

**ΤΕΙ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ**

ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ – ΕΠΟΠΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ - INTERFACES

Χ. ΤΣΩΝΟΣ

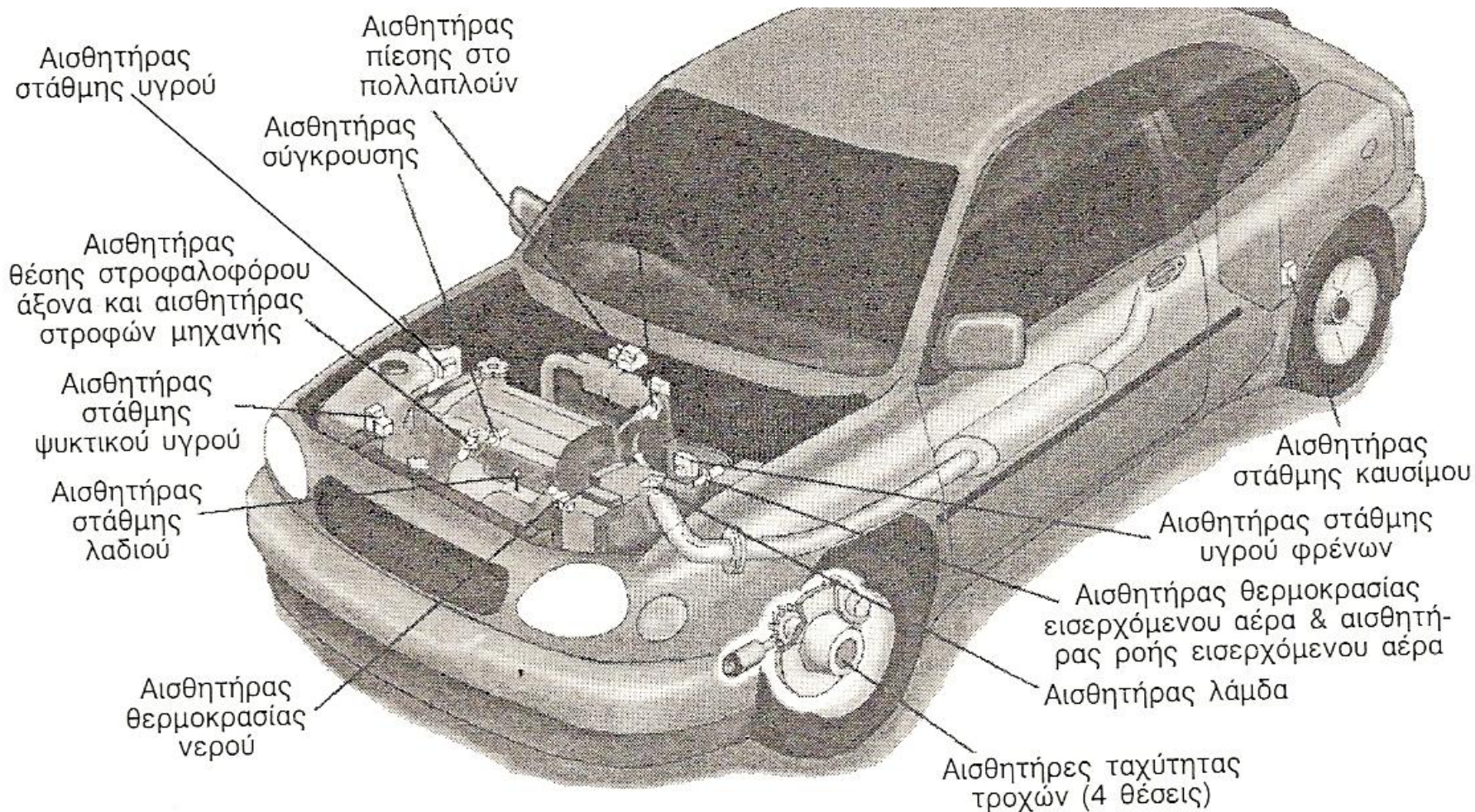
ΛΑΜΙΑ 2013

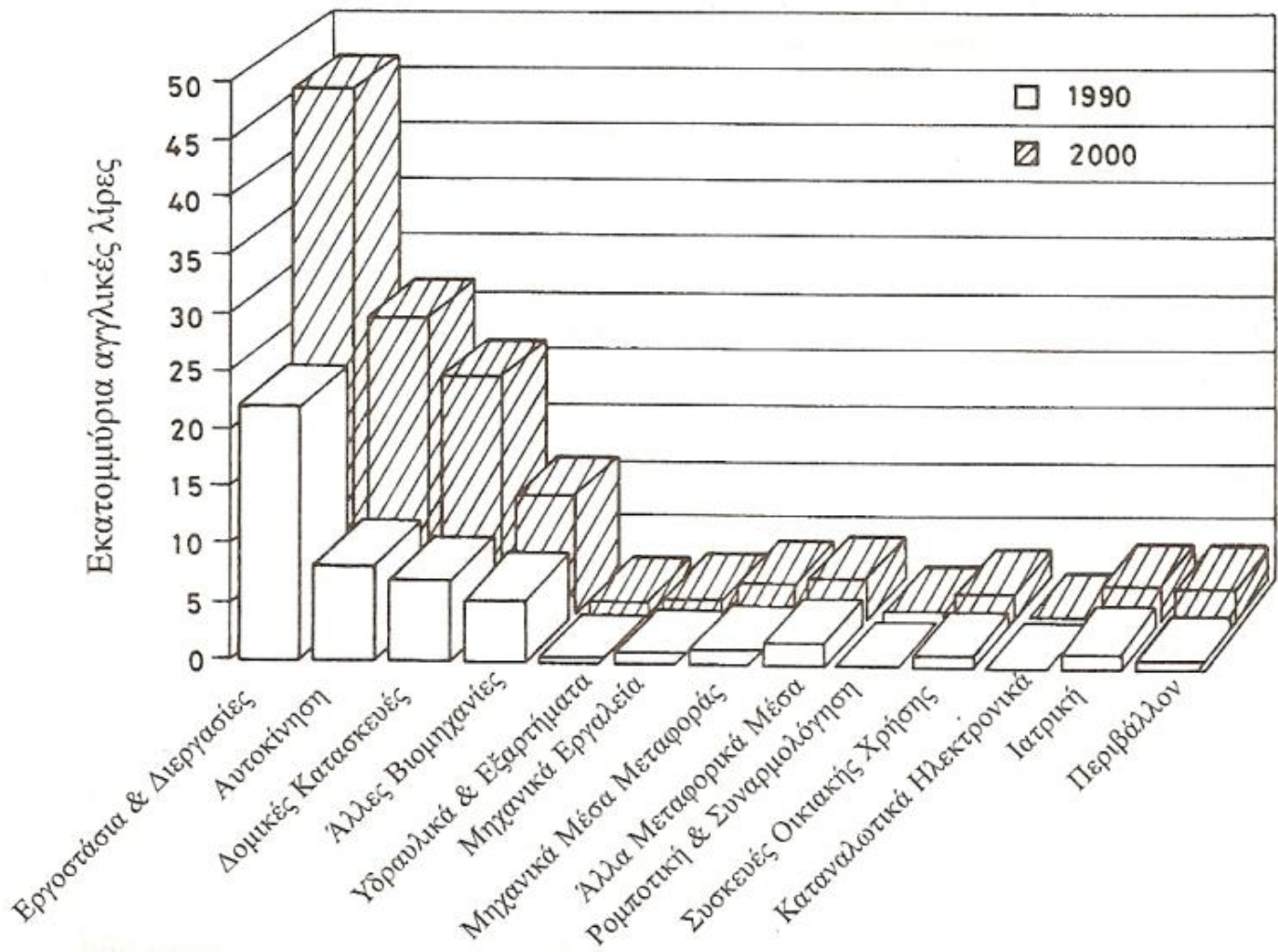
Εισαγωγή

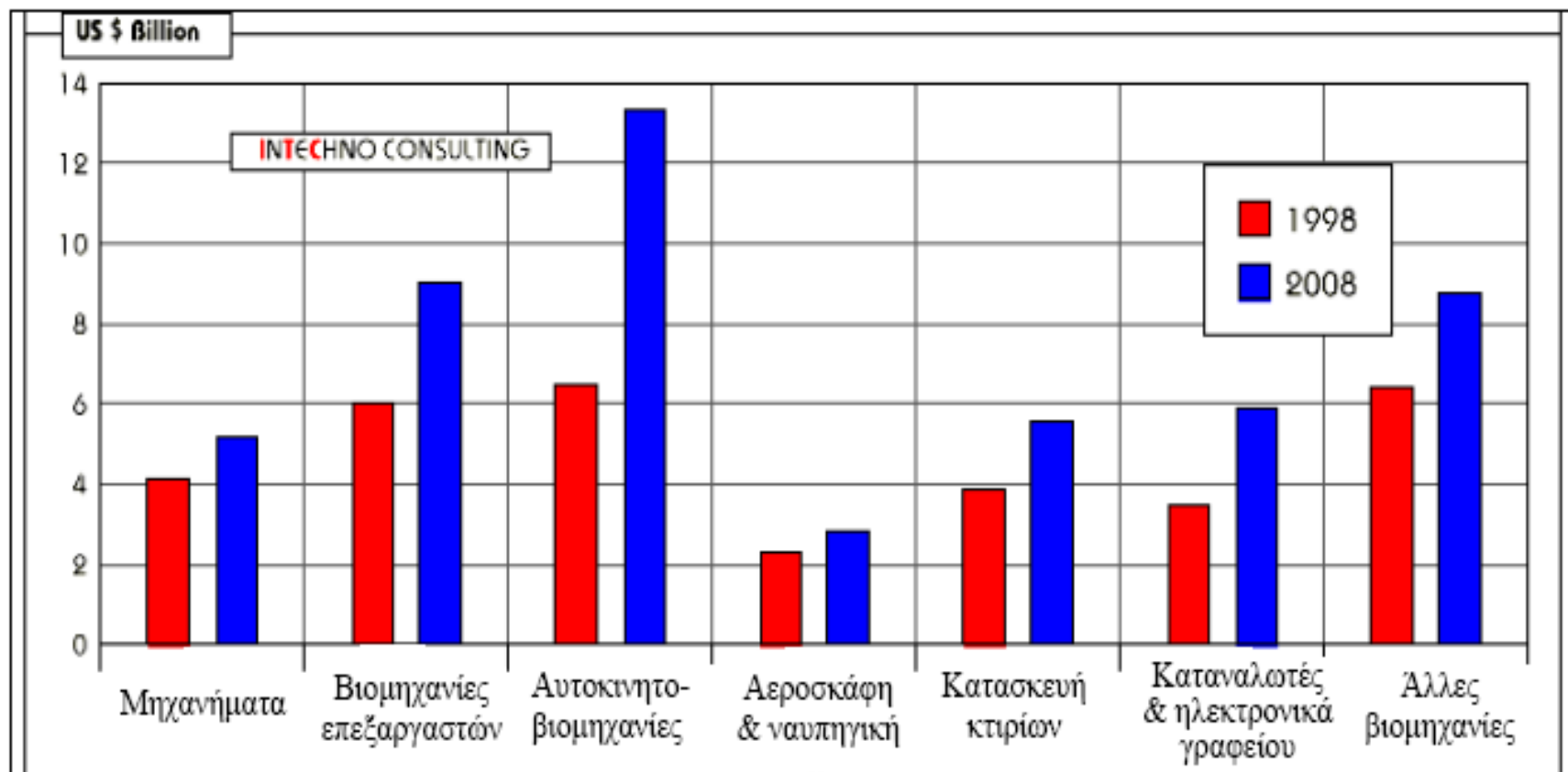
Κατηγοριοποίηση αισθητήρων

Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Κυκλώματα διασύνδεσης αισθητήρων







Ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τη φύση με τα αισθητήρια όργανά του

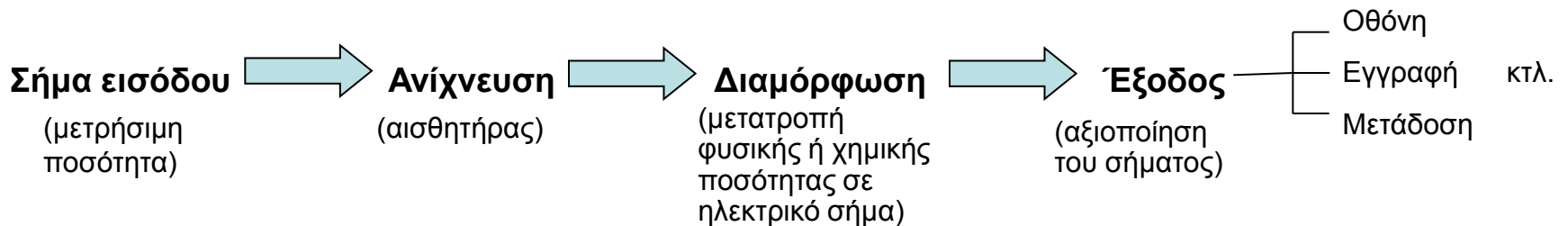


**υποκειμενική αντίληψη για
κάθε άτομο ξεχωριστά!**

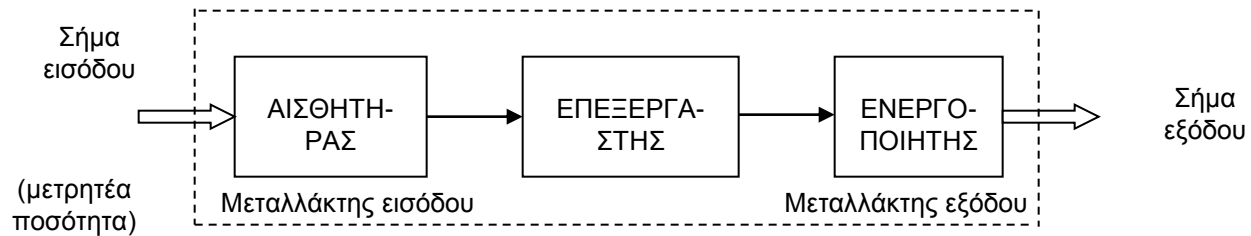
ποσοτικός τρόπος μέτρησης \longrightarrow αισθητήρες

Σύστημα πληροφορίας

Λειτουργικό Διάγραμμα συστήματος μέτρησης



Βασικά εξαρτήματα συστήματος μέτρησης ή επεξεργασίας πληροφορίας



Ανάλογα με τον τρόπο διέγερσης
οι αισθητήρες διακρίνονται

Παθητικοί

Ενεργοί

Ταξινόμηση αισθητήρων βάση
της μορφής του σήματος

Θερμικοί

Ακτινοβολίας

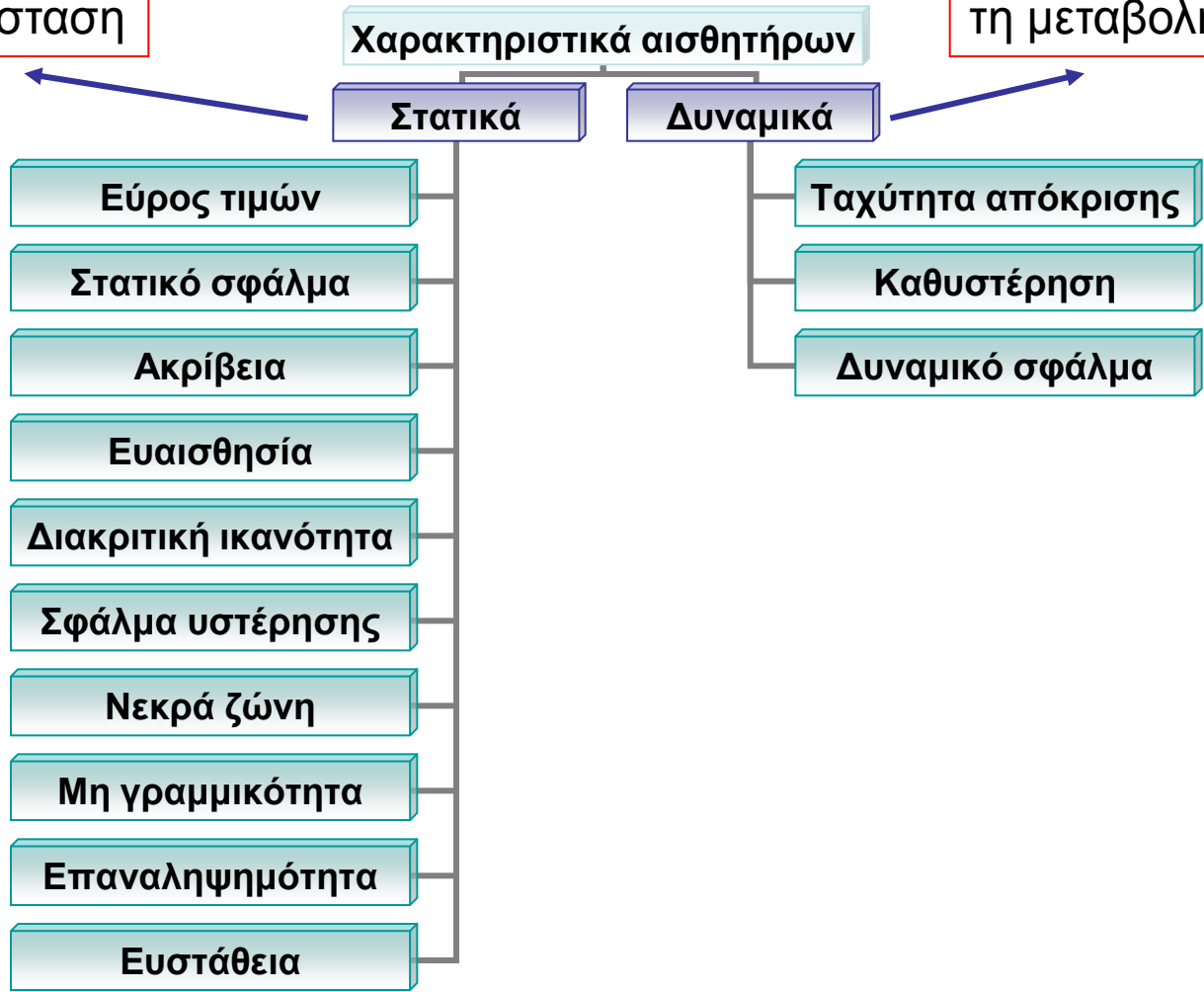
Μηχανικοί

Μαγνητικοί

Βιοχημικοί

Συμπεριφορά
αισθητήρων στη
μόνιμη κατάσταση

Συμπεριφορά
αισθητήρων κατά
τη μεταβολή της εισόδου



Στατικά Χαρακτηριστικά Αισθητήρων

Εύρος τιμών (Range). Το εύρος τιμών ενός αισθητήρα είναι το διάστημα τιμών μέσα στο οποίο μπορεί να μεταβάλλεται η είσοδος του αισθητήρα (*μετρούμενη φυσική μεταβλητή*), ώστε ο αισθητήρας να δίνει αξιόπιστες μετρήσεις.

Στατικό Σφάλμα (Static Error). Στατικό σφάλμα ενός αισθητήρα είναι η απόκλιση μεταξύ της πραγματικής τιμής και της μετρούμενης τιμής μετά από σταθεροποίηση. Τα στατικά σφάλματα οφείλονται σε διάφορες αιτίες και είναι συνήθως διαφορετικά για κάθε μετρούμενη τιμή.

Ακρίβεια (Accuracy). Ακρίβεια ενός αισθητήρα είναι το εύρος του αναμενόμενου σφάλματος μεταξύ της πραγματικής τιμής και της μετρούμενης τιμής. Για το προσδιορισμό της ακρίβειας λαμβάνονται υπόψη όλες οι δυνατές αιτίες σφαλμάτων. Η ακρίβεια εκφράζεται συχνά σαν ποσοστό επί του δυνατού εύρους τιμών εξόδου του αισθητήρα.

Ευαισθησία (Sensitivity). Η ευαισθησία ενός αισθητήρα εκφράζει το κατά πόσο μεταβάλλεται η έξοδος του αισθητήρα ανά μονάδα μεταβολής της εισόδου του.

Διακριτική ικανότητα (Resolution). Η διακριτική ικανότητα ενός αισθητήρα εκφράζει τη μικρότερη δυνατή μεταβολή της εισόδου του αισθητήρα που μπορεί να μετρηθεί. Όσο μικρότερη είναι η μεταβολή αυτή τόσο μεγαλύτερη είναι η διακριτική ικανότητα του αισθητήρα.

Σφάλμα υστέρησης (Hysteresis). Ένας αισθητήρας ενδέχεται να δώσει διαφορετική μέτρηση για την ίδια τιμή μιας μετρούμενης ποσότητας, ανάλογα με τη μορφή της μεταβολής της εισόδου του αισθητήρα (π.χ. μεταβολή διαρκούς αύξησης ή διαρκούς μείωσης). Η απόκλιση μεταξύ των διαφορετικών μετρήσεων ονομάζεται **σφάλμα υστέρησης**.

Νεκρή ζώνη (Dead Zone). Όταν η είσοδος του αισθητήρα αυξάνεται ξεκινώντας από μικρές τιμές, ενδέχεται να μη γίνεται αντιληπτή η μεταβολή από τον αισθητήρα, έως η τιμή της εισόδου ξεπεράσει ένα κατώφλι. Για παράδειγμα, αυτό συμβαίνει όταν στην μηχανική δομή του αισθητήρα εμφανίζονται στατικές τριβές. Η τιμή του κατωφλίου πέρα από το οποίο γίνεται αντιληπτή η μεταβολή της εισόδου από τον αισθητήρα ονομάζεται **νεκρή ζώνη**.

Μη γραμμικότητα (Non linearity). Στους περισσότερους αισθητήρες η σχέση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του αισθητήρα είναι μη γραμμική. Όμως συχνά στην πράξη ο προσδιορισμός της μέτρησης από την ένδειξη του αισθητήρα γίνεται θεωρώντας πως η σχέση αυτή είναι γραμμική.

Επαναληψιμότητα (Repeatability). Σε πολλές περιπτώσεις, οι προηγούμενες μεταβολές της εισόδου του αισθητήρα επηρεάζουν την τιμή της μέτρησης, όπως για παράδειγμα όταν ο αισθητήρας παρουσιάζει υστέρηση. Έτσι ενδέχεται να εμφανίζονται αποκλίσεις μεταξύ επαναλαμβανόμενων μετρήσεων της ίδιας τιμής της εισόδου του αισθητήρα. Το σφάλμα μεταξύ διαφορετικών μετρήσεων της ίδιας τιμής της εισόδου του αισθητήρα χαρακτηρίζει την επαναληψιμότητα του αισθητήρα και εκφράζεται συνήθως σαν ποσοστό επί του συνολικού εύρους τιμών. Όσο μικρότερο είναι το ποσοστό αυτό τόσο καλύτερη είναι η επαναληψιμότητα του αισθητήρα.

Ευστάθεια (Stability). Όταν η είσοδος του αισθητήρα διατηρείται σταθερή για αρκετό χρονικό διάστημα ενδέχεται με την πάροδο του χρόνου η έξοδος του αισθητήρα να εμφανίσει αργή μεταβολή. Η μεταβολή αυτή ονομάζεται **παρέκκλιση (drift)** και εκφράζεται συνήθως σαν ποσοστό επί του συνολικού εύρους τιμών. Το μέγεθος της παρέκκλισης χαρακτηρίζει την ευστάθεια του αισθητήρα. Όσο μικρότερη είναι η παρέκκλιση τόσο μεγαλύτερη είναι η ευστάθεια.

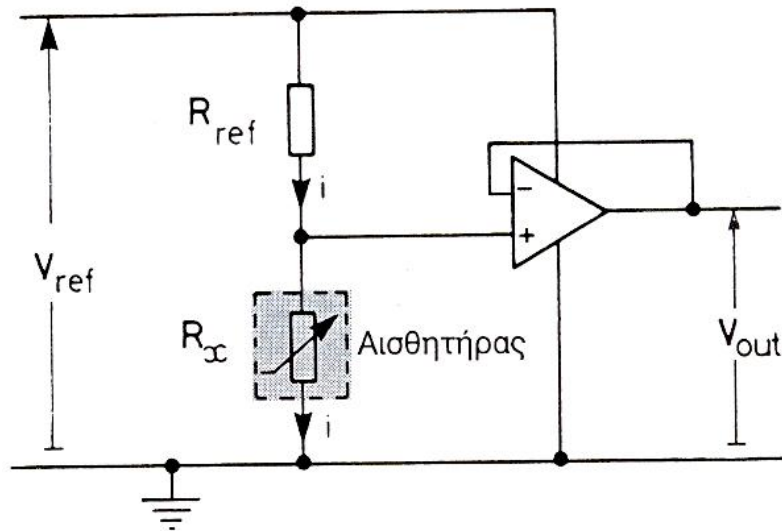
Δυναμικά Χαρακτηριστικά Αισθητήρων

Ταχύτητα απόκρισης (Speed of Response). Είναι η ταχύτητα με την οποία ο αισθητήρας ανταποκρίνεται στις μεταβολές του μετρούμενου μεγέθους. Η ταχύτητα απόκρισης μπορεί να εκτιμηθεί μετρώντας το χρόνο απόκρισης, δηλαδή το χρόνο που χρειάζεται η έξοδος του αισθητήρα για να φθάσει στο 90% της τελικής τιμής της, όταν στην είσοδο του αισθητήρα εφαρμόζεται βηματικό σήμα.

Καθυστέρηση (Lag). Η καθυστέρηση ενός αισθητήρα είναι η διαφορά μεταξύ της χρονικής τιμής στην οποία συμβαίνει μια μεταβολή της εισόδου του αισθητήρα και της χρονικής στιγμής στην οποία η μεταβολή αυτή γίνεται αντιληπτή στην έξοδο του αισθητήρα.

Δυναμικό σφάλμα (Dynamic Error). Είναι η διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής ενός μετρούμενου μεγέθους που μεταβάλλεται με το χρόνο και της αντίστοιχης μέτρησης του αισθητήρα, όταν θεωρείται ότι δεν υπάρχει καθόλου στατικό σφάλμα.

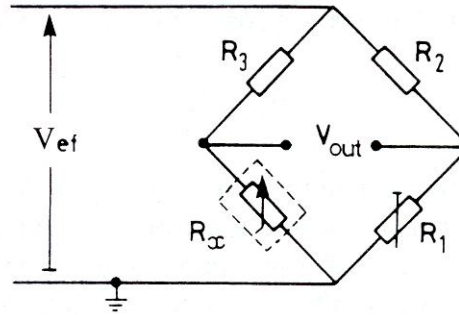
Κυκλώματα προσαρμογής



Κύκλωμα διαιρέτη τάσης με ενισχυτή απομόνωσης

$$V_{out} = \frac{R_x}{R_x + R_{ref}} V_{ref}$$

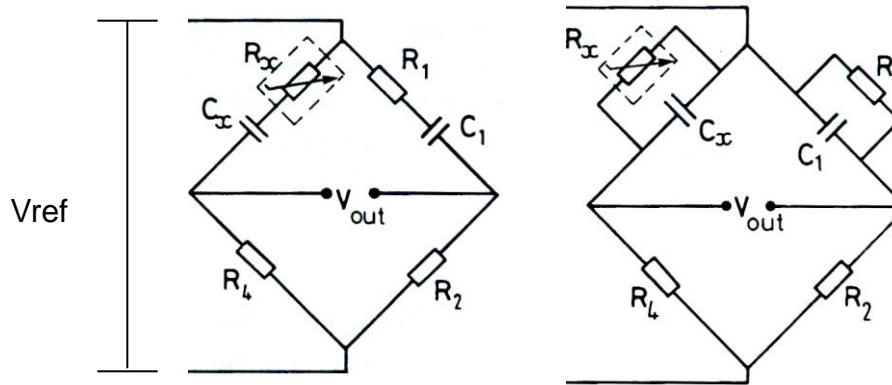
Αντίσταση



Γέφυρα Wheatstone

$$V_{out} \sim V_{ref}$$

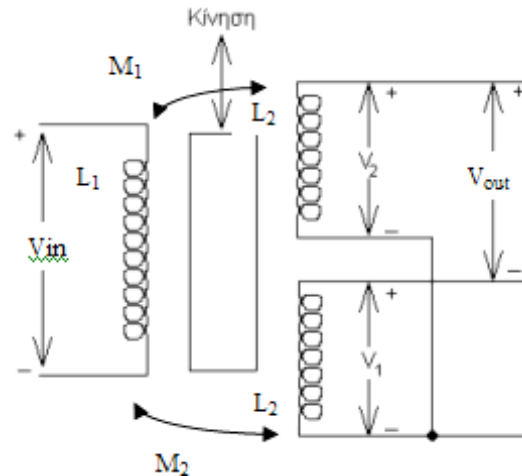
Χωρητικότητα



Γέφυρα πυκνωτών

$$V_{out} \sim V_{ref}$$

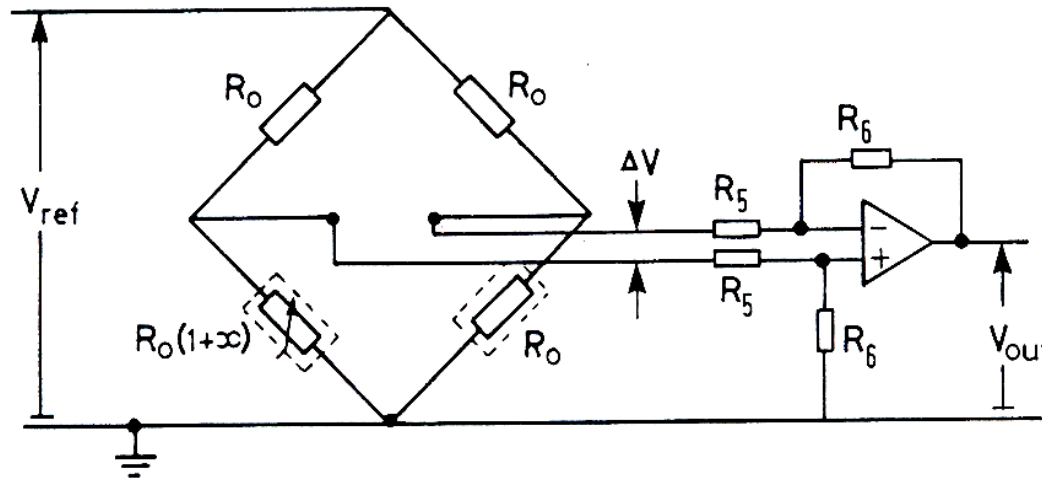
Επαγωγή



Γραμμικός μεταβλητός
διαφορικός μετασχηματιστής

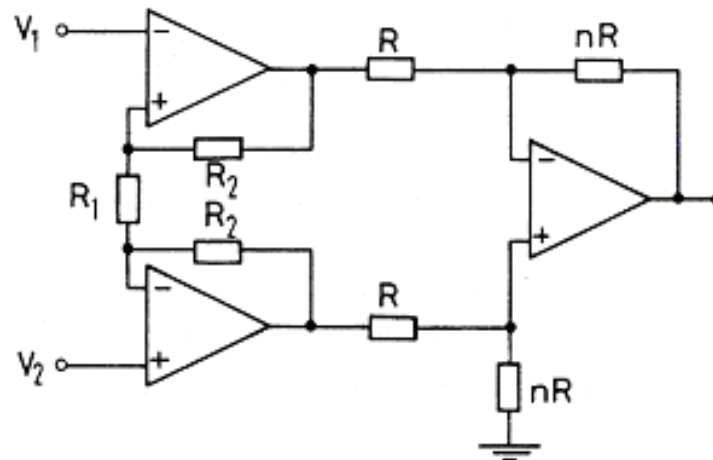
$$V_{out} = (M_1 - M_2) \frac{di}{dt}$$

Κύκλωμα μη ισοροπημένης γέφυρας Wheatstone με στοιχείο αντιστάθμισης



$$V_{out} \approx -\frac{R_6}{R_5} \Delta V \approx -\frac{R_6}{R_5} \left[\frac{V_{ref} x}{4} \right]$$

Συσκευή ενίσχυσης με τη χρήση τελεστικών ενισχυτών για ενίσχυση διαφορικών σημάτων (ενισχυτής οργάνων – Instrumentation Amplifier)

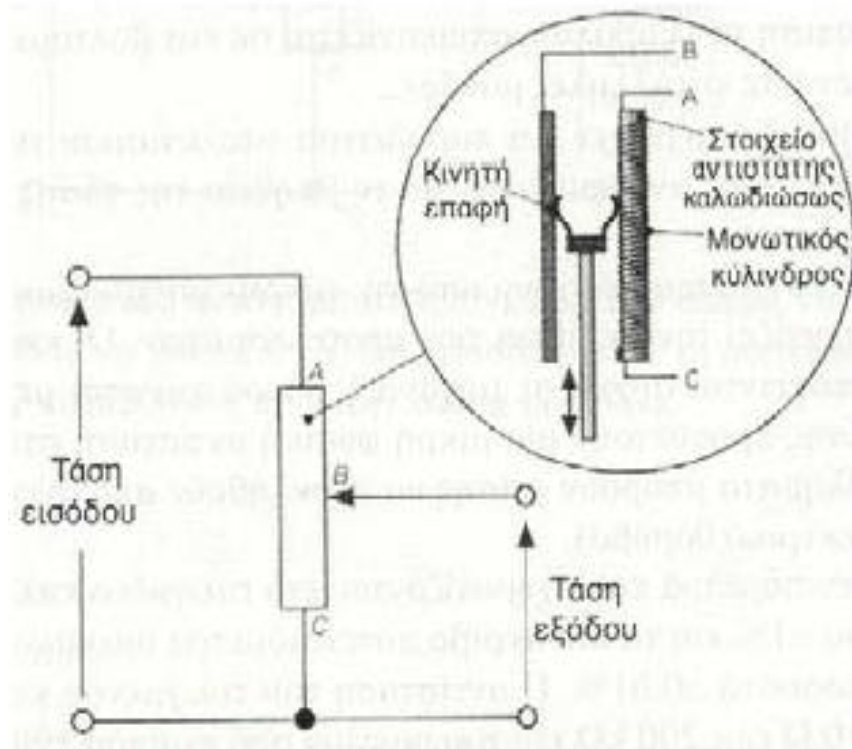


Αισθητήρες μετατόπισης

- Ευθύγραμμη μετατόπιση
- Γωνιακή μετατόπιση
- Προσέγγιση
- Επιτάχυνση

- Γραμμικό ποτενσιόμετρο

Τα ποτενσιόμετρα είναι ηλεκτρικές συσκευές που έχουν τη μορφή μίας μεταβλητής αντίστασης. Αποτελούνται από μία ολισθαίνουσα επαφή η οποία μπορεί να κινείται κατά το μήκος του στοιχείου που εμφανίζει η αντίσταση. Η κινητή αυτή επαφή συνδέεται με ένα έμβολο, το οποίο ακουμπά στο αντικείμενο του οποίου η μετατόπιση πρέπει να μετρηθεί.



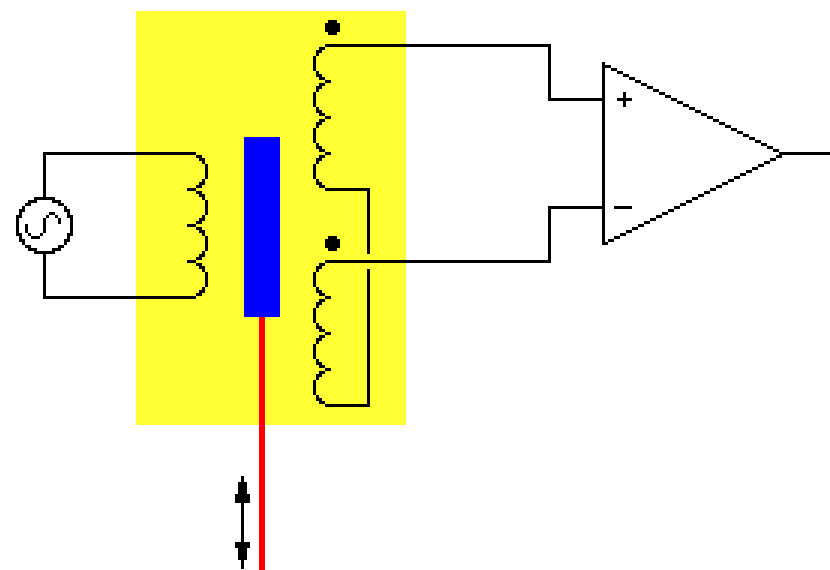
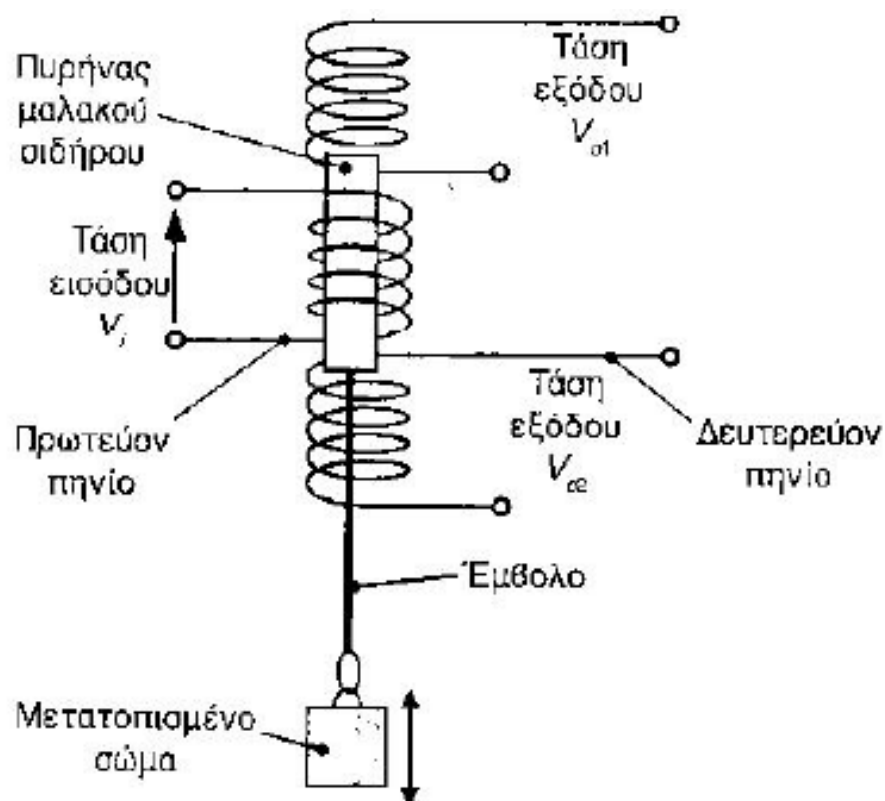
- τα ποτενσιόμετρα που σχηματίζονται από τυλιγμένο καλώδιο έχουν γραμμικότητα περίπου $\pm 1\%$ και τα πιο ακριβά ποτενσιόμετρα μπορούν να είναι γραμμικά σε ποσοστό $\pm 0.01\%$
- η αντίσταση του τυλιγμένου καλωδίου κυμαίνεται από περίπου 10Ω έως $200 \text{ k}\Omega$ και του υμενίου από περίπου 100Ω έως $1 \text{ M}\Omega$.
- Η διακριτική ικανότητα των ποτενσιομέτρων τυλιγμένου καλωδίου εξαρτάται από τον αριθμό των περιελίξεων επάνω στον κύλινδρο.
- Μπορεί να επιτευχθεί άμεση ένδειξη με τη χρήση ενός βολτομέτρου, το οποίο είναι βαθμονομημένο σε μονάδες μετατόπισης.

Χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές:

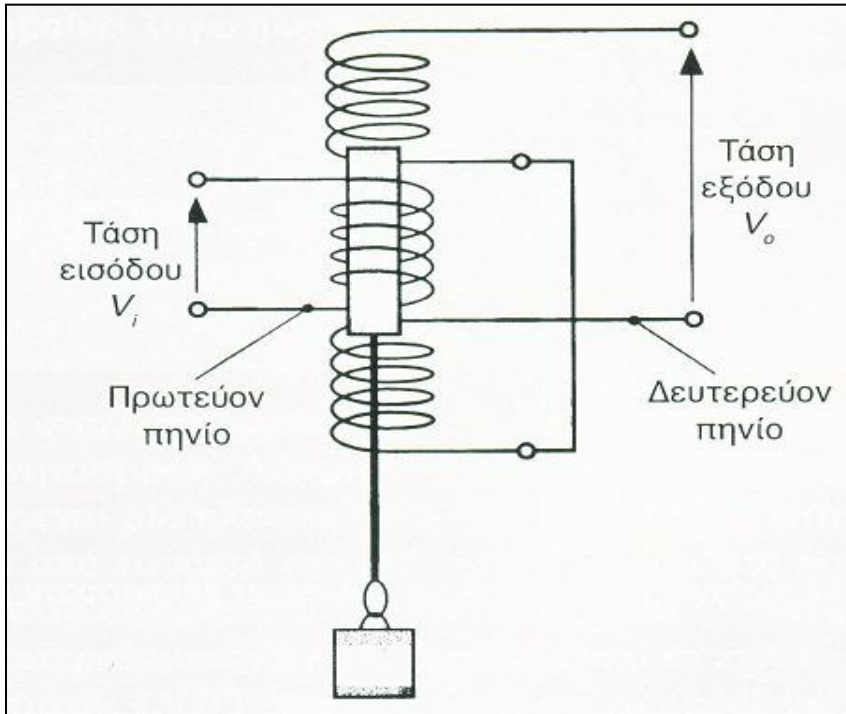
- καταγραφή της θέσης των αντικειμένων σε μία γραμμή παραγωγής
- για έλεγχο των διαστάσεων των αντικειμένων σε συστήματα ποιοτικού ελέγχου

- Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής (LVDT)

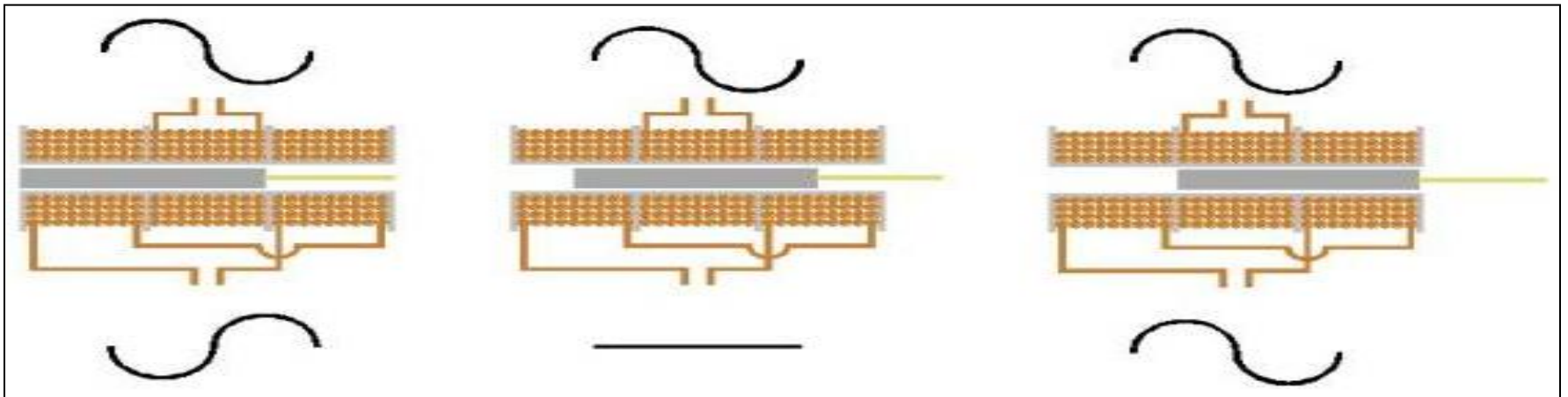
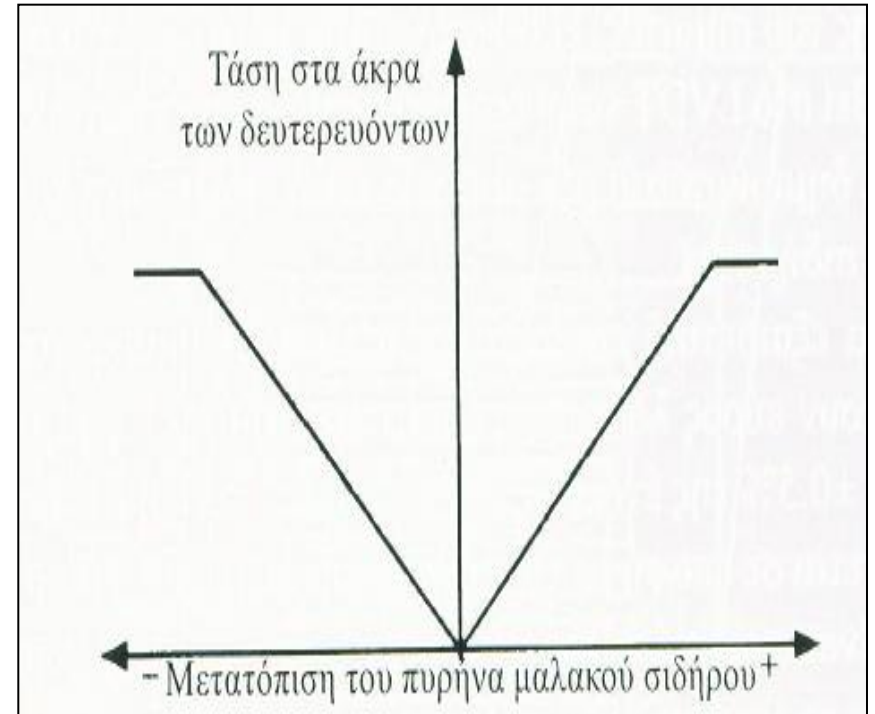
Ένας συμβατικός μετασχηματιστής αποτελείται από δύο πηνία που είναι ισχυρή σύζευξη και είναι τυλιγμένα γύρω από έναν κύλινδρο μαλακού σιδήρου. Αυτά ονομάζονται πρωτεύον και δευτερεύον πηνίο. Όταν εφαρμοστεί μία εναλλασσόμενη τάση στο πρωτεύον πηνίο, τότε επάγεται μία εναλλασσόμενη τάση στο δευτερεύον πηνίο. Αυτό συμβαίνει λόγω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (νόμος Faraday).

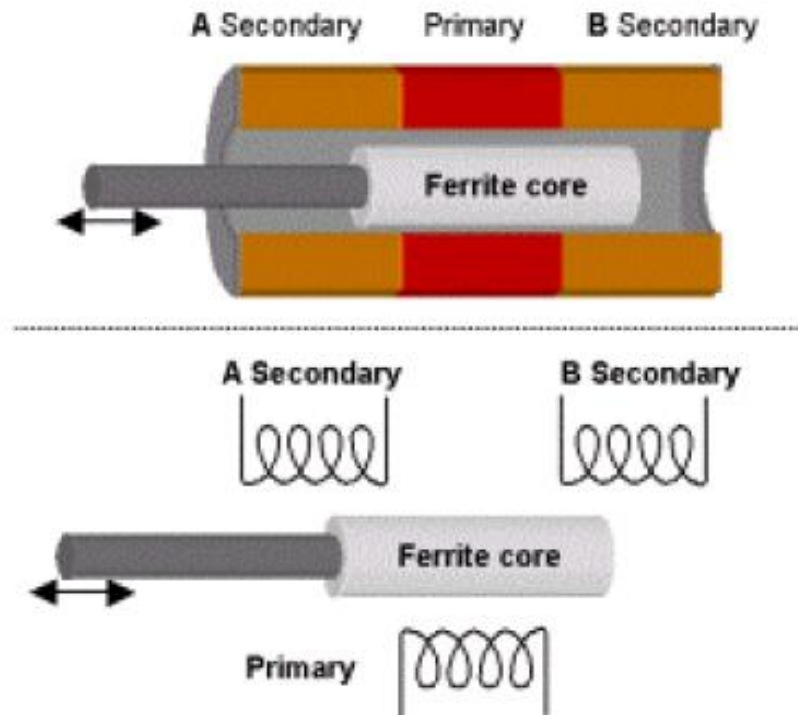


Οι περιελίξεις ενός LVDT μονής εξόδου



Τάση εξόδου στα άκρα των δευτερευόντων πηνίων ενός LVDT ως προς τη μετατόπιση



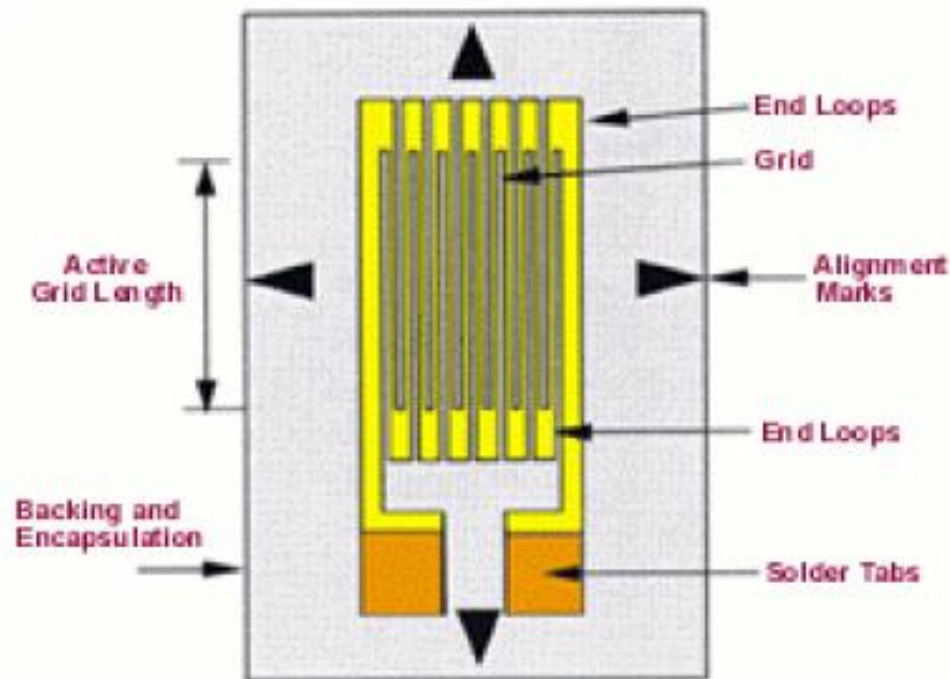


- Τα LVDT είναι εξαιρετικά ευαίσθητα μιας και η διακριτική τους ικανότητα φτάνει ως 0,05mm.
- Μετρούν μετατοπίσεις στην περιοχή 0,1 – 300mm.

Εφαρμογές LVDT: εργαλεία μηχανουργείου, ρομποτική, ψηφιακά συστήματα τοποθέτησης, μέτρηση δύναμης, μέτρηση πίεσης, μέτρηση επιτάχυνσης.

- Μετρητής μηχανικής τάσης (strain gauge)

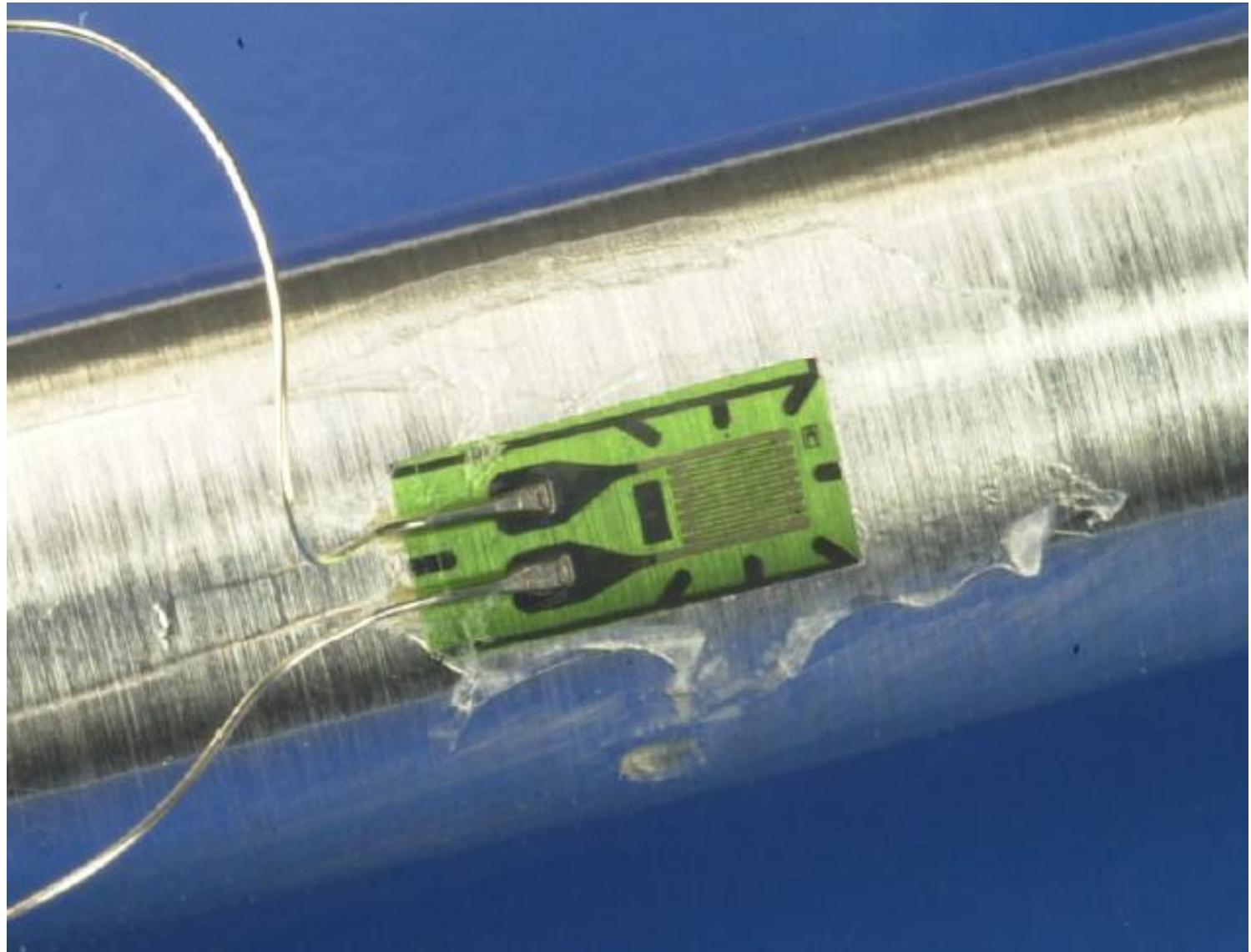
Οι μετρητές μηχανικής τάσης (strain gauge) μετρούν τις αλλαγές του μεγέθους ενός στερεού αντικείμενου που προκαλούνται από συμπίεση ή εφελκυσμό. Οι μετρητές αυτοί είναι στερεωμένοι στο αντικείμενο και έτσι, όταν αλλάζει το αντικείμενο αλλάζουν και αυτοί. Οι αισθητήρες αυτοί εμφανίζουν αλλαγή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων τους όταν αλλάζουν οι διαστάσεις τους. Όταν τεντώνονται ή συμπιέζονται αλλάζει η αντίσταση τους και αυτή η αλλαγή μπορεί να συσχετιστεί με μία μετατόπιση. Οι μετρητές μηχανικής τάσης με αντίσταση μπορούν να μετρούν τάσεις σε αντικείμενα μήκους έως και 50 mm, με τη συνολική μετατόπιση να αποτελεί ένα μικρό ποσοστό αυτού του μήκους (περίπου 1%).



Ο μετρητής μηχανικής τάσης (strain gauge) συνίσταται από ένα μεταλλικό φύλλο, το οποίο είναι στερεωμένο σε ένα υπόστρωμα. Το μεταλλικό φύλλο έχει χαραχθεί ή ξυστεί με τη βοήθεια φωτογραφικών τεχνικών, έτσι ώστε να σχηματιστεί μία συνεχή τεθλασμένη γραμμή με σχήμα ζιγκ ζαγκ. Αυτή η γραμμή ονομάζεται νηματίδιο (filament). Τα νηματίδια των μετρητών μηχανικής τάσης είναι κατασκευασμένα από κράμματα χαλκού – νικελίου ή χρωμίου – νικελίου, τα οποία έχουν υψηλή ειδική αντίσταση και υψηλή μηχανική αντοχή. Το πάχος τους συνήθως είναι μερικά μικρόμετρα. Τα υποστρώματα, στα οποία τα νηματίδια είναι κολλημένα, είναι κατασκευασμένα από εποξικές ρητίνες διαφόρων τύπων, ανάλογα με την εφαρμογή και είναι επίσης πολύ λεπτά. Μερικές φορές ολόκληρος ο μετρητής μπορεί να ευρίσκεται μέσα σε κάψουλα.

Όταν ένας μετρητής συγκολλάτε σε ένα αντικείμενο και το αντικείμενο (επομένως και ο μετρητής) αλλάξουν μέγεθος, θα αλλάξει η αντίσταση του νηματιδίου του μετρητή. Η αντίσταση αυτή, R , δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$



Η **μηχανική τάση**, ε , ορίζεται ως :
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

όπου Δl η μεταβολή του μήκους και l η αρχική του τιμή.

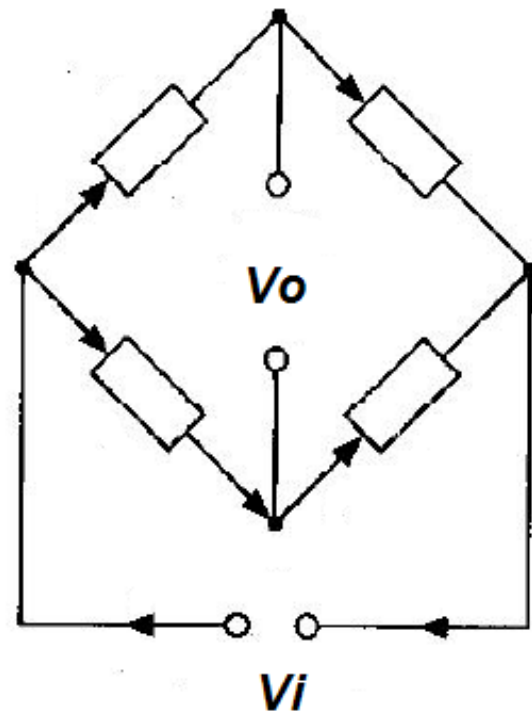
Η **ηλεκτρομηχανική τάση**, $G\varepsilon$, ορίζεται ως :
$$G\varepsilon = \frac{\Delta R}{R}$$

όπου ΔR η μεταβολή της αντίστασης και R η αρχική της τιμή.

Ο παράγοντας G παίρνει συνήθως τιμές 1,8 – 2,2.

Οι αντιστάσεις των μετρητών μηχανικής τάσης παίρνουν τιμές από 50 Ω έως 2k Ω .

Ήδη έχουμε δει ότι ο μετρητής εμφανίζει αλλαγή αντίστασης, όταν υφίσταται μηχανική τάση. Η αλλαγή της αντίστασης πρέπει να μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο να χρησιμοποιηθεί για να δείξει την τιμή της δύναμης που προκαλεί την τάση ή την αλλαγή διαστάσεων για να δείξει την τιμή της δύναμης που προκαλεί την τάση ή την αλλαγή διαστάσεων του αντικειμένου. Ένα κύκλωμα που χρησιμοποιείται για αυτό το σκοπό είναι η γέφυρα Wheatstone.

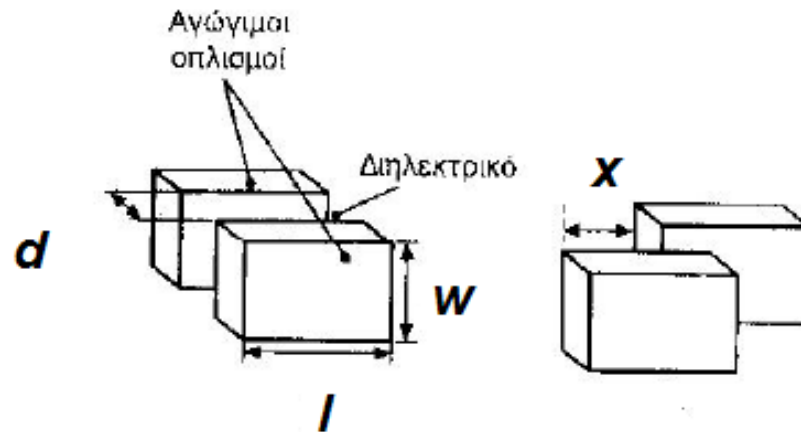


Οι μετρητές μηχανικής τάσης χρησιμοποιούνται:

- ευρέως στη βιομηχανία.
- για τη μέτρηση των μηχανικών τάσεων που εμφανίζονται σε διάφορες διευθύνσεις.
- για να αντισταθμίζουν το φαινόμενο που συμβαίνει όταν ένα αντικείμενο ταυτόχρονα κάμπτεται και εφελκύεται.
- δομικά έργα για να καταγράφουν τις μηχανικές τάσεις που υφίστανται οι οδικές και σιδηροδρομικές γέφυρες και οι τοίχοι ψηλών κτιρίων.
- εντοιχίζονται σε δρόμους για να καταγράφουν τη χρήση και τη φθορά τους.
- στο αντικείμενο των μηχανολόγων μηχανικών τάσεων σε δοκιμαστικά δείγματα μετάλλων, σε πρωτότυπους στροβιλοκινητήρες, κυλίνδρους, αεροσκάφη.

- Πυκνωτές μεταβλητού εμβαδού

Οι πυκνωτές μεταβλητού εμβαδού είναι παράλληλες πλάκες (οπλισμοί) και το διηλεκτρικό υλικό που βρίσκεται ανάμεσα τους όπως γυαλί, κηροζίνη και γενικότερα υλικά που ανθίσταται στην παρουσία του ηλεκτρικού πεδίου.



Αλλαγή της επιφάνειας κάλυψης των οπλισμών σε έναν πυκνωτή

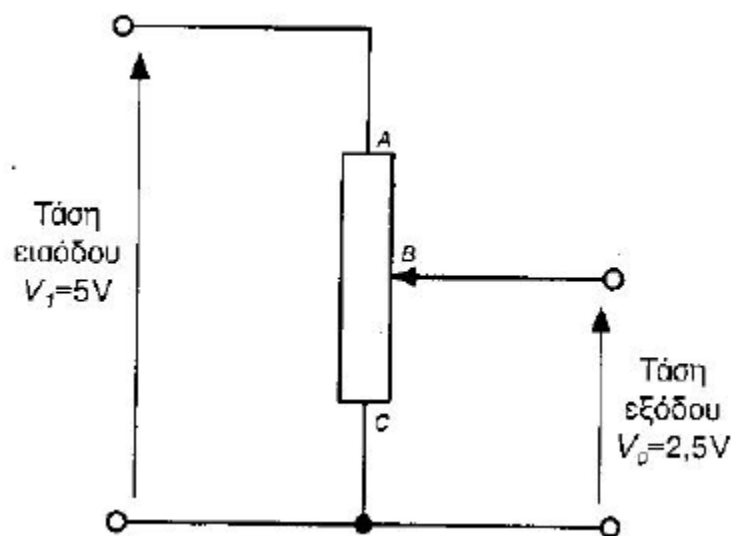
Η χωρητικότητα μετριέται σε farad (F) και δίνεται από την έκφραση: $C = \frac{A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{d}$

- A είναι το εμβαδόν επικάλυψης των οπλισμών του πυκνωτή (σε m^2).
- ϵ_0 είναι η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του ελεύθερου χώρου (και ισούται με $8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$).
- ϵ_r είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ή αλλιώς ηλεκτρική διαπερατότητα) του υλικού του διηλεκτρικού που υπάρχει ανάμεσα στους οπλισμούς.
- d είναι η απόσταση των οπλισμών (σε m).

Ασκήσεις

1. Θεωρήστε το ποτενσιόμετρο γραμμικής μετατόπισης που εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα. Η τάση εισόδου είναι $V_i = 5V$ και η τάση εξόδου είναι $V_o = 2.5V$. Το μήκος του αντιστάτη είναι συνολικά 100 mm και έτσι όταν η κινητή επαφή ευρίσκεται στη μέση B θα είναι $AB = BC = 50\text{ mm}$. Η γραμμική μετατόπιση ενός αντικειμένου αναγκάζει την επαφή να κινηθεί έτσι ώστε η τάση εξόδου να γίνει $2.65V$.

Να προσδιορίσετε τη μετατόπιση του αντικειμένου και την κατεύθυνση προς την οποία κινήθηκε.



2. Ένας μετρητής μηχανικής τάσης έχει αντίσταση 250Ω και παράγοντα G ίσο με 2.2 και συνδέεται ακλόνητα σε ένα αντικείμενο με σκοπό την ανίχνευση μετατόπισης.

Να προσδιορίσετε την αλλαγή στην αντίσταση του μετρητή, εάν αυτός υφίσταται τάση εφελκυσμού 450 με λόγω της αλλαγής των διαστάσεων του αντικειμένου.

Επιπρόσθετα, εάν η σχέση ανάμεσα στην αλλαγή της αντίστασης και τη μετατόπιση είναι $0.05 \Omega \text{mm}^{-1}$, να προσδιοριστεί η αλλαγή των διαστάσεων του αντικειμένου.

3. Μία γέφυρα με μετρητή τάσης έχει αντίσταση $R = 200\Omega$ και παράγοντα $G = 1.9$. Οι αντιστάσεις R_1 , R_2 και R_3 είναι σταθερές και έχουν τιμές επίσης 200Ω . Ο μετρητής υφίσταται τάση εφελκυσμού ίση με 400 με λόγω μετατόπισης του αντικειμένου.

Να προσδιορίσετε την αλλαγή της αντίστασης ΔR του μετρητή.

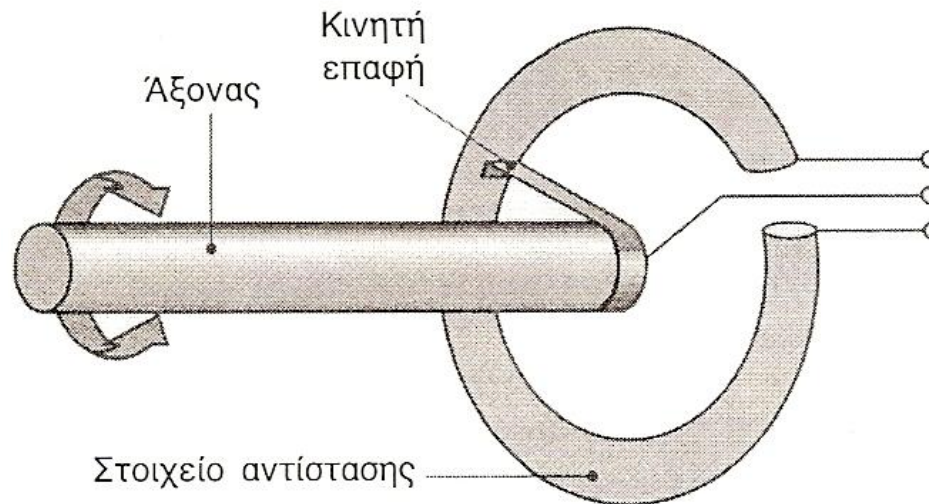
Εάν η τάση εισόδου είναι $V_i = 4V$, να προσδιορίσετε την αλλαγή ΔV_o της τάσης εξόδου.

4. Θεωρήστε έναν πυκνωτή που αποτελείται από δύο παράλληλους αγωγίμους οπλισμούς. Κάθε αγωγίμος οπλισμός έχει πλάτος $w = 0.1 \text{ m}$ και μήκος $l = 0.5 \text{ m}$. Η απόσταση των οπλισμών είναι $d = 0.1 \text{ m}$. Η σχετική ηλεκτρική διαπερατότητα ϵ_r του διηλεκτρικού υλικού είναι 1.

Εάν δίνεται ότι η διηλεκτρική σταθερά του ελεύθερου χώρου είναι $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$, να υπολογίσετε τη χωρητικότητα της κατασκευής. Εάν μειωθεί η επιφάνεια επικάλυψης κινώντας την μία πλάκα οριζόντια κατά απόσταση $x = 50 \text{ mm}$, να υπολογιστεί η νέα τιμή χωρητικότητας.

ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ

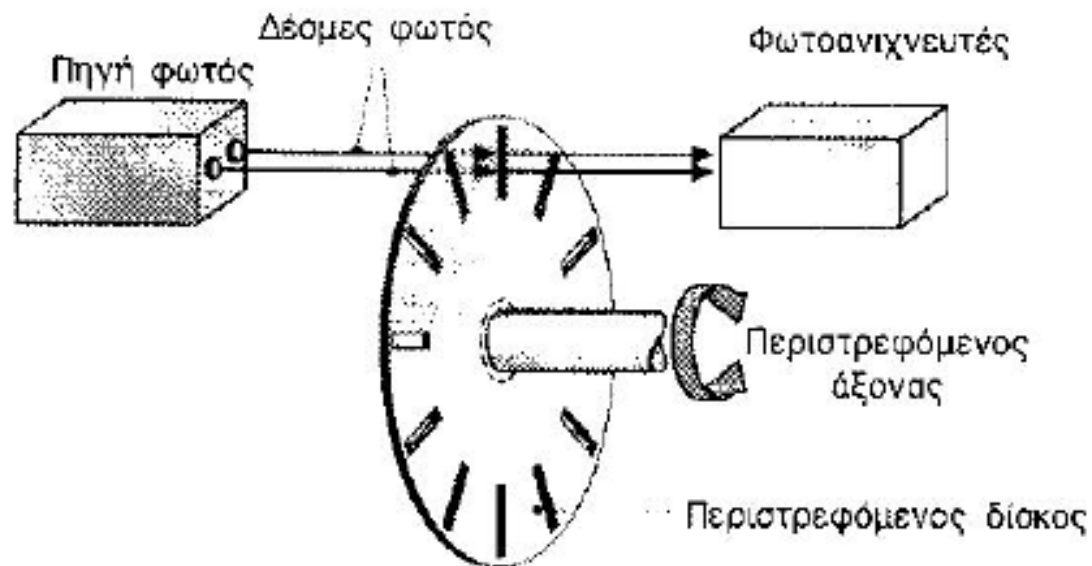
- Περιστροφικό ποτενσιόμετρο



Τα περιστροφικά ποτενσιόμετρα λειτουργούν με την ίδια αρχή που έχουν τα γραμμικά, τα οποία περιγράψαμε νωρίτερα στο παρόν κεφάλαιο. Χρησιμοποιούνται παρόμοια υλικά και τεχνικές και η κύρια διαφορά είναι ότι το στοιχείο αντίστασης έχει τη μορφή τόξου, επάνω στο οποίο ολισθαίνει η κινητή επαφή. Η τελευταία περιστρέφεται επειδή είναι συνδεδεμένη με τον άξονα εισόδου. Η τάση εξόδου είναι ανάλογη της γωνιακής μετατόπισης του άξονα και συνήθως διαβιβάζεται σε ένα βολτόμετρο βαθμονομημένο σε μονάδες γωνιακής μετατόπισης.

- Αυξητικός οπτικός κωδικοποιητής

Οπτικός κωδικοποιητής είναι ένας μετατροπέας στον οποίο η γραμμική ή γωνιακή μετατόπιση μεταβάλλει την εκπομπή μίας ακτίνας φωτός από μία πηγή σε έναν ανιχνευτή. Ο αυξητικός κωδικοποιητής παράγει ένα σήμα το οποίο δείχνει ότι έχει συμβεί μία γωνιακή μετατόπιση σε έναν άξονα. Απαριθμούνται πολλά τέτοια σήματα εξόδου και από το πλήθος τους εξάγεται η γωνιακή μετατόπιση του άξονα. Ο απόλυτος κωδικοποιητής παράγει ένα σήμα εξόδου, το οποίο δείχνει τη συνολική γωνιακή μετατόπιση του άξονα, από μία θέση που θεωρείται αρχική

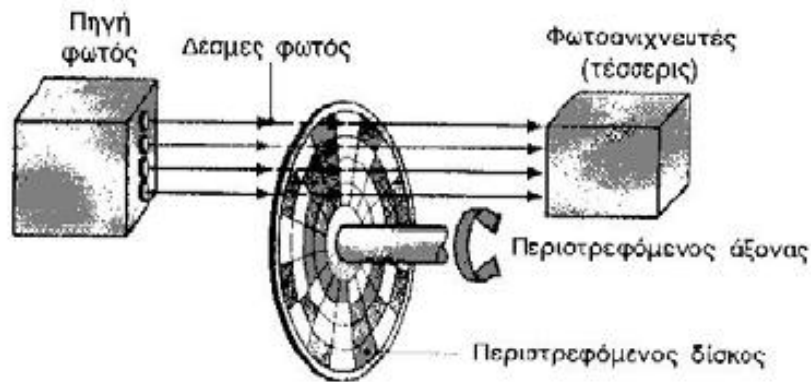


Καθώς περιστρέφεται ο άξονας, το φως περνά περιοδικά μέσα από τα ισαπέχοντα παράθυρα του δίσκου και εμποδίζεται από τις ενδιάμεσες αδιαφανείς περιοχές. Επομένως παράγεται μία παλμική δέσμη φωτός στην άλλη πλευρά του δίσκου. Οι ανιχνευτές LED είναι έτσι τοποθετημένοι ώστε καθώς περιστρέφεται ο άξονας και ο δίσκος η διαφορά φάσης των παλμοσειρών φωτός που προκύπτουν στους ανιχνευτές να δείχνει την κατεύθυνση της περιστροφής. Ο αριθμός των παλμών που ανιχνεύονται είναι ανάλογος της γωνίας κατά την οποία έχει μετατοπιστεί ο άξονας και ο δίσκος. Η γωνιακή μετατόπιση του άξονα μπορεί να προσδιοριστεί αναφορικά με ένα αυθαίρετα επιλεγμένο σημείο έναρξης.

- Απόλυτος οπτικός κωδικοποιητής

Ο απόλυτος κωδικοποιητής διαφέρει από τον αυξητικό στο γεγονός ότι το σήμα εξόδου που παράγει είναι σε ψηφιακή ή εν γένει κωδικοποιημένη μορφή. Αυτό παρέχει μία απόλυτη τιμή για τη μετατόπιση του άξονα.

Στον άξονα προσαρμόζεται ένας περιστρεφόμενος δίσκος με έναν αριθμό ομοκέντρων καναλιών (αυλακώσεων). Μία πηγή φωτός που αποτελείται από μερικές διόδους LED ευθυγραμμίζεται με τις αυλακώσεις του δίσκου. Μερικοί φωτοανιχνευτές ευθυγραμμίζονται με όμοιο τρόπο με το δίσκο και τις δέσμες φωτός που περνούν μέσα από το δίσκο.



Απόλυτος κωδικοποιητής, gray code, 10-bit έξοδος

Ένα κλειστό παράθυρο το οποίο είναι αδιαφανές και εμποδίζει τη διέλευση της φωτεινής δέσμης από κάποιο LED προς τον αντίστοιχο ανιχνευτή αντιπροσωπεύει το ψηφίο '0'. Ένα 'ανοιχτό' παράθυρο, το οποίο επιτρέπει το φως από κάποιο LED να φθάσει στον ανιχνευτή που βρίσκεται απέναντι του αντιπροσωπεύει το ψηφίο '1'. Ο συνδυασμός ανοικτών και κλειστών παραθύρων μπορεί να αντιπροσωπεύει όλους τους δεκαδικούς αριθμούς από 0 έως 2^{n-1} , όπου n είναι ο αριθμός των αυλακώσεων.

Οι οπτικοί κωδικοποιητές για τη μέτρηση της γωνιακής μετατόπισης έχουν εφαρμογές:

- σε μηχανές που ελέγχονται αριθμητικά, όπως είναι οι τόρνοι και οι φρέζες που ελέγχονται από υπολογιστή
- στη ρομποτική και τα συστήματα τοποθέτησης.
- μία συνηθισμένη εφαρμογή των σχετικών οπτικών κωδικοποιητών στους υπολογιστές αποτελεί το ποντίκι (mouse).

ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ

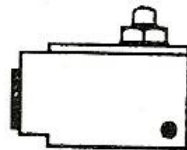
Προσδιορίζουν την ύπαρξη αντικειμένων σε μια καθορισμένη περιοχή κοντά στον ανιχνευτή.

