

# Određvanje frekvencijskih karakteristika ispitanih uzoraka

---

**Baričić, Luka**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:698175>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-21**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Luka Baričić**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ODREĐIVANJE  
FREKVENCIJSKIH  
KARAKTERISTIKA ISPITNIH  
UZORAKA**

Mentor:

Dr. sc. Tomislav Staroveški, dipl. Ing.

Student: Luka Baričić

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru dr.sc. Tomislavu Staroveškom na razumijevanju te svojom pomoći i stručnim savjetima prilikom izrade ovog završnog rada.

Luka Baričić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum - 02 - 2020	Prilog
Klasa: 602-04	20-13
Ur.broj: 15-1723	20-34

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Luka Baričić** Mat. br.: **0035210498**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Određivanje frekvencijskih karakteristika ispitnih uzoraka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Frequency analysis of test samples**

Opis zadatka:

Svojstvo prigušenja vibracija predstavlja jednu od značajnijih karakteristika tehničkih materijala. Jedan od načina na koji se ta karakteristika može odrediti je frekvencijskom analizom, tj. analizom odziva sustava koji je dinamički pobuđen vibracijama različitih frekvencija.

U radu je potrebno opisati elemente ispitnog postava za određivanje vibracijskih karakteristika ispitnih uzoraka koji se trenutno razvija u Laboratoriju za alatne strojeve. Zatim je potrebno napisati odgovarajuću programsku podršku kojom će biti moguće:

1. Generirati sinusni signal proizvoljne frekvencije (u rasponu 200 Hz – 10 kHz) i amplitude (do 1Vpp), koji će se koristiti kao referentni signal za aktuator.
2. Snimiti odzivni signal sa dva akcelerometra frekvencijom uzorkovanja koja je barem 10 puta viša od frekvencije referentnog signala.
3. Na osnovi snimljenih signala odrediti amplitudno frekvencijsku i fazno frekvencijsku karakteristiku pobuđenog uzorka.
4. Grafički prikazati rezultate

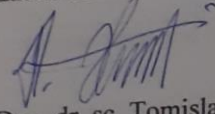
Naposljetku je potrebno donijeti zaključke rada.

Zadatak zadan:  
28. studenog 2019.

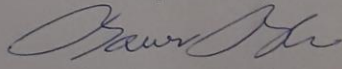
Datum predaje rada:  
1. rok: 21. veljače 2020.  
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.  
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.  
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.  
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Tomislav Staroveški

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
1. UVOD .....	1
2. PRIGUŠENJE VIBRACIJA.....	2
2.1 vrste prigušenja.....	2
2.2 prikazi prigušenja .....	2
3. UREĐAJI ZA MJERENJE VIBRACIJA ISPITNIH UZORAKA.....	4
3.1 beskontaktni senzori za mjerenje vibracija .....	5
3.1.1 induktivni senzor pomaka .....	5
3.1.2 kapacitivni senzor pomaka .....	8
3.1.3 ostali manje zastupljeni beskontaktni senzori .....	9
3.2 kontaktni senzori za mjerenje vibracija .....	10
3.2.1 kontaktni senzor brzine .....	11
3.2.2 kontaktni senzor ubrzanja .....	11
3.3 Odabir opreme za ispitivanje uzoraka na prigušenje vibracija .....	12
3.4 Opis i tehničke karakteristike opreme .....	13
3.4.1 trokomponentni senzor vibracija i nabožno pojačalo.....	13
3.4.2 zvučnik tvrtke esarc .....	14
3.4.3 višenamjensko računalo red pitaya .....	15
4. ISPITIVANJE UZORAKA NA PRIGUŠENJE VIBRACIJA.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.1 opis i povezanost između programskog jezika i Red pitaye .....	18
4.2 prikaz postavljenih instrumenata za ispitivanje .....	22
5. REZULTATI ISPITIVANJA .....	26
6. ZAKLJUČAK.....	29
POPIS LITERATURE .....	31

## POPIS SLIKA

Slika 3.1	Induktivni senzor pomaka.....	5
Slika 3.2	Princip rada beskontaktnog induktivnog senzora .....	6
Slika 3.3	Beskontaktni induktivni senzori .....	7
Slika 3.4	Beskontaktni induktivni senzori .....	7
Slika 3.5	Kapacitivni senzor pomaka .....	8
Slika 3.6	Način rada kapacitivnog senzora .....	8
Slika 3.7	Kontaktni senzor brzine .....	10
Slika 3.8	Kontaktni senzor ubrzanja .....	11
Slika 3.9	Područje primjene piezoelektričnog akcelerometra .....	11
Slika 3.10	Zvučnik tvrtke esarc .....	13
Slika 3.11	Senzor vibracija s nabojnim pojačalom.....	13
Slika 3.12	Red pitaya .....	14
Slika 3.13	Primjer prikaza u matplotlib-u .....	18
Slika 3.14	Prikaz sinusoide koristeći matplotlib .....	19
Slika 3.15	Pokretanje SCPI servera .....	19
Slika 3.16	izgled snimljenog vala na ulaz u Red pitayu preko aplikacije Osciloskop .....	20
Slika 4.1	For petlja.....	20
Slika 4.2	Prikaz signala u matplotlibu.....	21
Slika 4.3	Primjer spremanja snimaka u txt datoteku .....	22
Slika 4.4	Aktuator na spužvastoj podlozi .....	23
Slika 4.5	Ispitni uzorci .....	24
Slika 4.6	Uzorak pričvršćen trakom za aktuator .....	25
Slika 4.7	Akcelerometar pričvršćen trakom za ispitni uzorak .....	25
Slika 4.8	Kompletan sustav za ispitivanje vibracija .....	26
Slika 5.1	Pad amplitude ispitnog uzorka napravljenog od drva .....	27
Slika 5.2	Pad amplitude ispitnog uzorka napravljenog od metala .....	28
Slika 5.3	prikaz pada srednje amplitude u ovisnosti o udaljenosti akcelerometra od aktuatora.....	29

## POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Tehničke karakteristike akcelerometra i nabojnog pojačala .....	15
Tablica 3.2 Tehničke karakteristike Ottone zvučnika .....	16
Tablica 3.3 Tehničke karakteristike Red pitaye .....	17
Tablica 3.4 Tehničke karakteristike Osciloskopa i signal generatora .....	17



## POPIS OZNAKA

<b>Oznaka</b>	<b>Opis</b>
SCPI	Standard commands for programmable instrumentation
RP	Red pitaya

## **SAŽETAK**

Ovaj rad bavi se razvojem sustava za ispitivanje frekvencijskih karakteristika različitih materijala, gdje se važnost daje razvoju sustava za ispitivanje prigušenja vibracija. U uvodnom dijelu ukratko su opisane osnove vibracija, način na koji djeluju te za što su bitne. Prigušenje kao svojstvo otklanjanja vibracija te njegova važnost su detaljno opisani u drugom poglavlju. U nastavku je dana podjela metoda ispitivanja vibracija. U posljednjem dijelu rada opisan je eksperimentalni postav za ispitivanje frekvencijskih karakteristika materijala koji je razvijan u sklopu ovog rada. Sustav se zasniva na magnetostrikcijskom aktuatoru koji pobuđuje ispitni uzorak pri čemu se odziv mjeri kontaktnim akcelerometrom i odgovarajućim akvizivijским sustavom. Ti podatci će se obraditi te prikazati kao rezultati u numeričkom i grafičkom obliku.

Ključne riječi: Vibracije, prigušenje, frekvencija

## **SUMMARY**

This paper deals with the development of system for determination of frequency characteristics of different materials, where importance is given to the development of a vibration damping test system. The introductory section briefly describes the basics of vibration, emphasizing the damping properties of materials. Damping as a property of vibration elimination and its importance are described in detail in chapter two. Second part of paper describes the development of testbed system for frequency characterization of different materials. The system is based on a magnetostrictive actuator used for excitation and accelerometer connected to the suitable acquisition system. This data will be processed and displayed as a results in numerical and graphical form.

