

# Metode i principi mjerenja ultrazvukom

---

**Matić, Filip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:224768>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-01**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Stručni studij**

**METODE I PRINCIPI MJERENJA ULTRAZVUKOM**

**Završni rad**

**Filip Matić**

**Osijek, 2021.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju

Osijek, 19.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za završni ispit  
na preddiplomskom stručnom studiju**

Ime i prezime studenta:	Filip Matić
Studij, smjer:	Preddiplomski stručni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	A 4500, 23.07.2018.
OIB studenta:	59060684124
Mentor:	Dr.sc. Venco Čorluka
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Dr. sc. Krešimir Miklošević
Član Povjerenstva 1:	Dr.sc. Venco Čorluka
Član Povjerenstva 2:	Mr.sc. Dražen Dorić
Naslov završnog rada:	Metode i principi mjerenja ultrazvukom
Znanstvena grana rada:	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
Zadatak završnog rada	
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada):	Vrlo dobar (4)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	19.09.2021.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 12.10.2021.

Ime i prezime studenta:	Filip Matić
Studij:	Preddiplomski stručni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	A 4500, 23.07.2018.
Turnitin podudaranje [%]:	9%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Metode i principi mjerenja ultrazvukom**

izrađen pod vodstvom mentora Dr.sc. Venco Čorluka

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
<b>2. PRIMJENA ULTRAZVUKA</b> .....	<b>2</b>
2.1. Primjena ultrazvuka za mjerenje udaljenosti u automobilskoj industriji.....	3
2.2. Primjena ultrazvuka za mjerenje protoka .....	4
2.3. Primjena ultrazvuka u medicini .....	6
2.4. Primjena ultrazvuka u ispitivanju materijala .....	7
2.5. Primjena ultrazvuka za čišćenje .....	8
2.6. Primjena ultrazvuka za mjerenje razine .....	11
<b>3. ULTRAZVUČNI SENZORI</b> .....	<b>14</b>
3.1. Ultrazvučni senzor udaljenosti (HC-SR04) .....	15
3.2. Ultrazvučni senzor za mjerenje razine (GUT740) .....	16
<b>4. METODE I PRINCIPI MJERENJA</b> .....	<b>17</b>
4.1. Ultrazvučne tehnike .....	19
4.2. Ultrazvučni sustav mjerenja .....	22
<b>5. SIMULACIJSKI SUSTAV</b> .....	<b>24</b>
<b>5.1. Komponente</b> .....	<b>25</b>
5.1.1. Ulazni signal .....	25
5.1.2. Digitalno – analogni pretvarač.....	26
5.1.3. Bijeli šum i LP-filter .....	27
5.1.4. Refleksija .....	28
5.1.5. Prekidač odašiljača/prijamnika .....	29
5.1.6. Predpojačalo i LNA .....	29
5.1.7. Pojačalo s promjenjivim pojačanjem (VGA).....	29
5.1.8. Usklađeni filter .....	30
5.1.9. Izlazni signal.....	30
<b>5.2. VHDL</b> .....	<b>31</b>
5.2.1. Generiranje impulsa.....	31
5.2.2. Obrada signala .....	32

<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>33</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>34</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>35</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>35</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>36</b>

# 1. UVOD

Zamislite da ste dobili rođendanski poklon (zatvorenu kutiju) i vaš cilj je otkriti što možete očekivati kao poklon bez otvaranja. Podizanjem kutije možete osjetiti težinu sadržaja i procijeniti njegovu veličinu pomičući kutiju. Treskanje također omogućuje opažanje dodatne karakteristike na temelju vibracija i zvukova sadržaja koji udara u stranice kutije. Pitanja na koja biste možda mogli odgovoriti su: Je li sadržaj krutina ili tekućina? Je li tvrdo ili mekano? Je li teško? Je li sastavljen od mnogo dijelova? Na sva ova pitanja točne odgovore možemo dobiti pomoću ultrazvuka.

Za ultrazvuk možemo reći da su to vibracije frekvencija veće od gornje granice zvučnog raspona ljudskog sluha - to jest veće od oko 20 kiloherca. Pojam zvuk primjenjuje se na ultrazvučne valove vrlo velikih amplituda. Hiperzvuk, ponekad nazvan mikrozvuk, zvučni su valovi frekvencija većih od  $10^{13}$  herca. Ultrazvučni uređaji rade s frekvencijama od 20 kHz do nekoliko gigaherca.[1]

## 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak završnog rada je opisati gdje sve primjenjujemo ultrazvuk, pojedinačno opisati ultrazvučne senzore i na kojem principu rade, odnosno opisati metode i principe mjerenja ultrazvukom.

## 2. PRIMJENA ULTRAZVUKA

Ultrazvuk se koristi u mnogo različitih područja, a najveću primjenu imaju kao parking senzori. Ultrazvučni uređaji koriste se za mjerenje udaljenosti i otkrivanje predmeta. Ultrazvučna slika ili sonografija često se koriste u medicini. U ispitivanju struktura i proizvoda, ultrazvuk se koristi za otkrivanje nedostataka koji nisu vidljivi. U industriji se ultrazvuk koristi za ubrzavanje kemijskih procesa i miješanje te za čišćenje. Životinje kao što su šišmiši i koriste se ultrazvukom za lociranje prepreka i plijena.

Ultrazvučna kontrola ili ultrazvučno testiranje materijala jedna je od najvažnijih tehničkih primjena ultrazvuka. Rabi se za otkrivanje mikro pukotina u čvrstim objektima (kao što su glomazni rotirajući elementi, stijenke velikih spremnika pod tlakom), za provjeru kvalitete (prije ugradnje objekta) ili utvrđivanje stanja (dotrajalosti).

U praktičnoj medicini ultrazvuk primjenjuje se u liječenju raznih reumatskih bolesti (ultrasonoterapija), u dijagnostici, posebno u opstetriciji (mnogostruka trudnoća, razvoj zametka, promjene placente i drugo) i u kardiologiji.

Ultrazvuk se također koristi i pri čišćenju materijala, gdje se primjenjuje pojava kavitacije u tekućinama, kao što je voda. Ultrazvučni uređaji za čišćenje prisutni su u raznim dimenzijama, od malih ladica u laboratorijima i zubarskim ordinacijama (za čišćenje zubala nakon brušenja i poliranja), do većih postrojenja u industriji. Kavitacija izazvanog ultrazvuka omogućava i stvaranje emulzije pokreta ili više tekućina koje se inače ne miješaju.

Ultrazvuk se koristi kod izrade sonara iz razloga što ultrazvuk slabo gubi na jačini (intenzitetu) kod prolaska kroz vodu za razliku od zvučnih valova manjih frekvencija. Primjenom ultrazvuka može se lokalno povisiti temperatura, a primjenjuje se na više područja, kao što je u medicinskoj terapiji ili kod zavarivanja plastomera u industrijskoj primjeni.



## 2.1. Primjena ultrazvuka za mjerenje udaljenosti u automobilske industriji

Razvoj "pametnih automobila" zahtijeva nove senzore koji su u stanju izmjeriti udaljenosti u rasponu od nekoliko centimetara do nekoliko metara. Parkirna pomagala, kao i inteligentni ovjesi i niveliranje prednjih svjetala, neki su primjeri značajki koje zahtijevaju mjerenje udaljenosti beskontaktnim sensorima. Takvi senzori su razumno jeftini i rade u rasponu do nekoliko metara, iako se javljaju problemi u pogledu njihove točnosti i njihovo ponašanje u bučnim uvjetima na otvorenom. Performanse senzora su bolje od mnogih komercijalnih uređaja, zahvaljujući mogućnostima senzora koji ima procjenu uvjeta okoliša i zatim samoprilagođavanje tim uvjetima.

Senzor je dizajniran kako bi udovoljio tipičnim zahtjevima u automobilske industriji: izmjerena udaljenost u rasponu od 0,1-0,3 m i standardna nesigurnost od 1 mm u rasponu temperatura od 0 °C do 40 °C.

Mjerenja udaljenosti su moguće i do 1 m, a u širem rasponu temperature rade sa većom nesigurnosti.

Senzor koristi komercijalne piezoelektrične rezonantne pretvarače od 40 kHz za generiranje ultrazvučnog impulsa. Takvi pretvarači, koji se obično koriste u protuprovalnim sustavima, prisutni su u vodonepropusnim spremnicima po cijeni od oko jedan dolar.

Razdoblje generiranog signala je 25  $\mu$ s, što odgovara valnoj duljini od oko 9 mm pri 20 °C. Stoga je potrebno otkrivanje podvalne duljine kako bi se dobila potrebna nesigurnost.

Postignuta je potrebna standardna nesigurnost od 2,5  $\mu$ s s beskorisnim aranžmanom, koji se u osnovi sastoji od proizvoljnog generatora signala i detektora prelaska nule.

Generator signala sastoji se od 16 kbit-nog EPROM-a, koji sadrži uzorke koji odgovaraju signalima koji se generiraju, 16-bitni brojač, koji se koristi za skeniranje EPROM-a i 8-bitni digitalno-analogni pretvarač (DAC) koji napaja prijenosni piezoelektrični pretvarač.

Detektor za prelazak nule sastoji se od dva praga. Prvi detektor, čiji je prag dio vrha primljenog signala, omogućuje drugi detektor koji uspoređuje primljeni signal s obzirom na referentno tlo. Ovo dopušta detekciju u signalnom području na maksimalnom nagibu koji treba postići, čime se minimaliziraju učinci buke. [2]

## 2.2. Primjena ultrazvuka za mjerenje protoka

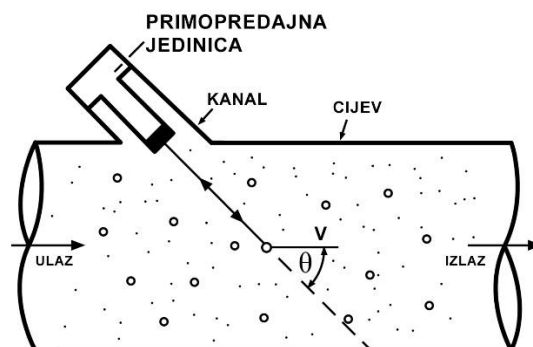
Ultrazvučni mjerači mjere protok na osnovi međudjelovanja ultrazvučnog vala koji prolazi kroz fluid i toka fluida. Kod ove vrste mjerača na rezultate mjerenja ne utječe temperatura, gustoća, tlak ili provodnost fluida. Koriste se za mjerenje protoka čistih tekućina, ali se tolerira i prisustvo čvrstih čestica ili male količine plina.

Jedne od najpoznatijih metoda ultrazvučnog mjerenja protoka koje se upotrebljavaju su najčešće tri, i to metode koji su zasnovane na mjerenju: vremena prolaska vala kroz fluid, promjene faze vala, promjene frekvencije vala

Jedan od najbitnijih senzora za mjerenje protoka je ultrazvučni senzor sa Doplerovim efektom koji se manifestira kao promjena frekvencije reflektiranog vala pri kretanju prijemnika ili predajnika.

Uvjeti titranja ultrazvučnih valova u različitim okruženjima ovise od brzine kretanja djelića tvari u tim okruženjima. Također, mnogi valni koncepti kao što su prelamanje, odbijanje, interferencija i sl. odvijaju se različito nepokretnim područjima nego u pokretnim. U načelu je moguće na različite načine upotrijebiti ultrazvučne valove da bi se odredila brzina djelića fluida, pa i sam protok. U praksi se često primjenjuju dvije metode. To su Doplerova metoda i metoda vremena prolaska.

