

ΤΕΙ ΔΥΤ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε.

# ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

**Κωδικός Μαθήματος: HN5441**

**Ακαδημαϊκό έτος 2017-2018, (Εαρινό εξάμηνο)**

N. Πουλάκης

## Ελληνική βιβλιογραφία

1. *“Ηλεκτρικές μετρήσεις και αισθητήρες: Αρχές λειτουργίας και σχεδιασμός των ηλεκτρονικών συστημάτων μέτρησης”* , Κ. Καλαϊτζάκης και Ε. Κουτρούλης, 1<sup>η</sup> έκδ. 2010, ISBN: 978-960-461-331-1, Εκδόσεις ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ, Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 13771
2. *“Τεχνολογία μετρήσεων και αισθητήρων”*, Σπυρίδων Ι. Λουτρίδης, 1<sup>η</sup> έκδ. 2008, ISBN: 978-960-411-656-0, Εκδόσεις ΣΤΕΛΛΑ ΠΑΡΙΚΟΥ & ΣΙΑ, Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 14757
3. *“Αισθητήρες μέτρησης και ελέγχου”*, Peter Elgar, 1<sup>η</sup> έκδ. 2003, ISBN: 978-960-8050-31-0, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 18548793
4. *“ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ: ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ & ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ”*, Ν. Σταθόπουλος, 1<sup>η</sup> έκδ. 2017, ISBN: 978-960-9474-13-9, Εκδόσεις ΑΡΑΚΥΝΘΟΣ, Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 68391179

## Βιβλιογραφία στα αγγλικά

5. *“Handbook of Modern Sensor: Physics, Design, and Applications”*, Jacob Fraden, 3<sup>rd</sup> ed., 2004 Springer, ISBN:0-387-00750-4
6. *“Sensor Technology Handbook”*, editor Jan S. Wilson, 2005 Newnes, ISBN:0-7506-7729-5.
7. *“Transducers and Their Elements: Design and Application”*, A. D. Khazan, 1994, PTR Prentice Hall, ISBN: 0-13-929480-5.

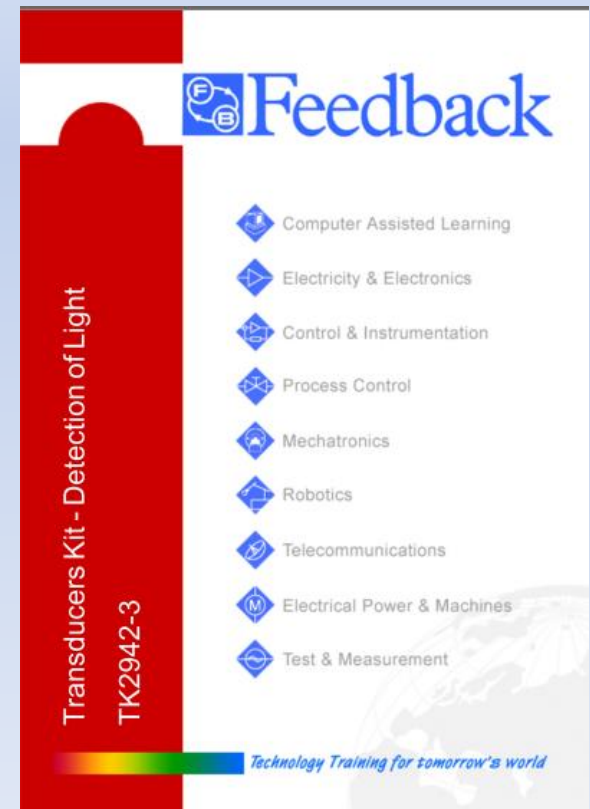
# ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ & ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κιτ αισθητήρων και μετατροπέων **TK2942** της εταιρείας **Feedback** (Feedback International Limited) και εγχειρίδιο ασκήσεων **2941-1** (έκδ. 2006)

Μέρος 1<sup>ο</sup> : Ηλεκτρομηχανικοί αισθητήρες

Μέρος 2<sup>ο</sup> : Αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας

Μέρος 3<sup>ο</sup> : Αισθητήρες ανίχνευσης φωτός



# ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το σύνολο των εργαστηριακών ασκήσεων που περιλαμβάνονται στο κιτ αισθητήρων **TK2942** της Feedback. Με έντονα γράμματα δείχνονται οι ασκήσεις που θα πραγματοποιηθούν στο εξαμηνιαίο μάθημα 'Τεχνολογία Μετρήσεων'.

## **ΜΕΡΟΣ 1: Ηλεκτρομηχανικοί Μετατροπείς**

1. Αντίσταση
2. Η Γέφυρα Wheatstone
3. Η Ευαισθησία της γέφυρας Wheatstone
4. Η Γέφυρα Wheatstone στο AC
- 5. Ο Τελεστικός Ενισχυτής**
6. Χρήση του Τελεστικού Ενισχυτή
7. Αισθητήρες Μεταβλητής Ειδικής Αντίστασης
8. Αισθητήρες Μεταβλητής Επιφάνειας
- 9. Αισθητήρες Μεταβλητού Μήκους**
- 10. Αισθητήρες Μηχανικής Τάσης**
11. Μέτρηση Χωρητικότητας
12. Μικρές Μεταβολές Χωρητικότητας
- 13. Ο Διευκρινιστής Συχνότητας**
14. Χωρητικοί Μετατροπείς σε ένα Σύστημα FM
15. Επαγωγικοί Μετατροπείς σε ένα Σύστημα FM
16. Αισθητήρες Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης
- 17. Ο γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής (LVDT)**

## **ΜΕΡΟΣ 2: Μέτρηση Θερμοκρασίας**

18. Εξοικείωση με τη Ράβδο Θερμότητας –
- 19. Το Θερμοζεύγος**
- 20. Το Θερμίστορ**
- 21. Θερμόμετρο Αντίστασης**
22. Έλεγχος Θερμοκρασίας ON-OFF
23. Συνεχής Έλεγχος Θερμοκρασίας

## **ΜΕΡΟΣ 3: Ανίχνευση του φωτός**

24. Η φύση του φωτός
- 25. Το φωτοαγώγιμο στοιχείο**
- 26. Η ημιαγώγιμη φωτοδίοδος**
- 27. Το ημιαγώγιμο φωτοτρανζίστορ**
28. Φασματική απόκριση

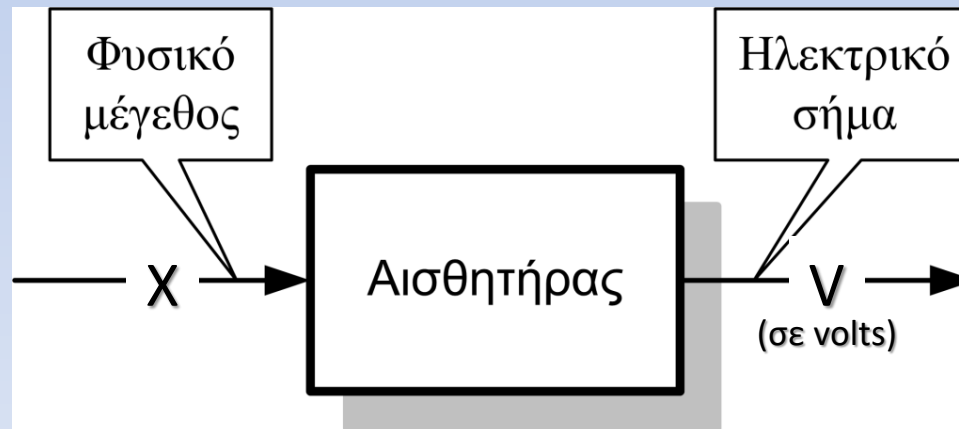
## Μέρος 1<sup>ο</sup> (\*)

- **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**
- **ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ**

(\*) Αντιστοιχεί στα κεφάλαια 1 και 2 του βιβλίου των Κ. Καλαϊτζάκη και Ε. Κουτρούλη “Ηλεκτρικές μετρήσεις και αισθητήρες: Αρχές λειτουργίας και σχεδιασμός των ηλεκτρονικών συστημάτων μέτρησης” „

# Αισθητήρες

- **Αισθητήρας (sensor)** είναι μια διάταξη για τη μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους (π.χ., θερμοκρασία, μήκος, πίεση)
- Μετατρέπει το μετρούμενο φυσικό μέγεθος ( $X$ ) σε ηλεκτρικό σήμα ( $V$ )



# Σχέση μετατροπών - αισθητήρων

## **ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ (SENSORS)**

- Μετρατρέπουν την τιμή ενός φυσικού μεγέθους (σήμα εισόδου) σε ηλεκτρική τάση ή ρεύμα (έξοδος)

## **ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ (TRANSDUCERS)**

- Μετατρέπουν ένα τύπο ενέργειας σε έναν άλλο
- Οι όροι «Αισθητήρας» και «Μετατροπέας» συχνά εναλλάσσονται.

