοί περιλαμβάνουν:
 - ο Θέση της αισθητήριας συσκευής
 - ο Ελεύθερος χώρος για την αισθητήρια συσκευή
 - ο Περιορισμοί βάρους
 - ο Διαθέσιμες πηγές τροφοδοσίας για την αισθητήρια συσκευή
 - ο Βασικές απαιτήσεις απ'την αισθητήρια συσκευή όπως ακρίβεια, επαναληπτική ικανότητα, ευκρίνεια, κλπ.

Η παραπάνω λίστα των καθορισμένων χαρακτηριστικών δεν περιλαμβάνει όλους τους πιθανούς παράγοντες στον καθορισμό ενός συστήματος. Ούτε όλα τα σχέδια αισθητήριων συσκευών απαιτούν την εκτίμηση όλων αυτών των παραγόντων. Απλώς περιλαμβάνονται εδώ ώστε να υποδείξουν το φάσμα του καθορισμού συστήματος.

Το τελικό αποτέλεσμα του καθορισμού συστήματος είναι να παραχθούν πλήρεις προδιαγραφές για την αισθητήρια συσκευή.

2.3.5 Γενικός Σχεδιασμός Συσκευών Διακριτής Εξόδου

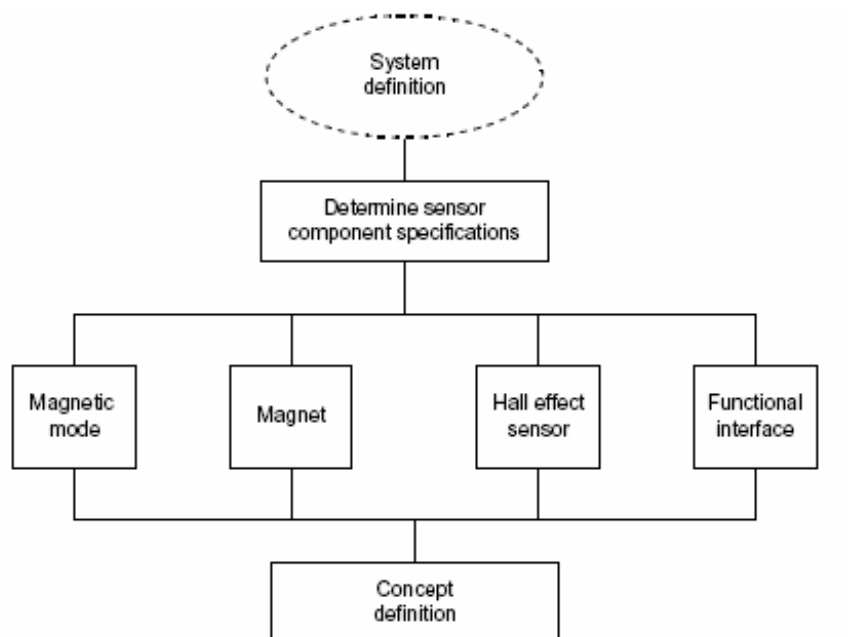
Ο καθορισμός της ιδέας είναι η διαδικασία όπου η αρχική διαμόρφωση και προδιαγραφές για τον αισθητήρα Hall οριστικοποιούνται. Οι προδιαγραφές αναλύονται και τα εσωτερικά εξαρτήματα (αισθητήριο Hall, μαγνητικό σύστημα, διατάξεις εισόδου και εξόδου) επιλέγονται με βάση τα δεδομένα καταλόγου του κατασκευαστή.

Η εικόνα 2.24 δείχνει τα κυριότερα βήματα στον καθορισμό της ιδέας για συστήματα μετρήσεων τα οποία ενεργοποιούνται από ένα μαγνήτη.

Το πρώτο βήμα είναι ο

καθορισμός των χαρακτηριστικών των εξαρτημάτων της αισθητήριας συσκευής. Αυτά περιλαμβάνουν:

- Το ελάχιστο και το μέγιστο κενό μεταξύ του μαγνήτη και του αισθητήρα Hall



Εικόνα 2.24 Σχεδιασμός αισθητήριων συσκευών διακριτής εξόδου

- Τα όρια της μετακίνησης του μαγνήτη
- Ειδικές απαιτήσεις για τον μαγνήτη όπως υψηλή μαγνητική δύναμη ώστε να μην επηρεάζεται από τα αντίθετα μαγνητικά πεδία που εμφανίζονται στο σύστημα.
- Μηχανικοί σύνδεσμοι (εάν απαιτείται)
- Τύπος εξόδου του αισθητήρα . . . NPN ή PNP
- Φάσμα θερμοκρασίας λειτουργίας
- Φάσμα θερμοκρασίας αποθήκευσης συστήματος
- Διάφορες προδιαγραφές εισόδου/ εξόδου από τα χαρακτηριστικά συστήματος.

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή της μαγνητικής μεθόδου, του μαγνήτη, του αισθητήρα Hall και του λειτουργικού τρόπου διασύνδεσης. Αυτά τα τέσσερα αντικείμενα φαίνονται στην εικόνα 2.24 να είναι παράλληλα επειδή οι επιλογές μπορούν να γίνουν ανεξάρτητα. Η απαιτούμενη δύναμη του μαγνήτη εξαρτάται από το κενό και τους περιορισμούς της διαδρομής του μαγνήτη (μαγνητική μέθοδος). Ο αισθητήρας εξαρτάται από την δύναμη του μαγνητικού πεδίου και άρα, από τη μαγνητική μέθοδο και τον μαγνήτη που θα επιλεγεί. Ο λειτουργικός τρόπος διασύνδεσης από τον τύπο της εξόδου του αισθητήρα και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.

Προκειμένου να εξασφαλίσουμε ότι τα χαρακτηριστικά των τεσσάρων αυτών αντικειμένων είναι συμβατά, ο σχεδιαστής πρέπει να έχει μια ιδέα του τύπου των χαρακτηριστικών λειτουργίας που πιθανά να έχουν τα εξαρτήματα καθώς και τη διαθεσιμότητα τους. Κάνοντας τις σωστές επιλογές θα έχει στα χέρια του ένα σετ παραμέτρων που μέσω σχεδιαστικών συμβιβασμών θα μπορέσει να ξεκινήσει ο λεπτομερής σχεδιασμός της αισθητήριας συσκευής.

2.3.6 Αισθητήριες συσκευές Hall ψηφιακής εξόδου

Σχεδίαση εφαρμογών που δεν απαιτούν ακρίβεια

Στις εφαρμογές αυτές το ακριβές σημείο ενεργοποίησης δεν είναι μέγιστης σημασίας. Η ακρίβεια αυτών των αισθητήριων συσκευών είναι συνάρτηση της αξιοπιστίας τους και μεγάλες ανοχές είναι αποδεκτές για τα σημεία λειτουργίας και απελευθέρωσης. Ένα καλό σχέδιο εξασφαλίζει αξιόπιστη λειτουργία κάτω από τις παρακάτω συνθήκες:

- Αποκλίσεις από μονάδα σε μονάδα (ως εξαρτήματα του αισθητήρα)
- Ακραίες θερμοκρασίες
- Μεταβολές της τάσης τροφοδοσίας
- Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές
- Σιδηρούχα υλικά μέσα στο σύστημα
- Κατασκευαστικές ανοχές

Η διαδικασία σχεδιασμού για αισθητήριες συσκευές που δεν απαιτούν ακρίβεια φαίνεται στο σχήμα 6-8. Ο καθορισμός της ιδέας που προσδιορίστηκε προηγουμένως αποτελεί τη βάση για το σχεδιασμό.

Το πρώτο βήμα είναι να αναπτυχθεί η διάταξη εισόδου (μια ιδέα για τη διάταξη εισόδου προσδιορίστηκε από τη βασική ιδέα, εικόνα 2.18). Σ' αυτό το βήμα, το λεπτομερές σχέδιο και το σχεδιάγραμμα της διάταξης εισόδου αναπτύσσεται. Για έναν απλό αισθητήρα θέσης, αυτό θα περιέχει μόνο την τοποθέτηση και ρύθμιση του μαγνήτη και του βασικού αισθητήρα Hall. Πιο πολύπλοκες εφαρμογές ίσως απαιτούν το σχεδιασμό μηχανικών συνδέσεων, γραναζιών, χρήση φυσούνας ή έκκεντρων τα οποία ελέγχουν την κίνηση του μαγνήτη.

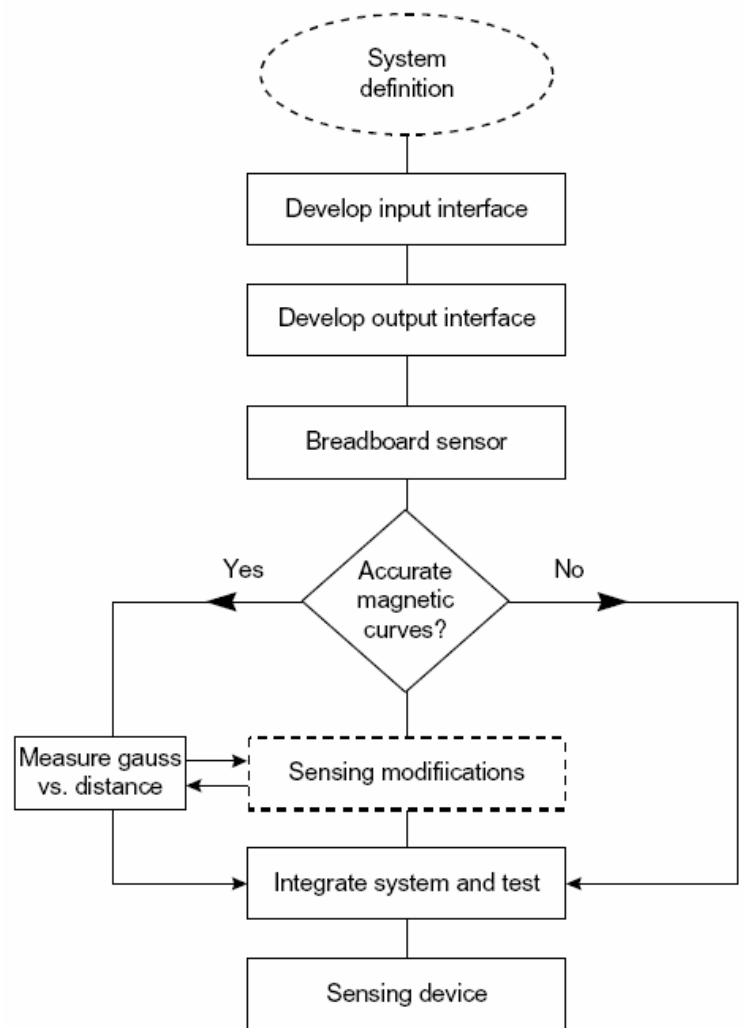
Ο σχεδιασμός της διάταξης εισόδου απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στη χρήση καλών μηχανικών – σχεδιαστικών πρακτικών. Σημασία θα πρέπει να δοθεί στα παρακάτω:

- Τοποθέτηση μαγνητών, κομμάτια πόλων, αισθητήριες συσκευές Hall και συγκεντρώσεις μαγνητικών γραμμών
- Τοποθέτηση και ρυθμίσεις που μπορεί να απαιτηθούν κατά την συναρμολόγηση
- Χαρακτηριστικά θερμικής διαστολής όπου συναντώνται ακραίες θερμοκρασίες
- Αύξηση ανοχών

Το επόμενο βήμα είναι η ανάπτυξη της διάταξης εξόδου. Σε πολλές εφαρμογές, η διάταξη εξόδου θα είναι αρκετά απλή, αποτελούμενη από μια απλή pull down ή pull up αντίσταση. Άλλες εφαρμογές μπορεί να απαιτούν τη σχεδίαση ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος, για παράδειγμα, όταν ο αισθητήρας Hall θα πρέπει να αποκτήσει μνήμη (buffer).

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στα προβλήματα θορύβου που πιθανά θα δημιουργηθούν όταν στο χώρο υπάρχουν υψηλά επίπεδα ηλεκτρικού θορύβου ή όταν χρησιμοποιούνται μεγάλοι μήκους καλώδια για τη σύνδεση της αισθητήριας συσκευής με το σύστημα.

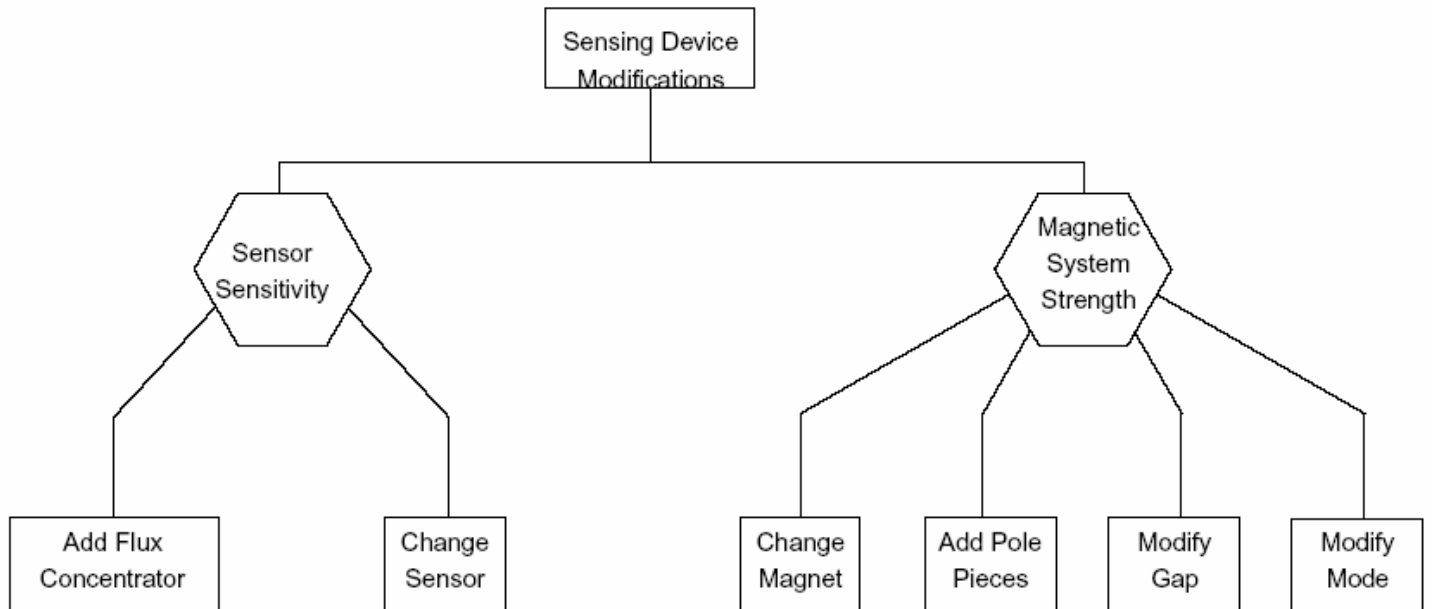
Ένα αρχικό σχέδιο για όλα τα βασικά εξαρτήματα της συσκευής είναι πλέον διαθέσιμο: η διάταξη εισόδου, το μαγνητικό σύστημα, ο αισθητήρας Hall, και η διάταξη εξόδου. Το επόμενο βήμα είναι να πραγματοποιήσουμε τη συσκευή πάνω σε ένα breadboard, με βάση το αρχικό σχέδιο. Η συσκευή



Εικόνα 2.25 Λεπτομερής διαδικασία σχεδιασμού. Αισθητήρας Hall μη - ακριβείας

μετρήσεων πάνω σε breadboard είναι πολύ καλή περίπτωση για να κάνουμε τις τελικές ρυθμίσεις, μικρές μετατροπές, ή σε μερικές περιπτώσεις, μεγάλες αλλαγές στον σχεδιασμό.

Μόλις η συσκευή ολοκληρωθεί πάνω στο breadboard, πρέπει να παρθεί μια απόφαση όσον αφορά την ανάγκη για τις ακριβείς καμπύλες του μαγνητικού συστήματος. Το μαγνητικό σύστημα θα παρουσιάσει ένα φάσμα από τιμές μαγνητικών γραμμών στην αισθητήρια συσκευή ως συνάρτηση της εισόδου της



Εικόνα 2.26 Επιλογές μετατροπών μιας συσκευής αισθητήρα

συσκευής. Στην κατάσταση λειτουργίας, η μέγιστη μαγνητική ροή του μαγνητικού συστήματος πρέπει να ξεπερνάει το μέγιστο επίπεδο λειτουργίας του αισθητήρα Hall. Αντίστοιχα, για την κατάσταση απελευθέρωσης, η ελάχιστη μαγνητική ροή του μαγνητικού συστήματος πρέπει να είναι μικρότερη από το ελάχιστο σημείο απελευθέρωσης κάτω από τις χειρότερες συνθήκες.

Η ευαισθησία της συσκευής μπορεί να αυξηθεί είτε επιλέγοντας αισθητήρια συσκευή με χαμηλότερο σημείο λειτουργίας (gauss), αν υπάρχει. Η δύναμη του πεδίου του μαγνητικού συστήματος μπορεί να αυξηθεί με μια σειρά από τρόπους:

- Ο μαγνήτης μπορεί να αντικατασταθεί από έναν με μεγαλύτερη πυκνότητα ροής.
- Κομμάτια πόλων μπορούν να προστεθούν ώστε να συγκεντρώνουν τη ροή στην περιοχή ευαισθησίας της συσκευής.
- Το κενό μεταξύ του μαγνήτη και του αισθητήρα μπορεί να μειωθεί.
- Δευτερεύοντες μαγνήτες μπορούν να προστεθούν στο σύστημα ώστε να αλλάξουν τη ρύθμιση.

Σημειώστε πως κάθε μια από αυτές τις τροποποιήσεις μπορεί να απαιτεί την αντίστοιχη μετατροπή στην διάταξη εισόδου.

Το τελικό βήμα στην προσέγγιση σχεδίασης για αισθητήριες συσκευές ψηφιακής εξόδου που δεν απαιτούν ακρίβεια είναι να ενσωματώσουμε τον αισθητήρα στο σύστημα και να το δοκιμάσουμε προκειμένου να εξασφαλίσουμε ότι έχουν πραγματοποιηθεί όλοι οι σχεδιαστικοί στόχοι. Η ενσωμάτωση του αισθητήρα περιλαμβάνει σχέδια, θέση και τοποθέτηση όλων των εξαρτημάτων του αισθητήρα,

εσωτερικές συνδέσεις και ηλεκτρική καλωδίωση. Περιλαμβάνει επίσης την καταγραφή οποιονδήποτε διαδικασιών που μπορεί να απαιτηθούν κατά την τελική κατασκευή. Το αποτέλεσμα ενός επιτυχημένου ελέγχου του ενσωματωμένου αισθητήρα είναι το οριστικοποιημένο σχέδια του αισθητήρα.

2.3.7 Σχεδίαση Εφαρμογών Ακριβείας

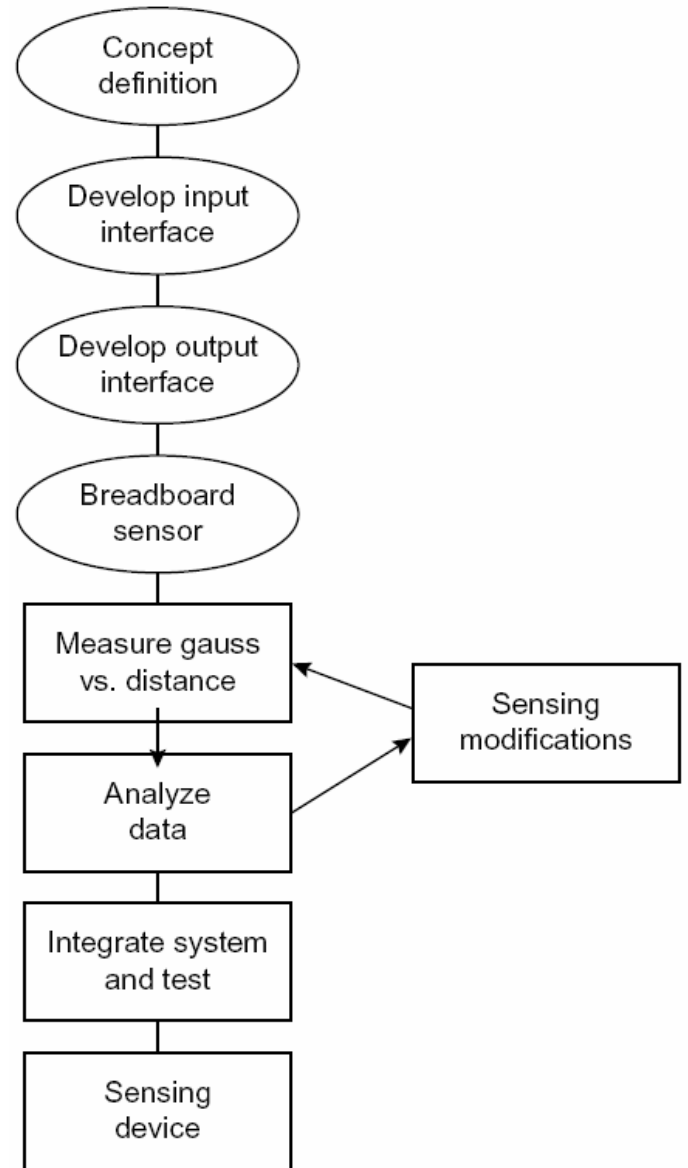
Η σχεδιαστική προσέγγιση για αισθητήρες Hall ακριβείας, ψηφιακής εξόδου είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιούμε όταν δεν απαιτείται ακρίβεια με μόνη διαφορά ότι το ακριβές σημείο λειτουργίας και/ή απελευθέρωσης είναι μεγάλης σημασίας. Οι διάφοροι συντελεστές που εξετάστηκαν παραπάνω βρίσκουν εφαρμογή και εδώ.