Υπολογίζονται τα παρακάτω μεγέθη :

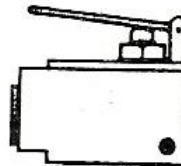
γραμμική μετατόπιση
γωνιακή μετατόπιση
ταχύτητα

Μικροδιακόπτες

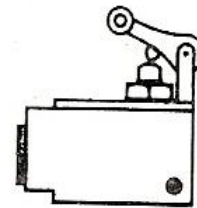
Οι μικροδιακόπτες έχουν ευρεία χρήση σε πολλούς τομείς εφαρμογών και είναι



Έμβολο



Μοχλός



Κυλινδρίσκος

Βιομηχανικοί μικροδιακόπτες μεταλλικού περιβλήματος, μη-σφραγισμένοι

Προδιαγραφές επαφής

480 V a.c. 15 A, 125 V d.c. 0.5 A, 15 V d.c. 15 A.

Μηχανική ζωή

>10⁵ κύκλοι λειτουργίας

Θερμοκρασιακό εύρος

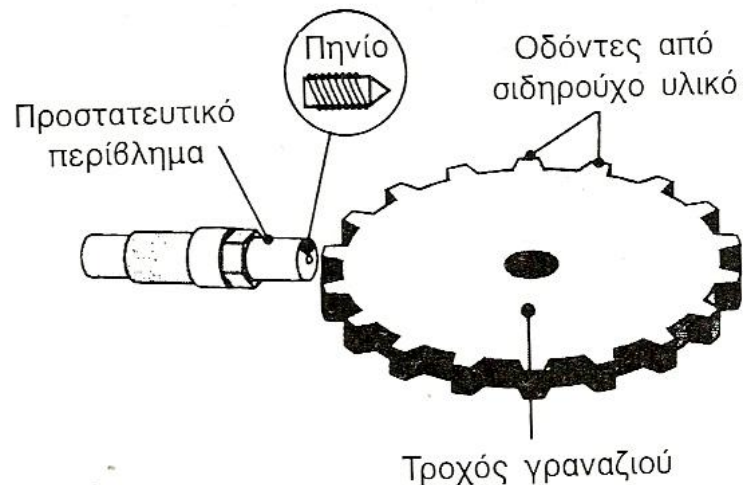
0–70 °C

Όρια λειτουργίας	Μορφής εμβόλου	Μορφής κυλινδρικού
Αρχική διαδρομή, μέγιστη	0.5 mm	0.8 mm
Διαφορικό, μέγιστο	0.08 mm	0.08 mm
Υπερ-απόκλιση, μέγιστη	4.6 mm	3.6 mm
Δύναμη λειτουργίας, μέγιστη	4.2 N	4.2 N
Δύναμη απασφάλισης, ελάχιστη	1.7 N	1.7 N

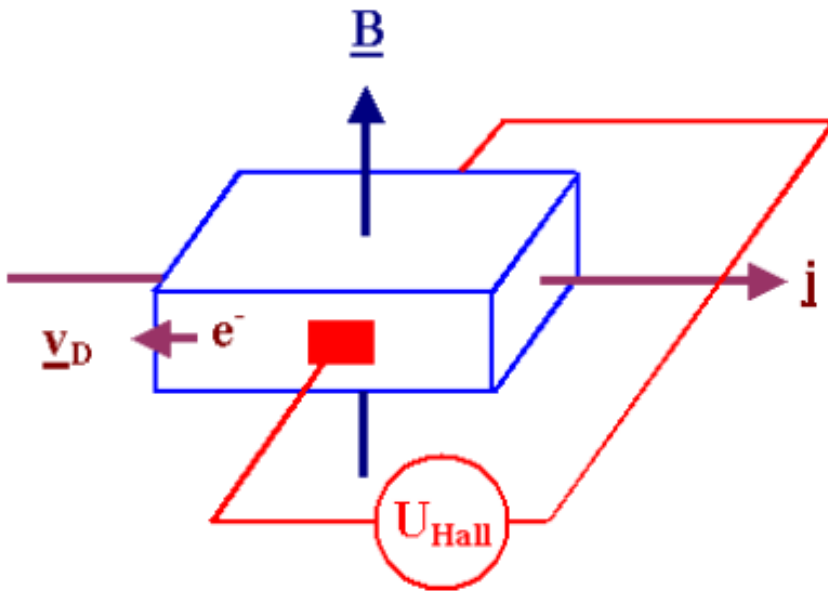
Αισθητήρες προσέγγισης μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Οι τυπικοί αισθητήρες αυτού του τύπου μπορούν να ανιχνεύουν σιδηρομαγνητικά υλικά σε αποστάσεις έως 2.5 mm. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές:

- ανίχνευση της γωνίας ενός άξονα.
- χρόνος ανάφλεξης σε κινητήρες.
- σε σκληρούς δίσκους ηλεκτρονικών υπολογιστών.
- ανίχνευση ταχύτητας κινητήρων.

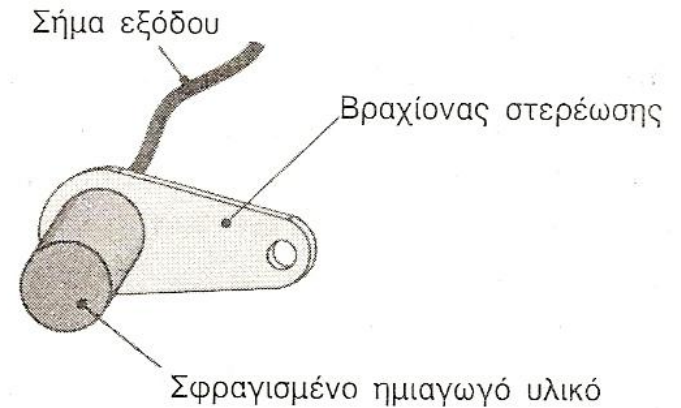


Αισθητήρες προσέγγισης φαινομένου Hall



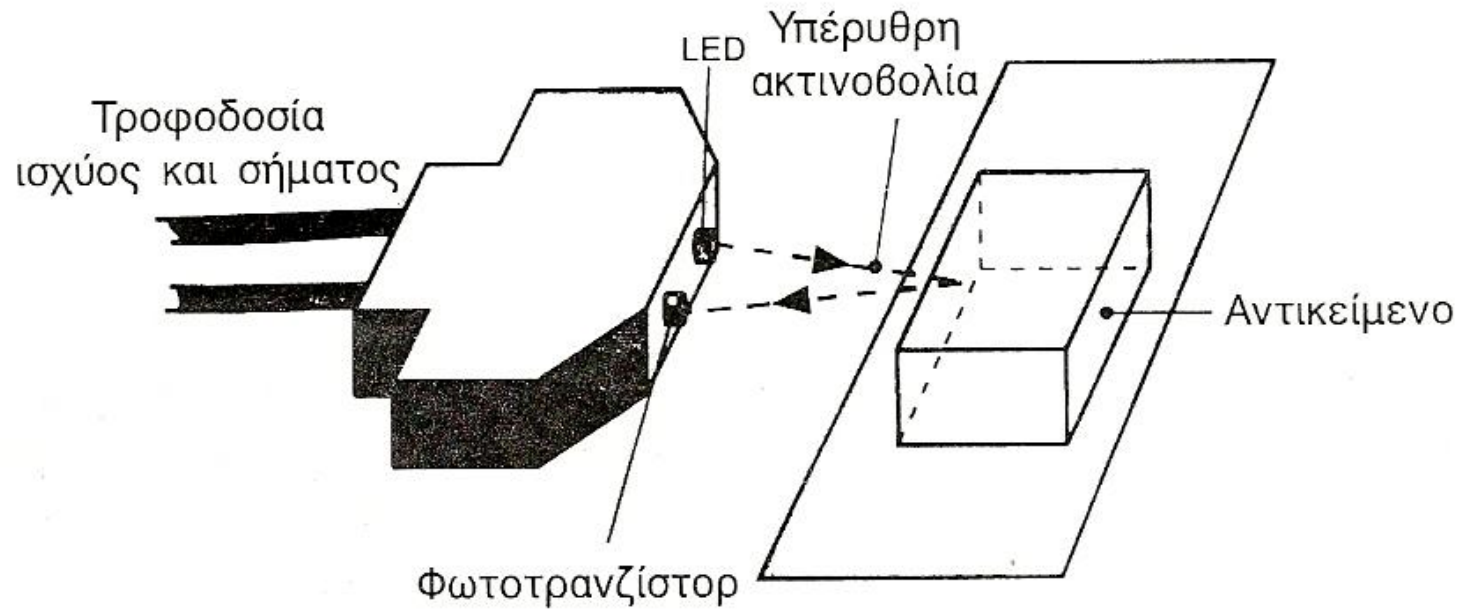
Το φαινόμενο Hall

$$U_{Hall} = \text{σταθ. } B \cdot I$$

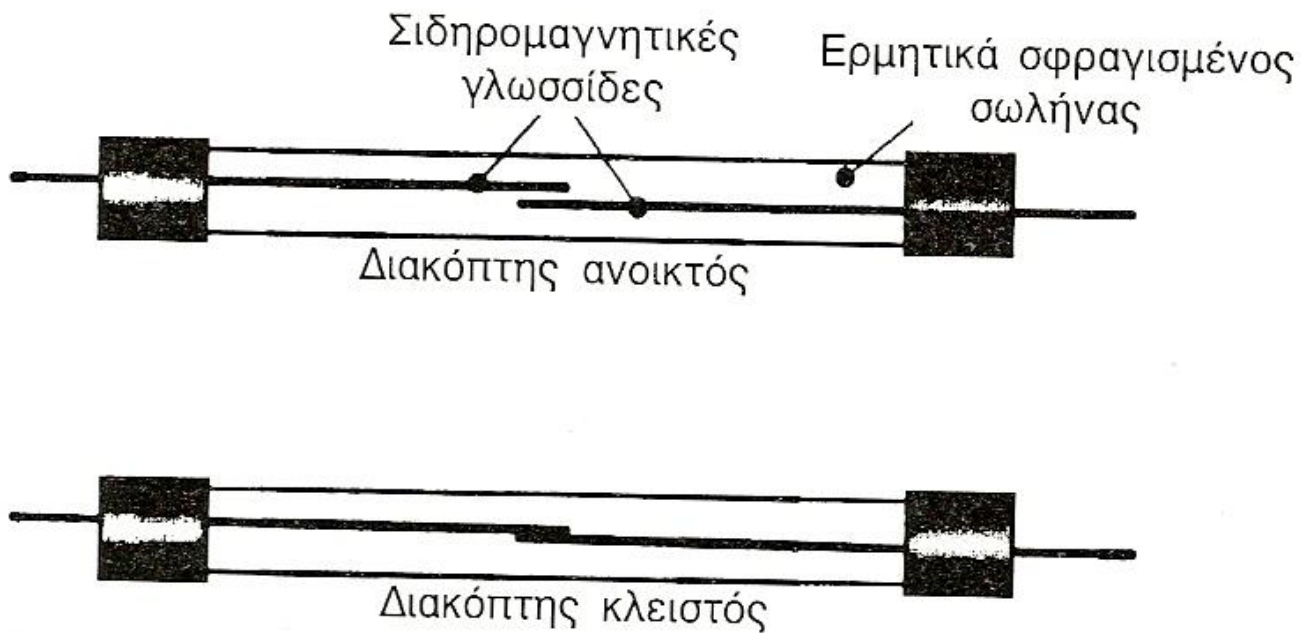


Ανιχνευτής φαινομένου Hall

Οπτικοί Αισθητήρες



Αισθητήρες διακόπτη με γλωσσίδα

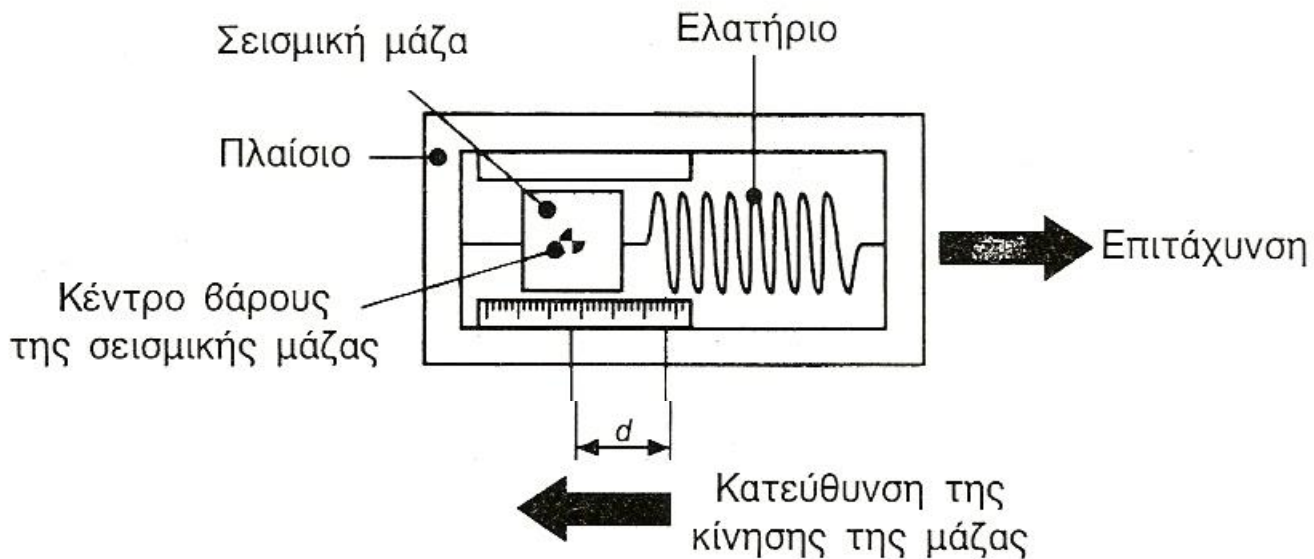


Επιταχυνσιόμετρα σεισμικής μάζας

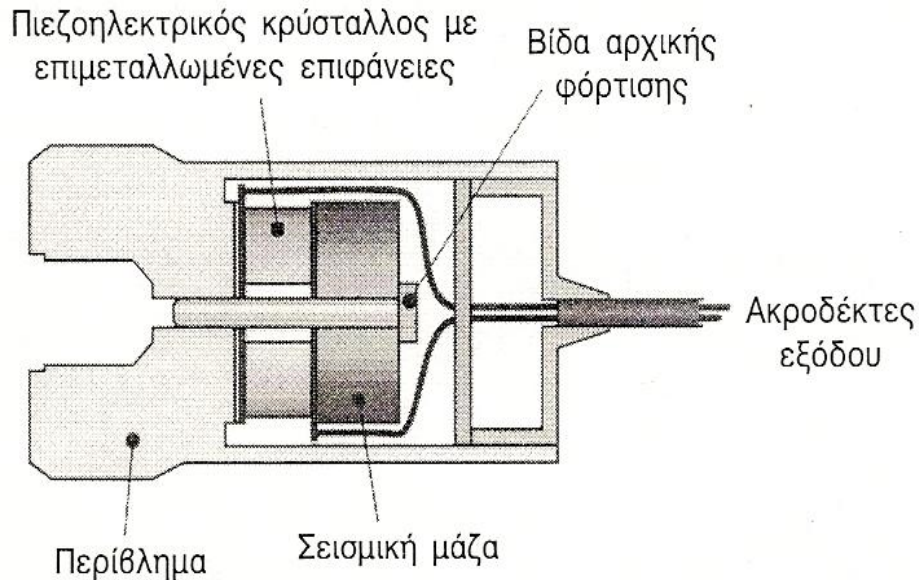
$$a = \frac{dK}{m}$$

όπου:

- a είναι η επιτάχυνση, σε $m\ s^{-2}$
- d είναι η μετατόπιση της μάζας ως προς το πλαίσιο, σε m
- K είναι η σταθερά του ελατηρίου, σε $N.m^{-1}$
- m είναι το μέγεθος της μάζας, σε kg



Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα



Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο βιομηχανικού ελέγχου με ενσωματωμένη ρύθμιση σήματος

Έξοδος

4 to 20 mA

Συχνотική απόκριση

2 Hz έως 1 kHz \pm 10%

Εύρος μετρήσεων

50 g (μέγιστο)

Ευαισθησία

0-10 mm.sec⁻¹

Περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας

-25°C έως 80°C

Θερμοκρασιακή ευαισθησία

0.08 %.^oC⁻¹

Ηλεκτρικός θόρυβος

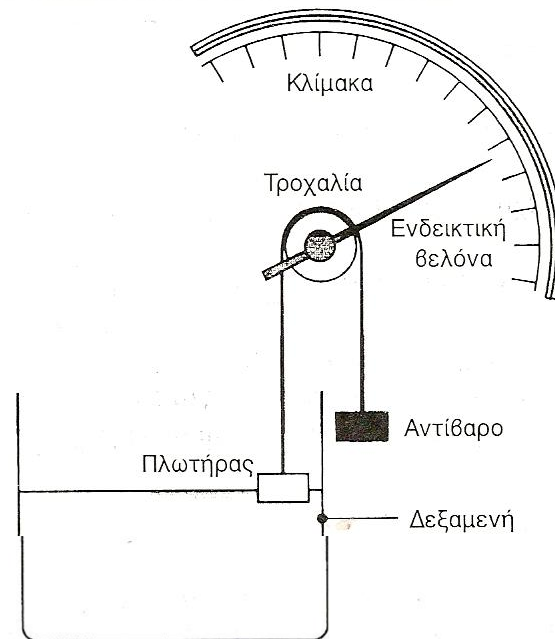
0.3 mV (μέγιστος)

ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΣΤΑΘΜΗΣ, ΥΨΟΥΣ, ΟΓΚΟΥ ΚΑΙ ΒΑΡΟΥΣ

Μετρήσεις στάθμης με πλωτήρα και αντίβαρο

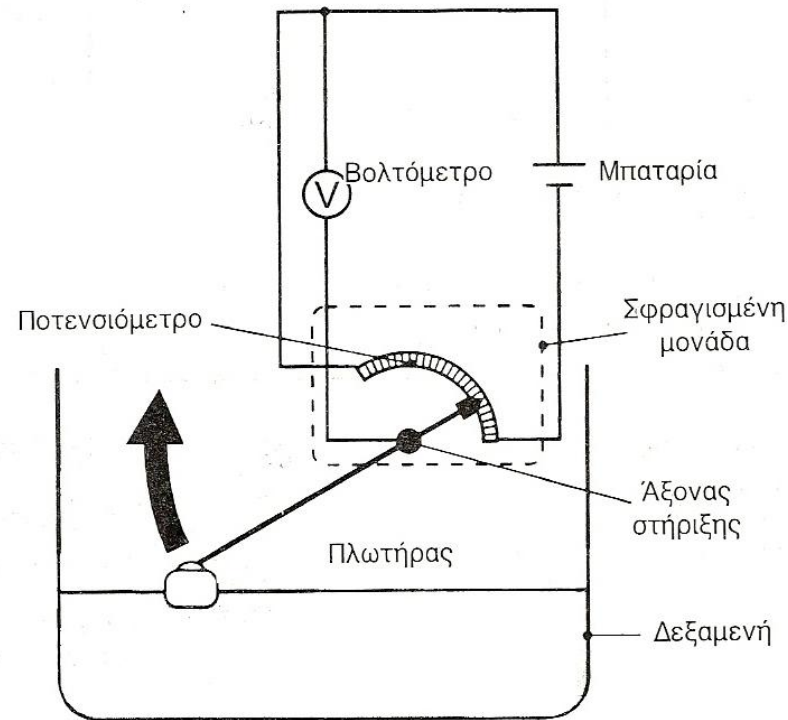
Ένας τυπικός μετρητής με πλωτήρα και αντίβαρο εικονίζεται στο Σχήμα 4.4. Εδώ, η κίνηση του πλωτήρα ακολουθεί τη μεταβαλλόμενη στάθμη του υγρού και επομένως κινεί την ενδεικτική βελόνα. Η κλίμακα μπορεί να βαθμονομηθεί σε μονάδες όγκου ή μάζας.

Μπορούν να ληφθούν ακριβείς ενδείξεις αλλά αυτό εξαρτάται από το μήκος της κλίμακας και το πλήθος των χαραγών που υπάρχουν σε αυτή.



Σχήμα 4.4 Μετρητής με πλωτήρα και αντίβαρο

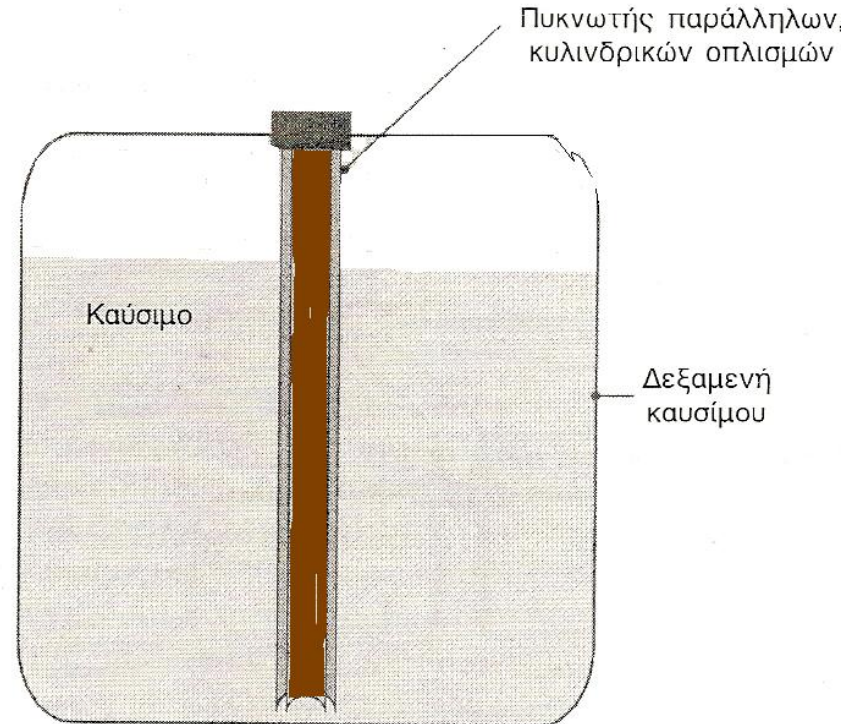
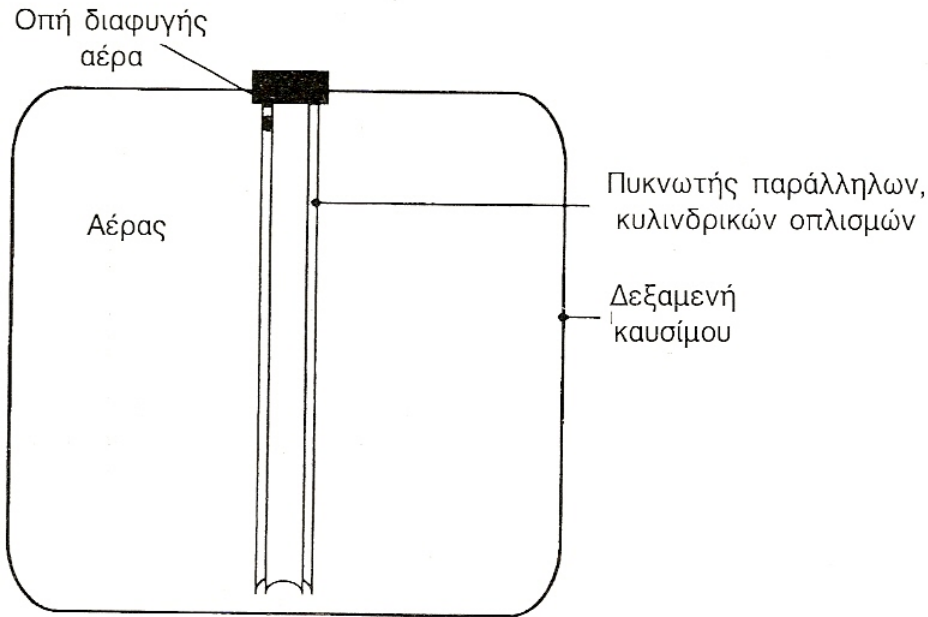
Ηλεκτρικός μετρητής με πλωτήρα



Η κλίμακα του βολτομέτρου μπορεί να βαθμονομηθεί σε μονάδες όγκου, μάζας ή ύψους.

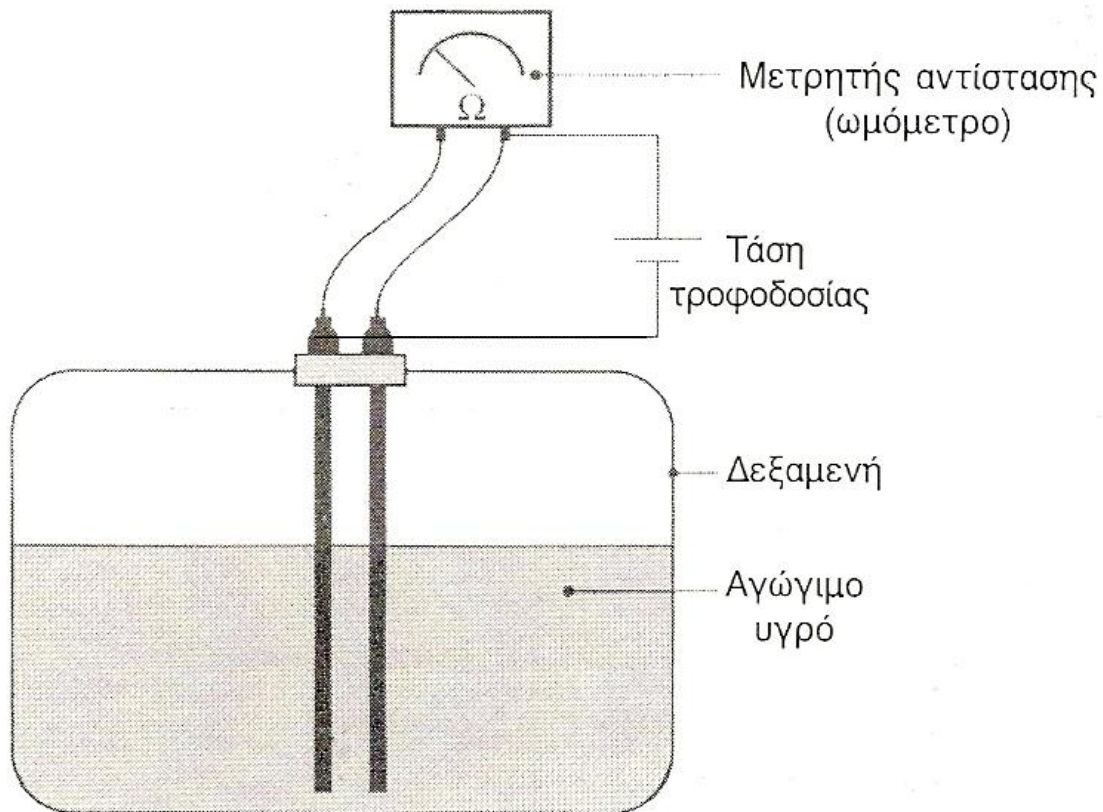
Επειδή το σήμα που δημιουργείται είναι ηλεκτρικό, μπορεί να ρυθμιστεί για τη λήψη ενδείξεων, καταγραφών και απεικόνισης από απόσταση, καθώς και να χρησιμοποιηθεί ως σήμα ανάδρασης από ένα σύστημα ελέγχου.

Βελόνες χωρητικότητας

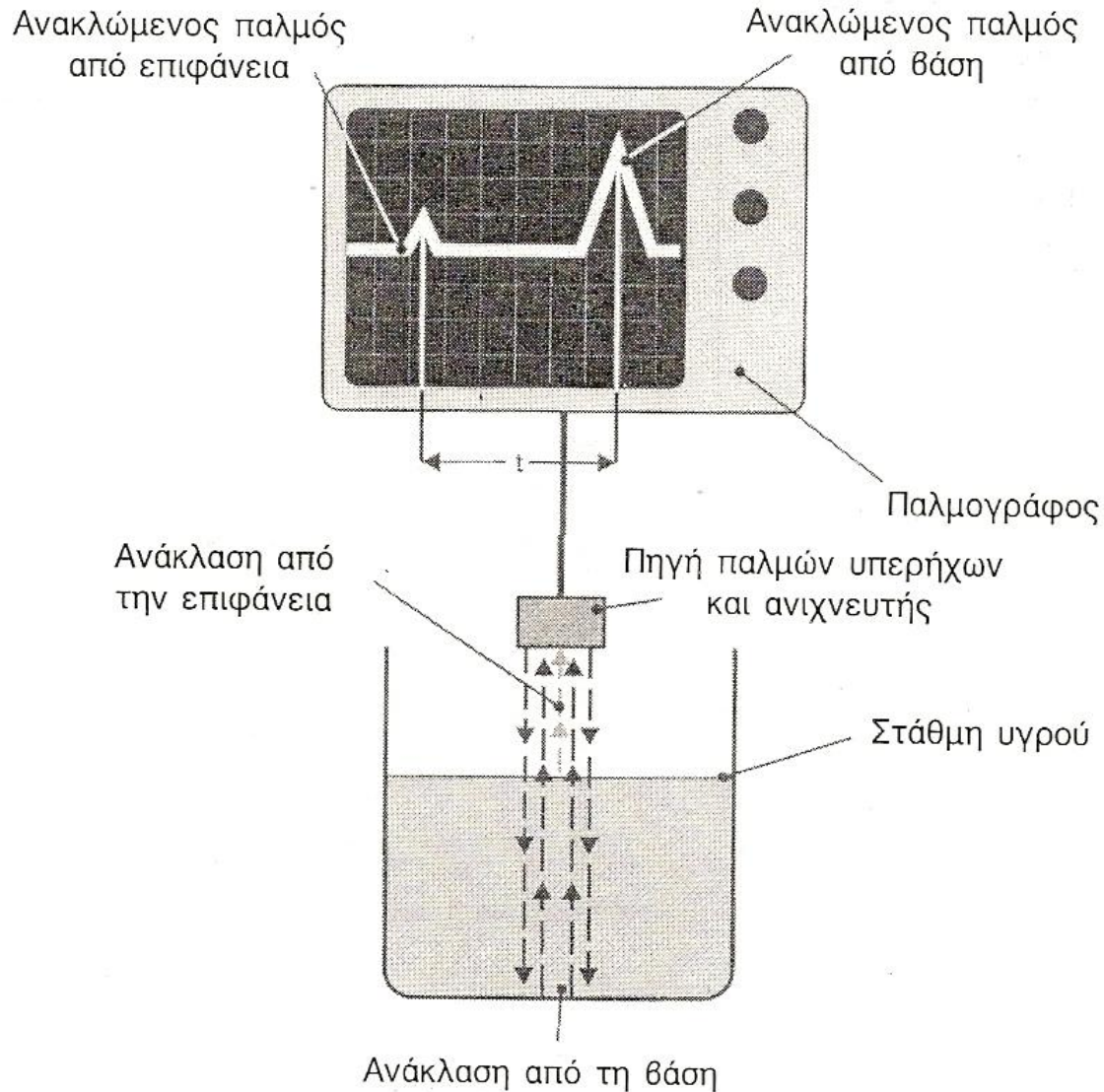


$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{r_{εξ.}}{r_{εσ.}}}$$

Βελόνη αγωγιμότητας



Μετρητής στάθμης με υπέρηχους



Μετρητής στάθμης με αισθητήρα πίεσης

$$P = \rho gh,$$

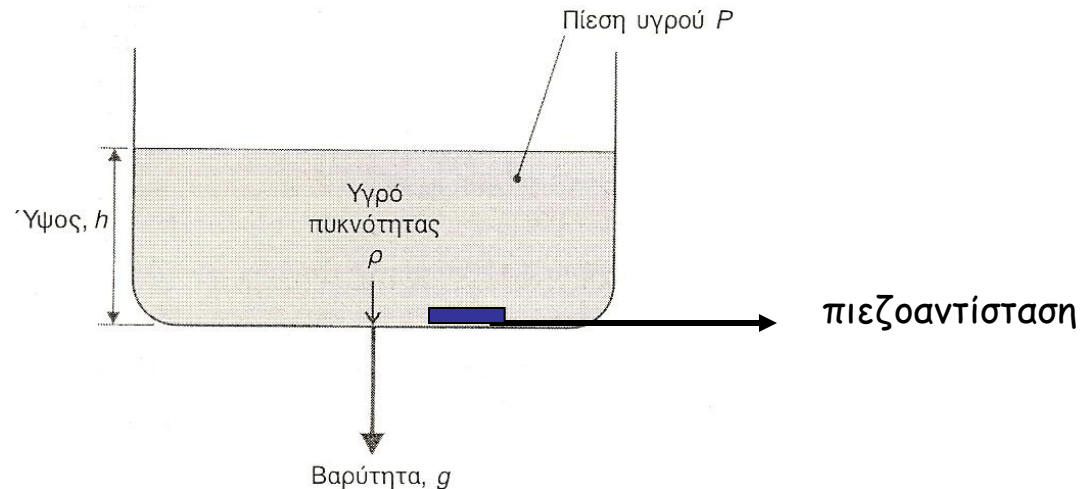
και έτσι είναι:

$$\text{Ύψος, } h = \frac{P}{\rho g}$$

όπου:

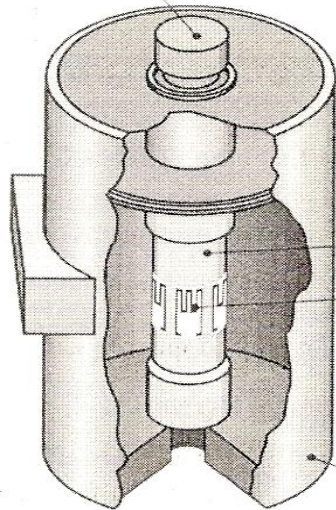
- ρ είναι η πυκνότητα του υγρού, σε kg.m^{-3} ,
- g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, που ισούται με 9.81 m.s^{-2}
- h είναι το ύψος του υγρού, σε m

Επομένως το h είναι ανάλογο της πίεσης P , εφόσον τα ρ και g είναι σταθερά για ένα δεδομένο υγρό και μία δεξαμενή σταθερής διατομής.



Μετρητές βάρους με κυψελίδες φόρτισης

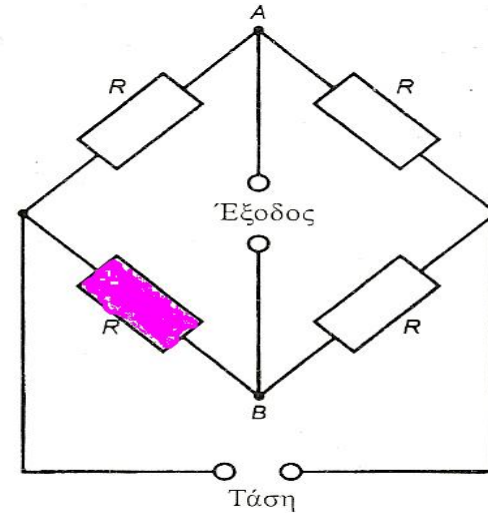
Πλήκτρο φόρτισης



Στοιχείο στήριξης φορτίου

Στοιχείο μετρητή μηχανικής τάσης

Προστατευτική θήκη



Γέφυρα Wheatstone

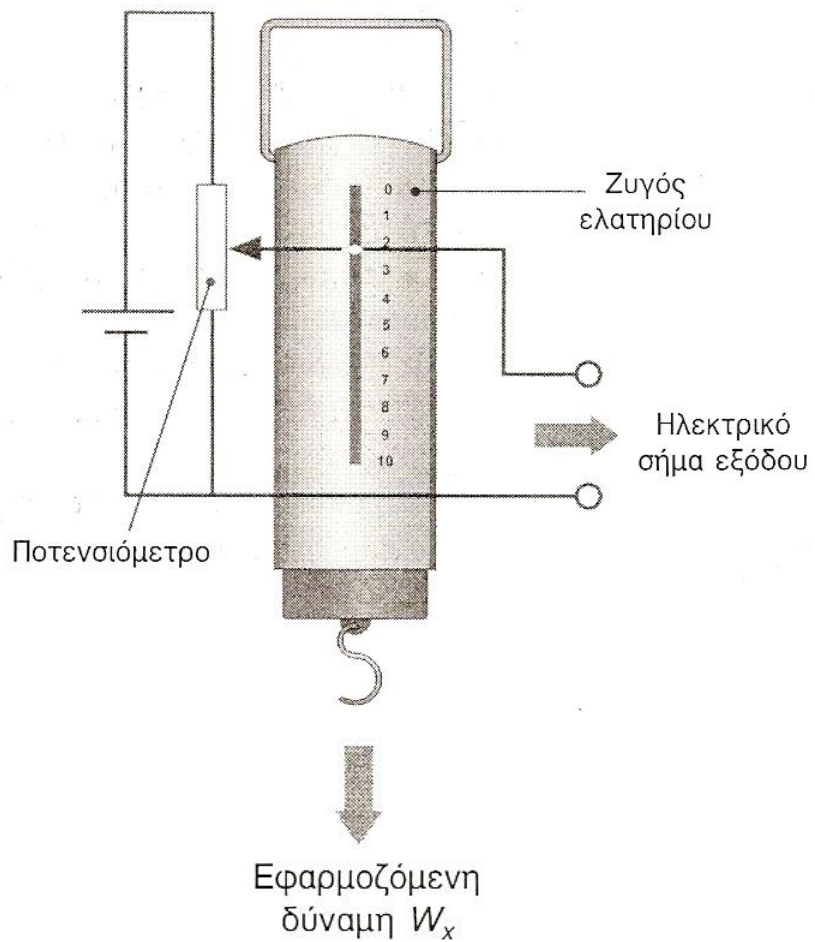
Οι κυψελίδες φόρτισης χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα, για τη μέτρηση:

- ♦ του βάρους υλικών που αποθηκεύονται σε κάδους
- ♦ του βάρους οχημάτων σε γέφυρες ζύγισης
- ♦ της στάθμης και του όγκου υγρών σε δεξαμενές (εάν είναι γνωστό το βάρος, μπορεί να υπολογιστεί ο όγκος)

Οι προδιαγραφές δείχνουν ότι οι συσκευές αυτές:

- ♦ είναι ακριβείς (καλύτερα από 0.25%)
- ♦ είναι γραμμικές (καλύτερα από 90%)
- ♦ έχουν καλή επαναληψιμότητα (καλύτερα από 0.25%)
- ♦ είναι ανθεκτικές σε υπερφόρτιση (καλύτερα από 150%)

Ζυγός ελατηρίου με ποτενσιόμετρο



ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΙΕΣΗΣ

Πίεση

Pressure (symbol: p) is the force per unit area acting on a surface in a direction perpendicular to that surface. Mathematically :

$$p = F/A$$

where p is the pressure, F is the normal force, and A is the area. Pressure is transmitted to solid boundaries or across arbitrary sections of fluid *normal* to these boundaries or sections at every point. It is a fundamental parameter in thermodynamics and it is conjugate to volume. A closely related quantity is the stress tensor σ which relates the vector force \mathbf{F} to the vector area \mathbf{A} via :

$$\mathbf{F} = \sigma \mathbf{A}$$

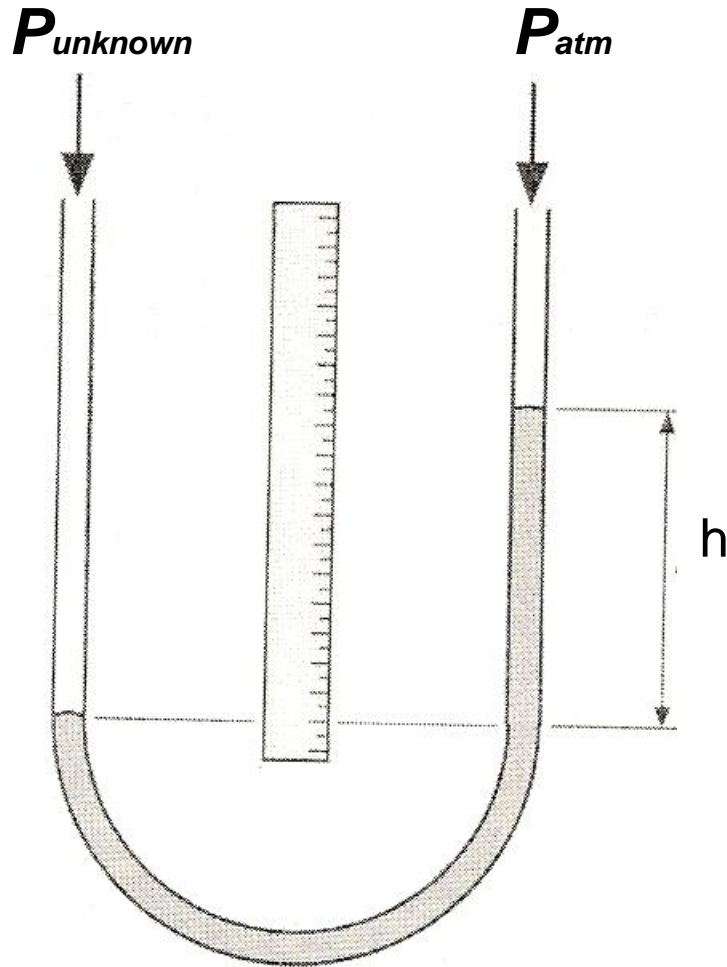
This tensor may be divided up into a scalar part (pressure) and a traceless tensor part shear. The shear tensor gives the force in directions *parallel* to the surface, usually due to viscous or frictional forces. The stress tensor is sometimes called the pressure tensor, but in the following, the term "pressure" will refer only to the scalar pressure.

