



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Αρχή λειτουργίας και ανάπτυξης αισθητήρα θερμοκρασίας

Κουρινάκη Κωνσταντίνο

A.M.4327

Εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Νικόλαου Φραγκιαδάκη

Χανιά, Μάρτης 2015

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Όποιος έχει σκοπό να σπαταλήσει τον χρόνο του διαβάζοντας αυτήν την πτυχιακή. Θα αποκομίσει γνώσεις για το τι είναι θερμοκρασία, τι είναι αισθητήρας και, το βασικότερο, τι είναι αισθητήρας θερμοκρασίας. Επίσης θα μάθει για αρκετά είδη θερμόμετρον, αλλά και ποια αρχή χρησιμοποιούν για να βγάλουν μια μέτρηση. Ακόμα, μια κύρια γνώση που μπορεί κανείς να αποκομίσει είναι τα διαφορά χαρακτηριστικά που έχουν οι αισθητήρες, και από τι επηρεάζονται. Ένα ενδιαφέρον κεφάλαιο, είναι διάφοροι τρόποι επικοινωνίας αισθητήρων με μονάδες εξόδου, αλλά και τον τρόπο επικοινωνίας τους με άλλες συσκευές. Το κύριο μέρος αυτής της εργασίας αναλύει μερικούς από τους πιο βασικούς αισθητήρες θερμοκρασίας όπως: θερμοζεύγη, θερμοαντιστάτης thermistor, ολοκληρωμένο αισθητήρα αλλά και Κρυωγενής αισθητήρας. Τέλος, στόχος είναι, να δωθεί μια ιδέα για το πως γίνεται η ανάπτυξη ενός αισθητήρα και πως η επιλογή καταλληλότερου αισθητήρα, αναλόγως τις ανάγκες που έχουμε.

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014 – 2015 στη Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών του ΤΕΙ Κρήτης, στο τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών Τ.Ε., υπό την επίβλεψη του Φραγκιαδάκη Νικόλαου. Το αντικείμενο μελέτης είναι η αρχή λειτουργίας και ανάπτυξης αισθητήρα θερμοκρασίας.

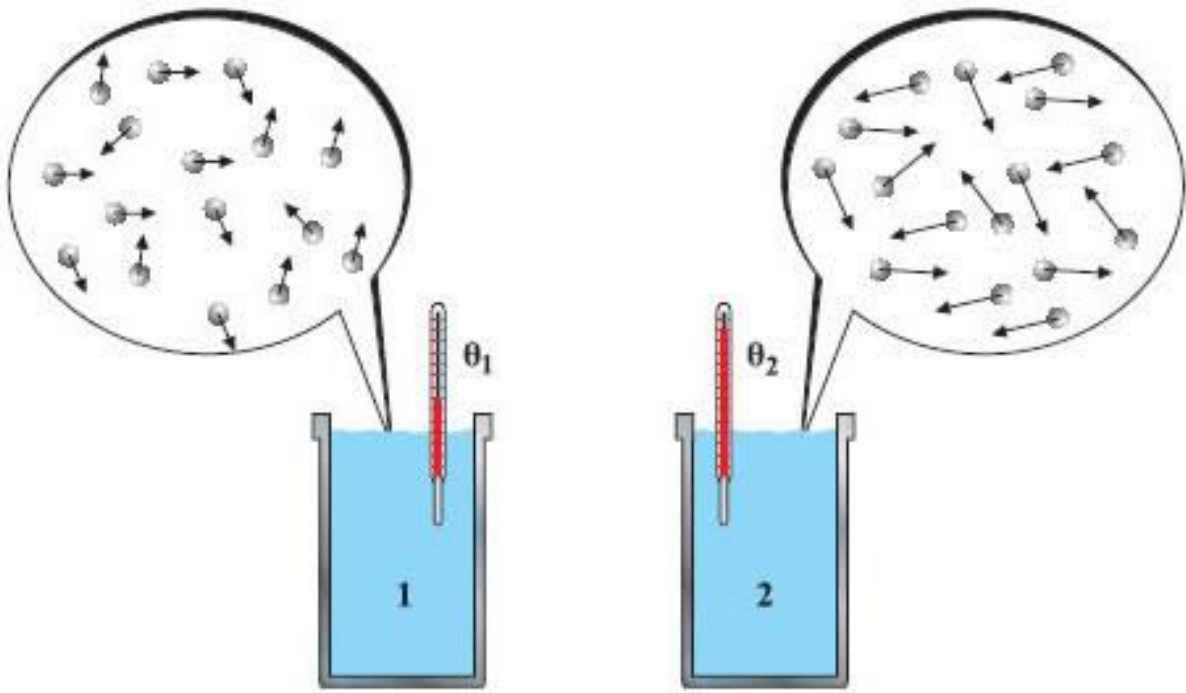
## Abstract

The study investigated the incidence of temperature sensors and their features. Furthermore, we will look into the categories that they are divided, how they are constructed, the way they are used, their advantages and disadvantages. The types of thermometers that we are going to describe, are the ones that measure temperature.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	02
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	03
<b>1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	
1.1Τι είναι θερμοκρασία.....	06
1.2 Τι είναι αισθητήρας.....	07
1.3 Τι είναι αισθητήρας θερμοκρασίας.....	08
1.4 Είδη θερμομέτρων.....	09
1.5 Χαρακτηριστικά αισθητήρων.....	10
1.6 Πεδία Εφαρμογών Αισθητήρων.....	17
<b>2.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ &amp; ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ</b>	
2.1 Διασύνδεση αισθητήρων με I2C.....	18
2.1.1 Εισαγωγή στο I2C.....	18
2.1.2 ιστορικό υπόβαθρο.....	19
2.1.3 Χαρακτηρίστηκα των I2C.....	19
2.2 Διασύνδεση αισθητήρων με SPI.....	21
2.2.1 Εισαγωγή στο SPI.....	21
2.2.2 χαρακτηριστικά SPI.....	22
2.3 Διασύνδεση μέσω USB.....	23
2.3.1 Εισαγωγή στο πρωτόκολλο USB.....	23
2.3.2 Αναλυτική περιγραφή USB.....	23
2.3.3 Τι είναι ο διάυλος USB.....	25

2.3.4 Ταχύτητες USB.....	25
2.3.5 Ιστορία USB.....	25
2.3.6 Γενική επισκόπηση USB.....	26
2.3.7 USB Αισθητήρας Επιτάχυνσης 5G.....	27
2.4 Πρωτόκολλο επικοινωνίας RS232.....	29
2.4.1 Ιστορία RS232.....	29
2.4.2 Εύρος ορισμού πρότυπών RS232.....	30
3.ΒΑΣΙΚΑ ΕΙΔΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	
3.1 θερμοζεύγη.....	32
3.2 Θερμοαντιστάτης RTDs.....	42
3.3 Θερμίστορ.....	48
3.4 Κρυωγένη αισθητήρες.....	57
3.5 Ολοκληρωμένοι αισθητήρες.....	62
4.ΑΝΑΠΤΥΞΗ-ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ	
4.1 Ανάπτυξη ενός αισθητήρα.....	65
4.2 Πως γίνεται η επιλογή ενός αισθητήρα.....	70
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73



# 1.Εισαγωγή

## 1.1Θερμοκρασία

Θερμοκρασία είναι το φυσικό μέγεθος που μετρά την ενέργεια κίνησης ή ταλάντωσης της ύλης σε ατομικό επίπεδο. Η ανταλλαγή της ενέργειας αυτής, όταν πιάνουμε κάτι με το χέρι για παράδειγμα, μας δίνει την αίσθηση του ζεστού και του κρύου, με την κατάσταση μεγαλύτερης ενέργειας να αντιστοιχεί στο «ζεστό» ή «θερμό», όταν συνολικά παίρνουμε ενέργεια, και της κατάστασης μικρότερης ενέργειας, κατά την οποία αντιλαμβανόμαστε να χάνουμε συνολικά ενέργεια, να αντιστοιχεί στο «κρύο».

Η θερμοκρασία στη πράξη είναι ακριβώς το μέτρο εκείνο με το οποίο προσδιορίζεται η "θερμική κατάσταση" των διαφόρων σωμάτων, είναι δηλαδή ένα φυσικό μέγεθος που συνδέεται με την μέση κινητική ενέργεια των σωματιδίων ενός συστατικού, το οποίο και χαρακτηρίζει πόσο θερμό ή πόσο ψυχρό είναι αυτό.

Το αίτιο που δημιουργεί το αίσθημα του θερμού ή ψυχρού είναι η θερμότητα που, όταν χορηγείται (απορροφάται) ή αφαιρείται (εκλύεται) από ένα σώμα, προκαλεί "μεταβολή θερμοκρασίας" (ύψωση ή υποβιβασμό). Συνεπώς θερμότητα και θερμοκρασία είναι διαφορετικές έννοιες. Η μεν θερμότητα είναι μορφή ενέργειας, η δε θερμοκρασία ιδιότητα και μέγεθος.

Η θερμοκρασία μετριέται με ειδικά όργανα που λέγονται θερμόμετρα, η λειτουργία των οποίων βασίζεται στο φαινόμενο της διαστολής ή συστολής ως αποτέλεσμα παροχής ή αφαίρεσης της θερμότητας. Αλλά και η μεταβολή της θερμοκρασίας (ύψωση ή υποβιβασμός) είναι επίσης αποτέλεσμα της παροχής ή αφαίρεσης της θερμότητας. Έτσι με την παρατήρηση της διαστολής ή συστολής του υδραργύρου, που χρησιμοποιείται συνήθως στα θερμόμετρα, διαπιστώνεται και η μεταβολή της θερμοκρασίας η οποία αναγνώσκεται στη κατάλληλα βαθμολογημένη σε βαθμούς θερμοκρασίας κλίμακα του θερμομέτρου. Γενικώς τα θερμόμετρα διακρίνονται σε "κοινά" ή "υδραργυρικά" και σε "θερμόμετρα οινόπνεύματος" (για χαμηλότερες θερμοκρασίες). Χρησιμοποιούνται επίσης και "ηλεκτρικά θερμόμετρα" που βασίζονται στην αρχή του θερμοηλεκτρικού στοιχείου, επίσης τα "οπτικά" ή ηλεκτρικά "πυρόμετρα" καθώς και άλλα ειδικών κατηγοριών. Η βαθμολογία των θερμομέτρων γίνεται σε βαθμούς Celsius (Κελσίου) °C, στο μετρικό σύστημα, και σε βαθμούς Fahrenheit (Φαρενάιτ) °F, στο αγγλικό σύστημα.

## 1.2 Τι είναι Αισθητήρας

Αισθητήρας ονομάζεται μία συσκευή που ανιχνεύει ένα φυσικό μέγεθος και παράγει από αυτό μία μετρήσιμη έξοδο. Για παράδειγμα, το υδραργυρικό θερμόμετρο μετατρέπει τη μετρούμενη θερμοκρασία σε διαστολή, η οποία μπορεί να αναγνωστεί από ένα βαθμονομημένο σωλήνα.

Με τον όρο αισθητήρες περιγράφονται όλες εκείνες οι συσκευές που μετρούν μια φυσική ποσότητα και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρικό συνήθως σήμα. Υπάρχουν πολλοί τρόποι κατηγοριοποίησης των αισθητήρων, πολλοί από τους οποίους αναφέρονται στη συνέχεια. Ο πρώτος αφορά το τι μπορεί να μετρήσει ένας αισθητήρας με πιο σημαντική διάκριση αυτή μεταξύ των φυσικών και χημικών αισθητήρων. Οι φυσικοί αισθητήρες ελέγχουν φυσικά μεγέθη όπως θέση, μάζα, ρεύμα, χρόνο και σχετικά τους μεγέθη ενώ οι χημικοί ελέγχουν την παρουσία διαφορετικών αερίων σε συγκεκριμένη ατμόσφαιρα. Ο δεύτερος τρόπος σχετίζεται με τα υλικά στις φυσικές ιδιότητες των οποίων βασίζεται η λειτουργία του αισθητήρα, με κύριες κατηγορίες τους αισθητήρες με αγωγή, ημιαγωγή, διηλεκτρικά, μαγνητικά και υπεραγωγή υλικά. Τέλος ο τρίτος τρόπος κατηγοριοποίησης αναφέρεται στη χρήση του αισθητήρα με σημαντικότερες κατηγορίες τους βιομηχανικούς, τους ιατρικούς, στρατιωτικούς, περιβαλλοντικούς.

Μια γενική διάκριση ανάμεσα στους αισθητήρες τους χωρίζει σε:

Ενεργούς: είναι οι αισθητήρες που απαιτούν εξωτερική διέγερση για να λειτουργήσουν. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας γραμμικής μετατόπισης (LVDT) πρέπει να τροφοδοτείται από κατάλληλη εναλλασσόμενη τάση.

Παθητικούς: είναι οι αισθητήρες που δημιουργούν μόνοι τους μια τάση και δεν χρειάζονται εξωτερική διέγερση. Για παράδειγμα, οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι, όταν πιεστούν, αναπτύσσουν στα άκρα τους ηλεκτρική τάση.

Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε καθημερινά αντικείμενα, όπως κουμπιά ανελκυστήρων ευαίσθητα στην αφή και λάμπες φωτισμού που εκπέμπουν λαμπρότερα ή απαλότερα αγγίζοντας τη βάση τους. Υπάρχουν αναρίθμητες ακόμη χρήσεις που οι περισσότεροι άνθρωποι δεν αντιλαμβάνονται. Εφαρμογές τους συναντάμε στα αυτοκίνητα, σε μηχανές, στην αεροναυπηγική, την ιατρική, τη βιομηχανία και τη ρομποτική.

### 1.3 Τι είναι αισθητήρας θερμοκρασίας



Τα διάφορα θερμόμετρα στηρίζονται στην αλλαγή, λόγω της θερμοκρασίας, κάποιας χαρακτηριστικής ιδιότητας ενός επιλεγμένου υλικού. Οι ιδιότητες που μπορούν να αξιοποιηθούν για τη μέτρηση της θερμοκρασίας είναι εν γένει οι ακόλουθες:

1. Η γραμμική διαστολή ενός υγρού (θερμόμετρα υδραργύρου)
2. Η γραμμική διαστολή ενός μετάλλου (μεταλλικά θερμόμετρα)
3. Η ηλεκτρική αντίσταση ενός μετάλλου (RTDs)
4. Το φαινόμενο του θερμοηλεκτρισμού (ή θερμοηλεκτρικό φαινόμενο) (θερμοζεύγη)
5. Η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα θερμό σώμα (πυρόμετρα)

Κάτω από ορισμένες συνθήκες η θερμική ενέργεια και η ηλεκτρική ενέργεια μπορούν να μετατραπούν η μια στην άλλη. Όταν δύο διαφορετικά μέταλλα σχηματίζουν βρόγχο και τα δύο σημεία σύνδεσης βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, τότε στο κλειστό κύκλωμα δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα που η τιμή του είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας των



δύο επαφών (σχήμα 1). Το ηλεκτρικό ρεύμα οφείλεται στη δημιουργία διαφορετικών ΗΕΔ, αντίθετης πολικότητας, στις δύο επαφές (σχήμα 1). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται θερμοηλεκτρικό φαινόμενο ή φαινόμενο Seebeck. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο γιατί επιτρέπει τη χρήση του θερμοηλεκτρισμού για τη μέτρηση της θερμοκρασίας.

Όταν οι δύο επαφές βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία τότε η συνολική ΗΕΔ είναι μηδέν (Σχήμα 1). Αν η θερμοκρασία μιας επαφής αρχίζει να μεταβάλλεται, ενώ της άλλης όχι, τότε θα δημιουργηθεί μια συνολική ΗΕΔ που θα μεταβάλλεται ανάλογα με τη διαφορά θερμοκρασίας των δύο επαφών. Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας του θερμοζεύγους.

Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των αγωγών των θερμοζευγών είναι συνήθως λευκόχρυσος, χαλκός, σίδηρος, κράματα νικελίου και χρωμίου, κράματα αλουμινίου και νικελίου, και κράματα νικελίου και χαλκού.

Τα θερμοζεύγη έχουν μικρό μέγεθος, ακαριαία απόκριση, μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας, και είναι απλά στην κατασκευή τους. Παρουσιάζουν όμως χαμηλή τάση εξόδου και γενικά δεν έχουν καλή γραμμικότητα σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Χρησιμοποιούνται για μετρήσεις θερμοκρασίας στη βιομηχανία (φούρνους, κλιβάνους, υγρά μέταλλα κλπ.), σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, σε ιατρικές εφαρμογές και σε ερευνητικά εργαστήρια.

## 1.4 Είδη θερμομέτρων

Υπάρχουν πολλά είδη θερμομέτρων. Τα κύρια είδη, τα οποία θα παραθέσουμε παρακάτω είναι τα κύρια χρησιμοποιούμενα και ευρέως γνωστά στην αγορά και στην έρευνα.

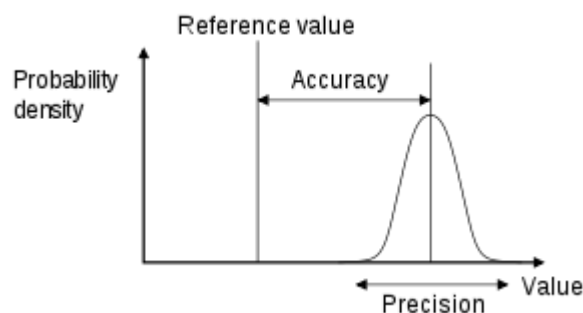
- Διαστολής ενός υγρού
- Διαστολής ενός μετάλλου
- Ηλεκτρικής αντίστασης
- Φαινόμενα θερμοηλεκτρισμού
- Ακτινοβολίας θερμότητας

## 1.5 Στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων ονομάζονται κάποιες παράμετροι που χαρακτηρίζουν τους αισθητήρες. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτρέπουν, την αξιολόγηση της ποιότητας του αισθητήρα και επιτρέπουν την επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή μέτρησης. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να επεκταθούν και στα ηλεκτρονικά κυκλώματα που συνδέονται στην έξοδο του αισθητήρα για να επεξεργαστούν το σήμα του αισθητήρα (πχ. ενίσχυση, φιλτράρισμα, περιορισμός θορύβου, κλπ.). Σε αυτήν την περίπτωση το σήμα εισόδου είναι το σήμα εξόδου του αισθητήρα.

### Ακρίβεια

Ο όρος ακρίβεια (accuracy) εκφράζει τον βαθμό ελευθερίας του αισθητήρα από τυχαία σφάλματα. Αν πάρουμε μεγάλο αριθμό μετρήσεων από έναν ακριβή αισθητήρα, τότε η μεταξύ τους διασπορά θα είναι μικρή. Η ακρίβεια συγγέεται συχνά με την πιστότητα. Η μεγάλη ακρίβεια δεν σημαίνει κατ' ανάγκην και μεγάλη πιστότητα. Ένας ακριβής αισθητήρας μπορεί να έχει κακή πιστότητα. Κακής πιστότητας μετρήσεις από έναν ακριβή αισθητήρα, σημαίνει ότι η μετρήσεις έχουν συστηματικό σφάλμα, γεγονός το οποίο μπορεί να διορθωθεί με βαθμονόμηση (διακρίβωση) του αισθητήρα.



### Πιστότητα

Η πιστότητα δε σχετίζεται με τον αριθμό των δεκαδικών ψηφίων με τον οποίο μπορεί να γίνει η μέτρηση, αλλά με το κατά πόσο το αποτέλεσμα που δίνει ο αισθητήρας πλησιάζει την φυσική

πραγματικότητα, μέσα σε ένα λογικό εύρος τιμών. Η πιστότητα δίνεται συνήθως «ως ποσοστό επί του εύρους λειτουργίας του αισθητήρα».

Για παράδειγμα εάν ένας αισθητήρας πίεσης, περιοχής λειτουργίας 0-10 bar έχει πιστότητα  $\pm 1.0\%$  της πλήρους κλίμακας τότε η μέγιστη αβεβαιότητα του αισθητήρα θα είναι ίση με 0,1 bar. Αυτό σημαίνει ότι όταν ο αισθητήρας δίνει ως αποτέλεσμα 1 bar τότε η μέγιστη αναμενόμενη αβεβαιότητα θα είναι ίση με το 10% της τιμής αυτής. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει το εύρος λειτουργίας των αισθητήρων να είναι όσο το δυνατόν εγγύτερα στο εύρος των μετρούμενων τιμών, ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή πιστότητα των μετρήσεων. Αν δηλαδή έχουμε μία εφαρμογή στην οποία οι πιέσεις μεταβάλλονται στο διάστημα 0-1 bar είναι λάθος να επιλέξουμε αισθητήρα περιοχής λειτουργίας 0-10 bar.

### **Βαθμονόμηση**

Η βαθμονόμηση (calibration) είναι η διαδικασία καθορισμού της συνάρτησης μεταφοράς ενός αισθητήρα ή γενικότερα ενός συστήματος μέτρησης. Η γνώση της συνάρτησης μεταφοράς του αισθητήρα είναι απαραίτητη κατά τη διαδικασία των μετρήσεων, έτσι ώστε μετρώντας την τιμή του ηλεκτρικού σήματος εξόδου που παράγει ο αισθητήρας να υπολογίζεται μέσω της συνάρτησης μεταφοράς και η αντίστοιχη τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης εφαρμόζονται γνωστές τιμές του μετρούμενου φυσικού μεγέθους στον αισθητήρα και μετρώνται οι αντίστοιχες τιμές του ηλεκτρικού σήματος εξόδου του. Η ακρίβεια με την οποία έχει καθοριστεί η συνάρτηση μεταφοράς του αισθητήρα επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια των μετρήσεων, που λαμβάνονται κατά τη χρήση του αισθητήρα σε ένα σύστημα μέτρησης.

### **Νεκρή ζώνη**

Νεκρή ζώνη (dead-zone, dead-band), αποκαλείται η περιοχή μετρήσεων (συνήθως γύρω από το μηδέν) για την οποία ο αισθητήρας δεν αποκρίνεται στις μεταβολές της μετρούμενης ποσότητας.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τα χαρακτηριστικά μίας νεκρής ζώνης. Δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει νεκρή ζώνη καθ' όλο το εύρος ενός οργάνου και συχνά οι υπολογίσιμες νεκρές ζώνες εμφανίζονται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες.



### Διαστάσεις

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

### Ολίσθηση

Ολίσθηση (drift) είναι η αργή μεταβολή του σήματος εξόδου του αισθητήρα, ενώ το μετρούμενο φυσικό μέγεθος παραμένει σταθερό. Μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες, όπως η θερμοκρασία λειτουργίας, υγρασία κλπ. Η μακροχρόνια ολίσθηση (long term drift) είναι η μεταβολή των χαρακτηριστικών του αισθητήρα με την πάροδο μεγάλου χρονικού διαστήματος και μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες, όπως η διάβρωση τμημάτων του αισθητήρα, η ρύπανση του αισθητήρα, η γήρανση των υλικών κατασκευής κλπ.

### Σφάλμα

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

### Υστέρηση

Η υστέρηση προκαλεί διαφορές στην έξοδο που δίνει ένας αισθητήρας, όταν η κατεύθυνση μεταβολής της εισόδου αντιστραφεί. Με τον τρόπο αυτό παράγεται σφάλμα και επηρεάζεται η ακρίβεια της συσκευής.

Η είσοδος του αισθητήρα, δηλαδή η μετρούμενη ποσότητα αυξάνεται με σταθερό βήμα. Όταν φτάσει τη μέγιστη δυνατή τιμή μειώνεται με το ίδιο σταθερό βήμα έως ότου λάβει ξανά την τιμή μηδέν. Η γραφική παράσταση δείχνει τη διαφορά που υπάρχει στην έξοδο του αισθητήρα, όταν η μετρούμενη ποσότητα αυξάνεται ή μειώνεται. Αυτό το γεγονός ονομάζεται υστέρηση του συστήματος. Δεν εμφανίζουν υστέρηση όλοι οι αισθητήρες και τα συστήματα μέτρησης. Η υστέρηση προκαλείται από διάφορους παράγοντες, ειδικότερα τη μηχανική τάση και την τριβή. Η χαλάρωση των συστημάτων γραναζιών και ο «τζόγος» σε συστήματα κοχλιών αποτελούν επίσης σημαντικά αίτια. Τα συστήματα μέτρησης που είναι πιθανό να εμφανίσουν υστέρηση πρέπει να περιέχουν μηχανικά γρανάζια, ρουλεμάν και άλλα κινητά μέρη, τα οποία να τείνουν να είναι ελαστικά, όπως είναι το λάστιχο, τα πλαστικά και κάποια μέταλλα.

