

**MEMS Inteligentné sensory a aktuátory**

doc. Ing. Richard Balogh, PhD.

**Akustické systémy**



© MAYO FOUNDATION FOR MEDICAL EDUCATION AND RESEARCH. ALL RIGHTS RESERVED

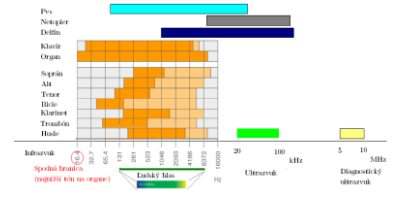
1

**Akustické systémy**

Zameranie na **ultrazvuk (UZ)**:  
vyššia f (40kHz - 10MHz)

- Prečo?
- UZ frekvencie sa ľahšie smerujú a detekujú
  - menšia  $\lambda \rightarrow$  vyššia presnosť (100 kHz  $\rightarrow \lambda = 3,43$  mm)
  - vysielacie a prijímače - prijateľnejšie rozmery
  - systémy nerušia ľudský sluch

- Metódy:
- známa rýchlosť šírenia zvuku c
  - geometria šírenia.



2

**Akustické systémy – využitie**

Využitie:

- zistenie prekážok, meranie vzdialeností
- defektoskopia
- meranie prítoku
- medicína - kontrola vnútorných orgánov
- systémy s povrchovými vlnami (PAV, angl SAW)
- spolupráca s inými obormi - akustooptika, chémia, atď...



3

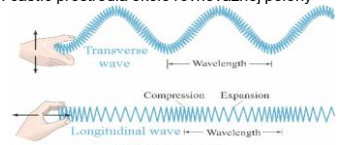
**Základné pojmy**

**Zvuk (sound, Schall, Звук)**

Šírenie mechanických kmitov hmotných častíc prostredia okolo rovnovážnej polohy

Typy vln:

- priestorové (objemové)
  - priečne
  - pozdĺžne
- Povrchové Akustické Vlny (PAV)
  - priečne
  - pozdĺžne



Plyny a kvapaliny – len pozdĺžne vlny

**Ultrazvukové (UZ) vlny**

- plyny od 20 ÷ 40 kHz do 300 ÷ 400 kHz
- kvapaliny a tuhé telesá rádovo MHz
- PAV 10-ky MHz.

4

**Akustické veličiny**

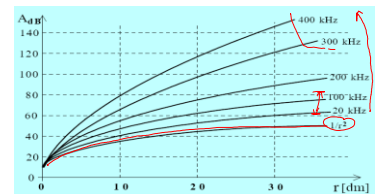
veľičina	jednotka	popis	vzťahy
<b>akustický tlak</b> p sound pressure	[Pa]	rozdiel medzi okamžitým tlakom prostredia a jeho tlakom pri šírení zvuku	
<b>akustická rýchlosť v</b> sound particle velocity	[m/s]	rýchlosť pohybu častíc – porovná s c	$v = \xi / t$
<b>rýchlosť šírenia</b> c sound velocity	[m/s]	rýchlosť šírenia zvukovej vlny v prostredí	závisí od teploty a vlhkosti
<b>akustická impedancia</b> Z acoustic impedance	[Pa.s.m <sup>-1</sup> ]	komplexná veličina vyjadrená posielom tlaku na danej ploche a rýchlosti	$Z = \frac{p}{v} = \rho \cdot c$
<b>intenzita zvuku</b> I sound intensity	[W/m <sup>2</sup> ] [dB]	charakterizuje prenos akustického výkonu P	$I = p \cdot v = P/A$
<b>akustický výkon</b> P <sub>s</sub> sound power	[W]	výkon vyžarovaný alebo prenášaný prostredie-tnom akustického vlnenia	$P = E / t$
<b>vlnová dĺžka</b> $\lambda$ wavelength	[m]	pre rýchlosť c v danom prostredí	$\lambda = c / f$

5

**Šírenie UZ v plynoch (vzduchu)**

**Útlm UZ vln**

intenzita klesá  $\approx 1/r^2$   
– reálne viac.



