

Αισθητήρες

ΣΑΕ Ι
Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού Ασπροπύργου
Σχολή Μηχανικών
Δρ. Στυλιανός Παππάς

Μηχανική Οργάνων και Αυτοματισμού (Instrumentation Engineering and Control)

- Ανάλυση, μέτρηση και έλεγχος διαφόρων μεταβλητών βιομηχανικών διεργασιών χρησιμοποιώντας όργανα και συστήματα ελέγχου με εργαλεία λογισμικού.
- Μέτρηση και έλεγχος των μεταβλητών διεργασιών.
- Διαχείριση και ρύθμιση της συμπεριφοράς άλλων συσκευών ή συστημάτων χρησιμοποιώντας βρόχους ελέγχου για τον έλεγχο διεργασιών ή μηχανημάτων/συστημάτων.

Στόχοι

Ο στόχος είναι:

- Η αύξηση της παραγωγικότητας και της ποιότητας
- Η βελτιστοποίηση των διεργασιών και η σταθερότητά τους
- Η αξιοπιστία, η ασφάλεια και απρόσκοπτη λειτουργία των διεργασιών/συστημάτων

Αισθητήρες

- Ένας αισθητήρας φέρνει σε επαφή τον μικροελεγκτή με το φυσικό περιβάλλον.
- Οι αισθητήρες λαμβάνουν τα ερεθίσματα από το περιβάλλον.
- Αυτά τα ερεθίσματα μπορεί να είναι οπτικά, όπως ο έλεγχος της φωτεινότητας ενός χώρου με αποτέλεσμα το άναμμα/σβήσιμο μιας λάμπας, χημικά για τις ανάγκες της χημικής βιομηχανίας ή μηχανικά, όπως λ.χ. η μέτρηση της πίεσης κ.ά.

Αισθητήρες

- Για να αναγνωριστεί μια μεταβολή του εξωτερικού περιβάλλοντος, πρέπει να γίνει η μέτρηση κάποιου φυσικού μεγέθους.
- Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να παρακολουθήσουμε τη διαδικασία θέρμανσης ενός προϊόντος μετρώντας τη θερμοκρασία του.
- Οι μετρήσεις των φυσικών μεγεθών γίνονται μέσω αισθητήρων (sensors).
- Οι αισθητήρες είναι εξαρτήματα/διατάξεις που διαθέτουν κάποια κατάλληλη ιδιότητα, η οποία μεταβάλλεται ως συνάρτηση του μετρούμενου φυσικού μεγέθους.
- Η μέτρηση αυτής της μεταβαλλόμενης ιδιότητας του αισθητήρα επιτρέπει τον άμεσο ποσοτικό υπολογισμό της τιμής του φυσικού μεγέθους.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Γραμμικότητα

- Ο αισθητήρας πρέπει διαθέτει μία ιδιότητα ή ένα χαρακτηριστικό, του οποίου η τιμή μεταβάλλεται, όταν μεταβάλλεται και η φυσική ποσότητα που μετρά.
- Οι μεταβολές της προς μέτρηση φυσικής ποσότητας πρέπει να προκαλούν αυστηρά ανάλογες μεταβολές της ιδιότητας του αισθητήρα.
- Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται “γραμμικότητα” (linearity) και είναι μεγάλης σημασίας.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ (*sensitivity*)

- Η ευαισθησία ενός αισθητήρα δείχνει πόσο μεγάλη είναι η έξοδος (π.χ. τάση, ρεύμα, σήμα) για κάθε μονάδα αλλαγής του φυσικού μεγέθους που ανιχνεύει (π.χ. θερμοκρασία, πίεση, ταχύτητα).
- Αν ένας αισθητήρας θερμοκρασίας έχει ευαισθησία **10 mV/°C**, αυτό σημαίνει ότι για κάθε 1 βαθμό Κελσίου αλλαγής στη θερμοκρασία, ο αισθητήρας θα δώσει 10 mV αλλαγή στο σήμα εξόδου.
- Μεγαλύτερη ευαισθησία σημαίνει μεγαλύτερη αντίδραση του αισθητήρα σε μικρές μεταβολές.
- Χρήσιμη για μετρήσεις όπου απαιτείται ακρίβεια σε μικρές αλλαγές.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Διακριτική ικανότητα/Ανάλυση (*resolution*)

