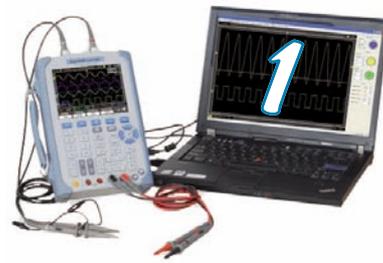


Βασικές Δομές Ηλεκτρονικών Συστημάτων Μετρήσεων



1.1 Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά συστήματα μετρήσεων

Με τον όρο *Μέτρηση* αναφερόμαστε στην απόκτηση πληροφορίας για τον προσδιορισμό του μέτρου ενός φυσικού μεγέθους που θέλουμε να ανιχνεύσουμε σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Με τον όρο *Ηλεκτρονικό Σύστημα* αναφερόμαστε στις μονάδες ή βαθμίδες που φέρουν ηλεκτρονικά στοιχεία τα οποία μας παρέχουν δυνατότητες όπως: τη μετατροπή ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, την ενίσχυση του σήματος, την προσαρμογή του σήματος σε επιθυμητά επίπεδα κ.α.. Η σχεδίαση και ανάπτυξη ηλεκτρονικών διατάξεων για την πραγματοποίηση μετρήσεων φυσικών και τεχνικών μεγεθών ορίζει τα *Ηλεκτρονικά Συστήματα Μετρήσεων*. Η χρήση ηλεκτρονικών διατάξεων σε συστήματα μετρήσεων έχει συντελέσει στην ανάπτυξη ηλεκτρονικών μετρητικών συστημάτων τα οποία προσφέρουν υψηλή αξιοπιστία των μετρήσεων με:

- υψηλό βαθμό ευαισθησίας για την ανίχνευση ασθενών σημάτων,
- υψηλό βαθμό επαναληψιμότητας,
- προσαρμοστικότητα με την πηγή μέτρησης του μεγέθους,
- ταχύτατη απόκριση, δηλαδή ανίχνευση και μέτρηση σημάτων με υψηλή συχνότητα,
- ενσύρματη ή ασύρματη μετάδοση, δίχως απώλειες πληροφοριών του μετρήσιμου σήματος,
- ποικιλία μεθόδων μέτρησης και εφαρμογής επεξεργασίας του μετρήσιμου μεγέθους, και
- μικρή κατανάλωση για τη φορητότητα του μετρητικού συστήματος.

Για παράδειγμα, αναφέρουμε την περίπτωση μέτρησης του φορτίου με μηχανικό όργανο όπως αυτό του Σχήματος 1.1. Η ακρίβεια και η αξιοπιστία της μέτρησης εξαρτάται από τα μηχανικά στοιχεία του οργάνου ενώ ο βαθμός επαναληψιμότητας και ανάγνωσης της μέτρησης εξαρτάται από την ικανότητα του χρήστη να πραγματοποιεί τη μέτρηση. Η ανάπτυξη ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης με χρήση αισθητήρα φορτίου και ηλεκτρονική μονάδα ψηφιακής επεξεργασίας και απεικόνισης παρέχει αξιόπιστη μέτρηση του μεγέθους με υψηλό βαθμό επαναληψιμότητας.



Σχήμα 1.1: α) Μηχανικό, και β) ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης βάρους.

Καθώς η τεχνολογία των ηλεκτρονικών στοιχείων και διατάξεων συνεχώς θα προοδεύει, ο βαθμός απόδοσης όλων των παραπάνω χαρακτηριστικών θα αυξάνεται, ενώ θα δίνεται η δυνατότητα ανάπτυξης νέων μεθόδων αντιμετώπισης ενός προβλήματος μέτρησης.

Επίσης, η χρήση ηλεκτρονικών συστημάτων μετρήσεων δίνει τη δυνατότητα στο μηχανικό να συνδυάζει διαφορετικά συστήματα μετρήσεων, για τη μέτρηση πολλαπλών μεγεθών τα οποία μπορούν να αφορούν το ίδιο ή και διαφορετικά συστήματα, τα οποία μέσω ηλεκτρονικής διασύνδεσής τους βάσει πρωτοκόλλου επικοινωνίας όπως: RS232, GPIB, USB, ProfiBUS, κ.α. να είναι σε θέση να επισκοπεί κάθε μέγεθος μέσα από μία κεντρική οθόνη. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα φέρουμε το δωμάτιο ελέγχου των μηχανών ενός τάνκερ, στο οποίο όλες οι μετρήσεις οδηγούνται στο πάνελ ελέγχου για την επιτήρηση και την αξιολόγηση από το μηχανικό της βάρδιας (Σχ .1.2).

Ηλεκτρονικά συστήματα μετρήσεων συναντάμε σε όλους τους τομείς των εφαρμοσμένων επιστημών. Για παράδειγμα, ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης απαιτείται για τον έλεγχο στροφών των τροχών ενός οχήματος σε σύστημα αντι-ολίσθησης (anti-bloq).

Στο χώρο της βιομηχανίας κάθε ηλεκτρομηχανική εργασία απαιτεί για την υποστήριξή της ένα μικρό ή μεγάλης κλίμακας ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης, όπως για παράδειγμα, η σύνθεση παράγωγων πετρελαίου απαιτεί μετρήσεις μεγεθών όπως πίεσης, θερμοκρασίας και ροής.

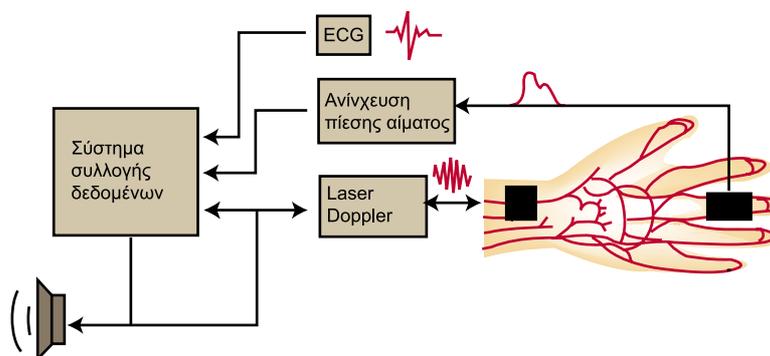


Σχήμα 1.2: α) Αναλογικά συστήματα μέτρησης και επιτήρησης σε δωμάτιο ελέγχου μηχανής (1960) και β) ψηφιακό ηλεκτρονικό σύστημα σε σύγχρονο τάνκερ.

Στον τομέα της ρομποτικής η κίνηση και ανίχνευση αντικειμένων από ένα ρομποτικό χέρι απαιτεί εξελιγμένα ηλεκτρονικά συστήματα μετρήσεων θέσης, ταχύτητας και όρασης.

Επίσης στον ιατρικό τομέα ηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης παροχής ποσότητας οξυγόνου και της μέτρησης καταγραφής καρδιακών παλμών, χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια μια χειρουργικής επέμβασης ή κατά την εντατική παρακολούθηση του ασθενούς. Στο Σχήμα 1.3 απεικονίζεται το λειτουργικό διάγραμμα ενός ολοκληρωμένου ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης ζωτικών παραμέτρων σε ασθενή εντατικής παρακολούθησης.

Μια μέτρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε *άμεσα* (direct) στο προς μέτρηση μέγεθος, όπως για παράδειγμα, τη μέτρηση του μήκους ενός αντικειμένου τοποθετώντας αυτό σε έναν μετρητικό κανόνα, είτε *έμμεσα* (indirect), ανάγοντας τη φυσική μεταβλητή σε νέο άλλο μετρήσιμο μέγεθος, όπως για παράδειγμα η μέτρηση της θερμοκρασίας του χώρου με χρήση ενός υδραργυρικού θερμομέτρου στο οποίο η μετατόπιση του υδραργύρου σε έναν κατάλληλο βαθμονομημένο άξονα αποδίδει την τιμή της θερμοκρασίας του χώρου. Ηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης διακρί-



Σχήμα 1.3: Λειτουργικό διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης ζωτικών παραμέτρων σε ασθενή.

νουμε και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις. Για παράδειγμα ένα ηλεκτρονικό μικρόμετρο ή ένα ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής θερμομέτρου (Σχ.1.4) αποτελούν παραδείγματα ηλεκτρονικών συστημάτων.



Σχήμα 1.4: Ηλεκτρονικό σύστημα: α) μέτρησης μήκους, και β) μέτρησης θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Η ανάπτυξη ενός ηλεκτρονικού συστήματος μετρήσεων μπορεί να αποτελεί ένα πολύπλοκο σχεδιαστικό πρόβλημα ο βαθμός του οποίου εξαρτάται από το μοντέλο του συστήματος. Η δομή ενός ηλεκτρονικού συστήματος μετρήσεων ακολουθεί το λειτουργικό διάγραμμα του Σχήματος 1.5.



Σχήμα 1.5: Βασικό λειτουργικό διάγραμμα συστήματος μετρήσεων.

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.5 ένα τυπικό ηλεκτρονικό σύστημα μετρήσεων αποτελείται από:

- τον αισθητήρα ή μορφοτροπέα,
- τον προσαρμογέα σήματος,
- τη μονάδα επεξεργασίας σήματος, και
- τη μονάδα απεικόνισης, καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων.

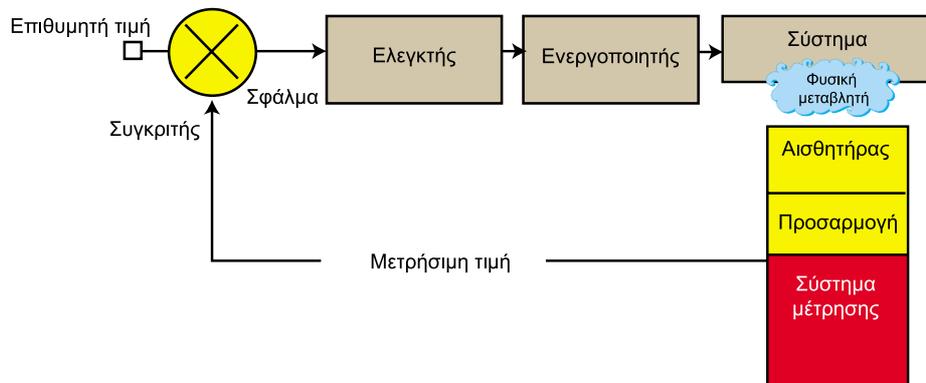
Σήμερα με την εξέλιξη της τεχνολογίας μιλάμε για συλλογή δεδομένων (Data Acquisition, DAQ). Συλλογή καλείται η μέθοδος μέσω της οποίας μεγέθη όπως: η τάση, το ρεύμα, η πίεση, η ροή, η θερμοκρασία, κ.α., συλλέγονται, απεικονίζονται, και καταγράφονται μέσω υπολογιστικής μονάδας. Για το σκοπό αυτό ένα *σύστημα συλλογής δεδομένων* (Data Acquisition System) μετατρέπει το εισερχόμενο σήμα

σε ψηφιακό δεδομένο. Υπεύθυνο για την επεξεργασία των αποκτημένων πληροφοριών είναι το λογισμικό που φέρει το σύστημα DAQ μέσω του οποίου εκτελούνται διεργασίες όπως: μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών, ανάλυση σήματος στο πεδίο της συχνότητας/ χρόνου, στατιστική ανάλυση σήματος, και πλήθος άλλων επεξεργασιών. Με τη χρησιμοποίηση μονάδων υψηλής τεχνολογίας, και λογισμικών επεξεργασίας σημάτων, όπως το LabVIEW της National Instrument μπορεί να επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια μέτρησης και ελέγχου της πληροφορίας του σήματος σε εργαστηριακή ή βιομηχανική εφαρμογή (Σχ. 1.6).