# Ταξινόμηση των αισθητήρων σε ενεργητικούς και παθητικούς

## ΠΑΘΗΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ (PASSIVE SENSORS)

- Ένας παθητικός αισθητήρας δεν χρειάζεται εξωτερική τροφοδοσία.
- Δημιουργεί στην έξοδό του άμεσα ένα ηλεκτρικό σήμα (τάση ή ρεύμα) ανάλογο της τιμής του φυσικού μεγέθους που μετράει (δηλαδή, μετατρέπει την ενέργεια εισόδου σε ηλεκτρική ενέργεια).
- Παραδείγματα: θερμοζεύγος, φωτοδίοδος, πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας

## ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ (ACTIVE SENSORS)

Οι ενεργητικοί αισθητήρες χρειάζεται εξωτερική τροφοδοσία (πηγή διέγερσης)

Παραδείγματα: οι αισθητήρες που βασίζονται στην αντίσταση (θερμίστορ, RTD - Resistance Temperature Detector και η πιεζοαντίσταση - strain gauge)

Για να προσδιοριστεί η τιμή της αντίστασής τους, πρέπει να περάσει ρεύμα από μέσα τους και να μετρηθεί η αντίστοιχη τάση τους.



# Οι συνηθισμένοι αισθητήρες και η έξοδός τους

Φυσικό μέγεθος	Αισθητήρας	Ενεργός/Παθητικός	Έξοδος
Θερμοκρασία	Θερμοζεύγος	Παθητικός	Τάση
	Πυρίτιο	Ενεργός	Τάση/Ρεύμα
	RTD	Ενεργός	Αντίσταση
	Θερμίστορ	Ενεργός	Αντίσταση
Δύναμη/Πίεση	Strain Gauge	Ενεργός	Αντίσταση
	Πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος	Παθητικός	Τάση
Επιτάχυνση	Επιταχυνσιόμετρο	Ενεργός	Χωρητικότητα
Θέση	LVDT	Ενεργός	AC Τάση
Φωτεινή ένταση	Φωτοδίοδος	Παθητικός	Ρεύμα

*Sensor Technology Handbook*”, editor Jan S. Wilson, 2005 Newnes, ISBN:0-7506-7729-5

# Ανιχνευτής

- Ανιχνευτής (detector) είναι μια διάταξη αισθητήρα ή μετατροπέα με έξοδο ON-OFF

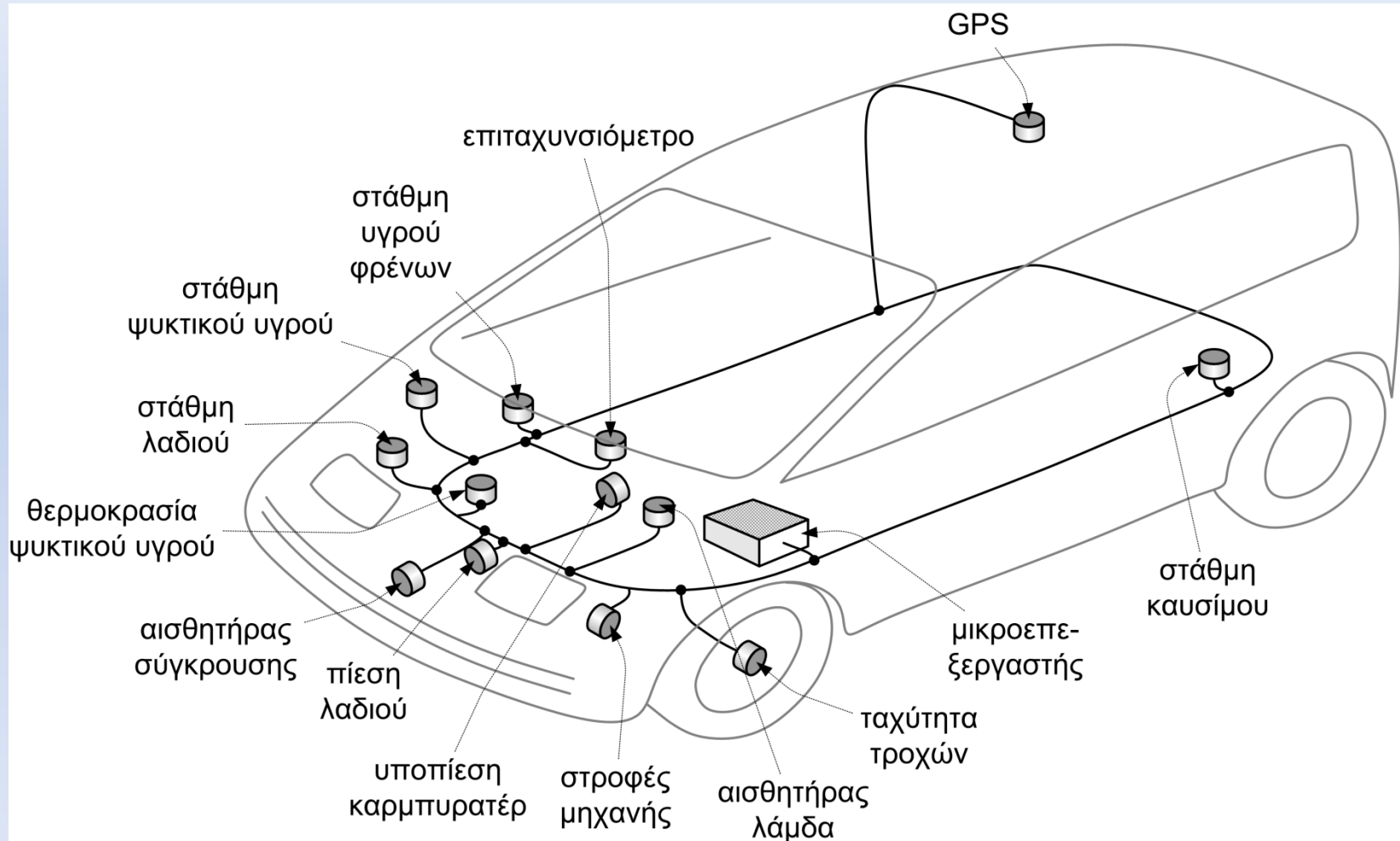
Παράδειγμα: θερμοστάτης θερμοσιφώνου ρυθμισμένος στους 60°C:

- για  $\theta \leq 60 \text{ }^\circ\text{C} = \text{ON}$ ,
- για  $\theta > 60 \text{ }^\circ\text{C} = \text{OFF}$

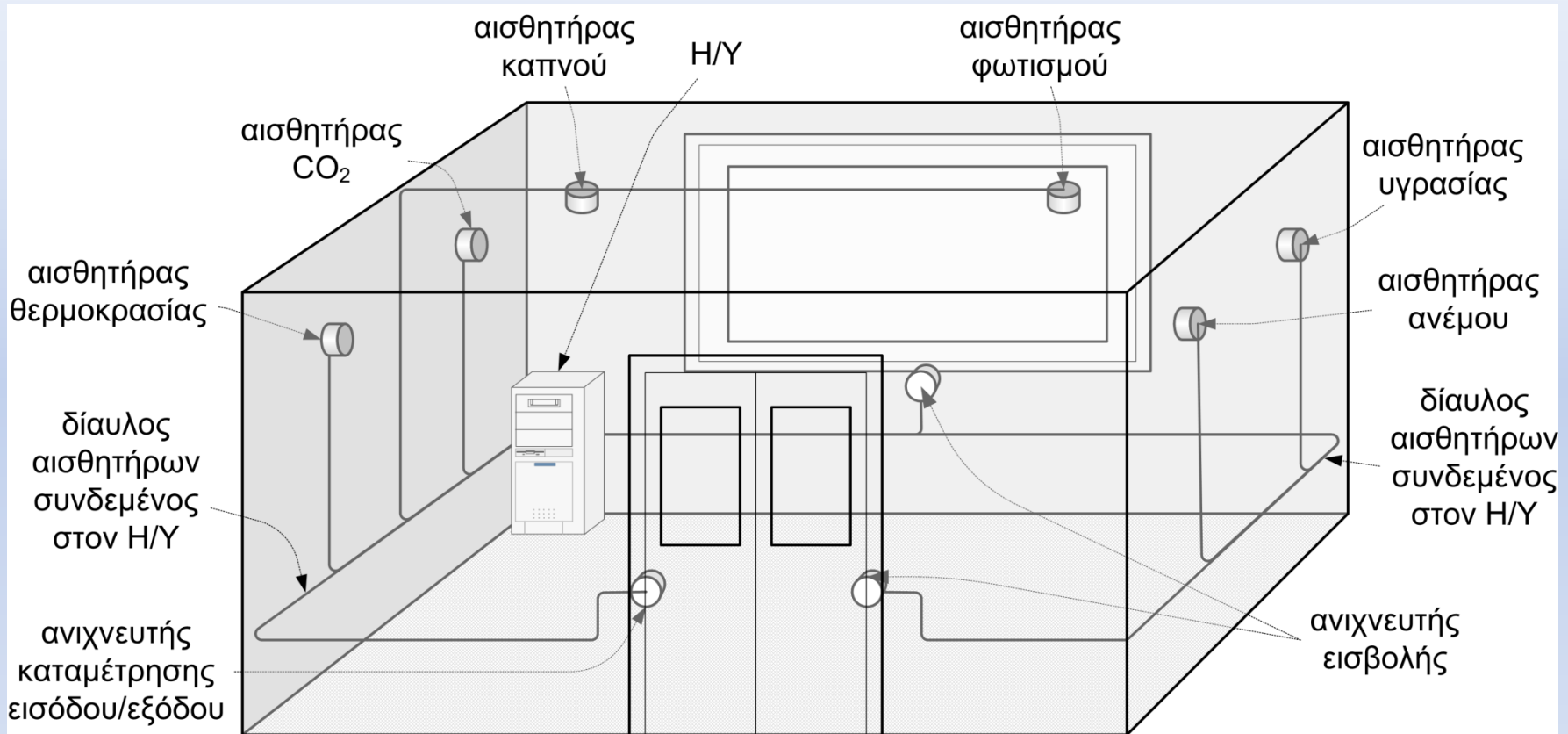
- Οι ανιχνευτές δεν χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση μεγεθών

## Εφαρμογές των αισθητήρων: (Α) Σε ένα αυτοκίνητο

- Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τη συλλογή πληροφοριών (δεδομένων) από ένα σύστημα και για τον έλεγχο του συστήματος.