- Αναφέρεται στην **ελάχιστη δυνατή μεταβολή** του φυσικού μεγέθους (π.χ. πίεσης, θερμοκρασίας, κ.λπ.) που μπορεί να **αντιληφθεί και να αποτυπώσει** ο αισθητήρας ως διακριτή αλλαγή στο σήμα εξόδου του.
- Αν ένας αισθητήρας πίεσης έχει διακριτική ικανότητα **0.01 bar**, σημαίνει ότι μπορεί να ανιχνεύσει αλλαγές στην πίεση μόνο **από 0.01 bar και πάνω**. Μικρότερες μεταβολές θα θεωρηθούν αμελητέες και δεν θα αλλάξουν την έξοδο.

Διαφορά με την Ευαισθησία:

- **Ευαισθησία:** Πόσο ισχυρό σήμα δίνει ο αισθητήρας για κάθε μονάδα του φυσικού μεγέθους.
- **Διακριτική ικανότητα:** Η μικρότερη τιμή μεταβολής (το ελάχιστο βήμα) που μπορεί να εντοπίσει ο αισθητήρας.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

ΑΚΡΙΒΕΙΑ

- Η ακρίβεια εκφράζει την απόκλιση της τιμής εξόδου του αισθητήρα από την πραγματική τιμή (αληθινή) τιμή του φυσικού μεγέθους που μετρά.
- Αντιστοιχεί στο συνολικό σφάλμα της μέτρησης και περιλαμβάνει όλες τις πηγές αβεβαιότητας.
- Σχετίζεται με την αξιοπιστία της μέτρησης σε απόλυτους όρους. Όσο μικρότερο το σφάλμα, τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Επανεληψιμότητα/(Repeatability)

- Περιγράφει την ικανότητα ενός αισθητήρα να δίνει την ίδια τιμή εξόδου όταν μετρά το ίδιο φυσικό μέγεθος υπό τις ίδιες ακριβώς συνθήκες και σε διαδοχικές μετρήσεις.
- Δηλώνει τη συνοχή των μετρήσεων που παράγει ο αισθητήρας υπό επαναλαμβανόμενες ίδιες συνθήκες. Όσο μικρότερη η διακύμανση μεταξύ επαναλαμβανόμενων μετρήσεων, τόσο καλύτερη η επανεληψιμότητα.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Εύρος Τιμών Εισόδου/(Full-Scale Input)

- Το εύρος τιμών εισόδου είναι το διάστημα τιμών του φυσικού μεγέθους (π.χ. θερμοκρασίας, πίεσης, τάσης, κ.λπ.) μέσα στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει με αξιοπιστία ένας αισθητήρας και να δώσει έγκυρα αποτελέσματα.
- Ορίζει την αξιόπιστη περιοχή λειτουργίας του αισθητήρα. Τιμές εκτός του εύρους αυτού ενδέχεται να προκαλέσουν μη έγκυρες μετρήσεις ή φθορά του αισθητήρα.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

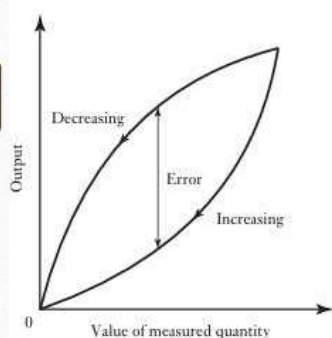
Εύρος Τιμών Εξόδου/(Full-Scale Output)

- Είναι το διάστημα των ηλεκτρικών σημάτων εξόδου (συνήθως τάσης ή ρεύματος) που μπορεί να παρέχει ένας αισθητήρας, που αντιστοιχεί στο πλήρες εύρος εισόδου του φυσικού μεγέθους που μετρά.
- Εκφράζει τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές εξόδου του αισθητήρα, όπως π.χ. 0–5 V, 4–20 mA
- Για αισθητήρα θερμοκρασίας με FSI: 0–100°C και FSO: 0–10 V, η έξοδος 0 V αντιστοιχεί στους 0°C και η έξοδος 10 V στους 100°C.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

- Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι ένας από τους βασικότερους εξωτερικούς παράγοντες που μπορούν να αλλάξουν ή να υποβαθμίσουν τις προδιαγραφές ενός αισθητήρα (όπως ακρίβεια, ευαισθησία, επαναληψιμότητα).

