

**ΤΕΙ ΧΑΛΚΙΔΑΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑ**  
**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (Θ)**

**ΔΙΔΑΣΚΩΝ**

**ΔΡ. ΧΑΤΖΗΕΥΦΡΑΙΜΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΗΣ**

**ΧΑΛΚΙΔΑ 2005-2006**

# Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή .....	4
1.1	Δομή του μαθήματος .....	4
1.2	Εφαρμογή αισθητήρων .....	5
1.2.1	Οι κατηγορίες συστημάτων που έχουν εφαρμογή οι αισθητήρες.....	5
1.2.2	Βασικά μέρη ενός συστήματος μέτρησης.....	6
1.3	Τεχνολογία Αισθητήρων.....	7
1.4	Κατηγορίες αισθητήριων – μετατροπέων .....	8
1.5	Διαδεδομένοι τύποι μετατροπέων σύμφωνα με την αρχή μετατροπής τους .....	8
1.6	Χαρακτηριστικά Αισθητήρων .....	11
2	Μέτρηση δύναμης.....	14
2.1	Ζυγός ισοροπίας.....	14
2.2	Είδη-Εφαρμογές μετατροπέων πιεζοαντίστασης.....	16
2.2.1	Μεταλλικοί.....	16
2.2.2	Προσκολλημένη πιεζοαντίσταση.....	17
2.2.3	Ελεύθερη πιεζοαντίσταση.....	20
2.2.4	Ημιαγωγικοί μετατροπείς πιεζοαντίστασης.....	21
2.2.5	Κυψελίδα φόρτισης - τυπικό παραδείγματα.....	22
3	Μέτρηση ροπής.....	23
3.1	Μετατροπέας ροπής .....	23
4	Μέτρηση ταχύτητας.....	24
4.1	Διαφόριση της μετατόπισης ως προς τον χρόνο.....	24
4.2	Υπολογισμός μέσης ταχύτητας σαν λόγο της μετατόπισης με τον χρόνο.....	24
4.3	Στροβοσκοπική μέθοδος.....	25
4.4	Μετατροπέας ταχύτητας.....	25
4.5	Ταχογεννήτριες.....	26
5	Μέτρηση επιτάχυνσης.....	27
5.1	Κατηγορίες επιταχυνσιόμετρων.....	29
5.1.1	Επιταχυνσιόμετρα με ποτενσιόμετρο.....	29
5.1.2	Επιταχυνσιόμετρα με μετατροπέα πιεζοαντίστασης.....	29
5.1.3	Επιταχυνσιόμετρα με ΓΜΔΜ.....	30

5.1.4	Ημιαγωγικά επιταχυνσιόμετρα.....	30
5.1.5	Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα.....	30
6	Μέτρηση Πίεσης.....	33
6.1	Συσκευές μέτρηση πίεσης.....	33
6.1.1	Μανόμετρα και διατάξεις ζύγισης.....	34
6.1.2	Ελαστικά μηχανικά στοιχεία.....	36
6.2	Βασικοί τύποι μετατροπέων πίεσης ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους.....	38
6.2.1	Μετατροπέας πίεσης με ΓΜΔΜ.....	39
6.2.2	Επαγωγικοί μετατροπείς πίεσης.....	39
6.2.3	Χωρητικοί μετατροπείς πίεσης.....	40
6.2.4	Μετατροπείς πίεσης με πιεζοαντίσταση.....	41
6.2.5	Πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς πίεσης.....	42
6.2.6	Μετατροπείς πίεσης με ποτενσιόμετρο.....	45
6.2.7	Ωμικοί μετατροπείς πίεσης.....	45
7	Μέτρηση ροής υγρών.....	46
7.1	Θεωρία.....	46
7.2	Είδη μετρητών ροής.....	47
7.2.1	Μετρητές παροχής διαφορικού τύπου.....	48
7.2.2	Ηλεκτρομαγνητικοί μετρητές παροχής.....	50
7.2.3	Μετρητές παροχής με υπερήχους.....	53
8	Μέτρηση Στάθμης υγρών.....	56
8.1	Μετρητές με μέτρηση πίεσης.....	56
8.2	Οι μετρητές με βυθιζόμενο σώμα.....	57
8.3	Οι μετρητές με επιπλέον σώμα.....	57
8.4	Οι μετρητές με χωρητικό μετατροπέα.....	58
8.5	Οι μετρητές με υπερήχους, ηλεκτρομαγνητική εκπομπή ή laser.....	58
9	Μέτρηση θερμοκρασίας.....	59
9.1	Θερμόμετρα διαστολής.....	60
9.2	θερμοζεύγη.....	62
9.3	Αισθητήρια θερμοκρασίας με αντίσταση.....	67
9.4	Θερμίστορ.....	68
9.5	Ημιαγωγικοί μετατροπείς θερμοκρασίας.....	70
10	Συστήματα προσαρμογής.....	71

# 1 Εισαγωγή

Σκοπός του μαθήματος είναι η παροχή των απαραίτητων γνώσεων και τεχνολογιών της επιστήμης της μετρολογίας για την μετατροπή των μεταβολών οποιοδήποτε μεγέθους σε αντίστοιχες ηλεκτρικές και την κατάλληλη επεξεργασία τους μέσω αισθητήρων και συστημάτων μέτρησης.

## 1.1 Δομή του μαθήματος

- Κατηγορίες συστημάτων με χρήση αισθητήρων
- Συστήματα μέτρησης
- Τεχνολογία αισθητήρων
- Ηλεκτρικές μετρήσεις μη ηλεκτρικών μεγεθών
  - Μέτρηση δύναμης και ροπής
  - Μέτρηση ταχύτητας και επιτάχυνσης
  - Μέτρηση πίεσης
  - Μέτρηση ροής και στάθμης υγρών
  - Μέτρηση θερμοκρασίας
- Συστήματα προσαρμογής
- Ειδικά αισθητήρια και εφαρμογές

Η τεχνολογία των αισθητήρων εφαρμόζεται συνήθως σε δύο ξεχωριστές περιοχές :

### **Συλλογή πληροφορίας.**

Παρέχουν δεδομένα με σκοπό την παρουσίαση τους για να είναι κατανοητή διαρκώς η τρέχουσα κατάσταση των παραμέτρων ενός συστήματος (ταχύμετρο αυτοκινήτου). Επίσης μπορεί να χρησιμοποιούνται για να παρέχουν μια εικόνα της εξέλιξης των παραμέτρων ενός συστήματος (ταχογράφος φορτηγών).

### **Έλεγχος συστημάτων.**

Διαφέρουν στο τρόπο αξιοποίησης της πληροφορίας. Το σήμα του αισθητήρα τροφοδοτεί ένα ελεγκτή, ο οποίος παράγει μια έξοδο που ρυθμίζει την τιμή της μετρούμενης παραμέτρου (σύστημα ABS αυτοκινήτων).

## 1.2 Εφαρμογή αισθητήρων

### 1.2.1 Οι κατηγορίες συστημάτων που έχουν εφαρμογή οι αισθητήρες

#### Σύστημα μέτρησης.

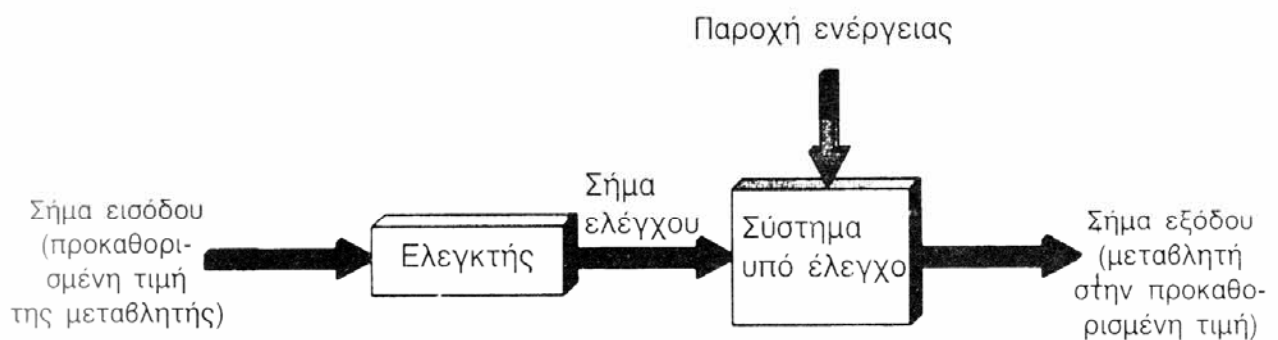
Εμφανίζει ή καταγράφει μια ποσοτική έξοδο που αντιστοιχεί στη μεταβλητή που μετρά, αλλά δεν ελέγχει την τιμή της ποσότητας εισόδου.



Λειτουργικά στοιχεία ενός συστήματος μέτρησης

#### Σύστημα ελέγχου ανοικτού βρόχου.

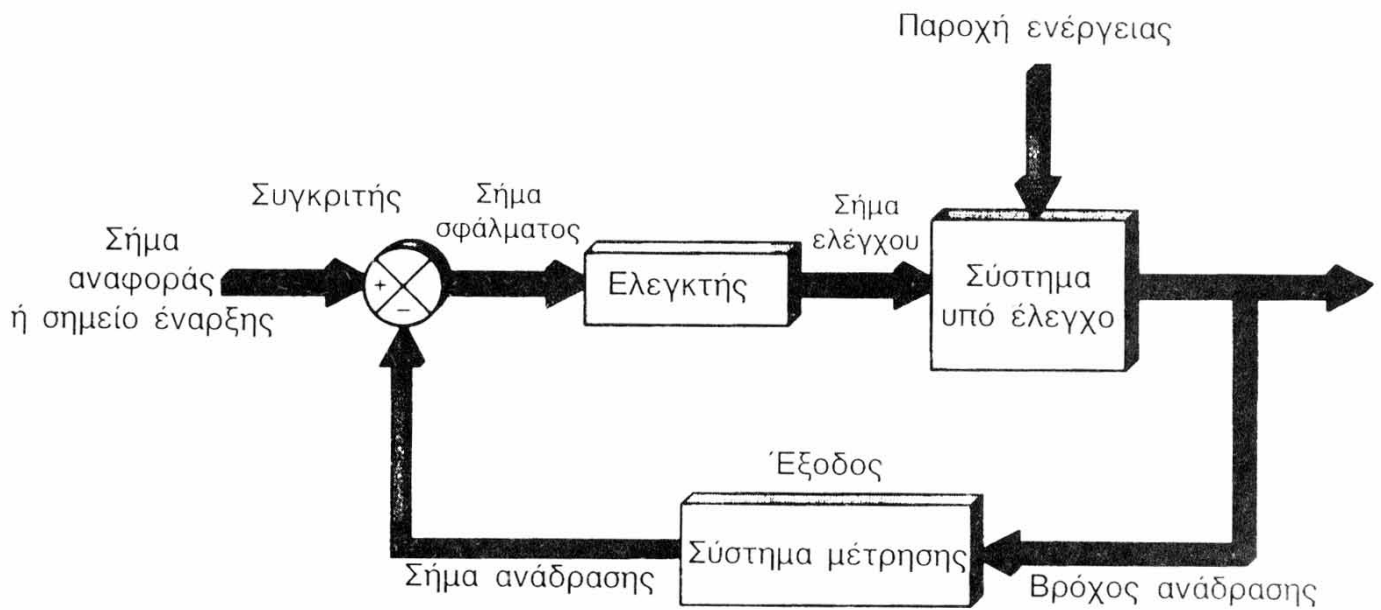
Η έξοδος του ελέγχεται από ένα σήμα που έχει μια προκαθορισμένη τιμή.



Σύστημα ελέγχου ανοικτού βρόχου

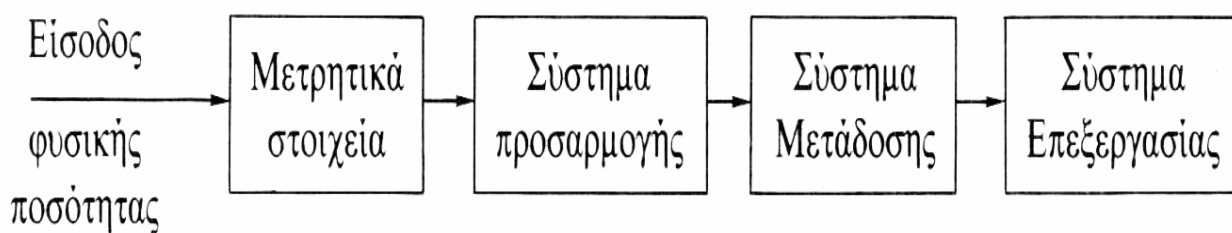
### Σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου.

Περιλαμβάνει σύστημα μέτρησης και η κατάσταση της εξόδου επηρεάζεται άμεσα από την κατάσταση της εισόδου. Συγκεκριμένα μετρά την τιμή της ελεγχόμενης παραμέτρου στην έξοδο του συστήματος και την συγκρίνει με την επιθυμητή τιμή. Η διαφορά των τιμών καλείται σφάλμα.



Σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου

### 1.2.2 Βασικά μέρη ενός συστήματος μέτρησης



Το γενικό σύστημα μέτρησης.

- Μετρητικά στοιχεία
- Σύστημα προσαρμογής
- Σύστημα μετάδοσης
- Σύστημα επεξεργασίας των μετρήσεων

### 1.3 Τεχνολογία Αισθητήρων

- Αρχές λειτουργίας
- Σχεδίαση και κατασκευή
- Εφαρμογές – πρακτικά παραδείγματα.

#### Ορισμός.

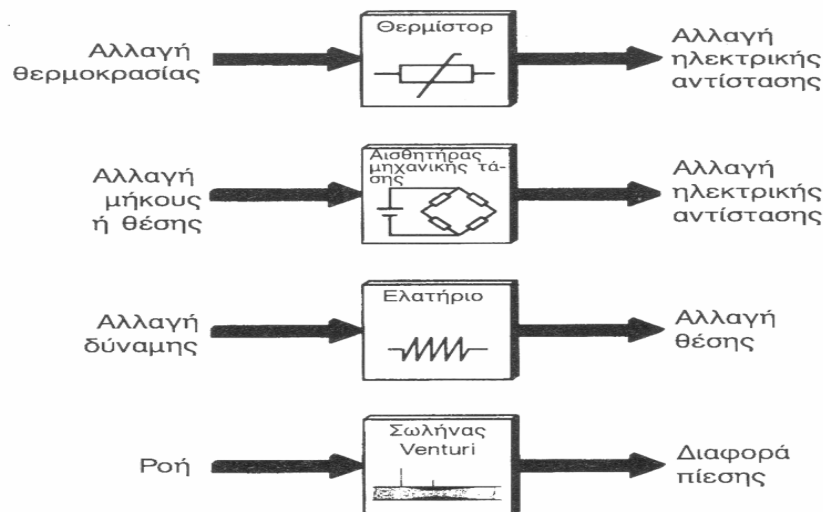
Οι αισθητήρες είναι ξεχωριστές συσκευές ή περίπλοκες κατασκευές των οποίων η βασική λειτουργία είναι η ανίχνευση ενός σήματος ή μιας διέγερσης και η παραγωγή μιας μετρήσιμης εξόδου.

#### Επιλογή αισθητήρα.

Κόστος, αξιοπιστία, ποιότητα απαιτούμενης πληροφορίας, καταλληλότητα μορφής αισθητήρα.

#### Εφαρμογές.

Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλούς βιομηχανικούς, δημόσιους, στρατιωτικούς και οικιακούς τομείς.



Παραδείγματα αισθητήρων

#### Σχέση αισθητήρων και μετατροπέων.

Ο μετατροπέας είναι μια οποιαδήποτε συσκευή που μετασχηματίζει μια μορφή ενέργειας σε μια άλλη (λαμπτήρας πυράκτωσης). Ο αισθητήρας είναι συνήθως ένας μετατροπέας αλλά δεν ισχύει πάντα το ανάποδο.

## 1.4 Κατηγορίες αισθητηρίων – μετατροπέων

### **Ενεργά.**

Απαιτούν για την λειτουργία τους μια εξωτερική πηγή ενέργειας.

### **Παθητικά.**

Δεν απαιτούν για την λειτουργία τους εξωτερική πηγή ενέργειας.

## 1.5 Διαδεδομένοι τύποι μετατροπέων σύμφωνα με την αρχή μετατροπής τους

### **Ηλεκτρομηχανικός τύπος.**

Στηρίζεται για την λειτουργία του στο νόμο επαγωγής του Faraday.

### **Τύπος ποτενσιόμετρου.**

### **Τύπος διαφορικού μετασχηματιστή.**

Αποτελείται από ένα πρωτεύον, δύο δευτερεύοντα και ένα κινητό οπλισμό, ο οποίος κινείται κάτω από την επίδραση του μετρούμενου μεγέθους.

### **Τύπος πιεζοαντίστασης.**

Στηρίζεται στην αρχή ότι αν ασκηθεί μια δύναμη εφελκυσμού επάνω σ' ένα σύρμα, τότε η μεταβολή στο μήκος του συνεπάγεται αντίστοιχη μεταβολή στην ηλεκτρική του αντίσταση.

### **Φωτοηλεκτρικός τύπος.**

Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε σε ηλεκτρικά φαινόμενα, που εμφανίζονται όταν προσπέσει φως σε ορισμένα φωτοευαίσθητα υλικά, το οποίο τροποποιεί την αγωγιμότητα τους.

### **Πιεζοηλεκτρικός τύπος.**

Χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους, οι οποίοι όταν βρεθούν υπό πίεση παράγουν ένα ηλεκτρικό φορτίο.



**Θερμοηλεκτρικός τύπος.**

Είναι κυρίως το θερμοζεύγος το οποίο αποτελείται από δύο διαφορετικά μέταλλα των οποίων το ένα άκρο είναι κοινό ενώ τα άλλα δύο είναι ελεύθερα.

**Τύπος μεταβλητής ηλεκτρικής αντίστασης.**

Ανήκουν οι μετατροπείς το κύριο στοιχείο των οποίων είναι μια ηλεκτρική αντίσταση η τιμή της οποίας εξαρτάται από κάποιο φυσικό μέγεθος.

**Τύπος θερμοδιαστολής.**

Ανήκουν οι μετατροπείς που στηρίζονται στη μεταβολή του όγκου ενός υλικού λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας του.

**Ημιαγωγικοί μετατροπείς θερμότητας.**

Βασίζονται στην αρχή ότι η τάση της διόδου βάσης-εκπομπού σε ορθή πόλωση ενός τρανζίστορ εξαρτάται από την θερμοκρασία.

**Χωρητικός τύπος.**

Αποτελείται από ένα πυκνωτή που η σχετική θέση των οπλισμών του εξαρτάται από το μετρούμενο μέγεθος.

**Επαγωγικός τύπος.**

Στηρίζονται στη μεταβολή της αυτεπαγωγής ενός πηνίου με πυρήνα όταν αλλάζει η θέση του πυρήνα.

**Τύπος ταλαντωτή.**

Χρησιμοποιούν κάποια διάταξη ταλαντωτή με πηνίο και πυκνωτή.

**Τύπος Hall και μαγνητοαντίστασης.**

Βασίζονται στο φαινόμενο Hall, σύμφωνα με το οποίο αν ένας ημιαγωγός βρίσκεται μέσα σ' ένα μαγνητικό πεδίο και διαρρέεται από ρεύμα κάθετο προς το μαγνητικό πεδίο, τότε ο ημιαγωγός εμφανίζει τάση στα άκρα του.

Αρχή μετατροπής Φυσικά μεγέθη	Ηλεκτρομηχανική	Ποτενσιόμετρο	Διαφορ. Μετασχ.	Πιέζοαντίσταση	Φωτοηλεκτρική	Πιέζοηλεκτρική	Θερμοηλεκτρική	Μεταβλ. Ηλ. Αντ.	Θερμοδιαστολή	Θερμ. Επίδρ. σε Ημιαγ.	Χωρητική	Επαγωγική	Ταλαντωτή	Hall και μαγνητοαντιστ.
Γραμμική μετατόπιση	X	X	X	X	X						X	X		
Γωνία	X	X	X	X	X						X	X		
Δύναμη	X		X	X		X					X	X	X	
Ροπή	X		X	X	X									
Ταχύτητα	X	X	X	X	X	X						X		
Επιτάχυνση	X	X	X	X	X	X					X	X		
Πίεση		X	X	X		X					X	X		
Ροή		X	X	X		X					X	X		
Θερμοκρασία							X	X	X	X			X	
Μαγν. Επαγωγή	X													X
Φωτισμός					X									
Υγρασία			X				X				X			

## 1.6 Χαρακτηριστικά Αισθητήρων

### Ακρίβεια-Σφάλμα.

Είναι ο βαθμός στον οποίο η τιμή την οποία δημιουργεί μπορεί να είναι εσφαλμένη (π.χ. Οικιακό θερμόμετρο)

### Βαθμονόμηση.

Αναφέρεται στις μονάδες, στις οποίες βαθμολογείται η κλίμακα εμφάνισης ή καταγραφής ενός οργάνου (π.χ. ταχύμετρο αυτοκινήτου).

### Νεκρή ζώνη.

Το μέγιστο ποσό αλλαγής της μετρούμενης ποσότητας που δεν προκαλεί αλλαγή στην έξοδο (π.χ διακόπτης ρύθμισης οικιακού φωτισμού)

### Διαστάσεις.

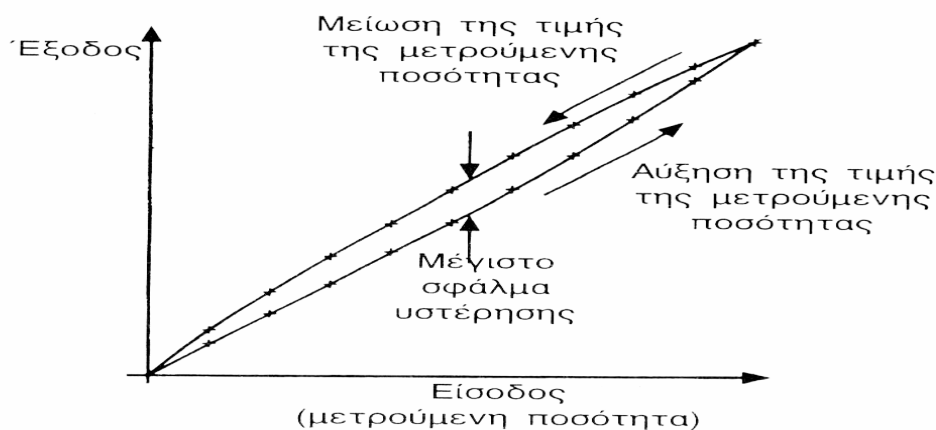
Το μέτρο του φυσικού του μεγέθους.