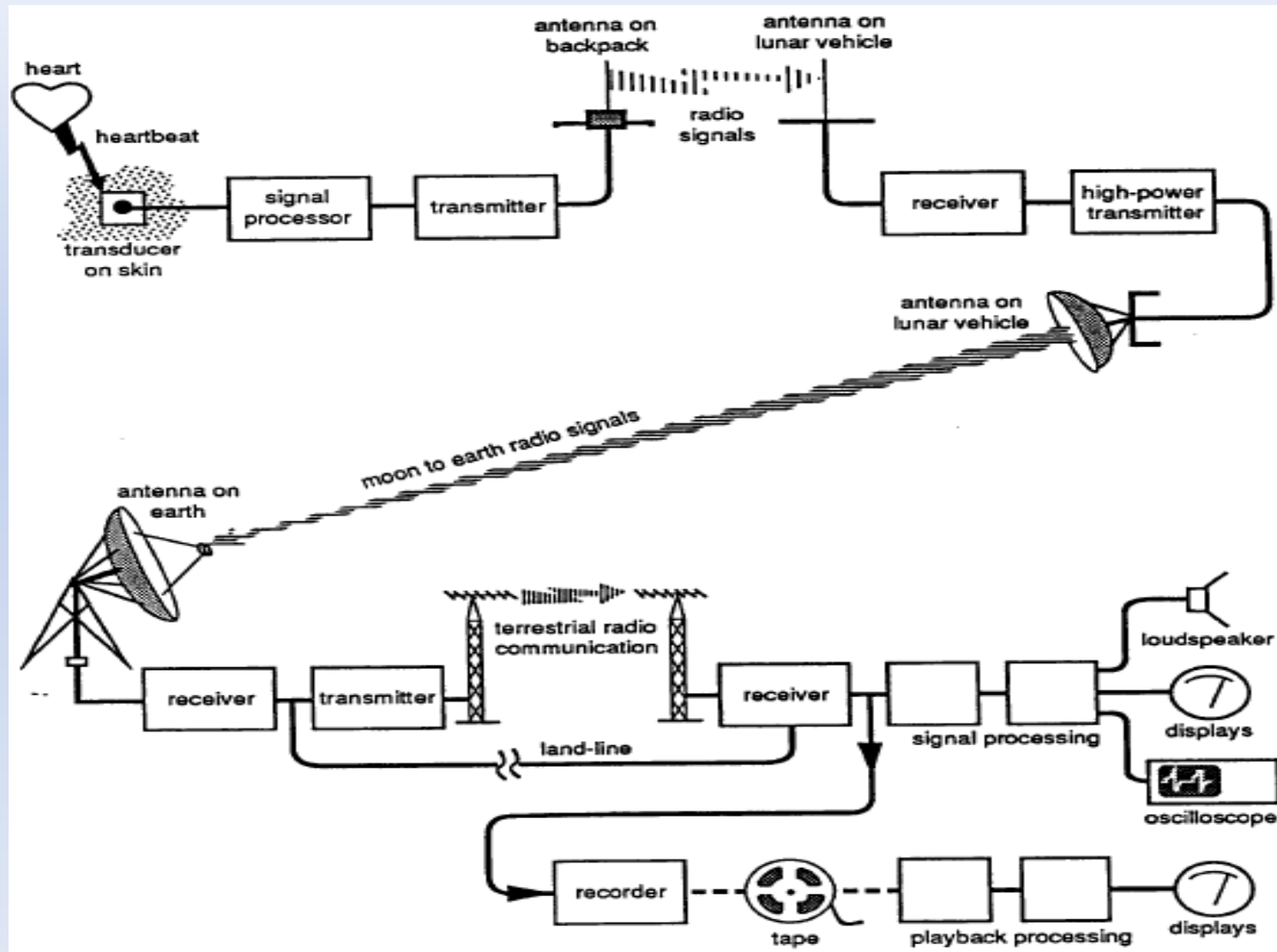


# Εφαρμογές των αισθητήρων: (B) Σε ένα σύγχρονο κτίριο



# Εφαρμογές των αισθητήρων: (Γ) Στη σύγχρονη διαστημική

Μέτρηση των καρδιακών παλμών ενός αστροναύτη όταν κάνει κάποια εργασία στην επιφάνεια της σελήνης ή έξω στο διάστημα.



# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Ένας καλός αισθητήρας πρέπει:

- Να είναι ευαίσθητος στο μετρούμενο μέγεθος
- Να μην είναι ευαίσθητος σε κανένα άλλο μέγεθος
- Να μην επηρεάζει το μέγεθος που μετράει

# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων

## Η συνάρτηση μεταφοράς

Η **συνάρτηση μεταφορά** (transfer function) ενός αισθητήρα είναι η σχέση μεταξύ της τιμής του φυσικού μεγέθους που μετράει στην είσοδό του και της τάσης στην έξοδό του

- ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ: Η συνάρτηση μεταφοράς του αισθητήρα επιτάχυνσης ADXL150 της εταιρείας Analog Devices δίνεται από τη σχέση

$$V(Acc) = 1.5volts + Acc \cdot 167 \frac{mV}{g}$$

όπου,  $Acc$  η επιτάχυνση σε  $g$  ( $g \approx 10 \frac{m}{s^2}$  η επιτάχυνση της βαρύτητας)

# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων:

## Η συνάρτηση μεταφοράς (συνέχεια)

Γενικά, η συνάρτηση μεταφοράς εκφράζεται σαν μια συνάρτηση της μορφής

$$V = f(X)$$

όπου,

$X$  συμβολίζει το μετρούμενο μέγεθος (π.χ., θερμοκρασία, επιτάχυνση, κ.λ.π.)

$V$  είναι η τάση εξόδου του αισθητήρα

Μια συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να έχει μορφή:

- Γραμμική  $V = \alpha + b \cdot X$
- Λογαριθμική  $V = \alpha + b \cdot \ln X$
- Εκθετική  $V = \alpha \cdot e^{k \cdot X}$
- Δύναμης  $V = \alpha + b \cdot X^k$



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

- (α) Ποια είναι η μορφή της συνάρτησης μεταφοράς  $V(Acc) = 1.5 \text{ volts} + Acc \cdot 167 \text{ mV/g}$  του αισθητήρα επιτάχυνσης ADXL150 της εταιρείας Analog Devices;
- (β) Σε ένα φύλλο excel, καταγράψτε τις τιμές εξόδου του αισθητήρα για διάφορες τιμές επιτάχυνσης στο διάστημα  $[-2g, 2g]$
- (γ) Σχεδιάστε τη γραφική παράσταση της σχέσης. Τι παρατηρείτε;

## Απάντηση

- (α) Συγκρίνοντας στη συγκεκριμένη συνάρτηση μεταφοράς

$$V(Acc) = 1.5 \text{ volts} + Acc \cdot 167 \frac{\text{mV}}{\text{g}}$$

με τον πίνακα

$V = \alpha + b \cdot X$
$V = \alpha + b \cdot \ln X$
$V = \alpha \cdot e^{k \cdot X}$
$V = \alpha + b \cdot X^k$

παρατηρούμε ότι είναι **γραμμικής** μορφής με

$$X = Acc,$$

$$\alpha = 1.5 \text{ volts}$$

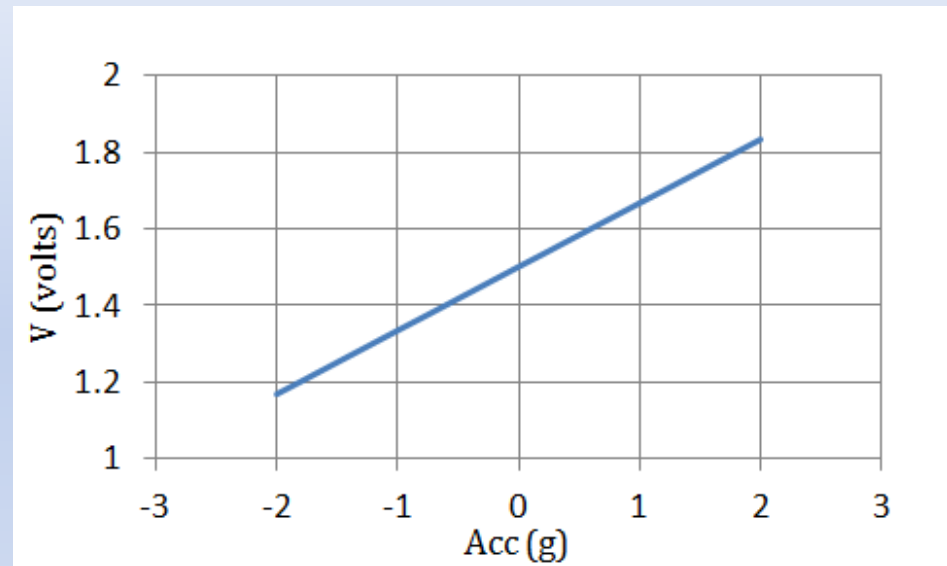
$$\text{και } b = 167 \frac{\text{mV}}{\text{g}} = 0.167 \frac{\text{V}}{\text{g}}$$

(Συνεχίζεται...)

