



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΠΜΣ «ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΑΝΑΓΝΩΣΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

ΚΑΡΑΔΗΜΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΟΥΚΑΛΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Όπως κάθεCopyright © Καραδήμας Παναγιώτης, Αθήνα 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο τμήμα Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Μικροσυστήματα και Νανοδιατάξεις» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που συνέβαλαν στην επιτυχή εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας. Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα, Δημήτρη Τσουκαλά, για την επιστημονική καθοδήγηση, την πολύτιμη βοήθειά καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας και για την εμπιστοσύνη που έδειξαν στις δυνατότητές μου. Ευχαριστώ επίσης τους Υπ. Διδ. Λάμπρο Πατσιούρα και Βαγγέλη Ασλανίδη για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε σε όλες τις ερευνητικές και πειραματικές δραστηριότητες της διπλωματικής εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου για την αμέριστη συμπαράσταση και στήριξη που μου έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ειδίκευσης ήταν η ανάπτυξη, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου ηλεκτρονικού μετρητικού συστήματος με εφαρμογή σε αισθητήρες παραμόρφωσης νανοσωματιδίων με μεταβολή στην αντίσταση. Η διπλωματική χωρίζεται σε πέντε ενότητες.

Το πρώτο κεφάλαιο καλύπτει το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο, ξεκινώντας από το γενικευμένο μοντέλο ενός σύγχρονου μετρητικού συστήματος και τα είδη των μετρητικών οργάνων μέχρι σήμερα, ενώ στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη επεξήγηση για το ρόλο του ηλεκτρονικού θορύβου σε αναλογικά και ψηφιακά κυκλώματα. Κλείνοντας τη θεωρία αναφέρουμε τα χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζουμε τη δομή του μετρητικού συστήματος, που αποτελείται από ένα αναλογικό κύκλωμα τεσσάρων τελεστικών ενισχυτών, και ένα ψηφιακό τμήμα. Το αναλογικό τμήμα μετατρέπει την μετρούμενη αντίσταση σε μια αντίστοιχη παλμική τάση στην έξοδό του, ενώ πραγματοποιήθηκε προσομοίωση στο NI Multisim για τον σαφή προσδιορισμό των παθητικών στοιχείων με γνώμονα το βέλτιστο σήμα εξόδου και την μέγιστη δυνατή ακρίβεια στη μέτρηση. Η περίοδος της παλμογραμμής μετράται από τον απαριθμητή του μικροελεγκτή και έπειτα μεταδίδεται ενσύρματα στο σύστημα καταγραφής του υπολογιστή μέσω του πρωτοκόλλου UART. Έπειτα αναλύουμε τον τρόπο καταγραφής και τις εντολές για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφουμε τα γεωμετρικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων παραμόρφωσης που χρησιμοποιήσαμε και τους μηχανισμούς αγωγιμότητας και ανίχνευσης εξωτερικής παραμόρφωσης. Στη συνέχεια αναφέρουμε το σχεδιασμό και την υλοποίηση της προς μηχανικό χαρακτηρισμό επιφάνειας, μέσω μιας συστοιχίας αισθητήρων, με έμφαση τη μηχανική υποστήριξη και την ηλεκτρική διασύνδεση πολλαπλών αισθητήρων με το μετρητικό σύστημα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο ακολουθεί η περιγραφή της πειραματικής διάταξης για τον χαρακτηρισμό των αισθητήρων σε συνθήκες παραμόρφωσης (βαθμονόμηση) καθώς και η περιγραφή του προγράμματος καταγραφής και παρουσίασης των μετρητικών δεδομένων που υλοποιήθηκε μέσω της πλατφόρμας γραφικού κώδικα NI Labview.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα, όπου γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων μέτρησης μεταξύ της μετρητικής πλακέτας και του

συστήματος του εργαστηρίου, όσον αφορά την μέτρηση της αντίστασης σε μεμονωμένους αισθητήρες, ενώ τέλος παραθέτουμε και αναλύουμε ποιοτικά τις μετρήσεις από το σύνολο οκτώ αισθητήρων για την εξωτερικά επιβαλλόμενη παραμόρφωση της επιφάνειας που κατασκευάσαμε, ως προς την ακρίβεια ανίχνευσης της πραγματικού ερεθίσματος.

Abstract

The purpose of this diploma thesis was to develop, design and implement an electronic data acquisition system applied to resistive nanoparticle strain sensors. Diplomacy is divided into five sections.

In the first chapter the necessary theoretical background is covered, starting from the generalized model of a modern data acquisition system (DAQ) and the types of laboratory instruments until today, and then we give a brief explanation of the role of electronic noise in analogue and digital circuits. By closing the theory we report the characteristics of a sensor.

In the second chapter we present the structure of the proposed DAQ system, consisting of an analogue circuit of four operational amplifiers, and a digital section. The analogue section converts the measured resistance into a corresponding pulse voltage at its output and has been simulated in the NI Multisim to determine the values of the passive components of the circuit leading to the optimum output signal and the highest possible accuracy in the measurement. The pulse's period is measured by the microcontroller counter and then transmitted through wires to the computer's logging system via the UART protocol. Then we analyze the recording mode and commands for programming the microcontroller.

In the third chapter we describe the geometrical and electrical characteristics of the strain sensors we used as well as the external strain detection and conductivity mechanisms. We then describe the design and the implementation of the surface to be characterized by the sensor array, with emphasis on mechanical support and electrical interconnection of multiple sensors with the DAQ system.

In the fourth chapter it is described the laboratory setup used for the characterization of the sensors in strain conditions (calibration) as well as the interface of the software for recording and plotting of the measured data that was implemented through the NI Labview graphics platform.

In the last chapter the experimental results are presented, where the measurement results are compared between the measurement board and the laboratory system, regarding the measurement of the resistance to individual sensors, while finally we quote and analyze the measurements from the total of eight sensors for the external imposed deformation of the surface we made in terms of the accuracy of detection of the actual strain.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Σύγχρονα μετρητικά συστήματα	7
1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Είδη οργάνων μέτρησης	8
1.3 Θόρυβος στα ηλεκτρονικά κυκλώματα.....	9
1.4 Χαρακτηριστικά αισθητήρων.....	11
Κεφάλαιο 2 Σχεδιασμός μετρητικού συστήματος	17
2.1 Βασική δομή συστήματος	17
2.2 Αναλογικό κύκλωμα ανάγνωσης	18
2.3 Διατάξεις τελεστικών ενισχυτών.....	18
2.4 Προσομοίωση στο NI Multisim	22
2.5 Μικροελεγκτής ATmega 1284	26
2.6 Πρωτόκολλο UART	30
2.7 Πολυπλέκτης	31
2.8 Ροή σήματος	33
2.9 Υλοποίηση σε τυπωμένο κύκλωμα	34
2.10 Προγραμματισμός του μικροελεγκτή.....	36
Κεφάλαιο 3 Χαρακτηριστικά του αισθητήρα	40
3.1 Γεωμετρία.....	40
3.2 Υπόστρωμα αισθητήρων παραμόρφωσης.....	40
3.3 Διαδικασία παραγωγής αισθητήρων	41
3.4 Φυσικός μηχανισμός αγωγιμότητας.....	42
3.5 Μοντέλο παραμόρφωσης αισθητήρα	45
3.6 Ανάπτυξη επιφάνειας συστοιχίας αισθητήρων	47
Κεφάλαιο 4 Εργαστηριακή διάταξη	52
4.1 Διάταξη παραμόρφωσης	52
4.2 Λογισμικό καταγραφής στο Labview	53
Κεφάλαιο 5 Πειραματικά αποτελέσματα	55
Κεφάλαιο 6 Μελλοντική μελέτη	68

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗΣ, ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ, ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ,
ΜΕΤΡΗΤΗΣ, ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

1. Σύγχρονα μετρητικά συστήματα αισθητήρων

1.1 Εισαγωγή

Η μελέτη του φυσικού κόσμου και η προσπάθεια ανάλυσης της δομής του και των μηχανισμών που τον διέπουν αποτελούσε ανέκαθεν μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις για τον άνθρωπο. Η εφευρετικότητα και η επιμονή του οδήγησαν στην ανάπτυξη τεχνολογικών συστημάτων, ικανά να μετρήσουν πληθώρα φυσικών μεγεθών με μεγάλη ακρίβεια, ακόμα και σε αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες. Ο τεράστιος όγκος των πληροφοριών που δύναται να έχουμε στα χέρια μας είναι σαφώς ελκυστικός, όμως προϋποθέτει τη χρήση, δομικά, πολύπλοκων μετρητικών οργάνων και καταγραφικών μηχανημάτων. Σε πολλές περιπτώσεις συναντούμε συστήματα που αποτελούνται από ένα σύνολο οργάνων ή συσκευών συνδεδεμένων μεταξύ τους. Ωστόσο η απαίτηση για όλο και πιο ακριβείς μετρήσεις σε συνδυασμό με την αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας οδηγεί στην περαιτέρω βελτιστοποίηση ή και επέκταση μετρητικών συστημάτων, με τρόπο που να ανταποκρίνονται στην αντίστοιχη εφαρμογή.

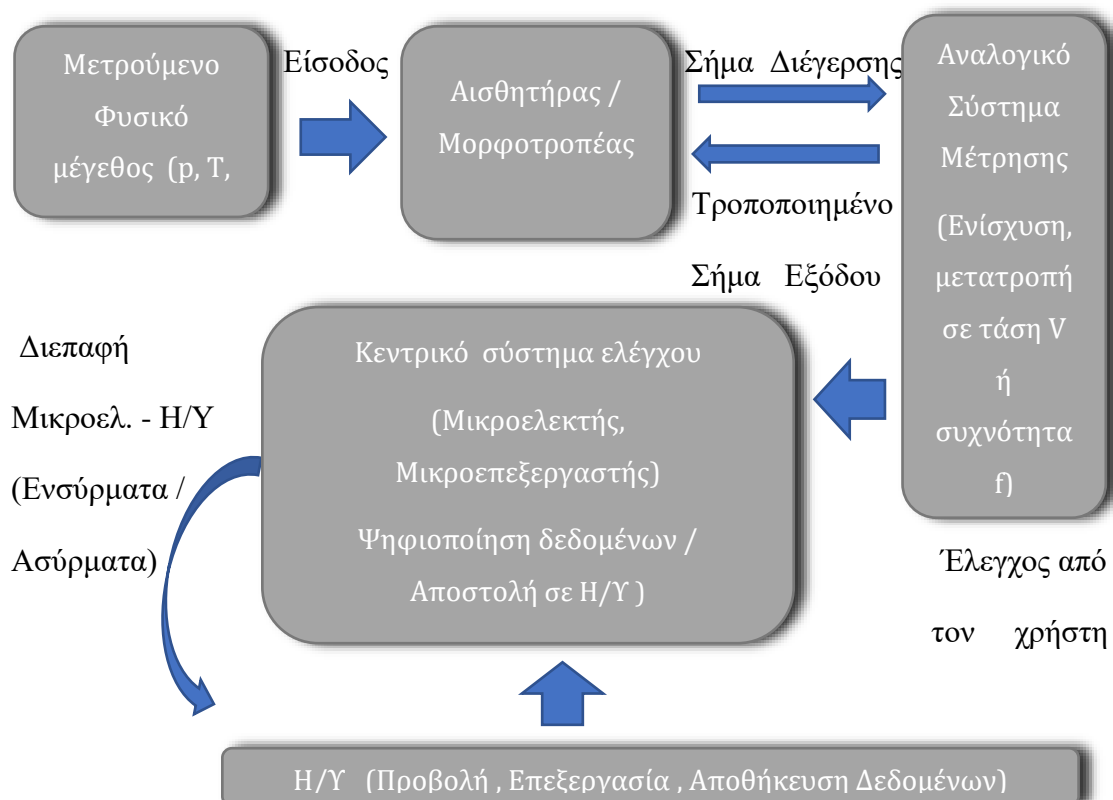
Ο συνδετικός κρίκος μεταξύ του φυσικού περιβάλλοντος και ενός οργάνου είναι οι αισθητήρες. Οι αισθητήρες αποτελούν πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής μας ζωής και παίζουν σημαντικό ρόλο τόσο σε απλές καθημερινές δραστηριότητες όσο και σε κρίσιμες διαδικασίες σύγχρονων τεχνολογικών εφαρμογών. Με αυτόν τον τρόπο η ανίχνευση, η επεξεργασία και η καταγραφή διαφόρων ειδών πληροφορίας πραγματοποιείται αποτελεσματικά, καθιστώντας εφικτή την παρουσίαση και τη σύγκριση αποτελεσμάτων με τελικό σκοπό της λήψη μιας βέλτιστης απόφασης.

Γενικά, είναι βολικό, η έξοδος του αισθητήρα να είναι ένα ηλεκτρικό μέγεθος, όπως ρεύμα ή αντίσταση, για να μπορεί να ενταχθεί εύκολα σε ένα ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης. και κατ' επέκταση να συνδεθεί με μικροεπεξεργαστές / μικροελεγκτές. Η επεξεργασία ηλεκτρικών σημάτων καταλαμβάνει πλέον το μεγαλύτερο μέρος σε μια διαδικασία μέτρησης, επειδή δεν επηρεάζονται εύκολα από περιβαλλοντικούς παράγοντες σε σχέση με άλλες μεθόδους. Παράλληλα η διαρκής μελέτη υλικών με καλύτερες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες αλλά και η ανάπτυξη μικρομηχανικών διεργασιών οδήγησαν στην κυριαρχία των ψηφιακών συστημάτων σε πολλά

τεχνολογικά πεδία, εφόσον είναι εφικτή η μαζική παραγωγή σε συνδυασμό με μειωμένο κόστος. Η ανάπτυξη μεγάλου πλήθους μικροδομών σε διάφορες διατάξεις είναι ένα σημαντικό όφελος, τόσο στα ηλεκτρονικά κυκλώματα όσο και στους αισθητήρες. Στο πεδίο των αισθητήρων η δυνατότητα δημιουργίας μικροδομών ή ακόμα και νανοδομών κατέστησε δυνατή την ανίχνευση μεταβολών ενός φυσικού μεγέθους, κάτι το οποίο θα ήταν αδύνατο διαφορετικά. Παραδείγματα τέτοιων αισθητήρων είναι οι πιεζοηλεκτρικοί, οι αισθητήρες επιτάχυνσης, αισθητήρες παραμόρφωσης και άλλοι.

1.2 Σύγχρονα μετρητικά συστήματα

Παρόλο το μεγάλο εύρος και τη διαφοροποίηση των μετρητικών οργάνων μπορούμε να διακρίνουμε ένα κοινό τρόπο λειτουργίας, ο οποίος υφίσταται σε κάθε όργανο. Συγκεκριμένα, μια μετρητική διάταξη μπορεί να θεωρηθεί ως μια αλυσίδα επιμέρους στοιχείων, που έχουν προκαθορισμένο ρόλο και αλληλοσυνδέονται κατάλληλα, ώστε να είναι εφικτή η μέτρηση ενός ή περισσότερων φυσικών μεγεθών. Στο σχήμα 1.1 απεικονίζεται μια γενικευμένη μορφή ενός συστήματος συλλογής και καταγραφής πληροφορίας, γνωστό ως Data Acquisition System στη διεθνή βιβλιογραφία.



Εικόνα 1.1. Γενικευμένο μοντέλο σύγχρονου μετρητικού συστήματος

Ο σχεδιασμός ενός ολοκληρωμένου συστήματος υλοποιείται σύμφωνα με ορισμένες προδιαγραφές. Μερικές από αυτές είναι:

- Το κόστος σχεδίασης και ανάπτυξης του συστήματος
- Το κόστος κάθε μεμονωμένου εξαρτήματος
- Η συνολική κατανάλωση ισχύος
- Η συνολική απόδοση ως προς την αξιοπιστία και την ταχύτητα εκτέλεσης προκαθορισμένων ενεργειών
- Ο χρόνος προτυποποίησης, κατά τον οποίο το σύστημα λειτουργεί δοκιμαστικά, παρακολουθείται και βελτιστοποιείται προτού βγει στην αγορά
- Οι δυνατότητες του συστήματος να αλλάζει πλήρη ή μερική λειτουργικότητα

Πρωτεύουσα διαδικασία ενός ηλεκτρονικού συστήματος είναι η μέτρηση. Ως μέτρηση ορίζουμε την αντιστοίχιση της ποσότητας εξόδου του αισθητήρα, εξαιτίας μιας μεταβολής στην ποσότητα του φυσικού μεγέθους, στο εξωτερικό περιβάλλον που μελετούμε. Το αποτέλεσμα μιας μέτρησης είναι το μέτρο του φυσικού μεγέθους, συνοδευόμενο με τις αντίστοιχες μονάδες και αντιπροσωπεύει ένα υπαρκτό, φυσικό χαρακτηριστικό.

1.3 Είδη οργάνων μέτρησης

Ψηφιακά και αναλογικά όργανα

Ένα βασικό χαρακτηριστικό ενός μετρητικού οργάνου είναι το είδος του σήματος που αυτά παράγουν στην έξοδό τους. Διακρίνουμε δύο είδη, τα αναλογικά και τα ψηφιακά όργανα μέτρησης. Στα αναλογικά, το σήμα εξόδου $y(t)$ είναι μια συνεχής συνάρτηση του χρόνου και μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή μέσα στο εύρος καλής λειτουργίας του οργάνου. Στα ψηφιακά, το σήμα εξόδου $y(t)$ μπορεί να λάβει διακριτές τιμές συναρτήσει του χρόνου, ενώ υπάρχει μια βαθμίδα ψηφιοποίησης του σήματος εισόδου, μέσω κατάλληλου μετατροπέα (Digital-to-Analog-Converter). Η διαφορά των δύο διαφορετικών ειδών οργάνων είναι ο βαθμός της διακριτικής ικανότητας που μπορούν να επιτύχουν.

Παθητικά και ενεργητικά

Με κριτήριο την ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία ενός οργάνου, διακρίνουμε τα παθητικά και τα ενεργητικά όργανα μέτρησης. Στα παθητικά συστήματα δεν απαιτείται η παροχή ενέργειας από κάποια εξωτερική πηγή, καθώς η ενέργεια για να γίνει μια μέτρηση προέρχεται από το ίδιο το σύστημα. Για παράδειγμα, το θερμόμετρο υδραργύρου είναι ένα παθητικό όργανο. Στις περισσότερες εφαρμογές συναντούμε ενεργητικά συστήματα, όπου είναι απαραίτητη η παροχή εξωτερικής ενέργειας, τα οποία μας παρέχουν περισσότερη ευελιξία.

Όργανα μηδενισμού και απόκλισης

Στα όργανα απόκλισης χρησιμοποιείται συνήθως ένα δείκτης, ο οποίος αποκλίνει σε μια βαθμονομημένη κλίμακα κατά μια ποσότητα, η οποία αντιστοιχεί στη μετρούμενη φυσική ποσότητα. Χαρακτηριστικά τέτοια όργανα είναι το μανόμετρο και το δυναμόμετρο. Στα όργανα μηδενισμού η μέτρηση επιτυγχάνεται μέσω της αντιστάθμισης του άγνωστου μετρούμενου μεγέθους μέχρι το σύστημα να έρθει σε ισορροπία. Για παράδειγμα, στο ζυγό ισορροπίας προσθέτουμε αντίβαρα στο ένα άκρο, μέχρι αυτός να ισορροπήσει. Επίσης στη γέφυρα Wheatstone γίνεται αντιστάθμιση της τάσης για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής αντίστασης σε αισθητήρες μηχανικής παραμόρφωσης. Τα όργανα μηδενισμού έχουν καλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις, ωστόσο είναι ακριβότερα των οργάνων απόκλισης.

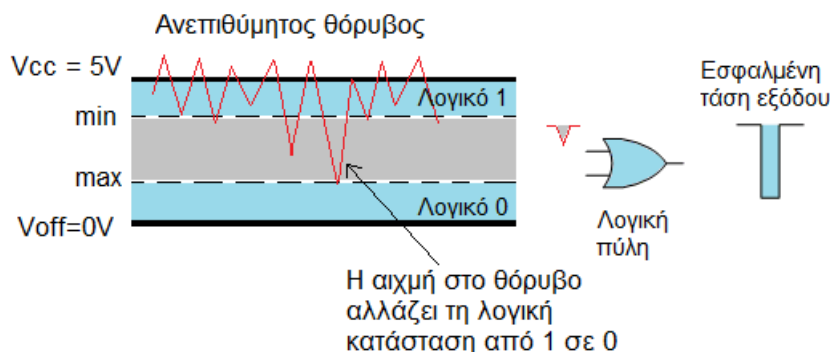
Όργανα απεικόνισης και καταγραφής

Ένα τελευταίο κριτήριο για την κατηγοριοποίηση των οργάνων μέτρησης είναι ο τρόπος απεικόνισης της ληφθείσας πληροφορίας. Στα όργανα απεικόνισης, όπως για παράδειγμα το υδραργυρικό θερμόμετρο, η ένδειξη της μέτρησης εμφανίζεται σε μια βαθμονομημένη κλίμακα και είναι διαθέσιμη στον παρατηρητή μόνο τη χρονική στιγμή, όπου λαμβάνεται και η αντίστοιχη μέτρηση. Μια εκ νέου μέτρηση θα εμφανίσει τη νέα ένδειξη στο όργανο κ.ό.κ. Αντίθετα στα όργανα καταγραφής, τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποθηκεύονται σε αναλογικά (εκτυπωτικό χαρτί, μαγνητικές ταινίες) ή ψηφιακά (σκληρός δίσκος) μέσα και είναι διαθέσιμα στον εκάστοτε χρήστη να τα απεικονίσει και να τα επεξεργαστεί και μετά το πέρας των

μετρήσεων. Έτσι η παρουσία του χρήστη την ώρα των μετρήσεων δεν είναι απαραίτητη.

1.4 Θόρυβος στα ηλεκτρονικά κυκλώματα

Ως θόρυβος στα ηλεκτρονικά ορίζουμε μια ανεπιθύμητη μορφή ενέργειας, η οποία προστίθεται στο τελικό επιθυμητό σήμα. Αποτελεί ένα σοβαρό ζήτημα τόσο στα αναλογικά όσο και στα ψηφιακά ηλεκτρονικά και χρήζει ιδιαίτερης σημασίας σε όλα τα στάδια υλοποίησης ενός κυκλώματος. Μπορεί να εμφανιστεί με διάφορους τρόπους ανάλογα την εφαρμογή, όπως για παράδειγμα τα ‘χιόνια’ στις αναλογικές τηλεοράσεις ή ένας υψίσυχνος άτονος ήχος σε ένα ραδιόφωνο. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις ο θόρυβος προέρχεται κυρίως από διαταραχές κατά την μετάδοση πληροφορίας από τον πομπό στο δέκτη. Αντίστοιχα στην ψηφιακή μετάδοση μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια μερικής πληροφορίας. Αν μια τυχαία κυματομορφή προστεθεί σε ένα λογικό – παλμικό – σήμα ενδέχεται να αντιστρέψει τη λογική κατάσταση στην έξοδο.



Εικόνα 1.2. Παράδειγμα θορύβου σε ψηφιακό σήμα

Γενικότερα περιορίζει το ελάχιστο μέγεθος του σήματος που μπορεί να επεξεργαστεί ένα κύκλωμα, το οποίο είναι πολύ σημαντικό, ειδικά όταν επιζητούμε μεγάλη ακρίβεια όπως η μέτρηση ενός αισθητήρα. Συνήθως κατηγοριοποιείται με βάση τον τύπο, την πηγή και την επίδραση με το δέκτη[A]. Ένα άλλο κριτήριο είναι η προέλευση του θορύβου και διακρίνουμε τις εξωτερικές και τις εσωτερικές πηγές θορύβου.

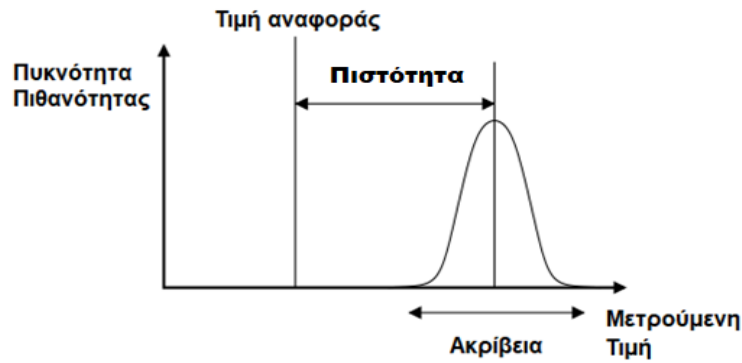
1.5 Χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Η σύνδεση του μετρητικού συστήματος με οποιοδήποτε φυσικό περιβάλλον επιτυγχάνεται με τη βοήθεια αισθητήρων. Ένας αισθητήρας διαθέτει σύνολο φυσικών, χημικών και μηχανικών ιδιοτήτων που επιτρέπουν τη μετατροπή μιας μεταβολής ενός φυσικού μεγέθους (πίεση P , θερμοκρασία T , δύναμη F κ.ά.) σε μεταβολή ηλεκτρικού μεγέθους.

Σημαντική διαδικασία στη λειτουργία του οργάνου αποτελεί η αντιστοίχιση των ερεθισμάτων που δέχεται ο αισθητήρας από το μετρούμενο φυσικό μέγεθος σε ενδείξεις κατάλληλων μονάδων στην κλίμακα του οργάνου, λόγω της μεταβολής ενός άλλου γνωστού φυσικού μεγέθους με καλά καθορισμένο τρόπο. Γενικά μας ενδιαφέρει να έχουμε καλή γνώση του αισθητήρα και του φυσικού μηχανισμού αντίχρευσης, ώστε να Τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων παίζουν μεγάλο ρόλο στην συνολική απόδοση του μετρητικού μας συστήματος. Διακρίνουμε τα στατικά και τα δυναμικά χαρακτηριστικά.

