

ΕΝΟΤΗΤΑ 1^Η :
ΘΕΩΡΙΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΑ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Κεφάλαιο 1^ο

ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Δεν είναι υπερβολή να πούμε ότι σ' ένα μεγάλο βαθμό η αυτοματοποίηση με την μια ή την άλλη μορφή έχει εισβάλλει στη ζωή μας και όπως διαφαίνεται, στο μέλλον θα κυριαρχεί όλο και περισσότερο.

Το αυτόματο πλυντήριο, η αυτόματη κουζίνα, η αυτοματοποιημένη κεντρική θέρμανση είναι μόνο λίγα από τα παραδείγματα αυτοματοποιημένων συστημάτων που βρίσκονται ήδη στη διάθεση του 'μέσου' ανθρώπου.

Από την άλλη μεριά η αυτοματοποίηση στις γραμμές παραγωγής των εργοστασίων συντελεί στη συνεχή μείωση του κόστους των καταναλωτικών προϊόντων με παράλληλη βελτίωση της ποιότητας τους. Αυτοκίνητα, ηλεκτρικές-ηλεκτρονικές συσκευές, υπολογιστές παράγονται σε πλήρως αυτοματοποιημένες γραμμές και κατακλύζουν τις αγορές του κόσμου.

Και βέβαια ας μην λησμονηθεί η καταλυτική σπουδαιότητα του αυτόματου ελέγχου σε τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας όπως :

- Αεροδιαστημική
- Αυτόματη πλοήγηση αεροσκαφών-υποβρυχίων
- Αυτόματος έλεγχος πυρηνικών εργοστασίων
- Έξυπνα οπλικά συστήματα

Η ταχύτατη εξέλιξη των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου - που σε μεγάλο βαθμό οφείλεται σαφώς στην επανάσταση της μικροηλεκτρονικής και των υπολογιστών - υπόσχεται σήμερα να απαλλάξει τον άνθρωπο από μονότονες εργασίες. Ήδη τα βιομηχανικά ρομπότ αναλαμβάνουν ακούραστα και αδιαμαρτύρητα να εκτελέσουν πολλές τέτοιες εργασίες.

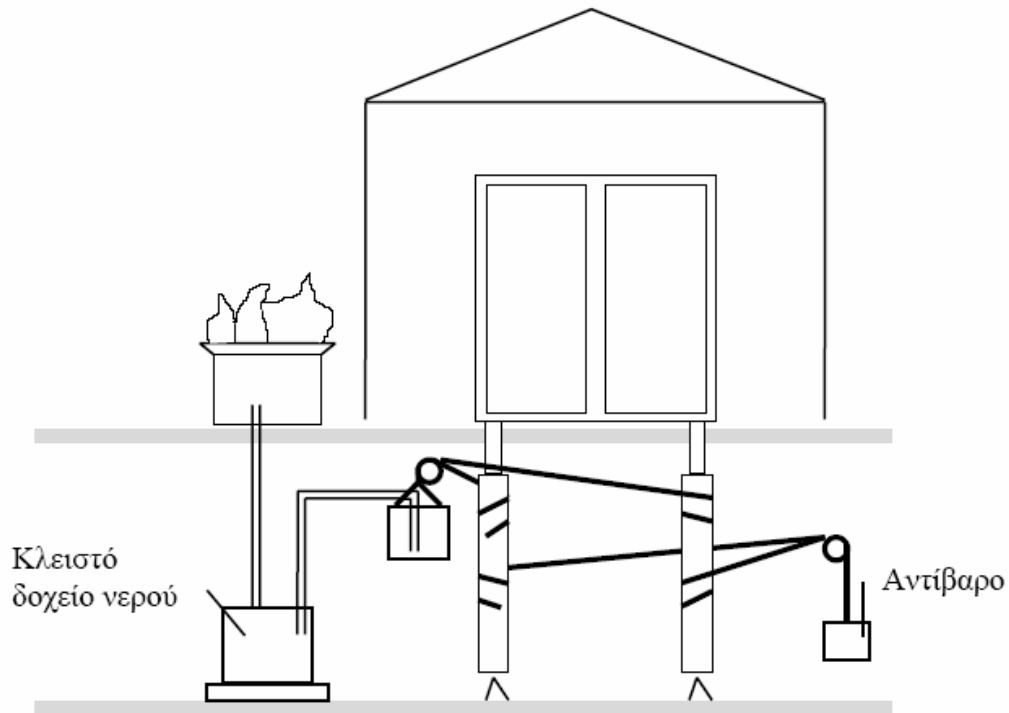
Υπάρχει πάντως λανθάνων και ο φόβος ότι η πλατιά εξάπλωση των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου στους χώρους δουλειάς οδηγεί στην ανεργία.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Ένα από τα πρώτα συστήματα αυτομάτου ελέγχου που αναφέρονται στην ιστορία είναι ο μηχανισμός που επινόησε ο Ήρωνας ο Αλεξανδρινός για το αυτόματο άνοιγμα των θυρών ενός αρχαίου ναού. Η διάταξη φαίνεται στο σχήμα 1.1 , και λειτουργούσε κάπως έτσι: Με το άναμμα της φωτιάς στο βωμό ο αέρας κάτω απ' αυτόν θερμαινόμενος διαστέλλεται και πιέζει το νερό από το κλειστό δοχείο να ανέβει στον κουβά. Ο τελευταίος γίνεται βαρύτερος και κατέρχεται ανοίγοντας τις θύρες με τη

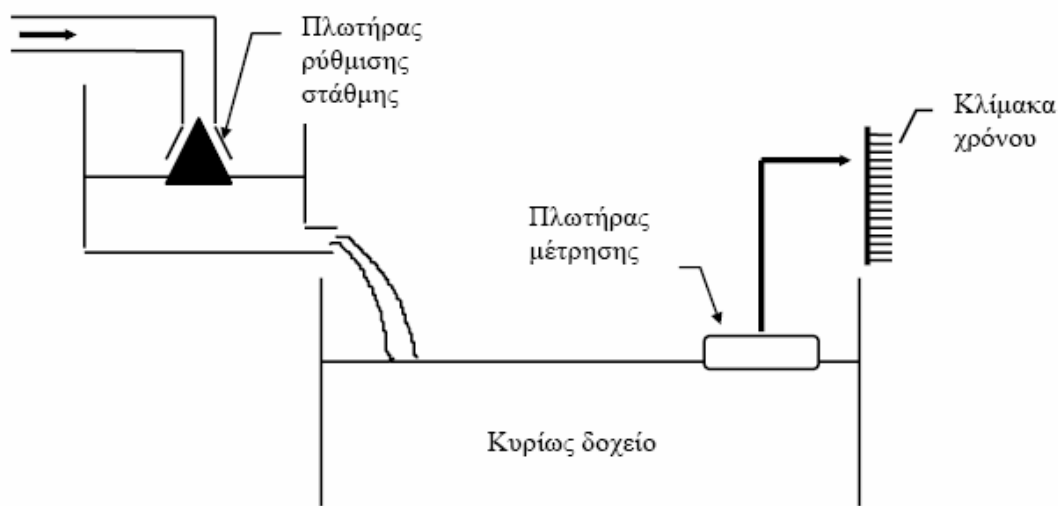
βοήθεια σχοινιών, παρασύρει δε και ανυψώνει το αντίβαρο . Η διαδικασία εξελίσσεται αντίστροφα όταν σβήσει η φωτιά. Ο αέρας κρυώνει, η πίεση του κλειστού δοχείου μικραίνει και συνεπώς το νερό κυλάει από τον κουβά στο κλειστό δοχείο λόγω βαρύτητας . Ο κουβάς λοιπόν γίνεται ελαφρύτερος οπότε κάποια στιγμή το αντίβαρο αρχίζει να κατεβαίνει κλείνοντας τις πόρτες .

Είναι πιθανόν ότι ο όλος μηχανισμός ενεργοποιείτο όταν οι ιερείς άρχιζαν να ανεβαίνουν τα σκαλοπάτια του ναού . Η διάταξη βέβαια δεν ήταν ορατή στους κοινούς θνητούς και έτσι το άνοιγμα αποδίδονταν στους Θεούς!



Σχήμα 1.1 Διάταξη που επινοήθηκε από τον Ήρωνα τον Αλεξανδρινό για το αυτόματο άνοιγμα θυρών ενός αρχαίου ναού.

Το πρώτο σύστημα ελέγχου με ανάδραση θεωρείται το υδάτινο ρολόι του Κτησίβιου που κατασκευάστηκε στην Αλεξάνδρεια τον 3ο π.Χ. αιώνα .



Σχήμα 1.2 Το υδάτινο ρολόι του Κτησίβιου

Στη διάταξη αυτή, που φαίνεται στο σχήμα 1.2, παραπάνω, ένα κύριο δοχείο χρησιμεύει για την συγκέντρωση νερού . Αν η ροή προς τη δεξαμενή διατηρείται σταθερή τότε η στάθμη της - κατάλληλα βαθμονομημένη - μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση του χρόνου. Προκειμένου να διατηρήσει τη ροή προς την δεξαμενή σταθερή, ο Κτησίβιος χρησιμοποίησε ένα δεύτερο δοχείο ρύθμισης . Του δοχείου αυτού έλεγχε την στάθμη με την βοήθεια ενός κωνικού πλωτήρα: Όταν η στάθμη κατέρχεται ο πλωτήρας κατερχόμενος αποκαλύπτει περισσότερο το στόμιο και επιτρέπει να περάσει περισσότερο νερό, άρα η στάθμη ξανανεβαίνει . Η σταθερή στάθμη του νερού στο δευτερεύον δοχείο επιβάλλει σταθερή ροή προς το κύριο (Η ροή από σταθερό στόμιο δοχείου εξαρτάται μόνο από τη στάθμη του νερού σ' αυτό) .Ένα μάλλον ογκώδες ρολόι ιδιαίτερα αν συγκριθεί με τα σύγχρονα ηλεκτρονικά!

Στο ρολόι του Κτησίβιου συναντάμε την αρχή της ανάδρασης: Η ελεγχόμενη ποσότητα (στάθμη του βοηθητικού δοχείου) ανατροφοδοτείται (επηρεάζει) στην είσοδο του συστήματος που είναι η ροή του νερού προς αυτό .

Κατά καιρούς εμφανίστηκαν και άλλα πρωτόγονα συστήματα αυτομάτου ελέγχου . Το πρώτο όμως που βρήκε (και βρίσκει) ευρεία χρήση, θεωρείται ο φυγοκεντρικός ρυθμιστής ταχύτητας που εφευρέθηκε το 1788 από τον James Watt για τον έλεγχο ταχύτητας των ατμομηχανών .

Ο ρυθμιστής του Watt εξελιγμένος φυσικά χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα για την ρύθμιση στροφών μοντέρνων στροβιλομηχανών . Το σύστημα είναι ενδιαφέρον από άποψη ευστάθειας, και μόνο το 1868 ο Maxwell το μελέτησε αναλυτικά .

Ισχυρή ώθηση δόθηκε στον Αυτόματο Έλεγχο κατά τη διάρκεια του 2ου Παγκοσμίου Πολέμου . Τότε η επιτακτική ανάγκη για τους εμπόλεμους να κατασκευάζουν συνεχώς τελειότερα όπλα, οδήγησε στην κατασκευή αυτομάτων συστημάτων σκόπευσης πυροβόλων, συστημάτων αυτόματης κατεύθυνσης κεραιών radar, συστημάτων αυτόματης πλοήγησης αεροσκαφών και υποβρυχίων. Δυστυχώς για μια ακόμη φορά ο Ηράκλειτος επαληθεύθηκε : ‘πόλεμος πατήρ πάντων..’ . Ακόμη και σήμερα, μετά τον ψυχρό πόλεμο, μεγάλα ποσά χρημάτων κατευθύνεται στην έρευνα οπλικών συστημάτων. Τουλάχιστον - κάτι είναι κι' αυτό - μετά κάποια χρονική περίοδο, τα αποτελέσματα των ερευνών στα εργαστήρια της πολεμικής βιομηχανίας κατευθύνονται σε ειρηνικούς σκοπούς...

Στη δεκαετία '50 - '60 εμφανίστηκαν οι αναλογικοί και στη συνέχεια οι ψηφιακοί υπολογιστές . Τα εργαλεία αυτά έχοντας την ικανότητα να μετρούν μεταβλητές και να εκτελούν ταχύτατα υπολογισμούς, έδωσαν τεράστια ώθηση στον αυτόματο έλεγχο . Σήμερα οι ψηφιακοί υπολογιστές έχουν ολοκληρωτικά επικρατήσει των αναλογικών . Εκατομμύρια απ' αυτούς είναι εγκατεστημένοι στη βιομηχανία όπου ελέγχουν διεργασίες παρακολουθώντας και ελέγχοντας πλήθος μεταβλητών .

Στη ίδια δεκαετία οι ανάγκες της αεροναυπηγικής βιομηχανίας για την κατασκευή εξαρτημάτων αεροσκαφών μεγάλης ακρίβειας οδήγησαν στην ανάπτυξη των αυτομάτων εργαλειομηχανών . Έτσι η πολεμική αεροπορία των ΗΠΑ ανέθεσε στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασαχουσέτης (MIT) την κατασκευή ηλεκτρονικά οδηγούμενης αυτόματης, προγραμματιζόμενης φρέζας μεγάλης ακριβείας . Σήμερα χιλιάδες μοντέρνες αυτόματες εργαλειομηχανές (CNC) είναι εγκατεστημένες και λειτουργούν στη βιομηχανία .

Αρχές της δεκαετίας του '60 η αμερικάνικη εταιρία UNIMATE κατασκευάζει το πρώτο ρομπότ, που χρησιμοποιείται σαν συγκολλητής σε γραμμή παραγωγής αυτοκινήτων . Σήμερα χιλιάδες βιομηχανικά ρομπότ εργάζονται ακούραστα απαλλάσσοντας ανθρώπους από μονότονες, κουραστικές και ανθυγιεινές εργασίες .

1.3 ΛΟΓΟΙ ΠΟΥ ΟΔΗΓΗΣΑΝ ΣΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Αρχικά τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου μπήκαν στην βιομηχανία λόγω της ανάγκης μείωσης του κόστους παραγωγής - μειώνοντας το κόστος εργατικών και αυξάνοντας τους ρυθμούς παραγωγής . Σε πολλές περιπτώσεις πραγματικά ο αριθμός των εργαζομένων στις γραμμές παραγωγής μειώθηκε δραστικά . Από την άλλη μεριά όμως οι ανάγκες άκρως εξειδικευμένου προσωπικού όπως και το υψηλό κόστος απόκτησης του εξοπλισμού αντισταθμίζουν τα οικονομικά οφέλη από τη μείωση των εργαζομένων . Έτσι σε πολλές περιπτώσεις τα οικονομικά αποτελέσματα δεν ήταν τόσο ικανοποιητικά όσο αναμενόταν .

Η ανάγκη περιορισμού των ελαττωματικών προϊόντων που παράγονται σε μια γραμμή παραγωγής είναι ένας άλλος λόγος για την εισαγωγή συστημάτων αυτομάτου ελέγχου . Τα αυτόματα συστήματα λειτουργούν ασταμάτητα και με την ίδια αξιοπιστία, ενώ τα αναπόφευκτα ανθρώπινα λάθη οδηγούν σε αύξηση των ελαττωματικών προϊόντων .

Η ανάγκη παραγωγής προϊόντων υψηλής ποιότητας - εντός αυστηρών προδιαγραφών είναι ένας άλλος λόγος που μπορεί από μόνος του να δικαιολογήσει την εγκατάσταση αυτοματοποιημένων συστημάτων. Π.χ. Εξαρτήματα ακριβείας σε μηχανές C.N.C.

Πρέπει ακόμη να αναφερθούμε στην ανάγκη αυτοματοποίησης των συστημάτων εκείνων με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά :

- Λειτουργούν εκεί που δεν μπορεί να επέμβει ο άνθρωπος : Στο φεγγάρι, μη επανδρωμένα διαστημόπλοια, βυθούς των ωκεανών ή στο μολυσμένο περιβάλλον ενός πυρηνικού αντιδραστήρα .
- Εκεί που η διαδικασία ελέγχου είναι πολύ πολύπλοκη έτσι που να μη μπορεί να γίνει από ανθρώπους : Έλεγχος ροής φυσικού αερίου από Σιβηρία προς Ευρώπη .
- Εκεί όπου ορισμένες ενέργειες ελέγχου είναι πολύ κρίσιμες για να αφεθούν στις ικανότητες ενός ανθρώπου : Μοντέρνα συστήματα πλοήγησης αεροσκαφών .

Οποιοσδήποτε κι' αν είναι ο λόγος αυτοματοποίησης μιας διαδικασίας ή της άλλης, αποφασιστικό ρόλο παίζει το κόστος . Πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις οδηγούν στη δραστική μείωση του κόστους απόκτησης μονάδων συστημάτων αυτομάτου ελέγχου . Αναφερόμαστε κυρίως στην εντυπωσιακή μείωση του κόστους μικροϋπολογιστών με την παράλληλη αύξηση των δυνατοτήτων τους .

Τα παραπάνω δικαιολογούν τον ισχυρισμό ότι η τεχνολογία του αυτομάτου ελέγχου είναι ένας τομέας ταχύτατα εξελισσόμενος . Η μεγάλη πλειοψηφία των συστημάτων παραγωγής που σχεδιάζονται και εγκαθίστανται σήμερα είναι είτε εξ αρχής πλήρως αυτοματοποιημένα είτε έτσι σχεδιασμένα που μπορούν να αυτοματοποιηθούν εύκολα .

1.4 ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Οι εντυπωσιακές εξελίξεις της μικροηλεκτρονικής συμβάλλουν σήμερα στο να αναπτύσσονται τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου με ραγδαίους ρυθμούς . Αναφερόμαστε κυρίως στα παρακάτω :

Μικροεπεξεργαστές και μικροϋπολογιστικά συστήματα, που αποτελούν το "μυαλό" κάθε μοντέρνου συστήματος ελέγχου, παράγονται μαζικά . Οι τιμές τους όπως και οι διαστάσεις τους μικραίνουν ενώ οι δυνατότητες τους από άποψη υπολογιστικής και αποθηκευτικής ικανότητας όλο ένα αυξάνονται.

Η αγορά των ηλεκτρονικών κατακλύζεται από λογής - λογής φτηνά **αισθητήρια** (sensors) που αποτελούν απαραίτητες λειτουργικές μονάδες κάθε αυτομάτου συστήματος ελέγχου : Αισθητήρια θέσης, ταχύτητας, επιτάχυνσης, δύναμης, πίεσης, ροής, στάθμης, θερμοκρασίας, ακτινοβολίας . Ελάχιστα σε διαστάσεις και με τιμές ολοένα και πιο προσιτές .

Οι επενεργητές (actuators), με τη βοήθεια των οποίων έχουμε τη δυνατότητα να επέμβουμε και να ελέγξουμε διαδικασίες, παράγονται και αυτοί μαζικά και τελειοποιούνται συνεχώς : Υδραυλικοί και πνευματικοί επενεργητές αλλά και ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες συνεχούς ή εναλλασσομένου ρεύματος .

Τα επιτεύγματα και οι εξελίξεις στην τεχνολογία των λειτουργικών τμημάτων των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, συμβάλλει στο να αναπτύσσονται σήμερα αξιοζήλευτα συστήματα .

- *Έλεγχος διεργασιών* : Οι Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές (Programmable logical Controllers, PLCs) έχουν την δυνατότητα να ελέγξουν τις πλέον πολύπλοκες διαδικασίες μετρώντας χιλιάδες μεταβλητών και ελέγχοντας συνακόλουθα .

- *Ρομποτική* : Το βιομηχανικό ρομπότ είναι η αιχμή του δόρατος της νέας τεχνολογίας . Προγραμματίζεται και χρησιμοποιείται για να κάνει μονότονα επαναλαμβανόμενες εργασίες, αλλά οι δυνατότητες του συνεχώς αυξάνονται και οι ερευνητικές προσπάθειες στρέφονται στο να το κάνουν ικανό να αισθάνεται το περιβάλλον : Με τεχνητή όραση και τεχνητή νοημοσύνη, ώστε να μπορεί να αντιδρά σε απρόβλεπτες μεταβολές.

- *Αυτόματες Προγραμματιζόμενες Εργαλειομηχανές* (CNC : Computer Numerical Control Machines) . Τεχνολογία περίπου ίδια μ' εκείνη του ρομπότ, εξαπλώνεται όλο και σε περισσότερες μηχανές με σκοπό να τις κάνει προγραμματιζόμενες άρα ευέλικτες . Εκτός από τις κλασικές εργαλειομηχανές μια σειρά από άλλες σχεδιάζονται και κατασκευάζονται με την παραπάνω τεχνολογία : Μηχανές κοπής μετάλλων, μηχανές για την αυτόματη συναρμολόγηση ηλεκτρονικών πλακετών.

Τα επιτεύγματα στη τεχνολογία των επικοινωνιών μεταξύ υπολογιστικών συστημάτων συμβάλλει στη προσπάθεια διασύνδεσης των επί μέρους συστημάτων είτε μεταξύ τους είτε με άλλα . Φανταστείτε μερικές αυτόματες εργαλειομηχανές και ένα σύστημα (πιθανόν ένα βιομηχανικό ρομπότ) για τη μεταφορά των προς επεξεργασία εξαρτημάτων από την μια μηχανή στην άλλη. Φανταστείτε ακόμη ένα κεντρικό υπολογιστή που αναλαμβάνει να εποπτεύει το όλο σύστημα, "μιλώντας" και δίνοντας οδηγίες στους ελεγκτές (υπολογιστές και αυτοί) των διαφόρων μηχανών . Τότε έχετε ένα όπως ονομάζεται ευέλικτο κατασκευαστικό κελί (ή σύστημα) παραγωγής (Flexible Manufacturing System, FMS) . Σ' ένα τέτοιο σύστημα μπορούν να παραχθούν διάφορα εξαρτήματα, που η περιγραφή (γεωμετρία) τους είναι αποθηκευμένη στον κεντρικό υπολογιστή, μάλιστα δε όποτε αυτά χρειάζονται και όσα χρειάζονται.

Ένα σκαλοπάτι παραπάνω στην ολοκλήρωση των συστημάτων αποτελεί η διασύνδεση τους σε επίπεδο εργοστασίου . Με τη βοήθεια ενός τοπικού δικτύου επικοινωνιών (Local Area Network, LAN), οι εποπτεύοντες των διαφόρων FMS υπολογιστές, "μιλούν" μεταξύ τους ανταλλάσσοντας πληροφορίες, αλλά και καθοδηγούνται αλλά και ενημερώνουν τον κεντρικό πλέον υπολογιστή του συστήματος παραγωγής.

Μιλάμε πλέον βέβαια για Ολοκληρωμένες Διαδικασίες Παραγωγής με τη βοήθεια του Υπολογιστή (Computer Intergrated Manufacturing, CIM) . Τέτοια συστήματα υπάρχουν ήδη και λειτουργούν .

Ερευνητικά προγράμματα σε Ιαπωνία, ΗΠΑ αλλά και Ευρώπη έχουν αρχίσει ήδη με στόχο την κατασκευή εργοστασίου που θα λειτουργεί χωρίς ούτε έναν άνθρωπο ! Αν και προς το παρόν φαίνεται πολύ μακρινό, τίποτα δεν μπορεί να αποκλεισθεί .

1.5 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ - ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ

Ποιες είναι οι συνέπειες των παραπάνω τεχνολογικών εξελίξεων για την κοινωνία ;

Επίδραση στη "φύση της" εργασίας

Ο άνθρωπος αποσύρεται σταδιακά από τη χειρονακτική εργασία, που θα εκτελείται πλέον από "έξυπνες" προγραμματιζόμενες μηχανές . Δεν θα κουράζεται πλέον σωματικά αλλά θα εξακολουθεί να υπάρχει πνευματική κόπωση .

Οι μονότονες δουλειές θα αναλαμβάνονται από τις μηχανές και οι άνθρωποι θα είναι ελεύθεροι να ασχολούνται με πιο δημιουργικές εργασίες που θα τον κάνουν πιο αποτελεσματικό και θα του αφήνουν χρόνο για νέες ανακαλύψεις .

Κάποια προβλήματα όμως διαφαίνονται ήδη στον ορίζοντα :

Θα υπάρξουν αρκετοί ειδικευμένοι άνθρωποι που θα είναι σε θέση να χειριστούν τα όλο και πιο πολύπλοκα αυτόματα συστήματα παραγωγής; Είναι πιθανόν ότι σύντομα θα κατακλυστούμε από τέτοια συστήματα αλλά δεν θα έχουμε αρκετούς ειδικούς γ'

αυτά. Έκθεση επιτροπής της Ευρωπαϊκής Ένωσης που δημοσιεύθηκε το 1995, αναφέρει ότι υπάρχουν και θα υπάρξουν ελλείψεις υψηλά καταρτισμένων τεχνικών στελεχών στους τομείς των νέων τεχνολογιών και συστημάτων παραγωγής. Ήδη γίνεται λόγος για μια τεχνολογική 'ελίτ' που θα σχεδιάζει και θα εποπτεύει τις νέες αυτοματοποιημένες διαδικασίες παραγωγής.

1.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΑΝΕΡΓΙΑ

Από την άλλη μεριά όμως χάνονται συνεχώς θέσεις εργασίας ανειδίκευτου προσωπικού. Αναμφισβήτητα πολλά επαγγέλματα περνούν κρίση. Σκεφτείτε τους τονναδόρους για παράδειγμα. Εδώ η ιδέα κλειδί είναι η συνεχής μετεκπαίδευση στις νέες τεχνολογίες.

Παρ' όλα αυτά, η τεχνολογική ανεργία όπως ονομάζεται απειλεί σοβαρά ένα μεγάλο μέρος των εργαζομένων και αυτό φαίνεται να συνειδητοποιείται σιγά - σιγά παγκοσμίως. Φαίνεται οξύμωρο αλλά αυτό που οραματίστηκαν κάποιοι ρομαντικοί της τεχνολογίας κάποτε : ένα κόσμο δηλαδή στον οποίο οι μηχανές θα δουλεύουν και οι άνθρωποι θα έχουν αρκετό ελεύθερο χρόνο για να φιλοσοφούν, να παίζουν και να ερωτεύονται, αυτό δηλαδή που σήμερα θα μπορούσε να συμβαίνει λόγω της τεχνολογικής έκρηξης, φαντάζει ακόμη μακρινό. Αντίθετα, για εκατομμύρια εργαζόμενους των οποίων η εργασία απειλείται, οι νέες τεχνολογίες ακούγονται σαν εφιάλτης.

Η λύση δεν μπορεί να είναι άλλη από την μείωση των ωρών εργασίας και αυτό φαίνεται ότι έχει αρχίσει να γίνεται συνείδηση σε Ευρώπη, Αμερική και Ιαπωνία.

Απαιτείται σίγουρα για κάτι τέτοιο συναίνεση σε παγκόσμιο επίπεδο, αφού οι αγορές είναι πλέον εντελώς διεθνοποιημένες και κάθε χώρα προβάλλει το επιχείρημα της ανταγωνιστικότητας των προϊόντων της. Η συναίνεση αυτή δεν είναι και τόσο εύκολη υπόθεση ασφαλώς. Φαίνεται και πάλι παρανοϊκό, αλλά λόγω ακριβώς της περίφημης αυτής ανταγωνιστικότητας, οι έχοντες εργασία δουλεύουν σκληρότερα για να την διατηρήσουν και να παράγουν όλο και περισσότερα και φτηνότερα προϊόντα - πολλά από τα οποία παντελώς άχρηστα για τις πραγματικές μας ανάγκες - ενώ κάποιοι άλλοι συσσωρεύονται στις λίστες των ανέργων.

Το πρώτο βήμα για μια κάποια λύση : η συνειδητοποίηση δηλαδή της τεράστιας αντίφασης φαίνεται να έχει γίνει. Μένει να δούμε αν θα παρθούν οι σωστές αποφάσεις, έτσι που η (νέα) τεχνολογία και οι τεράστιες παραγωγικές δυνατότητες που προσφέρει, να γίνουν ευλογία και όχι κατάρα.

Κεφάλαιο 2^ο **ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ**

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο όρος *αυτοματισμός* (automation), θα μπορούσαμε να πούμε ότι έχει διπλή σημασία : χρησιμοποιείται για μηχανές οι οποίες έχουν την ικανότητα να διορθώνουν αυτόματα τη συμπεριφορά της λειτουργίας τους σύμφωνα με κάποια επιθυμητή συνθήκη, δηλαδή να <<αυτοελέγχονται>> , και επίσης χαρακτηρίζει τις μεθόδους κατασκευής αυτομάτων μηχανών.

Όπως η *μηχανοποίηση* απάλλαξε τον εργάτη του εργοστασίου από τη μεγάλη φυσική καταπόνηση, έτσι και ο *αυτοματισμός* τον απάλλαξε από την επίμονη, συνεχή ή περιοδική απασχόληση του χειρισμού ελέγχου των μηχανών. Πολλοί θεωρούν τον αυτοματισμό τόσο σημαντικό επίτευγμα, ώστε τον χαρακτηρίζουν σαν <<δευτέρα βιομηχανική επανάσταση>> , και αυτό επειδή ο αυτοματισμός όχι μόνο αυξάνει την παραγωγική αποδοτικότητα αλλά συγχρόνως τροποποιεί ριζικά τη σχέση του ανθρώπου με τις μηχανές.

Η βασικότερη διαφορά μεταξύ κοινών και αυτομάτων μηχανών είναι η λεγόμενη *ανατροφοδότηση* (feedback). Η ανατροφοδότηση επιτυγχάνεται όταν ένας μετρητής-επόπτης, παρακολουθεί συνεχώς τη λειτουργία της μηχανής και τη συγκρίνει με την επιθυμητή λειτουργία. Η πληροφορία που προκύπτει από την σύγκριση αυτή ανατροφοδοτείται δια μέσου κάποιου ελεγκτή στη μηχανή και επιφέρει τις απαραίτητες μεταβολές για την βελτίωση της λειτουργίας της.

Ένα απλό παράδειγμα ανατροφοδοτήσεως είναι ο θερμοστάτης του συστήματος θερμάνσεως ενός σπιτιού. Έστω ότι έχουμε ρυθμίσει τον θερμοστάτη σε κάποια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Όταν η θερμοκρασία του δωματίου ξεπεράσει αυτή την συγκεκριμένη θερμοκρασία, ο θερμοστάτης που είναι μετρητής-επόπτης της θερμοκρασίας αντιλαμβάνεται τη διαφορά των δύο θερμοκρασιών και αυτόματα διακόπτει τη λειτουργία του καυστήρα. Ο καυστήρας με την σειρά του παραμένει σβηστός μέχρι ώσπου ο θερμοστάτης ανατροφοδοτήσει την πληροφορία ότι η θερμοκρασία του δωματίου έπεσε κάτω από τους επιθυμητούς βαθμούς που είχαμε ορίσει τον θερμοστάτη οπότε ανάβει και πάλι αυτόματα. Ένα άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα ανατροφοδοτήσεως είναι η αυτόματη λειτουργία του θερμοσίφωνα. Όταν η θερμοκρασία του νερού πέσει γίνεται αμέσως αντιληπτή από τον θερμοστάτη του θερμοσίφωνα. Ο θερμοστάτης ανατροφοδοτεί την πληροφορία αυτή στον καυστήρα, οπότε ο καυστήρας ανάβει και αρχίζει να θερμαίνει το νερό. Όταν το νερό θερμανθεί ο θερμοστάτης αυτόματα σβήνει τον καυστήρα.

ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ Σ. Α. Ε. : Σύστημα αυτομάτου ελέγχου (Σ. Α. Ε.) ονομάζουμε κάθε φυσική ή τεχνική διάταξη που μπορεί να ελέγχει και να ρυθμίζει ορισμένα μεγέθη που

αποτελούν λειτουργίες ή άλλες διατάξεις που κάνουν αυτές τις λειτουργίες. Έτσι γενικά, Σ. Α. Ε. είναι ένα σύστημα που τα διάφορα μέρη του είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους έτσι ώστε να συμπεριφέρονται αυτόματα κατά ένα προκαθορισμένο επιθυμητό τρόπο. Π.χ. Σ. Α. Ε. μπορεί να ελέγχει την θερμοκρασία, το φωτισμό, την ταχύτητα, τη θέση, τη ροή, τη διεύθυνση, την τάση, τις διαστάσεις, την υγρασία την πίεση κ.λ.π. ή να ελέγχει άλλα συστήματα που εκτελούν μία από τις παραπάνω λειτουργίες.

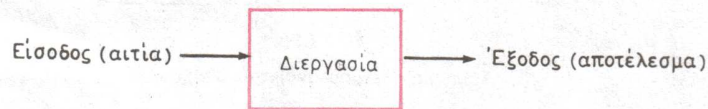
Ο ορισμός αυτός είναι γενικός και δεν περιλαμβάνει τα κατασκευαστικά δεδομένα των διατάξεων ούτε και τη λεπτομερή λειτουργία τους.

Γενικά ένα Σ. Α. Ε. μπορούμε να πούμε ότι έχει μια “είσοδο” που δέχεται ένα σήμα ή κάποιο ερεθισμό, ένα κεντρικό τμήμα που “επεξεργάζεται” τον ερεθισμό και βγάζει την απόκριση του συστήματος και μία “έξοδο” που δίνει αυτή την απόκριση με την οποία ελέγχουμε, παρακολουθούμε ή διορθώνουμε το σήμα ή ερεθισμό.

2.2 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Το σύστημα αυτομάτου ελέγχου είναι ένα σύνολο αλληλοσυνδεδεμένων μηχανισμών και εξαρτημάτων που αποσκοπεί να πετύχει ένα επιθυμητό αποτέλεσμα(απόκριση).

Η βάση για την ανάλυση των συστημάτων ελέγχου είναι η θεωρία γραμμικών συστημάτων η οποία προϋποθέτει ότι υπάρχει η σχέση <<αιτίου-αποτελέσματος>> μεταξύ των διάφορων στοιχείων που αποτελούν το σύστημα. (Ένα σύστημα λέγεται γραμμικό, όταν η έξοδος του ακολουθεί την είσοδο του συστήματος). Η σχέση αυτή είναι δυνατό να κατανοηθεί με την βοήθεια του σχήματος 2.1 , παρακάτω, όπου βλέπουμε ένα σχηματικό διάγραμμα κάποιας διεργασίας που θα αποτελέσει αντικείμενο ελέγχου.



Σχήμα 2.1 Διεργασία.

Θα χρησιμοποιήσουμε το παράδειγμα του θερμοσίφωνα που αναφέραμε παραπάνω.

Η *διεργασία*(process) που εκτελείται από ένα στοιχείο του συστήματος παριστάνεται συμβολικά με ένα κουτάκι. Αν πχ το σύστημα είναι ο θερμοσίφωνα, με το κουτάκι συμβολίζουμε τη διεργασία που επιτελείται από τον θερμοσίφωνα. Το αίτιο που ενεργοποιεί το θερμοσίφωνα ή *είσοδος του συστήματος* είναι η εντολή να θερμανθεί το νερό. Το σύστημα στη συνέχεια διεργάζεται αυτή την εντολή με αποτέλεσμα να

δουλέψει ο καυστήρας(που είναι στοιχείο της διεργασίας) για κάποιο χρονικό διάστημα και να μας δώσει ως έξοδο του συστήματος ζεστό νερό.

2.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ Σ. Α. Ε.

Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου διακρίνονται σε :

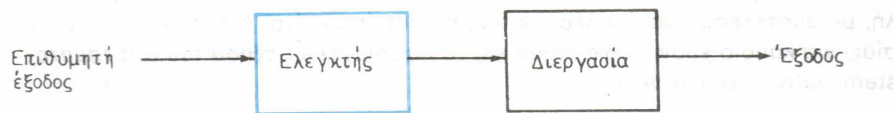
- α) *Ανοικτά Σ Α Ε ή Σ Α Ε ανοικτού βρόγχου.* (χωρίς ανατροφοδότηση) (open loop)
- β) *Κλειστά Σ Α Ε ή Σ Α Ε κλειστού βρόγχου.* (με ανατροφοδότηση) (feedback control systems)

Ανοικτό Σ Α Ε είναι διάταξη η οποία δίνει μια απόκριση που έχει σχέση μόνο με τον ερεθισμό που πήρε και με τίποτε άλλο ή το ίδιο η έξοδος του έχει σχέση μόνο με την είσοδο.

Κλειστό Σ Α Ε είναι διάταξη της οποίας η έξοδος έχει σχέση με την είσοδο και έξοδο του συστήματος ώστε να πετυχαίνετε ο αυτοέλεγχός του. Ένα σύστημα όπου σκοπός του είναι η σταθεροποίηση ή ρύθμιση της ροής ενέργειας. Γενικά, ένα κλειστό σύστημα χρησιμοποιεί την έξοδο για να επιτύχει αυτό ενώ ένα ανοικτό σύστημα πραγματοποιεί την ρύθμιση σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο τρόπο

Ανατροφοδότηση, ονομάζουμε την μεταφορά μεγέθους από την έξοδο ενός Σ Α Ε στην είσοδό του

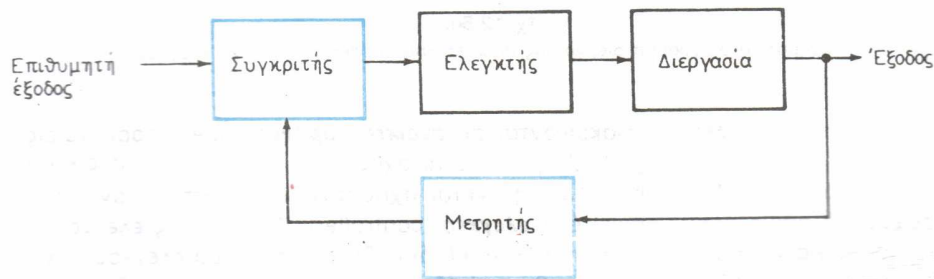
Στο σχήμα 2.2 , παρακάτω, φαίνεται σχηματικά ένα σύστημα ανοικτού βρόγχου το οποίο χρησιμοποιεί ένα *ελεγκτή*(controller). Ο ελεγκτής ελέγχει τη διεργασία, για να διατηρείται η επιθυμητή έξοδος. Στο παράδειγμα του θερμοσίφωνα, η επιθυμητή έξοδος (είσοδος) του συστήματος είναι το ζεστό νερό μιας ορισμένης θερμοκρασίας. Ο ελεγκτής είναι ένας θερμοστάτης ο οποίος ρυθμίζει τη λειτουργία του καυστήρα(διεργασία). Σε ένα σύστημα ελέγχου η είσοδος που εφαρμόζεται είναι η επιθυμητή έξοδος.



Σχήμα 2.2 Σύστημα ανοικτού βρόγχου.

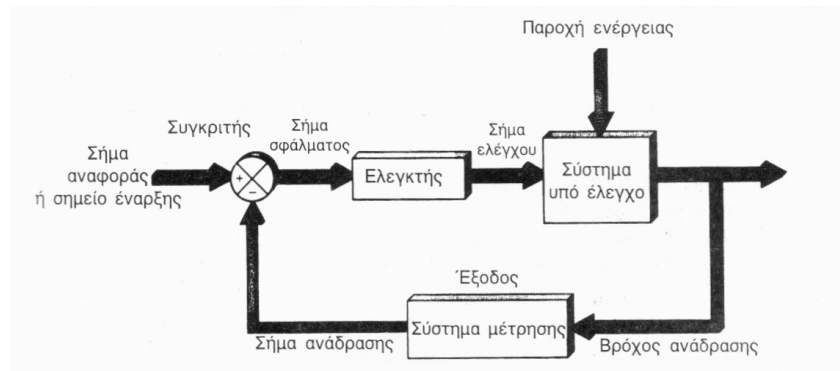
Στο σχήμα 2.3, φαίνεται σχηματικά ένα σύστημα κλειστού βρόγχου το οποίο χρησιμοποιεί δύο νέα στοιχεία: *το μετρητή*(counter), που μετράει την έξοδο που έχουμε, και *το συγκριτή*(comparator), ο οποίος συγκρίνει το σήμα του μετρητή με την είσοδο (ή

αλλιώς την επιθυμητή έξοδο). Το αποτέλεσμα της συγκρίσεως ενεργοποιεί τον ελεγκτή ο οποίος ρυθμίζει τη διεργασία ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Όπως βλέπουμε είναι φανερό, ότι ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου χρησιμοποιεί την ανατροφοδότηση για την επίτευξη του ελέγχου. Χρησιμοποιώντας το παράδειγμα του θερμοσίφωνα, αναγνωρίζουμε ότι η είσοδος του συστήματος(επιθυμητή έξοδος) είναι η εντολή να παραχθεί ζεστό νερό (π.χ $60^{\circ}C$). Αν η έξοδος(η θερμοκρασία του νερού μέσα στο θερμοσίφωνα) είναι $40^{\circ}C$ ο μετρητής(θερμόμετρο ενσωματωμένο στον θερμοστάτη), μετράει αυτή την θερμοκρασία, μετατρέπει αυτή την πληροφορία σε ηλεκτρικό σήμα και την ανατροφοδοτεί στο συγκριτή όπου εκεί είναι καταγραμμένη σε μορφή ηλεκτρικού σήματος η επιθυμητή θερμοκρασία των $60^{\circ}C$ και ενεργοποιείται ο ελεγκτής(κάποιος διακόπτης σε αυτή την περίπτωση) για να ανάψει τον καυστήρα ή την ηλεκτρική αντίσταση και να αρχίσει η παραγωγή θερμότητας μέχρις ότου η έξοδος φτάσει στους $60^{\circ}C$. Όταν αυτό συμβεί, ο μετρητής ανατροφοδοτεί την πληροφορία στο συγκριτή. Το αποτέλεσμα της συγκρίσεως με την επιθυμητή έξοδο θα είναι 0 ($60^{\circ}C - 60^{\circ}C = 0$). Την στιγμή αυτή δίνεται αυτόματα η εντολή στον ελεγκτή να διακόψει την παραγωγή θερμότητας και να σταματήσει η διαδικασία.



Σχήμα 2.3 Σύστημα κλειστού βρόγχου.

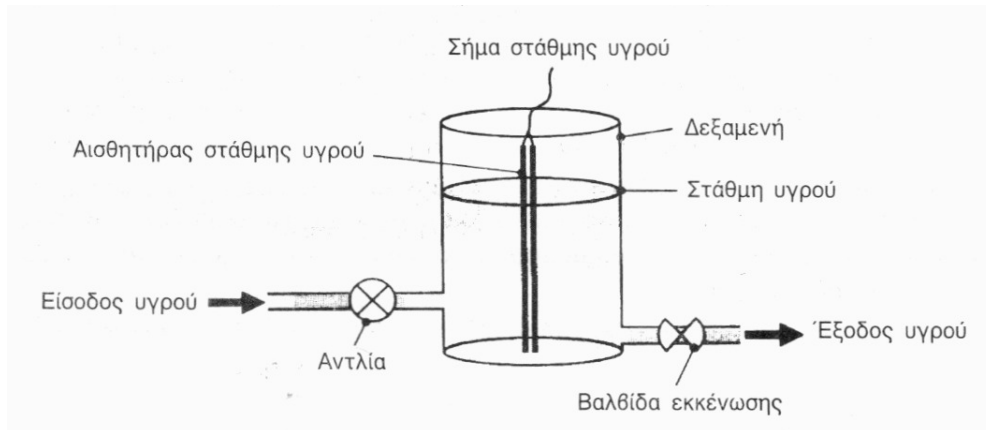
Γενικά , σε ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου, η κατάσταση της εξόδου επηρεάζει άμεσα την κατάσταση της εισόδου. Ένα τέτοιο σύστημα μετρά την τιμή της ελεγχόμενης παραμέτρου στην έξοδο του συστήματος και τη συγκρίνει με την επιθυμητή τιμή. Παρακάτω, στο σχήμα 2.4, εικονίζεται ένα διάγραμμα ροής ενός συστήματος κλειστού βρόγχου. Η επιθυμητή τιμή στην προκειμένη περίπτωση ονομάζεται σήμα αναφοράς. Αυτή, η επιθυμητή τιμή, συγκρίνεται με το σήμα από τη συσκευή μέτρησης, που ονομάζεται σήμα ανάδρασης. Η διαφορά τώρα ανάμεσα στο σήμα ανάδρασης και το σήμα αναφοράς είναι γνωστή ως σήμα σφάλματος. Το σήμα σφάλματος στη συνέχεια τροποποιείται έτσι ώστε να ρυθμίζεται η απόδοση του όλου συστήματος. Το τροποποιημένο σήμα σφάλματος ονομάζεται σήμα ελέγχου. Το σήμα ελέγχου είναι αυτό που ρυθμίζει την έξοδο του συστήματος έτσι ώστε το σήμα ανάδρασης να πλησιάσει την τιμή του σήματος αναφοράς. Όταν το σήμα σφάλματος μειωθεί στο μηδέν, έχει επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή.



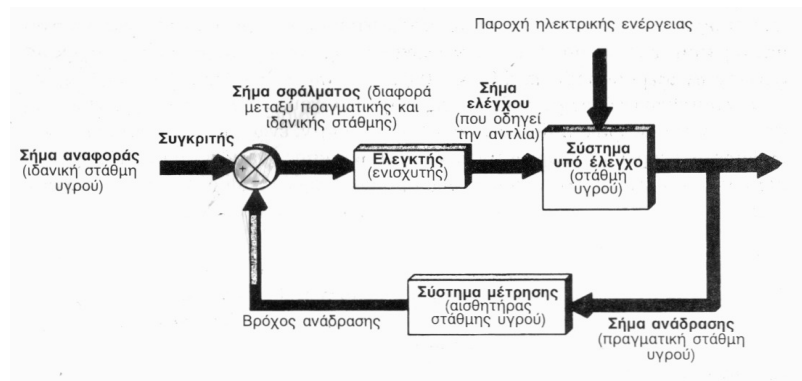
Σχήμα 2.4 Διάγραμμα ροής ενός συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου.

Για την κατανόηση των παραπάνω, θεωρούμε μία δεξαμενή σε ένα χημικό εργοστάσιο η οποία περιέχει ένα ισχυρό τοξικό υγρό (σχήμα 2.5). Με τη βοήθεια μιας αντλίας η δεξαμενή γεμίζεται με το υγρό. Όταν το υγρό πρέπει να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω χημική επεξεργασία, τότε ένα άλλο σύστημα ανοίγει μία βαλβίδα εκκένωσης και λαμβάνει την ποσότητα υγρού που απαιτείται ελαττώνοντας τη στάθμη του υγρού στη δεξαμενή. Αν στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιούσαμε ένα σύστημα ανοικτού βρόχου, οι συνέπειες που θα προέκυπταν εάν η τιμή που προκαθορίζαμε αποδεικνύονταν εσφαλμένη θα ήταν σοβαρές. Η δεξαμενή θα υπερχειλίζει και το τοξικό υγρό θα πλημμύριζε τους γύρω χώρους ή θα άδειαζε. Για να έχουμε λοιπόν μια αξιόπιστη λειτουργία, θα πρέπει η δεξαμενή να είναι διαρκώς γεμάτη σε βέλτιστο επίπεδο κάθε στιγμή. Άρα χρειάζεται ένας αισθητήρας στάθμης ώστε να ανιχνεύεται κάθε στιγμή η στάθμη του υγρού και να παράγεται μία ηλεκτρική έξοδος.

Στο σχήμα 2.6, φαίνεται το διάγραμμα ροής που ταιριάζει στο παραπάνω παράδειγμα. Η έξοδος από τον αισθητήρα στάθμης υγρού, το σήμα ανάδρασης, θα πρέπει να συγκριθεί με το σήμα που αντιπροσωπεύει την ιδανική στάθμη του υγρού. Έτσι δημιουργείται το σήμα σφάλματος, το οποίο ενισχύεται από τον ενισχυτή (ελεγκτή) και γίνεται σήμα ελέγχου. Το σήμα ελέγχου με την σειρά του οδηγεί τον κινητήρα της αντλίας καθορίζοντας έτσι το ρυθμό ροής του υγρού από την αντλία προς την δεξαμενή. Όταν το σήμα σφάλματος γίνει μηδέν τότε η στάθμη του υγρού πρέπει να έχει την ιδανική στάθμη, οπότε το σήμα ελέγχου γίνεται επίσης μηδέν και η αντλία σταματά. Με τον τρόπο αυτό, η πληροφορία που περιέχεται στο ηλεκτρικό σήμα που σχετίζεται με την στάθμη του υγρού, ελέγχει τη ροή που θα παρέχει η αντλία διατηρώντας τη στάθμη του υγρού σταθερή ανεξάρτητα από τις πιθανόν μεταβλητές συνθήκες εκκένωσης.



Σχήμα 2.5 Ο έλεγχος της στάθμης του υγρού σε μία δεξαμενή.



Σχήμα 2.6 Το διάγραμμα ροής(συστήματος κλειστού βρόχου) που αντιστοιχεί στο παραπάνω παράδειγμα, του ελέγχου της στάθμης του υγρού της δεξαμενής.

Τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου λοιπόν ρυθμίζονται από μόνα τους και έτσι είναι λιγότερο επιρρεπή σε σφάλματα σε σχέση με τα συστήματα ελέγχου ανοικτού βρόχου. Τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου είναι γενικώς πιο αποδοτικά απαιτώντας ταυτόχρονα λιγότερη εξωτερική παρέμβαση από κάποιο χειριστή.

2.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΟΙΚΤΩΝ ΚΑΙ ΚΛΕΙΣΤΩΝ Σ. Α. Ε.

Το κλειστό Σ Α Ε , όπως αναφέραμε και παραπάνω, μπορεί να καταπολεμήσει κάθε είδους μεταβολή που επιδρά άμεσα ή έμμεσα στο προς ρύθμιση τμήμα, χωρίς να είναι αναγκαία η πρόβλεψη της μεταβολής. Το σύστημα αυτό διεγείρεται από την απόκλιση της επιθυμητής τιμής του μεγέθους που θέλουμε να ρυθμίσουμε και προσπαθεί να ρυθμίσει την απόκλιση αυτή. Οι βαθμίδες του αποτελούν ένα κλειστό βρόγχο, οπότε υπάρχει πάντα το πρόβλημα της σταθερότητας που αν δεν υπάρχει κινδυνεύει να μεταπέσει σ' άλλη κατάσταση λειτουργίας.

Από την άλλη το ανοικτό Σ Α Ε δεν μπορεί να καταπολεμήσει κάθε είδους μεταβολή παρά μόνο αυτή που εμείς από προηγούμενα το έχουμε ρυθμίσει, για να καταπολεμήσει. Έτσι δεν είναι δυνατό να έχει μια σταθερή έξοδο αφού δεν είναι δυνατό να προβλεφθούν όλες οι πιθανές μεταβολές. Εδώ, δεν έχουμε ανασύζευξη και επομένως και κίνδυνο να μεταπέσει σ' άλλης μορφής λειτουργία.

Μια άλλη διαφορά είναι ο αριθμός των στοιχείων ή συσκευών που χρειάζονται για να γίνει ο έλεγχος. Το κλειστό Σ Α Ε χρειάζεται μεγαλύτερο αριθμό συσκευών άρα είναι πολυπλοκώτερο και πιο ακριβό (μεγάλο κόστος), και με μεγαλύτερη πιθανότητα να πάθει βλάβη απ' ότι τα ανοικτά ΣΑΕ .

Από τα προηγούμενα είδαμε ότι κάθε Σ Α Ε παρουσιάζει μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα. Αν συνδυαστούν όμως τα δύο συστήματα μπορούμε να εξουδετερώσουμε τα βασικότερα μειονεκτήματα της έμμεσης δράσης ενός κλειστού Σ Α Ε . Ο συνδυασμός των δύο τύπων Σ Α Ε γίνεται στις περιπτώσεις βελτιώσεώς τους.

Σήμερα σ' όλους γενικά τους τομείς υπάρχουν διατάξεις Σ Α Ε που ρυθμίζουν, ελέγχουν, παρακολουθούν και προστατεύουν, ανθρώπους, μηχανήματα και εγκαταστάσεις.

Θα αναφέρουμε μερικά παραδείγματα Σ Α Ε που συναντώνται σε διάφορες εφαρμογές σε καθαρά πληροφοριακό ύφος.

Σ Α Ε είναι η κεντρική θέρμανση ενός κτιρίου ή κάποιου χώρου.

Σ Α Ε είναι το αυτόματο ανοιγοκλείσιμο θυρών με φως, ήχο ή πέρασμα των ανθρώπων από ένα προκαθορισμένο σημείο.

Σ Α Ε είναι οι αυτόματοι πωλητές εισιτηρίων, ποτών, αντικειμένων, βενζίνης κ.λ.π.

Η παρακολούθηση και ρύθμιση του παραγόμενου χαρτιού σε ένα εργοστάσιο, ή φύλλων λαμαρίνας κ.λ.π. ως προς τις διαστάσεις, η καταμέτρηση αντικειμένων, η αυτόματη ειδοποίηση όταν εμφανιστεί φωτιά σε κάποιο χώρο, το αυτόματο σταμάτημα των ηλεκτρικών τρένων, η σηματοδότηση ισόπεδων διαβάσεων, η αυτόματη διακοπή παροχής νερού σε δεξαμενή και πάρα πολλά άλλα ακόμα είναι όλα Σ Α Ε .

Τη μεγαλύτερη εφαρμογή στα Σ Α Ε σήμερα έχουν οι ηλεκτρονικοί ελεγκτές οι οποίοι λειτουργούν με τελεστικούς ενισχυτές ή με ψηφιακούς υπολογιστές.

Κεφάλαιο 3^ο **ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ**

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Η μέτρηση αναφέρεται στη λήψη μιας πληροφορίας σχετικά με την τιμή ενός φυσικού μεγέθους. Οι μετρήσεις θα μπορούσαμε να πούμε ότι αποτέλεσαν τη βάση για την ανάπτυξη του τεχνολογικού μας πολιτισμού. Πρέπει να αναφέρουμε ότι τα πρώτα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μηχανικά. Στην πορεία κατασκευάστηκαν τα λεγόμενα ηλεκτρομηχανικά όργανα, τα οποία ακόμη και σήμερα εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται, με κύριο μειονέκτημά αυτών των οργάνων να είναι το ότι δεν μπορούν να μετρήσουν μεγέθη που μεταβάλλονται με υψηλή ταχύτητα, εξαιτίας της αδράνειας του κινητού τους μέρους. Έτσι, μετά φτάσαμε στην επινόηση των λεγόμενων ηλεκτρονικών οργάνων μέτρησης.

Οι μετρήσεις μπορούν να εξυπηρετούν πολλούς και διαφορετικούς σκοπούς μερικοί από τους οποίους είναι οι εξής:

- Η πειραματική επιβεβαίωση θεωρητικών αποτελεσμάτων,
- Η καταγραφή και η παρακολούθηση,
- Η διατύπωση εμπειρικών σχέσεων σε περιπτώσεις όπου η θεωρητική ανάλυση είναι ανεπαρκής κατά κάποιο τρόπο,
- Ο αυτόματος έλεγχος διεργασιών και
- Ο προσδιορισμός των παραμέτρων των υλικών, όπως η ειδική αντίσταση, η διηλεκτρική σταθερά, η μαγνητική διαπερατότητα.

Το αντικείμενο των ηλεκτρικών μετρήσεων εστιάζεται στη μέτρηση των βασικών ηλεκτρικών μεγεθών, όπως έντασης, τάσης, αντίστασης, ισχύος, με τη χρήση οργάνων μέτρησης. Ακόμη, εξετάζονται και αξιολογούνται οι διάφορες μέθοδοι που μπορούν να εφαρμοστούν στη μέτρηση του κάθε ηλεκτρικού μεγέθους. Τα μη ηλεκτρικά φυσικά μεγέθη, όπως θερμοκρασία, πίεση, δύναμη, ταχύτητα, ροή, φωτεινότητα, στάθμη κ.λ.π. , μετρώνται με τη χρήση στοιχείων μετατροπής, τα οποία ονομάζονται *αισθητήρια*. Τα αισθητήρια ουσιαστικά αντιστοιχίζουν το μετρούμενο φυσικό μέγεθος σε κάποιο άλλο μέγεθος, το οποίο σχεδόν πάντα είναι ηλεκτρικό. Συχνά, η πληροφορία για το μετρούμενο φυσικό μέγεθος πρέπει να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις ή να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος σε κάποιο σύστημα που ελέγχει αυτόματα κάποια διαδικασία. Στην περίπτωση αυτή αναφερόμαστε σε ένα σύστημα μέτρησης. Τα αισθητήρια και γενικότερα τα συστήματα μέτρησης αποτελούν αντικείμενο των ηλεκτρονικών μετρήσεων.

Για την μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο ορισμός της μονάδας μέτρησης του. Έτσι, η μέτρηση ενός μεγέθους αντιστοιχεί στη σύγκρισή του με τη μονάδα μέτρησης. Αν και τα φυσικά μεγέθη είναι πάρα πολλά, αρκεί να οριστούν οι μονάδες μέτρησης μόνο για ορισμένα από αυτά, τα οποία ονομάζονται θεμελιώδη μεγέθη. Οι αντίστοιχες μονάδες μέτρησης ονομάζονται θεμελιώδεις μονάδες. Το διεθνές σύστημα μονάδων (SI), είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο και περιλαμβάνει έξι θεμελιώδη μεγέθη με τις αντίστοιχες μονάδες τους όπως βλέπουμε και πιο κάτω στον πίνακα 1 .

Φυσικό Μέγεθος	Μονάδα Μέτρησης	Σύμβολο Μονάδος
Χρόνος	Δευτερόλεπτο	s
Μήκος	Μέτρο	m
Μάζα	Χιλιόγραμμα	kg
Θερμοκρασία	Βαθμός Kelvin	°K
Ηλεκτρικό Ρεύμα	Ampere	A
Φωτεινή Ένταση	Candela	cd
Γωνία	Ακτίνιο	rad

Πίνακας 1. Θεμελιώδη μεγέθη και οι αντίστοιχες μονάδες τους στο σύστημα (SI)

Από τις θεμελιώδεις μονάδες και μέσω μαθηματικών σχέσεων που εκφράζουν τους διάφορους φυσικούς νόμους προκύπτουν οι μονάδες των υπόλοιπων φυσικών μεγεθών τα οποία ονομάζονται παράγωγα μεγέθη και οι αντίστοιχες μονάδες τους παράγωγες μονάδες. Συχνά κάποια μεγέθη όπως η τάση, η ισχύς, η μάζα είναι είτε πολύ μεγαλύτερα είτε πολύ μικρότερα από τη μονάδα μέτρησής τους. Έτσι, για τη βολικότερη καταγραφή των αποτελεσμάτων της μέτρησης χρησιμοποιούνται τα πολλαπλάσια και τα υποπολλαπλάσια των μονάδων σύμφωνα με τον πίνακα 2, πιο κάτω.

Ονομασία	Σύμβολο	Αξία
Tera	T	10^{12}
Giga	G	10^9
Mega	M	10^6
Kilo	K	10^3
Milli	m	10^{-3}
Micro	μ	10^{-6}
Nano	n	10^{-9}
Pico	p	10^{-12}

Πίνακας 2. Πολλαπλάσια και υποπολλαπλάσια των μονάδων

Όσον αφορά για την ακρίβεια των μετρήσεων έχουν οριστεί τα πρότυπα (standards), τα οποία διακρίνονται σε φυσικά και ατομικά. Με τα ατομικά πρότυπα, τα οποία παρέχουν εξαιρετική ακρίβεια, ο ορισμός της μονάδος μέτρησης βασίζεται σε κάποια ιδιότητα των ατόμων ενός ισότοπου. Αντίθετα, τα φυσικά πρότυπα βασίζονται σε κάποιο αντικείμενο.

Από τα ελάχιστα φυσικά πρότυπα που χρησιμοποιούνται ακόμη είναι αυτό του χιλιογράμμου.

Ένα όργανο μέτρησης, αλλά και γενικότερα ένα πλήρες σύστημα μέτρησης, πρέπει να παράγουν ιδανικά μια ένδειξη η οποία να αντιστοιχεί ακριβώς στο μετρούμενο φυσικό μέγεθος. Επειδή αυτό δεν συμβαίνει, έχουν οριστεί διάφορα μεγέθη τα οποία εκφράζουν την απόκλιση μεταξύ της μετρούμενης και της πραγματικής τιμής του φυσικού μεγέθους από τη μετρητική διάταξη. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός οργάνου και γενικότερα μιας διάταξης μέτρησης είναι :

--*Το απόλυτο σφάλμα* (absolute error). Το απόλυτο σφάλμα Δh ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της μετρούμενης h και της πραγματικής τιμής h_o του φυσικού μεγέθους.

$$\Delta h = h - h_o$$

Το απόλυτο σφάλμα ενός οργάνου και γενικότερα μιας μετρητικής διάταξης δεν είναι σταθερό σε όλες τις τιμές του μετρούμενου μεγέθους. Έτσι, ορίζεται το μέγιστο απόλυτο σφάλμα Δh_{\max} ως το μεγαλύτερο από τα επιμέρους απόλυτα σφάλματα Δh .

--*Το σχετικό σφάλμα* (relative error). Το σχετικό σφάλμα ορίζεται από το λόγο του απόλυτου σφάλματος προς την πραγματική τιμή του φυσικού μεγέθους.

$$e = \frac{\Delta h}{h_o}$$

Καθώς συνήθως ισχύει $h \cong h_o$, το σχετικό σφάλμα ορίζεται συχνά ως προς τη μετρούμενη τιμή του φυσικού μεγέθους h , η οποία είναι γνωστή

$$e = \frac{\Delta h}{h}$$

Επειδή το σχετικό όπως και το απόλυτο σφάλμα δεν είναι σταθερό, ορίζεται το μέγιστο σχετικό σφάλμα

$$e_{\max} = \frac{\Delta h_{\max}}{h_o}, e_{\max} = \frac{\Delta h_{\max}}{h}$$

και το σχετικό σφάλμα ένδειξης από τη σχέση

$$e_i = \frac{\Delta h_{\max}}{h_{\max}}$$

όπου, h_{\max} είναι η μέγιστη ένδειξη του οργάνου. Από το σχετικό σφάλμα ένδειξης προκύπτει η κλάση του οργάνου, η οποία εκφράζει την ακρίβεια του οργάνου A , σύμφωνα με τη σχέση

$$A = 100 | e_i | \%$$

Τα σφάλματα στη μέτρηση των φυσικών μεγεθών διακρίνονται σε *τυχαία* και *συστηματικά*. Τα τυχαία σφάλματα οφείλονται στην επίδραση της θερμοκρασίας της υγρασίας της πίεσης κ.λ.π, στα ηλεκτρικά ή τα μαγνητικά πεδία και τον ανθρώπινο παράγοντα. Έτσι τα τυχαία σφάλματα μεταβάλλονται με απρόβλεπτο τρόπο μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων του ίδιου μεγέθους. Αντίθετα από τα τυχαία, τα συστηματικά σφάλματα παραμένουν σταθερά σε διαδοχικές μετρήσεις και οφείλονται σε κατασκευαστικές ατέλειες ή περιορισμούς που θέτει η κατασκευή είτε η αρχή λειτουργίας του ίδιου του οργάνου(μέθοδος μέτρησης), σε κακή ρύθμιση του οργάνου, στη γήρανση των εξαρτημάτων του οργάνου και στη μεταβολή των συνθηκών του φυσικού συστήματος από την εισαγωγή του οργάνου μέτρησης. Επομένως, τα συστηματικά σφάλματα αντισταθμίζονται εύκολα εφόσον εντοπιστούν, σε αντίθεση με τα τυχαία.

3.2 Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Η μέτρηση συνίσταται στο να δημιουργήσει μια αντιστοιχία ανάμεσα στο φυσικό μέγεθος που θέλουμε να αναλύσουμε και σε ένα άλλο μέγεθος άμεσα προσπελάσιμο στο τελικό τμήμα του συστήματος μέτρησης. Στο παρελθόν συχνά ανατρέχαμε σε διαδικασίες μηχανικής ή οπτικής για την υλοποίηση της αντιστοιχίας, αλλά σήμερα προστρέχουμε στα ηλεκτρικά σήματα. Το ηλεκτρικό σήμα μπορεί να δημιουργηθεί είτε άμεσα, όταν η μεταβολή του ενδιαμέσου μεγέθους παράγει ένα ηλεκτρικό μέγεθος(πιεζοηλεκτρισμός, θερμοηλεκτρισμός, φωτοηλεκτρισμός κ.λ.π.), είτε έμμεσα, όταν η μεταβολή του ενδιαμέσου μεγέθους οφείλεται σε μία τροποποίηση των εσωτερικών ιδιοτήτων του αισθητηρίου στοιχείου(αγωγιμότητα, διαπερατότητα κ.λ.π.). Η διαδικασία αυτή εισάγει την ανάγκη χρήσης ηλεκτρονικών διατάξεων στα συστήματα μέτρησης που τα πλεονεκτήματά τους είναι αναμφισβήτητα. Η μετατροπή λοιπόν, του φυσικού μεγέθους σε ηλεκτρικό γίνεται από το αισθητήριο. Η πρόοδος στην κατασκευή των αισθητηρίων είναι πολύ μεγάλη, καθώς οι απαιτήσεις από αυτά αυξάνονται συνεχώς. Από τις πιο απαιτητικές εφαρμογές είναι η αεροδιαστημική και η ιατρική, όπου απαιτούνται αισθητήρια μικρού όγκου, βάρους, υψηλής ακρίβειας και αξιοπιστίας. Σε άλλες εφαρμογές τα αισθητήρια πρέπει να λειτουργούν σε εξαιρετικά δυσμενείς συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας, κραδασμών, ακτινοβολίας ή σκόνης.

3.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Ο συνδυασμός των αισθητηρίων με τις σύγχρονες ηλεκτρονικές διατάξεις επιτρέπει:

-Υψηλή ταχύτητα

Γενικά, τα υπό μέτρηση φυσικά μεγέθη υπόκεινται σε πολύ γρήγορες μεταβολές. Η σύγχρονη ηλεκτρονική τεχνολογία επιτρέπει ταχύτητες πολλών χιλιάδων μετρήσεων ανά δευτερόλεπτο. Η ταχύτητα αυτή είναι απαραίτητη για μετρήσεις αυτοματισμού και κάνει το ηλεκτρονικό όργανο κατάλληλο για μετρήσεις τόσο της σταθερής κατάστασης λειτουργίας, όσο και του μεταβατικού φαινομένου. Η εισβολή της ψηφιακής στον τομέα των μετρήσεων γίνεται συνεχώς όλο και πιο βαθιά. Ταυτόχρονα δεν θα ήταν σωστό να αποσιωπηθεί η ανάπτυξη που προήλθε από τους μικροεπεξεργαστές, οι οποίοι χάρη στην ικανότητά τους να προσαρμόζονται στις πιο ποικίλες συνθήκες, να προγραμματίζονται εύκολα και να διαθέτουν μία απέραντη δυνατότητα αλλαγής προγραμματισμού, επιτρέπουν την υλοποίηση μεθόδων μέτρησης που παλαιότερα ήταν αδιανόητες στην ηλεκτρική οργανολογία.

-Μεγάλη ποικιλία μεθόδων προσέγγισης ενός προβλήματος μέτρησης

Οι μέθοδοι προσέγγισης ενός προβλήματος μέτρησης μπορούν να είναι άμεσες, όπως στις μετρήσεις ηλεκτρονικών μεγεθών και χαρακτηριστικών. Στην περίπτωση όμως που πρόκειται για παράδειγμα για την προσπάθεια απόκτησης ενός μετρήσιμου φαινομένου που παράγεται από μία εξωτερική επίδραση: π.χ. θερμική, οπτική κ.λ.π., τότε τα μεγέθη πρέπει να μετρηθούν έμμεσα. Αυτή είναι η συνηθέστερη περίπτωση όταν χρησιμοποιείται κάποια τεχνική που επιτρέπει την μετατροπή της μέτρησης ενός μεγέθους σε εκείνη ενός άλλου που δεν έχει τίποτε κοινό με το αρχικό. Η γενικά μεγάλη ποικιλία μεθόδων μέτρησης στις οποίες φυσικά προστίθεται η δυνατότητα επεξεργασίας σημάτων με βάση διάφορες μαθηματικές μεθόδους και τεχνικές, εμπλουτίζει αναμφισβήτητα την κυριαρχία των ηλεκτρονικών μεθόδων μέτρησης.

-Εξαιρετική ευαισθησία

Ένα από τα πιο σπουδαία χαρακτηριστικά των ηλεκτρονικών μεθόδων συνίσταται στο να κάνει το ηλεκτρικό σήμα περισσότερο ευαίσθητο στη διακύμανση του μετρούμενου μεγέθους.

-Πολύ μικρή κατανάλωση

Όταν η διακύμανση του σήματος της πηγής είναι περιορισμένη το σήμα οδηγείται στο ηλεκτρονικό σύστημα για να εξασφαλιστεί η ενίσχυσή του. Η παρέμβαση ενισχυτικών διατάξεων μεγάλης σύνθετης αντίστασης εισόδου και διατάξεων που προσαρμόζουν κατάλληλα τη σύνθετη αντίσταση επιτρέπει όχι μόνο την ελάττωση της καταναλώμενης ισχύος, αλλά επίσης με τη χρήση διατάξεων αντίστασης εξόδου μηδενικής σχεδόν τιμής, το σήμα να μπορεί να επενεργήσει σε διάφορα είδη φορτίου.

-Μεγάλη ευχέρεια στη μετάδοση από απόσταση

Συχνά συμβαίνει τα σημεία μετρήσεων να βρίσκονται απομακρυσμένα από τα όργανα μετρήσεων ή από το χώρο όπου πρέπει να χρησιμοποιηθεί το μετρούμενο φυσικό μέγεθος. Στην προκειμένη περίπτωση, οι σύγχρονες ηλεκτρονικές μέθοδοι παρέχουν στις περισσότερες εφαρμογές τα μόνα μέσα κατάλληλης μετάδοσης.

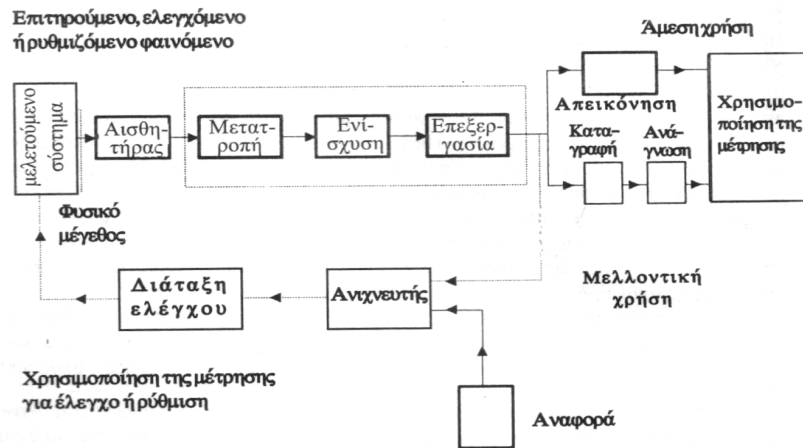
-Μεγάλη αξιοπιστία

Πρόκειται για το αποτέλεσμα της ανάπτυξης της ηλεκτρονικής προς την ολοκλήρωση σύνθετων διαδικασιών. Έτσι, μπορούμε να έχουμε σε ένα και μοναδικό τυπωμένο κύκλωμα ένα ολόκληρο σύστημα συλλογής και μετατροπής δεδομένων που περιλαμβάνει διαφορετικές διατάξεις, όπως : μετατροπείς, φίλτρα, ενισχυτές, πολυπλέκτες, κυκλώματα δειγματοληψίας και συγκράτησης, κ.λ.π. πράγμα που συνεπάγεται στον ελάχιστο αριθμό συνδέσεων στη διάταξη, με συνέπεια την αύξηση της αξιοπιστίας.

Διατάξεις αναλογικής μέτρησης

Οι ηλεκτρονικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις ποικίλουν ως προς τη σύνθεση της διάταξης μέτρησης, η οποία εξαρτάται στενά από το είδος της απαιτούμενης απεικόνισης καθώς και από την μορφή του μετρούμενου μεγέθους. Όσον αφορά για τις διατάξεις αναλογικής μέτρησης, το φέρον σήμα της πληροφορίας που εξέρχεται από τον αισθητήρα μεταδίδεται κατά μήκος της διάταξης και συνδέεται με το προς μέτρηση μέγεθος με ένα νόμο συνέχειας. Το σήμα που παρέχεται από τον αισθητήρα υπόκειται σε μία σειρά από μεταβολές που πραγματοποιούνται από μια διάταξη ρύθμισης σήματος, που γενικά περιλαμβάνει : τον μετατροπέα μέτρησης, ο οποίος τροποποιεί τη δομή του σήματος για να το προσαρμόσει καλύτερα στην μετάδοση, τον ενισχυτή, που αυξάνει την ένταση του σήματος, και μία ή περισσότερες διατάξεις επεξεργασίας του αποκτούμενου από την διαδικασία σήματος. (βλέπε ενδεικτικά, σχήμα 3.1).

Γενικά, το πλάτος του σήματος εξόδου που λαμβάνεται στην έξοδο ακολουθεί τις διακυμάνσεις του προς μέτρηση μεγέθους.



Σχήμα 3.1 Διάταξη αναλογικής μέτρησης.

Είναι δυνατόν το φυσικό μέγεθος που περιέχει την πληροφορία να είναι ημιτονοειδές σήμα του οποίου μεταβάλλουμε, είτε το στιγμιαίο πλάτος (διαμόρφωση πλάτους), είτε τη συχνότητα ή τη φάση σε σχέση με ένα ημιτονοειδές σήμα αναφοράς (διαμόρφωση συχνότητας ή φάσης). Συμβαίνει συχνά επίσης να χρησιμοποιηθούν, σαν φορέας της πληροφορίας, παλμοί των οποίων το πλάτος ή η συχνότητα παραμένει συνδεδεμένη με το προς μέτρηση μέγεθος, έτσι η μέτρηση μας γίνεται διακριτή μεν, κρατώντας όμως πάντοτε τον αναλογικό της χαρακτήρα δε.

Η πρόοδος της φυσικής των αισθητήρων, της ηλεκτρονικής και της πληροφορικής έχουν συμβάλει εξ' ίσου στην οργάνωση με τρόπο αποτελεσματικό και οικονομικό για τις αναρίθμητες μετρήσεις που απαιτούνται σήμερα στους τομείς της βιομηχανίας. Για να αποφευχθούν ωστόσο προβλήματα που οφείλονται στην σύζευξη μεταξύ διαφορετικών τρόπων μέτρησης σε παράλληλη σύνδεση, αλλά και για λόγους οικονομικούς, περνάμε πολλά σήματα από μία και μόνον γραμμή μετάδοσης, μέθοδος γνωστή με το όνομα πολυπλεξία. (πολυπλεξία συχνότητας, πολυπλεξία στο πεδίο του χρόνου).

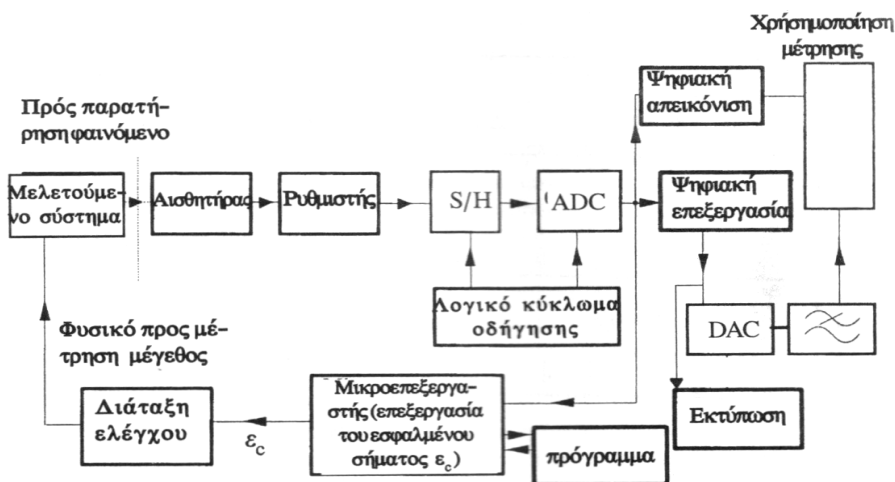
Διατάξεις ψηφιακής μέτρησης

Η πρόοδος της ψηφιακής ηλεκτρονικής καθώς και της πληροφορικής ήταν ραγδαία τα τελευταία χρόνια και ήταν φυσικό να επηρέαζαν τα συστήματα μετρήσεων. Στο σχήμα 3.2, πιο κάτω, φαίνεται ενδεικτικά μία διάταξη ψηφιακής μέτρησης. Ο ρυθμιστής σημάτων που βλέπουμε σε αυτό το σχήμα είναι ανάλογος εκείνου της αναλογικής διάταξης. Το αναλογικό σήμα που προέρχεται από τον ρυθμιστή εφαρμόζεται στην είσοδο ενός δειγματολήπτη συγκράτησης (S/H) του οποίου ο ρόλος είναι να παίρνει δείγμα της τιμής του σήματος και να διατηρεί την τιμή αυτή σταθερή στην είσοδο του αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα (ADC) τουλάχιστον για το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για μια μετατροπή. Οι δύο αυτές διατάξεις οδηγούνται από ένα λογικό κύκλωμα που στις χρονικές στιγμές που έχουν επιλεγεί δίνει τις εντολές δειγματοληψίας

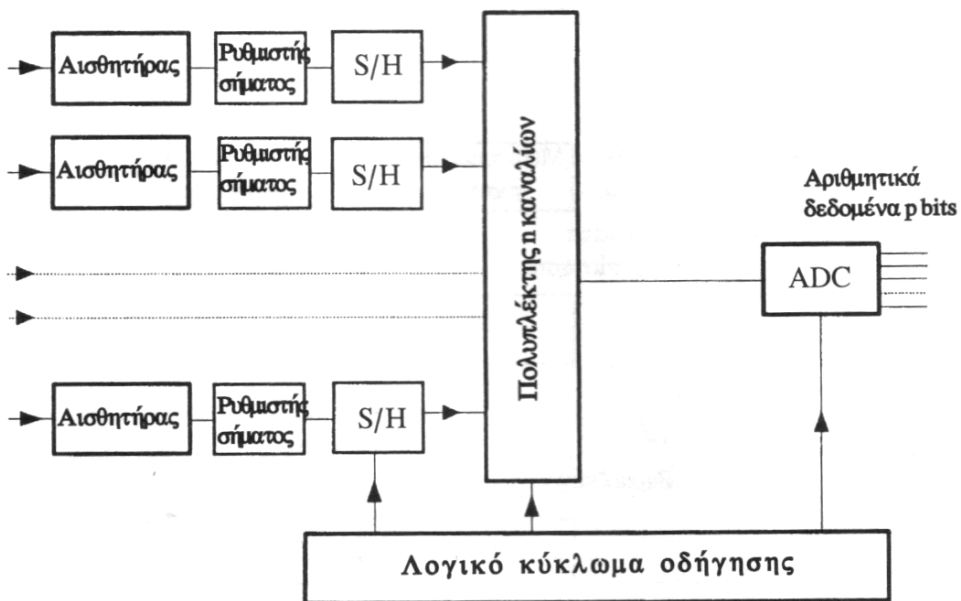
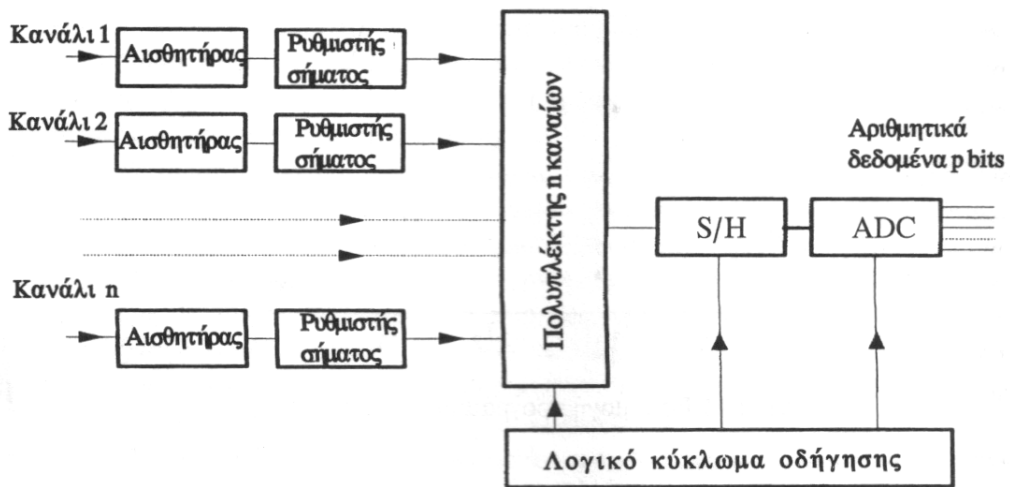
και συγκράτησης. Η ψηφιακή έξοδος του ADC μπορεί ή να επεξεργαστεί από ψηφιακό όργανο ή να τοποθετηθεί στην μνήμη ενός επεξεργαστή για μεταγενέστερη ανάλυση του μεγέθους ή να ανασυσταθεί με την αρχική αναλογική του μορφή από ένα μετατροπέα DAC (ψηφιακό-αναλογικό) και να μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμο για τον έλεγχο μιας διαδικασίας.

Στις περισσότερες εφαρμογές χρειάζεται να μετρηθούν και να καταγραφούν πολλά μεγέθη. Έτσι, συγκροτείται ένα σύστημα απόκτησης δεδομένων με τη βοήθεια ενός χρονικού πολυπλέκτη. (σχήμα 3.3) Ο πολυπλέκτης οδηγείται από ένα λογικό κύκλωμα οδήγησης. Επιτρέπει την εξοικονόμηση των χρησιμοποιούμενων κυκλωμάτων διότι το ADC και ο δειγματολήπτης συγκράτησης είναι κοινά σε όλα τα κανάλια. Σε μερικές εφαρμογές η χρησιμοποίηση ενός ενισχυτή προγραμματιζόμενου κέρδους επιτρέπει την κατάργηση των ενισχυτών στους ρυθμιστές σήματος για να πραγματοποιηθεί οικονομία στα κυκλώματα.

Τα βασικά εξαρτήματα των συστημάτων απόκτησης δεδομένων υπάρχουν σήμερα με τη μορφή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



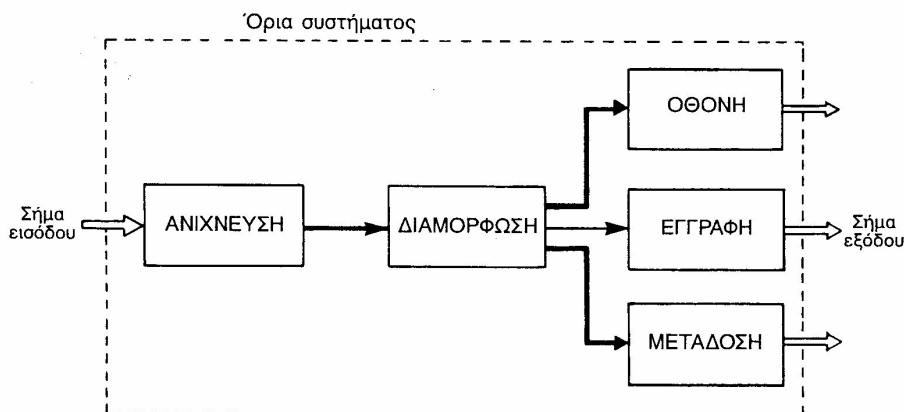
Σχήμα 3.2 Διάταξη ψηφιακής μέτρησης.

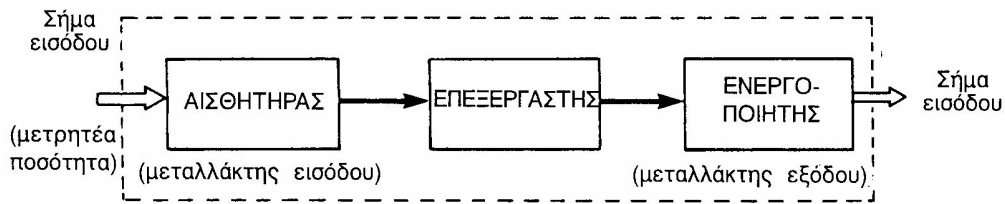


Σχήμα 3.3 Διάταξη χρονικού πολυπλέκτη.

3.4 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Επειδή η πληροφορία είναι από την φύση της υποκειμενική και ποιοτική, ο άνθρωπος από την αρχή της ιστορίας του σχεδίασε και χρησιμοποίησε όργανα και εργαλεία τα οποία του παρείχαν ένα ποσοτικό τρόπο μέτρησης. Σχεδιάστηκαν λοιπόν, μετρητικά συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν φυσικές και χημικές ιδιότητες για να λαμβάνουν ποσοτικά δεδομένα, τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να υποστούν επεξεργασία με κάποιον από τους υπάρχοντες τρόπους. Στο σχήμα 3.4 , παρακάτω εικονίζεται ένα διάγραμμα ενός συστήματος μέτρησης που παρουσιάζει τις βασικές λειτουργίες μιας μέτρησης ή ενός συστήματος επεξεργασίας πληροφορίας. Το σήμα εισόδου σε ένα τέτοιο σύστημα μέτρησης ονομάζεται συχνά *μετρήσιμη ποσότητα* (measurand), η οποία είναι η προς μέτρηση φυσική ή χημική ποσότητα (όπως μετατόπιση , πίεση , συγκέντρωση αερίου κλπ) . Η μετρήσιμη αυτή ποσότητα ανιχνεύεται ή γίνεται αντιληπτή από αυτό που συνήθως ονομάζεται *αισθητήρας* (sensor), ή *μετατροπέας* (transducer). Το ηλεκτρικό σήμα από τον αισθητήρα συχνά χρειάζεται τροποποίηση πριν μπορέσει να αξιοποιηθεί, όπως πχ για την απεικόνιση πληροφορίας σε κάποιο χειριστή, την καταγραφή του ή την μετάδοση του. Τα σήματα συνήθως που προέρχονται από κάποιο αισθητήριο έχουν αναλογική μορφή και ως εκ τούτου χρειάζεται η λεγόμενη αναλογική επεξεργασία. Ως *επεξεργαστής* (processor) μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε διάταξη που τροποποιεί το ηλεκτρικό σήμα που προέρχεται από ένα αισθητήρα, χωρίς να αλλάξει τη μορφή της ενέργειας του σήματος. Τελικά το σήμα από τον επεξεργαστή χρησιμοποιείται για να απεικονίσει κάποιες πληροφορίες στον χειριστή, όπως για παράδειγμα να ενεργοποιήσει μια οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD), ή μια συμβατική οθόνη. Εναλλακτικά, το σήμα μπορεί να καταγραφεί σε κάποιο χαρτί , μαγνητικό δίσκο ή σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα(RAM). Κάθε τέτοια συσκευή που μετατρέπει ένα ηλεκτρικό σήμα σε μια φυσική ή χημική ποσότητα θα αναφέρεται ως *ενεργοποιητής ή μετατροπέας εξόδου (μεταλλάκτης)*. Για παράδειγμα η απεικόνιση μιας πληροφορίας σε μια οθόνη απαιτεί τη μετατροπή ενός ηλεκτρικού σήματος σε ένα οπτικό σήμα το οποίο μπορεί να ανιχνευτεί να τροποποιηθεί και να δεχτεί την παρέμβαση από ένα χειριστή.



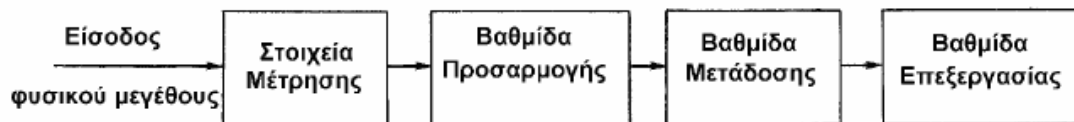


Σχήμα 3.4 Διάγραμμα βαθμίδων ενός συστήματος μέτρησης.

Ως γνωστό η διαδικασία μιας μέτρησης αποτελείται από ένα αριθμό βημάτων. Το σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται για να υλοποιηθεί αυτή η διαδικασία ορίζεται σαν *σύστημα μέτρησης*. Ένα σύστημα μέτρησης μπορεί να είναι μηχανικό, ηλεκτρικό ή και ηλεκτρονικό. Τα περισσότερα σύγχρονα συστήματα μέτρησης είναι τμηματικά ή εξ' ολοκλήρου ηλεκτρονικά. Μερικά πλεονεκτήματα τέτοιων ηλεκτρονικών συστημάτων μέτρησης είναι:

- Μεγάλη ταχύτητα μέτρησης.
- Δυνατότητα αποθήκευσης μετρήσεων.
- Δυνατότητα μετάδοσης μετρήσεων.
- Δυνατότητα επεξεργασίας μετρήσεων.

Μια απλή μορφή ενός ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης φαίνεται στο σχήμα 3.5, παρακάτω. Το μετρούμενο φυσικό μέγεθος θα μπορούσε να ήταν η θερμοκρασία ή η πίεση ενός βιομηχανικού χώρου και μετρείται με τη βοήθεια των αισθητήρων θερμοκρασίας ή πίεσης που αποτελούν τα στοιχεία μέτρησης. (μετρητικά στοιχεία).



Σχήμα 3.5 Διάγραμμα βαθμίδων ενός απλού ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης.

Επειδή το σήμα του μετρούμενου φυσικού μεγέθους είναι συνήθως μικρό, χρειάζεται ενίσχυση μέσω ενισχυτικών βαθμίδων (τελεστικοί ενισχυτές, ενισχυτές απομόνωσης, ενισχυτές οργανολογίας κ.λ.π.) Πολλές φορές επίσης χρειάζεται και η προσθήκη ενός φίλτρου για την απομάκρυνση θορύβων. Όλα τα στοιχεία που προαναφέρθηκαν συνθέτουν την *βαθμίδα προσαρμογής*. Στη συνέχεια το σήμα μεταδίδεται ενσύρματα ή ασύρματα με τη βοήθεια της *βαθμίδας μετάδοσης* προς την *βαθμίδα επεξεργασίας*. Η *βαθμίδα επεξεργασίας* μπορεί να αποτελείται από μια απλή διάταξη καταγραφής μέχρι και από ένα ισχυρό υπολογιστή. Αν η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων γίνεται ψηφιακά, τότε προηγείται μετατροπή του σήματος της μέτρησης από αναλογική μορφή σε ψηφιακή μορφή. Δηλαδή ουσιαστικά απαιτείται ένας *μετατροπέας* που μετατρέπει ένα σήμα από την αναλογική του μορφή σε ψηφιακή. Οι μετατροπείς αυτοί λέγονται A/D –Analog to digital converters-. Η μετατροπή σε ψηφιακή μορφή πρέπει να γίνει πριν την *βαθμίδα της μετάδοσης*. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν η επεξεργασία

των πληροφοριών γίνεται ψηφιακά και το αποτέλεσμα της πρέπει να μετατραπεί σε αναλογική μορφή χρειάζεται ένας μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό σήμα. Οι μετατροπείς αυτοί λέγονται D/A -Digital to analog converters- .

Η έννοια του στοιχείου μέτρησης που αναφέρθηκε είναι πολύ ευρεία. Ένα τέτοιο στοιχείο συνήθως αποκαλείται *μετατροπέας(transducer)* και ορίζεται σαν μια διάταξη που απορροφά ενέργεια από ένα σύστημα και την μεταφέρει σε ένα άλλο, αφού πρώτα την μετατρέψει σε ενέργεια άλλης μορφής. Οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των φυσικών μεγεθών είναι οι αποκαλούμενοι *μετατροπείς εισόδου* ή *μετατροπείς μέτρησης*, οι οποίοι διεγείρονται από κάποιο φυσικό μέγεθος (θερμοκρασία, πίεση, ηχητικό κύμα κ.λ.π.) και δημιουργούν κάποιο ηλεκτρικό συνήθως σήμα στην έξοδο, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του αντίστοιχου φυσικού μεγέθους. Αντίστοιχα, *μετατροπείς εξόδου* ονομάζονται οι μετατροπείς οι οποίοι μετασχηματίζουν την ηλεκτρική ενέργεια με την οποία διεγείρονται σε ενέργεια άλλης μορφής, συνήθως μηχανική.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και οι μετατροπείς εκπομπής υπερήχων οι οποίοι μετατρέπουν ένα ηλεκτρικό σήμα σε κύμα υπερήχων. Θα πρέπει να γίνει η παρατήρηση ότι η μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους μπορεί να απαιτεί και απορρόφηση ενέργειας από το σύστημα όπου μετρείται. Για παράδειγμα ένας μετατροπέας λήψης υπερήχων απορροφά μηχανική ενέργεια από το κύμα υπερήχων που προσπίπτει επάνω του και την μετατρέπει δια μέσου του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου σε ηλεκτρική ενέργεια.

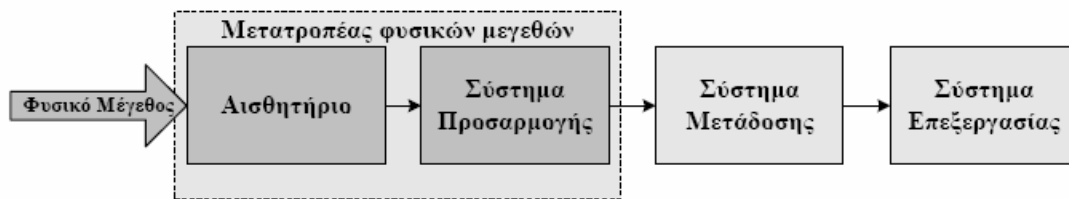
Αναλυτικά με τους μετατροπείς θα ασχοληθούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

Η συμπεριφορά των μετρητικών στοιχείων βελτιώνεται συνέχεια. Παράλληλα η αυξανόμενη εφαρμογή τους στην αεροδιαστημική , στα αυτοκίνητα, τα πλοία , τα ρομπότ, την ιατρική την μετεωρολογία κλπ , αυξάνει τις απαιτήσεις που υπάρχουν από τα μετρητικά στοιχεία. Για παράδειγμα πολλές φορές τα μετρητικά στοιχεία πρέπει να λειτουργούν κάτω από δύσκολες συνθήκες όπως συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, κραδασμών, σκόνης , ακτινοβολίας κλπ. Επίσης υπάρχουν απαιτήσεις για μετρητικά στοιχεία μικρού όγκου και βάρους για κάποιες ειδικές εφαρμογές. Έχουμε επίσης τα μετρητικά στοιχεία τα οποία μπορούν να συνδέονται εύκολα με συστήματα μικροϋπολογιστών και έτσι μειώνεται η πολυπλοκότητα και το κόστος μιας μετρητικής διάταξης που απαιτεί μεγάλη επεξεργασία δεδομένων.

3.5 ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ-ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Το πρώτο και πλέον σημαντικό τμήμα σε κάθε σύστημα μέτρησης είναι το αισθητήριο (σχήμα 3.6). Το αισθητήριο όπως έχουμε πει, μετατρέπει το προς μέτρηση φυσικό μέγεθος σε ένα άλλο μέγεθος, συνήθως ηλεκτρικό. Για τη μετατροπή αυτή το αισθητήριο

απορροφά ενέργεια από το φυσικό σύστημα, η οποία πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή, έτσι ώστε να μην διαταράσσεται η κατάσταση του φυσικού συστήματος. Τα τελευταία χρόνια η καλύτερη κατανόηση των φυσικών φαινομένων και ιδιαίτερα η εμφάνιση νέων υλικών έκανε δυνατή την ανάπτυξη πολλών διαφορετικών τύπων αισθητηρίων, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη ακρίβεια, ταχύτητα απόκρισης και ευρεία περιοχή μέτρησης. Περισσότεροι από 2000 διαφορετικοί τύποι αισθητηρίων είναι σήμερα διαθέσιμοι. Η λειτουργία των αισθητηρίων στηρίζεται φυσικά σε πολυάριθμες αρχές της φυσικής.



Σχήμα 3.6 Γενική δομή του συστήματος μέτρησης.

Τα αισθητήρια διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες :

- Στα διαμορφωμένα αισθητήρια και
- Στα αυτοδιεγυριόμενα αισθητήρια

Στα *διαμορφωμένα αισθητήρια*, το μετρούμενο φυσικό μέγεθος μεταβάλλει την τιμή ενός παθητικού ηλεκτρικού μεγέθους, όπως της ωμικής αντίστασης, της αυτεπαγωγής ή της χωρητικότητας. Επομένως για την λήψη του ηλεκτρικού σήματος από το αισθητήριο απαιτείται η τροφοδοσία του από μια εξωτερική πηγή. Το φυσικό μέγεθος προκαλεί τις παραπάνω μεταβολές επενεργώντας είτε στις διαστάσεις του υλικού του αισθητηρίου ή στις ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού.

Στην πρώτη περίπτωση το αισθητήριο περιλαμβάνει μια κινητή ή παραμορφώσιμη επιφάνεια στην οποία επενεργεί το μετρούμενο μέγεθος. Τα αισθητήρια αυτής της κατηγορίας είναι κατάλληλα για τη μέτρηση της θέσης, της μετατόπισης, της δύναμης, της πίεσης κ.λ.π. Στην δεύτερη περίπτωση το αισθητήριο αποτελείται από το κατάλληλο υλικό, κάποια από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του οποίου (ειδική αντίσταση, διηλεκτρική σταθερά, μαγνητική διαπερατότητα) είναι ευαίσθητη στο μετρούμενο μέγεθος. Η μέτρηση της θερμοκρασίας, της φωτεινότητας, όπως και άλλων μεγεθών, μπορεί να γίνει με αισθητήρια αυτής της κατηγορίας.

Έτσι έχουμε, αισθητήρια με μεταβολή της ειδικής αντίστασης, αισθητήρια με μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς, αισθητήρια με μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας.

Στα *αυτοδιεγυριόμενα αισθητήρια*, έχουμε την μετατροπή του μετρούμενου φυσικού μεγέθους σε αντίστοιχο ηλεκτρικό (τάση, ρεύμα, φορτίο) χωρίς να απαιτείται εξωτερική πηγή ενέργειας. Η λειτουργία λοιπόν των αυτοδιεγυριόμενων αισθητηρίων, στηρίζεται σε φυσικά φαινόμενα τα οποία επιτρέπουν τη μετατροπή της ενέργειας του μετρούμενου μεγέθους (μηχανική, ακτινοβολία) σε ηλεκτρική ενέργεια. Έτσι έχουμε, το φαινόμενο

της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, το φαινόμενο Hall.

Αναλυτικά, σε όλα τα παραπάνω και στις αρχές λειτουργίας των διαμορφωμένων και αυτοδιεγερώμενων αισθητηρίων, υπάρχει αναφορά με τύπους και σχήματα στο Παράρτημα της εργασίας αυτής.

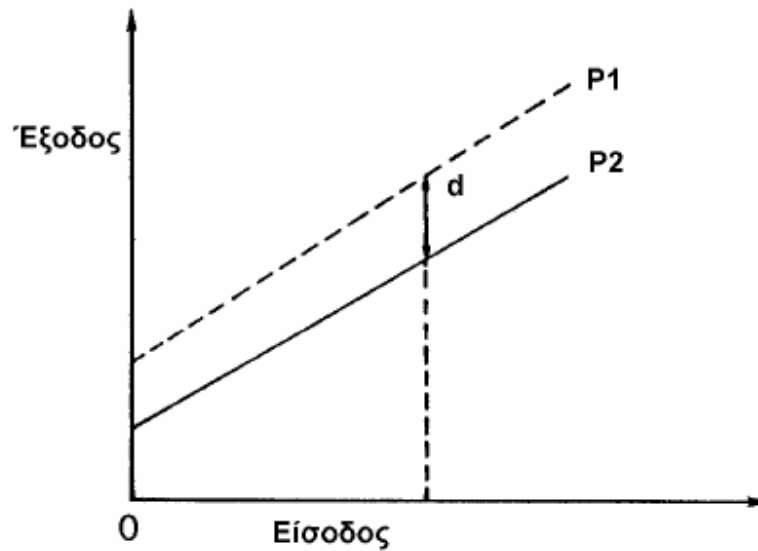
3.6 ΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Ένα σύστημα μέτρησης επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί που επιδρούν στο τελικό αποτέλεσμα μιας μέτρησης ονομάζονται *είσοδοι*. Οι είσοδοι αυτοί κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

- Επιθυμητές είσοδοι,
- Είσοδοι θορύβου ή παρεμβολής και
- Είσοδοι διαμόρφωσης.

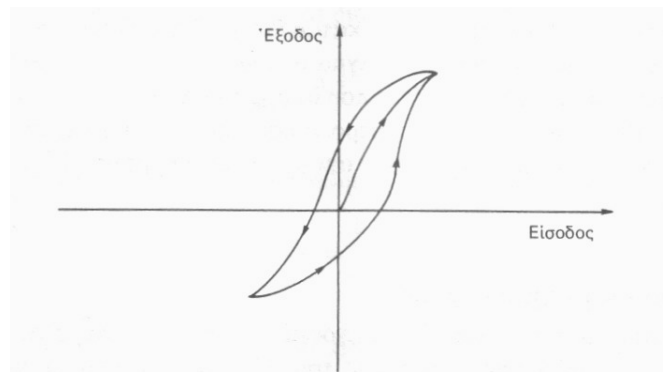
Επιθυμητές είσοδοι είναι τα φυσικά μεγέθη που μετράει το σύστημα μέτρησης. *Είσοδοι θορύβου ή παρεμβολής* είναι κάθε είδους θόρυβοι και παρεμβολές που επιδρούν στο σύστημα μέτρησης και αλλοιώνουν το αποτέλεσμα της μέτρησης. *Οι είσοδοι διαμόρφωσης* είναι διάφορες είσοδοι που επιδρούν στο αποτέλεσμα της μέτρησης και προέρχονται για παράδειγμα από την επίδραση του περιβάλλοντος χώρου των μετρήσεων ή από την εξωτερική τροφοδοσία του συστήματος μέτρησης.

Ρύθμιση , ενός συστήματος μέτρησης ονομάζουμε τη διαδικασία κατά την οποία μεταβάλλεται κατά γνωστό τρόπο η επιθυμητή είσοδος του συστήματος μέσα σε μία περιοχή τιμών (ενώ όλες οι άλλες είσοδοι κρατούνται όσο το δυνατόν σταθερές) έτσι ώστε να καλυφθεί η περιοχή μέτρησης του συστήματος και να αντιστοιχηθεί σε κάθε τιμή της εξόδου μια τιμή της επιθυμητής εισόδου. Η γραφική παράσταση αυτής της αντιστοιχίας τιμών εισόδου σε τιμές εξόδου ονομάζεται *καμπύλη ρύθμισης*. Αν σχεδιαστεί η καμπύλη ρύθμισης για διάφορες τιμές μιας εισόδου διαμόρφωσης, για παράδειγμα της πίεσης, τότε φαίνεται η επίδραση της πίεσης πάνω στη μέτρηση. Στο σχήμα 3.7, παρακάτω, φαίνεται το σφάλμα μέτρησης d που προκύπτει από την λειτουργία του συστήματος σε διαφορετική πίεση $P2$ αντί της κανονικής $P1$.



Σχήμα 3.7 Καμπύλες ρύθμισης ενός συστήματος μέτρησης σε δύο διαφορετικές πιέσεις P1 και P2.

Σε μερικές περιπτώσεις η καμπύλη ρύθμισης κατά την αύξηση της εισόδου δεν συμπίπτει με την καμπύλη ρύθμισης κατά την μείωση της εισόδου, οπότε έχουμε την εμφάνιση του *φαινομένου της υστέρησης* όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8, παρακάτω.



Σχήμα 3.8 Καμπύλη ρύθμισης με φαινόμενο υστέρησης.