Doplerov protokometar, može se upotrijebiti u fizici dobro poznati Doplerov efekt kako bi se došlo do informacije o brzini kretanja (strujanja) djelića fluida, a zatim i o protoku u cjelini. Ultrazvučni val učestalosti  $f_1$  koji emitira ultrazvučni generator (najčešće radi na principu piezoelektričnog efekta, sa kristalom kvarca kao aktivnim elementom), usmjerava se pod nekim kutem na cijev kroz koju protječe fluid. Može se izraditi poseban kanal za uvođenje vala u sredinu koju ispituujemo, kao što je naznačeno na slici 2.1.



Sl. 2.1. Doplerov protokometar

Dio zvučne energije vala odbija se od mjehurića fluida, bilo kakvih drugih nehomogenosti pokretne sredine ili eventualnih čvrstih djelića kakvih ima u zagađenoj tekućini.

Unatrag odbijeni val prihvaća se prijemnom jedinicom koja može biti u istom kućištu sa emiterom. Iz razloga što se djelići koji odbijaju ultrazvučni val kreću nekom brzinom  $v$ , učestalost vala koji stiže do prijemnika, po Doplerovom principu, nije jednaka učestalosti vala koji se emitira kroz fluid. Novu učestalost označimo sa  $f_2$ . I ona iznosi:

$$f_2 = f_1(1 + 2v \cos \theta / c) \quad (2.1)$$

Brzinu fluida dobivamo po formuli. Ovdje je  $c$  brzina zvuka u fluidu.:

$$v = c \frac{(f_2 - f_1)}{2f_1 \cos \theta} \quad (2.2.)$$

Pošto se u datom mjerenju ugao, učestalost  $f_1$  i brzina  $c$  poznate veličine,

$$c / (2f_1 \cos \theta) \quad (2.3.)$$

možemo cijeli izraz gledati kao stalan (konstantan). Sa  $\Delta f$  označimo razliku učestalosti  $f_2 - f_1$ , možemo ukratko zapisati

$$v = \text{const.} \Delta f / f \quad (2.4.)$$

Pošto je protok u cijevi poprečnog presjeka  $S$  jednak  $Q = Sv$ , možemo vidjeti da ova metoda mjerenja omogućava pronaći protok ukoliko znamo koliki je Doplerov pomak učestalosti  $\Delta f$ . Glavne prednosti ove metode su: protok je linearna funkcija izlazne veličine, u mjerilu nema pokretnih dijelova, mjerenje ne ometa protjecanje fluida. Ukoliko se mjerenje ponavlja, reproducibilnost (ponovljivost) rezultata je odlična (u granicama  $\pm 0,01\%$ ).

Ali, mjerne rezultate ne možemo smatrati pouzdanim kad postoji mogućnost da se mijenja veličina i koncentracija suspendiranih čestica koje reflektiraju ultrazvučni val. Na točnost mjerenja također može utjecati i profil brzina kroz cijev (istina, o takvoj se primjedbi može, manje ili više, govoriti i kad su u pitanju i neki drugi tipovi protokometra).

Kod mjerenja brzine fluida kao objekt javljaju se čestice nečistoće ili mjehurići zraka koji su aktivni u fluidu. Na istoj strani cjevovoda obično se nalaze prijemnik i predajnik. Tekućina čiji protok mjerimo mora biti bez čvrstih tijela i mjehurića plinova kako bi se umanjilo rasipanje signala i apsorpcija. Niska cijena prednost je ultrazvučnih senzora.

### **2.3. Primjena ultrazvuka u medicini**

Iako se ultrazvuk natječe s drugim oblicima medicinske slike, poput rendgenskih tehnika i magnetske rezonancije, on ima određene poželjne značajke - na primjer, Dopplerovu studiju pokreta - koje ostale tehnike ne mogu pružiti. Osim toga, među raznim modernim tehnikama za snimanje unutarnjih organa ultrazvučni su uređaji daleko najjeftiniji. Ultrazvuk se također koristi za liječenje bolova u zglobovima i za liječenje određenih vrsta tumora kod kojih je poželjno lokalno zagrijavanje. Vrlo učinkovita uporaba ultrazvuka koja proizlazi iz njegove prirode kao mehaničke vibracije je uklanjanje kamenaca iz bubrega i mjehura.

Mnogo medicinsko-dijagnostičkih slika provodi se s rendgenskim zrakama. Zbog visokih fotonskih energija X-zraka, ova vrsta zračenja je vrlo ionizirajuća - to jest, X-zrake su lako sposobne uništiti molekularne veze u tjelesnom tkivu kroz koje prolaze. To uništavanje može dovesti do promjena u funkciji zahvaćenog tkiva ili, u ekstremnim slučajevima, do njegovog uništenja. [3]

Jedna od važnih prednosti ultrazvuka je ta što je mehanička vibracija i stoga je neionizirajući oblik energije. Stoga je korisna u mnogim osjetljivim okolnostima u kojima bi X-zrake mogle štetiti. Također, rezolucija X-zraka je ograničena zbog njihove velike penetracijske sposobnosti i malih razlika između mekih tkiva. Ultrazvuk, s druge strane, daje dobar kontrast između različitih vrsta mekog tkiva.

Budući da je ultrazvuk mehanička vibracija i može biti dobro fokusiran na visokim frekvencijama, može se koristiti za stvaranje unutarnjeg zagrijavanja lokaliziranog tkiva bez štetnih učinaka na obližnje tkivo. Ova se tehnika može primijeniti za ublažavanje bolova u zglobovima, posebno u leđima i ramenima. Također, sada se provode istraživanja u liječenju određenih vrsta karcinoma lokalnim zagrijavanjem, jer fokusiranje intenzivnih ultrazvučnih valova može zagrijati područje tumora, a da pritom ne utječe značajno na okolno tkivo.

Operacija bez kolosijeka - odnosno operacija koja ne zahtijeva rez ili trag od kože do zahvaćenog područja - razvijena je za nekoliko stanja. Fokusirani ultrazvuk koristi se za liječenje Parkinsonove bolesti stvaranjem lezija mozga u područjima koja su nedostupna tradicionalnoj kirurgiji.

Uobičajena primjena ove tehnike je uništavanje bubrežnih kamenaca udarnim valovima nastalim rafalnim fokusiranim ultrazvukom. U nekim slučajevima uređaj nazvan ultrazvučni litotripter fokusira ultrazvuk uz pomoć rendgenskog navođenja, ali češća tehnika za uništavanje bubrežnih kamenaca, poznata kao endoskopska ultrazvučna dezintegracija, koristi malu metalnu šipku umetnutu kroz kožu za isporuku ultrazvuk u frekvencijskom području od 22 do 30 kiloherca.

## **2.4. Primjena ultrazvuka u ispitivanju materijala**

Ultrazvučno ispitivanje materijala je nerazorna metoda ispitivanja koja koristi zvučne valove za otkrivanje pukotina i nedostataka u dijelovima i materijalima. Također se može koristiti za određivanje debljine materijala, poput mjerenja debljine stijenke cijevi.

Budući da ova metoda ima veći potencijal snage od ostalih nerazornih vrsta ispitivanja, ultrazvučno ispitivanje može proizvesti slike koje su jasnije definirane od ostalih metoda i ukazuju na karakteristike dublje od razine površine.

Ovisno o zahtjevima ispitivanja, dijelovi se ocjenjuju pomoću ultrazvučnog ispitivanja kontaktom ili uronjenjem. Ultrazvučna inspekcija oslanja se na elektroničke pretvarače koji prenose visokofrekventne zvučne valove na materijal. Ovi zvučni valovi odbijaju slike, koje otkrivaju ključne karakteristike svojstava materijala. Slike nastale ultrazvučnim ispitivanjem mogu ukazivati na pukotine, zavarene utore i lomove, kao i na debljinu materijala i pomične dijelove.

Potopno ultrazvučno ispitivanje laboratorijski je pregled, korisno za otkrivanje manjih nedostataka, od pucanja do poroznosti. Potapanje komponente ili materijala omogućuje bolji zvuk od pretvarača i pruža točno izvještavanje o nepravilnostima i nedostacima na površini. Potopno ultrazvučno ispitivanje podržava širok spektar zahtjeva, jer se odnosi na bilo koju debljinu materijala, kao i na bilo koji materijal. [4]

## 2.5. Primjena ultrazvuka za čišćenje

Ultrazvučno čišćenje je postupak koji koristi ultrazvuk za miješanje tekućine. Ultrazvuk se može koristiti samo s vodom, ali upotreba otapala prikladnog za objekt koji se čisti i vrsta prisutne prljavštine pojačava učinak. Čišćenje obično traje između tri i šest minuta, ali može trajati i više od 20 minuta, ovisno o tome koji se predmet mora očistiti.

Ultrazvučna sredstva za čišćenje koriste se za čišćenje različitih vrsta predmeta, uključujući nakit, znanstvene uzorke, leće i druge optičke dijelove, satove, stomatološke i kirurške instrumente, alate, novčiće, nalivpera, palice za golf, kolute za ribolov, prozorske rolete, dijelove vatrenog oružja, glazbeni instrumenti, gramofonske ploče, dijelovi industrijskih strojeva i elektronička oprema. Koriste se u mnogim draguljarskim radionicama, u urarskim radionicama, u radionicama za elektronički popravak i znanstvenim laboratorijima.

Ultrazvučno čišćenje koristi kavitacijske mjehuriće inducirane visokofrekventnim tlačnim (zvučnim) valovima za miješanje tekućine. Miješanje stvara velike sile na onečišćenja koja prijanjaju na podloge poput metala, plastike, stakla, gume i keramike. Ova metoda također prodire u slijepu rupe, pukotine i udubljenja. Namjera je temeljito ukloniti sve tragove onečišćenja koji su čvrsto prijanjali ili koji se nalaze na čvrstim površinama. Može se koristiti voda ili otapala, ovisno o vrsti onečišćenja i o predmetu koji čistimo. Kontaminanti mogu obuhvaćati prašinu, prljavštinu, ulje, pigmente, hrđu, masnoću, alge, gljivice, bakterije, vapnenački kamen, spojeve za poliranje, otiske prstiju, vosak od čađe i plijesni, biološke stanice poput krvi itd. Ultrazvučno čišćenje se može koristiti za širok raspon oblika, veličina i materijala predmeta i možda neće zahtijevati rastavljanje dijelova prije čišćenja. [5]

Predmeti se tijekom postupka čišćenja ne smiju ostaviti na dnu uređaja, jer će to spriječiti kavitaciju na dijelu predmeta koji nije u kontaktu s otapalom.

U ultrazvučnom čistaču predmet koji se čisti stavlja se u komoru koja sadrži odgovarajuću otopinu (u vodenom ili organskom otapalu, ovisno o primjeni). U vodena sredstva za čišćenje često se dodaju površinski aktivne tvari (npr. Deterdžent za pranje rublja) kako bi se omogućilo otapanje nepolarnih spojeva kao što su ulja i masti. Pretvarač za stvaranje ultrazvuka ugrađen u komoru ili spušten u tekućinu stvara ultrazvučne valove u tekućini mijenjajući veličinu zajedno s električnim signalom koji oscilira na ultrazvučnoj frekvenciji. To stvara kompresijske valove u tekućini spremnika koji 'rastrgaju' tekućinu, ostavljajući iza sebe mnogo milijuna mikroskopskih 'praznina'/'djelomičnih vakuumskih mjehurića' (kavitacija). Ti se mjehurići urušavaju s ogromnom energijom; postižu se temperature i tlakovi od oko 5000 K i 135 MPa; međutim, oni su toliko mali

da čine samo čišćenje i uklanjanje površinske nečistoće i onečišćenja. Što je frekvencija veća, to su manji čvorovi između točaka kavitacije, što omogućuje čišćenje složenijih detalja.

