

2

Χαρακτηριστικά αισθητήρων

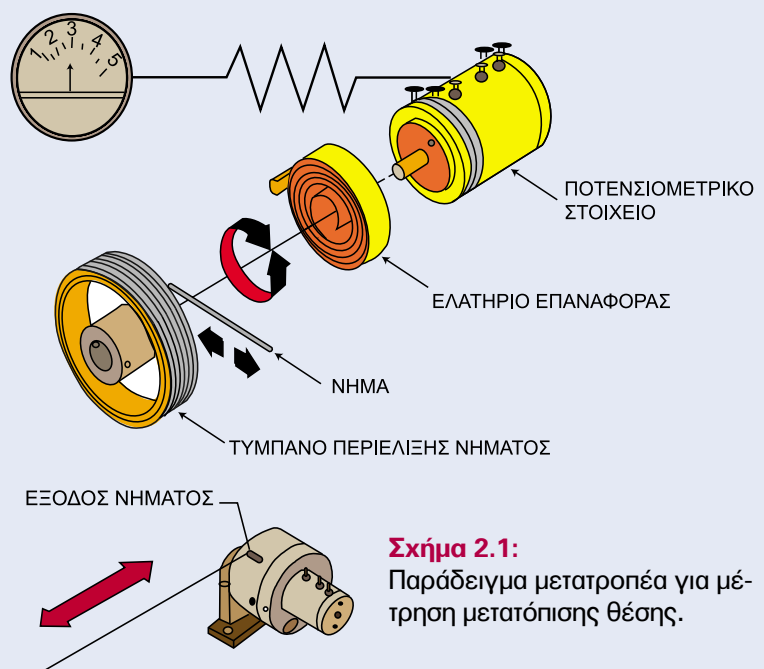
2.1 Αισθητήρες και μετατροπείς

Ως *ερέθισμα* (stimulus) ορίζεται μία φυσική ποσότητα η οποία προκαλεί διέγερση ενός αισθητήρα ή ενός μορφομετατροπέα. Όπως εξετάστηκε στο Κεφάλαιο 1, θεμέλιο στοιχείο για ένα σύστημα μέτρησης αποτελεί ο *αισθητήρας*. Ένας αισθητήρας μετατρέπει το φυσικό μέγεθος το οποίο αποτελεί την εξαρτημένη μεταβλητή του συστήματος μέτρησης σε πληροφορία ηλεκτρικού μεγέθους. Ένας αισθητήρας παράγει σήμα εξόδου το οποίο μπορεί να αποτελεί μεταβολή μεγέθους του πλάτους, της συχνότητας, της φάσης, του κύκλου εργασίας, κ.ά.. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται παραδείγματα αισθητήρων σε σχέση με τη μορφή ενέργειας που μπορούν να ανιχνεύσουν.

Πίνακας 2.1: Παραδείγματα αισθητήρων και ανιχνεύσιμων μορφών ενέργειας.

| Ενέργεια | Αισθητήρες |
|-------------|--|
| Ηλεκτρική | Φορτίου, ρεύματος, τάσης, αντίστασης, αγωγιμότητας, χωρητικότητας |
| Θερμική | Θερμοκρασίας, ροής θερμότητας, ροής αερίων, θερμικής αγωγιμότητας |
| Μηχανική | Ροής, πίεσης, μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης, δύναμης, μάζας |
| Μαγνητική | Μαγνητικού πεδίου, ροής, μαγνητικής διαπερατότητας |
| Ακτινοβολία | Υπεριώδους, υπεριώθρου, μικροκυμάτων, ακτίνων X, ακτίνων γ, |
| Χημική | Συγκέντρωσης αερίων, υγρασίας, pH, συγκέντρωσης ιόντων, ατμών, οσμών |

Όπως αναφέραμε στο πρώτο κεφάλαιο, δεν θα πρέπει να συγχέεται η έννοια του αισθητήρα με αυτή του μορφομετατροπέα (transducer) ο οποίος ορίζεται ως μία δομή η οποία μετατρέπει ένα φυσικό φαινόμενο σε ηλεκτρική πληροφορία μέσω μια σειράς ενεργειακών μεταβολών. Ένας μορφομετατροπέας περιέχει στη δομή του έναν ή περισσότερους αισθητήρες. Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζεται ένας μορφομετατροπέας μετατόπισης θέσης. Το νήμα, καθώς ξετυλίγεται από το τύμπανο, μεταβάλλει την οριζόντια μετατόπιση σε περιστροφική. Ο άξονας ενός πλήρους περιστροφικού ποτενσιόμετρου που είναι προσαρμοσμένος στο τύμπανο μετατρέπει την περιστροφική κίνηση σε μεταβολή αντίστασης για τη μέτρηση της μετατόπισης.



Σχήμα 2.1: Παράδειγμα μετατροπέα για μέτρηση μετατόπισης θέσης.

2.2 Ανιχνευτές

Ως **ανιχνευτής** (detector) ορίζεται μια δομή η οποία έχει ως σκοπό την ανίχνευση διακριτού επιπέδου της τιμής ενός φυσικού μεγέθους. Ένας ανιχνευτής χρησιμοποιεί κατάλληλους αισθητήρες και ηλεκτρονικές διατάξεις για την ανίχνευση του φυσικού φαινομένου παράγοντας στην έξοδό του μια διακριτή τιμή τάσης (boolean) ανάλογα με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των κυκλωμάτων υποστήριξης του ανιχνευτή. Για παράδειγμα ένας ανιχνευτής θερμοκρασίας προσδιορίζει εάν η θερμοκρασία μέσα σε ένα δωμάτιο είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από τους 15°C για να εκκινήσει τη λειτουργία ενός θερμικού αντιστάτη ή ενός καυστήρα θέρμανσης. Οι ανιχνευτές χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε συστήματα αυτομάτου ελέγχου ανίχνευσης διακριτών επιπέδων στη βιομηχανία και σε συστήματα ασφάλειας. Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζεται ένας ανιχνευτής καπνού, σκοπός του οποίου είναι, όταν το επίπεδο του μετρήσιμου μεγέθους μέσα στο δωμάτιο στο οποίο βρίσκεται ο ανιχνευτής περάσει το επιτρεπτό όριο, να ενεργοποιήσει μια σειρήνα μέσω ηλεκτρονόμου που φέρει στο ηλεκτρονικό κύκλωμα υποστήριξής του, παρέχοντας διακριτή τιμή τάσης εξόδου 0 και 220 V.

2.3 Κατηγορίες αισθητήρων

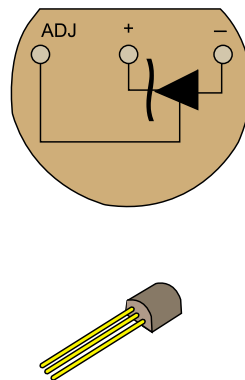
2.3.1 Παθητικοί και ενεργοί αισθητήρες

Οι αισθητήρες κατηγοριοποιούνται σε παθητικούς (passive) και ενεργούς (active). Οι ενεργοί αισθητήρες παράγουν ένα ηλεκτρικό σήμα ως απόκριση σε κάποιο ερεθίσμα χωρίς να απαιτούν ηλεκτρική ισχύ, μετατρέποντας την ενέργεια του εισερχόμενου ερεθίσματος στην μορφή του εξερχόμενου σήματος (π.χ. θερμοζεύγος).

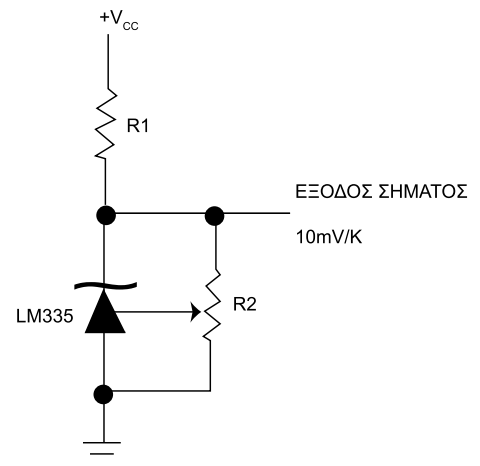
Σε αντίθεση με τους ενεργούς, οι παθητικοί αισθητήρες προκειμένου να παράγουν το σήμα εξόδου απαιτούν κατανάλωση ενέργειας η οποία προέρχεται από εξωτερική πηγή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο αισθητήρας θερμοκρασίας LM 335 ο οποίος απαιτεί τάση τροφοδοσίας για τη λειτουργία του (Σχ. 2.3).



Σχήμα 2.2: Ανιχνευτής καπνού και εσωτερικά κυκλώματα υποστήριξης.



Σχήμα 2.3: Ολοκληρωμένος ενεργός αισθητήρας LM335 (National Semiconductor) και τυπικό κύκλωμα πόλωσης του.



2.3.2 Απόλυτοι και σχετικοί αισθητήρες

Οι αισθητήρες διαχωρίζονται επίσης σε απόλυτους (absolute) και σχετικούς (relative). Το κριτήριο αποτελεί την αναφορά της μέτρησης του αισθητήρα σε κάποια κλίμακα, δηλαδή, απόλυτος χαρακτηρίζεται ο αισθητήρας του οποίου το σήμα παραγωγής αναφέρεται σε μία απόλυτη (ακριβή) φυσική κλίμακα που είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες μέτρησης, όπως στην περίπτωση ενός μετρητή της πίεσης με αναφορά το κενό. Σχετικός αισθητήρας χαρακτηρίζεται εκείνος ο οποίος παράγει σήμα που αναφέρεται σε μια ειδική κλίμακα τιμών, όπως στην περίπτωση του μανομέτρου.

