

2

Αισθητήρες Μετρήσεων*

2.1 Γενικά

Σε πολλές περιπτώσεις οι ηλεκτρονικές συσκευές χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και τον έλεγχο (δηλαδή την καθοδήγηση) φυσικών, χημικών, μηχανικών και γενικότερα τεχνολογικών διαδικασιών, από το αυτόματο άναμμα ενός λαμπτήρα όταν νυχτώνει μέχρι την αυτόματη ανάμιξη και επεξεργασία χημικών ουσιών σε ένα εργοστάσιο. Αυτό είναι και η ουσία της έννοιας του *αυτοματισμού*, η καθοδήγηση συστημάτων από ηλεκτρονικά συστήματα χωρίς την απαίτηση ανθρώπινης παρέμβασης.

Η πορεία μίας διαδικασίας μπορεί να γίνει γνωστή από κάποιο φυσικό μέγεθος που σχετίζεται με το αποτέλεσμα της. Για παράδειγμα, μπορούμε να παρακολουθήσουμε τη διαδικασία θέρμανσης ενός προϊόντος μετρώντας τη θερμοκρασία του.

Οι μετρήσεις των φυσικών μεγεθών γίνονται με τη βοήθεια *αισθητήρων* ή απλώς *αισθητηρίων* (*sensors*). Αυτά είναι διατάξεις που διαθέτουν κάποια κατάλληλη ιδιότητα, η οποία μεταβάλλεται ως συνάρτηση του μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Έτσι η μέτρηση της ιδιότητας του αισθητήρα επιτρέπει τον άμεσο ποσοτικό υπολογισμό της τιμής του φυσικού μεγέθους. Η μελέτη και εφαρμογή στην πράξη των αισθητήρων αποτελεί αντικείμενο της *Οργανολογίας* (*Instrumentation*).

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται τα κυριότερα είδη αισθητήρων που μπορούν να συνεργαστούν με ένα Η/Υ, ανάλογα με το φυσικό μέγεθος που μετρούν. Έτσι περιγράφονται αισθητήρες θερμοκρασίας, φωτεινής στάθμης, πίεσης και βάρους, στάθμης, όγκου, μετατόπισης και κίνησης. Σε κάθε είδος αισθητήρα περιγράφεται καταρχήν η αρχή λειτουργίας του και στη συνέχεια δίνονται αναλυτικά παραδείγματα προϊόντων του εμπορίου, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν οικονομικές επιλογές γενικής χρήσης.

* Το κεφάλαιο αυτό έχει βάση ένα αδημοσίευτο κείμενο περί αισθητήρων, γραμμένο από τους Ι. Καλόμοιρο, Σ. Μπουλταδάκη, Ι. Πεταλά για τον τόμο *Έλεγχος Κυκλωμάτων και μετρήσεων με Η/Υ*.

2.2 Είδη και Χαρακτηριστικά Αισθητήρων

Συχνά οι αισθητήρες δεν δίδουν στην έξοδό τους κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα. Τότε απαιτείται η χρήση ενός επιπρόσθετου ηλεκτρονικού κυκλώματος, το οποίο να λαμβάνει την έξοδο του αισθητήρα και να τη μετατρέπει σε κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των επόμενων βαθμίδων. Το κύκλωμα αυτό ονομάζεται *κύκλωμα ρύθμισης σήματος* (*signal conditioning circuit*), *κύκλωμα ελέγχου* (*control circuit*) ή *εξωτερική μονάδα* (*outer* ή *external module*). Για παράδειγμα, υπάρχουν αισθητήρες στάθμης που μετρούν το χρόνο που απαιτείται για να ανακλαστεί ένα υπερηχητικό κύμα από τη μετρούμενη επιφάνεια και να επιστρέψει στο σημείο από όπου εκπέμφθηκε. Σε αυτούς πρέπει να υπάρχει κατάλληλο κύκλωμα για τη μετατροπή των τιμών χρόνου σε ανάλογες τιμές τάσης.

Οι αισθητήρες που απαιτούν εξωτερική τροφοδοσία για να λειτουργήσουν ονομάζονται *ενεργοί*. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας γραμμικής μετατόπισης LVDT πρέπει να τροφοδοτείται από κατάλληλη εναλλασσόμενη τάση. Οι αισθητήρες που δημιουργούν μόνοι τους μία τάση και δε χρειάζονται εξωτερική τροφοδοσία ονομάζονται *παθητικοί*. Τέτοιοι είναι για παράδειγμα οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι, που όταν πιεστούν αναπτύσσουν στα άκρα τους ηλεκτρική τάση.

Τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων συγκροτούν τις *προδιαγραφές* τους (*specifications*) και είναι πολλά. Παρότι οι ποικίλοι αισθητήρες που υπάρχουν σήμερα στηρίζονται σε διαφορετικές αρχές λειτουργίας, έχουν κοινά τα βασικά τους χαρακτηριστικά. Αυτά είναι τα ακόλουθα:

ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑ

Ο κάθε αισθητήρας διαθέτει ένα χαρακτηριστικό ή ιδιότητα, του οποίου η τιμή μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται η φυσική ποσότητα που μετρά ο αισθητήρας. Είναι επιθυμητό οι μεταβολές της φυσικής ποσότητας να προκαλούν αυστηρά ανάλογες μεταβολές της ιδιότητας του αισθητήρα. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται *γραμμικότητα* (*linearity*) και είναι ιδιαίτερης σημασίας. Εάν ο αισθητήρας δεν είναι γραμμικός, τότε η αντιστοίχιση των τιμών του μετρούμενου μεγέθους με τις τιμές εξόδου του αισθητήρα γίνεται με βάση την καμπύλη «βαθμονόμησης». Η μη-γραμμικότητα είναι συχνά εγγενής ιδιότητα του υλικού, από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αισθητήρας και εν γένει είναι αδύνατο να μηδενιστεί.

ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ

Η *ευαισθησία (sensitivity)* εκφράζει πόσο υψηλό σήμα εξόδου αποδίδει ο αισθητήρας για κάθε μονάδα του μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Έτσι, εάν ένας αισθητήρας θερμοκρασίας έχει ευαισθησία $1 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, συνεπάγεται ότι παράγει έξοδο ίση με 1 mV για κάθε βαθμό της μετρούμενης θερμοκρασίας και προφανώς είναι πιο ευαίσθητος από έναν άλλο αισθητήρα με ευαισθησία $0.5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, ο οποίος για κάθε θερμοκρασία παράγει ως έξοδο τη μισή τάση.

ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

Η *διακριτική ικανότητα (resolution)* εκφράζει τη μικρότερη μεταβολή του φυσικού μεγέθους που μπορεί να ανιχνεύσει ο αισθητήρας και να μεταβάλλει την έξοδό του ανάλογα. Για παράδειγμα, ένα θερμομόμετρο με διακριτική ικανότητα 0.1°C σημαίνει ότι μπορεί να διακρίνει μεταξύ δύο θερμοκρασιών που απέχουν 0.1°C , δηλαδή να παράγει εξόδους ελαφρά διαφορετικής τιμής.

ΑΚΡΙΒΕΙΑ

Η *ακρίβεια (accuracy)* ισούται με το σφάλμα που εγγενώς περιέχει η τιμή που αποδίδει ο αισθητήρας στην έξοδο, δηλώνει δηλαδή την αβεβαιότητα που υπάρχει στην τιμή της εξόδου. Μπορεί να εκφράζεται σε απόλυτες τιμές (για παράδειγμα $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$) ή επί τοις εκατό (για παράδειγμα 1%). Στην πρώτη περίπτωση η ανακρίβεια είναι σταθερή και ανεξάρτητη της τιμής του μετρούμενου φυσικού μεγέθους, ενώ στην άλλη περίπτωση η ανακρίβεια είναι ανάλογη της παραπάνω τιμής.

ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ

Το *εύρος τιμών εισόδου (full-scale input, FSI)* ορίζει σε ποια πλαίσια του μετρούμενου φυσικού μεγέθους μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρας. Για παράδειγμα, υπάρχουν πολλοί αισθητήρες θερμοκρασίας (θερμοζεύγη, θερμίστορ, θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις) αλλά δεν ενδείκνυνται όλοι για τη μέτρηση θερμοκρασιών της τάξης των 1000°C . Η γνώση του εύρους τιμών εισόδου μας επιτρέπει να επιλέξουμε τον κατάλληλο αισθητήρα που ταιριάζει στις ανάγκες της εφαρμογής.

ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ ΕΞΟΔΟΥ

Το *εύρος τιμών εξόδου (full-scale output, FSO)* ορίζει τη μορφή (δηλαδή τις τιμές) που μπορεί να λαμβάνει η τάση ή το ρεύμα εξόδου ενός αισθητήρα. Οι αισθητήρες διατίθενται εν γένει σε παραλλαγές με διάφορα εύρη τιμών εξόδου,

ώστε να μπορεί ο χρήστης να επιλέξει τη μορφή που ταιριάζει περισσότερο στα κυκλώματα που θα παραλάβουν το σήμα εξόδου (για παράδειγμα σε ένα μετατροπέα A/D). Το εύρος τιμών εξόδου καθορίζεται συχνά από ένα κύκλωμα ρύθμισης σήματος, το οποίο συνδέεται μόνιμα με τον αισθητήρα.

Τέλος πρέπει να αναφέρουμε ότι η θερμοκρασία αποτελεί τον συνηθέστερο παράγοντα που αλλοιώνει τις προδιαγραφές των αισθητήρων. Η επίδραση της θερμοκρασίας στους αισθητήρες μπορεί να είναι γνωστή και συχνά υπάρχει τρόπος *αντιστάθμισής* της (*compensation*) με κατάλληλα ηλεκτρονικά κυκλώματα ρύθμισης σήματος. Για την περιγραφή της επίδρασης αυτής ορίζονται διάφορα μεγέθη, όπως η *ολίσθηση του σημείου μηδενός λόγω θερμοκρασίας* (*temperature zero shift*), η *ευαισθησία στη θερμοκρασία* (*temperature sensitivity*) και η *μεταβολή της ευαισθησίας λόγω θερμοκρασίας* (*thermal sensitivity shift*).

2.3 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

ΕΙΔΗ ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΩΝ

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
2. Η γραμμική διαστολή ενός μετάλλου
3. Η ηλεκτρική αντίσταση ενός μετάλλου
4. Το φαινόμενο του *θερμοηλεκτρισμού* (ή *θερμοηλεκτρικό φαινόμενο*)
5. Η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα θερμό σώμα

Την ιδιότητα της γραμμικής διαστολής αξιοποιούν τα γνωστά θερμόμετρα υδραργύρου, τα μεταλλικά θερμόμετρα κ.ά. Είναι όμως δύσκολο αυτή να μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο να μπορεί να ψηφιοποιηθεί κατάλληλα. Η ιδιότητα της ηλεκτρικής αντίστασης είναι πιο εύχρηστη, καθώς είναι εύκολο να δημιουργηθεί μία ηλεκτρική τάση, η οποία να μεταβάλλεται ανάλογα με την ηλεκτρική αντίσταση. Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο οδηγεί επίσης στην εμφάνιση μίας ηλεκτρικής τάσης.

Στις επόμενες παραγράφους θα περιγράψουμε τους βασικούς αισθητήρες που αξιοποιούν τις ιδιότητες (3) και (4), που είναι τα θερμίστορες και τα θερμοζεύγη. Επίσης θα περιγράψουμε έναν αισθητήρα θερμοκρασίας με μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος, που ονομάζεται *LM35*.

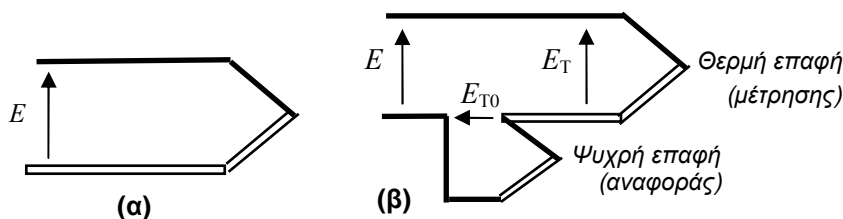
2.3.2 Θερμοζεύγη

Τα *θερμοηλεκτρικά ζεύγη* ή *θερμοζεύγη* (*thermocouples*) αποτελούν ένα εξαιρετικά διαδεδομένο είδος ανιχνευτών θερμοκρασίας, υψηλής ακρίβειας και χαμηλού κόστους. Αποτελούνται από δύο σύρματα διαφορετικών μετάλλων, τα οποία είναι ενωμένα σε δύο σημεία.

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η λειτουργία των θερμοζευγών στηρίζεται στο φαινόμενο του *θερμοηλεκτρισμού* (*thermoelectricity*), ή αλλιώς *φαινόμενο Seebeck* (*Seebeck effect*). Ειδικότερα, όταν δύο διαφορετικά μέταλλα ενώνονται σε ένα σημείο, τότε στο σημείο αυτό αναπτύσσεται μία τάση, η οποία λέγεται *θερμοηλεκτρική τάση* ή *δυναμικό επαφής* (*contact potential*) και οφείλεται στο διαφορετικό έργο εξόδου των μετάλλων. Έτσι, ανάμεσα στα ελεύθερα άκρα των συνδεδεμένων μεταλλικών συρμάτων [βλέπε Σχήμα 2.3(α)] αναπτύσσεται μία τάση E . Η τάση αυτή όμως εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Έτσι, εάν τα δύο μεταλλικά σύρματα ενωθούν σε δύο σημεία που ευρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία, θα δημιουργηθούν δύο θερμοηλεκτρικές τάσεις διαφορετικής τιμής. Η διαφορά των δύο τιμών είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας των δύο σημείων.

Η δομή ενός θερμοζεύγους εικονίζεται στο Σχήμα 2.3(β). Παρατηρούμε ότι υπάρχουν δύο σημεία επαφής: Το άνω σημείο, που ονομάζεται *θερμή επαφή* (*hot junction*), τοποθετείται στο αντικείμενο, του οποίου τη θερμοκρασία T θέλουμε να μετρήσουμε, και αναπτύσσεται σε αυτό μία θερμοηλεκτρική τάση E_T . Το άλλο σημείο (η κάτω επαφή του σχήματος) ονομάζεται *επαφή αναφοράς* (*reference junction*) ή *ψυχρή επαφή* (*cold junction*) και τοποθετείται σε ένα χώρο σταθερής θερμοκρασίας (π.χ. σε θερμοκρασία περιβάλλοντος T_0). Στα άκρα του αναπτύσσεται μία θερμοηλεκτρική τάση E_{T_0} . Λόγω της τοποθέτησης των μεταλλικών συρμάτων, οι τάσεις E_T και E_{T_0} έχουν αντίθετη πολικότητα, και έτσι στα άκρα του θερμοζεύγους αναπτύσσεται η διαφορά τους, $E = E_T - E_{T_0}$.



Σχήμα 2.3 (α) Εμφάνιση θερμοηλεκτρικής τάσης όταν δύο μέταλλα ενώνονται. (β) Δομή ενός θερμοζεύγους. Διακρίνονται η θερμή επαφή και η ψυχρή επαφή και σημειώνονται οι τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτό.

Η θερμοηλεκτρική τάση E δεν είναι ευθέως ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας ($T - T_0$) αλλά σε συγκεκριμένες, στενές περιοχές θερμοκρασιών T μπορεί να θεωρηθεί χωρίς σφάλμα ότι είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας. Συνήθως ανατρέχουμε σε πίνακες, οι οποίοι αναγράφουν τη διαφορά τάσης E που αντιστοιχεί σε ποικίλες διαφορές θερμοκρασίας ($T - T_0$) για ποικίλες θερμοκρασίες αναφοράς T_0 .

ΕΙΔΗ ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΩΝ

Τα θερμοζεύγη κατασκευάζονται από επιλεγμένα μέταλλα ή κράματα μετάλλων, τα οποία αναπτύσσουν όχι υψηλή απόλυτη τιμή θερμοηλεκτρικής τάσης αλλά θερμοηλεκτρική τάση που μεταβάλλεται ισχυρά με τη θερμοκρασία. Ονομάζονται από τα ονόματα των δύο μετάλλων ή κραμάτων, και αναφέρεται πρώτο το μέταλλο που γίνεται θετικότερο (και άρα αποτελεί το θετικό πόλο της θερμοηλεκτρικής τάσης). Το καλώδιο που καλύπτει το αρνητικό μέταλλο έχει πάντοτε κόκκινο χρώμα.

Τα πιο διαδεδομένα είδη θερμοζευγών είναι τα ακόλουθα [5]:

1. Σιδήρου - Κωνσταντάνης (*iron-constantan*) ή Τύπου J

Οι ακροδέκτες έχουν χρώματα λευκό και κόκκινο. Αναπτύσσει θερμοηλεκτρική τάση περίπου $50 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Το καλώδιο σιδήρου είναι μαγνητικό. Οι επαφές γίνονται με συγκόλληση ή ηλεκτροσυγκόλληση χρησιμοποιώντας συνηθισμένα μέσα συγκόλλησης (η κωνσταντάνη είναι κράμα χαλκού/νικελίου).