### **Καθυστέρηση**

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

### **Γραμμικότητα**

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

### **Χρόνος λειτουργίας**

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

## **Επαναληψιμότητα**

Η επαναληψιμότητα μίας συσκευής είναι ο βαθμός στον οποίο αυτή παράγει το ίδιο αποτέλεσμα, όταν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές τροφοδοτείται με ακριβώς την ίδια είσοδο. Στα αγγλικά αποδίδεται με τη λέξη «precision», η οποία συχνά συγχέεται με την καθημερινή έννοια της ακρίβειας (accuracy). Εντούτοις, στην ορολογία των συστημάτων μέτρησης ένας αισθητήρας μπορεί να έχει υψηλή επαναληψιμότητα και να δίνει παρόμοια έξοδο όταν μετρά πολλές φορές μία συγκεκριμένη είσοδο, αλλά, εάν υπάρχει σημαντικό σφάλμα στην έξοδο τότε η έξοδος δεν είναι ακριβής.

## **Εύρος**

Το εύρος λειτουργίας (operating range) μίας συσκευής ισούται με τα όρια, στα οποία μπορεί η συσκευή να λειτουργεί αξιόπιστα. Το εύρος λειτουργίας ενός αισθητήρα εκφράζεται συνήθως με την ελάχιστη και μέγιστη τιμή που είναι ικανός να μετρά. Άλλες έννοιες του εύρους που αναγράφονται συχνά στις προδιαγραφές είναι το «θερμοκρασιακό εύρος», δηλαδή η περιοχή θερμοκρασιών στην οποία μπορεί να λειτουργεί ο αισθητήρας. Συχνά αναφέρονται επίσης το εύρος τιμών πίεσης και το εύρος τιμών υγρασίας.

## **Απόκριση**

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

## **Διακριτική ικανότητα**

Η διακριτική ικανότητα (resolution) με την οποία μία συσκευή ή ένας αισθητήρας ανιχνεύει ή εμφανίζει μία τιμή αναφέρεται στην μικρότερη είσοδο ή αλλαγή εισόδου που μπορεί αυτός να ανιχνεύσει. Εκφράζεται συνήθως ως προς το μικρότερο διάστημα που μπορεί να ανιχνευθεί ή να μετρηθεί. Όσο μεγαλύτερη είναι η διακριτική ικανότητα ενός δείκτη, τόσο μικρότερο είναι το βήμα που μπορεί ο αισθητήρας να μετρήσει.

## **Ευστάθεια**

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

## **Στατικό σφάλμα**

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

## **Ανοχή**

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

## **Ευαισθησία**

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

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

## Ευαισθησία στη διαταραχή

Η βαθμονόμηση και τα χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα ισχύουν, όταν αυτός λειτουργεί εντός συγκεκριμένου εύρους περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η σχετική υγρασία κ.λ.π. Το εύρος καθορίζεται από τον κατασκευαστή του αισθητήρα.

Μεταβολή κάποιας από τις παραμέτρους αυτές ενδέχεται να μεταβάλλει κάποιο από τα στατικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Η μεταβολή αυτή ορίζεται ως η ευαισθησία στη διαταραχή. Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα που μεταβάλλονται είναι κυρίως δύο και είναι γνωστά ως ολίσθηση του μηδενός (zero drift) και ολίσθηση ευαισθησίας (sensitivity drift). Η ολίσθηση του μηδενός είναι το μη μηδενικό σήμα εξόδου του αισθητήρα, όταν το σήμα εισόδου είναι μηδέν, λόγω μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών. Μετριέται συνήθως σε °C-1 στην περίπτωση (π.χ. βολτόμετρου το οποίο έχει επηρεαστεί από τη μεταβολή της θερμοκρασίας). Αν ένας αισθητήρας επηρεάζεται από περισσότερες από μία περιβαλλοντικές παραμέτρους, τότε αυτός χαρακτηρίζεται από αντίστοιχες σε αριθμό ολισθήσεις του μηδενός. Χαρακτηριστική ολίσθηση μηδενός αισθητήρα πίεσης.

## Δυναμικά χαρακτηριστικά αισθητήρων

Η απόκριση ενός αισθητήρα σε ένα μεταβαλλόμενο σήμα εισόδου είναι διαφορετική από την απόκριση του σε ένα σταθερό ή αργά μεταβαλλόμενο σήμα εισόδου. Η απόκριση χαρακτηρίζεται από μια δυναμική συμπεριφορά που δε μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά από τα στατικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι λόγοι αυτής της διαφοροποίησης είναι ότι οι αισθητήρες περιλαμβάνουν στοιχεία που συσσωρεύουν ενέργεια όπως μάζες, πυκνωτές, επαγωγικά ή θερμικά στοιχεία κ.α. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα προσδιορίζονται εξετάζοντας την απόκριση του σε διάφορες κυματομορφές του σήματος εισόδου. Αυτές μπορεί να είναι κυματομορφές ώθησης, βήματος, γραμμικές, ημιτονοειδείς ή θορύβου.

Σε ένα όμως πραγματικό αισθητήρα η συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά του διαφέρουν αρκετά. Οι αιτίες είναι τόσο τα κατασκευαστικά προβλήματα που προκύπτουν όσο και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες, που επηρεάζουν τη λειτουργία του, επιπλέον αν ο αισθητήρας συνοδεύεται από κάποιο ηλεκτρονικό κύκλωμα, τότε αυτό το κύκλωμα μπορεί επίσης να επιβάλλει περιορισμούς στην λειτουργία του.



## 1.6 Πεδία Εφαρμογών Αισθητήρων

Οι αισθητήρες έχουν άπειρες εφαρμογές. Δεν υπάρχει συσκευή που να μην χρησιμοποιεί κάποιας μορφής αισθητήρα. Συνοπτικά ανάλογα με τον κλάδο που τους χρησιμοποιεί, οι εφαρμογές των αισθητήρων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Διαγνωστική : ολοκληρωμένα συστήματα ανάλυσης
- Φαρμακευτική : ανίχνευση και έλεγχος φαρμάκων
- Ιατρική : διαγνωστική
- Βιομηχανία τροφίμων και αγροτική οικονομία : διαγνωστική τροφίμων
- Βιοτεχνολογία : ψηφίδες DNA, ψηφίδες πρωτεϊνών, ψηφίδες κυττάρων
- Χημεία : Ειδικοί αισθητήρες μεγέθους ολοκληρωμένου κυκλώματος (lab-on-a-chip)
- Τεχνολογία περιβάλλοντος : μετρήσεις περιβαλλοντολογικές του αέρα νερού αποβλήτων
- Αυτοκινητοβιομηχανία : Κατασκευή αυτοκινήτων από robot, έλεγχος της ποιότητας των καυσίμων, ανάλυση αερίων, αερόσακοι

Καταγράφεται η αύξηση πωλήσεων στην παγκόσμια αγορά αισθητήρων για τους κυριότερους τομείς εφαρμογών, η οποία αναμενόταν 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%.

## 2.Εισαγωγή στα πρωτόκολλα επικοινωνιών & αισθητήρων

Σύμφωνα με τον οργανισμό “Terms and definitions in industrial-process measurement and control”, αισθητήρας(sensor) ορίζεται το βασικό στοιχείο σε μια μετρητική αλυσίδα, που μετατρέπει την μεταβλητή εισόδου σε μετρήσιμο σήμα.

Ερέθισμα(stimulus) εννοούμε μια ποσότητα, ιδιότητα ή κατάσταση η οποία γίνεται αισθητή και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα.

Στόχος του αισθητήρα, γενικά, είναι να μετατρέπει μια μη ηλεκτρική ποσότητα σε ηλεκτρική, δηλαδή σε ένα σήμα το οποίο είναι δυνατόν να διοχετευτεί, να ενισχυθεί και να τροποποιηθεί από κάποιο ηλεκτρονικό κύκλωμα. Για παράδειγμα, τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη, οι ανιχνευτές θερμοκρασίας αντίστασης(RTDs) και τα θερμίστορ(PTC & NTC) μετατρέπουν την θερμοκρασία σε ένα αναλογικό σήμα, το οποίο ένας αναλογικός σε ψηφιακό μετατροπέας μπορεί να μετρήσει.

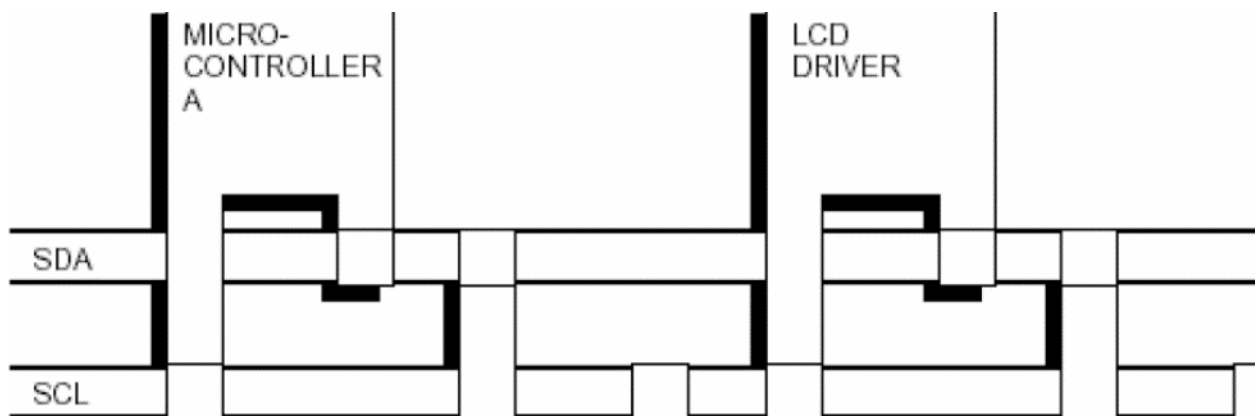
### 2.1 Διασύνδεση αισθητήρων με I2C

#### 2.1.1 Εισαγωγή στο I2C

Το I2C Bus αποτελεί ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για την διασύνδεση μεταξύ διαφορετικών ολοκληρωμένων, όπως των μικροελεγκτών και των υπόλοιπων ολοκληρωμένων περιφερειακών όπως EEPROMs, A/D μετατροπείς, LCD drivers, αισθητήρες αλλά και με άλλους μικροελεγκτές. Είναι ένα πρωτόκολλο που μεταδίδει δεδομένα σειριακά. Με το I2C αποφεύγεται η χρησιμοποίηση ενός παράλληλου διαύλου δεδομένων που εισάγει μεγάλη πολυπλοκότητα στη σχεδίαση αλλά και μεγαλύτερο κόστος. Βρίσκει πολλές εφαρμογές στα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα όπως σε συσκευές εικόνας και ήχου, σε τηλεφωνικές συσκευές, modems, dip switches, embedded microprocessor boards αλλά και στην επικοινωνία αισθητήρων θερμοκρασίας με τις οθόνες όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Οι ταχύτητες τις οποίες επιτυγχάνει μπορούν να φτάσουν μέχρι και 3.4 Mbps, ταχύτητες ικανές για την ανταλλαγή δεδομένων ανάμεσα στους κόμβους και το μήκος του καλωδίου μερικές δεκάδες μέτρα, μήκος αρκετά ικανό αν θεωρήσουμε ότι οι αποστάσεις συνήθως δεν ξεπερνάνε τα μερικά μέτρα.

## 2.1.2 Ιστορικό Υπόβαθρο

Το πρωτόκολλο I2C (inter-integrated circuit) αναπτύχθηκε την δεκαετία του 1980 από την Philips αρχικά με σκοπό την εύκολη επικοινωνία μεταξύ μιας Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας(CPU) με τα περιφερειακά κυκλώματα μιας τηλεόρασης. Σήμερα, το I2C bus χρησιμοποιείται σε πολύ περισσότερες εφαρμογές απ' αυτές σε εξαρτήματα ήχου και video. Το I2C bus είναι γενικά αποδεκτό στην βιομηχανία και έχει υιοθετηθεί από πολλούς κατασκευαστές chip όπως Xicor, ST Microelectronics, Infineon Technologies, Intel, Texas Instruments, Maxim, Atmel, Analog Devices και άλλες εταιρίες.



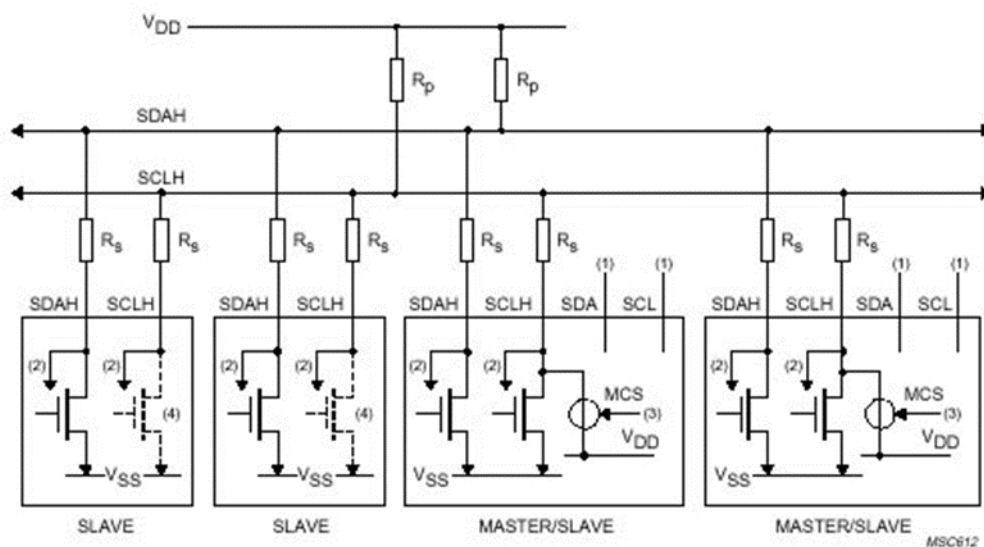
## 2.1.3 Χαρακτηριστικά του I2C Bus

Το I2C υλοποιείται με την χρήση δύο καλωδίων διπλής κατεύθυνσης. Τα δύο καλώδια αυτά είναι το SDA(Serial Data) που χρησιμοποιείται για την μεταφορά δεδομένων και το SCL(Serial Clock) για το ρολόι και είναι συνδεδεμένα πάντα σε θετική τροφοδοσία μέσω pull-up αντιστάσεων. Κάθε συσκευή πάνω στο bus έχει τη δικιά της μοναδική διεύθυνση, καθώς επίσης και το δικαίωμα αποστολής και λήψης δεδομένων από το δίαυλο. Το μήκος του καλωδίου(bus) μπορεί να φτάσει τα 3 με 4 μέτρα αλλά μπορεί και να αυξηθεί με τους λεγόμενους bus extenders έως και 100m. Επιπλέον κάθε συσκευή πάνω στο bus μπορεί να λειτουργεί είτε ως Master, οπότε αποφασίζει για τις λειτουργίες που επιτελούνται πάνω στο bus, είτε ως slave, οπότε ανταποκρίνεται στις αιτήσεις του Master. Μια γενική τοπολογία ενός δικτύου I2C με Master έναν μικροελεγκτή.

Εξαιτίας της αμφίδρομης φύσης των καλωδίων, SDA και SCL, τα στάδια εξόδου των ολοκληρωμένων για να μπορούν να αντεπεξέρχονται σε τυχόν συγκρούσεις (collision) χωρίς να καταστρέφονται έχουν στάδια εξόδου ανοικτού συλλέκτη (open collector/drain) έτσι ώστε να διεκπεραιώνουν την καλωδιωμένη-AND (wired-AND) λογική του καλωδίου. Το στάδιο εξόδου του ανοικτού συλλέκτη, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα, δεν έχει pull-up αντίσταση συνεπώς δεν μπορεί να οδηγήσει την γραμμή σε υψηλή στάθμη. Οι εξωτερικές pull-up αντιστάσεις οδηγούν τις γραμμές SDA, SCL οποτεδήποτε οι γραμμές αυτές δεν οδηγούνται από το τρανζίστορ εξόδου σε υψηλή στάθμη.

Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά είναι:

- Σειριακή επικοινωνία
- Απλός σχεδιασμός (αποφεύγοντας τον πολύπλοκο σχεδιασμό και το υψηλό κόστος που συνεπάγεται από αυτό).
- Μεταδίδει με 3,4 Mbps



- (1) SDA and SCL are not used here but may be used for other functions.  
 (2) To input filter.  
 (3) Only the active master can enable its current-source pull-up circuit  
 (4) Dotted transistors are optional open-drain outputs which can stretch the serial clock signal SCLH.

Από την παραπάνω τοπολογία συμπεραίνουμε ότι όταν το bus βρίσκεται σε αδρανή κατάσταση οι δυο γραμμές SDA, SCL, είναι σε υψηλή στάθμη. Το κύκλωμα οδήγησης των διαφόρων συσκευών

μπορεί μόνο να θέσει σε μηδενική στάθμη τις γραμμές SDA, SCL ενώ η υψηλή στάθμη δίνεται από τις εξωτερικές pull-up αντιστάσεις. Η ακριβής τιμή των αντιστάσεων δεν παίζει καθοριστικό ρόλο στην λειτουργία ενός συστήματος επικοινωνίας μέσω του πρωτοκόλλου I2C. Οι τιμές των αντιστάσεων μπορούν να κυμαίνονται από 1k8 (1800 ohms) έως 47k (47000 ohms). Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τιμές είναι 1k8, 4k7 και 10k. Η απουσία όμως αυτών των αντιστάσεων θα είχε ως αποτέλεσμα οι γραμμές των SCL, SDA να «κρατιούνται» πάντα σε χαμηλό επίπεδο - κοντά στα 0 volts- και το I2C να μην λειτουργεί. Η τιμή των pull-up αντιστάσεων, μαζί με την χωρητικότητα των γραμμών και των εισόδων των συσκευών, καθορίζουν την καθυστέρηση στην άνοδο του παλμού και για αυτό θα πρέπει το γινόμενο τους να είναι αρκετά μικρό, ώστε να είναι ευδιάκριτο το μέτωπο του παλμού. Για το λόγο αυτό η τιμή των pull-up αντιστάσεων θα πρέπει να είναι αρκετά μικρή.

## 2.2.1 Εισαγωγή στο SPI

Το SPI(Serial Peripheral Interface), όπως και το I2C αναπτύχθηκε με σκοπό την εύκολη επικοινωνία μεταξύ ολοκληρωμένων και τον καλύτερο τρόπο διασύνδεσης των περιφερειακών μονάδων και των μικροελεγκτών μεταξύ τους. Το Πρωτόκολλο SPI ή Serial Peripheral Interface Bus επιτρέπει την σειριακή σύγχρονη επικοινωνία μεταξύ ολοκληρωμένων σε πλήρης αμφίδρομη επικοινωνία. Ο διάυλος υλοποιήθηκε για πρώτη φορά από την εταιρία Motorola. Οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους σε mode Master/Slave. Ο Master του διαύλου είναι το ολοκληρωμένο που παράγει το frame των δεδομένων και το μεταδίδει προς τα ολοκληρωμένα slave. Μπορούν σε έναν SPI διάυλο να διασυνδεθούν περισσότερες από μία συσκευές slave χρησιμοποιώντας της γραμμές Chip Select. Πολλές φορές το SPI το αποκαλούν "σειριακό διάυλο 4 καλωδίων".

Το SPI επιτρέπει σε δεδομένα των 8-bits να αποστέλλονται σύγχρονα και ταυτόχρονα να λαμβάνονται σύγχρονα δεδομένα με ταχύτητα που φτάνει το 1Mbps.

Για να επιτευχθεί επικοινωνία το SPI χρησιμοποιεί 4 ακροδέκτες:

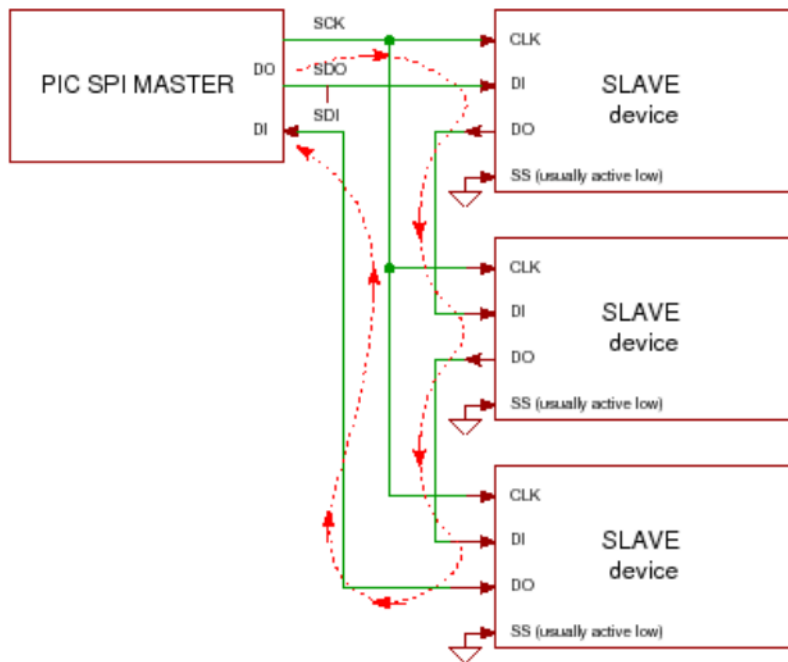
1. Τον ακροδέκτη SDO(Σειριακά δεδομένα εξόδου)
2. Τον ακροδέκτη SDI(Σειριακά δεδομένα εισόδου)
3. Το σειριακό ρολόι (SCK)

Επιπρόσθετα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένας τέταρτος ακροδέκτης στην λειτουργία slave: Επιλογή slave (SS'). Σε όλες τις μεταφορές στο SPI το ψηφίο υψηλότερης αξίας στέλνεται πρώτο, όπως εξάλλου συμβαίνει και στο I2C. Όταν αρχικοποιείται το SPI, πρέπει να καθοριστούν ορισμένα χαρακτηριστικά.



## 2.2.2 Χαρακτηριστικά του SPI

- Επιτρέπει την σύγχρονη επικοινωνία.
- Είναι σειριακό.
- Είναι πλήρως αμφίδρομο (full-duplex).
- Δεν είναι plug-and-play.
- Υπάρχει ένας και μόνο ένας Master στον δίαυλο, ενώ μπορεί να υπάρξουν ένας ή περισσότεροι Slaves.
- Το SPI επιτρέπει σε δεδομένα των 8-bits να αποστέλλονται σύγχρονα και ταυτόχρονα να λαμβάνονται σύγχρονα δεδομένα με ταχύτητα που φτάνει το 1Mbps.



## 2.3 Διασύνδεση μέσω USB πρωτοκόλλου

### 2.3.1 Εισαγωγή στο πρωτόκολλο USB

Ο Ενιαίος Σειριακός Δίαυλος, γνωστός και ως Universal Serial Bus ή απλά USB, είναι ένα σύστημα διαύλου, το οποίο χρησιμοποιείται για την επικοινωνία ενός υπολογιστή με περιφερειακά συστήματα. Η σύνδεση Ενιαίου Σειριακού Διαύλου (ΕΣΔ), απαιτεί λιγότερο χώρο και μπορεί επίσης να παρέχει ενέργεια σε απλές συσκευές όπως το ποντίκι, το πληκτρολόγιο ή την ιστοκάμερα. Με τη χρήση του ΕΣΔ οι περιφερειακές συσκευές και τα χαρακτηριστικά τους μπορούν να αναγνωρίζονται αυτόματα. Οι σύγχρονοι υπολογιστές διαθέτουν συνήθως 4 έως 6 θύρες.