2.4 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Κατά τη σχεδίαση ή την επιλογή ενός αισθητήρα ο μηχανικός θα πρέπει να ορίζει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που απαιτείται να έχει ο αισθητήρας που πρόκειται να χρησιμοποιήσει σε ένα σύστημα μέτρησης ή ελέγχου. Τα χαρακτηριστικά που εξετάζουμε σε έναν αισθητήρα είναι:

1. η συνάρτηση μεταφοράς,
2. η κλίμακα εισόδου,
3. το εύρος πλήρους κλίμακας εισόδου,
4. το εύρος πλήρους κλίμακας εξόδου,
5. η ακρίβεια και η ακρίβεια προσέγγισης
6. η βαθμονόμηση,
7. το σφάλμα βαθμονόμησης,
8. η υστέρηση,
9. η μη γραμμικότητα,
10. η διακριτική ικανότητα,
11. η επαναληψιμότητα,
12. ο συντελεστής κορεσμού,
13. η νεκρή ζώνη,
14. η σύνθετη αντίσταση εξόδου,
15. η διέγερση,
16. η αξιοπιστία,
17. το ελάχιστο σήμα κατωφλίου,
18. ο χρόνος απόκρισης,
19. ο θόρυβος,
20. η ολίσθηση, και
21. ο χρόνος προθέρμανσης.



2.4.1 Συνάρτηση μεταφοράς

Ένας ιδανικά σχεδιασμένος και κατασκευασμένος αισθητήρας, παράγει σήμα εξόδου που αντιπροσωπεύει την πραγματική τιμή του ερεθίσματος. Η συνάρτηση του σήματος εξόδου αποτελεί την ταυτότητα του αισθητήρα ή της μετρητικής διάταξης. Η σχέση εξόδου/εισόδου χαρακτηρίζεται από την αποκαλούμενη συνάρτηση μεταφοράς (transfer function). Μέσω της συνάρτησης μεταφοράς σχεδιάζονται οι μονάδες προσαρμογής του σήματος. Αυτή η συνάρτηση καθορίζει την εξάρτηση μεταξύ του ηλεκτρικού σήματος S που παράγεται από τον αισθητήρα και του ερεθίσματος s που αποτελεί την είσοδο του αισθητήρα:

$$S = f(s)$$

Η συνάρτηση αυτή μπορεί να είναι γραμμική, λογαριθμική, εκθετική ή πολυωνυμική.

- Γραμμική συνάρτηση μεταφοράς:

$$S = a + bs$$

- Λογαριθμική συνάρτηση μεταφοράς:

$$S = a + b \ln s$$

- Εκθετική συνάρτηση μεταφοράς:

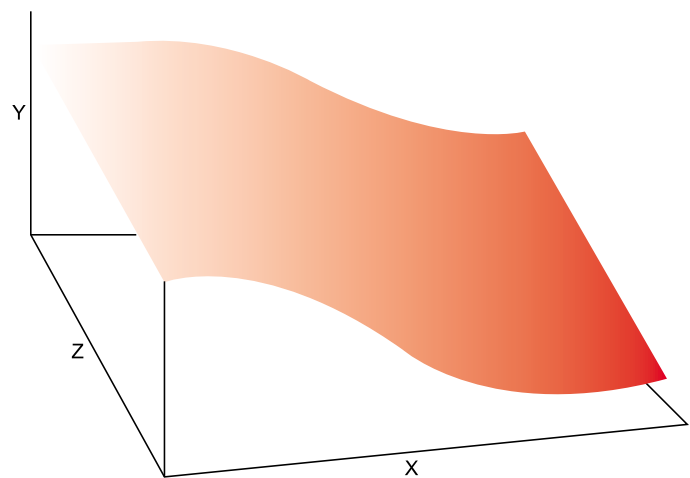
$$S = ae^{ks}$$

- Πολυωνυμική συνάρτηση μεταφοράς:

$$S = a_0 + a_1 s^k$$

όπου k : σταθερά

Πολλοί αισθητήρες παρουσιάζουν συνάρτηση μεταφοράς η οποία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα η επίδραση της ανίχνευσης θερμικού φαινομένου σε σχέση με τη θερμοκρασία του ίδιου του στοιχείου, μια παράμετρος η οποία είναι αλληλένδετη με τους θερμικούς ανιχνευτές ακτινοβολίας. Στην περίπτωση αυτή, η συνάρτηση μεταφοράς δεν παρουσιάζεται σε δισδιάστατο επίπεδο αλλά σε τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση (XYZ) όπως η απόκριση του Σχήματος 2.4. Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται λογισμικά ή υλικά συστήματα αντιστάθμισης.



Σχήμα 2.4: Γραφική παράσταση συνάρτησης μεταφοράς του αισθητήρα θερμικής ακτινοβολίας.

2.4.2 Περιοχή τιμών εισόδου

Περιοχή τιμών εισόδου (Range) καλούμε το πεδίο τιμών του ερεθίσματος που δέχεται ο αισθητήρας ή ο μορφομετατροπέας ως διέγερση:

$$Range = (x_{\min}, x_{\max})$$

Για παράδειγμα, αισθητήρας πίεσης φέρει περιοχή τιμών εισόδου (κλίμακα) 10 έως 120 psi.

2.4.3 Εύρος πλήρους κλίμακας εισόδου

Το εύρος πλήρους κλίμακας εισόδου (Span - Input Full Scale, IFS) ενός αισθητήρα ή μορφομετατροπέα, αποτελεί η αλγεβρική διαφορά της μέγιστης (x_{\max}) από την ελάχιστη (x_{\min}) τιμή του ερεθίσματος, και δίνεται από τη σχέση:

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

Για παράδειγμα, αισθητήρας πίεσης με κλίμακα εισόδου (10, 200)_{psi} έχει εύρος πλήρους κλίμακας εισόδου:

$$Span = x_{max} - x_{min} = 200 - 10 = 190 \text{ psi}$$

Επίσης, μορφομετατροπέας φέρει πεδίο τιμών εισόδου από -100 έως 250°C. Δηλαδή έχει εύρος πλήρους κλίμακας εισόδου:

$$Span = x_{max} - x_{min} = 250 - (-100) = 350^\circ C$$

2.4.4 Εύρος πλήρους κλίμακας εξόδου

Εύρος πλήρους κλίμακας εξόδου (Σχ. 2.5), FSO (Full Scale Output, FSO) αποτελεί η αλγεβρική διαφορά μεταξύ του μέγιστου (y_{max}) και του ελάχιστου (y_{min}) σήματος εξόδου σε όλο το πεδίο εισόδου του ερεθίσματος s του αισθητήρα ή του μορφομετατροπέα, δηλαδή ισχύει ότι:

$$FSO = y_{max} - y_{min}$$

Το εύρος εξόδου του αισθητήρα ή του μορφομετατροπέα δίνεται σε μονάδες μέτρησης του σήματος εξόδου.

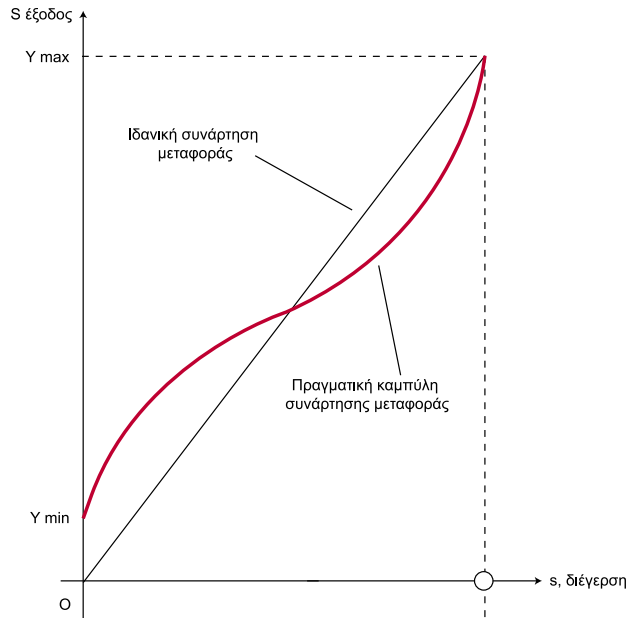
2.4.5 Ακρίβεια

Η ακρίβεια μιας διεργασίας ελέγχου η οποία μπορεί να περιλαμβάνει από τον απλό έλεγχο της στάθμης μέσα σε μία δεξαμενή μέχρι τον έλεγχο της ταχύτητας σωματιδίων σε μια σήραγγα, προσδιορίζεται από την ακρίβεια που διαθέτει ο αισθητήρας ή ο μορφομετατροπέας του συστήματος. Η ακρίβεια ενός συστήματος υπολογίζεται κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης. Ως ακρίβεια ενός αισθητήρα ορίζεται η διαφορά που παρουσιάζει το σήμα εξόδου σε σχέση με την πραγματική τιμή. Για το λόγο όμως ότι ποτέ δεν είναι γνωστή η πραγματική τιμή του μεγέθους, αποδίδουμε την ακρίβεια μέσω σχετικού σφάλματος με την παρακάτω σχέση:

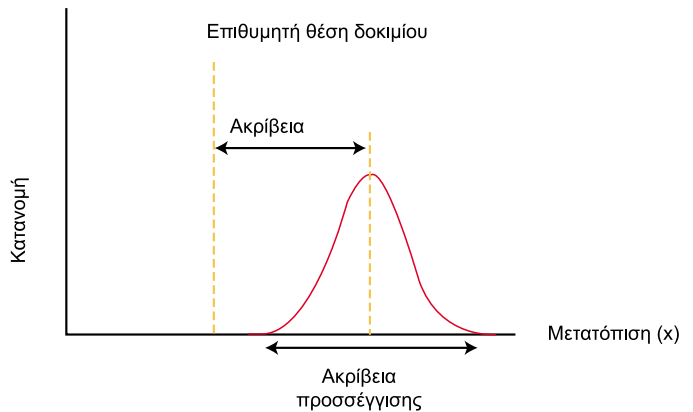
$$e_{res} = \frac{(\text{μετρούμενη τιμή} - \text{πραγματική τιμή})}{(\text{πραγματική τιμή})}$$

Αλληλένδετο μέγεθος με την ακρίβεια είναι η εκτίμηση του σφάλματος η οποία καλείται αβεβαιότητα (uncertainty). Η έννοια της αβεβαιότητας εμφανίστηκε στην μετρολογία πρόσφατα, ενώ έχει δημιουργηθεί ο Παγκόσμιος Οργανισμός Μέτρων (International Organization for Standards, ISO), ο οποίος καθορίζει πρότυπα, για τον προσδιορισμό της αβεβαιότητας των μετρήσεων. Η έννοια της αβεβαιότητας πολλές φορές συγχέεται με την έννοια του σφάλματος. Το σφάλμα αναφέρεται στην πραγματική διαφορά μεταξύ της μέτρησης και της εικαζόμενης τιμής της, ενώ η αβεβαιότητα στρέφεται στο κατά πόσο σωστή είναι η μετρήσιμη τιμή του μεγέθους. Στο Κεφάλαιο 30 γίνεται εκτενέστερη αναφορά του μεγέθους της αβεβαιότητας.