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων



Σφάλμα υστέρησης / (hysteresis error):

- Ένας αισθητήρας μπορεί να δίνει διαφορετική τιμή εξόδου για την ίδια τιμή του μετρούμενου φυσικού μεγέθους, ανάλογα με το αν η τιμή αυτή επιτεύχθηκε αυξάνοντας ή μειώνοντας τη μεταβλητή. Αυτή η απόκλιση ονομάζεται υστέρηση.
- Αν αυξήσεις σταδιακά την πίεση από $0 \rightarrow 100$ bar, η έξοδος γίνει 8.0 V στους 60 bar. Αν μειώσεις πίεση από $100 \rightarrow 0$ bar, μπορεί να δείξει 7.7 V στους 60 bar. Η διαφορά (0.3 V) είναι το σφάλμα υστέρησης.
- Η υστέρηση μπορεί να οφείλεται σε: Μηχανική τριβή, Θερμική καθυστέρηση, Ελαστικότητα υλικών, Μαγνητικά φαινόμενα.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Dead Band (Νεκρή Ζώνη / Νεκρό Εύρος)

- Η νεκρή ζώνη είναι ένα εύρος τιμών εισόδου στο οποίο ο αισθητήρας ή ο μετατροπέας δεν παράγει καμία απόκριση στην έξοδο .
- Σε έναν μετρητή ροής με περιστρεφόμενο μέρος, λόγω τριβών στα ρουλεμάν, μπορεί να μην αρχίσει να περιστρέφεται (άρα και να δώσει έξοδο) μέχρι η ροή να φτάσει σε μία ελάχιστη ταχύτητα, π.χ. 0.3 m/s.
- Σε έναν αισθητήρα θερμοκρασίας, μπορεί να περάσουν 3 δευτερόλεπτα από τη στιγμή που αλλάζει η θερμοκρασία μέχρι ο αισθητήρας να αρχίσει να ανταποκρίνεται στο σήμα εξόδου του.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Output impedance (Εμπέδηση Εξόδου)

- Όταν ένας αισθητήρας δίνει ηλεκτρικό σήμα (π.χ. τάση ή ρεύμα) και συνδέεται με κύκλωμα, πρέπει να γνωρίζουμε την «εμπέδηση εξόδου».
- Η εμπέδηση, (impedance), επηρεάζει το πώς μεταφέρεται το σήμα

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Output impedance (Εμπέδηση Εξόδου) – Παράδειγμα μετατροπέα πίεσης «2 θέσεων»

Εύρος μέτρησης (Ranges):

- Ο αισθητήρας μπορεί να μετρά πιέσεις από:
 - 70 έως 1000 kPa, ή
 - 2000 έως 70 000 kPa

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Output impedance (Εμπέδηση Εξόδου) – Παράδειγμα μετατροπέα πίεσης «2 θέσεων»

Τροφοδοσία (Supply voltage):

- Λειτουργεί με 10 V DC ή AC (r.m.s.).

Έξοδος πλήρους εύρους (Full range output):

- Δίνει 40 mV για όλο το εύρος εισόδου.

Σφάλμα μη γραμμικότητας + υστέρησης (Non-linearity and hysteresis):

- Μέγιστο σφάλμα: $\pm 0.5\%$ του **πλήρους εύρους** εξόδου:
 - Για το εύρος 1000 kPa $\rightarrow \pm 0.5\% = \pm 5$ kPa
 - Για το εύρος 70 000 kPa $\rightarrow \pm 0.5\% = \pm 350$ kPa

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Output impedance (Εμπέδηση Εξόδου) – Παράδειγμα μετατροπέα πίεσης «2 θέσεων»

Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας (Temperature range):

- Από -54°C έως $+120^{\circ}\text{C}$.

Θερμική μετατόπιση μηδενός (Thermal zero shift):

- Για κάθε 1°C αλλαγής, η έξοδος μεταβάλλεται κατά **0.030%** του πλήρους εύρους:
 - Για το εύρος 1000 kPa $\rightarrow 0.030\% = 0.3 \text{ kPa}/^{\circ}\text{C}$
 - Για 70 000 kPa $\rightarrow 0.030\% = 21 \text{ kPa}/^{\circ}\text{C}$
- Άρα: αν αλλάξει η θερμοκρασία κατά 1°C , η έξοδος μπορεί να αλλάξει έως και **0.3 kPa ή 21 kPa**, ακόμα κι αν δεν αλλάξει καθόλου η πίεση.
- Ο αισθητήρας επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και μπορεί να δώσει ψευδή ένδειξη πίεσης ακόμα κι αν η πραγματική πίεση είναι μηδέν.

Στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Στατικά

- Είναι τα χαρακτηριστικά που ισχύουν όταν το σύστημα βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση (steady state). Άρα, όταν ο αισθητήρας έχει «ηρεμήσει» μετά από κάποια αλλαγή και η έξοδός του δεν αλλάζει πλέον με τον χρόνο (όλα όσα είδαμε ως τώρα).

Δυναμικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

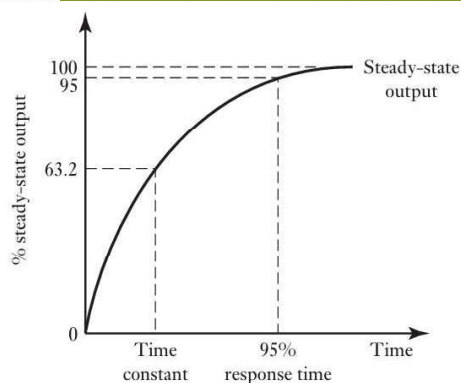
Δυναμικά

- Περιγράφουν τη συμπεριφορά του αισθητήρα κατά τη μετάβαση, από τη στιγμή που αλλάζει το ερέθισμα (είσοδος) μέχρι να σταθεροποιηθεί η έξοδος.

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά απαντούν σε ερωτήσεις όπως:

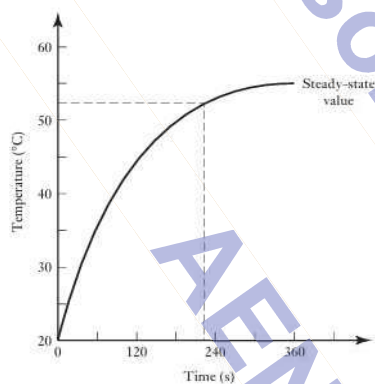
- Πόσο **γρήγορα** αντιδρά ο αισθητήρας;
- Υπάρχει **καθυστέρηση**;
- Υπάρχουν **ταλαντώσεις** ή **υπερβολική απόκριση**;

Δυναμικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων



Όρος	Ορισμός
Response Time	Χρόνος που χρειάζεται ο αισθητήρας για να φτάσει π.χ. στο 95% της τελικής τιμής μετά από βηματική είσοδο.
Time Constant	Χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το 63.2% της τελικής τιμής. Αντιπροσωπεύει την «αδράνεια» του αισθητήρα. Όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά χρόνου τόσο πιο αργά ανταποκρίνεται σε αλλαγές της εισόδου του.
Rise Time	Χρόνος για να ανέβει η έξοδος από το 10% στο 95% της τελικής τιμής.
Settling Time	Χρόνος μέχρι η έξοδος να σταθεροποιηθεί εντός κάποιου μικρού ποσοστού π.χ. $\pm 2\%$ της τελικής τιμής.

Δυναμικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων



Χαρακτηριστικό	Ορισμός	Τιμή (από γράφημα)	Τελική τιμή αναφοράς
Time Constant (τ)	63.2%	≈ 100 s	34.76 °C (63.2% of 55 °C)
Rise Time	Από 10% σε 90%	≈ 160 s	25.5 °C $\rightarrow$ 49.5 °C
Response Time	95%	228 s	52.25 °C
Settling Time	$\pm 2\%$	≈ 300 s	53.9 °C $\rightarrow$ 56.1 °C
Steady-State Value	—	—	55 °C

Αισθητήρες Μετατόπισης (ευθύγραμμης/περιστροφικής, θέσης, εγγύτητας)

Όρος	Τι μετράει
Displacement sensor	Μετράει πόσο έχει μετακινηθεί ένα αντικείμενο (απόσταση – mm, cm, κ.λπ.)
Position sensor	Προσδιορίζει τη θέση ενός αντικείμενου σε σχέση με ένα σταθερό σημείο
Proximity sensor	Ανιχνεύει αν ένα αντικείμενο πλησιάζει – δίνει σήμα ON/OFF όταν φτάσει σε συγκεκριμένη απόσταση