Στατικά χαρακτηριστικά

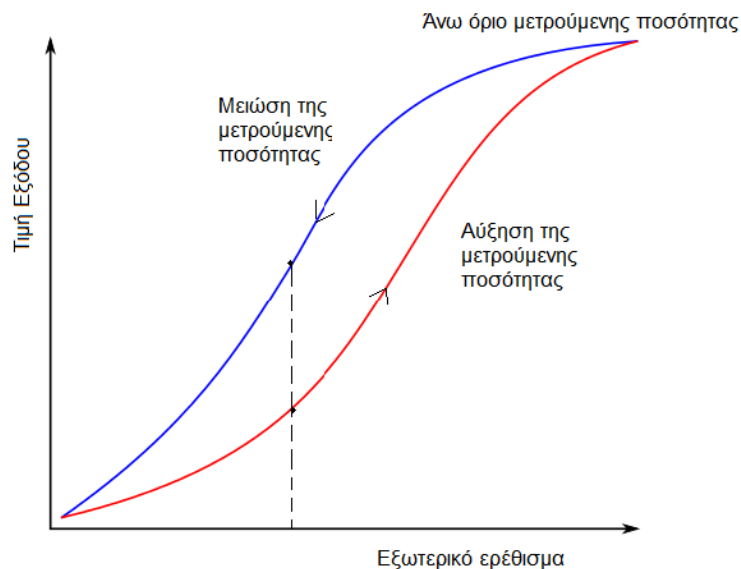
- *Ακρίβεια.* Είναι η απόκλιση της μετρούμενης τιμής από την πραγματική τιμή και καθορίζεται από το μέγιστο σφάλμα που προκύπτει από πολλές μετρήσεις για το ίδιο φυσικό μέγεθος με σταθερές τις παραμέτρους του πειράματος. Το εύρος της κατανομής των μετρήσεων για το ίδιο ερέθισμα σχετίζεται με την ακρίβεια.
- *Πιστότητα.* Η ικανότητα του αισθητήρα να δίνει ένα αποτέλεσμα που να ανταποκρίνεται στην πραγματική τιμή (τιμή αναφοράς). Υπάρχει περίπτωση ένας αισθητήρας να έχει μεγάλη ακρίβεια, αλλά κακή πιστότητα το οποίο σημαίνει ότι υπάρχει συστηματικό σφάλμα. Για να έχουμε καλή πιστότητα στις μετρήσεις πρέπει το εύρος λειτουργίας του αισθητήρα να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο εύρος των μετρούμενων τιμών.



Εικόνα 1.3. Σύγκριση πιστότητας και ακρίβειας σε έναν αισθητήρα

- **Στατιστικό σφάλμα.** Είναι η ποσοστιαία διαφορά της πραγματικής τιμής του φυσικού μεγέθους από την μετρούμενη, ως προς την πραγματική.

$$\frac{\Delta(A_{μετρ.} - A_{αναφ.})}{A_{αναφ.}} \cdot 100.$$
- **Υστέρηση.** Η διαφορά της τιμής εξόδου για το ίδιο ερέθισμα εισόδου, σε δύο αντίθετες φάσεις μέτρησης. Για παράδειγμα ένας αισθητήρας παραμόρφωσης μπορεί να δώσει μια τιμή εξόδου για μια τιμή της εξωτερικά επιβαλλόμενης πίεσης, κατά τη φάση που αυτή αυξάνεται και να δώσει διαφορετική τιμή εξόδου για την ίδια τιμή της πίεσης στη φάση που αυτή μειώνεται.

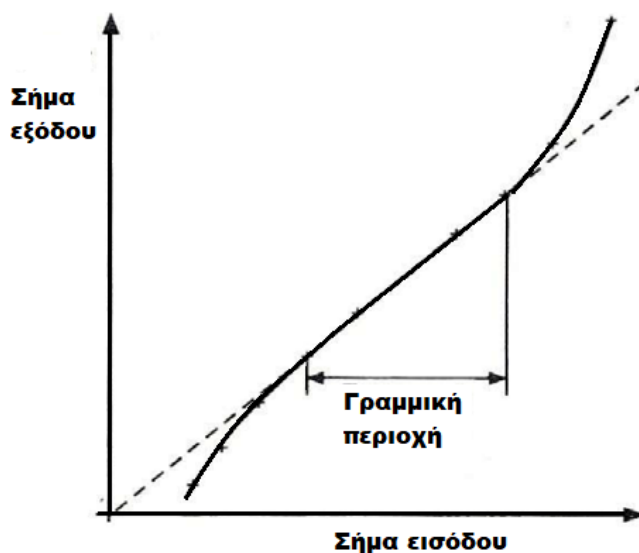


Εικόνα 1.4. Βρόχος υστέρησης αισθητήρα

- **Θόρυβος.** Ο θόρυβος αφορά την επίδραση διάφορων ενδογενών (σχετιζόμενες με το μηχανισμό αντίληψης του εκάστοτε αισθητήρα) και εξωγενών

(περιβαλλοντικών) παραγόντων στο τελικό αποτέλεσμα μιας μέτρησης. Ένας συνήθης τρόπος αναγνώρισής του σε μια μέτρηση είναι οι διακυμάνσεις στην έξοδο, χωρίς ο αισθητήρας να έχει δεχθεί κάποιο ερέθισμα. Η απομόνωση του θορύβου από τη μέτρηση δεν είναι πάντοτε εφικτή, ωστόσο η καλή γνώση του φυσικού μηχανισμού αντίχρευσής του αισθητήρα και των παραμέτρων που επιδρούν στη μέτρηση μπορούν να οδηγήσουν σε μια καλή εκτίμηση για τη συνιστώσα του (μέτρο και κυματομορφή) στο μετρούμενο σήμα.

- *Σταθερότητα.* Η έννοια της σταθερότητας δηλώνει την ικανότητα ενός αισθητήρα να δίνει την ίδια τιμή εξόδου στο ίδιο περιβάλλον μέτρησης (σταθερή είσοδος), όταν πραγματοποιείται μέτρηση για μεγάλο χρονικό.
- *Γραμμικότητα.* Υπάρχει μια περιοχή στο πεδίο μετρούμενων τιμών, όπου οι τιμές εξόδου έχουν ένα σταθερό συντελεστή αναλογίας συναρτήσεως των τιμών της μετρούμενης φυσικής ποσότητας, ενώ έξω από αυτά τα όρια ο αισθητήρας συμπεριφέρεται μη γραμμικά. Είναι σημαντικό να λειτουργεί ο αισθητήρας στη γραμμική περιοχή του, καθώς είναι πιο προβλέψιμη η συμπεριφορά του και η μελέτη των καταγεγραμμένων δεδομένων γίνεται απλούστερη.



Εικόνα 1.5. Γραμμικότητα ενός αισθητήρα

- *Εύρος.* Ένας αισθητήρας μπορεί να δίνει ένα σήμα εξόδου για μια μεγάλη γκάμα τιμών εισόδου. Ωστόσο, ως εύρος ορίζουμε την απόλυτη τιμή μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής ενός φυσικού μεγέθους για τις οποίες οι

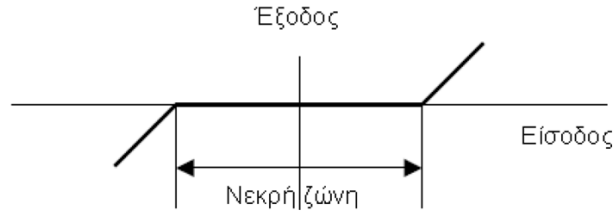
αντίστοιχες τιμές εξόδου είναι αξιόπιστες και μεγαλύτερες από το σφάλμα του αισθητήρα.

- *Ευαισθησία.* Η ευαισθησία εκφράζεται από το μέγεθος της μεταβολής του σήματος εισόδου ως προς το αντίστοιχο ερέθισμα του αισθητήρα. Συγκεκριμένα δίνεται από το λόγο

$$\text{ευαισθησία} = \frac{\text{Μέγιστη τιμή εξόδου} - \text{Ελάχιστη τιμή εξόδου}}{\text{Μέγιστη τιμή εισόδου} - \text{Ελάχιστη τιμή εισόδου}}$$

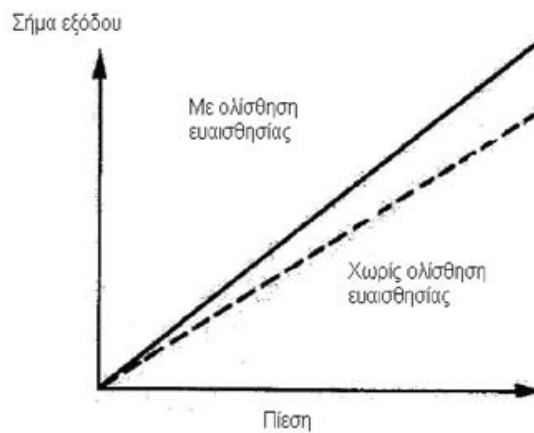
και οι μονάδες της εξαρτώνται από τις μονάδες του εξερχόμενου προς του μετρούμενου μεγέθους. Ένας ηλεκτρονικός αισθητήρας θερμοκρασίας για παράδειγμα θα έχει μονάδες ευαισθησίας mV/°C. Αν ο αισθητήρας λειτουργεί στη γραμμική περιοχή, τότε η ευαισθησία θα είναι σταθερή.

- *Διακριτική ικανότητα.* Είναι η ελάχιστη ποσότητα που μπορεί να ανιχνεύσει ένας αισθητήρας. Όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των μεταβολών που μπορεί να ανιχνεύσει ένας αισθητήρας σε ένα εύρος τιμών εισόδου.
- *Χρόνος απόκρισης.* Ο χρόνος απόκρισης σχετίζεται με το χρόνο που χρειάζεται ένας αισθητήρας ώστε να φτάσει στην επιθυμητή τελική τιμή εξόδου για δεδομένη είσοδο. Τυπικά οι κατασκευαστές ορίζουν μία χρονική παράμετρο, όπου εκφράζεται ο χρόνος (sec, msec, μsec ανάλογα τον αισθητήρα) για τιμή εξόδου πολύ κοντά στην ιδανική τιμή. Για παράδειγμα, η απόκριση $t_{90} = 5\text{sec}$ σημαίνει ότι σε 5sec ο αισθητήρας θα έχει φτάσει στο 90% της τελικής του τιμής).
- *Μέσος χρόνος ζωής.* Ο κάθε κατασκευαστής δίνει μια εκτίμηση για το χρόνο ζωής του αισθητήρα, δηλαδή για το χρονικό διάστημα που θα μπορεί να λειτουργεί σωστά και σύμφωνα με τις προδιαγραφές του. Με την πάροδο του χρόνου ένας αισθητήρας ενδέχεται να χάσει την ακρίβεια ή την ευαισθησία του λόγω κάποιας σταδιακής μικρής μεταβολής κάποιων ιδιοτήτων του. Έτσι ο αισθητήρας είτε αντικαθίσταται είτε υπόκειται σε ένα πλήθος διεργασιών από τον κατασκευαστή, αναβαθμονομείται και τοποθετείται στην διάταξη.
- *Νεκρή ζώνη.* Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας του αισθητήρα δεν υπάρχει καμία μεταβολή στην έξοδο και είναι δυνατή η ανίχνευση του φυσικού μεγέθους. Συνήθως ένας αισθητήρας βρίσκεται σε αυτήν την περιοχή κατά την αύξηση της μετρούμενη ποσότητας, μέχρι να γίνει αντιληπτή. Η τιμή της εισόδου όπου η μεταβολή εξόδου είναι μη μηδενική ονομάζεται τιμή κατωφλίου.



Εικόνα 1.6. Περιοχή νεκρής ζώνης ενός αισθητήρα

- **Ολίσθηση.** Ως ολίσθηση ορίζουμε την αργή μεταβολή του σήματος εξόδου, όταν δεν υπάρχει μεταβολή στην φυσική ποσότητα στην είσοδο. Οι παράγοντες που οδηγούν σε ολίσθηση είναι συνήθως η υγρασία και η θερμοκρασία, οι οποίοι μπορούν να τροποποιήσουν τις φυσικές ή ηλεκτρικές ιδιότητες ενός υλικού.



Εικόνα 1.7. Ολίσθηση στην έξοδο γραμμικού αισθητήρα πίεσης

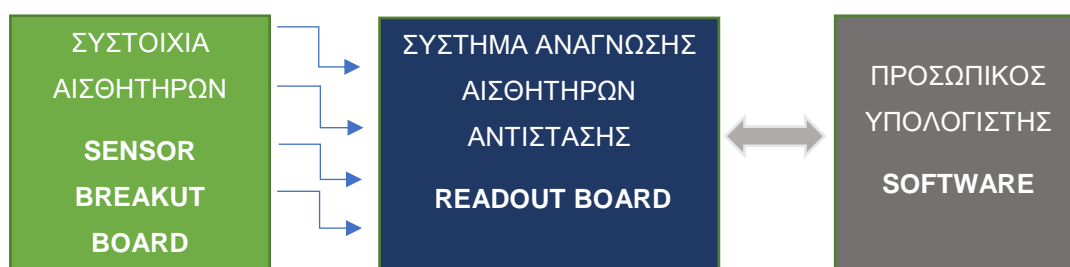
Δυναμικά χαρακτηριστικά

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά σχετίζονται με την συμπεριφορά ενός αισθητήρα κατά την διαρκή μεταβολή του σήματος εισόδου και διαφέρουν από τα στατικά χαρακτηριστικά, όπου βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση. Η δυναμική απόκριση ενός αισθητήρα δεν μπορεί να περιγραφεί με γενικευμένες παρατηρήσεις και εξαρτάται από το είδος του αισθητήρα και το πεδίο εφαρμογής του. Βασικός λόγος της αλλαγής των στατικών του στοιχείων σε δυναμικά ερεθίσματα είναι οι διάφορες μορφές αδράνειας που δημιουργούνται, όπως ενεργειακή, μάζας και άλλες.

2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

2.1 ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα δούμε όλη τη διαδικασία σχεδιασμού ενός οικονομικότερου, μικρότερης μεγέθους ολοκληρωμένου μετρητικού συστήματος, του οποίου η βασική του λειτουργία είναι η μέτρηση της αντίστασης. Ο σκοπός δημιουργίας του ήταν η μέτρηση αισθητήρων παραμόρφωσης με αντίσταση ως μέγεθος εξόδου. Στη συνέχεια μελετήθηκε η επέκταση του συστήματος για την ανάγνωση πολλαπλών αισθητήρων, σε μορφή συστοιχίας, όπου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της πολύπλεξης. Τέλος αναπτύχθηκε ένα υποσύστημα επικοινωνίας με ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου θα καταλήγουν οι μετρήσεις. Η βασική δομή περιγράφεται συνοπτικά από το παρακάτω διάγραμμα.



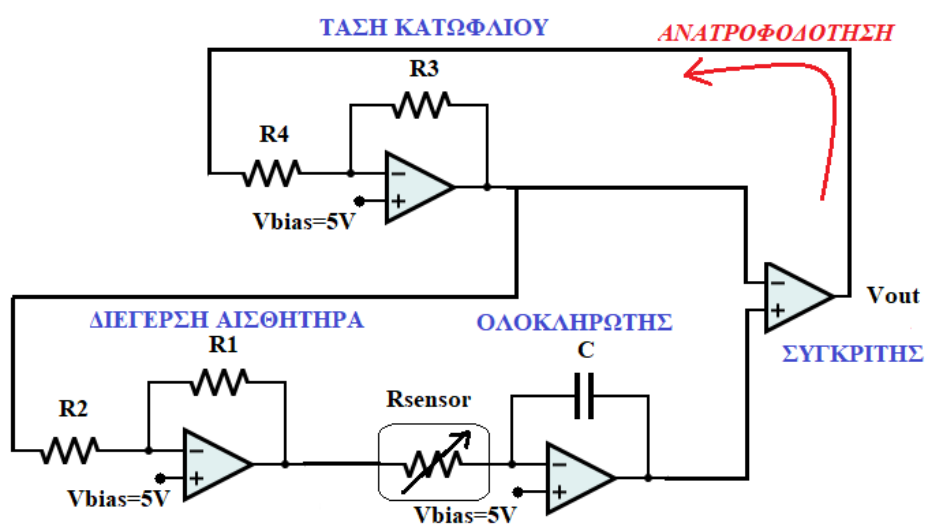
Αναλογική διασύνδεση

Επικοινωνία με ψηφιακή διεπαφή

Η διασύνδεση της πλακέτας που περιλαμβάνει τις συστοιχίες των αισθητήρων με την πλακέτα ανάγνωσης (readout board) είναι αναλογική και βασίζεται στη μέθοδο πολύπλεξης. Η πλακέτα ανάγνωσης (readout board) περιλαμβάνει ένα αυτόνομο αναλογικό υποκύκλωμα μέτρησης, το οποίο έχει γραμμική συμπεριφορά ως προς τη μεταβολή της αντίστασης, όπως θα δούμε και στην πορεία. Το κεντρικό της τμήμα αποτελεί ένας μικροελεγκτής που έχει καταχωρημένες συγκεκριμένες εντολές από τον χρήστη και εποπτεύει τις λειτουργίες όλων των επιμέρους κυκλωμάτων. Ο μικροελεγκτής ελέγχει ποιος αισθητήρας θα μετρηθεί, τη χρονική διάρκεια μιας μέτρησης, την καταγραφή της και την αποστολή της ως πακέτο ψηφιακών δεδομένων στον προσωπικό υπολογιστή μέσω κατάλληλης διεπαφής.

2.2 ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΝΑΓΝΩΣΗΣ

Όπως είδαμε, το σύστημα ανάγνωσης αποτελείται από αναλογικά και ψηφιακά στοιχεία. Αρχικά θα δούμε το αναλογικό κύκλωμα μέτρησης του αισθητήρα, το οποίο σχεδιάστηκε στο τμήμα Μικροηλεκτρονικής του Ε.ΚΕ.ΦΕ. «Δημόκριτος» με εφαρμογή σε μετρήσεις χημικών αισθητήρων. Στο κύκλωμα έγινε διεξοδική ανάλυση και μερική τροποποίησή του, κυρίως στα παθητικά του στοιχεία. Το αναλογικό κύκλωμα ανήκει στην κατηγορία των κυκλωμάτων ταλάντωσης και αποτελείται από τέσσερις τελεστικούς ενισχυτές. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το σχηματικό του κυκλώματος.



Εικόνα 2.1. Αναπαράσταση σχηματικού του αναλογικού τμήματος ανάγνωσης

Ξεκινώντας την ανάλυση θα δούμε τα βασικά στοιχεία ενός τελεστικού ενισχυτή και έπειτα θα αναλύσουμε τις τρεις διαφορετικές τοπολογίες που υπάρχουν στο κύκλωμα ανάγνωσης, όπου θα εξάγουμε τη σχέση της τάσης εξόδου από την τάση εισόδου.

2.3 Διατάξεις τελεστικών ενισχυτών

Ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο συναντάται πολύ συχνά σε εφαρμογές των αναλογικών ηλεκτρονικών και αποτελεί σχεδόν αναπόσπαστο κομμάτι τόσο παλιότερων όσο και σύγχρονων μετρητικών συστημάτων. Λόγω της πληθώρας των διατάξεων που μπορούν να υλοποιηθούν, οι τελεστικοί ενισχυτές

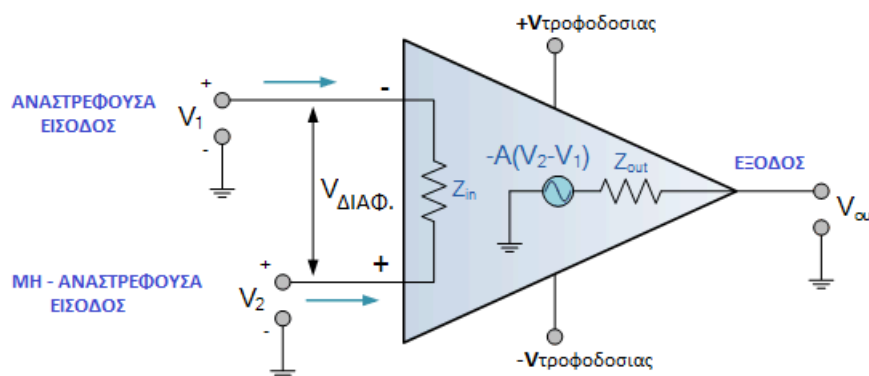
μπορούν να ανταποκριθούν σχεδόν σε κάθε εφαρμογή. Το μεγάλο κέρδος σήματος (έως και 10^6) και το μεγάλο εύρος διαφορετικών τοπολογιών που μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση παθητικών στοιχείων ένα κύκλωμα, με έναν ή περισσότερους τελεστικούς ενισχυτές είναι τα βασικά του πλεονεκτήματα. Το κύκλωμά του αποτελείται από μία βαθμίδα διαφορικού ενισχυτή, με μεγάλη αντίσταση στην είσοδο, και από μια βαθμίδα παροχής ρεύματος με μικρή αντίσταση στην έξοδο.

Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά ακολουθούνται δύο βασικοί κανόνες κατά την ανάλυση ενός τελεστικού ενισχυτή σε ένα κύκλωμα: Α) Το ρεύμα που ρέει από και προς τις εισόδους του είναι ιδανικά μηδενικό και πρακτικά αμελητέο, λόγω της πολύ μεγάλης αντίστασης εισόδου (της τάξης των μερικών εκατοντάδων $M\Omega$) και Β) η τάση στις δύο εισόδους του είναι ίδια, δηλαδή ισχύει $V_- = V_+$, μόνο όταν υπάρχει συνδεσμολογία κλειστού βρόχου.

Συγκριτής

Στην περίπτωση του ανοιχτού βρόχου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1, ισχύει $\Delta V_{\pm} \neq 0$ και η διαφορά αυτή ενισχύεται στην έξοδο.

Συγκεκριμένα, αφήνοντας τις εισόδους του τελεστικού ασύνδετες με την έξοδό του, δημιουργούμε μια τοπολογία διαφορικής ενίσχυσης της διαφοράς τάσεων ανάμεσα στις εισόδους. Η τάση εξόδου θα είναι $V_{out} = (V_2 - V_1) = \begin{cases} 0V, & V_2 = V_1 \\ 5V, & V_2 > V_1 \end{cases}$. Ο τελεστικός αυτής της τοπολογίας ονομάζεται συγκριτής.

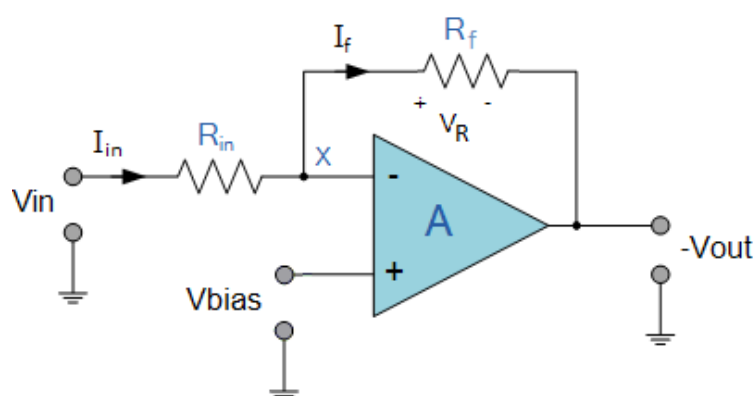


Εικόνα 2.2. Ο τελεστικός ενισχυτής ως συγκριτής (χωρίς ανατροφοδότηση)

με διαφορετικές τοπολογίες παθητικών στοιχείων, όπως αντιστάσεις ή πυκνωτές, κυρίως σε συνδεσμολογία κλειστού βρόχου.

Πολωμένος αναστρέφων

Η διάταξη ενός πολωμένου αναστρέφοντος τελεστικού ενισχυτή έχει μια αντίσταση που σχηματίζει ένα κλειστό βρόχο μεταξύ αναστρέφουσας εισόδου και εξόδου και μια αντίσταση σε σειρά με την πηγή V_{in} . Η μη – αναστρέφουσα είσοδος είναι πολωμένη σε τάση $V_+ = \frac{V_{cc}}{2}$.



Εικόνα 2.3. Ιδανικός πολωμένος αναστρέφων τελεστικός ενισχυτής

για την ανάλυση του κυκλώματος ενός, η τάση προκαλεί ένα ρεύμα I_{in} , που διαρρέει την αντίσταση R_{in} και εφόσον $I = 0$, εξέρχεται ένα ρεύμα I_f που διαρρέει την αντίσταση R_f . Για τον υπολογισμό της τάσης εξόδου εφαρμόζουμε τον πρώτο κανόνα του Kirchhoff στον κόμβο X, όπου το αλγεβρικό άθροισμα όλων των ρευμάτων πρέπει να ισούται με μηδέν.

$$I_{in} = I_f \Rightarrow$$

$$\frac{V_{in} - V_-}{R_{in}} = \frac{V_- - V_{out}}{R_f} \xrightarrow{V_- = V_+ = V_{bias}}$$

$$\frac{V_{in} - V_{bias}}{R_{in}} = \frac{V_{bias} - V_{out}}{R_f} \Rightarrow$$

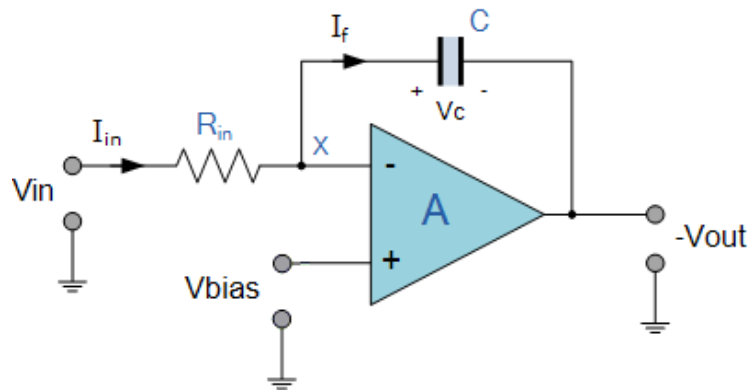
$$\frac{R_f}{R_{in}} (V_{in} - V_{bias}) = V_{bias} - V_{out} \Rightarrow$$

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_{in}} (V_{bias} - V_{in}) + V_{bias} \quad (1)$$

Από τη σχέση (1) συμπεραίνουμε ότι Η τάση εξόδου ακολουθεί την κυματομορφή της τάσης εισόδου με διαφορά φάσης 180° και με πλάτος που εξαρτάται από το λόγο των αντιστάσεων $\frac{R_f}{R_{in}}$.

Ολοκληρωτής

Στην τοπολογία του ολοκληρωτή υπάρχει ένας πυκνωτής που συνδέει την έξοδο με την αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή.



