

UPORABA AKUSTIČNE RESONANCE V MERITVAH IN DETEKCIJI NIVOJA FLUIDOV

Denis Đonlagić, Miha Završnik, Dali Đonlagić
Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Laboratorij za elektrooptične in senzorske sisteme, Univerza v Mariboru, Slovenija

Ključne besede: merjenje nivoja fluidov, detekcija nivoja fluidov, valovodi akustični, resonanca valovoda akustična, resonatorji akustični odprti, resonatorji akustični zaprti, materiali sipki, materiali fluidni, merilniki akustični resonančni, mreže nevronske, ločljivost velika

Povzetek: Predstavljamo novi metodi za zvezno merjenje in detekcijo nivoja fluidov, ki temeljita na pojavu akustične resonance valovoda. Metodi se odlikujeta po veliki robustnosti, ki se odraža v neobčutljivosti na obloge, usedline, delne zamašitve, pene, površinsko stanje fluida, itd. Eksperimentalno sta bila realizirana detektor in zvezni merilnik nivoja fluidov. Eksperimentalni rezultati nakazujejo na veliko robustnost obeh sistemov in s tem na možnost uporabe detektorja in merilnika v ekstremnih industrijskih razmerah.

Application of Acoustic Resonance for Fluid Level Measurements and Detection

Keywords: fluid level measurement, fluid level detection acoustic waveguides, acoustic waveguide resonance, open acoustic resonators, closed acoustic resonators, granular materials, fluid materials, acoustic resonance meters, neural networks, high resolution

Abstract: A new level measurement and level detection methods are presented. They are based on the acoustic resonance of a waveguide and can be successfully implemented for fluid level measurements and fluid level detection in industrial plants, where problems of residues, deposits, foams, etc. can be expected. An experimental level gauge and level detector have been built and tested under artificially induced residues, foams, deposits, etc. The resonance methods prove to be insensitive under extreme operating conditions. The proposed method represents an alternative to ultrasonic as well to some other level measurement and detection methods.

1. Uvod

V mnogih vejah industrije, posebej procesne industrije, je potrebno meriti in zaznavati nivo fluidov. Merilniki nivoja in nivojski detektorji (stikala) so tako nepogrešljivi členi zelo raznolikih tehnoloških procesov. Zelo pogosto imamo opraviti z visoko viskozni fluidi, fluidi katerih viskoznost je odvisna od tehnološkega procesa, fluidi z nedefiniranimi lastnostmi (npr. odpadne vode), itd. Značilen problem, ki ga srečamo pri procesnih merilnikih nivoja so raznovrstne zamašitve, obloge, pene, itd. Tovrstnih problemov ni možno prebroditi s klasičnimi merilnimi postopki, ki temeljijo na mehanskih, prevodnostnih, ultrazvočnih ali mikrovalovnih principih. Tako je večina današnjih merilnikov in detektorjev nivoja omejena le na določene vrste fluidov in specifične delovne pogoje.

V procesni industriji danes pogosto srečujemo ultrazvočne merilnike, ki temeljijo na uporabi ultrazvočnih akustičnih valov. Tovrstni merilniki so relativno preprosti in učinkoviti v primeru dobro definiranih delovnih pogojev. Uporaba ultrazvoka je močno omejena s parazitnimi odboji, ki jih povzročajo npr.: pene, obloge, površinska valovitost fluida, objekti v notranjosti posode, usedline, itd. Delno rešitev tovrstnih problemov zasledimo v literaturi [4,5,6,7,8,9].

Probleme s parazitnimi odboji je možno odpraviti s povečanjem valovne dolžine akustičnih valov, kar pa povzroči zmanjšanje ločljivosti in razreda točnosti merilnika.

V članku predstavljamo rešitev, ki sloni na uporabi pojava akustične resonance akustičnega valovoda. Akustična resonanca omogoča uporabo relativno dolgih akustičnih valov. Valovna dolžina je lahko tako celo večja od razdalje med pokrovom merilnika in nivojem fluida. Tovrstni valovi se ne odbijajo od ovir, ki so (precej) manjše od njihove valovne dolžine. Dodaten pojav, ki prispeva k zmanjšanju občutljivosti na obloge in ovire znotraj resonančnega prostora, je značilna porazdelitev tlačne in hitrostne amplitude znotraj resonatorja.

V obstoječi literaturi zasledimo uporabo akustične resonance le v primeru uporabe Helmholtzovega resonatorja, ki ga je možno uporabiti za neposredno merjenje prostornine posod in rezervoarjev [10]. Uporaba Helmholtzovega resonatorja je omejena z lastnostmi, kot so relativno nizke akustične frekvence (zlasti, ko je prostornina rezervoarja večja od 1 m³) in korenske odvisnosti med prostornino ter resonančno frekvenco, kar močno omejuje uporabnost tovrstnih merilnikov. Poleg omenjenih problemov se pogosto pojavijo še problemi z obliko in linearnostjo merilnika.

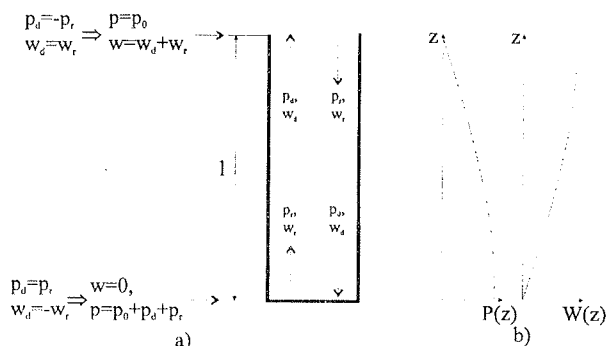
V nadaljevanju bomo podali teoretične osnove delovanja akustičnega resonančnega merilnika in detektorja nivoja fluidov, ki temeljita na resonanci valovoda. Sledita opisa realizacije zveznega merilnika ter detektorja nivoja fluidov. Eksperimentalni rezultati podajajo nekatere pomembne lastnosti in prednosti akustičnega resonančnega merilnika in detektorja pred klasičnimi pristopi.

2. Teorija

Opis akustičnih valovodov in resonatorjev najdemo v mnogih referencah [1,2,3,11], sledi kratek povzetek:

2.1 Odprt akustični resonator

Odprt akustični resonator je valovod, ki je odprt na eni strani in zaprt na drugi (Slika 1).



Slika 1. a) Princip odprtega resonatorja z robnimi pogoji; w_d =direktni hitrostni val, w_r =odbiti hitrostni val, p_d =direktni tlačni val, p_r =odbiti tlačni val, p_0 =tlak okolice.
b) $P(z)$ tlačna amplituda v odvisnosti od osne koordinate; $W(z)$ hitrostna amplituda v odvisnosti od osne koordinate

Za odprt konec valovoda lahko zapišemo naslednje ugotovitve:

- (1) Odbiti tlačni val ima obratno fazo kakor prvotni val (prvotni in odbiti val se drug od drugega odštevata).
- (2) Odbiti hitrostni val ima enako fazo kakor prvotni val (odbiti in prvotni val se seštevata)

Za zaprt konec valovoda velja:

- (1) odbiti tlačni val ima enako fazo kakor prvotni val (odbiti in prvotni val se seštevata)
- (2) odbiti hitrostni val ima nasprotno fazo kakor prvotni val (prvotni in odbiti val se drug od drugega odštevata).

Resonančna frekvenca odprtega resonatorja je določena z zgoraj omenjenimi robnimi pogoji. V primeru, ko nastopi resonančni pojav, mora biti tlačna amplituda enaka nič na zaprtem koncu resonatorja ter maksimalna na odprtem koncu resonatorja. Do podobnega sklepa lahko pridemo tudi za hitrostno amplitudo, ki mora biti največja na odprtem koncu in nič na zaprtem koncu resonatorja. To pomeni, da je odprti resonator četrtvalni resonator, resonančne frekvence pa so podane z:

$$f_n = (2n+1) \frac{c}{4l} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

pri tem je c hitrost zvoka, l dolžina resonatorja in n celo število ($n=0, 1, \dots$). V primer ko je $n=0$, govorimo o

osnovni resonančni frekvenci, za $n>0$ pa govorimo o višjih harmoničnih frekvencah. Slika 1b predstavlja porazdelitev tlaka in hitrosti delcev za primer osnovne resonančne frekvence v odprtem resonatorju.