## Παράδειγμα (. . . συνέχεια)

(β) Σε ένα φύλλο excel, υπολογίζουμε τις τιμές εξόδου του αισθητήρα για τιμές επιτάχυνσης μεταξύ  $-2g$  και  $+2g$

ADX150 accelerometer	
Acc (g)	V (volts)
-2	1.166
-1.6	1.2328
-1.2	1.2996
-0.8	1.3664
-0.4	1.4332
0	1.5
0.4	1.5668
0.8	1.6336
1.2	1.7004
1.6	1.7672
2	1.834



(γ) Η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου,  $V(\text{volts})$ , για τις τιμές της επιτάχυνσης,  $\text{Acc}$ , είναι ευθεία γραμμή (γραμμική συνάρτηση μεταφοράς)

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ** Από τη μαθηματική σχέση της συνάρτησης μεταφοράς  
$$V(Acc) = 1.5 \text{ volts} + Acc \cdot 167 \text{ mV/g}$$
του αισθητήρα επιτάχυνσης ADXL150, βρείτε την ευαισθησία του

### Απάντηση

Έχουμε  $V(Acc) = 1.5 \text{ volts} + Acc \cdot 167 \text{ mV/g}$

ή, πιο απλά,  $V = 1.5 + Acc \cdot 0.167$

Παραγωγίζοντας, έχουμε

$$\begin{aligned}\frac{dV}{dAcc} &= \frac{d}{dAcc} (1.5 + Acc \cdot 0.167) \\ &= \frac{d}{dAcc} (1.5) + \frac{d}{dAcc} (0.167 \cdot Acc) \\ &= \frac{d}{dAcc} (1.5) + 0.167 \cdot \frac{d}{dAcc} (Acc)\end{aligned}$$

Επομένως, 
$$S = \frac{dV}{dAcc} = \mathbf{0.167 \frac{V}{g}}$$

# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων:

## Ευαισθησία (συνέχεια)

Συχνά, η συνάρτηση μεταφοράς ενός αισθητήρα δίνεται από τον κατασκευαστή σαν **πίνακας τιμών** της τάσης εξόδου  $V$  για διάφορες τιμές του μετρούμενου μεγέθους  $X$

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ:** Δίνεται ο παρακάτω πίνακας τιμών ενός αισθητήρα θερμοκρασίας. Υπολογίστε την ευαισθησία του για θερμοκρασίες μεταξύ  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

$\theta\text{ (}^{\circ}\text{C)}$	$V\text{ (mV)}$
18.0	0.709
23.0	0.891
29.0	1.19
35.0	1.43
42.0	1.82
50.5	2.15
58.5	2.52

### Απάντηση

Η ευαισθησία σε αυτό το διάστημα θερμοκρασιών μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από το κλάσμα

$$\frac{\Delta V}{\Delta \theta} = \frac{V_{29^{\circ}\text{C}} - V_{23^{\circ}\text{C}}}{29^{\circ}\text{C} - 23^{\circ}\text{C}} = \frac{1.19\text{mV} - 0.891\text{mV}}{29^{\circ}\text{C} - 23^{\circ}\text{C}} = \frac{0.30\text{mV}}{6^{\circ}\text{C}} \cong 0.05 \frac{\text{mV}}{^{\circ}\text{C}}$$

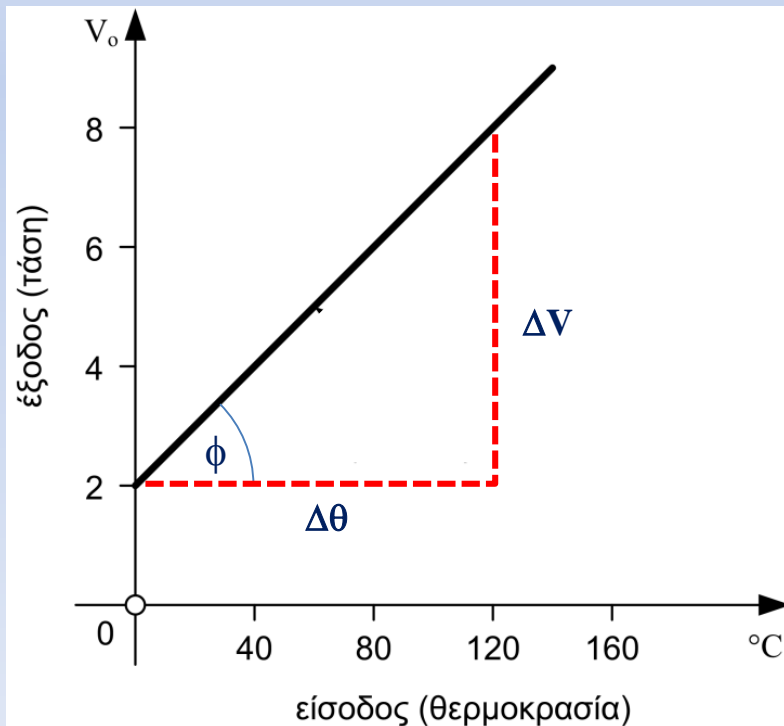
Επομένως, η μέση ευαισθησία του θερμομέτρου μεταξύ  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$  είναι  $\cong 0.05 \frac{\text{mV}}{^{\circ}\text{C}}$  ή  $50 \frac{\mu\text{V}}{^{\circ}\text{C}}$

# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων:

## Ευαισθησία (συνέχεια)

Όταν η συνάρτηση μεταφοράς ενός αισθητήρα δίνεται από τον κατασκευαστή μόνο σαν **γραφική παράσταση**, η ευαισθησία υπολογίζεται από την κλίση της γραμμής

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ:** Εκτιμήστε την ευαισθησία ενός αισθητήρα θερμοκρασίας του οποίου η τάση εξόδου ως προς τη θερμοκρασία δίνεται από την παρακάτω γραφική παράσταση.



### Απάντηση

Η κλίση της γραμμής, δηλαδή η εφαπτομένη της γωνίας  $\phi$  που κάνει με τον οριζόντιο άξονα (άξονας θερμοκρασίας), είναι

$$\tan \phi = \frac{\Delta V}{\Delta \theta} = \frac{8 \text{ V} - 2 \text{ V}}{120^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}} = 0.05 \frac{\text{V}}{^\circ\text{C}}$$

Άρα, η ευαισθησία του θερμομέτρου είναι

$$S = 0.05 \text{ V}/^\circ\text{C} \text{ ή } 50 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

και είναι σταθερή σε όλη την κλίμακα θερμοκρασιών (γραμμική αισθητήρας)

# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων: Εύρος (ή πλήρης κλίμακα) εισόδου

Εύρος (span) ή πλήρης κλίμακα εισόδου (input full scale, FS) ενός αισθητήρα είναι η περιοχή τιμών του φυσικού μεγέθους  $X$  την οποία μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια.

Τιμές του σήματος εισόδου εκτός αυτής της κλίμακας εισόδου, προκαλεί απaráδεκτα μεγάλα σφάλματα στη μέτρηση.

Το εύρος ονομάζεται και **δυναμική κλίμακα (dynamic range)** εισόδου του αισθητήρα

- ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ: Το εύρος εισόδου για το επιταχυνσιόμετρο ADXL322 είναι  $\pm 2g$  ( $Acc_{min} = -2g$ ,  $Acc_{max} = +2g$ ).

Για επιταχύνσεις εκτός αυτής της κλίμακα, η τάση εξόδου του αισθητήρα θα συνεχίσει να αυξάνει ή να μειώνεται αλλά η ευαισθησία του δεν είναι εγγυημένα  $167 \text{ mV/g}$ .

Ο αισθητήρας μπορεί να αντέξει επιταχύνσεις ως  $3500g$

# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων: Πλήρης κλίμακα εξόδου

Η πλήρης κλίμακα εξόδου (full-scale output, FSO) ενός αισθητήρα είναι η διαφορά των τιμών της τάσης εξόδου του στα δύο άκρα του εύρους εισόδου του, δηλαδή, για τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του φυσικού μεγέθους  $X$  που μπορεί να μετρήσει

$$FSO = V(X_{max}) - V(X_{min})$$

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ:** Το επιταχυνσιόμετρο ADXL322 έχει εύρος εισόδου  $FS = \pm 2g$ . Από τη συνάρτηση μεταφοράς,  $V(Acc) = 1.5\text{volts} + Acc \cdot 167 \frac{mV}{g}$ , υπολογίστε την πλήρη κλίμακα εξόδου του μέγιστη και ελάχιστη τιμή της τάσης εξόδου

## Απάντηση

Έχουμε  $V(+2g) = 1.5\text{ V} + (2g) \cdot 0.167 \frac{V}{g} = 1.5 + 0.334 = 1.83\text{ V}$

και  $V(-2g) = 1.5\text{ V} + (-2g) \cdot 0.167 \frac{V}{g} = 1.5 - 0.334 = 1.17\text{ V}$

Επομένως,  $FSO = V(+2g) - V(-2g) = 1.83 - 1.17 = 0.66\text{ V}$  ή  $660\text{ mV}$

# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων:

## Ακρίβεια

Η ακρίβεια (accuracy) ενός αισθητήρα στην πραγματικότητα σημαίνει ανακρίβεια (inaccuracy).