Σχήμα 1.6: Ολοκληρωμένα συστήματα συλλογής δεδομένων της National Instruments.

Τα ηλεκτρονικά συστήματα μετρήσεων αποτελούν ένα από τα κυριότερα τμήματα ενός συστήματος ελέγχου διότι σε μεγάλο βαθμό η ευστοχία του συστήματος αποτελεί συνάρτηση της ακρίβειας των μετρήσιμων μεγεθών. Η θέση στην οποία τοποθετείται το ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης σε ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου απεικονίζεται στο Σχήμα 1.7. Η μετρήσιμη τιμή του σήματος αποτελεί είσοδο στον συγκριτή (comparator) του συστήματος από τον οποίον προκύπτει το μετρήσιμο σφάλμα για το οποίο θα πρέπει ο ελεγκτής να διορθώσει παραμέτρους του συστήματος.



Σχήμα 1.7: Θέση ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης σε σύστημα ελέγχου.

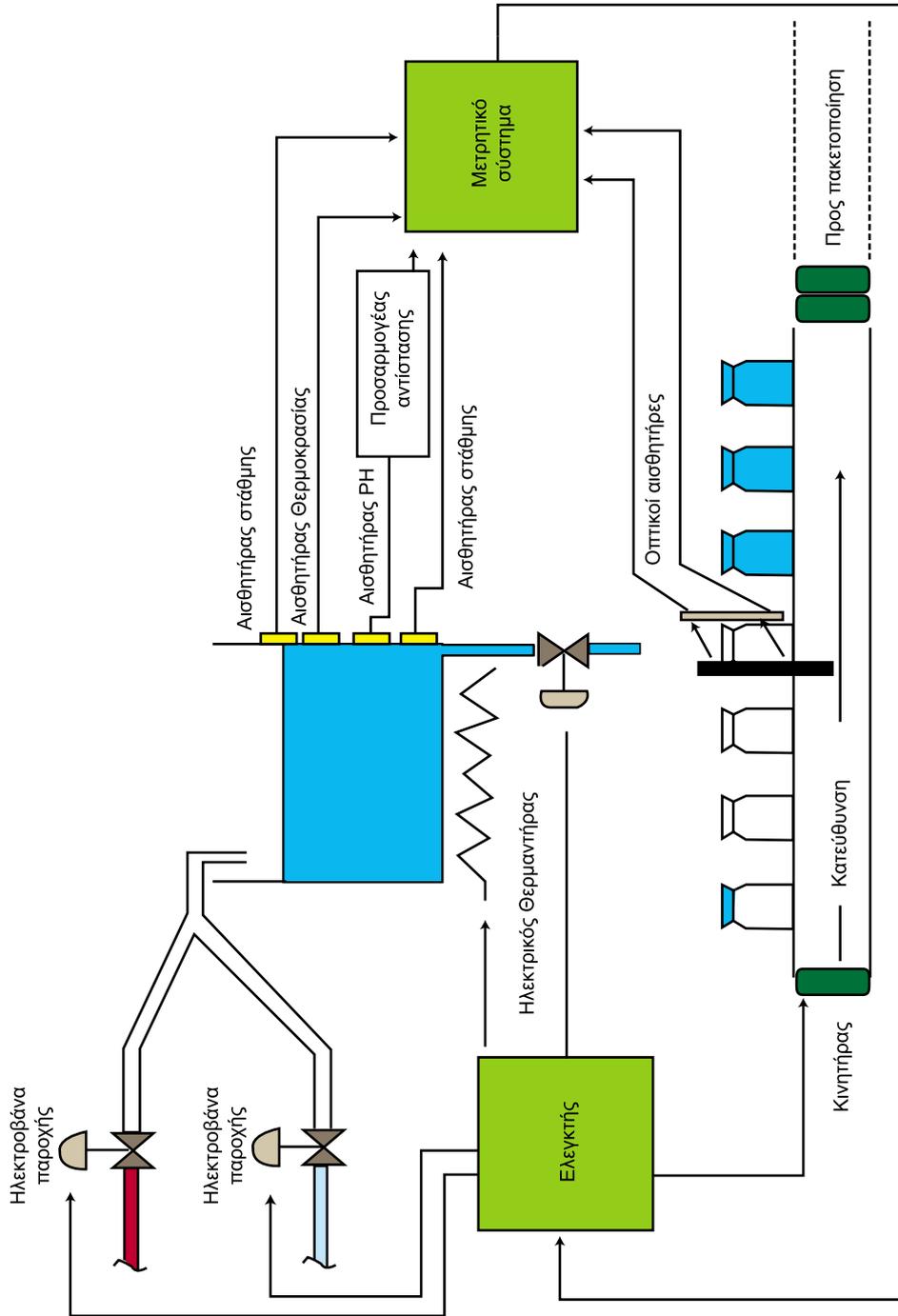
1.1.1 Παράδειγμα Βιομηχανικής εφαρμογής ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης

Στο Σχήμα 1.8 παρουσιάζεται παράδειγμα μετρήσεων και ελέγχου σε μονάδα παραγωγής τυποποιημένων προϊόντων, στην οποία, δοχεία που κινούνται μέσω μεταφορικής ταινίας, σε καθορισμένο σημείο γεμίζουν με ρευστό υλικό το οποίο αποτελεί μίγμα δύο διαφορετικών τύπων υλικού σε κύρια δεξαμενή. Ο ελεγκτής του συστήματος για τον αυτόματο έλεγχο της διαδικασίας λαμβάνει μέσω αισθητήριων:

- α) τη θερμοκρασία της δεξαμενής από αισθητήρα RTD,
- β) σήμα για τη θέση του δοχείου από αισθητήρα προσέγγισης στο σημείο τροφοδοσίας του,
- γ) πληροφορία για άνω οριακή στάθμη του παραγόμενου διαλύματος μέσα στη δεξαμενή από διακόπτη φλοτέρ,
- δ) πληροφορία για κάτω οριακή στάθμη του παραγόμενου διαλύματος υλικών μέσα στη δεξαμενή από διακόπτη φλοτέρ,
- ε) τη μέτρηση των κατιόντων υδροξωνίου (H_3O^+) στο διάλυμα (pH).

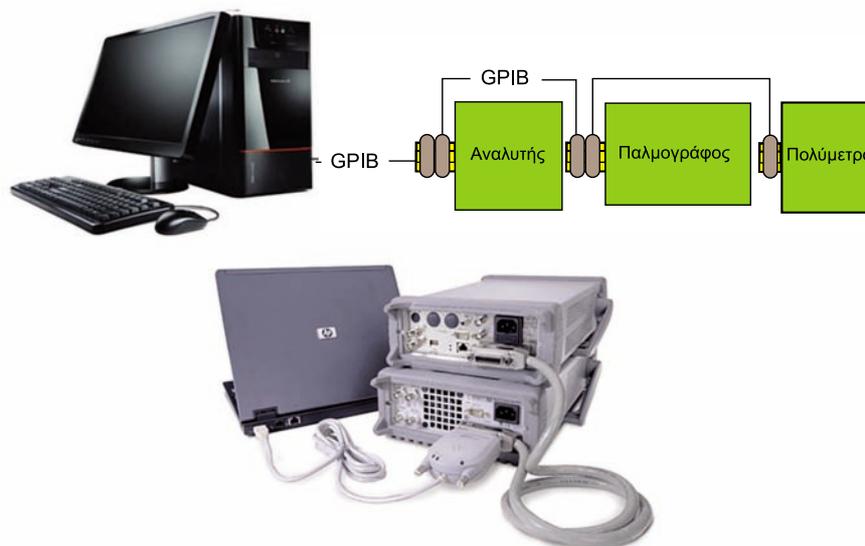
Ο ελεγκτής κατά την εκτέλεση του προγράμματος:

- α) ελέγχει μέσω κυκλώματος ισχύος, έναν κινητήρα για τη μετακίνηση των δοχείων προς το σημείο τροφοδοσίας τους ενεργοποιώντας ή απενεργοποιώντας τη λειτουργία κίνησης της μεταφορικής ταινίας,
- β) ελέγχει ηλεκτροβάνες για την προσθήκη υλικών στη δεξαμενή,
- γ) μέσω κυκλώματος ισχύος καθορίζει την παροχή καυσίμου από ηλεκτροβάνες, για τον έλεγχο της θερμοκρασίας παραγωγής του διαλύματος, και
- δ) για το γέμισμα του δοχείου ενεργοποιεί την ηλεκτροβάνη παροχής υλικού όταν λάβει σήμα από τον αισθητήρα προσέγγισης.



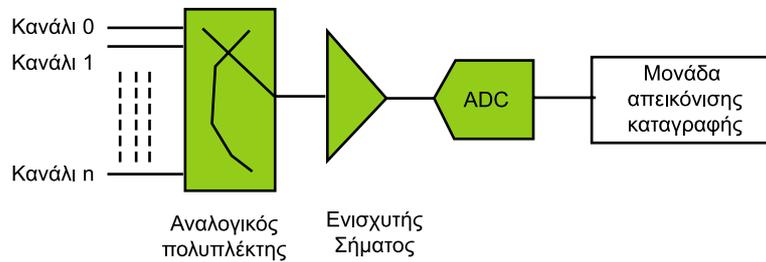
Σχήμα 1.8: Λειτουργικό διάγραμμα παραδείγματος βιομηχανικής εφαρμογής ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης.

Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης, όπως παλμογράφος αναλυτής φάσματος, ψηφιακό πολύμετρο γεννήτρια σήματος κ.α., φέρουν μονάδα μετάδοσης δεδομένων μέσω πρωτοκόλλων επικοινωνίας GPIB, USB ή RS232, αποκτώντας το ρόλο του μετρητικού συστήματος όπου ο μηχανικός μέσω ανάπτυξης κατάλληλου λογισμικού οδηγεί τα δεδομένα των μετρήσεων είτε στον ελεγκτή του συστήματος, είτε για απεικόνιση και καταγραφή (Σχ. 1.9).



Σχήμα 1.9: Ηλεκτρονικά όργανα μετρήσεων που φέρουν διεπαφή GPIB (Agilent GPIB).

Σε πολλές εργαστηριακές εφαρμογές όπως στην περίπτωση μέτρησης της στατικής πίεσης γύρω από μια πολύπλοκη γεωμετρία σώματος απαιτείται η ταυτόχρονη απόκτηση του μετρήσιμου σήματος. Για παράδειγμα, αναφέρουμε την ταυτόχρονη μέτρηση της στατικής πίεσης, για καταγραφή της κατανομής της, σε πολλαπλά σημεία γύρω από μοντέλο πτερύγιου αεροπλάνου, προκειμένου του υπολογισμού του μεγέθους της άντωσης. Στο Σχήμα 1.10 απεικονίζεται το βασικό λειτουργικό διάγραμμα ενός ηλεκτρονικού ψηφιακού συστήματος μέτρησης, το οποίο για την απόκτηση πολλαπλών σημάτων εισόδου φέρει στην είσοδο του έναν αναλογικό πολυπλέκτη. Ο χρόνος μεταβίβασης του αναλογικού πολυπλέκτη καθορίζει το χρόνο μεταξύ των διαδοχικών μετρήσεων. Ένα τέτοιο μετρητικό σύστημα δεν εξυπηρετεί το σκοπό μέτρησης του παραπάνω παραδείγματος.