V realnosti nihajo zvočni delci nekoliko v prostor okoli odprtega konca resonatorja, tako da hitrostna amplituda na robu resonatorja ne upade povsem na nič. Zato je potrebno dolžino l v enačbi (1) podaljšati za faktor Δl . Raighlijevo priporočilo je empirični izraz in podaja Δl kot:

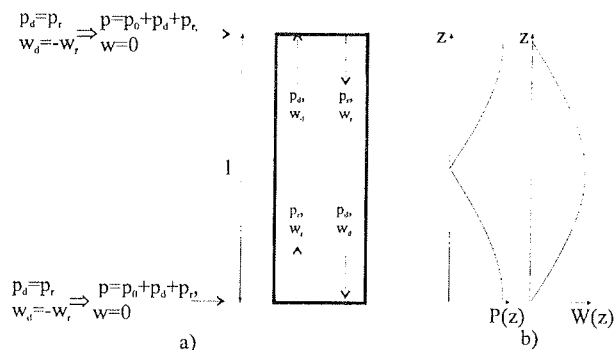
$$\Delta l = \pi D / 4 \quad (2)$$

pri tem je D premer valovoda (velja za primer valovoda krožnega preseka).

2.2 Zaprt akustični resonator

Zaprt akustični resonator je valovod, ki je zaprt na obeh straneh (slika 2). Za zaprti konec resonatorja velja:

- (1) odbiti tlačni val ima enako fazo kakor prvotni val (odbiti in prvotni val se seštevata)
- (2) odbiti hitrostni val ima nasprotno fazo kakor prvotni val (prvotni od odbiti val se odštevata).



Slika 2 a) Princip zaprtega resonatorja z robnimi pogoji w_d =direktni hitrostni val, w_r =odbiti hitrostni val, p_d =direktni tlačni val, p_r =odbiti tlačni val, p_0 =tlak okolice.
b) $P(z)$ tlačna amplituda v odvisnosti od osne koordinate; $W(z)$ hitrostna amplituda v odvisnosti od osne koordinate

Ob nastopu resonance mora biti zato tlačna amplituda na koncih resonatorja nič, nasprotno pa velja za hitrostno amplitudo, ki mora biti na obeh koncih resonatorja največja. To pomeni, da je zaprti resonator polvalni resonator in resonančno frekvenco lahko zapišemo v naslednji obliki:

$$f_n = (n+1) \frac{c}{2l} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

pri tem je c hitrost zvoka, l dolžina resonatorja in n celo število ($n=0, 1, \dots$). V primeru ko je $n=0$, govorimo o osnovni resonančni frekvenci za primer $n>0$ pa govorimo o višjih harmoničnih frekvencah. Slika 2b pred-

stavlja porazdelitev tlaka in hitrosti delcev za primer osnovne resonančne frekvence v zaprtem resonatorju.

2.3 Odzivni čas

Odzivni čas je čas, ki je potreben, da se v resonatorju vzpostavijo stacionarne razmere. Pravilna ocena odzivnega časa je izjemno pomembna. Karakteristike, ki so zajete s prekratko zakasnitvijo med začetkom vzbujanja in zajetjem amplitude stojnega vala so slabo izražene in netočne, kar neposredno vpliva na merilno negotovost in ločljivost merilnika. V primerih, ko je zakasnitev med začetkom vzbujanja in zajetjem amplitud zelo dolga in bistveno presega odzivni čas resonatorja, po nepotrebnem poslabšamo dinamične lastnosti merilnika. Odzivni čas merilnika lahko ocenimo z izrazom (1):

$$T = \frac{\ln 0.1}{\ln[k \exp(-Dl)]} \frac{l}{c} \quad (4)$$

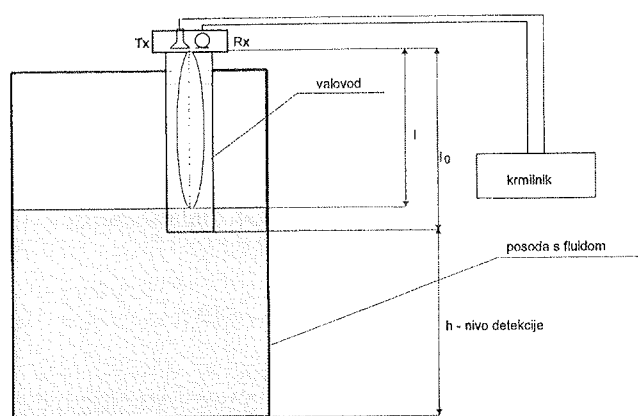
pri tem je D koeficient slabljenja akustičnega valovanja v plinu, l dolžina resonatorja in c hitrost zvočnega valovanja. Če v izraz (4) vstavimo značilne vrednosti $D=0.003 \text{ m}^{-1}$, $k=0.95$ (zrak-voda), $l=1 \text{ m}$, $c=340 \text{ m/s}$, dobimo značilen odzivni čas $T=130 \text{ ms}$.

3. Akustični resonančni detektor nivoja fluidov in sipkih materialov

3.1 Osnovni princip delovanja

Akustični resonančni detektor nivoja je sestavljen iz: valovoda, oddajnika zvočnega valovanja (zvočnika), sprejemnika (mikrofona) in procesne enote. Položaj spodnjega roba valovoda določa nivo pri katerem detektor zazna prisotnost fluida oziroma sipkega materiala. Postavitev resonančnega detektorja ponazarja slika 3.

V odvisnosti od položaja nivoja fluida ali sipkega materiala je spodnji konec resonatorja odprt (nivo je nižji od točke detekcije) ali zaprt (nivo je enak ali višji od točke detekcije). Resonančne frekvence valovoda se v primeru, da nivo fluida preseže spodnji rob valovoda



Slika 3 Akustični resonančni detektor nivoja

skokovito spremenijo. V idealnem primeru dobimo dva nabora resonančnih frekvenc:

- (1) nabor resonančnih frekvenc, ki je značilen za zaprti resonator (fluid je dosegel spodnji rob resonatorja), enačba (1):

$$f_n = (2n + 1) \frac{c}{4l} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

- (2) nabor resonančnih frekvenc, ki je značilen za odprti resonator (fluid ni dosegel spodnjega roba resonatorja), enačba (3):

$$f_n = (n + 1) \frac{c}{2l} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

S pomočjo identifikacije nabora resonančnih frekvenc lahko tako sklepamo na prisotnost nivoja.

3.2 Detekcija nivoja

V eksperimentalni postavitvi smo uporabili dva pristopa za detekcijo:

3.2.1 Nadzor resonančne frekvence odprtega resonatorja

Procesna enota tvori konstantno frekvenco, ki ustreza osnovni resonančni frekvenci odprtega resonatorja (enačba (1)) in hkrati nadzoruje amplitudo akustičnega valovanja, ki se ustvari v resonatorju. V primeru, ko doseže nivo fluida spodnji rob valovoda akustična amplituda močno upade, saj pride do skokovite spremembe resonančne frekvence (enačba (3)). Tako lahko sklepamo na prisotnosti nivoja fluida neposredno iz velikost amplitude akustičnega valovanja v valovodu. Postopek je izjemno preprost. Celoten detektor je možno v celoti realizirati z uporabo analognih komponent.

Resonator bi bilo možno vzbujati tudi z osnovno resonančno frekvenco zaprtega resonatorja, vendar pa je takšen postopek manj primeren oziroma bolj zapleten, saj se resonančna frekvenca zaprtega valovoda spreminja z nivojem (kadar nivo preseže spodnji rob valovoda je resonančna frekvenca odvisna od dolžine resonančnega prostora in s tem od nivoja).

3.2.2 Skaniranje frekvenčne karakteristike resonatorja in klasifikacija s pomočjo nevronske mreže

Procesna enota zajame celotno ali del frekvenčne karakteristike resonatorja in jo nato obdelava. Takšen pristop je zelo primeren za obratovanje detektorja pod ekstremnimi pogoji, ko pričakujemo obloge, zamašitve, pene ter druge nepredvidljive dogodke.