2. Νικελίου/Χρωμίου - Νικελίου/Αλουμινίου (*chromel-alumel*) ή Τύπου K

Οι ακροδέκτες έχουν χρώματα κίτρινο και κόκκινο. Αναπτύσσει θερμοηλεκτρική τάση περίπου $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Το καλώδιο από το κράμα alumel (νικελίου/αλουμινίου) είναι μαγνητικό. Οι επαφές γίνονται με συγκόλληση ή ηλεκτροσυγκόλληση και απαιτούνται ειδικά μέσα συγκόλλησης (άργυρος, ρέοντα υγρά). Το θερμοζεύγος αυτό δημιουργεί ηλεκτρικά σήματα όταν τα καλώδιά του κάμπτονται και έτσι δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε δονούμενα συστήματα, εκτός και αν χρησιμοποιείται κάποιο σύστημα αντιστάθμισης της μηχανικής τάσης.

3. Χαλκού - Κωνσταντάνης (*copper-constantan*) ή Τύπου T

Οι ακροδέκτες έχουν χρώματα μπλε και κόκκινο. Αναπτύσσει θερμοηλεκτρική τάση περίπου $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Κανένα καλώδιο δεν είναι μαγνητικό. Οι επαφές γίνονται με συγκόλληση ή ηλεκτροσυγκόλληση χρησιμοποιώντας συνηθισμένα μέσα συγκόλλησης. Το θερμοζεύγος αυτό εμφανίζει σφάλματα στην αγωγή του ρεύματος επειδή ο χαλκός έχει υψηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και δε θα πρέπει να χρησιμοποιείται, εκτός εάν μεγάλα μήκη

καλωδίου (100 έως 200 φορές η διάμετρος) τίθενται σε περιβάλλον σταθερής θερμοκρασίας

Τα είδη των θερμοζευγών που διατίθενται σήμερα στο εμπόριο αναγράφονται στον Πίνακα 2-1.

Πίνακας 2-1
Είδη θερμοζευγών και περιοχές λειτουργίας τους

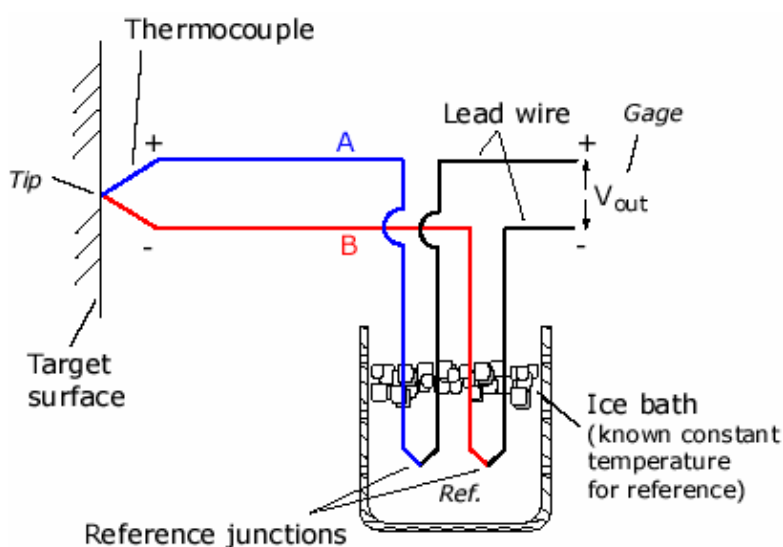
Είδος Θερμοζεύγους	Θετικό άκρο (+)	Αρνητικό άκρο (-)	Περιοχή Λειτουργίας
B	Λευκόχρυσος 30% Ρόδιο	Λευκόχρυσος 6% Ρόδιο	1370 – 1700 °C
C	W5Re (Βολφράμιο 5% Ρήνιο)	W26Re (Βολφράμιο 26% Ρήνιο)	1650 – 2315 °C
E	Chromel	Κονσταντάνη	95 – 900 °C
J	Σίδηρος	Κονσταντάνη	95 – 760 °C
K	Chromel	Alumel	95 – 1260 °C
N	Nicrosil	Nisil	650 – 1260 °C
R	Λευκόχρυσος 13% Ρόδιο	Λευκόχρυσος	870 – 1450 °C
S	Λευκόχρυσος 10% Ρόδιο	Λευκόχρυσος	980 – 1450 °C
T	Χαλκός	Κονσταντάνη	-200 – 350 °C

Τα θερμοζεύγη χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές που εκτείνονται από βιομηχανικές και επιστημονικές έως ιατρικές. Έτσι, χρησιμοποιούνται σε διάφορα περιβάλλοντα, όπως σε κλιβάνους, θαλάμους ψύξης, πυρηνικούς αντιδραστήρες αλλά και εγχειρήσεις για την παρακολούθηση της εσωτερικής θερμοκρασίας οργάνων. Αυτό συμβαίνει επειδή το θερμοζεύγος συνίσταται στην ουσία σε μία επαφή δύο μετάλλων, που μπορεί να λάβει μικροσκοπικές διαστάσεις και να κατευθυνθεί με τη βοήθεια δύο ευλύγιστων καλωδίων σε οποιοδήποτε σημείο μας ενδιαφέρει. Γι' αυτό αποτελούν μία από τις πρώτες επιλογές για τη μέτρηση θερμοκρασιών.

ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΩΝ

Παρακάτω παρουσιάζεται ο ορθότερος τρόπος για τη σύνδεση θερμοζευγών σε κύκλωμα μέτρησης. Η ένωση των μετάλλων του θερμοζεύγους με το όργανο μέτρησης δημιουργεί μία ή δύο επιπλέον θερμοηλεκτρικές επαφές (επαφές αναφοράς). Καταρχήν πρέπει να εξασφαλιστεί η τοποθέτηση της επαφής

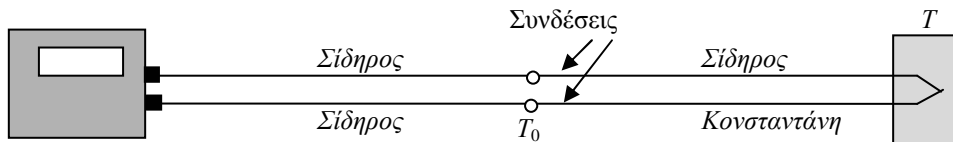
αναφοράς σε μία γνωστή, σταθερή θερμοκρασία T_0 , καθώς το σήμα στην έξοδο του θερμοζεύγους εξαρτάται όχι μόνον από τη μετρούμενη θερμοκρασία αλλά και από τη θερμοκρασία αναφοράς. Ένας τρόπος για να γίνει αυτό είναι η τοποθέτηση της επαφής αναφοράς σε λουτρό πάγου, οπότε η σταθερή θερμοκρασία είναι $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Σχ. 2.4). Άλλος τρόπος μπορεί να είναι ένα κυτίο σταθερής θερμοκρασίας (zone-box), το οποίο βρίσκεται συνήθως στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος $\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, (βλέπε Σχ. 2.6).



Σχ. 2.4 Σύνδεση θερμοζευγών, με τη βοήθεια επαφών αναφοράς, που παραμένουν σε σταθερή θερμοκρασία μέσα σε λουτρό πάγου.

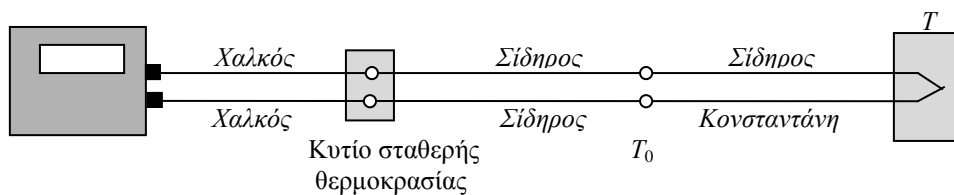
Τα σήματα των θερμοζευγών μπορούν να αναγινώσκονται από ένα βολτόμετρο και η θερμοκρασία να προσδιορίζεται από τον πίνακα αναφοράς, αλλά μπορούν και να διαβιβαστούν στον Η/Υ για επεξεργασία και προσδιορισμό της θερμοκρασίας μέσω λογισμικού.

Το απλούστερο δυνατό κύκλωμα θερμοζεύγους εικονίζεται στο Σχήμα 2.5. Για τη μελέτη μας χρησιμοποιούμε ένα θερμοζεύγος σιδήρου-κωνσταντάνης. Παρατηρούμε ότι έχουμε αποφύγει τη σύνδεση των καλωδίων με ένα τρίτο μέταλλο, όπως π.χ. χαλκό, επειδή γνωρίζουμε ότι σε κάθε σημείο σύνδεσης αναπτύσσεται μία θερμοηλεκτρική τάση, και έτσι διαβιβάζουμε το σήμα στον Η/Υ μέσω καλωδίου σιδήρου. Στη σύνδεση σιδήρου-σιδήρου δεν αναπτύσσεται θερμοηλεκτρική τάση και έτσι η τελική τάση E που φθάνει στο όργανο ισούται με $E_T - E_{T_0}$.



Σχήμα 2.5 Το απλούςτερο δυνατό κύκλωμα θερμοζεύγους, στο οποίο αποφεύγεται η χρήση καλωδίου από τρίτο υλικό για την οδήγηση του σήματος στο βολτόμετρο ή Η/Υ

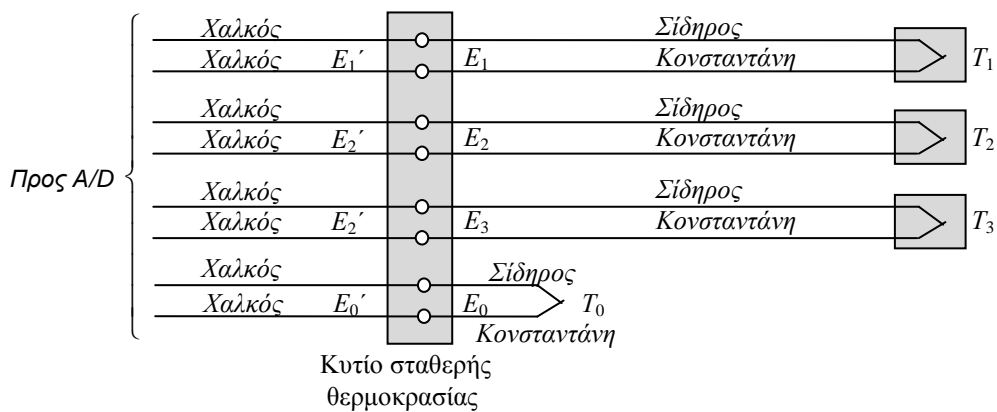
Εάν η χρήση χάλκινων καλωδίων είναι αναπόφευκτη, προσέχουμε να κάνουμε δύο συνδέσεις σιδήρου-χαλκού και όχι μία σιδήρου-χαλκού και μία κοιισταντάνης-χαλκού, επειδή στη δεύτερη περίπτωση οι θερμοηλεκτρικές τάσεις στις δύο επαφές θα είναι διαφορετικές και δε θα αλληλοαναιρούνται. Το κύκλωμα έχει τη μορφή του Σχήματος 2.6. Οι δύο συνδέσεις χαλκού σιδήρου προκαλούν θερμοηλεκτρικές τάσεις αντίθετης πολικότητας. Για να αναιρεθούν πλήρως αυτές μεταξύ τους πρέπει να ευρίσκονται ακριβώς στην ίδια θερμοκρασία, και γι' αυτό τις τοποθετούμε μέσα σε ένα *κυτίο σταθερής θερμοκρασίας (zone box)*. Το κυτίο αυτό δεν πρέπει να θεωρηθεί ως ένας *σταθεροποιητής θερμοκρασίας (temperature stabilizer)*, καθώς δε διατηρεί τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του *σταθερή*, αλλά *ομοιόμορφη*, ίδια για τις δύο συνδέσεις που περιέχει. Εν γένει τα κυτία αυτά τοποθετούνται μακριά από πηγές θερμότητας και ηλιακό φως, ώστε η θερμοκρασία τους να μη μεταβάλλεται με το χρόνο.



Σχήμα 2.6 Κύκλωμα θερμοζεύγους, στο οποίο χρησιμοποιείται καλώδιο από τρίτο υλικό για την οδήγηση του σήματος σε βολτόμετρο ή Η/Υ

Σε μία αυτοματοποιημένη διάταξη όλα τα θερμοζεύγη συνδέονται στα κανάλια ενός μετατροπέα A/D, οπότε οι ενδείξεις τους εισάγονται ανά τακτά

χρονικά διαστήματα σε ψηφιακή μορφή μέσα στον Η/Υ και εκεί τυγχάνουν επεξεργασίας. Παραμένοντας στο παράδειγμα με το θερμοζεύγος σιδήρου-κωνσταντάνης, διαπιστώνουμε ότι η καλωδίωση εδώ είναι απλούστερη, καθώς δεν είναι αναγκαίο το καλώδιο κωνσταντάνης του κάθε θερμοζεύγους να συνδεθεί με καλώδιο σιδήρου, ώστε κάθε θερμοζεύγος να έχει δύο επαφές σιδήρου-κωνσταντάνης. Αντίθετα, τα διάφορα θερμοζεύγη μπορούν να έχουν μία μόνον επαφή και η θερμοκρασία αναφοράς να λαμβάνεται από ένα επιπλέον, ξεχωριστό θερμοζεύγος. Η σύνδεση αυτή εικονίζεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7 Σύνδεση πολλών θερμοζευγών με μία κοινή επαφή αναφοράς

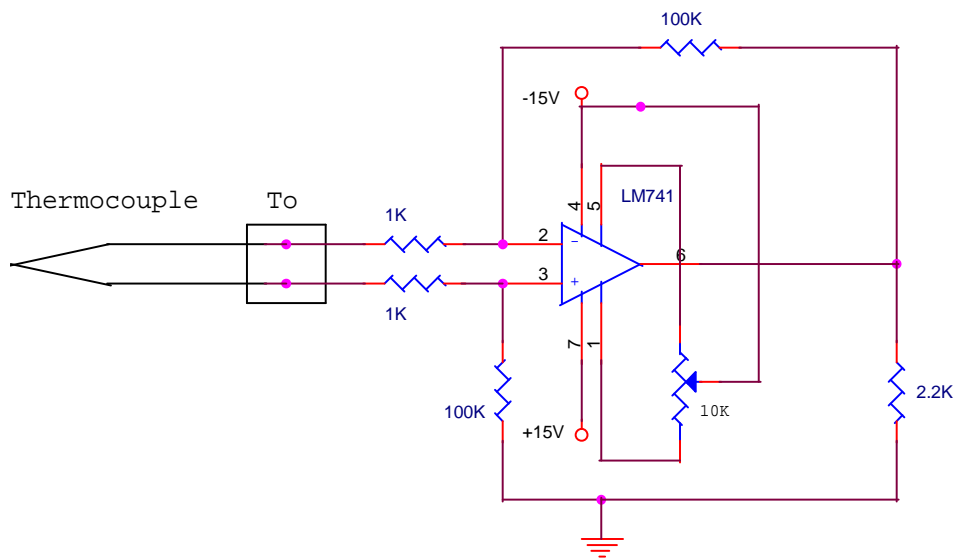
ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

1. Να κατασκευάσετε το παρακάτω κύκλωμα μέτρησης της θερμοκρασίας με θερμοζεύγος τύπου Κ:

Λάβετε υπόψη ότι γενικά σ' αυτές τις μετρήσεις ισχύει κατά προσέγγιση:

$$E = S(T - T_0),$$















όπου T_0 η θερμοκρασία της επαφής αναφοράς.



Σχ. 2.8 Πρακτική εφαρμογή με θερμοζεύγος

2. Να εξασφαλίσετε ότι οι επαφές του θερμοζεύγους με τον ενισχυτή είναι σε κοινή και σταθερή θερμοκρασία T_0 . Να φέρετε την άκρη του θερμοζεύγους σε θερμοκρασία πάγου (0°C), σε θερμοκρασία δωματίου (22°C) και σε θερμοκρασία βρασμού (100°C). Με βάση αυτές τις μετρήσεις να χαράξετε μια στοιχειώδη καμπύλη βαθμονόμησης, με τη θερμοκρασία στον οριζόντιο άξονα και την έξοδο του συστήματος μέτρησης (έξοδος V0 του ενισχυτή) στον κατακόρυφο άξονα.

ΧΡΩΜΑΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΩΝ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟΥ

Ω OMEGA  								
ANSI Code	Alloy Combination		Color Coding		Maximum Temperature Useful Range	EMF (mV) Over Max. Temperature Range	Limits of Error** (Whichever is Greater)	
	+Lead	-Lead	Thermocouple Grade	Extension Grade			Standard	Special
J	±IRON Fe (magnetic)	CONSTANTAN COPPER-NICKEL Cu-Ni			0 to 750°C (32 to 1382°F) Therm. Grade 0 to 200°C (32 to 392°F) Ext. Grade	-8.095 to 69.553	0 to 750°C (32 to 1382°F) 2.2°C or 0.75% 1.1°C or 0.4%	
K	CHROME NICKEL-CHROMIUM Ni-Cr	ALOMEGA NICKEL-ALUMINIUM Ni-Al (magnetic)			-200 to 1250°C (-328 to 2282°F) Therm. Grade 0 to 200°C (32 to 392°F) Ext. Grade	-6.458 to 54.886	-200 to 1250°C (-328 to 2282°F) 2.2°C or 0.75% Above 0°C 2.2°C or 2.0% Below 0°C 1.1°C or 0.4%	
V*	COPPER Cu	CONSTANTAN COPPER-NICKEL Cu-Ni	NONE ESTABLISHED	NONE ESTABLISHED	0 to 80°C (32 to 176°F) Ext. Grade			
T	COPPER Cu	CONSTANTAN COPPER-NICKEL Cu-Ni			-200 to 350°C (-328 to 662°F) Therm. Grade -60 to 100°C (-76 to 212°F) Ext. Grade	-6.528 to 20.872	-200 to 350°C (-328 to 662°F) 1.0°C or 0.75% Above 0°C 1.0°C or 1.5% Below 0°C 0.5°C or 0.4%	
ANSI Code	Alloy Combination		Color Coding		Maximum Temperature Useful Range	EMF (mV) Over Max. Temperature Range	Limits of Error** (Whichever is Greater)	
	+Lead	-Lead	Thermocouple Grade	Extension Grade			Standard	Special
E	CHROME NICKEL-CHROMIUM Ni-Cr	CONSTANTAN COPPER-NICKEL Cu-Ni			-200 to 900°C (-328 to 1652°F) Therm. Grade 0 to 200°C (32 to 392°F) Ext. Grade	-9.835 to 76.373	-200 to 900°C (-328 to 1652°F) 1.7°C or 0.5% Above 0°C 1.7°C or 1.0% Below 0°C 1.0°C or 0.4%	
N	OMEGA-P NICROSIL Ni-Cr-Si	OMEGA-N NISIL Ni-Si-Mg			-270 to 1300°C (-450 to 2372°F) Therm. Grade 0 to 200°C (32 to 392°F) Ext. Grade	-4.345 to 47.513	2.2°C or 0.75% Above 0°C 2.2°C or 2.0% Below 0°C 1.1°C or 0.4%	
R	PLATINUM 13% RHODIUM Pt-13% Rh	PLATINUM PT	NONE ESTABLISHED		0 to 1450°C (32 to 2642°F) Therm. Grade 0 to 150°C (32 to 300°F) Ext. Grade	-0.226 to 21.101	0 to 1450°C (32 to 2642°F) 1.5°C or 0.25% 0.6°C or 0.1%	
S	PLATINUM 10% RHODIUM Pt-10% Rh	PLATINUM PT	NONE ESTABLISHED		0 to 1450°C (32 to 2642°F) Therm. Grade 0 to 150°C (32 to 300°F) Ext. Grade	-0.236 to 18.693	0 to 1450°C (32 to 2642°F) 1.5°C or 0.25% 0.6°C or 0.1%	

2.3.1 Θερμίστορς

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι μεταβολές της τιμής της αντίστασης των θερμομέτρων ηλεκτρικής αντίστασης είδαμε ότι είναι μικρές και έτσι δε μπορούν να αξιοποιηθούν για τη μέτρηση μικρών μεταβολών θερμοκρασίας με ακρίβεια και να λειτουργήσουν ως διακόπτες. Τα θερμίστορς είναι και αυτά αντιστάσεις, των οποίων η τιμή μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, αλλά εμφανίζουν μεγάλες μεταβολές στην τιμή της αντίστασης. Τα θερμίστορς είναι κατασκευασμένα από οξειδία των μεταβατικών μετάλλων της σειράς του σιδήρου, όπως το χρώμιο, το μαγγάνιο, ο σίδηρος, το κοβάλτιο και το νικέλιο. Η αντίστασή τους μεταβάλλεται ισχυρά με τη θερμοκρασία αλλά έχει υψηλά όρια ανοχής, με αποτέλεσμα οι μετρήσεις θερμοκρασίας να μην έχουν την ακρίβεια άλλων μεθόδων. Από την άλλη πλευρά, η ισχυρή μεταβολή της αντίστασης επιτρέπει τη χρήση των θερμίστορς ως διακοπών ή περιοριστών ρεύματος. Τα θερμίστορς αποτελούν μία εξαιρετικά διαδεδομένη και οικονομική επιλογή για τη μέτρηση θερμοκρασιών.

Υπάρχουν δύο είδη θερμίστορς, τα *NTC* (*negative temperature coefficient, αρνητικού θερμοκρασιακού συντελεστή*) και τα *PTC* (*positive temperature coefficient, θετικού θερμοκρασιακού συντελεστή*). Στα *NTC* η αντίσταση μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, ενώ στα *PTC* η αντίσταση αυξάνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία. Με βάση τα θερμίστορς έχουν κατασκευαστεί και κινητοί ανιχνευτές θερμοκρασίας (*temperature probes*). Τυπικά θερμίστορς που διατίθενται στο εμπόριο εικονίζονται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.9 Τυπικά θερμίστορς του εμπορίου της εταιρείας *Therm-O-Disk* [4]

ΘΕΡΜΙΣΤΟΡΣ NTC

Τα θερμίστορς *NTC* εμφανίζουν μεγάλες μεταβολές αντίστασης όταν υφίστανται μικρές μεταβολές θερμοκρασίας. Χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση θερμοκρασιών μεταξύ -100 και 300 °C. Η μεταβολή της αντίστασής τους καθορίζεται από το πηλίκο της αντίστασης στους 25 °C προς την αντίσταση στους 125 °C και είναι, ανάλογα με το μοντέλο, της τάξης του 20 έως 40. Αυτό σημαίνει ότι η αντίσταση σε θερμοκρασία 125 °C γίνεται από 20 έως 40 φορές μικρότερη της αντίστασης σε θερμοκρασία δωματίου [4]. Οι ανοχές των θερμίστορς (της τάξης του 5%, ανάλογα με τη θερμοκρασία) είναι πολύ υψηλότερες από αυτές των θερμοηλεκτρικών αντιστάσεων. Τα θερμίστορς εμφανίζουν υψηλή χρονική σταθερότητα και η τιμή της αντίστασής τους στους 100 °C μεταβάλλεται μετά από 1000 ώρες λειτουργίας κατά ποσοστό της τάξης του 0.1% [4]. Σήμερα διατίθενται

θερμίστορες με διάφορες τιμές αντίστασης, από 500 Ω έως 10 ΜΩ σε θερμοκρασία δωματίου. Τα θερμίστορες NTC κατασκευάζονται σε μορφή ράβδου, δίσκου ή κάψουλας,

Η εξάρτηση της αντίστασης από τη θερμοκρασία στα θερμίστορες NTC έχει τη γενική μορφή:

$$R_T = R_{T_0} e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

όπου T είναι η θερμοκρασία μέτρησης σε βαθμούς Κέλβιν και T_0 μία θερμοκρασία αναφοράς (συνήθως οι 298 K, που αντιπροσωπεύουν τους 25 °C), ενώ R_T και R_{T_0} είναι οι τιμές της αντίστασης του θερμίστορα NTC στις παραπάνω θερμοκρασίες. Η παραπάνω σχέση δεν είναι στην πράξη χρήσιμη, επειδή στην ουσία επιθυμούμε να προσδιορίσουμε την τιμή T και γνωρίζουμε τις άλλες τρεις ποσότητες. Έτσι λύνοντας την εξίσωση ως προς T προκύπτει ο ακόλουθος τύπος του Steinhart που αναφέρεται στα θερμίστορες NTC:

$$\frac{1}{T} = a + b (\ln R) + c (\ln R)^3$$

Στον τύπο αυτό η θερμοκρασία T προκύπτει σε βαθμούς Κέλβιν. Οι ποσότητες a , b και c είναι συντελεστές που αναφέρονται στο συγκεκριμένο θερμίστορα που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, σε ένα απλό θερμίστορα, όπως το μοντέλο P1H103T της εταιρείας Therm-O-Disk που έχει αντίσταση 10 kΩ ± 2% στους 25 °C, οι συντελεστές a , b και c έχουν τις ακόλουθες τιμές:

P1H103T: $a = 1.125190920 \times 10^{-3}$
 $b = 2.347363293 \times 10^{-4}$
 $c = 8.551343472 \times 10^{-8}$

Με βάση τις παραπάνω τιμές, η ακρίβεια στον υπολογισμό της θερμοκρασίας από τον τύπο του Steinhart δίνει ακρίβεια καλύτερη από 0.05 °C στην περιοχή θερμοκρασιών 0 – 100 °C. Ο πίνακας τιμών θερμοκρασίας - αντίστασης του θερμίστορα NTC P1H103T στην παραπάνω περιοχή θερμοκρασιών παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-2.

Πίνακας 2-2

Τιμές θερμοκρασίας - αντίστασης του θερμίστορα NTC P1H103T της εταιρείας Therm-O-Disk

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ω)
0	32 654
10	19 903
20	12 493
30	8 056
40	5 327
50	3 603
70	1 752
100	680

Τα θερμίστορες εμφανίζουν *φαινόμενο αυτοθέρμανσης (self-heating effect)*, δηλαδή η θερμοκρασία τους αυξάνει όταν διαρρέονται από ρεύμα, το οποίο είναι της τάξης του ενός βαθμού Κελσίου ($1\text{ }^{\circ}\text{C}$) ανά 7 mW ηλεκτρικής ισχύος στο εσωτερικό τους.

Τα θερμίστορες NTC σε μορφή δίσκου εμφανίζουν υψηλή αποβολή θερμότητας και διαχείριση ισχύος λόγω του σχήματός τους, που έχει μεγάλη εξωτερική επιφάνεια, και ενδείκνυνται για χρήση όταν δεν απαιτείται η χρήση θερμίστορα πολύ μικρών διαστάσεων. Τα θερμίστορες αυτά μπορούν να διαθέτουν διηλεκτρική επικάλυψη υψηλής μόνωσης όταν είναι ανάγκη να υπάρχει ηλεκτρική μόνωση. Διατίθενται δύο επικαλύψεις, ανάλογα με τη μέγιστη μετρούμενη θερμοκρασία: *Εποξική επικάλυψη (epoxy coating)* για θερμοκρασίες έως $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ και *ελαστική επικάλυψη σιλικόνης (silicon rubber coating)* για θερμοκρασίες έως $250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Η μη γραμμική σχέση της αντίστασης του θερμίστορα NTC με τη θερμοκρασία αποθαρρύνει συχνά τη χρήση των θερμίστορες σε εφαρμογές. Η μη γραμμικότητα μπορεί να αντιμετωπιστεί επιτυχώς κατά την επεξεργασία των μετρήσεων αντίστασης αλλά και από το κύκλωμα λήψης μετρήσεων καθαυτό:

Όσον αφορά το πρώτο σκέλος, μπορούμε να απαλείψουμε τη μη γραμμικότητα με τη βοήθεια της σχέσης του Steinhart που περιγράψαμε παραπάνω.

Όσον αφορά το δεύτερο σκέλος, λαμβάνουμε υπόψη ότι τα θερμίστορες συνδέονται συνήθως σε ένα βραχίονα μίας γέφυρας Wheatstone. Η έξοδος της γέφυρας μπορεί να γραμμικοποιηθεί με έναν απλό διαιρέτη τάσης [ο οποίος γραμμικοποιεί την τάση εξόδου ως προς τη θερμοκρασία, Σχήμα 1(α)] ή με μία αντίσταση συνδεδεμένη παράλληλα με το θερμίστορα (η οποία γραμμικοποιεί την αντίσταση ως προς τη θερμοκρασία). Η γραμμικοποίηση που επιτυγχάνεται είναι καλύτερη από 0.5% όταν το εύρος των μετρούμενων θερμοκρασιών είναι μικρότερο από $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ΘΕΡΜΙΣΤΟΡΣ PTC

Τα θερμίστορες τύπου PTC έχουν αντίσταση που αυξάνει με τη θερμοκρασία, και ειδικότερα μεταπίπτουν από μία κατάσταση χαμηλής αντίστασης σε μία κατάσταση υψηλής αντίστασης όταν η θερμοκρασία ανέλθει σε μία συγκεκριμένη τιμή. Έτσι χρησιμοποιούνται ευρέως ως περιοριστές ρεύματος σε θερμοκρασίες μεταξύ 50 και $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Οι τιμές της αντίστασης των θερμίστορες PTC κυμαίνονται από $0.5\ \Omega$ έως $20\text{ k}\Omega$ σε θερμοκρασία δωματίου. Επειδή η αύξηση της αντίστασης γίνεται απότομα, τα θερμίστορες αυτά δεν ενδείκνυνται για τη μέτρηση συνεχών τιμών θερμοκρασίας αλλά για τη διακοπή της τροφοδοσίας κυκλωμάτων. Έτσι αποτελούν θερμοευαίσθητους ηλεκτρονικούς διακόπτες. Δεν έχουν μηχανικά μέρη όπως άλλοι διακόπτες, και επομένως εμφανίζουν μηδενική μηχανική φθορά

και μεγάλη διάρκεια ζωής. Επιπρόσθετα δεν εμφανίζουν φαινόμενα υστέρησης και έχουν εξαιρετικά χαμηλό κόστος. Τα θερμίστορες PTC αυτοθερμαίνονται όταν διαρρέονται από ρεύμα, και αυτό αξιοποιείται στις εφαρμογές.

Οι συνηθέστερες εφαρμογές των θερμίστορες PTC είναι οι εξής :

1. Μέτρηση της ροής ρευστών

Εάν ένα θερμίστορ PTC ευρίσκεται σε ακίνητο αέρα ή σε ακίνητο υγρό, αδυνατεί να αποβάλλει πολλή θερμότητα και αυτοθερμαίνεται γρήγορα Έτσι γρήγορα μεταβαίνει στην κατάσταση υψηλής αντίστασης, στην οποία μπορεί να διακόψει ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ελέγχει μία διαδικασία ψύξης, ευρισκόμενο μέσα στο ψυκτικό αέριο ή υγρό. Εάν η ροή του ψυκτικού αερίου ή υγρού μειωθεί, το θερμίστορ αποκτά μεγάλη αντίσταση και ενεργοποιεί ένα κύκλωμα προειδοποίησης ή το κύκλωμα ελέγχου της ροής του ψυκτικού.

2. Χρονική καθυστέρηση

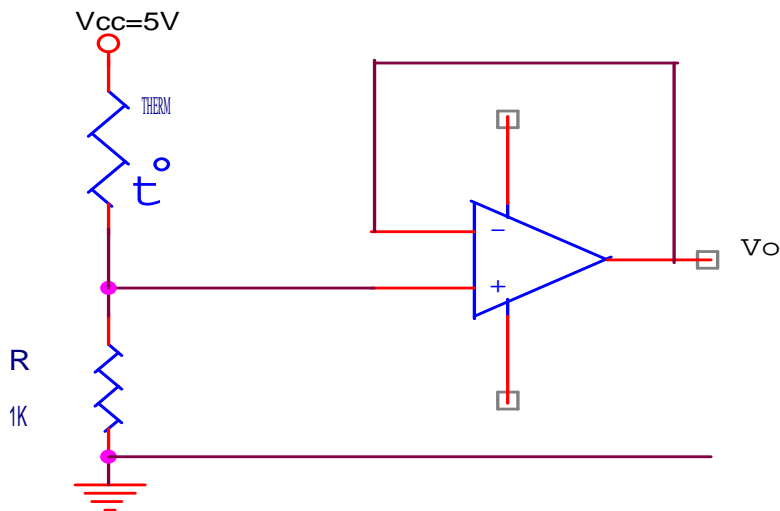
Εάν διαβιβάσουμε σε ένα θερμίστορ PTC ένα συγκεκριμένο ρεύμα, το θερμίστορ θα αυτοθερμανθεί και θα οδηγηθεί σε συγκεκριμένο χρόνο στην κατάσταση υψηλής αντίστασης, στην οποία μπορεί να ενεργοποιήσει κάποιο υποκύκλωμα. Επομένως μπορούμε να ενεργοποιήσουμε ένα υποκύκλωμα μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, να εισάγουμε δηλαδή μία επιθυμητή χρονική καθυστέρηση στη λειτουργία του υποκυκλώματος. Είναι σημαντικό να έχει το θερμίστορ PTC τη δυνατότητα να ψυχθεί πλήρως μεταξύ δύο διαδοχικών αυτοθερμάνσεων, αλλιώς η χρονική καθυστέρηση στη δεύτερη περίπτωση θα είναι μικρότερη και το θερμίστορ δε θα λειτουργεί αξιόπιστα.

3. Προστασία μπαταριών από υπερφόρτιση

Όταν οι μπαταρίες φορτίζονται στη μέγιστη χωρητικότητά τους, θερμαίνονται. Έτσι ένα θερμίστορ PTC που ευρίσκεται σε επαφή με μία μπαταρία μπορεί να ανιχνεύσει πότε η μπαταρία φορτίζεται πλήρως. Τότε η αντίστασή του αυξάνει απότομα και μηδενίζεται το ρεύμα που το διαρρέει, με αποτέλεσμα τη διακοπή της τροφοδοσίας της μπαταρίας.

ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΘΕΡΜΙΣΤΟΡ

Να υλοποιήσετε το παρακάτω κύκλωμα για τη μέτρηση της θερμοκρασίας με θερμίστορ.



Σχ. 2.10 Πρακτική εφαρμογή με θερμίστορ

Ο τελεστικός ενισχυτής στην έξοδο χρησιμεύει σαν απομονωτής (buffer). Η ενίσχυση τάσης που προκαλεί είναι μονάδα.