Pretvarači su obično piezoelektrični (npr. Izrađeni od olovnog cirkonat-titanata (PZT), barijevog titanata itd.), Ali ponekad su magnetostruktivni. Često jake kemikalije koje se koriste kao sredstva za čišćenje u mnogim industrijama nisu potrebne ili se koriste u mnogo nižim koncentracijama, uz ultrazvučno miješanje. Ultrazvuk se koristi za industrijsko čišćenje. [6]

Ultrazvučna aktivnost (kavitacija) pomaže rješavanju problema; obična voda obično ne bi bila učinkovita. Otopina za čišćenje sadrži sastojke stvorene da ultrazvučno čišćenje učine učinkovitijim. Na primjer, smanjenje površinskog napona povećava razinu kavitacije, pa otopina sadrži dobro sredstvo za vlaženje (površinski aktivno sredstvo). Vodene otopine za čišćenje sadrže deterdžente, sredstva za vlaženje i druge komponente i imaju velik utjecaj na postupak čišćenja. Ispravan sastav otopine ovisi o očišćenom predmetu. Otopine se uglavnom koriste tople, na oko 50–65 °C, međutim, u medicinskoj primjeni općenito je prihvaćeno da čišćenje treba biti na temperaturama nižim od 45 °C kako bi se spriječila koagulacija proteina.

Otopine na bazi vode imaju veća ograničenja u mogućnosti uklanjanja onečišćenja samo kemijskim djelovanjem od otopina otapala; npr. za osjetljive dijelove prekrivene gustom mašću. Napor potreban za stvaranje učinkovitog sustava za čišćenje vode za određenu svrhu mnogo je veći nego za sustav otapala.

Neki strojevi (koji nisu pretjerano veliki) integrirani su sa strojevima za odmašćivanje parom pomoću tekućina za čišćenje od ugljikovodika: Kaskadno se koriste tri spremnika. Donji spremnik koji sadrži prljavu tekućinu zagrijava se uzrokujući isparavanje tekućine. Na vrhu stroja nalazi se hladnjak. Tekućina se kondenzira na zavojnici i pada u gornji spremnik. Gornji spremnik na kraju prelijeva i čista tekućina ulazi u radni spremnik u kojem se odvija čišćenje. Nabavna cijena viša je od jednostavnijih strojeva, ali takvi su strojevi dugoročno ekonomični. Ista se tekućina može ponovno koristiti više puta, smanjujući gubitak i zagađenje.

Većina tvrdih, ne upijajućih materijala (metali, plastika itd.) Koje kemijska tekućina ne napada kemijski su pogodni za ultrazvučno čišćenje. Idealni materijali za ultrazvučno čišćenje uključuju male elektroničke dijelove, kabele, šipke, žice i detaljne predmete, kao i predmete izrađene od stakla, plastike, aluminijske ili keramike.

Ultrazvučno čišćenje ne sterilizira predmete koji se čiste, jer će na njima nakon čišćenja ostati spore i virusi. U medicinskim primjenama sterilizacija obično slijedi ultrazvučno čišćenje kao zaseban korak.

Industrijska ultrazvučna sredstva za čišćenje koriste se u automobilskoj, sportskoj, tiskarskoj, pomorskoj, medicinskoj, farmaceutskoj, galvanizacijskoj industriji, komponentama diskovnih pogona, inženjerstvu i industriji oružja.

Ultrazvučno čišćenje koristi se za uklanjanje onečišćenja s industrijske procesne opreme poput cijevi i izmjenjivača topline.

Ultrazvučno čišćenje se široko koristi za uklanjanje ostataka fluksa s zalemljenih pločica. Međutim, neke elektroničke komponente, posebno MEMS uređaji poput žiroskopa, akcelerometara i mikrofona, mogu se oštetiti ili uništiti vibracijama visokog intenziteta kojima su izloženi tijekom čišćenja. Piezoelektrični zujači mogu raditi obrnuto i stvarati napon, što može predstavljati opasnost za njihove pogonske krugove.

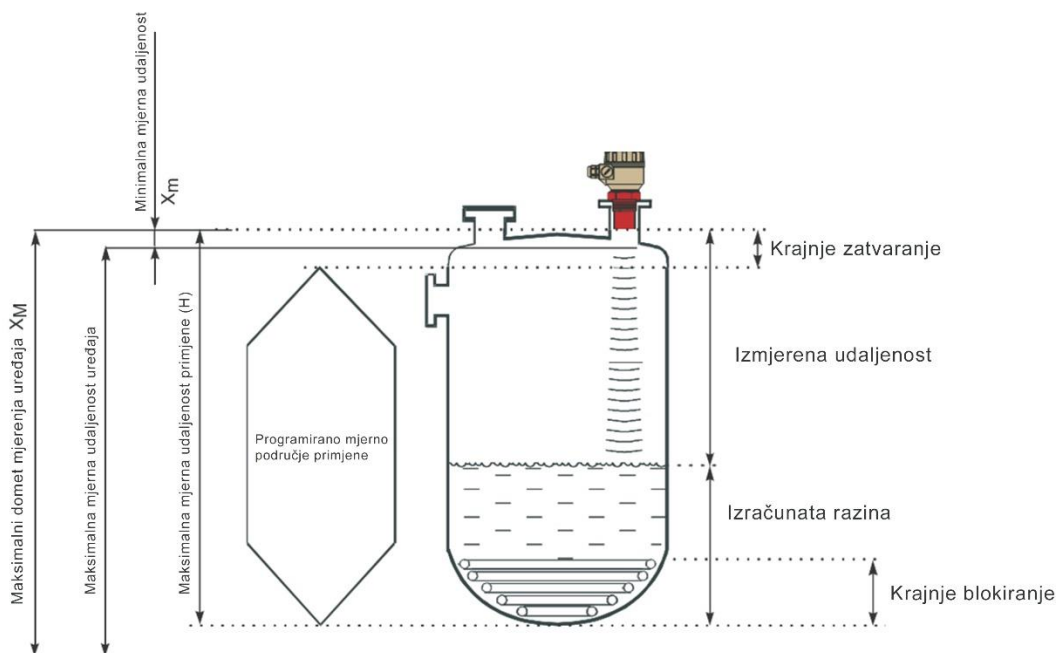
Preporučuje se izbjegavati upotrebu zapaljivih otopina za čišćenje jer ultrazvučna sredstva za čišćenje povećavaju temperaturu čak i ako nisu opremljena grijačem. Kad jedinica radi, umetanje ruke u otopinu može uzrokovati opekline zbog temperature; mogu se javiti i nelagoda i iritacija kože.



## 2.6. Primjena ultrazvuka za mjerenje razine

Instrumenti za ultrazvučnu razinu rade na osnovnom principu korištenja zvučnih valova za određivanje tekućine /krutina. Uz standardno mjerenje razine ili glasnoće, mogu nadzirati otvoreni kanal protoka, utvrditi stvarni volumetrijski protok u rastućim stanicama, izmjeriti diferencijalnu razinu i kontrolirati pumpe.

Ultrazvučni odašiljači sastoje se od dva elementa; 1) pretvarač visoke učinkovitosti i, 2) pridruženi elektronički primopredajnik. Zajedno određuju vrijeme odašiljanja ultrazvuka i njegov reflektirani odjek kako bi se postigao potpuni povratni put između beskontaktnog pretvarača i osjetio materijalnu razinu. [7]



Sl. 2.2. Osnovni koncept i elementi ultrazvučnog mjerenja razine [7]

Kao što je prikazano na slici 2.2., pretvarač montiran na vrh spremnika usmjerava valove prema dolje u naletima na površinu materijala čija se razina mjeri. Piezoelektrični kristal unutar pretvarača pretvara električne impulse u zvučnu energiju koja putuje u obliku vala na utvrđenoj frekvenciji i konstantnom brzinom u danom mediju. Odjeci tih valova vraćaju se na pretvarač, koji vrši proračune za pretvaranje udaljenosti putovanja valova u mjeru razine u spremniku. Vremenski razmak između ispaljenja rafala i primanja povratne jeke izravno je proporcionalno udaljenosti između pretvarača i materijala u posudi. Medij je normalno zrak iznad površine materijala, ali to može biti pokrivač nekih drugih plinova ili para. Instrument mjeri vrijeme za probijanje rafala na zrcalnu površinu i povratak. Ovaj put bit će proporcionalan udaljenosti od pretvarača do površine

i može se koristiti za određivanje razina tekućine u spremniku. Ovo osnovno načelo leži u središtu ultrazvučne tehnologije mjerenja, a ilustriran je jednadžbom:  $Udaljenost = (brzina\ zvuka \times vrijeme) / 2$ . Ovi ne kontaktni uređaji su dostupni u modelima koji mogu pretvoriti očitavanja u izlaze 4–20 mA u DCS-ove, PLC-ove ili druge daljinske upravljačke kontrole.

Raspon frekvencija za ultrazvučne metode je u rasponu od 15 ... 200 kHz. Donja frekvencija instrumenata koji se koriste za teže primjene; kao što su veće udaljenosti i normalna razina mjerenja i ona s većom frekvencijom koriste se za kraća mjerenja razine tekućine.

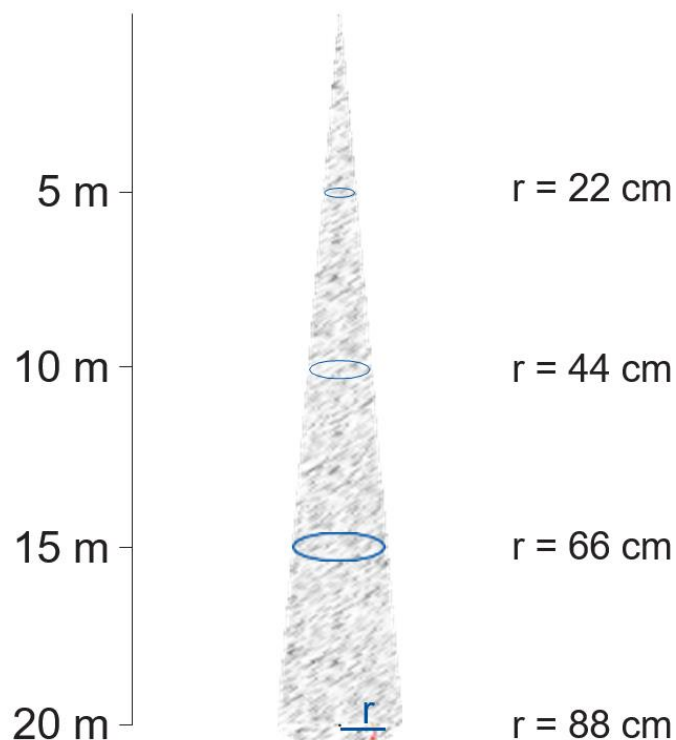
Za praktičnu primjenu ultrazvučne metode mjerenja moraju se uzeti u obzir brojni čimbenici. A nekoliko ključnih točaka su:

- Brzina zvuka kroz medij (obično zrak) varira ovisno o temperaturi medija. Pretvarač može sadržavati temperaturni senzor za kompenzaciju promjena radne temperature koja bi promijenila brzinu zvuka, a time i izračun udaljenosti koji određuje točnu razinu mjerenja. Osigurana je kompenzacija temperature radi ujednačenih temperaturnih varijacija od zvučnog medija. Osjetnik temperature smješten je unutar pretvarača i signal se šalje na primopredajnik preko ožičenja pretvarača. Po želji se može koristiti zamjenski temperaturni senzor, osigurati ulaz temperature, umjesto pomoću integriranog osjetnika temperature. Ako temperatura zvučnog medij treba ostati konstantna, umjesto da se koristi ili integrirana temperaturna kompenzacija ili daljinski senzor, tijekom konfiguracije primopredajnika može se unijeti željena temperatura.
- Prisutnost velike pjene/prašine na površini materijala može djelovati kao apsorber zvuka. U nekim slučajevima, apsorpcija može biti dovoljna da spriječi upotrebu ultrazvučne tehnike. Poboljšati performanse kod kojih pjena/prašina ili drugi čimbenici koji utječu na put valova prema i od površine tekućine, neki modeli mogu imati vodilicu snopa pričvršćenu na pretvarač.
- Ekstremne turbulencije tekućine mogu uzrokovati fluktuirajuća očitavanja. Upotreba prilagodbe prigušenja u instrumentu ili kašnjenje odgovora mogu pomoći u prevladavanju ovog problema. Primopredajnik omogućuje prigušivanje kontroliranja maksimalne brzine promjene prikazane razine materijala i fluktuaciju mA izlaznog signala.