### 2.3.2 Αναλυτική περιγραφή

Ο Ενιαίος Σειριακός Δίαυλος είναι τμηματικό πρότυπο διαύλου για τη διασύνδεση συσκευών. Ο USB είχε ως σκοπό να επιτρέψει στις περιφερειακές μονάδες να συνδέονται με τον υπολογιστή χρησιμοποιώντας μια ενιαία τυποποιημένη υποδοχή διεπαφών και να βελτιώσει τις έτοιμες προς χρήση ικανότητες των συσκευών για σύνδεση ή αποσύνδεσή τους με το σύστημα χωρίς να χρειάζεται επανεκκίνηση. Άλλα χαρακτηριστικά γνωρίσματα περιλαμβάνουν την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στις συσκευές χαμηλής κατανάλωσης χωρίς την ανάγκη εξωτερικής παροχής ηλεκτρικού ρεύματος και την δυνατότητα πολλών συσκευών USB να χρησιμοποιηθούν χωρίς την

απαίτηση ρυθμίσεων ή μεμονωμένων προγραμμάτων οδήγησης (drivers) από τους κατασκευαστές για να εγκατασταθούν. Ο USB προορίζεται να βοηθήσει να αποσυρθούν όλες οι διαφορετικού τύπου θύρες, σειριακές ή παράλληλες. Ο USB μπορεί να συνδέσει τις περιφερειακές μονάδες υπολογιστών όπως το ποντίκι, το πληκτρολόγιο, τα PDA, τα χειριστήρια παιχνιδιών, οι σαρωτές, οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, οι εκτυπωτές, οι συσκευές MP3 και οι φορητές μονάδες δίσκων ή μνημών (στο εξής οι τελευταίες θα αναφέρονται με τον αγγλικό όρο USB flash drive ή απλά flash drive). Για πολλές από τις προαναφερόμενες συσκευές η μέθοδος σύνδεσης USB έχει γίνει η τυποποιημένη μέθοδος σύνδεσης. Το USB χρησιμοποιείται επίσης εκτενώς για να συνδέσει τους μη-δικτυακούς εκτυπωτές με θύρα USB και απλοποιεί τη σύνδεση πολλών εκτυπωτών με έναν υπολογιστή. Ο μεγάλος όγκος των USB flash drives και η ευκολία χρησιμοποίησής τους έχει δημιουργήσει ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια των προσωπικών δεδομένων, που όμως αγνοείται συχνά. Μέσω λογισμικού μπορούν να κλειδωθούν οι συσκευές USB (ακόμα και οι φορητές μνήμες flash), ώστε να μην λειτουργούν με τον Η/Υ και να επιτρέπεται σε άλλες περιφερειακές μονάδες USB να λειτουργούν, όπως οι εκτυπωτές. Ο δίαυλος USB σχεδιάστηκε αρχικά για τους προσωπικούς υπολογιστές, αλλά έχει γίνει κοινό και σε άλλες συσκευές, όπως τα PDA και οι παιχνιδομηχανές. Το 2004 υπήρχαν περίπου 1 δισεκατομμύριο συσκευές USB στον κόσμο.





### 2.3.3 Τι είναι ο διάυλος USB

Ο διάυλος USB είναι μια σύνδεση Η/Υ με περιφερειακές συσκευές. Το 1995 η θύρα USB άρχισε να εμφανίζεται στους πρόσφατα κατασκευασμένους υπολογιστές. Από το 1997 τα Windows 98 ήταν η πρώτη έκδοση του λειτουργικού συστήματος Windows που υποστήριξε την τεχνολογία USB. Δεν πέρασε πολύς καιρός πριν αυξηθεί η δημοτικότητα της θύρας USB σε σημείο που όλα τα προηγούμενα πρότυπα σύνδεσης Η/Υ να αντικατασταθούν με περιφερειακά αυτής της θύρας σύνδεσης. Οι σημερινοί υπολογιστές παρέχουν τουλάχιστον τρεις θύρες σύνδεσης USB. Η σύνδεση USB υποστηρίζει την έτοιμη προς χρήση εγκατάσταση, δηλαδή δεν χρειάζονται κάποια ξεχωριστά προγράμματα οδήγησης (drivers) για να λειτουργήσει η θύρα USB, αλλά το λειτουργικό σύστημα περιλαμβάνει οδηγούς για αρκετές κλάσεις (classes) συσκευών USB. Η διασύνδεση USB απολαμβάνει επίσης της ευρείας αναγνώριση των χρηστών και φήμη για την υψηλή απόδοσή της.

### 2.3.4 Ταχύτητες USB

Ο USB λειτουργεί με τις ακόλουθες ταχύτητες:

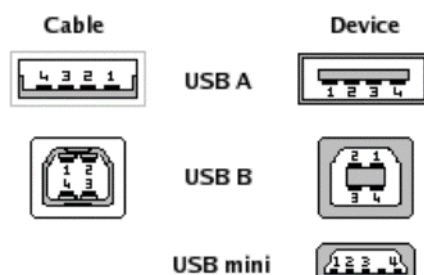
- 1.5 Mbit/s (χαμηλή-low ταχύτητα)
- 12 Mbit/s (πλήρης-full ταχύτητα)
- 480 Mbit/s (υψηλή-high ταχύτητα)
- 5 Gbit/s (υπερυψηλή-Super Speed ή SS)

Η πιο πρόσφατη εκδοχή του USB που λειτουργεί με την υπερύψηλής ταχύτητας ονομάζεται USB 3.0.

### 2.3.5 Ιστορία

Η προδιαγραφή USB 1.0 παρουσιάστηκε τον Νοέμβριο του 1995. Ο USB προωθήθηκε από την Intel (UHCI and open software stack), τη Microsoft (Windows software stack), την Philips (Hub, uSB-ήχος) και την US Robotics. Αρχικά ο USB προοριζόταν να αντικαταστήσει το πλήθος θυρών στο πίσω μέρος των Η/Υ, καθώς επίσης και να απλοποιήσει τη διαμόρφωση του λογισμικού των συσκευών επικοινωνίας. Η USB ήταν, επίσης, η κύρια θύρα στον Apple iMac που παρουσιάστηκε

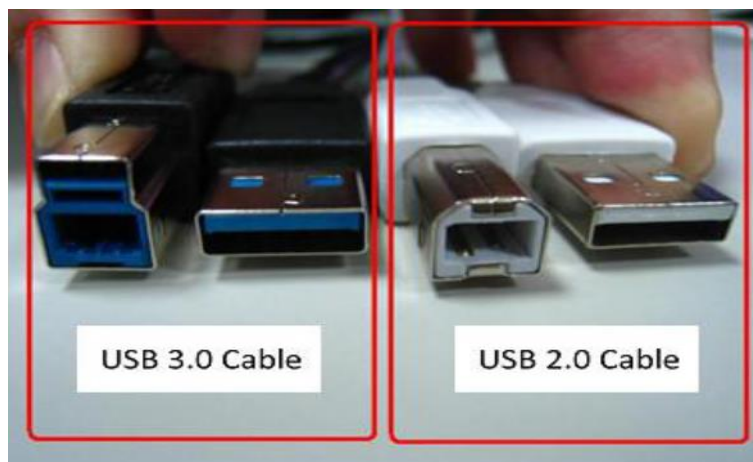
στις 6 Μαΐου του 1998, συμπεριλαμβανομένης τη θύρας για το νέο πληκτρολόγιο και το ποντίκι. Το πρότυπο USB 1.1 παρουσιάστηκε τον Σεπτέμβριο του 1998 για να αποκαταστήσει τα προβλήματα που εμφανίστηκαν με τις προηγούμενη έκδοσή του. Από το 2008 η προδιαγραφή USB βρίσκεται στην έκδοση 2.0 (με τις αναθεωρήσεις). Η Hewlett Packard, η Intel, η Lucent (τώρα Alcatel-Lucent), η Microsoft, η NEC, και η Philips συνεργάστηκαν από κοινού στην πρωτοβουλία να αναπτυχθεί ένα πρότυπο με υψηλότερο ποσοστό μεταφοράς δεδομένων από την προδιαγραφή 1.1. Η προδιαγραφή USB 2.0 παρουσιάστηκε τον Απρίλιο του 2000 και τυποποιήθηκε από την USB-IF στα τέλη του 2001. Ο εξοπλισμός προσαρμόζεται σε οποιαδήποτε έκδοση των προτύπων (1.0 , 1.1 , 2.0) και λειτουργεί, επίσης, με τις συσκευές που σχεδιάστηκαν σε οποιαδήποτε προηγούμενη προδιαγραφή (1.0 , 1.1 , 2.0) (γνωστή και ως οπίσθια συμβατότητα). Τα μικρότερα βύσματα και υποδοχές USB για τη χρήση στις φορητές και κινητές συσκευές, αποκαλούμενες mini-B, προστέθηκαν στην προδιαγραφή USB με τη πρώτη ειδοποίηση για την αλλαγή του σχήματος των αρχικών βυσμάτων και υποδοχών. Μια νέα παραλλαγή των μικρότερων βυσμάτων USB και των υποδοχών, αποκαλούμενη micro-USB, και των υποδοχών, αποκαλούμενη micro-USB, αναγγέλθηκε από το φόρουμ εφαρμοστών USB στις 4 Ιανουαρίου του 2007.



### 2.3.6 Γενική επισκόπηση USB

Ένα σύστημα USB έχει ασύμμετρο σχεδιασμό, που αποτελείται από μια υποδοχή (host), ένα πλήθος θυρών USB από κάτω και πολλαπλάσιων περιφερειακών συσκευών, που συνδέονται σε μια συσκευή. Πρόσθετοι κατανεμητές USB μπορούν να περιληφθούν σε σειρές, επιτρέποντας τη διακλάδωση σε μια σειρά από υποδοχές, υπό τον όρο ότι δεν ξεπερνά το όριο πέντε συνδέσεων. Η υποδοχή USB μπορεί να έχει πολλαπλάσιους ελεγκτές και κάθε ένας από αυτούς μπορεί να παρέχει μία ή περισσότερες θύρα/θύρες USB. Μέχρι 127 συσκευές, συμπεριλαμβανομένων των συσκευών ελέγχου, μπορούν να συνδεθούν με έναν ενιαίο ελεγκτή θυρών. Οι συσκευές USB συνδέονται μαζικά μέσω των θυρών. Πάντα υπάρχει ένας κατανεμητής (hub) γνωστός ως αρχικός κατανεμητής, ο οποίος είναι ενσωματωμένος στον ελεγκτή εισόδων. Υπάρχει και ο «διαμοιραστής» επιτρέποντας στους πολλαπλάσιους υπολογιστές να έχουν πρόσβαση στην ίδια περιφερειακή συσκευή, είτε μεταξύ των PC αυτόματα είτε χειροκίνητα. Ο διαμοιραστής χρησιμοποιείτε περισσότερο σε μικρά γραφεία και εταιρίες. Μια ενιαία φυσική συσκευή USB μπορεί να αποτελείται από διάφορες υποσυσκευές που αναφέρονται ως οι βασικές συσκευές λειτουργίας, επειδή κάθε μεμονωμένη συσκευή μπορεί να παρέχει διάφορες λειτουργίες, όπως σε μία ιστοκάμερα (τηλεοπτική λειτουργία συσκευών) ή σε ένα ενσωματωμένο μικρόφωνο (ακουστική λειτουργία συσκευών). Η επικοινωνία των συσκευών USB είναι βασισμένη πάνω σε

κανάλια. Τα κανάλια είναι συνδέσεις από την υποδοχή που καταλήγουν στη συσκευή και ονομάζεται άκρο (endpoint). Επίσης, το άκρο χρησιμοποιείται περιστασιακά για να αναφερθεί στο "κανάλι". Μια συσκευή USB μπορεί να έχει μέχρι 32 συνολικά ενεργά κανάλια", 16 στην υποδοχή και 16 από στον ελεγκτή. Κάθε άκρο μπορεί να μεταφέρει δεδομένα σε μια κατεύθυνση μόνο, είτε μέσα είτε έξω από τη συσκευή, και έτσι κάθε "κανάλι" είναι ομοιοκατευθυνόμενο. Τα άκρα αυτά ομαδοποιούνται στις διεπαφές και κάθε διεπαφή συνδέεται με μια ενιαία λειτουργία συσκευών. Μια εξαίρεση σε αυτό είναι το άκρο μηδέν, το οποίο χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση των συσκευών και δεν συνδέεται με καμία διεπαφή. Όταν μια νέα συσκευή USB συνδέεται με μια υποδοχή, αρχίζει η διαδικασία απαρίθμησης USB. Η απαρίθμηση υφίσταται αρχικά επεξεργασία και μετά στέλνει ένα σήμα αναστοιχειοθέτησης στη συσκευή USB. Η ταχύτητα της συσκευής USB καθορίζεται κατά τη διάρκεια της σηματοδότησης. Μετά από την αναστοιχειοθέτηση, οι πληροφορίες της κάθε USB διαβάζονται από τη συσκευή μέσω της υποδοχής της και αποδίδεται μία συγκεκριμένη διεύθυνση εύρους επτά bit στον ελεγκτή. Εάν η συσκευή υποστηρίζεται σωστά από την υποδοχή της, τότε οι πληροφορίες, φορτώνονται και η συσκευή τίθεται σε κατάσταση διαμόρφωσης. Εάν η υποδοχή USB επανεκκινήσει, η διαδικασία απαρίθμησης επαναλαμβάνεται για όλες τις συνδεδεμένες συσκευές. Ο ελεγκτής υποδοχών καθορίζει το δίαυλο για την επικοινωνία και έχει, συνήθως, κυκλική μορφή. Έτσι, καμία συσκευή USB δεν μπορεί να μεταφέρει οποιαδήποτε δεδομένα, όσον αφορά στο δίαυλο, χωρίς ένα ρητό αίτημα από την υποδοχή της.



### 2.3.7 USB Αισθητήρας Επιτάχυνσης 5G

Το αξελερόμετρο 5G μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλά πειράματα εντός και εκτός εργαστηρίου. Μετράει επιταχύνσεις κατά μήκος του βέλους που βρίσκεται πάνω στον αισθητήρα σε μονάδες  $m/s^2$  ή σε  $g$ . Ο αισθητήρας επηρεάζεται από την βαρύτητα της Γης και το γεγονός αυτό μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε για να τον βαθμονομήσουμε (καλιμπράρουμε). Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως κλισίμετρο για την μέτρηση γωνιών αφού όταν αλλάζουμε την θέση του από οριζόντια σε κάθετη θα αλλάξει και η ένδειξη του ανάλογα με τη γωνία (0-90°).

Ένας αισθητήρας οπού με τις κατάλληλες παραμετροποιήσεις μπορεί να κάνει πληθώρα με μετρήσεων, όπως θερμοκρασίας, ταχύτητας, αποστάσεις κτλ.

- Τεχνικά χαρακτηριστικά: 5G
- Εύρος:  $-47 \text{ m/s}^2 \sim +47 \text{ m/s}^2$
- Διαθέσιμο εύρος:  $-19.6 \text{ m/s}^2 \sim +19.6 \text{ m/s}^2$
- Ανάλυση:  $0.038 \text{ m/s}^2$
- Απόκριση συχνότητας:  $0 \sim 100 \text{ Hz}$

Ο προαναφερόμενος αισθητήρας λέγεται και αισθητήρας του μέλλοντος διότι υποστηρίζει πολύ υψηλές ταχύτητες 5ης γενιάς τεχνολογίας. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί, με τις κατάλληλες παραμετροποιήσεις, να κάνει αρκετές μετρήσεις. Μεγάλο μέρος του επιστημονικού κοινού τον θεωρεί κάτι σαν αισθητήρα-μικροελεκτή και σύντομα με αυτό το πρότυπο θα αποτελέσει το μέλλον των αισθητήρων.

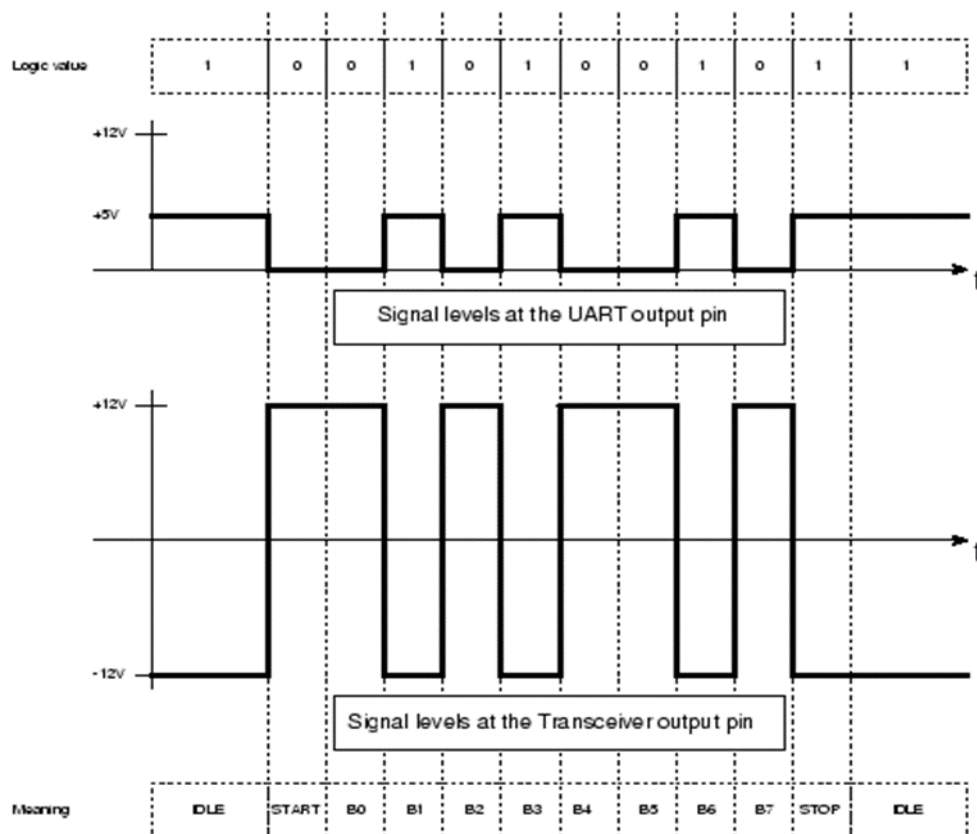


## 2.4 Πρωτόκολλο επικοινωνίας RS232

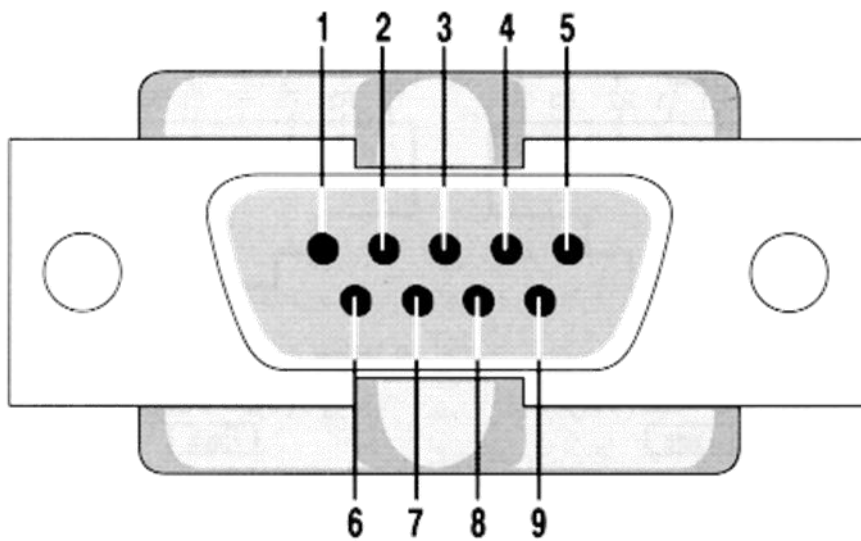
### 2.4.1 Εισαγωγή στο πρωτόκολλο επικοινωνίας RS232

Το RS232 (Recommended Standard 232) είναι ένα πρότυπο για σειριακή μετάδοση δυαδικών σημάτων δεδομένων ( ένα bit τη φορά) μεταξύ ενός DTE (Data Terminal Equipment) και ενός DCE (Data Circuit Terminating Equipment). Συχνότερα χρησιμοποιείται στις σειριακές θύρες των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Τα χαρακτηριστικά του RS232, όπως η τάση λειτουργίας, ο αριθμός των pins κ.τ.λ., έχουν καθοριστεί από το Electronics Industry Association (EIA) και είναι ίδια για όλες τις εφαρμογές. Βέβαια, υπάρχουν και κάποια χαρακτηριστικά, όπως η μορφή κρυπτογράφησης των χαρακτήρων, ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων κ.α., τα οποία καθορίζονται από τον εκάστοτε χρήστη. Με το RS232, τα δεδομένα μεταδίδονται σειριακά, σε μορφή bits. Υποστηρίζει τη σύγχρονη επικοινωνία καθώς και την ασύγχρονη. Αυτό συμβαίνει επειδή τα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για την αποστολή και τη λήψη δεδομένων, είναι διαφορετικά. Έτσι μπορεί να γίνει και ταυτόχρονη ανταλλαγή δεδομένων (full duplex). Τα επίπεδα τάσης που διαχειρίζεται το πρωτόκολλο, τα διαχωρίζει σε λογικό ένα και λογικό μηδέν. Έγκυρα σήματα, θεωρεί σήματα αρνητικά ή θετικά από 3 έως 15 V, όμως συχνότερα χρησιμοποιούνται τα +12 V και -12V. Τα σήματα που είναι πολύ κοντά στο μηδέν, τα λαμβάνει ως λανθασμένα. Σαν λογικό ένα, αντιλαμβάνεται τις αρνητικές τάσεις, ενώ σαν λογικό μηδέν αντιλαμβάνεται τις θετικές. Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται μία απλή μετάδοση του γράμματος j.

RS232 Transmission of the letter 'J'



Τα δεδομένα μεταδίδονται σειριακά προς τη μία κατεύθυνση μέσω ενός ζεύγους καλωδίων. Το pin που χρησιμοποιείται για την απόστολή, ονομάζεται Tx και το pin της λήψης ονομάζεται Rx. Για αμφίδρομη μετάδοση, απαιτούνται το λιγότερο τρία καλώδια, ένα για την αποστολή, ένα για τη λήψη και ένα για τη γείωση. Η σύνδεση με την άλλη συσκευή πρέπει να γίνει σταυρωτά, δηλαδή το pin Tx της πρώτης συσκευής να συνδεθεί με το Rx της δεύτερης και αντίστοιχα το Rx της πρώτης με το Tx της δεύτερης.



Pin	Signal	Pin	Signal
1	Data Carrier Detect	6	Data Set Ready
2	Received Data	7	Request to Send
3	Transmitted Data	8	Clear to Send
4	Data Terminal Ready	9	Ring Indicator
5	Signal Ground		

### 2.4.2 Ιστορία RS232

Τα πρώτα DTEs ήταν ηλεκτρομηχανικά τηλέτυπα και τα πρώτα DCEs ήταν (συνήθως) μόντεμ. Όταν άρχισαν να χρησιμοποιούνται τερματικά, ήταν συχνά σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι συνδιαλέξιμα με τα τηλέτυπα, και έτσι υποστήριζαν το RS-232. Η αναθεώρηση C του προτύπου εκδόθηκε το 1969 για να προσαρμόσει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά αυτών των συσκευών στο πρότυπο. Αφού η εφαρμογή σε συσκευές όπως υπολογιστές, εκτυπωτές, πειραματικά όργανα, και ούτω καθεξής δεν λαμβανόταν υπόψη από το πρότυπο, οι σχεδιαστές που υλοποιούσαν μια συμβατή, με το RS-232 διεπαφή του εξοπλισμού τους, συχνά ερμήνευαν τις απαιτήσεις ιδιόμορφα. Συχνά προβλήματα ήταν η μη πρότυπη απόδοση ακίδων των κυκλωμάτων στα βύσματα, και λανθασμένα ή απόντα σήματα ελέγχου. Η έλλειψη συνέπειας προς τα πρότυπα

παρήγε μια ακμάζουσα βιομηχανία breakout κουτιών, κουτιών patch, δοκιμαστικού εξοπλισμού, βιβλίων, και άλλων βοηθημάτων για την σύνδεση αταίριαστων συσκευών. Μια κοινή απόκλιση από το πρότυπο ήταν η οδήγηση των σημάτων σε μειωμένο δυναμικό: το πρότυπο απαιτεί ο πομπός να χρησιμοποιεί +12 V και -12 V, αλλά απαιτεί από τον δέκτη να ξεχωρίζει δυναμικά μικρά όσο +3 V και -3 V. Μερικοί κατασκευαστές λοιπόν κατασκεύαζαν πομπούς οι οποίοι παρείχαν +5 V και -5 V αποκαλώντας τους «RS-232 συμβατούς». Μεταγενέστεροι προσωπικοί υπολογιστές (και άλλες συσκευές) ξεκίνησαν να κάνουν χρήση του προτύπου ώστε να μπορούν να συνδέσουν υπάρχοντα εξοπλισμό. Για πολλά χρόνια, μια θύρα συμβατή με το RS-232 ήταν το χαρακτηριστικό γνώρισμα για τις σειριακές επικοινωνίες, όπως οι συνδέσεις μέσω μόντεμ, σε πολλούς υπολογιστές. Παρέμεινε σε ευρεία χρήση μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1990, και παρότι έχει σε μεγάλο βαθμό αντικατασταθεί από άλλα πρότυπα διεπαφής σε προϊόντα υπολογιστών, χρησιμοποιείται ακόμη για να συνδέσει παρωχημένα περιφερειακά, βιομηχανικό εξοπλισμό (όπως βασισμένο σε PLCs), και θύρες κονσόλας. Το πρότυπο έχει μετονομαστεί αρκετές φορές στη διάρκεια της ιστορίας του καθώς ο εγγυητής οργανισμός άλλαζε το όνομά του, και έχει γίνει γνωστό ως EIA RS 232, EIA 232, και πιο πρόσφατα TIA 232. Το πρότυπο συνεχίζει να αναθεωρείται και να αναβαθμίζεται από την EIA και από το 1988 από την TIA. Η Αναθεώρηση C εκδόθηκε σε ένα έγγραφο τον Αύγουστο του 1969. Η Αναθεώρηση D εκδόθηκε το 1986. Η τρέχουσα αναθεώρηση είναι η TIA-232-F Interface Between Data Terminal Equipment and Data Circuit-Terminating Equipment Employing Serial Binary Data Interchange, η οποία εκδόθηκε το 1997. Αλλαγές από την Αναθεώρηση C, στον χρονισμό και σε λεπτομέρειες, αποσκοπούσαν στο να βελτιώσουν την αρμονική συνεργασία με το CCITT πρότυπο V.24, αλλά ο εξοπλισμός που έχει κατασκευαστεί με το τρέχον πρότυπο συνεργάζεται με παλαιότερες εκδόσεις.