Εικόνα 2.4. Ιδανικός πολωμένος ολοκληρωτής

Θεωρώντας ότι έχουμε μια τάση εισόδου, V_{in} , συχνότητας f , όπως για παράδειγμα μια παλμοσειρά, τότε κατά το χρονικό διάστημα που η τάση είναι θετική (κορυφή του παλμού) δημιουργείται ένα ρεύμα I_{in} που διαπερνάει την αντίσταση και καταλήγει στον πυκνωτή, τον οποίο και φορτίζει σταδιακά. Μόλις η τάση εισόδου λάβει την ελάχιστη τιμή της (μηδέν ή αρνητική ανάλογα και την τάση τροφοδοσίας V_{cc} του τελεστικού), τότε ο η διαφορά δυναμικού μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή αντιστρέφεται και ο πυκνωτής αποφορτίζεται. Το σήμα εξόδου θα είναι μια τριγωνική κυματομορφή (συνάρτηση ράμπας). Ακολουθώντας το ίδιο σκεπτικό με την τοπολογία του πολωμένου αναστρέφοντος τελεστικού ενισχυτή, βρίσκουμε αναλυτικά την σχέση τάσης εξόδου-εισόδου.

$$I_{in} = I_f \Rightarrow$$

$$\frac{V_{in} - V_-}{R_{in}} = C \frac{dV_c}{dt} \Rightarrow$$

$$\frac{V_{in} - V_-}{R_{in}C} dt = dV_c \Rightarrow$$

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{V_{in} - V_-}{R_{in}C} dt = \int_{V_1}^{V_2} dV_c \xrightarrow{V_- = V_+ = V_{bias}}$$

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{V_{in} - V_+}{R_{in}C} dt = \int_{V_1}^{V_2} dV_c \Rightarrow$$

$$\Delta V_c = \frac{1}{R_{in}C} \int_{t_1}^{t_2} (V_{in} - V_+) dt$$

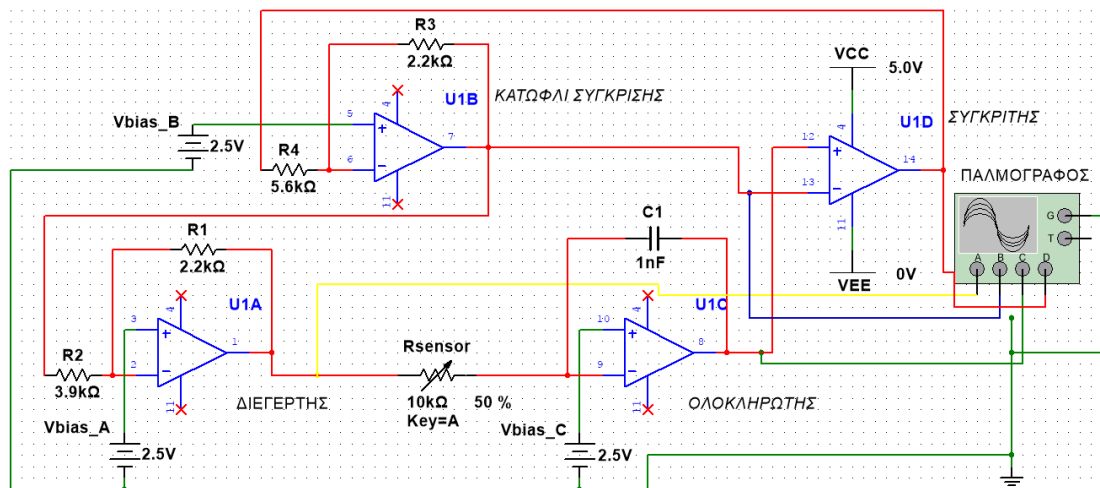
$$V_{out} = \frac{1}{R_{in}C} \int_{t_1}^{t_2} (V_{in} - V_+) dt + V_+$$

Η τοπολογία του αναστρέφοντος πολωμένου ενισχυτή χρησιμοποιείται στη διέγερση του αισθητήρα και στην παραγωγή της τάσης κατωφλίου, ενώ ο ολοκληρωτής δέχεται ως είσοδο το σήμα εξόδου του αισθητήρα. Ο συγκριτής συγκρίνει την τριγωνική τάση εξόδου του ολοκληρωτή με την τάση κατωφλίου και δίνει την τάση εξόδου του συνολικού κυκλώματος ταλάντωσης, η οποία έχει παλμική κυματομορφή. Λόγω της ανατροφοδότησης, η τάση κατωφλίου θα έχει και αυτή παλμική κυματομορφή, όπως και η τοπολογία του διεγέρτη. Αναλυτικά οι κυματομορφές των τεσσάρων τελεστικών φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.

2.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟ NI MULTISIM

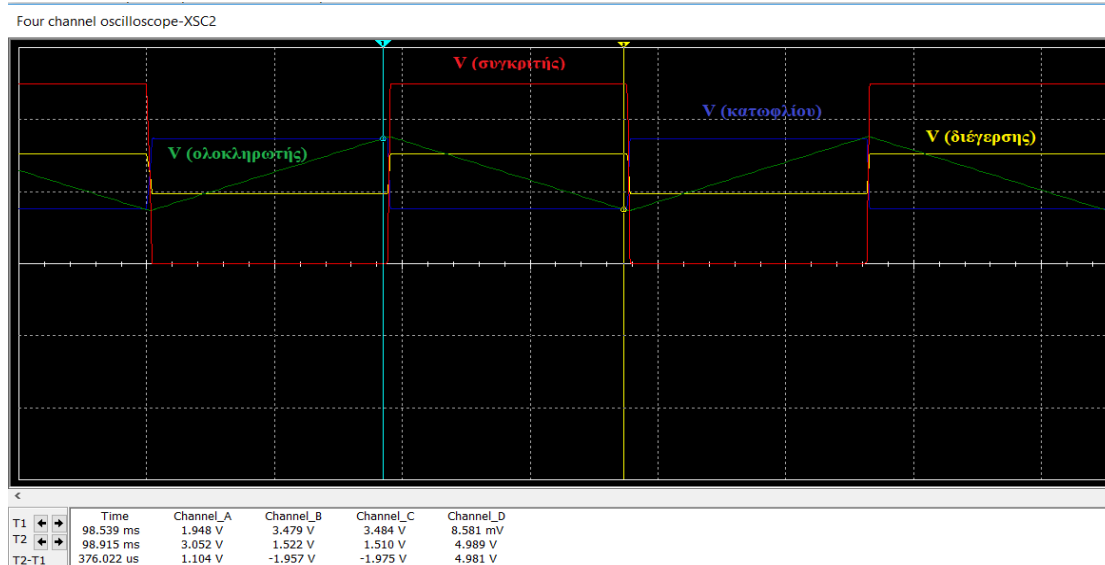
Το συνολικό αναλογικό κύκλωμα σχεδιάστηκε και προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα προσομοίωσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων Multisim της National Instruments. Οι τιμές των αντιστάσεων επιλέχθηκαν με δύο κριτήρια. Βασικά, ο λόγος τους σε κάθε αναστρέφων τελεστικό έπρεπε να είναι μικρότερο της μονάδας, ώστε να εξασθενούν το εισερχόμενο σήμα και ταυτόχρονα να δίνουν την ελάχιστη δυνατή χρονική περίοδο στους παλμούς εξόδου, για δεδομένη μετρούμενη αντίσταση. Ομοίως ο πυκνωτής οφείλει να δίνει το ελάχιστο δυνατό πλάτος παλμού, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση

περισσότερων παλμών σε μικρότερο χρονικό διάστημα αλλά ταυτόχρονα να μην αλλοιώνεται η ποιότητα του παλμού, Ο αισθητήρας αντιστοιχήθηκε με μια μεταβλητή αντίσταση, η οποία θα αντιπροσωπεύει την ανίχνευση εξωτερικών μεταβολών. Επίσης, η τάση τροφοδοσίας των τελεστικών επιλέχθηκε $V_{EE} = 0V$ και $V_{CC} = 5V$, εφόσον το συνολικό κύκλωμα θα υλοποιηθεί σε τυπωμένο κύκλωμα με πηγή τροφοδοσία 5V, μέσω θύρας USB ηλεκτρονικού υπολογιστή.



Εικόνα 2.5. Εικονικό σχηματικό κυκλώματος στο περιβάλλον του Multisim

Σκοπός της προσομοίωσης ήταν, επίσης, η μελέτη της ηλεκτρικής οδήγησης του αισθητήρα στην είσοδό του και η εύρεση της συνάρτησης εξόδου από τη μετρούμενη αντίσταση. Στην έξοδο του κάθε τελεστικού ενισχυτή συνδέθηκε ένας εικονικός παλμογράφος, όπου βλέπαμε τις αντίστοιχες τάσεις εξόδου του καθενός. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.6) φαίνονται στο διάγραμμα V-t οι κυματομορφές των τάσεων, ενώ στο κάτω πλαίσιο φαίνονται οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές τους.



Εικόνα 2.6. Τάσεις εξόδου των τεσσάρων τελεστικών

Μία ταλάντωση στο κύκλωμα αντιστοιχεί σε μία μέτρηση της αντίστασης. Τη στιγμή $t=0$ της μέτρησης, το σήμα εξόδου όλων των τελεστικών είναι 2,5V. Από εκεί και μετά, το σήμα του ενισχυτή της τάσης κατωφλίου αρχίζει να αυξάνεται λόγω της ανατροφοδότησης από τον συγκριτή. Αυτό μειώνει την τάση του διεγέρτη, λόγω της διαφοράς φάσης τους κατά 180° και ταυτόχρονα φορτίζει τον πυκνωτή, αυξάνοντας την τάση του ολοκληρωτή. Οι τάσεις V_C και V_B καταλήγουν στην μή αναστρέφουσα (+) και την αναστρέφουσα είσοδο (-) του συγκριτή. Όσο η τάση του ολοκληρωτή είναι μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου έχουμε ισχύ της συνθήκης $V_+ > V_-$ και παράγεται από την έξοδο παλμός πλάτους $V_D=5V$. Μέσω της ανατροφοδότησης επανακαθορίζεται η τάση κατωφλίου μέσα σε μισή ταλάντωση.

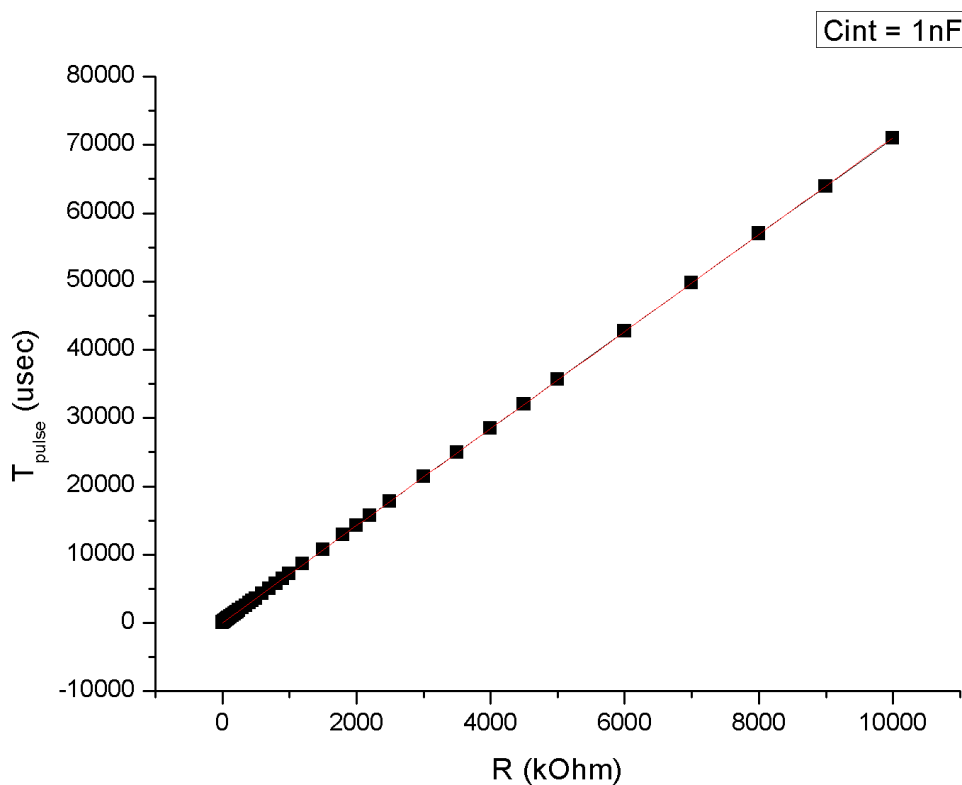
Σε αυτό το σημείο επισημαίνουμε τα βασικά χαρακτηριστικά του ταλαντωτικού κυκλώματος.

- Η τάση του ολοκληρωτή είναι αντιστρόφως ανάλογη της αντίστασης στην αναστρέφουσα είσοδό του, δηλαδή την αντίσταση του αισθητήρα ($V_C \sim 1/R_S$). Για μεγαλύτερες τιμές της R_S η κλίση της ράμπας στην V_C είναι μικρότερη και το χρονικό παράθυρο, όπου ισχύει η συνθήκη $V_C > V_B$ είναι πιο μεγάλο. Κατά συνέπεια και οι παλμοί εξόδου θα έχουν μεγαλύτερο πλάτος.
- Η τάση διέγερσης του αισθητήρα είναι στα 3V και παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της πραγματικής μέτρησης, ενώ μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια μιας ταλάντωσης. Δηλαδή, παρόλο που βλέπουμε παλμούς σε δύο διαφορετικές φάσεις, μόνο σε μία φάση, παράγεται παλμός εξόδου 5V, του οποίου η διάρκεια

αντιστοιχεί και στη μέτρηση, μέσω της αλλαγής στην τάση V_C . Αυτό είναι σημαντικό γιατί το ρεύμα εισόδου σε έναν παθητικό αισθητήρα οφείλει να μην επηρεάζει τον τρόπο λειτουργίας του, αλλά και να είναι αρκετό ώστε να μην υποβαθμίζει την απόδοσή του.

- Η σχέση της περιόδου του κάθε παλμού εξόδου έχει γραμμική εξάρτηση από την αντίσταση του αισθητήρα, κάτι το οποίο επιβεβαιώθηκε και από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.
- Η τάση εξόδου θα είναι $V_{out} = \begin{cases} 5V, & V_C > V_B \\ 0V, & V_C = V_B \end{cases}$.

Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης για τιμή της χωρητικότητας στον πυκνωτή του ολοκληρωτή $C_{int} = 1nF$, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα για την περίοδο ενός παλμού t_p συναρτήσει της αντίστασης ενός αισθητήρα. Συγκεκριμένα μετρήθηκε στον παλμογράφο η μέση περίοδος ενός παλμού εξόδου για ένα εύρος αντιστάσεων από $1k\Omega$ έως $10M\Omega$.



Εικόνα 2.7. Γραφική παράσταση διάρκειας παλμών από αντίσταση

Η σχέση των δύο μεγεθών είναι γραμμική και η συνάρτηση της ευθείας προκύπτει

$$T_{1p}(us) = 7,1067 R (k\Omega)$$

Προκειμένου να έχουμε αξιοπιστία στη μέτρηση, θα μετράμε περισσότερους από έναν παλμούς και συγκεκριμένα 50 εισερχόμενους παλμούς για κάθε τιμή της αντίστασης του αισθητήρα. Η σχέση της διάρκειας 50 παλμών από την αντίσταση θα είναι

$$T_{50p}(us) = 50 \cdot T_{1p} = 355,335 R (k\Omega)$$

Η αναλογία αυτή διευκολύνει πολύ στην γρήγορη και αξιόπιστη πρόβλεψη της συμπεριφοράς της αισθητήρα σε συνθήκες ανίχνευσης.

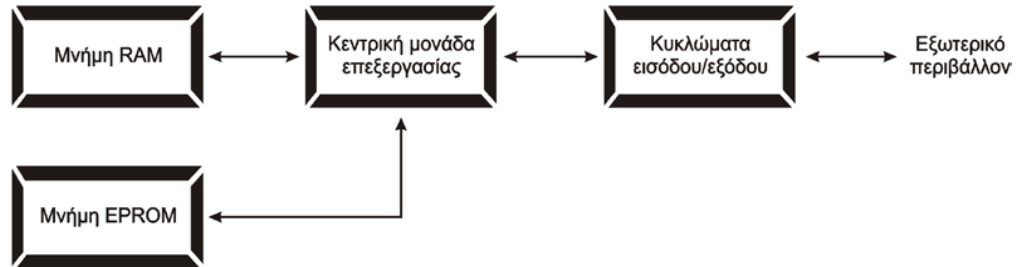
2.5 ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗΣ ATMEGA 1284

Σε αυτό το στάδιο αναπτύσσουμε τον τρόπο απαρίθμησης των παλμών, ως αποτέλεσμα της αντίστασης, ενώ ταυτόχρονα επιζητούμε τον έλεγχο μιας μέτρησης και την καταγραφή της. Ο πιο σύντομος και αξιόπιστος δρόμος για να επιτύχουμε αυτό το στόχο είναι η εισαγωγή ενός μικροελεγκτή.

Ένας μικροελεγκτής είναι ένα μικρό υπολογιστικό σύστημα, σχεδιασμένο σε ένα μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα υψηλής κλίμακας ολοκλήρωσης. Όπως κάθε υπολογιστικό κύκλωμα, περιέχει κεντρική μονάδα επεξεργασίας, ένα αριθμό καταχωρητών, κυκλώματα μνήμης και κυκλώματα ελέγχου περιφερειακών συσκευών. Κάθε μικροελεγκτής είναι, δηλαδή, ικανός να ανταλλάξει σήματα με το εξωτερικό περιβάλλον, να εκτελέσει πράξεις ανάμεσα σε μεταβλητές και να καταχωρήσει τιμές στη μνήμη RAM που διαθέτει. Συγκεκριμένα κάθε μικροελεγκτής περιέχει μέσα σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα τα παρακάτω στοιχεία:

- Έναν αριθμό από καταχωρητές ειδικού σκοπού (συσσωρευτή, καταχωρητή κατάστασης, μετρητή προγράμματος, καταχωρητή εντολών, καταχωρητή δείκτη)

- Εσωτερικούς χρονιστές – απαριθμητές
- Αριθμητική και λογική μονάδα (ALU)
- Μονάδα αποκωδικοποίησης εντολών

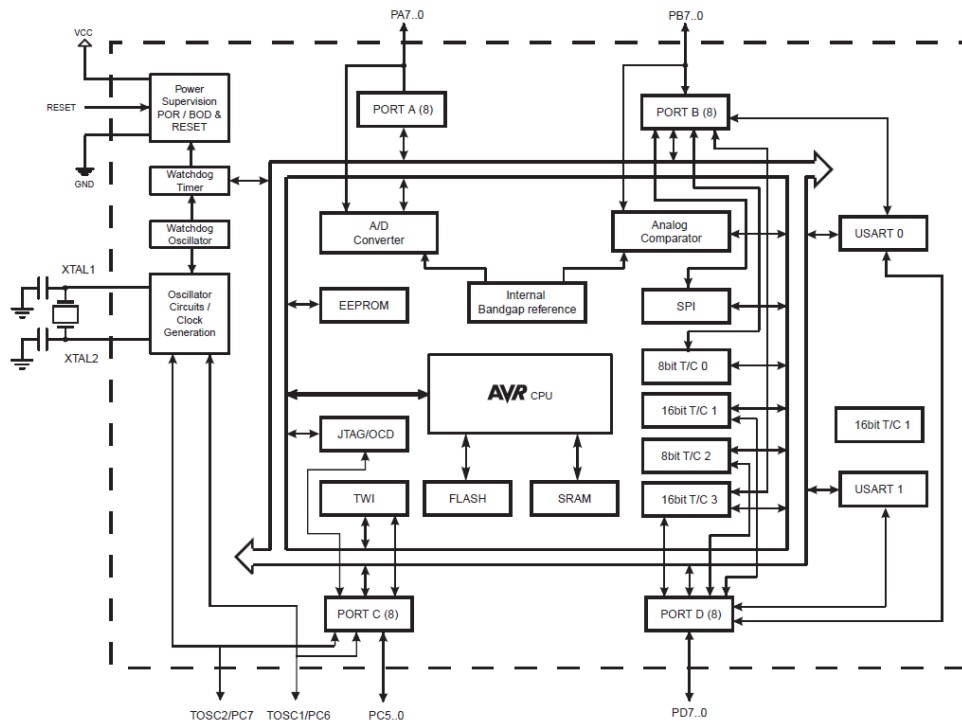


Εικόνα 2.8. Βασική δομή ενός μικροελεγκτή

Τα κυκλώματα εισόδου / εξόδου (I/O Ports) αναφέρονται στη σύνδεση περιφερειακών στους ακροδέκτες. Μέσα από τις θύρες I/O, ένας μικροελεγκτής μπορεί να δέχεται σήματα εισόδου με τη μορφή λογικών καταστάσεων, χαρακτήρες ή bytes δεδομένων με την τεχνική της σύγχρονης ή ασύγχρονης επικοινωνίας, σήματα διακοπών ή ακόμη και αναλογικά σήματα, τα οποία μετατρέπονται σε ψηφιακά. Συνήθη περιφερειακά που συναντούμε στους μικροελεγκτές είναι τα εξής:

- Χρονιστές / Μετρητές (Timer/Counter) 8-bit ή 16-bit με ξεχωριστές μονάδες διαίρεσης χρόνου, λειτουργία υπερχείλισης και σύγκρισης τιμής
- Ανεξάρτητες μονάδες διαμόρφωσης πλάτους παλμού (PWM)
- Μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC)
- Σειριακές διεπαφές μεταφοράς δεδομένων όπως TWI, UASRT
- Προγραμματιζόμενος χρονιστής επιτήρησης (Watchdog Timer)
- Λειτουργία εξωτερικών διακοπών (External Interrupts)

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής AVR ATmega 1284 της εταιρίας Atmel. Οι μικροελεγκτές AVR είναι βασισμένοι στην αρχιτεκτονική Harvard, όπου ο δίαυλος μεταφοράς δεδομένων (Data Bus) είναι διαφορετικός από τον δίαυλο μεταφοράς εντολών (Address Bus). Επίσης περιλαμβάνει δύο ξεχωριστές μνήμες, τη μνήμη δεδομένων (Data Memory) και τη μνήμη εντολών (Program Memory).

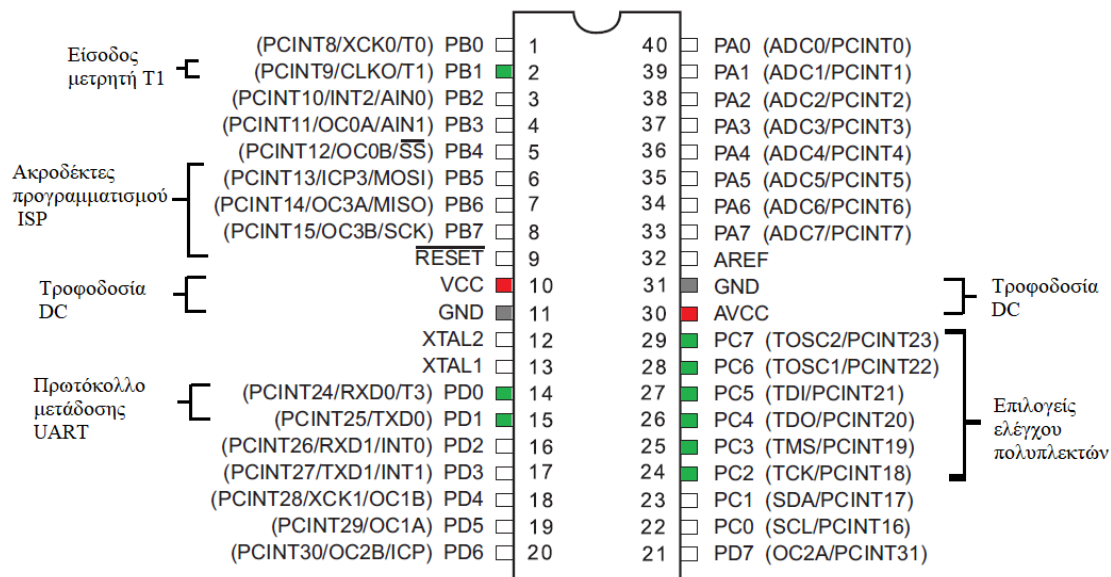


Εικόνα 2.9. Αρχιτεκτονική μικροελεγκτή AVR ATMEGA 1284

Τα βασικά περιφερειακά χαρακτηριστικά του ATmega1284 είναι:

- Μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό 8 εισόδων με προγραμματιζόμενο κέρδος 1x, 10x και 100x.
- Δύο Χρονιστές / Μετρητές 8 – bit και δύο Χρονιστές / Μετρητές 16 – bit με διαφορετικούς προεπιλογείς χρονισμού και δυνατότητας σύγκρισης ο καθένας.
- Τέσσερα κανάλια διαμόρφωσης πλάτους παλμού (PWM).
- Ένα κανάλι με πρωτόκολλο I2C .
- Δύο κανάλια με σειριακό πρωτόκολλο USART.

Τα περιφερειακά που θα χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση της συστήματος μέτρησης είναι δύο μετρητές και το σύστημα ασύγχρονης επικοινωνίας UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter).



Εικόνα 2.10. Λειτουργίες ακροδεκτών στον ATmega 1284

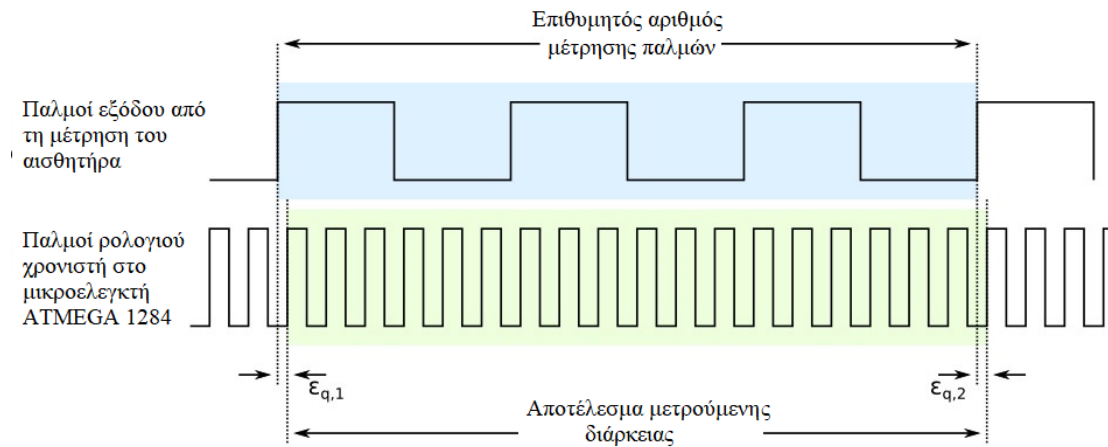
Ο χρονιστής / μετρητής είναι ένας καταχωρητής του οποίου η τιμή αυξάνεται ή μειώνεται με βάση ένα ρολόι σταθερού χρονικού βήματος. Η βασική λειτουργία είναι η μέτρηση χρονικών διαστημάτων. Ο χρονισμός που παρέχει το ρολόι μπορεί να ταυτίζεται με το χρονισμό του συστήματος (20MHz) ή να είναι ένα υποπολλαπλάσιό του.