Prigušivanje usporava brzinu odziva zaslona, posebno kada su tekuće površine uznemirene ili materijal pada u put zvuka tijekom punjenja.

Ultrazvučni odašiljač razine sposoban je nadgledati gotovo sva nekontraktivna ultrazvučna mjerenja razine kratkog do srednjeg dometa većine slobodno tekućih krutina (granula i praha) i

tekućina. U aplikacijama koje karakterizira prašina, instrument pokazuje značajnu stabilnost prilagođavanjem na težina procesa.



Sl. 2.3. Radijusi koji odgovaraju do 5° kuta snopa [7]

Definirana prednost nekih modela ultrazvučne razine odašiljača je njihov uski zbroj kuta snopa od 5 ° ili 6 ° na -3 dB. Kao rezultat uskog kuta snopa, emitirani ultrazvučni signal osigurava izvanredno fokusiranje i dobro prodiranje kroz prašinu i nadalje, pruža pouzdana mjerenja u uskim silosima sa neravne bočne stijenke i izbočene predmete (slika 2.3.).

Ti su pretvarači praktički imuni na nakupine jer se kondenzacija raspada u kontaktu s njima. Modeli niže frekvencije djeluju u izuzetno neprijateljskom okruženju kao što su cement, silosi za šećer, drobilice za kamen, kante za šljunak itd.

### 3. ULTRAZVUČNI SENZORI

Ultrazvučni senzor je instrument koji mjeri udaljenost do objekta pomoću ultrazvučnih zvučnih valova. Ultrazvučni senzor koristi pretvarač za slanje i primanje ultrazvučnih impulsa koji vraćaju informacije o blizini objekta. Ultrazvučni senzori koriste se širom svijeta, u zatvorenom i na otvorenom u najtežim uvjetima, za razne primjene. Ultrazvučni senzori, izrađeni od piezoelektričnih kristala, koriste visokofrekventne zvučne valove da rezoniraju željenu frekvenciju i pretvore električnu energiju u akustičnu, i obrnuto. Zvuk ne putuje u vakuumu. Ne rade na vrlo visokim temperaturama ili tlakovima. Ne lociraju predmete koji se kreću u trodimenzionalnom prostoru. Ne mjere dulje od oko 21 metar. [8]

Sve zajedno postoje četiri vrste ultrazvučnih senzora, razvrstane po frekvenciji i obliku: tip otpornog na kapanje, visokofrekventni tip i tip otvorene strukture (tip olova i SMD).

### 3.1. Ultrazvučni senzor udaljenosti (HC-SR04)

Ultrazvučni senzor udaljenosti HC-SR04 senzor je koji se koristi za otkrivanje udaljenosti od objekta pomoću sonara. Idealno je za bilo koji robotički projekt koji zahtijeva izbjegavanje predmeta, otkrivanjem koliko su blizu možete se udaljiti od njih!

HC-SR04 koristi beskontaktni ultrazvučni sonar za mjerenje udaljenosti do objekta, a sastoji se od dva ultrazvučna odašiljača (u osnovi zvučnika), prijamnika i upravljačkog kruga. Odašiljači emitiraju visokofrekventni ultrazvučni zvuk koji se odbija od svih obližnjih čvrstih predmeta, a prijemnik osluškuje bilo kakav povratni odjek. Taj odjek zatim obrađuje upravljački krug kako bi izračunao vremensku razliku između signala koji se prenosi i prima. Ovo se vrijeme može naknadno upotrijebiti, zajedno s pametnom matematikom, za izračunavanje udaljenosti između senzora i reflektirajućeg objekta!

HC-SR04 je sjajan, jer je jeftin, može se napajati preko 5V izlaza i relativno je precizan!

HC-SR04 senzor najbolje radi između 2 cm - 400 cm unutar konusa od 30 stupnjeva i precizan je do najbližih 0,3 cm. [9]



Sl. 3.1. Ultrazvučni senzor udaljenosti (HC-SR04) [9]

### 3.2. Ultrazvučni senzor za mjerenje razine (GUT740)

GUT740 ultrazvučni prijenosnik razine kombinacija je ultrazvučnog senzora, senzora temperature, ultrazvučnog servo i odašiljača. Koristi SMD komponente i ASC čip, što čini sklop kompaktnim i sažetim. Okrugla ploča je plosnata i ima visoku stabilnost i dugotrajnu pouzdanost. U međuvremenu, ljuska koristi NLEPF sintetičke materijale s čvrstom teksturom i dobrom akustičkom svojstvom. Pretvarač se može koristiti u većini radnih uvjeta. Dok se pričvršćuje na tekući zid ili kućište instrumenta, potrebni su alati kao što su vijci, ali rupica od 68 mm. Sadrži značajke stabilizacije, jednostavne instalacije i rastavljanja. [10]

Radi na udaljenostima do 15 metara. Može se napajati preko istosmjernog 24V izlaza. Najbolju točnost ima na temperaturama do 50 °C. A točnost mu je u granicama od  $\pm 0,25\%$ .



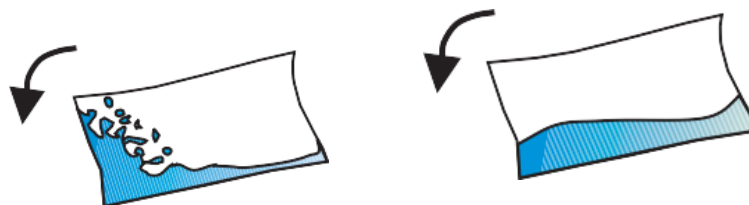
Sl. 3.2. Ultrazvučni prijenosnik razine (GUT740) [10]

## 4. METODE I PRINCIPI MJERENJA

Prirodno ponašanje pri istraživanju nove okoline ili ispitivanju nepoznatog predmeta, je djelovanje na njega i korištenje naših osjetila za dobivanje informacija ili odgovora putem osjetila. Izbor očito ovisi o našem cilju, ali također ovisi i o fizičkim i ostvarivim ograničenjima vezanim uz objekt ili medij koji ispituje. Općenito, ne možemo pronaći određeni senzor koji može izravno mjeriti željenu količinu definiranu našim ciljem, a mi moramo pronaći jedan (ili nekoliko) koji mogu izmjeriti nešto što o tome ovisi ili je na neki način povezano s tom traženom veličinom.

Za projektiranje mjernog sustava oko objekta ili medija i povezivanje modela ili objašnjenja na prikupljene podatke često se govori kao problem napretka. Pronalazak veze između modela i željene veličine naziva se inverznim problemom. [11]

Povezivanje naprednog problema i inverznog s gornjim primjerom; pretpostavimo na primjer da je spremnik napola pun tekućine, a cilj je procijeniti je li sadržaj slabo tečan ili sličan sirupu (procjenjuje viskoznost). Pokretač bi trebao rukom držati spremnik i lagano ga nagnje naprijed-natrag. Senzor bi mogao biti naša ruka jer osjeća masno istiskivanje sadržaja i slijedeće sile koje nastaju kad tekućina pogodi granice spremnika, prikazano na slici 4.1. Da biste saznali nešto o sadržaju, morate povezati nagibni pokret (uzbuđenje) na osjetni pomak mase (odgovor). To je ono što se podrazumijeva povezivanjem modela ili objašnjenje promatranih podataka. Jednostavan model mogao bi se temeljiti na vremenu koje je potrebno od nagiba dok se čini da tekućina ne udari u bok posude i ne smiri se; vrijeme odziva sustava. Ovo je primjer problema s prosljeđivanjem. Obrnuti problem je procjena karakteristika sadržaja na temelju modela. Ako je vrijeme odziva kratko, a pomak mase osjeća se nestalnim (slika 2.1), vjerojatno je lagano tečna tekućina (niska viskoznost).



Sl. 4.1: Ponašanje nisko viskozne tekućine (lijevo), i visoko viskozne tekućine (desno) [11]

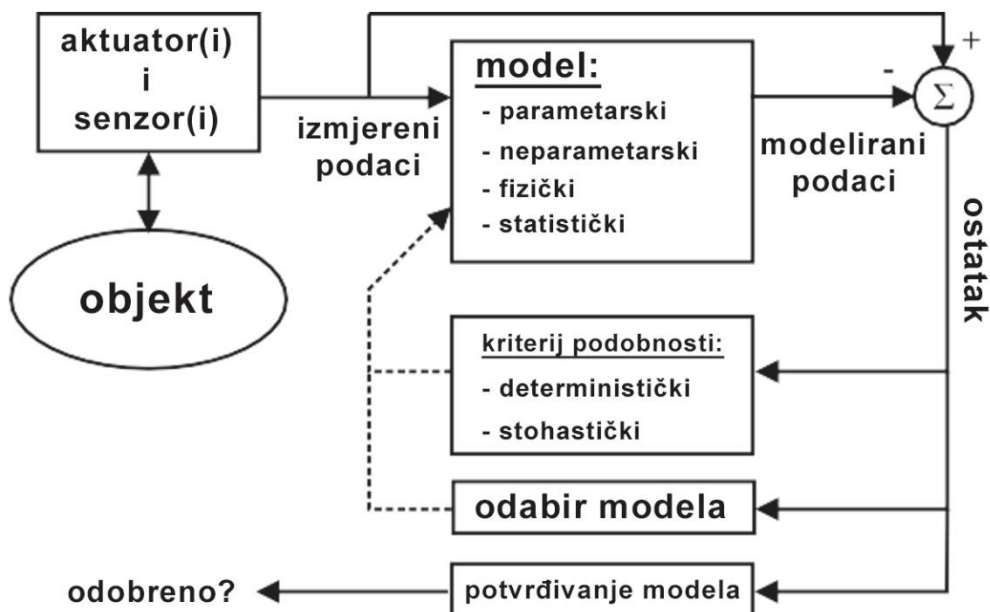
Na slici 4.2, prikazana je shema naprednog problema. Pogon djeluje na objekt ili medij, a senzor mjeri odziv. Dohvaćeni podaci su često sinkronizirani i unaprijed obrađeni prije analize kako bi se smanjilo: vremensko podrhtavanje; nestacionarni učinci; odjek i preklapanja; i trendovi i poremećaji. Opsežna predobrada često se sama po sebi opisuje kao napredni problem.

Izrađuje se model predmeta i prilagođava izmjerenim podacima pomoću kriterija. Ovaj bi se model mogao temeljiti na prethodnom fizičkom znanju o ponašanju objekta kada na njega utječe pogon, to može biti samo čisti statistički/empirijski model o odnosu između izmjerenih podataka senzora ili bi to mogao biti hibridni pristup kombinirajući obilježja toga dvoje. Model bi se mogao graditi na hvatanju strukture modela odnosa između mjerenja s nekoliko parametara (parametarski model), ili se model može izravno temeljiti na mjerenjima bez ikakvih parametara (neparametarski model).

Kriterij prikladnosti može se graditi iz determinističkog zaključivanja, često minimiziranjem neka norma pogreške jednadžbe ili iz predznanja o statističkim svojstvima mjerne buke (i parametara modela). Za praktičnu primjenu, složenost i ograničenja u stvarnom vremenu također mogu utjecati na ovaj izbor.