V eksperimentalni izvedbi je potekalo zajemanje frekvenčne karakteristike s skeniranjem. Procesna enota vzbudi resonator, počaka odzivni čas, nato zajame in hkrati filtrira akustični signal. Postopek se ponavlja pri tem pa se frekvenca v vsakem koraku poveča za določeno vrednost, vrednosti akustične am-

plitude se sprti shranjujejo v pomnilnik. Po končanem skeniranju je potrebno frekvenčno karakteristiko ustrezno klasificirati, tj. razpoznati ali je resonator odprt ali zaprt.

V ta namen je bila uporabljena nevronska mreža, saj ima v danem primeru vrsto prednosti pred ostalimi postopki za razpoznavanje vzorcev. Najpomembnejša lastnost nevronske mreže je sposobnost učenja na primerih. Detektor je tako možno preprosto optimirati (naučiti) za specifične pogoje obratovanja, tudi za primere, ko pogoji obratovanja močno odstopajo od idealnih.

V procesu učenja je tako potrebno pripraviti dva nabora karakteristik: prvi nabor mora vsebovati čim bolj različne primere, v katerih je nivo fluida prisoten, drugi niz mora vsebovati različne primere, v katerih je nivo odsoten. Oba niza je potrebno pripraviti čim bolj raznovrstno, vključujoč mejne in neidealne primere. Kvaliteta detekcije v neidealnih primerih je močno odvisna prav od raznovrstnosti primerov s katerimi učimo nevronske mrežo.

3.3 Eksperimentalna izvedba resonančnega detektorja

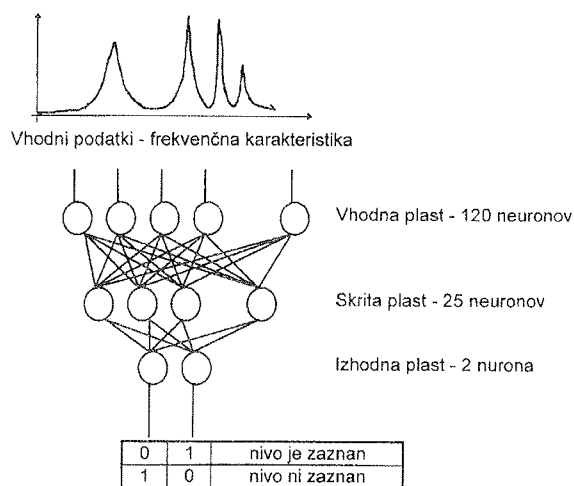
Eksperimentalna izvedba resonančnega detektorja je ponazorjena na sliki 3. Eksperimentalni resonator je dolg 70 cm in ima premer 10 cm. Izbira premera resonatorja je odvisna od lastnosti medija, katerega nivo zaznavamo. V primeru, da zaznavamo visoko viskozni medij ali medij, ki tvori obloge, je potrebno izbrati zadosten premer resonatorja tako, da preprečimo možnost popolne zamašitve. Dolžina resonatorja mora biti s stališča dinamičnih lastnosti detektorja čim manjša, saj ima daljši resonator daljši odzivni čas, vendar pa mora znašati razmerje med dolžino in premerom resonatorja vsaj tri do štiri. V nasprotnem primeru ne dobimo dobro izražene resonančne karakteristike.

V eksperimentalni izvedbi je bil uporabljen običajni audio zvočnik (moči 5W) in audio mikrofoni. Pokrov resonatorja je bil ustrezno zatesnjen. Tesnjenje je pomembno, saj povzroči kakršna koli odprtina na resonatorju znaten premik resonančne frekvence, kar vpliva na kvaliteto zaznavanja nivoja.

Osrednji del procesne enote je mikrokrmilnik HITACHI H8/510. Mikrokrmilnik skrbi za tvorbo sinusnega vzburjanja, zajemanje karakteristike, filtriranje, klasifikacijo karakteristike s pomočjo nevronske mreže, logične odločitve, prikaz rezultatov ter komunikacijo s servisnim računalnikom.

Učenje nevronske mreže je potekalo na gostiteljskem računalniku (PC), uteži nevronske mreže pa so bile naknadno prenesene v pomnilnik (E²PROM) procesne enote.

Uporabljena je bila običajna back-prop nevronska mreža z dvema aktivnima nivojema (slika 4). Vhodni vektor vsebuje frekvenčno karakteristiko (120 vrednosti, ki predstavljajo akustično amplitudo v odvisnosti od frekvence), vmesna plast je vsebovala 25 nevronov, izhodna pa dva nevrona. Nadaljnje povečanje števila



Slika 4 Klasifikacija frekvenčne karakteristike

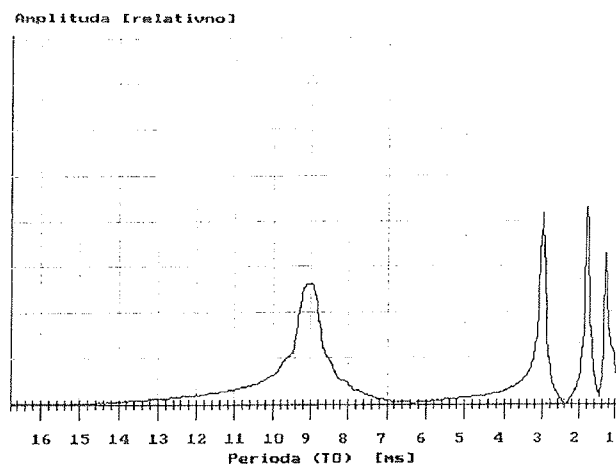
nevronov v skriti plasti ni pokazalo bistvenega izboljšanja sposobnosti zaznavanja nivoja. Tako je poraba pomnilnika za uteži nevronske mreže relativno skromna in primerna za realizacijo z mikrokrmilnikom (uteži so zasedle približno 12 KB pomnilnika). Število učnih ciklov nevronske mreže se je gibalo med 150 in 1500, odvisno od raznolikosti vhodnih (učnih) karakteristik.

Posebej pomemben postopek v realizaciji detektorja je priprava učnih naborov karakteristik. Tako so bile umetno ustvarjene različne neidealne obratovalne razmere (zamašitve, pene, obloge), kar je omogočilo pripravo raznovrstnih učnih naborov. Poseben nabor učnih karakteristik je bil pripravljen za primer detekcije akustično redkejših snovi, kot je na primer stiroporni granulati.

3.4 Eksperimentalni rezultati

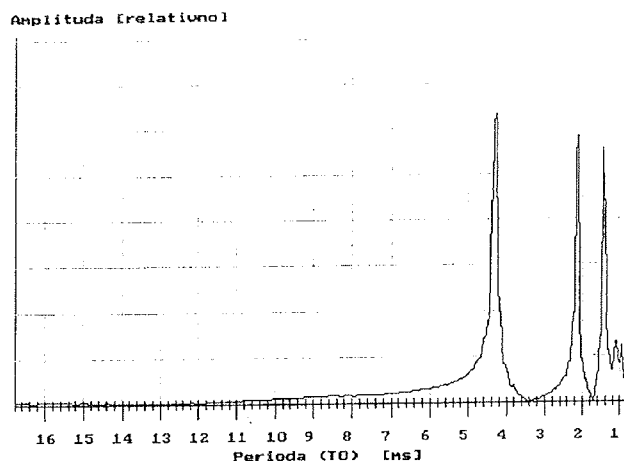
3.4.1 Značilne karakteristike

Slike 5-9 kažejo značilne karakteristike, ki so bile zajete med eksperimentalno fazo. Pri tem je na x-osi podan nihajni čas in ne frekvenca (takšen pristop je primernej-

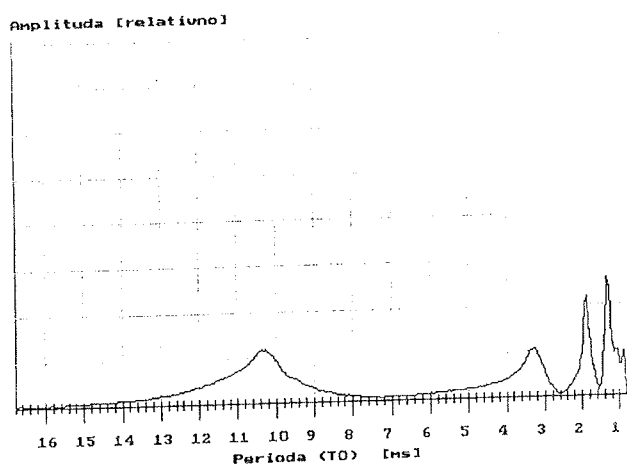


Slika 5 Frekvenčna karakteristika odprtega resonatorja, brez oblog, vsedlin in pen.