Η ακρίβεια ορίζεται σαν η μέγιστη απόκλιση (ή μέγιστο σφάλμα) της τιμής που δείχνει ο αισθητήρας από την πραγματική ή ιδανική τιμή στην είσοδό του

$$\text{Ακρίβεια} = X_{\text{μετρούμενο}} - X_{\text{πραγματικό}}$$

Η ακρίβεια ονομάζεται και αβεβαιότητα (uncertainty) ή σφάλμα (error) του αισθητήρα.



# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων:

## Ακρίβεια (συνέχεια)

Η ακρίβεια μπορεί να εκφραστεί:

- **άμεσα σε μονάδες του μετρούμενου μεγέθους**

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ: Ένα θερμόμετρο με ακρίβεια  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  σημαίνει ότι, αν το θερμόμετρο δίχνει  $20^{\circ}\text{C}$ , η πραγματική τιμή της θερμοκρασίας είναι μεταξύ  $19.5^{\circ}\text{C}$  και  $20.5^{\circ}\text{C}$

- **σαν εκατοστιαίο (%) σφάλμα της τιμής μέτρησης**

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ: Ένα θερμόμετρο με ακρίβεια  $\pm 0.5\%$  σημαίνει ότι, αν το θερμόμετρο δίχνει  $20^{\circ}\text{C}$ , το σφάλμα μέτρησης είναι

$$(\pm 0.5\%)(20^{\circ}\text{C}) = \left(\pm \frac{0.5}{100}\right)(20^{\circ}\text{C}) = \pm 1^{\circ}\text{C}$$

οπότε η πραγματική τιμή της θερμοκρασίας είναι μεταξύ  $19^{\circ}\text{C}$  και  $21^{\circ}\text{C}$

- **σαν εκατοστιαίο σφάλμα της πλήρους κλίμακας εισόδου του αισθητήρα**

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ: Ένα θερμόμετρο με εύρος θερμοκρασιών  $0 - 50^{\circ}\text{C}$  και ακρίβεια  $\pm 5\%$  FS σημαίνει ότι, αν το θερμόμετρο δίχνει  $20^{\circ}\text{C}$ , έχει σφάλμα μέτρησης

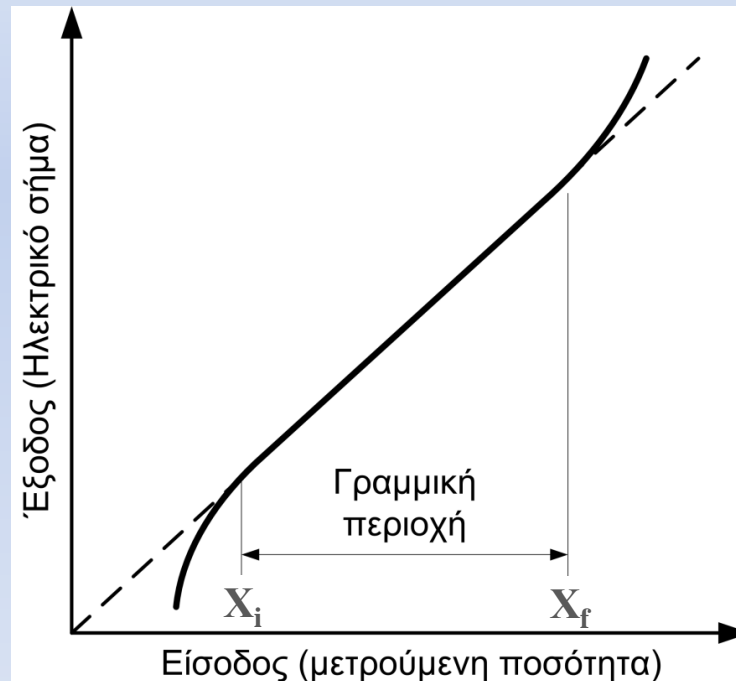
$$(\pm 5\%)(50^{\circ}\text{C}) = \left(\pm \frac{5}{100}\right)(50^{\circ}\text{C}) = \pm 2.5^{\circ}\text{C}$$

και η πραγματική τιμή της θερμοκρασίας είναι μεταξύ  $17.5^{\circ}\text{C}$  και  $22.5^{\circ}\text{C}$ .

# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων: Γραμμικότητα

Η **γραμμικότητα (linearity)** ενός αισθητήρα είναι ιδιότητα της συνάρτησης μεταφοράς του.

- Ένας αισθητήρας μπορεί να έχει γραμμικές και μη-γραμμικές περιοχές στην πλήρη κλίμακα (εύρος) εισόδου του.



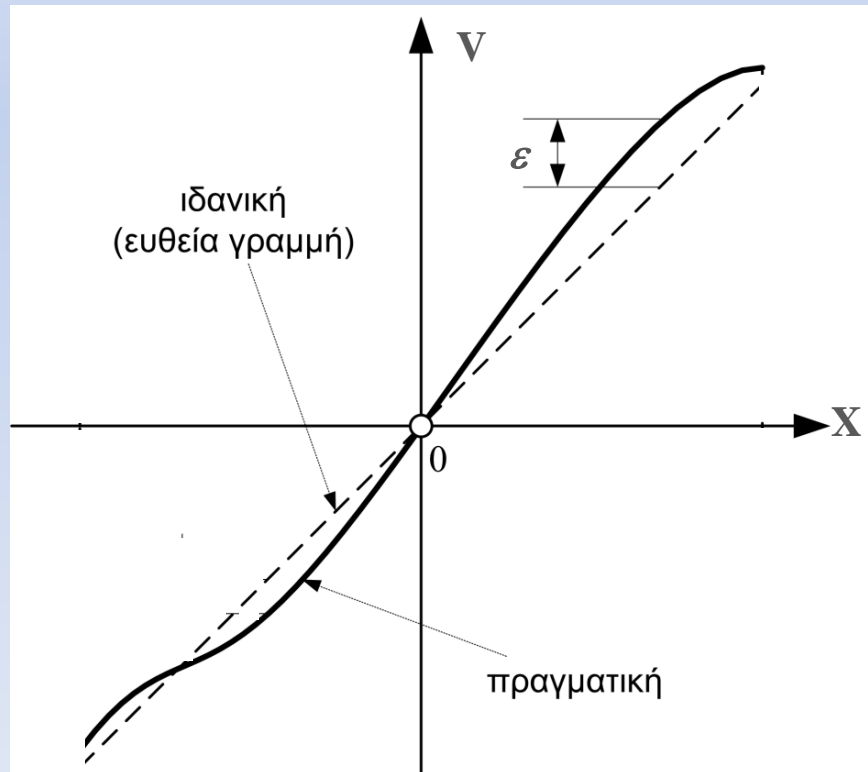
- Για τιμές της μετρούμενης ποσότητας μεταξύ  $X_i$  και  $X_f$ , η συνάρτηση μεταφοράς είναι γραμμική

# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων:

## Γραμμικότητα (συνέχεια)

Η γραμμικότητα (linearity) ενός αισθητήρα στην πραγματικότητα σημαίνει μη-γραμμικότητα (non-linearity).

- Η μη-γραμμικότητα ή σφάλμα μη γραμμικότητας ( $\varepsilon$ ) ορίζεται σαν η από-κλιση της **πραγματικής** συνάρτησης μεταφοράς του αισθητήρα από την **ιδανική** (ευθεία γραμμή)



# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων:

## Γραμμικότητα (συνέχεια)

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ:** Η γραμμικότητα του επιταχυνσιόμετρου ADXL322 δηλώνεται από τον κατασκευαστή ότι είναι μικρότερη από 0.2% της πλήρους κλίμακας εξόδου (FSO)

Εφόσον η πλήρης κλίμακα εξόδου για το επιταχυνσιόμετρο είναι  $FSO = 660 \text{ mV}$ , η μέγιστη απόκλιση από τη γραμμικότητα είναι

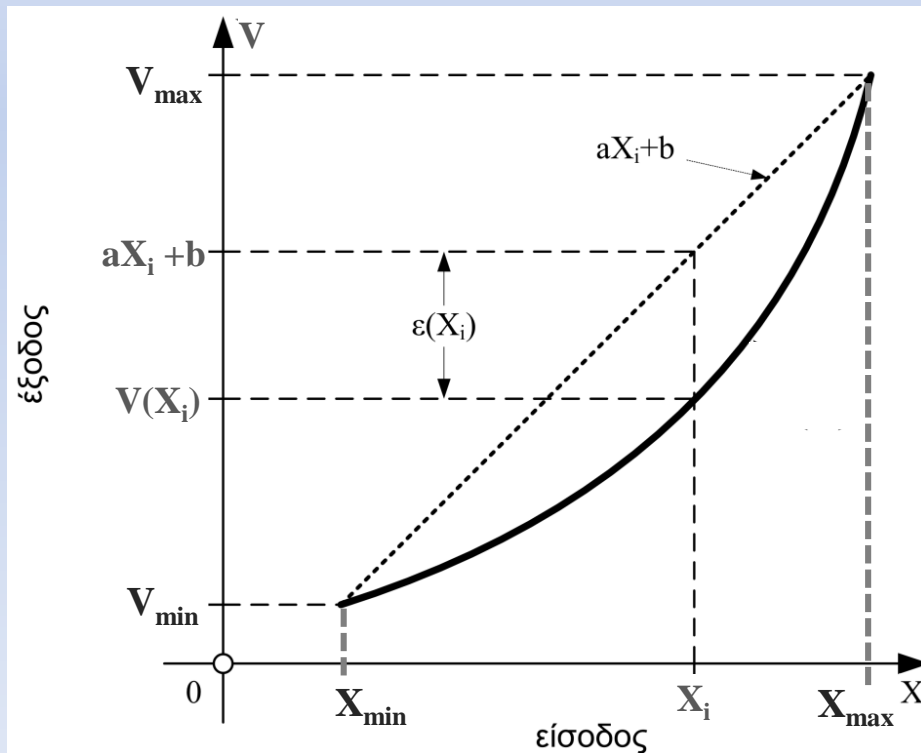
$$(0.2\%) (660 \text{ mV}) = \left( \frac{0.2}{100} \right) (660 \text{ mV}) = 1.32 \text{ mV}$$

