Karakterizacija materijala temeljem frekvencijske analize ultrazvučnih odziva

Brlek, Anja

Master's thesis / Diplomski 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:235:327411

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Anja Brlek

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
Prof. dr. sc. Damir Markučič, dipl.ing.

Student:
Anja Brlek

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ANJA BRLEK** Mat. br.: 0035193293

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija materijala temeljem frekvencijske analize ultrazvučnih odziva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Material characterization based on frequency analysis of ultrasonic pulses**

Opis zadatka:

Karakterizaciju ili klasifikaciju materijala moguće je provoditi korištenjem fizikalnih principa nerazornih metoda ispitivanja. Između različitih fizikalnih principa, brojne su mogućnosti karakterizacije materijala temeljem analize značajki ultrazvučnih signala.
Različiti unos topline kod postupaka zavarivanja većih debljina osnovnog materijala posljedično rezultira različitim mikro- i makrostrukturama materijala u različitim područjima volumena: od osnovnog materijala do samog volumena zavarenog spoja. Sukladno tome, u radu je potrebno odabrati odgovarajući uzorak te provesti:
1. Prikupiti ultrazvučne odzive iz karakterističnih volumena osnovnog materijala, zone utjecaja topline i volumena zavarenog spoja.
2. U svrhu prikupljanja ultrazvučnih odziva odabrati ultrazvučne sonde različitih frekvencijskih značajki.
3. Za odabrane sonde također prikupiti ultrazvučne odzive na standardnom radnom etalonu (ISO 2400).
4. Prikazati i usporediti sve dobivene ultrazvučne odzive u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.
5. Komentirati razlike ultrazvučnih frekvencijskih odziva s obzirom na mikro- ili makrostrukturu materijala u različitim volumenima zavarenoga spoja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: 24. rujna 2020.

Rok predaje rada: 26. studenog 2020.

Predviđeni datum obrane: 30. studenog do 4. prosinca 2020.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Damir Markučič

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

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

Iskreno se zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Damiru Markučiču na izdvojenom vremenu, stručnom vodstvu kroz rad, korisnim savjetima i pomoći.

Najveća hvala mojoj obitelji, roditeljima Nedjeljki i Željku, baki Slavici i djedu Dragutinu, na neizmjernom strpljenju, motivaciji i podršci tijekom godina studiranja. Također hvala dečku Marku na pomoći, potpori i razumijevanju.

Anja Brlek

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA IV
POPIS TABLICA VII
POPIS OZNAKA VIII
POPIS KRATICA IX
SAŽETAK X
SUMMARY XI
1. UVOD 1
1.1. Povijesni razvoj ultrazvuka 1
2. ISPITIVANJE I KONTROLA ULTRAZVUKOM 3
2.1. Elementi ultrazvučnog sustava 3
2.1.1. Vrste sondi 6
2.2. Geometrija ultrazvučnog snopa 9
2.3. Uvod u frekvencijsku analizu 10
2.3.1. Vremenska domena 10
3. KARAKTERIZACIJA MATERIJALA 12
3.1. Frekvencijska domena 13
3.2. Širina frekvencijskog spektra 16
3.3. Određivanje koeficijenta prigušenja 17
3.4. Matematička podloga provedbe FFT analize 19
3.4.1. Koeficijenti Fourierovog reda 19
3.4.2. Windowing ili Prozor tehnika 20
4. PRIMJERI ULTRAZVUČNE KARAKTERIZACIJE SVOJSTAVA MATERIJALA 23
4.1. Mjerenje veličine zrna 23
4.2. Vremensko-frekvencijska analiza ultrazvučnih odjeka i primjena u svrhu procjene toplinske degradacije čelika 23
4.3. Toplinska krhkost duplex nehrđajućeg čelika 25
4.4. Razaranje legure 625 uslijed starenja 25
5. POLAZNI MATERIJAL ISPITIVANJA 27

5.1. Osnovni materijal ... 27
5.2. Dodatni materijal ... 28
5.3. Mikrostruktura zavarenog spoja ... 29
6. KONCEPT ISPITIVANJA - PRELIMINARNO ISPITIVANJE ... 30
6.1. Tijek preliminarnog ispitivanja ... 30
6.2. Rezultati preliminarnog ispitivanja ... 31
7. REZULTATI ISPITIVANJA ... 35
7.1. Ulazni podaci ispitivanja ... 35
7.1.1. Volumen uzorka ultrazvučnog odziva ... 38
7.1.2. Rezultati mjerenja s etalona V1 pomoću sonde K2N ... 41
7.1.3. Rezultati mjerenja s etalona V1 pomoću sonde MB2S ... 43
7.2. Prikaz rezultata mjerenja ispitnog uzorka sondom K2N ... 45
7.2.1. Mjerno područje 1 ... 45
7.2.2. Mjerno područje 2 ... 47
7.2.3. Mjerno područje 3 ... 49
7.2.4. Mjerno područje 4 ... 51
7.2.5. Mjerno područje 5 ... 53
7.3. Prikaz rezultata mjerenja ispitnog uzorka sondom MB2S ... 55
7.3.1. Mjerno područje 6 ... 55
7.3.2. Mjerno područje 7 ... 57
7.3.3. Mjerno područje 8 ... 59
7.3.4. Mjerno područje 9 ... 61
7.3.5. Mjerno područje 10 ... 63
7.4. Zajednički prikaz rezultata ... 65
8. USPOREDBA REZULTATA ... 66
8.1. Usporedba rezultata sonde K2N i sonde MB2S ... 66
8.1.1. Utjecaj zavara na karakteristične veličine spektra ... 70
8.2. Usporedba frekvencijskih spektara iz istih mjernih područja ... 71
8.2.1. Usporedba mjernih područja 1 i 6 ... 71
8.2.2. Usporedba mjernih područja 2 i 7 ... 72
8.2.3. Usporedba mjernih područja 3 i 8 ... 73

8.2.4. Usporedba mjernih područja 4 i 9 74
8.2.5. Usporedba mjernih područja 5 i 10 75
8.2.6. Zapažanja 76
9. ZAKLJUČAK 77
LITERATURA 78
PRILOZI 80

POPIS SLIKA

Slika 1. Etalon ozanke V1 s pripadajućim tehničkim specifikacijama [3] 5
Slika 2. Etalon oznake V2 s pripadajućim tehničkim specifikacijama [3] 5
Slika 3. Primjeri referentnih uzoraka [2] 5
Slika 4. Dijelovi ravne sonde [2] 6
Slika 5. Dijelovi kutne sonde [2] 7
Slika 6. Dijelovi dvostruke sonde [2] 8
Slika 7. Razlika u geometriji UZ polja ovisno o broju pretvornika i vrsti pobude [4] 8
Slika 8. Geometrija ultrazvučnog snopa u mediju [2] 9
Slika 9. Valni oblik ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni [5] 11
Slika 10. Pravokutni val kao suma sinusoida [7] 14
Slika 11. Sinusoidni val u vremenskoj domeni [7] 15
Slika 12. Detekcija šuma u signalu iz vremenske domene [7] 15
Slika 13. Frekvencijski spektar ultrazvučnog impulsa [5] 16
Slika 14. Utjecaj prigušenja na širinu frekvencijskog spektra [8] 17
Slika 15. Signal s cjelovitim brojem perioda [7] 21
Slika 16. Signal s necjelovitim brojem perioda [7] 21
Slika 17. Primjena *prozor* tehnike (windowing) [7] 22
Slika 18. Prikaz rezultata CWT metode vremensko-frekvencijske analize za Cr-Mo čelik [11] 25
Slika 19. Osciloskop korišten u ispitivanju 30
Slika 20. Vremenska domena signala konstruirana iz snimljenih podataka 31
Slika 21. Vremenska domena signala zabilježena u trenutku snimanja na osciloskopu 32
Slika 22. Frekvencijska domena signala 32
Slika 23. Karakteristične veličine frekvencijskog spektra 33
Slika 24. a) Ispitni uzorak b) Makroizbrusak zavarenog spoja 35
Slika 25. Sonde K2N i MB2S 35
Slika 26. Dimenzije sonde K2N [19] 36
Slika 27. Dimenzije sonde MB2S [19] 36
Slika 28. Mjerna područja ispitnog uzorka 37

Slika 29. Mjerenje na etalonu V1 ... 38
Slika 30. Geometrija ultrazvučnog snopa u ispitnom uzorku ... 40
Slika 31. Vremenska domena signala snimljenog na etalonu V1 sondom K2N ... 41
Slika 32. Frekvencijska domena signala snimljenog na etalonu V1 sondom K2N ... 42
Slika 33. Vremenska domena signala snimljenog na etalonu V1 sondom MB2S ... 43
Slika 34. Frekvencijska domena signala snimljenog na etalonu V1 sondom MB2S ... 44
Slika 35. Vremenska domena signala ... 45
Slika 36. Frekvencijska domena signala ... 46
Slika 37. Vremenska domena signala ... 47
Slika 38. Frekvencijska domena signala ... 48
Slika 39. Vremenska domena signala ... 49
Slika 40. Frekvencijska domena signala ... 50
Slika 41. Vremenska domena signala ... 51
Slika 42. Frekvencijska domena signala ... 52
Slika 43. Vremenska domena signala ... 53
Slika 44. Frekvencijska domena signala ... 54
Slika 45. Vremenska domena signala ... 55
Slika 46. Frekvencijska domena signala ... 56
Slika 47. Vremenska domena signala ... 57
Slika 48. Frekvencijska domena signala ... 58
Slika 49. Vremenska domena signala ... 59
Slika 50. Frekvencijska domena signala ... 60
Slika 51. Vremenska domena signala ... 61
Slika 52. Frekvencijska domena signala ... 62
Slika 53. Vremenska domena signala ... 63
Slika 54. Frekvencijska domena signala ... 64
Slika 55. Usporedba vrijednosti središnjih frekvencija za sonde K2N i MB2S ... 66
Slika 56. Usporedba vrijednosti širine frek. spektra za sonde K2N i MB2S ... 67
Slika 57. Frekvencijski spektri signala snimljenih sondom K2N ... 68
Slika 58. Frekvencijski spektri signala snimljenih sondom MB2 ... 69
Slika 59. Rezultati iz najšireg dijela zavara ... 71

Slika 60. Rezultati iz središnjeg dijela zavara 72
Slika 61. Rezultati iz najužeg područja zavara 73
Slika 62. Rezultati iz mjernih područja ZUT-a..... 74
Slika 63. Rezultati iz mjernih područja osnovnog materijala 75

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav čelika X2CrNiMo17-12-2 [12] 27
Tablica 2. Mehanička svojstva čelika X2CrNiMo17-12-2 [13] 27
Tablica 3. Kemijski sastav metala zavara za TIG postupak [15] 28
Tablica 4. Kemijski sastav metala zavara za REL postupak [16] 29
Tablica 5. Nazivne vrijednosti sondi [19] 36
Tablica 6. Numerički rezultati ispitivanja 65

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
α	dB/mm	Koeficijent prigušenja
αs	dB/mm	Koeficijent rasipanja
A	m	Amplituda
Bw	%	Širina frekvencijskog spektra
D	mm	Promjer sonde
Def	mm	Efektivni promjer sonde
fc	MHz	Središnja frekvencija
fl	MHz	Donja frekvencija
fu	MHz	Gornja frekvencija
k_{dB}	/	Koeficijent kuta divergencije
λ	m	Valna dužina
N	mm	Blisko polje
t_{PD}	s	Vrijeme trajanja impulsa
v	m/s	Brzina propagacije ultrazvučnog vala
Z	Ns/m^3	Akustička impedancija

POPIS KRATICA

Kratica	**Opis**
AWS	*American Welding Society* – Američki standard
ISO	*International organization for standardization* – Međunarodna organizacija za standardizaciju
CWT	Continuous Wavelet Transform – Kontinuirana transformacija vala
DIN	*Deutsche Industrie Norm* – Njemački standard
DT	*Desructive testing* – Razorna ispitivanja
EN	Europski standard
FFT	*Fast Fourier Transformation* - Brza Fourierova transformacija
NDT	*Non destructive testing* – Nerazorna ispitivanja
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
TIG	*Tungsten Inert Gas* – zavarivanje volframovom žicom u atmosferi inertnog plina
UZ	Ultrazvuk/Ultravučni
ZUT	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

Ultrazvuk predstavlja jednu od metoda nerazornih ispitivanja koja ima brojne primjene u različitim područjima znanosti i tehnike, a u ovom diplomskom radu fizikalni princip ultrazvuka koristit će se u svrhu provedbe karakterizacije materijala. Karakterizacija materijala pruža podatke o značajkama sastava i strukture materijala (uključujući nepravilnosti i nedostatke unutar materijala) čije poznavanje je važno za određenu upotrebu ili provedbu ispitivanja. Kao predmet rada korišten je uzorak izrezan iz zavarenog spoja dviju ploča od nehrđajućeg čelika debljine 60 mm. Budući da je prilikom zavarivanja materijala većih debljina prisutan različit unos topline u različitim dijelovima materijala, razlikuju se mikro- i makrostrukture u različitim dijelovima volumena. Pretpostavka je da će se ultrazvučni odzivi dobiveni od osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala zavara značajno razlikovati. Na temelju snimljenih odziva u vremenskoj domeni te frekvencijskih značajki korištenih sondi provodi se frekvencijska analiza pomoću tzv. FFT ili brze Fourierove transformacije. Analiza i usporedba rezultata pokazat će sličnosti i odstupanja karakterističnih parametara u frekvencijskom spektru svakog snimljenog odziva.

Ključne riječi: karakterizacija materijala, ultrazvuk, ultrazvučni odziv, frekvencijska analiza, ultrazvučna frekvencijska analiza, frekvencijski spektar, brza Fourierova transformacija, FFT

SUMMARY

Ultrasonic measurement is one of the methods of non-destructive testing that has numerous applications in various fields of science and technology, and in this thesis the physical principle of ultrasound will be used to implement the characterization of the material. Material characterization provides information on the characteristics of the composition and structure of the material (including irregularities and defects within the material) whose knowledge is important for the particular use or study. A sample cut out from a welded joint of two stainless steel plates 60 mm thick was used as the subject of the paper. Since different heat inputs are present in different parts of the material when welding materials of larger thicknesses, micro- and macrostructures in different parts of the volume differ. It is assumed that the ultrasonic responses obtained from the base material, the zone of influence of heat and the weld metal will differ significantly. Based on the recorded responses in the time domain and the frequency characteristics of the used probes, the frequency analysis is performed using the FFT or fast Fourier transform. Analysis and comparison of the results will show the similarities and deviations of the characteristic parameters in the frequency spectrum of each recorded response.

Key words: material characterization, ultrasound, ultrasonic response, frequency analysis, ultrasonic frequency analysis, frequency spectrum, fast Fourier transform, FFT

1. UVOD

Nerazorna ispitivanja ili skraćeno NDT (od engleskog naziva non-destructive testing), kako i samo ime upućuje, ispitivanja su kojima se obavlja kontrola materijala bez opasnosti od oštećivanja istih, odnosno kontrola bez razaranja. Svrha provedbe NDT ispitivanja je osigurati i potvrditi pravilno održavanje konstrukcije kako bi se izbjegli nepotrebni zastoji u proizvodnji ili transportu ili havarije koje su često praćene ozljedama na radu i nesrećama. Ova vrsta ispitivanja vrlo je značajna u području praćenja kvalitete, bilo za vrijeme proizvodnje gdje je potrebno kontrolirati proizvode i poluproizvode ili tijekom eksploatacije (energetska i nuklearna postrojenja, posude pod tlakom i sl.). Provedba NDT kontrole može se odvijati bez ikakve opreme što se naziva vizualnom metodom kontrole prilikom koje inspektori također prikupljaju važeće podatke bez razaranja dijelova konstrukcije. Ipak, za određivanje stanja materijala potrebno je koristiti nešto složenije metode. Za površinska ispitivanja koriste se penetranti i magnetske čestice, dok volumne metode (otkrivanje nepravilnosti unutar materijala) uključuju radiografska, ultrazvučna i termovizijska ispitivanja.

Obzirom na fizikalne principe, postoji nekoliko metoda nerazornih ispitivanja, a svaka metoda sastoji se od nekoliko specifičnosti provedbe što se naziva tehnikom ispitivanja. Ono što je zajedničko svim metodama jest pojava određene vrste odziva od nepravilnosti koji omogućuje detekciju eventualne pogreške u strukturi. Osim otkrivanja neželjenih struktura, određene metode NDT-a primjenjuju se i u cilju karakterizacije materijala što je upravo zadatak ovog diplomskog rada, a ultrazvuk je metoda koja će se koristiti za provedbu frekvencijske analize zavarenog spoja.

1.1. Povijesni razvoj ultrazvuka

Ideja o postojanju ultrazvučnih valova javila se davne 1790. godine na temelju činjenice da se šišmiši prilikom kretanja ne koriste vidom, već zvukom. Nešto kasnije, otkrivena je sonografija korištenjem podvodnog zvona čime je prvi puta bila određena brzina zvuka u vodi. 1881. godine otkrivena je veza između električnog napona i kristala što je osnova za razvoj ultrazvučnih sondi i piezoelektričnih materijala kakvi se danas koriste kao ultrazvučni odašiljači i prijamnici. Potonuće slavnog Titanica, između ostalog, bilo je i prekretnica u razvoju ultrazvučnih uređaja koji su imali

zadatak otkriti sante leda, ali i različite objekte skrivene ispod površine vode. Prva praktična primjena ultrazvuka zabilježena je tijekom prvog svjetskog rata u svrhu otkrivanja podmornica, dok se prva primjena u medicini pojavila 30-ih godina prošlog stoljeća u dijagnostici tumora mozga. Zanimljivo je spomenuti da su pacijenti do 1950-ih godina morali biti potopljeni u vodi kako bi se uspješno obavio ultrazvučni pregled. Nakon toga, započeo je razvoj kontaktnih sondi, a usavršavanjem elektronike i računala današnji ultrazvučni uređaji u potpunosti se razlikuju od povijesnih [1].

U nastavku rada slijedi opis fizikalnih principa ultrazvučnog signala, parametara ispitivanja, utjecajnih čimbenika te specifičnosti i sastava materijala uzorka nakon čega će se provesti samo ispitivanje, obraditi podaci (snimljeni ultrazvučni odzivi) te usporediti rezultati dobiveni provedbom frekvencijske analize.

2. ISPITIVANJE I KONTROLA ULTRAZVUKOM

Ultrazvuk je definiran kao mehanički val koji se rasprostire u području frekvencija između 20 kHz i 10 GHz što se nalazi iznad granice čujnosti ljudskog uha te širenjem kroz prostor prenosi energiju. Pojam ultrazvuk često se veže uz medicinu gdje se koristi u svrhu dijagnostike i/ili terapije, no u ovome radu govorit će se o tehničkim primjenama ultrazvuka u području strojarstva što se uglavnom odnosi na ispitivanja i karakterizaciju materijala i komponenti. Područje frekvencija koje se koristi za NDT ispitivanja prostire se od 0,5 MHz do 10 MHz, a u nekim primjenama i do 20 MHz.

2.1. Elementi ultrazvučnog sustava

Odabir odgovarajućih elemenata mjernog sustava te stanje mjerne opreme u velikoj mjeri mogu utjecati na točnost i pouzdanost dobivenih rezultata. Elementi se izabiru ovisno u koju svrhu se provodi ispitivanje, a svaki sustav za ultrazvučno ispitivanje sastoji se od sljedećih elemenata:

- ultrazvučne sonde
- ultrazvučnog uređaja s monitorom
- kontaktnog sredstva
- etalona i referentnih uzoraka.

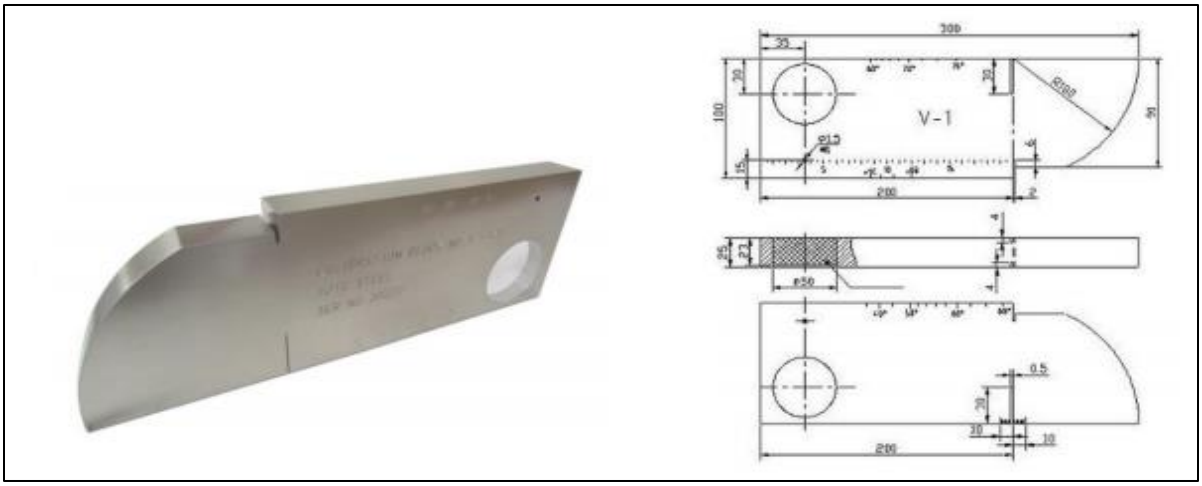
Norme EN ISO 16810 [17] i EN ISO 16811 [18] definiraju na koji način se odabiru elementi ultrazvučnog sustava te na koji način je potrebno podesiti i provjeriti parametre pojedinih elemenata prije početka ispitivanja kako bi se dobivenim rezultatima osigurala mjerodavnost i sljedivost.

Izvor ultrazvučnih signala nalazi se u sondi koja služi ujedno kao odašiljač i kao prijamnik valova. Općenito, ultrazvučni valovi proizvode se djelovanjem materijala kao što su piezoelektrici i magnetostriktici ili visokofrekventnim titranjem magnetnih ploča. U sondama za ultrazvučna ispitivanja uglavnom se koriste spomenuti piezoelektrici radi specifičnog piezoelektričnog efekta gdje se mehaničkim naprezanjem generira električni naboj i obrnuto, električnom pobudom uzrokuje se mehanička deformacija. Upravo je to objašnjenje dvostruke funkcije ultrazvučne

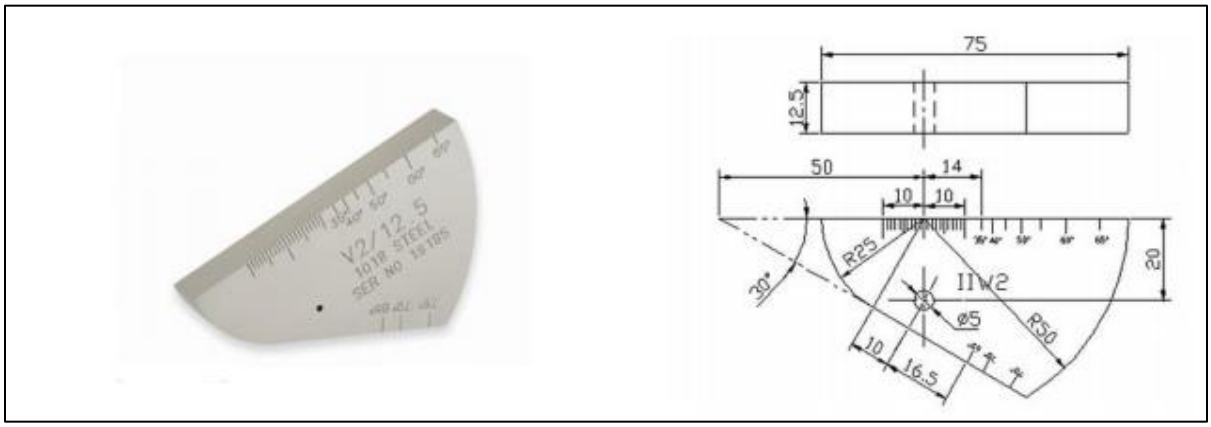
sonde. Osim samog materijala pretvornika, važne su i metalne, najčešće srebrne, elektrode spojene s pretvornikom koje dovode i odvode električni signal. Također, oblik elektroda definira i radnu površinu pretvornika te tako neizravno određuje oblik ultrazvučnog polja sonde. Konstrukcija sonde još zahtijeva izolator radi sprečavanja proboja te mogućnost prigušivanja neželjenih titraja koje je intenzivnije ukoliko su svojstva (akustička impedancija) pretvornika i prigušivača sličnija [2].

Važan kriterij za uspješnost ispitivanja je čista i dostupna kontaktna površina na koju se nanosi kontaktno sredstvo. Budući da zrak predstavlja svojevrsni izolator ultrazvuka radi vrlo malene brzine propagacije vala, kontaktno sredstvo ima funkciju prijenosa energije iz sonde u materijal (i obrnuto), odnosno poboljšava odašiljanje i primanje signala. Količina prenesene energije ovisi o vrsti i debljini nanesenog sloja primijenjenog kontaktnog sredstva. U tu svrhu, najčešće se koriste gelovi s antikorozivnom svojstvima koji ne kaplju i lako se odstranjuju s površine, koji su kemijski neutralni (tj. koji ne mogu kemijski reagirati s ispitnim materijalom) te se mogu primjenjivati u velikom temperaturom rasponu, dok u medicini kao kontaktna sredstva mogu poslužiti parafinska ulja, kreme te gelovi na bazi antireumatika, anestetika i glukokortikoida. U tehničkom smislu, odabir odgovarajućeg kontaktnog sredstva ovisi o stanju površine, odnosno o hrapavosti, neravninama i mehaničkim oštećenjima koja mogu nastati djelovanjem korozijskih produkata. U slučaju veće hrapavosti ili oštećenja potrebno je primijeniti sredstvo veće viskoznosti.

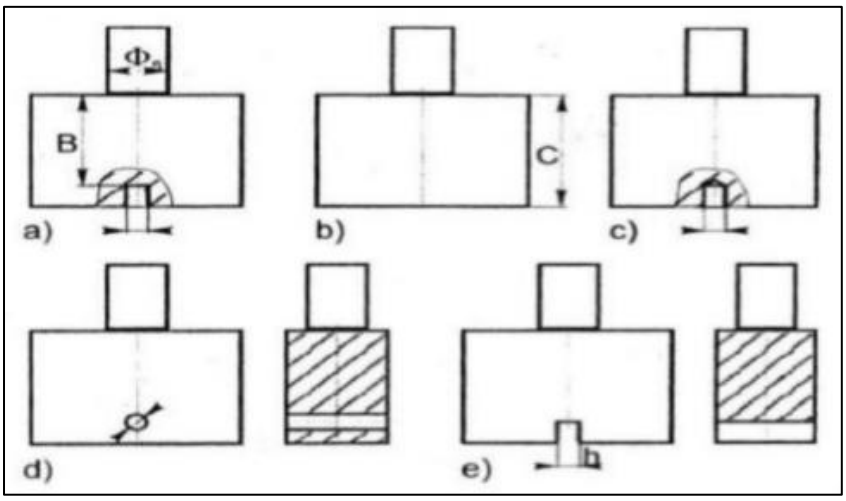
Etaloni, obavezno uz odgovarajući atest, koriste se radi pripreme i podešavanja ispitivačkog sustava što uključuje sljedeće: provjeru linearnosti sustava, određivanje izlazne točke sonde, provjeru kuta sonde, provjeru mrtve zone, provjeru osjetljivosti i razlučivosti sustava te odnosa signal/šum. S druge strane, referentni uzorci služe za fino podešavanje sustava [2]. Važno svojstvo etalona i referentnih uzorka je homogenost koja osigurava jednaka akustička svojstva po cijelom presjeku etalona, a kako bi se ona postigla normama su propisane toplinske obrade materijala. Uz toplinsku obradu norme također propisuju potrebne dimenzije, hrapavost te brzinu ultrazvučnih valova. Slike 1 i 2 prikazuju radne etalone oznaka V1 i V2 definirane ISO normama, a slika 3 prikazuje primjere referentnih uzoraka.



Slika 1. Etalon oznake V1 s pripadajućim tehničkim specifikacijama [3]



Slika 2. Etalon oznake V2 s pripadajućim tehničkim specifikacijama [3]

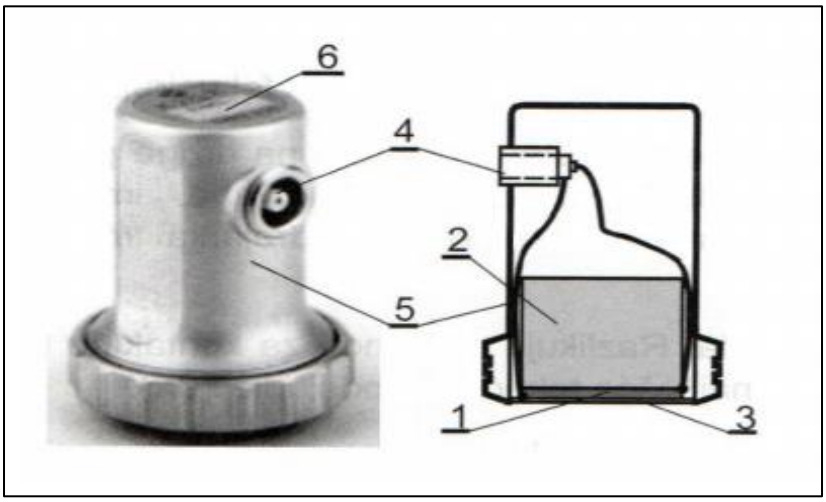


Slika 3. Primjeri referentnih uzoraka [2]

2.1.1. Vrste sondi

Ultrazvučne sonde dijele se s obzirom na smjer odašiljanja i prijema signala u odnosu na materijal koji se ispituje. Postoje standardne sonde – ravna i kutna te specijalne sonde čiji se pretvarač sastoji od mnogo manjih što omogućuje emitiranje s raznim uzorcima kašnjenja, ovisno o pobudi, kojima se postiže potpunije skeniranje objekta, tzv. *phased array* napredna tehnika skeniranja. Izvedbe standardnih sondi za ručnu ultrazvučnu kontrolu mogu biti u obliku dvostruke ili fokusirajuće sonde [2].

Osnovni dijelovi svake sonde jesu: pretvarač, blok za prigušenje, zaštitni sloj, priključnice, kućište te oznaka sonde. Funkcija bloka za prigušenje jest prigušenje primljenih valova koji prolaze kroz unutrašnjost sonde, ali i prigušenje slobodnog istitravanja pretvornika zbog čega se razlikuju frekvencijski spektri različitih sondi (ovisno o prigušenosti impulsa u vremenskoj domeni). Zaštitni sloj nalazi se s vanjske strane pretvornika, a ima ulogu zaštite piezoelektičnog elementa, ali isto tako služi za prijenos ultrazvučnih signala od izvora u materijal ispitivanja. Slike 4, 5 i 6 prikazuju nekoliko različitih konstrukcijskih izvedbi ultrazvučnih sondi.

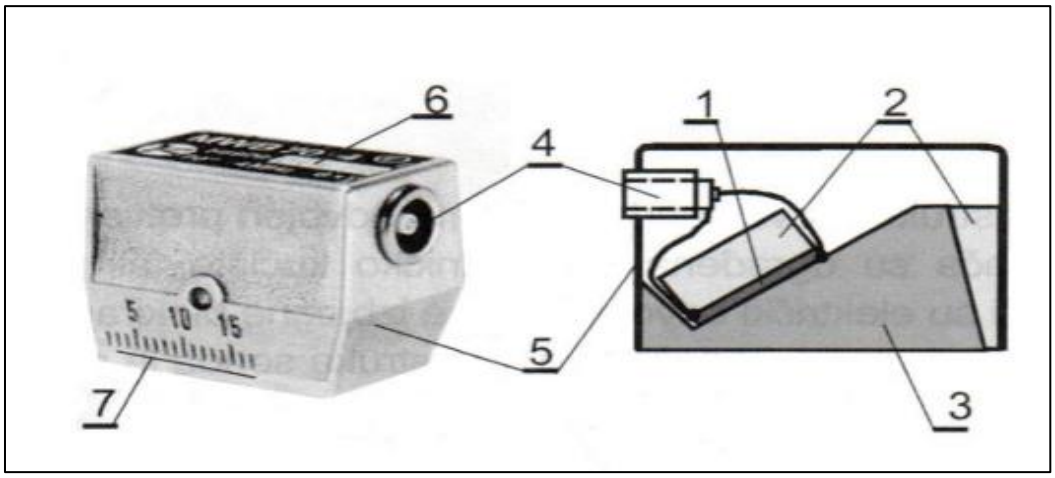


Slika 4. Dijelovi ravne sonde [2]

Slika 4. prikazuje dijelove ravne sonde gdje su brojevima redom označeni: 1 – pretvarač, 2 – blok za prigušenje, 3 – zaštitni sloj, 4 – priključnica, 5 – kućište i 6 – oznaka sonde.