### 2.4.3 Εύρος ορισμού του προτύπου

Το πρότυπο RS-232-C της Electronics Industries Alliance (EIA) του 1969 ορίζει:

- Χαρακτηριστικά ηλεκτρικών σημάτων όπως επίπεδα τάσης, ρυθμό μετάδοσης, χρονισμό και ρυθμό ανόδου των σημάτων, ανώτατο επίπεδο τάσης, συμπεριφορά σε βραχυκύκλωμα, μέγιστη παρασιτική χωρητικότητα και μήκος καλωδίου.
- Μηχανικά χαρακτηριστικά διεπαφής, συνδέσιμα βύσματα και προσδιορισμό ακίδων (pins).
- Λειτουργίες του κάθε κυκλώματος στο βύσμα διεπαφής.
- Τυποποιημένα υποσύνολα των κυκλωμάτων διεπαφής για επιλεγμένες τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές.

- Το πρότυπο δεν ορίζει στοιχεία όπως κωδικοποίηση χαρακτήρων (για παράδειγμα, ASCII, Baudot ή EBCDIC) τη διαμόρφωση των χαρακτήρων στη ροή δεδομένων (μπιτ ανά χαρακτήρα, μπιτ έναρξης/διακοπής, ισοτιμία).
- Πρωτόκολλα για εντοπισμό σφαλμάτων ή αλγόριθμους για συμπίεση δεδομένων.
- Ρυθμούς μπιτ για μετάδοση, αν και το πρότυπο αναφέρει ότι προορίζεται για ρυθμούς μπιτ μικρότερους από 20.000 μπιτ ανά δευτερόλεπτο. Πολλές μοντέρνες συσκευές υποστηρίζουν ταχύτητες 115.200 bps και άνω.
- Τροφοδοσία ρεύματος σε εξωτερικές συσκευές.

Λεπτομέρειες της διαμόρφωσης χαρακτήρων και του ρυθμού μετάδοσης μπιτ ελέγχονται από το υλικό της σειριακής θύρας, συχνά ένα μοναδικό ολοκληρωμένο κύκλωμα, το UART, το οποίο μετατρέπει δεδομένα από παράλληλη σε σειριακή μορφή. Μια τυπική σειριακή θύρα περιλαμβάνει εξειδικευμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα για τον οδηγό και το δέκτη, ώστε να μετατρέπει μεταξύ εσωτερικών λογικών επιπέδων και συμβατών με το RS-232 επιπέδων σήματος.

## 3. Βασικά είδη αισθητήρων θερμότητας

### 3.1 Θερμοζευγη

Η αρχή λειτουργίας των θερμοζευγών στηρίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο seebeck, το οποίο ανακαλύφθηκε το 1821. Ένα θερμοζεύγος αποτελείται από δύο αγωγούς, διαφορετικών μετάλλων ή κραμάτων μετάλλων. Όταν δυο διαφορετικά μέταλλα έρθουν σε επαφή αναπτύσσεται μεταξύ τους μια διαφορά δυναμικού  $E$  (Seebeck) που εξαρτάται από την θερμοκρασία  $T$  και το είδος των μετάλλων. Για μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας  $\Delta T$  ισχύει ο τύπος  $E = \alpha \Delta T$ , όπου  $\alpha$  ο συντελεστής Seebeck σε  $\mu V/^{\circ}C$ .

Η μέτρηση της θερμοκρασίας με το θερμοζεύγος γίνεται βάζοντας το στη περιοχή ή το σώμα που θέλουμε να μετρήσουμε και μετράμε την τάση στα άκρα του. Η επαφή των αγωγών της συσκευής, μέτρησης της τάσης, με τους αγωγούς του θερμοζεύγους δημιουργεί επιπλέον δυναμικό επαφής  $E$ .



Η λύση του προβλήματος της δημιουργίας νέων δυναμικών επαφής λύνεται με ένα από τους παρακάτω τρόπους:

1) Διατηρώντας τη θερμοκρασία στις άλλες επαφές σταθερή (συνήθως στους 0°C), ώστε να έχουμε σταθερό σφάλμα. Τις επαφές σε σταθερή γνωστή θερμοκρασία τις ονομάζουμε επαφές αναφοράς.

2) Με λογισμική αντιστάθμιση. Μετράμε την θερμοκρασία στις επαφές αναφοράς με ένα θερμίστορ, υπολογίζουμε την τάση  $E_1$  στις επαφές αναφοράς μέσω πινάκων, μετράμε την τάση  $E_2$  στο θερμοζεύγος και αφαιρώντας την τάση  $E_2$  από την  $E_1$ , παίρνουμε την τάση  $E_3$ , μέσω της οποίας υπολογίζουμε την θερμοκρασία που μας ενδιαφέρει.

3) Με ηλεκτρονική αντιστάθμιση. Ένας τελεστικός ενισχυτής σε συνδυασμό με ένα θερμίστορ στις επαφές αναφοράς λειτουργεί ως πηγή τάσης που αντισταθμίζει την τάση των πηγών αναφοράς στη θερμοκρασία 0°C.

Για να αυξήσουμε την ευαισθησία συνήθως συνδέουμε πολλά θερμοζεύγη σε σειρά.

Τυποποιημένα θερμοζεύγη που υπάρχουν στο εμπόριο (αλφαβητική σειρά)

Τύπος	Αποτελείται από	Θερμοκρασία λειτουργίας	Συντελεστής (Seebeck) / θερμοκρασία
B	(94%Pt / 6%Rh)(+) / (70%Pt / 30%Rh)(-)	0 - 1820 °C	6.0 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 600 °C
C	(95%W / 5%Re)(+) / (74%W / 26%Re)(-)	0 - 2320 °C	19.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 600 °C
D	(97%W / 3%Re)(+) / (75%W / 25%Re)(-)	0 - 2320 °C	19.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 600 °C
E	Chromel(+) / Constantan(-)	270 - 1000 °C	58.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 0 °C
G	W(+) / (74%W / 26%Re)(-)	0 - 2320 °C	19.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 600 °C
J	Fe(+) / Constantan(-)	210 - 760 °C	50.2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 0 °C
K	Chromel(+) / Alumel(-)	270 - 1370 °C	39.4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 0 °C
R	(87%Pt / 13%Rh)(+) / Pt(-)	50 - 1768 °C	11.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 600 °C
S	(90%Pt / 10%Rh)(+) / Pt(-)	50 - 1768 °C	10.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 600 °C
T	Cu(+) / Constantan(-)	270 - 400 °C	38.0 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 0 °C

Πίνακας μετάλλων και κραμάτων για κατασκευή θερμοζεύγων (αλφαβητική σειρά)

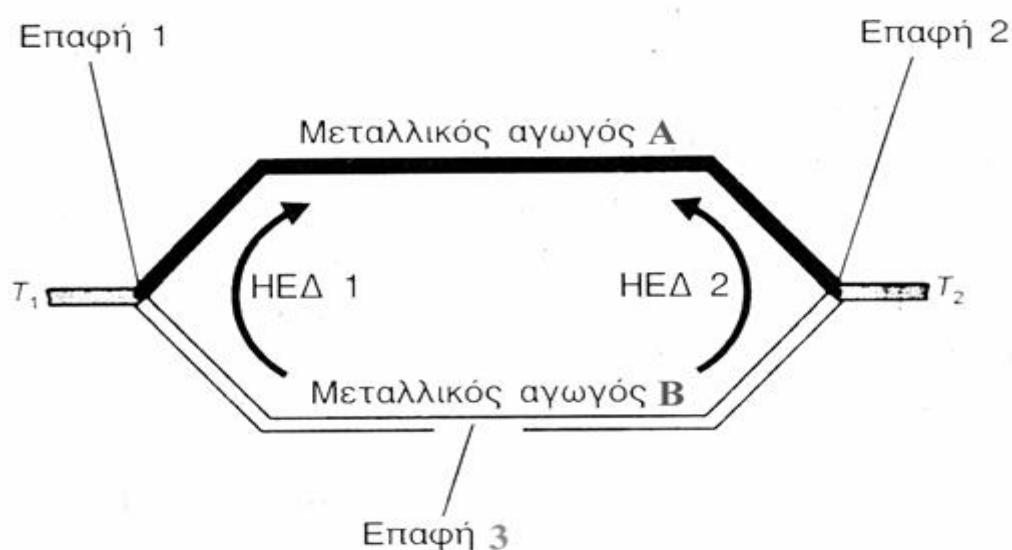
Μέταλλο / Κράμα	Σύσταση	Συνδυάζεται με
Alumel	95% Ni, 2% Mn, 2% Al	Chromel
Chromel	90% Ni, 10% Cr	Alumel, Constantan
Constantan	55% Cu, 45% Ni	Fe, Cu, Chromel
Κράμα Βολφραμίου - Ρηνίου	74% W, 26% Re / 95% W, 5% Re / 97% W, 3% Re	W
Κράμα Λευκόχρυσου - Ροδίου	70% Pt, 30% Rh / 87% Pt, 13% Rh / 90% Pt, 10% Rh / 94% Pt, 6% Rh	Pt

**Χαρακτηριστικά μετάλλων που χρησιμοποιούνται  
για κατασκευή θερμοαντιστάσεων**

Μέταλλο	$\rho(\mu\Omega/\text{cm})$ σε 20 °C	$\alpha(K^{-1})(0-100\text{ }^\circ\text{C})$
Χρυσός (Au)	2.44	0.0040
Αργυρος (Ag)	1.59	0.0041
Χαλκός (Cu)	1.72	0.0043
Λευκόχρυσος (Pt)	10.00	0.00393
Βολφράμιο (W)	5.60	0.0048
Νικέλιο (Ni)	7.80	0.0068

Η μέτρηση θερμοκρασίας με θερμοζεύγος ή θερμοηλεκτρικό στοιχείο είναι πολύ διαδεδομένη. Ένα θερμοζεύγος αποτελείται από δύο ανόμοια μέταλλα που συνδέονται μεταξύ τους σε δύο σημεία και σχηματίζουν ένα κλειστό κύκλωμα. Η μία επαφή βρίσκεται σε μια προστατευτική θήκη και αποτελεί το μετρητή του οργάνου, γιατί έρχεται σε επαφή με το σώμα άγνωστης θερμοκρασίας. Εάν μια επαφή διατηρείται σε διαφορετική θερμοκρασία από την άλλη, τότε θα υπάρχει ροή ρεύματος στο κύκλωμα. Το μέγεθος και η κατεύθυνση αυτού εξαρτώνται από το είδος των μετάλλων και τη διαφορά θερμοκρασίας των επαφών. Το μέγεθος της ηλεκτρεγερτικής δύναμης που προκύπτει είναι μικρό, της τάξης των μερικών mV.

Έστω ότι συνδέονται τα άκρα δύο συρμάτων από διαφορετικό υλικό, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Αν η ένωση 1 βρίσκεται σε θερμοκρασία  $T_1$ , και η ένωση 2 σε θερμοκρασία  $T_2$  θα κυκλοφορήσει ένα ηλεκτρικό ρεύμα μέσα από τα σύρματα το οποίο θα προσδιορίζεται από τον νόμο του Ohm:

$$I = \frac{E}{R}$$

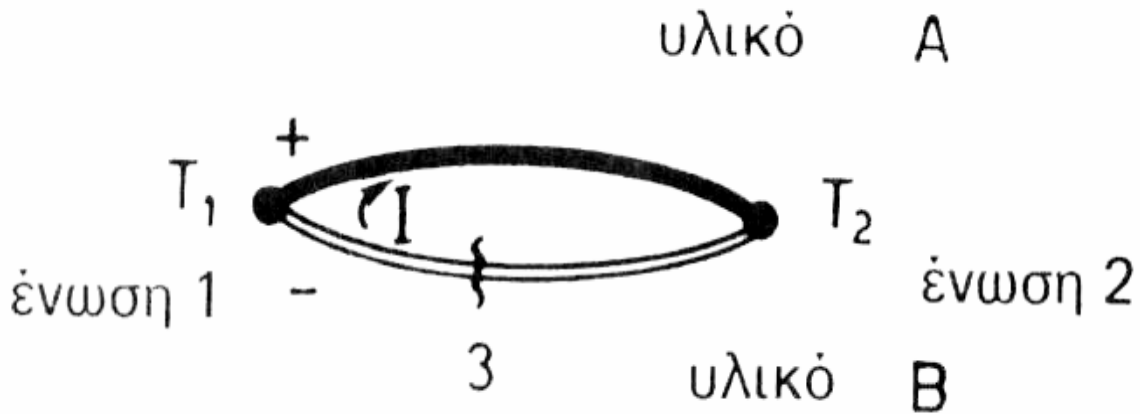
όπου  $E$  είναι η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται και  $R$  είναι η ωμική αντίσταση του κυκλώματος. Αν το σύρμα από υλικό κοπεί στην θέση 3 και συνδεθεί ένα βολτόμετρο άπειρη εσωτερικής αντίστασης η ένδειξη του βολτομέτρου θα είναι ίση με την θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη  $E$ .

Τα θερμοζεύγη έχουν μεγάλη περιοχή μέτρησης πράγμα που είναι σημαντικό πλεονέκτημα. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η γρήγορη απόκριση τους, η οποία μπορεί να είναι της τάξεως των msec. Υπάρχουν και θερμοζεύγη από κράματα Βολφραμίου τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από  $2500^{\circ}\text{C}$ . Τα θερμοζεύγη υπόκεινται σε διάβρωση και οξείδωση. Η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται από την θερμοκρασία λειτουργίας, το περιβάλλον λειτουργίας και τη διάμετρο των καλωδίων τους και από τον τύπο του θερμοστοιχείου. Τα θερμοζεύγη με ευγενή μέταλλα έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Για τα άλλα θερμοζεύγη η διάρκεια ζωής τους είναι μερικές χιλιάδες ώρες για θερμοκρασίες λειτουργίας κοντά στο ανώτερο σημείο της περιοχής μέτρησης τους.

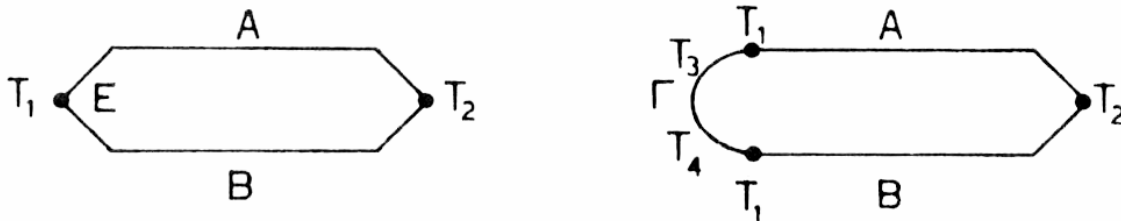
- Το θερμοζεύγος τύπου T είναι κατάλληλο για υγρό περιβάλλον καθώς και για ελαφρά οξειδωτικό περιβάλλον. Συνιστάται για μετρήσεις χαμηλών θερμοκρασιών.
- Το θερμοζεύγος τύπου E μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κενό καθώς και σε ελαφρά οξειδωτικό περιβάλλον. Για χαμηλές θερμοκρασίες δεν υφίσταται διάβρωση.
- Το θερμοζεύγος J είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο στην βιομηχανία.
- Το θερμοζεύγος K μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οξειδωτικό περιβάλλον.
- Τα θερμοζεύγη με λευκόχρυσο έχουν μεγάλη αντοχή σε διάβρωση και οξείδωση. Το υδρογόνο, ο άνθρακας και ατμοί μετάλλων (π.χ. σιδήρου) επιδρούν στο θερμοζεύγος σε υψηλές θερμοκρασίες.

Για την χρήση ενός θερμοζεύγους οι παρακάτω ιδιότητες είναι πολύ χρήσιμες :

α) Αν τα δύο υλικά του θερμοζεύγους έχουν ομοιογενή, θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη, τότε δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία κανενός σημείου του κυκλώματος, εκτός από τις θερμοκρασίες των ενώσεων 1 και 2.



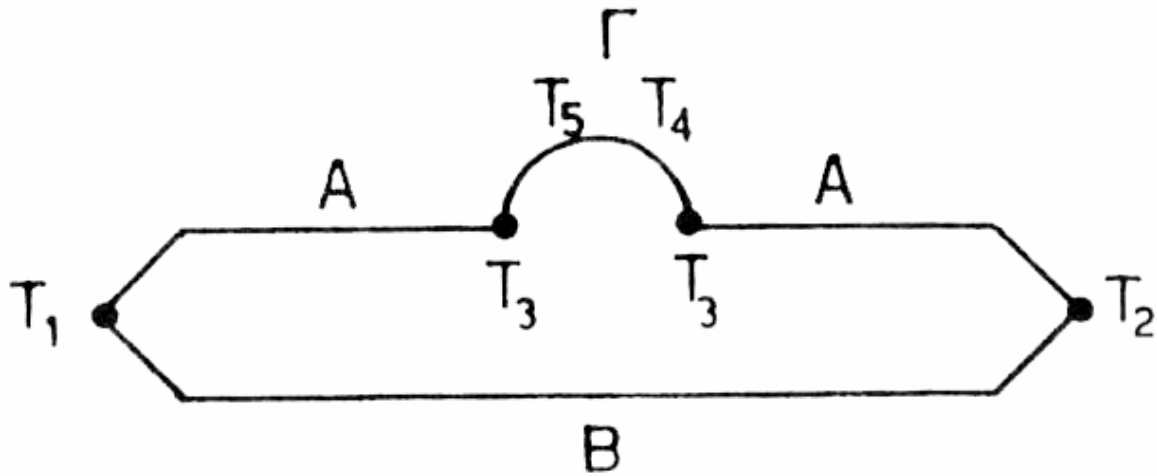
β) Ας υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία της ένωσης 1 είναι  $T_1$ , και της 2 είναι  $T_2$  όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα και ότι η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη είναι  $E$ .



Έστω ότι καταστρέφεται η ένωση 1 και μεταξύ των υλικών A και B παρεμβάλλεται ένα άλλο υλικό Γ . Αν η θερμοκρασία των νέων ενώσεων ΒΓ και ΑΓ 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 ΑΓ και ΒΓ είναι διαφορετική από την  $T_1$ .

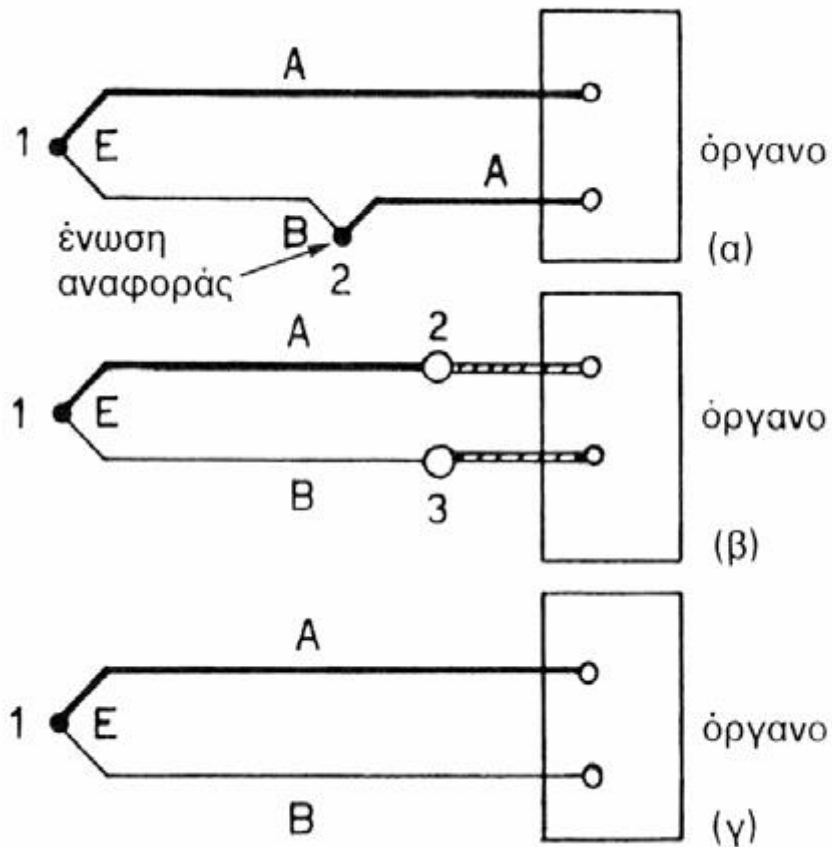
γ) Αν κοπεί ένα από τα δύο υλικά A ή B και παρεμβληθεί ένα άλλο υλικό Γ, η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη δεν μεταβάλλεται με την προϋπόθεση ότι οι ενώσεις ΑΓ και ΒΓ (ή

ΒΓ και ΓΒ) θα είναι στην ίδια θερμοκρασία  $T_3$  ακόμη και αν η θερμοκρασία του Γ έξω από τις ενώσεις είναι διαφορετική από την  $T_3$ .