δηλαδή, το σφάλμα γραμμικότητας είναι  $\varepsilon = 1.32 \text{ mV}$

# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων: Γραμμικότητα (συνέχεια)

Η μη-γραμμικότητα μετριέται με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τον τρόπο που ορίζουμε την ευθεία γραμμή ( $V = aX+b$ ) της ιδανικής συνάρτησης μεταφοράς

**1<sup>ος</sup> τρόπος:** Χρησιμοποιώντας τα **ακραία σημεία**  $V_{\max}$  και  $V_{\min}$  της συνάρτησης μεταφοράς.



$$a = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

$$b = \frac{V_{\min} X_{\max} - V_{\max} X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

Το σφάλμα μη-γραμμικότητας σε ένα σημείο  $X_i$  είναι

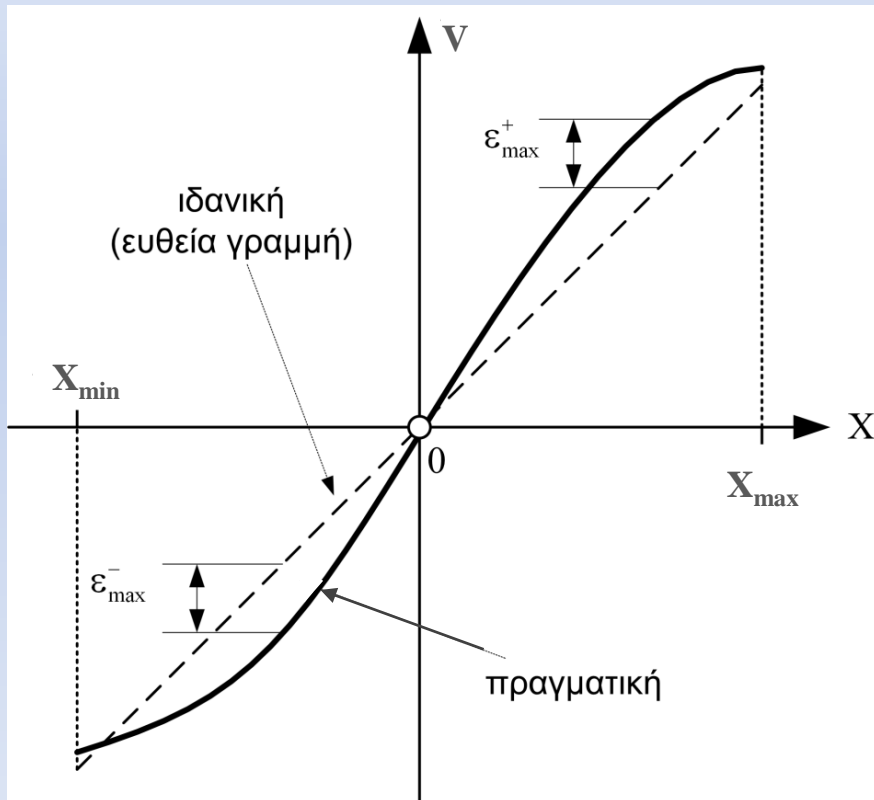
$$\varepsilon(X_i) = | V(X_i) - (aX_i + b) |$$

# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων:

## Γραμμικότητα (συνέχεια)

**2<sup>ος</sup> τρόπος:** Χρησιμοποιώντας την **ευθεία ελαχίστων τετραγώνων**

Μετράμε  $n$  τιμές της τάσης εξόδου  $(V_1, V_2, \dots, V_n)$  σε τιμές της εισόδου  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  από  $X_{\min}$  ως  $X_{\max}$ .



$$a = \frac{n \sum X_i V_i - \sum X_i \sum V_i}{n \sum (X_i)^2 - (\sum X_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum V_i \sum (X_i)^2 - \sum X_i \sum X_i V_i}{n \sum (X_i)^2 - (\sum X_i)^2}$$

Το μέγιστο σφάλμα μη-γραμμικότητας είναι  $\varepsilon_{\max} = \max \varepsilon(X_i)$

και εκφράζεται σε % της FSO

$$n_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max}}{FSO} = \frac{\varepsilon_{\max}}{V_{\max} - V_{\min}}$$

# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων:

## Γραμμικότητα (συνέχεια)

**ΠΡΟΒΛΗΜΑ:** Οι τιμές της τάσης εξόδου (V) ενός θερμομέτρου αντίστασης ως προς τη μεταβολή ( $\Delta R$ ) της αντίστασης του δίνονται στον πίνακα παρακάτω. Σχεδιάστε τη συνάρτηση μεταφοράς του θερμομέτρου και την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων.

$\Delta R$ ( $\Omega$ )	V (mV)
0.0	0
3.0	142
6.0	268
9.0	381
12.0	484
15.0	577
18.0	662
21.0	739
24.0	811
27.0	877
30.0	938
33.0	994
36.0	1047
39.0	1096
42.0	1141
45.0	1184

**ΛΥΣΗ:** Οι συντελεστές a και b της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων δίνονται από τις σχέσεις

$$a = \frac{n \sum \Delta R_i V_i - \sum \Delta R_i \sum V_i}{n \sum (\Delta R_i)^2 - (\sum \Delta R_i)^2}$$
$$b = \frac{\sum V_i \sum (\Delta R_i)^2 - \sum \Delta R_i \sum \Delta R_i V_i}{n \sum (\Delta R_i)^2 - (\sum \Delta R_i)^2}$$

Από τον πίνακα τιμών ( $n = 16$  τιμές) έχουμε

$$\sum V_i = 11339$$

$$\sum (\Delta R_i)^2 = 11160$$

$$\sum \Delta R_i = 360$$

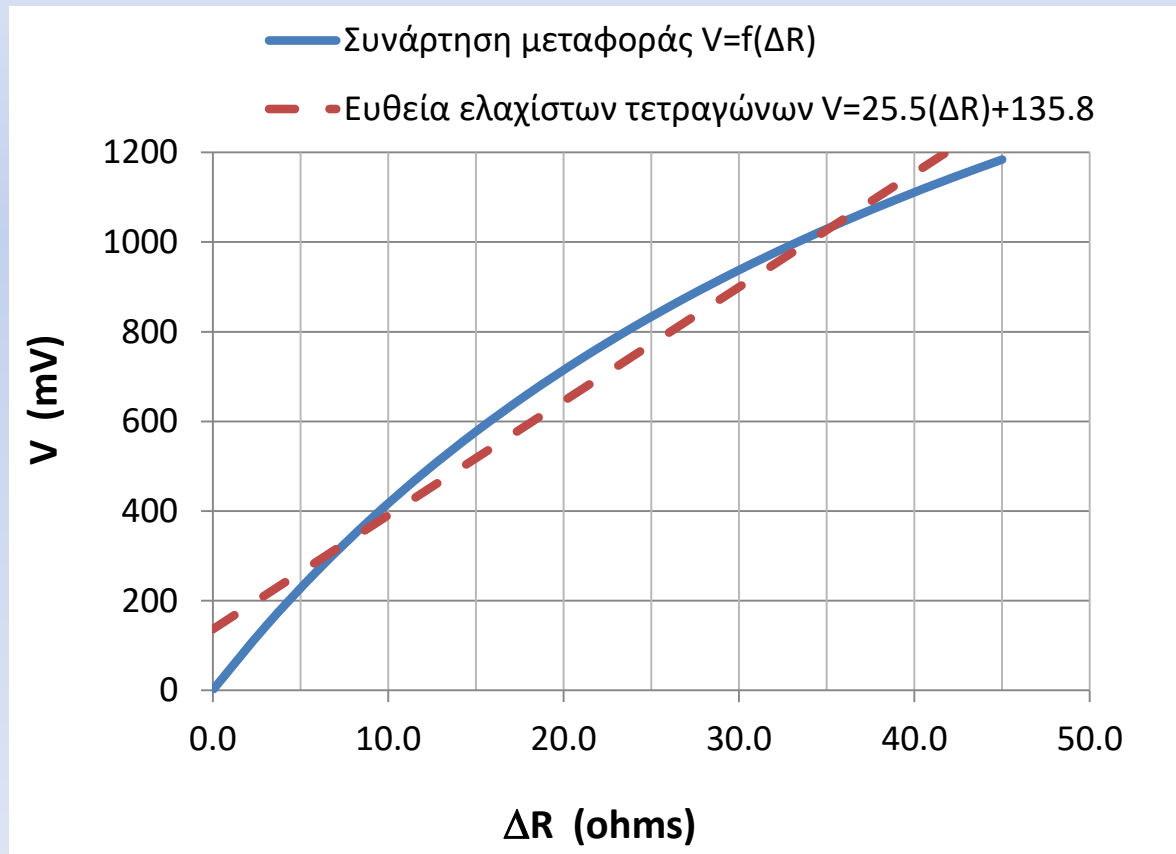
$$\sum (\Delta R_i)(V_i) = 333042$$

## ΛΥΣΗ (συνέχεια)

Αντικαθιστώντας βρίσκουμε:

$$a = \frac{16(333042) - (360)(11339)}{16(11160) - (360)^2} = 25.5 \quad \text{και} \quad b = \frac{(11339)(11160) - (360)(333042)}{16(11160) - (360)^2} = 135.8$$

Η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων είναι η  $V = 25.5 \cdot \Delta R + 135.8$





# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων:

## Γραμμικότητα (συνέχεια)

**ΠΡΟΒΛΗΜΑ:** Από τον πίνακα τιμών του θερμομέτρου του προηγούμενου προβλήματος, υπολογίστε το σφάλμα μη-γραμμικότητας σε κάθε σημείο της συνάρτησης μεταφοράς.

