

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Αρχές λειτουργίας και εφαρμογές
αισθητήρων θερμοκρασίας.*

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:

Τζούμας Ευθύμιος

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:

Δρ. Κουδουμάς Εμμανουήλ

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2010

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος	6
1. Αισθητήρες και Θερμοκρασία	
1.1 Θερμοκρασία	7
1.1.1 Πρώτη προσέγγιση μέσω του μηδενικού νόμου	7
1.1.2 Σημεία αναφοράς και κλίμακες θερμοκρασίας.....	8
1.2 Αισθητήρες	
1.2.1 Η «έννοια» του αισθητήρα	10
1.2.2 Στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων	13
1.2.3 Πλεονεκτήματα των αισθητήρων	16
1.2.4 Αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας	17
1.2.5 Εφαρμογές μέτρησης θερμοκρασίας	19
2. Κλασσικοί αισθητήρες θερμοκρασίας (τύπου επαφής)	
2.1 Θερμοζεύγη.....	22
2.1.1 Διαφορά δυναμικού στα θερμοζεύγη	23
2.1.2 Αρχή λειτουργίας του θερμοζεύγους.....	24
2.1.3 Τρόπος Σύνδεσης Θερμοζευγών.....	28
2.1.4 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα θερμοζευγών.....	31
2.1.5 Είδη θερμοζευγών.....	31
2.1.6 Ιδιότητες θερμοζευγών	38
2.1.7 Εφαρμογές θερμοζευγών	40
2.1.8 Παραδείγματα θερμοζευγών.....	41
2.2 Θερμόμετρα μεταβαλλόμενης ωμικής αντίστασης. Αισθητήρες RTD (<i>Resistance Temperature Detectors</i>)	
2.2.1 Γενικά.....	44
2.2.2 Αρχή Λειτουργίας αισθητήρων RTD.....	49
2.2.3 Τύποι αισθητήρων RTD.....	52
2.2.4 Μέτρηση της αντίστασης των αισθητήρων RTD	54

2.2.5 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα αισθητήρων RTD.....	57
2.2.6 Εφαρμογές αισθητήρων RTD	57
2.2.7 Χαρακτηριστικά αισθητήρων RTD	59
2.2.8 Παραδείγματα αισθητήρων RTD.....	59
2.3. Θερμοαντιστάτες (<i>Thermistor</i>)	
2.3.1 Γενικά.....	62
2.3.2 Λειτουργία και χαρακτηριστικά στοιχεία των θερμοαντιστατών.....	63
2.3.3 Κατηγορίες θερμοαντιστατών.....	69
2.3.3.1 Θερμοαντιστάτης τύπου NTC	69
2.3.3.2 Θερμοαντιστάτης τύπου PTC	75
2.3.4 Χρήσεις θερμοαντιστατών.....	78
2.3.5 Τρόποι σύνδεσης θερμοαντιστατών	79
2.3.6 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα	82
2.3.7 Παραδείγματα αισθητήρων θερμίστορ	82
2.4 Θερμόμετρα με υγρό ή αέριο(<i>Filled Systems Thermometer</i>)	
2.4.1 Γενικά.....	84
2.4.2 Αρχή λειτουργίας.....	84
2.4.3 Θερμόμετρα με υγρό.....	86
2.4.3.1 Θερμόμετρα υγρού σε γυαλί.....	88
2.4.4 Θερμόμετρα με αέριο και υγρό.....	89
2.4.5 Θερμόμετρα με αέριο.....	90
2.4.6 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα	92
2.5 Θερμόμετρα διμεταλλικού στοιχείου (<i>bimetallic strip</i>)	
Διμεταλλικά θερμόμετρα	

2.5.1 Γενικά.....	93
2.5.2 Αρχή λειτουργίας Διμεταλλικών θερμομέτρων.....	93
2.5.3 Είδη Διμεταλλικών θερμομέτρων.....	96
2.5.4 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα	97
2.5.5 Παραδείγματα Διμεταλλικών θερμομέτρων.....	98
2.6 Αισθητήρες θερμοκρασίας τύπου ημιαγωγού (<i>p-n junction temperature sensor</i>)	
2.6.1 Γενικά.....	103
2.6.2 Αισθητήρες τύπου ημιαγωγού. Θερμοдиодοι και θερμοτρανζίστορ σε ολοκληρωμένα κυκλώματα.....	105
2.6.3 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων τύπου ημιαγωγού	106
2.6.4 Χαρακτηριστικά αισθητήρων τύπου ημιαγωγού	108
2.6.5 Παραδείγματα αισθητήρων τύπου ημιαγωγού	109
3. Αισθητήρες θερμοκρασίας μη επαφής για μέτρηση από απόσταση (<i>non contact sensors</i>)	
Πυρόμετρα	111
3.1 Πυρόμετρα απορρόφησης	113
3.1.1 Αρχή λειτουργίας πυρομέτρων	115
3.2 Οπτικά πυρόμετρα	116
3.2.1 Κάμερες υπέρυθρης ακτινοβολίας	118
3.2.2 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων υπερύθρου	119
3.2.3 Είδη αισθητήρων υπερύθρου	120
3.2.4 Χρήσεις αισθητήρων υπερύθρου	122
3.2.5 Πλεονεκτήματα Υπέρυθρης Τεχνολογίας.....	122
3.2.6 Παραδείγματα αισθητήρων υπερύθρου	123
3.3 Αισθητήρες θερμοκρασίας με οπτική ίνα	

3.3.1 Γενικά.....	125
3.3.2 Οπτικές Ύψες.....	125
3.3.3 Κατανεμημένη καταγραφή θερμοκρασίας.....	128
3.3.4 Μέτρηση θερμοκρασίας.....	128
3.3.5 Χρήσεις αισθητήρων οπτικών	130
3.3.6 Παραδείγματα αισθητήρων θερμοκρασίας με οπτική ίνα	131
Περίληψη	133
Βιβλιογραφία	134

Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο: *Αρχές λειτουργίας και εφαρμογές αισθητήρων θερμοκρασίας* η οποία εκπονήθηκε από τον Τζούμα Ευθύμιο, φοιτητή του ΠΤΗ΄ εξαμήνου του Τμήματος Ηλεκτρολογίας του Τεχνολογικού Ιδρύματος Κρήτης υπό την επίβλεψη του Δρ. Εμμανουήλ Κουδουμά και ολοκληρώθηκε τον Δεκέμβριο του 2010.

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι να μας δείξει κάποια γενικά πράγματα όσο αφορά τους αισθητήρες θερμοκρασίας που υπάρχουν και χρησιμοποιούνται στις μέρες μας.

Πράγματα όπως:

- Τι είναι οι αισθητήρες θερμοκρασίας;
- Πώς λειτουργούν;
- Πού χρησιμοποιούνται;
- Καθώς και ποια είναι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του καθενός.

1.Θερμοκρασία και Αισθητήρες

1.1 Θερμοκρασία

1.1.1. Πρώτη προσέγγιση μέσω του μηδενικού νόμου

Η εμπειρική μας επαφή με την έννοια της θερμοκρασίας γίνεται μέσω του αισθήματος του ψυχρού και του θερμού, διαδικασία με καθαρά υποκειμενικό χαρακτήρα, πληροφορώντας μας μόνο για διαφορές θερμοκρασιών, μεταξύ ενός αντικειμένου και του σώματος μας, που βέβαια δεν είναι μια απόλυτα σταθερή θερμοκρασία αναφοράς. Γεννάται, λοιπόν, η ανάγκη να δοθεί ένας περισσότερο αντικειμενικός ορισμός της θερμοκρασίας. Ως πρώτο βήμα προς την κατεύθυνση αυτή, αξιοποιούμε το νόημα του μηδενικού νόμου της θερμοδυναμικής.

Θερμοκρασία είναι μια χαρακτηριστική μακροσκοπική παράμετρος για τα σώματα (όπως π.χ. η πίεση, ο όγκος, η εσωτερική ενέργεια), η οποία έχει τη χαρακτηριστική ιδιότητα ότι, για όλα τα σώματα που είναι σε θερμική ισορροπία μεταξύ τους, παίρνει την ίδια τιμή.

Για την μέτρησή της, αυτό που κάνουμε είναι να αντιστοιχούμε πλήρως τη θερμοκρασία, με το μέγεθος κάποιας χαρακτηριστικά μεταβαλλόμενης ιδιότητας του σώματος (**θερμομετρική ιδιότητα**), το οποίο θα παίζει το ρόλο του **θερμομέτρου**. Τέτοιες ιδιότητες είναι το μήκος μιας λεπτότατης στήλης του υδραργυρικού θερμομέτρου, το χρώμα στα πυρακτωμένα σώματα (οπτικό πυρόμετρο), η ηλεκτρική αντίσταση των σωμάτων (αύξηση της αντίστασης στα μέταλλα και έντονη ελάττωση στους ημιαγωγούς), η τάση επαφής δύο υλικών (θερμοηλεκτρική τάση, θερμοηλεκτρικό ζεύγος), η πίεση σε αέριο με σταθερό όγκο, ο όγκος αερίου σε σταθερή πίεση κ.ά.

1.1.2 Σημεία αναφοράς και κλίμακες θερμοκρασίας

Τα θερμόμετρα βαθμονομούνται σε ορισμένες σταθερές ή θεμελιώδεις θερμοκρασίες. Αυτές αντιστοιχούν σε κάποιες καταστάσεις ισορροπίας οι οποίες είναι εύκολο να αναπαραχθούν και των οποίων οι θερμοκρασίες έχουν προσδιορισθεί με άμεσες μεθόδους. Δηλαδή, εκτός από το θερμόμετρο, η μέτρηση της θερμοκρασίας απαιτεί τον σχεδιασμό κάποιας κλίμακας.

Στην πορεία της εξέλιξης των θερμομέτρων έχουν παρουσιαστεί πολλές κλίμακες. Οι περισσότερες από αυτές δεν ήταν ακριβείας και χρησιμοποιήθηκαν για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα.

Σήμερα, χρησιμοποιούνται κυρίως τρεις κλίμακες:

- ⊗ η κλίμακα **Celsius** η οποία παρουσιάστηκε το 1742,
- ⊗ η κλίμακα **Fahrenheit** (1714), και
- ⊗ η κλίμακα **Kelvin** (1850).

i. Κλίμακα Kelvin (Κέλβιν)

Στο χώρο της επιστήμης, χρησιμοποιείται ευρύτατα η κλίμακα Kelvin, που προκύπτει από μία πρότυπη μακροκατάσταση, το **τριπλό σημείο** του νερού. Αντί δεύτερης πρότυπης κατάστασης, εισάγεται αξιωματικά, η σχέση των ιδανικών αερίων, $T_1/T_2 = P_1/P_2$, δηλαδή ο λόγος των αντίστοιχων πιέσεων του ιδανικού αερίου. Το τριπλό σημείο είναι η κατάσταση όπου συνυπάρχουν και οι τρεις φάσεις του νερού: πάγος – υγρό – ατμός. Η κατάσταση αυτή παρουσιάζεται μόνο σε ορισμένη πίεση ατμών νερού, που είναι ίση με 4,58mmHg. Στο τριπλό σημείο του νερού αντιστοιχούμε αυθαίρετα την τιμή της απόλυτης θερμοκρασίας $T_{tr}=273,16K$, ενώ **T**, είναι το σύμβολο της θερμοκρασίας Kelvin.

Το μηδέν της κλίμακας Kelvin, $T = 0K$, είναι η πιο χαμηλή θερμοκρασία στην κλίμακα αυτή και αντιστοιχεί με την κατάσταση που ονομάζουμε **απόλυτο μηδέν**.

ii. Κλίμακα Celsius (Κελσίου)

Η κλίμακα Celsius καθορίζεται από δύο χαρακτηριστικά σημεία: το σημείο συνύπαρξης πάγου – νερού σε πίεση 1 Atm και το σημείο υγρού νερού – ατμού σε πίεση 1 Atm. Το πρώτο ορίστηκε από τον Celsius ως μηδέν (0°C) και το δεύτερο ως 100 °C. Μεταξύ της θερμοκρασίας T στην κλίμακα Kelvin και της αντίστοιχης ένδειξης θ στην κλίμακα Celsius ισχύει η σχέση:

$$\theta = (T - 273,15) \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

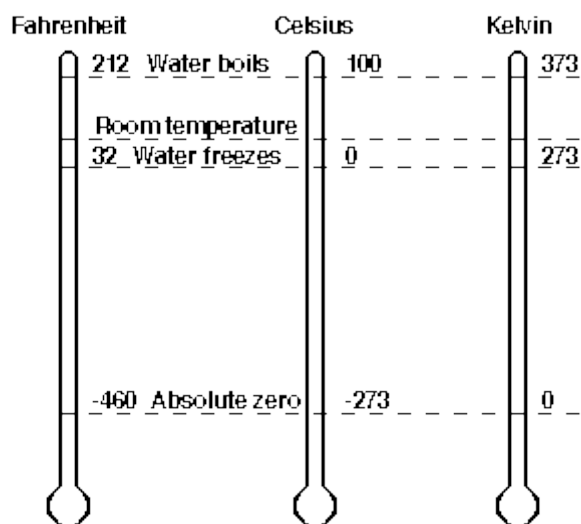
Το $T_{\text{tr}}=273,16\text{K}$ αντιστοιχεί σε $0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ στην ένδειξη $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ αντιστοιχούν $273,15\text{K}$. Το απόλυτο μηδέν ($T = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) αντιστοιχεί σε $\theta = -273,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

iii. Κλίμακα Fahrenheit

Η κλίμακα Fahrenheit χρησιμοποιείται στις Αγγλοσαξονικές χώρες για πρακτικούς λόγους. Στην κλίμακα αυτή χρησιμοποιούνται οι χαρακτηριστικές μακροκαταστάσεις της κλίμακας Κελσίου, με άλλη αντιστοιχία. Στις ενδείξεις 0°C και 100°C της κλίμακας Κελσίου αντιστοιχούν οι τιμές $32 \text{ }^{\circ}\text{F}$ και $212 \text{ }^{\circ}\text{F}$, της κλίμακας Fahrenheit. Έτσι, η σχέση μεταξύ των ισοδύναμων ενδείξεων C και F (θεωρήστε ότι τα δύο θερμομέτρα μετρούν ταυτόχρονα τη θερμοκρασία ενός σώματος), των δύο κλιμάκων είναι:

$$\frac{C - 0}{100 - 0} = \frac{F - 32}{212 - 32} \quad (2)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ αντιστοιχεί σε $1,8 \text{ }^{\circ}\text{F}$.



Σχήμα 1.1: Αναπαράσταση των τριών κλιμάκων.

Οι τρεις κλίμακες συνδέονται με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{C}{5} = \frac{F - 32}{9} \quad (3)$$

$$C = K - 273,16 \quad (4)$$

Σήμερα, είναι σε ισχύ η Διεθνής Θερμοκρασιακή Κλίμακα του 1990 (ITS-90) και η θερμοκρασία της οποίας υποδηλώνεται με T_{90} . Για το εύρος των μετεωρολογικών θερμοκρασιών (-80 έως +60 °C) αυτή η κλίμακα βασίζεται σε μια γραμμική σχέση με βάση την ηλεκτρική αντίσταση της πλατίνας και το τριπλό σημείο του ύδατος το οποίο ορίζεται στα 273.16 Kelvin.

1.2 Αισθητήρες

1.2.1 Η «έννοια» του αισθητήρα

Οι αισθητήρες είναι τα όργανα εκείνα, που μας επιτρέπουν να μετρήσουμε φυσικά μεγέθη, (τα οποία μετατρέπονται σε σήμα που μπορούμε να μελετήσουμε) ώστε να ελέγξουμε και να αυτοματοποιήσουμε τη λειτουργία διαφόρων συστημάτων.

Οι αισθητήρες, ο καθένας ανάλογα με τον προορισμό του, ανιχνεύουν συγκεκριμένες πληροφορίες στο χώρο που επιτηρούν. Τις πληροφορίες αυτές, αρχικά τις μετατρέπουν στην κατάλληλη μορφή και στη συνέχεια τις μεταφέρουν στο αυτόματο σύστημα επεξεργασίας των πληροφοριών. Εκεί γίνεται η αξιολόγησή τους και λαμβάνονται οι απαραίτητες αποφάσεις, για την καλύτερη λειτουργία του συστήματος. Στην αγγλική ορολογία οι αισθητήρες αναφέρονται με την ονομασία Sensors. Μπορούμε επίσης να τους βρούμε και με τις ακόλουθες ονομασίες: Converters, Detectors, Effectors, Transducers.

Οι αισθητήρες ενός συστήματος επιτελούν καθένας, παρόμοιο έργο, με εκείνο που επιτελούν και τα αισθητήρια όργανα του ανθρώπου, δηλαδή η όραση, η αφή, η όσφρηση, η ακοή και η γεύση.

Υπάρχουν διάφορες μορφές αισθητήρων, σχεδιασμένες να μετρούν διάφορες φυσικές παραμέτρους. Οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται είναι οι ακόλουθες:

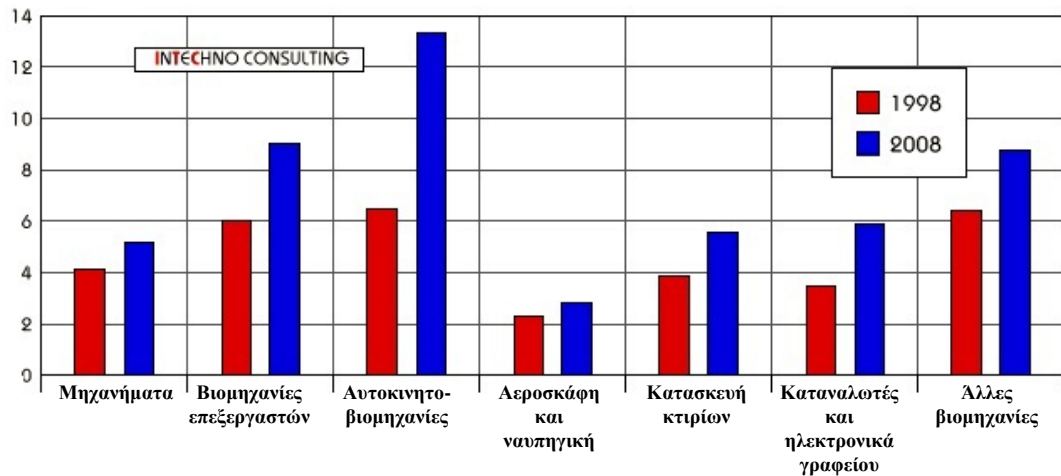
- Αισθητήρες γενικής εφαρμογής
- Εξειδικευμένοι αισθητήρες
- Αισθητήρες μέτρησης ποσότητας
- Αισθητήρες αναλυτικών μετρήσεων πάνω στη γραμμή παραγωγής
- Αισθητήρες αυτόματης διαλογής και αναγνώρισης προτύπων.

Ανάμεσα στις φυσικές ποσότητες που συναντώνται συχνά και απαιτούν μέτρηση είναι η θέση, η ταχύτητα, η επιτάχυνση, η ροή ρευστού, η στάθμη υγρού, η δύναμη, η πίεση, η προσέγγιση και η θερμοκρασία.

Σήμερα, με την τεχνολογική ανάπτυξη, έχει κατασκευαστεί πλήθος αισθητήρων, που είναι κατάλληλοι για την ανίχνευση πολλών φυσικών μεγεθών και καταστάσεων, όπως για παράδειγμα:

- Της θερμοκρασίας
- Της πίεσης
- Της δύναμης
- Της περιστροφής
- Της στάθμης
- Της ροής
- Της κίνησης
- Του ιξώδους
- Του βάρους
- Του όγκου
- Του pH

Στο σχήμα 1.2 καταγράφεται η ανάπτυξη στην παγκόσμια αγορά αισθητήρων, για τους κυριότερους τομείς εφαρμογών, η οποία αναμένεται το 2008 σε σχέση με το 1998 . Ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης της παγκόσμιας αγοράς αισθητήρων για το διάστημα 1998-2008 υπολογίζεται περίπου 4.5%.



Σχήμα 1.2: Τάση της παγκόσμιας αγοράς των αισθητήρων μέχρι το 2008

Σύμφωνα δε με πρόσφατες τεχνοοικονομικές μελέτες η αγορά μικροαισθητήρων αναμένεται με βάση τα σημερινά δεδομένα να διευρύνεται σταθερά με προβλεπόμενο ετήσιο ρυθμό της τάξης του 21,3%.

Στην παρούσα πτυχιακή θα γίνει αναφορά για τους αισθητήρες θερμοκρασίας, οι οποίοι είναι αισθητήρες γενικής εφαρμογής, για την αρχή λειτουργίας τους, τις διάφορες συνδεσμολογίες τους καθώς και για τις προσεγγίσεις που διέπουν την κάθε εφαρμογή του αισθητήρα.

Η χρήση των αισθητήρων στην αυτοματοποίηση διαφόρων συστημάτων, επέφερε πολλά θετικά συνεπακόλουθα.

Για παράδειγμα, στον παραγωγικό τομέα έχουμε:

- Χαμηλό κόστος παραγωγής,
- Αύξηση της παραγωγικότητας,
- Συνεχή λειτουργία χωρίς λάθη,
- Ασφάλεια στο προσωπικό και στο σύστημα κ.ά.

1.2.2 Στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Τα στατικά χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα καθορίζουν την απόδοσή του σε μια σταθερή κατάσταση και είναι τα ακόλουθα:

➤ Ακρίβεια

Η ακρίβεια είναι η ικανότητα ενός συστήματος να δίνει αποτελέσματα ταυτόσημα με την πραγματική τιμή της μετρήσιμης ποσότητας. Ως ανακρίβεια ορίζεται η απόκλιση της μέτρησης του αισθητήρα από την πραγματική τιμή του εξωτερικού ερεθίσματος. Είναι το αθροιστικό αποτέλεσμα άλλων χαρακτηριστικών όπως της υστέρησης και των σφαλμάτων βαθμονόμησης. Μπορεί να εκφρασθεί σαν απόλυτη τιμή του σφάλματος μέτρησης, ποσοστό της κλίμακας εισόδου ή ποσοστό της κλίμακας εξόδου.

➤ Διακριτική Ικανότητα

Ορίζεται ως η ελάχιστη μεταβολή της μετρήσιμης φυσικής ποσότητας που χρειάζεται για να παρατηρηθεί ανιχνεύσιμη μεταβολή στο σήμα εξόδου. Η ελάχιστη μεταβολή της μετρήσιμης ποσότητας από το μηδέν ορίζεται ως όριο της διακριτικής ικανότητας.

➤ Επαναληψιμότητα

Είναι η ικανότητα ενός μετρητικού συστήματος να δίνει το ίδιο αποτέλεσμα όταν μετρά την ίδια φυσική ποσότητα υπό τις ίδιες συνθήκες. Σχετίζεται με τη στατιστική διακύμανση των μετρήσεων.

➤ Ικανότητα αναπαραγωγής των αποτελεσμάτων

Είναι η πιστότητα των μετρήσεων σε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, ή σε διαφορετικά εργαστήρια, ή χρησιμοποιώντας διαφορετικό εξοπλισμό.

➤ **Ευαισθησία**

Η ευαισθησία ενός αισθητήρα είναι η παράγωγος της συνάρτησης μεταφοράς ως προς τη μετρήσιμη φυσική ποσότητα για μια ορισμένη τιμή της ποσότητας αυτής. Για μια γραμμική συνάρτηση μεταφοράς, η ευαισθησία του αισθητήρα είναι σταθερή. Ένας αισθητήρας με ιδανικά χαρακτηριστικά έχει μεγάλη και σταθερή ευαισθησία.

➤ **Μονοτονικότητα**

Η μονοτονικότητα της συνάρτησης μεταφοράς ενός αισθητήρα σημαίνει ότι η καμπύλη της συνάρτησης μεταφοράς είναι πάντα αύξουσα ή πάντα φθίνουσα ως προς την αύξηση της μετρήσιμης ποσότητας.

➤ **Πλήρης κλίμακα εισόδου**

Ορίζεται ως η μέγιστη μεταβολή της μετρήσιμης φυσικής ποσότητας την οποία μπορεί να μετρήσει ο αισθητήρας με σχετική ακρίβεια.

➤ **Πλήρης κλίμακα εξόδου**

Ορίζεται ως η αλγεβρική διαφορά μεταξύ των τιμών εξόδου ενός αισθητήρα που αντιστοιχούν στην μέγιστη και την ελάχιστη ανιχνεύσιμη τιμή της μετρήσιμης φυσικής ποσότητας.

➤ **Υστέρηση**

Είναι η απόκλιση μεταξύ των μετρήσεων του αισθητήρα, όταν η μετρήσιμη φυσική ποσότητα προσεγγίζεται από αντίθετες κατευθύνσεις.

➤ **Σφάλμα μη γραμμικότητας**

Ορίζεται μόνο για αισθητήρες με γραμμική συνάρτηση μεταφοράς, η οποία στην πράξη δεν είναι τελείως γραμμική. Για να έχει νόημα το σφάλμα αυτό, πρέπει να ορίσουμε την ευθεία γραμμή σε σχέση με την οποία θα το μετρήσουμε. Μια συνήθης επιλογή είναι η ευθεία που προκύπτει την ανάλυση των τιμών των μετρήσεων με τη

μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων. Το σφάλμα μη γραμμικότητας υπολογίζεται ως ποσοστό της μέγιστης τιμής εισόδου.

➤ *Σφάλματα βαθμονόμησης*

Τα σφάλματα βαθμονόμησης οφείλονται στην κακή βαθμονόμηση του αισθητήρα. Έτσι, αν η βαθμονόμηση δεν γίνει αναλυτικά (για κάθε σημείο της συνάρτησης μεταφοράς) αλλά για λίγα μόνο αντιπροσωπευτικά σημεία, προκύπτει ένα συστηματικό σφάλμα. Τα σφάλματα βαθμονόμησης μπορεί επίσης να σχετίζονται με την ανακρίβεια στη γνώση της μετρήσιμης φυσικής ποσότητας κατά τη βαθμονόμηση ή την λανθασμένη καταγραφή της απόκρισης του αισθητήρα στην αλλαγή αυτής της ποσότητας.

➤ *Συστηματικά σφάλματα*

Τα συστηματικά σφάλματα είναι αποτέλεσμα διάφορων παραγόντων όπως:

- Μεταβλητές που επηρεάζουν τη λειτουργία του αισθητήρα (π.χ. θερμοκρασία)
- Αλλαγές στη χημική σύνθεση ή μηχανική τάση εξαρτημάτων του αισθητήρα
- Επίδραση της μετρητικής διαδικασίας στη μετρήσιμη φυσική ποσότητα
- Φαινόμενα εξασθένησης του σήματος

Τα συστηματικά σφάλματα μπορούν να διορθωθούν με τεχνικές αντιστάθμισης όπως η ανάδραση και το φιλτράρισμα.

➤ *Τυχαία σφάλματα*

Τα τυχαία σφάλματα, γνωστά και ως "θόρυβος" είναι σήματα που δε μεταφέρουν δεδομένα. Πραγματικά τυχαία σφάλματα όπως ο "λευκός θόρυβος" περιγράφονται από μια κατανομή Gauss. Μπορεί να οφείλονται σε περιβαλλοντικούς παράγοντες ή να σχετίζονται με τη μετρητική διαδικασία και τη μετάδοση του σήματος. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις τους, θα πρέπει ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο να είναι πολύ μεγαλύτερος της μονάδας.

1.2.3 Πλεονεκτήματα Αισθητήρων

Βελτίωση των τρεχόντων αισθητήρων αναμένεται να οδηγήσει σε καλύτερη απόδοση, μεγαλύτερη αξιοπιστία και μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών. Επίσης, αναμένεται βελτίωση της ακρίβειας και της ανθεκτικότητάς τους λόγω της ανάπτυξης και χρήσης νέων υλικών. Τέλος, νέοι σχεδιασμοί συνδυασμένοι με την υπάρχουσα τεχνολογία (όπως lab-on-a-chip ή συστοιχίες αισθητήρων), θα προκαλέσουν την αύξηση του ενδιαφέροντος και τη διεύρυνση της αγοράς των αισθητήρων.

Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν συνοπτικά είναι:

- Μικρότερο μέγεθος, χαρακτηριστικό κρίσιμο σε αρκετές εφαρμογές (εμφυτεύματα).
- Μειωμένο κόστος κατασκευής (εξαρτώμενο από τον όγκο της παραγωγής).
- Ελαττωμένη κατανάλωση ενέργειας, χαρακτηριστικό κρίσιμης σημασίας για εφαρμογές όπου η διάρκεια λειτουργίας περιορίζεται από τη διάρκεια ζωής της πηγής ενέργειας.
- Μικρότερες ποσότητες ακριβών χημικών αντιδραστηρίων όπως σε περιπτώσεις στις οποίες το δείγμα δεν είναι διαθέσιμο σε αρκετά μεγάλες ποσότητες.
- Βελτιωμένη απόδοση.
- Μεγαλύτερη παραγωγή λόγω παράλληλων και ταχύτερων διαδικασιών.
- Ολοκλήρωση και πολυλειτουργικότητα.
- Αυτοματοποιημένη προετοιμασία δείγματος, σύνθεση σε ψηφίδα.
- Ένας μεγάλος αριθμός παραμέτρων θα μπορεί να ελέγχεται από συστήματα παρακολούθησης.
- Νέες λειτουργίες εξαιτίας νέων φαινομένων που προκύπτουν από τον παράγοντα σμίκρυνσης.
- Αυξημένη ασφάλεια.

1.2.4 Αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας

Η μέτρηση της θερμοκρασίας είναι σημαντική καθώς σε διαφορετικές θερμοκρασίες οι φυσικές ιδιότητες των ουσιών είναι διαφορετικές και έτσι εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά. Σαν παράδειγμα, η θερμοκρασία μιας ουσίας μπορεί να επηρεάζει τις ηλεκτρικές της ιδιότητες, ανάλογα εάν αυτή είναι στερεή, υγρή ή αέρια μορφή.

Οι συσκευές που μετρούν τη θερμοκρασία ονομάζονται θερμόμετρα ενώ κάποιες φορές ονομάζονται και πυρόμετρα, εάν μετρούν θερμοκρασίες από μακριά.

Τα σύγχρονα θερμόμετρα είναι ηλεκτρονικά και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα θερμόμετρα επαφής και στα θερμόμετρα εξ αποστάσεως. Τα θερμόμετρα επαφής ερχόμενα σε επαφή με το σύστημα του οποίου ζητείται η θερμοκρασία, δηλαδή μετρούν ουσιαστικά την ίδια τους την θερμοκρασία. Άρα, η ακρίβεια της μέτρησης εξαρτάται μεταξύ άλλων από το κατά πόσο έχει επέλθει θερμική ισορροπία μεταξύ θερμομέτρου και συστήματος. Τα θερμόμετρα εξ αποστάσεως μετρούν την θερμική ακτινοβολία του συστήματος και υπολογίζουν εμμέσως την θερμοκρασία. Ως εκ τούτου δεν απαιτείται η φυσική επαφή μεταξύ θερμομέτρου και συστήματος. Το είδος του αισθητήρα που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το εύρος διακύμανσης της προς μέτρηση θερμοκρασίας, την απαιτούμενη ακρίβεια, το περιβάλλον το οποίο θα τοποθετηθεί ο αισθητήρας, αν δηλαδή θα υποστεί μηχανικές ή άλλες καταπονήσεις κ.λπ.

Η ευκολία ή η δυσκολία της μέτρησης εξαρτάται από την τιμή της θερμοκρασίας, το μέσο του οποίου θέλουμε να προσδιορίζουμε την θερμοκρασία, καθώς και από τις απαιτήσεις για ακρίβεια και πιστότητα.

Ο πίνακας 1.2.1 συνοψίζει τη δυσκολία μέτρησης για διάφορες περιπτώσεις.

Απαίτηση σε ακρίβεια

Θερμοκρασία	$\pm 5^{\circ}C$	$\pm 1^{\circ}C$	$\pm 0.5^{\circ}C$	$\pm 0.1^{\circ}C$
-200 °C	Απαιτείται προσοχή	Δύσκολα	Δύσκολα	Πολύ Δύσκολα
-0 °C -50 °C	Εύκολα	Απαιτείται προσοχή	Δύσκολα	Πολύ Δύσκολα
1000 °C	Απαιτείται προσοχή	Πολύ Δύσκολα	Εξαιρετικά Δύσκολα	Σχεδόν Αδύνατον
2000 °C	Πολύ Δύσκολα	Εξαιρετικά Δύσκολα	Σχεδόν Αδύνατον	Αποκλείεται

Πίνακας 1.2.1

Αισθητήρες θερμοκρασίας τύπου επαφής είναι εποπτικά οι εξής:

- * Θερμοζεύγη (thermocouples),
- * Θερμόμετρα με υγρό ή αέριο (filled system thermometers),
- * Διμεταλλικά θερμόμετρα,
- * Ηλεκτρονικά θερμόμετρα,
- * Θερμίστορ (thermistors).

1.2.5 Εφαρμογές μέτρησης θερμοκρασίας

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας έχουν τόσο σημαντικό ρόλο στην καθημερινή μας ζωή, ώστε να μπορούν να χαρακτηριστούν απαραίτητοι για την καθημερινότητά μας.

1.2.5.1 Τομείς Εφαρμογών

Σήμερα, οι ερευνητές εξερευνούν ενεργά και πειραματίζονται με καινοτόμες εφαρμογές σε διάφορες περιοχές:

- Τεχνικές κατασκευές,
- Περιβαλλοντικός έλεγχος,
- Γεωργία – Γεωπονία,
- Ναυτιλία,
- Τρόφιμα,
- Ιατρική,
- Δημόσια ασφάλεια ,
- Εθνική ασφάλεια.

Αναλυτικότερα:

1.2.5.1.1 Τεχνικές κατασκευές

Καταγράφεται οποιαδήποτε ανωμαλία που μπορεί να σημαίνει πρόβλημα στην ακεραιότητα της κατασκευής, λόγω υπερβολικής αύξησης της θερμοκρασίας που μπορεί να σημαίνει πιθανή εκδήλωση πυρκαγιάς ή καταστροφή κάποιου κινητήρα.

1.2.5.1.2 Περιβαλλοντικός έλεγχος

Καταγραφή των θερμοκρασιών του περιβάλλοντος για μελέτες και παρατηρήσεις των κλιματικών αλλαγών.

1.2.5.1.3 Γεωργία - Γεωπονία

Στον τομέα της γεωργίας χρησιμοποιούνται κατανεμημένα όργανα ελέγχου με ενσωματωμένους αισθητήρες θερμοκρασίας σε αμπελώνες και θερμοκήπια.

Κάθε κόμβος παίρνει τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας ανά λεπτό και αποθηκεύει τα αποτελέσματα.

Αξιολογώντας τις μετρήσεις, λαμβάνονται ανάλογες αποφάσεις για τον τρόπο καλλιέργειας.

1.2.5.1.4 Ναυτιλία

Στη ναυτιλία διάφορες εφαρμογές αυτοματισμού χρειάζονται μέτρηση της θερμοκρασίας με ακρίβεια για προστασία εναντίον επικίνδυνων συνθηκών και εξασφάλιση ασφάλειας. Επομένως χρειάζονται συστήματα επιτήρησης θερμοκρασίας τα οποία θα παρέχουν αξιόπιστες μετρήσεις για εφαρμογές ελέγχου.