Displacement/Position Sensors

Τύπος	Περιγραφή
Contact sensors	Το αντικείμενο αγγίζει μηχανικά τον αισθητήρα
Non-contact sensors	Δεν υπάρχει φυσική επαφή, βασίζονται σε αλλαγές π.χ. πίεσης, χωρητικότητας ή επαγωγής

Αισθητήρες Μετατόπισης (ευθύγραμμης/περιστροφικής, θέσης, εγγύτητας)

Contact Linear Displacement Sensors:

Έχουν έναν άξονα που ακουμπά το αντικείμενο

- Η μετακίνησή του μετρείται μέσω:
 - Αλλαγής τάσης
 - Αντίστασης
 - Χωρητικότητας
 - Αμοιβαίας επαγωγής

Αισθητήρες Μετατόπισης (ευθύγραμμης/περιστροφικής, θέσης, εγγύτητας)

Contact Angular Displacement Sensors:

- Μηχανική σύνδεση με γρανάζια → μετράει περιστροφική μετατόπιση μέσω του αισθητήρα.

Non-contact Sensors:

- Ανιχνεύουν χωρίς επαφή
- Μπορούν να λειτουργούν μέσω:
 - Μεταβολής πίεσης αέρα
 - Μεταβολής επαγωγής ή χωρητικότητας

Αισθητήρες Ταχύτητας (Doppler)

- Για τη μέτρηση της ταχύτητας ενός αντικειμένου χρησιμοποιούνται ραδιοκύματα.
- Εκπέμπεται ένα σήμα προς το κινούμενο αντικείμενο, το οποίο ανακλάται από το αντικείμενο και ένα τμήμα του επιστρέφει προς τη συσκευή εκπομπής.
- Το τμήμα του κύματος που επιστρέφει, έχει μήκος ελάχιστα διαφορετικό από αυτό που εκπέμπεται, και η διαφορά αυτή σχετίζεται με την ταχύτητα του αντικειμένου.

Delta DRS1000 Non-Contact Speed Sensor
Suitable for a wide variety of speed measurement applications

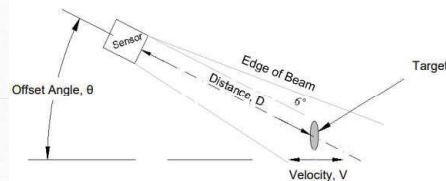


Figure 1: Example schematic showing the Delta DRS1000 Speed Sensor in use.

$$F_d = 2V \left(\frac{F_0}{c} \right) \cos(\theta)$$

The following apply in Equation 1:

F_d = Doppler shift (Hz) c = Speed of light
 V = Velocity F_0 = Original wave frequency (Hz)
 θ = Offset angle of sensor relative to direction of object motion

Αισθητήρες Ταχύτητας (Doppler)

Όσο μεγαλύτερη η επιφάνεια του στόχου, τόσο μεγαλύτερη η απόσταση από την οποία μπορεί ο αισθητήρας να τον εντοπίσει.

Για παράδειγμα:

- Ένα **αυτοκίνητο** (μεγάλη επιφάνεια) μπορεί να εντοπιστεί σε απόσταση περίπου **300 μέτρων**.
- Ένας **άνθρωπος** εντοπίζεται σε μικρότερη απόσταση 100 m).
- Μικρός **μεταλλικός στόχος** (αλουμινένια σφαίρα) εντοπίζεται σε ακόμη μικρότερη απόσταση (~10), λόγω μικρής επιφάνειας και ανακλαστικότητας.
- Η εμβέλεια του αισθητήρα εξαρτάται από:
- Το μέγεθος του στόχου, το υλικό και τη μορφή του στόχου

Delta DRS1000 Non-Contact Speed Sensor
Suitable for a wide variety of speed measurement applications





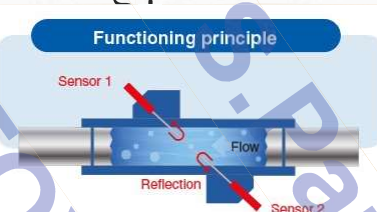
Doppler Flow Meter

Κατηγορία	Στοιχείο
Πλεονεκτήματα	
Μη-επαφής	Οι αισθητήρες δεν έρχονται σε επαφή με το ρευστό (ιδανικό για διαβρωτικά υγρά)
Κατάλληλο για ακάθαρτα ρευστά	Λειτουργεί καλά με ρευστά που περιέχουν σωματίδια ή φυσαλίδες
Εύκολη εγκατάσταση	Οι αισθητήρες τοποθετούνται εκτός σωλήνα – γρήγορη εγκατάσταση και συντήρηση
Συνεχής μέτρηση	Παρέχει πραγματικού χρόνου μέτρηση ροής
Χαμηλή πτώση πίεσης	Καθώς δεν παρεμβαίνει στο ρεύμα, δεν προκαλεί απώλεια πίεσης