Ένα σύστημα μέτρησης λέγεται ότι έχει *γραμμικότητα μέτρησης* αν η καμπύλη ρύθμισής του είναι ευθεία γραμμή. Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι η γραμμικότητα μέτρησης διαφέρει από την γραμμικότητα της δυναμικής του συστήματος. Δηλαδή μπορεί το σύστημα να διέπεται από γραμμική διαφορική εξίσωση (να είναι γραμμικό), αλλά να μην έχει γραμμικότητα μέτρησης. Σαν *ευαισθησία* ενός συστήματος μέτρησης ορίζουμε το λόγο της μεταβολής της εξόδου προς τη μεταβολή της εισόδου στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του. Ένας άλλος ορισμός της είναι η παράγωγος της καμπύλης ρύθμισης. Αν η καμπύλη ρύθμισης είναι ευθεία γραμμή, τότε η ευαισθησία είναι σταθερή σε όλη την περιοχή της μέτρησης. Σαν *διακριτική ικανότητα* ενός ηλεκτρονικού συστήματος ορίζουμε τη μικρότερη δυνατή μεταβολή της εισόδου που μπορεί να

μετρηθεί. *Υπερφόρτιση* ενός συστήματος μέτρησης ονομάζεται ο λόγος της μέγιστης τιμής του μετρούμενου μεγέθους που μπορεί να εφαρμοστεί σ' αυτό, χωρίς να υποστεί βλάβη, προς τη μέγιστη τιμή του μετρούμενου μεγέθους που μπορεί να μετρηθεί (άνω όριο περιοχής μέτρησης) Η

υπερφόρτιση αυτή είναι στατική, ή όπως συνηθίζεται να λέγεται συνεχής υπερφόρτιση. Ανάλογα με τη στατική υπερφόρτιση ορίζεται και η δυναμική, μόνο που σ' αυτήν την περίπτωση το μέγεθός της αλλάζει ανάλογα με τη διάρκειά της. Η υπερφόρτιση συνήθως εκφράζεται σαν ποσοστό. Για παράδειγμα όταν αναφέρεται για έναν αισθητήρα πίεσης ότι έχει στατική υπερφόρτιση 150% σημαίνει ότι αντέχει μέχρι 1.6 bar, ενώ μετράει μέχρι 1 bar. Επίσης αν αναφέρεται ότι αντέχει σε δυναμική υπερφόρτιση 180% διάρκειας 1 sec, σημαίνει ότι αντέχει πίεση 1.8 bar για διάρκεια 1 sec.

Ορίζουμε σαν *πόλωση* ενός συστήματος μέτρησης την τάση του να δίνει αποτέλεσμα διαφορετικό από την πραγματική τιμή κατά μία σταθερή ποσότητα. Αν το αποτέλεσμα είναι μεγαλύτερο της πραγματικής τιμής, τότε έχουμε θετική πόλωση, ενώ αν είναι μικρότερο τότε έχουμε αρνητική πόλωση.

3.7 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΕΣ

Η μεγάλη ανάπτυξη των συστημάτων μέτρησης χαρακτηρίζεται από ένα συνεχώς αυξανόμενο αριθμό παραμέτρων μέτρησης και από μία απαίτηση που γίνεται καθώς περνάει ο χρόνος πολύ αυστηρότερη ως προς την ποιότητα και ακρίβεια των μετρήσεων. Η ραγδαία ανάπτυξη της *ηλεκτρονικής* και της *πληροφορικής* τις τελευταίες δεκαετίες συνέβαλαν κατά το μείζον προς την κατεύθυνση αυτή, με την συνεχή βελτίωση και εξέλιξη των *μικροεπεξεργαστών*.

Είναι γεγονός ότι η εμφάνιση των μικροεπεξεργαστών δημιούργησε μία νέα διάσταση στη τεχνολογία. Τα βασικά τους γνωρίσματα, που είναι κυρίως η δυνατότητα προγραμματισμού, αλλά και το μικρό σχετικά κόστος, οι μικρές γεωμετρικές διαστάσεις και οι χαμηλές απαιτήσεις τους σε ηλεκτρική ενέργεια, δικαιολογούν την εκρηκτική τους ανάπτυξη.

Για το μέλλον, εκείνο που μπορεί να υποστηριχθεί, είναι ότι η εξέλιξη στο χώρο αυτόν θα είναι συνεχής και θα παρακολουθεί την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών. Έτσι αναμένεται περαιτέρω βελτίωση των τιμών βασικών μεγεθών των μικροεπεξεργαστών.

Σήμερα ο μικροεπεξεργαστής χρησιμοποιείται στη σύνθεση πολύπλοκων συστημάτων βιομηχανικού ελέγχου και παρακολούθησης βιομηχανικών διεργασιών, σε συστήματα ψηφιακών επικοινωνιών και τηλεφωνικών κέντρων, σε νοήμονα τερματικά υπολογιστών, σε στρατιωτικές εφαρμογές και βέβαια, σε μία πληθώρα επιστημονικών, εμπορικών και μηχανογραφικών εφαρμογών, αφού αποτελεί την καρδιά κάθε μικροϋπολογιστικού συστήματος. Ήδη γίνεται και ευρύτερα αντιληπτό ότι η εμφάνιση και η εκμετάλλευση

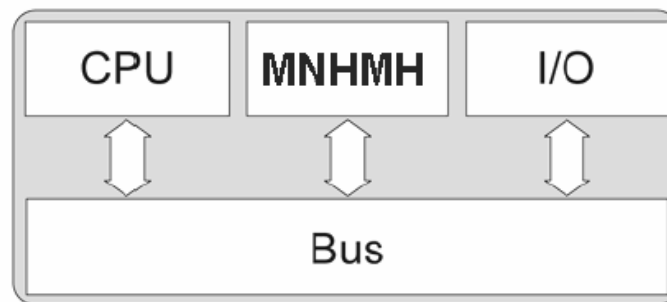
των μικροεπεξεργαστών σηματοδοτεί μία νέα εποχή εφαρμογών με μία συνεχή τάση βελτίωσης χαρακτηριστικών και επιδόσεων.

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, κατάφερε να δώσει τέτοιες ολοκληρώσεις στα chips, έτσι ώστε στην τελευταία δεκαετία εμφανίστηκαν απλά ολοκληρωμένα κυκλώματα τα οποία στην αρχή περιείχαν :

- Την κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU)
- Μνήμη (ROM και RAM).
- Μερικές παράλληλες ψηφιακές εισόδους / εξόδους.

Η κατηγορία αυτή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ονομάστηκαν **μικροελεγκτές** και μια απλή μορφή τους φαίνεται στο σχήμα 3.9, παρακάτω.

Μικροελεγκτής

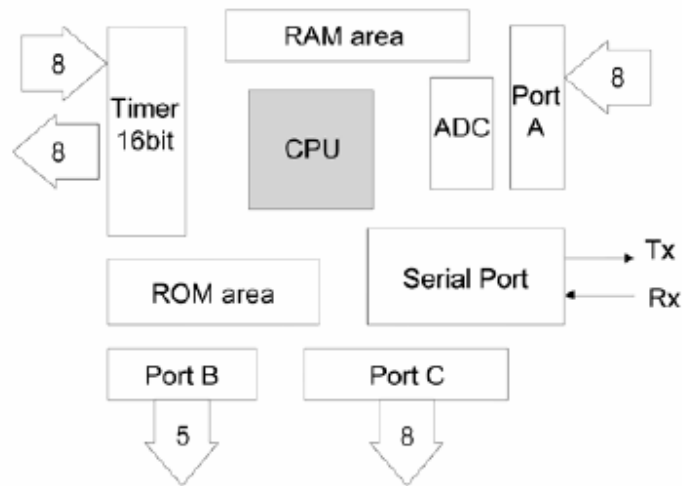


Σχήμα 3.9 Απλή μορφή ενός μικροελεγκτή.

Αργότερα πολλοί μικροελεγκτές άρχισαν να συνδυάζουν περισσότερες συσκευές όπως:

- Ένα σύστημα timer για την εκτέλεση εργασιών σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, μέτρηση περιόδου σημάτων κ.λ.π.
- Ports σύγχρονης και ασύγχρονης επικοινωνίας για τη δυνατότητα ροής δεδομένων μεταξύ διαφορετικών μικροελεγκτών ή άλλων συσκευών όπως ενός ή περισσότερων PC's.
- Μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, έτσι ώστε να έχει ο μικροελεγκτής την δυνατότητα να επεξεργάζεται αναλογικά σήματα.

Το σχήμα 3.10, παρακάτω, δείχνει μια πιο πολυπλοκότερη δομή ενός απλού chip μικροελεγκτή με τα υποσυστήματα που προαναφέρθηκαν.



Σχήμα 3.10 Μια πολυπλοκότερη δομή ενός chip μικροελεγκτή.

3.8 ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ

Μια εξελιγμένη μορφή μικροελεγκτών είναι αυτοί που αποκαλούνται *DSP's* (Digital Signal Processors). Οι μικροελεγκτές αυτοί έχουν όλα τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν, με την επιπλέον ισχυρή ικανότητα της *αριθμητικής επεξεργασίας σημάτων σε πραγματικό χρόνο για τα οποία γίνεται δειγματοληψία σε τακτά διαστήματα και ψηφιοποιούνται*.

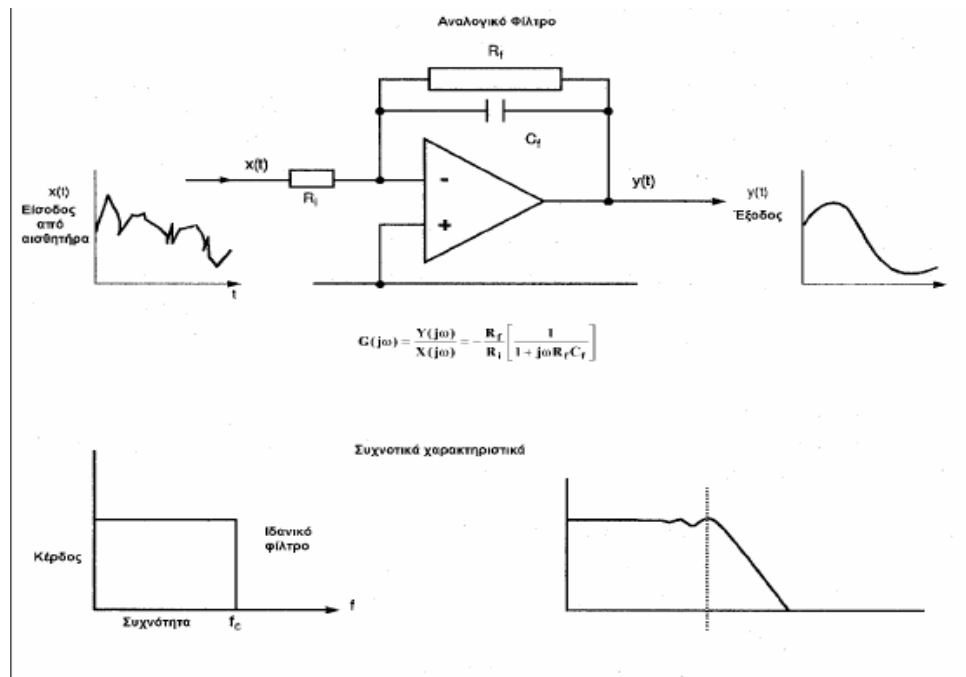
Παραδείγματα DSP επεξεργασίας μπορεί να περιλαμβάνουν τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Φιλτράρισμα (Filtering) των σημάτων.
- Συνέλιξη (Convolution) σημάτων η οποία είναι η μίξη των δύο σημάτων.
- Συσχέτιση (Correlation), η οποία είναι η σύγκριση δύο σημάτων.
- Ανόρθωση, Ενίσχυση, και / ή μετασχηματισμός ενός σήματος.

Πρόσφατα η τεχνολογία των ημιαγωγών έδωσε την απαιτούμενη επεξεργαστική ισχύ για να πραγματοποιηθούν ψηφιακά οι παραπάνω αλλά και άλλες λειτουργίες χρησιμοποιώντας DSP's. Οι οποίες λειτουργίες γινόταν έως τώρα παραδοσιακά χρησιμοποιώντας αναλογικά κυκλώματα.

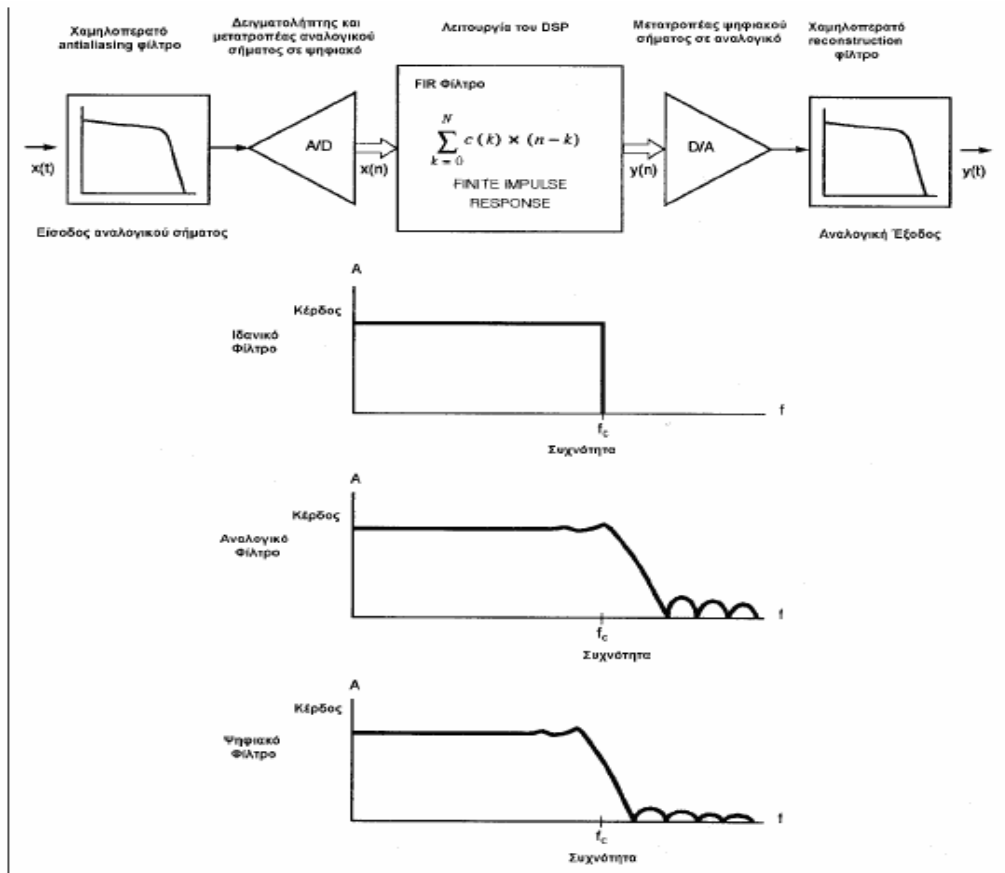
Το σχήμα 3.11, παρακάτω, δείχνει την διαδικασία μιας *αναλογικής επεξεργασίας σήματος*, το κύκλωμα στο σχήμα αυτό φιλτράρει ένα σήμα από έναν αισθητήρα χρησιμοποιώντας έναν τελεστικό ενισχυτή, και ελέγχει ένα στοιχείο ενεργοποίησης (actuator) ανάλογα με το αποτέλεσμα.

Το κύκλωμα αυτό συνήθως έχει χαμηλή ανοσία στο θόρυβο (noise immunity), χρειάζεται ρυθμίσεις και είναι δύσκολη κάθε ενέργεια βελτίωσής του.



Σχήμα 3.11 Απεικόνιση αναλογικής επεξεργασίας σήματος.

Το ισοδύναμο κύκλωμα χρησιμοποιώντας *DSP* φαίνεται στο σχήμα 3.12 . Η εφαρμογή αυτή απαιτεί έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog to Digital Converter – ADC) και έναν μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (Digital to Analog Converter – DAC) που συνήθως είναι ενσωματωμένοι μέσα στον DSP.



Σχήμα 3.12 Ισοδύναμο κύκλωμα χρησιμοποιώντας DSP – Απεικόνιση ψηφιακής επεξεργασίας σήματος.

Η επεξεργασία σε αυτό το κύκλωμα αρχίζει με τον περιορισμό του εύρους ζώνης του σήματος εισόδου με ένα χαμηλοπερατό anti-aliasing φίλτρο με σκοπό τη μείωση των σημάτων που βρίσκονται έξω από την επιθυμητή ζώνη κατά τη διαδικασία της δειγματοληψίας. Έτσι το σήμα δειγματοληπτείται και ψηφιοποιείται στον A/D μετατροπέα και εισέρχεται στον DSP για επεξεργασία. Το φίλτρο που υλοποιείται από τον DSP είναι κυριολεκτικά ένα κομμάτι από λογισμικό (Software). Ο DSP μπορεί να υλοποιήσει απ' ευθείας οτιδήποτε φίλτρο που θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με αναλογικές τεχνικές. Επίσης μπορούν να υλοποιηθούν με μεγάλη ευκολία προσαρμοστικά φίλτρα (adaptive filters) χρησιμοποιώντας DSP's, δεδομένου ότι αυτά τα φίλτρα είναι υπερβολικά δύσκολο να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας αναλογικές τεχνικές. Η ψηφιακή έξοδος του DSP μετατρέπεται σε αναλογική με τη βοήθεια ενός μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό και φιλτράρεται με ένα χαμηλοπερατό φίλτρο για να απομακρυνθούν οι επιπτώσεις της ψηφιοποίησης.

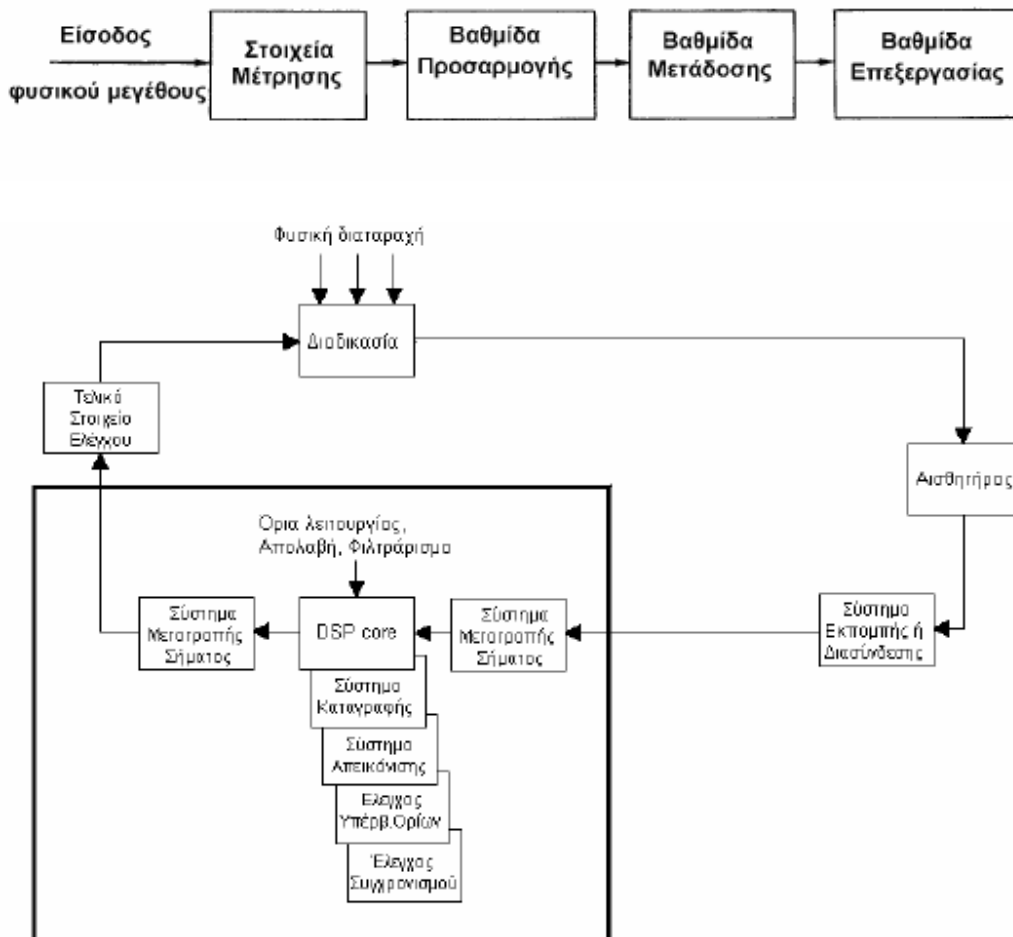
Περίληπτικά τα πλεονεκτήματα της χρήσης DSP μικροελεγκτών περιλαμβάνουν τα παρακάτω:

- Ευκολία υλοποίησης προσαρμοστικών φίλτρων (adaptive filters).
- Υλοποίηση φίλτρων με πολύ μικρή ανοχή
- Πολύ λιγότερα υλικά.

- Μεγάλο εύρος εφαρμογών.
- Μεγάλη ανοσία στο θόρυβο και απόρριψη λόγω μεταβολών της τροφοδοσίας (High noise immunity and power-supply rejection).
- Δυνατότητα ενσωμάτωσης ρουτινών αυτοδιάγνωσης (self-test routines).
- Δεν απαιτούνται ρυθμίσεις.

Οι εφαρμογές που καλούνται να δώσουν λύση οι όλο και πιο ισχυροί DSP μικροελεγκτές συνεχώς αυξάνονται. Σύμφωνα με τα τελευταία δεδομένα η ζήτηση για chips DSP's αυξάνεται με διπλάσιο ρυθμό σε σχέση με το ποσοστό αύξησης της συνολικής βιομηχανίας ημιαγωγών.

Κλείνοντας, παρατηρούμε το μετασχηματισμό ενός απλού μετρητικού συστήματος της προηγούμενης δεκαετίας σε ένα άλλο (σχήμα 3.13) με πολύ περισσότερες δυνατότητες, πιο αξιόπιστο και πιο συμπαγές, συγκρίνοντας τα δύο σχήματα παρακάτω:



Σχήμα 3.13 Διάγραμμα βαθμίδων ενός πολυσύνθετου συστήματος μέτρησης το οποίο ελέγχεται από εξελιγμένη μονάδα DSP.

Ένα τέτοιο σύστημα εκτός από την πανίσχυρη DSP (Digital Signal Processing) ψηφιακή επεξεργασία του σήματος με τη μορφή ελέγχου της απολαβής του και των όρων λειτουργίας του, ή του φιλτραρίσματός του, έχει και την δυνατότητα λήψης και εκπομπής του σήματος σε οποιαδήποτε μορφή όπως αναλογική, παράλληλη ψηφιακή, σειριακή ασύγχρονη ψηφιακή (RS-232, RS-485, 488), σειριακή σύγχρονη ψηφιακή (SPI), CAN κ.λ.π.

Στο κεφάλαιο αυτό γενικά, παρουσιάστηκε η εξέλιξη των συστημάτων μέτρησης, από την αρχική κατά βάση αναλογική μορφή τους έως τη σημερινή πολυσύνθετη μορφή τους, η οποία στηρίζεται πλέον στους γρήγορους, πανίσχυρους και χαμηλής κατανάλωσης DSP's. Κύρια χαρακτηριστικά αυτών των ισχυρών μικροελεγκτών είναι η ταχύτατη επεξεργασία δεδομένων (20-100 εκατομμύρια εντολές ανά δευτερόλεπτο) και η ακριβέστατη μέτρηση περιόδου (διακριτική ικανότητα 10-25 ns) των σημάτων.

Κεφάλαιο 4^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

4.1 ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ-ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ **(sensors-transducers)**

Ο μετατροπέας γενικά είναι μια συσκευή, η οποία μετατρέπει ενέργεια από μία μορφή σε μία άλλη. Για παράδειγμα το μικρόφωνο είναι ένας μετατροπέας, που μετατρέπει ηχητική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια.

Συστήματα μετατροπέων είναι π.χ. οι μετρητές πίεσεως λαδιού και οι μετρητές καυσίμων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα περισσότερα οχήματα και παρέχουν έξοδο, η οποία είναι δυνατό να μετρηθεί εύκολα. Παρόλα αυτά σε άλλες περιπτώσεις είναι συνήθως ευκολότερο η ακόμη και απαραίτητο να έχουμε την πληροφορία από κάποια παράμετρο με τη μορφή ηλεκτρικού σήματος. Έτσι, οι περισσότεροι μετατροπείς, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σήμερα, παρέχουν τη μέτρηση κάποιας παραμέτρου με τη μορφή ηλεκτρικού σήματος, του οποίου η τιμή είναι ανάλογη με την ποσότητα που μετράται. *Για παράδειγμα:*

Ο μετρητής καυσίμων ενός οχήματος είναι ένα σύστημα ηλεκτρικής μετατροπής. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η μέτρηση της στάθμης των καυσίμων στο ρεζερβουάρ του οχήματος, η οποία όμως δεν είναι δυνατό, να ληφθεί με άμεσο τρόπο. Παλαιότερα είχαν επινοηθεί μηχανικές μέθοδοι για την λήψη τέτοιων μετρήσεων. Είναι όμως ευκολότερο να μεταφέρουμε τις μετρήσεις αυτές από το ρεζερβουάρ του οχήματος στο μετρητή με ηλεκτρικές μεθόδους. Σ' αυτή την περίπτωση ο μετατροπέας είναι τοποθετημένος επάνω στο ρεζερβουάρ και αποτελείται από δύο βασικά στοιχεία: Ένα φλοτέρ (πλωτήρας), το οποίο κινείται επάνω και κάτω ανάλογα με τη στάθμη των καυσίμων, με αποτέλεσμα να παρέχει μια μηχανική μετακίνηση, και ένα ποτενσιόμετρο συνδεδεμένο με το φλοτέρ, το οποίο μετατρέπει τη μετατόπιση αυτή σε ηλεκτρικό σήμα. Το σήμα αυτό μεταφέρεται κατόπιν δια μέσου καλωδίων στο μετρητή στον πίνακα καταγραφής.

Το παραπάνω παράδειγμα δείχνει τα θεμελιώδη σημεία σχεδιάσεως ενός μετατροπέα, ο οποίος έχει δύο βαθμίδες μετατροπής, πρώτα από κάποια παράμετρο σε μετακίνηση και κατόπιν από τη μετακίνηση σε μια ηλεκτρική έξοδο. Ο μετατροπέας μετακινήσεως είναι από τους βασικότερους τύπους μετατροπέα.

Το όνομα το οποίο δίνεται σε κάποιο συγκεκριμένο μετατροπέα δείχνει συνήθως τη λειτουργία του. Ο μετρητής καυσίμων, για παράδειγμα, είναι ένας *ποτενσιομετρικός μετατροπέας*, ο οποίος μετράει τη στάθμη των καυσίμων δια μέσου της μετακινήσεως και κατόπιν παρέχει μια ηλεκτρική έξοδο δια μέσου ενός ποτενσιόμετρου. Με τον ίδιο τρόπο ένας *πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας* πίεσεως μπορεί να καταγράφει την πίεση δια μέσου ενός διαφράγματος ή ενός μηχανισμού με κάψα και κατόπιν να παράγει μια ηλεκτρική έξοδο δια μέσου ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου.

Μετατροπέας λέγεται η διάταξη που απορροφά ενέργεια από ένα σύστημα και την μεταφέρει, αφού συνήθως την μετατρέπει σε ενέργεια άλλης μορφής, σε ένα άλλο σύστημα.

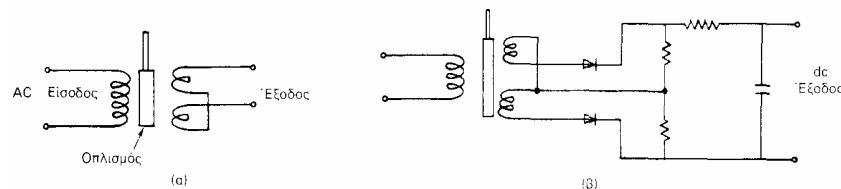
Οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται για μετρήσεις είναι οι λεγόμενοι *μετατροπείς εισόδου ή μετατροπείς μέτρησης*. Δηλαδή διεγείρονται από κάποια φυσική ποσότητα (θέση, πίεση, θερμοκρασία κλπ.) και δημιουργούν ένα σήμα εξόδου, συνήθως ηλεκτρικό, το οποίο χρησιμοποιείται για την μέτρηση της αντίστοιχης φυσικής ποσότητας. *Μετατροπείς εξόδου* λέγονται οι μετατροπείς που μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια σε ενέργεια άλλης μορφής, συνήθως μηχανική. Αυτοί οι μετατροπείς όταν χρησιμοποιούνται σε συστήματα ελέγχου λέγονται και *ενεργοποιητές* (όπως π.χ. κινητήρες, ηλεκτρικές βαλβίδες κλπ.). Μετατροπείς εξόδου είναι και τα μεγάφωνα, οι μετατροπείς υπερήχων κλπ.

Εδώ, αυτό που πρέπει να παρατηρήσουμε και να πούμε είναι ότι η μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους συνεπάγεται με απορρόφηση ενέργειας. Δηλαδή ο μετατροπέας απορροφά ενέργεια από το σύστημα - αντικείμενο που μετρείται. Πολλές φορές το σήμα εξόδου του μετατροπέα είναι *ηλεκτρικό* και αυτό γιατί η ηλεκτρική ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας που με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα μπορεί εύκολα να υποστεί επεξεργασία για μετάδοση και απόκτηση πληροφοριών. Για παράδειγμα ένα θερμοζεύγος απορροφά θερμική ενέργεια από τον χώρο του οποίου την θερμοκρασία θέλουμε να μετρήσουμε (μετρούμενο σύστημα) και την μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια.

4.2 ΤΥΠΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ

Ας δούμε τους πιο διαδεδομένους τύπους μετατροπέων. Ο κάθε ένας χαρακτηρίζεται από μια αρχή μετατροπής

Τύπος διαφορικού μετασχηματιστή : Ένας μετατροπέας διαφορικού τύπου φαίνεται στο σχήμα 4.1, παρακάτω.



Σχήμα 4.1 Μετατροπέας διαφορικού τύπου, α) με ac έξοδο, β) και με dc έξοδο.

Όπως βλέπουμε παραπάνω, ο διαφορικός μετασχηματιστής αποτελείται από ένα πρωτεύον πηνίο δύο δευτερεύοντα και ένα κινητό σπλισμό ο οποίος κινείται κάτω από την επίδραση του μετρούμενου μεγέθους. Καθώς ο πυρήνας κινείται ο διαφορικός μετασχηματιστής παράγει ένα εναλλασσόμενο σήμα που δίνει πληροφορίες για το μέγεθος και τη διεύθυνση της μετακίνησης του πυρήνα. Συχνά χρειάζεται η τάση εξόδου να είναι συνεχής οπότε χρησιμοποιείται το κύκλωμα προσαρμογής του σχήματος (β). Το μέγεθος της συνεχούς τάσης εξόδου παριστά το μέγεθος της μετακίνησης από τη θέση ισορροπίας και η πολικότητα της εξόδου δείχνει τη διεύθυνση της μετακίνησης του πυρήνα. Όταν ο πυρήνας είναι συμμετρικά τοποθετημένος ως προς τα πηνία (θέση ισορροπίας) οι τάσεις στις αντιστάσεις αλληλοαναιρούνται και έτσι η τάση στην έξοδο είναι μηδενική. Όταν μετακινηθεί ο πυρήνας η τάση στην μια αντίσταση αυξάνει ενώ στην άλλη μειώνεται και η διαφορά τους εμφανίζεται στην έξοδο και εκφράζει την θέση του πυρήνα ως προς τη θέση ισορροπίας.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των διαφορικών μετασχηματιστών είναι το ότι το σήμα εξόδου τους είναι ισχυρό.

Τα πιο σημαντικά μειονεκτήματά τους είναι:

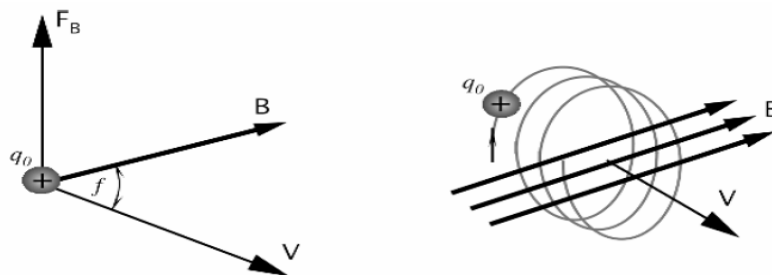
- Πολλοί πραγματικοί διαφορικοί μετασχηματιστές επηρεάζονται από κραδασμούς.
- Η ισχύς της εισόδου μειώνεται από απώλειες δινορρευμάτων και υστέρησης. Το φαινόμενο αυτό βέβαια είναι πιο έντονο στις υψηλές συχνότητες τροφοδοσίας.

Γενικά, οι διαφορικοί μετασχηματιστές είναι κατάλληλοι για μέτρηση μεγάλων μετατοπίσεων.

Ηλεκτρομηχανικός τύπος :

Ηλεκτρομηχανικού τύπου μετατροπείς είναι βασικά όσοι μετατροπείς στηρίζονται για την λειτουργία τους στο νόμο επαγωγής του Faraday (σχήμα 4.2).

Παράδειγμα μετατροπέα ηλεκτρομηχανικού τύπου είναι ο μετατροπέας ταχύτητας ο οποίος βασικά έχει ένα πηνίο το οποίο κινείται με την ταχύτητα που θέλουμε να μετρήσουμε μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Η επαγόμενη τάση στο πηνίο είναι ανάλογη της ταχύτητας

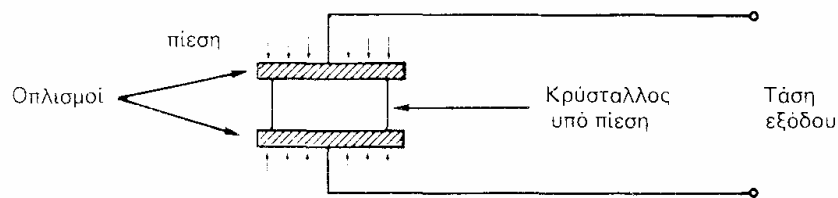


Σχήμα 4.2 Νόμος της επαγωγής του Faraday.

Πιεζοηλεκτρικός τύπος :**Λίγα λόγια για το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο**

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1880 από τους Pierre και Curie και προκαλεί την εμφάνιση ηλεκτρικών φορτίων αντίθετου πρόσημου στις απέναντι πλευρές ενός κρυστάλλου όταν αυτός πιέζεται, όταν αυτός δηλαδή υφίσταται μηχανική τάση. Το φορτίο είναι ανάλογο της μηχανικής τάσης.

Οι μετατροπείς πιεζοηλεκτρικού τύπου χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους. Οι κρύσταλλοι αυτοί (όπως ο κρύσταλλος quartz) όταν βρεθούν υπό πίεση, παράγουν ένα ηλεκτρικό φορτίο. Το φορτίο αυτό φορτίζει τον πυκνωτή που σχηματίζεται μεταξύ των δυο επιφανειών του κρυστάλλου και έτσι αναπτύσσεται μια τάση στα άκρα του. Στο σχήμα 4.3, παρακάτω, βλέπουμε αυτό το φαινόμενο



Σχήμα 4.3 Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

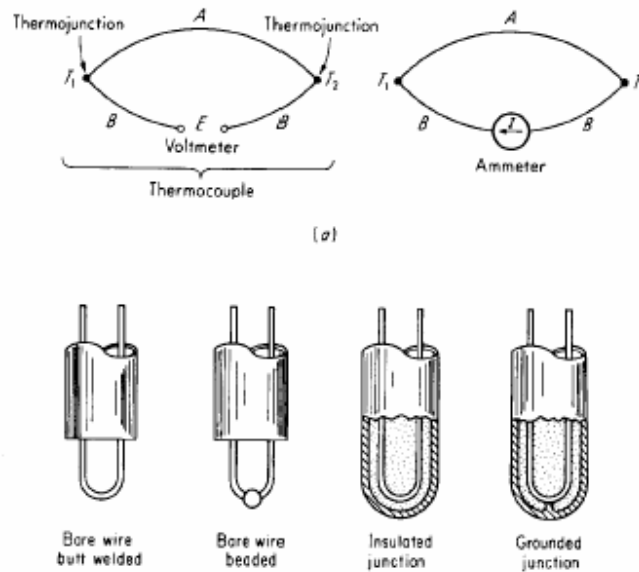
Οι μετατροπείς πιεζοηλεκτρικού τύπου δεν απαιτούν εξωτερική πηγή.

Οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι λειτουργούν και αντίστροφα. Δηλαδή αν βρεθούν σε διαφορά δυναμικού αλλάζει το σχήμα τους (συστέλλονται ή διαστέλλονται)

Οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μέτρηση πίεσης, δύναμης, επιτάχυνσης κλπ. Τέτοιοι κρύσταλλοι χρησιμοποιούνται ακόμη και σαν βελόνες πικ - απ. Καθώς γυρίζει ο δίσκος ο κρύσταλλος παρακολουθώντας τις αυλακώσεις του δίσκου παραμορφώνεται και έτσι αναπτύσσεται μια τάση η οποία στη συνέχεια ενισχύεται.

Θερμοηλεκτρικός τύπος :

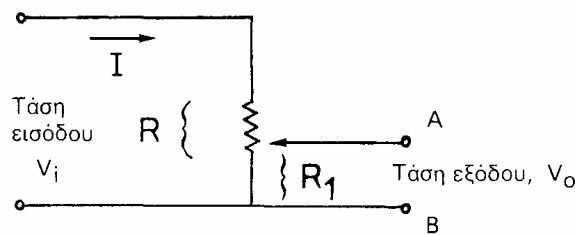
Ο θερμοηλεκτρικός τύπος μετατροπέα είναι κυρίως το θερμοζεύγος ή θερμοηλεκτρικό στοιχείο το οποίο αποτελείται από δύο διαφορετικά μέταλλα (σχήμα 4.4) των οποίων το ένα άκρο είναι κοινό ενώ τα άλλα δύο είναι ελεύθερα. Αν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του κοινού άκρου και των ελεύθερων άκρων αναπτύσσεται μια θερμοηλεκτρική τάση μεταξύ των ελεύθερων άκρων που εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.4 Θερμοζεύγος ή θερμοηλεκτρικό στοιχείο.

Τύπος ποτενσιόμετρου :

Ένας τέτοιος τύπος μετατροπέα φαίνεται στο σχήμα 4.5, παρακάτω



Σχήμα 4.5 Μετατροπέας ποτενσιόμετρου.

Η τάση εξόδου είναι: $V_o = V_i \frac{R_1}{R}$

Η παραπάνω σχέση ισχύει όταν η αντίσταση φορτίου είναι πρακτικά άπειρη.

Διαφορετικά η σχέση γίνεται: $V_o = V_i \frac{R_1 // R_\phi}{R_1 // R_\phi + R - R_1} = V_i \frac{R_1 R_\phi}{R R_1 + R R_\phi - R_1^2}$ Όπου

$R_1 // R_\phi$ είναι ο παράλληλος συνδυασμός των αντιστάσεων R_1 και R_ϕ .

Η μεταβλητή επαφή του ποτενσιόμετρου κινείται κάτω από την επίδραση του φυσικού μεγέθους που πρόκειται να μετρηθεί (π.χ. πίεση, θέση κλπ.) και έτσι μεταβάλλεται η αντίσταση R_1 . Αν δεχθούμε ότι $R_\phi \gg R_1$ τότε η τάση εξόδου μεταβάλλεται ανάλογα με την μεταβολή του μετρούμενου φυσικού μεγέθους.

Οι μετατροπείς του τύπου ποτενσιόμετρου έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Έχουν ισχυρό σήμα εξόδου το οποίο συχνά δεν χρειάζεται ενίσχυση.
- Λειτουργούν τόσο σε συνεχές όσο και σε εναλλασσόμενο ρεύμα.
- Είναι σχετικά φτηνοί και εγκαθίστανται εύκολα.

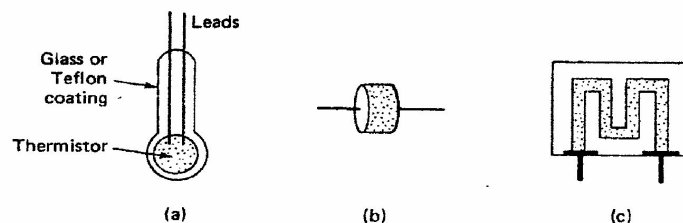
Τα πιο σημαντικά τους μειονεκτήματα είναι:

- Επηρεάζονται από την θερμοκρασία.
- Πρέπει να είναι κλειστού τύπου για προστασία από σκόνη και υγρασία.
- Παρουσιάζουν σημαντική αντίσταση τριβής στο σημείο επαφής της μεταβλητής αντίστασης.
- Έχουν μικρό εύρος ζώνης συχνοτήτων. Δηλαδή αποκρίνονται σε χαμηλές συχνότητες
- Είναι ευαίσθητοι σε κραδασμούς.
- Είναι σχετικά ογκώδεις.
- Εμφανίζουν με την πάροδο του χρόνου προβλήματα θορύβου

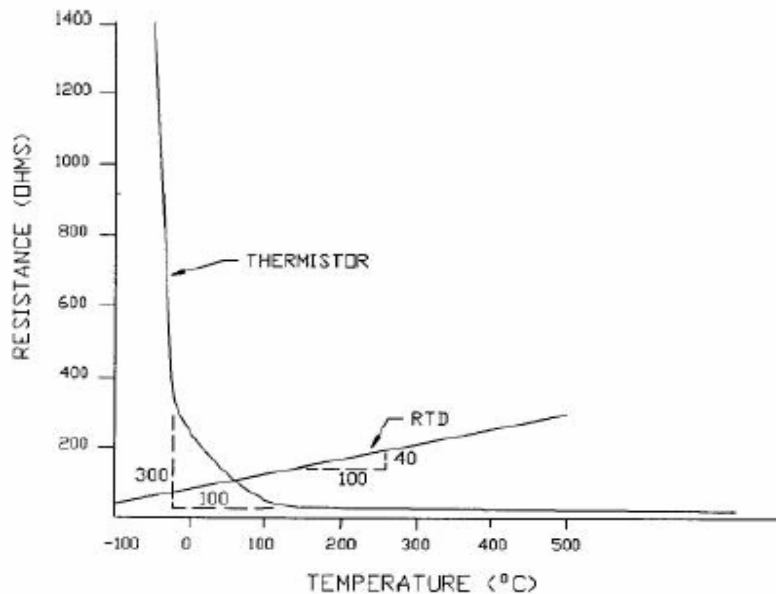
Τύπος μεταβλητής ηλεκτρικής αντίστασης :

Σε αυτόν τον τύπο ανήκουν οι μετατροπείς το κύριο στοιχείο των οποίων είναι μια ηλεκτρική αντίσταση η τιμή της οποίας εξαρτάται από κάποιο φυσικό μέγεθος. Για παράδειγμα η τιμή της αντίστασης μπορεί να αυξάνει ή να μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα *θερμίστορ** και οι *ανιχνευτές θερμοκρασίας με μεταβλητή αντίσταση* (Resistance temperature detectors – RTD).

Θερμίστορ: είναι τα πιο δημοφιλή αισθητήρια θερμοκρασίας και αποτελούνται ουσιαστικά από μια αντίσταση με μεγάλο θερμικό συντελεστή αντίστασης. Τα θερμίστορς είναι ημιαγωγοί διαφόρων γεωμετρικών σχημάτων. Παραθέτουμε χαρακτηριστικά στα παρακάτω σχήματα διάφορες μορφές θερμίστορς (σχήμα 4.6)



Σχήμα 4.6 Θερμίστορ διάφορων γεωμετρικών σχημάτων.



Σχήμα 4.7 Η αντίσταση του θερμίστορ συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Η αντίσταση των θερμίστορς συναρτήσει της θερμοκρασίας δεν ακολουθεί τον γραμμικό νόμο (όπως π.χ τα μέταλλα), αλλά τον εκθετικό. Τα θερμίστορς, σαν αισθητήρια θερμοκρασίας, η λειτουργία τους στηρίζεται στην μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης τους λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας. Η αντίσταση ενός θερμίστορ μειώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, αντίθετα από ότι συμβαίνει στην περίπτωση των RTD (σχήμα 4.7).

Τύπος πιεζοαντίστασης :

Λίγα λόγια για το φαινόμενο της πιεζοαντίστασης

Το φαινόμενο της πιεζοαντίστασης οφείλεται στην εξάρτηση της ειδικής αντίστασης ενός υλικού από τη μηχανική τάση την οποία δέχεται και εμφανίζεται σε μονοκρυστάλλους ημιαγωγικών υλικών.

Ο μετατροπέας τύπου πιεζοαντίστασης στηρίζεται στην εξής αρχή: Αν ασκηθεί μια δύναμη εφελκυσμού επάνω σε ένα σύρμα, το μήκος l του σύρματος αυξάνεται κατά Δl με αποτέλεσμα η ηλεκτρική αντίσταση R του σύρματος να μεταβληθεί κατά ΔR . Ισχύει στην περίπτωση η σχέση: $\frac{\Delta R}{R} = G \frac{\Delta l}{l}$ όπου ο συντελεστής G λέγεται συντελεστής μεταβολής (Gage factor). Ο συντελεστής G μπορεί να αναλυθεί σε τρεις όρους, ένας εκφράζει την μεταβολή της αντίστασης λόγω της μεταβολής του μήκους του σύρματος, ο δεύτερος εκφράζει την μεταβολή της αντίστασης λόγω της μεταβολής της διατομής του

σύρματος, και ο τρίτος όρος εκφράζει την μεταβολή της αντίστασης λόγω του φαινομένου πιεζοαντίστασης (δηλαδή της μεταβολής της ειδικής αντίστασης, ρ του σύρματος λόγω της καταπόνησης).

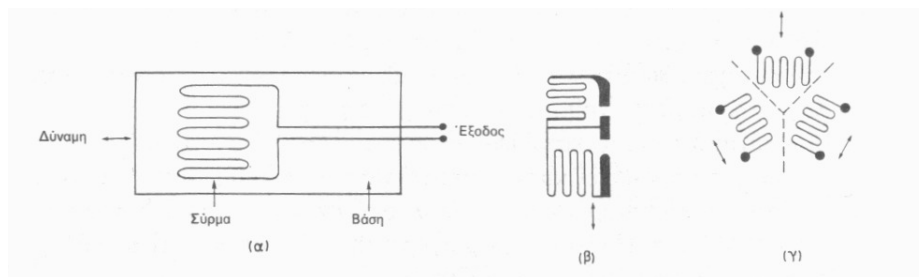
Με μετατροπέα τύπου πιεζοαντίστασης μπορεί να μετρηθεί, παραμόρφωση, δύναμη, πίεση, τάση φόρτισης κλπ.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες μετατροπέων τύπου πιεζοαντίστασης, προσκολλημένης και ελεύθερης πιεζοαντίστασης (σχήματα 4.8 και 4.9).

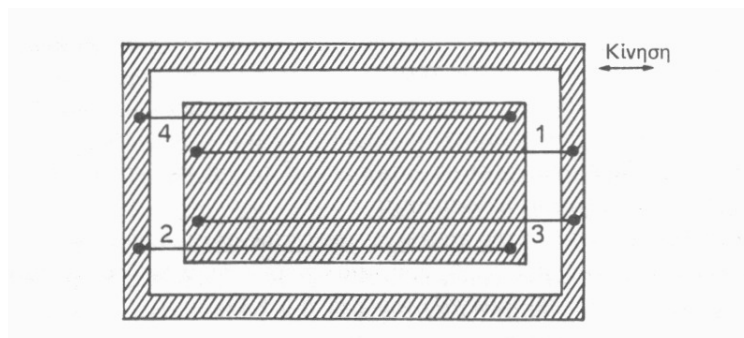
Οι μετατροπείς αυτού του τύπου μπορούν να κατασκευαστούν από μέταλλα αλλά και από ημιαγωγικό υλικό

Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματά τους είναι:

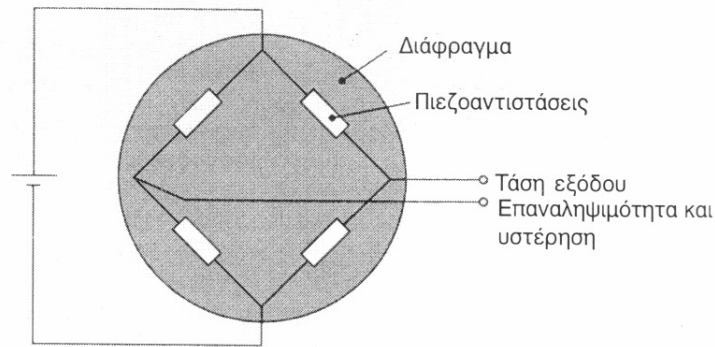
- Έχουν πολύ καλή στατική και δυναμική συμπεριφορά και μεγάλη ακρίβεια.
- Λειτουργούν τόσο με συνεχές όσο και με εναλλασσόμενο ρεύμα.



Σχήμα 4.8 Διάταξη μετατροπέα με προσκολλημένη πιεζοαντίσταση.



Σχήμα 4.9 Διάταξη μετατροπέα με ελεύθερη πιεζοαντίσταση.



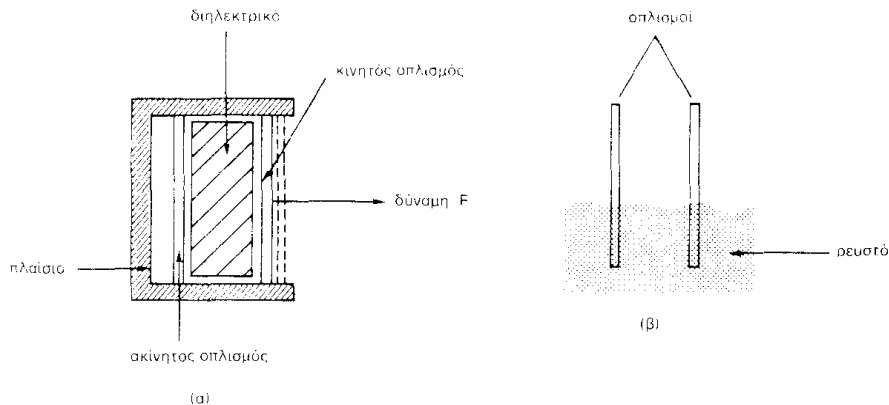
Σχήμα 4.10 Τέσσερις πιεζοαντιστάσεις σε γέφυρα Wheatstone (Διάφραγμα πιεζοαντίστασης).

Ημιαγωγικοί μετατροπείς θερμοκρασίας :

Οι πιο σημαντικοί ημιαγωγικοί μετατροπείς θερμοκρασίας είναι : οι αντιστάσεις, οι διόδοι και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Γνωρίζουμε ότι, η τάση της διόδου βάσης – εκπομπού, σε ορθή πόλωση, ενός τρανζίστορ πυριτίου εξαρτάται από την θερμοκρασία. Συγκεκριμένα καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται η τάση μειώνεται. Βάσει της συγκεκριμένης αρχής έχει κατασκευαστεί μια σειρά μετατροπέων θερμοκρασίας. Αυτοί οι μετατροπείς έχουν γρήγορη απόκριση. Οι ημιαγωγικές αντιστάσεις έχουν θετικό συντελεστή θερμοκρασίας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε γέφυρα όπως τα RTD και τα θερμίстор. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα είναι έτσι κατασκευασμένα ώστε να συμπεριφέρονται σαν πηγές ρεύματος των οποίων η ένταση εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αυτά τα κυκλώματα χρησιμοποιούνται σαν μετατροπείς θερμοκρασίας οι οποίοι είναι γραμμικοί και πολύ εύκολοι στην χρήση.

Χωρητικός τύπος :

Οι χωρητικού τύπου μετατροπείς είναι εντελώς απλοί από μηχανική άποψη και αποτελούνται βασικά από δύο ηλεκτρικά αγωγίμους δίσκους οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί ώστε να σχηματίζουν τις δύο πλάκες ενός πυκνωτή. Η τιμή της χωρητικότητας εξαρτάται από το διηλεκτρικό υλικό που χρησιμοποιείται από την απόσταση μεταξύ των δίσκων, καθώς και από την επιφάνεια των δίσκων. Η σχετική θέση των οπλισμών του πυκνωτή εξαρτάται από το μετρούμενο μέγεθος. Για παράδειγμα αν το μετρούμενο μέγεθος είναι η πίεση αυτή ασκεί μια δύναμη στον κινητό οπλισμό του μετατροπέα και μεταβάλλει την θέση του ως προς τον άλλο οπλισμό. Έτσι αλλάζει η χωρητικότητα του πυκνωτή. Υπάρχει και η περίπτωση και οι δύο οπλισμοί να είναι ακίνητοι και να μεταβάλλεται η στάθμη του διηλεκτρικού, το οποίο σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ρευστό. Έτσι, όπως είπαμε και πιο πάνω, με την μεταβολή του διηλεκτρικού μεταβάλλεται και η χωρητικότητα του πυκνωτή. (σχήμα 4.11).



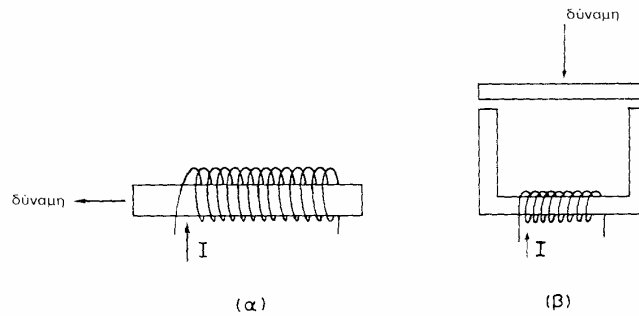
Σχήμα 4.11 Αρχή λειτουργίας χωρητικού τύπου μετατροπέα.

Η χρήση των χωρητικών μετατροπέων γενικά, περιορίζεται σε περιπτώσεις για τις οποίες εμφανίζουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα, π.χ. στην καταμέτρηση μιας πολύ μικρής μηχανικής φορτίσεως στην κάψα ενός υψομετρικού οργάνου ενός αεροπλάνου ή εκεί όπου η ηλεκτρική ασφάλεια είναι πολύ μεγάλης σημασίας, όπως στο μετρητή καυσίμων ενός αεροπλάνου.

Οι χωρητικού τύπου μετατροπείς γενικά, χρησιμοποιούνται συνήθως σαν στοιχεία γέφυρας εναλλασσομένου ρεύματος.

Επαγωγικός τύπος :

Οι μετατροπείς αυτοί χρησιμοποιούνται συνήθως σαν στοιχεία γέφυρας εναλλασσομένου ρεύματος. Αν και η χρήση του ποτενσιόμετρου σαν μετατροπέας είναι μεγάλη, συχνά είναι απαραίτητη η χρήση μετατροπέων άλλου τύπου οι οποίοι να μην έχουν τα μειονεκτήματα ενός ποτενσιόμετρου. Τα μειονεκτήματα αυτά εμφανίζονται σε ένα ποτενσιόμετρο επειδή χρησιμοποιούμε μία ολισθαίνουσα επαφή και είναι αποτέλεσμα της διακοπτόμενης αγωγής η οποία εμφανίζεται μεταξύ της ολισθαίνουσας επαφής και της αντίστασης του ποτενσιόμετρου και η οποία οφείλεται στις δονήσεις στην τριβή κλπ. Για να αποφύγουμε όλα αυτά τα προβλήματα χρησιμοποιούμε τους επαγωγικούς μετατροπείς οι οποίοι δεν περιλαμβάνουν αγωγή δια μέσου κάποιας επαφής. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην αρχή ενός κινούμενου οπλισμού και ένα στάτη από μαγνητικό υλικό, καθώς και ένα σύστημα από πηνία τα οποία έχουν μαγνητική ζεύξη η οποία μπορεί να μεταβάλλεται σε κάθε μετατόπιση του οπλισμού. Τα πιο γνωστά παραδείγματα αυτού του είδους μετατροπέα είναι ο συγχρομετασηματιστής, ο διαφορικός μετασηματιστής γραμμικής μεταβλητής (LVDT) κλπ. Για να συνοψίσουμε, γενικά, οι μετατροπείς αυτού του τύπου στηρίζονται στην μεταβολή της αυτεπαγωγής ενός πηνίου με πυρήνα όταν αλλάζει η θέση του πυρήνα. Όταν μετακινηθεί ο πυρήνας ή ο οπλισμός του πυρήνα κάτω από την επίδραση του μετρούμενου μεγέθους η αυτεπαγωγή της διάταξης μεταβάλλεται. (σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.12 Αρχή λειτουργίας επαγωγικού τύπου μετατροπέα.

Τύπος Hall και μαγνητοαντίστασης :

Λίγα λόγια για το φαινόμενο Hall

Το φαινόμενο Hall πήρε το όνομα του από τον E.H. Hall που το ανακάλυψε. Το φαινόμενο Hall είναι η δημιουργία μίας εγκάρσιας τάσης στα άκρα ενός αγωγού, όταν αυτός διαρρέεται από ρεύμα και βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο.

ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HALL

Απόκλιση ηλεκτρικών φορτίων σ' ένα ομοιόμορφο Μαγνητικό πεδίο

Όταν ένα φορτίο εισέλθει σε ένα μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα κάθετη στο μαγνητικό πεδίο ασκείται πάνω του δύναμη Lorentz που το αναγκάζει να κάνει κυκλική κίνηση.

$$F=BqV$$

Δύναμη που ασκείται σε ένα θετικό φορτίο σ' ένα ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο

Αν ένα φορτίο q βρεθεί μεταξύ δύο οπλισμών φορτισμένων από πηγή τάσης. Τότε το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται ασκεί μια δύναμη στο φορτίο και το αναγκάζει να κινηθεί παραβολικά προς τα πάνω η κάτω ανάλογα με το είδος του φορτίου.

$$F=qE$$

Δυνάμεις που ασκούνται σε φορτισμένα σωματίδια κινούμενα μέσα σε αγωγό που βρίσκεται μέσα στο χώρο ομογενούς μαγνητικού πεδίου.

Αν βάλω αγωγό μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, θα ασκηθεί μια δύναμη στα κινούμενα e και αυτά θα αποκλίνουν από την ευθύγραμμη τροχιά τους αλλά θα περιοριστούν από τα φυσικά όρια του αγωγού. Το ρεύμα θα συνεχίσει να ρέει αλλά εμείς πρέπει να βρούμε μια δύναμη που να αντισταθμίζει αυτή της απόκλισης. Αυτή η δύναμη θα προκαλείται

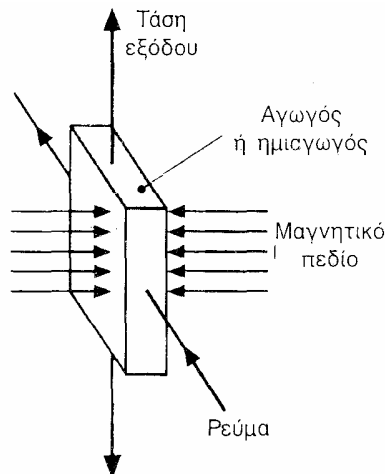
από το ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια του αγωγού. Από την εξίσωση των δυνάμεων έχουμε τη σχέση:

$$E = BV$$

Άρα η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι συνάρτηση της μαγνητικής επαγωγής που διαρρέει το αγωγό.

Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι αν ένας αγωγός που διαρρέετε από ρεύμα τοποθετηθεί σε μαγνητικό πεδίο τότε θα ασκηθεί πάνω του μια δύναμη μαγνητική κάθετη και αμοιβαία με το μαγνητικό πεδίο και το ρεύμα. Αυτό είναι γνωστό σαν το φαινόμενο Hall.

Το σχήμα 4.13, παρακάτω, εικονίζει τη βασική αρχή του φαινομένου Hall. Όταν ένας ρευματοφόρος αγωγός ή ημιαγωγός βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία μίας συσκευής πχ που να ανιχνεύει τη προσέγγιση.



Σχήμα 4.13 Φαινόμενο Hall.

Οι συσκευές που χρησιμοποιούν το φαινόμενο Hall τείνουν να χρησιμοποιούν ημιαγωγούς, επειδή εκεί το φαινόμενο είναι πιο ισχυρό.

Ο μετατροπέας Hall είναι κατάλληλος για μέτρηση μαγνητικής επαγωγής(αν το I είναι σταθερό) και έντασης ρεύματος. Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την τάση Hall.

Η μεταβολή της αντίστασης ενός κρυστάλλου Hall(ο οποίος διαρρέετε από ηλεκτρικό ρεύμα) κάτω από την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου λέγεται φαινόμενο μαγνητοαντίστασης. Και οι μετατροπείς που στηρίζονται σε αυτό το φαινόμενο, όπως και οι μετατροπείς Hall, επηρεάζονται από την θερμοκρασία.

Είναι φανερό ότι υπάρχουν πολλοί μετατροπείς που ανήκουν στον ίδιο τύπο μετατροπέα, δηλαδή έχουν την ίδια αρχή μετατροπής. Οι διαφορές τους μπορεί να βρίσκονται στον τρόπο κατασκευής, στην περιοχή μέτρησης, στην ευαισθησία κλπ.

Φωτοηλεκτρικός τύπος :

Θα δώσουμε αρχικά κάποιους ορισμούς της φωτεινής ισχύς, της φωτεινής έντασης και του φωτισμού.

Η ισχύς της φωτεινής ακτινοβολίας προκαλεί διαφορετικά αποτελέσματα σε διαφορετικά μήκη κύματος. Όταν ληφθεί υπ' όψη η διαφορετική απόκριση του ματιού σε διάφορα μήκη κύματος και τροποποιηθεί η ισχύς της φωτεινής ακτινοβολίας κατάλληλα μιλάμε για την *φωτεινή ισχύ*. Μονάδα της φωτεινής ισχύος είναι το lumen.

Φωτεινή ένταση είναι η φωτεινή ισχύς ανά μονάδα στερεάς γωνίας. Μονάδα της φωτεινής έντασης είναι το candela.

Φωτισμός λέγεται η φωτεινή ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας. Μονάδα φωτισμού είναι το lux.

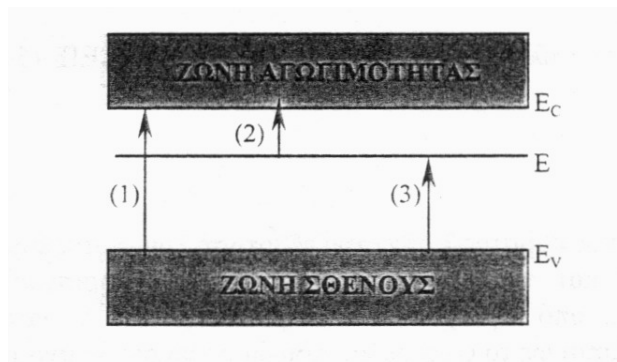
Ο όρος, *φωτοηλεκτρικός τύπος*, προσδιορίζει κυρίως ηλεκτρικά φαινόμενα που επηρεάζονται από την φωτεινή ακτινοβολία. Οι φωτομετατροπείς στηρίζονται κυρίως στα φαινόμενα της :

- Φωτοαγωγιμότητας
- Φωτοβολταικής δράσης, μετατροπής
- Και φωτοεκπομπής

Ας δούμε τα φαινόμενα αναλυτικότερα.

Φωτοαγωγιμότητα

Θεωρούμε τη διαδικασία κατά την οποία φωτόνια με μήκος κύματος $\lambda < \lambda_c$ πέφτουν πάνω σε ένα ημιαγωγό. Τα φωτόνια αυτά δίνουν την ενέργειά τους στα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ζώνη σθένους και καθιστούν αυτά ικανά να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Με άλλα λόγια, τα φωτόνια μεταφέρουν την ενέργειά τους στα ηλεκτρόνια, διεγείρουν τα άτομα του ημιαγωγού και δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρικών φορέων (ηλεκτρόνια και θετικές οπές), αυξάνοντας έτσι την αγωγιμότητά του, μετάβαση 1 στο σχήμα 4.14.

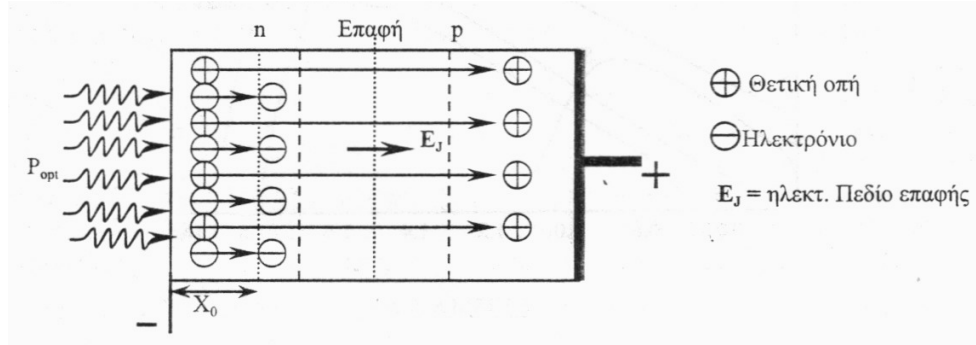


Σχήμα 4.14 Αρχή του φαινομένου της φωτοαγωγιμότητας.

Η απορρόφηση ακτινοβολίας είναι επίσης δυνατή και σε ημιαγωγούς που έχουν προσμίξεις άλλων ατόμων. Στη διαδικασία αυτή, η ενέργεια των φωτονίων δαπανάται για τη διέγερση των ατόμων πρόσμιξης, (μεταβάσεις 2 και 3 σχήματος 4.14). Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, οι διαδικασίες που παίρνουν μέρος αποτελούν την αρχή του φαινομένου της Φωτοαγωγιμότητας.

Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Θεωρούμε μια δίοδο ημιαγωγών και μια οπτική ακτινοβολία η οποία έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της επαφής p-n και η οποία “φωτίζει” την περιοχή n της διόδου. Όταν το υλικό απορροφά τα φωτόνια, των οποίων η ενέργεια είναι μεγαλύτερη ή ίση από το εύρος E_g του ενεργειακού χάσματος, στη περιοχή n της διόδου εμφανίζονται ζεύγη ηλεκτρικών φορέων, (ηλεκτρόνια-θετικές οπές), μέχρι σε ένα βάθος X_0 από την επιφάνεια του ημιαγωγού.



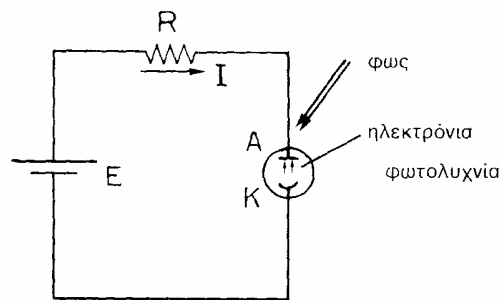
Σχήμα 4.15 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Οι φορείς αυτοί, που λέγονται και φωτοφορείς, διαχέονται μέσα στον ημιαγωγό μέχρι να φθάσουν στην επιφάνεια επαφής. (σχήμα 4.15). Για να συμβεί αυτό πρέπει το πάχος του ημιαγωγού αυτού να είναι τέτοιο ώστε, ένα μεγάλο μέρος από τους φωτοφορείς να φθάνει στην επιφάνεια επαφής πριν επανασυνδεθούν. Εκεί επέρχεται ο διαχωρισμός των φωτοφορέων. Το ηλεκτρικό πεδίο E_j της επαφής, εμποδίζει τα ηλεκτρόνια να διαχυθούν στον ημιαγωγό p. Αυτά συσσωρεύονται στη περιοχή του ημιαγωγού n που συνορεύει με την επαφή. Αντίθετα, οι θετικές οπές επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο E_j , περνάνε την επαφή και διαχέονται μέσα στον ημιαγωγό p. Παρατηρούμε ότι, το ρεύμα των φωτοφορέων που διαρρέει την επαφή p-n είναι αποτέλεσμα των φορέων μειονότητας, που είναι οι θετικές οπές. Τελικό αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η εμφάνιση ηλεκτρικής πόλωσης στα άκρα της φωτοδίοδου, όπου ο ημιαγωγός n φορτίζεται αρνητικά και ο ημιαγωγός p φορτίζεται θετικά. Η πόλωση αυτή ονομάζεται φωτοβολταϊκή τάση η δε πηγή που προκύπτει ονομάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Στο φαινόμενο της φωτοεκπομπής στηρίζονται οι φωτολυχνίες, ενώ στα δύο άλλα οι ημιαγωγικοί φωτομετατροπείς όπως οι φωτοδιόδοι.

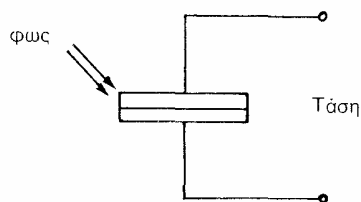
Όταν προσπέσει φως σε ορισμένα *φωτοευαίσθητα υλικά* αλλάζει η αγωγιμότητα αυτών των υλικών. Έτσι η αντίσταση αυτών των υλικών μεταβάλλεται με την φωτεινή ένταση. Χρησιμοποιούνται δε για την κατασκευή φωτοαντιστάσεων.

Η *φωτοεκπομπή*, (σχήμα 4.16), αναφέρεται στην απελευθέρωση ηλεκτρονίων από κάποιο υλικό λόγω της πρόσπτωσης φωτεινής ακτινοβολίας.



Σχήμα 4.16 Το ηλεκτρικό φαινόμενο της φωτοεκπομπής.

Η *φωτοβολταϊκή μετατροπή* συνίσταται στην δημιουργία τάσης όταν προσπέσει φωτεινή ακτινοβολία στην ένωση ορισμένων διαφορετικών υλικών



Σχήμα 4.17 Φωτοβολταϊκή μετατροπή.

Παρατηρούμε στο σχήμα 4.17, παραπάνω, ότι δεν απαιτείται εξωτερική πηγή για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή.

Αυτό το φαινόμενο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της φωτεινής ισχύος ή έντασης φωτισμού.

Ένας διαδεδομένος φωτοηλεκτρικός τύπος μετατροπέα είναι η φωτοδιόδος (p-n). Η φωτοδιόδος μπορεί να λειτουργεί βάσει της αρχής της φωτοαγωγιμότητας οπότε πρέπει να είναι ανάστροφα πολωμένη, ή βάσει της φωτοβολταϊκής αρχής, οπότε δεν χρειάζεται πόλωση.

Τύπος ταλαντωτή :

Ταλαντωτής είναι μια ηλεκτρονική διάταξη που μετασχηματίζει την ενέργεια των πηγών συνεχούς ρεύματος σε ενέργεια εναλλασσόμενης μορφής, δηλαδή σε ενέργεια ηλεκτρικών ταλαντώσεων.

Οι μετατροπείς αυτού του τύπου χρησιμοποιούν κάποια διάταξη ταλαντωτή (LC). Κάτω από την επίδραση του μετρούμενου μεγέθους αλλάζει η αυτεπαγωγή (με μετάθεση του πυρήνα) του πηνίου ή η χωρητικότητα του πυκνωτή. Έτσι μεταβάλλεται η συχνότητα ταλάντωσης. Η μεταβολή της συχνότητας ταλάντωσης δίνει πληροφορίες για το φυσικό μέγεθος που μετριέται. Για να έχει ο ταλαντωτής καλή ακρίβεια, χρονική και θερμοκρασιακή ευστάθεια πρέπει τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία να είναι καλής ποιότητας.

Παρακάτω δίνουμε τους μετατροπείς και δίπλα τα μεγέθη τα οποία συνήθως χρησιμοποιούνται από αυτούς τους μετατροπείς για μέτρηση.

ΑΡΧΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ**ΦΥΣΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ****Διαφορικού μετασχηματιστή**

Μετακίνηση, δύναμη, ροπή, ταχύτητα, επιτάχυνση, πίεση, ροή, υγρασία

Ηλεκτρομηχανική

Μετακίνηση, δύναμη, ροπή, ταχύτητα, επιτάχυνση, μαγνητική επαγωγή

Πιεζοηλεκτρική

Δύναμη, ταχύτητα, επιτάχυνση, πίεση, ροή

Θερμοηλεκτρική

Θερμοκρασία, υγρασία

Ποτενσιόμετρο

Μετακίνηση, ταχύτητα, επιτάχυνση, πίεση, ροή

Μεταβλητής ηλεκτρικής αντίστασης

Θερμοκρασία

Πιεζοαντίστασης

Μετακίνηση, δύναμη, ροπή, ταχύτητα, επιτάχυνση, πίεση, ροή

Θερμοδιαστολή

Θερμοκρασία

Ημιαγ.μετατροπ. θερμότητας

Θερμοκρασία

<u>Χωρητική</u>	<i>Μετακίνηση, δύναμη, επιτάχυνση, πίεση, ροή, υγρασία</i>
<u>Επαγωγική</u>	<i>Μετακίνηση, δύναμη, ταχύτητα, επιτάχυνση, πίεση, ροή</i>
<u>Hall και μαγνητοαντίστασης</u>	<i>Μαγνητική επαγωγή</i>
<u>Φωτοηλεκτρική</u>	<i>Μετακίνηση, ροπή, ταχύτητα, επιτάχυνση, φωτισμός</i>
<u>Ταλαντωτή</u>	<i>Δύναμη, θερμοκρασία</i>

Βλέποντας αναλυτικότερα τους όρους “αισθητήριο”, “μετατροπέας” :

Στο παρελθόν ο όρος μετατροπέας ή μεταλλάκτης χρησιμοποιήθηκε για διατάξεις που είτε μετέτρεπαν μία μη-ηλεκτρική φυσική ή χημική ποσότητα, όπως πίεση, θερμοκρασία, υγρασία σε ηλεκτρικό σήμα ή το αντίστροφο. Τώρα, ο τύπος του μετατροπέα-μεταλλάκτη που μετατρέπει ένα μη ηλεκτρικό μέγεθος σε ηλεκτρικό σήμα έχει πια επικρατήσει να ονομάζεται αισθητήρας και ενεργοποιητής ο τύπος του μετατροπέα-μεταλλάκτη που μετατρέπει ένα ηλεκτρικό σήμα σε μία μη ηλεκτρική ποσότητα. Το ηλεκτρικό σήμα που προέρχεται από τον αισθητήρα πολλές φορές χρειάζεται τροποποίηση πριν αξιοποιηθεί. Οποιαδήποτε συσκευή που τροποποιεί το ηλεκτρικό σήμα από έναν αισθητήρα, όπως ένας μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (για μετέπειτα επεξεργασία πχ σε κάποιο Η/Υ) ή ένας τελεστικός ενισχυτής, μπορεί να ονομαστεί επεξεργαστής.

Πάντως, στην εργασία αυτή, οι όροι “αισθητήριο” και “μετατροπέας” θα χρησιμοποιηθούν ελεύθερα, έχοντας συχνά την ίδια σημασία.

Αισθητήριο γενικά, λέγεται μια διάταξη που χρησιμοποιείται για την μέτρηση ή ανίχνευση ενός φυσικού μεγέθους.

Συνοψίζοντας , Οι όροι, *αισθητήρας* (sensor) και *μετατροπέας* (transducer) έχουν παρόμοια, αλλά ελαφρά διαφορετική σημασία και συχνά προκαλείται σύγχυση ανάμεσά τους. Γενικά, υπάρχει κάποια ασάφεια γύρω από αυτούς τους όρους. *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. Για παράδειγμα, ένας οικιακός λαμπτήρας πυρακτώσεως είναι ένας μετατροπέας, επειδή μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια που δέχεται σε φωτεινή ενέργεια και θερμότητα. Ο σκοπός των λαμπτήρων πυρακτώσεως είναι κανονικά να φωτίζουν ένα χώρο, ένα δωμάτιο, και όχι να παρέχουν ένδειξη ότι υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα. Εντούτοις, εάν ένας τέτοιος λαμπτήρας χρησιμοποιηθεί σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα για να μας δείχνει πότε κάποιο τμήμα του κυκλώματος διαρρέετε από ρεύμα, τότε θα μπορούσε να ονομαστεί αισθητήρας.

Τα αισθητήρια χρησιμοποιούνται πολλές φορές για την περίπτωση ενός απλού μετρητικού στοιχείου. Πολλές φορές όμως χρησιμοποιούνται και για σύνθετες διατάξεις μέτρησης. Για παράδειγμα συχνά γίνεται αναφορά σε <<αισθητήρια για μέτρηση στάθμης με Laser>>. Πρόκειται για διατάξεις που μετρούν την στάθμη ενός ρευστού σε μια δεξαμενή εκπέμποντας μια δέσμη φωτός από ένα Laser. Η δέσμη ανακλάται στην επιφάνεια του ρευστού και επιστρέφει. Η ανακλώμενη δέσμη ανιχνεύεται από τη διάταξη μέτρησης και μετριέται ο χρόνος που μεσολαβεί από την εκπομπή μέχρι τη λήψη. Βάσει αυτού του χρόνου υπολογίζεται (με χρήση μικροϋπολογιστού ή όχι) η απόσταση μεταξύ της διάταξης μέτρησης και της στάθμης του ρευστού. Ο όρος «αισθητήριο» θα μπορούσε να αναφέρεται στο βασικό μετρητικό στοιχείο που αντιδρά στην μετρούμενη ποσότητα. Ενώ μετατροπέας να είναι πιο γενικός όρος. Για παράδειγμα το θερμίστορ θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σαν αισθητήριο ενώ η γέφυρα στην οποία χρησιμοποιείται (ώστε η έξοδος να είναι τάση) θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σαν μετατροπέας. Βέβαια, αν το αισθητήριο μετατρέπει ενέργεια θα μπορούσε να ονομασθεί και μετατροπέας. Οι αισθητήρες μπορούν να είναι ξεχωριστές συσκευές ή περίπλοκες κατασκευές, αλλά όποια και να είναι η μορφή τους επιτελούν όλοι την ίδια βασική λειτουργία, που είναι η *ανίχνευση* ενός σήματος ή μίας διέγερσης και η *παραγωγή* μίας μετρήσιμης εξόδου. Ανάμεσα στις φυσικές ποσότητες που συναντώνται συχνά και απαιτούν μέτρηση είναι η *θέση, ταχύτητα, επιτάχυνση, ροή ρευστού, στάθμη υγρού, δύναμη, πίεση, και θερμοκρασία*. Η χρήση των αισθητήρων όμως δεν περιορίζεται σε αυτές τις βασικές ποσότητες. Υπάρχουν ειδικοί αισθητήρες που μετρούν *χημικές ποσότητες, ήχο, πυρηνική ακτινοβολία* κ.ά.

Η ανάγκη μέτρησης των φυσικών παραμέτρων που αναφέρθηκαν παραπάνω καθορίζεται από τις ειδικές ανάγκες της βιομηχανίας ή της εφαρμογής, όπου χρησιμοποιούνται. Η ακριβής *επιλογή* ενός αισθητήρα εξαρτάται από τη φύση των παραμέτρων που πρέπει να μετρηθούν και άλλους παράγοντες, όπως είναι το κόστος, η αξιοπιστία και η ποιότητα της απαιτούμενης πληροφορίας. Άλλοι παράγοντες μπορεί να περιλαμβάνουν την καταλληλότητα της μορφής του αισθητήρα, ώστε να χρησιμοποιηθεί σε κάποιο συγκεκριμένο περιβάλλον, και την ανάγκη αξιοποίησης της παρεχόμενης πληροφορίας άμεσα, μετά από κάποιο χρόνο ή σε κάποια άλλη θέση. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας θερμοκρασίας οικιακής χρήσης θα έχει διαφορετική μορφή από έναν αισθητήρα που χρησιμοποιείται σε μία χημική βιομηχανία. Ο τελευταίος μπορεί να είναι απροσπέλαστος, να υπόκειται σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, ή να ευρίσκεται σε ένα ισχυρά διαβρωτικό περιβάλλον.

Οι αισθητήρες ανιχνεύουν διάφορες φυσικές παραμέτρους, και η αξιοποίηση αυτών των παραμέτρων από εμάς καθιστά τους αισθητήρες πολύτιμους. Εν γένει, υπάρχουν δύο

ξεχωριστές περιοχές όπου χρησιμοποιείται η τεχνολογία των αισθητήρων: η συλλογή πληροφορίας και ο έλεγχος συστημάτων.

Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή πληροφορίας παρέχουν δεδομένα με σκοπό την παρουσίαση τους, έτσι ώστε να είναι διαρκώς κατανοητή η τρέχουσα κατάσταση των παραμέτρων ενός συστήματος, όπως είναι για παράδειγμα ο ανιχνευτής ταχύτητας και το ταχύμετρο ενός αυτοκινήτου.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ελέγχου δε διαφέρουν συνήθως από αυτούς που χρησιμοποιούνται για συλλογή πληροφορίας, αλλά αυτό που διαφέρει είναι ο τρόπος αξιοποίησης αυτής της πληροφορίας. Σε ένα σύστημα ελέγχου το σήμα από τον αισθητήρα τροφοδοτεί έναν ελεγκτή, ο οποίος παράγει μία έξοδο που ρυθμίζει την τιμή της μετρούμενης παραμέτρου. Για παράδειγμα, η πληροφορία που παρέχει ο αισθητήρας της ταχύτητας των τροχών σε ένα σύστημα αντιολίσθησης, χρησιμοποιείται για να ελέγξει την πίεση που ασκείται στα φρένα, ώστε οι τροχοί να μην ολισθαίνουν επάνω στο οδόστρωμα αλλά διαρκώς να κυλίνουν, κατά τη διάρκεια του φρεναρίσματος.

Με βάση το ηλεκτρικό τους σήμα, ορισμένοι αισθητήρες θεωρούνται αυτοδιεγείρομενοι (self-generating) κατ' αντιδιαστολή προς τους διαμορφωμένους (modulating). Γενικά, ένας αυτοδιεγείρομενος αισθητήρας είναι εκείνος που δεν χρειάζεται εξωτερική διάταξη τροφοδοσίας για να λειτουργήσει. Για παράδειγμα το θερμοζεύγος, που θα δούμε αναλυτικά σε παρακάτω ενότητα, είναι ένας αυτοδιεγείρομενος αισθητήρας γιατί παράγει μία ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) από τη διαφορά στις θερμοκρασίες επαφής. Στην περίπτωση αυτή δηλαδή, η ενέργεια παρέχεται από το θερμοδυναμικό σύστημα και όχι από κάποια εξωτερική διάταξη τροφοδοσίας. Στην αντίπερα όχθη, η φωτοδίοδος είναι ένας αισθητήρας που ακτινοβολεί και του οποίου το ρεύμα εξόδου διαμορφώνεται από φωτο-επαγωγικά ηλεκτρόνια. Άλλα παραδείγματα διαμορφωμένων αισθητήρων είναι τα γνωστά σε όλους μας φωτοκύτταρα τα θερμίστορ κλπ. Οι αυτοδιεγείρομενοι αισθητήρες συνήθως παράγουν πολύ χαμηλή ισχύ ενώ αντίθετα οι διαμορφωμένοι αισθητήρες παράγουν μεγάλη ισχύ. (Λεπτομερέστερη ανάλυση του θέματος θα γίνει παρακάτω).

Η τεχνολογία έχει προοδεύσει ραγδαία κατά τα τελευταία χρόνια, πέρα από τις προσδοκίες των περισσότερων μηχανικών και επιστημόνων. Οι περίπλοκες συσκευές που βρίσκονται σήμερα στους χώρους δουλειάς, το σπίτι και άλλα περιβάλλοντα περιλαμβάνουν τεχνολογίες που μόλις πριν από κάμποσα χρόνια αποτελούσαν εργαστηριακές εφευρέσεις. Το κύριο αίτιο για την ύπαρξη και διαθεσιμότητα αυτού του εξοπλισμού είναι η εξέλιξη των υπολογιστών και μικροεπεξεργαστών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως ευέλικτοι, ειδικευμένοι, περίπλοκοι, και παρ' όλα αυτά χαμηλού κόστους ελεγκτές. Εντούτοις, η λειτουργία τέτοιων συστημάτων θα ήταν πολύ φτωχή, και πιθανόν αδύνατη, εάν τα προγράμματα υπολογιστή που λαμβάνουν αποφάσεις δεν τροφοδοτούνταν από κατάλληλη, σύγχρονη και υψηλού επιπέδου πληροφορία για την κατάσταση του εξωτερικού συστήματος. Εφόσον αυτή η πληροφορία συλλέγεται από τους αισθητήρες, ρυθμίζεται να έχει την κατάλληλη μορφή, και στη συνέχεια παρέχεται στο σύστημα υπολογιστή, όπου εκεί αξιοποιείται και δημιουργεί μία κατάλληλη απόκριση. Όλα τα στοιχεία μίας διάταξης αισθητήρα θα πρέπει να παρέχουν το απαιτούμενο επίπεδο απόδοσης, που να ταιριάζει με την ποιότητα που απαιτείται από την εκάστοτε εφαρμογή. Εάν ένα στοιχείο είναι κατώτερο των προδιαγραφών, τότε η όλη διαδικασία υποβαθμίζεται.

Όπως αντιλαμβάνεστε οι αισθητήρες είναι η “καρδιά” όλων των μετρήσεων σε βιομηχανίες, εργαστήρια και γενικά όπου επιζητείται η παρακολούθηση μιας φυσικής μεταβλητής συναρτήσει του χρόνου. Επίσης έχουν καταστεί τόσο συνηθισμένη στην σύγχρονη κοινωνία, που συχνά θεωρούμε την ύπαρξη τους ως δεδομένη. Αυτό δημιουργεί την απαίτηση οι τεχνικοί και μηχανικοί να έχουν μία πρακτική γνώση για αυτούς, ώστε να μπορούν να επιλέξουν την κατάλληλη συσκευή από ένα κατάλογο με αναλυτικές προδιαγραφές ή να επισκευάζουν και να βαθμονομούν τους αισθητήρες που υπάρχουν σε κάποιο τμήμα εξοπλισμού που λειτουργεί.

4.3 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Οι γνωστοί σε όλους μας ανιχνευτές προσέγγισης, είναι όργανα τα οποία είναι σε θέση να μας δώσουν πληροφορία για την ύπαρξη ή όχι κάποιου αντικειμένου σε κάποια περιοχή ανίχνευσης. Η πληροφορία συνεπώς που μας δίνουν είναι η στοιχειώδης πληροφορία υπάρχει-δεν υπάρχει, πληροφορία δηλαδή 1bit. Σε πολλές εφαρμογές ωστόσο απαιτείται να γνωρίζουμε πολύ περισσότερα στοιχεία από μια εγκατάσταση, δηλαδή : μπορεί να θέλουμε να γνωρίζουμε π.χ. πόσο ψηλά είναι η στάθμη του υγρού σε ένα δοχείο και όχι απλώς αν το δοχείο είναι γεμάτο ή όχι. Στην προκειμένη περίπτωση είναι φανερό ότι επιθυμούμε να έχουμε μέτρηση της στάθμης. Υπάρχουν μια σειρά από όργανα με τη βοήθεια των οποίων είμαστε σε θέση να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις φυσικών μεγεθών. Τα όργανα αυτά ονομάζουμε και αισθητήρια όργανα. Η λειτουργία τους στηρίζεται πάντα σε κάποιο φυσικό νόμο ή αρχή. Κάποια αισθητήρια όργανα ασφαλώς μας είναι περισσότερο γνωστά, όπως, το θερμόμετρο, το πυκνόμετρο, το όργανο μέτρησης παροχής κ.λ.π. Συνήθως την ένδειξη τους μας την δίνουν σε κάποιο βαθμονομημένο κανόνα όπου και μπορούμε να την διαβιβάσουμε. Στα σύγχρονα συστήματα ελέγχου μας ενδιαφέρει η πληροφορία του οργάνου να είναι ηλεκτρική- σε μορφή δηλαδή τάσεως. Τούτο δε διότι, α) τότε μπορεί εύκολα η πληροφορία αυτή να διαβιβαστεί από κάποιο ηλεκτρονικό υπολογιστή και β) διότι τότε το όργανο μπορεί να δώσει εύκολα τα σήματα ανάδρασης σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου. Όταν λοιπόν αναφερόμαστε σε αισθητήρια όργανα εννοούμε όργανα μέτρησης φυσικών μεγεθών που μας δίνουν σε μορφή ηλεκτρική την πληροφορία για την τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Υπάρχουν σήμερα διαθέσιμα πλείστα όσα τέτοια αισθητήρια για μέτρηση σχεδόν κάθε μεγέθους που θα θέλαμε, με συνεχώς ολοένα μικρότερο μέγεθος και κόστος και με εκπληκτική πολλές φορές θα λέγαμε ακρίβεια. Τα αισθητήρια θα μπορούσαμε να τα χωρίσουμε βασικά σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το είδος του ηλεκτρικού σήματος που παρέχουν στην έξοδο τους. Έτσι έχουμε :

1. *Αισθητήρια αναλογικής εξόδου* : Όπου το σήμα στην έξοδο είναι αναλογικό με την έννοια του συνεχούς. Το μέγεθος της μετρούμενης μεταβλητής είναι ανάλογο του πλάτους της τάσης που δίνει το αισθητήριο. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι το ηλεκτρικό σήμα που δίνουν μπορεί να αλλοιωθεί από τον ηλεκτρικό θόρυβο έχοντας έτσι ως αποτέλεσμα την εμφάνιση κάποιων σφαλμάτων στη μέτρηση. Στο σχήμα 4.18,

εικονίζεται το πώς το σήμα του οργάνου μπορεί να “παραμορφωθεί” από τον ηλεκτρικό θόρυβο καθώς αυτό μεταφέρεται με καλώδιο από το αισθητήριο στον ηλεκτρονικό υπολογιστή ή το όργανο μέτρησης της τάσης. Το αισθητήριο κάποια χρονική στιγμή δίνει ως πούμε 5 Volts, και στον Η/Υ φτάνουν 5,1 Volts λόγω του θορύβου. Σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον τέτοιοι θόρυβοι όπως καταλαβαίνουμε είναι κατά κάποιο τρόπο αναπόφευκτοι.



Σχήμα 4.18 Παραμόρφωση του σήματος του οργάνου από τον ηλεκτρικό θόρυβο.

2. *Αισθητήρια ψηφιακής εξόδου* : Όπου το σήμα στην έξοδο είναι ψηφιακό, παίρνει δηλαδή διακριτές τιμές. Η πληροφορία για το μέγεθος του μετρούμενου μεγέθους είναι υπό μορφή δυαδικού αριθμού ή σειράς παλμών. Στην περίπτωση αυτή η μέτρηση δεν αλλοιώνεται τόσο εύκολα όσο προηγουμένως. Η πληροφορία δηλαδή εδώ δεν είναι στο πλάτος της τάσης άρα ακόμη και αν αυτό αλλοιωθεί λίγο η πληροφορία μπορεί να διατηρείται.

Συνοψίζοντας,

Ο αισθητήρας λοιπόν γενικά, μετατρέπει την φυσική μεταβλητή σε ηλεκτρική τάση. Η φυσική μεταβλητή μπορεί να είναι η μετακίνηση, η θερμοκρασία, η πίεση, η υγρασία, η στάθμη υγρού και πολλά άλλα . Εφόσον η μετατροπή της φυσικής μεταβλητής είναι ηλεκτρική τάση εξόδου από τον αισθητήρα, εύκολα μπορούμε να αντιληφθούμε ότι η μέτρηση της φυσικής μεταβλητής ανάγεται σε μέτρηση της ηλεκτρικής τάσης, που αυτή μπορεί να γίνει με προσαρμογή σε βαθμίδα μετατροπής αναλογικής σε ψηφιακή μορφή (A/D Converter), με σκοπό την αποθήκευση των πληροφοριών σε Η/Υ για μετέπειτα επεξεργασία. Επίσης, αυτή η μέτρηση της ηλεκτρικής τάσης που επιζητούμε μπορεί να γίνει και με ένα βολτόμετρο, ή καταγραφικό αν επιζητούμε μεταβολές συναρτήσε του

χρόνου. Φυσικά, εδώ πρέπει να υπενθυμίσουμε, ότι υπάρχουν αισθητήρες που μετατρέπουν την φυσική μεταβλητή σε άλλη μορφή ενέργειας όπως π χ μηχανική, αλλά οι αισθητήρες αυτοί αποτελούν ξεχωριστά κυρίως όργανα φτηνής κατασκευής, για οικιακές χρήσεις κυρίως.

Στην αγορά αισθητήρων μπορεί κανείς να βρει και έτοιμους αισθητήρες με ενσωματωμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα με σκοπό η τάση εξόδου να αλλάζει κατάσταση 0 ή 1 (π χ 5V ή 0V , επαφή εντός-εκτός), αν η τιμή της φυσικής παραμέτρου υπερβεί μια συγκεκριμένη τιμή (alarm sensors) . Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανίες, κτίρια και γενικά εκεί όπου επιθυμούμε να εκδηλωθεί συναγερμός, αν η τιμή της φυσικής παραμέτρου που μετρά ο αισθητήρας υπερβεί κάποια συγκεκριμένη τιμή.

Γενικά, πολλοί αισθητήρες παράγουν ηλεκτρικές εξόδους, που δεν σχετίζονται με την φυσική ποσότητα που μετρείται μέσω της τιμής μίας αντίστασης όπως η έξοδος που παράγει π χ κάποιο θερμίστορ, αλλά μέσω κάποιας τάσης, ρεύματος ή συχνότητας. Ένα ελατήριο παράγει μία αλλαγή στη θέση και έτσι μία βελόνα (ένας ενδείκτης) μπορεί να μετατοπίζεται κατά μήκος μίας κλίμακας, ανάλογα με το βάρος που έχει αναρτηθεί στο ελατήριο. Ο σωλήνας Venturi μετρά τη διαφορά δύο πιέσεων και έτσι προσδιορίζει τη ροή ενός υγρού.

Οι αισθητήρες και τα συστήματα αισθητήρων μπορεί λοιπόν να είναι μηχανικά, ηλεκτρικά ή και τα δύο μαζί. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλούς τομείς, βιομηχανικούς, δημόσιους, στρατιωτικούς και οικιακούς. Εκτελούν εργασίες όπως π χ 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 η απεικόνιση της ταχύτητας ενός αυτοκινήτου και πολλά άλλα.

Γενικά, η φύση και οι εφαρμογές των αισθητήρων καλύπτουν ένα ευρύ πεδίο. Παρακάτω θα δούμε πιο αναλυτικά τα δύο τους είδη με βάση το ηλεκτρικό τους σήμα, που ήδη έχουμε αναφέρει πιο πάνω, καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά γενικά των αισθητήρων.

4.4 ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟΙ ΚΑΙ ΑΥΤΟΔΙΕΓΟΙΡΟΜΕΝΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Τις τελευταίες δεκαετίες η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών μετατροπέων και αισθητήρων είναι ραγδαία. Αυτό οφείλεται στην καλύτερη κατανόηση και εξήγηση των φαινομένων αλλά και στην εμφάνιση ολοένα και περισσότερων νέων υλικών. Η πρόοδος αυτή έφερε ως αποτέλεσμα στο προσκήνιο, την επινόηση ολοένα και περισσότερων νέων μεθόδων μετατροπής ώστε να πραγματοποιηθεί μία ακριβέστερη μέτρηση από τις υπάρχουσες.

Οι αρχές της φυσικής που χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες είναι πολυάριθμες και οι αισθητήρες που διατίθενται σήμερα είναι χιλιάδες. Βέβαια, με έναν γενικό τρόπο μπορούμε να διακρίνουμε δύο είδη αισθητήρων : 1) Τους διαμορφωμένους αισθητήρες, και 2) Τους αυτοδιεγείρομενους αισθητήρες.

1) Διαμορφωμένοι αισθητήρες

Οι διαμορφωμένοι αισθητήρες, είναι αυτοί που κατά κάποιο τρόπο, απαιτούν θα λέγαμε, εξωτερική διάταξη τροφοδοσίας για να λειτουργήσουν. Οι διαμορφωμένοι αισθητήρες μεταβάλλουν ένα παθητικό στοιχείο, - R, C, L - αντίσταση, πυκνωτή, πηνίο, και παρέχουν ένα ηλεκτρικό σήμα όταν το κύκλωμα τροφοδοτείται από μία εξωτερική πηγή ενέργειας. (π.χ. φωτοдиодος, θερμίστορ κ.λ.π.). Πρόκειται δηλαδή για ηλεκτρικά στοιχεία που καταναλώνουν ενέργεια με την μορφή θερμικής ενέργειας, ή αποθηκεύουν ενέργεια με την μορφή ηλεκτρομαγνητικής είτε ηλεκτροστατικής ενέργειας. Η μεταβολή των αντιστάσεων τους είναι συνάρτηση του μετρήσιμου μεγέθους που μπορεί να ενεργήσει είτε στις *παραμέτρους των διαστάσεων*, είτε στις *ηλεκτρικές ιδιότητες* των συστατικών υλικών του αισθητήρα. Στην πρώτη περίπτωση, των παραμέτρων των διαστάσεων, ο αισθητήρας περιλαμβάνει ένα κινητό ή παραμορφώσιμο στοιχείο, που είναι η αρχή των περισσότερων αισθητήρων μετακίνησης, θέσης, πίεσης, επιτάχυνσης κ.λ.π. Στην δεύτερη περίπτωση, είναι οι ηλεκτρικές ιδιότητες (ειδική αντίσταση, διηλεκτρική σταθερά, διαπερατότητα) που είναι ευαίσθητες στα μελετούμενα φυσικά μεγέθη. Τα μετρήσιμα μεγέθη μπορούν να είναι η θερμοκρασία, η πίεση, η φωτεινότητα κ.λ.π. (Στο παράρτημα, δίνουμε σχετικούς πίνακες που παρουσιάζουν τις δύο παραπάνω περιπτώσεις).

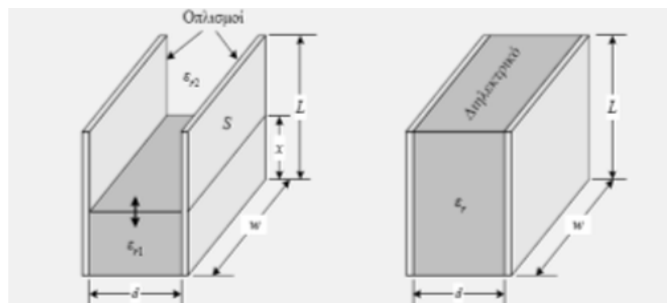
Όσον αφορά για τις περιπτώσεις των μεταβολών, αυτές όπως είπαμε και παραπάνω μπορεί να οφείλονται στην αλλαγή της ειδικής αντίστασης, στην αλλαγή της διηλεκτρικής σταθεράς, ή στην αλλαγή της διαπερατότητας, και έτσι έχουμε :

A) Αισθητήρες μεταβολής της ειδικής αντίστασης

Η μεταβολή αυτή μπορεί να οφείλεται, είτε στην χημική σύνθεση του αισθητήρα (π.χ. μέτρηση υγρασίας), είτε στην ακτινοβολία φωτός (φωτοαντιστάσεις), είτε στην θερμοκρασία (thermistors, RTDs), είτε στην τροποποίηση που μπορεί να δημιουργηθεί στις γεωμετρικές διαστάσεις του αισθητήρα (πιεζοαντιστάσεις).

B) Αισθητήρες μεταβολής της διηλεκτρικής σταθεράς

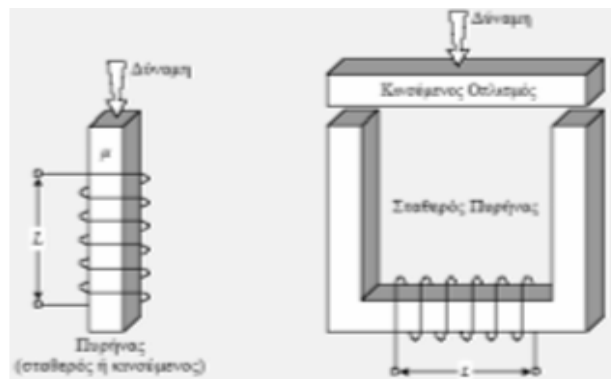
Αυτή την μεταβολή μπορούμε να την λάβουμε είτε με τροποποίηση της θέσεως του διηλεκτρικού στο εσωτερικό των οπλισμών κάποιου πυκνωτή όπου το διηλεκτρικό μπορεί να είναι στερεό ή υγρό, είτε με την επίδραση κάποιων εξωτερικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία και η υγρασία. (σχήμα 4.19).



Σχήμα 4.19 Αισθητήρια με μεταβολή της χωρητικότητας του πυκνωτή μέσω της διηλεκτρικής σταθεράς.

Γ) Αισθητήρες μεταβολής της διαπερατότητας

Είναι γνωστό ότι η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών αλλάζει όταν το υλικό υπόκειται σε μηχανική πίεση. Η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας αυξάνεται ή ελαττώνεται σύμφωνα με το είδος της πίεσης, του υλικού, καθώς και σύμφωνα με την πυκνότητα της μαγνητικής ροής στο υλικό. Αντίστοιχα εάν τροποποιηθεί η μαγνήτιση ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, στο υλικό εισάγονται εξωτερικές πιέσεις που το παραμορφώνουν. (μετατροπείς υπερήχων). Η παραμόρφωση του σιδηρομαγνητικού πυρήνα προκαλεί τη μεταβολή και της διαπερατότητας αλλά και της μαγνητικής αντίστασης που με την σειρά της μεταβάλλει την επαγωγή. (σχήμα 4.20).

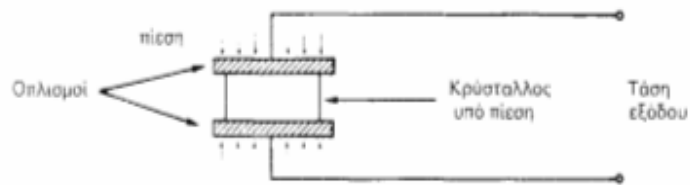


Σχήμα 4.20 Αισθητήρια με μεταβολή της αυτεπαγωγής του πηνίου μέσω της μαγνητικής διαπερατότητας και της θέσης του οπλισμού.

2) Αυτοδιεγερόμενοι αισθητήρες

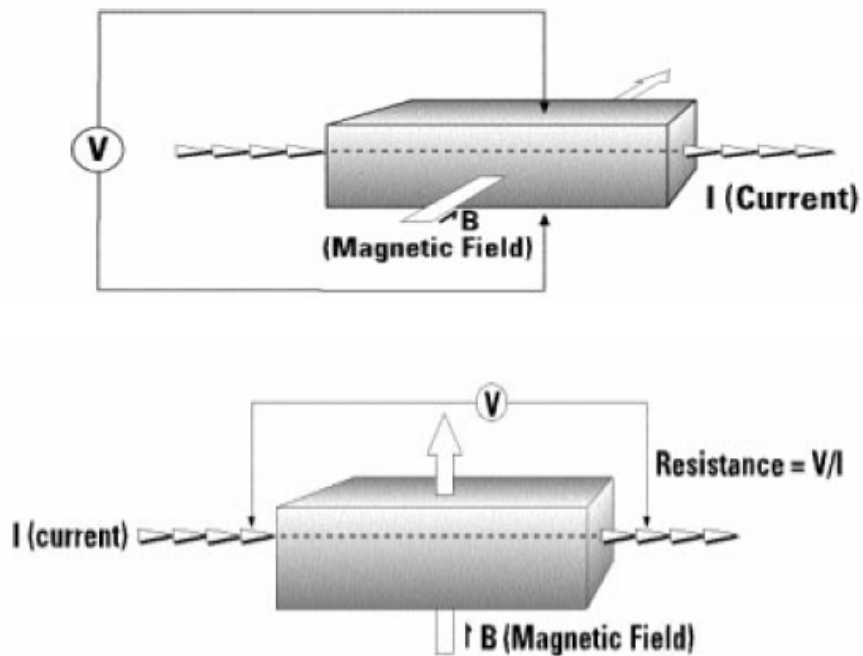
Οι αυτοδιεγερόμενοι αισθητήρες, είναι εκείνοι που δεν χρειάζονται εξωτερική διάταξη τροφοδοσίας για να λειτουργήσουν. Οι αυτοδιεγερόμενοι αισθητήρες παρέχουν ένα ηλεκτρικό μέγεθος (τάση, ρεύμα , ηλεκτρικό φορτίο) χωρίς να απαιτείται καμία εξωτερική ενέργεια. (π.χ. θερμοζεύγος). Πρόκειται για τους αισθητήρες λοιπόν, που βασίζονται σε φυσικά φαινόμενα τα οποία περιλαμβάνουν μετατροπή της ίδιας ενέργειας του μετρήσιμου μεγέθους σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ίδια ενέργεια του μετρήσιμου μεγέθους μπορεί να είναι θερμική, μηχανική, ακτινοβολίας κ.λ.π. (Τα φυσικά αυτά φαινόμενα δίνονται σε σχετικούς πίνακες στο παράρτημα). Έτσι έχουμε : Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, το φαινόμενο Hall, το φαινόμενο της επαγωγής, το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, και το μαγνητουδρودυναμικό φαινόμενο. Εν συντομία:

Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο : Πίεση μηχανική σε συγκεκριμένους κρυστάλλους δημιουργεί στις αντίθετες πλευρές τους ηλεκτρικά φορτία. (σχήμα 4.21).



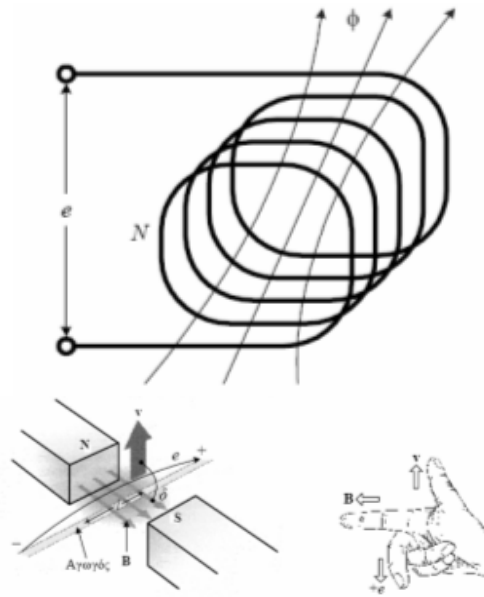
Σχήμα 4.21 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Φαινόμενο Hall : Είναι η δημιουργία μιας εγκάρσιας τάσης στα άκρα ενός αγωγίμου υλικού, όταν αυτό διαρρέετε από ρεύμα και βρίσκεται εντός μαγνητικού πεδίου. (σχήμα 4.22).