Conversion table

Some popular pressure units and conversion factors

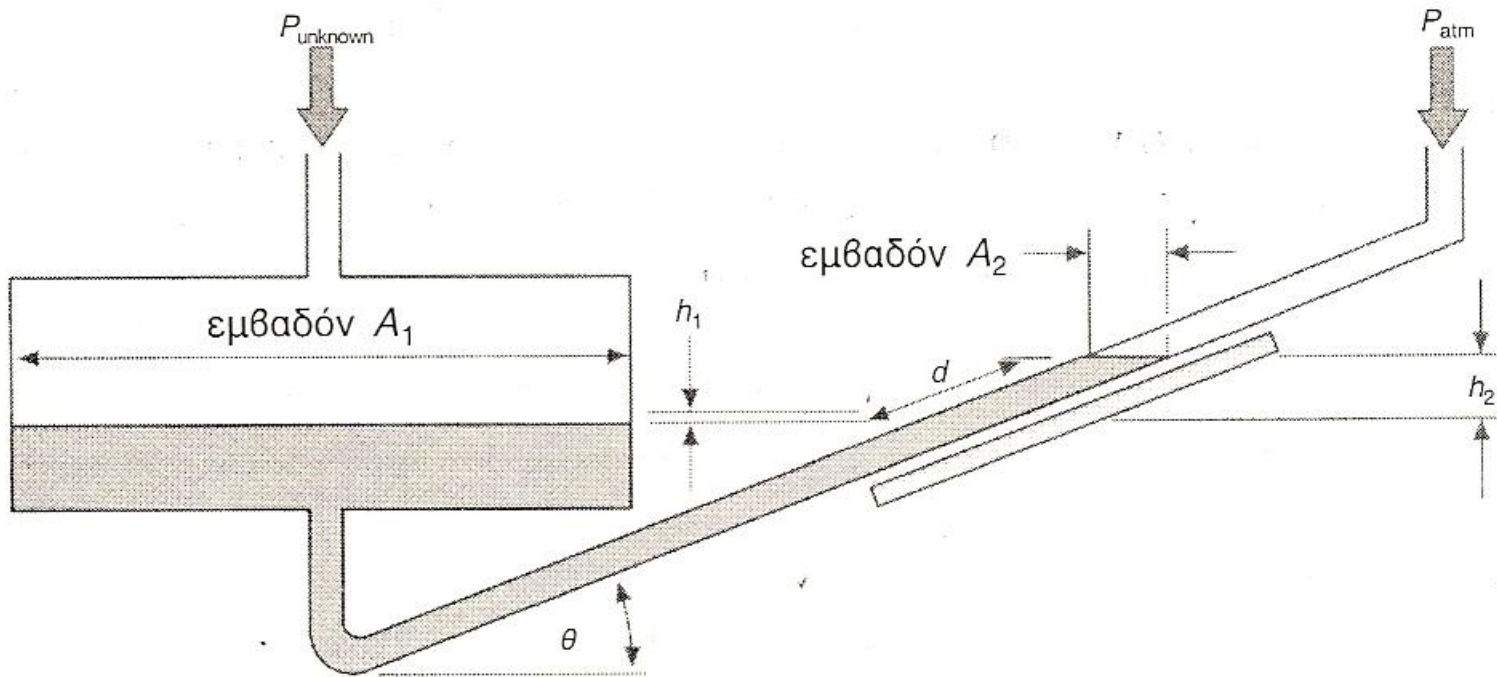
	pascal	MPa	bar	kp/m ²	at	atm	Torr
1 Pa (N/m²) =	1	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	0.102	0.102×10 ⁻⁴	0.987×10 ⁻⁵	0.0075
1 MPa (N/mm²) =	10 ⁶	1	10	1.02×10 ⁵	10.2	9.87	7501
1 <u>bar</u> (daN/cm²) =	10 ⁵	0.1	1	10200	1.02	0.987	750
1 <u>kp/m²</u> =	9.81	9.81×10 ⁻⁶	9.81×10 ⁻⁵	1	10 ⁻⁴	0.968×10 ⁻⁴	0.0736
1 <u>at</u> (kp/cm²) =	98100	0.0981	0.981	10000	1	0.968	736
1 <u>atm</u> (760 Torr) =	101325	0.1013	1.013	10330	1.033	1	760
1 <u>Torr</u> (<u>mmHg</u>) =	133	1.33×10 ⁻⁴	0.00133	13.6	0.00132	0.00132	1

Μανόμετρο υοειδούς σωλήνα



$$P_{unknown} = P_{atm} + \rho gh$$

Μανόμετρο κεκλιμένου επιπέδου



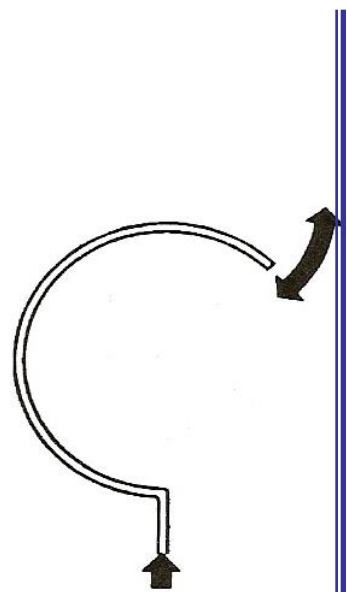
$$P_{\text{gauge}} = P_{\text{unknown}} - P_{\text{atm}} = \rho g d \left(\frac{A_2}{A_1} + \sin \theta \right)$$

όπου:

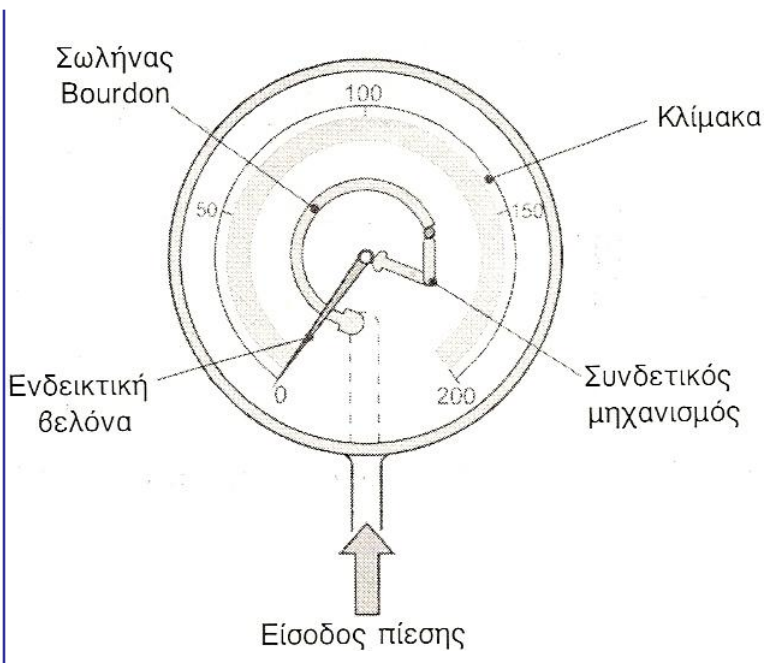
- ρ είναι η πυκνότητα του υγρού μέσα στο σωλήνα, σε $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, που είναι $9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
- d είναι η απόσταση κατά την οποία έχει κινηθεί το υγρό στον κεκλιμένο σωλήνα, σε m
- A_2 είναι το εμβαδόν της δεξαμενής, σε m^2
- A_1 είναι το εμβαδόν του υγρού στον κεκλιμένο σωλήνα, σε m^2
- θ είναι η γωνία κλίσης του κεκλιμένου σωλήνα, ως προς το οριζόντιο επίπεδο

Ελαστικοί αισθητήρες πίεσης

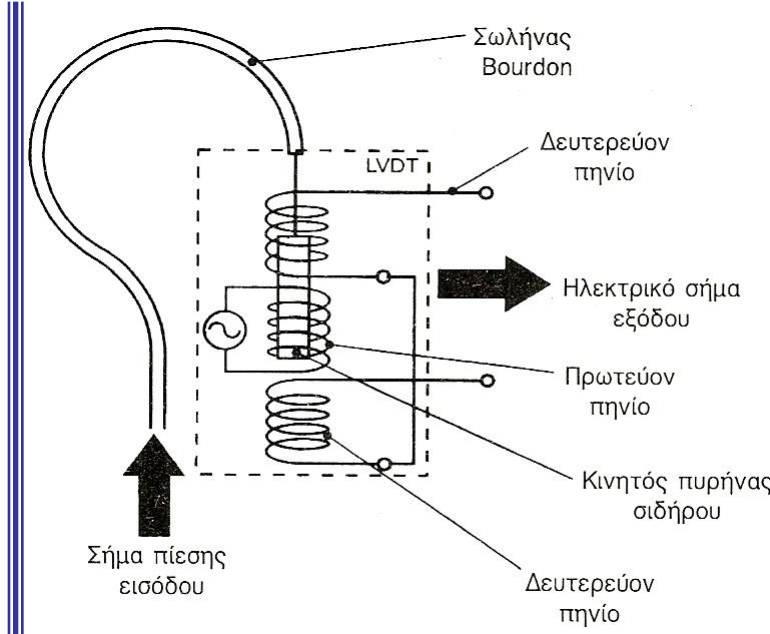
Μετρητής πίεσης με σωλήνα Bourdon



Σωλήνας Bourdon

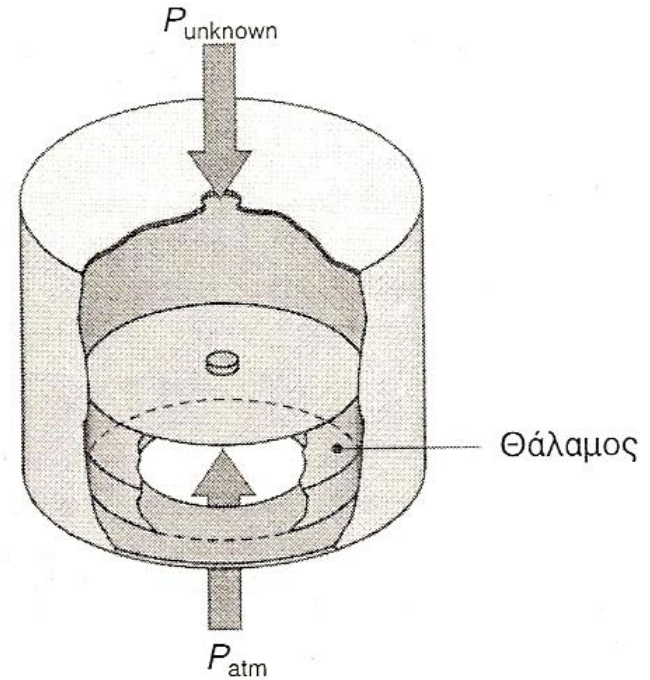
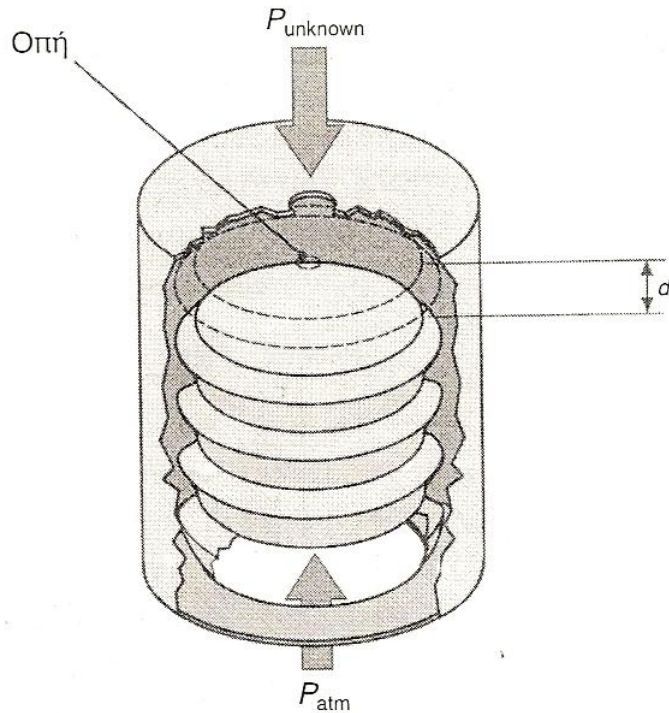


Μηχανισμός μετρητή πίεσης με Σωλήνα Bourdon.



Συνδυασμός σωλήνα Bourdon με LVDT.

Φυσητήρας

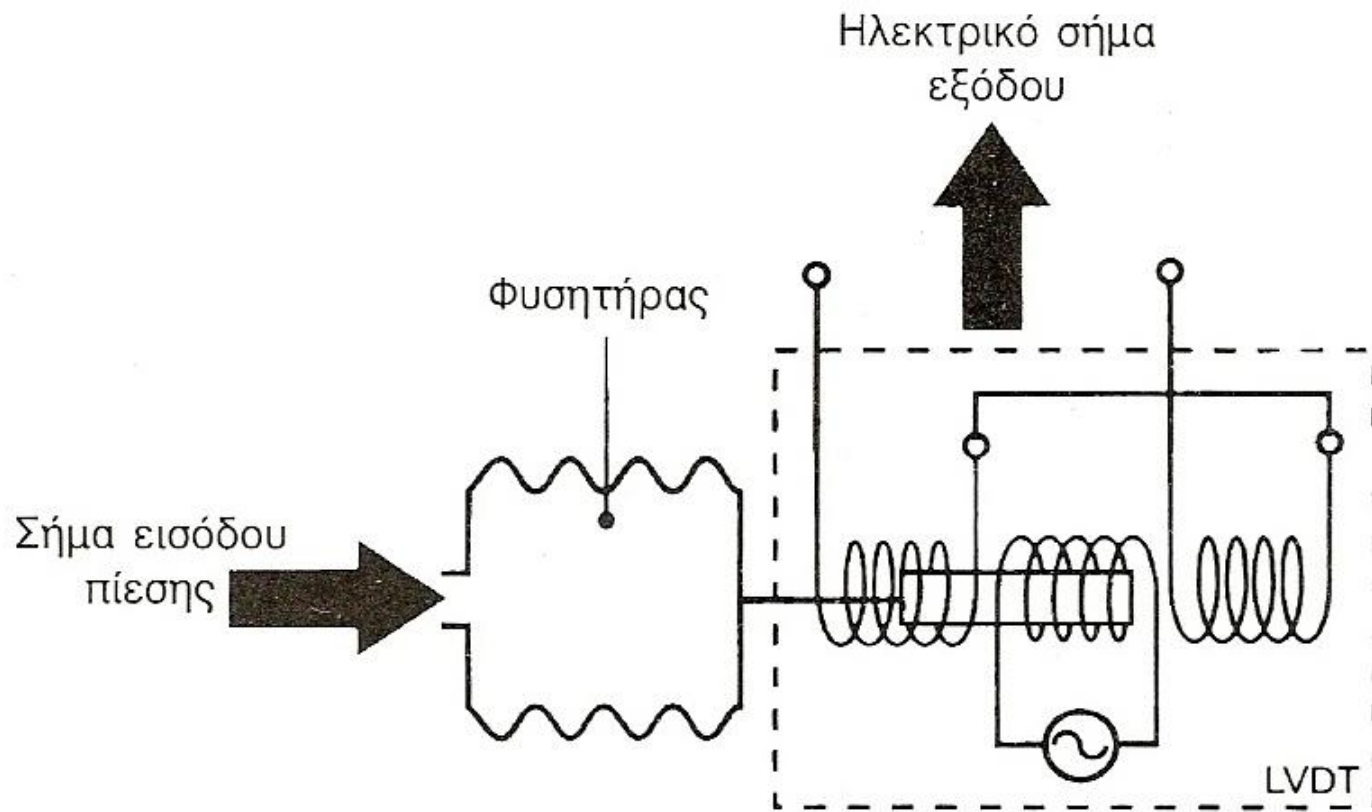


Η πίεση που ασκείται στο φυσητήρα είναι P_{unknown} και δίνεται από την εξίσωση:

$$P_{\text{unknown}} = \frac{d}{A} \lambda$$

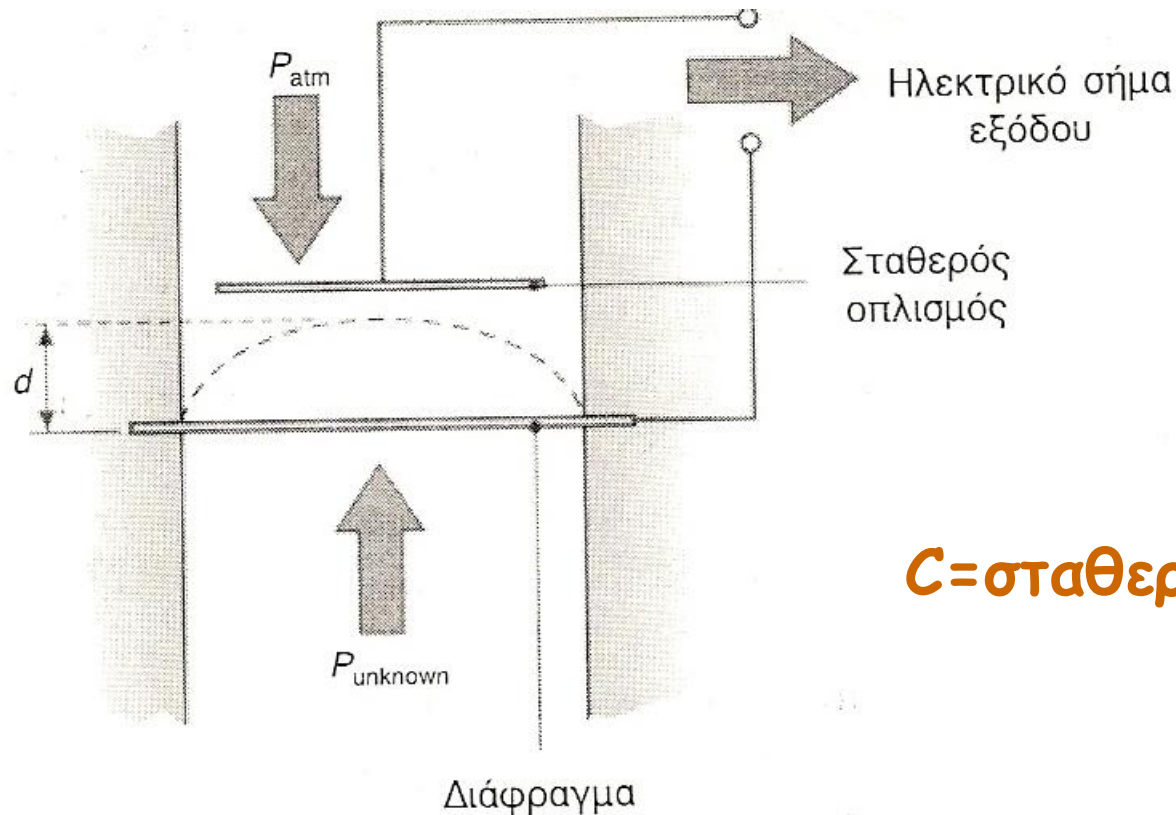
όπου:

- d είναι η απόσταση που διαγράφεται από το φυσητήρα, σε m
- A είναι το εμβαδόν διατομής του φυσητήρα, σε m^2
- λ είναι η σταθερά του φυσητήρα (ανάλογη με τη σταθερά των ελατηρίων), σε $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$



Συνδυασμός φυσητήρα με LVDT

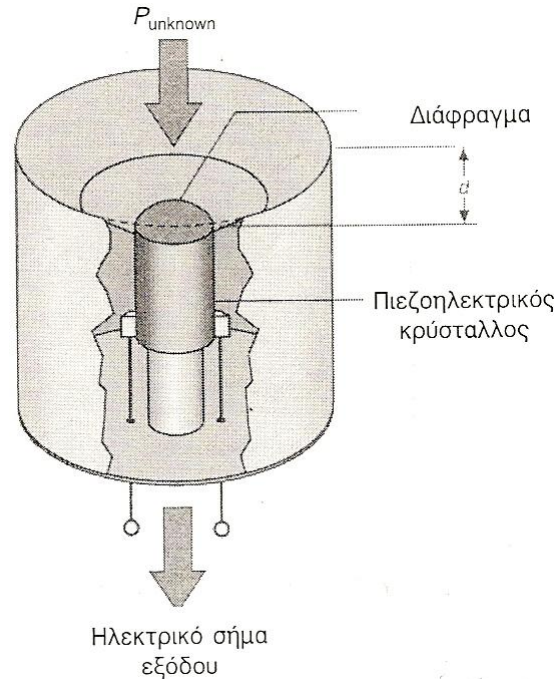
Χωρητικοί αισθητήρες πίεσης



$$C = \text{σταθερά} / d$$

Στους δύο οπλισμούς εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό σήμα. Κάθε αλλαγή της χωρητικότητας θα προκαλέσει μεταβολή του σήματος αυτού. Το σήμα στη συνέχεια υφίσταται ρύθμιση και εμφανίζεται σε μία συσκευή που έχει βαθμονομηθεί σε μονάδες πίεσης.

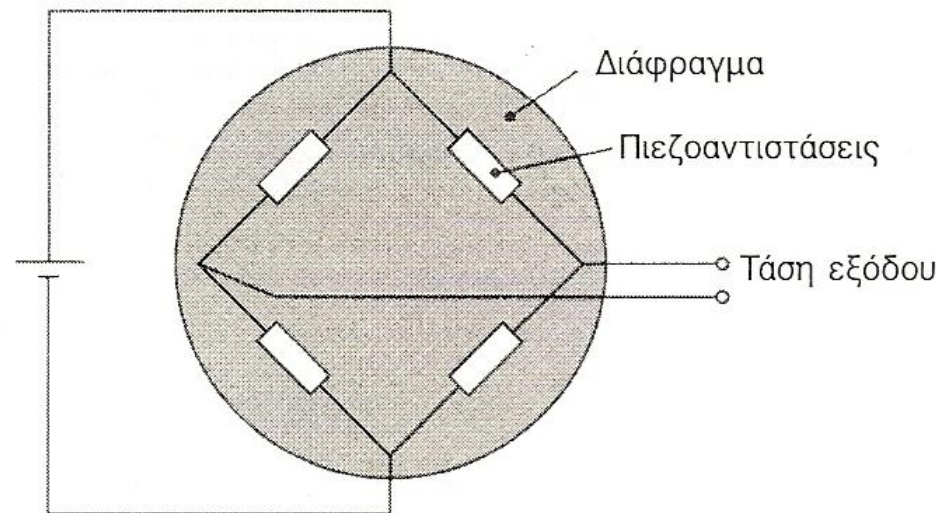
Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες πίεσης



Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος είναι συνήθως ένα κομμάτι *χαλαζία* (*quartz*). Αυτός ο τύπος αισθητήρα ενσωματώνει συχνά κάποιο κύκλωμα ρύθμισης σήματος σε σφραγισμένη μονάδα, χρησιμοποιώντας τεχνολογία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Αισθητήρες πίεσης με πιεζοαντίσταση και μετρητές μηχανικής τάσης

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



Διάφραγμα πιεζοαντίστασης

Όταν ασκείται πίεση στο διάφραγμα, οι αντιστάτες δέχονται μηχανική τάση. Η αντίστασή τους αλλάζει ανάλογα με την τάση αυτή και έτσι η μεταβολή της πίεσης γίνεται αντιληπτή.

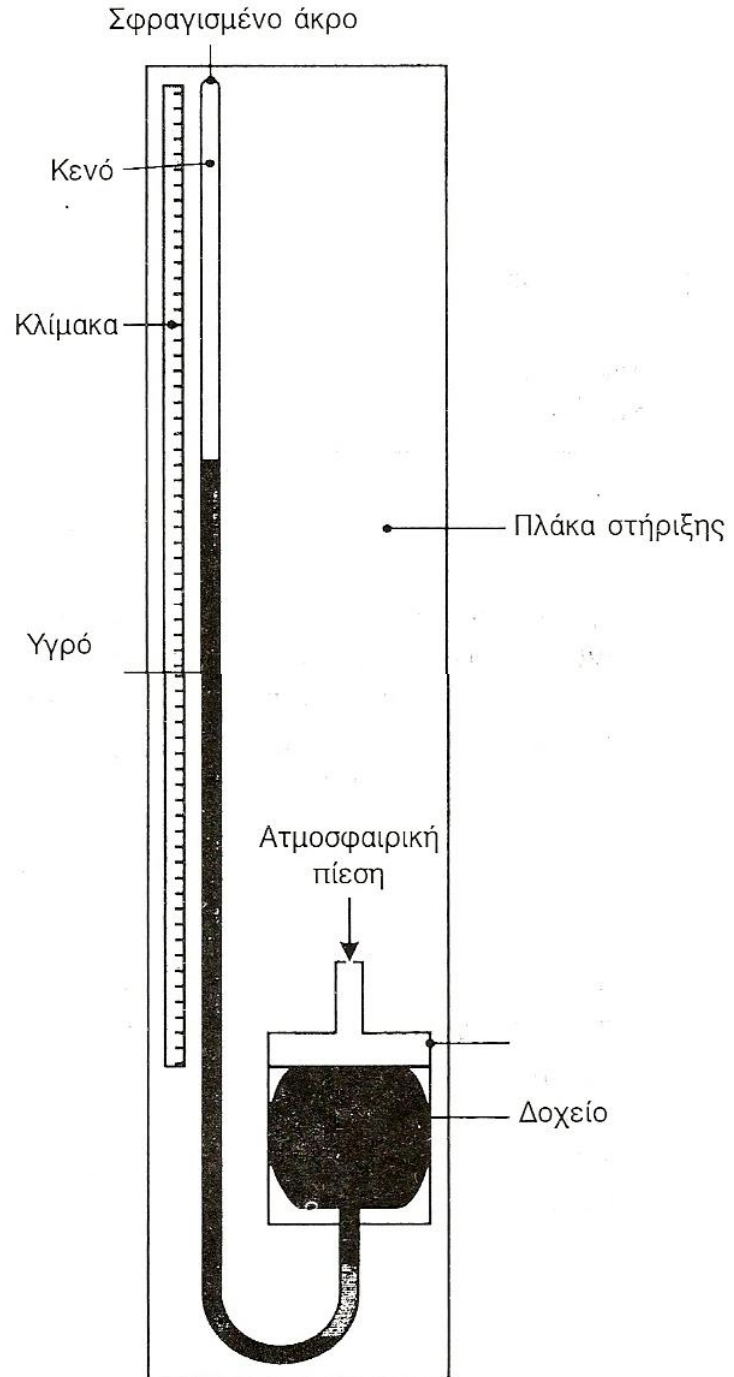
Προδιαγραφές ενός αισθητήρα πίεσης με πιεζοαντίσταση

Αισθητήρας πίεσης με πιεζοαντίσταση
Εύρος
0–50 kPa
Έξοδος πλήρους κλίμακας
50 mV
Ακρίβεια
$\pm 0.2\%$
Ευαισθησία
1 mV ανά kPa
Μέγιστη υπερπίεση
140 kPa
Χρόνος απόκρισης
< 1 ms
Τάση τροφοδοσίας
10 V
Επαναληψιμότητα και υστέρηση
$\pm 0.01\%$ FSO

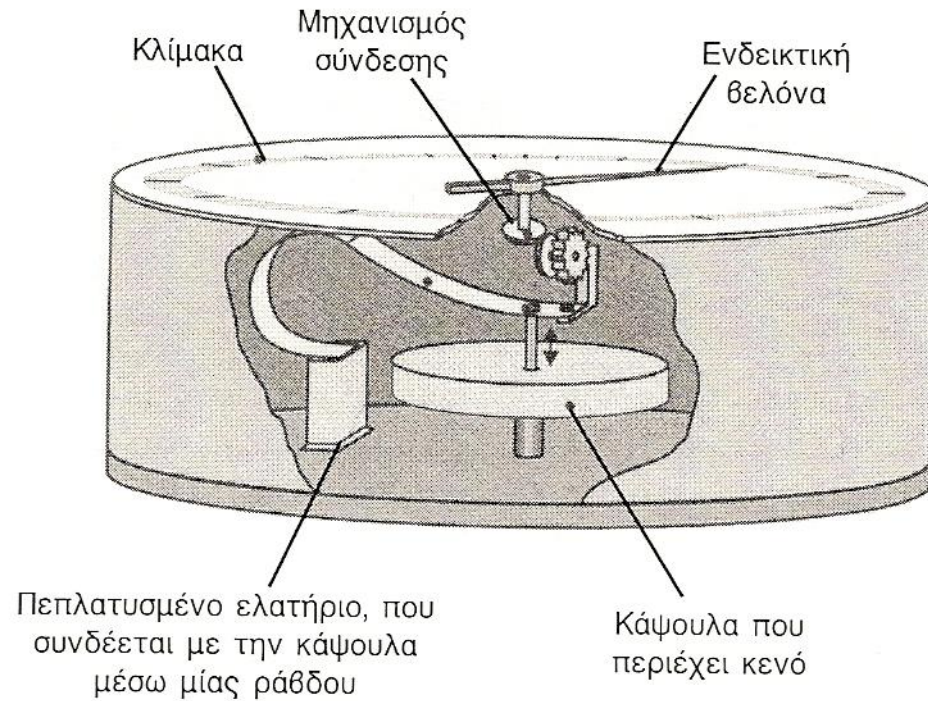
Βαρόμετρα

Το *βαρόμετρο* (*barometer*) είναι ένας αισθητήρας πίεσης που χρησιμοποιείται ειδικά για τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης. Λόγω αυτής της χρήσης, πρέπει να είναι ευαίσθητοι και να μετρούν την πίεση με απόλυτο τρόπο. Χρησιμοποιούνται βασικά για μετεωρολογικούς σκοπούς. Η υψηλή ατμοσφαιρική πίεση σχετίζεται κύρια με την καλοκαιρία, ενώ η εμφάνιση χαμηλών πιέσεων προμηνύει κακοκαιρία.

Βαρόμετρο υγρού



Μεταλλικό βαρόμετρο

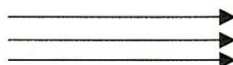


Το μεταλλικό βαρόμετρο είναι ευκολότερο στην ανάγνωση και καταλαμβάνει μικρότερο χώρο από το βαρόμετρο υγρού. Δεν επηρεάζεται από μεταβολές θερμοκρασίας τόσο σημαντικά, αλλά είναι λιγότερο ακριβές, επειδή περιέχει πολλά μηχανικά μέρη. Στην πράξη τα μεταλλικά βαρόμετρα βαθμονομούνται με τη βοήθεια των βαρομέτρων υγρού.

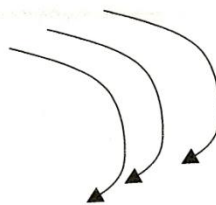
Τα μεταλλικά βαρόμετρα χρησιμοποιούνται ευρέως για οικιακούς σκοπούς. Πιθανόν βαθμονομούνται σε μονάδες εκτός του SI, όπως είναι τα χιλιοστόμετρα υδραργύρου και τα bar. Μερικές εκδόσεις βαθμονομούνται με βάση τις καιρικές συνθήκες που προκύπτουν!

ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΡΟΗΣ

- **Στρωτή ροή** : τα διανύσματα ταχυτήτων των στοιχειωδών μαζών του ρευστού είναι παράλληλα.



- **Τυρβώδη ροή** : τα διανύσματα ταχυτήτων των στοιχειωδών μαζών του ρευστού δεν είναι παράλληλα.



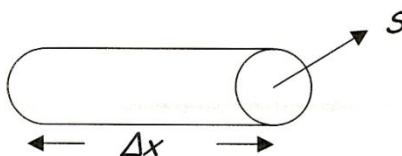
Οι αισθητήρες ροή μετρούν :

➤ Όγκο V , $P = \frac{V}{t}$

➤ Μάζα m ή βάρος W , $P = \frac{m}{t}$ ή $P = \frac{W}{t}$

➤ Ταχύτητα v

Σχέσεις μεταξύ των παραπάνω μετρούμενων μεγεθών :

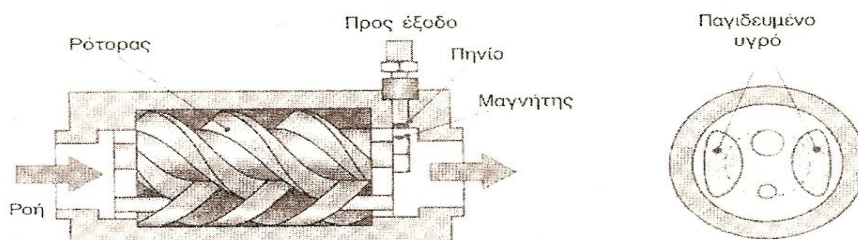


$$P = \frac{V}{t} = \frac{m}{d \cdot t} \Rightarrow m = d \cdot P \quad , \quad P = \frac{V}{t} = \frac{S \cdot \Delta x}{t} = S \cdot v \Rightarrow v = \frac{P}{S}$$

όπου d η πυκνότητα του ρευστού

Ι. ΜΕΤΡΗΣΗ ΟΓΚΟΥ

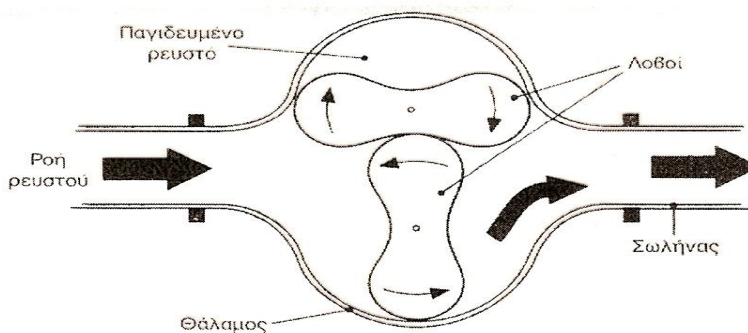
Μετρητής ελικοειδούς κοχλίας



-Η ποσότητα του ρευστού που προκαλεί μια περιστροφή του ρότορα είναι γνωστή.

-Οι επαγόμενοι παλμοί τάσης στο πηνίο απαριθμούνται και έτσι υπολογίζεται η συνολική ποσότητα του ρευστού.

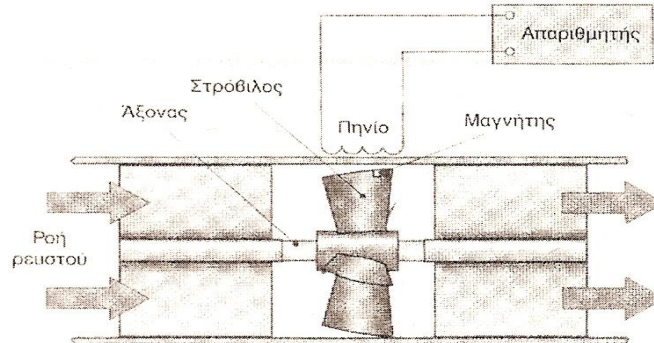
Μετρητής περιστρεφόμενων λοβών



-Κάθε λοβός παγιδεύει συγκεκριμένη ποσότητα ρευστού κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής.

-Απαριθμώντας τον αριθμό περιστροφών μπορεί να υπολογιστεί η συνολική ποσότητα του ρευστού.

Μετρητής στροβίλου

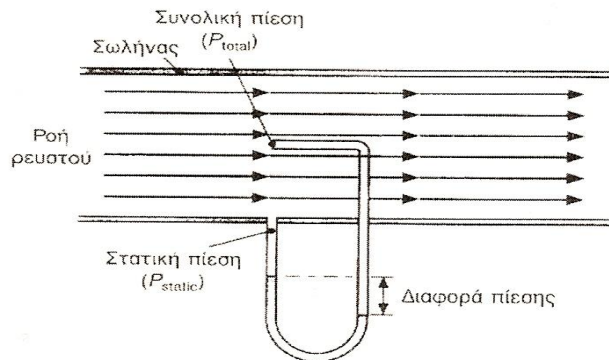


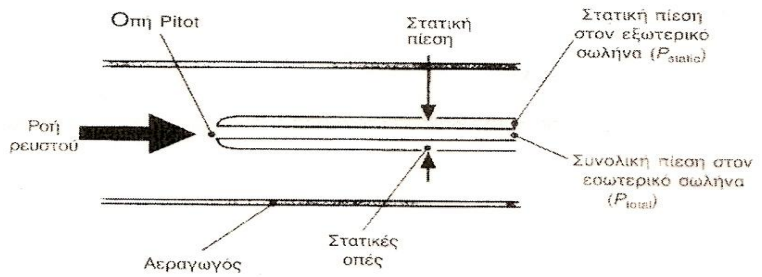
- Η ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου είναι ανάλογη με την ταχύτητα του ρευστού.

- Μετρώντας περιστροφής του στροβίλου μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα του ρευστού.

II. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Σωλήνες Pitot

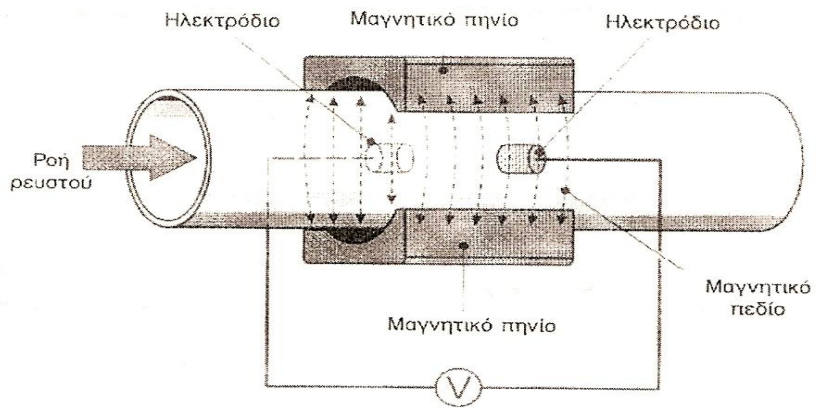




$$v = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}} \quad , \quad \text{όπου } \rho \text{ η πυκνότητα του ρευστού}$$

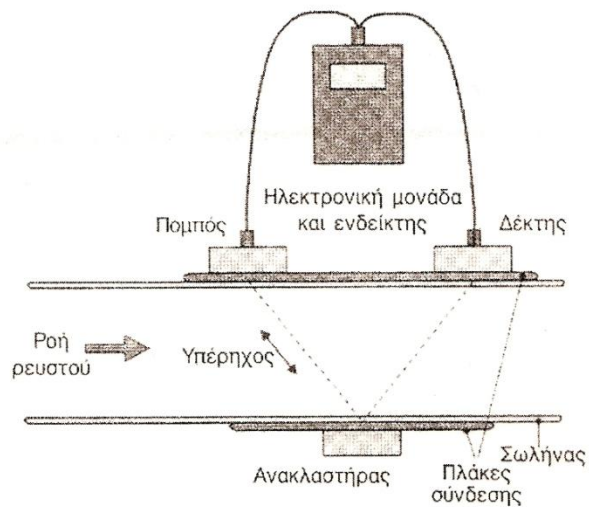
ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΟΥ ΔΕΝ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΡΟΗ

Ηλεκτρομαγνητικός μετρητής ροής



Στηρίζεται στο νόμο του Faraday : $V_{\text{HE}\Delta} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{l} \cdot \mathbf{u}$

Μετρητής ροής υπερήχων



-Η ταχύτητα διάδοσης ενός υπέρηχου σε ένα ρευστό εξαρτάται από την ταχύτητα $υ$ του ρευστού (μέτρο και κατεύθυνση).

-Μετρώντας την διαφορά χρόνου Δt μεταξύ Πομπού - Ανακλαστήρα και Ανακλαστήρα - Δέκτη, υπολογίζεται η ταχύτητα του ρευστού.

ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ

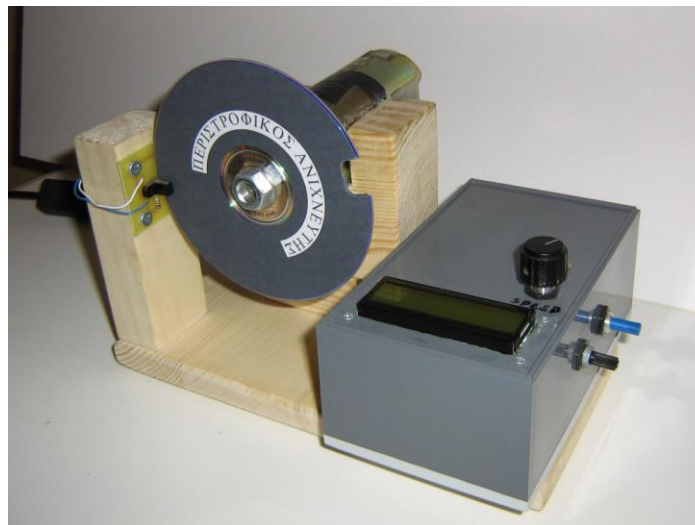
Η μέτρηση των στροφών (π.χ. ενός κινητήρα) μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους:

- μέσω μαγνητικού πεδίου (φαινόμενο Hall)
- μέσω οπτικών στοιχείων (φωτοκύτταρα, οπτοζεύκτες)

Περιγραφή λειτουργίας

Η κατασκευή του μετρητή στροφών βασίζεται στην λειτουργία οπτικών στοιχείων και πιο συγκεκριμένα στην λειτουργία ενός **ΟΠΤΟΖΕΥΚΤΗ (optocapler)**.

Ως πηγή των στροφών του μετρητή στροφών χρησιμοποιήθηκε ένα μοτέρ χαμηλής τάσης τροφοδοσίας (12 VDC) και μέγιστης ταχύτητας 2.900 στροφές ανά λεπτό.

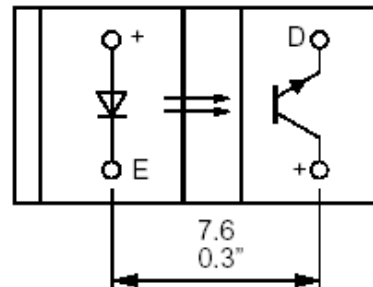


Οπτοζεύκτης (Optocapler)

- Ο οπτοζεύκτης αποτελείται από έναν **πομπό** (φωτοκύτταρο υπέρυθρης ακτινοβολίας) και από έναν **δέκτη** (φωτοτρανζίστορ). Ο πομπός και ο δέκτης είναι τοποθετημένοι αντικριστά μεταξύ τους έχοντας ανάμεσά τους απόσταση περίπου 1 cm.
- Όταν τροφοδοτείτε ο πομπός με τάση 5 VDC τότε εκπέμπει μια υπέρυθρη δέσμη η οποία προσπίπτει πάνω στον δέκτη.
- Ο δέκτης (φωτοτρανζίστορ) με τη σειρά του διεγείρεται από την υπέρυθρη δέσμη και αφήνει στην έξοδο του (στον εκπομπό του φωτοτρανζίστορ) να περάσει τάση 1,2 VDC.
- Αν η υπέρυθρη δέσμη φως δεν προσπίπτει πάνω στον δέκτη τότε στην έξοδό του έχουμε μηδενική τάση.



Οπτοζεύκτης



Κυκλωματικό διάγραμμα

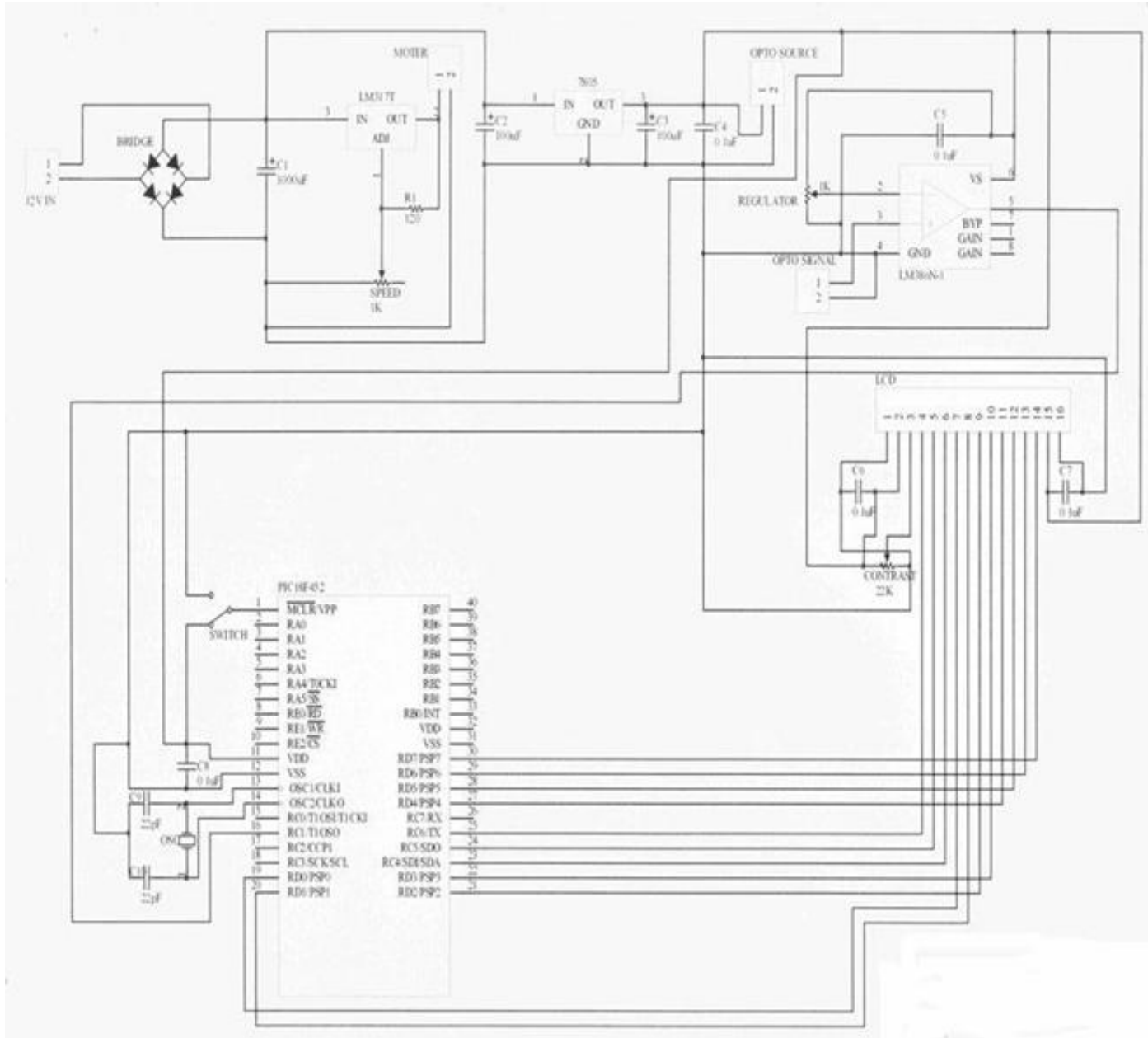
Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη παρεμβάλλεται ένας δίσκος CD που έχει σε ένα σημείο της περιμέτρου του μια μικρή εγκοπή (κενό).

Κατά την περιστροφή του δίσκου η εγκοπή του δίσκου αφήνει το κενό ελεύθερο ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη και έτσι έχουμε στην έξοδο του οπτοζεύκτη έναν τετραγωνικό παλμό τάσης σε κάθε περιστροφή του δίσκου.

Αν αυξήσουμε την ταχύτητα περιστροφής του δίσκου, τότε στην έξοδο του οπτοζεύκτη μειώνεται η περίοδος των τετραγωνικών παλμών της τάσης.

Τη μεταβαλλόμενη περίοδο των παλμών τάσης στην έξοδο του οπτοζεύκτη, μπορούμε να τη μετρήσουμε και να την χρησιμοποιήσουμε για να υπολογίσουμε μέσω του κατάλληλου ηλεκτρονικού κυκλώματος τον αριθμό των στροφών που εκτελεί ο δίσκος ανά λεπτό.

Κυκλωματική ανάλυση μετρητή στροφών



Το παραπάνω κύκλωμα τροφοδοτείται από τάση δικτύου (220 Volts). Η τάση αυτή περνάει μέσα από έναν μετασχηματιστή τάσης με έξοδο στα 12 VAC και ανορθώνεται μέσω μιας γέφυρας ανόρθωσης.

Σε αυτό το σημείο το κύκλωμα χωρίζεται σε δύο επιμέρους βασικά κυκλώματα, ένα **μικρό κύκλωμα** για την τροφοδοσία και την ρύθμιση των στροφών του κινητήρα και ένα **μεγάλο κύκλωμα** για την μέτρηση των στροφών ανά λεπτό (RPM) του δίσκου και την απεικόνιση τους σε μία LCD οθόνη.

Στο μικρό κύκλωμα ρύθμισης των στροφών του μοτέρ η ανορθωμένη τάση περνάει μέσα από έναν ηλεκτρολυτικό πυκνωτή C1 των 1000μF και ύστερα η ομαλοποιημένη πια τάση καταλήγει στην είσοδο ενός μεταβλητού ρυθμιστή τάσης (LM317 Variable Voltage Regulator).

Το LM317 έχει την ιδιότητα να παίρνει μια τιμή συνεχούς τάσης στην είσοδο του και με τη βοήθεια ενός ποτενσιόμετρου (SPEED) έχουμε την δυνατότητα να επιλέγουμε οποιαδήποτε στιγμή την τιμή της τάσης εξόδου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση στην έξοδο του LM317 μπορούμε να ρυθμίσουμε την τάση από 1,2VDC μέχρι και 12VDC. Η έξοδος του συνδέεται με την είσοδο τροφοδοσίας του μοτέρ και έτσι ρυθμίζουμε τις στροφές του κινητήρα.

Όσο αυξάνεται η τάση στην είσοδο του κινητήρα, τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των στροφών του ανά λεπτό.

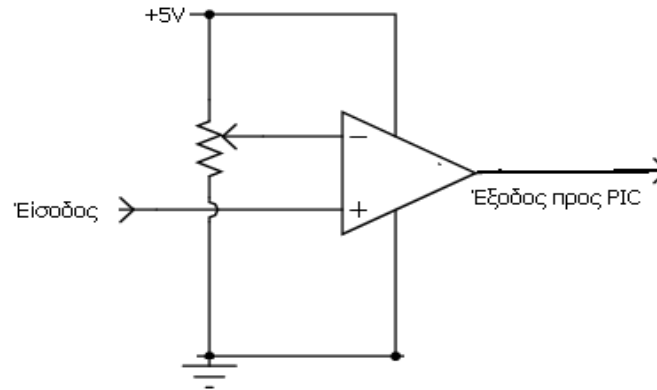
Στο **μεγάλο κύκλωμα** μέτρησης και απεικόνισης των στροφών του κινητήρα, η τάση αρχικά μειώνεται στα 5VDC μέσω ενός ρυθμιστή τάσης εξόδου (7805 Voltage Regulator) αφού πρώτα έχει ομαλοποιηθεί μέσω ενός ηλεκτρολυτικού πυκνωτή C2 των 100μF.

Ο ρυθμιστής τάσης 7805 έχει την ιδιότητα να παίρνει μια οποιαδήποτε συνεχή τάση στην είσοδό του και να την μετατρέπει με ακρίβεια στα 5 VDC. Στην έξοδο του 7805 η τάση περνάει μέσα από έναν πυκνωτή C3 των 100μF για την καλύτερη δυνατή ομαλοποίηση της τάσης, μετά την μείωση της τιμής της. Η τάση αυτή τροφοδοτεί τον πομπό του οπτοζεύκτη.

Για να μετρηθούν οι στροφές ανά λεπτό που εκτελεί ο δίσκος με τη βοήθεια του κινητήρα, θα πρέπει να υπολογιστεί η περίοδος των παλμών τάσης από την έξοδο του οπτοζεύκτη. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με ένα μικροελεγκτή κατάλληλα προγραμματισμένο.

Υπάρχει όμως ένα πρόβλημα. Γενικά όλοι οι μικροελεγκτές μπορούν να διαβάσουν παλμούς πλάτους 0 και 5 VDC. Όμως στην έξοδο του οπτοζεύκτη παίρνουμε παλμούς πλάτους 1,2VDC.

Για την μετατροπή του πλάτους αυτών των παλμών από 1,2 VDC σε 5 VDC χρησιμοποιείται στην έξοδο του οπτοζεύκτη ένας τελεστικός ενισχυτής **LM386N-1** ως **μη αναστρέφων συγκριτής τάσης** με αναφορά στα 1,2 VDC.



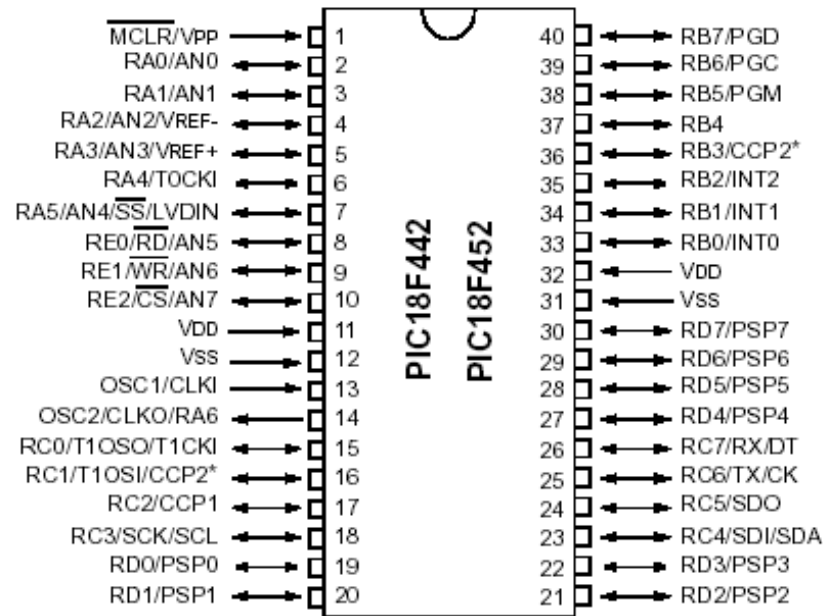
Ο τελεστικός ενισχυτής τροφοδοτείται με τάση 5VDC. Στην θετική είσοδο του τελεστικού ενισχυτή περνάνε οι παλμοί από την έξοδο του οπτοζεύκτη και στην αρνητική η τάση τροφοδοσίας 5VDC αφού πρώτα μειωθεί μέσω ενός ποτενσιόμετρου (REGULATOR) του 1K σε 1VDC, αυτή η τάση είναι η τάση αναφοράς.

Έτσι, όταν ο τελεστικός ενισχυτής διεγερθεί στην θετική του είσοδο με τάση μικρότερη από την τάση αναφοράς (1 VDC) τότε στην έξοδό του παίρνουμε μηδενική τάση.

Όταν η θετική του είσοδος διεγερθεί με τάση μεγαλύτερη από την τάση αναφοράς τότε στην έξοδο του παίρνουμε τάση 5VDC δηλαδή την τάση τροφοδοσίας του.

Έτσι λοιπόν όταν ο οπτοζεύκτης δίνει τετραγωνικούς παλμούς τάσης 0 - 1,2VDC τότε στην έξοδο του τελεστικού παίρνουμε τετραγωνικούς παλμούς τάσης 0 - 5VDC ίδιας χρονικής διάρκειας.

Οι τετραγωνικοί παλμοί από την έξοδο του τελεστικού ενισχυτή οδηγούνται στην είσοδο ενός μικροελεγκτή, κατάλληλα προγραμματισμένου, για τον υπολογισμό του αριθμού των στροφών ανά λεπτό (RPM) του δίσκου. Ο μικροελεγκτής αυτός είναι ο PIC18F452 της οικογένειας Microchip.



Ο μικροελεγκτής PIC18F452 δίνει την δυνατότητα να υπολογίζεται με μια μόνο εντολή η περίοδος των τετραγωνικού παλμών εξόδου του οπτοζεύκτη και έτσι με το κατάλληλο πρόγραμμα υπολογίζεται ο αριθμός των στροφών ανά λεπτό (RPM) που εκτελεί ο δίσκος. Ο RPM απεικονίζεται ψηφιακά συνδέοντας στις εξόδους του μικροελεγκτή τις εισόδους μιας LCD οθόνης.

Γενικά όλοι οι μικροελεγκτές της οικογένειας Microchip είναι κατασκευασμένοι έτσι ώστε να κρατούν στη μνήμη τους (RAM) δεδομένα από την τελευταία τους λειτουργία. Για την εκκαθάριση της μνήμης του ο μικροελεγκτής PIC18F452 έχει μια είσοδο (MCLR) η οποία μας δίνει την δυνατότητα να καθαρίζουμε τη μνήμη αυτή δίνοντας της έναν παλμό τάσης 5VDC. Για το σκοπό αυτό τοποθετήθηκε μεταξύ της εισόδου MCLR, της τροφοδοσίας 5VDC και της γείωσης 0VDC ένας διακόπτης τύπου ON-ON.

Για τον χρονισμό του μικροελεγκτή χρησιμοποιήθηκε κρύσταλλος χαλαζία των 4 MHz.

Ο κώδικας για τον προγραμματισμό του PIC18F452 γράφτηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Pascal μέσω του «mikroElektronika Pascal compiler for Microchip PIC microcontrollers». Η μεταφορά του κώδικα στην μνήμη του μικροελεγκτή πραγματοποιήθηκε μέσω μιας συσκευής προγραμματισμού PIC (PIC Programmer).

Τεχνικά χαρακτηριστικά Μετρητή Στροφών

Τάση τροφοδοσίας 220 Volts (Τάση Δικτύου)

Μέγιστη τάση τροφοδοσίας κινητήρα 12 VDC

Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του δίσκου 2900 RPM

ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Η πιο συνηθισμένη έκφραση για την υγρασία του αέρα είναι η **σχετική υγρασία (Relative Humidity, RH)**.

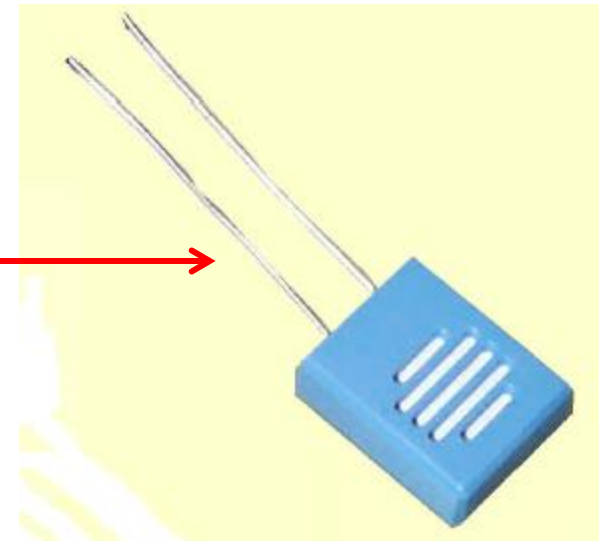
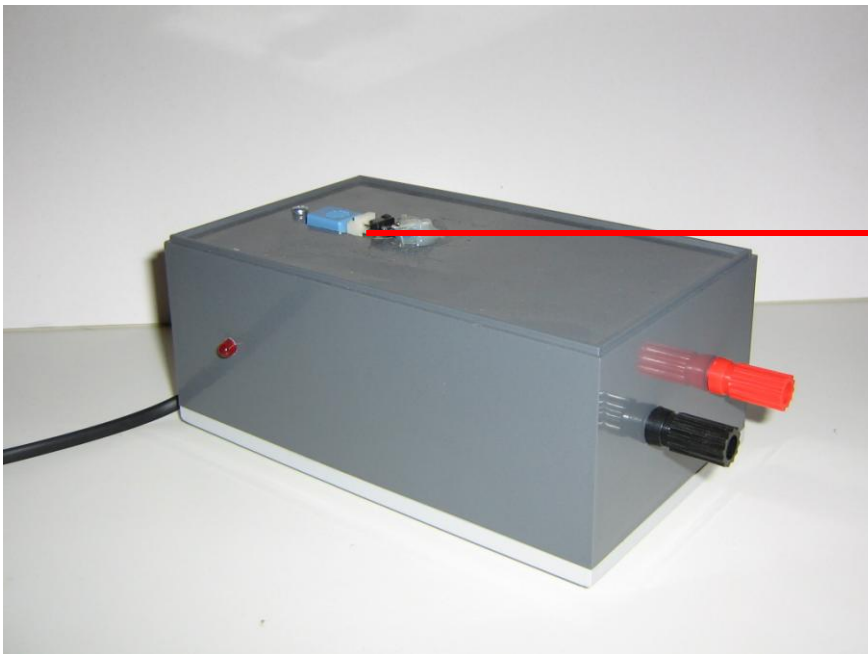
Η **σχετική υγρασία** είναι ο λόγος επί τοις εκατό (%) της μάζας των υδρατμών που περιέχεται σε ένα δεδομένο όγκο αέρα προς τη μάζα που θα έπρεπε να περιείχε ο ίδιος όγκος αέρα για να ήταν κορεσμένος από υδρατμούς

Η **μέτρηση** της **σχετικής υγρασίας** του αέρα επιτυγχάνεται με κάποιες ειδικές **συσκευές** οι οποίες ονομάζονται **αισθητήρες σχετικής υγρασίας**. Οι **συσκευές** αυτές έχουν σαν βασικό στοιχείο του κυκλώματός τους

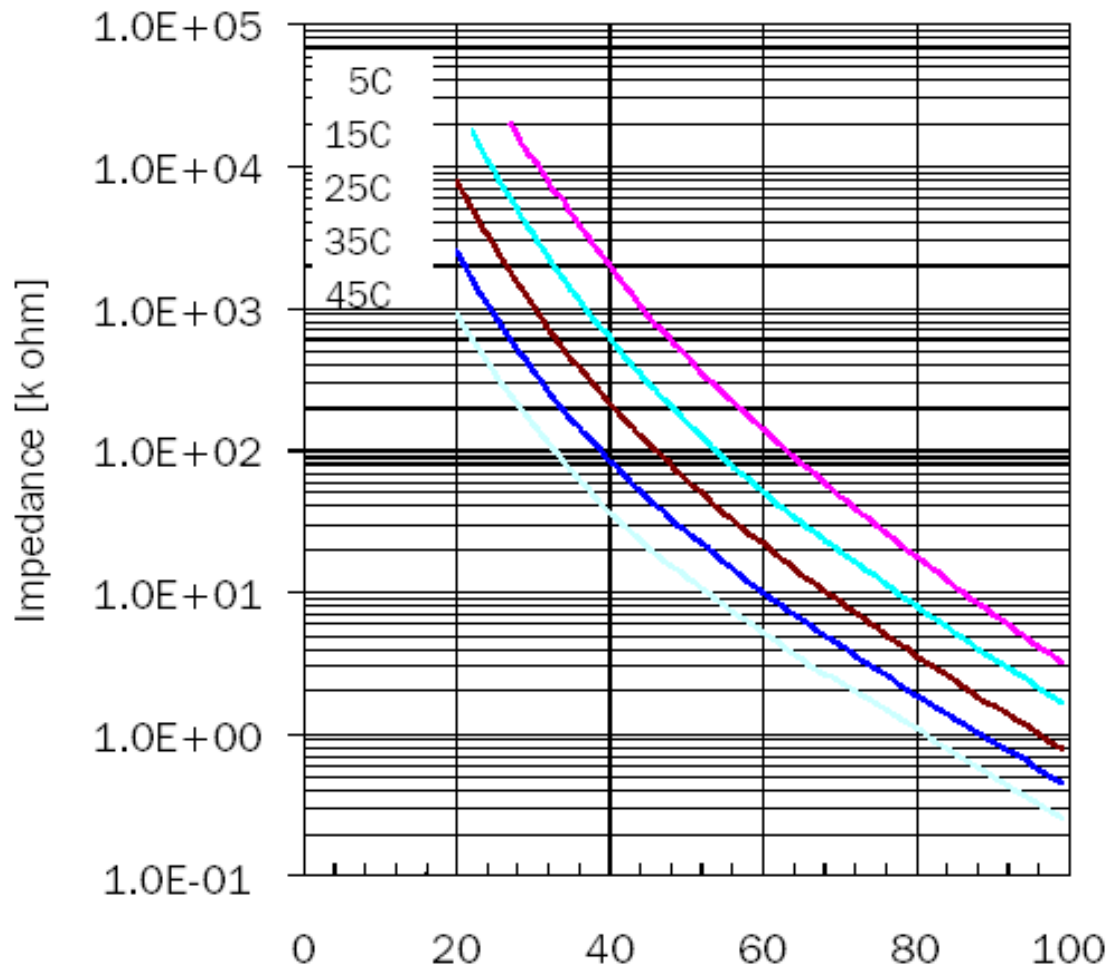
- μια **αντίσταση** που μεταβάλλει την ωμική της τιμή ανάλογα με το ποσοστό της σχετικής υγρασίας του αέρα,
- έναν **πυκνωτή** που μεταβάλλει την χωρητικότητά του ανάλογα με τη τιμή της σχετικής υγρασίας του αέρα.

ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

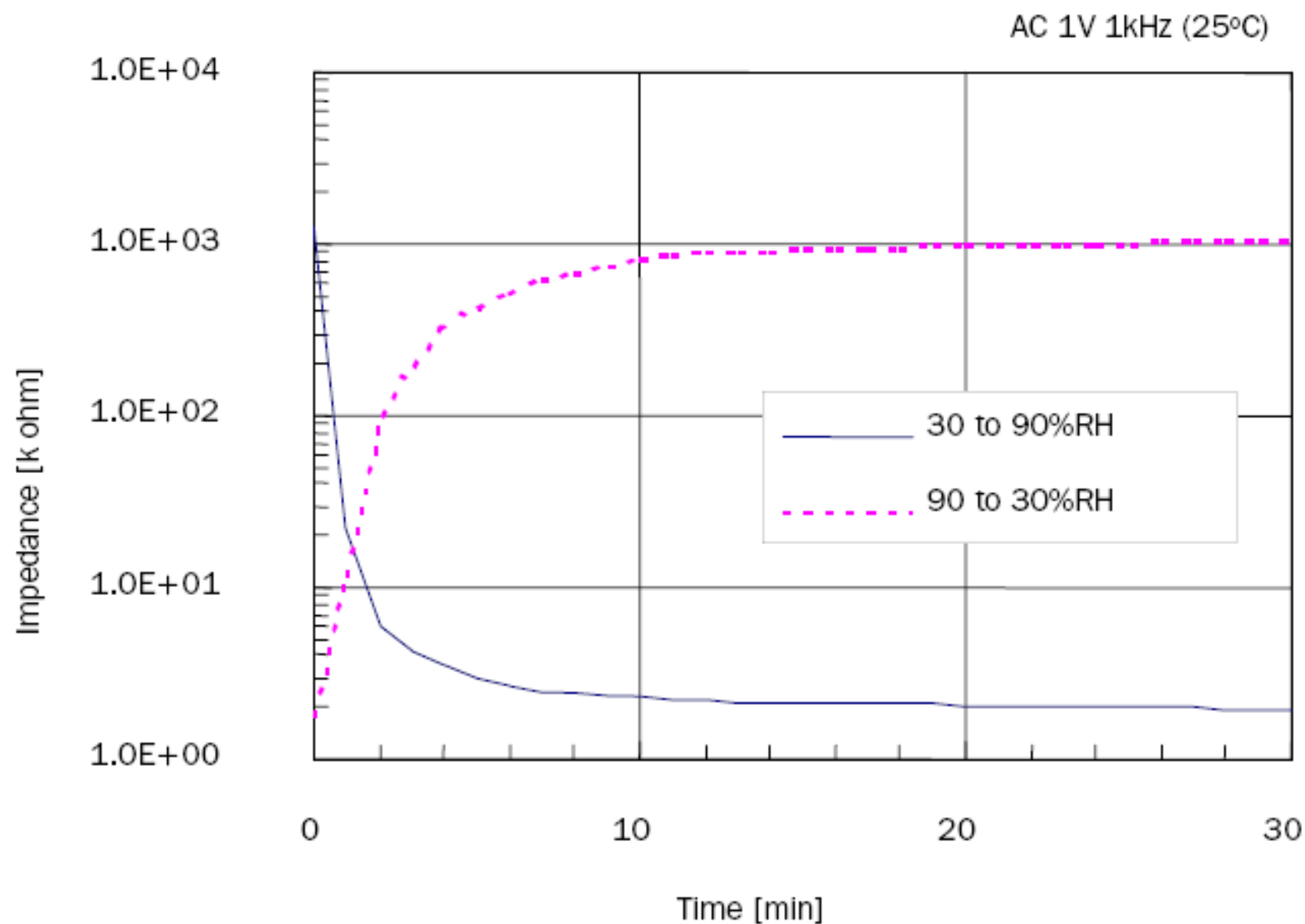
Ο αισθητήρας σχετικής υγρασίας στη συγκεκριμένη διάταξη (παρακάτω εικόνα), έχει σαν βασικό στοιχείο μια **μεταβλητή αντίσταση υγρασίας HS15P**.

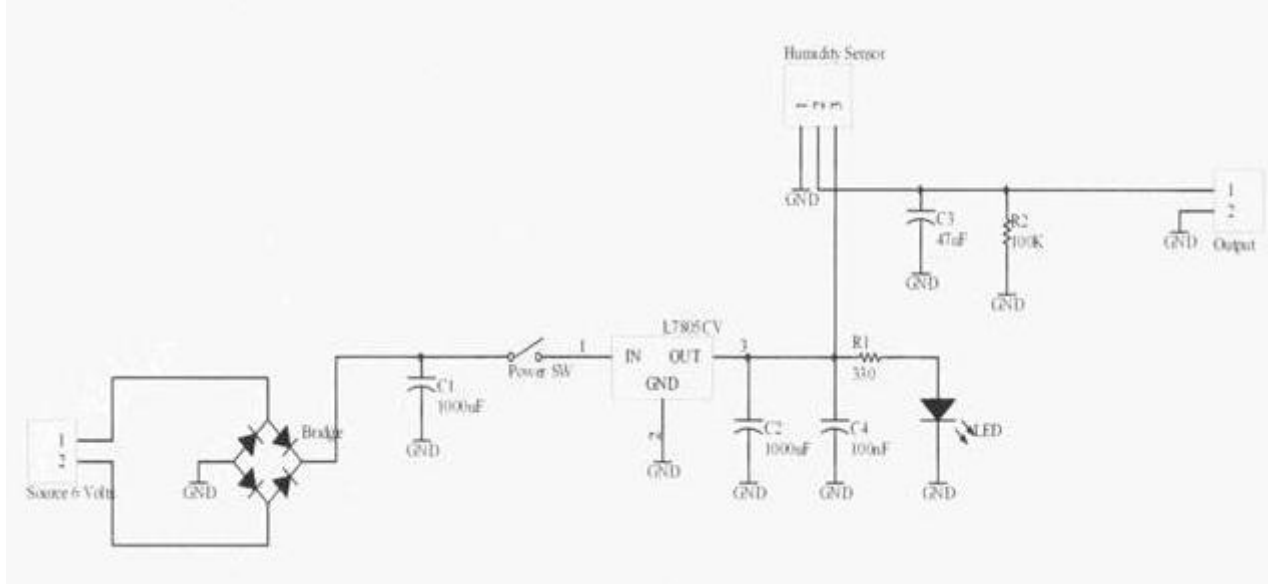


Χαρακτηριστικές ωμικής μεταβολής της αντίστασης υγρασίας **HS15P**



TYPICAL RESPONSE CURVE



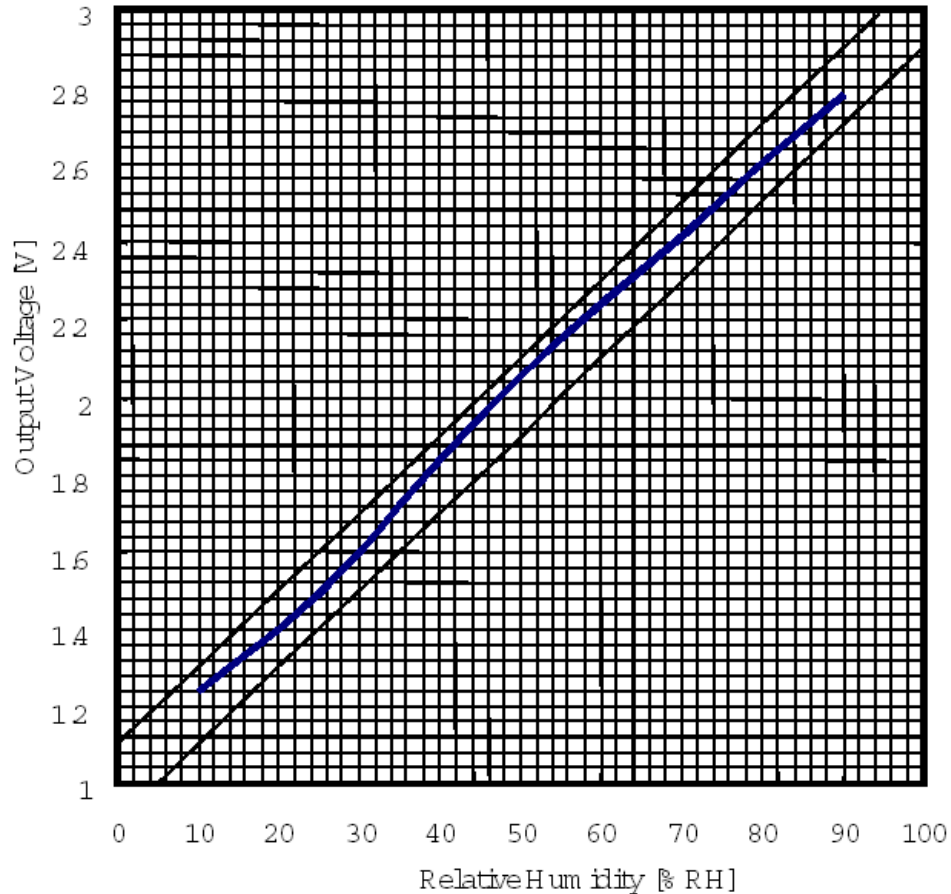


Το κύκλωμα τροφοδοτείται με 220 VAC (τάση δικτύου). Η τάση αυτή περνάει μέσα από έναν μετασχηματιστή (220-6)Volts και έπειτα ανορθώνεται μέσω μίας γέφυρας ανόρθωσης. Η ανορθωμένη αυτή τάση περνάει από έναν πυκνωτή C1 της τάξεως των 1000uF για την ομαλοποίησή της. Σε αυτό το σημείο έχει τοποθετηθεί ένας μονοπολικός διακόπτης (SWITCH ON-OFF) για να ανοίγουμε και να κλείνουμε τη συσκευή.

Επειδή θέλουμε η ανορθωμένη αυτή τάση να είναι ακριβώς 6 VDC, μετά τον πυκνωτή έχει τοποθετηθεί ένας ρυθμιστής τάσης (7805 Voltage Regulator) για να έχουμε στην έξοδό του την τιμή αυτή. Μετά τον ρυθμιστή τάσης τοποθετήθηκε άλλος ένας πυκνωτής C2 της τάξεως των 1000uF για μια τελευταία ομαλοποίηση της τάσης στην έξοδο του 7805.

Έτσι λοιπόν η τάση τροφοδοσίας είναι κατάλληλα διαμορφωμένη για να τροφοδοτηθεί το υποκύκλωμα τύπου διαιρέτη τάσης της μεταβλητής αντίστασης υγρασίας.