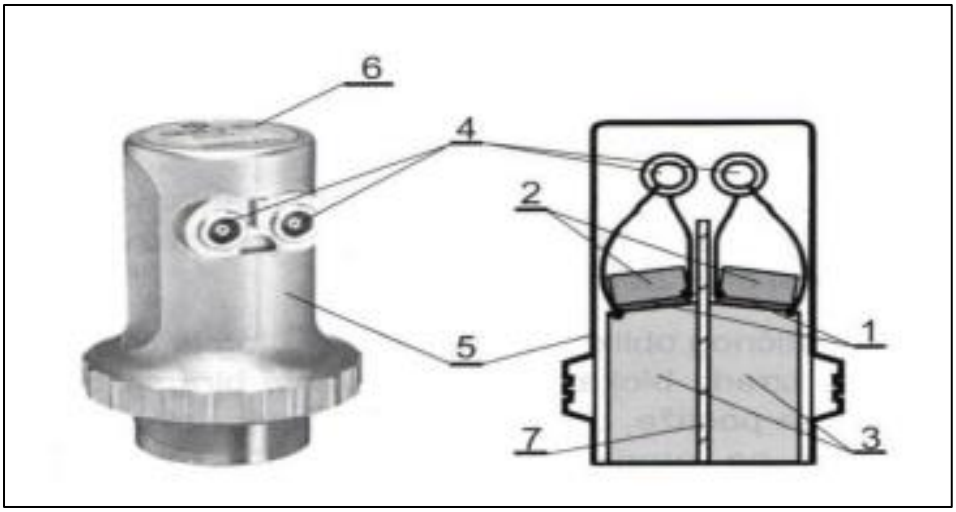
Kut izlaza ravne sonde iznosi 0° što znači da ona odašilje i prima signale okomito na svoju kontaktnu plohu. Pretvarač se pobuđuje pomoću elektroda od kojih je svaka spojena na suprotnu stranu pretvarača [2].

Za razliku od ravne, kutna sonda se izrađuje s kutovima ulaza ultrazvuka u materijal od 45°, 60°, 70° i 80°. Ipak, ovi kutovi određeni su u etalonskom čeliku, a ukoliko se sonda primijeni na drugom materijalu (različite brzine propagacije) kutovi će se razlikovati. Nazivni smjer odašiljanja i primanja ultrazvuka pod kutom u odnosu na normalu plohe pretvarača sadržan je u oznaci sonde. Ultrazvučne valove od pretvarača do materijala prenosi blok za usmjeravanje tj. prilagodbu prizmatičnog oblika [2]. Kutna sonda prikazana je slikom 5.



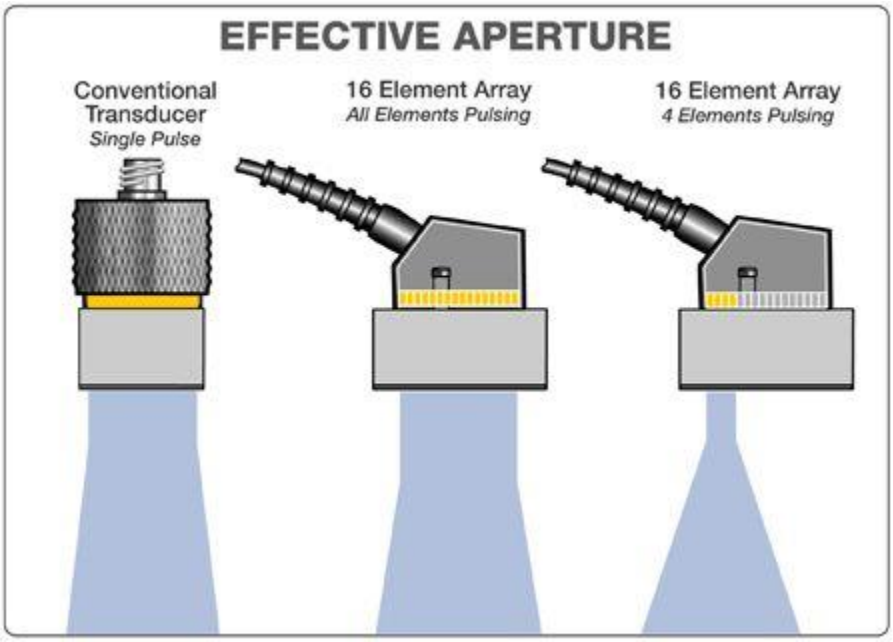
Slika 5. Dijelovi kutne sonde [2]

Konstrukciju dvostruke sonde karakterizira odvojen pretvarač prijemnika od pretvarača odašiljača. Pretvarači su međusobno akustički i električki izolirani, a generiran ultrazvučni signal širi se u predmet ispitivanja kroz blok za kašnjenje koji je spojen na pretvarač odašiljača [2]. Dvostruka sonda prikazana je slikom 6 gdje su brojevima označeni sljedeći dijelovi: 1 – pretvarač, 2 – blok za prigušenje, 3 – klin, 4 – priključnice, 5 – kućište, 6 – oznaka sonde te 7 – akustička izolacija.



Slika 6. Dijelovi dvostruke sonde [2]

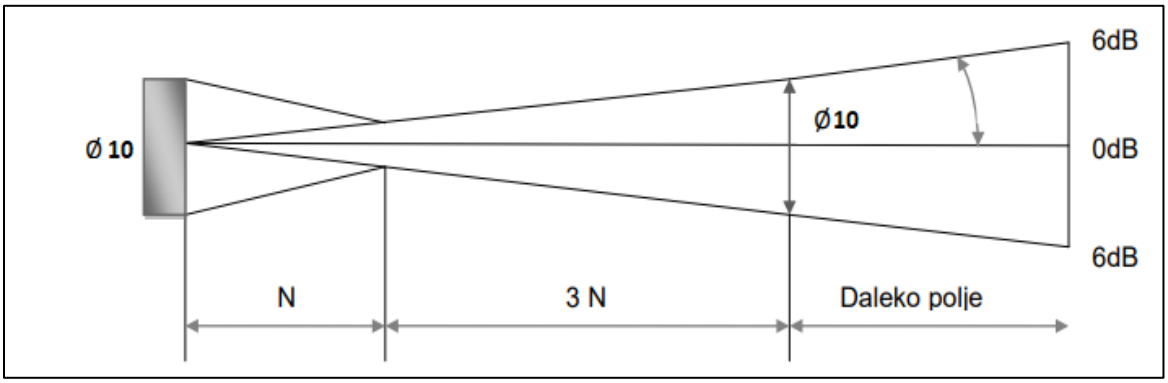
O geometriji ultrazvučnog polja detaljnije će se govoriti u sljedećem potpoglavlju, no važno je spomenuti da broj i oblik pretvarača u sondi kao i način njihove pobude znatno utječu na oblik UZ polja što uzrokuje promjenu područja, tj. volumena materijala koji je predmet skeniranja. Slika 7 prikazuje razliku između polja standardne sonde te polja generiranih pomoću sonde s većim brojem pretvarača.



Slika 7. Razlika u geometriji UZ polja ovisno o broju pretvornika i vrsti pobude [4]

2.2. Geometrija ultrazvučnog snopa

Geometrija ultrazvučnog snopa ili polja u određenom mediju za primjer promjera sonde 10 mm prikazana je slikom 8.



Slika 8. Geometrija ultrazvučnog snopa u mediju [2]

Poznavanje geometrije ili prostorne distribucije ultrazvučnog polja važno je za provedbu ispitivanja. Na udaljenosti *N* od sonde nalazi se tzv. *fokus* ultrazvučnog polja. Ovisno o obliku geometrijskog polja i značajki sonde (promjer sonde) moguće je definirati koji dio volumena je zahvaćen na kojoj dubini uzorka prilikom skeniranja. U konkretnom zadatku ovoga rada, volumen materijala zahvaćen ultrazvučnim snopom čini posebno važan podatak jer prilikom provođenja ispitivanja ne žele se istodobno zahvatiti dvije značajno različite mikrostrukture zavarenog spoja (npr. osnovni materijal i zona utjecaja topline ili zona utjecaja topline i područje metala zavara).

Parametri koji opisuju UZ polje jesu blisko polje N i kut divergencije γ, a ovise o veličini i frekvenciji pretvornika, odnosno o vrsti sonde. Ovi parametri definirani su sljedećim jednadžbama:

$$N = \frac{D^2}{\lambda} = \frac{D^2 f}{4v} \qquad (1)$$

$$sin\gamma_{dB} = k_{dB}\left(\frac{\lambda}{D}\right) \qquad (2)$$

gdje je: N – duljina bliskog polja [mm]

D – promjer pretvornika [mm]

λ – valna duljina [mm]

f – nazivna frekvencija [MHz]

v – brzina propagacije [m/s]

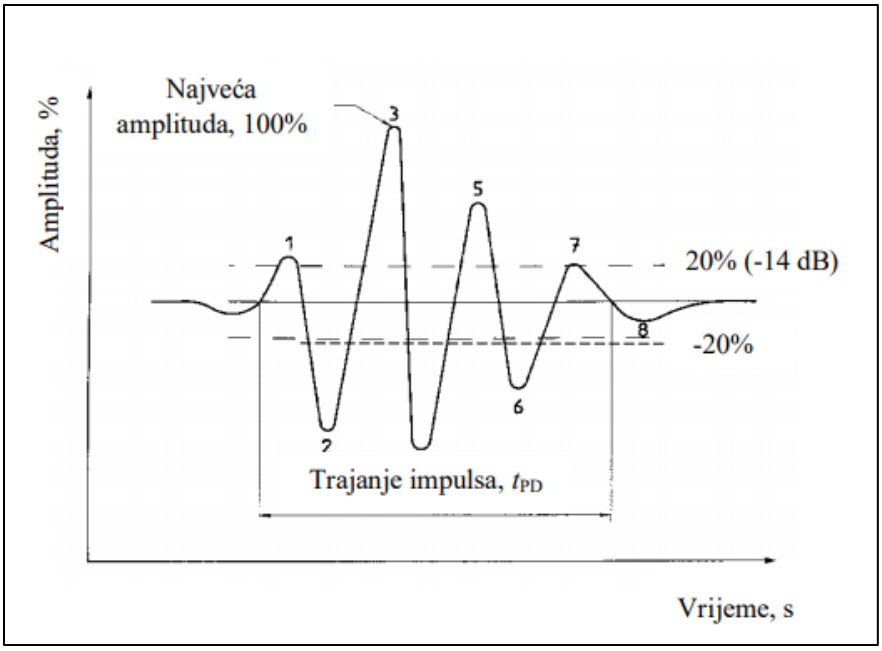
k_{dB} – koeficijent kuta divergencije.

2.3. Uvod u frekvencijsku analizu

Frekvencijska analiza ili analiza frekvencijskih karakteristika temelji se na snimanju reflektiranog impulsa te njegovom prikazu u vremenskoj domeni koji se transformira u frekvencijsku domenu. Svaki impuls koji ima trajanje ima i pripadajući frekvencijski spektar pa tako npr. ultrazvučni impuls generiran sondom nazivne frekvencije od 5 MHz može sadržavati frekvencije u rasponu od 4 MHz do 6 MHz. Upravo je to još jedan parametar kojim se opisuje ultrazvučni impuls, a naziva se *širinom frekvencijskog spektra*.

2.3.1. Vremenska domena

Postupak frekvencijske analize počinje snimanjem odjeka impulsa pomoću osciloskopa, a kao rezultat snimanja dobiva se signal u vremenskoj domeni. Vremenska domena je prikaz ultrazvučnog impulsa u ovisnosti o vremenu. U prikazu svih signala (bilo ultrazvučnih, zvučnih i sl.) promatra se promjena napona tijekom vremena. Valni oblik ultrazvučnog impulsa definiran je početkom, krajem i trajanjem. Vrijednost trajanja reflektiranog impulsa (t_{PD}) potrebna je za određivanje mehaničkog prigušenja pretvornika sonde, a početak i kraj određeni su poluperiodima s amplitudama većim ili jednakim od 20% vrijednosti najviše amplitude (-14 dB), slika 9.



Slika 9. Valni oblik ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni [5]

Definiranje frekvencijskog sadržaja ultrazvučnog impulsa moguće je iz frekvencijske domene pa je signal iz vremenske domene potrebno transformirati u frekvencijsku. Budući da frekvencijska domena pripada području karakterizacije materijala, detaljnije o transformaciji slijedi u idućem poglavlju.

3. KARAKTERIZACIJA MATERIJALA

U znanstvenom području koje se bavi proučavanjem materijala, karakterizacija se odnosi na općeniti postupak kojim se provjeravaju i mjere struktura i svojstva materijala. To je proces bez kojeg ne bi bilo moguće utvrditi razumijevanje tehničkih materijala na znanstvenoj razini. Karakterizacija materijala podrazumijeva brojne analitičke tehnike i metode u svrhu identifikacije, izoliranja ili kvantificiranja kemijskog sadržaja ili određivanja fizičkih svojstava materijala.

Svojstva materijala ovise o njegovom sastavu, strukturi, sintezi i obradi, a mnoga svojstva su vezana uz promjenu strukture neovisno o tome što sastav materijala ostaje isti. To je razlog zašto je poznavanje mikrostrukture materijala izuzetno važno. Na temelju različitih fizikalnih svojstava, materijali se klasificiraju u sljedeće kategorije:

1. metali i legure
2. polu-metali i poluvodiči
3. keramika i staklo
4. polimeri
5. kompozitni materijali.

Kategorije na temelju funkcionalne primjene materijala su: biomedicinska, elektronička, magnetska, energetska i ekološka, zrakoplovna te optička, dok strukturna klasifikacija uključuje dvije skupine, a to su: kristali (monokristali i polikristali) i amorfni materijali [6].

Područje karakterizacije materijala u osnovi se odnosi na procjenu elastičnog ponašanja materijala, mikrostrukturu i morfološke karakteristike te povezana mehanička svojstva. Tehnike karakterizacije osnovni su alat u kontroli i osiguranju kvalitete proizvoda, a dijele se na razorne (DT – Destructive Tehniques) i nerazorne kojima pripada ultrazvuk visokih frekvencija i niskog intenziteta kako bi se omogućio prijenos energije kroz medij i na taj način prikupili potrebni podaci [6].

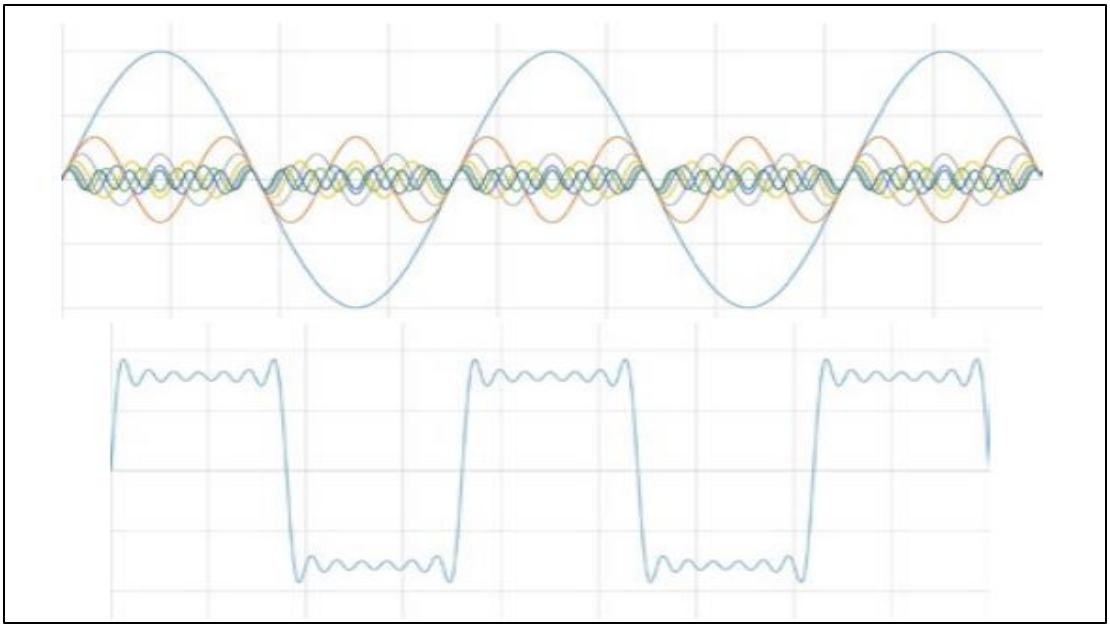
Obično, ultrazvučna karakterizacija koristi se za određivanje elastične konstante materijala (smični modul, Young-ov modul), mikrostrukture (veličina i tekstura zrna, gustoća), diskontinuiteta

(poroznost, oštećenja uzrokovana puzanjem ili zamorom materijala) i mehaničkih svojstava kao što su tvrdoća, vlačna i smična čvrstoća i sl. Naravno, materijal je moguće okarakterizirati isključivo poznavanjem ultrazvučnih parametara u različitim fizikalnim uvjetima. Najvažniji parametri su brzina ultrazvučnog vala i prigušenje. Ultrazvučna brzina je povezana s elastičnim konstantama i gustoćom materijala, dakle daje informacije o mehaničkim, anizotropnim i elastičnim svojstvima medija kroz koji prolazi. Također, kada se ultrazvuk širi kroz medij, jedan dio energije se prigušuje radi mehanizama kao što su raspršenje, apsorpcija, interakcija subatomskih čestica itd. Mjeru prigušenja izražava koeficijent prigušenja koji je povezan sa svojstvima toplinske vodljivosti, specifične topline, gustoće toplinske energije i elastičnim konstantama [6].

3.1. Frekvencijska domena

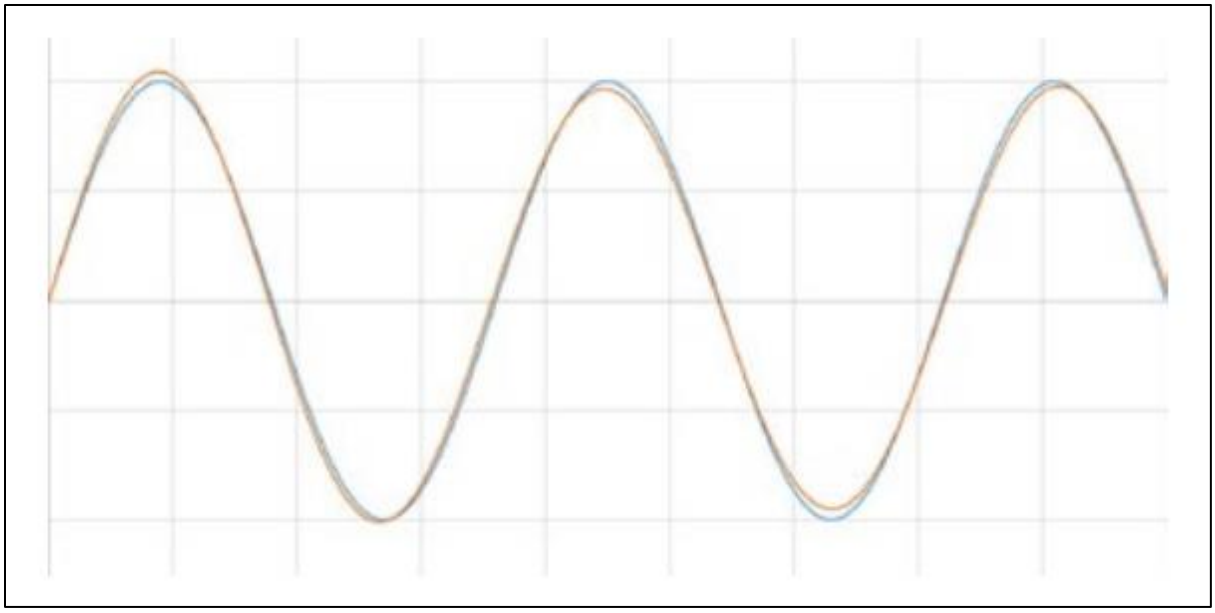
Kako je već ranije spomenuto, za određivanje frekvencijskih značajki sonde odnosno njezinog pretvarača, ultrazvučni impuls potrebno je prevesti u frekvencijsku domenu. Transformacija signala iz vremenske u frekvencijsku domenu postiže se primjenom numeričke metode nazvane *brza Fourierova transformacija* ili FFT (Fast Fourier Transformation). Metoda se sastoji od razvoja u tzv. Fourierov red koji omogućuje prikaz složenog periodičkog signala u obliku sume jednostavnih oscilatornih funkcija. Naime, razvoj ove vrlo složene matematičke metode proizlazi iz Fourierovog teorema baziranog na jednostavnom principu koji kaže da se bilo koji valni oblik u vremenskoj domeni može prikazati kao suma sinusnih i kosinusnih funkcija. Zbrojem najmanje dvije ili više sinusoida (različitih amplituda i frekvencija) nastaje potpuno novi signal. Važnost FFT-a leži u činjenici da ako je moguće konstruirati signal pomoću sinusnih funkcija, također je moguće razložiti signal na iste. Nakon što se signal razloži na komponente (sinusne funkcije), moguća je analiza različitih frekvencija koje su prisutne u izvornom signalu [7].

U nastavku, slika 10 prikazuje primjer kako izgleda složeni signal nastao zbrojem većeg broja sinusoida različitih frekvencija i amplituda, a specifičan oblik dobivenog signala naziva se *square wave* (pravokutni val).

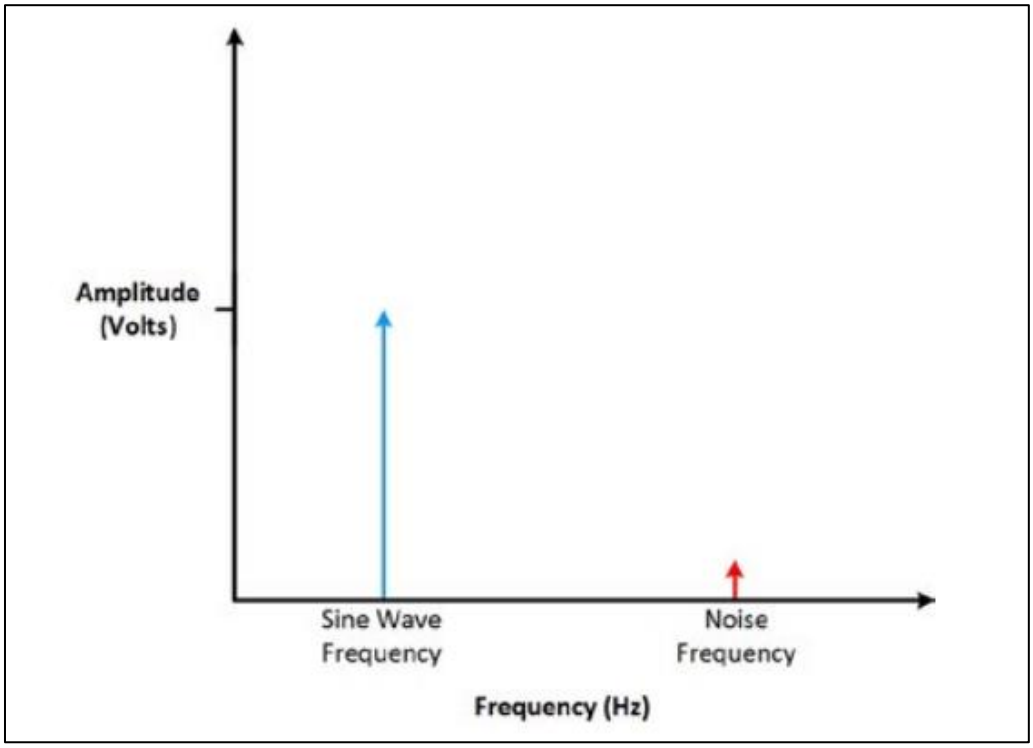


Slika 10. Pravokutni val kao suma sinusoida [7]

Frekvencijska domena prikazuje vrijednosti amplitude pri različitim frekvencijama te omogućuje uvid u drugačije značajke istog signala. Frekvencijska analiza signala može biti vrlo korisna prilikom provjere valjanosti signala. Npr. ako izlazni signal prikazan na osciloskopu u vremenskoj domeni izgleda kao savršeni sinusoidni val, u frekvencijskoj domeni očekuje se samo jedan skok (spike), tj. samo jedna frekvencija. Ipak, vrlo je česta pojava nekoliko skokova na različitim frekvencijama što ukazuje na postojanje neželjenog šuma u signalu koji nije bilo moguće uočiti u vremenskoj domeni. Dakle, frekvencijska domena je izvrstan alat za detekciju nečistih signala odnosno postojanje šumova u signalu (slike 11 i 12).



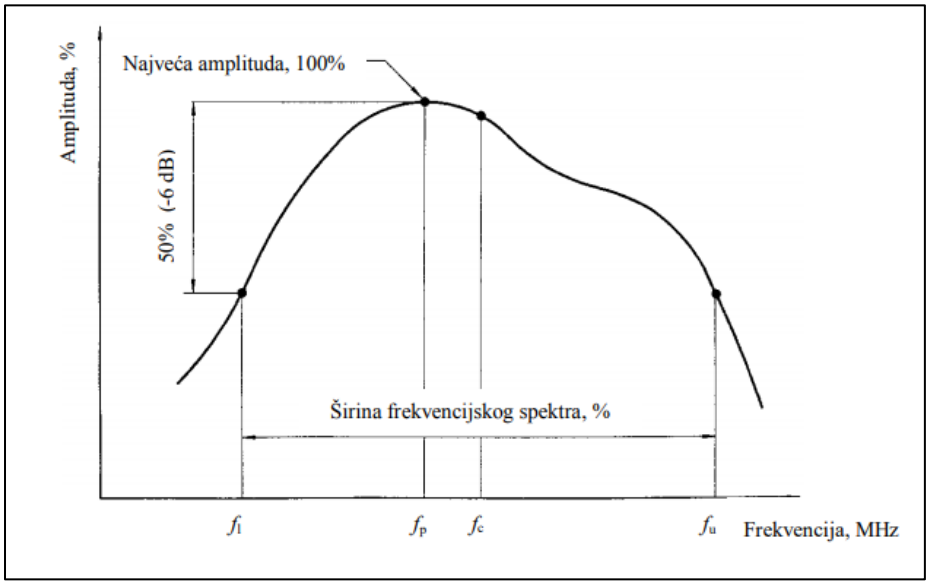
Slika 11. Sinusoidni val u vremenskoj domeni [7]



Slika 12. Detekcija šuma u signalu iz vremenske domene [7]

3.2. Širina frekvencijskog spektra

U prethodnom poglavlju prikazan je primjer frekvencijske domene za jednostavni sinusoidni signal. Međutim, ultrazvučni impulsi koji će biti snimljeni u okviru zadatka ovog rada sadržavat će velik broj različitih frekvencija i amplituda koje je potrebno analizirati. Rezultat provedbe FFT transformacije takvog složenog signala u frekvencijskoj domeni prikazuje slika 13.



Slika 13. Frekvencijski spektar ultrazvučnog impulsa [5]

Iz frekvencijske domene ultrazvučnog impulsa određuju se sljedeći parametri ultrazvučne sonde:

$$f_c = \frac{f_u + f_l}{2} \qquad (3)$$

$$B_w = \frac{f_u - f_l}{f_c} \cdot 100\% \qquad (4)$$

gdje su: f_p – frekvencija pri najvišoj amplitudi ili *vršna* frekvencija,

f_u *i* f_1 – gornja i donja frekvencija; frekvencije pri kojima amplituda iznosi 50% maksimalne vrijednosti (-6 dB),

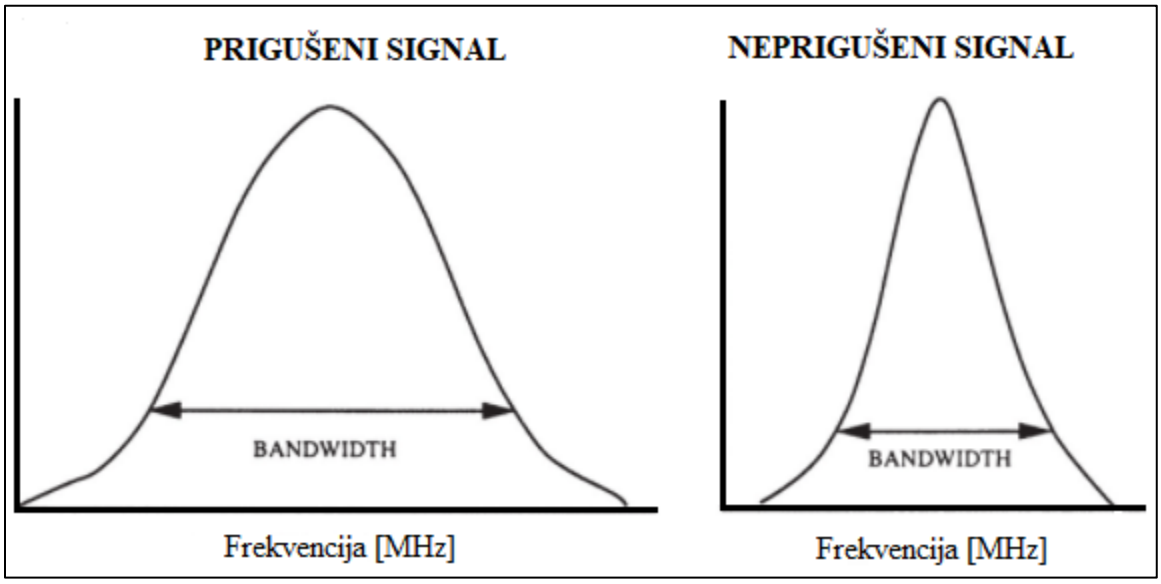
f_c - centralna frekvencija definirana izrazom (3)

B_w – širina frekvencijskog spektra definirana izrazom (4).

Provedbom frekvencijske analize moguće je identificirati specifične frekvencije povezane s određenim značajkama u volumenu (npr. dimenzije i oblike pora ili uključaka u metalu zavara) obzirom na različite frekvencije pobude. Takva identifikacija omogućuje kvalitetniji uvid u stanje materijala te bolju procjenu eventualnih promjena unutar konstrukcije. Tako široko ispitivanje neće se raditi u okviru ovog diplomskog rada, no važno je naglasiti mogućnosti FFT analize u kontekstu tehničkih primjena.

3.3. Određivanje koeficijenta prigušenja

Parametar ultrazvučne sonde *širina frekvencijskog spektra* ili *Bandwidth* ovisi o mehaničkom prigušenju slobodnih oscilacija pretvornika. Jače prigušenje uzrokuje kraći impuls, ali veću širinu frekvencijskog spektra, dok slabije prigušenje znači duži impuls užeg frekvencijskog spektra što je prikazano slikom 14.