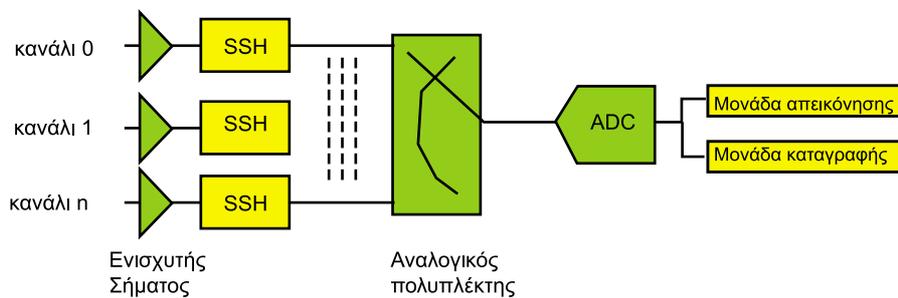
Σχήμα 1.10: Βασικό λειτουργικό διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης πολλαπλών εισόδων με είσοδο αναλογικού πολυπλέκτη.

Για να μπορεί να μετρηθεί η πίεση ταυτόχρονα σε πολλαπλά σημεία γύρω από μοντέλο περύγιου αεροπλάνου όπως αναφέραμε στο παράδειγμα χρησιμοποιούνται ψηφιακά ηλεκτρονικά συστήματα:

- ταυτόχρονης δειγματοληψίας (simultaneous sample and Hold SSH), ή
- πολλαπλών ADC μετατροπών (Multi-ADC).

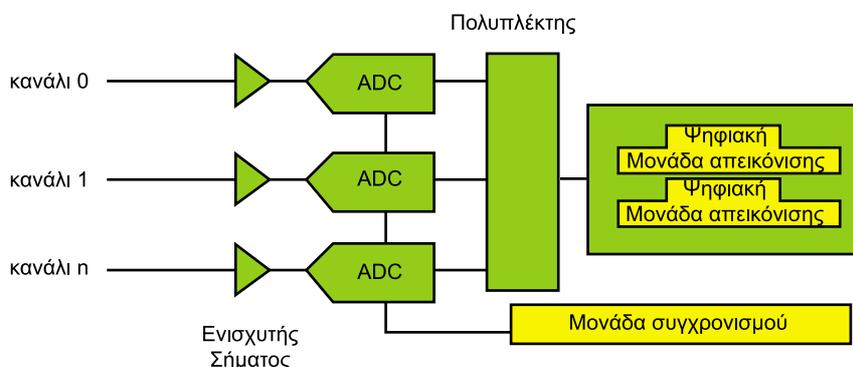
Στο Σχήμα 1.11 απεικονίζεται το λειτουργικό διάγραμμα της αρχιτεκτονικής ταυτόχρονης δειγματοληψίας. Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 1.11 στην αρχιτεκτονική της ταυτόχρονης δειγματοληψίας η δομή φέρει στην είσοδο της ανεξάρτητα κυκλώματα δειγματοληψίας\συγκράτησης για κάθε είσοδο του μετρητικού συστήματος. Με την τεχνική αυτή γίνεται απόκτηση του σήματος σε κάθε είσοδο στον ίδιο χρόνο. Στη συνέχεια ο αναλογικός πολυπλέκτης μεταβιβάζει το σήμα κάθε μονάδας SSH στον αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα του συστήματος. Στο σύστημα ο χρόνος μετάβασης του αναλογικού πολυπλέκτη δεν επηρεάζει το χρόνο μεταξύ της λήψης του σήματος για το λόγο ότι ο χρόνος της λήψης (που ήταν ταυτόχρονος για όλες τις εισόδους) ορίστηκε σε κάθε μονάδα SSH.

Στο Σχήμα 1.12 απεικονίζεται το λειτουργικό διάγραμμα πολλαπλών αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπών. Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 1.12 στην αρχιτεκτονική πολλαπλών αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπών η δομή φέρει στην είσοδό της ανεξάρτητους μετατροπείς, οι χρόνοι των οποίων, συγχρονίζονται από μονάδα συγ-



Σχήμα 1.11: Λειτουργικό διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης πολλαπλών εισόδων με ταυτόχρονη δειγματοληψία.

χρονισμού. Με την τεχνική αυτή γίνεται απόκτηση του σήματος σε κάθε είσοδο στον ίδιο χρόνο.



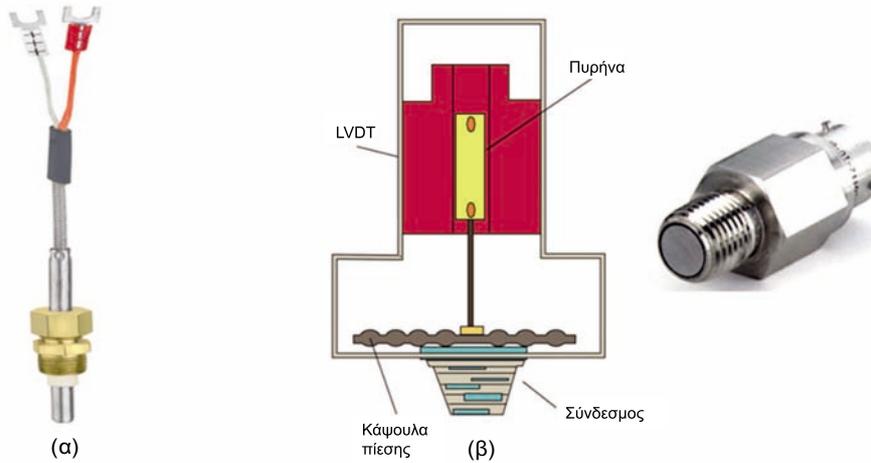
Σχήμα 1.12: Λειτουργικό διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης πολλαπλών αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέων.

1.2 Αισθητήρες

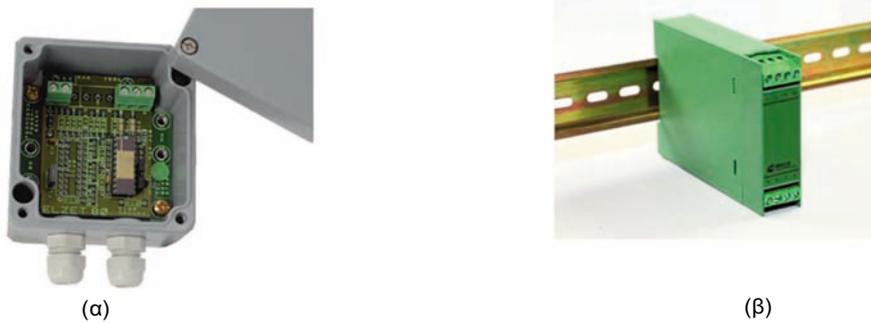
Η ανάπτυξη αισθητήριων διατάξεων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες στη σύγχρονη εξέλιξη των θετικών επιστημών, της τεχνολογίας, των εργαστηριακών ερευνών, της βιομηχανικής εξέλιξης και της καθημερινής ζωής του ανθρώπου. Η εξέλιξη των υλικών και η ανάπτυξη νέων μορφών αισθητήριων διατάξεων καθορίζουν το μέλλον νέων ερευνών και εφαρμογών, καθώς, η έννοια της μέτρησης αποτελεί την αρχή των συστημάτων συλλογής, καταγραφής, επεξεργασίας και ελέγχου σε πραγματικό χρόνο.

Αισθητήρα (sensor) αποτελεί το στοιχείο εκείνο το οποίο ανιχνεύει ένα φυσικό μέγεθος και παράγει από αυτό μία μετρήσιμη έξοδο σε μορφή ηλεκτρικού μεγέθους. Για παράδειγμα αναφέρουμε το στοιχείο του θερμοζεύγους (Σχ. 1.13α). Πολλά συστήματα μετρήσεων χρησιμοποιούν *μορφοτροπέα* (transducer) ο οποίος δεν μετατρέπει απ' ευθείας το φυσικό μέγεθος σε ηλεκτρική πληροφορία αλλά μετατρέπει πρώτα το φυσικό μέγεθος σε μορφή η οποία είναι εύκολα ανιχνεύσιμη και μετρήσιμη όπως ηλεκτρική, μηχανική, οπτική ή άλλη μορφή. Για παράδειγμα η διάταξη ενός αισθητήρα πίεσης με κάψουλα που απεικονίζεται στο Σχήμα 1.13β αποτελεί μονάδα μετατροπέα για το λόγο ότι το προς μέτρηση μέγεθος της πίεσης μετράται μέσω του στοιχείου LVDT σε γραμμική μετατόπιση που προκαλείται από την κίνηση της κάψουλας πίεσης.

Ένας αισθητήρας ο οποίος είναι τοποθετημένος σε απομακρυσμένο σημείο από τον ελεγκτή του συστήματος για να μεταδώσει την πληροφορία απαιτεί να φέρει βαθμίδα *μεταδότη* η οποία μετατρέπει το αρχικό σήμα που παράγει ο αισθητήρας στο βιομηχανικό πρότυπο 4-20mA. Πολλές φορές συναντάμε μεταδότη σε μορφή ράγας η οποία τοποθετείται κοντά στο στοιχείο του αισθητήρα (Σχ. 1.14).



Σχήμα 1.13: α) Αισθητήρας, και β) μορφοτροπέας.



Σχήμα 1.14: α) Ηλεκτρονικός μεταδότης σήματος 4-20 mA (GER-AD693) για σύνδεση σε αισθητήρα pt100 της εταιρείας ELZET80 και β) μεταδότης ράγας της εταιρείας Moshu (MS149).

Οι αισθητήρες διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τους παθητικούς (passive) και ενεργούς (active). Καλούμε ενεργό αισθητήρα εκείνο το στοιχείο το οποίο δεν απαιτεί κάποια ηλεκτρική διέγερση για την παραγωγή του ηλεκτρικού σήματος σε απόκριση του ερεθίσματος το οποίο ανιχνεύει. Παθητικό αισθητήρα καλούμε τον αισθητήρα που απαιτεί ηλεκτρική διέγερση για την παραγωγή του ηλεκτρικού σήματος. Ως παράδειγμα ενεργού αισθητήρα αναφέρουμε το θερμοζεύγος, το κινούμενο πηνίο ως στοιχείο γεννήτριας, το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, το φωτοβολταϊκό στοιχείο, ενώ ως παθητικό αισθητήρα αναφέρουμε το επιμυκνισιόμετρο, το θερμαινόμενο νήμα και τον γραμμικό διαφορικό μετασχηματιστή (LVDT). Στη διεθνή βιβλιογραφία άλλοι συγγραφείς κατατάσσουν αντίστροφα τα αισθητήρια, ακολουθώντας τη μη-σύμβαση των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Σε αυτό το σημείο να τονίσουμε ότι, όταν μια αισθητήρια διάταξη ανιχνεύει ένα διακριτό σημείο, για παρά-

δειγμα την ανίχνευση καπνού μέσα σε μια αίθουσα ώστε να ενεργοποιηθεί ένας συναγερμός, η διάταξη καλείται ανιχνευτής (detector).

1.2.1 Φυσικές αρχές λειτουργίας κυριότερων τύπων αισθητήρων

Η σύγχρονη τεχνολογία υλικών έχει φέρει την επανάσταση στη σχεδίαση και ανάπτυξη αισθητήριων στοιχείων. Πλειονότητα αισθητήρων στηρίζει τη λειτουργία τους στις βασικές φυσικές αρχές που ακολουθούν.

1.2.1.1 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων φαινομένου μεταβολής αντίστασης

Πολλοί τύποι αισθητήρων χρησιμοποιούν υλικά τα οποία η ειδική αντίσταση τους μεταβάλλεται είτε με τη θερμοκρασία, είτε με τη μηχανική καταπόνηση, είτε ακόμη και με την υγρασία.