Χαρακτηριστική τάσης εξόδου – σχετικής υγρασίας στους 25°C



Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Τάση εισόδου 220 VAC (Τάση δικτύου)

Τάση εξόδου (0 - 3) VDC

Εύρος μέτρησης υγρασίας (10 - 90)% RH

Μέγιστη θερμοκρασία καλής λειτουργίας 50 °C

ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ

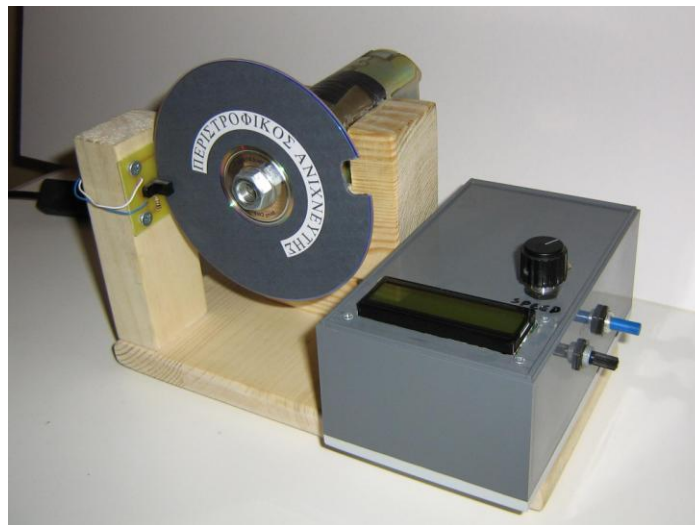
Η μέτρηση των στροφών (π.χ. ενός κινητήρα) μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους:

- μέσω μαγνητικού πεδίου (φαινόμενο Hall)
- μέσω οπτικών στοιχείων (φωτοκύτταρα, οπτοζεύκτες)

Περιγραφή λειτουργίας

Η κατασκευή του μετρητή στροφών βασίζεται στην λειτουργία οπτικών στοιχείων και πιο συγκεκριμένα στην λειτουργία ενός **ΟΠΤΟΖΕΥΚΤΗ (optocapler)**.

Ως πηγή των στροφών του μετρητή στροφών χρησιμοποιήθηκε ένα μοτέρ χαμηλής τάσης τροφοδοσίας (12 VDC) και μέγιστης ταχύτητας 2.900 στροφές ανά λεπτό.

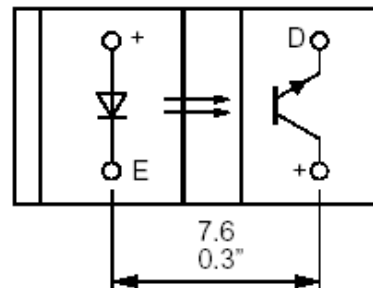


Οπτοζεύκτης (Optocapler)

- Ο οπτοζεύκτης αποτελείται από έναν **πομπό** (φωτοκύτταρο υπέρυθρης ακτινοβολίας) και από έναν **δέκτη** (φωτοτρανζίστορ). Ο πομπός και ο δέκτης είναι τοποθετημένοι αντικριστά μεταξύ τους έχοντας ανάμεσά τους απόσταση περίπου 1 cm.
- Όταν τροφοδοτείτε ο πομπός με τάση 5 VDC τότε εκπέμπει μια υπέρυθρη δέσμη η οποία προσπίπτει πάνω στον δέκτη.
- Ο δέκτης (φωτοτρανζίστορ) με τη σειρά του διεγείρεται από την υπέρυθρη δέσμη και αφήνει στην έξοδο του (στον εκπομπό του φωτοτρανζίστορ) να περάσει τάση 1,2 VDC.
- Αν η υπέρυθρη δέσμη φως δεν προσπίπτει πάνω στον δέκτη τότε στην έξοδό του έχουμε μηδενική τάση.



Οπτοζεύκτης



Κυκλωματικό διάγραμμα

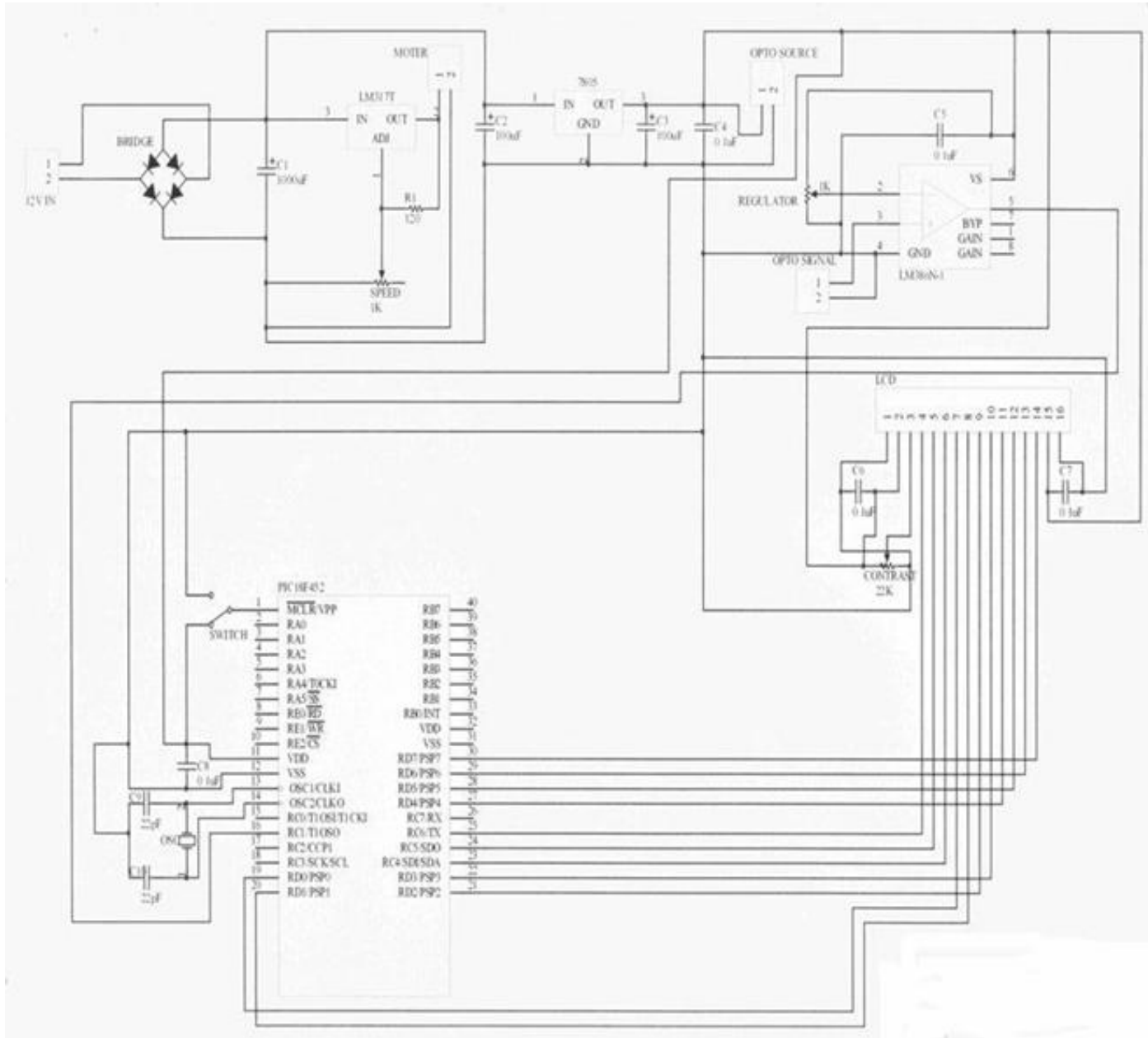
Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη παρεμβάλλεται ένας δίσκος που έχει σε ένα σημείο της περιμέτρου του μια μικρή εγκοπή (κενό).

Κατά την περιστροφή του δίσκου η εγκοπή του δίσκου αφήνει το κενό ελεύθερο ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη και έτσι έχουμε στην έξοδο του οπτοζεύκτη έναν τετραγωνικό παλμό τάσης σε κάθε περιστροφή του δίσκου.

Αν αυξήσουμε την ταχύτητα περιστροφής του δίσκου, τότε στην έξοδο του οπτοζεύκτη μειώνεται η περίοδος των τετραγωνικών παλμών της τάσης.

Τη μεταβαλλόμενη περίοδο των παλμών τάσης στην έξοδο του οπτοζεύκτη, μπορούμε να τη μετρήσουμε και να την χρησιμοποιήσουμε για να υπολογίσουμε μέσω του κατάλληλου ηλεκτρονικού κυκλώματος τον αριθμό των στροφών που εκτελεί ο δίσκος ανά λεπτό.

Κυκλωματική ανάλυση μετρητή στροφών



Το παραπάνω κύκλωμα τροφοδοτείται από τάση δικτύου (220 Volts). Η τάση αυτή περνάει μέσα από έναν μετασχηματιστή τάσης με έξοδο στα 12 VAC και ανορθώνεται μέσω μιας γέφυρας ανόρθωσης.

Σε αυτό το σημείο το κύκλωμα χωρίζεται σε δύο επιμέρους βασικά κυκλώματα, ένα **μικρό κύκλωμα** για την τροφοδοσία και την ρύθμιση των στροφών του κινητήρα και ένα **μεγάλο κύκλωμα** για την μέτρηση των στροφών ανά λεπτό (RPM) του δίσκου και την απεικόνιση τους σε μία LCD οθόνη.

Στο μικρό κύκλωμα ρύθμισης των στροφών του μοτέρ η ανορθωμένη τάση περνάει μέσα από έναν ηλεκτρολυτικό πυκνωτή C1 των 1000μF και ύστερα η ομαλοποιημένη πια τάση καταλήγει στην είσοδο ενός μεταβλητού ρυθμιστή τάσης (LM317 Variable Voltage Regulator).

Το LM317 έχει την ιδιότητα να παίρνει μια τιμή συνεχούς τάσης στην είσοδο του και με τη βοήθεια ενός ποτενσιόμετρου (SPEED) έχουμε την δυνατότητα να επιλέγουμε οποιαδήποτε στιγμή την τιμή της τάσης εξόδου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση στην έξοδο του LM317 μπορούμε να ρυθμίσουμε την τάση από 1,2VDC μέχρι και 12VDC. Η έξοδος του συνδέεται με την είσοδο τροφοδοσίας του μοτέρ και έτσι ρυθμίζουμε τις στροφές του κινητήρα.

Όσο αυξάνεται η τάση στην είσοδο του κινητήρα, τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των στροφών του ανά λεπτό.

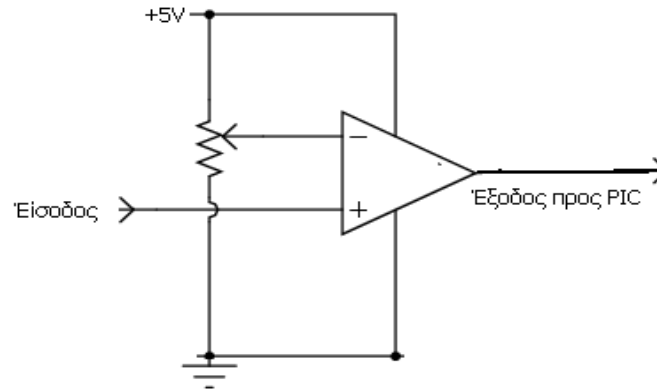
Στο **μεγάλο κύκλωμα** μέτρησης και απεικόνισης των στροφών του κινητήρα, η τάση αρχικά μειώνεται στα 5VDC μέσω ενός ρυθμιστή τάσης εξόδου (7805 Voltage Regulator) αφού πρώτα έχει ομαλοποιηθεί μέσω ενός ηλεκτρολυτικού πυκνωτή C2 των 100μF.

Ο ρυθμιστής τάσης 7805 έχει την ιδιότητα να παίρνει μια οποιαδήποτε συνεχή τάση στην είσοδό του και να την μετατρέπει με ακρίβεια στα 5 VDC. Στην έξοδο του 7805 η τάση περνάει μέσα από έναν πυκνωτή C3 των 100μF για την καλύτερη δυνατή ομαλοποίηση της τάσης, μετά την μείωση της τιμής της. Η τάση αυτή τροφοδοτεί τον πομπό του οπτοζεύκτη.

Για να μετρηθούν οι στροφές ανά λεπτό που εκτελεί ο δίσκος με τη βοήθεια του κινητήρα, θα πρέπει να υπολογιστεί η περίοδος των παλμών τάσης από την έξοδο του οπτοζεύκτη. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με ένα μικροελεγκτή κατάλληλα προγραμματισμένο.

Υπάρχει όμως ένα πρόβλημα. Γενικά όλοι οι μικροελεγκτές μπορούν να διαβάσουν παλμούς πλάτους 0 και 5 VDC. Όμως στην έξοδο του οπτοζεύκτη παίρνουμε παλμούς πλάτους 1,2VDC.

Για την μετατροπή του πλάτους αυτών των παλμών από 1,2 VDC σε 5 VDC χρησιμοποιείται στην έξοδο του οπτοζεύξη ένας τελεστικός ενισχυτής **LM386N-1** ως **μη αναστρέφων συγκριτής τάσης** με αναφορά στα 1,2 VDC.



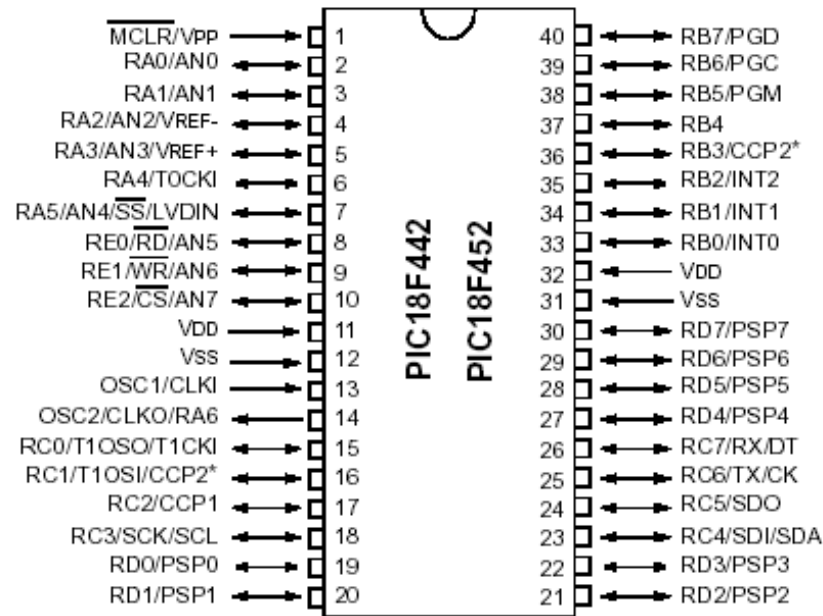
Ο τελεστικός ενισχυτής τροφοδοτείται με τάση 5VDC. Στην θετική είσοδο του τελεστικού ενισχυτή περνάνε οι παλμοί από την έξοδο του οπτοζεύκτη και στην αρνητική η τάση τροφοδοσίας 5VDC αφού πρώτα μειωθεί μέσω ενός ποτενσιόμετρου (REGULATOR) του 1K σε 1VDC, αυτή η τάση είναι η τάση αναφοράς.

Έτσι, όταν ο τελεστικός ενισχυτής διεγερθεί στην θετική του είσοδο με τάση μικρότερη από την τάση αναφοράς (1 VDC) τότε στην έξοδό του παίρνουμε μηδενική τάση.

Όταν η θετική του είσοδος διεγερθεί με τάση μεγαλύτερη από την τάση αναφοράς τότε στην έξοδο του παίρνουμε τάση 5VDC δηλαδή την τάση τροφοδοσίας του.

Έτσι λοιπόν όταν ο οπτοζεύκτης δίνει τετραγωνικούς παλμούς τάσης 0 - 1,2VDC τότε στην έξοδο του τελεστικού παίρνουμε τετραγωνικούς παλμούς τάσης 0 - 5VDC ίδιας χρονικής διάρκειας.

Οι τετραγωνικοί παλμοί από την έξοδο του τελεστικού ενισχυτή οδηγούνται στην είσοδο ενός μικροελεγκτή, κατάλληλα προγραμματισμένου, για τον υπολογισμό του αριθμού των στροφών ανά λεπτό (RPM) του δίσκου. Ο μικροελεγκτής αυτός είναι ο PIC18F452 της οικογένειας Microchip.



Ο μικροελεγκτής PIC18F452 δίνει την δυνατότητα να υπολογίζεται με μια μόνο εντολή η περίοδος των τετραγωνικού παλμών εξόδου του οπτοζεύκτη και έτσι με το κατάλληλο πρόγραμμα υπολογίζεται ο αριθμός των στροφών ανά λεπτό (RPM) που εκτελεί ο δίσκος. Ο RPM απεικονίζεται ψηφιακά συνδέοντας στις εξόδους του μικροελεγκτή τις εισόδους μιας LCD οθόνης.

Γενικά όλοι οι μικροελεγκτές της οικογένειας Microchip είναι κατασκευασμένοι έτσι ώστε να κρατούν στη μνήμη τους (RAM) δεδομένα από την τελευταία τους λειτουργία. Για την εκκαθάριση της μνήμης του ο μικροελεγκτής PIC18F452 έχει μια είσοδο (MCLR) η οποία μας δίνει την δυνατότητα να καθαρίζουμε τη μνήμη αυτή δίνοντας της έναν παλμό τάσης 5VDC. Για το σκοπό αυτό τοποθετήθηκε μεταξύ της εισόδου MCLR, της τροφοδοσίας 5VDC και της γείωσης 0VDC ένας διακόπτης τύπου ON-ON.

Για τον χρονισμό του μικροελεγκτή χρησιμοποιήθηκε κρύσταλλος χαλαζία των 4 MHz.

Ο κώδικας για τον προγραμματισμό του PIC18F452 γράφτηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Pascal μέσω του «mikroElektronika Pascal compiler for Microchip PIC microcontrollers». Η μεταφορά του κώδικα στην μνήμη του μικροελεγκτή πραγματοποιήθηκε μέσω μιας συσκευής προγραμματισμού PIC (PIC Programmer).

Τεχνικά χαρακτηριστικά Μετρητή Στροφών

Τάση τροφοδοσίας 220 Volts (Τάση Δικτύου)

Μέγιστη τάση τροφοδοσίας κινητήρα 12 VDC

Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του δίσκου 2900 RPM



HUMIDITY SENSORS: TYPE HS12P, HS15P

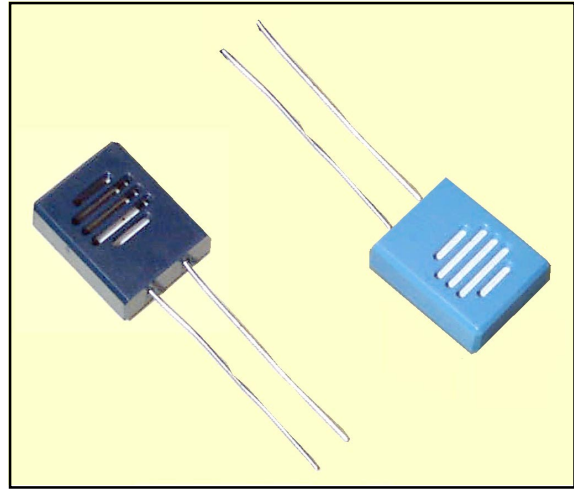
RELATIVE HUMIDITY SENSOR

DESCRIPTION:

Non-refresh type humidity sensor made of polymer.

FEATURES:

- Good long term reliability
- Cost effective performance
- HS15P water resistive
- Typical applications include humidity monitors, humidity controllers, air conditioners, humidifiers, dehumidifiers, automatic ventilation



DATA:

CODE	HS12P	HS15P
Operating Temperature	0 to 50°C	
Operating Humidity	20 to 90% RH (without condensing)	20 to 100% RH
Impedance at 25°C 50% RH	60 k ohm +/- 30 k ohm (+/- 5% RH)	
Rated Voltage	A.C. 1 V rms	
Rated Frequency	50 Hz to 1 kHz	
Consumption Power	0.3 mW	

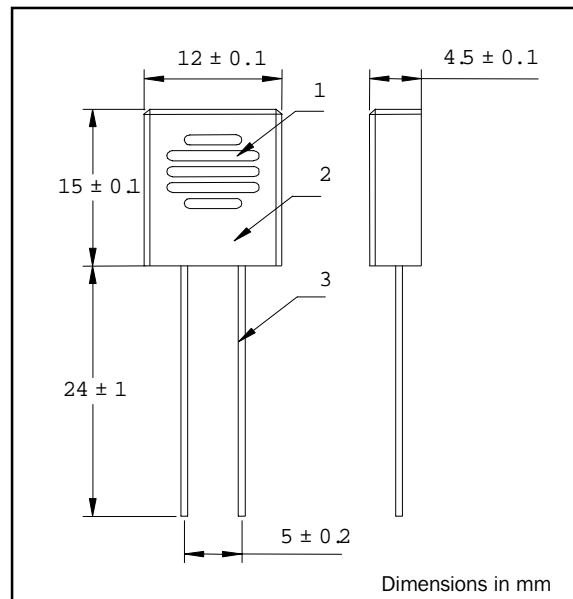
CODING:

HS12P: quick response type
 HS15P: water resistant type

WARNING:

Use only within the specified limits.
 Do not disassemble and change any parts.
 Do not apply DC voltage or DC bias.
 Do not immerse into water or any solution.

DIMENSIONS:



1. Filter

2. Case ABS: Dark blue (HS12P)
 Light blue (HS15P)

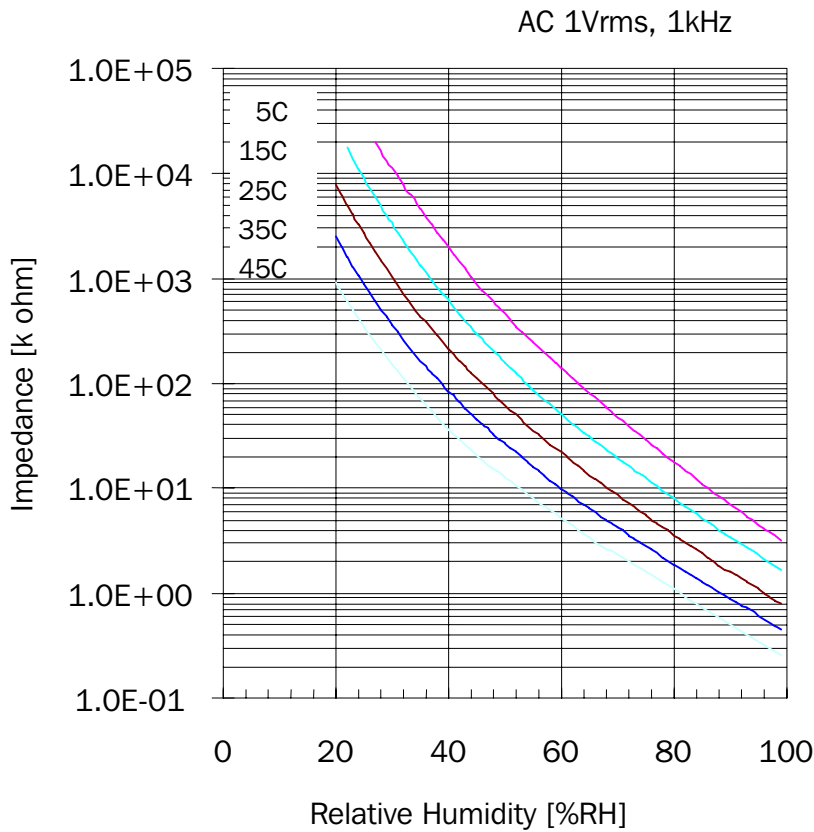
3. Lead wire Sn-Pb plated Cu
 Diameter: 0.6mm



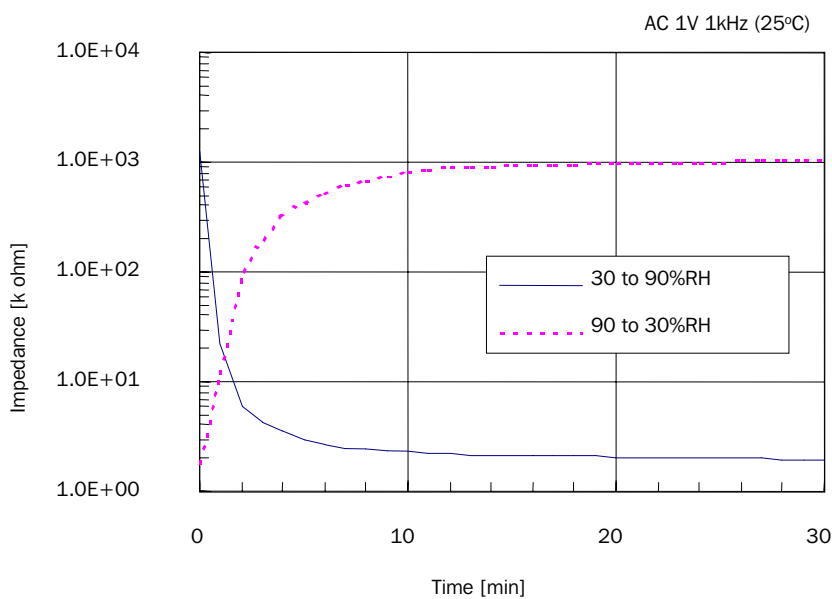
HUMIDITY SENSORS: TYPE HS12P, HS15P

RELATIVE HUMIDITY SENSOR

TYPICAL HUMIDITY CURVE:



TYPICAL RESPONSE CURVE:



Data sheet D-HS12/15P-1

ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

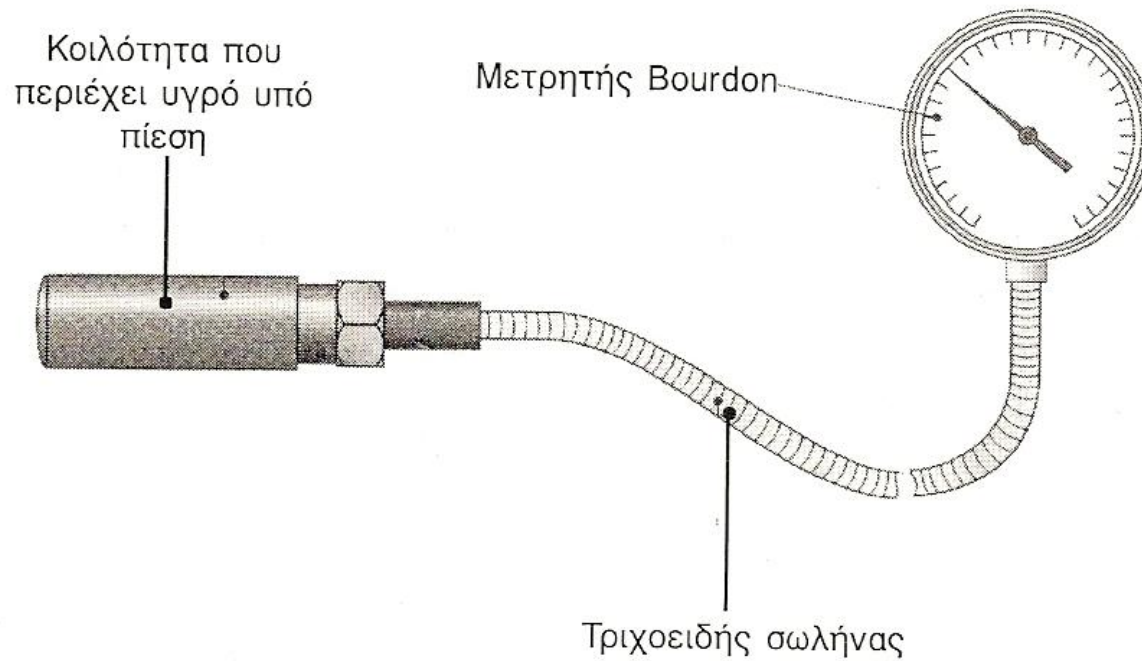
Η μέτρηση της θερμοκρασίας στηρίζεται κυρίως :

- διαστολή υγρού
- διαστολή μετάλλου
- ηλεκτρική αντίσταση
- φαινόμενο θερμοηλεκτρισμού
- ακτινοβολία θερμότητας

Κλίμακες θερμοκρασίας :

- Κελσίου (C)
- Κέλβιν (K)

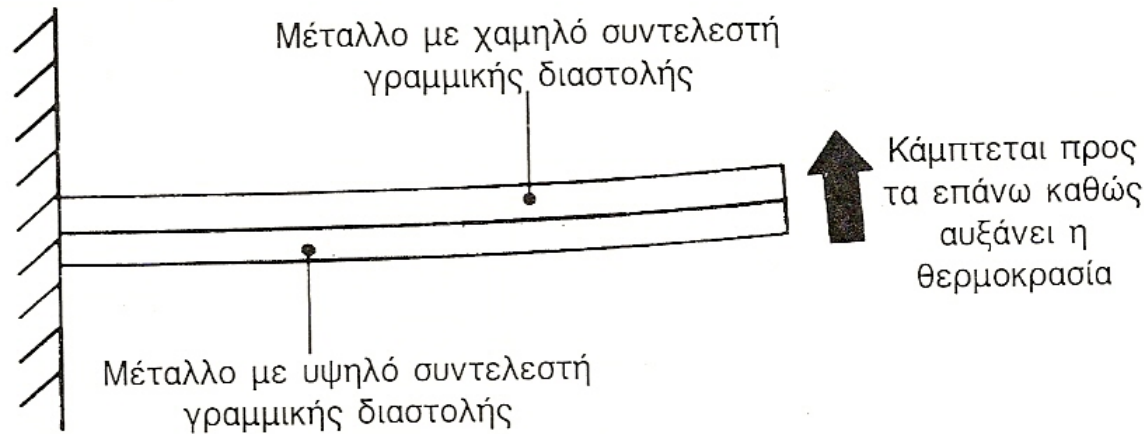
Μεταλλικά Θερμόμετρα



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

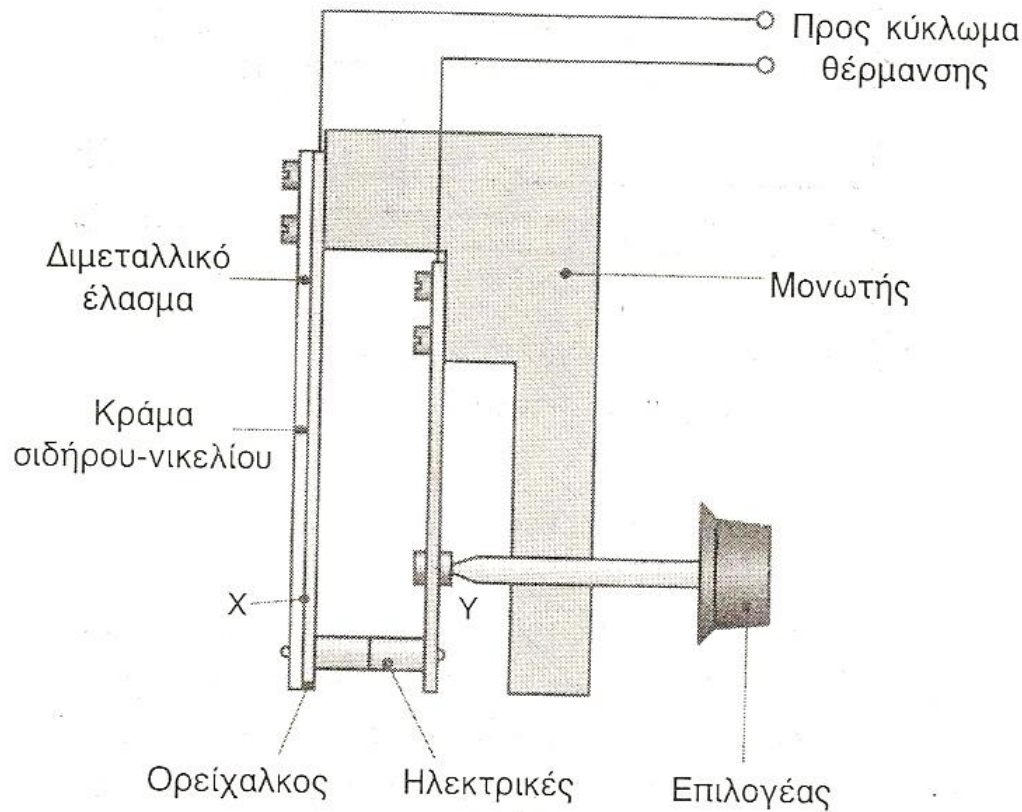
Διμεταλλικό έλασμα

Ο συντελεστής διαστολής ενός μετάλλου είναι το κλάσμα του αρχικού του μήκους, κατά το οποίο διαστέλλεται το μέταλλο, εάν η θερμοκρασία του αυξηθεί κατά ένα βαθμό.



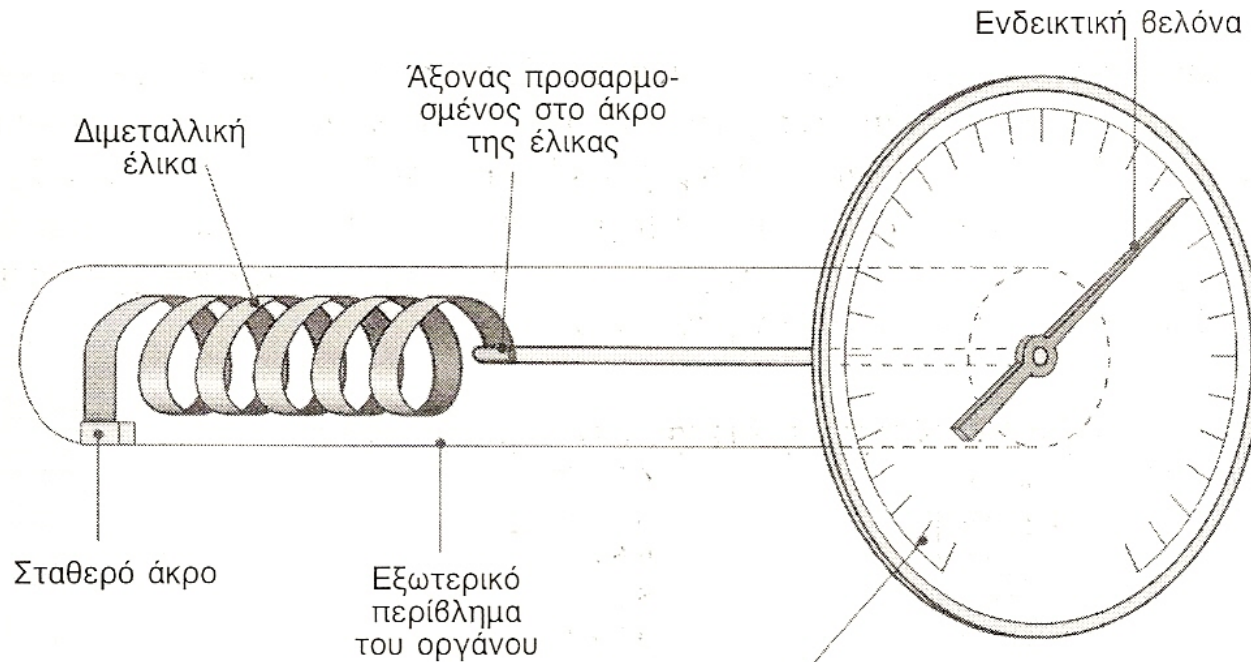
Τα διμεταλλικά ελάσματα χρησιμοποιούνται σε θερμοστάτες και διμεταλλικά θερμόμετρα. Επίσης έχουν εφαρμογές σε ηλεκτρομηχανικά τμήματα, όπως τα φώτα στάσης των αυτοκινήτων που ανάβουν και σβήνουν περιοδικά και τα φώτα των διαφημιστικών πινακίδων.

Μεταλλικός Θερμοστάτης



Πέρα από τον έλεγχο της οικιακής θερμοκρασίας, άλλες τυπικές εφαρμογές του θερμοστάτη είναι στα ηλεκτρικά σίδηρα, τους θερμοσίφωνες, τα ενυδρεία, τους φούρνους και τα ηλεκτρικά τζάκια. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε το διμεταλλικό θερμόμετρο.

Διμεταλλικό Θερμόμετρο



Το διμεταλλικό θερμόμετρο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας σε φούρνους, σωληνώσεις ζεστού νερού και θαλάμους ατμού. Είναι συμπαγές, ευκίνητο, σχετικά φθινό, και έχει ωφέλιμο θερμοκρασιακό εύρος από περίπου 238 K έως 873 K ($-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$) με γενικά καλή ακρίβεια. Εντούτοις, απαιτείται συχνή βαθμονόμηση, επειδή το διμεταλλικό έλασμα εμφανίζει γήρανση. Επιπλέον, τα διμεταλλικά θερμόμετρα δεν προσφέρονται για χρήση από απόσταση και αποκρίνονται αργά στις μεταβολές θερμοκρασίας.

Θερμόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης

Τα θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης (*electrical resistance thermometers*) χρησιμοποιούν τη σχέση που υπάρχει ανάμεσα στην ηλεκτρική αντίσταση ενός μετάλλου και τη θερμοκρασία του.