koeficient útlmu

- $\alpha$  [1/m] alebo
- $\alpha_{dB}$  [dB/m]  $\rightarrow (A_{dB} = \alpha_{dB} \cdot r)$

kont. budenie – harmonický signál – pokles amplitúdy  
imp. budenie – obdĺžnik (impulzy) – klesá strmosť hrán

6

## Šírenie UZ v plynoch (vzduchu)

### Rýchlosť šírenia c

upravená rovnica (vzduch, platí pre  $f < 100$  MHz)

$$c = 331,46 (1 + 1,83 \cdot 10^{-3} \vartheta) (1 + 2,2 \cdot 10^{-4} \delta),$$

$\vartheta$  - teplota (plynu) [°C] a  
 $\delta$  - relatívna vlhkosť (plynu) [%].

Příklad:

Pri meraní  $L = 1$  m a  $\Delta \vartheta 2$  °C je chyba 3,62 mm.  
 Pri  $\Delta \vartheta 20$  °C je chyba 35,33 mm (pre  $L = 1$  m)

Poznámka:

c vo vzduchu je cca 1234 km/hod = 1 MACH (letecký termín)

7

## Akustické meniče



- geometria
- elektrické parametre
- akustické parametre (ich vzťah k elektrickým)
- recipročná činnosť - jeden menič vysiela i prijíma

### Reálne systémy:

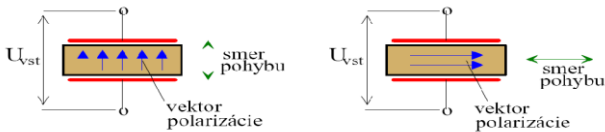
- **piezoelektrické** (ako permanentný magnet v el.)
- **kondenzátorové** (elektrostatické)
- **elektrický výboj** - najmä iskra ako vysielač

### Akustické parametre:

- akustický výkon (tlak) v mieste merania min.  $10^{-2}$  Pa
- citlivosť prijímača min. 0,1 mV/Pa (bežne  $1 \div 20$  mV/Pa)
- akustické prispôsobenie - malý rozdiel akust. impedancií (vln. odporov)

8

## Piezoelektrické meniče piezoelectric transducer



piezoelektrický jav  
 piezokeramika, (prírodné materiály)

Výroba:

suroviny, mletie, zmiešanie, lisovanie,  
 vypálenie, polarizácia

9

## Piezoelektrický jav

Materiály

$(\text{Pb}[\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x]\text{O}_3$  with  $0 \leq x \leq 1$ ) – keramika, skratka PZT

Kryštalické látky

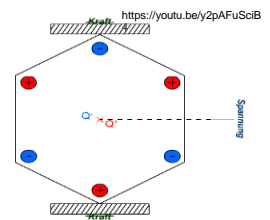
- Kremeň
- Langazit ( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ) – a quartz-analogous crystal
- Gallium orthophosphate ( $\text{GaPO}_4$ ) – a quartz-analogous
- Lithium niobate ( $\text{LiNbO}_3$ )
- Lithium tantalate ( $\text{LiTaO}_3$ )
- Lead titanate ( $\text{PbTiO}_3$ )

Keramika

- PZT
- $\text{Ba}_0,7\text{Na}_0,3\text{Nb}_2\text{O}_9$

Bezolovnaté

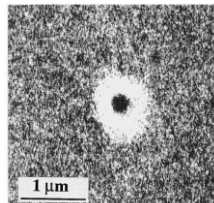
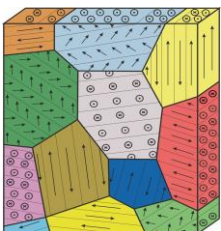
- Bismuth ferrite ( $\text{BiFeO}_3$ )
- Barium titanate ( $\text{BaTiO}_3$ )



