

**ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ**



ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΖΥΓΑΡΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΙΧΑΛΑΡΙΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΑΜ:3751**

Επιβλέπων: Διπλ. Φυσ. (M.Sc.) Φραγκιαδάκης Νικόλαος
Καθηγητής

Χανιά, Μάιος 2011

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει στόχο να αναλύσει τη δομή, τον τρόπο λειτουργίας και την κατασκευή μίας σύγχρονης ηλεκτρονικής ζυγαριάς.

Θα γίνει ανάλυση των αισθητηρίων που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρονικές ζυγαριές σήμερα, κυρίως του πιο διαδεδομένου, του strain gauge ή αλλιώς πιεζοαντίσταση.

Λέξεις κλειδιά

Ηλεκτρονική ζυγαριά, δυναμοκυψέλη, πιεζοαντίσταση, γέφυρα Wheatstone

Abstract

The present work aims at analyzing the structure, the way of operation and the manufacture of a modern electronic scale. There will be analysis of the sensors that are used in the electronic scale today, mainly the most widespread, of the strain gauge.

Key words

Electronic scale, load cell, strain gauge, Wheatstone bridge

Περιεχόμενα

| | |
|--------------------------|---|
| Περίληψη | 2 |
| Abstract | 2 |
| Ευρετήριο σχημάτων | 5 |

Κεφάλαιο 1

| | |
|---|----|
| Η Πιεζοαντίσταση | 7 |
| 1.1 Εισαγωγή | 8 |
| 1.2 Κατασκευή της πιεζοαντίστασης | 9 |
| 1.3 Η λειτουργία της πιεζοαντίστασης | 12 |
| 1.4 Η χρήση των πιεζοαντιστάσεων | 14 |
| 1.5 Κριτήρια επιλογής πιεζοαντίστασης | 16 |
| 1.5.1 Φύση της πίεσης | 17 |
| 1.5.1.1. Στατική πίεση | 17 |
| 1.5.1.2. Δυναμική πίεση | 17 |
| 1.5.2 Ηλεκτρική αντίσταση | 18 |
| 1.5.3 Περιβαλλοντολογικές συνθήκες | 19 |
| 1.5.3.1 Θερμοκρασία | 19 |
| 1.5.3.2 Κενό | 20 |
| 1.5.3.3 Υδροστατική πίεση | 21 |
| 1.5.3.4 Ακτινοβολία | 21 |
| 1.5.3.5 Μαγνητικά πεδία | 21 |
| 1.6 Επιλογή του στοιχείου συνένωσης | 22 |
| 1.6.1 Λειτουργία του στοιχείου συνένωσης | 22 |
| 1.6.2 Χαρακτηριστικά των καθορισμένων μεθόδων | 22 |
| 1.7 Υποδείξεις για την σωστή εκτέλεση των εφαρμογών των πιεζοαντιστάσεων | 24 |
| 1.8 Εκτίμηση της ακρίβειας | 26 |

Κεφάλαιο 2

| | |
|--|----|
| Η Γέφυρα Wheatstone | 27 |
| 2.1 Εισαγωγή | 28 |
| 2.2 Στοιχειώδεις κυκλώματα με πιεζοαντιστάσεις | 32 |
| 2.2.1 Μετρήσεις στην εφελκυστική ράβδο | 34 |
| 2.2.2 Μετρήσεις στην κάμπουσα δοκό | 36 |
| 2.2.3 Μετρήσεις στον στρεφόμενο άξονα | 37 |
| 2.3 Ανάλυση και αντιστάθμιση των μεγάλων πιέσεων | 38 |

| | |
|---|----|
| 2.4 Αντιστάθμιση των αρνητικών επιπτώσεων, ειδικότερα των επιπτώσεων της θερμοκρασίας | 42 |
| 2.5 Εξάλειψη των καλωδιακών σφαλμάτων | 45 |
| 2.6 Πίνακας διαφορετικών ρυθμίσεων κυκλωμάτων | 49 |
| 2.7 Παρατηρήσεις για τα όρια της αντιστάθμισης των σφαλμάτων | 52 |
| 2.8 Τα σφάλματα γραμμικότητας του κυκλώματος της γέφυρας Wheatstone | 53 |
| 2.8.1 Γέφυρα ενός βραχίονα | 53 |
| 2.8.2 Κύκλωμα μισής γέφυρας | 56 |
| 2.8.3 Κύκλωμα πλήρους γέφυρας | 58 |
| | |
| Κεφάλαιο 3 | |
| Δυναμοκυψέλες / Load cells | 59 |
| 3.1 Εισαγωγή | 60 |
| 3.2 Αρχή λειτουργίας των δυναμοκυψέλων | 61 |
| 3.2.1 Οι υδραυλικές δυναμοκυψέλες | 61 |
| 3.2.2 Οι δυναμοκυψέλες με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα (Pneumatic) | 62 |
| 3.2.3 Οι δυναμοκυψέλες με πιεζοαντίσταση | 62 |
| 3.3 Τύποι δυναμοκυψελών | 63 |
| | |
| Κεφάλαιο 4 | |
| Ηλεκτρονική ζυγαριά | 68 |
| 4.1 Εισαγωγή | 69 |
| 4.2 Ο Ενισχυτής | 70 |
| 4.3 Μικροελεκτήρας | 71 |
| 4.4 Το τροφοδοτικό | 80 |
| | |
| Βιβλιογραφία | 81 |

Ευρετήριο σχημάτων

| | |
|--|----|
| Σχήμα 1: Η αρχή κατασκευής της πιεζοαντίστασης..... | 10 |
| Σχήμα 2: Απλός μετρητής μηχανικής τάσης με αντίσταση..... | 11 |
| Σχήμα 3: Διάταξη ενός μετατροπέα με προσκολλημένη πιεζοαντίσταση..... | 11 |
| Σχήμα 4: Σχηματική δομή μίας αλυσίδας μετρήσεων..... | 15 |
| Σχήμα 5 : Το κύκλωμα της γέφυρας Wheatstone..... | 28 |
| Σχήμα 6: Γραφική παράσταση για τους κανόνες των ενδείξεων στη γέφυρα Wheatstone..... | 30 |
| Σχήμα 7: Διάφορες εκδοχές του κυκλώματος της γέφυρας Wheatstone..... | 33 |
| Σχήμα 8: Η εφελκυστική ράβδος..... | 34 |
| Σχήμα 9: Η κάμπουσα δοκός..... | 34 |
| Σχήμα 10: Ο στρεφόμενος άξονας..... | 37 |
| Σχήμα 11: Εφελκυστική ράβδος με κάμπουσα ροπή..... | 38 |
| Σχήμα 12: Ράβδος σύμφωνα με το σχήμα 11 με πιεζοαντιστάσεις..... | 38 |
| Σχήμα 13: Παράδειγμα της γραφικής επίλυσης μεικτών πιέσεων..... | 40 |
| Σχήμα 14: Δοκός σύμφωνα με το σχήμα 11 εφοδιασμένη με διαμήκεις και πλευρικούς μετρητές..... | 40 |
| Σχήμα 15: Συνδεσμολογία μισής γέφυρας με τέσσερις μετρητές..... | 42 |
| Σχήμα 16: Συνδέσεις μεταξύ των μετρητών και τα στοιχεία του ενισχυτή..... | 45 |
| Σχήμα 17: Το σχετικό σφάλμα γραμμικότητας της γέφυρας ενός βραχίονα σε συνάρτηση με τη σχετική μεταβολή της αντίστασης ή της πίεσης..... | 55 |
| Σχήμα 18: Σχετικό σφάλμα γραμμικότητας του κυκλώματος της μισής γέφυρας σε σχέση με την μεταβολή των αντιστάσεων R_1 και R_2 ή R_1 έως R_4 | 57 |
| Σχήμα 19: Η γεφυρα Wheatstone..... | 60 |
| Σχήμα 20,21: Δυναμοκυψέλη συμπίεσης..... | 63 |
| Σχήμα 22,23,24: Δυναμοκυψέλες συμπίεσης και τεντώματος..... | 64 |
| Σχήμα 25,26: Δυναμοκυψέλη με δοκό σχήματος S..... | 65 |
| Σχήμα 27,28: Δυναμοκυψέλη πλατφόρμας και ενιαίου σημείου..... | 66 |

| | |
|--|----|
| Σχήμα 29: Δυναμοκυψέλες χαμηλής κατατομής..... | 66 |
| Σχήμα 30,31,32: Δυναμοκυψέλη κάμπτουςας δοκού..... | 67 |
| Σχήμα 33,34: Δυναμοκυψέλη σε σχήμα μεταλλικού κουτιού..... | 67 |
| Σχήμα 35: Το διάγραμμα της ηλεκτρονικής ζυγαριάς..... | 69 |
| Σχήμα 36: Ο ενισχυτής που χρησιμοποιήσαμε..... | 70 |
| Σχήμα 37: Το κύκλωμα του μικροελεκτή και η σύνδεσή του με την οθόνη lcd..... | 72 |
| Σχήμα 38: Το διάγραμμα ροής του μικροελεκτή..... | 73 |
| Σχήμα 39: Διάφορες απεικονίσεις της οθόνης κατά τη λειτουργία της ζυγαριάς..... | 79 |
| Σχήμα 40: Το σχεδιάγραμμα του τροφοδοτικού..... | 80 |

Κεφάλαιο 1^ο

Η ΠΙΕΖΟΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (STRAIN GAUGE)

1.1 Εισαγωγή

Η **πιεζοαντίσταση (strain gauge)** είναι ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία της ηλεκτρονικής τεχνικής μετρήσεων που εφαρμόζεται στην μέτρηση μηχανικών ποσοτήτων. Όπως υποδηλώνει το όνομά τους χρησιμοποιούνται για την μέτρηση πίεσης. Ως τεχνικός όρος “η πίεση” αποτελείται από ελαστική και συμπιεστική πίεση, διακεκριμένη από θετικό ή αρνητικό πρόσημο. Γι'αυτό οι πιεζοαντιστάσεις χρησιμοποιούνται για να ανιχνεύσουν τη διαστολή όπως επίσης και τη συστολή.

Η πίεση του σώματος προκαλείται από εξωτερική επιρροή ή από εσωτερική επίδραση. Η πίεση του σώματος μπορεί να προκληθεί από δυνάμεις, πιέσεις, ορμές, θέρμανση, δομικές αλλαγές του υλικού. Αν συγκεκριμένες προϋποθέσεις εκπληρωθούν, η ποσότητα ή η τιμή της επιδρούσας ποσότητας μπορεί να απορρέει από τη μετρήσιμη τιμή πίεσης.

Στην πειραματική ανάλυση πίεσης, αυτό το χαρακτηριστικό χρησιμοποιείται ευρέως. Η πειραματική ανάλυση πίεσης χρησιμοποιεί τις τιμές πίεσης που έχουν μετρηθεί στην επιφάνεια της δοκού ή σε κατασκευασμένο μέρος για να εκφράσει την πίεση στο υλικό και επίσης να προβλέψει την ασφάλεια και την αντοχή του.

Ειδικοί μετατροπείς μπορεί να σχεδιαστούν για τη μέτρηση των δυνάμεων ή άλλων ποσοτήτων πχ ορμών, πιέσεων, επιταχύνσεων, εκτοπισμάτων, δονήσεων και άλλων. Οι μετατροπείς συνήθως περιλαμβάνουν ένα κατάλληλα διαμορφωμένο ελαστικό στοιχείο το οποίο παράγει μία καθαρή σχέση μεταξύ της μετρούμενης ποσότητας και της πίεσης σε ένα κατάλληλο σημείο στο ελαστικό στοιχείο.

Έχουμε αναφέρει τα κύρια πεδία χρήσης των πιεζοαντιστάσεων. Κατά τη διάρκεια της ύπαρξης της πιεζοαντίστασης, μία μεγάλη ποικιλία σχεδιασμών έχει παρουσιαστεί για να καλύψει διάφορες απαιτήσεις.

Αυτό οδηγεί σε μία πολλαπλή χρησιμότητα και σε μία προσαρμοστικότητα σε διάφορες και μερικές φορές πολύ ακραίες περιβαλλοντολογικές συνθήκες και έκαναν τη πιεζοαντίσταση επικρατέστερη στο πεδίο μέτρησης της πίεσης. Αυτό εμπλουτίζεται παραπέρα από:

- τα πλεονεκτήματα της πιεζοαντίστασης να είναι ένα ηλεκτρονικό μέσο μέτρησης
- την πιθανότητα μίας επιλεκτικής μέτρησης ξεχωριστών συνιστώσεων πίεσης με τη βοήθεια συγκεκριμένων ρυθμίσεων κυκλώματος
- πιθανή αντιστάθμιση δυσμενών επιδράσεων πχ από επέκταση θέρμανσης
- ένα εύρος πίεσης από $+ 10 \cdot 10^{-2}$ έως $- 10 \cdot 10^{-2}$ m/m (*10% έως -10%)
- υψηλή ανάλυση του μετρήσιμου σήματος με τη βοήθεια κατάλληλων ενισχυτών και ενδείξεων
- δεν έχουν όριο
- μία ευρεία κλίμακα θερμοκρασιών, από -269°C έως $+ 1000^{\circ}\text{C}$
- μικρού μεγέθους και χαμηλής μάζας, δηλαδή οι δυναμικές ιδιότητες ακόμα και μικρών δοκών δεν εξασθενούν
- η ιδιότητα να μετρούν δυναμικά αποτελέσματα
- η μεγάλη διάρκεια ζωής

και πολλές άλλες ιδιότητες.

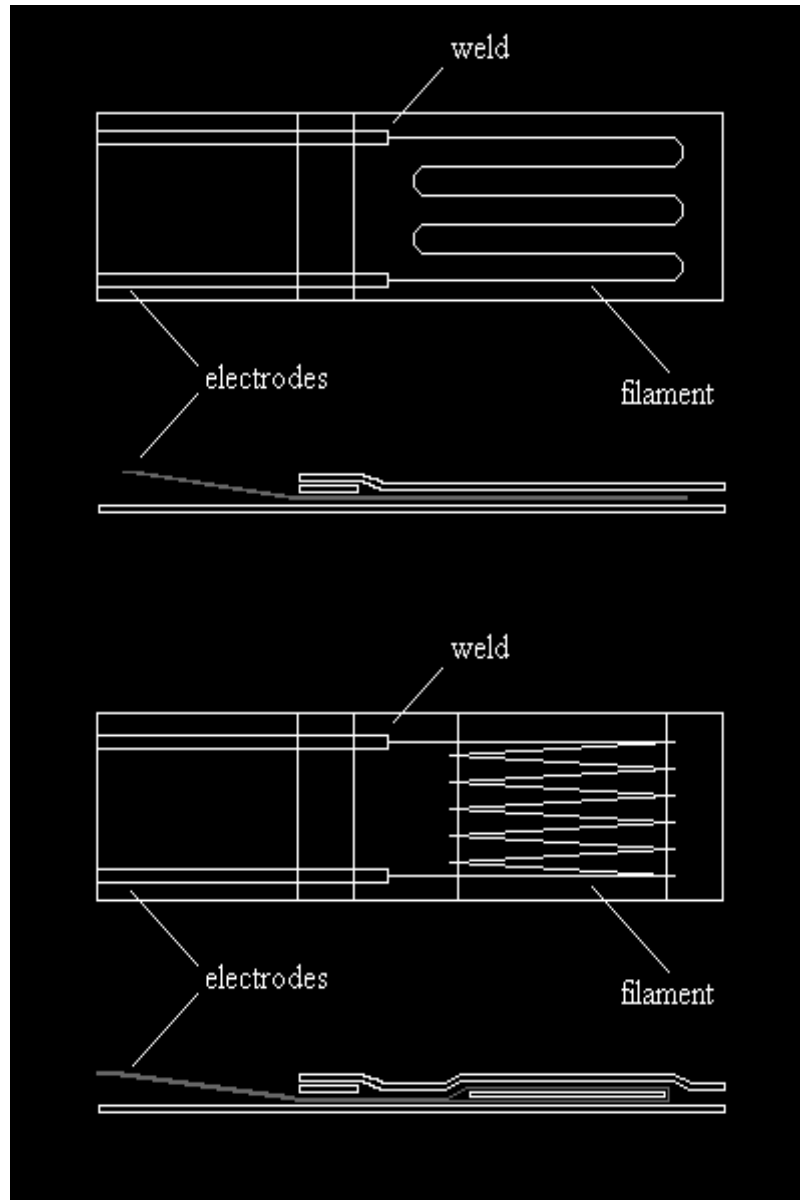
Σε περιορισμένο εύρος πίεσης η συνηθισμένη πιεζοαντίσταση θα εκθέσει όλες τις ιδιότητες όπως απαριθμούνται παραπάνω. Για ακραίες πιέσεις, ή θερμοκρασίες, αντίσταση σε δονήσεις, φυσικά, απαιτούνται ιδιαίτερες εκδόσεις.

Όπως έχει προαναφερθεί ένας μεγάλος αριθμός διαθέσιμων τύπων πιεζοαντίστασης οφείλεται στην εξαιρετική μεταβλητότητα της πιεζοαντίστασης. Κάθε χρήστης των πιεζοαντιστάσεων μπορεί να διαλέξει ένα κατάλληλο μετρητή από τα διαθέσιμα είδη στην αγορά, ακόμα και όταν δεν είναι ειδικός με τις πιεζοαντιστάσεις.

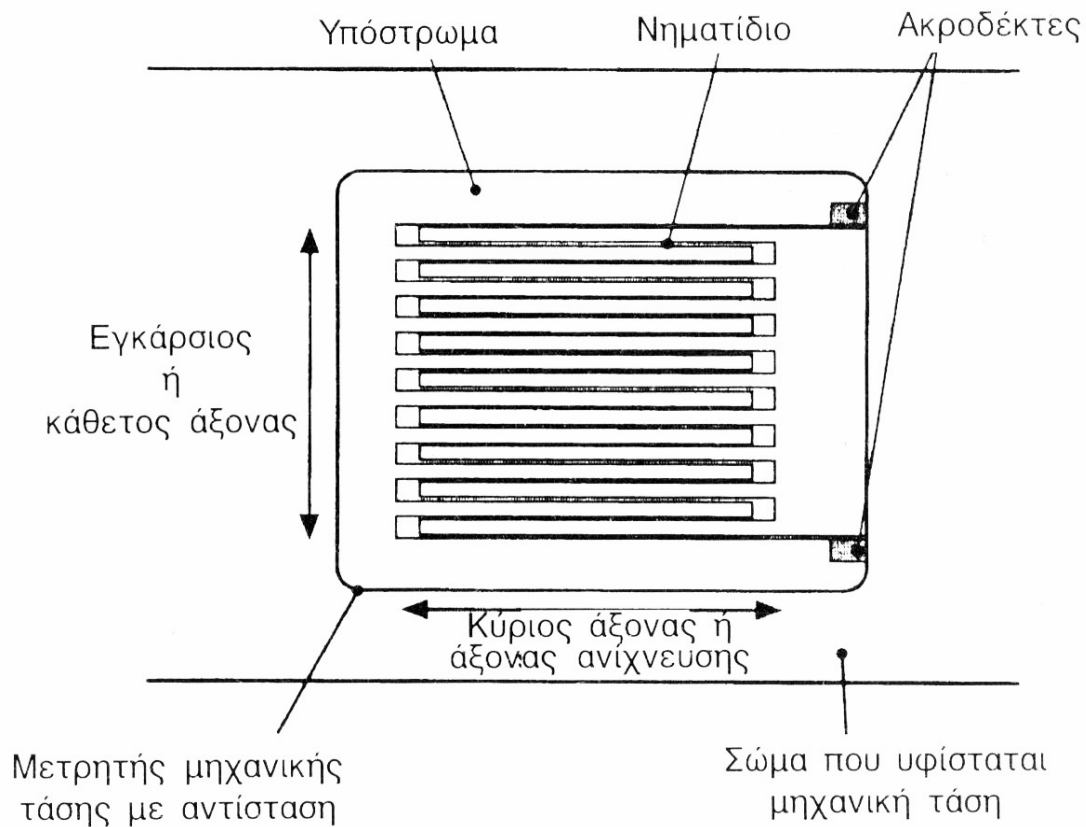
1.2 Κατασκευή της πιεζοαντίστασης

Το σχήμα 1 δείχνει την αρχή κατασκευής της πιεζοαντίστασης. Ενσωματωμένο ανάμεσα σε δύο πλαστικές λωρίδες είναι το πλέγμα μέτρησης, το ενεργό μέρος του μετρητή και είναι κατασκευασμένο από ένα λεπτό μεταλλικό φύλλο, το οποίο είναι ηλεκτρικά αγώγιμο. Οι μεγαλύτερες περιοχές στις άκρες του πλέγματος διευκολύνουν τη σύνδεση των καλωδίων. Τα χωριστά στρώματα του μετρητή συνδέονται μεταξύ τους. Το πλαστικό μέρος βοηθά στο χειρισμό του μετρητή και προστατεύει το ενεργό πλέγμα από μηχανική φθορά. Μόνο λίγα υλικά

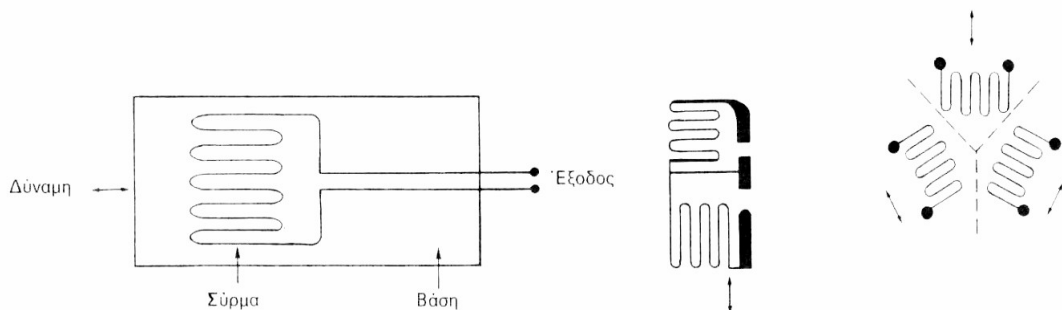
μπορεί να χρησιμοποιηθούν για το πλέγμα. Η επιλογή του υλικού για συγκεκριμένα είδη μετρητών εξαρτάται από το εύρος της εφαρμογής για την οποία προβλέπεται. Μία βασική διαφορά μεταξύ των “μεταλλικών μετρητών” και “ημιαγωγών μετρητών” είναι σε σχέση με την αρχή λειτουργίας και τη μέθοδο παραγωγής.



Σχήμα 1: Η αρχή κατασκευής της πιεζοαντίστασης



Σχήμα 2: Απλός μετρητής μηχανικής τάσης με αντίσταση



Σχήμα 3: Διάταξη ενός μετατροπέα με προσκολλημένη πιεζοαντίσταση

Το πλέγμα μέτρησης μιας μεταλλικής πιεζοαντίστασης παράγεται είτε με τη φωτο-χαρακτική μέθοδο από ένα φύλλο 3 με 5 μm παχύ είτε τυλίγεται από σύρματα διαμέτρου από 15 έως 25 μm. Γι'αυτό η παραγωγή μικρών πιεζοαντιστάσεων και περίπλοκων σχηματισμών πλεγμάτων έγινε εφικτό με τη βοήθεια της τεχνικής του φύλλου. Από την άλλη μετρητές σύρματος με πλαίσια μήκους άνω των 20 mm κατασκευάζονται ευκολότερα. Οι μετρητές σύρματος έχουν πλεονέκτημα σε εφαρμογές με

υψηλές θερμοκρασίες, επειδή είναι διαθέσιμα περισσότερα και πιο κατάλληλα υλικά, όπως και τεχνικές για την κατασκευή τους.

Το ενεργό πλέγμα ενός ημιαγωγού πιεζοαντίστασης είναι μία λεπτή, στενή λωρίδα με μερικά δέκατα του χιλιοστού πλάτος και μερικά εκατοστά παχύ. Δένεται μεταξύ πλαστικών φύλλων όπως το ενεργό πλέγμα των μεταλλικών πιεζοαντιστάσεων.

Πειραματική ανάλυση πίεσης: Προτιμούνται μετρητές με μεταλλικό πλέγμα. Ακριβοί μετρητές ημιαγωγών χρησιμοποιούνται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις.

Παραγωγή μετατροπών: Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται μετρητές με μεταλλικό πλέγμα. Μετρητές ημιαγωγών χρησιμοποιούνται σε ειδικά κυκλώματα, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους.

Σε μετατροπείς με υψηλή ακρίβεια οι μεταλλικοί μετρητές είναι ανώτεροι.