Η τάση V_0 δίνεται από τη σχέση

$$V_0 = \frac{R}{R + R_T} \times V_{CC}$$

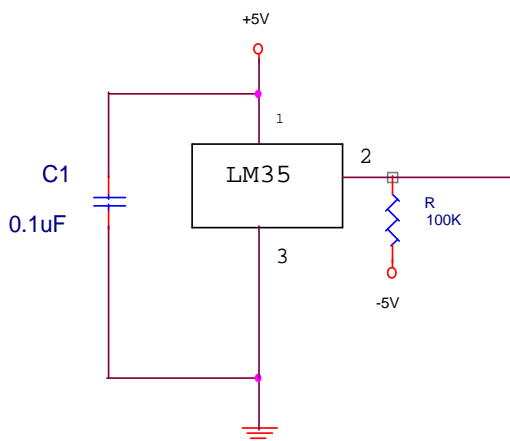
R_T είναι η αντίσταση του θερμίστορ που μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Η τιμή της αντίστασης R εξαρτάται από τον τύπο του θερμίστορ και επιλέγεται με κριτήριο να είναι αρκετά μικρότερη από την μικρότερη αντίσταση του θερμίστορ, στην περιοχή των θερμοκρασιών που μετράμε. Ο ρόλος του θερμίστορ στο δικτύωμα των αντιστάσεων είναι να ελέγχει το ρεύμα και άρα την πτώση τάσης πάνω στην R .

ΚΙΝΗΤΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (TEMPERATURE PROBES)

Οι κινητοί ανιχνευτές θερμοκρασίας αποτελούν μικρές διατάξεις που περιέχουν ένα θερμίστορ και μπορούν να ακουμπήσουν στην επιφάνεια, της οποίας η θερμοκρασία πρέπει να μετρηθεί. Οι ανιχνευτές αυτοί μετακινούνται εύκολα και μπορούν να προσαρμοστούν μόνιμα σε ένα χώρο μέτρησης. Αποτελούνται από



Σχήμα 2.11 Κινητός ανιχνευτής θερμοκρασίας του εμπορίου [4]



Σχ. 2.12β Συνδεσμολογία του LM35 για μετρήσεις και σε αρνητικές θερμοκρασίες

Στο Σχήμα 2.12(α) εικονίζεται το διάγραμμα βαθμίδα του βασικού κυκλώματος του αισθητήρα LM35, στο οποίο η έξοδος παραμένει ελεύθερη. Ο τελεστικός ενισχυτής μη αντιστροφής στην έξοδο χρησιμεύει ώστε η τάση εξόδου να βρίσκεται στα επιθυμητά όρια (π.χ. στα όρια τάσεων εισόδου μιας βαθμίδα μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό). Με τη σύνδεση αυτή ο αισθητήρας τροφοδοτείται με θετική μόνον τάση και έτσι παράγει στην έξοδο θετικές τάσεις, με συνέπεια να μετρά μόνο θετικές θερμοκρασίες, μεταξύ 2 και 150 °C. Εάν η έξοδος συνδεθεί σε αρνητική τάση τροφοδοσίας $-V_S$ μέσω μίας αντίστασης με τιμή $R_1 = V_S / (50 \mu A)$, τότε ο αισθητήρας μπορεί να μετρά θετικές και αρνητικές θερμοκρασίες, μεταξύ -55 και $+150$ °C [Σχήμα 2.12(β)].

Εκτός από τη σειρά LM35 υπάρχει η σειρά LM45, η οποία περιλαμβάνει αισθητήρες μικρότερου φυσικού μεγέθους και μικρότερων απαιτήσεων τάσης τροφοδοσίας, καθώς και η σειρά LM50, η οποία περιλαμβάνει αισθητήρες που ενδείκνυνται περισσότερο για μετρήσεις χαμηλών θερμοκρασιών (κάτω από 0 °C).

2.3.4 Θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις

Όπως είναι γνωστό, η ηλεκτρική αντίσταση των μετάλλων αυξάνει καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Άρα, είναι δυνατό να κατασκευαστεί διάταξη μέτρησης της θερμοκρασίας, μετρώντας την ηλεκτρική αντίσταση ενός πρότυπου μετάλλου, καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία του. Έτσι, κατασκευάζονται οι θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις (RTDs). Η μέτρηση της αντίστασης ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου γίνεται με τη βοήθεια γέφυρας Wheatstone ή με τη βοήθεια πηγής ρεύματος, που διεγείρει κατάλληλα τη θερμοηλεκτρική αντίσταση.

Οι θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις έχουν καλύτερη γραμμικότητα και είναι γενικά πιο ακριβείς από τα θερμοζεύγη, καθώς έχουν ανάλυση μικρότερη του ενός βαθμού Κελσίου. Εξαρτώνται από την απόλυτη τιμή της θερμοκρασίας και όχι απλώς από τη θερμοκρασιακή μεταβολή, όπως συμβαίνει στα θερμοζεύγη, άρα δεν έχουν ανάγκη από θερμοκρασίες αναφοράς. Όμως είναι πιο ακριβές και

απαιτούν εξωτερική διέγερση. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εργαστηριακές και βιομηχανικές εφαρμογές ακριβείας. Τυπικό μέταλλο για την κατασκευή θερμοηλεκτρικών αντιστάσεων είναι η πλατίνα.

2.3.5 Σύγκριση Αισθητήρων Θερμοκρασίας

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα LM35 αποτελεί την πληρέστερη λύση στο αντικείμενο της μέτρησης της θερμοκρασίας καθώς εμφανίζει γραμμικότητα και υψηλή ευαισθησία και είναι κατασκευασμένο για να συνεργάζεται με ηλεκτρονικά συστήματα συλλογής δεδομένων. Από την άλλη πλευρά η χρήση του υπόκειται σε περιορισμούς χώρου και το εύρος θερμοκρασιών που μπορεί να μετρηθεί δεν είναι υψηλό. Έτσι το κύκλωμα LM35 δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο διαδικασιών θέρμανσης που υπερβαίνουν τους 150 °C και σε περιβάλλον ψύξης με θερμοκρασίες της τάξης αυτής του υγρού αζώτου (-200 °C).

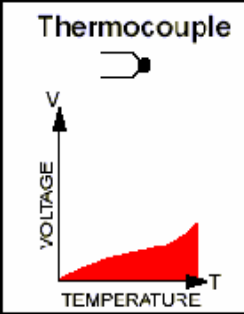
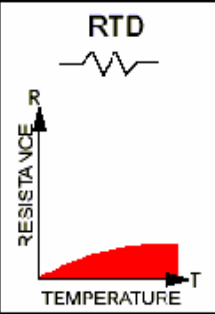
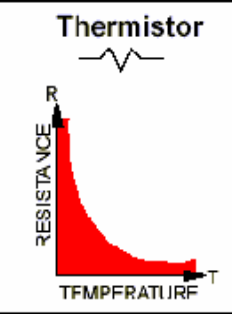
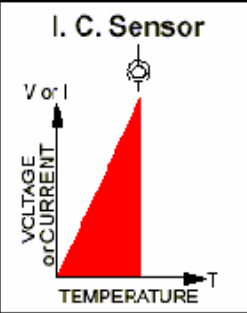
Οι θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις, τα θερμίστορ και τα θερμοζεύγη εμφανίζουν μη-γραμμική συμπεριφορά [9]. Τα θερμοζεύγη και τα θερμίστορ αποκρίνονται ταχέως, σε αντίθεση με τις θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις που αποκρίνονται με βραδύτητα. Τα θερμοζεύγη δεν απαιτούν εξωτερική τροφοδοσία, ενώ οι θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις και τα θερμίστορ απαιτούν. Τα θερμοζεύγη μετρούν μεγάλο εύρος θερμοκρασιών ενώ τα θερμίστορ μικρό (έως 300 °C). Πιο υψηλό κόστος έχουν οι θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις και πιο μικρό τα θερμοζεύγη.

Τα θερμοζεύγη αποδίδουν στην έξοδο μικρές τάσεις, οι οποίες είναι ευαίσθητες στο θόρυβο. Γενικά εμφανίζουν χαμηλή ευαισθησία και μικρότερη σταθερότητα από τα άλλα είδη αισθητήρων.

Οι θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις παρέχουν ενδείξεις υψηλής ακρίβειας και σταθερότητας, αλλά η αντίσταση των καλωδίων σύνδεσής τους τις αλλοιώνει και πρέπει να αντισταθμίζεται.

Τα θερμίστορ τέλος δίνουν εξαιρετικά επαναλήψιμες ενδείξεις, παρέχουν μεγάλη διακριτική ικανότητα και απαιτούν μικρό ρεύμα τροφοδοσίας. Χαρακτηρίζονται, όμως, από έντονη μη γραμμικότητα.

Πίνακας 2-3
Σύγκριση αισθητηρίων θερμοκρασίας

	 <p>Thermocouple</p>	 <p>RTD</p>	 <p>Thermistor</p>	 <p>I. C. Sensor</p>
πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> • Αυτο-τροφοδοτούμενο • Απλό • Φθηνό • Σε μεγάλη ποικιλία • Μεγάλη περιοχή θερμοκρασιών 	<ul style="list-style-type: none"> • Πολύ σταθερό • Πολύ ακριβές • Πιο γραμμικό από θερμοζεύγος 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλή έξοδος • Γρήγορο • Απλό 	<ul style="list-style-type: none"> • Πολύ γραμμικό • Υψηλή έξοδος • Φθηνό
Μειονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> • Μη γραμμικό • Χαμηλή τάση • Χρειάζεται αναφορά • Ελάχιστα ευαίσθητο 	<ul style="list-style-type: none"> • Ακριβό • Χρειάζεται πηγή ρεύματος • Μικρές μεταβολές R • Αυτοθέρμανση 	<ul style="list-style-type: none"> • Μη-γραμμικό • Μικρή περιοχή θερμοκρασιών • Χρειάζεται πηγή ρεύματος • Αυτοθέρμανση 	<ul style="list-style-type: none"> • $T < 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ • Χρειάζεται τροφοδοσία • Αργό • Αυτοθέρμανση

2.4. ΟΠΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

2.4.1 Φωτοαντιστάσεις (LDRs)

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Γνωρίζουμε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται μέσα σε ένα υλικό από τα ηλεκτρόνια του υλικού που μπορούν να κινηθούν μέσα σε αυτό και λέγονται *ελεύθερα ηλεκτρόνια* ή *ηλεκτρόνια αγωγιμότητας* (*conduction electrons*). Όσο περισσότερα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας έχει ένα υλικό, τόσο μεγαλύτερη *αγωγιμότητα*, και άρα μικρότερη *αντίσταση*, εμφανίζει στη ροή του ρεύματος.

Όταν προσπίπτει φως σε ένα φωτοαγώγιμο υλικό, αυξάνει ο αριθμός των ελευθέρων ηλεκτρονίων του. Αυτό γίνεται επειδή τα προσπίπτοντα φωτόνια διεγείρουν ηλεκτρόνια που είναι δεσμευμένα και τα καθιστούν ελεύθερα. Έτσι η αντίσταση του φωτοαγώγιμου υλικού μειώνεται. Η σχέση μεταξύ της προσπίπτουσας φωτεινής ισχύος P και της αντίστασης R δεν είναι γραμμική αλλά λογαριθμική και έχει τη μορφή:

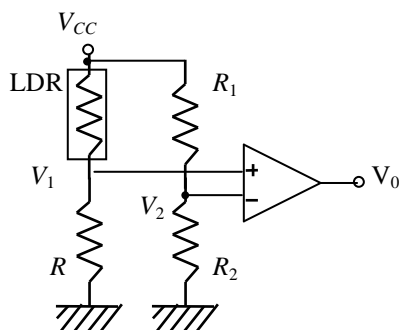
$$R = \frac{a}{P^b}$$

Από αυτήν καταλήγουμε στην εμπειρική σχέση

$$\log R = a - b \log P$$

Οι ποσότητες a και b είναι χαρακτηριστικές του φωτοαγώγιμου υλικού. Με βάση αυτά τα υλικά κατασκευάζονται τα εμπορικά προϊόντα των *φωτοαντιστάσεων* (*photoresistors*) ή *αντιστάσεων εξαρτώμενων από φωτεινή ένταση* (*light-dependent resistors – LDRs*).

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ



Σχήμα 2.13 Σύνδεση φωτοαντίστασης σε διαιρέτη τάσης.

Οι φωτοαντιστάσεις είναι εν γένει πολυκρυσταλλικά υμένα ή μονοκρυσταλλοί του ημιαγωγικού υλικού *θειούχου καδμίου* (*CdS*). Το υλικό αυτό είναι από τα πλέον κατάλληλα και εμφανίζει μέγιστη ευαισθησία σε μήκος κύματος $1 \mu\text{m}$ (που εμπίπτει στην περιοχή του κοντινού υπερύθρου). Η τάση που αναπτύσσει στην έξοδο όταν δέχεται ορατό φως είναι ανάλογη της έντασης του φωτός. Έχει το μεγαλύτερο

υπάρχον εύρος λειτουργίας καθώς η προσπίπτουσα ένταση μπορεί να μεταβληθεί κατά οκτώ τάξεις μεγέθους, αλλά δεν εμφανίζει εξαιρετική γραμμικότητα. Εντούτοις, οι φωτοαντιστάσεις από θειούχο κάδμιο είναι εν γένει φθηνές.

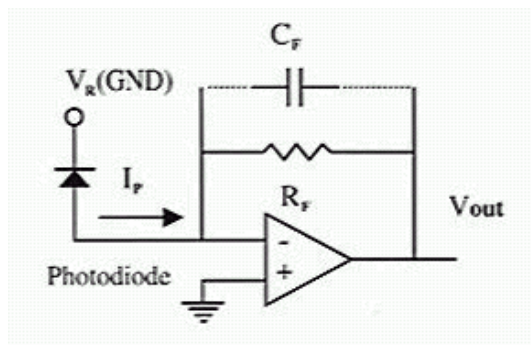
Σε απόλυτο σκοτάδι η τιμή μίας φωτοαντίστασης είναι τεράστια. Όταν τη συνδέουμε όμως σε ένα κύκλωμα, και άρα σε κάποια τάση, εμφανίζεται ένα μικρό ρεύμα που οφείλεται στην τυχαία απελευθέρωση ηλεκτρονίων από τα μητρικά τους άτομα και αποτελεί το *ρεύμα σκότους* (*dark current*). Όταν εκθέσουμε τη φωτοαντίσταση στο φως η τιμή της πέφτει σε μερικές δεκάδες ή εκατοντάδες Ωμ. Μία οποιαδήποτε φωτοαντίσταση του εμπορίου εμφανίζει αντίσταση της τάξης των 10 Ω όταν ευρίσκεται σε ένα φωτισμένο χώρο και αντίσταση της τάξης των 20 kΩ εάν τη σκεπάσουμε με το χέρι μας, δημιουργώντας συνθήκες σκότους.

Οι φωτοαντιστάσεις χρησιμοποιούνται συνήθως για να ενεργοποιούν (ON) ή να απενεργοποιούν (OFF) μία διάταξη και έτσι ο απλούστερος τρόπος σύνδεσής τους είναι σε ένα διαιρέτη τάσης. Ο διαιρέτης αυτός μπορεί να συγκρίνεται με μία σταθερή τάση V_2 , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13, με τη βοήθεια ενός τελεστικού ενισχυτή και έτσι η έξοδος του τελευταίου να ευρίσκεται σε θετική ή αρνητική τάση κόρου. Για παράδειγμα, εάν επιλέξουμε ίσες αντιστάσεις R_1 και R_2 , με αποτέλεσμα η σταθερή τάση αναφοράς V_2 να ισούται με το ήμισυ της τάσης V_{CC} , τότε η αντίσταση R είναι καλό να είναι μερικά kΩ. Στο εξαιρετικά απλό κύκλωμα του Σχήματος 2.13 η τάση εξόδου V_0 γίνεται θετική όταν υπάρχει φως και ο αισθητήρας λειτουργεί ως ανιχνευτής φωτός. Εάν εναλλαγούν οι θέσεις της φωτοαντίστασης και της αντίστασης R τότε ο αισθητήρας λειτουργεί ως ανιχνευτής σκότους. Με βάση την παραπάνω λογική ο αναγνώστης μπορεί να δημιουργήσει το δικό του κύκλωμα ελέγχου.

2.4.2 Φωτοδίοδοι και φωτοτρανζίστορ

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι φωτοδίοδοι και τα φωτοτρανζίστορ αποτελούν τα βασικά είδη φωτοβολταϊκών ανιχνευτών. Αυτά δημιουργούν ρεύμα, που ονομάζεται *φωτόρευμα* (*photocurrent*), ανάλογο της προσπίπτουσας φωτεινής έντασης. Τα φωτοτρανζίστορ είναι στην ουσία φωτοδίοδοι που επιπρόσθετα εκτελούν ενίσχυση του δημιουργούμενου ρεύματος και έτσι η αρχή λειτουργίας τους είναι ίδια με αυτήν των φωτοδίοδων. Ο όρος *φωτοδίοδος* μπορεί να επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει έως και τις ηλιακές μπαταρίες, αλλά συνήθως αναφέρεται μόνο στους αισθητήρες φωτεινής στάθμης.