March 1880: Jacques and Pierre Curie Brothers Discover Piezoelectricity

10

## Piezoelektrické meniče piezoelectric transducer

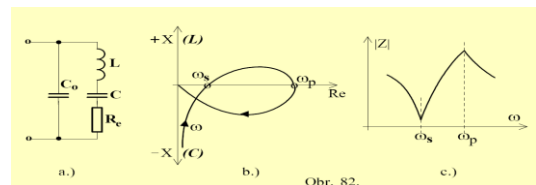


Piezoresponse image of a PZT-0.8 film excited by voltage pulses of opposite polarities. A positive 25 V voltage, applied to the central part of the film for 20 s, resulted in a bright spot of 900 nm in diameter, corresponding to a polarized area. An opposite domain, which appeared as a dark spot of 300 nm in diameter, was subsequently written in by a negative 8 V pulse applied for 3 s

Gruverman, Alexei & Auciello, O. & Tokumoto, H., (1996). Scanning force microscopy for the study of domain structure in ferroelectric thin films. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 14, 602 - 605. 10.1116/1.589143.  
 Kozlov, Sergey & Kura, Meinhard, (2016). Simulation of fatigue damage in ferroelectric polycrystals under mechanical/electrical loading. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 116, 150-170. 10.1016/j.jmps.2018.03.013.

11

## Piezoelektrické meniče ekvivalentná schéma

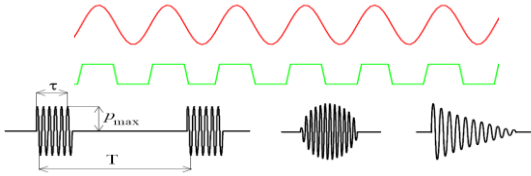


rezonančný obvod – náhradné parametre:

- $C_0$  – statická kapacita (~nF)
- $L^0$  – úmerná hmotnosti
- $\omega_S$  – sériová rezonancia
- $C$  – úmerná mech. poddajnosti
- $R_e$  – mechanické straty
- $\omega_P$  – paralelná rezonancia

12

### Piezelektrické meniče budenie vysieláča



- kontinuálny signál
  - harmonický, alebo obdĺžnik  $30 \div 200$  V
- rádiový impulz
- impulzné budenie - jeden impulz

13

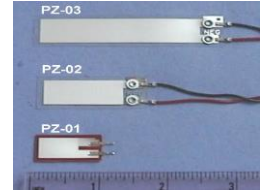
### Piezelektrické meniče Tvary piezomeničov



Materiály:  
**Piezokeramika**  
Vyžarovanie do vzduchu

fólia z **PVdF** (polyvinylidenfluorid)  
polarizovaný polymér,  
použitie ako piezokeramika

Vlnový odpor  $\rho_c$  (resp.  $Z$ ) [ $\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ]:  
vzduch @  $20^\circ\text{C}$   $4,13 \cdot 10^5$   
voda @  $20^\circ\text{C}$   $1,48 \cdot 10^6$   
PVdF fólia  $3,30 \cdot 10^6$   
piezokeramika  $3,00 \cdot 10^7$



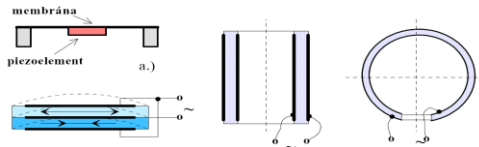
14

### Piezelektrické meniče Tvary piezomeničov

- platnička, disk  $\rightarrow x$   
membrána  
Sawyerovo dvojča (opačné vektory polarizácie)
- dutý valec  $\rightarrow xy$ , valcová vlna
- dutá guľa  $\rightarrow$  guľová vlnoplocha, priestorové merania

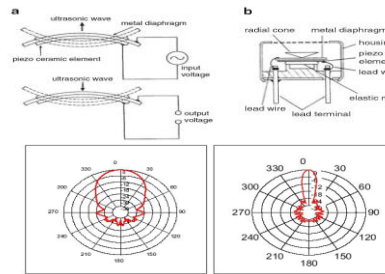


recipročný režim možný a využívaný (sonda)