Στα περισσότερα μέταλλα η αντίσταση αυξάνει με τη θερμοκρασία. Η σχέση ανάμεσα στην αντίσταση και τη θερμοκρασία είναι, σε κάποιο περιορισμένο εύρος, σχεδόν γραμμική και δίνεται από τη σχέση:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t)$$

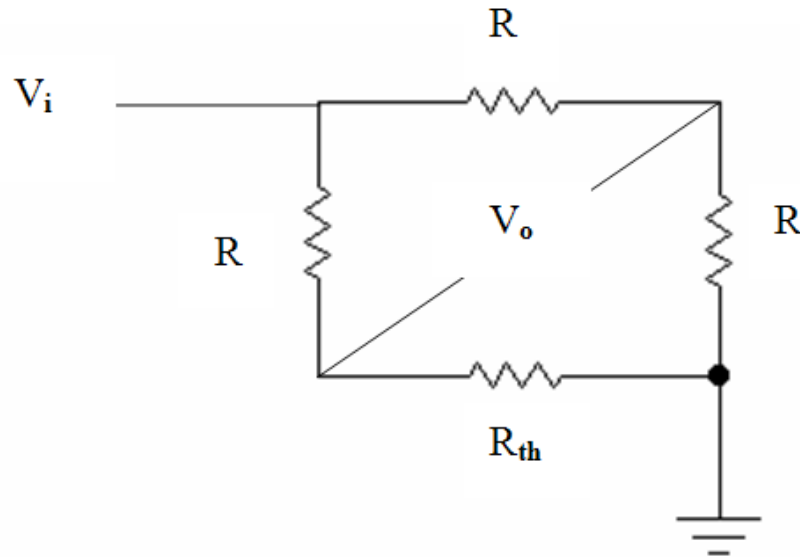
όπου:

- R_0 είναι η αντίσταση του αγωγού σε θερμοκρασία $0\text{ }^\circ\text{C}$ (σε Ω)
- R_t είναι η αντίσταση του αγωγού σε θερμοκρασία $t\text{ }^\circ\text{C}$ (σε Ω)
- α είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής της αντίστασης, σε $^\circ\text{C}^{-1}$

Μέταλλο	Θερμοκρασιακός συντελεστής της α
Χαλκός	4.3×10^{-3}
Άργυρος	3.9×10^{-3}
Σίδηρος	6.5×10^{-3}
Νικέλιο	6.5×10^{-3}
Λευκόχρυσος	3.9×10^{-3}

ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Ένα θερμόμετρο αντίστασης λευκόχρυσου συνδέεται σε έναν βραχίονα μιας γέφυρας Wheatstone με τον τρόπο που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι σταθερές αντιστάσεις της γέφυρας Wheatstone είναι $R=200\ \Omega$ η καθεμία, και η τάση εισόδου είναι $V_i=10\ \text{Volts}$. Στους $0^\circ\ \text{C}$ η γέφυρα βρίσκεται σε ισορροπία και σε αυτή τη θερμοκρασία το θερμόμετρο έχει αντίσταση $R_{th}=200\ \Omega$.

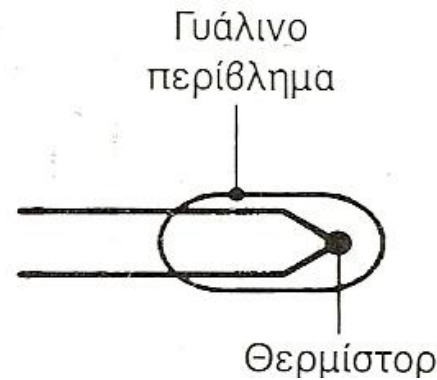


(α) Αν ο θερμοκρασιακός συντελεστής της αντίστασης για το λευκόχρυσο είναι $\alpha=4\cdot 10^{-3}\ \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, να υπολογιστεί η τάση εξόδου V_o της γέφυρας στη θερμοκρασία $30\ \text{ }^\circ\text{C}$.

(β) Η περιοχή λειτουργίας του θερμόμετρου θεωρείται ότι είναι $0 - 100\ \text{ }^\circ\text{C}$ και ενισχύουμε τη τάση εξόδου V_o της γέφυρας με ένα τελεστικό ενισχυτή (TE). Να βρεθεί πόση πρέπει να είναι η ενίσχυση A του TE αν θέλουμε στην έξοδό του να παίρνουμε τάση $V_o'=0 - 5\ \text{V}$.

Θερμίστορ

Οι ημιαγωγοί εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερες αλλαγές αντίστασης για δεδομένες μεταβολές θερμοκρασίας. Κατασκευάζονται από μίγματα μεταλλικών οξειδίων “σπανίων γαιών” (και περιέχουν συνήθως μαγγάνιο, νικέλιο, χρώμιο και κοβάλτιο, όχι όμως πυρίτιο και γερμάνιο, που είναι τα γνωστότερα ημιαγωγικά υλικά), με καθαρή σκόνη χαλκού. Η αντίσταση αυτών των υλικών είναι πολύ ευαίσθητη στις μεταβολές θερμοκρασίας.

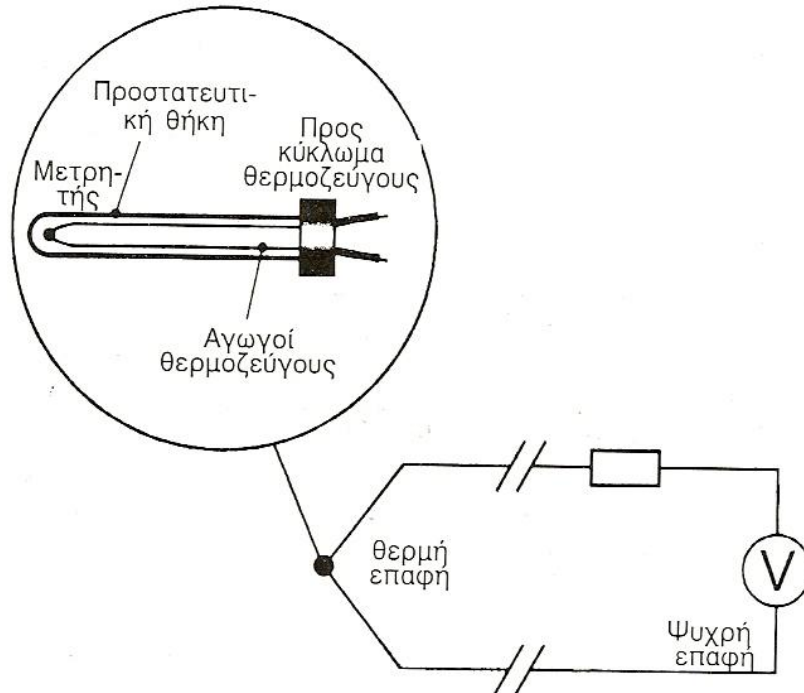


Η αντίσταση των θερμίστορ κανονικά μειώνεται με τη θερμοκρασία. Η σχέση ανάμεσα στις δύο ποσότητες είναι εκθετική, σε αντίθεση με τη γραμμική σχέση που υπάρχει στα θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης. Η αντίσταση ενός θερμίστορ δίνεται από τη σχέση:

$$R = R_A \cdot \exp (B/T)$$

Θερμοζεύγος

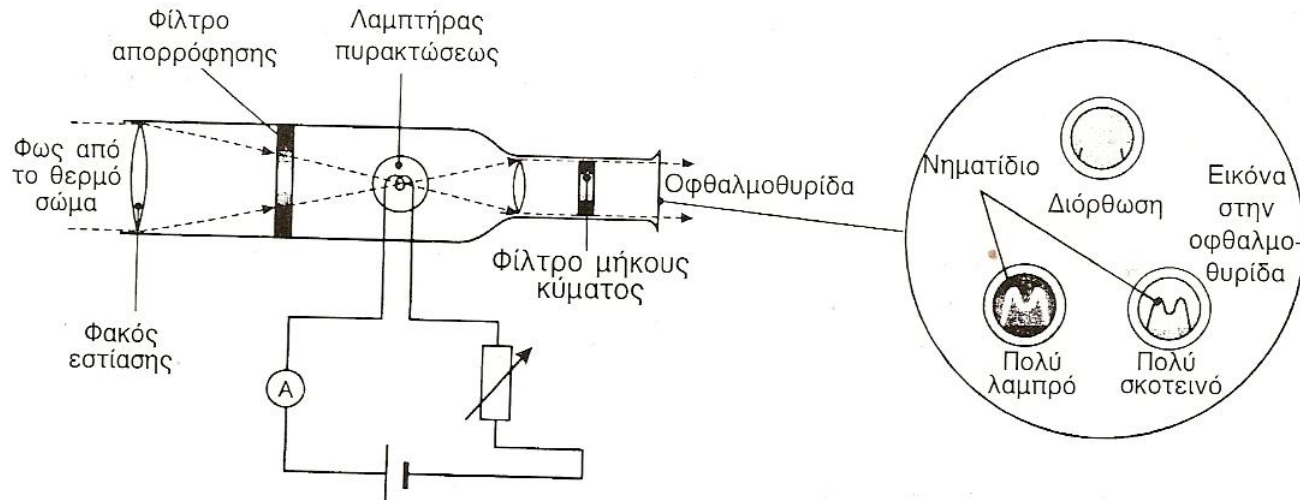
Ένα θερμοζεύγος (*thermocouple*) αποτελείται από δύο ανόμοια μέταλλα που συνδέονται μεταξύ τους σε δύο σημεία και σχηματίζουν ένα κλειστό κύκλωμα.



$$V = k.(T_h - T_c)$$

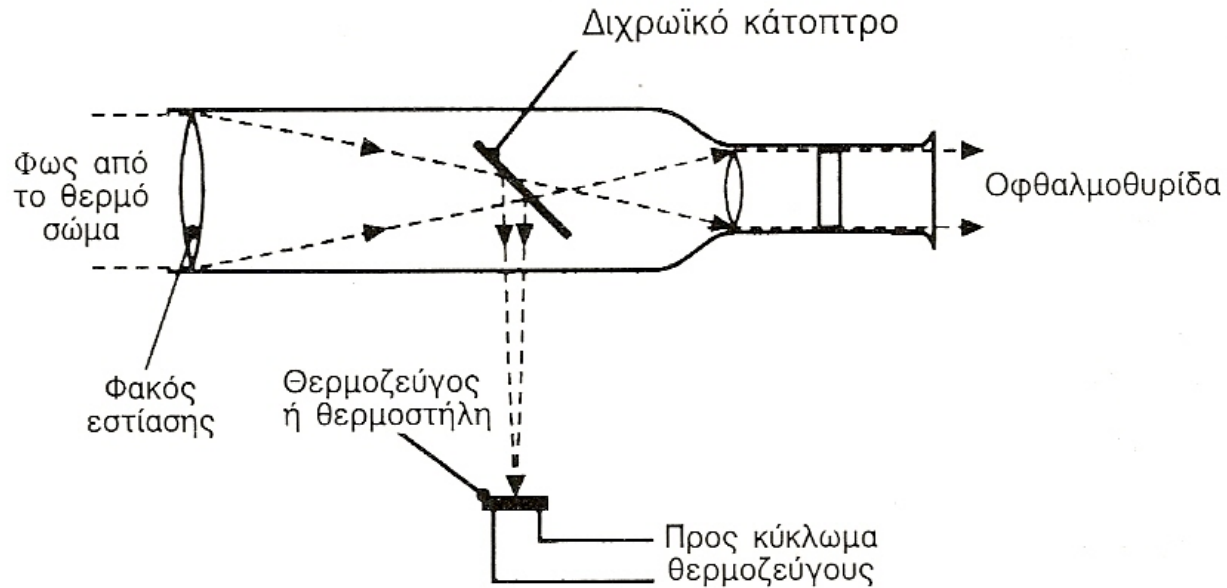
Οπτικό θερμόμετρο νήματος

Το οπτικό πυρόμετρο νήματος (*disappearing filament optical pyrometer*) χρησιμοποιεί την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που μπορεί να δει το ανθρώπινο μάτι για να μετρά τη θερμοκρασία. Επομένως, το σώμα του οποίου τη θερμοκρασία θέλουμε να μετρήσουμε, όπως ένας φούρνος, πρέπει να είναι αρκετά θερμό ώστε να λάμπει (να φεγγοβολεί). Αυτό σημαίνει ότι εν γένει πρέπει να είναι θερμότερο από 923 K (650 °C).



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.

Πυρόμετρο υπερύθρου



Τα πυρόμετρα υπερύθρου χρησιμοποιούνται στα ίδια πεδία εφαρμογών όπως και τα οπτικά πυρόμετρα νήματος, αλλά στις περιπτώσεις όπου απαιτούνται είτε μετρήσεις από απόσταση, είτε μικρότερο ή μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος μετρήσεων.

Εφαρμογές αισθητήρων θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία είναι ίσως η πιο σημαντική παράμετρος μιας διεργασίας και **30% περίπου όλων των αισθητήρων στερεάς κατάστασης** που πουλήθηκαν την προηγούμενη δεκαετία ήταν **θερμικοί αισθητήρες**.

Η θερμοκρασία είναι σημαντική στις περισσότερες **χημικές διεργασίες**, καθώς ο ρυθμός χημικής αντίδρασης είναι συνήθως εκθετική συνάρτηση της θερμοκρασίας σύμφωνα με τη σχέση του Arrhenius.

Η **βιομηχανική επεξεργασία** πολλών υλικών, η οποία περιλαμβάνει από τη παραδοσιακή μορφοποίηση του χάλυβα και άλλων μετάλλων ως την μικροεπεξεργασία του μονοκρυσταλλικού πυριτίου για παραγωγή μικροαισθητήρων, απαιτεί τη μέτρηση της θερμοκρασίας.

Η θερμοκρασία μετρείται στο **εργοστάσιο**, στα **αυτοκίνητα** (π.χ. στη μηχανή), στις **οικιακές συσκευές** (π.χ. στο ψυγείο), στην **ιατρική** (π.χ. θερμοκρασία του σώματος) και στο **περιβάλλον** (π.χ. θερμοκρασία αέρος).

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται, επίσης, για να **αντισταθμίσουν τα σφάλματα** που προκαλούνται από τη **θερμοκρασιακή μεταβολή των εξαρτημάτων ή των οργάνων**, ή αποτελούν μέρος ενός κυκλώματος ελέγχου.

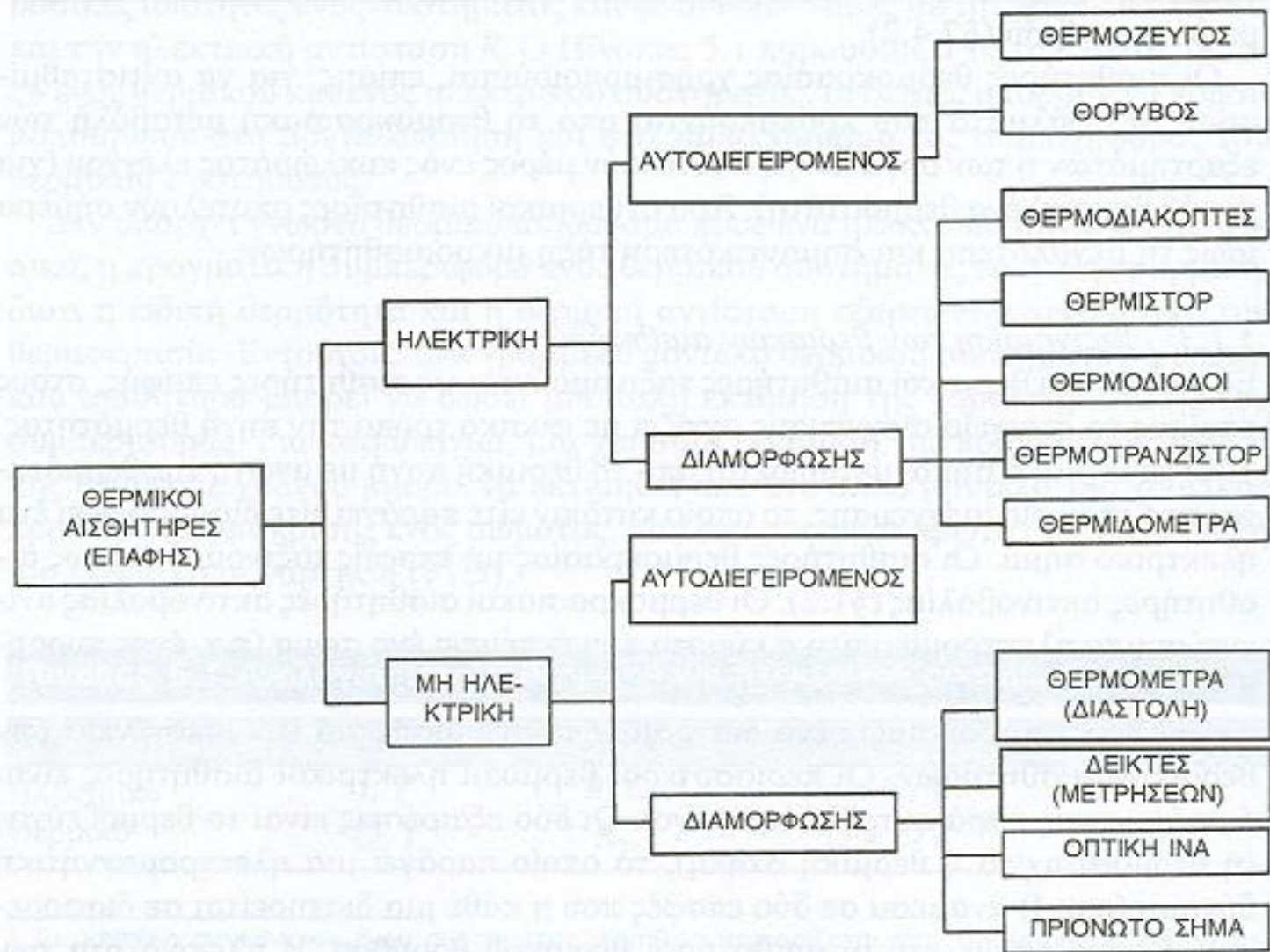
Ταξινόμηση των θερμικών αισθητήρων

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.

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας μη επαφής ταξινομούνται ως **αισθητήρες ακτινοβολίας**. Οι θερμοκρασιακοί αισθητήρες ακτινοβολίας ανιχνεύουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπει ένα σώμα (π.χ. ένας πυροηλεκτρικός ανιχνευτής).

Οι **περισσότεροι θερμικοί ηλεκτρικοί αισθητήρες είναι παθητικοί** παρά ενεργοί. Οι δύο εξαιρέσεις είναι το **θερμοζεύγος** (ή θερμοστοιχείο ή θερμική στήλη), το οποίο παράγει μια ηλεκτρομαγνητική δύναμη ανάμεσα σε δύο επαφές που η κάθε μια διατηρείται σε διαφορετική θερμοκρασία, και οι αισθητήρες **θερμικού θορύβου**.

Διάγραμμα ταξινόμησης των θερμικών αισθητήρων

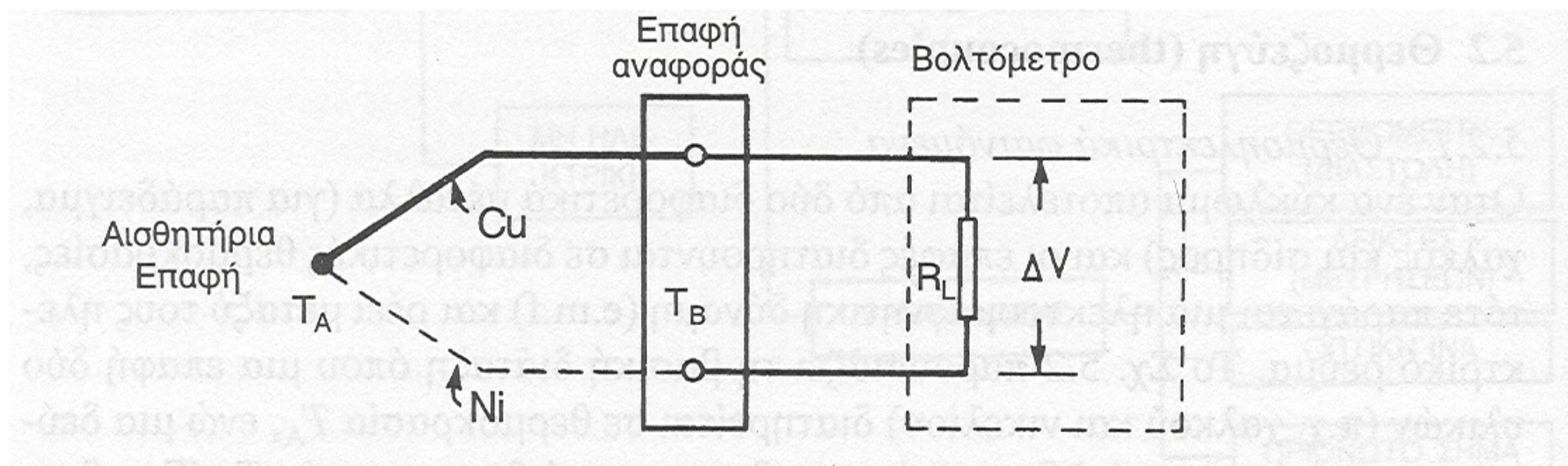


Περιοχή και ικανότητα διαφόρων αισθητήρων θερμοκρασίας

Αισθητήρας/τεχνική	Περιοχή θερμοκρασίας (Κ)	Τύπος	Διακριτική ικανότητα (Κ)
Θερμόμετρο αντίστασης γερμανίου	1,5 ως 100	Εργαστηρίου	0.0001
Θερμόμετρο αντίστασης άνθρακα	1,5 ως 100	Εργαστηρίου	0.001
Θερμόμετρο αντίστασης πλατίνας	1,5 ως 1000	Πρότυπος	0.00001
Θερμίστορ	4 ως 500	Εργαστηρίου	0.001
Επαφής πυριτίου p-n	210 ως 430	Εργαστηρίου	0.1
Θερμοζεύγος	20 ως 2700	Γενικής χρήσης	1
Ακτινοβολίας	270 ως 5000	Βιομηχανικός	2
Παραδοσιακοί:			
Θερμόμετρο αερίου	1,5 ως 1400	Εργαστηρίου	0.002
Υγρού σε γυάλινο σωλήνα	130 ως 950	Γενικής χρήσης	0.1
Διμεταλλικού ελάσματος	130 ως 700	Βιομηχανικός	1 ως 2

Θερμοζεύγη (thermocouples)

Όταν ένα κύκλωμα αποτελείται από δύο διαφορετικά μέταλλα (για παράδειγμα, χαλκός και σίδηρος) και οι επαφές διατηρούνται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, τότε παράγεται μια ηλεκτρομαγνητική δύναμη (τάση) και ρέει μεταξύ τους ηλεκτρικό ρεύμα.

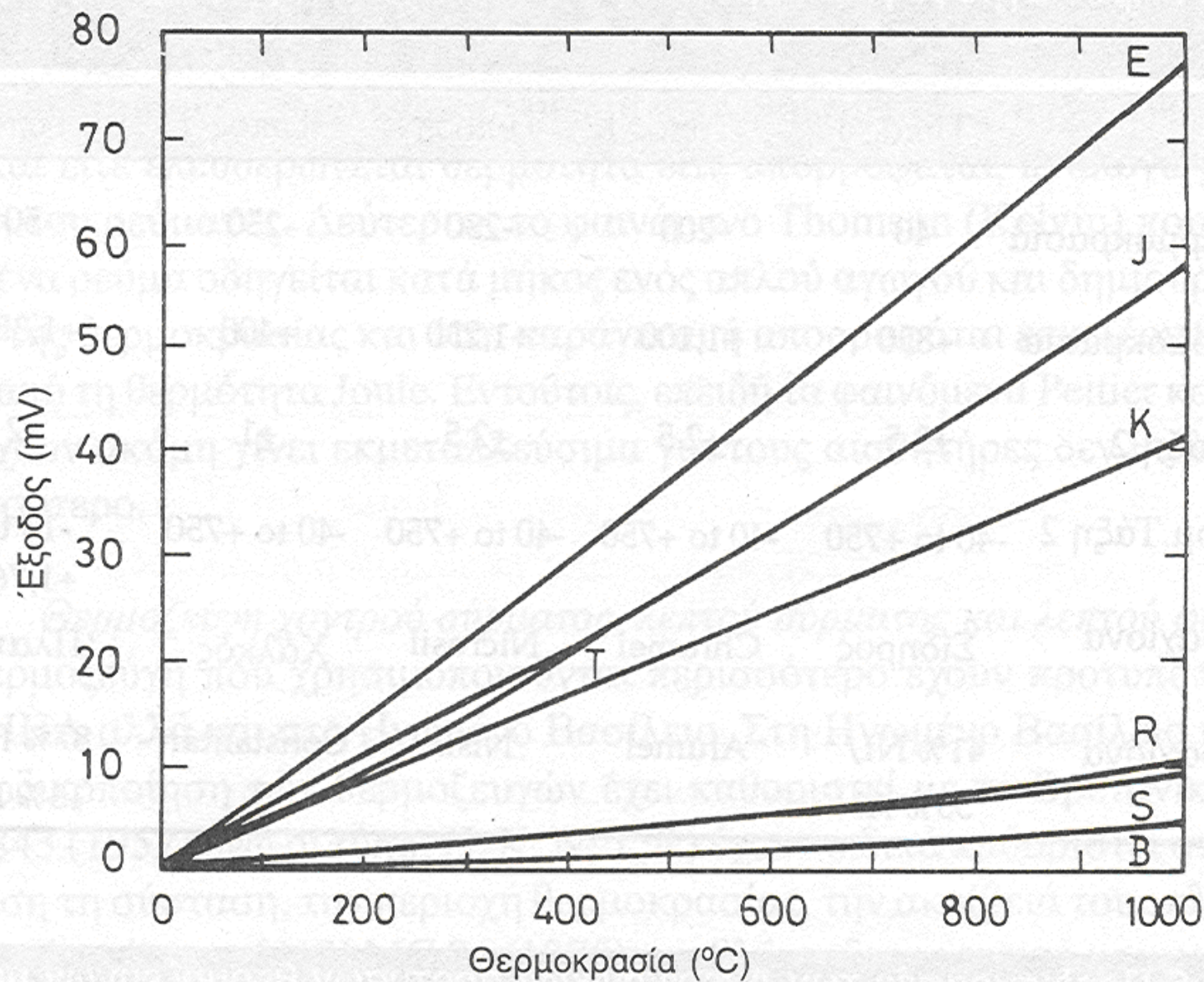


Βασικό κύκλωμα ενός θερμοζεύγους

Θερμοηλεκτρική ηλεκτρομαγνητική δύναμη και θερμική ισχύς διαφόρων μετάλλων και προτύπων κραμάτων θερμοζεύγους στους 200°C σε σχέση με την πλατίνα στους 0°C.

Υλικό	$\Delta V_r(\text{mV})$	$P_s(\mu\text{V/K})$	Υλικό	$\Delta V_r(\text{mV})$	$P_s(\mu\text{V/K})$
Αντιμόνιο	+10.14	+50.7	Pt-10% Rh	+1.44	+7.20
Chromel	+5.96	+29.8	Αργίλιο	+1.06	+5.30
Σίδηρος	+3.54	+17.7	Ταντάλιο	+0.93	+4.65
Μολυβδαίμιο	+3.19	+16.0	Πλατίνα	0.00	0.00
Βολφράμιο	+2.62	+13.1	Ασβέστιο	-0.51	-2.55
Κάδμιο	+2.35	+11.8	Παλλάδιο	-1.23	-6.15
Χρυσός	+1.84	+9.20	Alumel	-2.17	-10.85
Χαλκός	+1.83	+9.15	Κοβάλτιο	-3.08	-15.40
Άργυρος	+1.77	+8.85	Νικέλιο	-3.10	-15.50
Ρόδιο	+1.61	+8.05	Constantan	-7.45	-37.25
Pt-13% Rh	+1.47	+7.35	Βισμούθιο	-13.57	-67.85

Θερμοηλεκτρική ηλεκτρομαγνητική δύναμη εξόδου προτύπων θερμοζευγών



Τα θερμοζεύγη με **χοντρό σύρμα** (thick wire) είναι πολύ ανθεκτικά και γενικά αποτελούνται από ένα απλό σύρμα διαμέτρου **200 μm**.

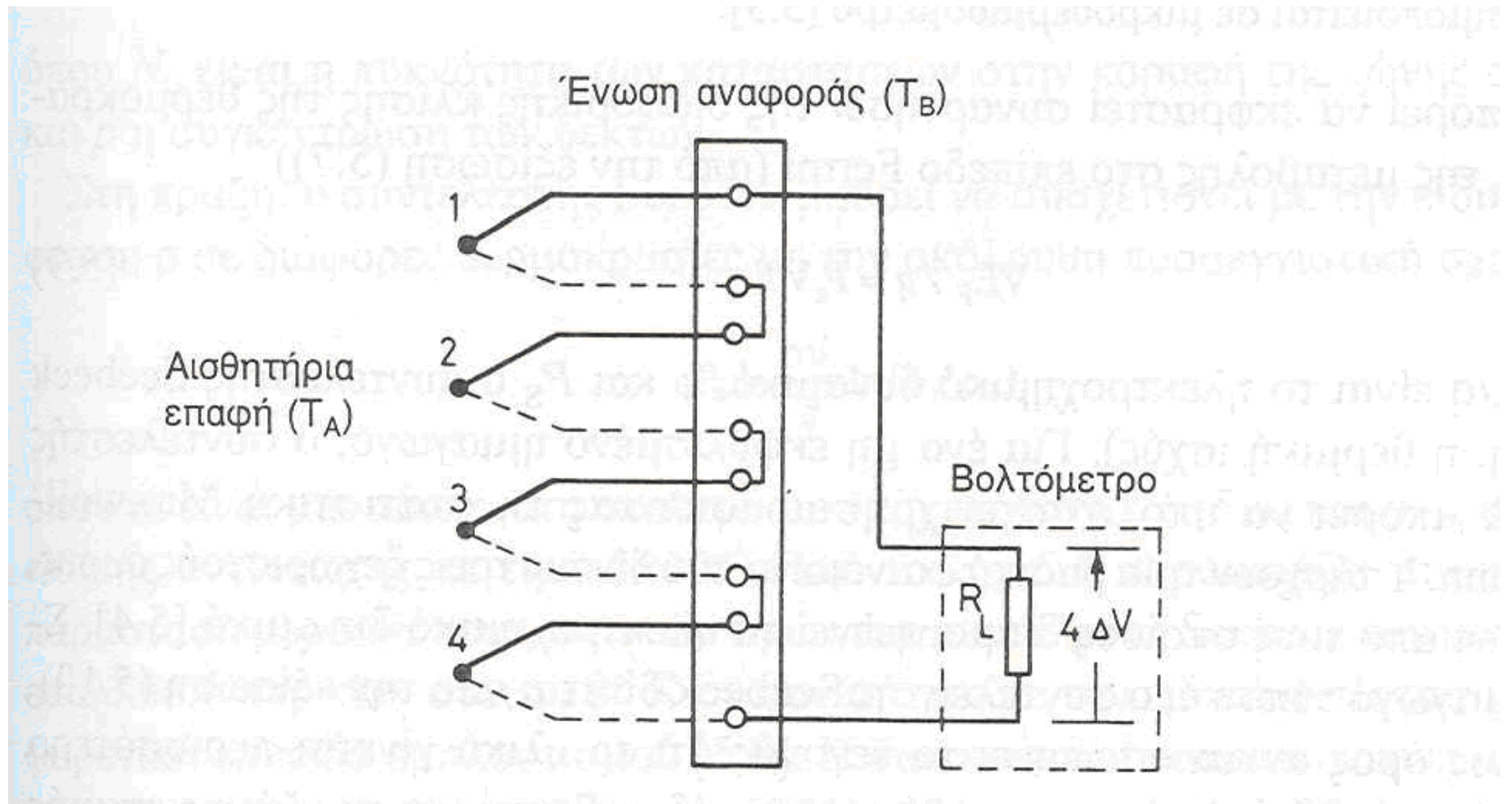
Τα θερμοζεύγη πολύ **λεπτού σύρματος** (fine wire) είναι διαθέσιμα και αποκρίνονται πολύ γρήγορα ($\tau < 0.1$ s) σε μεταβολές της θερμοκρασίας λόγω της χαμηλότερης θερμοχωρητικότητάς τους.

Πάρα πολύ γρήγορη απόκριση ($\tau = 5$ ms) έχουν επίσης τα θερμοζεύγη **λεπτού φύλλου** (thin foil) για μια περιοχή από 0 ως 800 °C. Ένα τυπικό πάχος φύλλου είναι **50 μm** και ενισχύεται με ένα φιλμ πολυαμιδίου. Τα θερμοζεύγη **λεπτού φύλλου** έχουν το πλεονέκτημα ότι **μπορούν να προσκολληθούν εύκολα σε επιφάνειες και καταλαμβάνουν μικρό χώρο**.

Όταν **απαιτείται έξοδος υψηλής τάσης**, μπορεί να ενωθεί σε **σειρά μια ομάδα θερμοζευγών**. Η προκύπτουσα διάταξη, η οποία χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για την ανίχνευση ενεργειακής ακτινοβολίας ονομάζεται **θερμική στήλη** ή **θερμοστήλη** (thermopile).

Η έξοδος μιας στήλης τεσσάρων ομοίων θερμοζευγών είναι τετραπλάσια εκείνης ενός απλού θερμοζεύγους.

Βασικό κύκλωμα θερμικής στήλης αποτελούμενο από τέσσερα όμοια θερμοζεύγυα



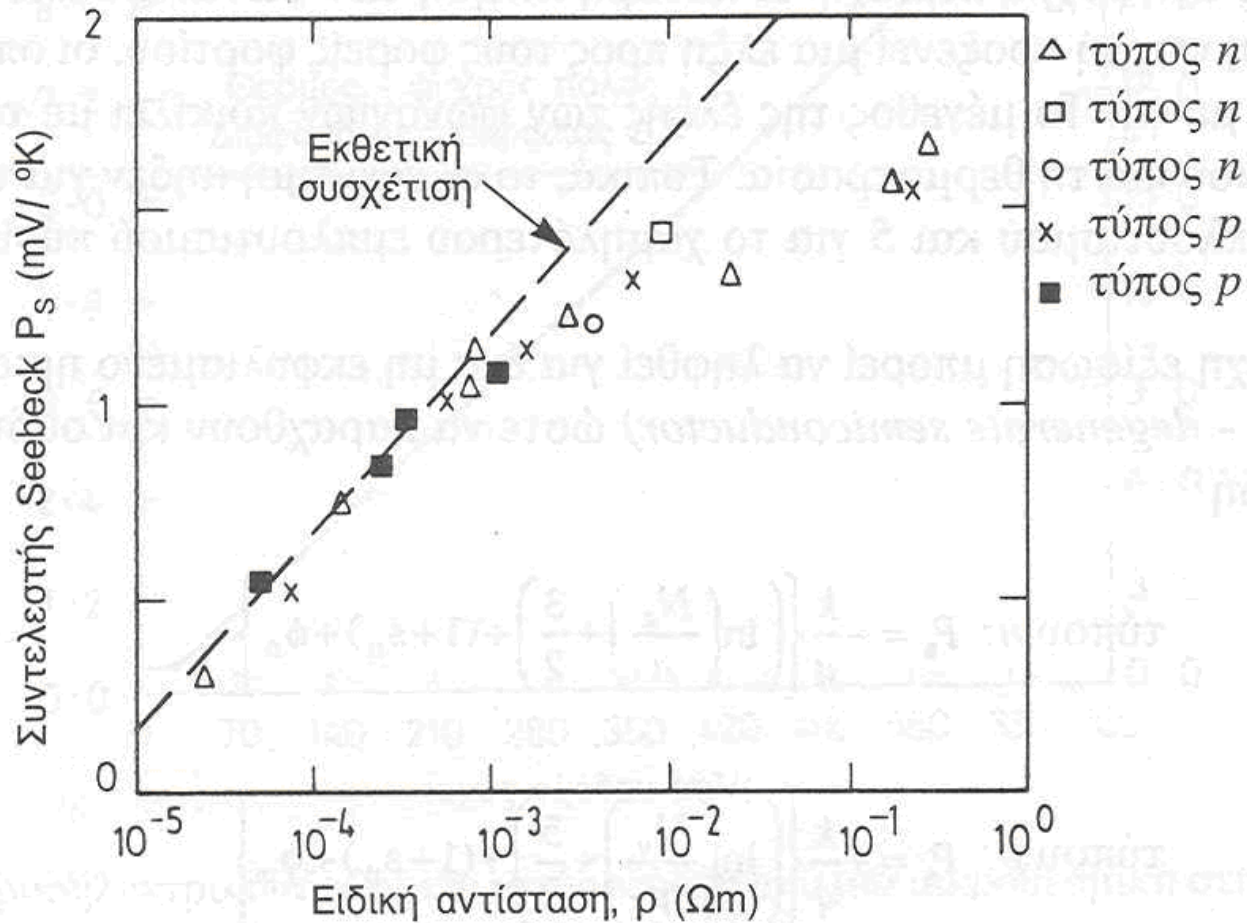
Θερμοζεύγη ημιαγωγών

Τα ημιαγώγιμα υλικά συχνά παρουσιάζουν ένα θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, το οποίο είναι εντονότερο από εκείνο που παρατηρείται στα μέταλλα.

Στη πράξη, ο συντελεστής Seebeck μπορεί να συσχετιστεί με την ειδική αντίσταση ρ σε διάφορες θερμοκρασίες με την ακόλουθη προσεγγιστική σχέση:

$$P_s \approx \frac{mk}{q} \ln\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)$$

όπου m είναι μια αδιάστατη σταθερά με τιμή περίπου 2.6 και ρ_0 η σταθερά ειδικής αντίστασης με τιμή $5 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$.

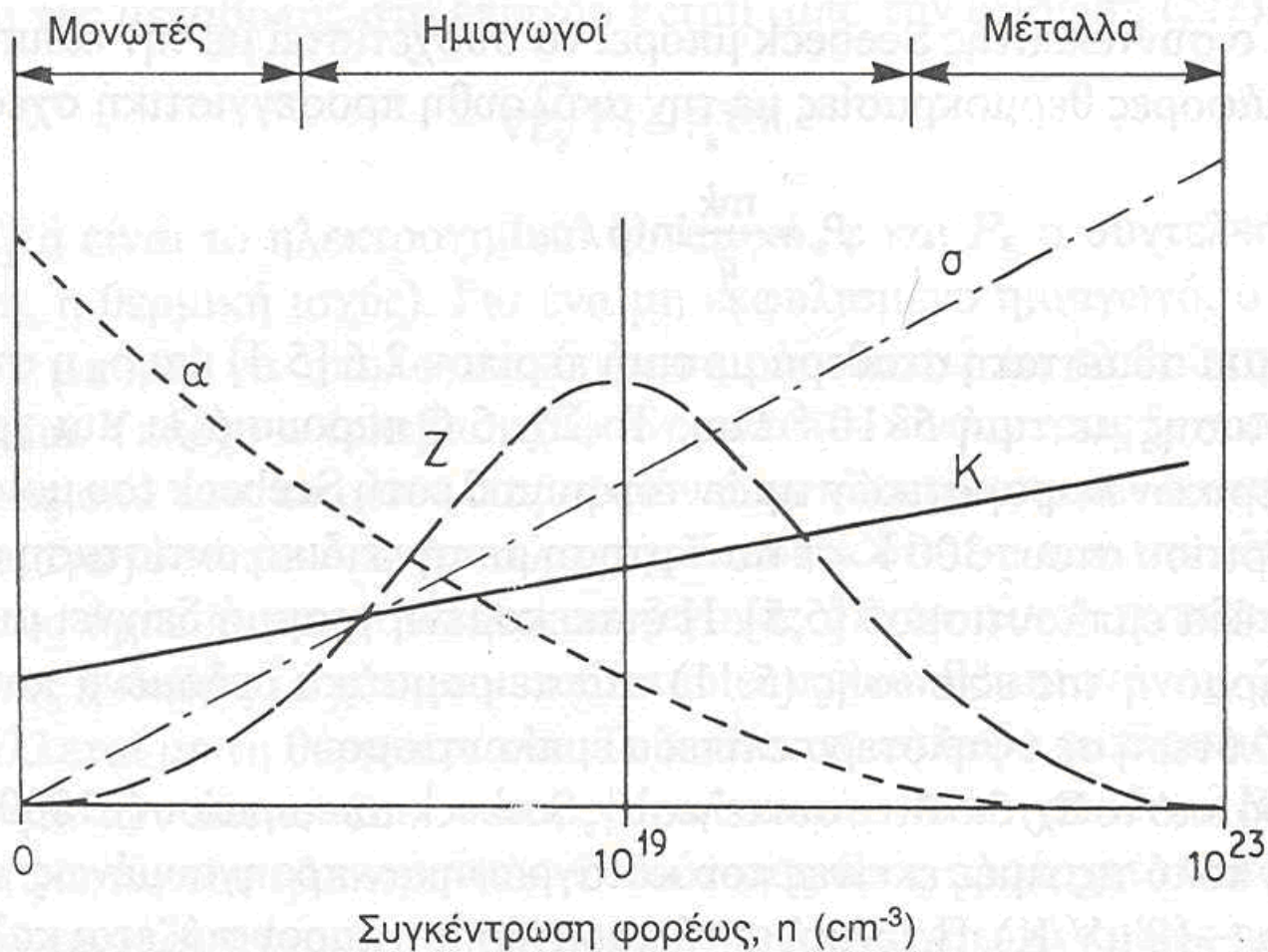


Το σχήμα παρουσιάζει μια γραφική παράσταση μερικών πειραματικών τιμών του συντελεστή Seebeck του μονο-κρυσταλλικού πυριτίου στους 300 K σε συνάρτηση με την ειδική αντίσταση σε διάφορα επίπεδα εμπλουτισμού. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει μια θεωρητική προσαρμογή της προηγούμενης εξίσωσης στα πειραματικά δεδομένα που είναι κατά πολύ καλύτερη σε υψηλότερα επίπεδα εμπλουτισμού.