### Ολίσθηση.

Η φυσική τάση μιας συσκευής ή συστήματος να μεταβάλει τα χαρακτηριστικά του με τον χρόνο και λόγο περιβαλλοντικών μεταβολών.

### Υστέρηση.

Η έξοδος διαφέρει όταν η κατεύθυνση της μεταβολής της εισόδου αντιστραφεί. Προκαλείται από διάφορους παράγοντες, ειδικότερα τη μηχανική τάση και την τριβή. (π.χ. μηχανικά γρανάζια, ρουλεμάν)



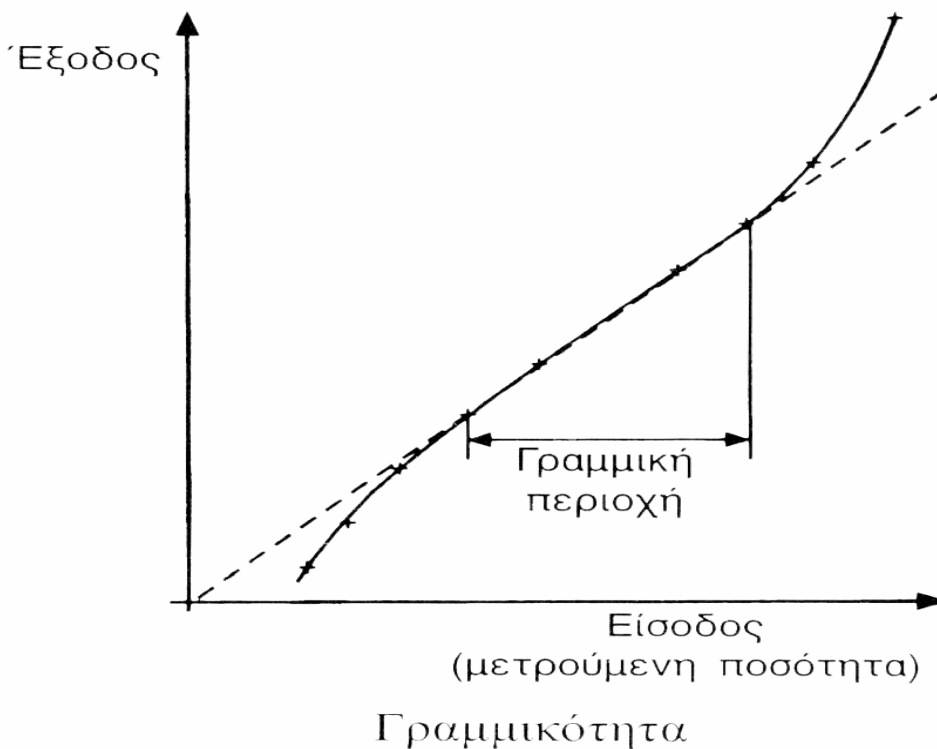
Γραφική παράσταση του φαινομένου της υστέρησης

**Καθυστέρηση.**

Η καθυστέρηση της αλλαγής της τιμής εξόδου ενός αισθητήρα ως προς την αλλαγή της τιμής εισόδου του (συνηθέστερα μετριέται σε κλάσματα του δευτερολέπτου).

**Γραμμικότητα.**

Αποτελεί το βαθμό, στον οποίο η γραφική παράσταση της εξόδου ως προς την είσοδο του αισθητήρα προσεγγίζει μια ευθεία γραμμή.

**Χρόνος λειτουργίας.**

Αποτελεί ένδειξη του χρόνου κατά τον οποίο αναμένεται να λειτουργεί στα πλαίσια των προδιαγραφών του. Εκφράζεται σε μονάδες χρόνου ή κύκλων λειτουργίας.

**Αξιοπιστία.**

Είναι η ικανότητα μιας συσκευής να λειτουργεί κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες για μια δεδομένη χρονική περίοδο.

**Επαναληψιμότητα.**

Εκφράζει το βαθμό στον οποίο μια συσκευή παράγει το ίδιο αποτέλεσμα όταν τροφοδοτείται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές με ακριβώς την ίδια είσοδο.

**Εύρος.**

Εκφράζει τα όρια στα οποία μια συσκευή μπορεί να λειτουργεί αξιόπιστα. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να δίνεται και η υπερφόρτιση.

**Ονομαστική τιμή.**

Αποτελεί το σύνολο των βέλτιστων συνθηκών υπό τις οποίες αυτή θα λειτουργεί με επιτυχία και ασφάλεια.

**Απόκριση.**

Ισούται με το χρόνο που απαιτείται για να λάβει μια συσκευή την τελική τιμή εξόδου της για μια δεδομένη είσοδο. Εκφράζεται σε δευτερόλεπτα ή κάποιες φορές ως ποσοστό επί της τελικής τιμής εξόδου.

**Διακριτική ικανότητα.**

Αναφέρεται στη μικρότερη τιμή εισόδου που μπορεί να ανιχνευτεί (πχ. Ψηφιακός ενδείκτης)

**Ευαισθησία.**

Εκφράζει τη σχέση ανάμεσα στην αλλαγή της εξόδου και την αντίστοιχη αλλαγή της εισόδου, με την προϋπόθεση ότι η σχέση μεταξύ τους είναι γραμμική.

**Ευστάθεια.**

Αποτελεί το μέτρο μεταβολής της εξόδου μιας συσκευής, όταν η είσοδος και οι συνθήκες παραμένουν σταθερές, κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης χρονικής περιόδου.

**Στατικό σφάλμα.**

Είναι ένα σταθερό σφάλμα που υπεισέρχεται καθ' όλο το εύρος τιμών εισόδου μιας συσκευής.

**Ανοχή.**

Είναι το μέγιστο ποσό σφάλματος που μπορεί να υπάρξει κατά τη διάρκεια λειτουργίας της.

**Περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας.**

Είναι η περιοχή μέσα στην οποία το κέρδος του αισθητήρα δεν μεταβάλλεται περισσότερο από 5 % της μέσης τιμής του.

## 2 Μέτρηση δύναμης.

Οι πιο βασικές κατηγορίες μέτρησης δύναμης είναι:

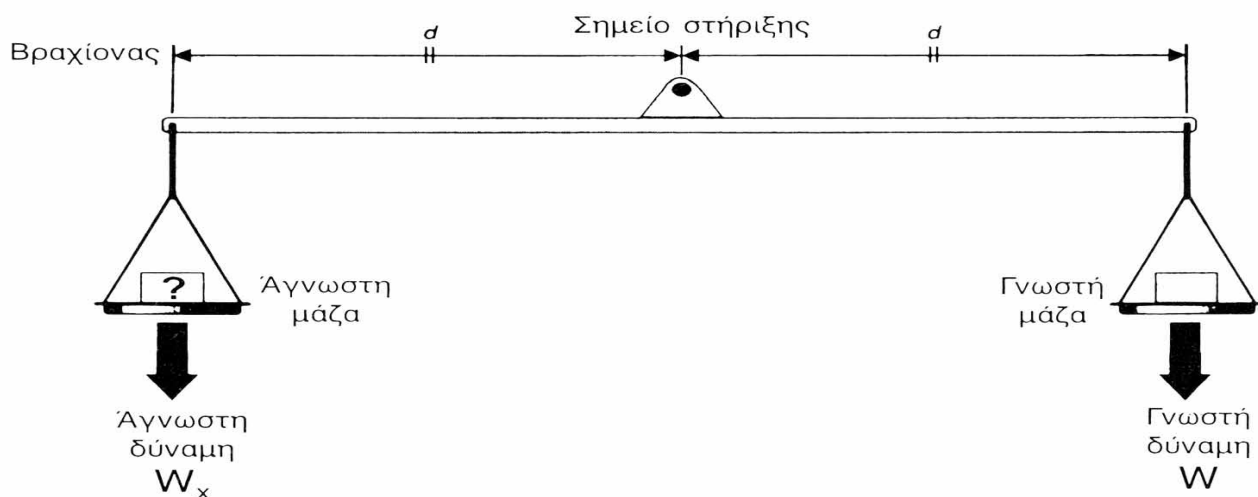
- Εξισορρόπηση της άγνωστης δύναμης με γνωστό βάρος
- Μετατροπή της δύναμης σε πίεση ενός ρευστού και μέτρηση της πίεσης
- Μέτρηση της παραμόρφωσης που δημιουργεί η δύναμη σε κάποιο ελαστικό στοιχείο

Οι δύο πρώτες τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για στατικά φορτία, ενώ η τελευταία τεχνική με χρήση ελαστικού στοιχείου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για δυναμικά φορτία με συχνότητες δεκάδων KHz.

### 2.1 Ζυγός ισορροπίας

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

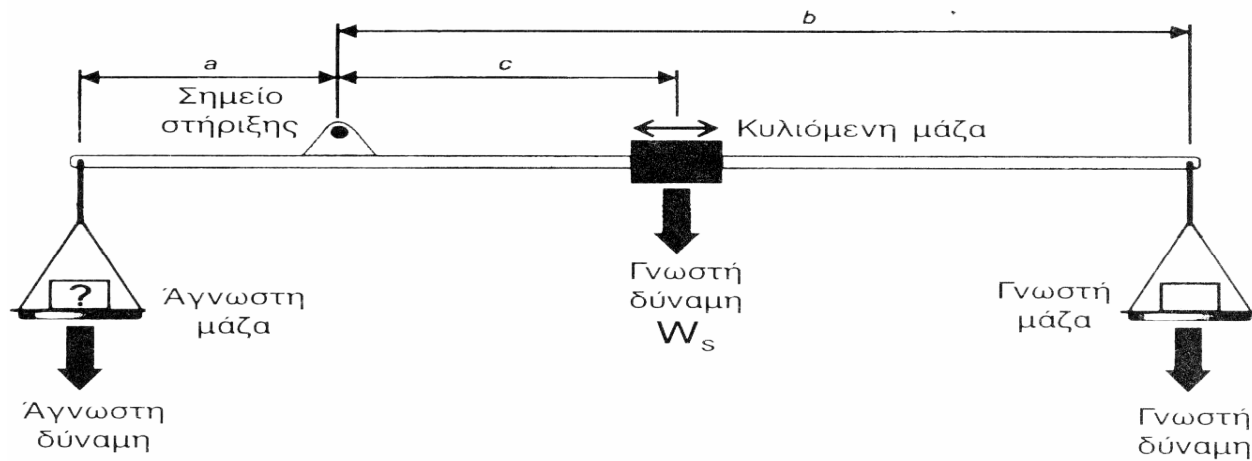
#### Ζυγός ισορροπίας με κεντρική στήριξη



Ζυγός ισορροπίας με κεντρική στήριξη

Ο ζυγός αποτελείται από έναν βραχίονα και από ισαπέχοντα άκρα στα οποία αναρτώνται οι γνωστές και οι άγνωστες δυνάμεις. Η συνθήκη ισορροπίας επιτυγχάνεται όταν  $Wx = W$ , όπου  $Wx$  και  $W$  η άγνωστη και γνωστή δύναμη αντίστοιχα.

**Ζυγός ισορροπίας με κυλιόμενη μάζα**

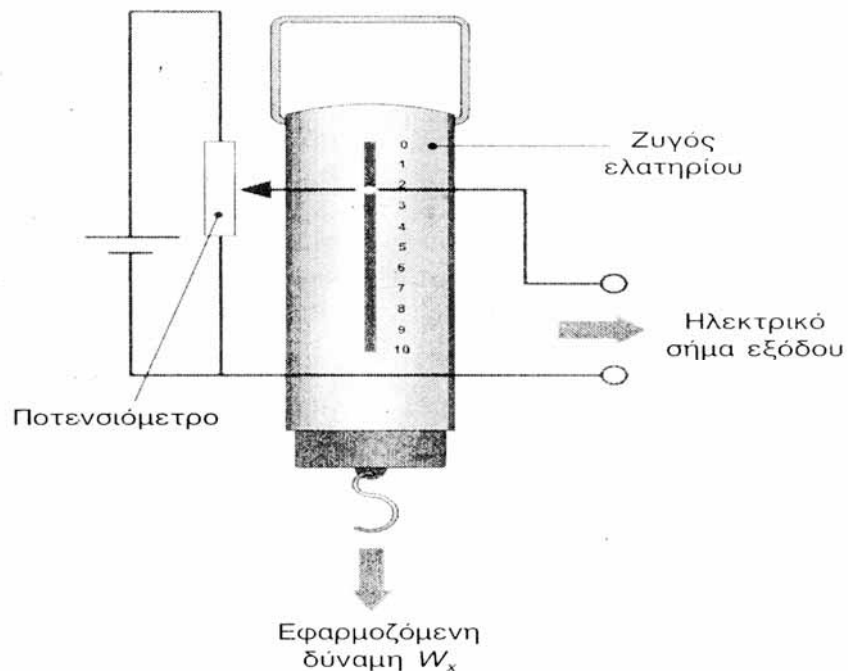


Ζυγός ισορροπίας με κυλιόμενη μάζα

Ο υπολογισμός της άγνωστης δύναμης βασίζεται στη προσθήκη γνωστής δύναμης στον άλλο δίσκο του ζυγού και τη μετατόπιση της γνωστής κυλιόμενης μάζας έτσι ώστε ο ζυγός να ισορροπήσει, σύμφωνα με την σχέση:

$$(W_x \cdot a) = (W \cdot b) + (W_s \cdot c)$$

**Ζυγός ελατηρίου**



Ζυγός ελατηρίου και ποτενσιόμετρο

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

## 2.2 Είδη-Εφαρμογές μετατροπέων πιεζοαντίστασης

Κατηγορίες μετατροπέων πιεζοαντίστασης:

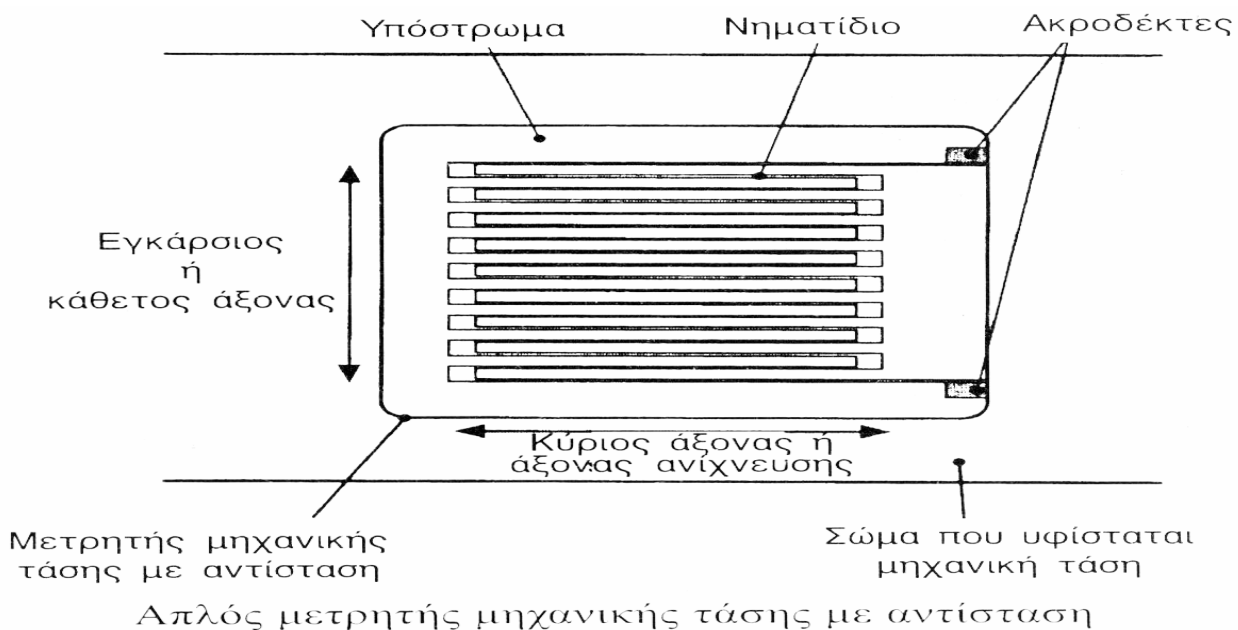
- Μεταλλικοί
  - Προσκολλημένης
  - Ελεύθερης πιεζοαντίστασης
- Ημιαγωγικοί
  - Μετατροπέας προσκολλημένης πιεζοαντίστασης
  - Μετατροπέας διάχυσης

Εφαρμογές μετατροπέων πιεζοαντίστασης:

- Βιομηχανία
- Δομικά έργα
- Μηχανολογικές κατασκευές

### 2.2.1 Μεταλλικοί

Βασίζονται στην ιδιότητα να μεταβάλλουν την αντίστασή τους όταν ασκηθεί κάποια δύναμη. Ένας γραμμικός μετρητής μηχανικής τάσης είναι ευαίσθητος σε αλλαγές μετατόπισης κατά μήκος του κύριου άξονα και πρακτικά αναίσθητος κατά μήκος του εγκάρσιου άξονα.

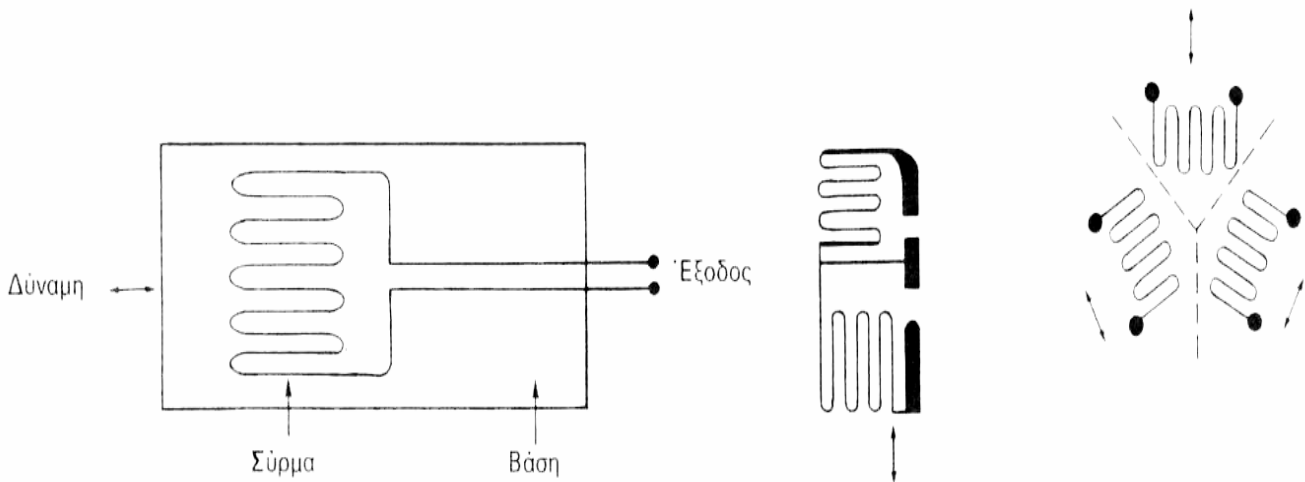


Επιθυμητή είσοδος ενός τέτοιου μετατροπέα είναι η μετατόπιση ή η δύναμη και η έξοδος είναι η αλλαγή της αντίστασης ή συνήθως η τάση μιας γέφυρας Wheatstone.



## 2.2.2 Προσκολλημένη πιεζοαντίσταση.

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



*Διάταξη ενός μετατροπέα με προσκολλημένη πιεζοαντίσταση.*

Για την αντίσταση  $R$  ενός σύρματος ισχύει :

$$R = \rho \frac{4l}{D^2 \pi}$$

όπου  $\rho$  η ειδική αντίσταση,  $l$  το μήκος και  $D$  η διάμετρος του.

Κατά την εφαρμογή μηχανικής τάσης μεταβάλλεται η αντίσταση  $R$  στην τιμή  $R+dR$ , που οφείλεται στις μικρές μεταβολές  $d\rho$ ,  $dl$  και  $dD$  :

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} - 2 \frac{dD}{D} \Rightarrow \frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} \left[ 1 + \frac{d\rho/\rho}{dl/l} - 2 \frac{dD/D}{dl/l} \right]$$

Το πηλίκο της μεταβολής των διαστάσεων ως προς τις αρχικές διαστάσεις καλείται διαστολή ή παραμόρφωση ή μηχανική τάση “ $\varepsilon$ ” και ορίζεται ως:

$$\varepsilon = \frac{dl}{l}$$

Η τιμή της σχέσεως της σχετικής μεταβολής της διαμέτρου ως προς την σχετική μεταβολή του μήκους είναι ο αριθμός “ $\mu$ ” του Poisson :

$$\mu = - \frac{dD/D}{dl/l}$$

Κατά συνέπεια η σχετική μεταβολή της αντίστασης μπορεί να γραφεί :

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon \left[ 1 + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon} + 2\mu \right] = \varepsilon \cdot G$$

Ο συντελεστής “G” περιγράφει την ευαισθησία της πιεζοαντίστασης και ορίζεται ως το πηλίκο της ποσοστιαίας αλλαγής της αντίστασης προς την ποσοστιαία αλλαγή του μήκους λόγω της εφαρμοζόμενης μηχανικής τάσης και ονομάζεται παράγοντας μεταβολής.