Πλέγμα από καλώδιο σε σύγκριση με το πλέγμα λωρίδας: αυτό έχει να κάνει με τις τεχνικές παραγωγής και όχι με την εφαρμογή.

Μετρητές λωρίδας είναι πιο οικονομικοί στην παραγωγή και είναι καλύτεροι με πλέγμα μήκους κάτω των 6mm, ή για περίπλοκους σχηματισμούς πλέγματος, ή για πολλαπλούς μετρητές πλέγματος.

Μετρητές σύρματος παράγονται οικονομικότερα εάν το μήκος του πλέγματος είναι άνω των 20mm. Από τεχνική άποψη είναι ανώτεροι σε εφαρμογές με υψηλή θερμοκρασία ή σε υψηλή πίεση.

1.3 Η λειτουργία της πιεζοαντίστασης

Η πιεζοαντίσταση αποδίδει τη σχετική ποσότητα “πίεσης” (ϵ) ως σήμα εξόδου ανάλογο με το σήμα εισόδου και όχι ως διαφορικό ΔL ενός εκ των προτέρων μήκους βάσης L_0 . Γι αυτό δεν απαιτείται μετατροπή. Η λειτουργία των μεταλλικών πιεζοαντιστάσεων βασίζεται στην επίδραση της πίεσης στην αντίσταση των ηλεκτρικών αγωγών, το οποίο ανακαλύφθηκε το 1843 από τον Wheatstone και μελετήθηκε από τον Thomson το 1856.

Η αντίσταση R του ηλεκτρικού αγωγού αλλάζει με αναλογία $\Delta R/R_0$ εάν πιεστεί μηχανικά με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το μήκος του αλλάζει κατά έναν παράγοντα $\epsilon = \Delta L/L_0$. Η αλλαγή στην αντίσταση εξαρτάται εν μέρει στην αλλαγή της γεωμετρίας του αγωγού και στην αλλαγή της αγωγιμότητας ρ του μετάλλου του αγωγού, εξαιτίας των αλλαγών στη δομή του υλικού. Αυτή η διαδικασία περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \epsilon \cdot (1 + 2\mu + (\frac{d\rho}{d\epsilon}) \cdot (\frac{1}{\rho})) \quad (1)$$

Υλικά με σταθερά χαρακτηριστικά από ένα ευρύ φάσμα πιέσεων προτιμώνται για την κατασκευή πιεζοαντιστάσεων. Το κράμα από νικέλιο – χαλκό το οποίο ονομάζεται “Constantan” είναι ένα από τα πιο γνωστά υλικά γι'αυτήν τη χρήση. Η σχετική αλλαγή της αντίστασης $\Delta R/R_0$ του constantan είναι, ως μια πολύ καλή προσέγγιση, ένα σταθερό ποσοστό της πίεσης ϵ . Γι αυτό μπορούμε να γράψουμε μια απλή εξίσωση:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \epsilon \cdot k \quad (2)$$

Ο παράγοντας k ονομάζεται και “παράγοντας μεταβολής”.

Η γραμμική χαρακτηριστική υπάρχει σε όλα τα κράματα μετάλλων τα οποία έχουν παράγοντα μεταβολής γύρω στο 2. Γι'αυτό είναι πολύ εύκολο να αποτιμήσουμε μετρήσεις οι οποίες έχουν γίνει με αυτές τις πιεζοαντιστάσεις. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους της επιτυχημένης εξάπλωσης των μεταλλικών πιεζοαντιστάσεων στο πεδίο της πειραματικής ανάλυσης πίεσης.

Το φυσικό αποτέλεσμα της πιεζοαντίστασης είναι κυρίως το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σε υλικά ημιαγωγών, το οποίο ανακαλύφθηκε από τον C. S. Smith το 1954. Η μηχανική πίεση προκαλεί μεγάλες αξιοσημείωτες αλλαγές στην αντίσταση εξαιτίας της αλλαγής στην κινητικότητα των ηλεκτρονίων. Το αποτέλεσμα από τη μεταβολή της γεωμετρίας του ημιαγωγού μπορεί να αμεληθεί. Με την εμφύτευση των ατομικών ακαθαρσιών στην κρυστάλινη δομή, ο απαραίτητος τύπος αγωγιμότητας και η τιμή της μπορούν να ρυθμιστούν. Η εξάρτηση της θερμοκρασίας από τη φυσική επίδραση μπορεί να γίνει μικρότερη με αυτόν τον τρόπο αλλά θα μειώσει την ευαισθησία. Η φυσική επίδραση της πιεζοαντίστασης μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = (\epsilon \cdot k) \cdot \frac{T_0}{T} + (\frac{T_0}{T})^2 \cdot c \epsilon^2 \quad (3)$$

Το T_0 είναι η θερμοκρασία αναφοράς και το T είναι η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Το k και το c είναι σταθερές, και το ϵ είναι η πίεση. Η μετρήσιμη τιμή εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από την πίεση

και την θερμοκρασία στην που υφίσταται. Υπάρχουν διαθέσιμοι ημιαγωγοί πιεζοαντίστασης με θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά. Παρόλο που δεν είναι ικανοποιητικός ο καθορισμός της κλίσης της παραβολικής καμπύλης με σχήμα παρόμοιο στον παράγοντα μέτρησης k των μεταλλικών πιεζοαντιστάσεων, αυτό επιτυγχάνεται στην πράξη.

Οι παράγοντες μέτρησης για τους διαθέσιμους εμπορικά ημιαγωγούς πιεζοαντίστασης, είναι από +110 έως 130 για αυτούς με πυρίτιο τύπου “p” και από -80 έως -100 για αυτούς με πυρίτιο τύπου “n”.

Εξαιτίας των μη γραμμικών χαρακτηριστικών των ημιαγωγών πιεζοαντίστασης, οι μετρήσιμες τιμές πρέπει να διορθωθούν αριθμητικά. Αυτή η μη γραμμικότητα μαζί με την υψηλή τιμή αγοράς περιορίζουν την εφαρμογή σε συγκεκριμένες περιπτώσεις στο πεδίο της πειραματικής ανάλυσης της πίεσης και στην κατασκευή των μετατροπέων. Οι παρακάτω επεξηγήσεις καλύπτουν τη μεταλλική πιεζοαντίσταση με περισσότερες λεπτομέρειες εξαιτίας της μεγαλύτερης σημασίας τους στην ανάλυση.

1.4 Η χρήση των πιεζοαντιστάσεων

Η πιεζοαντίσταση πρέπει να τοποθετηθεί στην επιφάνεια της δοκού στην οποία θέλουμε να καθορίσουμε την πίεση. Αυτό γίνεται κανονικά με τη βοήθεια ειδικών συγκολλήσεων, παρόλο που χρειάζονται ειδικές τεχνικές για τη στήριξη του συγκεκριμένου τύπου μετρητή. Πχ υψηλές θερμοκρασίες απαιτούν κεραμική στήριξη.

Μπορούμε να πούμε ότι η μετρήσιμη τιμή της πιεζοαντίστασης, η σχετική αλλαγή της αντίστασης $\Delta R/R_0$, είναι ανάλογη με την πίεση ϵ και με τον τον παράγοντα k :

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \epsilon \cdot k \quad (4)$$

Χρειάζονται επιπλέον κυκλώματα και όργανα για την περαιτέρω επεξεργασία της μετρήσιμης τιμής της πιεζοαντίστασης. Ένας βολικός συνδυασμός ονομάζεται “αλυσίδα μέτρησης” και περιλαμβάνει διαφορετικά στοιχεία ανάλογα με τον στόχο των μετρήσεων. Το σχήμα 4 δείχνει μία σχηματική δομή μίας αλυσίδας μετρήσεως, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις με πιεζοαντιστάσεις.



Σχήμα 4: Σχηματική δομή μίας αλυσίδας μετρήσεων

Το πρώτο στοιχείο της αλυσίδας είναι η πιεζοαντίσταση. Από τη μηχανική ποσότητα “πίεσης” σχηματίζεται η ηλεκτρική ποσότητα “σχετικής αλλαγής της αντίστασης” $\Delta R/R$.

Το δεύτερο στοιχείο της αλυσίδας είναι το κύκλωμα ρύθμισης, το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μία γέφυρα Wheatstone, η οποία περιλαμβάνει τη πιεζοαντίσταση. Η γέφυρα θα είναι αποσυντονισμένη από τη σχετική αλλαγή της αντίστασης, η οποία δεν μπορεί να ανιχνευθεί χωρίς περαιτέρω μέσα. Μία βοηθητική πηγή ενέργειας, η τάση λειτουργίας, πρέπει να οδηγηθεί στο κύκλωμα της γέφυρας. Στην έξοδο της γέφυρας εμφανίζεται μία τάση εξόδου U_A . Η αναλογία U_A/U_E είναι ισοδύναμη με την μεταβολή της αντίστασης $\Delta R/R_0$ και της πίεσης ϵ . Υπάρχουν πολλές παραλλαγές του κυκλώματος της γέφυρας Wheatstone. Επίσης στην μονάδα ρύθμισης σήματος περιλαμβάνεται και ο ενισχυτής, ο οποίος ενισχύει το σήμα U_A . Αυτό μπορεί να είναι είτε μία τάση εξόδου U_a ή ένταση εξόδου I_a . Δεδομένου ότι ο ενισχυτής είναι γραμμικός μπορούμε να πούμε ότι η τάση εξόδου U_a ή η ένταση εξόδου I_a είναι ανάλογες στο σήμα εισόδου U_A και συνεπώς της πίεσης ϵ . Το σήμα εξόδου του ενισχυτή μπορεί να οδηγηθεί στο τέταρτο στοιχείο της αλυσίδας.

Το τέταρτο στοιχείο της αλυσίδας μέτρησης είναι το όργανο ένδειξης. Αυτή η τέταρτη μετατροπή είναι απαραίτητη για τη μετατροπή του σήματος εξόδου του ενισχυτή με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι κατάλληλο για ανάγνωση από τον χρήστη. Ένας απλός και αποτελεσματικός τρόπος είναι με ένα βολτόμετρο ή αμπερόμετρο, το οποίο αποδίδει μία εκτροπή “α” του δείκτη ως ένδειξη της μετρήσιμης τιμής. Σε περίπτωση που η πίεση ποικίλει με τον χρόνο, είναι πιο αποτελεσματικό να χρησιμοποιήσουμε όργανα καταγραφής αντί όργανα ένδειξης.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η μονάδα τροφοδοσίας δεν παρέχει τάση μόνο στο κύκλωμα της γέφυρας, αλλά τροφοδοτεί και το κύκλωμα του ενισχυτή. Η μονάδα τροφοδοσίας τροφοδοτείται είτε από την κεντρική παροχή ρεύματος (220 V A.C.), είτε από επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Μία άλλη λειτουργία της μονάδας τροφοδοσίας είναι η σταθεροποίηση της τάσης διεγέρσεως της γέφυρας έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα

σφάλματα από τις αλλαγές τάσεως εξαιτίας της μείωσης της τάσεως στις μπαταρίες ή από διακυμάνσεις της κεντρικής παροχής.

Μία πλήρης εγκατάσταση πιεζοαντιστάσεων αποτελείται από πολλά περισσότερα πέραν του προσκολλημένου πάνω στη δοκό μετρητή. Φυσικά υπάρχει το καλώδιο του αισθητήρα και ένα κάλυμμα για την προστασία του αισθητήρα. Η ποιότητα της εγκατάστασης της πιεζοαντίστασης είναι ένας συνδυασμός από τις ιδιότητες της πιεζοαντίστασης, από το υλικό της, από το καλώδιο της και του προστατευτικού της καλύμματος. Φυσικά δεν είναι αρκετό μόνο η σωστή επιλογή μιας κατάλληλης πιεζοαντίστασης, πρέπει επίσης να λάβουμε υπόψιν την καταλληλότητα όλων των άλλων υλικών και την συμβατότητά τους.

1.5 Κριτήρια επιλογής πιεζοαντίστασης

Καθ'όλη τη διάρκεια της ζωής της, η πιεζοαντίσταση υφίσταται ποικίλες επιδράσεις. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός κριτηρίων τα οποία πρέπει να λάβουμε υπόψιν στην επιλογή της κατάλληλης πιεζοαντίστασης. Σε εξαιρετικές περιπτώσεις πρέπει να επιλεγούν με μεγάλη προσοχή ή να βρεθεί κάποιος συμβιβασμός. Πρέπει να λάβουμε υπόψιν ότι η τεχνική της πιεζοαντίστασης μπορεί να επιτύχει πολλά περισσότερα από κάθε άλλη μέθοδο μέτρησης πίεσης.

Αρχικά ο χρήστης πρέπει να μελετήσει όλες τις παραμέτρους για την εφαρμογή της. Είναι τα επίπεδα πίεσης μεγάλα ή μικρά; Η πίεση είναι συνεχής; Είναι απαραίτητο να έχουμε ένα απόλυτα σταθερό σημείο αναφοράς ή μπορεί να είναι επαρκές για την μέτρηση των τιμών κορυφής και τη συχνότητα της δόνησης και μετά να παραμελήσει το στατικό μέρος; Απαιτείται να μετρήσει “προληπτική” πίεση πχ για τον καθορισμό της πίεσης λόγω θερμότητας; Η λίστα με τις ερωτήσεις συνεχίζεται όταν συμπεριλαμβάνονται περιβαλλοντολογικές συνθήκες. Η θερμοκρασία εδώ είναι η πιο σημαντική επιρροή. Τι θερμοκρασία περιβάλλοντος θα έχουμε α) κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και β) μετά το πέρας των μετρήσεων; Θα έχουμε σταθερές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ή θα έχουμε ξαφνικές αλλαγές της θερμοκρασίας;

Περισσότερες επιρροές μπορούμε να έχουμε από τα ακόλουθα: υγρασία, νερό, ατμό, χημικούς παράγοντες, αέρια, συμπίεση, κενό, υψηλή ακτινοβολία, ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία και άλλα.

Επίσης πρέπει να λάβουμε υπόψιν την ώρα, κυρίως ως εικόνα για την διάρκεια των δυσμενών φαινομένων.

1.5.1 Φύση της πίεσης

Βασικά όλα τα είδη πιεζοαντιστάσεων είναι κατάλληλα για στατικές και δυναμικές μετρήσεις. Το μόνο που αλλάζει είναι το εύρος της πίεσης που δέχονται. Ειδικές μετρήσεις στην παραγωγή των πιεζοαντιστάσεων μπορούν να βοηθήσουν στην αύξηση του μέγιστου (στατικού) επίπεδου πίεσης ή της ζωής του αισθητήρα.

1.5.1.1 Στατική πίεση

Το πιο σημαντικό στην στατική πίεση είναι το μέγιστο σημείο πίεσης. Αυτό μπορεί να είναι από ± 2 έως $\pm 4 * 10^{-2}$ m/m, μερικές φορές πολύ περισσότερο για μεμονωμένες περιπτώσεις. Υπάρχουν ιδιαίτεροι τύποι πιεζοαντιστάσεων για υψηλά επίπεδα πίεσης οι οποίοι επιτρέπουν μετρήσεις έως $\pm 10 * 10^{-2}$ m/m ή περισσότερο. Αποκλίσεις από τη γραμμική χαρακτηριστική είναι συγκριτικά μικρές για πιεζοαντιστάσεις με παράγοντα μεταβολής γύρω στο 2, ακόμα και για μεγάλες πιέσεις. Μετρητές με κοντό πλέγμα μπορούν να επεκταθούν λιγότερο σε σχέση με τους μακρύτερους. Μπορεί να υπάρχουν μεγάλες διαφορές, ακόμα και σε μία σειρά ίδιου τύπου μετρητών. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται κυρίως σε έμφυτη πίεση που συμβαίνει στον μετρητή ή στην κόλλα κάτω από μεγάλες διακυμάνσεις της υγρασίας. Φυσικά, μεγάλο ρόλο παίζει και το υλικό με το οποίο έχει συγκολληθεί. Μετρητές υψηλών θερμοκρασιών περιορίζονται από τα κεραμικά συνένωσης, σε μέγιστη πίεση από 0,5 έως $1 * 10^{-2}$ m/m. Οι πιεζοαντιστάσεις δεν είναι κατάλληλες για μετρήσεις ελαστικών ή άλλων μαλακών υλικών, επειδή η πίεση θα σταματήσει από τις αντιδρούσες δυνάμεις στην επιφάνεια του ελαστικού μέρους.

1.5.1.2 Δυναμική πίεση

Μία πιεζοαντίσταση μπορεί να υποβληθεί σε πίεση δόνησης, ο αριθμός των κύκλων εξαρτάται από τα υλικά κατασκευής, σε κορυφαίες τιμές πίεσης και στον τύπο της πίεσης. Όπως σε όλα τα άλλα υλικά θα συμβεί μία καταστροφή υλικού στο υλικό του πλέγματος και στα υλικά υποστήριξης. Αυτό αρχικά θα προκαλέσει μετατόπιση του σημείου αναφοράς και αργότερα μία πλήρη βλάβη. Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που μπορεί να επιτευχθούν με πιεζοαντιστάσεις, σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνά την αντοχή των δομικών μερών, αν αυτά δεν είναι ειδικά σχεδιασμένα για υψηλή παλμική δύναμη. Ειδικοί τύποι

πιεζοαντιστάσεων με μεγάλη διάρκεια ζωής, ίσως λειτουργούν περισσότερο.

Η παλμική δύναμη των πιεζοαντιστάσεων είναι στο βέλτιστο στην αρνητική επαναλαμβανόμενη περιοχή, είναι λιγότερη στην περιοχή εναλλαγής και είναι μικρή στη θετική επαναλαμβανόμενη περιοχή. Είναι ανεπαρκές να αναφερθούν μόνο οι τιμές για το μέγιστο αριθμό κύκλων φόρτισης μέχρι την αποτυχία κόπωσης, ειδικότερα εάν πρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις με αναφορά σε ένα σταθερό σημείο αναφοράς.

Η συχνότητα περιορισμού ή αποκοπής μίας πιεζοαντίστασης καθορίζεται ως η μέγιστη συχνότητα εξαιτίας των παλμών ή τρανταγμάτων τα οποία μπορούν να ανιχνευτούν. Τα οριστικά στοιχεία δεν είναι ακόμα γνωστά. Στις μετρήσεις έχουν παρατηρηθεί συχνότητες έως 100 kHz. Πρέπει να σημειωθεί ότι για την επεξεργασία τέτοιων σημάτων, οι παράμετροι και οι ρυθμίσεις για τη σωστή μέτρηση πρέπει να είναι επαρκείς. Εάν πρέπει να μετρηθούν κρουστικά κύματα το μήκος του πλέγματος πρέπει να είναι σε σχέση με την αύξηση του παλμού, έτσι ώστε να υπολογιστεί σωστά η τιμή του κρουστικού κύματος.

1.5.2 Ηλεκτρική αντίσταση

Οι κατασκευαστικές εταιρίες προσφέρουν μετρητές με 120 Ω, 350 Ω και 600 Ω. Το κυρίως μέρος της παραγωγής είναι 120 Ω. Τα σημαντικότερα σημεία για την καλύτερη επιλογή της αντίστασης του μετρητή είναι:

- Η συμβατότητα με το όργανο που συνδέεται. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα με τους διαθέσιμους ενισχυτές.
- Επιρροές από την πορεία μετάδοσης μεταξύ του μετρητή και του οργάνου, πχ η χωρητικότητα των καλωδίων στην περίπτωση της λειτουργίας συχνότητας μεταφοράς, αντίσταση μόνωσης, αντίσταση πυρήνα καλωδίων.
- Επιρροές από την διαμόρφωση των κυκλωμάτων, δηλαδή πολλαπλοί μετρητές συνδεδεμένοι παράλληλα μπορεί να έχουν πάρα πολύ μικρή συνολική αντίσταση.

Η επιρροή από την αντίσταση της συνδεσμολογίας των καλωδίων μπορεί να αντισταθμιστεί εύκολα και γι αυτό το λόγο είναι μικρής σημασίας. Γενικά η χωρητικότητα των μεγάλων καλωδίων σύνδεσης είναι λιγότερο

σημαντική, εάν χρησιμοποιούνται μετρητές με πολύ μικρή αντίσταση. Οι διακυμάνσεις της αντίστασης των επαφών, των στοιχείων μετάδοσης, είναι λιγότερο σημαντικές, εάν χρησιμοποιηθούν μετρητές με μεγάλη αντίσταση.

1.5.3 Περιβαλλοντολογικές συνθήκες

1.5.3.1 Θερμοκρασία

Το ερώτημα της σταθερότητας που παρουσιάζει μια πιεζοαντίσταση στη θερμοκρασία δεν μπορεί να απαντηθεί με την παράθεση ενός σχήματος. Για την απάντηση αυτού του ερωτήματος πρέπει να συμπεριλάβουμε, πέραν του μετρητή, ολόκληρο το σύστημα μαζί με τα καλώδια σύνδεσης, τις συνδέσεις κ.λπ. Αναμφίβολα σημαντικό ρόλο παίζουν και άλλες επιρροές, πάνω από όλα η περίοδος του χρόνου σε συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Στις υψηλές θερμοκρασίες τα βασικά προβλήματα είναι η οξειδωση και η διάβρωση, ενώ στις χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να παρουσιαστεί ευθραυστότητα. Η υγρασία και οι χημικοί παράγοντες προσβάλλουν το μετρητή πιο σοβαρά σε υψηλές θερμοκρασίες. Εξαιτίας αυτών των γεγονότων οι πληροφορίες που δίνονται στα εγχειρίδια των πιεζοαντιστάσεων πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο ως οδηγοί. Άλλα εξαρτώμενα χαρακτηριστικά θερμοκρασίας όπως ο συντελεστής θερμοκρασίας και η ευαισθησία σφάλματος πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψιν, επειδή καθορίζουν την καταλληλότητα ενός συγκεκριμένου μετρητή.

Η εκτίμηση μίας εφαρμογής μετρητών πρέπει να έχει μια ανοχή που να συσχετίζεται άμεσα με τις απαραίτητες ακρίβειες. Ένα ακριβές όριο μεταξύ “καλού” και “όχι καλού” δεν μπορεί να οριστεί. Μετρήσεις που αναφέρονται σε ένα καθορισμένο σημείο αναφοράς είναι πιο ακριβείς από αυτές με μεταβλητό σημείο αναφοράς. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι είναι πιο εύκολο να μετρήσουμε σε χαμηλές θερμοκρασίες παρά σε υψηλές. Μετρήσεις με μεταβλητό σημείο αναφοράς, συχνά ορίζονται ως το εύρος των δυναμικών μετρήσεων, είναι από - 269 έως + 800° C και με επιπλέον προσπάθεια έως 1000° C. Το όριο της ανώτατης θερμοκρασίας είναι στους 600° C για μετρήσεις που αναφέρονται σε ένα καθορισμένο σημείο αναφοράς, συνήθως ονομαζόμενο ως “ εύρος στατικών μετρήσεων”. Στις περιοχές των υψηλών μετρήσεων, απαιτήσεις υψηλής ακρίβειας δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν.

Η εγκατάσταση της πιεζοαντίστασης μπορεί να επηρεαστεί από τη θερμότητα με πολλούς τρόπους. Το αν η επιρροή είναι επιβλαβής ή όχι μπορεί να αποφασιστεί με περαιτέρω διερεύνηση. Εάν οι επιδράσεις μειώνονται με το χρόνο τότε είναι προτιμότερο να περιμένουμε λίγο πριν πάρουμε μετρήσεις. Πρέπει να λάβουμε υπόψιν εάν οι επιβλαβείς επιρροές μπορούν να αντισταθμιστούν ή να διορθωθούν. Ως παράδειγμα μπορούμε να παραθέσουμε την χαρακτηριστική καμπύλη της θερμοκρασίας, η οποία είναι αποτέλεσμα διαφόρων συντελεστών θερμοκρασίας των υλικών της δοκού και της πιεζοαντίστασης. Μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση μετρητή αντιστάθμισης ή μπορεί να εξαλειφθεί με διόρθωση των μετρήσιμων τιμών με τη χαρακτηριστική καμπύλη της θερμοκρασίας, η οποία πρέπει να υπολογιστεί χωριστά. Εάν αυτό δεν είναι εφικτό, τότε προσφέρεται η λύση του μετρητή αντιστάθμισης της θερμοκρασίας. Ο συντελεστής θερμοκρασίας του μετρητή επιτυγχάνεται με ειδικές διαδικασίες κατά την παραγωγή, αλλά μόνο για έναν ενιαίο συντελεστή επέκτασης θερμότητας του υλικού της δοκού και για ένα περιορισμένο εύρος θερμοκρασίας. Γι'αυτό, τέτοιου είδους πιεζοαντιστάσεις ονομάζονται “ πιεζοαντιστάσεις αυτό-αντισταθμιζόμενης θερμοκρασίας”. Παρόλα αυτά ένα υπόλοιπο θερμοκρασίας δεν μπορεί να αποφευχθεί, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ της θερμοκρασίας και της θερμικής επέκτασης του υλικού και από το συντελεστή θερμοκρασίας της πιεζοαντίστασης.