15

### Piezelektrické meniče Tvary piezomeničov



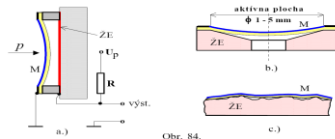
16

### Kondenzátorové meniče

vysielače: elektrostatické sily  
prijímače (mikrofóny): dopad zvuku  $\rightarrow$  zmena C

- ŽE - živá elektróda
- M - membrána
- Up - pol. napätie (50 - 300 V)

pre UZ frekvencie:  
- malé rozmery  
- tenké membrány  
(pokovený plast  $1 - 20 \mu\text{m}$ )



- polarizovaný plast typu **elektret** - netreba polarizačné napätie
- *self system* - pre plochu viacnásobný (84b)
- zdrsnená elektróda (84c)

17

### Kondenzátorové meniče



Využitie Si (aj ako membrána)

**Príklad:**

Vytvorená Si membrána  $0,8 \times 0,8 \text{ mm}$ ,  $h = 150 \text{ nm}$ , Al pokovenie  $100 \text{ nm}$ . V ďalšej časti Si substrátu je elektronika.

Budenie meničov:  $\sim 10 \div 100 \text{ V}$ .

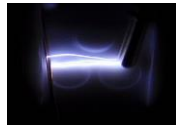
Meniče sú širokopásmové,  $f_{\text{medz}} 50 \div 300 \text{ kHz}$

recipročný režim možný a využívaný

18

## Elektrický výboj

ako vysielateľ UZ vln



### Elektrická iskra

- výboj medzi elektródami  
prierazné napätie

- + veľká intenzita zvuku  
strmá nábežná hrana  
široké frekv. spektrum, od počtateľných do cca 500 kHz  
kvázibodový zdroj zvuku
- iskra - zdroj porúch, nutné sú odrušenia (tienia) - dráha iskry je náhodná - menšia presnosť výbošné prostredia !!!

19

## Elektrický výboj

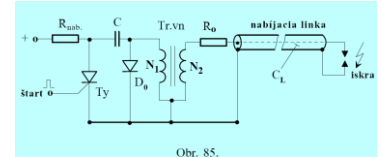
Iskra



### Realizácia:

statický zdroj - potrebné  $V_n$  ( $8 \div 10$  kV), menej vhodný  
impulzný zdroj -  $V_n$  impulzný transformátor obr. 85.

- \* C sa nabíja z + cez  $R_{nab.}$  (50 - 300 V)
- \* Start otvorí Ty a C je vybíjaný do primáru Tr.vn
- \*  $N_2 \gg N_1$   
→  $U_{vst.}$  je vysoké (impulz)
- \* nabíja sa "nabíjacia linka" (kondenzátor) s kapacitou  $C_L$
- \* U medzi elektródami rastie  
→ ionizačný proces
- \* U prekročí elektrickú pevnosť vzduchu  
→ kanálový výboj
- \* energia z nabíjacej linky  
 $W_L = 1/2 C_L \cdot U^2$  preaz.



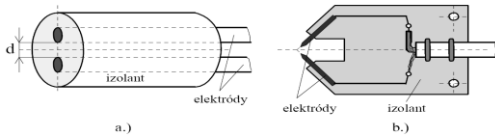
20

## Elektrický výboj

Iskra

Optimálna medzera medzi elektródami je  $0,3 \div 0,6$  mm  
(intenzita a presnosť polohy iskry)

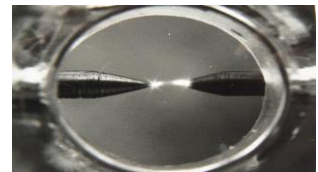
Vlastné meniče – žiariče  
a.) s výbojom po povrchu  
b.) medzi hrotmi



21

## Tlejivý výboj

ako prijímač UZ vln



stabilný výboj,  
definovaný pre  $I = 10^{-5} \div 1$  A  
(nízke tlaky-trubice)

parametre výboja závisia od p  
(aj akustický p)

elektrické parametre vieme vyhodnotiť

### Vlastnosti:

- malé rozmery - bodový prijímač
- bez hmotných pohyblivých častí - vysoká medzná f
- recipročný režim práce
- komplikované napájanie - konst. =  $U_N$  cca 4 kV
- výbošné prostredie
- nestabilita výboja : (citlivosť, vlastné kmitanie)