Επίσης η εξίσωση υπολογισμού του όγκου του σύρματος είναι :

$$V = l \cdot D^2 \frac{\pi}{4}$$

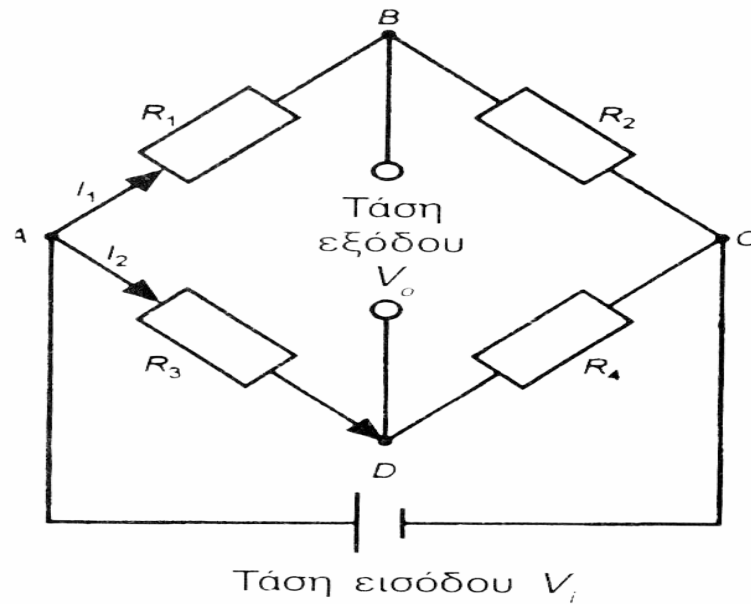
Άρα η σχετική μεταβολή του όγκου δίνεται από την σχέση:

$$\frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + 2 \frac{dD}{D} \Rightarrow \frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} (1 - 2\mu)$$

Με βάση τα προηγούμενα οι τιμές που μπορεί να πάρει ο συντελεστής Poisson είναι μεταξύ 0.2 και 0.5.

Η συνολική αντίσταση της πιεζοαντίστασης είναι συνήθως 120 Ω, 300 Ω, 500 Ω και 1 ΚΩ. Οι μέγιστες παραμορφώσεις που μετρούνται είναι συνήθως μερικά εκατοστά του συνολικού μήκους. Η διακριτική αυτή ικανότητα μπορεί να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο με χρήση ευαίσθητων ηλεκτρονικών ενισχυτών. Η επίδραση της θερμοκρασίας είναι σημαντική γιατί μεταβάλλει την αντίσταση της πιεζοαντίστασης.

Για την μετατροπή της μεταβολής της τιμής της αντίστασης σε ηλεκτρική τάση χρησιμοποιείται μια γέφυρα Wheatstone.



Κύκλωμα γέφυρας Wheatstone

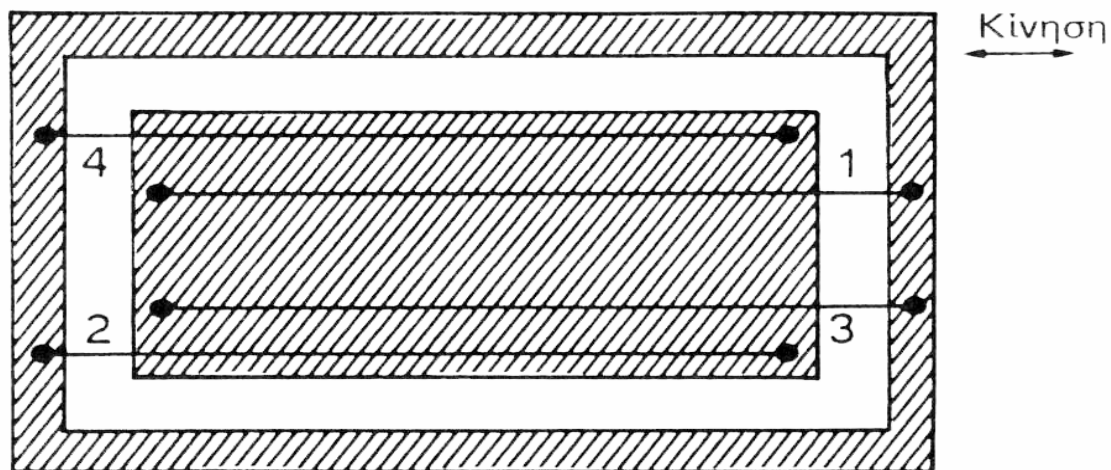
Εάν μία αντίσταση της γέφυρας αντικατασταθεί από μία πιεζοαντίσταση τότε μεταβολή στην τιμή της ασκούμενης δύναμης πάνω στην πιεζοαντίσταση, τροποποιεί την τιμή της και κατά συνέπεια οδηγεί την γέφυρα σε κατάσταση μη ισορροπίας. Η αλλαγή της τάσης εξόδου  $V_o$  εν συγκρίσει με την αλλαγή της αντίστασης  $R_1$  δίνεται από την σχέση:

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

όπου  $R_1$  η τιμή της πιεζοαντίστασης.

### 2.2.3 Ελεύθερη πιεζοαντίσταση

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



*Μετατροπέας με ελεύθερη πιεζοαντίσταση (απλή μορφή).*

## 2.2.4 Ημιαγωγικοί μετατροπείς πιεζοαντίστασης

Υπάρχουν δύο τύποι ημιαγωγικών μετατροπέων πιεζοαντίστασης. Στον ένα τύπο χρησιμοποιείται ένας κρύσταλλος πυριτίου με προσμίξεις σαν πιεζοαντίσταση. Τέσσερις τέτοιοι κρύσταλλοι συνδέονται ως γέφυρας Wheatstone και προσκολλούνται στην επιφάνεια την παραμόρφωση της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε. Ο δεύτερος τύπος που καλείται μετατροπέας διάχυσης χρησιμοποιεί πυρίτιο σαν μηχανική βάση και η πιεζοαντίσταση διαχέεται μέσα σ' αυτό.

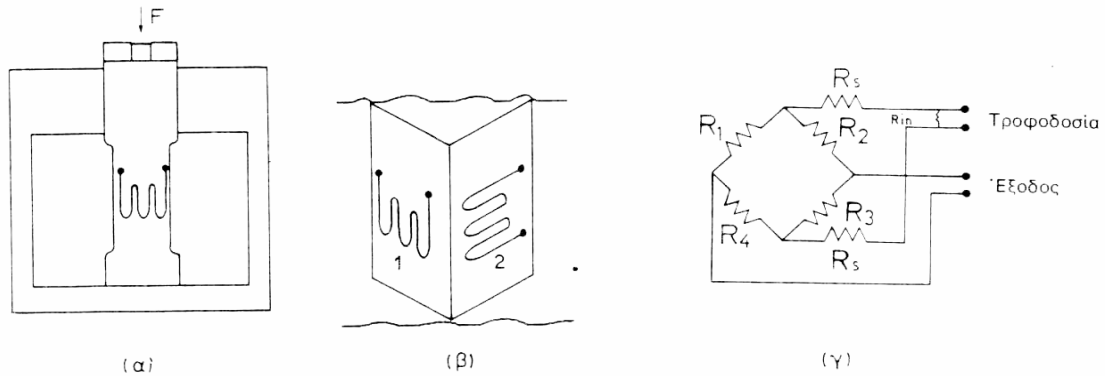
Οι ημιαγωγικοί μετατροπείς προσκολλημένης πιεζοαντίστασης επηρεάζονται από μεταβολές θερμοκρασίας και με την πάροδο του χρόνου μειώνεται η ακρίβεια τους, εν αντιθέσει με τους μετατροπείς διάχυσης οι οποίοι εμφανίζουν χρονική σταθερότητα.

### Επίδραση θερμοκρασίας.

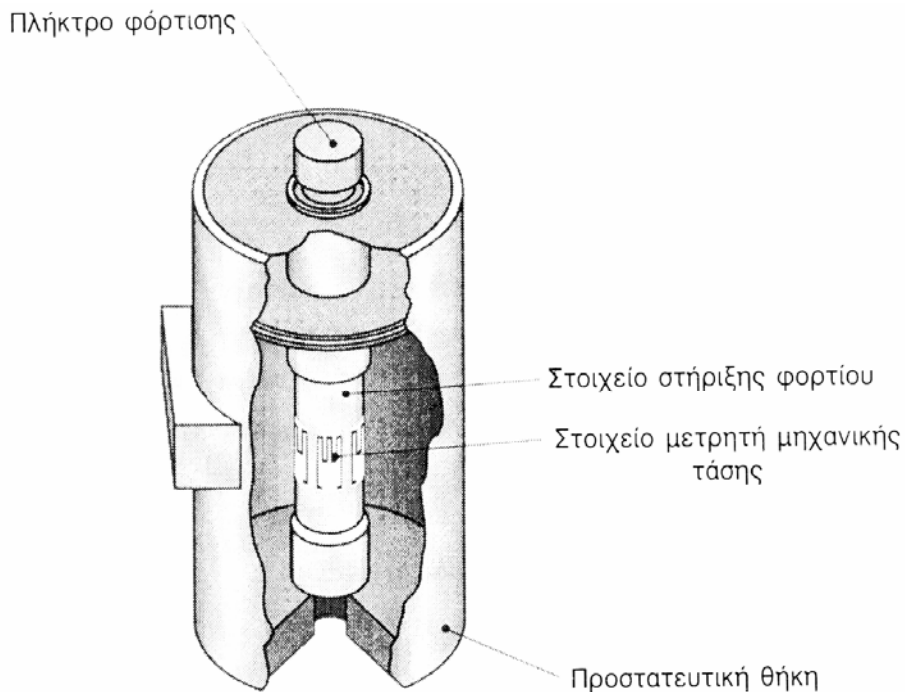
Σε όλους τους τύπους μετατροπέων πιεζοαντίστασης η θερμοκρασία δημιουργεί δύο ειδών σφάλματα:

- *Την θερμοκρασιακή απόκλιση ευαισθησίας.* Οφείλεται στο γεγονός ότι η ευαισθησία επηρεάζεται από την μεταβολή της θερμοκρασίας.
- *Την θερμοκρασιακή απόκλιση μηδενός.* Χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι για μηδενική δύναμη η τάση εξόδου θα είναι μικρή αλλά όχι μηδενική για μη μηδενική θερμοκρασία.

**2.2.5 Κυψελίδα φόρτισης - τυπικό παραδείγματα.**



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



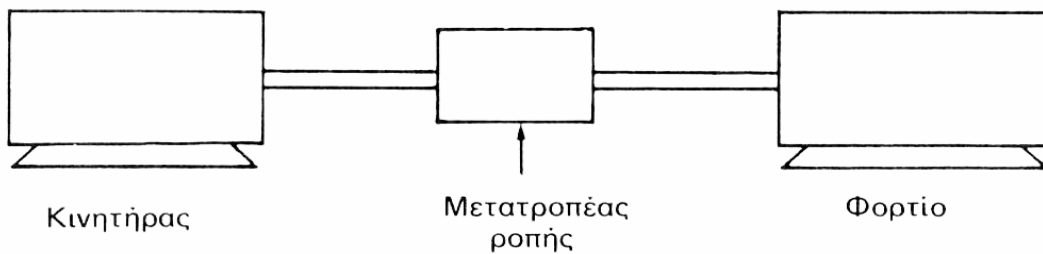
Κυψελίδα φόρτισης με μετρητή μηχανικής τάσης

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

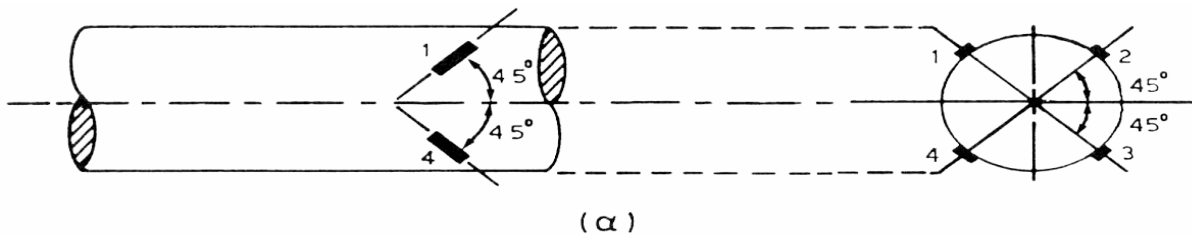
### 3 Μέτρηση ροπής

#### 3.1 Μετατροπέας ροπής

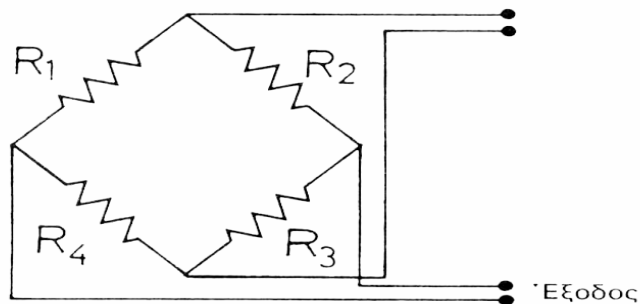
Είναι ένα τμήμα άξονα από κατάλληλο ελαστικό υλικό, το οποίο λόγω της παραμόρφωσης του μεταβιβάζει την ροπή σε στρέψη. Στην συνέχεια η ροπή του άξονα μετριέται με πιεζοαντιστάσεις, οι οποίες συνδέονται σε γέφυρα Wheatstone. Αν το ηλεκτρικό σήμα ενός μετατροπέα ροπής πολλαπλασιασθεί με το ηλεκτρικό σήμα ενός ταχομέτρου που μετράει την ταχύτητα περιστροφής του άξονα, το αποτέλεσμα θα είναι η μηχανική ισχύς του άξονα.



Διάταξη για μέτρηση ροπής άξονα.



(α)



(β)

Μετατροπέας ροπής.

Εάν οι πιεζοαντιστάσεις είναι τοποθετημένες με ακρίβεια και έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, ο μετατροπέας δεν επηρεάζεται σημαντικά από τάσεις κάμψης ή αξονικές τάσεις. Για την ηλεκτρική τους σύνδεση χρησιμοποιούνται δακτύλιοι με ψήκτρες.

## 4 Μέτρηση ταχύτητας

Οι πιο βασικοί μέθοδοι μέτρησης ταχύτητας είναι :

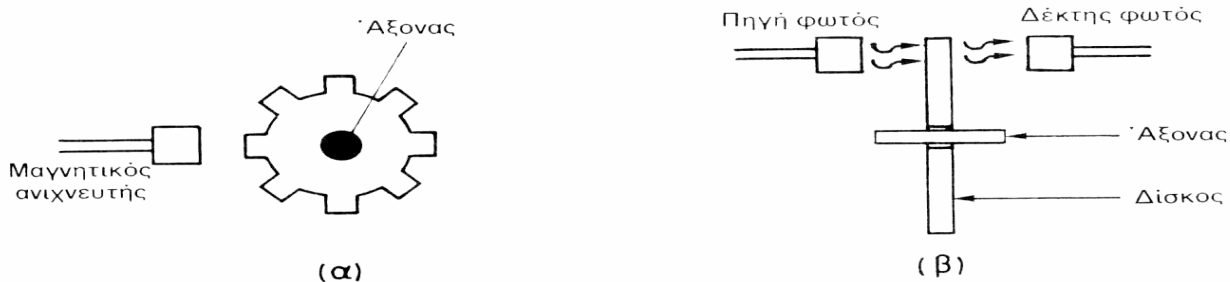
- Διαφόριση της μετατόπισης ως προς τον χρόνο
- Υπολογισμός μέσης ταχύτητας σαν λόγο της μετατόπισης με τον χρόνο
- Στροβοσκοπική μέθοδος
- Χρήση μετατροπέων ταχύτητας
- Ταχογεννήτριες

### 4.1 Διαφόριση της μετατόπισης ως προς τον χρόνο.

Η διαφορίση μπορεί να γίνει αριθμητικά ή ηλεκτρικά. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι αυξάνει το θόρυβο του σήματος. Κατά συνέπεια για να εφαρμοστεί αυτή η τεχνική απαιτείται ένα σήμα μετατόπισης σχετικά ελεύθερο από θορύβους. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα φίλτρα για περιορισμό του θορύβου.

### 4.2 Υπολογισμός μέσης ταχύτητας σαν λόγο της μετατόπισης με τον χρόνο.

Η μέτρηση πραγματοποιείται με την ανίχνευση της μετατόπισης ενός αντικειμένου μέσα σ' ένα χρονικό διάστημα. Η ανίχνευση αυτή μπορεί να γίνει οπτικά ή με ανιχνευτή αντικειμένου. Οπτικά η ανίχνευση γίνεται με τη διακοπή ή την ανάκλαση μιας φωτεινής δέσμης επάνω στο αντικείμενο. Οι ανιχνευτές αντικειμένου λειτουργούν ανιχνεύοντας τη μεταβολή που δημιουργείται σε κάποιο μέγεθος όταν ένα αντικείμενο βρεθεί μέσα στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή. Σ' αυτή τη μέθοδο υπάγονται και οι κάθε μορφής μηχανικοί καταμετρητές οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την μέτρηση ταχύτητας περιστροφής κάποιου άξονα. Η συγκεκριμένη τεχνική βασίζεται στη καταμέτρηση οπτικών ή μαγνητικών παλμών.



Καταμέτρηση μαγνητικών (α) και οπτικών (β) παλμών.



Για την καταμέτρηση των μαγνητικών ή οπτικών παλμών χρησιμοποιείται κατάλληλος δίσκος με δόντια ή με ανακλώμενη επιφάνεια αντίστοιχα, ο οποίος προσαρμόζεται στον περιστρεφόμενο άξονα. Καθώς ο δίσκος περιστρέφεται μέσα σε ένα χρονικό διάστημα  $\Delta t$ , παράγονται  $Nt$  παλμοί κάθε φορά που τα  $Nt$  δόντια ή η ανακλώμενη επιφάνεια περνάνε μπροστά από τον ανιχνευτή. Αν  $N$  ο αριθμός των δοντιών ή των ανακλώμενων επιφανειών τότε η γωνιακή ταχύτητα του άξονα είναι:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot Nt \text{ rad}}{\Delta t \cdot N \text{ sec}} \quad \text{ή} \quad \frac{Nt \text{ περ.}}{\Delta t \cdot N \text{ sec}}$$

Η απαρίθμηση μαγνητικών ή οπτικών παλμών είναι μια απλή μέθοδος, η οποία μπορεί να δώσει αποτελέσματα με ακρίβεια αν η ταχύτητα είναι σταθερή και ο αριθμός των παλμών που μετριοούνται μέσα σε χρόνο  $\Delta t$  είναι μεγάλος.

### 4.3 Στροβοσκοπική μέθοδος.

Έστω ένας άξονας που περιστρέφεται με ταχύτητα “ $n$  περ./sec” και μία λάμπα που φωτίζει τον άξονα αναβοσβήνει με συχνότητα “ $f$ ”. Αν υπάρχει κάποιο σημάδι επάνω στον άξονα, τότε αυτό θα φαίνεται ακίνητο σε περίπτωση που η συχνότητα περιστροφής είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας “ $f$ ”. Η μέτρηση γίνεται μεταβάλλοντας τη συχνότητα “ $f$ ” έως ότου κάποιο σημάδι του άξονα που ορίζεται για αυτό το σκοπό φανεί ακίνητο.

### 4.4 Μετατροπές ταχύτητας.

Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι μετατροπείς ηλεκτρομηχανικού τύπου δηλαδή κινητού πηνίου ή μαγνήτη. Βασίζονται στην επαγωγική τάση που εμφανίζεται στο πηνίο όταν υπάρχει σχετική κίνηση του ως προς τον πυρήνα, ο οποίος είναι ένας μόνιμος μαγνήτης. Η τάση αυτή “ $V$ ” κατά μέτρο δίνεται από την σχέση:

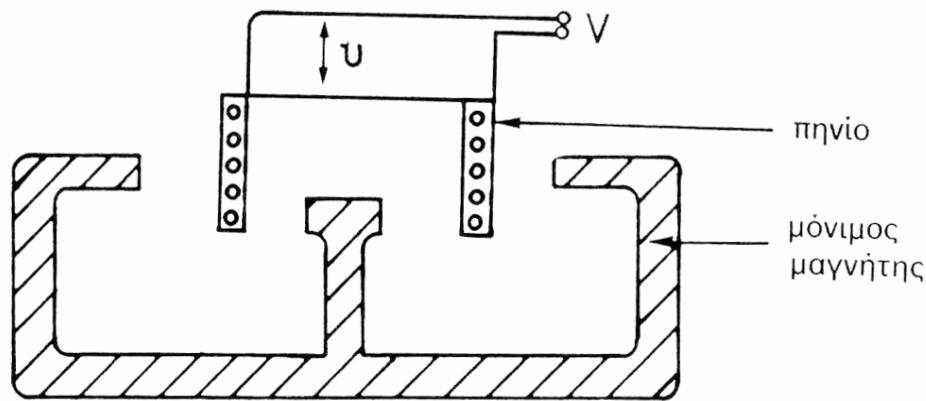
$$V = B \cdot l \cdot v, \quad \text{όπου}$$

$B$  η μαγνητική επαγωγή

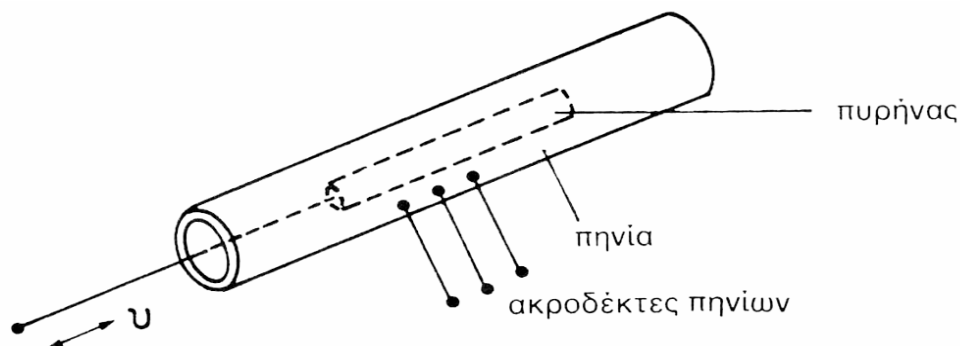
$l$  το μήκος του πηνίου

$v$  η σχετική ταχύτητα μεταξύ  
πηνίου και μαγνήτη

Επειδή η μαγνητική επαγωγή και το μήκος είναι σταθερές ποσότητες, η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη μόνο της ταχύτητας.