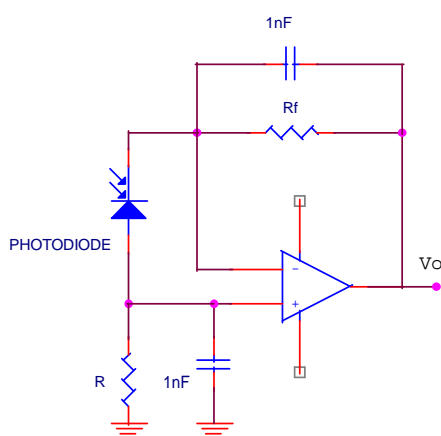


Σχήμα 2.14. Απλό κύκλωμα σύνδεσης φωτοδιόδου

Οι φωτοδιόδοι αποτελούνται από μία φωτοευαίσθητη δίοδο πυριτίου, δηλαδή μία επαφή p-n που έχει στην άνω όψη της ένα φωτοαγωγίμο στρώμα. Η πρόσπτωση φωτός στην επιφάνειά τους δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών στην περιοχή της επαφής, δηλαδή ένα μικρό ρεύμα (φωτόρευμα). Το φωτόρευμα είναι αμελητέο σε σύγκριση με τα ρεύματα που διαρρέουν τις φωτοδιόδους όταν αυτές είναι ορθά πολωμένες, οπότε άγουν ως κανονικές δίοδοι. Όταν όμως οι φωτοδιόδοι είναι ανάστροφα πολωμένες, το φωτόρευμα καθίσταται σημαντικό και επιτρέπει τη μέτρηση της προσπίπτουσας φωτεινής έντασης.

Η φωτοδιόδος μπορεί να λειτουργήσει πολωμένη ανάστροφα (οπότε η σύνδεση λέγεται *σύνδεση φωτοαγωγιμότητας – photoconductive, PC mode*). Ένας τέτοιος απλός τρόπος σύνδεσης εικονίζεται στο Σχήμα 2.14. Ο Τελεστικός ενισχυτής διαντίστασης μετατρέπει το φωτόρευμα σε τάση. Στην έξοδο του κυκλώματος η τάση V_{out} είναι ανάλογη του φωτορεύματος ($V_{out} = -R_p I_p$). Ο πυκνωτής χρησιμοποιείται προαιρετικά για αντιστάθμιση τυχόν διαφοράς φάσης ανάμεσα στην έξοδο και την είσοδο.

Σύμφωνα με μια άλλη δυνατή συνδεσμολογία η φωτοδιόδος είναι μη-πολωμένη. Στην περίπτωση αυτή η φωτεινή ένταση έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση φωτοβολταϊκής τάσης στα άκρα της φωτοδιόδου, η οποία και ενισχύεται από τον ενισχυτή διαφοράς. Η σύνδεση αυτή εικονίζεται στο Σχ. 2.15 και λέγεται *σύνδεση φωτοτάσης – photovoltaic, PV mode*. Η αντίσταση R ανάμεσα στη μη αναστρέφουσα είσοδο και τη γη ρυθμίζει την ευαισθησία του κυκλώματος και πρέπει να είναι μεγάλη (150K-10M).



Σχήμα 2.15. Σύνδεση της φωτοδιόδου σε λειτουργία φωτοτάσης

Γνωρίζουμε ότι η ανάστροφη πόλωση απομακρύνει τα ηλεκτρόνια και τις οπές από την επαφή p-n και

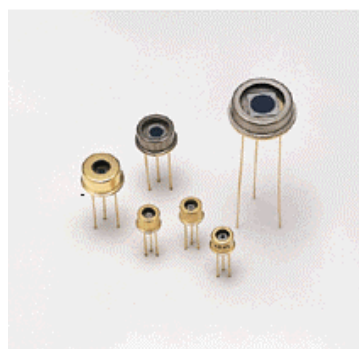
επακόλουθα μειώνει τη χωρητικότητα της επαφής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ταχύτερη απόκριση (επειδή η χωρητικότητα της επαφής είναι μικρή). Από την άλλη πλευρά, η ανάστροφη πόλωση δημιουργεί ρεύμα σκότους και άρα ανεπιθύμητο σήμα (θόρυβο) μέσα στην επαφή. Συνεπώς, έχουμε μικρότερη ευαισθησία. Αντίστοιχα, εάν η φωτοдиодος δεν είναι πολωμένη (λειτουργία φωτοτάσης), η απόκρισή της είναι βραδύτερη αλλά η ευαισθησία της μεγαλύτερη.

Η γραμμικότητα υποβαθμίζεται όταν η διόδος είναι μη-πολωμένη (σε λειτουργία φωτοτάσης), επειδή τότε το μέγεθος που εισάγεται στο κύκλωμα ελέγχου είναι η τάση στα άκρα της διόδου. Η τάση αυτή εξαρτάται λογαριθμικά και όχι γραμμικά από το φωτόρευμα (το οποίο είναι ευθέως ανάλογο της φωτεινής έντασης) και έτσι η σχέση φωτεινής έντασης και τάσης δεν είναι γραμμική.

Έτσι, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής μας μπορούμε να επιλέξουμε να πολώσουμε ή όχι ανάστροφα τη φωτοдиодο.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Στο εμπόριο υπάρχει πληθώρα φωτοδιόδων διαφόρων κατασκευαστών. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 2.16 εικονίζονται φωτοдиодοι της εταιρείας Hamamatsu. Οι διόδοι αυτές εμφανίζουν μεγάλη γραμμικότητα ως προς την προσπίπτουσα φωτεινή ένταση. Όταν η ένταση είναι μεταξύ 10–12 και 10–2 W, τότε το φωτόρευμα λαμβάνει τιμές που εκτείνονται σε περισσότερο από εννέα τάξεις μεγέθους, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο προϊόν και το κύκλωμα ελέγχου. Το άνω όριο της γραμμικότητας εξαρτάται από την αντίσταση φορτίου και την τιμή της ανάστροφης τάσης πόλωσης. Είναι δυνατή η ανίχνευση φωτός με κατώτερο μήκος κύματος 320 nm (οπότε η ευαισθησία της φωτοδιόδου εκτείνεται από την υπέρυθρη έως την ιώδη περιοχή). Υπάρχουν και προϊόντα ευαίσθητα στο υπεριώδες φως (όπως η σειρά προϊόντων S1226/S1336), στα οποία το λεγόμενο μήκος κύματος αποκοπής (*cutoff wavelength*) εκτείνεται στα 190 nm.



Σχήμα 2.16. Φωτοдиодοι της εταιρείας Hamamatsu [12]

Σύγκριση Αισθητήρων Φωτεινής Στάθμης (Φωτοαντιστάσεις-φωτοдиодοι)

Οι φωτοαντιστάσεις εμφανίζουν μεγάλους χρόνους απόκρισης (της τάξης των 100 msec) ενώ οι φωτοдиодοι μικρούς (μικρότερους από 1 msec). Η μέγιστη

ευαισθησία των φωτοαντιστάσεων και φωτοδιόδων είναι στο κοντινό υπέρυθρο (σε μήκος κύματος περίπου 1 μm). Οι φωτοαντιστάσεις έχουν μεγαλύτερο δυναμικό εύρος (*dynamic range*) από τις φωτοδιόδους (δηλαδή ανιχνεύουν μεγαλύτερη περιοχή τιμών φωτεινής έντασης) αλλά εμφανίζουν μικρότερη γραμμικότητα από αυτές. Οι δυνατότητες των φωτοδιόδων επεκτείνονται εάν αντικατασταθούν από φωτοτρανζίστορες, καθώς στα τελευταία ενισχύεται το δημιουργούμενο στη φωτοευαίσθητη επαφή *p-n* φωτόρευμα. Έτσι μπορούν να μετρηθούν μικρότερες φωτεινές εντάσεις και επακόλουθα αυξάνει το δυναμικό εύρος του αισθητήρα.

2.5 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΒΑΡΟΥΣ

Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ - ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΙΕΣΗΣ

Η πίεση αποτελεί μέτρο της δύναμης ή μηχανικής τάσης που ασκείται στην εξωτερική επιφάνεια κάποιου σώματος από ένα εξωτερικό αίτιο. Το βάρος αποτελεί τη -σταθερή- δύναμη προς τα κάτω που ασκεί η Γη σε ένα σώμα και αποτελεί μία ειδική περίπτωση δύναμης. Έτσι, εάν τοποθετηθεί ένα σώμα σε επαφή με έναν αισθητήρα πίεσης, ο αισθητήρας μπορεί να μετρά τη δύναμη που δέχεται το σώμα από ένα εξωτερικό αίτιο ή από τη Γη ανάλογα με τη σχετική θέση σώματος και αισθητήρα (κατακόρυφη, οριζόντια κ.ά.). Με άλλα λόγια, η μέτρηση του βάρους ανάγεται στη μέτρηση πίεσης και γι' αυτό οι μετρητές πίεσης χρησιμοποιούνται και για τη μέτρηση βάρους.

(Εδώ πρέπει να διευκρινίσουμε ότι το μετρούμενο σώμα θεωρείται ότι δεν κινείται λόγω της ύπαρξης δύναμης (ή βάρους) σε αυτό. Εάν το σώμα κινείται, χρησιμοποιούνται άλλα είδη αισθητήρων, οι *μετρητές κίνησης*, που στηρίζονται σε διαφορετικές αρχές και περιγράφονται στην Παράγραφο 2.7. Στην περίπτωση κινούμενων ρευστών, ο αισθητήρας πίεσης είναι ακίνητος και θεωρείται ότι δέχεται πίεση από το κινούμενο ρευστό)

Πίνακας 2-4
Σχέσεις μεταξύ των μονάδων πίεσης

1 atm = 101325 Pa
1 atm = 760 mmHg = 760 Torr
1 atm = 1.01325 bar
1 atm = 14.7 psi
1 bar = 100000 Pa
1 Torr = 133.32 Pa
1 psi = 6895 Pa

Η πίεση σχετίζεται με τη δύναμη με τη σχέση:

$$P = \frac{F}{A}$$

και άρα οι μονάδες της είναι μονάδες δύναμης ανά μονάδες επιφάνειας. Υπάρχουν πολλές μονάδες πίεσης: Καταρχήν είναι η *ατμόσφαιρα* (*atm*), που δημιουργήθηκε με βάση την πίεση που ασκεί η ατμόσφαιρα. *Μία ατμόσφαιρα* (*1 Atm*) ορίζεται ότι

είναι η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας και σε γεωγραφικό πλάτος 45°. Η πίεση αυτή δημιουργείται από τον αέρα που βρίσκεται από πάνω μας. Η ατμόσφαιρα της Γης αποτελείται κυρίως από οξυγόνο και άζωτο, φθάνει σε ύψος μερικών χιλιάδων χιλιομέτρων και πιέζει όλα τα αντικείμενα που ευρίσκονται στην επιφάνεια της Γης. Η μονάδα του σύμφωνα με το Διεθνές Σύστημα Μονάδων είναι το Νιούτον ανά τετραγωνικό μέτρο (N/m^2) ή Πασκάλ (Pa). Επειδή το ένα τετραγωνικό μέτρο είναι πολύ μεγάλη επιφάνεια, αναμένουμε ότι η πίεση που δημιουργεί σε ένα σημείο μία συνηθισμένη δύναμη ισούται με χιλιάδες Pa. Πράγματι, η μία ατμόσφαιρα ισούται με 101325 Pa. Για ευκολία ορίζεται ότι οι εκατό χιλιάδες Pa είναι ίσες με 1 bar. Η ατμοσφαιρική πίεση εξισορροπεί το βάρος μίας στήλης υδραργύρου ύψους 760 χιλιοστόμετρων, και έτσι ως μονάδα πίεσης υπάρχει το ένα χιλιοστόμετρο στήλης υδραργύρου (1 mmHg), που ονομάζεται ένα Torr (από τον Ιταλό Evangelista Torricelli που παρατήρησε το φαινόμενο). Στο αγγλοσαξωνικό σύστημα μονάδων μονάδα πίεσης είναι η μία λίβρα δύναμης ανά τετραγωνική ίντσα (round per square inch, lbf/in²), ή psi, όπου είναι 1 lbf = 4.4484 N και 1 in = 2.54 cm. Η σχέση μεταξύ των παραπάνω μονάδων συνοψίζεται στον Πίνακα 2-4.

ΕΙΔΗ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΠΙΕΣΗΣ

Η ατμοσφαιρική πίεση ασκείται πάντοτε και σε όλα τα σώματα. Εάν ασκούμε πίεση σε ένα σώμα, αυτό αντιλαμβάνεται την πίεσή μας συν την ατμοσφαιρική πίεση. Έτσι, το άθροισμα των δύο πιέσεων λέγεται απόλυτη πίεση (absolute pressure). Η πίεση που ασκούμε ονομάζεται πίεση μετρητή (gauge pressure) και αυτή μας ενδιαφέρει να προσδιορίσουμε. Το αγγλοσαξωνικό σύστημα μονάδων διακρίνει τις δύο αυτές πιέσεις γράφοντας την πίεση μετρητή ως psi και την απόλυτη πίεση ως psia (psi absolute). Έτσι, μία πίεση ίση με 16 psi σημαίνει ότι κάποιο εξωτερικό αίτιο (εκτός από την ατμόσφαιρα) ασκεί πίεση 16 psi, ενώ μία πίεση 16 psia σημαίνει ότι η συνολική πίεση που ασκείται είναι 16 psi, και επομένως ότι το εξωτερικό αίτιο ασκεί πίεση 1.3 psi.

Εάν τοποθετήσουμε ένα σώμα σε έναν αεροστεγή χώρο και αφαιρέσουμε με μηχανικό τρόπο μία ποσότητα αέρα από το χώρο, το σώμα θα πιέζεται λιγότερο από όσο εάν ευρίσκεται στην ελεύθερη ατμόσφαιρα και έτσι λέμε ότι δημιουργούμε κενό αέρος, ή αλλιώς κενό (vacuum). Οποιαδήποτε πίεση μικρότερη από την ατμοσφαιρική πίεση

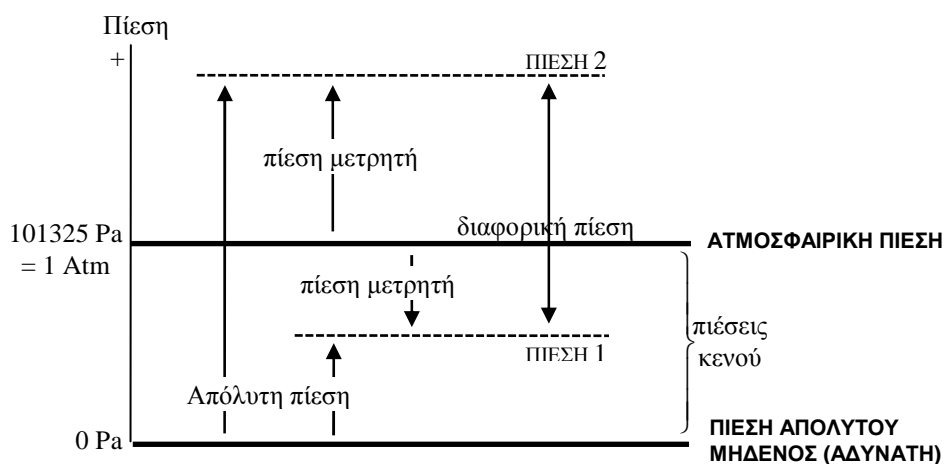
Πίνακας 2-5

Είδη αντλιών κενού και ενδεικτικά κενά που επιτυγχάνουν

Είδος Αντλίας	Κενό (Torr)
Περιστροφική	1×10^{-2}
Διαχύσεως	1×10^{-6}
Στροβίλου (τούρμπο)	1×10^{-8}
Ιόντων	1×10^{-12}

λέγεται *πίεση κενού* (*vacuum pressure*). Στην πράξη είναι αδύνατο να επιτύχουμε *πίεση μηδέν* (το λεγόμενο *απόλυτο κενό*) επειδή θα πρέπει να απομακρύνουμε *όλα* τα μόρια αέρα από ένα χώρο. Τα τεχνικά μέσα που διαθέτουμε σήμερα (οι *αντλίες κενού*, *vacuum pumps*) πετυχαίνουν όμως πολύ υψηλά κενά, ανάλογα με το είδος τους. Η απλούστερη από όλα τα είδη αντλιών, η *περιστροφική αντλία* (*rotary pump*) μειώνει την ατμοσφαιρική πίεση στο 1/100.000 της τιμής της (από τα 760 Torr σε λιγότερο από 0.01 Torr) και, όπως λέγεται, *επιτυγχάνει κενό καλύτερο από 10^{-2} Torr*. Οι καλύτερες αντλίες, οι *αντλίες ιόντων* (*ion pumps*), υποστηριζόμενες από αντλίες χαμηλότερων επιδόσεων επιτυγχάνουν κενά έως 10^{-12} Torr. Στον Πίνακα 2-5 εικονίζονται τα είδη αντλιών που υπάρχουν σήμερα και τα ενδεικτικά κενά που επιτυγχάνουν.

Εάν μετρούμε μία πίεση κενού με ένα μετρητή που λειτουργεί έχοντας ως αναφορά την ατμοσφαιρική πίεση, τότε αυτός θα δείξει αρνητική πίεση. Εάν ο μετρητής μετρά απόλυτες πιέσεις, θα εμφανίσει την πίεση κενού ως θετική πίεση. Η σχέση ανάμεσα στα είδη πιέσεων εικονίζεται στο Σχήμα 2.17. Εκεί σημειώνονται δύο καταστάσεις πίεσης (*ΠΙΕΣΗ 1* και *ΠΙΕΣΗ 2*) και οι έννοιες της πίεσης μετρητή και απόλυτης πίεσης. Εάν μετρούμε τη διαφορά δύο απόλυτων πιέσεων (όπως συμβαίνει σε διάφορα είδη μανομέτρων υγρού), τότε λέμε ότι μετρούμε μία *διαφορική πίεση* (*differential pressure*).