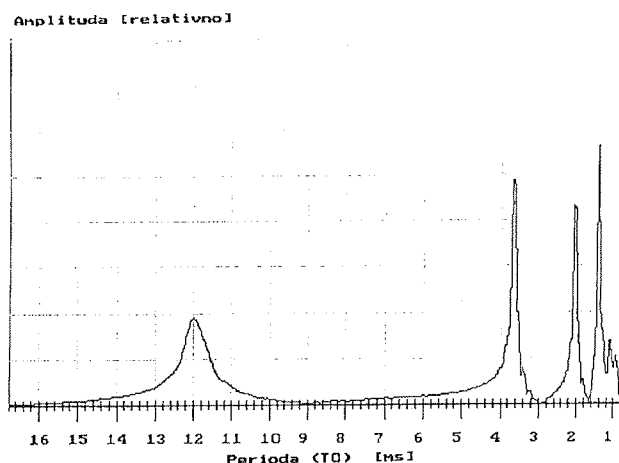
ši, saj je dejanski nivo tekočine sorazmeren z nihajnim časom, kar je pomembno pri zveznih meritvah nivoja).



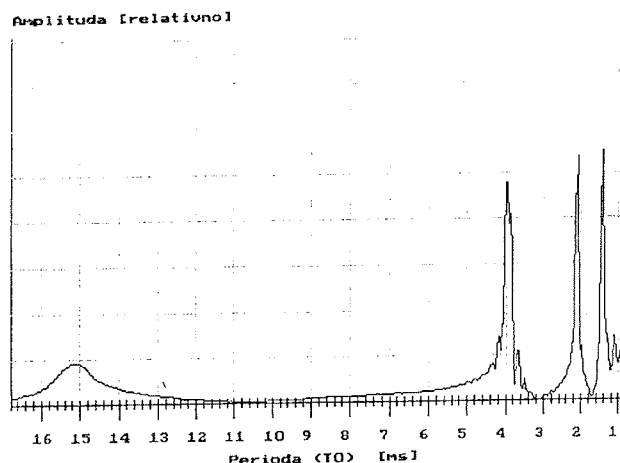
Slika 6 Frekvenčna karakteristika zaprtega resonatorja, brez oblog, vsedlin in pen.



Slika 7 Frekvenčna karakteristika resonatorja zaprtega s stiropornim granulatom



Slika 8 Frekvenčna karakteristika zaprtega resonatorja, ob prisotnosti zmernih oblog (80% zamašitev)



Slika 9 Frekvenčna karakteristika zaprtega resonatorja, ob prisotnosti močnih oblog (95% zamašitev).

Slika 5 in 6 ponazarjata značilna odziva, ki jih dobimo v primeru, da so odsotne obloge, pene, zamašitve, itd. Resonančna maksimuma v popolnosti ustrezata enačbam (1) in (3). Slika 7 ponazarja razmere, ko je resonator zaprt s stiropornim granulatom. Resonančni maksimumi so glede na enačbo 3 premaknjeni, nižji in nekoliko zabrisani. Sliki 8 in 9 ponazarjata razmere, ko je bila prisotna močna zamašitev. V primeru na sliki 8 je bilo zamašenega približno 80% celotnega preseka resonatorja, v primeru 9 pa je bilo zamašenega 95% celotnega preseka resonatorja.

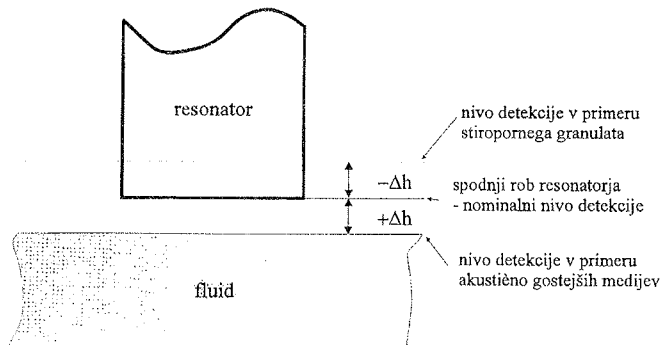
3.4.2 Detekcija nivoja

Po opravljenem učenju nevronske mreže je bil detektor pripravljen na zaznavanje nivoja pod različnimi obratovalnimi pogoji. Nivo je bil uspešno zaznan tudi v primeru, ko je zamašitev znašala več kakor 96% celotnega preseka resonatorja. Z ustreznim učenjem je bil detektor sposoben zaznati nastajanje oblog med samim učenjem. Tovrsten pristop omogoča pravočasno opozorilo operaterju, da je potrebno čiščenje detektorja, kar izboljša zanesljivost celotnega sistema.

Tovrstno robustnost akustičnega resonančnega detektorja nivoja lahko razložimo z dejstvom, da imamo opraviti z relativno dolgimi akustičnimi valovi. Valovna dolžina akustičnega vala je ob nastopu resonance dva do štiri krat večja od valovne dolžine resonatorja ter mnogo večja od morebitnih ovir znotraj ali v neposredni okolici resonatorja. Tako se akustično valovanje od morebitnih ovir ne odbije.

Pogrešek zaznavanja znaša v primeru akustično gostejših fluidov in snovi ter manjših zamašitev resonatorja približno $\Delta h \approx +2$ mm (Slika 10). V primeru, ko je bil resonator močno zamašen (90% in več), se je pogrešek zaznavanja povečal na $\Delta h \approx +1-3$ cm. Detektor je tako zaznal nivo še preden je le ta dosegel nominalno točko zaznavanja (spodnji rob resonatorja). Pogrešek zaznavanja je odvisen od raznovrstnosti učnih karakteristik, velikosti, položaja in oblike zamašitev oziroma obloge. V našem primeru je prišlo do največjega odstopanja $\Delta h = +3$ cm.

V primeru stiropornega granulata so bili pogreški večji in so znašali od $\Delta h = -3$ cm do $\Delta h = -15$ cm. Tako je prišlo do zaznavanja šele, ko je bil nominalni nivo (spodnji rob resonatorja) presežen. Pogrešek zaznavanja je bil odvisen od učnih karakteristik in velikosti stiropornih zrn in je v povprečju znašal $\Delta h = -7$ cm.



Slika 10 Nivoji detekcije

3.4.3 Dinamika detektorja

Osrednja pomanjkljivost resonančnega detektorja je dinamika. Odzivni časi resonatorja so lahko relativno dolgi (npr. okoli 130 ms za 1 m dolg resonator), tako da lahko traja skeniranje karakteristike tudi 10 ali več sekund. Obstaja več možnosti za zmanjšanje časa skeniranja: odzivni čas lahko prilagodimo frekvenci vzbujanja, skeniramo le del ali dele karakteristike, ločljivost karakteristike je možno zmanjšati v celotnem ali v delu frekvenčnega območja, itd., vendar je učinkovitost tovrstnih pristopov odvisna od specifičnih obratovalnih pogojev.

3.4.4 Primerjava resonančnega detektorja nivoja fluidov z nekaterimi drugimi detektorji

V primerjavi z ultrazvočnimi in mikrovalovnimi detektorji, resonančni detektor ni občutljiv na obloge, površinsko stanje fluida, odboje povzročene z oblogami, penami ter drugimi dejavniki. Kapacitivni, induktivni, konduktivni ter optični detektorji so mnogo bolj občutljivi na obloge, usedline in korozijo. V primerjavi s transversalnim vibracijskim detektorjem resonančni detektor ni občutljiv na spremembe v gostoti in viskoznosti fluida.