1.5.3.2 Κενό

Οι πιεζοαντιστάσεις μπορούν να αντέξουν τις υψηλές συνθήκες κενού του διαστήματος, το οποίο αποδείχτηκε από μετρήσεις κατά τη διάρκεια της προσγείωσης του σεληνιακού οχήματος “surveyor”. Σε αυτήν την περίπτωση λήφθηκε υπόψιν η απεριόριστη χωρητικότητα άντλησης του διαστήματος. Σε άλλα περιβάλλοντα θα ήταν πολύ πιο δύσκολο να λυθούν προβλήματα απομάκρυνσης αερίων των πλαστικών και της απορρόφησης της υγρασίας.

1.5.3.3 Υδροστατική πίεση

Οι πιεζοαντιστάσεις μπορούν να αντέξουν υδροστατικές πιέσεις πάνω από 10,000 bar. Υπάρχουν πολλά προβλήματα για να λυθούν στον τρόπο εφαρμογής των μετρητών. Φυσαλίδες αέρα στην κόλλα πρέπει να αποφευχθούν με τη σωστή συγκόλληση του μετρητή. Είναι ορθό να εφαρμόσουμε πολύ μεγαλύτερες δυνάμεις συμπίεστικής δύναμης κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης, παρά σε φυσιολογικές χρήσεις του μετρητή. Οι σύγχρονοι μετρητές πλέγματος φύλλου αλουμινίου έχουν μία γραμμική σχέση μεταξύ του σημείου αναφοράς έως τα 500 bar πίεσης και το μέγεθος πίεσης είναι από + 5 έως + $10 \cdot 10^{-6}$ m/m για κάθε 100 bar πίεσης.

1.5.3.4 Ακτινοβολία

Μεταξύ των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πιεζοαντιστάσεων, τα πρόσθετα κράματα “Constantan” και το κράμα πλατίνας- βολφραμίου “1200” απέδειξαν ότι είναι σταθερά. Το “Nichrome V” και τα υλικά των ημιαγωγών παρουσιάζουν μεγάλες αλλαγές της αντίστασης, όταν βρίσκονται υπό ακτινοβολία. Οι φαινολικές ρητίνες παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίσταση στην ακτινοβολία σε σχέση με άλλα πλαστικά υλικά. Το καλύτερο απ' όλα είναι τα κεραμικά στοιχεία συνένωσης, τα οποία είναι κατασκευασμένα από ιδιαίτερα καθαρισμένα οξειδία αλουμινίου.

Οι μετρήσεις μετά από μία περίοδο 100 ωρών ή ακόμα περισσότερο, είναι εφικτές. Σε οποιαδήποτε περίπτωση, συστήνεται η μελέτη σκοπιμότητας υπό τις συνθήκες εργασίας, δεδομένου ότι η δόση ακτινοβολίας καθώς επίσης και η φύση της ακτινοβολίας επηρεάζει την ποιότητα της εφαρμογής των πιεζοαντιστάσεων.

1.5.3.5 Μαγνητικά πεδία

Οι πιεζοαντιστάσεις με πλέγματα από constantan μπορούν να αντέξουν μαγνητικά πεδία μεγάλης ισχύος. Σε μελέτες πιεζοαντιστάσεων στο μαγνητικό πεδίο ενός επιταχυντή πρωτονίων έχουν αναφερθεί ότι αντέχουν έως 20,000 Gauss μαγνητικής ροής. Μετρητές με πλέγματα από κράμα “constantan” και με πλατίνα- βολφράμιο 1200 δεν επιρρεάζονταν από το μαγνητικό πεδίο.

1.6 Επιλογή του στοιχείου συνένωσης

1.6.1 Λειτουργία του στοιχείου συνένωσης

Οι κολλήσεις χρησιμεύουν στην σταθερή στήριξη των πιεζοαντιστάσεων στην επιφάνεια της δοκού και για την μεταφορά των παραμορφώσεων στο μετρητή, χωρίς καμία απώλεια. Αυτός ο στόχος γίνεται ακόμα πιο δύσκολος από διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, για παράδειγμα οι διαφορετικές ιδιότητες συγκόλλησης των υλικών που πρέπει να συγκολληθούν μεταξύ τους, οι περιβαλλοντικές θερμοκρασίες που εμφανίζονται, περιορισμοί μέσω άλλων όρων της εφαρμογής. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιούνται όχι μόνο διαφορετικά στοιχεία συνενώσεων αλλά και διαφορετικές μέθοδοι. Γενικά η συγκόλληση με πλαστικά υλικά εφαρμόζεται, αλλά η συγκόλληση σημείων δεν χρησιμοποιείται τόσο συχνά, επειδή μετέπειτα θα έπρεπε κάποιος να κατασκευάσει πρόσθετους τύπους μετρητών. Τα κεραμικά υλικά συνίστανται μόνο για εφαρμογές με υψηλές θερμοκρασίες και μερικές φορές για χρήση στο χώρο της κρύο-γενετικής. Η ενσωμάτωση των πιεζοαντιστάσεων κατευθείαν σε πλαστικά πρότυπα ή σε σκυρόδεμα δεν απαιτεί πρόσθετα υλικά συγκόλλησης.

Η ποιότητα της εφαρμογής των πιεζοαντιστάσεων και επίσης η αξιοπιστία των μετρήσεων εξαρτάται από την πιεζοαντίσταση και όχι από τη συγκόλληση. Κανένα από αυτά δεν μπορεί να εξεταστεί χωριστά. Ο ίδιος ο χρήστης μπορεί να συμβάλει καλύτερα στην επιτυχία με προσεκτική φροντίδα και ακολουθώντας τις οδηγίες χρήσεως.

Οι κόλλες των πιεζοαντιστάσεων πρέπει να συμμορφωθούν με άλλες απαιτήσεις σε σχέση με τις συνηθισμένες κόλλες. Αναπτύσσονται ειδικά για αυτήν την εφαρμογή ή τροποποιούνται τουλάχιστον από τις διαθέσιμες κόλλες του εμπορίου. Η ποικιλία των κολλών στην αγορά είναι μια συνέπεια των διάφορων απαιτήσεων των εφαρμογών.

1.6.2 Χαρακτηριστικά των καθορισμένων μεθόδων

Οι κόλλες κρύας πήξεως εφαρμόζονται ευκολότερα με ελάχιστη προσπάθεια. Τα περισσότερα αποτελούνται από 2 στοιχεία συνένωσης, τα οποία αναμειγνύονται σε μικρές ποσότητες. Το στοιχείο συνένωσης Z-70 αποτελεί εξαίρεση, διότι δεν απαιτεί άλλο στοιχείο συνένωσης. Η βάση του είναι από κυανο- ακρυλική ρητίνη.

Αυτές οι κόλλες χρησιμοποιούνται κυρίως για πειραματική ανάλυση πίεσης, σε ένα εύρος θερμοκρασιών από -200 έως $+100$ °C. Εάν αυτό το είδος κόλλας χρησιμοποιείται για την κατασκευή μετατροπέων τότε το εύρος πρέπει να περιοριστεί από -10 έως $+40$ °C και επίσης οι απαιτήσεις της ακρίβειας δεν πρέπει να είναι υψηλές.

Οι κόλλες θερμής πήξεως απαιτούν μία εγκατάσταση για τη θέρμανση της δοκού, ακολουθώντας ένα προκαθορισμένο πρόγραμμα. Αυτό καθιστά αδύνατο την χρήση αυτών των κολλών σε μεγάλες δοκούς. Γι'αυτό η κύρια εφαρμογή τους είναι η κατασκευή μετατροπέων όπου υψηλές ή υψηλότερες απαιτήσεις ακρίβειας μπορούν να εκπληρωθούν εξαιτίας των ανώτερων μηχανικών ιδιοτήτων τους. Σε ορισμένες περιπτώσεις καθορίζεται ένα εύρος θερμοκρασιών από -250 έως $+300$ °C, αλλά στην ανώτερη κλίμακα ακρίβειας δεν αναμένεται μεγάλη διάρκεια ζωής.

Τα κεραμικά στοιχεία συνένωσης, με ελάχιστες εξαιρέσεις, χρησιμοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες ή σε χρήσεις κρυογενετικής. Δεν υπάρχει κίνδυνος από την επαφή τους με υγρό οξυγόνο. Το ανώτατο όριο θερμοκρασίας είναι μία λειτουργία της αντίστασης μόνωσης, η οποία μειώνεται εξαιτίας του ιονισμού. Αυτό το όριο είναι μεγαλύτερο εάν το κεραμικό υλικό καθαρίζεται σε μεγαλύτερο βαθμό. Τα κεραμικά στοιχεία συνένωσης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για καθιερωμένους μετρητές, προορίζονται για ελεύθερες πιεζοαντιστάσεις ινών χωρίς έναν ενισχυτικό μεταφορέα.

Η λειτουργία μόνωσης για το πλέγμα μέτρησης δίνεται από τα στοιχεία συνένωσης. Τα κεραμικά στοιχεία συνένωσης βουρτσίζονται πάνω στην έτοιμη επιφάνεια με τη βοήθεια μίας μαλακής βούρτσας και στην συνέχεια πυρώνονται.

Το ανώτατο όριο θερμοκρασίας είναι περίπου 500 °C. Ιδιαίτερα καθαρισμένα οξειδία αλουμινίου, τα οποία υποβάλλονται σε ψεκασμό φλόγας επιτρέπουν θερμοκρασίες έως 800 ή ακόμα και 1000 °C. Η μέθοδος ψεκασμού φλόγας απαιτεί ειδικό εξοπλισμό. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ταχύτητα κατασκευής της πιεζοαντίστασης και η μικρή ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται στη δοκό.

Η συγκόλληση σημείων είναι μία από τις ευκολότερες μεθόδους κατασκευής πιεζοαντίστασης. Απαιτείται ελάχιστος χρόνος ανά μετρητή και μικρό κόστος εξοπλισμού. Αυτή η μέθοδος περιορίζεται σε μετρήσεις βαρέων οικοδομικών μερών, τα οποία είναι κατασκευασμένα από συγκολλημένα υλικά. Το εύρος θερμοκρασίας αυτής της μεθόδου περιορίζεται μόνο από το μετρητή. Μετατοπίζεται από θερμοκρασίες κρυογενετικής σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

1.7 Υποδείξεις για την σωστή εκτέλεση των εφαρμογών των πιεζοαντιστάσεων

Η καλή ποιότητα κατασκευής μίας εφαρμογής μετρητή είναι το πιο σημαντικό για την ποιότητα και την αξιοπιστία του σημείου μετρήσεων. Αυτός είναι και ο λόγος που παραθέτουμε συχνά λάθη και πρακτικές υποδείξεις.

Οι υποδείξεις για την χρήση των συγκολλήσεων πρέπει να ακολουθούνται πιστά.

Η κόλλα Z-50 μερικές φορές είναι δύσκολο να χειριστεί το χειμώνα. Η χαμηλή θερμοκρασία θα παρατείνει το χρόνο πήξης σε μεγάλο βαθμό, και η χαμηλή υγρασία του αέρα μπορεί να επιδεινώσει περαιτέρω το θέμα (η υγρασία είναι καταλύτης). Αυτό μπορεί να προκαλέσει ισχυρότερα αποτελέσματα συγκόλλησης πχ άμεση δράση των συγκολλημένων μερών. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί έτσι ώστε η γραμμή συγκόλλησης να είναι όσο το δυνατόν λεπτότερη. Τα χοντρά στρώματα ίσως δεν πήξουν επαρκώς και αυτό θα οδηγήσει σε απόλυτη αποτυχία.

Οι διαλύτες που χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση του γράσου από τη θέση της πιεζοαντίστασης πρέπει να είναι χημικά καθαροί. Οι διαλύτες με “τεχνική καθαρότητα” είναι ανεπαρκείς, θα αφήσουν ελαιούχα υπολείμματα τα οποία μπορούν να ειδωθούν μετά βίας και είναι πολύ επικίνδυνα. Μία κατάλληλα κολλημένη ένωση μπορεί να επιτευχθεί εάν η κόλλα υπάρχει και στα δύο μέρη.

Ένα απλό μέσο για τον πρώτο έλεγχο της εφαρμογής των πιεζοαντιστάσεων είναι η δοκιμή γόμας. Συνδέουμε τον μετρητή σε ενισχυτή πιεζοαντίστασης και το ισοσταθμίζουμε στο 0. Στη συνέχεια πιέζουμε τη γόμα στο μετρητή και στη συγκόλληση. Εάν η πίεση αφαιρεθεί ξανά η ένδειξη πρέπει να επιστρέψει στο 0. Πρέπει να είμαστε προσεκτικοί με τις λεπτές δοκούς για να μην τις παραμορφώσει μία ένδειξη η οποία θα δοθεί από την πιεζοαντίσταση.

Μία γόμα είναι χρήσιμη για τον καθαρισμό της επιφάνειας του μετρητή. Μία γόμα μελάνης από σκόνη γυαλιού θα τραχύνει ελαφρώς την επιφάνεια και θα αφαιρέσουν εντελώς τα υπολείμματα βρομιάς και γράσου, μετά τη χημική αφαίρεση γράσου. Αυτή η μέθοδος συστήνεται κυρίως για εφαρμογές σε αλουμίνιο όπου άλλες μέθοδοι ή η δημιουργία τραχύτητας είναι με τα βίας κατάλληλες.

Οι αξιόπιστες ενώσεις μεταξύ του πλέγματος μετρήσεων της πιεζοαντίστασης και του καλωδίου σύνδεσης γίνονται με συγκόλληση, ή με την ένωση σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι χαλαρές επαφές αποφεύγονται με μία κατάλληλη ροή η οποία πρέπει να εφαρμοστεί στην ένωση και όχι στην άκρη του σιδήρου συγκόλλησης. Η ροή δεν πρέπει να είναι διαβρωτική. Δεν μπορεί να υποθεθεί ότι ο πυρήνας του καλωδίου συγκόλλησης είναι πάντα από “ colophonium ”. Όλα τα υπολείμματα ροής, ακόμα και αν αυτά είναι μη διαβρωτικά, πρέπει να αφαιρεθούν προσεκτικά επειδή είναι υγροσκοπικά.

Ένα δύσκολο πρόβλημα είναι το κατάλληλο προστατευτικό επίστρωμα της εφαρμογής των πιεζοαντιστάσεων ενάντια στα επιβλαβή μέσα, όπως το νερό, ο ατμός, το έλαιο, οι χημικοί παράγοντες, τα αέρια και άλλα. Οι τεράστιες δυσκολίες που προκύπτουν από τις συνδυασμένες επιρροές υποτιμώνται στις περισσότερες περιπτώσεις, καθώς επίσης και το ποσό προστασίας που απαιτείται για μια μακροπρόθεσμη εφαρμογή μετρητών υποτιμάται στις περισσότερες περιπτώσεις. Η προστασία των μετρητών είναι ένα πρέπει, εάν το μέσο τείνει να υποβιβάζει την αντίσταση μόνωσης, ή να διασκορπιστεί στο φύλλο αλουμινίου του μεταφορέα ή την κόλλα, και να τους αναγκάσει να πρηστούν. Τότε μπορούν να καταστραφούν μέρη του συστήματος μετρήσεων. Μια μεγάλη ποικιλία των προστατευτικών ενώσεων μπορεί να βρεθεί στην αγορά που είναι ασφαλείς μέσα στα διευκρινισμένα όρια εφαρμογής τους και διαμορφώνουν μια προστασία ενάντια σε μερικά από τα επιβλαβή μέσα, αλλά οι περιορισμοί τους πρέπει σαφώς να αναγνωριστούν. Ο ατμός και η υγρασία έχουν μεγαλύτερο βαθμό διείσδυσης από το νερό. Αυτό το γεγονός καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την προστασία του μετρητή από τον ατμό, ακόμα και αν πρόκειται για σύντομο χρονικό διάστημα, ή για μικρές ποσότητες. Ένα μεταλλικό φύλλο μπορεί να προστεθεί καλύπτοντας την ένωση που έπειτα διαμορφώνει ένα εμπόδιο διάχυσης και περιορίζει τις πορείες διείσδυσης στις άκρες. Μια μακροπρόθεσμη, αξιόπιστη προστασία επηρεάζεται μόνο από μια μεταλλική μη πορώδη ενθυλάκωση. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο οι μετατροπείς στεγανοποιούνται, όποτε καθίσταται δυνατόν. Όλες οι άλλες συνθέσεις προστασίας μπορούν να προστατέψουν την πιεζοαντίσταση για περιορισμένο διάστημα ανάλογα με την ποιότητά τους και την καταλληλότητά τους, ακόμη και με τους πιο προηγμένους τύπους προστατευτικών ενώσεων. Το πάχος του προστατευτικού στρώματος μπορεί να παρατείνει μόνο τη διάρκεια. Εντούτοις, μια χρήσιμη διάρκεια ζωής της ολοκληρωμένης εφαρμογής των πιεζοαντιστάσεων για μερικές ώρες, ή ακόμα και μερικές ημέρες, ή μερικών εβδομάδων, ή μηνών

μπορεί να επιτευχθεί, ανάλογα με τον τύπο, την ένταση και την θερμοκρασία του προσβάλλοντος μέσου.

1.8 Εκτίμηση της ακρίβειας

Δεν είναι εύκολο να εκτιμηθεί η ακρίβεια για μία πιεζοαντίσταση μόνο. Αν δεν υπάρχει κάποια εφαρμογή στον μετρητή, οι μετρήσεις δεν είναι εφικτές. Ακριβή στοιχεία μπορούν να δοθούν μόνο για μία εφαρμοσμένη πιεζοαντίσταση. Αλλά συμπεριλαμβάνονται οι ιδιότητες της κόλλας, του δομικού μέρους, των ενισχυμένων ενώσεων ,εάν υπάρχουν, και των καλωδίων σύνδεσης. Επομένως, μπορούν να συζητηθούν μόνο οι ιδιότητες της πλήρους εφαρμογής των πιεζοαντιστάσεων. Είναι φανερό πως κάθε αλλαγή του συνδυασμού μπορεί να οδηγήσει στην αλλαγή των ιδιοτήτων. Ο χρήστης των πιεζοαντιστάσεων ενδιαφέρεται να πάρει κάποιες πληροφορίες για το μέγεθος της ακρίβειας που θα μπορούσε να επιτευχθεί. Τα δελτία στοιχείων τους καθώς επίσης και η ειδική ερμηνεία τους είναι η πιο προηγμένη και ακριβή πληροφορία που μπορεί να βρεθεί σήμερα όσον αφορά την ακρίβεια των στοιχείων των πιεζοαντιστάσεων.

Κεφάλαιο 2^ο

Η γέφυρα Wheatstone

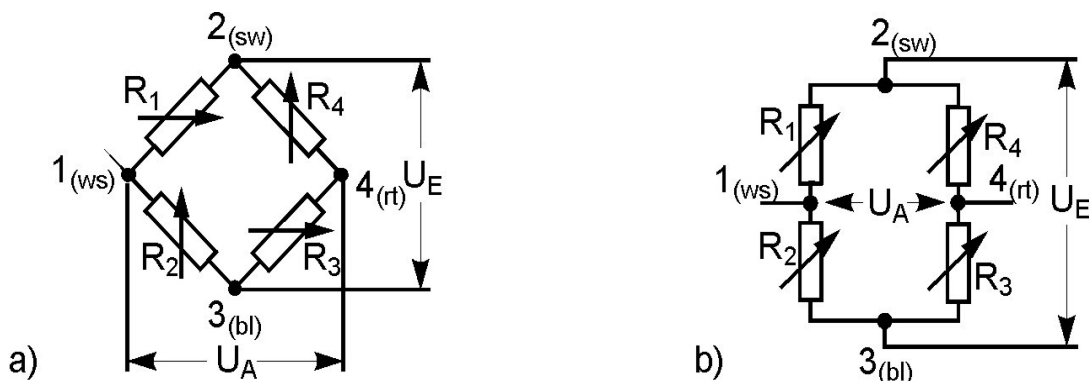
2.1 Εισαγωγή

Το 1843, ο Άγγλος φυσικός Sir Charles Wheatstone (1802 -1875) ανακάλυψε ένα κύκλωμα μέτρησης των ηλεκτρικών αντιστάσεων. Στη γέφυρα Wheatstone, άγνωστες αντιστάσεις συγκρίνονται με γνωστές τιμές αντιστάσεων. Η γέφυρα Wheatstone είναι κατάλληλη για τη μέτρηση μικρών μεταβολών της αντίστασης και για αυτό είναι κατάλληλη για τη μέτρηση της μεταβολής της αντίστασης σε μία πιεζοαντίσταση. Είναι ευρέως γνωστό ότι η πιεζοαντίσταση μετατρέπει τη εφαρμοζόμενη σε αυτό πίεση σε μία αναλογική μεταβολή της αντίστασης. Η σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης πίεσης ϵ ($\epsilon = \Delta L/L_0$) και της σχετικής μεταβολής της αντίστασης της πιεζοαντίστασης περιγράφεται από τη σχέση:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \epsilon. \quad (1)$$

Ο παράγοντας k , γνωστός και ως παράγοντας μεταβολής, είναι ένα χαρακτηριστικό της μέτρησης που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της πίεσης και διερευνάται πειραματικά.

Η γέφυρα Wheatstone θα μελετηθεί με εκτίμηση της εφαρμογής της σε τεχνικές πιεζοαντίστασης. Δύο διαφορετικές παρουσιάσεις δίνονται στο σχήμα 5: a) είναι βασισμένο στο πρωτότυπο σχήμα του Wheatstone και b) είναι ένα άλλο σχήμα, το οποίο είναι συνήθως ευκολότερο να γίνει κατανοητό από κάποιον ο οποίος δεν έχει ηλεκτρικές ή ηλεκτρονικές γνώσεις. Και οι δύο εκδοχές είναι, στην πραγματικότητα, πανομοιότυπες στην ηλεκτρική τους λειτουργία.



Σχήμα 5 : Το κύκλωμα της γέφυρας Wheatstone

Οι τέσσερις κλάδοι της γέφυρας σχηματίζονται από τις αντιστάσεις R_1 έως R_4 . Η είσοδος και έξοδος (οι τέσσερις κόμβοι) είναι αριθμημένοι σύμφωνα με τα στάνταρ που χρησιμοποιούνται σε όλα τα ήδη των μετατροπέων και των οργάνων.

Εάν οι βρόγχοι 2 και 3 συνδεθούν σε μια γνωστή τάση U_E (είσοδος γέφυρας) τότε μία τάση U_A (έξοδος τάσης) εμφανίζεται στους βρόγχους 1 και 4. Η τιμή της τάσης εξόδου εξαρτάται από την αναλογία των αντιστάσεων $R_1 : R_2$ και $R_4 : R_3$.

Η εξίσωση

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{(R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4)}{((R_1 + R_2)(R_3 + R_4))} \quad (2)$$

είναι έγκυρη και για την περίπτωση μίας ισορροπημένης γέφυρας έχουμε

$$\frac{U_A}{U_E} = 0 \quad \text{εάν } R_1 = R_2 = R_4 = R_3$$

$$\quad \text{ή } R_1 : R_2 = R_4 : R_3 \quad (3)$$

Σημείωση 2-1: Σε όλες τις πρακτικές περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται πιεζοαντιστάσεις, η κατάσταση της ισορροπημένης γέφυρας επιτυγχάνεται με περισσότερη ή λιγότερη απόκλιση. Εκτός αυτού, όλα τα όργανα τα οποία έχουν σχεδιαστεί για μετρήσεις πιεζοαντιστάσεων είναι εξοπλισμένα με στοιχεία εξισορρόπησης, τα οποία επιτρέπουν τη ρύθμιση της ένδειξης στο μηδέν για την αρχική κατάσταση. Αυτό μας επιτρέπει τη χρήση της εξίσωσης (3) για όλες τις επιπλέον θεωρήσεις. Μια άλλη υπόθεση είναι ότι η έξοδος της γέφυρας παραμένει εκφορτισμένη ηλεκτρικά. Η εσωτερική αντίσταση του οργάνου που είναι συνδεδεμένο σε αυτήν την έξοδο πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για να αποτρέψουμε αισθητά σφάλματα.