Key words: Vibrations, damping, frequency

## 1. UVOD

Vibracije se definiraju kao mehaničke oscilacije, odnosno varijacije amplitude u vremenu neke veličine u odnosu na dogovorenu referencu uz napomenu da se amplituda mijenja tako da je naizmjenično veća, odnosno manja od te reference. Ta veličina je kvantitativni opis gibanja nekog mehaničkog sustava. Vibracije su svakodnevna pojava budući da su rezultat djelovanja dinamičkih sila u strojevima s pomičnim dijelovima, čije se djelovanje širi na okoliš. [1]

Vibracije se dijele na: slobodne, prisilne i sinusoidalne . Slobodne vibracije su prirodan odaziv materije na udar ili pomicanje. Primjer je žica gitare, kad se povuče žica ona vibrira određenom frekvencijom i proizvodi željeni zvuk. Prisilne vibracije su odaziv materije na drugu vibraciju. Na primjer, čovjek koji radi za pneumatskim odvijačem i njegove ruke će vibrirati istom frekvencijom. Sinusoidalne vibracije su vibracije sa stalnom frekvencijom, nisu česte u prirodi, ali pružaju odličan inženjerski alat koji služi u eksperimentalnim metodama.

Parametri vibracija koji se mogu direktno mjeriti su pomak, brzina i ubrzanje, dok se ostale karakteristike npr. frekvencija i prigušenje mogu dobiti analizom navedenih veličina. [1]

Vibracije izazivaju trošenje i zamor materijala, te u konačnici kvar i uništenje strojeva. Međutim vibracije mogu biti i korisne. Primjeri su vibrirajući strojevi za uklanjanje pijeska od odljevka, popunjavanje uskih šupljina s određenim punilom i slično.

## 2. PRIGUŠENJE VIBRACIJA

Prigušenje ili atenuacija je smanjenje vrijednosti neke fizikalne veličine (električnog napona, kinetičke energije, zvuka i slično)[4]. Prigušenje vibracija je jedno od bitnih svojstava koje služi pri kontruiranju konstrukcije, alatnog stroja i sličnom da bi mogli postići svoje željene uvjete rada. Vibracije je kao pojavu u praksi teško izbjeći. Pobuđenje rezonantnih frekvencija nekih stukturnih dijelova može se dogoditi uz postojanje vibracija čak i ako je to samo mala beznačajna vibracija. Metalni lijevovi koji se koriste u proizvodnji alatnih strojeva, posebno ako se gledaju s obzirom na njihova mehanička svojstva. Ali ako se promatraju svojstva kao što su kemijska otpornost, jednostavnost proizvodnje, obradivost i prigušivanje, plastični i kompozitni materijali sve se više koriste u proizvodnji alatnih strojeva. U tim vremenima, kad se intenzivno razvijaju alatni strojevi, polimerni beton predstavlja novi proizvodni materijal u većini razvijenih zemalja i još uvijek se istražuje. Polimerni beton se smatra potencijalno prikladnom zamijenom lijevanom željezu i čeliku, posebno za izradu postolja alatnih strojeva. Prednosti upotrebe polimernog betona kao materijala za izradu postolja za alatne strojeve su jednostavnost izrade, otpornost na koroziju, velikom omjeru čvrstoće i mase, niskoj toplinskoj vodljivosti i svojstvom visokog prigušenja vibracija.

Prigušenje vibracija je osobito važno kod alatnih strojeva, kod kojih se negativan utjecaj vibracija u najvećoj mjeri očituje na kvaliteti obrađene površine i povećanoj dinamici trošenja alata.

### 2.1. Vrste prigušenja

Neke od vrsta prigušenja su : unutarne (materijalno) prigušenje, strukturno prigušenje i mehaničko prigušenje. Najčešće se susreću mehanički prigušivači, primjer su amortizeri na automobilu, pneumatski i hidraulični cilindri, gumene podloške i mnogi drugi. Najzanimljivija vrsta prigušenja je ona unutarne (materijalna), jer im je glavno obilježje vrsta materijala. Materijal prigušuje vibracije na način da energiju pretvara u toplinu na mikro i makro razini.

## 2.2. Prikazi prigušenja

Prigušenje se može predstaviti različitim parametrima kao što su specifični kapacitet prigušenja, faktor gubitka, faktor dobrote-Q i omjer prigušenja, a može se prikazati i kao model poput viskoznog, histeričkog, stukturnog i tekućeg. Postoje dva opća načina na koja se mogu izvršiti mjerenja prigušenja: metode vremenskog odziva i metode frekvencijskog odziva. [2]

Faktor dobrote Q je fizikalna veličina koja opisuje rezonantna svojstva titrajnog sustava, omjer je energije pohranjene u sustavu i energije utrošene u jednom periodu.

Specifični kapacitet prigušenja(1) opisuje se omjerom količine energije koja se raspršuje u harmonično pobuđenu strukturu i radom koji se na nju primjenjuje. [3]

$$\Psi = \frac{\Delta W}{W} \quad (1)$$

Gdje je:

- $\Psi$  specifični kapacitet prigušenja [1]
- $\Delta W$  količina raspršene energije u sustavu [J]
- $W$  rad koji je primijenjen [J]

### 3. UREĐAJI ZA MJERENJE VIBRACIJA ISPITNIH UZORAKA

Fizikalne veličine obično se mjere odgovarajućim sensorima čija je uloga pretvorba razmatrane fizikalne veličine u električni signal. Isto vrijedi i za mjerenje vibracija.

Vibracije mjerimo sensorima, odnosno pretvaračima koji vibracijske veličine poput pomaka, brzine ili ubrzanja pretvaraju u električne veličine koje su mjerljive.

Uređaji za mjerenje vibracija se dijele na:

- Beskontaktne: ne zahtijevaju fizički kontakt s objektom na kojem se mjere vibracije.
- Kontaktne: zahtijevaju fizički kontakt s objektom na kojem se mjere vibracije.

#### 3.1. Beskontaktni senzori za mjerenje vibracija

Neke od vrsta beskontaktnih senzora za mjerenje vibracija su: induktivni senzor pomaka, kapacitivni senzor pomaka i ostali manje zastupljeni senzori. Sve vrste su opisane u daljnjem tekstu rada.

##### 3.1.1. Induktivni senzor pomaka

Induktivni senzor pomaka radi na principu vrtložnih struja. Magnetno polje proizvedeno prolaskom izmjenične struje kroz zavojnicu inducira vrtložne struje u bilo kojem električni vodljivom materijalu blizu zavojnice. Takve senzore je potrebno prije uporabe dobro kalibrirati, odnosno prednamjestiti na određeni napon, a pomak vodljivog materijala od senzora se manifestira u obliku rasta, odnosno pada napona. Izgled i princip rada induktivnog senzora pomaka dani su na slikama 3.1 i 3.2.

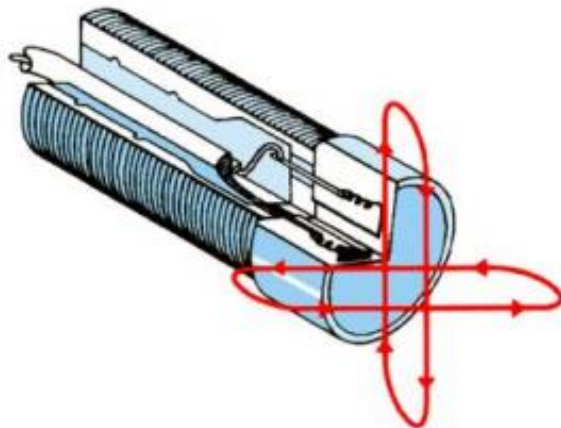
Osjetljivost ovakvog senzora je reda veličine  $8\text{mV}/\mu\text{m}$ .