Ο συντελεστής Seebeck του πυριτίου (1000 $\mu\text{V/K}$) ξεπερνά κατά πολύ τις τιμές εκείνες που καταγράφηκαν προηγουμένως για διάφορα μέταλλα (10 $\mu\text{V/K}$). Η γενική αυτή παρατήρηση παρουσιάζεται καλύτερα όταν εξετάζεται ο δείκτης αξίας Z (συντελεστής Z) που ορίζεται από τη σχέση

$$Z = P_s^2 \frac{\sigma}{\kappa}$$

όπου σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα και κ η θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Ο δείκτης αξίας δεν εξαρτάται μόνο από το μέγεθος του φαινομένου Seebeck, αλλά και από το λόγο της ηλεκτρικής προς τη θερμική αγωγιμότητα. Ένας υψηλός λόγος αγωγιμοτήτων είναι πλεονέκτημα, επειδή επιτρέπει τη διατήρηση μιας μεγάλης διαφοράς θερμοκρασίας με μικρή κατανάλωση ενέργειας.



Συγκέντρωση φορέως, n (cm^{-3})

Δείκτης αξίας Z για μονωτές, ημιαγωγούς και μέταλλα σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση φορέως n .

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται το πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης ενός ημιαγωγικού υλικού έναντι ενός μεταλλικού (ή μονωτικού) υλικού σε θερμοηλεκτρικό αισθητήρα. Παρόλο που είναι ένα κάπως χοντρικό μοντέλο, δείχνει ότι η μέγιστη απόδοση συμβαίνει σε μια πυκνότητα φορέως μεταξύ 10^{18} και 10^{20} cm^{-3} .

Μεταλλικές θερμοαντιστάσεις

Η ειδική αντίσταση των μετάλλων και των ημιαγωγών μεταβάλλεται με την θερμοκρασία, η φύση της συμπεριφοράς τους όμως είναι διαφορετική.

Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ($< 20\text{K}$), η ειδική αντίσταση είναι τυπικά σταθερή, ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία και ελέγχεται από τη σκέδαση προσμίξεων ηλεκτρονίων (εκτός από τους υπεραγωγούς).

Σε χαμηλές θερμοκρασίες (περίπου 20 K ως 50 K), παρατηρείται ένας εκθετικός νόμος, ο οποίος συνδέεται με μια διαδικασία σκέδασης ηλεκτρονίου-ηλεκτρονίου.

Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 50 K , η σχέση είναι σχεδόν γραμμική και καθορίζεται από τη σκέδαση ηλεκτρονίου-φωνονίου. Οι μεταλλικές θερμοαντιστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες από -200° C ως $+1000^\circ\text{ C}$

Ο θερμοκρασιακός συντελεστής της ειδικής αντίστασης a_r ορίζεται ως εξής

$$a_r = \frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho}{dT}$$

Για τα μέταλλα που βρίσκονται στην κατά προσέγγιση γραμμική περιοχή, η ειδική αντίσταση ρ μπορεί να περιγραφεί καλά από ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού,

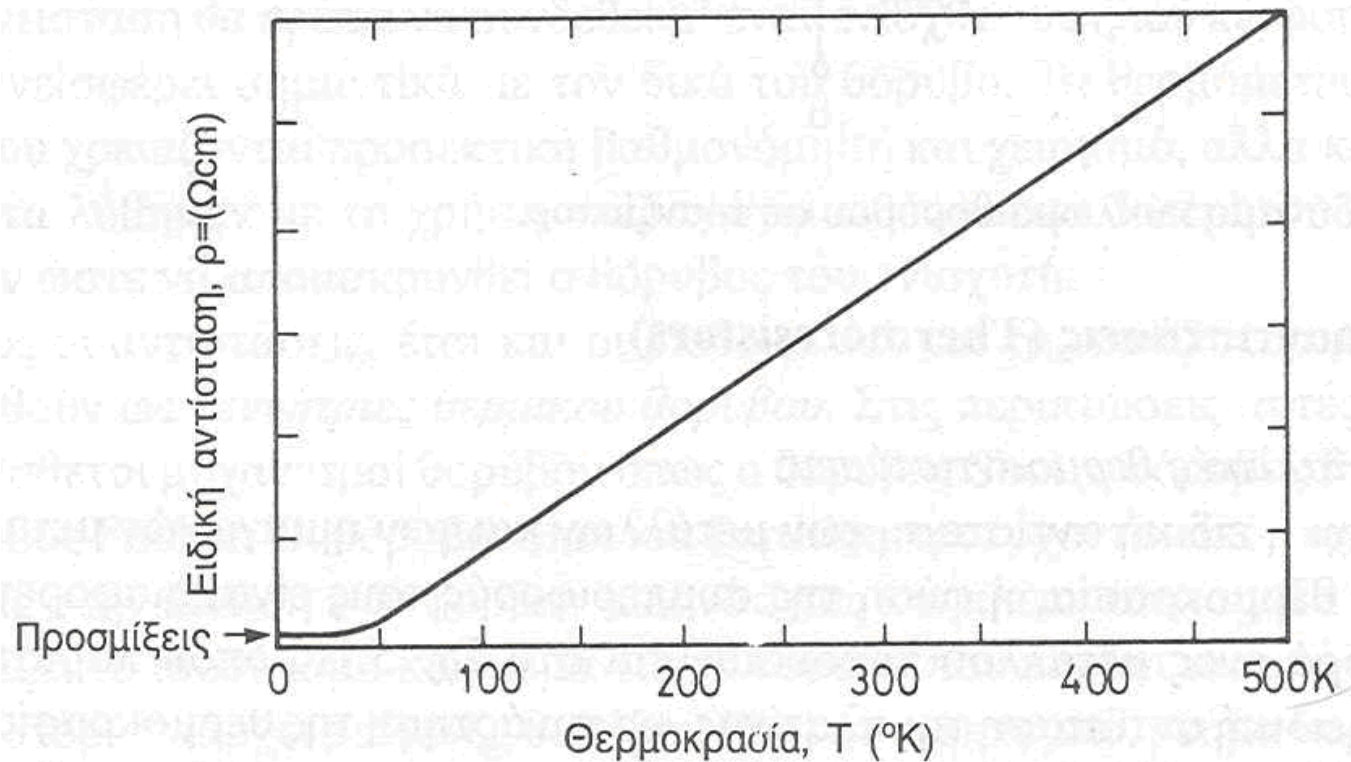
$$\rho \approx \rho_0 (1 + \alpha T + \beta T^2)$$

όπου ρ_0 είναι η ειδική αντίσταση σε θερμοκρασία αναφοράς 0°C και α και β οι σταθερές του υλικού. Σύμφωνα με την πρώτη σχέση, ο θερμοκρασιακός συντελεστής της ειδικής αντίστασης δίνεται από τη σχέση

$$a_r \approx \alpha + 2\beta T$$

Άρα η σταθερά υλικού α είναι ο γραμμικός θερμοκρασιακός συντελεστής της ειδικής αντίστασης και για τα μέταλλα είναι θετικός και λαμβάνει μια τυπική τιμή $5 \cdot 10^{-3}/\text{K}$.

Ειδική αντίσταση πλατίνας (λευκόχρυσος) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία



Η πλατίνα αποτελεί μια δημοφιλή επιλογή μετάλλου, επειδή η αντίστασή της είναι ιδιαίτερα γραμμική με τη θερμοκρασία (δηλαδή, το β είναι μικρό με τιμή $-5.9 \times 10^{-7} / \text{K}^2$).

Παρόλο που η πλατίνα δεν έχει την υψηλότερη ειδική αντίσταση, η οποία θα αποτελούσε σημαντικό πλεονέκτημα σε μικροσυσκευές, έχει μια λογικά υψηλή TCR (39.2×10^{-4}).

Τα θερμόμετρα αυτά καλύπτουν μια ευρεία περιοχή θερμοκρασίας από 15 K ως 1000 K με τυπική ακρίβεια 0.1°C και ονομαστική αντίσταση των 100 Ω . Μια τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης

$$\rho \approx \rho_0 (1 + \alpha T + \beta T^2)$$

που ονομάζεται εξίσωση Callendarvan Dusen χρησιμοποιείται στη βαθμονόμηση οργάνων που χρησιμοποιούν θερμοαντιστάσεις πλατίνας. Η εξίσωση αυτή εκτείνει το πολυώνυμο στον τέταρτο βαθμό (όροι T^4).

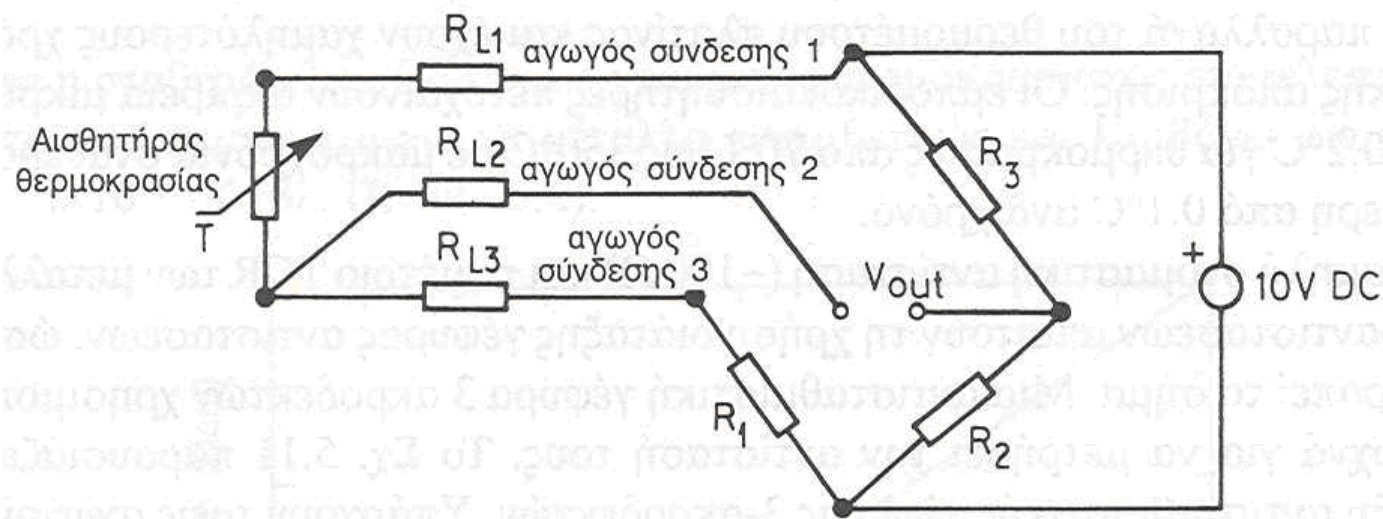
Η σταθερότητά της δίνει τη δυνατότητα στην πλατίνα να χρησιμοποιηθεί σαν πρότυπο θερμοκρασίας αναφοράς.

Τα θερμόμετρα αντίστασης νικελίου αποτελούν μια φθηνότερη εναλλακτική λύση σε σχέση με την πλατίνα, αλλά καλύπτουν μόνο μια περιοχή από 70 K ως 600 K.

Χαρακτηριστικά αντίστασης κοινών μετάλλων και κραμάτων.

Υλικό	Ειδική αντίσταση, ρ ($10^8 \Omega \cdot m$) στους ($20^\circ C$)	TRC, α ($10^{-4}/K$)
Nichrome (60% Ni, 16% Cr, 24% Fe)	109.0	2
Constantan (55% Cu, 45% Ni)	49.0	± 0.2
Manganin (86% Cu, 12% Mn, 2% Ni)	43.0	-0.2
Παλλάδιο	10.8	37.7
Πλατίνα	10.6	39.2
Σίδηρος	9.71	65.1
Τνδιο	9.00	45.0
Νικέλιο	6.84	68.1
Βολφράμιο	5,50	46.0
Ράδιο	4,70	45.7
Αλουμίνιο	2.69	42.0
Χρυσός	2.30	39.0
Χάλκος	1.67	43.0
Άργυρος	1.63	41.0

Η χαμηλή ονομαστική αντίσταση (100Ω) και το μέτριο TCR των μεταλλικών θερμοαντιστάσεων απαιτούν τη χρήση διάταξης γέφυρας αντιστάσεων, ώστε να μετατραπεί το σήμα. Μια αντισταθμιστική γέφυρα 3 ακροδεκτών χρησιμοποιείται συχνά για να μετρήσει την αντίστασή τους.



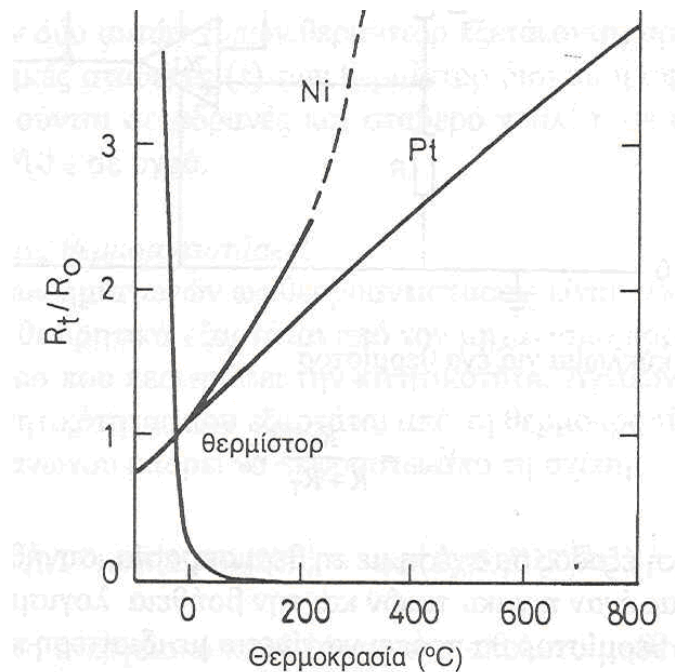
Υπάρχουν τρεις αγωγοί σύνδεσης με αντιστάσεις R_{L1} , R_{L2} , R_{L3} οι οποίες ενώνουν την θερμοαντίσταση αντίστασης R_T με το κύκλωμα γέφυρας. Σε κατάσταση ισορροπίας δεν ρέει ρεύμα στον αγωγό L_2 και με την προϋπόθεση ότι οι αντιστάσεις των αγωγών σύνδεσης μπορούν να εξισωθούν, θα υπάρχουν ίσες πτώσεις τάσης στους άλλους δύο αγωγούς L_1 και L_3 . Η γέφυρα έχει τη μέγιστη ευαισθησία όταν και οι τέσσερις βραχίονες (δηλαδή R_1 , R_2 , R_3 και R_T) έχουν την ίδια αντίσταση. Η έξοδος της γέφυρας V_{out} είναι περίπου $1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ για μία πρότυπη θερμοαντίσταση πλατίνας 10Ω και για τάση DC 10 V .

Θερμίστορ

Είναι δυνατόν να αντικατασταθεί το μέταλλο μιας θερμοαντίστασης με μια ευαίσθητη στην θερμοκρασία αντίσταση ημιαγωγού που σχηματίζεται από οξειδία διαφόρων μετάλλων ή από πυρίτιο. **Οι ημιαγώγιμες αυτές θερμοαντιστάσεις είναι λιγότερο σταθερές και ακριβείς από τις θερμοαντιστάσεις πλατίνας αλλά έχουν πλεονεκτήματα, όπως το χαμηλό κόστος παραγωγής και η δυνατότητα χρησιμοποίησης ολοκληρωμένων κυκλωμάτων προσαρμογής.**

Η ειδική αντίσταση ενός τυπικού θερμίστορ είναι κατά πολύ υψηλότερη από εκείνη ενός μεταλλικού θερμοαντιστάτη και το TCR του είναι αρνητικό και ιδιαίτερα μη γραμμικό, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Στη γραφική παράσταση φαίνεται η εξάρτηση του λόγου της αντίστασης του θερμίστορ ως προς την αντίσταση του σε 0°C από την θερμοκρασία και συγκρίνονται με τους αντίστοιχους για πλατίνα και νικέλιο.



Η ειδική αντίσταση ρ ενός θερμίστορ εκφράζεται από τη σχέση

$$\rho = \rho_{ref} \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right]$$

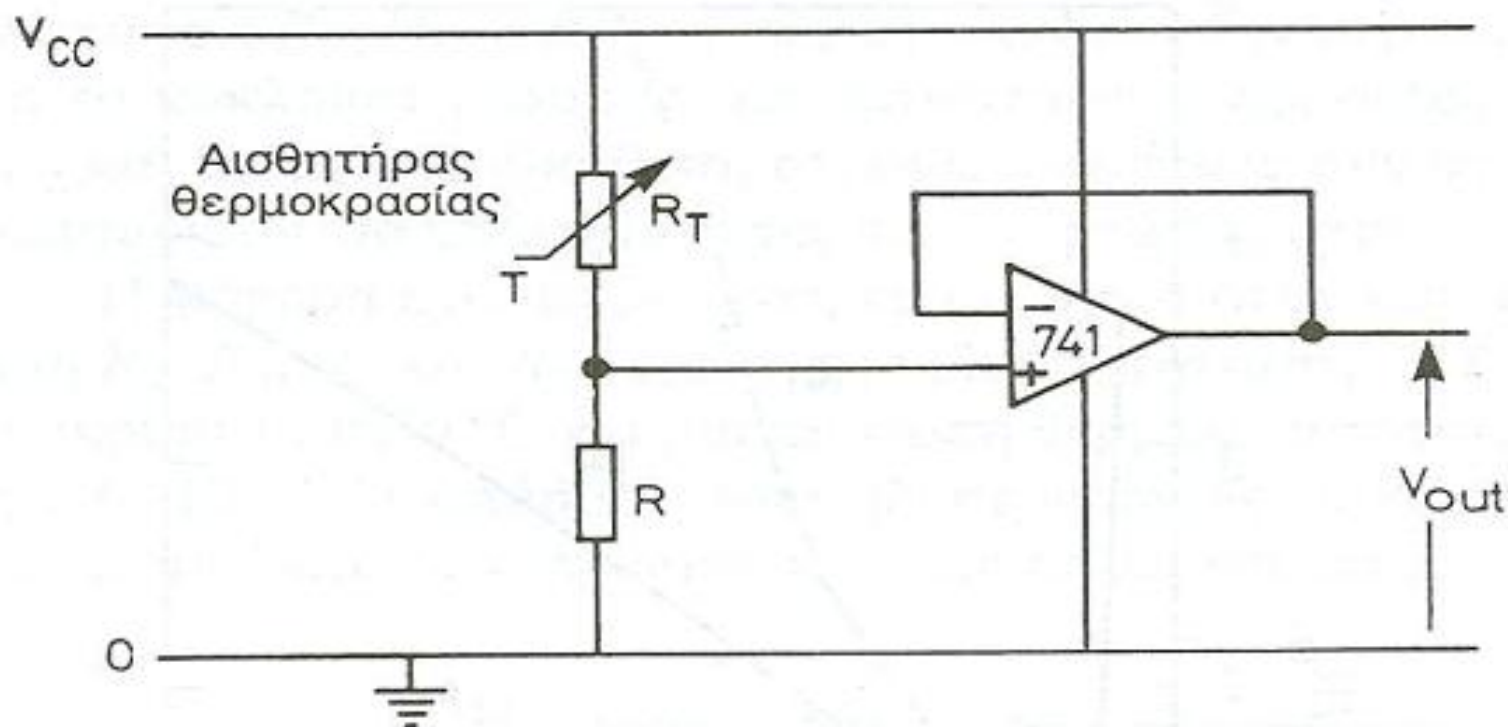
όπου ρ_{ref} είναι η ειδική αντίσταση σε θερμοκρασία αναφοράς T_{ref} (συννά 25°C και όχι 0°C), και β μια σταθερά του υλικού. Άρα από την εξίσωση αυτή, το TCR ενός θερμίστορ είναι

$$\alpha_r = -\frac{\beta}{T^2}$$

Οι τυπικές τιμές της εκθετικής σταθεράς β κυμαίνονται από 3000 ως 4500 K και η αντίστοιχη τιμή της αντίστασης στους 25°C μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 500 Ω και 10 M Ω .

Η μεγάλη μεταβολή της αντίστασης με τη θερμοκρασία επιτρέπει τη χρήση θερμίστορ σε βασικά κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών αντί συνδέσεων σε δίκτυο γεφύρας. Για παράδειγμα, ένας διαιρέτης με πρότυπη αντίσταση R και ενισχυτή τάσης (π.χ. με έναν τελεστικό ενισχυτή 741), μπορεί να είναι επαρκής για να απομονώσει το σήμα. Η τάση εξόδου V_{out} δίνεται από τη σχέση

$$V_{out} = \frac{R}{R + R_T} V_{cc}$$

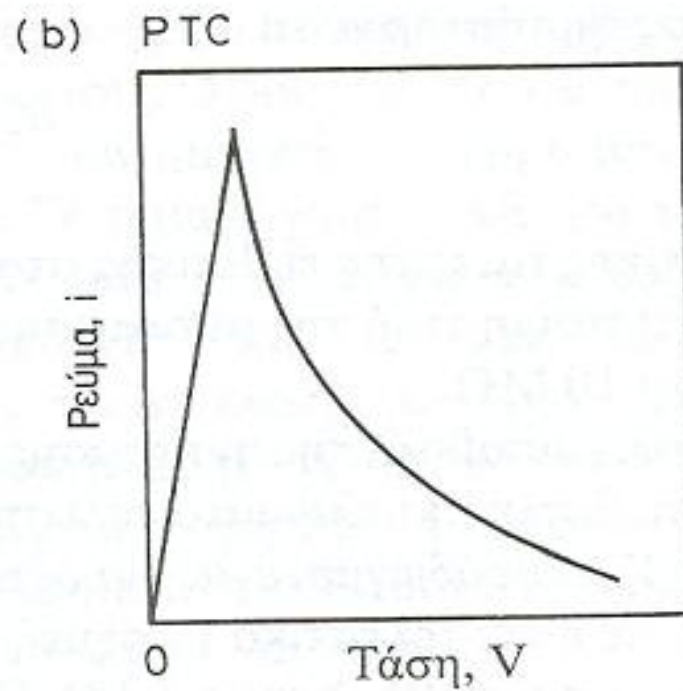
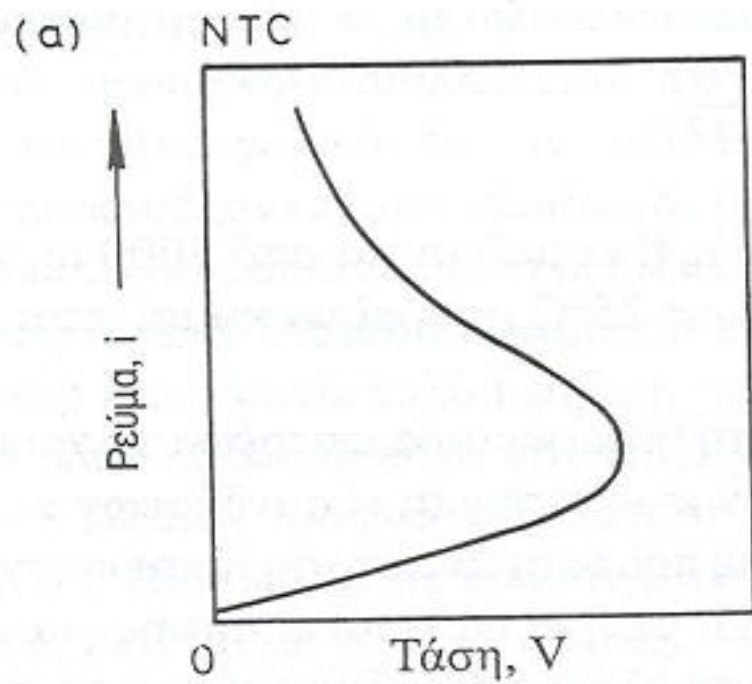


Η μη γραμμική έξοδος σε σχέση με τη θερμοκρασία, συνήθως βαθμονομείται χρησιμοποιώντας έναν πίνακα τιμών και την βοήθεια λογισμικού.

Η χρήση των θερμίστορ θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, επειδή το **TCR εξαρτάται πάρα πολύ από την κατανάλωση ισχύος**. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι χαρακτηριστικών ρεύματος- τάσης, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

Ένα θερμίστορ **NTC** (π.χ. τύπου BM, Bowthorpe) 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.

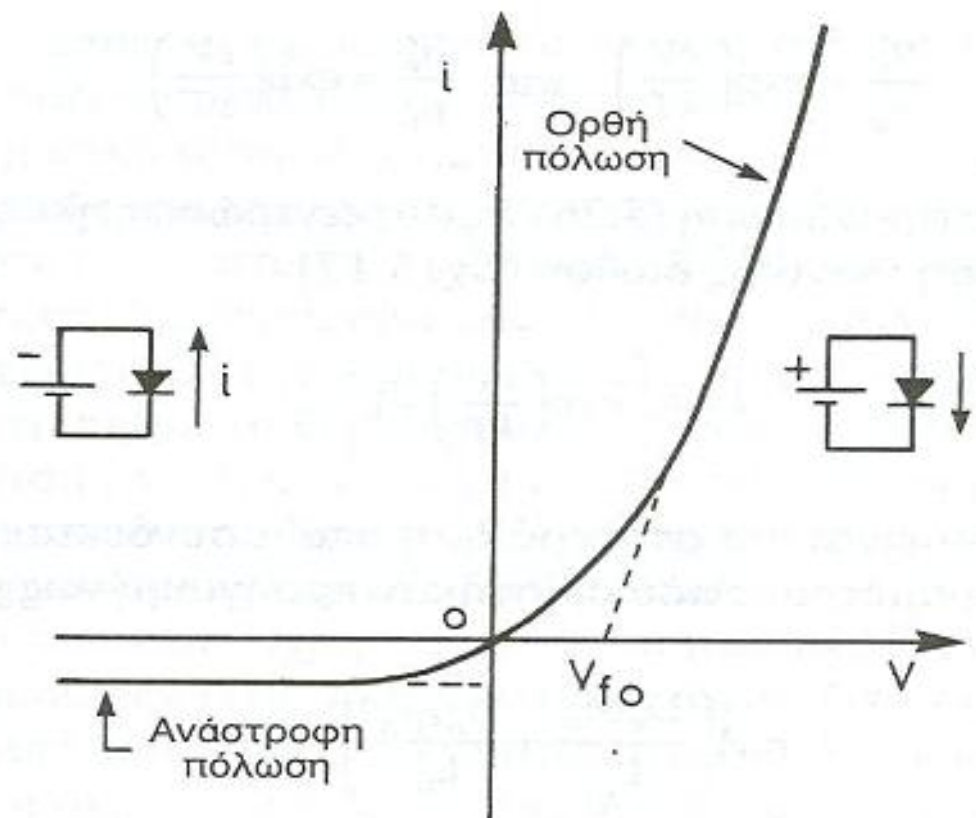
Μερικά οξειδία μετάλλων έχουν θετικό και όχι αρνητικό θερμοκρασιακό συντελεστή αντίστασης και αυτά τα θερμίστορ **PTC** έχουν ένα πολύ διαφορετικό χαρακτηριστικό ρεύματος-τάσης. Η υψηλή ροή ρεύματος προκαλεί επιπλέον αύξηση της αντίστασης, άρα μείωση του ρεύματος που ρέει μέσα από τη συσκευή.



Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης των θερμίστορ NTC και PTC.

Θερμοδιόδοι (thermiodiodes)

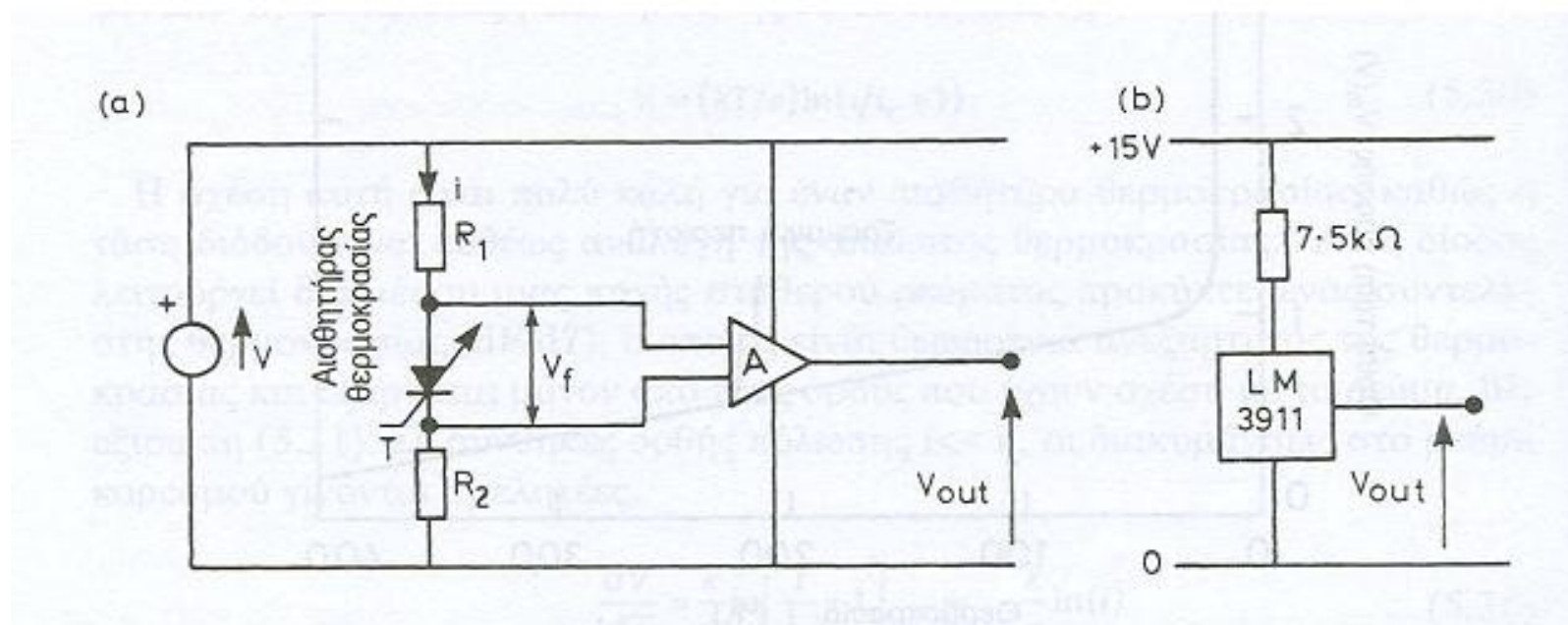
Η χρήση διόδων και τρανζίστορ ως θερμικών αισθητήρων διαμόρφωσης προτάθηκε για πρώτη φορά το 1962 από τον Mc Namara. Στα πλεονεκτήματα των θερμικών διόδων σε σχέση με άλλους τύπους θερμικών αισθητήρων περιλαμβάνονται η συμβατότητά τους με την τεχνολογία IC και το χαμηλό κόστος παραγωγής.



Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης ιδανικής διόδου πυριτίου p-n.

Θερμοδίοδος ολοκληρωμένου κυκλώματος

Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει ένα βασικό κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στη μέτρηση της πτώσης τάσης ορθής πόλωσης V_f σε μια θερμοδίοδο. Οι αντιστάσεις R_1 και R_2 περιορίζουν το ρεύμα i που ρέει μέσα από την επαφή. Η ορθή τάση στη δίοδο μετρείται κατόπιν διαμέσου ενός τελεστικού ενισχυτή διαφορικής τάσης, ώστε να δώσει μια έξοδο V_{out} εξαρτημένη γραμμικά από τη θερμοκρασία.



Βασικά κυκλώματα για (α) μια θερμοδίοδο πυριτίου και (β) ένα εμπορικό IC θερμοκρασίας της National Semiconductor.

Η εμπορικά διαθέσιμη συσκευή **LM3911** (*National Semiconductor*) είναι ένας χαμηλού κόστους αισθητήρας θερμοκρασίας, ο οποίος περιέχει έναν ολοκληρωμένο ενισχυτή, λειτουργεί από μια είσοδο απλής τάσης και έχει έξοδο 10 mV/K .

Στην πράξη, το ρεύμα κορεσμού ή το ρεύμα διαρροής i_s , εξαρτάται από τη διαδικασία κατασκευής και επηρεάζεται από τους ρυθμούς διάχυσης και επανασυνδυασμού και άρα από τη θερμοκρασία. Το ρεύμα κορεσμού για μια δίοδο πυριτίου είναι μόνο 25 nA στους 25°C αλλά φτάνει στο επίπεδο των 7 mA περίπου στους 150°C . **Η υψηλή αυτή απαίτηση ρεύματος περιορίζει και το εύρος και την γραμμικότητα των θερμοδιόδων.**

Η απόδοση ενός θερμικού μικροαισθητήρα IC μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας ένα θερμικό τρανζίστορ και όχι μια θερμοδίοδο, με τα κυκλώματά του να περιέχουν αντιστάσεις επεξεργασμένες με laser, ώστε να αυξάνουν την ακρίβειά του.

Επιπλέον, ο αρνητικός συντελεστής θερμοκρασίας της ορθής τάσης επαφής από τη θερμοδίοδο είναι ανεπιθύμητος σε πολλά κυκλώματα ελέγχου, επειδή αν "ανοίξει" το κύκλωμα θα εφαρμοστεί πλήρης ισχύς.

Θερμικά τρανζίστορ ή θερμοτρανζίστορ (thermotransistors)

Τα θερμικά τρανζίστορ έχουν εγγενή πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλους τύπους αισθητήρων θερμοκρασίας, διότι ενσωματώνονται πιο εύκολα σε κυκλώματα μικροηλεκτρονικής.

Το ρεύμα εκπομπού i_e σε ένα τρανζίστορ καθορίζεται κυρίως από τη διαδικασία διάχυσης, παρά από τις διαδικασίες επανασυνδυασμού ή διαρροής, οι οποίες καθορίζουν το ρεύμα βάσης.

Η τάση μεταξύ της βάσης και του εκπομπού του τρανζίστορ, V_{be} , εξαρτάται από την θερμοκρασία με μια σχέση όμοια με αυτή που αναφέρθηκε προηγουμένως για τη δίοδο. Η μόνη διαφορά είναι ότι οι σταθερές (π.χ η i_s) έχουν διαφορετική εξάρτηση από τη γεωμετρία της συσκευής.

Μια περισσότερο εξελιγμένη μέθοδος μέτρησης της θερμοκρασίας με ένα μόνο τρανζίστορ είναι πρώτα να εφαρμοστεί ένα υψηλό ρεύμα συλλέκτη i_{c1} και μετά ένα χαμηλό ρεύμα συλλέκτη i_{c2} . Στην περίπτωση αυτή η διαφορά στις τάσεις βάσης-εκπομπού ΔV_{be} εξαρτάται μόνον από τα ρεύματα συλλέκτη, παρά από παράγοντες που έχουν σχέση με τη γεωμετρία ή το είδος του υλικού,

$$\Delta V_{be} = (V_{be1} - V_{be2}) = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{i_{c1}}{i_{c2}} \right) \quad \text{με } i_{c1} \gg i_{c2}$$

Η έξοδος είναι ευθέως ανάλογη της απόλυτης θερμοκρασίας.

Θερμικοί διακόπτες (thermoswitches)

Ένας διακόπτης θερμοκρασίας, ή θερμοδιακόπτης, μπορεί να θεωρηθεί ως θερμικός αισθητήρας με συγκεκριμένη λειτουργία (δηλαδή, ανοικτός/κλειστός).

Οι θερμοδιακόπτες χρησιμοποιούνται συχνά σε οικιακές ή άλλες συσκευές (π.χ. σε έναν αυτόματο βραστήρα) ως μηχανισμός ελέγχου και όχι ως συσκευή μέτρησης.

Ο συνηθέστερος θερμοδιακόπτης είναι ο διμεταλλικός διακόπτης, ο οποίος αποτελείται από δύο μεταλλικά ελάσματα, με διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής ενωμένα με μηχανικό τρόπο. Η διαφορική μηχανική τάση που προκαλείται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας προξενεί κάμψη του ελάσματος ενεργοποιώντας, έτσι, μια λειτουργία ελέγχου.

Έχουν κατασκευαστεί μικρομηχανικά ισοδύναμα του διμεταλλικού ελάσματος. Οι συσκευές αυτές είναι στην πραγματικότητα θερμίστορ με απότομη μεταβολή στην αντίσταση από μια ονομαστική τιμή, για παράδειγμα, $100 \text{ k}\Omega$ στους 57°C ή 75°C σε 100Ω για μια μεταβολή μόνο κατά 10°C .

Η κατάλληλη σχεδίαση εξασφαλίζει ότι οι μεταβολές της αντίστασης είναι μικρές έξω από αυτή την περιοχή θερμοκρασίας.