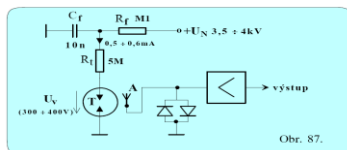
22

## Tlejivý výboj

ako prijímač

výboj je medzi dvoma zahrotenými elektródami

- prúd pri atm. tlaku musí byť obmedzený odporom (na  $10^{-5} \div 1$  A), inak vzniká iskra
- pretiekajúci prúd závisí od tlaku
- riešenie s "anténou" A.



### Poznámka:

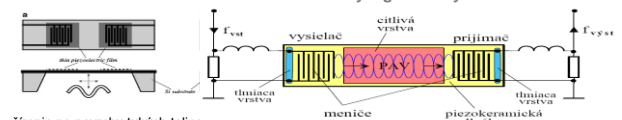
Nestabilita výboja - vážny problém. Prijímač sa náhodne stáva kmitajúcou sústavou, vydávajúcou zvuk (prskanie), čím je vyradený z činnosti. Toto bráni zatiaľ jeho vážnejšiemu využitiu.

23

## PAV: Povrchová akustická vlna

SAW: Surface acoustic wave

"Rayleighho vlny"



- šírenie po povrchu tuhých telies
- c je vysoká ⇒ vysoké f (desiatky MHz)
- filtre, analyzátory plynov, vlhkomery
- budenie - interdigitálne meniče = hrebeňové elektródy na piezokeramickej podložke - PZT keramika, t.j.  $Pb(ZrTi)O_3$
- rozmery a charakter meničov → základná f (napr. pre 30 MHz šírka 25 X<sub>m</sub>, medzery 25 X<sub>m</sub>)

Senzor - dva interdigitálne meniče, medzi nimi je aktívna (selektívna) vrstva

24

### 6.3. Akustické metódy

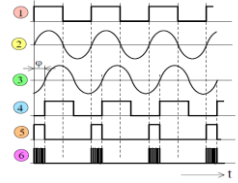
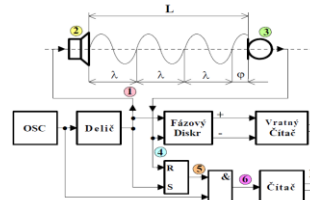
#### Možnosti merania vzdialeností a súradníc:

- vysielanie
  - kontinuálne metódy - nepretržité
  - impulzné metódy - vysielanie okamih
- zachytenie
  - priama vlna
  - odrazená vlna

25

### 6.3. Akustické metódy ► kontinuálne Fázová metóda

- inkrementálna metóda
- vždy pre  $\phi = 0$  → vznikne impulz → pridaná  $\lambda$  vzdialenosť (+ alebo -, smer)

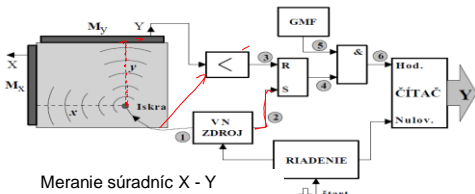
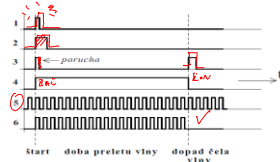


- pre  $f = 100$  kHz je  $\lambda = 3,4$  mm
- impulzy N reprezentujú vzd.  $N\lambda$
- doplnok  $\phi = L - N\lambda$ , platí  $\phi < \lambda$
- impulzy M - vzdialenosť  $\phi$
- v bloku  $\Sigma$  sa M a N sčítajú