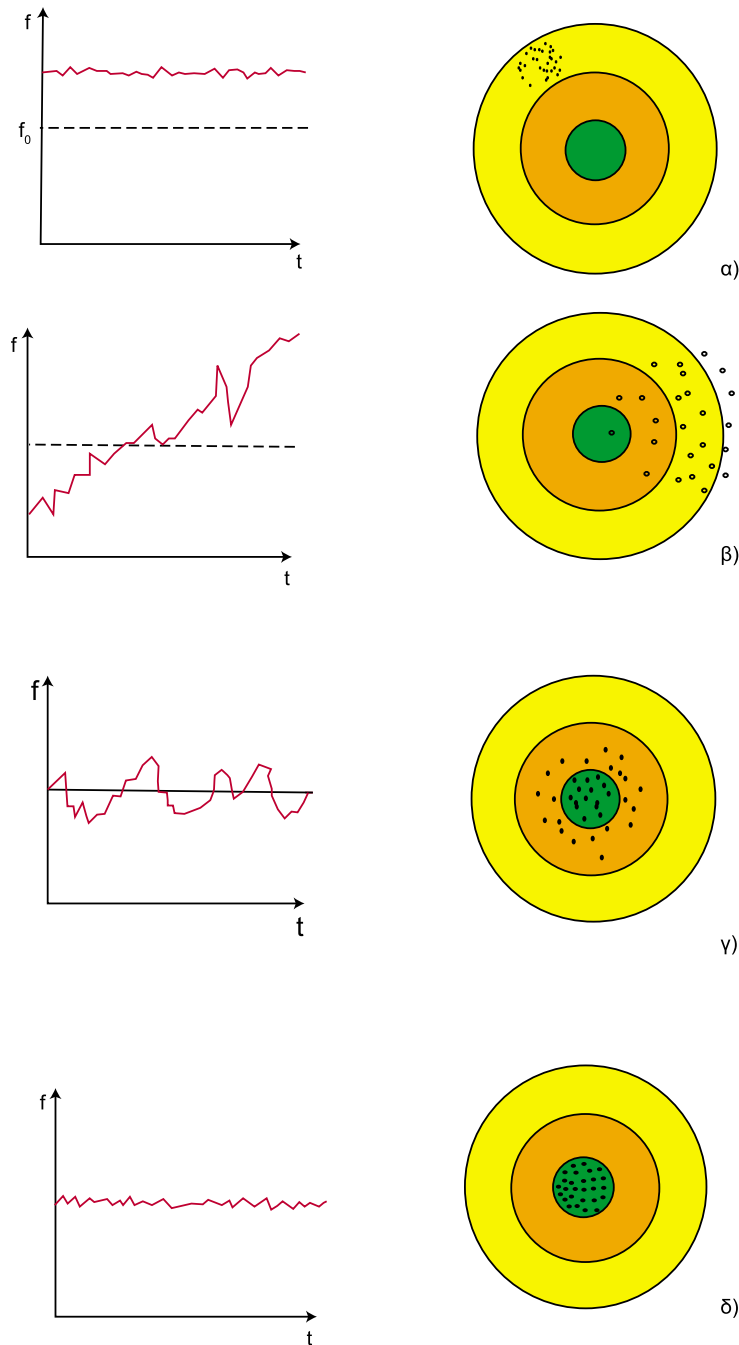
Ως **ακρίβεια προσέγγισης** (accuracy precision) ορίζεται κατά τη μετρολογία το πλήθος των δεκαδικών ψηφίων που χρησιμοποιούνται κατά τη βαθμονόμηση και κατά τη λειτουργία του μετρητικού συστήματος ή ενός αισθητήρα. Ως παράδειγμα αναφέρουμε ένα σύστημα μέτρησης στο οποίο η ακρίβεια προσέγγισης οριοθετεί την ακρίβεια μετατόπισης ενός ρομποτικού χεριού για την αρπαγή αντικειμένου μέσω συνάρτησης κανονικής κατανομής (Σχ. 2.6).



Σχήμα 2.5: Εύρος πλήρους κλίμακας εξόδου σε καμπύλη συνάρτηση μεταφοράς αισθητήρα.



Σχήμα 2.6: Τυπικό γράφημα ακρίβειας και προσέγγισης.



Σχήμα 2.7: Παραδείγματα διαφοροποίησης εννοιών ακρίβειας και προσέγγισης.

Στην εικόνα του Σχήματος 2.7 παρατηρούμε διαφορετικές περιπτώσεις των παραμέτρων ακρίβειας και ακρίβειας προσέγγισης γύρω από την πραγματική τιμή του μεγέθους. Στο Σχήμα 2.7α το σήμα παρουσιάζει υψηλή ακρίβεια προσέγγισης, δηλαδή, μετρήσιμες τιμές γύρω από την τιμή μέτρησης η οποία όμως σε σχέση με την ακρίβεια έχει μεγάλο σφάλμα. Στο Σχήμα 2.7β το σήμα παρουσιάζει πολύ μικρή ακρίβεια προσέγγισης, δηλαδή, μετρήσιμες τιμές πέρα από την τιμή μέτρησης η οποία παρουσιάζει μικρή ακρίβεια. Στο Σχήμα 2.7γ το σήμα παρουσιάζει πολύ μικρή ακρίβεια προσέγγισης, δηλαδή μετρήσιμες τιμές γύρω από την τιμή μέτρησης η οποία παρουσιάζει σχετικά καλή ακρίβεια. Στο Σχήμα 2.7δ το σήμα παρουσιάζει πολύ υψηλή ακρίβεια προσέγγισης, δηλαδή μετρήσιμες τιμές γύρω από την τιμή μέτρησης, και υψηλή ακρίβεια.

Παράδειγμα 2.1

Να υπολογίσετε το σχετικό σφάλμα ακρίβειας (%) για ένα όργανο πίεσης με εύρος μέτρησης πλήρους κλίμακας 0-50 psi, όταν η πραγματική τιμή της πίεσης είναι 14,8 psi με ένδειξη 15 psi.

Λύση

$$e_{res} = \frac{(\text{μετρούμενη τιμή} - \text{πραγματική τιμή})}{(\text{πραγματική τιμή})} = \frac{(15 - 14,8)}{14,8} = 0,013 = 1,3\%$$

Όπως αναφέραμε, η ακρίβεια ενός συστήματος υπολογίζεται κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης. Στο Σχήμα 2.7β' απεικονίζεται η ακρίβεια εξόδου ενός αισθητήρα θερμοκρασίας μέσω διαγράμματος απόκλισης (deviation plot).

Το Σχήμα 2.8 παρουσιάζει την ιδανική καθώς και την πραγματική συνάρτηση μεταφοράς ενός αισθητήρα. Όπως παρατηρούμε στο σχήμα, η πραγματική συνάρτηση μεταφοράς του αισθητήρα αποκλίνει από την ιδανική. Η απόκλιση αυτή οδηγεί σε μη γραμμικά φαινόμενα τα οποία θα πρέπει μέσω λογισμικού ή υλικού να αντισταθμιστούν. Λόγω των μη ιδανικών υλικών, η πραγματική συνάρτηση μεταφοράς θα πρέπει να φέρει μικρή απόκλιση από την ιδανική συνάρτηση του μοντέλου του αισθητήρα.

Τα όρια της ακρίβειας συνήθως δηλώνουν το μέγεθος του σφάλματος της χρήσης του αισθητήρα σε ένα σύστημα για το οποίο η ακρίβεια είναι αυστηρή.

Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η απόκλιση $\pm\Delta$ ενός δεύτερου αισθητήρα ο οποίος σε σχέση με την γραφική παράσταση του πρώτου ακολουθεί πιο στενά την πραγματική συνάρτηση μεταφοράς. Η απεικόνιση αυτή τον θέτει πιο αξιόπιστο από τον πρώτο και βρίσκει εφαρμογή στο σύστημα με μικρότερα σφάλματα κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

2.4.6 Βαθμονόμηση

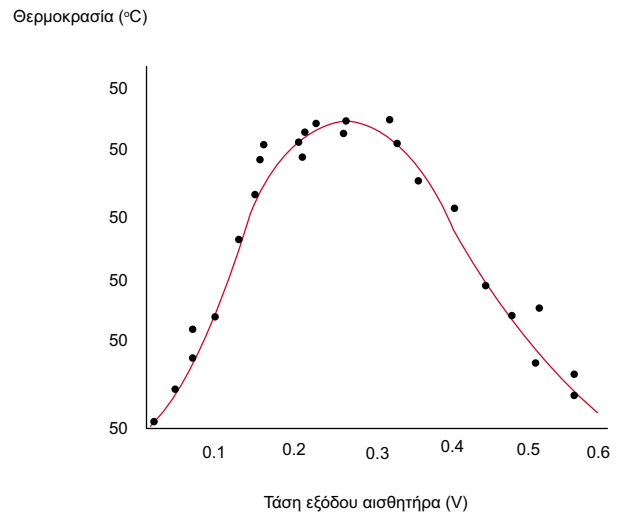
Ο όρος βαθμονόμηση, καλιμπράρισμα (calibration) χρησιμοποιείται από τη μετρολογία για την απόδοση της ακρίβειας των φυσικών προτύπων σε σχέση με τον αισθητήρα ή τον μορφομετατροπέα που μετρά το μέγεθος. Οι διαδικασίες της βαθμονόμησης μπορούν να ελέγξουν την κατάσταση ενός αισθητήρα, ενός μορφομετατροπέα ή ενός μετρητικού συστήματος, ώστε να εξασφαλίσουν τη σωστή λειτουργία του στοιχείου και την αξιοπιστία των μετρήσεων.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης απαιτεί ακριβή έλεγχο των παραμέτρων, για τις οποίες ο προς πιστοποίηση αισθητήρας ή μορφομετατροπέας θα πιστοποιηθεί. Το πιστοποιητικό βαθμονόμησης που συνοδεύει κάθε αισθητήρα ή όργανο πιστοποιεί ότι το στοιχείο λειτουργεί σωστά και μετρά ορθά.

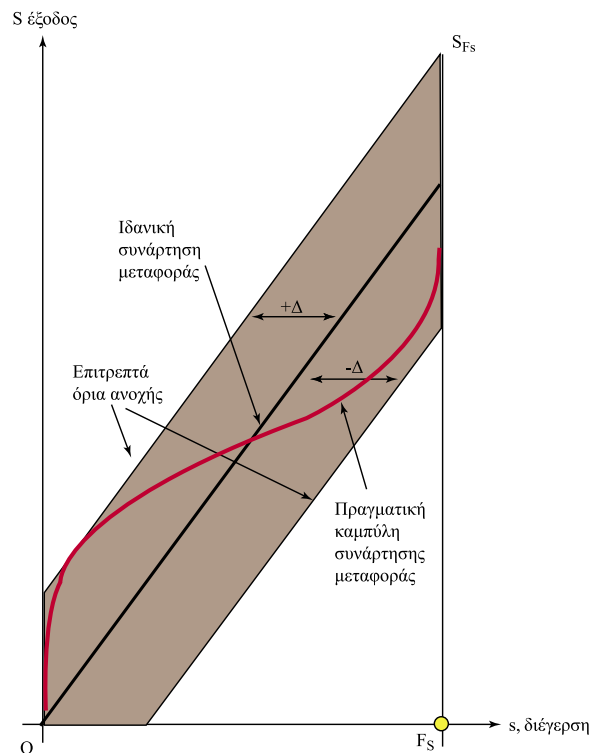
Στη μετρολογία διακρίνουμε δύο τύπους βαθμονόμησης, τη **στατική** και τη **δυναμική**. Κατά τη στατική βαθμονόμηση οι τιμές εισόδου – ερεθίσματα δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο. Αντίθετα στη δυναμική βαθμονόμηση οι τιμές εισόδου – ερεθίσματα μεταβάλλονται στο χρόνο.

Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη βαθμονόμησης ενός αισθητήρα. Η κλίση της καμπύλης προσδιορίζει τη στατική ευαισθησία ή το κέρδος του αισθητήρα απέναντι στο ερέθισμα. Η κλίση της καμπύλης δίνεται από τη σχέση:

$$K = \frac{dy}{dx}$$



Σχήμα 2.7β': Διάγραμμα καμπύλης απόκλισης.



Σχήμα 2.8: Ιδανική και πραγματική συνάρτηση μεταφοράς αισθητήρα.

Όσο μεγαλύτερη μεταβολή παρουσιάζει ο συντελεστής της στατικής βαθμονόμησης, τόσο ο αισθητήρας ή το σύστημα μέτρησης παρουσιάζει φαινόμενα μη γραμμικότητας τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε σφάλματα κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

*Η διαδικασία βελτίωσης της ακρίβειας ενός οργάνου ή ενός συστήματος μέτρησης με ένα πρότυπο όργανο γνωστής ακρίβειας καλείται **διακρίβωση**.*

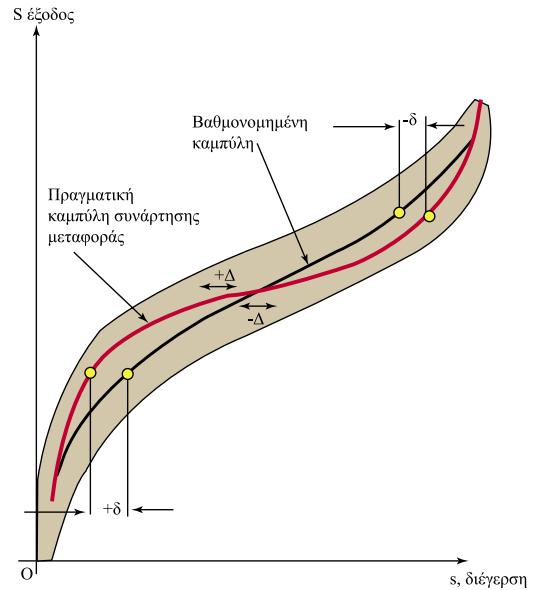
2.4.6.1 Παράδειγμα διαδικασίας βαθμονόμησης συστήματος μέτρησης pH

Ένας μετρητής pH μετρά τη συγκέντρωση των υδρογονοκατιόντων που περιβάλλουν μια γυάλινη σφαίρα του αισθητήρα. Λόγω ηλεκτροχημικού φαινομένου, ο αισθητήρας παράγει πολύ χαμηλό δυναμικό ανά βαθμό pH. Ο αισθητήρας, για να διατηρηθεί σε λειτουργική κατάσταση, πρέπει να παραμένει πάντα σε υγρό περιβάλλον. Για να μπορέσουμε να αποκτήσουμε το σήμα μέσω ενός μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό (ADC) πρέπει ο αισθητήρας να συνδεθεί σε είσοδο υψηλής αντίστασης. Για τη βαθμονόμηση του συστήματος μέτρησης του αισθητήρα pH εργαζόμαστε ως εξής:

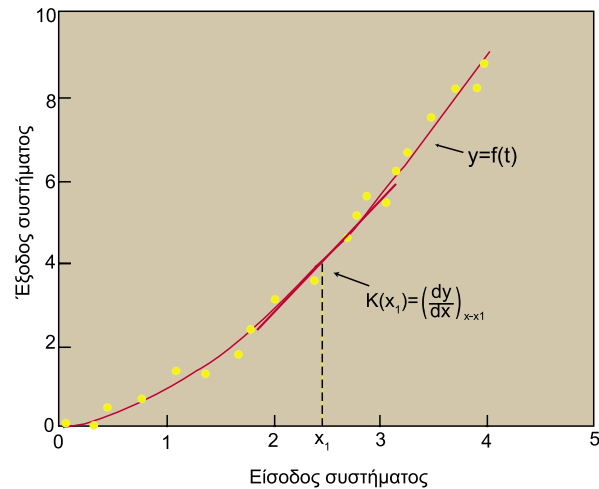
1. Συνδέουμε τον αισθητήρα στο κύκλωμα του μετρητικού μας συστήματος.
2. Γεμίζουμε δύο μικρούς δοκιμαστικούς σωλήνες με κατάλληλα πρότυπα διαλύματα. Ο πρώτος δοκιμαστικός σωλήνας περιέχει πρότυπο διάλυμα με ουδέτερο pH7 ενώ ο δεύτερος περιέχει pH10 για μετρήσεις σε αλκαλικά περιβάλλοντα ή pH4 για μετρήσεις σε όξινα περιβάλλοντα. Τα πρότυπα διαλύματα αναφέρονται για κανονικές συνθήκες με θερμοκρασία 25°C και πίεση 1atm (Σχ. 2.11).
3. Εμβαπτίζουμε τον αισθητήρα στο πρώτο πρότυπο διάλυμα και βαθμονομούμε το μετρητικό μας σύστημα.
4. Μετά από κάθε διαδικασία εμβάπτισης του αισθητήρα σε πρότυπο διάλυμα, ο αισθητήρας πρέπει να ξεπλένεται με απιονισμένο νερό.
5. Εμβαπτίζουμε τον αισθητήρα στο δεύτερο πρότυπο διάλυμα και βαθμονομούμε το μετρητικό μας σύστημα.
6. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία.

2.4.7 Σφάλμα βαθμονόμησης

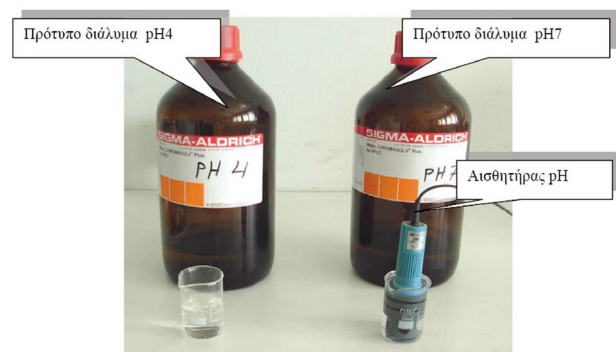
Στο γράφημα του Σχήματος 2.12 παρατηρούμε την απόκλιση που παρουσιάζει ένας βαθμονομημένος αισθητήρας, από έναν μη βαθμονομημένο, όταν αυτοί δεχτούν τα ίδια ακριβώς ερεθίσματα. Η διαφορά μεταξύ των δύο μετρήσεων A_2 και $A_2 - \Delta$ αποτελεί τιμή σφάλματος Δ . Η κλίση της καμπύλης μεταξύ των ερεθισμάτων s_1 και s_2 προσδιορίζει το σφάλμα της βαθμονόμησης. Πολλοί αισθητήρες πρέπει σύμφωνα με τον κατασκευαστή να βαθμονομούνται μετά το πέρας κάποιων μηνών ή ετών για τον καθορισμό της αξιοπιστίας τους. Το σφάλμα βαθμονόμησης του αισθητήρα καταγράφεται στο εγχειρίδιο του κατασκευαστή.



