

Αισθητήρες Ημιαγωγών, Αισθητήρες Θερμικοί,
μηχανικοί, μαγνητικοί, αισθητήρες ακτινοβολίας και
χημικοί αισθητήρες

Αθανάσιος Α. Αργυρίου
Επίκουρος Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Πατρών - Τμήμα Φυσικής
Τομέας Εφαρμοσμένης Φυσικής
argiriou@physics.upatras.gr

Πάτρα, Οκτώβριος 2004

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	13
1.1	Γενικά	13
1.2	Στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων	14
1.2.1	Πιστότητα	14
1.2.2	Ακρίβεια, επαναληψιμότητα, αναπαραγωγιμότητα	15
1.2.3	Ανοχή	15
1.2.4	Εύρος	15
1.2.5	Συστηματικό σφάλμα	15
1.2.6	Γραμμική απόκριση	16
1.2.7	Ευαισθησία στη μέτρηση	16
1.2.8	Ευαισθησία στη διαταραχή	16
1.2.9	Υστέρηση	18
1.2.10	Νεκρό εύρος	19
1.2.11	Κατώφλι	19
1.2.12	Διακριτική ικανότητα	19
1.3	Δυναμικά χαρακτηριστικά	19
1.3.1	Αισθητήρας μηδενικής τάξεως	20
1.3.2	Αισθητήρας πρώτης τάξεως	21
1.3.3	Αισθητήρας δευτέρας τάξεως	22
2	Θερμοκρασία	25
2.1	Γενικά	25
2.2	Θερμοζεύγη	27
2.2.1	Γενικές αρχές – Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο	27
2.2.2	Πρακτικές μέτρησης – Θερμοκρασία αναφοράς	32
2.3	Αντιστάτες	38
2.3.1	Γενικά	38
2.3.2	Τύποι PRTs	41

2.4	Θερμίστορες	45
2.5	Ολοκληρωμένοι αισθητήρες	48
2.6	Αισθητήρες οπτικών ινών	48
2.7	Κρυογενικοί αισθητήρες	49
2.8	Αισθητήρες εξ αποστάσεως	51
2.8.1	Γενικά - Αρχή λειτουργίας	51
2.8.2	Συστήματα μέτρησης θερμικής ακτινοβολίας	54
2.8.3	Ανιχνευτές	56
2.9	Επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα θερμοκρασίας	57
2.9.1	Θερμοζεύγη	57
2.9.2	Αντιστάτες	59
2.9.3	Θερμίστορες	59
2.9.4	Ολοκληρωμένοι αισθητήρες	59
3	Πίεση	61
3.1	Γενικά	61
3.2	Είδη αισθητήρων πίεσης	66
3.2.1	Ποτενσιομετρικοί	66
3.2.2	Επαγωγικοί	66
3.2.3	Χωρητικοί	66
3.2.4	Πιεζοηλεκτρικοί	67
3.2.5	Παραμόρφωσης	67
3.2.6	Πιεζοηλεκτρικοί ολοκληρωμένοι ημιαγωγοί	67
3.3	Εγκατάσταση και χρήση	68
3.4	Υδραυλικό πλήγμα	70
4	Παραμόρφωση	73
4.1	Γενικά	73
4.2	Ο αισθητήρας παραμόρφωσης	74
4.3	Πρακτικές μέτρησης	75
5	pH	81
5.1	Γενικά	81
5.2	Μέθοδοι μέτρησης	81

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Χαρακτηριστικά εξόδου αισθητήρα	16
1.2	(a) Ολίσθηση μηδενός, (b) Ολίσθηση ευαισθησίας, (c) Συνδυασμένη επί- δραση των δύο ολισθήσεων[8].	17
1.3	Χαρακτηριστικά εξόδου αισθητήρα με υστέρηση[8].	18
1.4	Χαρακτηριστικά εξόδου αισθητήρα με νεκρό εύρος[8].	19
1.5	Χαρακτηριστικά αισθητήρα πρώτης τάξεως[8].	21
1.6	Απόκριση αισθητήρα δευτέρας τάξεως[8].	23
2.1	Θερμοζεύγος.	29
2.2	Συντελεστής Seebeck διαφόρων θερμοζευγών. Τα γράμματα αντιστοιχούν σε στους τύπους θερμοζευγών του Σχήματος 2.3 [11].	30
2.3	Τύποι θερμοζευγών και πολυωνυμικοί συντελεστές μετατροπής της τάσης Seebeck $x(V)$ σε θερμοκρασία T ($^{\circ}C$) [11].	31
2.4	Μέτρηση τάσης Seebeck με τη βοήθεια βολτομέτρου [11].	32
2.5	Εξωτερική επαφή αναφοράς [11].	33
2.6	Θερμοζεύγος σιδήρου – κονσταντάνης [11].	34
2.7	Απομάκρυνση των νέων επαφών από τους ακροδέκτες του βολτομέτρου [11].	34
2.8	Αντικατάσταση λουτρού αναφοράς από ισοθερμική βάση [11].	35
2.9	Ενωση των δύο ισοθερμικών βάσεων [11].	35
2.10	Νόμος των ενδιαμέσων μετάλλων [11].	36
2.11	Ισοδύναμο κύκλωμα μετά την απομάκρυνση του αγωγού Fe από το σκέλος LO του Σχήματος 2.8 [11].	37
2.12	Εξωτερική πηγή αναφοράς [11].	37
2.13	Ηλεκτρική αντιστάθμιση θερμοζευγών [11].	37
2.14	Η αντίσταση νικελίου (Ni), χαλκού (Cu) και λευκοχρύσου (Pt) συναρτήσει της θερμοκρασίας [10].	39
2.15	Είδη PRTs[1].	42
2.16	Τυπική διάταξη PRTs με θήκη [1].	42

2.17	Επίδραση της αντίστασης των αγωγών [11].	43
2.18	Γέφυρα Wheatstone, για μέτρηση PRT [11].	44
2.19	Πρακτικό κύκλωμα μέτρησης PRT με γέφυρα [11].	44
2.20	Τεχνική τριών αγωγών [11].	44
2.21	Μέτρηση PRT με πηγή ρεύματος και βολτόμετρο [11].	45
2.22	Μορφή θερμίστορς [1].	46
2.23	Μεταβολή της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας, για τις τρεις βασικές κατηγορίες ηλεκτρονικών αισθητήρων θερμοκρασίας [11].	47
2.24	Φασματική κατανομή του μέλανος σώματος [1].	52
2.25	Λεπτομέρεια της φασματικής κατανομής του μέλανος σώματος [1].	53
2.26	Τεχνητό μέλαν σώμα [11].	54
2.27	Γεωμετρία διάταξης μέτρησης θερμικής ακτινοβολίας. (D_d η γραμμική διάσταση του ανιχνευτή, dS το είδωλο του ανιχνευτή προβαλλόμενο στην επιφάνεια μέτρησης, S_p η επιφάνεια του ανοίγματος του συστήματος εστίασης, Ω η στερεά γωνία μεταξύ συστήματος εστίασης και ειδώλου dS	55
2.28	Μέτρηση της θερμικής ροής της προερχόμενης από στοιχειώδη επιφάνεια.	56
2.29	Σήμα εξόδου θερμικού αισθητήρα ακτινοβολίας [11].	57
3.1	Ορισμοί Πιέσεων.	63
3.2	Βασικά αισθητήρια πίεσης [4].	64
3.3	Εξάρτηση της μετατόπισης από τη θερμοκρασία [4].	64
3.4	Εξάρτηση της ευαισθησίας από τη θερμοκρασία [4].	64
3.5	Απόκλιση από τη γραμμική συμπεριφορά [4].	65
3.6	Επαναληψιμότητα [4].	65
3.7	Υστέρηση [4].	65
3.8	Ποντενσιομετρικός αισθητήρας [4].	66
3.9	Επαγωγικός αισθητήρας με γραμμικό μεταβαλλόμενο διαφορικό μετασχηματιστή [4].	67
3.10	Κατασκευή ολοκληρωμένου πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα πίεσης [4].	68
3.11	Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας πίεσης, διαστάσεων μήκους 1,32, πλάτους 1,12 και ύψους 2,54 cm, συμπεριλαμβανομένης της θύρας επικοινωνίας [4].	68
3.12	Συνδεσμολογία αισθητήρα πίεσης - σήμα εξόδου: τάση (mV) [2].	69
3.13	Συνδεσμολογία αισθητήρα πίεσης - σήμα εξόδου: τάση (V) [2].	69
3.14	Συνδεσμολογία αισθητήρα πίεσης - σήμα εξόδου: ρεύμα (mA) [2].	69
3.15	Συνδεσμολογία αισθητήρα πίεσης με σήμα εξόδου ρεύμα (mA) με περισσότερα του ενός όργανα [2].	70
4.1	Ορισμός της παραμόρφωσης.	73

4.2	Μεταλλικός αισθητήρας παραμόρφωσης [9].	74
4.3	Γέφυρα Wheatstone [9].	76
4.4	Γέφυρα Wheatstone με αισθητήρα παραμόρφωσης [9].	76
4.5	Χρήση ανενεργού αισθητήρα για αντιστάθμιση των θερμοκρασιακών μεταβολών [9].	77
4.6	Διάταξη δύο ενεργών αισθητήρων [9].	77
4.7	Γέφυρα τεσσάρων αισθητήρων παραμόρφωσης [9].	78
4.8	Επίδραση της αντίστασης των αγωγών [9].	79
5.1	Ηλεκτρόδιο υάλου [6].	82
5.2	Διάταξη μέτρησης pH [6].	83

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Δυνατότητες μέτρησης θερμοκρασίας.	26
2.2	Χαρακτηριστικά διαφόρων αισθητήρων θερμοκρασίας.	28
2.3	Ανοχή αισθητήρων PRT	41
2.4	Τυπικά χαρακτηριστικά θερμίστορ 44004 YSI.	47
2.5	Κατηγορίες και ιδιότητες κρυογενικών αισθητήρων [1].	50
2.6	Χαρακτηριστικά αισθητήρων υπέρυθρης ακτινοβολίας.	58
3.1	Μονάδες πίεσης.	62

Πρόλογος

Οι σημειώσεις αυτές γράφτηκαν για τους φοιτητές του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Ηλεκτρονική και Επεξεργασία της Πληροφορίας, του Πανεπιστημίου Πατρών. Αποτελούν την ενότητα «Αισθητήρες ημιαγωγών, αισθητήρες θερμικοί, μηχανικοί, μαγνητικοί, αισθητήρες ακτινοβολίας και χημικοί αισθητήρες», του μαθήματος «Αισθητήρες, μικροελεγκτές και συστήματα συλλογής δεδομένων».

Πρόκειται για τη δεύτερη έκδοση του τεύχους αυτού, το οποίο χρησιμοποίησα για πρώτη φορά κατά την ακαδημαϊκή χρονιά 2003 – 2004. Προσπάθησα, στο μέτρο του δυνατού, να προχωρήσω σε ορισμένες διορθώσεις και βελτιώσεις. Ελπίζω στο μέλλον οι βελτιώσεις αυτές να γίνουν ακόμη περισσότερες. Οι υποδείξεις όλων των αναγνωστών είναι ιδιαίτερα ευπρόσδεκτες.

Πάτρα, Οκτώβριος 2004
Αθανάσιος Α. Αργυρίου
argiriou@physics.upatras.gr

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η σημασία των αισθητήρων για τον άνθρωπο είναι σχεδόν αυτονόητη. Οι πρώτοι αισθητήρες εμφανίζονται μαζί με τα έμβια όντα και αποτελούν όργανά τους. Το μάτι και το αφτί είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα: το πρώτο ανιχνεύει τμήμα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και το δεύτερο τον ήχο, δηλαδή κύματα πίεσης. Πολύ αργότερα, ο άνθρωπος συνειδητοποιεί ότι χρειάζεται όργανα μέτρησης για να λύσει καθημερινά πρακτικά προβλήματα, όπως αυτό της μέτρησης του μήκους, του βάρους ή του όγκου. Στη συνέχεια η επιθυμία του ανθρώπου να γνωρίσει τη Φύση αλλά και διάφοροι πρακτικοί λόγοι, δημιουργούν την ανάγκη μέτρησης περισσότερων φυσικών μεγεθών. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι το πρώτο θερμομέτρο εμφανίζεται το 1585, ενώ το βαρόμετρο το 1643 [12].

Οι πρώτοι αισθητήρες και όργανα μέτρησης είναι μηχανικά. Η αρχή λειτουργίας του πρώτου θερμομέτρου βασίζεται στη μεταβολή των διαστάσεων των σωμάτων με την θερμοκρασία, ενώ του βαρομέτρου στην μεταβολή της στάθμης ενός ρευστού ανάλογα με την ασκούμενη σε αυτό πίεση. Η συστηματική μελέτη του ηλεκτρισμού οδήγησε στην ανάπτυξη νέων αισθητήρων - ηλεκτρικών -, η έξοδος των οποίων ήταν ένα αναλογικό σήμα. Η ανάπτυξη των ημιαγωγών είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αισθητήρων ημιαγωγών αλλά και ψηφιακών οργάνων μέτρησης.

Για να συνειδητοποιήσει κανείς τη ραγδαία εξέλιξη στον τομέα των αισθητήρων, αρκεί να θυμηθεί ότι τα αυτοκίνητα παραγωγής της δεκαετίας του '60 και του '70, περιελάμβαναν δύο μόνο απλούς ηλεκτρικούς αισθητήρες, ένα για την μέτρηση της θερμοκρασίας του ψυκτικού υγρού και ένα δεύτερο για την μέτρηση της στάθμης του καυσίμου. Τα σύγχρονα αυτοκίνητα διαθέτουν πολλαπλάσιους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την:

- μέτρηση της πίεσης των ελαστικών,
- μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα εισαγωγής,
- ανίχνευση βροχής,
- μέτρηση της φωτεινότητας του περιβάλλοντος,
- ανάγκη ενεργοποίησης των ζωνών ασφαλείας και των αερόσακων,
- ανάγκη ενεργοποίησης του συστήματος αντιμπλοκαρίσματος των τροχών

και για πληθώρα άλλων αναγκών για τις οποίες δεν μπορούμε να επεκταθούμε εδώ.

Σημαντική ώθηση στην εξέλιξη των αισθητήρων έδωσε η ανάγκη αντιμετώπισης των προβλημάτων της σύγχρονης έρευνας στις θετικές επιστήμες καθώς και της εξέλιξης της τεχνολογίας. Ενδεικτικά αναφέρονται οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στη διαστημική τεχνολογία και στη Φυσική των Σωματιδίων.

Οι μελλοντικοί εξελιγμένοι αισθητήρες αναμένεται ότι θα προκύψουν από την έρευνα στη νανοτεχνολογία και τη βιοτεχνολογία.

Στο πρώτο κεφάλαιο των σημειώσεων αναλύουμε τα γενικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων, ενώ στα επόμενα κεφάλαια εξετάζουμε συγκεκριμένους αισθητήρες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ πεδίο εργαστηριακών / ερευνητικών αλλά και βιομηχανικών εφαρμογών [8].

1.2 Στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Τα στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων αναφέρονται στην κατάσταση κατά την οποία έχει επέλθει ισορροπία μεταξύ αισθητήρα και μετρούμενου μεγέθους. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο πρέπει το μετρούμενο μέγεθος είτε να είναι σταθερό, είτε να μεταβάλλεται πολύ αργά σε σχέση με τη δυνατότητα του αισθητήρα να αντιληφθεί τη μεταβολή αυτή.

1.2.1 Πιστότητα

Με τον όρο *πιστότητα* αποδίδεται ο αγγλικός όρος *accuracy*. Η πιστότητα δε σχετίζεται με τον αριθμό των δεκαδικών ψηφίων με τον οποίο μπορεί να γίνει η μέτρηση, αλλά με το κατά πόσο το αποτέλεσμα που δίνει ο αισθητήρας πλησιάζει την φυσική πραγματικότητα, μέσα σε ένα λογικό εύρος τιμών [10]. Η πιστότητα δίνεται συνήθως ως ποσοστό επί του εύρους λειτουργίας του αισθητήρα. Αν, για παράδειγμα, ένας αισθητήρας πίεσης, περιοχής λειτουργίας 0 – 10 *bar* έχει πιστότητα $\pm 1.0\%$ της πλήρους κλίμακας, τότε η μέγιστη

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

1.2.2 Ακρίβεια, επαναληψιμότητα, αναπαραγωγιμότητα

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

Οι όροι *επαναληψιμότητα* και *αναπαραγωγιμότητα* είναι ταυτόσημοι, χρησιμοποιούνται όμως ο καθένας σε διαφορετικές περιπτώσεις. Και οι δύο αναφέρονται στο πόσο κοντά είναι τα αποτελέσματα ενός αισθητήρα που μετρά το ίδιο σταθερό μέγεθος, ή μόν επαναληψιμότητα όταν οι συνθήκες μέτρησης είναι σταθερές, η δε αναπαραγωγιμότητα, όταν οι συνθήκες μέτρησης μεταβάλλονται.

1.2.3 Ανοχή

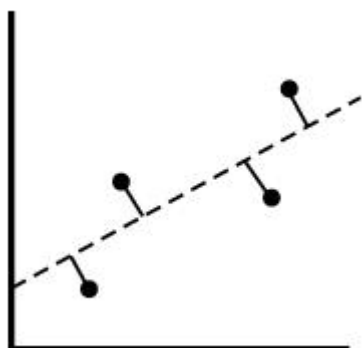
Η *ανοχή* συνδέεται στενά με την πιστότητα και ορίζει το μέγιστο αναμενόμενο σφάλμα μίας τιμής. Δεν πρόκειται για στατικό χαρακτηριστικό ενός αισθητήρα, αλλά το αναφέρουμε, γιατί πολλές φορές η πιστότητα δίνεται ως ανοχή.

1.2.4 Εύρος

Με τον όρο *εύρος* αναφερόμαστε στην ελάχιστη και την μέγιστη τιμή του φυσικού μεγέθους που μπορεί να μετρήσει ένας αισθητήρας.

1.2.5 Συστηματικό σφάλμα

Ως *συστηματικό σφάλμα* (bias) είναι ένα σταθερό σφάλμα, το ίδιο για όλο το εύρος του αισθητήρα, το οποίο συνήθως μπορεί να μηδενιστεί μέσω βαθμονόμησης. Χαρακτηριστικό



Σχήμα 1.1: Χαρακτηριστικά εξόδου αισθητήρα.

παράδειγμα συστηματικού σφάλματος εμφανίζεται στις οικιακές ζυγαριές, οι οποίες μπορεί να δείχνουν μη μηδενική ένδειξη, ακόμη και χωρίς φορτίο. Αυτή η μη μηδενική ένδειξη αποτελεί το συστηματικό σφάλμα το οποίο πρέπει να αφαιρέσουμε από την ένδειξη που παίρνουμε κατά τη μέτρηση ώστε να προκύψει η πραγματική τιμή.

1.2.6 Γραμμική απόκριση

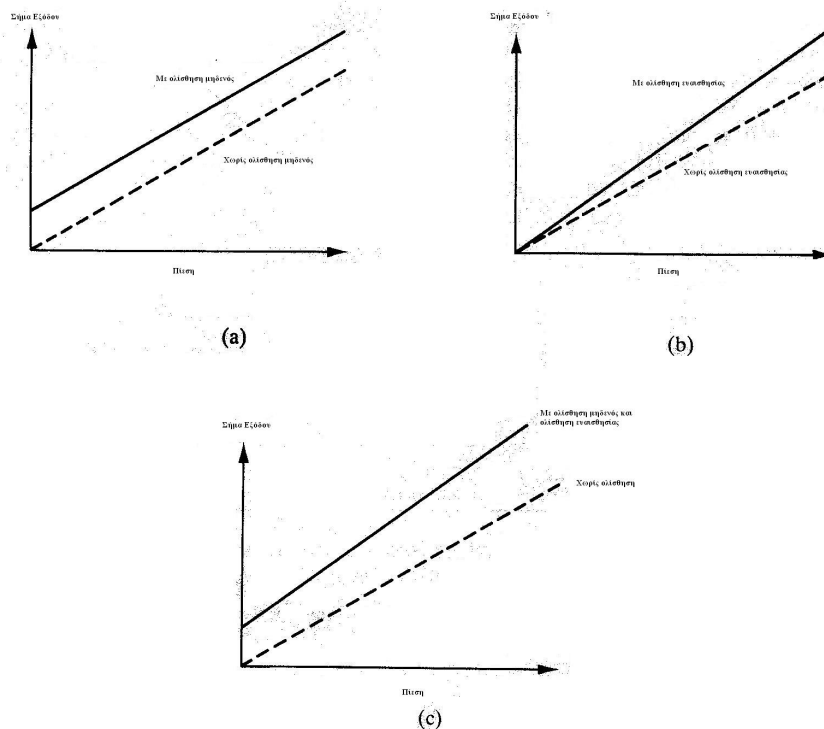
Είναι γενικά επιθυμητό η απόκριση ενός αισθητήρα να μεταβάλλεται γραμμικά με το μετρούμενο μέγεθος. Τα σημεία του Σχήματος 1.1 απεικονίζουν την σχέση μεταξύ σήματος εισόδου (οριζόντιος άξονας) και εξόδου (κατακόρυφος άξονας) ενός αισθητήρα. Η γραμμική μεταξύ των σημείων χαράσσεται εφαρμόζοντας την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η μή-γραμμικότητα εκφράζεται ως η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των σημείων και της γραμμής. Η μή-γραμμικότητα εκφράζεται συνήθως ως η απόκλιση του εύρους του αισθητήρα.

1.2.7 Ευαισθησία στη μέτρηση

Πρόκειται για το λόγο της μεταβολής στην ένδειξη του αισθητήρα, προς τη μεταβολή του φυσικού μεγέθους που την προκάλεσε. Από τον ορισμό αυτό προκύπτει ότι η ευαισθησία ισούται με την εφαπτομένη της γραφικής παράστασης του Σχήματος 1.1.