Η αξιόπιστη λειτουργία από μόνη της δεν είναι επαρκής για ψηφιακού τύπου αισθητήρες ακριβείας. Τα σημεία λειτουργίας και απελευθέρωσης πρέπει να βρίσκονται εντός καθορισμένων ορίων ανοχής. Οι δύο τύποι σφαλμάτων που θα επηρεάσουν τη λειτουργία ακριβείας είναι:

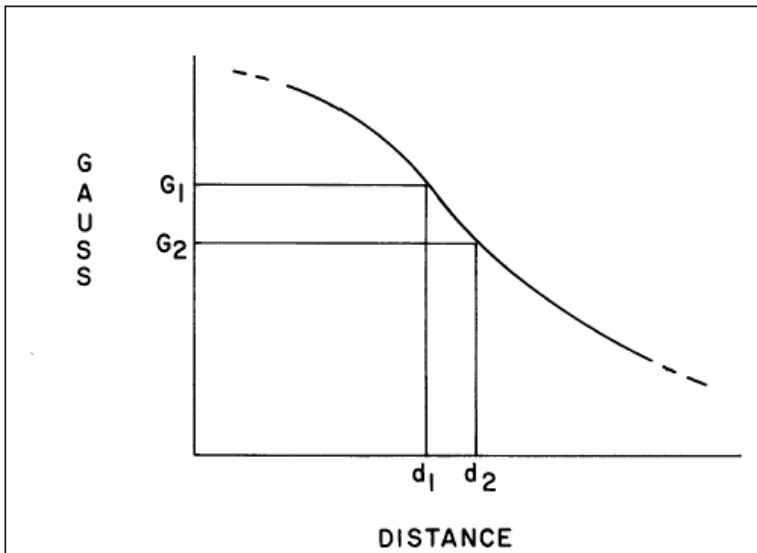
- Αποκλίσεις μεταξύ μονάδων του συστήματος οι οποίες προέρχονται από ανοχές σε εξαρτήματα, κατασκευαστικές ανοχές και ανοχές που δημιουργούνται κατά τη συναρμολόγηση.
- Αποκλίσεις κατά τη λειτουργία που προέρχονται από αλλαγές στη θερμοκρασία, μεταβατικά φαινόμενα στην τάση κλπ.

Η επιρροή και των δυο αυτών πηγών σφαλμάτων μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας την ευαισθησία της αισθητήριας συσκευής στην είσοδό της ή μειώνοντας την ευαισθησία στις πηγές σφαλμάτων. Οι αποκλίσεις από μονάδα σε μονάδα μπορούν να αντισταθμιστούν ρυθμίζοντας τον αισθητήρα κατά τη συναρμολόγηση ή με το καλιμπράρισμα του ολοκληρωμένου αισθητήρα. Μια λεπτομερή διαδικασία σχεδιασμού για αισθητήριες συσκευές ακριβείας, ψηφιακής εξόδου φαίνεται στην εικόνα 2.27.

Τα αρχικά βήματα, ο καθορισμός της ιδέας μέσω της κατασκευής στο breadboard είναι παρόμοια με αυτά που παρουσιάστηκαν για τα μη-ακρίβειας στην εικόνα 2.25. Επιπλέον μελέτη στο σχεδιασμό της

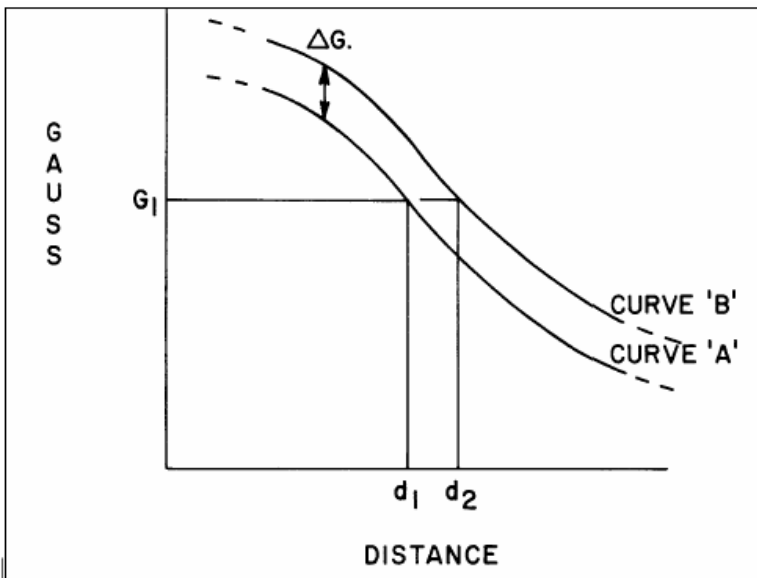


Εικόνα 2.27 Λεπτομερής διαδικασία σχεδιασμού. Αισθητήρας Hall ακριβείας



Εικόνα 2.28 Γραφική ανάλυση των χαρακτηριστικών λειτουργίας gauss συναρτήσεως της απόστασης

ορίσουμε G_1 το μαγνητικό σημείο λειτουργίας του αισθητήρα και d_1 τη θέση λειτουργίας. Αν το σημείο λειτουργίας αλλάξει σε G_2 (εξαιτίας μεταβολών από μονάδα σε μονάδα εντός του αισθητήρα, αλλαγών στη θερμοκρασία, κλπ.), τότε η θέση λειτουργίας θα είναι d_2 . Έτσι, μια μεταβολή στον αισθητήρα ($G_1 - G_2$) θα έχει σαν αποτέλεσμα σφάλμα ($d_2 - d_1$). Σημειώστε ότι:



Εικόνα 2.29 επίδραση της μεταβολής στον μαγνητισμό λειτουργίας

Το σφάλμα μέτρησης $d_2 - d_1$ δίνεται από την εξίσωση:

$$d_2 - d_1 = \frac{G}{(\Delta G / \Delta d)}$$

διάταξης εισόδου αποτελεί μέρος για τη ρύθμιση της συσκευής στο να λειτουργεί σε ένα καθορισμένο σημείο (εφόσον απαιτείται).

Μόλις η αισθητήρια συσκευή φτιαχτεί στο breadboard, είναι απαραίτητο να μετρηθεί η αντίσταση έναντι του μαγνητικού πεδίου (gauss) μεταξύ του μαγνήτη και του αισθητήρα. Ανάλυση της μαγνητικής καμπύλης που προκύπτει θα καθορίσει την ευαισθησία της συσκευής σε μεταβολές των χαρακτηριστικών των σημείων λειτουργίας/ απελευθέρωσης. Ένα μέρος μιας τυπικής μαγνητικής γραμμής φαίνεται στην εικόνα 2.28.

Για να αναλύσουμε αυτή τη καμπύλη, ας

$$d_2 - d_1 = \frac{(G_2 - G_1)}{(\Delta G / \Delta d)}$$

Όπου:

- $\Delta G / \Delta d$ είναι η κλίση της μαγνητικής καμπύλης στο G_1 . Μεγαλύτερη κλίση (μεγαλύτερο $\Delta G / \Delta d$) θα έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερο σφάλμα.

Η ευαισθησία της αισθητήριας συσκευής σε μεταβολές του μαγνητικού συστήματος μπορεί να προσδιοριστεί εξετάζοντας τη μαγνητική καμπύλη της εικόνας 2.29. Δείχνει ένα μέρος της μαγνητικής καμπύλης (Curve A) και την ίδια καμπύλη αφού έχει μεταβληθεί από ένα επίπεδο gauss κατά ΔG (Curve B).

Και πάλι, μεγαλύτερη κλίση θα έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερο σφάλμα μέτρησης. Το βήμα της ανάλυσης προϋποθέτει τον καθορισμό αν η κλίση της μαγνητικής καμπύλης είναι αρκετά μεγάλη ώστε τα σημεία λειτουργίας/ απελευθέρωσης του αισθητήρα να συναντούν τα όρια ανοχής του αισθητήρα.

Αρκετές επιλογές μετατροπών είναι διαθέσιμες σε περίπτωση που η ανάλυση δείξει ότι βρισκόμαστε έξω από τα όρια ανοχής του αισθητήρα. Μια επιλογή θα ήταν η αλλαγή του αισθητηρίου Hall με ένα με διαφορετικά σημεία λειτουργίας/ απελευθέρωσης ώστε να λειτουργεί σε διαφορετικό μέρος της μαγνητικής καμπύλης. Η μαγνητική γραμμή επίσης μπορεί να υποστεί μεταβολές, μετατρέποντας το μαγνητικό σύστημα. Μια τρίτη εναλλακτική είναι η ξεχωριστή ρύθμιση κάθε αισθητήρα μετά τη συναρμολόγηση. Κάθε μια απ' αυτές τις αλλαγές απαιτεί μια αντίστοιχη αλλαγή στη διάταξη εισόδου.

Το τελικό βήμα στη διαδικασία σχεδιασμού (εικόνα 2.27) είναι να ενσωματώσουμε την αισθητήρια συσκευή στο σύστημα και να κάνουμε τεστ ώστε να καθορίσουμε ότι όλοι οι σχεδιαστικοί στόχοι έχουν επιτευχθεί. Επιτυχημένα τεστ της αισθητήριας συσκευής μέσα στο σύστημα ολοκληρώνουν το σχέδιο.

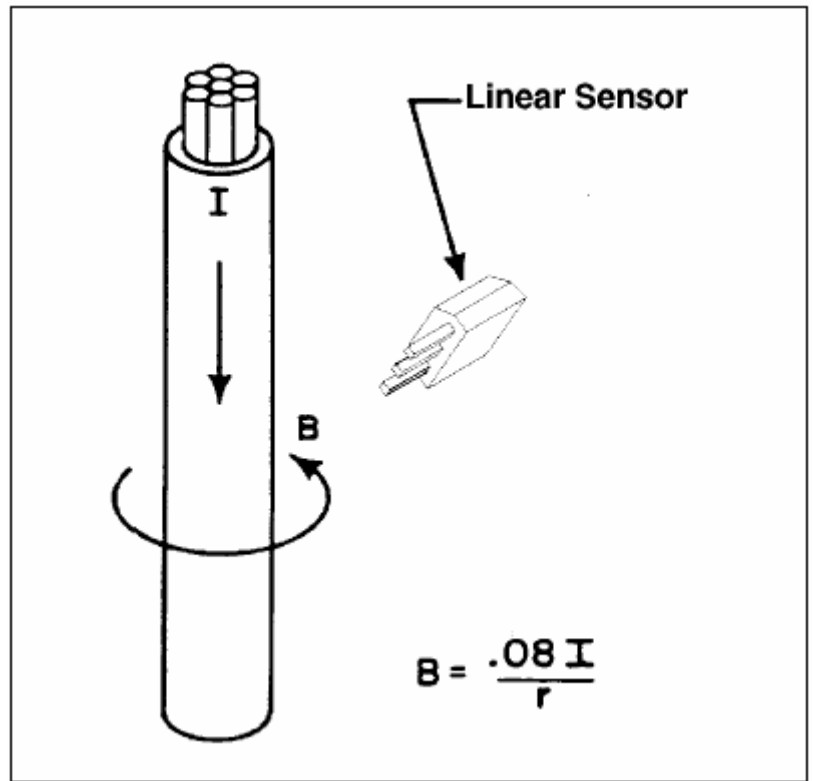
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ HALL

3.1 Μέτρηση Ρεύματος.

3.1.1 Εισαγωγή

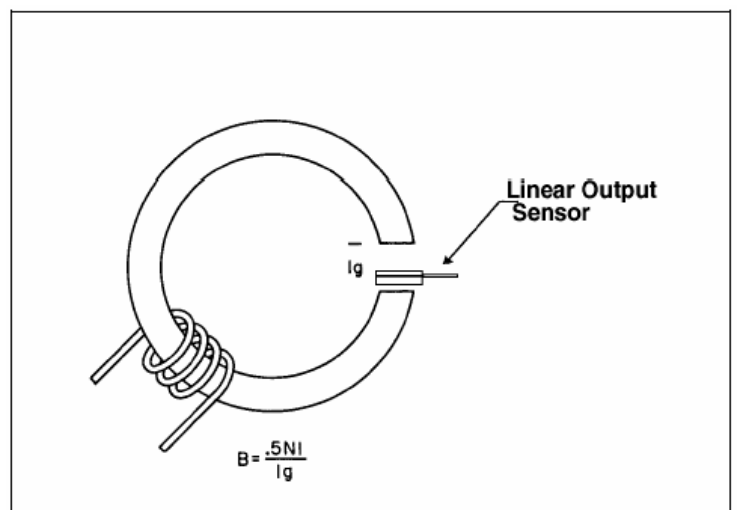
Οι αισθητήρες Hall γραμμικής εξόδου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση ρευμάτων εύρους από 250mA μέχρι χιλιάδες Ampere. Η απομονωμένη αναλογική τάση που παράγεται από τον αισθητήρα μπορεί να τροποποιηθεί προσθέτοντας ενισχυτές ή συγκριτές ώστε να επιτύχουμε ψηφιακή έξοδο, αλλαγή επιπέδου, θερμοκρασιακή απόσβεση, ρύθμιση κέρδους ή άλλες επιθυμητές παραμέτρους. Οι γραμμικοί αισθητήρες προσφέρουν υψηλή απόκριση συχνότητας (AC) και μετρήσεις σταθερών ρευμάτων (DC). Όταν ένας γραμμικός αισθητήρας τοποθετείται κοντά σε έναν αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα, η τάση εξόδου που αναπτύσσεται είναι ανάλογη της έντασης του μαγνητικού πεδίου που περιβάλλει τον αγωγό. Αφού, η ένταση του πεδίου σε ένα συγκεκριμένο σημείο είναι ανάλογη του επιπέδου του ρεύματος.



Εικόνα 3.1 Απλός αισθητήρας ρεύματος

Η πιο απλή διάταξη αισθητήρα ρεύματος αποτελείται από ένα αισθητήρα γραμμική εξόδου τοποθετημένο κοντά σε έναν αγωγό όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1. Αυτού του τύπου η διάταξη χρησιμοποιείται συνήθως για να μετρήσουμε σχετικά μεγάλα ρεύματα σε γραμμές υψηλής τάσης ή σε εξοπλισμό που βρίσκεται σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ευαισθησία του απλού συστήματος ανίχνευσης ρεύματος που φαίνεται στην εικόνα 3.1 μπορεί να αυξηθεί αν καταφέρουμε να ενισχύσουμε το μαγνητικό πεδίο που αντιλαμβάνεται ο αισθητήρας. Έτσι οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο υπερτάσεων, υποτάσεων και βλάβες φάσης για μεγάλες ηλεκτρικές μηχανές.



Εικόνα 3.2 Αισθητήρας ρευμάτων χαμηλής έντασης

Η εικόνα 3.2 δείχνει έναν ακόμα πιο ευαίσθητο αισθητήρα ρεύματος. Αυτός αποτελείται από ένα δακτυλιοειδή πυρήνα με ένα γραμμικό αισθητήρα τοποθετημένο στο κενό. Ο πυρήνας περικλείει τον αισθητήρα και συμπεριφέρεται σαν ένας επιπρόσθετος συλλέκτης των μαγνητικών γραμμών. Αυτοί οι αισθητήρες είναι ικανοί να μετρήσουν ρεύματα από 250mA μέχρι περίπου 1000A. Η επιλογή του υλικού του πυρήνα για την περιέλιξη απαιτεί μελέτη. Για παράδειγμα, ένα είδος ατσαλιού έχει υψηλά επίπεδα παραμένουτος μαγνητισμού. Η μαγνητική επαγωγή παραμένει μετά την απομάκρυνση της μαγνητεγερτικής δύναμης, καθιστώντας την επιλογή αυτή ακατάλληλη. Τα υλικά που περιέχουν φερίτη, μέταλλα σιλικόνης κ.α. είναι λογικές επιλογές λόγω της υψηλής διαπερατότητάς τους και του μικρού παραμένουτος μαγνητισμού.

Η τελική επιλογή πρέπει να βασίζεται σε πραγματικές δοκιμές πάνω στην εφαρμογή. Οι τιμές που δίνονται για τον παραμένουτο μαγνητισμό από τους προμηθευτές των υλικών αναφέρονται συνήθως σε κλειστό μαγνητικό περιβάλλον. Οι αισθητήρες ρεύματος απαιτούν μεγάλα κενά αέρος, έτσι πρέπει οι προδιαγραφές της εφαρμογής να μετρηθούν. Παρόλα αυτά οι τιμές που δίνουν οι κατασκευαστές μας παρέχουν κάποιες σχετικές ενδείξεις για τη συμπεριφορά του κάθε υλικού. Η θέση του τυλίγματος στον δακτυλιοειδή πυρήνα δεν έχει σημασία. Το σύρμα που χρησιμοποιείται θα πρέπει να μπορεί να αντέχει στο μέγιστο ρεύμα μόνιμα. Όσο μεγαλύτερα όρια αντοχής έχει το καλώδιο, τόσο μικρότερη πτώση τάσης εμφανίζεται.

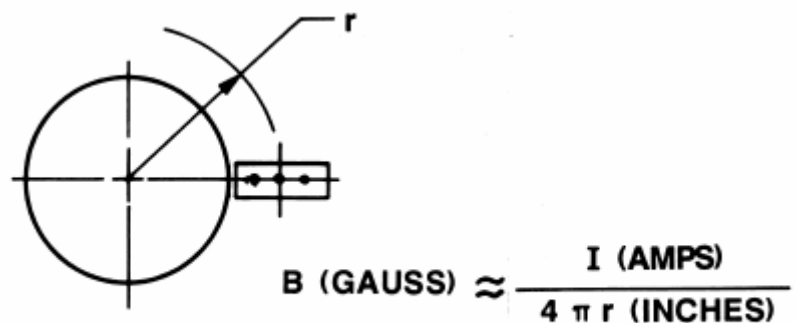
Οι αισθητήρες ρεύματος που κάνουν χρήση δακτυλίων είναι χρήσιμοι σε συστήματα τα οποία απαιτούν ένα ευρύ δυναμικό φάσμα, καθόλου αντίσταση σειράς και γραμμική μέτρηση ρεύματος. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι ότι ο αισθητήρας μπορεί να δημιουργήσει απομόνωση μεταξύ δυο διαφορετικών πηγών τροφοδοσίας. Τέτοιες διατάξεις συναντάμε σε εφαρμογές όπως ελεγκτές κινητήρων με ανάδραση ρεύματος.



Εικόνα 3.3 Τυπικός αισθητήρας ρεύματος

3.1.2 Αισθητήρες Ρεύματος

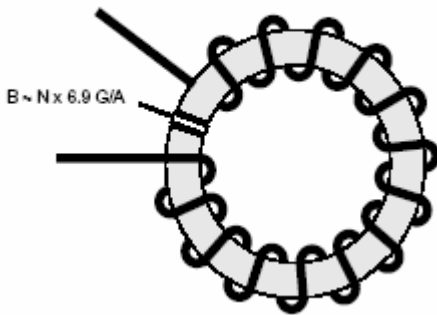
Οι συσκευές Hall είναι εξαιρετικοί αισθητήρες μέτρησης ρεύματος. Το εύρος απόκρισής τους κυμαίνεται από σταθερό ρεύμα (dc) μέχρι της τάξης των kHz. Επίσης



Εικόνα 3.4 Τύπος υπολογισμού της μαγνητικής πυκνότητας

δεν είναι απαραίτητο να διακοπεί ο αγωγός σε εφαρμογές υψηλών ρευμάτων. Συνήθως, το μαγνητικό πεδίο γύρω από έναν αγωγό δεν είναι αρκετά έντονο ώστε να διεγείρει έναν αισθητήρα Hall (εικόνα 3.4).

Η ακτίνα (r) μετριέται από το κέντρο του αγωγού μέχρι την ενεργή περιοχή της συσκευής Hall. Με ακτίνα 1,25cm και ρεύμα 1000A, θα υπάρχει μια μαγνητική πυκνότητα της τάξης των 159G στη συσκευή Hall. Για μικρότερα ρεύματα χρησιμοποιούμε δακτυλιοειδή διάταξη ή κλειστό μαγνητικό κύκλωμα ώστε να αυξήσουμε τη πυκνότητα των μαγνητικών γραμμών, όπως φαίνεται στις εικόνες 3.5 και 3.6.



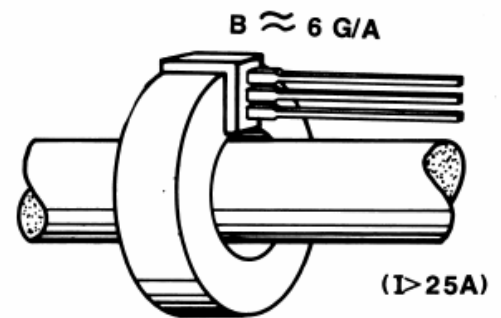
Εικόνα 3.5

εφαρμογές χαμηλής συχνότητας.

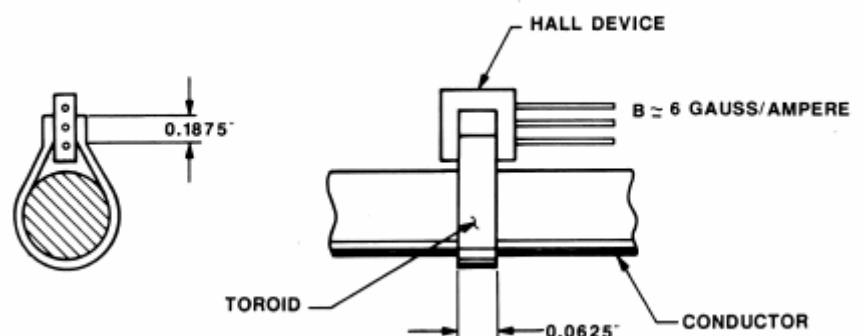
Το κυρίως θέμα είναι ο πυρήνας να διατηρεί ελάχιστο μαγνητικό πεδίο όταν το ρεύμα ελαττώνεται στο μηδέν, έτσι ώστε η πυκνότητα ροής στο κενό αέρος να είναι μια γραμμική συνάρτηση του ρεύματος και το κενό αέρος να είναι σταθερό για όλο το εύρος της θερμοκρασίας λειτουργίας.