Εάν οι αντιστάσεις R_1 έως R_4 ποικίλλουν, η γέφυρα θα αποσυντονιστεί και μια τάση εξόδου U_A θα εμφανιστεί. Με την υπόθεση ότι η διαφορά της αντίστασης ΔR_i είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση R_i (το οποίο ισχύει πάντα για τις μεταλλικές πιεζοαντιστάσεις), μπορούμε να παραβλέψουμε τους παράγοντες δεύτερης τάξης. Τότε έχουμε την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (4)$$

Σημείωση 2-2: Για την πρακτική εφαρμογή της πιεζοαντίστασης τα ζευγάρια R_1, R_2 και R_3, R_4 πρέπει να είναι ίσα ή και οι τέσσερις αντιστάσεις R_1 έως R_4 πρέπει να έχουν την ίδια ονομαστική αξία για να εξασφαλίσουμε ότι οι σχετικές αλλαγές στους βραχίονες της γέφυρας είναι ανάλογες με τη σχετική μεταβολή της τάσεως εξόδου. Δεν έχει σημασία αν οι R_1 και R_4 ή (R_2 και R_3) έχουν την ίδια ή διαφορετική ονομαστική αξία. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο υποθέτουμε πάντα ότι $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$. Το τελευταίο ισχύει όταν συνεχές ρεύμα χρησιμοποιείται για διέγερση της γέφυρας.

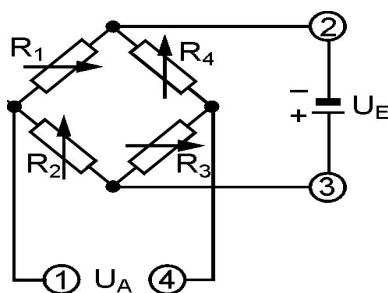
Αντικαθιστώντας την εξίσωση (1) στην (4) έχουμε

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4). \quad (5)$$

Οι ενδείξεις των όρων καθορίζονται ακολούθως (Σχήμα 6): Με την δεδομένη πολικότητα της ενεργοποιημένης τάσης U_E : κόμβος (2) = αρνητικό, (3) = θετικό, θα έχουμε θετικό δυναμικό στο (1), αρνητικό δυναμικό

στο (4), εάν $R_1 > R_2$ και/ή $R_3 > R_4$. Θα έχουμε αρνητικό δυναμικό στο (1), θετικό δυναμικό στο (4), εάν $R_1 < R_2$ και/ή $R_3 < R_4$.

Για A.C. οι παραπάνω προϋποθέσεις ισχύουν για τις σχέσεις φάσεως των U_E και U_A .



Σχήμα 6: Γραφική παράσταση για τους κανόνες των ενδείξεων στη γέφυρα Wheatstone

Σημείωση 2-3: Οι αλλαγές των γειτονικών πιεζοαντιστάσεων αφαιρούνται εάν το πρόσημο είναι ίδιο και προσθέτονται εάν έχουν αντίθετο πρόσημο. Αυτό το γεγονός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μερικούς συνδυασμούς ή μεθόδους αποκατάστασης.

Σημείωση 2-4: Σε συνάρτηση με τα πρότυπα όργανα μέτρησης, έχουμε :
σημείο (1) θετικό, σημείο (4) αρνητικό εάν $\epsilon_1 > \epsilon_2$ και/ή $\epsilon_3 > \epsilon_4$.
σημείο (1) αρνητικό, σημείο (4) θετικό εάν $\epsilon_1 < \epsilon_2$ και/ή $\epsilon_3 < \epsilon_4$.
Συνεπώς, η ποσότητα της πίεσης πρέπει να μελετηθεί σύμφωνα με την επιρροή της στην αντίσταση R. “Μεγαλύτερο από” ή “μικρότερο από” πρέπει να χρησιμοποιηθεί με αλγεβρική έννοια και όχι μόνο για ποσότητες, για παράδειγμα : $+10 \mu\text{m/m} > +5 \mu\text{m/m}$, $+5 \mu\text{m/m} > -20 \mu\text{m/m}$, $-5 \mu\text{m/m} > -50 \mu\text{m/m}$.

Σημείωση 2-4: Ειδικά χαρακτηριστικά των οργάνων μέτρησης πίεσης. Οι εξισώσεις (2) έως (4) υποθέτουν ότι μία μεταβολή της αντίστασης σε έναν ή περισσότερους βρόγχους της γέφυρας δημιουργεί μία μεταβολή της σχετικής τάσης εξόδου U_A/U_E . Ως τελικό αποτέλεσμα της μέτρησης αυτό έχει μόνο περιορισμένη σημασία. Επειδή η ακριβής τιμή της πίεσης είναι πιο σημαντική τα περισσότερα ειδικά όργανα έχουν μια ενδεικτική κλίμακα βαθμονομημένη σε “strain values”. Η τιμή πίεσης $1 \mu\text{m/m} = 10^{-6} \text{m/m}$ χρησιμοποιείται σαν “μονάδα”, σε παλαιότερες διατάξεις μπορεί να συναντηθεί με τη ορισμό “microstrain”.

Όλα αυτά τα ειδικά όργανα είναι ρυθμισμένα με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η δηλωμένη τιμή ϵ^* να είναι ισοδύναμη με την ακριβή τιμή της παρούσας πίεσης, εάν μόνο ένας ενεργός μετρητής βρίσκεται σε έναν βραχίονα της γέφυρας (σύνδεση quarter bridge) και εάν ο παράγοντας μεταβολής k του μετρητή σε χρήση ανταποκρίνεται με την τιμή βαθμονόμησης του οργάνου. Οι βρόχοι 2,3 και 4 της γέφυρας σχηματίζονται από αντιστάσεις ή από παθητικούς μετρητές. Στην πραγματικότητα αυτό σημαίνει ότι $\epsilon_2 = \epsilon_3 = \epsilon_4$ της εξίσωσης 5 είναι μηδέν και μπορούν να παραλειφθούν. Ορισμένα όργανα είναι βαθμονομημένα με ένα σταθερό παράγοντα μεταβολής $k = 2$, άλλα έχουν έναν επιλογέα για τον παράγοντα μεταβολής, ο οποίος μπορεί να ρυθμιστεί στον επιθυμητό παράγοντα μεταβολής. Με την προϋπόθεση ότι $k_{\text{gauge}} = k_{\text{instr}}$. θα έχουμε τη δηλωμένη τιμή πίεσης ίση με τη μετρήσιμη πίεση

$$\epsilon^* = \epsilon_1 \quad (6)$$

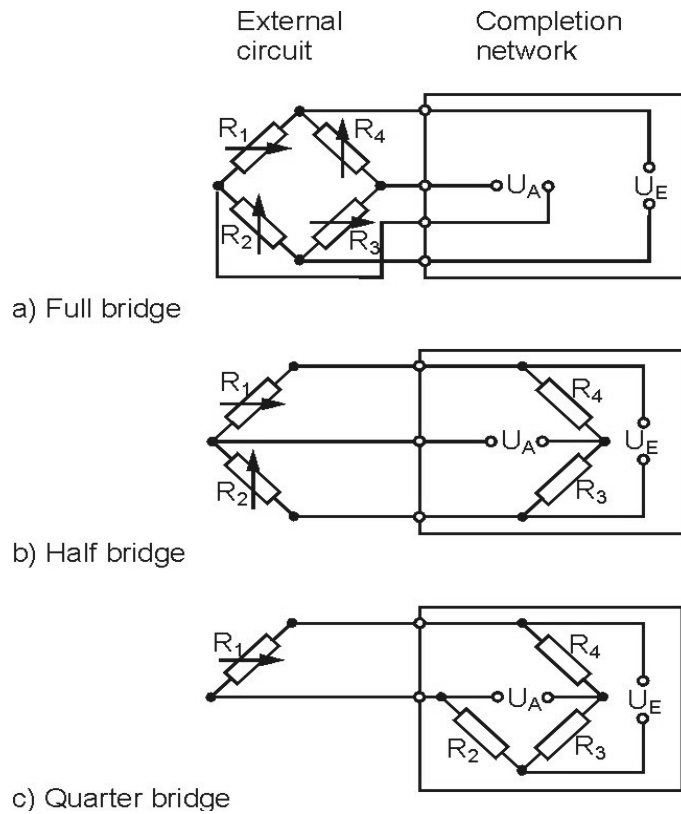
Εάν χρησιμοποιηθεί ένα όργανο με σταθερή βαθμονόμηση $k = 2$, οι μετρήσεις πρέπει να διορθωθούν, επειδή οι παράγοντες μέτρησης μπορεί να διαφέρουν με το υλικό και τη σύνθεση του πλέγματος. Η φόρμουλα διόρθωσης είναι

$$\epsilon_1 = \epsilon^* \frac{2}{k} \quad (7)$$

Για όλες τις περαιτέρω θεωρήσεις όλα αυτά τα ειδικά χαρακτηριστικά θα αμεληθούν από τη στιγμή που δεν είναι απαραίτητα για τη βασική κατανόηση της σύνθεσης της γέφυρας.

2.2 Στοιχειώδεις κυκλώματα με πιεζοαντιστάσεις

Τα κυρίως πεδία εφαρμογής των πιεζοαντιστάσεων είναι η πειραματική ανάλυση πίεσης, η σχεδίαση και η κατασκευή των μετατροπέων. Χαρακτηρισμοί όπως “πλήρης γέφυρα (full bridge)”, “μισή γέφυρα (half bridge)” ή “γέφυρα ενός βραχίονα (quarter bridge)” θα υποδηλώνουν τέτοιες διευθετήσεις, παρόλο που αυτοί δεν είναι σωστοί. Στην πραγματικότητα, το κύκλωμα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση είναι πάντοτε μια πλήρης γέφυρα, η οποία είτε είναι τελείως ή μερικώς σχηματισμένη από τους μετρητές στη δοκό. Ολοκληρώνεται με σταθερές αντιστάσεις οι οποίες είναι ενσωματωμένες στο όργανο (Σχήμα 7).

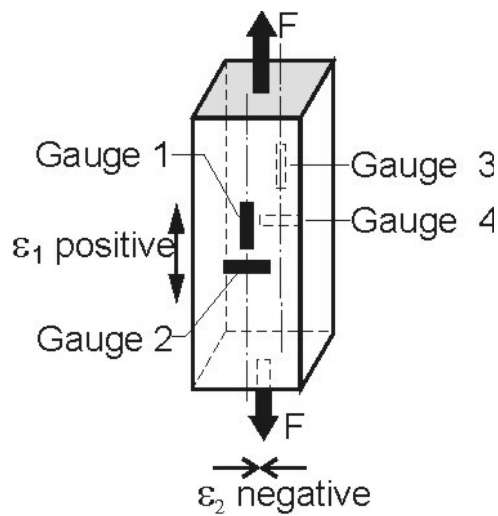


Σχήμα 7: Διάφορες εκδοχές του κυκλώματος της γέφυρας Wheatstone

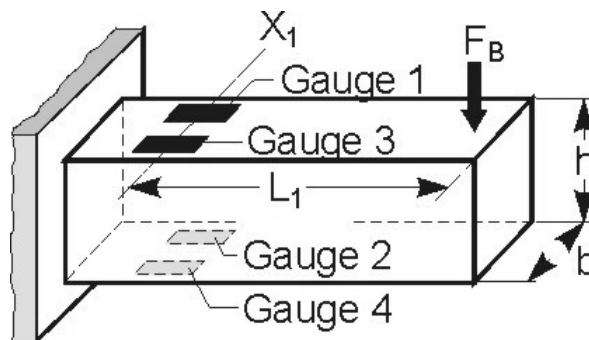
Οι μετατροπείς γενικά πρέπει να συμμορφώνονται με περισσότερο αυστηρές απαιτήσεις ακρίβειας σε σχέση με την ανάλυση της πίεσης. Συνεπώς, οι μετατροπείς θα έχουν πάντα ένα κύκλωμα πλήρους γέφυρα με ενεργούς μετρητές και στους τέσσερις βραχίονες. Οι διατάξεις πλήρους γέφυρα ή μισής γέφυρας μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν επιτυχώς στην ανάλυση πίεσης, εάν εξαλειφθούν οι διαταραχές διαφόρων ειδών. Σημαντική προϋπόθεση είναι ότι περιπτώσεις διαφορετικών πιέσεων μπορούν να διακριθούν ως συμπιεστικές ή ελαστικές δυνάμεις, καμπτικές και διάτμησης ή στρεφρόμενες δυνάμεις.

2.2.1 Μετρήσεις στην εφελκυστική ράβδο

Μία πίεση $\epsilon_1 = \sigma/E$ στην κατεύθυνση της δύναμης πίεσης θα συμβεί σε μία ράβδο φορτισμένη με ελαστική δύναμη. Κανονικά σε αυτήν την κατεύθυνση θα συμβεί μια εγκάρσια συστολή $\epsilon_2 = -\mu \cdot \epsilon_1$. Αυτή η αλλαγή αντίστασης $\Delta R_1 = \epsilon_1 \cdot k \cdot R_1$ θα βρεθεί στον μετρητή No. 1. Για τον μετρητή No. 2 αυτή η διαφορά θα είναι $\Delta R_2 = -\mu \cdot \epsilon_1 \cdot k \cdot R_2$. Το ίδιο ισχύει και για τους μετρητές No. 3 και No. 4.



Σχήμα 8: Η εφελκυστική ράβδος



Σχήμα 9: Η κάμπτουσα δοκός

Σημείωση 2-5: ο παράγοντας μ , γνωστός ως λόγος Poisson, είναι περίπου 0,3 για στερεά σώματα στο φάσμα της ελαστικής παραμόρφωσης. Πιο ακριβής μετρήσεις μπορεί να βρεθούν από πίνακες ή πειραματικά.

Εάν και οι τέσσερις μετρητές στην σειρά των δεικτών τους συνδεθούν για να σχηματίσουν μια πλήρη γέφυρα (σχ. 3a) ένα σήμα εξόδου, όπως περιγράφεται από την εξίσωση (5), θα δημιουργηθεί

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) = \frac{k}{4} [\epsilon_1 - (-\mu \epsilon_1) + \epsilon_3 - (-\mu \epsilon_3)]$$

Αντικαθιστώντας $\mu \approx 0,3$ και $\epsilon_1 = \epsilon_3 = \epsilon$ και $\epsilon_2 = \epsilon_4 \approx -0,3 \epsilon$ το σήμα θα είναι :

$$\frac{U_A}{U_E} \approx \frac{k}{4} \cdot 2,6 \epsilon_1 . \quad (8)$$

Σημείωση 2-6: Ένα κύκλωμα γέφυρας με τέσσερις ενεργούς μετρητές παράγει ένα σήμα 2,6 φορές της τιμής της πίεσης στην κυρίως κατεύθυνση της πίεσης. Μερικές φορές αυτός ο παράγοντας ονομάζεται παράγοντας γέφυρας “B”. Έτσι η σχέση (8) γίνεται:

$$\frac{U_A}{U_E} \approx \frac{k}{4} \cdot B \cdot \epsilon_1 \quad (9)$$

Εάν πρόκειται να μετρηθούν συμπιεστικές δυνάμεις, ισχύουν τα αντίθετα σύμβολα των πιέσεων ϵ_1 έως ϵ_4 .

Εάν η πίεση ϵ_1 από την κύρια κατεύθυνση πίεσης είναι άγνωστη, μπορεί να βρεθεί με μετατροπή από την εξίσωση (8):

$$\epsilon_1 = \frac{4}{2,6 k} \left(\frac{U_A}{U_E} \right) \quad (10)$$

ή στην πιο γενική μορφή από την εξίσωση (9):

$$\epsilon_1 = \frac{4}{B \cdot k} \left(\frac{U_A}{U_E} \right) . \quad (11)$$

Ένα κύκλωμα μισής γέφυρας, μόνο με τους μετρητές Νο. 1 και Νο. 2 ως ενεργούς μετρητές προσφέρει μόνο το μισό σήμα, γιατί ο παράγοντας B είναι μόνο 1,3.

Ένας συνδυασμός R_1 και R_3 σε συνδυασμό με ενεργούς μετρητές και R_2 και R_4 με σταθερές αντιστάσεις είναι δυνατόν και έχει απόδοση $B=2$.

Αλλά αυτό είναι χωρίς αυτόματη αντιστάθμιση της θερμικής διαστολής και άλλων επιρροών. Όμως, επιπρόσθετες καμπτικές δυνάμεις θα αντισταθμιστούν.

2.2.2 Μετρήσεις στην κάμπτουσα δοκό

Οι συνθήκες στην περίπτωση της κάμπτουσας δοκού είναι λίγο πιο απλές (Σχήμα 9). Εδώ οι τιμές των πιέσεων είναι της ίδιας τάξης μεγέθους αλλά αντίθετου πρόσημου. Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές των πιέσεων στην άνω και στην κάτω πλευρά του δοκού είναι ίδιες αλλά με αντίθετο πρόσημο. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5) βρίσκουμε μια προσθήκη των μετρήσιμων τιμών,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} [(\epsilon_1 - (-\epsilon_2) + \epsilon_3 - (-\epsilon_4))].$$

υποθέτοντας ότι $|\epsilon_1| = |\epsilon_2| = |\epsilon_3| = |\epsilon_4|$ και εναλλάσσοντας τα σύμβολα έχουμε $B=4$. Με την εξίσωση (9) έχουμε

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} B |\epsilon| = k |\epsilon| .$$

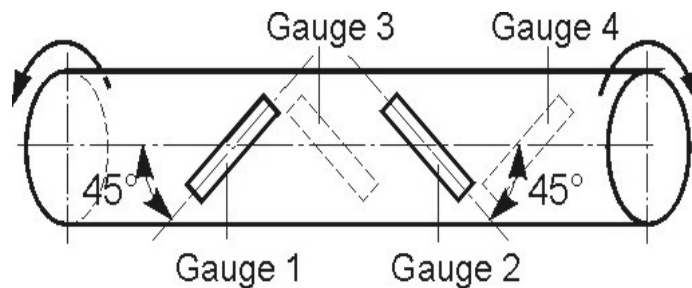
Αν η ένταση της πίεσης είναι : $|\epsilon| = \frac{U_A / U_E}{k}$,

τότε το σύμβολο είναι το θετικό στην εφελκυστική πλευρά και αρνητικό στην συμπιεστική πλευρά. Εάν η κατεύθυνση της πίεσης δεν είναι ευδιάκριτη τότε το σύμβολο μπορεί να βρεθεί από τους κανόνες στην ενότητα 2.1.

Εάν η κάμπτουσα δοκός μπορεί να εφοδιαστεί μόνο με δύο ενεργούς μετρητές, χρησιμοποιούνται οι βραχίονες Νο.1 και Νο.2 της γέφυρας. Τότε ο παράγοντας της γέφυρας είναι $B = 2$.

2.2.3 Μετρήσεις στον στρεφόμενο άξονα

Οι ίδιες ευνοϊκές συνθήκες όπως στην περίπτωση της κάμπτουσας δοκού συναντιούνται σε αυτήν την περίπτωση. Το ανώτατο όριο πίεσης είναι υπό $\pm 45^\circ$ με αναφορά στην κατεύθυνση του διατμητικού επιπέδου (ή υπό $\pm 45^\circ$ με αναφορά στον άξονα του κορμού, που στην πραγματικότητα είναι το ίδιο). Οι μετρητές πρέπει να τοποθετηθούν όπως φαίνεται στο σχήμα 10.



Σχήμα 10: Ο στρεφόμενος άξονας

Με ροπή προς τη φορά του ρολογιού οι μετρητές No.1 και No.3 θα ανιχνεύσουν θετική πίεση, οι μετρητές No.2 και No.4 αρνητική πίεση. Το μέγεθος όλων των πιέσεων είναι το ίδιο. Γι'αυτό, όλες οι τιμές των πιέσεων μπορούν να αθροιστούν σύμφωνα με την εξίσωση (5). Με την εξίσωση (9) και $B = 4$ το μετρήσιμο μέγεθος είναι ίσο με

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} B \epsilon = k \epsilon .$$

Από αυτή τη σχέση μπορούμε να αποκομίσουμε το μέγεθος της πίεσης ως :

$$|\epsilon| = \frac{U_A / U_E}{k}$$

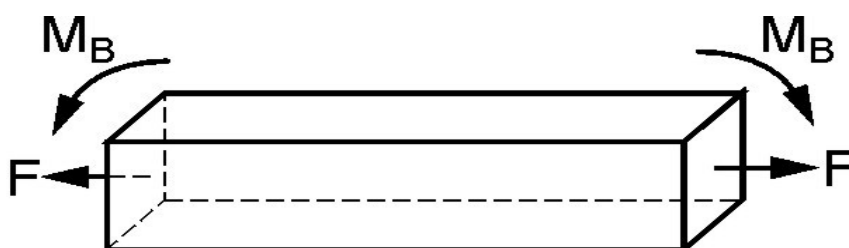
Εάν το πρόσημο της ροπής είναι άγνωστο μπορεί να βρεθεί με τους κανόνες από την ενότητα 2.1.

Σε αυτήν την περίπτωση του στρεφόμενου άξονα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη συνδεσμολογία μισής γέφυρας με ενεργούς μετρητές τους No.1 και No.2. Ο παράγοντας της γέφυρας θα είναι $B = 2$.

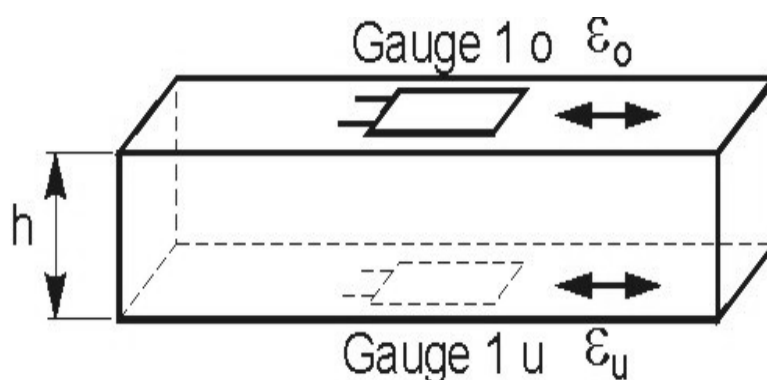
Σημείωση 2-7: Εάν το μετρήσιμο σήμα πρέπει να μεταδοθεί από έναν στρεφόμενο άξονα μέσω δακτυλίων ολίσθησης ή παρόμοιες συσκευές οι οποίες απαιτούνται συνήθως σε μετρήσεις ροπής, η συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας χρησιμοποιείται κατά προτίμηση. Το μεγάλο πλεονέκτημα βρίσκεται στο γεγονός ότι τα σφάλματα από την εκπομπή είναι αξιοσημείωτα πολύ μικρότερα σε σχέση με μία συνδεσμολογία μισής γέφυρας ή μίας γέφυρας ενός βραχίονα (ενότητα 2.5).

2.3 Ανάλυση και αντιστάθμιση των μεγάλων πιέσεων

Καθαρά εφελκυστικές ή θλιπτικές δυνάμεις καθώς επίσης καθαρά στρεφόμενες και κάμπτικές ροπές δεν μπορούν να θεωρηθούν σε όλες τις περιπτώσεις, όπως στην ενότητα 2.2. Στις περισσότερες πρακτικές υποθέσεις, είτε δύο είδη ή όλα τα τρία συνδιάζονται. Σαν παράδειγμα αυτή η περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί για μια δοκό η οποία βρίσκεται υπό εφελκυστική δύναμη μαζί με κάμπουσα ροή M_B .



Σχήμα 11: Εφελκυστική ράβδος με κάμπουσα ροπή



Σχήμα 12: Ράβδος σύμφωνα με το σχήμα 11 με πιεζοαντιστάσεις

Τα παρακάτω στελέχη της πίεσης μπορούν να ανιχνευτούν σε αυτήν τη δοκό:

α) Η ολική πίεση ϵ_o στην άνω πλευρά της δοκού και η ολική πίεση ϵ_U στην κάτω πλευρά της δοκού.

β) Η πίεση ϵ_N , η οποία προκαλείται από κανονική δύναμη (εφελκυστική ή συμπιεστική).

γ) Το στέλχος της πίεσης ϵ_B , το οποίο προκαλείται από την κάμπτουσα ροπή.

Τα σύνθετα μεγέθη πίεσης ϵ_o και ϵ_U μπορούν να βρεθούν με ένα μετρητή στη άνω και στην κάτω πλευρά της δοκού, προσαρμοσμένα σύμφωνα με τον άξονα της δοκού, σχήμα 12.