Nakon odabira modela i kriterija prilagođenosti, parametri modela se prilagođavaju prilagoditi mjerenjima. Ova prilagodba često uključuje optimizaciju nelinearnih funkcija s obzirom na parametre, te se moraju uzeti u obzir tehnike numeričke optimizacije. Pitanja koja se tiču lokalnih kritičnih točaka, loše uvjetovanih i singularnih matrica, a može doći do podparametarske i prekomjerne parametarije i mora se riješiti. Ako se model strogo temelji na fizičkim konceptima i idejama, parametri su fiksni. Inače, redoslijed modela treba procijeniti pomoću nekog postupka odabira modela. Bez obzira je li se model temelji na čistoj fizici, valja ga provjeriti ispitivanjem ostataka kojima se model nije mogao reproducirati. Kriteriji provjere valjanosti ovise o modelu aplikacija i naših ciljeva. Ako model ne uspije u koraku provjere valjanosti, potrebno je vratiti se na ranije korake i napraviti poboljšanja; povećanje redoslijeda modela, promjena strukture modela ili promjena senzora (senzora) i aktuatora.





Sl. 4.2. Shema naprednog problema [11]

Jednom kad se dobar model dobije i odobri u koraku provjere valjanosti, napredni problem je dovršen, a inverzni problem pronalaženja odnosa između procijenjenog modela (ili parametara modela).

Ako imamo sreće, model ili jedan parametar u modelu je procjena te količine i inverzni problem više nije problem. Općenito nismo te sreće, a odnos između modela/parametara i količina se mora naći fizičkom procjenom; statističkim alatima; ili kombinacijom oba.

Nastavljajući na gornji primjer, s jednostavnim vremenskim modelom, obrnuti je problem pronaći korelaciju između vremena odziva i viskoznosti tekućine. Ova veza može se opisati bilo fizikalnim modelom koji se temelji na ponašanju tekućine, njenoj viskoznosti, i okolne granice kada su pod utjecajem pokreta pobude; ili može biti zasnovano se na empirijskom ili statističkom modelu dobivenom eksperimentima na tekućinama s različitim viskoznostima; ili iz kombinacije obje metode.

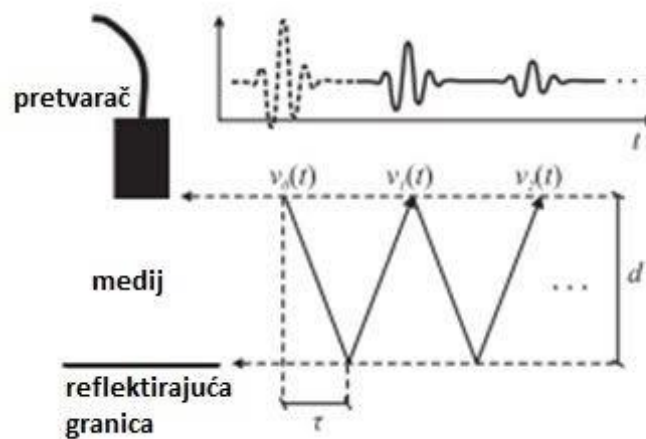
#### 4.1. Ultrazvučne tehnike

Koristeći ultrazvučne tehnike mjerenja, pokretač i senzor često se kombiniraju u jednom ultrazvučnom pretvaraču, uređaju koji može uzбудiti medij i registrirati odziv; analogno ruci u jednostavnom primjeru viskoznosti fluida raspravljano u poglavlju 4.

Podaci koji se mogu uočiti u ovom su slučaju ograničeni na promjene amplitude (slabljenje) i faza (fazna brzina) između izmjerenih signala, a ovisno o korištenju konfiguracija mjerenja i

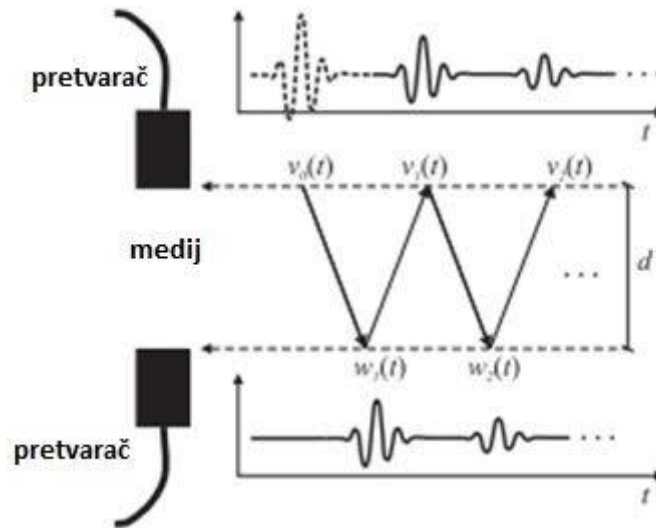
ispitivanom mediju, primjenjuju se različiti akustični modeli (parametarski ili neparametarski) koji se prilagođavaju izmjerenim podacima. [11]

Najčešće korištene konfiguracije pretvarača su impulsni odjek, prolazni prijenos i kombinacija ovih tehnika, prikazanih na sl. 4.3-4.5. Ova teza usredotočuje se isključivo na konfiguracije impulsnog odjeka, ograničeno na istraživanje medija iz jednog mjesta pomoću jednog pretvarača. Međutim, upotreba jedne konfiguracije pretvarača ne samo da pojednostavljuje poravnanje senzora i hardverske zahtjeve, već također povećava valjanost upotrebe reciprociteta u uzastopnim odjecima kako bi se smanjila dinamika prijavnika od miješanja u procjene modela i parametara. Bez uzajamnosti ove smetnje se obično smanjuju kalibracijskim mjerenjima.

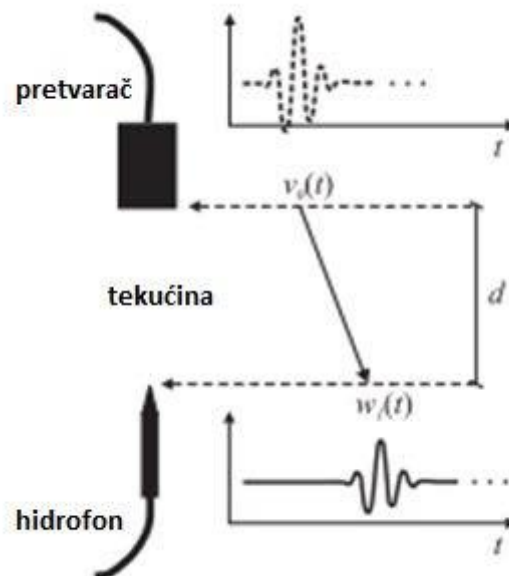


Sl. 4.3. Prikaz konfiguracije impulsnog odjeka pri normalnoj incidenciji [11]

Na slici 4.3.  $d$  označava udaljenost između pretvarača i reflektirajuće granice, a  $\tau$  predstavlja vrijeme prolaska. Isprekidani signal  $v_0(t)$  predstavlja emitirani signal generiran pobuđivanjem i općenito nije moguće preuzeti ga iz izmjerenog niza zbog oštećenja uzrokovano pobuđivanjem. Analiza je često ograničena na uzastopne odjeke  $v_m(t)$  za  $m \geq 1$ , predstavljene čvrstom supstancom. Pretvarač (ili reflektor) može biti uronjen u (fluidni) medij, pričvršćen za spremnik koji okružuje medij ili je pričvršćen na površinu (čvrstog) medija.



Sl. 4.4. Ilustracija kombinirane konfiguracije prolaznog prijenosa i impulsnog odjeka korištenjem dva paralelna pretvarača [11]



Sl. 4.5. Ilustracija ne ometajuće konfiguracije prolaznog prijenosa, koristeći pretvarač kao odašiljač i mali hidrofon kao prijateljnik [11]

Zbog dizajna i veličine hidrofona mogu biti bilo kakve refleksije ili smetnje vala tlaka na strani prijateljnika zanemaren, čime se sprječava preklapanje valnih oblika na malim udaljenostima  $d$ .

Međutim, upotreba jedne konfiguracije pretvarača često zahtijeva sposobnost odvojiti signal pobude od izmjerene odziva. To može biti problematično zbog male udaljenosti u kombinaciji s pretvaračima niske frekvencije (ili uskopojasnim), tj. kada je vrijeme leta kroz medij kraće od vremenske potpore signala.

Ova se situacija može usporediti s primjerom viskoznosti fluida. U kojem bi bilo teško procijeniti vrijeme odziva u malim spremnicima polaganim pokretima. Intuitivno se problem rješava bržim kretanjem kontejnera pobude, što bi olakšalo razlikovanje bržeg vremena odziva od uzbude. U ultrazvučnim mjerenjima pulsog odjeka, slična strategija može se primijeniti promjena signala pobude i središnje frekvencije pretvarača radi stvaranja impulsa s kompaktnijom vremenskom podrškom. Međutim, na vrlo malim udaljenostima ili u vrlo slabijim medijima, ovaj je pristup ili neadekvatan ili rezultira neupotrebljivim (bučnim) mjerenjima; i treba razmotriti druge tehnike. Unatoč povećanoj složenosti konfiguracije i hardverskim zahtjevima koji su uključeni u postavke kroz prijenos, ima nekoliko očiglednih prednosti: udvostručuje mjerljivu dubinu širenja (u homogenim medijima i linearnoj akustici); eliminirana pobuda i odziv preklapaju se na malim udaljenostima s pretvaračima koji ne ometaju (isključujući tanke slojeve); neovisan je o reflektorima ili reflektirajućim granicama; omogućuje jednostavnu analizu širenja i pretvorbe materijala i granica; i omogućuje kombinaciju impulsnog odjeka i prolazne analize.

## 4.2. Ultrazvučni sustav mjerenja

Pojednostavljena shema lanca mjerenja impulsnog odjeka prikazana je na slici 4.6. Mjerni lanac uključuje pogon, senzor i izmjerene podatke sa slike 4.2. Preuzimanje mjerenja pulsog odjeka može se pojednostaviti u sljedeća četiri koraka, označeno bojama od crvene do ljubičaste na slici 4.6:

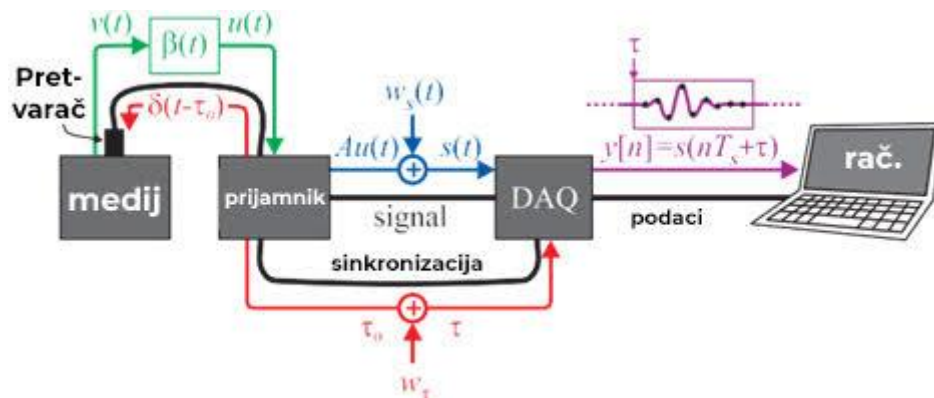
1. Pobuda sustava (crvena). Pulser / prijamnik šalje pobudni impuls  $\delta(t - \tau_0)$  pri vremenu  $\tau_0$  na pretvarač, a informacije o sinkronizaciji na prikupljanje podataka (DAQ) jedinica gdje  $w\tau$  predstavlja dodanu nesigurnost okidača.