1.2.8 Ευαισθησία στη διαταραχή

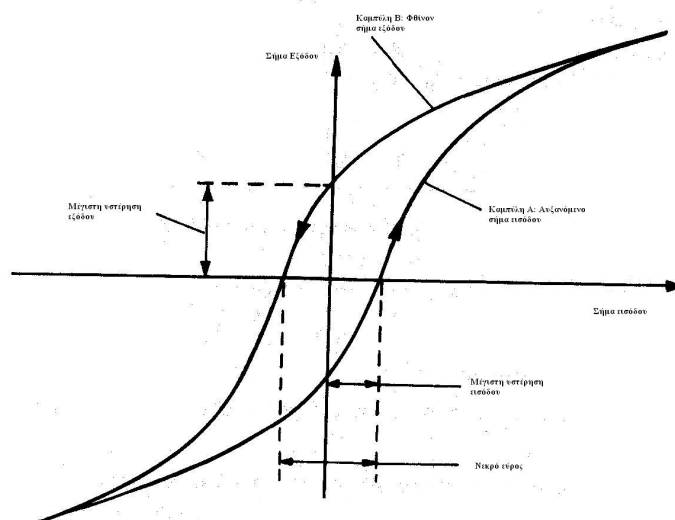
Η βαθμονόμηση και τα χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα ισχύουν όταν αυτό λειτουργεί εντός συγκεκριμένου εύρους περιβαλλοντικών συνθηκών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η σχετική υγρασία κ.λ.π. Το εύρος καθορίζεται από τον κατασκευαστή του



Σχήμα 1.2: (a) Ολίσθηση μηδενός, (b) Ολίσθηση ευαισθησίας, (c) Συνδυασμένη επίδραση των δύο ολισθήσεων[8].

αισθητήρα. Μεταβολή κάποιας από τις παραμέτρους αυτές ενδέχεται να μεταβάλλει κάποιο από τα στατικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Η μεταβολή αυτή ορίζεται ως η ευαισθησία στη διαταραχή. Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα που μεταβάλλονται είναι κυρίως δύο και είναι γνωστά ως ολίσθηση του μηδενός (*zero drift*) και ολίσθηση ευαισθησίας (*sensitivity drift*).

Η ολίσθηση του μηδενός είναι το μή μηδενικό σήμα εξόδου του αισθητήρα όταν το σήμα εισόδου είναι μηδέν, λόγω μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών. Μετράται συνήθως σε $V.^{\circ}C^{-1}$ στην περίπτωση π.χ. βολτομέτρου το οποίο έχει επηρεαστεί από τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Αν ένας αισθητήρας επηρεάζεται από περισσότερες της μίας περιβαλλοντικές παραμέτρους, τότε αυτός χαρακτηρίζεται από αντίστοιχες σε αριθμό ολισθήσεις του μηδενός, μία για κάθε επηρεάζουσα τον αισθητήρα παράμετρο. Χαρακτηρική ολίσθηση μηδενός αισθητήρα πίεσης, φαίνεται στο Σχήμα 1.2a.

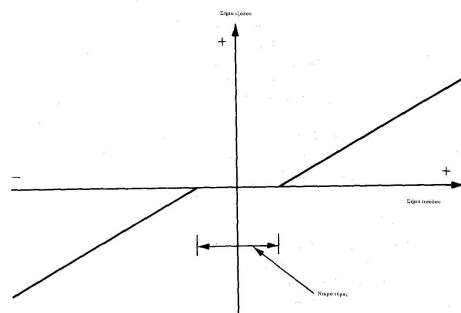


Σχήμα 1.3: Χαρακτηριστικά εξόδου αισθητήρα με υστέρηση[8].

Η ολίσθηση ευαισθησίας ορίζεται ως το ποσό μεταβολής της ευαισθησίας ενός αισθητήρα λόγω μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών. Εκφράζεται μέσω συντελεστών ολίσθησης ευαισθησίας, οι οποίοι εκφράζουν το μέγεθος της ολίσθησης ανά μονάδα μεταβολής της περιβαλλοντικής παραμέτρου που την προκάλεσε. Το Σχήμα 1.2b δείχνει την επίδραση της η ολίσθησης ευαισθησίας στα χαρακτηριστικά εξόδου ενός αισθητήρα. Η συνδυασμένη επίδραση των ολισθησεων μηδενός και ευαισθησίας στα χαρακτηριστικά εξόδου ενός αισθητήρα, φαίνεται στο Σχήμα 1.2c.

1.2.9 Υστέρηση

Στο Σχήμα 1.3 φαίνεται το σήμα εξόδου ενός αισθητήρα ο οποίος παρουσιάζει υστέρηση. Αν η τιμή του σήματος εισόδου μεταβάλλεται σταθερά, ξεκινώντας από αρνητικές τιμές, το σήμα εξόδου περιγράφεται από την καμπύλη Α. Αν κατόπιν το σήμα εξόδου μειώνεται σταδιακά, τότε το σήμα εξόδου περιγράφεται από την καμπύλη Β. Η μη ταύτιση των δύο καμπυλών «φορτίσεως - εκφορτίσεως» είναι γνωστή ως υστέρηση. Η υστέρηση εκφράζεται μέσω της μέγιστης υστέρησης εισόδου και της μέγιστης υστέρησης εξόδου, οι οποίες ορίζονται όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.4: Χαρακτηριστικά εξόδου αισθητήρα με νεκρό εύρος[8].

1.2.10 Νεκρό εύρος

Ως *νεκρό εύρος* (dead space) ορίζεται το εύρος του σήματος εισόδου, για το οποίο το σήμα εξόδου είναι μηδενικό, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.4. Όπως βλέπουμε και στο σχήμα, κάθε αισθητήρας ο οποίος εμφανίζει υστέρηση εμφανίζει και νεκρό εύρος. Παρόλα αυτά ακόμη και αισθητήρες οι οποίοι δεν εμφανίζουν σημαντική υστέρηση, μπορεί να εμφανίζουν νεκρό εύρος.

1.2.11 Κατώφλι

Αν το σήμα εισόδου ενός αισθητήρα αυξάνεται σταδιακά ξεκινώντας από μηδενική τιμή, αυτό θα πρέπει να λάβει μία ορισμένη - μη μηδενική - τιμή πριν ο αισθητήρας δώσει κάποιο μή μηδενικό σήμα εξόδου. Αυτή η ελάχιστη τιμή του σήματος εισόδου, ονομάζεται *κατώφλι* του αισθητήρα. Το κατώφλι άλλοτε δίνεται ως απόλυτη τιμή και άλλοτε ως ποσοστό του εύρους εξόδου του αισθητήρα.

1.2.12 Διακριτική ικανότητα

Ως *διακριτική ικανότητα* ενός αισθητήρα ορίζεται η απαιτούμενη ελάχιστη μεταβολή του σήματος εισόδου, ώστε να προκληθεί μεταβολή στο σήμα εξόδου του αισθητήρα.

1.3 Δυναμικά χαρακτηριστικά

Εκτός από τα στατικά χαρακτηριστικά τα οποία αναφέρονται στην περίπτωση όπου έχει επέλθει ισορροπία μεταξύ σήματος εισόδου και αισθητήρα (δηλαδή όταν πλέον τα σήματα

εισόδου - εξόδου δεν μεταβάλλονται με το χρόνο), κάθε αισθητήρας διαθέτει και *δυναμικά χαρακτηριστικά*. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά περιγράφουν τη συμπεριφορά του αισθητήρα μεταξύ της στιγμής κατά την οποία το σήμα εισόδου μεταβάλλεται έως τη στιγμή κατά την οποία το σήμα εξόδου θα σταθεροποιηθεί εκ νέου. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά ισχύουν, όπως και τα στατικά, εντός συγκεκριμένου εύρους συνθηκών λειτουργίας του αισθητήρα. Αν ο αισθητήρας βρεθεί να λειτουργεί εκτός αυτού του εύρους, τότε τα δυναμικά χαρακτηριστικά αναμένεται να μεταβληθούν.

Υποθέτοντας ένα γραμμικό αισθητήρα του οποίου οι ιδιότητες δεν μεταβάλλονται με το χρόνο, η σχέση μεταξύ σήματος εισόδου - εξόδου περιγράφεται από την εξίσωση:

$$a_n \frac{d_n q_o}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d_{n-1} q_o}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dq_o}{dt} + a_0 q_o = b_m \frac{d_m q_i}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d_{m-1} q_i}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dq_i}{dt} + b_0 q_i \quad (1.1)$$

όπου q_i και q_o τα σήματα εισόδου και εξόδου αντιστοίχως, και $a_0 \dots a_n, b_0 \dots b_m$ σταθερές.

Αν περιοριστούμε στην περίπτωση κατά την οποία το σήμα εισόδου είναι κλιμακωτή συνάρτηση¹, τότε η εξίσωση (1.1) λαμβάνει την ακόλουθη απλούστερη μορφή:

$$a_n \frac{d_n q_o}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d_{n-1} q_o}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dq_o}{dt} + a_0 q_o = b_0 q_i \quad (1.2)$$

Σε ειδικότερες περιπτώσεις, η σχέση (1.2) απλουστεύεται περισσότερο.

1.3.1 Αισθητήρας μηδενικής τάξεως

Αισθητήρας μηδενικής τάξεως είναι εκείνος του οποίου οι συντελεστές $a_1 \dots a_n$ είναι μηδέν και μόνο ο a_0 είναι διάφορος του μηδενός. Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση (1.2) γράφεται:

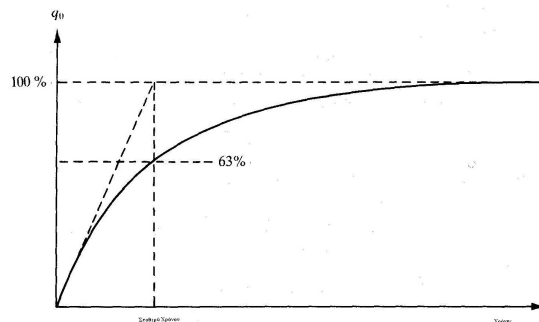
$$a_0 q_o = b_0 q_i \Rightarrow q_o = \frac{b_0}{a_0} q_i = K q_i \quad (1.3)$$

όπου K σταθερά, γνωστή και ως ευαισθησία του αισθητήρα, την οποία ορίσαμε νωρίτερα.

¹ Η κλιμακωτή συνάρτηση ή αλλιώς συνάρτηση Heaviside είναι η $f(x) = H(x - a)$, όπου:

$$H(x - a) = \begin{cases} 0, & x < a \\ 1/2, & x = a \\ 1, & x > a \end{cases}$$

Η τιμή της συνάρτησης κάνει άλμα από την τιμή 0 στην τιμή 1 για $x = a$.



Σχήμα 1.5: Χαρακτηριστικά αισθητήρα πρώτης τάξεως[8].

1.3.2 Αισθητήρας πρώτης τάξεως

Πρόκειται για τον αισθητήρα η συμπεριφορά του οποίου περιγράφεται από εξίσωση της μορφής:

$$a_1 \frac{dq_o}{dt} + a_0 q_o = b_0 q_i \quad (1.4)$$

Ορίζοντας τον τελεστή $D = d/dt$, η σχέση (1.4) γράφεται:

$$a_1 D q_o + a_0 q_o = b_0 q_i$$

από την οποία προκύπτει:

$$q_o = \frac{\frac{b_0}{a_0} q_i}{1 + \frac{a_1}{a_0} D} \quad (1.5)$$

Αν ορίσουμε ως $K = b_0/a_0$ τη στατική ευαισθησία και $\tau = a_1/a_0$ τη σταθερά χρόνου του αισθητήρα, η εξίσωση (1.5) γράφεται:

$$q_o = \frac{K q_i}{1 + \tau D} \quad (1.6)$$

Η αναλυτική λύση της εξίσωσης (1.6) φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 1.5. Η σταθερά χρόνου τ της απόκρισης του αισθητήρα στην κλιμακωτή μεταβολή του σήματος εισόδου, είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε το σήμα εξόδου να γίνει ίσο με το 63% της τελικής τιμής του. Παράδειγμα αισθητήρα πρώτης τάξεως είναι το θερμοζεύγος.

1.3.3 Αισθητήρας δευτέρας τάξεως

Πρόκειται για τον αισθητήρα η συμπεριφορά του οποίου περιγράφεται από εξίσωση της μορφής:

$$a_2 \frac{d^2 q_o}{dt^2} + a_1 \frac{dq_o}{dt} + a_0 q_o = b_0 q_i \quad (1.7)$$

Χρησιμοποιώντας ξανά το συμβολισμό του τελεστή D , η σχέση (1.7) γίνεται:

$$a_2 D^2 q_o + a_1 D q_o + a_0 q_o = b_0 q_i$$

από την οποία καταλήγουμε στην

$$\frac{b_0 q_i}{a_0 + a_1 D + a_2 D^2} \Rightarrow \frac{q_o}{q_i} = \frac{K}{\frac{D^2}{\omega^2} + \frac{2\epsilon D}{\omega} + 1} \quad (1.8)$$

Η (1.8) αποτελεί την τυπική εξίσωση αισθητήρα δευτέρας τάξεως. Οι όροι της στατικής ευαισθησίας K , μη αποσβεσθείσες φυσικής συχνότητας ω και λόγος αποσβέσεως ϵ ορίζονται ως εξής:

$$K = \frac{b_0}{a_0}$$

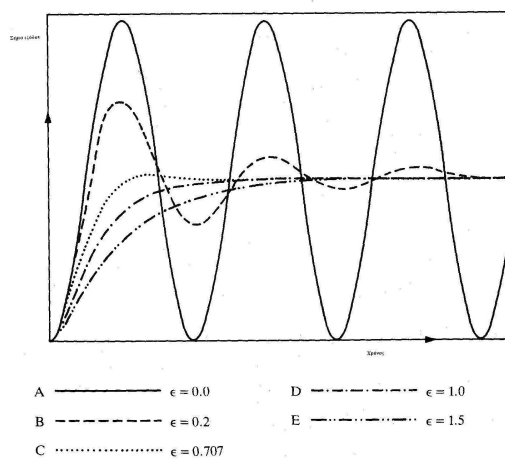
$$\omega = \frac{a_0}{a_2}$$

$$\epsilon = \frac{a_1}{2a_0 a_2}$$

Η μορφή του σήματος εξόδου του αισθητήρα, το οποίο θα προκύψει ως η αναλυτική λύση της (1.8), εξαρτάται από την τιμή του λόγου αποσβέσεως ϵ , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.6.

Στην πρώτη περίπτωση όπου δεν υπάρχει απόσβεση ($\epsilon = 0$) το σήμα εξόδου είναι περιοδικό, αποκρινόμενο στη μεταβολή του σήματος εισόδου. Για $\epsilon = 0,2$ το σήμα εξόδου εξακολουθεί να είναι περιοδικό αλλά οι ταλαντώσεις σταδιακά μηδενίζονται. Περαιτέρω αύξηση του ϵ προκαλεί πλήρη εξαφάνιση των ταλαντώσεων. Γενικά οι αισθητήρες θα πρέπει να επιλέγονται έτσι ώστε το ϵ να κυμαίνεται μεταξύ 0,6 - 0,8.

Ο αναγνώστης ο οποίος ενδιαφέρεται για εκτενέστερη μαθηματική περιγραφή της απόκρισης αισθητήρων πρώτης και δευτέρας τάξεως, μπορεί να συμβουλευθεί την αναφορά [5].



Σχήμα 1.6: Απόκριση αισθητήρα δευτέρας τάξεως[8].

Κεφάλαιο 2

Θερμοκρασία

2.1 Γενικά

Θερμοκρασία είναι η φυσική ιδιότητα που καθορίζει κατά πόσο ένα σύστημα ισορροπεί θερμικά ή όχι με άλλα¹. Τα όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας ονομάζονται θερμοόμετρα. Τα σύγχρονα θερμοόμετρα είναι ηλεκτρονικά και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα θερμοόμετρα επαφής και στα εξ αποστάσεως. Τα θερμοόμετρα επαφής μετρούν ερχόμενα σε επαφή με το σύστημα του οποίου ζητείται η θερμοκρασία, δηλαδή μετρούν ουσιαστικά την ίδια τους τη θερμοκρασία. Αρα, η ακρίβεια της μέτρησης εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από το κατά πόσο έχει επέλθει θερμική ισορροπία μεταξύ θερμομέτρου και συστήματος. Τα θερμοόμετρα εξ αποστάσεως μετρούν τη θερμική ακτινοβολία του συστήματος και εμμέσως υπολογίζουν τη θερμοκρασία. Ως εκ τούτου δεν απαιτείται φυσική επαφή μεταξύ θερμομέτρου και προς μέτρηση συστήματος. Το είδος του αισθητήρα που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το εύρος διακύμανσης της προς μέτρηση θερμοκρασίας, την απαιτούμενη ακρίβεια (precision) και πιστότητα (accuracy), το περιβάλλον στο οποίο θα τοποθετηθεί ο αισθητήρας - αν δηλαδή θα υποστεί μηχανικές ή άλλες καταπονήσεις - κ.λ.π. Η δυσκολία ή ευκολία της μέτρησης εξαρτάται από την τιμή της θερμοκρασίας, το μέσο του οποίου θέλουμε να προσδιορίσουμε τη θερμοκρασία, καθώς και από τις απαιτήσεις για ακρίβεια και πιστότητα. Ο Πίνακας 2.1 συνοψίζει τη δυσκολία μέτρησης της θερμοκρασίας για διάφορες περιπτώσεις.

Στο εργαστήριο και με ειδικό εξοπλισμό και τεχνικές, είναι δυνατόν να μετρηθεί η θερμοκρασία με ακρίβεια 1 mK (milliKelvin) ή καλύτερη. Η αρχή λειτουργίας των αισθητήρων επαφής βασίζεται στην εξάρτηση κάποιας ιδιότητάς τους από τη θερμοκρασία. Ως

¹R.A. Serway, Physics for Scientists and Engineers, Ελληνική απόδοση υπό Α.Κ. Ρεσβάνη, Τόμος III, σελ. 70.

Πίνακας 2.1: Δυνατότητες μέτρησης θερμοκρασίας.

		Απαιτηση σε ακρίβεια		
Θερμοκρασία	±5°C	±1°C	±0.5°C	±0.1°C
-200 °C	Απαιτείται προσοχή	Δύσκολα	Δύσκολα	Πολύ δύσκολα
0°C - 50 °C	Εύκολα	Απαιτείται προσοχή	Δύσκολα	Πολύ δύσκολα
1000 °C	Απαιτείται προσοχή	Πολύ δύσκολα	Εξαιρετικά δύσκολα	Σχεδόν αδύνατον
2000 °C	Πολύ δύσκολα	Εξαιρετικά δύσκολα	Σχεδόν αδύνατον	Αποκλείεται

παράδειγμα αναφέρουμε την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των μετάλλων, r_e , η οποία για καθαρά μέταλλα και θερμοκρασίες δωματίου, προσεγγίζεται από τη σχέση $r_e \cong r_{e,273}(T/273)$, όπου $r_{e,273}$ η ειδική ηλεκτρική αντίσταση στους 273 K². Με κατάλληλες ηλεκτρονικές διατάξεις μετράται η μεταβολή της ιδιότητας αυτής και, μέσω μιας διαδικασίας βαθμονόμησης, αντιστοιχείται σε μεταβολή της θερμοκρασίας. Αισθητήρες επαφής είναι:

- τα θερμοζεύγη,
- οι αντιστάτες (λευκοχρύσου ή νικελίου),
- τα θερμίστορς,
- τα ολοκληρωμένα θερμόμετρα,
- οι αισθητήρες οπτικών ινών,
- οι κρυογενικοί αισθητήρες.

Ο Πίνακας 2.1, μας επιτρέπει να συγκρίνουμε πρόχειρα τα χαρακτηριστικά διαφόρων αισθητήρων θερμοκρασίας – συμπεριλαμβανομένων των εξ αποστάσεως.

2.2 Θερμοζεύγη

2.2.1 Γενικές αρχές – Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο

Πρόκειται για το συνδυασμό δύο αγωγών από διαφορετικό υλικό – το οποίο μπορεί να είναι μέταλλο, ημιαγωγός ή αμέταλλο – ενωμένων ο ένας με τον άλλο στο ένα τους άκρο (Σχήμα 2.1). Το σημείο της ένωσης ονομάζεται *επαφή μέτρησης*, ενώ τα ελεύθερα άκρα αποτελούν την *επαφή αναφοράς*.

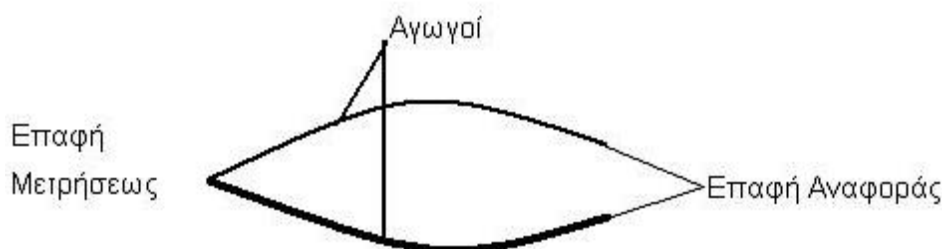
Η επαφή αναφοράς ονομάζεται συχνά και *ψυχρή επαφή*. Η ονομασία αυτή δεν είναι απόλυτα σωστή, γιατί υπονοεί ότι το θερμοζεύγος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν η θερμοκρασία της επαφής μέτρησης είναι μεγαλύτερη από την επαφή αναφοράς, ενώ κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Η μόνη απαίτηση είναι να υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας.

Η απλή κατασκευή και χρήση τους καθώς και η αξιοπιστία τους, έκαναν τα θερμοζεύγη τους πίο διαδεδομένους αισθητήρες σε πρακτικές εφαρμογές που έχουν συνήθεις απαιτήσεις σε ακρίβεια. Οσο αυξάνονται όμως οι απαιτήσεις χάνεται σταδιακά η απλότητα στη χρήση, ενώ η αξιοπιστία τους παύει να είναι εγγυημένη.

²R. Siegel, J.R. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer, 3rd ed., Taylor & Francis, 1992, σελ. 126.

Τύπος Αισθητήρα	Σήμα Εξόδου	Εύρος ($^{\circ}C$)	Πιστότητα ($\pm^{\circ}C$)	Αντοχή	Κόστος
Θερμοζεύγος	$40\mu V.^{\circ}C^{-1}$	-270 - 2300	1.5	Υψηλή	Χαμηλό
Αντιστάτης Πλατίνας	$0.4\%.^{\circ}C^{-1}$	-200 - 600	0.2	Μέση	Μέσο
Αντιστάτης Νικελίου	$0.4\%.^{\circ}C^{-1}$	-200 - 600	0.3	Μέση	Χαμηλό
Θερμίστορ	$5\%.^{\circ}C^{-1}$	-50 - 200	0.2	Υψηλή	Μέσο
Ημιαγωγοί	$10 mV.^{\circ}C^{-1}$ ή $1 \mu A.^{\circ}C^{-1}$	-40 - 125	1.5	Μέση	Χαμηλό
Εξ αποστάσεως	mV	0 - 6000+	2	Χαμηλή	Υψηλό
Οπτικές Ίνες	Ποικίλει	-100 - 200	1	Μέση	Πολύ Υψηλό
Κρυσταλλικοί	Ποικίλει	-273.15 - -200	Ποικίλει, έως ± 0.001	Ποικίλει	Ποικίλει

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά διαφόρων αισθητήρων θερμοκρασίας.