Ο κάθε μετρητής μπορεί να εισαχθεί σε μία γέφυρα ενός βραχίονα (σχήμα 7c) και παρατηρείται ένα μετρήσιμο μέγεθος. Ο μετρητής στην άνω πλευρά δίνει το άθροισμα $\epsilon_o = \epsilon_N + \epsilon_B$, ο μετρητής στην κάτω πλευρά τη διαφορά $\epsilon_U = \epsilon_N - \epsilon_B$. Από αυτές τις δύο τιμές, τα στελέχη της πίεσης μπορούν να υπολογιστούν με τη βοήθεια των σχέσεων:

$$\epsilon_N = \frac{1}{2}(\epsilon_o + \epsilon_U) \quad (12)$$

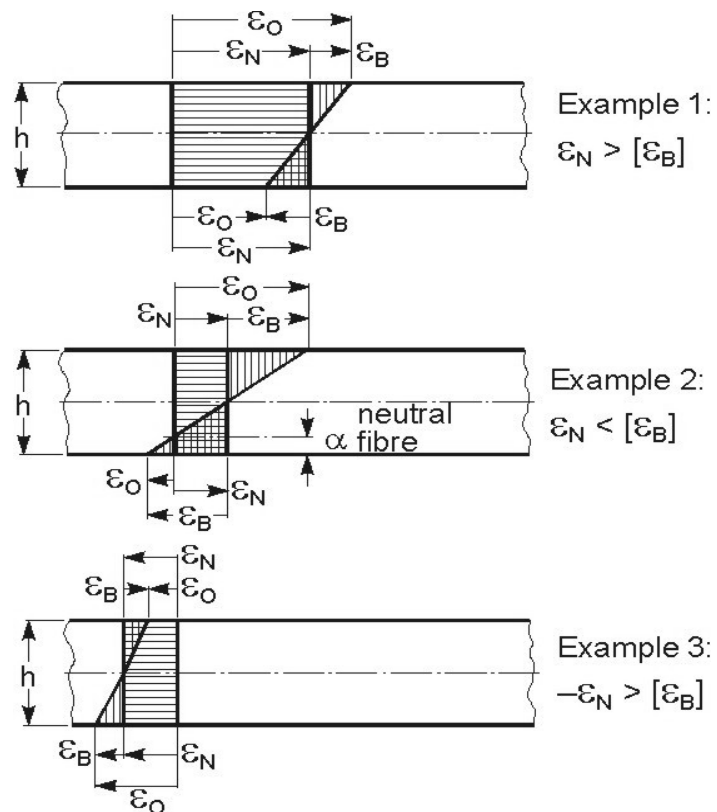
$$\epsilon_B = \frac{1}{2}(\epsilon_o - \epsilon_U) \quad (13)$$

Μία γραφική επίλυση με τρία παραδείγματα δίνεται στο σχήμα 13.

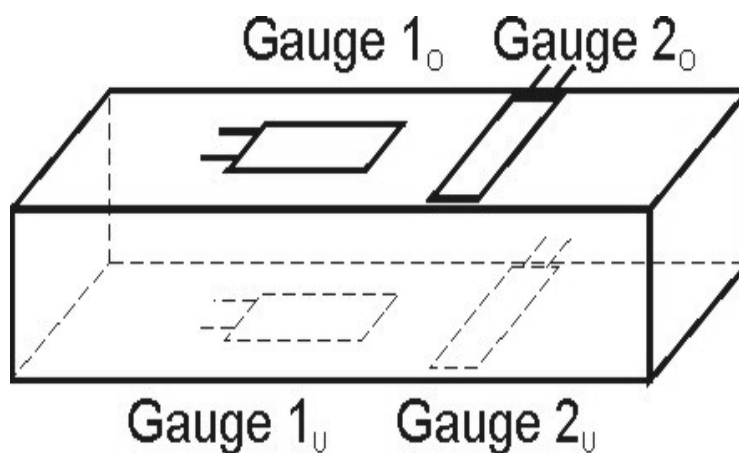
Εάν απαιτηθεί μία θερμοκρασιακή αντιστάθμιση της θερμικής διαστολής της δοκού, χρησιμοποιούνται αυτό-αντισταθμιζόμενοι μετρητές. Εάν αυτοί δεν είναι διαθέσιμοι ή εάν το εύρος της αντιστάθμισης είναι ανεπαρκή και οι δύο πλευρές της δοκού πρέπει να εξοπλιστούν με έναν διαμήκη και έναν πλευρικό μετρητή (σχήμα 10). Τότε η κάθε πλευρά πρέπει να σχηματίζει μία ξεχωριστή διάταξη μισής γέφυρας (σχήμα 7b). Τα δηλωμένα μεγέθη θα είναι

$$\epsilon_o^* = (1 + \mu)\epsilon_o = (1 + \mu)(\epsilon_N + \epsilon_B) \quad \epsilon_U^* = (1 + \mu)\epsilon_U = (1 + \mu)(\epsilon_N - \epsilon_B)$$

(βλέπε ενότητα 2.1). το αποτέλεσμα μπορεί να αναλυθεί με την βοήθεια των σχέσεων (12,13) ή να βρεθεί με την χρήση των γραφικών μεθόδων, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 13. Τα υποδηλωμένα μεγέθη ϵ_o^* και ϵ_U^* πρέπει αρχικά να διαιρεθούν δια $(1 + \mu)$. Οι μέθοδοι θερμοκρασιακής αντιστάθμισης συζητούνται στην ενότητα 2.4.



Σχήμα 13: Παράδειγμα της γραφικής επίλυσης μεικτών πιέσεων



Σχήμα 14: Δοκός σύμφωνα με το σχήμα 11, εφοδιασμένη με διαμήκεις και πλευρικούς μετρητές

Όταν σχεδιάζεται ένας μετατροπέας δύναμης, ο στόχος είναι πάντα να μετριοούνται μόνο δυνάμεις στην κατεύθυνση του άξονα του μετατροπέα και όχι να μετριοούνται οι κάμπτουςες πιέσεις από τα εκκεντρικά ή πλευρικά φορτία.

Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να χρησιμοποιείται ένας συνδιασμός μετρητών, όπως φαίνεται στο σχήμα 8. Οι μετρητές πρέπει να είναι τοποθετημένοι συμμετρικά και να είναι σε ζεύγη. Και οι τέσσερις μετρητές δημιουργούν ένα πλήρες κύκλωμα γέφυρας Wheatstone το οποίο είναι κατάλληλο για την ηλεκτρική αρμονία. Οι πιέσεις αφαιρούνται, εάν παρουσιαστούν με αντίθετο πρόσημο στους αντίθετους βραχίονες της γέφυρας. Είναι φανερό ότι οι αξονικές δυνάμεις προσθέτονται (Σχήμα 8) και τα σήματα από την κάμπτουςα δύναμη διαγράφονται. Τα συστατικά από την κάμπτουςα δύναμη κατανέμονται παρακάτω :

Gauge No.1 : $+\epsilon_B$

Gauge No.2 : $-\mu \cdot \epsilon_B$

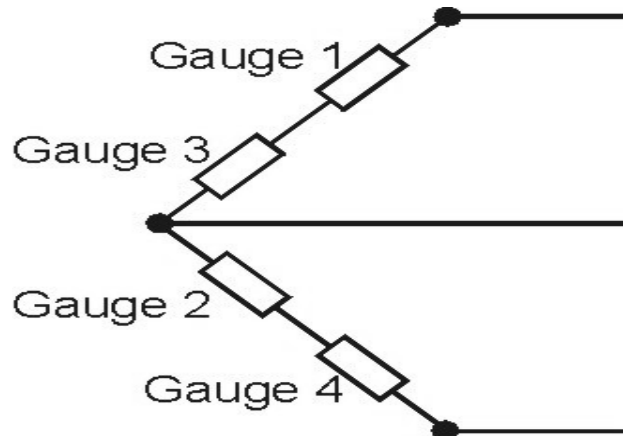
Gauge No.3 : $-\epsilon_B$

Gauge No.4 : $+\mu \cdot \epsilon_B$

Το σύνολο των αντίστοιχων σημάτων είναι ίσο, το οποίο οδηγεί σε πλήρη αντιστάθμιση (Βλέπε ενότητα 2.4).

Αυτή η αρχή μπορεί να εφαρμοστεί και για την αντιστάθμιση των αξονικών δυνάμεων στην κάμπτουςα δοκό ή για την αντιστάθμιση των κάμπτουςων δυνάμεων στον στρεφόμενο άξονα (βλέπε ενότητες 2.2.2 και 2.2.3).

Σημείωση 2-8: Υπάρχει η πιθανότητα να συνδεθούν και οι τέσσερις μετρητές ενός μετατροπέα σαν αυτόν σε κύκλωμα μισής γέφυρας, συνδέοντας σε σειρά τους μετρητές No. 1 και No. 3 και τους μετρητές No.2 και No.4 σε κάθε βραχίονα της γέφυρας, όπως φαίνεται στο σχήμα 15.



Σχήμα 15: Συνδεσμολογία μισής γέφυρας με τέσσερις μετρητές

Αυτό το κύκλωμα είναι συμμετρικό σε σχέση με την θέση των μετρητών αλλά όχι σε σχέση με τη συνδεσμολογία που οδηγεί στο πλαίσιο του κυκλώματος της γέφυρας, το οποίο πρέπει να ολοκληρωθεί με τη συμπληρωματική μισή γέφυρα η οποία βρίσκεται μέσα στο όργανο. Επίσης, η ευαισθησία είναι μόνο η μισή από την ευαισθησία της πλήρους γέφυρας. Τα μετρήσιμα μεγέθη των μετρητών οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε σειρά δεν θα προστεθούν. Για το κύκλωμα του σχήματος 15 ισχύει η παρακάτω σχέση :

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1 + \Delta R_3}{R_1 + R_3} - \frac{\Delta R_2 + \Delta R_4}{R_2 + R_4} \right) \quad (14)$$

Από αυτήν την σχέση φαίνεται εύκολα ότι εμφανίζεται μόνο το μισό σήμα.

2.4 Αντιστάθμιση των αρνητικών επιπτώσεων, ειδικότερα των επιπτώσεων της θερμοκρασίας.

Η σχέση (4) μας παρέχει μία βασική ερμηνεία της λειτουργίας του κυκλώματος της γέφυρας Wheatstone. Επίσης μας δείχνει πώς θα αντισταθμίσουμε ανεπιθύμητες αλλαγές της αντίστασης των μετρητών, οι οποίες προξενούνται από διαταραχές. Οι αλλαγές στις αντιστάσεις των μετρητών, οι οποίες εμφανίζονται με το ίδιο πρόσημο σε γειτονικούς βραχίονες, θα αφαιρούνται σε σχέση με το σήμα εξόδου της γέφυρας. Εάν προσπαθήσουμε να τοποθετήσουμε τους μετρητές σε ένα στοιχείο

μετατροπέα με τέτοιον τρόπο έτσι ώστε οι διαταραχές να επηρεάζουν τους γειτονικούς μετρητές με τον ίδιο τρόπο, οι επιπτώσεις τους θα απαλειφθούν. Ο βαθμός της αντιστάθμισης βασίζεται στην επίκτητη ομοιομορφία.

Σημείωση 2-9: Οι παρακάτω διαταραχές λαμβάνονται υπ' όψιν : θερμοκρασία, υγρασία, υδροστατική πίεση, κενό, μαγνητικά πεδία, ακτινοβολία κλπ. Ο βαθμός της επιρροής τους είναι διαφορετικός και βασίζεται στην κατασκευή του μετρητή και στο υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος. Συνίσταται συνήθως να προστατεύονται οι μετρητές με κατάλληλους τρόπους όσο το δυνατόν πιο πολύ και ακύρωση των εναπομεινάντων επιπτώσεων των διαταραχών με μεθόδους αντιστάθμισης.

Η μέθοδος αντιστάθμισης θα εξηγηθεί μόνο για τις επιπτώσεις της θερμοκρασίας.

Μπορούμε να υποθέσουμε, χωρίς να συμπεριλάβουμε τους λόγους με λεπτομέρεια, ότι ένας τοποθετημένος μετρητής μπορεί να έχει διαφορετικές τιμές αντίστασης σε διαφορετικές θερμοκρασίες της δοκού. Αυτό μπορεί να προκληθεί πχ. από θερμική διαστολή της δοκού η οποία, φυσικά, ανιχνεύεται από τον μετρητή.

Εάν συμβεί θερμική διαστολή κατά τη διάρκεια μηχανικής φόρτισης του κατασκευαστικού μέρους, θα λάβουμε ένα σύνθετο σήμα πίεσης. Η μία συνιστώσα είναι η επιθυμητή επίπτωση από τη μηχανική πίεση, ϵ_M , και η άλλη συνιστώσα είναι η ανεπιθύμητη επίπτωση από τη θερμική διαστολή, ϵ_W .

$$\frac{\Delta R}{R_o} = k(\epsilon_M + \epsilon_W) \quad (15)$$

Εάν χρησιμοποιηθούν τέσσερις μετρητές στη δοκο και συνδεθούν σε μία γέφυρα Wheatstone, όπως περιγράφεται στα παραδείγματα των ενοτήτων 2.2.1, 2.2.2, και 2.2.3 έχουμε την ακόλουθη επίλυση:

| Μετρητής Νο. | ϵ_M | ϵ_W |
|--------------|--------------|--------------|
| 1 | θετικό | θετικό |
| 2 | αρνητικό | θετικό |
| 3 | θετικό | θετικό |
| 4 | αρνητικό | θετικό |

Διακρίνουμε ότι το μερίδιο της θερμικής παραμόρφωσης στο συνολικό στέλεχος έχει το ίδιο πρόσημο για όλους τους μετρητές εντάσεως, υπό την προϋπόθεση ότι όλοι οι μετρητές υπόκεινται στην ίδια μεταβολή της θερμοκρασίας. Βασισμένοι στην εξίσωση (5) καταλήγουμε στην έκφραση

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} [(\epsilon_M + \epsilon_W)_1 - (-\epsilon_M + \epsilon_W)_2 + (\epsilon_M + \epsilon_W)_3 - (-\epsilon_M + \epsilon_W)_4] = \frac{k}{4} 4 \epsilon_M$$

Η συνιστώσα σφάλματος ϵ_W έχει απαλείφει.

Η ίδια μέθοδος αντιστάθμισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την συνδεσμολογία της μισής γέφυρας.

Αυτή η μέθοδος αντιστάθμισης δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην γέφυρα ενός βραχίονα, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στην πειραματική ανάλυση πιέσεων. Ο μόνος τρόπος για να παρακάμψουμε αυτό το μειονέκτημα είναι να χρησιμοποιήσουμε έναν μετρητή αντιστάθμισης για να συμπληρώσουμε την γέφυρα ενός βραχίονα σε μισή γέφυρα. Είναι πολύ σημαντικό να επιλέξουμε και να εφαρμόσουμε τον μετρητή αντιστάθμισης σωστά έτσι ώστε να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ο μετρητής αντιστάθμισης πρέπει :

- α) να έχει τα ίδια φυσικά χαρακτηριστικά με τους ενεργούς μετρητές
- β) να εφαρμοστεί σε σημείο όπου θα υπόκειται στην ίδια επιρροή σφάλματος όπως οι ενεργείς μετρητές
- γ) πρέπει μόνο να υποβάλλεται στην ποσότητα σφάλματος και σε καμία περίπτωση με την ποσότητα που θα μετρηθεί ϵ_M ή τις παρενέργειες.

Εάν κάποιο κατάλληλο σημείο δεν μπορεί να βρεθεί στη δοκό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα επιπρόσθετο υλικό. Ο μετρητής αντιστάθμισης μπορεί να συνδεθεί σε αυτό και η ρύθμιση μπορεί τότε να τοποθετηθεί δίπλα από το ενεργό ηλεκτρομηκυνσιόμετρο. Αυτό θα οδηγήσει σε μία καταλληλότερη αντιστάθμιση των σφαλμάτων (της θερμοκρασίας) χωρίς επιρροές από τάσεις από τη στιγμή που δεν υπάρχει μηχανική ζεύξη. Το

κομμάτι με τον μετρητή αντιστάθμισης πρέπει να είναι κατασκευασμένο από το ίδιο υλικό όπως η αρχική δοκός με τον ενεργό μετρητή, ιδίως εάν η παρεμβολή του αποτελέσματος οδηγήσει σε παραμόρφωση του υλικού, όπως η θερμική διαστολή, συμπίεση από υδροστατική πίεση κλπ.

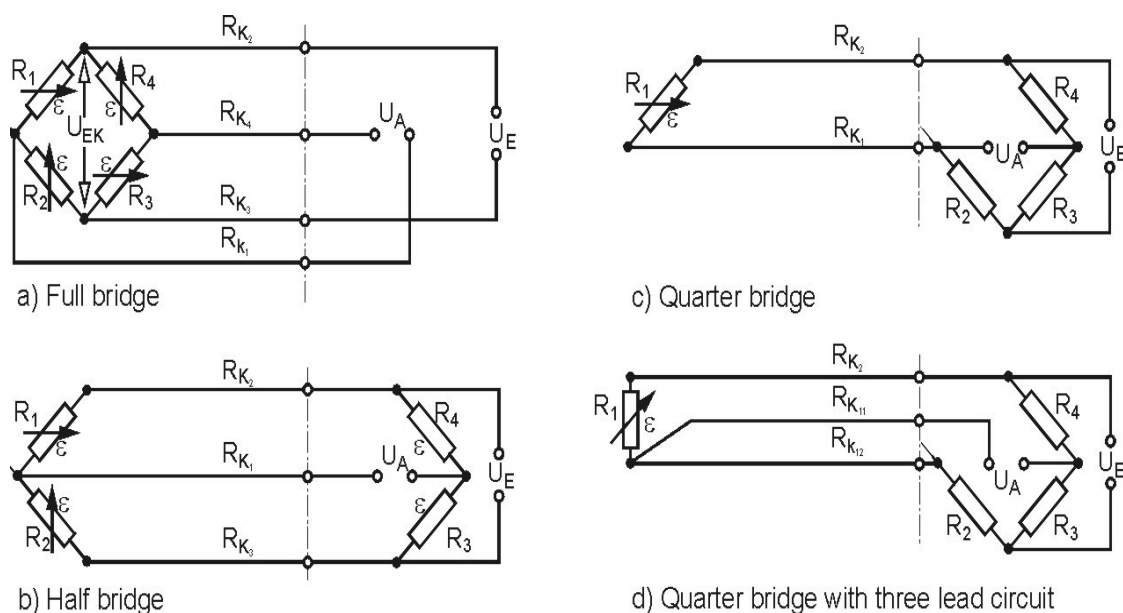
2.5 Εξάλειψη των καλωδιακών σφαλμάτων

Οι αγωγοί αποτελούν μια αντίσταση για το ηλεκτρικό ρεύμα, ανάλογα με το μήκος του αγωγού και την διατομή του. Οι αντιστάσεις των καλωδίων ποικίλλουν αισθητά ανάλογα με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος λόγω του μεγάλου συντελεστή θερμοκρασίας του χαλκού $\alpha_R c_u = 0,004/K$.

Κατά συνέπεια τα καλώδια πρέπει να διατηρούνται όσο το δυνατόν πιο κοντά και να έχουν μεγάλη διατομή, διότι οι αλλαγές της αντίστασης των καλωδίων είναι μικρότερες για μικρότερα μεγέθη αντιστάσεων.

Υπάρχουν όμως φυσικά όρια.

Λαμβάνοντας υπόψιν τις διαφορετικές μεθόδους σύνδεσης στο σχήμα 16, ανακαλύπτουμε δύο βασικές διαφορές: Εφόσον μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια πλήρης γέφυρα, τα καλώδια των συνδέσεων πρέπει να θεωρηθεί ότι δεν έχουν συμπεριληφθεί στο κύκλωμα της γέφυρας. Για όλες τις άλλες ρυθμίσεις τα καλώδια είναι πάντα μέρος του κυκλώματος της γέφυρας.



Σχήμα 16: Συνδέσεις μεταξύ των μετρητών και τα στοιχεία του ενισχυτή

α) Κύκλωμα πλήρους γέφυρας σχήμα. 16α

Για την πλήρη γέφυρα μπορεί να υποτεθεί ότι οι συνδέσεις στο εσωτερικό της γέφυρας είναι σύντομες και η προσφορά τους στα σφάλματα του καλωδίου είναι αμελητέα. Τα καλώδια R_{K2} και R_{K3} μπορούν να θεωρηθούν ως αντίσταση στο κύκλωμα της γέφυρας. Η πραγματική γέφυρα στη συνέχεια θα τροφοδοτηθεί με μία (μικρότερη) τάση U_{EK} σύμφωνα με την πτώση τάσης σε ολόκληρη την αντίσταση των καλωδιώσεων.

$$U_{EK} = U_E \frac{R_B}{R_B + R_{K2} + R_{K3}} \quad (16)$$

Από αυτό βρίσκουμε ότι :

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \cdot \left(\frac{R_B}{R_B + R_{K2} + R_{K3}} \right) \quad (16a)$$

Στην εξίσωση 16α η αντίσταση R_B της γέφυρας είναι παράλληλα μεταξύ των σημείων 2 και 3 (σχήμα 1).

$$R_B = \frac{(R1 + R2)(R3 + R4)}{R1 + R2 + R3 + R4} \quad (17)$$

Οι R_{K2} , R_{K3} είναι οι αντιστάσεις των καλωδίων $K2$ και $K3$, η αλλαγή λόγω θερμοκρασίας μπορεί να αγνοηθεί.

Σημείωση 2-10: Η ευαισθησία της γέφυρας με $R_B = 120$ Ohms θα μειωθεί κατά 5.8 % με τη χρήση ενός ειδικού καλωδίου μήκους 100 μέτρων και διατομής 0.5 mm^2 . Για $R_B = 600$ Ohms η μείωση στην ευαισθησία θα είναι μόνο 1.2 %.

Τα καλώδια R_{K1} και R_{K4} είναι συνδεδεμένα σε σειρά με την υψηλή είσοδο της σύνθετης αντίστασης του ενισχυτή μέτρησης, ή σε σειρά με την άπειρο αντίσταση ενός οργάνου ρυθμισμένου στο 0 ή αντισταθμιστή. Γι'αυτό το αποτέλεσμα της μέτρησης δεν επηρεάζεται από αυτά τα καλώδια.

β) Κύκλωμα μισής γέφυρας, σχήμα 16b

Στην περίπτωση της μισής γέφυρας, το καλώδιο R_{K2} συνδέεται σε σειρά με τον μετρητή No.1 και το R_{K3} σε σειρά με τον μετρητή No.2. Αυτό θα επηρεάσει την ολική ευαισθησία του μετρητή και μπορεί να θεωρηθεί ως φαινομενική αλλαγή στον παράγοντα μεταβολής και για τους δύο μετρητές. Ο φαινομενικός παράγοντας του μεταβολής k^* θα είναι

$$k^* = k \frac{R_{DMS}}{R_{DMS} + R_K} \quad (18)$$

Αυτή η αλλαγή της ευαισθησίας μπορεί να εφαρμοστεί στη σχετική έξοδο της τάσεως της γέφυρας ως εξής :

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \left(\epsilon_1 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{K2}} - \epsilon_2 \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_{K3}} \right) \quad (19)$$

Με την $R_1 = R_2 = R$ και $R_{K2} = R_{K3} = R_K$ θα έχουμε :

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2) \left(\frac{R}{R + R_K} \right) \quad (20)$$

Κάθε μεταβολή της καλωδιακής αντίστασης που συνδέεται σε σειρά με τον μετρητή θα έχει τα ίδια αποτελέσματα με την αλλαγή της αντίστασης του μετρητή. Σε μία διάταξη μισής γέφυρας επιδράσεις της θερμοκρασίας στα καλώδια μπορούν να αντισταθμιστούν.

Η μέθοδος περιγράφεται στην ενότητα 2.4. Μία συμμετρική ρύθμιση και των δύο βραχιόνων της γέφυρας, συμπεριλαμβάνοντας και τα καλώδια, τα οποία φυσικά θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό, έχουν το ίδιο μήκος και διατομή και θα πρέπει να υπόκεινται στην ίδια θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Το καλώδιο $K1$ δεν έχει καμία επιρροή στα αποτελέσματα, όπως έχει συζητηθεί στην περίπτωση α) της πλήρους γέφυρας.