Induktivni senzor temelji se na faradayevom zakonu indukcije(2):

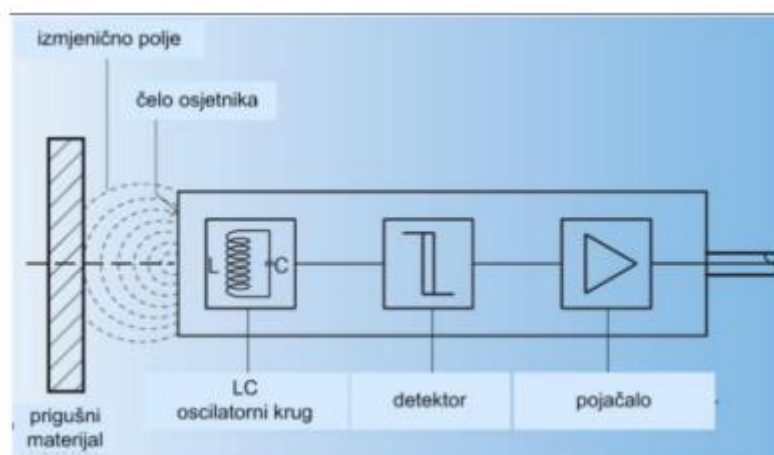
$$e = -N \times \frac{dB}{dt} \quad [\text{V}] \quad (2)$$

Gdje je:

- e - elektromotorna sila
- dB – promjena magnetske indukcije [T]
- dt – promjena vremena [s]



**Slika 3.1** Induktivni senzor pomaka



**Slika 3.2** Princip rada beskontaktnog induktivnog senzora

Prednosti beskontaktnog induktivnog senzora su:

- Veliko i masivno kućište koje je otporno na vanjske utjecaje okoline
- Napravljen od vodonepropusnih materijala te je svaki spoj zabrtvljen da ne propušta vodu i vlagu
- Nema kontakta s objektom na kojem se mjere vibracije
- Visoka točnost



- Brzi odziv

Nedostatci beskontaktnog induktivnog senzora su:

- Mogu se mjeriti samo električni vodljivi materijali
- Zbog magnetske indukcije bitna je debljina uzorka, senzor ne može osjetiti tanku foliju
- Ograničen mjerni opseg (<30mm)
- Nelinearan odnos izlaznog signala i udaljenosti mete
- Zahtijevaju kalibraciju pri puštanju u pogon



Slika 3.3

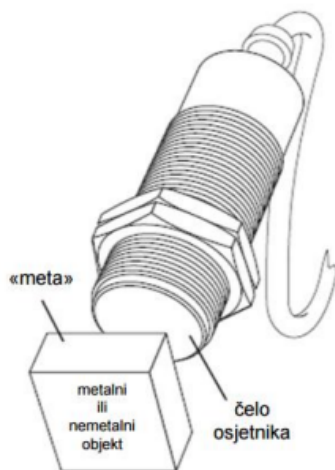


Slika 3.4

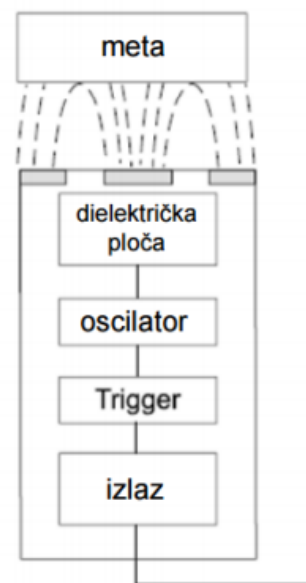
Na slikama 3.3 i 3.4 su prikazane razne izvedbe beskontaktnih induktivnih senzora pomaka.

### 3.1.2. Kapacitivni senzor pomaka

Kapacitivni senzori su beskontaktni senzori koji se primarno koriste za mjerenje linearnog pomaka od nekoliko milimetara do stotine milimetara. Sastoji se od tri ploče s gornjim parom, koji tvori jedan kondenzator i donjim koji tvori drugi kondenzator. Kapacitivni senzor pomaka radi na principu električnog polja. Oscilator stvara električno polje usmjereno u smjeru razmatrane površine, odnosno mjesta na kojem je potrebno mjeriti pomak, te se u ovisnosti o udaljenosti i površini objekta mijenja kapacitet osjetnika. Izgled i princip rada kapacitivnog senzora pomaka je prikazano na slikama 3.5 i 3.6.



**Slika 3.5** kapacitivni senzor pomaka



**Slika 3.6** način rada kapacitivnog senzora

Prednosti beskontaktnog kapacitivnog senzora su:

- Veliko i masivno kućište koje je otporno na vanjske utjecaje okoline
- Otpornost na vodu

- Ne ovise o električni vodljivim materijalima, mogu mjeriti sve materijale (metali, izolatori, voda ...)
- Nema kontakta s objektom na kojem se mjeri

Nedostatci beskontaktnog kapacitivnog senzora su:

- Veličina objekta na kojem se mjeri mora biti veći od jedne trećine osjetne zone
- Maksimalni mjerni opseg je <40% promjera osjetnika
- Točnost ovisi o površini objekta (zaobljenost, hrapavost, ...)
- Osjetljivost na promjenu vlage i temperature u zraku

Kapacitivni senzori se rjeđe koriste u praksi mjerenja vibracija, češće kao senzori pomaka ili prisutnosti.

### **3.1.3. Ostali manje zastupljeni beskontaktni senzori**

Postoje i druge izvedbe senzora za mjerenje pomaka, odnosno vibracija koji se rjeđe koriste u praksi što zbog ekonomskih razloga, što zbog potrebe za kompliciranim mjernim krugovima.

Neki do njih su:

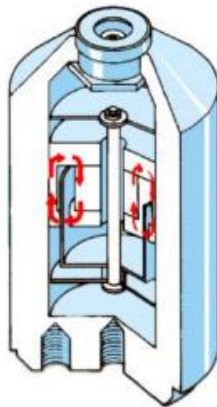
- Fotonički osjetnici – vlakna koja odašilju svjetlost i vlakna koja primaju reflektiranu svjetlost te mjere i kut između izlazne i reflektirane zrake
- Laserski osjetnici – laser obasjava metu na kojoj se mjeri pomak, na metu je postavljeno ogledalce ili reflektivna folija od koje se laserska zraka odbija na polje foto diode. Mjeri se kut ili fazni pomak između izlazne i reflektirane zrake.
- Potenciometerski pretvarači s poteznom niti – Nit je povezana na potencijometar i otpor se mijenja u ovisnosti o pomaku niti, a s time i iznos napona na tom istom otporniku.

### 3.2. Kontaktne senzori vibracija

Kontaktne senzori vibracija su senzori koji su u izravnom kontaktu s površinom mjenenog objekta. Najpoznatija dva kontaktne senzora vibracija su kontaktne senzor brzine i kontaktne senzor ubrzanja.

#### 3.2.1. Kontaktne senzor brzine

Kontaktne senzor brzine radi na elektrodinamičkom principu i ne koristi se često u praksi. Prikaz kontaktne senzora brzine dan je na slici 3.7.



Slika 3.7 kontaktne senzor brzine

Prednosti:

- Inducirani napon(3) je proporcionalan duljini svitka, brzini i magnetnom polju.

$$E = B \times l \times v \text{ [V]} \quad (3)$$

Gdje je: E – Inducirani napon na izlazu iz senzora [V]

B – Magnetska indukcija u zračnom rasponu [Wb]

L – Duljina svitka [m]

v – brzina [m/s]

Nedostatci :

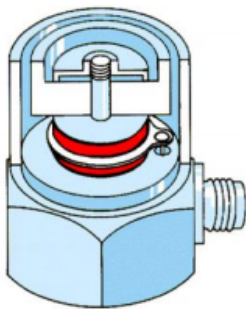
- Senzor je podložan trošenju zbog izravnog kontakta s mjenenom površinom objekta.
- Veće dimenzije

- Osjetljivost na magnetna polja
- Ograničeno frekvencijsko područje

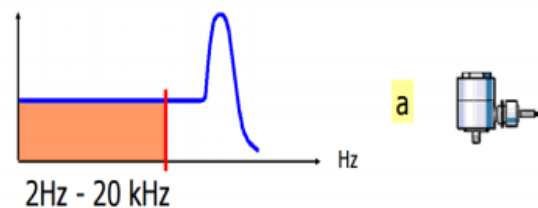
### 3.2.2. Kontaktni senzor ubrzanja (piezoelektrični akcelerometar)

Kontaktni senzor ubrzanja radi na piezoelektričnom efektu. Piezoelektrični efekt je pojava stvaranja električnog naboja na površini posebno odrezanog kristala koji je elastično deformiran vanjskom silom. Jedna strana (površina) tog kristala nabit će se negativno, a druga pozitivno. Dakle kristal postaje električki polariziran. Polarizacija kristala je najveća kada je naprezanje usmjereno u pravcu piezoelektrične osi kristala. Prikaz i područje primjene piezoelektričnog akcelerometra su dani na slici 3.8 i 3.9.