Οι διαστάσεις της κάθετης διατομής του πυρήνα είναι τουλάχιστον διπλάσιες από το κενό αέρος ώστε να διασφαλιστεί ένα ομογενές πεδίο στο κενό. Για παράδειγμα, ένα δακτυλιοειδές με κενό 0.15cm θα πρέπει να έχει διατομή τουλάχιστον 0,3cm. Ένα άλλο παράδειγμα και φτηνή εφαρμογή φαίνεται στην εικόνα 3.7.

Ένα δακτυλιοειδές με τη σωστή διάμετρο σχηματίζεται από ημίσκληρο σίδηρο με διαστάσεις 0,158cm πάχος και 0,476cm πλάτος. Οι άκρες είναι σχεδιασμένες ώστε να προσαρμόζονται σε κάθε πλευρά του του κεντρικού τμήματος της συσκευής Hall. Ένα πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι το δακτυλιοειδές μπορεί να τοποθετηθεί γύρω από έναν αγωγό χωρίς να χρειάζεται να διακοπεί ο αγωγός.



Εικόνα 3.6

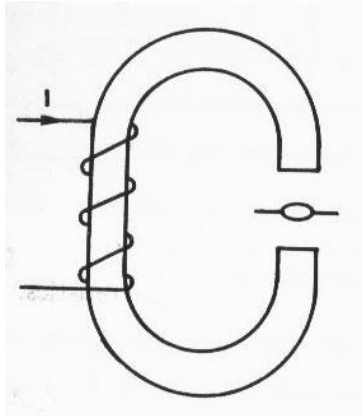


Εικόνα 3.7

3.1.3 Πείραμα 1: Χρήση του στοιχείου Hall σε μετρήσεις ρεύματος

Εισαγωγή

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ισχύος πολλές φορές απαιτείται η μέτρηση του ρεύματος χωρίς την παρεμβολή αμπερομέτρου στο κύκλωμα. Σ' αυτές τις περιπτώσεις για τη μέτρηση του ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί το στοιχείο Hall. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο σύστημα της εικόνας 3.8 που αποτελείται από ένα πηνίο τυλιγμένο πάνω σε ένα πυρήνα σιδήρου. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται είναι ανάλογο του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο.



Εικόνα 3.8 Ηλεκτρομαγνήτης

Όπως ξέρουμε από τη θεωρία του μαγνητισμού, τα μαγνητικά συστήματα συμπεριφέρονται παρόμοια με τα ηλεκτρικά. Η εξίσωση που αναλογεί στο νόμο του Ohm για μαγνητικά κυκλώματα είναι:

$$\Phi = F/R$$

Όπου: F = η μαγνητεγερτική δύναμη
 R = η μαγνητική αντίσταση
 Φ = η μαγνητική ροή

Η εξίσωση που δίνει την μαγνητεγερτική δύναμη για ένα πηνίο που διαρρέεται από ρεύμα I και σπείρες N είναι:

$$F = NI$$

Η εξίσωση που δίνει τη μαγνητική αντίσταση ενός μαγνητικού δρόμου είναι:

$$R = \frac{L}{\mu_o \mu A}$$

Όπου: L = το μήκος του δρόμου της μαγνητικής ροής σε μέτρα (m)
 μ = η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού
 μ_o = η μαγνητική διαπερατότητα του κενού = 1.26×10^{-6} H/m
 A = το εμβαδόν της διατομής του μαγνητικού δρόμου

Τέλος, η εξίσωση που δίνει την μαγνητική επαγωγή είναι $B = \Phi/A$

Σκοπός της Άσκησης

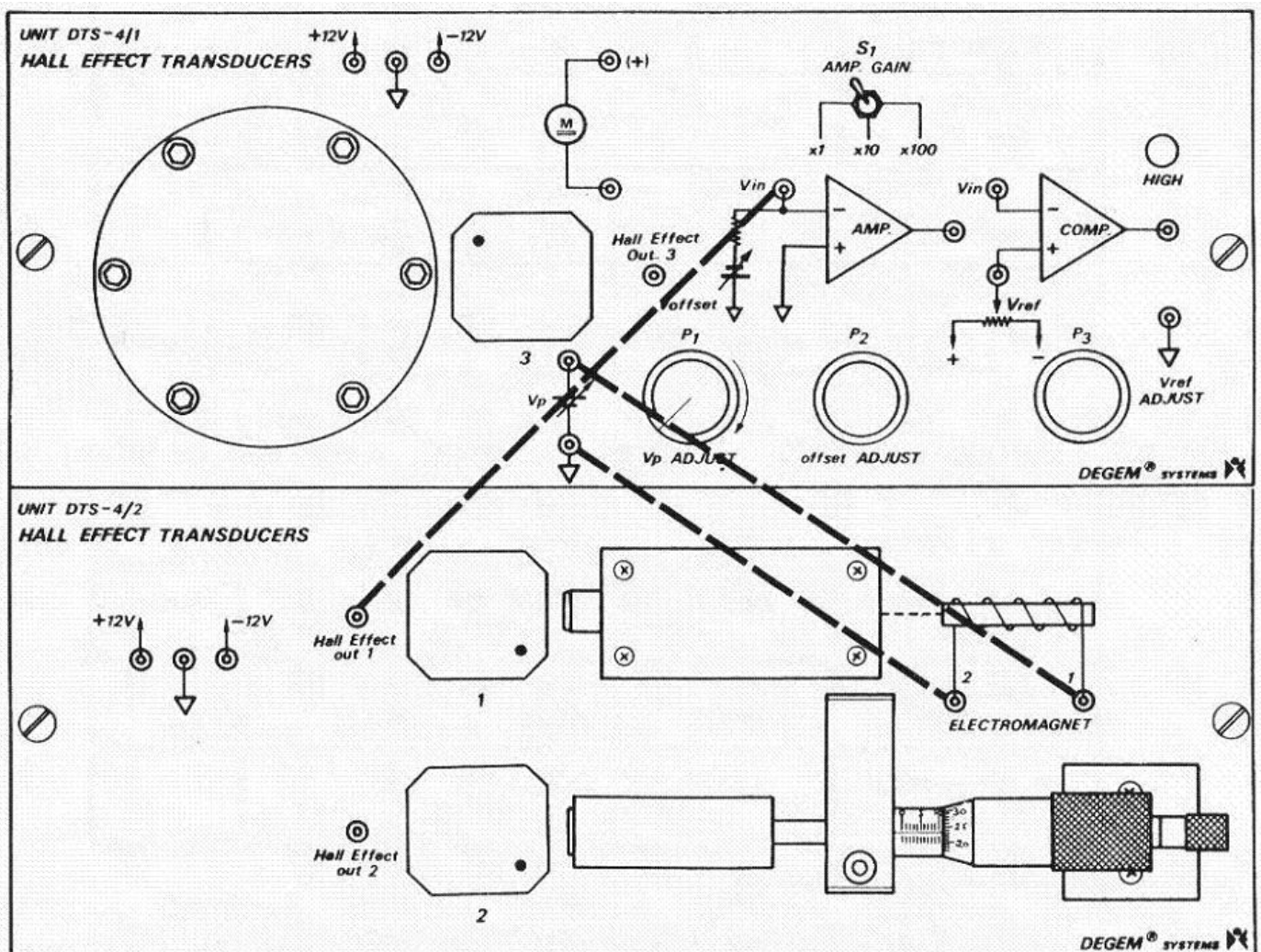
1. Να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο το στοιχείο Hall χρησιμοποιείται για μετρήσεις ρεύματος.
2. Να σχεδιαστεί η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου του στοιχείου Hall σαν συνάρτηση του ρεύματος του ηλεκτρομαγνήτη.
3. Να γίνουν κατανοητά τα γραμμικά χαρακτηριστικά και η υστέρηση του όλου συστήματος και να εξεταστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν αυτά τα χαρακτηριστικά.

Πειραματική Διαδικασία

1. Συνδέστε τη συσκευή No1 στην υποδοχή No1.
2. Συνδέστε το ψηφιακό πολύμετρο στην είσοδο του ηλεκτρομαγνήτη. Μετρήστε την αντίσταση του πηνίου και γράψτε την τιμή που βρήκατε:

$$R = 149,5 \Omega$$

3. Αποσυνδέστε το πολύμετρο και πραγματοποιείστε τις παρακάτω συνδέσεις στο σύστημα όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9.
 - a. θετικός πόλος της πηγής τάσης V_p στην είσοδο No1 του ηλεκτρομαγνήτη
 - b. αρνητικός πόλος της ίδιας πηγής στην είσοδο No2 του ηλεκτρομαγνήτη
 - c. έξοδος 1 του στοιχείου Hall στην είσοδο V_m του ενισχυτή



Εικόνα 3.9 Κυκλωματικό Διάγραμμα

4. Τοποθετήστε το διακόπτη S1 στη θέση x100.
5. Θέστε σε λειτουργία την τροφοδοσία.
Σημείωση: για να εξασφαλίσετε σταθερές μετρήσεις περιμένετε λίγο πριν πάρετε τις μετρήσεις σας.
6. Συνδέστε το πολύμετρο στην έξοδο της πηγής τάσης V_p . Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο P1 έτσι ώστε να έχετε μηδενική τάση στην έξοδο. Αποσυνδέστε το πολύμετρο.
7. Συνδέστε το πολύμετρο στην έξοδο του ενισχυτή. Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο P2 έτσι ώστε η τάση στην έξοδο του ενισχυτή να είναι μηδενική. Αποσυνδέστε το πολύμετρο.
8. Συνδέστε το πολύμετρο στην έξοδο της πηγής τάσης V_p . Ρυθμίστε το P1 έτσι ώστε να έχετε 0.5V στην είσοδο του πηνίου του ηλεκτρομαγνήτη.
9. Μετρήστε με το πολύμετρο την τάση εξόδου του ενισχυτή και σημειώστε την τιμή στον πίνακα 1.

Τάση εισόδου Πηνίου Ηλεκτρομαγνήτη (V)	0.5V	1V	2V	4V	8V
Τάση Εξόδου Ενισχυτή (V)	0,33	0,55	0,90	1,63	3,10
Ρεύμα Πηνίου Ηλεκτρομαγνήτη (mA)	3,3	6,7	13,4	26,8	53,5

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

10. Επαναλάβετε τα βήματα 9 και 10 για κάθε τάση εισόδου του πηνίου που φαίνεται στον πίνακα 1 (μπορείτε να προσθέσετε και ενδιάμεσες τιμές).
11. Ρυθμίστε την τάση V_p της πηγής χρησιμοποιώντας το ποτενσιόμετρο P1 έτσι ώστε να πάρει τις τιμές που δίνονται στον πίνακα 2. Επαναλάβετε το βήμα 10.

Τάση εισόδου Πηνίου Ηλεκτρομαγνήτη (V)	8V	4V	2V	1V	0.5V
Τάση Εξόδου Ενισχυτή (V)	3,18	1,91	1,25	0,94	0,78
Ρεύμα Πηνίου Ηλεκτρομαγνήτη (mA)	53,5	26,8	13,4	6,7	3,3

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

12. Διακόψτε την τροφοδοσία.
13. Αποσυνδέστε την συσκευή Νο1 (λευκή τελεία) από την υποδοχή της.
14. Συνδέστε τη συσκευή Νο2 (κίτρινη τελεία) στην υποδοχή Νο1.
15. Επαναλάβετε τα βήματα 6 με 11 σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 3.

Τάση εισόδου Πηνίου Ηλεκτρομαγνήτη (V)	0.5V	1V	2V	4V	8V
Τάση Εξόδου Ενισχυτή (V)	0,92	1,32	2,10	3,55	6,30
Ρεύμα Πηνίου Ηλεκτρομαγνήτη (mA)	3,3	6,7	13,4	26,8	53,5

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Τάση εξόδου του Hall με σίδηρο σαν συνάρτηση αυξητικών τιμών στο ρεύμα πηνίου

16. Επαναλάβετε σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 4.

Τάση εισόδου Πηνίου Ηλεκτρομαγνήτη (V)	8V	4V	2V	1V	0.5V
Τάση Εξόδου Ενισχυτή (V)	6,40	4,05	2,91	2,33	1,99
Ρεύμα Πηνίου Ηλεκτρομαγνήτη (mA)	53,5	26,8	13,4	6,7	3,3

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Τάση εξόδου του Hall με σίδηρο σαν συνάρτηση φθίνουσας φοράς στις τιμές ρεύματος του πηνίου

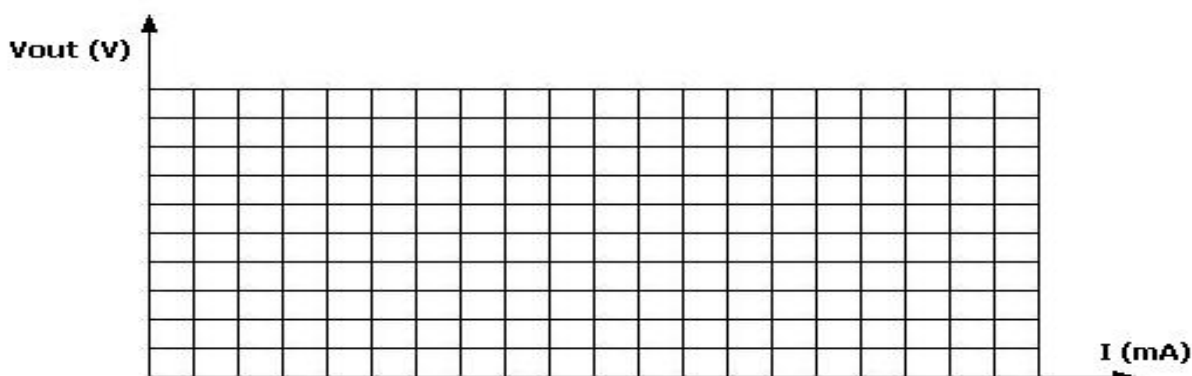
17. Διακόψτε την τροφοδοσία.

18. Αφαιρέστε όλες τις συνδέσεις που έχουν γίνει στο σύστημα.

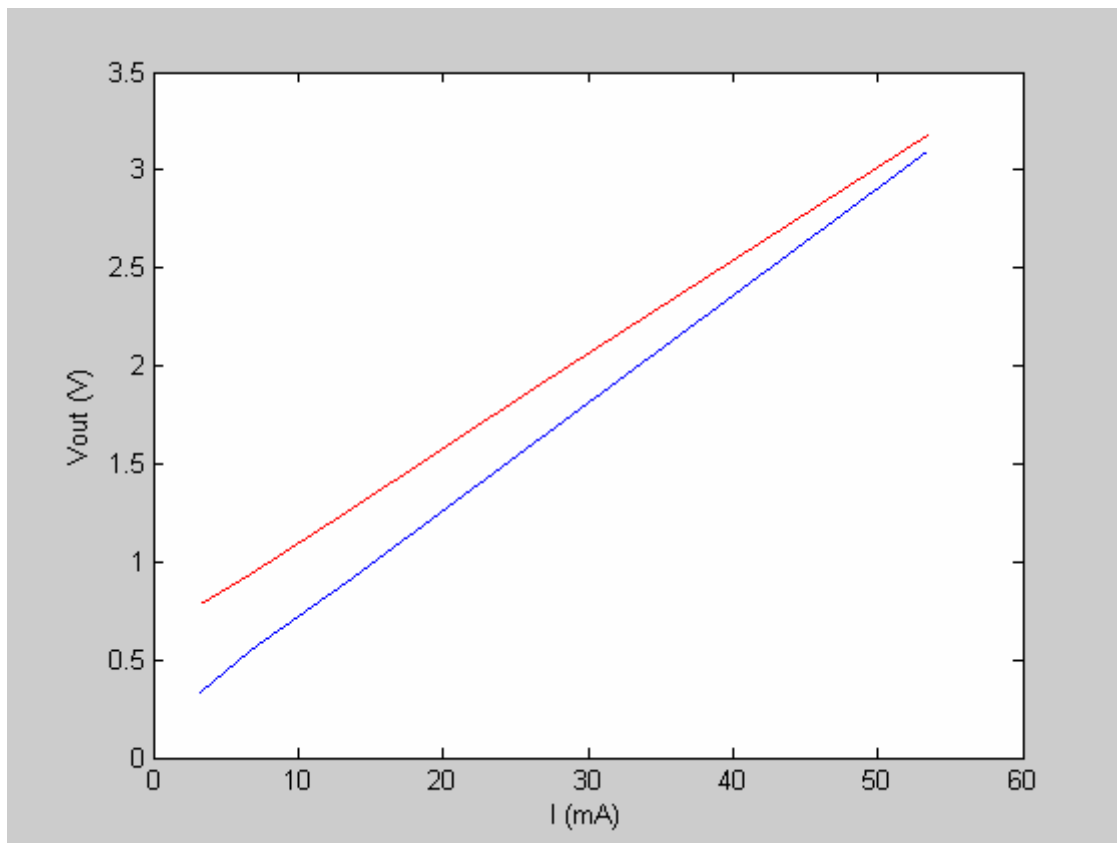
19. Αφαιρέστε τη συσκευή Νο2 (κίτρινη τελεία) από την υποδοχή Νο1.

Ανάλυση Αποτελεσμάτων

- Υπολογίστε και συμπληρώστε στους πίνακες 1,2,3 και 4 τις τιμές ρεύματος του πηνίου σύμφωνα με την αντίσταση του πηνίου που υπολογίστηκε στα πρώτα βήματα και των τιμών της τάσης εισόδου του ηλεκτρομαγνήτη.
- Σχεδιάστε στο σχήμα 1 την γραφική παράσταση της τάσης εξόδου του ενισχυτή σαν συνάρτηση του ρεύματος πηνίου του ηλεκτρομαγνήτη χρησιμοποιώντας τις τιμές των πινάκων 1 και 2 (πείραμα με τη συσκευή Νο1)

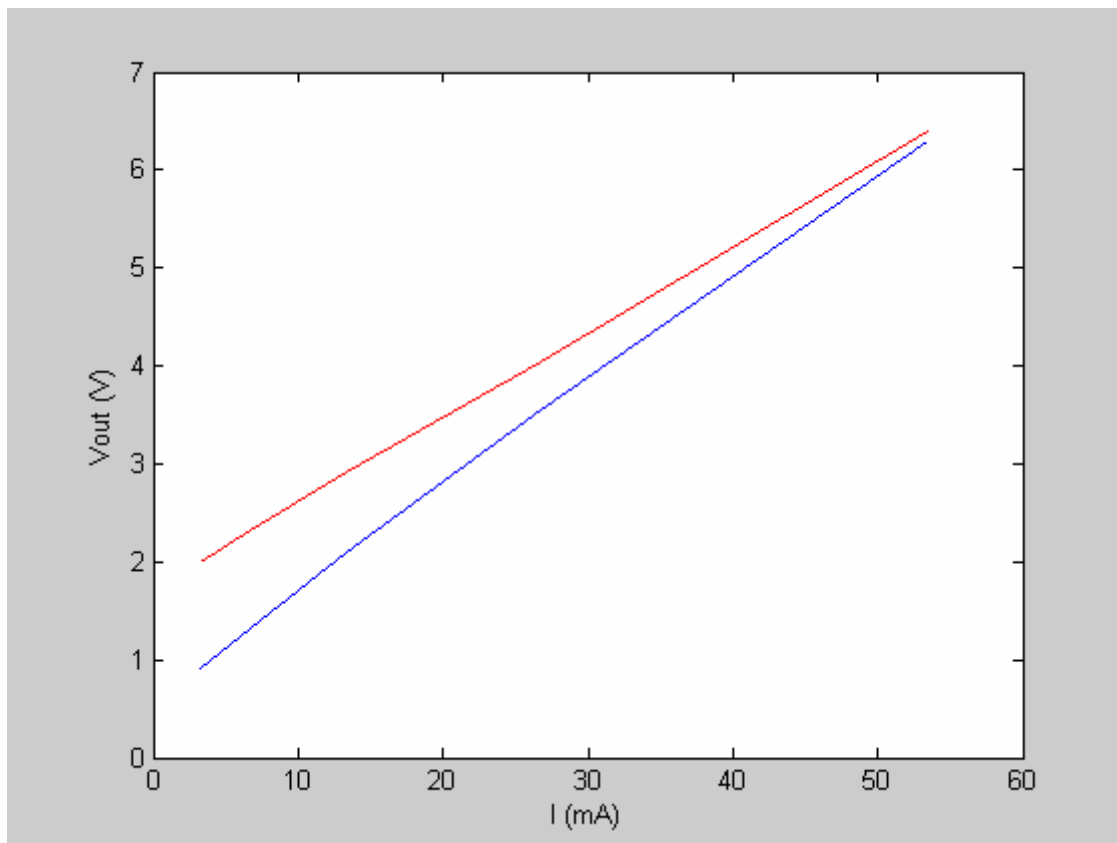


ΣΧΗΜΑ 1: Γράφημα της τάσης εξόδου του στοιχείου Hall χωρίς σίδηρο σαν συνάρτηση του ρεύματος του πηνίου



ΣΧΗΜΑ 2: Γράφημα της τάσης εξόδου του στοιχείου Hall χωρίς σίδηρο (No1) σαν συνάρτηση του ρεύματος του πηνίου

3. Προσδιορίστε από τα αποτελέσματα την περιοχή γραμμικής λειτουργίας. **6,7mA – 53,5mA ή από τα 0,94V – 3,18V**
4. Ποια είναι η ευαισθησία σ' αυτή την περιοχή; $(\Delta V/\Delta I)$ **2,24/0,0468 = 47,86V/A**
5. Ποια είναι η μέγιστη υστέρηση και που οφείλεται; **0,45V και οφείλεται στην λειτουργία του ενισχυτή κοντά στην αποκοπή, πολύ κοντά στα 0V**
6. Επαναλάβετε την παραπάνω διαδικασία για τις μετρήσεις των πινάκων 3 και 4 και συγκρίνετε το γράφημα με το αντίστοιχο του σχήματος 3. Διαφέρει η ευαισθησία και η υστέρηση; Διατυπώστε τις απόψεις σας.
 - Περιοχή γραμμικής λειτουργίας: **13,4mA – 53,5mA ή 2,91V – 6,40V**
 - Ευαισθησία στην περιοχή αυτή: **3,49 / 0,0401 = 87V/A**
 - Η μέγιστη υστέρηση είναι: **1,07V**
 - **Η ευαισθησία και η υστέρηση είναι σχεδόν διπλάσια μεγέθη σε σχέση με αυτά της συσκευής No 1. Αυτή η διαφορά οφείλεται στα διαφορετικά μαγνητικά χαρακτηριστικά των δυο συσκευών.**

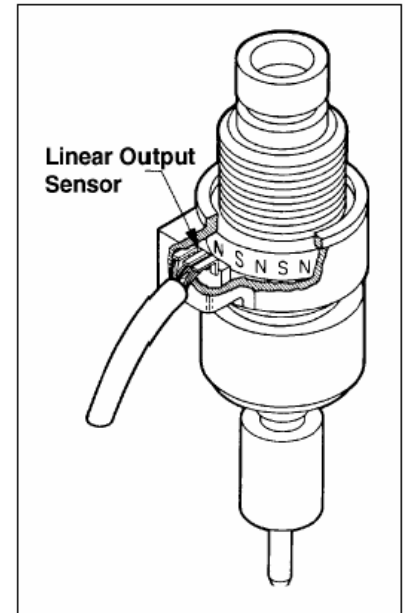


ΣΧΗΜΑ 3: Γράφημα της τάσης εξόδου του στοιχείου Hall με σίδηρο (No2) σαν συνάρτηση του ρεύματος του πηνίου

3.2 Μέτρηση περιστροφικής ταχύτητας.