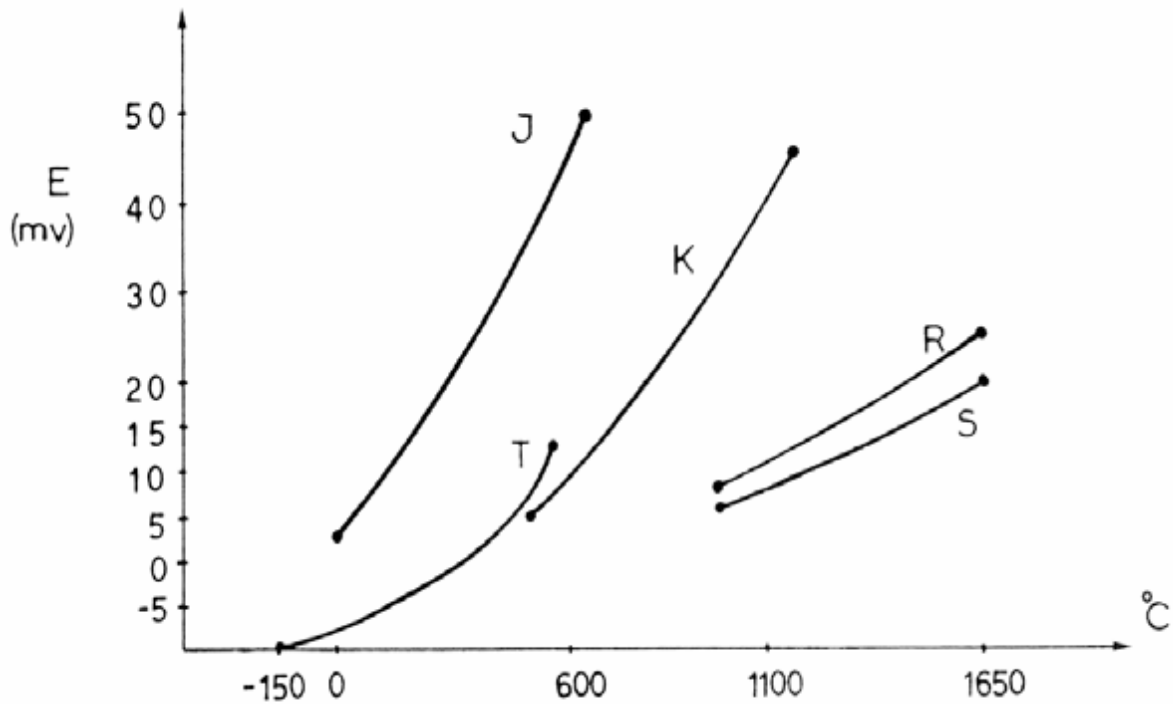


δ) Έστω ότι ένα θερμοζεύγος παράγει μία θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη  $E_1$ , όταν οι θερμοκρασίες των ενώσεων 1 και 2 είναι  $T_1$  και  $T_2$  αντίστοιχα. Όταν οι θερμοκρασίες των ενώσεων 1 και 2 είναι  $T_2$  και  $T_3$  αντίστοιχα έστω ότι η παραγόμενη θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη είναι  $E_2$ . Αν οι θερμοκρασίες των ενώσεων 1 και 2 είναι  $T_1$  και  $T_3$  αντίστοιχα η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη που θα παραχθεί θα είναι  $E_1 + E_2$ .

ε) Αν η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη μεταξύ των υλικών A και Γ είναι  $E_{AΓ}$  και μεταξύ των υλικών Γ και Β είναι  $E_{ΓΒ}$  η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη μεταξύ των υλικών A και Β θα είναι  $E_{AΓ} + E_{ΓΒ}$ . 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 που χρησιμοποιούνται φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα :



Σύμφωνα με τις ιδιότητες (α), (β) και (γ) η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη,  $E$  που αναπτύσσεται στα προηγούμενα σχήματα, εξαρτάται μόνο από τις θερμοκρασίες στις διάφορες ενώσεις 1, 2, 3 και στους ακροδέκτες του οργάνου. Η σύνδεση του σχήματος α αναφέρεται στην ιδιότητα (γ), οι δε συνδέσεις των σχημάτων β και γ αναφέρονται στην ιδιότητα (β). Έτσι για να μετρηθεί σωστά η  $E$  με τις συνδέσεις των σχημάτων α και γ πρέπει οι ακροδέκτες του οργάνου να βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία. Επίσης για να μετρηθεί σωστά η  $E$  με την σύνδεση β πρέπει οι ενώσεις 2 και 3 του θερμοζεύγους με τα καλώδια προέκτασης να βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία. Οι ενώσεις αυτές λέγονται ενώσεις αναφοράς και η θερμοκρασία τους λέγεται θερμοκρασία αναφοράς. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται συγκριτικά οι τάσεις που παράγονται από διάφορα θερμοζεύγη μέσα στις περιοχές μέτρησής τους.



Τα θερμοζεύγη ακρίβειας 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 αν δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια.

Τυποποιημένα θερμοζεύγη που υπάρχουν στο εμπόριο και θερμοκρασίες λειτουργίας:

- ΤΥΠΟΥ Β (0 - 1820 °C)
- ΤΥΠΟΥ C (0 - 2320 °C)
- ΤΥΠΟΥ D (0 - 2320 °C)
- ΤΥΠΟΥ E (270-100 °C)
- ΤΥΠΟΥ G (0 - 2320 °C)
- ΤΥΠΟΥ J (210 - 760 °C)
- ΤΥΠΟΥ K (270 - 1370 °C)
- ΤΥΠΟΥ R (50 - 1768 °C)
- ΤΥΠΟΥ S (50 - 1768 °C)
- ΤΥΠΟΥ T (270 - 400 °C)

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ο κάθε τύπος έχει διαφορετική πρόσμιξη μετάλλων και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να έχει διαφορετικές αποδόσεις mV/ °C .

## Χαρακτηριστικά θερμοζευγών

- Μεγάλο εύρος τιμών.
- Γρήγορη απόκριση.
- Λειτουργούν και σε θερμοκρασίες κοντά στις 2500 °C.
- Μεγάλες αντοχές σε καιρικές συνθήκες και πολύ δύσκολα οξειδώνουν.
- Τα θερμοζεύγη από ευγενή μέταλλα έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής.

## Συχνότερες εμπορικές εφαρμογές που βρίσκουμε τα θερμοζεύγη είναι:

Ασφάλειες σπιτιών (ρελέ πίνακα). Λόγο της γρήγορης απόκρισης που έχουν σαν εξαρτήματα.





Σε φούρνο μεγάλων θερμοκρασιών για τον λόγο ότι φτάνει κοντά στους 2500 °C.

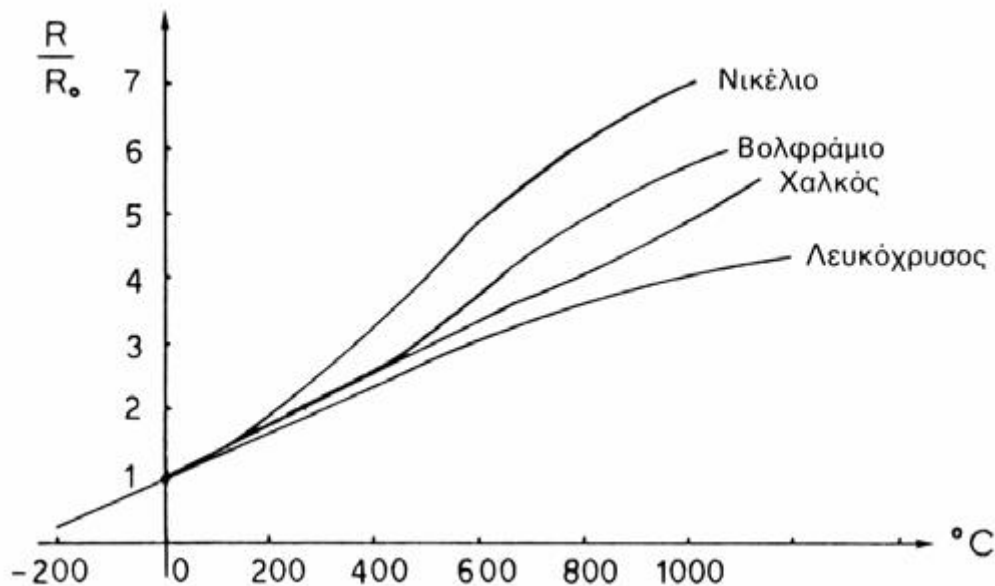


## 3.2 Θερμοαντιστάτης RTDs

Αυτά είναι διεθνώς γνωστά σαν RTD (Resistance Temperature Detector). Αποτελούνται από μέταλλα ή κράματα των οποίων η αντίσταση μεταβάλλεται με την θερμοκρασία. Η μεταβολή της αντίστασης εν γένει δεν είναι γραμμική. Μέσα όμως σε μια θερμοκρασιακή περιοχή είναι γραμμική με αρκετή προσέγγιση ιδίως για τον λευκόχρυσο. Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται κυρίως σαν RTD είναι:

- ο χαλκός
- ο λευκόχρυσος
- το νικέλιο
- το βολφράμιο

Οι καμπύλες των αντιστάσεων των παραπάνω μετάλλων σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας φαίνονται ενδεικτικά στο ακόλουθο σχήμα, όπου  $R$  είναι η αντίσταση σε μία θερμοκρασία  $T$  και  $R_0$  είναι η αντίσταση σε  $0^\circ\text{C}$ , η οποία συνήθως είναι  $R_0 = 100\ \Omega$  ή  $R_0 = 500\ \Omega$ . Τα αισθητήρια αυτά λειτουργούν σε θερμοκρασίες από  $-220^\circ\text{C}$  περίπου έως  $1000^\circ\text{C}$ .

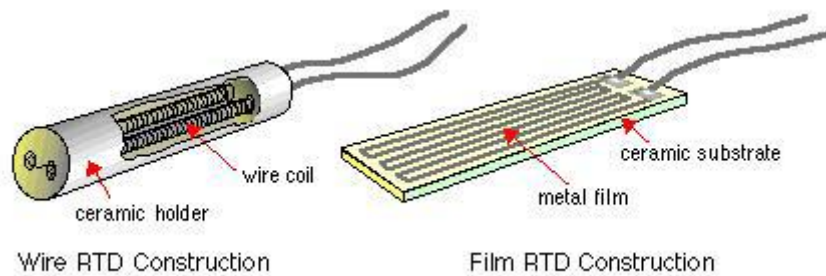


Η ηλεκτρική αντίσταση των μετάλλων είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Ο θερμικός συντελεστής είναι συνήθως θετικός και δεν μεταβάλλεται σημαντικά. Τα μέταλλα ή κράματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή θερμόμετρων αντίστασης πρέπει να είναι χημικά αδρανή,

να έχουν σχετικά μεγάλο θερμικό συντελεστή αντίστασης  $\alpha$ , καλή μηχανική αντοχή και μεγάλη ειδική αντίσταση  $\rho$ .

Τα θερμόμετρα αντίστασης κατασκευάζονται σε δυο κυρίως τύπους, σε μορφή σύρματος ή λεπτού μεταλλικού φιλμ:

- Στη μορφή σύρματος χρησιμοποιείται σύρμα σε διπλή περιέλιξη, για να αποφεύγονται τα ηλεκτρομαγνητικά παράσιτα, σε πυρήνα από κεραμικό υλικό, με ίδιο συντελεστή διαστολής με το σύρμα.
- Στη μορφή λεπτού φιλμ το μέταλλο στερεώνεται σε μορφή λεπτού φιλμ επάνω σε κεραμικό υλικό και είναι σφραγισμένο.



- Ο χαλκός σπάνια χρησιμοποιείται για κατασκευή αντιστάσεων γιατί έχει χαμηλή τιμή ειδικής αγωγιμότητας. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των αντιστάσεων χαλκού είναι 120 °C. Έχει καλή γραμμικότητα και είναι φτηνός.
- Το νικέλιο έχει μεγάλο θερμικό συντελεστή, δεν είναι χημικά αδρανές, έχει μη γραμμική απόκριση και παρουσιάζει ολίσθηση. Χρησιμοποιείται σε κράματα.
- Το βολφράμιο έχει καλές ιδιότητες, είναι εύθραυστο και η κατασκευή αντιστάσεων από αυτό είναι δύσκολη.
- Ο χρυσός και ο άργυρος έχουν μικρή τιμή ειδικής αντίστασης και μεγάλο κόστος.

- Ο λευκόχρυσος είναι ευγενές μέταλλο, χημικά αδρανές, με μηχανική αντοχή και σχετικά μεγάλη τιμή ειδικής αντίστασης. Χρησιμοποιείται ως πρότυπο στοιχείο μέτρησης της θερμοκρασίας στην περιοχή  $-182^{\circ}\text{C}$  έως  $630^{\circ}\text{C}$ .

Οι θερμοαντιστάτες είναι πιο γραμμικοί μετατροπείς από τα θερμοζεύγη. Η μεταβολή της αντίστασης με την θερμοκρασία, για μικρή περιοχή θερμοκρασιών είναι:

$R_{\theta}$ : αντίσταση σε θερμοκρασία  $\theta^{\circ}\text{C}$

$R_0$ : αντίσταση σε θερμοκρασία  $0^{\circ}\text{C}$

Οι θερμοαντιστάτες είναι παθητικοί μετατροπείς, όταν διαρρέονται από ρεύμα, η θερμοκρασία τους αυξάνεται ανάλογα με την θερμική αγωγιμότητα αντίστασης-περιβάλλοντος, οπότε δίνουν σφάλματα λόγω αυτοθέρμανσης. Για να μειωθούν τα σφάλματα χρησιμοποιείται το μικρότερο δυνατό ρεύμα μέτρησης, η μεγαλύτερη σε μέγεθος αντίσταση, με αποδεκτό χρόνο απόκρισης και γίνεται συχνά βαθμονόμηση. Οι συνδέσεις με αγωγούς χαλκού δημιουργούν διαφορά δυναμικού, που διορθώνεται με ηλεκτρονική αντιστάθμιση. Ακόμα επειδή συνήθως ο συντελεστής  $\alpha$  και η απόλυτη τιμή της αντίστασης είναι μικροί αριθμοί, οδηγούν σε σφάλματα εξαιτίας της αντίστασης των αγωγών σύνδεσης. Αυτό το πρόβλημα λύνεται με χρήση γέφυρας whetstone και μεταλλάκτη τριών αγωγών ή με την τεχνική των τεσσάρων αγωγών, στην οποία μετράμε την πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης.

**Χαρακτηριστικά μετάλλων που χρησιμοποιούνται για κατασκευή θερμοαντιστάσεων**

Μέταλλο	$\rho(\mu\Omega/\text{cm})$ σε $20^{\circ}\text{C}$	$\alpha(\text{K}^{-1})(0-100^{\circ}\text{C})$
Χρυσός (Au)	2.44	0.0040
Αργυρος (Ag)	1.59	0.0041
Χαλκός (Cu)	1.72	0.0043
Λευκόχρυσος (Pt)	10.00	0.00393
Βολφράμιο (W)	5.60	0.0048
Νικέλιο (Ni)	7.80	0.0068

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Άρα η μέτρηση της ειδικής αντίστασης μπορεί να οδηγήσει στην μέτρηση της θερμοκρασίας. Θεωρητικά οι αντιστάσεις – θερμομέτρα μπορούν να κατασκευαστούν από πληθώρα υλικών. Επειδή όμως η συνάρτηση ειδικής αντίστασης και θερμοκρασίας δεν είναι ίδια για όλα τα υλικά,

στην θερμότητα χρησιμοποιούμε συνήθως λευκόχρυσο , νικέλιο και χαλκό. Οι αντιστάσεις λευκόχρυσου θεωρείτε έως η καλύτερη επιλογή για αισθητήρα επαφής, σε διάφορες μορφές του μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις θερμοκρασίας από 14K έως και 960K, με ακρίβεια που αγγίζει το 1mK. Ο ίδιος αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες περιοχές θερμοκρασιών χωρίς να εμφανίσει φαινόμενα υστέρησης. Τα χαρακτηριστικά του παραμένου ιδιαίτερα σταθερά, ακόμη και μετά από πολλούς κύκλους χρήσης. Υπάρχουν διάφορες μορφές PRTs, ξεκινώντας από το πρότυπο αισθητήρα της διεθνούς θερμομετρικής κλίμακας, μέχρι PRTs του πιο διαδεδομένου αισθητήρα θερμοκρασίας. Σε εφαρμογές υψηλών αποτίσεων ακρίβειας χρησιμοποιούνται κατά αποκλειστικότητα.

Κλάση	Εξίσωση ανοχής (°C)
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	$\pm(0.60 + 0.0018 \cdot  t )$

### Κατηγοριοποίηση RTDS ως προς το υλικό

Ο λευκόχρυσος(PTs) είναι το ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό στους αισθητήρες επαφής, όχι επειδή περιλαμβάνει ιδιαίτερα υψηλού βαθμού ειδικής αντίστασης που έχει σαν υλικό, αλλά λόγω της σταθερότητας που έχει σαν υλικό. Στην πραγματικότητα ένας υψηλός συντελεστής ειδικής αντίστασης δεν είναι τόσο απαραίτητος για ένα PT δεδομένου ότι οι τιμές μπορούν να καθιερωθούν με ένα υψηλό βαθμό ακρίβειας, χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο εξοπλισμό και παίρνοντας τις επαρκείς προφυλάξεις για την παρουσία σφαλμάτων. Ο λευκόχρυσος που έχει τον υψηλότερο συντελεστή ειδικής αντίστασης, θεωρείτε το καλύτερο υλικό για την κατασκευή αισθητήρων θερμοκρασίας. Μια υψηλή τιμή συντελεστή είναι μια ένδειξη ότι ο λευκόχρυσος είναι καθαρός και έχει μικρό βαθμό σε προσμίξεις από ξένες ουσίες και άλλα μέταλλα. Η παρουσία προσμίξεων στα PTs είναι ανεπιθύμητη, λόγω του ότι η διάχυση, η πρόσμιξη και οι ενώσεις με άλλα μέταλλα και στοιχεία μπορεί να επηρεάσει σε τέτοιο βαθμό οπύ να προκαλέσει έλλειψη σταθερότητας στις μετρήσεις του αισθητήρα. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής της ειδικής αντίστασης είναι επίσης πολύ ευαίσθητος στις καταπονήσεις των υλικών.

Ο λευκόχρυσος χρησιμοποιείται στην βιομηχανία για κατασκευές αισθητήρων που έχουν μετρητική ικανότητα στην θερμοκρασία μέχρι και 800°C. Δεν οξειδώνει, αλλά πρέπει να προστατευτεί από μόλυνση και πρόσμιξης με άλλα μέταλλα. Η πιο κοινή αιτία μόλυνσης των αισθητήρων αντιστάσεων λευκόχρυσου είναι η επαφή με το διοξείδιο του πυριτίου, ή με άλλες πυρίμαχες ύλες που έχουν προσμίξεις πυριτίου. Το διοξείδιο του πυριτίου αλλοιώνει την δομή

του λευκόχρυσου και το κάνει εξαιρετικά ευαίσθητο. Τα PTs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν ακόμα και θερμοκρασίες 20K. Για την μέτρηση θερμοκρασιών μεταξύ 1K και 40K χρησιμοποιούνται αισθητήρες εμπλουτισμένα με γερμάνιο. Σε θερμοκρασίες άνω των 20K ο λευκόχρυσος έχει πολύ αυξημένο θερμοκρασιακό συντελεστή της ειδικής αντίστασης και σαν συνέπεια παρουσιάζει πολύ μεγάλη σταθερότητα.

### **Αισθητήρας θερμοκρασίας νικελίου**

Το νικέλιο διαμορφώνει μια χαμηλή σε κόστος εναλλακτική για την κατασκευή αισθητήρων θερμοκρασίας. Το θερμοκρασιακό τους φάσμα κυμαίνεται από  $-200^{\circ}\text{C}$  έως και  $+350^{\circ}\text{C}$ . Ο θερμοκρασιακός συντελεστής της ειδικής αντίστασης του νικελίου είναι 50% υψηλότερος από αυτόν του λευκόχρυσου που είναι και το μεγάλο του πλεονέκτημα σε ορισμένες εφαρμογές. Τα αισθητήρια νικελίου βρίσκουν ευρεία χρήση σε εφαρμογές που ασχολούνται με την μέτρηση θερμοκρασίας υγρών και σε εφαρμογές κλιματισμού.

Το ρεύμα που διαπερνά ένα αισθητήρα θερμοκρασίας από νικέλιο πρέπει να διατηρείτε σε πολύ χαμηλή στάθμη, έτσι ώστε να περιορίζει τον φαινόμενο εσωτερική θέρμανσης του ίδιου του αισθητήρα. Εντούτοις σε μερικές εφαρμογές όπως σε μέτρηση ροής, σε ανεμογεννήτριες και σε μετρητές υγρασίας της ατμοσφαιράς, το φαινόμενο αυτό χρησιμοποιείται προς όφελος του αισθητήρα.

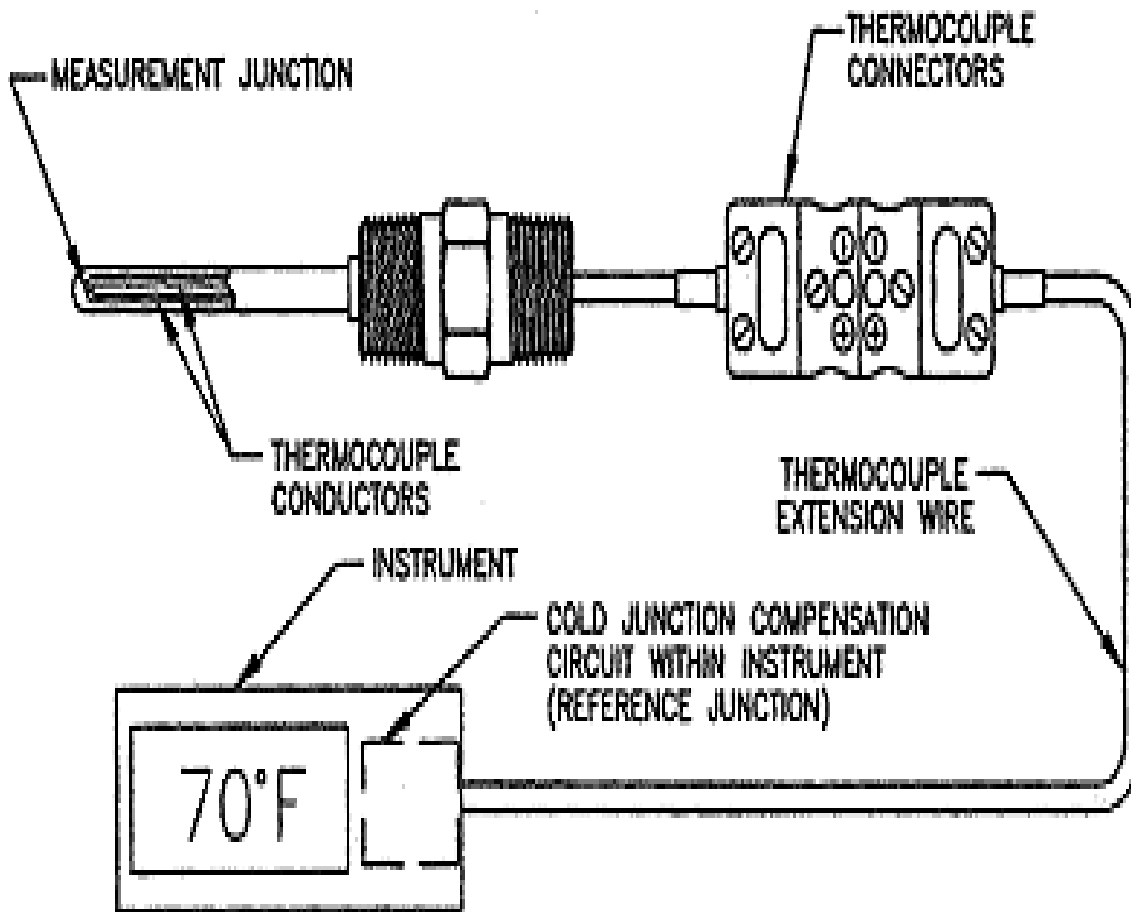
Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός RTD είναι:

- Η ονομαστική αντίσταση (σε  $0^{\circ}\text{C}$ )
- Περιοχή θερμοκρασίας μέτρησης
- Χρόνος απόκρισης
- Ευστάθεια διάρκειας

Η θερμοκρασία μπορεί να μετρηθεί με RTD με δύο κυρίως τρόπους:

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

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



### **Βασικές εφαρμογές όπου χρησιμοποιούμε RTDs**

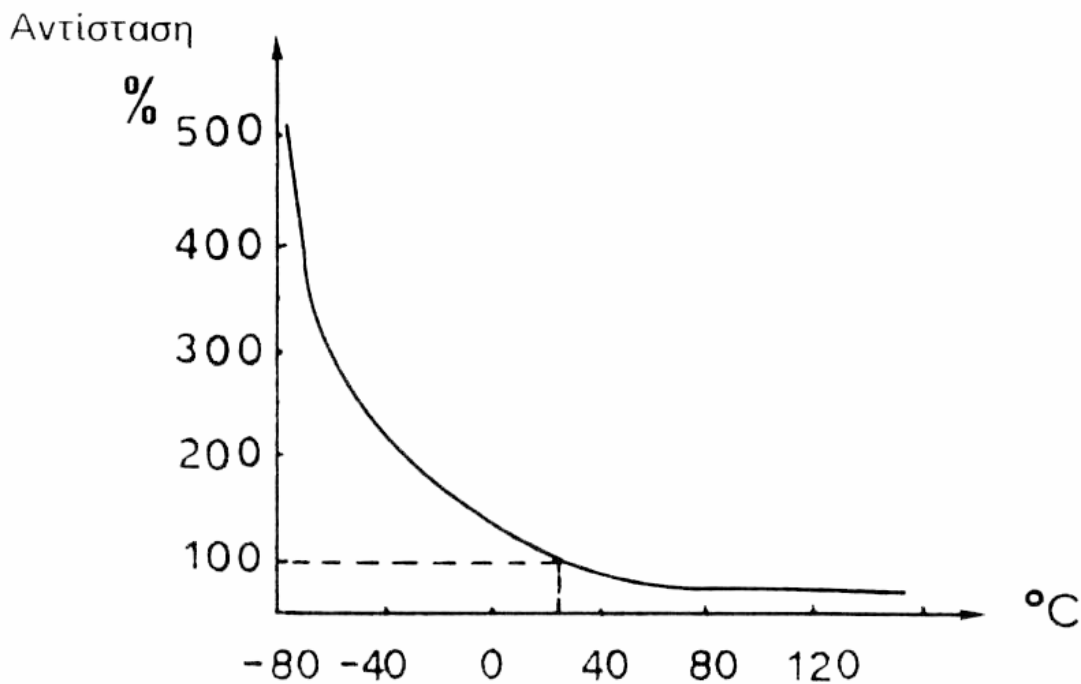
Λόγο και τον χαρακτηριστικών που αναφέρουμε παραπάνω οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως:

- Θερμόμετρα πολύ υψηλής ανάλυσης (λόγο της μεγάλης ακρίβειας)
- Σε κλιματιστικά και γενικότερα σε τεχνολογία που απαιτεί ρύθμιση θερμοκρασίας
- Σε Η/Υ, laptops, tablet και κινητά τηλέφωνα (σαν ρυθμιστής θερμοκρασίας)
- Σε ψυγεία αυτοκίνητων(λόγο της ιδιότητας να εκμεταλλεύεται την εσωτερική θερμοκρασία αισθητήρα )

- Σε ανεμογεννήτριες

### 3.3 Θερμίστορ

Τα Θερμίστορ κατασκευάζονται από οξείδια μετάλλων όπως, νικελίου, μαγγανίου, ουρανίου, σιδήρου, κοβαλτίου και χαλκού, έχοντας χαρακτηριστικά ημιαγωγών. Σαν αισθητήρια θερμοκρασίας η λειτουργία τους στηρίζεται στην μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασής τους λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας. Η αντίσταση ενός Θερμίστορ μειώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνει αντίθετα από ότι συμβαίνει στην περίπτωση των RTD. Τα Θερμίστορ είναι πολύ ευαίσθητα αλλά και πολύ μη γραμμικά. Το ακόλουθο σχήμα φαίνεται ενδεικτικά η μεταβολή της αντίστασης ενός θερμίστορ σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας.