Σχήμα 2.17 Σχέσεις μεταξύ των διαφόρων ειδών πίεσης

Τα κυριότερα είδη αισθητήρων πίεσης είναι τα ακόλουθα:

1. Μανόμετρα υγρού και αερίου
2. Χωρητικοί αισθητήρες
3. Επαγωγικοί αισθητήρες

4. Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και αισθητήρες πιεζοαντίστασης
5. Μετρητές μηχανικής τάσης και κυψελίδες φορτίου

Τα μανόμετρα υγρού και αερίου είναι το μοναδικό είδος αισθητήρων που δίνει ενδείξεις ορατές αλλά όχι άμεσα μετατρέψιμες σε ηλεκτρικό σήμα. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα μανόμετρα υοειδούς σωλήνα, τα μανόμετρα κεκλιμένου σωλήνα, τα μανόμετρα με ελαστικό σωλήνα Bourdon και τα μανόμετρα με φουσητήρα. Στα επόμενα θα περιγράψουμε τα υπόλοιπα είδη μετρητών πίεσης, τις βασικές αρχές λειτουργίας τους και τις προδιαγραφές τυπικών μετρητών του εμπορίου.

2.5.1 Χωρητικοί και Επαγωγικοί Αισθητήρες Πίεσης

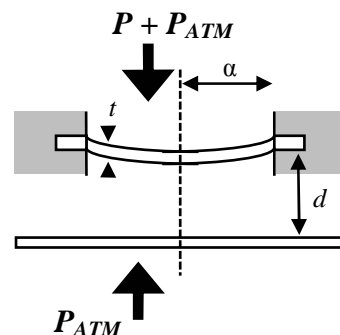
ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι αισθητήρες αυτοί στηρίζονται στην ύπαρξη ενός ελαστικού διαφράγματος, το οποίο χωρίζει έναν κλειστό χώρο σε δύο ημιχώρους. Εάν ο ένας ημιχώρος ευρίσκεται στην πίεση που θέλουμε να μετρήσουμε και ο άλλος σε μία πίεση αναφοράς (όπως π.χ. σε ατμοσφαιρική πίεση), τότε το διάφραγμα μετατοπίζεται προς μία κατεύθυνση. Η μετατόπιση αυτή μπορεί να προκαλέσει αλλοίωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός πυκνωτή και άρα αλλαγή της χωρητικότητάς του ή αλλοίωση της μαγνητικής διαρροής που διαρρέει ένα ή δύο πηνία, και άρα αλλαγή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης που αυτά παρουσιάζουν στα άκρα τους.

Για παράδειγμα στο Σχήμα 2.18 εικονίζεται ένας απλός χωρητικός αισθητήρας πίεσης, που συνίσταται σε έναν επίπεδο πυκνωτή, του οποίου ο ένας (ο άνω, στο σχήμα) οπλισμός είναι ελαστικός [1] και αποτελεί το διάφραγμα. Πάνω από το διάφραγμα επικρατεί η πίεση που θέλουμε να μετρήσουμε ενώ κάτω από αυτό η ατμοσφαιρική πίεση. Το διάφραγμα καμπυλώνεται λόγω της διαφοράς πίεσης και η χωρητικότητα C του πυκνωτή μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta C = C \times \frac{(1 - \nu^2) a^4}{16 E d t^3} \times P$$

όπου P είναι η πίεση μετρητή (δηλαδή η διαφορά των πιέσεων πάνω και κάτω από τον άνω οπλισμό), d η αρχική απόσταση των οπλισμών, a η ακτίνα του διαφράγματος, t το πάχος του διαφράγματος και ν και E δύο παράμετροι που



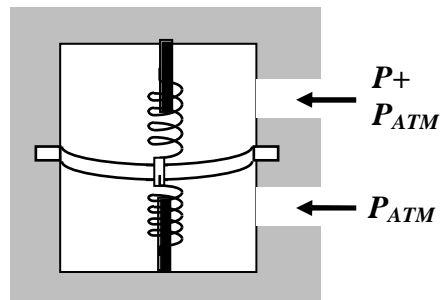
Σχήμα 2.18 Απλός χωρητικός αισθητήρας πίεσης

σχετίζονται με το υλικό του διαφράγματος (ο λόγος του Poisson και το μέτρο του Young, αντίστοιχα).

Η μεταβολή της χωρητικότητας μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολή μίας τάσης εάν διαβιβάσουμε στον πυκνωτή κάποιο σταθερό εναλλασσόμενο ρεύμα.

Γνωρίζοντας ότι η χωρητική του αντίσταση ισούται με $Z_C = 1/C\omega$, διαπιστώνουμε ότι η εναλλασσόμενη τάση στα άκρα του ($V_C = Z_C$

I) θα μεταβάλλεται ανάλογα με τις μεταβολές της χωρητικότητας. Ανάλογο αποτέλεσμα μπορεί να ληφθεί εάν διαβιβάσουμε στον πυκνωτή μία σταθερή εναλλασσόμενη τάση. Τότε, η μετατόπισή του άνω οπλισμού του και η επακόλουθη μεταβολή της χωρητικής του αντίστασης θα προκαλεί μεταβολή στο ρεύμα που τον διαρρέει.



Σχήμα 2.19 Απλός επαγωγικός αισθητήρας πίεσης

Στο Σχήμα 2.19 εικονίζεται η αρχή των επαγωγικών αισθητήρων πίεσης. Ένας κλειστός χώρος χωρίζεται σε δύο ημιχώρους με ένα διάφραγμα. Το διάφραγμα συνδέεται σταθερά με δύο πηνία και οι μετατοπίσεις του διαφράγματος μετατοπίζουν και τα πηνία. Στο εσωτερικό του κάθε πηνίου υπάρχει ένας πυρήνας από σιδηρομαγνητικό υλικό, ακλόνητα στερεωμένος στα τοιχώματα του χώρου. Τυχόν μεταβολή της θέσης των πηνίων προκαλεί αλλαγή της θέσης των πυρήνων ως προς τα πηνία και αλλαγή του συντελεστή αυτεπαγωγής τους L . Έτσι αλλάζει και η επαγωγική αντίσταση των πηνίων ($Z_L = L\omega$). Εάν επομένως διαβιβάσουμε στα πηνία ένα σταθερό εναλλασσόμενο ρεύμα, η τάση στα άκρα τους θα μεταβάλλεται ανάλογα με την επαγωγική αντίσταση ($V_L = Z_L I$) και άρα με τη μετατόπιση του διαφράγματος. Ανάλογο αποτέλεσμα μπορεί να ληφθεί εάν διαβιβάσουμε στα πηνία μία σταθερή εναλλασσόμενη τάση. Τότε, η μετατόπισή τους και η επακόλουθη μεταβολή της επαγωγικής τους αντίστασης θα προκαλεί μεταβολή στο ρεύμα που τα διαρρέει.



Σχήμα 2.20 Αισθητήρες πίεσης EPO της εταιρείας Entran [13]

2.5.2 Αισθητήρες Πιεζοαντίστασης

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι αισθητήρες αυτοί στηρίζονται στη μεταβολή της τιμής της αντίστασης ενός μεταλλικού σύρματος όταν αυτό πιεστεί κατά μήκος της κύριας διάστασής του. Για τον υπολογισμό της ποσοτικής σχέσης θεωρούμε την εξίσωση που σχετίζει την αντίσταση ενός σύρματος με τα φυσικά του χαρακτηριστικά:

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

όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση του υλικού, από το οποίο είναι φτιαγμένο το σύρμα, και l και A είναι το μήκος και το εμβαδό διατομής του σύρματος.

Εάν το υλικό συμπιεστεί (και άρα το μήκος του μειωθεί και η ενεργός διατομή του αυξηθεί), και εκφράσουμε τη μεταβολή ΔR της αντίστασης ως προς τις αντίστοιχες μεταβολές των ποσοτήτων ρ , l και A , αποδεικνύεται [1] ότι είναι:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = G \frac{\Delta l}{l_0},$$

όπου R_0 και l_0 είναι οι τιμές της αντίστασης και του μήκους όταν η πίεση μετρητή είναι μηδέν, Δl είναι η μεταβολή του μήκους και G είναι μία ποσότητα χαρακτηριστική του υλικού, που ονομάζεται παράγοντας G (*gauge factor*). Η ποσότητα G σχετίζεται με τα φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού και έχει γνωστή τιμή, η οποία εξαρτάται ελαφρά από τη συμπίεση Δl που προκαλείται στο υλικό. Το πηλίκο $\Delta l/l_0$ εκφράζει την ποσοστιαία συμπίεση του υλικού και είναι γνωστό με τον αγγλικό όρο *strain*.

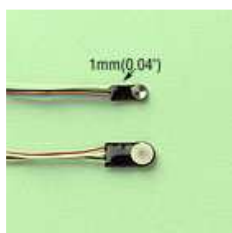
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Για την κατασκευή πιεζοαντιστάσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέταλλα ή κράματα μετάλλων αλλά και γνωστοί ημιαγωγοί, όπως πυρίτιο με προσμίξεις (δηλαδή τύπου p ή n). Για την επιλογή του υλικού πρέπει να ληφθούν υπόψη οι θερμοκρασιακές συνθήκες, καθώς οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας προκαλούν μεταβολή της τιμής του παράγοντα G αλλά και της τιμής R_0 της αντίστασης.

Τα μέταλλα έχουν παράγοντες G με μικρές τιμές (της τάξης του 2.0), οπότε η άσκηση πίεσης σε αυτά προκαλεί μικρές μεταβολές στην αντίστασή τους. Από την άλλη πλευρά όμως, οι μεταβολές του παράγοντα G με τη θερμοκρασία είναι μικρές και ο θερμικός συντελεστής της αντίστασης μπορεί να είναι μικρός, της τάξης του $4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν κράματα με πολύ μικρό συντελεστή γραμμικής διαστολής, ο οποίος εκφράζει την εξάρτηση της τιμής του αρχικού μήκους l_0 από τη θερμοκρασία.

Οι ημιαγωγοί έχουν μεγάλες τιμές παράγοντα G , που ενδέχεται να είναι και αρνητικές. Για παράδειγμα, το πυρίτιο τύπου p έχει τιμές παράγοντα G μεταξύ +100 και +175, ενώ το πυρίτιο τύπου n έχει τιμές παράγοντα G μεταξύ -100 και -140 [1]. Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι η συμπίεση προκαλεί αύξηση της αντίστασης του υλικού. Οι μεγάλες τιμές του παράγοντα G μας οδηγούν στη διαπίστωση ότι η αντίσταση των ημιαγωγικών υλικών είναι πολύ πιο ευαίσθητη στη συμπίεση από την αντίσταση των μεταλλικών υλικών. Από την άλλη όμως πλευρά είναι επίσης πιο ευαίσθητη σε μεταβολές της θερμοκρασίας. Αναφέρεται [1] ότι η αύξηση της θερμοκρασίας από 0° σε 40 °C προκαλεί μείωση της τιμής του παράγοντα G κατά περίπου 11% (από π.χ. 135 σε 120). Επίσης αναφέρεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας από 20° σε 60 °C προκαλεί αύξηση της τιμής της αντίστασης R_0 κατά 4% (από π.χ. 120 Ω σε 125 Ω).

Με τη βοήθεια πιεζοαντιστάσεων κατασκευάζονται μετρητικές διατάξεις που ονομάζονται *μετρητές μηχανικής τάσης (strain gauges)*. Αυτές αποτελούνται συνήθως από τέσσερις πιεζοαντιστάσεις σε διάταξη γέφυρας Wheatstone. Οι πιεζοαντιστάσεις κατασκευάζονται συνήθως από ένα λεπτό φύλλο αλουμινίου, το οποίο υφίσταται μία διαδικασία *απόξεσης (etching)* και λαμβάνει τη μορφή ενός σύρματος. Το αλουμίνιο συνδέεται σε μία βάση από ρητίνη και στη συνέχεια αυτή συγκολλάται στην επιφάνεια που μας ενδιαφέρει. Η έξοδος της γέφυρας Wheatstone είναι της τάξης των 100 mV και έτσι είναι αναγκαία η ενίσχυσή της προτού διαβιβαστεί σε ένα μετατροπέα A/D. Εναλλακτικά, η έξοδος μπορεί να μην υποστεί ενίσχυση εάν ο μετατροπέας A/D έχει υψηλή ευαισθησία (π.χ. έχει ανάλυση 12 bits).



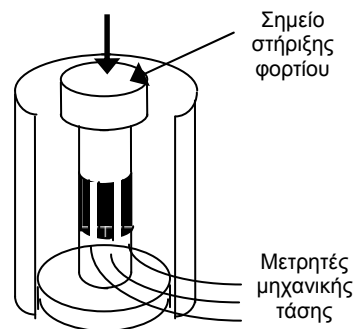
Σχήμα 2.21 Αισθητήρες πίεσης EPL της εταιρείας Entran [14]

2.5.3 Κυψελίδες Φορτίου

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι *κυψελίδες φορτίου* (*load cells*) είναι συσκευές που αποτελούνται από μετρητές μηχανικής τάσης (συνήθως τέσσερις) και μετρούν δυνάμεις. Ενδείκνυνται για τη μέτρηση πιέσεων (δηλαδή *μηχανικών φορτίων*) που ασκούν στερεά υλικά και έχουν τη μορφή που εικονίζεται στο Σχήμα 2.22. Οι μετρητές μηχανικής τάσης είναι συνήθως πιεζοαντιστάσεις, όπως αυτές που περιγράψαμε στην προηγούμενη Παράγραφο 2.5.2.

Η λειτουργία μίας κυψελίδας φορτίου στηρίζεται στο γεγονός ότι η εφαρμογή ενός μηχανικού φορτίου στο σημείο στήριξης της κυψελίδας (Σχήμα 2.22) προκαλεί συμπίεση (δηλαδή μηχανική παραμόρφωση) του κατακόρυφου άξονα που ενώνεται με αυτό και άρα συμπίεση των τεσσάρων πιεζοαντιστάσεων που είναι συγκολλημένες στον άξονα. Έτσι οι αντιστάσεις των πιεζοαντιστάσεων μεταβάλλονται και η μεταβολή αυτή μπορεί να μετατραπεί με τη βοήθεια μίας απλής γέφυρας Wheatstone, η οποία θα περιέχει και σταθερές αντιστάσεις αναφοράς, σε ηλεκτρική τάση.



Σχήμα 2.22 Κυψελίδα φόρτισης αποτελούμενη από τέσσερις μετρητές μηχανικής τάσης

2.5.4 Πιεζοηλεκτρικοί Αισθητήρες Πίεσης

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Όταν συμπιέζεται ή εφελκύεται ένας κρύσταλλος, μετατοπίζονται οι θέσεις των θετικών και αρνητικών φορτίων του και έτσι εμφανίζεται στα άκρα του μία ποσότητα φορτίου (θετικού στο ένα άκρο και αρνητικού στο άλλο άκρο), δηλαδή διαφορά δυναμικού (ηλεκτρική τάση). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο* (*piezoelectric effect*) και εμφανίζεται σε όλα τα κρυσταλλικά υλικά, είναι όμως ιδιαίτερα έντονο σε ορισμένα μόνο υλικά, τα οποία ονομάζονται για το λόγο αυτό *πιεζοηλεκτρικά*. Τα υλικά αυτά εμφανίζουν και το *αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο*, κατά το οποίο η εφαρμογή στα άκρα του υλικού μίας τάσης V προκαλεί συμπίεση (ή εφελκυσμό, ανάλογα με το πρόσημο της τάσης) κατά διάστημα x :

$$x = d V$$

όπου η ποσότητα d είναι η πιεζοηλεκτρική σταθερά του υλικού.

Η περιγραφή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου γίνεται πολύ απλά θεωρώντας ότι ένας κρύσταλλος λειτουργεί σαν ελατήριο σταθεράς k όταν συμπιέζεται κατά διάστημα x . Η σχέση μεταξύ δύναμης και διαστήματος είναι η εξής:

$$F = k x$$

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις εξάγεται η σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης δύναμης και της πιεζοηλεκτρικής τάσης αναπτύσσεται στα άκρα του υλικού:

$$F = k d V \Leftrightarrow V = \frac{1}{k d} F$$

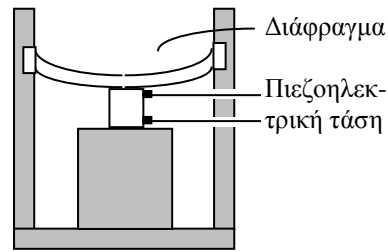
Οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι είναι συνήθως κρύσταλλοι χαλαζία (quartz). Μπορούν να έχουν πολύ μικρό μέγεθος και είναι ανθεκτικοί σε υψηλές θερμοκρασίες. Η σταθερά k των κρυστάλλων είναι πολύ μεγάλη (δηλαδή οι κρύσταλλοι είναι *σκληροί*), με αποτέλεσμα η τάση V που παράγεται να έχει μικρές τιμές και να απαιτείται η ενίσχυσή της ή η τοποθέτηση πολλών κρυστάλλων σε σειρά. Οι κρύσταλλοι τίθενται σε επαφή με ένα κινητό διάφραγμα, το οποίο δέχεται την πίεση, και συμπιέζονται από αυτό όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.23.

Οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι δε χρησιμοποιούνται μόνο για τη μέτρηση πιέσεων και δυνάμεων αλλά και επιταχύνσεων (Παράγραφος 2.7.4), καθώς γνωρίζουμε ότι η δύναμη και η επιτάχυνση είναι μεγέθη ανάλογα, με βάση τη γνωστή σχέση:

$$F = m a$$

όπου a είναι η επιτάχυνση και m είναι η μάζα που δέχεται την επιτάχυνση.