3.2.1 Αισθητήρας ταχύτητας τοποθετημένος στη μετάδοση.

Η εικόνα 3.10 δείχνει μια απλή προσέγγιση για το σχεδιασμό ενός αισθητήρα ταχύτητας που τοποθετείται στη μετάδοση ενός αυτοκινήτου. Ένας διπολικός αισθητήρας ψηφιακής εξόδου ενεργοποιείται ανιχνεύοντας το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ένα περιστρεφόμενο μαγνήτη που οδηγείται από τον άξονα εξόδου του ταχυμέτρου. Τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι: το σήμα εξόδου δεν επηρεάζεται από αλλαγές στην ταχύτητα, γρήγορα απόκριση, μεγάλη ζωή και υψηλή αξιοπιστία συστήματος.

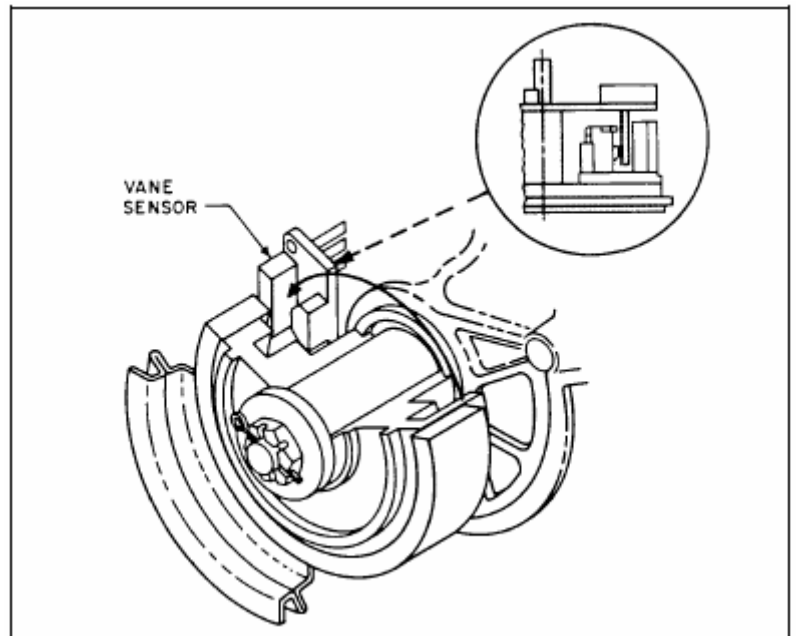


Εικόνα 3.10 αισθητήρας ταχύτητας

3.2.2 Θέση στρόφαλου ή αισθητήρας ταχύτητας

Ένας αισθητήρας με πτερύγια και εύρος θερμοκρασίας από -40 μέχρι 150 βρίσκεται τοποθετημένος στο στρόφαλο. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.11 η συχνότητα του σήματος εξόδου θα είναι ανάλογη με την ταχύτητα του στρόφαλου, ακόμα και για μηδενική ταχύτητα. Από τη στιγμή που το μαγνητικό πεδίο διακόπτεται, δονήσεις, ηλεκτρισμός και ανοχές έχουν μικρή επίδραση στο σήμα εξόδου.

εγκοπές στο χείλος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν σημάδια χρονισμού ώστε να δείχνουν τη θέση του στρόφαλου. Απευθείας διασύνδεση του αισθητήρα στον μικροεπεξεργαστή προσθέτει επιπλέον αξιοπιστία στο σύστημα.



Εικόνα 3.11 Αισθητήρας ταχύτητας τοποθετημένος στο στρόφαλο

3.2.3 Αισθητήρες Στροφών

Ο αισθητήρας στροφών είναι μια από τις πιο κοινές εφαρμογές ενός αισθητήρα Hall. Η μαγνητική ροή που απαιτείται για να

λειτουργήσει ο αισθητήρας μπορεί να επιτευχθεί από ξεχωριστούς μαγνήτες τοποθετημένους πάνω στο άξονα ή με ένα μαγνήτη δακτύλιο. Σχεδόν όλες οι λειτουργίες του αισθητήρα στροφών που φαίνονται

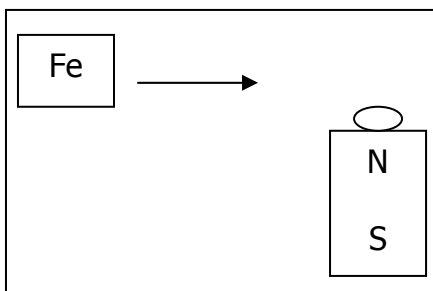
παρακάτω μπορούν να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας είτε ψηφιακής είτε αναλογικής εξόδου αισθητήρα. Η επιλογή εξαρτάται από τις απαιτήσεις εξόδου της εφαρμογής.

- Έλεγχος ταχύτητας
- Έλεγχος χρονισμού του κινητήρα
- Ανίχνευση μηδενικής ταχύτητας
- Ανίχνευση υπό ή υπερταχύτητας
- Ανίχνευση ταχύτητας δίσκου
- Ελεγκτής μετάδοσης αυτοκινήτου ή φορτηγού
- Κίνηση ανεμιστήρα
- Μετρητής στρωφών άξονα
- Μηχανές γεωτρήσεων
- Ανίχνευση περιστροφικής θέσης
- Μετρητής ροής
- Ταχύμετρα

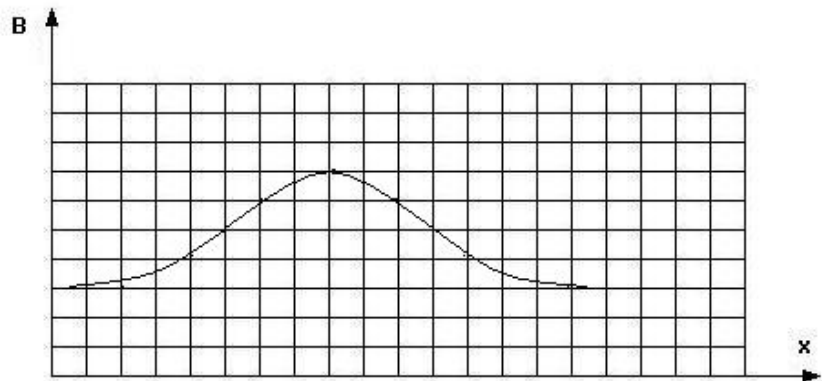
3.2.4 Πείραμα 3: Χρήση του στοιχείου Hall για τη μέτρηση περιστροφικής ταχύτητας

Εισαγωγή

Η εικόνα 3.12 δείχνει ένα μόνιμο μαγνήτη και ένα μεταλλικό αντικείμενο που κινείται παράλληλα στο βόρειο πόλο του μαγνήτη. Η πυκνότητα μαγνητικής ροής μεταξύ του μαγνήτη και του μεταλλικού αντικειμένου θα αυξάνεται καθώς το σιδερένιο σώμα θα πλησιάζει τον μαγνήτη. Μέγιστη πυκνότητα θα επιτευχθεί όταν το μεταλλικό σώμα θα έλθει στην κορυφή του μαγνήτη. Με την συνέχιση της κίνησης του μεταλλικού αντικειμένου προς τα δεξιά θα έχουμε μείωση της πυκνότητας μαγνητικής ροής. Η εικόνα 3.13 δείχνει την αλλαγή στην πυκνότητα μαγνητικής ροής σαν συνάρτηση της θέσης του μεταλλικού αντικειμένου.



Εικόνα 3.12 Κίνηση μεταλλικού αντικειμένου παράλληλα σε μόνιμο μαγνήτη

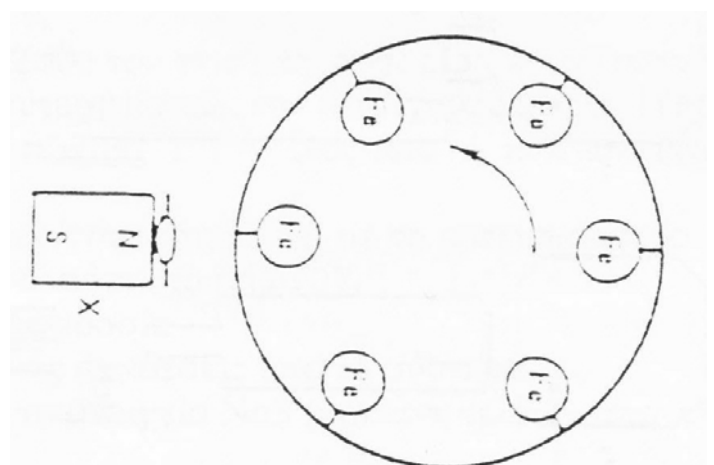


Εικόνα 3.13 Αλλαγή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής σαν συνάρτηση της θέσης του μεταλλικού αντικειμένου

Η αλλαγή της πυκνότητας μαγνητικής ροής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσουμε περιστροφική ταχύτητα. Η εικόνα 3.14 δείχνει ένα παράδειγμα συστήματος μέτρησης της περιστροφικής ταχύτητας που βασίζεται στην αλλαγή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής.

Στο παραπάνω σύστημα υπάρχει ένα περιστρεφόμενο πλατό από μη μεταλλικό υλικό. Μικρά κομμάτια από σίδηρο είναι προσαρμοσμένα στα χείλη του πλατό. Ο μόνιμος μαγνήτης είναι επίσης τοποθετημένος κοντά στο δίσκο, με το βόρειο πόλο κοντά στο χείλος του κυκλικού δίσκου. Κάθε φορά που ένα κομμάτι σιδήρου πλησιάζει τον μαγνήτη, όπως περιστρέφεται ο δίσκος, η πυκνότητα μαγνητικής ροής θα αλλάζει.

Το στοιχείο Hall που βρίσκεται τοποθετημένο στον βόρειο πόλο του μαγνήτη μας δίνει τη δυνατότητα να μετρήσουμε την αλλαγή στην



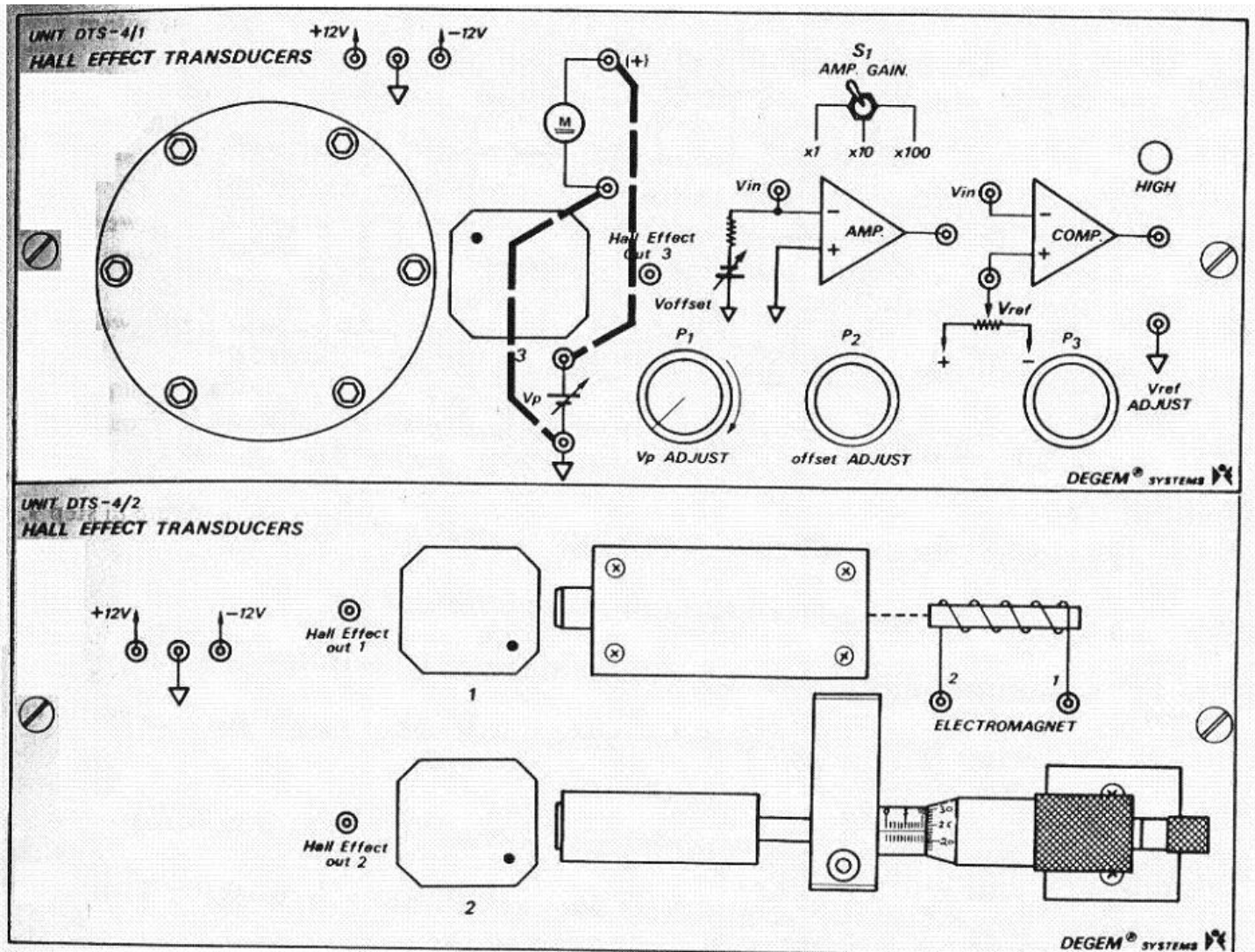
Εικόνα 3.14 Σύστημα μέτρησης της περιστροφικής ταχύτητας

πυκνότητα μαγνητικής ροής. Μπορούμε να μετρήσουμε την ταχύτητα περιστροφής του πλάτο με την μέτρηση του αριθμού των παλμών τάσης στην μονάδα του χρόνου που παρατηρούνται στην έξοδο του στοιχείου.

Σκοπός της Άσκησης

Είναι να μελετήσουμε τη μέθοδο χρήσης του στοιχείου Hall για μετρήσεις περιστροφικής ταχύτητας και η κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την ακρίβεια μιας τέτοιας μέτρησης.

Πειραματική Διαδικασία



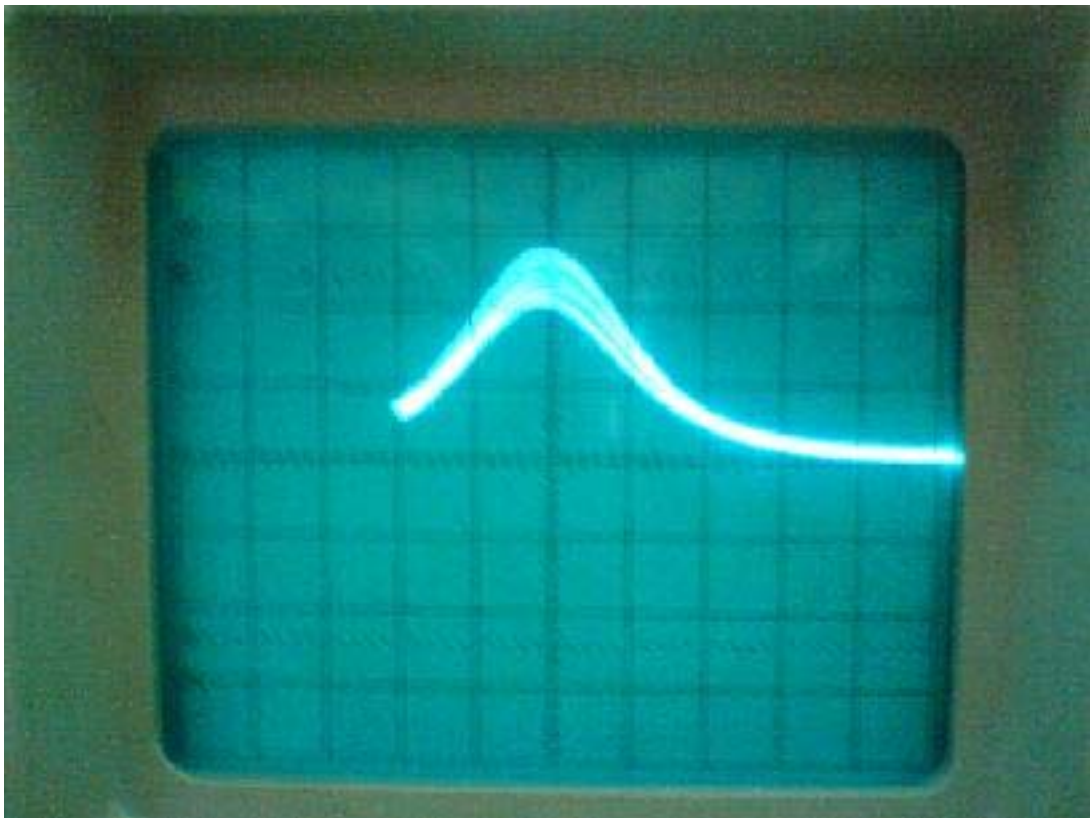
Εικόνα 3.15 Κυκλωματικό Διάγραμμα

1. Συνδέστε το στοιχείο Νο3 (κόκκινη τελεία) στην υποδοχή Νο3.
2. Κάντε τις συνδέσεις όπως φαίνονται στην εικόνα 3.15.
 - a. θετικός ακροδέκτης της πηγής τάσης V_p στην (+) είσοδο του μοτέρ
 - b. αρνητικός ακροδέκτης της πηγής τάσης στην άλλη είσοδο του μοτέρ
 - c. έξοδος Νο3 του στοιχείου Hall στην είσοδο V_{in} του ενισχυτή
3. Ανοίξτε την τροφοδοσία.
4. Τοποθετήστε τον διακόπτη S_1 στη θέση x_{10} .

5. Συνδέστε το πολύμετρο στην έξοδο του ενισχυτή.
6. Στρίψτε το πλατό με το χέρι σας έτσι ώστε ο μαγνήτης να βλέπει το άδειο τμήμα μεταξύ των δυο βιδών που είναι προσαρμοσμένες στο χείλος του πλατό.
7. Τοποθετήστε την τάση εξόδου του ενισχυτή στο μηδέν με το ποτενσιόμετρο P2.
8. Στρίψτε το πλατό με το χέρι σας έτσι ώστε ο μαγνήτης να βλέπει μια βίδα.
9. Γράψτε την τάση που μετρείται στην έξοδο του ενισχυτή:

$$V_o = \mathbf{1,095\ V}$$

10. Αποσυνδέστε το πολύμετρο.
11. Συνδέστε την έξοδο του ενισχυτή στον παλμογράφο.
12. Ρυθμίστε την τάση του μοτέρ στα 5V με το ποτενσιόμετρο P1.
13. Σχεδιάστε την κυματομορφή που παρατηρείτε στον παλμογράφο στο σχήμα 4.



ΣΧΗΜΑ 4: Κυματομορφή εξόδου του ενισχυτή όπως περιστρέφεται το πλατό

14. Ρυθμίστε την τάση V_{ref} με το ποτενσιόμετρο P3 στο μισό της τάσης που γράψατε στο βήμα 9.
15. Συνδέστε την έξοδο του ενισχυτή στην είσοδο του συγκριτή V_{in} .
16. Συνδέστε το δεύτερο κανάλι του παλμογράφου στην έξοδο του συγκριτή.
17. Γράψτε στον πίνακα 1 τη διάρκεια 6 παλμών όπως μετριοούνται από τον παλμογράφο.
18. Μειώστε την ταχύτητα του μοτέρ με το ποτενσιόμετρο P1 σύμφωνα με τις τιμές του πίνακα 1 και επαναλάβετε το βήμα 17.