Slika 14. Utjecaj prigušenja na širinu frekvencijskog spektra [8]

Općenito, prigušenje se definira kao smanjenje pritiska ultrazvučnog vala koji propagira kroz materijal uslijed apsorpcije i raspršivanja, dok koeficijent prigušenja predstavlja odnos prigušenja po jedinici prijeđenog puta, a ovisi o svojstvima materijala, valnoj duljini te vrsti vala. Intenzitet ili energija ultrazvuka smanjuje se s porastom udaljenosti od izvora. U primjeni tehnike odjeka,

impuls mora proći istu udaljenost dva puta radi refleksije pa ako su Ix_1 i Ix_2 intenziteti ultrazvučnog impulsa pri udaljenostima x_1 i x_2, tada vrijedi:

$$I_{x1} = I_0 e^{-\alpha x1} \quad (5)$$

$$I_{x2} = I_0 e^{-\alpha x2} \quad (6)$$

Rješavanjem prethodnih jednadžbi dobiva se izraz za koeficijent prigušenja *α:*

$$\alpha = \frac{1}{(x_2 - x_1)} log_e \frac{I_{x1}}{I_{x2}} \quad (7)$$

Koeficijent prigušenja definira se kao prigušenje po jedinici duljine ili jedinici vremena pomoću sljedećeg izraza:

$$\alpha = \frac{1}{(x_2 - x_1)} 20 log_{10} \frac{I_{x1}}{I_{x2}} \quad dB/mm \ (8)$$

3.4. Matematička podloga provedbe FFT analize

FFT transformacija u okviru ovog rada provoditi će se pomoću MATLAB softvera, a prikazat će se i komentirati samo konačni rezultati u numeričkom i grafičkom obliku. Iz tog razloga, važno je opisati tijek obrade prikupljenih (snimljenih) podataka, ali i matematičku podlogu koja se krije iza dobivenih rezultata.

3.4.1. Koeficijenti Fourierovog reda

Budući da se brza Fourierova transformacija zasniva na razvoju funkcije u Fourierov red, uvjet za provedbu FFT transformacije je periodičnost funkcije. FFT moguće je provesti i za neperiodične funkcije u određenom intervalu, no najprije ih je potrebno prevesti u periodičan oblik. Ako se neka funkcija f(x) = f(t) promatra kao signal promjenjiv u vremenu, onda prikaz te funkcije u obliku Fourierovog reda prikazuje frekvencije tog signala gdje koeficijenti a_0, a_n i b_n određuju amplitude, a vrijednost *n* red frekvencija. Razvoj funkcije s periodom *L* u Fourierov red zapisuje se kao:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}\left(a_n cos\frac{2\pi nx}{L} + b_n sin\frac{2\pi nx}{L}\right), \qquad n \geq 0 \qquad (9).$$

Nije potrebno promatrati fazu pojedine sinus funkcije već je dovoljno odrediti koeficijente (amplitude) uz sinus i kosinus pomoću sljedećih izraza:

$$a_0 = \frac{2}{L}\int_a^b f(x)dx \qquad (10),$$

$$a_n = \frac{2}{L}\int_a^b f(x)cos\frac{2\pi nx}{L}dx \quad (11) \quad te$$

$$b_n = \frac{2}{L}\int_a^b f(x)sin\frac{2\pi nx}{L}dx \quad (12).$$

Najvažniji uvjet za provedbu FFT transformacije je integrabilnost funkcije koja se razvija u Fourierov red jer upravo integral funkcije, odnosno signala, predstavlja energiju signala. Ako je integral konačan, smatra se da signal ima konačnu energiju. Zanimljivo je spomenuti da je ovo rješenje postignuto tek sto godina nakon utemeljenja Fourierove analize, točnije 1907. godine. Ovaj teorem naziva se *Parsevalovim teoremom* [9].

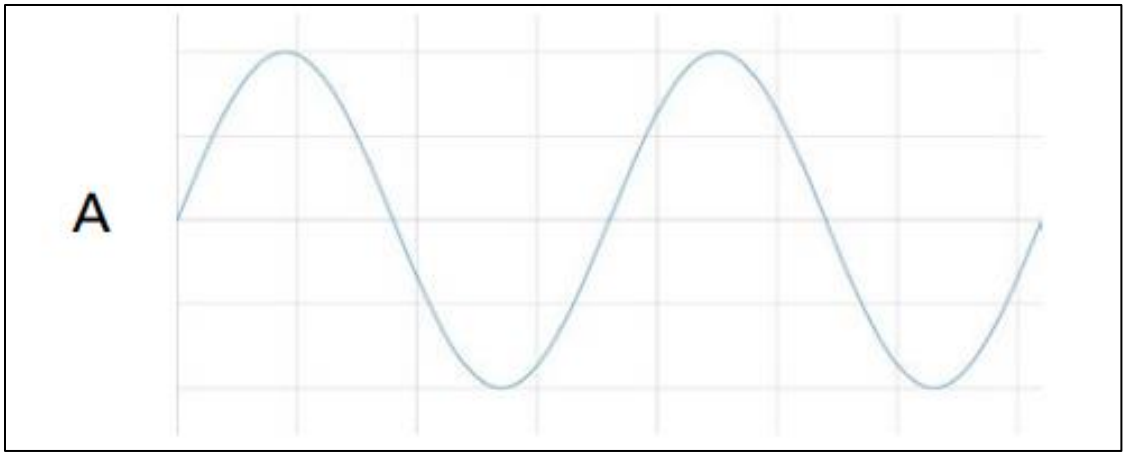
Nadalje, temeljem poznatih koeficijenata Fourierovog reda provodi se Fourierova transformacija (FFT) određenog signala (funkcije) na intervalu [a,b] pomoću sljedećeg izraza:

$$F(s) = \int_a^b f(x)e^{-2\pi sxi}dx \qquad (13).$$

Dobivena funkcija *F (s)* naziva se Fourierovom transformacijom funkcije *f (x),* a budući da oba izraza sadrže kompleksne brojeve potrebno ih je pretvoriti u prirodne brojeve kako bi se dobili važeći, opisivi te usporedivi rezultati analize. U današnje vrijeme, FFT transformacija jedan je od često korištenih matematičkih alata [9].

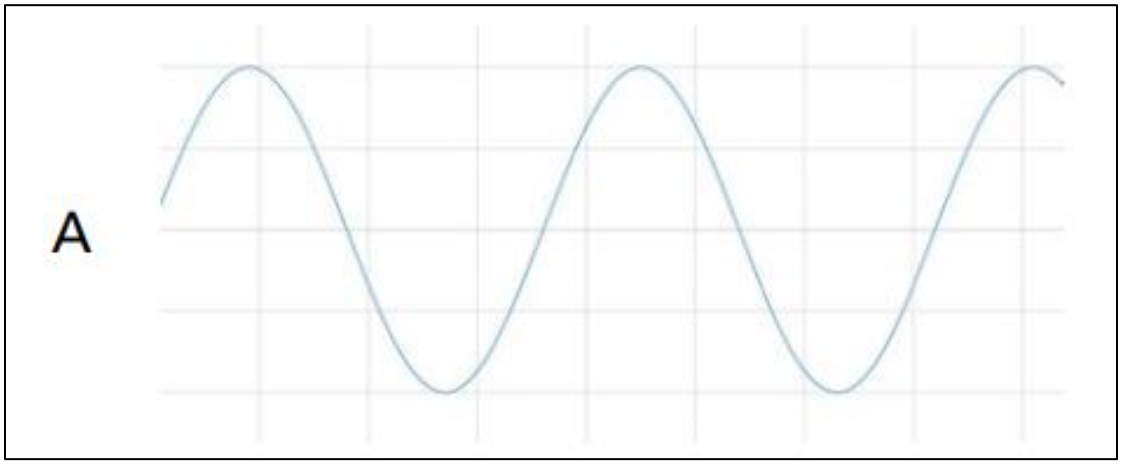
3.4.2. Windowing ili *Prozor tehnika*

Iako FFT transformacija daje vrlo značajne informacije o snimljenom signalu, postoje i ograničenja ove metode koja je moguće izbjeći koristeći tzv. *prozorske funkcije*. Windowing (hrv. *prozor tehnika*) je naziv za primjenu spomenutih prozorskih funkcija, a njihova svrha bit će objašnjena u nastavku. Prilikom korištenja FFT transformacije za određivanje frekvencijskih komponenti signala pretpostavlja se analiza na konačnom skupu podataka, a kontinuirani spektar predstavlja jedan period periodičnog signala. Drugim riječima, vremenski valni oblik započinje i završava na istoj vrijednosti amplitude, a kada bi se spojilo više takvih perioda, oni bi se savršeno nastavljali jedan na drugi (slika 15) za razliku od izmjerenog signala koji se ne sastoji od cjelovitog broja perioda (slika 16).



Slika 15. Signal s cjelovitim brojem perioda [7]

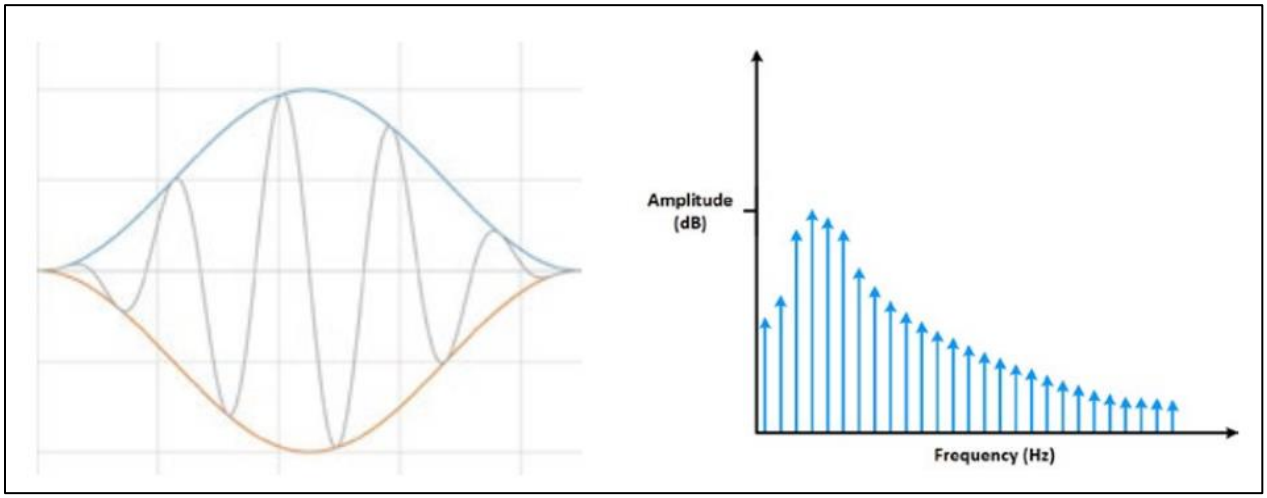
.



Slika 16. Signal s necjelovitim brojem perioda [7]

U prvom slučaju kada je broj perioda u signalu cjelovit, nema problema s rezultatima FFT transformacije. Međutim, u praksi se često radi o necjelovitom broju perioda gdje konačnost izmjerenog signala može rezultirati tzv. krnjim valnim oblikom s karakteristikama različitim od onih iz izvornog oblika signala te se pojavljuju diskontinuiteti (krajnje točke predstavljaju prekide). Takvi se diskontinuiteti u frekvencijskoj domeni pojavljuju kao visokofrekventne komponente koje ne postoje u izvornom signalu, a koje mogu biti puno veće od karakteristične *Nyquist* frekvencije (vrijednost polovice brzine uzorkovanja izražena pomoću broja uzoraka u sekundi). Dakle, dobiveni spektar nije stvaran spektar već pun lažnih indikacija. Čini se kao da energija jedne frekvencije „curi“ na druge frekvencije pa se ova pojava naziva *spectral leakage* ili *spektralno propuštanje* koje uzrokuje širenje frekvencijskog spektra. Utjecaj ove pojave može se

minimalizirati primjenom tehnike koja se naziva *prozor* (primjena *prozorskih* funkcija), a smanjuje amplitude diskontinuiteta na granicama perioda. Windowing ili primjena *prozor tehnike* podrazumijeva množenje vremenskog zapisa s prozorom konačne duljine što dovodi do susretanja krajnjih točaka valnog oblika, odnosno rezultat je kontinuirani valni oblik bez oštrih prijelaza [7]. Slika 17 prikazuje kako se amplituda postepeno smanjuje prema nuli na rubovima.



Slika 17. Primjena *prozor* tehnike (windowing) [7]

Postoji nekoliko različitih tipova prozorskih funkcija ovisno o frekvencijskim karakteristikama. Jedna od njih je tzv. *Hann* ili *Hanning window* koju obilježava vrlo dobra frekvencijska rezolucija i smanjeno spektralno propuštanje. U analizi signala koji se sastoji od kombinacije sinusnih valova daje zadovoljavajuće rezultate te je korištena prilikom snimanja ultrazvučnih signala u okviru ispitivanja za ovaj rad.

4. PRIMJERI ULTRAZVUČNE KARAKTERIZACIJE SVOJSTAVA MATERIJALA

4.1. Mjerenje veličine zrna

Veličina zrna važno je mikrostrukturno svojstvo koje određuje čvrstoću i žilavost materijala. Određivanje veličine zrna pomoću ultrazvuka temelji se na mjerenju koeficijenta rasipanja α_S koji je definiran jednadžbom:

$$\alpha_s = C_r \cdot D^3 \cdot f^4 \qquad (14)$$

gdje je: Cr - parametar raspršenja koji ovisi o vrsti vala i anizotropskim svojstvima

D – srednji promjer zrna [mm]

f – frekvencija [Hz].

Ova jednadžba vrijedi u tzv. Rayleigh-ovom rasponu raspršenja gdje je valna duljina veća nego veličina zrna te ujedno predstavlja područje u kojem se provodi većina ultrazvučnih ispitivanja. Koeficijent raspršenja varira ovisno o frekvenciji i veličini zrna. Ispitivanje počinje s izradom kalibracijskih krivulja koje povezuju koeficijente raspršenja i poznate veličine zrna pri različitim frekvencijama. Zatim se dobiva koeficijent raspršenja za nepoznatu veličinu zrna, a sama veličina zrna se procjenjuje iz kalibracijske krivulje [10].

4.2. Vremensko-frekvencijska analiza ultrazvučnih odjeka i primjena u svrhu procjene toplinske degradacije čelika

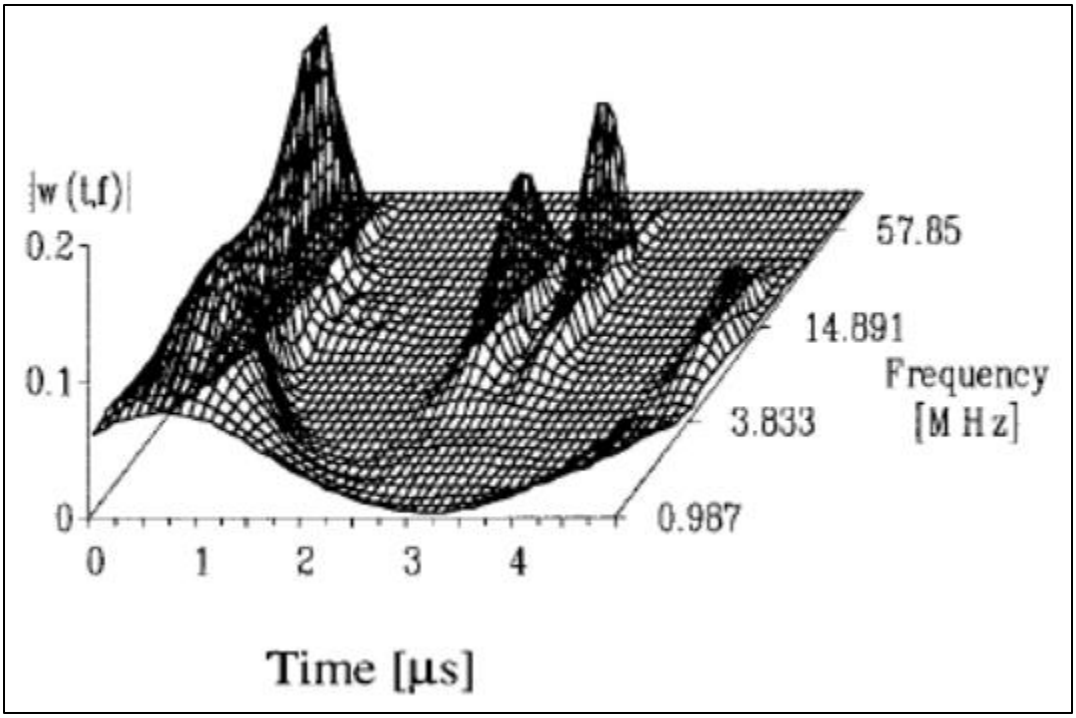
Konstrukcije kao što su elektrane, cjevovodi, posude pod tlakom i sl. tijekom svog radnog vijeka izložene su visokim temperaturama i visokim pritiscima zbog što uzrokuje toplinsku degradaciju materijala uključujući oštećenja od puzanja ili umora materijala. Budući da iznenadna pucanja komponenata takvih konstrukcija rezultiraju ozbiljnim industrijskim nezgodama i/ili ozljedama na radu, takva oštećenja u materijalu moraju biti na vrijeme detektirana, a tehnika ultrazvučnog odziva pokazala se kao najbolja u otkrivanju oštećenja nastalih zbog umora ili puzanja materijala.

Reflektirani ultrazvučni odjeci od unutarnjih nepravilnosti materijala pružaju podatke o kritičnom vremenu i frekvenciji. Ipak, teško je utvrditi oštećenja od puzanja ili umora koristeći konvencionalne tehnike obrade signala pa se u tu svrhu primjenjuje tzv. vremensko – frekvencijska analiza. Ova analiza omogućuje prikaz signala u dvodimenzionalnoj vremenskoj i frekvencijskoj ravnini što znači da je moguće dobiti frekvenciju, tj. specifičnu ultrazvučnu karakteristiku povezanu s određenim svojstvom materijala u vremensko-frekvencijskoj ravnini, a ne samo u jednoj ili drugoj domeni. Na taj način moguće je identificirati unutarnje nedostatke ili procijeniti nastala oštećenja [11].

Učinkovitost vremensko-frekvencijske analize potvrđena je provedbom ultrazvučnih ispitivanja s visokofrekventnim kontaktnim pretvaračima na toplinski razgrađenom čeliku. Prema znanstvenom članku [11], izmjereni ultrazvučni odjeci analizirani su pomoću tzv. Morletove funkcije koja je pokazala da s porastom stupnja toplinske razgradnje postepeno rastu i koeficijent prigušenja i njegova promjena uvjetovana promjenom frekvencije, dok je ultrazvučna brzina ostala nepromijenjena.

Općenito, ultrazvučno mjerenje uključuje usporedbu vremena proleta signala i promjene amplitude između površinskih odjeka, odnosno odjeka od donje i gornje površine objekta. Međutim, u slučaju kontaktnog mjerenja teško je odrediti razliku između odjeka od stijenke materijala i kašnjenja odjeka pretvarača pa je odjeke od prve i druge površine moguće uspoređivati tek kada su izravno povezani s vremenom proleta i prigušenjem. Budući da je ultrazvučni signal ograničen granicama frekvencijskog spektra ili pojasa, važno je unaprijed definirati frekvencijski spektar kako bi se dobili smisleni rezultati. Naime, ispod donje granice spektra nije moguće odrediti točno vrijeme proleta radi transformacije valova, a iznad gornje granice pretvarač ne može primiti visokofrekventne komponente reflektiranog signala. Na kraju, zaključeno je da su rezultati dobiveni u vremensko-frekvencijskoj ravnini zasigurno korisni u kvantitativnoj procjeni oštećenja materijala [11].

Jedna od metoda vremensko-frekvencijske analize je tzv. CWT Continuous Wavelet Transform ili kontinuirana transformacija vala, a rezultate ove metode primijenjene na ispitnom uzorku Cr-Mo čelika prikazuje slika 18.



Slika 18. Prikaz rezultata CWT metode vremensko-frekvencijske analize za Cr-Mo čelik [11]

4.3. Toplinska krhkost duplex nehrđajućeg čelika

Mikrostruktura duplex nehrđajućih čelika sastoji se od austenita i ferita zbog čega su ovi čelici vrlo otporni na koroziju, velike čvrstoće, žilavosti i dobre zavarljivosti. Najčešće se koriste u kemijskim postrojenjima i konstrukcijama u morskom okruženju. Mehanizam razgradnje koji je uočen kod duplex čelika je pojava krhkosti pri temperaturama između 600°C i 800°C. Testovi koji su provedeni u svrhu ultrazvučne procjene toplinske krhkosti uključivali su ispitne uzorke koji su žareni na 800°C punih 10 sati kako bi se stvorila sigma faza. Ultrazvučno mjerenje odnosilo se na praćenje brzine, prigušenja i središnje frekvencije primljenog ultrazvučnog impulsa. Uočeno je da prigušenje pada, dok brzina i središnja frekvencija rastu s porastom krhkosti [10].

4.4. Razaranje legure 625 uslijed starenja

Legura 625 je legura nikla, kroma i molibdena s dodatkom niobija. Koristi se u kemijskoj industriji radi postojane čvrstoće pri visokom temperaturama i otpornosti prema koroziji. Međutim, dugotrajna izloženost visokim temperaturama uzrokuje smanjenje duktilnosti i žilavosti jer dolazi

do izlučivanja Ni_3Nb i Ni_2Mo faza. Provedeno je istraživanje [10] u svrhu povezivanja ultrazvučnih parametara (brzine i prigušenja) sa stupnjem otvrdnjavanja uslijed starenja legure. Ispitivanje je provedeno na uzorcima koji su u različitim vremenskim periodima bili izloženi temperaturi između 500°C i 600°C. Uočen je porast brzine i prigušenja no bez značajne razlike u parametrima s obzirom na vrijeme izloženosti toplini. Uzorci su zatim podvrgnuti toplinskoj obradi na 700°C u trajanju od 6 sati kako bi se povratila mehanička svojstva nakon čega su brzina i prigušenje ponovno pali. Studija je utvrdila da se praćenjem ovih ultrazvučnih parametara može odrediti nastupanje otvrdnjavanja legure, ali i oporavak mehaničkih svojstava uslijed toplinske obrade.

Zaključno, promjene u svojstvima materijala utječu na ultrazvučne parametre ispitivanja koji se mogu mjeriti te osigurati određenu razinu pouzdanosti. Ultrazvučna karakterizacija materijala ipak ne može biti ključna u osiguranju kvalitete, ali služi kao alat za predviđanje i procjenu vijeka trajanja konstrukcije. Važno je naglasiti da za utvrđivanje bilo kakve povezanosti između mehaničkih svojstava i ultrazvučnih parametara, učinci različitih mikrostrukturnih svojstava (koja određuju mehanička svojstva) na parametre ultrazvučnog ispitivanja moraju biti međusobno odvojeni.

5. POLAZNI MATERIJAL ISPITIVANJA

Kako je najavljeno na uvodnim stranicama, cilj eksperimentalnog dijela rada je karakterizacija različitih područja (volumena) zavarenog spoja pomoću frekvencijske analize ultrazvučnih odziva. Za što kvalitetnije konačne rezultate te razumijevanje istih, potrebni su ulazni podaci ispitivanja koji uključuju informacije o osnovnom i dodatnom materijalu.

5.1. Osnovni materijal

Osnovni materijal ispitnog uzorka je nehrđajući krom-nikal (Cr-Ni) čelik legiran molibdenom u svrhu poboljšanja antikorozivnih svojstava, odnosno čelik X2CrNiMo17-12-2 (oznaka prema DIN-u: 1.4404, oznaka prema ASTM: 316L). U tablici 1 prikazan je kemijski sastav čelika X2CrNiMo17-12-2, a u tablici 2 njegova mehanička svojstva.

Tablica 1. Kemijski sastav čelika X2CrNiMo17-12-2 [12]

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Maseni udio [%]	< 0,03	< 1	< 2	< 0,045	< 0,03	od 16,5 do18,5	od 11 do 14	od 2 do 2,5

Tablica 2. Mehanička svojstva čelika X2CrNiMo17-12-2 [13]

	Vlačna čvrstoća, Rm [N/mm2]	**Granica razvlačenja, Rp0,2 [N/mm2]**	**Istezljivost, %**	**Tvrdoća, HB**
Čelik X2CrNiMo17-12-2	od 490 do 690	190	od 30 do 40	od 55 do 85

Iz tablice 1 može se očitati vrlo malen maseni udio ugljika koji iznosi manje od 0,03 %, što znači da materijal X2CrNiMo17-12-2 pripada skupini austenitnih čelika. Austenitni nehrđajući čelici uglavnom sadrže između 0,02 do 0,15% ugljika, 16 do 24% kroma te 8 do 20% nikla uz dodavanje određenog udjela molibdena, titanija, niobija, tantala ili dušika. Najvažnija karakteristika

austenitnih čelika je otpornost na interkristalnu koroziju, dok im je nedostatak niska granica razvlačenja upravo zbog malog udjela ugljika. Ostala bitna svojstva ove skupine čelika su sljedeća: nemagnetičnost, nemogućnost usitnjavanja zrna, pojava većih naprezanja i deformacija kod zavarivanja nego što je to slučaj s feritnim čelicima, visoka žilavost, nisu skloni povećanju kristalnog zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja, a legiranje s molibdenom, volframom i vanadijem omogućuje dobru otpornost prema puzanju pri temperaturama iznad 600°C. Konkretno, čelik X2CrNiMo17-12-2 ne koristi se iznad temperature od 400°C [14].

5.2. Dodatni materijal

Prva tri prolaza zavarena su TIG postupkom gdje je kao dodatni materijal korištena čvrsta nehrđajuća žica, visoko legirana, sljedećih oznaka: prema EN ISO 14343-A: W 19 12 3 L, prema AWS A5.9: ER316L, namijenjena za zavarivanje austenitnih čelika pri temperaturama između -120 i 400°C te otporna na interkristalnu koroziju. Žica se spaja na negativni pol istosmjerne struje, a kao zaštitni plin proizvođač preporučuje 100% Argon.

Tablica 3 prikazuje kemijski sastav metala zavara prema proizvođaču dodatnog materijala za zavarivanje „Böhler Welding“.

Tablica 3. Kemijski sastav metala zavara za TIG postupak [15]

Kemijski element	**C**	**Si**	**Mn**	**Cr**	**Ni**	**Mo**
Maseni udio, [%]	≤ 0,02	0,5	1,8	18,5	12,3	2,8

Prema ISO normi, oznaka elektrode W 19 12 3 L sadrži sljedeće podatke:

- slovo W je oznaka za TIG zavarivanje,
- broj 19 je oznaka za sadržaj kroma od 18% i 20%,
- broj 12 je sadržaj nikla od 11% do 14%,
- broj 3 je sadržaj molibdena od 2,5% do 3% te
- slovo L predstavlja nizak udio ugljika (ispod 0,03%).

Ostatak zavara popunjen je REL postupkom prilikom kojeg je korištena rutilno obložena elektroda, prema normi EN ISO 3581-A oznake E 19 12 3 LR 12, a prema AWS / ASME SFA5.4 normi oznake E316L-16, proizvođača Elektroda Zagreb. Ova elektroda koristi se za zavarivanje visokolegiranih Cr-Ni-Mo čelika s niskim sadržajem ugljika, a struktura metala zavara sastoji se od austenita s delta feritom [16]. Tablica 4 prikazuje kemijski sastav metala zavara za korištenu elektrodu.

Tablica 4. Kemijski sastav metala zavara za REL postupak [16]

Kemijski element	**C**	**Mn**	**Si**	**Cr**	**Ni**	**Mo**
Maseni udio [%]	≤ 0,03	0,9	0,8	18,5	12	2,7

5.3. Mikrostruktura zavarenog spoja

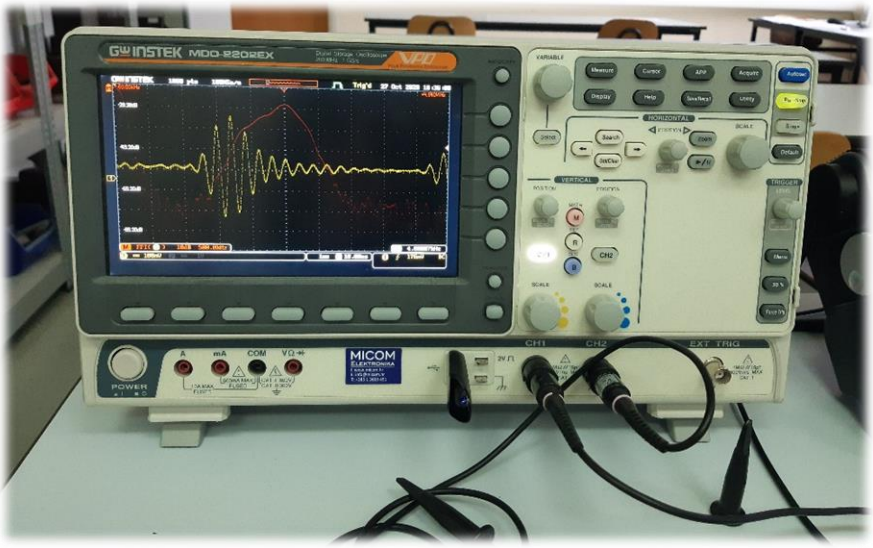
Općenito, hoće li toplinskom obradom nehrđajućeg čelika nastati austenitna ili austenitnoferitna mikrostruktura ovisi o sadržaju alfagenih i gamagenih legirnih elemenata. „Delta“ ferit je vikosotemperaturni ferit, često prisutan u austenitnoj mikrostrukturi, a nastaje zbog segregacije alfagenih legirnih elemenata (kroma) prilikom kristalizacije te naknadne toplinske obrade. Bez obzira što u određenim uvjetima ferit smanjuje duktilnost i žilavost austenitnih nehrđajućih čelika, prisutnost delta ferita u mikrostrukturi je poželjna u malim količinama, točnije volumni udio ne bi trebao prelaziti granicu od 2 – 3%. Neželjene, odnosno štetne faze u mikrostrukturi predstavljaju precipitati karbida i nitrida koji utječu na smanjenje korozijske postojanosti [16].

6. KONCEPT ISPITIVANJA - PRELIMINARNO ISPITIVANJE

Eksperimentalni dio rada sastoji se od dva dijela: preliminarnog (probnog) ispitivanja i ispitivanja na temelju kojeg se iznose zaključci u okviru karakterizacije materijala. Pojam *ispitivanje* odnosi se na mjerenje (skeniranje uzorka tj. prikupljanje ultrazvučnih odziva pomoću mjerne opreme), pohranjivanje tih podataka, njihovu analizu u softveru te prikaza konačnih rezultata provedene analize. U ovom poglavlju opisat će se tijek provedbe i važnost preliminarnog dijela eksperimenta.

6.1. Tijek preliminarnog ispitivanja

Preliminarno ispitivanje nije se provodilo na ispitnom uzorku već na etalonu V2 u svrhu određivanja stanja raspoložive mjerne opreme, provjere valjanosti prikupljenih podataka (odziva), planiranja tijeka ispitivanja te utvrđivanja postupka obrade podataka (FFT analiza). Za prikupljanje preliminarnih podataka korištena je ultrazvučna sonda nazivne frekvencije 4 MHz koja je nakon završenog preliminarnog ispitivanja zamijenjena sondama manje nazivne frekvencije (2 MHz). Iako preliminarni podaci nisu upotrebljivi u okviru zadatka, oni su poslužili kao uvod u postupak frekvencijske analize. Preliminarna mjerenja provedena su pomoću nekoliko vrsta uređaja, a na temelju dobivenih rezultata odlučeno je da će se za ispitivanje koristiti osciloskop proizvođača *GW Instek* (slika 19) radi veće rezolucije, a time i povećane točnosti rezultata.