**Απάντηση:** Το σφάλμα μη-γραμμικότητας σε κάθε σημείο είναι  $\varepsilon(\Delta R_i) = |V - (a \cdot \Delta R_i + b)|$   
 $= |V - (25.5 \cdot \Delta R_i + 135.8)|$

Υπολογίζουμε τις τιμές της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων  $a \cdot \Delta R + b$ , δηλαδή,  $25.5 \cdot \Delta R + 135.8$  για τις διάφορες τιμές  $\Delta R$  της 1<sup>ης</sup> στήλης (βλ. 3<sup>η</sup> στήλη)

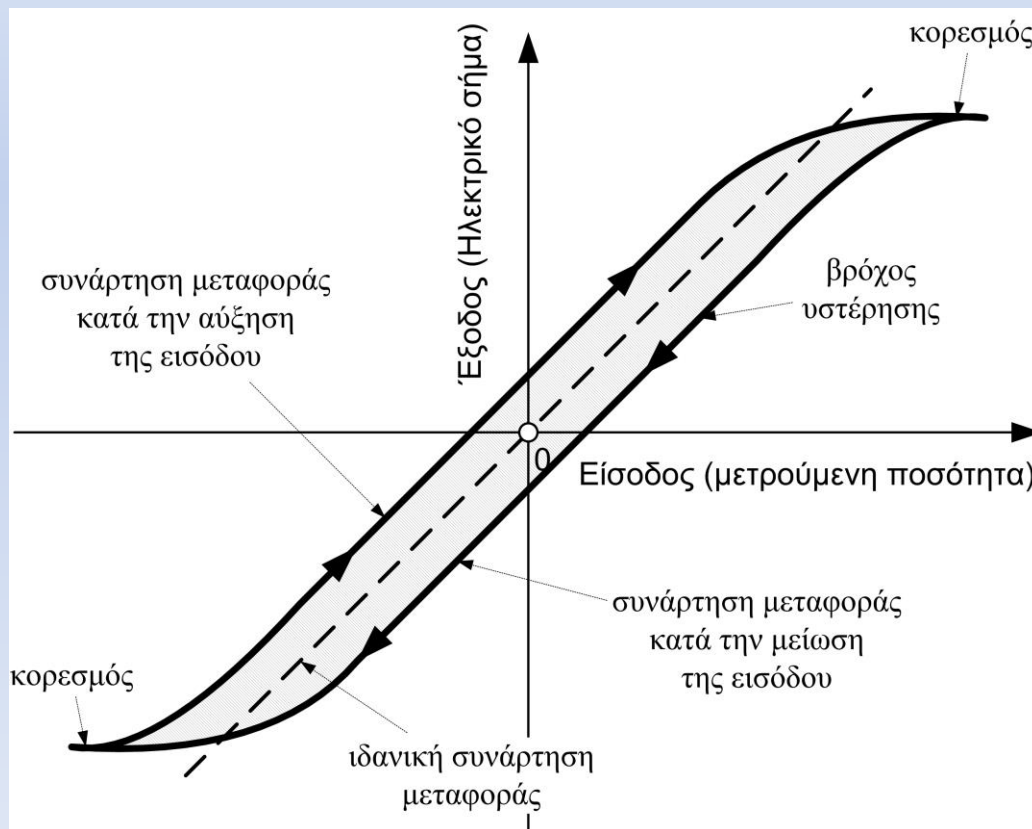
Οι τιμές του σφάλματος  $\varepsilon$  για κάθε τιμή  $\Delta R$  φαίνεται στην 4<sup>η</sup> στήλη του πίνακα.

Το μέγιστο σφάλμα μη-γραμμικότητας είναι  $\varepsilon_{\max} \approx 136 \text{ mV}$

$\Delta R$ ( $\Omega$ )	V (mV)	$a \cdot \Delta R + b$	$\varepsilon(\Delta R)$
0.0	0	135.8	135.8
3.0	142	70.7	70.7
6.0	268	20.7	20.7
9.0	381	16.4	16.4
12.0	484	42.5	42.5
15.0	577	59.2	59.2
18.0	662	67.6	67.6
21.0	739	68.9	68.9
24.0	811	63.9	63.9
27.0	877	53.4	53.4
30.0	938	37.8	37.8
33.0	994	17.9	17.9
36.0	1047	5.9	5.9
39.0	1096	33.3	33.3
42.0	1141	63.9	63.9
45.0	1184	97.4	97.4

# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων: Υστέρηση

Ορισμένοι αισθητήρες δεν επιστρέφουν στην ίδια τιμή της τάσης εξόδου όταν το μέγεθος που μετράνε (σήμα εισόδου) φτάνει σε μια ορισμένη τιμή από τιμές μεγαλύτερες και από τιμές μικρότερες. Η διαφορά στις τιμές της μετρούμενης ποσότητας ονομάζεται **υστέρηση (hysteresis)**



# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων: Υστέρηση (συνέχεια)

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ:** Ένας αισθητήρας θέσης, σε μια ορισμένη θέση του αντικειμένου, έχει έξοδο που διαφέρει κατά 20 mV όταν το αντικείμενο κινείται από αριστερά προς τα δεξιά σε σχέση με την τάση εξόδου του όταν το αντικείμενο κινείται από δεξιά προς τα αριστερά.

Αν η ευαισθησία του αισθητήρα είναι 10 mV/mm, το σφάλμα υστέρησης του

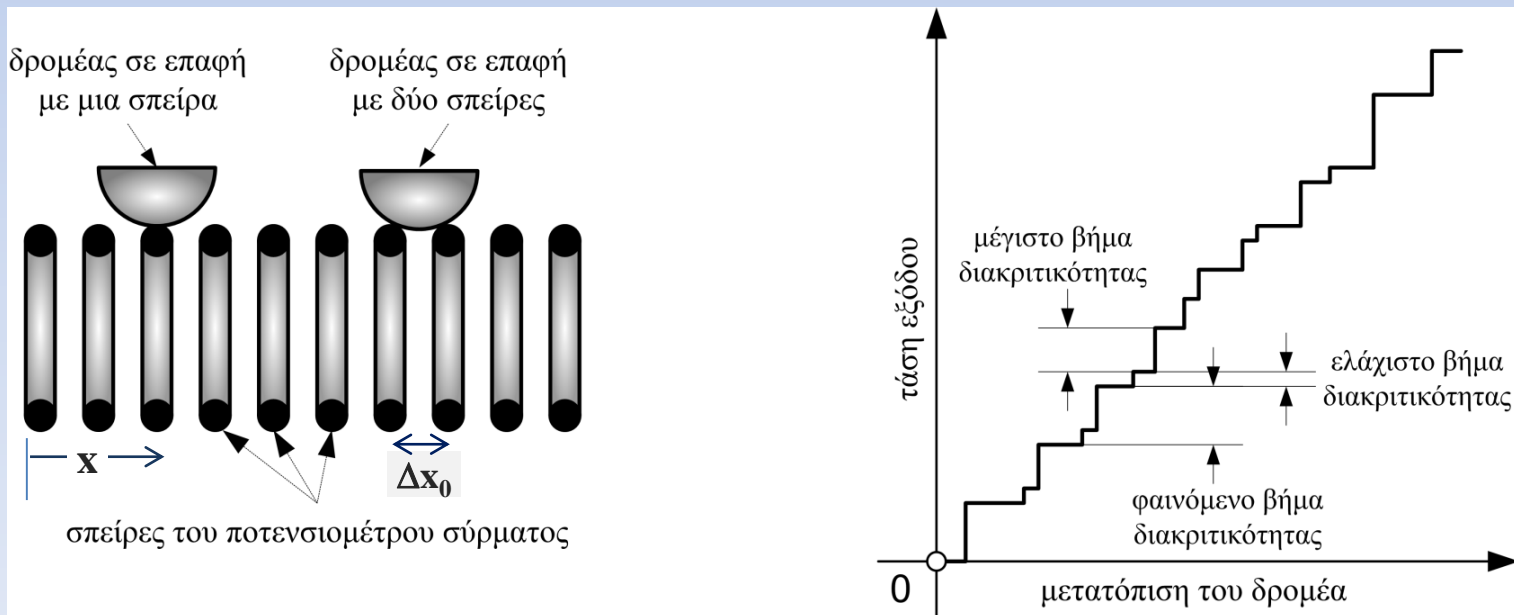
αισθητήρα είναι  $\frac{20 \text{ mV}}{10 \text{ mV/mm}} = 2 \text{ mm}$

# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων: Διακριτική ικανότητα

Η **διακριτική ικανότητα (resolution)** ενός αισθητήρα περιγράφει τη μικρότερη μεταβολή του σήματος εισόδου που μπορεί να ανιχνεύσει ο αισθητήρας.