Takvi senzori su najzastupljeniji u praksi.



**Slika 3.8** kontaktni senzor ubrzanja



**slika 3.9** područje primjene piezoelektričnog akcelerometra

Prednosti:

- Nema nikakvog trošenja
- Rad u širokom frekvencijskom području
- Kompaktnost
- Stabilnost
- Moguća ugradnja u bilo koji položaj

Nedostatci:

- Nema odziv na istosmjernu komponentu, što nije bitno za mjerenje vibracija ali za mjerenje nečeg drugog sigurno je

- Zahtjeva kruti spoj s površinom na kojoj se mjere vibracije
- Loš spoj rezultira smanjenjem frekvencijskog područja
- Osjetljivost na jake udare i padove (prilikom jakih udara dolazi do predopterećenja i promjene osjetljivosti što dovodi do potrebe za kalibracijom)

Prilikom mjerenja s piezoelektričnim akcelerometrom potrebno je obratiti pozornost na magnetsku indukciju drugih energetske kabela ukoliko se signalni kabel nalazi u njihovoj blizini.

Zbog potrebe za što boljim spojem s površinom na kojoj se mjere vibracije akcelerometri se uglavnom na strojeve pričvršćuju vijčanim spojem. Ukoliko se nekim senzorom mjeri na više uređaja odnosno da je senzor potrebno pričvršćivati na više mjesta (uređaja) tada se koriste magneti i dvostrano ljepljive trake. Time se gubi na frekvencijskom mjernom rasponu i to najčešće zadovoljava uvjete mjerenja (osim u sličaju laboratorijskih mjerenja ili mjerenja koja zahtijevaju visoku točnost). Isto tako treba pripaziti na utjecaj okoliša jer on također utječe na mjerni rezultat. Pod utjecajem okoliša se misli na buku, korozivne tvari, te magnetska i električna polja.

Uz kontaktni senzor ubrzanja uvijek se stavlja i predpojačalo, i to u svrhu:

- Prilagodbe impedancije
- Filtriranje signala
- Integracije signala tako da na izlazu iz pretpojačala imamo brzinu ili pomak

### **3.3. Odabir opreme za ispitivanje uzoraka na prigušenje vibracija**

U ovom radu je za potrebe generiranja vibracija odabran magnetostriksijski zvučnik tvrtke Esarc. Uređaj odabran zbog jednostavne montaže i principa rada koji se za potrebe razvoja ovog sustava pokazao prikladnim zbog širokog raspona frekvencija. Signali vibracija će biti prikupljeni mjernim sustavom sastavljenim od trokomponentnog piezo-električnog akcelerometra (tip 8688A50) i nabojnog pojačala (tip 5134B) proizvođača Kistler Holding AG. Za akvizicijski sustav odabrano je maleno višenamjensko računalo RedPitaya 125-14 slovenskog proizvođača. Oprema je prikazana na slici 3.10, 3.11 i 3.12



**Slika 3.10** Zvučnik tvrtke Esarc



**Slika 3.11** senzor vibracija s nabojnim pojačalom



**Slika 3.12** Red pitaya

### **3.4. Opis opreme i njihove tehničke karakteristike**

#### **3.4.1. Trokomponentni senzor vibracija i nabojno pojačala**

Trokomponentni piezo-električni akcelerometar( tip 8688A50) i nabojno pojačalo( tip 5134B) su proizvodi švicarskog proizvođača Kistler Holding AG. Popis tehničkih karakteristika dan je u tablici 3.1.



		Područje	Jedinica
Senzor vibracija (tip8688A50)	Mjerno područje akceleracije	±50	g
	Maksimalna dozvoljena akceleracija	±80	g
	Osjetljivost ( ±10%)	100	mV/g
	Frekvencijsko područje	0,5 ... 5000	Hz
Nabojno pojačalo (tip 5134B)	Broj kanala	4	
	Vremenska konstanta ulaznog kruga	10/1/0,1/0	s
	Programibilni faktor pojačanja	0,5 ... 150	
	Programibilni nisko propusni filter (-3db)	0,001... 10 <sup>7</sup>	Hz
	Izlazni signal po kanalu	±10,±5	V

Tablica 3.1

### 3.4.2. Zvučnik tvrtke Esarc

Magnetrostriksijski zvučnik koji može bilo koju površinu pretvoriti u zvučnik. Primijenjuje se na izlozima trgovine gdje se s unutarnje strane stakla zalijepi te staklo pretvara u zvučnik. Zvučnik je zaštićen od vanjskih utjecaja okoliša ( kiše, vlage, vandalizma) a prolaznici čuju glazbu na ulici. U ovom radu zvučnik će služiti kao aktuator za pobudu vibracija.

Tehnologija: magnetrostriktivna

Maksimalna snaga: 20 W

Impedancija: 4 ohm

Radna temperatura: 0 ° C – 70 ° C

Vlažnost: 5-95%

Visina: 50 mm

Širina: 50 mm

Masa: 840 g

### 3.4.3. Akvizicijski sustav

Osnovu akvizicijskog čini maleno višenamjensko računalo *Red Pitaya* slovenskog proizvođača. Računalo je opremljeno s dva analogno digitalna pretvornika koji mogu uzrokovati signal frekvencijama i do 125Ms/s te s dva digitalno analogna pretvornika koji pri istim frekvencijama mogu generirati proizvoljno zadani signal.

Operacijski sustav *Red Pitaya* računala temeljen je na *Linux* jezgri i obuhvaća niz aplikacija pisanih u otvorenom kodu. U ovom radu će se koristiti signal generator i osciloskop. Osciloskop je instrument koji grafički prikazuje vremenske profile istosmjernih i izmjeničnih signala. Signal generator proizvodi razne vrste periodičnih signala maksimalne amplitude  $\pm 1$  [V]. Vrste periodičnih signala su: sinus, pravokutnik, trokut, uzlazni zubi pile i silazni zubi pile. [12]

Tehničke karakteristike red pitay-e, signal generatora i osciloskop dani su u tablicama 3.2, 3.3 i 3.4.

RF ULAZI	RF IZLAZI
Broj kanala: 2	Broj kanala: 2
Propusnost: 50 MHz (3dB)	Propusnost: 50 MHz (3dB)
Brzina obrade uzoraka: 125 Msps	Brzina obrade uzoraka: 125 Msps
ADC rezolucija: 14 bitna	DAC rezolucija: 14 bitna
DC	DC
Razina glasnoće: < -119 dBm/Hz	Otpornost na opterećenje: 50Ω
Impedancija: 1MΩ // 10 pF	Ograničenje brzine izlaza: 200 V/us
Tip konektora: SMA	Tip konektora: SMA
Pun napon skale: 2Vpp	Puna skala snage: > 9 dBm
Pogreška istosmjernog pomaka: <5% FS	Pogreška istosmjernog pomaka: <5% FS
Pogreška dobitka: <3%	Pogreška dobitka: <5%
Harmonici:	Harmonici: obično na -8 dbm

- Na -3 dBFS: obično < -45 dBc - Na -20 dBFS: obično < -60 dBc	-51 dBc @ 1MHz -49 dBc @ 10 MHz -48 dBc @ 20 MHz -53 dBc @ 45 MHz
Lažne komponente frekvencije: obično < 90dBFS	
Odziv frekvencije podešava se digitalnom kompenzacijom	
Maksimalni apsolutni ulazni napon: 30V	

Tablica 3.2

## OSCILOSKOP:

Broj ulaznih kanala:	2
Propusnost:	40 MHz
Rezolucija:	14 bitna
Memorija:	16k uzoraka
Raspon ulaza:	+/- 1V (LV) i +/- 20V (HV)
	DC
Minimalna osjetljivost napona:	$\pm 0.122$ mV / $\pm 2.44$ mV
Vanjski okidač:	Ima