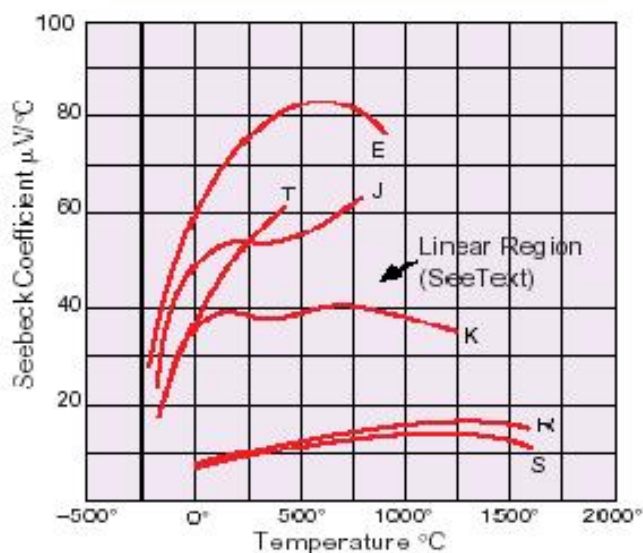
Σχήμα 2.1: Θερμοζεύγος.

Η αρχή λειτουργίας των θερμοζευγών στηρίζεται στο *θερμοηλεκτρικό φαινόμενο Seebeck*, το οποίο ανακαλύφθηκε το 1821. Ο T. Seebeck παρατήρησε ότι όταν δύο αγωγοί από διαφορετικά μέταλλα ενωθούν στις άκρες τους σχηματίζοντας κλειστό κύκλωμα, αυτό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, εφ' όσον οι δύο επαφές βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Η ποσοτική περιγραφή του φαινομένου Seebeck, έγινε αργότερα, μετά το 1826 οπότε και διατυπώθηκε ο νόμος του Ohm.

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, θα πρέπει οι επαφές μέτρησης και αναφοράς να βρίσκονται η κάθε μία σε ισόθερμο περιβάλλον, διαφορετικής θερμοκρασίας. Η εμφανιζόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) μεταξύ των ακροδεκτών της επαφής αναφοράς ονομάζεται *τάση Seebeck*. Η τάση Seebeck αυξάνει όσο αυξάνει η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο επαφών. Μια τυπική τιμή ευαισθησίας είναι $40 \mu V \cdot grad^{-1}$, η οποία μπορεί εύκολα να μετρηθεί με τα σύγχρονα βολτόμετρα.

Στην ενότητα που ακολουθεί, θα επιχειρήσουμε μια απλουστευμένη ερμηνεία του φαινομένου Seebeck. Θεωρούμε ότι ο μεταλλικός αγωγός αποτελείται από ένα πλέγμα ακίνητων θετικών ιόντων. Τα ηλεκτρόνια είναι ελεύθερα και κινούνται μέσα στο πλέγμα σαν να ήταν ένα αέριο. Αν όλος ο αγωγός βρίσκεται στην ίδια θερμοκρασία και δεν διαρρέεται από ρεύμα, τότε το ηλεκτρικό φορτίο κατανέμεται ομοιομόρφως σε όλο το μήκος του αγωγού, παρά το γεγονός ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτελούν άτακτη θερμική κίνηση. Αν προκληθεί κάποια βαθμίδα θερμοκρασίας, τότε κάποια ηλεκτρόνια θα κινηθούν περισσότερο, προκαλώντας έτσι μια ανισοκατανομή του φορτίου, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφοράς δυναμικού.

Παρατηρούμε ότι η τάση Seebeck οφείλει την ύπαρξή της στην βαθμίδα θερμοκρασίας, είναι ιδιότητα του μεταλλικού αγωγού και δεν εξαρτάται από την επαφή ή την ύπαρξη και δεύτερου αγωγού από διαφορετικό υλικό. Όπως θα δούμε στη συνέχεια, ο λόγος για τον οποίο συνδυάζονται δύο υλικά είναι για να αυξηθεί η παραγόμενη ΗΕΔ. Η τάση Seebeck, E ,



Σχήμα 2.2: Συντελεστής Seebeck διαφόρων θερμοζευγών. Τα γράμματα αντιστοιχούν σε στους τύπους θερμοζευγών του Σχήματος 2.3 [11].

των διαφόρων υλικών δίνεται συνήθως ως προς το λευκόχρυσο, ο οποίος θεωρείται ότι έχει μηδενική τάση Seebeck, $E_{Pt} = 0 \text{ mV}$, ανεξάρτητη της θερμοκρασίας. Εστω ότι έχουμε ένα θερμοζεύγος σιδήρου Fe κονσταντάνης στους $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Οι αντίστοιχες τάσεις Seebeck είναι: $E_{Fe} = +1,98 \text{ mV}$ και $E_{Co} = -3,51 \text{ mV}$. Η ΗΕΔ της επαφής Fe-Constantan στην θερμοκρασία αυτή θα είναι: $E_{Fe-Co} = +1,98 - (-3,51) \text{ mV} = 5,49 \text{ mV}$.

Η βασική διαφορά του θερμοζεύγους από τους άλλους αισθητήρες θερμοκρασίας, είναι ότι το σήμα εξόδου του δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία, αλλά από τη βαθμίδα θερμοκρασίας κατά μήκος του. Αν θεωρήσουμε έναν αγωγό μικρού μήκους, η μεταβολή της τάσης Seebeck dE , κατά μήκος αυτού, είναι ανάλογη του συντελεστή Seebeck του αγωγού, $s(T)$, και της θερμοβαθμίδος, dT , κατά μήκος του:

$$dE = s(T, x) \frac{dT}{dx} dx \quad (2.1)$$

Ο συντελεστής Seebeck εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη θέση κατά μήκος του αγωγού, ο οποίος γενικά δεν είναι απολύτως ομογενής και ομοιόμορφος. Οι κατά μήκος διαφορές στον αγωγό μπορεί να οφείλονται σε εξωτερικά αίτια, όπως συνδέσεις στο κύκλωμα κ.λ.π., ή από αναπόφευκτες αλλαγές και αλλοιώσεις, όπως μηχανικές τάσεις ή διάβρωση. Η μεταβολή του συντελεστή Seebeck διαφόρων θερμοζευγών, δίνεται στο Σχήμα 2.2.

	TYPE E	TYPE J	TYPE K	TYPE R	TYPE S	TYPE T
	Nickel-10% Chromium(+) Versus Constantan(-)	Iron(+) Versus Constantan(-)	Nickel-10% Chromium(+) Versus Nickel-5%(-) (Aluminum Silicon)	Platinum-13% Rhodium(+) Versus Platinum(-)	Platinum-10% Rhodium(+) Versus Platinum(-)	Copper(+) Versus Constantan(-)
ΔT	-100°C to 1000°C ± 0.5°C 8th order	0°C to 750°C ± 0.1°C 5th order	0°C to 1370°C ± 0.7°C 11th order	0°C to 1000°C ± 0.5°C 7th order	0°C to 1750°C ± 1°C 8th order	-100°C to 400°C ± 0.5°C 7th order
a_0	0.104267245	-0.042539252	0.226584502	0.262632917	0.927763167	0.10050910
a_1	17.8945282	19373.14503	24152.10900	179075.431	169528.5150	25727.04363
a_2	-202638.0050	-218514.5113	672034298	-40840041.37	-315683823.84	-4937051528
a_3	12982533.5	11534192.78	2710340.682	1.521002E+10	88020790283	78125505.81
a_4	-44370004.6	254917531.4	690053914.9	4.82704E+12	1.63555E+12	-924749653
a_5	1.10088E+10	20104413.14	4.81506E+10	7.62591E+14	1.80027E+14	6.97800E+11
a_6	-1.76827E+11		-1.16452E+12	-7.23228E+18	-1.37241E+16	-2.66132E+13
a_7	1.71048E+12		1.35850E+13	3.71468E+16	6.17501E+17	3.84270E+14
a_8	-8.18271E+12		-6.23708E+13	-8.03100E+19	-1.56102E+19	
	2.06132E+13				1.69536E+20	

TEMPERATURE CONVERSION EQUATION: $T = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_n \cdot x^n$
 NESTED POLYNOMIAL FORM: $T = a_0 + x(a_1 + x(a_2 + x(a_3 + x(a_4 + x(a_5 + a_6 x))))))$ (5th order)
 where x is in Volts, T is in °C
 NBS POLYNOMIAL COEFFICIENTS

Σχήμα 2.3: Τύποι θερμοζευγών και πολυωνυμικοί συντελεστές μετατροπής της τάσης Seebeck $x(V)$ σε θερμοκρασία $T (°C)$ [11].

Το γεγονός ότι ο υπολογισμός της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ) E ενός θερμοζεύγους σε ένα κύκλωμα όπως αυτό του Σχήματος 2.1, απαιτεί την εφαρμογή της εξίσωσης 2.1, οδηγεί πιθανόν στο συμπέρασμα ότι η χρήση του θερμοζεύγους στη θερμομετρία, κάθε άλλο παρά πρακτική είναι. Αυτό γιατί η εφαρμογή της εξίσωσης 2.1, απαιτεί λεπτομερή γνώση της θερμοβαθμίδας κατά μήκος των αγωγών, καθώς και της λεπτομερούς κατασκευής του αγωγού, όπως επίσης και των στοιχείων που αποτελούν το βολτόμετρο με το οποίο η E θα μετρηθεί. Το πρόβλημα αυτό υπερβαίνεται με τη βοήθεια δύο θεωρημάτων, τα οποία βασίζονται στην έννοια του ισοθέριμου περιβάλλοντος, και των ομογενών αγωγών[7].

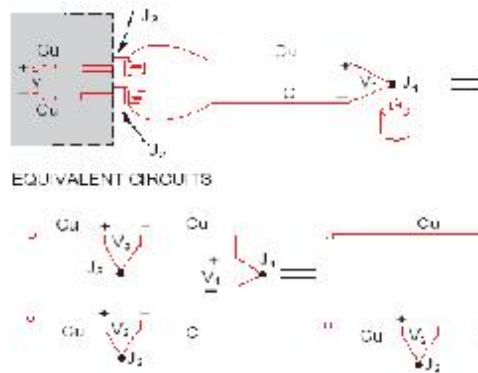
Θεώρημα 1 Αν δεν υπάρχει θερμοβαθμίδα (δηλ: $dT/dx = 0$ – ισόθερμο περιβάλλον), τότε δεν αναπτύσσεται τάση Seebeck.

Το θεώρημα αυτό αποδεικνύεται με άμεση αντικατάσταση της συνθήκης στην εξίσωση 2.1.

Θεώρημα 2 Αν ο αγωγός είναι ομογενής, (δηλ: $S(T, x) = S(T)$), τότε η τάση Seebeck εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία των άκρων του.

Η απόδειξη προκύπτει ολοκληρώνοντας τη σχέση 2.1.

Σημειώνεται ότι οι έννοιες ισόθερμο περιβάλλον και ομογενής αγωγός, είναι έννοιες αναφερόμενες σε ιδανικές καταστάσεις. Το Θεώρημα 1 είναι ισχυρότερο των δύο, υπό την έννοια ότι το ισόθερμο περιβάλλον είναι κατάσταση η οποία ελέγχεται μέσω μετρήσεως, ενώ η ομοιογένεια του αγωγού είναι δυσκολότερο να ελεγχθεί πειραματικά.



Σχήμα 2.4: Μέτρηση τάσης Seebeck με τη βοήθεια βολτομέτρου [11].

2.2.2 Πρακτικές μέτρησης – Θερμοκρασία αναφοράς

Πρακτικά η τάση Seebeck δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα· για τη μέτρησή της απαιτείται η χρήση βολτομέτρου, οι ακροδέκτες του οποίου συνδεόμενοι με το θερμοζεύγος, δημιουργούν επιπρόσθετες θερμοηλεκτρικές επαφές. Έστω ότι επιθυμούμε να μετρήσουμε την τάση Seebeck στα άκρα ενός θερμοζεύγους χαλκού – κονσταντάνης (Τύπου T) (Σχήμα 2.4).

Αυτό το οποίο θα έπρεπε να μετρά το βολτόμετρο είναι η ΗΕΔ η οφειλόμενη στην επαφή J_1 , δηλαδή η τάση V_1 . Η παρεμβολή όμως των χάλκινων ακροδεκτών του βολτομέτρου, δημιουργεί δύο νέες επαφές: την J_2 και την J_3 . Επειδή η επαφή J_3 γίνεται μεταξύ ομοίων αγωγών (χαλκός – χαλκός), δεν δημιουργείται τάση Seebeck. Άρα $V_3 = 0$. Η επαφή J_2 όμως, δημιουργείται μεταξύ χαλκού – κονσταντάνης με αποτέλεσμα την ανάπτυξη της ΗΕΔ V_2 , η οποία είναι αντίθετης πολικότητας ως προς την V_1 . Ως εκ τούτου, το βολτόμετρο θα μετρά τη συνισταμένη ΗΕΔ, η οποία είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας των επαφών J_1 και J_2 .

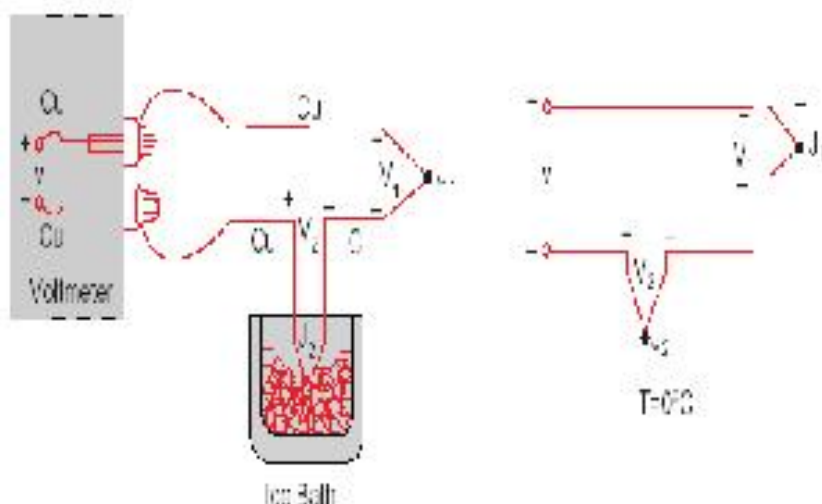
Ένας τρόπος προσδιορισμού της θερμοκρασίας της επαφής J_2 είναι να την τοποθετήσουμε σε λουτρό θερμοκρασίας $0\text{ }^\circ\text{C}$, μετατρέποντάς την έτσι σε επαφή αναφοράς (Σχήμα 2.5).

Από το Σχήμα 2.5 προκύπτει ότι το βολτόμετρο θα μετρά τώρα τάση:

$$V = V_1 - V_2 \approx s(T_{J_1} - T_{J_2})$$

Αναγράφοντας τη θερμοκρασία σε $^\circ\text{C}$ (σύμβολο θ), η τελευταία αυτή σχέση γίνεται:

$$V = V_1 - V_2 \approx s[(\theta_{J_1} + 273, 15) - (\theta_{J_2} + 273, 15)] = s(\theta_{J_1} - \theta_{J_2}) = s(\theta_{J_1} - 0) = s\theta_{J_1}$$



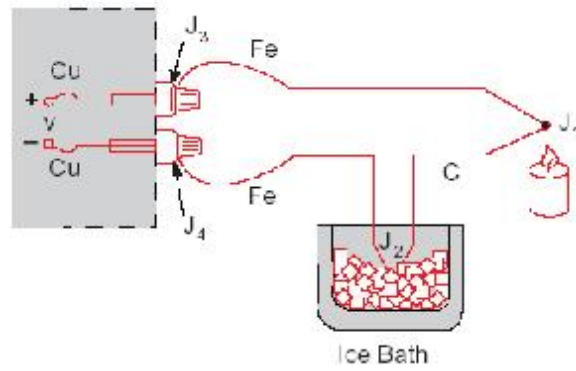
Σχήμα 2.5: Εξωτερική επαφή αναφοράς [11].

Παρουσιάσαμε αυτόν τον εύκολο υπολογισμό αναλυτικά, για να συνειδητοποιήσει ο αναγνώστης ότι η ΗΕΔ της επαφής J_2 δεν είναι μηδενική, αλλά ότι είναι συνάρτηση της απολύτου θερμοκρασίας. Αποδείξαμε έτσι ότι προσθέτοντας στο κύκλωμα του Σχήματος 2.4 την τάση της επαφής αναφοράς σε θερμοκρασία $0\text{ }^\circ\text{C}$, το βολτόμετρο μετρά τάση η οποία είναι ανάλογη μόνο της θερμοκρασίας της επαφής J_1 , την οποία επιθυμούμε να μετρήσουμε.

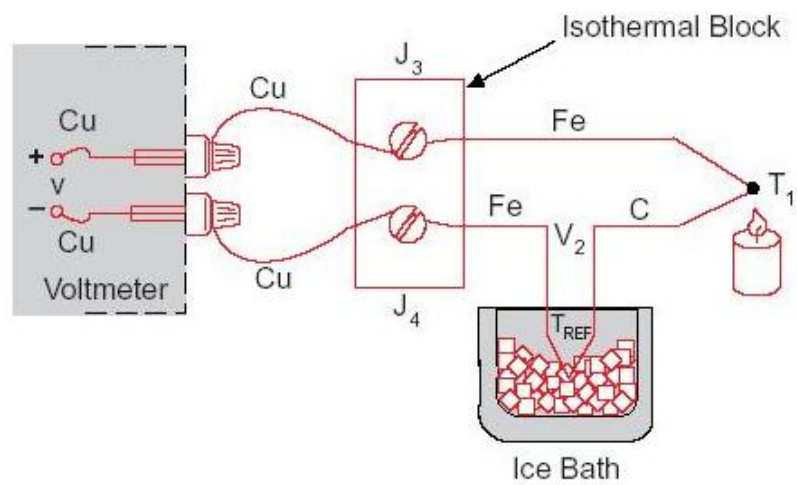
Ίσως αναρωτηθεί κανείς κατά πόσο η ανωτέρω μεθοδολογία μπορεί να γενικευτεί, δεδομένου ότι στο παράδειγμα που μόλις εξετάσαμε, ένας από τους δύο αγωγών του θερμοζεύγους αποτελείται από το ίδιο μέταλλο με τους ακροδέκτες του βολτομέτρου. Έστω ότι χρησιμοποιούμε τώρα θερμοζεύγος σιδήρου – κωνσταντάνης (Τύπου J), αντί του προηγούμενου Τύπου T . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6, η παρουσία του σιδήρου αυξάνει τον αριθμό των ετερογενών μεταλλικών επαφών στο κύκλωμα, αφού και οι δύο ακροδέκτες του βολτομέτρου μετατρέπονται σε θερμοζεύγη $Cu - Fe$.

Εάν οι δύο αυτοί ακροδέκτες δεν βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία, εισάγεται σφάλμα στη μέτρηση. Για βελτιωθεί η ακρίβεια της μέτρησης, πρέπει οι χάλκινοι αγωγοί του βολτομέτρου να επιμηκυνθούν, ώστε η επαφή χαλκού – σιδήρου να γίνει επάνω σε μία ισοθερμική βάση (Σχήμα 2.7).

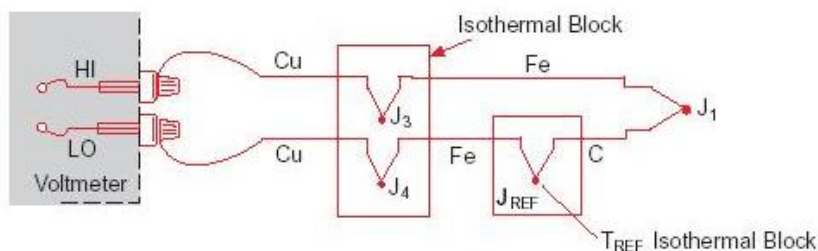
Η ισοθερμική βάση πρέπει να είναι μονωτής ως προς το ηλεκτρικό ρεύμα αλλά, ταυτόχρονα, πολύ καλός αγωγός της θερμότητας ώστε οι επαφές J_3 και J_4 να διατηρούνται στην ίδια θερμοκρασία. Η απόλυτη θερμοκρασία του μπλόκ δεν επηρεάζει τη μέτρηση, δεδομένου ότι πάλι ισχύει η σχέση $V = s(T_{J_1} - T_{REF})$. Αν τώρα αντικαταστήσουμε το λουτρό



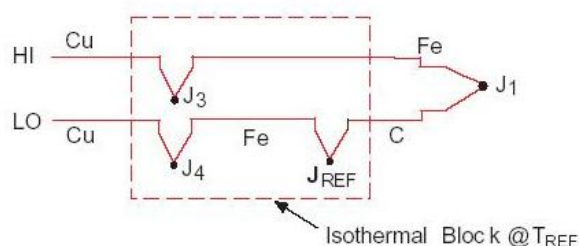
Σχήμα 2.6: Θερμοζεύγος σιδήρου – κονσταντάνης [11].



Σχήμα 2.7: Απομάκρυνση των νέων επαφών από τους ακροδέκτες του βολτομέτρου [11].



Σχήμα 2.8: Αντικατάσταση λουτρού αναφοράς από ισοθερμική βάση [11].



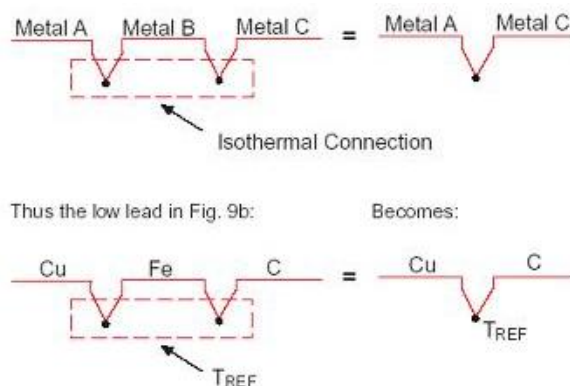
Σχήμα 2.9: Ένωση των δύο ισοθερμικών βάσεων [11].

$0\text{ }^{\circ}\text{C}$ με δεύτερη ισοθερμική βάση (Σχήμα 2.8). Αν η θερμοκρασία της νέας βάσης είναι T_{REF} και δεδομένου ότι οι επαφές J_3 και J_4 βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία, μπορούμε να αποδείξουμε ότι και πάλι $V = s(T_{J_1} - T_{REF})$.

Θα προσπαθήσουμε τώρα να απλοποιήσουμε το κύκλωμα του Σχήματος 2.8. Για να το πετύχουμε αυτό, ενώνουμε κατ' αρχήν τις δύο ισοθερμικές βάσεις (Σχήμα 2.9).