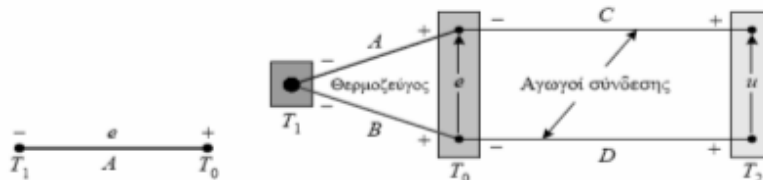
Σχήμα 4.22 Φαινόμενο Hall.

Φαινόμενο της επαγωγής : Η μετακίνηση ενός αγωγού εντός σταθερού μαγνητικού δημιουργεί στα άκρα του ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) ανάλογη της μαγνητικής επαγωγής, της ταχύτητας μετακίνησης του αγωγού και της έντασης του μαγνητικού πεδίου. (σχήμα 4.23).



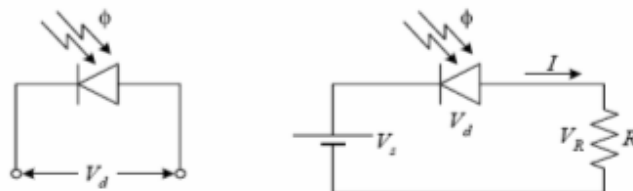
Σχήμα 4.23 Φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο : ή -φαινόμενο Seebeck- είναι η εμφάνιση μιας ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ) σε ένα κύκλωμα, όταν υπάρχουν στο κύκλωμα επαφές διαφορετικών μετάλλων σε διαφορετικές θερμοκρασίες. (σχήμα 4.24).



Σχήμα 4.24 Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο.

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο : Το οποίο έχει σαν προέλευση την απελευθέρωση των ηλεκτρικών φορτίων μέσα σε κάποιο υλικό κάτω από την επίδραση μιας φωτεινής ακτινοβολίας με μήκος κύματος κατώτερο από μία χαρακτηριστική τιμή κατωφλίου του υλικού. (σχήμα 4.25).



Σχήμα 4.25 Λειτουργία της φωτοδιόδου με τη φωτοβολταϊκή μετατροπή και τη φωτοαγωγιμότητα.

Μαγνητουδρودυναμικό φαινόμενο : π.χ. όταν ένα υγρό περιέχει ελεύθερα φορτία και κυλάει κάθετα σε ένα πεδίο επαγωγής σε ένα απομονωμένο κανάλι, δημιουργείται μια τάση ανάλογη της χωρητικότητας του καναλιού.

4.5 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Το αν είναι κατάλληλος ένας αισθητήρας για κάποια συγκεκριμένη εφαρμογή καθορίζεται ουσιαστικά από την χαρακτηριστική του απόδοση. Γενικά, διαφορετικές εφαρμογές μπορεί να απαιτούν πολύ διαφορετικές αποδόσεις αισθητήρα. Για παράδειγμα η θερμοκρασία ενός δωματίου συνήθως δεν χρειάζεται να μετρηθεί με μεγάλη ακρίβεια και άρα το σφάλμα στη μέτρηση της θερμοκρασίας μπορεί να έχει ελάχιστες συνέπειες εκτός εάν η θερμοκρασία δεν αποτελεί μέρος ενός συστήματος ελέγχου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ένα χαμηλού κόστους θερμόμετρο πυριτίου όπως ένα θερμοτρανζίστορ εξυπηρετεί τον επιθυμητό σκοπό. Όμως, ένας αισθητήρας που τοποθετείται στον βηματοδότη καρδιάς πρέπει να είναι εξαιρετικά αξιόπιστος για να μετρήσει ένα σφάλμα στον κτύπο της καρδιάς γιατί κάποια βλάβη του θα οδηγούσε στον θάνατο του χρήστη.

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 λοιπόν έναν αισθητήρα, είναι σημαντικό να προσαρμόζονται τα χαρακτηριστικά του στην ποιότητα της εξόδου που απαιτούμε να λαμβάνουμε.

Τα χαρακτηριστικά που ακολουθούν μπορούν να εφαρμόζονται στο όλο σύστημα μέτρησης και σε όλα τα επιμέρους τμήματα ενός συστήματος μέτρησης, περιλαμβάνοντας τον αισθητήρα, της μονάδας ρύθμισης του σήματος, και τη συσκευή εμφάνισης ή καταγραφής. Υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι για να τα εκφράζουμε, αλλά συνήθως αναφέρονται ως ποσοστά ή ως μέγιστη ή ελάχιστη τιμή, ανάλογα με τη μορφή του συστήματος, τη μετρούμενη ποσότητα και την επιθυμία του κατασκευαστή. Δεν εφαρμόζονται οπωσδήποτε όλα τα χαρακτηριστικά σε κάποιο δεδομένο αισθητήρα.

➤ **Απόκριση (response).**

Η **απόκριση** 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 sec, αυτό σημαίνει ότι η συσκευή χρειάζεται 3 sec για να λάβει η έξοδός της το 95% της τελικής τιμής.

➤ **Ευαισθησία (sensitivity).**

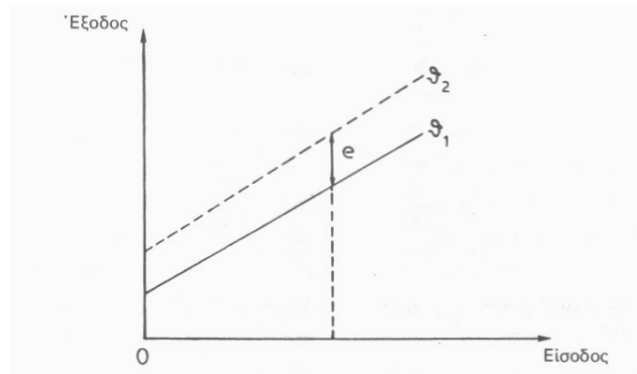
Ευαισθησία λέγεται ο λόγος της μεταβολής της εξόδου προς τη μεταβολή της εισόδου στη μόνιμη κατάσταση. Η ευαισθησία ενός αισθητήρα είναι ίση με τη διαφορά των τιμών εξόδου προς τη διαφορά των αντίστοιχων τιμών της εισόδου, δηλαδή της μετρούμενης ποσότητας. Άρα είναι

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

Διαφορετικά η ευαισθησία ορίζεται σαν η παράγωγος της καμπύλης ρύθμισης. Αν η καμπύλη ρύθμισης είναι ευθεία γραμμή τότε η ευαισθησία θα είναι σταθερή σε όλη την περιοχή μέτρησης.

Ρύθμιση ενός συστήματος μέτρησης λέγεται η διαδικασία κατά την οποία μεταβάλλεται κατά γνωστό τρόπο η επιθυμητή είσοδος του συστήματος μέσα σε μια περιοχή τιμών έτσι ώστε να καλυφθεί η περιοχή μέτρησης του συστήματος και να αντιστοιχηθεί σε κάθε τιμή της εξόδου μια τιμή της επιθυμητής εισόδου. Η γραφική παράσταση αυτής της αντιστοίχισης τιμών εξόδου σε τιμές εισόδου λέγεται *καμπύλη ρύθμισης*. Γενικά, όταν γίνεται λόγος για ρύθμιση ή για καμπύλη ρύθμισης αναφερόμαστε στην επιθυμητή είσοδο. Διαφορετικά μιλάμε για ρύθμιση ή καμπύλη ρύθμισης του συστήματος ως προς τις εισόδους θορύβου ή διαμόρφωσης.

Αν χαραχθεί η καμπύλη ρύθμισης για διάφορες τιμές μιας εισόδου διαμόρφωσης, π χ της θερμοκρασίας, τότε φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην μέτρηση. Αν οι προδιαγραφές λειτουργίας του συστήματος μέτρησης(π χ ενός πιεσόμετρου) ορίζουν ότι η μέτρηση πρέπει να γίνει σε θερμοκρασία Θ1, τότε στο σχήμα 4.26, παρακάτω, φαίνεται το σφάλμα μέτρησης που θα προκύψει αν η μέτρηση γίνει σε θερμοκρασία Θ2.



Σχήμα 4.26 Καμπύλες ρύθμισης σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες θ_1 και θ_2 .

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.

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.

➤ Διακριτική ικανότητα (resolution).

Η **διακριτική ικανότητα** 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. Ένα άλλο παράδειγμα, θεωρούμε ένα θερμόμετρο με περιοχή μέτρησης $-30^{\circ}C$ έως $+100^{\circ}C$ με διακριτική ικανότητα $0,5^{\circ}C$. Αυτό σημαίνει ότι διαφορά θερμοκρασίας $0,5^{\circ}C$ μπορεί να διακριθεί. Δηλαδή το θερμόμετρο μπορεί να αντιληφθεί αν μια θερμοκρασία είναι $20^{\circ}C$ ή $20,5^{\circ}C$. Μικρότερες όμως μεταβολές δεν μπορούν να μετρηθούν. Η διακριτική ικανότητα συνήθως εκφράζεται επί τοις εκατό.

➤ Ακρίβεια (accuracy).

Η **ακρίβεια** μπορεί να εκφραστεί ως το επί τοις εκατό σφάλμα ως προς το εύρος μέτρησης της συσκευής. Γενικά, η ακρίβεια μίας 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.

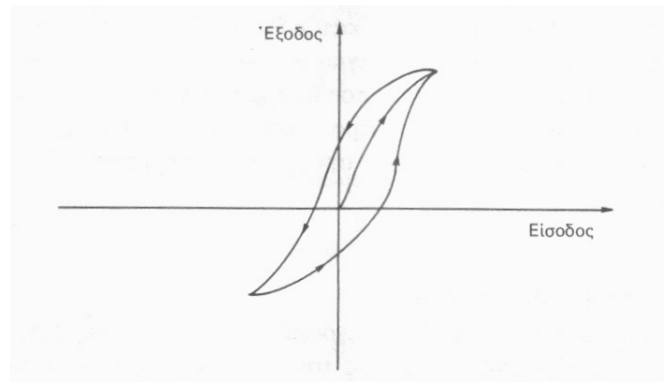
➤ **Βαθμονόμηση (calibration).**

Βαθμονόμηση είναι η διαδικασία που πραγματοποιείται για να εξασφαλιστεί ότι ο αισθητήρας συμμορφώνεται προς γνωστό πρότυπο με καθορισμένη ανοχή. Μία βαθμονόμηση είναι ένας έλεγχος κατά τον οποίο γνωστές τιμές της μετρήσιμης ποσότητας εφαρμόζονται σε έναν αισθητήρα και οι ενδείξεις εξόδου καταγράφονται. Από τις τιμές που προκύπτουν από την βαθμονόμηση μπορεί να σχεδιαστεί μία καμπύλη βαθμονόμησης. Η καμπύλη βαθμονόμησης δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να προσδιορίσει τα χαρακτηριστικά σφάλματος του αισθητήρα. Από την καμπύλη βαθμονόμησης μπορούν να προσδιοριστούν κάποια χαρακτηριστικά του αισθητήρα, όπως : η ευαισθησία, η περιοχή λειτουργίας, η απόκριση, η υστέρηση, η επαναληψιμότητα, κλπ.

Για να καταλάβουμε την έννοια της βαθμονόμησης, θα αναφέρουμε ένα συγκεκριμένο παράδειγμα. Όταν ένα είδος αισθητήρα μετρά π.χ. την ταχύτητα ενός οχήματος παράγει μια ηλεκτρική έξοδο, το μέγεθος της τάσης είναι ανάλογο της ταχύτητας του οχήματος. Η έννοια της **βαθμονόμησης** μίας συσκευής αναφέρεται στις μονάδες, στις οποίες βαθμολογείται η κλίμακα εμφάνισης ή καταγραφής ενός οργάνου. Στην περίπτωση της καταγραφής της ταχύτητας ενός 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 στην συγκεκριμένη περίπτωση, ότι το ταχύμετρο βαθμονομείται ως προς την ταχύτητα.

➤ **Νεκρή ζώνη (dead-band).**

Η **νεκρή ζώνη**, δηλώνει το μέγιστο ποσό αλλαγής της μετρούμενης ποσότητας που δεν προκαλεί κάποια αλλαγή στην έξοδο. Οι νεκρές ζώνες προκύπτουν λόγω στατικής τριβής ή υστέρησης. *Γενικά για το φαινόμενο της υστέρησης* : Ένα σύστημα μέτρησης λέγεται ότι έχει γραμμικότητα μέτρησης αν η καμπύλη ρύθμισης του είναι μια ευθεία γραμμή. (Πρέπει να σημειωθεί ότι η γραμμικότητα μέτρησης διαφέρει από την γραμμικότητα της δυναμικής του συστήματος. Μπορεί ένα σύστημα να διέπεται από γραμμική διαφορική εξίσωση αλλά να μην έχει γραμμικότητα μέτρησης, όπως π.χ. το θερμίστορ). Σε μερικές περιπτώσεις η καμπύλη ρύθμισης κατά την αύξηση της εισόδου δεν συμπίπτει με την καμπύλη ρύθμισης κατά την μείωση της εισόδου. Αν η καμπύλη ρύθμισης έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 4.27 , παρακάτω, τότε μιλάμε για το *φαινόμενο υστέρησης*.



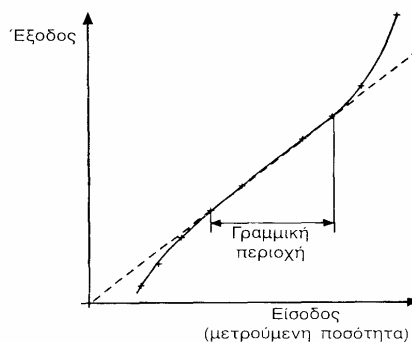
Σχήμα 4.27 Το φαινόμενο της υστέρησης.

➤ Ολίσθηση (drift).

Η φυσική τάση μίας συσκευής ή ενός συστήματος να μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του με το χρόνο και λόγω περιβαλλοντικών μεταβολών ονομάζεται **ολίσθηση**. Όταν υπάρχει μεταβολή στην έξοδο που παρέχει το σύστημα, ενώ η είσοδος παραμένει αμετάβλητη, επηρεάζεται η ακρίβεια. Ένα από τα πιο συνηθισμένα 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. Ολίσθηση μπορεί επίσης να προκληθεί από μηχανική διάβρωση ή ιδιοθέρμανση κάποιων τμημάτων της συσκευής, ή από κάποια οξείδωση κάποιων μεταλλικών μερών μιας συσκευής που είναι παλιά.

➤ Γραμμικότητα (linearity).

Ένα σύστημα μέτρησης γενικά, λέγεται ότι έχει **γραμμικότητα** μέτρησης αν η καμπύλη ρύθμισης του είναι μια ευθεία γραμμή. Ένας αισθητήρας μπορεί να είναι γραμμικός σε μια περιοχή τιμών εισόδου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.28, παρακάτω .



Σχήμα 4.28 Γραμμικότητα.

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.

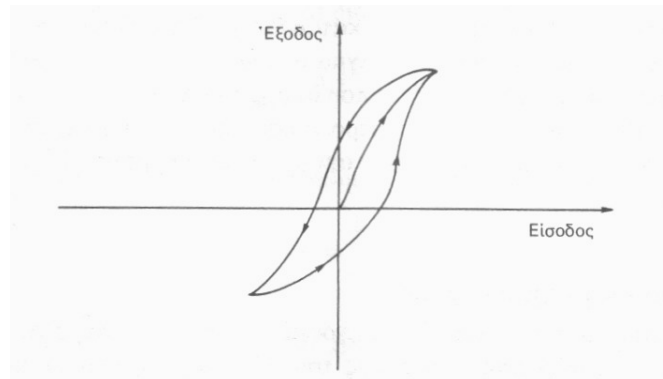
➤ **Σφάλμα (defect).**

Το **σφάλμα** ισούται με τη διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη τιμή και την πραγματική τιμή μίας ποσότητας. Τα σφάλματα μπορούν συχνά να εκφράζονται επί τοις εκατό, οπότε τότε αντιπροσωπεύουν την ακρίβεια του συστήματος.

➤ **Υστέρηση (hysteresis).**

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.

Όπως βλέπουμε και με την βοήθεια μίας γραφικής παράστασης στο σχήμα παρακάτω, 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 φαινόμενο ονομάζεται *υστέρηση του συστήματος*.



Η υστέρηση προκαλείται από διάφορους παράγοντες, ειδικότερα τη μηχανική τάση και την τριβή.

➤ **Χρόνος λειτουργίας (operating time).**

Ο **χρόνος λειτουργίας** ενός αισθητήρα αποτελεί ένδειξη του χρόνου, κατά τον οποίο αυτός αναμένεται να λειτουργεί ανάλογα με τις προδιαγραφές του. Εκφράζεται σε μονάδες χρόνου ή με τον αριθμό των κύκλων λειτουργίας που μπορεί να διεκπεραιώσει με επιτυχία.

➤ **Επαναληψιμότητα (precision).**

Η **επαναληψιμότητα** ενός συστήματος, μίας συσκευής, είναι ο βαθμός στον οποίο αυτή παράγει το ίδιο αποτέλεσμα όταν, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, τροφοδοτείται με ακριβώς την ίδια είσοδο. Εδώ να τονίσουμε ότι συχνά προκαλείται σύγχυση ανάμεσα στις έννοιες *επαναληψιμότητα* και *ακρίβεια*. Διαχωρίζοντας τις έννοιες αυτές μπορούμε να πούμε ότι 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 (repeatability= ικανότητα επανάληψης. , high-precision= υψηλή ακρίβεια. , resolution= διακριτική ικανότητα) .

➤ **Καθυστέρηση (delay , lag).**

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

➤ **Περιοχή λειτουργίας (operating range).**

Η **περιοχή λειτουργίας** μίας συσκευής ορίζει τα όρια στα οποία μπορεί η συσκευή να λειτουργεί αξιόπιστα. Η περιοχή λειτουργίας ενός αισθητήρα εκφράζεται συνήθως με την ελάχιστη και μέγιστη τιμή που είναι ικανός να μετρά. 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 τμήματά του. Στις προδιαγραφές που αναγράφονται στη συσκευή το εύρος περιοχής λειτουργίας μπορούμε να το βρούμε και σαν *θερμοκρασιακό εύρος*(περιοχή θερμοκρασιών που λειτουργεί ο αισθητήρας) ή σαν *εύρος τιμών πίεσης ή υγρασίας* .

➤ **Ονομαστική τιμή (rating).**

Η **ονομαστική τιμή** μίας συσκευής αποτελεί το σύνολο των βέλτιστων συνθηκών, ηλεκτρικών, μηχανικών κ.ά., υπό τις οποίες η συσκευή θα λειτουργεί με επιτυχία και ασφάλεια.

➤ **Αξιοπιστία (reliability).**

Η **αξιοπιστία** είναι η ικανότητα μιας συσκευής, ενός αντικειμένου να πραγματοποιήσει μια απαιτούμενη λειτουργία κάτω από καθορισμένες συνθήκες για καθορισμένη χρονική περίοδο. Άρα η αξιοπιστία ενός αισθητήρα είναι η ικανότητα του να παραμένει μέσα στις τεχνικές προδιαγραφές κατά την διάρκεια μιας προκαθορισμένης χρονικής περιόδου. Με αυτή την έννοια η αξιοπιστία ενός αισθητήρα είναι ένα μέτρο της σταθερότητας της εξόδου του και άρα της παραγωγής αποδεκτών σημάτων εξόδου σύμφωνα με την βαθμονόμηση που έχει προηγηθεί. Την αξιοπιστία μιας συσκευής μπορούμε να την συναντήσουμε συχνά και σαν *χρόνο λειτουργίας* της συσκευής.

➤ **Σταθερότητα-Ευστάθεια (stability).**

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

➤ **Στατικό σφάλμα (static error) .**

Το **στατικό σφάλμα** είναι ένα σταθερό σφάλμα που υπεισέρχεται καθ' όλο το εύρος τιμών εισόδου μίας συσκευής.

➤ **Ανοχή (tolerance).**

Η **ανοχή** μίας συσκευής, ορίζεται σαν 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.

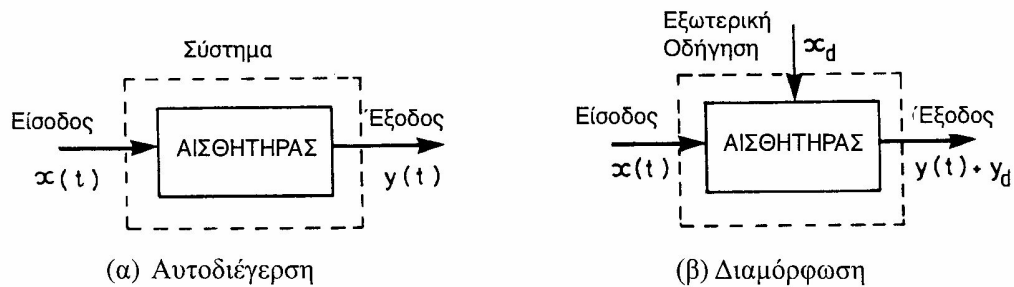
Παρακάτω παρουσιάζουμε τις διάφορες μορφές ενέργειας (σήματος), που συνήθως χρησιμοποιούνται στην ταξινόμηση των αισθητηρίων μαζί με κάποια από τα χαρακτηριστικά μετρούμενα μεγέθη.

Μορφή σήματος**Μετρήσιμες ποσότητες**

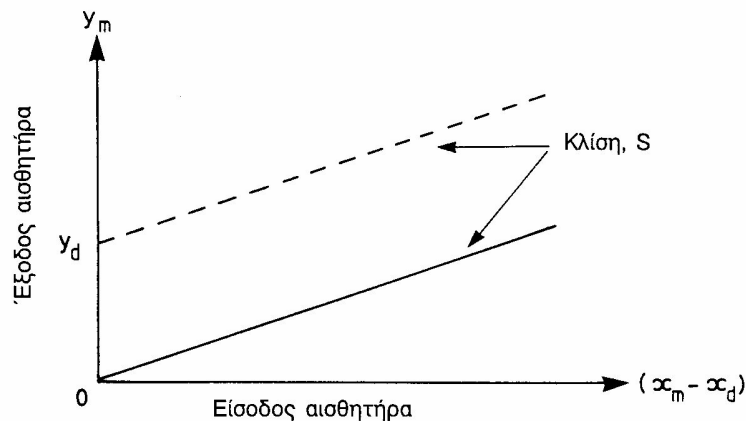
Θερμική	Θερμοκρασία, θερμότητα, ροή θερμότητας, εντροπία, κλπ
Ακτινοβολία	Ακτίνες Χ, ραδιοφωνικά κύματα, μικροκύματα, υπέρυθρη, Ορατή, υπεριώδης κλπ
Μηχανική	Μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση, δύναμη, ροπή, πίεση, Μάζα, ροή κλπ
Μαγνητική	Μαγνητικό πεδίο, μαγνητική ροή, μαγνητική ροπή, Μαγνητική διαπερατότητα, μαγνήτιση κλπ
Χημική	Υγρασία, pH, συγκέντρωση αερίων και ατμών, κλπ
Βιολογική	Σάκχαρα, πρωτεΐνες, κλπ
Ηλεκτρική	Φορτίο, ένταση, τάση, αντίσταση, αγωγιμότητα, χωρητικότητα, επαγωγή, διηλεκτρική σταθερά, πόλωση, συχνότητα κλπ

4.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΔΑΝΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

Στην απλή του μορφή, ένας αισθητήρας μπορεί να θεωρηθεί ως σύστημα με είσοδο $x(t)$ και έξοδο $y(t)$, όπως βλέπουμε στο σχήμα 4.29, παρακάτω, όπου εικονίζεται η περίπτωση ενός αυτοδιεγειρόμενου αισθητήρα και ενός διαμορφωμένου αισθητήρα.



Σχήμα 4.29 Αυτοδιεγειρόμενο(α), και διαμορφωμένο(β) σύστημα αισθητήρα.



Σχήμα 4.30 Ιδανική σχέση μεταξύ εισόδου – εξόδου των αυτοδιεγειρόμενων και διαμορφωμένων (διακεκομμένη γραμμή) αισθητήρων.

Στον αυτοδιεγειρόμενο αισθητήρα η έξοδος προέρχεται αποκλειστικά από το σήμα εισόδου. Η γενική εξίσωση που περιγράφει ένα αυτοδιεγειρόμενο σύστημα αισθητήρα είναι η εξής :

$$y(t) = S \cdot x(t) \quad y(t) = F(x(t))$$

Η εξίσωση που περιγράφει ένα σύστημα διαμορφωμένου αισθητήρα είναι η εξής :

$$y(t) = F(x(t) + x_d)$$

Όπου η $x_d(t)$ μπορεί να είναι κάποια τάση αναφοράς ή κάποιο ρεύμα σταθερής έντασης. Στην ιδανική περίπτωση το εξωτερικό σήμα $x_d(t)$ θα έπρεπε να είναι σταθερό και απαλλαγμένο από οποιοδήποτε θόρυβο.

Στο σχήμα 4.30, παραπάνω, εικονίζεται η ιδανική χαρακτηριστική εισόδου-εξόδου ενός αισθητήρα στον οποίο το σήμα εισόδου είναι ευθέως ανάλογο προς το σήμα εξόδου. Ο ιδανικός αισθητήρας έχει μία γραμμική έξοδο σήματος $y(t)$ και μπορεί να ακολουθήσει στιγμιαία το σήμα εισόδου $x(t)$, ώστε :

$$y(t) = S \cdot x(t)$$

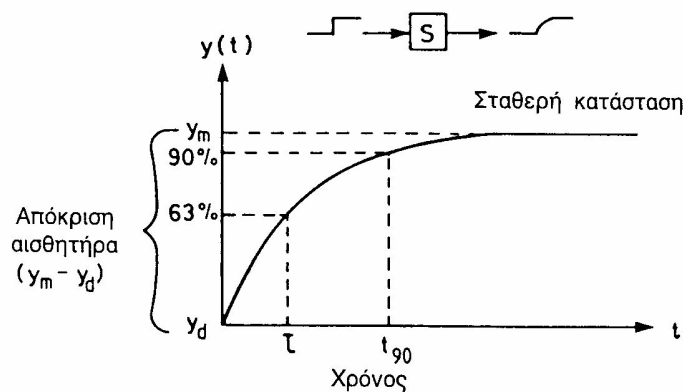
Για ένα γραμμικό αισθητήρα, η κλίση S της καμπύλης εισόδου-εξόδου έχει μία σταθερή τιμή και συνήθως αναφέρεται ως ευαισθησία.

Η ευαισθησία ενός ιδανικού αισθητήρα είναι ίση με το κέρδος και ανεξάρτητη και από το πλάτος και από την γωνιακή συχνότητα ενός σήματος.

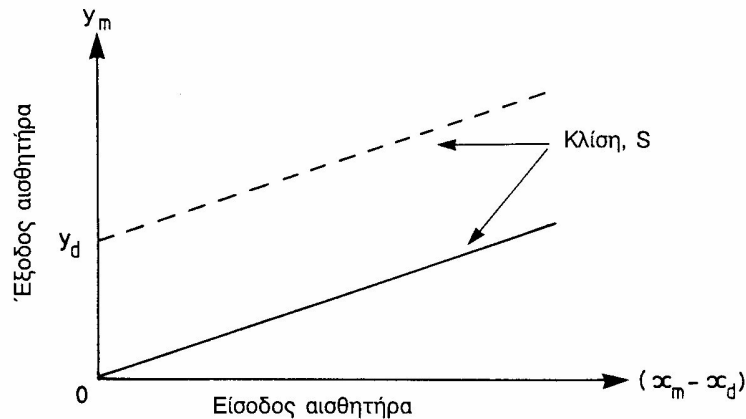
Κέρδος, (και ευαισθησία) οποιουδήποτε αισθητήρα μπορεί να οριστεί ως η απόλυτη τιμή (και μεταβολή) του σήματος εξόδου σε σχέση με την απόλυτη τιμή (και μεταβολή) του σήματος εισόδου.

Απόκριση ενός αισθητήρα είναι η μεταβολή στο σήμα εξόδου.

Στο σχήμα 4.31, παρακάτω, εικονίζεται η μεταβατική απόκριση ενός ιδανικού αισθητήρα. Από το σχήμα αυτό, καθώς και από το αμέσως επόμενο, μπορούμε να δούμε εύκολα τα ιδανικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων και τότε θα εισάγουμε μερικά από τα μη επιθυμητά χαρακτηριστικά που πολύ συχνά εμφανίζονται στους πραγματικούς αισθητήρες.



Σχήμα 4.31 Η μεταβατική απόκριση ενός ιδανικού αισθητήρα.



Όπως είπαμε και προηγουμένως, η απόκριση ενός αισθητήρα, είναι η μεταβολή στο σήμα εξόδου, π.χ. $(y_m - y_0)$, όπου y_0 , για να παραστήσουμε την έξοδο του αισθητήρα στο $x=0$. Τότε το y_0 , παριστάνει το σήμα αναφοράς (αναφορά μπορεί να θεωρηθεί η έξοδος κάτω από προκαθορισμένες συνθήκες) και πρέπει στην ιδανική περίπτωση να είναι ανεξάρτητο του χρόνου. Η ανύψωση και η πτώση ενός σήματος εξόδου από ένα αισθητήρα είναι στην ιδανική περίπτωση εκθετική με σταθερά χρόνου τ . ($y_d = y_0$). Η σταθερά αυτή του χρόνου, τ , μπορεί συνήθως να συσχετιστεί με τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος. Συχνά ορίζουμε τον χρόνο που απαιτείται ώστε το σήμα του αισθητήρα να πλησιάσει το 90% της τελικής του τιμής και αυτό αναφέρεται σαν χρόνος t_{90} (χρόνος απόκρισης). Ο χρόνος απόκρισης είναι επιθυμητό να είναι μικρότερος από μερικά δευτερόλεπτα ώστε ο αισθητήρας να πλησιάζει μία τελική τιμή σε ένα λογικό χρονικό διάστημα.

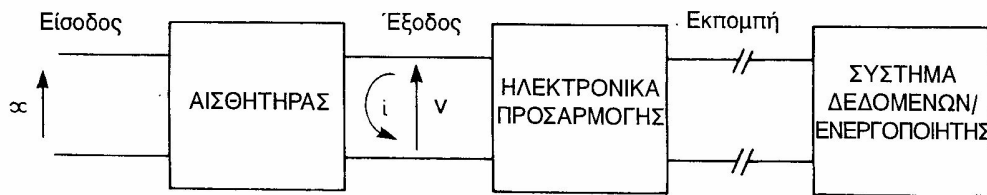
Παρακάτω παρουσιάζονται τα επιθυμητά χαρακτηριστικά γνωρίσματα (δηλαδή τα ιδανικά), καθώς και τα μη επιθυμητά χαρακτηριστικά γνωρίσματα που συχνά εμφανίζονται στους πραγματικούς αισθητήρες :

Χαρακτηριστικά	Ιδανική τιμή
Απόκριση, Δy	Ακριβώς γραμμική και χωρίς θόρυβο.
Αναφορά, y_0	Σημείο μηδέν.
Χρόνος απόκρισης, τ	Μηδενική για στιγμιαία απόκριση.
Εύρος συχνοτήτων	Άπειρο για στιγμιαία απόκριση.
Χρόνος για να προσεγγιστεί το 90% της τελικής τιμής, t_{90}	Μηδέν για στιγμιαία απόκριση.
Ένδειξη πλήρους κλίμακας, y_{\max}	Βαθμονομημένη μέγιστη έξοδος, π.χ. ρεύμα 20 mA.
Περιοχή λειτουργίας, $(y_{\max} - y_{\min})$	Άπειρη.
Ευσαιθησία, S	Υψηλή και σταθερή σε ολόκληρη την περιοχή λειτουργίας.
Διακριτική ικανότητα	Άπειρη.

Χαρακτηριστικό	Σημασία
Μη γραμμικότητα Αργή απόκριση	Η απόκριση δεν είναι ανάλογη προς το σήμα εισόδου. Η έξοδος αργεί να φτάσει στην τιμή μόνιμης κατάστασης (δηλαδή, μεγάλη τιμή του τ).
Μικρή περιοχή λειτουργίας Χαμηλή ευαισθησία	Η περιοχή λειτουργίας περιορίζεται πολύ. Ο αισθητήρας μπορεί να αποκριθεί μόνον σε μεγάλα σήματα εισόδου (δηλαδή το S είναι μικρό).
Ολίσθηση της ευαισθησίας	Η έξοδος μεταβάλλεται με το χρόνο, π.χ. μεταβάλλεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
Ολίσθηση της αναφοράς Αντιστάθμιση (Offset)	Η έξοδος μεταβάλλεται με το χρόνο. Συστηματικό λάθος στην έξοδο του αισθητήρα.
Ολίσθηση Αντιστάθμισης	Μετατόπιση αντιστάθμισης με το χρόνο, π.χ. η οφειλόμενη στη γήρανση του αισθητήρα.
Γήρανση Παρεμβολή	Η έξοδος του αισθητήρα μεταβάλλεται με το χρόνο. Η έξοδος είναι ευαίσθητη στις εξωτερικές συνθήκες, π.χ. παρασιτική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, υγρασία κλπ.
Υστέρηση Θόρυβος	Συστηματικό σφάλμα στην καμπύλη εισόδου-εξόδου. Η έξοδος περιλαμβάνει ένα ανεπιθύμητο τυχαίο σήμα.

4.7 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Για να διασφαλιστεί ότι το μέγιστο σήμα ή η μέγιστη ισχύς θα μεταφέρεται από έναν αισθητήρα, σε κάποια συσκευή απεικόνισης, χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές. Όταν συμβαίνει αυτό τότε λέμε ότι έχουμε *προσαρμογή* (matching , adjustment), και τότε ο αισθητήρας και η συσκευή είναι όπως λέμε *προσαρμοσμένα* (matched). Η έξοδος των αισθητήρων πολλές φορές χρειάζεται κάποια τροποποίηση ή ρύθμιση ώστε να υπάρχει κάποια συμβατότητα με τις καταγραφικές συσκευές, τους ενδείκτες ή τα κυκλώματα ελέγχου που ακολουθούν του αισθητήρα. Η τροποποίηση αυτή των σημάτων είναι γνωστή ως *ρύθμιση σήματος*. Άρα η ηλεκτρική έξοδος ενός αισθητήρα χρειάζεται κάποια μορφή επεξεργασίας ή ρύθμιση πριν χρησιμοποιηθεί από κάποια άλλη συσκευή. Το κύκλωμα αυτό, που επεξεργάζεται το σήμα, και βρίσκεται μεταξύ του αισθητήρα και ενός συστήματος δεδομένων(καταγραφική συσκευή, συσκευή απεικόνισης κλπ) συνήθως ονομάζεται *σύστημα προσαρμογής* (system interface) (σχήμα 4.32) . Τα κυκλώματα αυτά μπορούν να μετατρέψουν μία μεταβολή αντίστασης, χωρητικότητας ή επαγωγής σε σήμα τάσης.



Σχήμα 4.32 Διάγραμμα ενός συστήματος αισθητήρα που μας παρουσιάζει το όλο σύστημα προσαρμογής.

Τα κυκλώματα προσαρμογής χρησιμοποιούνται κυρίως για ενίσχυση του μη επεξεργασμένου σήματος σε επίπεδο που να μπορεί μετέπειτα να χρησιμοποιηθεί. Επίσης μία άλλη χρήση τους είναι η παροχή σταθερής ισχύος, όπως επίσης και η μείωση του θορύβου χρησιμοποιώντας κατάλληλα φίλτρα. Ακόμη μία άλλη χρήση των κυκλωμάτων προσαρμογής είναι η διόρθωση κάποιας έλλειψης στην απόδοση του αισθητήρα. Μπορούν να περιλαμβάνουν επίσης κάποια βοηθητική διάταξη για την παραγωγή ενός σήματος ελέγχου, για παράδειγμα ένα προειδοποιητικό σήμα όταν πέσει η τάση τροφοδοσίας ή μία λειτουργία αυτοελέγχου. Τέλος τα κυκλώματα προσαρμογής μπορεί να προετοιμάζουν το σήμα για μετάδοση προς άλλη συσκευή.

Οι κυριότερες μορφές μετάδοσης δεδομένων είναι η διαμόρφωση συχνότητας, το αναλογικό ρεύμα ή τάση, και η ψηφιακή μετάδοση.

4.8 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΩΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

Για την τροποποίηση ή την ρύθμιση της εξόδου των αισθητήρων χρησιμοποιούνται κυρίως ενεργητικές είτε παθητικές τεχνικές ή ο συνδυασμός τους.

Για τις ενεργητικές τεχνικές :

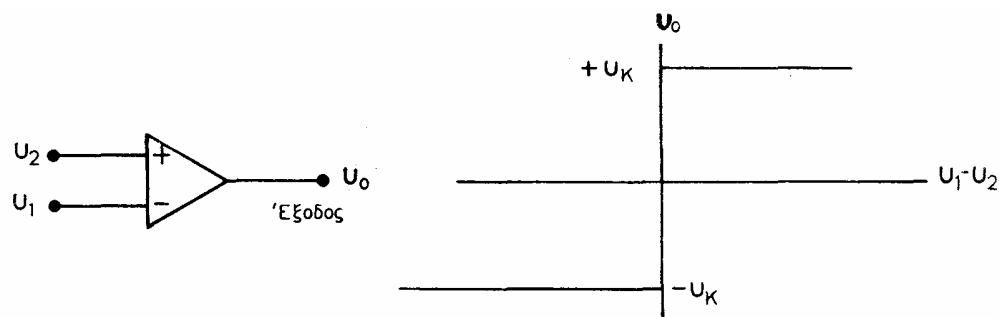
Τελεστικός ενισχυτής

Βασικά στοιχεία στα διάφορα κυκλώματα προσαρμογής είναι οι ενισχυτές και κυρίως οι : τελεστικοί ενισχυτές, οι ενισχυτές μέτρησης, και οι ενισχυτές απομόνωσης. Οι ενισχυτές έχουν ως αποστολή να ενισχύσουν τα ασθενή σήματα χωρίς να αλλάζουν τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Οι τελεστικοί ενισχυτές (*operational amplifiers*) μπορούν να χαρακτηριστούν σαν δομικοί λίθοι πολλαπλής χρήσης για το σχεδιασμό ηλεκτρονικών βαθμίδων και κατασκευάζονται σαν ολοκληρωμένα κυκλώματα. Στην πράξη χρησιμοποιούνται σαν ενεργά στοιχεία τα οποία ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή

συνδέονται με τα αντίστοιχα εξωτερικά κυκλώματα. Ένας τελεστικός ενισχυτής είναι ουσιαστικά ένας διαφορικός ενισχυτής (ενισχυτής διαφοράς των σημάτων εισόδου) μεγάλης απολαβής. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή είναι οι εξής :

- Άπειρη απολαβή
- Άπειρη αντίσταση εισόδου.
- Μηδενική αντίσταση εξόδου
- Άπειρο εύρος ζώνης διελεύσεως συχνοτήτων
- Άπειρος λόγος CMRR (λόγος αποβολής κοινού τύπου , ένδειξης ποιότητας του ενισχυτή)

Στο σχήμα 4.33 , παρακάτω, φαίνεται το σύμβολο του τελεστικού ενισχυτή καθώς και τα ιδανικά χαρακτηριστικά του.



Σχήμα 4.33 Σύμβολο και ιδανικά χαρακτηριστικά τελεστικού ενισχυτή.

Η είσοδος με $-$, λέγεται *είσοδος αναστροφής (inverting input)* και η είσοδος με το $+$, λέγεται *είσοδος χωρίς αναστροφή (non-inverting input)*. Για να γίνει περιγραφή της λειτουργίας ενός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή συμβολίζουμε τις τάσεις εισόδου με U_1 και U_2 και την τάση εξόδου με U_o . Στην ιδανική περίπτωση όταν η διαφορά τάσεων $U_1 - U_2$ είναι θετική ($U_1 > U_2$) η έξοδος U_o παίρνει την θετική τιμή κόρου U_K . Όταν πάλι η διαφορά τάσεων $U_1 - U_2$ είναι αρνητική ($U_1 < U_2$) η έξοδος U_o παίρνει την αρνητική τιμή κόρου $-U_K$ όπως φαίνεται και στο σχήμα , παραπάνω. Ένας ιδανικός ενισχυτής έχει άπειρη απολαβή τάσης επειδή μια πολύ μικρή διαφορά μεταξύ U_1 και U_2 έχει σαν αποτέλεσμα να παίρνει η έξοδος τιμή κόρου. Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής έχει δύο δυνατές τιμές εξόδου $+U_K$ και $-U_K$.

Τα πιο βασικά κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών είναι, ο αναστρέφων ενισχυτής, ο μη αναστρέφων ενισχυτής, ο ενισχυτής ολοκληρώσεως, ο διαφορικός ενισχυτής, το κύκλωμα μετατροπής ρεύματος σε τάση και το κύκλωμα μετατροπής τάσεως σε ρεύμα.

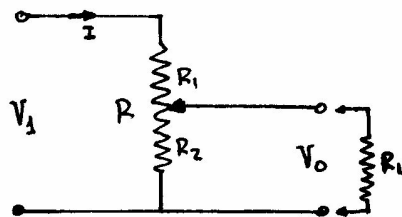
Για τις παθητικές τεχνικές :

Στις παθητικές τεχνικές ρύθμισης σήματος χρησιμοποιούνται συχνά το ποτενσιόμετρο καθώς και η γέφυρα Wheatstone.

Ποτενσιόμετρο

Το ποτενσιόμετρο κατασκευαστικά αποτελείται από μια αντίσταση σε ευθεία, κυκλική ή ελικοειδή μορφή πάνω στην οποία ολισθαίνει ένας δρομέας. Η κίνηση του δρομέα μπορεί να γίνει από πολλούς παράγοντες πχ από ένα κινητήρα, από ένα έμβολο, από ένα μανόμετρο κλπ . Γενικά τα ποτενσιόμετρα μπορούν στην προκειμένη περίπτωση να χρησιμοποιηθούν και για ρύθμιση σημάτων από άλλους αισθητήρες. Έτσι, πχ αν η έξοδος ενός αισθητήρα είναι αρκετά υψηλή, για να υπάρξει σωστή καταγραφή από κάποια συσκευή ένδειξης, υποβιβάζεται ανάλογα με την βοήθεια ενός ποτενσιόμετρου. Γενικά το ποτενσιόμετρο τροφοδοτείται από μια τάση V . Ο δρομέας που εκτελεί κίνηση ανάλογη με μια δύναμη που επενεργεί σε αυτόν , δίνει στην έξοδο μια τάση V_I , η οποία είναι ανάλογη με τη θέση του δρομέα ή το ίδιο ανάλογη με την αιτία που τον πήγε στην θέση αυτή. Επίσης υπάρχουν τα ποτενσιόμετρα πολλών στρωφών με ελικοειδή μορφή. Σε αυτά η αντίσταση έχει το σχήμα έλικας στο κέντρο της οποίας υπάρχει άξονας σε μορφή βίδας πάνω στην οποία στερεώνεται ο δρομέας. Γυρίζοντας τον άξονα ο δρομέας ακολουθεί την ελίωση και έτσι έχουμε την δυνατότητα μεταβολής της αντιστάσεως για πολύ μικρές τιμές. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει πολύ λεπτή ρύθμιση τάσεως ιδίως σε όργανα καταγραφής .

Το ποτενσιόμετρο μπορούμε να το αναπαραστήσουμε επίσης όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.34, παρακάτω, σαν διαιρέτη τάσης. Ο διαιρέτης τάσης είναι συνήθως μία διάταξη κυκλωμάτων που συμπεριφέρεται σαν το ποτενσιόμετρο που βλέπουμε παρακάτω. Έστω ότι στην είσοδο έχουμε μια τάση V_I που κυμαίνεται μεταξύ -5 και $+5$ Volt. Ο δρομέας του ποτενσιόμετρου διαιρεί (χωρίζει) την αντίσταση του R σε δύο αντιστάσεις, R_1 και R_2 . Στα όρια της R_2 είναι και η τάση εξόδου V_0 .



Σχήμα 4.34 Ποτενσιόμετρο σαν διαιρέτης τάσης.

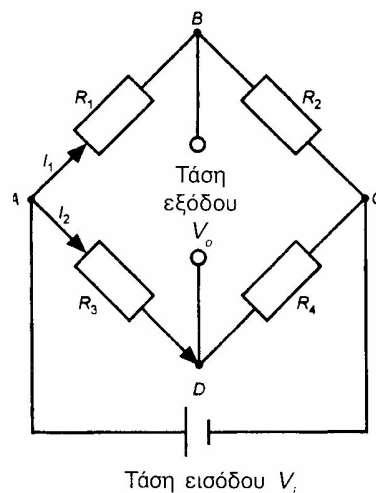
Τα κυκλώματα ποτενσιόμετρου παρουσιάζουν γενικά τρεις δυσκολίες, οι οποίες είναι : η μικρή ανάλυση της μεταβολής, η ευαισθησία στις μεταβολές της πηγής, και η ύπαρξη μιας τάσης ηρεμίας με απουσία του μελετούμενου φαινομένου. Με τις συνδεσμολογίες γέφυρας αποφεύγουμε αυτά τα προβλήματα.

Γέφυρα Wheatstone

Ο διαιρέτης τάσης που είδαμε πιο πάνω είναι να μεν απλός στην χρήση του αλλά εμφανίζει κάποια μειονεκτήματα, όπως της ευαισθησίας σε μικρές μεταβολές και επίσης η τάση εξόδου δεν εξαρτάται μόνο από την αντίσταση εισόδου της επόμενης συσκευής, αλλά και από τον τρόπο που επηρεάζεται ο ίδιος αισθητήρας από τη θερμοκρασία. Το πρόβλημα αυτό της μικρής ευαισθησίας μπορεί να υπερνικηθεί χρησιμοποιώντας την γέφυρα Wheatstone. Οι συνδεσμολογίες γέφυρας γενικά κατασκευάζονται σε πολλούς συνδυασμούς που η εκλογή τους εξαρτάται όχι μόνο από τη φύση της άγνωστης ηλεκτρικής αντίστασης αλλά και από την ακρίβεια της μέτρησης που θα πραγματοποιηθεί. Όταν χρησιμοποιείται σαν ρυθμιστής η γέφυρα Wheatstone έχει σαν έργο τη μετατροπή της μεταβολής της αντίστασης σε ένα ηλεκτρικό σήμα. Η μεταβολή αυτή είναι συνδεδεμένη με το φυσικό μέγεθος που παρέχεται από τον αισθητήρα. Το ενδιαφέρον για τις γέφυρες προκύπτει από τη διαφορική φύση της μέτρησης που κάνει το σήμα εξόδου λιγότερο ευαίσθητο στους θορύβους και στις τυχόν μεταβολές της πηγής.

Στο σχήμα 4.35, παρακάτω, εικονίζεται η βασική μορφή της γέφυρας Wheatstone. Το κύκλωμα θα λέγαμε ότι αποτελείται από 2 διαιρέτες τάσεις. Συνήθως κάποια από τις αντιστάσεις που βλέπουμε παρακάτω είναι κάποιος αισθητήρας. Η γέφυρα Wheatstone χρησιμοποιείται ιδιαίτερα ως σύστημα ρύθμισης σημάτων επειδή μπορεί να παρέχει μία γραμμική σχέση ανάμεσα στην τάση εξόδου της V_0 και την αλλαγή της αντίστασης σε μία από τις αντιστάσεις που την αποτελούν. Όταν η τάση εξόδου V_0 είναι μηδέν τότε λέμε ότι η γέφυρα είναι σε ισορροπία. Όταν η γέφυρα φύγει από αυτή την κατάσταση ισορροπίας τότε η τάση εξόδου V_0 θα πάψει να είναι μηδέν και η πολικότητα θα εξαρτάται από την αντίσταση που έχει αυξηθεί ή έχει μειωθεί. Γενικά, η αλλαγή της τιμής της τάσης V_0 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος σε ένα σύστημα μέτρησης ή ελέγχου. Η σχέση που παίρνουμε από το παρακάτω κύκλωμα έχει τη μορφή :

$$\Delta V_0 = V_i \left(\frac{\Delta R_1}{R_1 + R_2} \right)$$



Σχήμα 4.35 Γέφυρα Wheatstone.

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε σε διάφορες βασικές κατηγορίες των αισθητήριων για την μέτρηση κάποιων φυσικών μεγεθών, ποσοτήτων, και θα συζητηθούν μόνο μερικοί αντιπροσωπευτικοί τύποι από κάθε κατηγορία. Προκειμένου να συμπεριλάβανε κανείς όλο το φάσμα από τα αισθητήρια που χρησιμοποιούνται θα χρειαζόταν σίγουρα πάνω από ένα βιβλίο!

Κεφάλαιο 5^ο

ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι θερμικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται στη μέτρηση ποικίλων ποσοτήτων που σχετίζονται με τη θερμότητα, όπως η θερμοκρασία, η πυκνότητα ροής θερμότητας και η ειδική θερμότητα. Η θερμοκρασία είναι η πιο θεμελιώδης ποσότητα και αποτελεί ένα μέτρο της θερμικής ενέργειας ή της θερμότητας σε ένα σώμα. Εξ ορισμού οι θερμικοί αισθητήρες ταξινομούνται ως αισθητήρες επαφής, στους οποίους το στοιχείο ανίχνευσης αγγίζει με φυσικό τρόπο την πηγή θερμότητας, τότε το θερμικό σήμα μεταδίδεται από τη θερμική πηγή με αγωγή της θερμότητας στο στοιχείο ανίχνευσης το οποίο κατόπιν είτε παράγει είτε διαμορφώνει ένα ηλεκτρικό σήμα. Επίσης έχουμε τους αισθητήρες θερμοκρασίας μη επαφής που ταξινομούνται ως αισθητήρες ακτινοβολίας οι οποίοι ανιχνεύουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπει ένα σώμα. Οι περισσότεροι θερμικοί αισθητήρες είναι διαμόρφωσης παρά αυτοδιεγερόμενοι . Οι δύο εξαιρέσεις είναι το θερμοζεύγος (το οποίο θα δούμε αναλυτικά παρακάτω), το οποίο παράγει μια ηλεκτρομαγνητική δύναμη ανάμεσα σε δύο επαφές που η κάθε μια διατηρείται σε διαφορετική θερμοκρασία, και οι αισθητήρες θερμικού θορύβου. Η πλειονότητα των θερμοαγωγιμων αισθητήρων όπως για παράδειγμα το θερμίστορ, οι θερμοδίοδοι και τα θερμοτρανζίστορ, μπορούν να ταξινομηθούν ως μικροαισθητήρες.

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε την θερμοκρασία καθώς και τις συσκευές και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρηση της. Η θερμότητα είναι μία μορφή ενέργειας που επηρεάζει τη συμπεριφορά των υλικών με διάφορους τρόπους και εμείς χρησιμοποιούμε αυτές τις αλλαγές συμπεριφοράς για να μετρήσουμε τη θερμοκρασία των υλικών.

Θερμοκρασία ονομάζεται ο βαθμός κατά τον οποίο ένα σώμα, ουσία ή μέσο είναι θερμό σε σύγκριση με κάποιο άλλο. Όταν μετράμε την θερμοκρασία συγκρίνουμε το βαθμό θερμότητας με κάποιο άλλο συγκεκριμένο σημείο αναφοράς χρησιμοποιώντας κάποιες θερμοκρασιακές κλίμακες. Οι πιο συνηθισμένες κλίμακες για την μέτρηση της θερμοκρασίας είναι η κλίμακα *Κελσίου* (C) , η κλίμακα *Fahrenheit* (F) και η θερμοδυναμική κλίμακα ή κλίμακα *Kelvin* (K) . Στην κλίμακα Κελσίου ορίζεται το σημείο πήξης του νερού $0^{\circ}C$ και η θερμοκρασία βρασμού του νερού σε $100^{\circ}C$. Στην κλίμακα *Fahrenheit* το σημείο πήξης του νερού είναι σε $32^{\circ}F$ και το σημείο βρασμού του νερού σε $212^{\circ}F$. Στην θερμοδυναμική κλίμακα *Kelvin* χρησιμοποιείται το απόλυτο μηδέν ως σημείο αναφοράς. Το απόλυτο μηδέν είναι η χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία στην οποία μπορεί να φτάσει κάποια ουσία. Η θερμοκρασία αυτή συμβολίζεται με 0 K και αντιστοιχεί περίπου σε $273,16^{\circ}K$.

Η θερμοκρασία και η μέτρηση της αυτή καθ' αυτή είναι σημαντική επειδή σε διαφορετικές θερμοκρασίες οι φυσικές ιδιότητες των ουσιών(ανάλογα εάν αυτή είναι σε στερεή , υγρή ή αέρια μορφή) είναι διαφορετικές και έτσι αυτές παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά . Οι συσκευές που μετρούν την θερμοκρασία ονομάζονται *θερμόμετρα*. Κάποιες φορές αναφέρονται ως *πυρόμετρα* εάν μετρούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη θερμομέτρων. Τα κύρια είδη, είναι αυτά που μετρούν την θερμοκρασία στηριζόμενα :

- Στο φαινόμενο του θερμοηλεκτρισμού.
- Στην ηλεκτρική αντίσταση.
- Στην ακτινοβολία θερμότητας.
- Στη διαστολή ενός υγρού.
- Στη διαστολή ενός μετάλλου.

Στους *αισθητήρες θερμοκρασίας* η τάση εξόδου από τον αισθητήρα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας που μετρά ο αισθητήρας. Ανάλογα με την αρχή λειτουργίας αυτών χωρίζονται σε:

- Θερμίστορς
- Θερμόμετρα αντίστασης
- Θερμοζεύγη
- Θερμόμετρα διαστολής
- Μέθοδοι μεταβολής των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών σε ημιαγωγούς ή κρυστάλλους.

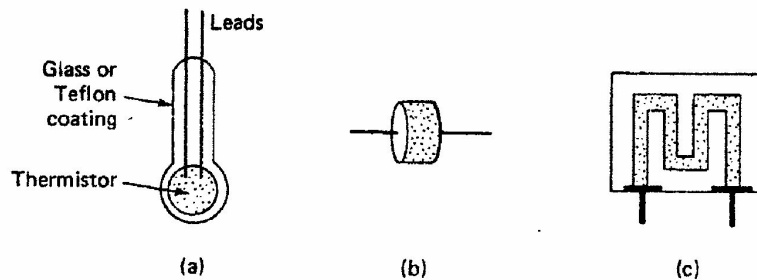
5.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΥΤΩΝ

5.2.1 Θερμίστορ (thermistor)

Τα θερμίστορ είναι τα πιο δημοφιλή αισθητήρια θερμοκρασίας και αποτελούνται ουσιαστικά από μια αντίσταση με μεγάλο θερμικό συντελεστή αντίστασης. Τα θερμίστορ χρησιμοποιούν σαν αρχή λειτουργίας την αλλαγή της αντίστασης με την θερμοκρασία. Ένα από τα πλεονεκτήματα των θερμίστορ που διαθέτει η αγορά είναι η μεγάλη ποικιλία σχημάτων και μεγεθών, κατάλληλα για διάφορες εφαρμογές της ηλεκτρονικής. Τα θερμίστορ καλύπτονται με διάφορα μονωτικά υλικά ώστε να διαθέτουν ηλεκτρική και μηχανική προστασία.

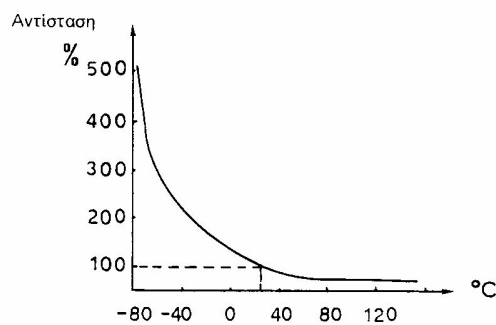
Τα θερμίστορ είναι ημιαγωγοί διαφόρων γεωμετρικών σχημάτων από τα οποία εξέρχονται δύο συρμάτινοι ακροδέκτες, όπως βλέπουμε στο σχήμα 5.1, παρακάτω.

Οι ημιαγωγοί εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερες αλλαγές αντίστασης για δεδομένες μεταβολές θερμοκρασίας. Κατασκευάζονται από μίγματα μεταλλικών οξειδίων και περιέχουν συνήθως μαγγάνιο, νικέλιο, χρώμιο και κοβάλτιο. Όχι όμως πυρίτιο και γερμάνιο που είναι τα πιο γνωστά ημιαγωγικά υλικά. Η αντίσταση αυτών των υλικών είναι πολύ ευαίσθητη στις μεταβολές θερμοκρασίας.



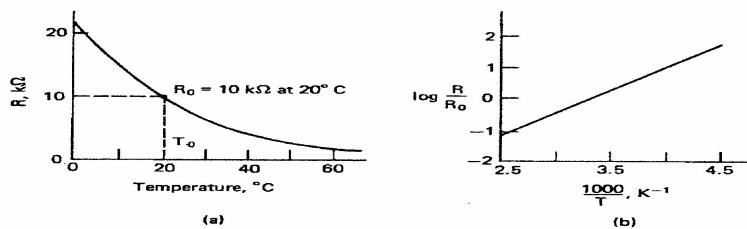
Σχήμα 5.1 Θερμίστορ σε διάφορα γεωμετρικά σχήματα.

Όπως οι άλλοι ημιαγωγοί τα θερμίστορ έχουν θερμικό συντελεστή αντίστασης (α) αρνητικό, που σημαίνει ελάττωση της τιμής της αντίστασης αυτών αυξανόμενης της θερμοκρασίας. (σχήμα 5.2).

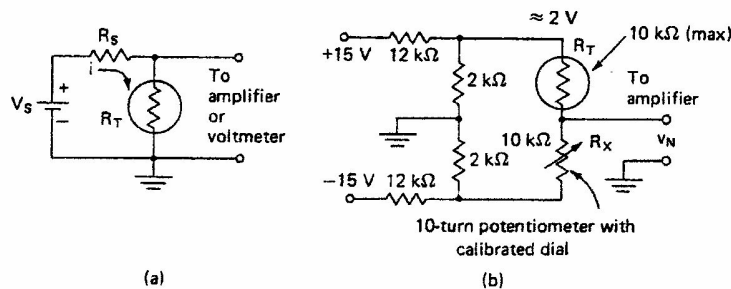


Σχήμα 5.2 Μεταβολή αντίστασης θερμίστορ με την θερμοκρασία.

Η αντίσταση των θερμίστορ συναρτήσει της θερμοκρασίας δεν ακολουθεί τον γραμμικό νόμο (όπως π.χ στα μέταλλα), αλλά εκθετικό σύμφωνα με την εξίσωση $R = R_A \exp(\alpha/T)$ όπως δείχνουν τα σχήματα 5.3 a,b), παρακάτω, όπου T η απόλυτη θερμοκρασία και R_A σταθερά που μπορεί να υπολογιστεί από τα R_o , T_o και α , εάν είναι γνωστές οι γραφικές παραστάσεις του σχήματος παρακάτω για κάθε θερμίστορ. Ο θερμικός συντελεστής αντίστασης (α) ισούται με $\alpha = (\Delta R/R_T)/\Delta T$ και εύκολα μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση της γραφικής παράστασης του σχήματος 5.3b, παρακάτω. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν και θερμίστορ με θετικό θερμικό συντελεστή αντίστασης.



Σχήμα 5.3 Γραφικές παραστάσεις θερμίστορ.



Σχήμα 5.4 Απλά κυκλώματα που χρησιμοποιούν θερμίστορ.

Στο σχήμα 5.4a), παραπάνω, δίνουμε ένα απλό κύκλωμα στο οποίο χρησιμοποιείται το θερμίστορ. Εάν V_T είναι η τάση στα άκρα του θερμίστορ, αυτή από το κύκλωμα του σχήματος θα είναι:

$$V_T = (V_S R_T) / (R_T + R_S) = V_S R_T / R_S \text{ εάν } R_T \ll R_S$$

Επομένως εάν διαλέξουμε αντίσταση $R_S \gg R_T$ τότε η τάση στα άκρα του θερμίστορ είναι ανάλογη της αντίστασης αυτού κατά προσέγγιση.

Στο σχήμα 5.4b), παραπάνω, ενδεικτικά δίνουμε ένα κύκλωμα γέφυρας, στο οποίο η τάση εξόδου ρυθμίζεται για μεταβολή της αντίστασης R_x ώστε να είναι μηδέν όταν το θερμίστορ ευρίσκεται στην θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Αποδεικνύεται ότι η τάση

$$V_n = V_b(\Delta R_T / R_T) = V_b \alpha \Delta T, \text{ όπου } R_x = R_{T\alpha} \text{ και } V_b = V_T \text{ όταν } V_n = 0.$$

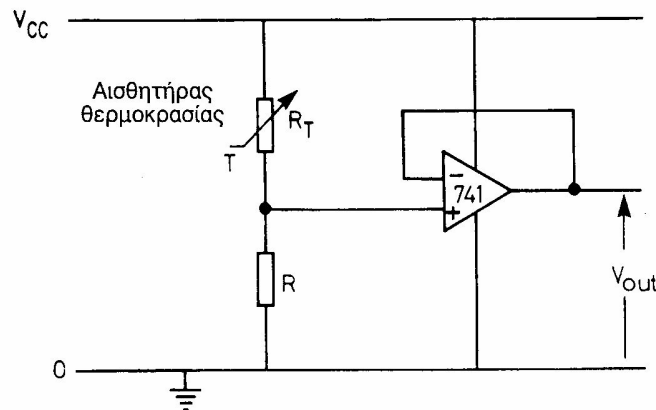
Το πλεονέκτημα του κυκλώματος αντιστάθμισης είναι ότι μπορεί να μετρήσει μικρές μεταβολές θερμοκρασίας με ακρίβεια. Το μειονέκτημά του όμως, είναι ότι η γραμμικότητα της περιοχής θερμοκρασίας μέτρησης περιορίζεται σε μερικούς βαθμούς Κελσίου γύρω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος όπου έγινε η αντιστάθμιση.

Τα θερμίστορ μπορούν να έχουν πολύ μικρό μέγεθος και παρόλα αυτά να έχουν υψηλή αντίσταση και εμφανίζουν ταχεία απόκριση στις μεταβολές θερμοκρασίας. Το θερμοκρασιακό εύρος των θερμίστορ εκτείνεται συνήθως μεταξύ 173 K και 573 K (-100°C και $+300^{\circ}\text{C}$) αλλά είναι εφικτές και μεγαλύτερες περιοχές λειτουργίας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση θερμοκρασιών σε μικρούς χώρους, έχουν καλή επαναληψιμότητα και υψηλή διακριτική ικανότητα σε μικρές περιοχές θερμοκρασιών και έτσι χρησιμοποιούνται σε ιατρικές εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως για τη μέτρηση θερμοκρασίας σε ηλεκτρονικά κυκλώματα και μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν επάνω σε στερεά σώματα και να μετρούν την επιφανειακή τους θερμοκρασία.

Η μεγάλη μεταβολή της αντίστασης με τη θερμοκρασία επιτρέπει τη χρήση θερμίστορ σε βασικά κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών αντί συνδέσεων σε δίκτυο γέφυρας. Για παράδειγμα ένας διαιρέτης με πρότυπη αντίσταση R και ενισχυτή τάσης $\mu\chi$ ένα τελεστικό ενισχυτή 741, μπορεί να είναι επαρκής για να απομονώσει το σήμα. Η τάση εξόδου V_{OUT} δίνεται από τη σχέση:

$$V_{OUT} = \frac{R}{R + R_T} V_{CC}$$

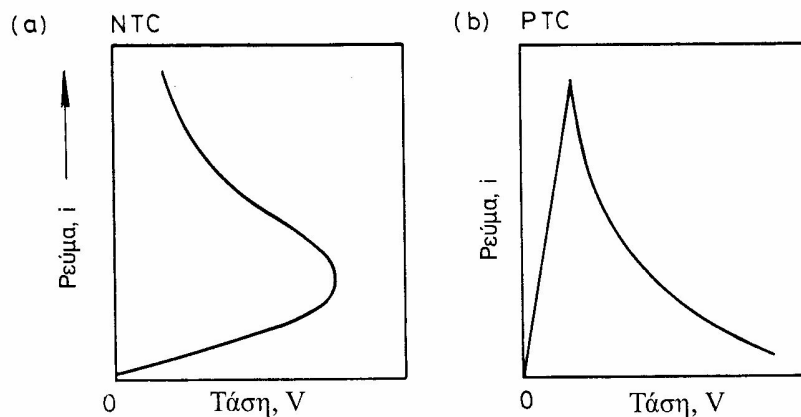
Βλέπουμε σχήμα 5.5, παρακάτω.



Σχήμα 5.5 Βασικό κύκλωμα για ένα θερμίστορ.

Η χρήση των θερμίστορ θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, επειδή το TCR (temperature coefficient of resistance – θερμοκρασιακός συντελεστής αντίστασης) εξαρτάται πάρα πολύ από την κατανάλωση ισχύος. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι

χαρακτηριστικών ρεύματος-τάσης όπως εικονίζεται και στο σχήμα 5.6, παρακάτω. Ένα θερμίστορ *NTC* (Negative temperature coefficient – αρνητικός συντελεστής θερμοκρασίας) έχει αρνητικό θερμοκρασιακό συντελεστή αντίστασης. Έτσι όταν ρέει ένα υψηλό ρεύμα παρουσιάζεται αυτοθέρμανση πράγμα που οδηγεί με τη σειρά του σε υψηλότερο ρεύμα για την ίδια εφαρμοζόμενη τάση. Τα θερμίστορ *PTC* (Positive temperature coefficient – θετικός συντελεστής θερμοκρασίας) έχουν θετικό θερμοκρασιακό συντελεστή αντίστασης. Η υψηλή ροή ρεύματος εδώ προκαλεί επιπλέον αύξηση της αντίστασης, άρα μείωση του ρεύματος που ρέει μέσα από την συσκευή.



Σχήμα 5.6 Χαρακτηριστικά ρεύματος – τάσης των θερμίστορ *NTC* και *PTC*.

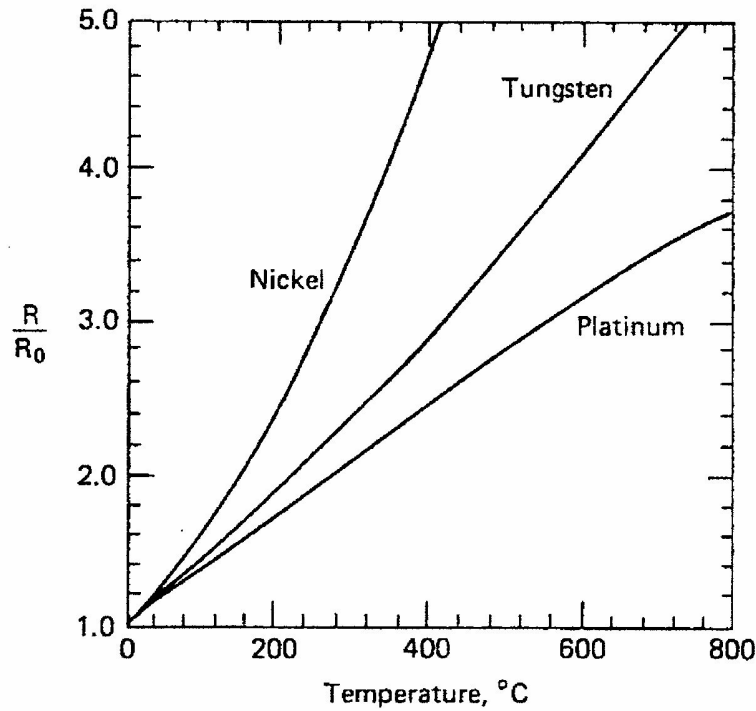
5.2.2 Θερμόμετρα αντιστάσεως (*resistance thermometers - RTD*)

Στα μέταλλα, η αντίσταση τους μεταβάλλεται με την θερμοκρασία και μάλιστα γραμμικά σύμφωνα με τον νόμο $R = R_0(1 + \alpha\theta)$, όπου R_0 η τιμή της αντίστασης στους 0°C , θ η τιμή της θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου και α , ο θερμικός συντελεστής αντίστασης.

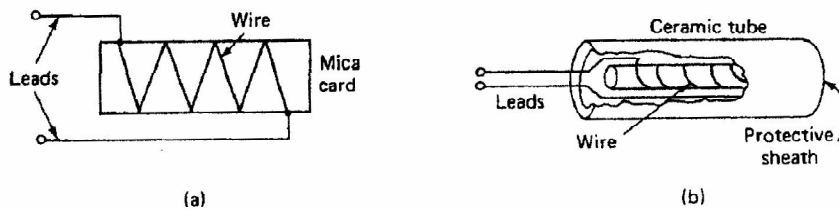
Η τιμή του α , εξαρτάται από την θερμοκρασία στα ποιο πολλά μέταλλα, όπως φαίνεται από το σχήμα 5.7, παρακάτω, όπου οι γραφικές θα έπρεπε να ήταν ευθείες για σταθερό θερμικό συντελεστή αντίστασης.

Επομένως, όλα τα μέταλλα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σαν θερμόμετρα αντίστασης. Από όλα τα μέταλλα, η πλατίνα (Pt) και το Νικέλιο (Ni) παρουσιάζουν γραμμικότητα σε μεγάλη περιοχή θερμοκρασιών με σταθερό συντελεστή (α) ανεξάρτητο της θερμοκρασίας

Η τιμή του α , για την πλατίνα είναι $3.92 \text{ m}\Omega/\Omega^\circ\text{C}$ και $6.8 \text{ m}\Omega/\Omega^\circ\text{C}$ για το νικέλιο. Το είδος του μετάλλου που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε σαν θερμόμετρο αντίστασης για μία εφαρμογή, εξαρτάται από την γραμμική περιοχή του συναρτήσεως της θερμοκρασίας και από την θερμοκρασία τήξεως αυτού. Η πλατίνα $\pi \chi$ χρησιμοποιείται σε περιοχή θερμοκρασίας από -250°C έως 1100°C , το δε νικέλιο από -100°C έως 300°C .



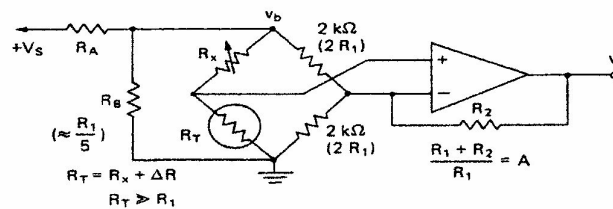
Σχήμα 5.7 Τιμή του α συναρτήσει της θερμοκρασίας σε διάφορα μέταλλα.



Σχήμα 5.8 Τρόπος κατασκευής θερμομέτρων αντίστασης (α) χωρίς προστατευτικό κάλυμμα, (β) με προστατευτικό κεραμικό κάλυμμα.

Στο σχήμα 5.8, παραπάνω, φαίνεται ο τρόπος κατασκευής των θερμομέτρων αντίστασης χωρίς προστατευτικό κάλυμμα καθώς και με προστατευτικό κεραμικό κάλυμμα.

Η χρησιμοποίηση των θερμομέτρων αντίστασης ως αισθητήριο φαίνεται στο σχήμα 5.9, παρακάτω, όπου έχει προσαρμοστεί σε γέφυρα αντίστασης. Με την βοήθεια της ρυθμιστικής αντίστασης R_x ρυθμίζουμε ώστε η τάση V_n να γίνει μηδέν όταν ο αισθητήρας R_T ευρίσκεται στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Εάν ο αισθητήρας ευρίσκεται σε θερμοκρασία διαφορετική από το περιβάλλον κατά ΔT , τότε αποδεικνύεται ότι για μικρό $\alpha \Delta T$: $V_n = E \alpha \Delta T/2$



Σχήμα 5.9 Θερμόμετρο αντίστασης ως αισθητήριο σε γέφυρα αντίστασης.

5.2.3 Θερμοστοιχεία-Θερμοζεύγη (thermo elements-thermocouples)

Ο θερμοηλεκτρισμός είναι ένα φαινόμενο που σχετίζει τη θερμοκρασία μία ουσίας και την ηλεκτρική ενέργεια. Κάτω από κάποιες συνθήκες η ηλεκτρική ενέργεια και η θερμότητα (δηλαδή η θερμική ενέργεια) μπορούν να μετατρέπονται η μία στην άλλη. Εάν μπορεί να μετρηθεί η μεταβολή της ηλεκτρικής ενέργειας που προκαλείται από κάποια μεταβολή της θερμικής ενέργειας, τότε μπορεί να προσδιοριστεί η θερμοκρασία της ουσίας που εξετάζεται.

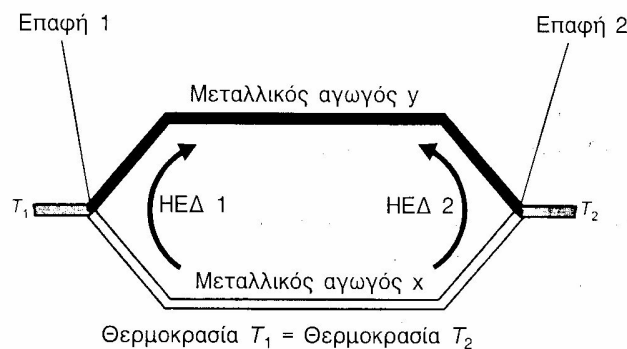
Όταν ένα ζεύγος δύο διαφορετικών μετάλλων σχηματίζουν ένα βρόχο και τα δύο σημεία σύνδεσης ευρίσκονται και διατηρούνται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, θα παραχθεί μια ηλεκτρομαγνητική δύναμη και τότε θα υπάρξει ροή ρεύματος με τιμή ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *θερμοηλεκτρικό φαινόμενο ή φαινόμενο Seebeck*. Στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, εμφανίζεται μία ΗΕΔ σε ένα κύκλωμα, όταν υπάρχουν στο κύκλωμα επαφές διαφορετικών μετάλλων σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Το *θερμοηλεκτρικό φαινόμενο*, μπορεί να συμβεί, για παράδειγμα, στην περίπτωση όπου δύο μέταλλα συνδέονται ως τμήματα ενός κυκλώματος και έχουν επαφές σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Τότε, παρότι η ΗΕΔ που αναπτύσσεται έχει πιθανόν μικρή τιμή, μπορεί να αποτελεί πρόβλημα και να πρέπει το κύκλωμα να σχεδιαστεί εκ νέου.

Εντούτοις, το *θερμοηλεκτρικό φαινόμενο* είναι ιδιαίτερα χρήσιμο επειδή επιτρέπει τη χρήση θερμοηλεκτρισμού για τη μέτρηση της θερμοκρασίας.

Γενικά, όπως βλέπουμε στο σχήμα 5.10, παρακάτω, το μέταλλο X και το μέταλλο Y είναι διαφορετικά και οι επαφές 1 και 2 ευρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, T_1 και T_2 . Λόγω του θερμοηλεκτρικού φαινομένου δημιουργούνται μικρές ΗΕΔ στις δύο επαφές. Το αλγεβρικό άθροισμα των δύο ΗΕΔ δεν είναι μηδέν και έτσι δημιουργείται ένα ρεύμα στο κύκλωμα. Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο είναι τέτοιο, ώστε όταν δύο δεδομένα μέταλλα έχουν επαφές που ευρίσκονται σε δεδομένες διαφορετικές θερμοκρασίες, η αναπτυσσόμενη συνολική ΗΕΔ είναι πάντοτε η ίδια. Επομένως αυτή μπορεί να μετρηθεί και να βαθμονομηθεί σε μονάδες θερμοκρασίας.

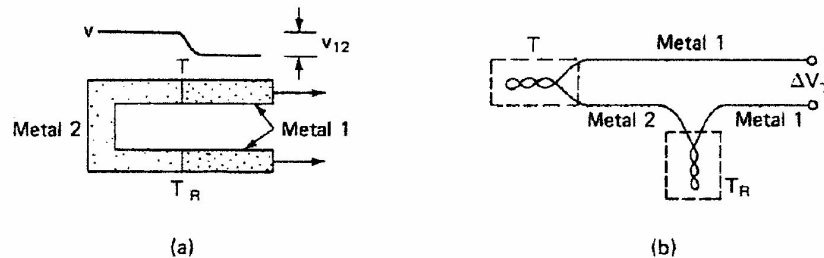
Εάν και οι δύο επαφές του θερμοζεύγους ευρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία, τότε δεν θα δημιουργηθεί συνολική ΗΕΔ. Εάν η θερμοκρασία μίας επαφής αρχίσει να αλλάζει και της άλλης όχι, τότε θα δημιουργηθεί μία ΗΕΔ η οποία θα μεγαλώνει όσο αυξάνει η διαφορά θερμοκρασίας. Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας του θερμοζεύγους.



Σχήμα 5.10 Θερμοζεύγος και η θεωρία του.

Συνοψίζοντας, τα θερμοστοιχεία-Θερμοζεύγη, αποτελούνται από την συνένωση δυο αγωγών διαφορετικών μετάλλων όπως δείχνει και πιο κάτω το σχήμα 5.11. Όταν η κοινή επαφή των δύο μετάλλων βρεθεί σε υψηλότερη θερμοκρασία τότε μία μικρή θερμοηλεκτρική τάση εμφανίζεται μεταξύ των δύο μετάλλων, το δε φαινόμενο ονομάζεται θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Εάν τα δύο μέταλλα δημιουργούν σχηματισμό δύο ενώσεων όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω τότε η θερμοηλεκτρική τάση ΔV είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta T = T - T_r$ σύμφωνα με τον νόμο $\Delta V = C(T - T_r)$, όπου C μια σταθερά που εξαρτάται από την φύση των δύο μετάλλων και ελάχιστα από την θερμοκρασία. Η μικρή μεταβολή του C από την θερμοκρασία σημαίνει ότι η θερμοηλεκτρική τάση ΔV είναι προσεγγιστικά ανάλογος της διαφοράς θερμοκρασίας $(T - T_r)$. Η θερμοκρασία T_r λέγεται θερμοκρασία αναφοράς και για τον λόγο αυτό στα εργαστήρια το τμήμα αυτό του θερμοζεύγους τοποθετείται σε πάγο με νερό που η θερμοκρασία του είναι $0^\circ C$ οπότε η θερμοηλεκτρική τάση ΔV είναι ανάλογη της απολύτου θερμοκρασίας T . Στο σχηματισμό θερμοζεύγους μιας επαφής του

σχήματος παρακάτω η θερμοκρασία αναφοράς T_r είναι προφανώς η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Σχήμα 5.11 Θερμοζεύγη (α) από τη συνένωση δύο αγωγών διαφορετικών μετάλλων , (β) τα δύο μέταλλα δημιουργώντας σχηματισμό δύο ενώσεων.

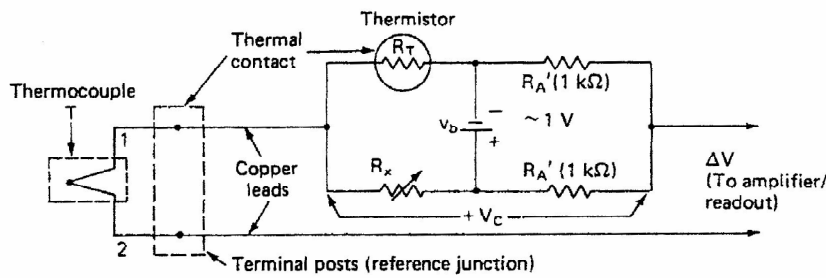
Στον πίνακα (1) παρακάτω φαίνονται οι τιμές της θερμοηλεκτρικής τάσης σε mV για τρία είδη θερμοζευγών, Χαλκού-Κωνσταντάνης (Cu-Con) , Πλατίνας με κράμα Πλατίνας+10%Ροδίου (Pt-Pt+10%Rh), και Χρωμίου-Αλουμινίου (Cr-Al), όταν η θερμοκρασία αναφοράς είναι $0^{\circ}C$.

T σε Κελσίου	Cu-Con (mV)	Pt-Pt-10Rh (mV)	Cr-Al (mV)
-60	-2.14	-2.20
-40	-1.46	-1.50
-20	-0.75	-0.77
0	0	0	0
20	0.78	0.113	0.80
40	1.61	0.235	1.61
60	2.47	0.364	2.43
80	3.36	0.500	3.26
100	4.28	0.643	4.10
120	5.23	0.792	4.92
140	6.20	0.946	5.73

Πίνακας 1) Τιμές της θερμοηλεκτρικής τάσεως (σε mV) για τρία είδη θερμοζεύγων

Τα ηλεκτρονικά όργανα αξιώσεων που μετρούν θερμοκρασία από αισθητήρια θερμοζεύγη, πρέπει με κάποιο τρόπο να λαμβάνουν υπ' όψιν την θερμοκρασία αναφοράς του περιβάλλοντος και να διορθώνουν τις τιμές του θερμοστοιχείου προσθέτοντας τον όρο CT_r ώστε οι εκάστοτε που εμφανίζονται ψηφιακά στο όργανο μέτρησης να αντιστοιχούν στις απόλυτες τιμές (T_r=0). Η αρχή της τεχνικής αυτής φαίνεται στο σχήμα 5.12, παρακάτω, όπου ένα θερμίστορ, που εκτίθεται στο περιβάλλον, ευρίσκεται σε

κύκλωμα γέφυρας ώστε στις εκάστοτε μετρήσεις να προστίθεται ο παράγων CTr. Η τεχνική αυτή ονομάζεται “Ψυχρά ένωσης” (Cold junction).



Σχήμα 5.12 Τεχνική “Ψυχρά ένωσης”.

Στο πίνακα 2 φαίνονται τα κυριότερα Θερμοζεύγη με τις ονομασίες τους, όπως έχουν τυποποιηθεί, τις ευαισθησίες σε $mV/°C$ (σταθερά C), και τις περιοχές θερμοκρασίας που μετρούν, ως και τις αποκλίσεις από την γραμμικότητα σε % πλήρη απόκλιση.

Θερμοζεύγος Τύπος	Περιγραφή	C Σε $mV/°C$	Περιοχή σε $°C$	Σφάλμα % F.S
TYPE - E	Chromel/ Constantan	0.044	0/ 800	0.5
TYPE - J	Iron/ Constantan	0.033	-250/ 700	0.75
TYPE - K	Chromel/ Alumel	0.020	-250/ 1200	0.75
TYPE- R&S	Pt/ Pt-Rh	0.010	0/ 1400	0.25
TYPE - T	Copper/ Constantan	0.040	-250/ 350	1.0
TYPE - C	Tungsten/ Rhenium	0.012	0/ 2000	0.5

Πίνακας 2) Τα κυριότερα θερμοζεύγη με τα χαρακτηριστικά τους

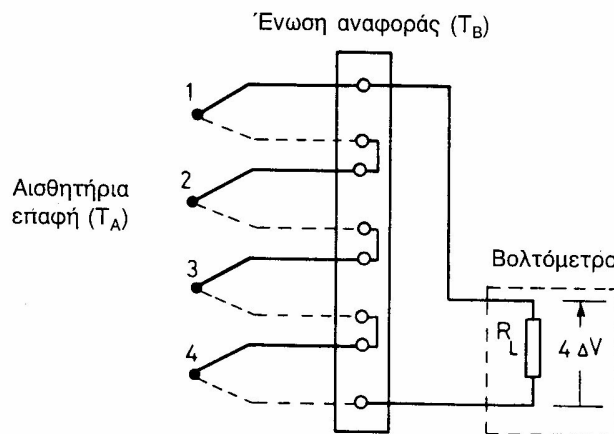
Τυπικά μέταλλα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των αγωγών των θερμοζεύγων είναι το ρόδιο, κράματα νικελίου και χρωμίου, κράματα νικελίου και χαλκού και κράματα αλουμινίου και νικελίου. Τα ανόμοια μέταλλα που συνδυάζονται με αυτά περιλαμβάνουν το λευκόχρυσο, το χαλκό και το σίδηρο. Η προστατευτική

επικάλυψη που τίθεται στο μετρητή μπορεί να κατασκευαστεί από διάφορα υλικά, για να παρέχει αντοχή σε διαβρωτικά περιβάλλοντα.

Τα θερμοζεύγη χρησιμοποιούνται ευρέως για μετρήσεις θερμοκρασίας σε βιομηχανικό επίπεδο όπως για παράδειγμα σε φούρνους σε υγρά μέταλλα κλπ χρησιμοποιούνται επίσης σε ιατρικές εφαρμογές, όπως είναι η καταγραφή της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια εγχειρήσεων.

Ένας λόγος που τα καθιστά δημοφιλή είναι ότι μπορούν να μετρούν τις διαστάσεις πολύ μικρών αντικειμένων, όπως είναι τα ημιαγωγικά μέρη των ηλεκτρικών κυκλωμάτων

Τα θερμοζεύγη χρησιμοποιούνται συχνά σε ομάδες, αυτό γίνεται για να αυξάνει την ευαισθησία και οι ομάδες αυτές ονομάζονται θερμοστοιχεία. Στο σχήμα 5.13, παρακάτω, παρουσιάζεται μια διάταξη θερμικής στήλης τεσσάρων ομοίων θερμοζεύγων που συνδέονται σε σειρά. Η έξοδος από αυτό είναι τετραπλάσια από εκείνης ενός απλού θερμοζεύγους. Αυτό συμβαίνει όταν απαιτείται έξοδος υψηλής τάσης.



Σχήμα 5.13 Κύκλωμα θερμικής στήλης αποτελούμενο από τέσσερα όμοια θερμοζεύγη.

5.2.4 Θερμόμετρα διαστολής (expansion thermometers)

Τα θερμόμετρα διαστολής υγρού στηρίζονται στην αρχή ότι ο όγκος κάποιων υγρών μεταβάλλεται σημαντικά με τη θερμοκρασία, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μεταβολές όγκου που παρατηρούνται στα στερεά σώματα. Το ποσό κατά το οποίο διαστέλλεται ένα υγρό μπορεί να βαθμονομηθεί σε μονάδες θερμοκρασίας.

Τα θερμόμετρα υγρού (liquid in glass, thermometers), όπως και τα μεταλλικά θερμόμετρα (liquid in metal, thermometers) επιδεικνύουν χαρακτηριστικά την παραπάνω αρχή.

1)Θερμόμετρα υγρού

Στο σχήμα 5.14, παρακάτω, εικονίζεται ένα τυπικό θερμόμετρο υγρού το οποίο αποτελείται από ένα γυάλινο σωλήνα, σφραγισμένο και στα δύο άκρα του με μία λεπτή στήλη στο κέντρο του, η οποία περιέχει το υγρό. Στη βάση της στήλης η στήλη σχηματίζει μία κοιλότητα, που αποτελεί μία μικρή δεξαμενή και ονομάζεται μπίλια. Η στήλη εμφανίζει μία κοιλότητα και στο επάνω τμήμα της για να επιτρέψει τη διαστολή του υγρού. Όταν το θερμόμετρο θερμαίνεται, το υγρό διαστέλλεται και αυξάνει το ύψος του μέσα στη γυάλινη στήλη. Επάνω από το υγρό ο χώρος είναι κενός, ή υπάρχει κάποιο αέριο που συμπιέζεται όταν το υγρό διαστέλλεται. Στη μία άκρη του στελέχους στήριξης υπάρχει μία κλίμακα, η οποία είναι βαθμονομημένη κατάλληλα, ώστε το ύψος του υγρού στο σωλήνα να είναι ανάλογο της θερμοκρασίας του θερμομέτρου.



Σχήμα 5.14 Θερμόμετρο υγρού.

Τα υγρά που χρησιμοποιούνται συνήθως σε τέτοια θερμόμετρα είναι ο υδράργυρος, η αλκοόλη και κάποια συνθετικά έλαια. Υπάρχουν και άλλα υγρά για μετρήσεις σε ακραίες καταστάσεις ή για τις περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή ασφάλεια σε περίπτωση

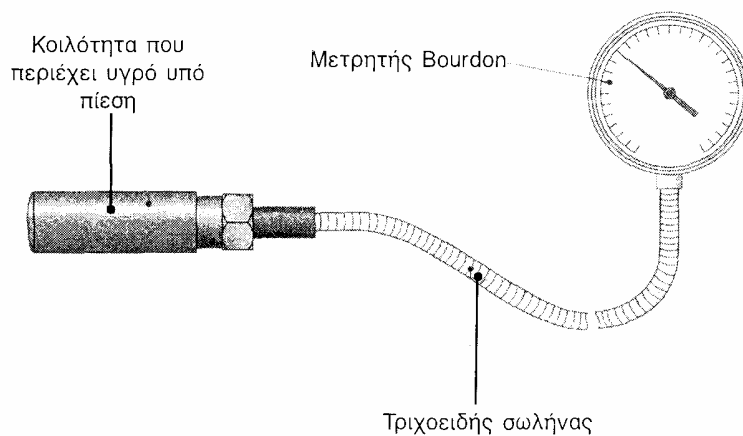
θραύσης (ο υδράργυρος είναι τοξικός). Το υγρό που χρησιμοποιείται σε αυτά τα θερμόμετρα εξαρτάται από την περιοχή θερμοκρασιών που θέλουμε να μετρήσουμε. Ένα πλεονέκτημα της χρήσης θερμόμετρου υγρού είναι ότι έχουν ένα σχεδόν σταθερό θερμοκρασιακό συντελεστή αντίστασης (TCR: temperature coefficient of resistance) δηλαδή μια έξοδο, η οποία είναι ευθέως ανάλογη της θερμοκρασίας σε μια ευρεία περιοχή θερμοκρασιών.

Τα θερμόμετρα υγρού χρησιμοποιούνται σε ιατρικές και κτηνιατρικές εφαρμογές για τη μέτρηση της θερμοκρασίας ανθρώπων και ζώων. Μία άλλη κοινή χρήση τους είναι η παρατήρηση της θερμοκρασίας του αέρα, για οικιακούς ή μετεωρολογικούς σκοπούς.

Τα θερμόμετρα υγρού είναι φθηνά, εύκολα στη χρήση και αξιόπιστα. Εντούτοις είναι εύθραυστα και απαιτούν προσεκτικούς χειρισμούς καθώς και περιβάλλοντα απαλλαγμένα από δονήσεις και πιθανές κρούσεις. Η απόκρισή τους όταν η θερμοκρασία μεταβάλλεται ταχέως είναι πτωχή και οι ενδείξεις τους μπορούν να διαβάζονται μόνο τοπικά. Η ακρίβεια μπορεί να είναι καλή, αλλά εξαρτάται ισχυρά από την ικανότητα του αναγνώστη. Δεν είναι κατάλληλα για μετρήσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας σωμάτων, και επομένως οι βιομηχανικές τους εφαρμογές είναι περιορισμένες.

2)Μεταλλικά θερμόμετρα

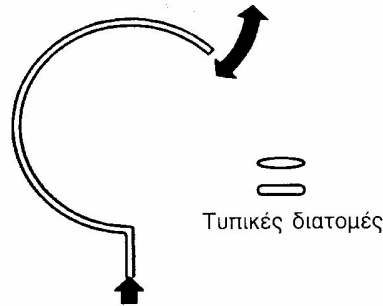
Στο σχήμα 5.15, παρακάτω, εικονίζεται ένα τυπικό μεταλλικό θερμόμετρο, το οποίο αποτελείται από μία μεταλλική κοιλότητα που περιέχει ένα υγρό, συνήθως υδράργυρο ή αλκοόλη, το οποίο συχνά ευρίσκεται υπό πίεση.



Σχήμα 5.15 Μεταλλικό θερμόμετρο.

Η μεταλλική κοιλότητα συνδέεται με έναν εύκαμπτο τριχοειδή σωλήνα. Σε αντίθεση με τα θερμόμετρα υγρού, η θερμοκρασία δε γνωστοποιείται κοιτάζοντας το υγρό μέσα στον τριχοειδή σωλήνα, αλλά αυτός συνδέεται με ένα σωλήνα Bourdon(οι σωλήνες Bourdon χρησιμοποιούνται κυρίως για μέτρηση της πίεσης, αποτελούνται από ένα σωλήνα με ελλειπτική ή οβάλ διατομή που είναι σφραγισμένος στο ένα του άκρο) ο οποίος είναι

βαθμονομημένος σε μονάδες θερμοκρασίας. Παρακάτω στο σχήμα 5.16 , βλέπουμε μια συνηθισμένη μορφή του σωλήνα Bourdon, χωρίς να σημαίνει ότι είναι και η μοναδική.



Σχήμα 5.16 Σωλήνας Bourdon.

Όταν διαστέλλεται το υγρό λόγω μίας αύξησης στη θερμοκρασία, ο σωλήνας Bourdon ευθυγραμμίζεται ελαφρά. Η κίνηση αυτή ενισχύεται μηχανικά με τη βοήθεια γραναζιών και μοχλών και αναγκάζει μία ενδεικτική βελόνα να κινηθεί, οπότε παρέχεται μία άμεση ανάγνωση της θερμοκρασίας. Τα κύρια πλεονεκτήματα των μεταλλικών θερμομέτρων σε σχέση με τα θερμομέτρα υγρού είναι ότι είναι πιο ευκίνητα και οι ενδείξεις τους μπορούν να διαβαστούν από απόσταση (έως και 35 μέτρα).

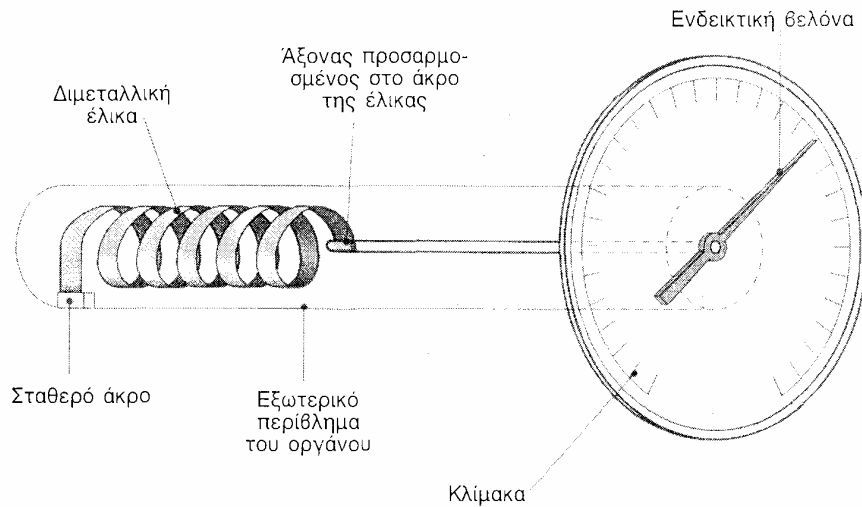
Τυπικές εφαρμογές των μεταλλικών θερμομέτρων είναι σε χημικά εργοστάσια, μηχανές οχημάτων και για τη μέτρηση της θερμοκρασίας κάποιων υγρών μετάλλων.

5.2.5 Διαστολή μετάλλων και διμεταλλικό έλασμα

1) Διμεταλλικό θερμοόμετρο

Στο σχήμα 5.17, παρακάτω, φαίνεται ένα τυπικό διμεταλλικό θερμοόμετρο. Για να υπάρχει σχετικά αυξημένη ευαισθησία, ένα διμεταλλικό έλασμα κάμπτεται σε ελικοειδή μορφή σε αυτό. Η μεταβολή της θερμοκρασίας προκαλεί συστροφή του ενός άκρου του ελάσματος ως προς το άλλο άκρο. Στο ελεύθερο άκρο του ελάσματος συνδέεται ένας άξονας και έτσι η περιστροφή του άκρου μεταφέρεται σε μία ενδεικτική βελόνα, η οποία μπορεί να κινείται επάνω σε μία βαθμονομημένη κλίμακα.

Το διμεταλλικό θερμοόμετρο χρησιμοποιείται κυρίως, για την μέτρηση της θερμοκρασίας σε φούρνους, και σε σωληνώσεις ζεστού νερού. Τα διμεταλλικά θερμοόμετρα αποκρίνονται αργά στις μεταβολές θερμοκρασίας και δεν προσφέρονται για χρήση από απόσταση.

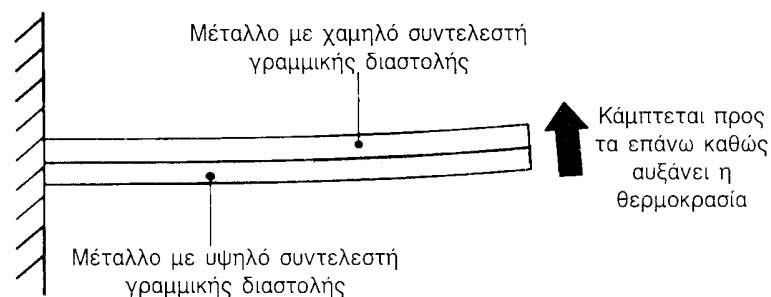


Σχήμα 5.17 Διμεταλλικό θερμόμετρο.

2) Διμεταλλικό έλασμα

Το διμεταλλικό έλασμα είναι μία κατασκευή που αποτελείται από δύο ανόμοια μεταλλικά ελάσματα του ίδιου μήκους, στερεωμένα το ένα με το άλλο με τη βοήθεια κάποιας συγκόλλησης ή δεσίματος, τα οποία έχουν διαφορετικούς συντελεστές γραμμικής διαστολής.

Στο σχήμα 5.18 παρακάτω, εικονίζεται ένα διμεταλλικό έλασμα



Σχήμα 5.18 Διμεταλλικό έλασμα.

Το ένα άκρο του ελάσματος είναι στερεωμένο και ακίνητο, και όταν υπάρχει αύξηση της θερμοκρασίας το ευθύγραμμο αρχικά έλασμα κάμπτεται και λαμβάνει καμπύλο σχήμα. Τα δύο μέταλλα που σχηματίζουν το διμεταλλικό έλασμα είναι συνήθως από ένα κράμα σιδήρου-νικελίου και ένα μέταλλο με υψηλό συντελεστή γραμμικής διαστολής όπως είναι ο ορείχαλκος. Ο ορείχαλκος έχει μεγαλύτερο συντελεστή γραμμικής διαστολής και

έτσι διαστέλλεται περισσότερο από το κράμα σιδήρου-νικελίου όταν συμβαίνει η ίδια μεταβολή στη θερμοκρασία. Άρα το ορειχάλκινο έλασμα έχει τώρα μεγαλύτερο μήκος από το άλλο έλασμα και έτσι ο ορειχάλκος ευρίσκεται στο εξωτερικό μέρος της καμπύλης.

Τα διμεταλλικά ελάσματα χρησιμοποιούνται σε θερμοστάτες και διμεταλλικά θερμόμετρα. Επίσης έχουν εφαρμογές σε ηλεκτρομηχανικά τμήματα, όπως τα φώτα στάσης των αυτοκινήτων που ανάβουν και σβήνουν περιοδικά και τα φώτα των διαφημιστικών πινακίδων.

5.2.6 Μέθοδοι μεταβολής ηλεκτρικών χαρακτηριστικών σε ημιαγωγούς ή κρυστάλλους

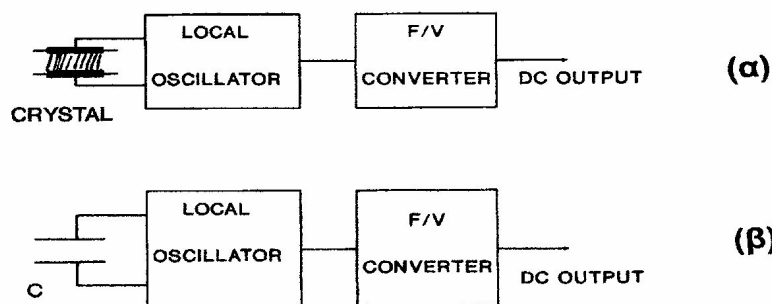
Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μέθοδοι μεταβολής των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ημιαγωγών και κρυστάλλων(σχήμα 5.19), όπως:

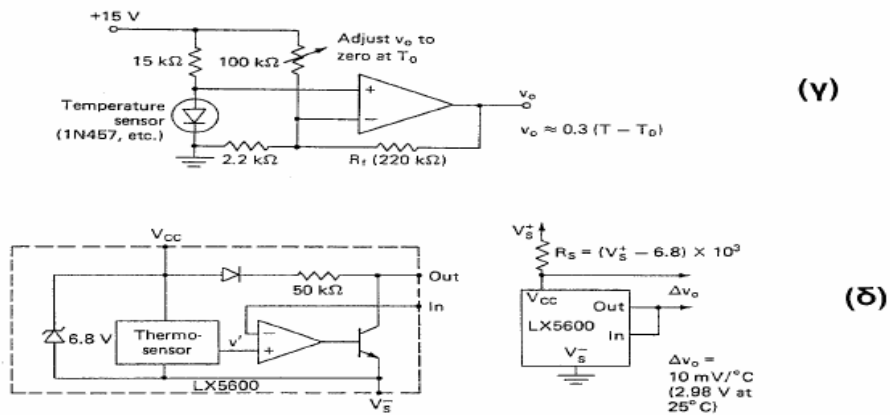
α)Μεταβολή της συχνότητας συντονισμού των πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων με την θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο σχήμα (5.19α).

β)Μεταβολή της χωρητικότητας πυκνωτού που είναι τμήμα κυκλώματος τοπικού ταλαντωτή με αποτέλεσμα να αλλάζει η συχνότητα συντονισμού αυτού , όπως φαίνεται στο σχήμα(5.19β).

γ) Μεταβολή της αγωγιμότητας διόδου (κατά την ορθή φορά) μετά της θερμοκρασίας. Το σχήμα (5.19γ) δείχνει μια ηλεκτρονική εφαρμογή χρησιμοποιώντας τελεστικό ενισχυτή.

δ)Στην αγορά ηλεκτρονικών εξαρτημάτων υπάρχουν ολοκληρωμένα κυκλώματα σε μικρές διαστάσεις όπως τα τρανζίστορς. Τυπικό παράδειγμα είναι ένα άλλο ολοκληρωμένο, το LX5600, όπου η μεταβολή της τάσεως εξόδου είναι ανάλογη της μεταβολής της θερμοκρασίας. Στο σχήμα (5.19δ) φαίνεται η εσωτερική δομή του ολοκληρωμένου κυκλώματος και η εφαρμογή του για μεταβολή εξόδου $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$.



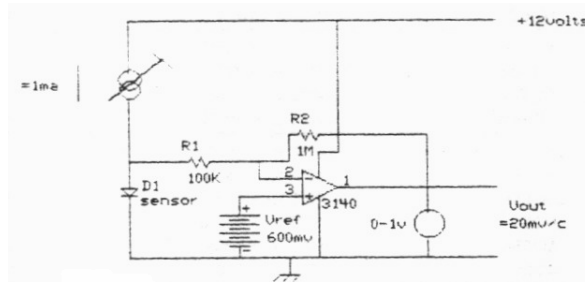


Σχήμα 5.19 Μέθοδοι μεταβολής των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών σε ημιαγωγούς και κρυστάλλους.

5.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ-ΙΔΕΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ—ICs ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα ενότητα θα εξετάσουμε τις πρακτικές εφαρμογές των μοντέρνων αισθητηρίων που έρχονται στην μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος.

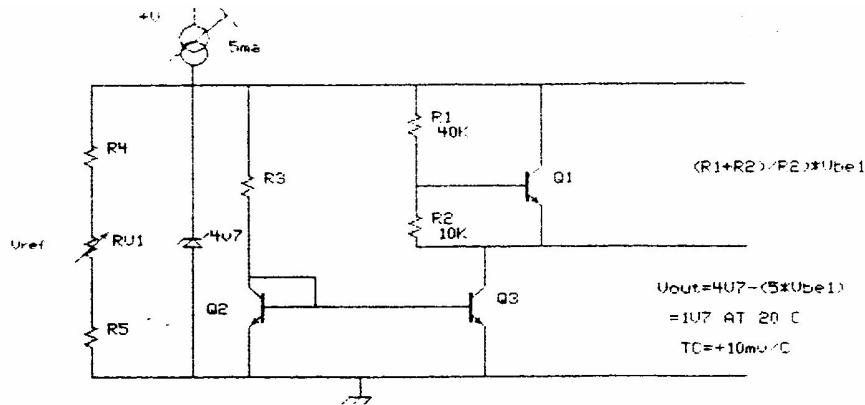
Μέχρι πριν μερικά χρόνια τα ηλεκτρικά-ηλεκτρονικά αισθητήρια υπήρχαν σε κάποιους βασικούς τύπους, που κανένας από αυτούς δεν ήταν ένας ακριβής μετατροπέας θερμοκρασίας σε τάση. Από αυτούς τους τύπους το θερμίστορ δεν είναι καθόλου γραμμικό και έχει μεγάλες ανοχές, ενώ τα θερμοζεύγη έχουν πολύ χαμηλή έξοδο. Κανένα από αυτά τα εξαρτήματα δεν μας δίνει μια καλιμπραρισμένη γνωστή σκάλα θερμοκρασίας. Από την άλλη, η κοινή δίοδος πυριτίου παράγει μια τάση περίπου $610mV$ και έχει θερμικό συντελεστή ίσο με $-2mV/^{\circ}C$ και ρεύμα $1mA$. Επομένως μπορούμε να τη χρησιμοποιήσουμε σαν αισθητήρα θερμοκρασίας. Τα κύρια πλεονεκτήματα της διόδου είναι ότι μας δίνει σταθερά και επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα, λόγω της μικρής της φυσικής μάζας και του γρήγορου θερμικού χρόνου αντίδρασης. Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι η τάση είναι αρκετά μεγάλη συγκρινόμενη με τις θερμικές αλλαγές της τάσης. Επίσης η τάση αλλάζει και με το ρεύμα. Το σχήμα 5.20, που ακολουθεί, μας βοηθά να δείξουμε αυτά τα προβλήματα.