Tablica 3.3

## SIGNAL GENERATOR:

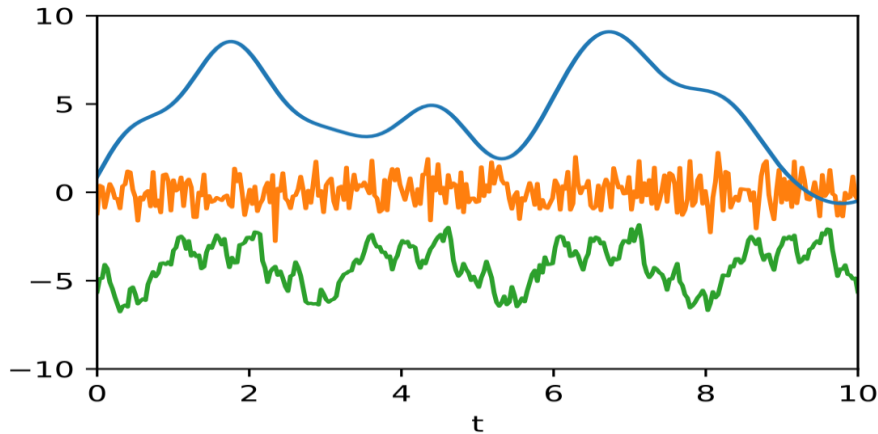
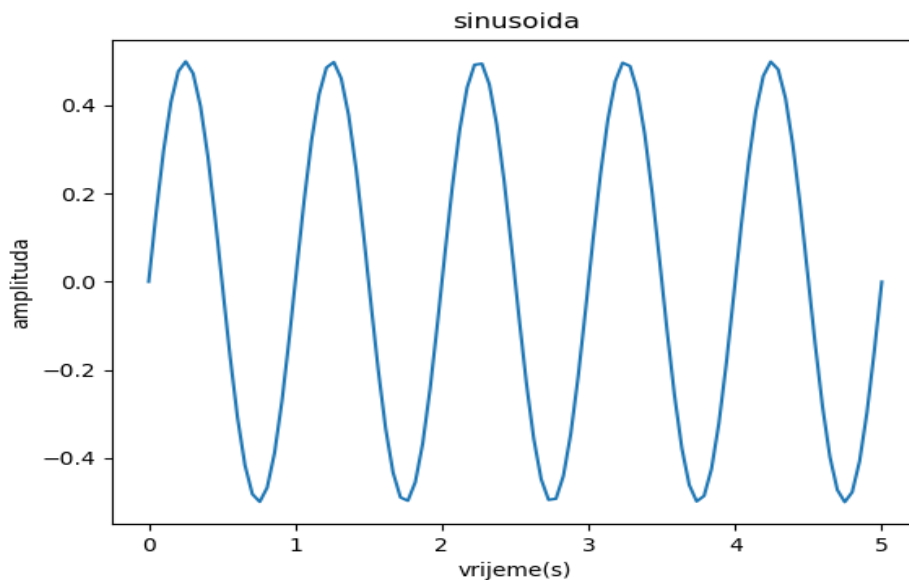
Broj izlaznih kanala:	2
Raspon frekvencije:	0-50 MHz
Rezolucija:	14 bitna
Međuspremnik signala:	16k uzoraka
Izlazni raspon:	+/- 1V
	DC
Vanjski okidač:	Ima
Izlazno opterećenje:	50 $\Omega$

Tablica 3.4

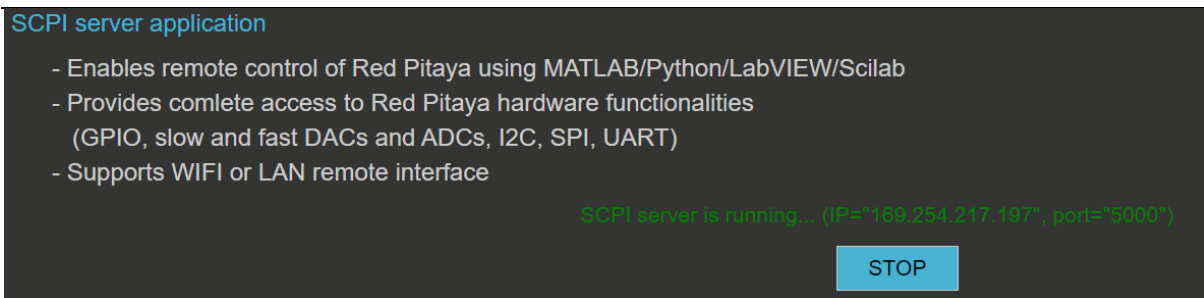
**3.5. Opis i povezanost između programskog jezika i Red pitaye**

Ispitivanje će se provoditi kroz korištenje programskog jezika Python. U pisanju programskog koda za ispitivanje prigušenja vibracija će se koristiti neke od poznatijih biblioteka za računanje u pythonu:

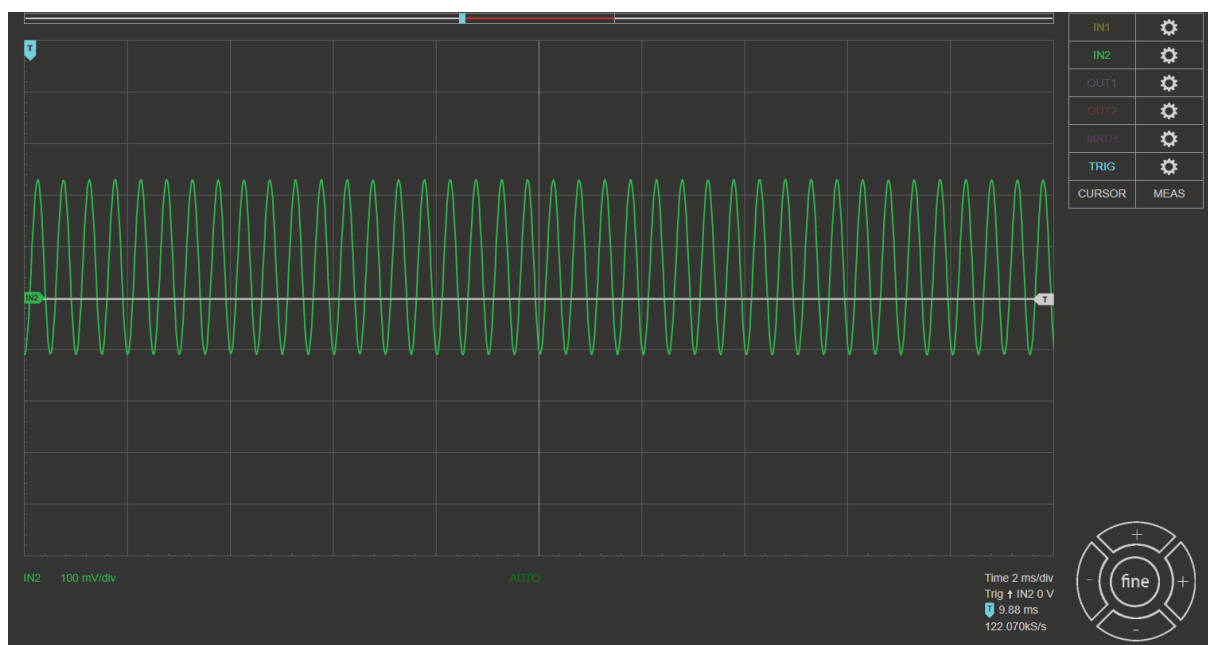
- Numpy je biblioteka koja omogućava podršku za višedimenzionalne nizove i matrice, zajedno s velikim brojem matematičkih funkcija matrične operacije.
- Matplotlib je biblioteka za grafički prikaz podataka. Oblici prikaza u matplotlib-u dani su na slikama 3.13 i 3.14.

**Slika 3.13 primjer prikaza matplotlib-a****Slika 3.14 prikaz sinusoide koristeći matplotlib**

Korištenje instrumenata (Osciloskop, Signal generator) na Red pitay-i se izvodi preko Python-a. Povezani su pomoću SCPI (Standardne naredbe za programibilne instrumente), SCPI sučelje obično se koristi za kontrolu instrumenata u svrhu razvoja, istraživanja ili automatizacije ispitivanja. SCPI koristi skup naredbi koje instrumenti prepoznaju kako bi se omogućilo poduzimanje određenih radnji( na primjer: prikupljanje podataka s brzih analognih ulaza, generiranje signala i kontrola ostalih perifernih područja. Izgled SCPI i sučelja osciloskopa prikazano je na slikama 3.15 i 3.16.