1.2.5.1.5 Τρόφιμα

Η υγιεινή στους χώρους επεξεργασίας και αποθήκευσης τροφίμων και η σωστή παρακολούθηση των συνθηκών σε όλα τα στάδια της επεξεργασίας και της συσκευασίας είναι πολύ σημαντικές για την ασφάλεια των τροφίμων, τόσο για τον προμηθευτή όσο και για τον καταναλωτή, με τη θερμοκρασία να είναι από τους πιο καθοριστικές παραμέτρους.

1.2.5.1.6 Ιατρική

Στον τομέα της ιατρικής οι χρήση των αισθητήρων θερμοκρασίας ποικίλει. Ας αναφέρουμε την απλή μέτρηση της θερμοκρασίας ενός ανθρώπου για να δούμε αν έχει πυρετό ή υποθερμία, ακόμη την μέτρηση της θερμοκρασίας ενός εμβρύου ή ακόμη την παρατήρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό μιας γυναίκας για να ξέρει πότε έχει ωορρηξία καθώς και πολλά άλλα.

1.2.5.1.7 Δημόσια ασφάλεια

Όσο αφορά την δημόσια ασφάλεια μπορούμε να αναφέρουμε πολλές περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούμε τους αισθητήρες θερμοκρασίας για το καλό του γενικού συνόλου.

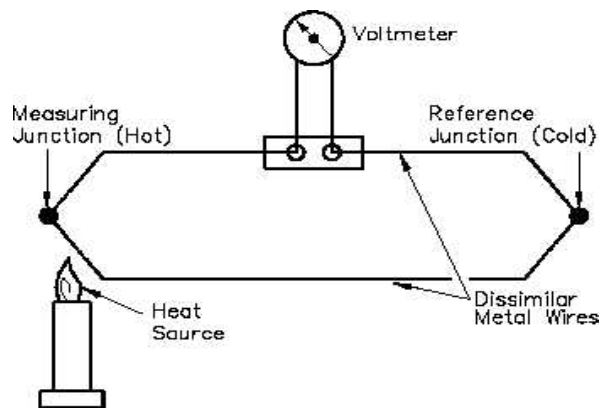
Σαν πρώτο και πιο πρόσφατο παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε τους αισθητήρες θερμοκρασίας οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί σε αεροδρόμια και άλλους μεγάλους χώρους συγκέντρωσης ανθρώπων για να μετρούν την θερμοκρασία του κάθε επισκέπτη. Σε περίπτωση που είχε αυξημένη θερμοκρασία, έπρεπε να παρθούν τα ανάλογα μέτρα από τους υπεύθυνους (πρόληψη από τον ιό H1N1).

Ακόμη ένα τρανταχτό παράδειγμα είναι τα μετεωρολογικά θερμόμετρα, που συμβουλευεται ο κάθε άνθρωπος πριν βγει από το σπίτι του, τους καλοκαιρινούς μήνες και κυρίως σε περιόδους καύσωνα.

2. Κλασικοί αισθητήρες θερμοκρασίας (τύπου επαφής)

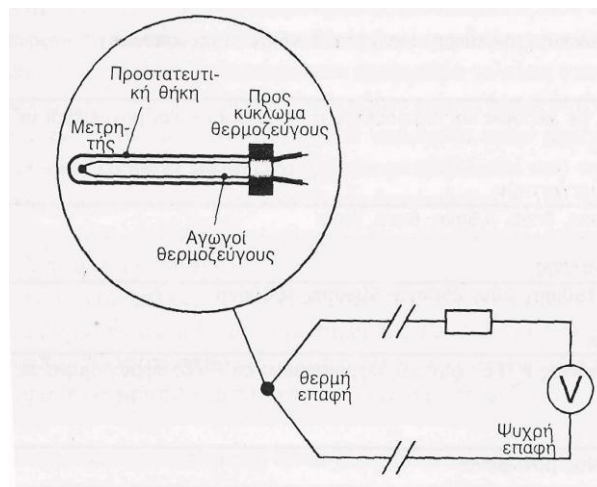
2.1. Θερμοζεύγη

Το θερμοζεύγος είναι ένα όργανο μέτρησης της θερμοκρασίας το οποίο αποτελείται από δυο ανόμοιους μεταλλικούς αγωγούς που είναι συνδεδεμένοι (συντηγμένοι) στο ένα άκρο.



Σχήμα 2.1: Δημιουργία θερμοκρασίας αναφοράς θερμοστοιχείου

Όταν θερμάνουμε αυτό το κοινό άκρο όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1, τότε εμφανίζεται **διαφορά δυναμικού** ανάμεσα στους δύο μεταλλικούς αγωγούς (όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί) που εξαρτάται από τη **διαφορά θερμοκρασίας**.



Σχήμα 2.2: Τυπική μορφή θερμοζεύγους

Τα **θερμοζεύγη** (thermocouples) είναι κατάλληλα για μέτρηση θερμοκρασιών πάνω στη γραμμική παραγωγή ή επεξεργασίας γιατί είναι:

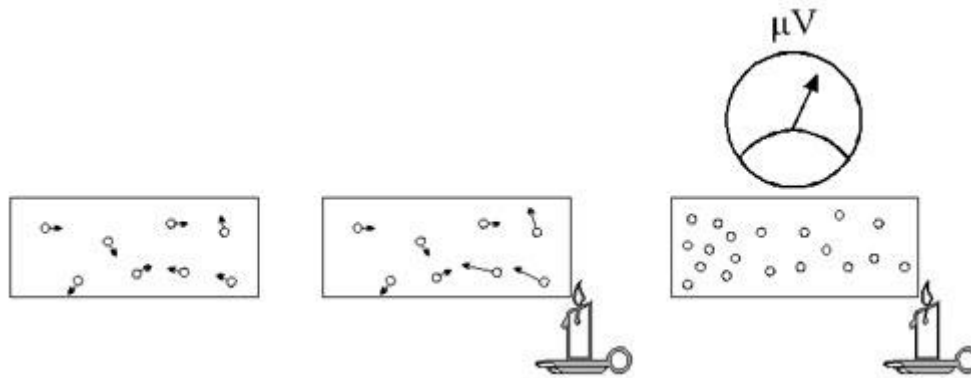
- μικρά (εύχρηστα),
- οικονομικά,
- ακριβή και
- αξιόπιστα.

Η μικρή απόκλιση από τη **γραμμικότητα** που παρουσιάζουν, μπορεί σήμερα να διορθωθεί με ηλεκτρονικά εξαρτήματα χαμηλού κόστους.

2.1.1 Διαφορά δυναμικού στα θερμοζεύγη

Γνωρίζουμε ότι τα μέταλλα, ως καλοί αγωγοί της θερμοκρασίας και του ηλεκτρισμού, έχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια. Για κάθε θερμοκρασία μεγαλύτερη του απολύτου μηδενός, η κινητική ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερη του μηδενός, δηλαδή, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται διαρκώς στη μάζα του μετάλλου. Όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία του μετάλλου, τόσο πιο μεγάλη είναι η κινητική ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων. Η κίνηση αυτή των ηλεκτρονίων είναι τυχαία, δηλαδή προς όλες δηλαδή τις διευθύνσεις.

Τώρα, ας υποθέσουμε ότι θερμαίνουμε μόνο το ένα άκρο του μετάλλου. Εφόσον η θερμοκρασία στο άκρο αυτό είναι υψηλότερη, τα ηλεκτρόνια έχουν μεγαλύτερη κινητική ενέργεια, δηλαδή μεγαλύτερη ταχύτητα. Έτσι, τα ηλεκτρόνια από το θερμό άκρο θα κινούνται πιο γρήγορα από τη θερμή περιοχή προς την ψυχρότερη, απ' ότι τα ηλεκτρόνια της ψυχρής περιοχής προς τη θερμή. Αποτέλεσμα θα είναι να παραμένουν στην θερμή περιοχή λιγότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια, απ' ότι στην ψυχρή περιοχή. Δηλαδή με άλλα λόγια, θα έχουμε συσσώρευση ελευθέρων ηλεκτρονίων στο ψυχρότερο άκρο. Η συσσώρευση ηλεκτρονίων στην ψυχρότερη περιοχή δημιουργεί ένα ηλεκτροστατικό πεδίο μέσα στο μέταλλο, με το πεδίο αυτό να αποτρέπει, όπως αναπτύσσεται, την περαιτέρω συσσώρευση ηλεκτρονίων.



Σχήμα 2.3: Αναπαράσταση φαινομένου Seebeck

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **θερμοηλεκτρικό φαινόμενο** ή φαινόμενο Seebeck. Είναι λοιπόν φανερό ότι το ηλεκτροστατικό πεδίο που αναπτύσσεται θα εξαρτάται από τη διαφορά στην κινητική ενέργεια που έχουν τα ηλεκτρόνια του θερμού άκρου από εκείνα του ψυχρού άκρου. Όμως, η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων όπως είδαμε εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Έτσι, η ΗΕΔ (E) που αναπτύσσεται στα άκρα του μετάλλου όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας στα άκρα του είναι:

$$E = S * (T_{\theta\epsilon\rho\mu} - T_{\psi\upsilon\chi\rho}) = S * \Delta T \quad (5)$$

όπου $T_{\theta\epsilon\rho\mu}$ και $T_{\psi\upsilon\chi\rho}$ είναι η θερμοκρασία τού θερμού και του ψυχρού άκρου αντίστοιχα σε βαθμούς K ή C. Ο συντελεστής αναλογίας S ονομάζεται συντελεστής Seebeck, η τιμή του είναι διαφορετική για κάθε υλικό και έχει μονάδες V/K. Από την τελευταία σχέση μπορούμε, μετρώντας την ΗΕΔ να υπολογίσουμε τη **διαφορά** θερμοκρασίας θερμού-ψυχρού άκρου.

2.1.2 Αργή λειτουργίας του θερμοζεύγους

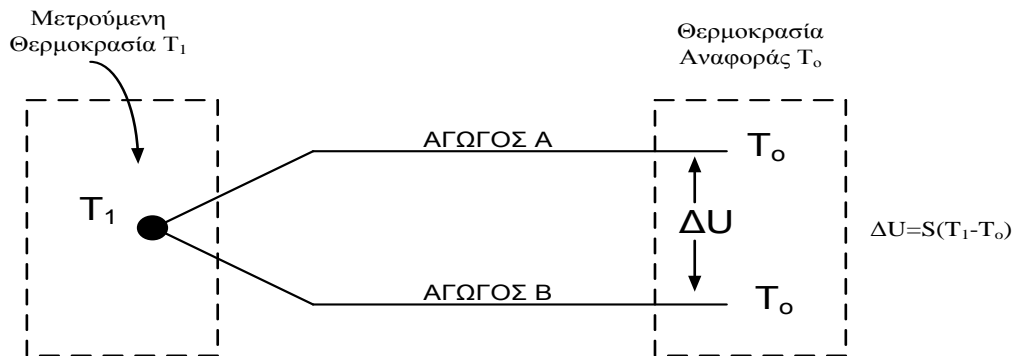
Αν θεωρηθούν δυο διαφορετικά μέταλλα (A και B) τα οποία έχουν διαφορετικό συντελεστή Seebeck S_A και S_B αντίστοιχα και τα συνδέσουμε στο ένα τους άκρο, τότε από την τελευταία σχέση θα έχουμε:

$$E = E_B - E_A = (S_B - S_A) * \Delta T = S_{BA} * \Delta T \quad (6)$$

δηλαδή, ανάμεσα στα δυο ελεύθερα άκρα θα εμφανίζεται ΗΕΔ η οποία θα εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) και θα είναι ανάλογη του συντελεστή S_{BA} . Το σύστημα των δυο μεταλλικών αγωγών που είναι ενωμένοι στο ένα τους άκρο ονομάζεται **θερμοηλεκτρικό ζεύγος** ή απλά **θερμοζεύγος**. Ο συντελεστής S_{BA} ονομάζεται συντελεστής Seebeck του θερμοζεύγους. Στην πράξη έχουμε πολλά είδη θερμοζευγών, ανάλογα με τα μέταλλα από τα οποία αποτελούνται. Χρησιμοποιούνται πάντοτε για τη μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ θερμού άκρου και άκρου αναφοράς όπως προκύπτει από την τελευταία σχέση. Μέταλλα που συνηθέστερα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή θερμοζευγών είναι ο σίδηρος, ο χαλκός, ο λευκόχρυσος (πλατίνα), και διάφορα κράματα: χρώμελ, άλουμελ, κονσταντάν και πλατίνα ρόδιο. Για παράδειγμα, το θερμοζεύγος τύπου T αποτελείται από έναν αγωγό χαλκού και από κράμα χαλκού-νικελίου (constantan), με την αντιστοιχία της διαφοράς δυναμικού που αναπτύσσεται και της διαφοράς θερμοκρασίας να φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Παρότι τα υλικά αυτά συνδυάζονται ανά ζεύγη ούτως ώστε να αναπτύσσεται αξιόλογη θερμοηλεκτρική τάση, η ευαισθησία του αισθητήρα παραμένει μικρή, της τάξης των $7-50 \mu V/^{\circ}C$. Άρα απαιτείται η χρήση οργάνων υψηλής ευαισθησίας, π.χ. ποτενσιόμετρο ή μικροβολτόμετρο, ενώ λόγω της μικρής στάθμης του αρχικού σήματος η ακρίβεια των μετρήσεων συχνά χωλαίνει, λόγω π.χ. ενδεχόμενων έντονων επιδράσεων εξωτερικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, της υγρασίας, των κραδασμών, τις κάμψεις των καλωδίων κ.ά..

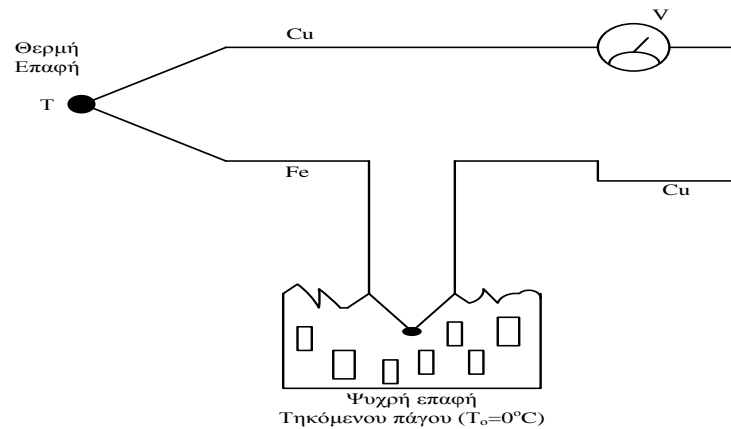
Επειδή τα μέταλλα έχουν γενικά πολύ υψηλό σημείο τήξης, τα θερμοζεύγη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση υψηλών θερμοκρασιών, και αυτό είναι το βασικό τους πλεονέκτημα.

Για την εύρεση της πραγματικής μετρούμενης θερμοκρασίας T στην άκρη του θερμοζεύγους, που αποκαλείται **θερμή επαφή** (hot junction), απαιτείται επίσης η γνώση της απόλυτης τιμής της θερμοκρασίας αναφοράς T_0 στους ακροδέκτες σύνδεσης του θερμοζεύγους, που αποκαλείται **ψυχρή επαφή** (cold junction).



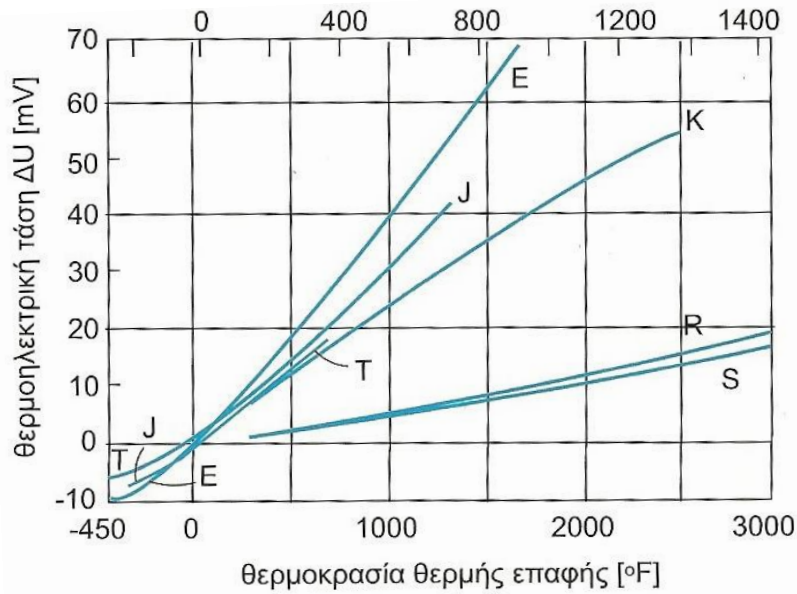
Σχήμα 2.4: Αρχή λειτουργίας του θερμοζεύγους σε ανοιχτό κύκλωμα

Ιστορικά χρησιμοποιήθηκαν διάφορα θερμοστατικά δοχεία γνωστής θερμοκρασίας ως αναφορά της ψυχρής επαφής, όπως π.χ. συνδυασμός πάγου-νερού που τήκεται στους 0°C σε συνδυασμό με ένα βολτόμετρο.



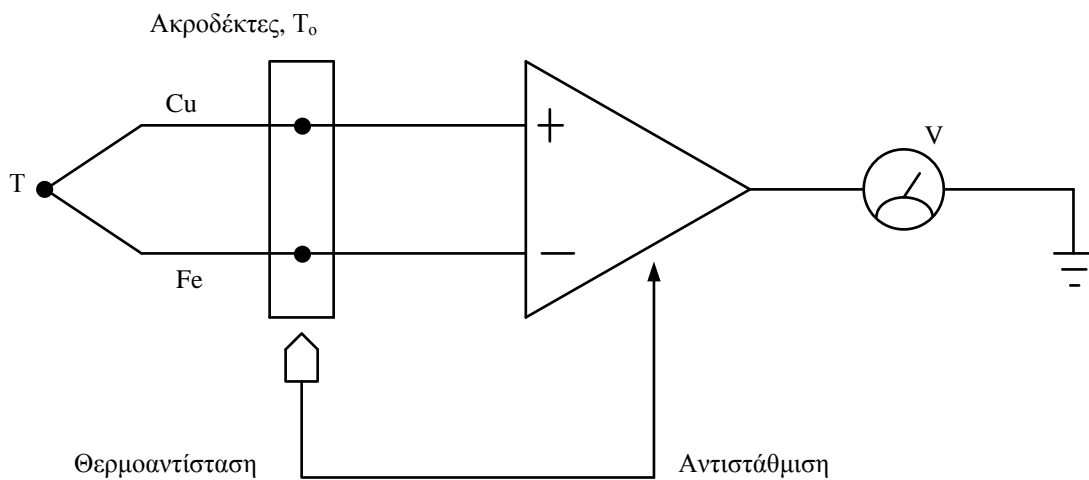
Σχήμα 2.5 : Δημιουργία θερμοκρασίας αναφοράς θερμοζεύγους με χρήση θερμοστατικού δοχείου τηκόμενου πάγου

Συνεπώς η μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μετατρέπεται εύκολα στη ζητούμενη θερμοκρασία T , με βάση την εξίσωση 6 ή ακριβέστερα με τη χρήση μιας καμπύλης βαθμονόμησης, όπως αυτές στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Καμπύλες βαθμονόμησης θερμοζευγών διαφόρων τύπων

Σε σύγχρονους αισθητήρες, η θερμοκρασία ψυχρής επαφής, που συμπίπτει πρακτικά με τη θερμοκρασία του χώρου που περιβάλλει το όργανο, υπολογίζεται με χρήση θερμοαντίστασης στο εσωτερικό του οργάνου.



Σχήμα 2.7: Δημιουργία θερμοκρασίας αναφοράς θερμοζεύγους με μέτρηση της θερμοκρασίας των ακροδεκτών π.χ. με εσωτερική θερμοαντίσταση.

Ακολουθως, η θερμοκρασία περιβάλλοντος μετατρέπεται σε διαφορά δυναμικού και προστίθεται στην εμφανιζόμενη θερμοηλεκτρική τάση του θερμοζεύγους, με αποτέλεσμα η αντισταθμισμένη τελική έξοδος του οργάνου να αντιστοιχεί στην υπό μέτρηση θερμοκρασία T . Το παραπάνω ισχύει με την προϋπόθεση ότι η θερμοκρασία στο εσωτερικό του οργάνου είναι ίδια με εκείνη στους πόλους σύνδεσης του θερμοζεύγους T_0 , δηλαδή στους ακροδέκτες του οργάνου. Αυτό κατά κανόνα πράγματι συμβαίνει, εκτός από ιδιάζουσες περιπτώσεις όπου οι ακροδέκτες του οργάνου αποκτούν, μόνιμα ή στιγμιαία μία θερμοκρασία αρκετά διαφορετική από το εσωτερικό του οργάνου.

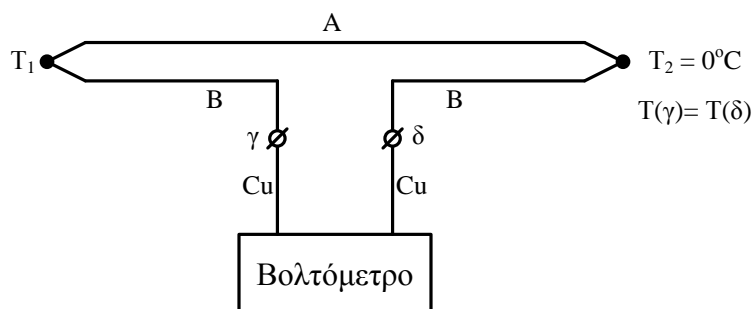
2.1.3 Τρόπος Σύνδεσης Θερμοζευγών

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται πάντοτε δύο λεπτές μεταλλικές ράβδοι ή σωστότερα σύρματα, με διαφορετική τιμή των συντελεστών S_a και S_b , ενωμένες μεταξύ τους.

Με το θερμοζεύγους μετράται η διαφορά των θερμοκρασιών, δηλαδή πόσο η επαφή είναι θερμότερη από τα ψυχρά άκρα. Συνεπώς για να μετρηθεί η θερμοκρασία της επαφής σωστά θα πρέπει να ελέγχεται η θερμοκρασία των ψυχρών άκρων. Το γεγονός αυτό κάνει τη μέτρηση κάπως περίπλοκη, όμως υπάρχουν σήμερα στο εμπόριο ειδικοί ενδείκτες που δίνουν απ' ευθείας το αποτέλεσμα. Η παράκαμψη της δυσκολίας αυτής γίνεται με δύο τρόπους.

2.1.3.1 Η μέθοδος των δύο Θερμοζευγών

Στη μέθοδο αυτή, τα δύο σύρματα, A και B, δημιουργούν δύο θερμοζεύγη. Η μία επαφή βρίσκεται σε θερμική διαφορά με το αντικείμενο, ενώ η δεύτερη, η οποία ονομάζεται επαφή αναφοράς, εμβαπτίζεται σε ένα δοχείο που περιέχει νερό και πάγο έτσι ώστε η θερμοκρασία αυτή να διατηρείται μόνιμα στους $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το σύρμα B κόβεται και τα άκρα που δημιουργούνται συνδέονται με ένα βολτόμετρο, συνήθως χρησιμοποιώντας χάλκινα σύρματα.



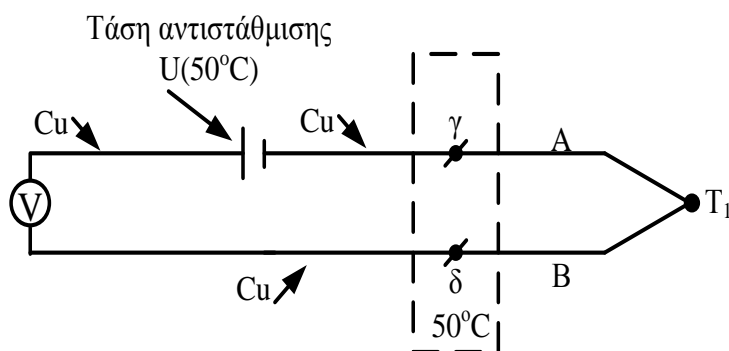
Σχήμα 2.8: Μέθοδος των δύο θερμοζευγών

Στην παραπάνω συνδεσμολογία οι θερμοηλεκτρικές τάσεις που δημιουργούνται στα δύο θερμοζεύγη αφαιρούνται. Συνεπώς η τάση που δημιουργείται στα σημεία γ και δ εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασιών $(T_1 - T_2) = (T_1 - 0) = T_1$, δηλαδή όπως βλέπουμε είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας T_1 . Οι ενδείξεις του μετρητή εξαρτώνται όμως και από τις τάσεις που δημιουργούνται στις επαφές γ και δ. Στην επιλεγείσα συνδεσμολογία και αυτές οι τάσεις αφαιρούνται. Το υπόλοιπο από την αφαίρεση μπορεί να εξαλειφτεί πλήρως αν οι θερμοκρασίες των επαφών γ και δ γίνουν ίσες. Η τιμή αυτής της κοινής θερμοκρασίας δεν είναι σημαντική, φτάνει αυτές να είναι ίδια στις δύο επαφές, κάτι που εύκολα επιτυγχάνεται στην πράξη.

2.1.3.2 Η μέθοδος του ενός Θερμοζεύγους

Η μέθοδος αυτή είναι πλέον διαδεδομένη. Στην πράξη αποφεύγεται η χρήση δύο θερμοζευγών κυρίως λόγω της ανάγκης χρήσης του δοχείου με το χιονόνερο, πράγμα που είναι καθόλου εύχρηστο. Έτσι προτιμάται η χρήση ενός θερμοζεύγους (Σχήμα 2.1). Το πρόβλημα εδώ εντοπίζεται στα ψυχρά σημεία του θερμοζεύγους, τα οποία κατά κανόνα, συνδέονται με τον μετρητή της τάσης με σύρματα από χαλκό. Στα σημεία σύνδεσης δημιουργούνται θερμοηλεκτρικές τάσεις οι οποίες αφαιρούνται μεν αλλά οι τιμές τους δυστυχώς δεν είναι ίδιες. Έτσι παραμένει κάποιο υπόλοιπο το οποίο εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, πράγμα που αποτελεί πρόβλημα. Το υπόλοιπο αυτό επηρεάζει την συνισταμένη τιμή της τάσης που παράγεται από το θερμοζεύγος και έτσι οι μετρήσεις επηρεάζονται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.

Στους μετρητές που χρησιμοποιούν ένα θερμοζεύγος, τα σημεία σύνδεσης θερμοστατούνται σε μία θερμοκρασία που είναι υψηλότερη από αυτήν του περιβάλλοντος, π.χ. στους 50°C. Το δε υπόλοιπο της τάσης που δημιουργείται στα σημεία σύνδεσης αφαιρείται μέσω της εφαρμογής μιας σταθερής τάσης αντιστάθμισης η οποία μπορεί να ρυθμίζεται.



Σχήμα 2.9: Μέθοδος του ενός θερμοζεύγους

Για την ρύθμιση της τάσης αυτής το θερμοζεύγος εμβαπτίζεται στο δοχείο που περιέχει πάγο και νερό και εν συνεχεία η τιμή της τάσης ρυθμίζεται έως ότου το βολτόμετρο να δείξει 0. Όμως επειδή η τάση αντιστάθμισης μεταβάλλεται με το χρόνο, ο έλεγχος και η ρύθμιση του μηδενός πρέπει να επαναλαμβάνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα.

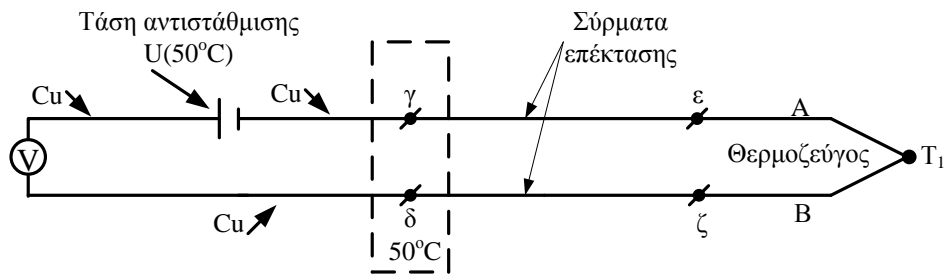
Τα σύγχρονα θερμοόμετρα τύπου θερμοζεύγους, κατά κανόνα είναι ψηφιακά όργανα που καλύπτουν περιοχή -200 °C έως 1000°C με διακριτική ικανότητα 0,1°C. Συνήθως ο θερμοστάτης βρίσκεται εντός του οργάνου, σε μία ειδική θέση που γίνεται η σύνδεση με το θερμοζεύγος. Σε όλα τα όργανα, η θερμοκρασία στον θερμοστάτη ελέγχεται ηλεκτρονικά και διατηρείται σταθερή με μεγάλη ακρίβεια.

Πολλές φορές το μήκος του θερμοζεύγους δεν επαρκεί για να καλύψει την απόσταση που χωρίζει τον μετρητή θερμοκρασίας από το αντικείμενο μελέτης. Στις περιπτώσεις αυτές η επιμήκυνση του θερμοζεύγους γίνεται με ειδικά ζεύγη συρμάτων επέκτασης.

- Κάθε είδος θερμοζεύγους έχει δικό του ζευγάρι επέκτασης.

Το σύρμα επέκτασης κατασκευάζεται από κράμα, το οποίο, στη θερμοκρασία δωματίου, έχει συντελεστή θερμοηλεκτρικής τάσης ίδιο με αυτόν που έχει το

αντίστοιχο σύρμα του θερμοζεύγους. Συνεπώς, η θερμοστάτηση των σημείων σύνδεσης του θερμοζεύγους με τα σύρματα επέκτασης (σημεία ε και ζ) δεν είναι απαραίτητη. (Βλ. σχ. 2.10)



Σχήμα 2.10: Απεικόνιση συρμάτων επέκτασης θερμοζεύγους

2.1.4 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα θερμοζευγών

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα θερμοζεύγη είναι κυρίως η ικανοποιητική ακρίβεια, η δυνατότητα χρήσης τους για μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, η εύκολη τοποθέτησή τους καθώς και το χαμηλό κόστος τους. Επίσης δεν απαιτούν τροφοδοσία και παράγουν απ' ευθείας τάση, ιδιότητα χρήσιμη σε πολλές εφαρμογές. Η χρονική σταθερά τους είναι μικρή, συνήθως 0.1-3 δευτερόλεπτα. Το κύριο μειονέκτημα των θερμοζευγών είναι η πολύ χαμηλή έξοδος, της τάξης των $40 \mu\text{V } ^\circ\text{C}^{-1}$ και η ανάγκη για βαθμονόμηση.

2.1.5 Είδη θερμοζευγών

Μερικά συνηθισμένα είδη θερμοζευγών είναι τα παρακάτω:

- **Θερμοζεύγος Τύπου T:** Χαλκός και constantan.



Σχήμα 2.11: Θερμοζεύγος τύπου T

Το θερμοζεύγος τύπου **T** είναι καλό για τη θερμοκρασία σε ένα εύρος από -200 έως 400°C. Θερμοζεύγος τύπου T είναι μια δημοφιλής επιλογή όταν υπάρχουν ισχυρά μαγνητικά πεδία και περιβάλλοντα υπό το μηδέν. Η ευαισθησία του είναι περίπου 43 V / °C. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο κενό, σε αδρανές περιβάλλον καθώς και σε οξειδωτικό περιβάλλον.

- **Θερμοζεύγος Τύπου J:** Σίδηρος και constantan.



Σχήμα 2.12: Θερμοζεύγος τύπου J

Είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο στον τομέα της βιομηχανίας. Έχει βέβαια περιορισμένο εύρος θερμοκρασιών (περίπου από -40 έως 750 °C) πράγμα που το καθιστά λιγότερο δημοφιλές από τον τύπο K. Η κύρια εφαρμογή είναι σε παλαιό εξοπλισμό που δεν μπορεί να αποδεχθεί τα σύγχρονα θερμοζεύγη. Οι μαγνητικές ιδιότητές του, αποτρέπουν τη χρήση του σε ορισμένες εφαρμογές. Το θερμοζεύγος Τύπου J έχει μία ευαισθησία περίπου 53μV / °C. Δεν συνιστάται για θερμοκρασία μεγαλύτερη των 480C, λόγω του υψηλότερου συντελεστή οξείδωσης του σιδήρου.

- **Θερμοζεύγος Τύπου E:** Νικέλιο και constantan.



Σχήμα 2.13: Θερμοζεύγος τύπου E

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κενό καθώς και σε ελαφρά οξειδωτικό περιβάλλον. Σε χαμηλές θερμοκρασίες δεν υφίσταται διάβρωση. Έχει υψηλή απόδοση, περίπου

68 μ V/°C, πράγμα το οποίο το καθιστά κατάλληλο για κρυογενική χρήση. Είναι μη μαγνητικό και συνιστάται για χρήση έως 870 °C.

- **Θερμοζεύγος Τύπου N:** Νικέλιο, χρώμιο και κράμα πυριτίου.



Σχήμα 2.14: Θερμοζεύγος τύπου N

Υψηλή σταθερότητα, αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και οξείδωση κάνει το θερμοζεύγος τύπου N αισθητήρα κατάλληλο και για μετρήσεις υψηλής θερμοκρασίας, χωρίς να έχει το κόστος της πλατίνας στους τύπους **B, R, S**. Μπορούν να αντέξουν θερμοκρασίες πάνω από ~ 1200 °C. Έχει ευαισθησία περίπου 38 μ V / °C στους 900 °C.

- **Θερμοζεύγος Τύπου B:** Λευκόχρυσος, Ρόδιο

Κατάλληλο για μετρήσεις υψηλής θερμοκρασίας έως περίπου 1800 °C. Ο συγκεκριμένος τύπος δίνει την ίδια απόδοση σε 0 °C και 42 °C πράγμα που τα καθιστά άχρηστα για μετρήσεις κάτω από 50 °C. Έχει ευαισθησία περίπου 10 μ V / °C στους 300 °C.



Σχήμα 2.15: Θερμοζεύγος Τύπου B

- **Θερμοζεύγος Τύπου C:** Βολφράμιο, Ρένειο

Ιδανικό για εύρος θερμοκρασιών από 0 έως 2316 ° C. Αυτό το θερμοστοιχείο είναι κατάλληλο για φούρνους σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 2.16: Θερμοζεύγος Τύπου C

- **Θερμοζεύγος Τύπου K:** Χρόμελ, Αλουμέλ

Είναι το πιο συνηθισμένο θερμοζεύγος. Μπορεί να χαρακτηριστεί σαν "γενικής χρήσης" αισθητήρας. Είναι διαθέσιμο σε ένα εύρος θερμοκρασιών από -200 °C έως 1200 °C. Η ευαισθησία είναι περίπου 41 V / °C. Τα θερμοζεύγη Τύπου K και N είναι τα πιο ανθεκτικά στην οξείδωση, σε σχέση με άλλα θερμοζεύγη που έχουν κοινά μέταλλα. Δεν συνιστούνται για θερμοκρασία μεγαλύτερη των 1200°C για μεγάλο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 2.18: Θερμοζεύγος τύπου K

- **Θερμοζεύγος τύπου R:** Λευκόχρυσος, ρόδιο

Καλό για υψηλές θερμοκρασίες έως $\sim 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Έχει χαμηλή ευαισθησία περίπου $10\text{ }\mu\text{V} / ^{\circ}\text{C}$ και υψηλό κόστος, πράγμα που το καθιστά ακατάλληλο για γενική χρήση.