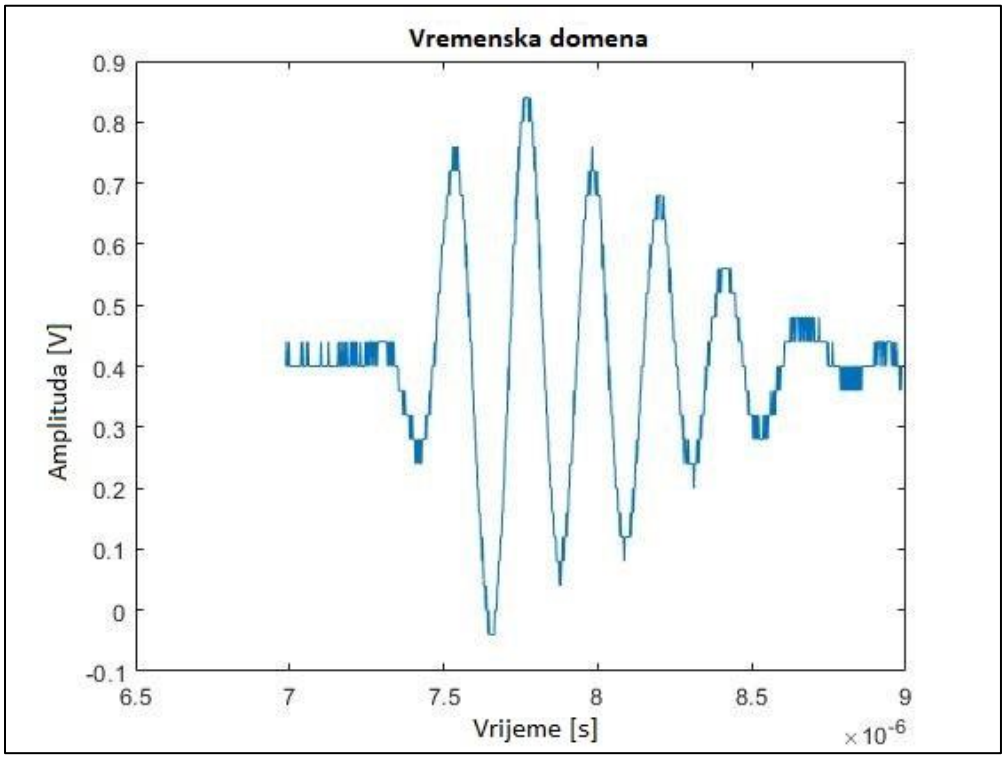


Slika 19. Osciloskop korišten u ispitivanju

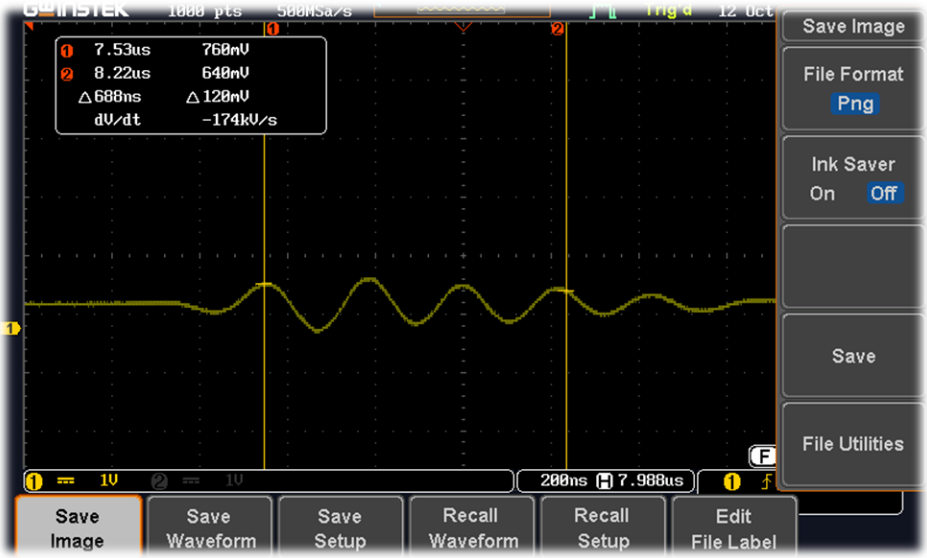
Budući da se ultrazvučni valovi reflektiraju više puta prilikom prolaska kroz materijal, na monitoru uređaja se pojavljuje veći broj impulsa. U svrhu FFT analize snimljeni su samo prvi impulsi, odnosno refleksija od zadnje stijenke uzorka (poznata debljina uzorka) kako bi bilo moguće odrediti volumen materijala zahvaćen ultrazvučnim snopom, tj. skenirani volumen materijala. Snimljeni podaci sadrže informacije o vremenskoj domeni (vrijednosti amplitude i vremenu proleta). Podaci se pohranjuju u tzv. *detail.csv* formatu, a zatim se importiraju u određeni softver za analizu signala, u konkretnom slučaju *MatLab*. Nakon što su svi podaci pojedinog signala učitani, može se započeti njihova obrada. Najprije se konstruira grafički prikaz vremenske domene (kao vrsta provjere) nakon čega slijedi FFT transformacija.

6.2. Rezultati preliminarnog ispitivanja

Vremenska domena ultrazvučnog odziva od zadnje stijenke etalona V2 prikazana je slikama 20 i 21.

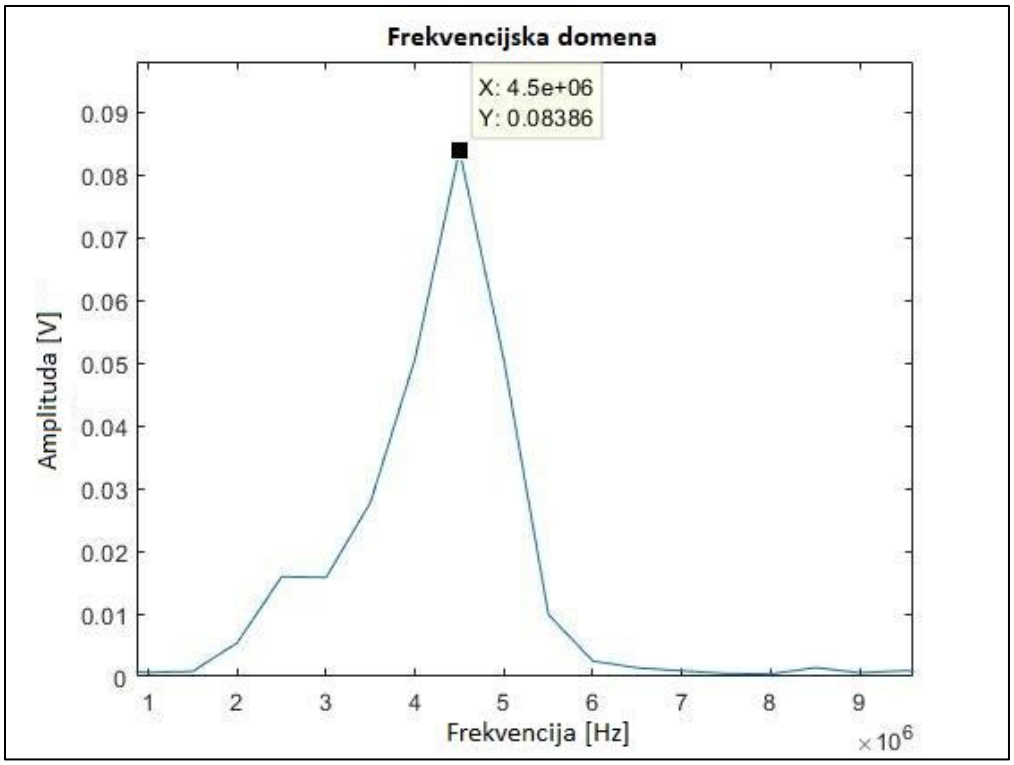


Slika 20. Vremenska domena signala konstruirana iz snimljenih podataka



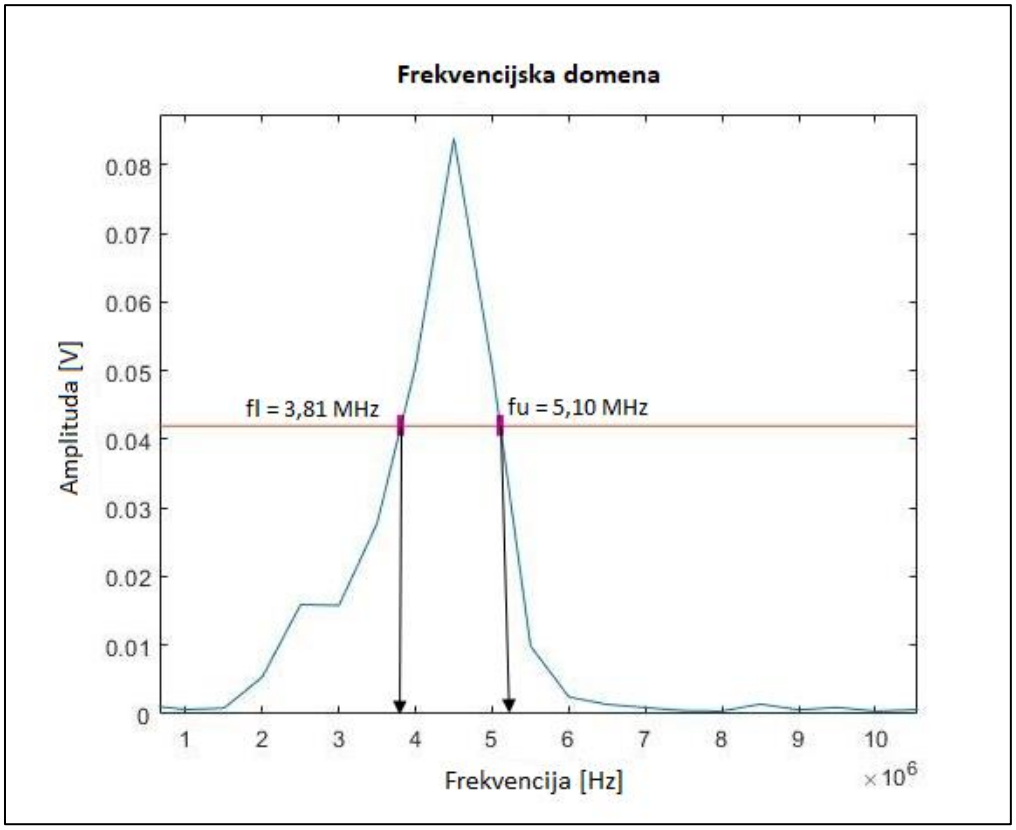
Slika 21. Vremenska domena signala zabilježena u trenutku snimanja na osciloskopu

Na temelju priloženih slika može se potvrditi da se radi o istom signalu. Karakteristike, odnosno parametri ultrazvučnog vala su jednaki (uz nešto drugačije vertikalno i horizontalno skaliranje). Nadalje, slijedi FFT transformacija signala u frekvencijsku domenu koju prikazuje slika 22.



Slika 22. Frekvencijska domena signala

Iz grafičkog prikaza može se očitati maksimalna amplituda ili tzv. *peak* koji iznosi 0,08386 V te vršna frekvencija koja iznosi 4,5 MHz. Na temelju ovog podatka pronalazi se vrijednost amplitude 50% manja od maksimalne koja definira donju i gornju vrijednost frekvencijskog spektra. Vrijednosti pojedinih točaka frekvencijske domene izračunava MatLab, a one su prikazane na slici 23.



Slika 23. Karakteristične veličine frekvencijskog spektra

Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti u izraz (3) izračunava se središnja frekvencija koja iznosi:

$$f_c = \frac{f_u + f_l}{2} = \frac{5{,}10 + 3{,}81}{2} = 4{,}46\ MHz$$

dok je širina frekvencijskog spektra prema izrazu (4):

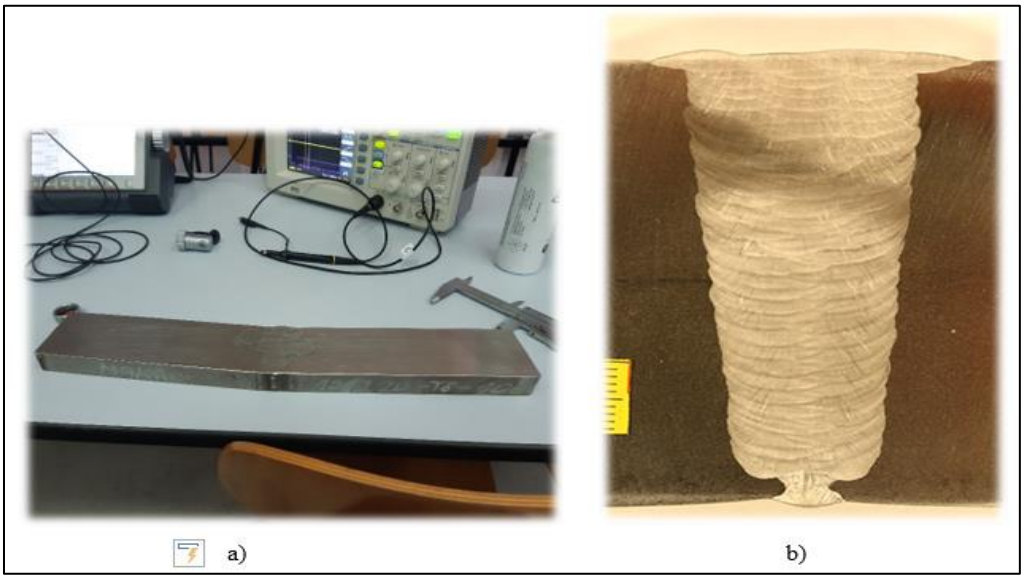
$$B_w = \frac{f_u - f_l}{f_c} \cdot 100\% = \frac{5{,}10 - 3{,}81}{4{,}46} \cdot 100\% = 28{,}92\ \%$$

Na temelju preliminarnog ispitivanja može se utvrditi da je korištena sonda užeg frekvencijskog spektra. Slijedi ispitivanje zavarenog spoja pomoću dvije sonde jednake nazivne frekvencije od 2 MHz, ali različitih karakteristika frekvencijskog spektra. Rezultati ovog ispitivanja će se uspoređivati međusobno, ali i obzirom na referentne vrijednosti dobivene mjerenjem na etalonu V1. Mjeriti će se pet karakterističnih područja uzorka, a rezultati će biti prikazani grafički i numerički. Nakon usporedbe rezultata, komentirati će se zapažanja te iznijeti zaključci čime će biti provedena karakterizacija materijala ispitnog uzroka.

7. REZULTATI ISPITIVANJA

7.1. Ulazni podaci ispitivanja

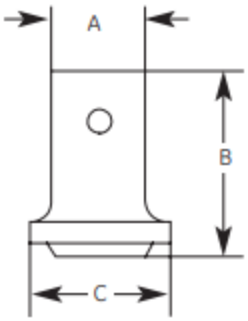
Ispitni uzorak na kojem je provedeno ispitivanje prikazan je slikom 24.



Slika 24. a) Ispitni uzorak b) Makroizbrusak zavarenog spoja

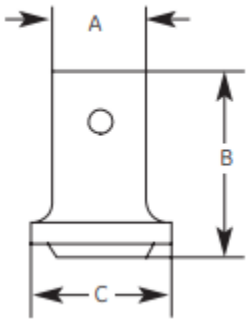
U ispitivanju su korištene dvije sonde jednake nazivne frekvencije od 2 MHz te jednakih promjera Ø = 10 mm s oznakama K2N i MB2S gdje je K2N sonda šireg frekvencijskog spektra, a MB2S sonda užeg frekvencijskog spektra (slika 25). Obilježje ovih sondi je opća primjena te jednostavna konstrukcija, a tehničke specifikacije korištenih sondi prikazane su slikama 26 i 27 te tablicom 5.

Slika 25. Sonde K2N i MB2S



Case Type	A		B		C	
	mm	in	mm	in	mm	in
Type 2	30	1.18	59	2.32	45	1.69
Type 3	20	0.79	43	1.77	25	0.98

Slika 26. Dimenzije sonde K2N [19]



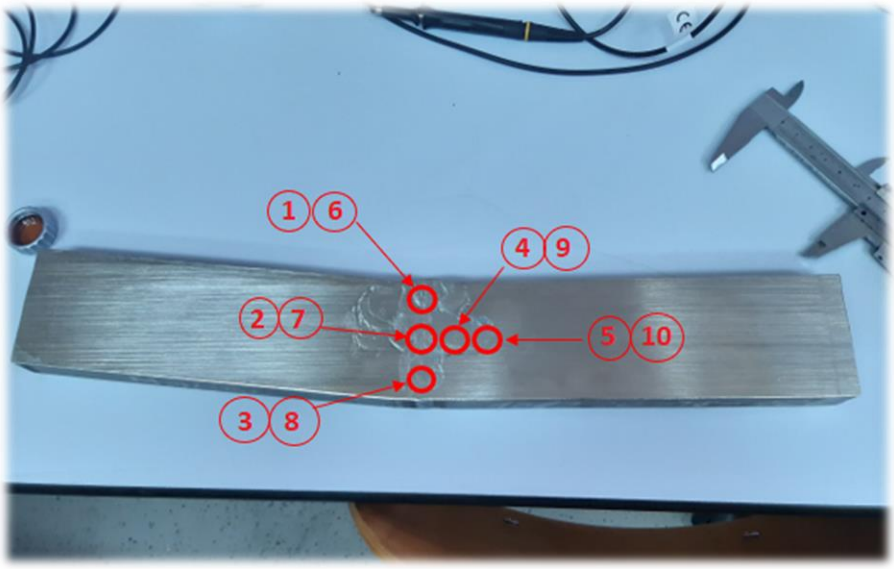
Case Type	A		B		C	
	mm	in	mm	in	mm	in
Type 2	30	1.18	59	2.32	45	1.69
Type 3	20	0.79	43	1.77	25	0.98

Slika 27. Dimenzije sonde MB2S [19]

Tablica 5. Nazivne vrijednosti sondi [19]

	D [mm]	f [MHz]	N [mm]	D_{ef} [mm]
K2N	10	2	8 ± 1	9,7 ± 0,2
MB2S	10	2	8 ± 1	9,7 ± ,2

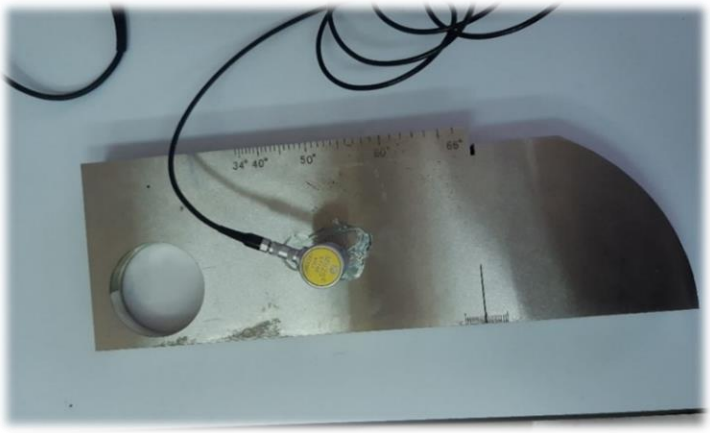
Kako je već spomenuto, ultrazvučni odjeci bilježili su se iz pet karakterističnih volumena uzorka koji uključuju metal zavara, ZUT te osnovni materijal gdje su brojevima od 1 do 5 označena područja volumena skenirana sondom K2N, a brojevima od 6 do 10 područja volumena skenirana sondom MB2S (slika 28).



Slika 28. Mjerna područja ispitnog uzorka

Dakle, karakteristična područja ispitivanja sastoje se od tri područja volumena po visini zavara (promjene po visini zavara vidljive su na slici 24.b), jednog u području zone utjecaja topline te jednog u osnovnom materijalu.

Prije predstavljanja rezultata ispitivanja potrebni su referentni podaci. Kao referentni podaci poslužit će mjerenja provedena na radnom etalonu V1. Razlog odabira ovog etalona kao referentnog je debljina materijala koja iznosi d = 25 mm, približno kao i debljina ispitnog uzorka d = 20 mm. Također, za etalon V1 je certifikatom proizvođača potvrđena brzina propagacije ultrazvuka koja iznosi 5935 m/s. Sa svakom sondom skenirano je jedno područje volumena etalona te zabilježen ultrazvučni impuls reflektiran od zadnje stijenke etalona. Prikupljanje referentnih podataka na etalonu V1 prikazano je slikom 29.



Slika 29. Mjerenje na etalonu V1

7.1.1. Volumen uzorka ultrazvučnog odziva

Na temelju slike 8 napravljen je izračun karakterističnih veličina ultrazvučnog snopa te je konstruiran volumen uzorka iz kojeg su snimljeni ultrazvučni odzivi.

Prema jednadžbi (1) blisko polje za sonde K2N i MB2S iznosi:

$$N = \frac{D^2 \cdot f}{4v} = \frac{0{,}010^2 \cdot 2 \cdot 10^6}{4 \cdot 5920} = 8{,}5\ mm$$

Dubina materijala na kojoj promjer ultrazvučnog snopa iznosi 10 mm je 4N, odnosno:

$$4N = 4 \cdot 8{,}5 = 34\ mm$$

Pomoću izračunatih vrijednosti moguće je odrediti kut divergencije snopa koji iznosi:

$$\gamma = tan^{-1}\left(\frac{D_{4N}}{4N}\right) = tan^{-1}\left(\frac{5}{34}\right) = 8{,}4°$$

pri čemu je D_{4N} – promjer snopa na dubini od 4N.

Na dubini od 20 mm, tj. na zadnjoj stijenki uzorka, promjer snopa iznosi:

$$\emptyset_{20} = 2 \cdot tg(\gamma) \cdot 20 = 5{,}9\ mm$$

Kada bi snop propagirao dalje, na dubini od 40 mm njegov bi promjer iznosio:

$$\emptyset_{40} = 2 \cdot tg(\gamma) \cdot 40 = 11{,}8\ mm$$

Izraz za izračun promjera snopa u fokusu sonde, tj. na dubini N, glasi :

$$FD_6 = \frac{k \cdot D_{ef}}{4}, \qquad k = \frac{F}{N}$$

gdje k – koeficijent ovisan o iznosu bliskog polja

D_{ef} – efektivni promjer sonde

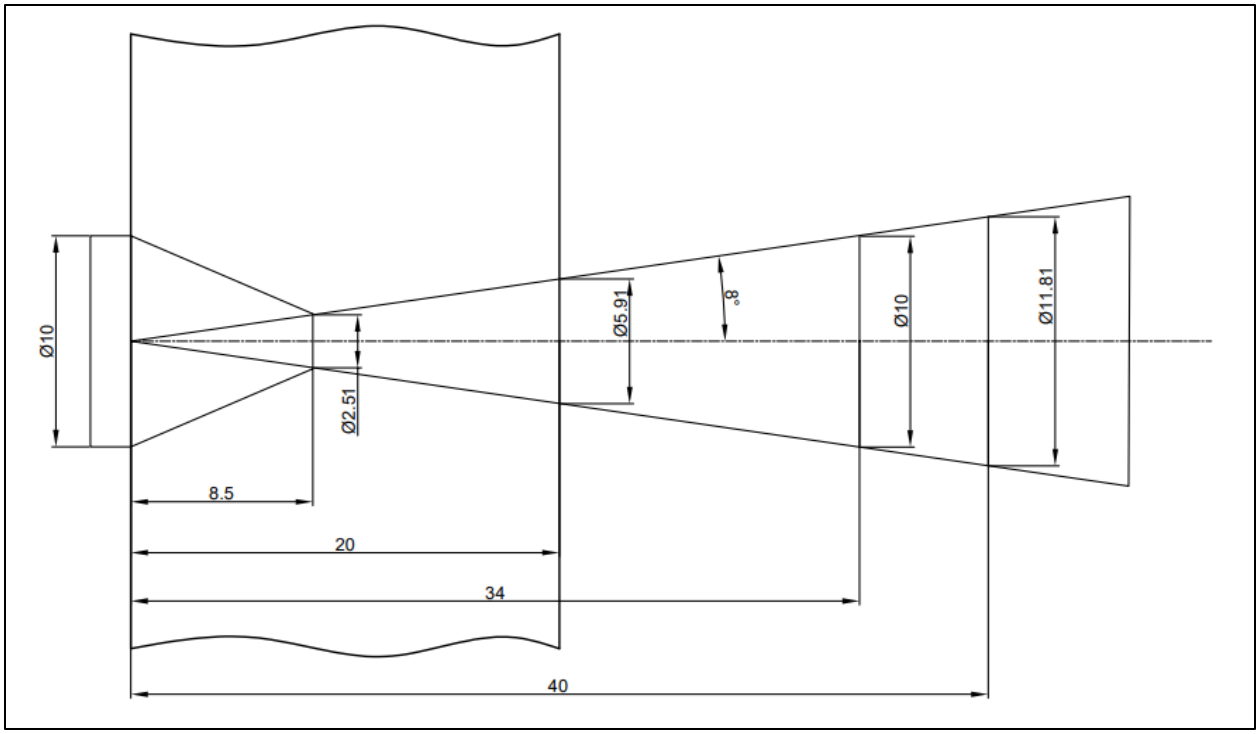
N – nazivni iznos bliskog polja sonde

F – izračunati iznos bliskog polja sonde.

Prema tome, FD_6 iznosi:

$$FD_6 = \frac{\frac{8.5}{8} \cdot 9{,}7}{4} = 2{,}6\ mm$$

Volumen uzorka ultrazvučnog odziva s izračunatim vrijednostima prikazan je na slici 30.



Slika 30. Geometrija ultrazvučnog snopa u ispitnom uzorku

Uz poznate karakteristične veličine snopa, izračunat je volumen uzorka ultrazvučnog odziva.

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V_1 = \left(\frac{1}{3} \cdot 5^2\pi \cdot 11{,}5\right) - \left(\frac{1}{3} \cdot 1{,}3^2\pi \cdot 3\right) = 295\ mm^3$$

$$V_2 = \left(\frac{1}{3} \cdot 2{,}95^2\pi \cdot 20\right) - \left(\frac{1}{3} \cdot 1{,}3^2\pi \cdot 8{,}5\right) = 167\ mm^3$$

$$V_3 = \left(\frac{1}{3} \cdot 5{,}9^2\pi \cdot 40\right) - \left(\frac{1}{3} \cdot 2{,}95^2\pi \cdot 20\right) = 1276\ mm^3$$

gdje su: V_1 – volumen između sonde i udaljenosti N

V_2 – volumen između N i zadnje stijenske uzorka

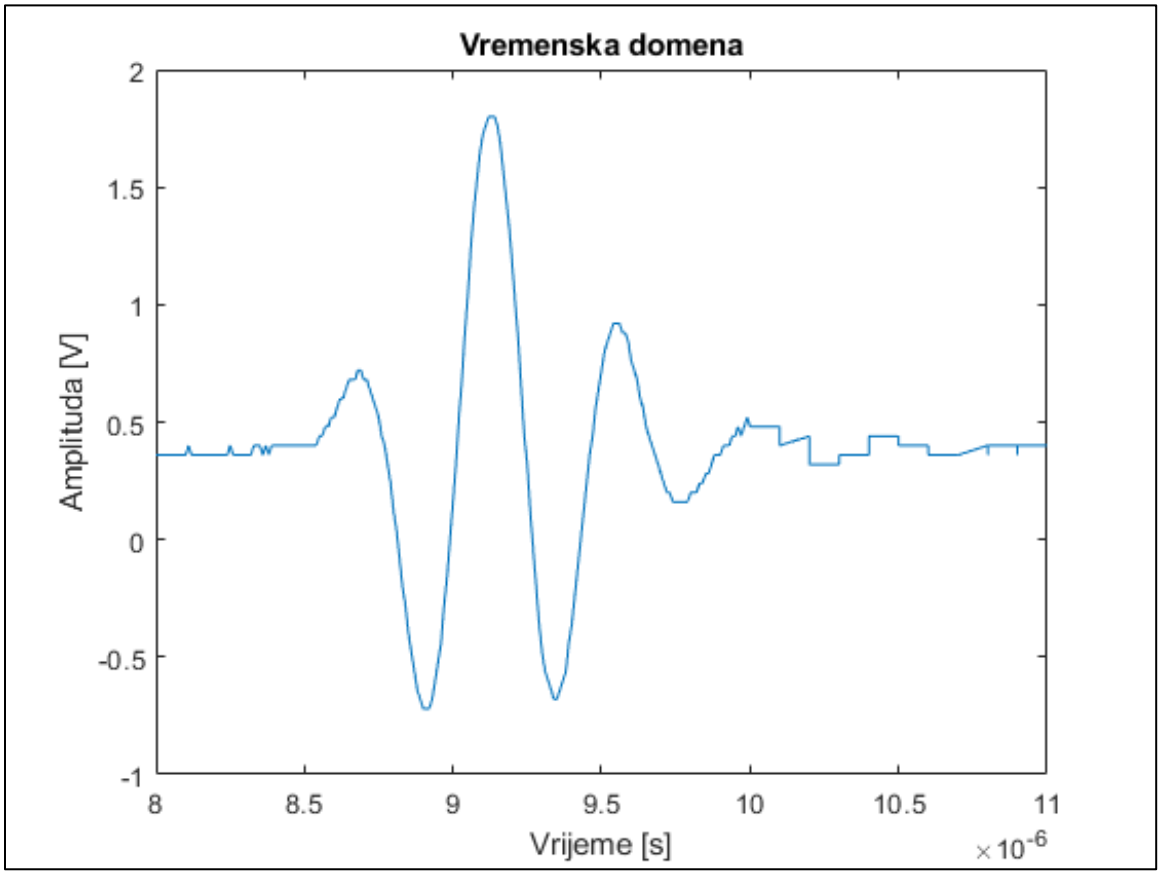
V_3 – volumen obuhvaćen prilikom refleksije ultrazvučnog snopa u sondu.

Dakle, ukupni volumen uzorka ultrazvučnog snopa iznosi približno:

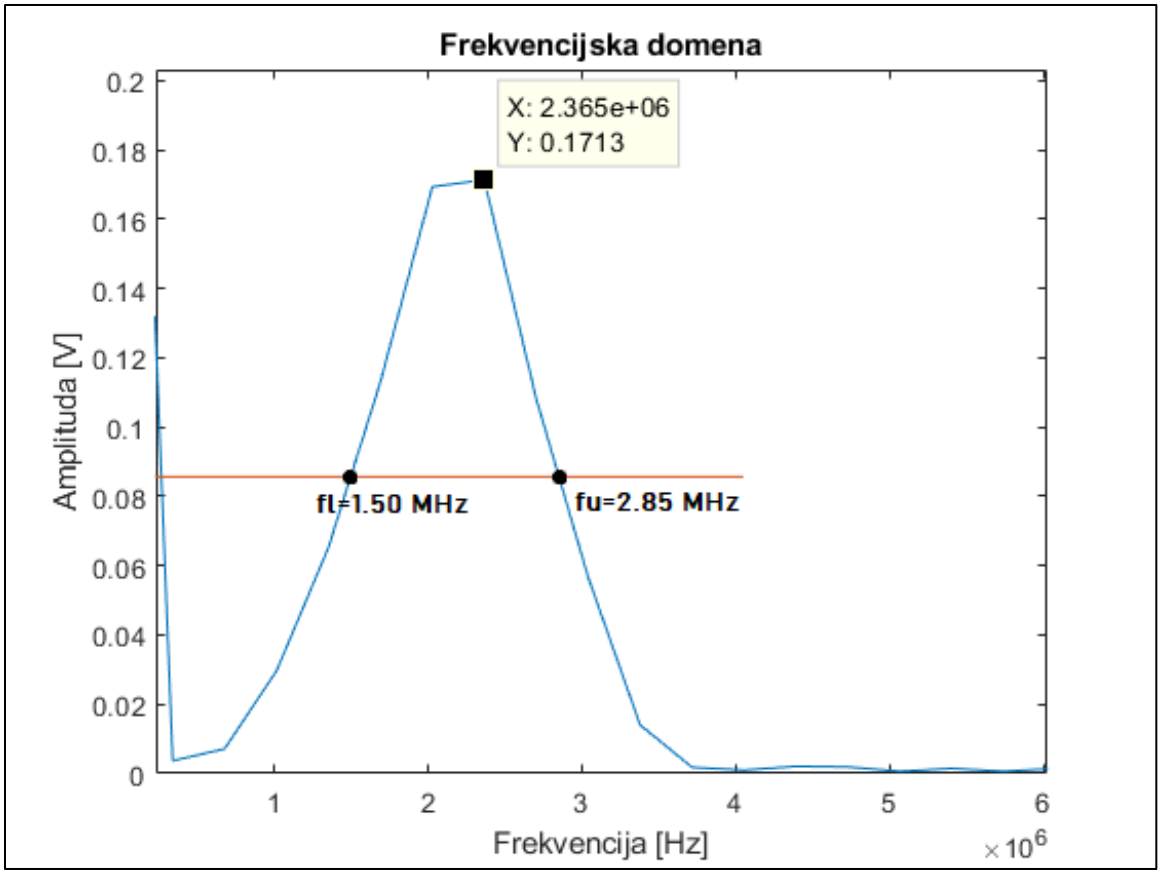
$$V = 295 + 167 + 1276 = 1738\ mm^3 = 1{,}7\ cm^3$$

7.1.2. Rezultati mjerenja s etalona V1 pomoću sonde K2N

Vremenska domena signala snimljenog na etalonu V1 pomoću sonde K2N prikazana je na slici 31, dok je frekvencijska domena prikazana slikom 32.