Slika 3.15 pokretanje SCPI servera



Slika 3.16 izgled snimljenog vala na ulaz u Red pitayu preko aplikacije Osciloskop

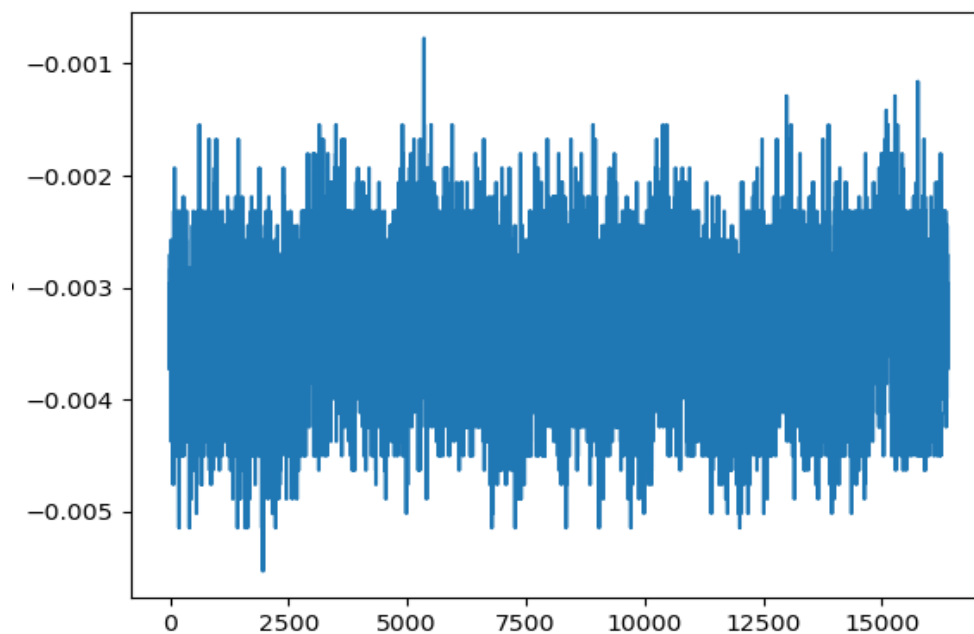
## 4. OPIS POKUSA

Red pitaya ima 2 izlaza i na prvi(OUTPUT1) analogni izlaz preko signal generatora se generiraju sinusni valovi amplitude 0.5 [Vpp] i frekvencija od 1 kHz do 15 kHz s korakom od 1 kHz. To se dobije jednostavnom for petljom prikazanom na slici 4. 1 i povezivanjem Python petlje s prvim analognim izlazom Red pitaye.

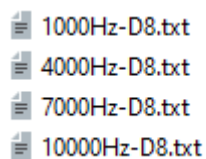
```
for i in range(1000,15000,1000):
    F=i
    T = 10/F
    Fs = 100000
    Ts = 1./Fs
    N = int(T/Ts)
    t = np.linspace(0, T, N)
    signal = np.sin(2*np.pi*F*t)*0.5
    print(i)
    rp_s.tx_txt('SOUR1:FREQ:FIX %s' % (str(i)))
    rp_s.tx_txt('OUTPUT1:STATE ON')
    time.sleep(0.2)
    #ovdje snimiti signal
    rp_s.tx_txt('ACQ: DEC 8')
    rp_s.tx_txt('ACQ:START')
    rp_s.tx_txt('ACQ:TRIG NOW')
```

Slika 4.1 for petlja

Sinusni valovi se puštaju jedan za drugim s vremenskom pauzom radi smirivanja oscilacija. Svaki sinusni val će biti snimljen u 16 000 točaka pomoću piezoelektričnog akcelometra koji preko pojačala šalje podatke na prvi analogni ulaz Red pitaye. Ti podatci se prikazuju u dva oblika(u obliku grafa preko matplotlib-a i kao lista točaka u tekstualnoj datoteci). Prikazano na slici 4.2 i 4.3.



**Slika 4.2** prikaz signala u matplotlib-u



**Slika 4.3** primjer spremanja snimaka u txt datoteku

Svaki snimak ima svoje značenje:

- Broj( na primjer 1000) označava frekvenciju sinusnog vala, ujedno je i glavno ime
- [Hz] mjerna jedinica
- D8 znači da je decimacija 8( broj uzoraka za svaki val je 16000)
- Txt da je to tekstualna datoteka

Podaci se za svako stanje pokusa pohranjuju u zasebnu tekstualnu datoteku, te ih je potrebno otvoriti i za svaku izračunati srednju vrijednost amplitude sinusnog vala. Svaki uzorak će se snimati dva puta za iste frekvencije uzorkovanja, prvi put će akcelerometar biti postavljen u blizini aktuatora, a drugi put na nekoj određenoj udaljenosti( na primjer 100 [mm]). Bit



ispitivanja je pokazati koji materijal bolje prigušuje vibracije, a to će se zaključiti formiranjem amplitudno frekvencijske karakteristike u obliku Bode-ovih dijagrama. Rezultati se obrađuju na način da se za svaku određenu frekvenciju izračuna srednja vrijednost amplitude i da se usporede rezultati kao pad srednje amplitude prvog mjerenja u blizini aktuatora i drugog mjerenja na nekoj udaljenosti. Očekivani rezultati su pad amplitude s obzirom na udaljenost tj. materijal upija vibracije te na taj način dolazi do prigušenja. Uspoređujući rezultate ispitnih uzoraka od različitih materijala koji su ispitani na isti način, lako se može zaključiti koji materijal bolje prigušuje vibracije.

#### 4.1. Prikaz postavljenih instrumenata za ispitivanje

Aktuator koji generira vibracije treba biti izoliran od okoliša, tj. ne smije biti u doticaju s nekim predmetom( osim ispitnim uzorkom). Najbolji način je smjestiti aktuator da visi u zraku, a pošto je to nemoguće izvesti, aktuator će biti smješten na spužvastu podlogu koja će služiti kao izolator od okoline. Na slici 4.4 je prikazan aktuator na spužvastoj podlozi.



**Slika 4.4** aktuator na spužvastoj podlozi

Ispitni uzorci korišteni za pokus( testiranje sustava) prikazani su na slici 4.5

- 2 ispitna uzorka
- Različitog materijala(drvo i metal)
- Istih dimenzija
- Odabire se širina 50 [mm](jer je aktuator te širine), duljina 300 [mm] i debljina 8 [mm]



**Slika 4.5** ispitni uzorci(drvo i metal)

Ispitni uzorak se stavlja na aktuator te se pričvršćuje za njega, ispitni uzorak i aktuator bi trebali biti kao jedno tijelo da bi ispitivanje bilo što bolje. Jedno od boljih rješenja je zalijepiti ispitni uzorak tankim slojem ljepila za aktuator, ali taj način otpada jer jednom kad se zalijepi s ljepilom visoke čvrstoće nema odljepljivanja i mijenjanja uzoraka. Drugi način je postići prijanjanje pomoću narinute vanjske sile. To se može postići korištenjem vijaka, utega, ljepljivih traka, elastičnih gumica i mnogih drugih pomoćnih sredstava. Kako je već spomenuto korištenje utega(velika masa) imalo bi utjecaj na ispitivanje uzoraka i aktuatora, zato se odabire ljepljiva traka kao sredstvo za prijanjanje ispitnih uzoraka na aktuator. Isti princip se primjenjuje za prijanjanje piezoelektričnog akcelerometra na ispitni uzorak. Na slikama 4.6 i 4.7 je prikazan ispitni uzorak pričvršćen na aktuator te akcelerometar pričvršćen na ispitni uzorak