Σχήμα 5.20 Βασικό ηλεκτρονικό θερμόμετρο.

Το σχήμα αυτό δείχνει ένα βασικό ηλεκτρονικό θερμόμετρο που χρησιμοποιεί μια κοινή διόδο και δουλεύει στην περιοχή $-10^{\circ}C$ έως $-40^{\circ}C$. Η διόδος οδηγείται από ένα σταθερό ρεύμα. Η έξοδος της D_1 εισέρχεται στην είσοδο ενός ενισχυτή που έχει απολαβή 10 και ο οποίος έχει μια τάση offset V_{ref} , που ρυθμίζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ακυρώνει το ρεύμα της διόδου στους $-10^{\circ}C$. Έτσι ο τελεστικός ενισχυτής δίνει μία έξοδο που είναι 0Volts στους $-10^{\circ}C$ και έχει ένα θερμικό συντελεστή $+20^{\circ}C$ και αυξάνεται στο +1 Volt στους $+40^{\circ}C$. Όταν το κύκλωμα καλιμπραριστεί υπάρχουν δύο πηγές λάθους. Το ένα είναι η μεταβολή του ρεύματος της διόδου D_1 και το δεύτερο είναι η μεταβολή της V_{ref} που έχει τιμή 600mV. Εδώ 1% μεταβολή (6mV), είναι ίση με $3^{\circ}C$ μεταβολή θερμοκρασίας στην D_1 . Έτσι έχουμε ένα σοβαρό πρόβλημα ακρίβειας.

Στο σχήμα 5.21, εικονίζεται ένα άλλο κύκλωμα που καλείται ενισχυμένη διόδος. Εδώ το Q_1 είναι το αισθητήριο. Η διόδος Zener παράγει μία τάση 4,7 Volts και τα transistors $Q_2 - Q_3$ δημιουργούν μία πηγή ρεύματος. Ένα ρεύμα στο συλλέκτη του Q_2 προκαλεί ακριβώς το ίδιο ρεύμα στο συλλέκτη του Q_3 . Το ρεύμα ρέει διαμέσου της R_1, R_2 και του transistor Q_1 , που παράγει μια τάση εξόδου ίση με την πτώση τάσης της διόδου βάσης-εκπομπού πολλαπλασιαζόμενη με $(R_1 + R_2) / R_2$, που στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει τιμή ίση με 5. Η ‘ενισχυμένη’ διόδος συμπεριφέρεται σαν να έχουμε συνδέσει 5 διόδους στην σειρά. Η πτώση τάσης είναι ίση με 3 Volt και ο θερμικός της συντελεστής ισούται με $-10mV/^{\circ}C$ στους $20^{\circ}C$. Έτσι η έξοδος του κυκλώματος ισούται με 4,7 Volt, πλην την παραπάνω τιμή, που στους $20^{\circ}C$ είναι περίπου 1,7V και έχει θερμικό συντελεστή ίσο με $+10mV/^{\circ}C$. Παρατηρούμε ότι έχουμε ένα πολύ σταθερό V_{ref} offset, που μπορούμε να το ρυθμίσουμε με το RV_1 . Βλέποντας επίσης τα σχήματα, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το βασικό μειονέκτημα των κυκλωμάτων αυτών είναι το αρχικό καλιμπράρισμα και η κλιμάκωση.



Σχήμα 5.21 Κύκλωμα ενισχυμένης διόδου.

Τα τελευταία χρόνια όμως η τεχνολογία έχει προχωρήσει πολύ, και μπορούμε να έχουμε ένα αισθητήριο με το κύκλωμα επεξεργασίας μέσα σε ένα ολοκληρωμένο. Έτσι έχουμε πολύ υψηλές αποδόσεις και δεν χρειάζονται καλιμπράρισμα. Τέτοια ολοκληρωμένα φυσικά είναι πολύ εύκολο να βρούμε στο εμπόριο και η τιμή τους είναι αρκετά χαμηλή.

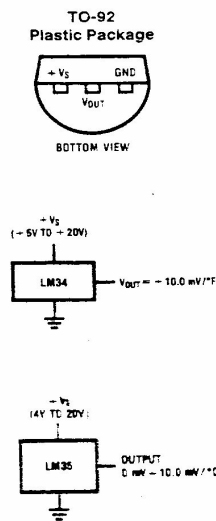
5.3.1 Πρακτικά αισθητήρια θερμοκρασίας

Τα ICs αισθητήρια θερμοκρασίας είναι εξαρτήματα, που μετατρέπουν τη θερμοκρασία σε τάση. Στον πίνακα(3), παρακάτω, παραθέτουμε ενδεικτικά, κάποιους τύπους ολοκληρωμένων και παραλλαγές τους. Εδώ, το LM 34CZ και το LM 35CZ είναι εξαρτήματα που οι έξοδοί τους είναι ανάλογες της θερμοκρασίας. Το LM 3352 είναι ένα απλό ρυθμιζόμενο ολοκληρωμένο που η έξοδος του είναι ανάλογη της θερμοκρασίας σε βαθμούς $^{\circ}C$. Το LM 3911N περιέχει μία τάση αναφοράς, ένα αισθητήρα θερμοκρασίας και ένα τελεστικό ενισχυτή. Το chip αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ένδειξη θερμοκρασίας ή σαν ηλεκτρονικός θερμοστάτης.

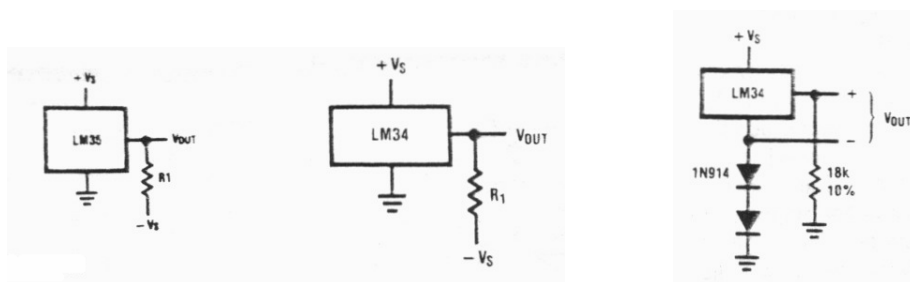
Part	Temp. Range	*Accuracy	Output Scale
LM34A	-50°F to +300°F	± 2.0°F	10 mV/°F
LM34	-50°F to +300°F	± 3.0°F	10 mV/°F
LM34CA	-40°F to +230°F	± 2.0°F	10 mV/°F
LM34C	-40°F to +230°F	± 3.0°F	10 mV/°F
LM34D	+32°F to +212°F	± 4.0°F	10 mV/°F
LM35A	-55°C to +150°C	± 1.0°C	10 mV/°C
LM35	-55°C to +150°C	± 1.5°C	10 mV/°C
LM35CA	-40°C to +110°C	± 1.0°C	10 mV/°C
LM35C	-40°C to +110°C	± 1.5°C	10 mV/°C
LM35D	0°C to +100°C	± 2.0°C	10 mV/°C
LM134-3	-55°C to +125°C	± 3.0°C	ISET ∝ °k
LM134-6	-55°C to +125°C	± 6.0°C	ISET ∝ °k
LM234-3	-25°C to +100°C	± 3.0°C	ISET ∝ °k
LM234-6	-25°C to +100°C	± 6.0°C	ISET ∝ °k
LM135A	-55°C to +150°C	± 1.3°C	10 mV/°k
LM135	-55°C to +150°C	± 2.0°C	10 mV/°k
LM235A	-40°C to +125°C	± 1.3°C	10 mV/°k
LM235	-40°C to +125°C	± 2.0°C	10 mV/°k
LM335A	-40°C to +100°C	± 2.0°C	10 mV/°k
LM335	-40°C to +100°C	± 4.0°C	10 mV/°k
LM3911	-25°C to +85°C	± 10.0°C	10 mV/°k (or °F)

Πίνακας 3) Κάποιοι τύποι ολοκληρωμένων και οι παραλλαγές τους

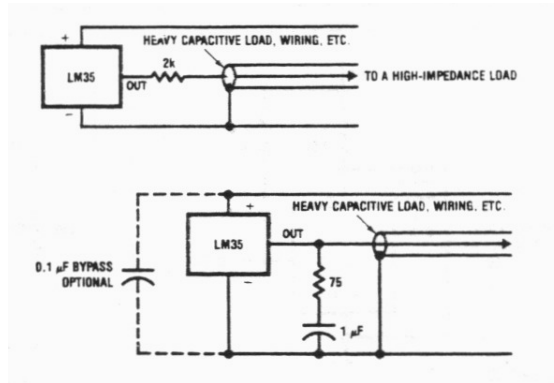
Τα LM 34CZ και LM 35CZ έρχονται σε περίβλημα TO-92 με τρεις ακροδέκτες και καταναλώνουν ελάχιστο ρεύμα. Το σχήμα 5.22, δείχνει το περίβλημά τους καθώς και ορισμένα κυκλώματα εφαρμογής. Τα κυκλώματα αυτά δίνουν ελάχιστη θερμοκρασία $+5^{\circ}F$ ή $+2^{\circ}C$. Τα ολοκληρωμένα μπορούν να μας δώσουν έξοδο για όλη την κλίμακα μετρήσεων που ξεκινάει από $-40^{\circ}F$ ή $-40^{\circ}C$ χρησιμοποιώντας δύο τροφοδοσίες (σχήματα 5.23). Ένα μικρό μειονέκτημα θα λέγαμε των παραπάνω ολοκληρωμένων είναι ότι τείνουν στην αστάθεια όταν οι έξοδοι τους οδηγούν χωρητικά φορτία μεγαλύτερα από μερικά pF . Αυτό διορθώνεται με το κύκλωμα του σχήματος 5.24.



Σχήμα 5.22 Περίβλημα των LM 34CZ και LM 35CZ, και ορισμένα κυκλώματα εφαρμογής

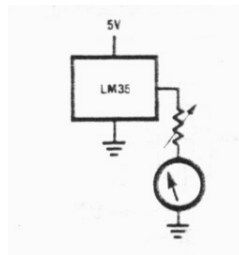


Σχήμα 5.23 Τα ολοκληρωμένα με δύο τροφοδοσίες.



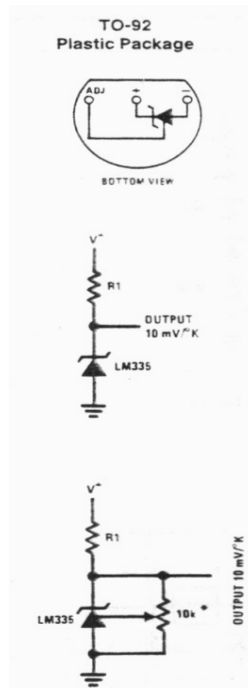
Σχήμα 5.24 Κύκλωμα που αντιμετωπίζει την αστάθεια, όταν τα παραπάνω ολοκληρωμένα οδηγούν χωρητικά φορτία μεγαλύτερα από μερικά pf

Τα δύο ολοκληρωμένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν απ' ευθείας σαν αναλογικά θερμόμετρα αν συνδέσουμε τις εξόδους με ένα όργανο π.χ. των $100\mu A$ όπως εικονίζεται στο σχήμα 5.25. Επίσης να σημειώσουμε ότι μπορούν να οδηγήσουν ένα ψηφιακό display με ευαισθησία $200mV$, αν συνδέσουμε στην έξοδο έναν εξασθενητή 10:1.

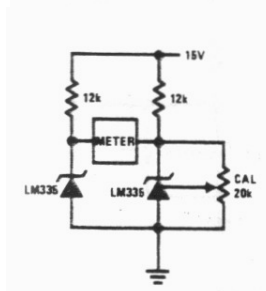
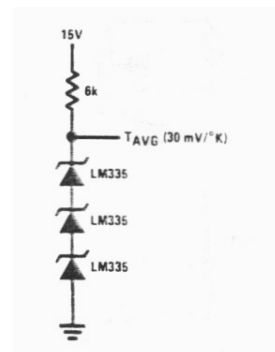
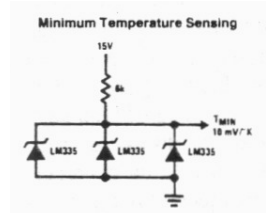
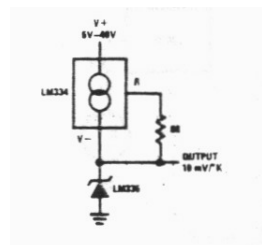


Σχήμα 5.25 Τα ολοκληρωμένα σαν αναλογικά θερμόμετρα με σύνδεση στην έξοδο οργάνου των $100\mu A$.

Το LM 335Z συμπεριφέρεται σαν μια μεταβαλλόμενη θερμοκρασιακά ευαίσθητη zener που μας δίνει μια έξοδο $+10mV/^\circ C$, και 2,982 Volts στους $25^\circ C$. Στο σχήμα 5.26, βλέπουμε το περίβλημα καθώς και δύο βασικά κυκλώματα εφαρμογής. Εδώ η R_1 θέτει το ρεύμα στο $1mA$. Στο σχήμα 5.27α), επίσης, φαίνεται πως μπορούμε να αλλάξουμε το κύκλωμα όταν χρησιμοποιούμε πλατιά τάση τροφοδοσίας. Το σχήμα 5.27β), μας δείχνει 3 LM 335Z συνδεδεμένα παράλληλα. Η έξοδος του κυκλώματος μας δίνει τη μικρότερη θερμοκρασία. Στο σχήμα 5.27γ), εικονίζεται ένα κύκλωμα από το οποίο παίρνουμε το μέσο όρο των τριών αισθητήρων. Και το σχήμα 5.27δ), μας δείχνει τη χρήση δύο LM 335Z για διαφορική ένδειξη της θερμοκρασίας.

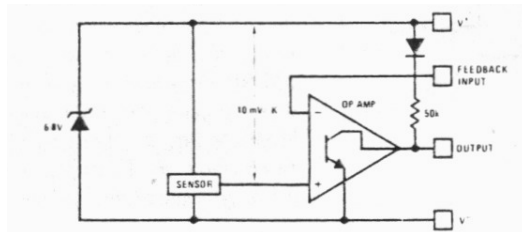


Σχήμα 5.26 Περίβλημα του LM335Z και δύο βασικά κυκλώματα εφαρμογής.

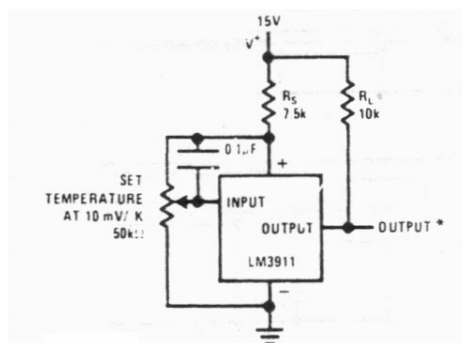


Σχήμα 5.27 (α) Αλλαγή κυκλώματος όταν χρησιμοποιείται πλατιά τάση τροφοδοσίας, (β) Τρία LM335Z συνδεδεμένα παράλληλα παίρνοντας στην έξοδο την μικρότερη θερμοκρασία, (γ) Τρία LM335Z συνδεδεμένα σε σειρά παίρνοντας τον μέσο όρο των τριών αισθητηρίων, (δ) Η χρήση δύο LM335Z για διαφορική ένδειξη θερμοκρασίας.

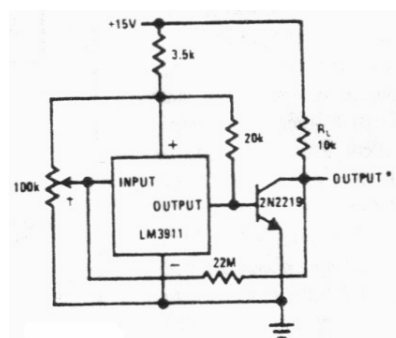
Το σχήμα 5.28, πιο κάτω, μας δείχνει ένα μπλοκ διάγραμμα του LM3911 ολοκληρωμένου που είναι ένας ελεγκτής θερμοκρασίας. Το σχήμα 5.29, μας δείχνει μια εφαρμογή του LM3911N σαν ελεγκτής θερμοκρασίας. Η R1 θέτει το ρεύμα στο 1mA και ο εσωτερικός τελεστικός χρησιμοποιείται σαν συγκριτής τάσης με ρύθμιση από το τρίμμερ των 50KΩ. Η έξοδος του κυκλώματος βρίσκεται σε υψηλή στάθμη τάσης όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει την προκαθορισμένη που έχουμε ορίσει με το τρίμμερ των 50KΩ η έξοδος πηγαίνει στα 0Volts. Το αντίστροφο μπορεί να γίνει με το κύκλωμα του σχήματος 5.30. Μπορούμε να συνδέσουμε πολλά LM3911 μαζί (σχήμα 5.31). Τελειώνοντας τα σχήματα 5.32, δείχνουν τρόπους χρήσης του LM3911N σαν θερμόμετρο Kelvin.



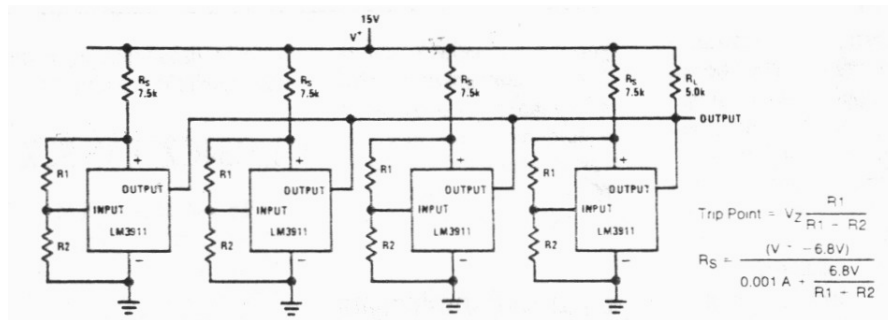
Σχήμα 5.28 Μπλοκ διάγραμμα του LM3911 σαν ελεγκτής θερμοκρασίας.



Σχήμα 5.29 Μια εφαρμογή του LM3911N σαν ελεγκτής θερμοκρασίας.



Σχήμα 5.30 Αντίστροφη διαδικασία.



Σχήμα 5.31 Σύνδεση πολλών LM3911 μαζί.



Σχήμα 5.32 Τρόποι χρήσης του LM3911N σαν θερμομέτρο Kelvin.

5.4 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Όταν σε ένα υλικό ή σώμα η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από κάποια τιμή, τότε βλέπουμε το υλικό να λάμπει. Η λάμψη αυτή είναι θερμική ενέργεια η οποία αποβάλλεται από το υλικό με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Όταν το υλικό γίνει πιο έντονα χρωματισμένο ή αλλάξει χρώμα συμπεραίνουμε ότι περισσότερη ενέργεια αποβάλλεται από το υλικό, δηλαδή είναι πιο θερμό.

Όλα τα υλικά εκπέμπουν θερμότητα με μορφή ακτινοβολίας. Συχνά όμως οι ηλεκτρομαγνητικές ακτίνες είναι πέρα από την εμβέλεια του ανθρώπινου οφθαλμού και δε μπορούμε πάντοτε να δούμε την ακτινοβολία που εκπέμπεται από κάποιο σώμα. Πχ υπέρυθη περιοχή. Εμείς βέβαια έχουμε επινοήσει συσκευές που τις ανιχνεύουν σε κάθε περίπτωση

Ένα σώμα που απορροφά τελείως οποιαδήποτε ακτινοβολία ή φως που προσπίπτει σε αυτό ονομάζεται μέλαν σώμα (ιδανικό σώμα). Μέλαν σώματα στην πράξη δεν υπάρχουν. Το ποσό της ενέργειας που αποβάλλεται από την επιφάνεια ενός σώματος ονομάζεται συντελεστής εκπομπής. Ο συντελεστής εκπομπής είναι ίσος με το πηλίκο της ενέργειας που απορροφάται από μία δεδομένη επιφάνεια προς την ακτινοβολία που απορροφάται από ένα μέλαν σώμα που έχει την ίδια θερμοκρασία επιφάνειας και βρίσκεται υπό τις ίδιες συνθήκες. Ένα γνωρίζουμε το συντελεστή εκπομπής ενός υλικού, τότε μετρώντας

την ακτινοβολία που εκπέμπεται από αυτό μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θερμοκρασία του. Η ακτινοβολία μπορεί να προσδιοριστεί εξετάζοντας την ένταση ή το χρώμα του υλικού. Οι συσκευές που μετρούν την θερμοκρασία με αυτόν τον τρόπο ονομάζονται *πυρόμετρα ακτινοβολίας*. Τα πυρόμετρα ακτινοβολίας μετρούν υψηλές θερμοκρασίες χωρίς να είναι αναγκαίο να είναι σε επαφή με το σώμα τη θερμοκρασία του οποίου μετρούν.

1) Οπτικό πυρόμετρο νήματος

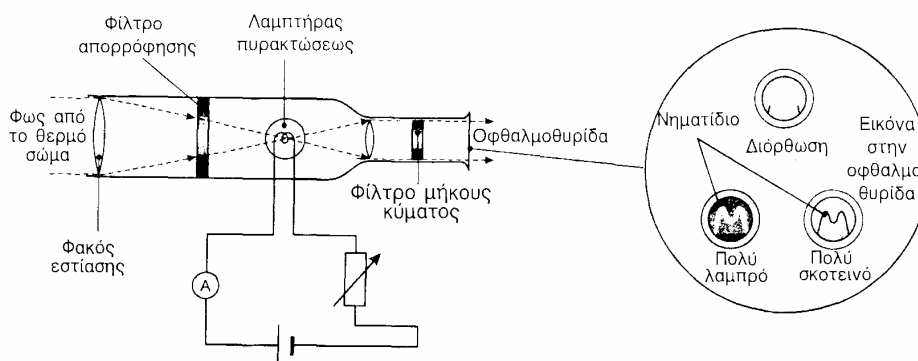
Το *οπτικό πυρόμετρο νήματος* (*disappearing filament optical pyrometer*) χρησιμοποιεί την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που μπορεί να δει το ανθρώπινο μάτι για να μετρά τη θερμοκρασία.

Το οπτικό πυρόμετρο νήματος συγκρίνει την ορατή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που αποβάλλεται από ένα θερμό σώμα με το φως που εκπέμπεται από ένα λαμπτήρα πυρακτώσεως. Ο λαμπτήρας είναι βαθμονομημένος, έτσι ώστε η λαμπρότητα του νηματιδίου του να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες.

Στο σχήμα 5.33, παρακάτω βλέπουμε ένα οπτικό πυρόμετρο νήματος το οποίο στοχεύει προς το θερμό σώμα. Κοιτάζοντας μέσα από την οφθαλμοθυρίδα, ο χρήστης παρατηρεί ένα μικρό τμήμα του θερμού σώματος, και το νηματίδιο του λαμπτήρα να υπερτίθεται σε αυτό. Έτσι μπορεί να συγκρίνει τη λαμπρότητα του σώματος με τη λαμπρότητα του νηματιδίου, αφού τα βλέπει ταυτόχρονα.

Ρυθμίζοντας το ρεύμα που διαρρέει το λαμπτήρα, ρυθμίζουμε τη λαμπρότητα του νηματιδίου του. Ο χρήστης μεταβάλλει το ρεύμα έως ότου το νηματίδιο πάψει να φαίνεται. Αύτη η “εξαφάνιση” του νηματιδίου σημαίνει ότι το σώμα και το νηματίδιο ευρίσκονται στην ίδια περίπου θερμοκρασία. Εάν το νηματίδιο φαίνεται να είναι σκοτεινό, σημαίνει ότι είναι λιγότερο θερμό από το σώμα που μετρείται. Εάν φαίνεται να είναι πιο φωτεινό, είναι πιο θερμό από αυτό.

Τα οπτικά πυρόμετρα νήματος χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές, όπως είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας λιωμένων μετάλλων, φούρνων και διαδικασιών θερμικής επεξεργασίας.



Σχήμα 5.33 Οπτικό πυρόμετρο νήματος.

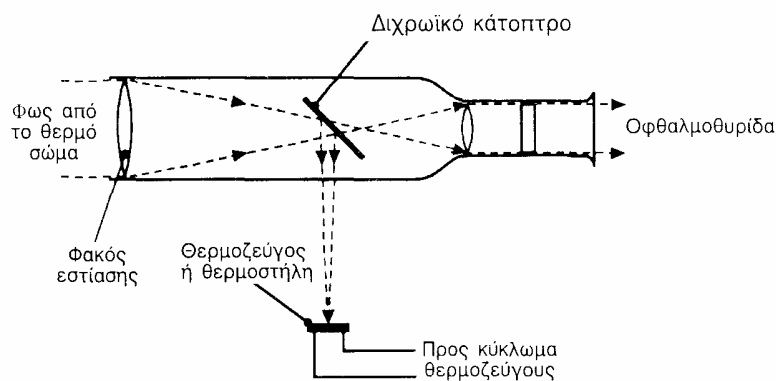
2) Πυρόμετρο υπέρυθρου

Τα πυρόμετρα υπέρυθρου (*infra-red pyrometers*) επιτρέπουν τη μέτρηση θερμοκρασίας από απόσταση και βασίζονται λιγότερο στην κρίση του χρήστη, από ότι τα οπτικά πυρόμετρα νήματος. Χρησιμοποιούν την υπέρυθη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα σώμα (όταν οι ηλεκτρομαγνητικές ακτίνες ανήκουν στην υπέρυθη περιοχή) και μετρούν την έντασή της με τη βοήθεια μίας συσκευής όπως το θερμοζεύγος.

Τα υπέρυθρα πυρόμετρα μπορούν να μετρήσουν μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών από ότι τα οπτικά πυρόμετρα νήματος. Αυτό συμβαίνει επειδή μπορούν να ανιχνεύουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που δεν είναι ορατή από τον ανθρώπινο οφθαλμό. Το κύκλωμα του θερμοζεύγους επιτρέπει την ανάγνωση από απόσταση.

Τα πυρόμετρα υπέρυθρου χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές, όπως είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας λιωμένων μετάλλων, φούρνων και διαδικασιών θερμικής επεξεργασίας, αλλά και στις περιπτώσεις όπου απαιτούνται είτε μετρήσεις από απόσταση, είτε μικρότερο ή μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος μετρήσεων.

Στο σχήμα 5.34, παρακάτω, φαίνεται ένα τυπικό πυρόμετρο υπέρυθρου. Ο χρήστης εστιάζει το τηλεσκοπικό τμήμα επάνω στο θερμό σώμα. Ένα διχρωμικό κάτοπτρο ανακλά ένα συγκεκριμένο τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως π.χ. το υπέρυθρο τμήμα, αλλά επιτρέπει τα υπόλοιπα να διέρχονται και έτσι μπορεί ο χρήστης να εκτελέσει εστίαση. Η υπέρυθη ακτινοβολία που έχει ανακλαστεί από το κάτοπτρο προσπίπτει στο θερμοζεύγος. Η έξοδος αυτών είναι μία τάση, η οποία βαθμονομείται σε μονάδες θερμοκρασίας.



Σχήμα 5.34 Οπτικό πυρόμετρο υπέρυθρου.

5.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η θερμοκρασία είναι μια θεμελιώδης παράμετρος σε πολλές διεργασίες και μπορεί να χρειαστεί να μετρηθεί ή ακόμα να ελεγχθεί με κάποιο τρόπο. Η θερμοκρασία όχι μόνο μετριέται στο εργοστάσιο, στις οικιακές συσκευές, στην ιατρική, στο περιβάλλον, αλλά επίσης μπορούμε να την αξιοποιήσουμε σαν μια δευτερεύουσα αισθητήρια μεταβλητή σε έναν μη θερμικό αισθητήρα, όπως στον αισθητήρα αερίου ή σε έναν μηχανικό αισθητήρα ροής ανέμου. Οι αισθητήρες θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται επίσης για να αντισταθμιστούν τα σφάλματα που προκαλούνται από τη θερμοκρασιακή μεταβολή των εξαρτημάτων ή των οργάνων ή αποτελούν μέρος ενός κυκλώματος ελέγχου.

Οι θερμικοί αισθητήρες αποτελούν μια σημαντική τάξη αισθητηρίων εξαιτίας των πολλών εφαρμογών. Η πλειονότητα των συσκευών αυτών χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και όχι της ροής θερμότητας ή της θερμοχωρητικότητας ενός αντικειμένου. Η επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα εξαρτάται από το κόστος, το μέγεθος, την ευαισθησία, το εύρος θερμοκρασίας κλπ. Κατά συνέπεια μόνο μετά από λεπτομερή εξέταση του προβλήματος μέτρησης ή ελέγχου μπορεί να επιλεγεί ο κατάλληλος αισθητήρας.

Κεφάλαιο 6^ο

ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ-ΘΕΣΗΣ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Κίνηση, ονομάζεται γενικά, η αλλαγή της φυσικής θέσης ενός αντικειμένου. Μετακίνηση, ονομάζεται η απόσταση από κάποιο σημείο αναφοράς προς κάποια δεδομένη κατεύθυνση. Εάν αυτή μετριέται σε μια ευθεία γραμμή, ονομάζεται γραμμική, και αν μετριέται με τη βοήθεια μιας γωνίας περιστροφής ονομάζεται γωνιακή. Οι *αισθητήρες μετακίνησης*, (μετατόπισης), και προσέγγισης, ανιχνεύουν μεταβολές στην θέση ενός αντικειμένου και προσδιορίζουν αυτή.

Η μέτρηση της μετακίνησης είναι πολύ σημαντική διότι πάρα πολλά συστήματα έχουν είσοδο ή έξοδο που έχει τη μορφή μετακίνησης. Εντούτοις, η μετακίνηση που μετρούν αυτά τα συστήματα μπορεί να σχετίζεται και έτσι να εκφραστεί με κάποια άλλη παράμετρο. π.χ. ένα ελατήριο που μετράει κάποια δύναμη, μετράει στην ουσία την μετακίνηση από την θέση ισορροπίας.

Πολλές συσκευές γραμμικής και γωνιακής μετακίνησης είναι επίσης ικανές να μετρούν την μετακίνηση ως προς τον χρόνο, και άρα να μετρούν ουσιαστικά την ταχύτητα και την επιτάχυνση. Άλλες πάλι μπορούν να την μετρήσουν απευθείας (επιταχυνσιόμετρα). (Πιο αναλυτικά για αυτές θα αναφερθούμε στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο).

Η κίνηση αυτή καθ' αυτή όπως καταλαβαίνουμε, περιλαμβάνει πολλές μεταβλητές. π.χ. ως θεωρήσουμε ένα αυτοκίνητο το οποίο κινείται σε μια ευθεία γραμμή από ένα σημείο X σε ένα σημείο Y και μετακινείται, μετατοπίζεται, κατά μ μέτρα. Σε κάθε σημείο κάθε χρονική στιγμή, θα κινείται με γραμμική ταχύτητα από το σημείο X προς το σημείο Y έχοντας μια επιτάχυνση ή επιβράδυνση a . Κοιτώντας τους τροχούς του αυτοκινήτου μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι το όχημα δεν εκτελεί μόνο ευθύγραμμη κίνηση, αλλά ταυτόχρονα και μία κυκλική (περιστροφική). Εάν περιστρέφεται κατά γωνία θ ακτινίων θα περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω/sec , και αν π.χ. επιταχύνεται το όχημα, καταλαβαίνουμε ότι η γωνιακή αυτή ταχύτητα θα αλλάζει με το ρυθμό της επιτάχυνσης ανά sec.

6.2 ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ-ΘΕΣΗΣ

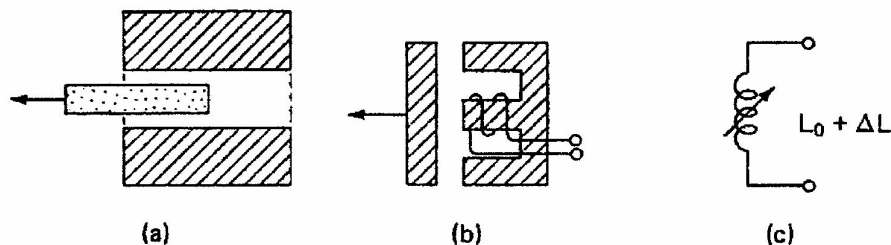
6.2.1 Αισθητήρες μετακίνησης, βασιζόμενοι στην μεταβολή της αυτεπαγωγής (inductive transducers).

Ο νόμος της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής δηλώνει ότι όταν ένας αγωγός μετακινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο τότε αναπτύσσεται μία ΗΕΔ στα άκρα του, ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής.

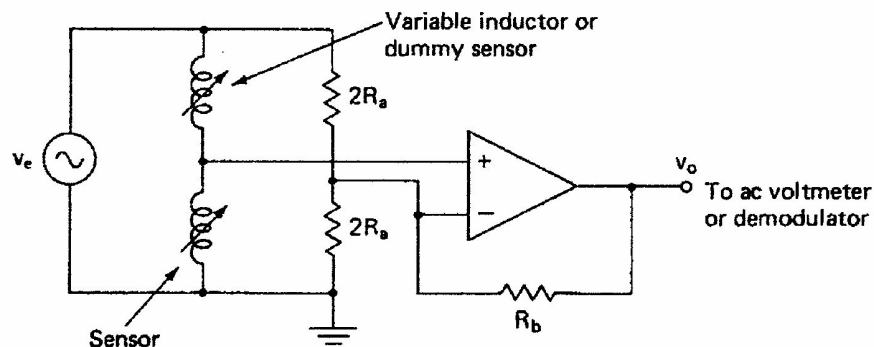
Όταν σε ένα κύκλωμα μεταβάλλεται η ένταση του ρεύματος, μεταβάλλεται και η μαγνητική ροή, που δημιουργεί το ρεύμα αυτό. Η μεταβαλλόμενη ροή διαπερνά τις σπείρες του κυκλώματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία, στο ίδιο το κύκλωμα, ηλεκτρεγερτικής δύναμης εξ επαγωγής σύμφωνα με τον νόμο της επαγωγής. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *αυτεπαγωγή*. Η ΗΕΔ επίσης ονομάζεται ηλεκτρεγερτική δύναμη εξ αυτεπαγωγής, επειδή οφείλεται στη μεταβολή του ίδιου του μαγνητικού πεδίου του κυκλώματος

Οι αισθητήρες της κατηγορίας αυτής βασίζονται στην μεταβολή της αυτεπαγωγής πηνίου όταν ο πυρήνας αυτού είναι συνδεδεμένος με το στερεό που υφίσταται την μετακίνηση. Η αρχή λειτουργίας φαίνεται στα σχήματα 6.1a,b) παρακάτω, για δύο διαφορετικούς τύπους πηνίων, το δε ηλεκτρικό ισοδύναμό του φαίνεται στο σχήμα 6.1c). Η πάγια μέθοδος μετρήσεως μεταβολών αυτεπαγωγής, είναι η διάταξη γέφυρας του σχήματος 6.2, όπου η τάση εξόδου V_o από τον ενισχυτή είναι ανάλογη της μετακίνησης του πυρήνα

$$V_o = kx$$

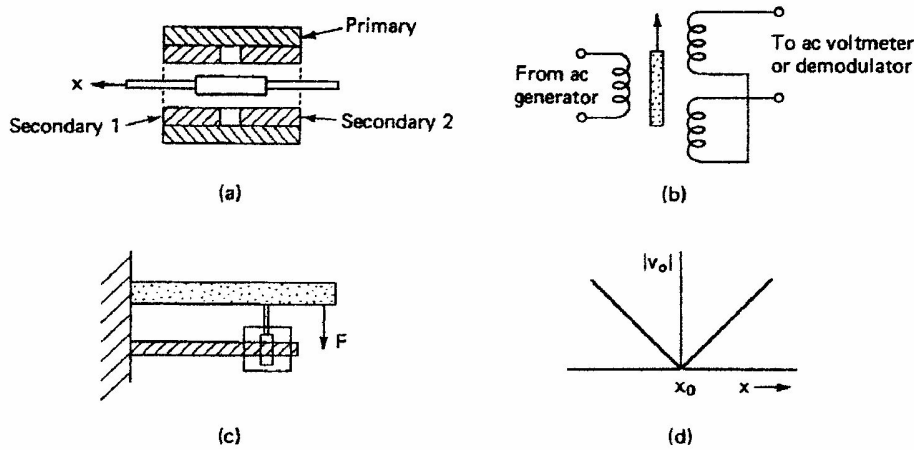


Σχήμα 6.1 Η αρχή λειτουργίας για δύο διαφορετικούς τύπους πηνίων(σχήματα (a) και (b)), και (c) το ηλεκτρικό ισοδύναμο.

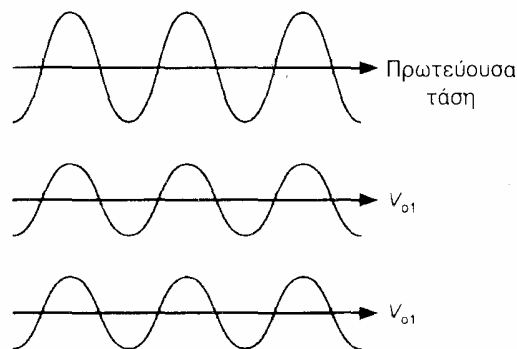


Σχήμα 6.2 Διάταξη γέφυρας για μέτρηση μεταβολών της αυτεπαγωγής.

Μια παραλλαγή της μεθόδου αυτής είναι η LVDT μέθοδος (*Linear variable differential transformers- γραμμικοί μεταβλητοί διαφορικοί μετασχηματιστές*) κατά την οποία έχουμε συνδυασμό ενός πηνίου πρωτεύοντος και δύο δευτερευόντων , όπως φαίνεται και στα σχήματα 6.3, παρακάτω. Ο συνδυασμός των πηνίων αυτών, θυμίζει μετασχηματιστή με πυρήνα που είναι συνδεδεμένος με το σώμα που υφίσταται την μετακίνηση.



Σχήμα 6.3 (a) και (b) Μέθοδος LVDT με συνδυασμό ενός πηνίου πρωτεύοντος και δύο δευτερευόντων, (c) και (d) Η έξοδος στο δευτερεύον ανάλογη της μετακίνησης x του πυρήνα, ($V_o = kx$ -δίνει την μετακίνηση του πυρήνα).



Το πρωτεύων του “μετασχηματιστή” τροφοδοτείται με σταθερή εναλλασσόμενη τάση υψηλής σχετικό συχνότητας (10 KHz). Τα πηνία του δευτερεύοντος είναι ίσων περιελίξεων και συνδεδεμένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε η έξοδος να είναι μηδέν όταν ο πυρήνας βρίσκεται στο κέντρο του μετασχηματιστή. Επομένως η σύνδεση των πηνίων δευτερεύοντος δίνουν διαφορά φάσεως 180 μοιρών. Με την μετακίνηση κατά x του

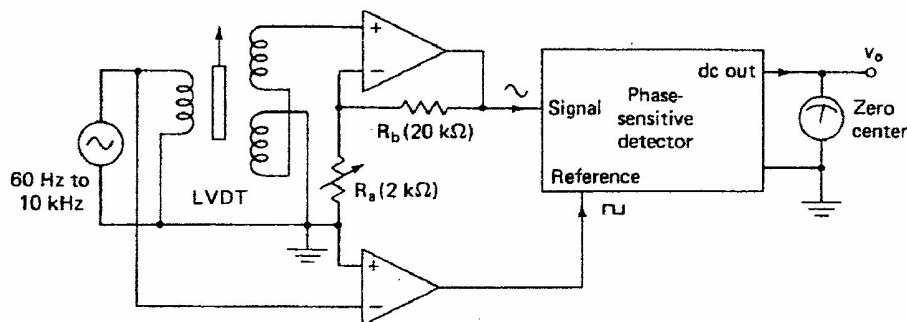
πυρήνα η έξοδος στο δευτερεύον θα είναι ανάλογη της μετακίνησης x ($V_o = kx$ -δίνει την μετακίνηση του πυρήνα), όπως δείχνει και το σχήμα παραπάνω.

Ο γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής (LVDT) ονομάστηκε έτσι με βάση την αρχή λειτουργίας του, η οποία κατά κάποιο τρόπο μπορεί να γίνει κατανοητή εξετάζοντας την ονομασία του λέξη προς λέξη.

Καταρχήν είναι ένας μετασχηματιστής και υπακούει στις αρχές της Η/Μ επαγωγής. Έχει ένα πρωτεύον πηνίο και δύο δευτερεύοντα πηνία, τα οποία συνδέονται και παρέχουν τη διαφορά των αντίστοιχων τάσεων που έχουν στις εξόδους τους. Γι αυτό ονομάζεται διαφορικός. Επειδή η μαγνητική σύζευξη ανάμεσα στο πρωτεύον και τα δύο δευτερεύοντα μπορεί να μεταβληθεί και έτσι να επηρεάσει το μέγεθος της επαγόμενης ΗΕΔ είναι μεταβλητός. Τέλος, η σχεδίαση του όλου συστήματος είναι τέτοια ώστε η μεταβολή της σύζευξης του πρωτεύοντος με τα δευτερεύοντα πηνία να γίνεται γραμμικά.

Ο αισθητήρας που βασίζεται στην μέθοδο LVDT αποτελεί το κύριο μέρος των αισθητήρων μετακίνησης και αισθητηρίων πίεσης (διότι πίεση σημαίνει μετακίνηση μιας μεμβράνης), που υπάρχουν στην διεθνή αγορά.

Στο σχήμα 6.4, παρακάτω, φαίνεται μία εφαρμογή του αισθητήρα LVDT με ηλεκτρονικό κύκλωμα ανιχνευτή φάσης (Phase detector), όπου η έξοδος είναι συνεχής (DC) και ανάλογος της μετακίνησης.



LVDΤ with phase-sensitive-detector readout.

Σχήμα 6.4 Μία εφαρμογή του αισθητήρα LVDT με ηλεκτρονικό κύκλωμα ανιχνευτή φάσης.

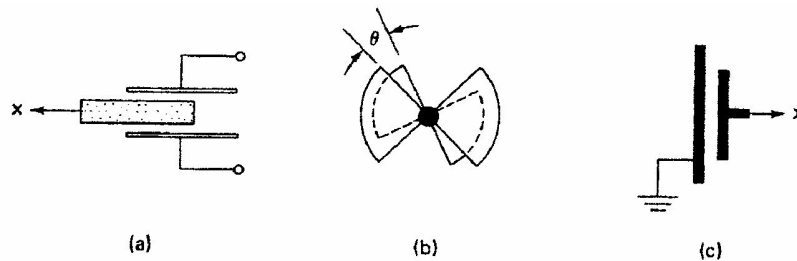
Τα LVDT είναι εξαιρετικά ευαίσθητα και παρέχουν διακριτική ικανότητα έως 0,05 mm. Διαθέτουν εύρος λειτουργίας από περίπου +/- 0,1 mm έως +/- 300 mm. Η ακρίβεια είναι το +/- 0,5% της ένδειξης της κλίμακας. Τα LVDT έχουν μεγάλη χρήση σε πολλές εφαρμογές όπως ρομποτική, ψηφιακά συστήματα τοποθέτησης κ.λ.π. και χρησιμοποιούνται συχνά σε συστήματα μέτρησης δύναμης, επιτάχυνσης και κυρίως πίεσης.

6.2.2 Αισθητήρες μετακίνησης βασιζόμενοι στην μεταβολή της χωρητικότητας πυκνωτή (capacitive transducers).

Χωρητικότητα (μετριέται σε Farad , (F)), ονομάζεται η ιδιότητα που επιτρέπει σε ένα σύστημα να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια. Ο *πυκνωτής* είναι ένα ηλεκτρικό στοιχείο που εμφανίζει χωρητικότητα. Ο πυκνωτής είναι μια διάταξη από δύο αγωγούς τοποθετημένους σε μικρή απόσταση ο ένας από τον άλλο μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται αέρας ή άλλο μονωτικό υλικό (διηλεκτρικό) . Οι αγωγοί, που μπορεί να έχουν οποιαδήποτε μορφή, ονομάζονται *οπλισμοί* του πυκνωτή.

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί την ηλεκτρική ιδιότητα της χωρητικότητας.

Οι αισθητήρες της κατηγορίας αυτής βασίζονται στην μεταβολή της χωρητικότητας του πυκνωτή. Ως γνωστόν η χωρητικότητα του πυκνωτή ισούται με $C = \epsilon \epsilon_0 A/d$, όπου ϵ , η διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού του πυκνωτή, ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού, A το εμβαδόν των οπλισμών του πυκνωτή και d , η απόσταση αυτών. Επομένως, μεταβολή της χωρητικότητας του πυκνωτή θα έχουμε : α) Εάν μετακινήσουμε το διηλεκτρικό του πυκνωτή (σχήμα 6.5 α), β) Εάν μεταβάλλουμε το ενεργό εμβαδόν A των οπλισμών του πυκνωτή (σχήμα 6.5 β), και γ) Εάν μετακινήσουμε τον ένα οπλισμό (σχήμα 6.5 c). Ακόμη, σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, εάν ο πυκνωτής είναι τμήμα κυκλώματος τοπικού ταλαντωτή, τότε η συχνότητα του ταλαντωτή θα μεταβληθεί με την μεταβολή του πυκνωτή, και επομένως και με την μετακίνηση.



Σχήμα 6.5 Μεταβολή της χωρητικότητας με (a) μετακίνηση του διηλεκτρικού του πυκνωτή, με (b) μεταβολή του ενεργού εμβαδού A των οπλισμών του πυκνωτή, και με (c) μετακίνηση του ενός οπλισμού.

Το σήμα εξόδου των πυκνωτών χρειάζεται σημαντική ρύθμιση. Επίσης είναι απαραίτητο για να μην επηρεάζεται η χωρητικότητα και να εισάγονται σφάλματα να αντισταθμίζεται το κύκλωμα με τη βοήθεια πρόσθετου κυκλώματος για τις θερμοκρασιακές αλλαγές.

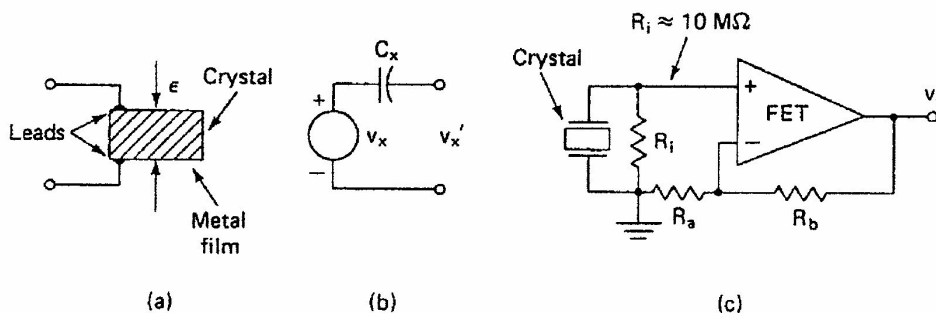
Οι αισθητήρες της κατηγορίας αυτής, είναι κατάλληλοι για την μέτρηση μόνο μικρών μετατοπίσεων. Είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι, έχουν άπειρη διακριτική ικανότητα αλλά μπορεί να είναι ακριβοί και απαιτούν προσεκτική τοπική ρύθμιση. Χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές όπως, η μέτρηση μηχανικής φθοράς η ανίχνευση της επιφανειακής μορφολογίας υλικών κ λ π .

6.2.3 Αισθητήρες μετακίνησης βασιζόμενοι στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (piezoelectric effect)

Οι αισθητήρες της κατηγορίας αυτής βασίζονται στο *πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο*.

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο όπως έχουμε ξαναπεί, προκαλεί την εμφάνιση ηλεκτρικών φορτίων αντίθετου προσήμου στις απέναντι πλευρές ενός κρυστάλλου όταν αυτός πιέζεται, δηλαδή υφίσταται μηχανική τάση. Το φορτίο είναι ανάλογο της μηχανικής τάσης.

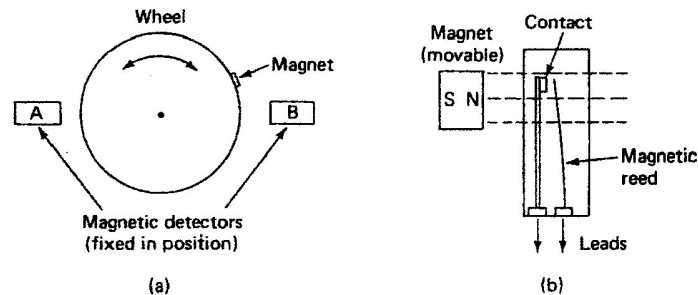
Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.6a) παρακάτω, εάν εφαρμόσουμε δυνάμεις στα άκρα του κρυστάλλου, τότε εμφανίζεται ηλεκτρική τάση στα άκρα αυτού . Το σχήμα 6.6b) δείχνει το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του. Η τάση αυτή μπορεί να ενισχυθεί με την βοήθεια τελεστικού ενισχυτή FET όπως φαίνεται στο σχήμα 6.6c) . Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε μικρές μετακινήσεις αν το ένα άκρο του κρυστάλλου είναι σταθερό και επομένως σαν αισθητήρας παραμόρφωσης.



Σχήμα 6.6 Αισθητήρες μετακίνησης βασιζόμενοι στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, (a) εφαρμογή δύναμης στον κρύσταλλο και εμφάνιση τάσεως στα άκρα του, (b) ηλεκτρικό ισοδύναμο, (c) ενίσχυση της τάσεως αυτής με την βοήθεια τελεστικού ενισχυτή FET.

6.2.4 Αισθητήρες μετακίνησης βασιζόμενοι στην μεταβολή του μαγνητικού πεδίου (*magnetic field transducers*)

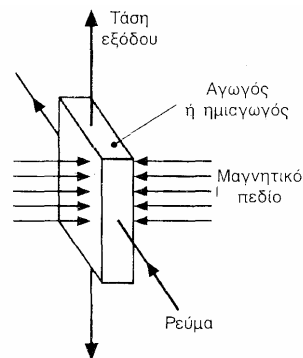
Οι μαγνητικοί αισθητήρες μετακίνησης βασίζονται στην μεταβολή του μαγνητικού πεδίου γύρω από τον αισθητήρα, όταν υφίσταται μετακίνηση το στερεό σώμα που θέλουμε να ανιχνεύσουμε την μετακίνησή του. Επομένως στο στερεό σώμα που μετακινείται πρέπει να βρίσκεται συνδεδεμένος ένας μόνιμος μαγνήτης. Στα σχήματα 6.7 a,b), φαίνεται η αρχή λειτουργίας μαγνητικού αισθητήρα τύπου προσέγγισης. Υπό την επίδραση του μόνιμου μαγνήτη, η μαγνητική ακίδα επαφής έλκεται και η επαφή παραμένει κλειστή, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.7b). Στην αντίθετη περίπτωση η επαφή είναι ανοικτή. Οι μαγνητικοί αισθητήρες προσέγγισης αποτελούν τους απαραίτητους αισθητήρες σε όλα τα ακριβιά συστήματα συναγερμού για παραβίαση πόρτων και παραθύρων οικιών και άλλων χώρων. Οι μαγνητικοί αισθητήρες παρουσιάζουν το πλεονέκτημα έναντι των κοινών μηχανικών διακοπών, ότι δεν χρειάζεται να έρθουν σε μηχανική επαφή με την πόρτα ή το παράθυρο.



Σχήμα 6.7 Αρχή λειτουργίας μαγνητικού αισθητήρα τύπου προσέγγισης (Magnetic proximity detectors).

Μια άλλη κατηγορία μαγνητικών αισθητήρων μετακίνησης είναι οι μαγνητικοί αισθητήρες Hall. Οι αισθητήρες αυτοί βασίζονται στο φαινόμενο Hall (σχήμα 6.8).

Το φαινόμενο Hall είναι η δημιουργία μίας εγκάρσιας τάσης στα άκρα ενός αγωγού, όταν αυτός διαρρέεται από ρεύμα και βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο.

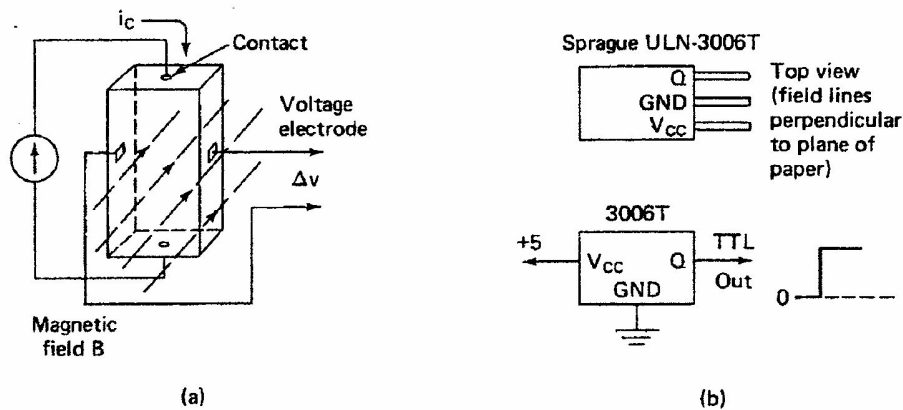


Σχήμα 6.8 Το φαινόμενο Hall.

Εάν σε αγωγό ή ημιαγωγό περάσει ρεύμα εντάσεως I_C και κάθετα προς αυτόν ευρίσκεται μαγνητικό πεδίο B , τότε στην τρίτη κάθετο διεύθυνση μεταξύ I_C και B εμφανίζεται μικρή ηλεκτρική τάση $V_H = k.I_C.B$, η οποία ονομάζεται τάση Hall (σχήμα 6.9a) παρακάτω). Οι εταιρίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έχουν κατασκευάσει ολοκληρωμένα κυκλώματα αισθητήρων Hall (σχήμα 6.9b) παρακάτω), τα οποία περικλείουν τον αισθητήρα Hall, καθώς και ενισχυτή και κύκλωμα μεταλλαγής της εξόδου από 0 σε 5 V εξαρτώμενης αν υπάρχει μαγνητικό πεδίο ή όχι. Με τους αισθητήρες Hall αποφεύγονται οι μεταλλικές επαφές και τα προβλήματα αυτών. Η μαζική παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων Hall έχουν κατεβάσει τόσο φθηνά το κόστος, ώστε ένας αισθητήρας Hall να είναι πια κατά πολύ φθηνότερος των μαγνητικών αισθητήρων προσέγγισης.

Υπάρχουν πολλές συσκευές που στηρίζονται στο φαινόμενο Hall, όπως είναι οι βαλβίδες φαινομένου Hall και οι αισθητήρες ρεύματος φαινομένου Hall.

Οι συσκευές που χρησιμοποιούν το φαινόμενο Hall τείνουν να χρησιμοποιούν ημιαγωγούς, επειδή εκεί το φαινόμενο είναι πιο ισχυρό.



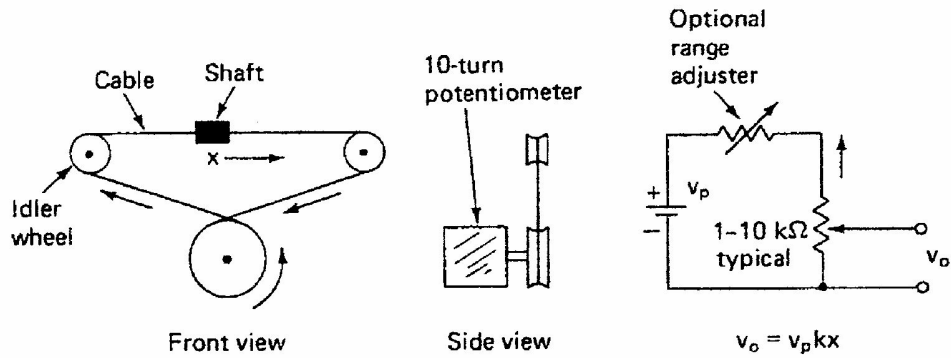
Σχήμα 6.9 (a) Το φαινόμενο και η τάση Hall, και (b) Ενδεικτικά ολοκληρωμένα κυκλώματα αισθητήρων Hall.

6.2.5 Αισθητήρες μετακίνησης βασισμένοι στην μεταβολή ποτενσιόμετρου (potentiometer transducers)

Τα ποτενσιόμετρα είναι ηλεκτρικές συσκευές που έχουν την μορφή μιας μεταβλητής αντίστασης

Οι αισθητήρες της κατηγορίας αυτής μετατρέπουν την μηχανική μετακίνηση μέσω νήματος και τροχαλιών σε περιστροφική κίνηση ποτενσιόμετρου ακριβείας 10 στροφών, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.10 παρακάτω. Εάν το ποτενσιόμετρο τεθεί σε ηλεκτρικό κύκλωμα όπως φαίνεται στο σχήμα 6.10, τότε η τάση V_o θα είναι ανάλογη της

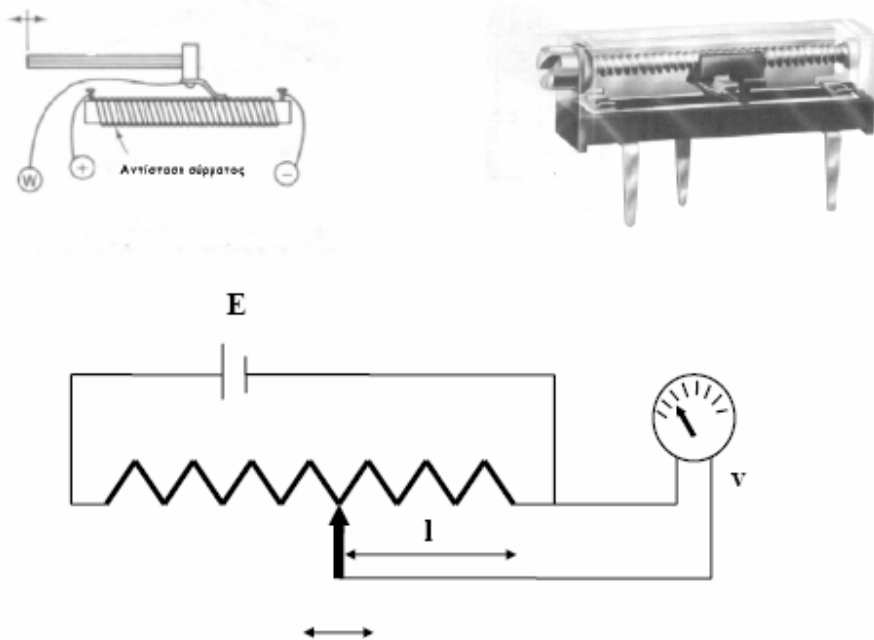
μετακίνησης x ($V_o = V_p \cdot k \cdot x$). Ο αισθητήρας αυτός είναι αρκετά διαδεδομένος σε εφαρμογές μεγάλων μετακινήσεων λόγω της απλότητάς του.



Σχήμα 6.10 Αισθητήρες μετακίνησης βασισμένοι στην μεταβολή ποτενσιόμετρου.

1) Γραμμικά ποτενσιόμετρα

Είναι ίσως το απλούστερο αισθητήριο μετακίνησης. Αποτελείται από μια αντίσταση κατά μήκος της οποίας κινείται μια επαφή, ή μεσαία λήψη όπως ονομάζεται (σχήμα 6.11).

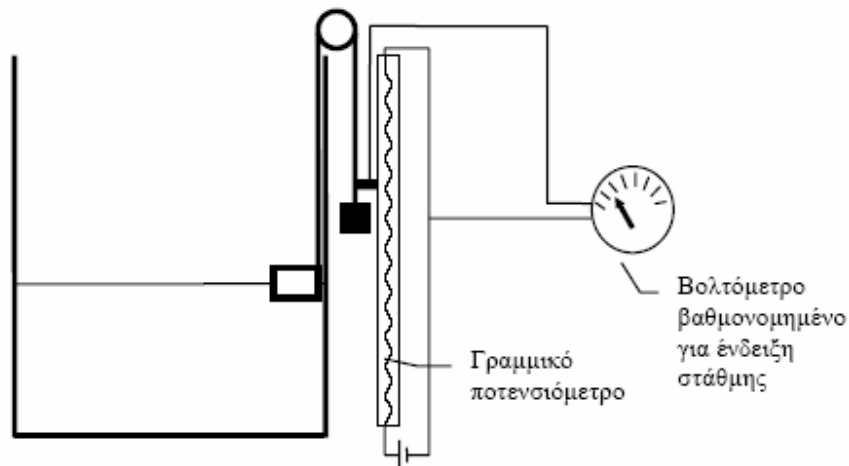


Σχήμα 6.11 Γραμμικό ποτενσιόμετρο.

Η αντίσταση που είναι συνήθως 10 KΩ τροφοδοτείται με συνεχή τάση. Η τάση τότε στη μεσαία λήψη είναι ανάλογη της απόστασής I από το άκρο της αντίστασης που έχει μηδενική τάση.

$$V = E * L / I = K * I$$

όπου L το συνολικό μήκος της αντίστασης. Είναι φανερό λοιπόν ότι το όργανο μετρά την μετατόπιση I με την βοήθεια του πλάτους της τάσης V . Η μέτρηση δε όπως φαίνεται είναι γραμμική. Πρόκειται δηλαδή για ένα αναλογικό όργανο μέτρησης της μετατόπισης. Συνήθως η αντίσταση είναι προσαρμοσμένη σε μια ακίνητη επιφάνεια η δε επαφή σε ένα κινούμενο στέλεχος. Τότε η τάση στη μεσαία λήψη (κινούμενη επαφή) του ποτενσιόμετρου είναι ανάλογη της μετατόπισης του στελέχους. Το στοιχείο αντίστασης μπορεί να είναι είτε κυλινδρικό είτε επίπεδο (τύπου φιλμ). Η διακριτική ικανότητα (resolution) του οργάνου εξαρτάται από την πυκνότητα των τυλιγμάτων της αντίστασης. Στα ποτενσιόμετρα τύπου φιλμ, αυτή είναι σχεδόν άπειρη. Μπορεί κανείς να βρει στο εμπόριο γραμμικά ποτενσιόμετρα μήκους από μερικά εκατοστά μέχρι και μερικά μέτρα.



Σχήμα 6.12 Χρησιμοποίηση του γραμμικού ποτενσιόμετρου για την μέτρηση της στάθμης υγρού σε δοχείο.

Στο σχήμα 6.12, πιο πάνω, φαίνεται πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα γραμμικό ποτενσιόμετρο για την μέτρηση της στάθμης υγρού σε δοχείο. Η μεσαία λήψη παρακολουθεί τη στάθμη με τη βοήθεια του πλωτήρα και του αντίβαρου. Τη τάση της μεσαίας λήψης παρακολουθούμε με τη βοήθεια βολτομέτρου, το οποίο έχουμε βαθμονομήσει κατάλληλα.

Μπορεί να επιτευχθεί άμεση ένδειξη με τη χρήση ενός βολτομέτρου, το οποίο να είναι βαθμονομημένο σε μονάδες μετατόπισης. Ή μπορεί να επιτευχθεί ένδειξη από απόσταση χρησιμοποιώντας την αλλαγή τάσης στα άκρα της εξόδου ως ένα σήμα εισόδου σε ένα σύστημα μέτρησης ή καταγραφής.

Τα γραμμικά ποτενσιόμετρα χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, για παράδειγμα την καταγραφή της θέσης των αντικειμένων σε μία γραμμή παραγωγής και τον έλεγχο των διαστάσεων των αντικειμένων.

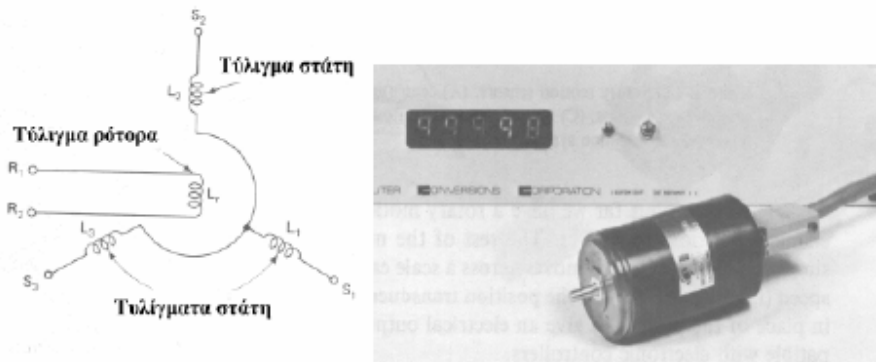
2)Περιστροφικά ποτενσιόμετρα

Τα περιστροφικά ποτενσιόμετρα μετρούν την γωνιακή μετατόπιση. Λειτουργούν με την ίδια αρχή που έχουν τα γραμμικά που είδαμε προηγουμένως, επίσης χρησιμοποιούνται παρόμοια υλικά και τεχνικές. Η κύρια διαφορά είναι ότι το στοιχείο αντίστασης έχει την μορφή τόξου, επάνω στο οποίο ολισθαίνει η κινητή επαφή. Η κινητή επαφή περιστρέφεται επειδή είναι συνδεδεμένη με τον άξονα εισόδου. Η τάση εξόδου είναι ανάλογη της γωνιακής μετατόπισης του άξονα.

Το περιστροφικό (κοινό) ποτενσιόμετρο είναι ίσως το όργανο με την πιο διαδεδομένη χρήση. Το ηλεκτρικό σήμα (τάση) στη μεσαία λήψη είναι συνήθως ανάλογο της γωνίας περιστροφής. Συνήθως η στροφή είναι περιορισμένη στις 360° , αλλά υπάρχουν και ποτενσιόμετρα περισσοτέρων περιστροφών.

Ο περιστροφικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής είναι το ακριβές ανάλογο του γραμμικού και χρησιμοποιείται για την μέτρηση γωνιών στροφής. Στην προκειμένη βέβαια περίπτωση ο πυρήνας στρέφεται αντί να ολισθαίνει.

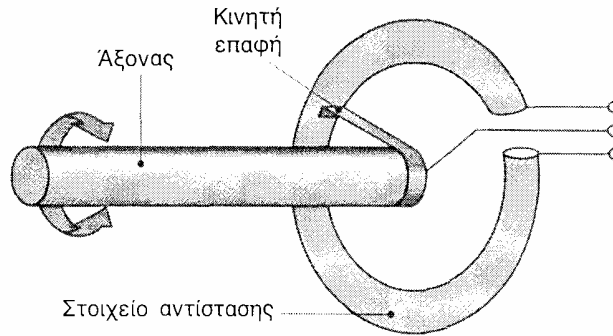
Για την μέτρηση γωνιών στροφής χρησιμοποιείται ακόμη το "σύγχρο" (synchro). Πρόκειται για συσκευή που μοιάζει με μοτέρ εναλλασσόμενου ρεύματος ως προς την κατασκευή (Σχήμα 6.13)



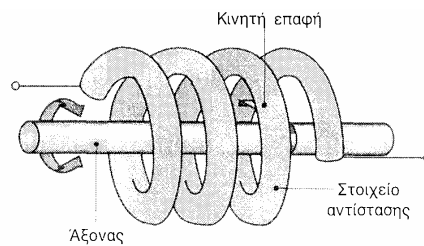
Σχήμα 6.13 "Σύγχρο" για την μέτρηση γωνιών στροφής.

Το σύγχρο έχει ένα στρεφόμενο πηνίο (ρότορα) που συνδέεται - με ψήκτρες - σε μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης. Στο στάτη υπάρχουν 3 τυλίγματα τοποθετημένα συμμετρικά στην περιφέρεια. Καθώς ο ρότορας στρέφεται, τα ρεύματα που επάγονται στα τρία τυλίγματα του στάτη εξαρτώνται από την θέση του ρότορα. Αποδεικνύεται ότι με κατάλληλη σύγκριση των ρευμάτων αυτών, η γωνία στροφής του ρότορα μπορεί να προσδιορισθεί ακριβώς. Την εργασία αυτή την κάνει ο "αποδιαμορφωτής". Η φορά περιστροφής μπορεί επίσης να προσδιορισθεί. Οι συσκευή που περιγράψαμε είναι θαυμάσια όσον αφορά την ακρίβεια της είναι όμως αρκετά ακριβή.

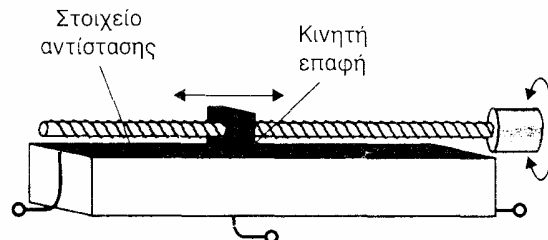
Παρακάτω, στο σχήμα 6.14, φαίνεται ένα περιστροφικό ποτενσιόμετρο, μίας στροφής. Στο σχήμα 6.15, φαίνεται ένα σπειροειδές ποτενσιόμετρο πολλών στροφών. Τέλος, στο σχήμα 6.16, φαίνεται μία άλλη μορφή ενός ποτενσιόμετρου πολλών στροφών



Σχήμα 6.14 Περιστροφικό ποτενσιόμετρο.



Σχήμα 6.15 Σπειροειδές ποτενσιόμετρο.



Σχήμα 6.16 Μια άλλη μορφή ποτενσιόμετρου πολλών στροφών.

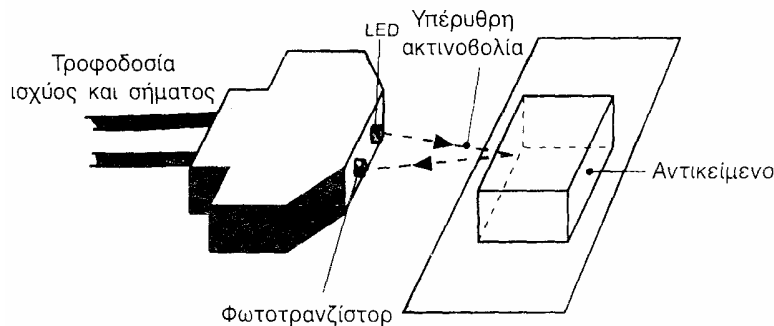
Τα περιστροφικά ποτενσιόμετρα χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, από τα ηλεκτρονικά κυλιόμενα καθίσματα, έως τα αεροσκάφη.

6.2.6 Αισθητήρες μετακίνησης βασιζόμενοι σε οπτικά φαινόμενα (*optical phenomena*)

Γενικά, οι *οπτικοί αισθητήρες*, αποτελούνται από μία πηγή φωτός και έναν ανιχνευτή. Οι πηγές φωτός, είναι συχνά *δίοδοι φωτοεκπομπής (LED)*, και οι ανιχνευτές είναι *φωτοτρανζίστορ πυριτίου* (είναι μία ημιαγωγική διάταξη, της οποίας οι ιδιότητες αλλάζουν όταν δεν υπάρχει φως). Χρησιμοποιείται συνήθως οπτικό ή υπέρυθρο φως. Η χρησιμοποίηση οπτικού φωτός, καθιστά εύκολη την εγκατάσταση και συντήρηση, αλλά το υπέρυθρο φως πάσχει λιγότερο από το φαινόμενο της *συμβολής* (interference) που μπορεί να προκληθεί από άλλες γειτονικές πηγές φωτός. Η πηγή εκπέμπει ορατό κόκκινο ή υπέρυθρο φως το οποίο ανακλάται από κάθε αντικείμενο που πλησιάζει τον αισθητήρα. Το ανακλώμενο φως ανιχνεύεται από το *φωτοτρανζίστορ*.

Μία οπτική μέθοδος, είναι αυτή της *διαπερατότητας*, στην οποία η πηγή φωτός και ο ανιχνευτής βρίσκονται απέναντι ο ένας από τον άλλο. Στους αισθητήρες διαπερατότητας, η φωτεινή δέσμη διακόπτεται και έτσι δεν προσπίπτει φως στον ανιχνευτή, οπότε διαπιστώνεται και η ύπαρξη κάποιου αντικειμένου.

Μία άλλη οπτική μέθοδος είναι αυτή του *αισθητήρα ανακλώμενης οπτικής δέσμης*, στον οποίο η πηγή φωτός και ο ανιχνευτής στερεώνονται δίπλα-δίπλα. Στο σχήμα 6.17, παρακάτω, παρουσιάζεται η βασική αρχή του αισθητήρα ανακλώμενης οπτικής δέσμης.



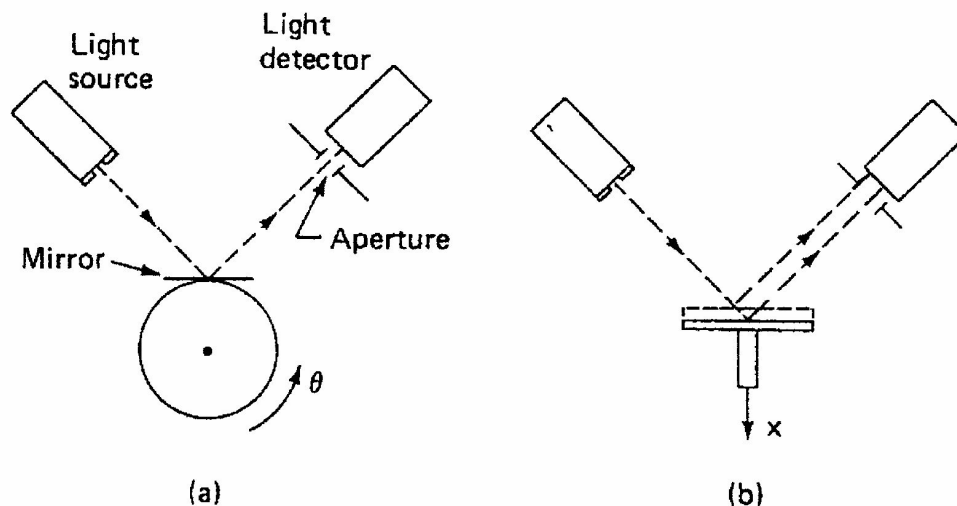
Σχήμα 6.17 Η βασική αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα ανακλώμενης οπτικής δέσμης.

Η ελάχιστη απόσταση προσέγγισης, στην οποία μπορεί να λειτουργήσει ο αισθητήρας, εξαρτάται από την ισχύ της εκπεμπόμενης φωτεινής δέσμης, δηλαδή την ισχύ του LED στην προκειμένη περίπτωση, την ευαισθησία του φωτοτρανζίστορ και τη φύση του αντικειμένου που ανακλά. Οι οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εφαρμοστεί η τεχνική σε σημεία όπου είναι αδύνατη η προσέγγιση άλλων αισθητήρων και η εφαρμογή άλλων μεθόδων μέτρησης.

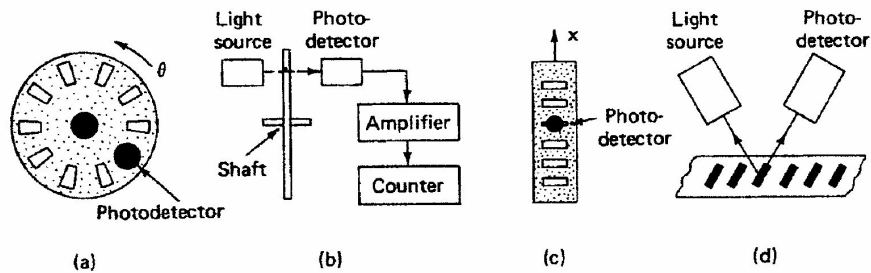
Γενικά, οι οπτικοί αισθητήρες βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα συναγερού και στον έλεγχο ποιότητας, ειδικά στις περιπτώσεις μαζικής παραγωγής αντικειμένων.

Γενικά, οι αισθητήρες μετακίνησης βασίζονται σε οπτικά φαινόμενα, χρησιμοποιούν πηγή φωτός και συνδυάζουν την μετακίνηση ως αλλαγή της πορείας δέσμης φωτός που πέφτει στον φωτοανιχνευτή. Στο σχήμα 6.18a) παρακάτω, φαίνεται διάταξη που μετρά την γωνιακή μετακίνηση τροχού ($\Delta\theta$), επί του οποίου έχει προσαρμοσθεί κάτοπτρο. Κατά την μετακίνησή του όλο και λιγότερο φως διέρχεται από τον φωτοανιχνευτή. Στο σχήμα 6.18 b) παρακάτω, η ίδια διάταξη χρησιμοποιείται για την γραμμική μετακίνηση μιας τράπεζας.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και οι ψηφιακοί αισθητήρες μετακίνησης που η αρχή λειτουργίας τους φαίνεται στο σχήμα 6.19. Τα σχήματα 6.19 a,b), δείχνουν την αρχή λειτουργίας ανίχνευσης γωνιακής μετακίνησης κυκλικού δίσκου που φέρει στην περιφέρεια του N οπές. Ο κυκλικός δίσκος περιστρέφεται κόβοντας διαδοχικά την δέσμη της φωτεινής πηγής-φωτοανιχνευτού όπως δείχνει το σχήμα. Κάθε φορά που η φωτεινή δέσμη θα συναντήσει οπή στον κυκλικό δίσκο τότε ένας ηλεκτρονικός παλμός από τον φωτοανιχνευτή θα οδηγηθεί στον ενισχυτή, και επομένως ο μετρητής παλμών της επόμενης βαθμίδας θα καταγράψει μια ακόμα μονάδα. Από τον αριθμό καταγραφής του μετρητού γνωρίζουμε τον αριθμό περιστροφών του κυκλικού δίσκου εφόσον σε μια περιστροφή ο μετρητής μετρά αριθμό N . Προφανώς η ακρίβεια μέτρησης της γωνιακής μετακίνησης εξαρτάται από τον αριθμό των οπών N του κυκλικού δίσκου και είναι $360/N = 2\pi/N$. Ανάλογη περίπτωση για την γραμμική μετακίνηση φαίνεται και στα σχήματα 6.19 c,d).



Σχήμα 6.18 (a) Διάταξη που μετράει την γωνιακή μετακίνηση του τροχού, (b) η ίδια διάταξη χρησιμοποιείται για την γραμμική μετακίνηση μιας τράπεζας.



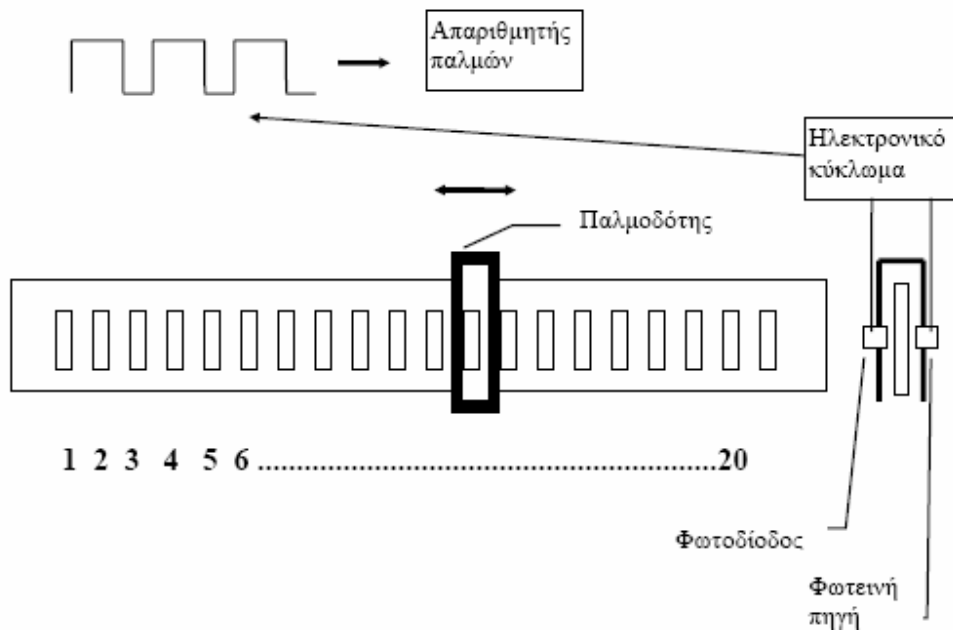
Σχήμα 6.19 Αρχή λειτουργίας ψηφιακών αισθητήρων μετακίνησης, (a) και (b) αρχή λειτουργίας ανίχνευσης γωνιακής μετακίνησης κυκλικού δίσκου με N οπές, (c) και (d) ανάλογη περίπτωση για την γραμμική μετακίνηση.

6.3 ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΤΕΣ (encoders)

1) Γραμμικοί κωδικοποιητές θέσης (Linear Encoders)

Πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία των αισθητηρίων οδήγησαν στην κατασκευή ψηφιακών οργάνων ανάγνωσης γραμμικής θέσης που ονομάζονται κωδικοποιητές θέσης.

Αναφερόμενοι στο σχήμα 6.20, παρακάτω, βλέπουμε σχηματικά πως μπορεί να είναι ένας τέτοιος κωδικοποιητής. Πάνω σε μια μακρόστενη μεταλλική πλάκα έχουν ανοιχτεί σε ίσες αποστάσεις οι οπές που φαίνονται. Κατά μήκος της πλάκας έχει τη δυνατότητα να ολισθαίνει ο παλμοδότης - στη προκειμένη περίπτωση μια λεπτή κατασκευή σε μορφή Π που 'αγκαλιάζει' τη πλάκα. Από την μια μεριά του Π υπάρχει φωτεινή πηγή που εκπέμπει λεπτή δέσμη φωτός και από την άλλη φωτοδίοδος ή φωτοτρανζίστορ - ηλεκτρονικές μονάδες που 'άγουν' ηλεκτρικά όταν πέσει πάνω τους φως. Η φωτοευαίσθητη μονάδα συνδέεται κατάλληλα σε κύκλωμα στην έξοδο του οποίου παίρνουμε είτε υψηλή τάση (όταν το Π βρίσκεται μπροστά από οπή) είτε χαμηλή (στην αντίθετη περίπτωση). Καθώς λοιπόν το Π κινείται κατά μήκος της πλάκας, η έξοδος του ηλεκτρονικού κυκλώματος θα εναλλάσσεται από μια χαμηλή τάση σε μια υψηλή. Η εναλλαγή αυτή ονομάζεται παλμός - τάσης εν προκειμένω.



Σχήμα 6.20 Ένας γραμμικός κωδικοποιητής θέσης αυξητικού τύπου.

Ας υποθέσουμε ότι ο παλμοδότης ξεκινά από την αρχή της πλάκας και κινείται. Για κάθε οπή που συναντά και περνά θα υπάρχει στην έξοδο ένας παλμός. Ο αριθμός λοιπόν των παλμών αντιπροσωπεύει τον αριθμό των οπών που έχει συναντήσει ο παλμοδότης κατά τη κίνησή του. Όμως η απόσταση μεταξύ των οπών είναι συγκεκριμένη, άρα η απόσταση που έχει διανύσει ο παλμοδότης είναι :

$$\text{Απόσταση} = \text{Αριθμός παλμών} * \text{απόσταση μεταξύ οπών}$$

Άρα για τη μέτρηση της απόστασης που διανύθηκε, αρκεί να μετρηθεί ο αριθμός των παλμών που έδωσε ο παλμοδότης. Έχουμε ήδη αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο ότι υπάρχουν οι απαριθμητές με τη βοήθεια των οποίων είμαστε σε θέση να μετράμε αριθμό παλμών. Η διαδικασία λοιπόν της μέτρησης έχει ως εξής : Ο παλμοδότης έρχεται σε κάποια θέση της πλάκας και ο απαριθμητής μηδενίζεται. Από κει και πέρα η ένδειξη του απαριθμητή αντιπροσωπεύει μετατόπιση από την θέση μηδενισμού. Είναι λοιπόν φανερό ότι η μέτρηση δεν είναι απόλυτη, μετράμε μετατόπιση από τη θέση μηδενισμού του απαριθμητή. Αυτό δεν είναι και τόσο σοβαρό πρόβλημα για κάποιες εφαρμογές αλλά για άλλες είναι. Ο κωδικοποιητής για το λόγο αυτό ονομάζεται κωδικοποιητής αυξητικού τύπου (Incremental encoder).

Η διακριτική ικανότητα του οργάνου είναι η απόσταση μεταξύ δύο οπών. Στο διάστημα αυτό ο απαριθμητής δίδει ένα παλμό, που είναι και το ελάχιστο που μπορεί να αναγνώσει ο απαριθμητής παλμών. Υπάρχουν σήμερα κωδικοποιητές θέσης που έχουν διακριτική ικανότητα της τάξης του 1/10 του χιλιοστού.

Έτσι όπως περιγράφηκε, το όργανο δεν είναι σε θέση να διακρίνει αν η κίνηση είναι προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά. Αν δηλαδή ο παλμοδότης κινηθεί 12 οπές προς τα δεξιά και μετά επιστρέψει 5 οπές, ο απαριθμητής θα έχει καταγράψει 17 παλμούς που θα μπορούσε να σημαίνει ότι κινήθηκε 17 οπές δεξιά. Για το σκοπό αυτό οι περισσότεροι κωδικοποιητές δίδουν δύο παλμοσειρές που προέρχονται από δύο ζεύγη φωτεινής πηγής

φωτοτρανζίστορ μετατοπισμένα μεταξύ τους κατά $1/4$ της απόστασης των οπών. Μπορεί τότε να αποδειχθεί ότι όταν η κίνηση είναι προς τα δεξιά η μια παλμοσειρά προηγείται της άλλης κατά $T/4$, όπου T η περίοδος του παλμού - ενώ το αντίθετο συμβαίνει όταν η κίνηση είναι προς τα αριστερά. Η πληροφορία αυτή για τη διαφορά φάσης των δύο παλμοσειρών αξιοποιείται στη συνέχεια από κατάλληλο ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο και πληροφορεί των απαριθμητή παλμών αν πρέπει να προσθέτει (κίνηση προς τα δεξιά) ή να αφαιρεί παλμούς (κίνηση προς τα αριστερά). Έτσι ανεξάρτητα της φοράς της κίνησης γνωρίζουμε τότε την πραγματική θέση.

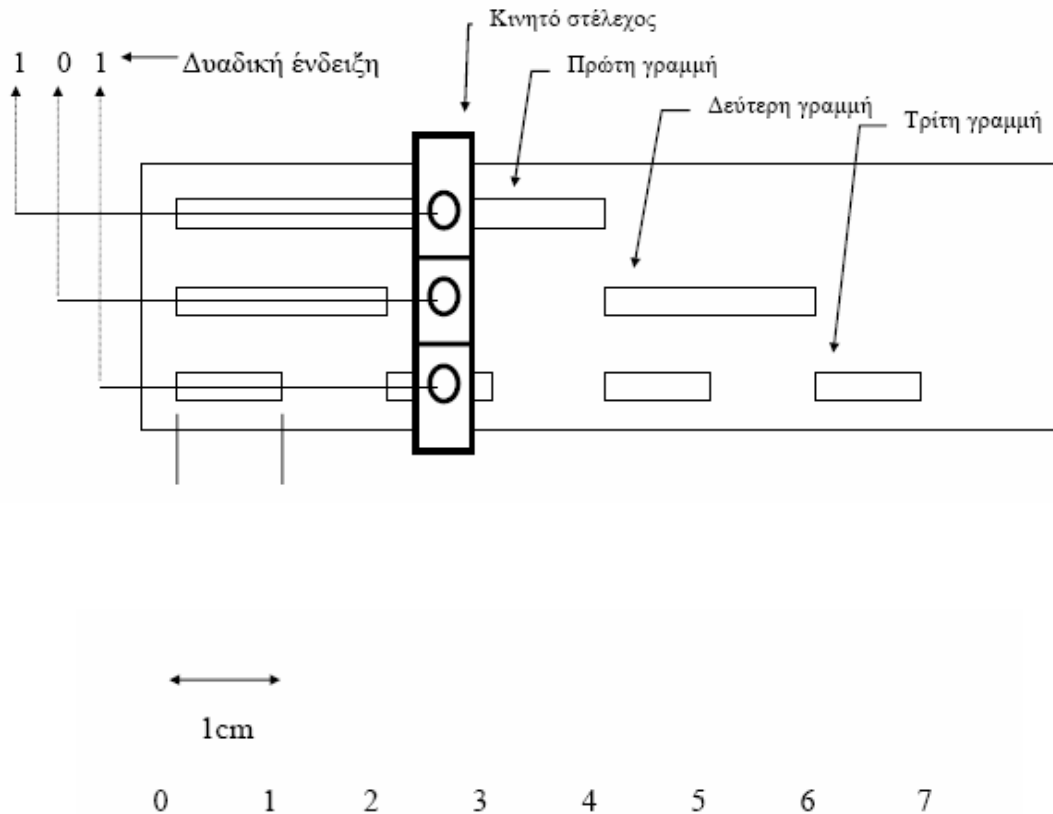
Ο γραμμικός κωδικοποιητής απολύτου τύπου είναι αρκετά διαφορετικός . Κατ' αρχήν όπως φαίνεται στο σχήμα 6.21, πιο κάτω, η πλάκα είναι χαραγμένη κατά αρκετά πιο πολύπλοκο τρόπο . Υπάρχουν στην προκειμένη περίπτωση τρεις διαφορετικές γραμμές οπών, κάθε μία με το δικό της "μάτι" - δηλαδή την συσκευή για την δημιουργία των παλμών όπως και προηγουμένως.

Σε κάθε θέση της πλάκας κάθε 'μάτι' δίδει την πληροφορία 0 ή 1 (σκοτεινή περιοχή ή φωτεινή περιοχή). Άρα για κάθε θέση της πλάκας σχετικά με το κινητό στέλεχος έχουμε ένα τριψηφίο δυαδικό αριθμό και μόνο ένα. Έτσι μπορούμε να φτιάξουμε τον παρακάτω πίνακα που αντιστοιχίζει την ένδειξη του αισθητηρίου με την απόσταση από την αρχή της πλάκας

:

Ένδειξη αισθητηρίου

Απόσταση από αρχή	1η γραμμή	2η γραμμή	3η γραμμή	Δεκαδική μορφή
0 - 1 cm	0	0	0	0
1 - 2 cm	0	0	1	1
2 - 3 cm	0	1	0	2
3 - 4 cm	0	1	1	3
....				
.....				
7 - 8 cm	1	1	1	7



Σχήμα 6.21 Γραμμικός κωδικοποιητής απόλυτου τύπου.

Στην θέση του κινητού στελέχους στο σχήμα παραπάνω, η ένδειξη θα είναι 0 - 1 - 0 που πράγματι αντιστοιχεί σε μετακίνηση 2 - 3 cm από την αρχή της κλίμακας. Η μετατόπιση λοιπόν από την αρχή της πλάκας αντιστοιχίζεται σε ένα και μόνο ένα δυαδικό αριθμό. Συνεπώς πρόκειται για απόλυτη μέτρηση. Ο δυαδικός αυτός αριθμός στη συνέχεια συνήθως διαβάζεται από Η/Υ.

Είμαστε σε θέση να καταλάβουμε ότι η διακριτική ικανότητα του παραπάνω αισθητηρίου είναι 1 cm. Αν θέλαμε να την κάνουμε καλύτερη - ας πούμε 0,5 cm - απλά πρέπει να προσθέσουμε άλλη μια γραμμή στην κλίμακα.

Γενικότερα η διακριτική ικανότητα του οργάνου είναι

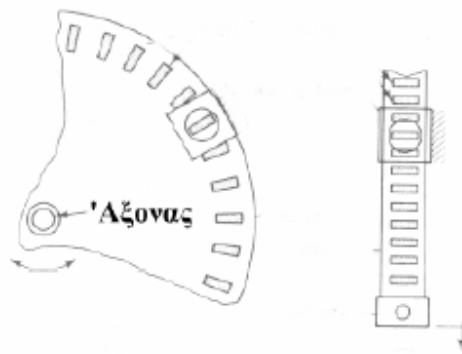
$$\text{Διακριτική ικανότητα} = \text{Μήκος μέτρησης} / 2^v$$

όπου v : Αριθμός των 'ματιών' που χρησιμοποιούνται.

Εύκολα φαίνεται ότι για να πετύχει κανείς μεγάλη διακριτική ικανότητα και μεγάλο μήκος μέτρησης πρέπει να αυξήσει πολύ τον αριθμό των 'ματιών', πράγμα που κάνει πολύπλοκο και ακριβό το όργανο.

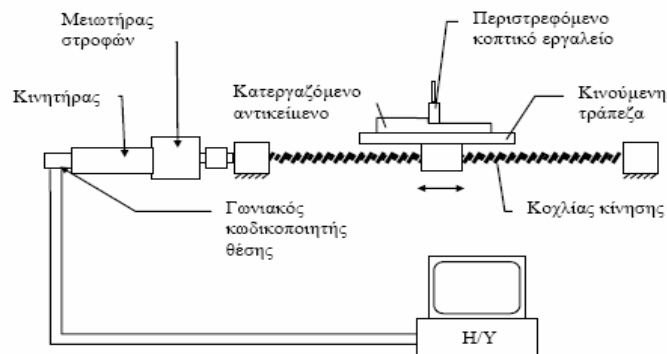
2)Κωδικοποιητές γωνιακής θέσης (rotary shaft encoders)

Όπως και στην γραμμική κίνηση, υπάρχουν και για την περιστροφική, ψηφιακά αισθητήρια θέσης, οι κωδικοποιητές γωνιακής θέσης (rotary shaft encoders) . Όπως και με τους γραμμικούς αντίστοιχους χωρίζονται και αυτοί σε "απόλυτους" και "αυξητικούς". Στο σχήμα 6.22, παρακάτω, συγκρίνονται ένας γραμμικός και ένας γωνιακός κωδικοποιητής θέσης (αυξητικού τύπου) . Και οι δύο αυτοί τύποι, καθώς και οι αντίστοιχοι απόλυτοι, κυκλοφορούν σήμερα ευρέως και είναι διαθέσιμοι σε κατηγορίες ανάλογα με την επιθυμητή διακριτική τους ικανότητα



Σχήμα 6.22 Γωνιακός και γραμμικός κωδικοποιητής θέσης.

Από τα ψηφιακά όργανα που περιγράψαμε, ο γωνιακός κωδικοποιητής θέσης αυξητικού τύπου έχει ίσως τις περισσότερες εφαρμογές. Τέτοια όργανα υπάρχουν διαθέσιμα με διακριτικές ικανότητες μέχρι και κάποια δέκατα της μοίρας. Υπάρχει όπως φαίνεται και στο σχήμα παραπάνω ένας δίσκος πάνω στον οποίο είναι χαραγμένες οπές, καθώς και παλμοδότης. Η όλη κατασκευή είναι κλεισμένη σε κυλινδρικό κουτί από το οποίο βγαίνει μόνο ο άξονας πάνω στον οποίο είναι στερεωμένος ο δίσκος. Αρκεί να συνδέσει κανείς το άξονα αυτό πάνω στον άξονα του οποίου θέλει να μετρήσει τη γωνία στροφής. Το όργανο χρησιμοποιείται κατά κόρο στις αυτόματες εργαλειομηχανές για μέτρηση της θέσης του φορείου καθώς και σε ρομποτικές εφαρμογές.



Σχήμα 6.23 Χρησιμοποίηση κωδικοποιητή γωνιακής θέσης για την μέτρηση της μετατόπισης της τράπεζας αυτόματης εργαλειομηχανής.

Στο σχήμα 6.23, πιο πάνω, φαίνεται πως συνήθως χρησιμοποιείται ένας κωδικοποιητής γωνιακής θέσης για τη μέτρηση της μετατόπισης της τράπεζας αυτόματης εργαλειομηχανής. Η τράπεζα κινείται με τη βοήθεια κοχλίας κίνησης και περικοχλίου. Ο κοχλίας παίρνει κίνηση από κινητήρα (συνεχούς ρεύματος) μέσω του μειωτήρα. Η μέτρηση της μετατόπισης της τράπεζας γίνεται έμμεσα, μετρώντας δηλαδή τη γωνία στροφής του ρότορα του κινητήρα.

Ας υποθέσουμε ότι α) ο κοχλίας κίνησης έχει βήμα 5 χιλιοστά. β) ότι η σχέση μείωσης είναι 3:1 γ) ότι ο κωδικοποιητής δίδει 360 παλμούς/περιστροφή. Τότε σε ένα παλμό αντιστοιχεί μετατόπιση του φορείου :

$$5 \text{ mm} / (360 \cdot 3) \square 1/200 \text{ mm}$$

που αποτελεί και τη διακριτική ικανότητα μέτρησης της θέσης της τράπεζας και που είναι απόλυτα ικανοποιητική : Στις αυτόματες εργαλειομηχανές επιθυμούμε ακρίβειες κατεργασίας της τάξης του 1/100 mm. Ας σημειωθεί ότι ο μειωτήρας είναι συνήθως απλώς ένα ζεύγος σύγχρονων τροχαλιών με ιμάντα για να αποφεύγονται οι 'τζόγοι' των γραναζιών.

Η ανάγνωση βέβαια της θέσης γίνεται από τον Η/Υ που ελέγχει την μηχανή. Μπορεί ακόμη να σκεφθεί κανείς ότι αφού πρόκειται για κοπή κάποιου κομματιού, δεν ενδιαφέρει η απόλυτη θέση : Το κοπτικό εργαλείο φέρεται κοντά στο κομμάτι που πρόκειται να κοπεί και η θέση της τράπεζας μηδενίζεται. Για το λόγο αυτό αρκεί κωδικοποιητής θέσης αυξητικού τύπου.

6.4 ΜΙΚΡΟΔΙΑΚΟΠΤΕΣ (*microswitches*)

Οι μικροδιακόπτες είναι μικροί διακόπτες που λειτουργούν με μία πολύ μικρή κίνηση κάποιου εμβόλου και άρα είναι χρήσιμοι σαν αισθητήρες άμεσης επαφής.

Οι επαφές του μικροδιακόπτη μπορούν στην κανονική κατάσταση να είναι ανοικτές, είτε κλειστές. Το άνοιγμα ή το κλείσιμο των επαφών χρησιμοποιείται για να ενεργοποιήσει ή να διακόψει ένα κύκλωμα.

Οι μικροδιακόπτες είναι οι πιο συνηθισμένοι ανιχνευτές προσέγγισης. Στις τυπικές εφαρμογές των μικροδιακοπών περιλαμβάνονται τα καλύμματα ασφαλείας, τα οποία διακόπτουν τη λειτουργία ενός μηχανήματος ή θέτουν σε λειτουργία κάποιο συναγερμό εάν ανοιχθεί κάποιο κάλυμμα ή καπάκι. Το εξάρτημα που ενεργοποιεί το μικροδιακόπτη μπορεί να έχει τη μορφή εμβόλου με ένα κυλινδρικό, ο οποίος να ακολουθεί την γραμμή ενός έκκεντρου.

Κεφάλαιο 7^ο ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ

7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Μετακίνηση, μετατόπιση, ονομάζεται η απόσταση από κάποιο σημείο αναφοράς προς κάποια δεδομένη κατεύθυνση. Εάν αυτή μετριέται σε ευθεία γραμμή μιλάμε για γραμμική μετατόπιση, ενώ αν μετριέται με τη βοήθεια μιας γωνίας περιστροφής ονομάζεται γωνιακή μετατόπιση.

Ως αισθητήρας μετακίνησης, μετατόπισης, ορίζεται ο αισθητήρας ο οποίος μετρά μια μετατόπιση, ανιχνεύει την κίνηση ή υπολογίζει την θέση ενός αντικειμένου.

Η κίνηση ενός στερεού σώματος περιγράφεται από την ταχύτητά του.

Ταχύτητα u , (*velocity*), είναι ο ρυθμός μεταβολής της μετακίνησης, μετατόπισης x , με το χρόνο t , και είναι διανυσματική ποσότητα. Αντίθετα το μέτρο της ταχύτητας (*speed*) είναι βαθμωτή ποσότητα. Για γραμμικό σύστημα η ταχύτητα και το μέτρο της είναι :

$$u = \frac{dx}{dt} \text{ (ταχύτητα) , } |u| = \left| \frac{dx}{dt} \right| \text{ (μέτρο)}$$

Σε περιστρεφόμενο σύστημα η γωνιακή ταχύτητα ω , είναι ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας θ με τον χρόνο και συνδέεται με την γραμμική ταχύτητα μέσω της ακτινικής απόστασης a :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

$$\omega = \frac{u}{a}$$

Έτσι, η ταχύτητα ενός αντικειμένου μπορεί να υπολογιστεί από την πρώτη παράγωγο της μετατόπισης του με τον χρόνο ή αλλιώς με ολοκλήρωση της επιτάχυνσης του a :

$$u = \frac{dx}{dt} \text{ ή } \int_0^t a dt'$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \text{ ή } \int_0^\theta \alpha_\theta dt'$$

Η ολοκλήρωση του όρου της επιτάχυνσης παρέχει μία διαφορική και όχι μία απόλυτη μέτρηση.

Η ταχύτητα μερικών αντικειμένων μπορεί επίσης να υπολογιστεί με έναν π.χ. αισθητήρα πίεσης- ύψους. Για παράδειγμα, η ταχύτητα καθόδου ενός αεροπλάνου, συσχετίζεται με

την μεταβολή του ύψους του και της πίεσης. Επομένως, οι μέθοδοι που ανιχνεύουν την ταχύτητα περιλαμβάνουν και εκείνες που ήδη έχουμε αναφέρει σε προηγούμενα κεφάλαια, για την μέτρηση της μετακίνησης, για την μέτρηση της πιέσεως που θα δούμε αργότερα κ.λ.π.

Επιτάχυνση, (acceleration), ονομάζεται ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας. Οι αισθητήρες επιτάχυνσης ή οι μετρητές επιτάχυνσης χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν την επιτάχυνση, την ταλάντωση και την μηχανική κρούση. Η επιτάχυνση είναι η πρώτη παράγωγος της ταχύτητας και η δεύτερη παράγωγος της μετατόπισης. Οι σχέσεις μεταξύ ταχύτητας και μετατόπισης για ένα γραμμικό ή περιστρεφόμενο σύστημα είναι

$$: a = \frac{du}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x} \quad \text{και} \quad a_{\theta} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \ddot{\theta}$$

Στενά συνδεδεμένη με τις μετρήσεις της ταχύτητας και της επιτάχυνσης είναι η μέτρηση της μετατόπισης της ταχύτητας και της επιτάχυνσης ταλαντώσεων.

7.2 ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Μια κλασική διάταξη για τη μέτρηση της ταχύτητας είναι ο γνωστός ρυθμιστής του Watt όπου η μετατόπιση μιας περιστρεφόμενης σφαίρας αντιστοιχίζεται με την γωνιακή ταχύτητα. Μια άλλη προφανής μέθοδος μέτρησης της ταχύτητας είναι η διαφόριση της μετατόπισης ως προς τον χρόνο, η οποία μπορεί να γίνει αριθμητικά ή ηλεκτρικά, με το πρόβλημα αυτής της μεθόδου να επικεντρώνεται στην αύξηση του θορύβου του σήματος αφού η διαφόριση γενικά ενισχύει το θόρυβο που υπάρχει στο σήμα μετατόπισης.

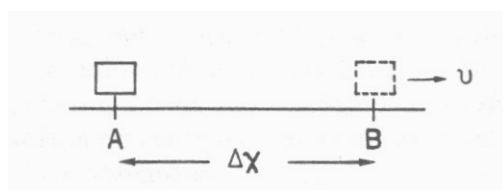
Οι πιο βασικοί μέθοδοι μέτρησης της ταχύτητας είναι :

- Υπολογισμός της μέσης ταχύτητας σαν λόγο της μετατόπισης προς τον χρόνο
- Με χρήση μετατροπέων, αισθητήρων ταχύτητας
- Ταχογεννήτριες

7.2.1 Υπολογισμός της μέσης ταχύτητας σαν λόγο της μετατόπισης προς τον χρόνο

Καταρχάς θεωρούμε το σχήμα 7.1, παρακάτω, και υποθέτουμε ότι η απόσταση Δx μεταξύ των δύο σημείων A και B είναι γνωστή. Αν μετρηθεί ο χρόνος Δt που απαιτείται για την κίνηση ενός αντικειμένου από την θέση A στην θέση B τότε : $u = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ είναι η μέση ταχύτητα στο χρονικό διάστημα Δt . Αν η ταχύτητα είναι σταθερή τότε η μετρούμενη ταχύτητα u ισούται με την σταθερή ταχύτητα. Αν πάλι η ταχύτητα είναι μεταβαλλόμενη

τότε η u είναι η μέση ταχύτητα στο χρονικό διάστημα Δt . Για να επιτευχθεί μια προσέγγιση στιγμιαίας ταχύτητας πρέπει το χρονικό διάστημα Δt να είναι μικρό. Και η μέτρηση γίνεται ως εξής : ανιχνεύεται η διέλευση του αντικείμενου από την θέση Α και μετριέται ο χρόνος που μεσολαβεί μέχρι να ανιχνευθεί το αντικείμενο στη θέση Β, η οποία ανίχνευση μπορεί να γίνει στο αντικείμενο οπτικά ή με ανιχνευτή-αισθητήρα αντικείμενου. Οπτικά η ανίχνευση γίνεται με την διακοπή μιας φωτεινής δέσμης ή την ανάκλαση της δέσμης επάνω στο αντικείμενο. Από την άλλη οι ανιχνευτές αντικείμενου λειτουργούν ανιχνεύοντας την μεταβολή που δημιουργείται σε κάποιο μέγεθος όταν ένα αντικείμενο βρεθεί μέσα στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή. Με μεταβολή της αυτεπαγωγής κάποιου πηνίου όταν το αντικείμενο είναι κατασκευασμένο από σιδηρομαγνητικό υλικό, με μεταβολή της χωρητικότητας κ.λ.π.