Slika 31. Vremenska domena signala snimljenog na etalonu V1 sondom K2N



Slika 32. Frekvencijska domena signala snimljenog na etalonu V1 sondom K2N

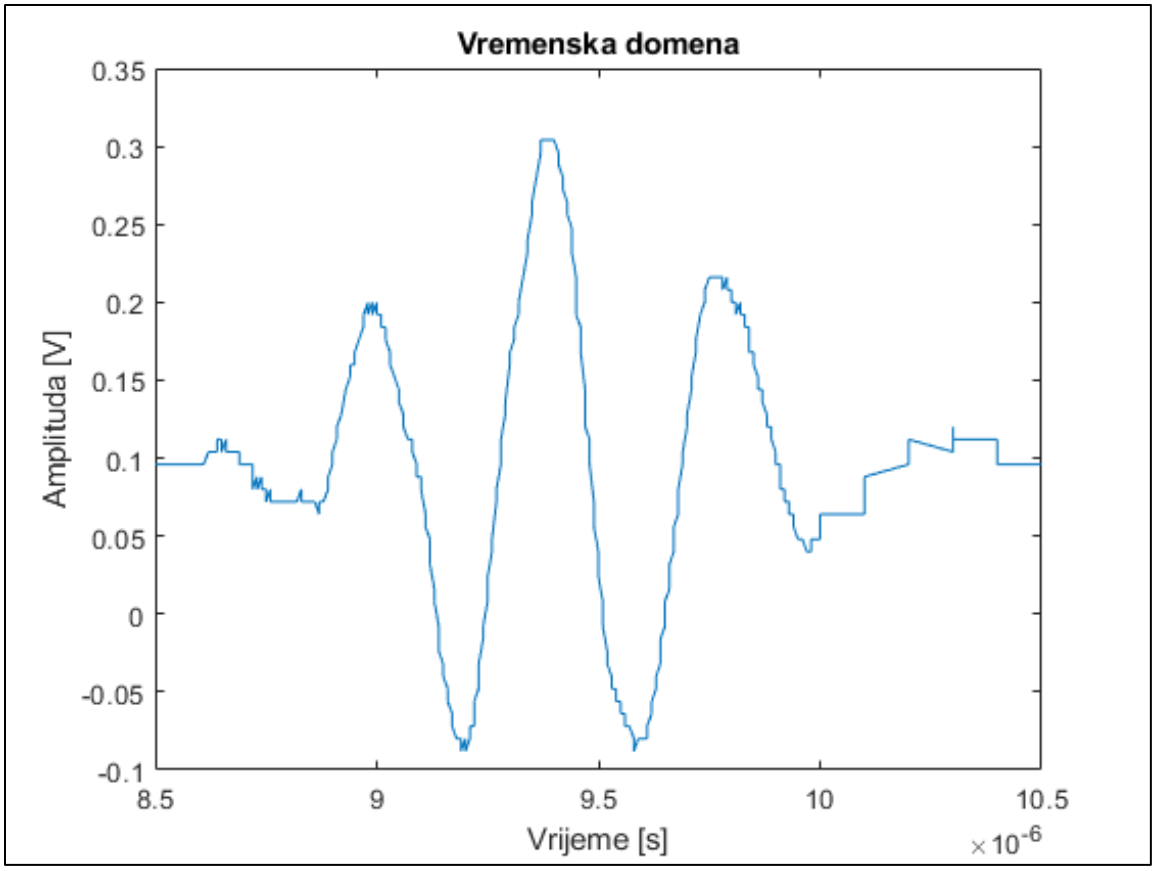
Prema jednadžbama (3) i (4) središnja frekvencija te širina frekvencijskog spektra prikazanog signala imaju sljedeće iznose:

$$f_c = \frac{f_u + f_l}{2} = \frac{2{,}85 + 1{,}50}{2} = 2{,}18\ MHz$$

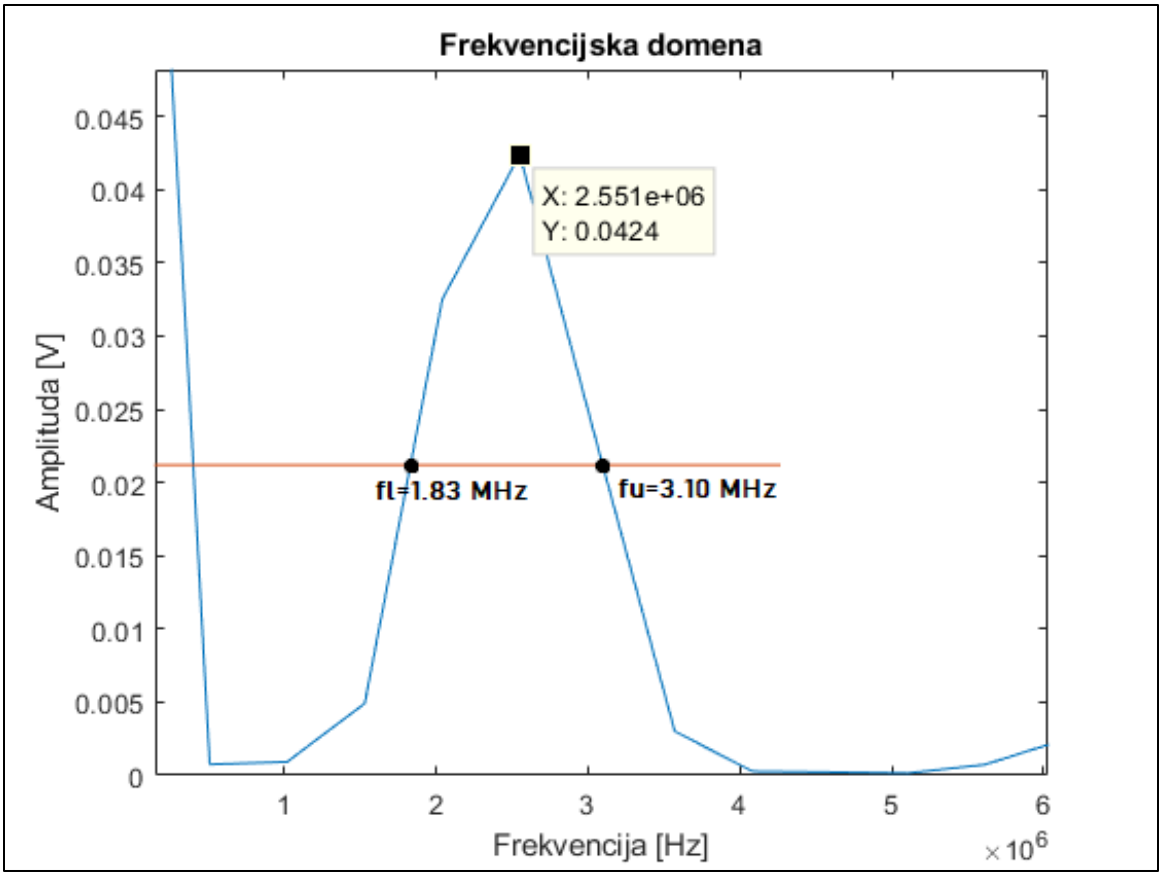
$$B_w = \frac{f_u - f_l}{f_c} \cdot 100\% = \frac{2{,}85 - 1{,}50}{2{,}18} = 61{,}93\ \%$$

7.1.3. Rezultati mjerenja s etalona V1 pomoću sonde MB2S

Vremenska i frekvencijska domena signala snimljenog na etalonu V1 pomoću sonde MB2S prikazane su na slikama 33 i 34.



Slika 33. Vremenska domena signala snimljenog na etalonu V1 sondom MB2S



Slika 34. Frekvencijska domena signala snimljenog na etalonu V1 sondom MB2S

Karakteristične veličine za sondu MB2S iznose:

$$f_c = \frac{f_u + f_l}{2} = \frac{3{,}10 + 1{,}83}{2} = 2{,}47\ MHz$$

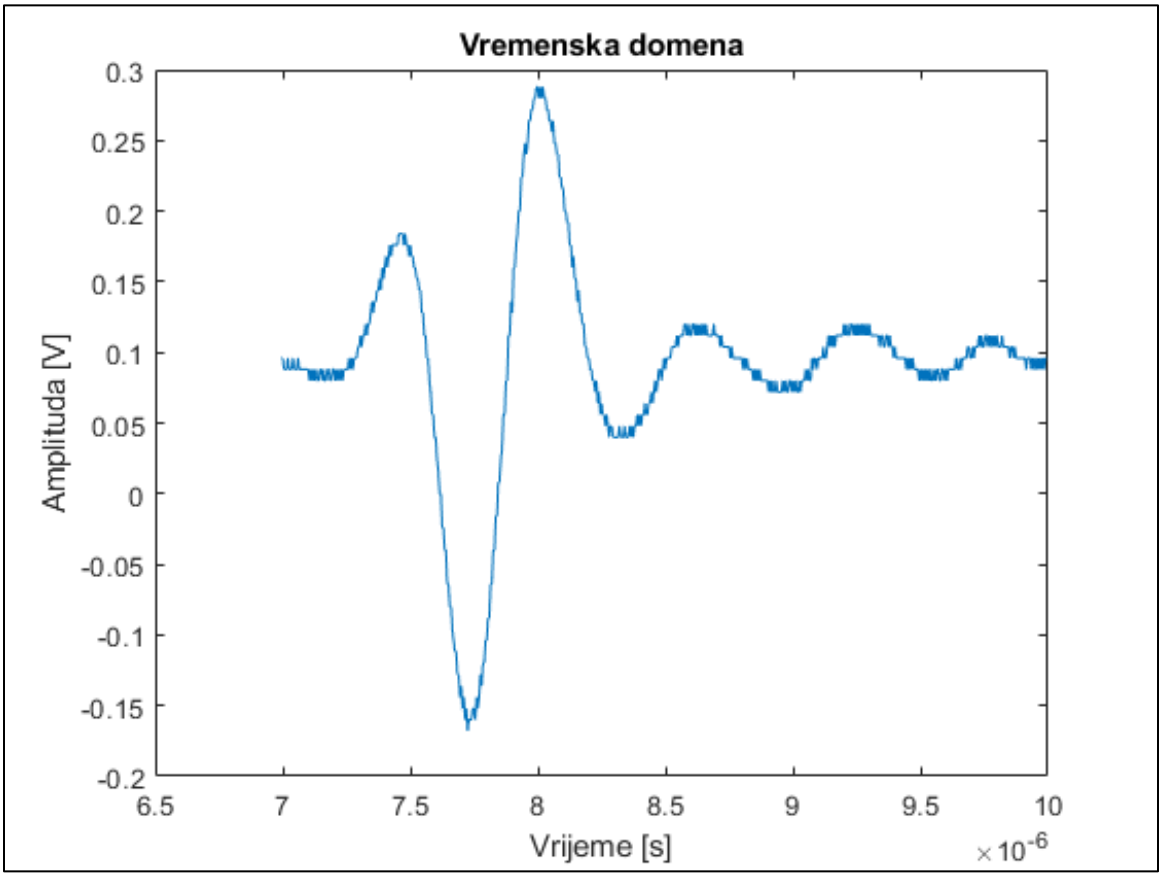
$$B_w = \frac{f_u - f_l}{f_c} \cdot 100\% = \frac{3{,}10 - 1{,}83}{2{,}47} = 51{,}42\ \%$$

Oblici ultrazvučnih valova u vremenskoj domeni te iznosi širine frekvencijskog spektra za pojedinu sondu potvrđuju da je karakteristika K2N sonde širi frekvencijski spektar (78,24%), dok je MB2S sonda užeg frekvencijskog spektra (51,42%). Kako različite frekvencijske karakteristike sondi utječu na karakterizaciju zavarenog spoja pokazat će rezultati ispitivanja u poglavlju 7.2.

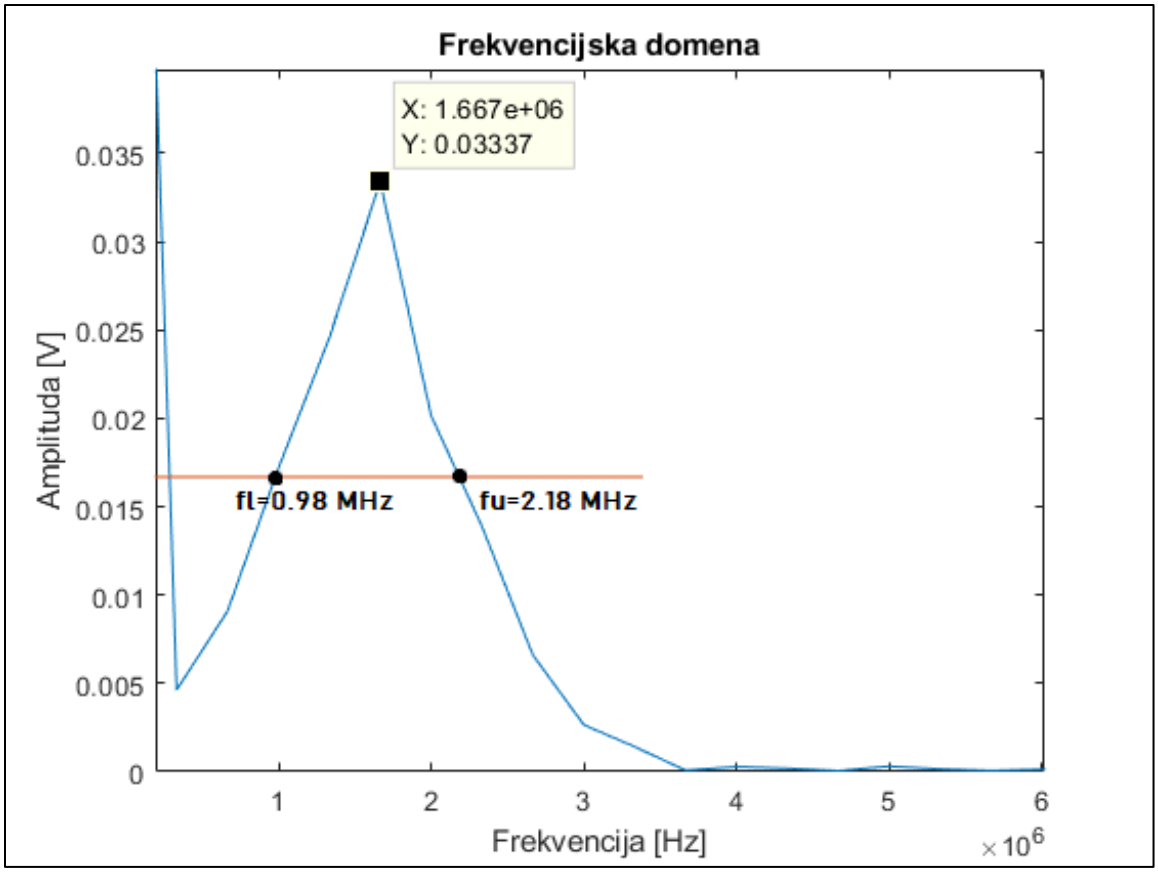
7.2. Prikaz rezultata mjerenja ispitnog uzorka sondom K2N

7.2.1. Mjerno područje 1

Vremenska i frekvencijska domena ultrazvučnog signala dobivenog iz mjernog područja *1* prikazane su slikama 35 i 36.



Slika 35. Vremenska domena signala



Slika 36. Frekvencijska domena signala

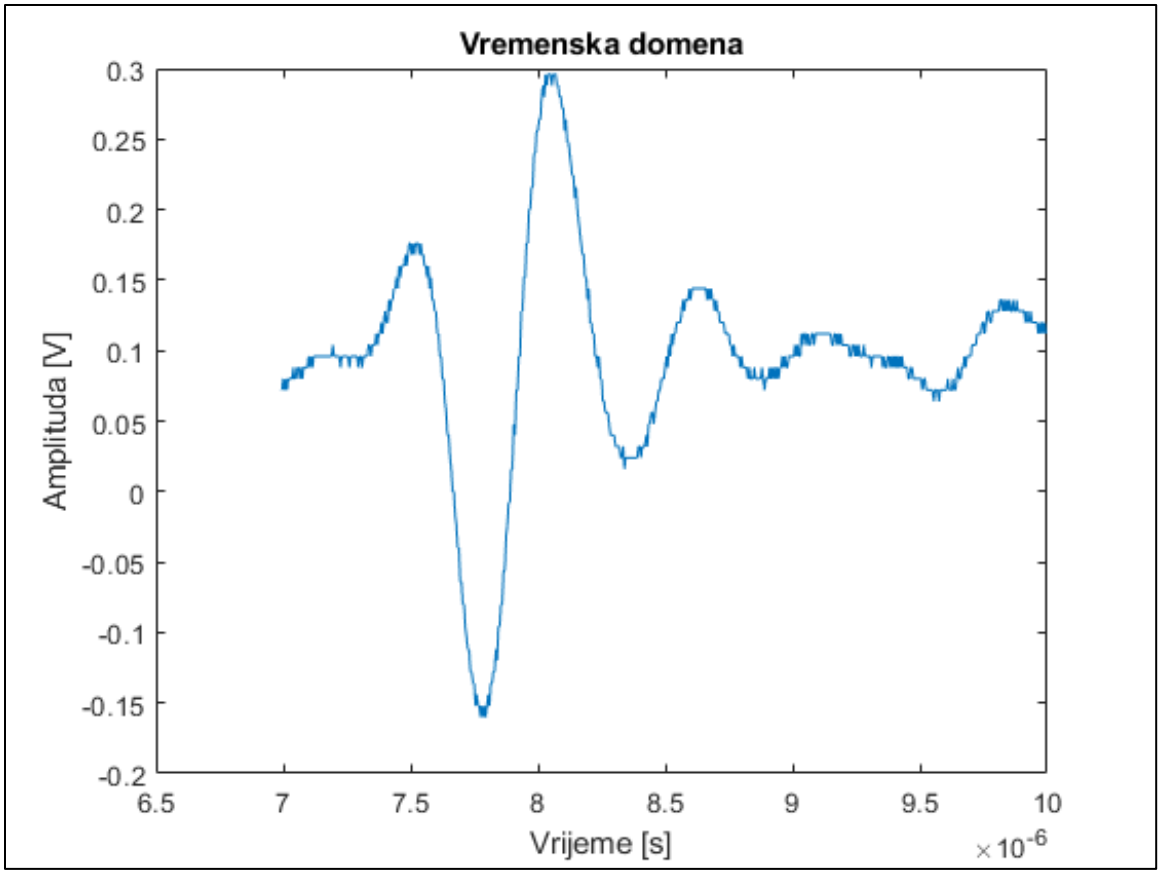
Središnja frekvencija te širina frekvencijskog spektra iznose:

$$f_c = \frac{f_u + f_l}{2} = \frac{2{,}18 + 0{,}98}{2} = 1{,}58\ MHz$$

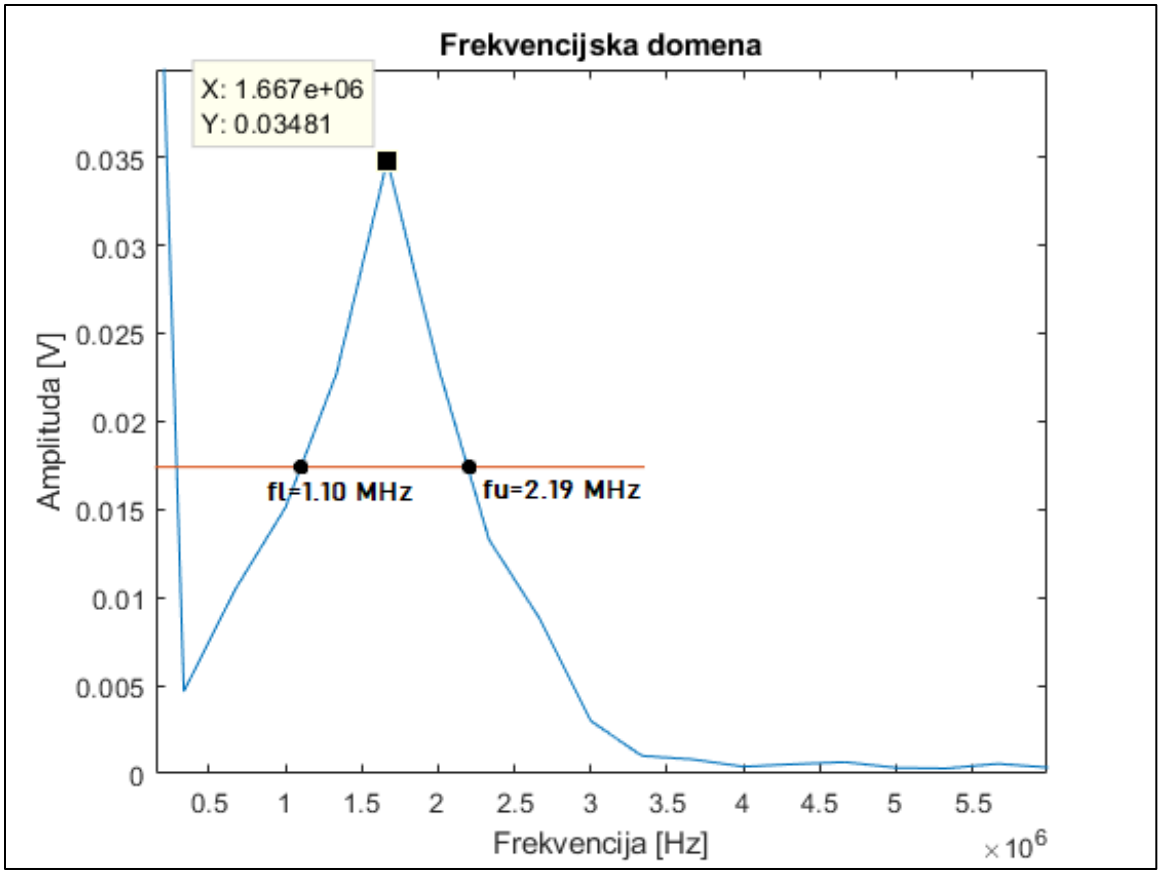
$$B_w = \frac{f_u - f_l}{f_c} \cdot 100\% = \frac{2{,}18 - 0{,}98}{1{,}58} = 75{,}95\ \%$$

7.2.2. Mjerno područje 2

Vremenska i frekvencijska domena ultrazvučnog signala dobivenog iz mjernog područja *2* prikazane su slikama 37 i 38.



Slika 37. Vremenska domena signala



Slika 38. Frekvencijska domena signala

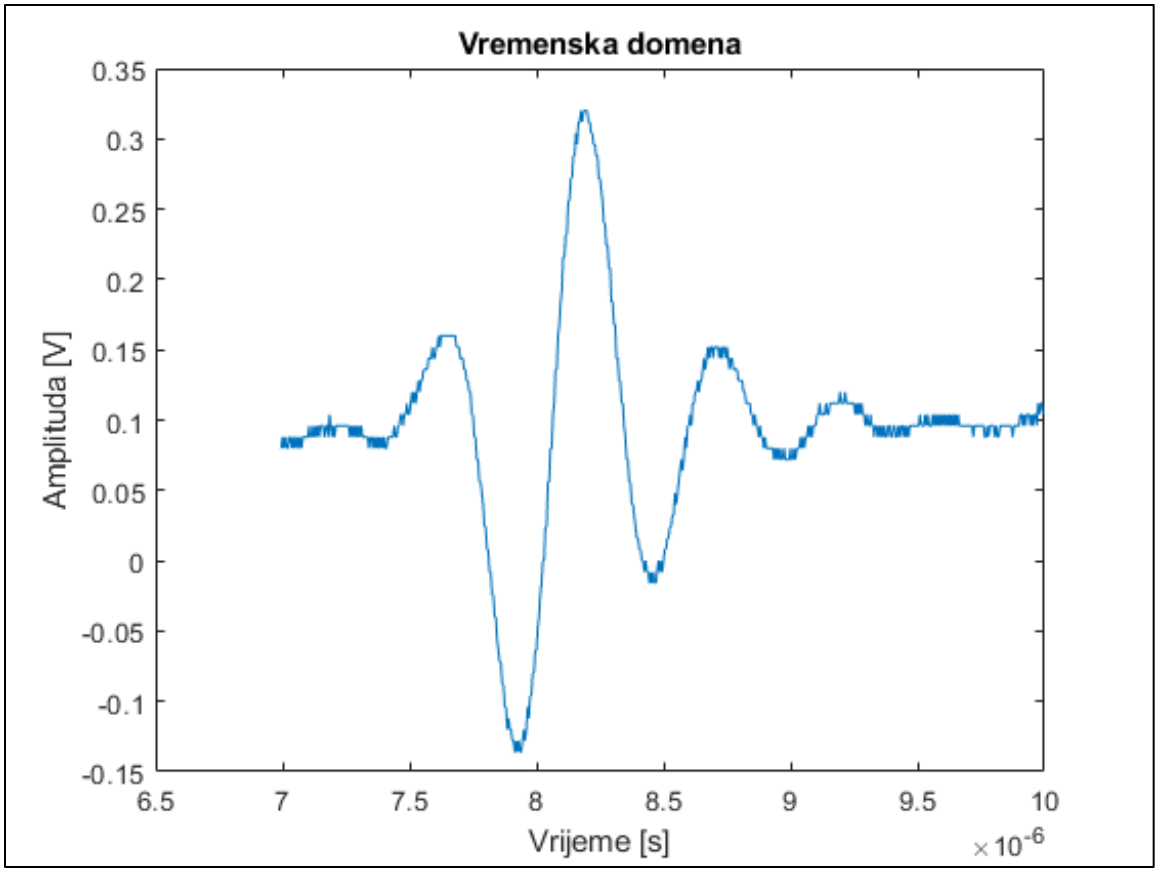
Iznosi središnje frekvencije i širine frekvencijskog spektra su sljedeći:

$$f_c = \frac{f_u + f_l}{2} = \frac{2{,}19 + 1{,}10}{2} = 1{,}65\ MHz$$

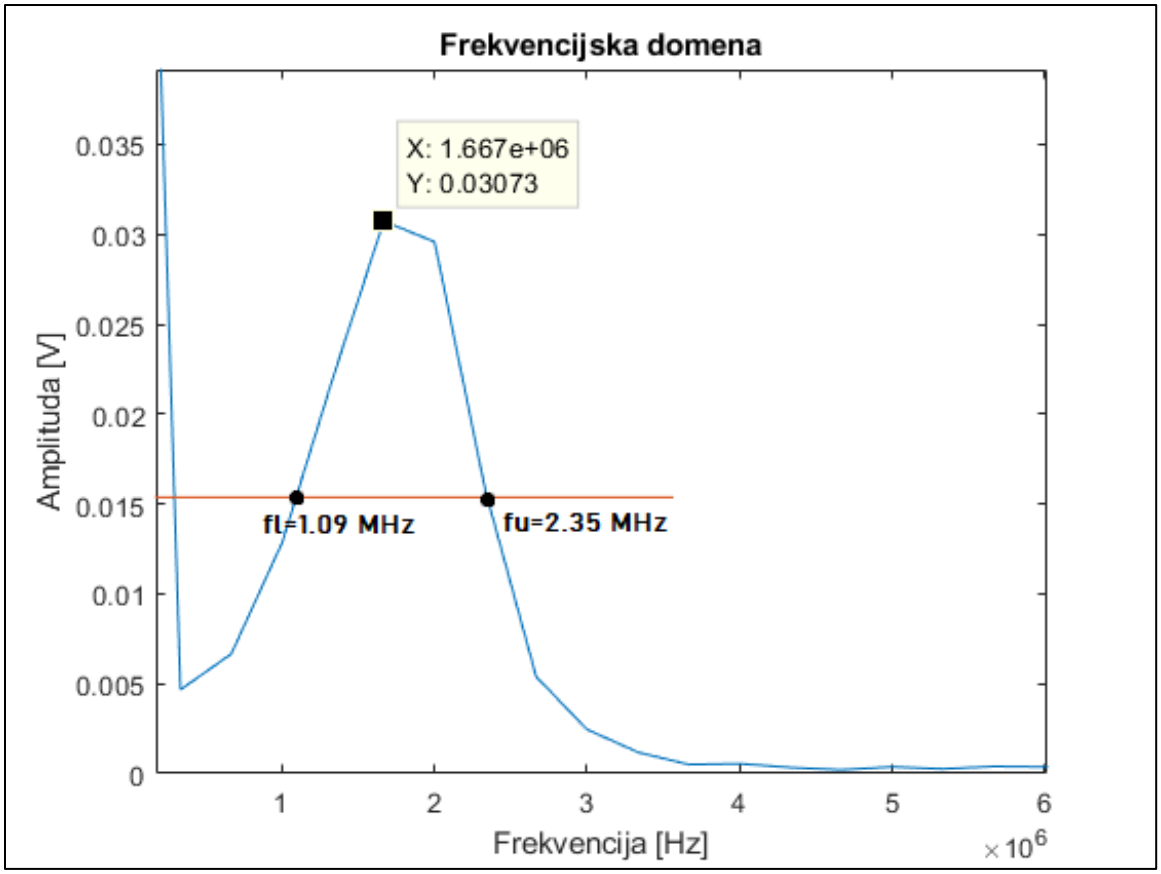
$$B_w = \frac{f_u - f_l}{f_c} \cdot 100\% = \frac{2{,}19 - 1{,}10}{1{,}65} = 66{,}06\ \%$$

7.2.3. Mjerno područje 3

Vremenska i frekvencijska domena ultrazvučnog signala dobivenog iz mjernog područja *3* prikazane su slikama 39 i 40.