Η ειδική αντίσταση ενός στοιχείου-μετάλλου σχετίζεται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

όπου,

ρ : η ειδική αντίσταση του στοιχείου σε θερμοκρασία T ,

ρ_0 : η ειδική αντίσταση του στοιχείου σε θερμοκρασία αναφοράς T_0 (0°C ή 20°C), και

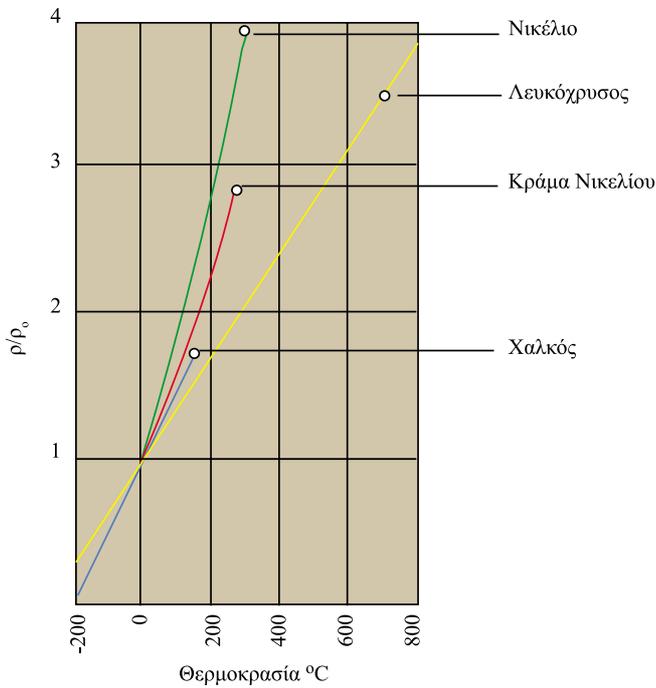
α : ο θερμικός συντελεστής του στοιχείου.

Ο πίνακας 1.3 παρουσιάζει τιμές της ειδικής αντίστασης ρ σε θερμοκρασία 20°C και του θερμικού συντελεστή α , για τα συνηθέστερα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αισθητήρων μέτρησης θερμοκρασίας με ηλεκτρική αντίσταση.

Πίνακας 1.1: Τιμές ειδικής αντίστασης και θερμικού συντελεστή συνήθη μετάλλων.

Μέταλλο	ρ ($\mu\Omega/\text{cm}$) σε 20°C	α ($^\circ\text{C}^{-1}$)
Χρυσός (Au)	2,44	0,0040
Άργυρος (Ag)	1,59	0,0041
Χαλκός (Cu)	1,72	0,0043
Λευκόχρυσος (Pt)	10,00	0,00393
Βολφράμιο (W)	5,60	0,0048
Νικέλιο (Ni)	7,80	0,0068

Η ευαισθησία του μετάλλου σε μεταβολές της θερμοκρασίας δίνεται από το λόγο μεταβολής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ / ρ_0 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και είναι διαφορετική για κάθε υλικό. Από το διάγραμμα στο Σχήμα 1.15 παρατηρείται ότι το νικέλιο παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στις μεταβολές της θερμοκρασίας σε σχέση με το χαλκό.



Σχήμα 1.15: Διάγραμμα μεταβολής του λόγου ρ/ρ_0 διαφόρων μετάλλων σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

Τυπικές τιμές μέτρησης θερμοκρασίας εξαρτόμενη από τον τύπο κατασκευής (φιλμ ή σύρματος), με στοιχεία RTD (Resistance Temperature Detectors, RTD) (Σχ. 1.16) είναι:

- με υλικό χαλκού στην περιοχή -100°C έως $+200^{\circ}\text{C}$,
- με υλικό κράμα νικελίου από -150°C έως $+300^{\circ}\text{C}$, και
- με υλικό λευκόχρυσου ή πλατίνα από -270°C έως $+850^{\circ}\text{C}$.

Άλλα στοιχεία που μεταβάλλουν την αντίστασή τους με τη θερμότητα είναι τα θερμίστορ. Τα θερμίστορ κατασκευάζονται από υλικά ημιαγωγών που έχουν υποστεί επεξεργασία με οξείδια χρωμίου, κοβαλτίου, σιδήρου, μαγγανίου και νικελίου.



Σχήμα 1.16: Τυπικά δείγματα αισθητήρων RTD.

Η μορφή τους ποικίλει από δισκία και κάψουλες μέχρι και στυλίσκους (Σχ. 1.18). Μπορούν να έχουν μικρό μέγεθος και εμφανίζουν μικρούς χρόνους απόκρισης. Τα θερμίστορ παρουσιάζουν αρνητικό θερμικό συντελεστή, δηλαδή η αντίστασή τους μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία σύμφωνα με την εξίσωση:

$$R_{TH} = R_{REF} e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{REF}} \right)}$$

όπου,

R_{TH} : η αντίσταση του θερμίστορ,

R_{REF} : η αντίσταση στη θερμοκρασία αναφοράς,

T : η θερμοκρασία,

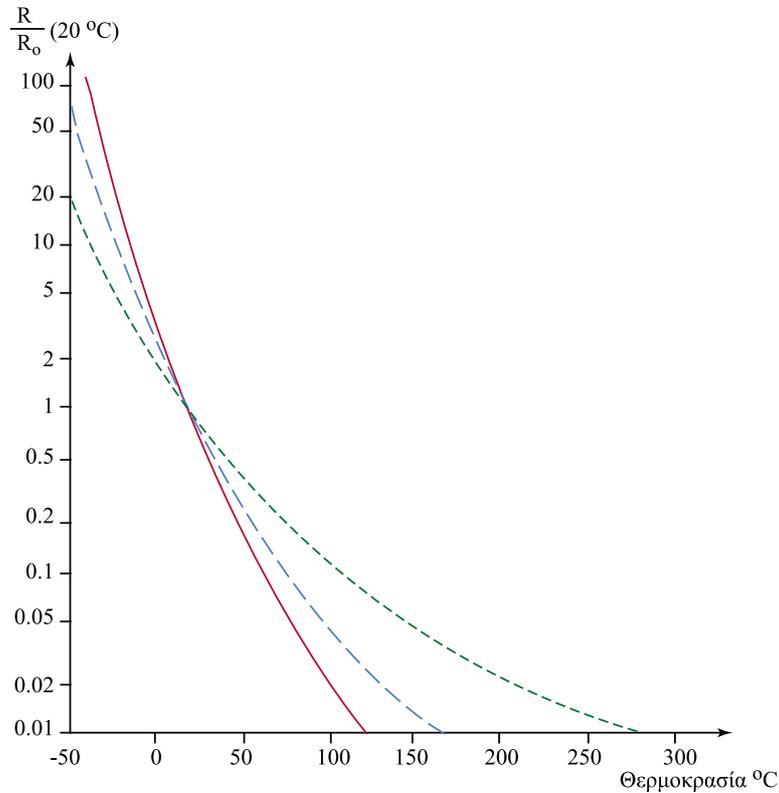
T_{REF} : η θερμοκρασία αναφοράς του θερμίστορ (25 °C, 77 °F, 298.15 K), και

β : ο συντελεστής βαθμονόμησης του θερμίστορ ο οποίος εξαρτάται από το υλικό κατασκευής του, και λαμβάνει τυπικές τιμές από 3.000 έως 5.000 K.

Τα θερμίστορ που ικανοποιούν την παραπάνω σχέση καλούνται θερμίστορ αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας NTC (Negative Temperature Coefficient, NTC). Στο διάγραμμα στο Σχήμα 1.19 απεικονίζεται η μη γραμμική μεταβολή της αντίστασης του θερμίστορ με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Με κατάλληλες μορφές προσμίξεων κατασκευάζονται θερμίστορ με θετικό θερμικό συντελεστή. Τα θερμίστορ αυτά καλούνται θερμίστορ θετικού συντελεστή θερμοκρασίας PTC (Positive Temperature Coefficient).



Σχήμα 1.18 Τυπικά δείγματα θερμίστορ.



Σχήμα 1.19 Διάγραμμα μεταβολής της αντίστασης θερμίστορ NTC με τη θερμοκρασία.

Η ωμική αντίσταση ενός αγωγού δίνεται από τη σχέση:

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

όπου,

- ρ: ειδική αντίσταση υλικού,
- L: το μήκος του αγωγού, και
- A: η διατομή του αγωγού.

Επίσης, η αντίσταση του αγωγού (σύρματος) λαμβάνεται:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A}$$

Από την παραπάνω σχέση εύκολα συμπεραίνουμε ότι αν ασκηθεί εφελκυσμός στον αγωγό με μήκος l τότε η συνολική του αντίσταση R μπορεί να μεταβληθεί λόγω αύξησης του μήκους κατά Δl .

Ο λόγος $\frac{\Delta l}{l}$ καλείται παραμόρφωση ή ειδική μήκυνση και συμβολίζεται με το γράμμα 'ε'.

Ο λόγος $\frac{\Delta d}{d}$ καλείται εγκάρσια παραμόρφωση 'ε_T'. (μεταβολή της διαμέτρου με μεταβολή του Dl)

Η επίδραση της μεταβολής της διαμέτρου του αγωγού σε σχέση με τη μεταβολή του μήκους δίνεται:

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 \Rightarrow \frac{\Delta A}{A} = -2\nu \frac{\Delta l}{l}$$

Η μεταβολή της ειδικής αντίστασης που οφείλεται στη μεταβολή του όγκου αποδεικνύεται:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = c(1 - 2\nu) \frac{\Delta l}{l}, \quad c = \text{σταθερά Bridgman}$$

Ο λόγος της ειδικής μήκυνσης 'ε' και της εγκάρσιας παραμόρφωσης 'ε_T' καλείται συντελεστής Poisson (Poisson's ratio) με συνήθη τιμή 0,3. Ισχύει ότι:

$\frac{\Delta d}{d} = -\nu \frac{\Delta l}{l}$ ή $\varepsilon_T = -\nu\varepsilon$ οπότε η εξίσωση $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A}$ μπορεί να γραφτεί ως:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \varepsilon(1 + 2\nu)$$

Καθώς η αντίσταση του στοιχείου μεταβάλλεται λόγω μήκυνσης, ορίζεται ο παράγοντας μετατροπής (gage factor, GF) που δίνεται από τη σχέση:

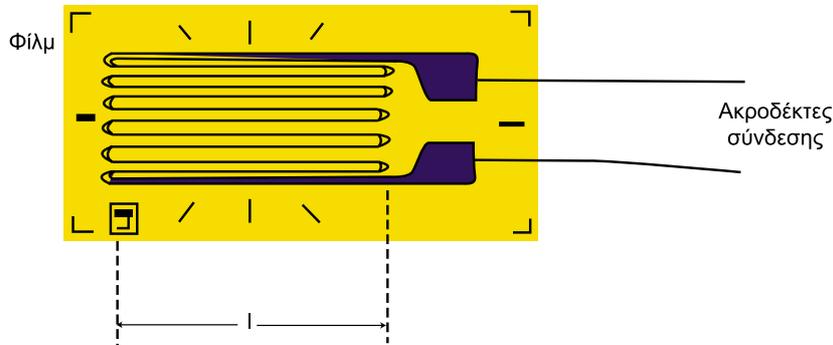
$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon}$$

όπου αντικαθιστώντας στην εξίσωση $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \varepsilon(1 + 2\nu)$ λαμβάνουμε ότι:

$$GF = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\varepsilon}$$

Ο παράγοντας μετατροπής GF εξαρτάται από το υλικό του στοιχείου που είναι κατασκευασμένη η πιεζοαντίσταση με τυπική τιμή 2 για τα συνήθη χρησιμοποιού-

μενα μέταλλα κατασκευής. Στο Σχήμα 1.20 απεικονίζεται ένα στοιχείο πιεζοαντίστασης συγκολλημένου τύπου ή επαφής.