γ) Κύκλωμα γέφυρα ενός βραχίονα, σχήμα 16c

Η γέφυρα ενός βραχίονα έχει περιορισμένη χρησιμότητα εξαιτίας της υψηλής της ευαισθησίας ενάντια στις διαταραχές. Πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο υπό τις πλέον ευνοϊκές συνθήκες ή εάν όλες οι επιρροές από σφάλματα είναι γνωστές και μπορούν να αντισταθμιστούν. Επιπλέον, υπάρχει μία απώλεια ευαισθησίας εξαιτίας της αντίστασης των καλωδίων στα καλώδια συνδέσεων :

$$k^* = k \frac{R_{DMS}}{R_{DMS} + R_{K1} + R_{K2}} \quad (21)$$

ή με αναφορά στη σχετική τάση εξόδου της γέφυρας :

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot \epsilon_1 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{K1} + R_{K2}} \quad (22)$$

Η γέφυρα ενός βραχίονα συνίσταται μόνο για μετρήσεις κάτω από σταθερές θερμοκρασίες ή αν χρησιμοποιηθούν μετρητές με αντιστάθμιση θερμοκρασίας. Η σωστή λειτουργία της αντιστάθμισης της θερμοκρασίας μπορεί να επιτευχθεί με το επονομαζόμενο “ κύκλωμα τριών δρόμων” στο σχήμα 16d. Αυτή η μέθοδος απαιτεί τα καλώδια K2 και K12 να είναι από το ίδιο υλικό, ίδιου μήκους και να δέχονται την ίδια επιρροή από τη θερμοκρασία, αλλά το καλώδιο K11 δεν είναι κρίσιμο από αυτήν την άποψη. Το τρικ σε αυτήν την διευθέτηση είναι ότι το καλώδιο K2 δεν είναι συνδεδεμένο σε σειρά με τον μετρητή No.1, ενώ το K12 είναι μέρος του γειτονικού βραχίονα της γέφυρας και είναι σε σειρά με τη συμπληρωματική αντίσταση R₂. Αυτό μας εξασφαλίζει τις ίδιες συνθήκες αντιστάθμισης όπως και στο κύκλωμα μισής γέφυρας.

Για την απώλεια της ευαισθησίας του μετρητή ισχύει η εξίσωση (18) ή

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot \epsilon_1 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{K2}} \quad (23)$$

2.6 Πίνακας διαφορετικών ρυθμίσεων κυκλωμάτων

Ο πίνακας παρακάτω μας δείχνει την εξάρτηση της γεωμετρικής θέσης των μετρητών, τον τύπο του κυκλώματος της γέφυρας που χρησιμοποιείται και τον προκύπτοντα παράγοντα B για τις κανονικές δυνάμεις, κάμψεις, ροπές και θερμοκρασίες. Οι μικροί πίνακες για το κάθε παράδειγμα καθορίζουν τον παράγοντα B της γέφυρας για κάθε είδος ποσότητας. Οι σχέσεις χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η ωφέλιμη πίεση από το σήμα εξόδου της γέφυρας U_A/U_E . Εάν χρησιμοποιηθούν μετρητές πίεσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα οι σχέσεις (7) ή (11).

1

$$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_b = \frac{4}{k} \frac{U_A}{U_E} - \varepsilon_s$$

| T | F _N | M _b | M _d |
|---|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 1 | 1 | 0 |

9

$$\varepsilon = \varepsilon_n = \frac{1}{2(1+\mu)} \cdot \frac{4}{k} \frac{U_A}{U_E}$$

| T | F _N | M _b | M _d |
|---|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 2(1+μ) | 0 | 0 |

2

$$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_b = \frac{4}{k} \frac{U_A}{U_E}$$

| T | F _N | M _b | M _d |
|---|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 1 | 1 | 0 |

10

$$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{2(1-\mu)} \cdot \frac{4}{k} \frac{U_A}{U_E}$$

| T | F _N | M _b | M _d |
|---|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 0 | 2(1+μ) | 0 |

3

$$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_b = \frac{1}{(1+\mu)} \cdot \frac{4}{k} \frac{U_A}{U_E}$$

| T | F _N | M _b | M _d |
|---|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 1+μ | 1+μ | 0 |

11

$$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{2(1+\mu)} \cdot \frac{4}{k} \frac{U_A}{U_E}$$

| T | F _N | M _b | M _d |
|---|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 0 | 2(1+μ) | 0 |

4

$$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \frac{U_A}{U_E}$$

| T | F _N | M _b | M _d |
|---|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 0 | 2 | 0 |

12

$$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \frac{U_A}{U_E}$$

| T | F _N | M _b | M _d |
|---|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 0 | 2 | 0 |

5

$$\varepsilon = \varepsilon_n = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \frac{U_A}{U_E} - \varepsilon_s$$

| T | F _N | M _b | M _d |
|---|----------------|----------------|----------------|
| 2 | 2 | 0 | 0 |

13

$$\varepsilon = \alpha d = \frac{1}{4} \cdot \frac{4}{k} \frac{U_A}{U_E}$$

| T | F _N | M _{b_x} | M _{b_y} | M _d |
|---|----------------|------------------|------------------|----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |

6

$$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_b = \frac{1}{2(1+\nu)} \cdot \frac{4}{k} \frac{U_A}{U_E}$$

| T | F _N | M _b | M _d |
|---|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 2(1+ν) | 2(1+ν) | 0 |

14

$$\varepsilon = \varepsilon_d = \frac{1}{4} \cdot \frac{4}{k} \frac{U_A}{U_E}$$

| T | F _N | M _{b_x} | M _{b_y} | M _d |
|---|----------------|------------------|------------------|----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |

7

$$\varepsilon = \varepsilon_n = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \frac{U_A}{U_E}$$

| T | F _N | M _b | M _d |
|---|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 2 | 0 | 0 |

15

$$\varepsilon = \varepsilon_d = \frac{1}{4} \cdot \frac{4}{k} \frac{U_A}{U_E}$$

| t | F _N | M _{b_x} | M _{b_y} | M _d |
|---|----------------|------------------|------------------|----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |

8

$$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \frac{U_A}{U_E}$$

| T | F _N | M _b | M _d |
|---|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 0 | 4 | 0 |

Σημείωση 2-11: Ένας κυλινδρικός άξονας χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ροπής στα παραδείγματα 13, 14, 15. Για λόγους συμμετρίας επιτρέπεται η κάμψη στην X και Y κατεύθυνση. Οι ίδιοι όροι ισχύουν επίσης για τη ράβδο με τετράγωνη ή ορθογώνια διατομή. Επεξήγηση των συμβόλων :

t = θερμοκρασία

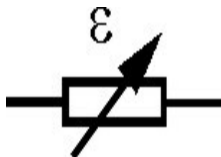
F_N = κανονική δύναμη

M_b = ροπή κάμψης

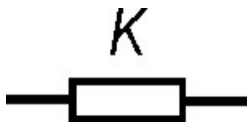
M_{bx}, M_{by} = ροπή κάμψης για X και Y κατευθύνσεις

M_d = ροπή

Αυτές οι επιδράσεις καταλήγουν στις αντίστοιχες πιέσεις $\epsilon_s, \epsilon_n, \epsilon_b, \epsilon_{bx}, \epsilon_d$
 $\epsilon = H$ ωφέλιμη πίεση στο σημείο μέτρησης Z_o με P και M_b σε κανονική (αξονική) κατεύθυνση, για M_d υπό $\varphi = +45^\circ$.



Ενεργή πιεζοαντίσταση



Πιεζοαντίσταση για αντιστάθμιση θερμοκρασίας



Παθητική πιεζοαντίσταση ή αντίσταση

2.7 Παρατηρήσεις για τα όρια της αντιστάθμισης των σφαλμάτων

Οι επεξηγήσεις των μεθόδων αντιστάθμισης για επιρροές από σφάλματα μέσω του κυκλώματος της γέφυρας Wheatstone απαιτούν μερικές κρίσιμες παρατηρήσεις :

Η αντιστάθμιση της θερμοκρασιακής διαστολής είναι ορθή μόνο όταν μερικές συνθήκες εκπληρωθούν αυστηρά. Αυτές περιλαμβάνουν :

- α) συμμετρία της γέφυρας
- β) πανομοιότυποι συντελεστές θερμοκρασίας για όλα τα υλικά
- γ) πανομοιότυπες αντιστάσεις όλων των μερών στους βραχίονες της γέφυρας τα οποία συνδυάζονται για την αντιστάθμιση
- δ) πανομοιότυπη θερμοκρασία για όλα τα στοιχεία της αντιστάθμισης στο ολικό κύκλωμα της γέφυρας

Σε όλες τις πρακτικές εφαρμογές θα υπάρχουν πάντα κάποιες αποκλίσεις, οι οποίες θα οδηγούν σε δεύτερης τάξης σφάλματα, παρόλο που οι μέθοδοι αντιστάθμισης χρησιμοποιούνται όπως περιγράφεται παραπάνω.

Οι μετατροπείς ακριβείας αντισταθμίζονται με ιδιαίτερο τρόπο για τα δεύτερης τάξης σφάλματα σε συγκεκριμένα στάδια παραγωγής.

Η πιθανότητα αντιστάθμισης μηχανικών σφαλμάτων είναι περιορισμένη, για παράδειγμα η αντιστάθμιση της κάμπτουςας δύναμης σε μία δοκό έντασης. Οι βασικότεροι λόγοι είναι:

- α) ανοχές στην ευθυγράμμιση των μετρητών στη δοκό,
- β) μικρές διαφορές της ευαισθησίας των πιεζοαντιστάσεων,
- γ) το όριο της ελαστικότητας που εξαρτάται από την κατεύθυνση της δύναμης,
- δ) διαστατικές (κατασκευή) ανοχές της δοκού,
- ε) παραμόρφωση της διατομής του οργάνου υπό πίεση που οδηγεί σε ατέλειες από την προηγούμενη συμμετρία,
- στ) ανισότροπες επιπτώσεις των ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού της δοκού.

Εμπειρικά μαθαίνουμε ότι οποιαδήποτε επιρροή σφάλματος μπορεί να αντισταθμιστεί από 95 % έως 98 %, υπό την προϋπόθεση ότι η πιεζοαντίσταση έχει εφαρμοστεί κατάλληλα. Το υπόλοιπο 2 με 5% συμπεριλαμβάνεται στο αποτέλεσμα της μέτρησης.

2.8. Τα σφάλματα γραμμικότητας του κυκλώματος της γέφυρας Wheatstone

Στις τεχνικές με πιεζοαντιστάσεις, θεωρείται μία γραμμική σχέση μεταξύ της σχετικής μεταβολής της αντίστασης της πιεζοαντίστασης και της σχετικής τάσεως εξόδου της γέφυρας Wheatstone, όπως περιγράφεται από τη σχέση (4). Αυτό είναι κατάλληλο, φυσικά, για όλους τους πρακτικούς σκοπούς, εφόσον ισχύουν όλοι οι περιορισμοί για την εξίσωση (4). Αλλά εάν σχετικές αλλαγές της αντίστασης της πιεζοαντίστασης αυξηθούν, για μικρό ποσοστό, ή απαιτείται ακραία ακρίβεια, οι αξιώσεις δεν μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν. Τα πραγματικά αποτελέσματα της σχέσης από την εξίσωση (2) ή από την ακόλουθη σχέση :

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \quad (24)$$

Το μέγεθος του σφάλματος γραμμικότητας εξαρτάται, αφενός, στην απόλυτη τιμή της σχετικής απόκλισης της αντίστασης και του πρόσημου της και αφετέρου, στους βραχίονες της γέφυρας όπου πραγματοποιείται η αλλαγή. Οι συνηθέστεροι σχηματισμοί, πχ. ενός βραχίονα, μισής και πλήρους γέφυρας (ενότητα 2.2) παρουσιάζονται ξεχωριστά στις ακόλουθες ενότητες. Οι γραμμικές αποκλίσεις υπολογίζονται και παρουσιάζονται ως καμπύλη σφάλματος με αναφορά στην εφαπτομένη μέσω του μηδέν. Η εφαπτομένη μέσω του μηδέν περιγράφεται από την εξίσωση (4). Γενικά, η καμπύλη σφάλματος περιγράφει την απόκλιση της εξόδου της γέφυρας ως συνάρτηση του σήματος εισόδου. Λαμβάνοντας την υπολογισμένη απόκλιση με το αντίθετο πρόσημο, διορθώνουμε το μετρήσιμο μέγεθος.

2.8.1 Γέφυρα ενός βραχίονα

Το σφάλμα της γραμμικότητας της γέφυρας ενός βραχίονα είναι το πρώτο που θα μελετηθεί επειδή χρησιμοποιείται πιο συχνά και είναι το πιο απλό κύκλωμα ηλεκτρομηκυνσιομέτρου (σχήμα 7c). Υποθέτοντας ότι $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, από τη σχέση (24) έχουμε:

$$\frac{U_A^*}{U_E} = \frac{\Delta R_1}{2(2R + \Delta R_1)} \quad (25)$$

Η επαπτομένη μέσω του μηδέν μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (4) ή από τον τύπο της γέφυρας ενός βραχίονα

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{\Delta R_1}{4R} \quad (26)$$

Ορίζοντας το σχετικό σφάλμα γραμμικότητας ως:

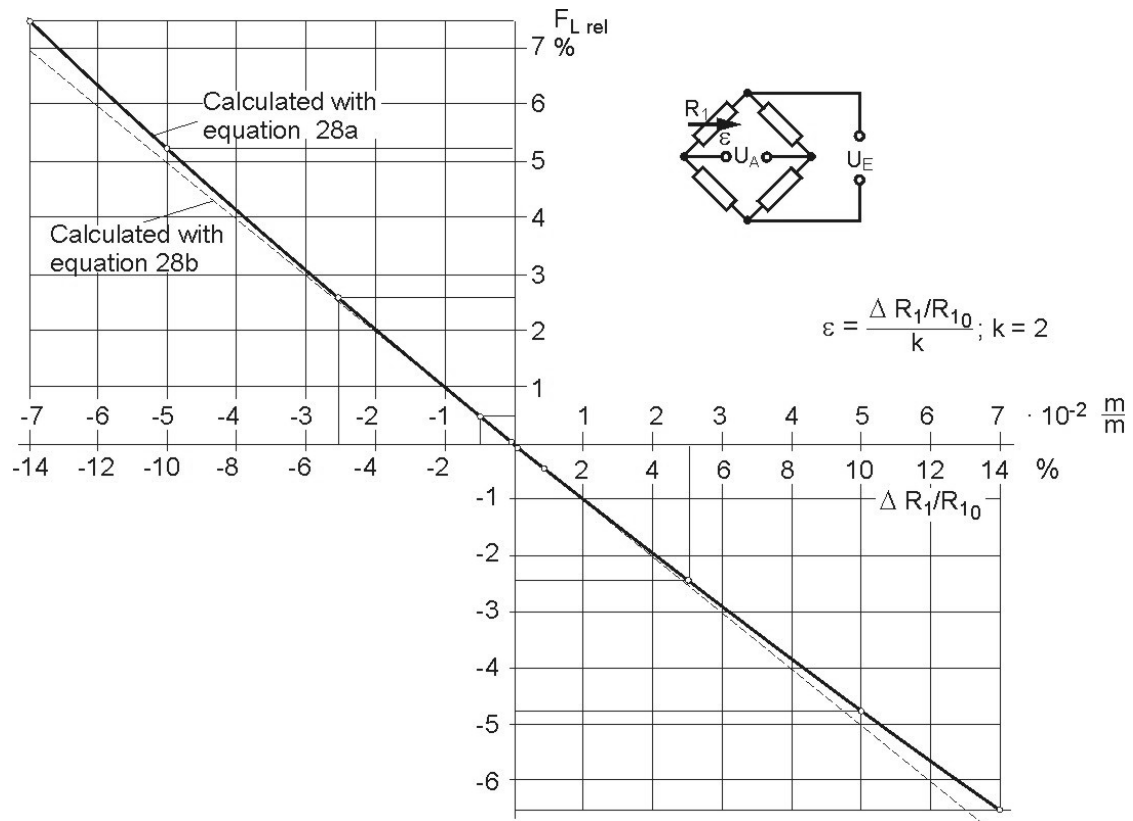
$$F_{Lrel} = \frac{\frac{U_A^*}{U_E} - \frac{U_A}{U_E}}{\frac{U_A}{U_E}} \cdot 100 A \quad (27)$$

σε αυτήν την περίπτωση έχουμε:

$$F_{Lrel} = \frac{-\Delta R}{2R + \Delta R} \cdot 100 A \quad (28\alpha)$$

ή ως στρογγυλοποίηση:

$$F_{Lrel} \approx \frac{-\Delta R}{2R} \cdot 100 A \quad (28\beta)$$



Σχήμα 17: Το σχετικό σφάλμα γραμμικότητας της γέφυρας ενός βραχίονα σε συνάρτηση με τη σχετική μεταβολή της αντίστασης ή της πίεσης

Σημείωση 2-12: Στα διαγράμματα 17 και 18, είναι φανερό ότι τα ποσοστά είναι πάντα δύσκολα. Η τετμημένη και η τεταγμένη έχουν και οι δύο ποσοστό κλίμακας, αλλά με διαφορετικές τάξεις μεγέθους: Το σφάλμα γραμμικότητας είναι στο 25% της σχετικής μεταβολής της αντίστασης. Σε μαθηματική έννοια, το σφάλμα γραμμικότητας έχει το μέγεθος 10^{-4} .

Σημείωση 2-13: Επειδή $\Delta R/R = k \cdot \epsilon$ από την εξίσωση (1) έχουμε $F_{Lrel} \approx -\epsilon$ ως πρακτικός κανόνας για $k = 2$.

2.8.2 Κύκλωμα μισής γέφυρας

Στο κύκλωμα μισής γέφυρας, ενεργές πιεζοαντιστάσεις χρησιμοποιούνται και στους δύο βραχίονες της γέφυρας (R_1 και R_2).

Σημείωση 2-14: Η R_2 χρησιμοποιείται για αντιστάθμιση της θερμοκρασίας ή για την αντιστάθμιση άλλων επιδράσεων, όλες οι χρήσεις θεωρούνται ως γέφυρα ενός βρόγχου.

Υποθέτοντας ότι $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, από τη σχέση (24) έχουμε

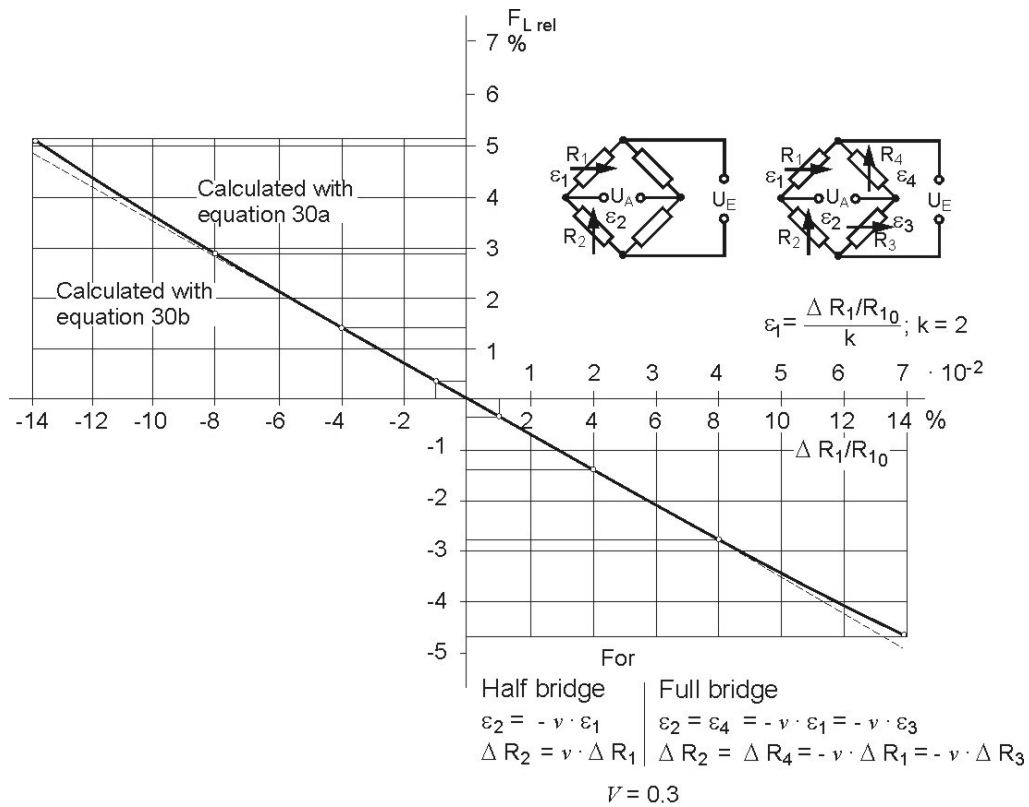
$$\frac{U_A^*}{U_E} = \frac{-\Delta R_1 - \Delta R_2}{2(2R + \Delta R_1 + \Delta R_2)} \quad (29)$$

Δύο χαρακτηριστικές εφαρμογές της μισής γέφυρας περιγράφονται στις ενότητες 2.1 και 2.2 η 2.3. Είναι σημαντικό για τέτοιες εφαρμογές να πραγματοποιείται θετική και αρνητική πίεση την ίδια στιγμή, η οποία υπολογίζεται από τις συνδεδεμένες πιεζοαντιστάσεις στους γειτονικούς βραχίονες. Σε αυτά τα παραδείγματα, η πιεζοαντίσταση No 1. υπόκειται σε θετική πίεση και η πιεζοαντίσταση No 2. υπόκειται σε αρνητική πίεση. Γι'αυτό έχουμε θετικές τιμές για το ΔR_1 και αρνητικές τιμές για το ΔR_2 . Η εξίσωση (29) στην πρώτη εκδοχή είναι μία επιβεβαίωση της δήλωσης του πρώτου μέρους, ότι τα μετρήσιμα μεγέθη με αντίθετα σύμβολα σε γειτονικούς βραχίονες της γέφυρας, προστίθενται, αλλά οι τιμές των ΔR_1 , ΔR_2 αφαιρούνται καθώς είναι υπεύθυνα για το σφάλμα γραμμικότητας της εξίσωσης (29). Απαλείφονται τελείως, όταν έχουν την ίδια απόλυτη τιμή. Αυτό ισχύει για την κάμπουσα δοκό (ενότητα 2.2) και για τον στρεφόμενο άξονα (ενότητα 2.3). Για την εφελκυστική ράβδο (ενότητα 2.1), υπάρχει ένα έμφυτο γραμμικό σφάλμα επειδή $\epsilon_1 : \epsilon_2 = \Delta R_1 : \Delta R_2$ με το $\Delta R_2 = -\mu \times \Delta R_1$ είναι μικρότερο από την γέφυρα ενός βρόγχου :

$$F_{rel} = \frac{-(\Delta R_1 + \Delta R_2)}{2R + \Delta R_1 + \Delta R_2} \cdot 100 A \quad (30\alpha)$$

ή ως κατα προσέγγιση

$$F_{Lrel} \approx \frac{-(\Delta R1 + \Delta R2)}{2R} \cdot 100 A \quad (30\beta)$$



Σχήμα 18: Σχετικό σφάλμα γραμμικότητας του κυκλώματος της μισής γέφυρας σε σχέση με την μεταβολή των αντιστάσεων R_1 και R_2 ή R_1 έως R_4

2.8.3 Κύκλωμα πλήρους γέφυρας

Στο κύκλωμα πλήρους γέφυρας (σχήμα 7a), ενεργές πιεζοαντιστάσεις χρησιμοποιούνται στους τέσσερις βραχίονες από R1 έως R4.

Υποθέτοντας ότι $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, από τη σχέση (24) έχουμε:

$$\frac{R + \Delta R_1}{(2R + \Delta R_1 + \Delta R_2)} = \frac{R + \Delta R_4}{(2R + \Delta R_3 + \Delta R_4)} \quad (31)$$

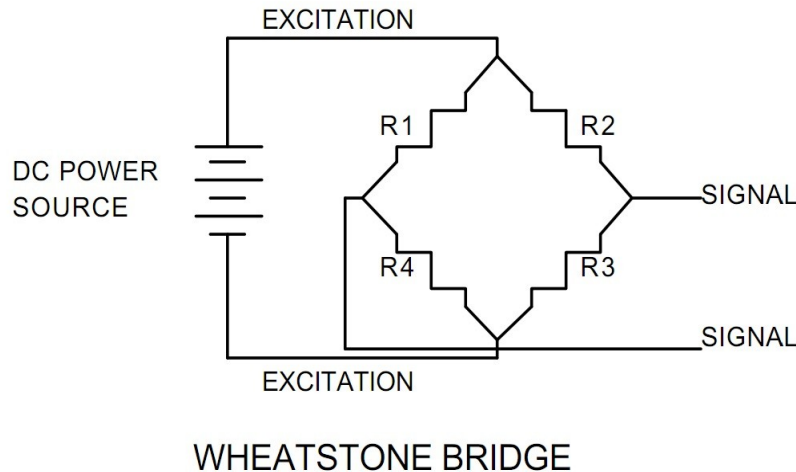
Με την χρήση των κυκλωμάτων που περιγράφονται στις ενότητες 2.2 και 2.3, δεν θα υπάρχουν γραμμικά σφάλματα. Υπο αυτήν την άποψη η πλήρης γέφυρα και η μισή γέφυρα είναι ισοδύναμες. Επίσης το σχήμα 18 ισχύει και για την συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας.