Σχήμα 2.19: Θερμοζεύγος τύπου R

- **Θερμοζεύγος Τύπου S:** Λευκόχρυσος, Ρόδιο

Καλό για υψηλές θερμοκρασίες έως $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Έχει χαμηλή ευαισθησία περίπου $10\text{ }\mu\text{V} / ^{\circ}\text{C}$ και υψηλό κόστος, πράγμα που το καθιστά ακατάλληλο για γενική χρήση όπως και το παραπάνω θερμοζεύγος. Όμως λόγω της υψηλής σταθερότητας της, το θερμοζεύγος τύπου S χρησιμοποιείται ως πρότυπο αναφοράς για το σημείο τήξης του χρυσού ($1.064,43\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Σχήμα 2.20: Θερμοζεύγος τύπου S

- **Θερμοζεύγος Τύπου M:**

Τα θερμοστοιχεία τύπου M χρησιμοποιούν ένα κράμα νικελίου για κάθε σύρμα. Το πρώτο σύρμα περιέχει 18% μολυβδαίνιο, ενώ το άλλο περιέχει 0,8% κοβάλτιο. Αυτά τα θερμοστοιχεία χρησιμοποιούνται στους φούρνους κενού για τους ίδιους λόγους με τον τύπο C. Γενικότερα, σε σχέση με τους άλλους τύπους θερμοστοιχείων χρησιμοποιείται λιγότερο. Η υψηλότερη θερμοκρασία περιορίζεται στους 1400 °C.

- **Χρώμελ-χρυσός/σίδηρος**

Στα θερμοστοιχεία χρώμελ - χρυσού/σιδήρου, το ένα σύρμα είναι χρώμελ ενώ το άλλο είναι χρυσός με ένα μικρό κλάσμα (0,03-0,15 τοις εκατό) από σίδηρο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κρυογονικές εφαρμογές (1,2-300 K και ακόμα μέχρι 600 K). Τόσο η ευαισθησία όσο και το εύρος της θερμοκρασίας εξαρτώνται από τη συγκέντρωση του σιδήρου. Η ευαισθησία είναι συνήθως γύρω στα 15 $\mu\text{V/K}$ σε χαμηλές θερμοκρασίες και η χαμηλότερη μετρήσιμη θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 1,2 και 4,2 K.

Οι κυριότεροι τύποι θερμοζευγών φαίνονται στο πίνακα που ακολουθεί:

<i>Σύμβολο</i>	<i>Είδος</i>	<i>Περιοχή Λειτουργίας (°C)</i>	<i>Μέγιστη Επιτρεπτή Θερμοκρασία (°C)</i>	<i>Μέγιστο Σχετικό Σφάλμα (%)</i>
<i>T</i>	Χαλκός/costantan (99.9%Cu+45%Ni)	-250 έως 400	500	±0.4
<i>E</i>	Χρωμονικέλιο/ costantan (-90%Ni+10%Cr / 55%Cu+45%Ni)	-200 έως 850	870	±0.5
<i>J</i>	Σίδηρος/ costantan* (99,9%Fe/55%Cu +45%Ni)	-40 έως 750	760	±0.4
<i>K</i>	Χρώμελ /Αλούμελ** (90%Ni+10%Cr / 95%Ni +2%Al+2%Mn+1%Si)	-200 έως 1200	1200	±0.75
<i>R</i>	Λευκόχρυσος Λευκόχρυσος,Ρόδιο(13%) (100%Pt/87%Pt+13%Rh)	0 έως 1400	1650	±0.5
<i>S</i>	Λευκόχρυσος Λευκόχρυσος,Ρόδιο(10%) (100%Pt/90%Pt+10%Rh)	0 έως 1400	1650	±0.5
<i>B</i>	Λευκόχρυσος, ρόδιο / Λευκόχρυσος, ρόδιο (94%Pt+6%Rh/70%Pt+30%Rh)	0 έως 1500	1700	±0.5

Πίνακας: Σύσταση θετικού και αρνητικού αγωγού, συνιστώμενο εύρος μέτρησης διαφόρων τυποποιημένων εμπορικών θερμοζευγών

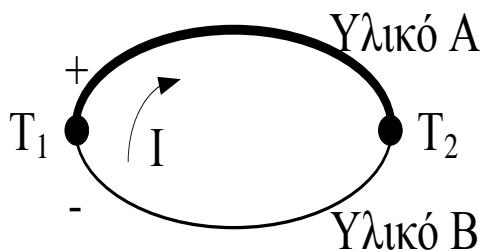
* costantan: κράμα νικελίου-χαλκού

** Χρώμελ: κράμα νικελίου-χρωμίου, Άλουμελ: κράμα νικελίου με αλουμίνιο, μαγγάνιο και πυρίτιο.

2.1.6 Ιδιότητες θερμοζευγών

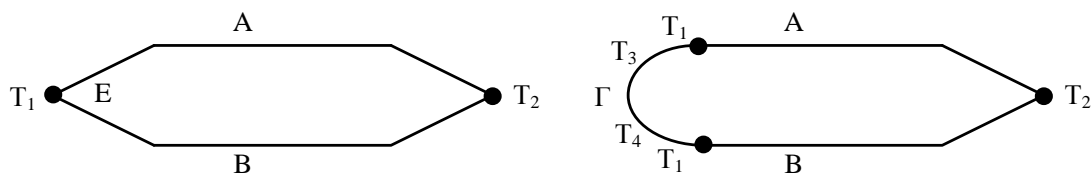
Για την χρήση ενός θερμοζεύγους, είναι άκρως χρήσιμες οι παρακάτω ιδιότητες:

- a) Αν τα δύο υλικά του θερμοζεύγους, είναι ομοιογενή η θερμοηλεκτρεγερτική του δύναμη δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία κανενός σημείου του κυκλώματος εκτός, από τις θερμοκρασίες των σημείων των ενώσεων 1 και 2.



Σχήμα 2.21:

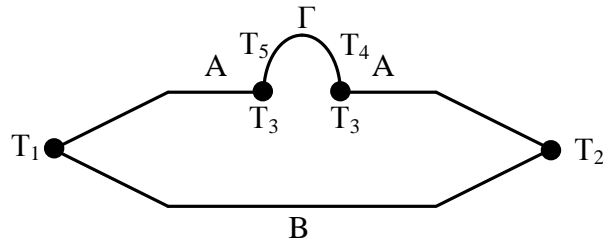
- b) Ας υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία της ένωσης 1 είναι T_1 και της ένωσης 2 είναι T_2 αντίστοιχα, και τέλος ότι E είναι η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη.



Σχήμα 2.22:

Έστω ότι καταστρέφεται η ένωση 1, και μεταξύ των υλικών A και B παρεμβάλλεται ένα άλλο υλικό Γ. Αν η θερμοκρασία των ενώσεων μεταξύ B/Γ και A/Γ είναι T_1 , τότε η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη θα είναι ίση με E ακόμη και στην περίπτωση που η θερμοκρασία τμημάτων του Γ έξω από τις ενώσεις A/Γ και B/Γ είναι διαφορετική της T_1 .

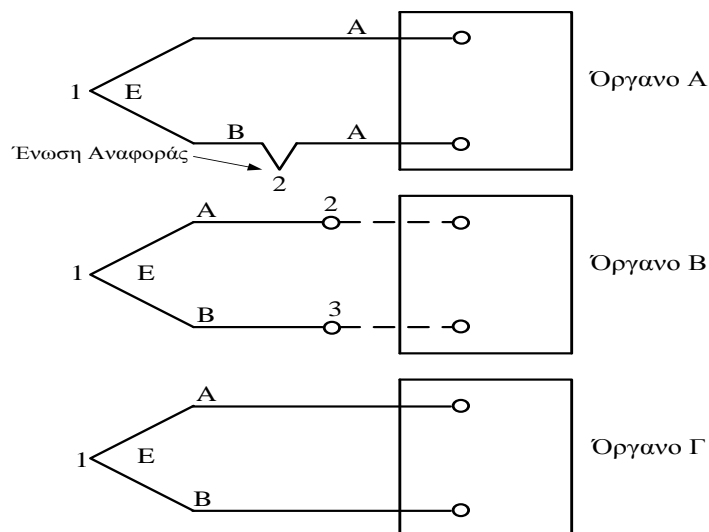
- c) Αν κοπεί ένα από τα υλικά A ή B και παρεμβληθεί ένα άλλο υλικό Γ, η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη δεν μεταβάλλεται με την προϋπόθεση ότι οι ενώσεις μεταξύ A/Γ και Γ/A (ή B/Γ και Γ/B) θα είναι στην ίδια θερμοκρασία T_3 ακόμη και αν η θερμοκρασία του Γ έξω από τις ενώσεις είναι διαφορετική από την T_3 .



Σχήμα 2.23:

- d) Έστω ότι ένα θερμοζεύγος παράγει μία θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη E_1 , όταν η θερμοκρασίες των ενώσεων 1 και 2 είναι T_1 και T_2 αντίστοιχα. Αντίστοιχα έστω ότι η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη είναι E_2 όταν οι θερμοκρασίες των ενώσεων 1 και 2, είναι T_2 και T_3 αντίστοιχα. Αν οι θερμοκρασίες των ενώσεων 1 και 2 γίνουν T_1 και T_3 , τότε η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη που θα παραχθεί θα είναι $(E_1 + E_2)$.
- e) Αν η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη μεταξύ των υλικών A και Γ είναι $E_{A\Gamma}$ και μεταξύ των υλικών Γ και B είναι $E_{\Gamma B}$ η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη των υλικών A και B θα είναι $(E_{A\Gamma} + E_{\Gamma B})$.

Για την μέτρηση της E και την αντιστοίχιση της σε κάποια θερμοκρασία χρησιμοποιούνται όργανα μέτρησης τάσης, τα οποία είναι σε κάποια απόσταση από την ένωση του θερμοζεύγους. Οι συνδέσεις μεταξύ οργάνου και θερμοστοιχείου φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 2.24:

Σύμφωνα με τις ιδιότητες a, b και c, η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη, E που αναπτύσσεται στα παραπάνω σχήματα, εξαρτάται από τις θερμοκρασίες στις ενώσεις 1, 2 και 3 καθώς και στους ακροδέκτες των οργάνων.

Η σύνδεση του πρώτου σχήματος αναφέρεται στην ιδιότητα c, η δε συνδέσεις του δεύτερου και του τρίτου σχήματος αναφέρονται στην ιδιότητα b. Έτσι για να μετρηθεί σωστά η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη E με τις συνδέσεις του πρώτου και τρίτου σχήματος πρέπει οι ακροδέκτες του οργάνου να βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία. Οι ενώσεις αυτές λέγονται ενώσεις αναφοράς και η θερμοκρασία τους θερμοκρασία αναφοράς.

Τα θερμοζεύγη ακριβείας ρυθμίζονται ξεχωριστά για να ληφθούν υπόψη διαφορές στην ποιότητα του σύρματος που εμφανίζονται κατά την παραγωγή.

Για να αποφευχθούν σφάλματα η θερμοκρασία αναφοράς πρέπει να ελέγχεται με μεγάλη ακρίβεια εκτός μόνο της περίπτωσης όπου δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια.

2.1.7 Εφαρμογές θερμοζευγών

Τα θερμοζεύγη λόγω των χαρακτηριστικών τους, είναι αισθητήρες που προτείνονται πολύ σε μία σειρά από εφαρμογές. Είναι ανθεκτικά, ανεπηρέαστα από κρούσεις και κραδασμούς. Απλά στην κατασκευή τους και δεν χρειάζονται κάποια εξωτερική διέγερση για να λειτουργήσουν. Τα θερμοζεύγη τέλος πρέπει να σημειωθεί πως δεν αυτοθερμαίνονται και πως μπορούν να κατασκευαστούν σε σχετικά πολύ μικρό μέγεθος. Κανένας άλλος αισθητήρας δεν παρουσιάζει τέτοιο εύρος πλεονεκτημάτων.

Παραδείγματα χρήσεις των θερμοζευγών μπορούν να αναφερθούν τα παρακάτω:

- Στις χημικές και πετροχημικές βιομηχανίες (δεν αυτοθερμαίνονται).
- Στην αυτοκινητοβιομηχανία (ανθεκτικά σε κρούσεις και κραδασμούς)
- Στις βιομηχανίες τροφίμων
- Οικιακές χρήσεις κ.λ.π

2.1.8 Παραδείγματα θερμοζευγών

Κάποια παραδείγματα θερμοζευγών τα οποία μπορούμε να συναντήσουμε στο εμπόριο είναι τα ακόλουθα:

Μοντέλο 905-T2: θερμόμετρο επιφάνειας



Τεχνικά χαρακτηριστικά:

Τύπος μπαταρίας: 3 μπαταρίες τύπου AAA

Διάρκεια ζωής: 1000h

Βάρος: 80g

Διαστάσεις: 230 x 37 x 36 cm

Τύπος αισθητήρα: θερμοζεύγος τύπου K

Κλίμακα μέτρησης: -50 έως +350°C

Ακρίβεια: ±1 °C

Ανάλυση: 0.1°C

Μοντέλο 926-1



Τεχνικά χαρακτηριστικά:

Τύπος μπαταρίας: 9V, 6F22

Βάρος: 171g

Διαστάσεις: 182 x 64 x 40 mm

Τύπος αισθητήρα: θερμοζεύγος τύπου T

Κλίμακα μέτρησης: -50 έως +400°C

Ακρίβεια: ± 3 °C

Ανάλυση: 0.1°C

MS7220 Όργανο βαθμονόμησης Θερμοζεύγους



Όργανο ακριβείας που χρησιμοποιείται ως όργανο μέτρησης ή ως πηγή για την βαθμονόμηση συσκευών Θερμοηλεκτρικής σύζευξης. Αναγραφόμενες μονάδες σε κλίμακες: °C, °F ή mV. Μέτρηση θερμοκρασίας από την έξοδο του θερμοζεύγους

Εξομοίωση εξόδου θερμοζεύγους. Συμβατό με 8 διαφορετικούς τύπους θερμοζευγών.

Βαθμονόμηση με πηγή mV.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά:

Εύρος: -200 °C - 1800 °C , 10 - 75mV

Ανάλυση: 0.1°C, 0.01mV

Ακρίβεια: +/- (0.3 °C +10μV +0.02%

2.2 Θερμόμετρα μεταβαλλόμενης ωμικής αντίστασης. Αισθητήρες RTD (*Resistance Temperature Detectors*)

2.2.1 Γενικά

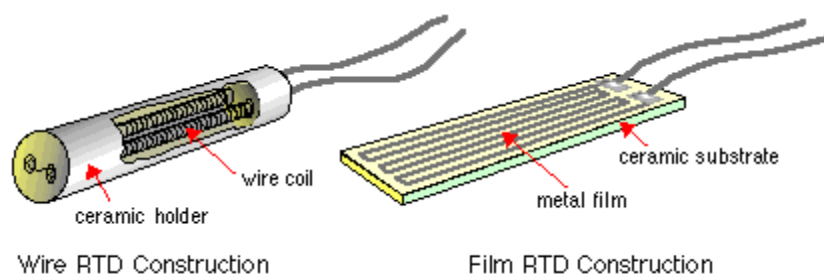
Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες, αποτελούνται από περιελισσόμενο σύρμα ή λεπτή μεταλλική επίστρωση (φιλμ) (Σχ. 2.20a) που μετρούν θερμοκρασία με βάση τη φυσική αρχή του θετικού συντελεστή μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης των μετάλλων με την θερμοκρασία.

➤ Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης.

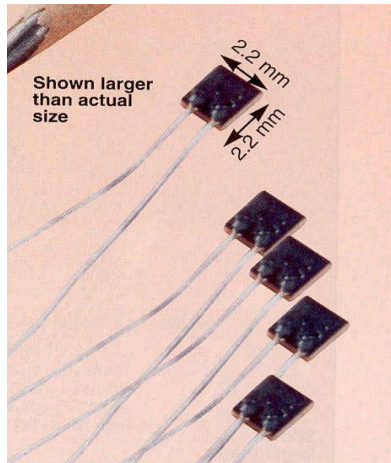
Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών των αισθητήρων κατασκευάζεται από πλατίνα (platinum) και για το λόγο αυτό πολλές φορές αποκαλούνται και αισθητήρες PRT (platinum resistance thermometers).

Τα θερμόμετρα αντίστασης κατασκευάζονται σε δύο κυρίως μορφές όπως προαναφέρθηκε:

- ❖ Ελικοειδούς σύρματος (αριστερή απεικόνιση), με διπλή περιέλιξη για να αποφεύγονται τα ηλεκτρομαγνητικά παράσιτα, προστατευμένο με κέλυφος κεραμικού υλικού παραπλήσιου συντελεστή διαστολής με το σύρμα (συχνά υπάρχει και εξωτερική μεταλλική θωράκιση).
- ❖ Λεπτής μεταλλικής επίστρωσης (φιλμ) πάνω σε κεραμικό υπόστρωμα (δεξιά απεικόνιση Σχ. 2.25a), θωρακισμένου με γυαλί ή πορσελάνη για λόγους προστασίας σε αντίξοα περιβάλλοντα.



Σχήμα 2.25a: Θερμόμετρα αντίστασης τύπου ελικοειδών σωματιδίων και λεπτού φιλμ με εγχάρακτους αγωγούς λευκόχρυσου.



Σχήμα 2.25b: Απεικόνιση λεπτού αισθητήρα τύπου RTD

Στα παραπάνω συστήματα, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των μετάλλων είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, άρα η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να οδηγήσει σε προσδιορισμό της θερμοκρασίας. Επειδή όμως η ηλεκτρική αντίσταση του RTD μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την θερμοκρασία, για να μετατραπεί αυτή η μεταβολή αντίστασης σε τάση, χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρικό κύκλωμα όμοιο με αυτό μιας γέφυρας Wheatstone. Αυτό εγκαθίσταται σε συστήματα ελέγχου, σχεδιασμένα για χρήση σε όργανα αντίστασης (RTD). Στη συνέχεια ένα συνεχές ρεύμα στην γέφυρα παράγει μία τάση εξόδου (V_{out}) η οποία μεταβάλλεται με την θερμοκρασία.

Θεωρητικά, αντιστάτες – θερμόμετρα μπορούν να κατασκευαστούν από πληθώρα μετάλλων. Καταλληλότερα μέταλλα θερμοαντίστασης, όλα ανθεκτικά στην οξείδωση είναι τα εξής: λευκόχρυσος (Pt), χρυσός (Au), άργυρος (Ag), νικέλιο (Ni), χαλκός (Cu) και για πολύ υψηλές θερμοκρασίες βολφράμιο (W). Για χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω από 50°C) χρησιμοποιούνται αντιστάσεις άνθρακα.

Επειδή όμως η συνάρτηση μεταξύ ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και θερμοκρασίας δεν είναι η ίδια για όλα τα υλικά, στη θερμομετρία χρησιμοποιούνται, κατά φθίνουσα σημασία, ο λευκόχρυσος, το νικέλιο και ο χαλκός.

Οι αντιστάτες λευκόχρυσου (Platinum Resistance Thermometers ή PRT's), είναι ίσως οι καλύτεροι αισθητήρες θερμοκρασίας τύπου αντίστασης. Σε διάφορες μορφές τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις θερμοκρασίας από -250°C έως 1200°C (με την περιοχή λειτουργίας να καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της), με υψηλή ακρίβεια.

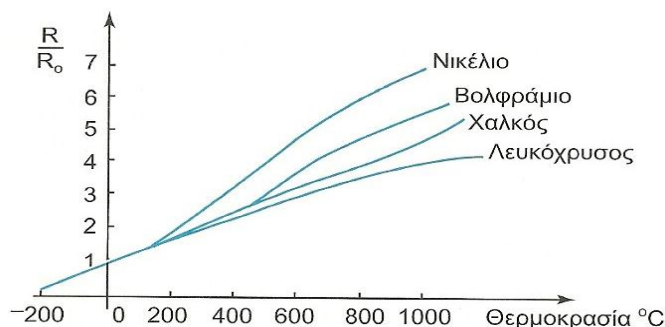
Ο ίδιος αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιείται σε διάφορες περιοχές θερμοκρασιών χωρίς να εμφανίζει φαινόμενα υστέρησης. Τα χαρακτηριστικά του παραμένουν ιδιαίτερα σταθερά, ακόμη και μετά από πολλούς κύκλους χρήσης. Υπάρχουν διάφορες μορφές PRT's, ξεκινώντας από τον πρότυπο αισθητήρα της Διεθνούς Θερμομετρικής Κλίμακας, μέχρι PRT's βιομηχανικών εφαρμογών, οι οποίοι είναι ιδιαίτερος ανθεκτικοί και με ακρίβεια της τάξης του δεκάτου του βαθμού. Το χαμηλό κόστος καθώς και η πολύ καλή ακρίβεια των PRT's τους έχει κάνει τους πιο διαδεδομένους αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας. Σε εφαρμογές δε υψηλών απαιτήσεων ακριβείας, χρησιμοποιούνται κατ' αποκλειστικότητα.

Οι αντιστάτες λευκόχρυσου, σε αντίθεση με τα θερμοζεύγη, για να λειτουργήσουν απαιτούν εξωτερική διέγερση. Η διέγερση αυτή μπορεί να είναι είτε ρεύμα είτε τάση, η μέτρηση των οποίων οδηγεί στον υπολογισμό της τιμής της ηλεκτρικής τους αντίστασης και, μέσω μιας διαδικασίας βαθμονόμησης, στη θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό πρέπει για τον υπολογισμό της ακρίβειας μιας μέτρησης θερμοκρασίας, να παίρνουμε υπόψη μας, εκτός από τις αβεβαιότητες του ίδιου του αισθητήρα και τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με τα όργανα μέτρησης της αντίστασης.

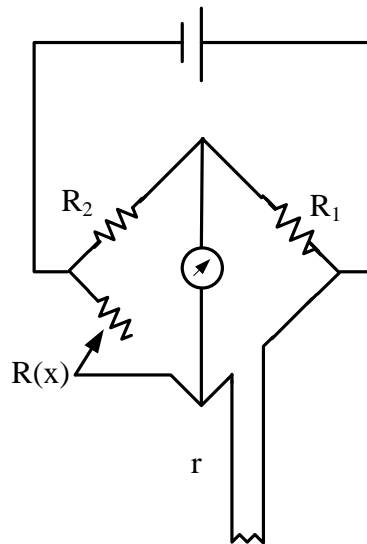
Στο σημείο αυτό, ας εξετάσουμε για ποιο λόγο η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Η εξάρτηση της αντίστασης από τη θερμοκρασία περιγράφεται κατά προσέγγιση από τη σχέση:

$$R(T) = R(0^{\circ}\text{C}) (1 + \alpha T) \quad (7)$$

όπου α ο θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης (για το λευκόχρυσο είναι: $\alpha = 3,92 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) και T η θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$). Στο σχ. 2.26α παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου $R(T) / R(0^{\circ}\text{C})$, σε συνάρτηση της θερμοκρασίας για νικέλιο, χαλκό, λευκόχρυσο και βολφράμιο.



Σχήμα 2.26α: Η μεταβολή της ωμικής αντίστασης του: νικελίου, χαλκού και λευκόχρυσου συναρτήσει της θερμοκρασίας



Σχήμα 2.26b: Συνδεσμολογία απομακρυσμένης θερμοαντίστασης R σε γέφυρα Wheatstone με δύο αγωγούς, έκαστος ωμικής αντίστασης r

Στο παραπάνω σχήμα 2.26a παρατηρούμε την πολύ καλή γραμμικότητα στη μεταβολή της αντίστασης του λευκόχρυσου, γεγονός που ερμηνεύει, μεταξύ άλλων, την καταλληλότητα του μετάλλου αυτού στη θερμομετρία. Η μη γραμμική συμπεριφορά των άλλων δύο μετάλλων – περισσότερο του Ni και λιγότερο του Cu, ερμηνεύεται κυρίως από την ύπαρξη προσμίξεων και τις ατέλειες του πλέγματός τους. Εκτός από τη γραμμική συμπεριφορά, για να μπορεί ένα μέταλλο να χρησιμοποιηθεί ως αισθητήρας θερμοκρασίας, πρέπει να έχει και άλλες ιδιότητες, όπως αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες, να είναι χημικώς αδρανές και να μπορεί να βρεθεί εύκολα σε χημικώς καθαρή μορφή. Ο λευκόχρυσος ικανοποιεί το σύνολο των απαιτήσεων αυτών.

Η εξ. (8) ισχύει γενικά για τα περισσότερα μέταλλα, σε χαμηλές όμως θερμοκρασίες. Ειδικά για τις αντιστάσεις πλατίνας, χρησιμοποιείται η ακριβέστερη σχέση Callendar – van Dusen:

$$R(T) = R(0^{\circ}C)(1 + A * T + B * T^2 + C(T - 100) * T^3) \quad (8)$$

Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 0°C η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την μετρούμενη αντίσταση ως εξής:

$$0 = R(0^{\circ}C) * B * T^2 + R(0^{\circ}C) * A * T + (R(0^{\circ}C) + R(T)) \Leftrightarrow$$

$$R(T) = \frac{-R(0^{\circ}C) * A + \sqrt{R(0^{\circ}C)^2 * A^2 - 4 * R(0^{\circ}C) * B * (R(0^{\circ}C) + R(T))}}{2 * R(0^{\circ}C) * B} \quad (9)$$

Τυπικές τιμές των συντελεστών αυτών είναι (πρότυπο IEC751 (Pt100)):

$$A = 3,985 * 10^{-3} / ^{\circ}C$$

$$B = -5,85 * 10^{-7} / ^{\circ}C$$

$$C = 4,27 * 10^{-12} / ^{\circ}C$$

Για ένα βιομηχανικού τύπου PRT, οι αντίστοιχες τιμές είναι (πρότυπο SAMA RC-4):

$$A = 3,908 * 10^{-3} / ^{\circ}C$$

$$B = -5,80 * 10^{-7} / ^{\circ}C$$

$$C = 4,27 * 10^{-12} / ^{\circ}C$$

$$a = 3,85 * 10^{-3} / ^{\circ}C$$

Η παράμετρος a , μια χαρακτηριστική σταθερά για το υλικό, που λέγεται συντελεστής γραμμικής διαστολής και εξαρτάται από τη θερμοκρασία T του υλικού αλλά και την τιμή της καθαρότητας του λευκόχρυσου. Στις παραμέτρους, ονομάζεται τιμή άλφα του αισθητήρα και ορίζεται ως εξής:

$$a = \frac{R(100^{\circ}C) - R(0^{\circ}C)}{100R(0^{\circ}C)} \quad (10)$$

Η παράμετρος αυτή προκύπτει μετρώντας την αντίσταση στο σημείο πήξεως του ύδατος (0°C) και στο σημείο βρασμού του (100°C).

Υπάρχουν διάφοροι ισοδύναμοι τρόποι αναγραφής της παραμέτρου a :

- 0,385 Ω/°C για PRT 100 Ω
- $3,85 * 10^{-3} / ^{\circ}C$
- 0,385%/°C
- 3850 ppm/°C.

Η τιμή α εξακολουθεί να χρησιμοποιείται και σήμερα ως μέτρο της καθαρότητας του λευκόχρυσου. Στη θερμομετρία όμως, επειδή το σημείο βρασμού του ύδατος δεν χρησιμοποιείται πλέον στη Διεθνή Θερμομετρική Κλίμακα, η τιμή α έχει αντικατασταθεί από την τιμή ρ (σημείωση: διαβάζεται “τιμή ρ ”), η οποία ορίζεται ως εξής:

$$\rho = \frac{R(29,7646^{\circ}\text{C})}{R(0^{\circ}\text{C})} \quad (11)$$

όπου $29,7646^{\circ}\text{C}$, το σημείο τήξης του γαλλίου.

Η ανοχή των αισθητήρων, που χαρακτηρίζει το αναμενόμενο σφάλμα κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης σειράς μετρήσεων ενός οργάνου που ακολουθούν το πρότυπο IEC751, ταξινομείται σε τέσσερις κλάσεις, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα. Το σύμβολο $|t|$ υποδηλώνει την απόλυτη τιμή της θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου.

<i>Κλάση</i>	<i>Εξίσωση ανοχής ($^{\circ}\text{C}$)</i>
A	$\pm (0.15 + 0.002 \cdot t)$
B	$\pm (0.30 + 0.005 \cdot t)$
C	$\pm (0.40 + 0.009 \cdot t)$
D	$\pm (0.60 + 0.0018 \cdot t)$

2.2.2 Αργή Λειτουργίας αισθητήρων RTD

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας RTD είναι κατασκευασμένοι από μέταλλα των οποίων η αντίσταση αυξάνει με τη θερμοκρασία.

Μάλιστα, σε ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας, η ηλεκτρική αντίσταση αυξάνεται γραμμικά με την θερμοκρασία. Κάθε μέταλλο έχει μία και μοναδική αντίσταση η τιμή της οποίας μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά. Αυτή η αντίσταση είναι ευθέως ανάλογη με το μήκος του σύρματος μετάλλου, και αντιστρόφως ανάλογο προς τη διατομή.

$$R = \rho * l/S \quad (12)$$

Όπου:

R: η αντίσταση (ohm, Ω)

ρ : η ειδική αντίσταση του υλικού (ohm, Ω)

S: το εμβαδό εγκάρσιας διατομής του αγωγού (m^2)

l: το μήκος του αγωγού (m)

Η σχέση ειδικής αντίστασης και θερμοκρασίας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\rho = \rho_o[1 + a(T - T_o)] \quad (13)$$

Όπου:

ρ : η ειδική αντίσταση στη θερμοκρασία T (ohm, Ω)

ρ_o : η ειδική αντίσταση σε συνθήκες αναφοράς ($0^\circ C$) (ohm, Ω)

a: συντελεστής θερμοκρασίας της αντίστασης ($1/^\circ C$)

T: θερμοκρασία ($^\circ C$)

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (12) και (13) προκύπτει ότι:

$$R/R_o = a * T + 1 \quad (14)$$

Η χημική σταθερότητα, η διαθεσιμότητα σε καθαρή μορφή, και ιδιαίτερα οι ηλεκτρικές ιδιότητες της πλατίνας, την καθιέρωσε σαν το κατάλληλο μέταλλο της επιλογής για την κατασκευή αισθητήρων RTD.

Οι αισθητήρες RTD μπορούν να έχουν χρόνους απόκρισης ένα κλάσμα του δευτερολέπτου.

Για τη μέτρηση της αντίστασης ενός αισθητήρα θερμοκρασίας RTD, ένα μικρό ηλεκτρικό ρεύμα (περίπου 1 mA) πρέπει να μεταβεί μέσω του αισθητήρα για να δημιουργήσει την απαραίτητη πτώση τάσης. Αυτό όμως μπορεί να οδηγήσει σε θέρμανση της πλατίνας στον RTD πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η θέρμανση αυτή είναι ανάλογη της ηλεκτρικής ισχύος ($P = I^2 R$) του RTD. Εάν ο αισθητήρας RTD βρίσκεται σε ένα “φτωχό” μέσο μεταφοράς θερμότητας (π.χ. αέρα), θα ζεσταθεί περισσότερο από ό, τι αν ήταν σε ένα ρευστό, όπως το νερό. Επομένως το

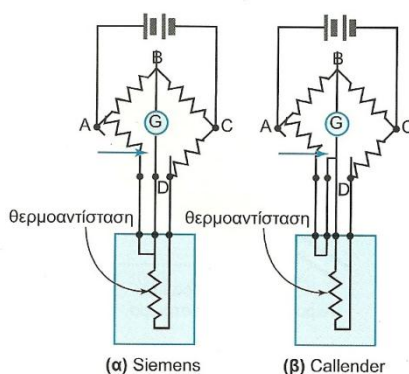
ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να θερμάνει τον αισθητήρα, πράγμα που μπορεί να επηρεάσει την μέτρηση.

Πρακτικά για τη σύνδεση μιας σχετικά απομακρυσμένης θερμοαντίστασης R σε γέφυρα Wheatstone απαιτούνται δύο κλώνοι αγωγών, έκαστος ωμικής αντίστασης r (Σχ. 2.26b).

Οι μεταβολές που επέρχονται τότε στη συνθήκη ισορροπίας στη γέφυρα (ωμική αντίσταση $r + R + r$) εξισορροπούνται με μεταβολή της αντίστασης $R(x)$ του ροοστάτη. Συνεπώς κατά την ισορροπία της γέφυρας του Σχ. 2.20b θα ισχύει:

$$R = \frac{R_1}{R_2} R(x) - 2r \quad (15)$$

Για την εξάλειψη της ωμικής αντίστασης r εκάστου αγωγού σύνδεσης της θερμοαντίστασης με τη γέφυρα εφαρμόζεται μία από τις ζυγισμένες συνδεσμολογίες του Σχ. 2.27.



Σχήμα 2.27: Δύο μέθοδοι συνδεσμολογίας για θερμοαντίσταση

Απαιτείται κατά περίπτωση τρίκλωνο ή τετράκλωνο καλώδιο σύνδεσης, καθώς και σταθεροποιημένη διάταξη διέγερσης για την πραγματοποίηση της μέτρησης. Επισημαίνεται ότι η δίοδος ηλεκτρικού ρεύματος προκαλεί θέρμανση της θερμοαντίστασης που αποκτά πρακτικά μια θερμοκρασία κατά τι υψηλότερη από τη μετρούμενη, γι αυτό πρέπει να ελαχιστοποιείται η ένταση του διαρρέοντος ρεύματος. Σε κάθε περίπτωση, η σχεδίαση του συνολικού κυκλώματος μέτρησης και η βαθμονόμηση του οργάνου πρέπει να λαμβάνει υπόψη και το παραπάνω φαινόμενο.

Η μέτρηση θερμοκρασίας με θερμοαντιστάσεις σημαίνει εναλλακτικά: α) την αγορά του πλήρους οργάνου, το οποίο διατίθεται ζυγισμένο και διακριβωμένο από τον κατασκευαστή ή β) την εργαστηριακή υλοποίηση του, με αγορά μόνο αισθητήρων θερμοαντίστασης και κοινών ωμικών αντιστάσεων. Η δεύτερη περίπτωση πλεονεκτεί όταν απαιτούνται αρκετά σημεία μέτρησης λόγω σημαντικής περικοπής του κόστους, γι αυτό διατίθεται στην αγορά τυποποιημένες θερμοαντιστάσεις, π.χ. ο συμβολισμός Pt100 αντιστοιχεί σε θερμοαντιστάτη λευκόχρυσου των 100Ω στους 0°C, με τυπική ευαισθησία 0.4Ω/ °C. Ταυτόχρονα όμως, η δεύτερη επιλογή απαιτεί επίμονη προσπάθεια βαθμονόμησης κάθε ξεχωριστής γέφυρας, με δεδομένες μάλιστα τις διακυμάνσεις που παρουσιάζουν οι ωμικές αντιστάσεις του εμπορίου. Οι αισθητήρες θερμοαντίστασης διατίθενται σε διάφορες γεωμετρικές μορφές είτε ως ελεύθερα συρματίδια είτε με προστατευτικό κάλυμμα, καθώς και υπό μορφή φιλμ. Για την ασφαλή εμφάνιση σε διάφορα ρευστά επιβάλλεται η θωράκιση του αισθητήρα σε επιμήκεις καθετήρες.