Σχήμα 1.20: Πιεζοαντίσταση συγκολλημένου τύπου ή επαφής.

Καθώς μεταβάλλεται η υγρασία στο περιβάλλον χώρο του υλικού, η χημική σύνθεση από την οποία αποτελείται το υλικό παρουσιάζει μεταβολή στην ειδική αντίστασή του και συνεπώς στην ωμική αντίσταση του υλικού.

1.2.1.2 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων φαινομένου μεταβολής χωρητικότητας

Όταν ένας αισθητήρας στηρίζει την αρχή λειτουργίας του στη μεταβολή της χωρητικότητας, το μέγεθος, είναι συνάρτηση της απόστασης d μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή, του εμβαδού της επιφάνειας A των παράλληλων επίπεδων οπλισμών και της διηλεκτρικής σταθεράς ϵ του διηλεκτρικού υλικού ανάμεσα στους οπλισμούς του πυκνωτή:

$$C = f(d, A, \epsilon) = \frac{\epsilon A}{d}$$

Η χωρητικότητα του πυκνωτή συναρτήσει της κάθετης απόστασης x ανάμεσα στους οπλισμούς του πυκνωτή, δίνεται από τη σχέση:

$$C(x) = \frac{\epsilon A}{x} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{x}$$

όπου,

ϵ : η διηλεκτρική σταθερά,

ϵ_r : η σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού,

ϵ_0 : $8.854188 \times 10^{-12} \text{ F/m}^{-1}$,

x : η απόσταση των πλακών και

A : η επιφάνεια των παράλληλων επίπεδων οπλισμών.

Η χωρητικότητα του πυκνωτή συναρτήσει της παράλληλης μετατόπισης x του διηλεκτρικού ανάμεσα στους οπλισμούς του πυκνωτή, δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{\epsilon_0 w [\epsilon_2 l - (\epsilon_2 - \epsilon_1) x]}{d}$$

όπου,

- l : το μήκος της επιφάνειας του οπλισμού στο οποίο εφάπτεται το διηλεκτρικό υλικό,
- w : το πλάτος της επιφάνειας του οπλισμού,
- ϵ : η διηλεκτρική σταθερά του υλικού στο μήκος της μετατόπισης x ,
- ϵ_2 : η διηλεκτρική σταθερά του υλικού στο εναπομείναν μήκος $l-x$ και
- d : η απόσταση μεταξύ των οπλισμών.

Συνήθως οι αισθητήρες χωρητικότητας μεταβλητού διηλεκτρικού χρησιμοποιούνται στη μέτρηση της στάθμης δεξαμενών. Η μεταβολή της στάθμης του ρευστού της δεξαμενής μεταβάλλει το διηλεκτρικό ανάμεσα στους οπλισμούς του πυκνωτή. Σε αυτή τη διάταξη η χωρητικότητα του πυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

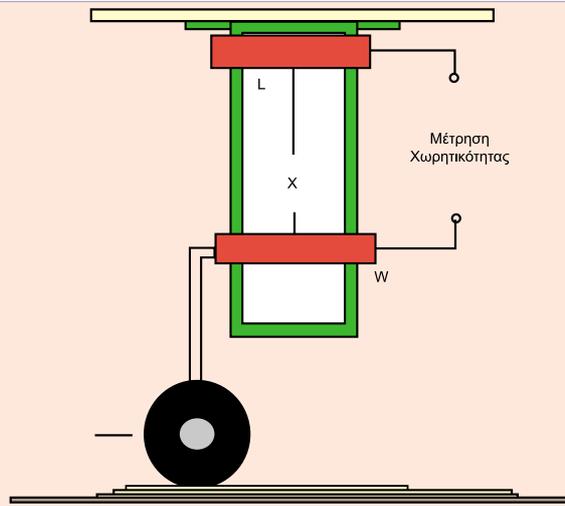
$$C = C_0 \epsilon_r \frac{d}{r} + C_0$$

όπου,

- C_0 : η τιμή της χωρητικότητας στο αέρα,
- ϵ_r : η διηλεκτρική σταθερά του ρευστού,
- r : το συνολικό μήκος των οπλισμών, και
- d : η στάθμη του διηλεκτρικού μέσα στον αισθητήρα.

Παράδειγμα 1.1

Ένα σύστημα μέτρησης φύλλων χάρτου με μικρομετρικό άξονα χρησιμοποιεί στοιχείο χωρητικότητας. Ο πυκνωτής έχει δύο στοιχειώδη πλάκες με διαστάσεις $w=0,01\text{m}$ και μήκος $L=0,02\text{m}$. Η απόσταση μεταξύ των πλακών σε θέση ηρεμίας είναι $x=0,005\text{m}$. Να υπολογίσετε τη μεταβολή της χωρητικότητας, όταν ο άξονας παρασύρει τον έναν οπλισμό του πυκνωτή, κατά $-0,001\text{m}$ από τη θέση ηρεμίας. Το διηλεκτρικό της χωρητικότητας είναι $\epsilon_r=26$. Δίνεται: $\epsilon_0=8,854 \cdot 10^{-12} \text{ f / m}$.



Λύση

Η επιφάνεια του οπλισμού του χωρητικού αισθητήρα είναι:

$$A = wL = 0,01 \cdot 0,02 = 0,0002m^2$$

Επομένως η χωρητικότητα του αισθητήρα όταν οι οπλισμοί του είναι σε θέση ηρεμίας βρίσκεται:

$$C_0 = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{x} = 26 \cdot \epsilon_0 \frac{0,0002m^2}{0,005m} = 9,2pf$$

και όταν ο μικρομετρικός άξονας παρασύρει τον οπλισμό στη νέα θέση κατά $-0,001m$ τότε η χωρητικότητα του αισθητήρα βρίσκεται:

$$C_1 = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{x} = 26 \cdot \epsilon_0 \frac{0,0002m^2}{0,004m} = 11,5pf$$

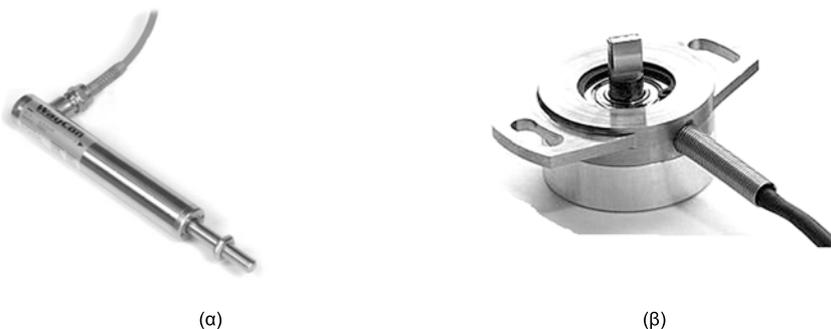
Συνεπώς στο σύστημα παρουσιάζεται μεταβολή χωρητικότητας κατά $2,3pf$.

1.2.1.3 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων φαινομένου μεταβολής αυτεπαγωγής

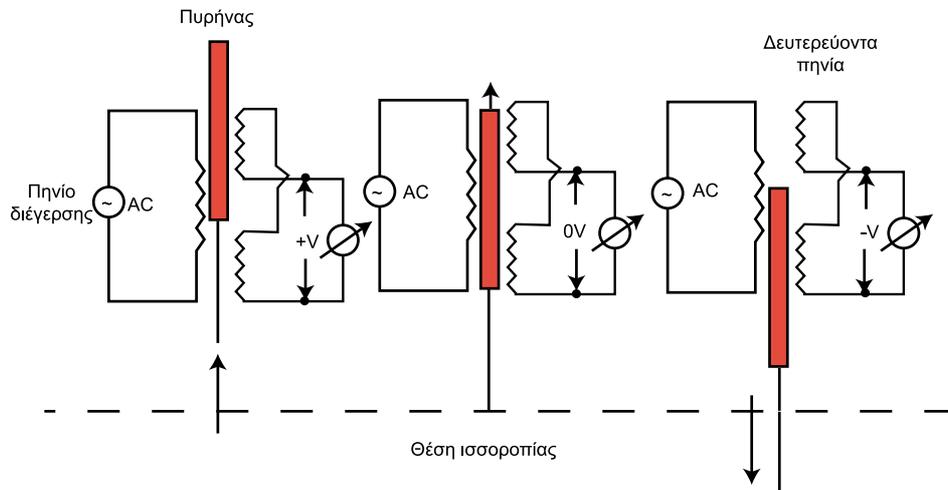
Όταν ένας αισθητήρας στηρίζει την αρχή λειτουργίας του στη μεταβολή της αυτεπαγωγής για την οποία ισχύει:

$$L = \mu_r \mu_0 N^2 \frac{A}{l}$$

κάθε μεταβολή του αριθμού των σπειρών (N), της διατομής (A) και του μήκους (l) μεταβάλλει την αυτεπαγωγή του στοιχείου το μέγεθος της οποίας εξαρτάται και από τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού του πυρήνα μ_r και του κενού $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (\text{N} \cdot \text{A}^{-2})$. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αισθητήρα αυτεπαγωγής αποτελεί ο Γραμμικά Μεταβαλλόμενος Διαφορικός Μετασχηματιστής - LVDT (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της γραμμικής μετατόπισης ή θέσης (Σχήμα 1.21 (α)), και β) ο Στροφικά Μεταβαλλόμενος Διαφορικός Μετασχηματιστής - RVDT (Rotational Variable Differential Transformer, RVDT) που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της γωνιακής μετατόπισης ή θέσης (Σχήμα 1.21 (β)). Ο LVDT είναι ένας ηλεκτρομηχανικός μετατροπέας που μπορεί να μετατρέψει την ευθύγραμμη κίνηση ενός σώματος στο οποίο συνδέεται μηχανικά, σε ένα αναλογικό ηλεκτρικό σήμα. Η εσωτερική δομή του μετατροπέα περιλαμβάνει ένα πρωτεύον έλασμα (πηνίο) που βρίσκεται μεταξύ ενός ζεύγους όμοιων καμπύλων δευτερευόντων ελασμάτων (πηνίων), συμμετρικά διατεταγμένων ως προς αυτό. Το κινητό μέρος του αισθητήρα αποτελείται από ένα ξεχωριστό σωληνοειδές επαγωγικό στέλεχος, κατασκευασμένο από μαγνητικά διαπερατό υλικό που ονομάζεται πυρήνας. Ο πυρήνας κινείται ελεύθερα, κατά μήκος της εσωτερικής κοιλότητας που σχηματίζουν τα ελάσματα (πηνία), και είναι μηχανικά συνδεδεμένος στο αντικείμενο του οποίου μετράται η μετατόπιση. Το ηλεκτρικό σήμα εξόδου του αισθητήρα είναι η διαφορική εναλλασσόμενη τάση μεταξύ των δευτερευόντων ελασμάτων (πηνίων) η οποία μεταβάλλεται λόγω της παλινδρομικής κίνησης του πυρήνα εντός της κοιλότητας των ελασμάτων (πηνίων) (Σχ. 1.22).