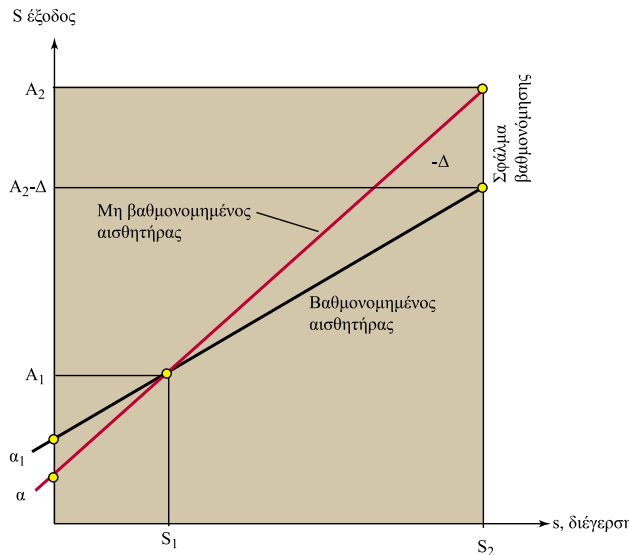
Σχήμα 2.9: Ιδανική και πραγματική συνάρτηση μεταφοράς αισθητήρα.



Σχήμα 2.10: Τυπική καμπύλη στατικής βαθμονόμησης.



Σχήμα 2.11: Στοιχεία για βαθμονόμηση αισθητήρα pH.



Σχήμα 2.12: Διάγραμμα σφάλματος βαθμονόμησης.

Παράδειγμα 2.2

Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης ενός αισθητήρα θερμοκρασίας καταγράφηκαν οι παρακάτω τιμές μέτρησης. Να αξιολογήσετε τα αποτελέσματα και τη δυνατότητα χρήσης του αισθητήρα σε ένα σύστημα μέτρησης ελέγχου θερμοκρασίας σε κλίβανο.

Λύση

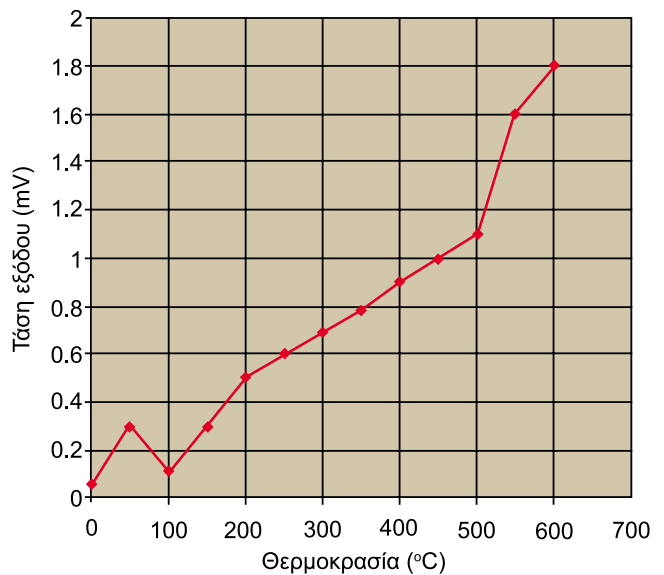
Στο λογισμικό excel παρουσιάζουμε σε γράφημα διασποράς την έξοδο του αισθητήρα. Η κατάλληλη περιοχή τιμών λειτουργίας του στοιχείου για τη χρήση του ως αισθητήρα θερμοκρασίας στον κλίβανο είναι στη γραμμική περιοχή από 200°C έως 500°C. Πέρα από αυτό το πεδίο τιμών απαιτείται γραμμικοποίηση της εξόδου του.



QR 2.2:
Εφαρμογή excel -1-

qr.tziola.gr/C0eaz

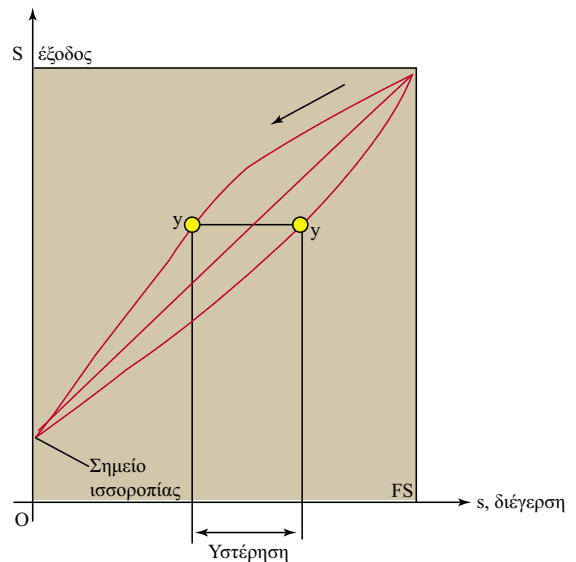
| Θερμοκρασία (°C) | Τάση εξόδου αισθητήρα (mV) |
|------------------|----------------------------|
| 0 | 0,05 |
| 50 | 0,3 |
| 100 | 0,1 |
| 150 | 0,3 |
| 200 | 0,5 |
| 250 | 0,6 |
| 300 | 0,69 |
| 350 | 0,78 |
| 400 | 0,9 |
| 450 | 0,99 |
| 500 | 1,1 |
| 550 | 1,6 |
| 600 | 1,8 |



2.4.7 Υστέρηση

Μερικοί αισθητήρες δεν επιστρέφουν την ίδια τιμή του σήματος εξόδου όταν το ερέθισμα εισόδου υπόκειται σε παλινδρόμηση μεταξύ δύο σημείων του μεγέθους. Το φαινόμενο αυτό ορίζεται ως **υστέρηση** (hysteresis). Στο Σχήμα 2.13 παρατηρούμε τις διαφορετικές τιμές πλάτους εξόδου που παρουσιάζει ο ίδιος αισθητήρας σε επαναλαμβανόμενα ίδια ερεθίσματα. Το μέγεθος της υστέρησης του συγκεκριμένου αισθητήρα προσδιορίζεται στη μέγιστη ($y-y'$) επαναλαμβανόμενη απόκλιση μεταξύ του πλάτους εξόδου. Το φαινόμενο της υστέρησης που παρουσιάζει ένας αισθητήρας δεν είναι σταθερό. Αυτό σημαίνει ότι με τη συνεχή χρήση του αισθητήρα στο χρόνο το φυσικό του υλικό μπορεί να αλλοιωθεί και να παρουσιάζει μεγαλύτερο βαθμό υστέρησης.

Για το λόγο αυτό απαιτείται σε τακτά χρονικά διαστήματα ο έλεγχος του στοιχείου. Για παράδειγμα αναφέρουμε τον γραμμικό διαφορικό μετατροπέα LVDT (variable inductance displacement transducer) και τον περιστροφικό διαφορικό μετατροπέα RVDT (rotary differential transformer). Συνήθως μεγάλο βαθμό υστέρησης παρουσιάζουν στοιχεία που φέρουν μαγνήτες ή ηλεκτρομαγνήτες. Ειδικότερα, σε διάταξεις μέτρησης οι οποίες φέρουν μηχανικά στοιχεία με μεταβολή του μήκους τους όπως ελατήρια, το φαινόμενο της μεταβολής του βαθμού της υστέρησης είναι μεγαλύτερο. Επίσης, η οξείδωση στα μηχανικά στοιχεία συντελεί στην αύξηση του μεγέθους. Για τη μείωση του βαθμού υστέρησης απαιτείται η συνεχής λίπανση και η μηχανική συντήρηση των μηχανικών τμημάτων της μετρητικής διάταξης.

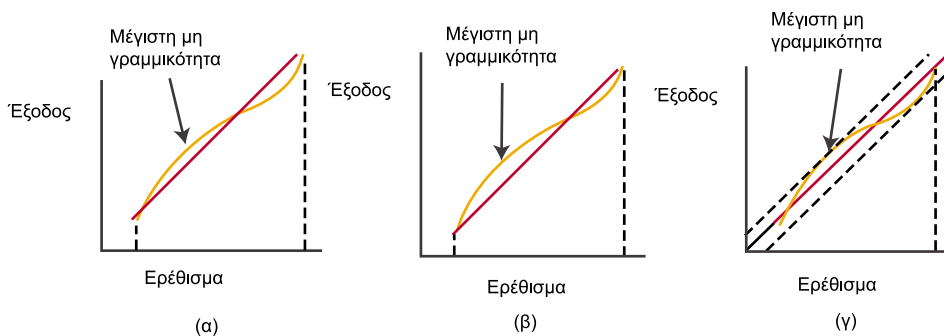


Σχήμα 2.13: Καμπύλη υστέρησης.