2.2.3 Τύποι Αισθητήρων RTD

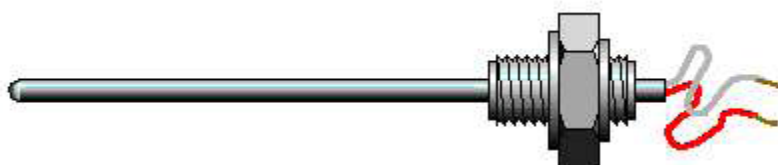
Τα PRT's κατασκευάζονται σε διάφορες μορφές. Οι αισθητήρες γενικής χρήσης αποτελούνται από σύρμα πλατίνας. Τα τελευταία χρόνια όμως έχουν αναπτυχθεί και PRT's λεπτών υμενίων, τα οποία κερδίζουν συνεχώς έδαφος (σχ. 2.20a).

Οι αισθητήρες σύρματος αποτελούνται από ελικοειδές πολύ λεπτό σύρμα πλατίνας τοποθετημένου στο εσωτερικό κεραμικού σωληνίσκου, ώστε να προστατεύεται και να στηρίζεται. Το σύρμα μπορεί να είναι ενωμένο με το σωληνίσκο. Οι αισθητήρες σύρματος είναι κατά κανόνα ακριβέστεροι από αυτούς με λεπτό υμένιο, επειδή και η καθαρότητα του μετάλλου ελέγχεται καλύτερα και δεν αναπτύσσονται σφάλματα λόγω διάτμησης. Είναι όμως ακριβότεροι.

Οι αισθητήρες υμενίου αποτελούνται από ένα λεπτό μεταλλικό υμένιο το οποίο εναποτίθεται σε κεραμικό ή υαλώδες υπόστρωμα. Είναι λιγότερο ακριβείς σε σχέση με τους αισθητήρες σύρματος. Είναι όμως σχετικά φθηνοί, διατίθενται σε μικρά μεγέθη και αντέχουν περισσότερο σε μηχανικές καταπονήσεις.

Οι αισθητήρες δεν μπορούν γενικά να χρησιμοποιηθούν στη βασική μορφή τους, όπως δηλαδή απεικονίζονται στο σχ. 2.20a, γιατί είναι ευαίσθητοι. Εισάγονται

συνήθως σε κάποια προστατευτική διάταξη - θήκη, ώστε να μπορούν να αντέξουν στο περιβάλλον στο οποίο θα λειτουργήσουν. Συνήθως πρόκειται για κυλίνδρους από ανοξείδωτο χάλυβα, οι οποίοι γεμίζονται με ειδικό γράσο αυξημένης θερμικής αγωγιμότητας (σχ. 2.28). Ο αισθητήρας βυθίζεται μέσα στο γράσο. Η διάταξη αυτή προστατεύει τον αισθητήρα και από κραδασμούς. Οι τυποποιημένες διαμέτροι των σωλήνων αυτών είναι 3, 4.5, 6, 8, 10, 12 και 15 mm και τα τυποποιημένα μήκη 250, 300, 500, 750 και 1000 mm.



Σχήμα 2.28: Τυπική διάταξη PRT με θήκη.



Σχήμα 2.29: Απεικόνιση Τυπικής διάταξης PRT με θήκη

Κατά τη χρήση των PRT's δημιουργούνται επαφές δύο μετάλλων: της πλατίνας και των χάλκινων αγωγών μέσω των οποίων μεταφέρονται τα σήματα στη μετρητική διάταξη. Άρα, δημιουργείται κάτι σαν θερμοζεύγος. Επομένως αν κατά μήκος του συστήματος αυτού δημιουργηθεί θερμοβαθμίδα, αναπτύσσεται τάση Seebeck της τάξης των

$7 \mu\text{V} / ^\circ\text{C}$. Η τιμή αυτή δεν επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων, εκτός αν πρόκειται για μετρήσεις ιδιαίτερης ακριβείας οι οποίες διεξάγονται με πολύ μικρή ένταση ρεύματος.

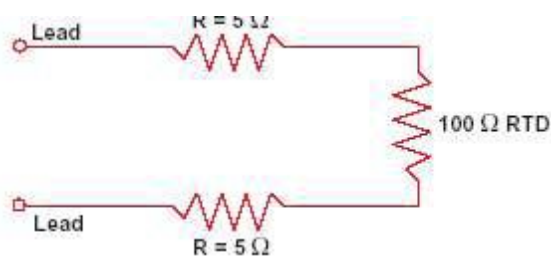
2.2.4 Μέτρηση της αντίστασης των αισθητήρων RTD

Η θερμοκρασία μπορεί να μετρηθεί κυρίως με δύο τρόπους:

- Την μέτρηση της πτώσης τάσης που προκαλεί στο RTD η διέλευση γνωστού ρεύματος,
- Μέσω γέφυρας.

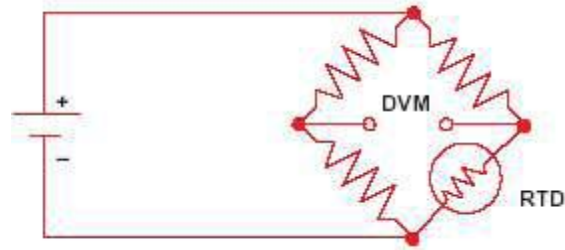
Τα RTD διατίθενται σε σχήμα κατάλληλο για την μέτρηση της θερμοκρασίας σε ρευστά και σε επιφάνειες στερεών σωμάτων.

Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα, η παράμετρος άλφα ενός PRT 100Ω ισούται με $0,385 \text{ } \Omega/^{\circ}\text{C}$. Για να μετρήσουμε την αντίσταση ενός αισθητήρα, άρα και τη θερμοκρασία, πρέπει να τον ενώσουμε με μια κατάλληλη διάταξη. Η ένωση γίνεται με χάλκινους αγωγούς, η αντίσταση των οποίων, αναλόγως του απαιτούμενου μήκους, μπορεί να κυμαίνεται από μερικά Ω , ως μερικές δεκάδες Ω . Παρατηρώντας ότι η τιμή της παραμέτρου άλφα είναι μικρή, καταλαβαίνουμε ότι ακόμα και μια μικρή πρόσθετη αντίσταση των αγωγών, αν δεν ληφθεί υπ' όψη, μπορεί να επιφέρει σημαντικό σφάλμα στη μέτρηση. Έστω για παράδειγμα το κύκλωμα του σχ. 2.30, με το οποίο μετράται η αντίσταση ενός PRT 100 Ω . Αν η αντίσταση καθενός από τους δύο αγωγούς ισούται με 5 Ω , η συνολική επιπλέον αντίσταση θα είναι 10 Ω . Άρα η διαφορά θερμοκρασίας που αντιστοιχεί σε αυτά τα 10 Ω θα είναι $10 \text{ } ^{\circ}\text{C} / 0,385 \text{ } \Omega.^{\circ}\text{C}^{-1} = 26 \text{ } ^{\circ}\text{C}$.



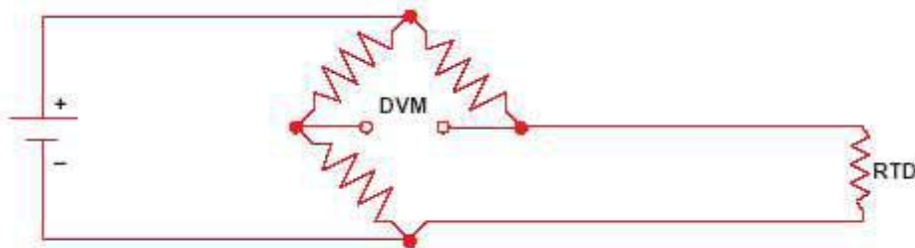
Σχήμα 2.30: Επίδραση της αντίστασης των αγωγών

Ο κλασικός τρόπος για την αποφυγή αυτού του προβλήματος είναι η χρήση της γέφυρας Wheatstone (σχ. 2.31). Η τάση εξόδου V_{out} της γέφυρας είναι μια έμμεση μέτρηση της τιμής της ζητούμενης αντίστασης R_g . Η χρήση της γέφυρας απαιτεί μία εξωτερική πηγή τάσης και τρεις αντιστάτες, μηδενικού συντελεστή άλφα.



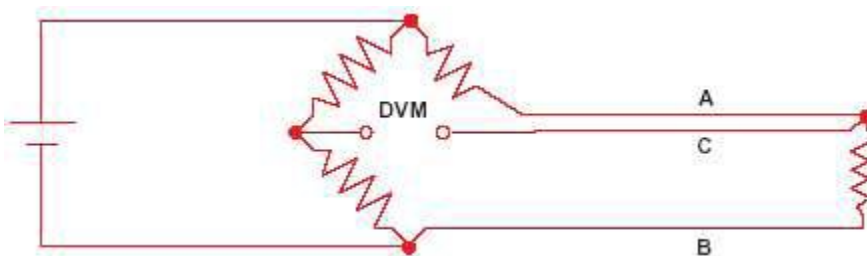
Σχήμα 2.31: Γέφυρα Wheatstone, για μέτρηση PRT

Για να μην εκτίθενται οι τρεις αντιστάτες στην ίδια θερμοκρασία με το PRT, χρησιμοποιείται στην πράξη το διαφοροποιημένο κύκλωμα του σχήματος 2.32.



Σχήμα 2.32: Πρακτικό κύκλωμα μέτρησης PRT με γέφυρα

Τώρα όμως εμφανίζεται ξανά ίδιο το πρόβλημα: η αντίσταση των δύο προεκτεταμένων αγωγών επιδρά στη μέτρηση της θερμοκρασίας. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας τη λεγόμενη τεχνική των τριών αγωγών (σχ. 2.33). Αν οι αγωγοί A και B έχουν ακριβώς το ίδιο μήκος, οι αντιστάσεις τους αλληλοαναιρούνται, δεδομένου ότι ανήκουν σε αντίθετα σκέλη της γέφυρας.

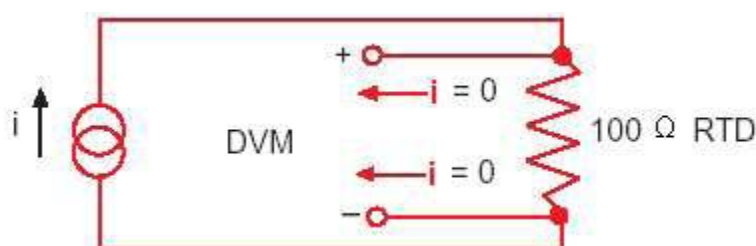


Σχήμα 2.33: Τεχνική τριών αγωγών

Το κύκλωμα όμως του σχήματος 2.33 έχει ως αποτέλεσμα η μεταβολή της τάσης εξόδου της γέφυρας με την αντίσταση του PRT να μην είναι γραμμική. Αυτή η μη

γραμμικότητα έρχεται να προστεθεί στην ήδη μη γραμμική εξάρτηση μεταξύ θερμοκρασίας και αντίστασης του PRT.

Τα προβλήματα που σχετίζονται με τη χρήση της γέφυρας, λύνονται αν η μέτρηση γίνει χρησιμοποιώντας αντί της εξωτερικής πηγής τάσης, μία πηγή ρεύματος. Ένα τέτοιο κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα 2.34.



Σχήμα 2.34: Μέτρηση PRT με πηγή ρεύματος και βολτόμετρο

Για την υλοποίηση του κυκλώματος αυτού απαιτούνται τέσσερις αγωγοί, γι' αυτό και ονομάζεται τεχνική των τεσσάρων αγωγών ή τεσσάρων συρμάτων (four wire technique). Η τάση που μετρά το βολτόμετρο είναι η πτώση τάσης στα άκρα στα άκρα του PRT και είναι ευθέως ανάλογη της αντίστασής του, αλλά ανεξάρτητη από το μήκος των χρησιμοποιούμενων αγωγών. Η τεχνική των τεσσάρων αγωγών είναι η ακριβέστερη για τη μέτρηση της θερμοκρασίας με PRTs.

Εκτός από το λευκόχρυσο, για την κατασκευή αντιστατών – αισθητήρων θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται και άλλα μέταλλα όπως νικέλιο, χαλκός και μολυβένιο. Οι χρήσεις τους όμως είναι εξειδικευμένες και οι συνολικές τους δυνατότητες δεν καλύπτουν αυτές των αισθητήρων λευκόχρυσου. Κατά τα λοιπά, ο τρόπος χρήσης και οι συνδεσμολογίες μέτρησης είναι οι ίδιες.

2.2.5 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα Αισθητήρων RTD

Πλεονεκτήματα:

- Εύρος μέτρησης κατά προσέγγιση μεταξύ $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $800\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- Χρόνος απόκρισης σε κλάσματα δευτερολέπτου,
- Πιστότητα (καλύτερη από αυτή των θερμοζευγών),
- Μικρό μέγεθος (μπορεί να συγκριθεί και με το μέγεθος της μύτης ενός μολυβιού) και
- Μακροπρόθεσμη σταθερότητα.

Μειονεκτήματα:

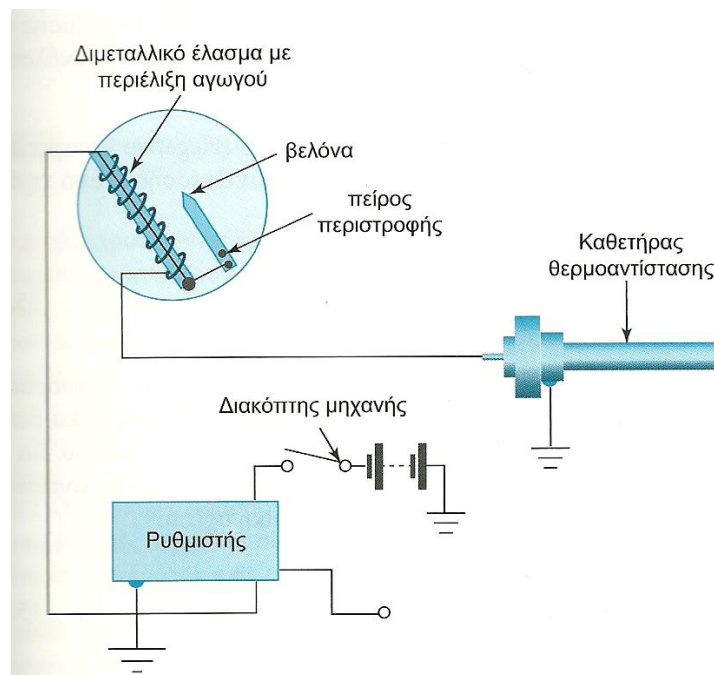
- Μεγάλο κόστος αγοράς,
- Επιρρεπή σε αυτοθέρμανση,
- Χαμηλή ευαισθησία (περίπου $+0.4\Omega/^{\circ}\text{C}$ για 100Ω Pt100 RTD) και
- Περιορισμένο εύρος αντίστασης (100Ω έως $10\text{k}\Omega$).

2.2.6 Εφαρμογές αισθητήρων RTD

Τα θερμομέτρα αντίστασης πλατίνας χρησιμοποιούνται για αρκετά χρόνια έως σήμερα σε εργαστήρια και βιομηχανικές εφαρμογές όπου απαιτείται η μέτρηση της θερμοκρασίας και έχουν αποκτήσει μία πολύ καλή φήμη όσο αφορά την υψηλή ακρίβεια και την σταθερότητα της μέτρησης. Για παράδειγμα, στην τεχνολογία επεξεργασίας, η σωστή θερμοκρασία είναι κρίσιμη για την ποιότητα και απόδοση της διεργασίας. Στην τεχνολογία αυτοματισμού, η ακριβής ανίχνευση θερμοκρασίας είναι πολύ σημαντική για εγκαταστάσεις επιτήρησης και για προστασία από επικίνδυνες καταστάσεις. Στην θέρμανση και τον κλιματισμό, δεν είναι δυνατή η οικονομική και εύκολη λειτουργία, χωρίς μέτρηση και έλεγχο θερμοκρασίας.

Ας δούμε και ας εξηγήσουμε μία καθημερινή χρήση των θερμομέτρων μεταβαλλόμενης ωμικής αντίστασης. Μέτρηση θερμοκρασίας σε κινητήρα. Η μέτρηση των μεταβολών της θερμοκρασίας του νερού στο κύκλωμα ψύξης του κινητήρα γίνεται με αισθητήρα τύπου αντίστασης, που τοποθετείται στην έξοδο του

νερού από τα υδροχιτώνια. Το μεταβλητό ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση, οδηγείται σε ενδεικτικό όργανο στο ταμπλό του οχήματος, όπου θερμαίνεται με περιελιγμένο αγωγό ένα διμεταλλικό στοιχείο (Σχ. 2.35). Το τελευταίο, θερμαινόμενο μετακινεί τελικά την ενδεικτική βελόνα του οργάνου. Εισάγοντας την πρόσθετη θερμική αδράνεια του διμεταλλικού ελάσματος στο σύστημα μέτρησης, ο παραπάνω ευφυής μηχανισμός αυξάνει σημαντικά τη σταθερά χρόνου του οργάνου. Η επιθυμητή συνέπεια του είναι η αργή απόκριση του οργάνου στις μεταβολές θερμοκρασίας του κινητήρα, με αποτέλεσμα την άμβλυνση των απότομων στιγμιαίων μεταβολών (χωρίς της παρεμβολής του διμεταλλικού στοιχείου η ένδειξη θα παρουσίαζε άσκοπες συνεχείς διακυμάνσεις, παρακολουθώντας τις ανάλογες πραγματικές μεταβολές του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα, με αρνητικές επιπτώσεις στην αναγνωσιμότητα και μάλλον την άσκοπη θορύβηση του οδηγού). Η επιθυμητή αύξηση της σταθεράς του χρόνου του οργάνου στην εφαρμογή αυτή μπορεί εναλλακτικά να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση επαρκούς θερμομάζας στο περίβλημα της αντίστασης.



Σχήμα 2.35: Μέτρηση θερμοκρασίας κινητήρα με διάταξη θερμοαντίστασης

2.2.7 Χαρακτηριστικά αισθητήρων RTD

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα RTD είναι:

- Η ονομαστική αντίσταση (σε 0°C)
- Η περιοχή θερμοκρασίας μέτρησης.
- Χρόνος απόκρισης
- Ευστάθεια διαρκείας.

2.2.8 Παραδείγματα αισθητήρων RTD

Κάποια παραδείγματα αισθητήρων RTD τα οποία μπορούμε να συναντήσουμε στο εμπόριο είναι τα ακόλουθα:

Glass Wire Wound Platinum RTD Elements KN1515 1Pt50



Τεχνικά χαρακτηριστικά:

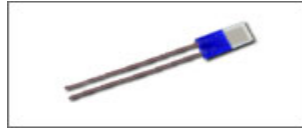
Αντίσταση: 50Ω

Εύρος μέτρησης: -196 έως 660 °C

Μήκος: 15mm

Διάμετρος: 1.5mm

Θερμόμετρα αντίστασης τύπου λεπτού φιλμ με εγχάρακτους αγωγούς λευκόχρυσου.



L416

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

Αντίσταση: 100Ω

Εύρος μέτρησης: -50 έως 400 °C

Μήκος: 3.9mm

Πάχος: 1.5mm

Ύψος: 1.0mm

Λεπτός αισθητήρας τύπου RTD



Ni 100

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

Αντίσταση: 100Ω

Εύρος μέτρησης: -60 έως 250 °C

Μήκος: 3.0mm

Πάχος: 2.0mm

Ύψος: 1.4mm

Θερμόμετρο θερμοαντίστασης τύπου ελικοειδών συρματιδίων



GO 1020

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

Αντίσταση: 100Ω

Εύρος μέτρησης: -200 έως 400 °C

Μήκος: 10.0mm

Διάμετρος: 2.0mm

2.3. Θερμοαντιστάτες (Thermistor)

2.3.1 Γενικά

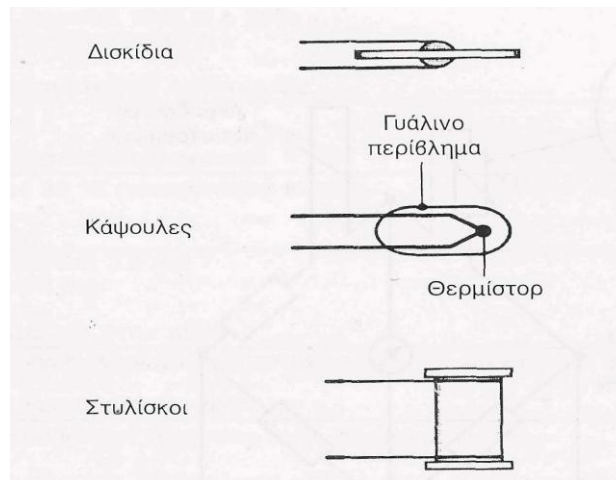
Ο ειδικός αισθητήρας θερμοκρασίας **thermistor** (thermal resistor) ή αλλιώς **θερμοαντιστάτης**, είναι ένα εξάρτημα το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως σε διάφορα ηλεκτρονικά κυκλώματα, όπου είναι απαραίτητο οι αλλαγές της θερμοκρασίας να μετατραπούν σε ηλεκτρικά σήματα, έτσι ώστε να ενεργοποιηθούν κάποια εξαρτήματα. Ο θερμοαντιστάτης (thermistor) όπως λέει και η ίδια του η ονομασία, είναι αντίσταση, όμως η τιμή της μεταβάλλεται **αντιστρόφως** ανάλογα με την θερμοκρασία. Γνωστό παράδειγμα εφαρμογής του θερμοαντιστάτη είναι η συσκευή κλιματισμού, η οποία ενεργοποιείται ή απενεργοποιείται αυτόματα ανάλογα με την θερμοκρασία του χώρου, οι φούρνοι, οι τηλεοράσεις, οι ενισχυτές και η προστασία των ηλεκτρικών συσκευών και εξαρτημάτων από υπερθέρμανση.



Σχήμα 2.36: Αναπαράσταση και σύμβολο θερμοαντιστάτη

Ο θερμοαντιστάτης κατασκευάζεται από θερμοευαίσθητα υλικά, με μεγάλο συντελεστή θερμοκρασίας, τα οποία είναι χημικά σταθερά, έχουν μικρή μηχανική αντοχή και δεν επηρεάζονται από τη γήρανση του υλικού, τα ισχυρά πεδία και τη ραδιενέργεια. Τα υλικά αυτά συνήθως είναι προϊόντα σύντηξης μαγνησίου, κοβαλτίου, νικελίου και άλλων υλικών.

Τα θερμίστορ διατίθενται σε πολλές μορφές όπως δισκία κάψουλες και στυλίσκοι όπως απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα.



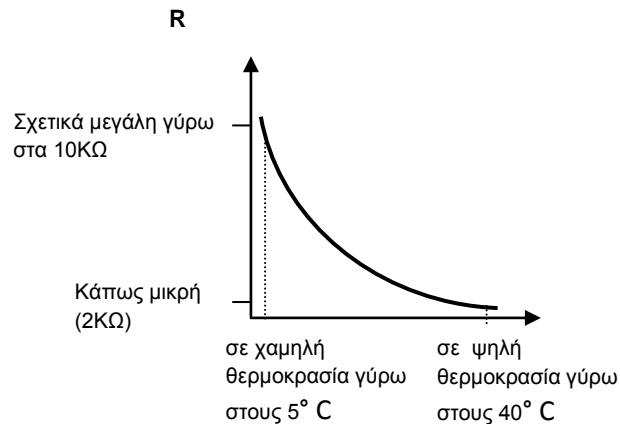
Εικόνα 2.37: Διάφορες απεικονίσεις θερμίστορ

Ως ηλεκτρικό εξάρτημα, ο θερμοαντιστάτης δεν έχει πολικότητα έτσι για τη σύνδεσή του σε κύκλωμα δε χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή.

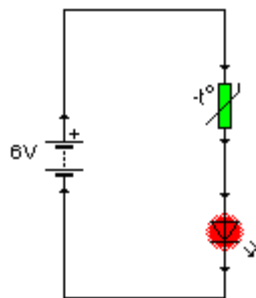
Οι θερμοαντιστάτες όπως και οι αισθητήρες τύπου RTD χρησιμοποιούνται σε σειρά με πηγή ρεύματος ή σε γέφυρα. Κατά την εκλογή ενός θερμοαντιστάτη πρέπει να δίνεται προσοχή στην αντίστασή του στις διάφορες θερμοκρασίες. Η αντίσταση αυτή πρέπει να έχει τιμές που προσαρμόζονται στις αντιστάσεις των συστημάτων προσαρμογής (ενισχυτές ή βολτόμετρα, αμπερόμετρα κ.τ.λ.). Η αντίσταση του θερμοαντιστάτη δεν πρέπει να είναι μικρή όταν επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν μεγάλοι αγωγοί σύνδεσης. Τέλος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η έκκληση θερμότητας μέσα στον θερμοαντιστάτη λόγω του φαινομένου Joule.

2.3.2 Λειτουργία και χαρακτηριστικά στοιχεία των θερμοαντιστατών

Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι ο θερμοαντιστάτης σε υψηλές θερμοκρασίες (ζέστη) έχει κάπως μικρή αντίσταση (π.χ. στους 40°C έχει αντίσταση γύρω στα 2 kΩ) ενώ σε χαμηλές θερμοκρασίες (κρύο) έχει σχετικά μεγάλη αντίσταση (π.χ. στους 5°C έχει αντίσταση γύρω στα 10 kΩ), όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα.

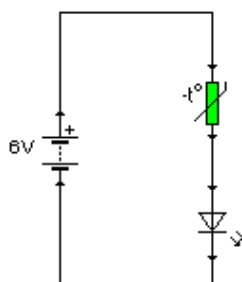


Τα απλά κυκλώματα των παρακάτω σχημάτων, δείχνουν την αγωγιμότητα του θερμοαντιστάτη σε υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες αντίστοιχα.



Σχήμα2.38:

Σε ψηλές θερμοκρασίες ο θερμοαντιστάτης έχει κάπως μικρή αντίσταση. Άρα στο κύκλωμα ρέει ρεύμα, αρκετό για να ανάψει το LED.



Σχήμα2.39:

Σε χαμηλές θερμοκρασίες ο θερμοαντιστάτης έχει σχετικά μεγάλη αντίσταση. Άρα στο κύκλωμα ρέει πολύ μικρό ρεύμα, όχι όμως αρκετό για να ανάψει το LED.

Οι θερμοαντιστάτες, κατασκευάζονται από ημιαγωγά υλικά, που είναι συνήθως οξειδία μετάλλων.

Η ειδική αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού δίνεται από τη μαθηματική εξίσωση:

$$\sigma = e (n * \mu_e + p * \mu_h) \quad (16)$$

Όπου:

- e το φορτίο του ηλεκτρονίου,
- n και p : οι συγκεντρώσεις των φορέων ηλεκτρονίων και οπών αντιστοίχως,
- μ_e και μ_h : οι ευκινησίες των ηλεκτρονίων και οπών αντιστοίχως.

Η μαθητική εξίσωση για την περίπτωση ενδογενούς ημιαγωγού, δηλαδή εκείνου του οποίου οι φορείς είναι τα ηλεκτρόνια των ατόμων του, γράφεται:

$$\sigma = e * n_i * (\mu_e + \mu_h) \quad (17)$$

Γνωρίζουμε όμως ότι:

$$n_i^2 = BT^3 \exp(-E_G/kT) \quad (18)$$

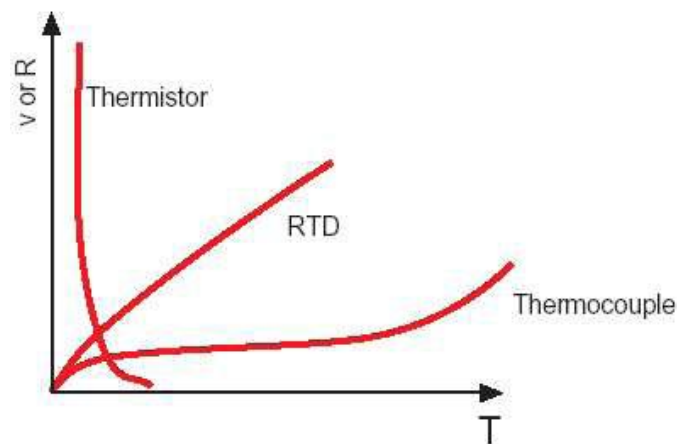
Όπου:

- B : σταθερά εξαρτώμενη από το υλικό του κρυστάλλου,
- k : η σταθερά Boltzmann.
- T : η θερμοκρασία ($^{\circ}C$)
- E_G : το ενεργειακό χάσμα

Η σχέση 18 μας δείχνει ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας, αυξάνεται η συγκέντρωση των φορέων συνεπώς και η ειδική αγωγιμότητα (σχέση 16). Επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντίστασης του θερμοαντιστάτη.

Αν το θερμοζεύγος είναι ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος ηλεκτρικός αισθητήρας θερμοκρασίας και το RTD ο πιο σταθερός, ο θερμοαντιστάτης είναι ο πιο ευαίσθητος.

Από τις τρεις κατηγορίες, ο θερμοαντιστατής είναι αυτός, του οποίου η αντίσταση μεταβάλλεται περισσότερο με τη θερμοκρασία.

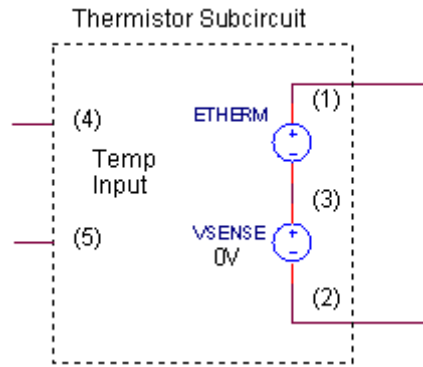


Σχήμα 2.40: Μεταβολή της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας, για τις τρεις βασικές κατηγορίες ηλεκτρονικών αισθητήρων θερμοκρασίας.

Όπως είναι αναμενόμενο, για κάθε πλεονέκτημα υπάρχει τουλάχιστον ένα μειονέκτημα κι αυτό είναι πως η σχέση αντίστασης - θερμοκρασίας είναι ιδιαίτερα μη γραμμική.

Αυτό θέτει θέματα όχι μόνο της επεξεργασίας του σήματος αλλά και της διαμόρφωσής του.

Θα πρέπει να κινηθούμε πέρα από τα βασικά ηλεκτρικά στοιχεία RLC για να περιγράψουμε τη μη γραμμική συμπεριφορά της θερμοαντίστασης. Αλλά, μόλις είναι γνωστή η εξίσωση που περιγράφει την σχέση της αντίστασης μιας θερμοαντίστασης με τη θερμοκρασία, η δημιουργία ενός προτύπου είναι ιδιαίτερα εύκολη. Για να φθάσουμε εκεί, χρειαζόμαστε ακριβώς ένα απλό τέχνασμα διαμόρφωσης της αντίστασης χωρίς τη χρησιμοποίηση μιας άλλης αντίστασης. Κατόπιν, μια εξίσωση που περιγράφει την αντίσταση ως συνάρτηση της θερμοκρασίας θα τεθεί στο πρότυπο.



Σχήμα 2.41: Αναπαράσταση κυκλώματος Thermistor

Έστω ότι η σχέση μεταξύ της αντίστασης και της θερμοκρασίας είναι γραμμική. Τότε ισχύει ότι:

$$\Delta R = k * \Delta T \quad (19)$$

Όπου:

- ΔR : Διαφορά αντίστασης
- ΔT : Διαφορά θερμοκρασίας
- k : συντελεστής θερμοκρασίας της αντίστασης

Ο συντελεστής θερμοκρασίας των θερμοαντιστατών είναι κατά κανόνα αρνητικός. Υπάρχουν θερμοαντιστάτες θετικού συντελεστή θερμοκρασίας, αλλά χρησιμοποιούνται πολύ λιγότερο. Η μεταβολή του συντελεστή θερμοκρασίας μπορεί να είναι πολύ μεγάλη, φθάνοντας σε τάξη μεγέθους αρκετές μονάδες επί τοις εκατό ανά °C. Το γεγονός αυτό τους επιτρέπει να ανιχνεύουν πολύ μικρές θερμοκρασιακές μεταβολές, οι οποίες δεν θα μπορούσαν να ανιχνευθούν με αντιστάτη πλατίνας ή θερμοζεύγος. Η ευαισθησία αυτή όμως έχει ως αποτέλεσμα την ισχυρώς μη-γραμμική συμπεριφορά τους.

Η αντίσταση ενός θερμοαντιστάτη στους 20 °C μπορεί να κυμαίνεται από μερικά kΩ έως τα 40MΩ.

Τυπικά χαρακτηριστικά του πλέον δημοφιλούς θερμίστορ 44004 της YSI δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

<i>Παράμετρος</i>	<i>Χαρακτηριστικά</i>
Αντίσταση στους 25°C	2252 Ω (διαθέσιμα από 100 έως 1ΜΩ)
Εύρος (Περιοχή μέτρησης)	-80 to +120 °C τυπική (250°C max)
Ανοχή	±0.1 ή ±0.2 °C
Σταθερότητα (ετήσια)	< 0.02°C στους 25°C, < 0.25°C στους 100°C
Σταθερά χρόνου	< 1.0 s σε έλαιο, < 60 s σε ακίνητο αέρα
Αυτοθέρμανση	0.13 °C/mW σε έλαιο, 1.0 °C/mW στον αέρα
Συντελεστές γραμμικοποίησης	$a = 1.4733 \times 10^{-3}$, $b = 2.372 \times 10^{-3}$, $c = 1.074 \times 10^{-7}$
Διαστάσεις	Ελλειψοειδές στέλεχος 2.5mm x 4mm

Πίνακας 2.1

Στην πράξη, η γραμμική σχέση ακόμη και αν ισχύει, ισχύει για μικρή περιοχή θερμοκρασιών. Η πραγματική σχέση μεταξύ αντίστασης και θερμοκρασίας των θερμοαντιστατών δίνεται από την εξίσωση Steinhart & Hart:

$$T = \frac{1}{[a + b * \ln(R) + c * \ln(R)]^3} \quad (20)$$

Όπου:

- **a, b, c:** σταθερές,
- **T:** η απόλυτη θερμοκρασία σε Kelvin και
- **R:** η ηλεκτρική αντίσταση (ohm,Ω).

Το σφάλμα στην εξίσωση Steinfart & Hart είναι γενικά μικρότερο από 0.02°C κατά τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, οι τυπικές τιμές για ένα θερμίστορ με αντίσταση 3000Ω σε θερμοκρασία δωματίου (25°C) είναι:

$$a = 1.40 * 10^{-3}$$

$$b = 2.37 * 10^{-4}$$

$$c = 9.90 * 10^{-8}$$

Η εξίσωση Steinhart & Hart δεν παρέχει την απαιτούμενη ακρίβεια αν εφαρμοστεί στο σύνολο του εύρους λειτουργίας του θερμίστορ. Γι αυτό θα πρέπει η περιοχή λειτουργίας να υποδιαιρείται σε μικρές ζώνες, για κάθε μία εκ των οποίων θα υπολογίζονται οι σταθερές a, b και c.