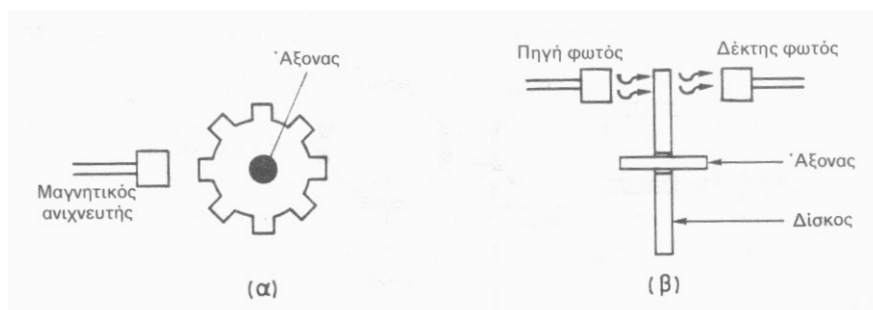


Σχήμα 7.1 Υπολογισμός της μέσης ταχύτητας.

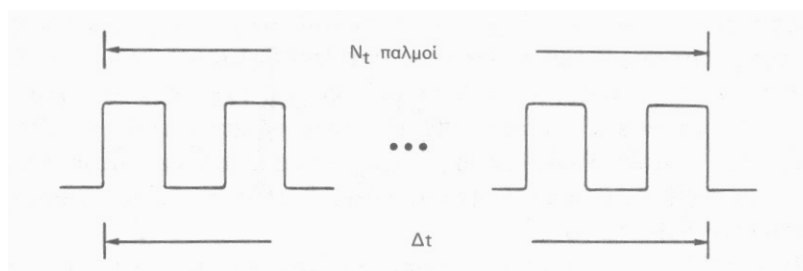
Στην παραπάνω μέθοδο μέτρησης της ταχύτητας υπάγονται οι κάθε μορφής μηχανικοί καταμετρητές.

Για την μέτρηση τώρα της ταχύτητας περιστροφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η καταμέτρηση οπτικών ή μαγνητικών παλμών (βλέπε σχήμα 7.2). Για την καταμέτρηση μαγνητικών παλμών (σχήμα 7.2α) χρησιμοποιείται ένας οδοντωτός δίσκος ο οποίος προσαρμόζεται στον περιστρεφόμενο άξονα, και καθώς ο δίσκος περιστρέφεται περνάνε τα δόντια του μπροστά από έναν ανιχνευτή αντικείμενου δίνοντας στην έξοδό του ένα παλμό (σχήμα 7.3).

Για την καταμέτρηση οπτικών παλμών χρησιμοποιείται και οπτικός κωδικοποιητής μεταβολής και η μέθοδος λειτουργίας είναι ακριβώς η ίδια με εκείνη της μέτρησης γωνίας μέσω οπτικού κωδικοποιητή μεταβολής, με μόνη διαφορά ότι μετριέται ο αριθμός των παλμών μέσα σε ένα χρονικό διάστημα Δt . (σχήμα 7.2β).

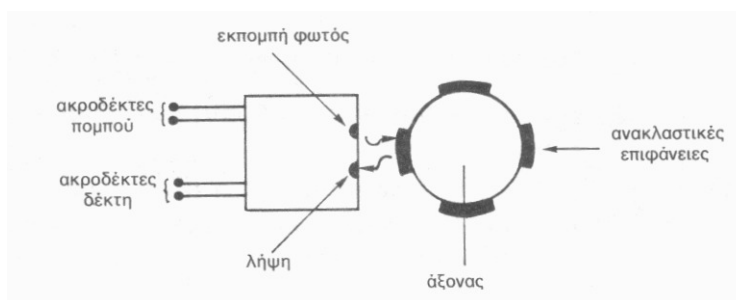


Σχήμα 7.2 Καταμέτρηση (α) μαγνητικών, και (β) οπτικών παλμών.



Σχήμα 7.3 Έξοδος ανιχνευτή.

Όσον αφορά τις οπτικές διατάξεις για τη μέτρηση παλμών ανακλαστικού τύπου ας δούμε το σχήμα 7.4, που εικονίζεται παρακάτω. Στον άξονα επάνω, η ταχύτητα του οποίου θα μετρηθεί, τοποθετούνται ανακλαστικές επιφάνειες οι οποίες ανακλούν το φως που εκπέμπεται από ένα πομπό φωτός(φωτεινή πηγή) . Η ανάκλαση αυτή ανιχνεύεται από ένα δέκτη φωτός και έτσι παράγεται ένας παλμός. Ο χρόνος Δt στον οποίο μετρείται ο αριθμός των παλμών εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής και τον αριθμό των δοντιών του δίσκου. Π.χ αν ο δίσκος έχει 8 δόντια και η ταχύτητα περιστροφής του άξονα είναι 1200rpm (με $\Delta t=1$ sec) τότε θα μετριοούνται 160 παλμοί/sec, με ακρίβεια μέτρησης 0,625%.

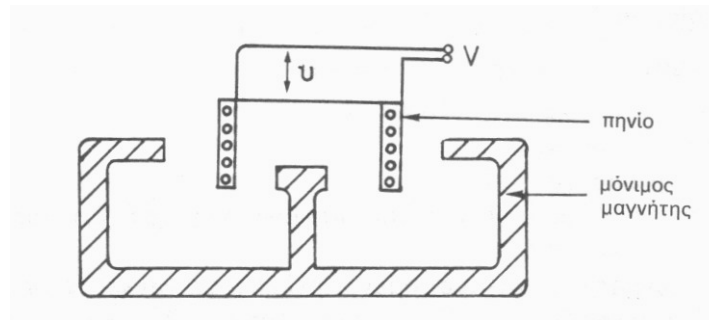


Σχήμα 7.4 Μέτρηση παλμών με ανάκλαση φωτός.

Γενικά η απαρίθμηση μαγνητικών ή οπτικών παλμών είναι μια απλή μέθοδος η οποία μπορεί να δώσει αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια αν η ταχύτητα είναι σταθερή και ο αριθμός των παλμών που μετριοούνται μέσα στο χρόνο είναι μεγάλος.

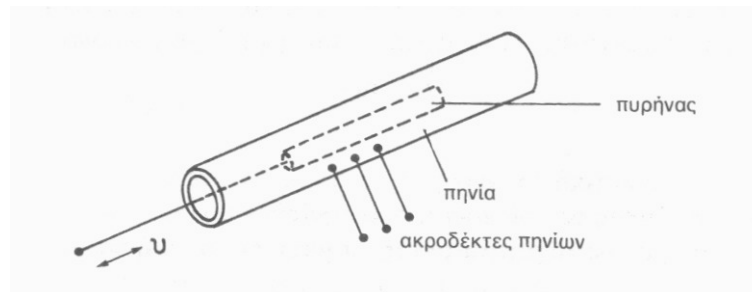
7.2.2 Με χρήση μετατροπέων-αισθητήρων ταχύτητας κινητού πηνίου και κινητού μαγνήτη

Αυτοί είναι μετατροπείς ηλεκτρομηχανικού τύπου, όπως : Κινητού πηνίου ή κινητού μαγνήτη. Και οι δύο αυτοί τύποι στηρίζονται στην επαγωγή της τάσης στο πηνίο όταν υπάρχει σχετική κίνηση του πηνίου ως προς τον πυρήνα ο οποίος είναι ένας μόνιμος μαγνήτης. Στο σχήμα 7.5, πιο κάτω, εικονίζεται ένας μετατροπέας κινητού πηνίου. Οι μετατροπείς αυτού του τύπου αποτελούνται από πηνίο από λεπτό σύρμα. Το λεπτό σύρμα χρησιμοποιείται για να αυξηθεί η ευαισθησία του μετατροπέα. Με το σύστημα μόνιμων μαγνητών η μαγνητική επαγωγή που μπορεί να δημιουργηθεί είναι η μέγιστη. Οι μετατροπείς του παραπάνω τύπου συχνά χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ταχύτητας ταλαντώσεων.



Σχήμα 7.5 Μετατροπέας ταχύτητας κινητού πηνίου.

Στο παρακάτω σχήμα 7.6, βλέπουμε και την κατασκευή ενός μετατροπέα ταχύτητας κινητού μαγνήτη αυτή την φορά. Η οποία όπως καταλαβαίνουμε είναι διαφορετική ώστε να επιτρέπεται η κίνηση του μαγνήτη.

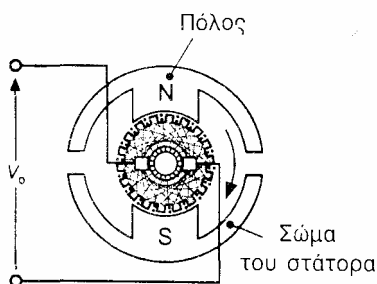


Σχήμα 7.6 Μετατροπέας ταχύτητας κινητού μαγνήτη.

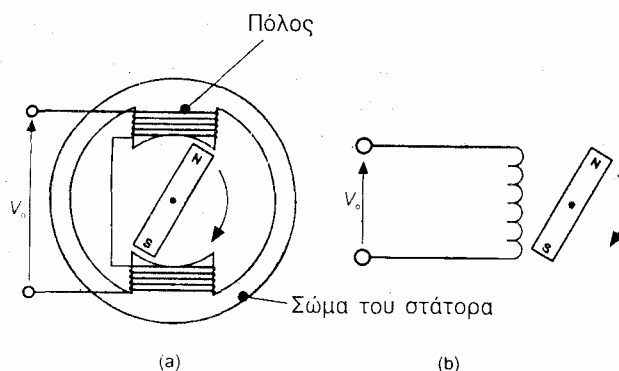
7.2.3 Ταχογεννήτριες

Καταρχάς, ταχύμετρο, ονομάζεται κάθε συσκευή που χρησιμοποιείται για την μέτρηση περιστροφής κάποιου άξονα. Γεννήτρια, ονομάζεται η συσκευή που μετατρέπει την κινητική-μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Έτσι η ταχογεννήτρια είναι μια συσκευή η οποία όταν οδηγείται από μια περιστροφική μηχανική δύναμη παράγει μια ηλεκτρική έξοδο ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής της. Οι ταχογεννήτριες συνδέονται στον περιστρεφόμενο άξονα, του οποίου την ταχύτητα θέλουμε να μετρήσουμε. Αυτό μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, όπως με άμεση ζεύξη ή με τη βοήθεια μάντων ή γραναζιών. Οι ταχογεννήτριες διακρίνονται ως συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος. Στα σχήματα 7.7 και 7.8 ,παρακάτω, βλέπουμε την μορφή τους. Η ταχογεννήτρια συνεχούς ρεύματος (σχήμα 7.7), είναι μια συνηθισμένη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος της οποίας η κατασκευή είναι προσεγμένη για να έχει καλή ακρίβεια και ευαισθησία. Όπως είναι γνωστό η τάση εξόδου μιας γεννήτριας συνεχούς ρεύματος είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του άξονα. Η ταχογεννήτρια συνεχούς ρεύματος διαφέρει από τις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος στο ότι κάποια μέρη της έχουν σχεδιαστεί με ειδικό τρόπο ώστε να βελτιώνουν την ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί στον προσδιορισμό της ταχύτητας, ενώ σε μια απλή γεννήτρια σκοπός είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.. Η τάση τώρα εξόδου αλλάζει πολικότητα όταν αλλάξει η φορά περιστροφής του άξονα. Οι ταχογεννήτριες ακριβείας χρησιμοποιούν μόνιμο μαγνήτη αντί τυλίγματος διέγερσης. Όσον αφορά τώρα για τις ταχογεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος (σχήμα 7.8), από το όνομα τους καταλαβαίνουμε ότι παράγουν μια εναλλασσόμενη έξοδο. Οι ταχογεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι κινητήρες κλωβού δύο τυλιγμάτων συνήθως. Το ένα

τύλιγμα τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα και λόγω της περιστροφής επάγεται στο άλλο τύλιγμα μια εναλλασσόμενη τάση της οποίας το πλάτος είναι ανάλογο της ταχύτητας περιστροφής.

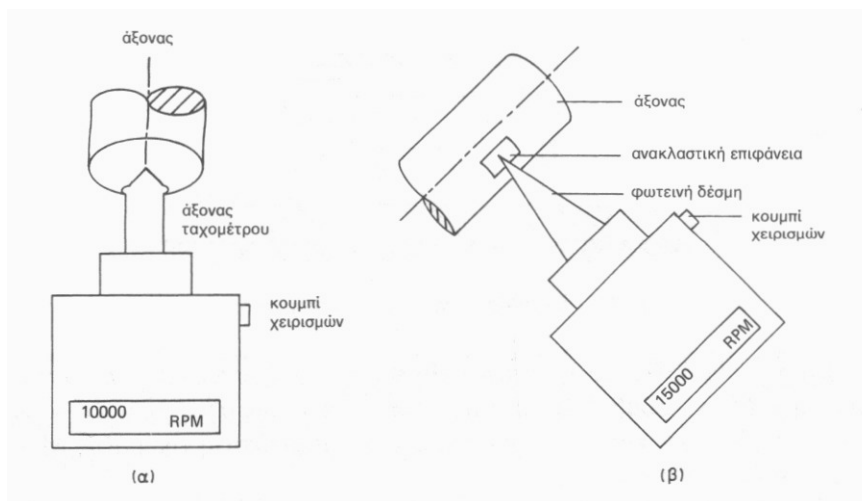


Σχήμα 7.7 Μορφή ταχογεννήτριας συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 7.8 Μορφή ταχογεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος.

Οι ταχογεννήτριες γενικά χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Ο άξονας τους μπορεί να συνδεθεί με τον άξονα την ταχύτητα του οποίου επιθυμούμε να μετρήσουμε. Επίσης υπάρχουν ταχογεννήτριες φορητές των οποίων ο άξονας εφάπτεται με τον άξονα του οποίου την ταχύτητα μετράνε για κάποιο χρονικό διάστημα ώσπου να παρθεί η μέτρηση. (βλέπε και σχήμα 7.9). Υπάρχουν ταχογεννήτριες που για την κίνησή τους χρειάζονται ροπή μερικών δεκάκις χιλιοστών του Kpm. Η απεικόνιση του αριθμού των στροφών μπορεί να είναι ψηφιακή ή αναλογική



Σχήμα 7.9 Φορητές ταχογεννήτριες.

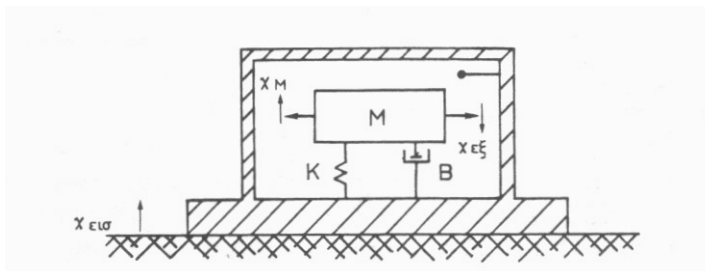
Τέλος, να τονίσουμε, ότι για την μέτρηση της ταχύτητας υπάρχουν και άλλοι μέθοδοι, ενδεικτικά αναφέρουμε, την στροβοσκοπική μέθοδο και την μέθοδο με κωδικοποιητές.

7.3 ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ

Οι μετατροπείς που μετρούν την επιτάχυνση λέγονται επιταχυνσιόμετρα. Τα επιταχυνσιόμετρα χωρίζονται βασικά σε 2 κατηγορίες : Τα επιταχυνσιόμετρα ανοικτού βρόχου, και τα επιταχυνσιόμετρα κλειστού βρόχου (ή σερβοεπιταχυνσιόμετρα)

7.3.1 Επιταχυνσιόμετρα ανοικτού βρόχου

Τα περισσότερα επιταχυνσιόμετρα ανοικτού βρόχου βασίζονται στο σύστημα του σχήματος 7.10, παρακάτω. Διαφέρουν μόνο ως προς διάφορες κατασκευαστικές λεπτομέρειες, όπως το είδος του ελατηρίου, του αποσβεστήρα κ.λ.π. Αυτός ο βασικός τύπος επιταχυνσιόμετρου αποτελείται από ένα περίβλημα το οποίο πακτώνεται σε μια επιφάνεια την επιτάχυνση της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε ως προς ένα ακίνητο σύστημα αναφοράς. Μέσα στο περίβλημα υπάρχει ένα σώμα με μάζα M το οποίο στηρίζεται στο περίβλημα μέσω ενός ελατηρίου με σταθερά K και ενός αποσβεστήρα που είναι ένα σύστημα που η δύναμη αντίδρασης του είναι ανάλογη της ταχύτητας μετατόπισης, με σταθερά B . Με $X_{εισ}$ συμβολίζεται η μετατόπιση του περιβλήματος (είσοδος του συστήματος), με $X_{εξ}$ συμβολίζεται η μετατόπιση του σώματος με μάζα M ως προς το περίβλημα (έξοδος του συστήματος) και με X_M συμβολίζεται η μετατόπιση της μάζας M ως προς το σύστημα αναφοράς. Η έξοδος αυτού του συστήματος είναι μια μετατόπιση. Έτσι για να υπάρχει ηλεκτρική έξοδος χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας σχετικής θέσης, οπότε η διάταξη του παρακάτω σχήματος μαζί με τον μετατροπέα σχετικής θέσης αποτελούν το επιταχυνσιόμετρο. Ο μετατροπέας σχετικής θέσης είναι τέτοιος ώστε μέσα στην περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας του επιταχυνσιόμετρου η τάση εξόδου του να είναι ανάλογη της μετατόπισης



Σχήμα 7.10 Βασικός τύπος επιταχυνσιόμετρου.

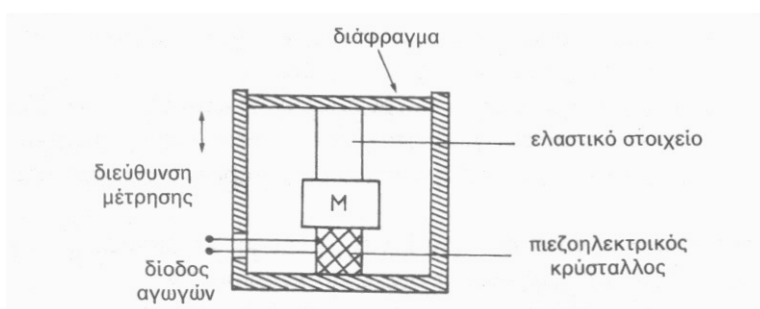
Τα βασικότερα επιταχυνσιόμετρα ανοικτού βρόχου είναι τα εξής :

- Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα
- Τα επιταχυνσιόμετρα με ποτενσιόμετρο
- Τα επιταχυνσιόμετρα με γραμμικό μεταβλητό διαφορικό μετασχηματιστή
- Τα επιταχυνσιόμετρα με μετατροπέα πιεζοαντίστασης και
- Τα ημιαγωγικά επιταχυνσιόμετρα

7.3.1.α. Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα

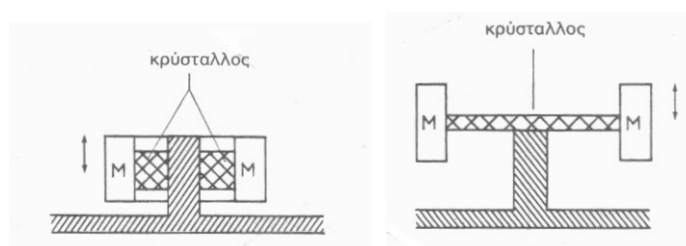
Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα είναι από τους πιο διαδεδομένους τύπους επιταχυνσιομέτρων και χρησιμοποιούνται γενικά σε μεγάλη κλίμακα για δυναμικές μετρήσεις.

Στο σχήμα 7.11, παρακάτω, εικονίζεται μία χαρακτηριστική κατασκευή ενός πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου. Η μάζα M πιέζει τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο ο οποίος συνήθως βρίσκεται σε τάση ακόμη και για μηδενική επιτάχυνση. Αυτό γίνεται για να μπορεί ο μετατροπέας να μετράει επιταχύνσεις και προς τις δύο φορές ενώ ο κρύσταλλος θα βρίσκεται υπό πίεση και δεν θα καταπονείται σε εφελκυσμό. Το διάφραγμα βιδώνεται συνήθως και έτσι μέσω του ελαστικού στοιχείου εξασκείται η μόνιμη πίεση στον κρύσταλλο.



Σχήμα 7.11 Κατασκευή ενός πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου.

Επίσης υπάρχουν και κατασκευές όπου ο κρύσταλλος καταπονείται σε κάμψη ή διάτμηση, (βλέπε σχήμα 7.12). Αυτά τα επιταχυνσιόμετρα έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα. Η ευαισθησία κάθετης διεύθυνσης είναι καλή (Ευαισθησία κάθετης διεύθυνσης, λέγεται η ευαισθησία που παρουσιάζει το επιταχυνσιόμετρο σε επιταχύνσεις με διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση λειτουργίας του). Το επιταχυνσιόμετρο με καταπόνηση σε κάμψη έχει μεγάλη τάση εξόδου και καλή συμπεριφορά στις χαμηλές συχνότητες.



Σχήμα 7.12 Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα με καταπόνηση (α)διάτμησης, και (β)κάμψης.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών επιταχυνσιομέτρων είναι:

-η μεγάλη τάση εξόδου, και η

-μεγάλη φυσική συχνότητα τους, ω , Πράγμα που τα καθιστά κατάλληλα για μετρήσεις επιταχύνσεων που περιέχουν υψηλές αρμονικές (απότομες μεταβολές επιτάχυνσης). Υπάρχουν πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα με πολύ μικρό όγκο γραμμάρια).

Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα εμφανίζουν συχνά καλή απόκριση σε υψηλές συχνότητες αλλά φτωχή απόκριση στις χαμηλές συχνότητες. Παράγουν σχετικά υψηλές τάσεις εξόδου αλλά αυτές συνοδεύονται συχνά και από θόρυβο. Η περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας μπορεί να φθάσει μέχρι μερικές δεκάδες ΚΗΖ για τις κανονικές θερμοκρασίες λειτουργίας. Στις χαμηλές συχνότητες συνήθως η περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας αρχίζει από μερικά ΗΖ. Υπάρχουν όμως και πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα που η περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας τους αρχίζει από 0,1 ΗΖ.

Η ακρίβεια τους είναι συνήθως 1% της πλήρους κλίμακας. Οι μέγιστες ενδείξεις των πιεζοηλεκτρικών επιταχυνσιομέτρων είναι από μερικά έως χιλιάδες g (g : επιτάχυνση της βαρύτητας της γης). Το μειονέκτημα των πιεζοηλεκτρικών επιταχυνσιομέτρων είναι η αδυναμία τους να μετρήσουν σταθερή επιτάχυνση.

7.3.1.β. Επιταχυνσιόμετρα με ποτενσιόμετρο

Σε αυτόν τον τύπο το ποτενσιόμετρο χρησιμοποιείται για την μέτρηση της θέσης $X_{εξ}$ της μάζας Μ ως προς το περίβλημα. Η αντίσταση στηρίζεται στο περίβλημα ενώ η κινητή επαφή παρασύρεται από την κίνηση της μάζας. Αυτοί οι τύποι επιταχυνσιομέτρων χρησιμοποιούνται για μέτρηση επιταχύνσεων που δεν μεταβάλλονται γρήγορα. Μπορούν να μετρήσουν επιταχύνσεις μέχρι μερικές δεκάδες g. Η ακρίβεια τους είναι συνήθως γύρω στο 1% της πλήρους απόκλισης. Για μεγάλες θερμοκρασίες η ακρίβεια μειώνεται. Η φυσική τους συχνότητα είναι συνήθως μερικές δεκάδες Ηz.

7.3.1.γ. Επιταχυνσιόμετρα με γραμμικό μεταβλητό διαφορικό μετασχηματιστή

Τα επιταχυνσιόμετρα αυτά χρησιμοποιούν γραμμικό μεταβλητό διαφορικό μετασχηματιστή για την μέτρηση της $X_{εξ}$. Τα πηνία πρέπει να συνδεθούν με το περίβλημα και ο οπλισμός με την μάζα Μ.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επιταχύνσεις μέχρι αρκετές εκατοντάδες g .Η φυσική τους συχνότητα φτάνει συνήθως μέχρι αρκετές εκατοντάδες Ηz.

Η ακρίβεια τους είναι καλύτερη από 2% της πλήρους κλίμακας

7.3.1.δ. Επιταχυνσιόμετρα με μετατροπέα πιεζοαντίστασης

Υπάρχουν δύο είδη. Το ένα είδος χρησιμοποιεί ελεύθερη πιεζοαντίσταση και το άλλο προσκολλημένη πιεζοαντίσταση. Τα χαρακτηριστικά και των δύο τύπων είναι περίπου ίδια.

Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτών των επιταχυνσιομέτρων είναι το ότι το βάρος και ο όγκος τους είναι σχετικά μικρός.

Μετρούν επιταχύνσεις πολλών εκατοντάδων g . Η φυσική τους συχνότητα φτάνει μέχρι αρκετές εκατοντάδες Hz. Γι αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επιταχύνσεις που μεταβάλλονται σχετικά γρήγορα.

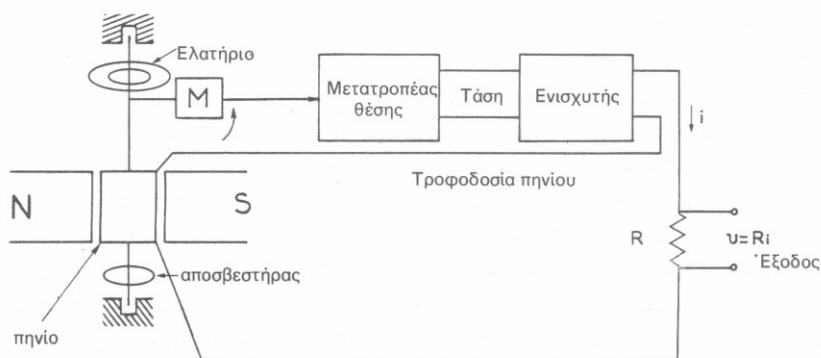
Η ακρίβεια τους είναι περίπου 1% της πλήρους κλίμακας.

7.3.1.ε. Ημιαγωγικά επιταχυνσιόμετρα

Χρησιμοποιούν κάποιο ημιαγωγό για την μέτρηση της μετατόπισης ή της αδρανειακής δύναμης και μετρούν επιταχύνσεις μερικές εκατοντάδες g .

7.3.2 Επιταχυνσιόμετρα κλειστού βρόχου

Τα επιταχυνσιόμετρα κλειστού βρόχου έχουν πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια από τα αντίστοιχα του ανοικτού βρόχου. Τα επιταχυνσιόμετρα κλειστού βρόχου δεν διαθέτουν ελατήριο. Εδώ, το ρόλο του ελατηρίου παίζει η μαγνητική ροπή. Η μη ύπαρξη του ελατηρίου δίνει καλύτερη γραμμικότητα στο σύστημα. Έχουν μια μάζα M επάνω στην οποία όταν εμφανιστεί επιτάχυνση, ασκείται μία αδρανειακή δύναμη η οποία τείνει και να κινήσει την μάζα. Όταν η επιτάχυνση είναι μηδενική, η μάζα είναι τοποθετημένη σε ένα σημείο το οποίο ονομάζεται σημείο αναφοράς, και όταν εμφανιστεί επιτάχυνση η μάζα τείνει να μετακινηθεί λόγω της αδρανειακής δύναμης από το σημείο αναφοράς. Η μετακίνηση αυτή μετριέται από κάποιον μετατροπέα θέσης και μεταφέρεται σε ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογου μεγέθους το οποίο αφού ενισχυθεί τροφοδοτεί ένα ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα που μετατρέπει με τη σειρά του το ηλεκτρικό σήμα σε δύναμη. Η δύναμη αυτή εξασκείται στην μάζα και εξισορροπεί την αδρανειακή δύναμη. Το ρεύμα που τροφοδοτεί τον ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα εξόδου έχει ένταση ανάλογη της επιτάχυνσης και κατά συνέπεια η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον μετατροπέα είναι ένα μέτρο της επιτάχυνσης. Όλα αυτά φαίνονται καλύτερα στο σχήμα 7.13, που ακολουθεί.



Σχήμα 7.13 Ένα επιταχυνσιόμετρο κλειστού βρόχου.

Η περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας τους φτάνει τα 100Hz περίπου. Οι μέγιστες ενδείξεις τους φτάνουν σε αρκετές δεκάδες g. Η ακρίβεια τους είναι καλύτερη από 0,1% της πλήρους κλίμακας.

Κεφάλαιο 8^ο **ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ- ΔΥΝΑΜΗΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗΣ**

8.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι αισθητήρες παραμόρφωσης ανιχνεύουν τις μικρές μεταβολές κατά την παραμόρφωση των στερεών. Σε όλες τις πρακτικές εφαρμογές η μέτρηση της δύναμης γίνεται έμμεσα – μετρώντας δηλαδή την παραμόρφωση την οποία αυτή προκαλεί όταν επενεργεί σε κατάλληλα διαλεγμένα μηχανικά στοιχεία (μια ράβδος, ένα διάφραγμα ή ένα ελατήριο). Η παραμόρφωση, που όταν είναι μικρή είναι σύμφωνα με τον νόμο του Hook ανάλογη της δύναμης, μετριέται στη συνέχεια με κάποιο αισθητήριο θέσης ή παραμόρφωσης. Συνήθως χρησιμοποιείται το μηκυσιόμετρο ή ο μετρητής παραμόρφωσης (strain gauge) σπανιότερα δε το LVDT. Το πρόβλημα βέβαια που αντιμετωπίζουμε όταν πρόκειται να μετρήσουμε δύναμη με τον παραπάνω τρόπο είναι ότι το μέγεθος των παραμορφώσεων είναι απειροελάχιστο, της τάξης μεγέθους μερικών μικρών πολύ συχνά. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο έχουν αναπτυχθεί ειδικές διατάξεις μέτρησης των παραμορφώσεων. Να σημειώσουμε εδώ ότι παραμορφώσεις χρειάζεται να μετρά κανείς και σε άλλες περιπτώσεις ανεξάρτητα από μέτρηση δύναμης (π.χ. για μετρήσεις παραμορφώσεων σε φέρουσες κατασκευές προκειμένου να διαπιστώσει την αντοχή τους- γέφυρες, μεγάλους γερανούς κ.λ.π.)

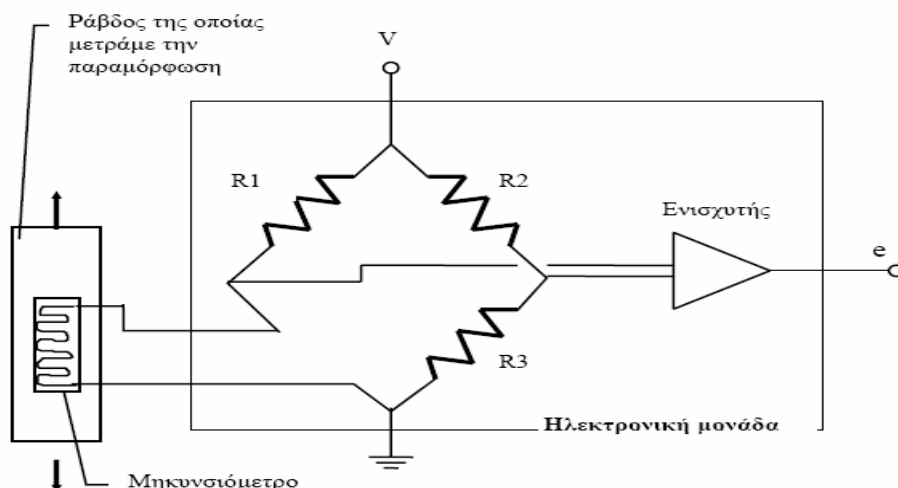
8.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

8.2.1 Μηκυσιόμετρο ενσωματωμένου συρματιδίου – Μετρητής παραμόρφωσης

Ο πιο γνωστός αισθητήρας παραμόρφωσης είναι το μηκυσιόμετρο ενσωματωμένου συρματιδίου (bonded wire strain gauge). Η λειτουργία του στηρίζεται στο γεγονός ότι η ηλεκτρική αντίσταση ενός συρματιδίου εξαρτάται εκτός των άλλων και από το μήκος και από τη διατομή του. Όταν το συρματίδιο παραμορφώνεται υπό την επίδραση κάποιας δύναμης, τότε μεταβάλλεται και το μήκος και η διατομή του, και άρα και η ηλεκτρική του αντίσταση.

Στο σχήμα 8.1 , πιο κάτω εικονίζεται η όλη διάταξη με την βοήθεια της οποίας ένα μηκυσιόμετρο μετράει την παραμόρφωση κάποιας ράβδου. Το μηκυσιόμετρο συνδέεται σαν η τέταρτη αντίσταση σε γέφυρα Wheatstone . Η γέφυρα τροφοδοτείται με τάση V στα δύο άκρα της, γνωρίζουμε δε ότι η τάση στα δύο άλλα άκρα είναι ανάλογη της μεταβολής της αντίστασης της μεταβαλλόμενης αντίστασης , δηλαδή του μηκυσιομέτρου εν προκειμένω. Στη συνέχεια η μικρή αυτή τάση ενισχύεται και (φιλτράρεται συνήθως) έτσι που να μας δίνει ένα σήμα μετρήσιμο από μετρητικά όργανα ή από κάποιο H/Y. Όλη η

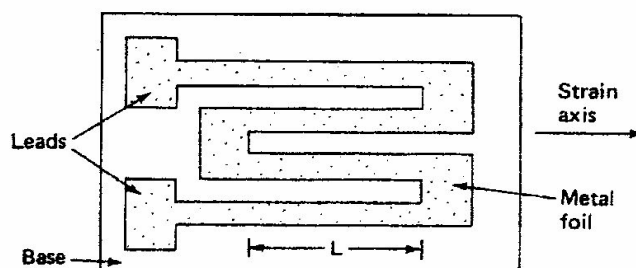
εργασία γίνεται στην ηλεκτρονική μονάδα, το δε σήμα e που παίρνουμε είναι συνήθως μια τάση $0...5V$ ή $0...10V$ ανάλογη της παραμόρφωσης, κατάλληλη δηλαδή να "διαβαστεί" από ένα Η/Υ. Από κατασκευαστική άποψη το συρματίδιο είναι σε μορφή μαιάνδρου ενσωματωμένο σε λεπτό φύλλο πλαστικού. Το φιλμ του πλαστικού ενσωματώνεται στη συνέχεια στη ράβδο της οποίας πρόκειται να μετρηθεί η παραμόρφωση.



Σχήμα 8.1 Διάταξη με την βοήθεια της οποίας ένα μηκυνσιόμετρο μετρά την παραμόρφωση κάποιας ράβδου.

Γενικά, με τους αισθητήρες παραμόρφωσης μετράμε μικρές παραμορφώσεις στερεών σωμάτων, όπως συμπίεση, εφελκυσμός, κύρτωση ράβδων ή πετρωμάτων. Οι περισσότεροι αισθητήρες παραμόρφωσης αποτελούνται από μεταλλικό φύλλο ή σύρμα που είναι τοποθετημένο σε ένα πλαστικό φύλλο ή μονωτική βάση όπως δείχνει το σχήμα 8.2, παρακάτω. Ο αισθητήρας αυτός συγκολλείται στο στερεό που πρόκειται να παραμορφωθεί. Κατά την παραμόρφωση του στερεού μεταβάλλεται το ολικό μήκος του μεταλλικού σύρματος του αισθητήρα και επομένως η αντίστασή του. Εάν R_0 , είναι η αντίσταση του αισθητήρα πριν την παραμόρφωση και ΔR η μεταβολή αυτού μετά την παραμόρφωση, τότε αποδεικνύεται με προσέγγιση ότι:

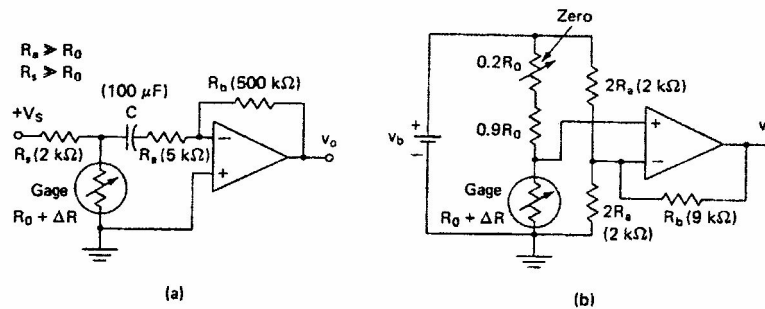
$\Delta R / R_0 = G \varepsilon$ όπου ε η επιμήκυνση και G ένας σταθερός συντελεστής του αισθητήρα.



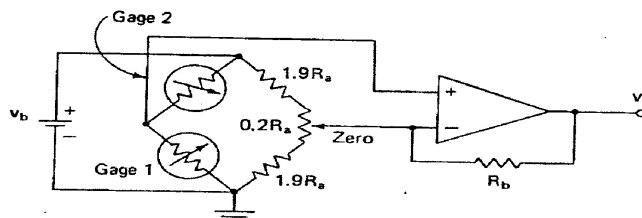
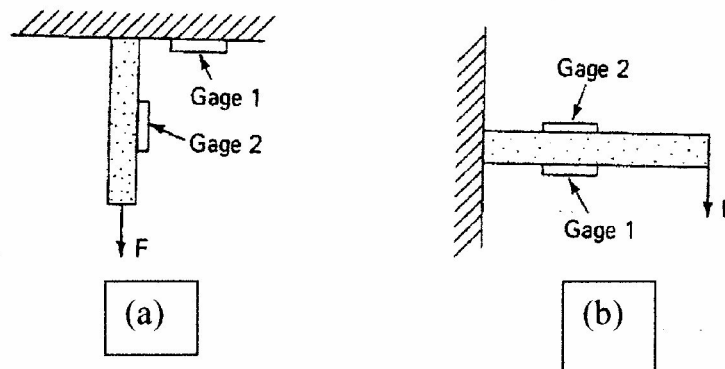
Σχήμα 8.2 Αισθητήρας παραμόρφωσης αποτελούμενος από μεταλλικό φύλλο ή σύρμα τοποθετημένο σε μονωτική βάση.

Η προσαρμογή του αισθητήρα παραμόρφωσης σε ηλεκτρικό κύκλωμα μπορεί να γίνει όπως ακριβώς και στα θερμίστορες, στην διάταξη απλής προσαρμογής του σχήματος 8.3a) και στην διάταξη γέφυρας του σχήματος 8.3b) .

Επειδή στους αισθητήρες παραμόρφωσης η αντίσταση μπορεί να μεταβληθεί και από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, γι αυτό το λόγο στις μετρήσεις με τους παραπάνω αισθητήρες σκόπιμο είναι να τοποθετούνται δύο όμοιοι αισθητήρες στο σώμα που υφίσταται την παραμόρφωση όπως δείχνει το σχήμα 8.4. Οι δύο αυτοί αισθητήρες αποτελούν στοιχεία ηλεκτρικής γέφυρας του σχήματος . Η μεταβολή της αντίστασης στους αισθητήρες από την θερμοκρασία αντισταθμίζεται καθόσον αυτή θα είναι ίδια και στους δύο αισθητήρες της γέφυρας.



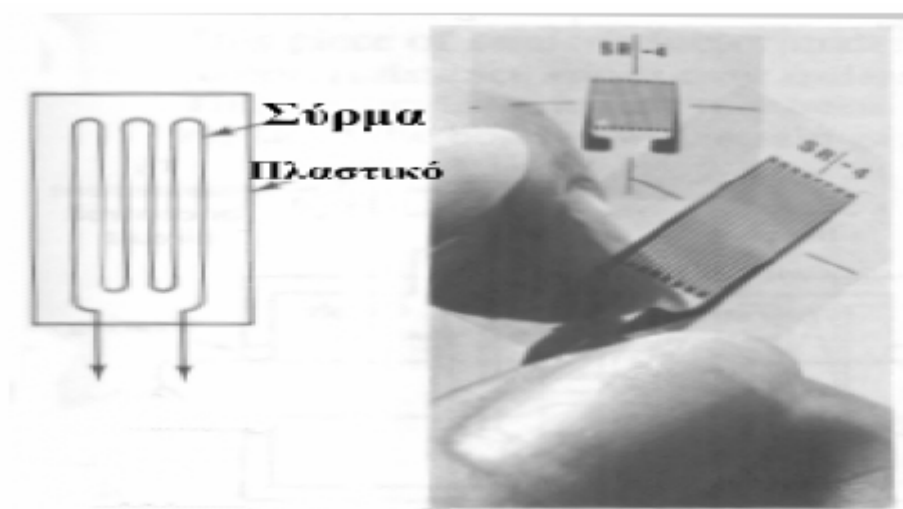
Σχήμα 8.3 Η προσαρμογή του αισθητήρα παραμόρφωσης σε ηλεκτρικό κύκλωμα σε (a) διάταξη απλής προσαρμογής και (b) σε διάταξη γέφυρας.



Σχήμα 8.4 Δύο όμοιοι αισθητήρες, που αποτελούν στοιχεία ηλεκτρικής γέφυρας του παραπάνω σχήματος.

8.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

Όπως είπαμε και παραπάνω, στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, η μέτρηση της δύναμης γίνεται έμμεσα – μετρώντας δηλαδή την παραμόρφωση την οποία αυτή προκαλεί όταν επενεργεί σε κατάλληλα διαλεγμένα μηχανικά στοιχεία (μια ράβδο, ένα διάφραγμα ή ένα ελατήριο). Η παραμόρφωση, που όταν είναι μικρή είναι σύμφωνα με τον νόμο του Hook ανάλογη της δύναμης, μετριέται στη συνέχεια με κάποιο αισθητήριο θέσης ή παραμόρφωσης.



Σχήμα 8.5

Αν φανταστούμε τώρα στην κατασκευή του σχήματος 8.5, παραπάνω, την ράβδο να είναι κατάλληλα διαλεγμένη τότε η όλη κατασκευή αν βαθμονομηθεί μετρά τη δύναμη επενέργειας πάνω στη ράβδο, αφού η παραμόρφωση είναι ανάλογη της δύναμης στην ελαστική περιοχή. Το όργανο τότε είναι μια μονάδα μέτρησης δύναμης και θα την ονομάζουμε δυναμοκυψέλη (load cell). Υπάρχουν σήμερα διαθέσιμες δυναμοκυψέλες για μέτρηση δυνάμεων από μερικά γραμμάρια μέχρι αρκετούς τόνους. Όταν καλούμαστε να επιλέξουμε πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη την περιοχή δυνάμεων που θέλουμε να μετράμε καθώς και το είδος της δύναμης (θλιπτική ή εφελκυστική). Το μηχανοσκόπιο χρησιμοποιείται και για την μέτρηση της ροπής που μεταφέρει κάποιος άξονας. Για τον σκοπό αυτό ενσωματώνεται έτσι στον άξονα ώστε να μετράει την στρέψη του, η οποία είναι για την ελαστική περιοχή ανάλογη της μεταφερόμενης ροπής. Πρόσφατα κατασκευάστηκαν μετρητές παραμορφώσεων που χρησιμοποιούν ημιαγωγό υλικό αντί για συρματίδιο. Το πλεονέκτημα τους είναι ότι η αντίστασή τους μεταβάλλεται πολύ περισσότερο για μια δεδομένη παραμόρφωση από ότι αυτή του κοινού σύρματος και συνεπώς μπορούν να μετρήσουν μικρότερες δυνάμεις. Μειονεκτήματά τους είναι το κόστος και η ευαισθησία σε θερμοκρασίες και κτυπήματα.

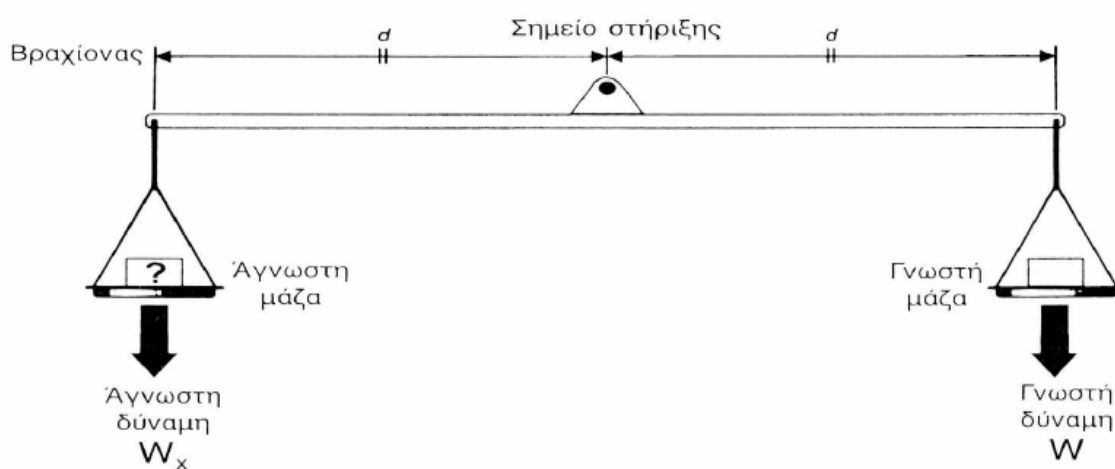
8.3.1 Ζυγοί ισορροπίας

Είναι ένα σύστημα στο οποίο επιδιώκεται η κατάσταση της ισορροπίας, για να προσδιοριστούν κάποιες άγνωστες τιμές δύναμης(βάρους) και μάζας

1) Ζυγός ισορροπίας με κεντρική στήριξη

Ο ζυγός αποτελείται από ένα βραχίονα και από ισαπέχοντα άκρα στα οποία αναρτώνται οι γνωστές και οι άγνωστες δυνάμεις (σχήμα 8.6).

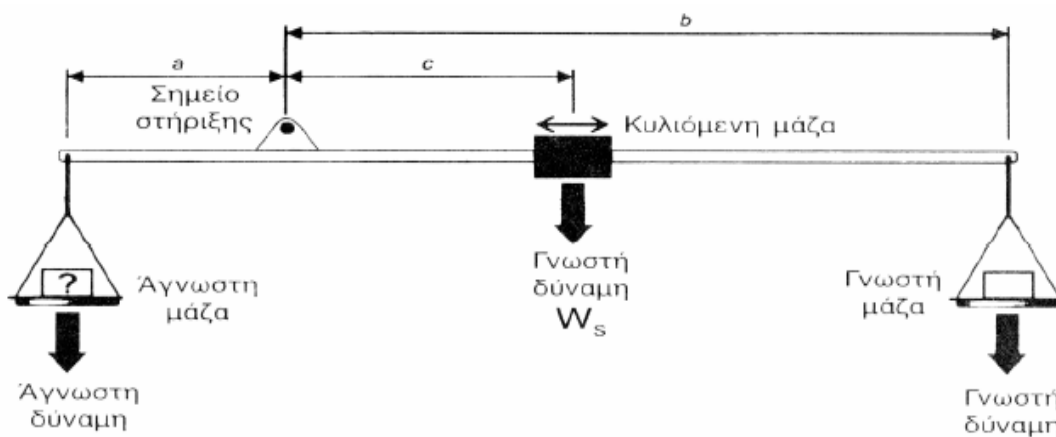
Η συνθήκη ισορροπίας επιτυγχάνεται όταν $W_x = W$, όπου W_x και W η άγνωστη και η γνωστή δύναμη αντίστοιχα.



Σχήμα 8.6 Ζυγός ισορροπίας με κεντρική στήριξη.

2) Ζυγός ισορροπίας με κυλιόμενη μάζα

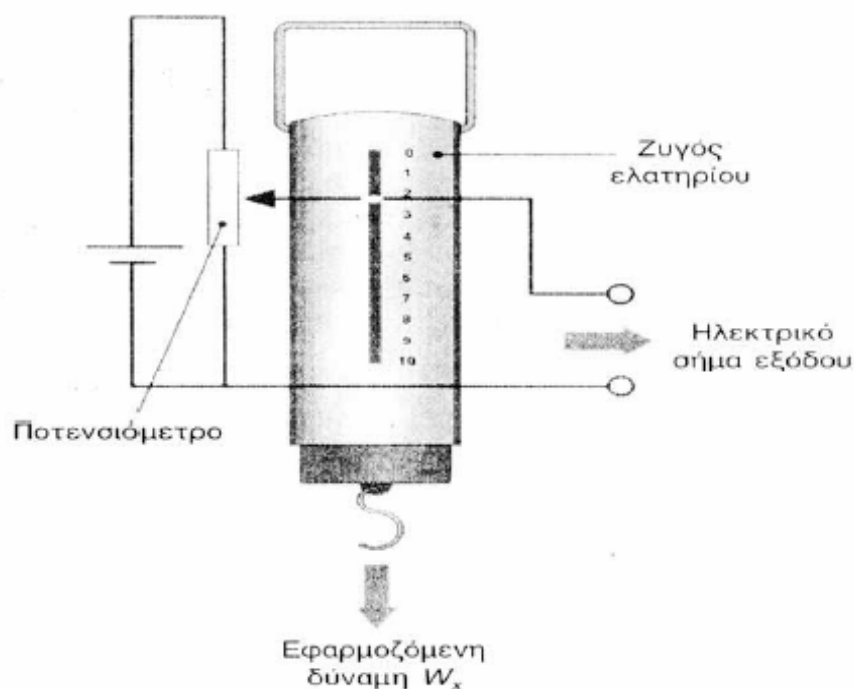
Ο υπολογισμός της άγνωστης δύναμης βασίζεται στη προσθήκη γνωστής δύναμης στον άλλο δίσκο του ζυγού και τη μετατόπιση της γνωστής κυλιόμενης μάζας έτσι ώστε ο ζυγός να ισορροπήσει σύμφωνα με την εξής σχέση : $(W_x \cdot a) = (W \cdot b) + (W_s \cdot c)$. (σχήμα 8.7).



Σχήμα 8.7 Ζυγός ισορροπίας με κυλιόμενη μάζα.

3) Ζυγός ελατηρίου

Το ένα άκρο του ελατηρίου είναι σταθερό, ενώ το άλλο άκρο επιμηκύνεται λόγω της εφαρμογής της δύναμης W_x , σύμφωνα με τον νόμο του Hook. Αν συνδυαστεί κατάλληλα το ελατήριο με ένα ποτενσιόμετρο τότε μετατρέπεται εύκολα η μετατόπιση σε ηλεκτρικό σήμα. (σχήμα 8.8).



Σχήμα 8.8 Ζυγός ελατηρίου και ποτενσιόμετρο.

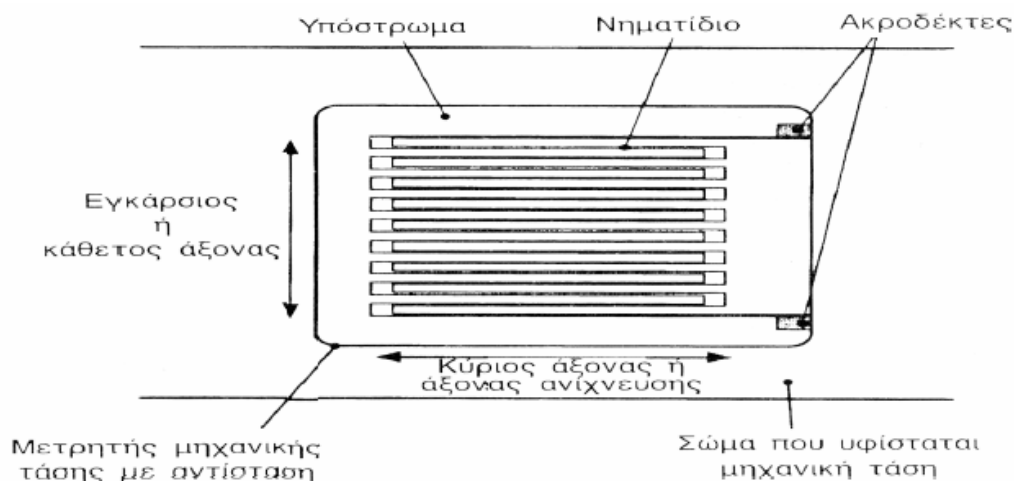
8.3.2 Αισθητήρια δύναμης τύπου πιεζοαντίστασης

Τα πιο διαδεδομένα αισθητήρια δύναμης είναι αυτά του τύπου πιεζοαντίστασης. Οι κατηγορίες των μετατροπέων πιεζοαντίστασης είναι 1) Οι μεταλλικοί (ελεύθερης και προσκολλημένης πιεζοαντίστασης) και 2) Οι ημιαγωγοί (μετατροπέας διάχυσης και μετατροπέας προσκολλημένης πιεζοαντίστασης)

1) Μεταλλικοί

Οι μεταλλικοί βασίζονται στην ιδιότητα να μεταβάλλουν την αντίστασή τους όταν ασκηθεί κάποια δύναμη. Ένας γραμμικός μετρητής μηχανικής τάσης είναι ευαίσθητος σε αλλαγές μετατόπισης κατά μήκος του κύριου άξονα και πρακτικά ανεπηρέαστος κατά μήκος του εγκάρσιου άξονα (σχήμα 8.9).

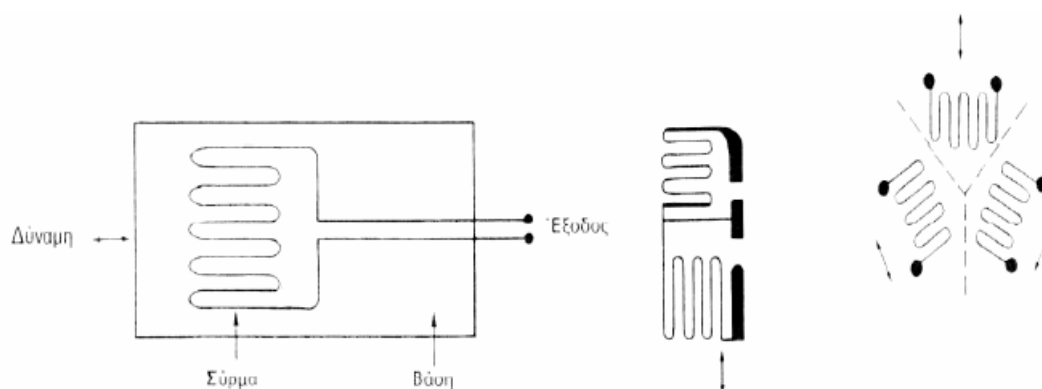
Επιθυμητή είσοδος ενός τέτοιου μετατροπέα είναι κατά κύριο λόγο η δύναμη ή και η μετατόπιση, και η έξοδος είναι η αλλαγή της αντίστασης ή συνήθως η τάση κάποιας γέφυρας Wheatstone.



Σχήμα 8.9 Απλός μετρητής μηχανικής τάσης με αντίσταση.

α) Προσκολλημένη πιεζοαντίσταση

Οι συγκεκριμένοι μετατροπείς αποτελούνται από λεπτό σύρμα το οποίο σχηματίζει διάφορα σχήματα έτσι ώστε να εμφανίζει ευαισθησία κατά την μία διεύθυνση, κατά δύο διευθύνσεις ή κατά τρεις διευθύνσεις. (σχήμα 8.10).



Σχήμα 8.10 Διάταξη ενός μετατροπέα με προσκολλημένη πιεζοαντίσταση.

Για την αντίσταση R του σύρματος ισχύει : $R = \rho \frac{4l}{D^2\pi}$

Όπου ρ η ειδική αντίσταση, όπου l το μήκος, και D η διάμετρός του.

Οι μέγιστες παραμορφώσεις που μπορούν να μετρούνται, είναι συνήθως μερικά εκατοστά του συνολικού μήκους. Η διακριτική αυτή ικανότητα μπορεί να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο με χρήση ευαίσθητων ηλεκτρονικών ενισχυτών. Η επίδραση της θερμοκρασίας είναι σημαντική γιατί μεταβάλλει την αντίσταση της πιεζοαντίστασης.

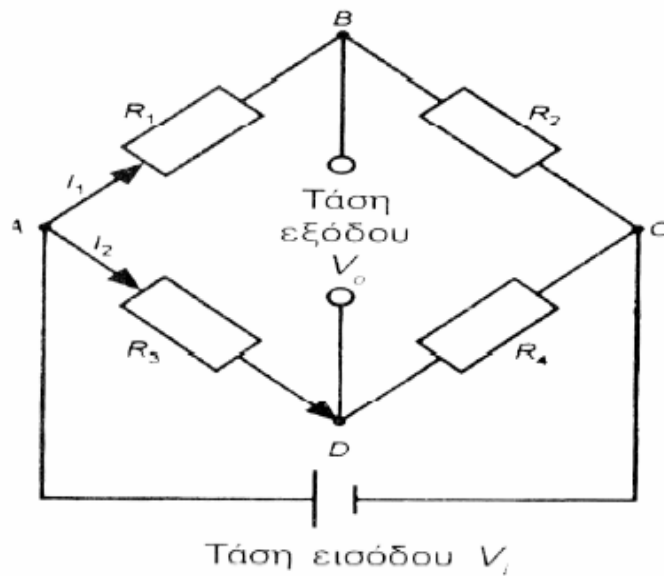
Για την μετατροπή της μεταβολής της τιμής της αντίστασης σε ηλεκτρική τάση, χρησιμοποιείται μια γέφυρα Wheatstone (σχήμα 8.11).

Εάν μία αντίσταση της γέφυρας αντικατασταθεί από μία πιεζοαντίσταση, τότε μεταβολή στην τιμή της ασκούμενης δύναμης πάνω στην πιεζοαντίσταση τροποποιεί την τιμή της και κατά συνέπεια οδηγεί την γέφυρα σε κατάσταση μη ισορροπίας. Η αλλαγή της τάσης

εξόδου V_o , εν συγκρίσει με την αλλαγή της αντίστασης R_1 , δίνεται από την σχέση :

$$dV_o = V_i \frac{dR_1}{R_1 + R_2}$$

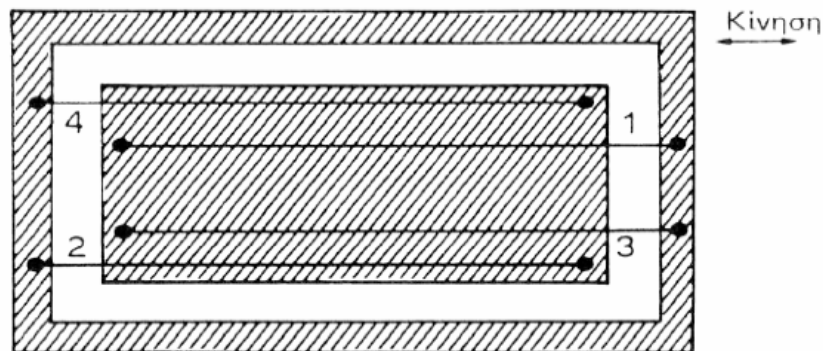
Όπου R_1 , η τιμή της πιεζοαντίστασης.



Σχήμα 8.11 Κύκλωμα γέφυρας Wheatstone.

β)Ελεύθερη πιεζοαντίσταση

Εδώ, οι μετατροπείς διαθέτουν πιεζοαντιστάσεις τα άκρα των οποίων είναι στηριγμένα σε δύο βάσεις οι οποίες μπορούν να κινηθούν. Συνήθως η μία είναι σταθερή και η άλλη κινείται κάτω από την επίδραση μιας δύναμης. Διαθέτουν επίσης 4 σύρματα τα οποία έχουν ήδη μια προένταση η οποία δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ο μετατροπέας αυτός και σε περίπτωση θλίψης. Τα σύρματα που αναφέραμε συνδέονται σε γέφυρα Wheatstone η οποία με χρήση μεταβλητών αντιστάσεων ισορροπεί όταν δεν ασκείται δύναμη. Όταν όμως ασκηθεί κάποια δύναμη, οι αντιστάσεις των συρμάτων μεταβάλλονται και η έξοδος της γέφυρας είναι μια τάση ανάλογη της μετατόπισης ή παραμόρφωσης που προκάλεσε η δύναμη στα σύρματα. (σχήμα 8.12).



Σχήμα 8.12 Μετατροπέας με ελεύθερη πιεζοαντίσταση σε απλή μορφή.

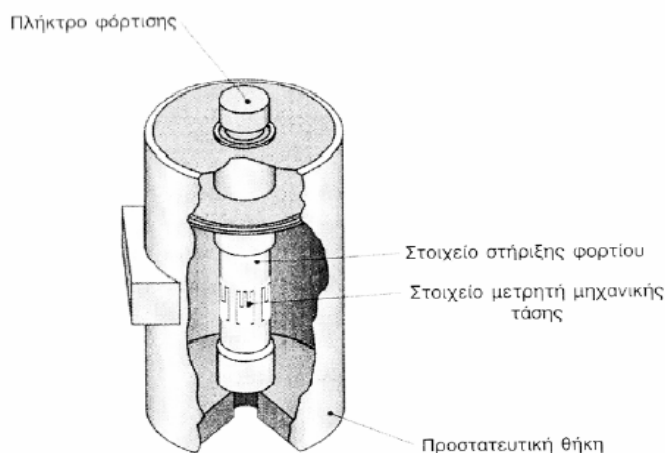
2) Ημιαγωγικοί μετατροπείς πιεζοαντίστασης

Υπάρχουν βασικά δύο τύποι ημιαγωγικών μετατροπέων πιεζοαντίστασης. Στον ένα τύπο, (ημιαγωγικοί μετατροπείς προσκολλημένης πιεζοαντίστασης) χρησιμοποιείται ένας κρύσταλλος πυριτίου με προσμίξεις σαν πιεζοαντίσταση. Τέσσερις τέτοιοι κρύσταλλοι συνδέονται σε γέφυρα Wheatstone και προσκολλούνται στην επιφάνεια την παραμόρφωση της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε. Ο δεύτερος τύπος που καλείται και μετατροπέας διάχυσης, χρησιμοποιεί πυρίτιο σαν μηχανική βάση και η πιεζοαντίσταση διαχέεται μέσα σε αυτό.

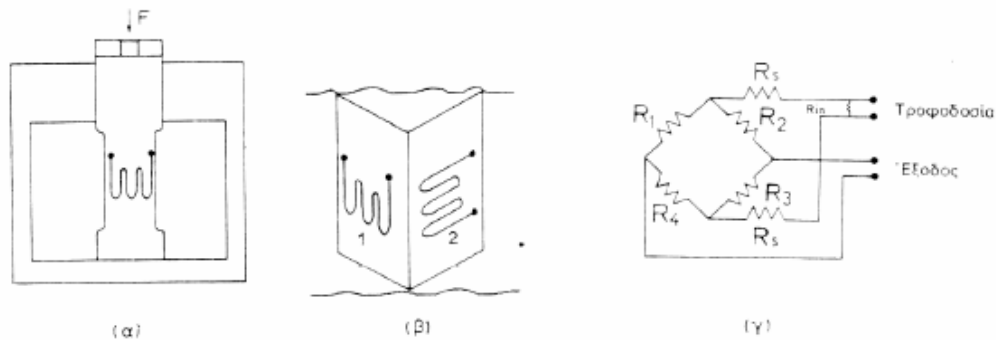
Οι ημιαγωγικοί μετατροπείς προσκολλημένης πιεζοαντίστασης επηρεάζονται από μεταβολές θερμοκρασίας και με την πάροδο του χρόνου μειώνεται η ακρίβειά τους, σε αντίθεση με τους μετατροπείς διάχυσης οι οποίοι εμφανίζουν θα λέγαμε μια χρονική σταθερότητα.

8.3.3 Κυψελίδα φόρτισης

Χρησιμοποιεί ελαστικό υλικό που έχει τη μορφή τετράγωνης κολόνας πάνω στο οποίο βρίσκονται προσκολλημένες οι πιεζοαντιστάσεις (σχήμα 8.13). Όταν το υλικό αυτό βρίσκεται υπό κάποια μηχανική τάση, τότε προκαλούνται μικρές μεταβολές στις αντιστάσεις των τεσσάρων μετρητών. Τα στοιχεία μαζί με κατάλληλες αντιστάσεις σταθερής τιμής, συγκροτούν μια γέφυρα Wheatstone, η ακριβής φύση της οποίας εξαρτάται από την εφαρμογή και τη μορφή της μηχανικής τάσης που ασκείται.



Σχήμα 8.13 Κυψελίδα φόρτισης με μετρητή μηχανικής τάσης.



Σχήμα 8.14 (α, β)Σχηματική παράσταση μετατροπέα βάρους, (γ)Συνδεσμολογία των πιεζοαντιστάσεων.

8.3.4 Άλλα αισθητήρια δύναμης

Ένα άλλο αισθητήριο δύναμης είναι ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος. Η λειτουργία του βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (ορισμένοι κρύσταλλοι όταν συμπιεστούν εμφανίζουν μια τάση στα άκρα τους). Και χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιπτώσεις ταχέως μεταβαλλόμενων δυνάμεων. Επίσης για την μέτρηση της δύναμης μπορούν να χρησιμοποιηθούν αισθητήρια δύναμης με ΓΜΔΜ, και μεταβλητής επαγωγής.

Όταν τώρα μιλάμε για μέτρηση της μάζας, ουσιαστικά μιλάμε για μέτρηση του βάρους. Ένας αισθητήρας δύναμης μπορεί να θεωρηθεί ως αισθητήρας μάζας όταν η δύναμη που εφαρμόζεται είναι το βάρος. Οι αισθητήρες δύναμης μετρούν γενικά, μεγάλες δυνάμεις. Εντούτοις, υπάρχει μία άλλη τάξη αισθητηρίων μάζας οι οποίοι ονομάζονται μικροζυγοί και μετρούν πολύ μικρές μάζες.

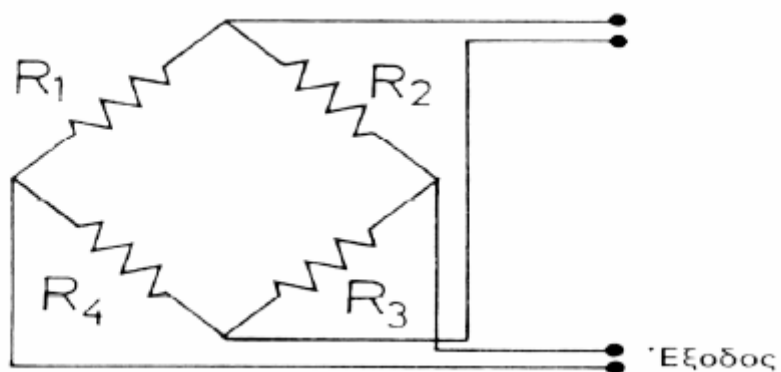
8.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ

Όσον αφορά για την μέτρηση της ροπής. Παρακάτω, στο σχήμα 8.15 , εικονίζεται μια διάταξη για την μέτρηση ροπής άξονα, όπου βλέπουμε το φορτίο, τον μετατροπέα ροπής και την κινητήρια μηχανή. Ο μετατροπέας ροπής είναι ένα τμήμα άξονα από κατάλληλο ελαστικό υλικό, το οποίο λόγω της παραμόρφωσής του μεταβιβάζει την ροπή σε στρέψη. Στην συνέχεια η ροπή του άξονα μετριέται με πιεζοαντιστάσεις οι οποίες συνδέονται σε γέφυρα Wheatstone (σχήμα 8.16). Για την ηλεκτρική τους σύνδεση χρησιμοποιούνται δακτύλιοι με ψήκτρες. Αν το ηλεκτρικό σήμα ενός μετατροπέα ροπής πολλαπλασιασθεί με το ηλεκτρικό σήμα ενός ταχομέτρου που μετράει την ταχύτητα περιστροφής του άξονα, το αποτέλεσμα θα είναι η μηχανική ισχύς του άξονα.

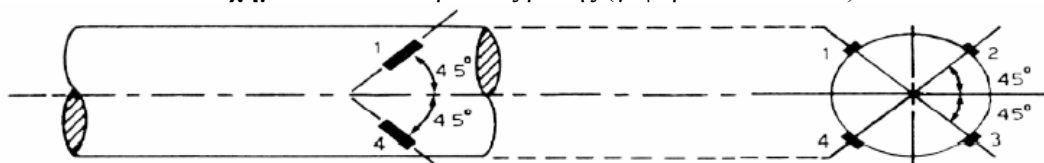
Εάν οι πιεζοαντιστάσεις είναι τοποθετημένες με ακρίβεια και έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, ο μετατροπέας δεν επηρεάζεται σημαντικά από τάσεις κάμψης ή αξονικές τάσεις.



Σχήμα 8.15 Διάταξη για την μέτρηση ροπής άξονα.



Σχήμα 8.16 Μετατροπέας ροπής (γέφυρα Wheatstone).



Για την μέτρηση της ροπής χρησιμοποιούνται επίσης δυναμόμετρα και στροβοσκόπια.

Κεφάλαιο 9^ο **ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΕΩΣ**

9.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η πίεση αποτελεί ένα γενικό όρο και γενικά είναι μία μορφή μηχανικής τάσης. Μηχανική τάση είναι η δύναμη που ασκείται σε ένα στερεό αντικείμενο ή που προκαλείται από αυτό. Στο διεθνές σύστημα μονάδων, μονάδα μέτρησης της πίεσεως είναι το ένα πασκάλ(Pa) που ισούται με ένα νιούτον ανά τετραγωνικό μέτρο (Nt/m^2). Επειδή όμως είναι πολύ μικρή μονάδα και επειδή υπάρχει μεγάλη εξοικείωση με την πίεση μιας ατμόσφαιρας συχνά χρησιμοποιείται το Kp/cm^2 σαν μονάδα μέτρησης της πίεσης.

Επειδή ουσιαστικά η πίεση ορίζεται σαν η εξασκούμενη σε μια επιφάνεια δύναμη δια της επιφάνειας αυτής, καταλαβαίνει κανείς ότι είναι δυνατόν να μετρηθεί η πίεση αν μετρηθεί η δύναμη που εξασκεί αυτή πάνω σε μια γνωστή επιφάνεια. Έτσι, τα περισσότερα αισθητήρια πίεσης χρησιμοποιούν κατά βάση κάποιο αισθητήριο δύναμης.

Η πίεση γενικά, είναι ένα φυσικό μέγεθος που μπορεί να μετρηθεί ηλεκτρικά από ένα πλήθος αισθητήρων. Υπάρχουν αρκετοί μηχανικοί μετατροπείς όπως: διαφράγματα, κάψουλες, μανομετρικοί σωλήνες, σωλήνες Bourdon κ.α. που μετρούν την πίεση με το αντίστοιχο μήκος ή απόσταση καθώς και με τις αλλαγές στην κίνηση που παράγεται.

Έτσι, οι αισθητήρες πίεσης αποτελούνται συνήθως από ένα ελαστικό στοιχείο το οποίο συχνά είναι ένα διάφραγμα και από έναν άλλο αισθητήρα συνήθως θέσεως, ο οποίος μετατρέπει την παραμόρφωση του διαφράγματος στο κέντρο του λόγω της πίεσης, σε ένα ηλεκτρικό σήμα. Το είδος του δεύτερου αισθητήρα προσδιορίζει και τον τύπο του αισθητήρα πίεσης.

Οι μετρητές πίεσης χωρίζονται σε 4 κατηγορίες από πλευράς είδους πίεσης που μετρούν και συγκρίνουν την πίεση που πρόκειται να μετρηθεί με μία πίεση αναφοράς.. Ανάλογα με την πίεση αναφοράς μιλάμε για μετρητές:

- Σχετικής πίεσης
- Σχετικής πίεσης ως προς την ατμοσφαιρική
- Απόλυτης πίεσης, και
- Διαφορικής πίεσης

Μιλώντας για ατμοσφαιρική πίεση εννοούμε οτιδήποτε βρίσκεται επάνω στην επιφάνεια της γης που υφίσταται πίεση επειδή ο αέρας έχει βάρος. Η ατμοσφαιρική πίεση μπορεί να μεταβάλλεται διαρκώς για αυτό δεν είναι πάντοτε σκόπιμο να μετράμε την πίεση με απόλυτο τρόπο. Ένας όρος που χρησιμοποιείται συχνά κατά την μέτρηση των πιέσεων είναι η πίεση μετρητή, η οποία χρησιμοποιεί ως πίεση αναφοράς την ατμοσφαιρική πίεση. Η απόλυτη πίεση είναι τότε το άθροισμα της πίεσης μετρητή και της ατμοσφαιρικής πίεσης.

Η *Σχετική πίεση*, μετριέται από τους μετρητές σχετικής πίεσης οι οποίοι συγκρίνουν την μετρούμενη πίεση με την πίεση που υπάρχει σε ένα σφραγισμένο χώρο μέσα στον μετρητή. Αυτή η πίεση είναι η πίεση αναφοράς.

Η *σχετική πίεση* ως προς την ατμοσφαιρική (ή αλλιώς μανομετρική πίεση), μετριέται από τους μετρητές σχετικής πίεσης ως προς την ατμόσφαιρα οι οποίοι συγκρίνουν την μετρούμενη πίεση με την ατμοσφαιρική πίεση. Εδώ, η πίεση αναφοράς είναι η πίεση της ατμόσφαιρας.

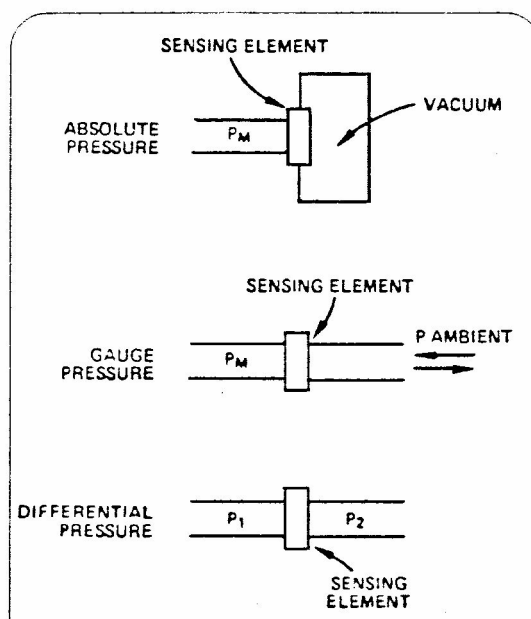
Η *απόλυτη πίεση*, μετριέται με τους μετρητές απόλυτης πίεσης οι οποίοι μετρούν την πίεση ως προς το κενό. Ο χώρος αναφοράς αυτών των μετρητών έχει πρακτικά μηδενική πίεση. (μέτρηση πίεσης με αναφορά τη μηδενική πίεση).

Η *διαφορική πίεση*, μετριέται από τους μετρητές διαφορικής πίεσεως και αναφέρεται στην μέτρηση της διαφοράς δύο πιέσεων. Οι μετρητές διαφορικής πίεσης έχουν δύο εισόδους, ο χώρος αναφοράς τους αποτελεί την δεύτερη είσοδο.

Οι αισθητήρες πίεσεως βασίζονται ουσιαστικά στην ανίχνευση μετακίνησης μιας ελαστικής επιφάνειας όταν μεταβάλλεται η πίεση αυτής. Το κυριότερο τμήμα σε ένα αισθητήρα πίεσεως είναι και κάποιος συνήθως αισθητήρας μετακίνησης, θέσης.

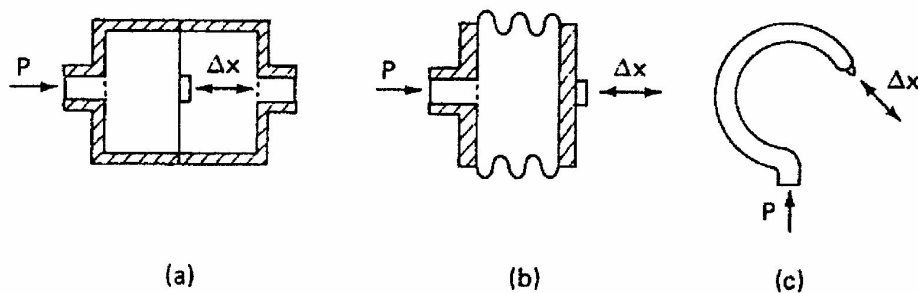
9.2 ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Όπως με όλους τους αισθητήρες, χρειάζεται μεγάλη προσοχή και εμπειρία για να πάρουμε μία μέτρηση γραμμική και σταθερή. Η έξοδος από ένα μηχανικό interface εφαρμόζεται σε έναν ηλεκτρικό μετατροπέα. Ασφαλώς τα τελευταία χρόνια έχουν κάνει την εμφάνιση τους αισθητήρες καθαρά ηλεκτρονικοί.

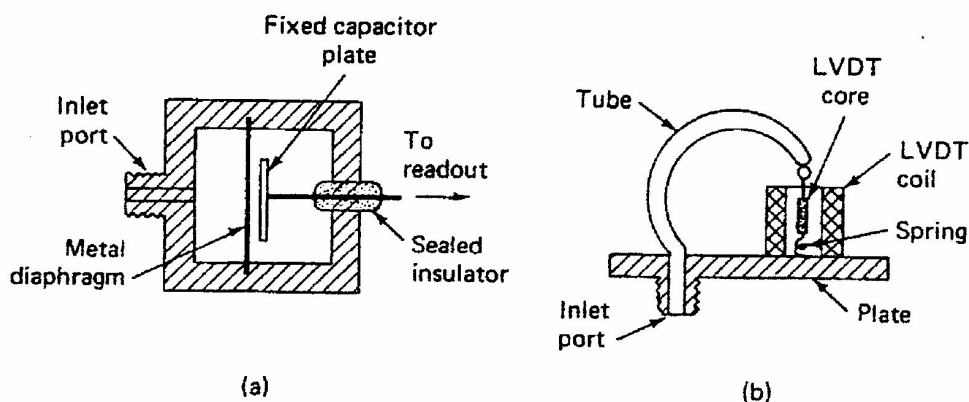


Σχήμα 9.1 Τρεις τύποι μετατροπέων πίεσης.

Οι πιο δημοφιλής τύποι αισθητήρων πίεσης που υπάρχουν φαίνονται στο σχήμα 9.2, παρακάτω. Η μεταβολή της πίεσης προκαλεί μεταβολή μίας ελαστικής μεμβράνης (διαφράγματος), αυτός δε ο τύπος λέγεται αισθητήρας πίεσεως διαφράγματος (diaphragm pressure sensor) και φαίνεται στο σχήμα 9.2a), η οποία παραμόρφωση του διαφράγματος μπορεί να μετρηθεί με τις μεθόδους LVDT (Linear variable differential transformer), μεταβολής χωρητικότητας κ.τ.λ. Στο σχήμα 9.2b), ο αισθητήρας πίεσης έχει την μορφή ελαστικής φουσαρμόνικας (bellow pressure sensor), με αποτέλεσμα η μεταβολή της πίεσης να ενεργεί ως μεταβολή της ελαστικής φουσαρμόνικας, και επομένως την μετακίνηση της επιφάνειας του κατά Δx . Πιο δίπλα, στο σχήμα 9.2c), ο αισθητήρας έχει την μορφή ελαστικού μεταλλικού σωλήνα σχήματος αγκίστρου (bourdon tube pressure sensor), με αποτέλεσμα η μεταβολή της πίεσης να δημιουργεί μεταβολή κατά Δx του ελαστικού αγκίστρου. Οι σωλήνες bourdon είναι από τους πιο δημοφιλής μετρητές πίεσεως. Στο σχήμα, φαίνεται η μέτρηση της μετακίνησης του διαφράγματος με την μεταβολή της χωρητικότητας, όπου ο ένας οπλισμός του πυκνωτή είναι το μεταλλικό διάφραγμα. Τέλος, στο σχήμα 9.3, φαίνεται η προσαρμογή του αισθητήρα μετακίνησης LVDT στον ελαστικό άγκιστρο του αισθητήρα πίεσης, ώστε η μεταβολή της πίεσης να ανάγεται τελικά σε μεταβολή της τάσης εξόδου από τον αισθητήρα LVDT.



Σχήμα 9.2 Τρεις κύριοι τύποι αισθητήρων πίεσης. (a) Αισθητήρας πίεσεως διαφράγματος, (b) αισθητήρας πίεσεως σε μορφή ελαστικής φουσαρμόνικας, και (c) αισθητήρας πίεσεως σε μορφή ελαστικού μεταλλικού σωλήνα σχήματος αγκίστρου (bourdon sensor).



Σχήμα 9.3 Η προσαρμογή του αισθητήρα μετακίνησης LVDT στο ελαστικό άγκιστρο του αισθητήρα πίεσης.

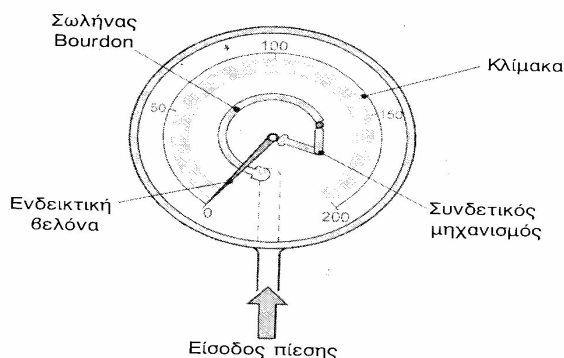
Οι περισσότεροι αισθητήρες πίεσης απαιτούν βαθμονόμηση. Η βαθμονόμηση μπορεί να αλλάξει με τον χρόνο και έτσι απαιτείται περιοδική επανάληψη της διαδικασίας βαθμονόμησης. Για την επίτευξη της υψηλότερης δυνατής ακρίβειας, πολλοί αισθητήρες πίεσης βαθμονομούνται πριν από κάθε χρήση τους.

9.2.1 Σωλήνας Bourdon και μέτρηση της πίεσης (Bourdon tube pressure sensor)

Οι σωλήνες Bourdon είναι σωλήνες διαφόρων σχημάτων των οποίων η διατομή δεν είναι κυκλική. Υπάρχουν διάφορες μορφές σωλήνων Bourdon όπως βλέπουμε και στο σχήμα 9.4, παρακάτω. Οι σωλήνες Bourdon κατασκευάζονται στην απλούστερη περίπτωση από μεταλλικά κράματα. Όταν η πίεση στο εσωτερικό των σωλήνων αυτών είναι μεγαλύτερη από την πίεση στο εξωτερικό μέρος τους επέρχεται μία παραμόρφωση της διατομής των σωλήνων η οποία τείνει να γίνει κυκλική. Η παραμόρφωση αυτή της διατομής δημιουργεί λόγω του σχήματος των σωλήνων μια μετατόπιση του ελεύθερου άκρου τους για τους σπειροειδείς και τύπου C σωλήνες και μία περιστροφή του ελεύθερου άκρου των σπειροειδών σωλήνων Bourdon. Αυτή η μετατόπιση του ελεύθερου άκρου των σωλήνων αυτών είναι ένα μέτρο της διαφοράς πίεσης μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού των σωλήνων. Η μετατόπιση αυτή μπορεί να μετρηθεί με κάποιον μετατροπέα θέσης ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κίνηση κάποιου δείκτη οπότε έχουμε τους μηχανικούς μετρητές πίεσης με σωλήνες Bourdon (σχήμα 9.5, παρακάτω). Η βελόνα μετακινείται επάνω σε μία βαθμονομημένη κλίμακα, όταν εφαρμόζεται κάποια πίεση η κίνηση του σωλήνα είναι σχετικά μικρή και έτσι για να αυξηθεί η απόκλιση της βελόνας πραγματοποιείται μηχανική ενίσχυση. Αυτό γίνεται με την βοήθεια ενός συνδετικού μηχανισμού, ο οποίος αποτελείται από ένα σύστημα βραχίονα τόξου και οδοντωτού τροχού.



Σχήμα 9.4 Διάφορες μορφές σωλήνων Bourdon.

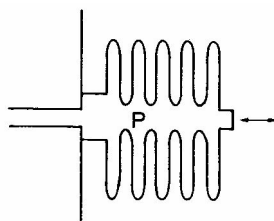


Σχήμα 9.5 Μετρητής πίεσης με σωλήνα Bourdon.

Οι εφαρμογές των σωλήνων Bourdon εκτείνονται από τους αισθητήρες πίεσης στα ελαστικά των αυτοκινήτων έως και τον έλεγχο της πίεσης στις σωληνώσεις χημικών εργοστασίων και γενικά έχουν πολλές οικιακές καθώς και βιομηχανικές εφαρμογές.

9.2.2 Φυσητήρες (bellows)

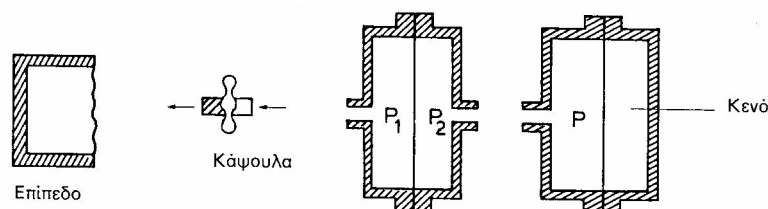
Οι φυσητήρες είναι διαφορικοί αισθητήρες πίεσης. Χρησιμοποιούνται για μικρές πιέσεις συνήθως μικρότερες από μερικές δεκάδες ατμόσφαιρες. Είναι κατασκευασμένοι από ένα λεπτό σωλήνα από κράμα χαλκού που πιέζεται και λαμβάνει την μορφή ενός αυλακωτού φύλλου. Ο σωλήνας είναι σφραγισμένος στο ένα του άκρο και έχει μία μικρή οπή στο άλλο. Όταν εφαρμοστεί πίεση μέσω της οπής τότε ο φυσητήρας διαστέλλεται. Η μετατόπιση μπορεί να βαθμονομηθεί σε μονάδες πίεσης. Στο σχήμα 9.6, παρακάτω βλέπουμε ένα φυσητήρα.



Σχήμα 9.6 Φυσητήρας.

9.2.3 Διάφραγμα (septum)

Συνήθως ένας αισθητήρας πίεσης αποτελείται από ένα διάφραγμα και έναν αισθητήρα θέσεως που μετράει την μετατόπιση λόγω παραμόρφωσης του κέντρου του διαφράγματος. Η παραμόρφωση που υφίσταται το διάφραγμα πρέπει να είναι μικρή για να υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της πίεσης και της μετατόπισης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι διαφραγμάτων, στο σχήμα 9.7, παρακάτω βλέπουμε μερικούς βασικούς από αυτούς.

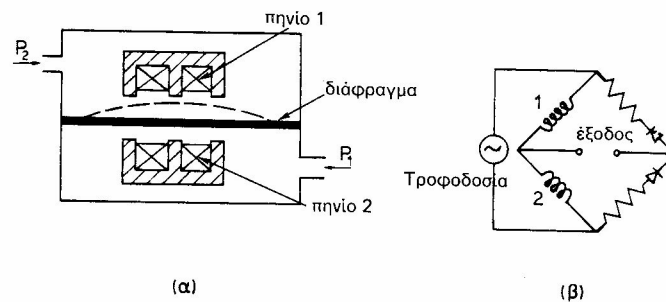


Σχήμα 9.7 Διάφοροι τύποι διαφραγμάτων.

9.3 ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΠΙΕΣΗΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥΣ

9.3.1 Επαγωγικοί αισθητήρες πίεσης (inductive pressure sensors)

Στο σχήμα 9.8, παρακάτω, βλέπουμε την αρχή λειτουργίας ενός επαγωγικού αισθητήρα πίεσης.

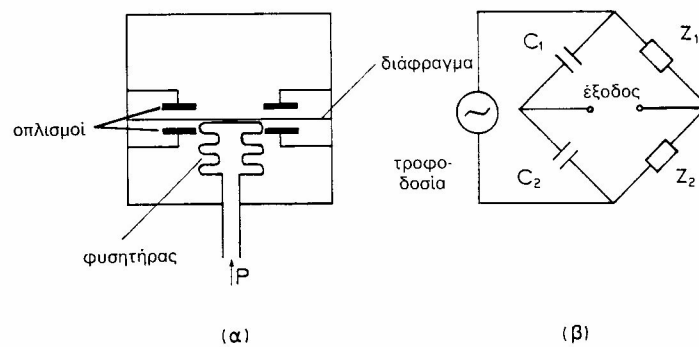


Σχήμα 9.8 Αρχή λειτουργίας ενός επαγωγικού αισθητήρα πίεσης.

Όπως βλέπουμε στο σχήμα 9.8, τα δύο πηνία συνδέονται σε γέφυρα. Όταν παραμορφωθεί το διάφραγμα λόγω της ασκούμενης πίεσης η αυτεπαγωγή του ενός από τα δύο πηνία αυξάνει, ενώ του άλλου μικραίνει. Έτσι δεν υπάρχει ισορροπία στην γέφυρα και η έξοδος της γέφυρας είναι ανάλογη της πίεσης.

9.3.2 Χωρητικοί αισθητήρες πίεσης (capacitive pressure sensors)

Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούν σαν ελαστικό στοιχείο ένα διάφραγμα. Χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ιδιότητα της χωρητικότητας για να μετρήσουν την μετατόπιση του διαφράγματος. Το διάφραγμα στην προκειμένη περίπτωση βρίσκεται μεταξύ των οπλισμών ενός πυκνωτή. Το κατά πόσο μετατοπίζεται το διάφραγμα ως προς την άγνωστη πίεση που του ασκείται σε αυτό εξαρτάται από το σχήμα του το μέγεθος το πάχος το υλικό κατασκευής κλπ. Επομένως η ακριβή σχέση ανάμεσα στην πίεση και την μετατόπιση που προκύπτει εξαρτάται από την εκάστοτε σχεδίαση του αισθητήρα. Όπως βλέπουμε και στο σχήμα 9.9α), παρακάτω, συχνά αντί δύο πυκνωτών χρησιμοποιείται ένας. Στην περίπτωση που το διάφραγμα βρίσκεται μεταξύ δύο οπλισμών δημιουργούνται δύο πυκνωτές, ο ένας αποτελείται από τον έναν οπλισμό και το διάφραγμα και ο άλλος από τον άλλο οπλισμό και το διάφραγμα. Οι πυκνωτές αυτοί συνδέονται σε γέφυρα όπως φαίνεται στο σχήμα 9.9β), παρακάτω. Καθώς το διάφραγμα μετακινείται αλλάζουν οι χωρητικότητες $C1$ και $C2$ και έτσι σταματάει να υφίσταται ισορροπία στην γέφυρα οπότε στην έξοδο εμφανίζεται μία τάση που είναι ανάλογη της πίεσεως.



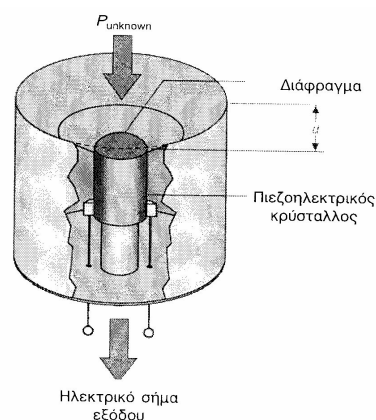
Σχήμα 9.9 Αρχή λειτουργίας ενός χωρητικού αισθητήρα πίεσης.

Για την μέτρηση της μετατόπισης του διαφράγματος πέρα από την αλλαγή της χωρητικότητας χρησιμοποιούνται και πολλές άλλες τεχνικές.

Οι αισθητήρες αυτοί είναι ευαίσθητοι, κατασκευάζονται σαν απόλυτοι και διαφορικοί μετατροπείς πίεσης. Είναι κατάλληλοι για να ανιχνεύουν μικρές μεταβολές πίεσης.

9.3.3 Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες πίεσης (piezoelectric pressure sensors)

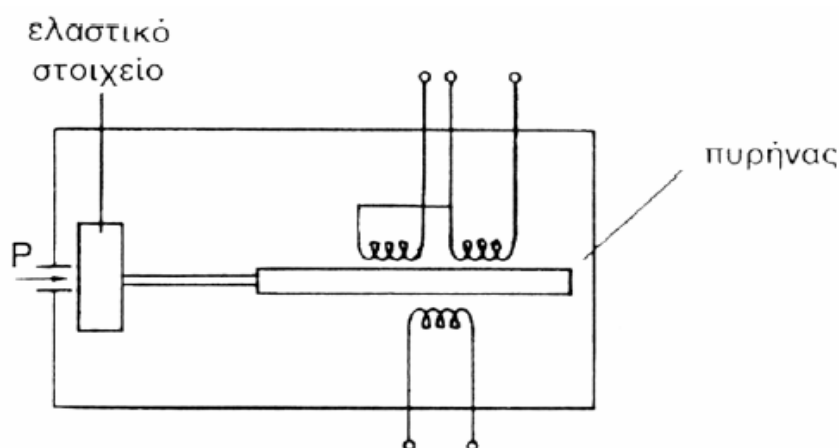
Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται για την μέτρηση γρήγορα μεταβαλλόμενης πίεσης. Χρησιμοποιούνται κυρίως για δυναμικές μετρήσεις και όχι στατικές. Οι πιεζοηλεκτρικοί τύποι αποκρίνονται γρηγορότερα στις αλλαγές. Σε μερικές εφαρμογές η γρήγορη αλλαγή είναι ανεπιθύμητη γι' αυτό και χρησιμοποιούνται φίλτρα. Σε ένα αισθητήρα πίεσης που εκμεταλλεύεται το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, το διάφραγμα πιέζει τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο καθώς παραμορφώνεται από τις μεταβολές πίεσης που δέχεται. Τα ηλεκτρικά φορτία αντίθετου πρόσημου που εμφανίζονται είναι ανάλογα της μηχανικής τάσεως και άρα της πίεσης. Στο σχήμα 9.10, παρακάτω, εικονίζεται ένας πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας πίεσης



Σχήμα 9.10 Αρχή λειτουργίας ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα πίεσης.

Οι μέγιστες πιέσεις που μετρούν αυτοί οι αισθητήρες είναι συνήθως από $1\text{Kp}/\text{cm}^2$ μέχρι μερικές χιλιάδες Kp/cm^2 . Η θερμοκρασία λειτουργίας τους συνήθως δεν ξεπερνάει τους $150-200^\circ\text{C}$. Κύριο πλεονέκτημα τους είναι ότι έχουν ταχεία απόκριση και μεγάλο εύρος λειτουργίας. Η τάση εξόδου για την μέγιστη πίεση μπορεί να είναι μερικά V. Γενικά έχουν καλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα καθώς και χαμηλή υστέρηση. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ειδικές εφαρμογές όπως είναι η μέτρηση της πίεσης στο εσωτερικό ενός όπλου όταν αυτό εκτυρσοκροτεί. Επειδή αυτοί οι αισθητήρες πίεσης συχνά χρησιμοποιούνται για πιέσεις που αυξάνονται απότομα πολλοί κατασκευαστές δίνουν τον χρόνο απόκρισης του αισθητήρα για μία συγκεκριμένη μεταβολή της πίεσης.

9.3.4 Αισθητήρες πίεσης με ΓΜΔΜ (LVDT pressure sensors)



Σχήμα 9.11 Αρχή λειτουργίας μετατροπέα πίεσης με ΓΜΔΜ.

Οι μετατροπείς αυτοί χρησιμοποιούν έναν ΓΜΔΜ για την μέτρηση της μετατόπισης λόγω παραμόρφωσης ελαστικού στοιχείου το οποίο μπορεί να είναι διάφραγμα, φουσητήρας ή σωλήνας Bourdon. Έναν τέτοιο μετατροπέα βλέπουμε στο σχήμα 9.11, παραπάνω.

Το ελαστικό στοιχείο παραμορφώνεται γραμμικά λόγω της πίεσης. Η παραμόρφωση αυτή μετατοπίζει, μετακινεί, τον πυρήνα του ΓΜΔΜ και έτσι δημιουργείται ένα ηλεκτρικό σήμα στην έξοδο του ΓΜΔΜ ανάλογο της πίεσης. Επειδή τα ηλεκτρικά τους μέρη δεν είναι εκτεθειμένα στην πίεση, οι συγκεκριμένοι αυτοί μετατροπείς χαρακτηρίζονται για την αξιοπιστία τους.

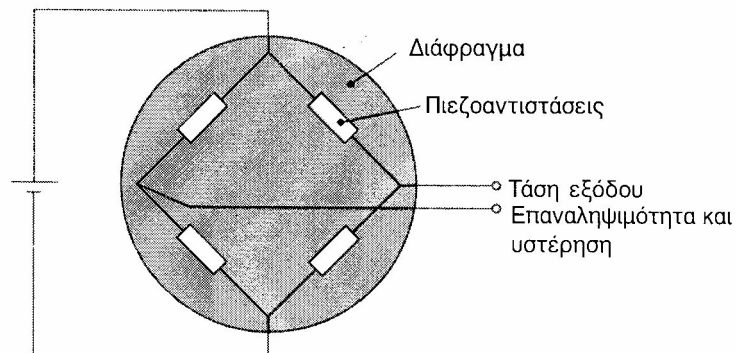
9.3.5 Αισθητήρες πίεσης με ποτενσιόμετρο (potentiometer pressure sensors)

Χρησιμοποιείται ένα ποτενσιόμετρο για τη μέτρηση της μετατόπισης λόγω παραμόρφωσης κάποιου σημείου ενός ελαστικού στοιχείου. Παρέχουν μεγάλη τάση εξόδου αλλά έχουν αδυναμία στη μέτρηση γρήγορων μεταβολών πίεσης. Η μέγιστη πίεση που μπορούν να μετρήσουν φτάνει τα $700\text{Kp}/\text{cm}^2$ με ακρίβεια 1% της πλήρους κλίμακας.

9.3.6 Αισθητήρες πίεσης με πιεζοαντίσταση (piezoresistive pressure sensors)

Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούν ένα διάφραγμα σαν ελαστικό στοιχείο και πιεζοαντιστάσεις για την μέτρηση της μετατόπισης. Οι πιεζοαντιστάσεις αυτές χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της μετατόπισης του κέντρου του διαφράγματος ή των τάσεων του διαφράγματος ανάλογα και με τον τύπο του μετατροπέα.

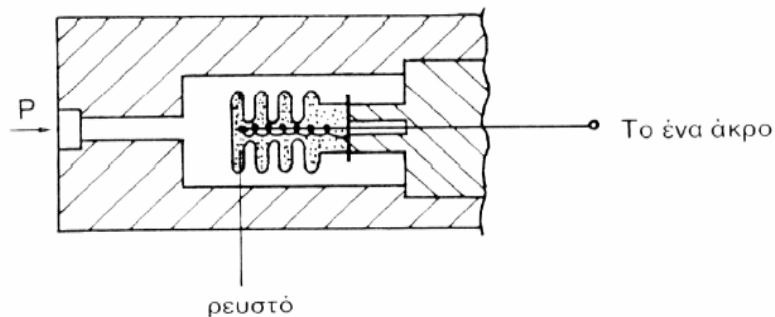
Όπως βλέπουμε στο σχήμα 9.12, παρακάτω, έχουμε 4 πιεζοαντιστάσεις που σχηματίζουν γέφυρα Wheatstone. Όταν ασκείται πίεση στο διάφραγμα οι αντιστάσεις δέχονται μία μηχανική τάση και η αντίστασή τους αλλάζει ανάλογα με την τάση αυτή με αποτέλεσμα την μεταβολή της πίεσης.



Σχήμα 9.12 Αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα πίεσης με πιεζοαντίσταση.

Η ακρίβεια τους είναι συνήθως καλύτερη από 0,5% της πλήρους κλίμακας. Οι μέγιστες πιέσεις που μπορούν να μετρήσουν κυμαίνονται από μερικά δέκατα του Kp/cm^2 μέχρι μερικές χιλιάδες Kp/cm^2 . Για μέγιστη πίεση η τάση εξόδου είναι μερικά mV. Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται καλή επαναληψιμότητα και ακρίβεια καθώς και χαμηλή υστέρηση. Για μέτρηση μεγάλων πιέσεων χρησιμοποιούνται αντί για πιεζοαντιστάσεις, συνδεδεμένοι μετρητές μηχανικής τάσης

9.3.7 Ωμικοί αισθητήρες πίεσης (resistive pressure sensors)



Σχήμα 9.13 Ωμικός αισθητήρας πίεσης.

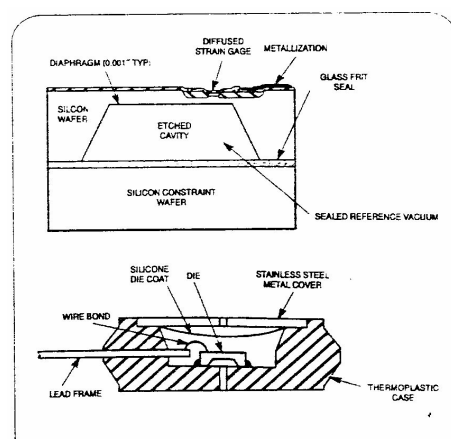
Στο σχήμα 9.13, παραπάνω, εικονίζεται ένας ωμικός αισθητήρας πίεσης.

Χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση πολύ μεγάλων πιέσεων. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στο γεγονός ότι η ηλεκτρική αντίσταση μερικών αγώγιμων υλικών (συνήθως κράμα Cu, Mn και Ni) αλλάζει με την πίεση.

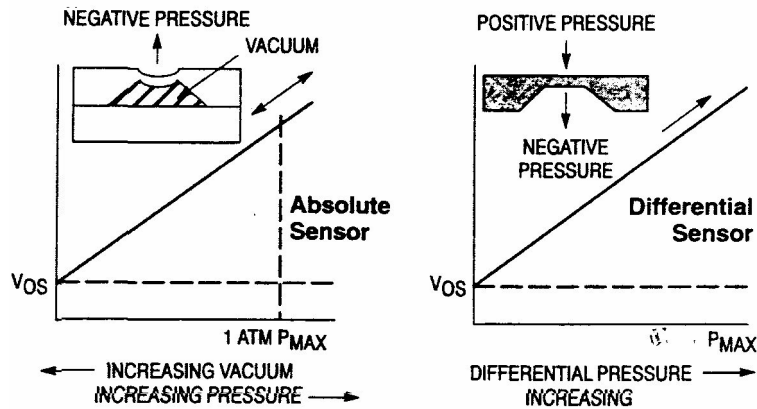
Η μαγγανίνη βρίσκεται συνήθως υπό την μορφή ελατηρίου μέσα σε ένα ρευστό. Η πίεση μεταδίδεται στο ρευστό και έτσι η μαγγανίνη βρίσκεται κάτω από υδροστατική πίεση. Το ένα άκρο του ελατηρίου συνδέεται στο μεταλλικό σώμα του αισθητήρα και το άλλο μονωμένο οδηγείται έξω από τον αισθητήρα. Η αντίσταση συνδέεται σε γέφυρα Wheatstone για την ανίχνευση της μεταβολής της.

Το πιο συχνό λάθος που γίνεται στους αισθητήρες είναι η επιλογή ενός λανθασμένου αισθητήρα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Ένα άλλο πρόβλημα που πολλές φορές παραβλέπεται είναι η θερμοκρασία. Ενδεικτικά όμως, ας δούμε και ας εξετάσουμε καλύτερα έναν αισθητήρα πίεσης.

Η Motorola είναι μια από τις μεγαλύτερες εταιρείες κατασκευής ηλεκτρονικών αισθητήρων στον κόσμο. Οι αισθητήρες πίεσης της Motorola έχουν σχεδιαστεί με μια πιεζοαντίσταση πυριτίου που παράγει μία τάση εξόδου που είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης πίεσης. Η αντίσταση αυτή σχηματίζει εσωτερικά ένα μετρητή πίεσης (strain gauge). Εφαρμόζοντας πίεση στο διάφραγμα αλλάζουμε την αντίσταση στον αισθητήρα πίεσης που αλλάζει την τάση εξόδου ανάλογα με την εφαρμοζόμενη πίεση. Ο μετρητής πίεσης είναι ολοκληρωμένος με το διάφραγμα πυριτίου έτσι ώστε δεν υπάρχουν φαινόμενα θερμοκρασίας στις διαφορές των διαστολών του μετρητή με το διάφραγμα. Οι παράμετροι εξόδου του μετρητή πίεσης εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και μπορούν να αντισταθμιστούν. Το σχήμα 9.14, πιο κάτω, μας δείχνει έναν αισθητήρα απόλυτης πίεσης. Η διαφορά του με αυτόν της διαφορικής είναι ότι δεν έχει την τρύπα στο υπόστρωμα. Το σχήμα 9.15, μας δείχνει γραφικά τη λειτουργία των αισθητήρων.