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά διακρίνονται μεταξύ τους ανάλογα με την τιμή του ηλεκτρικού σήματος που παράγουν εξαιτίας μίας δεδομένης πίεσης, την απόκρισή τους σε πιέσεις διαφόρων συχνοτήτων, τη συχνότητα στην οποία εμφανίζουν το φαινόμενο του συντονισμού κ.ά.



Σχήμα 2.23 Μορφή πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα πίεσης

2.6 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΚΑΙ ΟΓΚΟΥ

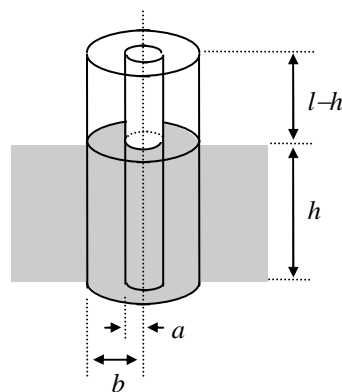
Οι αισθητήρες στάθμης και όγκου χρησιμοποιούνται στην περίπτωση υγρών, τα οποία καταλαμβάνουν το κάτω τμήμα του δοχείου ή της δεξαμενής στην οποία τίθενται και σχηματίζουν μία οριζόντια ελεύθερη επιφάνεια στο άνω μέρος. Το πόσο μεγάλο είναι το τμήμα της δεξαμενής που καταλαμβάνεται εξαρτάται από τον όγκο του υγρού. Η απόσταση της ελεύθερης επιφάνειας από τον πυθμένα της δεξαμενής αποτελεί τη *στάθμη (level)* του υγρού.

Πέρα από τα *δοχεία παρατήρησης*, τους *ογκομετρικούς κυλίνδρους* και τις *ράβδους βυθομέτρησης*, που είναι βαθμολογημένα σκεύη και αναφέρονται σε εφαρμογές μικρής κλίμακας (δηλαδή σε μικρές ποσότητες υγρών), σήμερα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της στάθμης υγρών *χωρητικοί αισθητήρες* και *αισθητήρες πίεσης*.

2.6.1 Χωρητικοί Αισθητήρες Στάθμης

Οι χωρητικοί αισθητήρες στάθμης αποτελούνται από έναν κυλινδρικό πυκνωτή, στον οποίο το διάκενο μεταξύ των κυλινδρικών οπλισμών δεν περιέχει διηλεκτρικό και μπορεί να γεμίσει με υγρό. Η μορφή ενός τέτοιου πυκνωτή εικονίζεται στο Σχήμα 2.24. Το ύψος του κυλινδρικού πυκνωτή είναι ίσο με l (άρα l είναι η μέγιστη στάθμη που μπορεί να ανιχνευθεί) και έστω ότι η πραγματική στάθμη φθάνει σε ύψος h . Αυτό σημαίνει ότι ύψος h του πυκνωτή περιέχει το υπό εξέταση υγρό, σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ , και ότι το υπόλοιπο ύψος $(l - h)$ περιέχει αέρα, σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon = 1$. Άρα ο συνολικός πυκνωτής ανάγεται σε δύο επιμέρους πυκνωτές συνδεδεμένους παράλληλα και η συνολική χωρητικότητα εξαρτάται από το ύψος h της στάθμης του υγρού.

Λόγω του σχήματός τους οι χωρητικοί αισθητήρες στάθμης ονομάζονται και *βελόνες χωρητικότητας (capacitance probes)*.



Σχήμα 2.24 Αρχή λειτουργίας ενός χωρητικού αισθητήρα στάθμης

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Ένας ελεγκτής που ενδείκνυται για μετρήσεις στάθμης σε συγκεκριμένο σημείο είναι το μοντέλο 14L της εταιρείας SigmaHellas [20]. Αυτός χρησιμοποιεί έναν ηλεκτρονόμο (ρελέ), ο οποίος αλλάζει κατάσταση όταν η στάθμη υπερβεί μία συγκεκριμένη τιμή, δηλαδή όταν η δεξαμενή που ελέγχεται υπερχειλίζει. Στο Σχήμα 2.25 εικονίζεται ο ελεγκτής 14L χωρίς το προστατευτικό περίβλημά του. Ο ελεγκτής ενδείκνυται για χρήση σε αγωγή ή μη αγωγή υγρά, σε κοκκώδη υλικά, αφρό, ζύμες και παχύρρευστα υλικά και μπορεί να τοποθετηθεί σε απόσταση έως 7.5 m μακριά από τον αισθητήρα. Υπάρχουν επίσης *ελεγκτές πολλών σημείων*, που ενεργοποιούν περισσότερους του ενός ηλεκτρονόμους ανάλογα με το σημείο, στο οποίο ευρίσκεται η μετρούμενη στάθμη.



Σχήμα 2.25 Μορφή του ελεγκτή 14L της εταιρείας SigmaHellas [20]

2.7 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΑΙ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΓΕΝΙΚΑ

Η ανίχνευση της *φυσικής θέσης* και της *κίνησης* των αντικειμένων έχει ζωτική σημασία, αφού οι περισσότερες κατασκευές και διατάξεις διαθέτουν κινητά μηχανικά μέρη. Είναι συχνά απαραίτητο να γνωρίζουμε τη θέση ενός αντικειμένου. Ενδέχεται να θέλουμε να προσδιορίσουμε εάν ή πότε ένα κινητό μέρος ευρίσκεται σε κάποια προκαθορισμένη θέση του χώρου. Άλλοτε είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε εάν και σε ποιο βαθμό ένα κινητό μέρος κινείται ή περιστρέφεται προς κάποια κατεύθυνση ή την αντίθετή της. Κάποιες φορές μας ενδιαφέρει πόσο γρήγορα κινείται ένα κινητό μέρος. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, η γνώση της θέσης, της προσέγγισης, της μετατόπισης και της ταχύτητας ή επιτάχυνσης ενός αντικειμένου αφορούν στο γενικότερο ζήτημα της ανίχνευσης κάποιας παραμέτρου της *κίνησής του*.

Ανάλογα επομένως με τη φύση της εφαρμογής μας πρέπει να χρησιμοποιήσουμε αισθητήρες που να ανιχνεύουν κάποιο από τα ακόλουθα μεγέθη:

- Θέση
- Προσέγγιση
- Μετατόπιση (ευθύγραμμη ή περιστροφική)
- Ταχύτητα ή επιτάχυνση

Η μετατόπιση (*displacement*) προκύπτει από τον υπολογισμό της απόστασης ανάμεσα στη νέα και την παλαιά θέση του εξεταζόμενου αντικειμένου, και άρα η ανίχνευση της θέσης ανάγεται στην ανίχνευση της μετατόπισης και αντίστροφα. Η προσέγγιση (*proximity*) αποτελεί μία ειδική περίπτωση ανίχνευσης θέσης, καθώς τότε μας ενδιαφέρει να γνωρίζουμε εάν θα ευρεθεί το εξεταζόμενο αντικείμενο σε μία συγκεκριμένη, προκαθορισμένη θέση. Έτσι η ανίχνευση της προσέγγισης δίνει δύο δυνατά αποτελέσματα (ΝΑΙ και ΟΧΙ) και είναι απλούστερη από την ανίχνευση θέσης, η οποία πρέπει να δίνει ως αποτελέσματα συνεχείς αριθμητικές τιμές (σε χιλιοστόμετρα ή μίρες). Η μέτρηση της ταχύτητας και της επιτάχυνσης διαφέρει από τις μετρήσεις μηκών και γωνιών (θέσεων, μετατοπίσεων κ.ά.) και στηρίζεται σε διαφορετικές αρχές.

Η μετατόπιση μπορεί να μετρηθεί στις απλούστερες περιπτώσεις με μηχανικά συστήματα (γραμμικά μικρόμετρα ή γωνιόμετρα) και για να γίνει αυτό πρέπει να υπάρξει ανθρώπινη παρέμβαση, όσον αφορά στην ανάγνωση της μέτρησης και συχνά στην εκτέλεσή της. Ένας καλύτερος τρόπος είναι με τη βοήθεια ενός ποτενσιομέτρου (γραμμικού ή περιστροφικού), καθώς γνωρίζουμε ότι η έξοδος ενός ποτενσιομέτρου είναι ανάλογη κάποιου μήκους ή γωνίας. Τα μειονεκτήματα των ποτενσιομέτρων είναι η εξάρτηση της τάσης εξόδου από την αντίσταση που συνδέεται σε αυτήν, η μηχανική φθορά της ποτενσιομετρικής ράβδου ή του ποτενσιομετρικού δακτυλίου από τη συνεχή ολίσθηση ενός δρομέα επάνω του και η συχνά βηματική φύση των τιμών της τάσης εξόδου, όταν η ποτενσιομετρική ράβδος αποτελείται από περιελιγμένο καλώδιο και επομένως ο δρομέας σταθμεύει εν γένει μεταξύ των περιελίξεων. Οι πιο σύγχρονοι τρόποι μέτρησης της μετατόπισης και θέσης είναι οι επαγωγικοί και οι χωρητικοί αισθητήρες μετατόπισης, που θα περιγραφούν στη συνέχεια.

Η μέτρηση της προσέγγισης μπορεί να γίνει με μηχανικό τρόπο με τη βοήθεια ενός διακόπτη επαφής: Τοποθετούμε το διακόπτη στη θέση που μας ενδιαφέρει και όταν το κινούμενο αντικείμενο φθάσει σε αυτήν τη θέση κλείνει ή ανοίγει το διακόπτη, ενεργοποιώντας μέσω αυτού κάποιο κύκλωμα ελέγχου. Ένας πιο ολοκληρωμένος τρόπος μέτρησης της προσέγγισης είναι μέσω της αντίστοιχης θέσης. Για να το κάνουμε αυτό χρησιμοποιούμε έναν αισθητήρα μετατόπισης, ο οποίος παράγει μία τάση ανάλογη της θέσης. Συγκρίνουμε την τάση αυτή με την τάση που αναπτύσσεται όταν το εξεταζόμενο αντικείμενο φθάσει στην προκαθορισμένη θέση και από το αποτέλεσμα της σύγκρισης ενεργοποιούμε ή όχι το κύκλωμα ελέγχου. Έτσι, η μέτρηση της προσέγγισης ανάγεται στη μέτρηση της μετατόπισης. Υπάρχουν πάντως και ειδικές μέθοδοι μέτρησης της μετατόπισης, που στηρίζονται στη μέτρηση μαγνητικού πεδίου (αισθητήρες προσέγγισης μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, αισθητήρες προσέγγισης φαινομένου Hall) και στην ανάκλαση μίας φωτεινής δέσμης από το μετατοπιζόμενο αντικείμενο (οπτικοί αισθητήρες προσέγγισης)

Για τη μέτρηση της ταχύτητας ενός αντικειμένου χρησιμοποιούνται τεχνικές υπερήχων ή ραδιοκυμάτων (radar). Σύμφωνα με αυτές εκπέμπεται προς το

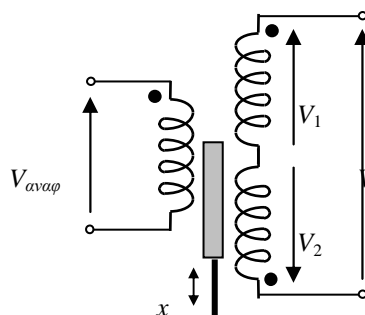
αντικείμενο ένα κύμα (υπέρηχος ή ραδιοκύμα), το οποίο ανακλάται από το αντικείμενο και ένα τμήμα του επιστρέφει προς τη συσκευή εκπομπής. Το τμήμα του κύματος που επιστρέφει έχει μήκος κύματος ελαφρά διαφορετικό από αυτό που εκπέμπεται λόγω του φαινομένου Doppler και η διαφορά αυτή σχετίζεται με την ταχύτητα του αντικειμένου. Μετρήσεις ταχύτητας απαιτούνται σε ειδικές εφαρμογές και η περιγραφή τους ξεφεύγει από τους σκοπούς του παρόντος βιβλίου.

Η μέτρηση της επιτάχυνσης σχετίζεται με τη μέτρηση της δύναμης, καθώς τα μεγέθη αυτά είναι ανάλογα. Εντούτοις, οι αισθητήρες δύναμης που έχουμε περιγράψει στην προηγούμενη παράγραφο στηρίζονται στη μέτρηση του μεγέθους της πίεσης, η οποία προϋποθέτει τη φυσική επαφή του εξεταζόμενου αντικειμένου με το αντικείμενο που το πιέζει. Είναι όμως δυνατό να επιταχυνθεί ένα αντικείμενο χωρίς να υποστεί πίεση, εάν για παράδειγμα μετατοπιστεί βίαια το στήριγμά του λόγω κάποιας δύναμης (βαρυτικής, φυγόκεντρης, ηλεκτρικής κ.ά.) που ενεργεί επάνω σε αυτό από απόσταση. Έτσι υπάρχουν αισθητήρες ειδικά κατασκευασμένοι για να μετρούν αποκλειστικά το μέγεθος της επιτάχυνσης και ονομάζονται *επιταχυνσιόμετρα (accelerometers)*. Αυτοί θα περιγραφούν στη συνέχεια της παραγράφου.

2.7.1 Επαγωγικοί Αισθητήρες Μετατόπισης – Η διάταξη LVDT

Αρχή Λειτουργίας

Οι επαγωγικοί αισθητήρες μετατόπισης στηρίζονται σε ένα μετασχηματιστή, του οποίου ο πυρήνας σιδήρου συνδέεται στο εξεταζόμενο αντικείμενο. Όταν μετατοπίζεται το αντικείμενο, μετατοπίζεται και ο πυρήνας. Το δευτερεύον του μετασχηματιστή αποτελείται από δύο ίδια πηνία, συνδεδεμένα σε σειρά, τα οποία ευρίσκονται σε επαγωγική σύζευξη με το πρωτεύον πηνίο του μετασχηματιστή με τη βοήθεια του πυρήνα σιδήρου. Εάν μετατοπιστεί ο πυρήνας προς μία κατεύθυνση, θα εισέλθει περισσότερο στο ένα δευτερεύον πηνίο και επακόλουθα θα αυξηθεί η σύζευξή του με αυτό, με αποτέλεσμα το πηνίο αυτό να εμφανίσει αυξημένη τάση στα άκρα του. Ταυτόχρονα ο πυρήνας απομακρύνεται από το άλλο δευτερεύον πηνίο, με αποτέλεσμα αυτό να εμφανίσει μειωμένη τάση στα άκρα του. Η διαφορά των δύο τάσεων αποτελεί την τάση εξόδου και έχει πλάτος και διαφορά φάσης που είναι ανάλογα της μετατόπισης του πυρήνα σιδήρου (η



Σχήμα 2.26 Γενική μορφή ενός επαγωγικού αισθητήρα γραμμικής μετατόπισης (LVDT)

διαφορά φάσης υπολογίζεται ως προς το εναλλασσόμενο σήμα που εφαρμόζουμε στο πρωτεύον πηνίο, το οποίο αποτελεί *σήμα αναφοράς*). Το πρόσημο της διαφοράς φάσης δεικνύει την κατεύθυνση της μετατόπισης. Η γενική μορφή των σημάτων αναφοράς (στο πρωτεύον) και εξόδου είναι:

$$V_{\text{αναφ}} = V_I \eta \mu(\omega t)$$

και

$$V = V_1 - V_2 = V_O \eta \mu(\omega t + \varphi)$$

Ο απλούστερος τρόπος σύνδεσης των δύο δευτερευόντων πηνίων μεταξύ τους, ώστε να λαμβάνεται εύκολα η διαφορά των τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτά, επιτυγχάνεται εάν αυτά έχουν αντίθετη φορά περιέλιξης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.25.

Η διάταξη αυτή ονομάζεται *γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής (linear variable differential transformer, LVDT)* και παράγεται ως εμπορικό προϊόν για τη μέτρηση θέσεων και γραμμικών μετατοπίσεων

Μία παραλλαγή της διάταξης LVDT είναι ο *περιστροφικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής (rotary variable differential transformer, RVDT)*, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη μέτρηση γωνιακών μετατοπίσεων, δηλαδή περιστροφών. Η μέτρηση αυτή επιτυγχάνεται τοποθετώντας έναν περιστρεφόμενο πυρήνα σιδήρου μεταξύ δύο πηνίων που έχουν μορφή τυπωμένου κυκλώματος. Τα πηνία είναι τοποθετημένα έκκεντρα ως προς τον άξονα περιστροφής του πυρήνα, και έτσι η περιστροφή του πυρήνα μεταβάλλει τη σύζευξη των πηνίων, προκαλώντας τη δημιουργία τάσης σε δύο κατάλληλα σημεία.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Οι διατάξεις LVDT είναι ιδιαίτερα συνηθισμένες για τη μέτρηση μετατοπίσεων και διατίθενται πολλά προϊόντα του εμπορίου. Για παράδειγμα, μπορεί να αναφέρει κανείς τις διατάξεις LVDT της σειράς E750 της εταιρείας Macrosensors [22]. Τα προϊόντα της σειράς έχουν χαμηλό κόστος, διπλή θωράκιση και υψηλή ευαισθησία.