Κεφάλαιο 3^ο

ΔΥΝΑΜΟΚΥΨΕΛΕΣ LOAD CELLS

3.1 Εισαγωγή

Το load cell ή αλλιώς δυναμοκυψέλη είναι ένας μετατροπέας, ο οποίος δέχεται τάση από μία πηγή και στην έξοδό του εμφανίζεται σήμα χαμηλής τάσης, όταν εφαρμόζεται σε αυτό κάποια δύναμη. Αυτή η μετατροπή επιτυγχάνεται από τη φυσική παραμόρφωση των πιεζοαντιστάσεων, οι οποίες είναι κολλημένες πάνω στη δοκό της δυναμοκυψέλης και είναι συνδεδεμένες σε συνδεσμολογία γέφυρας Wheatstone. Όταν δεν υπάρχει φορτίο στη δυναμοκυψέλη, οι δύο γραμμές σήματος έχουν ίδια τάση. Όταν εφαρμόζεται φορτίο στη δυναμοκυψέλη, η τάση στη μία γραμμή σήματος αυξάνεται ελάχιστα και ελαττώνεται ελάχιστα στην άλλη. Η διαφορά τάσης των δύο σημάτων αναλογεί στο βάρος του φορτίου. Η δυναμοκυψέλη συνήθως είναι κατασκευασμένη από ατσάλι ή αλουμίνιο. Παρόλο που υπάρχουν πολλά είδη δυναμοκυψελών, οι δυναμοκυψέλες που είναι βασισμένες στις πιεζοαντιστάσεις είναι οι πιο συνηθισμένες.



Σχήμα 19: Η γέφυρα Wheatstone

Πριν οι δυναμοκυψέλες με πιεζοαντιστάσεις γίνουν η επιλογή για τις βιομηχανικές εφαρμογές μέτρησης, χρησιμοποιούντουσαν ευρέως μηχανικές ζυγαριές. Το 1843, ο Άγγλος φυσικός Sir Charles Wheatstone

επινόησε ένα κύκλωμα γεφυρών που θα μπορούσε να μετρήσει τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Το κύκλωμα γεφυρών Wheatstone είναι ιδανικό για τη μέτρηση των μεταβολών των αντιστάσεων που εμφανίζονται στις πιεζοαντιστάσεις. Παρόλο που η πρώτη πιεζοαντίσταση, η οποία ήταν συνδεδεμένη με καλώδια, ανταπύχθηκε τη δεκαετία του 1940 δεν ήταν τεχνικά και οικονομικά εφικτή. Από τότε, οι πιεζοαντιστάσεις έχουν πολλαπλασιαστεί ως μηχανικά τμήματα ζυγαριάς και σε αυτόνομες δυναμοκυψέλες. Σήμερα, εκτός από κάποια εργαστήρια που χρησιμοποιούν ακόμα μηχανικές ζυγαριές ακριβείας, οι δυναμοκυψέλες με πιεζοαντιστάσεις κυριαρχούν στην βιομηχανία. Οι δυναμοκυψέλες με πιεζοαντιστάσεις προσφέρουν ακρίβεια από 0,03% έως 0,25% και είναι κατάλληλες για σχεδόν όλες τις βιομηχανικές εφαρμογές.

3.2 Αρχή λειτουργίας των δυναμοκυψέλων

Τα σχήματα των δυναμοκυψέλων μπορούν να διαχωριστούν σύμφωνα με τον τύπο της εξόδου που παραγεται (υδραυλική, ηλεκτρική, με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα) ή σύμφωνα με τον τρόπο που αναγνωρίζουν το βάρος (κάμψη, συμπίεση, ένταση, κ.λπ.)

3.2.1 Οι υδραυλικές δυναμοκυψέλες

Οι υδραυλικές δυναμοκυψέλες είναι συσκευές ισοροπησης δύναμης, μετρούν το βάρος ως μεταβολή της πίεσης του εσωτερικού τους υγρού πλήρωσης. Σε ένα κυλιόμενο υδραυλικού τύπου διάφραγμα δυναμοκυψέλης, ένα φορτίο ή μία δύναμη που ενεργεί σε ένα κεφάλι φόρτωσης, μεταφέρεται σε ένα πιστόνι, το οποίο στη συνέχεια συμπιέζει ένα υγρό πλήρωσης το οποίο περιορίζεται σε ένα θάλαμο διαφραγμάτων. Καθώς η δύναμη αυξάνεται, η πίεση του υδραυλικού υγρού αυξάνεται. Αυτή η πίεση μπορεί να υποδειχθεί τοπικά ή να μεταδοθεί για μακρινό έλεγχο ή ένδειξη. Η έξοδος είναι γραμμική και σχετική με την απρόσβλητη από την ποσότητα του υγρού πλήρωσης ή της θερμοκρασίας του. Αν οι δυναμοκυψέλες έχουν εγκατασταθεί και έχουν ρυθμιστεί κατάλληλα, η ακρίβεια μπορεί να είναι από 0,25% ή και καλύτερη, αποδεκτή για τις περισσότερες εφαρμογές ζύγισης. Επειδή αυτός ο

αισθητήρας δεν έχει κανένα ηλεκτρικό στοιχείο, είναι ιδανικός για χρήση σε επικίνδυνες περιοχές. Οι υδραυλικές εφαρμογές των δυναμοκυψέλων συναντιούνται κυρίως σε δεξαμενές. Για μέγιστη ακρίβεια, το βάρος της δεξαμενής πρέπει να ληφθεί με την τοποθέτηση μίας δυναμοκυψέλης σε κάθε σημείο στήριξης και να αθροιστούν οι έξοδοί τους.

3.2.2 Οι δυναμοκυψέλες με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα (Pneumatic)

Οι δυναμοκυψέλες με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα (Pneumatic) λειτουργούν επίσης βασισμένες στην αρχή δύναμης – ισορροπίας. Αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούν πολλαπλούς ηχομονωμένους θαλάμους για να προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια από μία υδραυλική συσκευή. Σε μερικούς σχεδιασμούς, ο πρώτος θάλαμος χρησιμοποιείται ως θάλαμος μέτρησης απόβαρου. Οι δυναμοκυψέλες αυτές συχνά χρησιμοποιούνται για να μετρήσουμε σχετικά μικρά βάρη στις βιομηχανίες όπου η καθαριότητα και η ασφάλεια έχουν τον πρώτο λόγο. Τα πλεονεκτήματα αυτού του είδους δυναμοκυψέλης περιλαμβάνουν την έμφυτη αντοχή τους σε εκρήξεις και είναι απαθή στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Επιπλέον δεν περιέχουν υγρά, τα οποία μπορούν να μολύνουν τη διαδικασία εάν το διάφραγμα σπάσει. Τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν την σχετικά αργή ταχύτητα απόκρισης και την αναγκαιότητα να είναι καθαρά, στεγνά και να παρέχεται ρυθμιζόμενος αέρας ή άζωτο.

3.2.3 Οι δυναμοκυψέλες με πιεζοαντίσταση

Οι δυναμοκυψέλες με πιεζοαντίσταση μετατρέπουν την πίεση που ασκείται σε ηλεκτρικά σήματα. Οι μετρητές συνδέονται πάνω σε μία δοκό ή σε ένα δομικό μέρος, το οποίο παραμορφώνεται όταν ασκείται πίεση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται τέσσερις πιεζοαντιστάσεις για να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια και αντιστάθμιση της θερμοκρασίας. Όταν ασκείται βάρος, η πίεση μεταβάλλει την αντίσταση του μετρητή ανάλογα με το φορτίο. Πλεονέκτημα των δυναμοκυψέλων με πιεζοαντίσταση είναι η μεγάλη τους ακρίβεια και το χαμηλό τους κόστος.

3.3 Τύποι δυναμοκυψελών

- **Δυναμοκυψέλη συμπίεσης / compression load cells**



Σχήμα 20,21: Δυναμοκυψέλη συμπίεσης

Οι δυναμοκυψέλες συμπίεσης έχουν ένα σχεδιασμό κουμπιού. Είναι κατάλληλες για να τοποθετούνται όπου υπάρχει περιορισμένος χώρος. Προσφέρουν άριστη μακροπρόθεσμη σταθερότητα.

- Δυναμοκυψέλη συμπίεσης και τεντώματος /compression-tension load cells



Σχήμα 22,23,24: Δυναμοκυψέλες συμπίεσης και τεντώματος

Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου το φορτίο μπορεί να μετατραπεί από ένταση σε συμπίεση και το αντίστροφο. Είναι κατάλληλες για μέρη με περιορισμένο χώρο. Οι άκρες τους διευκολύνουν την εύκολη εγκατάσταση.

- Δυναμοκυψέλη με δοκό σχήματος S / S-beam load cells



Σχήμα 25,26: Δυναμοκυψέλες με δοκό σχήματος S

Το όνομά τους προέρχεται από το σχήμα τους. Χρησιμοποιούνται σε δεξαμενές και ζυγαριές φορτηγών. Παρέχουν την ανώτερη δευτερεύουσα απόρριψη φορτίου.

- **Δυναμοκυψέλη πλατφόρμας και ενιαίου σημείου / Platform and single point load cells**



Σχήμα 27,28: Δυναμοκυψέλες πλατφόρμας και ενιαίου σημείου

Χρησιμοποιούνται στα εμπορικά και βιομηχανικά συστήματα ζύγισης. Παρέχουν ακριβή αποτελέσματα σύμφωνα με τη θέση που είναι τοποθετημένο το φορτίο στην πλατφόρμα.

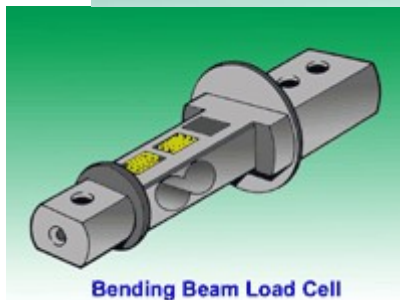
- **Δυναμοκυψέλες χαμηλής κατατομής / Low profile load cells**



Σχήμα 29: Δυναμοκυψέλες χαμηλής κατατομής

Δυναμοκυψέλες συμπίεσης και τεντώματος. Οι προυπάρχουσες τρύπες παρέχουν εύκολη εγκατάσταση. Χρησιμοποιούνται συχνά σε έρευνες ζυγίσματος και ευθύγραμμους ελέγχους δύναμης.

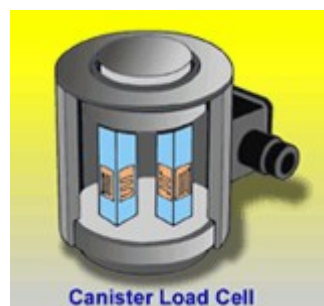
- **Δυναμοκυψέλη κάμπτουςας δοκού / bending beam load cell**



Σχήμα 30,31,32: Δυναμοκυψέλες κάμπτουςας δοκού

Χρησιμοποιούνται σε πολλαπλές εφαρμογές δυναμοκυψέλων, ζύγιση δεξαμενών και έλεγχο βιομηχανικής διαδικασίας. Χαρακτηρίζονται από τη χαμηλή κατατομή κατασκευής για την ένταξή τους σε περιορισμένες περιοχές.

- **Δυναμοκυψέλη σε σχήμα μεταλλικού κουτιού / canister load cell**



Σχήμα 33,34: Δυναμοκυψέλες σε σχήμα μεταλλικού κουτιού

Χρησιμοποιούνται για μεμονομένες ή πολλαπλές εφαρμογές ζύγισης. Οι περισσότερες χαρακτηρίζονται από ένα ανοξείδωτο σχέδιο και σφραγίζονται ερμητικά για περιοχές υγρές και πλυσίματος.

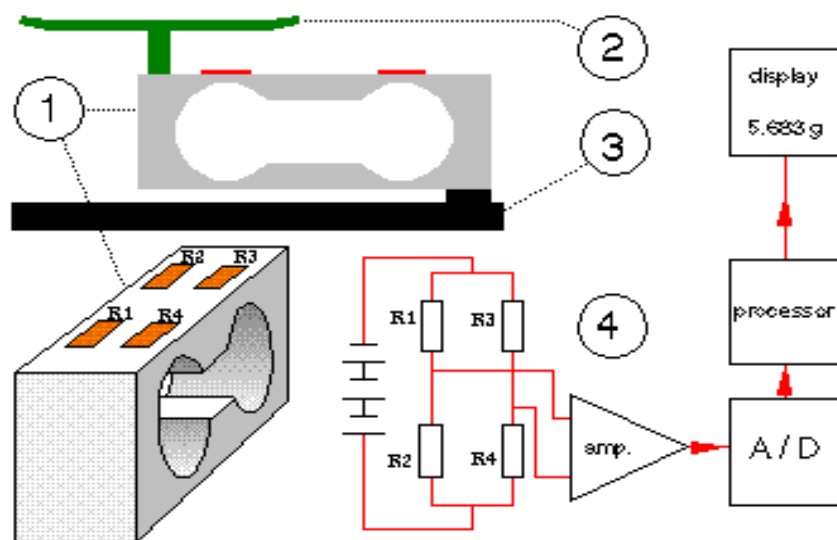
Κεφάλαιο 4^ο

Ηλεκτρονική ζυγαριά

4.1 Εισαγωγή

Για την κατασκευή της ηλεκτρονικής ζυγαριάς απαιτούνται τα εξής στοιχεία:

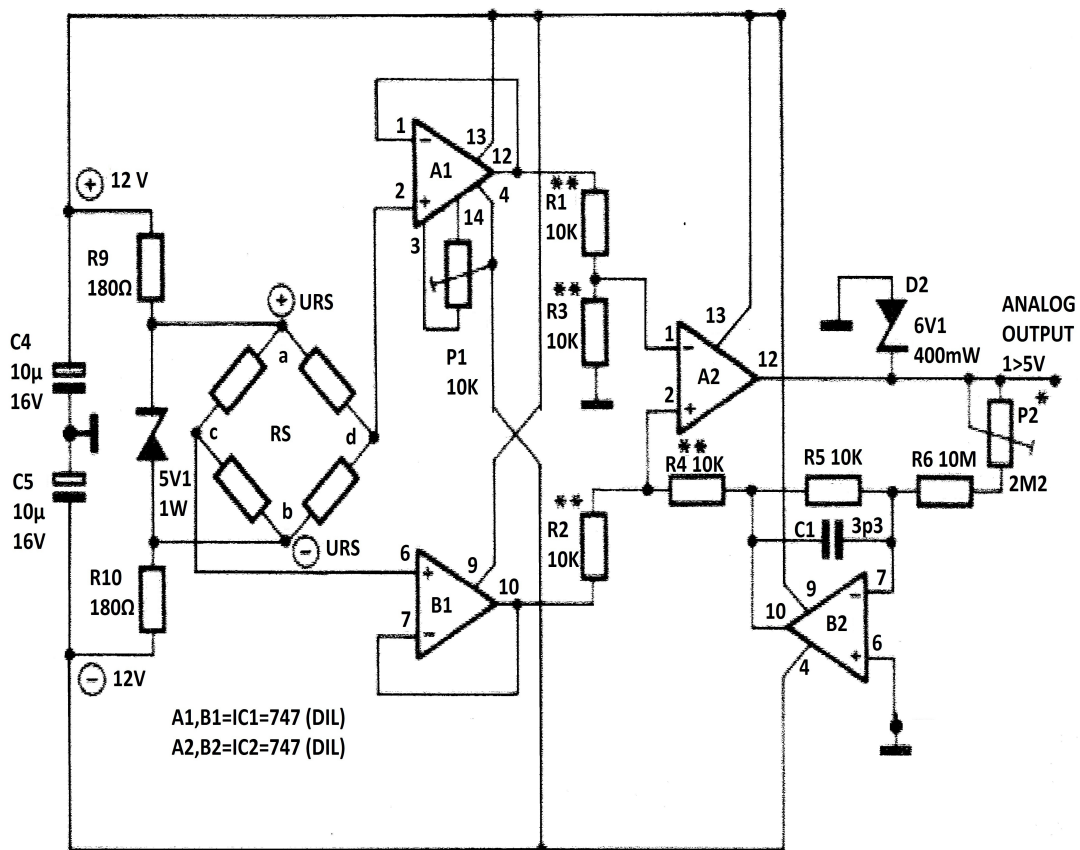
- Δυναμοκυψέλη, για την μετατροπή του βάρους σε ηλεκτρικό σήμα
- Έναν ενισχυτή, για την ενίσχυση του σήματος
- Έναν μικροελεγκτή
- Οθόνη απεικόνισης
- Τροφοδοτικό



Σχήμα 35: Το διάγραμμα της ηλεκτρονικής ζυγαριάς

4.2 Ο Ενισχυτής

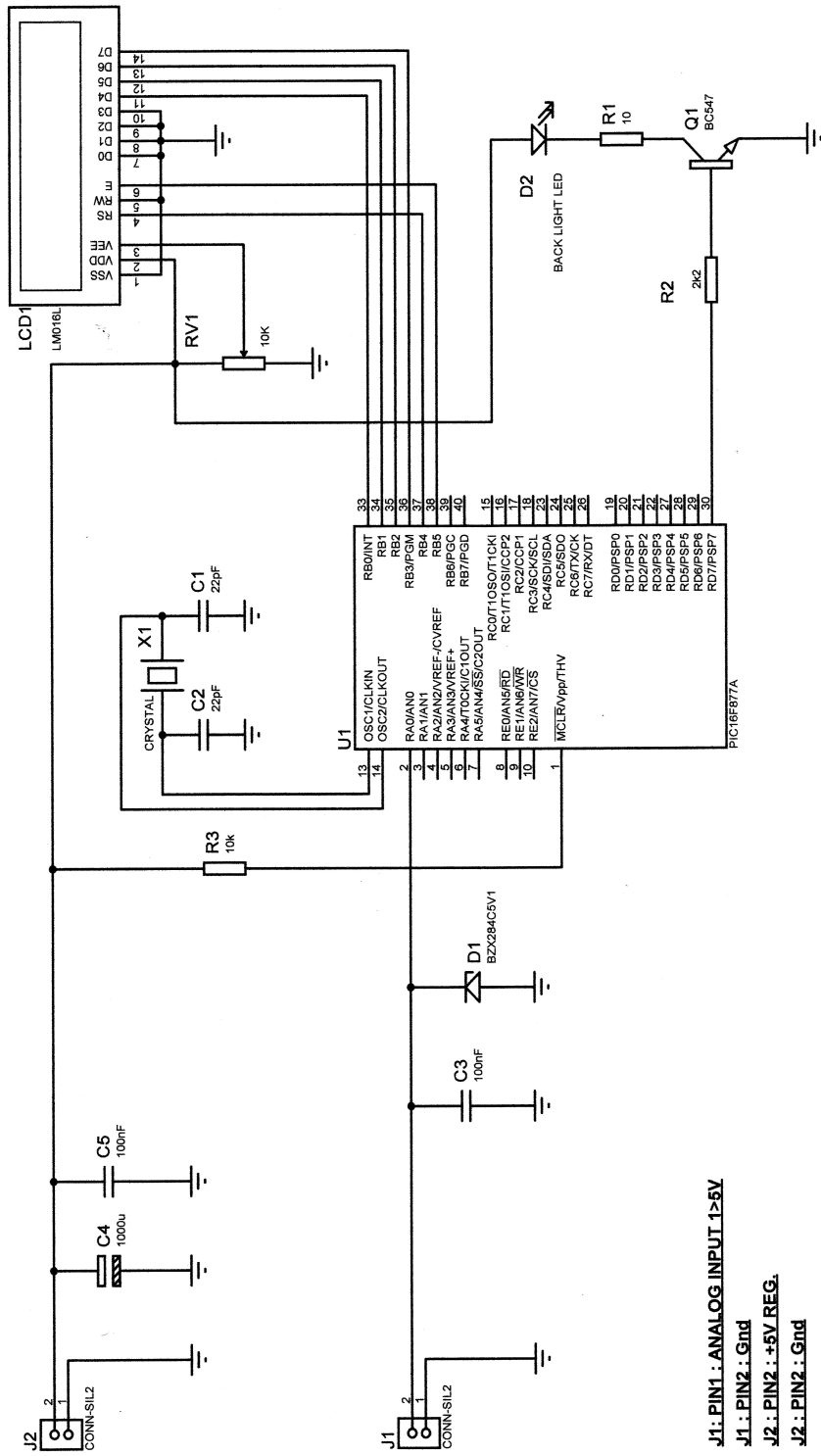
Η έξοδος της γέφυρας Wheatstone είναι της τάξης των 100 mV και έτσι είναι αναγκαία η ενίσχυσή της προτού διαβιβαστεί σε ένα μετατροπέα A/D. Αυτό πραγματοποιείται με δύο ολοκληρωμένα 747, τα οποία περιέχουν το καθένα δύο ολοκληρωμένα 741. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αντί των δύο 747, τέσσερα 741. Στο σχήμα 36 απεικονίζεται ο ενισχυτής. Τα A1 και B1 είναι συνδεδεμένα ως ενισχυτές κέρδους με υψηλή αντίσταση εισόδου, έτσι ώστε η γέφυρα να μην φορτώνεται από το κύκλωμα ενίσχυσης. Αυτό αποτελείται από τα A2 και B2, τα οποία είναι συνδεδεμένα ως διαφορικός ενισχυτής με κέρδος περίπου 1000, ρυθμιζόμενο από το P2. Σε συνθήκες ηρεμίας (χωρίς να ασκείται δύναμη στον μετρητή), το P1 ρυθμίζεται έτσι ώστε η τάση εξόδου να είναι 0.



Σχήμα 36: Ο ενισχυτής που χρησιμοποιήσαμε

4.3 Μικροελεκτής

Ο μικροελεκτής λαμβάνει το ενισχυμένο σήμα, το μετατρέπει και το προβάλλει στην οθόνη. Το διάγραμμα για την κατασκευή του κυκλώματος του μικροελεγκτή δίνεται παρακάτω στο σχήμα 37.