2.3.3 Κατηγορίες θερμοαντιστατών

Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες θερμοαντιστατών:

- ✓ ο τύπος **NTC** (*Negative Temperature Coefficient* – αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας), όπου η αντίσταση μικραίνει με την αύξηση της θερμοκρασίας και χρησιμοποιείται κυρίως για μέτρηση θερμοκρασιών.
- ✓ ο τύπος **PTC** (*Positive Temperature Coefficient* – θετικού συντελεστή θερμοκρασίας), όπου η αντίσταση αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας και χρησιμοποιείται κυρίως για έλεγχο του ηλεκτρικού ρεύματος

2.3.3.1 Θερμοαντιστάτης τύπου NTC:

Η μη γραμμική εξάρτηση της ωμικής αντίστασης R από τη θερμοκρασία T εκφράζεται ως εξής:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln \frac{R}{R_0} \quad (21)$$

όπου R_0 η ωμική αντίσταση του θερμίστορ της θερμοκρασίας αναφοράς T_0 (συνήθως 25°C) και B η σταθερά του θερμίστορ. Η παραπάνω εξάρτηση οφείλεται στο διαφορετικό βαθμό διέγερσης των φορέων μεταξύ των ενεργειακών σταθμών του υλικού. Για καλύτερη συσχέτιση της μετρούμενης θερμοκρασίας T με την ωμική αντίσταση R χρησιμοποιείται εναλλακτικά η γενική λογαριθμική σχέση:

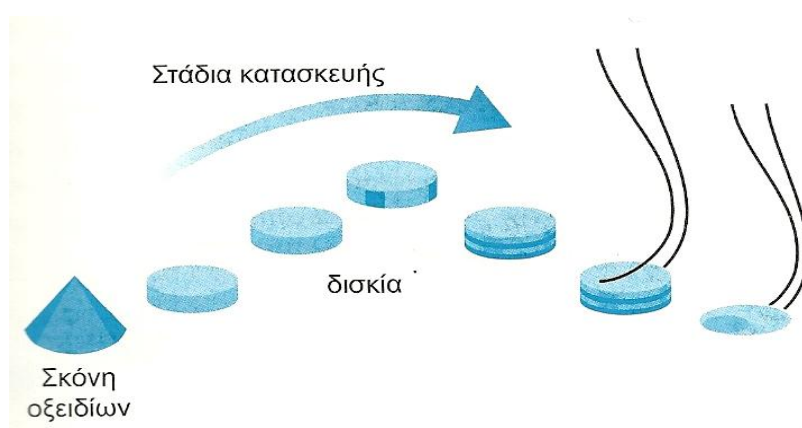
$$\frac{1}{T} = A_0 + A_1 \ln R + A_2 \ln R^2 + A_3 \ln R^3 + \dots A_n \ln R^n \quad (22)$$

Η θερμοκρασία λειτουργίας των θερμίστορ NTC δεν ξεπερνά τους 350 °C, ενώ μια χαρακτηριστική χρήση των είναι NTC είναι για προστασία κάποιων ηλεκτρικών

και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων: επειδή παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση σε ψυχρή κατάσταση προστατεύουν αυτόματα το κύκλωμα στην έναρξη λειτουργίας, ώστε να μην υπάρξει αρχικά μεγάλο ρεύμα στο κύκλωμα. Τα θερμίστορ αυτά παρουσιάζουν τιμές ωμικής αντίστασης κυμαινόμενες από 1Ω έως $10^7\Omega$, ενώ επιλέγονται με κριτήριο τη μετρούμενη θερμοκρασία. Για υψηλές θερμοκρασίες επιλέγονται θερμίστορ υψηλής ονομαστικής ωμικής αντίστασης.

Κατασκευάζονται από οξείδια των στοιχείων της ομάδας του σιδήρου όπως είναι τα οξείδια του χρωμίου (Cr), μαγγανίου (Mn), σιδήρου (Fe), χαλκού (Cu) ή νικελίου (Ni). Τα οξείδια αυτά έχουν μεγάλη ειδική αντίσταση και μπορεί κάτω από ορισμένες συνθήκες να μετατραπούν σε ημιαγωγούς τύπου n και p. Για την κατασκευή του θερμίστορ, τα οξείδια:

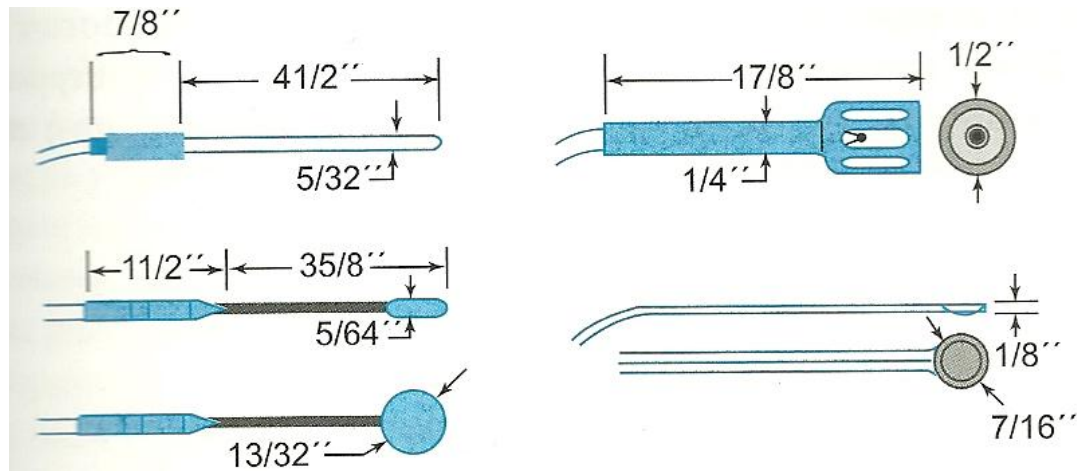
1. κονιοποιούνται,
2. ανακατεύονται με υλικό συγκράτησης,
3. μπαίνουν με πίεση σε ειδικά καλούπια,
4. ψήνονται σε ειδικούς φούρνους όπου σε υψηλή θερμοκρασία γίνεται σύντηξη του οξειδίου,
5. τοποθετούνται οι ακροδέκτες,
6. επιστρώνονται με μονωτικό υλικό και μπαίνουν τα χρώματα που δείχνουν τα χαρακτηριστικά τους
7. δίνονται στο εμπόριο.



Σχήμα 2.42: Διαδοχικά στάδια κατασκευής

Οι εμπορικές θερμικές αντιστάσεις NTC μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο σημαντικές ομάδες, ανάλογα με τη μέθοδο με την οποία τα ηλεκτρόδια είναι συνδεδεμένα με το κεραμικό σώμα.

Κάθε ομάδα μπορεί να υποδιαιρεθεί περαιτέρω σε διάφορους τύπους θερμικών αντιστάσεων, όπου κάθε τύπος χαρακτηρίζεται από τις διαφορές σε: σχήμα, μέγεθος και προστασία.



Εικόνα 2.43: Αντιπροσωπευτικές μορφές θερμίστορ

Η πρώτη ομάδα αποτελείται από τις θερμικές αντιστάσεις τύπου bead.

Όλες οι θερμικές αντιστάσεις αυτού του τύπου έχουν αγωγούς από κράμα λευκόχρυσου, το οποίο είναι τοποθετημένο μέσα σε κεραμικό σώμα.

Οι θερμικές αντιστάσεις τύπου bead διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Bare Beads
- Glass Coated Beads
- Ruggedized Beads
- Miniature Glass Probes
- Glass Probes

Bare Beads:

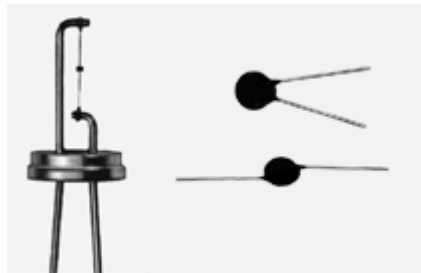
Χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά γρήγορη απόκριση.

Διάχυση: $\sim 0.1 \text{ MW} / ^\circ\text{C}$.

Αντίσταση: 1k, 5k, 10k, 20k, 50k, 100k

Ανοχή: $\pm 5\%$ έως 30% ,

Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας: έως 300°C .



Σχήμα 2.44: Απεικόνιση Bare Beads

Glass Coated Beads:

Χαρακτηρίζεται από γρήγορη απόκριση.

Εξαιρετική σταθερότητα.

Έκλυση θερμότητας: $0.1 - 0.4 \text{ mW} / ^\circ \text{C}$.

Σταθερά χρόνου: 1 - 4 sec.

Ανοχή: $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, 10% . $\pm 20\%$.

Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας: έως 300°C .



Σχήμα 2.45: Απεικόνιση Glass Coated Beads

Ruggedized Beads:

Ανοχή: + / -5%, 10%,

Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας: έως 100° C,

Αντίσταση: 20 έως 300Ω



Σχήμα 2.46: Απεικόνιση Ruggedized Beads

Miniature Glass Probes:

Χαρακτηρίζονται από υψηλή ευαισθησία,

εξαιρετική σταθερότητα και

πολύ γρήγορη απόκριση.

Αντίσταση τύπου: 1k, 5k, 10k, 20k, 50k, 100k

Ανοχή: + / -5%, + / -10%, + / -20%.



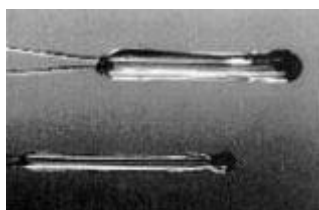
Σχήμα 2.47: Απεικόνιση Miniature Glass Probes

Glass Probes:

Είναι ανθεκτικοί σε κρούσεις και ιδανικά για εμβάπτιση σε υγρό. Είναι εξαιρετικά αξιόπιστοι και σταθεροί και είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν σε μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών.

Ανοχή $\pm 1\%$ έως $\pm 25\%$

Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας έως $300\text{ }^{\circ}\text{C}$



Σχήμα 2.48: Απεικόνιση Glass Probes

Η δεύτερη ομάδα αποτελείται από θερμοαντιστάσεις οι οποίες υλοποιούνται σε διάφορες γεωμετρίες με διάχυση κάποιων μεταλλικών οξειδίων ή άλλων αγωγίμων φορέων σε κρυσταλλικά ή ημικρυσταλλικά θερμοπλαστικά πολυμερή υλικά, με μεταλλουργική τεχνολογία σύντηξης κόνεων (sintering), συνήθως σε μικροσκοπικές διαστάσεις υπό μορφή λεπτού φιλμ. Οι κυκλικές πορείες του παραγόμενου δισκίου με συμπιεστική συγκόλληση των αδιάπαστων κόνεων διαδοχικά επαργυρώνονται, εφοδιάζονται με ακροδέκτες και προστατεύονται με εποξική κάλυψη.

Οι θερμοαντιστάσεις αυτές, περιλαμβάνουν τα ακόλουθα είδη:

- Disks
- Chips (Wafers)
- Surface Mounts
- Flakes
- Rods
- Washers

Οι θερμικές αντιστάσεις NTC είναι διαθέσιμες σε μια ευρεία ποικιλία διαμορφώσεων και προστατευτικών επιστρωμάτων για να ταιριάζουν σχεδόν σε οποιαδήποτε εφαρμογή. Οι σταθερότερες και πιο ακριβείς θερμοαντιστάσεις είναι εκείνες που είναι ερμητικώς σφραγισμένες με γυαλί.

Οι θερμοαντιστάσεις τύπου bead είναι κεραμικοί αγωγοί που περιέχουν προσμίξεις μεταλλικών οξειδίων, όπως NiO, MnO, Fe₃O₄, Mn₂O₃ και Co₂O₃, αξιοποιώντας την εξάρτηση της ειδικής αντίστασης των ημιαγωγών από τη θερμοκρασία.

Όλοι οι εμπορικοί τύποι θερμοαντιστάσεων τύπου bead έχουν αγωγούς από κράματα λευκόχρυσου που κυμαίνονται από 0.018mm σε 0.1mm διάμετρο.

Για να αποφευχθεί η άσκηση πίεσης από εξωτερικούς παράγοντες στους αγωγούς μιας θερμοαντίστασης τύπου bead, σφραγίζονται ερμητικά σε μονάδες κατασκευασμένες από γυαλί.

Η χρήση μιας ερμητικής σφραγισμένης θήκης παρέχει μεγάλη βελτίωση στη σταθερότητα μιας θερμοαντίστασης.

Σε γενικές γραμμές τα θερμίστορ τύπου bead προσφέρουν υψηλή σταθερότητα και αξιοπιστία, γρήγορους χρόνους απόκρισης, και λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες. Είναι διαθέσιμα σε μικρά μεγέθη και, κατά συνέπεια, επιδεικνύουν συγκριτικά χαμηλές σταθερές διάχυσης. Η κατασκευή τους είναι πιο δαπανηρή απ' ό,τι οι θερμοαντιστάσεις μεταλλικής επιφάνειας.

2.3.3.2 Θερμοαντιστάτης τύπου PTC:

Οι θερμοαντιστάσεις τύπου PTC (Positive Temperature Coefficient, θετικού συντελεστή θερμοκρασίας) χαρακτηρίζονται από τον υψηλό θετικό συντελεστή θερμοκρασίας δηλαδή από την αύξηση της τιμής της αντίστασης τους με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό γίνεται μόνο για ορισμένες περιοχές θερμοκρασίας αφού για άλλες περιοχές ο συντελεστής είναι ή μηδέν ή αρνητικός.

Κατασκευάζονται παρόμοια με τα NTC. Ενδεικτικά τα υλικά κατασκευής των PTC

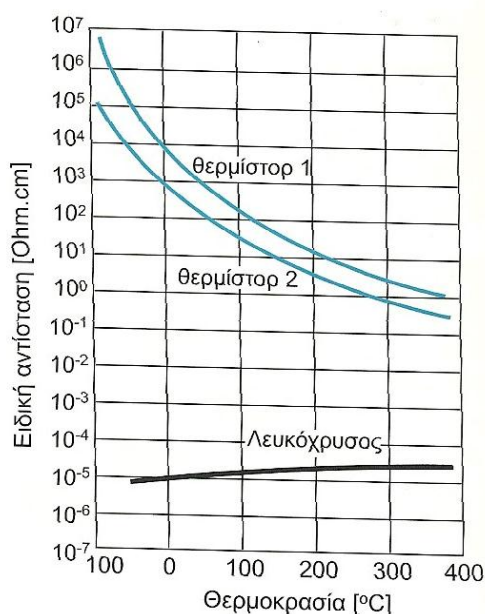
είναι μείγματα ανθρακικού βαρίου (BaTiO_3) ή οξειδία στροντίου και τιτανίου (SrTiO_3) τα οποία ανακατεύονται μ' άλλα υλικά μαζί με ύλη συγκράτησης.

Το υλικό:

1. μπαίνει σε καλούπια,
2. θερμαίνεται,
3. προστίθενται οι ακροδέκτες και τα διάφορα χρώματα
4. δίνεται στο εμπόριο.

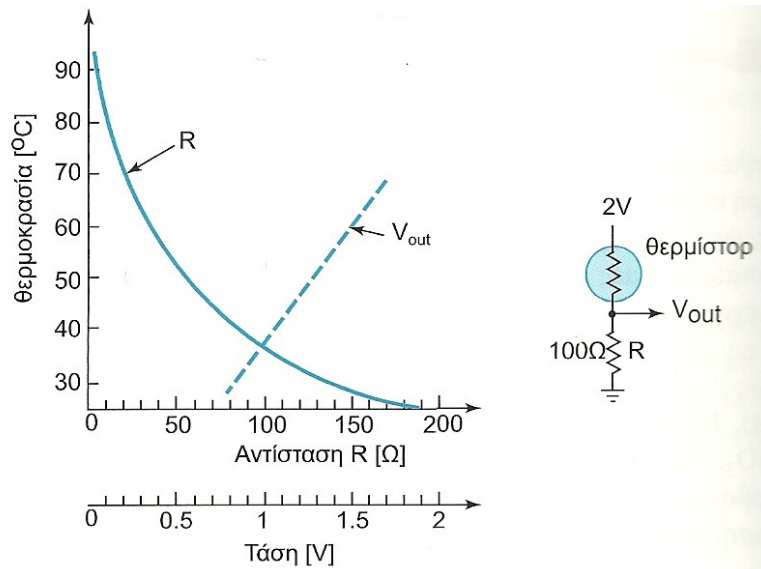
Τυπικές εφαρμογές των συγκεκριμένων θερμίστορ αποτελούν προστασία από υπερβολικές θερμοκρασίες, η αυτορρύθμιση της θέρμανσης ή ακόμη ως περιοριστές έντασης ρεύματος κ.ά.

Μεγαλύτερη χρήση βρίσκουν τα θερμίστορ τύπου NTC, ενώ η μέτρηση πραγματοποιείται τυπικά με χρήση γέφυρας Wheatstone. Στο σύνηθες εύρος μέτρησης ενός θερμίστορ η ωμική αντίσταση μεταβάλλεται περίπου κατά 20Ω για μεταβολή θερμοκρασίας κατά 1°C , δηλαδή, η μέση ευαισθησία είναι $20\Omega/^\circ\text{C}$, τιμή που είναι 10 – 20 φορές μεγαλύτερη από εκείνη των θερμομέτρων αντίστασης – βλ. σχ. 2.43.



Σχήμα 2.49: Συγκριτική μεταβολή της ωμικής αντίστασης θερμίστορ και αντίστασης λευκόχρυσου (platinum)

Το βασικό μειονέκτημα των θερμίστορ σε σύγκριση με τις αντιστάσεις είναι η μη γραμμική μεταβολή της αντίστασης, καθώςον αυτή ακολουθεί προσεγγιστικά την εκθετική καμπύλη.

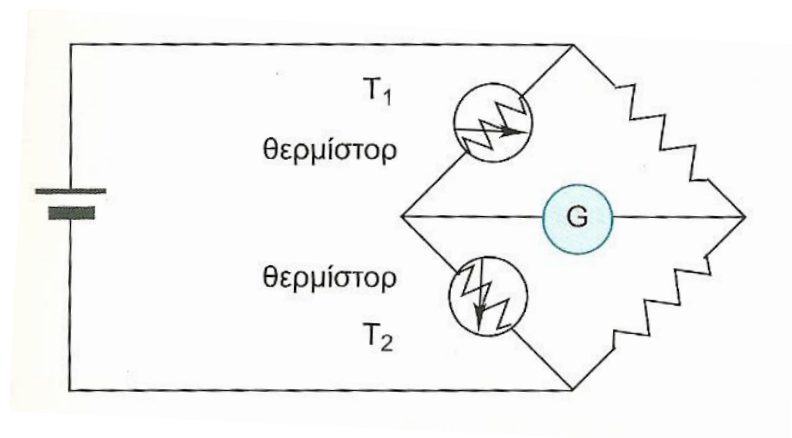


Σχήμα 2.50: Γραμμικοποίηση της απόκρισης θερμίστορ με κύκλωμα διαιρέτη τάσης

Η γραμμικοποίηση της καμπύλης βαθμονόμησης των θερμίστορ μπορεί εντούτοις να επιτευχθεί με αντισταθμιστικές ωμικές αντιστάσεις ή εναλλακτικά στο τμήμα επεξεργασίας του σήματος με χρήση κατάλληλου μικροεπεξεργαστή. Αναλυτικότερα, τοποθετώντας ένα θερμίστορ και μία παραπλήσια ωμική αντίσταση R σε ένα διαιρέτη τάσης, η έξοδος τάσης του κυκλώματος είναι σχεδόν γραμμική στη μεσαία περιοχή, εμφανίζοντας μάλιστα θετική κλίση (Σχ. 2.50).

Τα θερμίστορ παρουσιάζουν αισθητή ολίσθηση της θέρμανσης (δηλαδή, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, μειώνεται η αντίσταση) λόγω αυτοθέρμανσης κατά τη λειτουργία, σφάλμα που μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση και δεύτερου θερμίστορ σε ηλεκτρικό κύκλωμα διαιρέτη τάσης, που προσφέρει ταυτόχρονα και γραμμικοποίηση του σήματος. Αμφότερα τα θερμίστορ τύπου NTC και PTC προτιμώνται για σχετικά στενό εύρος μέτρησης θερμοκρασιών. Ενδεικτικά τα NTC χρησιμοποιούνται στην περιοχή 0 έως 200 °C, ενώ για μεγαλύτερα εύρη θα πρέπει να συνδυάζονται με πρόσθετα κυκλώματα γραμμικοποίησης, ηλεκτρικά ή μικροηλεκτρονικά. Παρουσιάζουν γρήγορη απόκριση σε μεταβατικές συνθήκες, με σταθερά χρόνου της τάξης των ms, διότι έχουν μικρή θερμοχωρητικότητα. Με

κατάλληλη συνδεσμολογία, δύο θερμίστορ μπορεί να μετρηθεί διαφορά θερμοκρασίας, ήτοι με διαφορικό θερμίστορ.



Σχήμα 2.51: Μέτρηση διαφοράς θερμοκρασίας με διαφορικό θερμίστορ

2.3.4. Χρήσεις θερμοαντιστάτων

Γενικά τα θερμίστορ χρησιμοποιούνται σαν εξαιρετικοί ρυθμιστές ρεύματος και θερμοκρασίας σε πολλές εφαρμογές. Παλαιότερα ως θερμοαντιστάτες χρησιμοποιούνταν νήματα σιδήρου σε ατμόσφαιρα υδρογόνου με μορφή ηλεκτρονικών λυχνιών.

Επίσης μια κοινή λυχνία φωτισμού ενεργεί σαν αντίσταση θερμίστορ, περιορισμένης δυνατότητας, αφού αλλάζει την αντίστασή της με την θερμοκρασία

Ειδικότερα οι θερμοαντιστάτες για την μέτρηση θερμοκρασιών έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

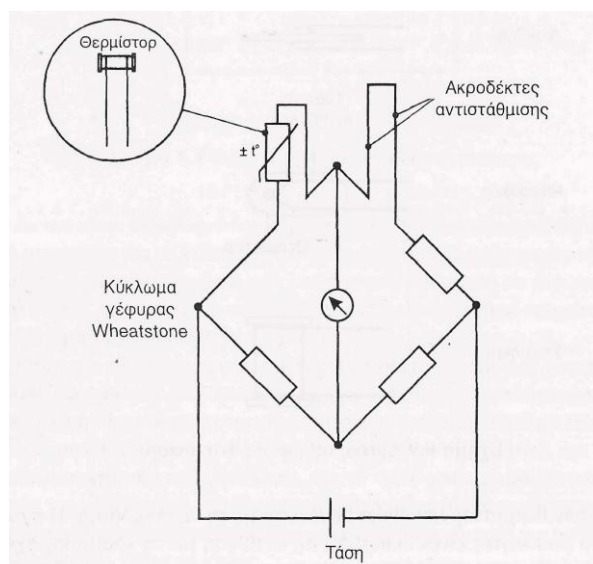
1. Θερμίστορ σε σχήμα χάνδρας είναι κατάλληλα για ανίχνευση θερμοκρασιών σε πολύ στενούς χώρους ή για επιφάνειες.
2. Η ευαισθησία των θερμίστορ είναι τόσο μεγάλη ώστε να είναι πολύ ευαίσθητα σ' ελάχιστες ή ακαριαίες μεταβολές θερμοκρασίας.
3. Δεν χρειάζονται αντισταθμιστικές επαφές ούτε κρύες ενώσεις.

4. Όσο μεγαλύτερη είναι η ηλεκτρική αντίσταση του θερμοαντιστάτη τόσο μικρότερο είναι το σφάλμα που εισάγεται από μεγάλους ακροδέκτες οι οποίοι δεν μπορούν να ξεπερνούν τα 10 μέτρα.
5. Οι θερμοαντιστάτες κατασκευάζονται με κατάλληλη σύνθεση έτσι ώστε με την γήρανσή τους να μην παρουσιάζουν αποκλίσεις και να δίνουν σταθερές ενδείξεις.
6. Για χρήσεις σε θερμοκρασίες κάτω των 150°C μπορεί να παρουσιάζουν ένα σφάλμα της τάξης του $\pm 1\%$.

Για την επιλογή ενός θερμοαντιστάτη για μέτρηση θερμοκρασίας, εξετάζουμε την επίδραση της θέρμανσης πάνω στο υλικό του θερμοαντιστάτη έτσι ώστε η αντίστασή του να μην γίνεται πολύ μικρή στην υψηλότερη θερμοκρασία. Για την αντίσταση του θερμίστορ έχουμε σαν αναφορά τις χαρακτηριστικές θερμοκρασίας - αντίστασης.

2.3.5 Τρόποι σύνδεσης θερμοαντιστατών

Ο θερμοαντιστάτης μπορεί να συνδεθεί σε ένα βραχίονα μιας γέφυρας Wheatstone, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.52: Σύνδεση thermistor σε γέφυρα Wheatstone

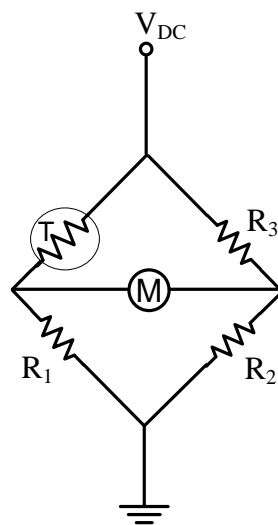
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να συνδεθεί και χρησιμοποιηθεί αντίστοιχα ένας θερμοαντιστάτης. Οι τρόποι αυτοί είναι τέσσερις για την ακρίβεια.

Ο αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μία απλή συσκευή μέτρησης της θερμοκρασίας όταν τοποθετείται σε σειρά με το όργανο μέτρησης, πράγμα που κάνει το όργανο ευαίσθητο στη ροή του ρεύματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μία μικρή αλλαγή στο ρεύμα να προκαλεί ισοδύναμη αλλαγή σε βαθμούς θερμοκρασίας.



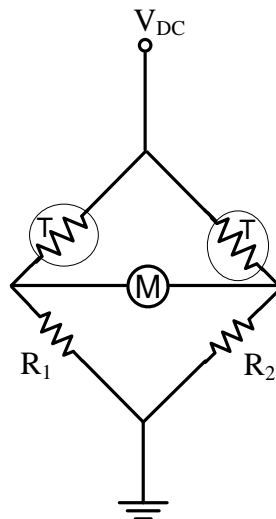
Σχήμα 2.53: Συνδεσμολογία απλής μέτρησης θερμοκρασίας

Το όργανο μέτρησης, δείχνει την ελάχιστη αλλαγή του ρεύματος η οποία απεικονίζεται σε βαθμούς θερμοκρασίας.



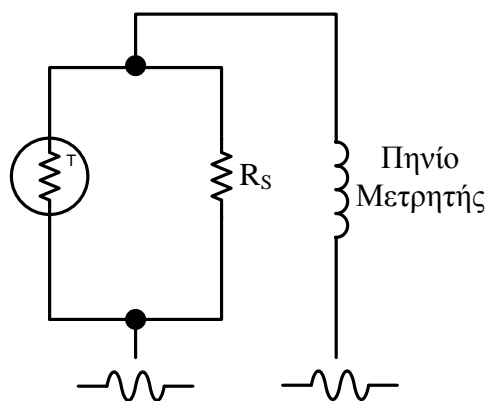
Σχήμα 2.54: Συνδεσμολογία ακριβής μέτρησης θερμοκρασίας

Ένας άλλος τρόπος σύνδεσης του συγκεκριμένου αισθητήρα, είναι όταν επιθυμούμε σύγκριση θερμοκρασιών, οπότε τοποθετούμε σε συνδεσμολογία γέφυρας δύο θερμίστορ, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Όταν η γέφυρα δεν διαρρέεται από ρεύμα τότε βρίσκεται σε ισορροπία. Όταν όμως αλλάζει η θερμοκρασία θα υπάρξει διαρροή ρεύματος διαμέσου του βαθμονομημένου οργάνου μέτρησης επειδή δεν θα υπάρχει ισορροπία.



Σχήμα 2.55: Συνδεσμολογία σύγκρισης θερμοκρασιών.

Τέλος, το θερμίστορ μπορεί να τοποθετηθεί παράλληλα με την αντίσταση και σε σειρά με το πηνίο μέτρησης. Το πρώτο έχει αρνητικό θερμοκρασιακό συντελεστή ενώ το σύρμα χαλκού έχει ίσο αλλά θετικό θερμοκρασιακό συντελεστή. Έτσι ώστε οποιαδήποτε αλλαγή στη θερμοκρασία να επηρεάζει και τα δύο αλλά σε αντίθετες κατευθύνσεις.



Σχήμα 2.56 : Συνδεσμολογία μέτρησης θερμοκρασίας

2.3.6. Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Στα πλεονεκτήματα των θερμίστορ εντάσσονται η μεγάλη ευαισθησία τους στις θερμοκρασιακές μεταβολές, το μικρό τους μέγεθος (2mm – 2.5mm), το μεγάλο εύρος εφαρμογών και η επαναληπτικότητα στις μετρήσεις.

Βασικό μειονέκτημα των αισθητήρων αυτών, είναι η μη γραμμικότητά τους.

2.3.7. Παραδείγματα αισθητήρων θερμίστορ

Κάποια παραδείγματα θερμοαντιστατών τα οποία μπορούμε να συναντήσουμε στο εμπόριο είναι τα ακόλουθα:

NTC Thermistor



SEN-00250

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

Αντίσταση στους 25 °C: 3.3 Ω έως 470 kΩ

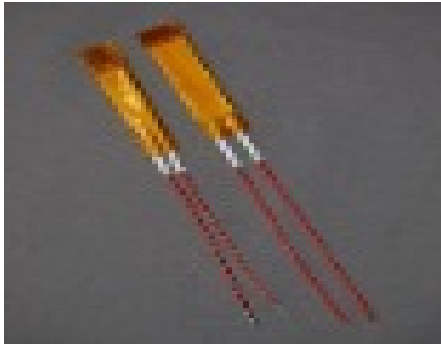
Ανοχή: ± 2 %; ± 3 %; ± 5 %

Χρόνος απόκρισης: 1.2 s

Εύρος Μέτρησης θερμοκρασίας: - 40 °C έως + 125 °C

Βάρος: 0.3 g

PTC Thermistor



TTF3A502

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

Αντίσταση στους 25 °C: 5 kΩ

Ανοχή: ± 1 %; ± 2 %; ± 5 %

Χρόνος απόκρισης: 5 s

Εύρος Μέτρησης θερμοκρασίας: - 40 °C έως + 120 °C

2.4 Θερμόμετρα με υγρό ή αέριο (*Filled Systems Thermometer*)

2.4.1 Γενικά

Η λειτουργία των θερμομέτρων αυτών βασίζεται στη γραμμική ελαστική παραμόρφωση Δl ενός ελαστικού στερεού στελέχους ή στη μεταβολή ύψους μίας στήλης υγρού λόγω θερμικής διαστολής, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta l = S\Delta T \quad (23)$$

Τα συγκεκριμένα θερμομέτρα επομένως περιέχουν ένα αέριο ή ένα πτητικό υγρό και στηρίζονται σε μετρήσεις πίεσης για να παρέχουν τις ενδείξεις θερμοκρασίας. Υπάρχουν 3 είδη θερμομέτρων αυτού του τύπου, τα οποία μπορούν να περιέχουν:

- i. Υγρό (liquid filled system)
- ii. Υγρό και τους ατμούς του (Liquid vapor pressure filled system)
- iii. Αέριο (gas filled system)

2.4.2 Αρχή λειτουργίας

Αν και κάθε τύπος θερμομέτρου υγρού/αερίου είναι ελαφρώς διαφορετικός, έχουν παρόμοια κατασκευή και μοιράζονται την ίδια αρχή λειτουργίας.

Μοιάζουν με έναν μακρύ, λεπτό σωλήνα με έναν παχύτερο σωλήνα στη περιοχή θέρμανσης.

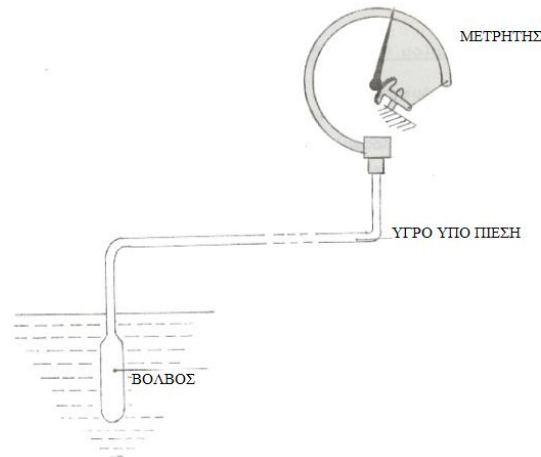
Η απλή κατασκευή τους, επιτρέπει την παραγωγή ανθεκτικών θερμομέτρων με μικρές απαιτήσεις συντήρησης. Επίσης, η ικανοποιητική ευαισθησία και ακρίβειά τους συγκρίνονται με την ευαισθησία και ακρίβεια άλλων θερμομέτρων στο ίδιο εύρος θερμοκρασιών.

Σε αντίθεση με τα ηλεκτρικά όργανα θερμομέτρησης, τα θερμομέτρα αυτά υπόκεινται σε περιορισμούς μέγιστης θερμοκρασίας μέτρησης.

Είναι αυτοτελή, δεν χρειάζονται τροφοδοσία.

Ένα θερμομέτρο υγρού/αερίου αποτελείται από:

- 1) έναν σωλήνα πίεσης,
- 2) ένα τριχοειδή σωλήνα
- 3) και ένα σωλήνα Bourdon



Σχήμα 2.57: Σχηματικό διάγραμμα της αρχής λειτουργίας του θερμομέτρου βολβού υγρής-αερίας φάσης, υλοποιημένο με μετρητή και κλίμακα βαθμονόμησης.

Όλα τα στοιχεία του θερμομέτρου γεμίζουν με ένα υγρό ή ένα υγρό και τους ατμούς του, ή ένα αέριο. Όταν η θερμοκρασία αλλάζει, το ρευστό είτε διαστέλλεται είτε συστέλλεται, γεγονός που αναγκάζει ένα σωλήνα Bourdon να κινηθεί, κινώντας με αυτόν τον τρόπο τη θέση της βελόνας στην κλίμακα.

Σωλήνας πίεσης:

Αυτός κατασκευάζεται από χαλκό, monel, ή ανοξείδωτο χάλυβα. Τον γεμίζουμε με το υγρό ή το αέριο ή το υγρό με τους ατμούς του.

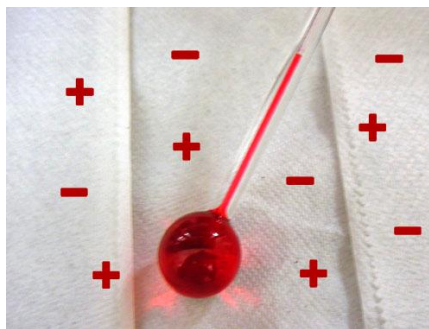
Τριχοειδής σωλήνας:

Συνδέει το σωλήνα που γεμίζει με υγρό ή αέριο με το λαμβάνον στοιχείο.

Το λαμβάνον στοιχείο: Είναι ένας αισθητήρας πίεσης και μπορεί να είναι ένας σωλήνας Bourdon, ένας φυσητήρας ή ένα διάφραγμα. Το ελεύθερο άκρο του σωλήνα Bourdon συνδέεται με έναν δείκτη βαθμολογημένης κλίμακας θερμοκρασίας.