2.4.8 Μη γραμμικότητα

Όταν οι τιμές εξόδου ενός αισθητήρα ή ενός μορφομετατροπέα παρουσιάζουν απόκλιση από τη γραμμικότητά του, τότε μιλάμε για σφάλμα μη γραμμικότητας. Για την γραμμικοποίηση της εξόδου του στοιχείου εφαρμόζουμε μαθηματικές διορθώσεις με λογισμική εφαρμογή, οι οποίες αφορούν:

- τη χάραξη της ευθείας μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων (Σχ. 2.14α),
- τη χάραξη της ευθείας σύνδεσης των άκρων της μη γραμμικής καμπύλης (Σχ. 2.14β), και
- τη χάραξη της ευθείας μεταξύ των μέγιστων της μη γραμμικής καμπύλης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.14γ.



Σχήμα 2.14: Μέθοδοι γραμμικοποίησης: (α) μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων, (β) ευθείας που συνδέει τα δύο άκρα, και (γ) της ανεξάρτητης ευθείας μεταξύ μέγιστων.

2.4.9 Διακριτική ικανότητα

Ως διακριτική ικανότητα (resolution) ενός αισθητήρα ορίζεται η μικρότερη ανιχνεύσιμη μεταβολή του μετρήσιμου μεγέθους. Ο οπτικός κωδικοποιητής του Σχήματος 2.15 παρουσιάζει διακριτική ικανότητα 45° λόγω του ότι σε κάθε περιστροφή του παράγει οκτώ δυαδικούς αριθμούς ($2^3=8$).

2.4.10 Επαναληψιμότητα

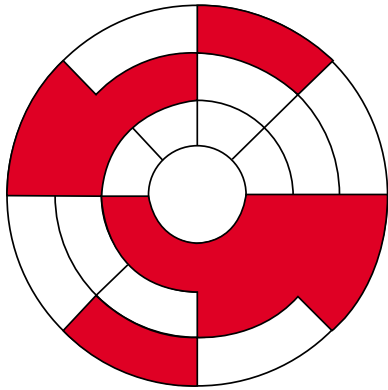
Σφάλμα επαναληψιμότητας καλείται το σφάλμα που παρουσιάζει ένας αισθητήρας όταν για ίδιο ερέθισμα δεν παράγει ίδιο σήμα εξόδου (Σχ.2.16). Το σφάλμα επαναληψιμότητας δίνεται από τη σχέση:

$$\delta_r = \frac{\Delta}{FS} \cdot 100\%$$

Σε σχέση με τους αισθητήρες ημιαγωγών, οι μορφομετατροπείς οι οποίοι φέρουν μηχανικά στοιχεία παρουσιάζουν μεγαλύτερο σφάλμα επαναληψιμότητας στο χρόνο, λόγω της καταπόνησης των στοιχείων τους.

2.4.11 Συντελεστής κορεσμού

Στο Σχήμα 2.17 απεικονίζεται το σημείο στο οποίο ο αισθητήρας μετά από μια τιμή του ερεθίσματος παρου-



Σχήμα 2.15: Παράδειγμα διακριτικής ικανότητας οπτικού κωδικοποιητή 2^3 .

σιάζει στην έξοδο του κατάσταση κορεσμού. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας θερμοκρασίας ο οποίος δίνει πλάτος σήματος εξόδου 100mV στο ανώτατο επίπεδο της ανίχνευσής του, έστω στους 120°C, για θερμοκρασία 130°C η έξοδος του αισθητήρα θα έχει πάλι το ίδιο πλάτος, δηλαδή 100mV.

2.4.12 Νεκρή ζώνη

Νεκρή ζώνη χαρακτηρίζεται η μη δυνατότητα ανίχνευσης του ερεθίσματος ενός αισθητήρα για το οποίο το στοιχείο δεν παρουσιάζει καμία μεταβολή στην έξοδό του. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.18, η έξοδος του αισθητήρα κοντά στην περιοχή των αρχικών τιμών ερεθισμάτων είναι μηδέν.

2.4.13 Σύνθετη αντίσταση εξόδου

Η σύνθετη αντίσταση εξόδου του αισθητήρα (output impedance- Z_{out}) πρέπει να είναι προσαρμοσμένη στην αντίσταση εισόδου του μετρητικού συστήματος, προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη μεταφορά ισχύος του σήματός του στο ηλεκτρονικό κύκλωμα μέτρησης.

2.4.14 Διέγερση

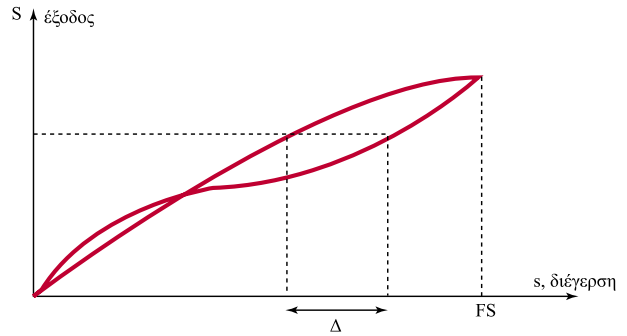
Διέγερση (excitation) χαρακτηρίζεται το δυναμικό τάσης ή η σταθερή ένταση ρεύματος που απαιτείται για τη λειτουργία ενός ενεργού αισθητήρα. Τυπικές τιμές τάσης πόλωσης ή διέγερσης δίνονται τα 3,3, 5, 10 και 12 Volt, ενώ τυπικές τιμές ρεύματος διέγερσης δίνονται τα 50μΑ, 100μΑ, 200μΑ και 1mA.

2.4.15 Αξιοπιστία

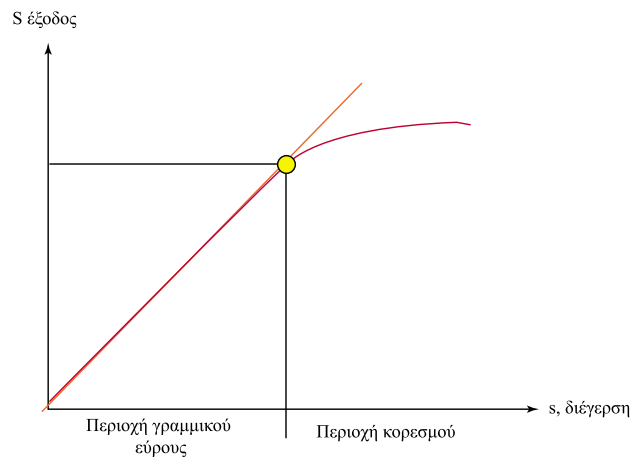
Αξιοπιστία (Reliability) καλείται η ικανότητα που έχει ένας αισθητήρας να λειτουργεί χωρίς σφάλματα για μεγάλο χρονικό διάστημα.

2.4.16 Ελάχιστο σήμα κατωφλίου

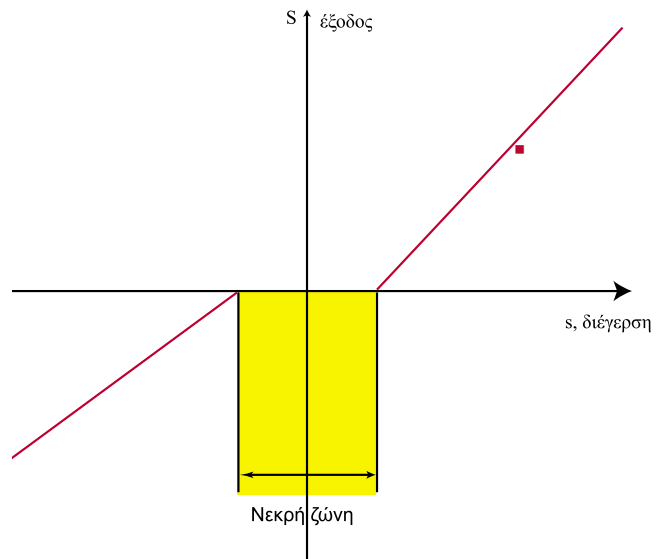
Ως ελάχιστο σήμα κατωφλίου (threshold) ενός αισθητήρα καλούμε εκείνη την τιμή του ερεθίσματος εισόδου που απαιτείται από τον αισθητήρα ώστε να ανιχνεύσει το ερέθισμα και να αποκριθεί σε αυτό. Για παράδειγμα, αναφέρουμε την ελάχιστη τιμή τάσης που θα πρέπει να δεχτεί μια πύλη πυριτίου σε σχέση με μία πύλη γερμανίου στην κατασκευή ψηφιακών κυκλωμάτων.



Σχήμα 2.16: Καμπύλη σφάλματος επαναληψιμότητας.



Σχήμα 2.17: Σημείο εμφάνισης κορεσμού.



Σχήμα 2.18: Καμπύλη με εμφάνιση νεκρής ζώνης.

2.4.17 Χρόνος απόκρισης

Σύμφωνα με τη γραφική παράσταση του Σχήματος 2.19, ο αισθητήρας A αντιδρά πιο γρήγορα χρονικά στη μεταβολή του μεγέθους από ότι ο αισθητήρας B. Δηλαδή έχει μικρότερο χρόνο απόκρισης.

2.4.18 Θόρυβος

Όλοι οι αισθητήρες παράγουν κάποιο θόρυβο παράλληλα με το σήμα εξόδου. Συχνές πηγές θορύβου είναι ο θερμικός θόρυβος (θόρυβος Johnson) των στοιχείων. Το φάσμα του θορύβου ποικίλει από αισθητήρα σε αισθητήρα.