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1<sup>ο</sup>**: Για ποτενσιομετρικούς αισθητήρες, η τάση εξόδου μεταβάλλεται μόνο όταν η μεταβολή της θέσης ( $x$ ) του δρομέα ξεπεράει μια ορισμένη τιμή που αντιστοιχεί στην απόσταση ( $\Delta x_0$ ) μεταξύ δύο διαδοχικών σπειρών.

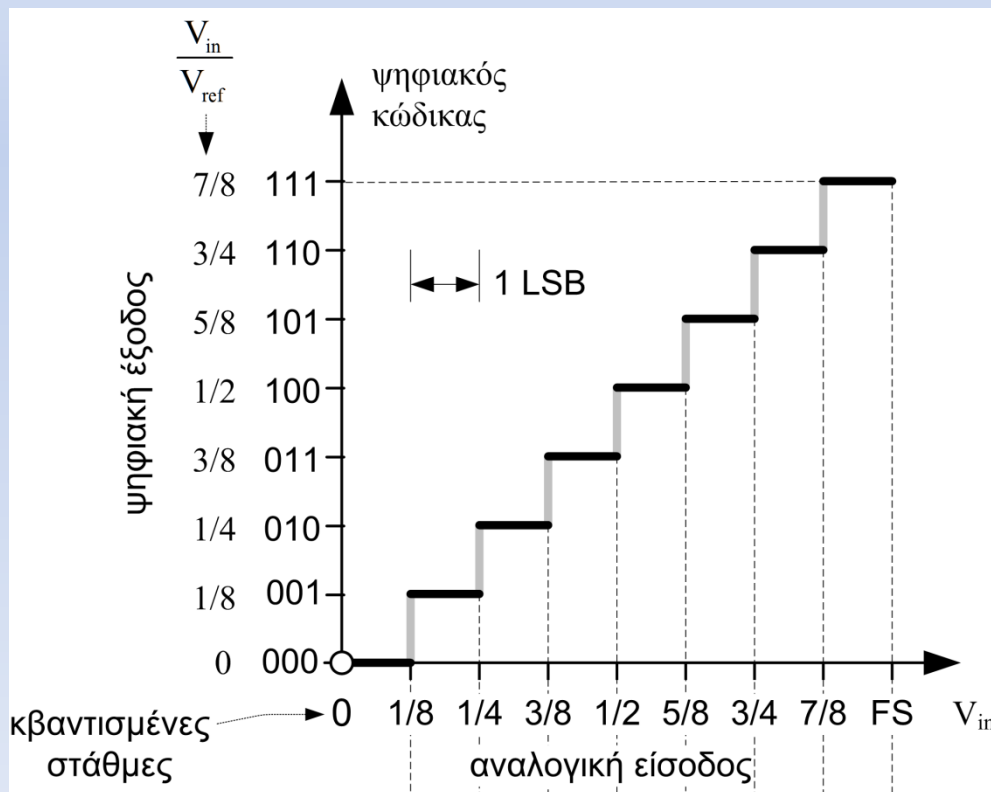
Διακριτική ικανότητα (ποτενσιομετρικού αισθητήρα) =  $\Delta x_0$ .



# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων: Διακριτική ικανότητα (συνέχεια)

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2<sup>ο</sup>** : Στους αισθητήρες ψηφιακής εξόδου, η πλήρης κλίμακα της αναλογικής εισόδου (FS) χωρίζεται σε  $2^n$  διακριτές τιμές τάσης από ένα μετατροπέα A/D (αναλογικό σε ψηφιακό), όπου  $n$  είναι ο αριθμός των bit του A/D.

Η διακριτική ικανότητα ενός αισθητήρα ψηφιακής εξόδου  $n$  -bit A/D =  $\frac{FS}{2^n}$



**Εικόνα:** Αισθητήρας ψηφιακής εξόδου με μετατροπέα A/D 3-bit.

Η τάση εξόδου πλήρους κλίμακας διαιρείται σε  $2^3 = 8$  διακριτές τιμές.

Η ελάχιστη τιμή του σήματος εισόδου που εμφανίζεται στην έξοδο είναι  $\frac{1}{8} FS$

# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων:

## Διακριτική ικανότητα (συνέχεια)

Όλοι οι αισθήρες παρουσιάζουν κάποια διακύμανση στην τάση εξόδου τους επιπλέον της διακύμανσης που οφείλεται στις χρονικές μεταβολές της τιμής του φυσικού μεγέθους που μετράνε.

Η διακύμανση αυτή οφείλεται στις θερμικές διεγέρσεις των ηλεκτρονίων στον αισθητήρα και στους αγωγούς που τον συνδέουν και ονομάζεται (θερμικός) **θόρυβος (noise)**.

Ο θόρυβος είναι ένας παράγων που περιορίζει τη διακριτική ικανότητα ενός αισθητήρα.

Ο θόρυβος στην έξοδο του αισθητήρα εκφράζεται σε Volts/ $\sqrt{\text{Hz}}$

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3<sup>ο</sup>** : Ο θόρυβος στην έξοδό του επιταχυνσιομέτρου ADXL150 είναι  $50 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

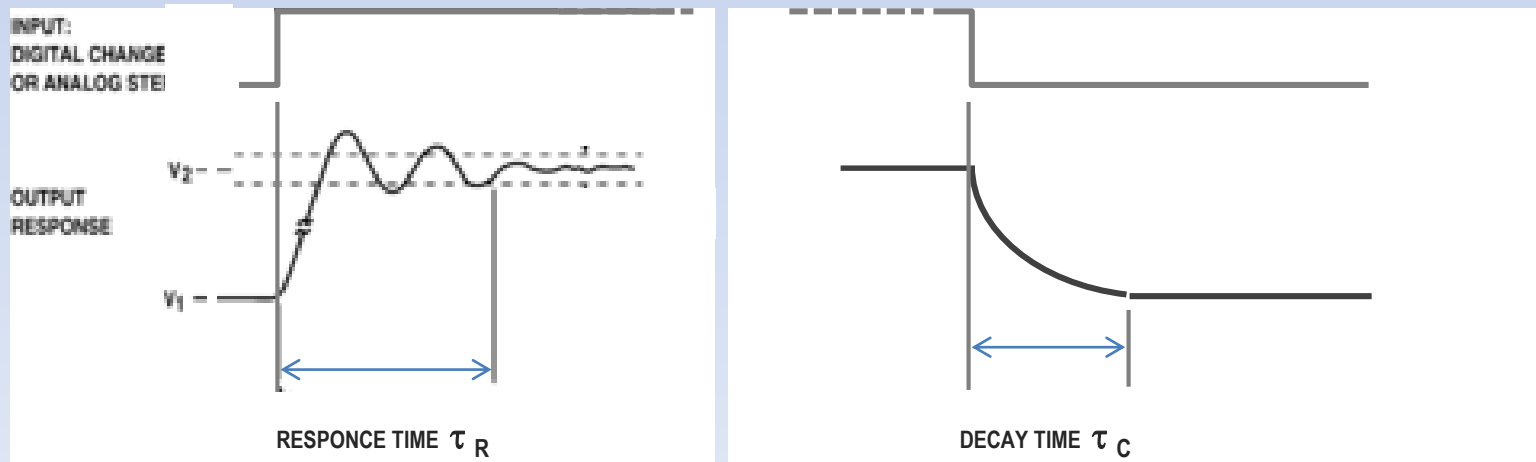
Για έναν τέτοιο αισθητήρα, που έχει ένα LP (Low-pass) φίλτρο 10Hz, ο συνολικός θόρυβος στην έξοδό του θα είναι  $\left(50 \frac{\mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right) \sqrt{10 \text{ Hz}} = 160 \mu\text{V}$

Διαιρώντας με την ευαισθησία (167 mV/g), προκύπτει η διακριτική ικανότητα του επιταχυνσιομέτρου , 1 mg.

# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων: Εύρος συχνοτήτων

Το εύρος συχνοτήτων (bandwidth, BW) ενός αισθητήρα είναι το διάστημα μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης συχνότητας σήματος που μπορεί να δεχθεί,  $BW = f_{\text{high cutoff}} - f_{\text{low cutoff}}$

- Η ελάχιστη συχνότητα αποκοπής (low cutoff frequency)  $f_{\text{low cutoff}} = 1/\tau_C$  όπου  $\tau_C$  ο χρόνος απόσβεσης (Decay time) του αισθητήρα σε μια βηματική μείωση του σήματος εισόδου.
- Η μέγιστη συχνότητα αποκοπής (high cutoff frequency)  $f_{\text{high cutoff}} = 1/\tau_R$  όπου  $\tau_R$  ο χρόνος απόκρισης (Response time) του αισθητήρα σε μια βηματική αύξηση του σήματος εισόδου.





# Χαρακτηριστικά των αισθητήρων: Επαναληψιμότητα

**Επαναληψιμότητα (repeatability)** είναι η ιδιότητα ενός αισθητήρα να δίνει την ίδια τιμή στην έξοδό του σε διαδοχικές μετρήσεις που εκτελούνται στις ίδιες συνθήκες.

- Η επαναληψιμότητα ενός αισθητήρα μετριέται με το **σφάλμα επαναληψιμότητας (repeatability error)**, τη μέγιστη διαφορά μεταξύ δύο ανεξάρτητων μετρήσεων του ίδιου μεγέθους.

$$\text{Σφάλμα επαναληψιμότητας} = \frac{\Delta}{FS} \times 100\%$$

**Σχέση μεταξύ ακρίβειας (accuracy) και επαναληψιμότητας (precision)**