Τάση Μοτέρ	5V	4V	3V	2V	1V
Διάρκεια 6 παλμών (ms)	35	58	∞		
Ταχύτητα (rpm)	1714	1034	0		

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Ταχύτητα μοτέρ σαν συνάρτηση της τάσης εισόδου του

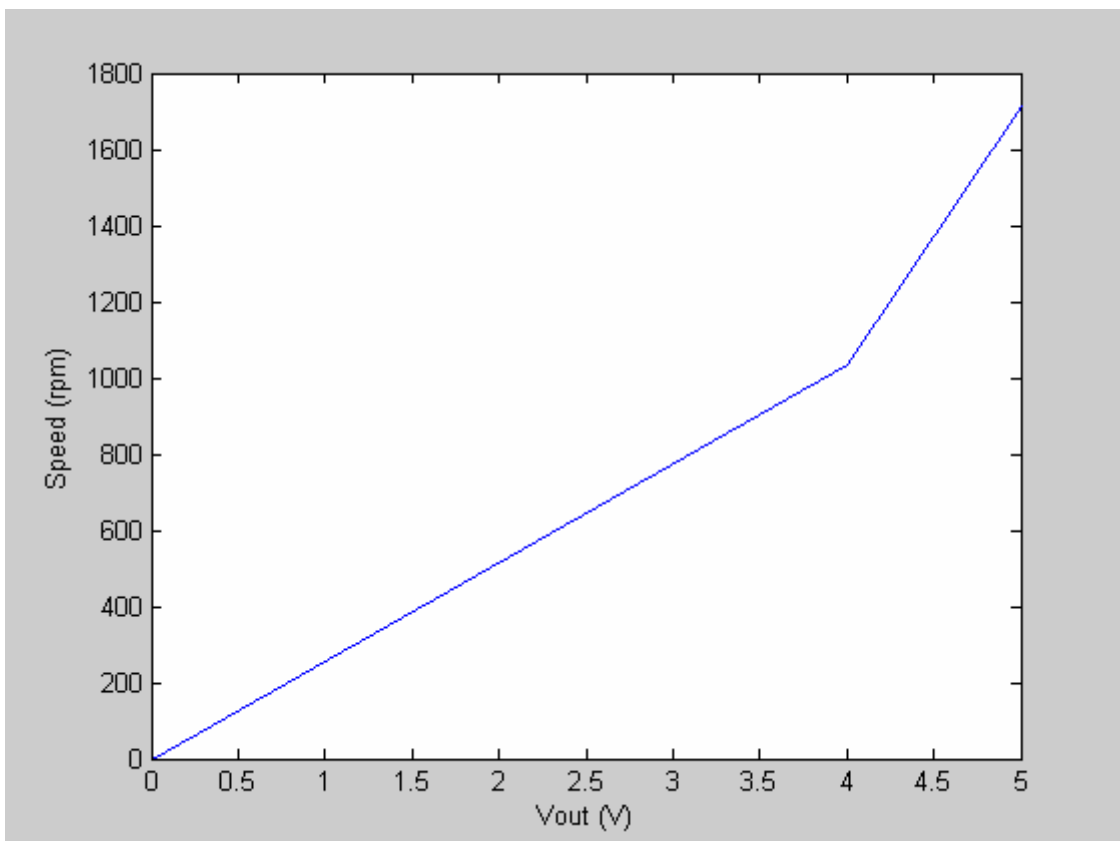
19. Κλείστε την τροφοδοσία.

20. Απομακρύνετε τις συνδέσεις από το σύστημα.

21. Απομακρύνετε το στοιχείο Νο3 (κόκκινη τελεία) από την υποδοχή Νο3.

Ανάλυση Αποτελεσμάτων

1. Γράψτε την εξίσωση που συσχετίζει τον χρόνο των 6 κύκλων όπως μετριοούνται από τον παλμογράφο με την ταχύτητα του μοτέρ. Θυμηθείτε ότι υπάρχουν 6 βίδες στο χείλος του πλατό.
 $X = 60000/\text{διάρκεια 6 παλμών (ms)}$
2. Υπολογίστε την ταχύτητα του μοτέρ με τη βοήθεια της φόρμουλας που επιτύχατε στην προηγούμενη ερώτηση χρησιμοποιώντας τις τιμές του πίνακα 1. Γράψτε τα αποτελέσματα στην τελευταία γραμμή του πίνακα 1.
3. Σχεδιάστε το γράφημα της μετρούμενης ταχύτητας σαν συνάρτηση της τάσης εισόδου του μοτέρ βασιζόμενοι στα αποτελέσματα του πίνακα 1.
4. Με ποιο τρόπο κατά τη γνώμη σας μπορεί να γίνει η μέτρηση με μεγαλύτερη ακρίβεια στις χαμηλές ταχύτητες; **Αν αυξήσουμε τις μεταλλικές βίδες πάνω στο περιστρεφόμενο πλατό. Έτσι για μια δεδομένη ταχύτητα αν για παράδειγμα έχουμε 12 βίδες τότε θα παίρνουμε στον παλμογράφο περισσότερους παλμούς με μεγαλύτερη συχνότητα.**
5. Εξηγείστε γιατί το σήμα εξόδου του συγκριτή είναι προτιμότερο από το σήμα εξόδου του ενισχυτή όταν χρησιμοποιείται ένα σύστημα switching. **Γιατί μεταφέρει πολύ πιο ακριβείς παλμούς στην έξοδο και φαίνεται ξεκάθαρα η συχνότητα.**



ΣΧΗΜΑ 5: Γραφική παράσταση της ταχύτητας συναρτήσει της τάσης εισόδου

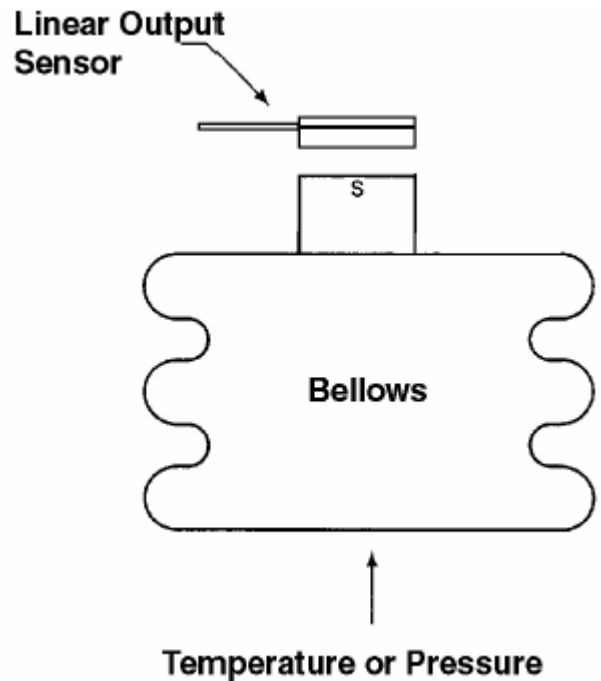
3.3 Μετατροπή κίνησης σε τάση.

3.3.1 Αισθητήρας θερμοκρασίας ή πίεσης.

Οι ιδιότητες ενός αισθητήρα γραμμικής εξόδου επιτρέπουν σε ποσότητες άλλες εκτός από θέση και ρεύμα να ανιχνεύονται. Όταν ένας γραμμικός αισθητήρας συνδυάζεται με το κατάλληλο μαγνητικό σύστημα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει θερμοκρασία ή πίεση. Η εικόνα 3.16 δείχνει αυτή την ιδέα.

Στην ανίχνευση πίεσης το μαγνητικό σύστημα βρίσκεται τοποθετημένο σε μια κατασκευή τύπου φυσούνας. Καθώς η φυσούνα διαστέλλεται και συστέλλεται, το μαγνητικό σύστημα μετακινείται. Αν ο αισθητήρας είναι τοποθετημένος σε κοντινή απόσταση με την κατασκευή, μια τάση εξόδου ανάλογη της πίεσης που εισάγεται στο σύστημα μπορεί να επιτευχθεί.

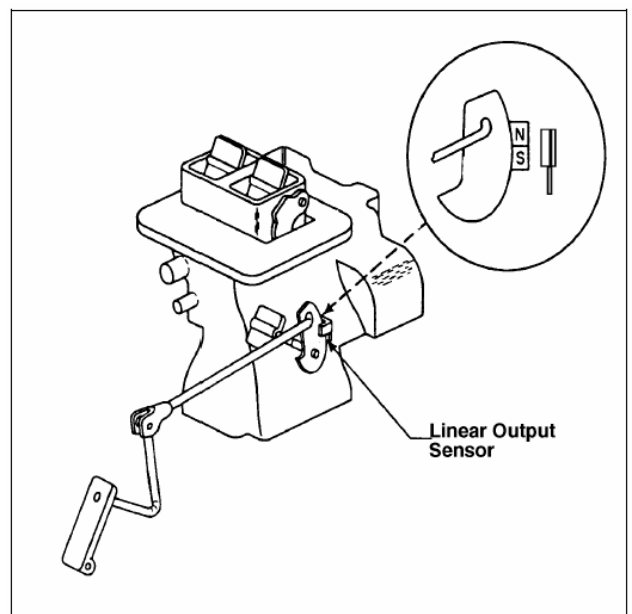
Η μέτρηση θερμοκρασίας υλοποιείται με παρόμοιο τρόπο με τη μέτρηση της πίεσης, μόνο που εδώ γίνεται χρήση ενός αερίου με γνωστά χαρακτηριστικά θερμικής διαστολής το οποίο σφραγίζεται εντός της φυσούνας. Καθώς ο θάλαμος θερμαίνεται, το αέριο διαστέλλεται προκαλώντας μια τάση από τον αισθητήρα η οποία είναι ανάλογη της θερμοκρασίας.



Εικόνα 3.16 Αισθητήρας θερμοκρασίας ή πίεσης

3.3.2 Αισθητήρας γωνίας γκαζιού

Η εικόνα 3.17 δείχνει μια εφαρμογή η οποία κάνει χρήση ενός αισθητήρα γραμμικής εξόδου ώστε να μας παρέχει ένα σήμα ανάλογο με τη γωνιακή θέση της πεταλούδας του γκαζιού. Ο βραχίονας της πεταλούδας σχηματίζει καμπύλη ώστε να μας παρέχει τα επιθυμητά μη γραμμικά χαρακτηριστικά. Ο μαγνήτης είναι τοποθετημένος στο μοχλό του τσοκ.

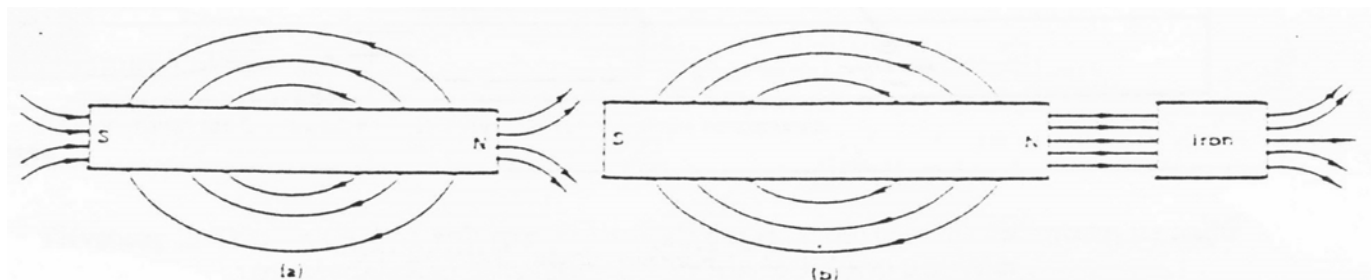


Εικόνα 3.17 Αισθητήρας γωνίας της πεταλούδας

3.3.3 Πείραμα 2: Το στοιχείο Hall σαν μετατροπέας κίνησης σε τάση

Εισαγωγή

Μετρήσεις διαφόρων φυσικών μεταβλητών όπως πάχος, στάθμη υγρού και πίεση, μπορούν να γίνουν σαν μετρήσεις κίνησης. Σε κάποια συστήματα, όταν απαιτείται να μεταφέρουμε κίνηση σε τάση, το στοιχείο Hall μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μετατροπέας. Όπως θυμάστε, το στοιχείο Hall μπορεί να μετρήσει την πυκνότητα της μαγνητικής ροής. Η εικόνα 3.18 δείχνει τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου ενός μόνιμου μαγνήτη.

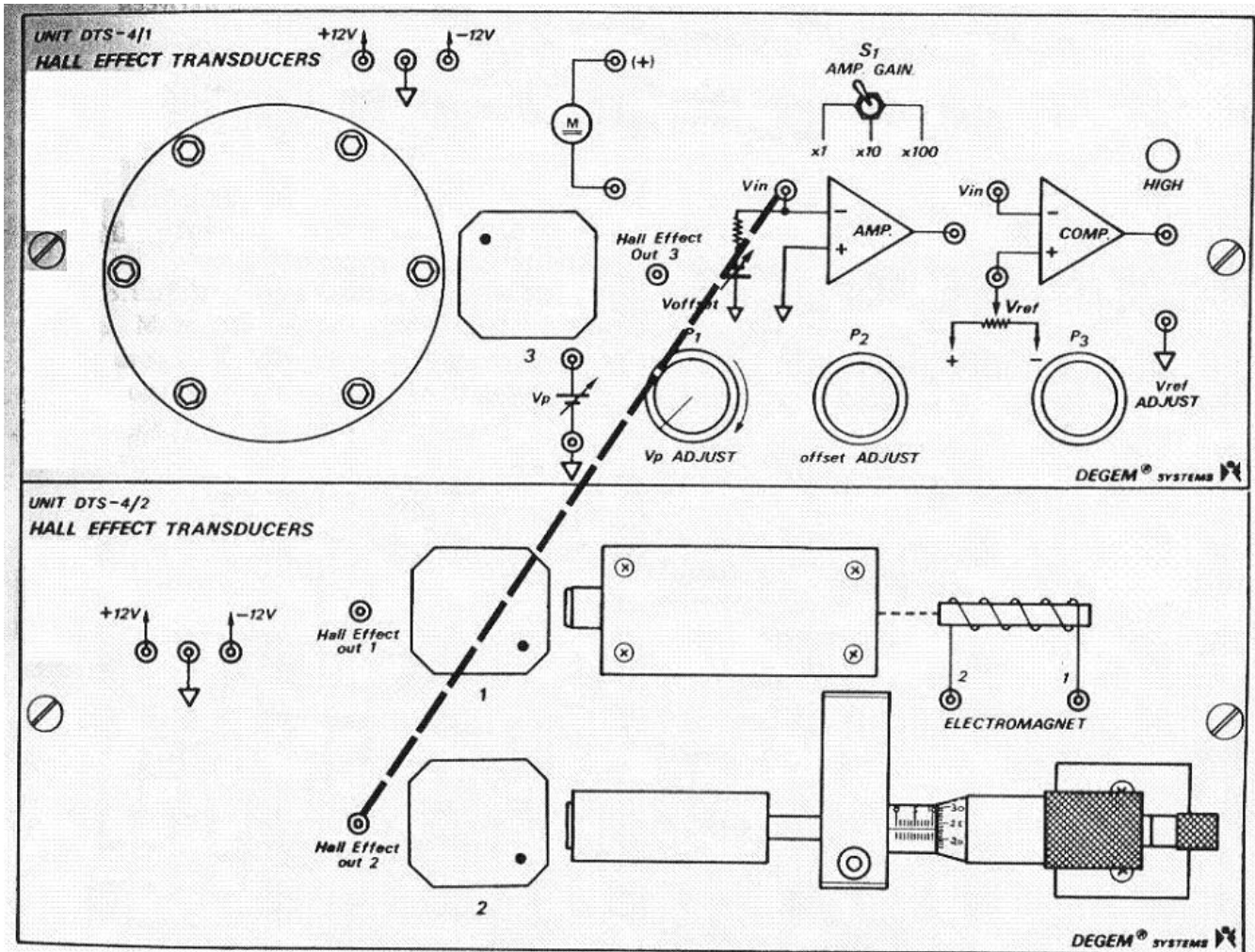


Εικόνα 3.18 Γραμμές Μαγνητικού Πεδίου

Το σχήμα α δείχνει τις διευθύνσεις των γραμμών του πεδίου στον αέρα χωρίς την παρουσία του μεταλλικού σώματος κοντά στον μαγνήτη. Όπως οι γραμμές του πεδίου διέρχονται στον αέρα, η πυκνότητα μαγνητικής ροής στον αέρα είναι πολύ μικρότερη από την πυκνότητα εντός του μαγνήτη. Πλησιάζοντας ένα μεταλλικό αντικείμενο κοντά στον μαγνήτη εξαναγκάζουμε τις δυναμικές γραμμές να συγκεντρωθούν όπως φαίνεται στο σχήμα β. η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο κενό μεταξύ μαγνήτη και σιδήρου είναι μεγαλύτερη από την κατάσταση χωρίς το σίδηρο. Έτσι προκύπτει πως η πυκνότητα ροής στο κενό είναι αντιστρόφως ανάλογη στην απόσταση μεταξύ μαγνήτη και μεταλλικού σώματος.

Σκοπός της Άσκησης

1. Να μετρήσουμε την επίδραση της απόστασης μεταξύ του μεταλλικού σώματος και του μόνιμου μαγνήτη στην πυκνότητα μαγνητικής ροής μεταξύ αυτών.
2. Να σχεδιάσουμε την χαρακτηριστική καμπύλη του μετατροπέα κίνησης σε τάση που βασίζεται στο φαινόμενο Hall.
3. Να αξιολογήσουμε την γραμμικότητα του μετατροπέα και να καθορίσουμε την ευαισθησία του σε διάφορες περιοχές μέτρησης.



Εικόνα 3.19 Κυκλωματικό Διάγραμμα

Πειραματική Διαδικασία

1. Συνδέστε το στοιχείο Νο3 (κόκκινη τελεία) στην υποδοχή Νο2.
2. Συνδέστε την τάση εξόδου Νο2 του Hall στην είσοδο V_{in} του ενισχυτή (εικόνα 3.19).
3. Καθορίστε το σχετικό μηδέν του μικρομέτρου τοποθετώντας τον μεταλλικό κύλινδρο κοντά αλλά όχι να ακουμπά το στοιχείο Hall Νο3 (κόκκινη τελεία). **4,53mm**
4. Θέστε τον διακόπτη S_1 στη θέση x10.
5. Ανοίξτε την τροφοδοσία.

Σημείωση: για να εξασφαλίσετε σταθερές μετρήσεις περιμένετε λίγο πριν πάρετε τις μετρήσεις σας.

6. Συνδέστε το πολύμετρο στην έξοδο του ενισχυτή.
7. Ρυθμίστε την τάση εξόδου του ενισχυτή σε 4V χρησιμοποιώντας το ποτενσιόμετρο P2.
8. Αλλάξτε τη θέση του μικρομέτρου σύμφωνα με τις τιμές του πίνακα 2. Σε κάθε περίπτωση, μετράτε την τάση εξόδου του ενισχυτή και την καταχωρείτε στον πίνακα 1.

Σχετική Θέση Μικρομέτρου (mm)	0	1	2	3	4
Τάση Εξόδου (V)	4,08	3,00	2,33	1,91	1,65

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Τάσεις εξόδου στοιχείου Hall για αυξανουσες αποστάσεις μεταξύ μεταλλικού σώματος και μόνιμου μαγνήτη

9. Πλησιάστε το μικρόμετρο σύμφωνα με τις τιμές του πίνακα 2. Σε κάθε θέση μετρήστε την τάση εξόδου του ενισχυτή και καταχωρείστε την στον πίνακα 2. (ΠΡΟΣΟΧΗ μην ακουμπήσετε το στοιχείο Hall όπως πλησιάζει το μικρόμετρο)

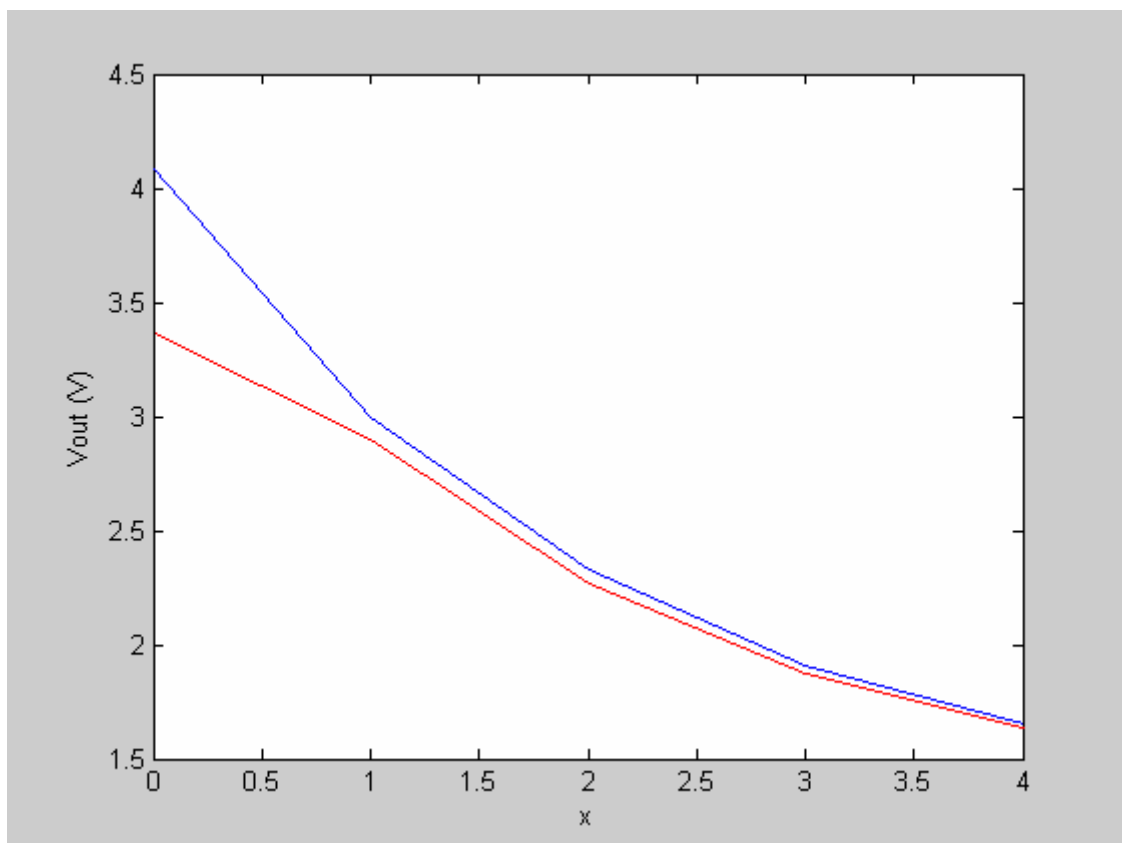
Σχετική Θέση Μικρόμετρου (mm)	4	3	2	1	0
Τάση Εξόδου (V)	1,64	1,87	2,27	2,90	3,36

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Τάσεις εξόδου του στοιχείου Hall όπως μειώνεται η απόσταση μεταξύ του μεταλλικού αντικειμένου και του μόνιμου μαγνήτη

10. Κλείστε τη τροφοδοσία.
 11. Μετακινήστε τις συνδέσεις του συστήματος.
 12. Απομακρύνετε το στοιχείο Νο3 (κόκκινη τελεία) από την υποδοχή Νο2.