2.4.19 Ολίσθηση

Η ολίσθηση είναι ένα σύνθετο φαινόμενο του οποίου τα αποτελέσματα είναι η αλλαγή στην τιμή της ευαισθησίας του αισθητήρα. Σε ολίσθηση οδηγούν οι μεταβολές των περιβαλλοντικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η πίεση και η υγρασία, που επιδρούν στα επιμέρους τμήματα του μετρητικού συστήματος ή του αισθητήρα. Μηδενική ολίσθηση (zero drift) έχουμε όταν δεν μεταβάλλεται η θέση ηρεμίας του οργάνου. Τα αναλογικά πολύμετρα στη θέση του δείκτη φέρουν κοχλία ώστε να μηδενίζουν το σφάλμα της ολίσθησης. Στο Σχήμα 2.20 παρουσιάζεται σε γράφημα το φαινόμενο της ολίσθησης σε θερμικό αισθητήρα ακτινοβολίας, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

Στο Σχήμα 2.21 παρουσιάζεται ο βαθμός ολίσθησης ενός μηχανικού στοιχείου όπου λόγω φυσικών και χημικών διεργασιών στην επιφάνειά του, στο πέρασ του χρόνου η απόκρισή του μεταβάλλεται.

2.4.20 Χρόνος προθέρμανσης

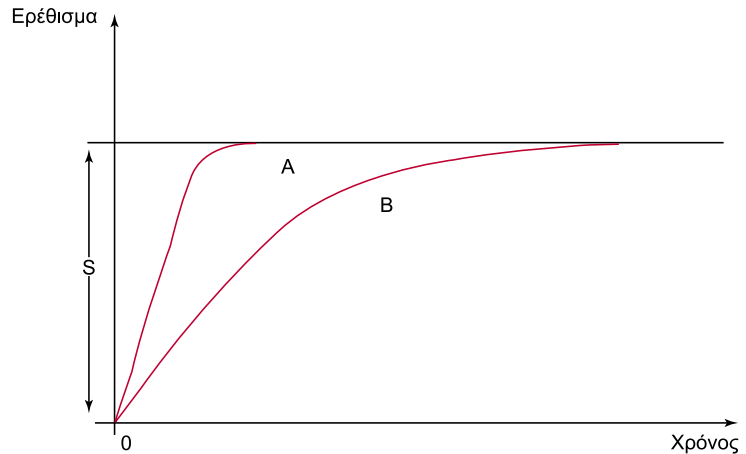
Ο χρόνος προθέρμανσης (warm-up time) είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο αισθητήρας να λειτουργήσει κανονικά και να αποκριθεί στο ερέθισμα.

2.5 Εμπορικοί αισθητήρες και μορφομετατροπείς

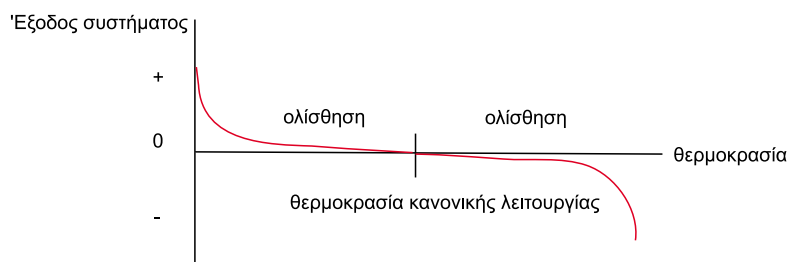
Κάθε αισθητήρας ή μορφομετατροπέας συνοδεύεται από εγχειρίδιο στο οποίο ο κατασκευαστής αναφέρει αναλυτικά όλους τους τύπους σφαλμάτων του στοιχείου. Σε αυτό το σημείο για την αξιολόγηση μεταξύ ίδιων αισθητήρων ή μορφομετατροπέων, η αξιολόγηση του συνολικού σφάλματος το οποίο προέρχεται από το άθροισμα των απόλυτων τιμών των σφαλμάτων που περιγράψαμε στις προηγούμενες ενότητες μπορεί να αποτελέσει κριτήριο επιλογής. Το συνολικό σφάλμα αποδίδεται με τη σχέση:

$$e_{total} = |e_1| + |e_2| + \dots + |e_n|$$

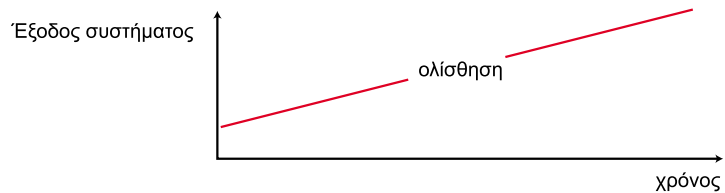
Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζεται παράδειγμα τιμών σφαλμάτων αισθητήρα πίεσης της εταιρείας Omega. Ο αισθητήρας φέρει τη δομή του Σχήματος 2.22.



Σχήμα 2.19: Καμπύλη χρόνου απόκρισης αισθητήρα.



Σχήμα 2.20: Ολίσθηση λόγω μεταβολής θερμοκρασίας.



Σχήμα 2.21: Σταθερή ολίσθηση σε ελατήριο συστήματος ζυγού ισορροπίας.

Πίνακας 2.2 Προδιαγραφές σφαλμάτων αισθητήρα μέτρησης πίεσης της εταιρείας Omega.

| | |
|---------------------------|-------------------|
| Εύρος εισόδου | 0-500psi |
| Τάση τροφοδοσίας | 5V |
| Εύρος εξόδου | 4-20mA |
| Χρόνος απόκρισης | <1 ms |
| Σφάλμα ευαισθησίας | ± 0,05% |
| Γραμμικό σφάλμα | ± 0,30% |
| Σφάλμα υστέρησης | < ± 0,15% |
| Εύρος θερμοκρασίας | -20...+80 ° C |
| Εξωτερικό περιβάλλον | Ανοξειδωτο ατσάλι |
| Μακροπρόθεσμη σταθερότητα | ± 0,25% |

**Σχήμα 2.22:** Αισθητήρας πίεσης της εταιρείας Omega.**Παράδειγμα 2.3**

Ένα σύστημα μέτρησης βάρους χρησιμοποιεί ως αισθητήρα, στοιχείο μηχανομετρου σε κυψέλη φορτίου τύπου S (Σχ. 2.23). Κατά τη βαθμονόμηση του μετρητικού συστήματος προέκυψε ο παρακάτω πίνακας δοκιμών της τάσης εξόδου της γέφυρας στην οποία είναι συνδεδεμένη η κυψέλη, συναρτήσει του βάρους βαθμονόμησης.

Για την αξιολόγηση του συστήματος μέτρησης καλείστε:

1. να κατασκευάσετε τη γραφική παράσταση των καταγεγραμμένων δοκιμών σε μορφή αρχείου .xls,
2. να ορίσετε τη στατική ευαισθησία,
3. να υπολογίσετε το συστηματικό σφάλμα του συστήματος,
4. να καθορίσετε το μέγιστο σφάλμα υστέρησης.

Λύση

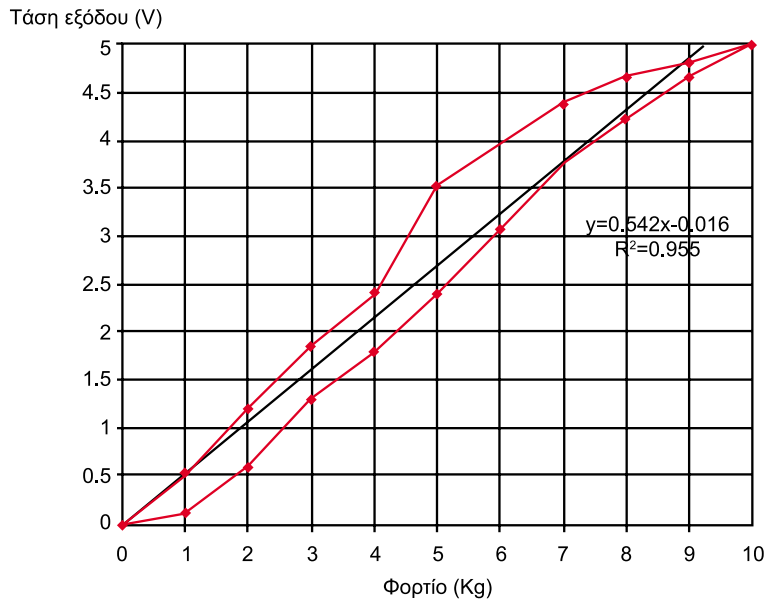
1. Γραφική παράσταση καταγεγραμμένων δοκιμών.
2. Με δεξιά κλικ σε σημείο του γραφήματος επιλέγουμε “προσθήκη γραμμής τάσης” και “προβολή της εξίσωσης”. Από την ενέργεια αυτή προκύπτει:

$$y = 0,542x - 0,016$$

Το σύστημα παρουσιάζει υψηλό $R^2 = 0,955$.