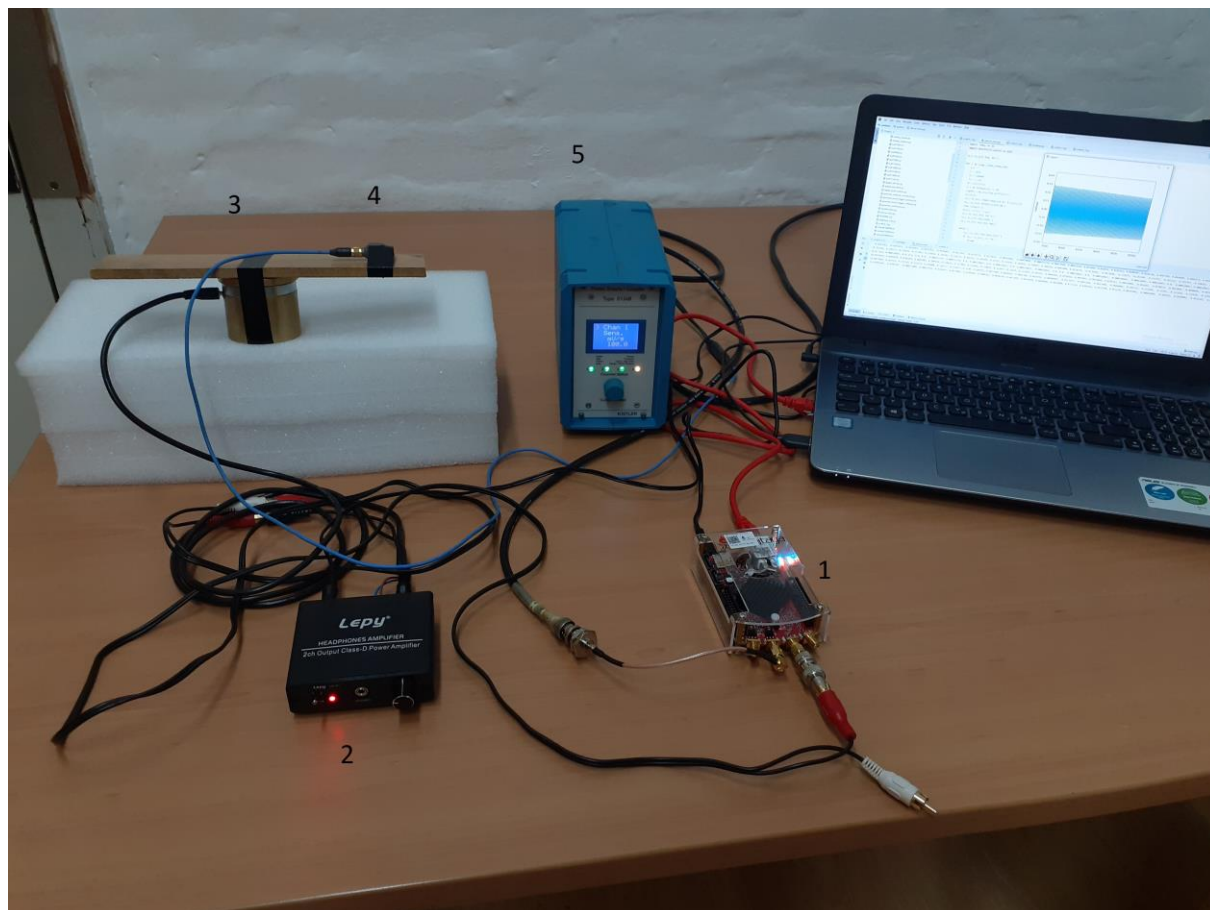


**Slika 4.6** uzorak pričvršćen trakom za aktuator



**Slika 4.7** akcelerometar pričvršćen trakom za uzorak

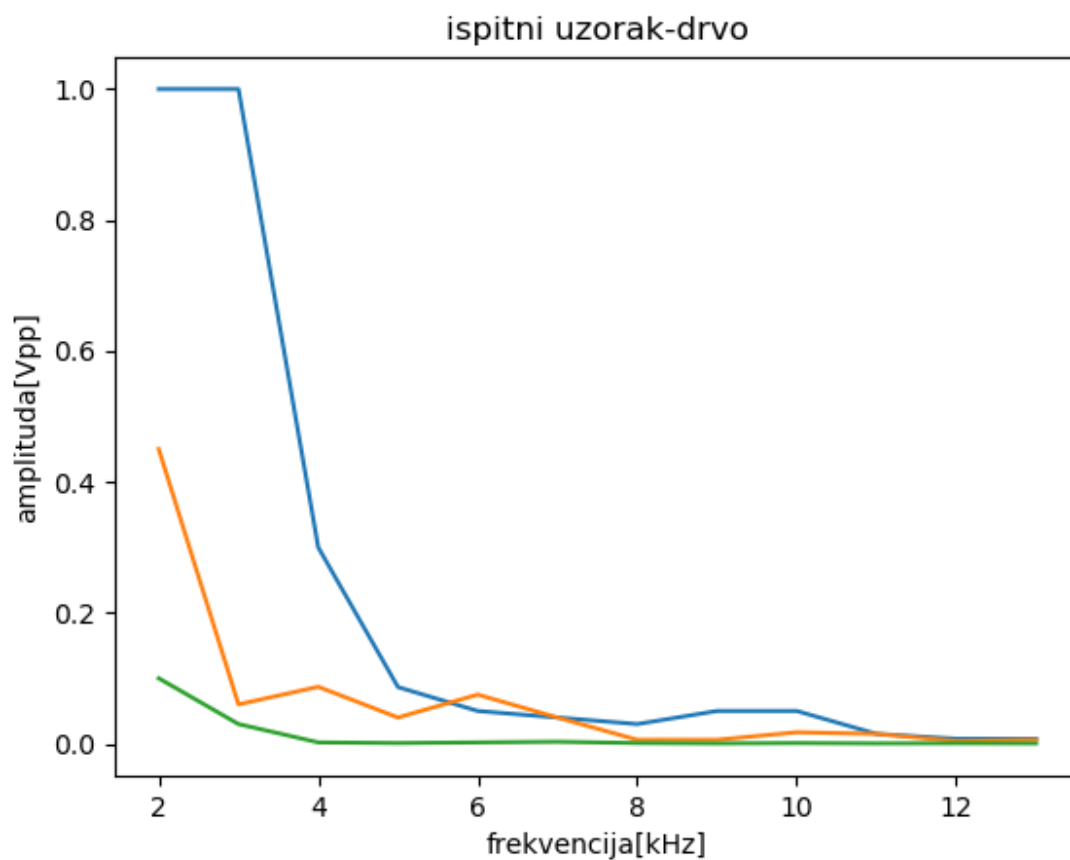
Kompletan sustav za ispitivanje frekvencijskih karakteristika je sastavljen i prikazan slikom 4.8