Ο χρονιστής T/C 1 (16-bit) θα δέχεται ως είσοδο τους εισερχόμενους παλμούς του αναλογικού κυκλώματος ταλάντωσης, μέσω του ακροδέκτη PB1. Το ρολόι χρονισμού του θα καθορίζεται από τη συχνότητα των παλμών. Ο χρονιστής μπορεί να ανιχνεύει την ανερχόμενη ή την κατερχόμενη τάση σε έναν τετραγωνικό παλμό είτε και τις δύο. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η απαρίθμησή τους. Όπως προαναφέραμε, για να έχουμε αξιόπιστες μετρήσεις είναι επιθυμητή η απαρίθμηση 50 εισερχόμενων παλμών για να συμπεράνουμε το τελικό αποτέλεσμα. Γι' αυτό θέτουμε σε λειτουργία ένα δεύτερο χρονιστή / απαριθμητή, του οποίου το ρολόι χρονισμού του θα καθορίζεται από την κεντρική συχνότητα λειτουργίας του μικροελεγκτή. Το τελικό αποτέλεσμα θα εξαρτάται από τη συχνότητα χρονισμού του δεύτερου μετρητή (T3), η οποία μπορεί να οριστεί ανάλογα την τιμή του διαιρέτη χρονισμού του ρολογιού, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Διαιρέτης Χρόνου Ρολογιού	Συχνότητα Χρονισμού f	Χρονική Διακριτική Ικανότητα 1/f	Μέγιστη Μετρήσιμη τιμή $2^{16} * (1/f)$
$f_{clk}/1$	20 MHz	50 nsec	3,2768 msec
$f_{clk}/8$	2,5 MHz	0,4 μ sec	26,214 msec

$f_{clk}/64$	312,5 kHz	3,2 μ sec	209,715 msec
$f_{clk}/256$	78,125 kHz	12,8 μ sec	838,84 sec
$f_{clk}/1024$	19,53 kHz	51,2 μ sec	3,355 sec

Το αποτέλεσμα μιας μέτρησης θα είναι ο αριθμός των παλμών του δεύτερου χρονιστή, ο οποίος θα είναι ενεργός για όση διάρκεια έχουν οι 50 εισερχόμενοι παλμοί.



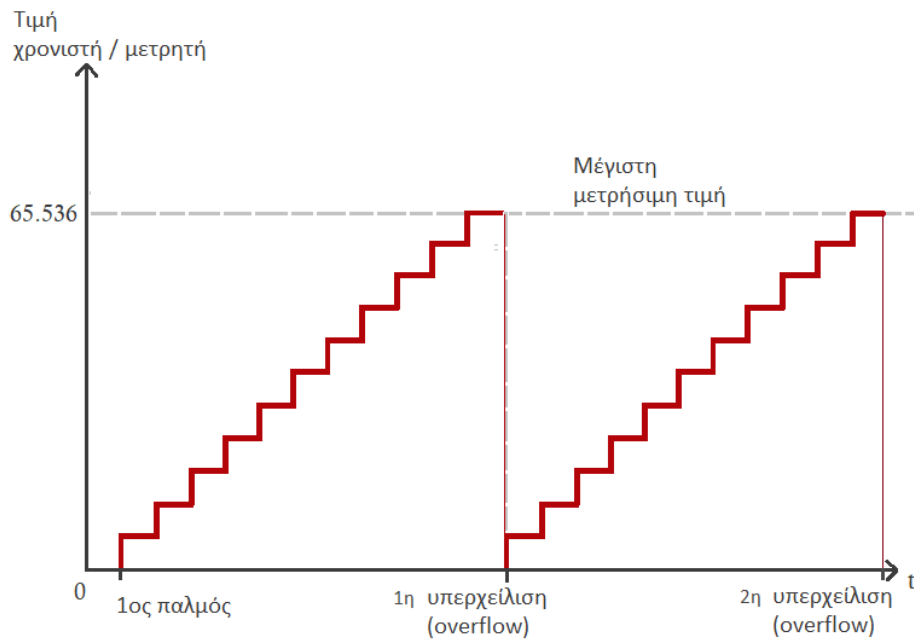
Εικόνα 2.11. Παλμοί των δύο μετρητών

Ανάλογα το ρολόι χρονισμού του δεύτερου μετρητή προκύπτει τελικά ο αριθμός των παλμών που καταγράφονται συναρτήσει της αντίστασης του αισθητήρα.

$$N_{out} = \frac{T_{50p}}{T_{count}} = \begin{cases} 7.106,7 R, f = 20MHz \\ 888,375 R, f = 2,5MHz \\ 111,042 R, f = 312,5kHz \end{cases}$$

όπου R_s σε $[k\Omega]$.

Ο καταχωρητής του χρονιστή είναι 16-bit, άρα η μέγιστη τιμή αριθμού παλμών που μπορεί να μετρήσει είναι $2^{16}=65.536$. Αν η ξεπεράσει αυτή την τιμή κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης, τότε έχουμε υπερπλήρωση (overflow) και η τιμή του μηδενίζεται. Γνωρίζοντας αυτήν την τιμή καταχωρούμε τον αριθμό των υπερπληρώσεων που έγιναν σε μια μέτρηση καθώς και την πιο πρόσφατη τιμή του χρονιστή, ώστε να εξάγουμε το συνολικό αριθμό παλμών.

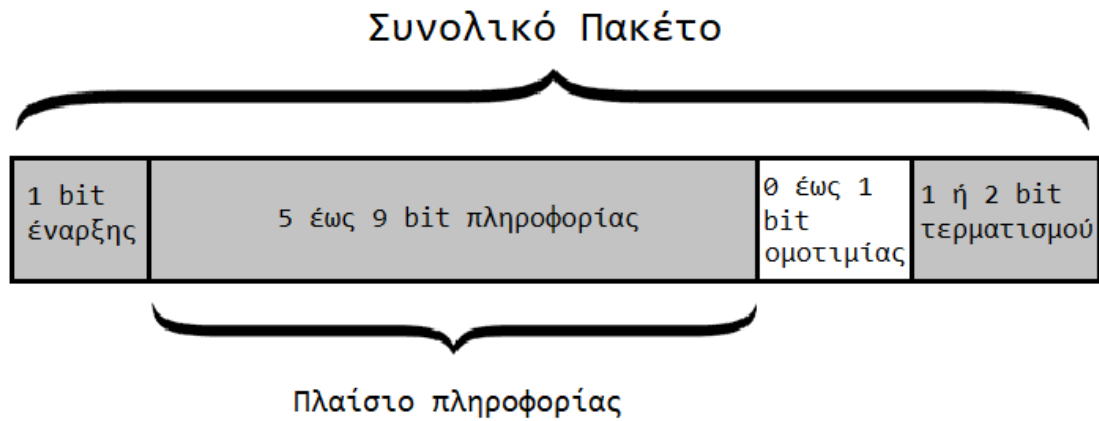


Εικόνα 2.12. Αναπαράσταση βηματικής αύξησης της τιμής ενός χρονιστή

Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης του απαριθμητή παλμών είναι ότι γίνεται μετατροπή αντίστασης σε παλμούς με το αναλογικό κύκλωμα έναντι της μετατροπής της τάσης εξόδου του αισθητήρα σε ψηφιακό σήμα με τη χρήση του μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα, όπου θα είχαμε απώλεια πληροφορίας, λόγω κβαντισμού των μετρούμενων τιμών. Έτσι επιτυγχάνουμε μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα και μεγαλύτερο εύρος αντιστάσεων σε αισθητήρες αντίστασης.

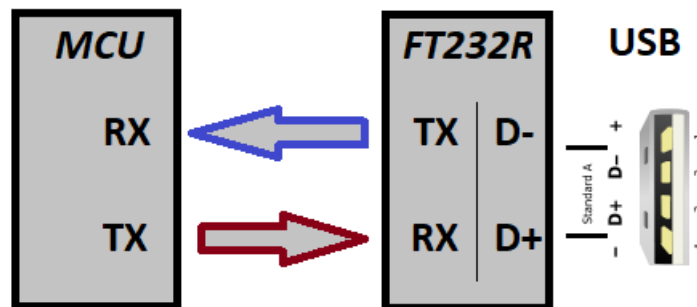
2.6 Πρωτόκολλο UART

Μια βασική διαδικασία για την ολοκλήρωση του συνολικού μετρητικού συστήματος είναι η διασύνδεσή του με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η προβολή, αρχικά, και στη συνέχεια η καταγραφή των αποτελεσμάτων από κάθε μέτρηση ξεχωριστά ολοκληρώνει το σκοπό ενός του συστήματος μέτρησης. Τα αποτελέσματα κάθε μέτρησης αποστέλλονται ως ψηφιακά δεδομένα μέσω του πρωτοκόλλου USART. Είναι ένα σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνίας, το οποίο είναι ευέλικτο και απλό στη χρήση του, ενώ συναντάται σε όλους του ς ηλεκτρονικούς υπολογιστές.



Εικόνα 2.13. Αναπαράσταση πακέτου μετάδοσης

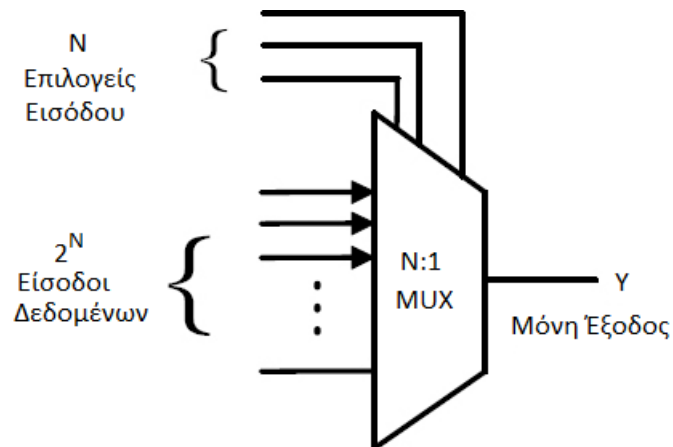
Οι αριθμοί που προκύπτουν κυμαίνονται από 16-bit μέχρι 32-bit σε μέγεθος. Σε κάθε λήψη / αποστολή δεδομένων, μεταφέρεται ένα πακέτο δεδομένων μεγέθους 8-bit, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Συνεπώς η μετάδοση του αποτελέσματος μιας μέτρησης γίνεται σταδιακά.



Εικόνα 2.14. Σύνδεση με το ολοκληρωμένο κύκλωμα FTDI και μετά σε socket USB

2.7 ΠΟΛΥΠΛΕΚΤΗΣ (MULTIPLEXER)

Με τη χρήση ενός πολυπλέκτη επιτυγχάνουμε τη σύνδεση πολλαπλών πηγών με ένα κύκλωμα μέσω μίας και μοναδικής γραμμής. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιούμε τον αριθμό των συνολικών διασυνδέσεων, συνεπώς και την πολυπλοκότητα του κυκλώματος. Ως πολυπλέκτης (N:1) ορίζεται το συνδυαστικό κύκλωμα που αποτελείται από N γραμμές εισόδου S_N και μία μοναδική γραμμή εξόδου Y. Ένας πολυπλέκτης διαθέτει n επιλογείς A_n με $N=2^n$, που δέχονται δυαδικές πληροφορίες και ρυθμίζουν ποια από τις N γραμμές θα συνδεθεί με την έξοδο του κυκλώματος Y.

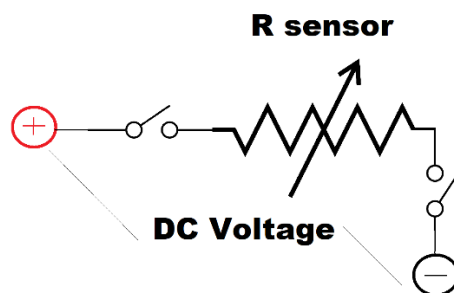


Εικόνα 2.15. Αναπαράσταση λειτουργίας πολυπλέκτη

Ανάλογα τις λογικές τιμές των επιλογέων εισόδου καθορίζεται ποια είσοδος μεταβιβάζεται στην έξοδο Y. Για έναν πολυπλέκτη 8:1, ο πίνακας αληθείας είναι ο εξής:

Τιμές Επιλογέων			Έξοδος
A ₀	A ₁	A ₂	Y
0	0	0	S ₁
1	0	0	S ₂
0	1	0	S ₃
1	1	0	S ₄
0	0	1	S ₅
1	0	1	S ₆
0	1	1	S ₇
1	1	1	S ₈

Στην περίπτωση μας, ένα και μόνο κύκλωμα ταλάντωσης τελεστικών ενισχυτών είναι αρκετό για να οδηγήσει ένα πλήθος αισθητήρων, οι οποίοι συνδέονται στις εισόδους δεδομένων.



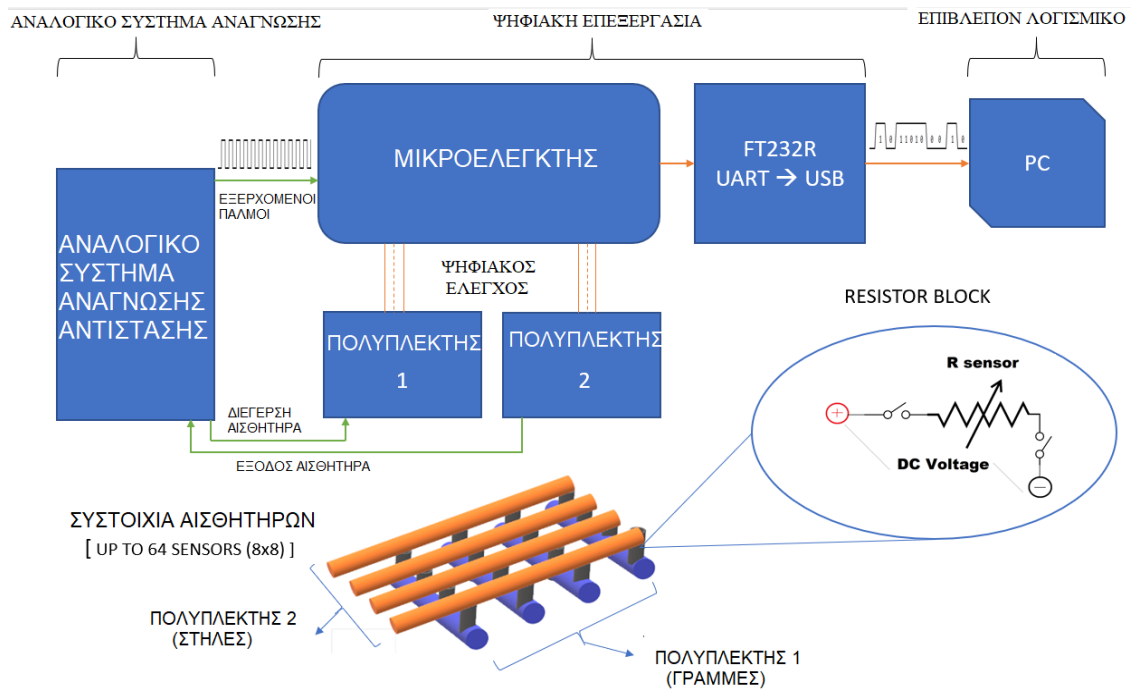
Εικόνα 2.16. Επιλογείς σχηματισμού κλειστού κυκλώματος σε έναν αισθητήρα μέσω πολυπλεκτών

2.8 Ροή σήματος (signal flow)

Αρχικά η πλακέτα συνδέεται σε μια θύρα USB ενός υπολογιστή, η οποία παρέχει και την συνεχή τάση τροφοδοσίας για όλα τα επιμέρους ολοκληρωμένα κυκλώματα. Ταυτόχρονα ενεργοποιούνται και οι πολυπλέκτες από τον ακροδέκτη EN, που είναι και αυτός συνδεδεμένος με την τάση τροφοδοσίας. Αφού εκτελεστούν οι καταχωρημένες εντολές στο μικροελεγκτή, η πρώτη είσοδος, S_0 , και των δύο πολυπλεκτών μεταβιβάζεται στις εξόδους τους αντίστοιχα και το κύκλωμα ταλάντωσης των τελεστικών ενισχυτών κλείνει το κύκλωμα με τον πρώτο αισθητήρα.

Η έξοδος του αναλογικού κυκλώματος των τελεστικών ενισχυτών συνδέεται στον ακροδέκτη PB1 του μικροελεγκτή. Ο χρονισμός του μετρητή T1 καθορίζεται από τη συχνότητα των παλμών εισόδου. Παράλληλα, ο δεύτερος χρονιστής T3, που έχει κοινό χρονικό σημείο εκκίνησης με τον T1, αυξάνει την τιμή του. Μόλις η τιμή του χρονιστή T1 φτάσει την προκαθορισμένη, από τον χρήστη, τιμή, ενεργοποιείται μια διακοπή, όπου σημαίνει και το τέλος της μέτρησης.

Ο σχεδιασμός ενός πίνακα ανάγνωσης αισθητήρων απαιτεί τη χρήση δύο πολυπλεκτών. Η τοπολογία της σύνδεσης ενός πίνακα αισθητήρων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

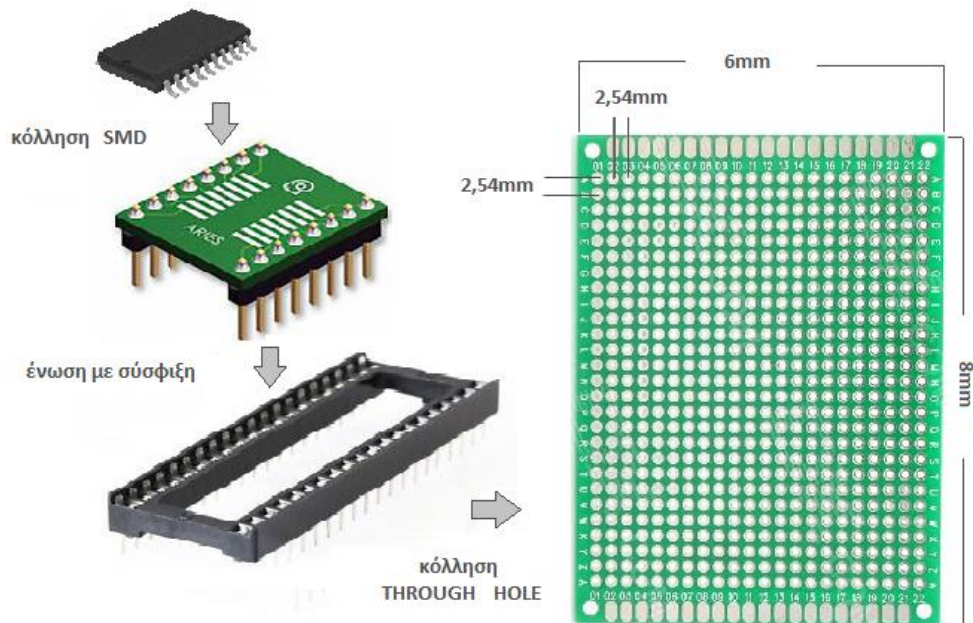


Εικόνα 2.16. Διάγραμμα Μπλοκ του μετρητικού συστήματος

2.9 Υλοποίηση σε τυπωμένο κύκλωμα PCB

Για την υλοποίηση του μετρητικού συστήματος σε φυσικό επίπεδο, χρησιμοποιήθηκε μια διάτρητη πλακέτα δύο όψεων. Όλες οι τοποθετήσεις των επιμέρους εξαρτημάτων καθώς και οι διασυνδέσεις έγιναν με θερμή κόλληση. Το υλικό κόλλησης ήταν σύρμα κασσίτερου διαμέτρου 0.5mm, ώστε να έχουμε ακρίβεια και έλεγχο σε κάθε κόλληση. Η χρήση επιπρόσθετης ρητίνης (εκτός της ενσωματωμένης ρητίνης στο κέντρο του σύρματος) κρίθηκε απαραίτητη, προκειμένου να αποφευχθεί η ανάπτυξη οξειδίων, λόγω μεγάλης θερμοκρασίας (~320°C – 330°C), και κατά συνέπεια επιπρόσθετη αντίσταση στις επαφές. Ειδικά σε ψηφιακά σήματα, η εμφάνιση παρασιτικών αντιστάσεων και χωρητικοτήτων μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένη μετάδοση ή και απώλεια πληροφορίας. Γι' αυτό το λόγο οι κολλήσεις οφείλουν να είναι 'καθαρές' από οξείδια και οι διασυνδέσεις να είναι βραχείς, όσο αυτό είναι δυνατό, ανάλογα με την πολυπλοκότητα του σχηματικού του κυκλώματος. Στο επόμενο στάδιο, η πλακέτα καθαρίζεται με καθαρή ακετόνη, η οποία αφαιρεί την περίσσεια ρητίνη. Κατά περιπτώσεις χρησιμοποιούμε και μηχανικό τρόπο για την αφαίρεση της ρητίνης παράλληλα με την ακετόνη. Μετά από έναν οπτικό έλεγχο για τυχόν εμφανή λάθη, έγινε ηλεκτρολογικός έλεγχος για ανεπιθύμητα βραχυκυκλώματα, και διασφάλιση της

συνέχειας του σήματος σε ένα σύνολο διασυνδέσεων, όπως η συνέχεια των συνδέσεων συνεχούς τροφοδοσίας σε όλο το κύκλωμα. Τα εξαρτήματα κολλήθηκαν αρχικά σε breakout boards, ανάλογα με τον τύπο των αποτυπωμάτων τους. Τέλος τοποθετήθηκαν τα εξαρτήματα στις αντίστοιχες υποδοχές και η πλακέτα συνδέθηκε με USB σε θύρα προσωπικού υπολογιστή, η οποία παρέχει και την τροφοδοσία του συστήματος.



Εικόνα 2.17. Δομή επιμέρους στοιχείων της πλακέτας

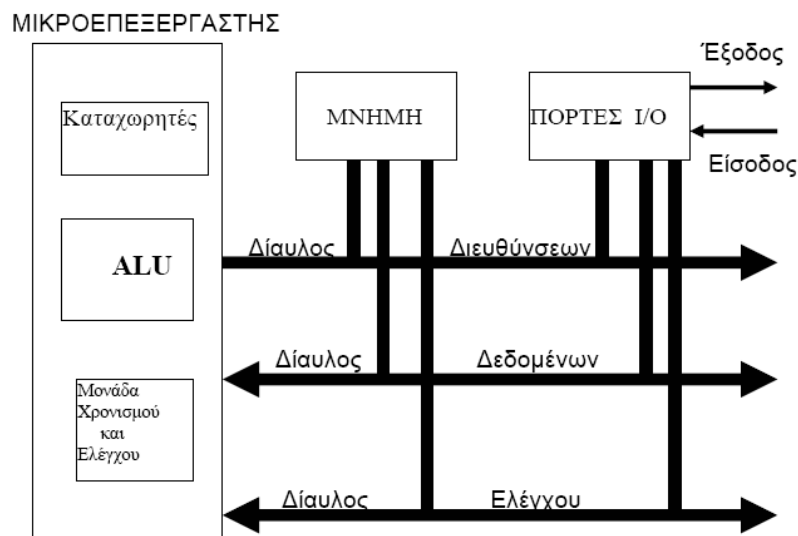
Η τελική δομή της πλακέτας φαίνεται στην εικόνα 2.16.



Εικόνα 2.18. Τελική μορφή της πλακέτας

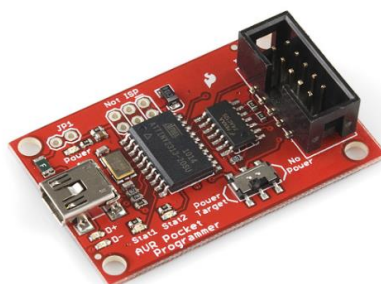
2.10 Προγραμματισμός του μικροελεγκτή

Ο προγραμματισμός ενός μικροελεγκτή είναι η διαδικασία καθορισμού των εντολών που απαιτούνται, ώστε ο μικροελεγκτής να εκτελέσει μια εργασία. Οι εντολές εκτελούνται σειριακά. Συγκεκριμένα είναι η διαδικασία τροποποίησης των τιμών που αποθηκεύονται στους καταχωρητές του. Υπάρχουν διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας με το λογισμικό προγραμματισμού.



Εικόνα 2.19. Διάγραμμα ροής ενός μικροελεγκτή

Η κατασκευάστρια εταιρία των μικροελεγκτών AVR, Atmel, διαθέτει αναπτυξιακό περιβάλλον που περιλαμβάνει επεξεργαστή κειμένου, συμβολομεταφραστή (assembler), μεταφραστή γλώσσας C (Compiler) και ενσωματωμένη υποστήριξη για τα συνήθη πρωτόκολλα προγραμματισμού, όπως ISP, TPI και PDI, το AVR Studio. Το hardware διασύνδεσης με την πλακέτα είναι ο pocket Avr programmer.



Εικόνα 2.20. Συσκευή προγραμματισμού pocket AVR programmer

Οι ακροδέκτες PB5 (MISO), PB6 (MOSI), PB7 (SCK), RESET και η τροφοδοσία DC (Vcc / GND) χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση με το AVR Programmer μέσω του ISP.

Σκοπός είναι η ανάπτυξη ενός συνόλου εντολών που θα εκτελεί ο μικροελεγκτής για την καταγραφή των παλμών εξόδου του αναλογικού κυκλώματος και τη μετάδοση του αποτελέσματος μέσω του σειριακού πρωτοκόλλου. Για τη διάταξη της συστοιχίας αισθητήρων, η ανάγνωση θα γίνεται σειριακά, ενώ θα προηγείται της μέτρησης (καταγραφής παλμών), η επιλογή εισόδων στους πολυπλέκτες.