Η τάση εξόδου εξακολουθεί να είναι $V = s(T_{J_1} - T_{REF})$. Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε τον εμπειρικό «νόμο» των «ενδιαμέσων μετάλλων», βάσει του οποίου ένας αγωγός αποτελούμενος από μέταλλο B, παρεμβληθεί μεταξύ δύο αγωγών μετάλλου A και C αντίστοιχα, μιας επαφής, δεν μεταβάλλει την παραγόμενη τάση Seebeck, εφ' όσον οι δύο επαφές που δημιουργούνται από την παρεμβολή αυτή βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία (Σχήμα 2.10).

Εδώ ο τρίτος μεταλλικός αγωγός είναι αυτός από σίδηρο, ο οποίος μπορεί να καταργηθεί. Προκύπτει έτσι το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.11. Η τάση Seebeck είναι και πάλι ίση με $V = s(T_{J_1} - T_{REF})$. Το λουτρό αναφοράς αντικαταστάθηκε από τις επαφές J_3 και J_4 , που αποτελούν τώρα την επαφή αναφοράς. Άρα αν μετρήσουμε τη θερμοκρασία T_{REF} της ισοθερμικής βάσης, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη ζητούμενη θερμοκρασία T_{J_1} .



Σχήμα 2.10: Νόμος των ενδιάμεσων μετάλλων [11].

Η απόλυτη θερμοκρασία της ισοθερμικής βάσης μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια άλλου αισθητήρα π.χ. μέσω αντιστάτη πλατίνας, ή θερμίστορ (Σχήμα 2.12).

Έτσι χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό πολύμετρο ελεγχόμενο από υπολογιστή, ακολουθούμε τα εξής βήματα:

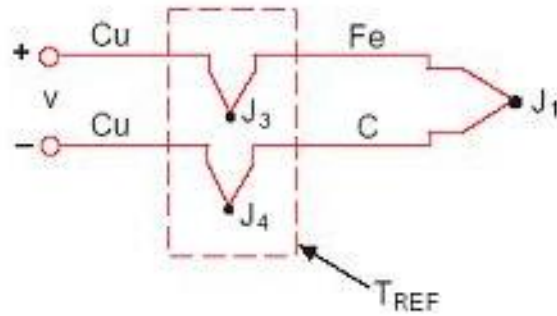
- μετράμε τη R_T , για να υπολογίσουμε την T_{REF} την οποία κατόπιν μετατρέπουμε στην ισοδύναμη τάση επαφής V_{REF} .
- μετράμε τη V από την οποία αφαιρώντας τη V_{REF} υπολογίζουμε τη V_1 , την οποία μετατρέπουμε σε θερμοκρασία T_{J_1} .

Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται *υπολογιστική αντιστάθμιση* (software compensation), γιατί το λουτρό αναφοράς αντικαθίσταται από μια σειρά απλών μαθηματικών πράξεων, μέσω του υπολογιστή.

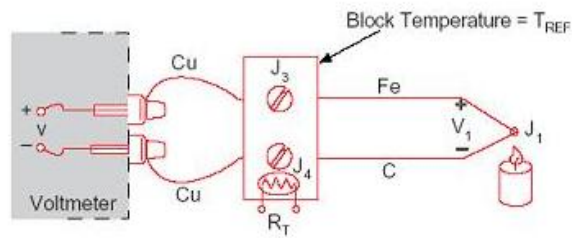
Αμεσότερος τρόπος αντιστάθμισης είναι η *ηλεκτρική αντιστάθμιση* (hardware compensation). Επιτυγχάνεται αντισταθμίζοντας την τάση Seebeck της ισοθερμικής βάσης, παρεμβάλλοντας στο κύκλωμα μια πηγή τάσης (Σχήμα 2.13).

Γενικά μεταξύ των δύο μεθόδων προτιμάται η υπολογιστική αντιστάθμιση, γιατί η εφαρμογή της είναι ενιαία για όλους τους τύπους θερμοζευγών. Επίσης επιτρέπει τη διόρθωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς των θερμοζευγών στην περιοχή των θερμοκρασιών που ενδιαφέρει την κάθε εφαρμογή.

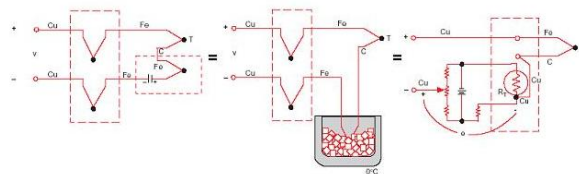
Το σήμα εξόδου των θερμοζευγών είναι γενικά χαμηλό – τυπικά 50 mV στην πλήρη κλίμακα και γι' αυτό ευαίσθητο σε παρεμβολές που μπορεί να προέρχονται από ηλεκτροκινητήρες, ηλεκτρικά καλώδια και μετασχηματιστές. Έτσι καλό είναι οι αγωγοί των θερμοζευγών να θωρακίζονται. Συστρέφοντας τα θερμοζεύγη (ενδεικτικά, μία περιστροφή ανά 10



Σχήμα 2.11: Ισοδύναμο κύκλωμα μετά την απομάκρυνση του αγωγού Fe από το σκέλος LO του Σχήματος 2.8 [11].



Σχήμα 2.12: Εξωτερική πηγή αναφοράς [11].



Σχήμα 2.13: Ηλεκτρική αντιστάθμιση θερμοζευγών [11].

cm) περιορίζεται σημαντικά η επίδραση των μαγνητικών πεδίων. Η χρήση θωρακισμένων καλωδίων περιορίζει την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου. Η διάταξη μέτρησης θα πρέπει να φιλτράρει τα σήματα είτε με ηλεκτρονικές διατάξεις είτε μέσω λογισμικού, χρησιμοποιώντας φίλτρα με ισχυρή αποκοπή στην περιοχή της συχνότητας τροφοδοσίας (50/60 Hz) και των αρμονικών της.

Για την επιλογή του κατάλληλου θερμοζεύγους, πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν και το περιβάλλον λειτουργίας του. Η έκθεση σε ιδιαίτερος οξειδωτική ή αναγωγική ατμόσφαιρα μπορεί να αλλοιώσει ορισμένους τύπους θερμοζευγών. Τα θερμοζεύγη επίσης που περιέχουν ρόδιο (τύποι *B*, *R* και *S*) δεν είναι κατάλληλα σε περιβάλλον όπου υπάρχει ροή νετρονίων.

Τα θερμοζεύγη είναι, λόγω των χαρακτηριστικών τους, οι αισθητήρες που προτιμώνται περισσότερο σε σειρά εφαρμογών. Είναι ανθεκτικά, ανεπηρέαστα από κρούσεις και κραδασμούς, απλά στην κατασκευή τους, δεν απαιτούν εξωτερική διέγερση, δεν αυτοθερμαίνονται και μπορούν να κατασκευασθούν σε ιδιαίτερος μικρό μέγεθος. Κανένας άλλος ηλεκτρονικός αισθητήρας θερμοκρασίας δεν παρουσιάζει τέτοιο εύρος πλεονεκτημάτων.

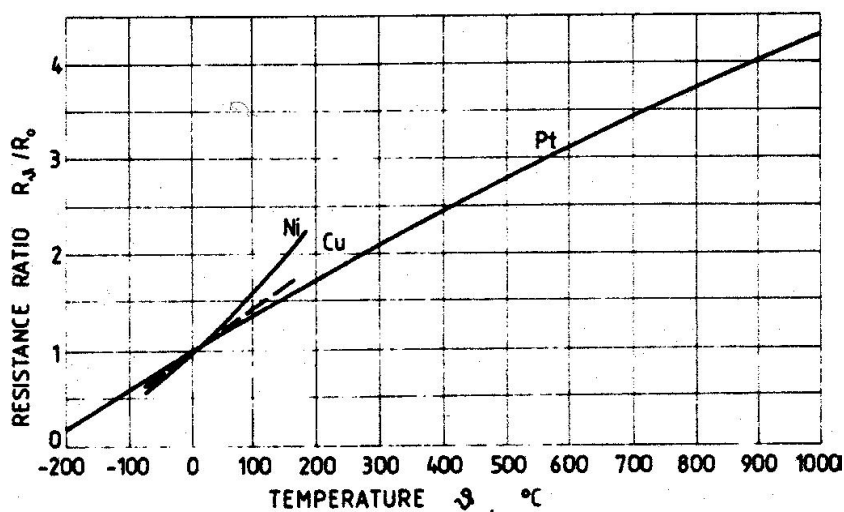
Στον αντίποδα, το σήμα εξόδου τους είναι χαμηλό και μη γραμμικό, οπότε η διάταξη μέτρησης της θερμοηλεκτρικής τάσης πρέπει να είναι ευαίσθητη, σταθερή και να παρέχει τη δυνατότητα αντιστάθμισης και διόρθωσης της μη γραμμικότητας. Επίσης λόγω του χαμηλού σήματος εξόδου τους, απαιτείται να λαμβάνεται μέριμνα κατά την εγκατάστασή τους ώστε να ελαχιστοποιούνται οι πιθανές πηγές θορύβου.

2.3 Αντιστάτες

2.3.1 Γενικά

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των μετάλλων είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Αρα η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να οδηγήσει στον προσδιορισμό της θερμοκρασίας. Θεωρητικά αντιστάτες – θερμομέτρα μπορούν να κατασκευαστούν από πληθώρα υλικών. Επειδή όμως η συνάρτηση μεταξύ ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και θερμοκρασίας δεν είναι η ίδια για όλα τα υλικά, στη θερμομετρία χρησιμοποιούνται, κατά φθίνουσα σημασία, ο λευκόχρυσος, το νικέλιο και ο χαλκός.

Οι αντιστάτες λευκοχρύσου (Platinum Resistance Thermometers ή PRTs), είναι ίσως οι καλύτεροι αισθητήρες επαφής. Σε διάφορες μορφές τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις θερμοκρασίας από 14 K έως 960 °C, με ακρίβεια η οποία προσεγγίζει το 1 mK. Ο ίδιος αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιείται σε διάφορες περιοχές θερμοκρασιών χωρίς να εμφανίζει φαινόμενα υστέρησης. Τα χαρακτηριστικά του παραμένουν ιδιαίτερα σταθερά, ακόμη και μετά από πολλούς κύκλους χρήσης. Υπάρχουν διάφορες μορφές



Σχήμα 2.14: Η αντίσταση νικελίου (Ni), χαλκού (Cu) και λευκοχρύσου (Pt) συναρτήσει της θερμοκρασίας [10].

PRTs, ξεκινώντας από τον πρότυπο αισθητήρα της Διεθνούς Θερμομετρικής Κλίμακας, μέχρι PRTs βιομηχανικών εφαρμογών, οι οποίοι είναι ιδιαίτερα ανθεκτικοί και με ακρίβεια της τάξης μεγέθους του δεκάτου του βαθμού. Το χαμηλό κόστος καθώς και η πολύ καλή ακρίβεια των PRTs τους έχει κάνει τους πιο διαδεδομένους αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας. Σε εφαρμογές δε υψηλών απαιτήσεων ακριβείας, χρησιμοποιούνται κατ' αποκλειστικότητα.

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

Η εξάρτηση της αντίστασης από τη θερμοκρασία περιγράφεται από τη σχέση:

$$R(T) = R(0^{\circ}\text{C})(1 + \alpha T) \quad (2.2)$$

όπου α ο θερμοκός συντελεστής ειδικής αντίστασης (για το λευκόχρυσο $\alpha = 3,92 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Στο Σχήμα 2.14 δίνεται η μεταβολή του λόγου $\frac{R(T)}{R(0^{\circ}\text{C})}$, συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Στο σχήμα αυτό παρατηρούμε την πολύ καλή γραμμικότητα στη μεταβολή της αντί-

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

Η εξίσωση (2.2) ισχύει γενικά για τα περισσότερα μέταλλα. Ειδικά για τις αντιστάσεις πλατίνας, χρησιμοποιείται η ακριβέστερη σχέση Callendar - van Dusen:

$$R(T) = R(0^{\circ}C)(1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3) \quad (2.3)$$

Ο συντελεστής C λαμβάνει την τιμή 0 για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των $0^{\circ}C$. Τυπικές τιμές των συντελεστών αυτών είναι (πρότυπο IEC751 (Pt100)):

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

$$B = -5,85 \times 10^{-7}/^{\circ}C^2$$

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

$$\alpha = 3,927 \times 10^{-3}/^{\circ}C$$

$$\rho = 1,11814$$

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

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

$$B = -5,80 \times 10^{-7}/^{\circ}C^2$$

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

$$\alpha = 3,85 \times 10^{-3}/^{\circ}C$$

$$\rho = 1,1158$$

Η παράμετρος α στις ανωτέρω τιμές, ονομάζεται τιμή άλφα του αισθητήρα και ορίζεται ως εξής:

$$\alpha = \frac{R(100^{\circ}C) - R(0^{\circ}C)}{100R(0^{\circ}C)} \quad (2.4)$$

Πίνακας 2.3: Ανοχή αισθητήρων PRT

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

Η παράμετρος αυτή προκύπτει μετρώντας την αντίσταση στο σημείο πήξεως του ύδατος ($0^{\circ}C$) και στο σημείο βρασμού του ($100^{\circ}C$). Υπάρχουν διάφοροι ισοδύναμοι τρόποι αναγραφής της παραμέτρου άλφα:

- $0,385 \Omega/^{\circ}C$ για PRT 100Ω
- $3,85 \times 10^{-3}/^{\circ}C$
- $0,385\%/^{\circ}C$
- $3850 \text{ ppm}/^{\circ}C$

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

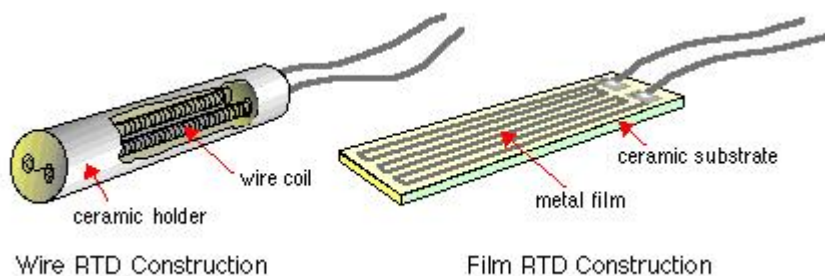
$$\rho = \frac{R(29,7646^{\circ}C)}{R(0^{\circ}C)} \quad (2.5)$$

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

Η ανοχή των αισθητήρων, που ακολουθούν το πρότυπο IEC751, ταξινομείται σε τέσσερις κλάσεις, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.3. Το σύμβολο $|t|$ υποδηλώνει την απόλυτη τιμή της θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου.

2.3.2 Τύποι PRTs

Τα PRTs κατασκευάζονται σε διάφορες μορφές. Οι αισθητήρες γενικής χρήσης αποτελούνται από σύρμα πλατίνας (Σχήμα 2.15 αριστερά). Τα τελευταία χρόνια όμως έχουν αναπτυχθεί και PRTs λεπτών υμενίων, τα οποία κερδίζουν συνεχώς έδαφος (Σχήμα 2.15 δεξιά).



Σχήμα 2.15: Είδη PRTs[1].



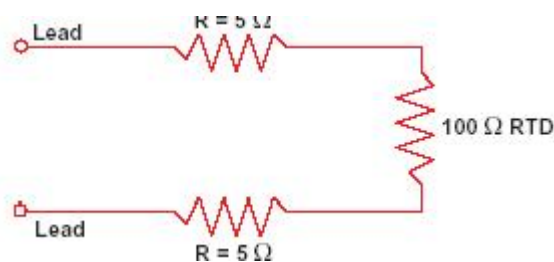
Σχήμα 2.16: Τυπική διάταξη PRTs με θήκη [1].

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

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

Οι αισθητήρες δεν μπορούν γενικά να χρησιμοποιηθούν στη βασική μορφή τους, όπως δηλαδή απεικονίζονται στο Σχήμα 2.15, γιατί είναι ευαίσθητοι. Εισάγονται συνήθως σε κάποια προστατευτική διάταξη - θήκη, ώστε να μπορούν να αντέξουν στα περιβάλλοντα στα οποία θα λειτουργήσουν. Συνήθως πρόκειται για κυλίνδρους από ανοξείδωτο χάλυβα, οι οποίοι γεμίζονται με ειδικό γράσο αυξημένης θερμικής αγωγιμότητας (Σχήμα 2.16). Ο αισθητήρας βυθίζεται τέλος μέσα στο γράσο. Η διάταξη αυτή προστατεύει τον αισθητήρα και από κραδασμούς. Οι τυποποιημένες διαμέτρους των σωλήνων αυτών είναι 3, 4.5, 6, 8, 10, 12 και 15 mm και τα τυποποιημένα μήκη 250, 300, 500, 750 και 1000 mm.

Κατά τη χρήση των PRTs δημιουργούνται επαφές δύο μετάλλων: της πλατίνας και των



Σχήμα 2.17: Επίδραση της αντίστασης των αγωγών [11].

χάλκινων αγωγών μέσω των οποίων μεταφέρονται τα σήματα στη μετρητική διάταξη. Άρα, δημιουργείται θερμοζεύγος. Επομένως αν κατά μήκος του συστήματος αυτού δημιουργηθεί θερμοβαθμίδα, αναπτύσσεται τάση Seebeck της τάξης των $7 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Η τιμή αυτή δεν επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων, εκτός αν πρόκειται για μετρήσεις ιδιαίτερης ακριβείας οι οποίες διεξάγονται με πολύ μικρή ένταση ρεύματος. Μέτρηση της αντίστασης Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα, η παράμετρος άλφα ενός PRT 100Ω ισούται με $0,385 \Omega/^\circ\text{C}$. Για να μετρήσουμε την αντίσταση ενός αισθητήρα, άρα και τη θερμοκρασία, πρέπει να τον ενώσουμε με μια κατάλληλη διάταξη. Η ένωση γίνεται με χάλκινους αγωγούς, η αντίσταση των οποίων, αναλόγως του απαιτούμενου μήκους, μπορεί να κυμαίνεται από μερικά Ω , ως μερικές δεκάδες Ω . Παρατηρώντας ότι η τιμή της παραμέτρου άλφα είναι μικρή, καταλαβαίνουμε ότι ακόμα και μια μικρή πρόσθετη αντίσταση των αγωγών, αν δεν ληφθεί υπ' όψη, μπορεί να επιφέρει σημαντικό σφάλμα στη μέτρηση.

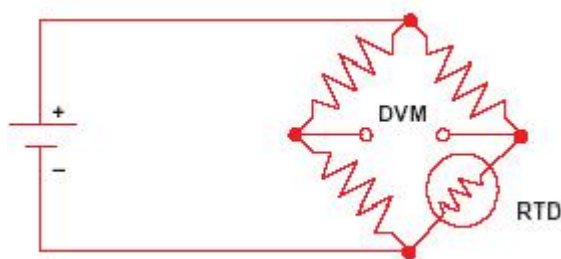
Έστω για παράδειγμα το κύκλωμα του Σχήματος 2.17, με το οποίο μετράται η αντίσταση ενός PRT 100Ω . Αν η αντίσταση καθενός από τους δύο αγωγούς ισούται με 5Ω , η συνολική επιπλέον αντίσταση θα είναι 10Ω . Άρα η διαφορά θερμοκρασίας που αντιστοιχεί θα είναι $10^\circ\text{C} / 0,385 \Omega \cdot ^\circ\text{C}^{-1} = 26^\circ\text{C}$.

Ο κλασικός τρόπος για την αποφυγή αυτού του προβλήματος είναι η χρήση της γέφυρας Wheatstone (Σχήμα 2.18). Η τάση εξόδου V_{out} της γέφυρας είναι μια έμμεση μέτρηση της τιμής της ζητούμενης αντίστασης R_g . Η χρήση της γέφυρας απαιτεί μία εξωτερική πηγή τάσης και τρεις αντιστάτες, μηδενικού συντελεστή άλφα.

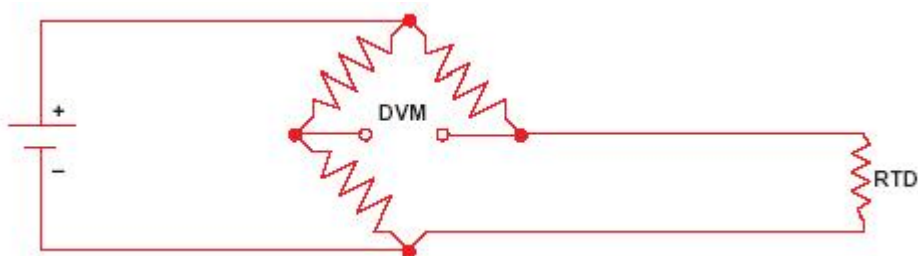
Για να μην εκτίθενται οι τρεις αντιστάτες στην ίδια θερμοκρασία με το PRT, χρησιμοποιείται στην πράξη το διαφοροποιημένο κύκλωμα του Σχήματος 2.19.

Τώρα όμως εμφανίζεται ξανά ίδιο το πρόβλημα: η αντίσταση των δύο προεκτεταμένων αγωγών επιδρά στη μέτρηση της θερμοκρασίας. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας τη λεγόμενη τεχνική των τριών αγωγών (Σχήμα 2.20). Αν οι αγωγοί A και B έχουν ακριβώς το ίδιο μήκος, οι αντιστάσεις τους αλληλοαναιρούνται, δεδομένου ότι ανήκουν σε αντίθετα σκέλη της γέφυρας.

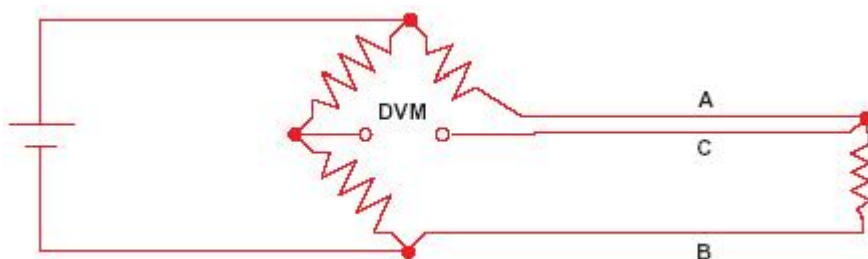
Το κύκλωμα του Σχήματος 2.20 έχει ως αποτέλεσμα η μεταβολή της τάσης εξόδου



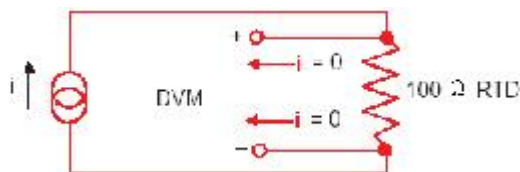
Σχήμα 2.18: Γέφυρα Wheatstone, για μέτρηση PRT [11].