Μετατροπέας ταχύτητας κινητού πηγίου.



Μετατροπέας ταχύτητας κινητού μαγνήτη.

#### 4.5 Ταχογεννήτριες

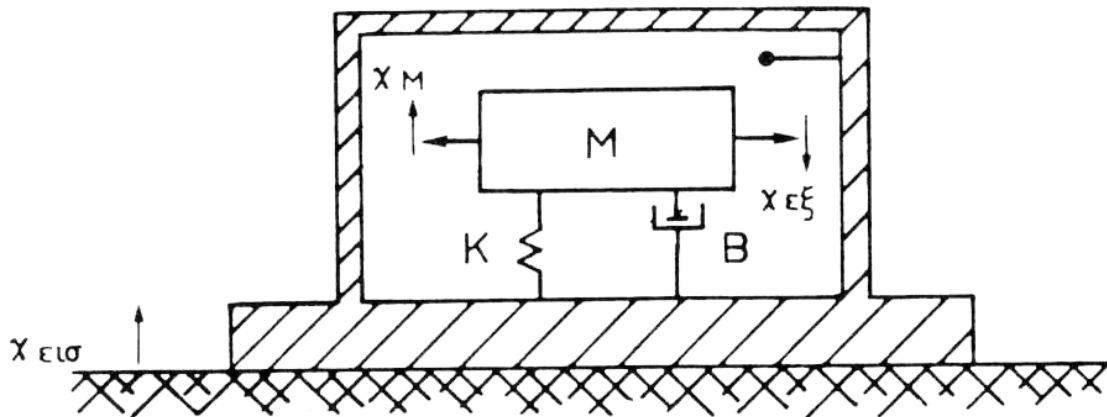
Οι ταχογεννήτριες διακρίνονται σε εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος. Παράγουν μία τάση ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του άξονα τους.

Οι ταχογεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι κινητήρες κλωβού δύο τύλιγμάτων. Το ένα τύλιγμα τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα. Λόγω της περιστροφής επάγεται στο άλλο τύλιγμα μια εναλλασσόμενη τάση με πλάτος ανάλογο της ταχύτητας περιστροφής. Η συχνότητα είναι ίση με την συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας και η φάση της ως προς την τάση τροφοδοσίας είναι  $0^\circ$  ή  $180^\circ$  ανάλογα με την φορά περιστροφής.

Οι ταχογεννήτριες συνεχούς ρεύματος παρέχουν τάση εξόδου συνεχούς ρεύματος ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του άξονα. Χρησιμοποιούν συνήθως μόνιμο μαγνήτη αντί για πηγίο διέγερσης για να έχουν καλή ακρίβεια και ευαισθησία. Η τάση εξόδου αλλάζει πολικότητα όταν η φορά περιστροφής αντιστραφεί. Η ροπή που απαιτείται για την κίνηση των ταχογεννητριών πρέπει να είναι πολύ πιο μικρή από την ροπή του μετρούμενου άξονα γιατί διαφορετικά η ταχογεννήτρια φορτίζει τον υπό μέτρηση άξονα.

## 5 Μέτρηση επιτάχυνσης.

Οι μετατροπείς που μετρούν επιτάχυνση καλούνται επιταχυνσιόμετρα.



Βασικός τύπος επιταχυνσιόμετρου.

Ένας βασικός μετατροπέας αποτελείται από ένα περίβλημα το οποίο πακτώνεται στην επιφάνεια την επιτάχυνση της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε. Μέσα στο περίβλημα υπάρχει ένα σώμα με μάζα  $M$  το οποίο στηρίζεται στο περίβλημα μέσω ενός ελατηρίου με σταθερά  $K$  και ενός αποσβεστήρα με σταθερά  $B$ . Ο αποσβεστήρας είναι ένα σύστημα που η δύναμη αντίδρασης του είναι ανάλογη της ταχύτητας μετατόπισης. Με  $x_{\epsilon\iota\sigma}$  συμβολίζεται η μετατόπιση του περιβλήματος, με  $x_{\epsilon\xi}$  η μετατόπιση του σώματος μάζας  $M$  ως προς το περίβλημα και με  $x_M$  η μετατόπιση του σώματος μάζας  $M$  ως προς το σύστημα μεταφοράς.

Εύκολα αποδεικνύεται ότι ισχύει:

$$K \cdot x_{\epsilon\xi} + B \frac{dx_{\epsilon\xi}}{dt} = M \frac{d^2 x_M}{dt^2} \Rightarrow$$

$$K \cdot x_{\epsilon\xi} + B \frac{dx_{\epsilon\xi}}{dt} = M \left[ \frac{d^2 x_{\epsilon\iota\sigma}}{dt^2} - \frac{d^2 x_{\epsilon\xi}}{dt^2} \right]$$

Εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Laplace προκύπτει:

$$\frac{X_{\epsilon\xi}(s)}{X_{\epsilon\iota\sigma}(s)} = \frac{s^2 \cdot M}{s^2 \cdot M + s \cdot B + K}$$

Θέτοντας  $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$  και  $\zeta = \frac{B}{2\sqrt{K \cdot M}}$  προκύπτει:

$$\frac{X_{εξ}(s)}{X_{εισ}(s)} = \frac{s^2}{s^2 + s \cdot 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n + \omega_n^2},$$

με  $\omega_n$  η κυκλική φυσική συχνότητα και  
 $\zeta$  ο συντελεστής απόσβεσης του συστήματος

Αν θεωρηθεί σαν είσοδο του συστήματος η επιτάχυνση “ $\gamma$ ” της επιφάνειας στήριξης αντί της μετατόπισης “ $x_{εισ}$ ” τότε εύκολα προκύπτει ότι:

$$\frac{X_{εξ}(s)}{\gamma(s)} = \frac{1}{s^2 + s \cdot 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n + \omega_n^2} \Rightarrow$$

$$\frac{X_{εξ}(\omega)}{\gamma(\omega)} = \frac{(1/\omega_n^2)}{(j\omega/\omega_n)^2 + 2 \cdot \zeta \cdot (j\omega/\omega_n) + 1}$$

Για  $\omega \ll \omega_n$  το κέρδος του συστήματος είναι σταθερό και ίσο με  $1/\omega_n^2$ . Επιπλέον η διαφορά φάσης μεταξύ εισόδου και εξόδου είναι περίπου ίση με  $0^\circ$ . Με άλλα λόγια η μορφή της εισόδου δεν παραμορφώνεται από το σύστημα, το οποίο σημαίνει ότι η έξοδος είναι ανάλογη της εισόδου και άρα προσφέρεται για μέτρηση. Για αυτό η περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας του είναι μεταξύ 0 Hz και μιας συχνότητας πολύ μικρότερης της φυσικής του συχνότητας. Όπως προκύπτει από την προηγούμενη εξίσωση για να έχει ένα σύστημα μεγάλη ευαισθησία πρέπει η κυκλική φυσική συχνότητα του να είναι μικρή, το οποίο όμως περιορίζει τη περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας του.

## 5.1 Κατηγορίες επιταχυνσιομέτρων

Τα επιταχυνσιόμετρα διακρίνονται σε ανοικτού και κλειστού βρόγχου.

### Επιταχυνσιόμετρα ανοικτού βρόγχου

Η έξοδος των συστημάτων που περιγράφηκαν προηγούμενα είναι μία μετατόπιση. Για να υπάρξει ηλεκτρική έξοδος χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας θέσης, ο οποίος δίνει τάση εξόδου ανάλογη της μετατόπισης. Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής του μετατροπέα θέσης, του ελατηρίου και του αποσβεστήρα, τα επιταχυνσιόμετρα ανοικτού βρόγχου διακρίνονται :

- Επιταχυνσιόμετρα με ποτενσιόμετρο.
- Επιταχυνσιόμετρα με μετατροπέα πιεζοαντίστασης (ελεύθερη ή προσκολλημένη).
- Επιταχυνσιόμετρα με γραμμικό μεταβλητό διαφορικό μετασχηματιστή (ΓΜΔΜ).
- Ημιαγωγικά επιταχυνσιόμετρα.
- Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα.

#### 5.1.1 Επιταχυνσιόμετρα με ποτενσιόμετρο.

Χρησιμοποιείται ένα ποτενσιόμετρο για τη μέτρηση της μετατόπισης της θέσης της μάζας ως προς το περίβλημα. Η αντίσταση στηρίζεται στο περίβλημα ενώ η κινητή επαφή παρασύρεται από την κίνηση της μάζας. Μετρούν επιταχύνσεις μέχρι μερικές δεκάδες g για συχνότητα μερικές δεκάδες Hz, έχουν ευαισθησία κάθετης διεύθυνσης περίπου  $\pm 1\%$  και ακρίβεια γύρω στο 1% πλήρους απόκλισης για θερμοκρασία γύρω στους 20° C.

#### 5.1.2 Επιταχυνσιόμετρα με μετατροπέα πιεζοαντίστασης.

Η πιεζοαντίσταση παίζει το ρόλο του ελατηρίου. Μετρούν επιταχύνσεις μέχρι μερικές εκατοντάδες g για συχνότητα εκατοντάδων Hz, έχουν ευαισθησία κάθετης διεύθυνσης περίπου  $\pm 2\%$  και ακρίβεια γύρω στο 1% πλήρους απόκλισης για θερμοκρασία γύρω στους 20° C.

### 5.1.3 Επιταχυνσιόμετρα με ΓΜΔΜ.

Χρησιμοποιούν γραμμικό μεταβλητό διαφορικό μετασχηματιστή (ΓΜΔΜ) για την μέτρηση της μετατόπισης, όπου τα πηνία συνδέονται με το περίβλημα και ο οπλισμός με τη μάζα. Μετρούν επιταχύνσεις μέχρι μερικές εκατοντάδες g για συχνότητα εκατοντάδων Hz, έχουν ακρίβεια γύρω στο 2% πλήρους απόκλισης και παρέχουν σχετικά υψηλή τάση εξόδου (έως και 1 V για συχνότητα 2 KHz).

### 5.1.4 Ημιαγωγικά επιταχυνσιόμετρα.

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

### 5.1.5 Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα.

Βασίζονται στη χρήση ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου, πάνω στον οποίο τοποθετείται το σώμα μάζας M. Η κατασκευή γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο κρύσταλλος να βρίσκεται σε τάση ακόμη και για μηδενική επιτάχυνση. Με τον τρόπο αυτό δεν καταπονείται στον εφελκυσμό. Αν θεωρηθεί ως έξοδος του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου η τάση “υ” και ως είσοδο η μεταβολή “ $\chi_{εξ}$ ” της διάστασης του κρυστάλλου κατά τη διεύθυνση μέτρησης τότε η συνάρτηση μεταφοράς του είναι :

$$\frac{U(s)}{X(s)} = \frac{K_k \cdot \tau \cdot s}{1 + \tau \cdot s}, \text{ όπου}$$

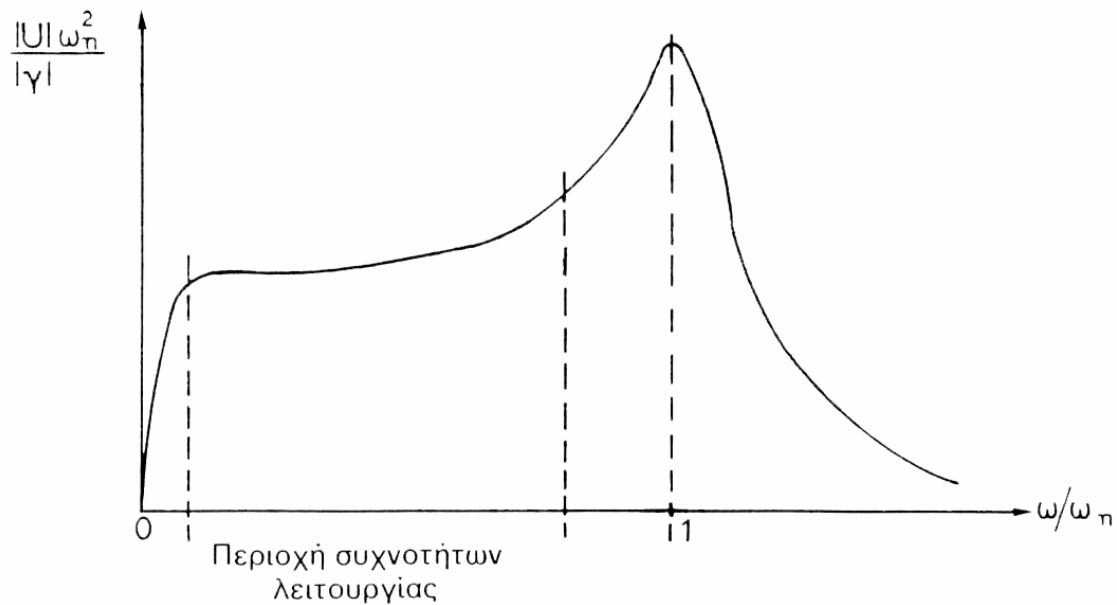
$\tau$  μια χρονική σταθερά και  $K_k$  η ευαισθησία

Με βάση τη μελέτη που έγινε για την μέτρηση της επιτάχυνσης προκύπτει:

$$\frac{U(s)}{Y(s)} = \frac{K_k \cdot \tau \cdot s}{(1 + \tau \cdot s) \cdot (s^2 + s \cdot 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n + \omega_n^2)} \Rightarrow$$

$$\frac{U(\omega)}{Y(\omega)} = \frac{(K_k \cdot \tau \cdot \omega / \omega_n^2)}{(1 + \tau \cdot j\omega) \cdot [(j\omega / \omega_n)^2 + 2 \cdot \zeta \cdot (j\omega / \omega_n) + 1]}$$

Έτσι προκύπτει το παρακάτω γράφημα:



*Γραφική παράσταση κέρδους σαν συνάρτηση του  $\omega / \omega_n$ .*

Όπως φαίνεται το πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο δεν μπορεί να λειτουργήσει ούτε σε πολύ χαμηλές ούτε σε πολύ υψηλές συχνότητες.

Τα πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων είναι:

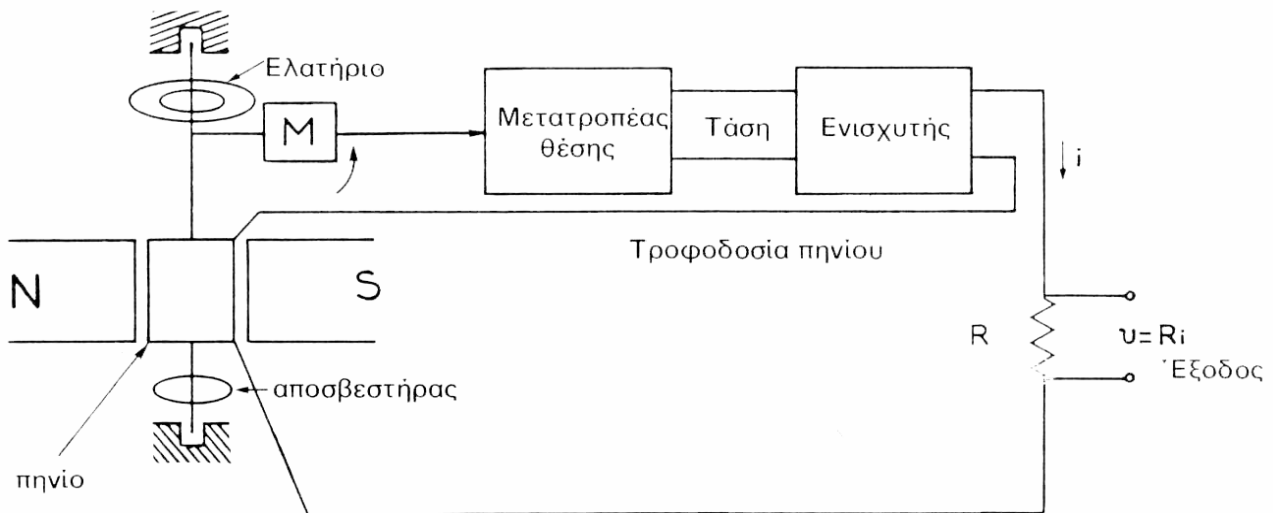
- Μεγάλη τάση εξόδου
- Μεγάλη φυσική συχνότητα  $\omega_n$  που τα καθιστά ιδανικά για μετρήσεις επιταχύνσεων που περιέχουν υψηλές αρμονικές.
- Υπάρχουν πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα με πολύ μικρό όγκο και βάρος.
- Η ευαισθησία τους φτάνει και μέχρι 100 mV / g.
- Η ευαισθησία κάθετης διεύθυνσης είναι περίπου 5 %
- Η μεταβολή της ευαισθησίας λόγω θερμοκρασίας είναι γύρω στα 10 % για ακραίες θερμοκρασίες λειτουργίας.
- Η περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας μπορεί να φτάσει μερικές δεκάδες KHz.
- Η ακρίβεια τους είναι της τάξης του 1% της πλήρους κλίμακας.
- Οι μέγιστες ενδείξεις των πιεζοηλεκτρικών επιταχυνσιομέτρων είναι έως μερικές χιλιάδες g.

Το μειονέκτημα τους είναι η αδυναμία να μετρήσουν σταθερή επιτάχυνση.

Σημαντική παράμετρος επιλογής αποτελεί η ευαισθησία κάθετης διεύθυνσης που παρουσιάζει το επιταχυνσιόμετρο σε επιταχύνσεις κάθετες προς τη διεύθυνση λειτουργίας του.

### Επιταχυνσιόμετρα κλειστού βρόγχου

Τα συγκεκριμένα επιταχυνσιόμετρα διαθέτουν μεγαλύτερη ακρίβεια από τα επιταχυνσιόμετρα ανοικτού βρόγχου. Δεν διαθέτουν ελατήριο ή άλλο ελαστικό υλικό, αλλά μόνο μια μάζα “M” πάνω στην οποία όταν εμφανιστεί επιτάχυνση  $\gamma$ , ασκείται μια αδρανειακή δύναμη  $F = M \cdot \gamma$ , η οποία τείνει να κινήσει την μάζα. Η μετακίνηση αυτή μετρείται με κάποιο μετατροπέα θέσης και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα ανάλογου μεγέθους, το οποίο ενισχύεται και τροφοδοτεί ένα ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα εξόδου. Η δύναμη που προκύπτει εφαρμόζεται στη μάζα και εξισορροπεί την αδρανειακή δύναμη. Το ρεύμα που τροφοδοτεί τον ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα εξόδου έχει ένταση ανάλογη της επιτάχυνσης. Σημειώνεται ότι το ρόλο του ελατηρίου παίζει η μαγνητική ροπή. Αποτέλεσμα της μη ύπαρξης του ελατηρίου είναι η καλύτερη γραμμικότητα του συστήματος.



*Αρχή λειτουργίας ενός επιταχυνσιόμετρου κλειστού βρόγχου.*

Τα επιταχυνσιόμετρα αυτά έχουν περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας μέχρι 100 Hz και μετρούν επιταχύνσεις από μερικά g έως αρκετές δεκάδες g. Η τάση εξόδου για μέγιστη επιτάχυνση είναι γύρω στα  $\pm 7.5V$ . Η ευαισθησία που παρουσιάζουν στη κάθετη διεύθυνση είναι συνήθως 0.01-0.1% ενώ η ακρίβεια είναι καλύτερη από 0.1% της πλήρους κλίμακας. Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ευαισθησία είναι μικρή (0.02% / °C). Σημαντικό στοιχείο είναι ότι το βάρος του είναι μερικές δεκάδες γραμμάρια.



## 6 Μέτρηση Πίεσης

### 6.1 Συσκευές μέτρηση πίεσης.

Οι διάφορες συσκευές για μέτρηση πίεσης χωρίζονται σε δύο βασικούς τύπους :

**Στον τύπο σύγκρισης δύναμης.** Χρησιμοποιούνται μανόμετρα και διατάξεις ζύγισης, όπου η πίεση μετριέται μέσω της δύναμης που εξασκείται σε μια επιφάνεια γνωστού εμβαδού.

**Στον τύπο ελαστικής παραμόρφωσης.** Χρησιμοποιούνται ελαστικά μηχανικά στοιχεία τα οποία παραμορφώνονται κάτω από την επίδραση της πίεσης.

Οι μετρητές πίεσης συγκρίνουν την πίεση που πρόκειται να μετρηθεί με μια πίεση αναφοράς. Ανάλογα με την πίεση αναφοράς χωρίζονται στις κατηγορίες :

**Σχετικής πίεσης ως προς την ατμοσφαιρική.** Συγκρίνουν την μετρούμενη πίεση με την ατμοσφαιρική.

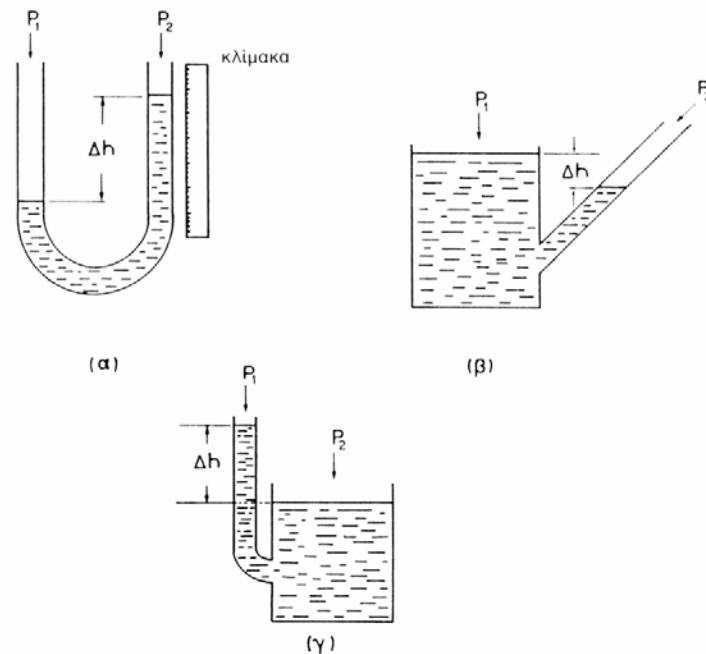
**Σχετικής πίεσης.** Συγκρίνουν την μετρούμενη πίεση με την πίεση που υπάρχει σ' ένα σφραγισμένο χώρο μέσα στο μετρητή.