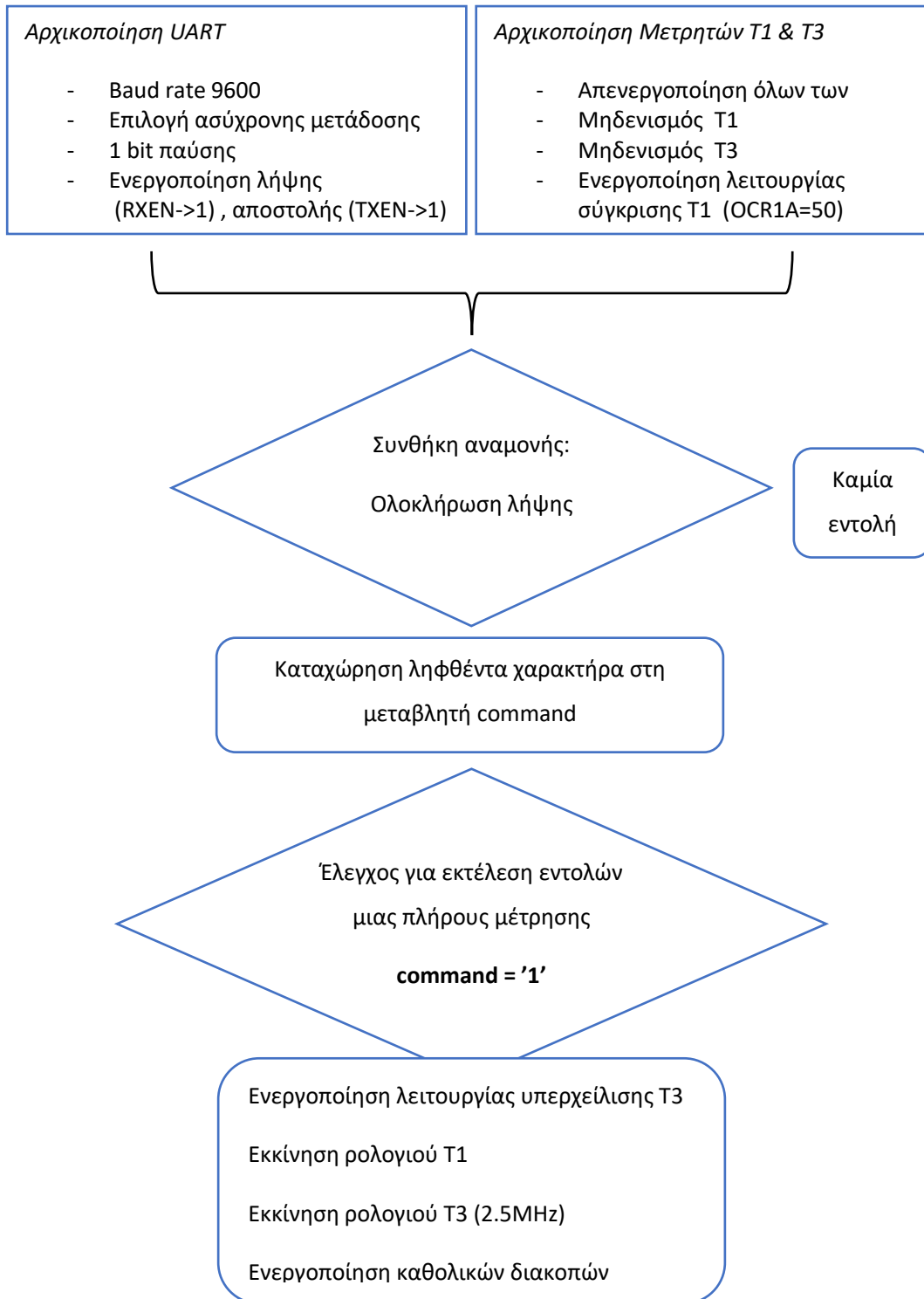
Η περίοδος της συχνότητας λειτουργίας είναι ένας κύκλος μηχανής. Για τα 20MHz, ένας κύκλος μηχανής διαρκεί 50nsec, ενώ η διάρκεια για την εκτέλεση μια εντολής εξαρτάται από το μήκος των λέξεων που αυτή αποτελείται. Δηλαδή μια εντολή τριών λέξεων εκτελείται σε 150nsec.

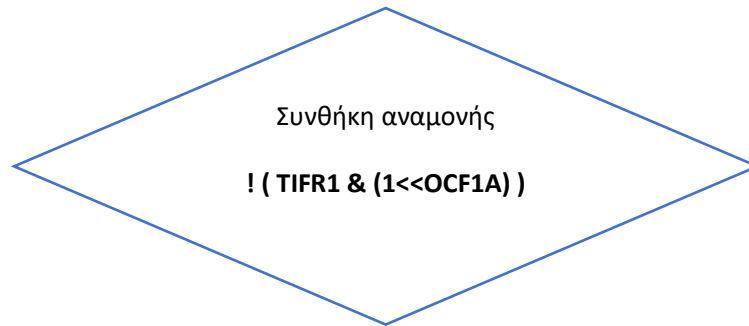
Όλοι οι μικροελεγκτές ATmega διαθέτουν μια ειδική ομάδα καταχωρητών, γνωστές ως ασφάλειες (fuses). Ο ATmega έχει τρεις ασφάλειες των 8-bit, LOW Fuse, HIGH Fuse και EXTENDED Fuse, που ρυθμίζουν καίριες λειτουργίες του, όπως τη συχνότητα λειτουργίας, την ενεργοποίηση προγραμματισμού μέσω ISP, τη ενεργοποίηση εργαλείου αναγνώρισης σφαλμάτων (JTAG) και άλλες. Η αρχική συχνότητα λειτουργίας καθορίζεται μέσω ενός ενσωματωμένου ταλαντωτή συχνότητας 8MHz στο 1/8 του ταλαντωτή, δηλαδή στα 1MHz. Η αλλαγή συχνότητας λειτουργίας στα 20MHz, με συνδεδεμένο τον αντίστοιχο κρύσταλλο προϋποθέτει τη ρύθμιση της LOW fuse στην τιμή 0xFF.

Στη συνέχεια δοκιμάστηκε ο χρονισμός του ATmega, γράφοντας έναν απλό κώδικα εναλλαγής λογικής κατάστασης, λογικού 1 σε λογικό 0, σε έναν ακροδέκτη εξόδου με καθυστέρηση 500ms ανάμεσα στις αλλαγές. Στον ακροδέκτη συνδέθηκε μια δίοδος φωτεινής εκπομπής (LED), ώστε να παρακολουθούμε το αποτέλεσμα της εκτέλεσης των εντολών. Σε περίπτωση που η επιθυμητή συχνότητα είναι διαφορετική από την πραγματική, η εναλλαγή έχει ορατές αποκλίσεις.

Στη συνέχεια προγραμματίστηκαν οι καταχωρητές για το πρωτόκολλο UART

Avr studio, isp, atmega 1284, fuses για 20MHz, dokimi timer, dokimi uart,





Καμία
εντολή

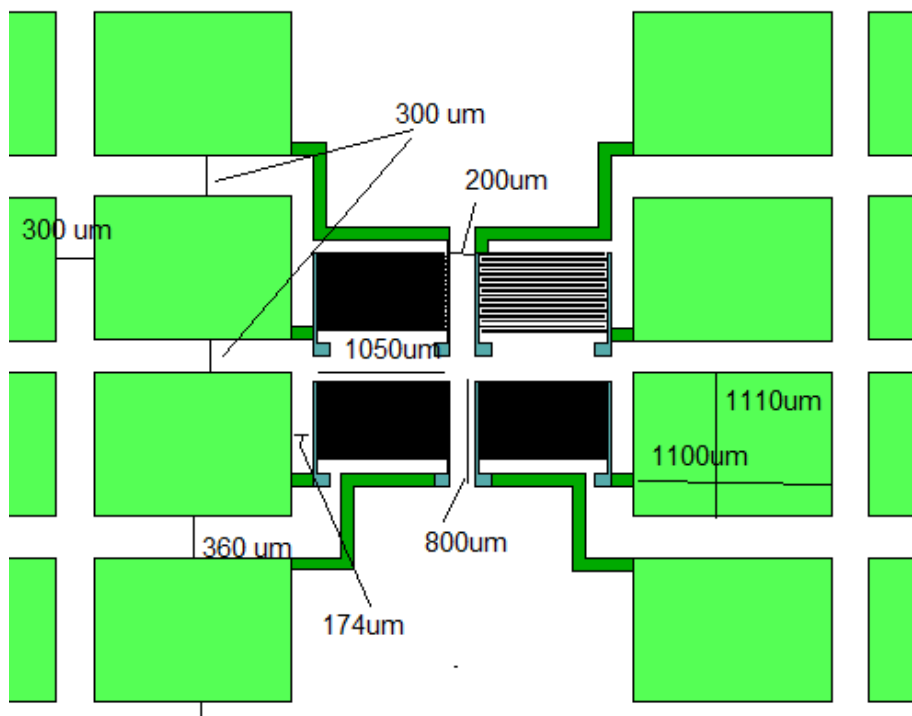
ISR – υπερχείλιση
χρονιστή T3
counter3++ :
απαριθμεί τις

ISR – αντιστοίχιση
T1 στην τιμή 50
Λήξη μέτρησης 50
παλμών

3. Χαρακτηριστικά του αισθητήρα παραμόρφωσης

3.1 Διαστάσεις και γεωμετρία

Με τη χρήση αλληλοσυνδεδεμένων ηλεκτροδίων είναι δυνατή η ανάπτυξη πολλών αισθητήρων ανάμεσα σε γειτονικά – κοντινά – ηλεκτρόδια, διατεταγμένοι παράλληλα μεταξύ τους. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι η σχετικά μικρή συνολική αντίσταση και η μείωση του μήκους του κάθε αισθητήρα. Για έναν δίκτυο N αισθητήρων αντίστασης, η συνολική αρχική αντίσταση μειώνεται κατά N^2 , σε σχέση με την αντίσταση διάταξης σε σειρά.



Εικόνα 3.1. Μάσκα αισθητήρα

3.2 Υπόστρωμα αισθητήρων παραμόρφωσης

Η χρήση του πολυιμιδίου προτιμάται σε εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις, καθώς είναι ένα πολύ ανθεκτικό και ταυτόχρονα εύκολα διαχειρίσιμο υλικό. Μπορεί να διατηρείται

σταθερό, ως προς τις διαστάσεις του, σε θερμοκρασίες έως και 300°C, έχει μεγάλη αντίσταση αντίδρασης με πολλούς χημικούς διαλύτες και σε συνδυασμό με το χαμηλή του μάζα το καθιστά καλή επιλογή για υπόστρωμα τυπωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.



Εικόνα 3.2. Πολυιμίδιο σε διάφορες εφαρμογές

Το πολυιμίδιο χρησιμοποιείται ως ελαστικό υπόστρωμα σε πολλές εφαρμογές στους αισθητήρες δίνοντας έτσι τη δυνατότητα μεγάλης παραμόρφωσης και μεγάλου εύρους μέτρησης.

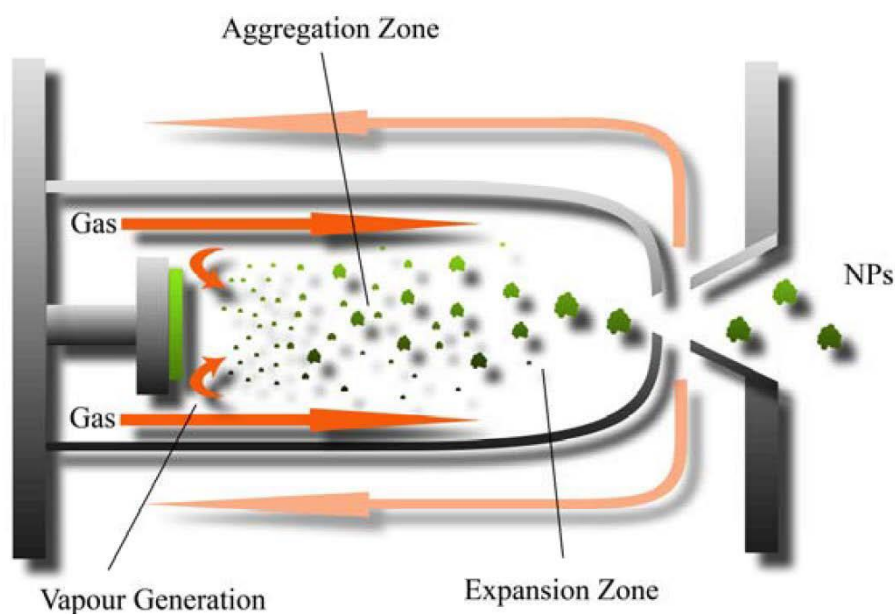
3.3 Διαδικασία παραγωγής των αισθητήρων

Οι διεργασίες για την παραγωγή των αισθητήρων απαιτούν ακρίβεια ακολουθώντας συγκεκριμένες προδιαγραφές σε κάθε στάδιο, προκειμένου να πετύχουμε ένα αποδεκτό τελικό αποτέλεσμα. Η πλειοψηφία των τεχνικών διεργασιών πραγματοποιείται στον καθαρό χώρο του Ε.Μ.Π. Αφετηρία αποτελεί ο σχεδιασμός της μάσκας των αισθητήρων, μέσω κατάλληλου σχεδιαστικού προγράμματος, η οποία θα καθορίσει και τη γεωμετρία τους. Το υλικό της μάσκας μπορεί να είναι χαλαζίας ή κάποιο πλαστικό και αποτελείται από σκοτεινές και διαφανείς περιοχές, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί πολλές φορές για τη δημιουργία μιας διάταξης. Στη συνέχεια εναποτίθεται στο υπόστρωμα του αισθητήρα μια ποσότητα ρητίνης (διάλυμα πολυμερούς) και όλο το σώμα υπόκειται σε φυγοκέντριση (spin-coating), ώστε να είναι ομοιόμορφο το πάχος της ρητίνης. Σε αυτό το στάδιο απαιτείται και θέρμανση του δείγματος, ώστε να εξατμιστεί ο η περίσσεια του διαλύτη και να σταθεροποιηθεί η ρητίνη. Έπειτα ακολουθεί η φωτολιθογραφία.

Το δείγμα εκτίθεται σε υπεριώδη ακτινοβολία, μέσω λάμπας UV, όπου παρεμβάλεται η μάσκα. Το φως θα καταφέρει να φτάσει την επιφάνεια της ρητίνης, μόνο μέσω των διαφανών περιοχών της μάσκας, ενώ οι σκοτεινές θα το απορροφήσουν. Λόγω της φωτοευαισθησίας του πολυμερούς, αλλάζει η σύστασή του και συγκεκριμένα

σταθεροποιείται στις περιοχές που ακτινοβολήθηκαν, αν είναι θετικού τόνου, ενώ αντίθετα αποδομείται λόγω της ακτινοβολίας, αν είναι αρνητικού τόνου. Το επόμενο στάδιο είναι η επιμετάλλωση. Στο δείγμα εναποτίθεται χρυσός και έπειτα εμβαπτίζεται ολόκληρο σε ακετόνη. Μετά από ένα χρονικό διάστημα, η ακετόνη αποδομεί εντελώς τις περιοχές της ρητίνης που έχουν ακτινοβοληθεί (εδώ χρησιμοποιούμε θετικού τόνου) παρασύροντας και το χρυσό (lift-off), ενώ παραμένουν οι περιοχές που (δεν) ακτινοβολήθηκαν. Σε αυτό το στάδιο είναι πλέον εμφανή τα ηλεκτρόδια και οι επαφές του αισθητήρα.

Στο τελευταίο στάδιο γίνεται εναπόθεση των νανοσωματιδίων, στην περιοχή των αλληλοσυνδεμένων ηλεκτροδίων, σε θάλαμο κενού.



Εικόνα 3.3. Θάλαμος κενού παραγωγής νανοσωματιδίων

3.4 ΦΥΣΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Τα νανοσωματίδια αποτελούν το ενεργό υλικό στον αισθητήρα, μέσω του οποίου μπορούμε να ανιχνεύουμε εξωτερικές μεταβολές. Η αγωγιμότητα στο διδιάστατο δίκτυο νανοσωματιδίων διέπεται κυρίως από φαινόμενα σήραγγας μεταξύ μετάλλου – μονωτή – μετάλλου. Για τον υπολογισμό του ρεύματος λόγω φαινομένου σήραγγας αναφέρουμε αρχικά την πιθανότητα ένα ηλεκτρόνιο να μεταβεί σε κενή ενεργειακή κατάσταση ενός γειτονικού νανοσωματιδίου

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-\mu)/k_B T}}$$

όπου μ το χημικό δυναμικό (ενέργεια Fermi σε $T=0K$). Αντίστοιχα, η πιθανότητα να είναι κατειλημμένη η ενεργειακή στάθμη είναι $[1 - f(E)]$ και η συνολική πιθανότητα μετάβασης προκύπτει από το γινόμενο

$$f(E) * [1 - f(E)]$$

Το φράγμα δυναμικού που συναντά ένα ηλεκτρόνιο κατά τη μετάβαση είναι

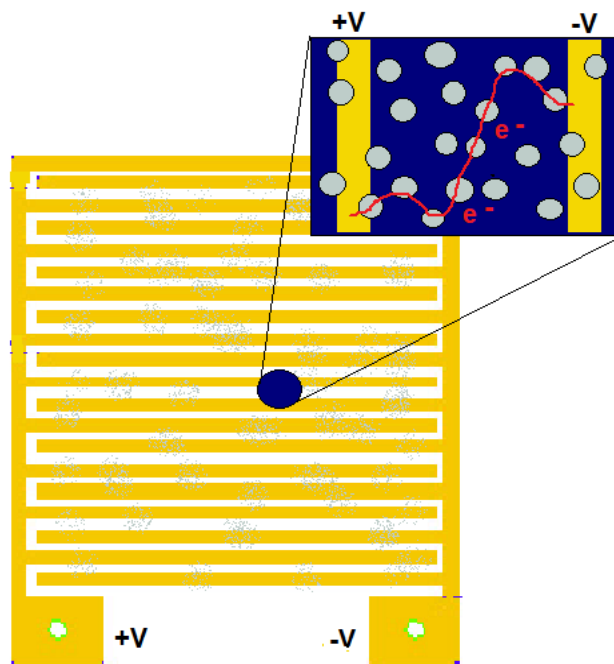
$$U = W + E_f - E$$

και με την επιβολή μιας εξωτερικής διαφοράς δυναμικού V κατά τη διεύθυνση x , μειώνεται σε

$$U = W + E_f - E - \frac{eVx}{L}$$

όπου L το πλάτος του φράγματος, δηλαδή η απόσταση δύο γειτονικών νανοσωματιδίων. Το συνολικό ρεύμα που διαρέει το δίκτυο των νανοσωματιδίων,

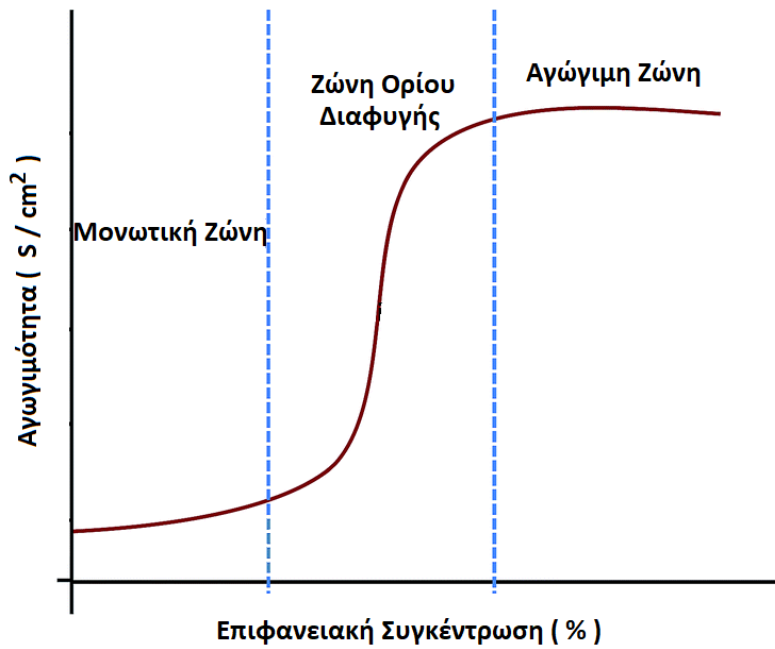
σύμφωνα με [1] θα είναι $I = \frac{4\pi e}{\hbar} \int_0^\infty \rho(E)\rho(E + eV_b) |T(E)|^2 [f(E) - f(E + eV_b)] dE$.



Εικόνα 3.4. Διδιάστατο δίκτυο νανοσωματιδίων στους αισθητήρες

Σκοπός της εναπόθεσης των νανοσωματιδίων ως ενεργό υλικό είναι η δημιουργία αγωγίμων δρόμων μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτροδίων με διαφορετικό δυναμικό το καθένα. Κατά την εναπόθεση των νανοσωματιδίων στην ενεργή επιφάνεια του αισθητήρα, δημιουργούνται νησίδες διαφόρων μεγεθών, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την αγωγιμότητα του αισθητήρα. Η κατανομή τους είναι τυχαία πάνω στην επιφάνεια και η αγωγιμότητα έχει άμεση σχέση με την επιφανειακή συγκέντρωσή τους. Από μία συγκεκριμένη επιφανειακή συγκέντρωση και πάνω σχηματίζεται ένας τουλάχιστον αγωγίμος δρόμος. Αυτό είναι το λεγόμενο όριο διαφυγής (percolation threshold). Κάτω από αυτό το όριο δεν έχουμε αγωγιμότητα, ενώ ξεπερνώντας το κατά πολύ, όταν η επιφανειακή πυκνότητα είναι πολύ μεγάλη, η αγωγιμότητα αυξάνεται. Συγκεκριμένα, η εξάρτηση της αγωγιμότητας από την επιφανειακή πυκνότητα είναι εκθετική, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα.

Όταν στη διάταξη ενός αισθητήρα έχουμε είτε πολύ μικρή είτε πολύ υψηλή (περιοχή ΙΙΙ του διαγράμματος 2.3) αγωγιμότητα, η ευαισθησία θα είναι μειωμένη. Στην πρώτη περίπτωση, το δίκτυο βρίσκεται στην μονωτική κατάσταση, (περιοχή Ι του διαγράμματος 2.3) καθώς τα νανοσωματίδια είναι απομονωμένα μεταξύ τους και οι αγωγίμοι δρόμοι είναι ελλιπείς. Κατά συνέπεια η παραμόρφωση του υποστρώματος δεν μπορεί να επηρεάσει το διδιάστατο δίκτυο νανοσωματιδίων, ώστε να παρατηρήσουμε μακροσκοπικά μια ανιχνεύσιμη αλλαγή στην αντίσταση και να μετρήσουμε ένα τροποποιημένο σήμα εξόδου. Αντίθετα στην κατάσταση μεγάλης αγωγιμότητας στο δίκτυο, παρατηρούμε μεγάλο πλήθος παράλληλων αγωγίμων δρόμων. Κατά την παραμόρφωση του υποστρώματος, η διακοπή τμημάτων ή ολόκληρων αγωγίμων δρόμων θα είναι ανεπαίσθητη στην μεταβολή της συνολικής αντίστασης του φιλμ, καθώς τα ηλεκτρόνια μπορούν εύκολα να διαφύγουν μέσω άλλων διαθέσιμων αγωγίμων δρόμων. Η εύρεση μιας ενδιάμεσης κατάστασης, όπου η μεταβολή του αριθμού των αγωγίμων δρόμων ακολουθεί το εξωτερικό ερέθισμα αποτελεί πρόκληση στην κατασκευή μιας νανοδιάταξης. Αν αυτή η σχέση είναι γραμμική, τότε οι χαρακτηρίζουμε τις διατάξεις ως ωμικές.



Εικόνα 3.5. Συνάρτηση επιφανειακής συγκέντρωσης - αγωγιμότητας

Φυσικός μηχανισμός λειτουργίας του αισθητήρα: Η επιβολή μιας εξωτερικής πίεσης παραμορφώνει ολόκληρη την επιφάνεια του δείγματος, με αποτέλεσμα η απόσταση των νανοσωματιδίων να αυξάνεται. Τα ηλεκτρόνια συναντούν μεγαλύτερο φράγμα δυναμικού και

3.5 Μοντέλο παραμόρφωσης αισθητήρα

Για να καθορίσουμε την παραμόρφωση ε , ως το ερέθισμα εισόδου που εισάγουμε στον αισθητήρα, οφείλουμε να τη συνδέσουμε με την κάθετη μετατόπιση d του εμβόλου. Για τους υπολογισμούς μας, χρησιμοποιούμε τον αντίστοιχο τύπο της παραμόρφωσης ε που ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του μήκους ($L' - L_0$) προς το αρχικό μήκος L_0 .

$$\varepsilon = \frac{L' - L_0}{L_0}$$

Σύμφωνα με το μοντέλο παραμόρφωσης ελαστικού σώματος, υπάρχει ένα επίπεδο x-y ανάμεσα στην άνω και κάτω επιφάνεια ενός παραμορφωμένου σώματος που καμπυλώνεται αλλά διατηρεί το αρχικό του μήκος και ονομάζεται ουδέτερο επίπεδο.

Όταν το σώμα βρίσκεται στην ελαστική περιοχή, το ουδέτερο επίπεδο συναντάται στο μέσο του πάχους του σώματος $z = \frac{d}{2}$.