Slika 39. Vremenska domena signala



Slika 40. Frekvencijska domena signala

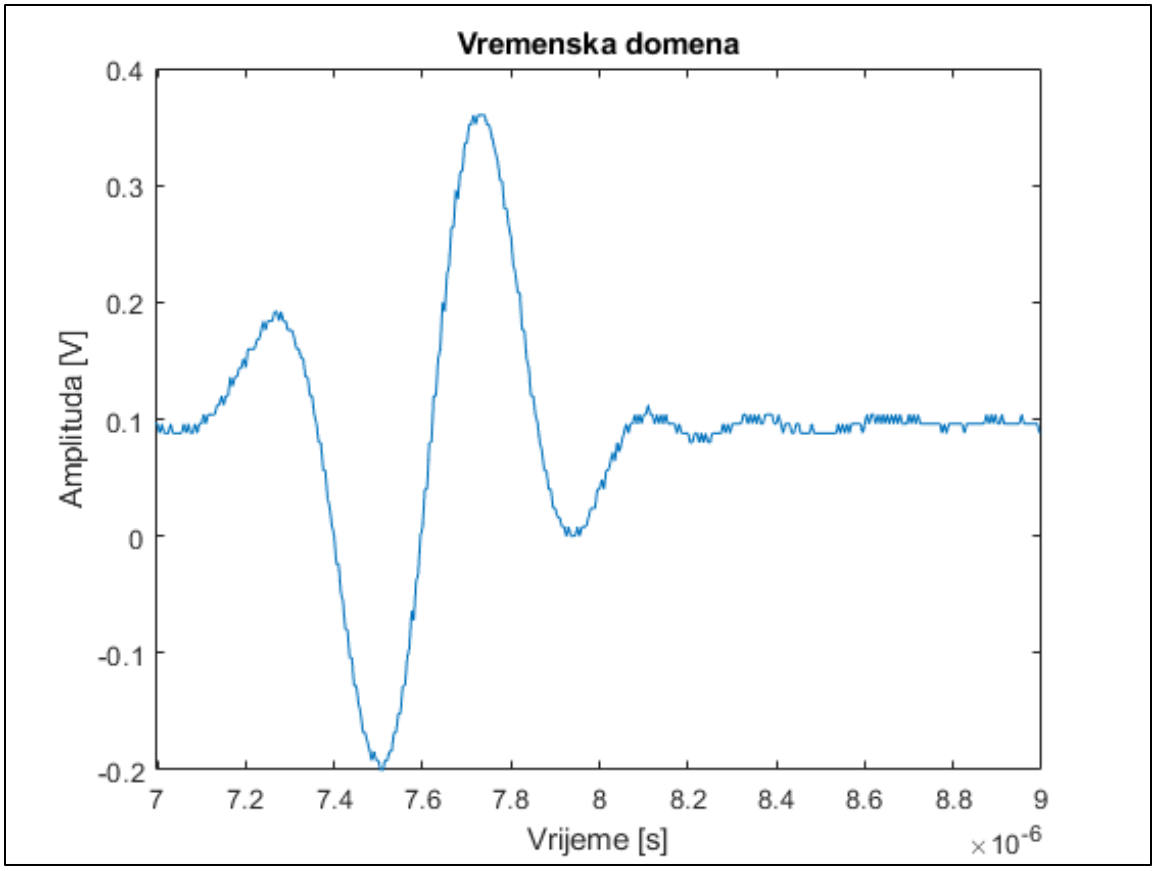
Središnja frekvencija te širina frekvencijskog spektra iznose:

$$f_c = \frac{f_u + f_l}{2} = \frac{2{,}35 + 1{,}09}{2} = 1{,}72\ MHz$$

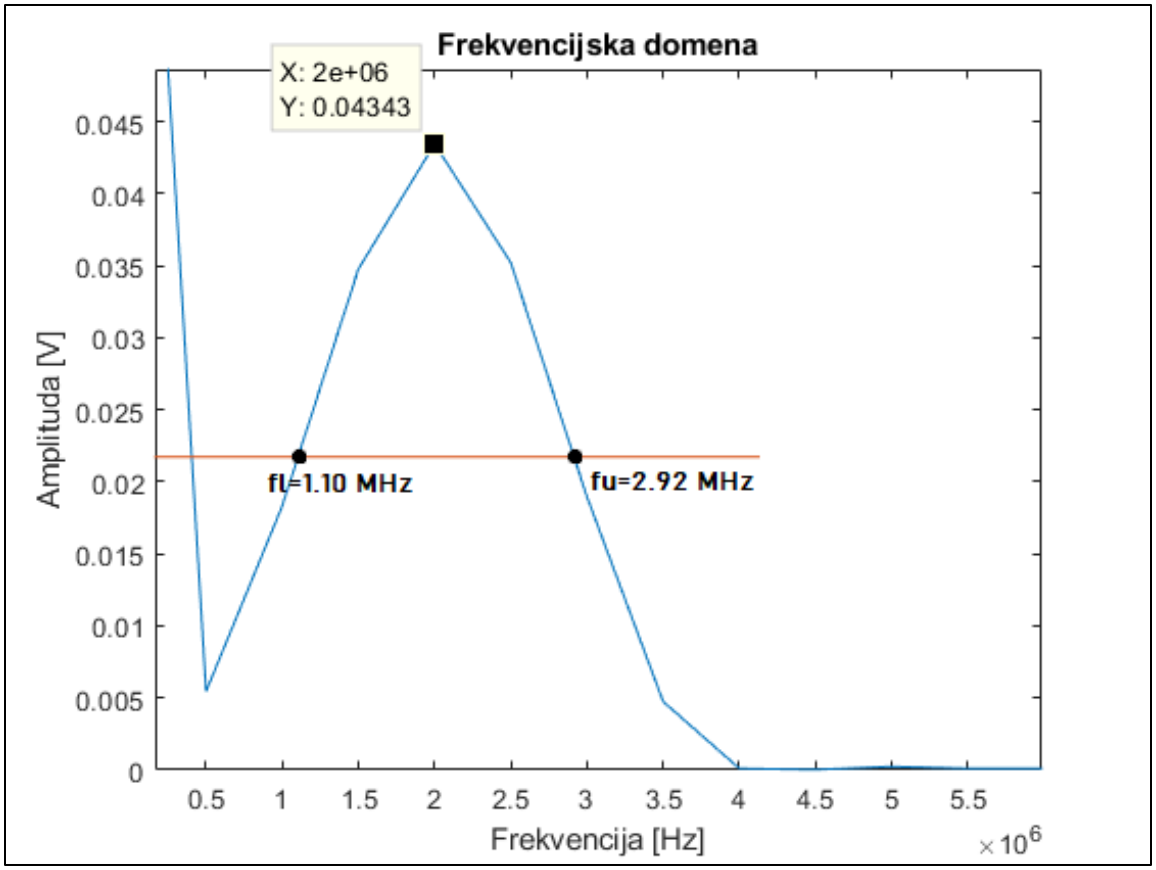
$$B_w = \frac{f_u - f_l}{f_c} \cdot 100\% = \frac{2{,}35 - 1{,}09}{1{,}72} = 73{,}26\ \%$$

7.2.4. Mjerno područje 4

Vremenska i frekvencijska domena ultrazvučnog signala dobivenog iz mjernog područja *4* prikazane su slikama 41 i 42.



Slika 41. Vremenska domena signala



Slika 42. Frekvencijska domena signala

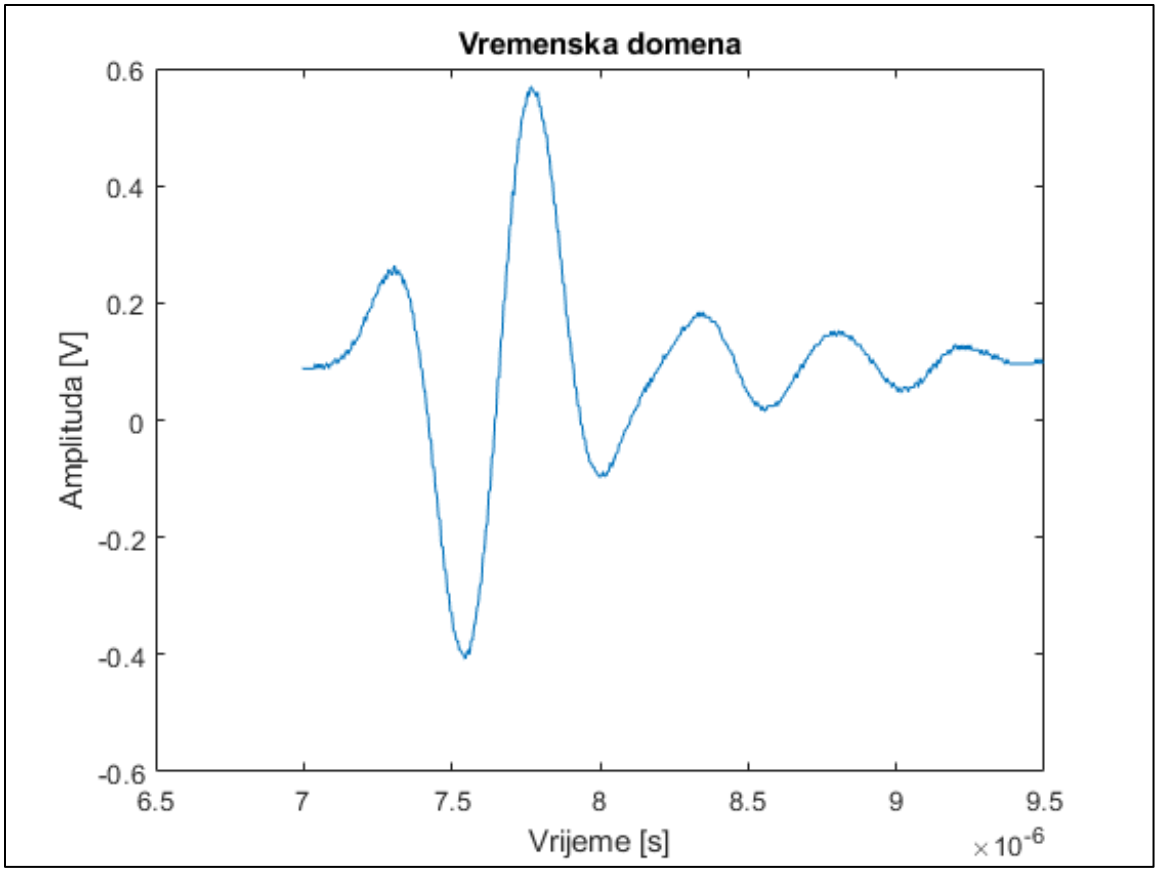
Karakteristične veličine iznose:

$$f_c = \frac{f_u + f_l}{2} = \frac{2{,}92 + 1{,}10}{2} = 2{,}01\ MHz$$

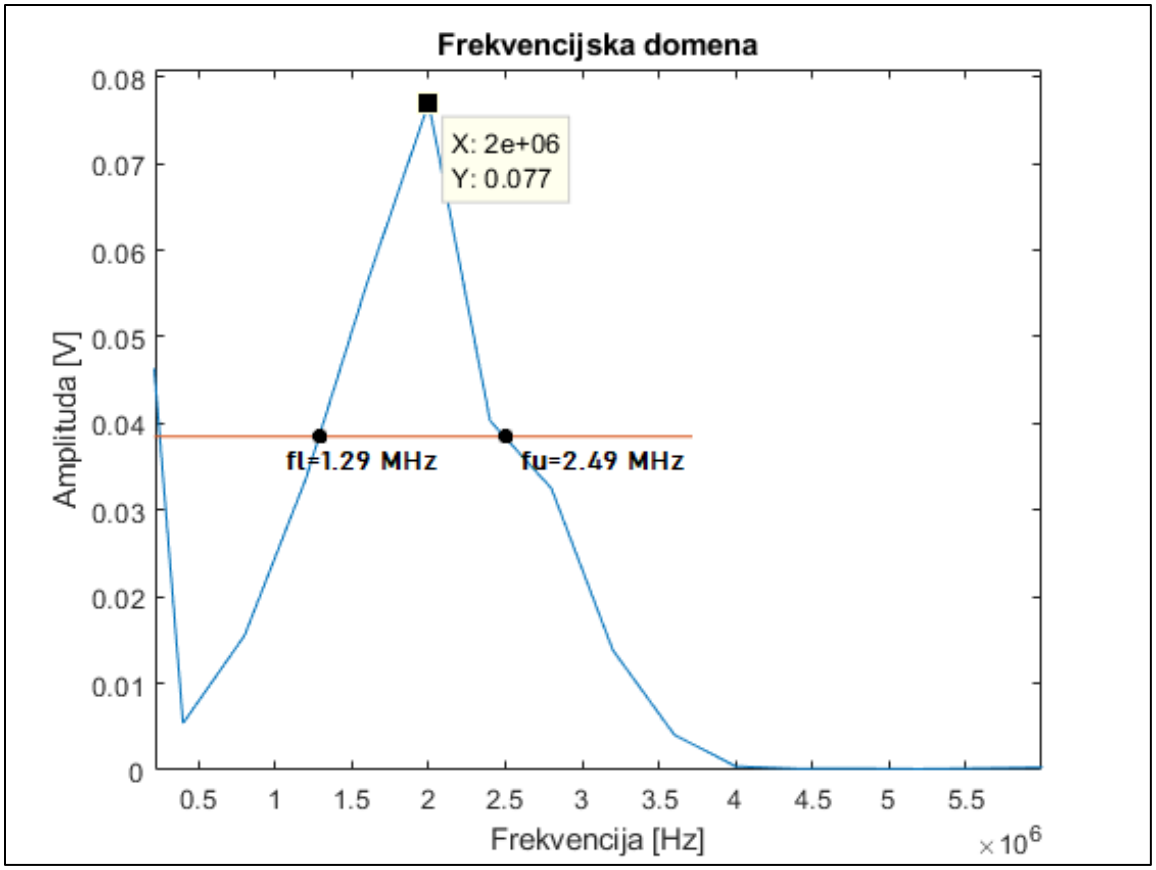
$$B_w = \frac{f_u - f_l}{f_c} \cdot 100\% = \frac{2{,}92 - 1{,}10}{2{,}01} = 90{,}55\ \%$$

7.2.5. Mjerno područje 5

Vremenska i frekvencijska domena ultrazvučnog signala dobivenog iz mjernog područja *5* prikazane su slikama 43 i 44.



Slika 43. Vremenska domena signala



Slika 44. Frekvencijska domena signala

Središnja frekvencija te širina frekvencijskog spektra iznose:

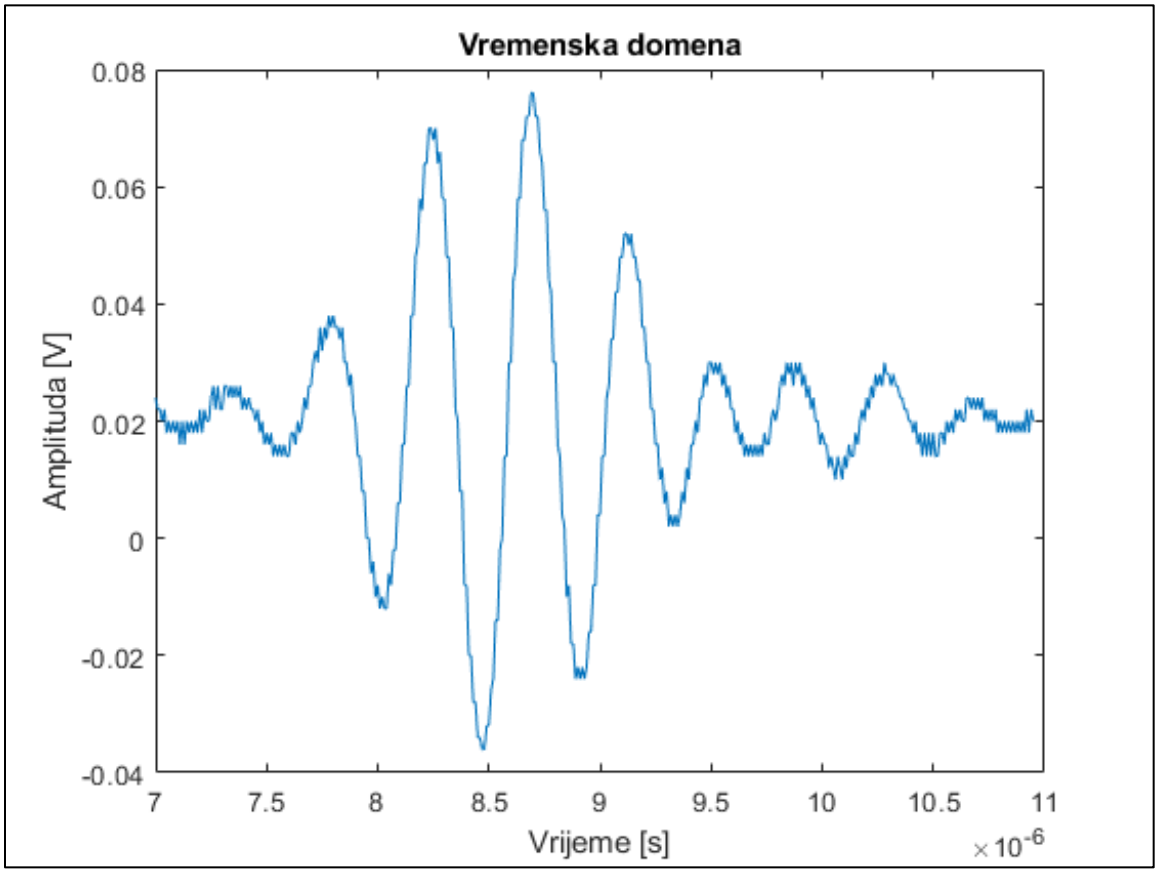
$$f_c = \frac{f_u + f_l}{2} = \frac{2{,}49 - 1{,}29}{2} = 1{,}89\ MHz$$

$$B_w = \frac{f_u - f_l}{f_c} \cdot 100\% = \frac{2{,}49 - 1{,}29}{1{,}89} = 63{,}49\ \%$$

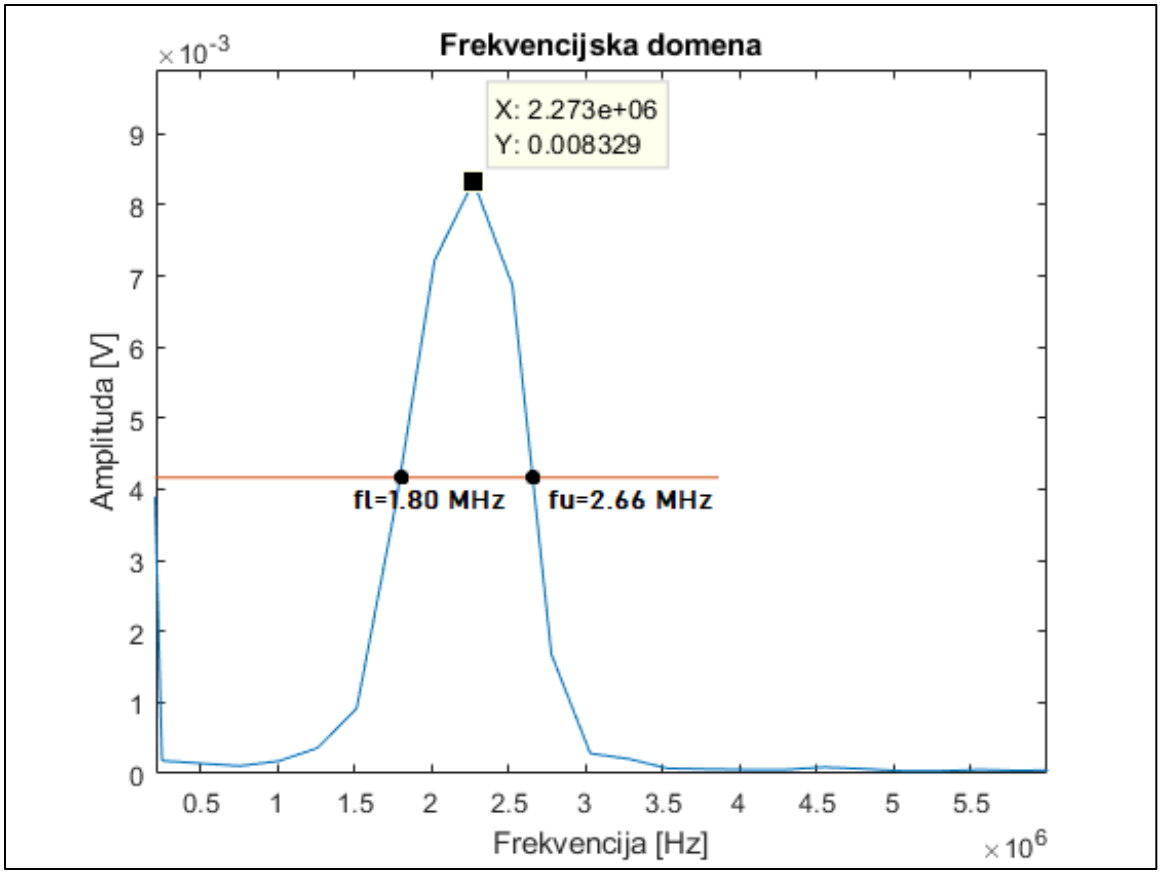
7.3. Prikaz rezultata mjerenja ispitnog uzorka sondom MB2S

7.3.1. Mjerno područje 6

Vremenska i frekvencijska domena ultrazvučnog signala dobivenog iz mjernog područja *6* prikazane su slikama 45 i 46.



Slika 45. Vremenska domena signala



Slika 46. Frekvencijska domena signala

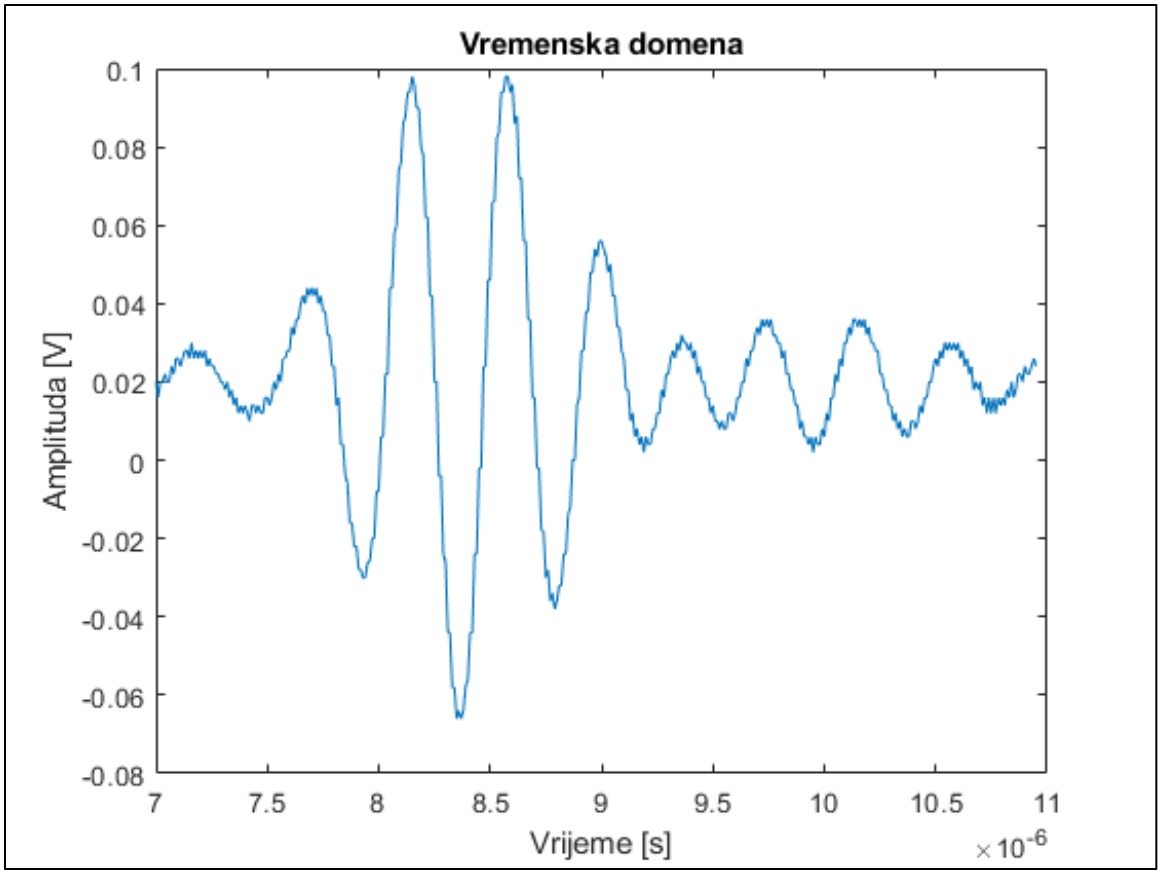
Središnja frekvencija te širina frekvencijskog spektra signala iznose:

$$f_c = \frac{f_u + f_l}{2} = \frac{2{,}66 + 1{,}80}{2} = 2{,}23\ MHz$$

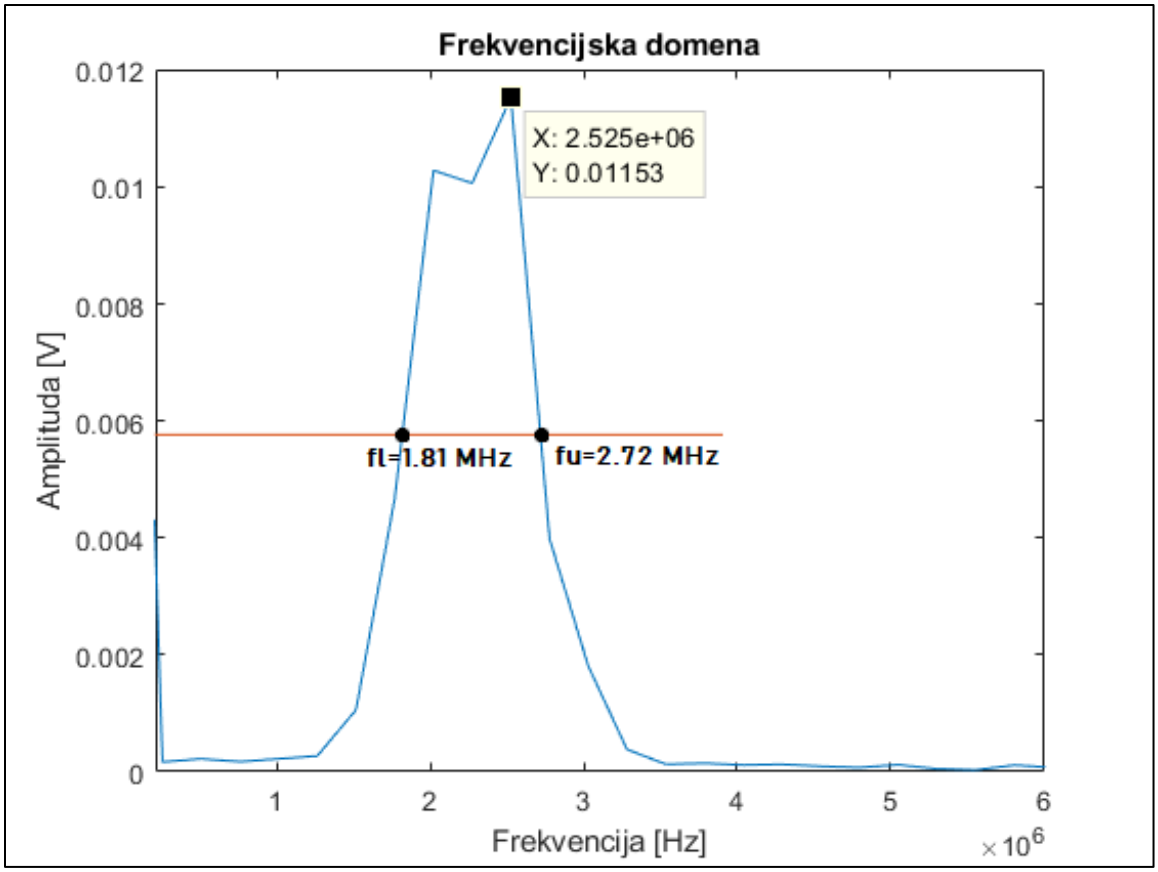
$$B_w = \frac{f_u - f_l}{f_c} \cdot 100\% = \frac{2{,}66 - 1{,}80}{2{,}23} = 38{,}57\ \%$$

7.3.2. Mjerno područje 7

Vremenska i frekvencijska domena ultrazvučnog signala dobivenog iz mjernog područja *7* prikazane su slikama 47 i 48.



Slika 47. Vremenska domena signala



Slika 48. Frekvencijska domena signala

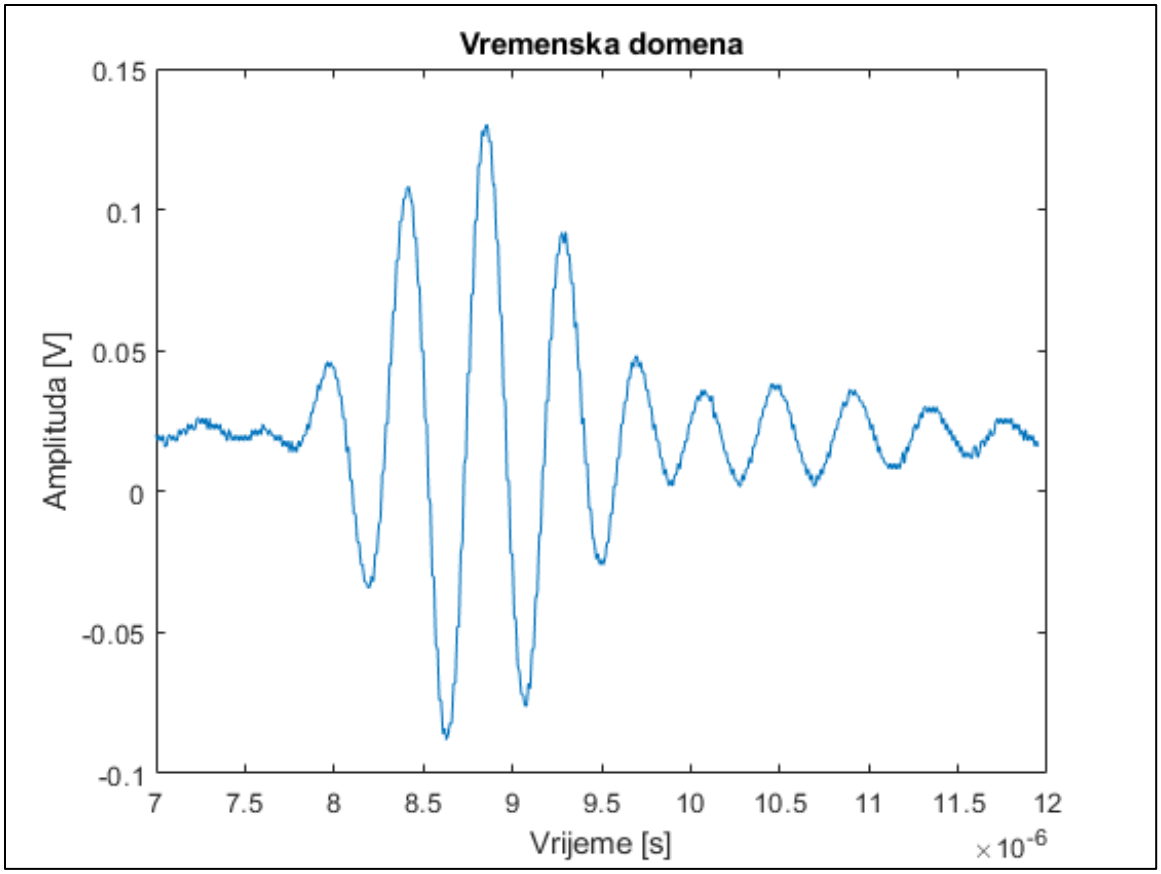
Središnja frekvencija i širina frekvencijskog spektra iznose:

$$f_c = \frac{f_u + f_l}{2} = \frac{2{,}72 + 1{,}81}{2} = 2{,}27\ MHz$$

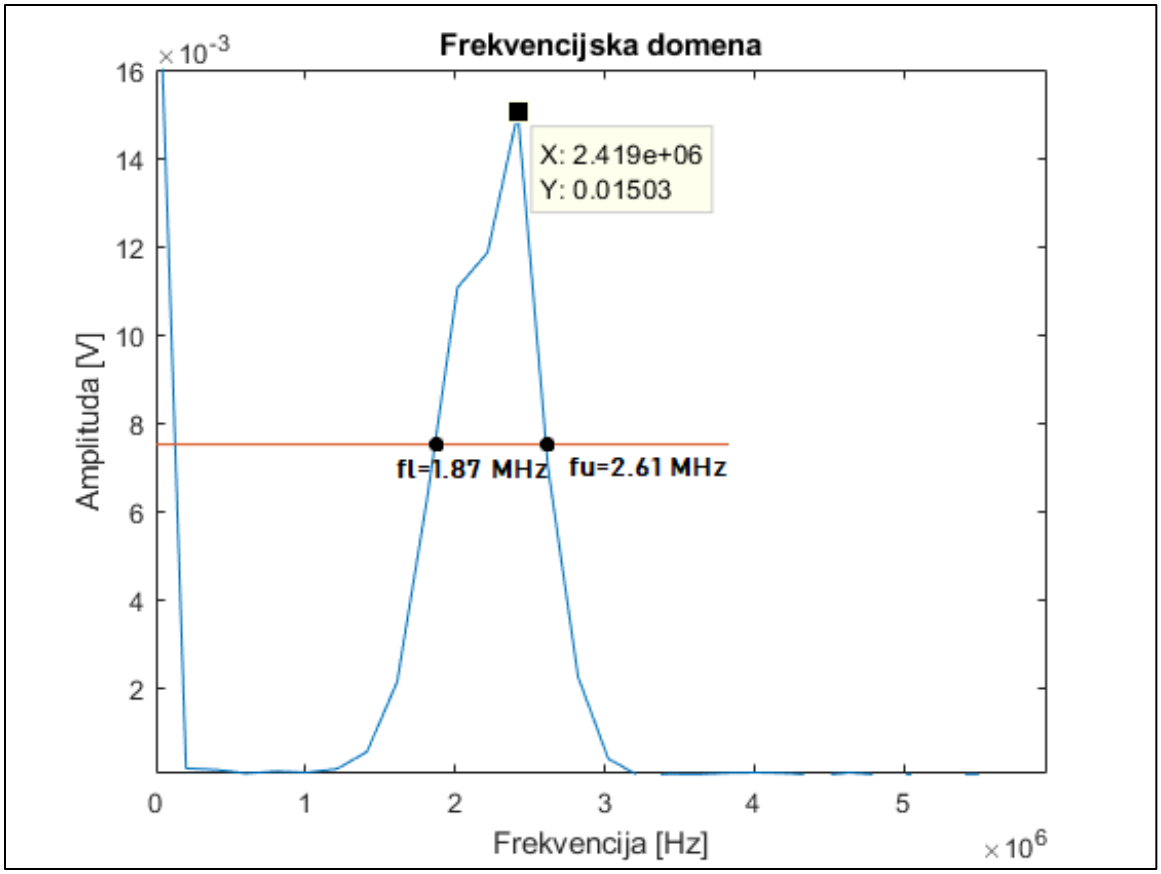
$$B_w = \frac{f_u - f_l}{f_c} \cdot 100\% = \frac{2{,}72 - 1{,}81}{2{,}27} = 40{,}10\ \%$$

7.3.3. Mjerno područje 8

Vremenska i frekvencijska domena ultrazvučnog signala dobivenog iz mjernog područja *8* prikazane su slikama 49 i 50.