**Απόλυτης πίεσης.** Μετρούν την πίεση ως προς το κενό.

**Διαφορικής πίεσης.** Αναφέρονται στη διαφορά της μέτρησης δύο πιέσεων.

### 6.1.1 Μανόμετρα και διατάξεις ζύγισης.

Διάφοροι τύποι μανομέτρων:



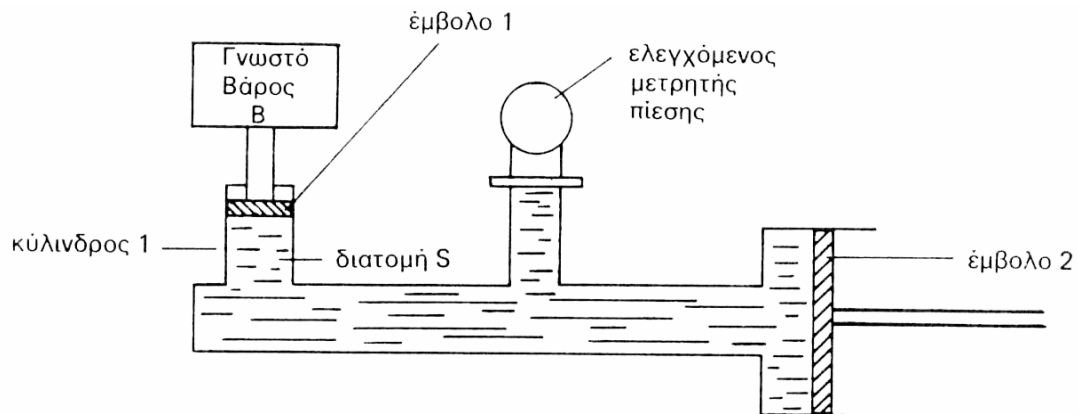
Μανόμετρα. α) Τύπου U. β) Με σωλήνα υπό κλίση. γ) Διαφορετικής διατομής.

Τα μανόμετρα συγκρίνουν την άγνωστη πίεση με την πίεση που δημιουργείται από μια στήλη υγρού, το οποίο είναι συνήθως υδράργυρος. Συγκεκριμένα αν “g” η επιτάχυνση της βαρύτητας στο σημείο μέτρησης και “ρ” η ειδική μάζα του υγρού, τότε η διαφορά της πίεσης  $P_1$  και  $P_2$  είναι:

$$\Delta P = |P_1 - P_2| = \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

Η θερμοκρασία επηρεάζει την μέτρηση της πίεσης γιατί μεταβάλλει την ειδική μάζα του υγρού. Η ακρίβεια της μέτρησης είναι περίπου 0.3 % της μέγιστης ένδειξης.

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



*Αρχή λειτουργίας διάταξης ζύγισης.*

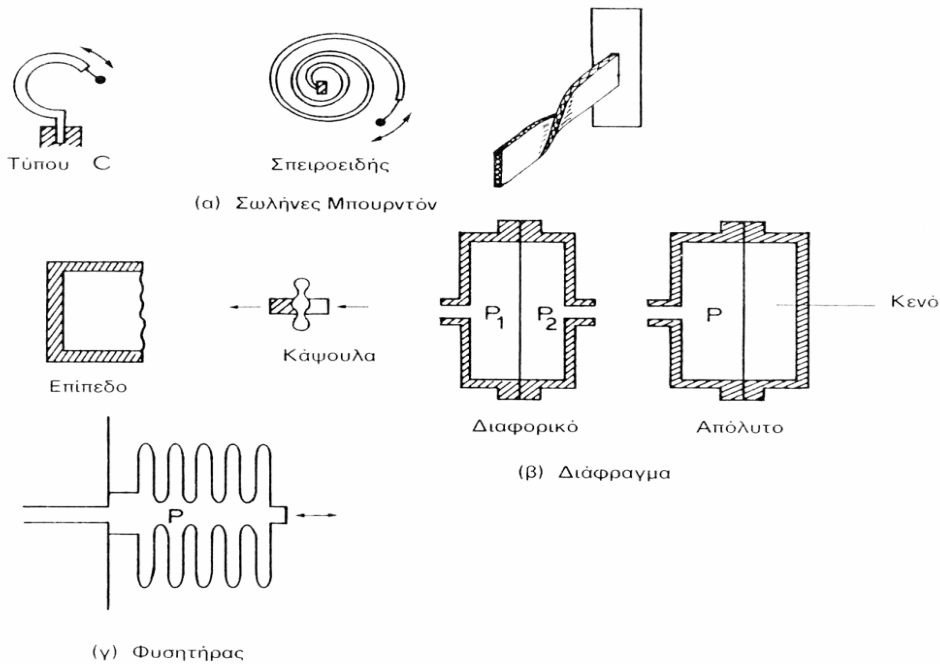
Το έμβολο 2 προωθείται προς τα μέσα, με αποτέλεσμα η πίεση “P” του υγρού αυξάνει έως ότου το έμβολο 1 με το γνωστό βάρος “B” επιπλεύσει. Ισχύει :

$$B = S \cdot P \quad , \text{ όπου “S” η διατομή του κυλίνδρου 1.}$$

Επειδή το βάρος “B” και η διατομή “S” είναι γνωστά, υπολογίζεται η πίεση “P” και συγκρίνεται με την ένδειξη του ελεγχόμενου μετρητή πίεσης. Ο υπολογισμός της πίεσης μπορεί να γίνει με ακρίβεια ακόμα και 0.01%.

**6.1.2 Ελαστικά μηχανικά στοιχεία.**

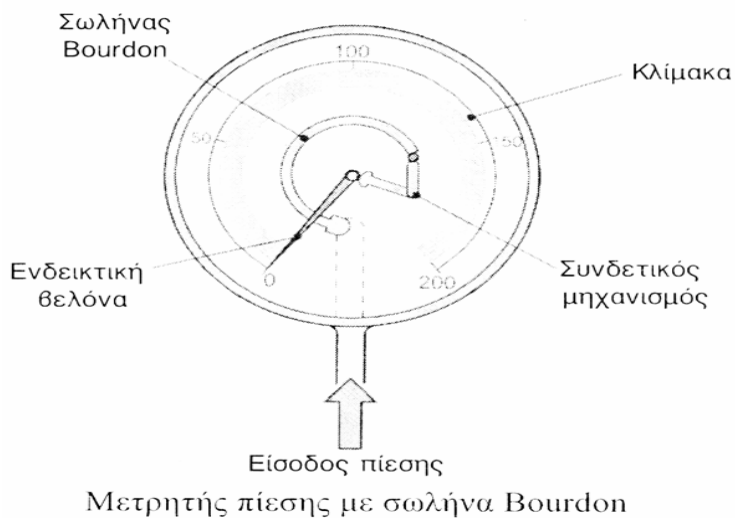
Διακρίνονται σε Σωλήνες Bourdon, Διαφράγματα και Φυσητήρες.



Ελαστικά μηχανικά στοιχεία.

**6.1.2.1 Σωλήνες Bourdon.**

Είναι σωλήνες διαφόρων σχημάτων, των οποίων η διατομή δεν είναι κυκλική. Όταν η πίεση στο εσωτερικό τους είναι μεγαλύτερη από την πίεση στο εξωτερικό τους μέρος, επέρχεται μια παραμόρφωση της διατομής η οποία τείνει να γίνει κυκλική. Αυτή η παραμόρφωση δημιουργεί λόγω του σχήματος των σωλήνων μια μετατόπιση του ελεύθερου άκρου τους ή μια περιστροφή ανάλογα με τον τύπο τους. Η μετατόπιση αυτή μπορεί να μετρηθεί με κάποιο δείκτη ή με κάποιο μετατροπέα θέσης.

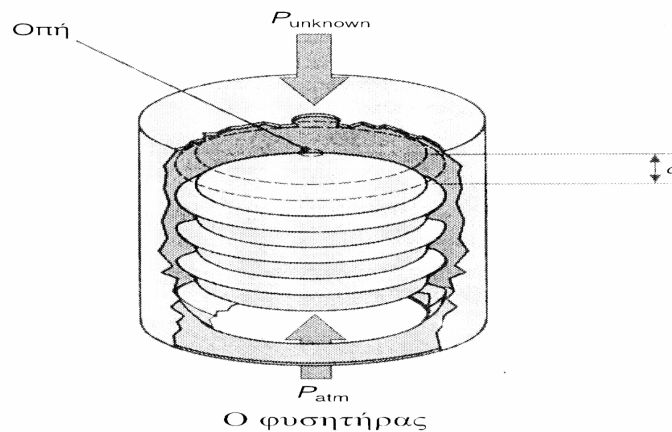


### 6.1.2.2 Διαφράγματα.

Ένας μετατροπέας πίεσης αυτού του τύπου αποτελείται συνήθως από ένα διάφραγμα και ένα μετατροπέα θέσης που μετράει την μετατόπιση λόγω παραμόρφωσης του κέντρου του διαφράγματος. Η παραμόρφωση που υφίστανται το διάφραγμα πρέπει να είναι μικρή για να υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της πίεσης και της μετατόπισης.

### 6.1.2.3 Φυσητήρες.

Είναι διαφορικοί αισθητήρες πίεσης. Χρησιμοποιούνται για μικρές πιέσεις συνήθως μικρότερες από μερικές δεκάδες ατμόσφαιρες.



Είναι κατασκευασμένοι από λεπτό σωλήνα κράματος χαλκού που πιέζεται και λαμβάνει τη μορφή ενός αυλακωτού φύλλου. Ο σωλήνας είναι σφραγισμένος στο ένα άκρο του και έχει μια μικρή οπή στο άλλο. Όταν εφαρμοστεί πίεση μέσω της οπής, ο φυσητήρας διαστέλλεται κατά μήκος “d”. Η πίεση που ασκείται στο φυσητήρα δίνεται από την εξίσωση:

$$P = \lambda \frac{d}{A}$$
, όπου “d” η απόσταση που διαγράφεται από το φυσητήρα, “A” το εμβαδόν διατομής του και “λ” η σταθερά του.

## 6.2 Βασικοί τύποι μετατροπέων πίεσης ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους

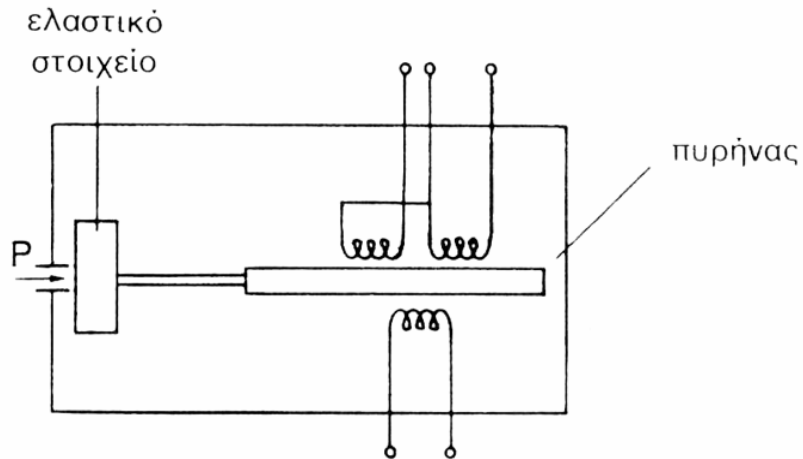
- Ο μετατροπέας με ΓΜΔΜ
- Ο επαγωγικός μετατροπέας
- Ο χωρητικός μετατροπέας
- Ο μετατροπέας με πιεζοαντίσταση
- Ο πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας
- Ο μετατροπέας με ποτενσιόμετρο
- Ο ωμικός μετατροπέας

Τα πλεονεκτήματα μετατροπέων πίεσης, έναντι άλλων μετρητών πίεσης:

- Μικρό κόστος
- Παρέχουν ως έξοδο ηλεκτρικό σήμα
- Έχουν καλή δυναμική συμπεριφορά
- Μεγάλη ακρίβεια
- Μικρό όγκο και βάρος

**6.2.1 Μετατροπέας πίεσης με ΓΜΔΜ**

Οι μετατροπείς αυτοί χρησιμοποιούν έναν ΓΜΔΜ για την μέτρηση της μετατόπισης λόγω παραμόρφωσης ελαστικού στοιχείου το οποίο μπορεί να είναι διάφραγμα, φουσητήρας ή σωλήνας Bourdon.

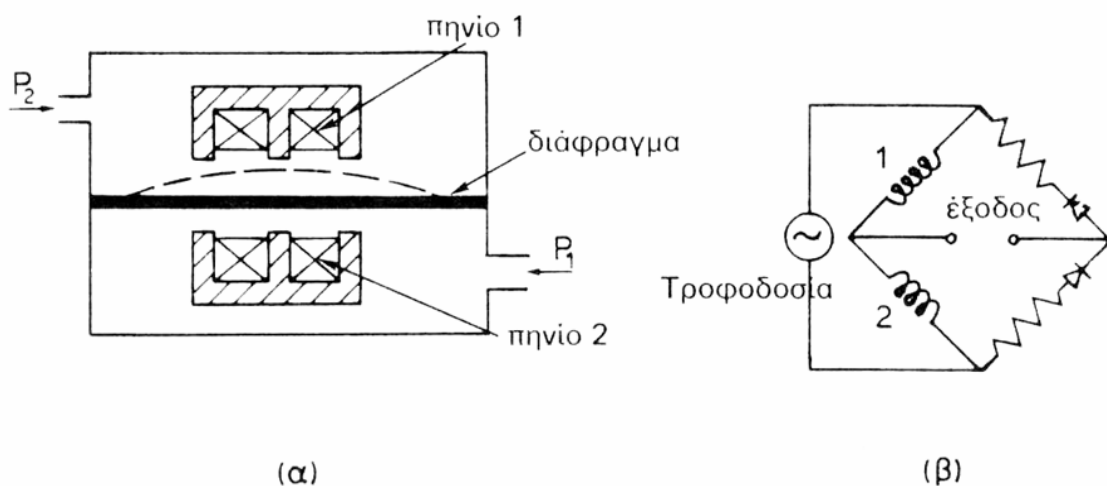


*Αρχή λειτουργίας μετατροπέα με ΓΜΔΜ.*

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

**6.2.2 Επαγωγικοί μετατροπείς πίεσης**

Διαθέτουν διάφραγμα από ανοξείδωτο χάλυβα το οποίο παίζει το ρόλο του οπλισμού σε δύο πηνία.

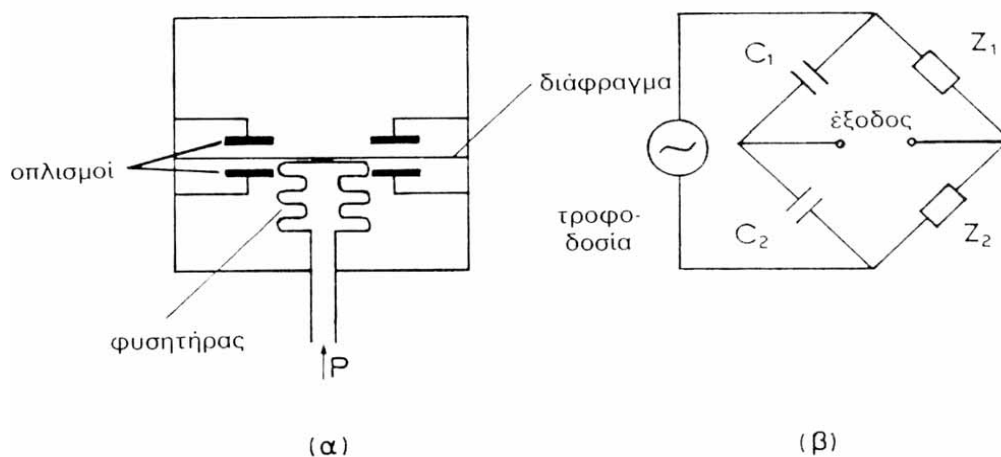


*Αρχή λειτουργίας επαγωγικού μετατροπέα πίεσης.*

Τα δύο πηνία συνδέονται σε γέφυρα. Όταν παραμορφωθεί το διάφραγμα λόγω της ασκούμενης πίεσης η αυτεπαγωγή του ενός πηνίου αυξάνει ενώ του άλλου μικραίνει. Έτσι διαταράσσεται η ισορροπία της γέφυρας και η έξοδος της είναι ανάλογη της πίεσης. Μετρούν πιέσεις μέχρι εκατοντάδες  $\text{Kp/cm}^2$ , έχουν ακρίβεια έως και 0.1% της πλήρους κλίμακας, ενώ η τάση εξόδου μπορεί να φτάσει τα 1.5 V για μέγιστη πίεση.

### 6.2.3 Χωρητικοί μετατροπείς πίεσης

Χρησιμοποιούν σαν ελαστικό στοιχείο ένα διάφραγμα, το οποίο συχνά προσκολλάται σ' ένα φυσητήρα. Η πίεση ασκείται στο φυσητήρα, ο οποίος καθώς επιμηκύνεται ή συστέλλεται κινεί το διάφραγμα, το οποίο βρίσκεται μεταξύ των οπλισμών ενός ή δύο πυκνωτών.



(α) (β)  
*Αρχή λειτουργίας χωρητικού μετατροπέα πίεσης.*

Οι πυκνωτές αυτοί συνδέονται σε γέφυρα. Καθώς το διάφραγμα μετακινείται αλλάζουν οι χωρητικότητες των πυκνωτών και έτσι διαταράσσεται η ισορροπία της γέφυρας. Αποτέλεσμα στην έξοδο της να εμφανίζεται μια τάση που είναι ανάλογη της πίεσης.

Οι μέγιστες πιέσεις που μετρούν κυμαίνονται από μερικά δέκατα του  $\text{Kp/cm}^2$  μέχρι  $10000 \text{ Kp/cm}^2$ , με ακρίβεια καλύτερη του 1% της πλήρους κλίμακας. Η τάση εξόδου για μέγιστη πίεση είναι συνήθως 5 V.

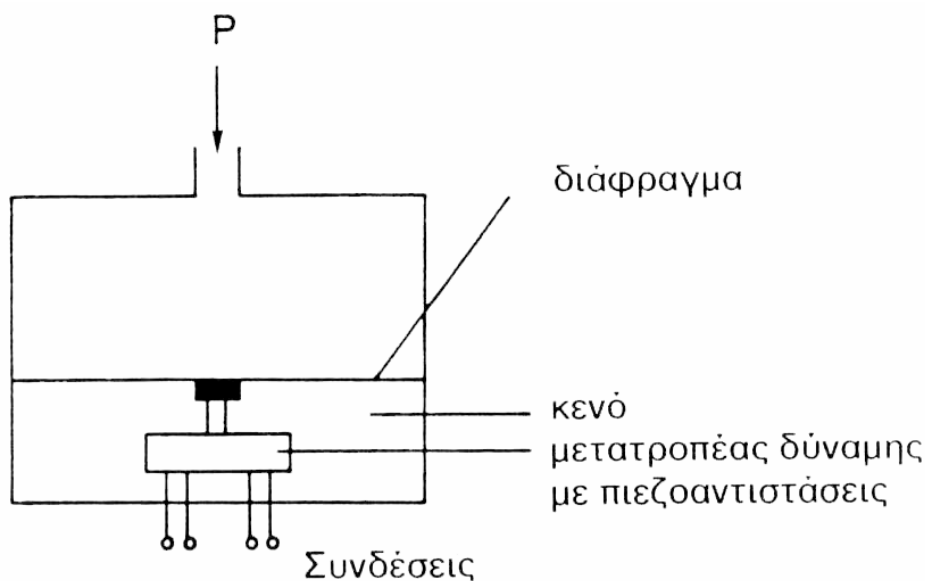


### 6.2.4 Μετατροπείς πίεσης με πιεζοαντίσταση

Χρησιμοποιούν ένα διάφραγμα σαν ελαστικό στοιχείο και ελεύθερες ή προσκολλημένες πιεζοαντιστάσεις για τη μέτρηση της μετατόπισης του κέντρου του διαφράγματος ή των τάσεων του διαφράγματος.

Οι μετατροπείς πίεσης με ελεύθερες πιεζοαντιστάσεις συνήθως μετρούν τη μετατόπιση του κέντρου του διαφράγματος. Μπορούν να μετρήσουν μέγιστες πιέσεις έως και μερικές εκατοντάδες  $\text{Kp/cm}^2$ . Η ακρίβεια τους είναι καλύτερη από 1% της πλήρους κλίμακας και παρέχουν τάση εξόδου μερικές δεκάδες mV.

Οι μετατροπείς πίεσης με προσκολλημένη πιεζοαντίσταση μετρούν την μετατόπιση του κέντρου του διαφράγματος (με χρήση μετατροπέα δύναμης) ή των τάσεων του διαφράγματος (με χρήση συνήθως τεσσάρων προσκολλημένων πιεζοαντιστάσεων στο διάφραγμα).