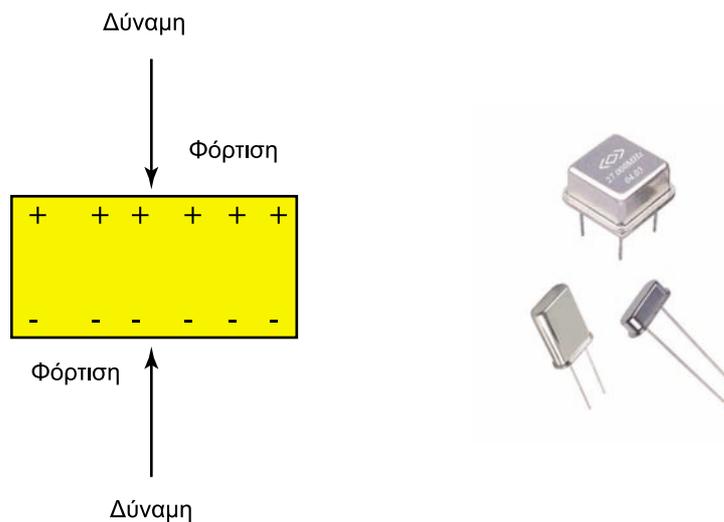
Σχήμα 1.21: Τυπικό δείγμα α) Γραμμικά Μεταβαλλόμενου Διαφορικού Μετασχηματιστή, και β) Στροφικά Μεταβαλλόμενου Διαφορικού Μετασχηματιστή.



Σχήμα 1.22: Αρχή λειτουργίας στοιχείου LVDT.

1.2.1.4 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων πιεζοηλεκτρικού φαινομένου

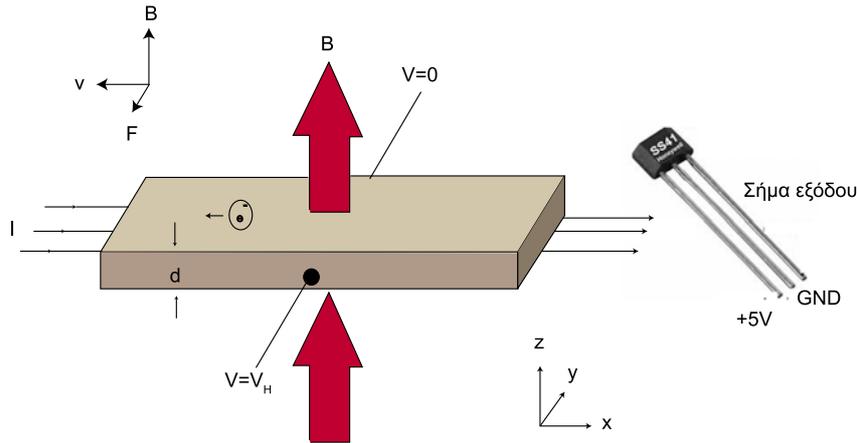
Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του στοιχείου χαλαζία όταν σε αυτόν ασκείται απότομη μηχανική δύναμη παράγεται ηλεκτρικό φορτίο στα άκρα του (Σχ. 1.23). Η εφαρμογή στατικής δύναμης πάνω στον πιεζοκρύσταλλο προκαλεί εκθετική εξασθένηση του παραγόμενου ηλεκτρικού φορτίου έως ότου μηδενιστεί. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι ειδικά σχεδιασμένοι να μετρούν μη στατικές ταλαντούμενες δυνάμεις, κρούσεις ή απότομες δυνάμεις συμπίεσης/αποσυμπίεσης.



Σχήμα 1.23: Τυπικά δείγματα πιεζοκρυστάλλων.

1.2.1.5 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων φαινομένου Hall

Στους αισθητήρες Hall αξιοποιείται το φαινόμενο της ανάπτυξης τάσης στον εγκάρσιο άξονα ενός αγώγιμου ή ημιαγώγιμου πλακιδίου, όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα κατά το διαμήκη άξονά του, και βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο κάθετο στον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα όπως απεικονίζεται στο Σχ. 1.24.



Σχήμα 1.24: Αρχή φαινομένου Hall και τυπικό δείγμα αισθητήρα.

Η αιτία του φαινομένου Hall, είναι η δύναμη Lorentz που ασκείται σε κάθε φορτίο που κινείται με ταχύτητα v μέσα σε μαγνητικό πεδίο B :

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$$

όπου:

B : η μαγνητική επαγωγή,

q : το ηλεκτρικό φορτίο του σωματιδίου, και

v : η στιγμιαία ταχύτητα του φορτίου

Η τάση Hall που αναπτύσσεται σε στοιχεία ημιαγωγών δίνεται από τη σχέση:

$$V_H = \frac{R_H BI}{d}$$

όπου,

d = το πάχος του πλακιδίου,

I : το ρεύμα που διαρρέει το πλακίδιο, και

R_H = ονομάζεται σταθερά Hall και ισούται με $\frac{1}{nq}$.

Παράδειγμα 1.2

Να υπολογίσετε την τάση Hall που αναπτύσσεται στα άκρα του ενός αγώγιμου πλακιδίου όταν διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως ίσο με 3 A. Το πλακίδιο έχει πάχος $d=0,1\text{ cm}$ και είναι τοποθετημένο κάθετα σε μαγνητικό πεδίο έντασης 5T. Δίνεται:

$$n = 11 \times 10^{28} \text{ ηλεκτρόνια/m}^3$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$$

Λύση

Από τη σχέση $V_H = \frac{R_H BI}{d}$ έχουμε:

$$R_H = \frac{1}{nq} = 5,68 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{Cb} \text{ \textit{όποτε} } V_H = \frac{R_H BI}{d} = 0,852 \text{ mV}$$

Οι αισθητήρες φαινόμενου Hall χρησιμοποιούνται συνήθως ως ανιχνευτές προσέγγισης και μπορούν να ανιχνεύουν εξαιρετικά ασθενή μαγνητικά πεδία και μικρές αλλαγές της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές όπου γίνεται χρήση αισθητήρων Hall, όπως: ανάγνωση μαγνητικών καρτών, συστήματα μέτρησης ταχύτητας, συστήματα μέτρησης μαγνητικού πεδίου, συστήματα καθοδήγησης, συστήματα ανάφλεξης κλπ.

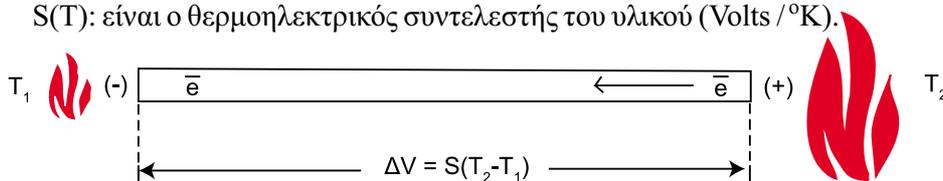
1.2.1.6 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων θερμοηλεκτρικού φαινομένου

Σε ένα μέταλλο που οι δύο άκρες του βρίσκονται σε διαφορετικά θερμικά περιβάλλοντα $T_2 > T_1$ αναπτύσσεται μικρή διαφορά δυναμικού dV λόγω θερμοηλεκτρικού φαινομένου (thermoelectricity), ή αλλιώς φαινόμενο Seebeck. Κατά το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, τα ηλεκτρόνια του μεταλλικού αγωγού που βρίσκονται στο υψηλό θερμοκρασιακό περιβάλλον T_1 διαχέονται προς την περιοχή που εκτίθεται στη θερμοκρασία T_2 λόγω της υψηλής τους ενεργειακής στάθμης (Σχ.1.25). Η διαφορά δυναμικού δίνεται από τη σχέση:

$$dV = S(T) \cdot (T_2 - T_1)$$

όπου,

$S(T)$: είναι ο θερμοηλεκτρικός συντελεστής του υλικού (Volts /°K).



Σχήμα 1.25: Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο ($T_2 > T_1$).

Ο συντελεστής Seebeck αποτελεί έκφραση των ενεργειακών μεταβολών των ηλεκτρονίων και δίνεται από τη σχέση:

$$S \approx - \frac{2\pi^2 k \left(\frac{1}{2} kT \right)}{3eE_f}$$

όπου,

E_f : η ενέργεια Fermi.

Τα θερμοζεύγη αξιοποιούν το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας (Σχ.1.26).



Σχήμα 1.26: Τυπικό δείγμα θερμοζεύγους (omega).

1.2.1.7 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων φωτοηλεκτρικού φαινομένου

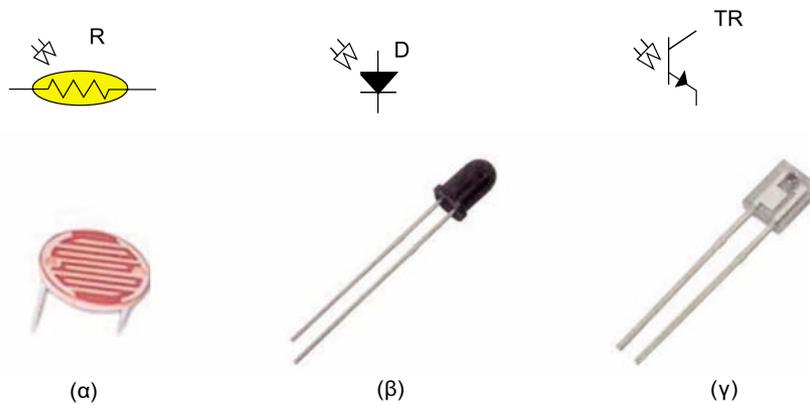
Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ) ενός ημιαγωγού αποτελείται από το άθροισμα των όρων των δύο φορέων του υλικού (ηλεκτρόνια και οπές).

$$\sigma = nq_e\mu_n + pq_e\mu_p$$

Όπως παρατηρούμε κάθε όρος της παραπάνω εξίσωσης είναι ανάλογος:

- του αριθμού του φορέα ανά μονάδα όγκου στη ζώνη σθένους (n , ο αριθμός ηλεκτρονίων, και p , ο αριθμός των οπών),
- της κινητικότητας των φορέων (μ_n , για τα ηλεκτρόνια, και μ_p , για τις οπές) και
- του φορτίου του ηλεκτρονίου (e).

Στους ημιαγωγούς, τα ηλεκτρόνια συμπληρώνουν τα διαθέσιμα ενεργειακά επίπεδα του υλικού μέχρι την κορυφή της ζώνης σθένους (V_B), η οποία είναι χωρισμένη από το κατώτατο σημείο της κενής ζώνης αγωγιμότητας (C_B) από ένα ενεργειακό χάσμα (E_g), το οποίο είναι χαρακτηριστικό του υλικού. Οι κυριότεροι τύποι αισθητήρων που στηρίζουν τη λειτουργία τους στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι: η φωτοαντίσταση, η φωτοδιόδος και το φωτοτρανζίστορ (Σχ.1.27).



Σχήμα 1.27: α) Φωτοαντίσταση, β) φωτοδιόδος, και γ) φωτοτρανζίστορ.

1.2.1.8 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων φαινόμενου χημικής αντίδρασης

Η λειτουργία τους βασίζεται στα ερεθίσματα που προκαλούνται πάνω σε αυτούς όταν έρθουν σε επαφή με κάποια χημική ουσία. Λόγω της ιδιαίτερης σύνθεσης των ερεθισμάτων ένας χημικός αισθητήρας θα πρέπει να αναγνωρίζει με μεγάλη επιλεκτικότητα μια αναλυόμενη ουσία η οποία είναι παρούσα είτε μέσα στην αέρια είτε μέσα στην υγρή φάση. Για παράδειγμα κατά τη διαδικασία των αντιδράσεων οξειδοαναγωγής (oxidation reduction potential) μια χημική ουσία χάνει (οξειδωση) ή κερδίζει ηλεκτρόνια (αναγωγή), με αποτέλεσμα να έχει διαφορετικό αριθμό ηλεκτρονίων στις στιβάδες των ατόμων της, πριν και μετά τη χημική αντίδραση. Συνεπώς σε κάθε αντίδραση οξειδοαναγωγής εμπλέκεται ένας μηχανισμός ανταλλαγής ηλεκτρονίων. Η δυνατότητα που έχει κάθε χημική ουσία να απελευθερώνει ή να προσλαμβάνει ηλεκτρόνια κατά τη διάρκεια μιας οξειδοαναγωγικής αντίδρασης εκφράζεται με μονάδες ηλεκτρικού δυναμικού (E_0) και μετρούνται σε Volt.