Σχήμα 2.19: Πρακτικό κύκλωμα μέτρησης PRT με γέφυρα [11].



Σχήμα 2.20: Τεχνική τριών αγωγών [11].



Σχήμα 2.21: Μέτρηση PRT με πηγή ρεύματος και βολτόμετρο [11].

της γέφυρας με την αντίσταση του PRT να μην είναι γραμμική. Αυτή η μη γραμμικότητα έρχεται να προστεθεί στην ήδη μη γραμμική εξάρτηση μεταξύ θερμοκρασίας και αντίστασης του PRT.

Τα προβλήματα που σχετίζονται με τη χρήση της γέφυρας, λύνονται αν η μέτρηση γίνει χρησιμοποιώντας αντί της εξωτερικής πηγής τάσης, μία πηγή ρεύματος. Ένα τέτοιο κύκλωμα φαίνεται στο Σχήμα 2.21.

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

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

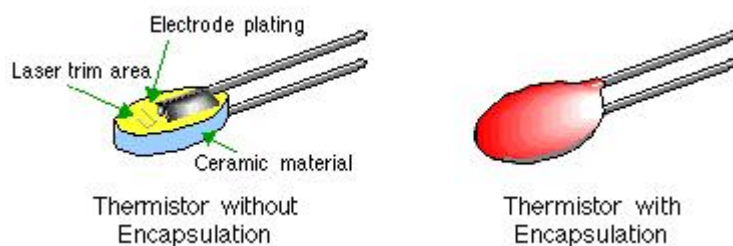
2.4 Θερμίστορες

Τα θερμίστορες κατασκευάζονται από ημιαγωγά υλικά, συνήθως οξειδία μετάλλων. Η ειδική αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού δίνεται από την σχέση ³:

$$\sigma = e (n \mu_e + p \mu_h) \quad (2.6)$$

όπου e το φορτίο του ηλεκτρονίου, n και p οι συγκεντρώσεις των φορέων ηλεκτρονίων και οπών αντιστοίχως, μ_e και μ_h οι ευκινησίες των ηλεκτρονίων και οπών αντιστοίχως. Η σχέση (2.6) για την περίπτωση ενδογενούς ημιαγωγού, δηλαδή εκείνου του οποίου οι

³Θ.Λ. Δεληγιάννη, Ηλεκτρονικά Στοιχεία - Κυκλώματα, Τόμος Α, 1992, σελ. 138



Σχήμα 2.22: Μορφή θερμίστορς [1].

φορείς είναι τα ηλεκτρόνια των ατόμων του, γράφεται:

$$\sigma = e n_i (\mu_e + \mu_h) \quad (2.7)$$

Γνωρίζουμε όμως ότι:

$$n_i^2 = BT^3 \exp\left(-\frac{E_G}{kT}\right) \quad (2.8)$$

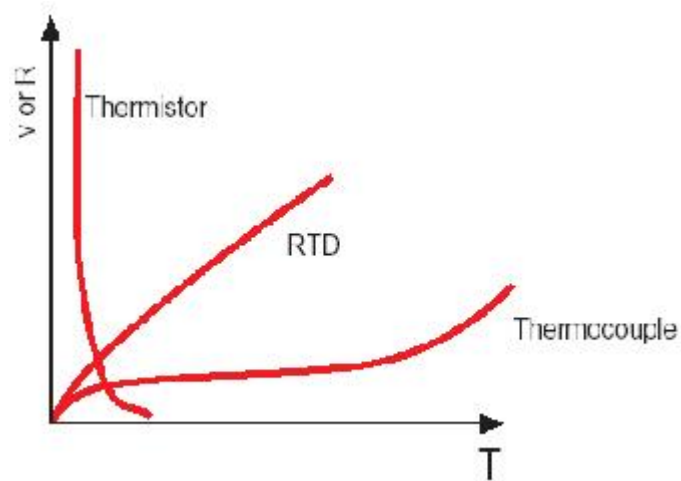
όπου B σταθερά εξαρτώμενη από το υλικό του κρυστάλλου και k η σταθερά Boltzmann. Η σχέση (2.8) μας δείχνει ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας, αυξάνεται η συγκέντρωση των φορέων, άρα και η ειδική αγωγιμότητα (σχέση 2.6). Επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντίστασης του θερμίστορ. Η μορφή των θερμίστορς φαίνεται στο Σχήμα 2.22.

Αν το θερμοζεύγος είναι ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος ηλεκτρικός αισθητήρας θερμοκρασίας και το PRT ο πιο σταθερός, το θερμίστορ είναι ο πιο ευαίσθητος. Από τις τρεις κατηγορίες, το θερμίστορ είναι αυτό του οποίου η αντίσταση εξαρτάται περισσότερο από τη θερμοκρασία (Σχήμα 2.23).

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

Η αντίσταση ενός θερμίστορ στους $20^{\circ}C$ μπορεί να κυμαίνεται από μερικά $k\Omega$ έως τα $40 M\Omega$. Τυπικά χαρακτηριστικά του πλέον δημοφιλούς θερμίστορ 44004 της YSI δίνονται στον Πίνακα 2.4.

Τα θερμίστορς έχουν πολύ καλή μηχανική αντοχή και είναι απλά στην χρήση τους. Λόγω της μεγάλης ευαισθησίας τους χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην έρευνα, αλλά όχι τόσο σε βιομηχανικές εφαρμογές.



Σχήμα 2.23: Μεταβολή της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας, για τις τρεις βασικές κατηγορίες ηλεκτρονικών αισθητήρων θερμοκρασίας [11].

Πίνακας 2.4: Τυπικά χαρακτηριστικά θερμίστορ 44004 YSI.

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

Η σχέση μεταξύ αντίστασης και θερμοκρασίας των θερμίστορς δίνεται από την εξίσωση Steinhart & Hart:

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

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

2.5 Ολοκληρωμένοι αισθητήρες

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

Η αρχή λειτουργίας των ολοκληρωμένων αισθητήρων βασίζεται στη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και ρεύματος του τρανζίστορ. Αν δύο τρανζίστορ λειτουργούν υπό διαφορετικό, αλλά σταθερό ρεύμα συλλέκτη, τότε η διαφορά δυναμικού μεταξύ βάσης και εκπομπού είναι ανάλογη της απόλυτης θερμοκρασίας του τρανζίστορ. Αυτή η τάση μετράται απ' ευθείας ή μετατρέπεται σε ρεύμα.

Οι ολοκληρωμένοι αισθητήρες θερμοκρασίας είναι ιδανικοί για μετρήσεις στο εσωτερικό διαφόρων συσκευών, ειδικά εφ' όσον χρησιμοποιούνται και άλλα ολοκληρωμένα κυκλώματα.

2.6 Αισθητήρες οπτικών ινών

Οι αισθητήρες οπτικών ινών μετρούν διάφορες παραμέτρους χρησιμοποιώντας λεπτές οπτικές ίνες ως το μόνο μέσο για τη διέγερση και ανάγνωση του αισθητήριου στοιχείου. Οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι οι ίδιες με αυτές των τηλεπικοινωνιών. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι αισθητήρες που εξετάσαμε στις

προηγούμενες ενότητες. Ένα παράδειγμα είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας στις περιελίξεις ενός μετασχηματιστή ισχύος υψηλής τάσης. Η τάση μπορεί να φθάνει έως και τα 500 kV, οπότε η χρήση αισθητήρων που επικοινωνούν με μεταλλικούς αγωγούς είναι αδύνατη για λόγους ασφαλείας. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται αισθητήρες οπτικών ινών.

Οι οπτικές ίνες διαθέτουν διάφορα χαρακτηριστικά, τη μεταβολή των οποίων εκμεταλλευόμαστε για να τις χρησιμοποιήσουμε ως αισθητήρες. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι οι μικροκάμψεις (micro bendings), συμβολομετρικά φαινόμενα, η μεταβολή του δείκτη διαθλάσεως, η αλλαγή της πόλωσης, η μεταβολή του μήκους κύματος, τα περιθλαστικά φράγματα καθώς και το φαινόμενο Sagnac το οποίο εφαρμόζεται για την ανίχνευση περιστροφικής κίνησης⁴.

Η θερμοκρασία υπολογίζεται εμμέσα αφού μετρηθούν μεταβολές μήκους κύματος ή διαφορές φάσης και μετατραπούν σε θερμοκρασία, μέσω κατάλληλων ηλεκτρονικών διατάξεων. Επειδή οι οπτικές ίνες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αισθητήρες αυτόνομοι, όπως τα θερμοζεύγη, ή οι αντιστάτες, θα τους εξετάσουμε σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

2.7 Κρυογενικοί αισθητήρες

Κρυογενικοί ονομάζονται οι αισθητήρες θερμοκρασίας που μετρούν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιούνται κυρίως στη φυσική χαμηλών θερμοκρασιών και σε διαστημικές εφαρμογές. Η αρχή λειτουργίας τους είναι η ίδια με αυτή των συνήθων αισθητήρων, αλλά τα υλικά κατασκευής τους διαφέρουν. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες διαφόρων υλικών μεταβάλλονται ταχέως και μερικές φορές απότομα, όσο η θερμοκρασία τους προσεγγίζει το απόλυτο μηδέν. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε πειράματα φυσικής χαμηλών θερμοκρασιών πρέπει να υπακούουν σε πολύ αυστηρές προδιαγραφές. Δεν πρέπει π.χ. οι αγωγοί των αισθητήρων να μεταδίδουν θερμότητα στο χώρο μέτρησης. Πρέπει επίσης οι αισθητήρες, αναλόγως του είδους του πειράματος, να μην επηρεάζονται από μαγνητικά πεδία ή την πυρηνική ακτινοβολία. Στον Πίνακα 2.5 δίνονται διάφορες κατηγορίες κρυογενικών αισθητήρων.

⁴Περιγραφή του φαινομένου Sagnac δίνεται π.χ. στην ιστοσελίδα <http://www.mathpages.com/rr/s2-07/2-07.htm>

Πίνακας 2.5: Κατηγορίες και ιδιότητες χρωμογενικών αισθητήρων [1].

Τύπος αισθητήρα	Περιοχή θερμοκρασιών (K)	Ανοχή σε μαγνητικά πεδία	Ανοχή σε πυρηνική ακτινοβολία	Σχόλια
Δίοδος Ga - Al - As	1,4 - 325	καλή	μικρή	Εξωτερική διέγερση 10 μ A
Δίοδος Si	1 - 475	ανεκτή	μικρή	Εξωτερική διέγερση 10 μ A
Χωρητικότητα	-	καλή	καλή	Ολισθαίνει
Θερμοζεύγος	> 5	ανεκτή	ανεκτή	Φτωχή συνολική απόδοση
RTD ανθρακονήματος	1.4 - 325	ανεκτή	καλή	Ευρεία χρήση, καλή ευαισθησία
RTD Cermax	30 - 800	καλή	εξαιρετική	Καλή συνολική απόδοση
RTD Pt	30 - 800	μικρή κάτω των 40 K	ανεκτή	Ανεκτός άνω των 70 K, δεν χρησιμοποιείται κάτω των 14 K
RTD Ge	0,05 - 300	μικρή	ανεκτή	Καλή απόδοση κάτω των 30 K, όπου χρησιμοποιείται
RTD Rh - Fe	1.4 - 325	ανεκτή	εξαιρετική	ως δευτερεύον πρότυπο
RTD Ru oxide	$< 50 \times 10^{-3}$ - 300	καλή	καλή	Σε μορφή λεπτού υμενίου, ταχεία απόκριση
Θερμόστορ Thermox	70 - 300			Καλή ευαισθησία

2.8 Αισθητήρες εξ αποστάσεως

2.8.1 Γενικά - Αρχή λειτουργίας

Οι αισθητήρες εξ αποστάσεως μετρούν τη θερμοκρασία ενός συστήματος χωρίς να είναι σε φυσική επαφή με αυτό. Αυτό έχει πλεονεκτήματα στις περιπτώσεις που:

- οι μετρούμενες θερμοκρασίες είναι πολύ υψηλές, πέρα από τα όρια αντοχής των υλικών των αισθητήρων επαφής,
- ο αισθητήρας θα δεχθεί σημαντικές μηχανικές καταπονήσεις ή θα εκτεθεί σε χημικά,
- το προς μέτρηση σύστημα κινείται,
- το προς μέτρηση σύστημα βρίσκεται σε απόσταση τέτοια ώστε δεν μπορεί να μετρηθεί ενσύρματα, ή τέλος,
- απαιτείται τέτοια ακρίβεια ώστε το θερμοκρασιακό πεδίο να μην πρέπει να διαταραχθεί από την παρουσία του αισθητήρα.

Οι περισσότεροι αισθητήρες εξ αποστάσεως λειτουργούν ανιχνεύοντας τη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από όλα τα σώματα θερμοκρασίας μεγαλύτερης του απόλυτου μηδενός. Επειδή στην πλειοψηφία των εφαρμογών η εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία βρίσκεται στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ($\lambda = 0,7$ έως $1000 \mu\text{m}$), οι αισθητήρες εξ αποστάσεως ονομάζονται και υπέρυθροι αισθητήρες.

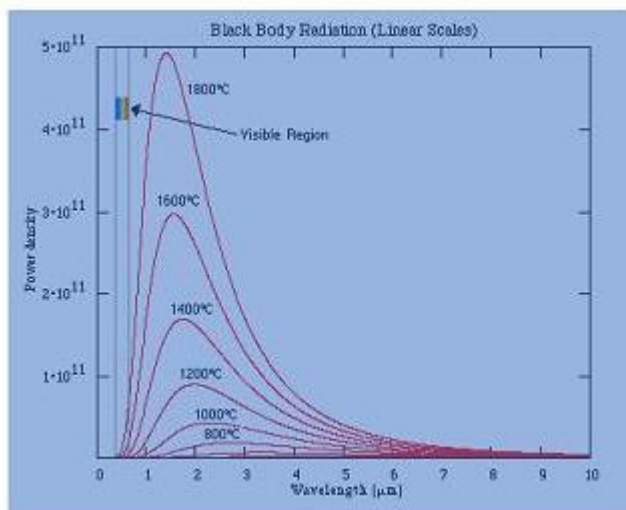
Η φασματική κατανομή του μέλανος σώματος⁵ περιγράφεται από το νόμο του Planck:

$$e_{\lambda b}(\lambda, T) = \frac{2\pi C_1}{\lambda^5 e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (2.9)$$

όπου C_1 και C_2 σταθερές, λ το μήκος κύματος και T η απόλυτη θερμοκρασία του μέλανος σώματος. Η σχέση (2.9) αποδίδεται γραφικά στο Σχήμα 2.24. Ο δείκτης b υποδηλώνει το μέλαν σώμα.

Παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται η θερμοκρασία του μέλανος σώματος, τόσο το μέγιστο της αντίστοιχης φασματικής κατανομής μετατοπίζεται προς τα μεγαλύτερα μήκη κύματος.

⁵Μέλαν λέγεται ένα ιδανικό σώμα το οποίο επιτρέπει στο σύνολο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας να εισχωρήσει σ' αυτό (δεν ανακλά ενέργεια) και εσωτερικά απορροφά το σύνολο της ακτινοβολίας αυτής (δεν επιτρέπει στην ακτινοβολία να το διαπεράσει. Αυτό ισχύει για όλα τα μήκη κύματος και για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Χρησιμοποιείται ως μέτρο σύγκρισης της συμπεριφοράς των πραγματικών σωμάτων.



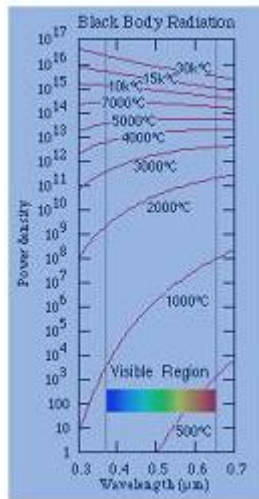
Σχήμα 2.24: Φασματική κατανομή του μέλανος σώματος [1].

Η τιμή του μεγίστου μήκους κύματος συναρτήσει της θερμοκρασίας δίνεται από το νόμο της φασματικής μετατόπισης του Wien:

$$\lambda_{max}T = 2897,8 \mu m.K \quad (2.10)$$

Η εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία δεν γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι όταν η θερμοκρασία του εκπέμποντος σώματος είναι χαμηλή. Στο Σχήμα 2.25 φαίνεται η φασματική κατανομή του μέλανος σώματος, για την περιοχή μηκών κύματος μεταξύ 0,3 - 0,7 μm , η οποία περιλαμβάνει το ορατό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Παρατηρούμε ότι για να μπορέσουμε να διακρίνουμε την εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία, θα πρέπει η θερμοκρασία του μέλανος σώματος να είναι περίπου 500 °C. Το χρώμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από το φασματικό περιεχόμενό της. Αν αυτή περιλαμβάνει κυρίως μεγάλα μήκη κύματος, τότε θα έχει χρώμα ερυθρωπό. Αν μεγάλα και μικρά μήκη κύματος περιέχονται σε περίπου ίδιες αναλογίες, το χρώμα θα φαίνεται λευκό, ενώ αν υπερτερούν τα μικρά μήκη κύματος, η απόχρωση θα τείνει προς το κυανό. Λόγω αυτού του φαινομένου, μπορούμε να εκτιμήσουμε τη θερμοκρασία των σωμάτων από το χρώμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας τους. Πρόκειται για εκτίμηση και όχι μέτρηση, γιατί η ακρίβεια με την οποία μπορεί το ανθρώπινο μάτι να προσδιορίσει το χρώμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, οδηγεί σε σφάλματα στην εκτίμηση της θερμοκρασίας της τάξης των ± 200 °C, στην καλύτερη περίπτωση.



Σχήμα 2.25: Λεπτομέρεια της φασματικής κατανομής του μέλανος σώματος [1].

Η ολοφασματική (δηλαδή σε όλα τα μήκη κύματος) εκπεμπόμενη από το μέλαν σώμα θερμική ακτινοβολία, προκύπτει αν ολοκληρώσουμε τη σχέση (2.9) ως προς το μήκος κύματος. Η έκφραση που θα προκύψει αποτελεί το νόμο των Stefan - Boltzmann για το μέλαν σώμα:

$$e_b = \int_0^{\infty} e_{lb}(\lambda) d\lambda = \sigma T^4. \quad (2.11)$$

Η συνολικώς εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία από ένα πραγματικό σώμα δίνεται από τη σχέση:

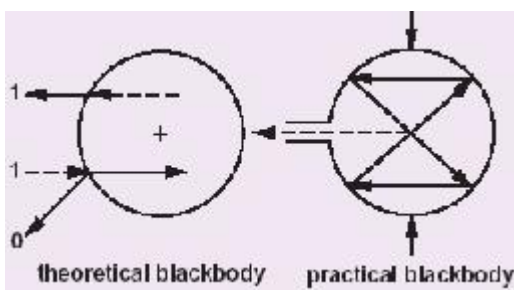
$$e = \epsilon e_b. \quad (2.12)$$

Συνδυασμός των (2.11) και (2.12) δίνει:

$$e = \epsilon \sigma T^4. \quad (2.13)$$

Ο συντελεστής ϵ ονομάζεται *συντελεστής εκπομπής*⁶ και χαρακτηρίζει το σώμα. Το ϵ είναι αδιάστατο και λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 - 1. Η τιμή 1 αντιστοιχεί στο μέλαν σώμα. Στην πράξη το μέλαν σώμα προσομοιώνεται ως μία σφαιρική κοιλότητα της οποίας η είσοδος

⁶ Η αυστηρή ονομασία του ϵ εν προκειμένω είναι ολικός (ή ολοφασματικός) ημισφαιρικός συντελεστής εκπομπής. Το ϵ είναι πάντα συνάρτηση της θερμοκρασίας της εκπέμπουσας επιφάνειας. Οι επιθετικοί προσδιορισμοί (με την γραμματική έννοια του όρου) του ϵ εξαρτώνται από σειρά παραμέτρων και η παρουσίασή τους ξεφεύγει από το σκοπό αυτών των σημειώσεων. Το θέμα συζητείται εκτενώς στο σύγγραμμα R. Siegel, J.R. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer, 3rd ed., Taylor and Francis, 1992, Κεφάλαιο 3. Το βιβλίο αυτό είναι ίσως το καλύτερο παγκοσμίως σε θέματα μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία.



Σχήμα 2.26: Τεχνητό μέλαν σώμα [11].

είναι ένας σωλήνας πολύ μικρής διαμέτρου (της τάξης μερικών mm) (Σχήμα 2.26), που δεν επιτρέπει στην εισερχόμενη σε αυτήν ακτινοβολία να ξαναβγεί. Ο συντελεστής εκπομπής του τεχνητού μέλανος σώματος ισούται με 0,998.

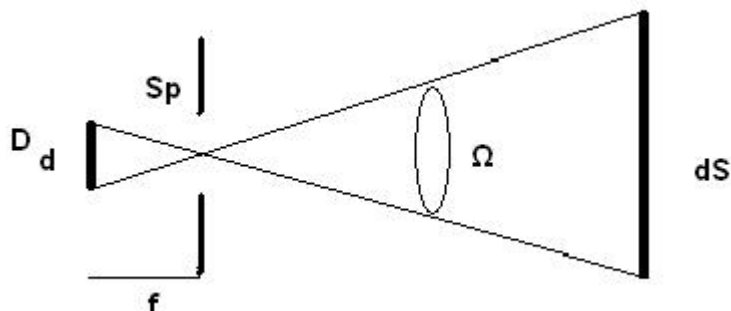
Στην πράξη οι αισθητήρες θερμικής ακτινοβολίας μετρούν την εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενός πραγματικού σώματος, e , και μέσω της σχέσης (2.13) προσδιορίζεται η απόλυτη θερμοκρασία του σώματος, εφ' όσον είναι γνωστός ο συντελεστής εκπομπής του. Αν όχι, τότε μπορεί να προσδιορισθεί μόνο η ισοδύναμη θερμοκρασία μέλανος σώματος, δηλαδή η θερμοκρασία την οποία έχει το μέλαν σώμα όταν η συνολικώς εκπεμπόμενη θερμική του ακτινοβολία ισούται με τη μετρούμενη. Στην περίπτωση αυτή, η απόκλιση της ισοδύναμης θερμοκρασίας μέλανος σώματος από την πραγματική θερμοκρασία, εξαρτάται από την τιμή της τέταρτης ρίζας του ϵ .