Τα θερμίστορ κατασκευάζονται από ημιαγωγά υλικά, έχουν μεγάλο συντελεστή θερμοκρασίας, είναι χημικά σταθερά, δεν επηρεάζονται από την γήρανση του υλικού, ισχυρά πεδία και την ραδιενέργεια, έχουν μικρή μηχανική αντοχή. Έχουν μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 150°C. Τα θερμίστορ με θετικό συντελεστή θερμοκρασίας ονομάζονται τύπου PTC και με αρνητικό NTC.



Για θερμοκρασίες  $\sim 50^{\circ}\text{C}$ , από την μέση θερμοκρασία λειτουργίας, έχει ακρίβεια  $\sim 0.02^{\circ}\text{C}$ . Για να μετατραπεί η μη γραμμική συμπεριφορά των θερμίστορ σε γραμμική χρησιμοποιούμε δύο ή περισσότερα στοιχεία με αντισταθμιστικές αντιστάσεις ή χρησιμοποιούμε μικροεπεξεργαστή. Τα θερμίστορ λειτουργούν σε περιορισμένη περιοχή θερμοκρασιών, έχουν μικρή θερμική μάζα γι' αυτό έχουν ταχεία απόκριση, παρουσιάζοντας σφάλματα αυτοθέρμανσης. Τα θερμίστορ είναι παθητικά στοιχεία γι αυτό έχουν ανάγκη από σταθεροποιημένη πηγή τάσης.

Το όνομα thermistor επινοήθηκε ως αρκτικόλεξο για την περιγραφή ενός στοιχείου των ηλεκτρικών κυκλωμάτων που έχει αξιοσημείωτη μεταβολή της ειδικής αντίστασης σε σχέση με την θερμοκρασία σε μία εκτεταμένη περιοχή θερμοκρασιών "thermally-sensitive-resistor". Αυτές οι συσκευές αναπτύχθηκαν στη δεκαετία του 1940, ως αποτέλεσμα της έρευνας των ιδιοτήτων των οξειδίων των μετάλλων που έχουν αναμιχθεί μη στοιχειομετρικά και στις οποίες, σε ορισμένες περιπτώσεις, ίχνη ακαθαρσιών έχουν προστεθεί σε πολύ μικρές ποσότητες.

Το αποτέλεσμα των διαφόρων αναμίξεων ήταν η ανάπτυξη συσκευών που σύντομα έγιναν εμπορικά διαθέσιμες από ένα μεγάλο αριθμό εταιρειών. Οι συσκευές αυτές είχαν μεγάλη εξάπλωση επειδή η ειδική ηλεκτρική αντίσταση τους μεταβαλλόταν κατά 4 και 5% ανά βαθμό Κελσίου που ήταν αρκετά μεγαλύτερη από οποιοδήποτε άλλο στοιχείο ή κράμα μετάλλου. Επιπλέον, επειδή τα οξείδια των μετάλλων είναι ημιαγώγιμα, αντιθέτως με τα μέταλλα, μία μεγάλη γκάμα τιμών της αντίστασης ήταν διαθέσιμη.

Στη δεκαετία του 1950 ανακαλύφθηκε ότι το κεραμικό τιτανικό βάριο έχει ημιαγώγιμες ιδιότητες, όταν μικρές ποσότητες είτε βαρίου, είτε τιτανίου, αντικατασταθούν από άτομα με παρόμοια ακτίνα και μεγαλύτερο σθένος. Επιπλέον, σε μία περιορισμένη περιοχή θερμοκρασιών, πάνω από το σημείο Curie, έχουμε μία αξιοσημείωτη άνοδο της ειδικής αντίστασης σε σχέση με την θερμοκρασία, της τάξης 15% ανά βαθμό Κελσίου. Φαίνεται λοιπόν λογικό ότι και αυτό το υλικό, στη μορφή συσκευής, να μπορεί να χαρακτηριστεί ως thermistor, αλλά για αρκετό καιρό ο όρος χρησιμοποιούνταν μόνο για συσκευές που είχαν μείωση της αντίστασης με την θερμοκρασία. Στις μέρες μας, όμως, ο όρος thermistor είναι γενικός. Συσκευές με μείωση της αντίστασης με την αύξηση της θερμοκρασίας λέγονται NTC (Negative temperature Coefficient of Resistance) και συσκευές που έχουν αύξηση της αντίστασης με την θερμοκρασία ονομάζονται PTC (Positive temperature Coefficient of Resistance).

Η έρευνα στα οξείδια των NTC thermistor δεν έχει οδηγήσει σε κάποια αύξηση της μεταβολής της αντίστασης, έχει όμως παρατηρηθεί ανώμαλη συμπεριφορά σε συγκεκριμένη μίξη οξειδίων που περιέχουν το  $\text{Vd}_2\text{O}_5$  ως συστατικό. Σ' αυτό το υλικό παρατηρούμε μείωση της ειδικής αντίστασης κατά 100% ανά βαθμό Κελσίου για μια πολύ συγκεκριμένη περιοχή θερμοκρασιών περίπου στους  $68^{\circ}\text{C}$ . Περαιτέρω έρευνα είναι δυνατόν να δημιουργήσει τέτοια συμπεριφορά και σε άλλες θερμοκρασίες χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά.

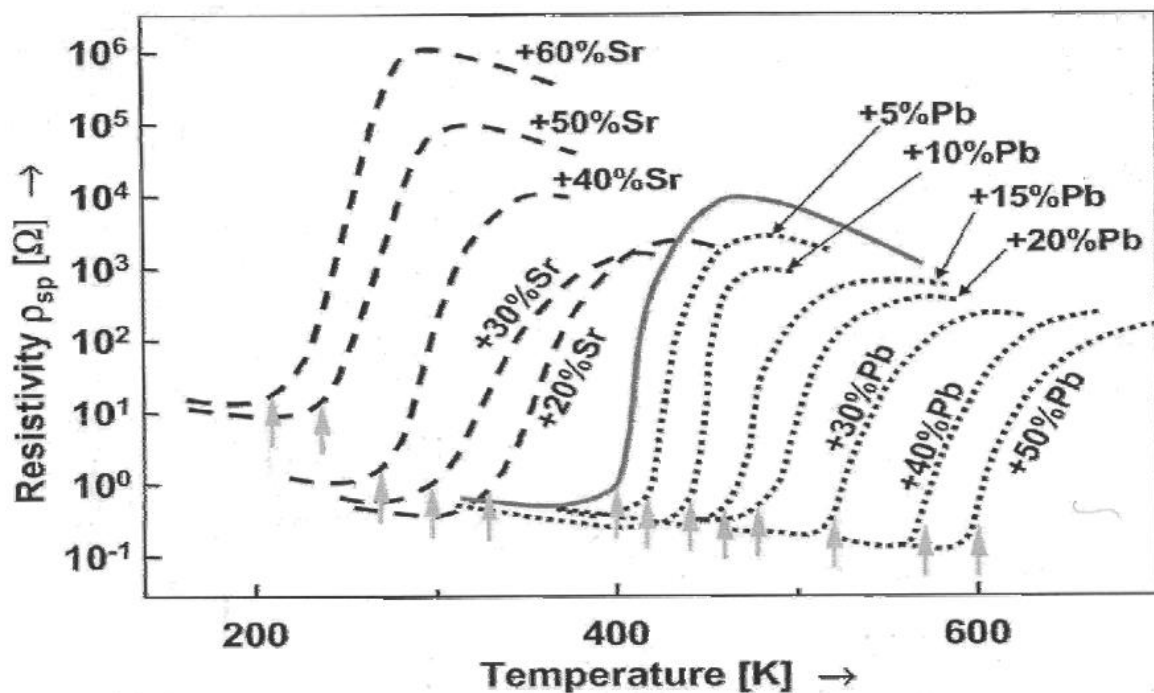
Τέτοια έρευνα έχει γίνει και έχει οδηγήσει σε ραγδαία εξέλιξη των PTC τιτανικού βαρίου thermistors στο οποίο μπορεί να προστεθεί τιτανικός μόλυβδος ή τιτανικό στρόντιο σε μικρές ποσότητες με ελεγχόμενο τρόπο. Μ' αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η κατασκευή thermistor με μεταβολή της ειδικής αντίστασης κατά 60% ανά βαθμό Κελσίου σε μικρή περιοχή θερμοκρασιών

(μερικούς δεκάδες βαθμούς). Η μεταβολή αυτή μπορεί να λαμβάνει χώρα από τους  $-100^{\circ}\text{C}$  μέχρι τους  $350^{\circ}\text{C}$  ανάλογα με την περιεκτικότητα σε τιτανικό στρόντιο ή μόλυβδο.

Επίσης, έχουν παρασκευαστεί NTC και PTC υλικά με μικρή μεταβολή στην ειδική αντίσταση σε σχέση με την θερμοκρασία (<2% ανά βαθμό Κελσίου) και βρίσκουν εφαρμογές σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις. Για τους συνηθισμένους NTC thermistors η εξάρτηση της αντίστασης με την θερμοκρασία ακολουθεί ένα εκθετικό νόμο. Αυτό συμβαίνει και στους μονοκρυσταλλικούς thermistors καρβιδίου του πυριτίου, οι οποίοι έχουν εφαρμογές από τους  $-100^{\circ}\text{C}$  έως τους  $300^{\circ}\text{C}$ . Οι PTC thermistors είναι κατασκευασμένοι από δύο ειδών υλικά: συνδυασμούς υλικών που έχουν ως βάση τη δομή του τιτανικού βαρίου (ένα άλλο εμπορικό όνομα γι' αυτούς είναι Posistors) και ημιαγωγούς με την μορφή διαμαντιού, όπως το πυρίτιο (ένα άλλο όνομα είναι Silistors). Το φάσμα θερμοκρασίας που οι thermistors τιτανικού βαρίου είναι λειτουργικοί εξαρτάται από την σύνθεσή του. Οι thermistors που έχουν την κρυσταλλική δομή του διαμαντιού έχουν μικρή μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την θερμοκρασία ( $\approx 0,8\%$  ανά βαθμό Κελσίου για το πυρίτιο), αλλά είναι πιο εφαρμόσιμη για ένα ευρύτερο φάσμα θερμοκρασίας.

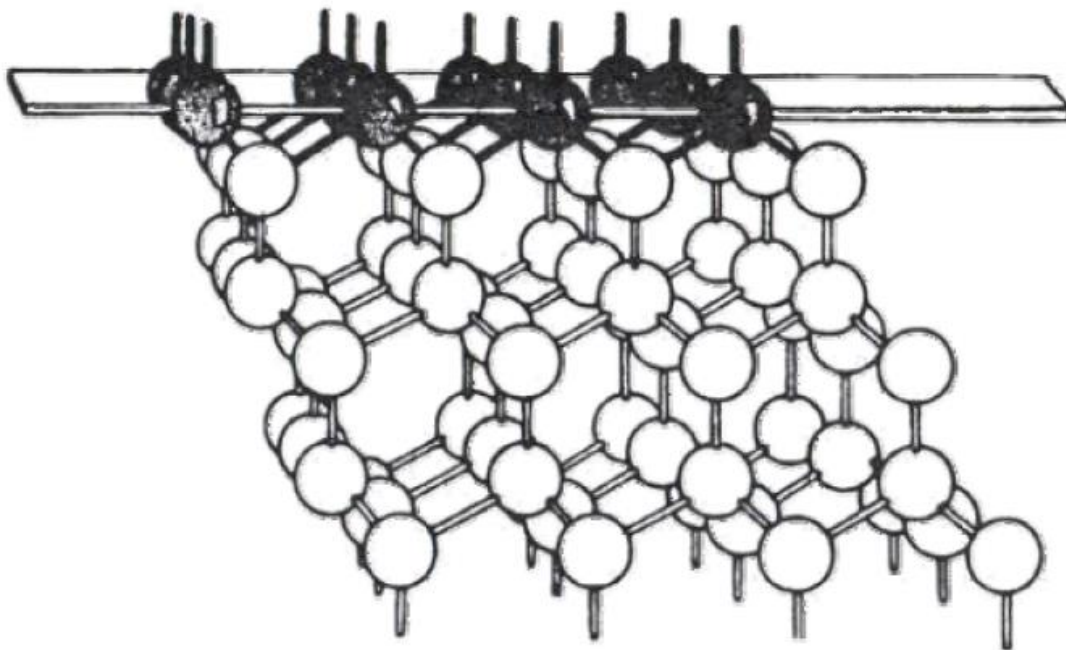
Η βασική ιδιότητα των υλικών των thermistor είναι η σχέση αντίστασης-θερμοκρασίας. Όμως, η θερμοκρασία του υλικού μπορεί να επηρεαστεί με διάφορους τρόπους. Ο ένας είναι από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Άλλος είναι από θέρμανση εξ' αιτίας της εσωτερικής ενέργειας, που μπορεί να είναι αποτέλεσμα της σύνδεσης της συσκευής σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή η απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, συνήθως στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος. Επιπλέον, όταν έχουμε μεγάλη θέρμανση τέτοιας μορφής, η θερμοκρασία του υλικού δεν είναι σταθερά για δοσμένη εσωτερική ενέργεια, αφού η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από το περιβάλλον.

Το τιτανικό βάριο ( $\text{BaTiO}_3$ ), που μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα μη αγώγιμο κεραμικό, επιδεικνύει μία έντονη αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής αντίστασης σε μία σχετικά μικρή περιοχή θερμοκρασίας. Μία μεγάλη ποικιλία thermistors είναι διαθέσιμη, στην οποία το υλικό είναι ένα μίγμα από τιτανικό βάριο-στρόντιο-μόλυβδο. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι καμπύλες της ειδικής αντίστασης σε σχέση με την θερμοκρασία για διαφορετικές αναλογίες τιτανικού στρόντιου και τιτανικού μολύβδου στο τιτανικό βάριο.



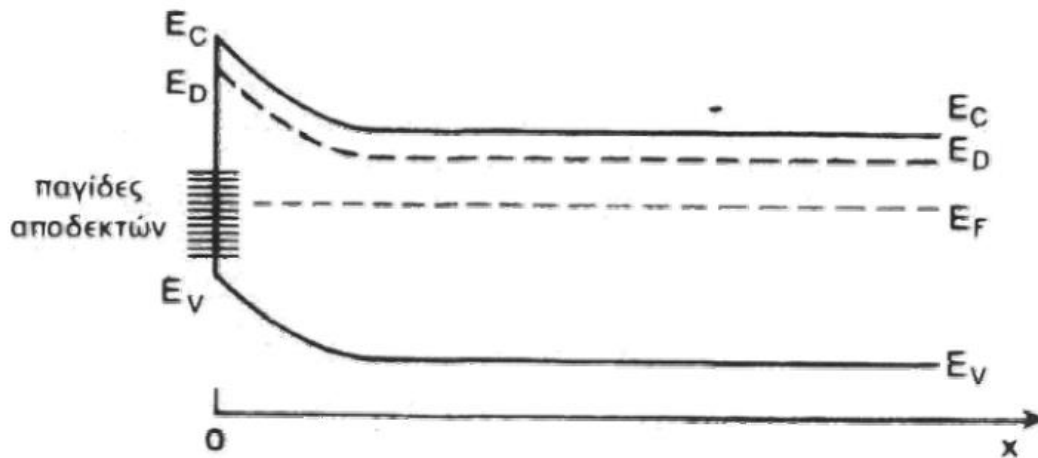
Η ημιαγώγιμη συμπεριφορά δημιουργείται από την αντικατάσταση ατόμων, βαρίου από στοιχεία που έχουν παρόμοιο μέγεθος ιόντος με το  $Ba^{2+}$  και σθένος μεγαλύτερο από δύο ή από στοιχεία με παρόμοια ιοντική ακτίνα με το  $Ti^{4+}$  και σθένος μεγαλύτερο του 4. Για παράδειγμα, η χρησιμοποίηση  $Sb^{3+}$  σε μικρές συγκεντρώσεις (0,3 άτομα %) προκαλούν την αλλαγή του σθένους στα γειτονικά ιόντα τιτανίου από +4 σε +3. Αυτό σημαίνει ότι από τα ιόντα αυτά ένας αριθμός πλεονάζοντος, ίσος με τον αριθμό των ιόντων, παράγονται και είναι ελεύθερα να κινηθούν στο πλέγμα. Συνεπώς, έχουμε ημιαγωγιμότητα n-τύπου και μία ειδική αντίσταση της τάξης των  $30\Omega\text{cm}$  σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Το  $BaTiO_3$  είναι ένα πολυκρυσταλλικό κεραμικό υλικό. Σε τέτοια υλικά το περιβάλλον των ατόμων στα όρια των κόκκων είναι πολύ διαφορετικά με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αντίστοιχα, στην περιοχή αυτή του κόκκου, η ενέργεια των ηλεκτρονίων και γενικότερα η συμπεριφορά των φορέων. Συγκεκριμένα, στα άτομα των ορίων του κόκκου πολλοί δεσμοί μένουν ασυμπλήρωτοι από ηλεκτρόνια, αφού δεν υπάρχουν αφού δεν υπάρχουν αντίστοιχα γειτονικά άτομα προς την εξωτερική πλευρά.



Δημιουργείται έτσι μια ενεργειακή στάθμη επιφάνειας από αποδέκτες, που βρίσκεται μέσα στην απαγορευμένη ζώνη του διαγράμματος των ενεργειακών ζωνών του ημιαγωγού. Η πυκνότητα των αποδεκτών στη στάθμη επιφάνειας είναι όση και των ατόμων στην επιφάνεια ενός κόκκου. Αυτό οφείλεται στην τάση των αποδεκτών της στάθμης επιφάνειας να μετατρέψουν την επιφανειακή περιοχή του κρυστάλλου σε p-τύπου ημιαγωγό, ανεξάρτητα από το χαρακτήρα του εσωτερικού του (ενδογενής, p-τύπου ή n-τύπου). Πρακτικά αυτό σημαίνει πως υπάρχει ένα φράγμα δυναμικού στα όρια των κόκκων, που πρέπει να ξεπεράσουν οι φορείς αγωγιμότητας, για να κινηθούν στο επόμενο όριο των κόκκων.

Το τιτανικό βάριο είναι σιδηροηλεκτρικό υλικό. Αυτό σημαίνει πως παρατηρείται μία αυθόρμητη πόλωση στους κόκκους. Οι φορείς πόλωσης στα όρια του κόκκου έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση αυτού του φράγματος δυναμικού με αποτέλεσμα η κίνηση των φορέων αγωγιμότητας να γίνεται πιο εύκολα και συνεπώς η τιμή της αντίστασης του υλικού να μην είναι τεράστια. Πάνω από την θερμοκρασία Curie, όμως, όπου το υλικό δεν είναι πλέον σιδηροηλεκτρικό και χάνεται η αυθόρμητη πόλωση, το φράγμα δυναμικού στα όρια των κόκκων μεγαλώνει, οπότε γίνεται πιο δύσκολη η κίνηση των φορέων αγωγιμότητας διαμέσο των κόκκων, άρα η τιμή της ειδικής αντίστασης αυξάνεται. Σ' αυτό το φαινόμενο οφείλεται και η πολύ μεγάλη αύξηση της τιμής της αντίστασης σε μια πολύ μικρή περιοχή θερμοκρασίας (κοντά στην θερμοκρασία Curie).

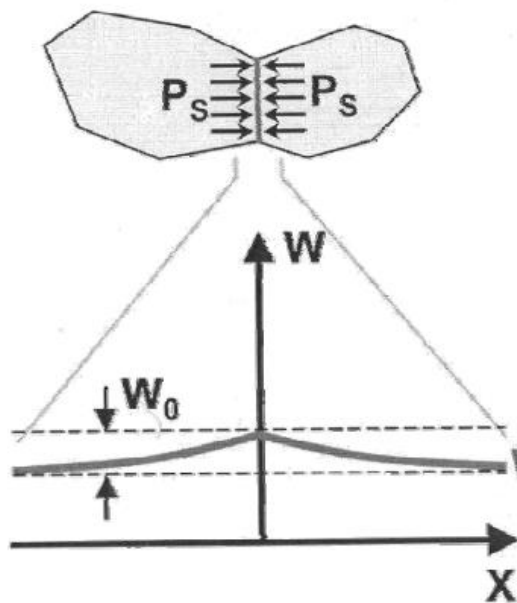


Σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο του Heywang, η ειδική αντίσταση  $\rho_c$  του υλικού πάνω από την θερμοκρασία Curie εξαρτάται εκθετικά από το φράγμα δυναμικού  $\phi$  στα όρια του κόκκου

$$\rho_c = \rho_0 e^{\left(\frac{e\phi}{kT}\right)}$$

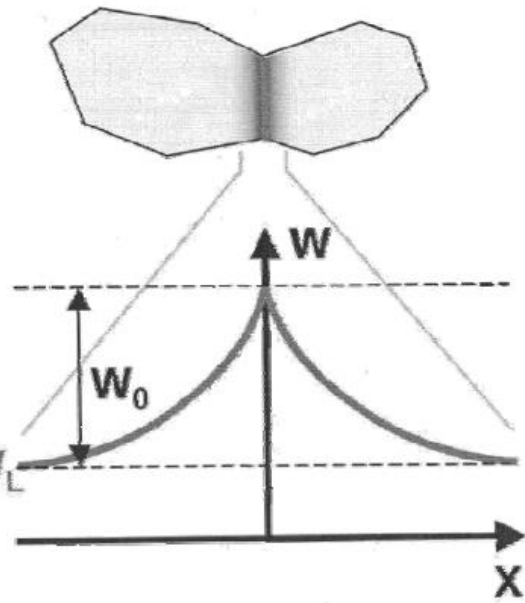
Όπου  $\rho_0$  μία σταθερά,  $e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου και  $K$  η σταθερά Boltzmann.