Ανάλυση Αποτελεσμάτων

1. Σχεδιάστε στο σχήμα 6 το γράφημα της τάσης εξόδου του ενισχυτή σαν συνάρτηση της σχετικής θέσης του μικρομέτρου. Χρησιμοποιείστε τις μετρήσεις από τους πίνακες 1 και 2.



ΣΧΗΜΑ 6: Γράφημα της τάσης εξόδου του ενισχυτή σαν συνάρτηση της σχετικής θέσης του μικρομέτρου

2. Καθορίστε τις περιοχές γραμμικής λειτουργίας από τα αποτελέσματα που έχετε και με τη βοήθεια του γραφήματος. **Η περιοχή γραμμικής λειτουργίας είναι περίπου από το 1 μέχρι τα 3 mm.**
3. Ποια είναι η ευαισθησία σε κάθε περιοχή λειτουργίας; $\Delta V / \Delta X$. **$1,03 / 2 = 0,515V/mm$**
4. Γράψτε την τιμή της μέγιστης υστέρησης σαν ποσοστό της πλήρους κλίμακας.
 $(0,72 * 100) / 4,08 = 17,65\%$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

4.1 ΘΕΩΡΙΑ

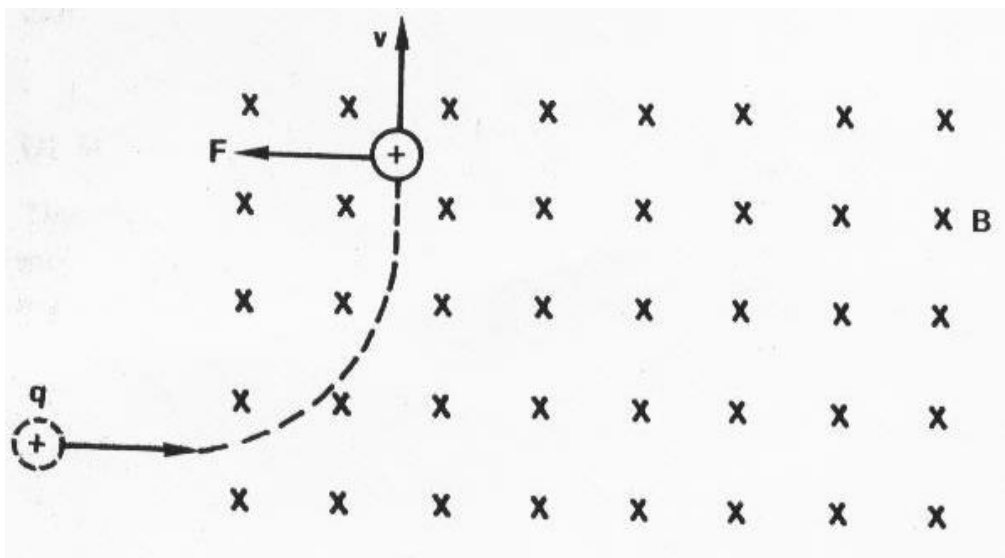
4.1.1 Θεωρία του Φαινομένου Hall

Εισαγωγή

Το φαινόμενο Hall είναι ένα φυσικό φαινόμενο που βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε βιομηχανικά όργανα. Βασίζεται στην αρχή της κίνησης φορτίων σε ένα μαγνητικό πεδίο και των δυνάμεων που ασκούνται σε φορτία σ' ένα ηλεκτρικό πεδίο.

Συμπεριφορά Ηλεκτρικών Φορτίων μέσα σε Ομογενές Μαγνητικό Πεδίο

Οι δυνάμεις που ασκούνται σε ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια που κινούνται σ' ένα μαγνητικό πεδίο εξετάζονται σε κεφάλαια φυσικής που καλύπτουν θέματα ιόντων και ηλεκτρονίων.

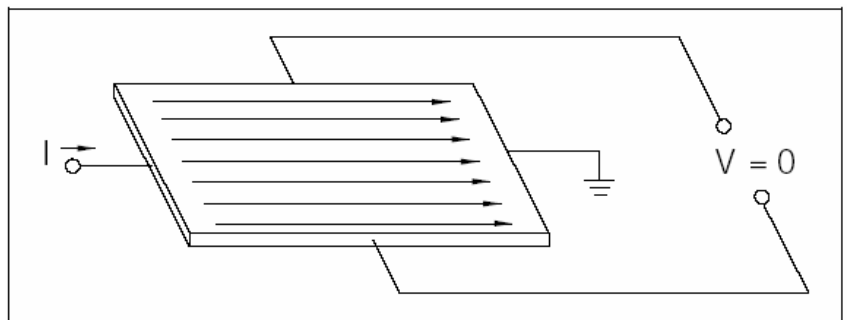


Εικόνα 4.1

Στην εικόνα 4.1 φαίνεται ένα μαγνητικό πεδίο με ροή έντασης B. Όταν το θετικά φορτισμένο (+q) σωματίδιο εισέρχεται στο μαγνητικό πεδίο μια δύναμη Lorentz ασκείται πάνω του. Το μέγεθος της δύναμης υπολογίζεται από τη σχέση $F=BqV$.

Η διεύθυνση της δύναμης που ασκείται στο σωματίδιο είναι κάθετη στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας όπως φαίνεται στην εικόνα. Αφού αυτή η δύναμη που ασκείται κάθετα στη διεύθυνση της ταχύτητας, είναι μια κεντρομόλος δύναμη, θα αναγκάσει το σωματίδιο να κινηθεί σε ένα κυκλικό δρόμο και να αποκλίνει από την ευθεία τροχιά.

Το φαινόμενο Hall προκύπτει λόγω της φύσης του ρεύματος που ρεεί μέσα σε έναν αγωγό. Το ρεύμα αποτελείται από την κίνηση πολλών μικρών φορτισμένων «σωματιδίων» (τυπικά, αλλά όχι πάντα, ηλεκτρόνια). Αυτά τα σωματίδια δέχονται



Εικόνα 4.2 Απουσία μαγνητικού πεδίου

μία δύναμη, που καλείται η δύναμη Lorenz, όταν υπάρχει μαγνητικό πεδίο το οποίο δεν είναι παράλληλο με τη διεύθυνση της κίνησής τους.

Όταν ένα τέτοιο μαγνητικό πεδίο απουσιάζει, τα φορτισμένα σωματίδια ακολουθούν μια σχεδόν ίσια διαδρομή. Παρόλα αυτά, όταν ένα κάθετο μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται, η διαδρομή τους μετατρέπεται σε καμπύλη έτσι ώστε τα κινούμενα φορτία να συγκεντρώνονται στη μια πλευρά του υλικού. Αυτό αφήνει ίσης ποσότητας και αντίθετης πολικότητας φορτία εκτεθειμένα στην άλλη πλευρά, όπου υπάρχει έλλειψη από κινούμενα φορτία. Το αποτέλεσμα είναι μια ασύμμετρη κατανομή πυκνότητας φορτίου κατά μήκος του στοιχείου Hall το οποίο είναι κάθετο και στην ίσια διαδρομή αλλά και στο εφαρμοσμένο μαγνητικό πεδίο. Ο διαχωρισμός των φορτίων δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο το οποίο αντιτίθεται στη μετακίνηση περαιτέρω φόρτισης, έτσι δημιουργείται μια σταθερή διαφορά δυναμικού καθ' όλη τη διάρκεια ροής του ρεύματος.

Βασικές Αρχές Φαινομένου Hall

Για ένα απλό μέταλλο όπου υπάρχει μόνο ένας τύπος φορέων φορτίου (ηλεκτρόνια) η τάση Hall V_H δίνεται από την εξίσωση:

$$V_H = \frac{-IB/d}{ne}$$

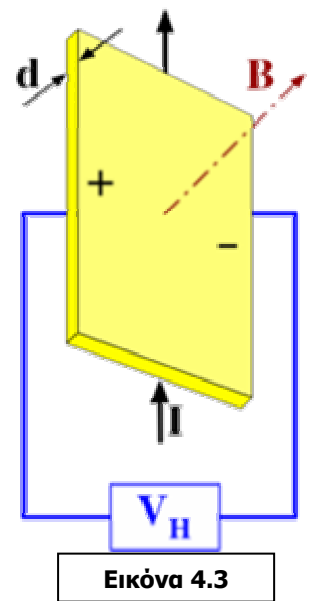
και η σταθερά Hall υπολογίζεται:

$$R_H = \frac{V_H}{IB/d} = -\frac{1}{ne}$$

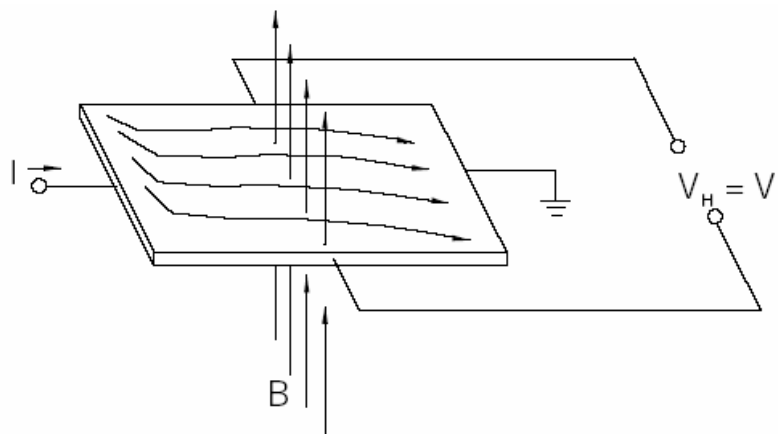
όπου I είναι το ρεύμα κατά μήκος της πλάκας, B η μαγνητική πυκνότητα ροής, d είναι το πάχος της πλάκας, e είναι το φορτίο των ηλεκτρονίων και n είναι η πυκνότητα φορτίου των ηλεκτρονίων.

Αν τοποθετήσουμε έναν αγωγό ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σ' ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο μια δύναμη θα ασκηθεί στα κινούμενα ηλεκτρόνια. Σαν αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια θα αποκλίνουν από την αρχικά ευθύγραμμη τροχιά τους, αλλά τα φυσικά όρια του αγωγού θα περιορίσουν αυτή την απόκλιση της τροχιάς των ηλεκτρονίων. Στη δύναμη αυτή αντιτίθεται μια άλλη δύναμη που οφείλεται στο ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει στην επιφάνεια του αγωγού. Η φορά της δύναμης αυτής είναι αντίθετη μ' αυτήν που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο.

Το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να εξαχθεί από την παρακάτω εξίσωση που εκφράζει την ισορροπία



Εικόνα 4.3



Εικόνα 4.4 Αρχή του Φαινομένου Hall

μαγνητικής και ηλεκτρικής δύναμης πάνω στο φορτίο q .

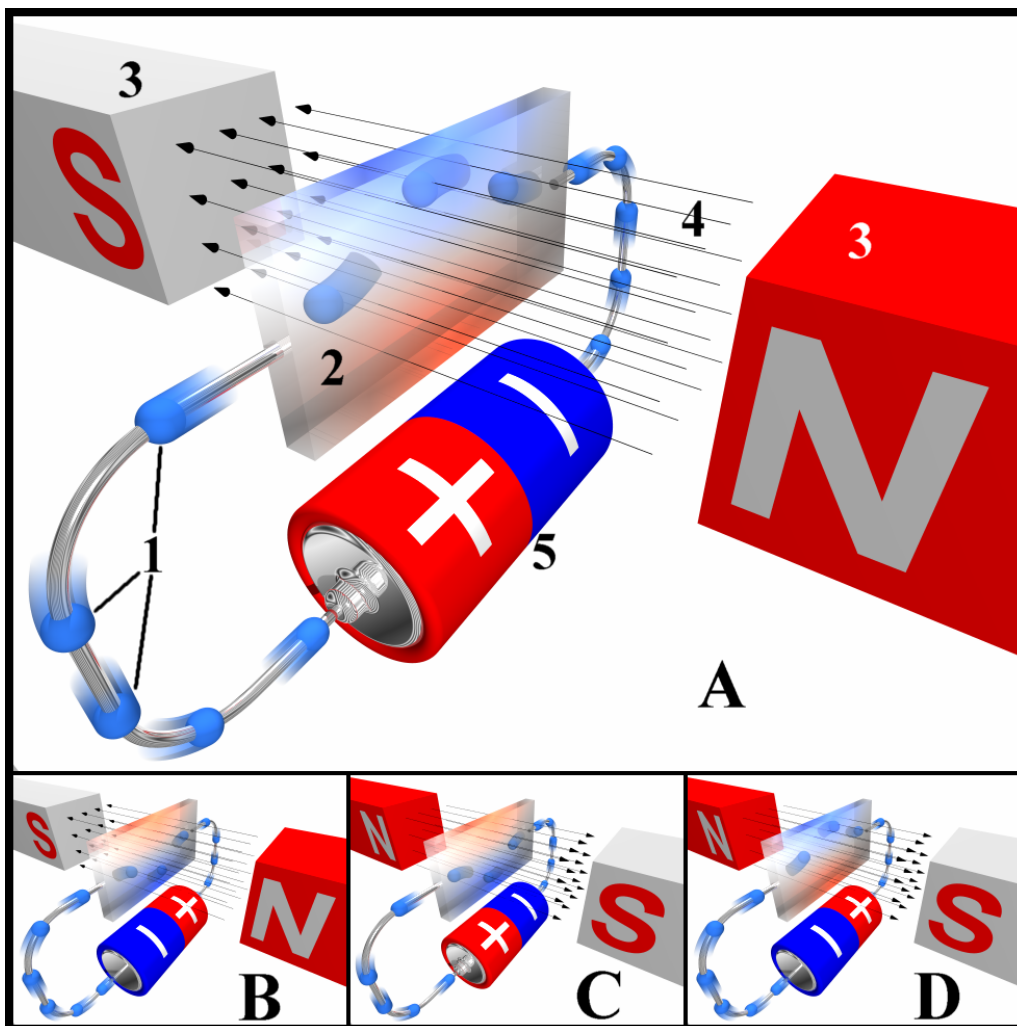
$$\mathbf{E}_q = \mathbf{B}q\mathbf{V} \Leftrightarrow \mathbf{E} = \mathbf{V}\mathbf{B}$$

Έτσι, Όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα τοποθετείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, μια κατακόρυφη τάση θα αναπτυχθεί σε σχέση με το ρεύμα και το μαγνητικό πεδίο. Αυτή η αρχή είναι γνωστή σαν φαινόμενο Hall. Η εικόνα 4.2 δείχνει αυτή τη βασική αρχή. Δείχνει ένα λεπτό φύλλο ημιαγωγίου υλικού (στοιχείο Hall) το οποίο διαρρέεται από ρεύμα. Οι συνδέσεις εξόδου είναι κάθετες στην κατεύθυνση του ρεύματος. Όταν δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο, η διανομή του ρεύματος είναι ομοιόμορφη και δεν διαπιστώνεται διαφορά τάσης στην έξοδο. Όταν εφαρμόζεται ένα κάθετο μαγνητικό πεδίο, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4, μια δύναμη Lorentz ασκείται στο ρεύμα. Αυτή η δύναμη διαταράσσει τη διανομή του ρεύματος, δημιουργώντας μια διαφορά τάσης στην έξοδο. Αυτή η τάση ονομάζεται τάση Hall (V_H). Η μορφή της εξίσωσης που δείχνει την αλληλεπίδραση του μαγνητικού πεδίου και του ρεύματος φαίνεται στην εξίσωση 4.1

$$V_H \propto \mathbf{I} \times \mathbf{B}$$

Εξίσωση 4.1

Η τάση Hall είναι ανάλογη της συνέλιξης του ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου. Είναι της μορφής $7\mu\text{V}/\text{Vs}/\text{gauss}$ στη σιλικόνη και έτσι απαιτείται ενίσχυση για συγκεκριμένες εφαρμογές.



Εικόνα 4.5

Συμπεράσματα

Επομένως, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι συνάρτηση της μαγνητικής επαγωγής του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.

Μπορούμε λοιπόν να συμπεράνουμε ότι όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα τοποθετηθεί σ' ένα μαγνητικό πεδίο τότε θα ασκηθεί πάνω του μια αντιμαγνητική δύναμη κάθετη αμοιβαία στο μαγνητικό πεδίο και το ρεύμα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **Φαινόμενο HALL** και μπορεί κατάλληλα να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση μεταβολών της μαγνητικής επαγωγής.

Το στοιχείο HALL που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Το κύκλωμα αυτό μετρά την αντιμαγνητική δύναμη που εξασκείται πάνω σ' ένα αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα και βρίσκεται στο χώρο ενός μαγνητικού πεδίου. Στη συνέχεια και υπό μορφή σήματος την ενισχύει. Αυτή η ενίσχυση μας επιτρέπει να μετρήσουμε μικρές μεταβολές στην μαγνητική επαγωγή.

Για τα πειράματα θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω διατάξεις Hall:

Συσκευή No1 (λευκή τελεία): Το στοιχείο μόνο του χωρίς επιπρόσθετα μέρη.

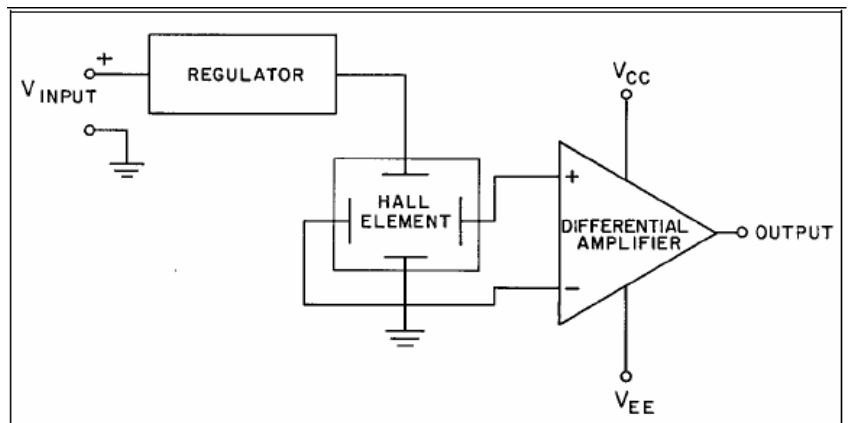
Συσκευή No2 (κίτρινη τελεία): Το στοιχείο μ' ένα κομμάτι μετάλλου.

Συσκευή No3 (κόκκινη τελεία): Το στοιχείο μ' ένα μαγνήτη.

Σαν αποτέλεσμα, το φαινόμενο Hall είναι ένα πολύ χρήσιμο μέσο για να μετράμε την πυκνότητα των φορέων καθώς και το μαγνητικό πεδίο. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του φαινομένου Hall είναι ότι συμπεριφέρεται διαφορετικά μεταξύ θετικών φορτίων που κινούνται προς μια κατεύθυνση και αρνητικών κινούμενων προς την αντίθετη. Το φαινόμενο Hall μας έδωσε την πρώτη αληθινή απόδειξη ότι τα ηλεκτρικά ρεύματα στα μέταλλα μεταφέρονται από κινούμενα ηλεκτρόνια και όχι από πρωτόνια. Το φαινόμενο Hall επίσης μας έδειξε ότι σε μερικές ουσίες (ειδικά στους ημιαγωγούς), είναι πιο σωστό να θεωρούμε το ρεύμα σαν θετικές οπές που κινούνται παρά σαν αρνητικά ηλεκτρόνια.