2.8.2 Συστήματα μέτρησης θερμικής ακτινοβολίας

Τα βασικά στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος είναι:

- ένα σύστημα εστίασης μέσω του οποίου η θερμική ακτινοβολία εστιάζεται στον ανιχνευτή,
- ένας ανιχνευτής ο οποίος μετατρέπει τη θερμική ακτινοβολία σε ηλεκτρικό σήμα,
- μια διάταξη αντιστάθμισης της θερμοκρασίας, το οποίο διατηρεί τη θερμοκρασία του ανιχνευτή σταθερή.

Κάποια συστήματα φέρουν και διατάξεις ρύθμισης του συντελεστή εκπομπής ώστε στην έξοδό τους να δίνεται απ' ευθείας η πραγματική θερμοκρασία του σώματος. Το οπτικό μέρος της διάταξης μέτρησης φαίνεται στο Σχήμα 2.27.



Σχήμα 2.27: Γεωμετρία διάταξης μέτρησης θερμικής ακτινοβολίας. (D_d η γραμμική διάσταση του ανιχνευτή, dS το είδωλο του ανιχνευτή προβαλλόμενο στην επιφάνεια μέτρησης, S_p η επιφάνεια του ανοίγματος του συστήματος εστίασης, Ω η στερεά γωνία μεταξύ συστήματος εστίασης και ειδώλου dS).

Αποδεικνύεται ότι το σήμα εξόδου του ανιχνευτή δίνεται από τη σχέση⁷:

$$u = \frac{\pi f^2}{4\sqrt{A} \Delta\nu} u_b \frac{\Omega}{N^2} \cos^4 \alpha \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D_\lambda^* \epsilon'_\lambda(\theta, T) L_\lambda^o(T) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D_\lambda^* \rho'_\lambda(\theta, T, T_a) L_\lambda^o(T_a) d\lambda \right] \quad (2.14)$$

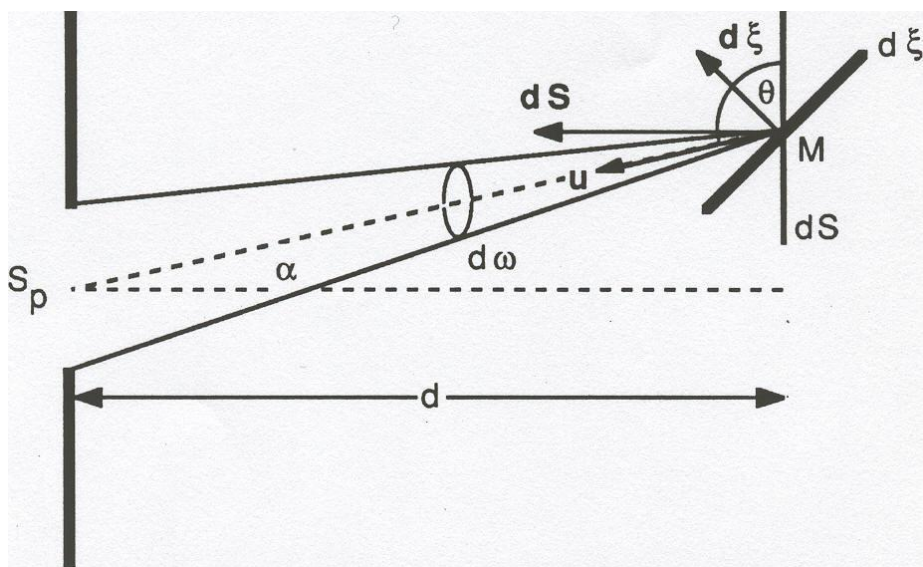
όπου A επιφάνεια του ανιχνευτή, $\Delta\nu$ εύρος ζώνης του ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης, N σχετικό άνοιγμα του φακού⁸, α γωνία μεταξύ αισθητήρα και μετρούμενης επιφάνειας (βλέπε Σχήμα 2.28), D_λ^* ειδική ανιχνευσιμότητα του αισθητήρα (specific detectivity)⁹, ϵ'_λ μονοχρωματικός κατευθυντικός συντελεστής εκπομπής του μετρουμένου σώματος, ρ'_λ μονοχρωματικός κατευθυντικός συντελεστής ανάκλασης του μετρουμένου σώματος, $L_\lambda^o(T)$ λαμπρότητα μέλανος σώματος στη θερμοκρασία T , $L_\lambda^o(T_a)$ λαμπρότητα μέλανος σώματος στη θερμοκρασία T_a . Η περιοχή λειτουργίας των ανιχνευτών επιλέγεται ώστε να μην επηρεάζεται η μετρούμενη ακτινοβολία από την ατμόσφαιρα.

Παρατηρούμε ότι μεταξύ της παρένθεσης της σχέσης (2.14), υπάρχουν δύο προσθεταίοι. Ο πρώτος αναφέρεται στην θερμική ακτινοβολία που εκπέμπει το σώμα και την οποία με

⁷ A. Argiriou, La mesure en thermographie infrarouge, calibration et traitement du signal: application à la validation d'une modélisation numérique, en régime instationnaire, d'un convertisseur thermique de l'énergie solaire sous concentration de type THEK. Doctorat, Université de Provence, Marseille, France, 1987.

⁸ R.A. Serway, Physics for Scientists and Engineers, Ελληνική απόδοση υπό Α.Κ. Ρεσβάνη, Τόμος III, σελ. 251.

⁹ Ως ειδική ανιχνευσιμότητα, ορίζεται το μέγεθος $D_\lambda^* = D_\lambda \sqrt{A \Delta\nu}$ όπου A η επιφάνεια του ανιχνευτή και $\Delta\nu$ το εύρος ζώνης του ηλεκτρονικού κυκλώματος μέτρησης. Μετράται σε $m \cdot W^{-1} \cdot s^{-1/2}$.



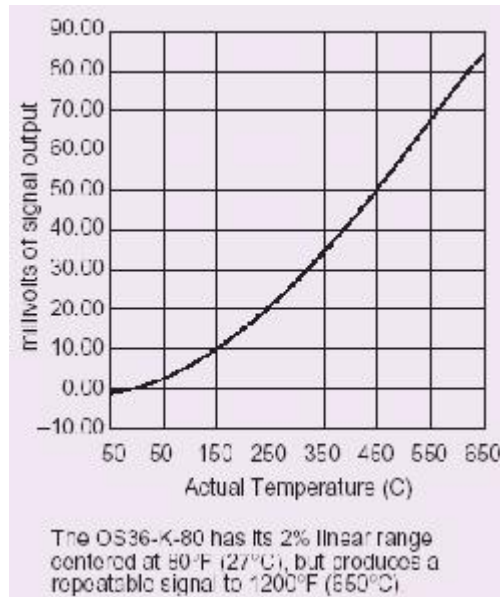
Σχήμα 2.28: Μέτρηση της θερμικής ροής της προερχόμενης από στοιχειώδη επιφάνεια.

ενδιαφέρει να μετρήσω. Ο δεύτερος όρος αναφέρεται στη θερμική ακτινοβολία η οποία προέρχεται από το περιβάλλον και η οποία ανακλάται στο μετρούμενο σώμα. Αυτός ο όρος εισάγει σφάλμα στην μέτρηση. Κατά τη χρήση των αισθητήρων θερμικής ακτινοβολίας, θα πρέπει να φροντίζουμε ώστε ο όρος αυτός να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος.

2.8.3 Ανιχνευτές

Το βασικότερο χαρακτηριστικό των ανιχνευτών θερμικής ακτινοβολίας είναι η φασματική τους απόκριση. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους *κβαντικούς* και τους *θερμικούς*. Οι κβαντικοί ανιχνευτές ανιχνεύουν φωτόνια των οποίων η ενέργεια υπερβαίνει μία ελάχιστη τιμή. Κατασκευάζονται συνήθως από κάποιο ημιαγωγό. Η απόκρισή τους είναι ομογενής, μέχρι ένα ορισμένο μήκος κύματος, αλλά πέραν αυτού, η απόκρισή τους μειώνεται ταχύτατα. Το πλεονέκτημά τους είναι ότι αποκρίνονται ταχύτατα σε διακυμάνσεις της ακτινοβολίας.

Οι θερμικοί ανιχνευτές βασίζουν την λειτουργία τους στη θέρμανση που προκαλεί η απορροφώμενη ακτινοβολία. Η μικρή αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να ανιχνευθεί από συμβατικούς αισθητήρες θερμοκρασίας, συνήθως θερμοστήλες (θερμοζεύγη συνδεδεμένα σε σειρά) ή θερμίστορες. Τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή καθορίζονται από τα φασματικά χαρακτηριστικά της απορροφώσας επιφάνειας. Γενικά η απόκρισή τους εκτείνεται σε ευρεία περιοχή του φάσματος και είναι ομογενής, δεν διαθέτουν όμως την ταχεία απόκριση των κβαντικών ανιχνευτών.



Σχήμα 2.29: Σήμα εξόδου θερμικού αισθητήρα ακτινοβολίας [11].

Διάφοροι τύποι ανιχνευτών καθώς και τα χαρακτηριστικά τους, δίνονται στον Πίνακα 2.6. Στο Σχήμα 2.29 δίνεται η μεταβολή του σήματος εξόδου ενός θερμικού αισθητήρα ακτινοβολίας.

2.9 Επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα θερμοκρασίας

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

2.9.1 Θερμοζεύγη

Η τάση εξόδου των θερμοζευγών αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Πλεονεκτήματα: δεν απαιτείται εξωτερική διέγερση, απλά στην κατασκευή, αντοχής, χαμηλού κόστους, διατίθενται σε πολλούς τύπους, καλύπτουν μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Μειονεκτήματα: Η σχέση θερμοκρασίας - τάσης εξόδου δεν είναι γραμμική, το σήμα εξόδου είναι χαμηλό,

Πίνακας 2.6: Χαρακτηριστικά αισθητήρων υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Αισθητήρας	Τύπος	Φασματική απόκριση	Ευαισθησία	Σχόλια
Θερμοστέγη	Θερμικός	Ευρεία	Χαμηλή	Η απόκριση μεταβάλλεται με επεξεργασία της επιφάνειας.
Φωτοδίοδος πυριτίου	Κβαντικός	0.4 – 1.1 μm	Χαμηλή	Απόκριση κατάλληλη για ακτινόμετρα υψηλών θερμοκρασιών.
Θειούχος Μόλυβδος (PbS)	Κβαντικός	1.0 – 3.0 μm	Καλή	Ψύξη στους 77 K εκτείνει την απόκριση έως τα 4 μm και μειώνει το θόρυβο.
Σεληνιούχος Μόλυβδος (PbSe)	Κβαντικός	1.0 – 4.5 μm	Καλή	Ψύξη στους 77 K εκτείνει την απόκριση έως τα 4 μm και μειώνει το θόρυβο.
Πυροηλεκτρικά ^a πλαστικά υμένα	Θερμικός	8 – 11 μm	Καλή στις μεταβολές	Φθορισύχο πολυβινυλιδένιο (PVDF) (υμένο Kyriar της Ampac ή Sofef της Solvay et Cie).
Πυροηλεκτρικά κεραμικά	Θερμικός	έως 14 μm	Ικανοποιητική	

^a Μερικοί από τους κρυστάλλους ο οποίοι εμφανίζουν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, όπως ο τουρμαλίνη και το κρυστάλλινο πυρίτιο, εμφανίζουν και το φαινόμενο του πυροηλεκτρισμού. Όταν οι κρυστάλλοι θερμαίνονται, φορτίζονται θετικά στη μία πλευρά τους και αρνητικά στην άλλη, ενώ όταν ψύχονται η πολικότητα των δύο πλευρών αλλάζει πρόσημο. Περισσότερες πληροφορίες στο σύγγραμμα: Kubo R., Nagamiya T., Solid State Physics, McGraw-Hill, 1969.

απαιτούν τη χρήση αναφοράς, είναι τα λιγότερο σταθερά και τα λιγότερο ευαίσθητα σε σχέση με τους υπολοίπους τύπους αισθητήρων.

2.9.2 Αντιστάτες

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

2.9.3 Θερμίστορς

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

2.9.4 Ολοκληρωμένοι αισθητήρες

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

Κεφάλαιο 3

Πίεση

3.1 Γενικά

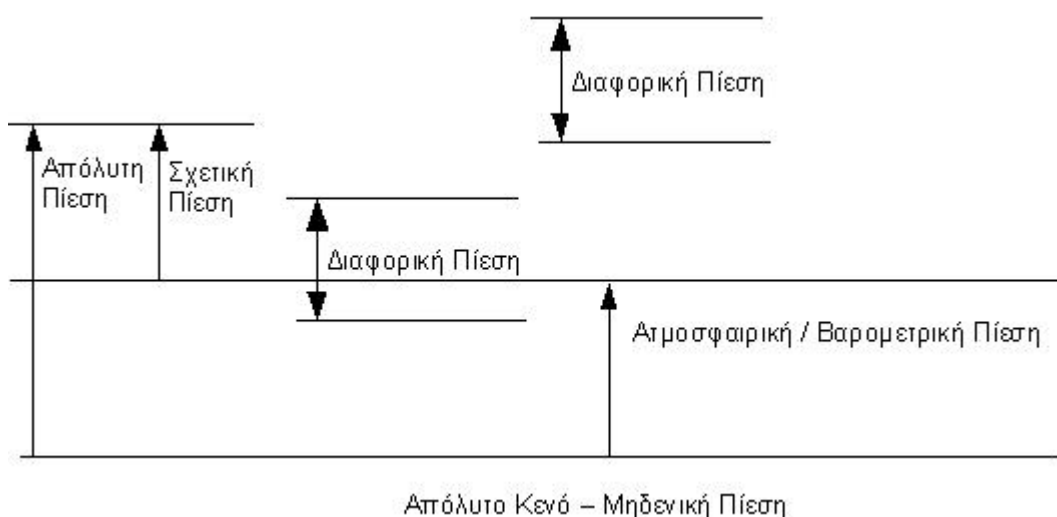
Αν σε στοιχειώδη επιφάνεια μέτρου ds , ασκείται δύναμη μέτρου dF , τότε η πίεση ισούται με το λόγο $p = dF/ds$. Η μέτρηση της πίεσης γίνεται πάντα ως προς κάποια πίεση αναφοράς. Ως τέτοια μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ατμοσφαιρική πίεση, η πίεση στο εσωτερικό κάποιας σφραγισμένης κοιλότητας στο εσωτερικό του αισθητήρα, ή η πίεση σε κάποιο άλλο σημείο. Στο Σχήμα 3.1, δίνονται ορισμοί πιέσεων.

Η μηδενική πίεση είναι αυτή του απόλυτου κενού. Η απόλυτη πίεση μετράται ως προς το απόλυτο κενό. Οι αισθητήρες που μετρούν την απόλυτη πίεση αναφέρονται σε σφραγισμένη κοιλότητα στο εσωτερικό τους, στην οποία έχει δημιουργηθεί κενό. Από τον ορισμό της, η απόλυτη πίεση είναι πάντα υπερπίεση, δηλαδή λαμβάνει μόνο θετικές τιμές. Η σχετική πίεση μετριέται ως προς την ατμοσφαιρική πίεση, οπότε αυτή μπορεί να λάβει είτε αρνητικές (υποπίεση) είτε θετικές (υπερπίεση) τιμές. Η διαφορική πίεση μετράται ως προς μία τυχαία αναφορά. Όπως και η σχετική πίεση και η διαφορική μπορεί να είναι είτε θετική, είτε αρνητική. Ονομάζουμε κανονική πίεση, την πίεση της κανονικής ατμόσφαιρας, η οποία λαμβάνεται ίση με $1013,25 \text{ hPa}$ ($1 \text{ h} = 1 \text{ hecto} = 10^2$). Στον Πίνακα 3.1, δίνονται διάφορες μονάδες πίεσης καθώς και οι μεταξύ τους σχέσεις.

Οι μετρήσεις πίεσης, όπως και άλλων φυσικών μεγεθών, γίνονται είτε σε μόνιμες (σταθερές) είτε σε χρονικώς μεταβαλλόμενες (δυναμικές) συνθήκες. Οι μετρήσεις υπό σταθερές συνθήκες γίνονται όταν ενδιαφέρουν μόνο συνθήκες ισορροπίας, ή τα φαινόμενα μεταβάλλονται αργά με το χρόνο. Όταν ενδιαφέρουν οι μεταβολές της πίεσης συναρτήσει του χρόνου, τότε οι μετρήσεις είναι δυναμικές. Η δυναμική μέτρηση της πίεσης παρουσιάζει περισσότερες δυσκολίες σε σχέση με τις μετρήσεις υπό σταθερές συνθήκες. Στη δυναμική μέτρηση, πρέπει να ληφθεί υπ όψιν η απόκριση του αισθητήρα (το πόσο γρήγορα ανταποκρί-

Πίνακας 3.1: Μονάδες πύσης.

	<i>PSI</i>	<i>Pascal</i>	<i>Bar</i>	<i>mbar</i>	<i>mmHg</i>	<i>mmH₂O</i>	<i>ATM</i>	<i>kg/cm²</i>
<i>PSI</i>	1	0.00014504	14.504	0.014504	0.019337	0.0014223	14.696	14.223
<i>Pascal</i>	6894.6	1	10 ⁵	100	133.32	9.8068	101320	98067
<i>Bar</i>	0.068946	0.00001	1	0.001	0.0013332	9.8068E-05	1.0132	0.98068
<i>mbar</i>	68.946	0.01	10 ³	1	1.3332	0.098068	1031.2	980.68
<i>mmHg</i>	51.714	0.0075006	750.06	0.75006	1	0.073558	760	735.59
<i>mmH₂O</i>	703.05	0.10197	10197	10.197	13.595	1	10332	10000
<i>ATM</i>	0.068045	9.8692 × 10 ⁻⁶	0.98692	0.00098692	0.0013158	9.6788E-05	1	0.9678
<i>kg/cm²</i>	0.070305	1.0197 × 10 ⁵	1.0197	0.0010197	0.0013595	0.0001	1.0332	1



Σχήμα 3.1: Ορισμοί Πίεσεων.

νεται σε δεδομένη μεταβολή του μετρούμενου μεγέθους), η επίδραση του χώρου μέσα στον οποίο γίνεται η μέτρηση, καθώς επίσης και η διαταραχή του μετρούμενου συστήματος που ενδεχομένως να προκαλείται από τον ίδιο τον εξοπλισμό μέτρησης. Οι αισθητήρες πίεσης διακρίνονται σε μηχανικούς και ηλεκτρομηχανικούς. Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε μόνο με τους ηλεκτρομηχανικούς αισθητήρες. Οι ηλεκτρομηχανικοί αισθητήρες διαθέτουν μηχανικές διατάξεις των οποίων κάποια διάσταση μεταβάλλεται με την πίεση (Σχήμα 3.2). Οι διατάξεις αυτές μπορεί να είναι πλάκες, κελύφη ή σωλήνες. Η μεταβολή της διάστασης προκαλεί μηχανική κίνηση, η οποία μεταφέρεται σε ηλεκτρική διάταξη και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα.

Το σήμα εξόδου ενός ηλεκτρομηχανικού αισθητήρα αποδίδεται μαθηματικά ως εξής:

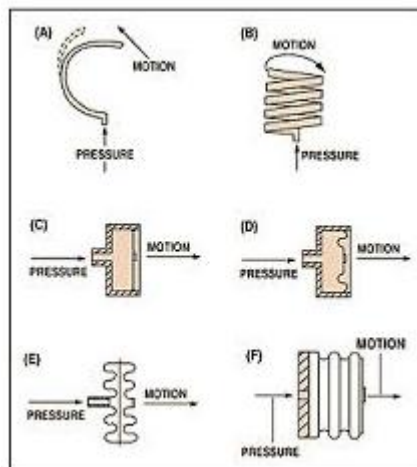
$$V = k_0 + k_1 P \quad (3.1)$$

όπου V η τάση εξόδου, P η μετρούμενη πίεση, k_0 η ολίσθηση του μηδενός και k_1 η ευαισθησία του αισθητήρα σε Volt / μονάδα πίεσης. Γενικά τα k_0 και k_1 δεν είναι σταθερές αλλά συντελεστές εξαρτώμενοι από τη θερμοκρασία (Σχήμα 3.3 και 3.4).

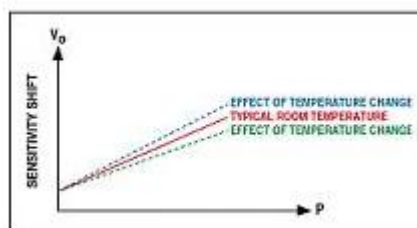
Οι αισθητήρες χαρακτηρίζονται επίσης από τα ακόλουθα μεγέθη:

Γραμμικότητα: Αναφέρεται στην απόκλιση της συμπεριφοράς του αισθητήρα από την ευθεία της εξίσωσης (3.1) (Σχήμα 3.5).

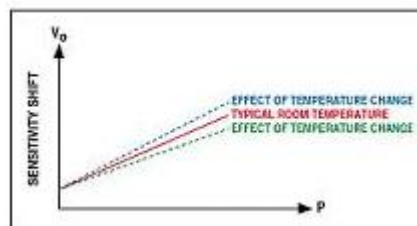
Επαναληψιμότητα: Εκφράζει την ικανότητα του αισθητήρα να δώσει την ίδια τιμή όταν εφαρμόζεται σ' αυτόν διαδοχικά την ίδια τιμή πίεσης.



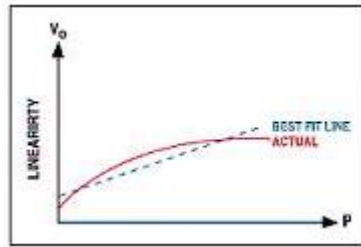
Σχήμα 3.2: Βασικά αισθητήρια πίεσης [4].



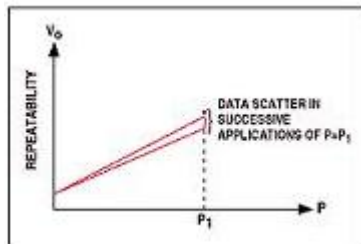
Σχήμα 3.3: Εξάρτηση της μετατόπισης από τη θερμοκρασία [4].



Σχήμα 3.4: Εξάρτηση της ευαισθησίας από τη θερμοκρασία [4].



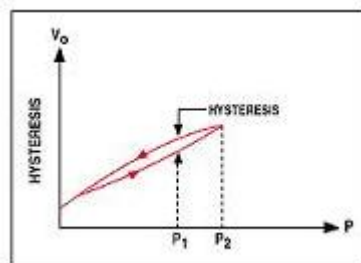
Σχήμα 3.5: Απόκλιση από τη γραμμική συμπεριφορά [4].