$T < T_C$  : Σιδηροηλεκτρισμός  
→ Αυθόρμητη πόλωση



Τα φορτία της πόλωσης  
μειώνουν το φράγμα δυναμικού  
στα όρια των κόκκων

$T > T_C$  : Απώλεια της  
αυθόρμητης πόλωσης



Δεν υπάρχουν φορτία  
πόλωσης, οπότε το φράγμα  
δυναμικού στα όρια των  
κόκκων μεγαλώνει

Η συνολική ειδική αντίσταση ενός PTC thermistor είναι το άθροισμα της ειδικής αντίστασης στους κόκκους και της ειδικής αντίστασης στα όρια των κόκκων.

Η κατασκευή ενός thermistor και η διαμόρφωσή του σε συγκεκριμένο σχήμα και διαστάσεις είναι δυνατόν να γίνει με μία από τις παρακάτω τεχνικές:

- Τήξη των συστατικών και κατόπιν στερεοποίηση αυτών
- Με τεχνικές εξάχνωσης καθώς και τεχνικές δημιουργίας λεπτών υμενίων
- Θέρμανση των συμπιεσμένων σκονών σε μία θερμοκρασία όπου συσσωματώνονται σε μία συμπαγή μάζα

Για thermistors με οξειδία η τελευταία τεχνική χρησιμοποιείται ευρέως. Με την τεχνική αυτή γίνεται εύκολο να αναμειχθούν δύο ή παραπάνω οξειδία σε διάφορες ποσότητες και να

δημιουργήσουν ένα ομοιόμορφο και ομογενές στερεό. Η ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται κυρίως από τις ποσότητες των συστατικών, η τελευταία ελέγχεται προσεκτικά με την χημική ανάλυση των μιγμάτων. Η αντίσταση μπορεί επίσης να εξαρτάται, σε πολύ μικρότερο βαθμό, από την θερμοκρασία στην οποία γίνεται η έψηση του υλικού που είναι μεταξύ 1000°C και 1350°C. Συνήθως οι thermistors διαμορφώνονται σε 4 βασικά σχήματα: σφαίρα, δίσκο, ράβδο και υμένα.

Σε κάθε περίπτωση τα οξείδια αναμιγνύονται και διαμορφώνουν ένα ομογενές και λεπτόκοκκο μίγμα σε ένα σφαιρόμυλο ή παρόμοια συσκευή. Στη συνέχεια γίνεται η συμπίεση της σκόνης στο επιθυμητό σχήμα και η ψήσει του σε μια θερμοκρασία ικανή να γίνει η πυροσυσσωμάτωση του υλικού.

Τα Θερμίστορ χρησιμοποιούνται όπως και τα RTD σε σειρά με πηγή ρεύματος ή σε γέφυρα. Κατά την εκλογή Θερμίστορ πρέπει να δίνεται προσοχή στην αντίσταση του στις διάφορες θερμοκρασίες. Η αντίσταση αυτή πρέπει να έχει τιμές που προσαρμόζονται στις αντιστάσεις των συστημάτων προσαρμογής (ενισχυτές, ή βολτόμετρα, αμπερόμετρα κλπ.). Η αντίσταση του Θερμίστορ δεν πρέπει να είναι πολύ μικρή αν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν μεγάλοι αγωγοί σύνδεσης. Επίσης πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη η έκκλιση θερμότητας μέσα στο Θερμίστορ λόγω φαινομένου Joule.

Τα χαρακτηριστικά των Θερμίστορ είναι:

- Μεγάλη αντίσταση, πράγμα που σημαίνει καλύτερη προσαρμογή με τα όργανα μέτρησης
- Μεγάλη ευαισθησία
- Καλή ακρίβεια διασποράς και καλή ευστάθεια μεγάλου χρόνου
- Υπάρχει μεγάλη ποικιλία Θερμίστορ όσον αφορά την αντίσταση τους, σε διάφορα σχήματα και διαστάσεις
- Ο χρόνος απόκρισης ποικίλλει από ms μέχρι s
- Τα Θερμίστορ δεν έχουν πολύ μεγάλη περιοχή μέτρησης. Υπάρχουν όμως Θερμίστορ που λειτουργούν σε -200° C καθώς και Θερμίστορ που λειτουργούν σε 500° C. Όλη αυτή η περιοχή δεν καλύπτεται βέβαια από έναν τύπο Θερμίστορ
- Είναι ημιαγώγιμα υλικά με παθητικά στοιχεία
- Παρουσιάζει μεγάλο σφάλμα αυτοθέρμανσης
- Έχει την δυνατότητα να παράγονται και PTC και NTC

- Οι συσκευές αυτές είχαν μεγάλη εξάπλωση επειδή η ειδική ηλεκτρική αντίσταση τους μεταβαλλόταν κατά 4 και 5% ανά βαθμό Κελσίου που ήταν αρκετά μεγαλύτερη από οποιοδήποτε άλλο στοιχείο ή κράμα μετάλλου

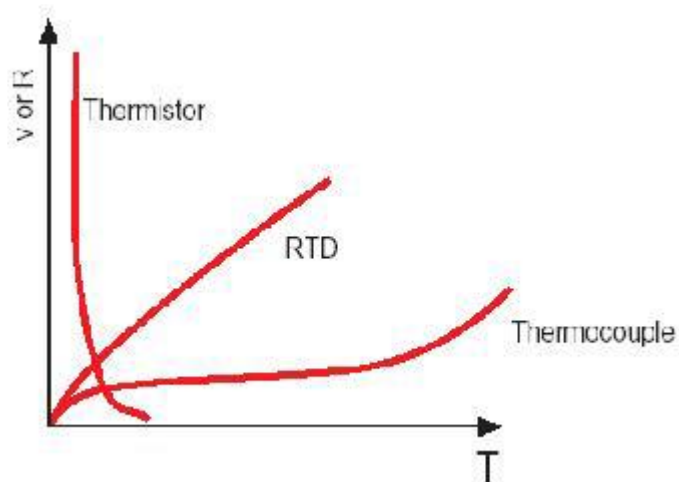
Εφαρμογές θερμίστορ έχουμε:

- Λόγο της μεγάλης ποικιλίας σχήματος που έχουν τα θερμίστορ στην αγορά η πιο κοινή χρήση του είναι πάνω σε πλακέτες με χειροκίνητη ρύθμιση
- Επίσης με την τόσο ταχύ ανταπόκριση που έχουν της τάξης των ms χρησιμοποιούνται σε φωτογραφικές μηχανές
- Τηλεπικοινωνιακά συστήματα (εδώ να σημειωθεί ότι έχουν σχεδόν την αποκλειστικότητα)
- Συναγερμούς
- Φωτοβολταϊκά

Ακολουθεί πίνακας ο οποίος συγκρίνει τα χαρακτηριστικά των θερμοζευγών, RTD και θερμίστορ.

Ιδιότητες	Θερμοζεύγη	RTD	Θερμίστορ
Γενικά	Πολύ καλή γραμμικότητα Μεγάλη περιοχή μέτρησης	Πολύ καλή γραμμικότητα Καλή ακρίβεια	Μη γραμμικό Μεγάλη ευαισθησία
Ευαισθησία	δεκάδες $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	0,1 - δεκάδες $\Omega / ^\circ\text{C}$	εκατοντάδες $\Omega / ^\circ\text{C}$
Ακρίβεια διασποράς	μερικοί βαθμοί Κελσίου	0,01 - 0,05 $^\circ\text{C}$	0,01 - 1 $^\circ\text{C}$
Περιοχή μέτρησης	-250 $^\circ\text{C}$ έως 2500 $^\circ\text{C}$	-220 $^\circ\text{C}$ έως 1000 $^\circ\text{C}$	-80 $^\circ\text{C}$ έως 300 $^\circ\text{C}$
Ευστάθεια μεγάλου χρόνου	1 $^\circ\text{C}$ / χρόνο	0,1% σε 5 χρόνια	~0,1 έως 3 $^\circ\text{C}$ / χρόνο
Ελάχιστο μέγεθος	Διάμετρος 0,025 mm	8 mm διαμ. x 6 mm μήκος	0,25 mm διάμετρος





### 3.4 Κρυωγένη αισθητήρες

Κρυγένικοι ονομάζονται οι αισθητήρες θερμοκρασίας που μετρούν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιούνται κυρίως στην φυσική χαμηλών θερμοκρασιών και σε διαστημικές εφαρμογές. Η αρχή λειτουργίας τους είναι η ίδια με αυτή των συνήθων αισθητήρων αλλά τα υλικά κατασκευής τους διαφέρουν. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών μεταβάλλονται ταχέως και μερικές φορές απότομα, όσο αφορά την θερμοκρασία, προσεγγίζει το απόλυτο μηδέν (-273°C). Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε πειράματα φυσικής πολύ χαμηλών θερμοκρασιών πρέπει να υπακούουν σε πολύ αυστηρές προδιαγραφές. Δεν πρέπει π.χ. οι αγωγοί των αισθητήρων να μεταδίδουν θερμοκρασία στον χώρο διότι αλλοιώνουν τα αποτελέσματα και χάνουν την ακρίβεια τους. Πρέπει επίσης οι αισθητήρες, αναλόγως το είδών του πειράματος, να μην επηρεάζονται από μαγνητικά πεδία ή πυρηνική ακτινοβολία.

#### Κρυωγενή αντίσταση εξαρτώμενη από την θερμοκρασία

Η διαφορά της ηλεκτρικής αντίστασης των μετάλλων με την θερμοκρασία χρησιμοποιείται συχνά για την μέτρηση της θερμοκρασίας. Εφόσον η ηλεκτρική αντίσταση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, τότε μιλάμε για τον συντελεστή θετικής θερμοκρασίας ή PTC. Προκειμένου να εφαρμόσουμε αυτή την λειτουργία για την μέτρηση της θερμοκρασίας, η αντίσταση του ηλεκτρικού φορτίου του μετάλλου θα πρέπει να μεταβάλλεται σταδιακά με βάση την θερμοκρασία. Τα χαρακτηριστικά του μετάλλου δεν θα πρέπει να αλλάζουν κατά την διάρκεια της λειτουργίας, γιατί αυτό θα οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα. Ο συντελεστής θερμοκρασίας θα πρέπει να είναι ανεξάρτητος όσο γίνεται με την θερμοκρασία, την πίεση και τις χημικές επιδράσεις.

## Αισθητήρες τυποποιημένης πλατίνας

Η πλατίνα εδραιώθηκε ως το υλικό το οποίο έχει σταθερή χημική δομή, σχετικά εύκολη επεξεργασία και καλή αναπαραγωγιμότητα των ηλεκτρικών του ιδιοτήτων. Προκειμένου να διασφαλιστεί η καθολική εναλλαξιμότητα, οι ιδιότητες καθορίζονται στο πρότυπο EN 60751. Αυτό το πρότυπο ορίζει την αντίσταση ηλεκτρικού φορτίου και τις επιτρεπτές ανοχές στις διαφορετικές θερμοκρασίες.

Υπάρχουν επίσης και ορισμοί που καλύπτουν την ονομαστική τιμή του αισθητήρα θερμοκρασίας και το εύρος των τιμών της θερμοκρασίας. Ο υπολογισμός διαφοροποιείται μεταξύ των θερμοκρασιών από  $-200^{\circ}\text{C}$  έως  $0^{\circ}\text{C}$  και από  $0^{\circ}\text{C}$  έως  $850^{\circ}\text{C}$ .

Το εύρος από  $-200$  έως  $0^{\circ}\text{C}$  καλύπτεται από την συνάρτηση:

$$R(t) = R_0(1 + A \times t + B \times t^2 + C \times (t - 100^{\circ}\text{C}) \times t^3)$$

Το εύρος από  $0$  έως  $850^{\circ}\text{C}$  καλύπτεται από την συνάρτηση:

$$R(t) = R_0(1 + A \times t + B \times t^2)$$

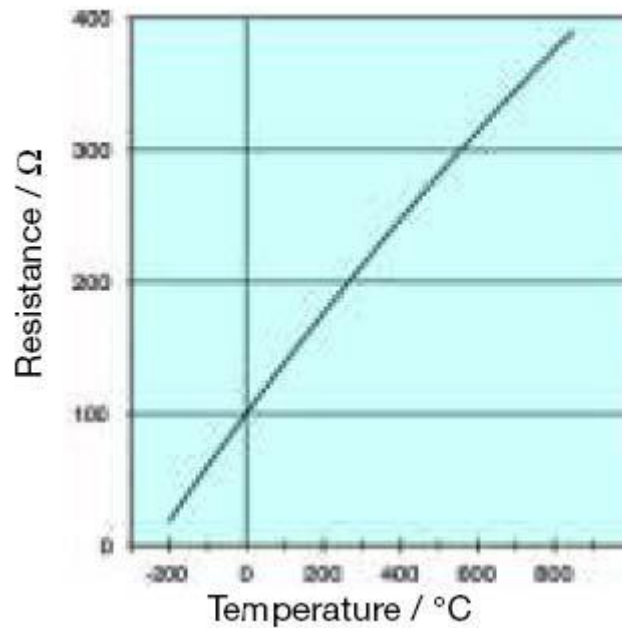
Χρησιμοποιώντας σταθερές όπως:

$$A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,183 \times 10^{-12} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-4}$$

Ο όρος  $R_0$  αναφέρεται ως η ονομαστική τιμή, και ορίζεται ως η αντίσταση στους  $0^{\circ}\text{C}$ .



Σύμφωνα με το EN 60751, η ονομαστική τιμή είναι ίση με 100.000Ω στους 0°C που αντιπροσωπεύει τον αισθητήρα θερμοκρασίας Pt100. Η αλλαγή της αντίστασης στο εύρος της θερμοκρασίας μέχρι τους 100°C είναι περίπου 0.4Ω/°C για τον αισθητήρα θερμοκρασίας Pt100.

Επίσης, το πρότυπο καθορίζει ένα μέσο συντελεστή θερμοκρασίας μεταξύ 0°C και 100°C. Αυτός ο συντελεστής ορίζεται ως ο μέσος όρος των αλλαγών.

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \times 100^\circ\text{C}} = 3,850 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Όπου  $R_0$  και  $R_{100}$  είναι οι αντιστάσεις σε θερμοκρασίες 0°C και 100°C αντίστοιχα.

### Μετρώντας την θερμοκρασία μέσα από την αντίσταση

Η αντίσταση χρησιμοποιείται προκειμένου να βρεθεί η αντίστοιχη θερμοκρασία εκείνη τη στιγμή. Ο τύπος παρακάτω δείχνει την αλλαγή της αντίστασης σε σχέση με την θερμοκρασία. Για θερμοκρασίες πάνω από τους 0°C είναι εύκολο να καταλήξεις στον παρακάτω τύπο που συμφωνεί με το EN 60 751:

$$t = \frac{-R_0 \times A + [(R_0 \times A)^2 - 4 \times R_0 \times B \times (R_0 - R)]^{1/2}}{2 \times R_0 \times B}$$

R = μετρούμενη αντίσταση σε Ω

t = υπολογισμένη θερμοκρασία σε °C

R<sub>0</sub>, A, B = παράμετρος σύμφωνα με το IEC 751

### Όρια ανοχών

Το EN 60 751 ορίζει την ανοχή μεταξύ δύο κλάσεων A και B. Στον αισθητήρα θερμοκρασίας PT100 αναφερόμαστε στην πρώτη κλάση.

$$\text{Class A: } \Delta t = \pm(0.15 + 0.002 \times |t|)$$

t = θερμοκρασία σε βαθμούς °C

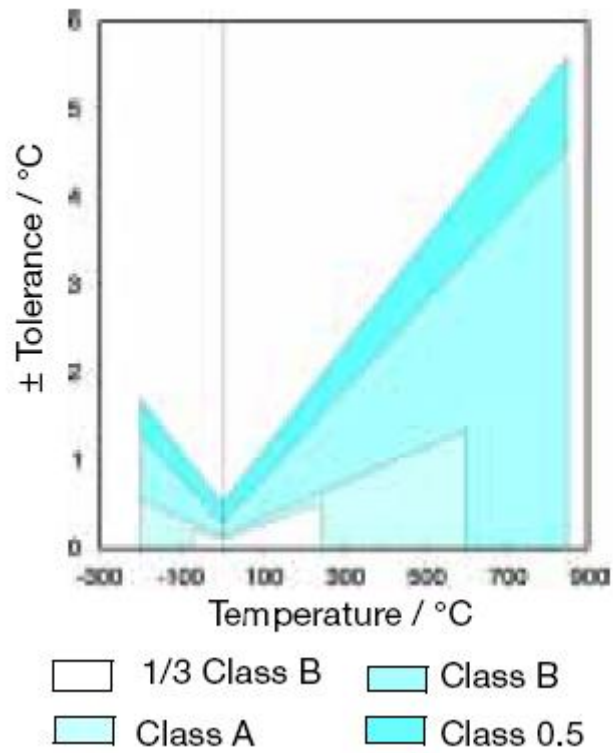
Ο τύπος για τον υπολογισμό της ανοχής ΔR, σε Ω, σε θερμοκρασία t > 0°C είναι:

$$\Delta R = R_0(A + 2 \times B \times t) \times \Delta t$$

Για t < 0°C είναι:

$$\Delta R = R_0(A + 2 \times B \times t - 300^\circ\text{C} \times C \times t^2 + 4 \times C \times t^3) \times \Delta t$$

Η ανοχή κλάσης A ισχύει για θερμοκρασίες μεταξύ -200°C και +600°C.



Διακύμανση ανοχής που εξαρτάται από την μετρούμενη θερμοκρασία.

Tolerance class	Temperature range	Tolerance in °C	Tolerance at	
			t = 0°C	t = 100°C
1/3Class B	- 70 to +250°C	$\pm (0.10\text{ }^\circ\text{C} + 0.0017 \times  t )$	$\pm 0.10\text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0.27\text{ }^\circ\text{C}$
Class A	-200 to +600°C	$\pm (0.15\text{ }^\circ\text{C} + 0.020 \times  t )$	$\pm 0.15\text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0.35\text{ }^\circ\text{C}$
Class B	-200 to +850°C	$\pm (0.30\text{ }^\circ\text{C} + 0.0050 \times  t )$	$\pm 0.30\text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0.80\text{ }^\circ\text{C}$
Class 0.5	-200 to +850°C	$\pm (0.50\text{ }^\circ\text{C} + 0.0060 \times  t )$	$\pm 0.50\text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 1.10\text{ }^\circ\text{C}$

**Εφαρμογές που χρησιμοποιούνται οι κρυωγένη αισθητήρες είναι:**

- Διαστημικές εφαρμογές
- Φυσικά πειράματα ψύχους

- Μέτρηση θερμοκρασίας καυσίμων αζώτου υγραερίων κτλ.
- Σε θαλάμους ψύξεις(πειραματικούς χορούς απολυτού ψύχους)
- Σε πυρηνικούς αντιδραστήρες (διότι δεν μεταδίδουν θερμοκρασία, μαγνητικά πεδία και πυρηνικά πεδία)

### 3.5 Ολοκληρωμένοι αισθητήρες

Οι ολοκληρωμένοι αισθητήρες θερμοκρασίας κατασκευάζονται επάνω σε ημιαγωγούς, όπως όλα τα σύγχρονα ηλεκτρονικά στοιχεία, π.χ. οι μικροεπεξεργαστές. Τα χαρακτηριστικά τους είναι η γραμμικότητα του σήματος εξόδου, το σχετικώς μικρό μέγεθός τους, η περιορισμένη περιοχή λειτουργίας (συνήθως μεταξύ  $-40^{\circ}\text{C}$  έως  $+120^{\circ}\text{C}$ ), το χαμηλό τους κόστος και η καλή ακρίβεια, εφ' όσον βαθμονομηθούν ικανοποιητικά. Σε μερικές περιπτώσεις, οι ολοκληρωμένοι αισθητήρες έχουν κακό θερμικό σχεδιασμό, με αποτέλεσμα ο αισθητήρας – ημιαγωγός να μην έρχεται σε καλή θερμική επαφή με την εξωτερική επιφάνεια του αισθητήρα, άρα και με το σύστημα του οποίου ζητάμε τη θερμοκρασία. Παίρνοντας όλους αυτούς τους περιορισμούς υπόψη μας, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους ολοκληρωμένους αισθητήρες αποτελεσματικά σε πολλές εφαρμογές.

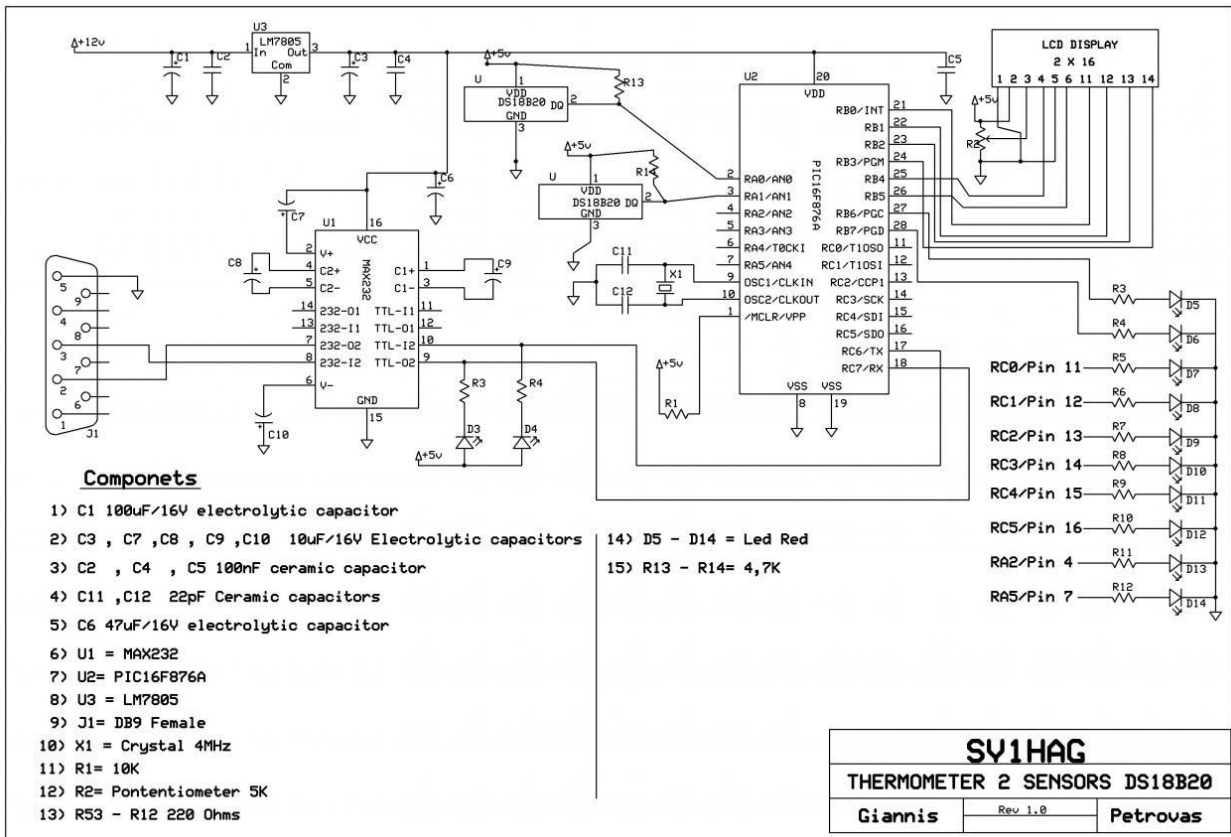
Η αρχή λειτουργίας των ολοκληρωμένων αισθητήρων βασίζεται στη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και ρεύματος του τρανζίστορ. Αν δύο τρανζίστορ λειτουργούν υπό διαφορετικό, αλλά σταθερό ρεύμα συλλέκτη, τότε η διαφορά δυναμικού μεταξύ βάσης και εκπομπού είναι ανάλογη της απόλυτης θερμοκρασίας του τρανζίστορ. Αυτή η τάση μετράτε απ' ευθείας ή μετατρέπεται σε ρεύμα. Οι ολοκληρωμένοι αισθητήρες θερμοκρασίας είναι ιδανικοί για μετρήσεις στο εσωτερικό διαφόρων συσκευών, ειδικά εφ' όσον χρησιμοποιούνται και άλλα ολοκληρωμένα κυκλώματα.