2.7.2 Χωρητικοί Αισθητήρες Μετατόπισης

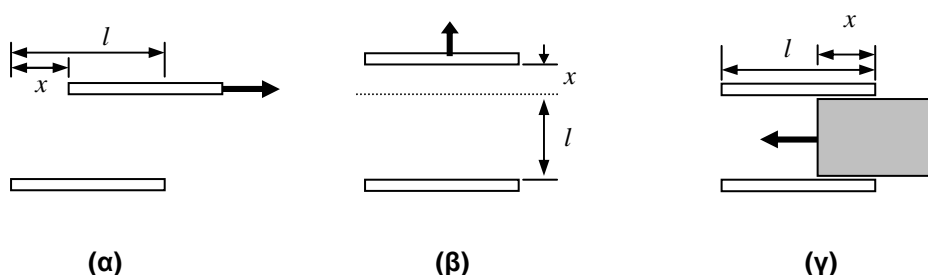
ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι χωρητικοί αισθητήρες μετατόπισης αξιοποιούν τη γνωστή σχέση που συνδέει τη χωρητικότητα C ενός επίπεδου πυκνωτή με τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά:

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{l}$$

όπου S είναι το εμβαδόν των οπλισμών, l η απόσταση των οπλισμών, ε_0 η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού (είναι ίση με $8.85 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$) και ε η σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού που υπάρχει μεταξύ των οπλισμών (λαμβάνει τιμές από 1 έως περίπου 80).

Με εξαίρεση την ε_0 , που είναι σταθερή ποσότητα, τα μεγέθη S , l και ε μπορούν να μεταβάλλονται και έτσι είναι δυνατή η αναγωγή κάποιας μετατόπισης x στη μεταβολή ενός από τα παραπάνω μεγέθη. Οι περιπτώσεις αυτές εικονίζονται διαγραμματικά στο Σχήμα 2.26.



Σχήμα 2.27 Παραδείγματα μεταβολής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός πυκνωτή: **(α)** ολίσθηση ενός οπλισμού ως προς τον άλλο, **(β)** απομάκρυνση των οπλισμών, **(γ)** εισαγωγή ενός τεμαχίου διηλεκτρικού υλικού

Έτσι η ολίσθηση του ενός οπλισμού ως προς τον άλλο [Σχήμα 2.24(α)] μεταβάλλει την επιφάνεια επικάλυψης των οπλισμών. Εάν οι οπλισμοί έχουν μήκος s και πλάτος w και επικαλύπτονται, τότε η μέγιστη επιφάνεια επικάλυψης ισούται με $S = sw$. Η ολίσθηση του ενός οπλισμού ως προς τον άλλο υπολογίζεται εύκολα ότι μεταβάλλει τη χωρητικότητα C κατά ποσό:

$$\Delta C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{s(w-x)}{l}$$

Η απομάκρυνση ή προσέγγιση των οπλισμών [Σχήμα 2.24(β)] μεταβάλλει την απόστασή τους l . Για παράδειγμα, εάν οι δύο οπλισμοί απομακρυνθούν κατά x υπολογίζεται εύκολα ότι η χωρητικότητα C μεταβάλλεται κατά ποσό:

$$\Delta C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{Sx}{l(l+x)}$$

Η εισαγωγή ενός τεμαχίου διηλεκτρικού υλικού (ξύλου, πλαστικού, κεραμικού, γυαλιού κ.ο.κ) με σχετική διηλεκτρική σταθερά ε κατά απόσταση x στο διάκενο μεταξύ δύο οπλισμών μήκους s και πλάτους w [Σχήμα 2.24(γ)] υπολογίζεται εύκολα ότι μεταβάλλει τη χωρητικότητα C κατά ποσό:

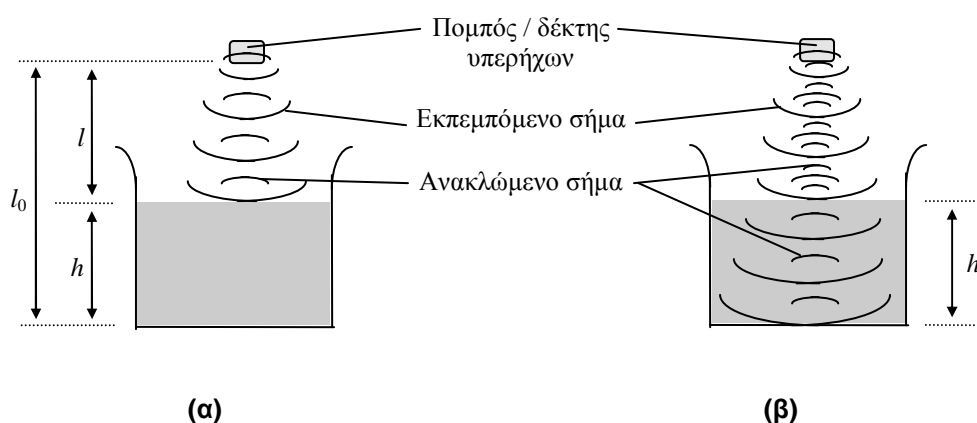
$$\Delta C = (\varepsilon - 1) \varepsilon_0 \frac{wx}{l}$$

Οι παραπάνω μεταβολές της χωρητικότητας μπορούν να μετατραπούν εύκολα σε μεταβολές τάσης εάν διαβιβαστεί στους οπλισμούς εναλλασσόμενο σήμα συχνότητας f . Γνωρίζουμε ότι η σύνθετη αντίσταση (εμπέδηση) Z_C ενός πυκνωτή δίνεται από τη σχέση $Z_C = 1/2\pi fC$. Αυτό σημαίνει ότι οι μεταβολές χωρητικότητας δημιουργούν αντίστοιχες μεταβολές εμπέδησης, οι οποίες γνωρίζουμε ότι μετρούνται, μεταξύ άλλων, με κυκλώματα γέφυρας Wheatstone ή διαιρέτες τάσης. Έτσι μπορεί να προκύψει μία εναλλασσόμενη τάση με πλάτος που εξαρτάται από τη μεταβολή της χωρητικότητας και άρα τη μετατόπιση.

2.7.3 Αισθητήρες Υπερήχων

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η ανθρώπινη φωνή δημιουργεί σύνθετες δονήσεις του αέρα γύρω από το στόμα, με ελάχιστη συχνότητα 300 Hz και μέγιστη συχνότητα 3400 Hz. Όπως λέγεται, το φάσμα (spectrum) της ανθρώπινης φωνής είναι μεταξύ 300 και 3400 Hz. Η φωνή ενός συγκεκριμένου ανθρώπου έχει μικρότερο φάσμα από τις παραπάνω ακραίες τιμές, καθώς όλοι γνωρίζουμε ότι οι ανδρικές φωνές είναι πιο μπάσες, δηλαδή δε φθάνουν τα 3400 Hz, ενώ οι γυναικείες πιο ψιλές, δηλαδή ξεκινούν ψηλότερα από τα 300 Hz. Το ανθρώπινο αυτί ακούει και ήχους που ξεφεύγουν από τα όρια της φωνής και έχουν συχνότητα από 20 έως 20.000 Hz, περίπου. Ήχοι με συχνότητα άνω των 20.000 Hz δε μπορούν να γίνουν αντιληπτοί από το ανθρώπινο αυτί και ονομάζονται υπέρηχοι (ultrasounds).



Σχήμα 2.28 Τεχνικές μέτρησης στάθμης με υπερήχους: **(α)** Υπολογισμός χρονικού διαστήματος μεταξύ εκπομπής και λήψης. **(β)** Υπολογισμός χρονικού διαστήματος μεταξύ ανάκλασης από επιφάνεια και ανάκλασης από τον πυθμένα του δοχείου

Οι υπέρηχοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση και καταγραφή διαφόρων φυσικών μεγεθών, όπως της στάθμης ενός υγρού, της ταχύτητας κίνησης ενός αντικειμένου, και της ταχύτητας ροής ενός ρευστού. Οι διαδικασίες παρακολούθησης στηρίζονται στην εκπομπή ενός υπερηχητικού κύματος από ένα σημείο, την ανάκλασή του από μία επιφάνεια και τη λήψη του ανακλώμενου κύματος στο ίδιο ή κάποιο άλλο σημείο. Το κύμα εκπέμπεται σε μορφή παλμών και όχι σε συνεχή μορφή, ώστε να μπορεί να διαπιστωθεί το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στην εκπομπή ενός παλμού και τη λήψη του, αφότου ο παλμός έχει υποστεί ανάκλαση.

Για την ανίχνευση της στάθμης υγρών χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές:

(α) Προσδιορισμός του χρονικού διαστήματος t που μεσολαβεί ανάμεσα στην εκπομπή ενός παλμού και τη λήψη του αντίστοιχου κύματος που ανακλάται από την ελεύθερη επιφάνεια [Σχήμα 2.28(α)]. Έτσι υπολογίζεται η απόσταση l της ελεύθερης επιφάνειας από τον πομποδέκτη των υπερηχητικών παλμών, με βάση τη σχέση $2l = v_0 t$, όπου v_0 είναι η ταχύτητα του ήχου στον αέρα. Η στάθμη h εξάγεται από τη διαφορά $h = l_0 - l$.

(β) Προσδιορισμός του χρονικού διαστήματος t που μεσολαβεί ανάμεσα στη λήψη του κύματος που ανακλάται από την ελεύθερη επιφάνεια και τη λήψη του κύματος που ανακλάται από την κάτω επιφάνεια του δοχείου [Σχήμα 2.28(β)]. Έτσι υπολογίζεται η στάθμη h του υγρού μέσα στο δοχείο από η σχέση $2h = v t$, όπου v είναι η ταχύτητα του ήχου στο μετρούμενο υγρό.

Η ταχύτητα του ήχου στον αέρα είναι ίση με $v_0 = 340$ m/s (= 1224 km/h). Η ταχύτητα αυτή λέγεται *ένα Mach*. Σε οποιοδήποτε άλλο υλικό (στερεό, υγρό) η ταχύτητα του ήχου είναι μικρότερη από αυτήν την τιμή και ίση με $v = v_0/n$, όπου n είναι μία σταθερά του υλικού που λέγεται *δείκτης διάθλασης (refraction index)* και έχει τιμή μεγαλύτερη του 1. Ο αέρας (για την ακρίβεια, το κενό) έχει τιμή $n = 1$.

Το *μήκος κύματος (wavelength)* λ ενός ηχητικού ή υπερηχητικού κύματος συχνότητας f δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

όπου v είναι η ταχύτητα του ήχου στο υλικό (και ισούται με v_0 εάν το υλικό είναι ο αέρας). Για να αποκτήσουμε μία αίσθηση του τύπου, ένα υπερηχητικό κύμα συχνότητας 20 kHz στον αέρα ($v_0 = 340$ m/s) έχει μήκος κύματος 0.017 m, δηλαδή 17 mm, ενώ ένα ηχητικό κύμα συχνότητας 2000 Hz στον αέρα έχει μήκος κύματος 0.17 m, δηλαδή 17 cm.

Η χρήση υπερήχων για την παρακολούθηση και καταγραφή φυσικών ποσοτήτων παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα [1], καθώς οι υπέρηχοι:

1. Περνούν μέσα από τα μεταλλικά τοιχώματα δοχείων και σωλήνων και επομένως δεν είναι ανάγκη να έρχονται σε επαφή με το μετρούμενο υγρό. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό όταν το υγρό είναι οξειδωτικό, διαβρωτικό, εύφλεκτο, εκρηκτικό ή ραδιενεργό.
2. Διαδίδονται μέσα στους ανθρώπινους ιστούς, με αποτέλεσμα να ενδείκνυνται για ιατρική παρακολούθηση ασθενών.
3. Δεν ακούγονται και έτσι ενδείκνυνται για στρατιωτικές εφαρμογές.
4. Έχουν μικρότερο μήκος κύματος από τους ήχους και έτσι η πορεία τους υφίσταται μικρότερη καμπύλωση (για την ακρίβεια *περίθλαση, diffraction*) όταν περνά δίπλα από συνήθη αντικείμενα. Άρα οι υπέρηχοι είναι περισσότερο *κατευθυντικοί*.

Για την παραγωγή του εκπεμπόμενου υπερηχητικού κύματος και την ανίχνευση του ανακλώμενου υπερηχητικού κύματος χρησιμοποιούνται συνήθως δύο πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι: Ο πρώτος κρύσταλλος λειτουργεί σαν πομπός και τροφοδοτείται με κατάλληλη τάση, οπότε δονείται σε μία επιθυμητή υπερηχητική συχνότητα. Ο δεύτερος κρύσταλλος λειτουργεί ως δέκτης, καθώς δέχεται το ανακλώμενο υπερηχητικό κύμα, δονείται και αναπτύσσει τάση στα άκρα του ανάλογη της συχνότητας του κύματος. Η τάση αυτή αποτελεί την τάση εξόδου.

Στο Σχήμα 2.29 εικονίζεται η μορφή ενός αισθητήρα και ο ενδείκτης που τον συνοδεύει. Ο αισθητήρας πρέπει να τοποθετηθεί έτσι ώστε να «βλέπει» απευθείας την ελεύθερη επιφάνεια του υλικού και να είναι μακριά από εμπόδια που ανακλούν το εκπεμπόμενο σήμα και δημιουργούν ανεπιθύμητες ανακλάσεις στο δέκτη,



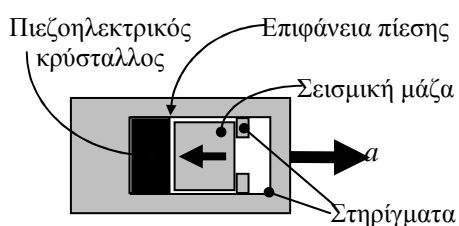
Σχήμα 2.29 Μορφή του αισθητήρα SHLIT25 της εταιρείας SigmaHellas [26] και του ενδείκτη που τον συνοδεύει

2.7.4 Επιταχυνσιόμετρα

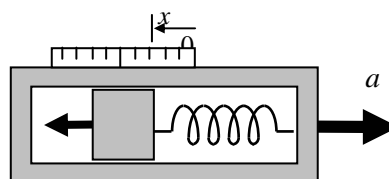
ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Τα επιταχυνσιόμετρα είναι αισθητήρες που ανιχνεύουν επιταχύνσεις και επιπρόσθετα δονήσεις και κρούσεις (shocks). Διαθέτουν μία μάζα m που τείνει να κινηθεί αντίθετα από την κατεύθυνση της επιτάχυνσης (λόγω της αδράνειας που εμφανίζει) και γι' αυτό ονομάζεται *σεισμική μάζα* (*seismic mass*). Υπάρχουν δύο τρόποι αξιοποίησης του φαινομένου αυτού για την παραγωγή ενός ανάλογου ηλεκτρικού σήματος εξόδου.

Καταρχήν η μάζα μπορεί να αφηθεί να κινηθεί, συνδεδεμένη με ένα ελατήριο και έναν αποσβεστήρα (αμορτισέρ) με τον τρόπο που εικονίζεται στο Σχήμα 2.31. Η μετατόπιση x της μάζας υπόκειται στο νόμο του Hooke, $F = kx$, όπου k είναι η σταθερά του χρησιμοποιούμενου ελατηρίου και είναι ανάλογη της σκληρότητας του. Η επιτάχυνση a υπολογίζεται από τη γνωστή σχέση $a = F/m$. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η μετατόπιση πρέπει να μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα με τη βοήθεια ενός ποτενσιομέτρου ή μίας διάταξης LVDT.



Σχήμα 2.30 Αρχή λειτουργίας πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου



Σχήμα 2.31 Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιόμετρου σεισμικής μάζας

Εναλλακτικά, η σεισμική μάζα μπορεί να τεθεί σε μόνιμη επαφή με έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, ο οποίος να είναι ακλόνητα συνδεδεμένος με το περίβλημα του συστήματος (Σχήμα 2.30). Εάν το σύστημα υποστεί επιτάχυνση, η μάζα τείνει να κινηθεί αντίθετα προς την κατεύθυνση της επιτάχυνσης και πιέζει τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, οπότε αυτός παράγει μία τάση ανάλογη της πίεσης (δύναμης) που έχει δεχθεί, και επομένως ανάλογη της επιτάχυνσης. Τα στηρίγματα του Σχήματος 2.30 αντικαθίστανται συχνά από μία βίδα, η οποία διαπερνά τον κρύσταλλο και τη σεισμική μάζα και τα κρατά σε επαφή.

Τα επιταχυνσιόμετρα των Σχημάτων 2.30 και 2.31 μπορούν να ανιχνεύουν επιταχύνσεις παράλληλες στην κύρια διάστασή τους. Υπάρχουν στο εμπόριο και επιταχυνσιόμετρα που ανιχνεύουν επιταχύνσεις κάθετες στην κύρια διάστασή τους. Θα περιγράψουμε τα δύο είδη στα παραδείγματα που ακολουθούν.

Παραδείγματα

Στο εμπόριο διατίθενται πολλά προϊόντα από διάφορους κατασκευαστές. Ως παράδειγμα επιταχυνσιομέτρων που μετρούν διαμήκεις επιταχύνσεις, παράλληλες στην κύρια διάστασή τους, αναφέρουμε τη σειρά EGA της εταιρείας Entran [27]. Η εξωτερική όψη και το σχηματικό διάγραμμα των προϊόντων της σειράς εικονίζονται στο Σχήμα 2.32.



Σχήμα 2.32 Επιταχυνσιόμετρο σειράς EGA της εταιρείας Entran [27]