Slika 4. 8 kompletan sustav za ispitivanje vibracija

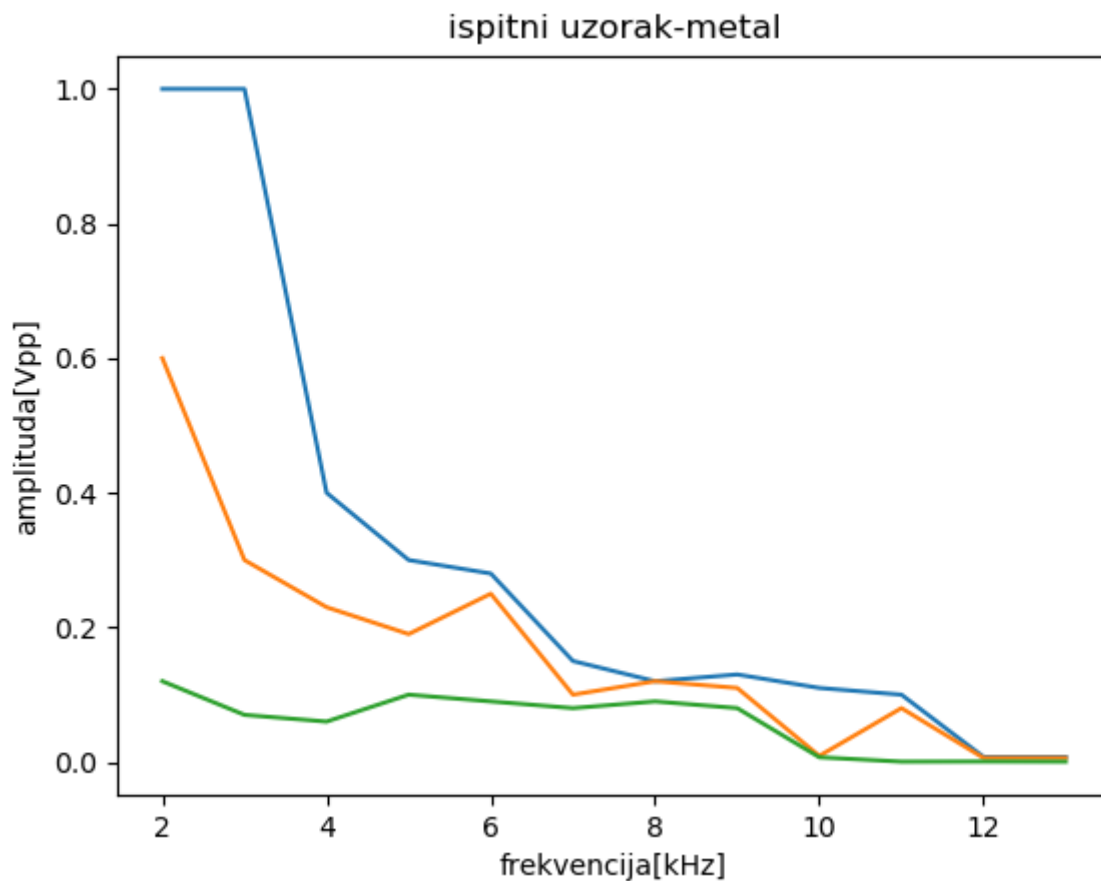
## 5. REZULTATI TESTIRANJA

Ispitni uzorci postavljeni na aktuator ispitani su s akcelerometrom na tri različite udaljenosti. Test se ponovio dva puta radi točnosti rezultata. S obzirom na udaljenosti pad krivulje u grafu prati svoj oblik, do 4 kHz pad amplitude dolazi do izražaja, a s povećanjem frekvencije do 12 kHz amplituda se asimptotski približava nuli. Prvi uzorak je drvo te je njegov graf prikazan na slici 5.1



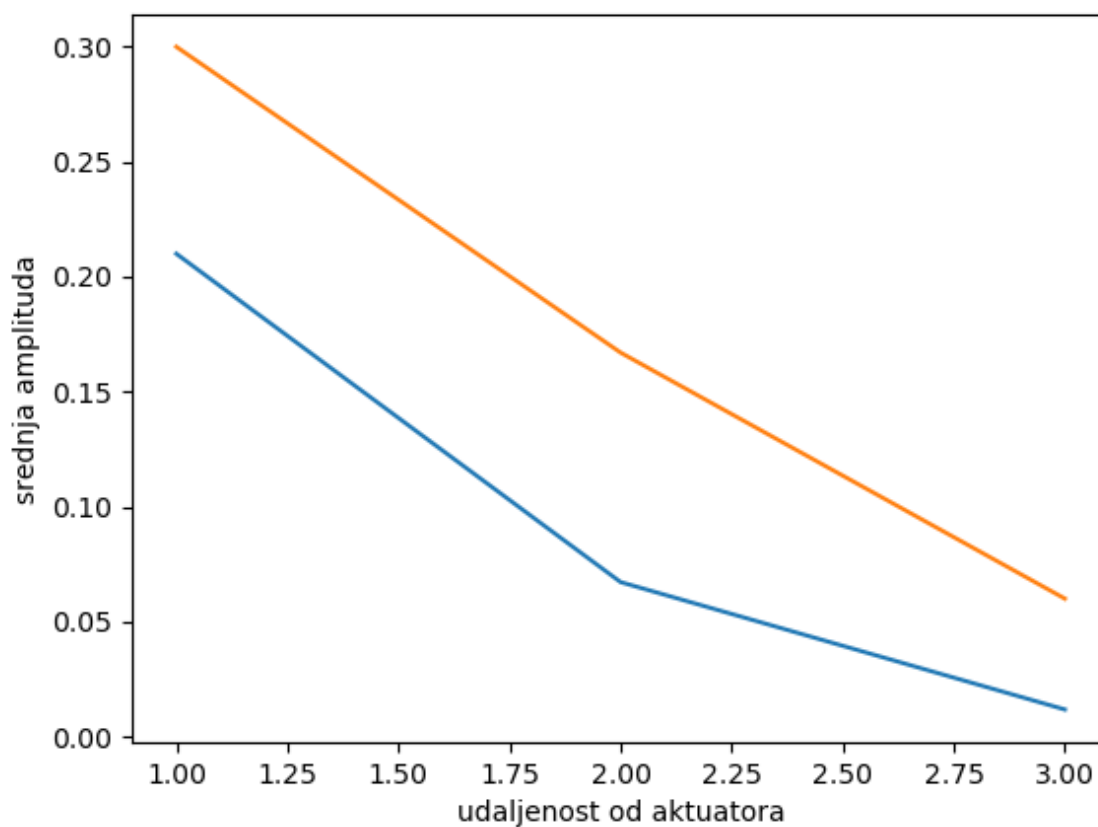
**Slika 5.1** pad amplitude ispitnog uzorka napravljenog od drva

Drugi uzorak je metal, njegov graf je približno sličan grafu drvenog uzorka, ali se može primijetiti da su padovi amplituda manji, što se i očekivalo prije testa. Prikaz pada amplitude metalnog uzorka dan je na slici 5.2.



**Slika 5.2** pad amplitude ispitnog uzorka napravljenog od metala

Radi bolje usporedbe koji ispitni uzorak bolje prigušuje vibracije napravljen je graf koji prikazuje srednje vrijednosti amplituda za svaki uzorak u ovisnosti o udaljenosti mjerenja od aktuatora.



**Slika 5.3** prikaz pada srednje amplitude u ovisnosti o udaljenosti akcelerometra od aktuatora

## 6. ZAKLJUČAK

Smisao ovog rada bio je napraviti sustav koji je u mogućnosti detaljno mjeriti i analizirati vibracije pobuđene u nekom uzorku. Glavni problem je visoka cijena ispitnih uređaja i nedostatak laboratorijskih uvjeta rada. Sustav je realiziran i napravljena su probna ispitivanja na metalnom i drvenom uzorku.

Iako je na temelju provedenih ispitivanja uočen očekivani trend pada amplitude s porastom frekvencija, te pad amplitude s obzirom na ispitne uzorke i mjesto mjerenja ne može se sa sigurnošću zaključiti da sustav radi bez greške. Sustav je jako fleksibilan, što bi značilo da se svi parametri mogu podešavati prema traženim vrijednostima s tim da budu u granicama mogućnosti opreme.

Buduća istraživanja biti će usmjerena razvoju programske podrške, automatizacije procesa, umjeravanju opreme za ispitivanje te provedbu samih ispitivanja.



---

**POPIS LITERATURE:**

- [1] Singiresu S. Rao: Mechanical vibrations
- [2] Himanshu Mevada, Dipal Patel: experimental determination of structural damping of different materials
- [3] <http://www.janssenprecisionengineering.com/downloads/Structural-damping-definitions.pdf>
- [4] C.F. Beards: Structural Vibration: Analazys and damping
- [5] Sezan Orak: investigation of vibration damping on polymer concrete with polyester resin
- [6] Tomislav Staroveški : "Modeliranje trošenja medicinskog svrdla", Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013.
- [7]RedpitayaStemlabdocumentation:  
<https://buildmedia.readthedocs.org/media/pdf/redpitaya/latest/redpitaya.pdf>
- [8] Numpy: <https://en.wikipedia.org/wiki/NumPy>
- [9] Matplotlib: <https://en.wikipedia.org/wiki/Matplotlib>
- [10] Mario Essert: Python, Digitalni udžbenik
- [11] Scipy: <https://www.scipy.org/>
- [12] Red pitaya script: <https://redpitaya.readthedocs.io/en/latest/appsFeatures/appsFeatures.html>