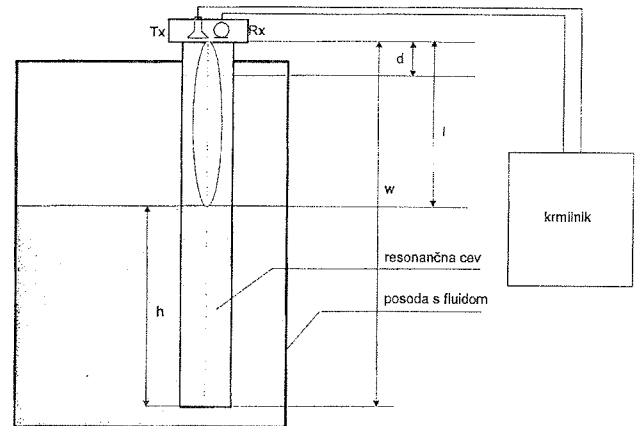
4. Akustični resonančni merilnik nivoja fluidov

Poleg detekcije nivoja fluidov in sipkih materialov omogoča uporaba akustične resonance konstrukcijo učinkovitega merilnika nivoja fluidov.

4.1 Osnovni princip delovanja

Nivo fluida določa spodnji rob in s tem dolžino resonatorja. Resonančna frekvenca resonatorja je tako odvisna od nivoja fluida in jo lahko izrazimo s pomočjo enačbe (3).

Podobno, kakor akustični resonančni detektor, je zvezni merilnik nivoja sestavljen iz: valovoda (resonatorja), oddajnika zvočnega valovanja (zvočnika), sprejemnika (mikrofona) in procesne enote. Resonančni merilnik nivoja ponazarja slika 11.



Slika 11 Akustični resonančni merilnik nivoja - princip delovanja

Valovod je na eni strani omejen s fluidom, katerega nivo merimo, na drugi strani pa s pokrovom valovoda v katerem sta nameščena oddajnik in sprejemnik. Oddajnik in sprejemnik sta lahko postavljena kjerkoli znotraj valovoda; zaradi merilnega območja je najugodnejša namestitvev v pokrovu merilnika. Stoječe valovanje se vzpostavi med pokrovom in nivojem fluida. Resonančna frekvenca za tako konstruiran valovod, je funkcija razdalje med pokrovom valovoda in gladino fluida. Uporabimo lahko tudi odprt resonator, vendar so eksperimentalni rezultati pokazali, da je resonančni pojav pri zaprtem resonatorju bistveno bolj izrazit, kar ugodno vpliva na ločljivost. Zato smo obravnavali le zaprt resonator.

Poleg osnovne resonančne frekvence ima takšen tip resonatorja tudi izrazite višje harmonične frekvence.

Za meritve nivoja so zanimivi tako osnovni, kakor tudi višji harmoniki. V skladu z enačbo (3) obstoja med dolžino resonančnega prostora l in resonančnimi frekvencami f_n naslednja povezava:

$$l = (n + 1) \frac{c}{2f_n} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

V skladu s sliko 11 velja:

$$h = w - l \frac{c}{2f_0} \quad (6)$$

Merilno območje merilnika:

Merilno območje merilnika je omejeno z dolžino in premerom resonančne cevi ter izvedbo krmilnika. Premer cevi namreč določa do kod sme seči nivo; maksimalni nivo mora biti za premer cevi manjši od dolžine valovoda ($h_{\max} = w - d$, slika 11). Kadar pogoj ni izpolnjen, ne vemo, ali se resonanca vzpostavi med pokro-

vom merilnika in gladino fluida, ali pa kar med bočnima stenama resonatorja. Zato je merilno območje za premer resonatorja manjše od dolžine celotne cevi. Druga omejitev je delovno območje krmilnika. Resonančna frekvenca narašča obratno sorazmerno z dolžino resonančnega prostora, zato je smiselno zagotoviti mrtvo območje med vrhom resonatorja in maksimalnim nivojem, saj lahko na tak način bistveno omejimo zahteve po frekvenčnem razponu v katerem mora delovati krmilnik.

Podobno, kakor drugi akustični merilnik nivoja, potrebuje tudi resonančni merilnik sistem za kompenzacijo spremenljive hitrosti zvoka v plinu nad gladino merjenega fluida. V primeru, da imamo opraviti s plini, ki imajo podobne lastnosti kakor idealni plini (npr. zrak), lahko spremembe hitrosti zvoka kompenziramo z merjenjem temperature ter ustrezno korekcijo hitrosti zvoka v enačbi (6). V primerih ko imamo opraviti z neidealnimi plini je najprimernejša uporaba referenčnega resonatorja.

4.2 Eksperimentalna izvedba resonančnega merilnika

4.2.1 Fizična izvedba merilnika

Resonančni merilnik nivoja na temelju osnovne resonančne frekvence je sestavljen iz naslednjih komponent

- valovod - resonator glava merilnika z oddajnikom in sprejemnikom mehanskega valovanja (zvočnik, mikrofoni)
- krmilnik (generator z nastavljivo frekvenco, filter, logična enota)
- temperaturni senzor

Valovod (resonator) je lahko narejen iz različnih materialov. V eksperimentalni izvedbi je bila uporabljena polietilenska cev. Maksimalna dolžina cevi in s tem merilni doseg, je omejen s frekvenčnim območjem oddajnika in sprejemnika. Drugi pomemben parameter je premer resonančne cevi. S premerom cevi je določeno minimalno mrtvo področje resonančnega merilnika. Reso-

nančna cev mora segati najmanj za lastni premer čez maksimalni nivo fluida. Minimalno mrtvo področje je mnogokrat odvisno tudi od zmogljivosti krmilnika, saj se resonančna frekvenca nelinearno povečuje s krajšanjem resonatorja.

Poseben problem predstavlja odzračevanje. Vsaka odprtina na valovodu namreč povzroči premik resonančne frekvence. Zato je potrebno odprtine za odzračevanje zmanjšati kolikor je le to mogoče. Problem odzračevanja je podrobneje opisan v eksperimentalnem delu.

Primer konstrukcijske izvedbe glave resonančnega merilnika je prikazan na sliki 12.

4.3 Merilni algoritem

Postopkov, po katerih lahko določimo resonanco valovoda je več. V eksperimentalni izvedbi je bil uporabljen postopek skaniranja, s katerim pregledujemo frekvenčno območje in iščemo maksimum. Prisotnost višjih harmonikov zahteva ustrezno, dodatno obravnavo. Realizacijo dodatno zaplete primer, ko se posoda popolnoma izprazni in se resonator obnaša kot odprt resonator.

4.3.1 Skaniranje celotnega frekvenčnega območja

Resonator vzbuja od minimalne frekvence (ta je določena z minimalnim nivojem oz. maksimalno dolžino resonatorja) do maksimalne frekvence, ki je omejena z minimalno dolžino resonančnega prostora (premer cevi) ali pa z zgornjim frekvenčnim območjem krmilnika. V primeru realizacije na H8 mikrokrmilniku (program je napisan izključno v C jeziku) je zgornje frekvenčno območje vzbuja 1.2 KHz, kar ustreza približno 15 cm.

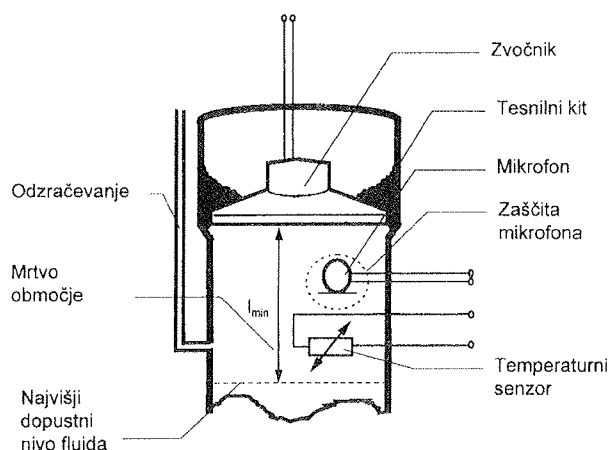
Merilni algoritem povečuje nihajni čas znotraj celotnega frekvenčnega območja in hkrati beleži dobljene vrednosti akustičnih amplitud. Sledi ustrezna obdelava dobljenih vrednosti:

- iskanje maksimumov v skanirani karakteristiki
- primerjava in obdelava harmonikov.