Μειονεκτήματα	
Απαιτεί σωματίδια	Δεν λειτουργεί σε καθαρά ρευστά – χρειάζεται σωματίδια ή φυσαλίδες
Εξάρτηση από γωνία	Η γωνία εκπομπής πρέπει να είναι σωστή για μέγιστη ακρίβεια
Ευαισθησία σε παράσιτα	Θόρυβος, ανακλάσεις από τοίχωμα σωλήνα ή δονήσεις μπορούν να επηρεάσουν την έξοδο
Περιορισμένη ακρίβεια	Όχι τόσο ακριβές όσο οι τεχνικές μέτρησης χρόνου διέλευσης (transit-time)

Doppler Flow Meter - Λειτουργία

1. Ο αισθητήρας 1 (Sensor 1) εκπέμπει υπερηχητικά κύματα διαγώνια μέσα από το ρευστό.
2. Τα κύματα ανακλώνται πάνω σε μικροσωματίδια ή φυσαλίδες που κινούνται με το ρεύμα.
3. Η αντανάκλαση επιστρέφει στον αισθητήρα 2 (Sensor 2).
4. Καθώς το ρευστό κινείται, η συχνότητα του ανακλώμενου κύματος αλλάζει λόγω του φαινομένου Doppler.
5. Η διαφορά συχνότητας (Doppler shift) χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η ταχύτητα ροής V .



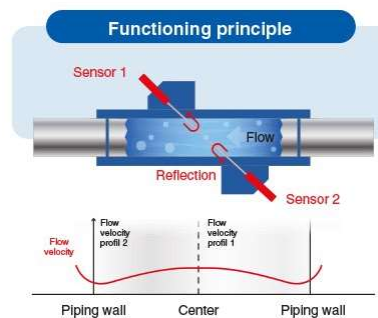
Functioning principle

$$F_d = 2V \left(\frac{F_0}{c} \right) \cos(\theta)$$

Doppler Flow Meter

Προφίλ ταχύτητας ροής:

- Δείχνει ότι η ταχύτητα δεν είναι ίδια παντού μέσα στον σωλήνα.
- Στο κέντρο του σωλήνα η ροή είναι γρηγορότερη, ενώ κοντά στα τοιχώματα είναι πιο αργή (λόγω τριβής – φαινόμενο γνωστό ως parabolic profile).
- Οι αισθητήρες «βλέπουν» ένα μέσο προφίλ ροής, από το οποίο προκύπτει η μέση ταχύτητα.



$$F_d = 2V \left(\frac{F_0}{c} \right) \cos(\theta)$$

$$\frac{F_d}{F_0} = \frac{2V}{c} \cos(\theta)$$

$$\text{Αν } \theta = 0 \rightarrow \cos(\theta) = 1$$

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{2v}{c}$$

Αισθητήρες Επιτάχυνσης

- Μετρούν την επιτάχυνση καθώς και τους κραδασμούς.
- Ο μετρητής επιτάχυνσης βρίσκεται ενσωματωμένος άμεσα στο αντικείμενο το οποίο δονείται, και μετατρέπει την ενέργεια των κραδασμών σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο είναι ανάλογο της στιγμιαίας επιτάχυνσης του αντικειμένου.
- Μπορούν να πραγματοποιήσουν μέτρηση σε μια, δύο ή τρεις διαστάσεις.
 - Επιτάχυνση κατά τον άξονα X (δεξιά-αριστερά)
 - Κατά τον άξονα Y (πάνω-κάτω, π.χ. λόγω βαρύτητας)
 - Κατά τον άξονα Z (μπροστά-πίσω)
- Έχουν εφαρμογές, όπως: Απόσβεση κραδασμών σε μηχανές, Μέτρηση δονήσεων, Προληπτική συντήρηση, Έλεγχος ανεμογεννητριών