2.4.3 Θερμόμετρα με υγρό

Ένα θερμόμετρο με υγρό γεμίζει εντελώς με το υγρό. Η αρχή λειτουργίας αυτού του συστήματος στηρίζεται στο ότι το υγρό διαστέλλεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αποτελείται από ένα σωλήνα γεμάτο με το υγρό και ένα συνδεδεμένο μερικώς γεμισμένο τριχοειδή σωλήνα. Όταν η θερμοκρασία του θερμομέτρου αυξάνεται, η διαφορετική διαστολή μεταξύ του σωλήνα πίεσης και του υγρού προκαλεί άνοδο του υγρού μέσα στο τριχοειδές αγγείο.



Σχήμα 2.58a: θερμόμετρο με υγρό

Όταν το υγρό διαστέλλεται, προκαλεί μία αύξηση στην πίεση, η οποία αναγκάζει το σωλήνα Bourdon να εκτυλιχθεί και να κινήσει τη βελόνα στην κλίμακα. Χρησιμοποιούνται περισσότερο αδρανείς υδρογονάνθρακες όπως το ξυλόλιο λόγω του χαμηλού συντελεστή διαστολής τους. Σε μερικές περιπτώσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και το νερό. Ποικίλα υγρά, όπως ο υδράργυρος, το οινόπνευμα, το τολουόλιο, και το πεντάνιο, και διαφορετικοί σωλήνες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή θερμομέτρων, έτσι ώστε να καλύπτονται διαφορετικές περιοχές θερμοκρασιών μεταξύ -184°C και $+649^{\circ}\text{C}$.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τυπικά υγρά που χρησιμοποιούνται στα θερμόμετρα υγρού:

<i>ΥΓΡΟ</i>	<i>ΕΥΡΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ °C</i>
<i>Ύδραργυρος</i>	-35 έως 510
<i>Άλκοόλη</i>	-80 έως 70
<i>Τολουόλιο</i>	-80 έως 100
<i>Πεντάνιο</i>	-200 έως 30

Πίνακας 2.2: Υγρά που συνήθως χρησιμοποιούνται

Τα συστήματα που περιέχουν υδράργυρο τα κατατάσσουμε συνήθως σε μια χωριστή κατηγορία από τα συστήματα που περιέχουν απλό υγρό, επειδή ανταποκρίνονται καλύτερα στις αλλαγές θερμοκρασίας και έχουν έναν υψηλότερο βαθμό ακρίβειας από άλλα υγρά.

Η εξίσωση που χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα με υγρό είναι:

$$V_t = V_o(1 + K * T) \quad (24)$$

Όπου:

V_t : ο τελικός όγκος ενός υγρού (m^3).

V_o : ο αρχικός όγκος ενός υγρού (m^3).

K : ο συντελεστής θερμικής διαστολής του υγρού (σταθερά) ($grad^{-1}$).

T : η διαφορά θερμοκρασίας ($^{\circ}C$).

Η τελική ογκομετρική αύξηση του υγρού κατά τη βύθιση στην πηγή συσχετίζεται γραμμικά με τον V_o , δηλαδή τον αρχικό όγκο του υγρού που γεμίζεται το σύστημα.

2.4.3.1 Θερμόμετρα υγρού σε γυαλί

Ένα θερμόμετρο γυαλιού περιέχει, ερμητικά κλεισμένη, μία ποσότητα υγρού σε ισορροπία με τους ατμούς του. Η αρχή λειτουργίας του θερμομέτρου γυαλιού βασίζεται στο ότι η πίεση στο θάλαμο που περιέχει το ρευστό και τους ατμούς του, είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και του όγκου του δοχείου, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο.

Με τα θερμόμετρα γυαλιού μπορούμε να μετρήσουμε θερμοκρασίες μέσα στην περιοχή που συνυπάρχει το ρευστό με τους ατμούς του. Παράδειγμα, το υδραργυρικό θερμόμετρο, που αποτελείται από το βολβό αποθήκευσης του θερμομετρικού υγρού, τον τριχοειδή σωλήνα όπου ανέρχεται το υγρό διαστελλόμενο, τον θάλαμο εκτόνωσης στο άλλο άκρο, και εξωτερικά τη βαθμονομημένη κλίμακα.



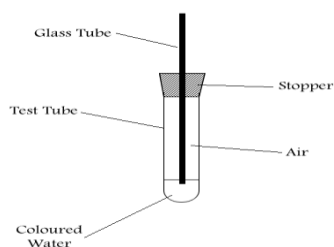
Σχήμα 2.58b: Θερμόμετρο υδραργύρου σε γυαλί

Περιγραφή του υδραργυρικού θερμομέτρου: Αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί διαστολή του υγρού που υψώνεται μέσα στο στέλεχος. Για θερμοκρασίες πάνω από το σημείο βρασμού του Hg (457°C σε πίεση 1atm), μπορούμε να γεμίσουμε το χώρο πάνω από το υγρό με άζωτο υπό πίεση, ανυψώνοντας έτσι το σημείο βρασμού με Hg.

Μερικά πλεονεκτήματα των θερμομέτρων αυτών είναι ότι, είναι απλά στην κατασκευή και φθηνά. Μεταφέρονται εύκολα και είναι εύκολα στο χειρισμό χωρίς πρόσθετα ενδεικτικά όργανα. Ενώ, κύρια μειονεκτήματα των συγκεκριμένων θερμομέτρων είναι ότι, είναι εύθραυστα, έχουν σχετικά υψηλή θερμοχωρητικότητα, που προκαλεί καθυστέρηση απόκρισης του θερμομέτρου σε απότομες μεταβολές θερμοκρασίας.

2.4.4 Θερμόμετρα με αέριο και υγρό

Ένα σύστημα ατμού (vapor system) περιέχει ένα σταθερό, πτητικό υγρό και τον ατμό του. Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στο ότι η πίεση στο σωλήνα που περιέχει ένα υγρό και τον ατμό του αυξάνεται με τη θερμοκρασία και είναι ανεξάρτητη από τον όγκο του. Με το σύστημα αυτό, η θερμοκρασία μετριέται στη διεπαφή του υγρού και του ατμού του.



Σχήμα 2.59: Θερμόμετρο με αέριο και υγρό

Το χρήσιμο κομμάτι οποιασδήποτε καμπύλης πίεσης υγρού-ατμού είναι περίπου μεταξύ 1 atm και της κρίσιμης πίεσης, δηλαδή της πίεσης ατμού στην κρίσιμη θερμοκρασία, η οποία είναι η υψηλότερη θερμοκρασία για ένα ιδιαίτερο σύστημα υγρού-ατμού. Υπάρχει μια μη γραμμική σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της πίεσης ατμού, οπότε η κίνηση του σωλήνα bourdon είναι μεγαλύτερη στο ανώτερο όριο της καμπύλης ατμού-πίεσης. Επομένως, αυτά τα θερμικά συστήματα χρησιμοποιούνται κανονικά κοντά στο ανώτερο όριο της διακύμανσής τους, και αναμένεται ακρίβεια 1% ή και καλύτερη.

Τα υγρά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι η μεθυλική αλκοόλη, το διοξείδιο του θείου, ο αιθέρας, το τολουόλιο, το βουτάνιο, το προπάνιο, και το εξάνιο.

Η σχέση μεταξύ της πίεσης ατμού και της θερμοκρασίας είναι μη γραμμική:

$$P = \log(a - b/T) \quad (25)$$

Όπου:

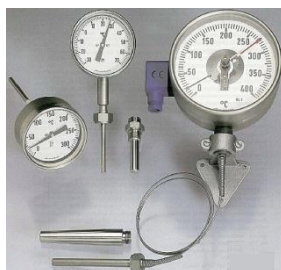
a, b: σταθερές

P: πίεση ατμού (atm)

T: θερμοκρασία (°K)

2.4.5 Θερμόμετρα με αέριο

Τα συστήματα που περιέχουν αέριο (gas-filled) χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία και σε μερικές περιπτώσεις σε εργαστηριακές μετρήσεις. Η λειτουργία τους είναι βασισμένη στον νόμο ιδανικού αερίου. Όταν ο όγκος και η ποσότητα του αερίου διατηρούνται σταθερά, η αύξηση της θερμοκρασίας του βολβού προκαλεί αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό του, καθόσον η πίεση κορεσμού της αέριας φάσης είναι νομοτελειακά ανάλογη με τη θερμοκρασία της. Προσεγγιστικά για αύξηση της θερμοκρασίας κατά 20°C, η πίεση διπλασιάζεται. Σε ένα χαρακτηριστικό gas-filled σύστημα, το αέριο (συνήθως άζωτο) δεν είναι τέλειο, έτσι μπορεί να υπάρξει μια μικρή αλλαγή στον όγκο. Εντούτοις, αυτή η διαφορά είναι δευτερεύουσα και δεν αποτρέπει τη χρήση της μέτρησης πίεσης για να υποδείξει τη θερμοκρασία.



Εικόνα 2.60: Απεικόνιση θερμομέτρων αερίου

Αυτός ο τύπος θερμομέτρου συνδέει έναν σωλήνα bourdon με έναν τριχοειδή σωλήνα στο σωλήνα πίεσης. Όταν το σύστημα σχεδιάζεται για ένα αέριο και γεμίζεται με αυτό (συνήθως άζωτο ή ήλιο), η πίεση στο σύστημα ακολουθεί ουσιαστικά το νόμο αερίου, και η ένδειξη θερμοκρασίας λαμβάνεται από το σωλήνα Bourdon. Η σχέση θερμοκρασίας-πίεσης-κινήσεων είναι σχεδόν γραμμική. Ας υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία αυξάνεται. Τα μόρια του αερίου κινούνται ταχύτερα και συγκρούονται με τα τοιχώματα πιο συχνά. Αυτό σημαίνει ότι η πίεση μέσα στο δοχείο αυξάνεται αφού τα τοιχώματα είναι ανένδοτα. **Όταν το σύστημα σχεδιάζεται για να γεμίζει με ένα υγρό και γεμίζει με ένα υγρό, η αλλαγή όγκου του υγρού ωθεί το σωλήνα πίεσης.**

Με απλά λόγια, η πίεση που δημιουργείται μεταφέρεται με τον τριχοειδή σωλήνα στο όργανο ένδειξης, που απαρτίζεται από αισθητήρα πίεσης τύπου σωλήνα Bourdon, ενδεικτική βελόνα και κλίμακα θερμοκρασιών.

Το σύστημα με αέριο χρησιμοποιεί τον νόμο των τέλειων αερίων, ο οποίος δηλώνει ότι ένα ιδανικό αέριο ενός δεδομένου βάρους με σταθερό όγκο παράγει μια απόλυτη πίεση ευθέως ανάλογα με την απόλυτη θερμοκρασία του αερίου υπό ιδανικές συνθήκες.

$$P * V = n * R * T \quad (26)$$

Όπου:

P: απόλυτη πίεση (atm).

V: συγκεκριμένος όγκος του αερίου (m^3).

n: Ο αριθμός των moles του αερίου μέσα σε όγκο V.

R: Παγκόσμια σταθερά των αερίων με τιμή $R = 8.317 \text{ J/mole} \cdot \text{K}$

T: απόλυτη θερμοκρασία ($^{\circ}\text{K}$)

Εάν ο όγκος του αερίου στο όργανο μέτρησης διατηρείται σταθερός, η αναλογία της πίεσης και της θερμοκρασίας αερίου θα είναι σταθερή, έτσι ώστε:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (27)$$

Οι μόνοι περιορισμοί στην παραπάνω εξίσωση είναι ότι η θερμοκρασία πρέπει να εκφραστεί σε βαθμούς Kelvin και η πίεση πρέπει να μετράται σε απόλυτες μονάδες.

2.4.6 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Τα θερμόμετρα με υγρό ή αέριο εμφανίζουν τα παρακάτω μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα:

Πλεονεκτήματα:

Τα θερμόμετρα αυτά μπορούν να μεταφέρουν την ένδειξη αρκετά μακρύτερα από το σημείο μέτρησης, μέσω του τριχοειδή σωλήνα. Ακόμη λόγω της σημαντικής δύναμης μπορεί να εξασκηθεί από τη δημιουργούμενη διαφορά πίεσης, τα θερμόμετρα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορους σερβομηχανισμούς π.χ. στην θερμοστατική βαλβίδα των συστημάτων ψύξης και κλιματισμού. Είναι πιο οικονομικά, ευπροσάρμοστα, χρησιμοποιούνται ευρέως, είναι τραχιά στην κατασκευή, με χαμηλή συντήρηση και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για μακρινές ενδείξεις. Τέλος είναι σταθερά στη λειτουργία τους.

Μειονεκτήματα:

Η ενδεχόμενη έκθεση του τριχοειδή σωλήνα σε διαφορετικές θερμοκρασίες κατά μήκος της διαδρομής του καθώς και η πλημμελής στερέωση του βολβού (δηλ. κακή θερμική επαφή) μειώνουν την ακρίβεια του οργάνου.

2.5 Θερμόμετρα διμεταλλικού στοιχείου (bimetallic strip)

Διμεταλλικά θερμόμετρα

2.5.1 Γενικά

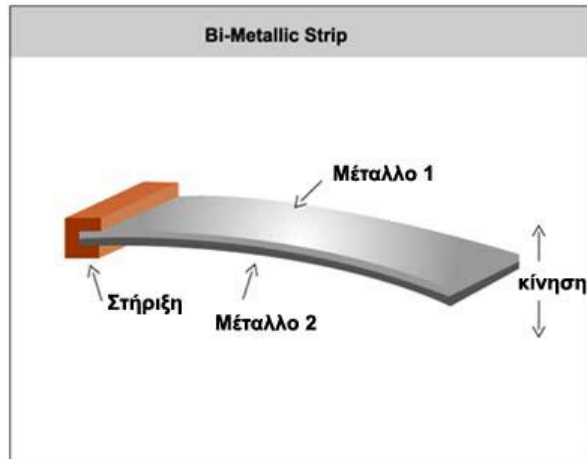
Το διμεταλλικό θερμόμετρο, αποτελείται από δύο μεταλλικά ελάσματα ίδιου μήκους, από διαφορετικά υλικά, στερεωμένα ακλόνητα το ένα με το άλλο με τη βοήθεια καρφώματος ή κάποιας μορφής συγκόλλησης - cladding.

Αν μεταβληθεί η θερμοκρασία τα δύο μέταλλα διαστέλλονται κατά διαφορετική ποσότητα και έτσι επέρχεται παραμόρφωση η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Η παραμόρφωση ενός διμεταλλικού στοιχείου με τη μεταβολή της θερμοκρασίας μπορεί να αξιοποιηθεί πλην της κατασκευής οργάνων μέτρησης, και για τη συνεχή καταγραφή της θερμοκρασίας με άμεση μηχανική διασυνδεσή του με γραφίδα, π.χ. σε καταγραφικά περιστρεφόμενου τυμπάνου αλλά και ως θερμικοί διακόπτες, αλλιώς θερμοστάτες.

Με πιο απλά λόγια τα διμεταλλικά στοιχεία χρησιμοποιούνται σαν θερμόμετρα αλλά και σαν απλοί διακόπτες διακοπής και αποκατάστασης αλλά και σαν υπερέντασης σε ηλεκτρικά φορτία.

2.5.2 Αργή λειτουργίας διμεταλλικών θερμομέτρων

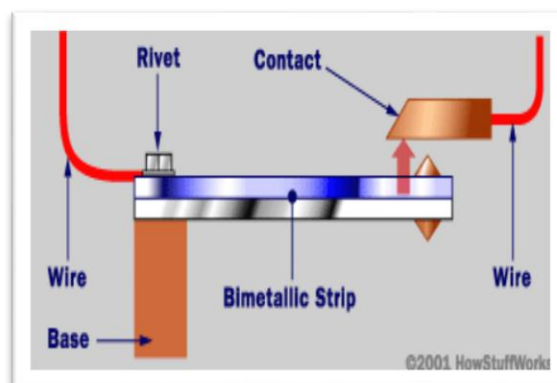
Το ένα άκρο του ελάσματος είναι στερεωμένο και ακίνητο, οπότε όταν υπάρχει αύξηση της θερμοκρασίας το ευθύγραμμο αρχικά έλασμα κάμπτεται και λαμβάνει καμπύλο σχήμα. Αυτό οφείλεται στο διαφορετικό συντελεστή διαστολής των δύο μετάλλων αφού είναι κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά. Το μέταλλο με το μεγαλύτερο συντελεστή διαστέλλεται περισσότερο ώστε να έχει μεγαλύτερο μήκος από το άλλο έλασμα. Η μετατόπιση του είναι ανάλογη της μεταβολής της θερμοκρασίας, του τετραγώνου του μήκους του, και αντιστρόφως ανάλογα προς το πάχος του.



Σχήμα 2.61: Διμεταλλικό έλασμα

Όπως αναφέραμε και παραπάνω όταν ένα διμεταλλικό έλασμα θερμαίνεται, κάμπτεται, καθώς το ένα από τα δύο μέταλλα που το αποτελούν διαστέλλεται περισσότερο.

Το διμεταλλικό έλασμα μπορεί να τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε τις στιγμές που θερμαίνεται, και επομένως κάμπτεται, ή τις στιγμές που ψύχεται, και επομένως ευθυγραμμίζεται, να ανοίγει ή να κλείνει αντίστοιχα τις επαφές ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Σ' αυτή την αρχή, καθώς και στην αρχή λειτουργίας του θερμομέτρου αερίου, στηρίζονται οι θερμοστάτες (thermostats), που ελέγχουν έτσι με απλό τρόπο το άνοιγμα- κλείσιμο της λειτουργίας πολλών συσκευών θέρμανσης ή ψύξης (ψυγεία, αερόθερμα κτλ).



Σχήμα 2.62: Απεικόνιση συνδεσμολογίας διμεταλλικού ελάσματος

Στο παραπάνω διάγραμμα (βλ. Σχ. 2.62), το μαύρο μέταλλο θα διασταλεί γρηγορότερα από το μπλε μέταλλο, εάν η συσκευή χρησιμοποιείται σε φούρνο. Στο ψυγείο, χρησιμοποιείται η αντίθετη εγκατάσταση, έτσι ώστε όταν η θερμοκρασία

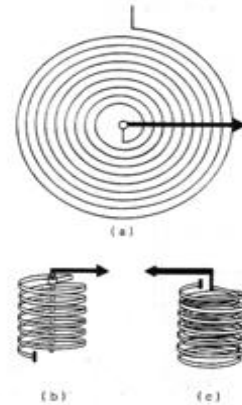
αυξάνεται το μπλε μέταλλο να διαστέλλεται γρηγορότερα από το μαύρο μέταλλο. Έτσι, και στις δύο περιπτώσεις, η ταινία θα λυγίζει προς τα πάνω κλείνοντας την επαφή κι έτσι το ρεύμα μπορεί να ρέει. Με την προσαρμογή του μεγέθους του χάσματος μεταξύ της ταινίας και της επαφής, αποκτάται ο έλεγχος της θερμοκρασίας. Στο ψυγείο, στο καλοριφέρ, στην ηλεκτρική κουζίνα, το διμεταλλικό έλασμα του θερμοστάτη, που έχουν οι συσκευές αυτές, διακόπτει ή αποκαθιστά το ηλεκτρικό ρεύμα που τις διαρρέει, όταν η θερμοκρασία αποκτήσει ορισμένη τιμή. Έτσι, όταν η θερμοκρασία στο ηλεκτρικό ψυγείο ανέβει λίγο πάνω από την προεπιλεγμένη τιμή (για παράδειγμα τους 4 °C), ο θερμοστάτης θέτει σε λειτουργία το μοτέρ και η θερμοκρασία ελαττώνεται. Όταν πέσει λίγο κάτω από τους 4 °C, ο θερμοστάτης διακόπτει τη λειτουργία του μοτέρ κ.ο.κ..

Λόγω των διαφορετικών συντελεστών θερμικής διαστολής των δύο μετάλλων το θερμαινόμενο διμεταλλικό στοιχείο κάμπτεται, με μέγεθος και φορά της κάμψης ανάλογα με τη θερμοκρασία. Για τη γεωμετρική μάλιστα ενίσχυση της κάμψης το διμεταλλικό κατασκευάζεται σε μορφή έλικας (Σχ. 2.63).

2.5.3 Είδη Διμεταλλικών θερμομέτρων

Τα διμεταλλικά θερμομέτρα μπορεί να είναι:

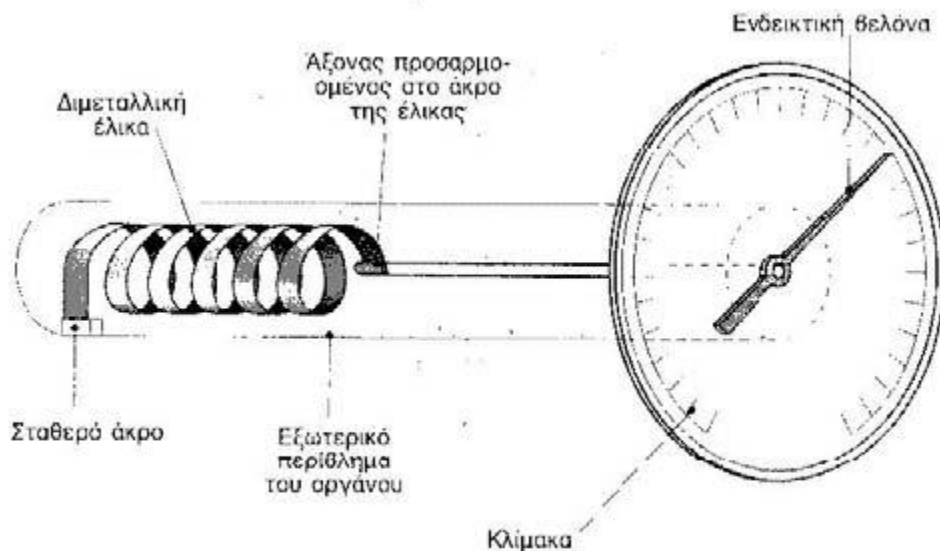
- επίπεδης σπείρας,
- απλής έλικας,
- πολλαπλής έλικας.



Πολλές φορές τυλίγουμε τα διμεταλλικά ελάσματα σε σπειροειδή μορφή. Το μεγάλο μήκος παρέχει έτσι επαρκή κίνηση του δείκτη.



Το διμεταλλικό θερμομέτρο αποτελείται από διμεταλλικό σπειροειδές ελατήριο ορείχαλκου - ίνβαρ, στη μία άκρη του οποίου έχει στερεωθεί ένας δείκτης. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, το ελατήριο συσπειρώνεται και ο δείκτης κινείται στη βαθμολογημένη κλίμακα.



Σχήμα 2.63: Κατασκευαστική μορφή θερμομέτρου έλικας διμεταλλικού στοιχείου (bimetallic helix)

2.5.4 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα:

- Συμπαγές, ευέλικτης σχεδίασης, σχετικά φθινό.
- Το ωφέλιμο θερμοκρασιακό εύρος είναι από 1°C έως 600°C με γενικά καλή ακρίβεια.
- Δεν απαιτείται ηλεκτρική τροφοδοσία

Μειονεκτήματα:

- το διμεταλλικό έλασμα εμφανίζει γήρανση, οπότε χάνεται η αρχική ακρίβεια
- υπάρχει ανάγκη επαναβαθμονόμησης με το πέρασμα του χρόνου
- δεν προσφέρεται για χρήση από απόσταση.
- αποκρίνεται αργά στις μεταβολές της θερμοκρασίας.

2.5.5 Παραδείγματα διμεταλλικών θερμομέτρων

Κάποια παραδείγματα διμεταλλικών θερμομέτρων τα οποία μπορούμε να συναντήσουμε στο εμπόριο είναι τα ακόλουθα:

Απλό θερμομέτρο μαγειρικής

CTO6148



Χαρακτηριστικά:

Είδος: Διμεταλλικό θερμομέτρο

Υλικό κατασκευής: Ανοξείδωτος χάλυβας

Υλικό δείκτη: Πλαστικό

Χρώμα εδεικτικής βελόνας: Ερυθρό

Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας: 1°C έως 88°C

Μήκος άξονα: 15cm

Χρήσεις: Μέτρηση θερμοκρασίας τροφίμων

Θερμόμετρο εξωτερικού χώρου

CTO6154



Χαρακτηριστικά:

Είδος: Διμεταλλικό θερμόμετρο

Μήκος άξονα: 10cm

Υλικό δείκτη: Πλαστικό

Χρώμα εδεικτικής βελόνας: Μαύρο

Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας: -40°C έως 50°C

Υλικό κατασκευής: Ορείχαλκος

Χρήσεις: Μέτρηση θερμοκρασίας εξωτερικών χώρων.

Θερμόμετρο φούρνου

CTO6153



Χαρακτηριστικά:

Είδος: Διμεταλλικό θερμόμετρο

Μήκος άξονα: 8cm

Υλικό δείκτη: Χάλυβας

Χρώμα εδεικτικής βελόνας: Μαύρο

Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας: 65°C έως 315°C

Υλικό κατασκευής: Ανοξείδωτος χάλυβας

Χρήσεις: Μέτρηση θερμοκρασίας φούρνων

ΘΕΡΜΟΣΤΑΤΗΣ ELCO Γενικής χρήσης



Χαρακτηριστικά:

Είδος: Θερμοστάτης κουζίνας γενικής χρήσης

Αριθμός επαφών: 2

Εύρος θερμοκρασίας: 50°C έως 200°C

Βάρος: 200gr

Διαστάσεις: 6cm x 8cm x 26cm

ΘΕΡΜΟΣΤΑΤΗΣ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΑ ΜΕ 4 ΕΠΑΦΕΣ Γενικής χρήσης



Χαρακτηριστικά:

Είδος: Θερμοστάτης θερμοσίφωνα γενικής χρήσης

Αριθμός επαφών: 4

Εύρος θερμοκρασίας: 40°C έως 80°C

Διαστάσεις: 4.5cm x 5cm x 18cm

ΘΕΡΜΟΣΤΑΤΗΣ ΑΣΠΡΟΣ (ΜΑΚΡΥΣ ΑΞΟΝΑΣ 70°C)



ΘΕ-04-090

Διαστάσεις: 5cm x 10cm x 10cm

Βάρος: 100gr

2.6 Αισθητήρες θερμοκρασίας τύπου ημιαγωγού

(*p-n junction temperature sensor*)

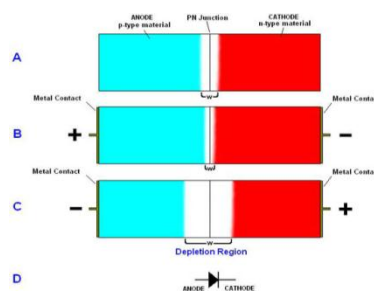
2.6.1 Γενικά

Τα χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα θερμοκρασίας τύπου ημιαγωγού είναι η γραμμικότητα του σήματος εξόδου, το μικρό του μέγεθος, η περιορισμένη περιοχή λειτουργίας ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $120\text{ }^{\circ}\text{C}$), το χαμηλό του κόστος καθώς και η ικανοποιητική ακρίβεια, εφόσον έχουν βαθμονομηθεί σωστά. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι αισθητήρες αυτού του τύπου έχουν κακό θερμικό σχεδιασμό με αποτέλεσμα ο αισθητήρας να μην έρχεται σε καλή θερμική επαφή με την εξωτερική επιφάνεια του, άρα και με το σύστημα του οποίου ζητείται να μετρηθεί η θερμοκρασία. Έχοντας υπ' όψη όλους αυτούς τους περιορισμούς μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους αισθητήρες αποτελεσματικά σε πολλές εφαρμογές.

Ο αισθητήρας θερμοκρασίας τύπου ημιαγωγού βασίζεται στη χρήση δύο επαφών τύπου p-n που, όπως είναι γνωστό, εμφανίζουν καλή γραμμικότητα του σήματος εξόδου.

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν με την τεχνολογία επεξεργασίας ημιαγωγών κάνοντας χρήση της εξάρτησης των χαρακτηριστικών του ημιαγωγού επαφής τύπου p-n από τη θερμοκρασία. Η διαδικασία κατασκευής των αισθητήρων αυτών σχετίζεται με την τεχνολογία των ημιαγωγών, η οποία μπορεί να προσφέρει χαμηλό κόστος καθώς και σταθερή μέτρηση της θερμοκρασίας, πράγμα που μπορεί να προσφέρει ποιότητα στους συγκεκριμένους αισθητήρες.

Μία επαφή τύπου p-n σχηματίζεται από τη συνένωση ημιαγωγών τύπου-p και τύπου-n σε πολύ στενή επαφή.



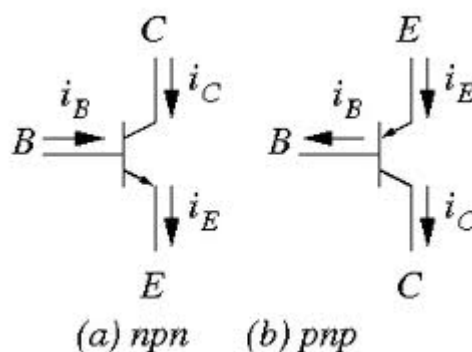
Σχήμα 2.64: Επαφή τύπου p-n

Ο όρος «junction» αναφέρεται στα όρια (σύνορα) της διεπαφής, όπου συναντώνται οι περιοχές των δύο ημιαγωγών.

Οι επαφές τύπου p-n είναι στοιχειώδη δομικά στοιχεία για όλες σχεδόν τις ηλεκτρονικές συσκευές ημιαγωγών, όπως:

- δίοδοι,
- αντιστάσεις,
- κρυσταλλολυχνίες,
- ηλιακά κύτταρα,
- τα LED και ολοκληρωμένα κυκλώματα.

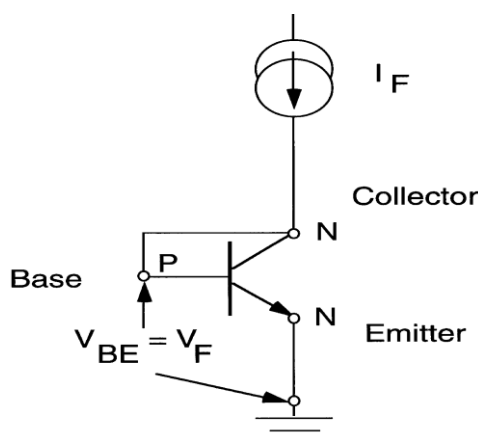
Είναι τα ενεργά κέντρα όπου λαμβάνει χώρα η ηλεκτρονική δράση της συσκευής. Για παράδειγμα, ένα τρανζίστορ κοινού τύπου, ή μία διπολική διασταύρωση τρανζίστορ, αποτελείται από δύο κόμβους p-n σε σειρά, σε μορφή **n-p-n** ή **p-n-p**.



Σχήμα 2.65a: τρανζίστορ τύπου npn και pnp αντίστοιχα.

Οι **νέου τύπου** αισθητήρες θερμοκρασίας κόμβου (συνένωσης) διόδων p-n, είναι ολοκληρωμένοι αισθητήρες θερμοκρασίας οι οποίοι κατασκευάζονται επάνω σε ημιαγωγούς όπως όλα τα σύγχρονα ηλεκτρονικά στοιχεία, π.χ. οι μικροεπεξεργαστές. Μπορούν να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασίας περίπου $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Για θερμοκρασίες $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ με τη ρύθμιση της μπροστινής τάσης δυναμικού, για $150\text{-}500\text{ }^{\circ}\text{C}$ με την αντίστροφη τάση δυναμικού περίπου 1V με πολύ μεγάλη ευαισθησία και ακρίβεια όπως μια θερμική αντίσταση NTC.

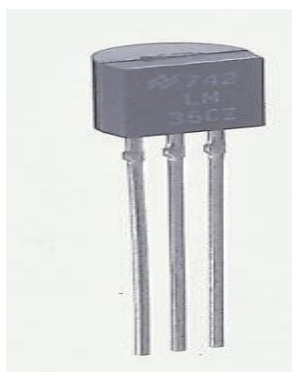
Οι περισσότεροι αισθητήρες θερμοκρασίας τύπου ημιαγωγού χρησιμοποιούν μια δίοδο συνδεδεμένη σε διπολικό τρανζίστορ. Ένα σταθερό ρεύμα διέρχεται μεταξύ της βάσης και του εκπομπού και παράγει μια τάση μεταξύ της βάσης και του εκπομπού (V_{BE}) που είναι μια γραμμική συνάρτηση της απόλυτης θερμοκρασίας (Σχήμα 2.65b). Η συνολική πτώση τάσης προς τα εμπρός έχει συντελεστή θερμοκρασίας περίπου $2^{\circ}\text{C mV}^{-1}$.



Σχήμα 2.65b: Διπολικό τρανζίστορ ως αισθητήρας θερμοκρασίας

2.6.2 Αισθητήρες τύπου ημιαγωγού. Θερμοдиодοι και θερμοτρανζίστορ σε ολοκληρωμένα κυκλώματα

Οι νέου τύπου αισθητήρες, στους οποίους βρίσκουμε τις **θερμοδιόδους** και τα **θερμοτρανζίστορ** τα οποία αποτελούν αμφότερα σύγχρονες σχεδιάσεις θερμομέτρων μικρού κόστους και ελάχιστου όγκου που ενσωματώνονται εύκολα σε ολοκληρωμένα κυκλώματα. Ειδικότερα, πρόκειται κατά κανόνα για μικροαισθητήρες πολυπυριτικού υλικού, όπου η θερμοδιόδος ή εναλλακτικά το θερμοτρανζίστορ έχουν ενσωματωθεί σε μονολιθικό ολοκληρωμένο κύκλωμα, παρέχοντας ταυτόχρονα αυξημένες δυνατότητες ρυθμίσεων και προγραμματισμού. Κύριο πλεονέκτημα αμφότερων των θερμοηλεκτρικών αυτών θερμομέτρων είναι το μικρό κόστος, ενώ βασικό μειονέκτημα το μικρό εύρος μέτρησης, τυπικά -55 έως 150°C .



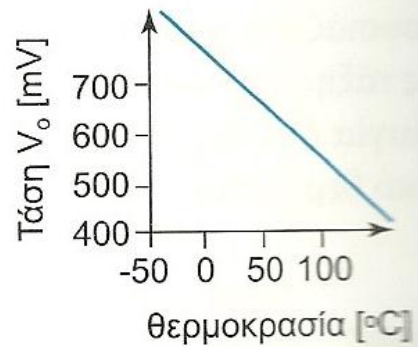
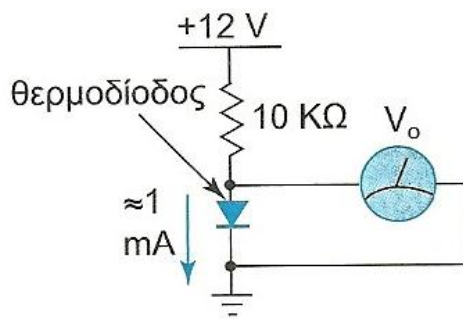
Σχήμα 2.66: Απεικόνιση θερμοτρανζίστορ

2.6.3 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων τύπου ημιαγωγού

Η αρχή λειτουργίας των αισθητήρων αυτών βασίζεται στη σχέση θερμοκρασίας και ρεύματος του τρανζίστορ. Αν δύο τρανζίστορ λειτουργούν υπό διαφορετικό αλλά σταθερό ρεύμα συλλέκτη, τότε η διαφορά δυναμικού μεταξύ βάσης και εκπομπού είναι ανάλογη της απόλυτης θερμοκρασίας του τρανζίστορ εφόσον η βάση βραχυκυκλωθεί με το συλλέκτη.