Σχήμα 9.14 Αισθητήρας απόλυτης πίεσης – Τομές αισθητήρων.



Σχήμα 9.15 Μετρήσεις πιέσεων (η λειτουργία των αισθητήρων γραφικά).

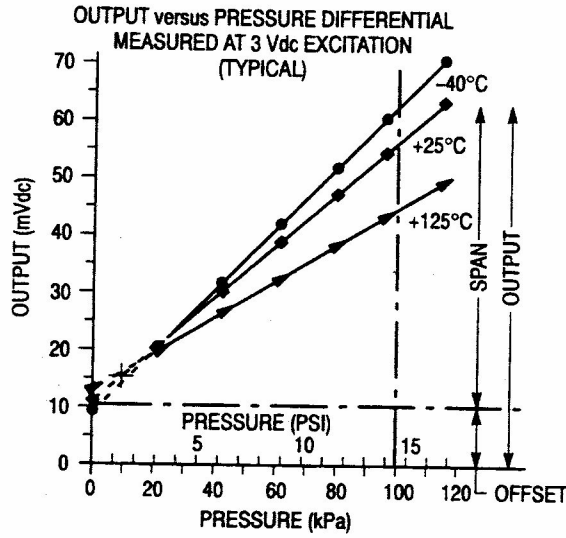
Στη συνέχεια παραθέτουμε ενδεικτικά μερικές πληροφορίες εφαρμογών για μια από τις πιο δημοφιλείς σειρές αισθητήρων πίεσης της Motorola που είναι οι MPX 10/50/100.

9.4 ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

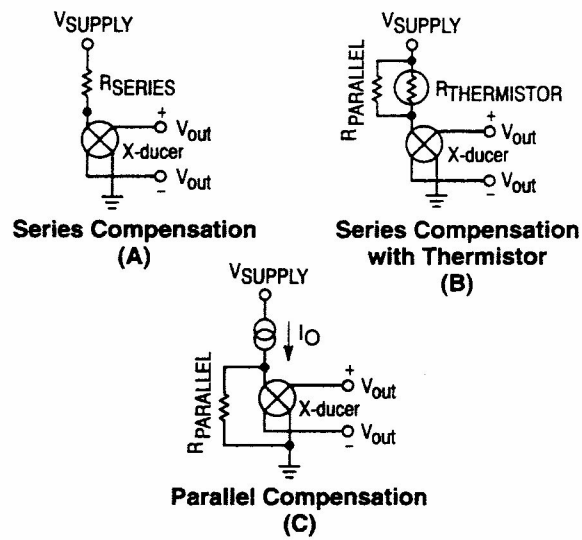
Οι παράμετροι εξόδου των αισθητήρων εξαρτώνται από την θερμοκρασία και θα πρέπει να αντισταθμιστούν, εάν θέλουμε να τους χρησιμοποιήσουμε σε μεγάλες περιοχές θερμοκρασιών. Το σχήμα 9.16, μας δείχνει την έξοδο των αισθητήρων ως συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Απλά δικτυώματα αντιστάσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θερμοκρασιακή αντιστάθμιση. Στο σχήμα 9.17, πιο κάτω βλέπουμε 3 μεθόδους αντιστάθμισης της θερμοκρασίας. Η απλούστερη φαίνεται στο σχήμα 9.17A). Μία μόνο αντίσταση 1% μας δίνει καλά αποτελέσματα στη περιοχή $0^{\circ}C - 85^{\circ}C$. Η τιμή της αντίστασης μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο : $R_s = R_x 3.577$. Υποθέτοντας αντίσταση 494Ω στους $25^{\circ}C$ για τον αισθητήρα χρειαζόμαστε εν σειρά μία αντίσταση ίση με: $R_s = 494 * 3.577 = 1767\Omega$.

Στο σχήμα 9.18, φαίνονται τιμές υψηλότερες και χαμηλότερες από την ιδανική.

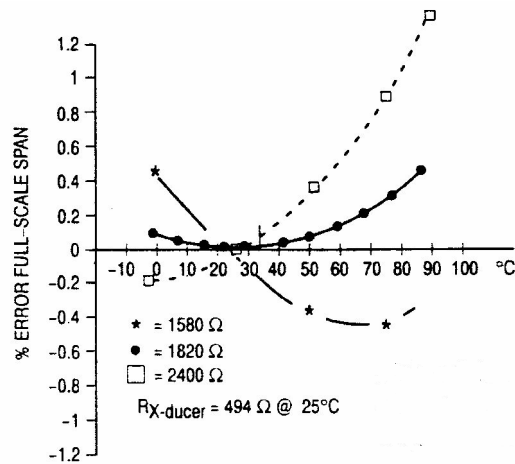
Ένα θερμίστορ και μια παράλληλη αντίσταση όπως φαίνεται στο σχήμα 9.17B), μας δίνουν αντιστάθμιση από $-40^{\circ}C$ έως $+125^{\circ}C$. Το θερμίστορ θα πρέπει να είναι αρνητικής αντίστασης. Στο σχήμα 9.17C), χρησιμοποιούμε την ίδια τιμή αντίστασης όπως στην πρώτη περίπτωση έχοντας μια πηγή σταθερού ρεύματος.



Σχήμα 9.16 Η έξοδος των αισθητήρων ως συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας.



Σχήμα 9.17 Μέθοδοι αντιστάθμισης της θερμοκρασίας.



Σχήμα 9.18 Χαρακτηριστικές λάθους ως προς την θερμοκρασία.

Η απλούστερη μέθοδος αντιστάθμισης όλων των παραμέτρων φαίνεται στο σχήμα 9.19 . Η τυπική full scale έξοδος του αισθητήρα είναι $60mV$. Επομένως χρειαζόμαστε κάποια απολαβή για να χρησιμοποιήσουμε την έξοδο. Στο σχήμα 9.19, χρησιμοποιούμε ένα διπλό τελεστικό ενισχυτή τύπου LM258 . Υποθέτοντας ότι η αντίσταση R_s είναι 4 φορές μεγαλύτερη από αυτή του αισθητήρα η τάση V_3 είναι περίπου $2V_{dc}$. Η τάση εξόδου στα σημεία $S+$ και $S-$ είναι $1V_{dc}$. Ο διαιρέτης τάσης αποτελείται από την R_1 (8K) και την R_2 (1K) και μας δίνει στο σημείο V_4 περίπου $1.1V_{dc}$. Επειδή ο αισθητήρας έχει θετικό συντελεστή θερμοκρασίας η τάση στο σημείο V_3 καθώς και στο σημείο V_1 θα αυξηθούν. Ο αισθητήρας έχει τη δική του αντιστάθμιση που είναι περίπου $\pm 15\mu V/^{\circ}C$. Επομένως πρέπει να υπολογίσουμε την αντίσταση R_T , από τον τύπο που ακολουθεί :

$$R_T = [(\Delta V_1 / \Delta V_0) * R_5] - (R_1 * R_2) / (R_1 + R_4) \quad \text{Ή}$$

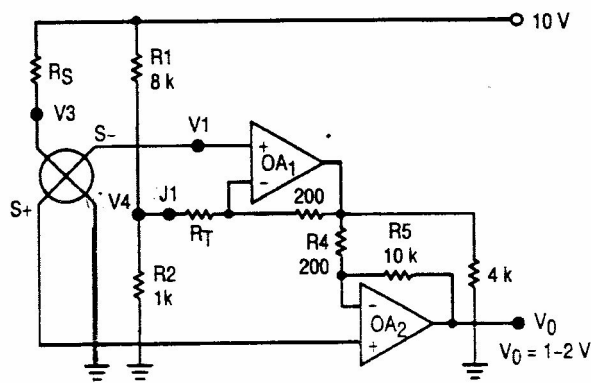
$$R_T = [(\Delta V_1 / \Delta V_0) * R_5] - (R_1 * R_2) / (R_1 + R_2)$$

Όπου $\Delta V_1 = V_1$ στο μέγιστο της θερμοκρασίας πλην το V_1 σε θερμοκρασία δωματίου. Ή

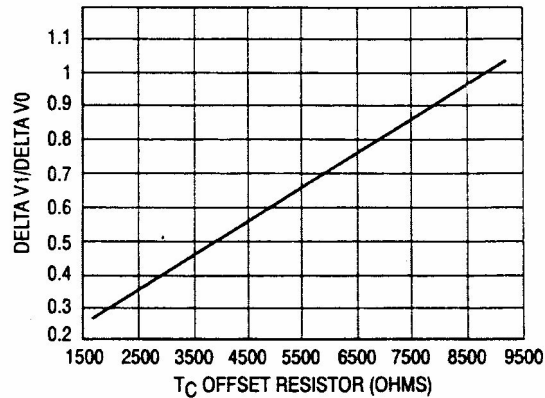
$$\Delta V_1 = V_1(t \text{ max}) - V_1(t 25^{\circ}C)$$

$$\Delta V_0 = V_0(t \text{ max}) - V_0(t 25^{\circ}C)$$

Το σχήμα 9.20, μας δίνει την επιλογή της TC.



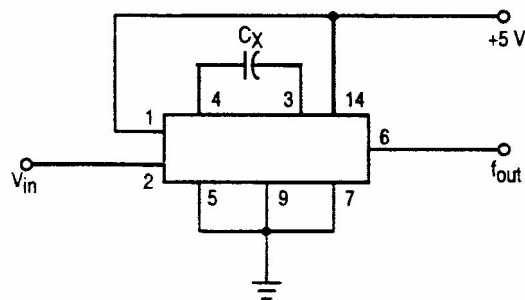
Σχήμα 9.19 Κύκλωμα αντιστάθμισης.



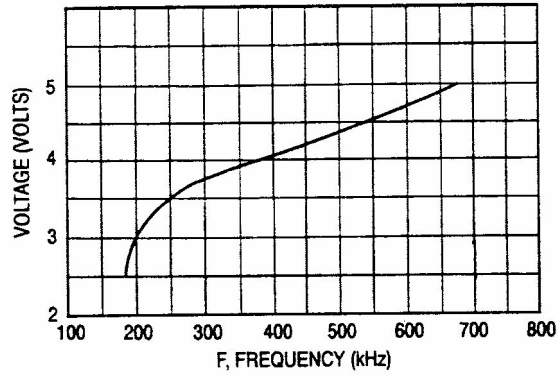
Σχήμα 9.20 Η επιλογή της TC.

9.5 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ

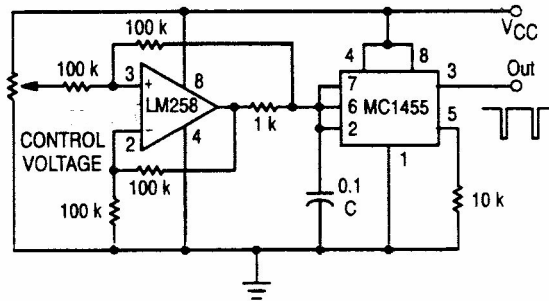
Η μετατροπή της τάσης σε συχνότητα μπορεί να επιτευχθεί με ένα IC όπως το MC 4324 (σχήμα 9.21). Η συχνότητα λειτουργίας καθορίζεται από τον κρύσταλλο C_x . Μια γραμμική σχέση τάσης σε συχνότητα καθορίζεται με την τιμή του πυκνωτή C_x στα 680 pF . Η έξοδος του κυκλώματος δίνεται στο γράφημα του σχήματος 9.22. Μια εναλλακτική λύση είναι να χρησιμοποιήσουμε το κύκλωμα του σχήματος 9.23. Το LM 258 χρησιμοποιείται ως προγραμματιζόμενη πηγή ρεύματος από τάση.



Σχήμα 9.21 Το κύκλωμα ελέγχου πολυδόνησης του MC4324.

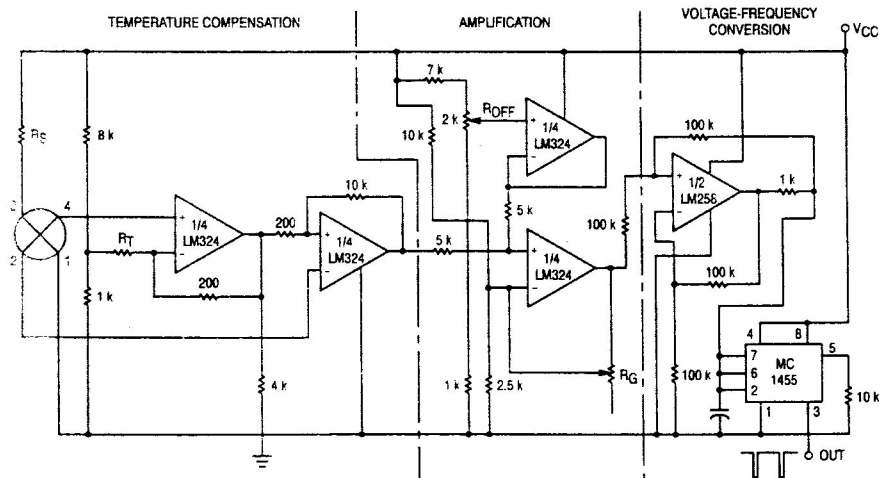


Σχήμα 9.22 Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης ως προς τη συχνότητα (για $C_x=680\text{Pf}$).



Σχήμα 9.23 Μετατροπή τάσης σε συχνότητα (MC1455 / LM258).

Ένα πλήρες κύκλωμα μετατροπής πίεσης σε συχνότητα φαίνεται στο σχήμα 9.24.



Σχήμα 9.24 Μετατροπή πίεσης σε συχνότητα.

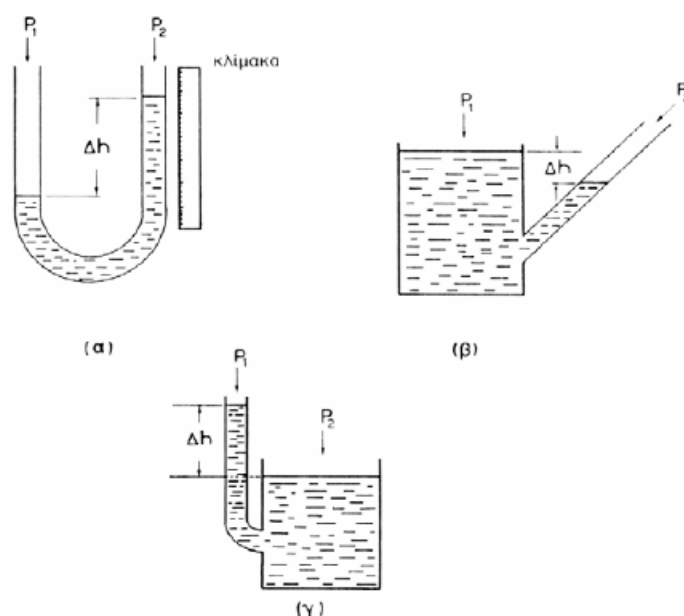
Στην ενότητα αυτή είδαμε την έννοια της πίεσεως καθώς και κάποιες από τις συσκευές που χρησιμοποιούνται ευρέως για την μέτρηση της. Εξετάσαμε τους αισθητήρες πίεσης όσο αφορά την κατηγορία των ελαστικών αισθητήρων. Έκτος όμως από τους ελαστικούς αισθητήρες, υπάρχουν και κάποιες άλλες κατηγορίες όπως είναι τα μανόμετρα και τα βαρόμετρα.

Τα μανόμετρα (manometer), είναι διαφορικοί αισθητήρες πίεσης. Ένας διαφορικός αισθητήρας πίεσης μετρά τη διαφορά ανάμεσα στην πίεση που εφαρμόζεται και μία πίεση αναφοράς (που είναι συνήθως η ατμοσφαιρική πίεση). Υπάρχουν πολλές μορφές και τύποι μανομέτρων .

Τα βαρόμετρα (barometer), είναι αισθητήρες πίεσης που χρησιμοποιούνται ειδικά για την μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης. Χρησιμοποιούνται κυρίως για μετεωρολογικούς σκοπούς, είναι ευαίσθητοι και πρέπει να μετρούν την πίεση με απόλυτο τρόπο. Τα βαρόμετρα τα διακρίνουμε γενικά σε δύο βασικές μορφές, τα μεταλλικά βαρόμετρα καθώς και τα βαρόμετρα υγρού.

9.6 ΜΑΝΟΜΕΤΡΑ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΖΥΓΙΣΗΣ

Παρακάτω στο σχήμα 9.25, εικονίζονται διάφοροι τύποι μανομέτρων



Σχήμα 9.25 Μανόμετρα α)Τύπου U , β)Με σωλήνα υπό κλίση, και γ)Διαφορετικής διατομής

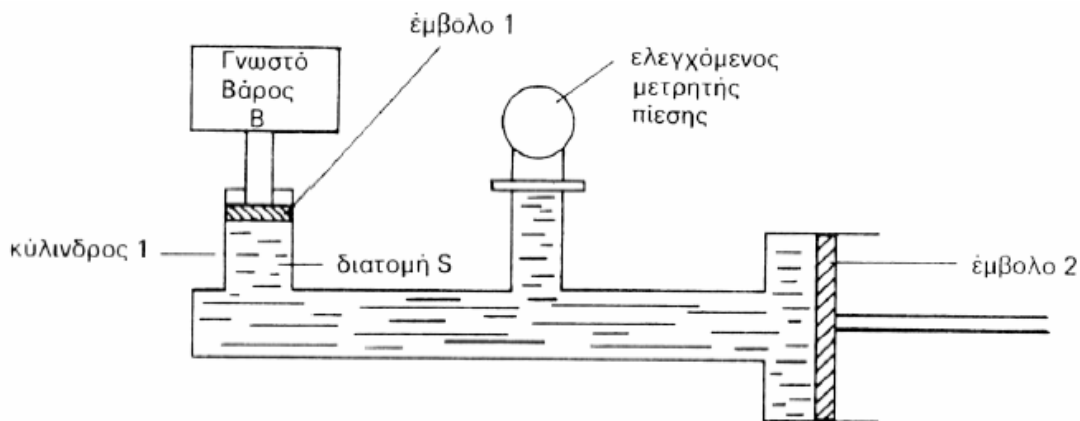
Τα μανόμετρα συγκρίνουν στην προκειμένη περίπτωση, την άγνωστη πίεση με την πίεση που δημιουργείται από μια στήλη υγρού, η οποία είναι συνήθως υδράργυρος.

Συγκεκριμένα, αν “g” η επιτάχυνση της βαρύτητας στο σημείο μέτρησης και “ρ” η ειδική μάζα του υγρού, τότε η διαφορά πίεσης P1 και P2 είναι :

$$\Delta P = |P1 - P2| = \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

Η θερμοκρασία επηρεάζει την μέτρηση της πίεσης γιατί μεταβάλλει την ειδική μάζα του υγρού. Η ακρίβεια της μέτρησης είναι περίπου 0,3% της μέγιστης ένδειξης.

Οι διατάξεις ζύγισης χρησιμοποιούνται κυρίως για μέτρηση οργάνων με πιο μικρή ακρίβεια ή για μετρήσεις ακρίβειας.



Σχήμα 9.26 Αρχή λειτουργίας διάταξης ζύγισης.

Το έμβολο 2, στο παραπάνω σχήμα 9.26 , προωθείται προς τα μέσα με αποτέλεσμα η πίεση “P” του υγρού να αυξάνει έως ότου το έμβολο 1 με το γνωστό βάρος “B” επιπλεύσει. Ισχύει : $B = S \cdot P$, όπου “S” η διατομή του κυλίνδρου 1.

Επειδή το βάρος “B” και η διατομή “S” είναι γνωστά, υπολογίζεται η πίεση “P” και συγκρίνεται με την ένδειξη του ελεγχόμενου μετρητή πίεσης. Ο υπολογισμός της πίεσης στην προκειμένη περίπτωση μπορεί να γίνει με ακρίβεια ακόμα και 0,01% .

Γενικά για τους αισθητήρες πίεσης, απαιτείται προσοχή όσο αφορά στη σχεδίαση του φίλτρου για την αποκοπή του θορύβου, δηλαδή η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου θα πρέπει να ορίζεται έτσι ώστε να μην περιορίζει την δυναμική συμπεριφορά του αισθητήρα. Κάτι άλλο που πρέπει να προσέξουμε όσο αφορά μετρήσεις ακριβείας, είναι η απόκλιση από την θερμοκρασία. Σε τέτοιες περιπτώσεις τα κυκλώματα που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να μην επηρεάζονται σημαντικά από την θερμοκρασία.

Κεφάλαιο 10^ο

ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΩΝ ΥΓΡΩΝ

10.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

Παρόλο που η κίνηση του στερεού σώματος περιγράφεται καλύτερα από την ταχύτητά του, η κίνηση ενός ρευστού(υγρό ή αέριο) περιγράφεται από τη ροή του.

Ροή, είναι η συνεχής κίνηση ενός ρευστού. Η μέτρηση της ροής εφαρμόζεται σε υγρά και αέρια και κάποιες φορές σε κάποια στερεά όταν αυτά κινούνται έχοντας τα βασικά χαρακτηριστικά των ρευστών. Η μέτρηση της ροής πραγματοποιείται σε ένα ευρύ πεδίο διαφορετικών εφαρμογών, από τις ιατρικές εφαρμογές, όταν π.χ καταγράφουμε την ροή του αίματος, έως τις εφαρμογές μεγάλης κλίμακας όπως είναι οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας. Ακόμα έχουν μεγάλο πεδίο εφαρμογών όσο αφορά τους οικιακούς σκοπούς. Το απλούστερο από τα αισθητήρια της κατηγορίας αυτής είναι το κοινό όργανο μέτρησης της κατανάλωσης νερού που χρησιμοποιείται στα σπίτια μας. Μετράει ποσότητα υγρού και όχι ροή (ποσότητα ανά μονάδα χρόνου) και χρησιμοποιεί για τον σκοπό αυτό περιστρεφόμενο δίσκο που εγκλωβίζει στο περίβλημα του οργάνου ποσότητα υγρού και την οδηγεί στην έξοδο. Έτσι οι περιστροφές του δίσκου αντιστοιχούν σε καθορισμένη ποσότητα υγρού. Μια άλλη ομάδα αισθητήρων ροής χρησιμοποιούν στην ουσία ένα σωλήνα Venturi για την μέτρηση. Όπως είναι γνωστό όταν ο σωλήνας ροής στενεύει η πίεση πέφτει και η πτώση πίεσης είναι ανάλογη της παροχής (υπό συνθήκες). Μια τρίτη ομάδα τέτοιων αισθητηρίων χρησιμοποιεί ένα μικροσκοπικό στρόβιλο. Όταν η ροή περάσει μέσα από το αισθητήριο, ο στρόβιλος περιστρέφεται με ταχύτητα που είναι ανάλογη της παροχής (υπό συνθήκες). Στη συνέχεια βέβαια απαιτείται αισθητήριο ταχύτητας. Τα αισθητήρια αυτά που περιγράψαμε πιο πάνω, έχουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι πρέπει να παρεμβληθούν σε σειρά στο κύκλωμα του οποίου μετριέται η παροχή. Πρόσφατα αναπτύχθηκαν αισθητήρια που δεν απαιτούν κάτι τέτοιο και τα οποία χρησιμοποιούν ένα πομπό και ένα δέκτη υπερήχων και η λειτουργία τους βασίζεται στο ότι η ταχύτητα διάδοσης του υπερήχου σε ένα υγρό εξαρτάται εκτός των άλλων και από την ταχύτητα του υγρού.

Είναι σημαντικό να επιλέγουμε την σωστή μορφή μέτρησης ώστε αυτή να ταιριάζει με την εφαρμογή μας. Ο ογκομετρικός ρυθμός ροής π.χ. μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν μετράμε το ποσό του υγρού που γεμίζει μία δεξαμενή δεδομένου μεγέθους. Όμως, η μέτρηση της ροής της μάζας μπορεί να είναι πιο κατάλληλο μέγεθος όταν γεμίζουμε ένα αεροσκάφος με καύσιμο, επειδή η εμβέλεια πτήσης του αεροσκάφους καθορίζεται από την μάζα και όχι από τον όγκο του καυσίμου. Πολλές φορές πάλι μπορεί να είναι σημαντική η μέτρηση της ταχύτητας της ροής, όπως για παράδειγμα συμβαίνει κατά τον υπολογισμό της ταχύτητας ενός αεροσκάφους που γίνεται μετρώντας την πίεση του αέρα γύρω από το αεροσκάφος. Για να μπορούμε να κατανοήσουμε την φύση της ροής και να την χρησιμοποιήσουμε με τον καλύτερο δυνατό τρόπο θα πρέπει να μπορούμε να την ποσοτικοποιήσουμε και να την μετράμε κατάλληλα. Στους αισθητήρες ροής ρευστών μετράμε τον λόγο του όγκου του ρευστού που περνά από τον αισθητήρα ανά μονάδα του χρόνου, δηλαδή με λίγα λόγια την παροχή. Οι πιο πολλοί αισθητήρες ροής βασίζονται στον νόμο του Bernoulli (βασική εξίσωση της υδροδυναμικής):

$$P + \rho gh + \frac{1}{2} \rho u^2 = \text{σταθ.} \quad (\text{για ιδανικά ρευστά, χωρίς τριβές}).$$

όπου, (P) η υδροστατική πίεση, (ρ) η πυκνότητα του ρευστού και (u) η ταχύτητα του ρευστού σε ένα σημείο., (g) η επιτάχυνση της βαρύτητας και (h) το ύψος που βρίσκεται το ρευστό σε σχέση με ένα επίπεδο αναφοράς.

10.2 ΕΙΔΗ ΜΕΤΡΗΤΩΝ ΡΟΗΣ

Τα βασικότερα είδη μετρητών ροής είναι :

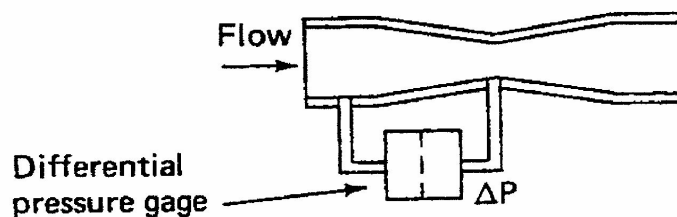
- Μετρητές παροχής διαφορικού τύπου
- Ηλεκτρομαγνητικοί μετρητές παροχής
- Μετρητές παροχής με υπερήχους
- Άλλοι μετρητές ροής

10.2.1 Μετρητές παροχής διαφορικού τύπου

Στο σχήμα 10.1, παρακάτω εικονίζεται η αρχή λειτουργίας ενός σωλήνα βεντουριμέτρου όπου ο διαφορικός αισθητήρας πίεσης μετράει την διαφορά πίεσης $\Delta p = p_1 - p_2$ μεταξύ μεγάλης διατομής S_1 και μικρής διατομής S_2 του βεντουριμέτρου. Η ταχύτητα U_1 του εισερχόμενου ρευστού εφαρμόζοντας τον νόμο του Bernoulli, δίνει :

$$U_1 = [2(p_1 - p_2) / \rho (s_1^2 / s_2^2 - 1)]^{1/2}$$

όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού.

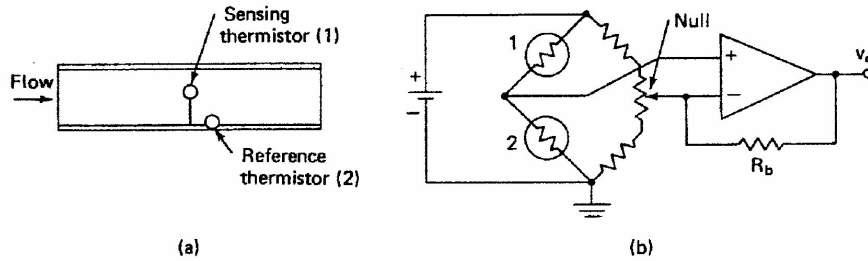


Σχήμα 10.1 Η αρχή λειτουργίας ενός σωλήνα βεντουριμέτρου.

Άρα, με το βεντουρίμετρο και με ένα διαφορικό αισθητήρα πίεσης μπορούμε να μετράμε την ταχύτητα και την παροχή, εφόσον αυτή είναι: $\Pi = S_1 U_1$ ρευστών που προσεγγίζουν τα ιδανικά.

Εδώ να τονίσουμε, ότι στα πραγματικά υγρά υπάρχουν τριβές. Έτσι ένα μέρος της ενέργειας τους καταναλίσκεται στην υπερνίκηση των τριβών. Επίσης τα αέρια είναι συμπιεστά, οπότε πρέπει να ληφθεί υπόψη η συμπιεστότητά τους.

Ένας άλλος αισθητήρας ροής, είναι το ανεμόμετρο θερμού σύρματος(hot-wire anemometer) και εφαρμόζεται κυρίως στην ανεμομετρία (για μέτρηση ταχύτητας αερίων). Εικονίζεται στο σχήμα 10.2, παρακάτω .



Σχήμα 10.2 Άλλος ένας αισθητήρας ροής, το ανεμόμετρο θερμού σύρματος (Hot-wire anemometer).

Στον παραπάνω αισθητήρα, δύο θερμίστορ τοποθετούνται όπως εικονίζεται στο σχήμα 10.2a). Τα θερμίστορ αυτά τροφοδοτούνται με μία υψηλή τάση V_T . Η ισχύς απωλειών αυτών είναι $P = \frac{V_T^2}{R_T}$. Τα θερμίστορ εδώ συμπεριφέρονται και σαν θερμαντήρες καθώς

και σαν αισθητήρες θερμοκρασίας. Αρχικά, η θερμοκρασία των θερμίστορ αυξάνεται με την τροφοδότησή τους μέχρι η ισχύς απωλειών των θερμίστορ να εξισωθεί με τις απώλειες στο περιβάλλον και στους χάλκινους αγωγούς τους. Εάν περάσει κάποιο ρευστό από τον σωλήνα του αισθητήρα, τότε το θερμίστορ 1 ανιχνεύει μικρότερη θερμοκρασία γιατί επάγεται μεγαλύτερο ποσό θερμότητας από το θερμίστορ 2, τόσο δε μεγαλύτερο όσο η ταχύτητα του ρευστού αυξάνει. Το θερμίστορ 2 είναι συνδεδεμένο με το τοίχωμα του σωλήνα όπου η ταχύτητα του ρευστού είναι μηδέν. Άρα τα δύο θερμίστορ στο σχήμα 10.2b), δίπλα, που είναι σε κύκλωμα γέφυρας, θα δίνουν τάση εξόδου που αποδεικνύεται ότι είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της παροχής του ρευστού Π .

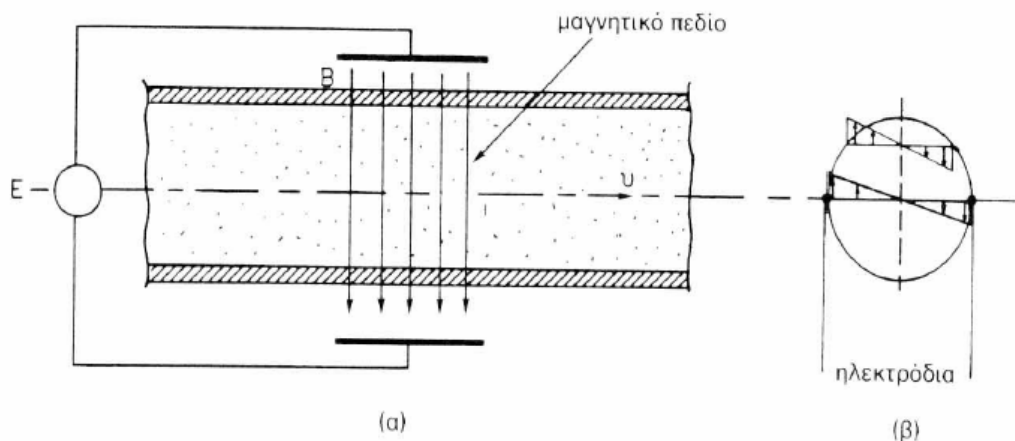
$$u = k(\Pi)^{1/2}$$

όπου, k η σταθερά ευαισθησίας που εξαρτάται από τους τύπους των θερμίστορ και την γεωμετρία της διάταξης.

Τα ανεμόμετρα θερμού σύρματος περιέχουν όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες για την βαθμονόμηση τους με την μορφή γραφικών παραστάσεων , έτσι ώστε η ταχύτητα του αερίου να μπορεί να υπολογιστεί εύκολα από τις τιμές τάσης ή ρεύματος. Χρησιμοποιούνται για να μετρούν μεγάλο εύρος ταχυτήτων μέχρι και υπερηχητικές ταχύτητες.

10.2.2 Ηλεκτρομαγνητικοί μετρητές παροχής

Πιο κάτω στο σχήμα 10.3 , φαίνεται επίσης η αρχή λειτουργίας ενός ηλεκτρομαγνητικού μετρητή παροχής όπως λέγεται.

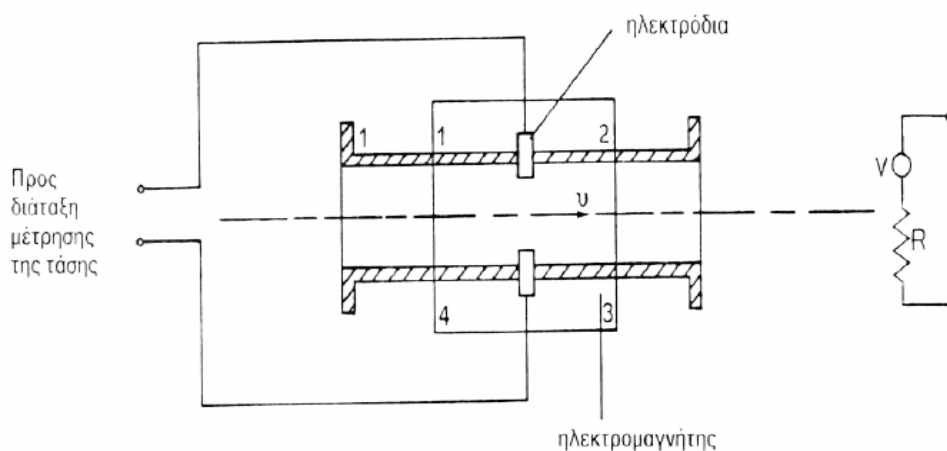


Σχήμα 10.3 α) Αρχή λειτουργίας ηλεκτρομαγνητικού μετρητή παροχής, β) Κατανομή δυναμικού σε μία τομή του σωλήνα.

Ο σωλήνας μέσα στον οποίο ρέει το ρευστό βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από έναν ηλεκτρομαγνήτη. Ο ηλεκτρομαγνήτης μπορεί να τροφοδοτείται με συνεχές ή με εναλλασσόμενο ρεύμα. Θεωρούμε αρχικά ότι ο ηλεκτρομαγνήτης τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Το ρευστό θεωρείται αγώγιμο οπότε θα αναπτυχθεί ένα ηλεκτρικό πεδίο. Έτσι μεταξύ δύο σημείων της περιφέρειας του σωλήνα εμφανίζονται τάσεις.

Για στατικό μαγνητικό πεδίο με επαγωγή B η τάση αυτή ισούται με : $V = B d u$, όπου d η διάμετρος του σωλήνα και u η ταχύτητα ροής.

Το υλικό του σωλήνα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να επιτρέπει την διόδο του μαγνητικού πεδίου και δεν πρέπει να είναι αγώγιμο για να μην βραχυκυκλώνει την τάση που αναπτύσσεται. Στα άκρα της διαμέτρου που είναι κάθετη στο μαγνητικό πεδίο και στην διεύθυνση της ροής τοποθετούνται δύο ηλεκτρόδια.



Σχήμα 10.4 Τμήμα του σωλήνα του μετρητή με τις φλάντζες και τα ηλεκτρόδια.

Στο σχήμα 10.4, παραπάνω, από την αξονική κατανομή του δυναμικού παρατηρείται ότι κοντά στα άκρα 1-4 και 2-3 του πεδίου παρατηρείται μία εξασθένηση της τάσης. Αυτή η εξασθένηση μπορεί να επηρεάζει την τάση και στο κέντρο του πεδίου όπου βρίσκονται τα ηλεκτρόδια. Για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο πρέπει το μήκος του ηλεκτρομαγνήτη να είναι αρκετά μεγαλύτερο από την διάμετρο του αγωγού.

Η τροφοδοσία του ηλεκτρομαγνήτη στην πράξη γίνεται με εναλλασσόμενο ρεύμα. Αποφεύγεται το συνεχές για να μην παραμορφώνεται η συμμετρική κατανομή ταχυτήτων και για να εμποδίζεται η εναπόθεση θετικών ιόντων στο αρνητικό ηλεκτρόδιο.

Αν η τροφοδοσία του ηλεκτρομαγνήτη είναι εναλλασσόμενη, τότε η τάση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων είναι : $V = B d \mu \sin \omega t + K \omega B \cos \omega t$, όπου K μία σταθερά.

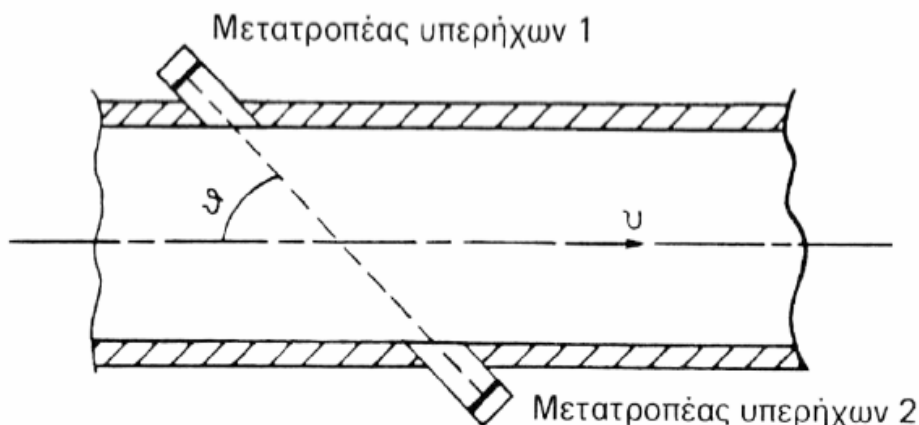
Ο δεύτερος όρος της εξίσωσης είναι ανεξάρτητος της ταχύτητας ροής. Εκφράζει την τάση που επάγεται λόγω της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου στο βρόχο που δημιουργείται από τα καλώδια σύνδεσης των ηλεκτροδίων και του αγωγίμου δρόμου (μέσω του ρευστού) που υπάρχει μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Σε πραγματικά ρευστά η ταχύτητα ροής δεν είναι σταθερή κατά μήκος της διαμέτρου του σωλήνα, υπάρχει μια κατανομή ταχυτήτων. Σε περίπτωση συμμετρικής κατανομής ως προς το κέντρο του σωλήνα η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη της μέσης ταχύτητας ροής. Μη συμμετρική όμως κατανομή ταχυτήτων επιδρά στο αποτέλεσμα της μέτρησης.

$$\text{Η παροχή είναι : } Q = \pi \frac{d^2}{4} \mu \Rightarrow Q = \pi \frac{d}{4} \frac{V}{B}$$

10.2.3 Μετρητές παροχής με υπερήχους

Στο σχήμα 10.5, πιο κάτω, φαίνεται ένας άλλος μετρητής παροχής χρόνου μετάβασης όπως λέγεται, με υπερήχους.



Σχήμα 10.5 Αρχή λειτουργίας μετρητή παροχής χρόνου μετάβασης.

Δύο μετατροπείς υπερήχων εκπέμπουν και λαμβάνουν υπό γωνία σε σχέση με την διεύθυνση ροής. Ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσουν οι υπέρηχοι από τον μετατροπέα

1 στον μετατροπέα 2 είναι T_{12} , ενώ ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσουν οι υπέρηχοι από τον μετατροπέα 2 στον 1 είναι T_{21} .

$$T_{12} = \frac{d}{(u + u \cos \theta) \sin \theta} \quad T_{21} = \frac{d}{(u - u \cos \theta) \sin \theta}$$

όπου u η ταχύτητα του ήχου στο ρευστό του σωλήνα και d η διάμετρος του.

Επειδή $u \gg u \cos \theta$ προκύπτει η σχέση : $\Delta T = T_{21} - T_{12} = \frac{2d u \cos \theta}{\sin \theta u^2} = \frac{2d \cos \theta}{\sin \theta S u^2} Q$

Όπου Q η παροχή , S η διατομή του σωλήνα.

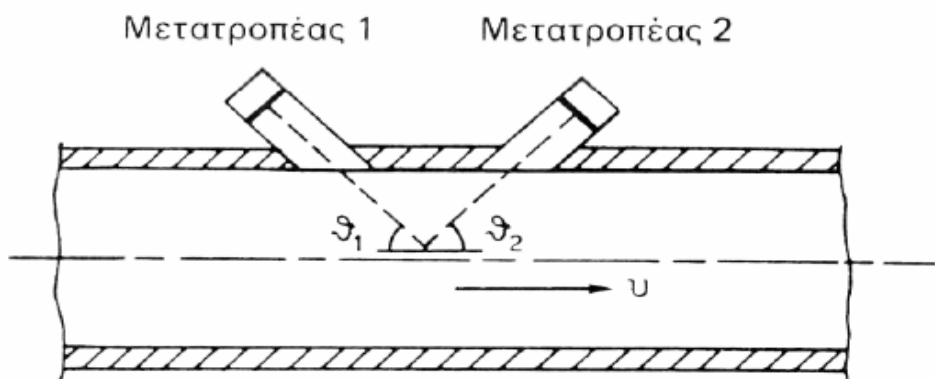
Επειδή η μέτρηση της παροχής επηρεάζεται από την ταχύτητα του ήχου στο συγκεκριμένο ρευστό, συχνά για την μέτρηση χρησιμοποιείται η σχέση :

$$\frac{\Delta T}{T_{21} \cdot T_{12}} = \frac{\sin 2\theta}{d} u = \frac{\sin 2\theta}{S \cdot d} Q$$

Η κατανομή ταχυτήτων επηρεάζει πολύ την μέτρηση γιατί η ταχύτητα u που μετρείται από τον μετρητή είναι η μέση τιμή της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής διάδοσης του ήχου μεταξύ των δύο μετατροπέων. Η μέση αυτή ταχύτητα μπορεί να μην συμπίπτει με την μέση ταχύτητα ροής αν η ροή είναι για παράδειγμα στροβιλώδης.

Για την μέτρηση της ποσότητας $\frac{\Delta T}{T_{21} \cdot T_{12}}$ χρησιμοποιούνται δύο μετατροπείς που λειτουργούν σαν πομποί και δέκτες.

Εκτός από τον μετρητή παροχής χρόνου μετάβασης υπάρχει και ο μετρητής παροχής Doppler, η αρχή λειτουργίας του οποίου φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 10.6.



Σχήμα 10.6 Αρχή λειτουργίας μετρητή παροχής Doppler.

Ο μετατροπέας 1 είναι ο πομπός και ο 2 ο δέκτης. Για να χρησιμοποιηθεί αυτός ο μετρητής πρέπει να υπάρχουν μέσα στη ροή σωματίδια επάνω στα οποία θα ανακλαστούν οι υπέρηχοι. Το σήμα που εκπέμπεται είναι ημιτονοειδές με συχνότητα π.χ. f_e . Το σήμα που

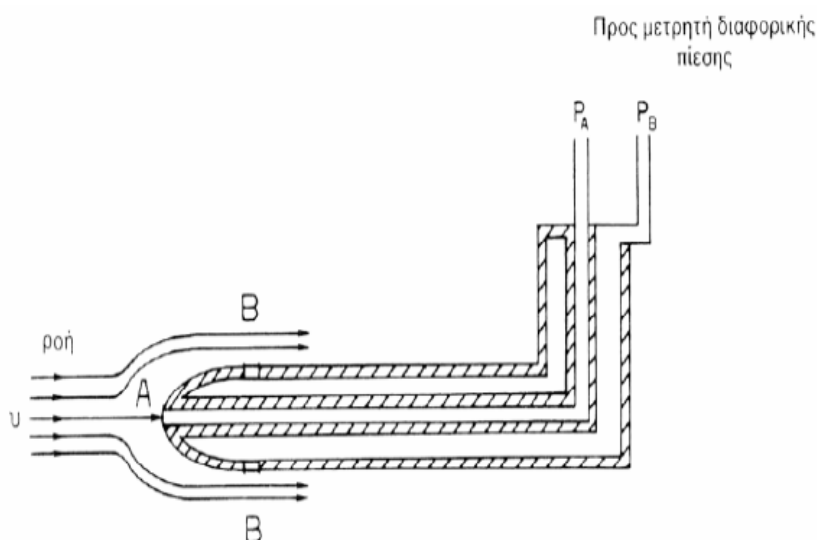
λαμβάνεται από τον μετατροπέα 2 θα έχει συχνότητα f_λ η οποία λόγω του φαινομένου Doppler συνδέεται με την f_ε μέσω της σχέσης :

$$f_\lambda - f_\varepsilon = f_\varepsilon \frac{u}{c} (\cos \theta_1 + \frac{f_\lambda}{f_\varepsilon} \cos \theta_2)$$

Επειδή η κατανομή των στοιχείων ανάκλασης επιδρά στην ακρίβεια της μέτρησης, η ακρίβεια μετρητών παροχής Doppler είναι συνήθως μικρή.

10.2.4 Άλλοι μετρητές ροής

Τέλος, ένας άλλος μετρητής ροής εικονίζεται στο σχήμα 10.7, παρακάτω, όπου φαίνεται η αρχή λειτουργίας του λεγόμενου σωλήνα Pitot.



Σχήμα 10.7 Αρχή λειτουργίας σωλήνα Pitot.

Οι σωλήνες Pitot βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στην μέτρηση ταχύτητας αεροπλάνων. Για την χρησιμοποίηση των σωλήνων αυτών πρέπει να είναι γνωστή η διεύθυνση της ταχύτητας.

Η οπή A βρίσκεται στην κορυφή του σωλήνα ενώ στις πλευρές του υπάρχουν μερικές οπές B. Ο σωλήνας προσανατολίζεται προς την ροή της οποίας η ταχύτητα είναι u. Η οπή A είναι κάθετη προς την ροή. Στην θέση B επικρατεί η κανονική πίεση του ρευστού, ενώ στην θέση A η πίεση είναι μεγαλύτερη.

Από την εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli προκύπτει για ασυμπίεστο χωρίς τριβές ρευστό :

$$P_A = P_B + \frac{1}{2} \rho u^2$$

όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού, u η ταχύτητα ροής του, P_A και P_B οι πιέσεις στα σημεία A και B αντίστοιχα.

Η διαφορά πιέσεων P_A και P_B μετριέται με ένα διαφορικό μετατροπέα πίεσης και στην συνέχεια υπολογίζεται η ταχύτητα u. Η διάμετρος του σωλήνα Pitot πρέπει να είναι πολύ μικρή (θεωρητικά μηδενική) για να μην διαταράσσεται η ροή.

Σφάλματα στην μέτρηση μπορούν να προκύψουν από κακή ευθυγράμμιση του σωλήνα Pitot με την διεύθυνση της ροής, καθώς και από το ότι η διάμετρος του σωλήνα δεν είναι μηδενική.

10.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΥΓΡΩΝ

Σε πάρα πολλές εφαρμογές στην βιομηχανία, είναι επιθυμητό να παρακολουθούμε την στάθμη σε δοχεία υγρών. Για το σκοπό αυτό υπάρχουν διαφόρων ειδών αισθητήρια στάθμης. Τα περισσότερα από αυτά χρησιμοποιούν κάποιο πλωτήρα σε συνδυασμό με ένα αισθητήριο γραμμικής ή γωνιακής θέσης. Ακόμη υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης της στάθμης μετρώντας την πίεση στον πυθμένα κάποιου δοχείου.

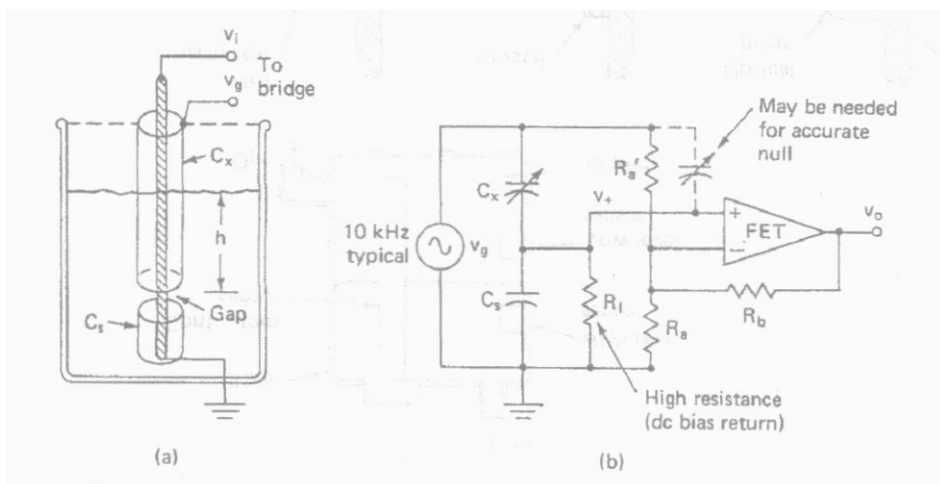
Όσο αφορά την μέτρηση της στάθμης, οι πιο βασικοί μετρητές στάθμης είναι:

- Οι μετρητές στάθμης με υπέρηχους
- Οι μετρητές με ηλεκτρομαγνητική εκπομπή ή με εκπομπή Laser.
- Οι μετρητές με επιπλέον σώμα
- Οι μετρητές με βυθιζόμενο σώμα (βυθομέτρηση)
- Οι μετρητές με μέτρηση πίεσης
- Οι μετρητές χωρητικότητας

Γενικά, οι αισθητήρες στάθμης υγρών μετρούν το ύψος ή την ποσότητα του υγρού και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

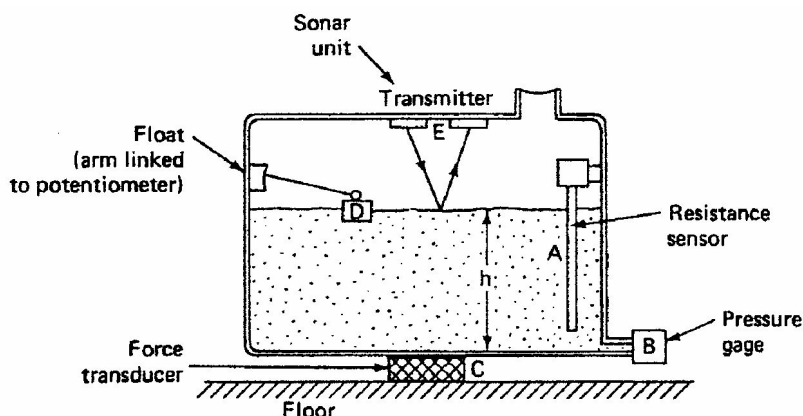
- Της συνεχούς ανίχνευσης της μεταβολής του ύψους, και
- Της διακριτής ανίχνευσης της μεταβολής του ύψους

Στην συνεχή ανίχνευση της στάθμης υγρών, χρησιμοποιούνται π.χ. κυλινδρικοί πυκνωτές, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.8, παρακάτω.



Σχήμα 10.8 (a) Κυλινδρικοί πυκνωτές για την συνεχή ανίχνευση της στάθμης υγρών, και (b) κύκλωμα γέφυρας με ενισχυτή για την μέτρηση της στάθμης υγρού της δεξαμενής.

Εδώ, το υγρό μέσα στη δεξαμενή παίζει τον ρόλο του διηλεκτρικού και επομένως η χωρητικότητα του πυκνωτή γίνεται μεγαλύτερη όσο αυξάνεται και η στάθμη της δεξαμενής. Στην τεχνική αυτή πολλές φορές χρησιμοποιούνται δύο κυλινδρικοί πυκνωτές, με τον δεύτερο κυλινδρικό πυκνωτή να χρησιμοποιείται σαν πυκνωτής αναφοράς τοποθετούμενος κοντά στον πυθμένα της δεξαμενής. Δίπλα, στο σχήμα 10.8b), φαίνεται ένα ηλεκτρικό κύκλωμα σε σύνδεση γέφυρας με ενισχυτή, FET για την μέτρηση της στάθμης του υγρού της δεξαμενής. Επίσης στο σχήμα 10.9, εικονίζεται μια δεξαμενή καθώς και οι διάφοροι μέθοδοι μέτρησης της στάθμης του υγρού της δεξαμενής. (για την συνεχή ανίχνευση).



Σχήμα 10.9 Οι διάφοροι μέθοδοι μέτρησης της στάθμης του υγρού της δεξαμενής.

Βλέπουμε τις μεθόδους μέτρησης του υγρού της δεξαμενής, όπως:

- 1) Μέτρηση της αγωγιμότητας του υγρού με μεταλλική ράβδο. (resistance sensor).
- 2) Μέτρηση με αισθητήρα πίεσεως τοποθετημένο στον πυθμένα. (pressure gage).
- 3) Με αισθητήρα παραμόρφωσης, όπου η παραμόρφωση είναι ανάλογη του βάρους της δεξαμενής και άρα ανάλογη του ύψους της στάθμης του υγρού. (force transducer).

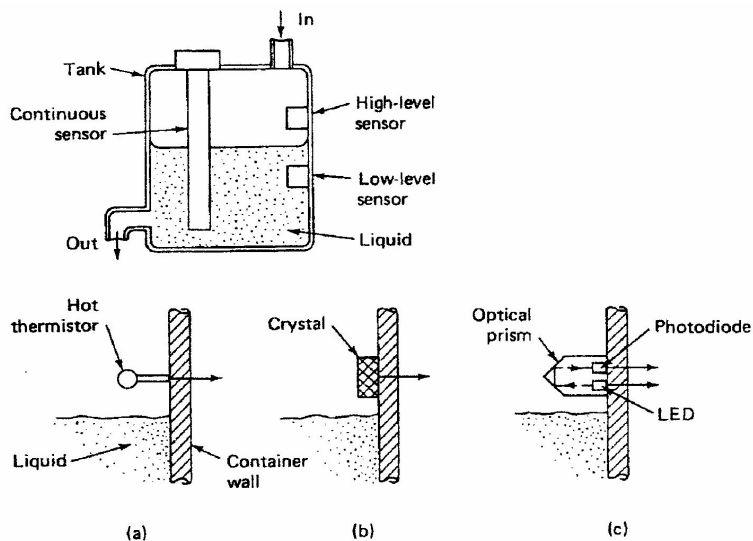
4) Με αισθητήρα μετακίνησης ποτενσιόμετρου και, (float (arm linked to potentiometer).

5) Με σύστημα εκπομπής και λήψης υπέρηχων μετά από ανάκλασή τους στην επιφάνεια του υγρού της δεξαμενής, με το ύψος της στάθμης να υπολογίζεται από την διαφορά του χρόνου μεταξύ εκπομπής και λήψης του παλμού των υπερήχων. (sonar unit. transmitter-receiver).

Είδαμε έως τώρα κάποιους από τους πολλούς τρόπους που υπάρχουν για την μέτρηση της συνεχούς μεταβολής της στάθμης του υγρού σε μια δεξαμενή.

Ας δούμε τώρα κάποια πράγματα όσο αφορά την *διακριτή ανίχνευση* του ύψους της στάθμης του υγρού σε κάποια δεξαμενή.

Στο σχήμα 10.10, παρακάτω, φαίνεται μια δεξαμενή με δύο διακριτούς αισθητήρες στάθμης υγρού με σκοπό να ενεργοποιείται μια αντλία νερού όταν η στάθμη του υγρού της δεξαμενής κατέβει κάτω από το ελάχιστο όριο και να σταματάει όταν ανέβει σε ένα μέγιστο όριο. Εδώ να τονίσουμε ότι, στην διακριτή ανίχνευση μεταβολής του ύψους ο αισθητήρας ουσιαστικά μας δείχνει αν η στάθμη του υγρού καλύπτει ή όχι τον αισθητήρα με αποτέλεσμα το ηλεκτρονικό τμήμα του αισθητήρα να αλλάζει ανάλογα με την περίπτωση ψηφιακή κατάσταση από 1 σε 0 , δηλαδή π.χ 5V ή 0V , με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται κάποιος ενδεικτικός λαμπτήρας ή να θέτετε σε κίνηση κάποια αντλία. Οι διακριτοί αισθητήρες μπορεί να είναι θερμίστορ (απλή και οικονομική λύση), που αλλάζει η τιμή της αντιστάσεως τους όταν καλυφθούν από κάποιο υγρό λόγω ψύξεως (σχήμα 10.10a) , ή μπορεί να είναι κρύσταλλος τοπικού ταλαντωτή και να αλλάζει η συχνότητα ταλάντωσης λόγω ψύξεως (σχήμα 10.10b)) , ή μπορεί να είναι κάποια οπτική διάταξη (σχήμα 10.10c)) που αποτελείται από φωτοανιχνευτή και κάποιο ανακλαστήρα και έτσι με την παρουσία του υγρού να έχουμε σκέδαση στην φωτεινή δέσμη.



Σχήμα 10.10 (Πάνω) Δεξαμενή αποθήκευσης υγρού με δύο διακριτούς αισθητήρες στάθμης.. (a) το θερμίστορ σαν διακριτός αισθητήρας, (b) κρύσταλλος τοπικού ταλαντωτή σαν διακριτός αισθητήρας, (c) οπτική διάταξη με φωτοανιχνευτή και ειδικό ανακλαστήρα σαν διακριτός αισθητήρας.

Κεφάλαιο 11^ο **ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ**

11.1 ΓΕΝΙΚΑ

Απόλυτη υγρασία καλείται, το πηλίκο της μάζας m των υδρατμών που περιέχεται εντός όγκου V ατμοσφαιρικού αέρα δια του όγκου αυτού ($\beta = \frac{m}{V}$). Σαν σχετική υγρασία Σ , καλείται το πηλίκο της μάζας m των υδρατμών δια της μάζας m_k των υδρατμών τους οποίους θα έπρεπε να περιέχει αυτός ο όγκος ατμοσφαιρικού αέρα για να είναι κεκορεσμένος σε αυτή την θερμοκρασία ($\Sigma = m / m_k$).

Η λειτουργία των αισθητήρων υγρασίας βασίζεται στην απορρόφηση υδρατμών από την επιφάνεια του αισθητήρα η οποία έχει επικαλυφθεί από χημικό υγροσκοπικό υλικό με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η αντίσταση. Τα υλικά αυτά είναι συνήθως άλατα όπως το χλωριούχο λίθιο. Όσο μεγαλύτερη είναι η σχετική υγρασία τόσο πιο πολύ υγρασία απορροφά το χλωριούχο λίθιο με αποτέλεσμα να μικραίνει η αντίστασή του.

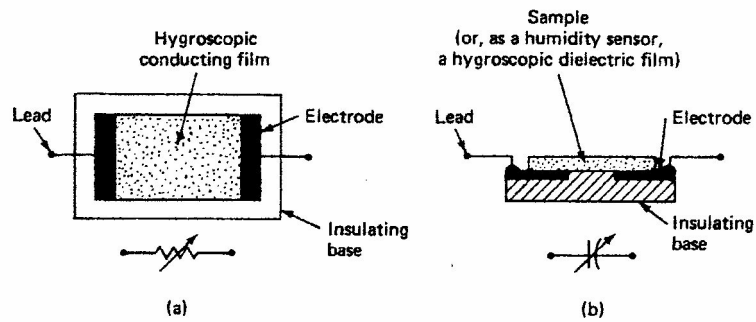
11.2 ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

11.2.1 Μετρητής ηλεκτρικής αντίστασης

Στο σχήμα 11.1a), παρακάτω φαίνεται η αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα υγρασίας όπου σε μια μονωτική βάση με δύο ηλεκτρόδια έχει τοποθετηθεί υγροσκοπικό φιλμ από υλικό $LiCl$ ή KH_2PO_4 . Όταν η υγρασία του περιβάλλοντος αυξάνεται τότε περισσότερη ποσότητα υδρατμών απορροφάται από το υγροσκοπικό υλικό του αισθητήρα με αποτέλεσμα την ελάττωση της αντίστασής του.

11.2.2 Χωρητικός μετρητής

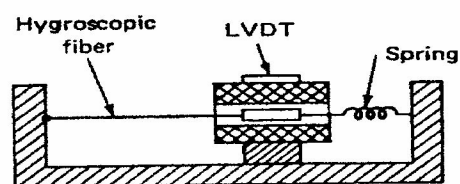
Στο σχήμα 11.1b), εικονίζεται ένας άλλος τύπος αισθητήρα υγρασίας που στηρίζεται στην μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς του υγροσκοπικού φιλμ με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η χωρητικότητα του αισθητήρα. Η μεταβολή της χωρητικότητας του αισθητήρα μπορεί να μετρηθεί είτε σε κύκλωμα γέφυρας είτε με αλλαγή της συχνότητας συντονισμού τοπικού ταλαντωτή, όπου η χωρητικότητα του αισθητήρα είναι τμήμα αυτού.



Σχήμα 11.1 (a) Η αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα υγρασίας όπου σε μια μονωτική βάση με δύο ηλεκτρόδια έχει τοποθετηθεί υγροσκοπικό φιλμ από υλικό $LiCl$ ή KH_2PO_4 . (b) Ένας άλλος τύπος αισθητήρα υγρασίας που στηρίζεται στην μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς του υγροσκοπικού φιλμ μετά της υγρασίας με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η χωρητικότητα του αισθητήρα.

11.2.3 Μετρητής τριχός με ΓΜΑΜ

Τέλος, στο σχήμα 11.2 , παρακάτω, εικονίζεται ένας άλλος τύπος αισθητήρα υγρασίας που η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στην μεταβολή του μήκους υγροσκοπικής ίνας από την μεταβολή της υγρασίας. Η μεταβολή αυτή ανιχνεύεται από την μετακίνηση του πυρήνα αισθητήρα μετακίνησης τύπου LVDT.



Σχήμα 11.2 Ένας άλλος τύπος αισθητήρα υγρασίας που η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στην μεταβολή του μήκους υγροσκοπικής ίνας από την μεταβολή της υγρασίας.

Κεφάλαιο 12^ο

ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

12.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ήχος, είναι ο μετασχηματισμός της ενέργειας, κατά την διαδικασία της εκπομπής της δια μέσου της ύλης με τη βοήθεια μηχανικών δονήσεων. Ο ήχος μπορεί να διαδοθεί δια μέσου των αερίων, υγρών και στερεών, αλλά όχι δια μέσου του κενού.

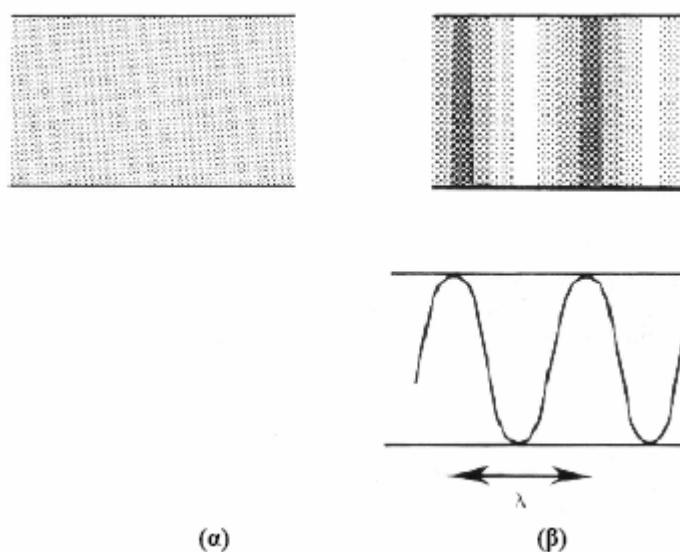
Υπέρηχος, είναι ο ήχος στον οποίο η συχνότητα των δονήσεων είναι μεγαλύτερη από 20 KHz. Το επάνω όριο συχνοτήτων είναι αρκετά υψηλό, και θεωρείται στα 10^{13} Hz. Στην πράξη για τις διάφορες εφαρμογές χρησιμοποιούνται συχνότητες χαμηλότερες από 20 MHz. Ο λόγος φυσικά είναι η βαθμιαία αύξηση της απόσβεσης τέτοιων κυμάτων υπερήχων καθώς αυξάνεται η συχνότητα και έτσι αφ' ενός μειώνεται η απόσταση διάδοσής των, αφ' ετέρου δε η διείσδυσή τους στην ύλη είναι πολύ φτωχή (σε περιπτώσεις που μας ενδιαφέρει έλεγχος δομής ή της συνέχειας κάποιων υλικών).

Οι υπέρηχοι όπως και οι ακτίνες X, είναι κύματα που μεταφέρουν ενέργεια (όχι ύλη) στο χώρο. Ένα κύμα είναι μια μεταβολή σε κάποιες ποσότητες, γνωστές σαν κυματικές μεταβλητές, που διαδίδεται στο χώρο με μια χαρακτηριστική ταχύτητα. Στην περίπτωση των ακτινών X, οι οποίες μεταφέρουν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια και μέσα στο κενό, η ταχύτητα διάδοσης είναι η γνωστή μας ταχύτητα του φωτός ($c = 3 \times 10^8$ m/sec). Οι υπέρηχοι, που δεν είναι τίποτα άλλο παρά ακουστικά κύματα με συχνότητες μεγαλύτερες από εκείνες στις οποίες είναι ευαίσθητο το ανθρώπινο αυτί (συχνότητες όπως είπαμε άνω των 20kHz), διαφέρουν από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο ότι για την μεταφορά ενέργειας στο χώρο απαιτείται κάποιο μέσο διάδοσης. Η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων (c), και του ήχου γενικότερα, είναι συνάρτηση της πυκνότητας (ρ) και της ελαστικότητας όγκου (K) του μέσου διάδοσης. Συγκεκριμένα : $c = (K / \rho)^{1/2}$. Η ελαστικότητα όγκου είναι το μέτρο της μεταβολής του όγκου ενός υλικού κάτω από μια ορισμένη πίεση, δηλαδή το μέτρο της αντίστασης του υλικού στη συμπίεση. Τυπικές ταχύτητες υπερήχων σε διάφορα βιολογικά και άλλα υλικά δίνονται στον πίνακα 1), πιο κάτω.

Υλικό	Ταχύτητα (m/sec)
Αέρας	331
Λίπος	1450
Λάδι (castor)	1500
Νερό (50°C)	1540
Μαλακοί ιστοί	1540
Ήπαρ	1550
Αίμα	1570
Μυς	1585
Οστά (κρανίο)	4080
Χαλαζίας (quartz)	5740
Αλουμίνιο	6400

Πίνακας 1) Ταχύτητα ήχου σε διάφορα υλικά

Μια άλλη βασική διαφορά μεταξύ ήχου και διαφόρων μορφών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι ότι τα ακουστικά κύματα είναι διαμήκη (longitudinal), ενώ τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι εγκάρσια (transverse). Διαμήκη ονομάζονται τα κύματα, στα οποία οι μεταβολές των κυματικών μεταβλητών είναι στην ίδια κατεύθυνση με την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Αντίθετα, εγκάρσια ονομάζονται τα κύματα, στα οποία οι κυματικές μεταβλητές μεταβάλλονται κάθετα προς την κατεύθυνση διάδοσής τους. Έτσι, στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, η ένταση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου μεταβάλλεται κάθετα προς την κατεύθυνση διάδοσης τους. Άλλο παράδειγμα γνωστό εγκάρσιων κυμάτων είναι τα θαλάσσια κύματα. Αντίθετα, τα ακουστικά κύματα διαδίδονται βάζοντας τα σωματίδια του μέσου διάδοσης σε παλμική κίνηση γύρω από τη θέση ισορροπίας τους και στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Στο σχήμα 12.1, παρακάτω, φαίνονται διαγραμματικά η στιγμιαία θέση των σωματιδίων του μέσου διάδοσης στο χώρο και η αντίστοιχη πίεση σαν συνάρτηση της απόστασης, καθώς διαδίδεται ένα συνεχές κύμα (CW) υπερήχων. Συνεχές (μη παλμικό) ονομάζεται ένα κύμα μεγάλης διάρκειας, του οποίου οι κυματικές μεταβλητές είναι ημιτονοειδής συναρτήσεις του χρόνου. Η περιοδική αυτή αλλαγή στην τιμή μιας κυματικής μεταβλητής, ξεκινώντας από την τιμή της σε κάποια κατάσταση ηρεμίας, φθάνοντας σε μια μέγιστη τιμή, περνώντας από τη μέση τιμή ηρεμίας, κατεβαίνοντας σε μια ελάχιστη τιμή και επιστρέφοντας ξανά στη μέση τιμή ηρεμίας, επαναλαμβάνεται συνεχώς και η κάθε επανάληψη ονομάζεται κύκλος. Όταν ο ηχοβολέας σταματήσει να εκπέμπει το συνεχές αυτό κύμα, τα σωματίδια του μέσου διάδοσης επανέρχονται στην αρχική θέση ηρεμίας.



Σχήμα 12.1 Στιγμιαία θέση σωματιδίων ομοιογενούς μέσου πριν (α) και μετά (β) τη διάδοση συνεχούς κύματος υπερήχων.

Οι υπέρηχοι, όπως όλα τα κύματα, χαρακτηρίζονται από ορισμένες παραμέτρους. Οι παράμετροι αυτές είναι η συχνότητα, η περίοδος, το μήκος κύματος, η ταχύτητα διάδοσης, το πλάτος κύματος και η ένταση. Η συχνότητα, η περίοδος, το πλάτος κύματος και η ένταση εξαρτώνται από την πηγή των υπέρηχων, η ταχύτητα είναι χαρακτηριστική του μέσου διάδοσης και το μήκος κύματος εξαρτάται τόσο από την πηγή των υπερήχων όσο και από το μέσο διάδοσης.

Συχνότητα (f) ονομάζεται ο αριθμός κύκλων μιας κυματικής μεταβλητής ανά sec και εκφράζεται σε μονάδες Hertz (1 hertz= 1 κύκλος/sec) ή Megahertz (1 megahertz= 1000000 Hz).

Περίοδος (T) είναι η διάρκεια ενός κύκλου και ισούται με το αντίστροφο της συχνότητας, δηλαδή : $T=1/f$.

Μήκος κύματος (λ) ονομάζεται το μήκος, στο χώρο, που καταλαμβάνει ένας κύκλος του κύματος. Είναι δηλαδή, η απόσταση, κατά την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος, μεταξύ γειτονικών σωματιδίων του μέσου διάδοσης, που έχουν το ίδιο πλάτος μετατόπισης από τη θέση ηρεμίας (σχήμα παραπάνω). Το μήκος κύματος είναι ίσο με την ταχύτητα μεταφοράς δια τη συχνότητα, δηλαδή : $\lambda=c/f$.

Η επιστήμη της παραγωγής και εκπομπής ηχητικών κυμάτων στην ύλη έχει ενταχθεί ήδη σε τεχνολογία αιχμής με πολλές πρακτικές εφαρμογές. Μεταξύ των εφαρμογών εκπομπής χαμηλού πλάτους είναι η υποθαλάσσια εκπομπή ηχητικών κυμάτων για τον εντοπισμό υποβρυχίων, η μέτρηση του βάθους και των λεπτομερειών του βυθού των θαλασσών και ωκεανών, ο εντοπισμός ατελειών της ύλης, και πολλές ιατρικές εφαρμογές

Οι υπέρηχοι όπως είπαμε, είναι ένα ακουστικό κύμα. Οι υπέρηχοι παρουσιάζουν όλα τα βασικά φαινόμενα που συναντάμε στα κύματα, δηλαδή την διάθλαση την συμβολή και την περίθλαση. Αφού οι υπέρηχοι είναι ακουστικό κύμα, δηλαδή διάδοση μιας μηχανικής διαταραχής σε ένα συνεχές μέσο τότε αυτή η διαταραχή μπορεί να περιγραφεί με μία κατάλληλη συνάρτηση ορισμένη σε ολόκληρο το μέσο διάδοσης. Συνηθίζεται να αποκαλούμε την συνάρτηση αυτή ως "κύμα", δηλαδή να λέμε : το κύμα $K(x,y,z)$. Στην περίπτωση που το μέσο διάδοσης είναι ρευστό(υγρό ή αέριο) η συνάρτηση αυτή μπορεί να είναι η συνάρτηση της πίεσης $P(x,y,z)$. Εδώ να τονίσουμε ότι η διαταραχή αυτή μπορεί να φθίνει καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή της, όπως γίνεται όταν απομακρυνόμαστε από ένα ηχείο όπου παρατηρούμε μείωση της έντασης του ήχου. Αυτή η μείωση της έντασης της διαταραχής οφείλεται κατά κύριο λόγο στην διεύρυνση του μετώπου του κύματος κατά την διάδοση του και κατά δεύτερο λόγο στις απώλειες ενέργειας στο ιξώδες του ρευστού. Κατά προσέγγιση το ρευστό μπορεί να θεωρηθεί ιδανικό χωρίς απώλειες. Ένα κύμα $P(x,y,z)$ διαδιδόμενο σε ένα ιδανικό ρευστό ικανοποιεί την λεγόμενη *εξίσωση κύματος* που είναι:

$$\nabla^2 P - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0$$

όπου, η ποσότητα c είναι η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο ελεύθερο ρευστό, δηλαδή σε χώρο απείρων διαστάσεων χωρίς όρια ή εμπόδια, γεμάτο με αυτό το ρευστό. Η εξίσωση αυτή είναι μία γραμμική εξίσωση, συνεπώς ισχύει η γνωστή αρχή της επαλληλίας. Σύμφωνα με αυτή την αρχή, δύο κύματα πχ $P_1(x, y, z)$ και $P_2(x, y, z)$ που διαδίδονται στο ίδιο μέσο δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και έτσι : $P(x, y, z) = P_1(x, y, z) + P_2(x, y, z)$

Συνηθίζεται να θεωρούμε ότι το τυχαίο κύμα $P(x, y, z)$ συγκροτείται από την επαλληλία ημιτονικών κυμάτων διαφόρων συχνοτήτων, φάσεων και πλατών. Τα κύματα αυτά είναι οι συνιστώσες Fourier του κύματος $P(x, y, z)$ δηλαδή οι φασματικές του συνιστώσες. Λόγω της γραμμικότητας της εξίσωσης κύματος οι συνιστώσες αυτές δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, δηλαδή η καθεμιά διαδίδεται χωρίς να αντιλαμβάνεται την ύπαρξη κάποιας άλλης. Επιπλέον, σύμφωνα με την δεδομένη εξίσωση, όλες οι συνιστώσες διαδίδονται στο ελεύθερο ρευστό με την ίδια ταχύτητα, έτσι το σχήμα ενός εκπεμπόμενου παλμού που διαδίδεται μέσα στο ελεύθερο ρευστό δεν μεταβάλλεται κατά την διάδοση. Στην

περίπτωση που το ρευστό δεν είναι ελεύθερο, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της διάδοσης του ήχου σε ένα σωλήνα γεμάτο με το ρευστό, κάθε συνιστώσα έχει την δική της ταχύτητα διάδοσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *διασκεδασμός* (dispersion).

Όταν διαδίδεται κάποιο ακουστικό κύμα μπορεί να συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών. Έτσι για παράδειγμα ένα κύμα διαδιδόμενο στον αέρα μπορεί να συναντήσει τα τοιχώματα ενός σωλήνα ή την επιφάνεια ενός υγρού. Η συμπεριφορά του κύματος σε αυτές τις διαχωριστικές επιφάνειες εξαρτάται ισχυρά από ένα μέγεθος που ονομάζεται *ακουστική αντίσταση του μέσου* Z .

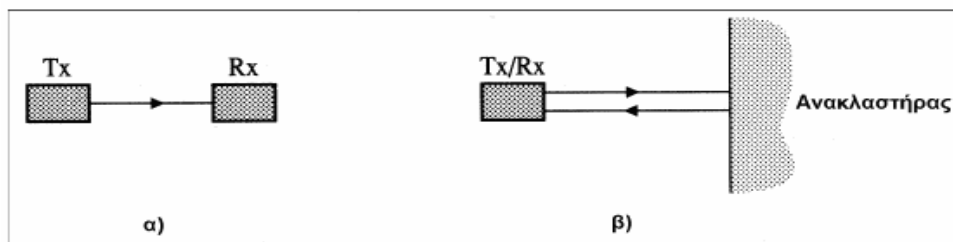
$$Z = \rho c$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του μέσου και c η ταχύτητα του ήχου στο μέσο διάδοσης. Αν υπάρχει μεγάλη διαφορά στις ακουστικές αντιστάσεις δύο υλικών που βρίσκονται σε επαφή τότε ο ήχος δεν θα μπορεί να διαδοθεί καλά από το ένα υλικό στο άλλο. Ελάχιστο μέρος θα διαδοθεί στο άλλο υλικό ενώ το μεγαλύτερο μέρος θα ανακλαστεί στη διαχωριστική τους επιφάνεια. Η σχετική ποσότητα των υπερήχων που θα ανακλαστεί και διαδοθεί στη διαχωριστική επιφάνεια δεν εξαρτάται μόνο από την ακουστική αντίσταση αλλά επίσης και από τη γωνία πρόσπτωσης των υπερήχων πάνω στην διαχωριστική αυτή επιφάνεια.

Ένας *αισθητήρας υπερήχων* είτε γεννά υπέρηχους από μία μορφή ενέργειας και είναι πομπός (TX), είτε μετατρέπει τον υπέρηχο σε μια άλλη μορφή ενέργειας (ηλεκτρική) και αντιπροσωπεύει τον δέκτη (RX). Πολλοί αισθητήρες κάνουν και τα δύο.

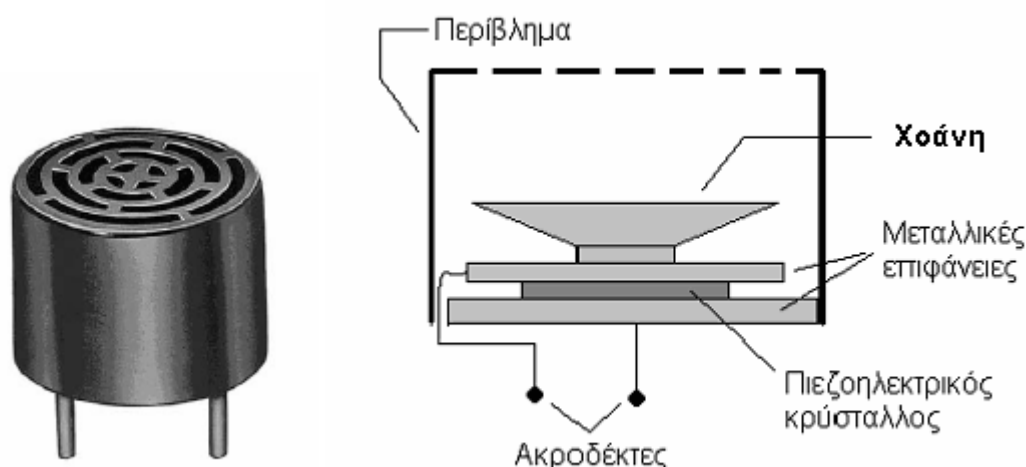
Υπάρχει μία πολύ μεγάλη ποικιλία αισθητήρων. Οι πιο ενδιαφέροντες, κυρίως για συχνότητες στην περιοχή των μεγακύκλων είναι οι πιεζοηλεκτρικοί (piezoelectric) και ηλεκτροσυστολικοί (electrostrictive).

Πολύ συχνά, ένας αισθητήρας ο οποίος λειτουργεί σαν πομπός μπορεί επίσης να λειτουργεί και σαν δέκτης και το αντίστροφο, σ' αυτήν την περίπτωση η σχεδίαση του πομπού και του δέκτη είναι πανομοιότυπη. Οι όροι μονοστατικός (monostatic) και διστατικός (bistatic) χρησιμοποιούνται σε σχέση με τη δράση των αισθητήρων. Εάν κάποιος αισθητήρας χρησιμοποιείται μόνο σαν πομπός ή μόνο σαν δέκτης, ονομάζεται μονοστατικός. το σχήμα 12.2α), παρακάτω, δείχνει δύο μονοστατικούς αισθητήρες, έναν για εκπομπή και τον άλλον για λήψη. Ο όρος διστατικός χρησιμοποιείται όταν ο ίδιος αισθητήρας δρα αμφότερα σαν πομπός και δέκτης, θα μπορούσε για παράδειγμα κατά πρώτον να δρα σαν πομπός εκπέμποντας μια παλμοσειρά υπερήχων και κατόπιν, μετά από κατάλληλο χρονικό διάστημα να δρα σαν δέκτης για το ανακλώμενο σήμα (σχήμα 12.2β)).



Σχήμα 12.2 Μονοστατικός και διστατικός αισθητήρας. (α) Μονοστατικός πομπός και μονοστατικός δέκτης, β) Διστατικός πομπός/δέκτης.

Οι υπέρηχοι που χρησιμοποιούνται για μετρήσεις στον αέρα μπορούν να παραχθούν και να ανιχνευθούν με διάφορους τρόπους. Ένας δημοφιλής τρόπος είναι η χρήση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων. Ένας πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας μπορεί γενικά να χρησιμοποιηθεί και ως πομπός και ως δέκτης γιατί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι αντιστρεπτό. Σε ορισμένες περιπτώσεις ένας πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας προορίζεται για χρήση είτε ως πομπός μόνο, είτε ως δέκτης. Αυτό συμβαίνει γιατί ο συγκεκριμένος αισθητήρας έχει βελτιστοποιηθεί για τη συγκεκριμένη χρήση, κι όχι γιατί είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθεί διαφορετικά. Στο σχήμα 12.3, παρακάτω, εικονίζεται ένας τυπικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας και δίπλα η δομή του (εσωτερικό της κατασκευής).



Σχήμα 12.3 Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας και η δομή του.

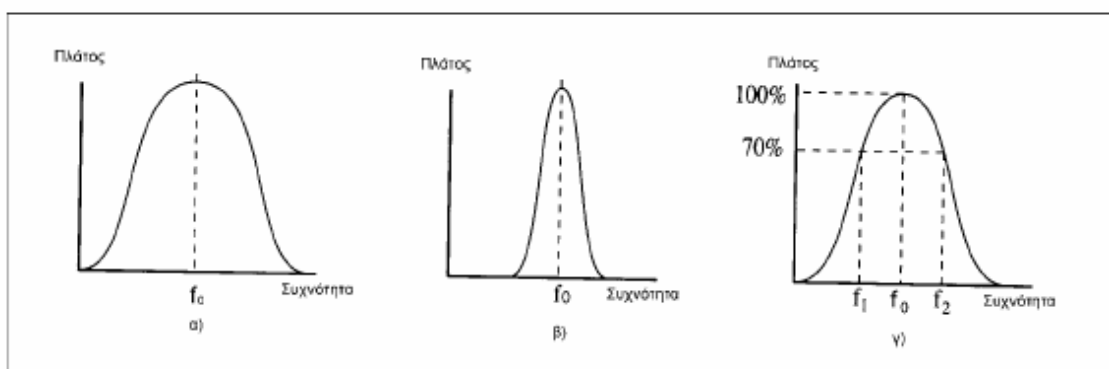
Βασικό στοιχείο της κατασκευής είναι ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος. Οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι είναι υλικά στα οποία η εφαρμογή μηχανικής παραμορφωτικής πίεσης (τάσης) προκαλεί την ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης και αντιστρόφως. Ο κρύσταλλος βρίσκεται μεταξύ δυο μεταλλικών πλακών που συνδέονται ηλεκτρικά με τους εξωτερικούς ακροδέκτες. Η πάνω επιφάνεια είναι ελεύθερη να κινείται. Η κάτω επιφάνεια είναι μέρος του περιβλήματος. Ο κρύσταλλος είναι πολύ λεπτός και το πάχος του είναι μικρότερο του ενός χιλιοστού. Οι μεταλλικές επιφάνειες έχουν πολύ μεγαλύτερες διαστάσεις και μάζα από τον κρύσταλλο.

Όταν ο κρύσταλλος χρησιμοποιείται ως πομπός, εφαρμόζεται μια εναλλασσόμενη τάση στους ακροδέκτες του. Η τάση αυτή αναγκάζει τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο να ταλαντώνεται στην συχνότητα της διεγείρουσας τάσης. Η ταλάντωση αυτή μεταφέρεται στην πάνω μεταλλική επιφάνεια και από εκεί στην χοάνη. Η ταλαντούμενη χοάνη εκπέμπει τον υπέρηχο στον αέρα. Όταν ο κρύσταλλος χρησιμοποιείται ως δέκτης οι ακροδέκτες του χρησιμοποιούνται ως έξοδος τάσης σχετικής με το λαμβανόμενο υπερηχητικό σήμα. Η ταλάντωση του αέρα που προέρχεται από το εισερχόμενο ακουστικό κύμα διεγείρει την χοάνη, με την σειρά της η χοάνη δονεί την άνω μεταλλική επιφάνεια που με τη σειρά της δονεί τον κρύσταλλο. Οι δονήσεις του κρυστάλλου παράγουν μια εναλλασσόμενη τάση μεταξύ των δυο μεταλλικών επιφανειών που μεταφέρεται στους ακροδέκτες.

12.2 ΣΥΧΝΟΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Γενικά ένας αισθητήρας δεν ανταποκρίνεται το ίδιο καλά σε όλες τις συχνότητες είτε λειτουργεί ως πομπός είτε ως δέκτης.

Για παράδειγμα, θεωρούμε ένα αισθητήρα που διεγείρεται από ένα ημιτονικό σήμα τάσης με ρυθμιζόμενη συχνότητα και σταθερό πλάτος. Το πλάτος του παραγόμενου υπερηχητικού κύματος θα μεταβάλλεται καθώς αλλάζει η συχνότητα όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 12.4 .



Σχήμα 12.4 Συχνοτική απόκριση πλάτους αισθητήρα υπέρηχων.

Η καμπύλη αυτή διατηρεί την μορφή της για μια ευρεία περιοχή πλατών της ημιτονικής διέγερσης κι έτσι ο αισθητήρας μπορεί να θεωρηθεί γραμμικό σύστημα. Η καμπύλη έχει στενή ζωνοπερατή μορφή που θυμίζει συντονισμένο σύστημα. Το μέγιστο του υπερηχητικού σήματος παράγεται για μια συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού f_0 . Η συχνότητα αυτή συνήθως δίνεται από τον κατασκευαστή και αποτελεί την βασική παράμετρο χαρακτηρισμού του αισθητήρα. Έτσι έχουμε αισθητήρες των 22KHz, 40KHz, 400KHz, κλπ.

Τα διαφορετικά εύρη που εμφανίζουν οι κορυφές στη συχνοτική απόκριση των αισθητήρων όπως για παράδειγμα οι περιπτώσεις α και β του σχήματος 12.4 παραπάνω εκφράζονται με τον όρο του εύρους ζώνης BW (bandwidth). Μια οξεία κορυφή εκφράζει μικρό εύρος, ενώ μια διευρυμένη κορυφή εκφράζει μεγάλο εύρος.

Το εύρος ζώνης BW ορίζεται ως η διαφορά συχνοτήτων f_2-f_1 εντός των οποίων το πλάτος έχει μειωθεί κατά -3Db ή 70%, και μάλιστα πιο σωστά στο $\frac{1}{\sqrt{2}} = 70,7\%$ του μέγιστου πλάτους (σχήμα 12.4γ)).

Κάποιες φορές ένας αισθητήρας μπορεί να έχει περισσότερες από μια συχνότητες συντονισμού. Ο αισθητήρας όμως σχεδιάζεται ώστε να λειτουργεί κανονικά σε μια μόνο απ' αυτές που είναι και η ονομαστική του συχνότητα.

Παράγοντας ποιότητας Q

Ο παράγοντας ποιότητας Q μας δίνει πληροφορίες σχετικές με την απόσβεση του αισθητήρα και την ικανότητά του να δημιουργεί στενούς παλμούς.

Ο παράγοντας Q ουσιαστικά είναι το μέτρο της ευκολίας με την οποία χάνεται η ενέργεια από ένα ταλαντούμενο σύστημα. Πολύ συχνά ορίζεται σαν μια συνάρτηση του λόγου της ενέργειας που αποθηκεύεται σε κάθε κύκλο προς την ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε κύκλο. Ο παράγοντας Q έχει δύο αξιόλογες εμφανίσεις σε μεγέθη που εξετάζουμε και μας ενδιαφέρουν. Κατά πρώτον συσχετίζεται με το εύρος ζώνης (bandwidth) BW και τη συχνότητα συντονισμού f_0 με την έκφραση:

$$Q = \frac{f_0}{BW}$$

Μια μεγάλη τιμή του παράγοντα Q υποδηλώνει ότι η κορυφή συντονισμού είναι πολύ οξεία, ενώ μια μικρή τιμή του Q υποδηλώνει μια ευρεία κορυφή συντονισμού. Ένας αισθητήρας που έχει μεγάλο Q δεν έχει την ικανότητα να δημιουργεί στενούς παλμούς. Για εκπομπή και λήψη στενών παλμών χρειαζόμαστε αισθητήρες με χαμηλό Q . Από την άλλη μεριά ένας αισθητήρας με μεγάλο Q θα ήταν πολύ αποτελεσματικός στο να παράγει η να ανιχνεύει μια σταθερή και μονή συχνότητα κυρίως σε λειτουργία συνεχούς κύματος (CW).

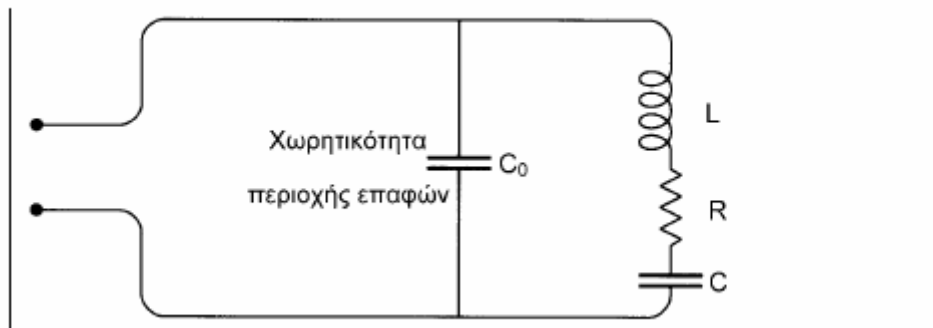
Η δεύτερη σημαντική εμφάνιση του παράγοντα ποιότητας Q είναι ότι μας παρέχει τη δυνατότητα πρόβλεψης σε ένα αισθητήρα πόσο γρήγορα θα εξαλειφθούν οι μηχανικές δονήσεις σαν αποτέλεσμα φυσικής μηχανικής απόσβεσης. Μια μεγάλη τιμή του Q υποδηλώνει ασθενή απόσβεση, ενώ αντίθετα μια μικρή τιμή του Q έχει σαν αποτέλεσμα μια γρήγορη απόσβεση.

12.3 Ο ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΩΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Η γνώση της συμπεριφοράς του αισθητήρα ως ηλεκτρικού φορτίου είναι απαραίτητη για την καλή σχεδίαση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων της εκπομπής και της λήψης. Η ηλεκτρική συμπεριφορά ενός αισθητήρα μπορεί να είναι πολύ πολύπλοκη. Υπάρχει σίγουρα μια χωρητική συνιστώσα σε αυτή τη συμπεριφορά λόγω του τρόπου κατασκευής του αισθητήρα. Λόγω της συμπεριφοράς του ως συντονισμένου κυκλώματος θα υπάρχει και επαγωγική συνιστώσα στη συμπεριφορά του. Η εκπομπή ενέργειας φανερώνει την ύπαρξη ωμικής συνιστώσας.

Υπάρχουν διάφορα ισοδύναμα κυκλώματα για την περιγραφή της συμπεριφοράς του αισθητήρα ως ηλεκτρικού φορτίου. Ένα από αυτά παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα.12.5). Το μοντέλο περιγράφει ικανοποιητικά τον αισθητήρα μόνο στην περιοχή κοντά στη συχνότητα συντονισμού. Η ακριβέστερη περιγραφή και για μεγαλύτερο εύρος

συνθηκών απαιτεί την χρήση πιο πολύπλοκων ισοδύναμων κυκλωμάτων. Τα ισοδύναμα αυτά δεν έχουν την απλότητα και την αμεσότητα του εν λόγω ισοδύναμου.



Σχήμα 12.5 Ένα ισοδύναμο αισθητήρα σαν ηλεκτρικό φορτίο.

12.4 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΠΟΜΠΗ

Με δεδομένη την συνάρτηση μεταφοράς ενός αισθητήρα μπορούμε να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα για τις ικανότητες εκπομπής του. Κατ' αρχήν η στενή ζωνοπερατή μορφή της συνάρτησης μεταφοράς φανερώνει ότι το εκπεμπόμενο σήμα θα είναι ένα σήμα στενής ζώνης στην περιοχή της f_0 . Θα είναι δηλαδή ένα ημιτονοειδές σήμα με συχνότητα παγιδευμένη στην περιοχή της f_0 και με πλάτος που δεν θα μπορεί να αλλάζει γρήγορα.

Επίδραση της μεταβολής του πλάτους του εκπεμπόμενου σήματος

Σε πολλές περιπτώσεις μας ενδιαφέρει το πόσο γρήγορα μπορεί να μεταβάλλεται το πλάτος του εκπεμπόμενου σήματος. Για παράδειγμα, έστω ότι διεγείρουμε τον αισθητήρα με μια αιχμή τάσης. Το εκπεμπόμενο σήμα δεν θα είναι μια αιχμή ακουστικού σήματος αλλά φθίνουσες ακουστικές ταλαντώσεις. Ο χρόνος απόσβεσης αυτών των ταλαντώσεων είναι μια σημαντική παράμετρος γιατί καθορίζει την διάρκεια του εκπεμπόμενου σήματος και την οξύτητα της περιβάλλουσάς του. Για να μελετήσουμε την ταχύτητα μεταβολής του πλάτους του εκπεμπόμενου σήματος θα πρέπει πρώτα να αναφερθούν μερικά στοιχεία από την διαμόρφωση πλάτους (AM). Ας θεωρήσουμε ότι έχουμε έναν ημιτονικό φορέα συχνότητας f_0 τον οποίο διαμορφώνουμε κατά πλάτος χρησιμοποιώντας ένα άλλο ημιτονικό σήμα συχνότητας f_a . Σύμφωνα με την θεωρία της κατά πλάτος διαμόρφωσης (AM), το διαμορφωμένο σήμα θα έχει στο φάσμα του τρεις φασματικές γραμμές. Η πρώτη βρίσκεται στη συχνότητα f_0 και αντιστοιχεί στη συχνότητα του φορέα. Οι δύο άλλες βρίσκονται στις συχνότητες $f_0 - f_a$ και $f_0 + f_a$ και ονομάζονται πλευρικές. Αυτές προέρχονται

από την διαμόρφωση και περιέχουν την πληροφορία της μεταβολής του πλάτους. (σχήμα 12.6).

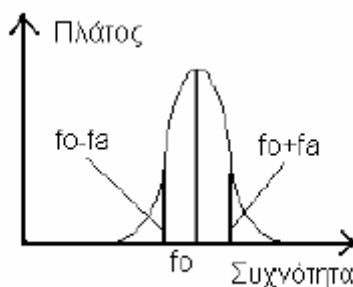


Σχήμα 12.6 Πλευρικές συχνότητες στην διαμόρφωση πλάτους (AM).

Ο χρόνος ανόδου του πλάτους από την ελάχιστη τιμή του ως τη μέγιστη T θα αντιστοιχεί στην μισή περίοδο της f_a οπότε $T=1/2f_a$. Θεωρούμε τώρα ότι το φάσμα του εκπεμπόμενου υπερηχητικού σήματος θα είναι παρόμοιο με τη συνάρτηση μεταφοράς. Αυτό είναι μια πολύ λογική παραδοχή. Αν η διέγερση γίνεται με στενό παλμό (περίπου δέλτα συνάρτηση) τότε το φάσμα του σήματος είναι ακριβώς η συνάρτηση μεταφοράς (από τη γραμμική θεωρία). Πράγματι αν συμβολίσουμε με $f(t)$ την απόκριση ενός κυκλώματος και με $g(t)$ την διέγερσή του, τότε η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος δίνεται από τη σχέση: $L\{f(t)\} = L\{h(t)\} = H(s)$ από την οποία προκύπτει ότι $L\{f(t)\} = H(s)L\{g(t)\}$. Αν θεωρήσουμε ότι η διέγερση του κυκλώματος είναι η δέλτα συνάρτηση (μοναδιαία ώση), τότε επειδή $L\{g(t)\} = L\{\delta(t)\} = 1$, έχουμε: $L\{f(t)\} = L\{h(t)\} = H(s)$. Και όπως προκύπτει από την τελευταία σχέση, η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος είναι ο μετασχηματισμός Laplace της κρουστικής του απόκρισης $h(t)$.

Αν το σήμα διέγερσης έχει το συχνοτικό του περιεχόμενο εντοπισμένο στην περιοχή λειτουργίας του αισθητήρα, δηλαδή γύρω από την f_0 τότε το εκπεμπόμενο φάσμα θα μοιάζει με τη συνάρτηση μεταφοράς. Αν το μέγιστο μέρος του φασματικού περιεχομένου του σήματος διέγερσης ευρίσκεται εκτός της ζώνης διέλευσης της συνάρτησης μεταφοράς, τότε το εκπεμπόμενο φάσμα δεν θα μοιάζει με την συνάρτηση μεταφοράς. Η περίπτωση αυτή όμως δεν έχει πρακτική αξία γιατί το πλάτος υφίσταται ισχυρή απόσβεση εκτός της ζώνης διέλευσης της συνάρτησης μεταφοράς οπότε η λειτουργία του αισθητήρα δεν είναι αποδοτική. Με αυτήν την παραδοχή προκύπτει ότι η μεταβολή του πλάτους του υπερηχητικού σήματος θα πρέπει να οδηγεί σε πλευρικές συχνότητες που θα περιέχονται εντός της ζώνης διέλευσης της συνάρτησης μεταφοράς. Αυτό ισχύει ανεξάρτητα του αν το υπερηχητικό σήμα προέρχεται από μια διεργασία διαμόρφωσης πλάτους ή από κάποια άλλη διεργασία, όπως η έναρξη σταθερής ταλάντωσης συχνότητας f_0 από την ηρεμία.

Αν το εύρος ζώνης συχνοτήτων σημαντικού πλάτους στη συνάρτηση μεταφοράς είναι BW τότε θα είναι κατά προσέγγιση $2f_a=BW$ (σχήμα 12.7).



Σχήμα 12.7 Εύρος ζώνης.

Οπότε ο χρόνος ανόδου του πλάτους από την ελάχιστη στη μέγιστη τιμή του θα είναι περίπου $T=1/2fa=1/BW$. Συνήθως είναι $BW = 0.025 - 0.1f_0$. Αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος T είναι της τάξης των δέκα έως σαράντα περιόδων της f_0 . Συνεπώς μπορούμε να πούμε ότι η περιβάλλουσα του εκπεμπόμενου σήματος θα μεταβάλλεται βραδέως. Σήματα με απότομες μεταβολές στο πλάτος, όπως είναι οι αιχμές, δεν είναι δυνατό να μεταδοθούν με αποδοτική χρήση του αισθητήρα. Έτσι, ένας παλμός τάσης δεν θα δώσει μόνο έναν ακουστικό παλμό αλλά ένα ημιτονοειδές κύμα συχνότητας περίπου f_0 με φθίνουσα περιβάλλουσα που θα περιέχει περίπου f_0/BW περιόδους. Δηλαδή η κυματομορφή του σήματος αντήχησης μπορεί να μοντελοποιηθεί χρονικά σαν μια ημιτονοειδής ταλάντωση με απόσβεση:

$$V(t) \approx V_0 t^n e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi)$$

Σ' αυτήν την μαθηματική περιγραφή οι παράμετροι n , α , φ και ω είναι εξαρτώμενοι από τον τύπο των χρησιμοποιούμενων αισθητήρων υπερήχων. Η παράμετρος ω είναι η συχνότητα συντονισμού του αισθητήρα. Η σχέση αυτή μας δίνει ότι το μέγιστο πλάτος εμφανίζεται κατά την χρονική στιγμή $t=n/\alpha$.

Επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του εκπεμπόμενου σήματος

Και στην περίπτωση αυτή για την μελέτη δηλαδή της ταχύτητας μεταβολής της συχνότητας του εκπεμπόμενου σήματος θα αναφερθούν πρώτα μερικά στοιχεία από την διαμόρφωση συχνότητας (FM).

Έστω ότι έχουμε έναν ημιτονικό φορέα συχνότητας f_0 τον οποίο διαμορφώνουμε κατά συχνότητα χρησιμοποιώντας ένα άλλο ημιτονικό σήμα συχνότητας f_m . Επίσης ας θεωρήσουμε ότι η μέγιστη επιτρεπτή συχνοτική απόκλιση από την f_0 του διαμορφωμένου φορέα είναι f_d . Τότε, σύμφωνα με τη θεωρία της FM διαμόρφωσης, ισχύει ο τύπος του Carson που λέει ότι το φασματικό εύρος που καταλαμβάνει το FM σήμα είναι κατά προσέγγιση $2(f_m+f_d)$.

Ας θεωρήσουμε τώρα ότι ο αισθητήρας βρίσκεται αρχικά σε σταθερή κατάσταση κατά την οποία εκπέμπει ημιτονικό σήμα σταθερού πλάτους και συχνότητας f_1 . Κατόπιν αναγκάζουμε τον αισθητήρα να μεταβεί σε άλλη σταθερή κατάσταση κατά την οποία εκπέμπει ημιτονικό σήμα ίδιου πλάτους και συχνότητας f_2 . Στόχος μας είναι να

μελετήσουμε την ταχύτητα μεταβολής αυτής της μετάβασης. Οι f_1 και f_2 είναι τυχαίες συχνότητες που όμως βρίσκονται στην περιοχή λειτουργίας του αισθητήρα, δηλαδή στην περιοχή της f_0 .

Με το ίδιο σκεπτικό όπως και κατά την μελέτη των μεταβολών του πλάτους και θεωρώντας τώρα ότι ο αισθητήρας εκτελεί περιοδικά την μετάβαση $f_1 \rightarrow f_2 \rightarrow f_1 \rightarrow f_2$ με συχνότητα f_m , διαπιστώνουμε ότι η κατάσταση αυτή αντιστοιχεί σε διαμόρφωση FM ενός φορέα συχνότητας $f_c = (f_1 + f_2)/2$ με $f_d = |f_2 - f_1|/2$ και διαμορφώνουσα συχνότητα f_m . Η μετάβαση μεταξύ των σταθερών και ακραίων καταστάσεων με συχνότητες f_1 και f_2 θα γίνεται σε χρόνο T που θα αντιστοιχεί στη μισή περίοδο του διαμορφώνοντος σήματος, δηλαδή $T = 1/2f_m$. Θεωρούμε επίσης ότι το διαθέσιμο εύρος ζώνης γύρω από τη συχνότητα $f_c = (f_1 + f_2)/2$ για την συνάρτηση μεταφοράς είναι περίπου BW , δηλαδή οι f_1 και f_2 είναι κοντά στην f_0 . (Από τον τύπο του Carson θα είναι $BW = 2(f_m + f_d)$ οπότε $2f_m = BW - 2f_d = BW - |f_2 - f_1|$. Συνεπώς $T = 1/(BW - |f_2 - f_1|)$). Ο τύπος αυτός είναι προσεγγιστικός.

Καθώς το διαθέσιμο εύρος ζώνης θα είναι το πολύ BW και η διαφορά $|f_2 - f_1|$ έχει ελάχιστη τιμή το μηδέν προκύπτει ότι η μεταβολή θα είναι πάντοτε βραδύτερη του χρόνου $1/BW$.

12.5 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΛΗΨΗ

Για τη λήψη ισχύουν ακριβώς τα ίδια με αυτά που ισχύουν για την εκπομπή μόνο που σ' αυτήν την περίπτωση μελετάμε την παραγόμενη τάση και όχι το ακουστικό κύμα. Η συνάρτηση μεταφοράς του αισθητήρα όταν χρησιμοποιείται ως δέκτης είναι, όπως είδαμε, η ίδια με αυτή που έχει όταν χρησιμοποιείται ως πομπός. Μόνο που τώρα το ακουστικό κύμα είναι η είσοδος και η τάση είναι η έξοδος. Έτσι το πλάτος της τάσης εξόδου δεν μπορεί να μεταβάλλεται απότομα. Ο χρόνος που χρειάζεται για τη μεταβολή του πλάτους μεταξύ δυο ακραίων τιμών προκύπτει από την ίδια σχέση που συναντήσαμε και στην περίπτωση της εκπομπής, δηλαδή $T = 1/BW$. Αυτό σημαίνει ότι ένας ακουστικός παλμός δεν θα δώσει ως έξοδο τάσης ένα παλμό τάσης, αλλά μια φθίνουσα ταλάντωση τάσης. Επίσης η επίδραση της μεταβολής της συχνότητας είναι ίδια όπως και κατά την εκπομπή.