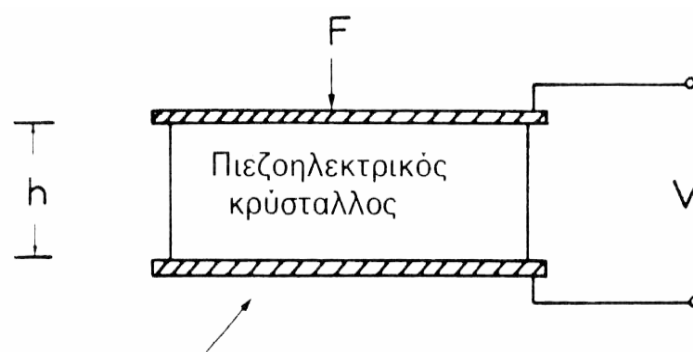
*Μετατροπέας πίεσης που χρησιμοποιεί μετατροπέα δύναμης.*

Και στις δύο περιπτώσεις οι πιεζοαντιστάσεις είναι συνδεδεμένες έτσι ώστε να αποτελούν μια γέφυρα Wheatstone. Η ακρίβεια που παρέχουν είναι καλύτερη από το 0.5% της πλήρους κλίμακας και μπορούν να μετρήσουν πιέσεις από μερικά δέκατα του  $\text{Kp/cm}^2$  έως και μερικές χιλιάδες  $\text{Kp/cm}^2$ . Η τάση εξόδου για μέγιστη πίεση είναι μερικά mV.

### 6.2.5 Πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς πίεσης

Συνήθως χρησιμοποιούνται κρύσταλλοι χαλαζία σε μορφή δίσκου, οι οποίοι τοποθετούνται ο ένας πάνω στον άλλον. Οι κρύσταλλοι συμπιέζονται από δύο μεταλλικές πλάκες. Η ενασκούμενη πίεση μεταβάλλει τη συμπίεση των κρυστάλλων και έτσι παράγεται μια τάση εξόδου σύμφωνα με το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Έστω ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος διατομής “S” και ύψους “h”, πάνω στον οποίο ασκείται μια δύναμη “F”.



διατομή S

Πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος.

Το μέτρο ελαστικότητας Young “E” του κρυστάλλου ορίζεται ως το πηλίκο της τάσεως προς την ανηγμένη επιμήκυνση.

$$E = \frac{F/S}{x/h} = \frac{F \cdot h}{x \cdot S}, \text{ όπου “x” η μεταβολή του ύψους του κρυστάλλου.}$$

$$\text{Οπότε } F = K_1 \cdot x, \text{ όπου } K_1 = E \cdot S/h$$

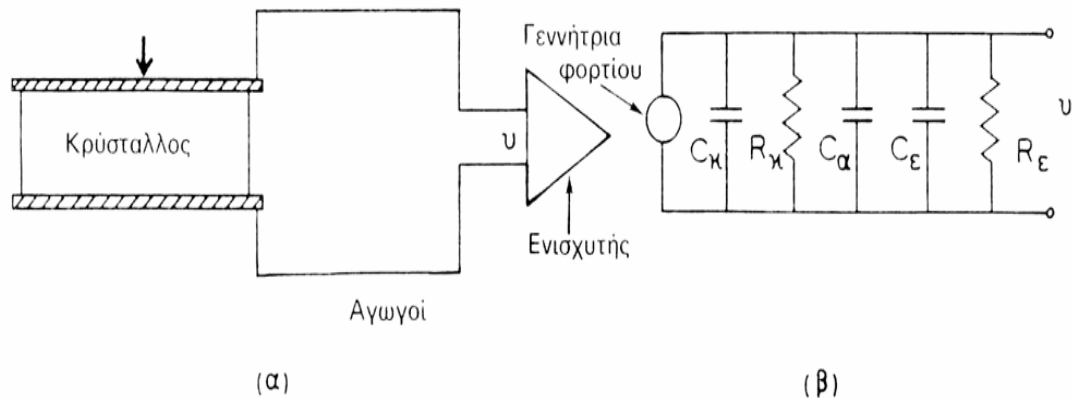
$$\text{Επειδή } P = F/S \text{ προκύπτει ότι } P = \frac{E}{h} \cdot x$$

Το ηλεκτρικό φορτίο που αναπτύσσεται στον κρύσταλλο είναι :

$$Q = r \cdot F = r \cdot E \cdot S/h \cdot x, \text{ όπου “r” ο πιεζοηλεκτρικός συντελεστής του κρυστάλλου.}$$

Το φορτίο με τη σειρά του θα αναπτύξει μία τάση  $U = Q/C$  στα άκρα του κρυστάλλου, όπου “C” η χωρητικότητα του. Λόγω του γεγονότος ότι ο κρύσταλλος εμφανίζει μια ωμική αντίσταση της τάξεως των δεκάδων GΩ, η τάση του δεν θα παραμείνει μόνιμα αλλά θα υπάρχουν κάποιες απώλειες.

Για τη μέτρηση της τάσεως ο κρύσταλλος συνδέεται μ' έναν ενισχυτή.



Πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας (κρύσταλλος και ενισχυτής)

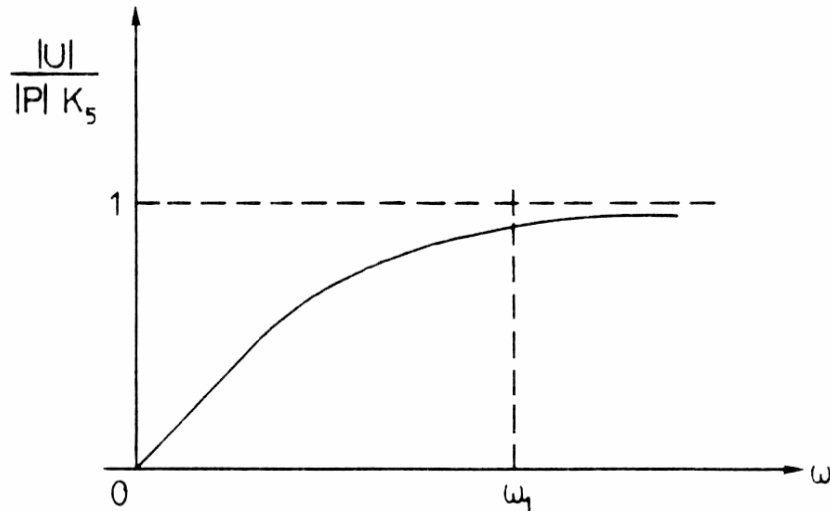
Εφαρμόζοντας τον νόμο του Kirchhoff και στην συνέχεια το μετασχηματισμό Laplace στο παραπάνω κύκλωμα προκύπτει:

$$\frac{U(s)}{P(s)} = \frac{r \cdot S}{C} \cdot \tau \cdot s \quad \text{όπου } \tau = R \cdot C \text{ και "}\tau\text{" η χρονική του σταθερά.}$$

Οπότε η ημιτονοειδής συνάρτηση μεταφοράς είναι:

$$\frac{U(\omega)}{P(\omega)} = \frac{K \cdot \tau \cdot j\omega}{1 + \tau \cdot j\omega}, \quad \text{όπου } K = \frac{r \cdot S}{C}$$

Το κανονικοποιημένο κέρδος  $\left| \frac{U}{P \cdot K_5} \right|$  του μετατροπέα παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα:



*Η καμπύλη του κανονικοποιημένου κέρδους του πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα.*

Όπως προκύπτει η περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας του μετατροπέα είναι για  $\omega > \omega_1$ . Η κυκλική συχνότητα  $\omega_1$  για την οποία το κανονικοποιημένο κέρδος είναι 0.95 ισούται με  $\omega_1 = 3.04 / \tau$ .

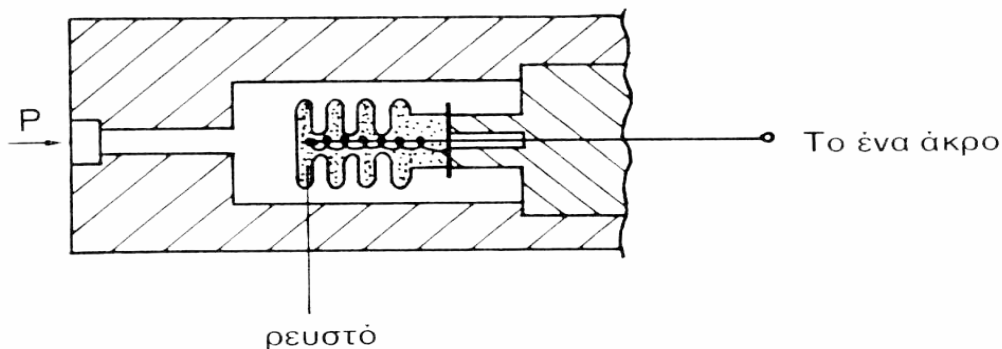
Σημειώνεται ότι οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπέες πίεσης χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση γρήγορα μεταβαλλόμενης πίεσης. Οι μέγιστες πιέσεις που μετρούν είναι συνήθως από 1 Kp/cm<sup>2</sup> μέχρι χιλιάδες Kp/cm<sup>2</sup>, ενώ η αντίστοιχη μέγιστη τάση είναι μερικά V. Η ακρίβεια τους είναι συνήθως 1% της πλήρους κλίμακας, ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας τους δεν ξεπερνάει τους 200 °C.

### 6.2.6 Μετατροπείς πίεσης με ποτενσιόμετρο

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

### 6.2.7 Ωμικοί μετατροπείς πίεσης

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



*Ωμικός μετατροπέας πίεσης.*

Η μαγγανίνη βρίσκεται συνήθως υπό την μορφή ελατηρίου μέσα σ' ένα ρευστό. Η πίεση μεταδίδεται στο ρευστό και έτσι η μαγγανίνη βρίσκεται κάτω από υδροστατική πίεση. Το ένα άκρο του ελατηρίου συνδέεται στο μεταλλικό σώμα του μετατροπέα και το άλλο μονωμένο οδηγείται έξω από τον μετατροπέα. Η αντίσταση συνδέεται σε γέφυρα Wheatstone για την ανίχνευση της μεταβολής της. Η αντίσταση της μαγγανίνης αλλάζει γραμμικά με την πίεση συνήθως κατά  $0.25\% / 1000 \text{ Kp/cm}^2$ . Οι ωμικοί μετατροπείς πίεσης χρησιμοποιούνται για πιέσεις μεγαλύτερες από  $7000 \text{ Kp/cm}^2$  και μέχρι  $14000 \text{ Kp/cm}^2$ , με ακρίβεια γύρω στο 0.5 % της πλήρους κλίμακας.

## 7 Μέτρηση ροής υγρών

### 7.1 Θεωρία

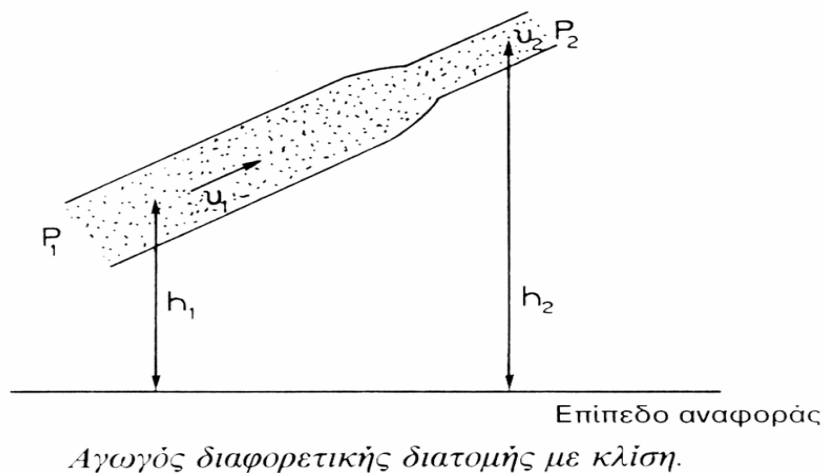
Οι μετρήσεις αυτές αφορούν υγρά και αέρια. Η βασική εξίσωση της υδροδυναμικής (Bernoulli) για ένα ασυμπίεστο ρευστό χωρίς τριβές είναι:

$$P + \rho \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 = \text{σταθ.},$$

όπου “P” η υδροστατική πίεση, “ρ” η πυκνότητα, “g” η επιτάχυνση της βαρύτητας, “h” το ύψος που βρίσκεται το ρευστό σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς και “v” η ταχύτητα σ’ ένα σημείο του ρευστού.

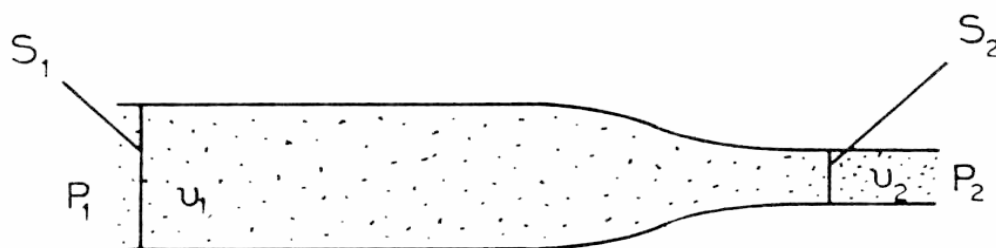
Για την περίπτωση σωλήνα με κλίση η εξίσωση Bernoulli γράφεται :

$$P_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 = P_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2$$



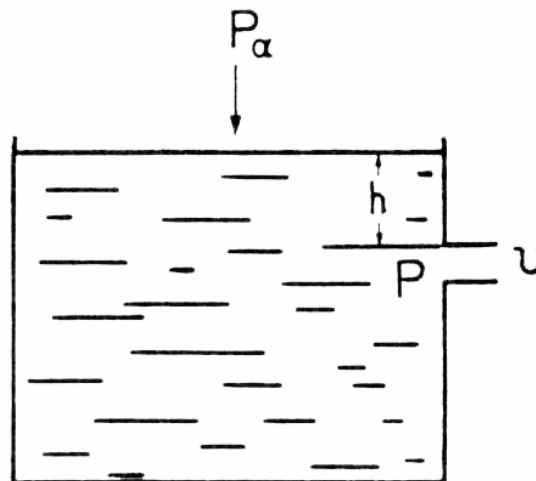
Μια άλλη σημαντική εξίσωση είναι η εξίσωση συνέχειας. Για ροή ασυμπίεστου ρευστού με ομοιόμορφη ταχύτητα ισχύει η εξίσωση:

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$



Οριζόντιος αγωγός διαφορετικής διατομής.

Έστω το δοχείο του ακόλουθου σχήματος το οποίο έχει ένα στόμιο.



*Δοχείο με στόμιο.*

Θεωρώντας ότι το υγρό είναι ασυμπίεστο και χωρίς τριβές ισχύει:

$$P + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 = P_\alpha \Rightarrow P_\alpha - P = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2$$

Επίσης ισχύει:

$$P_\alpha - P = \rho \cdot g \cdot h$$

Οπότε η ταχύτητα εκροής “ $v$ ” είναι:

$$v = \sqrt{2g \cdot h}$$

Η παροχή του ρευστού δίνεται από την σχέση:

$$Q(\text{όγκος/sec}) = S \cdot v = S \sqrt{2g \cdot h}$$

όπου “ $S$ ” η διατομή του στομίου.

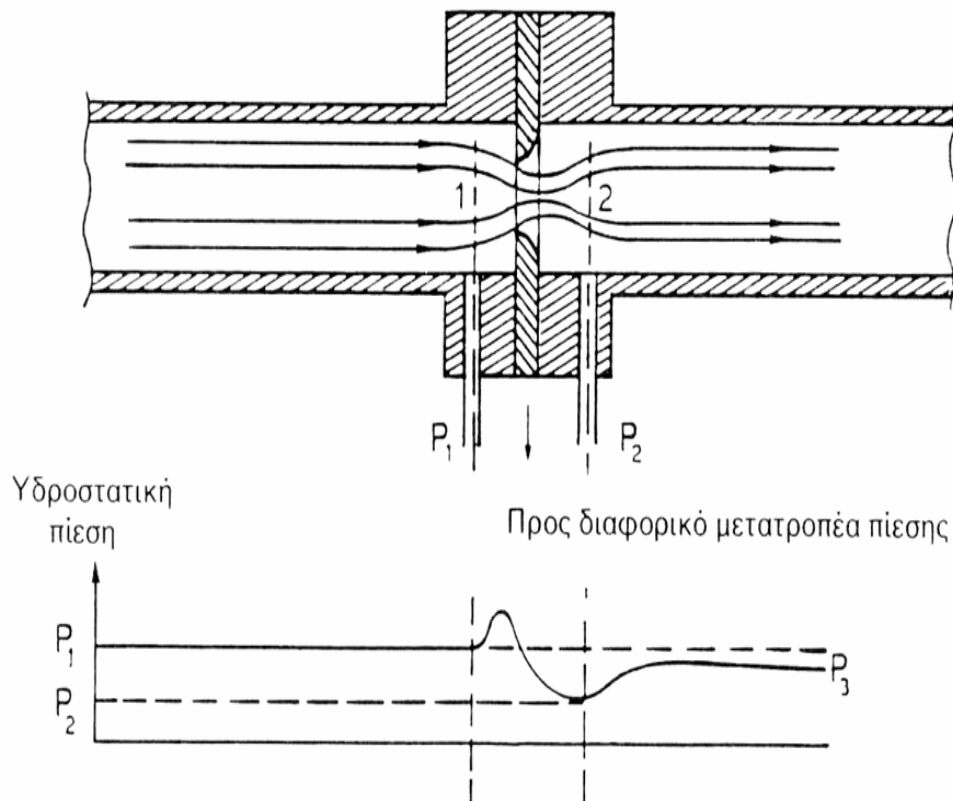
## 7.2 Είδη μετρητών ροής

Τα βασικότερα είδη μετρητών ροής είναι:

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

### 7.2.1 Μετρητές παροχής διαφορικού τύπου

Μετρούν τη παροχή βάση της διαφοράς πίεσης σε δύο σημεία του ρευστού. Για τη δημιουργία της διαφοράς πίεσης χρησιμοποιείται κάποιο εμπόδιο, όπως ένα διάφραγμα ή αλλαγή της διατομής του σωλήνα. Η αρχή λειτουργίας του μετρητή διαφράγματος φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



*Αρχή λειτουργίας μετρητή διαφράγματος.*

Για ρευστά ασυμπίεστα και χωρίς τριβές ισχύουν οι εξισώσεις της συνέχειας και του Bernoulli. Έτσι προκύπτει:

$$Q = \frac{S_2}{\sqrt{1 - (S_2/S_1)^2}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

όπου  $S_1$ ,  $P_1$  και  $S_2$ ,  $P_2$  η διατομή της ροής και η πίεση αντίστοιχα στις θέσεις 1 και 2.

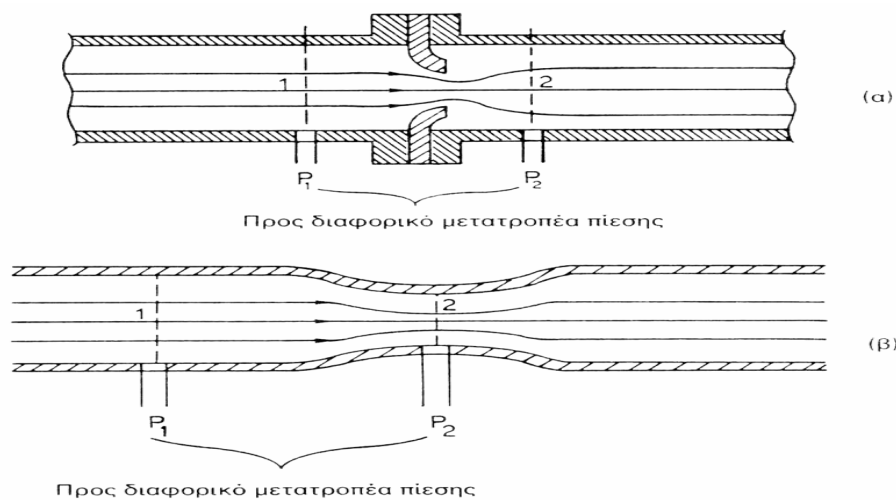
Οι διατομές  $S_1$  και  $S_2$  δεν είναι σταθερές αλλά καθορίζονται από τη διατομή του σωλήνα όσο και από τη διατομή του διαφράγματος. Επιπλέον η ύπαρξη τριβής σ' ένα πραγματικό ρευστό επηρεάζει τη διαφορά πίεσης μεταξύ δύο σημείων. Οπότε σε μη ιδανική περίπτωση υπεισέρχεται ένας συντελεστής "C" που καλείται συντελεστής εκροής.



Κατά συνέπεια η παροχή “Q” δίνεται από την σχέση:

$$Q = C \cdot \frac{S_2}{\sqrt{1 - (S_2/S_1)^2}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

Η μεταβολή της πίεσης που δημιουργεί το διάφραγμα μπορεί να δημιουργηθεί και με άλλους τρόπους, όπως με ακροφύσια ή σωλήνες Venturi.



α) Αρχή λειτουργίας μετρητή ακροφυσίου. β) Αρχή λειτουργίας μετρητή Venturi.

Το πλεονέκτημα των μετρητών ακροφυσίου και Venturi εν συγκρίσει με τους μετρητές διαφράγματος είναι ο μεγαλύτερος συντελεστής εκροή που παρουσιάζουν και κατά συνέπεια η μικρότερη απώλεια πίεσης.