1.2.2 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Τα χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα είναι πολύ σημαντικές παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την υλοποίηση μετρητικών συστημάτων. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά που αξιολογούμε σε έναν αισθητήρα είναι:

- **Συνάρτηση μεταφοράς:** η συνάρτηση μεταφοράς εκφράζει το μαθηματικό μοντέλο με το οποίο ο αισθητήρας μετατρέπει το ερέθισμα σε ηλεκτρικό σήμα.
- **Κλίμακα εισόδου:** Ως κλίμακα εισόδου (range) αναφερόμαστε στο πεδίο τιμών του μετρήσιμου μεγέθους που μπορεί να δεχτεί ο αισθητήρας ως διέγερση. Για παράδειγμα αισθητήρας πίεσης φέρει κλίμακα εισόδου 50 έως 200 psi.
- **Εύρος πλήρους κλίμακας εισόδου:** Ως εύρος πλήρους κλίμακας εισόδου (Span Input Full Scale - IFS) αναφερόμαστε στην αλγεβρική διαφορά της ελάχιστης (X_{\min}) από τη μέγιστη (X_{\max}) τιμή του μετρήσιμου μεγέθους, και δίνεται:

$$Span = x_{\max} - x_{\min}$$

Αισθητήρας θερμοκρασίας με κλίμακα εισόδου (-100, 150) έχει εύρος πλήρους κλίμακας εισόδου:

$$Span = x_{\max} - x_{\min} = 150 - (-100) = 250 \text{ } C^0$$

- **Εύρος πλήρους κλίμακας εξόδου:** Ως εύρος πλήρους κλίμακας εξόδου, FSO (Full Scale Output - FSO) εννοούμε την αλγεβρική διαφορά της ελάχιστης (X_{\min}) από τη μέγιστη (X_{\max}) τιμή του σήματος, στην έξοδο του αισθητήρα.
- **Ακρίβεια:** Ως ακρίβεια ορίζεται η διαφορά του σήματος εξόδου σε συνάρτηση με την πραγματική τιμή του μετρήσιμου μεγέθους. Το σχετικό σφάλμα της ακρίβειας, σε συνάρτηση με την πραγματική τιμή του μεγέθους δίνεται:

$$e_{res} = \frac{(\text{μετρούμενη τιμή} - \text{πραγματική τιμή})}{\text{πραγματική τιμή}}$$

Παράδειγμα 1.3

Ένα σύστημα μέτρησης πίεσης έχει εύρος 0-200 psi. Να υπολογίσετε το σχετικό σφάλμα ακρίβειας του αισθητήρα για πραγματική τιμή ασκούμενης δύναμης 148.2psi στην ένδειξη των 150 psi.

Λύση

$$e_{res} = \frac{(\text{μετρούμενη τιμή} - \text{πραγματική τιμή}_t)}{\text{πραγματική τιμή}} = \frac{(150 - 148,2)}{148,2} = 0,012 = 1,2\%$$

- **Διέγερση:** Ως διέγερση καλούμε την τάση τροφοδοσίας για τη λειτουργία ενός ενεργού αισθητήρα με τυπικές τιμές πόλωσης 5, 10 και 12 Volt.
- **Διακριτική ικανότητα:** Ως διακριτική ικανότητα (resolution) καλούμε τη μικρότερη δυνατή ανιχνεύσιμη μεταβολή του μεγέθους της φυσικής ποσότητας. Για παράδειγμα, αισθητήρας θερμοκρασίας ανιχνεύει μεταβολή της τάξης των 0,02 °C.
- **Σύνθετη αντίσταση εξόδου:** Κάθε αισθητήρας φέρει ονομαστική αντίσταση εξόδου έτσι ώστε να επιτευχθεί από το σύστημα η μέγιστη μεταφορά ισχύος του σήματος.
- **Υστέρηση:** Υστέρηση (hysteresis) σε ένα αισθητήρα καλούμε το φαινόμενο κατά το οποίο ο αισθητήρας δεν επιστρέφει την ίδια τιμή του σήματος εξόδου με την ίδια φυσική ποσότητα.
- **Σφάλμα μη γραμμικότητας:** Σφάλμα μη γραμμικότητας καλούμε την παραγόμενη τιμή εξόδου του αισθητήρα που φέρει απόκλιση από τη γραμμικότητά του.
- **Βαθμονόμηση:** Πολλοί αισθητήρες απαιτούν σε σταδιακά χρονικά διαστήματα να βαθμονομούνται λόγω φθορών της δομής τους στο χρόνο. Ειδικότερα αισθητήριες διατάξεις οι οποίες φέρουν μηχανικά συστήματα όπως ελατήρια, απαιτείται η συντήρησή τους καθώς και βαθμονόμηση τους σε μικρότερα χρονικά διαστήματα.

Σήμερα η τεχνολογία έχει να επιδείξει την ανάπτυξη αισθητήριων στοιχείων που καλύπτουν θέματα μετρήσεων:

- **Κίνησης**
- **Μετατόπισης**
- **Στάθμης**
- **Θερμοκρασίας**
- **Πίεσης**
- **Ροής**
- **Ταχύτητας**
- **Επιτάχυνσης**
- **Δύναμης**
- **Ροπής**
- **Μαγνητικών Πεδίων**
- **Ασθενών και Υψηλών Ρευμάτων**
- **Αφής**
- **Οπτικών Μεγεθών**
- **Ακουστικών Μεγεθών**

- **Ιονίζουσας Ακτινοβολίας**
- **Χημικών Μεγεθών**
- **Βιοιατρικών Μεγεθών**
- **Ηλεκτροφυσιολογίας Φυτών**
- **Περιβαλλοντικών Μεγεθών**

1.3 Βαθμίδα προσαρμογής σήματος

Η βαθμίδα *προσαρμογής σήματος* (signal conditioning) έχει ως κύριο σκοπό τη τροποποίηση των χαρακτηριστικών του παραγόμενου σήματος από τον αισθητήρα ή τον μορφοτροπέα στην επιθυμητή μορφή ώστε να μπορεί να επεξεργαστεί και κατόπιν να καταγραφεί ή να απεικονιστεί. Οι διατάξεις προσαρμογής σήματος αυξάνουν την ακρίβεια και την απόδοση του μετρητικού συστήματος. Οι συνηθέστεροι μέθοδοι προσαρμογής που εφαρμόζουμε σε ένα αποκτημένο σήμα είναι:

- η ενίσχυση,
- η εξασθένηση,
- η απομόνωση,
- το φιλτράρισμα,
- η διέγερση,
- η γραμμικοποίηση,
- η αντιστάθμιση ψυχρής επαφής, και
- η διασύνδεση μέσω γέφυρας.

Όπως αναφέραμε η βαθμίδα της προσαρμογής μπορεί να περιλαμβάνει ένα πλήθος μονάδων που έχουν ως σκοπό η αποκτημένη πληροφορία από τον αισθητήρα ή τον μετατροπέα να αποκτήσει κατάλληλο πεδίο τιμών ώστε να απεικονιστεί ή να καταγραφεί σε κατάλληλο βαθμονομημένο όργανο ή να μετατραπεί από έναν αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα σε ψηφιακό δεδομένο. Η παράμετρος ενίσχυσης ως προσαρμογή σήματος ενισχύει το πλάτος του αποκτημένου σήματος παρέχοντας κατά αυτό τον τρόπο αύξηση της ακρίβειας και της ευαισθησίας για τη βαθμίδα εισόδου ενός αναλογικού σε ψηφιακό μετατροπέα. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει η βαθμίδα του ενισχυτή είναι ο μεγάλος λόγος σήματος προς θόρυβο (S/N) μειώνοντας την επίδραση του θορύβου στο ενισχυμένο σήμα. Η μέθοδος της εξασθένησης χρησιμοποιείται όταν το πεδίο τιμών του αποκτημένου σήματος είναι μεγαλύτερο από την κλίμακα εισόδου ενός αναλογικού σε ψηφιακό μετατροπέα. Η προσαρμογή μέσω απομόνωσης αφορά τη διασύνδεση μεταξύ αισθητήρα και μετρητικού συστήματος δίχως γαλβανική σύνδεση. Συνήθεις μέθοδοι απομόνωσης είναι η χρήση μετασχηματιστών, οπτοζευκτών και χωρητικών στοιχείων. Η μέθοδος της απομόνωσης προστατεύει το μετρητικό σύστημα από την επίδραση πηγών υψηλής τάσης που μπορεί να βρίσκονται στο περιβάλλον του συστήματος, προκαλώντας θετικές αιχμές στο σήμα οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στην καταστροφή του συστήματος μέτρησης.

Επίσης το φιλτράρισμα αποτελεί προσαρμογή του σήματος με την έννοια της αποκοπής ανεπιθύμητων χαρακτηριστικών του σήματος λόγω παρεμβολών θορύβου με χρήση διαφόρων τύπων φίλτρων. Ένας συνήθης τύπος φίλτρου σε ένα μετρητικό σύστημα είναι το χαμηλοπερατό φίλτρο ως φίλτρο αντι-αναδίπλωσης συχνοτήτων για τις συχνότητες που είναι μεγαλύτερες από τη συχνότητα Nyquist στην οποία δειγματολυπτεί ο αναλογικός σε ψηφιακό μετατροπέας.

Με τον όρο γραμμικοποίηση εννοούμε τη διαδικασία προσαρμογής κατά την οποία προσαρμόζεται η έξοδος του σήματος να είναι γραμμική με τη μεταβολή του ερεθίσματος. Η γραμμικοποίηση μπορεί να γίνει είτε με κατάλληλα ηλεκτρικά κυκλώματα είτε μέσω λογισμικού.

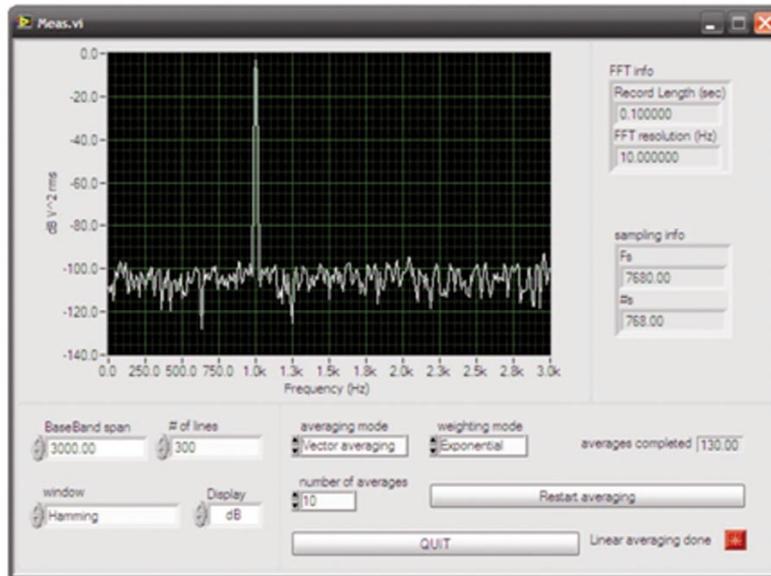
1.4 Βαθμίδα επεξεργασία σήματος

Ως επεξεργασία σήματος ορίζουμε την ανάλυση ενός σήματος για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Για την επεξεργασία ενός σήματος εργαζόμαστε:

- στο πεδίο επεξεργασίας των σημάτων στο χρόνο (time analysis),
- στο πεδίο επεξεργασίας στατιστικής σημαντικότητας (statistic probability analysis),
- στο πεδίο επεξεργασίας συχνοτήτων (power spectrum analysis), και
- στο πεδίο επεξεργασίας στο επίπεδο παραμέτρου / χρόνου (cofience – time analysis)

Η πληροφορία του σήματος σε ψηφιακή μορφή στην έξοδο του αναλογικού σε ψηφιακού μετατροπέα δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας των δεδομένων από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, ή από έναν μικροϋπολογιστή που μπορεί να φέρει το ηλεκτρονικό μετρητικό σύστημα όταν αυτό αποτελεί ένα ενσωματωμένο σύστημα συλλογής και καταγραφής δεδομένων όπως στην περίπτωση ενός καταγραφέα δεδομένων (data logger).