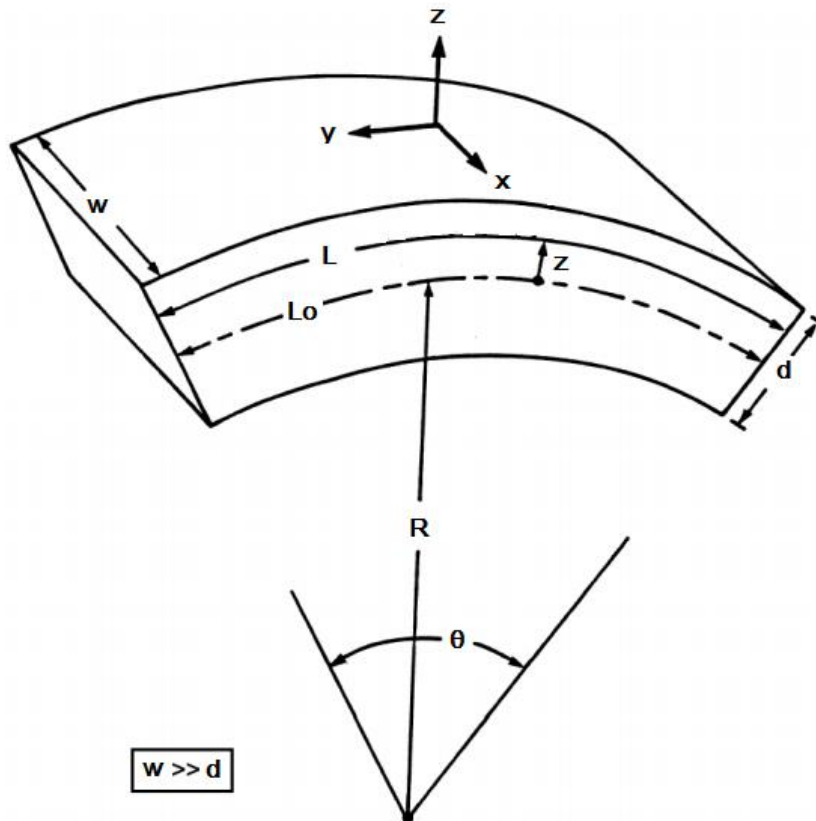
εικόνα

Χρησιμοποιώντας το Πυθαγόρειο Θεώρημα για το τρίγωνο

Υπολογίζοντας την ακτίνα καμπυλότητας r ως συνάρτηση της κάθετης μετατόπισης s , έχουμε

$$r^2 = \left(\frac{L_0}{2}\right)^2 + (r - s)^2 \Rightarrow 2rs = \frac{L_0^2}{4} + s^2 \Rightarrow r = \frac{L_0^2 + 4s^2}{8s}$$

Η συνολική ακτίνα καμπυλότητας θα είναι $R = r + z$, όπου $z = \frac{d}{2} = 150 \mu\text{m}$



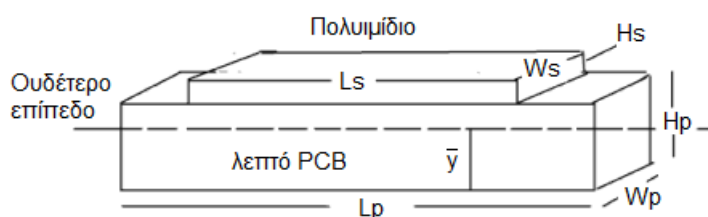
Εικόνα 3.6. Μοντέλο παραμόρφωσης ελαστικής δοκού

Εφόσον το δοκίμιο που χρησιμοποιούμε είναι ένα σύνθετο σώμα, που αποτελείται από δύο υποστρώματα, πρέπει να λάβουμε υπόψιν τη διαφοροποίηση της ακτίνας καμπυλότητας και του πάχους σε σχέση με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του μεμονωμένου δείγματος. Θεωρούμε ότι το πάχος της ταινίας συγκόλλησης ανάμεσα στο δείγμα και στο λεπτό PCB είναι αμελητέο και δεν θα συμπεριληφθεί στους

υπολογισμούς μας. Αρχικά υπολογίζουμε τη απόσταση του νέου ουδέτερου επιπέδου στον άξονα y από τη σχέση

$$\bar{y} = \frac{A_{pcb} \cdot y_{pcb} + A_s \cdot y_s}{A_{pcb} + A_s} = \frac{(L_{pcb} \cdot W_{pcb}) \cdot y_{pcb} + (L_s \cdot W_s) \cdot y_s}{(L_{pcb} \cdot W_{pcb}) + (L_s \cdot W_s)}$$

με διαστάσεις μήκους $L_{pcb} = 13.000\mu m$ και πλάτους $W_{pcb} = 600\mu m$ για το λεπτό PCB και αντίστοιχα $L_s = 600\mu m$ και $W_s = 600\mu m$ για το δείγμα (sample). Το πάχος του δείγματος είναι $D_s = 125\mu m$ και του PCB $D_{pcb} = 200\mu m$, οπότε έχουμε τις αποστάσεις της κάθε επιφάνειας από το ουδέτερο επίπεδο του PCB υποστρώματος, $y_s = 100\mu m$ και $y_{pcb} = 162,5\mu m$. Με αντικατάσταση προκύπτει ότι $\bar{y} = 219,5\mu m$.



Εικόνα 3.7. Γεωμετρία δοκιμίου παραμόρφωσης

3.6 Ανάπτυξη επιφάνειας συστοιχίας αισθητήρων

Η κατασκευή της συστοιχίας των αισθητήρων πραγματοποιήθηκε εξ' ολοκλήρου στο χώρο του εργαστηρίου, προκειμένου να ανταποκρίνεται κατάλληλα στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Σκοπός ήταν η δημιουργία μιας επιφάνειας, με ευαισθησία ανάλογη στην κάθετη, σε αυτήν, πίεση. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατή η ανίχνευση της δύναμης και του σημείου εφαρμογής της στο επίπεδο της επιφάνειας. Το εύρος της ανιχνεύσιμης δύναμης αποτέλεσε βασικό κριτήριο για την επιλογή των υλικών, της γεωμετρίας της επιφάνειας και της τοπολογίας των αισθητήρων.

Αρχικά επιλέχτηκε ένα ελαστικό υλικό ως υπόστρωμα για τους αισθητήρες, το οποίο έπρεπε να πληρεί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- 1) Να είναι ελαστικό, ώστε κατά την εφαρμογή της δύναμης να κάμπτεται – παραμορφώνεται – μεταφέροντας έτσι την παραμόρφωση στους αισθητήρες.

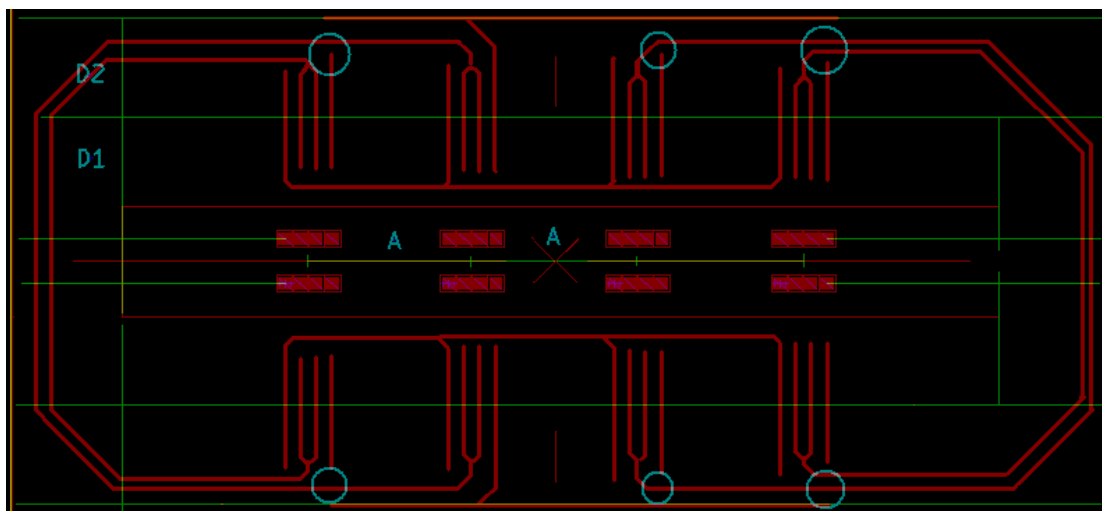
Ιδανικά θα θέλαμε μια επιφάνεια από πολυιμίδιο , πάνω στο οποίο να είναι ‘τυπωμένοι’ οι αισθητήρες αποφεύγοντας έτσι ασυνέχειες στην επιφάνεια. Ωστόσο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα διαφορετικό ελαστικό υλικό με παρόμοιο, το οποίο να έχει ένα σχετικά μεγάλο εύρος παραμορφώσεων. Η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης που μπορούμε να του ασκήσουμε εξαρτάται και από τις διαστάσεις του, όπως θα δούμε στη συνέχεια.

- 2) Να βρίσκεται στη ελαστική περιοχή παραμόρφωσης κατά την επιβολή εξωτερικής τάσης. Αυτό σημαίνει ότι μετά το πέρας της δράσης πάνω στην επιφάνεια, αυτή πρέπει να επανέρχεται στην αρχική κατάσταση (θέση στον y-άξονα). Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να έχουμε επαναληψιμότητα και αξιοπιστία στις μετρήσεις. Διαφορετικά, δημιουργούνται παραμένουσες τάσεις πάνω στην επιφάνεια που επιφέρουν αντίστοιχη έξοδο από τον αισθητήρα χωρίς όμως αυτή να αντιπροσωπεύει κάποιο εξωτερικό ερέθισμα.

Το συγκεκριμένο πειραματικό κομμάτι αποτέλεσε πρόκληση, καθώς έγιναν πολλές δοκιμές τόσο στο σχεδιασμό όσο και στην υλοποίηση της επιφάνειας, έως ότου να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Βασική δυσκολία ήταν η δημιουργία επαφής με τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα, ώστε να καταλήξουμε στις υποδοχές των πολυπλεκτών. Ενδεικτικά θα αναφέρουμε τις δύο επικρατέστερες εκδοχές για την επιφάνεια αφής στον αρχικό σχεδιασμό και τα αδύναμα σημεία τους.

Επιλέχθηκε, αρχικά, ένα ελαστικό υπόστρωμα από PVC 1,5mm, όπου θα τοποθετούνταν οι αισθητήρες σε διάταξη τετραγώνου. Μια δεύτερη επιφάνεια με λεπτά χάλκινα σύρματα ευθυγραμμισμένα με τις χρυσές επαφές του κάθε αισθητήρα εναποτίθεντο πάνω στο PVC με τα δείγματα, όπου η ηλεκτρική επαφή γινόταν μέσω της πίεσης μεταξύ των χρυσών επαφών του αισθητήρα και των χάλκινων συρμάτων. Παράλληλα σχηματίστηκαν οι κατάλληλες ηλεκτρικές διακλαδώσεις, για 16 αισθητήρες, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η επαφή δεν γινόταν σε όλους τους αισθητήρες, ενώ χανόταν σχεδόν ολοκληρωτικά κατά την επιβολή παραμόρφωσης στο σύνθετο σώμα των δύο επιφανειών. Η μεγαλύτερη επιμήκυνση της άνω επιφάνειας σε σχέση με την κάτω και η παράλληλη πάκτωση των άκρων τους, οδήγησε στη δημιουργία ενός κενού μεταξύ τους, το οποίο αυξανόταν σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις, καθιστώντας αδύνατη τη μέτρηση. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε και στις δοκιμές με άλλα υλικά.

Μέσω της μελέτης της παραπάνω κατασκευής καταλήξαμε στο συμπέρασμα, ότι πρέπει να αναπτυχθούν δύο διαφορετικές επιφάνειες αλλά στο ίδιο επίπεδο. Η μια επιφάνεια θα είναι σταθερή και θα περιέχει τις διασυνδέσεις και τις προεκτάσεις των επαφών του αισθητήρα. Η δεύτερη επιφάνεια θα είναι ελαστική σε σχήμα λωρίδας, όπου θα είναι στερεωμένοι οι αισθητήρες, κατάλληλα στοιχισμένοι στις προεκτάσεις. Η γεωμετρία όλου του επιπέδου των δύο επιφανειών σχεδιάστηκε στο ελεύθερο λογισμικό υλοποίησης τυπωμένων κυκλωμάτων Kicad.



Εικόνα 3.8. Σχέδιο της επιφάνειας στήριξης στο Kicad

Στην εικόνα 3.8 διακρίνουμε τη λωρίδα σε πράσινο πλαίσιο, κατά μήκος του σχεδίου, στο κεντρικό τμήμα, με σχηματική αναπαράσταση των αισθητήρων, των οποίων τα κέντρα απέχουν $A = 1,5cm$ μεταξύ τους. Το αποτύπωμα των αισθητήρων δεν θα βρίσκεται στο τελικό αποτέλεσμα και σχεδιάστηκε μόνο για τον ακριβή υπολογισμό ορισμένων αποστάσεων και την ευθυγράμμιση των προεκτάσεων. Επίσης θα είναι αποσπώμενο. Το υπόλοιπο τμήμα θα είναι η σταθερή επιφάνεια με τις συνδέσεις.

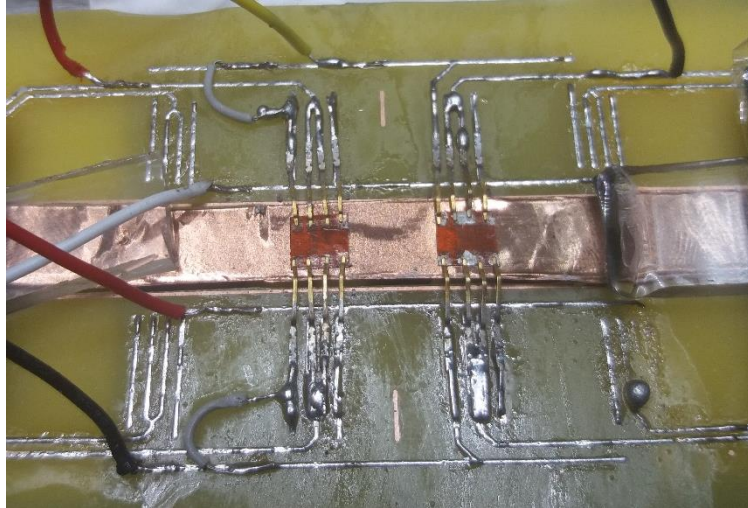
Η επόμενη φάση μετά το σχεδιασμό είναι η υλοποίησή του σε τυπωμένο κύκλωμα. Τα βήματα για την υλοποίηση σε τυπωμένο κύκλωμα είναι τα εξής:

1. Ασπρόμαυρη εκτύπωση του σχεδίου σε φωτογραφικό χαρτί με θερμικό εκτυπωτή
2. Μηχανική λείανση της πλακέτας χαλκού και καθαρισμός με αλκοόλη 95%

3. Εναπόθεση υδατικού διαλύματος ακετόνης 70% v/v στην πλακέτα και τοποθέτηση του φωτογραφικού χαρτιού με την πλευρά του σχεδίου πάνω στην πλακέτα
4. Μετά από 5sec ασκείται κάθετη πίεση για 2-3min, μέχρι να εξατμιστεί πλήρως ο διαλύτης (ακετόνη)
5. Τοποθέτηση της πλακέτας σε νερό, ώστε να αποκολληθεί το χαρτί, χωρίς να φύγει το αποτύπωμα του μελανιού (αντίστοιχη διαδικασία με το lift-off)
6. Χημική αποχάλκωση με διάλυμα 40% HCl και 60% H₂O₂
7. Καθαρισμός του μελανιού με ακετόνη

Η κεντρική λωρίδα του PCB αφαιρέθηκε μηχανικά και αντικαταστάθηκε με μια επιφάνεια από PVC διαστάσεων W=10cm, L=80cm και D=1mm, πάνω στην οποία κολλήθηκε μια ταινία χαλκού. Η άνω πλευρά της ταινίας έχει υψηλή πρόσφυση, το οποίο βοηθάει στο να μένουν σταθερά τα δείγματα κατά τη διάρκεια της άσκησης πίεσης. Μετά την τοποθέτηση των αισθητήρων και την ευθυγράμμισή τους στις επαφές του πλαισίου όλη η επιφάνεια τοποθετείται στη διάταξη παραμόρφωσης του εργαστηρίου, με μηχανική στήριξη στα άκρα της και με το έμβολο να βρίσκεται κάτω από το κέντρο της ελαστικής επιφάνειας.

Πιέζουμε το έμβολο μέχρις ότου οι προεκτάσεις του πλαισίου να έρθουν σε επαφή με τις χρυσές επαφές όλων των αισθητήρων. Κατά συνέπεια, στην αρχική θέση της μέτρησης υπάρχει ήδη μια παραμόρφωση. Έπειτα εκτελούμε μια μεγάλη περιστροφή το βερνιέρο, εισάγοντας έτσι μια μεγάλη παραμόρφωση. Η επιφάνεια των αισθητήρων παραμένει σε αυτή τη θέση για 100sec, και μετά επιστρέφει στην αρχική, όπου παραμένει άλλα 100sec. Αυτός ο κύκλος μέτρησης εκτελείται συνολικά 4 φορές, ενώ παράλληλα σε κάθε στάδιο γίνεται σειριακή ανάγνωση της αντίστασης 8 συνολικά αισθητήρων.

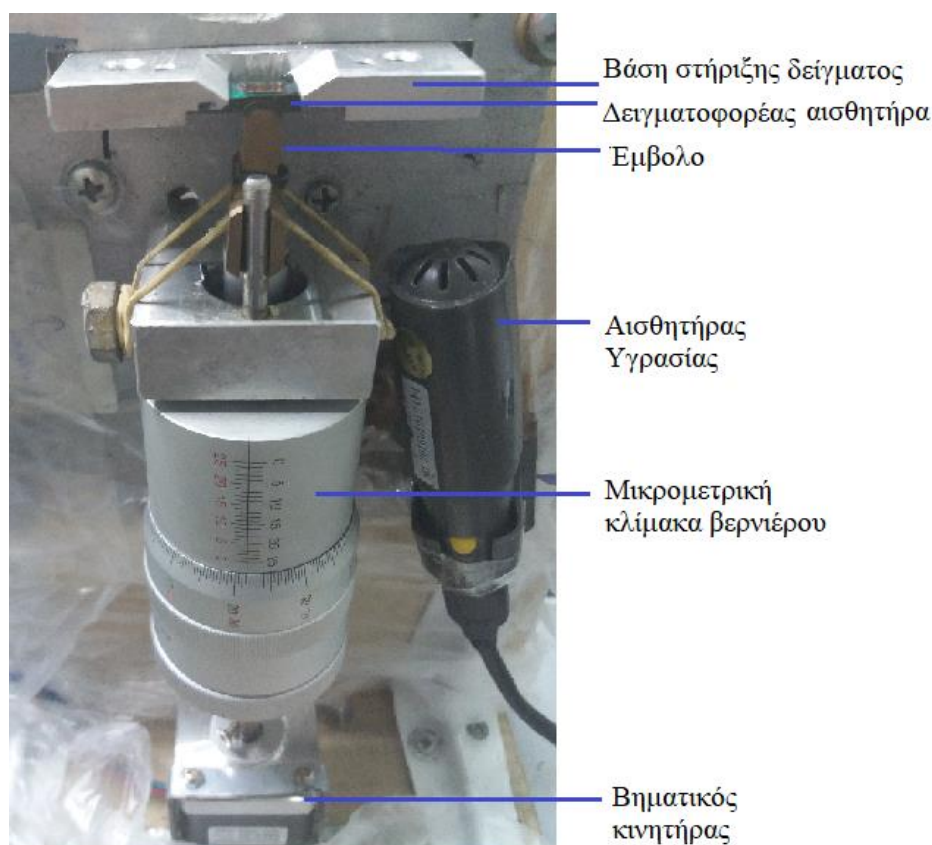


Εικόνα 3.9. Πλακέτα PCB με διασυνδέσεις αισθητήρων και επιφάνεια παραμόρφωσης στο κέντρο

4. Εργαστηριακή διάταξη

4.1 Διάταξη παραμόρφωσης

Ο χαρακτηρισμός σε παραμόρφωση είναι το τελικό στάδιο αξιολόγησης ενός αισθητήρα, όπου ταυτόχρονα μετριέται και η σταθερότητα της ηλεκτρικής του αντίστασης με το χρόνο. Η διάταξη παραμόρφωσης είναι τοποθετημένη σε οπτική τράπεζα, αποφεύγοντας έτσι ανεπιθύμητους κραδασμούς για σταθερότητα στη μέτρηση και αποτελείται από τρία τμήματα: 1) μια μεταλλική βάση όπου τοποθετείται το υπό μελέτη δοκίμιο, 2) ένα μικρομετρικό βερνιέρο ακρίβειας 5μm με ένα μεταλλικό έμβολο προσαρτημένο στο άνω άκρο του και 3) ένα βηματικό κινητήρα συνδεδεμένο ακλόνητα στην χειρολαβή του βερνιέρου, ο οποίος ρυθμίζει την περιστροφή του.



Εικόνα 4.1. Εργαστηριακή διάταξη άσκησης παραμόρφωσης

Το δοκίμιο αποτελείται από έναν πλαστικό, ελαστικό δειγματοφορέα διαστάσεων 13mm(M) x 6mm(Π) και ένα δείγμα τεσσάρων αισθητήρων διαστάσεων 6mm(M) x 6mm(Π). Στη διάταξη του εργαστηρίου, το δείγμα στερεώνεται μέσω ταινία υψηλής

ικανότητας συγκόλλησης στο μέσο της επιφάνειας ενός πλαστικού, ελαστικού δειγματοφορέα, το οποίο εφάπτεται στα άκρα του με τη μεταλλική βάση. Η συμμετρική στήριξη στα άκρα και η καλή συγκόλληση του δείγματος εξασφαλίζουν ομοιόμορφη παραμόρφωση τόσο στο δειγματοφορέα όσο και στο δείγμα.

Η παραμόρφωση στο δοκίμιο προκαλείται από το έμβολο που πιέζει κάθετα το μέσο του υποστρώματος, με αποτέλεσμα η μπροστινή επιφάνεια που βρίσκονται εκτεθειμένοι οι αισθητήρες να υπόκεινται σε εφελκυστική παραμόρφωση. Το μέγεθος της παραμόρφωσης καθορίζεται μέσω της κάθετης μετατόπισης του εμβόλου. Η ελάχιστη περιστροφή στην οπτική κλίμακα του βερνιέρου αντιστοιχεί σε κάθετη μετατόπιση 5 μ m,

Για τη μέτρηση της αντίστασης χρησιμοποιείται το Keithley 2400 sourcemeter, το οποίο μετράει την αντίσταση του αισθητήρα σε πραγματικό χρόνο. Η διάταξη παραμόρφωσης είναι κοινή για τους δύο τρόπους μέτρησης (keithley και PCB).



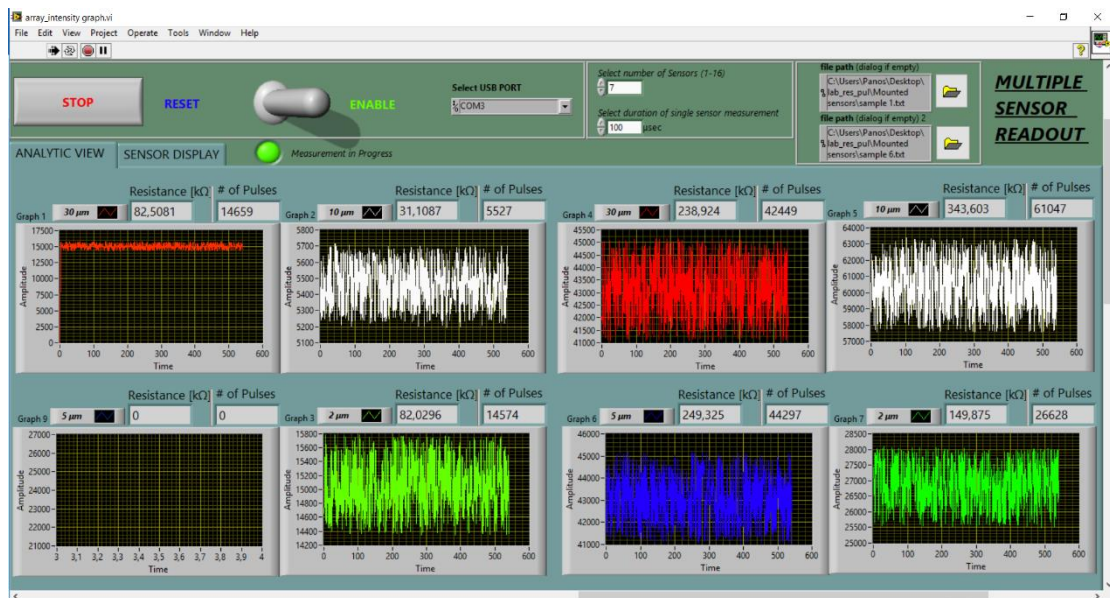
Εικόνα 4.2. Keithley 2400 sourcemeter

4.2 Λογισμικό καταγραφής στο Labview

Το τελικό βήμα για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού του μετρητικού συστήματος είναι ένα πρόγραμμα επεξεργασίας των εισερχόμενων δεδομένων στον υπολογιστή. Για αυτό το σκοπό σχεδιάστηκε εκ νέου ένα πρόγραμμα στην πλατφόρμα LABVIEW, που

θα επιβλέπει την μετρητική πλακέτα και θα είναι υπεύθυνο για τη συλλογή, την απεικόνιση και την καταγραφή των μετρήσεων.

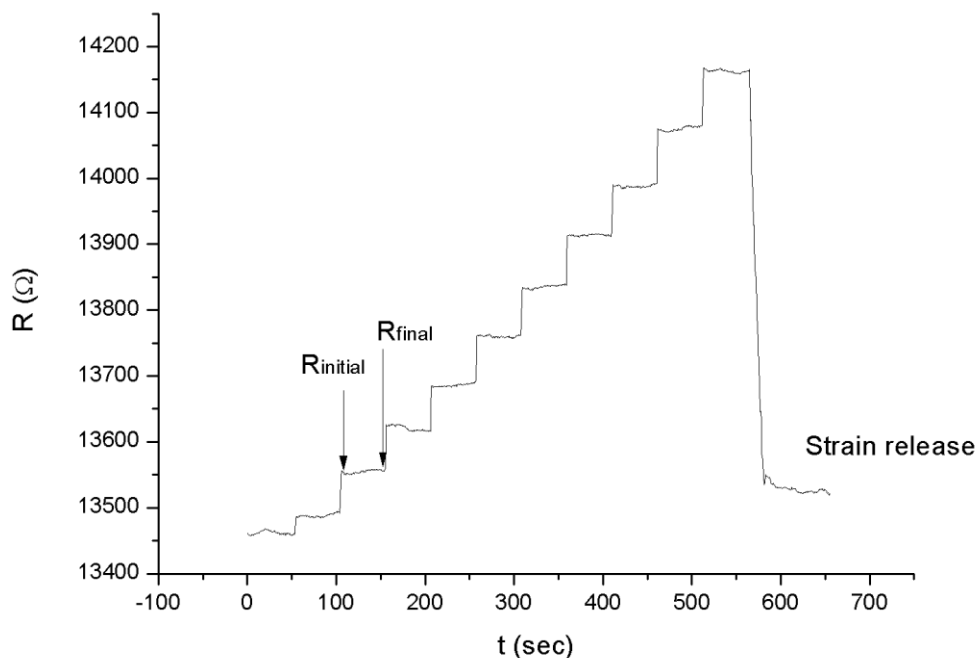
Το LABVIEW της National Instruments αποτελεί μια πλατφόρμα σχεδιασμού προγραμμάτων και παίζει κυρίαρχο ρόλο σε πολλά σύγχρονα μετρητικά συστήματα, ενώ στο αναπτυξιακό του περιβάλλον χρησιμοποιείται γραφικός κώδικας. Η αντίσταση του κάθε αισθητήρα απεικονίζεται σε αντίστοιχο διάγραμμα συναρτήσεως του χρόνου, ενώ οι τιμές αποθηκεύονται αυτόματα σε προκαθορισμένα αρχεία .txt. Για να αρχίσει η μέτρηση γυρνάμε το διακόπτη στη θέση ENABLE, ώστε να λάβει η πλακέτα την εντολή να αρχίσει τη μέτρηση. Υπάρχουν, τέλος, οι δυνατότητες επιλογής της διάρκειας μίας μέτρησης και ο αριθμός των αισθητήρων που θέλουμε να μετρήσουμε.