Βασικοί Αισθητήρες Hall

Το στοιχείο Hall είναι το βασικό αισθητήριο μαγνητικού πεδίου. Στις περισσότερες εφαρμογές απαιτείται ρύθμιση του σήματος ώστε το σήμα εξόδου να είναι εύχρηστο. Οι ηλεκτρονικές διατάξεις που απαιτούνται γι' αυτή τη διαδικασία αποτελούνται από μια ενισχυτική βαθμίδα και από αντισταθμιστές θερμοκρασίας. Η εικόνα 4.6 μας δείχνει έναν βασικό αισθητήρα Hall. Αν η τάση Hall μετρηθεί κατά τη διάρκεια απουσίας μαγνητικού πεδίου, τότε η έξοδος θα είναι μηδέν. Παρόλα αυτά, αν η τάση σε κάθε έξοδο μετρηθεί με αναφορά τη γείωση, μια μη μηδενική τάση θα εμφανιστεί. Αυτή λέγεται κοινού τύπου τάση (Common Mode Voltage CMV) και είναι η ίδια σε κάθε ακροδέκτη εξόδου. Μηδέν είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών. Η ενισχυτική βαθμίδα



Εικόνα 4.6 Βασικός αισθητήρας Hall

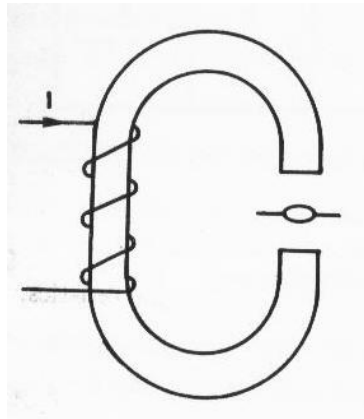
που φαίνεται στην εικόνα 4.6 αποτελείται από διαφορικό ενισχυτή έτσι ώστε να ενισχύει τη διαφορά δυναμικού, δηλαδή την τάση Hall. Η τάση Hall είναι ένα χαμηλής ισχύος σήμα της τάξης των 30μV κατά την παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου 1 gauss. Αυτή η χαμηλής ισχύος έξοδος απαιτεί ένα ενισχυτή με μικρό θόρυβο, υψηλή αντίσταση εισόδου και ρυθμιζόμενο κέρδος. Ένας διαφορικός ενισχυτής με τέτοια χαρακτηριστικά μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί με ένα στοιχείο Hall χρησιμοποιώντας τεχνολογία διπολικών τρανζίστορ. Καθώς φαίνεται από την εξίσωση 4.1, η τάση Hall είναι συνάρτηση του ρεύματος εισόδου. Ο σκοπός του ρυθμιστή στην εικόνα 4.6 είναι να διατηρεί αυτό το ρεύμα σταθερό έτσι ώστε η έξοδος του αισθητήρα να αντικατοπτρίζει μόνο την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.2.1 Πείραμα 1: Χρήση του στοιχείου Hall σε μετρήσεις ρεύματος

Εισαγωγή

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ισχύος πολλές φορές απαιτείται η μέτρηση του ρεύματος χωρίς την παρεμβολή αμπερομέτρου στο κύκλωμα. Σ' αυτές τις περιπτώσεις για τη μέτρηση του ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί το στοιχείο Hall. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο σύστημα της εικόνας 4.7 που αποτελείται από ένα πηνίο τυλιγμένο πάνω σε ένα πυρήνα σιδήρου. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται είναι ανάλογο του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο.



Εικόνα 4.7 Ηλεκτρομαγνήτης

Όπως ξέρουμε από τη θεωρία του μαγνητισμού, τα μαγνητικά συστήματα συμπεριφέρονται παρόμοια με τα ηλεκτρικά. Η εξίσωση που αναλογεί στο νόμο του Ohm για μαγνητικά κυκλώματα είναι:

$$\Phi = F/R$$

Όπου: $F = \eta$ μαγνητεγερτική δύναμη
 $R = \eta$ μαγνητική αντίσταση
 $\Phi = \eta$ μαγνητική ροή

Η εξίσωση που δίνει την μαγνητεγερτική δύναμη για ένα πηνίο που διαρρέεται από ρεύμα I και σπείρες N είναι:

$$F = NI$$

Η εξίσωση που δίνει τη μαγνητική αντίσταση ενός μαγνητικού δρόμου είναι:

$$R = \frac{L}{\mu_0 \mu A}$$

Όπου: $L =$ το μήκος του δρόμου της μαγνητικής ροής σε μέτρα (m)
 $\mu = \eta$ μαγνητική διαπερατότητα του υλικού
 $\mu_0 = \eta$ μαγνητική διαπερατότητα του κενού $= 1.26 \times 10^{-6}$ H/m
 $A =$ το εμβαδόν της διατομής του μαγνητικού δρόμου

Τέλος, η εξίσωση που δίνει την μαγνητική επαγωγή είναι $B = \Phi/A$

Σκοπός της Άσκησης

4. Να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο το στοιχείο Hall χρησιμοποιείται για μετρήσεις ρεύματος.
5. Να σχεδιαστεί η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου του στοιχείου Hall σαν συνάρτηση του ρεύματος του ηλεκτρομαγνήτη.
6. Να γίνουν κατανοητά τα γραμμικά χαρακτηριστικά και η υστέρηση του όλου συστήματος και να εξεταστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν αυτά τα χαρακτηριστικά.

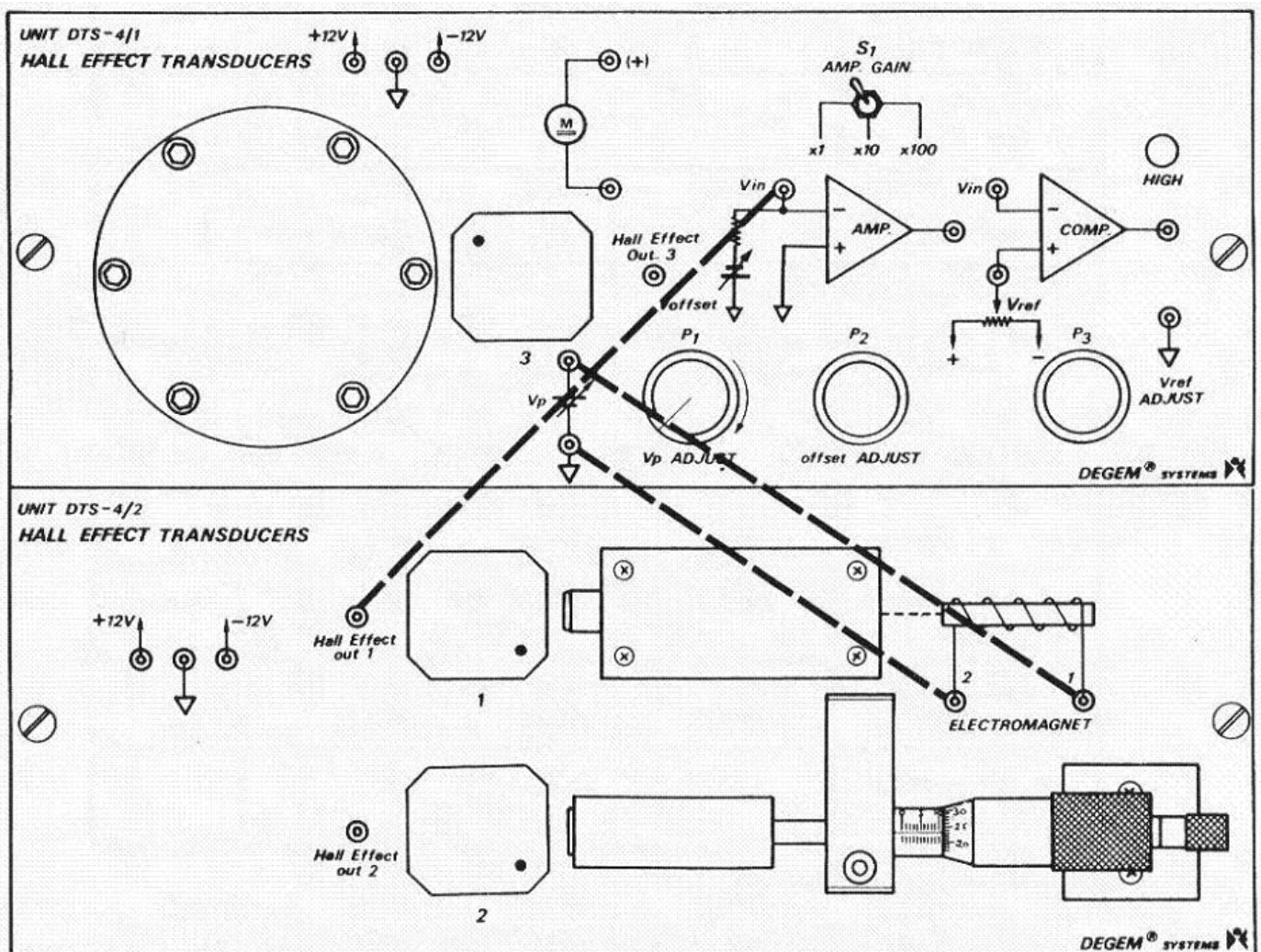
Πειραματική Διαδικασία

20. Συνδέστε τη συσκευή No1 στην υποδοχή No1.
21. Συνδέστε το ψηφιακό πολύμετρο στην είσοδο του ηλεκτρομαγνήτη. Μετρήστε την αντίσταση του πηνίου και γράψτε την τιμή που βρήκατε:

$$R = \quad \Omega$$

22. Αποσυνδέστε το πολύμετρο και πραγματοποιείστε τις παρακάτω συνδέσεις στο σύστημα όπως φαίνεται στην εικόνα 4.8.

- a. θετικός πόλος της πηγής τάσης V_p στην είσοδο No1 του ηλεκτρομαγνήτη
- b. αρνητικός πόλος της ίδιας πηγής στην είσοδο No2 του ηλεκτρομαγνήτη
- c. έξοδος 1 του στοιχείου Hall στην είσοδο V_m του ενισχυτή



Εικόνα 4.8 Κυκλωματικό Διάγραμμα

23. Τοποθετήστε το διακόπτη S1 στη θέση x100.

24. Θέστε σε λειτουργία την τροφοδοσία.

Σημείωση: για να εξασφαλίσετε σταθερές μετρήσεις περιμένετε λίγο πριν πάρετε τις μετρήσεις σας.

25. Συνδέστε το πολύμετρο στην έξοδο της πηγής τάσης V_p . Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο P1 έτσι ώστε να έχετε μηδενική τάση στην έξοδο. Αποσυνδέστε το πολύμετρο.

26. Συνδέστε το πολύμετρο στην έξοδο του ενισχυτή. Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο P2 έτσι ώστε η τάση στην έξοδο του ενισχυτή να είναι μηδενική. Αποσυνδέστε το πολύμετρο.

27. Συνδέστε το πολύμετρο στην έξοδο της πηγής τάσης V_p . Ρυθμίστε το P1 έτσι ώστε να έχετε 0.5V στην είσοδο του πηνίου του ηλεκτρομαγνήτη.

28. Μετρήστε με το πολύμετρο την τάση εξόδου του ενισχυτή και σημειώστε την τιμή στον πίνακα 1.

Τάση εισόδου Πηνίου Ηλεκτρομαγνήτη (V)	0.5V	1V	2V	4V	8V
Τάση Εξόδου Ενισχυτή (V)					
Ρεύμα Πηνίου Ηλεκτρομαγνήτη (mA)					

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

29. Επαναλάβετε τα βήματα 9 και 10 για κάθε τάση εισόδου του πηνίου που φαίνεται στον πίνακα 1 (μπορείτε να προσθέσετε και ενδιάμεσες τιμές).

30. Ρυθμίστε την τάση V_p της πηγής χρησιμοποιώντας το ποτενσιόμετρο P1 έτσι ώστε να πάρει τις τιμές που δίνονται στον πίνακα 2. Επαναλάβετε το βήμα 10.

Τάση εισόδου Πηνίου Ηλεκτρομαγνήτη (V)	8V	4V	2V	1V	0.5V
Τάση Εξόδου Ενισχυτή (V)					
Ρεύμα Πηνίου Ηλεκτρομαγνήτη (mA)					

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

31. Διακόψτε την τροφοδοσία.

32. Αποσυνδέστε την συσκευή No1 (λευκή τελεία) από την υποδοχή της.

33. Συνδέστε τη συσκευή No2 (κίτρινη τελεία) στην υποδοχή No1.

34. Επαναλάβετε τα βήματα 6 με 11 σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 3.

Τάση εισόδου Πηνίου Ηλεκτρομαγνήτη (V)	0.5V	1V	2V	4V	8V
Τάση Εξόδου Ενισχυτή (V)					
Ρεύμα Πηνίου Ηλεκτρομαγνήτη (mA)					

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Τάση εξόδου του Hall με σίδηρο σαν συνάρτηση αυξητικών τιμών στο ρεύμα πηνίου

35. Επαναλάβετε σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 4.

Τάση εισόδου Πηνίου Ηλεκτρομαγνήτη (V)	8V	4V	2V	1V	0.5V
Τάση Εξόδου Ενισχυτή (V)					
Ρεύμα Πηνίου Ηλεκτρομαγνήτη (mA)					

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Τάση εξόδου του Hall με σίδηρο σαν συνάρτηση φθίνουσας φοράς στις τιμές ρεύματος του πηνίου

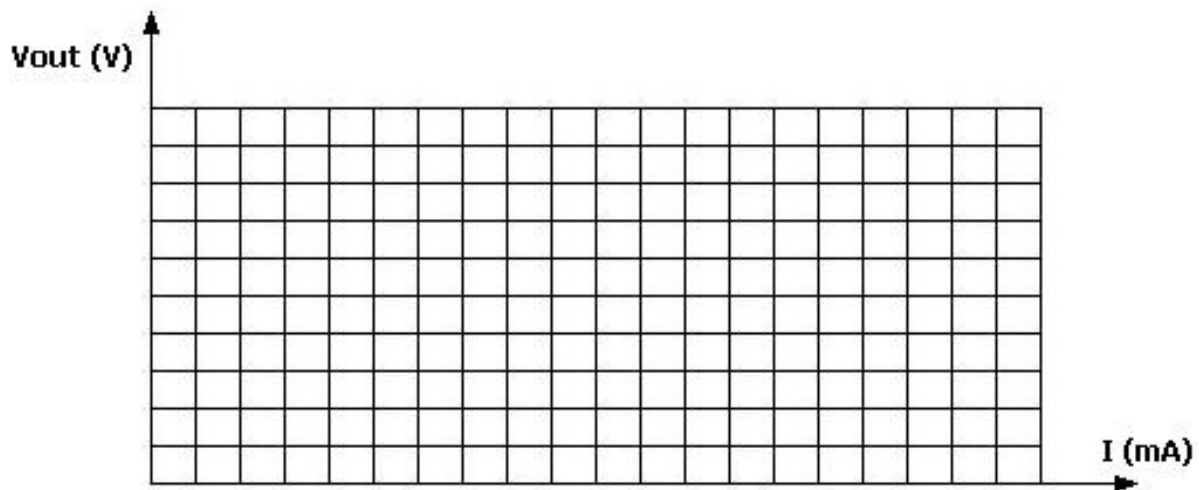
36. Διακόψτε την τροφοδοσία.

37. Αφαιρέστε όλες τις συνδέσεις που έχουν γίνει στο σύστημα.

38. Αφαιρέστε τη συσκευή Νο2 (κίτρινη τελεία) από την υποδοχή Νο1.

Ανάλυση Αποτελεσμάτων

- Υπολογίστε και συμπληρώστε στους πίνακες 1,2,3 και 4 τις τιμές ρεύματος του πηνίου σύμφωνα με την αντίσταση του πηνίου που υπολογίστηκε στα πρώτα βήματα και των τιμών της τάσης εισόδου του ηλεκτρομαγνήτη.
- Σχεδιάστε στο σχήμα 7 την γραφική παράσταση της τάσης εξόδου του ενισχυτή σαν συνάρτηση του ρεύματος πηνίου του ηλεκτρομαγνήτη χρησιμοποιώντας τις τιμές των πινάκων 1 και 2 (πείραμα με τη συσκευή Νο1)



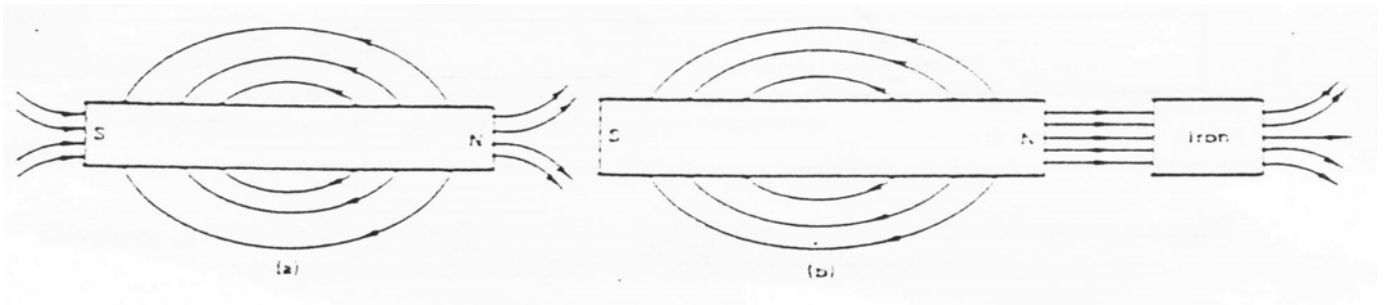
ΣΧΗΜΑ 7: Γράφημα της τάσης εξόδου του στοιχείου Hall χωρίς σίδηρο σαν συνάρτηση του ρεύματος του πηνίου

- Προσδιορίστε από τα αποτελέσματα την περιοχή γραμμικής λειτουργίας.
- Ποια είναι η ευαισθησία s' αυτή την περιοχή; ($\Delta V/\Delta I$)
- Ποια είναι η μέγιστη υστέρηση και που οφείλεται;
- Επαναλάβετε την παραπάνω διαδικασία για τις μετρήσεις των πινάκων 3 και 4 και συγκρίνετε το γράφημα με το αντίστοιχο του σχήματος 3. Διαφέρει η ευαισθησία και η υστέρηση; Διατυπώστε τις απόψεις σας.

4.2.2 Πείραμα 2: Το στοιχείο Hall σαν μετατροπέας κίνησης σε τάση

Εισαγωγή

Μετρήσεις διαφόρων φυσικών μεταβλητών όπως πάχος, στάθμη υγρού και πίεση, μπορούν να γίνουν σαν μετρήσεις κίνησης. Σε κάποια συστήματα, όταν απαιτείται να μεταφέρουμε κίνηση σε τάση, το στοιχείο Hall μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μετατροπέας. Όπως θυμάστε, το στοιχείο Hall μπορεί να μετρήσει την πυκνότητα της μαγνητικής ροής. Η εικόνα 4.9 δείχνει τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου ενός μόνιμου μαγνήτη.

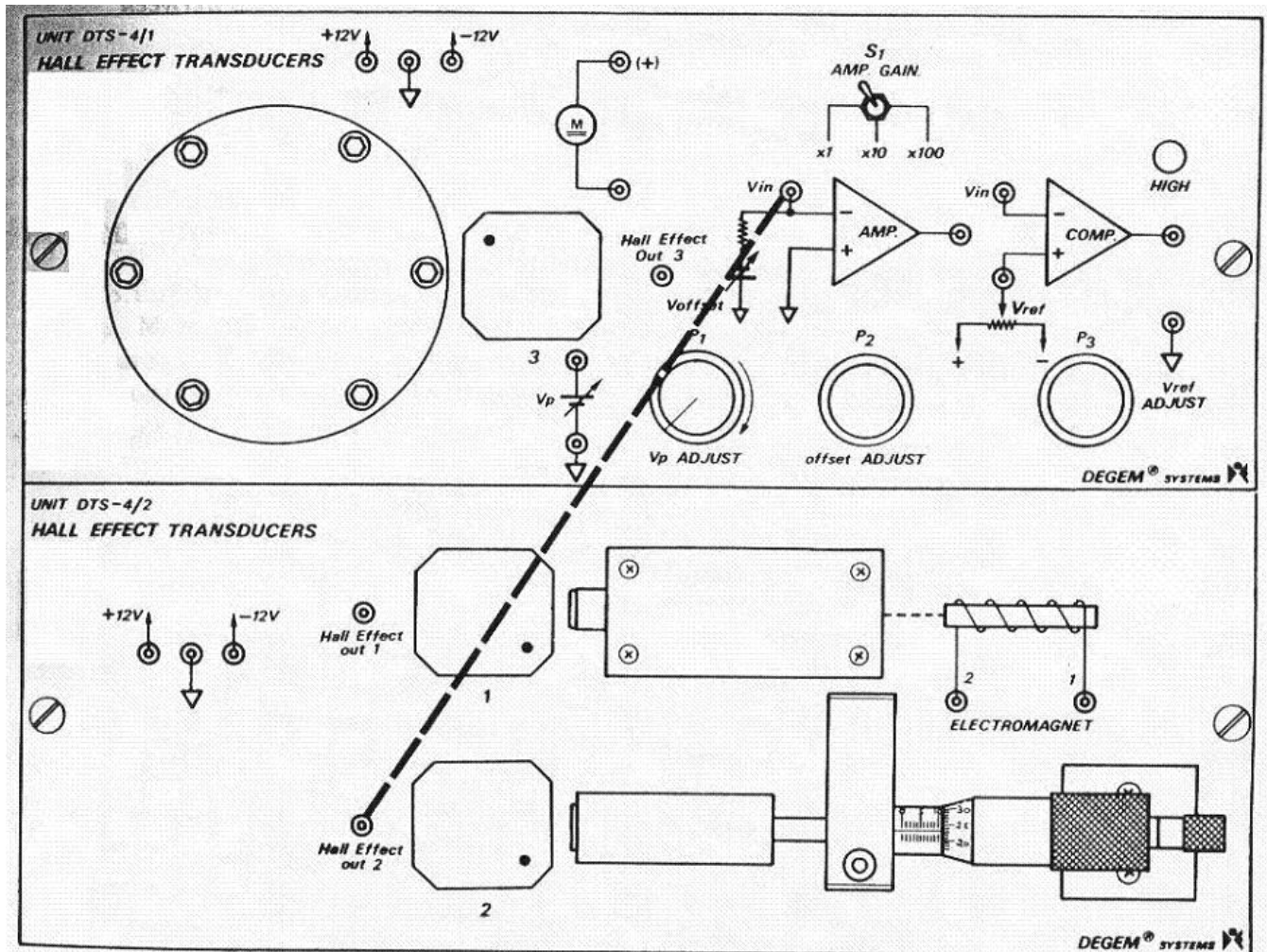


Εικόνα 4.9 Γραμμές Μαγνητικού Πεδίου

Το σχήμα α δείχνει τις διευθύνσεις των γραμμών του πεδίου στον αέρα χωρίς την παρουσία του μεταλλικού σώματος κοντά στον μαγνήτη. Όπως οι γραμμές του πεδίου διέρχονται στον αέρα, η πυκνότητα μαγνητικής ροής στον αέρα είναι πολύ μικρότερη από την πυκνότητα εντός του μαγνήτη. Πλησιάζοντας ένα μεταλλικό αντικείμενο κοντά στον μαγνήτη εξαναγκάζουμε τις δυναμικές γραμμές να συγκεντρωθούν όπως φαίνεται στο σχήμα β. η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο κενό μεταξύ μαγνήτη και σιδήρου είναι μεγαλύτερη από την κατάσταση χωρίς το σίδηρο. Έτσι προκύπτει πως η πυκνότητα ροής στο κενό είναι αντιστρόφως ανάλογη στην απόσταση μεταξύ μαγνήτη και μεταλλικού σώματος.