2. Odgovor sustava (zeleno). Pretvarač kroz medij emitira ultrazvučni impuls  $v_0(t)$  (uzbudni signal savijen s impulsnim odzivom pretvarača). Uzastopni odjek refleksije  $v(t) = \infty$  m = 1  $v_m(t)$  pretvarač osjeti, kao što je prikazano na slici 4.3. Na valne oblike u  $v(t)$  također mogu utjecati nestacionarni uvjeti okoliša, npr. promjene temperature i tlaka, koji mijenjaju karakteristike

pretvarača i medija. Te promjene predstavljene su impulsnim odzivom  $\beta(t)$ . Osjeti se rezultirajući valni oblik  $u(t)$  pulsarom/prijamnikom.

3. Kondicioniranje signala (plavo). Signal  $u(t)$  često se uvjetuje pomoću pojačala (predstavljeno pojačanjem  $A$ ) kako bi se smanjio utjecaj aditivnog mjernog šuma  $w_s(t)$ , prije DAQ-a.

4. Prikupljanje podataka (ljubičasta). DAQ jedinica aktivira se u trenutku  $\tau$  i uzorkuje konačni slijed valnog oblika  $y[n] = s(nT_s + \tau)$ , za  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ , gdje  $T_s$  označava razdoblje uzorkovanja. Signal je također poželjno filtriran protiv aliasinga, bilo na kraju pulsa / prijemnika (često ugrađeno u fazu pojačanja) ili DAQ jedinicom prije uzorkovanja. [11]

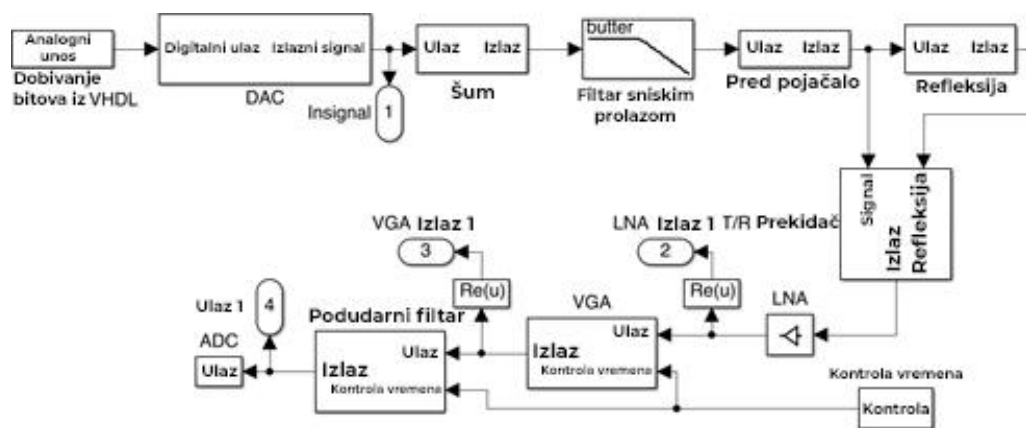


Sl. 4.6. Shema lanca mjerenja impulsnog odjeka [11]

## 5. SIMULACIJSKI SUSTAV

U ovom projektu napravljen je simulacijski sustav u dva različita razvojna okruženja, Xilinx ISE i MATLAB/Simulink. Xilinx ISE upravlja simulacijom digitalnog kruga, a MATLAB/Simulink analognom simulacijom. Softver sprema i učitava podatke iz datoteka pa je moguće pokrenuti svaku simulaciju s ulazom koji generira drugi softver.

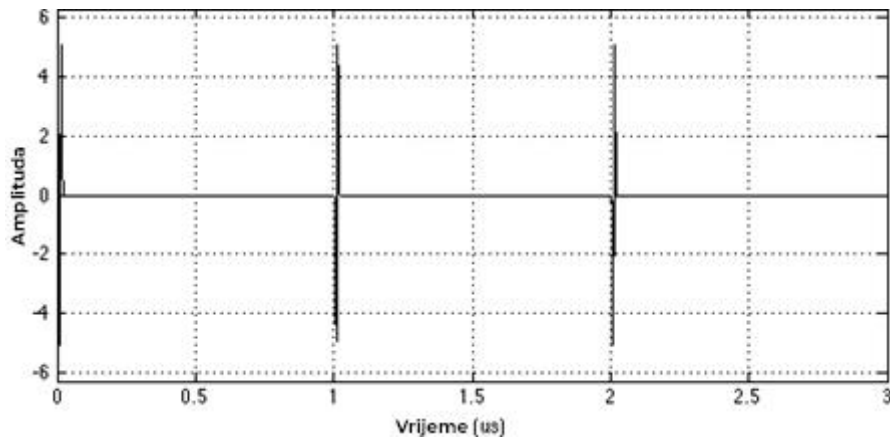
Puls se izrađuje iz funkcije MATLAB i sprema u datoteku. Xilinx ISE kod učitava tu datoteku, pretvara je u binarne bitove i sprema u drugu datoteku. Simulink model čita binarne vrijednosti iz te datoteke i koristi ih kao digitalni ulaz. Rezultat iz Simulinka se izvozi natrag u Xilinx ISE gdje se analizira.



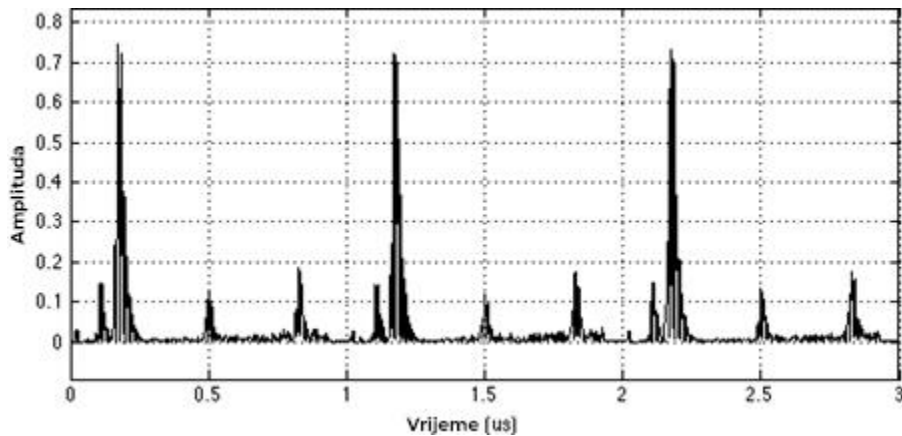
Sl. 5.1. Blok shema analognog modela za svaku komponentu pri uvozu podataka iz VHDL-a [12]

Sustav radi savršeno i mnoge varijable se lako konfiguriraju ovisno o tome kako korisnik želi pokrenuti simulaciju. Korisnik također može odabrati simulaciju A-skeniranja, gdje rezultat prikazuje energiju za impulsni odziv, ili normalnu simulaciju, gdje rezultat prikazuje normalni vremenski dijagram za signal, u sustavu.

Prezentacija rezultata iz analognog modela vrši se grafikonima iz vremenskih raspona. Primjer ulaza i izlaza simulacije prikazan je na slikama 5.2 i 5.3. U ovoj simulaciji signal se sastoji od tri impulsa, s frekvencijom ponavljanja od 1 MHz gdje svaki impuls ima srednju frekvenciju od 40 MHz, početnu amplitudu od 5 V i frekvenciju uzorka od 800 MHz. [12]



Sl. 5.2. Ulazni signal u analognoj simulaciji u Simulinku nakon prolaska kroz DAC [12]



Sl. 5.3. Rezultat analogne simulacije u Simulinku prije prolaska kroz ADC predstavljen kao A-skeniranje [12]

## 5.1. Komponente

### 5.1.1. Ulazni signal

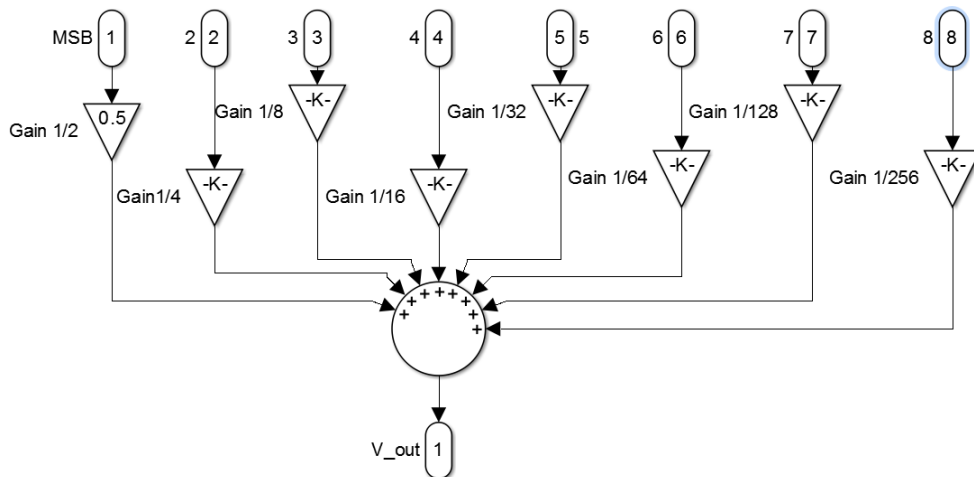
Ulazni signal sastoji se od bitova generiranih VHDL-kodom. Ovaj se kôd pohranjuje u datoteku i učitava u simulaciju putem funkcije MATLAB. Za rukovanje matricom iz datoteke kao signalom koristimo unbuffer (otpuštanje iz međuspremnika), blok dijagram ovoga u Simulinku prikazan je na slici 5.4.



Sl. 5.4. Blok shema u Simulink-u za obradu izlaza iz VHDL-a kao digitalnog signala [12]

### 5.1.2. Digitalno – analogni pretvarač

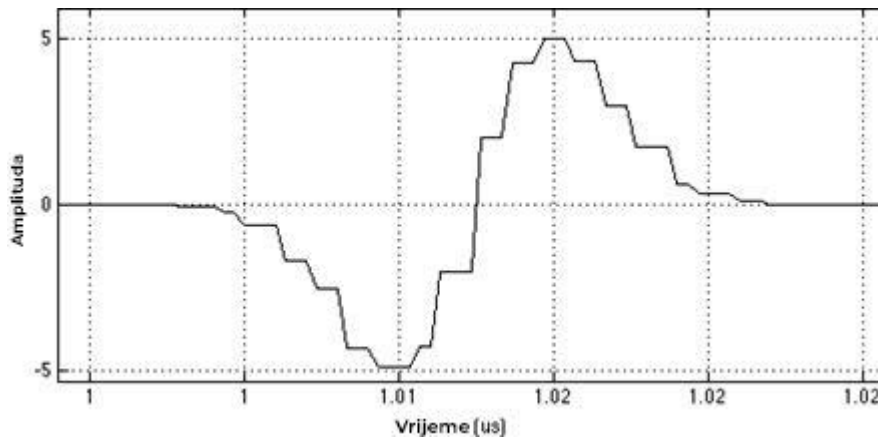
Digitalno – analogni pretvarač (DAC) koji se koristi u simulacijama ima rezoluciju 17 bita i stvara sliku signala dovoljno jasnog za uporabu u ostatku simulacije. Za izradu digitalno – analognog pretvarača u Simulinku korišten je model R-2R. Simulacijski blok sastoji se od podsustava sa 17 ulaza gdje je prvi ulaz najniža vrijednost signala, a ostali su raspoređeni od MSB do LSB i dobiveni s opadajućim faktorom po dva za svaki bit, MSB se dobiva s  $1/2$ , a LSB s  $1/2$ . Podsustav za dobivanje MSB-a do osmog bita prikazan je na slici 5.5.