26

### 6.3. Akustické metódy ► impulzné Impulzná metóda

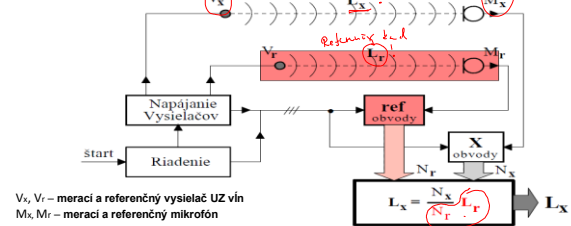
- metódy sú absolútne - skutočná vzdialenosť.
- potrebný akustický impulz (strmý nástup)
- modulovaná nosná - rádiový impulz



Meranie súradníc X - Y

27

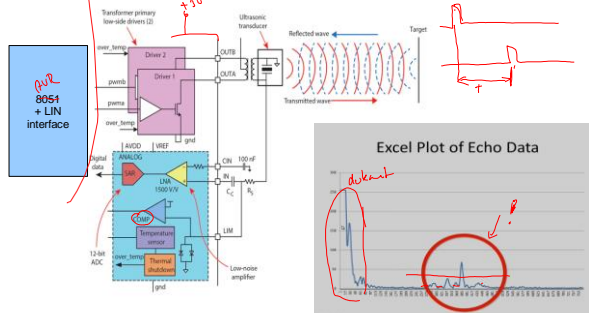
### 6.3. Akustické metódy ► impulzné Referenčný kanál



$V_s, V_r$  – meraci a referenčný vysielateľ UZ vln  
 $M_x, M_r$  – meraci a referenčný mikrofón  
 ref. obvody a X obvody – obvody na získanie počtu impulzov

28

### 6.3. Akustické metódy ► PGA450 – ASIC od TI



Source: <http://www.ti.com/lit/ds/tymlink/pga450-q1.pdf>

29

### 6.3. Akustické metódy ► Porovnávací tabuľka

	Parallax PING)))	China HC SR-04	Devantech SRF08	Devantech SRF02	Maxbotix LV-MaxSonar-EZ0	Polaroid / SensComp 6500
robotshop.eu	33,20 €	1,67 – 6,61	36,40 €	14,27 €	28,81 €	--
rozsah opakovanie	0,2 – 3 m 20 ms	0,2 – 4 m 25 ms	0,03 – 6 m 65 ms	0,22 – 6 m 65 ms	0,3 – 5 m 50 ms	0,15 – 10,5 m 80 ms
presnosť napájanie	± 2 cm 5 V	0,5 cm 5 V	3-4 cm 5 V	3-4 cm 5 V	1% 2,5 – 5 V	1% 5 V
budenie	40 kHz	40 kHz	40 kHz	40 kHz	42 kHz	50 kHz
interface	start+echo	start, echo	I2C bus	I2C, serial	serial, analog, pulse	Init / echo / blank...

30

6.3. Akustické metódy ► impulzné  
Priestorové merania

usporiadanie s bodovými,  
kvázibodovými, resp.  
guľovými mikrofónmi

nutné min. 3, pre 4 a viac možná i určitá kompenzácia

- a.) kompenzuje vplyv teploty a vlhkosti (4 ks)
- b.) kompenzuje aj gradient teploty v zvislom smere – častý (5 ks)

- zdroj guľovej vlny (piezo, iskra)
- snímače bodové, kvázibodové, alebo guľové
- meranie 4 (5) vzdialeností, (počty impulzov  $N_a, N_b, N_c, N_d$ )
- súradnice – zložitejšie vzťahy

31

6.3. Akustické metódy ► impulzné  
Priestorové merania

ak zmeráme  $N_a, N_b, N_c, N_d$ , potom

$$x = \frac{d^2 + K^2(N_a^2 - N_b^2)}{2d}$$

kde  $K$  určíme z rovnice

$$a_4 K^4 + a_2 K^2 + a_0 = 0$$

a koeficienty  $a_i$  sú

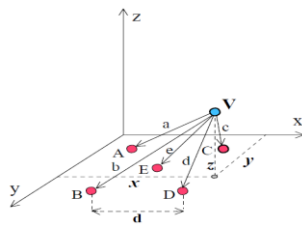
$$a_4 = d^4[(N_a^2 - N_b^2)^2 + (N_b^2 - N_c^2)^2 + (N_c^2 - N_d^2)^2]$$