Έστω ότι η θερμοκρασία αυξάνει και προκαλείται μία αύξηση στο β_{dc} ($\beta_{dc}=I_c/I_b$). Αυτό στη συνέχεια προκαλεί αύξηση στο ρεύμα συλλέκτη. Μόλις το ρεύμα συλλέκτη αυξηθεί, η τάση συλλέκτη – εκπομπού ελαττώνεται, επειδή εμφανίζεται πρόσθετη πτώση τάσης στην αντίσταση του συλλέκτη. Αυτή η τάση μετράται απευθείας ή μετατρέπεται σε ρεύμα. Η πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης βάσης γίνεται μικρότερη και το ρεύμα βάσης μειώνεται. Καθώς το ρεύμα βάσης γίνεται μικρότερο, το ρεύμα συλλέκτη ελαττώνεται, αντισταθμίζοντας μερικά την αρχική του αύξηση.

Στις θερμοδιόδους με σταθερό ρεύμα πόλωσης η πτώση τάσης U μέσω ενός ημιαγωγού τύπου p-n είναι της τάξης των $2mV/^{\circ}C$ (Σχ. 2.67) .

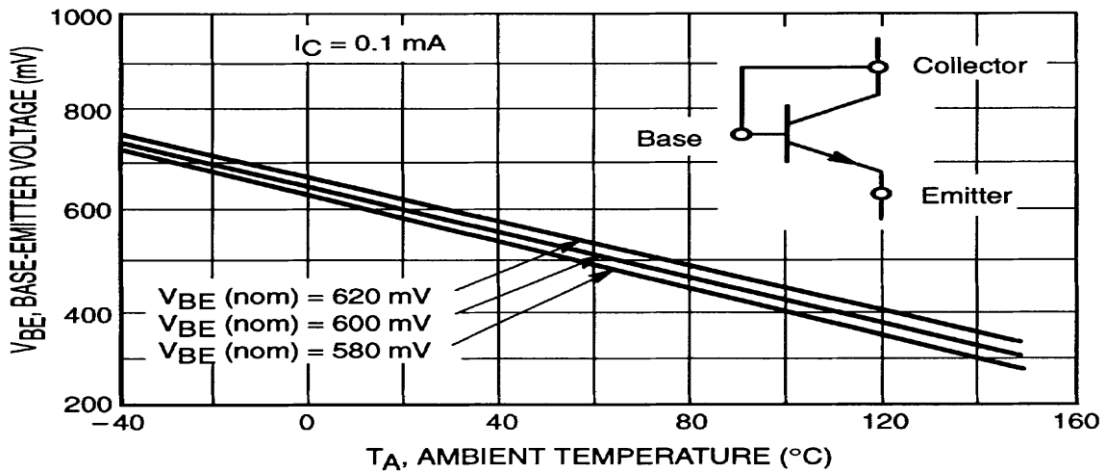


Σχήμα 2.67: Εξάρτηση του σήματος εξόδου από τη θερμοκρασία μίας θερμοδιόδου

Η μεταβολή της τάσης σε μία δίοδο ως προς τη θερμοκρασία είναι περίπου $-2,3\text{mV}/^\circ\text{C}$ για ενώσεις πυριτίου και $-2,1\text{mV}/^\circ\text{C}$ για ενώσεις γερμανίου.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία T . Το σήμα εξόδου είναι σχετικά μικρό, της τάξεως των 600mV ., απαιτώντας μάλιστα ατομική βαθμονόμηση για τη επίτευξη ικανοποιητικής ακρίβειας λόγω της διαφοροποίησης της ευαισθησίας ακόμη και σε θερμοδιόδους της ίδιας παρτίδας παραγωγής. Λέγοντας ατομική βαθμονόμηση εννοούμε τη διαδικασία που πραγματοποιείται από κατάλληλα αναλογικά ή ψηφιακά κυκλώματα, που έχουν κατασκευαστεί στο ολοκληρωμένο κύκλωμα του αισθητήρα.

Όμοια με τη θερμοδίοδο, όπως αναφέραμε και στην αρχή της παραγράφου αυτής, σε θερμοτρανζίστορ η εμφανιζόμενη τάση μεταξύ της βάσης και εκπομπού V_{BE} εξαρτάται γραμμικά από την απόλυτη θερμοκρασία εφόσον η βάση βραχυκυκλωθεί με το συλλέκτη.



Σχήμα 2.68: Εξάρτηση του σήματος εξόδου από τη θερμοκρασία ενός θερμοτρανζίστορ για τρεις διαφορετικές τιμές της τάσης βάσης – εκπομπού V_{BE} .

Ο αισθητήρας θερμοτρανζίστορ μετά την προ-επεξεργασία του σήματος παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία από τη θερμοδίοδο, της τάξης των 10 mV/ $^{\circ}C$.

Συμπερασματικά, αυξανόμενης της θερμοκρασίας η τάση μειώνεται για σταθερό ρεύμα. Αυτή η θερμοκρασιακή εξάρτηση της τάσης μιας ένωσης σε δίοδο ή σε τρανζίστορ (ένωσης βάσης – εκπομπού) χρησιμοποιείται για την κατασκευή μετατροπέων θερμότητας.

Τέλος υπάρχουν ολοκληρωμένα κυκλώματα τα οποία είναι έτσι κατασκευασμένα ώστε να συμπεριφέρονται σαν πηγές ρεύματος, των οποίων η ένταση εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Αυτά τα κυκλώματα χρησιμοποιούνται σαν μετατροπείς θερμοκρασίας οι οποίοι είναι γραμμικοί και πολύ εύκολοι στη χρήση.

2.6.4 Χαρακτηριστικά αισθητήρων τύπου ημιαγωγού

Τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων θερμοκρασίας τύπου ημιαγωγού είναι τα ακόλουθα:

- Οι αισθητήρες θερμοκρασίας τύπου ημιαγωγού έχουν θετικό συντελεστή θερμοκρασίας συνήθως 0,8% της πλήρους κλίμακας ανά $^{\circ}C$.
- Η γραμμικότητά τους είναι καλή. Το σφάλμα της γραμμικότητας είναι περίπου 0,5% της πλήρους κλίμακας.

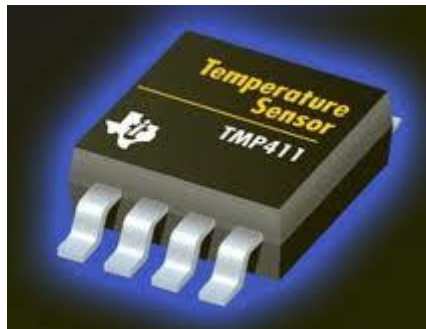
- Οι τιμές των ημιαγωγικών αντιστάσεων σε κανονική θερμοκρασία (25 °C) ποικίλει από δεκάδες Ohm σε δεκάδες ΚΩ.
- Οι ημιαγωγικές αντιστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε γέφυρα όπως οι θερμοαντιστάτες και τα RTD.

2.6.5 Παραδείγματα αισθητήρων τύπου ημιαγωγού

Κάποια παραδείγματα αισθητήρων τύπου ημιαγωγού τα οποία μπορούμε να συναντήσουμε στο εμπόριο είναι τα ακόλουθα:

Θερμοδίodos

TMP411



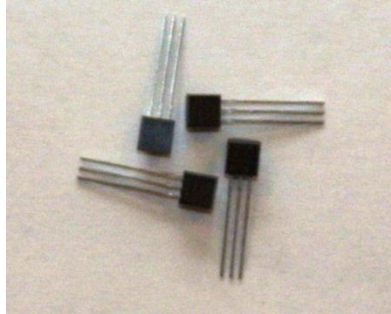
Τεχνικά χαρακτηριστικά:

Εύρος μέτρησης: -55°C έως +125°C

1°C ακρίβεια από -10°C έως +85 °C

Θερμοτρανζίστορ

DS18S20



Τεχνικά χαρακτηριστικά:

Εύρος μέτρησης: -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$

0.5°C ακρίβεια από -10°C έως $+85^{\circ}\text{C}$

3. Αισθητήρες θερμοκρασίας για μετρήσεις από απόσταση

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, επαφής και μη επαφής όπως αναφέραμε και στην αρχή αυτής της πτυχιακής εργασίας. Στους αισθητήρες επαφής πρέπει το αντικείμενο να βρίσκεται απαραίτητα σε επαφή με τον αισθητήρα έτσι ώστε να ανιχνευτεί η θερμοκρασία.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τους αισθητήρες μη επαφής, όπου απαιτείται μόνο οπτική επαφή.

ΠΥΡΟΜΕΤΡΑ (pyrometers)

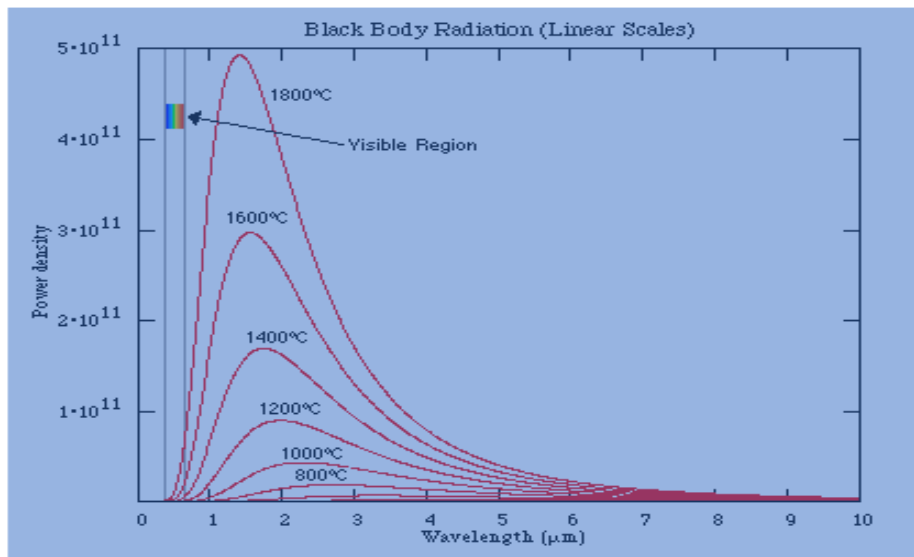
Τα πυρόμετρα είναι θερμοόμετρα που βασίζονται στην απορρόφηση της θερμικής ακτινοβολίας και βρίσκουν χρήση κυρίως στην τηλεμέτρηση μεγάλων θερμοκρασιών, σε περιπτώσεις μάλιστα καταστροφικά υψηλών θερμοκρασιών αποτελούν ίσως τη μόνη επιλογή. Για όλους τους τύπους πυρομέτρων, η τηλεμέτρηση της θερμοκρασίας ενός σώματος βασίζεται στην αξιοποίηση όλου ή μέρους του φάσματος των μήκων κύματος που εκπέμπονται ως θερμική ακτινοβολία από την επιφάνεια του. Η ακτινοβολία αυτή, συγκεντρώνεται με σύστημα φακών στο στοιχείο ανίχνευσης που είναι τοποθετημένο στην εστία του οπτικού συστήματος του πυρομέτρου. Η διάταξη δεν απαιτεί φυσική επαφή με τη μετρούμενη επιφάνεια, ούτε επηρεάζεται από την απόσταση οργάνου - επιφάνειας (μέσα σε προκαθορισμένα βέβαια όρια). Τα παραπάνω καθιστούν πλεονεκτικά τα πυρόμετρα για τη μέτρηση υψηλών θερμοκρασιών από απόσταση ασφαλείας, π.χ. τηλεμέτρηση της θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας μιας πολλαπλής εξαγωγής καυσαερίων μίας μηχανής εσωτερικής καύσης. Συνεπώς, η χρήση πυρομέτρων προσφέρεται μόνο για ορατές επιφάνειες και όχι για μέτρηση θερμοκρασιών σε εσωτερικά σημεία.

Αναφορικά με τη λειτουργία τους, είναι γνωστό ότι μεταξύ δύο σωμάτων διαφορετικών θερμοκρασιών T_1 και T_2 ανταλλάσσεται θερμότητα q με αμοιβαία

εκπομπή – απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$q = \frac{Q}{A} = \sigma \epsilon_1 C_{1-2} (T_1^4 - T_2^4) \quad (28)$$

Όπου σ η σταθερά των Stefan-Boltzman, ϵ_1 ο συντελεστής εκπομπής του σώματος 1 και C_{1-2} ο συντελεστής θέασης από το σώμα 1 προς το σώμα 2. Για μελανά σώματα (δηλ. απόλυτα μαύρα) ο συντελεστής απορρόφησης α και ο συντελεστής εκπομπής ϵ είναι μονάδα, δηλαδή $\alpha = \epsilon = 1$, ενώ τα πραγματικά σώματα εναλλάσσουν θερμική ακτινοβολία με τιμές των α και ϵ μεταξύ 0 και 1. Ενδεικτικά, η πλειονότητα των μη μεταλλικών σωμάτων έχει συντελεστή εκπομπής περίπου $\epsilon = 0.9$, ενώ οι λείες μη οξειδωμένες μεταλλικές επιφάνειες εμφανίζουν $\epsilon = 0.1$ περίπου. Η παραπάνω ενέργεια εκπέμπεται σε ένα ευρύ φάσμα μήκων κύματος, που εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα για διάφορες θερμοκρασίες από το συνολικό εμβαδόν που διαγράφεται κάτω από αντίστοιχη καμπύλη εκπομπής. Φαίνεται δηλαδή ότι οποιοδήποτε επίγειο σώμα εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων, παρομοιαζόμενο με ασυντόνιστο υψίσυχο ραδιοφωνικό πομπό. Το μέγιστο της εκπεμπόμενης ενέργειας για μία θερμοκρασία T παρατηρείται για μήκος κύματος λ_0 ,



Σχήμα 3.1: Φασματική κατανομή της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας για μέλαν σώμα ($\epsilon=1$) σε θερμοκρασίες από 800°C έως 1800°C

υπακούοντας στη σχέση:

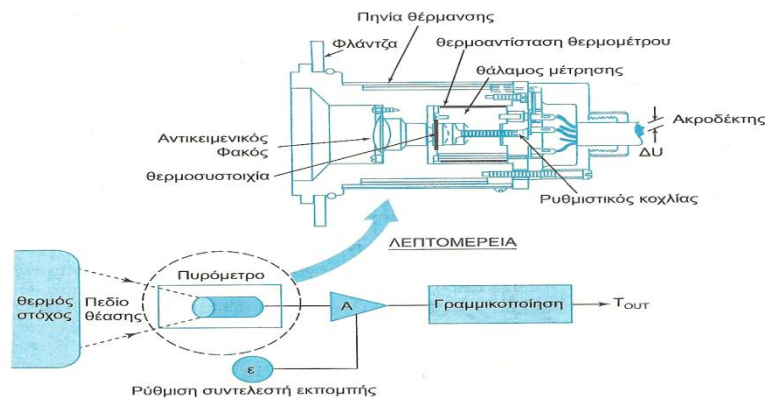
$$\lambda_0 T = 2898 \mu m K \quad (29)$$

Η αξιοποίηση της παραπάνω ακτινοβολίας στην εστία του οργάνου για τη μέτρηση θερμοκρασιών μπορεί να γίνει εναλλακτικά με δύο, παρακάτω εξεταζόμενους, τρόπους:

- * 1^{ος} τρόπος: με τη μετατροπή της σε θερμότητα και ακόλουθη μέτρηση της θερμοκρασίας του απορροφητή (πυρόμετρα απορρόφησης)
- * 2^{ος} τρόπος: με άμεση οπτική σύγκριση (οπτικά πυρόμετρα).

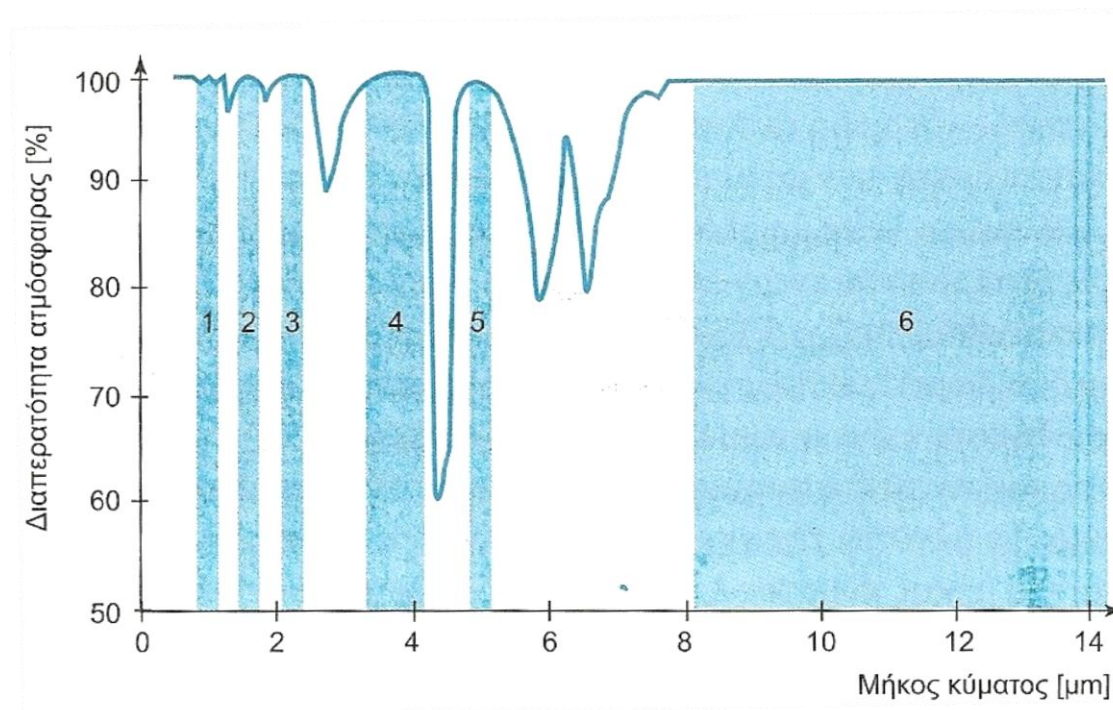
3.1 Πυρόμετρα απορρόφησης

Όταν η θερμική ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα μέλαν σώμα τότε απορροφάται πλήρως και μετατρέπεται σε θερμότητα, θερμαίνοντας την επιφάνειά του. Σε πυρόμετρα απορρόφησης αυτό αξιοποιείται για την τηλεμέτρηση της θερμοκρασίας μίας επιφάνειας, έχοντας τοποθετημένο ένα στοιχείο απορρόφησης μαύρου χρώματος στην εστία του οπτικού συστήματος όπως στο παρακάτω σχήμα .



Σχήμα 3.2: Σχηματική διαδικασία θερμομέτρησης με πυρόμετρο ολικής ακτινοβολίας: ως λεπτομέρεια διακρίνεται ο αντικειμενικός φακός (lens) και η θερμοσυστοιχία στο εστιακό επίπεδό του.

Διακρίνονται οι τύποι πυρομέτρων απορρόφησης ολικής ακτινοβολίας και υπέρυθρης ακτινοβολίας. Ειδικότερα, ανάλογα με το εύρος της απορροφόμενης ακτινοβολίας διακρίνονται τα πυρόμετρα ευρείας (*wideband*) ζώνης περίπου 0.7-20 μm και στενής (*narrowband*) επιλεκτικά ρυθμιζόμενης ζώνης. Σημειώνεται ότι η επιλογή των διαφόρων στενών ζωνών μέτρησης επηρεάζεται πρακτικά από το <<παράθυρο ακτινοβολίας>> της ατμόσφαιρας, δηλ. επιλέγονται ζώνες μέτρησης όπου απουσιάζει ή ελαχιστοποιείται η ατμοσφαιρική απορρόφηση.



Σχήμα 3.5:

Επιλογή στενών ζωνών λειτουργίας σε πυρόμετρα απορρόφησης, σε τμήματα της θερμικής ακτινοβολίας όπου απουσιάζει η ατμοσφαιρική απορρόφηση, με χρήση των ακόλουθων κατά περίπτωση φασματικά επιλεκτικών υλικών απορροφητή: 1.φωτοδίοδος Si, 2.φωτοδίοδος Ge, 3.φωτοδίοδος PbS, 4.φωτοδίοδος PbSe ή 5.μπολόμετρο.

3.1.1 Αρχή λειτουργίας πυρομέτρων

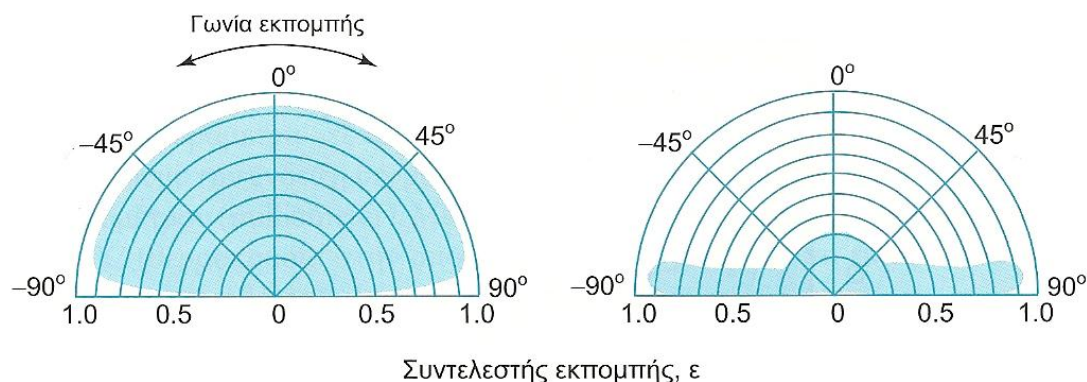
Η αρχή λειτουργίας των πυρομέτρων απορρόφησης είναι ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του απορροφητή του οργάνου συγκριτικά με εκείνη του περιβάλλοντος αποτελεί μέτρο της έντασης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από το εξεταζόμενο σώμα, άρα και της θερμοκρασίας της επιφάνειάς του. Η μέτρηση της θερμοκρασίας του απορροφητή του οργάνου γίνεται με διάφορες συστοιχίες μαύρου χρώματος, ήτοι αναλυτικότερα:

- a. Με συστοιχία θερμοαντιστατικών αισθητήρων, όπως αντιστάσεις, θερμίστορ, θερμοδίοδοι. Στην περίπτωση αυτή το πυρόμετρο αποκαλείται επίσης μολόμετρο. Τα μολόμετρα βρίσκουν εξειδικευμένες χρήσεις στη πυρηνική φυσική για την ανίχνευση σωματιδίων (*particle detection*) και σε αστρονομικές παρατηρήσεις.
- b. Με θερμοηλεκτρικούς αισθητήρες, δηλαδή εναλλακτικά με θερμοσυστοιχία θερμοζευγών ή με πυροηλεκτρική θερμοσυστοιχία (πυροηλεκτρικά πυρόμετρα).

Τα **πυροηλεκτρικά πυρόμετρα** μοιάζουν κατασκευαστικά με τα πυρόμετρα απορρόφησης, η διαφορά τους έγκειται στο ότι ο απορροφητής στην εστία συγκέντρωσης της θερμικής ακτινοβολίας είναι συστοιχία πυροηλεκτρικών αισθητήρων, που μετατρέπει μέρος της απορροφόμενης ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό. Η εμφανιζόμενη πυροηλεκτρική τάση είναι ανάλογη με την επιτυγχάνόμενη θερμοκρασία του απορροφητή, έτσι με κατάλληλη ρύθμιση του οργάνου επιτυγχάνεται τηλεμέτρηση θερμοκρασιών. Τα πυροηλεκτρικά πυρόμετρα διαθέτουν μεγαλύτερη ευαισθησία από τα πυρόμετρα άλλων κατηγοριών, άρα η χρήση τους είναι δυνατή και για μέτρηση χαμηλότερων θερμοκρασιών.

Τα πυρόμετρα είναι συνήθως ρυθμισμένα για την μέτρηση της επιφανειακής θερμοκρασίας ενός μέλανος σώματος. Συνεπώς, πριν τη χρήση σε μία πραγματική επιφάνεια, που διαθέτει γενικά συντελεστή εκπομπής $\epsilon < 1$, πρέπει να προηγηθεί ρύθμιση του οργάνου για τη συγκεκριμένη επιφάνεια, ο συντελεστής εκπομπής της οποίας μπορεί να είναι γνωστός ή άγνωστος. Γενικότερα ο συντελεστής επιφάνειας

εξαρτάται από το υλικό, το χρώμα, την οξείδωση και την επιφανειακή εν γένει κατεργασία, ενώ συχνά εμφανίζει σημαντική εξάρτηση από το μήκος κύματος και από τη γωνία εκπομπής.



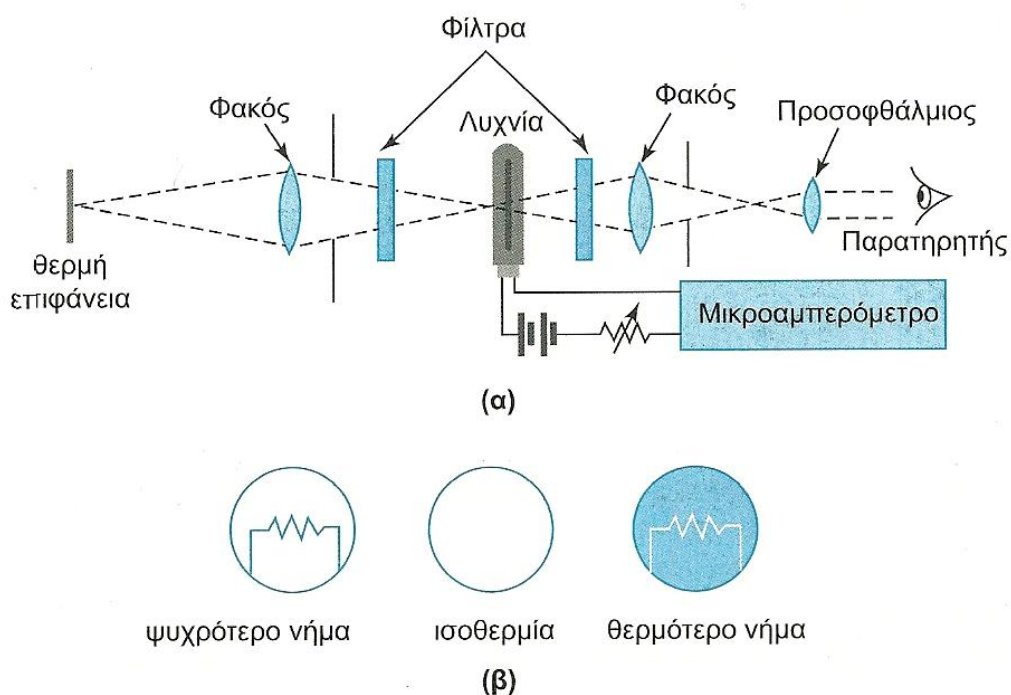
Σχήμα 3.3: Γωνιακή εξάρτηση του συντελεστή εκπομπής για μη μεταλλική και για γυαλισμένη μεταλλική επιφάνεια.

Για ακριβείς μετρήσεις επιβάλλεται μία αρχική μέτρηση της θερμοκρασίας με άλλο όργανο ικανοποιητικής ακρίβειας και η ακόλουθη ρύθμιση του πυρομέτρου, π.χ. με την εισαγωγή της σωστής τιμής του συντελεστή εκπομπής ϵ . Η παραπάνω διαδικασία πρέπει να επαναλαμβάνεται για κάθε νέα επιφάνεια με διαφορετικό συντελεστή εκπομπής, στοιχείο που αποτελεί μειονέκτημα στη χρήση των πυρομέτρων απορρόφησης.

3.2 Οπτικά πυρόμετρα

Τα οπτικά πυρόμετρα (Σχ. 3.4) βασίζονται στη χρωματική σύγκριση της ορατής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ενσωματωμένη λυχνία πυράκτωσης με την εκπεμπόμενη από τη μετρούμενη θερμή επιφάνεια, προϋποθέτοντας ότι η τελευταία έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη από τα 1000 K. Τα οπτικά πυρόμετρα στενής ζώνης διαθέτουν πίσω από τον αντικειμενικό φακό (*objective lens*) κατάλληλο φίλτρο στενής διέλευσης, που επιτρέπει τη δίοδο ακτινοβολίας μόνο στην περιοχή των 0.6 μm – η ορατή ακτινοβολία περιέχεται στη ζώνη 0.38-0.78 μm , Η μέτρηση είναι συγκριτική και υποκειμενική, βασιζόμενη στη χρήση μιας θερμοκρασίας αναφοράς που παρέχεται από ηλεκτρική λυχνία πυράκτωσης ρυθμιζόμενης φωτεινότητας, πάνω στην οποία σχηματίζεται ταυτόχρονα το οπτικό είδωλο της θερμικής ακτινοβολίας

που εκπέμπεται από τη μετρούμενη επιφάνεια. Με ρύθμιση του ροοστάτη αυξομειώνεται η φωτεινότητα του διάπυρου νήματος μέχρις ότου επιτευχθεί ισοθερμία για εξάλειψη του ειδώλου μέσω του προσοφθάλμιου φακού (*eyepiece*), γι' αυτό τα οπτικά πυρόμετρα ονομάζονται και πυρόμετρα <<εξαφανιζόμενου νήματος>> .

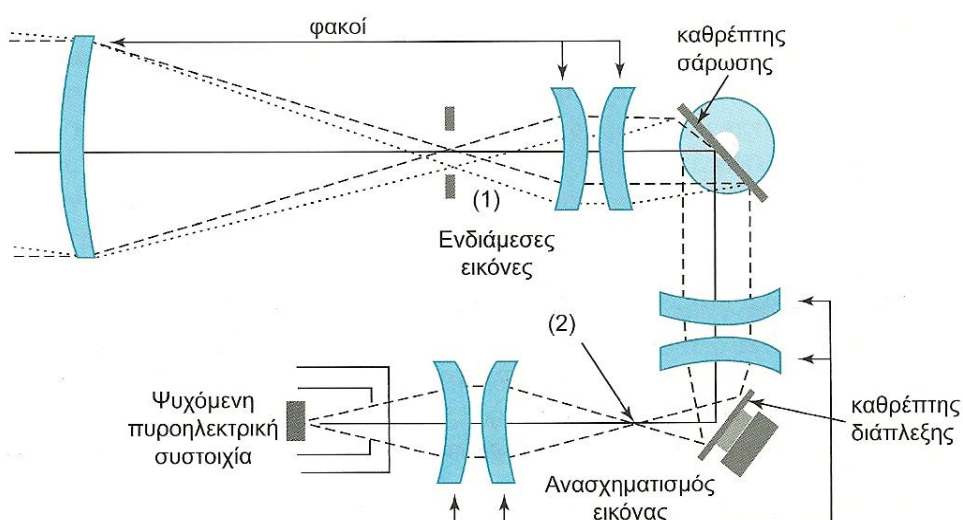


Σχήμα 3.4: Οπτικό πυρόμετρο: α) σχηματική διάταξη μερών, β) οπτική σύγκριση θερμοκρασιών νήματος και μετρούμενης επιφάνειας

Στη θέση αυτή διαβάζουμε την ένδειξη θερμοκρασίας στη βαθμονομημένη κλίμακα του μικροαμπερομέτρου (*milliammeter*). Με οπτικά πυρόμετρα μετρούνται θερμοκρασίες από 775°C (θερμοκρασία στην οποία ένα σώμα έχει αρχίζει να εκπέμπει και ορατή θερμική ακτινοβολία) μέχρι περίπου 4200 °C.

3.2.1 Κάμερες υπέρυθρης ακτινοβολίας (*infra-red temperature sensors*)

Οι αισθητήρες υπέρυθρου (*infra-red pyrometers*) αποτελούν μια προηγμένη μορφή πυρομέτρου απορρόφησης. Παρέχουν δισδιάστατες απεικονίσεις της θερμοκρασιακής κατανομής στο πεδίο θέασης του αντικειμενικού φακού. Η κατασκευή των αισθητήρων αυτών είναι βελτιστοποιημένη όχι μόνο για μέτρηση θερμοκρασιών αλλά και για **θερμική απεικόνιση** (*thermal imaging*), αξιοποιώντας τη σύλληψη και καταγραφή της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από όλα πρακτικά τα επίγεια και τα ουράνια σώματα. Διαθέτουν οπτικό σύστημα συγκέντρωσης της ακτινοβολίας ανάλογο με τις συμβατικές αναλογικές και ψηφιακές φωτογραφικές κάμερες, στο εστιακό επίπεδο του οποίου τοποθετείται μία συστοιχία (*array*) φωτοευαίσθητων πυροηλεκτρικών αισθητήρων.



Σχήμα 3.5: Απλοποιημένη παράσταση του οπτικού συστήματος υπέρυθρης κάμερας εφοδιασμένης με ενεργητικά ψυχομένη συστοιχία

Το ηλεκτρικό φορτίο στα άκρα κάθε πυροηλεκτρικού κρύσταλλου της συστοιχίας παραλαμβάνεται και αξιοποιείται με πολύπλοκη ψηφιακή επεξεργασία, με τρόπο παρόμοιο με τις σύγχρονες ψηφιακές κάμερες, είτε με φωτοσυστοιχία CCD (*charged-coupled device*) ή CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*). Μερικές φορές απαντώνται και συστοιχίες μολομέτρων, δηλ. ευαίσθητων θερμοαντιστάσεων όπως το οξείδιο του βαναδίου, καθώς και θερμοπυκνωτών βασιζόμενο στις μεταβολές των διηλεκτρικών ιδιοτήτων με τη θερμοκρασία.

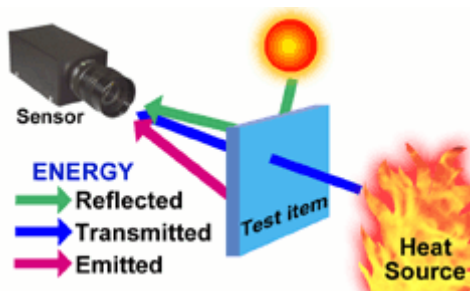
Πρόσθετες δυσκολίες στη σχεδίαση των υπέρυθρων καμερών θέτουν οι απαιτήσεις καλής θερμομόνωσης της θερμοσυστοιχίας για την αποφυγή απώλειας σήματος, η ανάγκη περιοδικής αποκοπής της έκθεσης (*chopping*) για τη δημιουργία ισχυρότερου σήματος, καθώς και η χρήση καθρεπτών σάρωσης (*scanning*) και διάπλεξης (*interlacing*).



Σχήμα 3.6: Διάφορα είδη υπέρυθρων αισθητήρων

3.2.2 Αργή λειτουργίας αισθητήρων υπέρυθρου

Ας δούμε λίγο πιο αναλυτικά τι συμβαίνει με τους αισθητήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας.



Η υπέρυθρη ακτινοβολία είναι μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, το οποίο περιλαμβάνει τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, το ορατό φως, υπεριώδες φως καθώς τις ακτίνες γ και X.

Το μήκος κύματος των υπέρυθρων κυμαίνεται μεταξύ των 700nm και 10^5 nm.

Κάνοντας χρήση προηγμένων οπτικών συστημάτων και ανιχνευτών, ο αισθητήρας υπερύθρου μπορεί να επικεντρωθεί σε σχεδόν κάθε τμήμα ή κάποια τμήματα του συγκεκριμένου φάσματος.