12.6 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΣΕ ΣΥΖΕΥΞΗ -ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ

Στα συστήματα μετρήσεων με υπερήχους έχουμε την εκπομπή και την λήψη ενός υπερηχητικού ακουστικού κύματος. Συνεπώς στο σύστημα θα υπάρχει ένας πομπός κι ένας δέκτης. Ο πομπός και ο δέκτης μπορεί να είναι διαφορετικοί αισθητήρες ή ο ίδιος αισθητήρας. Για παράδειγμα έστω ότι θέλουμε να μετρήσουμε κάποια απόσταση. Αν χρησιμοποιούμε δυο αισθητήρες, μπορούμε να τους τοποθετήσουμε στα άκρα αυτής της απόστασης και μετρώντας το time of flight (χρόνο διάδοσης) ενός ακουστικού παλμού από

τον πομπό στον δέκτη να προσδιορίσουμε την απόσταση. Αν χρησιμοποιούμε ένα αισθητήρα μπορούμε να τον τοποθετήσουμε στο ένα άκρο και στο άλλο να τοποθετήσουμε έναν ανακλαστήρα. Ο αισθητήρας εκπέμπει ένα παλμό που ανακλάται και επιστρέφει πάλι στον αισθητήρα. Ο αισθητήρας ανιχνεύει αυτόν τον παλμό (θεωρώντας ότι έχει προλάβει να ηρεμήσει) αφού μπορεί να λειτουργήσει και ως δέκτης. Από το time of flight (χρόνο ταξιδιού) μπορεί να υπολογισθεί η απόσταση.

12.7 ΥΛΙΚΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ

Η έκφραση “πιεζοηλεκτρικό” κατέληξε να χρησιμοποιείται για να περιγράψει και τα πιεζοηλεκτρικά φαινόμενα και τα φαινόμενα ηλεκτροτανοσμού (electrostrictive)..

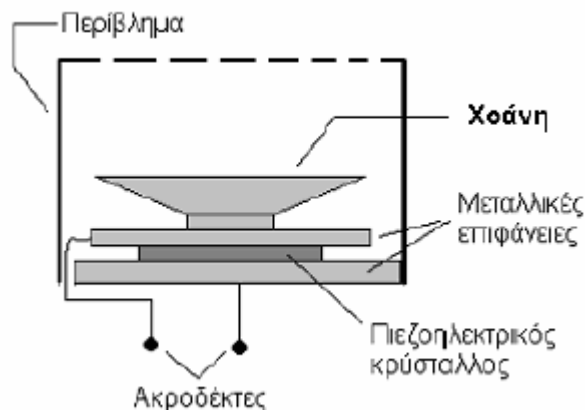
Ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό είναι ένα υλικό στο οποίο η εφαρμογή μηχανικής τάσης (πίεσης) οδηγεί στην δημιουργία ηλεκτρεγερτικής δύναμης. Για παράδειγμα, μια λεπτή φέτα από τέτοιο υλικό, όταν συμπιέζεται παράγει μια τάση μεταξύ των δύο απέναντι επιφανειών της. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν και το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή όταν μια ηλεκτρική τάση εφαρμόζεται στις απέναντι επιφάνειες της φέτας, παρατηρείται μια αλλαγή στο πάχος της. Τα δυο αυτά φαινόμενα χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή και την ανίχνευση υπερήχων.

Δυστυχώς δεν υπάρχουν πολλά βολικά υλικά που να είναι καθαρά πιεζοηλεκτρικά. Το πιο γνωστό από αυτά είναι το Quartz. Από την άλλη πλευρά υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από electrostrictive υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά, δεδομένου ότι τα δυο φαινόμενα έχουν σημαντικές ομοιότητες μεταξύ τους. Η κατηγορία των σιδηροηλεκτρικών υλικών δίνει ένα αρκετά ισχυρό electrostrictive φαινόμενο που μπορεί να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά. Πολλά από τα σιδηροηλεκτρικά υλικά είναι κεραμικά που μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν σε διάφορα χρήσιμα σχήματα. Το πιο γνωστό πιεζοηλεκτρικό κεραμικό είναι το $PbZrO_3$ που είναι γνωστό και ως PZT. Ένα άλλο υλικό είναι το οργανικό πολυμερές πλαστικό PVDF. Η βασική διαφορά ανάμεσα στα πιεζοηλεκτρικά και τα σιδηροηλεκτρικά υλικά είναι ότι στα πιεζοηλεκτρικά η σχέση της πίεσης και της τάσης είναι γραμμική ενώ στα σιδηροηλεκτρικά είναι τετραγωνική. Έτσι, στα πιεζοηλεκτρικά υλικά η αλλαγή στο πάχος με την επιβολή μιας τάσης μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική. Στα σιδηροηλεκτρικά υλικά η αλλαγή θα είναι πάντα θετική. Έτσι, η επιβολή μιας ημιτονικής τάσης σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό δίνει μια ημιτονική παραμόρφωση ενώ σε ένα σιδηροηλεκτρικό υλικό η παραμόρφωση έχει τη μορφή πλήρως ανορθωμένου ημιτόνου.

Για να διορθωθεί αυτό το ανεπιθύμητο χαρακτηριστικό των σιδηροηλεκτρικών υλικών, τα υλικά αυτά υποβάλλονται σε μια διαδικασία “παραμένουσας πόλωσης” κατά την κατασκευή τους. Κατά την κατασκευή υποβάλλονται σε πολύ ισχυρά ηλεκτρικά πεδία που προκαλούν ένα μόνιμο υπόβαθρο ηλεκτρικής πόλωσης στο υλικό, ισοδύναμο με την μόνιμη παρουσία μιας υψηλής DC τάσης πόλωσης στους ακροδέκτες του αισθητήρα. Η εξωτερική τάση που θα εφαρμοστεί αργότερα στον αισθητήρα κατά την χρήση του, παίζει τον ρόλο μιας μικρής AC τάσης. Έτσι το υλικό μετατρέπεται από τετραγωνικό σε γραμμικό και ένας αισθητήρας με σιδηροηλεκτρικό υλικό συμπεριφέρεται όπως ένας με πιεζοηλεκτρικό.

12.8 Η ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ

Θα αναλυθεί η αρχή λειτουργίας για την εκπομπή. Για την λήψη ισχύουν αντίστοιχοι συλλογισμοί. Γίνεται αναφορά πάντοτε στους αισθητήρες που προορίζονται για χρήση στον αέρα και που συζητήθηκαν παραπάνω. Το εσωτερικό ενός αισθητήρα που θα συζητήσουμε φαίνεται στο σχήμα 12.8, παρακάτω,



Σχήμα 12.8 Δομή του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα και αρχή λειτουργίας.

Η λειτουργία ενός τέτοιου αισθητήρα μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Η εφαρμοζόμενη τάση στον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο προκαλεί αυξομειώσεις του πάχους του. Οι αυξομειώσεις αυτές κινούν την πάνω επιφάνεια που με τη σειρά της κινεί τη χοάνη. Η δονούμενη χοάνη εκπέμπει τον υπέρηχο στον αέρα.

Η περιγραφή αυτή είναι μια πολύ απλοποιημένη όψη της πραγματικότητας. Οι αισθητήρες που συζητούμε σε αυτή την ενότητα ανήκουν σε μια ιδιαίτερη κατηγορία. Οι αισθητήρες αυτής της κατηγορίας είναι φθηνοί και μικροί που προορίζονται για χρήση σε χαμηλές συχνότητες (περιοχή 40KHz) για εφαρμογές όπως η μέτρηση μικρών αποστάσεων, οι συναγερμοί και οι τηλεχειρισμοί. Ένα μεγάλο μέρος των αισθητήρων αυτής της κατηγορίας έχει την δομή που παρουσιάστηκε στο σχήμα παραπάνω ή παρόμοια, αλλά η περιγραφή της αρχής λειτουργίας μοιάζει διαφορετική από αυτή που δώσαμε.

Οι αισθητήρες αυτοί αναπτύχθηκαν από εταιρείες όπως η Murata, και είναι γνωστοί ως benders (καμπτικοί αισθητήρες). Οι καμπτικοί αισθητήρες βασίζονται στο ότι όταν ενεργοποιείται ένας πιεζοηλεκτρικός δίσκος, δεν μεταβάλλεται μόνο το πάχος του, αλλά ο δίσκος διαστέλλεται και συστέλλεται ακτινικά. Η άνω μεταλλική επιφάνεια ονομάζεται bender και είναι αυτή που παράγει το κύμα. Η διάσταση της επιλέγεται κατάλληλα σύμφωνα με την επιθυμητή συχνότητα συντονισμού f_0 . Η διάστασή της είναι μεγαλύτερη από του πιεζοηλεκτρικού δίσκου. Ο bender στηρίζεται στον πιεζοηλεκτρικό δίσκο. Ο πιεζοηλεκτρικός δίσκος κολλάται κατάλληλα στις δυο μεταλλικές επιφάνειες ώστε να μην επιτρέπεται η ακτινική κίνηση του. Έτσι, η κίνηση αυτή μετατρέπεται σε καμπτική παραμόρφωση. Ο δίσκος λοιπόν αναγκάζει με τη σειρά του τον bender να καμφθεί. Στον bender αναπτύσσονται ακτινικά στάσιμα κύματα καμπτικής παραμόρφωσης τα οποία δονούν την χοάνη που εκπέμπει τον υπέρηχο στον αέρα. Εδώ είναι η κατασκευή του bender που καθορίζει την f_0 . Η περιγραφή αυτή διαφέρει από αυτή που δόθηκε προηγουμένως.

Παρόλα αυτά οι δυο περιγραφές γίνονται πρακτικά σχεδόν ισοδύναμες με την κατάλληλη επιλογή των “ενεργών τιμών” των μεγεθών-παραμέτρων που εμπλέκονται στην ανάλυση του αισθητήρα σύμφωνα με την πρώτη περιγραφή. Τέτοιες ισοδυναμίες συναντάμε συχνά στη φυσική (π.χ. ισοδύναμα κυκλώματα). Επιπλέον, οι βασικές ομοιότητες στην συμπεριφορά όλων των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι μια καθολική, απλή περιγραφή της αρχής λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων αρκεί για την ικανοποιητική περιγραφή των benders.

Γενικά, οι υπέρηχοι διαθλώνται θα λέγαμε με τον ίδιο τρόπο όπως το φως, όταν περνούν από μέσα με διαφορετικές πυκνότητες. Αυτό το χαρακτηριστικό κάνει τους υπέρηχους να συγκλίνουν, όπως το φως όταν περνά μέσα από ένα φακό.

Μπορούμε να κατασκευάσουμε χρήσιμους αισθητήρες, εκμεταλεύομενοι τα χαρακτηριστικά των υπερήχων. Όλοι μας ξέρουμε ότι οι νυκτερίδες χρησιμοποιούν υπερήχους για να ανιχνεύουν εμπόδια. Το ίδιο συμβαίνει και με τα sonars. Για βιομηχανικές σκοπούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, όπως για ανιχνευτές ανωμαλιών σε μέταλλα, σε διαγνωστικά ιατρικά εργαλεία κ.λ.π.

Όταν χρησιμοποιούμε υπέρηχους στον αέρα, αυξάνοντας την συχνότητα αυξάνεται και η μη γραμμική διάδοση με ανάκλαση και διάχυση με αποτέλεσμα να έχουμε παρόμοια χαρακτηριστικά όπως στο φως. Αν η συχνότητα είναι πολύ μεγάλη το ηχητικό κύμα απορροφάται από τον αέρα και εξαφανίζεται. Για αυτό τον λόγο πρέπει να διαλέγουμε πάντα μια κατάλληλη συχνότητα.

Λαμβάνοντας υπόψη τα πλεονεκτήματα και τα διάφορα χαρακτηριστικά που προσφέρονται από τους υπερηχητικούς αισθητήρες, είναι δυνατόν να αναπτύξουμε ένα σύστημα ελέγχου πολύ υψηλής ακρίβειας.

Κεφάλαιο 13^ο

ΓΕΝΙΚΑ ΑΛΛΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ- ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

13.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

13.1.1 Πυρηνική και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Ακτινοβολία είναι η εκπομπή είτε σωματιδίων είτε ηλεκτρομαγνητικών ακτινών από μια πηγή. Τα πυρηνικά σωματίδια είναι τα σωματίδια που εκπέμπονται από ένα αντικείμενο, δηλαδή σωματίδια τα οποία εκπέμπονται από τον πυρήνα, και μπορούν να παραχθούν από τη διάσπαση ενός ραδιενεργού υλικού ή με την αλληλεπίδραση ενός πυρήνα με μία άλλη πηγή ενέργειας. Τα πυρηνικά σωματίδια σε αντίθεση με τις ηλεκτρομαγνητικές ακτίνες, έχουν καθορισμένη μάζα ηρεμίας. Η μάζα χρησιμοποιείται στην ταξινόμηση των πυρηνικών σωματιδίων σε διάφορες ομάδες : βαρυόνια (βαριά σωματίδια), μεσόνια (μεσαία σωματίδια) και λεπτόνια (ελαφρά σωματίδια).

Ως ακτίνες (α) και (β) χαρακτηρίζονται δύο κοινά πυρηνικά σωματίδια που βρέθηκε ότι εκπέμπονται από υλικά που βρίσκονται στη φύση.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία τώρα, είναι στην ουσία μια ροή σωματιδίων σχεδόν χωρίς μάζα ή κβάντων ενέργειας. Τα ηλεκτρομαγνητικά "σωματίδια" έχουν μηδενική ενέργεια μάζας ηρεμίας και περιγράφονται συνήθως σαν κύματα παρά σαν σωματίδια. Όλα ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός στο κενό και έχουν ισοδύναμη ενέργεια μάζας η οποία συνδέεται με την συχνότητά τους ή το μήκος κύματος.

Επειδή η ενέργεια ενός ηλεκτρομαγνητικού σωματιδίου είναι ανάλογη με τη συχνότητά του, είναι συνηθισμένη η ταξινόμηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σύμφωνα με τη συχνότητά της ως θεμελιώδους ιδιότητας. Σε σχήμα παρακάτω, δίνουμε το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Πολλοί από τους τύπους της ακτινοβολίας, χρησιμοποιούνται όπως γνωρίζουμε, συχνά στην καθημερινή μας ζωή. Οι ακτίνες X χρησιμοποιούνται για να αποτυπώσουν π.χ. την εικόνα της δομής των οστών στην ιατρική. Η υπεριώδης ακτινοβολία χρησιμοποιείται π.χ για την λεγόμενη τεχνητή ηλιοθεραπεία. Η ορατή ακτινοβολία (που συνήθως ονομάζεται φως) ανιχνεύεται από το ανθρώπινο μάτι, αλλά καταλαμβάνει μια μικρή μόνο περιοχή μήκους κύματος (400 έως 700 nm). Εντούτοις, η ορατή ακτινοβολία είναι μεγάλης σημασίας σε πολλές εφαρμογές (π.χ. οπτικο-ηλεκτρονική, κάμερες κ.λ.π.). Η χρήση της ακτινοβολίας και σε άλλους τύπους αισθητήρων πέραν της ακτινοβολίας, είναι συνηθισμένη. Η υπεριώδης ακτινοβολία λόγω χάρη μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην μελέτη των ιδιοτήτων των μορίων ή στη μέτρηση της θερμοκρασίας. Η ακτινοβολία μικροκυμάτων και radar χρησιμοποιείται σε αισθητήρες μέτρησης της μετακίνησης ή της απόστασης, ενώ μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για θέρμανση.

13.1.2 Ταξινόμηση των αισθητήρων ακτινοβολίας

Οι αισθητήρες ακτινοβολίας μπορούν να ταξινομηθούν ως αισθητήρες μη επαφής, επειδή ανιχνεύουν από μακριά την εκπομπή των διάφορων σωματιδίων ή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Οι αισθητήρες ακτινοβολίας μπορούν για ευκολία να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες : πυρηνικά σωματίδια και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Οι αισθητήρες ακτινοβολίας πυρηνικών σωματιδίων χρησιμοποιούνται συχνά για την μέτρηση των σωματιδίων ή υλικών που εκπέμπονται από ένα ραδιενεργό υλικό, όπως σωματίδια α , σωματίδια β (γρήγορα ηλεκτρόνια), και βαριά σωματίδια (νετρόνια, πρωτόνια κ.λ.π.). Οι αισθητήρες πυρηνικής ακτινοβολίας μπορούν να μετρήσουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως ακτίνες γ και ακτίνες X, που εκπέμπεται από ραδιενεργές πηγές. Οι αισθητήρες πυρηνικής ακτινοβολίας οι οποίοι ανιχνεύουν και σωματίδια και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αναφέρονται μερικές φορές ως ανιχνευτές νουκλεονίων (nucleonic detectors).

Το μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή στερεάς κατάστασης, όπως η φωτοδίοδος πυριτίου (από ακτίνες X ως NIR) , ή με έναν πυροηλεκτρικό ανιχνευτή (IR). Οι αισθητήρες αυτοί μετρούν την ενέργεια ακτινοβολίας ή τη ροή σε ένα σημείο του χώρου και έτσι μπορούν να θεωρηθούν σαν "σημειακοί" ή "διακριτοί" αισθητήρες.

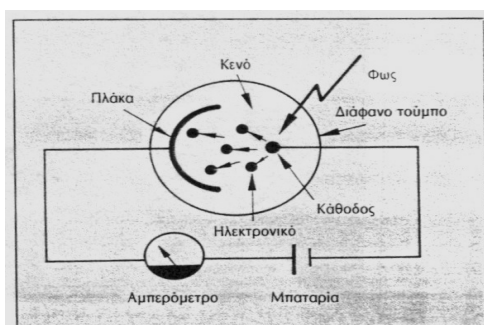
Αυτός ο τύπος αισθητήρα χρησιμοποιείται συχνά σαν βάση για άλλα είδη αισθητήρων. Για παράδειγμα, μία φωτοδίοδος ή ένας πυροηλεκτρικός αισθητήρας χρησιμοποιείται και στους αισθητήρες μετακίνησης ή προσέγγισης.

13.1.3 Αισθητήρες υπεριώδους, ορατής και υπέρυθρης ακτινοβολίας κοντά στην ορατή

Σημαντικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος για τους αισθητήρες είναι η υπεριώδης (UV από 0.002 ως 0.4 μm), η ορατή (Vis, από 0.4 ως 0.7 μm) και η υπέρυθρη (IR, από 0.7 ως 500 μm). Η υπέρυθρη περιοχή μπορεί να διαιρεθεί στην υπέρυθρη που βρίσκεται κοντά στην ορατή περιοχή (NIR) , και στην κύρια υπέρυθρη που βρίσκεται πολύ πιο πάνω από την ορατή περιοχή.

13.1.3.α. Φωτοκύτταρα (cell)

Τα φωτοκύτταρα είναι διατάξεις των οποίων η ωμική αντίσταση μειώνεται όταν αυξάνεται το φως (φαινόμενο της φωτοαγωγιμότητας). Παρακάτω στο σχήμα 13.1, εικονίζεται το φωτοκύτταρο. Είναι χρήσιμα για την ανίχνευση φωτεινών πηγών, ή την παρακολούθηση της φωτεινότητας του χώρου κίνησης. Εύκολη συνδεσμολογία, εμφανίζουν όμως αργή απόκριση, και επομένως δεν είναι κατάλληλα για υψίσυχνες εφαρμογές.



Σχήμα 13.1 Φωτοκύτταρο.

13.1.3.β. Φωτοдиодοι (photodiode)

Οι φωτοδιόδοι μπορούν να ταξινομηθούν ως ποτενσιομετρικοί αισθητήρες ακτινοβολίας, διότι η ακτινοβολία παράγει μια τάση σε μια ημιαγώγιμη επαφή. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Με την αυστηρή έννοια των όρων, τα φωτόνια δημιουργούν ελεύθερους φορείς (ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών) οι οποίοι κινούνται λόγω των τοπικών πεδίων, που οφείλονται σε διαφορά στον εμπλουτισμό, σε διαφορά στην σύσταση ή σε διαφορά και στα δύο.

Οι φωτοδιόδοι χρησιμοποιούνται ευρέως στην ανίχνευση της παρουσίας της έντασης και του μήκους κύματος της ακτινοβολίας UV-NIR . Το πλεονέκτημα των φωτοδιόδων σε σχέση με τα φωτοκύτταρα είναι : η μεγαλύτερη ευαισθησία, ο ταχύτερος χρόνος απόκρισης, το μικρότερο μέγεθος και η καλύτερη γραμμικότητα και σταθερότητα.

13.1.3.γ. Φωτοτρανζίστορ (phototransistor)

Με τα φωτοτρανζίστορ η ευαισθησία στο φως μπορεί να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο σε σχέση με την φωτοδιόδο. Επιπλέον τα φωτοτρανζίστορ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπου απαιτούνται αναγνώστες, απαριθμητές ή κωδικοποιητές.

13.1.4 Αισθητήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας

Η υπέρυθρη ακτινοβολία εκπέμπεται από όλα τα υλικά όταν η θερμοκρασία τους είναι πάνω από το απόλυτο μηδέν.

Υπάρχουν δύο τύποι ανιχνευτών υπέρυθρου : ο θερμικός τύπος καθώς και ο κβαντικός τύπος. Ο θερμικός τύπος περιλαμβάνει αισθητήρες επαφής θερμοκρασίας, όπως π.χ. το θερμοζεύγος και η θερμοστήλη καθώς επίσης και τον πυροηλεκτρικό ανιχνευτή μη επαφής. Αντίθετα, ο κβαντικός τύπος έχει μια ισχυρή εξάρτηση από το μήκος κύματος με γρηγορότερες αποκρίσεις και περιλαμβάνει τις φωτοαγώγιμες και φωτοβολταϊκές συσκευές.

Οι αισθητήρες ακτινοβολίας IR χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία, την γεωργία, την ιατρική ,τη φυσική, τη χημεία, τις οπτικές επικοινωνίες, και στους αισθητήρες που λειτουργούν από άρα πολύ απομακρυσμένες αποστάσεις.

Έτσι, έχουμε τους : Φωτοαγώγιμους αισθητήρες IR, φωτοβολταϊκούς αισθητήρες IR, πυροηλεκτρικούς αισθητήρες IR.

13.2 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Οι φωτοαισθητήρες στηρίζονται κυρίως στα φαινόμενα της φωτοεκπομπής, της φωτοαγωγιμότητας, και της φωτοβολταϊκής δράσης.

Ας γυρίσουμε όμως στην αρχή, και ας δούμε πως ήταν αρχικά τα πράγματα.

Η αρχική ιδέα ήταν να μετατρέπει το φως σε ηλεκτρισμό. Ας δούμε από κοντά αυτή την αρχή. Δυο ηλεκτρόδια, η κάθοδος και η άνοδος, τοποθετούνται σε κενό και μια τάση εφαρμόζεται μεταξύ των ηλεκτροδίων . Επειδή τα ηλεκτρόδια είναι ξεχωριστά δεν ρέει ρεύμα ανάμεσά τους. Σε αυτή την κατάσταση, αν προβάλλουμε φως σ' ένα από τα δυο

ηλεκτρόδια, ένα ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργείται, με αποτέλεσμα το φως να μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό (σχήμα 13.1). Επειδή το φως είναι μια ροή ενέργειας, αν φτάσει στην κάθοδο, τότε φωτο-ηλεκτρόνια εκπέμπονται από την επιφάνεια της καθόδου και κινούνται προς το αντίθετο ηλεκτρόδιο το οποίο έχει θετικό δυναμικό. Ηλεκτρόνια μεταφέρονται από την κάθοδο στην άνοδο, με αποτέλεσμα ένα ηλεκτρικό ρεύμα να ρέει. Στην πραγματικότητα, η ποσότητα του ρεύματος που παίρνουμε με αυτή την μέθοδο, είναι πολύ περιορισμένη και χρειαζόμαστε περίπλοκη επεξεργασία του σήματος για την ενίσχυση και τον έλεγχο. Η αρχή βέβαια φαίνεται απλή, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι είναι εύκολο να σχεδιάζουμε φωτο-ηλεκτρικούς αισθητήρες.

Ύστερα από την ανακάλυψη του transistor άλλαξε φυσικά και η πορεία των φωτο-ηλεκτρικών αισθητήρων. Οι ενισχυτές-ελεγκτές που χρησιμοποιούσαν λυχνίες, αντικαταστάθηκαν από τα μικρά transistors και οι φωτοκυψέλλες κατασκευάζονταν από φωτοτρανζίστορ. Αποτέλεσμα όλων αυτών των εξελίξεων, ήταν οι υψηλότερες επιδόσεις των αισθητηρίων και η μείωση του όγκου τους. Έτσι, ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται στις γραμμές παραγωγής των εργοστασίων για βιομηχανική αυτοματοποίηση. Ακόμη πάντως και με αυτές τις βελτιώσεις, υπήρχε ένα σημαντικό πρόβλημα στη σχεδίαση των φωτο-ηλεκτρικών αισθητήρων, το οποίο δεν ήταν άλλο από την πηγή φωτός. Εφόσον το αισθητήριο λειτουργεί με φως καταλαβαίνουμε ότι η πηγή φωτός παίζει πρωταρχικό και σημαντικό ρόλο. Έτσι, συνήθως χρησιμοποιούσαν μια λάμπα σαν πηγή φωτός και με αυτόν τον τρόπο οι φωτο-ηλεκτρικοί αισθητήρες παρέμεναν στην τεχνολογία της λυχνίας, όσο κι αν υπήρχαν τμήματα που χρησιμοποιούσαν transistors. Αυτό φυσικά τότε, ήταν ένας αρνητικός παράγοντας για ευρεία διάδοση των φωτο-ηλεκτρικών αισθητηρίων στη βιομηχανία.

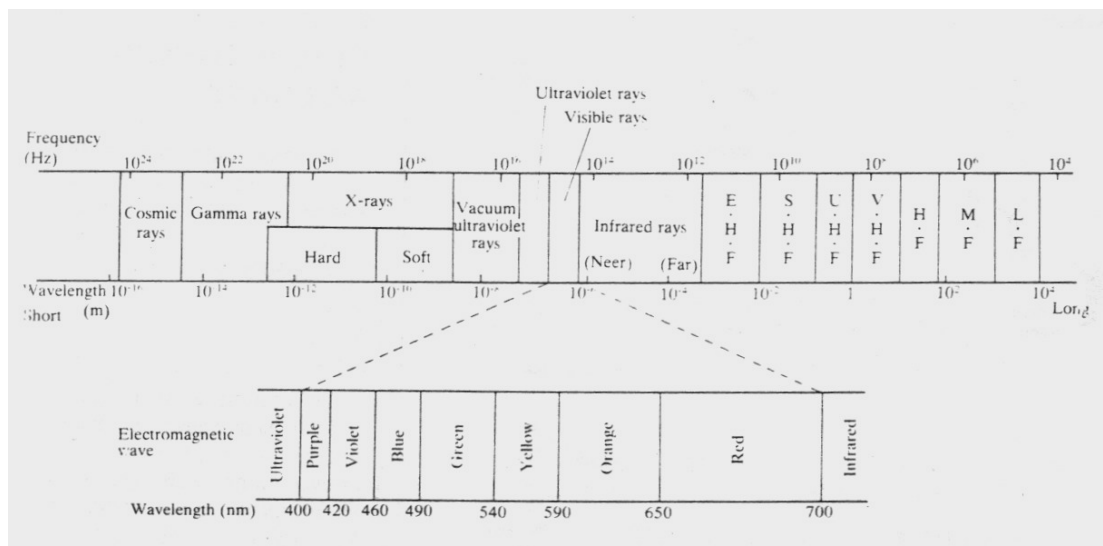
Στα τέλη της δεκαετίας του '60, η παραγωγή των γνωστών μας LEDs έγινε πραγματικότητα, με αποτέλεσμα να έχουμε ραγδαίες εξελίξεις και στους φωτο-ηλεκτρικούς αισθητήρες. Παρόλα αυτά όμως στην αρχή οι μηχανικοί δεν ήξεραν τι να κάνουν, γιατί η ένταση του εκπεμπόμενου φωτός ήταν πολύ μικρή. Η ένταση του φωτός που είχαν από τις λάμπες ήταν μερικά Watts ενώ από την άλλη η ένταση ενός LED ήταν της τάξης του $1mW$. Αρκετοί κατασκευαστές στην πορεία εγκατέλειψαν την προσπάθεια. Η Sunx ωστόσο ήταν η πρώτη εταιρία που κατασκεύασε φωτο-ηλεκτρικό αισθητήρα με LED και κύκλωμα με transistors, εφαρμόζοντας μερικές πολύ πρωτότυπες ιδέες για την κατασκευή του. Η πιο αξιοσημείωτη ήταν ο χειρισμός της μειωμένης έντασης του LED με τέτοιο τρόπο, ώστε να δημιουργεί μια έξοδο. Το LED αναβοσβήνει σε μια συγκεκριμένη συχνότητα και ο ανιχνευτής συλλαμβάνει παλμούς φωτός στην ίδια συχνότητα.

Στην πορεία, η εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων, είχε σαν αποτέλεσμα την κατασκευή ενός καινούργιου φωτο-ηλεκτρικού αισθητήρα με υψηλές επιδόσεις και αποδοτικότητα. Με την ανάπτυξη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (ICs) οι αισθητήρες έγιναν μικρότεροι και φθηνότεροι. Μπορούμε ακόμη να πούμε ότι και σήμερα οι επιδόσεις των φωτο-ηλεκτρικών αισθητήρων εξαρτώνται από τα ολοκληρωμένα που χρησιμοποιούν. Κάθε γενιά καινούργιων ολοκληρωμένων, φέρνει καλύτερες βελτιώσεις και επιδόσεις. Οι ανάγκες για φωτο-ηλεκτρικά αισθητήρια να σημειώσουμε ότι αυξάνονται συνεχώς καθημερινά.

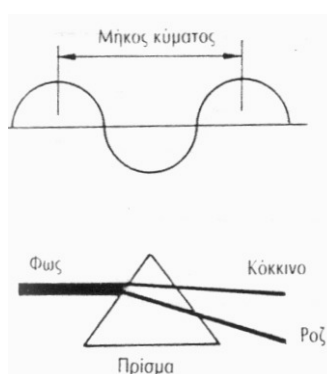
13.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Μήκος κύματος :

Το φως είναι ένα είδος ροής ενέργειας και το θεωρούμε σαν ένα κύμα φωτονίων. Ένα είναι κύμα, θα πρέπει να υπάρχει μια απόσταση από τις κορυφές (peaks) –(όπως τα κύματα της θάλασσας)- . Αυτή η απόσταση καλείται μήκος κύματος (με μονάδα μέτρησης τα μέτρα (m)). Επειδή η απόσταση όμως ουσιαστικά είναι πολύ μικρή, η μονάδα μέτρησης είναι συνήθως τα nm ($10^{-9}m$). Τα μήκη κύματος του φωτός υπάρχουν σε διάφορες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (σχήμα 13.2). Ωστόσο, το ανθρώπινο μάτι βλέπει μόνο ένα μικρό κομμάτι του φάσματος αυτού. Η περιοχή του μήκους κύματος αυτού είναι από 400 nm μέχρι 700 nm. Φως με μήκος κύματος μικρότερο από 400 nm ονομάζεται υπεριώδες, ενώ από 700 nm και πάνω ονομάζεται υπέρυθρο. Το υπεριώδες φως μπορεί να προκαλέσει εγκαύματα και το καταλαβαίνουμε σαν θερμότητα. Το φως που μπορούμε να δούμε διαφέρει σε χαρακτηριστικά ανάλογα με το μήκος κύματος. Το μεγαλύτερο μήκος κύματος φαίνεται κόκκινο, ενώ το μικρότερο σαν ροζ. Με άλλα λόγια η διαφορά των χρωμάτων που βλέπουμε οφείλεται στη διαφορά μήκους κύματος.



Σχήμα 13.2 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.



Σχήμα 13.3

Διάθλαση :

Το φως διαθλάται, όταν περνά μέσα από ένα αντικείμενο με διαφορετική πυκνότητα. Φακοί και πρίσματα κάνουν χρήση αυτών των χαρακτηριστικών (σχήμα 13.3). Επίσης, όταν το φως διαθλάται, τα μικρά μήκη κύματος σχηματίζουν μεγάλες γωνίες, ενώ τα μεγάλα μήκη κύματος, μικρές γωνίες. Ο λόγος που εμφανίζονται τα χρώματα της ίριδας όπου το φως πέσει πάνω σε κάποιο πρίσμα, είναι γιατί το φως αποτελείται από πολλά μήκη κύματος, που τα καθένα διαθλάται με διαφορετική γωνία. Ας το δούμε από μια διαφορετική γωνία. Γιατί ο ουρανός είναι γαλάζιος; Μην απαντήσετε, γιατί ήταν γαλάζιος πριν πάρα πολλά χρόνια ή είναι γαλάζιος γιατί είναι ο ουρανός. Ο ουρανός είναι γαλάζιος για ένα λόγο. Το φως που έρχεται στη γη από τον κοσμικό χώρο, διαθλάται από τη διαφορά πυκνότητας της ατμόσφαιρας. Το φως που διαθλάται σε μεγάλες γωνίες, διαθλάται και αντανακλάται ξανά και ξανά από τα σωματίδια της ατμόσφαιρας όπως σκόνη και υγρασία. Αυτό σημαίνει ότι το φως με μικρότερα μήκη κύματος διαχέεται στον ουρανό, γι αυτό το χρώμα είναι γαλάζιο. Αν δεν υπήρχε αέρας, ο ουρανός θα ήταν μαύρος.

Ανάκλαση :

Ενώ ξέρουμε ότι το φως μπορεί να ανακλαστεί, μερικές φορές μπορεί να μπερδευτούμε, μιας και υπάρχουν διάφοροι τρόποι που συμβαίνει η ανάκλαση. Ένα είδος ανακλάσεως, είναι όταν χρησιμοποιούμε καθρέπτη. Επειδή η γωνία προβολής είναι ίση με την γωνία ανάκλασης, το είδωλο μπορεί να εστιαστεί. Δεν μπορούμε να εστιάσουμε είδωλο, όταν έχουμε ανάκλαση από υλικά όπως το χαρτί, γιατί το ανακλώμενο και διάχυτο φως, έχουν διαφορετικές κατευθύνσεις. Τότε, γιατί το άσπρο χαρτί φαίνεται άσπρο ; Ο λόγος γι αυτό είναι ότι το ορατό φως ανακλάται ακανόνιστα πάνω στο χαρτί σε όλες τις κατευθύνσεις, έτσι φαίνεται άσπρο. Το

μαύρο χαρτί φαίνεται μαύρο, γιατί απορροφά όλα τα μήκη κύματος. Έτσι, π.χ το κόκκινο χαρτί φαίνεται κόκκινο, γιατί ανακλά φως με μεγάλα μήκη κύματος και απορροφά τα μικρά.

Εξασθένηση :

Όπως είναι γνωστό, το φως εξασθενεί καθώς περνά σε κάποιο χώρο ή μέσα από κάποιο αντικείμενο. Για αυτήν την εξασθένηση υπάρχουν δύο λόγοι. Ένας λόγος είναι ότι το φως έχει γωνία απόκλισης, που σημαίνει ότι το φως “ανοίγει” με μια συγκεκριμένη γωνία καθώς ταξιδεύει. Η ακτίνα laser είναι ένα ειδικό φως που δεν μπορούμε να βρούμε στη φύση. Επειδή η γωνία απόκλισης είναι πολύ μικρή, ο ρυθμός εξασθένησης είναι επίσης πολύ μικρός αν συγκριθεί με το φυσικό φως όταν ταξιδεύουν σε παρόμοια μεταξύ τους απόσταση.. Αυτός, και άλλοι πολλοί λόγοι είναι οι αιτίες για την χρησιμοποίηση των lasers στις επικοινωνίες. Άλλος λόγος για την εξασθένηση του φωτός είναι η ανάκλαση και η απορρόφησή του από τα σωματίδια του αντικειμένου που προσέκρουσε.

13.2.2 ΤΙ ΕΙΝΑΙ Ο ΦΩΤΟ-ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ—ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ

Ο φωτο-ηλεκτρικός αισθητήρας είναι ένα εξάρτημα που ανιχνεύει στόχους με μια φωτο-ηλεκτρική ακτίνα που ανακλάται, απορροφάται ή κόβεται από το στόχο και μεταδίδεται στον ανιχνευτή όπου εκεί δημιουργεί και μια συγκεκριμένη έξοδο.

Χαρακτηριστικά τους είναι :

- **Μεγάλη απόσταση ανίχνευσης** .
- **Ανίχνευση χωρίς φυσική επαφή** : Χάρη στη χρήση του φωτός σαν μέσο ανίχνευσης εξαφανίζεται ο κίνδυνος καταστροφής είτε της κεφαλής είτε του στόχου ανίχνευσης, εξασφαλίζοντας μεγάλη διάρκεια ζωής και λειτουργία χωρίς συντήρηση.
- **Ανίχνευση όλων των ειδών των αντικειμένων από οποιοδήποτε υλικό** : Η ανίχνευση στηρίζεται στην ποσότητα του λαμβανόμενου φωτός, ή στην αλλαγή της ποσότητας του ανακλώμενου φωτός. Η μέθοδος επιτρέπει ανίχνευση στόχων διαφορετικών υλικών όπως γυαλιού , μετάλλου, πλαστικών, ξύλου και υγρών
- **Μεγάλη ταχύτητα απόκρισης** : Ο αισθητήρας φωτός λειτουργεί ηλεκτρονικά . Έτσι η απόκρισή του είναι πολύ γρήγορη.
- **Ανίχνευση υψηλής ακρίβειας** : Ένα μοναδικό οπτικό σύστημα και ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ακριβείας επιτρέπουν τον εξαιρετικά ακριβή προσδιορισμό θέσης και την ανίχνευση πολύ μικρών αντικειμένων.
- **Αναγνώριση χρώματος** : Ο αισθητήρας έχει την ικανότητα ανίχνευσης φωτός από αντικείμενο με βάση την ανακλασιμότητα ή την απορρόφηση του χρώματός του, πράγμα που επιτρέπει την ανίχνευση και τον διαχωρισμό χρωμάτων.

Οι φωτοηλεκτρικοί αισθητήρες μπορούν να χωριστούν σε 4 μεγάλες βασικές κατηγορίες από τα παρακάτω σημεία :

- 1)Την μέθοδο ανίχνευσης
- 2)Την δομή
- 3)Την έξοδο
- 4)Την πηγή φωτός

Οι παραπάνω κατηγορίες μπορούν να χωριστούν πάλι και κάθε τύπος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Κάθε χαρακτηριστικό θα πρέπει να κατανοηθεί κατάλληλα για να διαλέξουμε το σωστό αισθητήρα. Εμείς εδώ θα αναλύσουμε την κατηγορία με το κριτήριο της μεθόδου ανίχνευσης. (σχήμα 13.4).

Τύπος Throu-beam

Πλεονεκτήματα

- 1) Μεγάλη απόσταση ανίχνευσης
- 2) Υψηλή ακρίβεια
- 3) Δεν επηρεάζεται από το χρώμα της επιφανείας
- 4) Μεγάλος λόγος φωτεινού / σκοτεινού (contrast)

Μειονεκτήματα

- 1) Χρειάζεται χώρο για την τοποθέτηση
- 2) Κόστος καλωδίωσης
- 3) Πιθανή δυσκολία κεντραρίσματος
- 4) Διάφανοι στόχοι δεν ανιχνεύονται

Τύπος Retro-reflective

Πλεονεκτήματα

- 1) Μικρός χώρος για τοποθέτηση
- 2) Χαμηλό κόστος καλωδίωσης
- 3) Εύκολο κεντράρισμα της δέσμης

Μειονεκτήματα

- 1) Χρειάζεται ειδικό ανακλαστήρα
- 2) Η ακρίβεια επανάληψης είναι μικρότερη

Τύπος Diffuse-reflective

Πλεονεκτήματα

- 1) Μικρός χώρος για τοποθέτηση
- 2) Χαμηλό κόστος καλωδίωσης
- 3) Δεν χρειάζεται κεντράρισμα

Μειονεκτήματα

- 1) Μικρή απόσταση ανίχνευσης
- 2) Η ανίχνευση εξαρτάται από τα χρώμα και την ανακλαστικότητα

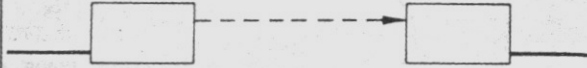
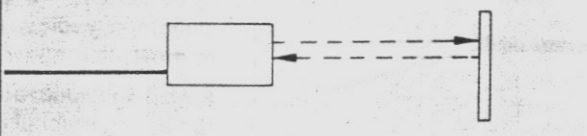
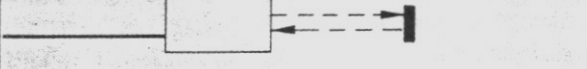

Τύπος Diffuse-reflective (μικρής απόστασης)

Πλεονεκτήματα

- 1) Ίδια σαν το Diffuse-reflective
- 2) Δεν επηρεάζεται από το φόντο του στόχου

Μειονεκτήματα

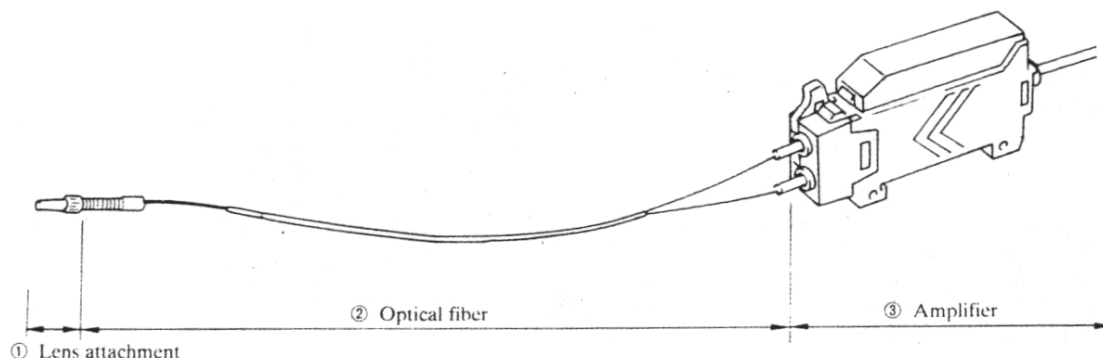
- 1) Δεν μπορεί να ξεχωρίσει χρώματα

Τύπος	Sensing method
A. Thru-beam	
B. Retro-reflective	
C. Diffuse-reflective	
D. Limited-distance diffuse-reflective	

Σχήμα 13.4 Κατηγορίες με το κριτήριο της μεθόδου ανίχνευσης.

Οι φωτο-ηλεκτρικοί αισθητήρες σήμερα φυσικά μπορούν να στείλουν και να λάβουν τη δέσμη φωτός με τη χρήση οπτικών ινών (σχήμα 13.5). Τα πλεονεκτήματα της χρήσης οπτικών ινών είναι πάρα πολλά, ενδεικτικά αναφέρουμε τα εξής:

- 1) Ο ανιχνευτής είναι μικρός.
- 2) Ένας τύπος ενισχυτή χρησιμοποιείται για όλα τα είδη στόχων.
- 3) Επειδή δεν έχουμε ηλεκτρισμό στον ανιχνευτή, μπορούμε να τον χρησιμοποιήσουμε σε οποιοδήποτε περιβάλλον. Η αντίσταση στον θόρυβο, έχει πολύ καλά χαρακτηριστικά θερμοκρασίας. Επίσης, η οπτική ίνα μπορεί εύκολα να λυγίσει. Έτσι μπορούμε να την τοποθετήσουμε σε πολύ μικρούς χώρους. Επίσης είναι ελαφριές και δεν καταστρέφονται εύκολα.



Σχήμα 13.5 Φωτοηλεκτρικός αισθητήρας με χρήση οπτικής ίνας.

13.3 ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ α, β, γ ΚΑΙ X

Για την ανίχνευση ακτίνων α, β και γ , χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τύποι μετατροπέων, ο τύπος ιονισμού και ο φωτοηλεκτρικός τύπος, που μετατρέπουν την ακτινοβολία σε ηλεκτρικό σήμα.

Στον τύπο ιονισμού, χρησιμοποιούνται κρύσταλλοι ή ημιαγωγοί μέσα στους οποίους δημιουργούνται φορτία λόγω ιονισμού. Ένα μέτρο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι η ένταση που δημιουργείται λόγω των φορτίων αυτών. Στον φωτοηλεκτρικό τύπο χρησιμοποιούνται υλικά τα οποία παράγουν φωτεινή ακτινοβολία όταν γίνει αντιληπτή α, β ή γ ακτινοβολία.

Όσο αφορά την ανίχνευση ακτίνων X, συνήθως χρησιμοποιείται μετατροπέας φωτοηλεκτρικού τύπου με κατάλληλο υλικό. Υπάρχει επίσης και ένα άλλο είδος μετατροπέα ακτίνων X ο οποίος στηρίζεται στην ιδιότητα μερικών υλικών να εμφανίζουν μείωση της αντίστασής τους όταν προσβάλλονται από ακτίνες X.

13.4 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Μαγνητικά πεδία υπάρχουν παντού γύρω μας. Τα ουράνια σώματα παράγουν μαγνητικά πεδία όπως επίσης μαγνητικά πεδία παράγονται από βιολογικά συστήματα. Τα μεγαλύτερα μαγνητικά πεδία κατασκευάζονται από τον άνθρωπο (τεχνητά μαγνητικά πεδία) και εμφανίζονται στα καλώδια μεταφοράς, στους μετασχηματιστές ισχύος, σε μαλακά ή σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά κ.λ.π.

Η μονάδα έντασης του μαγνητικού πεδίου H είναι το Ampere ανά μέτρο (A/m), ενώ οι μονάδες της μαγνητικής επαγωγής ή της πυκνότητας μαγνητικής ροής είναι το TESLA (T)

Τόσο τα υλικά (σιδηρομαγνητικά) με υψηλή διαπερατότητα, όσο και εκείνα με χαμηλή διαπερατότητα (διαμαγνητικά ή παραμαγνητικά) χρησιμοποιούνται στους μαγνητικούς αισθητήρες.

Η ανακάλυψη διαφόρων μαγνητικών φαινομένων και η ανάπτυξη ειδικών μαγνητικών υλικών επέτρεψαν την κατασκευή πολλών μαγνητικών αισθητήρων. Παρακάτω, στον πίνακα 1), παρέχεται μία επισκόπηση αυτών των φαινομένων. Τα φαινόμενα αυτά γίνονται αντικείμενο εφαρμογής με διάφορους τρόπους, σε άμεσες εφαρμογές ο μαγνητικός αισθητήρας είναι ουσιαστικά ένα μαγνητόμετρο (magnetometer). Έτσι χρησιμοποιείται στη μέτρηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου όπως αυτό της γης, ή το πεδίο που διαμορφώθηκε από μαγνητικό υλικό σε μαγνητικές ταινίες, δίσκους κ.λ.π. Σε έμμεσες εφαρμογές ο μαγνητικός αισθητήρας χρησιμοποιείται σαν ενδιάμεσος αισθητήρας στην ανίχνευση μη μαγνητικών σημάτων, όπως στην ανίχνευση της πίεσης καθώς και της γραμμικής και γωνιακής ανίχνευσης θέσης χρησιμοποιώντας το φαινόμενο Hall, στον έλεγχο κινητήρων DC χωρίς ψήκτρες, στην ανίχνευση ρεύματος χωρίς επαφή.

Ετος	Φαινόμενο	Περιγραφή	Εφαρμογή
1842	Joule	Αλλαγή του σχήματος σιδηρομαγνήτη με μαγνήτιση.	Μαγνητόμετρα ακουστικής καθυστέρησης
1846		Μεταβολή του μέτρου Young με μαγνήτιση	Μαγνητόμετρα ακουστικής καθυστέρησης.
1847	Matteucci	Στρέψη σιδηρομαγνητικής ράβδου μεταβάλλει τη μαγνήτιση.	Μαγνητοελαστικοί αισθητήρες
1856	Thomson	Μεταβολή ηλεκτρικής αντίστασης με το μαγνητικό πεδίο.	Αισθητήρες μαγνητοαντίστασης.
1858	Wiedemann	Δημιουργία στρέψης από σιδηρομαγνητική ράβδο που διαρρέεται από ρεύμα όταν υποβάλλεται σε διαμήκες πεδίο.	Μέτρηση ροπής στρέψης και δύναμης.
	Villari	Μαγνήτιση προκαλούμενη από δύναμη εφελκυσμού ή συμπίεσης.	Μαγνητοελαστικοί αισθητήρες.
	Hall	Εγκάρσια τάση που δημιουργείται σε έναν κρύσταλλο που διαρρέεται ρεύμα από το μαγνητικό πεδίο.	Μαγνητογαλβανικοί αισθητήρες.
1903	Skin	Μετατόπιση ρεύματος στην επιφάνεια, η οποία οφείλεται στο ρεύμα Foucault.	Αισθητήρες θέσης (απόσταση, εγγύτητα).
	Sixtus, Tonks	Παλμική μαγνήτιση από μεγάλα άλματα Berkhausen.	Αισθητήρες Wiegand
1962	Josephson	Κβαντικό φαινόμενο σήραγγας μεταξύ δύο υπεραγωγίων στρωμάτων.	Μαγνητόμετρα SQUID.

Πίνακας 1) Μαγνητικά φαινόμενα στους αισθητήρες.

Οι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιούνται στην ανάλυση και τον έλεγχο της λειτουργίας χιλιάδων συσκευών και διατάξεων. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μαγνητικών αισθητήρων περιέχουν πολλές γνώσεις φυσικής και ηλεκτρονικών.

Έντεκα από τις πιο κοινές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση μαγνητικού πεδίου θα περιγραφούν και θα συγκριθούν. Αυτές είναι: search coil, flux-gate, optically pumped, nuclear precession, SQUID, Hall effect, magnetoresistive, magnetodiode, magnetotransistor, fiber optic και magneto-optic.

13.5 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Οι μαγνητικοί αισθητήρες βοήθησαν στο να αναλυθούν και να ελεγχθούν εκατοντάδες παράγοντες για αρκετές δεκαετίες. Οι υπολογιστές π.χ., έχουν απεριόριστη μνήμη χάρη στη χρήση μαγνητικών αισθητήρων στους μαγνητικούς σκληρούς δίσκους και στις δισκέτες εγγραφής. Τα αεροπλάνα πετούν με υψηλότερα στάνταρ ασφαλείας εξαιτίας της υψηλής σταθερότητας των διακοπών χωρίς επαφή οι οποίοι έχουν μαγνητικούς αισθητήρες. Οι βιομηχανίες έχουν υψηλή παραγωγικότητα εξαιτίας της υψηλής σταθερότητας και του χαμηλού κόστους των μαγνητικών αισθητήρων.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι να αισθανθούμε το μαγνητικό πεδίο, οι περισσότεροι από αυτούς βασίζονται στην στενή σχέση μεταξύ των μαγνητικών και ηλεκτρικών φαινομένων. Ένα κοινό στοιχείο όλων των εφαρμογών είναι ότι οι μαγνητικοί αισθητήρες εξασφαλίζουν μια αξιόπιστη τεχνολογία συγκρινόμενοι με άλλες τεχνολογίες αισθητήρων.

Οι τεχνικές των μαγνητικών αισθητήρων εκμεταλλεύονται μια ευρεία κλίμακα από αρχές της φυσικής και της χημείας. Έντεκα από τις πιο κοινές τεχνολογίες παρουσιάζονται στον πίνακα 2), πιο κάτω, στο οποίο συγκρίνονται κατά προσέγγιση με βάση την κλίμακα ευαισθησίας τους. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι η κλίμακα ευαισθησίας για κάθε είδος αισθητήρα επηρεάζεται από τα απαιτούμενα ηλεκτρονικά. Επιπλέον, υπάρχουν πολλοί άλλοι παράγοντες όπως η απόκριση της συχνότητας, το μέγεθος και η ισχύς, που καθιστούν έναν αισθητήρα κατάλληλο για μία εφαρμογή.

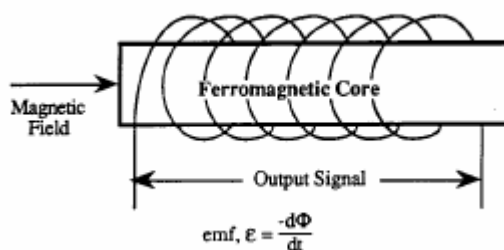
Ακολουθεί στη συνέχεια η ανάπτυξη των έντεκα τεχνολογιών.

Magnetic Sensor Technology	Detectable Field (gauss)*				
	10^{-10}	10^{-6}	10^{-2}	10^2	10^6
1. Search-Coil Magnetometer					
2. Flux-Gate Magnetometer					
3. Optically Pumped Magnetometer					
4. Nuclear-Precession Magnetometer					
5. SQUID Magnetometer					
6. Hall-Effect Sensor					
7. Magnetoresistive Magnetometer					
8. Magnetodiode					
9. Magnetotransistor					
10. Fiber-Optic Magnetometer					
11. Magneto-Optical Sensor					

*Note: $1T = 10^4G = 10^9 \gamma$

Πίνακας 2) σύγκρισης μαγνητικών αισθητήρων.

13.5.1 Search-Coil - Μαγνητόμετρο (πηνίο έρευνας).



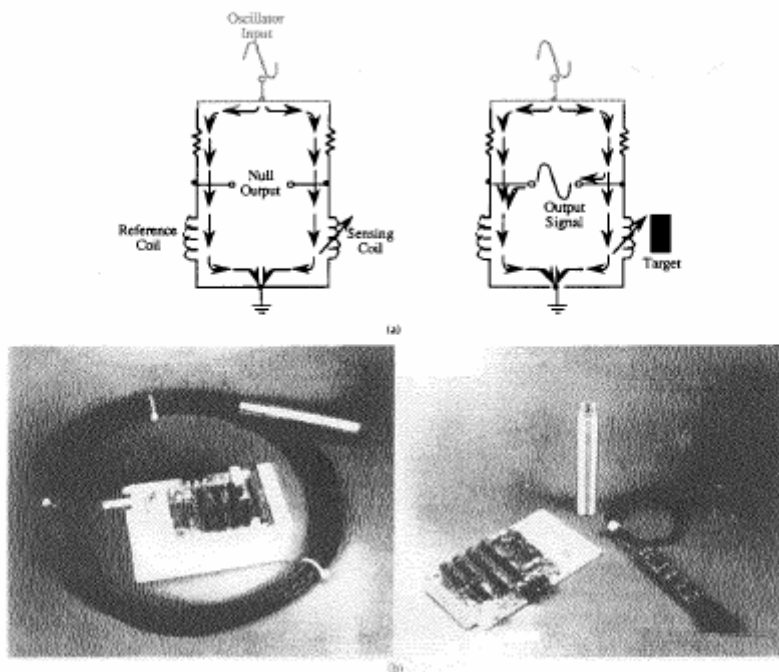
Σχήμα 13.6 Νόμος του Faraday.

Η αρχή πάνω στην οποία στηρίζεται το μαγνητόμετρο Search-Coil, (Σχήμα 13.6), είναι ο νόμος του Faraday για την επαγωγή. Που όπως έχουμε ξαναπεί, λέει : αν η μαγνητική ροή διαμέσου ενός σπειροειδή αγωγού αλλάζει, ένα ρεύμα προκαλείται στη σπείρα και μία τάση ανάλογη του μεγέθους της αλλαγής της ροής ανάμεσα στον αγωγό. Η ροή ανάμεσα στις σπείρες θα αλλάξει αν η σπείρα βρίσκεται σε μεταβαλλόμενο με το χρόνο μαγνητικό πεδίο ή αν η σπείρα κινείται μέσα σε ένα ανομοιογενές πεδίο. Τυπικά μία ράβδος από φερρομαγνητικό υλικό με υψηλή μαγνητική διαπερατότητα εισάγεται μέσα στην σπείρα για να συγκεντρώσει το περιβάλλον μαγνητικό πεδίο και αυξήσει τη ροή της συχνότητας.

Η ευαισθησία του μαγνητομέτρου Search-Coil εξαρτάται από την διαπερατότητα του υλικού στον πυρήνα, την επιφάνεια της σπείρας, των αριθμό των σπειρών και το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής διαμέσου του πηνίου. Η συχνότητα που ανταποκρίνεται στον αισθητήρα περιορίζεται από την ακτίνα του εξ' επαγωγής πηνίου, η αντίσταση του οποίου καθορίζει τον χρόνο που χρειάζεται το επαγόμενο ρεύμα να διαχυθεί όταν το εξωτερικό πεδίο απομακρύνεται . Όσο μεγαλύτερη είναι η επαγωγή τόσο πιο αργά διαχέεται το ρεύμα και όσο μικρότερη είναι η αντίσταση τόσο γρηγορότερα το ρεύμα διαχέεται. Στην πράξη παρόλα αυτά, η τάση που δίνουν τα ηλεκτρονικά μπορεί να περιορίζει την ευαισθησία και την απόκριση της συχνότητας του αισθητήρα.

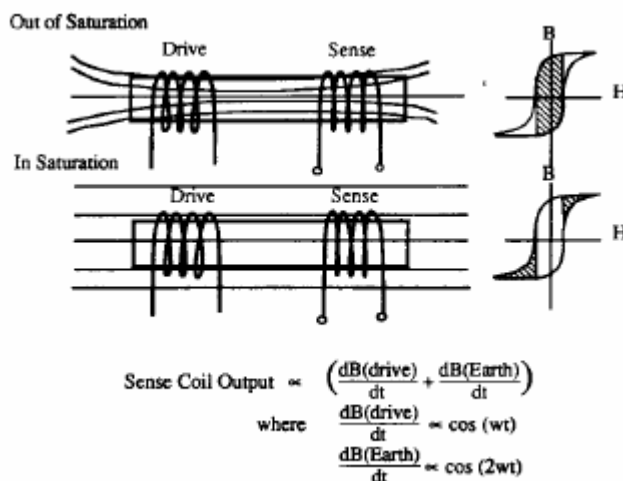
Αισθητήρες αυτού του τύπου μπορούν να ανιχνεύσουν πεδία ασθενή της τάξης $10^{-6} G$ και δεν υπάρχει άνω όριο στην κλίμακα ευαισθησίας τους. Η συνήθης κλίμακα συχνότητας τους είναι από 1Hz έως 1MHz, το άνω όριο καθορίζεται από την ακτίνα του πηνίου επαγωγής και της αντίστασης του.

Ένας αισθητήρας ανίχνευσης μπορεί επίσης να λειτουργήσει ως πηνίο ανίχνευσης με ενεργό τρόπο. Η μέθοδος ενεργού τρόπου περιέχει ενσωματωμένο το πηνίο ανίχνευσης όπως ένα επαγωγικό στοιχείο σ' ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Υπάρχουν δύο βασικά είδη κυκλωμάτων. Το ένα ενσωματώνει μία επαγωγική γέφυρα ισορροπίας όπου μία επαγωγική αλλαγή στο ένα άκρο της γέφυρας παράγει μία μη ισορροπημένη (out-of-balance) τάση στο κύκλωμα. Το δεύτερο είδος ενσωματώνει ένα συνηχητικό κύκλωμα όπου μία αλλαγή στην επαγωγή έχει ως αποτέλεσμα μια μεταβολή στην συχνότητα του συνηχητικού κύματος. Αυτό το κύκλωμα συχνά αναφέρεται και ως eddy-killed ταλαντωτής , αφού αγωγή υλικά κοντά στο ενεργό πηνίο θα επάγουν ρεύματα eddy (ρεύμα που αναπτύσσεται σε αγωγή υλικό, όταν αυτό βρεθεί σε μαγνητικό πεδίο) τα οποία θα παράγουν μία αμοιβαία μεταβολή στην επαγωγή του κυκλώματος. Ένα παράδειγμα ενεργού πηνίου ανίχνευσης φαίνεται στο σχήμα 13.7, παρακάτω.



Σχήμα 13.7 Search-Coil μαγνητόμετρο που λειτουργεί σαν ενεργό πηνίο. ανίχνευσης.

13.5.2 Flux-Gate - Μαγνητόμετρο (πύλη ροής)



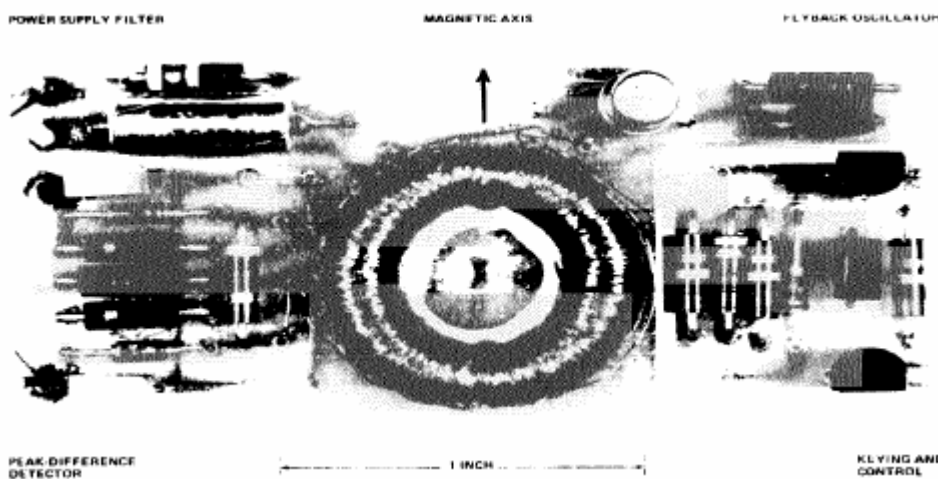
Σχήμα 13.8 Flux Gate μαγνητόμετρο.

Το μαγνητόμετρο Flux-Gate φαίνεται στο σχήμα 13.8, παραπάνω, και περιέχει ένα φερρομαγνητικό υλικό πλαισιωμένο από δύο πηνία. Αυτό εκμεταλλεύεται την μαγνητική επαγωγή μαζί με την υστέρηση που εισάγουν όλα τα φερρομαγνητικά υλικά. Υστέρηση είναι η εξάρτηση της κατάστασης του φυσικού συστήματος από τη δική του προϊστορία. Σ’ αυτή την περίπτωση ο όρος αναφέρεται στο γεγονός ότι η μαγνητική ροή διαμέσου του φερρομαγνητικού πυρήνα καθυστερεί λόγω μεταβολών στο μαγνητικό πεδίο. Όταν ένα ρεύμα εφαρμοστεί σ’ ένα από τα πηνία, το ρεύμα μαγνητίζει το πυρήνα, προκαλώντας τον έτσι να φτάσει για πρώτη φορά στην κατάσταση κορεσμού στο μισό κύκλο. Λόγω της

υστέρησης η μαγνητική ροή διαμέσου του πυρήνα θα σχηματίσει ένα βρόχο αν σχεδιαστεί με την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Αλλαγές της πυκνότητας ροής διαμέσου του πυρήνα αισθάνονται από το δεύτερο πηνίο. Καθώς ο πυρήνας οδηγείται στον κορεσμό η δυσκολία αυτού να φτάσει την ακραία τιμή μαγνητικού πεδίου αυξάνεται. Με αυτό τον τρόπο το μαγνητικό πεδίο δυσκολεύεται να περάσει μέσα από τον πυρήνα. Όταν αυτό το πεδίο απομακρυνθεί, οι μεταβολές αντιλαμβάνονται από το δεύτερο πηνίο. Καθώς ο πυρήνας απομακρύνεται από την κατάσταση κορεσμού, γεγονός που πραγματοποιείται μειώνοντας το ρεύμα στο τρέχον πηνίο, το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και πάλι έλκεται από τον πυρήνα, κάτι το οποίο γίνεται και πάλι αντιληπτό από τον δεύτερο πυρήνα. Έτσι η εναλλασσόμενη έλξη και απόθεση έχει ως αποτέλεσμα οι μαγνητικές γραμμές της ροής να κόβονται από το δεύτερο πηνίο.

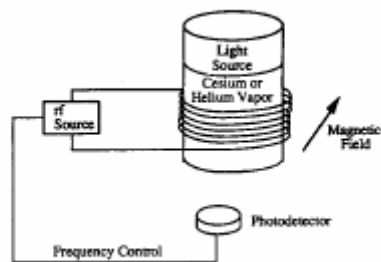
Η ευαισθησία αυτού του αισθητήρα εξαρτάται από το σχήμα της καμπύλης υστέρησης. Για μέγιστη ευαισθησία η μεταβολή B-H πρέπει να είναι τετράγωνη, αυτό παράγει την υψηλότερη εσωτερική ηλεκτρομαγνητική δύναμη για δεδομένη τιμή του πεδίου της γης. Για ελάχιστη κατανάλωση ισχύος, ο πυρήνας του υλικού θα πρέπει να έχει χαμηλές τιμές κορεσμού. Η κλίμακα ευαισθησίας είναι από $10^{-6}G$ έως $100G$. Η απόκριση στην συχνότητα του αισθητήρα περιορίζεται από το εφαρμοζόμενο πεδίο και το χρόνο ανταπόκρισης του φερρομαγνητικού υλικού. Το ανώτερο όριο είναι γύρω στα $10kHz$. Τα μαγνητόμετρα Flux-Coil, μοιάζουν με τα Search-Coil στο μέγεθος αλλά καταναλώνουν πέντε φορές περισσότερη ισχύ. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των μαγνητομέτρων Flux-Coil έναντι των Search-Coil είναι η ικανότητά τους να μετρούν με ακρίβεια συνεχή πεδία ρεύματος.

Πολλές μορφές μαγνητομέτρων Flux-Coil έχουν αναπτυχθεί. Οι περισσότερες από αυτές έχουν ως αποτέλεσμα την κατανάλωση λιγότερης ισχύος, αυτό γίνεται ρυθμίζοντας τον αισθητήρα να λειτουργεί σ' ένα πολύ μικρό βρόγχο υστέρησης. Έτσι δεν οδηγείται ο πυρήνας από κορεσμό σε κορεσμό. Μαγνητόμετρα Flux-Coil με μικρό βρόγχο υστέρησης είναι περισσότερο ευαίσθητα στα drive-readout ηλεκτρονικά από εκείνα με μεγάλους βρόγχους. Το σχήμα 13.9, πιο κάτω, δείχνει ένα τοροειδή πυρήνα ενός μαγνητομέτρου Flux-Coil με μικρό βρόγχο υστέρησης, το οποίο σχεδιάστηκε για δύο άξονες ευαισθησίας.



Σχήμα 13.9 Μαγνητόμετρο Flux Gate τοροειδούς πυρήνα και μικρού βρόγχου υστέρησης.

13.5.3 Optically Pumped Μαγνητόμετρο



Σχήμα 13.10 Φαινόμενο Zeeman.

Το Optically Pumped μαγνητόμετρο φαίνεται στο σχήμα 13.10, παραπάνω, και βασίζεται στο φαινόμενο Zeeman. Το 1896 ο γερμανός φυσικός Peter Zeeman έδειξε ότι μερικές από τις χαρακτηριστικές φασματικές γραμμές των ατόμων διαιρούνται όταν τα άτομα βρεθούν σε ένα μαγνητικό πεδίο. Μία φασματική γραμμή μετατρέπεται σε ένα γκρουπ από γραμμές με ελαφρά διαφορετικά μήκη κύματος. Ο διαχωρισμός αυτός κυρίως εμφανίζεται στα αλκάλια όπως το καίσιο.

Τα Optically Pumped μαγνητόμετρα εκμεταλλεύονται τρεις ενεργειακές καταστάσεις διαθέσιμες στο μόνο ένα ηλεκτρόνιο σθένους του καισίου: δύο χαμηλές στάθμες οι οποίες βρίσκονται κοντά και μία ακόμη στάθμη σε πολύ υψηλότερες ενέργειες. Η διαφορά ενέργειας μεταξύ των χαμηλών σταθμών ανταποκρίνεται στην ανάλογη φασματική γραμμή συχνότητας και η μετάβαση ανάμεσα σε μία από τις χαμηλές ενεργειακές στάθμες και την υψηλή ενεργειακή στάθμη ανταποκρίνεται στη φασματική γραμμή στην περιοχή του ορατού.

Η διαφορά ανάμεσα στις ενέργειες των δύο χαμηλών σταθμών οφείλεται στον διαφορετικό προσανατολισμό των spin των ηλεκτρονίων. Ο άξονας του spin ενός ηλεκτρονίου μπορεί να έχει ένα από τους δύο δυνατούς προσανατολισμούς σε συμφωνία με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο -παράλληλο ή αντιπαράλληλο- και ο ένας απαιτεί λιγότερη ενέργεια από τον άλλο. Οι χαμηλές ενεργειακές στάθμες θεωρείται ότι διαφέρουν μεταξύ τους μία κβαντική μονάδα της γωνιακής ορμής του spin. Η υψηλότερη κατάσταση είναι ειδικά επιλεγμένη γιατί έχει την ίδια γωνιακή ορμή με μία από τις υψηλότερες καταστάσεις. Θεωρήστε ένα αέριο καισίου που διεγείρεται από κυκλικά πολωμένο φως. Το ποσό του φωτός που απορροφάται από το αέριο ρυθμίζεται από ένα φωτοανιχνευτή. Αρχικά μερικά από τα ηλεκτρόνια στο αέριο θα βρεθούν σε μία από τις χαμηλές ενεργειακές στάθμες και μερικά σε άλλες. Όταν τα άτομα απορροφούν φωτόνια από το κυκλικά πολωμένο φως η γωνιακή τους ορμή απαραίτητα μεταβάλλεται κατά μία μονάδα. Έτσι ηλεκτρόνια σε ενεργειακή κατάσταση η οποία διαφέρει από την ανώτερη στάθμη κατά μία μονάδα γωνιακής ορμής θα απορροφήσουν φωτόνια και θα αναχθούν σε υψηλότερη στάθμη, ενώ ηλεκτρόνια που έχουν ίδια γωνιακή ορμή με την υψηλή στάθμη δεν θα απορροφήσουν. Επειδή μερικά φωτόνια απορροφούνται, η φωτεινή δέσμη γίνεται αμυδρότερη. Ένα ηλεκτρόνιο στην υψηλή στάθμη αποδιεγείρεται σε μία από τις δύο χαμηλές στάθμες σχεδόν αμέσως. Κάθε φορά που ένα ηλεκτρόνιο κάνει αυτή τη μετάβαση υπάρχει μία πιθανότητα να μεταπέσει πίσω στην κατάσταση που δεν απορροφά φως. Δίνοντας αρκετό χρόνο σχεδόν όλα τα ηλεκτρόνια θα καταλήξουν σε αυτή την κατάσταση. Το αέριο τότε θεωρείται διαφανές στο φως.

Αν σε αυτή την περίπτωση εφαρμοστεί ένα πεδίο ραδιοσυχνοτήτων παράλληλα στη τροχιά του φωτός τα ηλεκτρόνια θα αλλάξουν την γωνιακή τους ορμή. Ουσιαστικά το πεδίο των

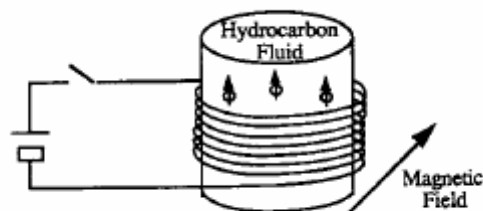
ραδιοσυχνοτήτων αναγκάζει τα ηλεκτρόνια να πηγαionoέρχονται από την μία χαμηλή ενεργειακή στάθμη στην άλλη. Ως αποτέλεσμα το αέριο ξανά απορροφά φως. Το πεδίο ραδιοσυχνοτήτων και οι οπτικές επιδράσεις συνδυάζονται για να δώσουν ένα σχετικά οξύ συντονισμό και είναι αυτός ο συντονισμός που το Optically Pumped μαγνητόμετρο εξηγεί. Η ενέργεια που απαιτείται για να αλλάξει το spin των ηλεκτρονίων και έτσι η ραδιοσυχνότητα, εξαρτάται από την ισχύ του μαγνητικού πεδίου. Στο μαγνητόμετρο ένας βρόγχος ανάδρασης ελέγχει τη ραδιοσυχνότητα έτσι ώστε να ρυθμίζει την ελάχιστη μετάδοση φωτός. Η συχνότητα έτσι χρησιμεύει για να μετράται το μαγνητικό πεδίο.

Το Optically Pumped μαγνητόμετρο μετρά το ολικό μαγνητικό πεδίο, όποιος και αν είναι ο προσανατολισμός, αντίθετα με τα περισσότερα μαγνητόμετρα, τα οποία μετρούν μόνο τη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου η οποία βρίσκεται κατά μήκος του ευαίσθητου άξονα.

Η ευαισθησία και η δυναμική εμβέλεια ενός Optically Pumped μαγνητόμετρου όπως και τα περισσότερα μαγνητόμετρα καθορίζονται από τα εξωτερικά ηλεκτρονικά. Τυπικές ευαισθησίες για το καίσιο και το ήλιο, το οποίο μερικές φορές χρησιμοποιείται αντί για το καίσιο, είναι 700kHz/G και 2.8MHz/G αντίστοιχα. Αυτό ερμηνεύεται στη κλίμακα ευαισθησίας από 10G έως 1G. Αυτός ο αισθητήρας παρόλα αυτά είναι σχετικά μεγάλος και έχει υψηλή κατανάλωση ισχύος.

13.5.4 Nuclear-Precession Μαγνητόμετρο

Αυτό το μαγνητόμετρο, (σχήμα 13.11), εκμεταλλεύεται την αντίδραση στο μαγνητικό πεδίο από τα νουκλεΐδια των ατόμων σε ένα υδρογονοανθρακούχο υγρό όπως η βενζίνη. Τα πρωτόνια σε ένα νουκλεΐδιο ενός ατόμου μπορεί να θεωρηθούν σαν μικρά μαγνητικά δίπολα, επειδή περιστρέφονται και έχουν ηλεκτρικό φορτίο και μικρή μαγνητική ροπή.

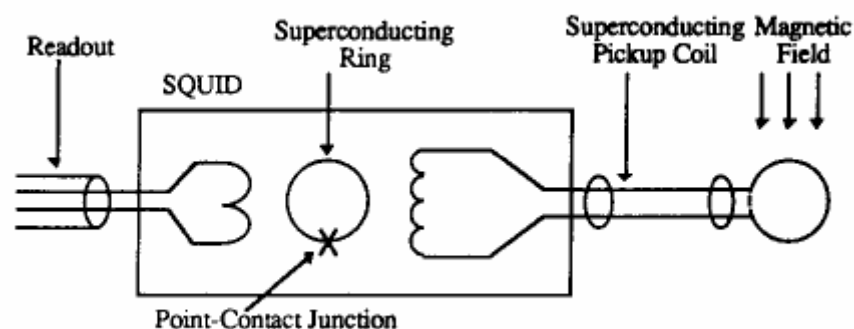


Σχήμα 13.11 Συμπεριφορά των διπόλων υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου.

Τα πρωτόνια στο υγρό μπορούν προσωρινά να ευθυγραμμιστούν από το ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργείται από το ρεύμα διαμέσου του πηνίου. Όταν το πολωμένο ρεύμα καταργείται τα πρωτόνια θα ξεκινήσουν τη διαδικασία για το περιβάλλον μαγνητικό πεδίο. Ο άξονας spin ενός πρωτονίου που δεν είναι ευθυγραμμισμένο με ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο καθορίζει ένα κύκλο με μία γραμμή παράλληλη στο πεδίο.

Η ακτίνα από την οποία ο κύκλος αυτό καθορίζεται καλείται precession συχνότητα, εξαρτάται δε από την ισχύ του μαγνητικού πεδίου. Τα precession πρωτόνια δίνουν ένα σήμα στο πηνίο των οποίων η συχνότητα είναι ανάλογη της ισχύος του μαγνητικού πεδίου. Όπως τα Optically Pumped μαγνητόμετρα το Nuclear-Precession Μαγνητόμετρο μετρά το ολικό μαγνητικό πεδίο. Αυτά τα μαγνητόμετρα έχουν κλίμακα ευαισθησίας από $10^{-7} G$ έως 1G.

13.5.5 SQUID (superconductive quantum interference device) μαγνητόμετρο



Σχήμα 13.12 SQUID Μαγνητόμετρο.

Τα πιο ευαίσθητα από όλα τα όργανα που μετράνε μαγνητικά πεδία είναι τα SQUID (σχήμα 13.12). Βασίζεται στις εκπληκτικές αλληλεπιδράσεις του ηλεκτρικού ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου, όταν συγκεκριμένα υλικά ψήχονται κάτω από μία υπεραγώγιμη μεταβατική θερμοκρασία. Σε αυτή τη θερμοκρασία, τα υλικά γίνονται υπεραγωγοί και χάνουν όλη τους την αντίσταση στον τρέχον ηλεκτρισμό.

Αν μία γραμμή μαγνητικής ροής περάσει μέσα από ένα δακτύλιο από υπεραγώγιμο υλικό, ένα ρεύμα επάγεται από τον δακτύλιο. Αν δεν υπάρχουν άλλες διαταραχές το ρεύμα θα συνεχίσει να διαρρέετε για πάντα. Το μέγεθος του επαγόμενου ρεύματος είναι ένας τέλεια ευαίσθητος δείκτης της πυκνότητας ροής. Πράγματι ο δακτύλιος ανταποκρίνεται στις μεταβολές του πεδίου οι οποίες ανταποκρίνονται στους παράγοντες μιας μοναδιαίας κβαντικής μονάδας της μαγνητικής ροής.

Σε ένα SQUID μαγνητόμετρο οι περιοδικές μεταβολές χρησιμοποιούνται για να μετρηθεί το ρεύμα σε ένα υπεραγώγιμο δακτύλιο και από αυτό το περιβάλλον μαγνητικό πεδίο. Τυπικά, ο δακτύλιος είναι επαγωγικά συνδεδεμένος με ένα κύκλωμα ραδιοσυχνοτήτων που εφοδιάζει ένα γνωστό πολωμένο πεδίο και χρησιμεύει ως ανιχνευτής εξόδου. Αλλαγές στο ρεύμα του δακτυλίου μεταβάλλουν την ισχυρή συχνότητα του κυκλώματος. Με αποτέλεσμα το εξωτερικό σήμα αλλάζει περιοδικά καθώς το πεδίο μεταβάλλεται. Αλλαγές στο πεδίο μπορούν να βρεθούν μετρώντας τις κορυφές και τις κοιλάδες. Διαφορετικά ένας βρόγχος ανάδρασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να φράξει το κύκλωμα των ραδιοσυχνοτήτων πάνω σε μία μόνο κορυφή, συνεχώς ρυθμίζοντας το πεδίο πόλωσης να αντισταθμίζει τις αλλαγές στο εξωτερικό πεδίο. Το ρεύμα ανάδρασης μετρείται τότε από το περιβάλλον πεδίο.

Κάποιος μπορεί να ρυθμίσει ένα dc SQUID δημιουργώντας δύο Josephson συνδέσεις στον δακτύλιο. Όταν τα δύο weak links συνδεθούν κατάλληλα στο κύκλωμα, το ρεύμα στον δακτύλιο έχει μία dc απόκριση στο ροή που περνάει από αυτόν. Ο υπεραγώγιμος δακτύλιος σε ένα SQUID είναι τυπικά ένα τοροειδές με διάμετρο λίγα mm και κατασκευάζεται από μέταλλα όπως το νιόβιο και ο μόλυβδος. Η ευαισθησία βελτιώνεται συζεύγοντας τον δακτύλιο σε ένα μεγαλύτερο βρόγχο υπεραγωγού ή πηνίου (χωρίς weak link), το οποίο πραγματικά λειτουργεί σαν μία μαγνητική «κεραία» ή dc πηνίο ανίχνευσης, συγκεντρώνοντας έτσι ροή γύρω από μία περιοχή αρκετών cm^2 . Με υπεραγώγιμες ιδιότητες κάποιος μπορεί να δημιουργήσει ένα dc μετασχηματιστή μεταξύ του ευαίσθητου βρόγχου και την έξοδο του SQUID. Ο δακτύλιος του SQUID βασικά λειτουργεί ως ένα

πολύ ακριβή αμπερόμετρο για την μέτρηση του ρεύματος στο pick up πηνίο. Έτσι η συσκευή έχει τρία υπεραγωγία μέρη: τον ίδιο τον SQUID δακτύλιο, το πηνίο των ραδιοσυχνοτήτων και ένα μεγάλο βρόγχο για κεραία. Και τα τρία αυτά μέρη πρέπει να ψυχθούν ως την υπεραγωγίμη κατάσταση.

Η κλίμακα ευαισθησίας για ένα SQUID κυμαίνεται από $10^{-10} G$ έως $10^{-4} G$. Η ικανότητα του να θέτει ένα υποτιθέμενο επίπεδο με το να προσθέτει το πολωμένο πεδίο στο κύκλωμα των ραδιοσυχνοτήτων κάνει την συσκευή πρακτικά χρήσιμη για μετρήσεις διαφόρων πεδίων. Για παράδειγμα, αν το υποτιθέμενο επίπεδο τοποθετηθεί στον μέσο όρο των γήινων μαγνητικών πεδίων, το όργανο θα διαβάσει διακριτές ανωμαλίες στο πεδίο.

Το SQUID μπορεί να είναι αρκετά μικρό, αλλά η ανάγκη για ψύξη με υγρό ήλιο κάνει το όλο σύστημα αρκετά ογκώδη και βαρύ. Η κατανάλωση ισχύος των αρκετών watts οφείλεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στα ηλεκτρονικά του κυκλώματος των ραδιοσυχνοτήτων.

Μία νέα οικογένεια υλικών με υπεραγωγίμες ιδιότητες για θερμοκρασίες πάνω από τη θερμοκρασία υγρού αζώτου ($77^{\circ} K$) ανακαλύφθηκε το 1986. Η δυνατότητα για SQUID μαγνητόμετρα σε υψηλότερες θερμοκρασίες φάνηκε δυνατή.

13.5.6 Hall Effect Αισθητήρας

Ο Hall Effect αισθητήρας στηρίζεται σε ένα φυσικό φαινόμενο που ανακαλύφθηκε από τον Hall πάνω από 100 χρόνια πριν. Βρήκε ότι όταν ένα λεπτό ορθογώνιο πλαίσιο από χρυσό τοποθετείται μέσα σε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο κάθετο προς το επίπεδο του ορθογωνίου εμφανίζεται μία διαφορά τάσης όταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα περνάει κατά μήκος αυτού. Ένα ηλεκτρόνιο που κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο δέχεται μία δύναμη, γνωστή ως δύναμη Lorentz, η οποία είναι κάθετη τόσο κατά μήκος της διεύθυνσης της κίνησης όσο και στη διεύθυνση του πεδίου. Η απόκριση σε αυτή τη δύναμη δημιουργεί την τάση Hall.

Ας τον εξετάσουμε αναλυτικά.

ΓΕΝΙΚΑ

Οι αισθητήρες HALL είναι ημιαγωγοί ευαίσθητοι σε μαγνητικά πεδία που μπορούν να παράγουν τάσεις κάτω από την παρουσία σταθερών ή μεταβαλλόμενων πεδίων. Με την χρήση τους μπορούμε να μετρήσουμε ρεύματα, ισχύ, την θέση γωνίας, καθώς και το μήκος διαφόρων αντικειμένων, κ.α. Υπάρχουν μαγνητικοί διακόπτες που δουλεύουν χωρίς κάποια φυσική επαφή και μπορούν να απλοποιήσουν και να βελτιώσουν το σύστημά μας.

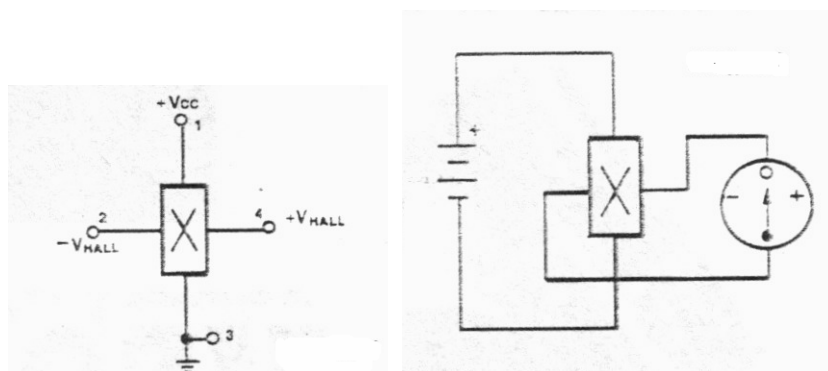
Το δυνατό σημείο των αισθητήρων HALL είναι η απλή διακοπτική τους λειτουργία. Οι αισθητήρες συνδυάζουν γεννήτριες τάσεως HALL, ενισχυτές σκανδαλιστές, όλα σε ένα κέλυφος. Η έξοδος είναι καθαρή, γρήγορη, χωρίς τα φαινόμενα αναπήδησης. Ένα αισθητήριο HALL μπορεί να κοστίζει λιγότερο από οποιοδήποτε ηλεκτρομαγνητικό διακόπτη. Αυτοί είναι τα διακοπτικά αισθητήρια. Ασφαλώς υπάρχουν και τα γραμμικά που ανιχνεύουν την κίνηση, την θέση ή την αλλαγή του μαγνητικού πεδίου. Η κατανάλωση ενέργειας είναι πολύ μικρή. Η έξοδος είναι γραμμική και θερμοκρασιακά σταθερή. Η απόκριση του αισθητήρα είναι γραμμική μέχρι τα 25KHz. Οι αισθητήρες HALL δεν επηρεάζονται από περιβαλλοντολογικές διαταραχές επομένως μπορούν να δουλέψουν κάτω από δύσκολες συνθήκες. Ο αισθητήρας HALL μπορεί να «δει» με ακρίβεια και στο σκοτάδι και στην σκόνη.

Οι εφαρμογές των αισθητήρων HALL είναι πάρα πολλές και εδώ ενδεικτικά αναφέρουμε μερικές από αυτές, όπως : Σε συστήματα ασφαλείας, σε συστήματα ελέγχου ταχύτητας, σε

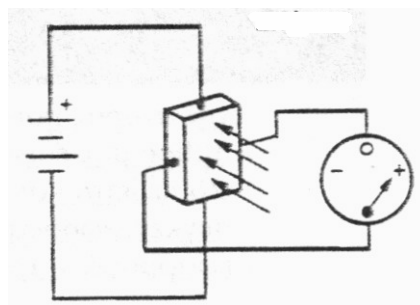
συστήματα ανάφλεξης, σε ταξίμετρα, μικρόμετρα, σε ανιχνευτές θέσης, σε ανιχνευτές ρεύματος, σε διάφορα μοτέρ DC, σε διακόπτες για pc's , printers, disc drives κ.α.

Ο ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ HALL ΚΑΙ Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ

Ο βασικός αισθητήρας HALL είναι ένα μικρό φύλλο ημιαγώγιμου υλικού όπως φαίνεται στο σχήμα 13.13(αριστερά) . Μια πηγή σταθερής τάσης (σχήμα 13.13 δεξιά) αναγκάζει ένα σταθερό ρεύμα πόλωσης να ρέει στο ημιαγώγιμο υλικό . Η έξοδος είναι η μετρούμενη τάση στο πλάτος του φύλλου όταν δεν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο. Εάν τώρα θεωρήσουμε τον αισθητήρα μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, από τις γραμμές κάθετες στο ρεύμα HALL (σχήμα 13.14), η τάση εξόδου είναι ανάλογη της δύναμης του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου. (E.F. HALL -1879-).

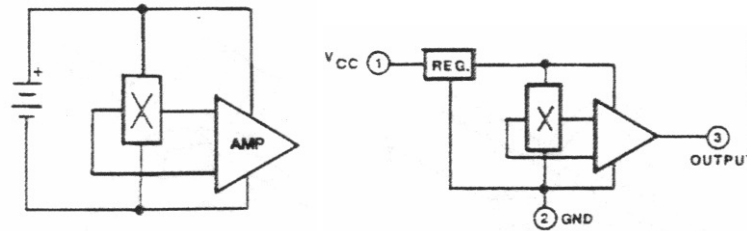


Σχήμα 13.13 Βασικός αισθητήρας Hall (αριστερά), και πηγή σταθερής τάσης (δεξιά).



Σχήμα 13.14 Ο αισθητήρας τοποθετημένος σε μαγνητικό πεδίο.

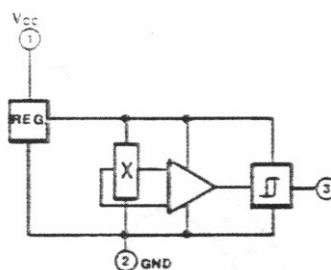
Η τάση εξόδου ωστόσο είναι πολύ μικρή. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα σε περιβάλλον με ηλεκτρικό θόρυβο. Με την προσθήκη ενός ενισχυτή DC υψηλής ποιότητας και με ένα κύκλωμα ρύθμισης τάσης , όπως στα σχήματα 13.15, η έξοδος του αισθητήρα βελτιώνεται σημαντικά και μπορεί να λειτουργήσει με διάφορες τάσεις. Αυτός ο αισθητήρας μας δίνει μια αναλογική έξοδο που είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής που εφαρμόζεται.



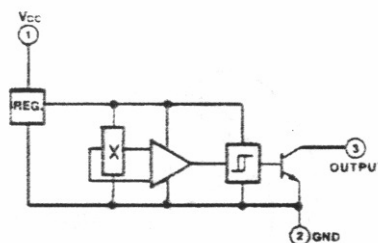
Σχήμα 13.15 Ενισχυτής dc υψηλής ποιότητας (αριστερά), και ένα κύκλωμα ρύθμισης τάσης (δεξιά).

ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ HALL ΜΕ ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΞΟΔΟ

Με την προσθήκη ενός σκανδαλιστή Schmitt και ένα βρόχο υστέρησης όπως εικονίζεται στο σχήμα 13.16, έχουμε ένα αισθητήριο HALL με ψηφιακή έξοδο. Όταν το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο ξεπεράσει μια προκαθορισμένη τιμή ο σκανδαλιστής Schmitt παρέχει μια καθαρή μετάβαση από την κατάσταση OFF στην κατάσταση ON χωρίς αναπήδηση. Η εσωτερική υστέρηση μας απαλλάσσει από τις τυχόν ταλαντώσεις. Μπορεί να προστεθεί στον αισθητήρα ένα transistor NPN ανοικτού συλλέκτη (σχήμα 13.17), που μας δίνει συμβατότητα με τα «λογικά» επίπεδα των τάσεων. Το transistor είναι ένας «κορεσμένος» διακόπτης που συνδέει την έξοδο στην γείωση όταν το μαγνητικό πεδίο ξεπεράσει κάποιο όριο. Ο διακόπτης είναι συμβατός με όλες τις οικογένειες ψηφιακών σημάτων. Το transistor εξόδου μπορεί να οδηγήσει ρελέ, SCR(θυρίστορ) και LED. Τα στοιχεία του κυκλώματος του σχήματος 13.17, έχουν ολοκληρωθεί σε έναν αισθητήρα.



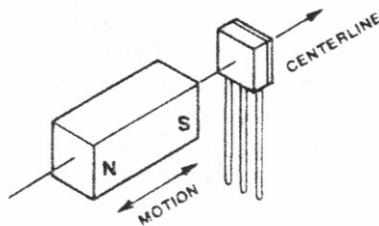
Σχήμα 13.16 Αισθητήρας με βρόχο υστέρησης και σκανδαλιστή Schmitt.



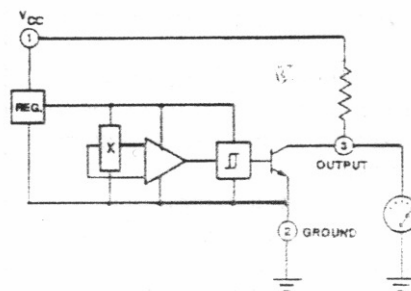
Σχήμα 13.17 Προσθήκη και ενός transistor NPN ανοικτού συλλέκτη στον αισθητήρα.

Λειτουργία

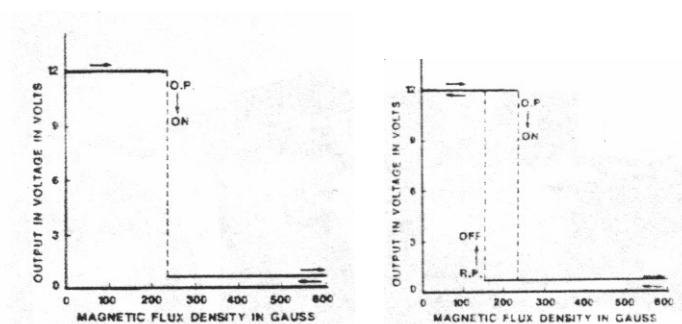
Ο αισθητήρας HALL ενεργοποιείται από το μαγνητικό πεδίο. Να τονίσουμε ότι τα δύο σημαντικά χαρακτηριστικά των μαγνητικών πεδίων είναι : 1) η μαγνητική ροή, και 2) η πολικότητα. Όταν δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο στους περισσότερους διακόπτες HALL η έξοδος είναι OFF. Θα αλλάξει κατάσταση σε ON εάν εφαρμοστεί το κατάλληλο μαγνητικό πεδίο με αρκετή πυκνότητα και το σωστό προσανατολισμό. Οι διακόπτες HALL έχουν την περιοχή ενεργοποίησης πιο κοντά σε μια πλευρά. Για να λειτουργήσουν το πεδίο θα πρέπει να είναι κάθετο σ' αυτή την πλευρά και να έχει τον σωστό προσανατολισμό. Στο σχήμα 13.18, παρακάτω, εάν πλησιάσουμε το αισθητήριο με τον νότιο πόλο του μαγνήτη αυτό θα ενεργοποιηθεί, ωστόσο εάν το πλησιάσουμε με τον βόρειο πόλο δεν θα συμβεί τίποτα. Τα γραφήματα του σχήματος 13.20, παίρνονται από το κύκλωμα του σχήματος 13.19. Όταν δεν υπάρχει πεδίο (0G) ο διακόπτης είναι κλειστός και η έξοδος βρίσκεται στα 12V (τάση τροφοδοσίας). Όταν ο νότιος πόλος ενός μόνιμου μαγνήτη πλησιάσει κάθετα το αισθητήριο τότε η μαγνητική πυκνότητα αυξάνεται. Όταν η πυκνότητα φτάσει περίπου τα 240G τότε το transistor εξόδου ανοίγει και η έξοδος πηγαίνει στα μηδέν Volt. Αυτή η τιμή της μαγνητικής πυκνότητας καλείται το σημείο λειτουργίας. Εάν αυξήσουμε την πυκνότητα μέχρι 600G τίποτα δεν συμβαίνει. Ο διακόπτης παραμένει ανοικτός. Για να κλείσουμε τον διακόπτη η πυκνότητα πρέπει να πέσει λιγότερο από 240G. Γι αυτό το παράδειγμα χρησιμοποιούμε υστέρηση 90G οπότε το αισθητήριο κλείνει στα 150G.



Σχήμα 13.18 Αισθητήριο και μαγνήτης.



Σχήμα 13.19



Σχήμα 13.20 Γραφήματα που προκύπτουν από το παραπάνω κύκλωμα.

Επειδή το ηλεκτρονικό μέρος του αισθητήρα και η σύνδεσή του με άλλα ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι απλή υπόθεση μεγαλύτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην φυσική τοποθέτηση του αισθητήρα.

Σε μια εφαρμογή για ανίχνευση θέσης, για παράδειγμα θα πρέπει να απαντήσουμε στα παρακάτω

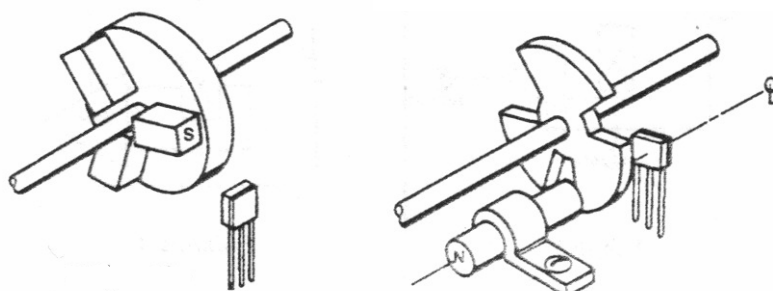
- Τι είδους κίνησης έχουμε;
- Τι γωνιακή ή θέση ακρίβεια χρειαζόμαστε;
- Τι χώρο έχουμε για την τοποθέτηση του εξαρτήματος;
- Τι θερμοκρασίες περιμένουμε; Κ.λ.π.

Ασφαλώς θα πρέπει να ερευνήσουμε και το πεδίο το οποίο εφαρμόζεται στην κατασκευή μας.

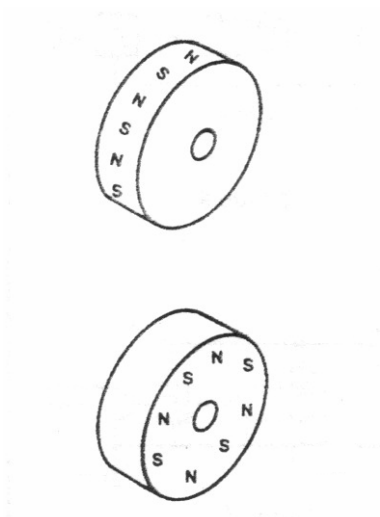
Παρακάτω θα δούμε μερικές εφαρμογές-ιδέες για τους αισθητήρες HALL αφήνοντας την θεωρία τους.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ HALL

Μια συχνή εφαρμογή για τα αισθητήρια HALL είναι η δημιουργία μιας ψηφιακής εξόδου που είναι ανάλογη της ταχύτητας, θέσης ή απομάκρυνσης ενός περιστρεφόμενου άξονα. Το μαγνητικό πεδίο για περιστρεφόμενες εφαρμογές μπορεί να δοθεί με δύο τρόπους : Οι μαγνήτες να είναι σταθεροί πάνω στον άξονα (σχήμα 13.21 αριστερά). Ή η άλλη περίπτωση είναι όταν ο μαγνήτης και το αισθητήριο είναι σταθερά και μια φτερωτή στον άξονα διακόπτει το μαγνητικό πεδίο (σχήμα 13.21 δεξιά). Επίσης μια άλλη περίπτωση είναι η χρησιμοποίηση μαγνητών που έρχονται σε μορφή δακτυλιδιών (σχήμα 13.22).

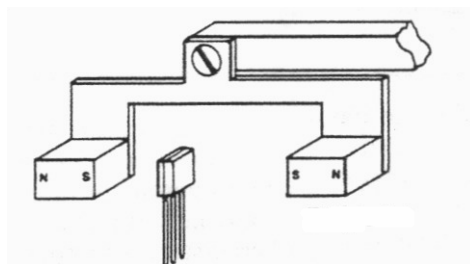


Σχήμα 13.21 Περιπτώσεις : Οι μαγνήτες σταθεροί πάνω στο άξονα (αριστερά) και ο αισθητήρας και ο μαγνήτης είναι σταθερά και μια φτερωτή στον άξονα διακόπτει το μαγνητικό πεδίο (δεξιά).



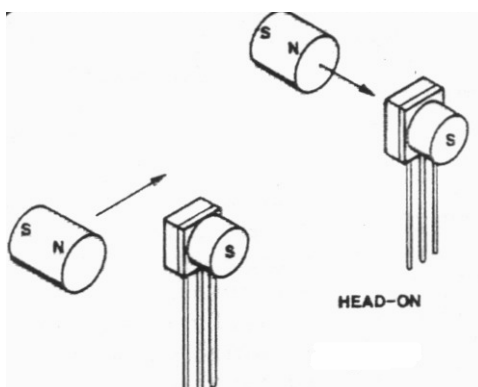
Σχήμα 13.22 Μαγνήτες σε μορφή δακτυλιδιών.

Μια άλλη εφαρμογή είναι η μέτρηση θέσης ή απόστασης με ένα αισθητήριο και 2 μαγνήτες. Η έξοδος του αισθητηρίου είναι ανάλογη της απόστασης που βρίσκονται οι μαγνήτες στην προκειμένη περίπτωση (σχήμα 13.23).



Σχήμα 13.23 Η μέτρηση θέσης ή απόστασης με ένα αισθητήριο και 2 μαγνήτες.

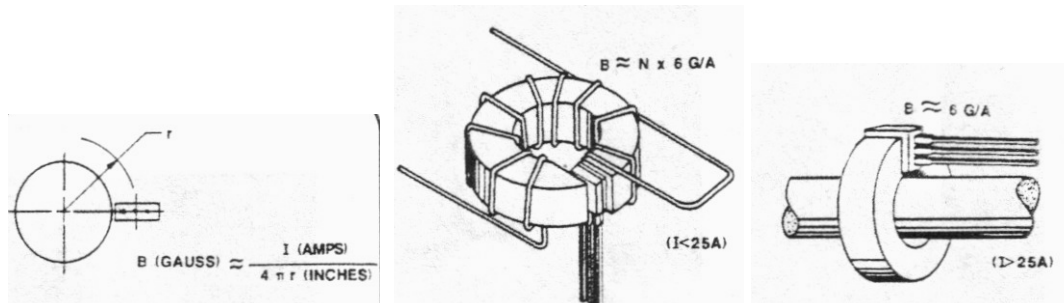
Στο σχήμα 13.24, φαίνεται επίσης μια διακοπτική λειτουργία του αισθητήρα HALL. Εδώ έχουμε δύο περιπτώσεις. Ο μαγνήτης κατευθύνεται μετωπικά στο αισθητήριο και στην δεύτερη περίπτωση ο μαγνήτης περνά πλάγια.



Σχήμα 13.24 Διακοπτική λειτουργία του αισθητηρίου Hall.

Μια άλλη εφαρμογή των αισθητήρων HALL είναι η μέτρηση του ρεύματος και ο περιορισμός.

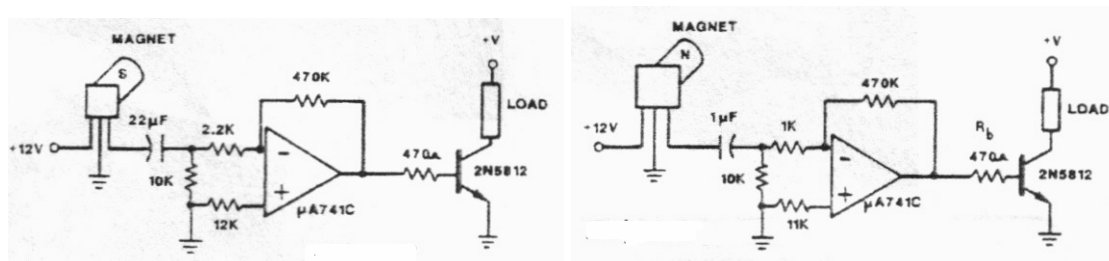
Κανονικά το μαγνητικό πεδίο ενός αγωγού δεν είναι αρκετό για να λειτουργήσει σωστά ο αισθητήρας HALL (σχήματα 13.25). Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούμε ένα τοροειδή για να αυξήσουμε το μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα 13.25 Μέτρηση ρεύματος και περιορισμός.

Τέλος στο σχήμα 13.26, βλέπουμε δύο ανιχνευτές διαμαγνητικών και μεταλλικών αντικειμένων.

Να τονίσουμε εδώ, ότι σίγουρα βέβαια υπάρχουν και άλλες εφαρμογές που δεν καλύφθηκαν εδώ.



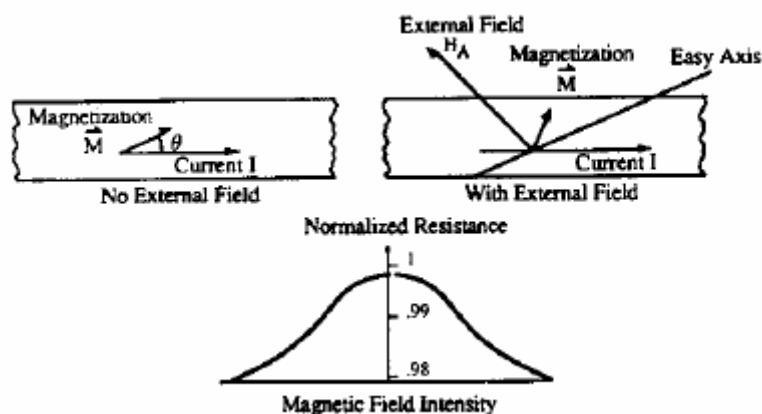
Σχήμα 13.26 Δύο ανιχνευτές διαμαγνητικών και μεταλλικών αντικειμένων.