Εικόνα 4.3. Διεπαφή προγράμματος καταγραφής σε περιβάλλον Labview

5. Πειραματικά Αποτελέσματα

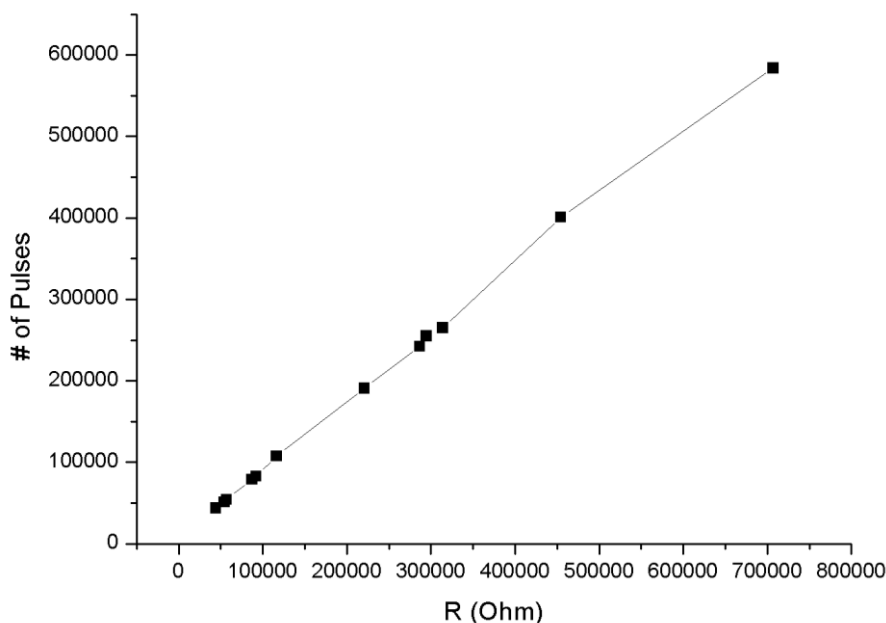
Παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων χαρακτηρισμού των αισθητήρων σε συνθήκες παραμόρφωσης. Λόγω πιθανής μεταβολής της αρχικής αντίστασης των αισθητήρων με το χρόνο ή λόγω υγρασίας, ο κάθε αισθητήρας μετρήθηκε διαδοχικά, αρχικά με το Keithley 2400 και αμέσως μετά με την μετρητικό σύστημα στην πλακέτα σε συνθήκες παραμόρφωσης. Ένα τυπικό διάγραμμα μέτρησης αντίστασης είναι το εξής.



Διάγραμμα 1. Βηματική απόκριση του αισθητήρα κατά την επιβολή αυξανόμενης παραμόρφωσης – απεικόνιση συνάρτησης R-t

Στο κάθε βήμα αυξάνεται η κάθετη μετατόπιση του εμβόλου, άρα και του δείγματος, κατά 20μm που αντιστοιχεί σε αύξηση της παραμόρφωσης κατά 0,02%. Η μέγιστη τιμή παραμόρφωσης ήταν 0,4% και ο αριθμός των βημάτων ορίστηκε στα 16 στα περισσότερα δείγματα. Ο αισθητήρας παρέμενε για 100sec σε κάθε κατάσταση παραμόρφωσης, ενώ ο χρόνος δειγματοληψίας ήταν 0,5sec.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε ένα διάγραμμα με τις αρχικές αντιστάσεις, όπως αυτές μετρήθηκαν με το Keithley 2400 και έπειτα με την πλακέτα.



Διάγραμμα 2. Γραφική απεικόνιση μετρούμενων παλμών (PCB) συναρτήσει της αρχικής αντίστασης R των αισθητήρων

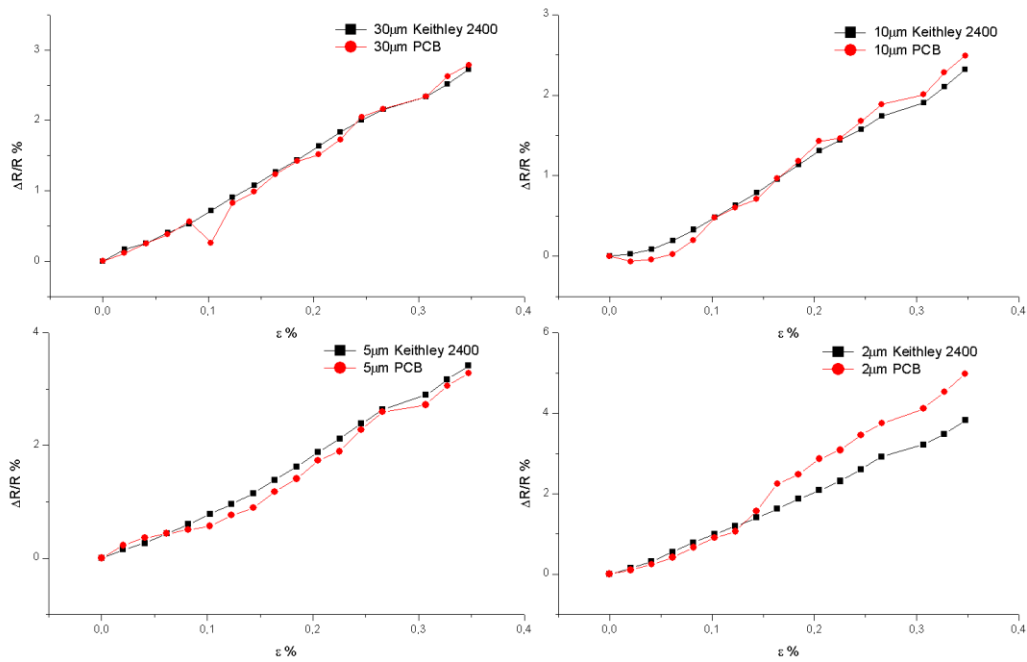
Η σχέση των καταγεγραμμένων παλμών με την αντίσταση είναι γραμμική όπως είχαμε προβλέψει και από τη θεωρία, μέσω της προσομοίωσης στο Multisim και συγκεκριμένα προκύπτει η γραμμική συνάρτηση

$$N_{out} = 829 \cdot R [k\Omega]$$

Η θεωρητική πρόβλεψη αυτής της καμπύλης είναι $N_{out} = 888 \cdot R [k\Omega]$, όπου βλέπουμε μια διαφορά της τάξης του 6,8% στο συντελεστή αναλογίας. Αυτό σημαίνει ότι πρακτικά θα μετρήσουμε λιγότερους παλμούς για την ίδια αντίσταση συγκριτικά με τη θεωρητική πρόβλεψη. Πιθανή αιτία είναι η ποιότητα του παλμού.

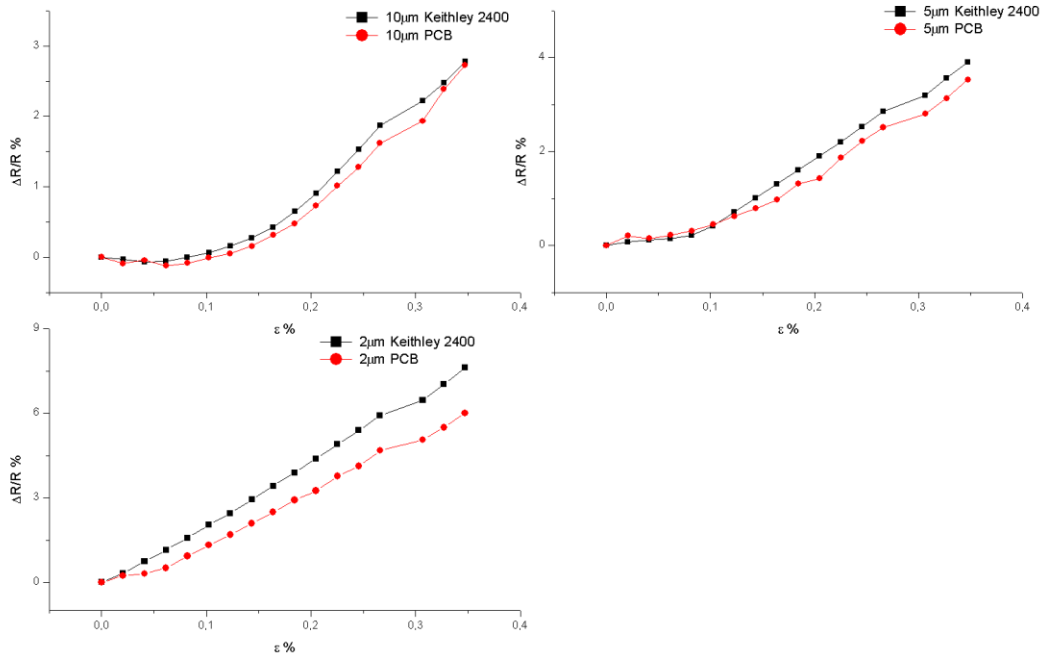
Στα ακόλουθα διαγράμματα εξάγουμε τις καμπύλες ευαισθησίας των αισθητήρων και κάνουμε σύγκριση των δύο μετρητικών συστημάτων.

	Απόσταση Ηλεκτροδίων	Παράγοντας g (Keithley 2400)	Παράγοντας g (PCB)
Δείγμα 1	30μm	8,02	8,37
	10μm	6,98	7,86
	5μm	10,12	9,66
	2μm	15,14	11,03



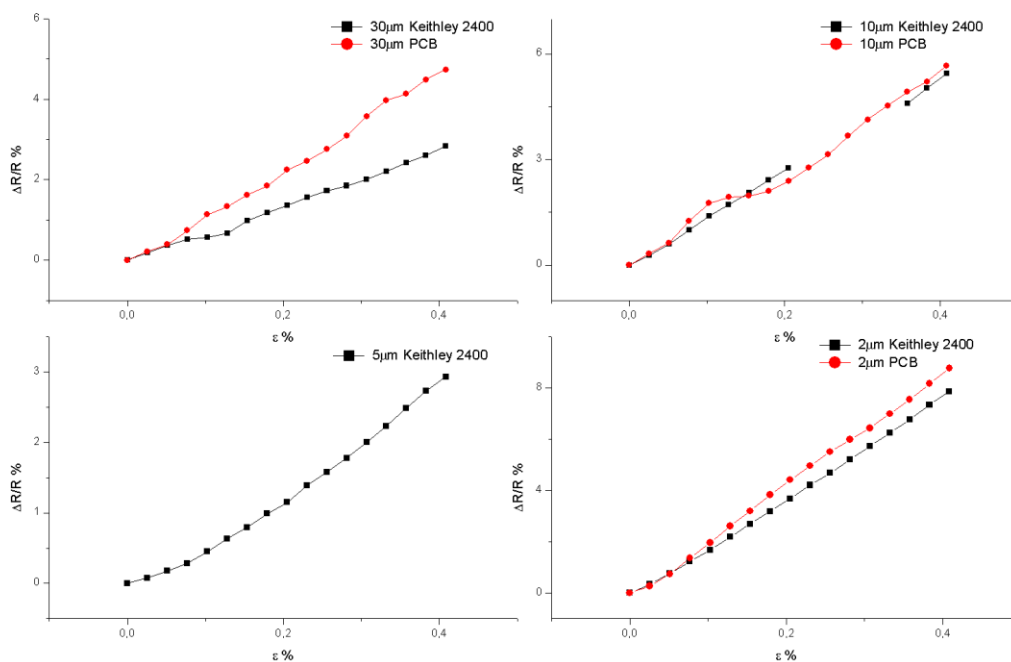
Διάγραμμα 3. Καμπύλες ευαισθησίας ($\Delta R/R\%$ - $\Delta L/L\%$) αισθητήρων δείγματος 1 με τους δύο τρόπους μέτρησης

	Απόσταση Ηλεκτροδίων	Παράγοντας g (Keithley 2400)	Παράγοντας g (PCB)
Δείγμα 2	10μm	8,60	8,08
	5μm	12,04	10,33
	2μm	22,81	18,05



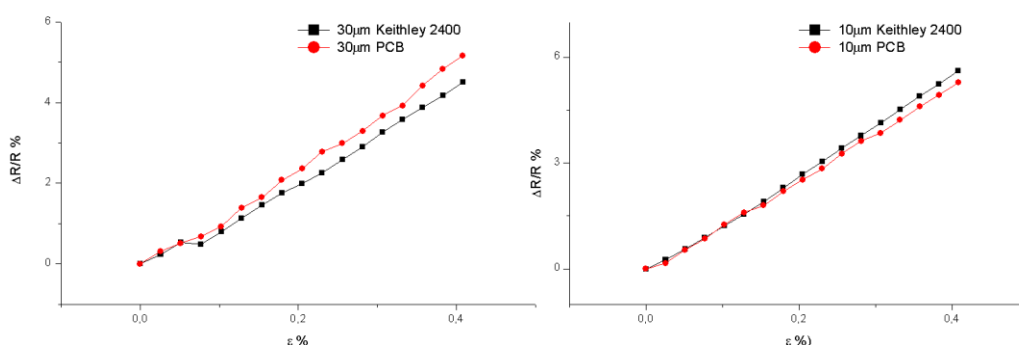
Διάγραμμα 4. Καμπύλες ευαισθησίας ($\Delta R/R\%$ - $\Delta L/L\%$) αισθητήρων δείγματος 2 με τους δύο τρόπους μέτρησης

	Απόσταση Ηλεκτροδίων	Παράγοντας g (Keithley 2400)	Παράγοντας g (PCB)
Δείγμα 3	30μm	6,87	11,94
	10μm	13,02	13,37
	5μm	7,42	--
	2μm	19,54	21,92



Διάγραμμα 5. Καμπύλες ευαισθησίας ($\Delta R/R\%$ - $\Delta L/L\%$) αισθητήρων δείγματος 3 με τους δύο τρόπους μέτρησης

	Απόσταση Ηλεκτροδίων	Παράγοντας g (Keithley 2400)	Παράγοντας g (PCB)
Δείγμα 4	30μm	11,24	12,73
	10μm	14,02	13,13



Διάγραμμα 6. Καμπύλες ευαισθησίας ($\Delta R/R\%$ - $\Delta L/L\%$) αισθητήρων δείγματος 4 με τους δύο τρόπους μέτρησης

Οι ευαισθησίες είναι οι κλίσεις των ευθειών που προκύπτουν από τα παραπάνω διαγράμματα και κυμάνθηκαν από 6,87, το ελάχιστο, μέχρι 22,81 το μέγιστο. Συγκρίνοντας τις καμπύλες ανά δείγμα παρατηρούμε αρχικά τις ποιοτικές ομοιότητες στη μορφή των ευθειών, αλλά και τις μικρές αποκλίσεις στους παράγοντες g (ευαισθησία).

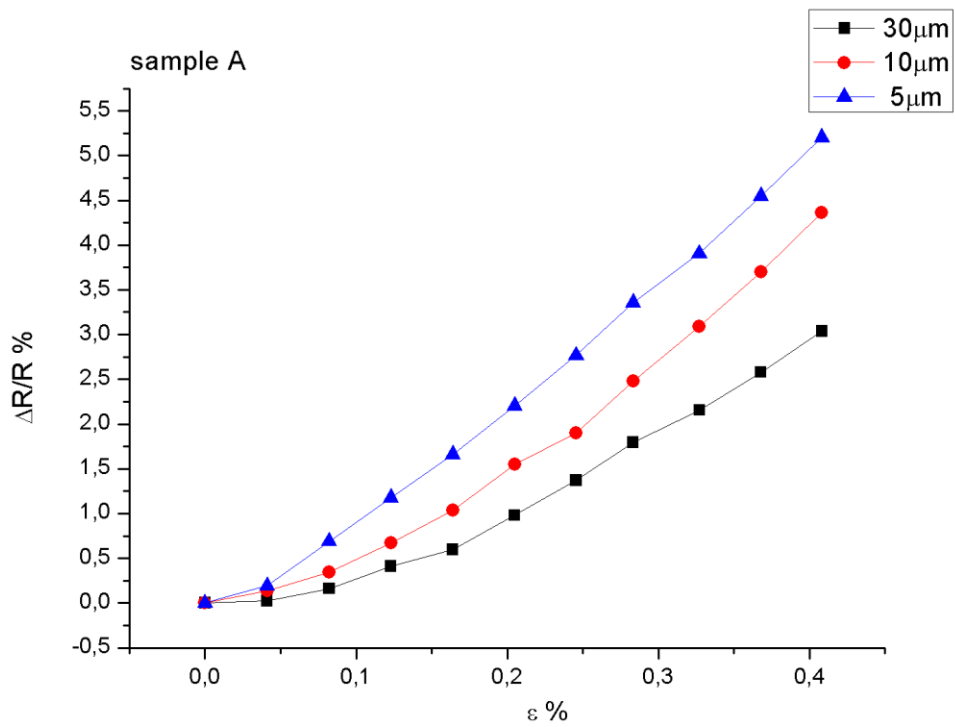
Κατά την επαναφορά του αισθητήρα, το έμβολο επανέρχεται στην αρχική του θέση και δεν ασκείται καμία εξωτερική πίεση, ενώ παράλληλα συνεχίζεται η μέτρηση της αντίστασής του. Η επιστροφή του εμβόλου στην αρχική του θέση γίνεται βηματικά, πραγματοποιώντας 16 περιστροφές αντίθετης, τώρα, φοράς αυτόματα μέσω του

προγράμματος οδήγησης και μία ακόμα χειροκίνητα για το μισό χαμένο βήμα κατά την αλλαγή φοράς περιστροφής. Η επαναφορά διαρκεί 6-7sec και η διάρκεια αυτού του βήματος ορίζεται κατά βούληση, ανάλογα την συμπεριφορά του εκάστοτε αισθητήρα. Ιδανικά αναμένουμε να επανέλθει η αντίσταση στην αρχική της τιμή, το οποίο και παρατηρήθηκε ότι σε μερικούς αισθητήρες. η αντίσταση επανερχόταν άμεσα κοντά στην αρχική της τιμή, ενώ σε άλλους η επαναφορά διαρκούσε κάποια λεπτά.

5.2 Χαρακτηρισμός συστοιχίας αισθητήρων

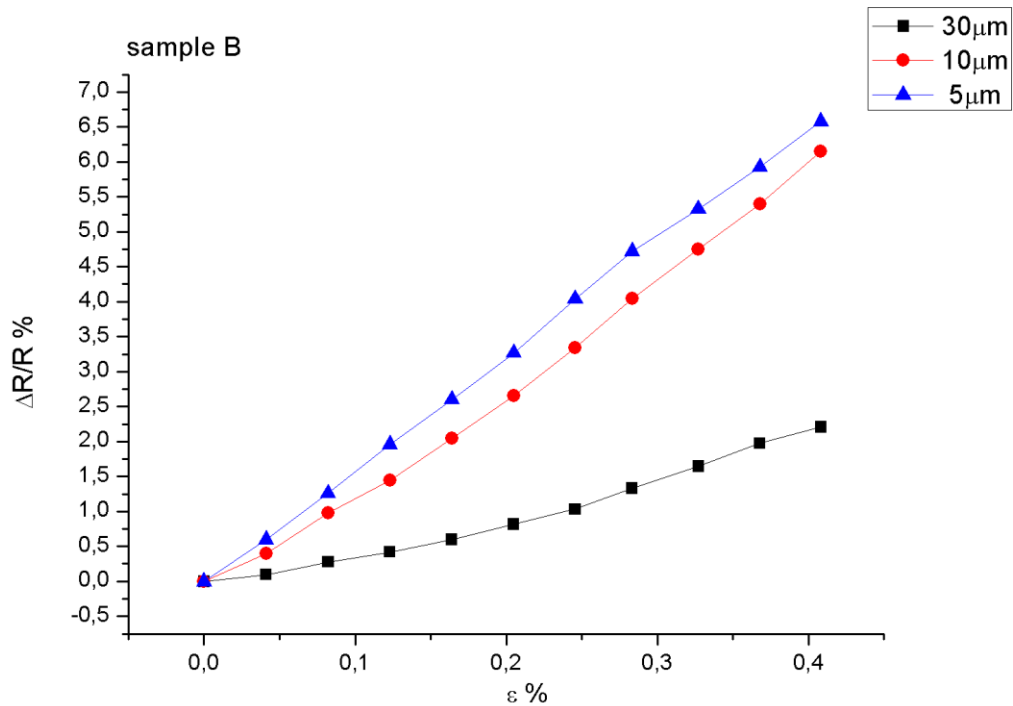
Στην επόμενη φάση του πειραματικού μέρους, χαρακτηρίστηκαν αρχικά δύο ακόμη δείγματα τεσσάρων αισθητήρων σε παραμόρφωση, μέσω της αρχικής εργαστηριακής διάταξης και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν πάνω στην επιφάνεια, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Σκοπός ήταν η ταυτόχρονη καταγραφή της μεταβολής της αντίστασής τους, ώστε να εξάγουμε την ποσοστιαία μεταβολή της παραμόρφωσης που ασκήσαμε, γνωρίζοντας τον παράγοντα της ευαισθησίας από τον αρχικό τους χαρακτηρισμό.

	Απόσταση Ηλεκτροδίων	Αρχική αντίσταση R_0	παράγοντας g
Δείγμα Α	30 μm	362.373,11 Ω	7,78
	10 μm	790.619,31 Ω	10,87
	5 μm	13.462,01 Ω	13,06



Διάγραμμα 7. Καμπύλες εναισθησίας τριών αισθητήρων του δείγματος A μετρούμενες με το Keithley

	Απόσταση Ηλεκτροδίων	Αρχική αντίσταση R_0	παράγοντας g
Δείγμα Β	30μm	178.498,3 Ω	5,55
	10μm	528.607,5 Ω	15,29
	5μm	23.040,67 Ω	16,36



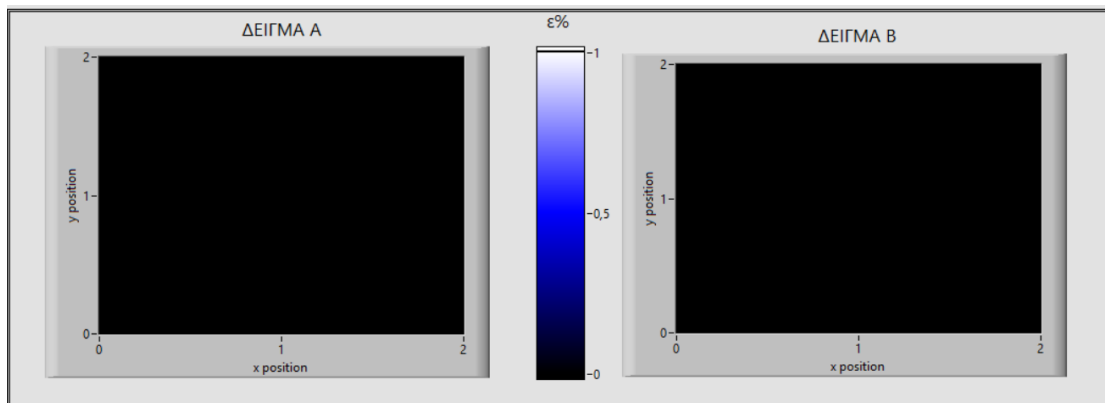
Διάγραμμα 8. Καμπύλες ευαισθησίας τριών αισθητήρων του δείγματος B μετρούμενες με το Keithley

Μέσω της σχέσης $\varepsilon\% = \frac{g}{\frac{\Delta R}{R}\%}$ υπολογίζουμε την παραμόρφωση που δημιουργήθηκε στο υπόστρωμα, όπως μετρήθηκε από τους αισθητήρες. Εκτελούμε συνολικά 4 κύκλους μετρήσεων, όπου μετατοπίζουμε την ελαστική λωρίδα κατά περίπου 250μm και έπειτα επιστρέφουμε στην αρχική θέση. Η χρονική διάρκεια κάθε βήματος είναι 100sec. Η διάταξη των αισθητήρων στο δείγμα είναι η εξής:

<i>30μm</i>	<i>5μm</i>	<i>30μm</i>	<i>5μm</i>
<i>10μm</i>	<i>2μm</i>	<i>10μm</i>	<i>2μm</i>

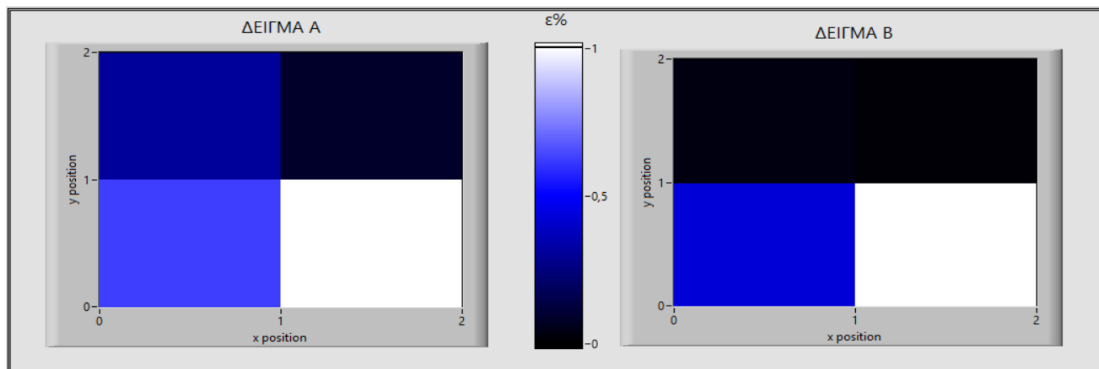
Παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα κάθε βήματος μέσω οπτικής κλίμακας, η οποία αντιστοιχεί σε ποσοστιαία μεταβολή της παραμόρφωσης, με μέγιστο το 1% (άσπρο) και ελάχιστο 0% (μαύρο). Οι ποσοστιαίες μεταβολές υπολογίζονται ως προς την αρχική αντίσταση του πρώτου κύκλου. Το κάθε παράθυρο απεικονίζει μια τετράδα αισθητήρων, το δείγμα A αριστερά και το δείγμα B δεξιά.