$$a_2 = 2d^6[N_a^2 - N_b^2 - N_c^2 - N_d^2]$$

$$a_0 = 3d^8$$

32

6.3. Akustické metódy ► impulzné  
Priestorové merania

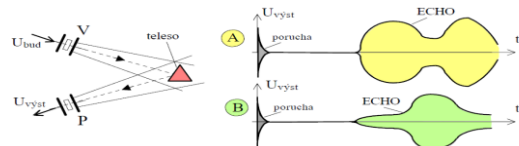


**Poznámka:**  
Kompenzácia vektorových vplyvov - prúdenia je možná len cyklickou zámennou funkcie vysielajúca a niektorého prijímača  
→ nutné **recipročné** meniče.

33

6.3. Akustické metódy ► impulzné  
Určenie tvaru telesa z echa

približná metóda pre jednoduché, značne odlišné telesá  
využitá je odrazená vlna impulznej metódy



- obálka odrazenej vlny má určitý tvar - ECHO
- tvar je pre každé teleso iný (závisí tiež od natoženia)
- A, B sú echa pre dva rôzne typy telesa

Porovnaním so "standardnými tvarmi" sa dá približne usúdiť, čo sa nachádza v zornom poli.

34

6.3. Akustické metódy ► aplikácie  
Snímače hladiny

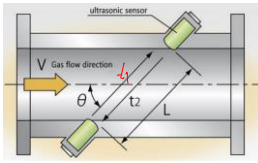
Hladina: aj sypké a penovité

35

6.3. Akustické metódy ► aplikácie  
Snímače prúdenia

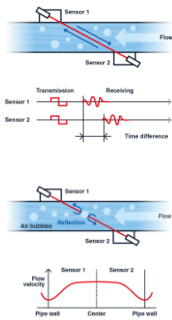
36

6.3. Akustické metódy ► aplikácie  
Snímače prietoku



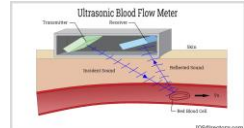
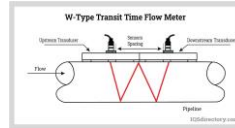
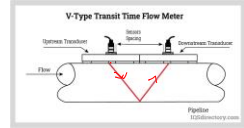
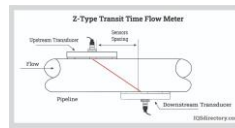
$v$  – rýchlosť tekutiny [m/s]  
 $c$  – rýchlosť zvuku v danom médiu [m/s]  
 $L$  – vzdialenosť RT [m]  
 $t_1$  – čas prijatia signálu smerom nahor [s]  
 $t_2$  – čas prijatia signálu smerom nadol [s]

$N_1 = c + v \cdot \cos \theta$      $t_1 = \frac{L}{c + v \cdot \cos \theta}$      $c \gg v$   
 $N_2 = c - v \cdot \cos \theta$      $t_2 = \frac{L}{c - v \cdot \cos \theta}$   
 $\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{L}{c - v \cdot \cos \theta} - \frac{L}{c + v \cdot \cos \theta} = \frac{2Lv \cos \theta}{c^2 - v^2 \cos^2 \theta}$



37

6.3. Akustické metódy ► aplikácie  
Snímače prietoku



38

6.3. Akustické metódy ► aplikácie

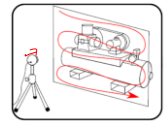


39

6.3. Akustické metódy ► aplikácie  
Akustická mapa



Analýza hlučnosti, odhlučenie problematických častí



Source: [https://www.microfrown.com/assets/uploads/bestanden/Product-Lesfleets/Product-Lesfleets\\_ScanPairs-8pages.pdf](https://www.microfrown.com/assets/uploads/bestanden/Product-Lesfleets/Product-Lesfleets_ScanPairs-8pages.pdf)

40