Το αποτέλεσμα Hall είναι πολύ μικρό στους μεταλλικούς αγωγούς, αλλά στους υπεραγωγούς γίνεται πολύ έντονο. Αφού υπάρχουν λίγα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας σε ένα υπεραγωγό, αν το ολικό ρεύμα που διαρρέει ένα υπεραγωγό είναι το ίδιο με το ρεύμα που διαρρέει μέταλλο, τα ηλεκτρόνια στον υπεραγωγό πρέπει να έχουν πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα εκτροπής από αυτά στα μέταλλα. Όσο γρηγορότερα κινούνται τα ηλεκτρόνια, τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη που δέχονται και τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση Hall για να έχουμε ισορροπία. Φθηνοί Hall Effect αισθητήρες γενικά κατασκευάζονται από πυρίτιο. Πιο ευαίσθητοι αισθητήρες κατασκευάζονται από ημιαγωγούς III-IV, οι οποίοι έχουν ηλεκτρόνια μεγαλύτερης ευκινησίας από αυτά του πυριτίου. Οι πιο εμπορικά διαθέσιμοι αισθητήρες έχουν στοιχεία κατασκευασμένα από III-IV ημιαγωγούς ινδίου αντιμονίου. Οι συσκευές Si έχουν κλίμακα ευαισθησίας από 10G έως 1000G και οι αισθητήρες ινδίου αντιμονίου έχουν χαμηλότερο όριο στα $10^{-1}G$. Οι Hall Effect αισθητήρες μπορούν να μετρούν σταθερή ή μεταβαλλόμενη ροή. Η συχνότητα οριοθέτησης είναι περίπου 1MHz.

Είναι ελαφροί με μέγεθος περίπου 0.1in^2 . Η απαιτούμενη ισχύς είναι μεταξύ 0.1 και 0.2W και μπορούν να λειτουργούν σε εξαιρετικά ευρεία κλίμακα θερμοκρασίας, η οποία περιορίζεται μόνο από τη κατασκευή. Συσκευές τέτοιου είδους είναι διαθέσιμες με κλίμακα θερμοκρασίας από 200°C έως περίπου στο απόλυτο μηδέν (-273°C).

13.5.7 Μαγνητοαντίστασεις

Το μαγνητόμετρα αυτά βασίζονται στο φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης, μία μεταβολή στην αντίσταση προκαλείται από ένα περιβάλλον πεδίο. Υλικό όπως το permalloy (κράμα νικελίου και σιδήρου) μπορούν να δώσουν προτιμητέο μαγνητικό προσανατολισμό, έτσι ώστε ένα ρεύμα περνώντας μέσα από μία ταινία του υλικού να το μαγνητίζει με διεύθυνση παράλληλη προς τη διεύθυνση του ρεύματος. Αν ένα μαγνητικό πεδίο εφαρμοστεί τότε κάθετα προς το ρεύμα η διεύθυνση της μαγνήτισης θα στραφεί προς τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Η γωνία με την οποία περιστρέφεται εξαρτάται από το εύρος του περιβάλλοντος μαγνητικού πεδίου. Η αντίσταση του permalloy στοιχείου μειώνεται καθώς η διεύθυνση της μαγνήτισης στρέφεται μακριά από τη διεύθυνση στην οποία το ρεύμα ρέει γιατί τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας κινούνται κατά τη διεύθυνση της μαγνήτισης έχουν μεγαλύτερη τάση να σκευαστούν. Η αντίσταση μεταβάλλεται έντονα με το τετράγωνο του συνημίτονου της γωνίας με την οποία η διεύθυνση της μαγνήτισης προσανατολίζεται. Το σχήμα 13.27, παρακάτω, δείχνει το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης.



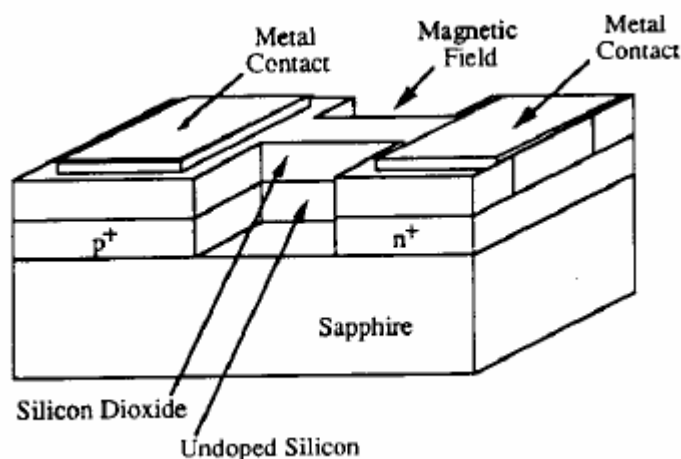
Σχήμα 13.27 Φαινόμενο μαγνητοαντίστασης.

Η αντίσταση ενός φερρομαγνητικού λεπτού υμένιο ποικίλει με τη διεύθυνση της μαγνήτισης στο υμένιο. Η αντίσταση είναι μεγαλύτερη όταν η μαγνήτιση είναι παράλληλη προς το ρεύμα και μικρότερη όταν είναι κάθετη προς αυτό. Η μαγνήτιση στρέφεται κατά την διεύθυνση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου, αλλά γενικά δεν καταλήγει στο να έχει ακριβώς την ίδια διεύθυνση με το πεδίο γιατί αυτή η διεύθυνση καθορίζεται από διάφορους παράγοντες. Ένας είναι οι εύκολοι άξονες μαγνήτισης, ο οποίος καθορίζεται από το υπάρχον μαγνητικό πεδίο κατά την διάρκεια εναπόθεσης του υμενίου. Άλλος είναι το σχήμα του υμενίου, οποίος για την περίπτωση ενός μακρύ και λεπτού υμενίου διατηρεί τη μαγνήτιση στο επίπεδο του υμενίου και τείνει να το προσανατολίσει κατά το μήκος του υμενίου. Το permalloy είναι το πιο κοινό υλικό για αισθητήρες μαγνητοαντίστασης γιατί έχει σχετικά υψηλό συντελεστή μαγνητοαντίστασης γιατί τα χαρακτηριστικά του είναι σύμφωνα με τις τεχνικές παραγωγής που εφαρμόζονται για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων πυριτίου όπως αυτά με μηδενικό συντελεστή μαγνητοσυστολής. Ένας ολοκληρωμένος αισθητήρας κανονικά αποτελείται από τέσσερις

αντιστάσεις permalloy που εναποτίθενται με sputter πάνω σε ένα υπόστρωμα πυριτίου. Οι τέσσερις αντιστάσεις σχηματίζουν μία γέφυρα.

Οι Magnetoresistive αισθητήρες με open loop ηλεκτρονικά έχουν κλίμακα ευαισθησίας από $10^{-2}G$ έως 50G και μία εξαιρετικά ευρεία συχνοτική κλίμακα από dc έως σχεδόν 1GHz. Οι αισθητήρες αυτοί είναι ελαφροί, μικροί και απαιτούν ισχύ μεταξύ 0.1-0.5mV.

13.5.8 Μαγνητοδιόδοι



Σχήμα 13.28 Μαγνητοδιόδος.

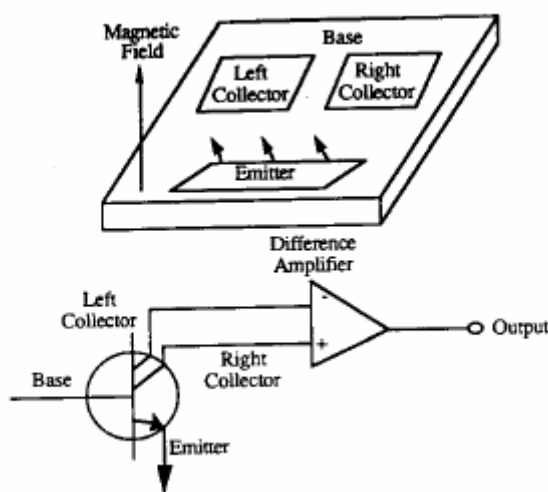
Η μαγνητοδιόδος είναι βασικά μία διόδος ημιαγωγού ή μία pn επαφή (σχήμα 13.28). Σε μία μαγνητοδιόδο, παρόλα αυτά η περιοχή p είναι χωρισμένη από την n περιοχή με μία περιοχή καθαρού πυριτίου. Πάνω από το Si υπάρχει ένα στρώμα από SiO₂ και κάτω από αυτό υπάρχει ζαφείρι, που είναι το υπόστρωμα πάνω στο οποίο κατασκευάζεται ο αισθητήρας. Αν μία μεταλλική επαφή συνδεθεί με τη καθαρά p-περιοχή δίνει ένα θετικό δυναμικό και μία μεταλλική επαφή συνδεδεμένη με την η-καθαρά περιοχή δίνει αρνητικό δυναμικό. Οπές στο p-τύπου υλικό και ηλεκτρόνια στο n-τύπου θα εκχυθούν στην περιοχή του καθαρού πυριτίου. Το ρεύμα είναι το άθροισμα το ρεύματος των οπών και του ρεύματος των ηλεκτρονίων γιατί οι αντίθετα φορισμένοι φορείς κινούνται σε u945 αντίθετες διευθύνσεις.

Μερικοί φορείς, ειδικά αυτοί κοντά στη διεπιφάνεια μεταξύ του Si και του SiO₂ ή αυτοί κοντά στη διεπιφάνεια μεταξύ του Si και του ζαφειριού θα ανασυζευχθούν. Η απώλεια φορισμένων φορέων αυξάνει την αντίσταση του υλικού. Απουσία πεδίου η ανασύζευξη στις δύο διεπιφάνειες συνεισφέρει στην αντίσταση. Ένα μαγνητικό πεδίο κάθετο στη διεύθυνση κίνησης των φορισμένων φορέων τα εκτρέπει είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω γεγονός που εξαρτάται από τη διεύθυνση του πεδίου. Τόσο τα ηλεκτρόνια όσο και οι οπές εκτρέπονται προς την ίδια διεύθυνση γιατί κινούνται σε αντίθετες διευθύνσεις. Φορισμένοι φορείς κοντά στη διεπιφάνεια μεταξύ του Si και του ζαφειριού έχουν μεγαλύτερη τάση να ανασυζευχθούν από αυτούς κοντά στην διεπιφάνεια μεταξύ του Si και του SiO₂. Έτσι αν ένα μαγνητικό εκτρέπει τους φορισμένους φορείς προς τα κάτω, η αντίσταση του υλικού είναι μεγαλύτερη από την κανονική, ενώ αν τα εκτρέπει προς τα πάνω η αντίσταση γίνεται μικρότερη της κανονικής. Η απόκριση μιας μαγνητοδιόδου στο μαγνητικό πεδίο είναι περίπου δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτή που έχει μία συσκευή silicon Hall effect. Ο αριθμός των κατάλληλων εφαρμογών για τις μαγνητοδιόδους θα

ήταν μεγαλύτερος αν η συσκευή μπορούσε να φτιαχτεί σε standard τεχνολογία πυριτίου. Γενικά οι μαγνητοдиодοι απαιτούν Si-on-insulator υπόστρωμα.

13.5.9 Μαγνητοτρανζίστορ

Αυτοί οι αισθητήρες, όπως και οι μαγνητοдиодοι, είναι συσκευές ολοκληρωμένου πυριτίου. Αν η μαγνητοдиодος είναι μία μορφή pn επαφής, το μαγνητοτρανζίστορ είναι μία μορφή ενός npn τρανζίστορ. Όπως στο τρανζίστορ, αποτελείται από ένα n-εκπομπό χωρισμένος από ένα n-συλλέκτη με μία p-βάση. Η διαφορά είναι ότι υπάρχουν δύο συλλέκτες αντί για ένα (σχήμα 13.29).

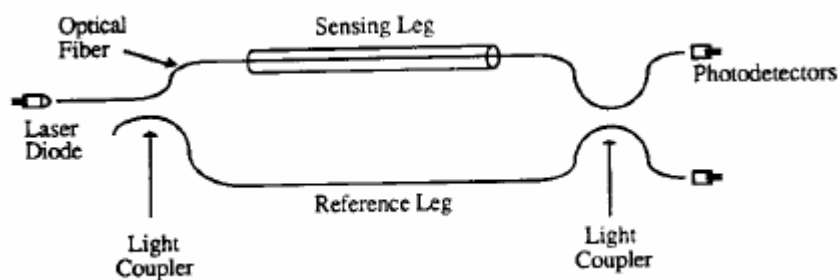


Σχήμα 13.29 Μαγνητοτρανζίστορ.

Απουσία μαγνητικού πεδίου, ίσος αριθμός φορτισμένων φορέων φτάνει στους δύο συλλέκτες. Αν υπάρχει μαγνητικό πεδίο κάθετο στη διεύθυνση κίνησης των φορτισμένων φορέων, εκτρέπονται προς τον ένα ή τον άλλο συλλέκτη, γεγονός που εξαρτάται από τη διεύθυνση του πεδίου. Οι τάσεις των δύο συλλεκτών τροφοδοτούνται από διαφορετικούς ενισχυτές των οποίων η απόδοση είναι ανάλογη του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Δύο διαφορετικά φαινόμενα χρησιμοποιούνται στα μαγνητοτρανζίστορ για την ανίχνευση μαγνητικών πεδίων. Είναι το φαινόμενο Hall και το φαινόμενο Suhl. Στο φαινόμενο Hall, όπως περιγράφηκε προηγούμενος, η δύναμη Lorentz αντισταθμίζεται από ένα αντίθετο ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο εφαρμόζεται μεταξύ των δύο συλλεκτών. Το φαινόμενο Suhl λαμβάνει χώρα όταν η δύναμη Lorentz δεν αντισταθμίζεται. Ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο προκαλεί αλλαγή στην τροχιά των κινούμενων φορέων προκαλώντας μεταβολή στην κατανομή του ρεύματος που ανιχνεύεται μεταξύ των εξόδων του συλλέκτη. Παρόλο που τα δύο φαινόμενα συμβαίνουν ταυτόχρονα, είναι πιθανόν να σχεδιαστούν συσκευές στις οποίες το εάν φαινόμενο είναι επικρατέστερο.

13.5.10 Fiber-Optic Μαγνητόμετρο

Το Fiber-Optic μαγνητόμετρο είναι σχετικά νέος αισθητήρας και βρίσκεται υπό ανάπτυξη. Αποτελείται από δύο γυάλινες ίνες που διατάσσονται ώστε να διαμορφώνουν το συμβολόμετρο March-Zender. Όπως φαίνεται στο σχήμα 13.30, παρακάτω, φως από laser περνά διαμέσου ενός διαχωριστή δέσμης μέσα στις δύο ίνες, κινείται κατά μήκος των ινών, ανασυγκροτείται σε ένα συγκεντρωτή δέσμης και καταλήγει σε ένα φωτοανιχνευτή στο τέλος κάθε ίνας. Μία από τις ίνες ή τυλίγεται γύρω ή επικαλύπτεται με ένα μαγνητοσυσταλικό υλικό που είναι ένα υλικό του οποίου οι διαστάσεις εξαρτώνται από τη διεύθυνση και το βαθμό μαγνήτισης του. Όταν το μαγνητοσυσταλικό υλικό μαγνητίζεται από ένα περιβάλλον πεδίο το μήκος της ίνας αλλάζει.



Σχήμα 13.30 Fiber Optic Μαγνητόμετρο.

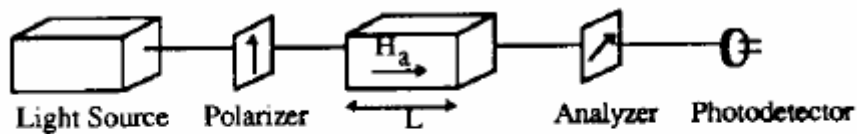
Αν το μήκος αλλάζει από ένα παράγοντα του μήκους κύματος το φως που περνά διαμέσου της ίνας φτάνει στο συγκεντρωτή δέσμης ελαφρά εκτός φάσης σε σχέση με το φως που φτάνει από την ίνα αναφοράς. Η συμβολή των δύο κυμάτων του φωτός προκαλεί στο επίπεδο του φωτός στους φωτοανιχνευτές να αλλάξει κατά ένα ποσό που εξαρτάται από τη διαφορά φάσης.

Διαφορές στην πορεία του φωτός με τιμή στα $10^{-3} m$ είναι ανιχνεύσιμες από αυτού του τύπου τα συμβολόμετρα. Η συσκευή είναι επίσης ευαίσθητη στον προσανατολισμό των γραμμών του πεδίου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει την καμπυλότητα των γραμμών του πεδίου όπως επίσης και την ισχύ του μαγνητικού πεδίου. Η πραγματοποίηση της επικάλυψης με ηλεκτρισμό ενός μαγνητοσυσταλικού υλικού πάνω σε ίνες έχει αποδειχθεί. Επιπλέον χρειάζεται προσπάθεια για να εξαλειφθεί το πρόβλημα του θορύβου και της συσκευασίας.

Τα Fiber-Optic μαγνητόμετρο έχουν κλίμακα ευαισθησίας μεταξύ $10^{-7} G$ έως $10G$. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρούν είτε σταθερά πεδία είτε πεδία που κυμαίνονται σε συχνότητες κάτω των $60 kHz$. Το μέγεθος τους εξαρτάται από την απαιτούμενη ευαισθησία, αλλά ένας τυπικός αισθητήρας είναι $4in$ μήκος και $1in$ πλάτος.

13.5.11 Magneto-Optical Αισθητήρας

Ο Magneto-Optical αισθητήρας στηρίζεται πάνω σ'ένα φαινόμενο που ανακάλυψε ο Faraday. Αυτό το γεγονός, (σχήμα 13.31), σχετίζεται με την περιστροφή του επιπέδου του πολωμένου φωτός όταν αυτό περνά μέσα από ένα μαγνητικό υλικό.



$$\text{Polarization rotation } (\Theta_F) = V \cdot L \cdot H_a$$

$$V = \text{Verdet constant}$$

$$H_a = \text{Applied field}$$

Σχήμα 13.31 Magneto-Optical Αισθητήρας.

Το φαινόμενο είναι εντονότερο σε μερικούς κρυστάλλους όταν οι διαδιδόμενες διευθύνσεις φωτός, οι κρυσταλλικοί άξονες και το εφαρμοζόμενο πεδίο είναι ευθυγραμμισμένα. Για να καταλάβουμε αυτό το φαινόμενο πόλωσης του Faraday πρέπει να θεωρήσουμε ότι ένα επίπεδο κύμα πολωμένου φωτός συγκροτείται από δύο κυκλικά πολωμένα κύματα, ένα κατά την φορά των δεικτών του ρολογιού (cw) και ένα κατά την αντίθετη φορά (ccw). Η περιστροφή πόλωσης του επίπεδου κύματος έρχεται ως αποτέλεσμα της αλλαγής των σχετικών φάσεων του cw και ccw κυμάτων. Αυτό το φαινόμενο Faraday τότε απορρέει από την αλλαγή στον κρυσταλλικό δείκτη διάθλασης, που εξαρτάται από τον αν η προήγηση των ηλεκτρονίων για το διάμηκες μαγνητικό πεδίο είναι της ίδιας και αντίθετης φοράς όπως η περιστροφή του ηλεκτρικού του κυκλικά πολωμένου φωτός. Ένας figure of merit που χρησιμοποιείται για να συγκρίνει το φαινόμενο αυτό μεταξύ των υλικών είναι η σταθερά Verdet, που έχει μονάδες γωνιακής περιστροφής ανά μονάδα εφαρμοζόμενου ανά μονάδα μήκους του υλικού.

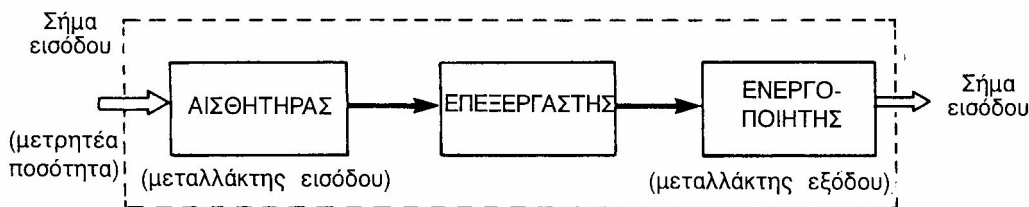
Υπάρχουν τρία βασικά κρυσταλλικά υλικά που χρησιμοποιούνται που χρησιμοποιούνται για να εκμεταλλευτούμε το φαινόμενο αυτό. Ένα κοινό υλικό ευαίσθητο στο πεδίο είναι το τέρβιον γάλλιο γρανάτης, που έχει σταθερά Verdet, ίση $0,5 \text{ min /G.cm}$

Τα μοναδικά πλεονεκτήματα των Magneto-Optical αισθητήρων έναντι των άλλων μαγνητικών αισθητήρων είναι η πολύ γρήγορη απόκριση χρόνου. Έχουν κατασκευαστεί αισθητήρες με απόκριση της τάξης των GHz. Δυστυχώς η μαγνητική ευαισθησία των αισθητήρων αυτών είναι στην καλύτερη περίπτωση μέτρια γιατί το φαινόμενο πόλωσης Faraday είναι ένα ασθενές φαινόμενο σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο της γης.

Κεφάλαιο 14^ο ΜΙΚΡΟΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΕΞΥΠΝΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

14.1 ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΙ ΕΞΥΠΝΟΙ ΚΑΙ ΕΥΦΥΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Στο σχήμα 14.1, παρακάτω, φαίνονται τα βασικά εξαρτήματα ενός συστήματος μέτρησης ή επεξεργασίας της πληροφορίας. Ως γνωστόν τα περισσότερα σήματα που προέρχονται από κάποιο αισθητήριο στοιχείο είναι από την φύση τους αναλογικά και ως εκ τούτου χρειάζεται αναλογική επεξεργασία. Ως επεξεργαστής μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε διάταξη που τροποποιεί το ηλεκτρικό σήμα που προέρχεται από έναν αισθητήρα, χωρίς να αλλάξει τη μορφή ενέργειας του σήματος. Είναι συχνά χρήσιμο να διακρίνουμε την κύρια μονάδα επεξεργασίας από την μονάδα προετοιμασίας σήματος (όπως ένας μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, ένας ενισχυτής, ή ένα φίλτρο). Η διάταξη αυτή αναφέρεται ως προεπεξεργαστής ή μετατροπέας. Το σήμα από τον επεξεργαστή χρησιμοποιείται για να απεικονίσει κάποιες πληροφορίες στον χειριστή με οποιοδήποτε τρόπο. Η συσκευή που μετατρέπει ένα ηλεκτρικό σήμα σε μια φυσική ή χημική ποσότητα αναφέρεται ως ενεργοποιητής ή μεταλλάκτης (μετατροπέας εξόδου). Για παράδειγμα η απεικόνιση της πληροφορίας σε μία οθόνη απαιτεί τη μετατροπή ενός ηλεκτρικού σήματος σε οπτικό. Στο σχήμα 14.1 εδώ, εικονίζεται ο αισθητήρας, ο επεξεργαστής σήματος (που περιλαμβάνει και τον προεπεξεργαστή) και ο ενεργοποιητής.



Σχήμα 14.1 Διάγραμμα ενός συστήματος μέτρησης ή επεξεργασίας της πληροφορίας.

Η κύρια τάση της ερευνητικής προσπάθειας πάντα ήταν να δημιουργήσει όσο γίνεται μικρότερους και ευφυέστερους αισθητήρες από ένας ήδη υπάρχοντες. Έτσι, πρόσφατες έρευνες οδήγησαν στην ανάπτυξη μικροσκοπικών αισθητήρων, οι οποίοι έχουν δημιουργήσει επανάσταση στον χώρο των οργάνων μέτρησης. Οι νέοι αυτοί μικροαισθητήρες χρησιμοποιούνται τώρα πλέον σε ευρεία κλίμακα και σε εργοστασιακές αλλά και σε οικιακές εφαρμογές.

Ο όρος “μικροαισθητήρας” χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα αισθητήρα που η φυσική του διάσταση είναι μικρότερη του χιλιοστού. Οι πρόσφατες βελτιώσεις στην κατανόηση και η εξοικίωση πλέον με τις αρχές των αισθητήρων σε συνδυασμό πάντα με τις ραγδαίες εξελίξεις στην τεχνολογία, οδήγησε στο σχεδιασμό ολοένα και καλύτερων αισθητήρων. Η μείωση του μεγέθους ενός αισθητήρα συχνά μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των εφαρμογών του σε συνδυασμό με την μείωση του κόστους. Η σημαντική πρόοδος της τεχνολογίας της μικροηλεκτρονικής και η χρησιμοποίηση του πυριτίου, επέτρεψε την παραγωγή επεξεργαστών πολύ αξιόπιστων με την μορφή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Όλη αυτή η εξέλιξη όπως ήταν φυσικό, οδήγησε στην απαίτηση και στην

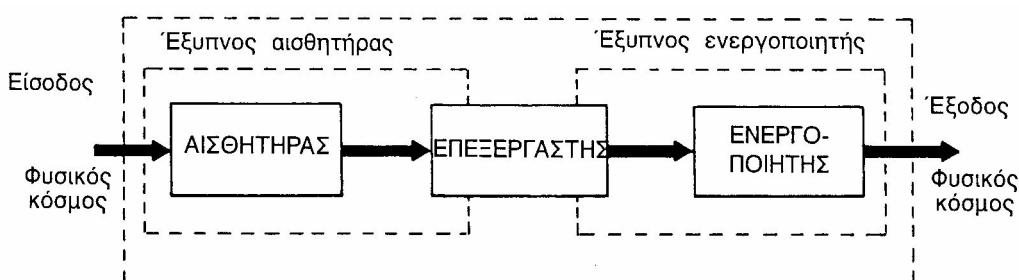
ζήτηση για μικροαισθητήρες οι οποίοι μπορούν να εκμεταλλευτούν πλήρως τις μεγάλες δυνατότητες και τα οφέλη της τεχνολογίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Οι μικροαισθητήρες κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας τεχνολογία λεπτής και παχιάς στιβάδας, καθώς και πιο πρόσφατες τεχνολογίες, που επιτρέπουν την πλήρη ενσωμάτωση αισθητήρα-επεξεργαστή - ενεργοποιητή σε ένα πλακίδιο πυριτίου, όπως αυτής της μικροεπεξεργασίας πυριτίου. Στην κατασκευή των μικροαισθητήρων, η συμβατική επίπεδη τεχνολογία πυριτίου για κατασκευή μικροηλεκτρονικών, έχει αναπτυχθεί πέρα από τα υπόλοιπα, για να εξομαλύνει την επεξεργασία τόσο των αδρανών όσο και των ενεργών υλικών.

Η τεχνολογία των μικροαισθητήρων φυσικά αποτελεί πρόκληση, διότι περιλαμβάνει την επεξεργασία ενός πολύ μεγάλου φάσματος υλικών. Αυτό από μόνο του συντελεί στην δημιουργία σοβαρής ζήτησης για την τεχνολογία των αισθητήρων.

Η επιτυχής εφαρμογή πολλών τύπων αισθητήρων στερεάς κατάστασης είχε θετικό αντίκτυπο στην αγορά και οδήγησε σε ζήτηση για αισθητήρες είτε με χαμηλότερο κόστος είτε με αυξημένη λειτουργικότητα ώστε να βελτιωθεί η ανταγωνιστικότητά . Αυτά μπορούν να επιτευχθούν μέσα από ένα υψηλότερο επίπεδο ολοκλήρωσης της συσκευής.

Επιστέφοντας, στο σχήμα 14.2, παρακάτω, εικονίζονται τα κυριότερα στοιχεία ενός συστήματος επεξεργασίας της πληροφορίας, συγκεκριμένα βλέπουμε: έναν αισθητήρα, έναν επεξεργαστή και έναν ενεργοποιητή καθώς όμως και την εφαρμογή του. Η *ενοποίηση*, ή αλλιώς η ενσωμάτωση του αισθητήρα και μέρους του επεξεργαστή, είναι συχνά επιθυμητή καθώς έτσι βελτιώνονται τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Ένας αισθητήρας με μερικώς ή πλήρως ενσωματωμένο επεξεργαστή ονομάζεται *έξυπνος ή ολοκληρωμένος αισθητήρας* (smart or integrated sensor). Αντιστοίχως, ένας ενεργοποιητής μερικώς ή πλήρως ενσωματωμένος με τον επεξεργαστή μπορεί να ονομαστεί *έξυπνος ή ολοκληρωμένος ενεργοποιητής*



Σχήμα 14.2 Η ενσωμάτωση των στοιχείων σε ένα σύστημα μέτρησης.

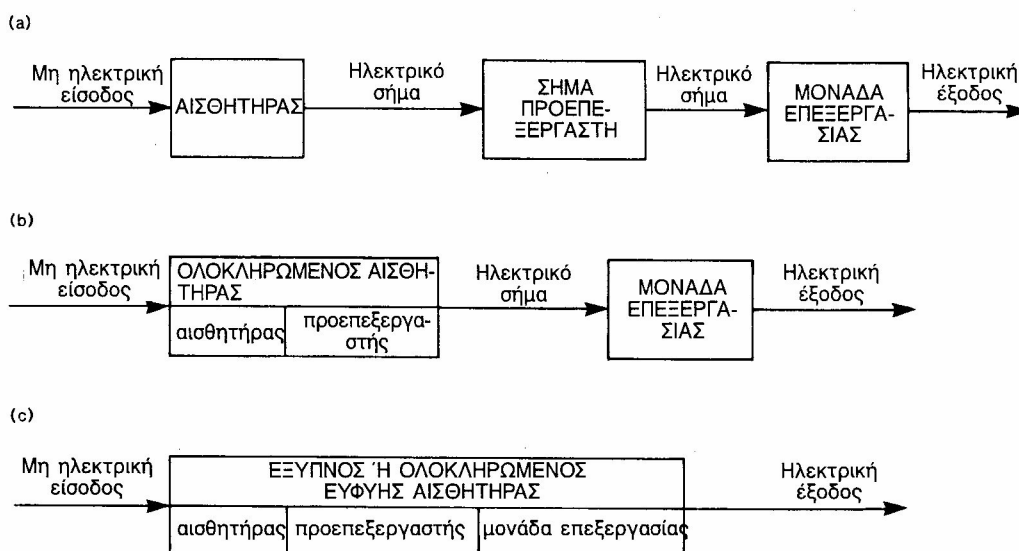
Ωστόσο οι απόψεις για τον ακριβή ορισμό του έξυπνου αισθητήρα δίστανται. Όπως είπαμε έξυπνος αισθητήρας είναι η συσκευή πάνω στην οποία έχει ολοκληρωθεί τουλάχιστον ένα αισθητήριο στοιχείο και ένα κύκλωμα επεξεργασίας σήματος. Ωστόσο το πρόβλημα με αυτό τον ορισμό είναι ότι οι περισσότεροι αισθητήρες θα ονομάζονταν έξυπνοι, ακόμη και εάν κατείχαν ένα αρκετά χαμηλό επίπεδο νοημοσύνης. Χρησιμοποιώντας τον όρο <<ολοκληρωμένος αισθητήρας>> περιγράφουμε τον τύπο αυτό του έξυπνου αισθητήρα χαμηλού επιπέδου όπου το μεγαλύτερο μέρος του προεπεξεργαστή του είναι ενσωματωμένο (σχήμα 14.3b) . Ο όρος <<έξυπνος>> διατηρείται για να δηλώσει

την επιμέρους ή αλλιώς την ολοκληρωτική ενσωμάτωση της κύριας μονάδας επεξεργασίας η οποία προσθέτει ευφυΐα (σχήμα 14.3c))

Ωστόσο όλοι οι έξυπνοι αισθητήρες πρέπει να είναι ολοκληρωμένοι και ευφυείς , ενώ κάθε αισθητήρας που έχει σημαντική ευφυΐα αλλά δεν είναι πλήρως ενσωματωμένος μπορεί να ονομαστεί *ευφυής αισθητήρας* (intelligent sensor). Ο μόνος ορισμός που παραμένει είναι εκείνος του ευφυούς αισθητήρα. Ένας ευφυής αισθητήρας πρέπει να έχει ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Εκτέλεση λογικής λειτουργίας
- Επικοινωνία με μία ή περισσότερες άλλες συσκευές
- Λήψη απόφασης με χρήση σαφών ή ασαφών δεδομένων.

Ένα μέτρο της ευφυΐας ενός αισθητήρα είναι η ικανότητά του να επιτελέσει κάποιο είδος λογικής λειτουργίας. Ένας ευφυής αισθητήρας για να επιτελέσει μια λογική λειτουργία είναι φυσικό να χρειάζεται κάποιου τύπου μονάδα επεξεργασίας. Ένας ευφυής αισθητήρας είναι ικανός να επικοινωνεί με τον χειριστή του και να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για διάφορα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν ή μπορεί να επικοινωνεί με μια άλλη συσκευή και να τροποποιεί την ίδια του συμπεριφορά και λειτουργία. Μπορεί δηλαδή στην απλούστερη μορφή του να παρέχει μια προειδοποίηση για την ύπαρξη μη φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας ή να παρέχει κάποιο μηχανισμό ελέγχου ανάδρασης. Η κατασκευή ενός αισθητήρα ο οποίος μπορεί να προειδοποιεί το χρήστη ή να προσαρμόζεται σε συνθήκες περιβάλλοντος απαιτεί κάποια ικανότητα λήψης αποφάσεων. Κατά παράδοση οι αισθητήρες χρησιμοποιούν παραμετρικά δεδομένα στη λήψη αποφάσεων, πχ το σήμα από κάποια θερμοδίοδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να παρέχει μία προστασία σε μια συσκευή όταν υπερβαίνει την κανονική θερμοκρασία λειτουργίας της. Ωστόσο φυσικά υπάρχουν και ευφυείς αισθητήρες που χρησιμοποιούν μη παραμετρικές μεθόδους.



Σχήμα 14.3 Τα 3 επίπεδα ολοκλήρωσης από τα οποία δημιουργούνται τα συστήματα αισθητήρων. Βλέπουμε : (a) Ένα σύστημα αισθητήρα , (b) τον ολοκληρωμένο αισθητήρα σε ένα σύστημα αισθητήρα και (c) ένα ολοκληρωμένο ευφυή αισθητήρα(έξυπνο αισθητήρα).

Η ολοκλήρωση του προεπεξεργαστή ή του ίδιου του επεξεργαστή σε ένα απλό μικροκύκλωμα έχει πολλά πλεονεκτήματα. Το πιο πειστικό επιχείρημα για την κατασκευή ολοκληρωμένου αισθητήρα είναι η αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο (S/N). Επίσης με την χρήση αυτή έχουμε αυξημένη λειτουργικότητα, μικρότερο μέγεθος ή βάρος με χαμηλότερο κόστος.

Οι περισσότεροι αισθητήρες έχουν τουλάχιστον δύο παραμέτρους που χρειάζεται να καθοριστούν κατά την διάρκεια της κατασκευής τους, η αντιστάθμιση και η ευαισθησία ή το κέρδος. Η διαδικασία βαθμονόμησης είναι ουσιαστική και πολλές φορές απαραίτητη κατά τη διάρκεια της ζωής ενός αισθητήρα εξ αιτίας της ολίσθησης. Έτσι για να επαναβαθμονομηθεί χειρωνακτικά η αντιστάθμιση ή το κέρδος χρειάζεται συντήρηση της συσκευής, κατά συνέπεια υπάρχει σημαντική ανάγκη για αυτοβαθμονομούμενους αισθητήρες οι οποίοι να μπορούν να πραγματοποιήσουν οι ίδιοι τη βαθμονόμηση τους.

Η ικανότητα ενός αισθητήρα να είναι αυτοελεγχόμενος, να ελέγχει την λειτουργικότητά του είναι ιδιαίτερα επιθυμητή. Μια ολοκληρωτική βλάβη, συνήθως ανιχνεύεται από το χρήστη όταν η έξοδος, είτε ρεύματος είτε τάσης, πέφτει κάτω από τις προδιαγραφές λειτουργίας του. Πάντως σε πολλές περιπτώσεις ένας αισθητήρας μπορεί να μην έχει ικανοποιητική απόδοση αλλά να παρέχει μία λογική έξοδο. Στις περιπτώσεις αυτές είναι αναγκαία μία πιο πολύπλοκη διαδικασία διασφάλισης ποιότητας.

Τέλος, να τονίσουμε ότι οι έξυπνοι αισθητήρες συχνά βελτιώνουν την απόδοσή τους μέσα από τη χρήση άλλων αισθητήρων, οι οποίοι παρακολουθούν τις ανεπιθύμητες εξαρτημένες μεταβλητές. Για παράδειγμα, η ευαισθησία ενός αισθητήρα στη θερμοκρασία θα μπορούσε να βελτιωθεί με την ενσωμάτωση μιας θερμοδιόδου κοντά στο αισθητήριο στοιχείο. Ένας έξυπνος αισθητήρας μπορεί επίσης να εξαλείψει και τα τυχαία, που μπορεί να προκύψουν, λανθασμένα σήματα. Για παράδειγμα, μία συστοιχία όμοιων αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να συζευχθεί με μικροεπεξεργαστή ο οποίος υπολογίζει τη μέση έξοδο των αισθητήρων ή απορρίπτει κάθε ανώμαλη ένδειξη με λογική επιλογή. (*πολυαίσθηση*).

14.2 Η ΕΚΛΟΓΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟΥ

Η εκλογή των κατάλληλων αισθητηρίων που θα χρησιμοποιηθούν σε ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου είναι σπουδαίας σημασίας για την καλή λειτουργία του συστήματος. Από την στιγμή που έχει ξεκαθαριστεί πια μεταβλητή είναι επιθυμητό να μετρηθεί, πρέπει να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά του αισθητηρίου : Ποιο είναι το εύρος της μέτρησης, ποια είναι η επιθυμητή διακριτική ικανότητα του οργάνου, ποια είναι η απόκριση χρόνου του αισθητηρίου, δηλαδή το πόσο γρήγορα εκτελεί την μέτρηση. Μετά την εκλογή του καταλληλότερου αισθητηρίου πρέπει να ακολουθήσει η εκλογή της τοποθέτησής του στο όλο σύστημα. Πολλές φορές έχουμε την δυνατότητα να μετρήσουμε την ίδια μεταβλητή σε πολλά σημεία του συστήματος. Σε μια τέτοια περίπτωση πρέπει να διαλέξουμε την πιο κατάλληλη θέση, εκεί δηλαδή που η μέτρηση θα γίνει και θα είναι πιο αξιόπιστη. Πρέπει ακόμη να λάβουμε υπόψη πως θα μεταφερθεί το ηλεκτρικό σήμα στη μετρητική διάταξη

διότι συχνά στο βιομηχανικό περιβάλλον παρεμβάλλονται παράσιτα που παραμορφώνουν το σήμα.

ΕΝΟΤΗΤΑ 2^η :
ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Θεωρητική ανάλυση και οι μετρήσεις, στο εργαστήριο Τεχνολογίας αυτοματισμού του τμήματος ΕΝ.ΠΕ.Τ. του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, πάνω σε διάφορα αισθητήρια θερμοκρασίας.



ΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Στο εργαστήριο Τεχνολογίας Αυτοματισμού, του τμήματος ΕΝ.ΠΕ.Τ. του Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ υπήρχε όλος ο απαραίτητος εξοπλισμός για την πραγματοποίηση και την επεξεργασία των μετρήσεων και των πειραμάτων μας με επιτυχία.

Το πρώτο βήμα, κρίνουμε σκόπιμο να αναφέρουμε, ήταν πρώτα η πλήρης εξοικείωση με την θεωρία, η οποία θα μας βοηθούσε να προχωρήσουμε με σωστό τρόπο και να κατανοήσουμε σε βάθος τα αποτελέσματα που θα βλέπαμε στις μετρήσεις μας, ή να αντιμετωπίζαμε τα όποια προβλήματα προέκυπταν κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, συνδυάζοντας έτσι με ουσιαστικό τρόπο θεωρία και πράξη. Για αυτό και κρίναμε σκόπιμο να την αναπτύξουμε και στην παρούσα ενότητα αναφέροντας για κάθε είδος αισθητηρίου χωριστά την απαιτούμενη πρώτα θεωρία του, προχωρώντας έπειτα στα χαρακτηριστικά του ιδιαίτερου αισθητηρίου που χρησιμοποιήσαμε, στις μετρήσεις και τέλος σε κάποια συμπεράσματα.

Έτσι,

Το δεύτερο βήμα ήταν να εφοδιαστούμε με τα κατάλληλα αισθητήρια θερμοκρασίας. Χρησιμοποιήσαμε το ολοκληρωμένο αισθητήριο θερμοκρασίας LM35, ένα θερμίστορ NTC(UEI 310), το αισθητήριο αντιστάσεως PT100 (πλατίνα) και ένα θερμοζεύγος τύπου K.

Με αυτά τα αισθητήρια, καθώς και με κατάλληλες μετρητικές διατάξεις που θα δημιουργούσαμε, θα παίρναμε ακολούθως κάποιες μετρήσεις και θα μπορούσαμε να

δούμε κάποια βασικά γενικά χαρακτηριστικά τους, φτάνοντας στο τέλος σε κάποιες συγκρίσεις και κάποια συμπεράσματα που αφορούσαν αυτά.

Το τρίτο βήμα ήταν να συνδυάσουμε αυτά τα αισθητήρια, το καθένα χωριστά, με τον απαιτούμενο στην κάθε περίπτωση απαραίτητο εξοπλισμό και κατόπιν να πάρουμε κάποιες μετρήσεις στο κάθε ένα από αυτά, διαμορφώνοντας παράλληλα το κατάλληλο πειραματικό περιβάλλον ανά περίπτωση, που θα μας βοηθούσε στις όσο πιο δυνατό καλύτερες, αξιόπιστες μετρήσεις και παρατηρήσεις.

Όλα ήταν έτοιμα για να ξεκινήσουν οι μετρήσεις.

Μέτρηση της θερμοκρασίας

Η θερμότητα γενικά, είναι μια μορφή ενέργειας που επηρεάζει τη συμπεριφορά των υλικών με διάφορους τρόπους και εμείς χρησιμοποιούμε αυτές τις αλλαγές συμπεριφοράς για να μετρήσουμε τη θερμοκρασία των υλικών.

Η θερμοκρασία είναι ταυτοχρόνως θερμοδυναμικό μέγεθος και θεμελιώδες μέγεθος του διεθνούς μετρητικού συστήματος (S.I.). Δεν υπάρχει ίσως άλλη κατηγορία αισθητηρίων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, για την οποία να υπάρχει τόση ποικιλία οργάνων σε σχετικά χαμηλές τιμές, όσο αυτή των αισθητηρίων θερμοκρασίας. Η μέτρηση της θερμοκρασίας είναι σημαντική σε ευρύ φάσμα εφαρμογών : από τη βελτίωση της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των θερμικών μεγεθών μέχρι την καταγραφή της κατάστασης της υγείας ενός ασθενούς.

Η ιδιαιτερότητα του μεγέθους αυτού, είναι ότι πλησιάζει περισσότερο προς μια κατάσταση παρά σε μετρήσιμη ιδιότητα. Χαρακτηριστικό είναι ότι δύο σώματα του ίδιου βάρους ή μήκους θα δώσουν το διπλάσιο βάρος ή μήκος όταν ενωθούν. Για δύο σώματα της ίδιας θερμοκρασίας η θερμοκρασία θα παραμείνει ίδια.

Για να δοθεί επαρκής ορισμός για το μέγεθος της θερμοκρασίας έχουν γίνει πολλές προσπάθειες :

- Η θερμοκρασία είναι ο βαθμός “θέρμης” ή “ψύχους” ενός σώματος (M. Planck).
- Η θερμοκρασία ενός συστήματος είναι η ιδιότητα που καθορίζει αν το σύστημα βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με άλλα συστήματα (Zemansky and Dittman – 1981).
- Η θερμοκρασία είναι η παράμετρος κατάστασης ενός συστήματος σε θερμική ισορροπία, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον ρυθμό μεταβολής του λογαρίθμου του αριθμού των εφικτών καταστάσεων συναρτήσει της ενέργειας.

Για καθημερινές ανάγκες, η θερμοκρασία μπορεί να γίνεται αντιληπτή ως το μέτρο “θέρμης ενός αντικειμένου ή η διαφορά της κατ’ αναλογία με την τάση στον ηλεκτρισμό, ως το δυναμικό που προκαλεί την μετάδοση θερμότητας.

Προκειμένου να οριστεί τώρα μια κλίμακα θερμοκρασίας, θα πρέπει να ικανοποιηθούν τρεις βασικές απαιτήσεις : 1) ο ορισμός του μεγέθους του διακριτού βήματος (βαθμού), 2) σταθερά σημεία αναφοράς προκειμένου να καθοριστούν κάποιες γνωστές θερμοκρασίες σε γνωστές συγκεκριμένες ιδιαίτερες καταστάσεις, 3) μια μέθοδος παρεμβολής μεταξύ των σταθερών σημείων.

Η χρήση π.χ. του μηδενικού νόμου της θερμοδυναμικής (δύο συστήματα σε θερμική ισορροπία με ένα τρίτο, είναι σε θερμική ισορροπία και μεταξύ τους) μπορεί να ορίζει την ισότητα δύο θερμοκρασιών, δεν ορίζει όμως και κλίμακα θερμοκρασίας.

Ίσως το βασικότερο πρόβλημα στον ορισμό της κλίμακας θερμοκρασίας είναι ο τρόπος με τον οποίο θα γίνεται η παρεμβολή μεταξύ των σταθερών σημείων-γνωστών θερμοκρασιών. Έστω π.χ. γνωστά τα σημεία 0 και 100 °C σε ένα θερμόμετρο στήλης υγρού. Η χάραξη του σημείου 50 °C μπορεί να γίνει μόνο αν θεωρηθεί γραμμική η συμπεριφορά του θερμομέτρου, ή αν εκτεθεί το θερμόμετρο σε γνωστή θερμοκρασία 50 °C οπότε και θα αποτελεί πλέον σταθερό σημείο που προέκυψε από βαθμονόμηση. Όσο περισσότερα τα γνωστά σημεία αναφοράς τόσο μικρότερη η αβεβαιότητα στον τρόπο παρεμβολής.

Όταν μετράμε την θερμοκρασία συγκρίνουμε το βαθμό θερμότητας με κάποιο άλλο συγκεκριμένο σημείο αναφοράς χρησιμοποιώντας κάποιες θερμοκρασιακές κλίμακες. Οι πιο συνηθισμένες κλίμακες για τη μέτρηση της θερμοκρασίας είναι η κλίμακα Κέλσιου (°C), η κλίμακα Fahrenheit (°F) και η κλίμακα Kelvin (°K) . Για την μέτρηση της θερμοκρασίας ορίζεται μια κλίμακα βάσει των σημείων τήξης ή βρασμού των υλικών, επειδή τα διάφορα σημεία της αναπαράγονται εύκολα με πολύ μεγάλη ακρίβεια.

Στην κλίμακα Κέλσιου, η οποία και μας απασχολεί και πρωτίστως εδώ, ορίζεται το σημείο πήξης του νερού 0 °C και η θερμοκρασία βρασμού του νερού 100 °C .

Ενδεικτικά αναφέρουμε επίσης,

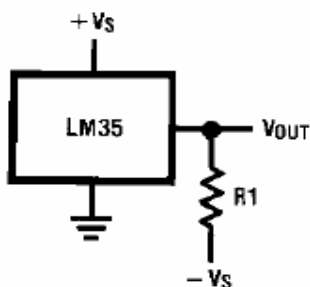
Στην κλίμακα Fahrenheit το σημείο πήξης του νερού είναι σε 32 °F και το σημείο βρασμού του νερού σε 212 °F .

Στην κλίμακα Kelvin ορίζεται το σημείο πήξης του νερού στους 273,16 °K και το σημείο βρασμού του στους 373,15 °K . Στην θερμοδυναμική κλίμακα Kelvin χρησιμοποιείται το απόλυτο μηδέν ως σημείο αναφοράς(η χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία στην οποία μπορεί να φτάσει κάποια ουσία).

Στους αισθητήρες θερμοκρασίας η έξοδος από τον αισθητήρα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας που μετρά ο αισθητήρας. Οι βασικοί μετατροπείς για την μέτρηση της θερμοκρασίας, και που εξετάζουμε και παρακάτω, είναι :

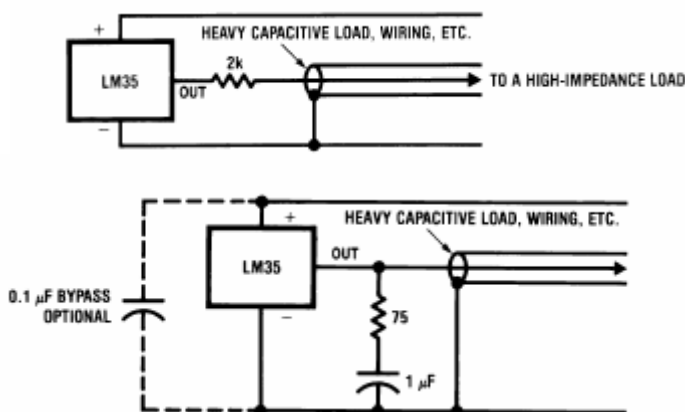
- Οι ημιαγωγικοί μετατροπείς θερμοκρασίας (π.χ ολοκληρωμένα κυκλώματα).
- Τα θερμίστορ. (θερμομετρία ηλεκτρικής αντίστασης)
- Οι μετατροπείς αντίστασης μετάλλου. (θερμομετρία ηλεκτρικής αντίστασης)
- Τα θερμοζεύγη. (θερμοηλεκτρική θερμομετρία)

μετρήσεων που ξεκινάει από $-40^{\circ}F$ ή $-40^{\circ}C$ χρησιμοποιώντας δύο τροφοδοσίες όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω.

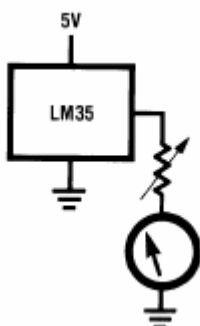


Choose $R_1 = -V_S/50 \mu A$
 $V_{OUT} = +1,500 \text{ mV at } +150^{\circ}C$
 $= +250 \text{ mV at } +25^{\circ}C$
 $= -550 \text{ mV at } -55^{\circ}C$

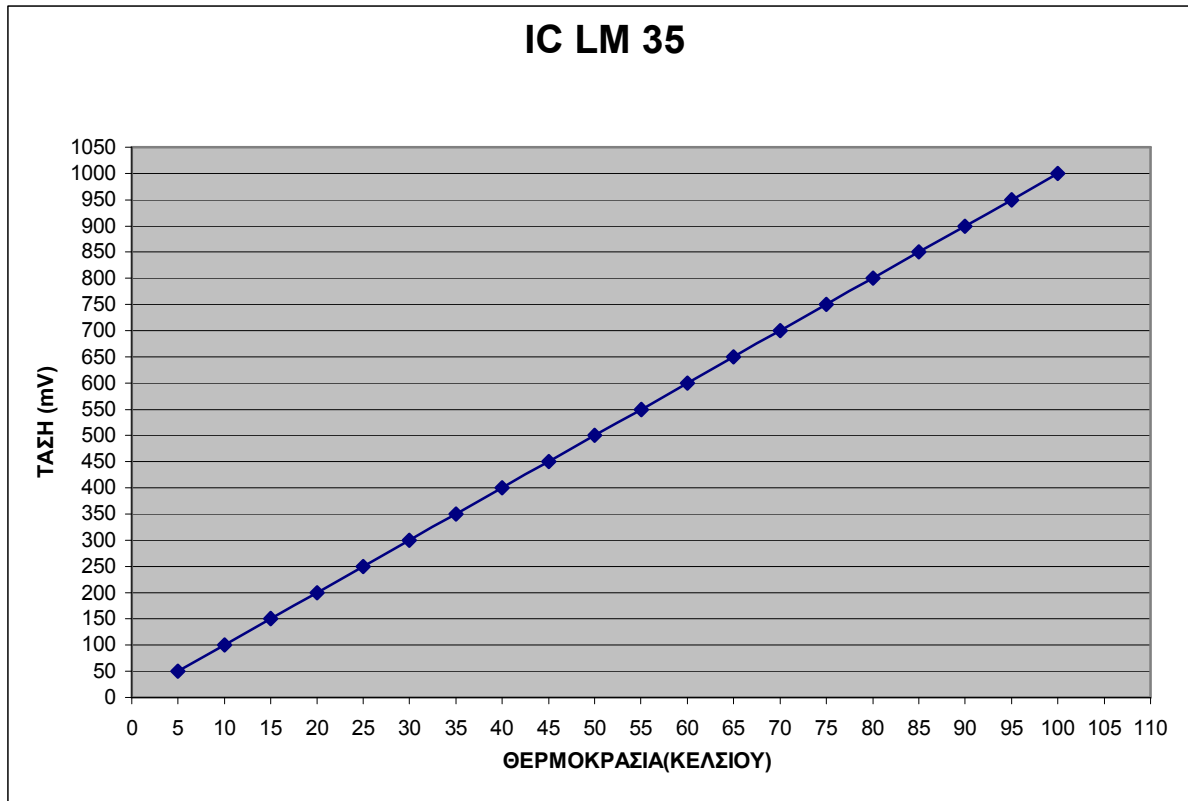
Ένα μικρό μειονέκτημα του συγκεκριμένου ολοκληρωμένου είναι ότι τείνει στην αστάθεια όταν η έξοδος του οδηγεί χωρητικά φορτία μεγαλύτερα από μερικά pF. Αυτό μπορεί να διορθωθεί με το κύκλωμα του παρακάτω σχήματος.



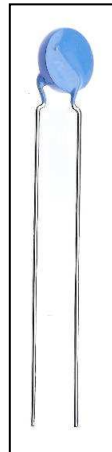
Το ολοκληρωμένο βέβαια μπορεί να χρησιμοποιηθεί απ' ευθείας σαν αναλογικό θερμόμετρο αν συνδέσουμε την έξοδό του με ένα όργανο π.χ. των 100 μA όπως φαίνεται στο σχήμα πιο κάτω. Επίσης μπορεί να οδηγήσει ένα ψηφιακό display, αν συνδέσουμε στην έξοδο έναν εξασθενητή 10:1.



<u>Θερμοκρασία</u>	<u>Τάση(mV)</u>
<u>5</u>	<u>50</u>
<u>10</u>	<u>100</u>
<u>15</u>	<u>150</u>
<u>20</u>	<u>200</u>
<u>25</u>	<u>250</u>
<u>30</u>	<u>300</u>
<u>35</u>	<u>350</u>
<u>40</u>	<u>400</u>
<u>45</u>	<u>450</u>
<u>50</u>	<u>500</u>
<u>55</u>	<u>550</u>
<u>60</u>	<u>600</u>
<u>65</u>	<u>650</u>
<u>70</u>	<u>700</u>
<u>75</u>	<u>750</u>
<u>80</u>	<u>800</u>
<u>85</u>	<u>850</u>
<u>90</u>	<u>900</u>
<u>95</u>	<u>950</u>
<u>100</u>	<u>1000</u>



2) Θερμίστορ NTC (UEI 310) :



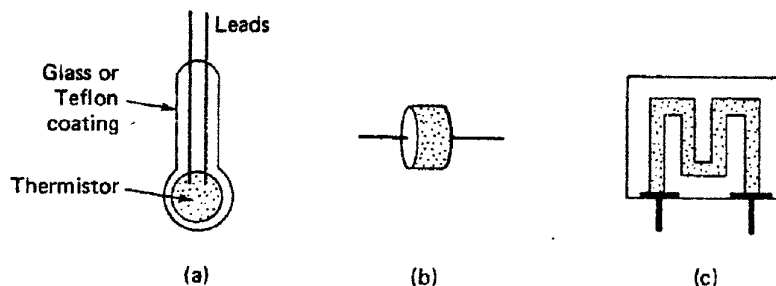
Γενικά για τα θερμίστορ

Τα θερμίστορ αποτελούνται από μια αντίσταση με μεγάλο θερμικό συντελεστή αντίστασης και χρησιμοποιούν σαν αρχή λειτουργίας την αλλαγή της αντίστασης με την θερμοκρασία.

Κατασκευάζονται σε μεγάλη ποικιλία σχημάτων και μεγεθών και καλύπτονται με διάφορα μονωτικά υλικά ώστε να διαθέτουν ηλεκτρική και μηχανική προστασία.

Τα θερμίστορ γενικά είναι ημιαγωγοί διαφόρων γεωμετρικών σχημάτων από τα οποία εξέρχονται 2 συρμάτινοι ακροδέκτες, όπως εικονίζεται και στο σχήμα παρακάτω.

Οι ημιαγωγοί εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερες αλλαγές αντίστασης για δεδομένες μεταβολές θερμοκρασίας. Κατασκευάζονται από οξειδία μετάλλων όπως, νικελίου, μαγγανίου, σιδήρου, ουρανίου, κοβαλτίου και χαλκού, όχι όμως από πυρίτιο και γερμάνιο που είναι τα πιο γνωστά ημιαγωγικά υλικά. Η αντίσταση των πιο πάνω υλικών που αναφέραμε, είναι πολύ ευαίσθητη στις μεταβολές της θερμοκρασίας.



Η θερμοκρασία με θερμίστορ μπορεί να μετρηθεί με δύο κυρίως τρόπους, είτε με τοποθέτηση σε σειρά με πηγή ρεύματος είτε μέσω γέφυρας.

Στο σχήμα παρακάτω, δίνουμε ένα απλό κύκλωμα στο οποίο χρησιμοποιείται το θερμίστορ. Εάν V_T είναι η τάση στα άκρα του θερμίστορ, αυτή από το κύκλωμα του σχήματος θα είναι:

$$V_T = (V_S R_T) / (R_T + R_S) = V_S R_T / R_S \text{ εάν } R_T \ll R_S$$

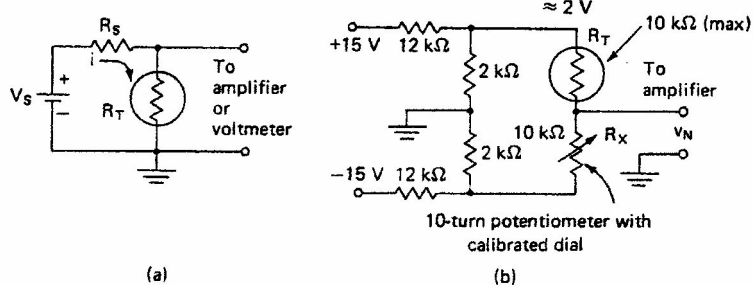
Επομένως εάν διαλέξουμε αντίσταση $R_S \gg R_T$ τότε η τάση στα άκρα του θερμίστορ είναι ανάλογη της αντίστασης αυτού κατά προσέγγιση.

Στο σχήμα παρακάτω επίσης ενδεικτικά δίνουμε ένα κύκλωμα γέφυρας, στο οποίο η τάση εξόδου ρυθμίζεται για μεταβολή της αντίστασης R_x ώστε να είναι μηδέν όταν το θερμίστορ ευρίσκεται στην θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Αποδεικνύεται ότι η τάση

$$V_n = V_b (\Delta R_T / R_T) = V_b \alpha \Delta T, \text{ όπου } R_x = R_{T\alpha} \text{ και } V_b = V_T \text{ όταν } V_n = 0.$$

Το πλεονέκτημα του κυκλώματος αντιστάθμισης είναι ότι μπορεί να μετρήσει μικρές μεταβολές θερμοκρασίας με ακρίβεια. Το μειονέκτημά του όμως, είναι ότι η γραμμικότητα της περιοχής θερμοκρασίας μέτρησης περιορίζεται σε μερικούς βαθμούς Κελσίου γύρω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος όπου έγινε η αντιστάθμιση.



Τα θερμίστορ μπορούν να έχουν πολύ μικρό μέγεθος και παρόλα αυτά να έχουν υψηλή αντίσταση και εμφανίζουν ταχεία απόκριση στις μεταβολές θερμοκρασίας. Το θερμοκρασιακό εύρος γενικά των θερμίστορ εκτείνεται συνήθως μεταξύ $-100^{\circ}C$ και $+300^{\circ}C$, αλλά είναι εφικτές και μεγαλύτερες περιοχές λειτουργίας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση θερμοκρασιών σε μικρούς χώρους, έχουν καλή επαναληψιμότητα και υψηλή διακριτική ικανότητα σε μικρές περιοχές θερμοκρασιών.

Κατά την εκλογή του θερμίστορ πρέπει να δίνεται προσοχή στην αντίστασή του στις διάφορες θερμοκρασίες. Η αντίσταση αυτή πρέπει να έχει τιμές που προσαρμόζονται στις αντιστάσεις των συστημάτων προσαρμογής (ενισχυτές, αμπερόμετρα, βολτόμετρα κ.λπ.). Η αντίσταση του θερμίστορ δεν πρέπει να είναι πολύ μικρή αν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν μεγάλοι αγωγοί σύνδεσης. Επίσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η έκκληση θερμότητας μέσα στο θερμίστορ λόγω φαινομένου Joule.

Η χρήση των θερμίστορ θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, επειδή το TCR (temperature coefficient of resistance – θερμοκρασιακός συντελεστής αντίστασης) εξαρτάται πάρα πολύ από την κατανάλωση ισχύος.

Όταν μιλάμε για θερμίστορ NTC εννοούμε το θερμίστορ με συντελεστή αντίστασης αρνητικό, που αυτό σημαίνει ελάττωση της τιμής της αντίστασης του θερμίστορ αυξανόμενης της θερμοκρασίας.



NTC UEI 310

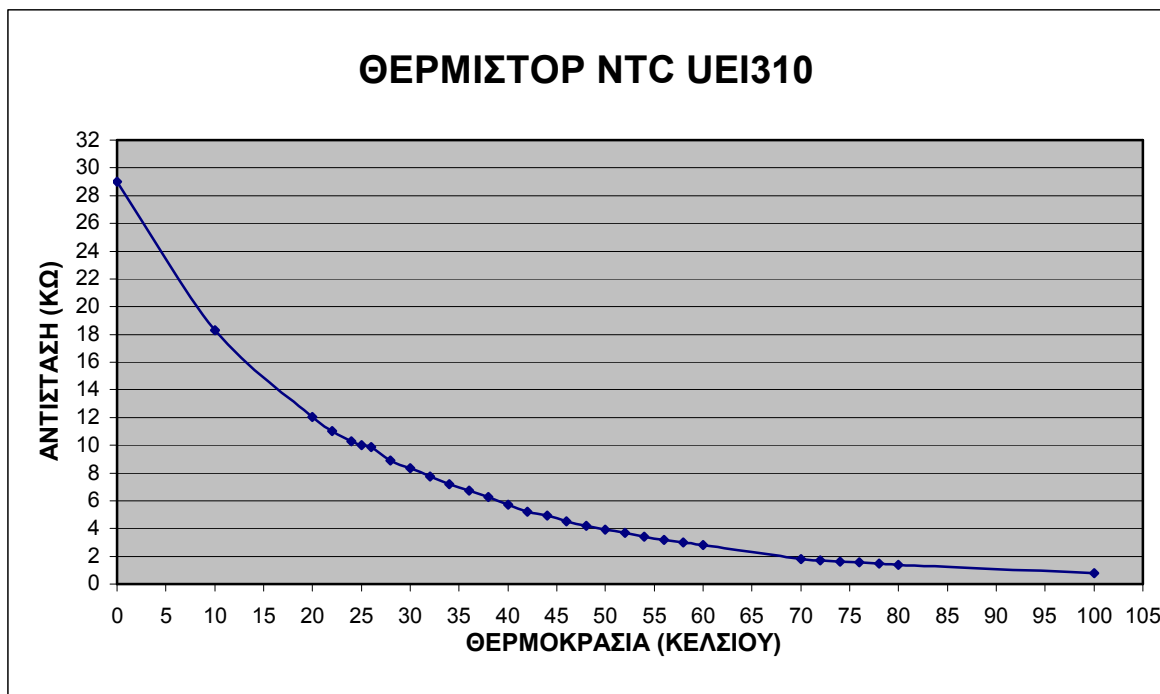
Θερμίστορ NTC (UEI 310)

- Ονομαστική αντίσταση : 10KΩ στους 25 °C
- Περιοχή θερμοκρασίας μέτρησης : (περίπου από -20 °C έως 125 °C).
- Μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα στους 25 °C : 10mA.
- Θερμική σταθερά απωλειών : 5,5 mW/ °C .
- Θερμική σταθερά καθυστέρησης : 10 sec .

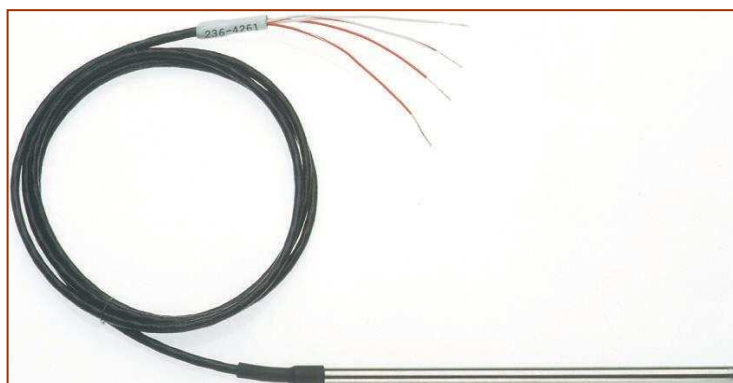
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ:

<u>Θερμοκρασία</u> (°C)	<u>Αντίσταση(KΩ)</u>
<u>0</u>	<u>29,01</u>
<u>10</u>	<u>18,30</u>
<u>20</u>	<u>12,05</u>
<u>22</u>	<u>11,00</u>
<u>24</u>	<u>10,28</u>
<u>25</u>	<u>10,00</u>
<u>26</u>	<u>9,884</u>
<u>28</u>	<u>8,910</u>
<u>30</u>	<u>8,330</u>
<u>32</u>	<u>7,747</u>
<u>34</u>	<u>7,201</u>
<u>36</u>	<u>6,730</u>
<u>38</u>	<u>6,289</u>
<u>40</u>	<u>5,695</u>
<u>42</u>	<u>5,204</u>
<u>44</u>	<u>4,915</u>
<u>46</u>	<u>4,540</u>
<u>48</u>	<u>4,201</u>
<u>50</u>	<u>3,928</u>
<u>52</u>	<u>3,670</u>
<u>54</u>	<u>3,390</u>
<u>56</u>	<u>3,170</u>
<u>58</u>	<u>2,987</u>
<u>60</u>	<u>2,795</u>
<u>70</u>	<u>1,820</u>
<u>72</u>	<u>1,710</u>
<u>74</u>	<u>1,625</u>
<u>76</u>	<u>1,545</u>

<u>78</u>	<u>1,466</u>
<u>80</u>	<u>1,389</u>
<u>100</u>	<u>0,800</u>



3) RTD - Αισθητήριο θερμοκρασίας PT100 (platinum resistance sensor) :



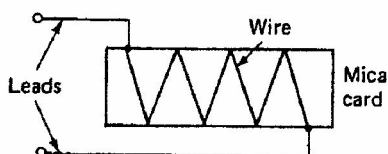
Γενικά για τα θερμομέτρα αντίστασης

Η βασική ιδέα στα μέταλλα είναι ότι η ηλεκτρική αντίστασή τους μεταβάλλεται με την θερμοκρασία.

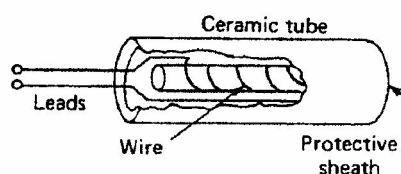
Όλα τα μέταλλα, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σαν θερμομέτρα αντίστασης. Από όλα τα μέταλλα η πλατίνα (Pt) και το νικέλιο (Ni) είναι αυτά που παρουσιάζουν γραμμικότητα σε μεγαλύτερη περιοχή θερμοκρασιών.

Το είδος του μετάλλου που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε σαν θερμομέτρο αντίστασης για μια εφαρμογή, εξαρτάται από την γραμμική περιοχή του συναρτήσει της θερμοκρασίας και από την θερμοκρασία τήξεωσ αυτού.

Στο σχήμα παρακάτω φαίνεται ο τρόπος κατασκευής των θερμομέτρων αντίστασης χωρίς προστατευτικό κάλυμμα, καθώς και με προστατευτικό κεραμικό κάλυμμα.



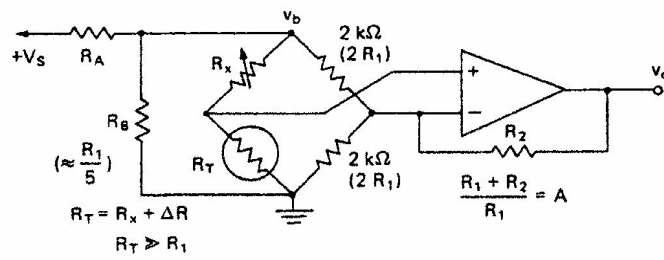
(a)



(b)

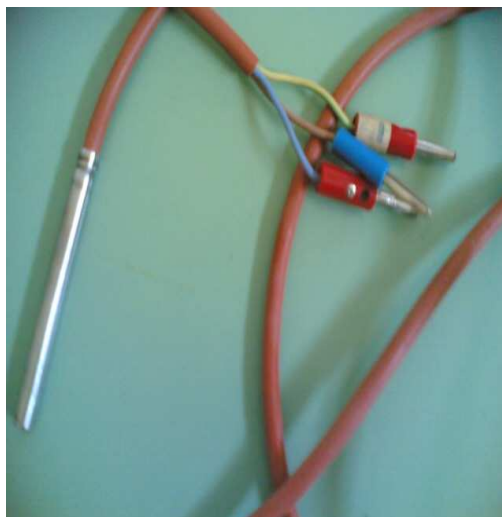
Η θερμοκρασία με RTD μπορεί να μετρηθεί με δύο κυρίως τρόπους, είτε με τοποθέτηση σε σειρά με πηγή ρεύματος, είτε μέσω γέφυρας

Μία χρησιμοποίηση των θερμομέτρων αντίστασης ως αισθητήριο εικονίζεται στο σχήμα πιο κάτω, όπου έχει προσαρμοστεί σε γέφυρα. Με την βοήθεια της μεταβλητής αντίστασης ρυθμίζουμε ώστε η τάση να γίνει μηδέν όταν ο αισθητήρας R_t ευρίσκεται στην θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Το PT100 το οποίο χρησιμοποιήσαμε, είναι ένα στοιχείο κατασκευασμένο με βάση την πλατίνα (λευκόχρυσος), που μεταβάλλει την αντίστασή του συναρτήσει της θερμοκρασίας. Το μέγεθος του είναι μικρό και συνήθως συναντάται και ερμητικά κλεισμένο μέσα σε μεταλλικό περίβλημα γιατί είναι πολύ ευαίσθητο.

Ο αγωγός από πλατίνα σχηματίζει ένα μαϊάνδρο ώστε να αυξηθεί το μήκος του και ο επηρεασμός του από την θερμοκρασία.



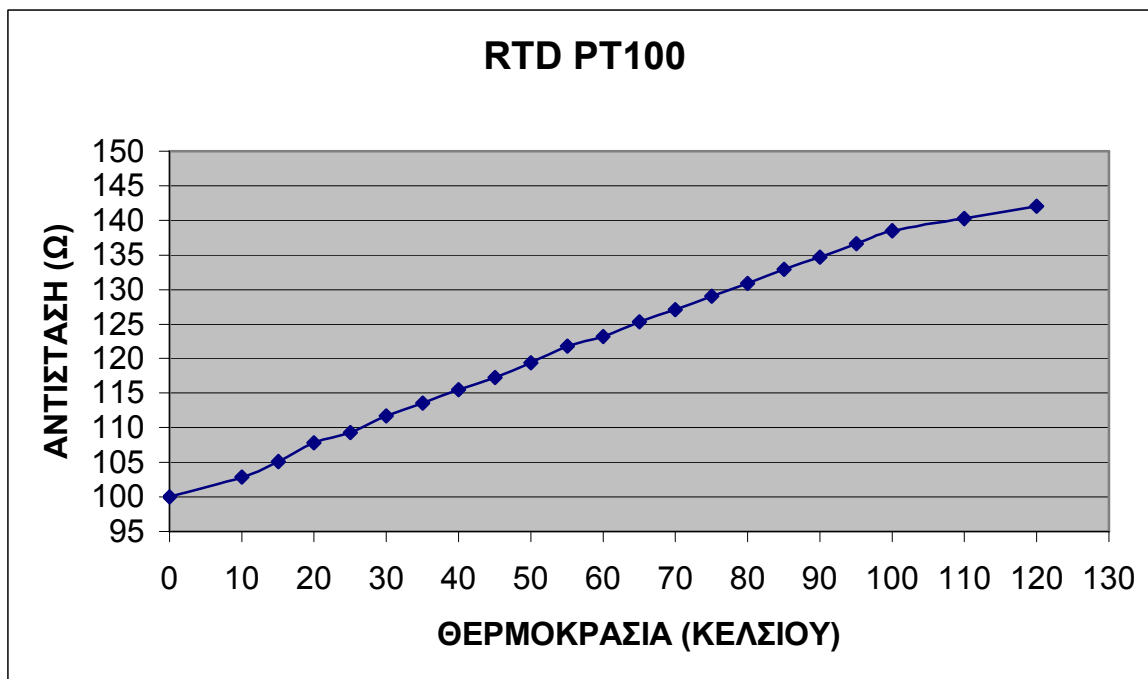
PT 100

PT100 (BS EN60751)

- Ονομαστική αντίσταση : 100Ω σε $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. (3 -wire)
- Περιοχή θερμοκρασίας μέτρησης : (περίπου από $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $850\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Ευαισθησία : περίπου $0,4\Omega/^{\circ}\text{C}$

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ:

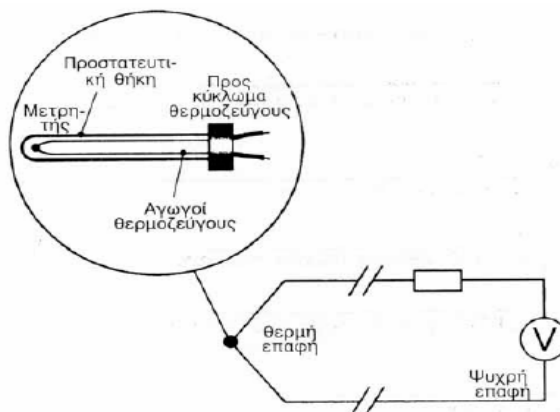
<u>Θερμοκρασία</u> <u>(°C)</u>	<u>Αντίσταση(Ω)</u>
<u>0</u>	<u>100,00</u>
<u>10</u>	<u>102,90</u>
<u>15</u>	<u>105,07</u>
<u>20</u>	<u>107,79</u>
<u>25</u>	<u>109,32</u>
<u>30</u>	<u>111,67</u>
<u>35</u>	<u>113,55</u>
<u>40</u>	<u>115,54</u>
<u>45</u>	<u>117,22</u>
<u>50</u>	<u>119,40</u>
<u>55</u>	<u>121,80</u>
<u>60</u>	<u>123,24</u>
<u>65</u>	<u>125,32</u>
<u>70</u>	<u>127,08</u>
<u>75</u>	<u>129,01</u>
<u>80</u>	<u>130,90</u>
<u>85</u>	<u>132,90</u>
<u>90</u>	<u>134,71</u>
<u>95</u>	<u>136,62</u>
<u>100</u>	<u>138,51</u>
<u>110</u>	<u>140,30</u>
<u>120</u>	<u>142,00</u>



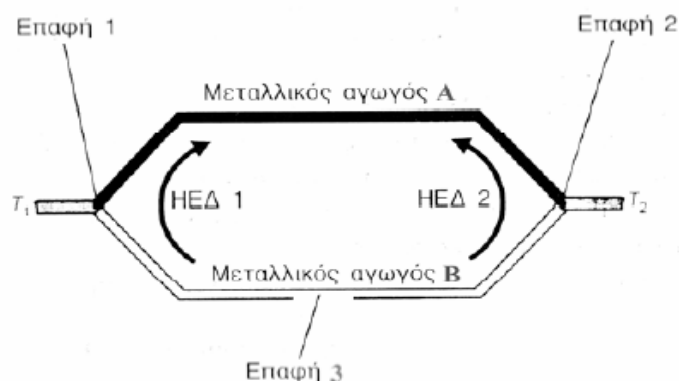
4) Θερμοζεύγος τύπου-K :

Γενικά για τα θερμοζεύγη

Τα θερμοζεύγη έχουν σαν αρχή λειτουργίας την διαφορά δυναμικού που δημιουργείται στα άκρα δύο διαφορετικών μετάλλων σε επαφή η οποία διαφορά αλλάζει ανάλογα με την αλλαγή της θερμοκρασίας που είναι εκτεθειμένο το ζεύγος.



Τα δύο ανόμοια μέταλλα συνδέονται μεταξύ τους σε δύο σημεία και σχηματίζουν ένα κλειστό κύκλωμα. Η μία επαφή βρίσκεται σε προστατευτική θήκη (σχήμα παραπάνω), και αποτελεί ουσιαστικά τον μετρητή του οργάνου, γιατί έρχεται σε επαφή με το σώμα άγνωστης θερμοκρασίας. Εάν η μία επαφή διατηρείται σε διαφορετική θερμοκρασία από την άλλη τότε θα υπάρξει ροή ρεύματος στο κλειστό κύκλωμα που σχηματίζουν τα δύο αυτά μέταλλα. Το μέγεθος και η κατεύθυνση αυτού εξαρτώνται από το είδος των μετάλλων και τη διαφορά θερμοκρασίας των επαφών. Το μέγεθος της ΗΕΔ που θα προκύψει στην παραπάνω περίπτωση είναι μικρή της τάξης λίγων mV.



Εάν και οι δύο επαφές του θερμοζεύγους ευρίσκονται στην ίδια ακριβώς θερμοκρασία, τότε δεν θα δημιουργηθεί συνολική ΗΕΔ. Εάν η θερμοκρασία της μίας επαφής αρχίσει

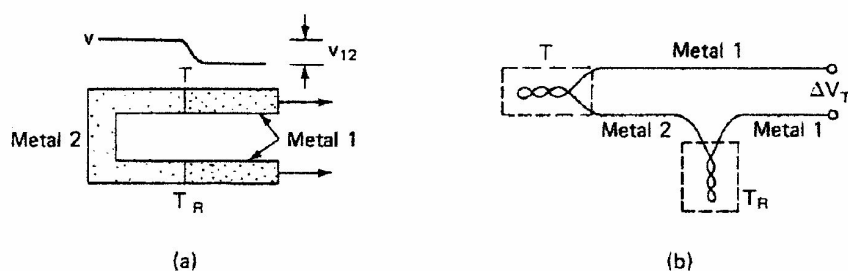
να αλλάζει και της άλλης όχι, τότε θα δημιουργηθεί μία ΗΕΔ η οποία θα μεγαλώνει όσο αυξάνει η διαφορά θερμοκρασίας. Αυτή είναι και η αρχή λειτουργίας του θερμοζεύγους

Βλέποντας το σχήμα πιο πάνω, αν το μέταλλο Α και το μέταλλο Β είναι διαφορετικά και η επαφή 1 βρίσκεται σε θερμοκρασία T_1 και η επαφή 2 σε θερμοκρασία T_2 τότε λόγω του θερμοηλεκτρικού φαινομένου δημιουργούνται μικρές ΗΕΔ στις 2 επαφές, το αλγεβρικό άθροισμα των δύο ΗΕΔ δεν είναι μηδέν και έτσι θα κυκλοφορήσει ένα ηλεκτρικό ρεύμα μέσα από τους αγωγούς το οποίο θα προσδιορίζεται από τον νόμο του ohm $I = \frac{E}{R}$, όπου E είναι η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται και R η ωμική αντίσταση του κυκλώματος.

Αν το σύρμα από υλικό κοπεί στην θέση 3 και συνδεθεί ένα βολτόμετρο άπειρης εσωτερικής αντίστασης η ένδειξη του βολτομέτρου θα είναι ίση με την θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη E. (Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο είναι τέτοιο, ώστε όταν δύο δεδομένα μέταλλα έχουν επαφές που ευρίσκονται σε δεδομένες διαφορετικές θερμοκρασίες, η αναπτυσσόμενη συνολική ΗΕΔ είναι πάντοτε η ίδια. Επομένως αυτή μπορεί να μετρηθεί και να βαθμονομηθεί σε μονάδες θερμοκρασίας).

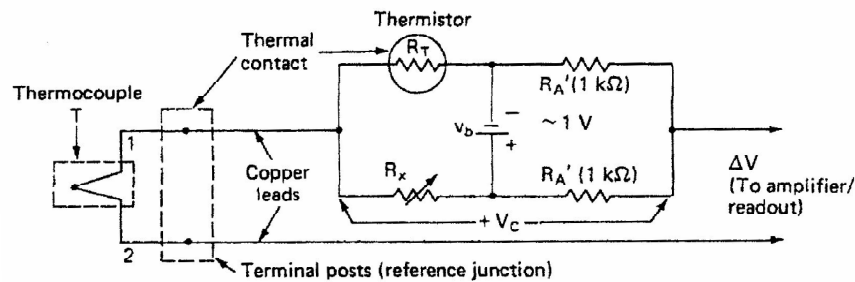
Συνοψίζοντας,

Εάν τα δύο μέταλλα δημιουργούν σχηματισμό δύο ενώσεων όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω τότε η θερμοηλεκτρική τάση ΔV είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta T = T - T_r$ σύμφωνα με τον νόμο $\Delta V = C(T - T_r)$, όπου C μια σταθερά που εξαρτάται από την φύση των δύο μετάλλων και ελάχιστα από την θερμοκρασία. Η μικρή μεταβολή του C από την θερμοκρασία σημαίνει ότι η θερμοηλεκτρική τάση ΔV είναι προσεγγιστικά ανάλογος της διαφοράς θερμοκρασίας $(T - T_r)$. Η θερμοκρασία T_r λέγεται θερμοκρασία αναφοράς και για τον λόγο αυτό στα εργαστήρια το τμήμα αυτό του θερμοζεύγους τοποθετείται σε πάγο με νερό που η θερμοκρασία του είναι $0^\circ C$ οπότε η θερμοηλεκτρική τάση ΔV είναι ανάλογη της απόλυτου θερμοκρασίας T. Στο σχηματισμό θερμοζεύγους μιας επαφής του σχήματος παρακάτω η θερμοκρασία αναφοράς T_r είναι προφανώς η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



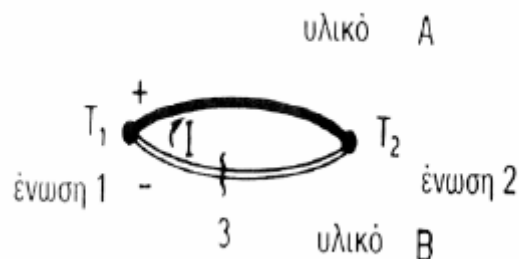
Όσον αφορά τώρα για την μέτρηση της θερμοκρασίας, τα ηλεκτρονικά όργανα αξιώσεων που μετρούν θερμοκρασία από αισθητήρια θερμοζεύγη, πρέπει με κάποιον τρόπο να λαμβάνουν υπ' όψιν την θερμοκρασία αναφοράς του περιβάλλοντος και να διορθώνουν τις τιμές του θερμοστοιχείου προσθέτοντας τον όρο CT_r ώστε οι εκάστοτε που εμφανίζονται ψηφιακά στο όργανο μέτρησης να αντιστοιχούν στις απόλυτες τιμές ($T_r=0$). Η αρχή της τεχνικής αυτής φαίνεται στο σχήμα παρακάτω, όπου ένα

θερμίστορ, που εκτίθεται στο περιβάλλον, ευρίσκεται σε κύκλωμα γέφυρας ώστε στις εκάστοτε μετρήσεις να προστίθεται ο παράγων CTr. Η τεχνική αυτή ονομάζεται “Ψυχρά ένωσης” (Cold junction).

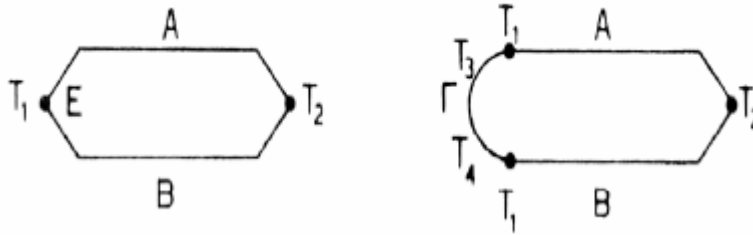


Για την χρήση και την μέτρηση ενός θερμοζεύγους αναφέρουμε τις παρακάτω πέντε χρήσιμες ιδιότητες :

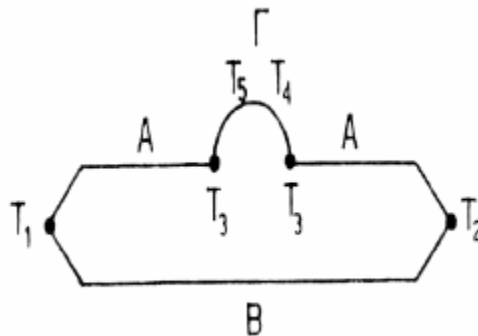
A) Εάν τα δύο υλικά του θερμοζεύγους είναι ομοιογενή η θερμοηλεκτρεγερτική του δύναμη δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία κανενός σημείου του κυκλώματος πέρα από τις θερμοκρασίες των ενώσεων 1 και 2.



B) Εάν υποθέσουμε στο ακόλουθο σχήμα ότι η θερμοκρασία της ένωσης 1 είναι T_1 και της ένωσης 2 είναι T_2 και η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη είναι E , και έστω ότι καταστρέφεται η ένωση 1 και μεταξύ των υλικών A και B παρεμβάλλεται κάποιο άλλο υλικό Γ. Αν η θερμοκρασία των νέων ενώσεων ΒΓ και ΓΑ είναι T_1 , τότε η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη θα είναι ίση με E ακόμη και στην περίπτωση που η θερμοκρασία των τμημάτων του Γ έξω από τις ενώσεις ΒΓ και ΓΑ είναι διαφορετική από την T_1 .



Γ) Εάν στο παραπάνω σχήμα κοπεί ένα από τα δύο υλικά A ή B (σχήμα παρακάτω) και παρεμβληθεί ένα άλλο υλικό Γ, η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη δεν μεταβάλλεται με την προϋπόθεση ότι οι ενώσεις ΑΓ και ΓΑ που δημιουργούνται θα είναι στην ίδια θερμοκρασία T_3 ακόμη και αν η θερμοκρασία του Γ έξω από τις ενώσεις είναι διαφορετική από την T_3 .

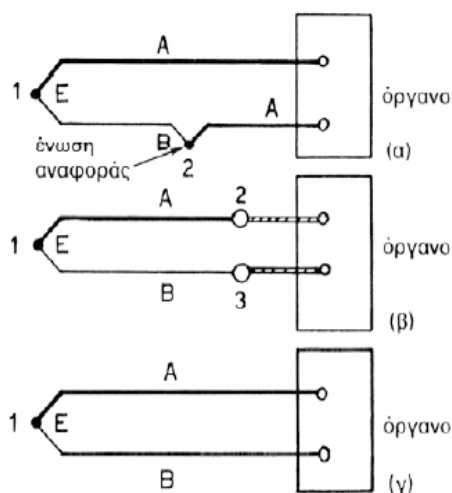


Δ) Έστω ότι ένα θερμοζεύγος παράγει μία θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη E_1 , όταν οι θερμοκρασίες των ενώσεων 1 και 2 είναι T_1 και T_2 αντίστοιχα.

Όταν οι θερμοκρασίες των ενώσεων 1 και 2 είναι τώρα T_2 και T_3 αντίστοιχα έστω ότι η παραγόμενη θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη είναι E_2 . Αν οι θερμοκρασίες των ενώσεων 1 και 2 είναι T_1 και T_3 αντίστοιχα η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη που θα παραχθεί θα είναι $E_1 + E_2$.

Ε) Αν η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη μεταξύ των υλικών A και Γ είναι E_{AG} και μεταξύ των υλικών Γ και B είναι E_{GB} η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη μεταξύ των υλικών A και B θα είναι $E_{AG} + E_{GB}$.

Όσον αφορά την μέτρηση της θερμοηλεκτρεγερτικής δύναμης E και την αντιστοίχησή της σε κάποια θερμοκρασία χρησιμοποιούνται ως γνωστόν όργανα μέτρησης τάσης τα οποία είναι σε κάποια απόσταση από την ένωση του θερμοζεύγους. Παρακάτω δίνουμε τις συνδέσεις με το όργανο μέτρησης.



Η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη E (με βάση τις ιδιότητες (Α), (Β) και (Γ) που αναφέραμε παραπάνω) εξαρτάται μόνο από τις θερμοκρασίες στις διάφορες ενώσεις 1,2,3 και στους ακροδέκτες του οργάνου. Η σύνδεση (α) πιο πάνω, αναφέρεται στην ιδιότητα (Γ), οι δε συνδέσεις (β) και (γ) αναφέρονται στην ιδιότητα (Β). Για την σωστή μέτρηση της E όσον αφορά τις συνδέσεις (α) και (γ) πρέπει οι ακροδέκτες του οργάνου να βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία. Και για την σωστή μέτρηση της E σύμφωνα με την σύνδεση (β) πρέπει οι ενώσεις 2 και 3 του θερμοζεύγους με τα καλώδια προέκτασης να βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία. Οι ενώσεις αυτές λέγονται ενώσεις αναφοράς και η θερμοκρασία τους λέγεται θερμοκρασία αναφοράς.

Τα δύο μέταλλα διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του θερμοζεύγους, και έτσι έχουμε τους λεγόμενους τύπους θερμοζεύγων, όπως τύπου -K, -J, -E, -T, -R, -S κ.α.

-Να τονίσουμε ότι, η τάση που δημιουργείται στα άκρα των μετάλλων είναι ιδιαίτερα μικρή, για αυτό πολλές φορές είναι απαραίτητο να γίνει χρησιμοποίηση ενισχυτικών διατάξεων για την σωστή και ακριβή ανάγνωση της τάσης.-

Το θερμοζεύγος που χρησιμοποιήσαμε, ήταν τύπου-K, Νικελίου- χρωμίου /αλουμινίου (Cr-Al).



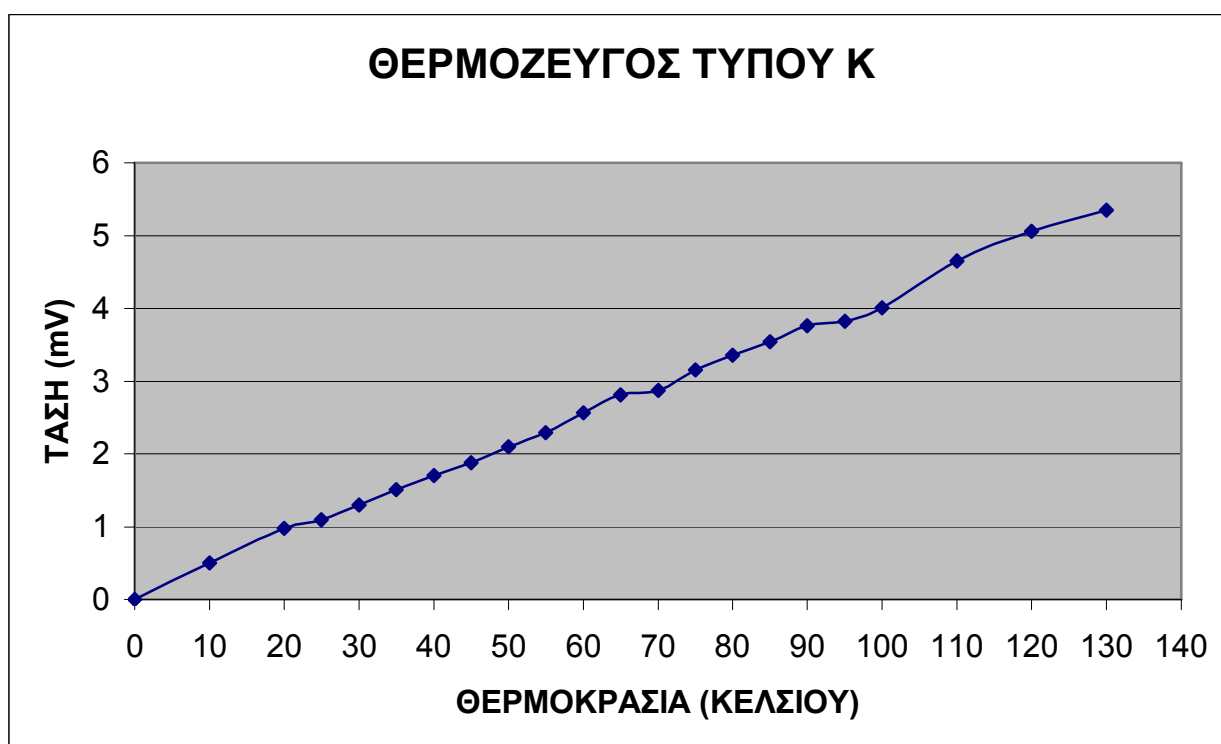
ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΟΣ ΤΥΠΟΥ-K

- Τύπου-K (Χρωμιοκικέλιο /αλουμέλ - 90% Ni + 10% Cr / 95% Ni + 2% Al + 2% Mn + 1% Si -)
- Περιοχή θερμοκρασίας μέτρησης : (περίπου από -250°C έως 1200°C).
- Μέγιστο σχετικό σφάλμα (%) : $\pm 0,75$.
- Μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία : 1300°C περίπου.
- Ευαισθησία : περίπου $0,040\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$.
- Δεν χρειάζεται τροφοδοσία.

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ:

<u>Θερμοκρασία</u>	<u>Τάση(mV)</u>
<u>0</u>	<u>0,000</u>
<u>10</u>	<u>0,500</u>
<u>20</u>	<u>0,980</u>

<u>25</u>	<u>1,093</u>
<u>30</u>	<u>1,299</u>
<u>35</u>	<u>1,504</u>
<u>40</u>	<u>1,697</u>
<u>45</u>	<u>1,880</u>
<u>50</u>	<u>2,100</u>
<u>55</u>	<u>2,290</u>
<u>60</u>	<u>2,560</u>
<u>65</u>	<u>2,810</u>
<u>70</u>	<u>2,870</u>
<u>75</u>	<u>3,155</u>
<u>80</u>	<u>3,359</u>
<u>85</u>	<u>3,542</u>
<u>90</u>	<u>3,760</u>
<u>95</u>	<u>3,820</u>
<u>100</u>	<u>4,010</u>
<u>110</u>	<u>4,653</u>
<u>120</u>	<u>5,056</u>
<u>130</u>	<u>5,347</u>



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

-Το ολοκληρωμένο αισθητήριο θερμοκρασίας **LM35**, σε σχέση με τα υπόλοιπα στοιχεία, είναι όπως διαπιστώσαμε ένας ακριβής μετατροπέας θερμοκρασίας σε τάση. Δίνει μια καλιμπραρισμένη γνωστή σκάλα θερμοκρασίας (άμεση βαθμονόμηση σε κλίμακα Κέλσιου).

Επίσης παρουσιάζει την καλύτερη γραμμικότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα αισθητήρια (βλέποντας και τις καμπύλες) και δίνει μεγάλη τιμή εξόδου. Παρόλο του χαμηλού του κόστους του, έχει γενικά πολύ καλή απόδοση και ταυτόχρονα είναι πολύ εύκολο στην χρήση του. Το LM35 τέλος να σημειώσουμε ότι χρειάζεται τροφοδοσία, παρουσιάζει αυτοθέρμανση (χαμηλή) και η θερμοκρασία μέτρησης έχει περιορισμένο σχετικά εύρος.

-Τα θερμίστορ ανήκουν στην κατηγορία των θερμομέτρων αντίστασης. Αποτελούνται από μια αντίσταση με μεγάλο θερμικό συντελεστή αντίστασης. Κατασκευάζονται από οξειδία μετάλλων, υλικά πολύ ευαίσθητα στις μεταβολές της θερμοκρασίας, και καλύπτονται με διάφορα μονωτικά υλικά ώστε να διαθέτουν ηλεκτρική και μηχανική προστασία. Τα θερμίστορ όπως διαπιστώσαμε είναι ημιαγωγικά υλικά που παρουσιάζουν ελάττωση της ηλεκτρικής τους αντίστασης με την αύξηση της θερμοκρασίας (NTC). Αφ' ενός η ελάττωση αυτή έρχεται σε αντίθεση με την αντίστοιχη αύξηση που υφίστανται οι αγωγοί και άρα και τα RTD (όπως διαπιστώσαμε στην περίπτωση του PT100), αφ' ετέρου είναι ιδιαίτερα έντονη καθιστώντας τα θερμίστορ αισθητήρες μεγάλης ευαισθησίας σε συγκεκριμένα εύρη θερμοκρασιών. Γενικά η ευαισθησία των θερμίστορ θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι τέτοιας τάξεως, ώστε να είναι περίπου 100 φορές μεγαλύτερη από ένα RTD (PT100) και 1000 φορές μεγαλύτερη από κάποιο τυπικό θερμοστοιχείο. Η μεγάλη τους εξάρτηση από την θερμοκρασία αποτελεί μειονέκτημα (περιορισμένο εύρος μέτρησης του κάθε αισθητήρα). Τα θερμίστορ έχουν γενικά πολύ υψηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης και δεν υπόκεινται σε επίδραση των αντιστάσεων των συνδετικών αγωγών όπως τα RTD. Είναι από την κατασκευή τους ανθεκτικά σε δυσμενή περιβάλλοντα. Έχουν μικρή χρονική σταθερά και άρα είναι κατάλληλα για δυναμικές μετρήσεις. Για την βαθμονόμηση των θερμίστορ γίνεται μια πολύ μεγάλης ακριβείας μέτρηση της αντίστασής του.

Το θερμίστορ (NTC - UEI 310), όπως παρατηρήσαμε και από τις καμπύλες που εξάγαμε από τις μετρήσεις, είναι θα λέγαμε μη γραμμικό. Παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία (εκατοντάδες $\Omega / ^\circ C$), πράγμα επίσης που βοηθάει στη μέτρηση πολύ μικρών διαφορών θερμοκρασίας. Δίνει μεγάλη τιμή εξόδου(καλύτερη προσαρμογή με τα όργανα μέτρησης) και είναι γρήγορο. Επίσης παρουσιάζει καλή ευστάθεια μεγάλου χρόνου και έχει καλή γενικά ακρίβεια (ακρίβεια διασποράς : $0,01 - 1 ^\circ C$). Έχει σχετικά μικρή περιοχή θερμοκρασιών (περίπου από $-20 ^\circ C$ έως $125 ^\circ C$ -- πλήρης δυνατότητα), χρειάζεται τροφοδοσία και είναι αυτοθερμαινόμενο.

-Το θερμοζεύγος όπως είδαμε, αποτελείται από 2 μεταλλικούς αγωγούς (θερμοστοιχεία) που ενώνονται σε ένα τουλάχιστο σημείο σχηματίζοντας την θερμοηλεκτρική επαφή. Η επαφή τοποθετείται μέσα στο υλικό του οποίου πρόκειται να μετρήσουμε την θερμοκρασία, ενώ οι αντίθετες άκρες των συρμάτων διατηρούνται σε κάποια σταθερή θερμοκρασία αναφοράς. Όταν η θερμοκρασία αναφοράς είναι διαφορετική από την θερμοκρασία της επαφής αναπτύσσεται ανάμεσα στις 2 αυτές επαφές ένα δυναμικό. Η έξοδος λοιπόν ενός θερμοστοιχείου είναι μια διαφορά δυναμικού (μικρής τιμής), η οποία είναι άμεσα εξαρτώμενη από την θερμοκρασιακή διαφορά που επικρατεί ανάμεσα στις επαφές του. Τα θερμοζεύγη λοιπόν βαθμονομούνται ως προς μια θερμοκρασία αναφοράς (η διαφορά δυναμικού που προκύπτει από την θερμοκρασιακή διαφορά σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς, εξαρτάται από τον συνδυασμό των θερμοστοιχείων από τον οποίο και προκύπτει ο τύπος του θερμοζεύγους). Το όλο παραπάνω σκεπτικό λειτουργίας είναι και αυτό που κάνει το θερμοζεύγος να διαφέρει από τα υπόλοιπα αισθητήρια, όσον αφορά την μέτρησή του. Η όλη παραπάνω διαδικασία δεν απαιτεί τροφοδοσία.

Το θερμοζεύγος (τύπου-K), όπως παρουσιάζεται και από την καμπύλη τάσης-θερμοκρασίας, δεν παρουσιάζει τόσο καλή γραμμικότητα, παρά ταύτα μπορεί να δώσει μεγάλη περιοχή μέτρησης θερμοκρασιών (περίπου από $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ -- πλήρης δυνατότητα). Το θερμοζεύγος χρειάζεται αναφορά. Επίσης δεν είναι τόσο ευαίσθητο (δεκάδες $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$) και τόσο σταθερό. Δεν χρειάζεται τροφοδοσία και δίνει γενικά μικρή τάση στην έξοδο. (Ακρίβεια διασποράς : μερικοί βαθμοί Κέλσιου).

-Τα RTD ανήκουν και αυτά στην κατηγορία των θερμομέτρων αντίστασης, σε αντίθεση όμως με τα θερμίστορ που χρησιμοποιούν ημιαγωγικό υλικό αυτά χρησιμοποιούν μεταλλικό στοιχείο αντίστασης. Έτσι, τα RTD αποτελούνται από λεπτό μεταλλικό αγωγό επί μονωτικού στηρίγματος και προστατευμένου από τον περιβάλλον χώρο με ειδικό περίβλημα. Η βασική ιδέα στα μέταλλα είναι ότι η ηλεκτρική αντίστασή τους μεταβάλλεται με την θερμοκρασία. Όπως διαπιστώσαμε η ηλεκτρική αντίσταση ενός μεταλλικού αγωγού (RTD) αυξάνεται συναρτήσει της θερμοκρασίας, ενώ αυτή του θερμίστορ όπως είδαμε είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας. Τα RTD σε γενικές γραμμές είναι πιο κατάλληλα για στατικές συνθήκες (στις δυναμικές είναι αργά). Μόνη εξαίρεση είναι η χρήση πολύ λεπτών αγωγών PT ($\square 0,01\text{cm}$) για μέτρηση θερμοκρασίας σε διαβρωτικά περιβάλλοντα οπότε και η πολύ μικρή αδράνεια του αισθητήρα οδηγεί σε μικρή χρονική σταθερά αλλά υπάρχει ο κίνδυνος θραύσης. Μια εφαρμογή που κερδίζει συνεχώς έδαφος είναι η χρήση "μεμβρανών" πλατίνας, για αύξηση της αντοχής και σύγχρονη μείωση της χρονικής σταθεράς. Βασικό χαρακτηριστικό των RTD είναι η γενικά πολύ καλή ακρίβεια και σταθερότητα που παρουσιάζουν. Τα RTD υπόκεινται σε επίδραση των αντιστάσεων των συνδετικών αγωγών και έχουν γενικά χαμηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης.

Το RTD (PT100) θα λέγαμε, ότι είναι περισσότερο γραμμικό από το θερμοζεύγος και ακόμη περισσότερο γραμμικό από το θερμίστορ. Λόγω και της πλατίνας παρουσιάζεται γραμμικότητα σε ακόμα μεγαλύτερη περιοχή θερμοκρασιών, συγκριτικά πάντα με το θερμοζεύγος και το θερμίστορ. Παρουσιάζει πολύ καλή ακρίβεια ($0,01 - 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$) και είναι πολύ σταθερό. Δίνει σχετικά μεγάλη περιοχή μέτρησης θερμοκρασιών (περίπου από $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ -- πλήρης δυνατότητα). Το RTD επίσης είναι κάπως

περισσότερο ευαίσθητο από το θερμοζεύγος ($0,1$ - δεκάδες $\Omega/^{\circ}C$), αλλά λιγότερο ευαίσθητο συγκριτικά με το θερμίστορ. Παρουσιάζει γενικά μικρή απόλυτη αντίσταση και μικρό ΔR .

Γενικά, συνοψίζοντας:

Όσον αφορά κατά πρώτον, το PT100 (RTD), το θερμοζεύγος (K), και το θερμίστορ (NTC UEI 310) :

-Το PT100 γενικά είναι πιο σταθερό, πιο ακριβές (έχει την καλύτερη ακρίβεια διασποράς) και παρουσιάζει καλύτερη γραμμικότητα από το θερμοζεύγος και ακόμα καλύτερη συγκριτικά με το θερμίστορ(που είναι μη γραμμικό). Το θερμοζεύγος έχει καλύτερο χρόνο απόκρισης από το PT100. Επίσης το θερμοζεύγος μπορεί να δώσει πρακτικά, την υψηλότερη περιοχή θερμοκρασιών και έχει τον καλύτερο συντελεστή απόδοσης σχετικά με το PT100 και με το θερμίστορ, αλλά δεν είναι τόσο σταθερό και ευαίσθητο. Το θερμίστορ είναι το περισσότερο ευαίσθητο και το πιο γρήγορο από τα παραπάνω.

Ωστόσο, την καλύτερη γραμμικότητα από όλα τα παραπάνω που αναφέραμε, την παρουσιάζει το LM35 το οποίο δίνει και μια γνωστή καλιμπραρισμένη σκάλα θερμοκρασίας (ακριβής μετατροπέας θερμοκρασίας σε τάση). Βέβαια να σημειώσουμε το περιορισμένο του εύρους θερμοκρασιών μέτρησης του συγκεκριμένου αισθητηρίου.