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. Αυτό σημαίνει ότι, αυξανόμενης της θερμοκρασίας, η τάση μιας ένωσης μειώνεται για σταθερό ρεύμα. Αυτή η θερμοκρασιακή εξάρτηση της τάσης μίας ένωσης σε δίοδο ή σε τρανζίστορ (ένωση 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 την θερμοκρασία. Αυτά τα κυκλώματα χρησιμοποιούνται σαν μετατροπείς θερμοκρασίας, οι οποίοι είναι γραμμικοί και πολύ εύκολοι στην χρήση.

Χαρακτηριστικά ημιαγωγικών αντιστάσεων :

- Οι ημιαγωγικές αντιστάσεις έχουν θετικό συντελεστή θερμοκρασίας συνήθως 0,8% της πλήρους κλίμακας ανά °C.
- Η γραμμικότητα τους είναι καλή. Το σφάλμα μη γραμμικότητας είναι συνήθως περίπου 0,5% της πλήρους κλίμακας.
- Οι τιμές των ημιαγωγικών αντιστάσεων σε κανονική θερμοκρασία (25°C) ποικίλλει από δεκάδες Ω σε δεκάδες ΚΩ.
- Οι ημιαγωγικές αντιστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε γέφυρα όπως τα RTD και τα θερμίστορ.
- Περιορισμένη περιοχή λειτουργίας.
- Χαμηλό κόστος.
- Μικρό μέγεθος.
- Γραμμικότητα στο σήμα εξόδου.



## Εφαρμογές ολοκληρωμένων αισθητήρων

Κυρίως χρησιμοποιείτε για να διαβάζουμε την εσωτερική θερμοκρασία των πολύ μικρών κυκλωμάτων.



## 4. Ανάπτυξη-Επιλογή αισθητήρα

### 4.1 Ανάπτυξη ενός αισθητήρα

Η δημιουργία ενός αισθητήρα αποτελεί από μόνη της μια επιστήμη όπου συνδυάζονται γνώσεις από την επιστήμη των υλικών, την ηλεκτρονική και τη μετρολογία. Στην ενότητα αυτή θα γίνει παρουσίαση μιας σχετικά γενικευμένης διαδικασίας που μπορεί να ακολουθηθεί για την ανάπτυξη ενός αισθητήρα. Δίνεται έμφαση στην ανάπτυξη και τις βασικές αρχές των μαγνητικών αισθητήρων.

#### Καθορισμός του υπό μέτρηση Φυσικού Μεγέθους

Καταρχήν πρέπει να γίνει ο προσδιορισμός του προβλήματος και συνεπώς του φυσικού μεγέθους που θα μετρηθεί. Το υπό μέτρηση μέγεθος μπορεί να είναι θέση, μάζα, πεδίο, χρόνος, ηλεκτρικά μεγέθη, θερμοκρασία καθώς και παράγωγά τους μεγέθη.

Μόλις ολοκληρωθεί το στάδιο αυτό λαμβάνει χώρα ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των φυσικών ιδιοτήτων που θα μετρηθούν κάτι που έχει άμεσο αντίκτυπο και στα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου αισθητήρα. Οι πιο σημαντικές από αυτές τις ιδιότητες είναι το εύρος λειτουργίας, η ευαισθησία, η αβεβαιότητα και η εξάρτηση της απόκρισης του αισθητήρα από παραμετρικά φαινόμενα.

Η ευαισθησία είναι ο λόγος της εξόδου προς την είσοδο του αισθητήρα. Η ευαισθησία δείχνει πόσο εύκολα ένας αισθητήρας μπορεί να μετρήσει ένα φυσικό μέγεθος.

Η αβεβαιότητα ενός αισθητήρα είναι η απόκλιση της μέτρησης από την πραγματική τιμή του φυσικού μεγέθους, τη στιγμή της μέτρησης. Το σφάλμα που προσδιορίζεται από την τιμή της αβεβαιότητας περιλαμβάνει το σφάλμα που εκτιμάται μέσω της ακρίβειας του αισθητήρα αλλά και το σφάλμα από την επίδραση παραμετρικών φαινομένων. Η αβεβαιότητα ενός μαγνητικού αισθητήρα, αφορά κυρίως την υστέρηση που προκαλείται από τη μαγνητική απόκριση του χρησιμοποιούμενου υλικού.

Η απόκριση μιας συσκευής ισούται με το χρόνο που απαιτείται για να ληφθεί η τελική τιμή εξόδου της συσκευής για μια συγκεκριμένη είσοδο. Η απόκριση ενός μαγνητικού αισθητήρα εξαρτάται από το περιβάλλον πεδίο, τη θερμοκρασία, την υγρασία καθώς και το χρόνο.

Το εύρος λειτουργίας του αισθητήρα, ισούται με τα όρια εντός των οποίων η συσκευή λειτουργεί αξιόπιστα, δηλαδή η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή που είναι ικανός να μετρά. Στις προδιαγραφές των αισθητήρων αναφέρονται επίσης, το θερμοκρασιακό εύρος καθώς και το εύρος τιμών υγρασίας.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό του αισθητήρα που αναγράφεται στις προδιαγραφές του είναι η διακριτικότητα, η οποία αναφέρεται στο μικρότερο διάστημα που μπορεί να ανιχνευθεί και να μετρηθεί. Όσο μεγαλύτερη είναι η διακριτικότητα μιας αισθητήριας συσκευής τόσο μικρότερη υποδιαίρεση του μεγέθους μπορεί αυτή να μετρήσει.

### **Επιλογή της Αρχής Λειτουργίας**

Όταν πλέον έχουν προσδιοριστεί τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του υπό ανάπτυξη αισθητήρα, σειρά έχει ο καθορισμός των κριτηρίων που αφορούν την επιλογή του μαγνητικού φαινομένου και του υλικού που θα χρησιμοποιηθούν. Οι πιο σημαντικές παράμετροι για την επιλογή του μαγνητικού φαινομένου και του υλικού που θα χρησιμοποιηθούν σε αισθητήριες εφαρμογές είναι ο βαθμός εξάρτησης από την ευαισθησία, την αβεβαιότητα, το περιβάλλον πεδίο, την θερμοκρασία και την υγρασία. Στη συνέχεια συντάσσεται ένας πίνακας ο οποίος περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του κάθε φαινομένου και τις απαιτούμενες ιδιότητες έτσι ώστε να επιλεγεί το φαινόμενο εκείνο που ικανοποιεί περισσότερο τα κριτήρια που έχουν τεθεί. Η επιλογή ενός μαγνητικού φαινομένου ανάμεσα σε φαινόμενα αγωγών, ημιαγωγών, υπεραγωγών, οπτικοηλεκτρονικής κ.λ.π, χωρίς αυτό να είναι περισσότερο θεμιτό από τα προαναφερόμενα φαινόμενα, μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία του όλου σχεδιασμού.

### **Προσαρμογή & Χαρακτηρισμός του Υλικού**

Εφόσον επιλεγεί κάποιο μαγνητικό φαινόμενο για την ανάπτυξη του αισθητήρα απαραίτητος είναι τόσο ο χαρακτηρισμός της αισθητήριας συσκευής όσο και η κατάλληλη προσαρμογή του μαγνητικού υλικού. Τεχνικές Παρασκευής Υλικού Η ανάπτυξη της συσκευής περιλαμβάνει το σχεδιασμό και την κατασκευή του μαγνητικού υλικού. Οι κύριες τεχνικές παρασκευής είναι τρεις:

- τεχνικές παρασκευής λεπτών υμενίων
- τεχνικές παρασκευής παχιών υμενίων
- τεχνικές παρασκευής ταχέων ψυχόμενων μεταλλικών ινών (rapid quenching techniques)

## **Τεχνικές παρασκευής λεπτών υμενίων**

Ο τρόπος σχηματισμού στερεών στρωμάτων πάνω σε συγκεκριμένες επιφάνειες, είναι η τεχνική σύνθεσης υλικών από συστατικά που βρίσκονται σε αέρια κατάσταση. Η διαδικασία αυτή γίνεται είτε με χημική αντίδραση των στοιχείων που αποτίθενται (χημική απόθεση ατμών – CVD) είτε με απλή (φυσική) απόθεση ατμών (PVD). Η χημική απόθεση ατμών λαμβάνει χώρα σε αντιδραστήρα υπό υψηλές θερμοκρασίες. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης χημικών ατμών είναι η πυρόλυση, η αναγωγή, η οξείδωση και η νιτρίδωση.

Οι πιο γνωστές τεχνικές φυσικής εναπόθεσης ατμών είναι η τεχνική της εξάχνωσης υλικών και αυτή του θρυμματισμού του υλικού που πρόκειται να εναποτεθεί. Και οι δύο τεχνικές πραγματοποιούνται σε συνθήκες κενού.

Πιο κλασική τεχνική, είναι αυτή που πραγματοποιείται με εξάχνωση ενός θερμαινόμενου υλικού. Το υλικό αυτό θερμαίνεται σε συνθήκες κενού, εξαχνώνεται και διασπείρεται σε όλο το χώρο άρα και στην προεπιλεγμένη επιφάνεια εναπόθεσης του υλικού. Η εξάχνωση γίνεται είτε με ωμική θέρμανση είτε με δέσμη ηλεκτρονίων (ηλεκτρονικό πυροβόλο).

Η τεχνική της εξάχνωσης με θρυμματισμό βασίζεται στην απομάκρυνση επιφανειακών ατόμων ή μορίων από την επιφάνεια ενός υλικού -μέσω βομβαρδισμού με ενεργοποιημένα ιόντα- τα οποία στη συνέχεια προσκρούουν υπό ελεγχόμενες συνθήκες με το υπόστρωμα εναπόθεσης.

## **Τεχνικές παρασκευής παχιών υμενίων**

Με την τεχνική αυτή ένα υδατικό ή μη διάλυμα, ελεγχόμενης σύστασης, απλώνεται με σπάτουλα στις επιφάνειες εναπόθεσης και κατά τη θερμική επεξεργασία πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις εκείνες που δίνουν υμένια συγκεκριμένων χαρακτηριστικών

Τεχνικές παρασκευής ταχέως ψυχόμενων ινών Η κύρια εφαρμογή των τεχνικών παρασκευής ταχέως ψυχόμενων μεταλλικών ινών (rapid quenching techniques), αφορά την παρασκευή άμορφων μαγνητικών υλικών. Τα άμορφα μαγνητοσυστολικά υλικά (ταινίες και σύρματα), είναι είτε συμβατικά ή με επικάλυψη γυαλιού (glass-covered amorphous wires).

Η τεχνική παρασκευής των άμορφων ταινιών και ινών βασίζεται στην ταχεία απόψυξη του τηγμένου μητρικού κράματος, το οποίο προσκρούει είτε σε περιστρεφόμενο τύμπανο χαλκού (δημιουργία ταινιών) είτε σε υδάτινο κύλινδρο (δημιουργία ινών). Η ταχεία απόψυξη- της τάξης των 106 K/sec- προσδίδει την άμορφη δομή των ταινιών και των ινών.

Η πρόσφατα αναπτυχθείσα τεχνική Taylor, αφορά την παρασκευή συρμάτων με επικάλυψη γυαλιού . Μία μήτρα από άμορφο πυρίτιο, γύρω από την οποία βρίσκεται πηλίο που διαχέεται από ρεύμα, φέρει στο εσωτερικό της το κράμα. Όταν το άμορφο πυρίτιο περιέλθει σε παχύρρευστη κατάσταση τότε εκχυόμενο ταυτόχρονα με το τηγμένο κράμα ξεκινά η μορφοποίηση μεγάλου μήκους συρμάτων στην επιφάνεια των οποίων υπάρχει επίστρωση γυαλιού (glass-covered wires). Τα σύρματα που λαμβάνονται με την τεχνική αυτή έχουν εσωτερική και εξωτερική διάμετρο της τάξης των 10μm και 20μm, αντίστοιχα.

### **Χαρακτηρισμός του αισθητήρα**

Όσον αφορά τον χαρακτηρισμό της διάταξης, η διαδικασία περιλαμβάνει χαρακτηρισμό δομής, μαγνητικό χαρακτηρισμό και βαθμονόμηση του αισθητήριου στοιχείου.

Ο μαγνητικός χαρακτηρισμός έχει σχέση με τον προσδιορισμό των καμπυλών B-H και λ-H, σε ένα ή και περισσότερους άξονες ανισοτροπίας του υλικού. Ο χαρακτηρισμός της δομής αφορά τον χαρακτηρισμό της επιφάνειας του υλικού του αισθητήρα με χρήση μικροσκοπιών σάρωσης, όπως SEM, TEM, με μικροσκόπια ατομικής, μαγνητικής δύναμης και διέλευσης-σάρωσης (AFM, MFM, STM, αντίστοιχα), με περίθλαση ακτινών X καθώς και με διαφορική, θερμική ανάλυση (DTA).

### **Προσαρμογή των ιδιοτήτων του υλικού**

Τα αποτελέσματα του χαρακτηρισμού της συσκευής, υποδεικνύουν και την διαδικασία προσαρμογής του υλικού, που θα ακολουθηθεί.

### **Ανόπτηση**

Από τις πιο σημαντικές διαδικασίες προσαρμογής είναι η ανόπτηση, μέσω της οποίας ελέγχεται η μικροδομή του μαγνητικού υλικού. Η ανόπτηση πραγματοποιείται με θερμική κατεργασία και ταυτόχρονα με παραμετρικό έλεγχο του πεδίου, της μηχανικής τάσης και του ρεύματος που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.

Ενδεικτικά αναφέρονται τα παρακάτω είδη ανόπτησης:

- Θερμική ανόπτηση
- Θερμική ανόπτηση με εφαρμογή μαγνητικού πεδίου
- εφαρμογή εναλλασσόμενου ρεύματος σε ατμόσφαιρα αργού (flash current annealing)
- εφαρμογή ρεύματος και μηχανικής καταπόνησης ταυτόχρονα (stress current annealing)
- Θερμική κατεργασία με ταυτόχρονη εφελκυστική καταπόνηση (creep induced)

### **Εισαγωγή προσμίξεων**

Μια άλλη διαδικασία προσαρμογής είναι η νόθευση του μαγνητικού υλικού με στόχο την σκλήρυνσή του μέσω ακύρωσης των μαγνητικών διπόλων σε συγκεκριμένους προσανατολισμούς. Τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία νόθευσης του μαγνητικού υλικού είναι η διάχυση και η ιοντική εμφύτευση.

Η διαδικασία εναπόθεσης των προσμίξεων πραγματοποιείται τοποθετώντας το υλικό σε φούρνο όπου υπάρχει συνεχής ροή αδρανούς αερίου ενώ η πηγή των προσμίξεων μπορεί να είναι σε αέρια, υγρή ή σε στερεή φάση.

Η βασική αρχή της τεχνικής της ιοντικής εμφύτευσης είναι η πρόσκρουση κατάλληλων ιόντων με ενέργειες 3-400keV, πάνω στην επιφάνεια του υπό νόθευση υλικού. Ανάλογα με την ενέργεια τους τα προαναφερθέντα ιόντα εισάγονται σε βάθη από 100-10000 Å περίπου κάτω από την επιφάνεια του υλικού. Τελικά τα ιόντα που εισέρχονται στο υλικό σκεδάζονται με τα άτομα και τα ηλεκτρόνια του υλικού, με αποτέλεσμα την συνεχή επιβράδυνσή τους ως την ακινητοποίησή τους. Τέλος πραγματοποιούνται διαδικασίες βαθμονόμησης του αισθητήρα με χρήση πρωτεύοντων (primary), δευτερευόντων (secondary) και εργασιακών προτύπων (working standards). Τα τελευταία σχετίζονται με τη χρήση αισθητήριων οργάνων. Το απαιτούμενο επίπεδο αβεβαιότητας σε κάθε εφαρμογή είναι αυτό που καθορίζει ποια τεχνική βαθμονόμησης θα χρησιμοποιηθεί κάθε φορά.

### **Το Ηλεκτρονικό Μέρος του Αισθητήρα**

Μετά την ανάπτυξη του αισθητήριου στοιχείου που ολοκληρώνεται με την διαδικασία χαρακτηρισμού και προσαρμογής του υλικού, ακολουθεί η ανάπτυξη του ηλεκτρονικού μέρους του αισθητήρα. Το ηλεκτρονικό μέρος αναφέρεται στην δημιουργία του κυκλώματος διέγερσης, του κυκλώματος ρύθμισης του σήματος εξόδου και του κυκλώματος αυτο-βαθμονόμησης.

Το κύκλωμα διέγερσης είναι είτε συνεχές είτε ημιτονοειδές, τριγωνικό ή παλμικό ρεύμα που εφαρμόζεται ωμικά ή επαγωγικά στο αισθητήριο μέσο. Η κατανάλωση ενέργειας αυτού του κυκλώματος κυμαίνεται από 1nW ως 1mW. Στον σχεδιασμό τέτοιων κυκλωμάτων χρησιμοποιούνται ευρέως ενισχυτές MOSFET και ολοκληρωμένα κυκλώματα. Τα κυκλώματα ρύθμισης σήματος και αυτοβαθμονόμησης είναι συνήθως ενισχυτές που φέρουν μετατροπείς σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό και μικροϋπολογιστές για την εκπόνηση λογισμικών διαδικασιών.

### **Έλεγχος Παραμετρικών Φαινομένων**

Μετά και την ολοκλήρωση του ηλεκτρονικού μέρους σειρά έχουν οι εργασίες που αφορούν τον προσδιορισμό της επίδρασης των παραμετρικών φαινομένων στον αισθητήρα. Κυριότερα είναι το περιβάλλον ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, η θερμοκρασία, η υγρασία και ο χρόνος.

Η επίδραση του χρόνου στη συσκευή συνήθως αντιμετωπίζεται μέσω διαδικασίας γήρανσης. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται με χρήση ενός συνδυασμού οξειδωτικής και χημικής προσβολής του υλικού. Το ζήτημα της εξάρτησης από την θερμοκρασία επιλύεται μέσω της σταθεροποίησης της απόκρισης που απαιτείται μέσα σε συγκεκριμένα θερμοκρασιακά όρια. Τα όρια αυτά (κατώτερο και ανώτερο) θεωρούνται ως το χαμηλότερο και υψηλότερο όριο της θερμικής συμπεριφοράς του αισθητήρα.

Η παρεμβολή του περιβάλλοντος ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου είναι ίσως το πιο σοβαρό πρόβλημα στους μαγνητικούς αισθητήρες. Βέβαια αν πρόκειται για αισθητήρα πεδίου δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα εφόσον το περιβάλλον πεδίο είναι το μέγεθος που μετράται. Σε διαφορετική όμως περίπτωση υπάρχουν δύο λύσεις: η μία αφορά την κλασική μαγνητική θωράκιση, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση και η άλλη είναι η ακύρωση του περιβάλλοντος πεδίου με χρήση διατάξεων σε σειρά και αντίθετα έτσι ώστε να τα επαγόμενα μαγνητικά πεδία να αναιρούνται μεταξύ τους. Η προστασία του αισθητήρα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (βροχή, υγρασία, υψηλή θερμοκρασία) επιτυγχάνεται με το πακετάρισμα (housing) του αισθητήρα. Αυτό κυρίως αναφέρεται στους αριθμούς IP (βαθμοί υδατοστεγανότητας) της συσκευής.

Τέλος ο αισθητήρας βαθμονομείται ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα και πραγματοποιείται ο προσδιορισμός των διορθωτικών κινήσεων. Με την ολοκλήρωση αυτού του σταδίου είναι έτοιμος τόσο ο αισθητήρας όσο και ο φάκελος με τα τεχνικά χαρακτηριστικά (technical envelope).

## 4.2 Επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα

Είναι προφανές πως η επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Στην παράγραφο αυτή θα επιχειρήσουμε να συνοψίσουμε τα βασικά σημεία αναφορικά με τους βασικούς τύπους ηλεκτρικών θερμομέτρων, δηλαδή των θερμοζευγών, των θερμομέτρων αντιστατών, των θερμίστορς και των ολοκληρωμένων θερμομέτρων.

### Θερμοζεύγη

Η τάση εξόδου των θερμοζευγών αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Πλεονεκτήματα: Δεν απαιτείται εξωτερική διέγερση, απλά στην κατασκευή, αντοχής, χαμηλού κόστους, διατίθενται σε πολλούς τύπους, καλύπτουν μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Μειονεκτήματα: Η σχέση θερμοκρασίας – τάσης εξόδου δεν είναι γραμμική, το σήμα εξόδου είναι χαμηλό, απαιτούν τη χρήση αναφοράς, είναι τα λιγότερο σταθερά και τα λιγότερο ευαίσθητα σε σχέση με τους υπολοίπους τύπους αισθητήρων.

### Αντιστάτες RTDs

Η αντίσταση των αντιστατών - αισθητήρων θερμοκρασίας αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Πλεονεκτήματα: Είναι οι σταθερότεροι και ακριβέστεροι αισθητήρες. Γραμμικότεροι σε σχέση με τα θερμοζεύγη. Μειονεκτήματα: Μεγάλο κόστος. Απαιτείται εξωτερική διέγερση (πηγή ρεύματος). Σχετικά σύνθετη συνδεσμολογία (4 αγωγών). Λόγω της αρχής λειτουργίας τους, αυτοθερμαίνονται. Έχουν χαμηλό σήμα εξόδου.

### Θερμίστορς

Η αντίστασή τους μειώνεται με τη θερμοκρασία. Πλεονεκτήματα: Υψηλό σήμα εξόδου. Ταχεία απόκριση. Απλή συνδεσμολογία (2 αγωγών). Μειονεκτήματα: Μή γραμμικό σήμα εξόδου. Περιορισμένη περιοχή λειτουργίας. Εύθραυστοι. Απαιτείται εξωτερική διέγερση (πηγή ρεύματος). Αυτοθερμαίνονται.

### Ολοκληρωμένοι αισθητήρες

Το σήμα εξόδου τους μπορεί να είναι τάση ή ρεύμα, αυξανόμενο με τη θερμοκρασία. Πλεονεκτήματα: Οι περισσότεροι γραμμικοί. Το υψηλότερο σήμα εξόδου. Χαμηλού κόστους. Μειονεκτήματα: Χρησιμοποιούνται μέχρι τους 200 °C. Απαιτείται τροφοδοσία. Αργή απόκριση. Αυτοθερμαίνονται. Λίγοι διαθέσιμοι τύποι.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από αυτήν την πτυχιακή άσκηση είναι, ότι οι αισθητήρες και πιο συγκεκριμένα οι αισθητήρες θερμοκρασίας είναι ένας κλάδος με ταχείς ρυθμούς ανάπτυξης. Οι αισθητήρες βρίσκονται παντού, στην καθημερινότητα μας, με τους αισθητήρες θερμοκρασίας να ποικίλουν ανάλογα με τις ανάγκες που προκύπτουν, έχοντας την ικανότητα να μετρήσουν από  $-273^{\circ}\text{C}$  έως και  $+2500^{\circ}\text{C}$ . Υπάρχουν αισθητήρες μεγάλης ακρίβειας, γραμμικοί, γρήγορης απόκρισης, και μεγάλης αντοχής ακόμα και για διαστημικές τεχνολογίες. Σε αυτήν την πτυχιακή μπορεί να διαβάσει κανείς για τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν έναν αισθητήρα, τα βασικότερα είδη αισθητήρων θερμοκρασίας, τρόπους επικοινωνίας με αυτούς και τελικά πως θα μπορεί να γίνει σωστή επιλογή αισθητήρα.



# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

<http://www.best-microcontroller-projects.com/how-rs232-works.html>>

<<http://www.mechatronics.gr/el/rd/10-interfacing-the-parallel-port.html>

Κωνσταντίνος Καλοβρέκτης, “Αισθητήρες Μέτρησης και Ελέγχου”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2012

ΣΕΡΓΟΥΝΙΩΤΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ, “ΈΛΕΓΧΟΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ LABVIEW ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΙΚΟΝΙΚΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ”, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2005

<http://rbkwin.bosch.com/el/el/automotivetechnology/overview/newsspecial/fully-automatic-parking/index.html>

<http://www.naftemporiki.gr/news/cstory.asp?id=2204287>

<http://www.tovima.gr/science/technologyplanet/article/?aid=451635>