Prvi najdeni maksimum (maksimum, kateremu ustreza najdaljši nihajni čas oz. najmanjša frekvenca) predstavlja osnovno resonančno frekvenco, ki je osnova za izračun nivoja. Ostali maksimumi predstavljajo višje harmonike.

Iz razmerja med prvim harmonikom in osnovno resonančno frekvenco lahko ugotovimo, če je posoda prazna in se resonator obnaša kot odprt resonator. Prisotnost prvega harmonika (pri $T_0/2$ oz. $2f_0$) je zanesljiv znak, da prvi najden maksimum zagotovo ustreza osnovni resonančni frekvenci in zato lahko preidemo na skaniranje delnega območja.

Skaniranje celotnega frekvenčnega območja je relativno počasno. To neugodno vpliva na dinamiko merilnika. Da bi izboljšali dinamiko je bil dodan dodaten sledilni algoritem za skaniranje delnega območja.



Slika 12 Primer izvedbe glave merilnika

4.3.2 Sledilni algoritem (skaniranje delnega območja)

Algoritem sledi maksimumu, ki ga poiščemo s skaniranjem celotnega območja. Algoritem skanira okolico najdenega maksimuma in stari maksimum nadomesti z novim. Tako lahko za počasne spremembe nivoja zagotovimo sledenje maksimumu (nivoju). Da se zavarujemo pred morebitnimi hitrimi spremembami nivoja, je zelo pomembna obravnava harmoničnih frekvenc:

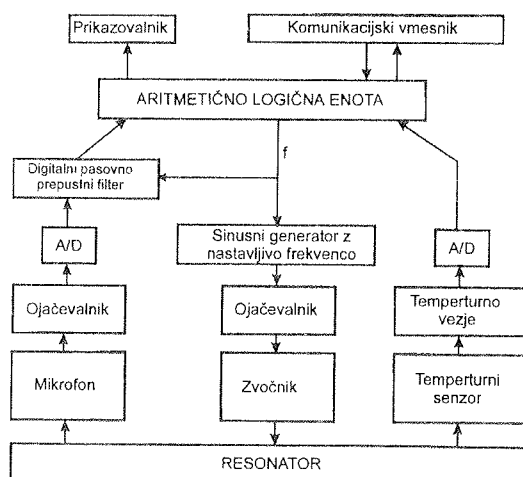
- če maksimum pri dvakratni osnovni frekvenci ne obstaja in če frekvenca vsaj približno ustreza resonančni frekvenci odprtega resonatorja pomeni, da je posoda popolnoma prazna in se resonator obnaša kot odprt resonator; dobljena frekvenca ne predstavlja realnega nivoja.
- če maksimum pri dvakratniku osnovne frekvence obstaja pomeni, da izmerjena osnovna frekvenca ustreza realnemu nivoju.
- če obstaja maksimum pri polovici ali tretjini osnovne frekvence pomeni, da se je sledilni algoritem ujel, namesto na osnovno, na višjo harmonično frekvenco (1. ali 2.). Do tega pojava lahko pride pri naglem padcu nivoja.

4.3.3 Ukrepi za izboljšanje dinamičnih lastnosti merilnika

Algoritem vsebuje naslednje ukrepe za izboljšanje dinamike:

- Skaniranje celotnega območja ne poteka z največjo možno resolucijo. Tako s skaniranjem celotnega frekvenčnega območja ugotovimo le približno lego resonančne frekvence.
- Dokončna določitev maksimuma poteka z delnim skaniranjem (sledilni algoritem). Tudi delno skaniranje je sestavljeno iz grobega skaniranja in finega skaniranja. Grobo skaniranje zagotavlja sledenje nivoja, fino skaniranje pa omogoča doseganje maksimalne resolucije. Algoritem za delno skaniranje, realiziranega merilnika, zajema območje ± 5 cm glede na zadnji izmerjeni nivo.

4.4 Blokovni diagram resonančnega merilnika nivoja



Slika 13 Blokovni diagram

Blokovni diagram celotnega merilnika ponazarja slika 13.

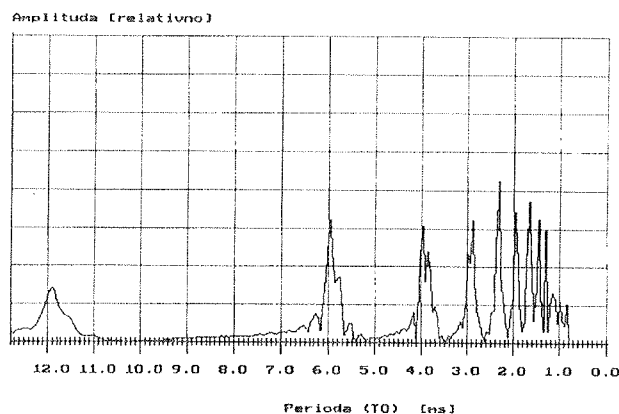
4.5 Eksperimentalni rezultati

4.5.1 Nekatere tipične karakteristike zaprtega resonatorja ter lastnosti realiziranega merilnika

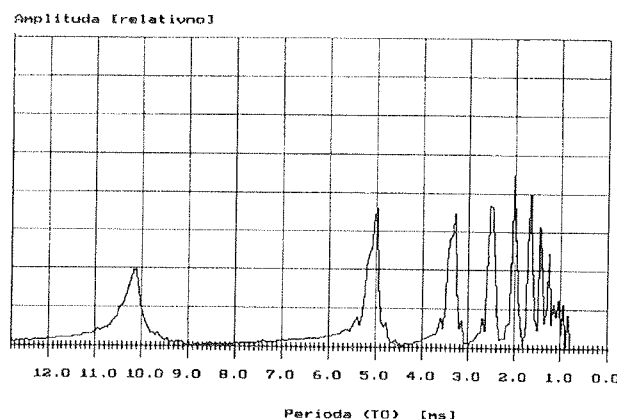
Slike 14 do 18 prikazujejo tipične karakteristike realiziranega eksperimentalnega resonančnega merilnika, ki jih dobimo s skaniranjem celotnega merilnega območja. Iz priloženih slik je razvidno, da je resonančni vrh manj izrazit pri nižjih frekvencah, kar je posledica manjše občutljivosti audio komponent.

Realiziran resonančni akustični merilnik ima naslednje lastnosti:

- merilno območje: 1.8 m (2.06 m - resonator); sprememba nazivnega merilnega območja je enostavna, saj zahteva le spremembo dolžine resonatorja ter spremembo ustreznih programsko določenih konstant
- ločljivost: 2.1 mm (= 0.116%)
- merilna negotovost: 6.3 mm (= 0.35%)
- histereza < 0.116%
- nelinearnost: 2.1 mm (= 0.116%)

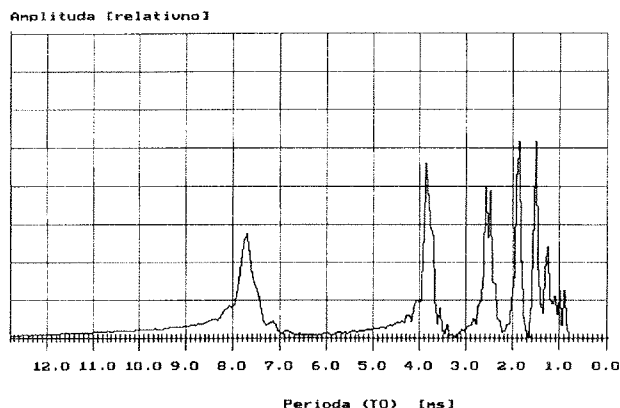


Slika 14 Resonančna karakteristika pri $h = 0$ m. Dolžina resonatorja $l = 2.05$ m.