Τα σημαντικά πλεονεκτήματα των μετρητών παροχής διαφορικού τύπου είναι :

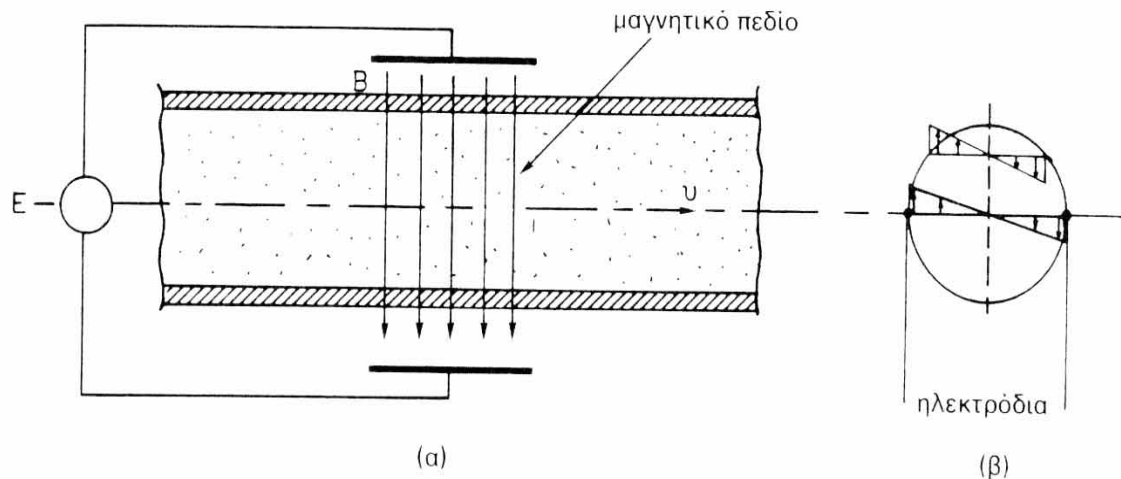
- Μικρό κόστος κατασκευής
- Χρησιμοποιούνται για πολλά υγρά και αέρια
- Δεν έχουν κινούμενα μέρη

Τα κύρια μειονεκτήματα τους είναι:

- Εμφανίζουν απώλεια πίεσης.
- Έχουν μικρή περιοχή μέτρησης.
- Η ακρίβεια τους εξαρτάται από τον συντελεστή εκροής ο οποίος επηρεάζεται από το είδος της ροής.
- Η εναπόθεση υλικού και η διάβρωση που εμφανίζεται με το χρόνο προκαλούν σφάλματα.

### 7.2.2 Ηλεκτρομαγνητικοί μετρητές παροχής

Η αρχή λειτουργίας ενός ηλεκτρομαγνητικού μετρητή παροχής φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



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

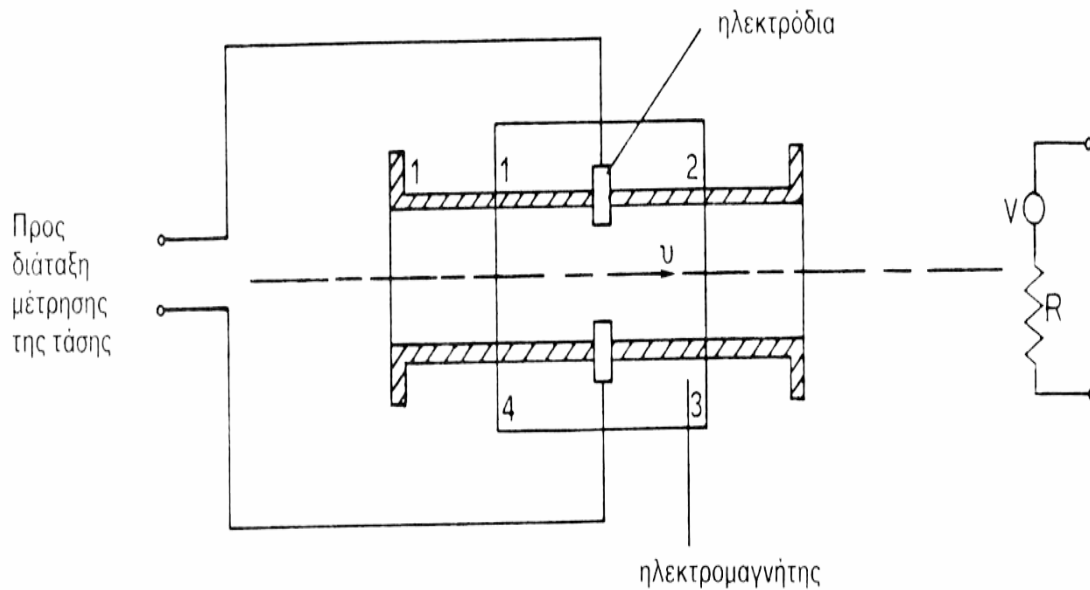
Ο σωλήνας μέσα στον οποίο ρέει το ρευστό βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από έναν ηλεκτρομαγνήτη. Ο ηλεκτρομαγνήτης μπορεί να τροφοδοτείται με συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα. Ας θεωρήσουμε κατ' αρχήν ότι ο ηλεκτρομαγνήτης τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Το ρευστό θεωρείται αγώγιμο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

Για στατικό μαγνητικό πεδίο με επαγωγή “ $B$ ” η τάση αυτή ισούται με:

$$V = B \cdot d \cdot v, \text{ όπου “}d\text{” η διάμετρος του σωλήνα και “}v\text{” ταχύτητα ροής.}$$

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

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



*Τμήμα του σωλήνα του μετρητή με τις φλάντζες και τα ηλεκτρόδια.*

Αν η τροφοδοσία του ηλεκτρομαγνήτη είναι εναλλασσόμενη, τότε η τάση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων είναι:

$$V = B \cdot d \cdot v \cdot \sin \omega t + K \cdot \omega \cdot B \cdot \cos \omega t ,$$

όπου K μία σταθερά.

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

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

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

Η παροχή είναι:

$$Q = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot v \Rightarrow Q = \pi \cdot \frac{d}{4} \cdot \frac{V}{B}$$

Τα πλεονεκτήματα του ηλεκτρομαγνητικού μετρητή παροχής είναι:

- Καλή ακρίβεια, περίπου 1% της μέγιστης ένδειξης.
- Μεγάλη γραμμική περιοχή.
- Καλή δυναμική συμπεριφορά.
- Δεν περιέχει εμπόδια πράγμα που σημαίνει ότι δεν εμφανίζεται απώλεια πίεσης.
- Η μέτρηση δεν επηρεάζεται από την πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού.
- Μπορεί να μετρήσει την ταχύτητα και προς τις δύο φορές ροής, γιατί αλλάζει το πρόσημο της επαγόμενης τάσης όταν αλλάζει η φορά ροής.

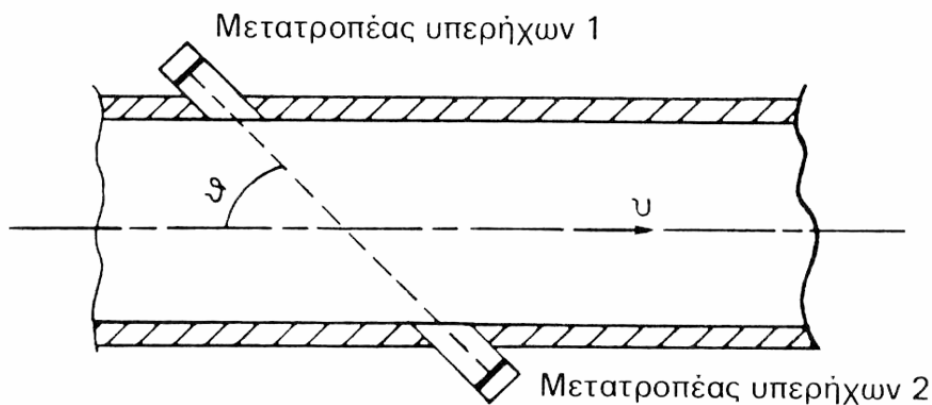
### 7.2.3 Μετρητές παροχής με υπερήχους

Τα είδη μετρητών παροχής με υπερήχους είναι:

- Μετρητές παροχής χρόνου μετάβασης
- Μετρητές παροχής Doppler
- Άλλοι μετρητές ροής

#### Μετρητές παροχής χρόνου μετάβασης

Η αρχή λειτουργίας αυτών των μετρητών φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα :



*Αρχή λειτουργίας μετρητού παροχής χρόνου μετάβασης.*

Δύο μετατροπείς υπερήχων εκπέμπουν και λαμβάνουν υπό γωνία σε σχέση με την διεύθυνση ροής. Ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσουν οι υπέρηχοι από τον μετατροπέα 1 στον 2 είναι  $T_{12}$ , ενώ ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσουν οι υπέρηχοι από τον μετατροπέα 2 στον 1 είναι  $T_{21}$ .

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

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

Επειδή  $u \gg v \cos \theta$  προκύπτει η σχέση:

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

όπου “ $Q$ ” η παροχή, “ $S$ ” η διατομή του σωλήνα.

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

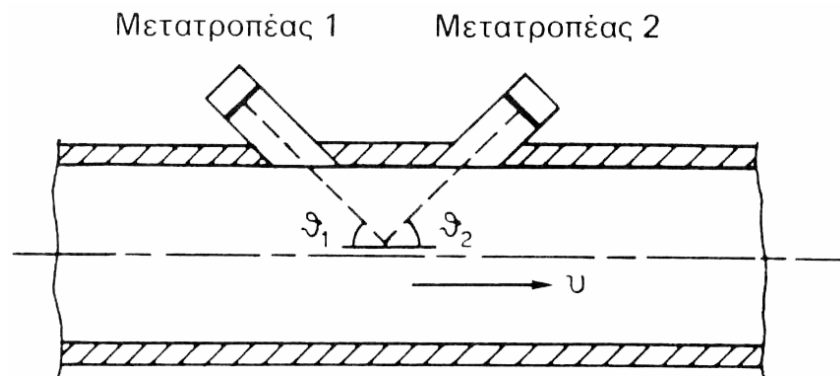
$$\frac{\Delta T}{T_{21} \cdot T_{12}} = \frac{\sin 2\theta}{d} v = \frac{\sin 2\theta}{S \cdot d} Q$$

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

Για τη μέτρηση της ποσότητας  $\frac{\Delta T}{T_{21} \cdot T_{12}}$  χρησιμοποιούνται δύο μετατροπείς που λειτουργούν σαν πομποί και δέκτες. Οι μετρητές αυτοί έχουν συνήθως ακρίβεια περίπου 1% της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας για σωλίνες με κατάλληλη διάμετρο.

### Μετρητές παροχής Doppler

Η αρχή λειτουργία τους φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



*Αρχή λειτουργίας μετρητή παροχής Doppler.*

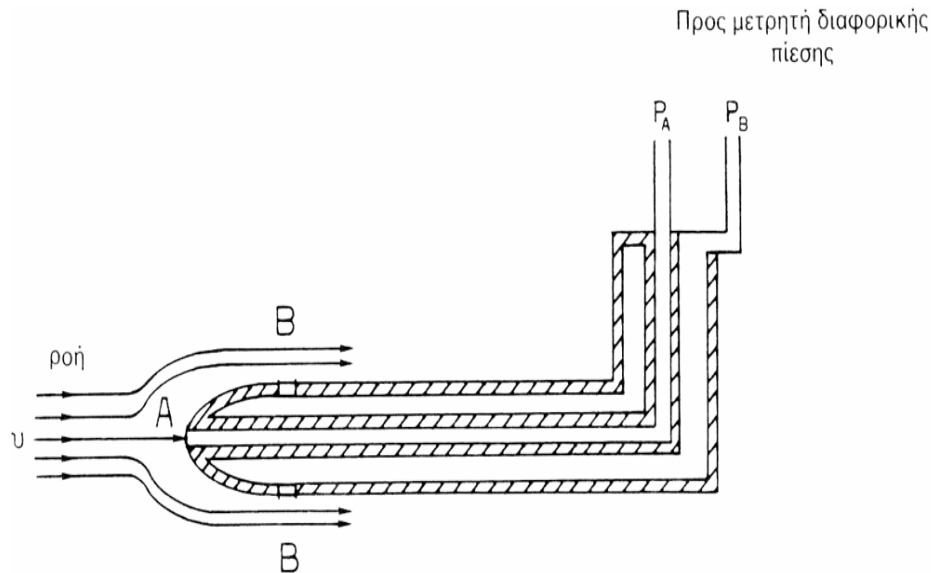
Ο μετατροπέας 1 είναι ο πομπός και ο 2 ο δέκτης. Για να χρησιμοποιηθεί αυτός ο μετρητής πρέπει να υπάρχουν μέσα στη ροή σωματίδια επάνω στα οποία θα ανακλαστούν οι υπέρηχοι. Το σήμα που εκπέμπεται είναι ημιτονοειδές με συχνότητα  $f_\varepsilon$ . Το σήμα που λαμβάνεται από τον μετατροπέα 2 θα έχει συχνότητα  $f_\lambda$  η οποία λόγω του φαινομένου Doppler συνδέεται με την  $f_\varepsilon$  μέσω σχέσης:

$$f_\lambda - f_\varepsilon = f_\varepsilon \cdot \frac{v}{u} \cdot \left( \cos \theta_1 + \frac{f_\lambda}{f_\varepsilon} \cos \theta_2 \right)$$

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

### Άλλοι μετρητές ροής

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η αρχή λειτουργίας του σωλήνα Pitot.



*Αρχή λειτουργίας σωλήνα Pitot.*

Για να χρησιμοποιηθούν πρέπει να είναι γνωστή η διεύθυνση της ταχύτητας. Μεγάλη εφαρμογή βρίσκουν οι σωλήνες Pitot στην μέτρηση ταχύτητας αεροπλάνων. Η οπή A βρίσκεται στην κορυφή του σωλήνα ενώ στις πλευρές του υπάρχουν μερικές οπές B. Ο σωλήνας προσανατολίζεται προς την ροή της οποίας η ταχύτητα είναι “u”. Η οπή A είναι κάθετη προς την ροή. Στη θέση B επικρατεί η κανονική πίεση του ρευστού, ενώ στην θέση A η πίεση είναι μεγαλύτερη.

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

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

όπου “ρ” η πυκνότητα του ρευστού, “u” η ταχύτητα ροής του, “P<sub>A</sub>” και “P<sub>B</sub>” οι πιέσεις στα σημεία A και B αντίστοιχα.

Η διαφορά πιέσεων P<sub>A</sub> και P<sub>B</sub> μετρείται με ένα διαφορικό μετατροπέα πίεσης και στην συνέχεια υπολογίζεται η ταχύτητα “u”. Η διάμετρος του σωλήνα Pitot πρέπει να είναι πολύ μικρή (θεωρητικά μηδενική) για να μην διαταράσσεται η ροή.

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

## 8 Μέτρηση Στάθμης υγρών

Οι πιο βασικοί μετρητές στάθμης υγρών είναι:

- Οι μετρητές με μέτρηση πίεσης.
- Οι μετρητές με βυθιζόμενο σώμα.
- Οι μετρητές με επιπλέον σώμα.
- Οι μετρητές με χωρητικό μετατροπέα.

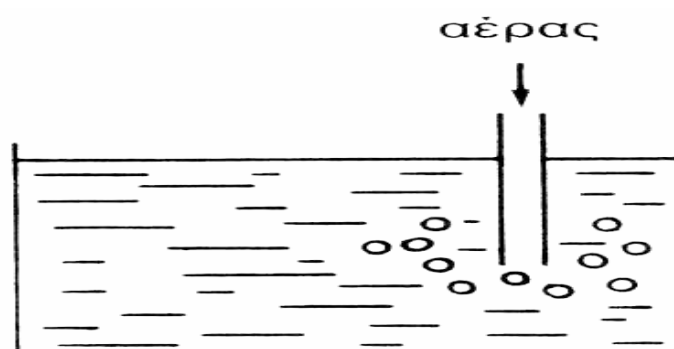
### 8.1 Μετρητές με μέτρηση πίεσης

Οι μετρητές με μέτρηση πίεσης μετρούν την υδροστατική πίεση “P” του υγρού σε κάποιο σημείο. Η πίεση αυτή είναι :

$$P = \rho \cdot g \cdot h ,$$

όπου “ $\rho$ ” η πυκνότητα του υγρού, “g” η επιτάχυνση της βαρύτητας και “h” η στάθμη του υγρού.

Η μέτρηση της πίεσης μπορεί να γίνει με παροχή αέρα. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου με παροχή αέρα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



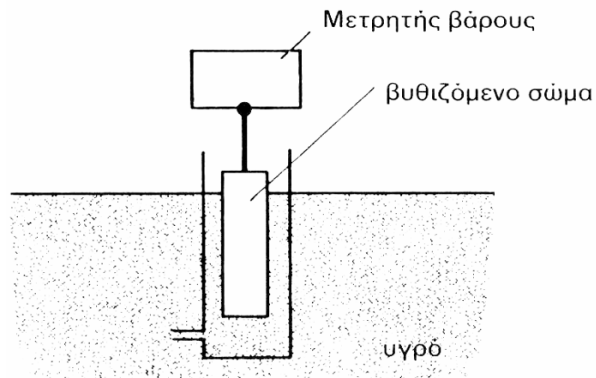
*Μέθοδος με παροχή αέρα.*

Ένας σωλήνας βυθίζεται μέσα στο υγρό, μέσα από τον οποίο διοχετεύεται αέρας με τόση πίεση όση χρειάζεται για να αρχίσουν να βγαίνουν φυσαλίδες από το κάτω άκρο του σωλήνα. Τότε η πίεση του αέρα ισούται με την πίεση που επικρατεί στο κάτω άκρο του σωλήνα. Η πίεση του αέρα μετριέται με έναν μετατροπέα πίεσης και αποτελεί ένα μέτρο της στάθμης.



## 8.2 Οι μετρητές με βυθιζόμενο σώμα.

Η αρχή λειτουργίας του μετρητή στάθμης με βυθιζόμενο σώμα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:

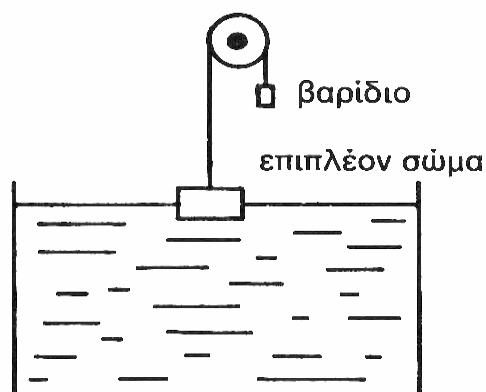


*Μετρητής στάθμης με βυθιζόμενο σώμα.*

Ένα σώμα με ειδικό βάρος μεγαλύτερο από το ειδικό βάρος του υγρού εμβαπτίζεται μέσα στο υγρό. Η διαφορά του άγνωστου βάρους με το βάρος του σώματος που εμβαπτίζεται είναι ανάλογη της στάθμης του υγρού.

## 8.3 Οι μετρητές με επιπλέον σώμα

Οι μετρητές με επιπλέον σώμα μετρούν την στάθμη ενός υγρού μετρώντας την θέση του επιπλέοντος σώματος.

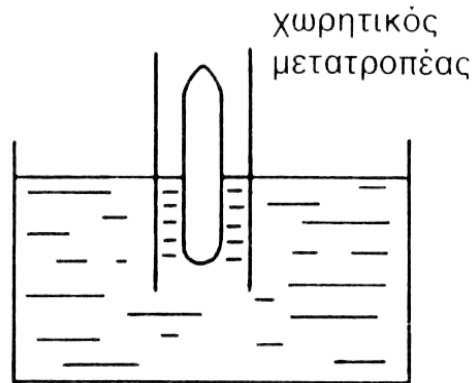


*Μετρητής με επιπλέον σώμα.*

Το βαρίδι ισορροπεί το φαινόμενο βάρος του επιπλέοντος σώματος. Αν ανεβεί ή κατεβεί η στάθμη θα ανεβεί ή θα κατεβεί και το επιπλέον σώμα και η τροχαλία θα περιστραφεί αντίστοιχα. Η περιστροφή της τροχαλίας αντιστοιχεί στην μεταβολή της στάθμης.

#### 8.4 Οι μετρητές με χωρητικό μετατροπέα.

Χρησιμοποιούν έναν χωρητικό μετατροπέα ο οποίος βυθίζεται κατά ένα μέρος στο υγρό. Το υγρό εισέρχεται μεταξύ των οπλισμών του και παίζει ρόλο διηλεκτρικού :



*Αρχή μετρητή στάθμης με χωρητικό μετατροπέα.*

Ο πυκνωτής συνήθως αποτελείται από δύο ομόκεντρους σωλήνες μεταξύ των οποίων μπαίνει το υγρό καθώς ο μετατροπέας βυθίζεται μέσα στο υγρό. Ο μετρητής αυτός δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί προφανώς για αγώγιμα υγρά.

#### 8.5 Οι μετρητές με υπερήχους, ηλεκτρομαγνητική εκπομπή ή laser.

Συχνά μετριέται η απόσταση μεταξύ ενός πομπού και της επιφάνειας του υγρού η οποία χρησιμοποιείται σαν ανακλαστήρας.

## 9 Μέτρηση θερμοκρασίας

Οι πιο συνηθισμένες κλίμακες για τη μέτρηση της θερμοκρασίας είναι η κλίμακα Κελσίου ( $^{\circ}\text{C}$ ), η κλίμακα Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ) και η κλίμακα Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ). Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας ορίζεται μια κλίμακα βάσει των σημείων τήξης ή βρασμού των υλικών, επειδή τα διάφορα σημεία της αναπαράγονται εύκολα με πολύ μεγάλη ακρίβεια.

- Στην κλίμακα Κελσίου ορίζεται το σημείο πήξης του νερού  $0^{\circ}\text{C}$  και η θερμοκρασία βρασμού του νερού σε  $100^{\circ}\text{C}$ .
- Στην κλίμακα Fahrenheit το σημείο πήξης του νερού είναι σε  $32^{\circ}\text{F}$  και το σημείο βρασμού του νερού σε  $212^{\circ}\text{F}$ .
- Στην κλίμακα Kelvin ορίζεται το σημείο πήξης του νερού στους  $273,16^{\circ}\text{K}$  και το σημείο βρασμού του στους  $373,15^{\circ}\text{K}$ .