**Σχήμα 2.23:** Κυψέλη φορτίου της εταιρείας Omega.**Πίνακας δοκιμών συστήματος μέτρησης**

| Αυξανόμενο Φορτίο | | | Μειούμενο φορτίο | | |
|-------------------|-------------|-------------------|------------------|-------------|-------------------|
| Αριθμός δοκιμίου | Φορτίο (kg) | Τάση εξόδου Volts | Αριθμός δοκιμίου | Φορτίο (kg) | Τάση εξόδου Volts |
| 1 | 0 | 0,009 | 12 | 10 | 5 |
| 2 | 1 | 0,52 | 13 | 9 | 4,68 |
| 3 | 2 | 1,2 | 14 | 8 | 4,22 |
| 4 | 3 | 1,86 | 15 | 7 | 3,75 |
| 5 | 4 | 2,41 | 16 | 6 | 3,1 |
| 6 | 5 | 3,55 | 17 | 5 | 2,4 |
| 7 | 6 | 3,99 | 18 | 4 | 1,8 |
| 8 | 7 | 4,39 | 19 | 3 | 1,3 |
| 9 | 8 | 4,65 | 20 | 2 | 0,58 |
| 10 | 9 | 4,8 | 21 | 1 | 0,12 |
| 11 | 10 | 5 | 22 | 0 | 0,005 |



Η στατική ευαισθησία του συστήματος από την προβολή της εξίσωσης της γραμμής τάσης είναι:

$$K = 0,542 \frac{V}{Kg}$$

- 3. Το συστηματικό σφάλμα είναι ίσο με $-0,016 V$.
- 4. Το μέγιστο σφάλμα υστέρησης δίνεται με βάση τον παρακάτω πίνακα για τον αριθμό δοκιμίου 5 ίσο με $1,15V$.

| Αριθμός δοκιμίου | Τάση εξόδου με μείωση φορτίου (V) | Τάση εξόδου με προσαύξηση φορτίου (V) | Διαφορά (V) |
|------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------|
| 10 | 5 | 5 | 0 |
| 9 | 4,68 | 4,8 | 0,12 |
| 8 | 4,22 | 4,65 | 0,43 |
| 7 | 3,75 | 4,39 | 0,64 |
| 6 | 3,1 | 3,99 | 0,89 |
| 5 | 2,4 | 3,55 | 1,15 |
| 4 | 1,8 | 2,41 | 0,61 |
| 3 | 1,3 | 1,86 | 0,56 |
| 2 | 0,58 | 1,2 | 0,62 |
| 1 | 0,12 | 0,52 | 0,4 |
| 0 | 0,005 | 0,009 | 0,004 |

Εφαρμόζοντας την εξίσωση από τη γραμμή τάσης για κάθε μετρήσιμη τιμή λαμβάνουμε τον παρακάτω πίνακα. Το μέγιστο σφάλμα μη γραμμικότητας (NL_{error}) προκύπτει για αριθμό δοκιμίου 5.

| Δοκίμιο | Τάση εξόδου (V) | $NL_{error} = V - y$ |
|---------|-----------------|----------------------|
| 0 | 0,009 | 0,025 |
| 1 | 0,52 | -0,006 |
| 2 | 1,2 | 0,132 |
| 3 | 1,86 | 0,25 |
| 4 | 2,41 | 0,258 |
| 5 | 3,55 | 0,856 |

| Δοκίμιο | Τάση εξόδου (V) | $NL_{error} = V - y$ |
|---------|-----------------|----------------------|
| 6 | 3,99 | 0,754 |
| 7 | 4,39 | 0,612 |
| 8 | 4,65 | 0,33 |
| 9 | 4,8 | -0,062 |
| 10 | 5 | -0,404 |
| 10 | 5 | -0,404 |
| 9 | 4,68 | -0,182 |
| 8 | 4,22 | -0,1 |
| 7 | 3,75 | -0,028 |
| 6 | 3,1 | -0,136 |
| 5 | 2,4 | -0,294 |
| 4 | 1,8 | -0,352 |
| 3 | 1,3 | -0,31 |
| 2 | 0,58 | -0,488 |
| 1 | 0,12 | -0,406 |
| 0 | 0,005 | 0,021 |

2.6 Δυναμικά Χαρακτηριστικά

Όταν τα χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα μεταβάλλονται με το χρόνο, τότε μιλάμε για δυναμικά χαρακτηριστικά. Μαθηματικά η δυναμική συμπεριφορά ενός αισθητήρα παρουσιάζεται μέσω διαφορικής εξίσωσης. Η τάξη της διαφορικής εξίσωσης καθορίζεται από το μοντέλο του αισθητήρα. Ένας αισθητήρας μηδενικής τάξης ο οποίος δεν φέρει στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας (χωρητικότητα, επαγωγή) αποτυπώνεται ως χρονική μεταβολή και δίνεται από τη σχέση:

$$S(t) = a + bs(t)$$

a : η απόκλιση (offset)

b : η στατική ευαισθησία.

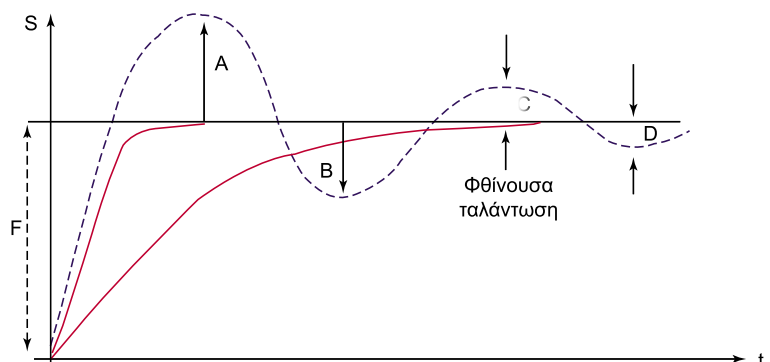
Ένας χωρητικός ή επαγωγικός αισθητήρας αποτελεί ένα δυναμικό σύστημα αισθητήρα πρώτης τάξης. Η συνάρτηση μεταφοράς του αισθητήρα παριστάνεται με την πιο κάτω διαφορική εξίσωση:

$$s(t) = b_1 \frac{dS(t)}{dt} + b_0 S(t)$$

Όταν ένας αισθητήρας ή διάταξη φέρει χωρητικότητα και επαγωγή ή δύο ίδια μεγέθη τότε ο αισθητήρας αποτελεί ένα δυναμικό σύστημα αισθητήρα δεύτερης τάξης. Η συνάρτηση μεταφοράς του αισθητήρα παριστάνεται με την πιο κάτω διαφορική εξίσωση:

$$s(t) = b_2 \frac{d^2 S(t)}{dt^2} + b_1 \frac{dS(t)}{dt} + b_0 S(t)$$

Στην περίπτωση ενός αισθητήρα δεύτερης τάξης, η γραφική παράσταση της απόκρισής του αποτελεί μια ταλάντωση γύρω από την τιμή του ερεθίσματος η οποία στο χρόνο εξασθενεί όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4. Η συχνότητα της ταλάντωσης ποικίλει από αισθητήρα σε αισθητήρα διότι συσχετίζεται με τις φυσικές ιδιότητές του. Η αξιολόγηση του



Σχήμα 2.24: Απόκριση αισθητήρων με διαφορετικό συντελεστή απόσβεσης.

αισθητήρα, δηλαδή το πόσο γρήγορα αποκρίνεται δίχως ταλάντωση, προσδιορίζεται από τον συντελεστή απόσβεσης ο οποίος και εκφράζεται ως:

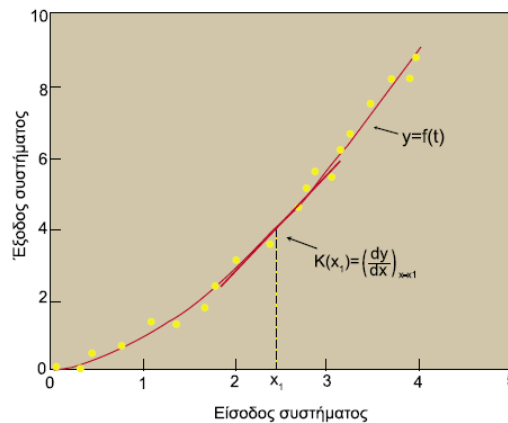
$$\text{Συντελεστής απόσβεσης} = \frac{F}{A} = \frac{B}{C}$$

Ερωτήσεις κατανόησης της ύλης του κεφαλαίου

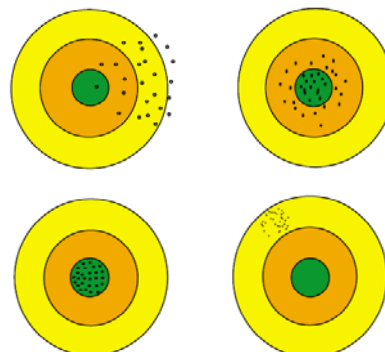
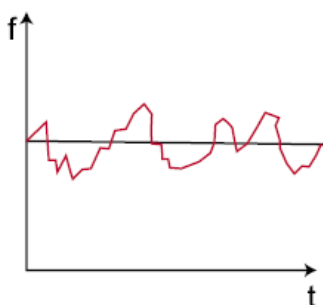
- 2.1 Ποια η διάφορα μεταξύ ανιχνευτή και αισθητήρα;
- 2.2 Τι καλείται μορφοτροπέας;
- 2.3 Ποια η διαφορά μεταξύ παθητικού και ενεργού αισθητήρα;
- 2.4 Συμπληρώστε τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων δεν εμφανίζονται στην παρακάτω λίστα.

| | |
|------------------------|----------------------------------|
| ▪ Συνάρτηση μεταφοράς | |
| ▪ Κλίμακα εισόδου | |
| | ▪ Εύρος πλήρους κλίμακας εισόδου |
| | ▪ Ακρίβεια |
| ▪ Μη γραμμικότητα | |
| ▪ Διακριτική ικανότητα | |
| | ▪ Ελάχιστο σήμα κατωφλίου |
| | ▪ Χρόνος προθέρμανσης |
| | |
| | |
| | |
| | |

- 2.5 Τι καλείται διακρίβωση;
- 2.6 Τι παρουσιάζει ο συντελεστή Κ στο παρακάτω διάγραμμα;



- 2.7 Να κυκλώσετε το στόχο που αναπαριστά την γραφική απόκριση του μετρήσιμου μεγέθους γύρω από τη μέση τιμή του.



2.8 Να τσεκάρετε όσα από τα παρακάτω στοιχεία αποτελούν παθητικούς αισθητήρες:

- RTD.
- Φωτοτρανζίστορ.
- Θερμοζεύγος.
- Αντίσταση Shuntt.

2.9 Ποια η διαφορά μεταξύ στατικής και δυναμικής βαθμονόμησης; Εξηγήστε με παράδειγμα.

2.10 (Κυκλώστε τη σωστή απάντηση) Ποία από τις παρακάτω γραφικές παραστάσεις αντιπροσωπεύει τη διαδικασία μέτρησης της εύρεσης του σφάλματος επαναληψιμότητας;