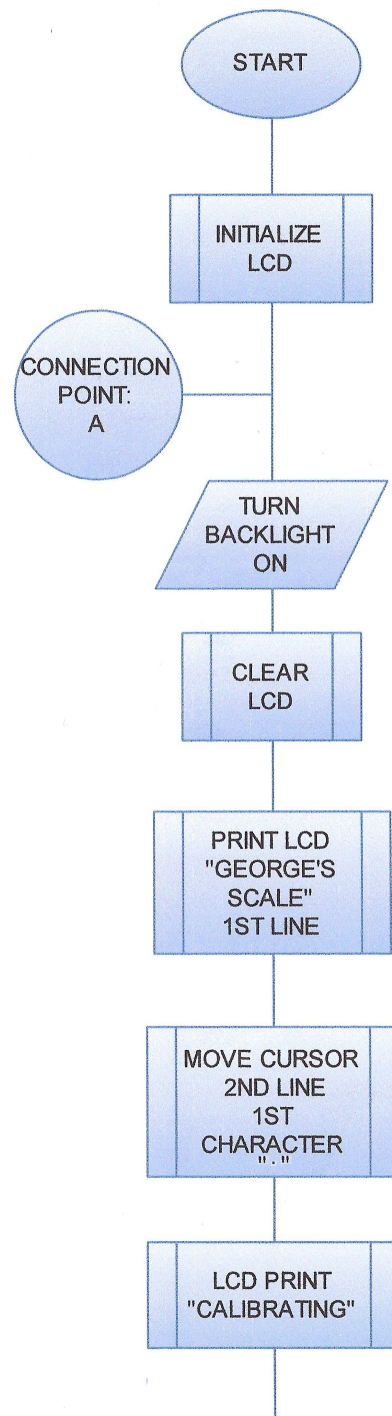


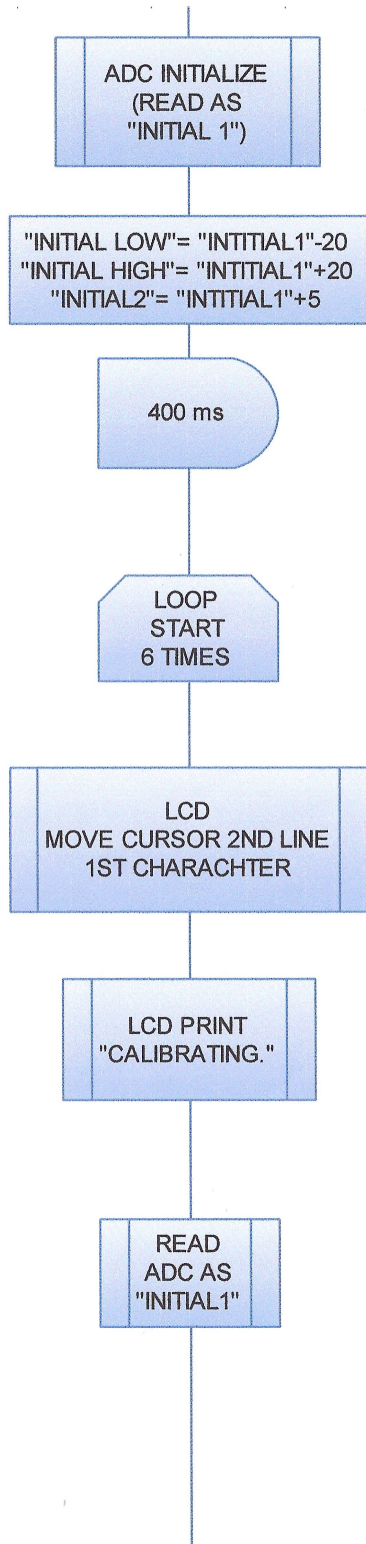
GEORGE'S SCALE

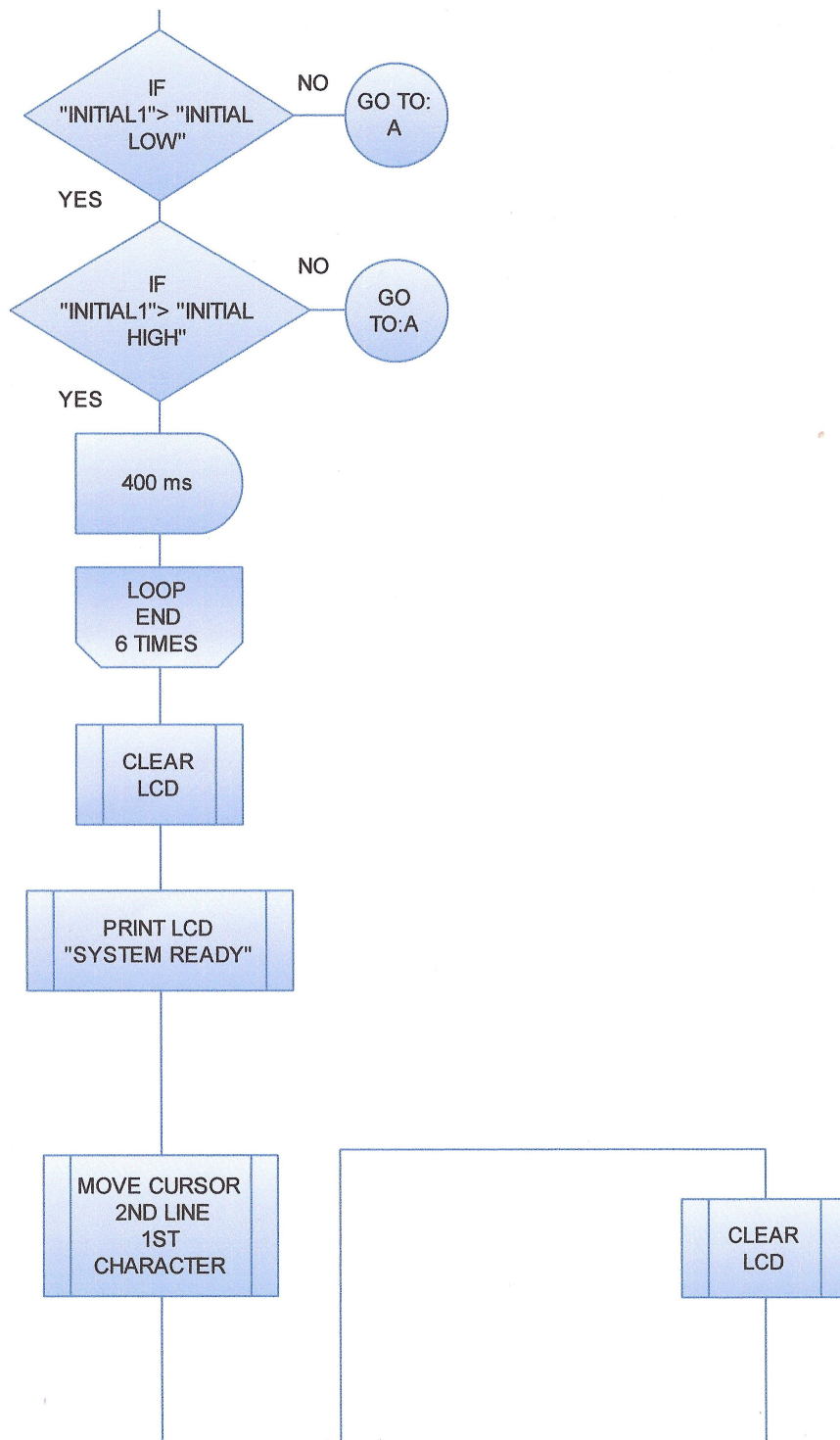
Σχήμα 37: Το κύκλωμα του μικροελεκτη και η σύνδεσή του με την οθόνη lcd

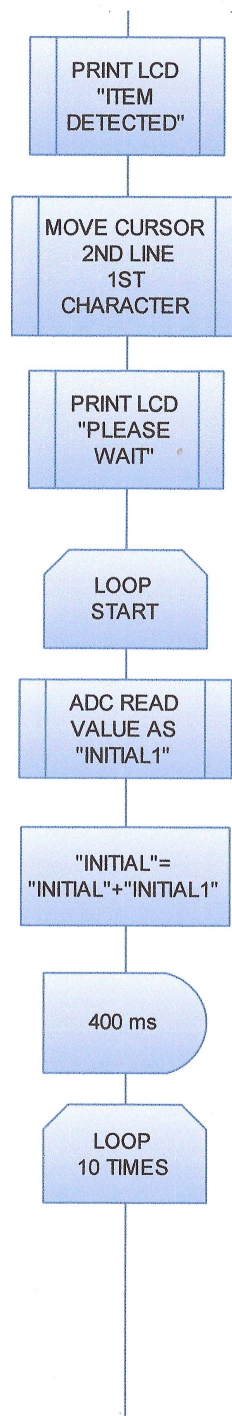
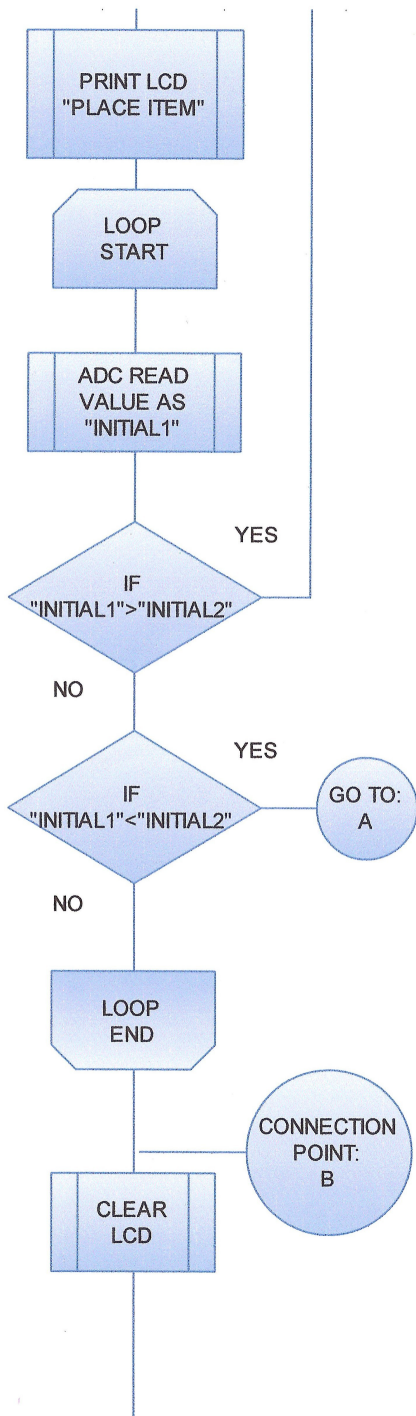
Οι πυκνωτές C4 και C5 χρησιμοποιούνται για εξωμάλυνση. Η zener D1 χρησιμοποιείται για προστασία σε περίπτωση που έχουμε τάση μεγαλύτερη των 5V.

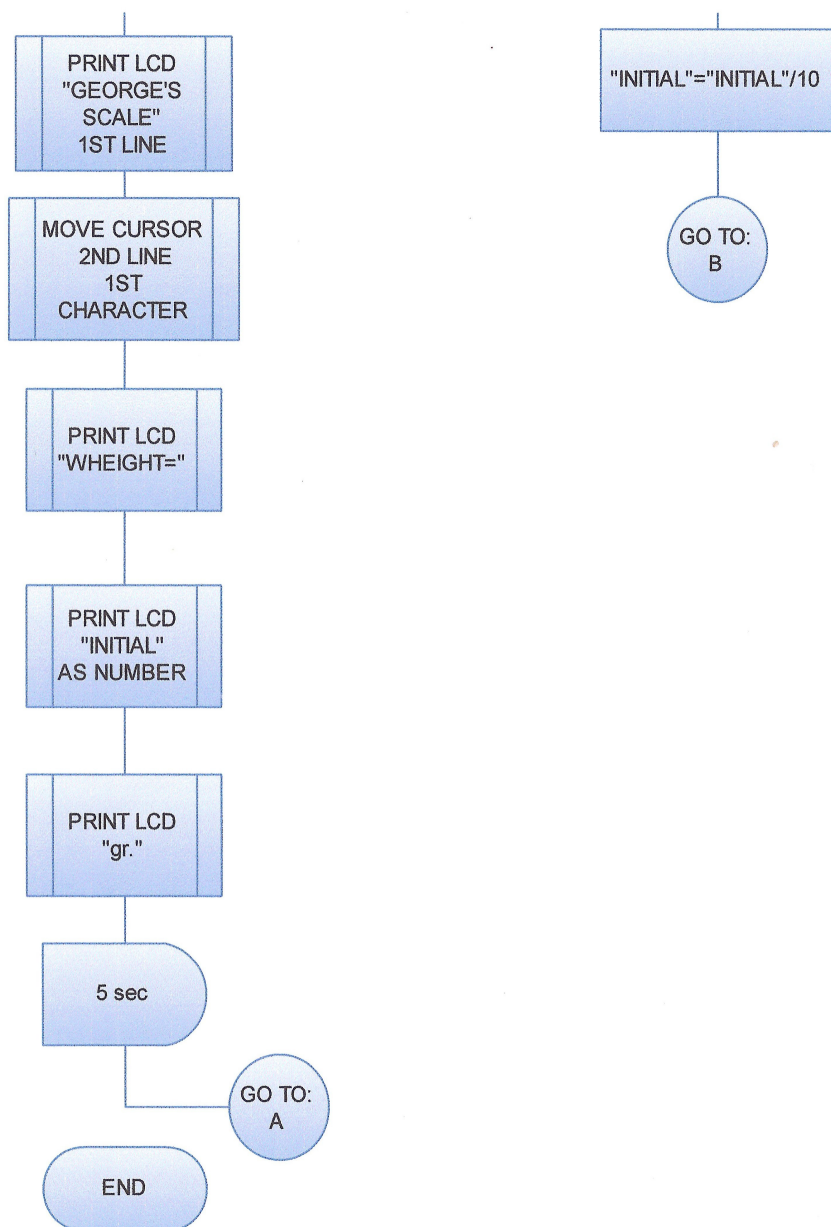
Το διάγραμμα ροής του μικροελεγκτή δίνεται παρακάτω (σχήμα 38)











Σχήμα 38: Το διάγραμμα ροής του μικροελεγκτή

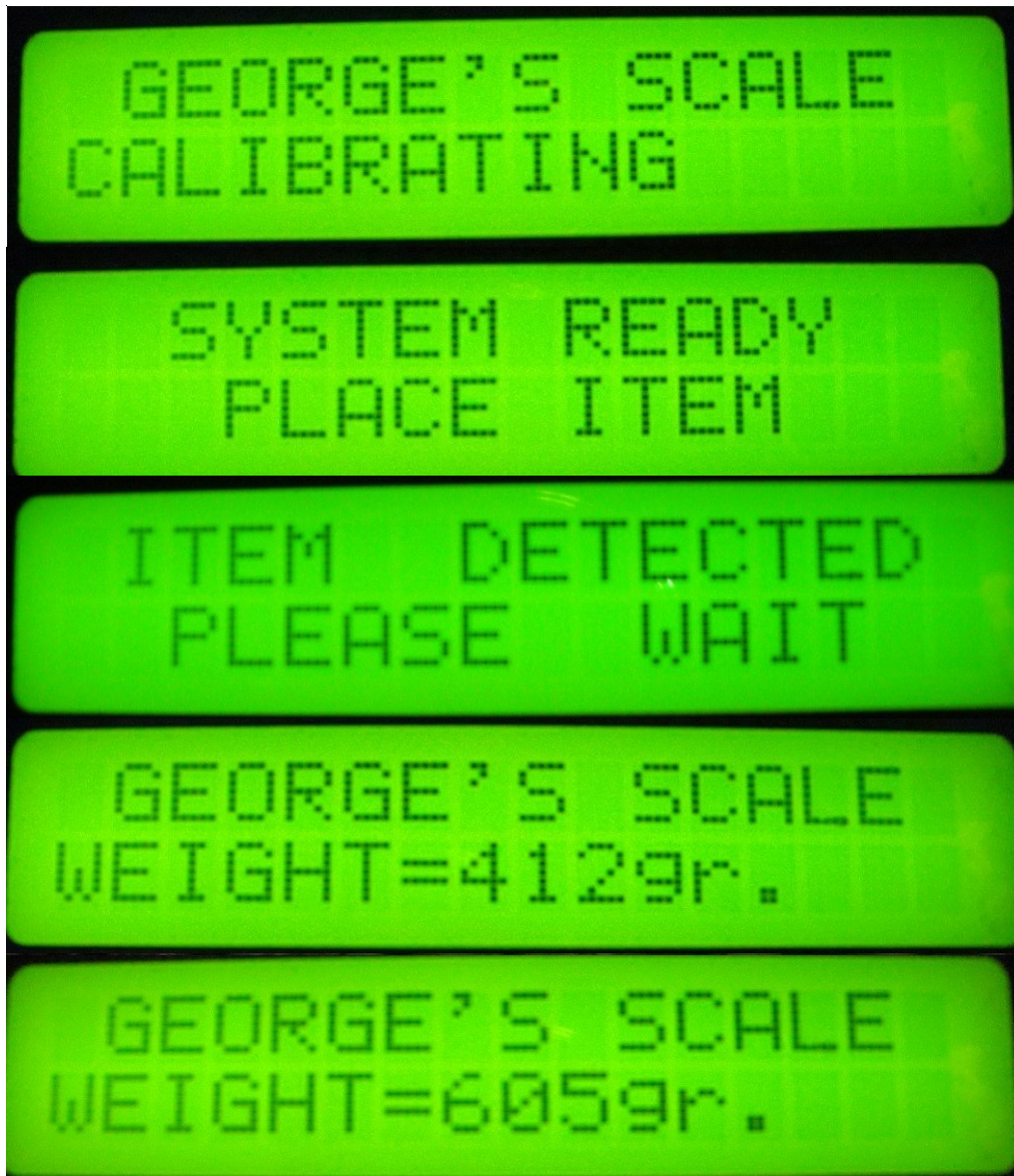
Με την εκκίνηση του προγράμματος γίνεται αρχικοποίηση της lcd. Σε αυτό το σημείο δημιουργούμε ένα σημείο αναφοράς A. Στη συνέχεια ανάβει το φως της οθόνης και δίνεται η εντολή να καθαριστεί η μνήμη της. Έπειτα στην πρώτη γραμμή εμφανίζεται “GEROGE'S SCALE” και στην δεύτερη “CALIBRATING”. Κατά τη διάρκεια του calibrating ή αλλιώς ρύθμισης γίνονται οι ακόλουθες διαδικασίες. Γίνεται αρχικοποίηση του μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό. Το σήμα που δέχεται το διαβάζει ως “INITIAL 1”. Στη συνέχεια ορίζει τα εξής: ως “INITIAL LOW” ορίζει το “INITIAL 1” – 20, ως “INITIAL HIGH” ορίζει το “INITIAL 1” + 20 και ως “INITIAL 2” το “INITIAL 1” + 5. Με αυτήν την διαδικασία η αρχικοποίηση του σήματος που δέχεται ο μικροελεκτήρας.

Στη συνέχεια περιμένει 400ms και δημιουργεί ένα loop το οποίο θα επαναληφθεί 6 φορές. Ο μετατροπέας A/D ορίζει το σήμα που δέχεται ως “INITIAL 1”. Στην συνέχεια συγκρίνει το αρχικό σήμα “INITIAL 1” με το “INITIAL LOW”. Εάν το “INITIAL LOW” είναι μεγαλύτερο από το “INITIAL 1” τότε επιστρέφει η διαδικασία στο σημείο αναφοράς A. Σε αντίθετη περίπτωση το πρόγραμμα συνεχίζει και συγκρίνει αν το “INITIAL HIGH” είναι μεγαλύτερο από το “INITIAL 1”, σε περίπτωση που ισχύει, τότε επιστρέφει η διαδικασία στο σημείο αναφοράς A, αλλιώς συνεχίζει και καθυστερεί για 400ms. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται 6 φορές. Μόλις ολοκληρωθεί, δίνεται η εντολή να καθαριστεί η μνήμη της οθόνης και να τυπωθεί σε αυτήν το “SYSTEM READY” στην πρώτη γραμμή της οθόνης και στην δεύτερη “PLACE ITEM”.

Αφού τοποθετήσουμε κάποιο αντικείμενο ξεκινάει ένα νέο loop. Ο μετατροπέας A/D ορίζει το σήμα που δέχεται ως “INITIAL 1” και το συγκρίνει με το “INITIAL 2”

- Σε περίπτωση που το “INITIAL 1” είναι μεγαλύτερο από το “INITIAL 2”, τότε διαγράφεται η μνήμη της lcd και εμφανίζεται σε αυτήν “ITEM DETECTED” στην πρώτη γραμμή και στην δεύτερη “PLEASE WAIT”. Στη συνέχεια ξεκινάει ένα νέο loop. Ο μετατροπέας A/D ορίζει το σήμα που δέχεται ως “INITIAL 1” και στην συνέχεια προσθέτει το “INITIAL 1” με το “INITIAL” και το αποθηκεύει ως “INITIAL”. Υπάρχει μία καθυστέρηση 400ms. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται 10 φορές. Στο τέλος το “INITIAL” διαιρείται με το 10 για να βρεθεί ο μέσος όρος των μετρήσεων και αποθηκεύεται ως “INITIAL”. Στη συνέχεια το πρόγραμμα μεταβαίνει στο σημείο αναφοράς B
- Σε περίπτωση που το “INITIAL 1” είναι μικρότερο από το “INITIAL 2” τότε το πρόγραμμα μεταβαίνει στο σημείο αναφοράς A.

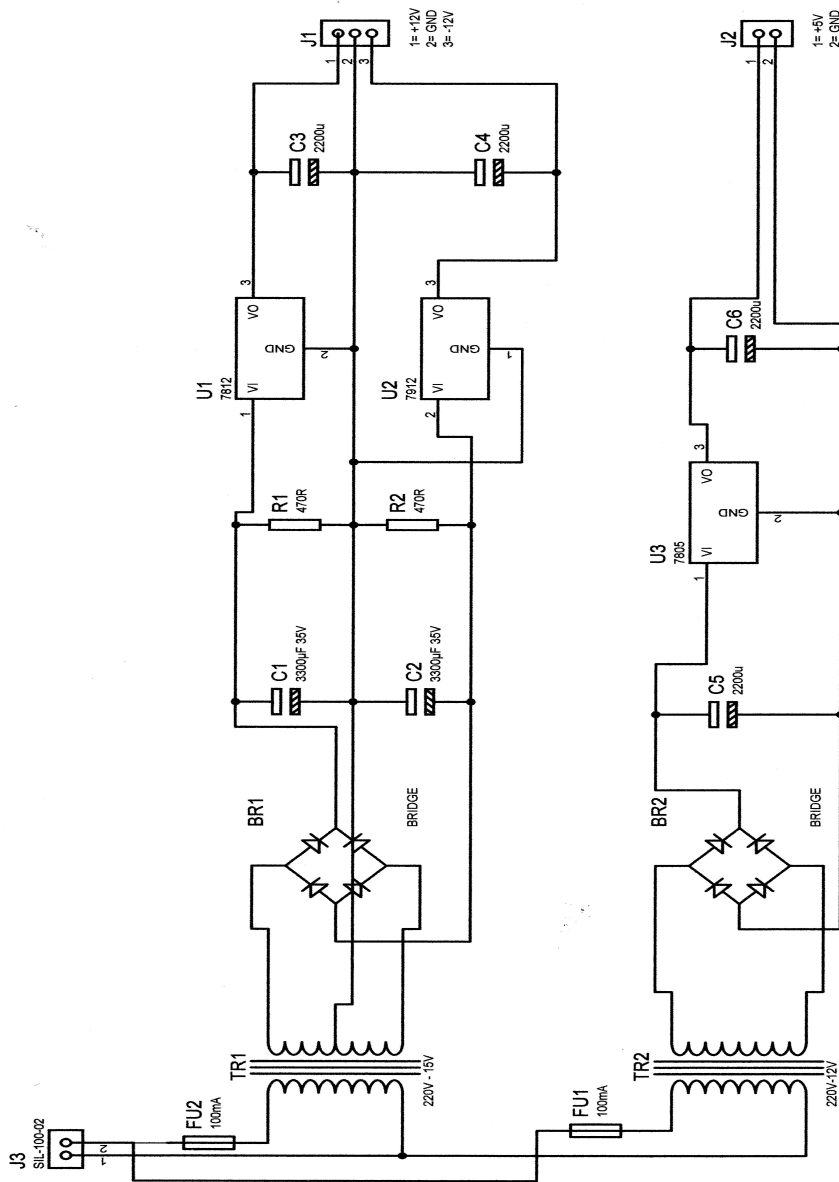
- Σε περίπτωση που το “INITIAL 1” δεν είναι μικρότερο από το “INITIAL 2”, τότε το loop τελειώνει και δημιουργείται ένα σημείο αναφοράς B. Στην συνέχεια διαγράφεται η μνήμη της LCD. Στην πρώτη γραμμή εμφανίζεται “GEOERGE'S SCALE” και στη δεύτερη “WHEIGHT=”. Η τιμή του “INITIAL” μετατρέπεται σε αριθμό και τυπώνεται στην οθόνη μαζί με την ένδειξη “gr.” Δίνεται μία καθυστέρηση 5 sec και το πρόγραμμα μεταβαίνει στο σημείο αναφοράς A.



Σχήμα 39: Διάφορες απεικονίσεις της οθόνης κατά τη λειτουργία της ζυγαριάς

4.4 Το Τροφοδοτικό

Οι τάσεις εξόδου του τροφοδοτικού είναι +12V, -12V για τη λειτουργία του ενισχυτή και +5V για τη λειτουργία του μικροελεγκτή.



Σχήμα 40: Το σχεδιάγραμμα του τροφοδοτικού

Βιβλιογραφία

- [1] en.wikipedia.org
- [2] <http://www.omega.com/prodinfo/loadcells.html>
- [3] <http://www.sunshineloadcell.com/>
- [4] <http://www.reliablescale.com/pdf/en/manuals/Load%20Cell%20Troubleshooting%20Guide.PDF>
- [5] <http://www.sensorland.com/>
- [6] http://www.ee.teihal.gr/lessons/techno/private/uploads/shmeioseis_f_.pdf
- [7] <http://www.hbm.com/>
- [8] http://www.aandd.jp/products/weighing/loadcell/introduction/introduction_to_load_cells.html
- [9] <http://www.omega.com/literature/transactions/volume3/strain.html>
- [10] http://www.ife.p.lodz.pl/downloads/Korczynski/Electronic_Measurement%20III_sem%20ScM%20STRAIN%20GAUGE%20MEASUREMENTS.pdf
- [11] <http://www.kyowa-ei.co.jp/english/pdf/whats.pdf>
- [12] <http://focus.ti.com/docs/solution/folders/print/392.html>
- [13] <http://www.china-loadcells.com/>
- [14] http://www.mkxa.deit.univpm.it/biblioteca/sala_tecnica/scaffale_sensori/esten_simetri/straingages.pdf

- [15] http://www.ehow.com/how-does_5070012_digital-scale-work.html
- [16] <http://www.hlektronika.gr/forum/archive/index.php>
- [17] <http://www.transducertechniques.com/>
- [18] <http://www.weighing-systems.com/TechnologyCentre/Balances.html>
- [19] περιοδικό elektor october 1979 (Αγγλική έκδοση)