Slika 49. Vremenska domena signala



Slika 50. Frekvencijska domena signala

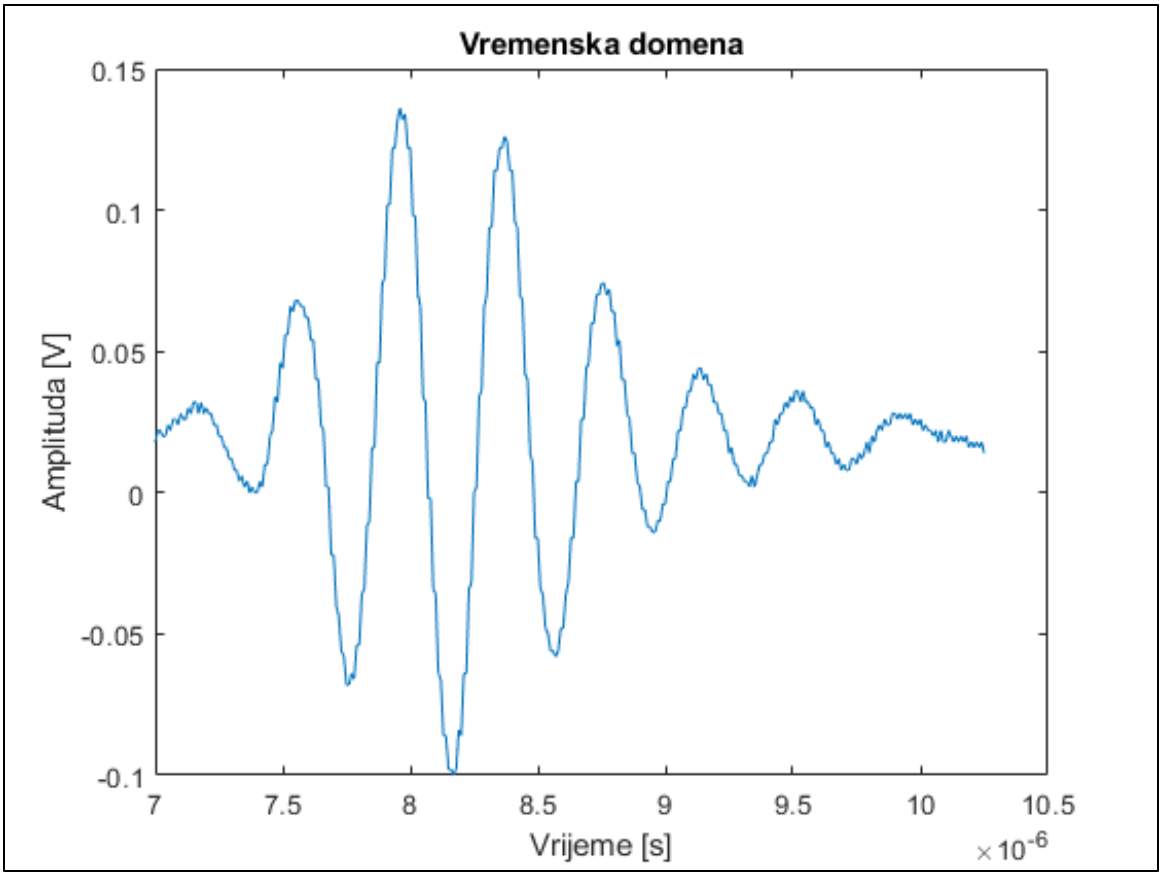
Karakteristične veličine frekvencijskog spektra iznose:

$$f_c = \frac{f_u + f_l}{2} = \frac{2{,}61 + 1{,}87}{2} = 2{,}24\ MHz$$

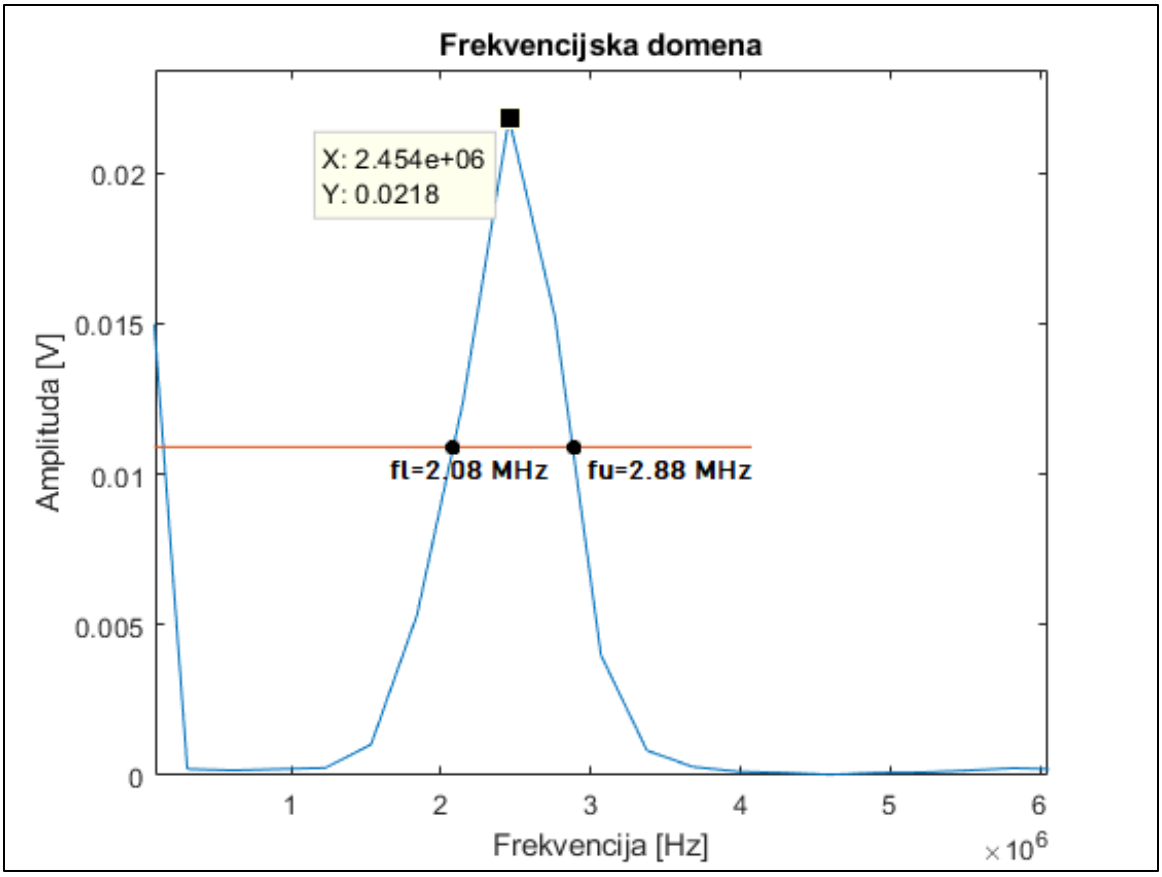
$$B_w = \frac{f_u - f_l}{f_c} \cdot 100\% = \frac{2{,}61 - 1{,}87}{2{,}24} = 33{,}04\ \%$$

7.3.4. Mjerno područje 9

Vremenska i frekvencijska domena ultrazvučnog signala dobivenog iz mjernog područja *9* prikazane su slikama 51 i 52.



Slika 51. Vremenska domena signala



Slika 52. Frekvencijska domena signala

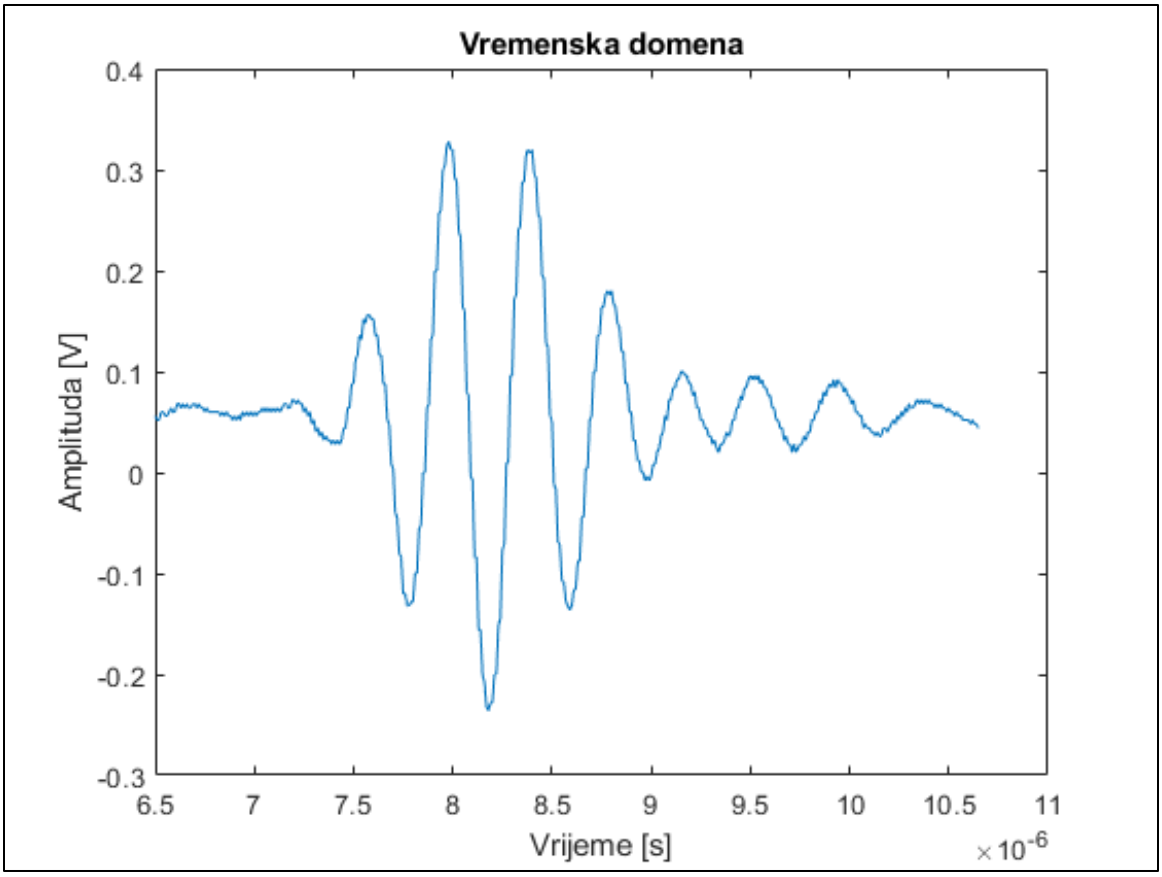
Karakteristične veličine spektra iznose:

$$f_c = \frac{f_u + f_l}{2} = \frac{2{,}88 + 2{,}08}{2} = 2{,}48\ MHz$$

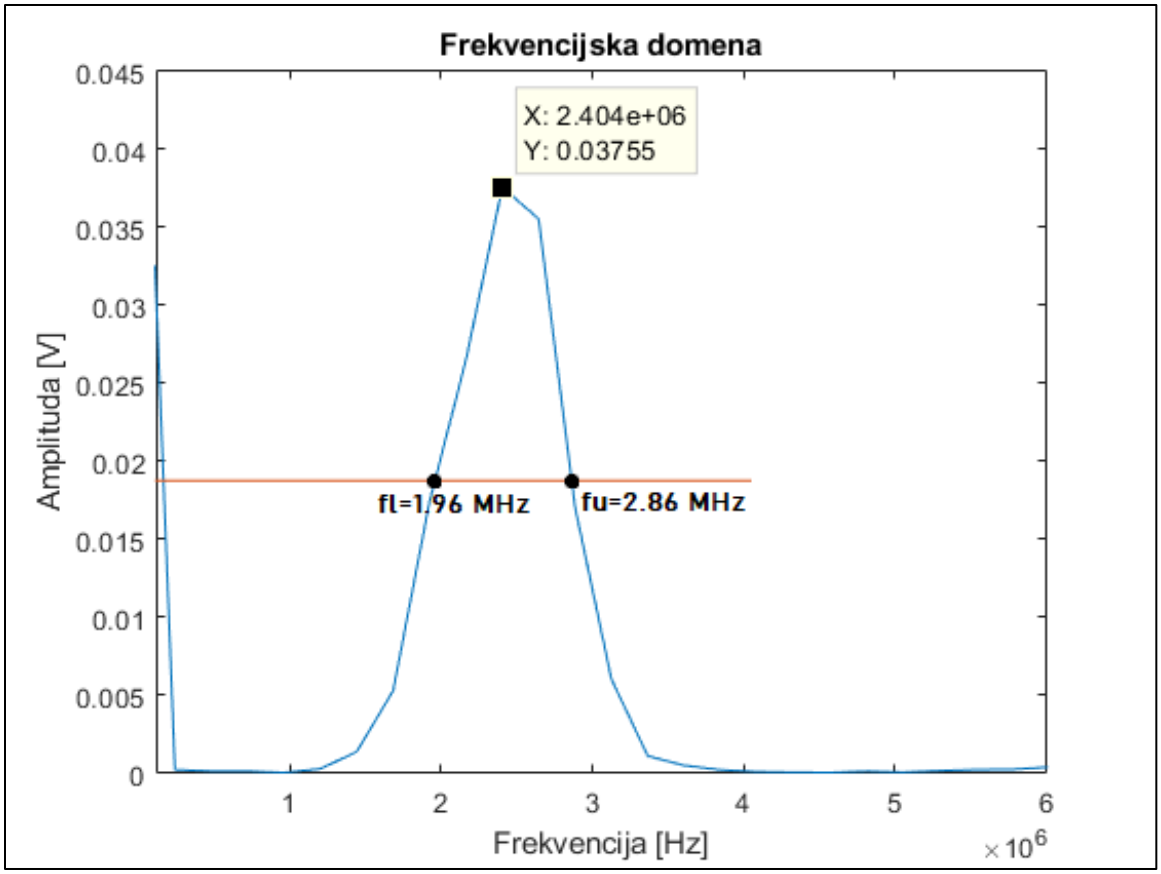
$$B_w = \frac{f_u - f_l}{f_c} \cdot 100\% = \frac{2{,}88 - 2{,}08}{2{,}48} = 32{,}26\ \%$$

7.3.5. Mjerno područje 10

Vremenska i frekvencijska domena ultrazvučnog signala dobivenog iz mjernog područja *10* prikazane su slikama 53 i 54.



Slika 53. Vremenska domena signala



Slika 54. Frekvencijska domena signala

Iznosi središnje frekvencije te širine frekvencijskog spektra jesu:

$$f_c = \frac{f_u + f_l}{2} = \frac{2{,}86 + 1{,}96}{2} = 2{,}41\ MHz$$

$$B_w = \frac{f_u - f_l}{f_c} \cdot 100\% = \frac{2{,}86 - 1{,}96}{2{,}41} = 37{,}34\ \%$$

7.4. Zajednički prikaz rezultata

U svrhu preglednijeg prikaza, svi rezultati numerički su prikazani u tablici 6.

Tablica 6. Numerički rezultati ispitivanja

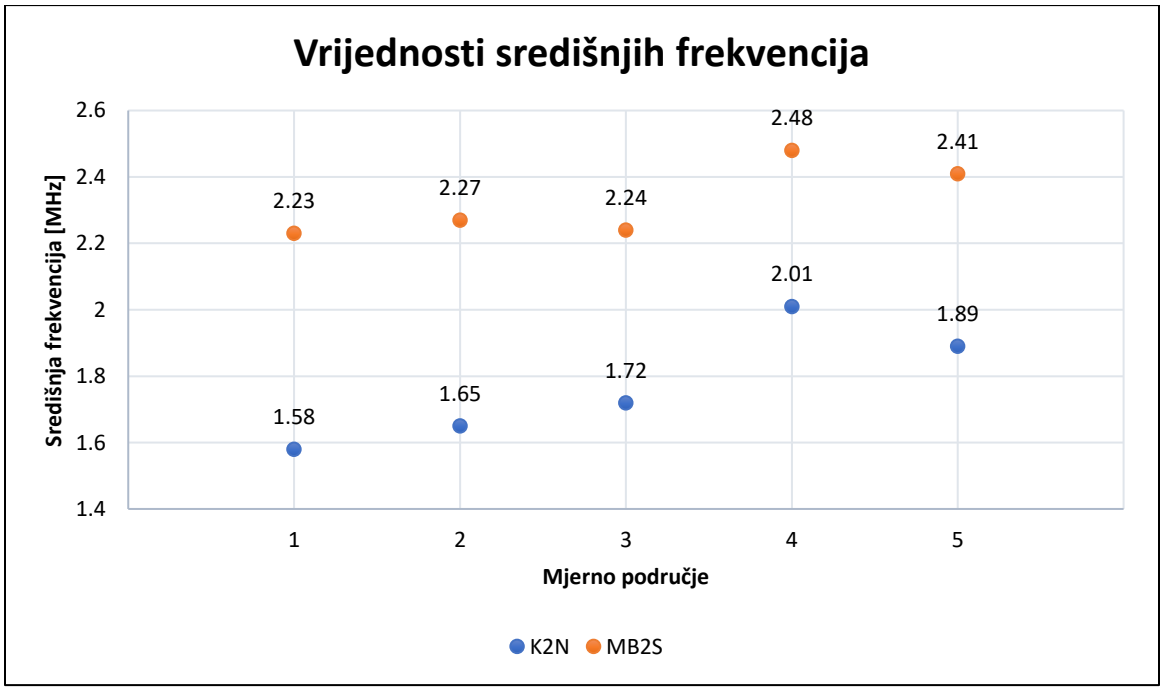
	K2N			MB2S		
		fc [MHz]	**Bw [%]**		**fc [MHz]**	**Bw [%]**
REFERENTNI PODACI	**Etalon V1**	2,18	61,93	**Etalon V1**	2,47	51,42
ZAVAR	**Mjerno područje 1**	1,58	75,95	**Mjerno područje 6**	2,23	38,57
	Mjerno područje 2	1,65	66,06	**Mjerno područje 7**	2,27	40,10
	Mjerno područje 3	1,72	73,26	**Mjerno područje 8**	2,24	33,04
ZUT	**Mjerno područje 4**	2,01	90,55	**Mjerno područje 9**	2,48	32,26
OSNOVNI MATERIJAL	**Mjerno područje 5**	1,89	63,49	**Mjerno područje 10**	2,41	37,34

8. USPOREDBA REZULTATA

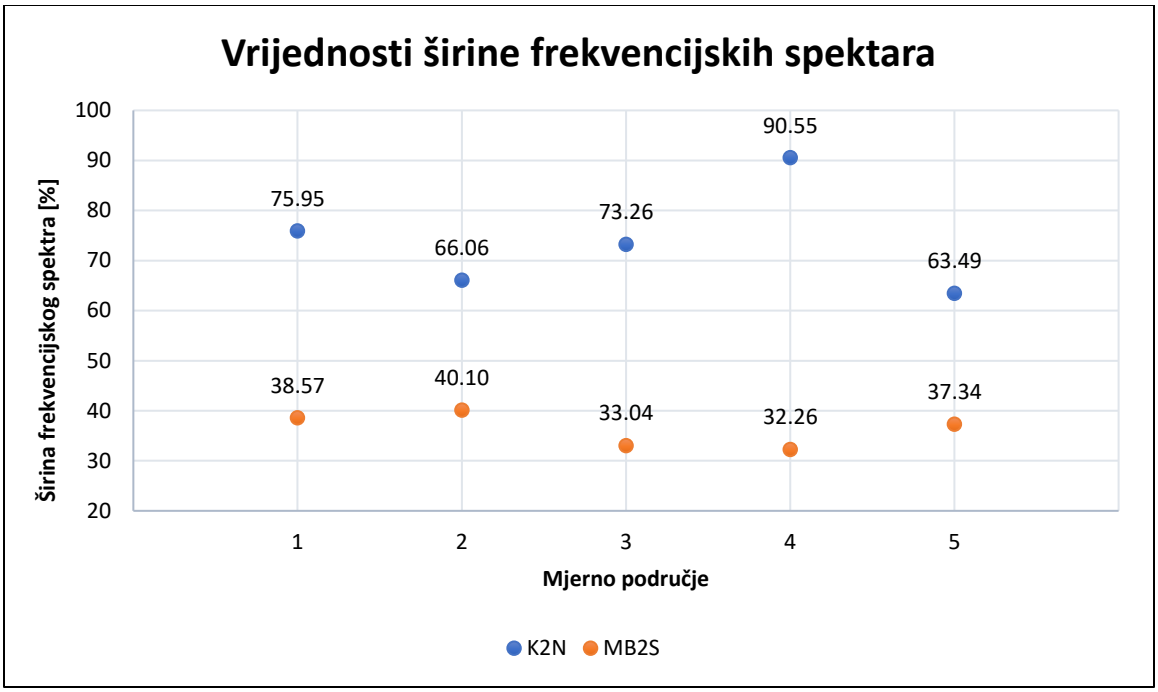
Prema prikazanim rezultatima u prethodnom poglavlju moguće je utvrditi da se vrijednosti središnje frekvencije i širine frekvencijskog spektra ispitnog uzorka ne razlikuju značajno obzirom na referentne vrijednosti, iako je materijal etalona V1 ugljični čelik, a materijal ispitnog uzorka nehrđajući čelik. Najprije slijedi usporedba rezultata dviju sondi, a zatim će se paralelno uspoređivati po dva jednaka mjerna područja od kojih je svako skenirano drugom sondom.

8.1. Usporedba rezultata sonde K2N i sonde MB2S

Uspoređujući karakteristične veličine frekvencijskog spektra svih 5 mjernih područja, neovisno o sondi, one se ne razlikuju u velikoj mjeri. Ipak, postoji određena tendencija koja će se najbolje opisati pomoću grafičkog prikaza. Slika 55 prikazuje trend vrijednosti središnjih frekvencija, dok slika 56 prikazuje trend vrijednosti širine frekvencijskog spektra.



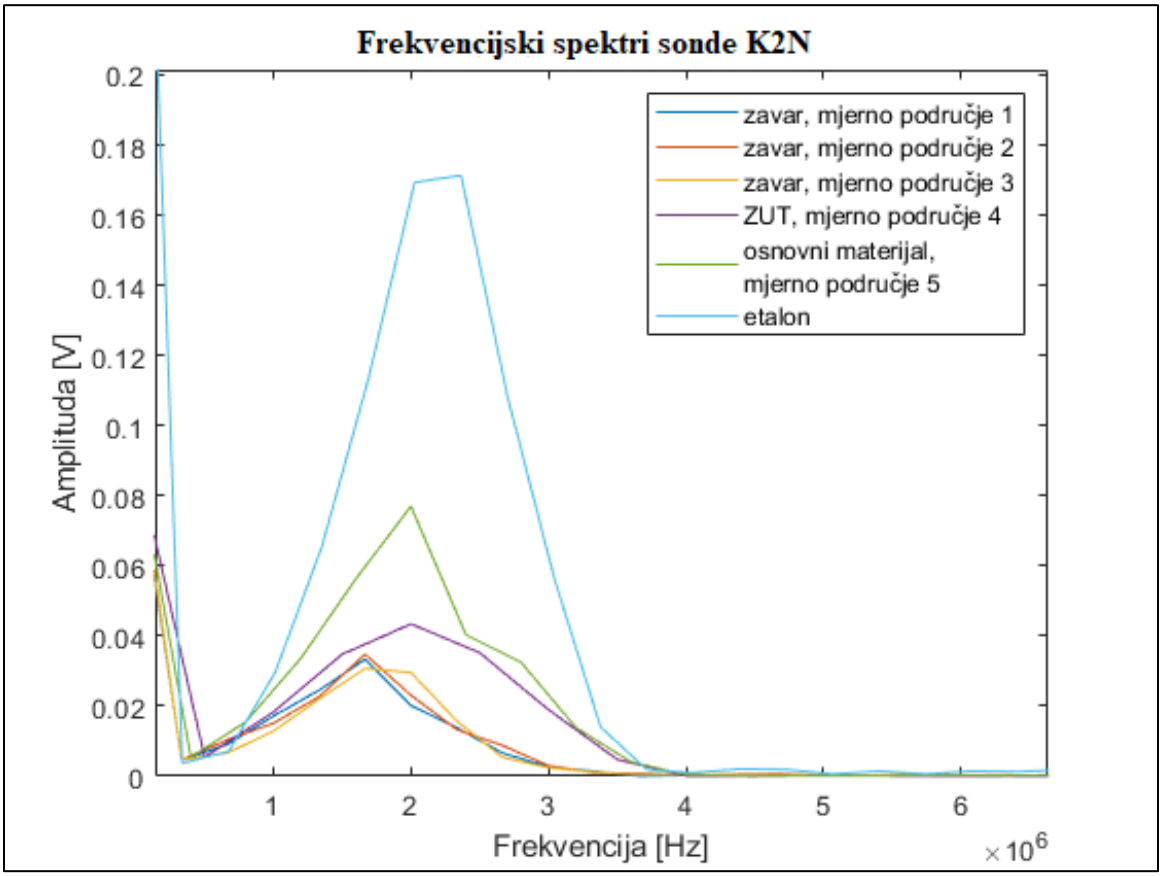
Slika 55. Usporedba vrijednosti središnjih frekvencija za sonde K2N i MB2S



Slika 56. Usporedba vrijednosti širine frek. spektra za sonde K2N i MB2S

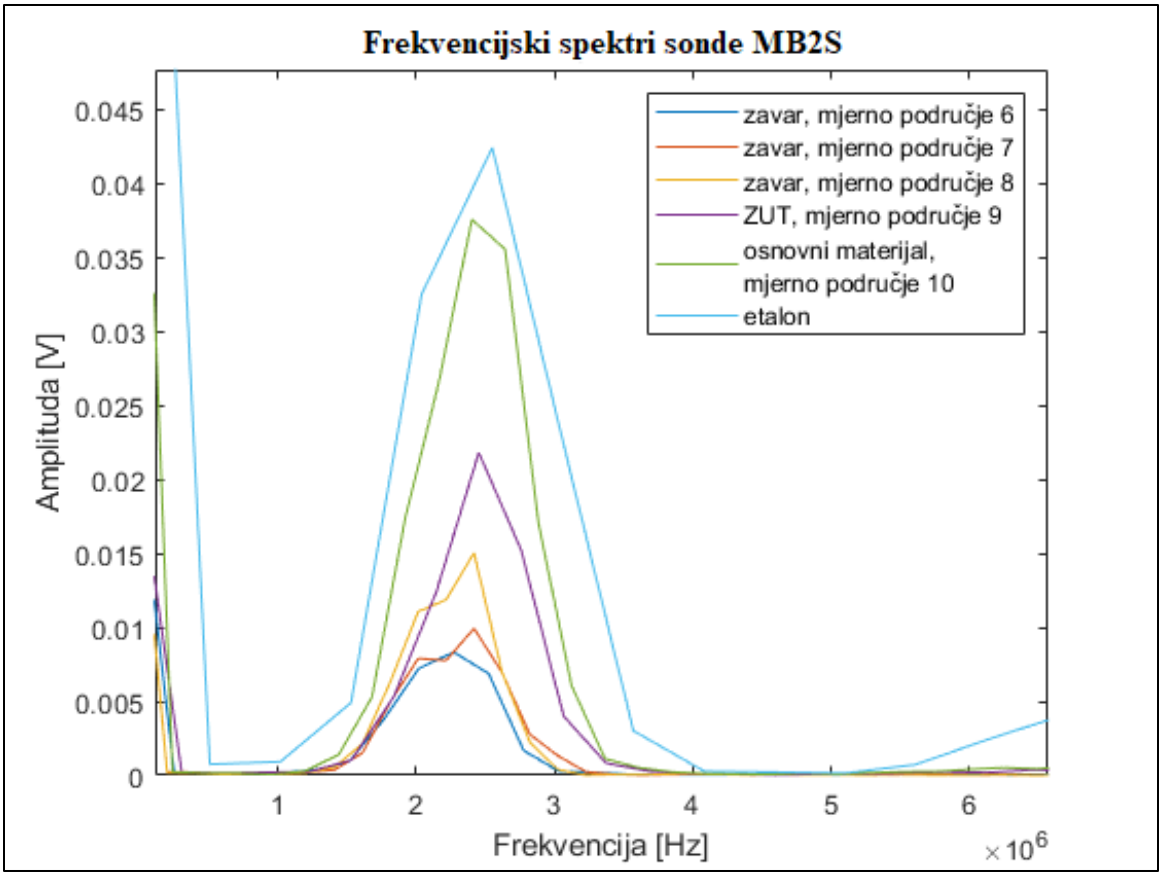
Sonda šireg frekvencijskog spektra (K2N) pokazuje veće razlike u vrijednostima središnje frekvencije što znači da ima veću mogućnost detekcije promjena u materijalu nego sonda užeg frekvencijskog spektra (MB2S). Sonda K2N ima nešto niže vrijednosti središnjih frekvencija od sonde MB2S što znači su u frekvencijskim spektrima sonde K2N zastupljenije niže frekvencije u odnosu na frekvencijske spektre sonde MB2S. Tendencije praćenih vrijednosti za obje sonde su vrlo slične što dokazuje da su mjerenja ispravno provedena, odnosno rezultati mjerenje MB2S potvrđuju rezultate mjerenja sondom K2N. Ipak, u područjima ZUT-a (područja 4 i 9) vidljive su nešto značajnije promjene. Središnja frekvencija ovdje poprima najviše vrijednosti kod obje sonde, no vrijednosti širine frekvencijskog spektra se bitno razlikuju. Sonda K2N u području ZUT-a poprima maksimalnu vrijednost *Bw*, dok sonda MB2S minimalnu. Razlog tome je razlika u zahvaćenom volumenu materijala prilikom skeniranja ZUT-a gdje je većim dijelom zahvaćeno područje zavara ili osnovnog materijala. Utjecaj kemijskog sastava ispitnog uzorka na rezultate nije uočen što je u skladu s prethodno prikazanim tablicama 1, 3 i 4 iz kojih se vidi da je kemijski sastav uzorka, uključujući osnovni materijal i dijelove zavara, prilično ujednačen.

Osim prikaza trenda praćenih vrijednosti, navedena zapažanja potkrepljuju i frekvencijski spektri na slikama 57 i 58.



Slika 57. Frekvencijski spektri signala snimljenih sondom K2N

Iako postoji određena razlika u iznosima maksimalnih amplituda između etalona i ispitnog uzorka, frekvencijski spektar osnovnog materijala pokazuje najveću sličnost sa etalonskim spektrom. Područje zavara prigušeno je u najvećoj mjeri, a između karakteristika različitih dijelova zavara skoro i nema vidljivih razlika. Također, u frekvencijskim spektrima zavara središnja frekvencija je pomaknuta u lijevo u odnosu na ostatak uzorka što pokazuje da su izgubljene visoke frekvencije, odnosno zastupljene su uglavnom niske frekvencije (između 0,5 i 3 MHz). Dakle, zavar je uzrokovao prigušenje visokih frekvencija.