Η εξίσωση που συνδέει βαθμούς Κελσίου και Fahrenheit είναι:

$$F = \frac{9}{5}C + 32$$

Οι βασικοί μετατροπείς για την μέτρηση της θερμοκρασίας είναι:

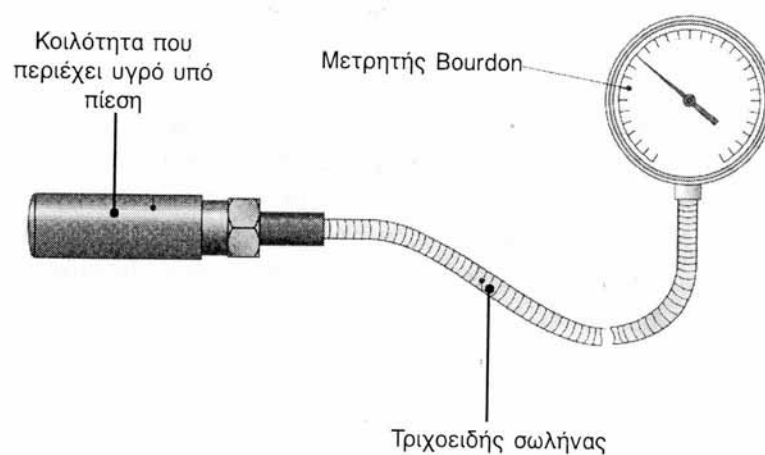
- Τα θερμόμετρα διαστολής.
- Τα θερμοζεύγη.
- Οι μετατροπείς αντίστασης μετάλλου.
- Τα Θερμίστορ.
- Οι ημιαγωγικοί μετατροπείς θερμοκρασίας.

## 9.1 Θερμόμετρα διαστολής

Τα πιο παλιά και πιο γνωστά θερμόμετρα είναι τα θερμόμετρα διαστολής που χρησιμοποιούν κάποιο υγρό μέσα σε γυάλινο σωλήνα. Τα πιο συνηθισμένα υγρά που χρησιμοποιούνται είναι ο υδράργυρος (σημείο πήξης  $-38,9^{\circ}\text{C}$ ) και το οινόπνευμα (σημείο πήξης  $-62,2^{\circ}\text{C}$ ). Οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες που μετρούν θερμόμετρα με υγρό είναι γύρω στους  $500^{\circ}\text{C}$ . Η ακρίβεια τους μπορεί να είναι πολύ καλή μέχρι μερικά εκατοστά του βαθμού Κελσίου.



Θερμόμετρο υγρού

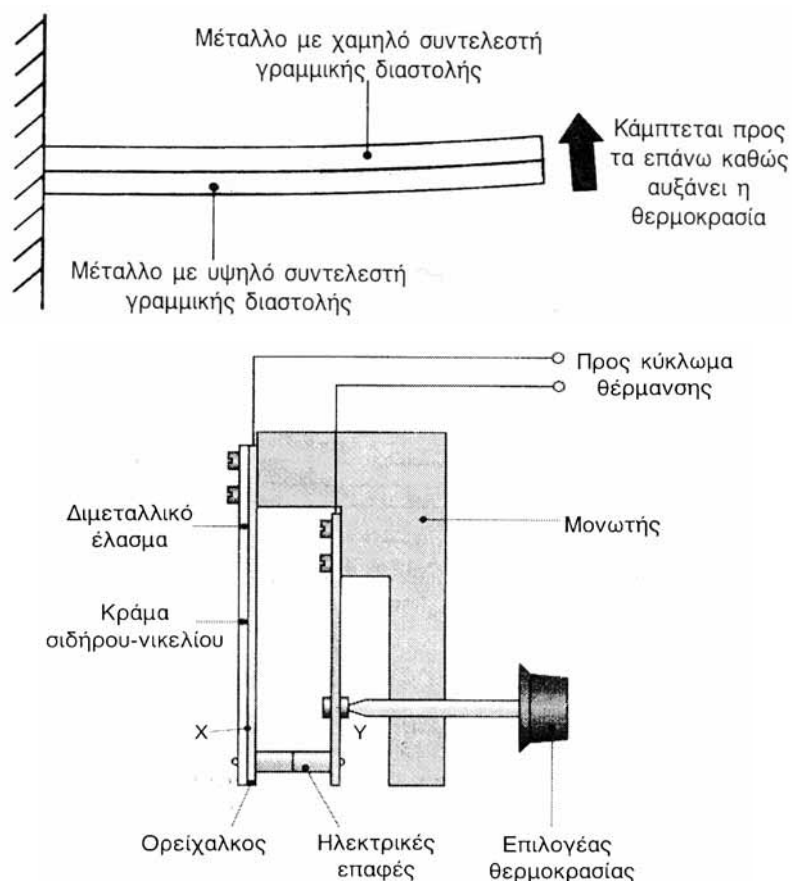


Μεταλλικό θερμόμετρο

Ανάλογα με το ποσοστό εμβάπτισης ενός θερμομέτρου μέσα σ' ένα ρευστό, τα θερμομέτρα διαστολής υγρού διακρίνονται σε πλήρους εμβάπτισης και μερικής εμβάπτισης. Όταν ένα θερμομέτρο μετράει την θερμοκρασία ενός ρευστού και δεν είναι ολόκληρο μέσα στο ρευστό, η μέτρηση επηρεάζεται από την ροή θερμότητας που δημιουργείται λόγω του ότι τα δύο του άκρα βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Τα θερμομέτρα πλήρους εμβάπτισης έχουν μικρότερο σφάλμα από θερμομέτρα μερικής εμβάπτισης. Τα καλά θερμομέτρα πλήρους εμβάπτισης μπορούν να φθάσουν μέχρι μερικά εκατοστά του βαθμού Κελσίου απόλυτο σφάλμα για θερμοκρασίες από  $0^{\circ}\text{C}$  έως  $100^{\circ}\text{C}$ .

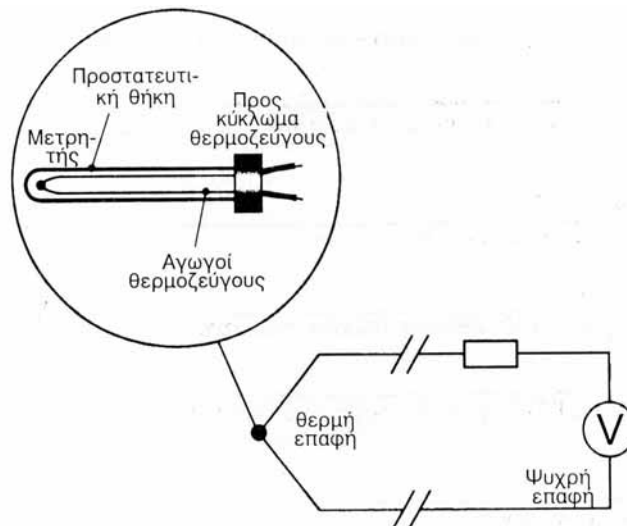
Εκτός από υγρά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αέρια σαν μέσο διαστολής. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της πίεσης, η οποία στην συνέχεια μετριέται με κάποιον μετατροπέα πίεσης. Τα θερμομέτρα αυτά λέγονται θερμομέτρα πίεσης.

Τέλος υπάρχουν και τα διμεταλλικά θερμομέτρα τα οποία χρησιμοποιούν δύο διαφορετικά μεταλλικά ελάσματα με διαφορετικό συντελεστή διαστολής τα οποία προσκολλώνται το ένα πάνω στο άλλο. Αν μεταβληθεί η θερμοκρασία τα δύο μέταλλα διαστέλλονται κατά διαφορετική ποσότητα και έτσι επέρχεται παραμόρφωση η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία. Διμεταλλικά στοιχεία χρησιμοποιούνται σαν θερμομέτρα αλλά και σαν απλούς διακόπτες διακοπής και αποκατάστασης και υπερέντασης σε ηλεκτρικά φορτία.

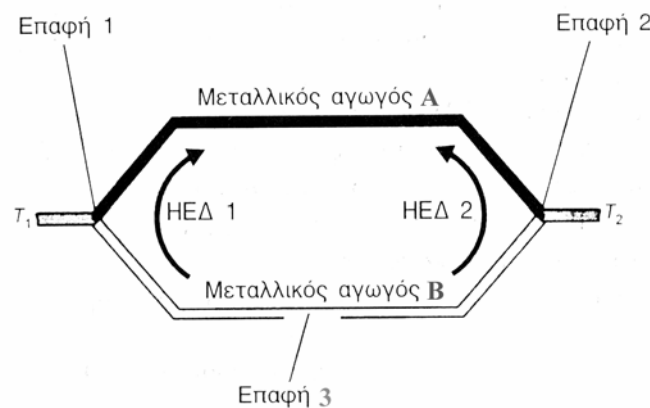


## 9.2 Θερμοζεύγη

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  $I = E / R$ ,

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 άπειρης εσωτερικής αντίστασης η ένδειξη του βολτομέτρου θα είναι ίση με την θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη E.

Οι κυριότεροι τύπου θερμοζευγών φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί :

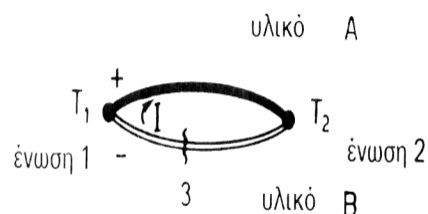
Σύμβολο	Είδος	Περιοχή λειτουργίας (°C)	Μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία (°C)	Μέγιστο σχετικό σφάλμα (%)
T	Χαλκός / κονσταντάν (99,9%Cu/55%Cu + 45%Ni)	-250 έως 400	500	±0,4
E	Χρωμιοκικέλιο / κονσταντάν(-90% Ni + 10% Cr / 55% Cu + 45% Ni)	-200 έως 850	1100	±0,5
J	Σίδηρος / κονσταντάν (99,9%Fe/55%Cu + 45%Ni)	-200 έως 850	1100	±0,4
K	Χρωμιοκικέλιο / Αλουμέλ (90% Ni + 10% Cr / 95% Ni + 2% Al + 2%Mn+1%Si)	-200 έως 1100	1300	±0,75
R	Λευκόχρυσος / Λευκόχρυσος, ρόδιο(13%) (100%Pt/87%Pt+13%Rh)	0-1400	1650	±0,5
S	Λευκόχρυσος / Λευκόχρυσος, ρόδιο (10%) (100%Pt/90%+10%Rh)	0-1400	1650	±0,5
B	Λευκόχρυσος, ρόδιο / Λευκόχρυσος, ρόδιο (94% Pt + 6% Rh / 70% Pt + 30% Rh)	0-1500	1700	±0,5

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° 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.

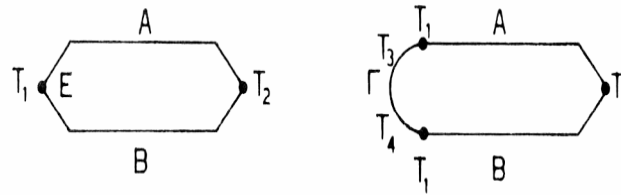
Για την χρήση ενός θερμοζεύγους οι παρακάτω ιδιότητες είναι πολύ χρήσιμες :

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



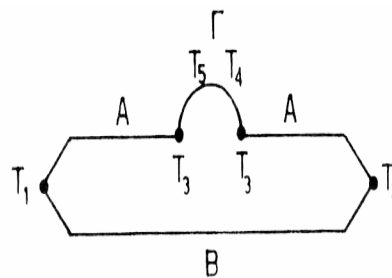
β) Ας υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία της ένωσης 1 είναι  $T_1$ , και της 2 είναι  $T_2$  όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα και ότι η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη είναι  $E$ .





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

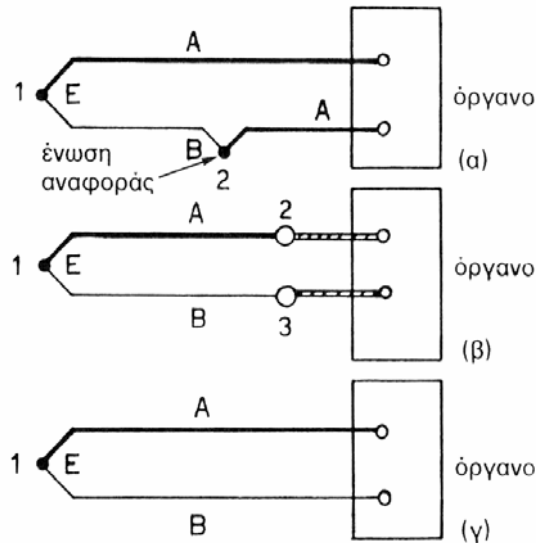
γ) Αν κοπεί ένα από τα δύο υλικά A ή B και παρεμβληθεί ένα άλλο υλικό  $\Gamma$ , η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη δεν μεταβάλλεται με την προϋπόθεση ότι οι ενώσεις A $\Gamma$  και  $\Gamma$ A (ή B $\Gamma$  και  $\Gamma$ B) θα είναι στην ίδια θερμοκρασία  $T_3$  ακόμη και αν η θερμοκρασία του  $\Gamma$  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  $E_1 + E_2$ .

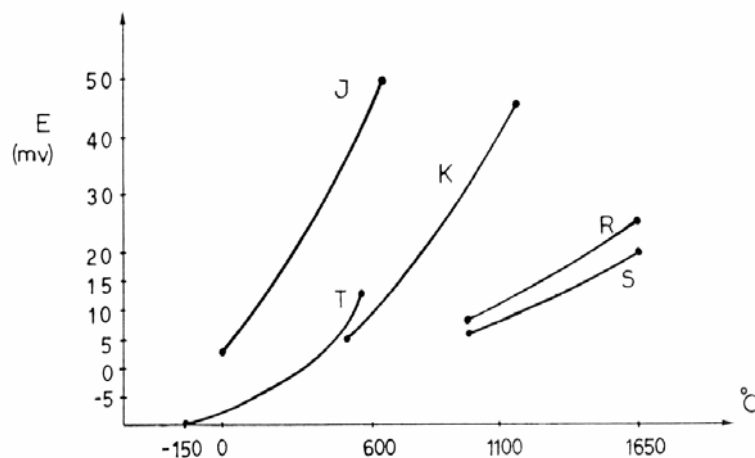
ε) Αν η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη μεταξύ των υλικών A και  $\Gamma$  είναι  $E_{A\Gamma}$  και μεταξύ των υλικών  $\Gamma$  και B είναι  $E_{\Gamma B}$  η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη μεταξύ των υλικών A και B θα είναι  $E_{A\Gamma} + E_{\Gamma B}$ .

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



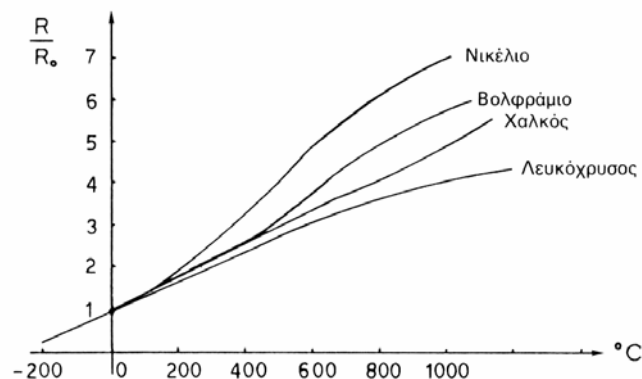
Τα θερμοζεύγη ακριβείας ρυθμίζονται ξεχωριστά για να ληφθούν υπόψη διαφορές στην ποιότητα του σύρματος που εμφανίζονται κατά την παραγωγή. Για να αποφευχθούν σφάλματα η θερμοκρασία αναφοράς πρέπει να ελέγχεται με μεγάλη ακρίβεια εκτός αν δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια.

### 9.3 Αισθητήρια θερμοκρασίας με αντίσταση

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, και
- 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  $1000^\circ\text{C}$ .



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:

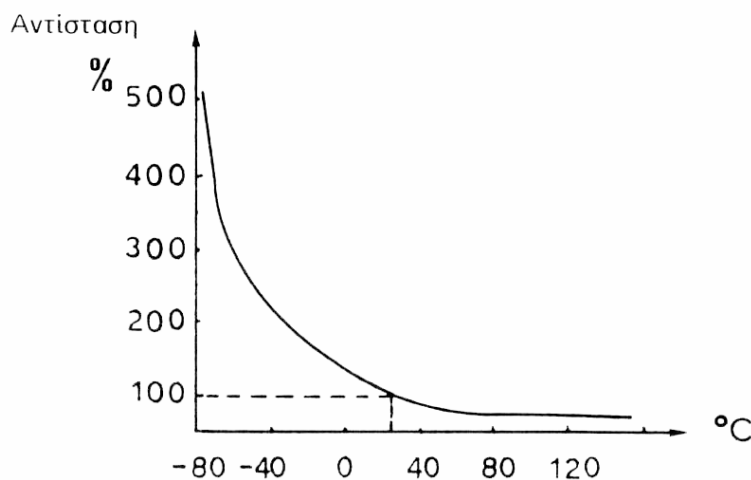
- Την μέτρηση της πτώσης τάσης που προκαλεί στο RTD η διέλευση γνωστού ρεύματος,
- Μέσω γέφυρας.

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

## 9.4 Θερμίστορ

Τα Θερμίστορ κατασκευάζονται από οξειδία μετάλλων όπως, νικελίου, μαγγανίου, ουρανίου, σιδήρου, κοβαλτίου και χαλκού και έχουν χαρακτηριστικά ημιαγωγών. Σαν αισθητήρια θερμοκρασίας η λειτουργία τους στηρίζεται στην μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης τους λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας. Η αντίσταση ενός Θερμίστορ μειώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνει αντίθετα από ότι συμβαίνει στην περίπτωση των RTD. Τα Θερμίστορ είναι πολύ ευαίσθητα αλλά και πολύ μη γραμμικά.

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται ενδεικτικά η μεταβολή της αντίστασης ενός θερμίστορ σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας.



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 αντίστασή τους, σε διάφορα σχήματα και διαστάσεις.
- Ο χρόνος απόκρισης ποικίλλει από ms μέχρι δευτερόλεπτα.
- Τα Θερμίστορ δεν έχουν πολύ μεγάλη περιοχή μέτρησης. Υπάρχουν όμως Θερμίστορ που λειτουργούν σε  $-200^{\circ}\text{C}$  καθώς και Θερμίστορ που λειτουργούν σε  $500^{\circ}\text{C}$ . Όλη αυτή η περιοχή δεν καλύπτεται βέβαια από έναν τύπο Θερμίστορ.

Τα Θερμίστορ χρησιμοποιούνται όπως και τα RTD σε σειρά με πηγή ρεύματος ή σε γέφυρα. Κατά την εκλογή Θερμίστορ πρέπει να δίνεται προσοχή στην αντίστασή του στις διάφορες θερμοκρασίες. Η αντίστασή αυτή πρέπει να έχει τιμές που προσαρμόζονται στις αντιστάσεις των συστημάτων προσαρμογής (ενισχυτές, ή βολτόμετρα, αμπερόμετρα κλπ.). Η αντίστασή 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.

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

## 9.5 Ημιαγωγικοί μετατροπείς θερμοκρασίας

Οι πιο σημαντικοί ημιαγωγικοί μετατροπείς θερμοκρασίας είναι:

- αντιστάσεις,
- δίοδοι,
- ολοκληρωμένα κυκλώματα.

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 Ohm σε δεκάδες ΚΩ.
- Οι ημιαγωγικές αντιστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε γέφυρα όπως τα RTD και τα θερμίστορ.

Η μεταβολή της τάσης σε μία δίοδο ως προς τη θερμοκρασία είναι περίπου -2,3 mV/°C για ενώσεις πυριτίου και -2,1 mV / °C για ενώσεις γερμανίου. Αυτό σημαίνει ότι αυξανόμενη 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.

## 10 Συστήματα προσαρμογής

Τα πιο σημαντικά μέρη ενός συστήματος προσαρμογής είναι:

- Οι γέφυρες
- Τα αναλογικά φίλτρα
- Οι ενισχυτές
- Οι πολυπλέκτες
- Τα κυκλώματα συγκράτησης
- Οι μετατροπείς A/D & D/A

Οι γέφυρες χρησιμοποιούνται κυρίως στα θερμίστορ και τις πιεζοαντιστάσεις.

Τα φίλτρα χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό του φάσματος του σήματος, ώστε να αποφεύγεται το σφάλμα της επικάλυψης κατά τη δειγματοληψία ενός αναλογικού σήματος. Επίσης χρησιμοποιούνται συμπλήρωμα προστατευτικών μέσων έναντι του θορύβου.

Βασικά στοιχεία στα διάφορα κυκλώματα προσαρμογής είναι οι ενισχυτές και κυρίως οι:

- Τελεστικοί ενισχυτές
- Ενισχυτές μέτρησης
- Ενισχυτές απομόνωσης

Τα πιο βασικά χαρακτηριστικά ενός τελεστικού ενισχυτή είναι:

- Το κέρδος ανοικτού βρόγχου
- Το εύρος ζώνης
- Η απόκλιση
- Η ολίσθηση
- Ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος
- Το ρεύμα πόλωσης στην είσοδο

Οι ενισχυτές μέτρησης είναι ενισχυτές σχεδιασμένοι ώστε να έχουν ακρίβεια και σταθερότητα με τον χρόνο και την θερμοκρασία. Επιπλέον έχουν μεγάλη αντίσταση εισόδου, μικρό σφάλμα μη γραμμικότητας, σταθερό κέρδος και μικρή αντίσταση εξόδου.

Πολλές φορές το κέρδος ενός ενισχυτή μπορεί να ρυθμιστεί, όποτε οι ενισχυτές αυτοί λέγονται ενισχυτές με προγραμματιζόμενο κέρδος.

Τα χαρακτηριστικά των τελεστικών ενισχυτών ισχύουν και στην περίπτωση των ενισχυτών μέτρησης και απομόνωσης.

Οι ενισχυτές απομόνωσης είναι ενισχυτές των οποίων οι εισοδοί και οι εξοδοί είναι γαλβανικά απομονωμένες μεταξύ τους και με την πηγή τροφοδοσίας.

Από πλευράς σκοπού των συστημάτων προσαρμογής διακρίνουμε:

- Την ενίσχυση
- Τον περιορισμό του φάσματος του σήματος
- Την αποκοπή του θορύβου
- Την πολύπλεξη
- Την γαλβανική απομόνωση
- Την πόλωση
- Τη γραμμικοποίηση
- Την μετατροπή του αναλογικού σε ψηφιακό και το ανάποδο