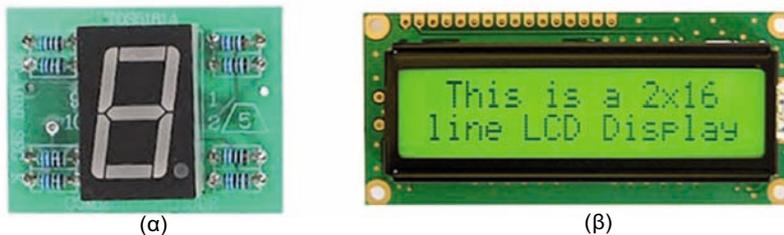
Υπεύθυνο για την επεξεργασία των αποκτημένων πληροφοριών είναι το λογισμικό που φέρει το ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης μέσω του οποίου εκτελούνται διεργασίες όπως: μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών, ανάλυση σήματος στο πεδίο της συχνότητας/ χρόνου, στατιστική ανάλυση σήματος, και πλήθος άλλων επεξεργασιών. Με τη χρησιμοποίηση μονάδων υψηλής τεχνολογίας, και λογισμικών επεξεργασίας σημάτων, όπως το LabVIEW της National Instrument μπορεί να επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια μέτρησης και ελέγχου της πληροφορίας του σήματος σε εργαστηριακή ή βιομηχανική εφαρμογή. Στο Σχήμα 1.28 απεικονίζεται περιβάλλον μέτρησης αναπτυγμένο με τη γραφική γλώσσα προγραμματισμού LabVIEW.



Σχήμα 1.28: Παράδειγμα περιβάλλοντος μέτρησης αναπτυγμένο με τη γραφική γλώσσα προγραμματισμού LabVIEW.

1.5 Καταγραφή και απεικόνιση δεδομένων

Σε ένα σύστημα συλλογής δεδομένων (data acquisition) μετά την απόκτηση του σήματος από τον αισθητήρα, την προσαρμογή του σήματος (signal condition) από διατάξεις ενίσχυσης, φιλτράρισματος και απομόνωσης, και τη μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό δεδομένο για την επεξεργασία του, τελική βαθμίδα αποτελούν τα όργανα απεικόνισης και καταγραφής των δεδομένων. Τα όργανα αυτά μπορεί να είναι αναλογικά ή ψηφιακά. Κύριος τύπος αναλογικού οργάνου αποτελεί το όργανο κινητού πηνίου (moving coil meters). Οι ηλεκτρονικές οθόνες απεικόνισης ανήκουν στα ψηφιακά όργανα και παρέχουν άμεση ψηφιακή ανάγνωση της μετρούμενης τιμής σε ένα μετρητικό όργανο με κύριο χαρακτηριστικό την καθαρότητα και την σαφή ανάγνωση του αριθμού από τον χρήστη. Οι κυριότεροι τύποι ψηφιακών οθονών (Σχ.1.29) που χρησιμοποιούνται σήμερα στα μετρητικά όργανα είναι:



Σχήμα 1.29: α) Οθόνη επτά τμημάτων, και β) οθόνη υγρών κρυστάλλων.

- η οθόνη επτά τμημάτων(seven segment)
- η οθόνη υγρών κρυστάλλων (Liquid crystal display)

Η καταγραφή των μετρήσεων γίνεται και μέσω του υπολογιστικού συστήματος σε μορφή δυαδικών αρχείων που μπορούν να ανακτηθούν στο μέλλον από τον χρήστη ή ακόμη να μεταδοθούν σε απόμακρα συστήματα μέσω ενός τοπικού δικτύου ή ακόμη και του διαδικτύου. Πολλές φορές χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικές διατάξεις καταγραφής δεδομένων σε μορφή ενσωματωμένων συστημάτων (data logger) (Σχ. 1.30). Στα προηγούμενα χρόνια τα πιο συνηθισμένα όργανα καταγραφής ήταν οι καταγραφείς χαρτιού/ πέννας (chart recorders) οι οποίοι κυκλοφορούσαν σε διάφορους τύπους και μορφές προκειμένου να εξυπηρετούν τους εκάστοτε σκοπούς της μέτρησης. Οι καταγραφείς αυτοί είναι συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούν συνήθως χαρτί ως μέσο καταγραφής των πληροφοριών σε μορφή γραφημάτων.



Σχήμα 1.30: Τυπικό δείγμα καταγραφέα δεδομένων.



Για πλήρη κάλυψη όλων των παραπάνω θεμάτων μέτρησης φυσικών μεγεθών, και της ανάπτυξης διατάξεων ολοκληρωμένων συστημάτων μετρήσεων και ελέγχου ανατρέξτε στο βιβλίο:

**ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ
2^η Έκδοση**

ISBN 978-960-418-386-9
Σελίδες.: 1050
Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ

Το βιβλίο καλύπτει θέματα αισθητήρων και μεθόδων μετρήσεων σε πλήθος πεδίων και εφαρμογών όπως: κίνησης, μετατόπισης, στάθμης, θερμοκρασίας, πίεσης, ροής, ταχύτητας, επιτάχυνσης, δύναμης, ροπής, μαγνητικών πεδίων, ασθενών και υψηλών ρευμάτων, αφής, οπτικών μεγεθών, ακουστικών μεγεθών, ιονίζουσα ακτινοβολίας, χημικών μεγεθών, βιοιατρικών μεγεθών, ηλεκτροφυσιολογίας φυτών, περιβαλλοντικών μεγεθών, διαφόρων φυσικών και τεχνικών μεγεθών, έξυπνων και ασύρματων ZigBEE αισθητήριων διατάξεων κ.α..

Στη συνέχεια το βιβλίο καλύπτει θέματα ανάπτυξης διατάξεων ολοκληρωμένων συστημάτων μετρήσεων και ελέγχου εμβαθύνοντας σε κάθε βαθμίδα.

Για το λόγο ότι η δυναμική εξέλιξη των λογισμικών πακέτων επεξεργασίας, ανάλυσης και απεικόνισης δεδομένων επέφερε σημαντική ανάπτυξη και διάδοση των εικονικών οργάνων (Virtual Instruments), παρέχετε στον αναγνώστη όλο το γνωστικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων και ελέγχου εφαρμογών μέσω των λογισμικών LAbVIEW, MultiSIM καθώς και της μοντελοποίησης τους μέσω του λογισμικού SIMULINK (MATLAB).

Επίσης το βιβλίο καλύπτει στα θέματα του πλήθος λυμένων ασκήσεων και εργαστηριακών εφαρμογών ώστε ο φοιτητής σε θεωρητικό και εργαστηριακό επίπεδο να καλύψει στην πράξη πλήρως το πεδίο των αισθητήρων και των μετρητικών διατάξεων.



 **Ερωτήσεις**

1. Να αναφέρετε πέντε (5) παραδείγματα χρήσης ενός ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης.
2. Να αναφέρετε πέντε (5) ενεργούς και πέντε (5) παθητικούς αισθητήρες από τη βιβλιογραφία.

3. Να προδιαγράψετε τις απαιτήσεις για ένα ηλεκτρονικό σύστημα σε εφαρμογή του ενδιαφέροντος σας.
4. Ποια είναι η διαφορά ενός αισθητήρα από έναν μεταδότη.
5. Ποιες κατηγορίες αισθητηρίων διακρίνουμε ως προς τη μετατροπή του ερεθίσματος;
6. Τι είναι το θερμίστορ και ποια η διαφορά από την αντίσταση πλατίνας.
7. Τι είναι η πιεζοαντίσταση και ποια η αρχή λειτουργίας. Δώστε εφαρμογές.
8. Ποιο τύπο αισθητήρα θα χρησιμοποιούσατε σε ένα ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης στάθμης σε δεξαμενή.
9. Δώστε τη λειτουργία του στοιχείου LVDT και μια εφαρμογή του ενδιαφέροντος σας.
10. Αναφέρετε εφαρμογές με χρήση αισθητήρων πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.
11. Τι γνωρίζετε για το θερμοζεύγος.
12. Αναφέρετε εφαρμογές με χρήση αισθητήρα Hall.
13. Ερευνήστε στη βιβλιογραφία διαφόρους τύπους αισθητήρων για τη μέτρηση των παρακάτω μεγεθών:
 - Θερμοκρασία
 - Πίεση
 - Ροή
 - Ταχύτητα
 - Επιτάχυνση
 - Δύναμη
 - Ροπή
 - Περιβαλλοντικών Μεγεθών
 - Μαγνητικών Μεγεθών
 - Στάθμη και
 - Μετατόπιση
14. Να σχεδιάσετε το λειτουργικό διάγραμμα ενός ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης.
15. Ποιο σκοπό εξυπηρετεί η μονάδα προσαρμογής και ποιές τυπικές μέθοδοι εφαρμόζονται;
16. Ποιο σκοπό εξυπηρετεί η μονάδα επεξεργασίας;
17. Ποιο σκοπό εξυπηρετεί η μονάδα απεικόνισης και καταγραφής;

18. Αναπτύξτε στο λογισμικό LabVIEW εικονικό όργανο προσομείωσης μέτρησης της θερμοκρασίας και απεικόνισής της σε καταγραφικό με κλίμακα εισόδου από -50 έως 120°C .
19. Για την εύρεση αισθητήρων στο διεθνή εμπόριο συναντάμε δύο από τους πιο μεγάλους προμηθευτές υλικών: την Digikey και την Farnell, στις οποίες μέσω μηχανών αναζήτησης μπορεί ο μηχανικός να αναζητήσει τον αισθητήρα βάση των προδιαγραφών του και να το παραγγείλει. Να ερευνήσετε και να καταγράψετε ένα μοντέλο αισθητήρα για τα παρακάτω μετρήσιμα μεγέθη συμπληρώνοντας τις κενές προδιαγραφές σύμφωνα με τον αισθητήρα που θα επιλέξετε.



<http://www.digikey.com/>



<http://export.farnell.com/>

Μοντέλο Αισθητήρα	Μετρήσιμο Μέγεθος	Κλίμακα εισόδου	Κλίμακα εξόδου	Σφάλμα
	Μετατόπιση	1mm-100mm		
	Πίεση	1-20 psi	4-20mA	
	Ροή			0,1%
	Ταχύτητα		1...10mV	
	Επιτάχυνση			0,02%
	Θερμοκρασία	$-30...80^{\circ}\text{C}$		
	Επιτάχυνση			0,05%
	Στάθμη	0...80 cm		
	Ροπή		0,1...10V	
	Δύναμη	1...30N		