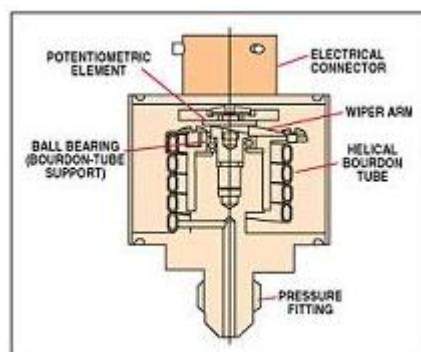
Σχήμα 3.6: Επαναληψιμότητα [4].

Υστέρηση: Εκφράζει την ικανότητα του αισθητήρα να δώσει τις ίδιες τιμές πίεσης κατά την αύξουσα και κατόπιν φθίνουσα μεταβολή της πίεσης.

Ευαισθησία (gauge factor): Ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του παραγόμενου ηλεκτρικού μεγέθους σε όλο το εύρος των μετρούμενων πιέσεων, προς την τιμή του για μηδενική πίεση. Αν π.χ. το μεταβαλλόμενο μέγεθος είναι η ηλεκτρική αντίσταση, τότε η ευαισθησία ορίζεται ως $\Delta R/R$, όπου R η αντίσταση όταν δεν εφαρμόζεται πίεση και ΔR η μεταβολή της αντίστασης όταν εφαρμοστεί η μέγιστη δυνατή πίεση.



Σχήμα 3.7: Υστέρηση [4].



Σχήμα 3.8: Ποτενσιομετρικός αισθητήρας [4].

3.2 Είδη αισθητήρων πίεσης

3.2.1 Ποτενσιομετρικοί

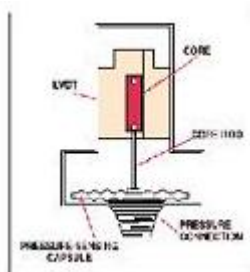
Χρησιμοποιούν μηχανική διάταξη, η παραμόρφωση της οποίας κινεί το δρομέα ενός ποτενσιομέτρου. Για να λειτουργεί αξιόπιστα πρέπει ο δρομέας να συνδέεται με τη μηχανική διάταξη αρκετά ισχυρά, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σφάλματα υστέρησης και επαναληψιμότητας. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές περιορισμένων απαιτήσεων, όπως π.χ. για τη μέτρηση της πίεσης του λιπαντικού του κινητήρα των αυτοκινήτων.

3.2.2 Επαγωγικοί

Η μηχανική κίνηση μετακινεί τον οπλισμό ενός ηλεκτρομαγνήτη. Απαιτούν εξωτερική διέγερση εναλλασσομένου ρεύματος. Αντί για ηλεκτρομαγνήτη χρησιμοποιείται και ο λεγόμενος γραμμικός μεταβαλλόμενος διαφορικός μετασχηματιστής, του οποίου ο οπλισμός μετακινούμενος μεταβάλλει την επαγωγική ζεύξη πρωτεύοντος - δευτερεύοντος. Η απόκριση αυτών των αισθητήρων είναι σχετικά αργή.

3.2.3 Χωρητικοί

Οι χωρητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν ένα λεπτό διάφραγμα ως οπλισμό ενός πυκνωτή. Η εφαρμοζόμενη πίεση παραμορφώνει το διάφραγμα, μεταβάλλοντας τη χωρητικότητα του πυκνωτή. Η μεταβολή της χωρητικότητας μπορεί να είναι γραμμική ή μή και είναι της τάξης μερικών pF (pikoFarad) για συνολική χωρητικότητα της τάξης των 50 - 100 pF .



Σχήμα 3.9: Επαγωγικός αισθητήρας με γραμμικό μεταβαλλόμενο διαφορικό μετασχηματιστή [4].

3.2.4 Πιεζοηλεκτρικοί

Αποτελούνται από κρύσταλλο χαλαζία ή άλλα κεραμικά υλικά. Είναι σημαντικό να θυμηθούμε ότι η πιεζοηλεκτρική τάση εμφανίζεται όσο διαρκεί η εφαρμοζόμενη μεταβολή της πίεσης. Γι' αυτό τους χρησιμοποιούμε για τη μέτρηση μεταβολών πίεσης.

3.2.5 Παραμόρφωσης

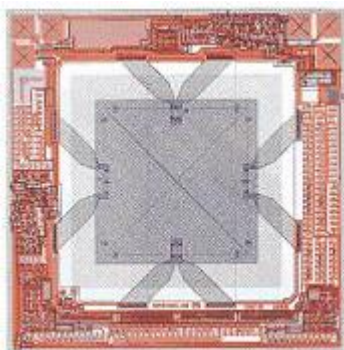
Η μέτρηση της πίεσης είναι δυνατή και με αισθητήρες παραμόρφωσης (strain), τους οποίους θα εξετάσουμε στο Κεφάλαιο που αναφέρεται στην Παραμόρφωση.

3.2.6 Πιεζοηλεκτρικοί ολοκληρωμένοι ημιαγωγοί

Χρησιμοποιούνται οι τεχνικές δημιουργίας ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για το σχηματισμό πιεζοαντιστατών στην επιφάνεια ενός ωαfer πυριτίου (Σχήμα 3.10).

Ως μηχανική διάταξη μέτρησης της πίεσης χρησιμοποιείται διάφραγμα, πάνω στο οποίο τοποθετούνται τέσσερις πιεζοαντιστάτες, δύο για τη μέτρηση των εφαπτομενικών και οι άλλοι δύο για τη μέτρηση των ακτινικών παραμορφώσεων, που αναπτύσσονται όταν ασκηθεί πίεση στο διάφραγμα. Οι τέσσερις αντιστάτες συνδέονται ως γέφυρα. Η εικόνα ενός τέτοιου αισθητήρα δίνεται στο Σχήμα 3.11.

Τα κυκλώματα ενίσχυσης, αντιστάθμισης θερμοκρασίας και βαθμονόμησης, μπορούν να ενσωματωθούν στο ίδιο ολοκληρωμένο στοιχείο. Οι αισθητήρες μπορούν να κατασκευασθούν για ευρεία περιοχή πιέσεων, μεταβάλλοντας κατάλληλα το πάχος του διαφράγματος, ενώ για πολύ χαμηλές πιέσεις τη διάμετρό του. Χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση όλων των πιέσεων (απόλυτης, διαφορικής και σχετικής). Λόγω των μικρών του διαστάσεων έχει ταχεία απόκριση και χρησιμοποιείται για δυναμική μέτρηση της πίεσης.



Σχήμα 3.10: Κατασκευή ολοκληρωμένου πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα πίεσης [4].

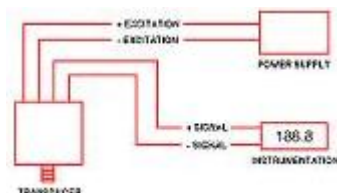


Σχήμα 3.11: Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας πίεσης, διαστάσεων μήκους 1,32, πλάτους 1,12 και ύψους 2,54 *cm*, συμπεριλαμβανομένης της θύρας επικοινωνίας [4].

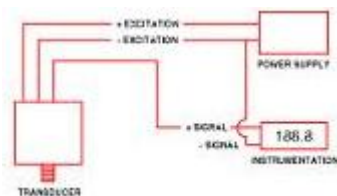
3.3 Εγκατάσταση και χρήση

Το σήμα εξόδου των αισθητήρων πίεσης μπορεί να είναι τάση (mV ή V) ή ρεύμα (mA). Η επιλογή του κατάλληλου σήματος εξόδου, εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Θα εξετάσουμε στη συνέχεια τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθώς και τη συνδεσμολογία για κάθε μία από αυτές τις τρεις περιπτώσεις. Οι αισθητήρες που έχουν σήμα εξόδου τάση της τάξης των mV χρησιμοποιούνται κυρίως σε εργαστηριακές εφαρμογές. Είναι φθηνοί, μικροί σε μέγεθος και απαιτούν εξωτερική τροφοδοσία. Επειδή το σήμα εξόδου είναι χαμηλό, δεν μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις - η ανώτερη απόσταση μεταξύ αισθητήρα και συστήματος μέτρησης είναι περίπου 60 *m*. Επίσης είναι ευαίσθητο σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από γειτονικά ηλεκτρικά σήματα (άλλα όργανα, γραμμές υψηλής τάσης, κ.λ.π.). Η συνδεσμολογία τους φαίνεται στο Σχήμα 3.12.

Οι αισθητήρες με ενισχυμένο σήμα εξόδου χρησιμοποιούνται σε ήπια βιομηχανικά περιβάλλοντα ή σε συνδυασμό με υπολογιστικά συστήματα, όπου απαιτούνται υψηλότερα συνεχή σήματα. Επειδή η ενισχυτική διάταξη εμπεριέχεται στον αισθητήρα, το κόστος και το μέγεθός τους είναι μεγαλύτερα απ' ό,τι αυτό των αισθητήρων που έχουν ως σήμα εξόδου μ . Η απόσταση μεταξύ αισθητήρα και συστήματος μέτρησης μπορεί να είναι μεγαλύτερη και είναι καλύτερα προστατευμένοι ως προς τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Η



Σχήμα 3.12: Συνδεσμολογία αισθητήρα πίεσης - σήμα εξόδου: τάση (mV) [2].

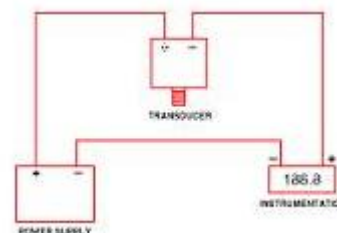


Σχήμα 3.13: Συνδεσμολογία αισθητήρα πίεσης - σήμα εξόδου: τάση (V) [2].

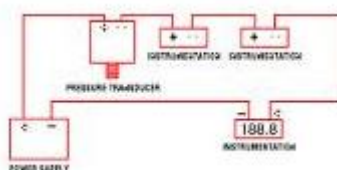
συνδεσμολογία τους φαίνεται στο Σχήμα 3.13.

Οι αισθητήρες των οποίων το σήμα εξόδου είναι ρεύμα (mA), χρησιμοποιούνται σε βαρειά βιομηχανικά περιβάλλοντα και είναι ο συνηθέστερος τύπος αισθητήρα που χρησιμοποιούμε σε εφαρμογές ελέγχου διεργασιών. Η διάταξη μετατροπής του σήματος σε ρεύμα είναι ενσωματωμένη στον αισθητήρα. Για το λόγο αυτό και αυτού του είδους οι αισθητήρες είναι μεγαλύτεροι και ακριβότεροι, σε σχέση με εκείνους των οποίων το σήμα εξόδου είναι mV . Οι αισθητήρες αυτής της κατηγορίας είναι προστατευμένοι από παρεμβολές. Το σήμα τους μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις. Η συνδεσμολογία τους φαίνεται στο Σχήμα 3.14.

Βασικό πλεονέκτημα του αισθητήρα πίεσης με έξοδο ρεύμα, είναι η δυνατότητά του να συνδεθεί με περισσότερες από μία συσκευές, ιδιαίτερα απλά. Η συνδεσμολογία φαίνεται



Σχήμα 3.14: Συνδεσμολογία αισθητήρα πίεσης - σήμα εξόδου: ρεύμα (mA) [2].



Σχήμα 3.15: Συνδεσμολογία αισθητήρα πίεσης με σήμα εξόδου ρεύμα (mA) με περισσότερα του ενός όργανα [2].

στο Σχήμα 3.15. .

Ο μόνος περιορισμός που τίθεται είναι η τροφοδοσία του αισθητήρα. Εστω ότι έχουμε έναν αισθητήρα πίεσης ($4 - 20 mA$) του οποίου η τάση τροφοδοσίας είναι $12 - 30 VDC$. Ο αισθητήρας συνδέεται με όργανο ψηφιακής ένδειξης, εμπέδησης 10Ω , ένα καταγραφικό εμπέδησης 25Ω και υπολογιστή εμπέδησης 200Ω . Δίνεται επίσης ότι η ολική αντίσταση των χρησιμοποιούμενων αγωγών είναι 5Ω . Η ελάχιστη τάση τροφοδοσίας υπολογίζεται από το νόμο του Ohm, λαμβάνοντας υπόψη ότι θα πρέπει να είναι ίση με την ελάχιστη τάση διέγερσης του αισθητήρα ($V_{ex,min}$ εδώ $12 VDC$) συν την πτώση τάσης στις επί μέρους συσκευές (για τη μέγιστη ένταση του σήματος εξόδου δηλαδή $20 mA$):

$$V_{min} = V_{ex,min} + i_{max}R_{ολ} = 12V + 0,02 A \times (10 + 25 + 200 + 5)\Omega = 16,8 V$$

Το πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά τη χρήση των αισθητήρων με σήμα εξόδου ρεύμα, είναι το πώς θα συνδυαστούν με τα διάφορα όργανα, δεδομένου ότι τα περισσότερα απ' αυτά δέχονται στην είσοδό τους τάσεις. Αυτό γίνεται παρεμβάλλοντας μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου του οργάνου έναν αντιστάτη, η τιμή της αντίστασης του οποίου καθορίζει τη σχέση μετατροπής του ρεύματος σε τάση. Αν, για παράδειγμα, χρησιμοποιήσουμε έναν αντιστάτη των 500Ω , τότε η έξοδος των $4 - 20 mA$ του αισθητήρα μετατρέπεται (εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm) σε τάση εξόδου $2 - 20 V$.

3.4 Υδραυλικό πλήγμα

Κατά τη χρήση των αισθητήρων πίεσης, εμφανίζεται ένα σύνθετο φαινόμενο το οποίο ονομάζεται υδραυλικό πλήγμα (waterhammer). Πρόκειται για στιγμιαία, αλλά πολύ μεγάλη μεταβολή της πίεσης που προκαλείται κατά την απότομη, κυρίως διακοπή, ή και την έναρξη της ροής του ρευστού σ' ένα υδραυλικό κύκλωμα. Όταν σταματίσουμε τη ροή μίας φλέβας νερού που ρέει στο εσωτερικό ενός αγωγού, τότε τα στοιχεία του νερού που κινούνται

πριν τον διακόπτη, συγκρούονται το ένα με το άλλο. Επειδή το νερό είναι ασυμπίεστο, δημιουργούνται κρουστικά κύματα και αναπτύσσονται τεράστιες πιέσεις. Το φαινόμενο παρομοιάζεται με ένα τρένο του οποίου η μηχανή πέφτει σε ένα τοίχο και ακινητοποιείται, ενώ τα βαγόνια που ακολουθούν συνθλίβονται λόγω της αδράνειας.

Οι πιέσεις που αναπτύσσονται είναι τόσο μεγάλες ώστε να μπορούν να καταστρέψουν τον αισθητήρα. Η καταστροφή προέρχεται από τη μόνιμη παραμόρφωση της μηχανικής διάταξης του αισθητήρα στην οποία εφαρμόζεται η πίεση. Αποτέλεσμα εμφάνισης του κέρατος κριού είναι ο έντονος ήχος που προέρχεται από τις υδραυλικές εγκαταστάσεις, όταν κλείνουμε απότομα μία βρύση. Σε συστήματα ελέγχου διεργασιών, το κέρατος κριού δημιουργείται κατά τη λειτουργία διαφόρων ηλεκτροβανών που περιλαμβάνονται στα υδραυλικά κυκλώματα, στα οποία, αν υπάρχουν αισθητήρες πίεσης, μπορεί να καταστραφούν. Για το λόγο αυτό θα πρέπει σε τέτοια κυκλώματα οι αισθητήρες να τοποθετούνται αφού παρεμβληθούν ειδικές προστατευτικές διατάξεις [3].

Κεφάλαιο 4

Παραμόρφωση

4.1 Γενικά

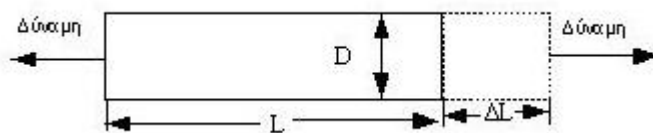
Η παραμόρφωση (strain), είναι η μεταβολή των διαστάσεων ενός σώματος, εξ αιτίας της εφαρμογής μίας δύναμης. Η παραμόρφωση ποσοτικοποιείται μέσω της παραμόρφωσης εφελκυσμού (ή *ανηγμένης μήκυνσης*) (ϵ) η οποία ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του μήκους (ΔL) προς το αρχικό μήκος (L):

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (4.1)$$

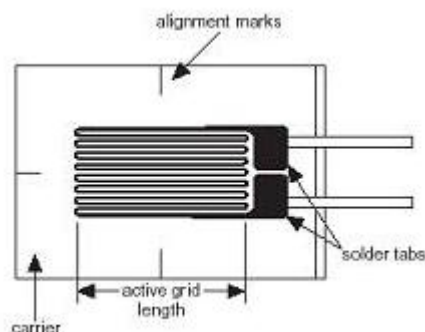
Η διάσταση L είναι αυτή κατά τη διεύθυνση της οποίας εφαρμόζεται η δύναμη.

Η παραμόρφωση μπορεί να είναι θετική ή αρνητική. Αν και αδιάστατο μέγεθος, η παραμόρφωση δίνεται έχοντας ως μονάδες το λόγο δύο μηκών (συνήθως mm/mm). Στην πράξη, η μετρούμενη παραμόρφωση είναι πολύ μικρή. Για το λόγο αυτό εκφράζεται συνήθως ως μικροπαραμόρφωση, δηλαδή $\epsilon \times 10^{-6}$.

Όταν μία ράβδος επιμηκύνεται υπό την επίδραση μίας διαμήκουσ δύναμης, όπως στο Σχήμα 4.1, τότε η άλλη της διάσταση D (η κάθετη προς τη φορά της εφαρμοζόμενης δύναμης) μικραίνει. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *εκλέπτυνση* ή *παραμόρφωση Poisson*.



Σχήμα 4.1: Ορισμός της παραμόρφωσης.



Σχήμα 4.2: Μεταλλικός αισθητήρας παραμόρφωσης [9].

Το μέγεθος της μεταβολής της διάστασης D , εξαρτάται από το λόγο *Poisson*, ο οποίος χαρακτηρίζει κάθε υλικό και ορίζεται ως ο αρνητικός λόγος της παραμόρφωσης ως προς τον άξονα τον κάθετο προς τη δύναμη που την προκαλεί (ϵ_T), προς την παραμόρφωση στον άξονα εφαρμογής της δύναμης (ϵ):

$$\nu = -\frac{\epsilon_T}{\epsilon} \quad (4.2)$$

Για παράδειγμα, ο λόγος Poisson του χάλυβα κυμαίνεται μεταξύ 0,25 και 0,30.

4.2 Ο αισθητήρας παραμόρφωσης

Πρόκειται για διάταξη της οποίας η ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται την παραμόρφωση την οποία υφίσταται. Για παράδειγμα, ο πιεζοαντιστατικός (piezoresistive) αισθητήρας παραμόρφωσης είναι ένας ημιαγωγός, του οποίου η ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται - μη γραμμικά - με την παραμόρφωση.

Ο περισσότερο διαδεδομένος αισθητήρας παραμόρφωσης είναι ο μεταλλικός. Αυτός αποτελείται από ένα πολύ λεπτό μεταλλικό στοιχείο (σύρμα, ή συνήθως λεπτό μεταλλικό φύλλο) (Σχήμα 4.2). Η παραμόρφωση εφαρμόζεται παράλληλα προς την επιφάνειά του. Η διατομή του μεταλλικού στοιχείου επιλέγεται να είναι πολύ μικρή, συγκριτικά με το μήκος του, ώστε να ελαχιστοποιείται η επίδραση από την εμφάνιση της παραμόρφωσης Poisson. Το μεταλλικό στοιχείο προσκολλάται σε μία λεπτή επιφάνεια, που ονομάζεται φορέας. Ο φορέας προσαρμόζεται στο σώμα του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε την παραμόρφωση. Με τον τρόπο αυτό, η αναπτυσσόμενη στο σώμα παραμόρφωση, μεταφέρεται στον αισθητήρα, ο οποίος αποκρίνεται μεταβάλλοντας γραμμικά την ηλεκτρική του αντίσταση. Η

ονομαστική αντίσταση των αισθητήρων που διατίθενται στο εμπόριο, κυμαίνονται μεταξύ 30 έως 3 000 Ω. Οι πιο συνηθισμένες τιμές είναι 120, 350 και 1 000 Ω.

Προσοχή απαιτείται στην τοποθέτηση του αισθητήρα πάνω στο δοκίμιο, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή μεταφορά της παραμόρφωσης από το δοκίμιο στο φορέα και στη συνέχεια στο μεταλλικό στοιχείο.

Βασική παράμετρος των αισθητήρων παραμόρφωσης είναι η ευαισθησία τους (gauge factor). Ο ορισμός της ευαισθησίας διαφέρει εδώ από εκείνο των αισθητήρων πίεσης. Ορίζεται ως ο λόγος της σχετικής μεταβολής της ηλεκτρικής του αντίστασης προς την σχετική μεταβολή του μήκους:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (4.3)$$

Η συνήθης τιμή της ευαισθησίας των μεταλλικών αισθητήρων παραμόρφωσης είναι 2.

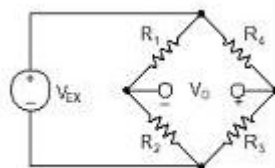
Ιδανικά θα θέλαμε η ηλεκτρική αντίσταση να μεταβάλλεται μόνο συναρτήσει της παραμόρφωσης. Το μεταλλικό όμως στοιχείο καθώς και το μετρούμενο δοκίμιο επηρεάζονται από τη θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό οι αισθητήρες υφίστανται επεξεργασία κατά την κατασκευή τους, ώστε να αντισταθμίζονται οι όποιες επιδράσεις της θερμοκρασίας στο μετρούμενο δοκίμιο. Παρ' όλα αυτά, δεν είναι δυνατόν να εξαλειφθεί τελείως η επίδραση της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, έστω αισθητήρας ο οποίος διαθέτει αντιστάθμιση για το αλουμίνιο, του οποίου η εξάρτηση από τη θερμοκρασία είναι $23 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Αν η ονομαστική του αντίσταση είναι 1 000 Ω και η ευαισθησία του 2, το σφάλμα στην παραμόρφωση θα είναι $11,5 \text{ } \mu\epsilon/^\circ\text{C}$. Άρα απαιτείται καλύτερη αντιστάθμιση θερμοκρασίας.

4.3 Πρακτικές μέτρησης

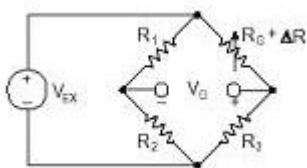
Στην πράξη, η τάξη μεγέθους των παραμορφώσεων είναι $\epsilon \times 10^{-3}$. Για το λόγο αυτό, η μέτρηση της παραμόρφωσης απαιτεί πολύ ακριβείς μετρήσεις μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης. Έστω, για παράδειγμα, ένα δοκίμιο το οποίο υφίσταται σημαντική παραμόρφωση ίση με $500 \text{ } \mu\epsilon$. Η ηλεκτρική αντίσταση αισθητήρα ευαισθησίας 2, θα μεταβληθεί κατά $2(500 \times 10^{-6}) = 0,1\%$. Αν η ονομαστική του αντίσταση είναι 120 Ω, η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης θα είναι 0,12 Ω.