Σκοπός της Άσκησης

4. Να μετρήσουμε την επίδραση της απόστασης μεταξύ του μεταλλικού σώματος και του μόνιμου μαγνήτη στην πυκνότητα μαγνητικής ροής μεταξύ αυτών.
5. Να σχεδιάσουμε την χαρακτηριστική καμπύλη του μετατροπέα κίνησης σε τάση που βασίζεται στο φαινόμενο Hall.
6. Να αξιολογήσουμε την γραμμικότητα του μετατροπέα και να καθορίσουμε την ευαισθησία του σε διάφορες περιοχές μέτρησης.



Εικόνα 4.10 Κυκλωματικό Διάγραμμα

Πειραματική Διαδικασία

13. Συνδέστε το στοιχείο Νο3 (κόκκινη τελεία) στην υποδοχή Νο2.
 14. Συνδέστε την τάση εξόδου Νο2 του Hall στην είσοδο V_{in} του ενισχυτή (εικόνα 4.10).
 15. Καθορίστε το σχετικό μηδέν του μικρομέτρου τοποθετώντας τον μεταλλικό κύλινδρο κοντά αλλά όχι να ακουμπά το στοιχείο Hall Νο3 (κόκκινη τελεία).
 16. Θέστε τον διακόπτη S_1 στη θέση x10.
 17. Ανοίξτε την τροφοδοσία.
- Σημείωση: για να εξασφαλίσετε σταθερές μετρήσεις περιμένετε λίγο πριν πάρετε τις μετρήσεις σας.
18. Συνδέστε το πολύμετρο στην έξοδο του ενισχυτή.
 19. Ρυθμίστε την τάση εξόδου του ενισχυτή σε 4V χρησιμοποιώντας το ποτενσιόμετρο P_2 .
 20. Αλλάξτε τη θέση του μικρομέτρου σύμφωνα με τις τιμές του πίνακα 2. Σε κάθε περίπτωση, μετράτε την τάση εξόδου του ενισχυτή και την καταχωρείτε στον πίνακα 1.

Σχετική Θέση Μικρομέτρου (mm)	0	1	2	3	4
Τάση Εξόδου (V)					

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Τάσεις εξόδου στοιχείου Hall για αυξανουσες αποστάσεις μεταξύ μεταλλικού σώματος και μόνιμου μαγνήτη

21. Πλησιάστε το μικρόμετρο σύμφωνα με τις τιμές του πίνακα 2. Σε κάθε θέση μετρήστε την τάση εξόδου του ενισχυτή και καταχωρείστε την στον πίνακα 2. (ΠΡΟΣΟΧΗ μην ακουμπήσετε το στοιχείο Hall όπως πλησιάζει το μικρόμετρο)

Σχετική Θέση Μικρόμετρου (mm)	4	3	2	1	0
Τάση Εξόδου (V)					

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Τάσεις εξόδου του στοιχείου Hall όπως μειώνεται η απόσταση μεταξύ του μεταλλικού αντικειμένου και του μόνιμου μαγνήτη

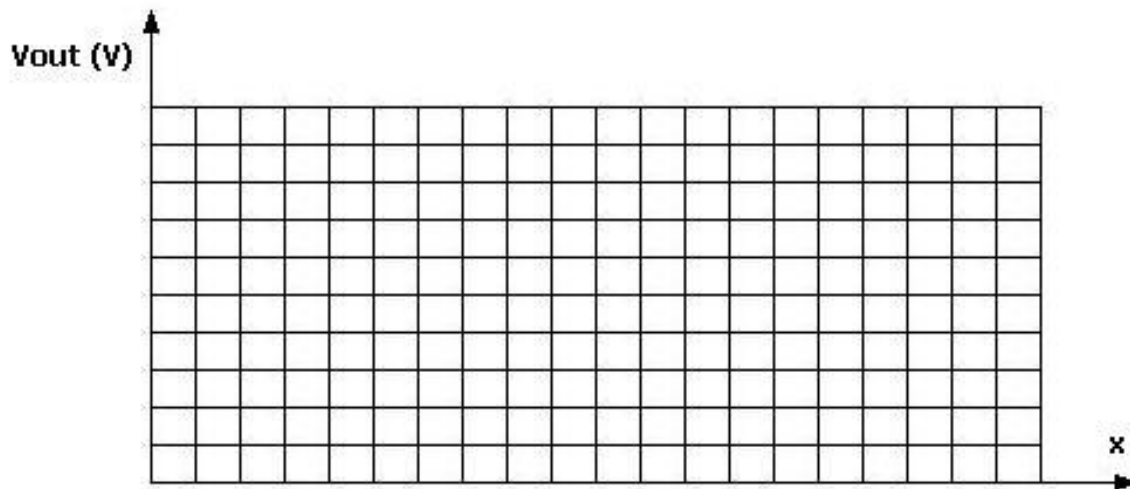
22. Κλείστε τη τροφοδοσία.

23. Μετακινήστε τις συνδέσεις του συστήματος.

24. Απομακρύνετε το στοιχείο Νο3 (κόκκινη τελεία) από την υποδοχή Νο2.

Ανάλυση Αποτελεσμάτων

5. Σχεδιάστε στο σχήμα 8 το γράφημα της τάσης εξόδου του ενισχυτή σαν συνάρτηση της σχετικής θέσης του μικρομέτρου. Χρησιμοποιείστε τις μετρήσεις από τους πίνακες 1 και 2.



ΣΧΗΜΑ 8: Γράφημα της τάσης εξόδου του ενισχυτή σαν συνάρτηση της σχετικής θέσης του μικρομέτρου

6. Καθορίστε τις περιοχές γραμμικής λειτουργίας από τα αποτελέσματα που έχετε και με τη βοήθεια του γραφήματος.

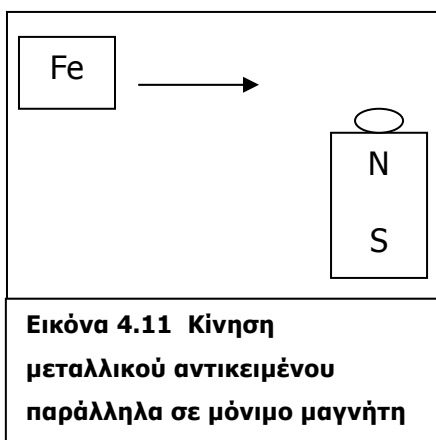
7. Ποια είναι η ευαισθησία σε κάθε περιοχή λειτουργίας;

8. Γράψτε την τιμή της μέγιστης υστέρησης σαν ποσοστό της πλήρους κλίμακας.

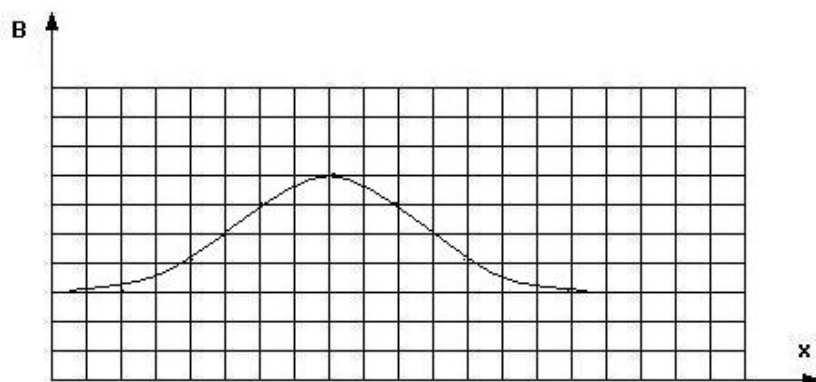
4.2.3 Πείραμα 3: Χρήση του στοιχείου Hall για τη μέτρηση περιστροφικής ταχύτητας

Εισαγωγή

Η εικόνα 4.11 δείχνει ένα μόνιμο μαγνήτη και ένα μεταλλικό αντικείμενο που κινείται παράλληλα στο βόρειο πόλο του μαγνήτη. Η πυκνότητα μαγνητικής ροής μεταξύ του μαγνήτη και του μεταλλικού αντικειμένου θα αυξάνεται καθώς το σιδερένιο σώμα θα πλησιάζει τον μαγνήτη. Μέγιστη πυκνότητα θα επιτευχθεί όταν το μεταλλικό σώμα θα έλθει στην κορυφή του μαγνήτη. Με την συνέχιση της κίνησης του μεταλλικού αντικειμένου προς τα δεξιά θα έχουμε μείωση της πυκνότητας μαγνητικής ροής. Η εικόνα 4.12 δείχνει την αλλαγή στην πυκνότητα μαγνητικής ροής σαν συνάρτηση της θέσης του μεταλλικού αντικειμένου.



Εικόνα 4.11 Κίνηση μεταλλικού αντικειμένου παράλληλα σε μόνιμο μαγνήτη

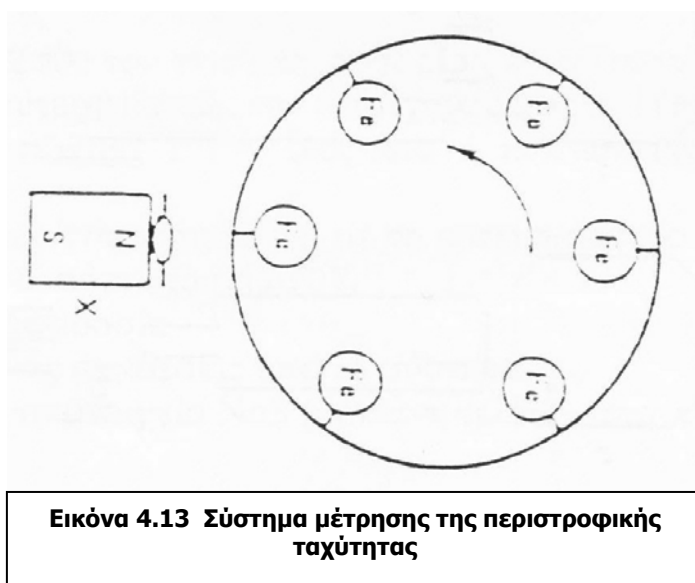


Εικόνα 4.12 Αλλαγή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής σαν συνάρτηση της θέσης του μεταλλικού αντικειμένου

Η αλλαγή της πυκνότητας μαγνητικής ροής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσουμε περιστροφική ταχύτητα. Η εικόνα 4.13 δείχνει ένα παράδειγμα συστήματος μέτρησης της περιστροφικής ταχύτητας που βασίζεται στην αλλαγή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής.

Στο παραπάνω σύστημα υπάρχει ένα περιστρεφόμενο πλατό από μη μεταλλικό υλικό. Μικρά κομμάτια από σίδηρο είναι προσαρμοσμένα στα χείλη του πλατό. Ο μόνιμος μαγνήτης είναι επίσης τοποθετημένος κοντά στο δίσκο, με το βόρειο πόλο κοντά στο χείλος του κυκλικού δίσκου. Κάθε φορά που ένα κομμάτι σιδήρου πλησιάζει τον μαγνήτη, όπως περιστρέφεται ο δίσκος, η πυκνότητα μαγνητικής ροής θα αλλάζει.

Το στοιχείο Hall που βρίσκεται τοποθετημένο στον βόρειο πόλο του μαγνήτη μας δίνει τη δυνατότητα να μετρήσουμε την αλλαγή στην



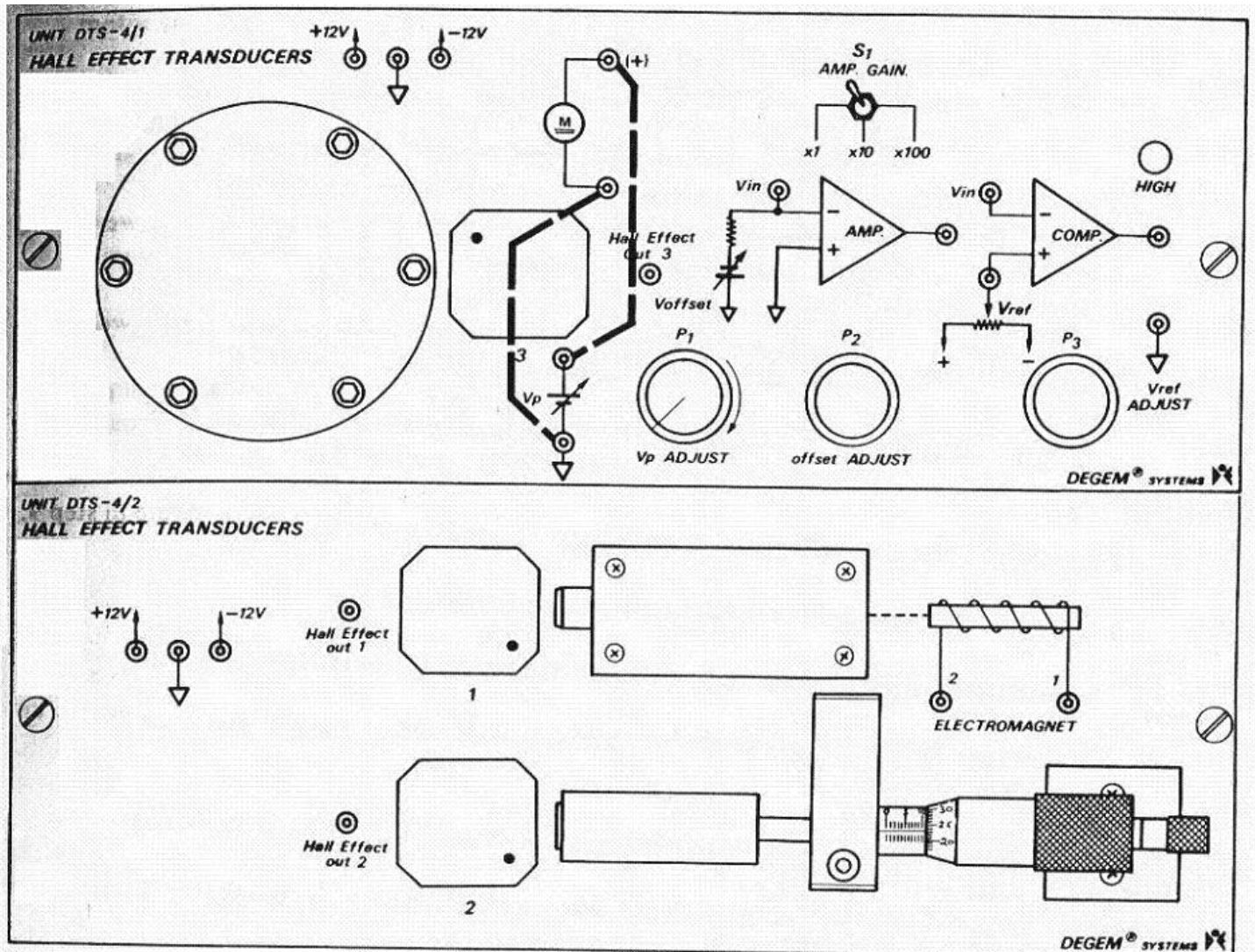
Εικόνα 4.13 Σύστημα μέτρησης της περιστροφικής ταχύτητας

πυκνότητα μαγνητικής ροής. Μπορούμε να μετρήσουμε την ταχύτητα περιστροφής του πλάτο με την μέτρηση του αριθμού των παλμών τάσης στην μονάδα του χρόνου που παρατηρούνται στην έξοδο του στοιχείου.

Σκοπός της Άσκησης

Είναι να μελετήσουμε τη μέθοδο χρήσης του στοιχείου Hall για μετρήσεις περιστροφικής ταχύτητας και η κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την ακρίβεια μιας τέτοιας μέτρησης.

Πειραματική Διαδικασία



Εικόνα 4.14 Κυκλωματικό Διάγραμμα

22. Συνδέστε το στοιχείο Νο3 (κόκκινη τελεία) στην υποδοχή Νο3.

23. Κάντε τις συνδέσεις όπως φαίνονται στην εικόνα 4.14.

- θετικός ακροδέκτης της πηγής τάσης V_p στην (+) είσοδο του μοτέρ
- αρνητικός ακροδέκτης της πηγής τάσης στην άλλη είσοδο του μοτέρ
- έξοδος Νο3 του στοιχείου Hall στην είσοδο V_{in} του ενισχυτή

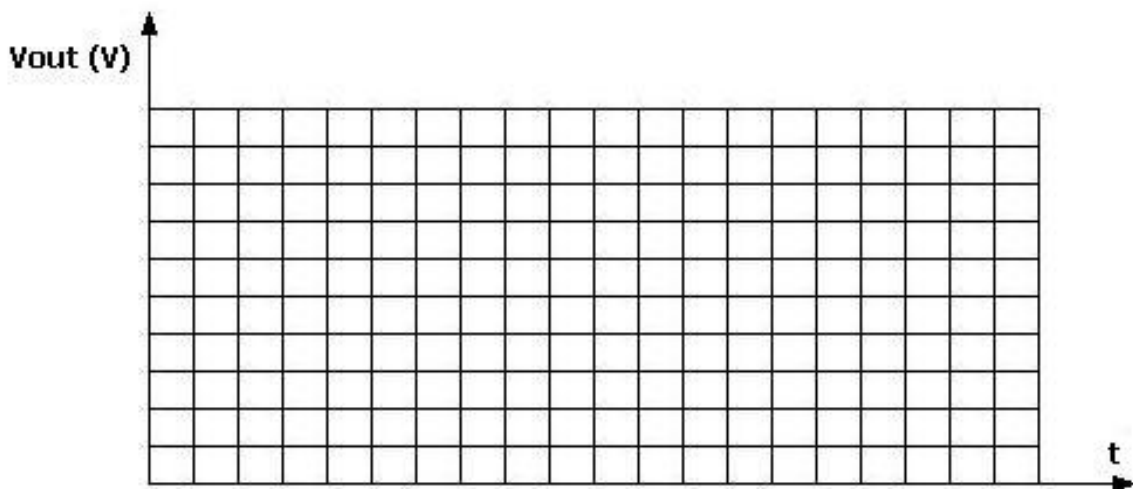
24. Ανοίξτε την τροφοδοσία.

25. Τοποθετήστε τον διακόπτη S_1 στη θέση x_{10} .

26. Συνδέστε το πολύμετρο στην έξοδο του ενισχυτή.
 27. Στρίψτε το πλατό με το χέρι σας έτσι ώστε ο μαγνήτης να βλέπει το άδειο τμήμα μεταξύ των δυο βιδών που είναι προσαρμοσμένες στο χείλος του πλατό.
 28. Τοποθετήστε την τάση εξόδου του ενισχυτή στο μηδέν με το ποτενσιόμετρο P2.
 29. Στρίψτε το πλατό με το χέρι σας έτσι ώστε ο μαγνήτης να βλέπει μια βίδα.
 30. Γράψτε την τάση που μετρείται στην έξοδο του ενισχυτή:

$$V_o = \quad V$$

31. Αποσυνδέστε το πολύμετρο.
 32. Συνδέστε την έξοδο του ενισχυτή στον παλμογράφο.
 33. Ρυθμίστε την τάση του μοτέρ στα 5V με το ποτενσιόμετρο P1.
 34. Σχεδιάστε την κυματομορφή που παρατηρείτε στον παλμογράφο στο σχήμα 9.



ΣΧΗΜΑ 9: Κυματομορφή εξόδου του ενισχυτή όπως περιστρέφεται το πλατό

35. Ρυθμίστε την τάση V_{ref} με το ποτενσιόμετρο P3 στο μισό της τάσης που γράψατε στο βήμα 9.
 36. Συνδέστε την έξοδο του ενισχυτή στην είσοδο του συγκριτή V_{in} .
 37. Συνδέστε το δεύτερο κανάλι του παλμογράφου στην έξοδο του συγκριτή.
 38. Γράψτε στον πίνακα 1 τη διάρκεια 6 παλμών όπως μετριοούνται από τον παλμογράφο.
 39. Μειώστε την ταχύτητα του μοτέρ με το ποτενσιόμετρο P1 σύμφωνα με τις τιμές του πίνακα 1 και επαναλάβετε το βήμα 17.

Τάση Μοτέρ	5V	4V	3V	2V	1V
Διάρκεια 6 παλμών (sec)					
Ταχύτητα (rpm)					

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Ταχύτητα μοτέρ σαν συνάρτηση της τάσης εισόδου του

40. Κλείστε την τροφοδοσία.
 41. Απομακρύνετε τις συνδέσεις από το σύστημα.
 42. Απομακρύνετε το στοιχείο Νο3 (κόκκινη τελεία) από την υποδοχή Νο3.

Ανάλυση Αποτελεσμάτων

6. Γράψτε την εξίσωση που συσχετίζει τον χρόνο των 6 κύκλων όπως μετριοούνται από τον παλμογράφο με την ταχύτητα του μοτέρ. Θυμηθείτε ότι υπάρχουν 6 βίδες στο χείλος του πλατό.
7. Υπολογίστε την ταχύτητα του μοτέρ με τη βοήθεια της φόρμουλας που επιτύχατε στην προηγούμενη ερώτηση χρησιμοποιώντας τις τιμές του πίνακα 1. Γράψτε τα αποτελέσματα στην τελευταία γραμμή του πίνακα 1.
8. Σχεδιάστε το γράφημα της μετρούμενης ταχύτητας σαν συνάρτηση της τάσης εισόδου του μοτέρ βασιζόμενοι στα αποτελέσματα του πίνακα 1.
9. Με ποιο τρόπο κατά τη γνώμη σας μπορεί να γίνει η μέτρηση με μεγαλύτερη ακρίβεια στις χαμηλές ταχύτητες;
10. Εξηγείστε γιατί το σήμα εξόδου του συγκριτή είναι προτιμότερο από το σήμα εξόδου του ενισχυτή όταν χρησιμοποιείται ένα σύστημα switching.