Slika 58. Frekvencijski spektri signala snimljenih sondom MB2

Obzirom na sondu K2N, ovdje su frekvencijski spektri simetrični u odnosu jedan na drugoga, odnosno nema značajnog pomaka središnjih frekvencija. Frekvencijski spektar osnovnog materijala puno je sličniji spektru etalona nego što je to slučaj kod sonde K2N. Iznosi amplituda u ovom slučaju su duplo manji nego kod sonde K2N, no razlog tome mogu biti postavke na ultrazvučnom uređaju. Područje zavara također je prigušeno, a frekvencijski spektri dijelova zavara su vrlo slični. Ipak, ovdje je vidljiva mala razlika između mjernog područja 8 i ostatka zavara što se opet može objasniti razlikom u zahvaćenom volumenu budući da se radi o najužem dijelu zavara. Kao i u prethodnom slučaju, dio visokih frekvencija nije zastupljen u frekvencijskim spektrima zavara.

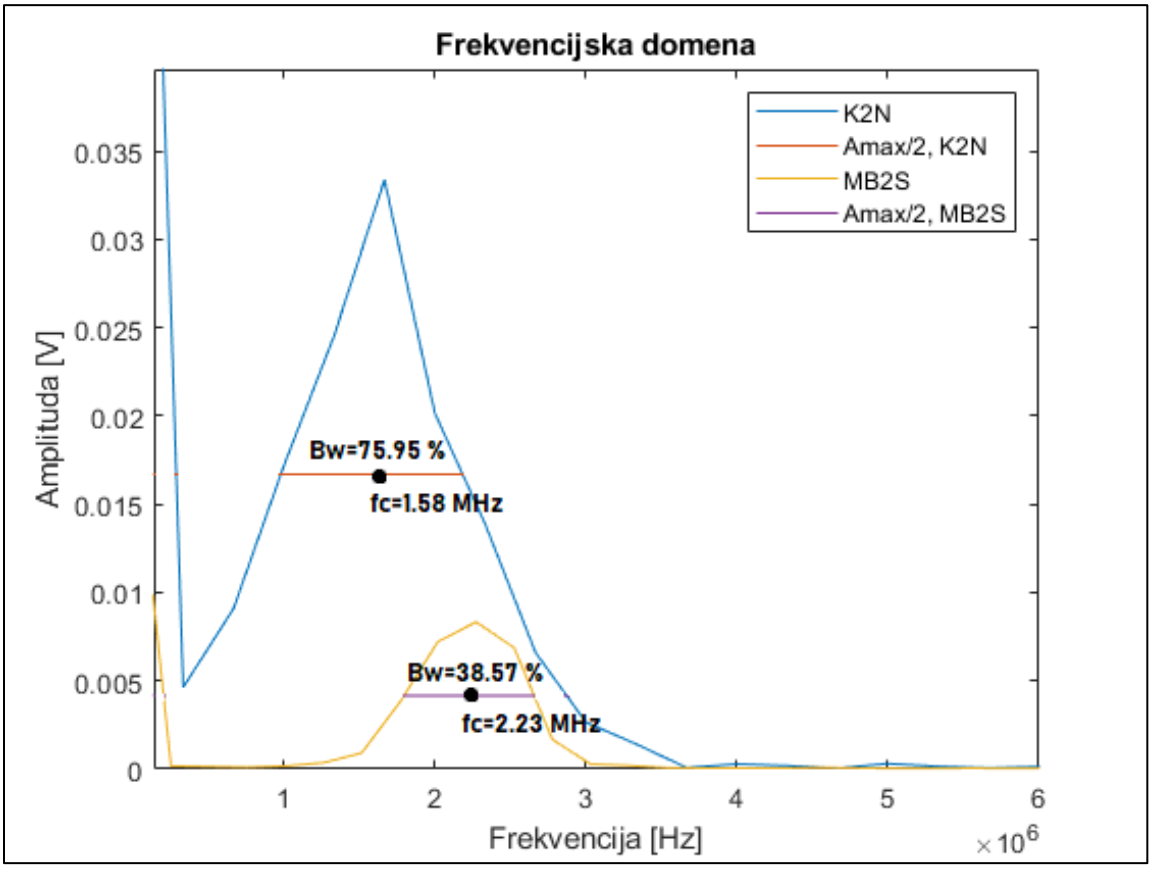
8.1.1. Utjecaj zavara na karakteristične veličine spektra

Utjecaj zavara na karakteristične veličine frekvencijskog spektra jednak je kod obje sonde. Na temelju rezultata uočeno je da su vrijednosti širine frekvencijskog spektra najviše u području najšireg zavara te se postepeno smanjuju kako se širina zavara smanjuje. Razlog tome može biti toplinsko popuštanje područja zavara koja su najranije nanesena (u ovom slučaju područja 3 i 8). Dalje, obzirom na različite postupke zavarivanja (TIG u najužem dijelu, REL u ostatku zavara) nisu uočene značajne promjene pa se može zaključiti da postupak zavarivanja ne utječe znatno na promjenu mikrostrukture. To je očekivano budući da se parametri zavarivanja (unos topline, jakost struje i napona i dr.) određuju obzirom na svojstva materijala koji se zavaruje te se ne smiju značajno razlikovati bez obzira na primijenjeni postupak. Na osnovi prikazanih rezultata, zaključuje se da zavar predstavlja određenu vrstu prigušivača energije, ali i visokih frekvencija ultrazvučnog signala u odnosu na osnovni materijal ispitnog uzorka.

8.2. Usporedba frekvencijskih spektara iz istih mjernih područja

8.2.1. Usporedba mjernih područja 1 i 6

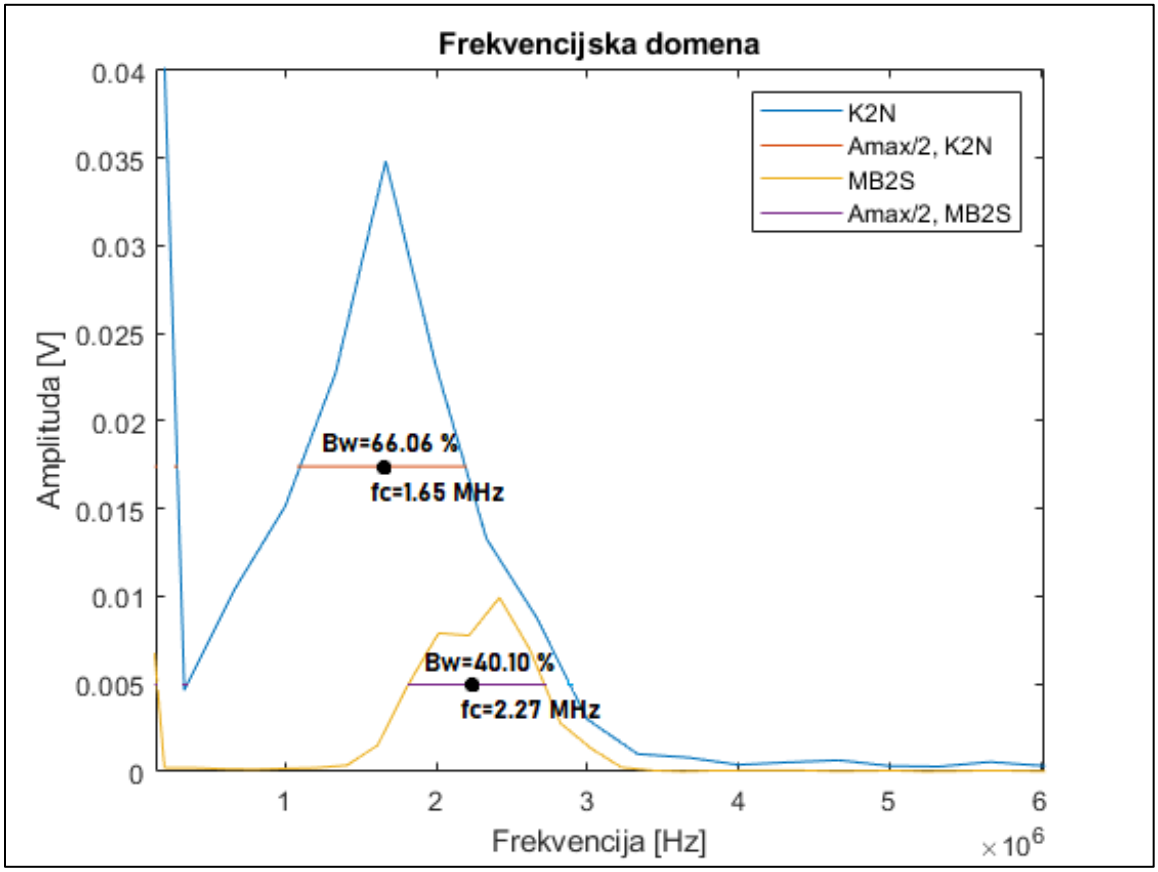
Preklapanje frekvencijskih spektara iz najšireg dijela zavara prikazano je slikom 59.



Slika 59. Rezultati iz najšireg dijela zavara

8.2.2. Usporedba mjernih područja 2 i 7

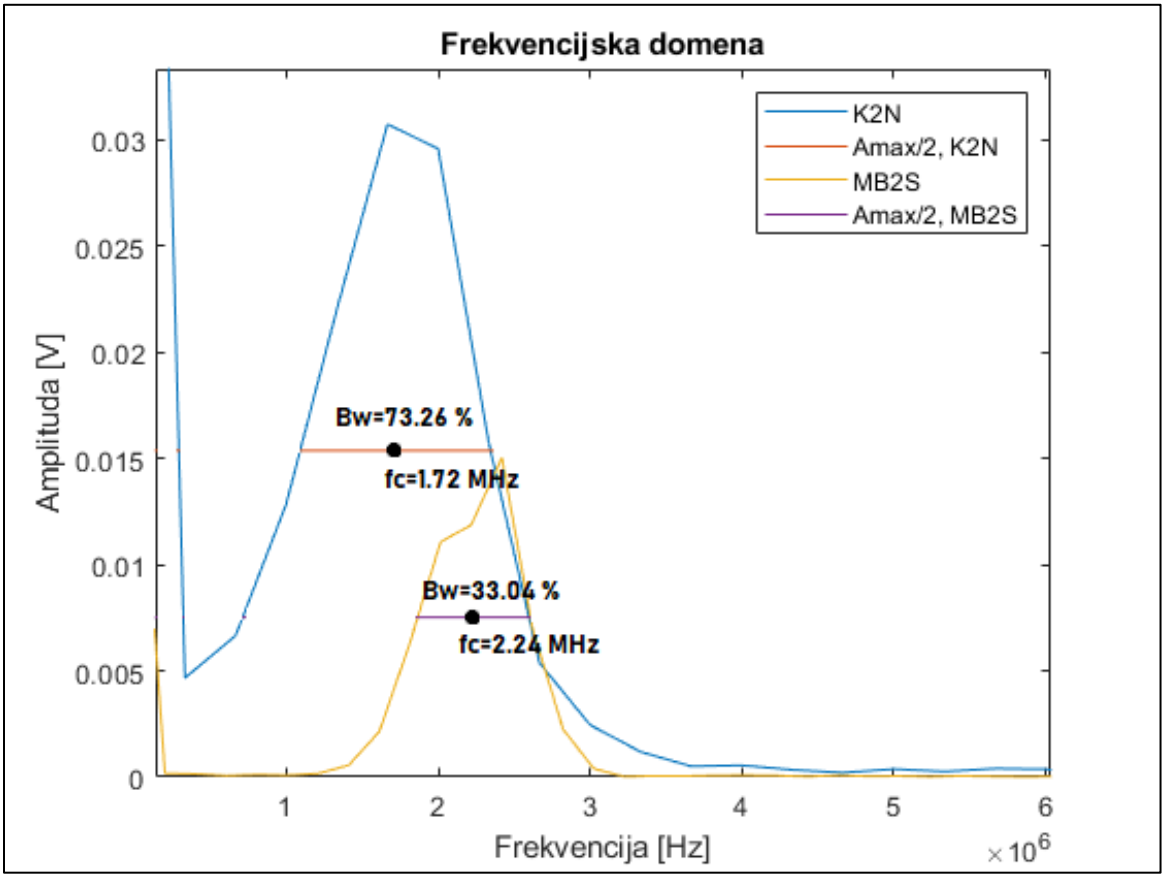
Preklapanje mjernih područja iz središnjeg dijela zavara prikazuje slika 60.



Slika 60. Rezultati iz središnjeg dijela zavara

8.2.3. Usporedba mjernih područja 3 i 8

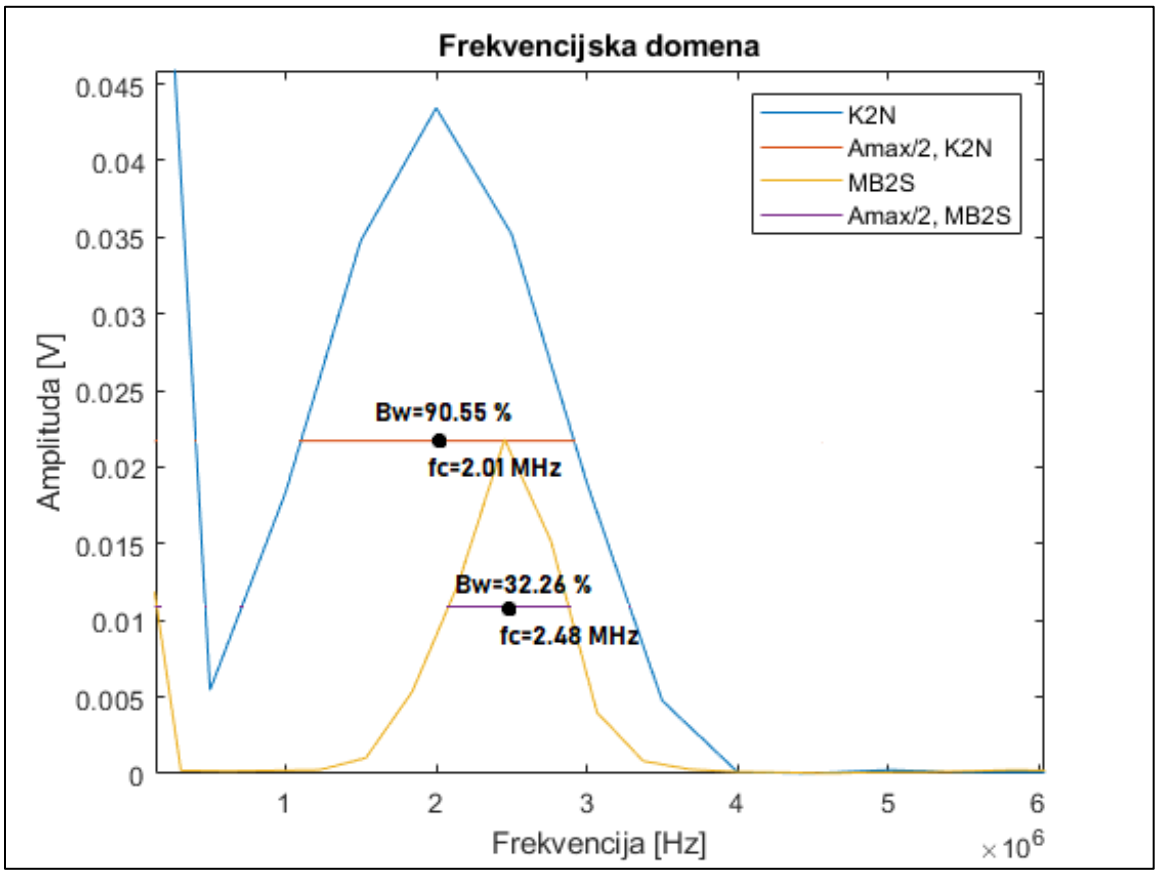
Preklapanje frekvencijskih spektara iz najužeg dijela zavara prikazuje slika 61.



Slika 61. Rezultati iz najužeg područja zavara

8.2.4. Usporedba mjernih područja 4 i 9

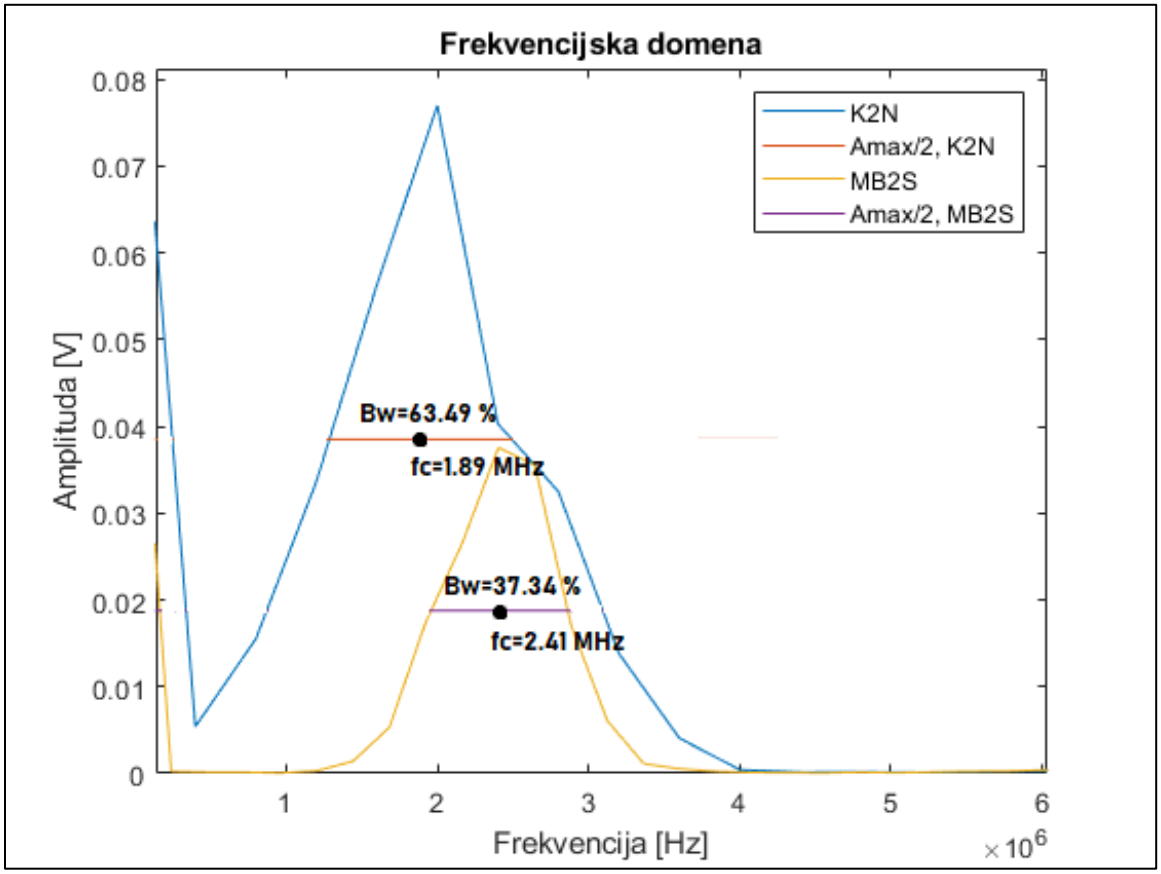
Preklapanje frekvencijskih spektara iz područja ZUT-a prikazuje slika 62.



Slika 62. Rezultati iz mjernih područja ZUT-a

8.2.5. Usporedba mjernih područja 5 i 10

Preklapanje frekvencijskih spektara iz područja osnovnog materijala uzorka prikazuje slika 63.



Slika 63. Rezultati iz mjernih područja osnovnog materijala

8.2.6. Zapažanja

Usporedba mjernih područja pokazala je da su u frekvencijskim spektrima sonde K2N podjednako zastupljene niske i visoke frekvencije, dok se u frekvencijskim spektrima sonde MB2S gubi velik dio niskih frekvencija uglavnom između 0 MHz i 1 ili 1,5 MHz te manji dio visokih frekvencija između 3,5 i 4 MHz, a najzastupljenije su one frekvencije između 2 MHz i 3 MHz. Ukratko, kod sonde MB2S uočeno je jače prigušenje niskih frekvencija. Navedena zapažanja vrijede za sva područja ispitnog uzorka uključujući zavar, ZUT i osnovni materijal. Dakle, uspoređujući sonde K2N i MB2S jednake nazivne frekvencije od 2 MHz pokazalo se da širi frekvencijski spektar obuhvaća frekvencije u rasponu od 0,2 MHz do 4 MHz, dok uži frekvencijski spektar sadrži frekvencije od 1,5 MHz do 3,5 MHz uz pomaknutu središnju frekvenciju u desno u odnosu na sondu K2N što znači da su većim dijelom zastupljene više frekvencije. Osim toga, uočeno je da amplitude frekvencijskog spektra sonde MB2S u području ZUT-a i osnovnog materijala iznose 50% amplitude frekvencijskog spektra sonde K2N, dok se u području zavara razlika između amplituda povećava. Time se potvrđuje već ranije donesen zaključak da zavar značajno prigušuje ultrazvučni impuls.

9. ZAKLJUČAK

Provedenom FFT analizom ultrazvučnih odziva ispitnog uzorka te usporedbom sondi K2N i MB2S jednakih nazivnih frekvencija, ali različitih karakteristika frekvencijskih spektara, dobiveni su rezultati koji upućuju na razlike u mikrostrukturi materijala u mjernim točkama. Iako prije početka ispitivanja nije definirana hipoteza, dobiveni rezultati pokazali su se smislenima te je na temelju njih moguće provesti određenu karakterizaciju mikrostrukture materijala u mjernim točkama zavarenog spoja. Pomoću ovog ispitivanja dokazano je da se klasifikacija može provesti bez specijalnih sondi, već običnim, lako dostupnim sondama opće namjene i vrlo jednostavne konstrukcije, a uzorak korišten u ispitivanju može poslužiti kao referentni blok za neka buduća ispitivanja na ovu temu. Važno je spomenuti da frekvencijski spektri prikazani u radu nisu zaobljeni, već su izlomljeni. Razlog tome je rezolucija uzorkovanja i rezolucija vremenske domene, a dodatni razlog čine postavke na ultrazvučnom uređaju na koje ubuduće treba obratiti pažnju te ih prilagoditi značajkama korištene ultrazvučne sonde kako bi se dobili oblici vala i pripadajućeg spektra u većim rezolucijama. Također, rezolucija u vremenskoj domeni razlikuje se za sondu K2N i MB2S što može biti važan podatak za neko buduće mjerenje pa je prijedlog da se na početku sljedećeg ispitivanja rezolucije prilagode.

LITERATURA

[1] http://www.ultrazvuk.hr/povijest-ultrazvucnih-uredaja/, Pristupljeno 14. listopada 2020.

[2] Prof. dr. sc. Vjera Krstelj - Ultrazvučna kontrola, Zagreb 2003.

[3] Mihaljević M. Procjena mjerne nesigurnosti ultrazvučnnog mjerenja debljine stijenke [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2015.

[4] https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/pa-beam/steering/, Pristupljeno 14. listopada 2020.

[5] Markučič D.: Razvoj metodologije ultrazvučne kontrole podvodnih konstrukcija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska, doktorska disertacija, 1998.

[6] Dharmendra Kumar Pandey and Shri Pandey, Ultrasonics: A Technique of Material Characterization, Pristupljeno 24. kolovoza 2020.

[7] https://download.ni.com/evaluation/pxi/Understanding%20FFTs%20and%20Windowing.pdf, Pristupljeno 15. listopada 2020.

[8] http://folk.ntnu.no/stoylen/strainrate/Basic_ultrasound, Pristupljeno 19. listopada 2020.

[9] http://e.math.hr/math_e_article/br19/matijevic, Pristupljeno 19. listopada 2020.

[10] P.P. Nanekar and B. K. Shah Atomic Fuels Division Bhabha Atomic Research Centre, Characterization of material properties by ultrasonics

[11] Research Reports of the National Institute of Industrial Safety, NIIS-RR-2002-2003, TimeFrequency Analysis of Ultrasonic Echoes and its Application to Nondestructive Evaluation of Thermal Damage of Steel, Shiwei MA, Tetsuya SASAKI, Etsuji YOSHIHISA i Takashi HONDA

[12] http://www.strojopromet.com/inox/, Pristupljeno 25. kolovoza 2020.

[13] http://www.konimb.hr/blog/sto_je_inox.html, Pristupljeno 25. kolovoza 2020.

[14]http://www.alruqee.com/Userfiles/Product/TablePdf/01112015000000B_Boehler%20EAS%204%20M-IG_tig%20rod.pdf, Pristupljeno 25. kolovoza 2020.

[15] https://www.ezg.hr/download/EZ_catalogue_2018_eng.pdf, Pristupljeno 26. kolovoza 2020.

[16] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1354629739-0-ssnc_7i8_pred_tekst.pdf, Pristupljeno 26. kolovoza 2020.

[17] EN ISO 16810:2014, Non-destructive testing. Ultrasonic examination. General principles.

[18] EN ISO 16811:2014, Non-destructive testing. Ultrasonic examination. Sensitivity and range setting.

[19] GEIT Ultrasonic Transducer Catalog, 8.11.2020.

PRILOZI

I. CD-R disc

II. MATLAB kodovi

KOD ZA IMPORT PODATAKA IZ EXCELA I FFT TRANSFORMACIJU

```
clc
clear all

load datoteka.mat
vrijeme=ime_datoteke.Source;
napon=ime_datoteke.CH1;
plot (vrijeme, napon)
title('Vremenska domena')
xlabel('Vrijeme [s]')
ylabel('Amplituda [V]')

L=length(napon);
dt=sampling_period;
fs=1/dt;
out=fft(napon,L)/L;
x=fs/2*linspace(0,1,(length(out)/2)+1)
y=abs(out(1:(length(out)/2)+1))
plot(x,y)
title('Frekvencijska domena')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel('Amplituda [V]')
```

KOD ZA OČITAVANJE KOORDINATA IZ GRAFA

```
uiwait(msgbox('Click a point'));
[x,y] = ginput(1)
```

KOD ZA DODAVANJE HORIZONTALNE LINIJE U GRAF

```
hold on;
plot(the main function)
plot([o x_max],[y y])        % Horizontal line
```

Being:

y: location on vertical axis where you place the horizontal line.

x_max: point where you want the vertical line to end.

CJELOVITI KOD ZA FFT SONDE K2N

```
clc
clear all

load datoteka.mat
vrijeme=ime_datoteke.Source;
napon=ime_datoteke.CH1;
plot(vrijeme, napon)
title('Vremenska domena')
xlabel('Vrijeme [s]')
ylabel('Amplituda [V]')

L=length(napon);
dt=5*10^(-9);
fs=1/dt;
out=fft(napon,L)/L;
x=fs/2*linspace(0,1,(length(out)/2)+1)
y=abs(out(1:(length(out)/2)+1))
figure(2)
plot(x,y)
title('Frekvencijska domena')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel('Amplituda [V]')
hold on
plot([0 5*10^6],[0.016685 0.016685])%promijeniti
```

CJELOVITI KOD ZA FFT SONDE MB2S

```
clc
clear all

load datoteka.mat
vrijeme=ime_datoteke.Source;
napon=ime_datoteke.CH1;
plot(vrijeme, napon)
title('Vremenska domena')
xlabel('Vrijeme [s]')
ylabel('Amplituda [V]')

L=length(napon);
dt=1*10^(-8);
fs=1/dt;
out=fft(napon,L)/L;
x=fs/2*linspace(0,1,(length(out)/2)+1)
y=abs(out(1:(length(out)/2)+1))
figure(2)
plot(x,y)
title('Frekvencijska domena')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel('Amplituda [V]')
```

```
hold on
plot([0 5*10^6],[0.0041645 0.0041645])%promijeniti
```

KOD ZA PREKLAPANJE SVIH GRAFOVA SONDE K2N

```
clc
clear all

load t1.mat
vrijeme=DS0001.Source;
napon=DS0001.CH1;
L=length(napon);
dt=5*10^(-9);
fs=1/dt;
out=fft(napon,L)/L;
x=fs/2*linspace(0,1,(length(out)/2)+1)
y=abs(out(1:(length(out)/2)+1))
plot(x,y)
title('Frekvencijska domena')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel('Amplituda [V]')
hold on


load t2.mat
v=DS0002.Source;
n=DS0002.CH1;
L=length(n);
dt=5*10^(-9);
fs=1/dt;
out=fft(n,L)/L;
x=fs/2*linspace(0,1,(length(out)/2)+1)
y=abs(out(1:(length(out)/2)+1))
plot(x,y)
title('Frekvencijska domena')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel('Amplituda [V]')
hold on


load t3.mat
vr=DS0003.Source;
na=DS0003.CH1;
L=length(na);
dt=5*10^(-9);
fs=1/dt;
out=fft(na,L)/L;
x=fs/2*linspace(0,1,(length(out)/2)+1)
y=abs(out(1:(length(out)/2)+1))
plot(x,y)
title('Frekvencijska domena')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel('Amplituda [V]')
```

```
hold on


load t4.mat
vri=DS0004.Source;
nap=DS0004.CH1;
L=length(nap);
dt=5*10^(-9);
fs=1/dt;
out=fft(nap,L)/L;
x=fs/2*linspace(0,1,(length(out)/2)+1)
y=abs(out(1:(length(out)/2)+1))
plot(x,y)
title('Frekvencijska domena')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel('Amplituda [V]')
hold on


load t5.mat
vrij=DS0005.Source;
napo=DS0005.CH1;
L=length(napo);
dt=5*10^(-9);
fs=1/dt;
out=fft(napo,L)/L;
x=fs/2*linspace(0,1,(length(out)/2)+1)
y=abs(out(1:(length(out)/2)+1))
plot(x,y)
title('Frekvencijska domena')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel('Amplituda [V]')
hold on

load t11.mat
v2=DS0011.Format;
n2=DS0011.E;
L=length(n2);
dt=1*10^(-8);
fs=1/dt;
out=fft(n2,L)/L;
x=fs/2*linspace(0,1,(length(out)/2)+1)
y=abs(out(1:(length(out)/2)+1))
plot(x,y)
title('Frekvencijska domena')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel('Amplituda [V]')
hold on
```

KOD ZA PREKLAPANJE SVIH GRAFOVA SONDE MB2S

```
clc
clear all

load t6.mat
vrijeme=DS0006.Source;
napon=DS0006.CH1;
L=length(napon);
dt=1*10^(-8);
fs=1/dt;
out=fft(napon,L)/L;
x=fs/2*linspace(0,1,(length(out)/2)+1)
y=abs(out(1:(length(out)/2)+1))
plot(x,y)
title('Frekvencijska domena')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel('Amplituda [V]')
hold on


load t7.mat
v=DS0007.Source;
n=DS0007.CH1;
L=length(n);
dt=1*10^(-8);
fs=1/dt;
out=fft(n,L)/L;
x=fs/2*linspace(0,1,(length(out)/2)+1)
y=abs(out(1:(length(out)/2)+1))
plot(x,y)
title('Frekvencijska domena')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel('Amplituda [V]')
hold on


load t8.mat
vr=DS0008.Source;
na=DS0008.CH1;
L=length(na);
dt=1*10^(-8);
fs=1/dt;
out=fft(na,L)/L;
x=fs/2*linspace(0,1,(length(out)/2)+1)
y=abs(out(1:(length(out)/2)+1))
plot(x,y)
title('Frekvencijska domena')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel('Amplituda [V]')
hold on
```

```
load t9.mat
vri=DS0009.Source;
nap=DS0009.CH1;
L=length(nap);
dt=1*10^(-8);
fs=1/dt;
out=fft(nap,L)/L;
x=fs/2*linspace(0,1,(length(out)/2)+1)
y=abs(out(1:(length(out)/2)+1))
plot(x,y)
title('Frekvencijska domena')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel('Amplituda [V]')
hold on


load t10.mat
vrij=DS0010.Source;
napo=DS0010.CH1;
L=length(napo);
dt=1*10^(-8);
fs=1/dt;
out=fft(napo,L)/L;
x=fs/2*linspace(0,1,(length(out)/2)+1)
y=abs(out(1:(length(out)/2)+1))
plot(x,y)
title('Frekvencijska domena')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel('Amplituda [V]')
hold on

load t12.mat
v2=DS0012.Format;
n2=DS0012.E;
L=length(n2);
dt=5*10^(-9);
fs=1/dt;
out=fft(n2,L)/L;
x=fs/2*linspace(0,1,(length(out)/2)+1)
y=abs(out(1:(length(out)/2)+1))
plot(x,y)
title('Frekvencijska domena')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel('Amplituda [V]')
hold on
```