Για να μετρήσουμε τόσο μικρές μεταβολές τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης, με ταυτόχρονη αντιστάθμιση της θερμοκρασίας, όπως αναφέραμε προηγουμένως, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε διάταξη γέφυρας, με πηγή τάσης ή ρεύματος. Μιά τυπική διάταξη γέφυρας Wheatstone φαίνεται στο Σχήμα 4.3.

Η τάση εξόδου της γέφυρας δίνεται από την σχέση:



Σχήμα 4.3: Γέφυρα Wheatstone [9].



Σχήμα 4.4: Γέφυρα Wheatstone με αισθητήρα παραμόρφωσης [9].

$$V_o = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] V_{EX}. \quad (4.4)$$

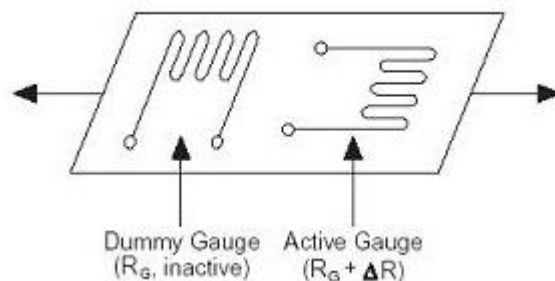
Από την σχέση 4.4 είναι προφανές ότι όταν $R_1/R_2 = R_4/R_3$, η τάση V_o θα είναι μηδενική. Στην περίπτωση αυτή η γέφυρα βρίσκεται σε ισορροπία. Οποιαδήποτε μεταβολή της αντίστασης σε οποιοδήποτε σκέλος της γέφυρας θα έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μίας τάσης V_o μη μηδενικής. Επομένως, αν αντικαταστήσουμε την αντίσταση R_4 του Σχήματος 4.3 με έναν αισθητήρα παραμόρφωσης, ονομαστικής αντίστασης R_G (Σχήμα 4.4), η τάση εξόδου της γέφυρας θα είναι μη μηδενική, για οποιαδήποτε μεταβολή της ονομαστικής αυτής αντίστασης.

Αν μία παραμόρφωση μεταβάλλει την ονομαστική αντίσταση του αισθητήρα κατά ΔR , αυτή η μεταβολή μπορεί να γραφτεί ως εξής: $\Delta R = R_G GF \epsilon$. Υποθέτοντας ότι $R_1 = R_2$ και $R_3 = R_G$, η εξίσωση της τάσεως εξόδου της γέφυρας (4.4), μπορεί να πάρει την ακόλουθη μορφή:

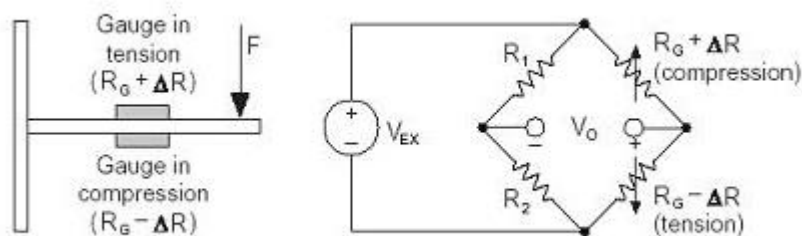
$$\frac{V_o}{V_{EX}} = \frac{GF \epsilon}{4} \left[\frac{1}{1 + GF \frac{\epsilon}{2}} \right] \quad (4.5)$$

Στην σχέση (4.5), ο όρος μέσα στην αγκύλη δηλώνει ότι η τάση εξόδου της γέφυρας δεν μεταβάλλεται γραμμικά με την παραμόρφωση.

Η επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας στη γέφυρα έναν επιπλέον αισθητήρα παραμόρφωσης, της ίδιας ονομαστικής αντίστασης. Στο



Σχήμα 4.5: Χρήση ανενεργού αισθητήρα για αντιστάθμιση των θερμοκρασιακών μεταβολών [9].

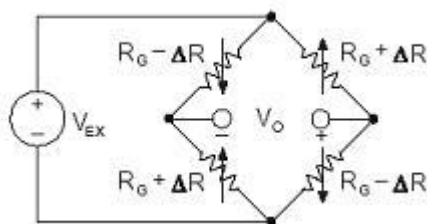


Σχήμα 4.6: Διάταξη δύο ενεργών αισθητήρων [9].

Σχήμα 4.5 φαίνεται η διάταξη δύο αισθητήρων, όπου ο ένας είναι ενεργός ($R_G + \Delta R$) και ο δεύτερος είναι τοποθετημένος εγκάρσια ως προς την εφαρμοζόμενη παραμόρφωση. Ο δεύτερος ονομάζεται και *ψευδοαισθητήρας* (dummy gauge), γιατί η εφαρμοζόμενη παραμόρφωση δεν μεταβάλλει την ηλεκτρική του αντίσταση. Η ηλεκτρική αντίσταση όμως και των δύο αισθητήρων θα μεταβληθεί με τον ίδιο τρόπο εφόσον αλλάξει η θερμοκρασία, οπότε ο λόγος των αντιστάσεών τους δεν θα μεταβληθεί, άρα ούτε και η τάση εξόδου V_0 της γέφυρας. Με το τρόπο αυτό ελαχιστοποιείται η επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας στη μέτρηση.

Εναλλακτικά, μπορούμε να διπλασιάσουμε την ευαισθησία της γέφυρας, χρησιμοποιώντας και τους δύο αισθητήρες ως ενεργούς. Στο Σχήμα 4.6 δίνεται το παράδειγμα δύο αισθητήρων, από τους οποίους ο ένας μετρά *ελκυσμό* (tension) και ο άλλος *θλίψη* (compression). Στο ίδιο σχήμα δίνεται και η αντίστοιχη διάταξη της γέφυρας.

Η τάση εξόδου αυτής της διάταξης αποδεικνύεται ότι είναι γραμμική συνάρτηση της παραμόρφωσης και δίνεται από την έκφραση:



Σχήμα 4.7: Γέφυρα τεσσάρων αισθητήρων παραμόρφωσης [9].

$$\frac{V_o}{V_{EX}} = \frac{GF \epsilon}{2} \quad (4.6)$$

Συγκρίνοντας τις σχέσεις (4.5) και (4.6), παρατηρούμε ότι για δεδομένη τάση διέγερσης V_{EX} , η τάση εξόδου της γέφυρας είναι περίπου διπλάσια στην περίπτωση των δύο ενεργών αισθητήρων.

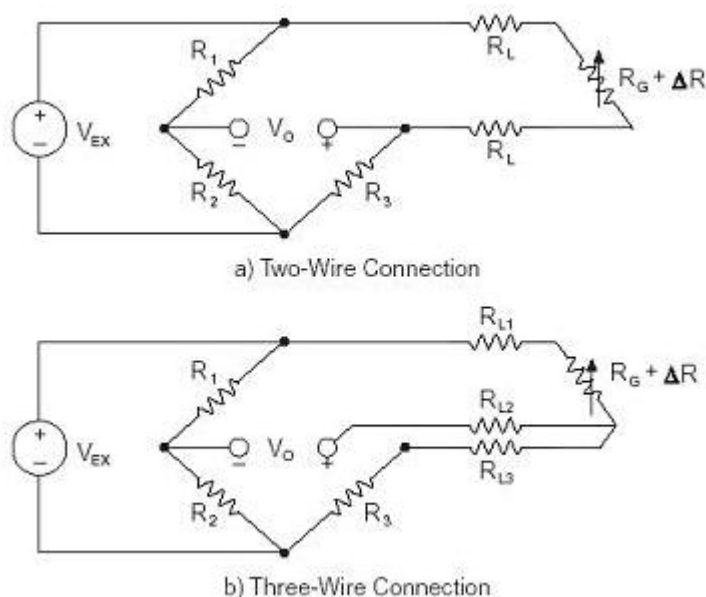
Τέλος, είναι δυνατόν να αυξηθεί περισσότερο η ευαισθησία του κυκλώματος, αντικαθιστώντας το σύνολο των αντιστατών της γέφυρας με ενεργούς αισθητήρες παραμόρφωσης, από τους οποίους οι δύο θα μετρούν έκταση και οι δύο συμπύεση. Το σχετικό κύκλωμα φαίνεται στο Σχήμα 4.7 και η τάση εξόδου δίνεται από την σχέση:

$$\frac{V_o}{V_{EX}} = -GF \epsilon \quad (4.7)$$

Οι μαθηματικές σχέσεις (4.4) έως (4.7) που δίνουν την τάση εξόδου της γέφυρας Wheatstone, βασίζονται στην υπόθεση ότι η γέφυρα είναι σε ισορροπία, δηλαδή ότι η τάση της είναι μηδενική όταν δεν εφαρμόζεται παραμόρφωση. Στην πράξη όμως, οι ανοχές στην τιμή των αντιστατών καθώς και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά την τοποθέτηση των αισθητήρων στα δοκίμια, έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μη μηδενικής τάσης V_o . Ο μηδενισμός της μπορεί να γίνει είτε προβλέποντας μία μεταβλητή αντίσταση στο κύκλωμα της γέφυρας, είτε μέσω του λογισμικού μέτρησης.

Επίσης στις πιο πάνω σχέσεις αγνοήσαμε τις αντιστάσεις των αγωγών των αισθητήρων παραμόρφωσης. Αυτό έγινε για να κατανοήσουμε καλύτερα την λειτουργία τους, καθώς και την χρήση τους μέσω της γέφυρας. Αγνοώντας όμως τις αντιστάσεις αυτές στην πράξη εισάγουμε στη μέτρησή μας σημαντικά σφάλματα.

Εστω, για παράδειγμα, η συνδεσμολογία του Σχήματος 4.8(a): Ο αισθητήρας παραμόρφωσης ενώνεται με την γέφυρα, μέσω δύο αγωγών μήκους 15 m ο καθένας και αντίστασης 1 Ω. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το συγκεκριμένο σκέλος της γέφυρας να εμφανίζει πρό-



Σχήμα 4.8: Επίδραση της αντίστασης των αγωγών [9].

σθετη αντίσταση ίση με 2Ω . Εκτός από τη μη μηδενική τάση ισορροπίας, η ύπαρξη της πρόσθετης αυτής αντίστασης μειώνει την ευαισθησία της γέφυρας. Αποδεικνύεται ότι η μείωση αυτή ισούται με $(1 + R_L/R_G)$. Το εισαγόμενο σφάλμα διορθώνεται αν μετρήσουμε την αντίσταση R_L των αγωγών και εισάγουμε την τιμή της στις σχετικές εξισώσεις. Δυσκολότερο πρόβλημα όμως, είναι αυτό του υπολογισμού της μεταβολής της αντίστασης των αγωγών λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας. Παίρνοντας υπόψη μας ότι ο θερμοκρασιακός συντελεστής μεταβολής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του χαλκού ισούται με $0,0068 \Omega \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, βλέπουμε ότι ακόμη και μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας, οδηγούν σε σφάλματα αρκετών με. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας τη συνδεσμολογία των τριών αγωγών (Σχήμα 4.8 b). Στην περίπτωση αυτή οι αντιστάσεις R_{L1} και R_{L3} εμφανίζονται σε διαδοχικά σκέλη της γέφυρας, με αποτέλεσμα οι όποιες μεταβολές τους λόγω της θερμοκρασίας να αλληλοαναιρούνται. Η αντίσταση R_{L2} παρεμβάλλεται στην έξοδο της γέφυρας. Το ρεύμα που την διαρρέει είναι πολύ μικρό, με αποτέλεσμα οι όποιες μεταβολές της τιμής της να είναι αμελητέες.

Κεφάλαιο 5

pH

5.1 Γενικά

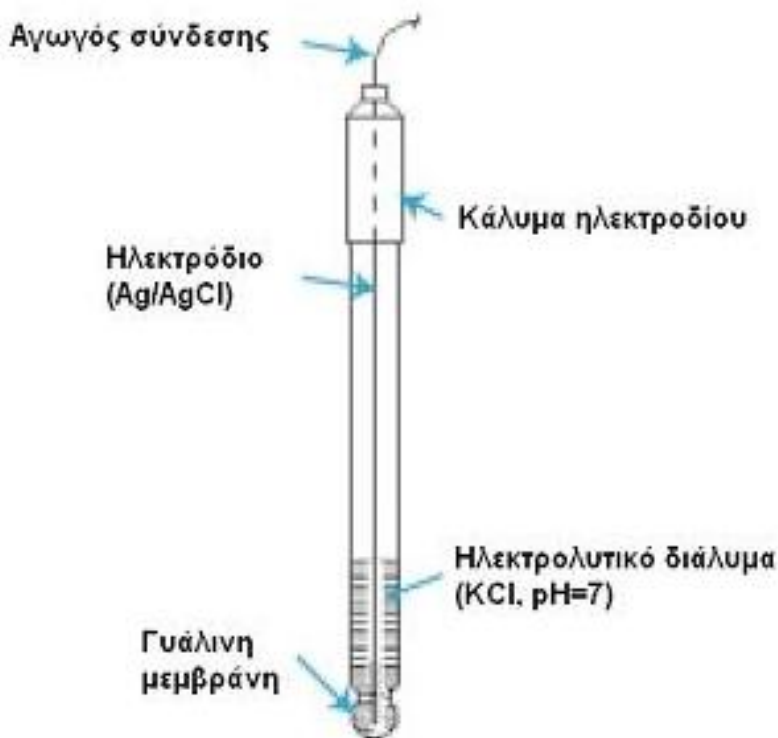
Το pH είναι μία παράμετρος με την οποία ποσοτικοποιείται ο *βαθμός οξύτητας* των διαλυμάτων. Το κατά πόσο ένα διάλυμα είναι όξινο ή αλκαλικό εξαρτάται από τη συγκέντρωση σε αυτό του ιόντος οξονίου (H_3O^+). Αν είναι μεγαλύτερη των $10^{-7} mol.l^{-1}$, τότε το διάλυμα είναι όξινο, ενώ αν είναι μικρότερη της τιμής αυτής, τότε το διάλυμα είναι αλκαλικό. Δηλαδή αν το pH είναι ίσο με 7, τότε το διάλυμα είναι ουδέτερο. Αν κυμαίνεται μεταξύ 0 - 7, τότε είναι όξινο ενώ αν είναι μεταξύ 7 - 14, τότε είναι αλκαλικό.

5.2 Μέθοδοι μέτρησης

Η σύγχρονη μέθοδος μέτρησης του pH βασίζεται στην κατασκευή γαλβανικών στοιχείων [13]. Μετρείται δηλαδή η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο ημιστοιχείων, η οποία οφείλεται στο οξόνιο. Για να γίνει αυτό απαιτούνται τα εξής:

- Ένας μετρητής pH, ο οποίος μετρά με ακρίβεια και μετατρέπει την τάση η οποία προκαλείται από το οξόνιο, σε τιμή του pH.
- Ένα ηλεκτρόδιο pH υάλου (ονομάζεται γενικά ενδεικτικό ηλεκτρόδιο), του οποίου το δυναμικό εξαρτάται από τη συγκέντρωση του οξονίου.
- Ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς, το οποίο έχει χρονικά σταθερό δυναμικό και ανεξάρτητο της συγκέντρωσης του οξονίου.

Ο μετρητής pH μετρά τη διαφορά δυναμικού μεταξύ του ηλεκτροδίου pH (το οποίο ανιχνεύει τα ιόντα οξονίου) και του ηλεκτροδίου αναφοράς (του οποίου το σήμα είναι



Σχήμα 5.1: Ηλεκτρόδιο υάλου [6].

ανεξάρτητο από τη σύσταση του διαλύματος). Πρόκειται ουσιαστικά για έναν ενισχυτή μεγάλης εμπέδησης, ο οποίος μετρά τη διαφορά δυναμικού και εμφανίζει το αποτέλεσμα είτε σε ψηφιακή είτε σε αναλογική μορφή.

Το δυναμικό του ηλεκτροδίου pH μεταβάλλεται με τη συγκέντρωση των ιόντων οξονίου. Ένα τέτοιο ηλεκτρόδιο απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1.

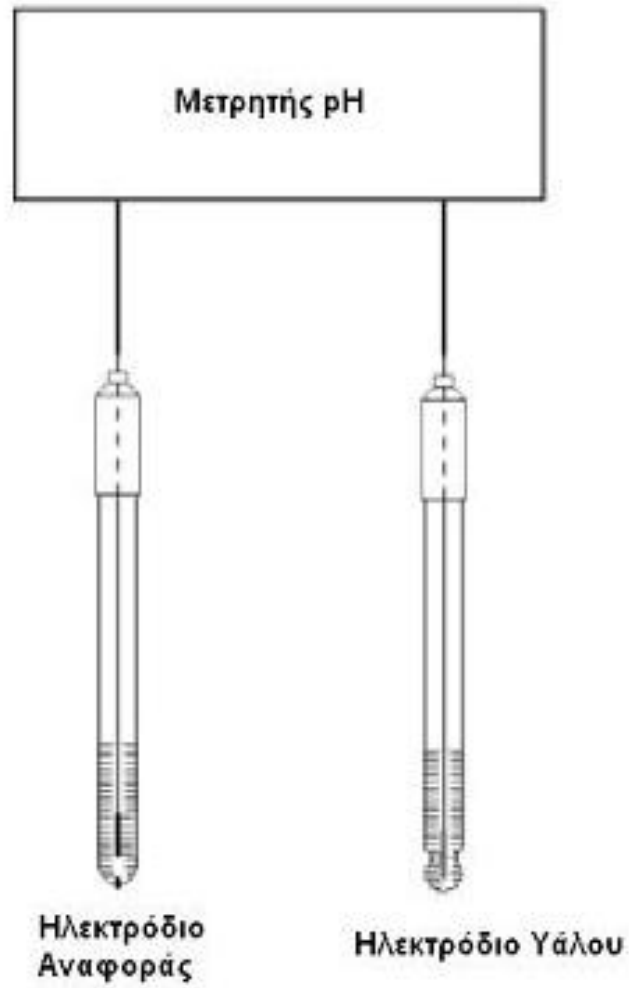
Το ηλεκτρόδιο αναφοράς έχει ανάλογη κατασκευή με το ενδεικτικό ηλεκτρόδιο.

Το pH προκύπτει από την μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ ηλεκτροδίου pH υάλου και ηλεκτροδίου αναφοράς. (Σχήμα 5.2).

Στα σύγχρονα συστήματα, τα δύο ηλεκτρόδια - αναφοράς και υάλου - ενσωματώνονται σε ένα συνδυασμένο ηλεκτρόδιο.

Η προκύπτουσα διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, συνδέεται με τη συγκέντρωση του οξονίου, άρα και με το pH, μέσω της σχέσης του Nernst:

$$U = U_0 + \frac{2,303RT}{z_i F} \log[H_3O^+] \quad (5.1)$$



Σχήμα 5.2: Διάταξη μέτρησης pH [6].

όπου U η μετρούμενη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, U_0 μία σταθερή τάση εξαρτώμενη από το ηλεκτρόδιο αναφοράς, R η παγκόσμιος σταθερά των αερίων ($8,31441 \text{ J.K}^{-1}\text{mol}^{-1}$), T η απόλυτη θερμοκρασία του διαλύματος, z_i η (αλγεβρική) τιμή του φορτίου το οξονίου (+1), F η σταθερά Faraday ($96\,484,56 \text{ }^\circ\text{C}$). Όπως βλέπουμε από την εξίσωση (5.1), η τιμή του pH εξαρτάται και από τη θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό, τα σύγχρονα pH-μετρα έχουν ενσωματωμένους και αισθητήρες θερμοκρασίας. Η τάση U είναι της τάξης μεγέθους των mV .

Θεωρητικά ένα pH-μετρο κατασκευάζεται έτσι ώστε να παράγει τάση 0 mV , όταν το μετρούμενο pH είναι 7. Η τιμή αυτή ονομάζεται *μηδενικό δυναμικό* του ηλεκτροδίου. Το μηδενικό δυναμικό είναι ένα από τα δύο βασικά χαρακτηριστικά του ηλεκτροδίου. Το δεύτερο είναι η *απόκριση κατά Nernst* του ηλεκτροδίου, η οποία μας δίνει τη διαφορά του μετρούμενου δυναμικού μεταξύ δύο διαλυμάτων των οποίων το pH διαφέρει κατά 1, σε σχέση με την αναμενόμενη θεωρητική τιμή (από τη σχέση Nernst). Η θεωρητική τιμή της είναι $59,16 \text{ mV.pH}^{-1}$ στους $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Στην πραγματικότητα όμως υπάρχουν αποκλίσεις, οι οποίες υπολογίζονται μέσω της βαθμονόμησης του ηλεκτροδίου.

Βιβλιογραφία

- [1] CAPGO Data Acquisition and Data Logging Web Page:
<http://www.capgo.com/Resources/Sensors/Temperature/TempHome/TempMeasurement.html>.
- [2] Omegadyne, Pressure Transducers – Installation and Use:
<http://www.omegadyne.com>.
- [3] Omegadyne, Waterhammer - A complex phenomenon with a simple solution:
<http://www.omegadyne.com>.
- [4] Bicking R.E. *Fundamentals of Pressure Sensor Technology*. www.sensormag.com, 1998.
- [5] Doebelin E.O. *Measurement Systems Application and Design*. McGraw-Hill International Editions, New York, 1990.
- [6] Metrohm Ltd. *The backgrounds of pH measurement and hints for your daily work*. Metrohm Ltd., 1999.
- [7] Michalski L., Eckersdorf K., McGee J. *Temperature Measurement*. John Wiley and Sons, 1991.
- [8] Morris A.S. *Principles of Measurement and Instrumentation*. Prentice Hall, New York, 1993.
- [9] National Instruments. *Strain gauge measurements – A tutorial, Application Note 078*. www.ni.com, 1998.
- [10] Nicholas J.V., White D.R. *Traceable Temperatures – An Introduction to Temperature Measurement and Calibration*. John Wiley and Sons, 1994.
- [11] Omega Engineering Inc. *Omega Temperature Measurement Handbook and Encyclopedia*. Omega Engineering Inc, 1992.

- [12] Φλόκα Αθ. Απόστολου. *Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1992.
- [13] Καραγιάννη Μ.Ι. *Χημική Οργανολογία - Εισαγωγικά Μαθήματα*. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 1992.