Ένα θερμόμετρο υπερύθρου (IR thermometer) μπορεί να συγκριθεί με ένα ανθρώπινο μάτι. Ο φακός του ματιού αντιστοιχεί στο φακό του αισθητήρα μέσω του οποίου η ακτινοβολία (ροή φωτονίων) από ένα αντικείμενο φθάνει σε ένα φωτοευαίσθητο δέκτη (βυθός ματιού - retina) για να μετατραπεί σε σήμα το οποίο στη συνέχεια στέλνεται στον εγκέφαλο. Οποιοδήποτε σώμα με θερμοκρασία υψηλότερη από το απόλυτο μηδέν (-273,15 °C) εκπέμπει υπέρυθη ακτινοβολία η οποία εκφράζεται με τον συντελεστή εκπομπής ϵ . Για αυτό το λόγο η χρήση κάμερας θερμικής απεικόνισης είναι μία άριστη μέθοδος μέτρησης θερμικών μεταβολών.

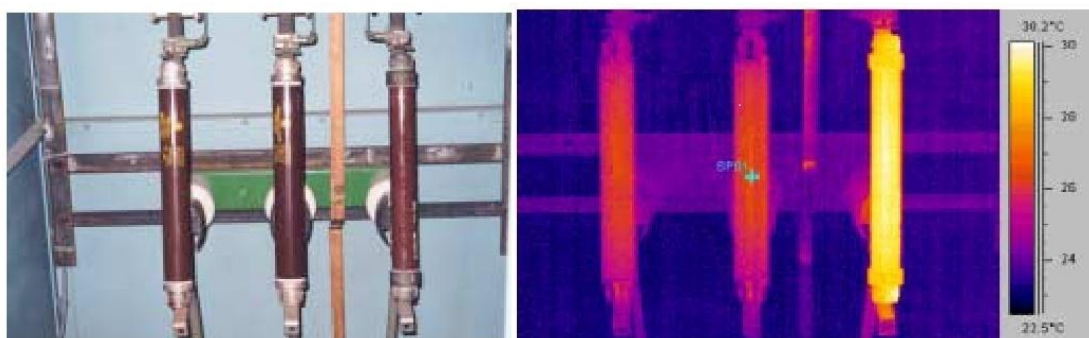
3.2.3 Είδη αισθητήρων υπερύθρου

Υπάρχουν διάφοροι αισθητήρες IR που μπορούν να επιλεγούν για αξιόπιστες μετρήσεις στην παραγωγή, στο εργαστήριο και σε εμπορικές εφαρμογές. Επίσης, υπάρχουν σταθεροί online αισθητήρες και σαρωτές θερμικών απεικονίσεων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για το συνεχή έλεγχο της θερμοκρασίας σε κρίσιμα σημεία της γραμμής παραγωγής. Παράλληλα, τα φορητά θερμόμετρα χρησιμοποιούνται κυρίως για τακτικούς και γρήγορους προληπτικούς και περιοδικούς ελέγχους σε όλες τις πιθανές εφαρμογές.

Οι σταθεροί και σε απευθείας σύνδεση αισθητήρες IR (online έλεγχος θερμοκρασιών) έχουν ενσωματωμένους μικροεπεξεργαστές, διπλής κατεύθυνσης ψηφιακές επικοινωνίες, αναλογικές και ψηφιακές εξόδους και λογισμικό ανάλυσης και ελέγχου για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση των προβλημάτων που ανακύπτουν στην παραγωγική διαδικασία. Τεχνικοί ή μηχανικοί μπορούν να επισημαίνουν τον ακριβή χρόνο και τον εξοπλισμό όπου η διαδικασία βρέθηκε εκτός προδιαγραφών και να προσδιορίσουν τα προϊόντα που επηρεάστηκαν. Επίσης, οι αισθητήρες μπορούν να συνδεθούν μέσω δικτύου, ελέγχοντας πολλά σημεία ταυτόχρονα, παρέχοντας, επίσης, τη δυνατότητα ενσωμάτωσής τους στα πιο συνήθη βιομηχανικά δίκτυα.

Η θερμική απεικόνιση ελέγχει την ποιότητα των προϊόντων. Όπου η ομοιομορφία των προϊόντων είναι απαραίτητη, σαρωτές παρέχουν θερμικές

απεικονίσεις κρίσιμων επιφανειών στη διαδικασία παραγωγής σε πραγματικό χρόνο και μπορούν να εγκατασταθούν στα στρατηγικά σημεία για στιγμιαία αναγνώριση θερμών ή ψυχρών σημείων. Ο σαρωτής συλλέγει την υπέρυθη ακτινοβολία από μια επιφάνεια που περνά κάτω από το οπτικό πεδίο του και παρουσιάζει τα στοιχεία αμέσως υπό μορφή επίπεδου θερμικού χάρτη θερμοκρασιών επιφανείας. Οι οπτικές πληροφορίες μας επιτρέπουν να καθορίσουμε εάν η παραγωγή λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές και να αντιδράσουμε γρήγορα σε περίπτωση προβλημάτων.



Σχήμα 3.7: παράδειγμα θερμικής απεικόνισης.



Σχήμα 3.8: παράδειγμα θερμικής απεικόνισης

Εκτός από τα παραπάνω, πολύ χρήσιμα είναι και τα φορητά θερμόμετρα IR που διαθέτουν προηγμένα χαρακτηριστικά για να ελέγχουν την ποιότητα των προϊόντων ή για χρήση σε προληπτική συντήρηση, περιβαλλοντικό έλεγχο και ελέγχους ασφάλειας. Τα φορητά υπέρυθρα θερμόμετρα είναι πολύ εύκολα στη χρήση και λειτουργία - στοχεύουμε το υλικό ή αντικείμενο, φωτογραφίζουμε και διαβάζουμε τη θερμοκρασία στην οθόνη, όπως ακριβώς γίνεται και με τις συμβατικές αναλογικές και ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές. Ο έλεγχος μιας επιφάνειας με ένα θερμόμετρο IR μας δείχνει εύκολα τα «θερμά» και «ψυχρά» σημεία. Η χρήση λέιζερ βοηθά στον

εντοπισμό μικρών στόχων από απόσταση, ακόμη και εκεί όπου ο φωτισμός είναι χαμηλός.



Σχήμα 3.9: Φορητό θερμόμετρο IR

3.2.4 Χρήσεις αισθητήρων υπέρυθρου

Τα πυρόμετρα απορρόφησης υπέρυθρης ακτινοβολίας βρίσκουν εφαρμογή στην προσεγγιστική τηλεμέτρηση της θερμοκρασίας θερμών εξωτερικών επιφανειών, π.χ. του μπλοκ μιας μηχανής εσωτερικής καύσης, της πολλαπλής εξαγωγής (που είναι βέβαια κάπως μικρότερη, πλην όμως ενδεικτική της θερμοκρασίας των διερχόμενων καυσαερίων), των ελαστικών μετά από σκληρή χρήση κ.ά. Πυρόμετρα υπέρυθρης ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται επίσης για την ανίχνευση της παρουσίας επιβήτη για τον έλεγχο της ενεργοποίησης του αερόσακου, για την μέτρηση της επιδερμικής θερμοκρασίας κάθε επιβήτη προς αυτόματη ρύθμιση του κλιματισμού του οχήματος κ.α.

3.2.5 Πλεονεκτήματα Υπέρυθρης Τεχνολογίας

Υπάρχουν δύο τεχνολογίες για μέτρηση θερμοκρασίας σε επιφάνειες: Θερμόμετρα επαφής ή υπέρυθρα θερμόμετρα μη-επαφής. Τα μειονεκτήματα των θερμομέτρων επαφής είναι ότι προκαλούν ζημιές στις επιφάνειες, απαιτούν χρόνο προσαρμογής στις θερμοκρασίες για να παρέχουν ακριβή ανάγνωση και έχουν σύντομη διάρκεια ζωής στα σκληρά και οξειδωτικά, υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντα. Σε πολλές, επίσης, περιπτώσεις, ειδικά σε βιομηχανίες τροφίμων, απαιτείται να μην έρχεται τίποτα σε επαφή με το προϊόν, για λόγους υγιεινής. Για την πλειοψηφία των βιομηχανικών και εμπορικών εφαρμογών, η χωρίς επαφή υπέρυθρη (IR)

θερμομέτρηση είναι η καλύτερη επιλογή, δεδομένου ότι εξασφαλίζει ασφάλεια, ελαχιστοποιεί τα υλικά απόβλητα και οι έλεγχοι γίνονται πιο γρήγορα και πιο αποδοτικά. Αυτή η λύση επιτρέπει την ασφαλή, μη καταστρεπτική μέτρηση της θερμοκρασίας σε σημεία που είναι ευαίσθητα, κινούμενα, υψηλής τάσης, εξαιρετικά καυτά ή απρόσιτα. Τέλος ένα πολύ βασικό πλεονέκτημα της μέτρησης της θερμοκρασίας από απόσταση, είναι ότι μπορεί να γίνει καταγραφή της θερμοκρασίας ενός σώματος ενώ αυτό βρίσκεται εν κινήσει.

3.2.6 Παραδείγματα αισθητήρων υπερύθρου

Κάποια παραδείγματα αισθητήρων υπερύθρου τα οποία μπορούμε να συναντήσουμε στο εμπόριο είναι τα ακόλουθα:

Θερμοκάμερα υπερύθρων IC 80L της TROTEC



Τεχνικά Χαρακτηριστικά:

Πολύ υψηλή γεωμετρική ανάλυση 1.3 mrad

Υψηλής απόδοσης αισθητήρα με ανάλυση 384 x 288

Πολύ ακριβής μέτρηση θερμοκρασίας από -20 °C μέχρι +600 °C

Υψηλή συχνότητα επαναλήψεως εικόνας 50/60 Hz

Υψηλή θερμική ευαισθησία 0.08 °C

Οθόνη 3.5 ίντσες

Θερμόμετρο CT Laser



Τεχνικά Χαρακτηριστικά:

Εύρος μέτρησης (° C): -40 έως 975

Οπτική ανάλυση 75:1

Φασματική περιοχή 8 έως 14μm

Καινοτόμες αισθητήρα υπερύθρων με διπλό στόχο λέιζερ

Θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι 85 ° C, χωρίς ψύξη

3.3 Αισθητήρες θερμοκρασίας με οπτική ίνα

3.3.1 Γενικά

Οι οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αισθητήρες για να μετρήσουν την πίεση, τη θερμοκρασία και άλλες παραμέτρους. Το μικρό μέγεθος και το γεγονός ότι δεν απαιτείται καμία ηλεκτρική τροφοδοσία, δίνουν στην ίνα, τον οπτικό αισθητήρα, πλεονέκτημα σε σχέση με έναν συμβατικό ηλεκτρικό αισθητήρα σε ορισμένες εφαρμογές.

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου απαιτείται η μέτρηση της θερμοκρασίας αλλά απαγορεύεται αυστηρά η χρήση μεταλλικών αντικειμένων (σπάτουλες, λαβίδες, μεταλλικά φύλλα, θερμόμετρα υδραργύρου κλπ).

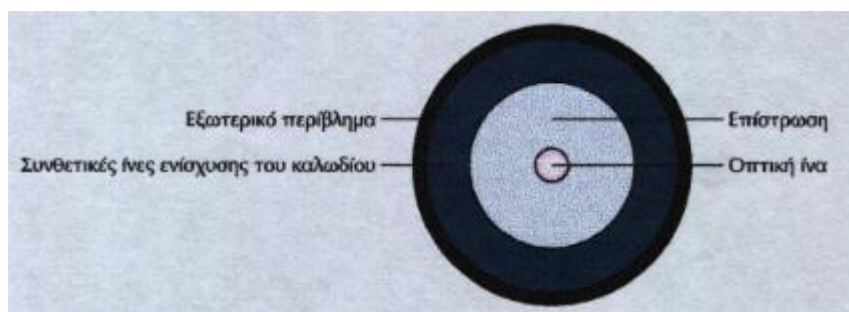
Σε μία τέτοια περίπτωση, η μέτρηση της θερμοκρασίας εκτελείται με ειδικούς αισθητήρες οπτικών ινών, οι οποίοι επιδεικνύουν ικανοποιητική ακρίβεια για τις ανάγκες των συγκεκριμένων απαιτήσεων και λειτουργούν ικανοποιητικά στο μικροκυματικό πεδίο. Οι αισθητήρες θερμοκρασίας οπτικών ινών σε αντίθεση με άλλους αισθητήρες θερμοκρασίας δεν απορροφούν μικροκυματική ενέργεια ή αναπτύσσουν ηλεκτρικό δυναμικό.

3.3.2 Οπτικές Ίνες

Η οπτική ίνα είναι γνωστή σαν ένα διαφορετικό, αλλά αρκετά συνηθισμένο καλώδιο, για τις σύγχρονες καλωδιώσεις. Χρησιμοποιείται, για μετάδοση πληροφορίας κυρίως, όπου οι αποστάσεις είναι μεγάλες και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί το καλώδιο συνεστραμμένων ζευγών και όπου οι απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης είναι αρκετά αυξημένες. Σκεφτείτε, ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οπτική ίνα για να καλύψουμε απόσταση 5Km και οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων να φθάνουν τα 10 Gbps.



Η βασική κατασκευή μιας οπτικής ίνας φαίνεται στο σχήμα 3.10. Στο κέντρο ενός καλωδίου υπάρχει η οπτική ίνα, η οποία κατασκευάζεται από γυαλί ικανό να μεταφέρει δέσμη φωτός συγκεκριμένου μήκους κύματος με πολύ μικρές απώλειες. Την οπτική ίνα περιβάλλει ειδική επίστρωση γυαλιού με μικρότερο δείκτη διάθλασης από το υλικό της ίνας, το οποίο ονομάζεται cladding ή buffer. Η εξωτερική αυτή επίστρωση βοηθά στη συνεχή ανάκλαση της δέσμης μέσα στην ίνα, οπότε με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η διάδοση του φωτός. Η συνεχής ανάκλαση επιτυγχάνεται, εφόσον η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της οριακής, διότι σε άλλη περίπτωση θα έχουμε και διάθλαση στην εξωτερική επίστρωση (cladding) (Βλ. σχ. 3.12). Με αυτό τον τρόπο η οπτική ίνα εγκλωβίζει τη δέσμη του φωτός και την οδηγεί στην άκρη της.

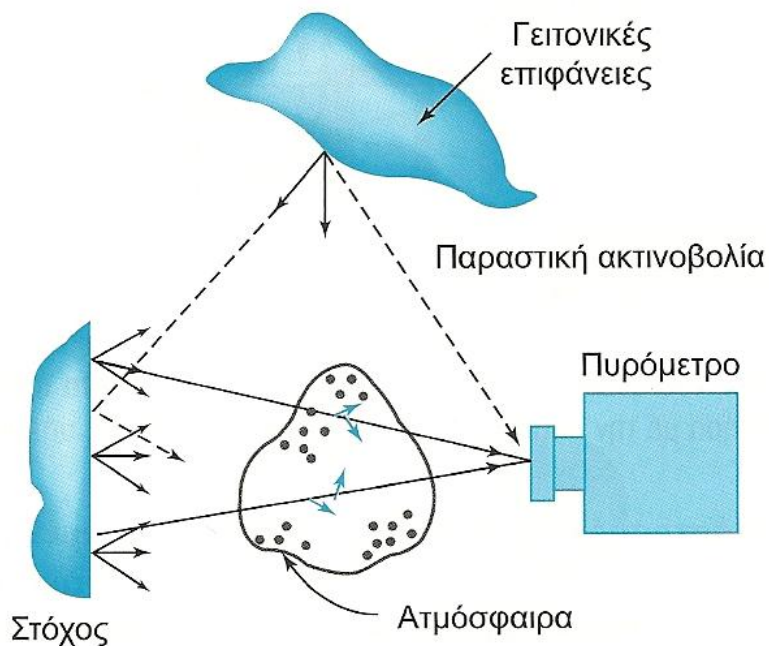


Σχήμα 3.10: Κατασκευή καλωδίου οπτικής ίνας

Την εξωτερική επίστρωση περιβάλλει δέσμη συνθετικών ινών, οι οποίες έχουν στόχο την προστασία της ίνας από πιθανά τραβήγματα, όπου είναι επικίνδυνο να σπάσει το γυαλί, που αποτελεί τον πυρήνα της ίνας. Όλα τα παραπάνω περικλείονται σε εξωτερικό πλαστικό περίβλημα όμοιο με αυτό των καλωδίων συνεστραμμένων ζευγών.

Οι αισθητήρες οπτικών ινών ή αλλιώς **πυρόμετρα οπτικών ινών** όπως μπορεί να τους συναντήσουμε σε διάφορες βιβλιογραφίες, αποτελούν μία ειδική περίπτωση. Μεταφέρουν με οπτική ίνα την προσπίπτουσα θερμική ακτινοβολία σε μικρή κοιλότητα του αισθητήρα, για την επακόλουθη ευχερέστερη μέτρηση της. Το σύστημα είναι σχετικά πολύπλοκο και απαιτεί ενδιάμεση εναλλαγή της ακτινοβολίας από την ίνα υψηλής θερμοκρασίας στην οπτική ίνα χαμηλής θερμοκρασίας. Τα πυρόμετρα λεπτών καθετήρων οπτικών ινών προσφέρονται για μετρήσεις θερμοκρασίας σε στενούς και δύσκολα προσπελάσιμους χώρους. Τα πυρόμετρα απορρόφησης αποτελούν καλή επιλογή για μέτρηση επιφανειακών θερμοκρασιών εξ

αποστάσεως, σε κινούμενα σώματα και σε περιπτώσεις δυσκολιών προσάρτησης ενός αισθητήρα στην εξεταζόμενη επιφάνεια, παρουσιάζοντας ταυτόχρονα μικρή σταθερά χρόνου t_D , ενδεικτικά 1sec για μολόμετρα, 10ms για πυρόμετρα θερμοσυστοιχίας, 0.5sec για πυροηλεκτρικά πυρόμετρα. Η ένδειξη μπορεί να επηρεάζεται από το περιβάλλον μέτρησης,



Σχήμα 3.11: Επίδραση των γειτονικών σωμάτων και της ατμόσφαιρας στη λειτουργία πυρομέτρων.

Ιδιαίτερα από την παρουσία θερμών γειτονικών σωμάτων για κοντινές μετρήσεις και από την ατμοσφαιρική απορρόφηση για μακρινές μετρήσεις. Εντούτοις, τα πυρόμετρα αποτελούν ίσως τη μοναδική επιλογή για μέτρηση πολύ υψηλών θερμοκρασιών ($>1500^{\circ}\text{C}$).

3.3.3 Κατανεμημένη καταγραφή θερμοκρασίας

Τα κατανεμημένα συστήματα θερμοκρασίας (DTS) είναι οπτοηλεκτρονικές διατάξεις που μετρούν τις θερμοκρασίες με τη βοήθεια οπτικών ινών.

Οι οπτοηλεκτρονικές διατάξεις είναι ουσιαστικά οπτο-ηλεκτρικοί ή ηλεκτρο-οπτικοί μορφοτροπέις (transducers) που μετατρέπουν την οπτική ακτινοβολία σε ηλεκτρικό σήμα και αντίστροφα.

Οι θερμοκρασίες καταγράφονται κατά μήκος του οπτικού καλωδίου αισθητήρων, υπό μορφή ενός συνεχούς διαγράμματος. Έτσι επιτυγχάνεται μία υψηλή ακρίβεια προσδιορισμού θερμοκρασίας σε μεγάλες αποστάσεις. Χαρακτηριστικά, τα συστήματα DTS μπορούν να εντοπίσουν τη θερμοκρασία σε μια χωρική ανάλυση 1 μm με την ακρίβεια σε $\pm 1^\circ\text{C}$ σε μια ανάλυση 0.01 $^\circ\text{C}$.

Για αποστάσεις μεγαλύτερες των 30 χλμ οι θερμοκρασίες μπορούν να ελεγχθούν και με πιο εξειδικευμένα συστήματα.

3.3.4 Μέτρηση θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία γι' αυτήν την κατηγορία αισθητήρων υπολογίζεται έμμεσα αφού μετρηθούν είτε μεταβολές του μήκους κύματος ή κάποιας διαφοράς φάσης και μετατραπούν σε θερμοκρασία μέσω κατάλληλων ηλεκτρονικών διατάξεων. Οι οπτικές ίνες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αισθητήρες αυτόνομοι όπως για παράδειγμα τα διμεταλλικά θερμομέτρα, τα θερμοζεύγη ή τα RTD, επειδή χρειάζονται όπως αναφέραμε και στην παραπάνω παράγραφο κάποια οπτοηλεκτρονική διάταξη για να μετατρέψει την οπτική ακτινοβολία σε ηλεκτρικό σήμα. Ας δούμε όμως αναλυτικότερα πως μπορεί να μετρηθεί η θερμοκρασία με χρήση αισθητήρων οπτικών ινών σε μία περίπτωση όπου απαγορεύεται η εγκατάσταση καλωδίων.

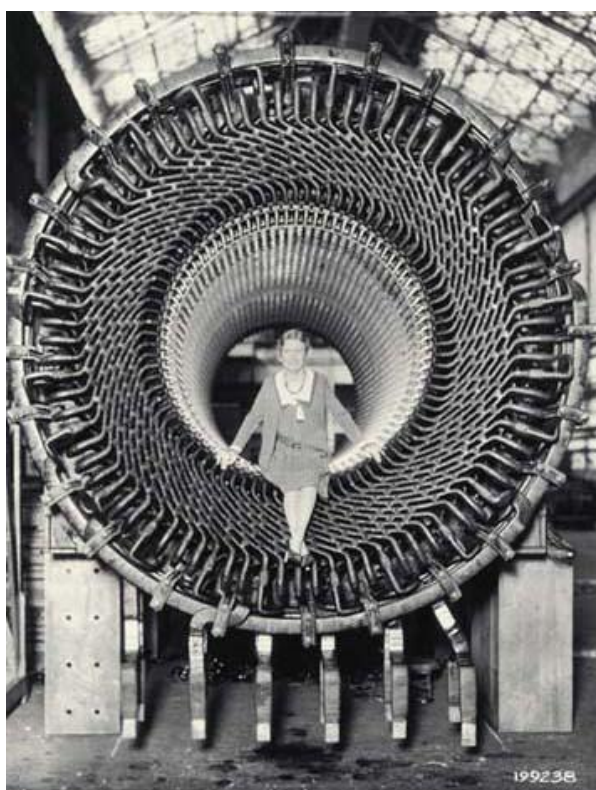
Η μέτρηση της θερμοκρασίας με οπτικές ίνες είναι μία τεχνική πολλά υποσχόμενη. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω πρόκειται για ένα είδος μέτρησης όπου δεν απαιτείται ηλεκτρισμός αλλά φως.

Το φως μεταφέρεται μέσω μίας γυάλινης ή πλαστικής οπτικής ίνας στον χώρο της πραγματικής μέτρησης όπου πρόκειται να μεταβληθεί η προς μέτρηση ποσότητα και στη συνέχεια επιστρέφει μέσω της ίδιας οπτικής ίνας ή ακόμη και μέσω μίας δεύτερης.

Το αντίστοιχο όργανο αντιλαμβάνεται την τιμή μέτρησης από την επιστρεφόμενη ποσότητα φωτός. Ένα παράδειγμα αποτελεί το όργανο *Lumitherm* που κατασκευάζεται από την αμερικάνικη εταιρία *Iritek*, το οποίο εκπέμπει φωτεινούς παλμούς από μία δίοδο LED μέσω μίας οπτικής ίνας στον ακροδέκτη μέτρησης και διεγείρει μία φθορίζουσα επιφάνεια. Η χρονική διάρκεια της φωτοεκπομπής εξαρτάται από τη θερμοκρασία, πράγμα που εκμεταλλευόμαστε για να κάνουμε μετρήσεις με τη βοήθεια του ανακλώμενου φωτός πίσω στο όργανο μέτρησης. Συστήματα του είδους αυτού στα οποία μία οπτική ίνα χρησιμοποιείται μόνο για την μεταφορά του φωτός, ονομάζεται εξωγενές σύστημα οπτικών ιών.

Είναι επίσης δυνατό να χρησιμοποιήσουμε την ίδια οπτική ίνα ως στοιχείο εκτέλεσης μίας μέτρησης. Σε τέτοια ενδογενή συστήματα οπτικών ιών εκμεταλλευόμαστε την μικροσκοπική αλλά όχι αμελητέα επίδραση των εξωτερικών φυσικών φαινομένων στη διάδοση του φωτός μέσω της οπτικής ίνας.

Αν ληφθεί υπόψη ότι το ίδιο το φως είναι κύμα τότε μπορούμε να πετύχουμε πολύ υψηλά επίπεδα ευαισθησίας και ανάλυσης. Σύμφωνα με μία ευρύτατα χρησιμοποιούμενη τεχνική, μπορούμε να εγγράψουμε στα εσωτερικά τοιχώματα μιας



οπτικής ίνας ένα πλέγμα τύπου *Bragg*. Ένα πλέγμα τύπου *Bragg* αποτελείται από επαναλαμβανόμενες περιοχές με υψηλό δείκτη διάθλασης που δημιουργείται με τη βοήθεια υπεριώδους ακτινοβολίας. Μία δέσμη φωτός μήκους κύματος που αντιστοιχεί ακριβώς στο διπλάσιο της βασικής απόστασης μεταξύ των περιοχών του παραπάνω πλέγματος, ανακλάται πίσω στην πηγή της δέσμης, ενώ οποιοδήποτε άλλο μήκος

κύματος περνά χωρίς να υποστεί καμία επίδραση.

Πολλά φυσικά φαινόμενα μπορούν να επηρεάσουν την διάδοση του φωτός μέσα από μία οπτική ίνα. Μεγέθη τα οποία μπορούν να μετρηθούν με τον τρόπο αυτό είναι η επιμήκυνση, η τάση εφελκυσμού, στάθμη υγρών, πίεση, γωνία περιστροφής, θερμοκρασία, ακτινοβολία ιόντων και πολλά άλλα. Το γεγονός αυτό καθιστά δυνατή μία μεγάλη γκάμα διαφορετικών μετρήσεων κάτω από δυσμενείς συνθήκες, σε περιπτώσεις όπου παλιά η μέτρηση της θερμοκρασίας θεωρούνταν αδύνατη. Όπως για παράδειγμα μέσα σε μία γεννήτρια 1300MW.

3.3.5 Χρήσεις αισθητήρων οπτικών ινών

Η κατανεμημένη καταγραφή θερμοκρασίας μπορεί να επεκταθεί επιτυχώς σε διαδικασίες σχετικές με:

- Εξερεύνηση πετρελαίου & αερίου – μόνιμος έλεγχος κατά μήκος της τρύπας εξόρυξης
- Έλεγχος γραμμών καλωδίων
- Πυρανίχνευση σε σήραγγες και κτίρια
- Βιομηχανική επιτήρηση φούρνων επαγωγής
- Έλεγχος θερμοκρασίας στις εγκαταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων των σωληνώσεων μετάδοσης
- Δεξαμενές αποθήκευσης σε σκάφη

Πιο πρόσφατα σχεδιάζεται να χρησιμοποιηθεί, για οικολογικό έλεγχο σχετικά με:

- Θερμοκρασία ρευμάτων
- Θερμοκρασία τροπικών δασών με διάφορες πυκνότητες φυλλώματος

3.3.6 Παραδείγματα αισθητήρων θερμοκρασίας με οπτική ίνα

Ένα παράδειγμα αισθητήρα θερμοκρασίας με οπτική ίνα το οποίο μπορούμε να συναντήσουμε στο εμπόριο είναι το ακόλουθο:

Η παρακάτω οπτικοηλεκτρονική διάταξη μπορεί να χαρακτηριστεί από μία σειρά δυνατοτήτων όπως για παράδειγμα να μπορεί να κάνει καταγραφή της θερμοκρασίας με οπτική ίνα μήκους τεσσάρων χιλιομέτρων μετατρέποντας την οπτική ακτινοβολία σε ηλεκτρικό σήμα.

HALO DTS



Τεχνικά Χαρακτηριστικά:

Αποθήκευση θερμοκρασιών από -15 έως 65 ° C

Σχετική υγρασία: 5% έως 95%

Θερμοκρασία περιβάλλοντος από 0 μέχρι 40 ° C

Βάρος: 9Kg

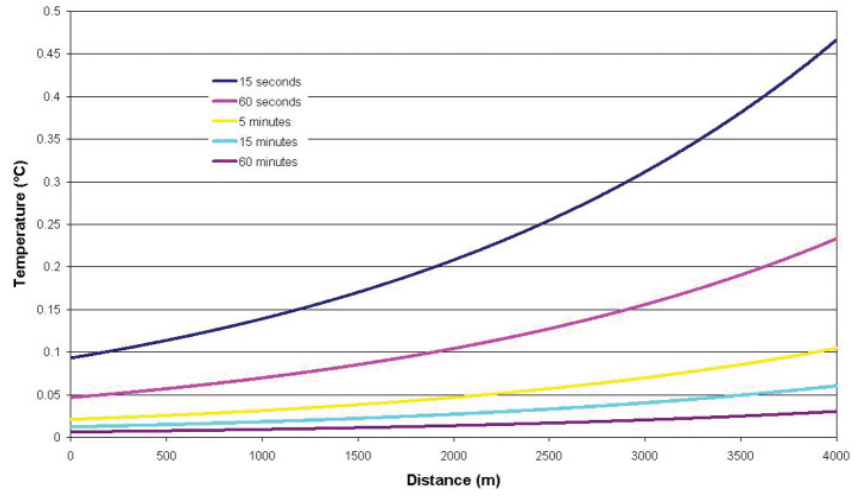
Ύψος: 87mm

Πλάτος:435mm

Μήκος:445mm

Η ικανότητα μέτρησης της θερμοκρασίας του συγκεκριμένου προϊόντος φαίνεται στην παρακάτω χαρακτηριστική θερμοκρασίας-απόστασης.

Halo DTS Performance



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάστηκε η θερμοκρασία, οι συσκευές καθώς και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρηση της. Η θερμότητα είναι μία μορφή ενέργειας που επηρεάζει τη συμπεριφορά των υλικών με διάφορους τρόπους, και χρησιμοποιούμε αυτές τις αλλαγές της συμπεριφοράς των υλικών για να μετρήσουμε τη θερμοκρασία τους.

Όλες οι συσκευές που περιγράψαμε διατίθενται σε διάφορα σχέδια και θερμοκρασιακές περιοχές. Η επιλογή κάποιας συγκεκριμένης συσκευής εξαρτάται από τους περιορισμούς και το εύρος των θερμοκρασιών που θέλουμε να μετρήσουμε. Υπάρχουν και άλλες συσκευές, τεχνικές και παραλλαγές, πέρα από αυτές που έχουν περιγραφεί, με τις οποίες μπορούμε να μετρούμε θερμοκρασίες. Αυτή η πτυχιακή εργασία σας έχει παράσχει ικανοποιητική εμπέθυνση στο αντικείμενο της μέτρησης της θερμοκρασίας.

Βιβλιογραφία



ΞΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. www.instrumentation.co.za/article.aspx?pk1ArticleId=4038&pk1CategoryId=7
7
2. http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/el/Distributed_temperature_sensing
3. http://www.engineeringtoolbox.com/rtd-termal-resistive-d_498.html
4. (<http://www.mne.psu.edu/sommer/me445/ntcnotes.pdf>)
5. http://www.hep.upatras.gr/class/download/ais_mik_sis_sil_ded/chapt0_1.pdf
6. http://1ekfe-anatol.att.sch.gr/metabook/metabook_gr/therm/common/techno_thermostatis.htm
7. <http://www.howstuffworks.com/therm2.htm>
8. <http://www.globalspec.com/reference/10945/179909/Chapter-7-Temperature-Measurement-Filled-System-Thermometers>
9. <http://www.globalspec.com/reference/10945/179909/Chapter-7-Temperature-Measurement-Filled-System-Thermometers>
10. http://www.isa.org/InTechTemplate.cfm?Section=Control_Fundamentals1&template=/ContentManagement/ContentDisplay.cfm&ContentID=59242
11. <http://www.answers.com/topic/thermometer>



12. <http://ezinearticles.com/?Filled-Systems-Thermometer-Or-Pressure-Gauge-Thermometer&id=1996310>
13. <http://www.temperatures.com/filledvendors.html>
14. http://www.isa.org/InTechTemplate.cfm?Section=Control_Fundamentals1&template=/ContentManagement/ContentDisplay.cfm&ContentID=59242
15. <http://www.answers.com/topic/thermometer>
16. <http://ezinearticles.com/?Filled-Systems-Thermometer-Or-Pressure-Gauge-Thermometer&id=1996310>
17. <http://www.howstuffworks.com/therm2.htm>
18. http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/el/Distributed_temperature_sensing
19. <http://www.keyosens.com/thermocouples.php>
20. <http://www.hst-us.com/productSelectionChart.php>
21. <http://www.indiamart.com/thakar-sons/products.html#bare-beads>

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. http://www.eng.ucy.ac.cy/kyratsi/thermoelectrics/thermo_count.html
2. <http://www.sigmahellas.gr/index.php?lang=1&thecatid=5&thesubcatid=104>
<http://www.sigmahellas.gr/index.php?lang=1&thecatid=2&thesubcatid=48&thesubsubcatid=123>
3. <http://dbserver.forthnet.gr/Praxis/servlet/praxis.PServlet?s=praxis.TMShowPublic?id=295&l=el>
4. www.ics.forth.gr/~tsakalid/PAPERS/Soroptimists_07052004.ppt

5. <http://www2.enthesis.net/index.php?news=539>
6. www.mtee.net/Presentations/MM/Sensors%201.ppt
7. <http://www.sigmahellas.gr/index.php?lang=1&thecatid=5&thesubcatid=104>
8. www.ics.forth.gr/~tsakalid/PAPERS/Soroptimists_07052004.ppt
9. http://www.bep.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=927&Itemid=192
10. www.electroniccircuits.gr/antistaseis.html
11. http://www.hep.upatras.gr/class/download/ais_mik_sis_sil_ded/chapt0_1.pdf
12. <http://www.hlektronika.gr/index.php?page=theory?thermistor>
13. http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Thermometria_Thermografia_1.pdf
14. www.texnologia.org/filla/c_gymnasiou/5%20ExartimI.doc
22. http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Thermometria_Thermografia_1.pdf
15. http://www.vt.teithe.gr/t/prapas/files/Aisthithires_No1.pdf
16. www.mtee.net/Presentations/MM/Sensors%201.ppt,
17. www.ics.forth.gr/~tsakalid/PAPERS/Soroptimists_07052004.ppt
18. <http://www.sigmahellas.gr/index.php?lang=1&thecatid=5&thesubcatid=104>
19. <http://www.thermis-sa.gr/greek/category.php?id=97>
20. <http://www.hellenica.de/Technologia/Ilektroniki/Optoelectronics.html>

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. R.A serway, Physics for scientists and engineers
2. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook CRC-IEEE 1999

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ



1. P.Elgar, Αισθητήρες και Μετρήσεις Ελέγχου
2. Albert Paul Malvino, Βασική ηλεκτρονική
3. Δ. Πράπας, Τεχνολογία Μετρήσεων, Αρχές και εφαρμογές
4. Γ. Φραγκιαδάκης, Φυσική και τεχνολογία