Κατάσταση ηρεμίας 1^{ος} κύκλος (αρχική θέση)



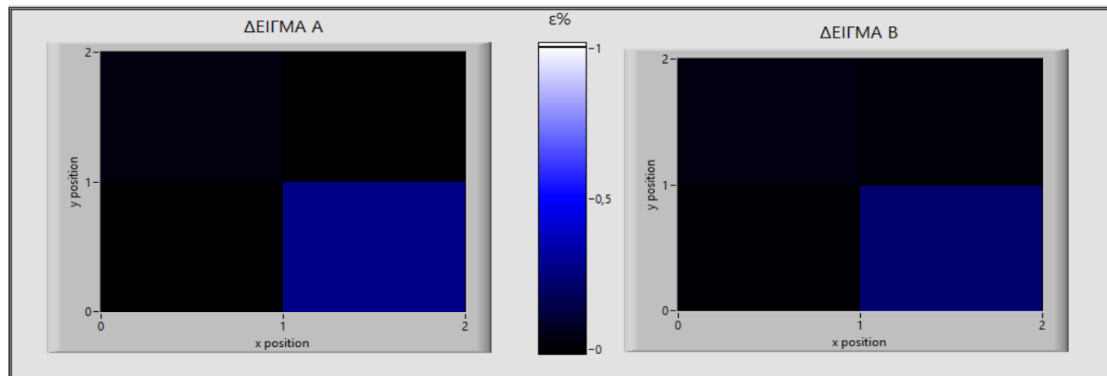
0	0	0	0
0	0	0	0

Κατάσταση παραμόρφωσης 1^{ος} κύκλος



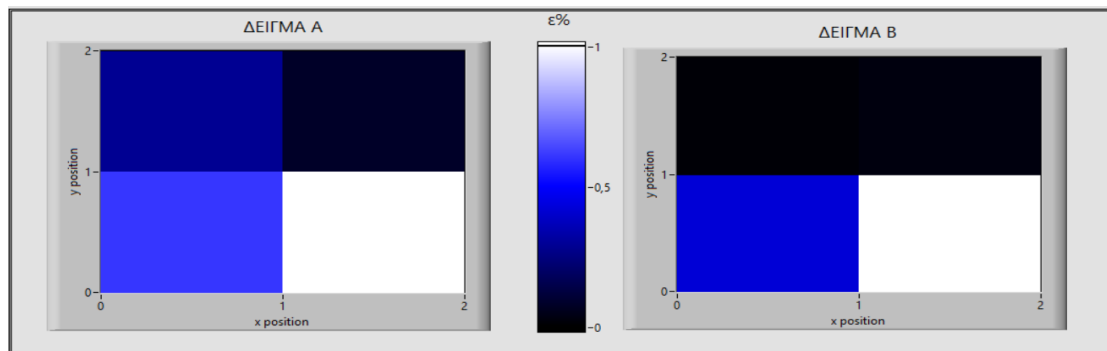
0,306	0,08	0,034	0,01
0,626	123,72	0,424	279,55

Κατάσταση ηρεμίας 2^{ος} κύκλος



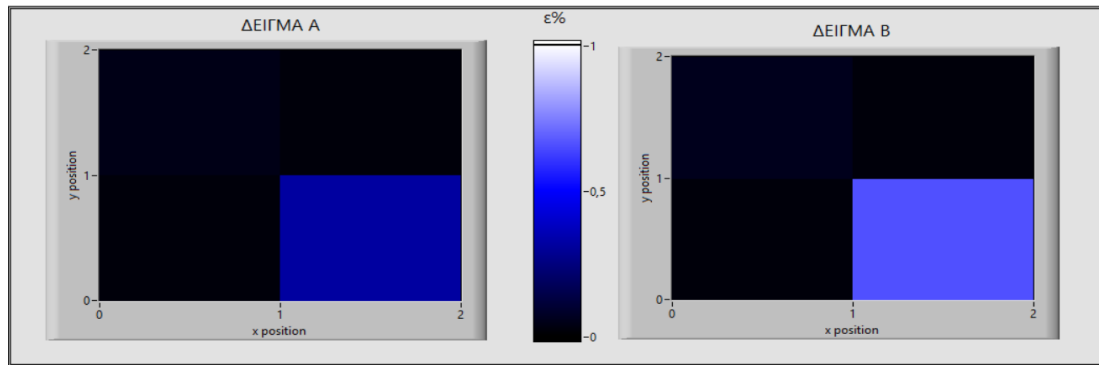
0,029	0,005	0,032	0,014
0,004	0,215	0,006	0,264

Κατάσταση παραμόρφωσης 2^{ος} κύκλος



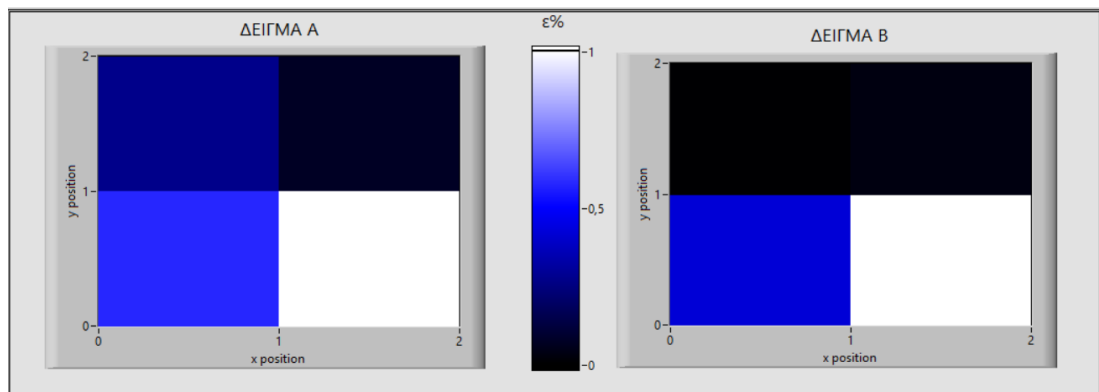
0,288	0,078	0,013	0,029
0,607	122,54	0,422	278,10

Κατάσταση ηρεμίας 3^{ος} κύκλος



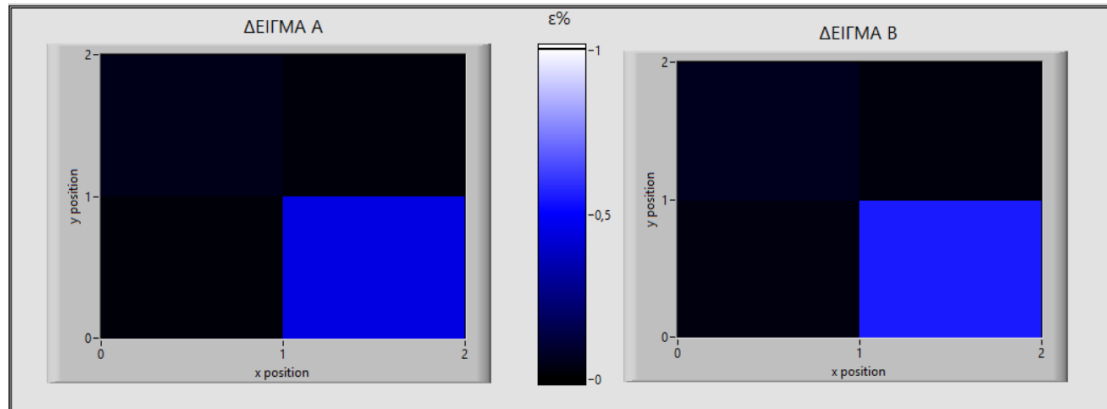
0,042	0,02	0,053	0,021
0,02	0,658	0,021	0,317

Κατάσταση παραμόρφωσης 3^{ος} κύκλος



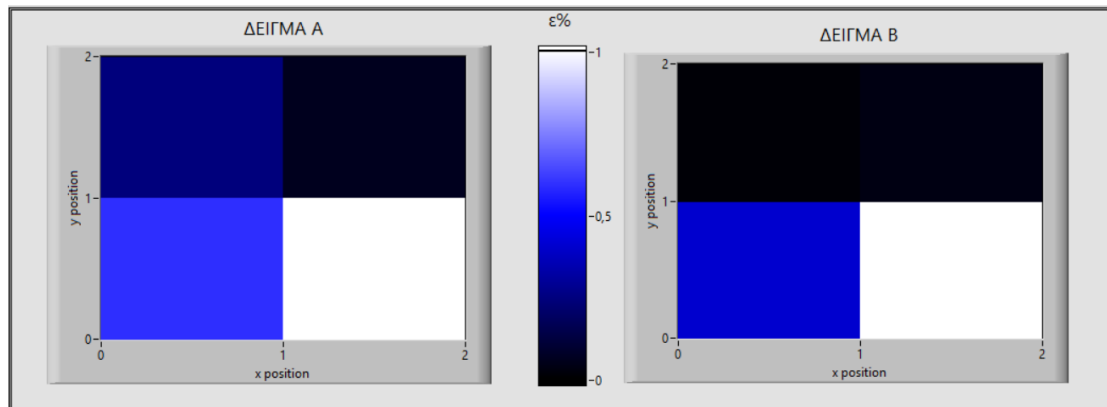
0,273	0,072	0,004	0,03
0,579	121,98	0,423	276,83

Κατάσταση ηρεμίας 4^{ος} κύκλος



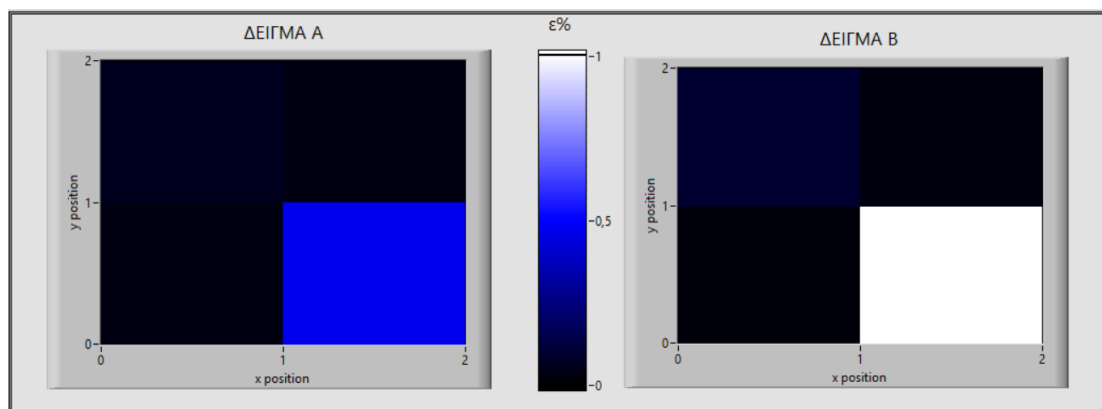
0,046	0,022	0,06	0,025
0,016	0,553	0,03	0,448

Κατάσταση παραμόρφωσης 4^{ος} κύκλος



0,246	0,06	0,001	0,035
0,59	121,72	0,409	276,43

Κατάσταση ηρεμίας – Τελική θέση



0,061	0,034	0,094	0,029
0,03	0,471	0,021	1,2

Οι αισθητήρες των 2μm και στα δύο δείγματα δεν μετρήθηκαν σε stain λόγω μεγάλης αστάθειας στην αντίστασή τους, γι' αυτό και δεν λαμβάνονται υπόψιν. Επίσης μερικοί αισθητήρες δεν κάνουν καλή ηλεκτρική επαφή με τις προεκτάσεις της πλακέτας και δεν φαίνεται να ανιχνεύουν την αλλαγή στην παραμόρφωση, λόγω μικρής μεταβολής στην αντίσταση (σκούρο χρώμα). Τα συμπεράσματα για την παραμόρφωση της επιφάνειας προκύπτουν από τους αισθητήρες 30μm και 10μm στο πρώτο δείγμα (A) και 10μm στο δεύτερο (B), από τα οποία εξάγουμε το μέσο όρο τους για την πειραματική τιμή ε%. Στον ακόλουθο πίνακα γίνεται σύγκριση με την θεωρητική τιμή παραμόρφωσης, με βάση τις διαστάσεις της ελαστικής λωρίδας και το μοντέλο παραμόρφωσης, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

	1 ^{ος} κύκλος	2 ^{ος} κύκλος	3 ^{ος} κύκλος	4 ^{ος} κύκλος
Πειραματική τιμή ε%	0,452	0,439	0,425	0,415
Θεωρητική τιμή ε%	0,536			

Η μικρή πτώση της μέσης πειραματικής παραμόρφωσης δικαιολογείται λόγω της ποιότητας του υλικού της επιφάνειας, το οποίο δεν είναι απόλυτα ελαστικό και δημιουργούνται παραμένουσες τάσεις κατά την φάση απελευθέρωσης της πίεσης. Τέλος, από τη σύγκριση της πειραματικής με την θεωρητική τιμή, συμπεραίνουμε ότι η ανίχνευση της παραμόρφωσης είναι εφικτή σε μια επιφάνεια, με τον τρόπο που παρουσιάσαμε, εφόσον οι τιμές είναι αρκετά κοντά.

6. Μελλοντικές μελέτες

Όσο αφορά το ηλεκτρονικό μετρητικό σύστημα παρέχει μεγάλη ευελιξία στο να προσαρμοστεί σε νέες, διαφορετικές λειτουργίες. Αρχικά είναι αρκετά εύκολη η επέκταση του συστήματος για την ανάγνωση περισσότερων των 64 αισθητήρων, καθώς απαιτούνται μόνο η αντικατάσταση των πολυπλεκτών με άλλους που έχουν περισσότερες εισόδους και η χρήση μερικών ακόμα ακροδεκτών στον μικροελεγκτή για τον έλεγχο των εισόδων. Για παράδειγμα για τη μέτρηση 128 αισθητήρων αντικαθίσταται μόνος ο ένας πολυπλέκτης με έναν 16-κάναλο, με τέσσερις επιλογείς εισόδων, δηλαδή έναν επιπλέον ακροδέκτη του MCU. Στην περίπτωση αντικατάστασης με δύο 16-κάναλους πολυπλέκτες και χρήση δύο επιπλέον ακροδεκτών του μικροελεγκτή γίνεται δυνατή η μέτρηση 256 αισθητήρων. Η απαίτηση για τη μέγιστη δυνατή χρήση επιφάνειας, χωρίς να υποβαθμίζεται η χωρική διακριτική ικανότητα μπορεί να καλυφθεί από αυτήν την διάταξη.

Επίσης μπορεί να βρει εφαρμογή και σε μετρήσεις χωρητικότητας με , καθώς η έξοδος του αναλογικού κυκλώματος προσδιορίζεται από το γινόμενο RC. Κρατώντας σταθερή την αντίσταση του ολοκληρωτή, δημιουργούμε ένα κλειστό βρόχο με την αναστρέφουσα είσοδό του με το υπό μελέτη δείγμα. Το σήμα εξόδου θα έχει γραμμική σχέση με τη χωρητικότητα. Κατ' επέκταση η παρούσα διάταξη βρίσκει εφαρμογή και σε συμβατικές επιφάνειες αφής χωρητικού τύπου.

Ακόμη είναι σημαντική η μελέτη μιας επιφάνειας αφής, όπου θα έχει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και οι ηλεκτρικές επαφές με τους αισθητήρες θα είναι καλύτερες. Μελλοντικά θα είχε πολλά οφέλη η διεξοδική μελέτη θορύβου στην πλακέτα και η εύρεση τρόπων μείωσής του. Ο σχεδιασμός ενός συνολικού τυπωμένου κυκλώματος, ώστε να μειωθούν οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτρονικών στοιχείων και η επιλογή παθητικών στοιχείων με μικρότερη ανοχή θα βοηθούσε στη μείωση του θορύβου.

A' Παράρτημα

Κώδικας για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή ATmega 1284, σε γλώσσα προγραμματισμού c.

```
/*
 * atmega 1284 test 2.c
 *
 * Created: 27/10/2017 5:07:17 μμ
 * Author : Panos
 */
#define F_CPU 20000000UL
#define BAUD_RATE 96000UL
#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <stdint.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>

#define START_MEASUREMENT '1'
#define STOP_MEASUREMENT '2'
#define TRANSMIT_RESULT '3'
// #define UBRR_VALUE (F_CPU/(BAUD_RATE*16UL)-1)

unsigned long int result_pulses=0;
char bytes[20]; // sending result pulses
char reads[8]; // for reading
char bits[4];
int count=0;
char command;
volatile int counter3=0;
volatile int set=1;

void uart_init()
{
    UBRR0L = 129; // define BAUD rate
    UBRR0H = (129 >> 8);

    UCSR0B = (1<<TXEN0) | (1<<RXEN0); //Receive ,Transmit Enable
    UCSR0C = (1<<UCSZ00) | (1<<UCSZ01); //8bit data transfer
    UCSR0C &= ~(1<<USBS0); // 1 stop bit
}
```

```

void split_to_8bits(unsigned long number , int i)
{
    uint8_t temp_number=0;
    for(i=0;i<=1;i++)
    {
        temp_number = (( number>>(i*8) ) & 0xFF); // split number to 8-bit
(i) sections / return first LSB and then MSB
    }
}

```

```

char uart_getnew()
{
    while(!(UCSR0A & (1<<RXC0)))
    ;
    return UDR0;
}

```

```

void uart_readnew(char *calledstring) //calledstring local var
{
    char ch; // define also here because it is used in uart_getnew()
    int cntr = 0;

    while (1)
    {

        ch = uart_getnew(); // puts an 8 bit received character to ch

        if (ch == 13) // New Line ASCII character
        {
            calledstring[cntr] = 0;
            return;
        }
        else
        {
            calledstring[cntr] = ch;
            cntr++;
        }
    }
}

```

```

void uart_outchar(char ch)
{
    while(!(UCSR0A &(1<<UDRE0)))
    ;
    UDR0 = ch; // sets character to data register
}

```

```

void uart_output(char *calledstring) // read an 8-bit length cell array
{

```

```

for (int i=0; i<=30; i++)
{
    if (calledstring[i] != 0)
    {
        uart_outchar(calledstring[i]);
    }
    else
    {
        break;
    }
}

void long_int_to_text(unsigned long int number,uint8_t nibbles)
{
    uint8_t nibble_counter;
    uint8_t temp_result = 0;

    for (nibble_counter = 0; nibble_counter < nibbles; nibble_counter++) {
        temp_result = (uint8_t) (number >> ((nibbles-1)*4 - nibble_counter *
4)); // swift 0:28 / 1:24 / 2:20 / 3:16 / 4:12 / 5:8 / 6:4 / 7:0 msb first lsb last
        temp_result &= 0x0F;//keep only LSB nibble
        itoa(temp_result,bytes,30);
        uart_output(bytes);

        //    usiTwitransmitByte('0' + temp_result);

        //    usiTwitransmitByte('A' + temp_result - 10);
    }
}

int main(void)
{
    cli();
    uart_init();
    DDRB &=(1<<0); // set T1 pin as input (optional)
    TCCR1B |=(1<<WGM12); // set timer 1 to ctc mode
    OCR1A = 50; // set number of pulses to count
    while (1)
    {
        while(!(UCSR0A & (1<<RXC0)))
        ;
        command=UDR0;
        if(command=='1') // check condition to proceed to measurement
        {
            //TIMSK1 |=(1<<OCIE1A); // compare A interrupt timer
            TIMSK3 |=(1<<TOIE3); // overflow interrupt timer 3 on
            TCCR1B |=(1<<CS12)|(1<<CS11)|(1<<CS10); // set clock to
            rising edge detection / clock 1 on
        }
    }
}

```

```

        TCCR3B |= (0<<CS32)|(1<<CS31)|(0<<CS30); // set clock to
prescaler div8 2.5MHz / clock 3 on
        sei(); // enable global interrupts
        while(!(TIFR1&(1<<OCF1A))); // flag for compa set proceed
to stop clocks and transmit result uart
        result_pulses=(TCNT3+(counter3*65536));
        TIMSK1 &=~(1<<OCIE1A); // all
clocks and interrupts disabled
        TCCR1B &=~((1<<CS12)|(1<<CS11)|(1<<CS10)); //
        TCCR3B &=~((0<<CS32)|(1<<CS31)|(0<<CS30)); //
        TCNT1=0x00; // reset counters 1& 3
        TCNT3=0x00; //
        counter3=0; // reset overflow counter 3
        long_int_to_text(result_pulses,8);
        uart_output("\n");
        TIFR1 |= (1<<OCF1A); // clear flag
    }
    else
    {
    }
}
}

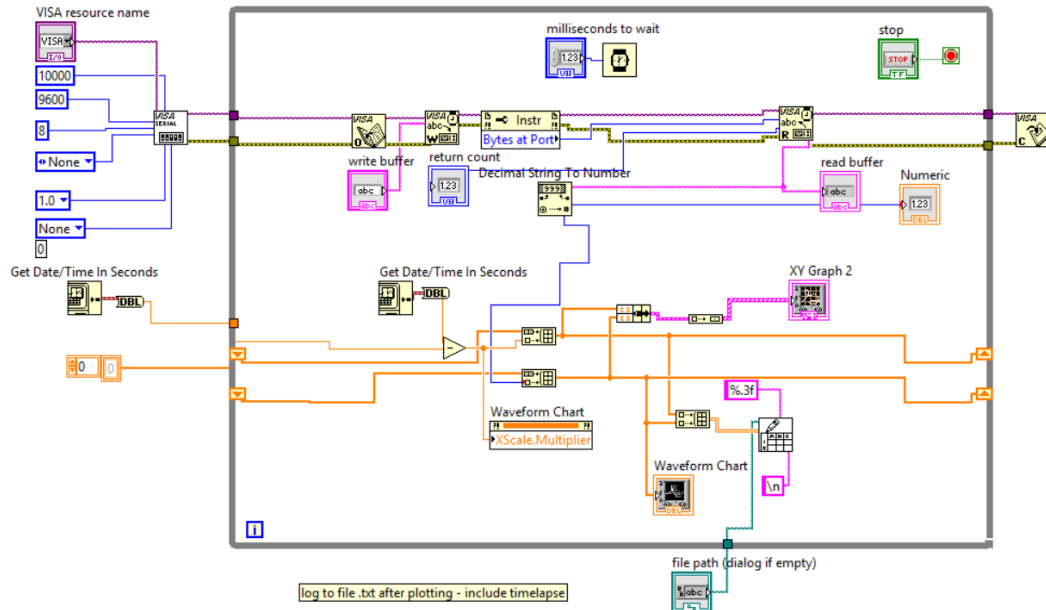
ISR(TIMER1_COMPA_vect)
{
    // 50 pulses measured
    TIMSK3 &=~(1<<TOIE3); // disable ovf interrupt of timer 3
}

ISR(TIMER3_OVF_vect)
{
    counter3++;
}

```

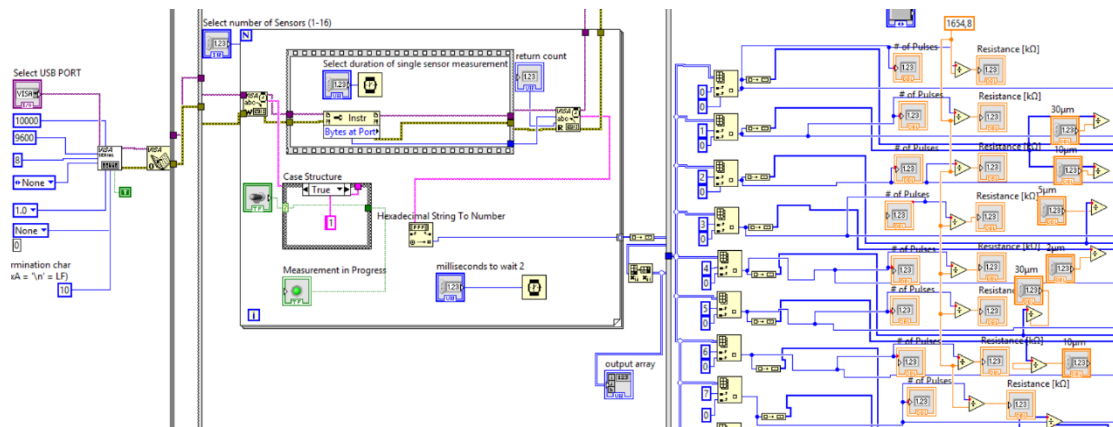
B' ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Γραφικός κώδικας στο Block Diagram του Labview για τη μέτρηση μεμονωμένων αισθητήρων.



Γ' ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Τμήμα υπολογισμού των παλμών σε αντίσταση σε γραφικό κώδικα στο Labview για τη μέτρηση πολλών αισθητήρων



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. ΠΕΚΜΕΣΤΖΗ, «ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΕΣ AVR» ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΜΙΚΡΟΎΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»
- [2] RON MANCINI , TEXAS INSTRUMENTS, «UNDERSTANDING BASIC ANALOG – IDEAL OP AMPS» APPLICATION REPORT 1999
- [3] Óscar Oballe-Peinado ^{1,2}, Fernando Vidal-Verdú ^{1,2,*}, José A. Sánchez-Durán ^{1,2}, Julián Castellanos-Ramos ^{1,2} and José A. Hidalgo-López Improved Circuits with Capacitive Feedback for Readout Resistive Sensor Arrays 2016
- [4] Μαρίνος Καττής «ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ» ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΔΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»
- [5] ΖΑΧΜΑΝΟΓΛΟΥ ΑΡΤΕΜΙΣ «ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΩΝ» ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΕΣ»
- [6] <http://slideplayer.gr/slide/3644072/> 15/9/2017
- [7] <https://alexkaltsas.wordpress.com/2012/02/29/avr-gcc-uart> 16/10/2017
- [8] <http://slideplayer.gr/slide/11328984/> 4/10/2017
- [9] <http://www.next.gr/circuits/Use-Analog-Techniques-To-Measure-Capacitance-In-Capacitive-Sensors-125515.html> 4/10/2017
- [10] <http://www.ni.com/tutorial/4256/en/#toc5> 5/10/2017
- [11] <http://www.theasciicode.com.ar/extended-ascii-code/letter-e-acute-accent-e-acute-lowercase-ascii-code-130.html> 12/8/2017
- [12] Παπαπαύλου Χρήστος «Ανάπτυξη εκπαιδευτικού συστήματος (H/W, S/W) για δικτυακές εφαρμογές, βασισμένου σε μικροελεγκτή AVR» 2013
- [13] <http://www.electronics-tutorials.ws/opamp/op-amp-comparator.html>
- [14] <https://www.allaboutcircuits.com/worksheets/opamp-oscillator-circuits/>

- [15] Numerical study of read scheme in one-selector one-resistor crossbar array
Author links open overlay panel SunghoKim^a Hee-Dong Kim^a Sung-JinChoi^b , Solid State electronics 2015
- [16] <http://www.polyonics.com/FlexibleSubstrates/index.html>
- [17] <http://slideplayer.com/slide/10372232/>
- [18] <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/water-absorption-24-hours>
- [19] Detection of Steel Fatigue Cracks with Strain Sensing Sheets Based on Large Area Electronics Yao Yao and Branko Glisic Sensors 2015
- [20] A highly programmable sensor network interface with multiple sensor readout circuits Jichun Zhang, Junwei Zhou, Prasanna Balasundaram and Andrew Mason
- [21] Τεχνική Μηχανική, Σημειώσεις Διαλέξεων, Μαρίνος Καττής 2012
- [22] Εισαγωγή στις ηλεκτρικές μετρήσεις, Διαφάνειες, Σοφία Τσεκερίδου
- [23] Σχεδιασμός, ανάλυση και υλοποίηση κυκλωμάτων για τη μέτρηση και τον έλεγχο χωρητικών και ηλεκτροχημικών αισθητήρων , Ιωάννης Ράμφος 2014
- [24] Χημικοί Αισθητήρες Νανοδομημάτων, Λεωνίδας Μαδιανός 2013
- [25] Αισθητήρες Παραμόρφωσης αποτελούμενοι από σύνολα νανοδομημάτων, Δημήτρης Μουσαδάκος 2011