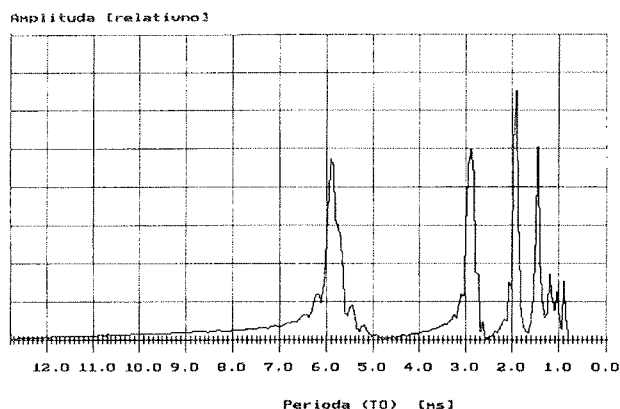


Slika 15 Resonančna karakteristika pri $h = 0.3$ m. Dolžina resonatorja $l = 1.75$ m.

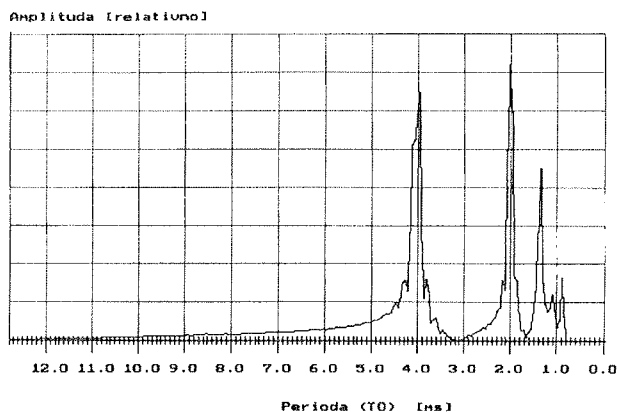
- dinamika: skaniranje celotnega območja: 25 s
skaniranje delnega območja (najslabši primer): 12 s



Slika 16 Resonančna karakteristika pri $h=0.705$ m. Dolžina resonatorja $l=1.3$ m



Slika 17 Resonančna karakteristika pri $h=1.05$ m. Dolžina resonatorja $l=1.0$ m.



Slika 18 Resonančna karakteristika pri $h=1.55$ m. Dolžina resonatorja $l=0.5$ m.

4.5.2 Vpliv odprtih na obnašanje resonatorja

Zanimiva lastnost akustičnega resonatorja je premik resonančne frekvence zaradi dodatne odprtine na resonatorju. Frekvenčni premik resonance je opazen pri relativno majhni odprtini, hkrati pa je odvisen tudi od položaja odprtine. Velikost in položaj odprtine vplivata tudi na kvaliteto resonatorja (površino in velikost resonančnega vrha). Zato moramo paziti, da morebitna odprtina za odzračevanje ni prevelika, oziroma, da ji dodatno povečamo akustično impedanco (npr. odzračevanje izvedemo preko dolge in tanke cevke).

Da bi ugotovil vsaj približno odvisnost premika resonančne frekvence resonatorja od položaja in velikosti odprtine, smo opravili dva niza poizkusov:

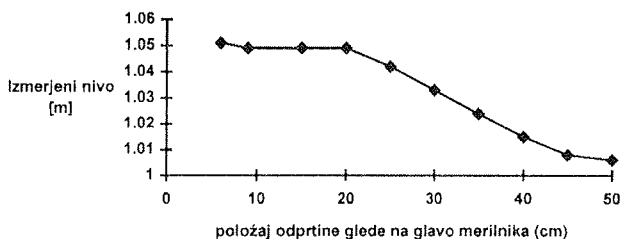
- odprtino z $d=10$ mm smo premikal vzdolž resonatorja in opazoval odziv
- na razdalji 4 cm od glave merilnika smo postopoma večali odprtino in opazoval odziv

Rezultati poizkusov so podani na sliki 19 in 20.

Dobljene karakteristike ponazarjajo odvisnost resonančne frekvence od položaja in velikosti odprtine. Vidimo lahko, da je postavitve odzračevalne odprtine zelo pomembna.

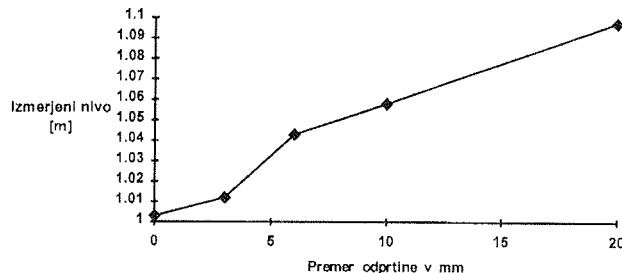
Razlago za takšno obnašanje resonatorja je možno najti v robnih pogojih. Dodatna odprtina na steni resonatorja podre tlačno ravnovesje v resonatorju. Posledica je zamik resonančne frekvence. Tako odprtina na sredini

Izmerjeni nivo v odvisnosti od položaja 10mm odprtine



Slika 19 Izmerjeni nivo v odvisnosti od položaja odprtine (dejanski nivo je stalen)

Izmerjeni nivo glede na velikost odprtine (dejanski nivo je konstanten in znaša 1.003 m) - Odprtina je locirana 60 mm pod glavo merilnika.



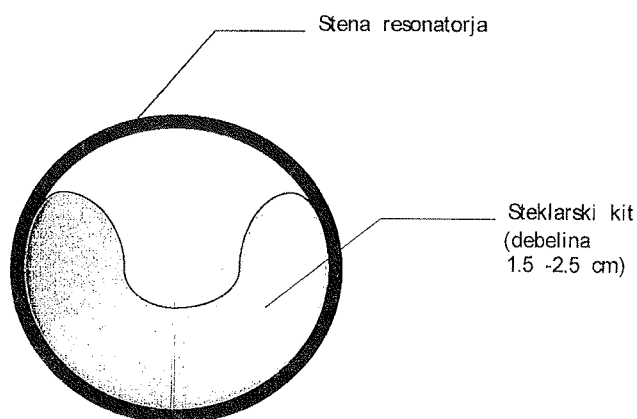
Slika 20 Izmerjeni nivo glede na velikost odprtine (dejanski nivo je stalen)

resonatorja ne vpliva bistveno na resonanco (tlačna amplituda je na sredini resonatorja nič), odprtina v glavi merilnika, pa najmočneje spremeni prvotno karakteristiko.

4.5.3 Vpliv oblog na merilno negotovost merilnika

Izvedel je bil niz poizkusov, s katerimi smo skušali ovrednotiti vpliv oblog na merilno negotovost merilnika.

Resonator ($l = 2$ m) smo potopili v vodo do polovice ($h \approx 1$ m). V resonančno cev smo na različnih višinah postavil oviro iz steklarskega kita, ki smo jo oblikovali kot kaže slika 21. Pri konstantnem nivoju smo nato spreminjali položaj ovire. V prvem nizu poizkusov je prečni presek ovire znašal več kakor 60% celotnega preseka resonatorja. Nato smo oviro zmanjšali na 25% celotnega preseka resonatorja in jo postavili na mesto, kjer je bil prej premik resonance najbolj izrazit.



Slika 21 Oblika in namestitve testne ovire (obloge)

V naslednjih tabelah je prikazan vpliv postavitve ovire na pogrešek merilnika (S - prečni presek ovire, S_0 - presek resonatorja):

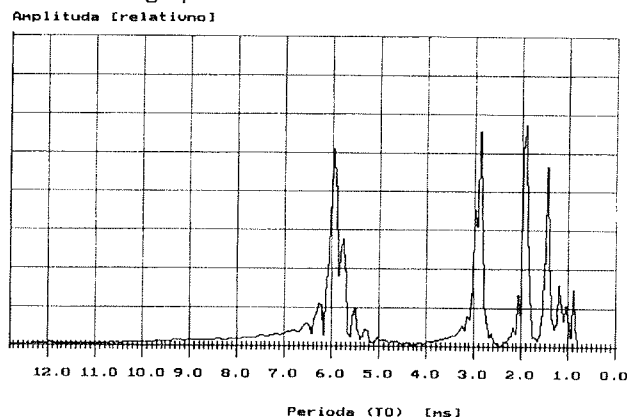
Oddaljenost od glave merilnika (ovira: $S=60\% S_0$)	absolutni pogrešek	relativni pogrešek
10 cm	2.1 mm	0.16%
25 cm	17.3 mm	1%
50 cm	41 mm	2.2%

Oddaljenost od glave merilnika (ovira: $S=25\% S_0$)	absolutni pogrešek	relativni pogrešek
50 cm	10.5 mm	0.58%

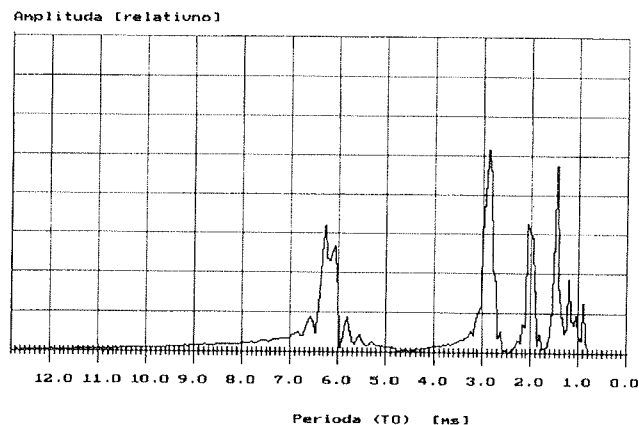
Na sliki 22 je tipična karakteristika za primer, ko v resonatorju ni ovire. Na slikah 23 in 24 sta tipični karakteristiki za primer, ko se ovira nahaja na sredini resonatorja (pogrešek je največji).

Na osnovi opravljenih poizkusov lahko sklepamo, da obloge na stenah resonatorja bistveno ne popačijo

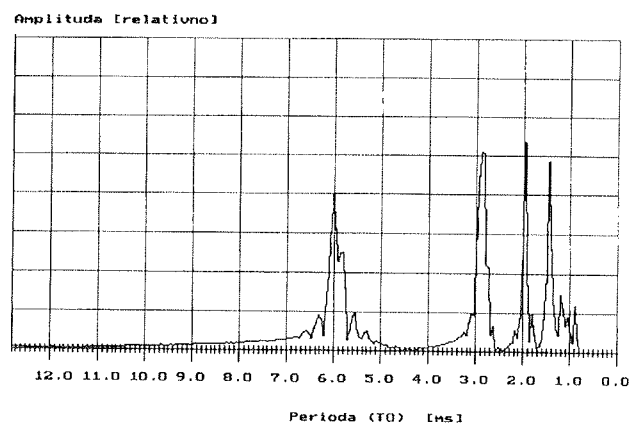
karakteristike. V primeru, da prečni presek oblog na stenah resonatorja ne preseže 30% nazivnega preseka resonatorja, se relativni pogrešek ne poveča za več kot 0.6%. Odstopanje je največje, kadar je ovira na sredi resonančnega prostora.



Slika 22 "Običajna karakteristika" brez ovire



Slika 23 Karakteristika merilnika z oviro. Ovira je postavljena na sredino resonančnega prostora (površina ovire 60% nazivnega preseka resonatorja)



Slika 24 Karakteristika merilnika z oviro. Ovira je postavljena na sredino resonančnega prostora (površina ovire = 25% nazivnega preseka resonatorja)

Opravljeni poizkusi kažejo tudi, da na karakteristiko ne vpliva površinska obdelava sten resonatorja (hrpavost).

Vzrok za takšno obnašanje je v uporabi relativno velikih valovnih dolžin, saj je valovna dolžina zvočnega valovanja ob nastopu resonance dvakrat večja kot sam resonator. Valovna dolžina zvočnega valovanja je bistveno večja od ovire (obloge) in zato ovira bistveno ne vpliva na karakteristiko. Drugi vzrok je razporeditev hitrostne in tlačne amplitude znotraj resonatorja ter robni pogoji zaprtega resonatorja.

5. Zaključek

Akustična resonanca valovoda omogoča realizacijo učinkovitega detektorja ter merilnika nivoja fluidov. Detektor omogoča tudi zaznavanje različnih vrst sipkih snovi. Eksperimentalno sta bila realizirana in ovrednotena tako detektor, kakor tudi zvezni merilnik nivoja fluidov. Za obe izvedbi je značilna velika robustnost, ki se odraža v neobčutljivosti na spremenljive delovne pogoje, obloge, usedline, parazitne odboje, pene, zožitve, površinsko stanje fluida, itd.

Izjemna robustnost izhaja iz relativno veliki valovnih dolžin akustičnih valov, saj je valovna dolžina ob nastopu resonance dvakrat daljša, kakor resonančni prostor. Tako so morebitne ovire vselej bistveno manjše od valovne dolžine akustičnih valov, kar preprečuje parazitne odboje.

Akustični resonančni detektor nivoja je bil dodatno izboljšan z uporabo nevronske mreže, kar omogoča izjemno učinkovito klasifikacijo frekvenčnih karakteristik ter možnost prilagajanja na specifične delovne pogoje. Detektor je možno uporabiti tudi za zaznavanje akustično redkejših medijev, kot je npr. stiroporni granulati. Ob pravilnem učnem postopku je detektor uspešno zaznaval nivo tudi v primerih, ko je prišlo do več kakor 95% zamašitve resonatorja.

Akustični resonančni merilnik nivoja se odlikuje z relativno visoko ločljivostjo tudi pod ekstremnimi pogoji obratovanja, ko so v resonatorju prisotne izdatne obloge, ovire in druge neidealnosti. Merilnik lahko prenese zamašitve, ki presegajo 60% nazivnega preseka resonatorja.

Osrednja pomanjkljivost akustičnega merilnika in detektorja nivoja je v dinamiki obeh sistemov, saj se trajanje skeniranja celotnega območja povečuje z dolžino resonatorja in lahko znaša nekaj 10 s za 2 m dolg resonator.

Zgradba merilnika in detektorja nivoja je izjemno preprosta, kar omogoča relativno preprosto realizacijo ob uporabi srednje zmogljivih mikrokrmilnikov.

Reference:

- /1/ H. Georgi, The physics of waves, Prentice Hall, New Jersey, 1993, ch. 7, pp. 155-171
- /2/ L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens and J.V. Sanders, Fundamentals of acoustics, third ed., John Wiley & Sons, 1982, ch. 9 and 10, pp. 200 - 242, 154-156
- /3/ R.E. Berg and D.G. Stork, The physics of sound, Prentice Hall, New Jersey, 1982, ch.3, pp. 63-88
- /4/ B. Blitzer and U. Lamotte, Ultrasonic sensors for an energy-saving system, Sensors and Actuators A, 32(1992), pp. 545-549
- /5/ S. Ros, J.M. Martin Abreu, T. Freire and L. Calderon, Digital techniques improve range measurement with ultrasound sensor, Sensors and Actuators A, 32(1992), pp. 550-555
- /6/ W. Burda and W.-J. Becker, Ultraschall-Resonanz-Messgerät fuer die Fluid-Prozessmesstechnik, Technisches Messen, 60(1993), pp. 375-382
- /7/ C. E. Stapleton and J.T. Numata, Ultrasonic liquid measuring device for use in storage tanks containing liquids having a non-uniform vapor density, US patent 5,085,077 (1992)
- /8/ E.M. Gregory and T.B. Williams, Sonic tank monitoring system, US patent 5,095,748 (1992)
- /9/ J.S. Haynes, Tank sonic gauging system and methods, US patent 4,805,453 (1989)
- /10/ K.S. Bates and D.B. Chang, Low frequency acoustic fuel sensor, US patent 5,251,482 (1993)
- /11/ D. Donlagić, M. Završnik, D. Donlagić, Low frequency acoustics resonance level detector with neural network classification, Sensors and Actuators A, 55 (1996), PP 99-106

*mag. Denis Donlagić, dipl.ing.el.
Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko,
Smetanova 17, 2000 Maribor
Tel.: 062 221 112
Fax: 062 225 013
El. pošta: ddonlagic@uni-mb.si*

*mag. Miha Završnik, dipl.ing.el.
Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko,
Smetanova 17, 2000 Maribor
Tel.: 062 221 112
Fax: 062 225 013
El. pošta: miha.zavrsnik@uni-mb.si*

*prof. dr. Dali Donlagić, dip.ing.el.
Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko,
Smetanova 17, 2000 Maribor
Tel.: 062 221 112
Fax: 062 225 013
El. pošta: donlagic@uni-mb.si*