Sl. 5.5. Simulink blok shema prvog podsustava za model R-2R [12]

Nakon što su bitovi pojačani, dva se komplementa koriste za izračunavanje analogne vrijednosti signala u sadašnjem trenutku, a signal se dobiva s izlaznim intervalom DAC-a. Signal se zatim uzorkuje pomoću bloka "uzimanje uzorka i zadržavanje" kojim upravlja rastući rub digitalnog sata. Da bi se simuliralo kako bi se DAC ponašao u stvarnom krugu, u sat uzorka dodaje se titranje pomoću bloka slučajnih brojeva i bloka odgode. Titranje utječe na izlaz DAC-a zadržavajući uzorke neko vrijeme prije nego što se pošalju. Ovo slučajno kašnjenje prikazano je na slici 5.6. Kako je kašnjenje titranja implementirano na primjer sata prikazano je na slici 5.7. Pregled načina na koji je cijeli DAC ugrađen u Simulink prikazan je na slici 5.8.

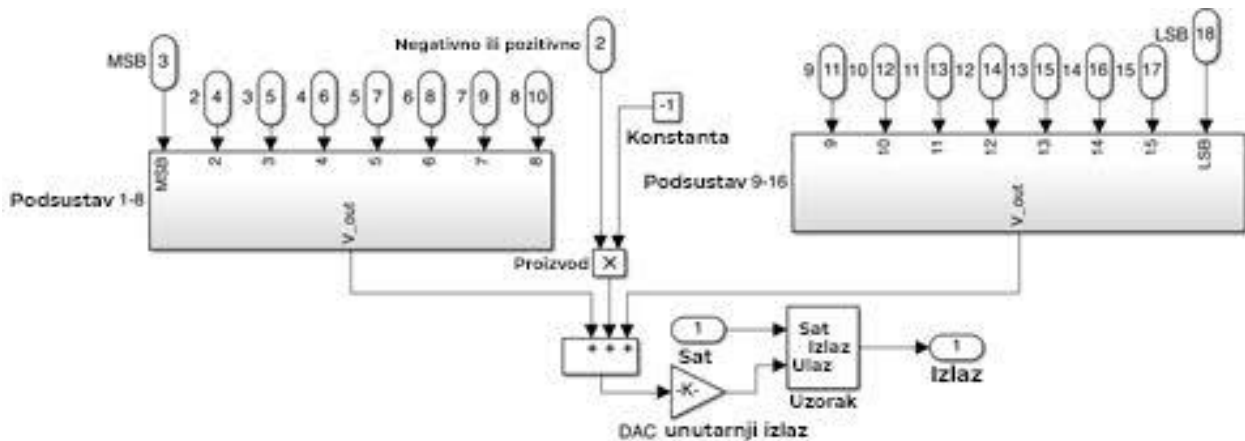




Sl. 5.6. Puls nakon DAC-a s dodatnim titranjem [12]



Sl. 5.7. Simulink blok shema uzorka sata s titranjem [12]



Sl. 5.8. Simulink blok shema DAC-a, podsustav 1-8 prikazan je na slici 5.5 [12]

### 5.1.3. Bijeli šum i LP-filter

Za implementaciju bijelog Gaussova šuma (WGN) u simulacijski model, modelu se nakon DAC-a dodaje blok bijelog Gaussova šuma. Nakon dodavanja šuma, signal putuje kroz niskopropusni filter Butterworth s frekvencijom ruba propusnog pojasa postavljenom blizu osam puta većoj od

srednje frekvencije izvornih impulsa i sa redom sedam za filtriranje visokofrekventnih šumova i sprječavanje preklapanja.

#### 5.1.4. Refleksija

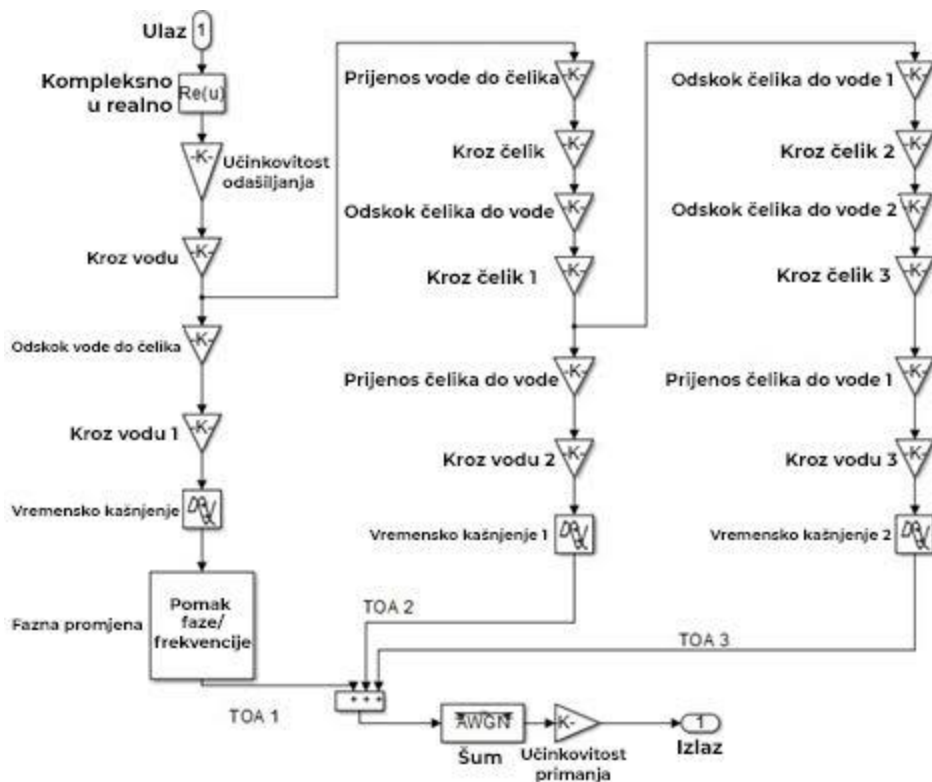
Model refleksije sastoji se od tri vremenske odgode, jednog izmjenjivača faza, za prvu refleksiju, i broj refleksija za simulaciju gubitka energije koju signal dobiva kada se reflektira, prenosi i putuje kroz materijale. Bijeli šum i dva bloka pojačanja koriste se za simulaciju ponašanja pretvarača u stvarnom strujnom krugu. Kako je refleksirani dio ugrađen u Simulink prikazan je na slici 5.9.

$$A_{out} = Ae^{-\alpha d} \quad (5.1.)$$

$$\alpha_{voda} = 0.2 * (10^{-6} f)^2 \quad (5.2.)$$

$$R = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (5.3.)$$

$$Z = \rho c \quad (5.4.)$$

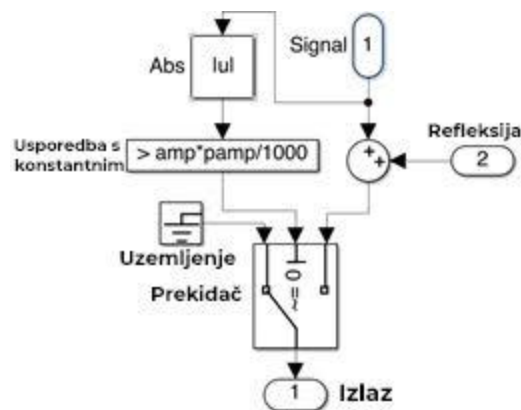


Sl. 5.9. Simulink blok shema modela refleksije [12]

Za izračun izgubljene energije pri prolasku signala kroz materijale koristi se (5.1). Koeficijenti apsorpcije za vodu izračunavaju se pomoću (5.2). Za čelik konstanta je između 1-2,5, vrijednost korištena u simulaciji je 2. Energija izgubljena u refleksiji i u prijenosima izračunava se pomoću (5.3) i (5.4). Vremenske odgode izračunavaju se pomoću debljine i brzine širenja impulsa u materijalu i prijenosnom mediju. Korisnik lako mijenja sve varijable kako bi simulirao različite scenarije.

### 5.1.5. Prekidač odašiljača/prijamnika

Uspoređujući odašiljački signal s konstantom, prekidač će propustiti signale samo ako je amplituda odašiljačkog signala niža od specificirane konstante. To bi trebalo izbjeći kako LNA ne bi prestao raditi. Uzemljenje je spojeno na drugi ulaz radi simulacije prekidača kad je isključen.



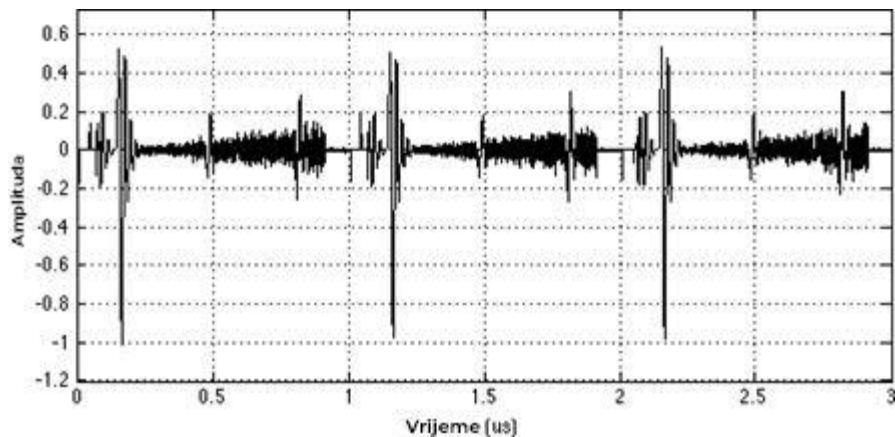
Sl. 5.10. Simulink blok shema prekidača za odašiljač/prijemnik kreirana za model [12]

### 5.1.6. Predpojačalo i LNA

Za simulaciju LNA (nisko-šumno pojačalo) i predpojačala koristi se blok-pojačalo iz SimRF-ovog bloka 6, blok-sklopa sadržanog u studentskoj verziji biblioteke Simulink. Ovaj blok omogućuje dodavanje šuma i nelinearnosti ako to želite. U modelu se koriste približne vrijednosti za LNA i predpojačalo. Pojačala su implementirana u model kako je prikazano na slici 5.1.

### 5.1.7. Pojačalo s promjenjivim pojačanjem (VGA)

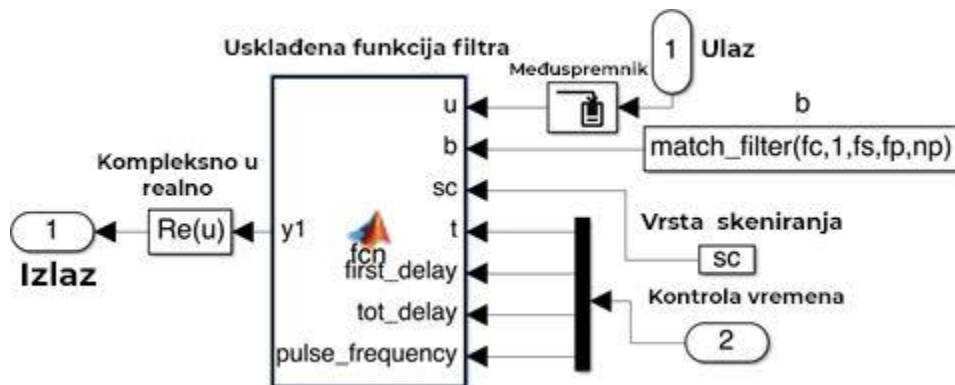
VGA, u ovom slučaju TGC, predstavljen je funkcijom MATLAB koja je konfigurirana za određenu simulaciju za linearno povećanje pojačanja za vrijeme odziva impulsa i resetiranje prije nego što stigne prvi TOA sljedećeg impulsa. Linearno pojačanje VGA može se vidjeti ako se pogleda šum na slici 5.11.



Sl. 5.11. Vremenski raspon nakon pojačala s promjenjivim pojačanjem [12]

### 5.1.8. Usklađeni filtar

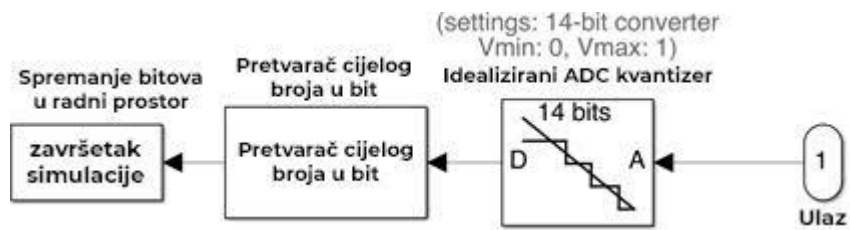
Za simuliranje usklađenog filtera bez kašnjenja koristi se međuspremnik za spremanje onoliko uzoraka od koliko se impuls sastoji. MATLAB funkcija koristi se za usporedbu signala s filtrom, a zatim samo daje posljednju vrijednost kako bi se dobio konačan rezultat. Funkcija izračuna filtriranog signala također kontrolira koju vrstu skeniranja korisnik želi pokrenuti, normalno ili A-skeniranje.[12] Cijeli blok dijagram usklađenog filtera u Simulinku prikazan je na slici 5.12.



Sl. 5.12. Blok shema usklađenog filtera kreiranog za model [12]

### 5.1.9. Izlazni signal

Pretvaranje signala u digitalne bitove vrši se idealnim ADC-om i "pretvaračem u cijeli broj". Bitovi se spremaju u radni prostor i putem funkcije spremaju u datoteku koju VHDL može pročitati. Blok shemu možete vidjeti na slici 5.13.

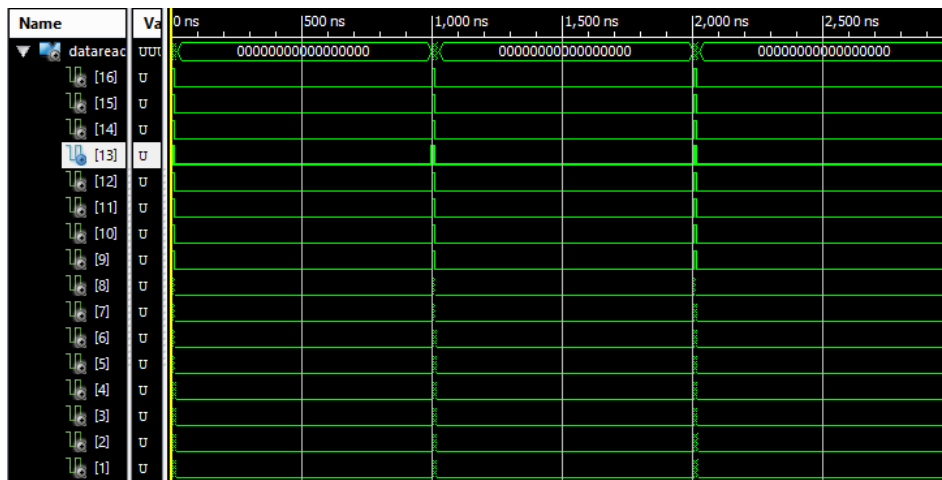


Sl. 5.13. Blok shema pretvaranja analognog izlaza u digitalni i spremanje [12]

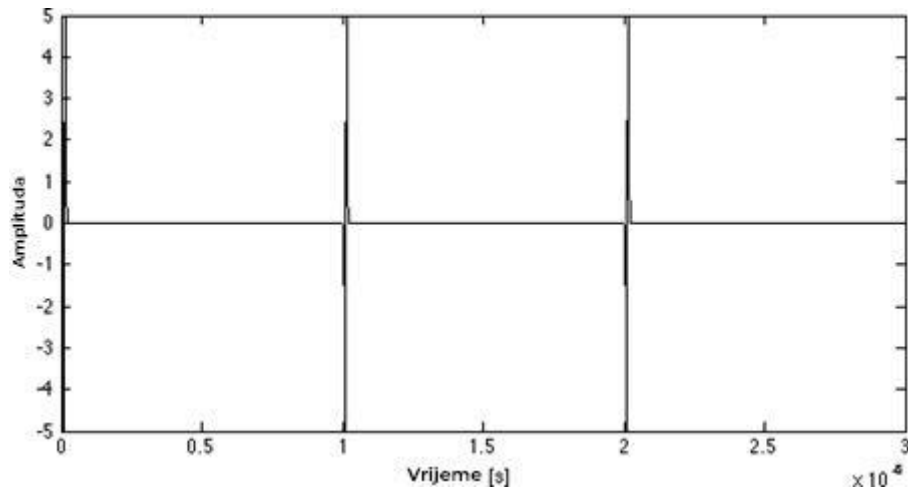
## 5.2. VHDL

### 5.2.1. Generiranje impulsa

Impulsi korišteni u simulacijama prvo se generiraju u MATLAB-u iz skripte za generiranje impulsa. Uzorci iz generiranja impulsa spremaju se u tekstualnu datoteku. VHDL kôd za generiranje impulsa učitava podatke iz tekstualne datoteke, pretvara ih u binarne brojeve i koristi ih kao izlaz. [12] Izlaz se sprema u drugu tekstualnu datoteku i koristi se kao digitalni ulaz za simulacije u Simulinku. Sl. 5.14. i 5.15. prikazuju generiranje impulsa u MATLAB -u i Xilinx ISE-u.



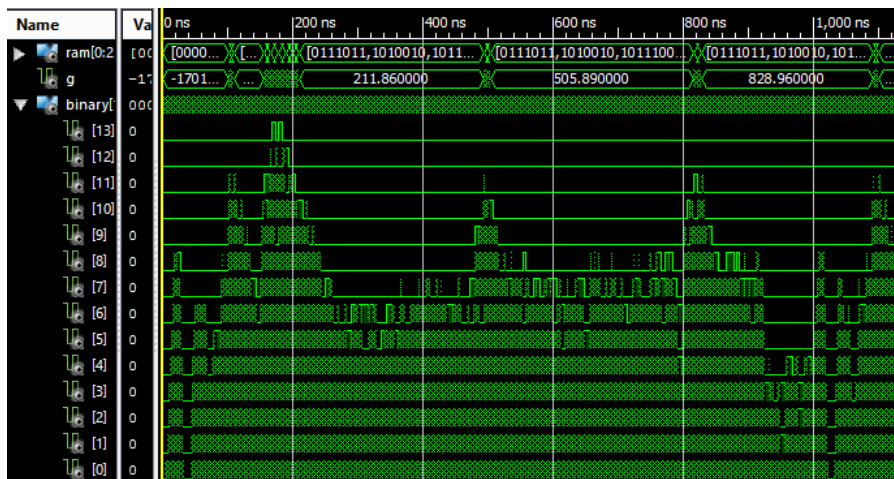
Sl. 5.14. Generirani 17-bitni impulsni niz, Xilinx ISE [12]



Sl. 5.15. Generirani impulsni niz, MATLAB [12]

### 5.2.2. Obrada signala

Impulsni odziv simulacije u Simulinku sprema se u tekstualnu datoteku kao binarni uzorak. VHDL skripta za obradu signala čita podatke iz tekstualne datoteke i pokreće simulaciju s podacima kao ulazom. Ako se vrijednost ulaza smatra vršnom, vrijeme do kojeg se dogodi sprema se u RAM - u. Slika simulacije u Xilinx ISE-u gdje se vrijeme za vrijednosti koje se smatraju vrhom, sprema u RAM može se vidjeti na slici 5.16.



Sl. 5.16. Obrada signala za 14-bitni impulsni odziv u intervalu od 0ns do 1140ns u Xilinx ISE-u sprema se u RAM ako je vrijednost pretvorena u cijeli broj veća od 1500 [12]

## 6. ZAKLJUČAK

Primjena ultrazvuka je veoma široka od primjene za mjerenje udaljenosti u automobilske industriji za parking senzore, primjena za mjerenje protoka, primjena pri ispitivanju materijala, primjena u medicini, primjena ultrazvuka za čišćenje, primjena za mjerenje razine. Na tržištu postoji veliki raspon ultrazvučnih senzora izrađenih za razne primjene. Oni jednostavniji i koji su više u upotrebi su jeftiniji dok su oni složeniji i manje u primjeni značajno skuplji. U simulaciji dva sustava koja su stvorena dobro funkcioniraju i sve varijable se lako mijenjaju tako da korisnik može prilagoditi program ovisno o vrsti situacije koju korisnik želi simulirati. Model je izgrađen za simulaciju ultrazvučnog sustava i može obraditi frekvencije u intervalu koji se koristi za ultrazvučna ispitivanja. Za pokretanje simulacije korisnik mora definirati sve parametre signala, materijala i transportnog medija koji su potrebni.

## LITERATURA

- [1] <https://enciklopedija.hr/>
- [2] A. Carullo; M. Parvis: An ultrasonic sensor for distance measurement in automotive applications
- [3] <https://www.britannica.com/>
- [4] <https://www.element.com/>
- [5] Phillion, R.: The Application of Industrial Scale Ultrasonic Cleaning to Heat Exchangers (2011.)
- [6] Azar, Lawrence: Cavitation in ultrasonic cleaning and cell disruption (2009.)
- [7] Indumart Inc.: Various Technics of Liquids and Solids Level Measurements
- [8] EGE: Ultrasonic sensors
- [9] Preuzeto sa web stranice PiBorg, Ultrasonic distance sensor (HC-SR04)  
url: <https://www.piborg.org/>
- [10] Preuzeto sa web stranice Gavincc, GUT740 Ultrasonic sensor  
url: <http://www.gavincc.com/>
- [11] J. Martinsson: Ultrasonic Measurement Principles: Modeling, Identification, and Parameter Estimation
- [12] J. Björsell; V. Ferm; L. J. Törmä: Simulation model of an ultrasonic sensor used in non-destructive testing



## **SAŽETAK**

U ovom završnom radu opisane su metode i principi mjerenja ultrazvukom. Opisane su razne primjene ultrazvuka od parking senzora koji su najraširenija primjena pa sve do primjene u industriji. Opisani su ultrazvučni senzori za mjerenje udaljenosti i za mjerenje razine. Spomenute su metode i principi mjerenja ultrazvukom. Jedna od najpoznatijih metoda za mjerenje protoka je ultrazvučni senzor sa Doplerovim efektom. Kroz simulaciju je prikazano kako uz podešavanje određenih parametara vrlo lako možemo simulirati i prikazati rezultate.

Ključne riječi: metode i principi mjerenja ultrazvukom, ultrazvuk, ultrazvučni senzor

## **ABSTRACT**

This final paper describes the methods and principles of ultrasound measurement. Various applications of ultrasound are described, from parking sensors, which are the most widespread applications, to applications in industry. Ultrasonic sensors for distance measurement and level measurement are described as well as methods and principles of ultrasound measurement are mentioned. One of the most well-known methods for measuring flow is an ultrasound sensor with a Doppler effect. Through the simulation it is shown how by setting certain parameters we can very easily simulate and display the results.

Keywords: methods and principles of ultrasound measurement, ultrasound, ultrasonic sensor

## **ŽIVOTOPIS**

Filip Matić rođen je 23. listopada 1999. godine u Požegi. Nakon završene osnovne škole 2014. godine upisuje Tehničku školu u Požegi.

Nakon završene srednje škole zbog zanimanja u danje obrazovanje u području elektrotehnike 2018. godine upisuje Fakultet elektrotehnike, računalstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, preddiplomski stručni studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika.