

# Procjena mjerne nesigurnosti ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke

---

Mihaljević, Morana

Doctoral thesis / Disertacija

2015

*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:235:487461>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-27**

*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Morana Mihaljević

**PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI  
ULTRAZVUČNOG MJERENJA  
DEBLJINE STIJENKE**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2015.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL  
ARCHITECTURE

Morana Mihaljević

**MEASUREMENT UNCERTAINTY  
ESTIMATION OF THE ULTRASONIC  
THICKNESS MEASUREMENT**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2015.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Morana Mihaljević

**PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI  
ULTRAZVUČNOG MJERENJA  
DEBLJINE STIJENKE**

DOKTORSKI RAD

Mentor: Prof. dr. sc. Damir Markučić

Zagreb, 2015.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL  
ARCHITECTURE

Morana Mihaljević

**MEASUREMENT UNCERTAINTY  
ESTIMATION OF THE ULTRASONIC  
THICKNESS MEASUREMENT**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Prof. Damir Markučič, PhD

Zagreb, 2015.

## PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

---

|   |   |
|---|---|
| <b>UDK:</b>                                     | 620.179.16: 669.14  |
| <b>Ključne riječi:</b>                          | ultrazvučno mjerenje debljine, plan pokusa<br>Monte Carlo simulacija, mjerne nesigurnosti.  |
| <b>Znanstveno područje:</b>                     | Tehničke znanosti   |
| <b>Znanstveno polje:</b>                        | Strojarstvo   |
| <b>Institucija u kojoj je rad izrađen:</b>      | Sveučilište u Zagrebu,<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje   |
| <b>Mentor rada:</b>                             | prof. dr.sc. Damir Markučić   |
| <b>Broj stranica:</b>                           | 158   |
| <b>Broj tablica:</b>                            | 44  |
| <b>Broj slika:</b>                              | 86  |
| <b>Broj korištenih bibliografskih jedinica:</b> | 65  |
| <b>Datum obrane:</b>                            | 1. srpnja 2015.   |
| <b>Povjerenstvo:</b>                            | dr.sc. Damir Markučić, redoviti profesor<br>dr.sc. Josip Stepanić, izvanredni profesor<br>dr.sc. Biserka Runje, izvanredni profesor<br>dr. sc Željko Alar, docent<br>dr.sc. Duško Pavletić, redoviti profesor |
| <b>Institucija u kojoj je rad pohranjen:</b>    | Sveučilište u Zagrebu,<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje   |

*Mojim najdražima*  
*... Davidu, Bruni, Goranu*  
*i roditeljima...*

## **ZAHVALA**

*Iskreno se zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Damiru Markučiću na stalnim poticajima, korisnim savjetima i pruženoj podršci u svakom trenutku.*

*Srdačno se zahvaljujem predsjednici povjerenstva prof. dr. sc. Biserki Runje na velikoj pomoći i nesebičnom pružanju konstruktivnih savjeta za ostvarivanje ovog rada. Na svim savjetima, kritikama i sugestijama veliko hvala članovima povjerenstva dr. sc. Željku Alaru prof. dr. sc. Josipu Stepaniću i prof. dr. sc. Dušku Pavletiću.*

*Također se zahvaljujem svim kolegama i prijateljima sa Zavoda za kvalitetu koji su mi bili potpora i pomoć u svakom trenutku izrade ovog doktorata. Posebice se zahvaljujem dipl. ing Miroslavu Omeliću na pomoći i korisnim promišljanjima pri provedbi eksperimenta.*

*Na bezgraničnom strpljenju i stalnoj podršci hvala mojim roditeljima Beniti i Miljenku, a suprugu Goranu zahvaljujem na razumijevanju i velikoj motivaciji kao i njegovim roditeljima Želji i Vladimiru.*

*I na kraju najveća hvala sinu Davidu i kćerki Bruni koji su nestrpljivo čekali svaki mamin povratak kući tijekom izrade doktorata.*



---

**SADRŽAJ**

---

**POPIS SLIKA**  
**POPIS TABLICA**  
**POPIS KRATICA**  
**POPIS OZNAKA**  
**SAŽETAK / SUMMARY**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. UVOD .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1.1 Motivacija.....</b>                                   | <b>2</b>  |
| <b>1.2 Trenutno stanje razvoja predmetnog područja .....</b> | <b>3</b>  |
| <b>1.3 Cilj i hipoteze istraživanja .....</b>                | <b>7</b>  |
| <b>1.4 Metodologija i plan istraživanja .....</b>            | <b>8</b>  |
| <b>1.5 Očekivani znanstveni doprinos .....</b>               | <b>11</b> |
| <b>2. ULTRAZVUČNO MJERENJE DEBLJINE STIJENKE.....</b>        | <b>12</b> |
| <b>2.1 Osnove ultrazvučnog mjerenja debljine.....</b>        | <b>12</b> |
| <b>2.2 Elementi ultrazvučnog mjernog sustava .....</b>       | <b>14</b> |
| 2.2.1 Uređaj za ultrazvučno mjerenje debljine stijenke.....  | 15        |
| 2.2.2 Sonde za ultrazvučno mjerenje debljine .....           | 25        |
| 2.2.3 Kontaktno sredstvo .....                               | 30        |
| 2.2.4 Etalon.....  | 38        |
| <b>3. KONCEPTUALIZACIJA EKSPERIMENTA.....</b>                | <b>43</b> |
| <b>3.1 Definiranje utjecajnih čimbenika .....</b>            | <b>43</b> |
| <b>3.2 Značajke utjecajnih čimbenika.....</b>                | <b>45</b> |
| 3.2.1 Utjecaj glavnog uzroka „Mjerena komponenta“ .....      | 46        |

---

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 3.2.2      | Utjecaj glavnog uzroka „Metoda mjerenja“ .....   | 47         |
| 3.2.3      | Utjecaj glavnog uzroka „Mjerni sustav“ .....   | 48         |
| 3.2.4      | Utjecaj glavnog uzroka „Mjeritelj“ .....   | 49         |
| <b>4.</b>  | <b>ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA UTJECAJA KONTAKTNOG SREDSTVA .....</b>                                   | <b>51</b>  |
| <b>4.1</b> | <b>Plan pokusa za kvantificiranje utjecaja kontaktnog sredstva .....</b>                                   | <b>52</b>  |
| <b>4.2</b> | <b>Utjecaj kontaktnog sredstva - ulje.....</b>   | <b>55</b>  |
| 4.2.1      | Analiza rezultata – kontaktno sredstvo ulje .....  | 55         |
| 4.2.2      | Analiza utjecaja ulja kao vrste kontaktnog sredstva .....  | 58         |
| <b>4.3</b> | <b>Utjecaj kontaktnog sredstva - gel .....</b>   | <b>65</b>  |
| 4.3.1      | Analiza rezultata - kontaktno sredstvo gel .....   | 65         |
| 4.3.2      | Analiza utjecaja gela kao vrste kontaktnog sredstva .....  | 67         |
| <b>4.4</b> | <b>Utjecaj kontaktnog sredstva - voda .....</b>  | <b>73</b>  |
| 4.4.1      | Analiza rezultata - kontaktno sredstvo voda .....  | 73         |
| 4.4.2      | Analiza utjecaja vode kao vrste kontaktnog sredstva .....  | 75         |
| <b>5.</b>  | <b>ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA UTJECAJA ULTRAZVUČNOG UREĐAJA .....</b>                                  | <b>82</b>  |
| <b>5.1</b> | <b>Plan pokusa za kvantificiranje utjecaja parametara ultrazvučnog uređaja.....</b>                        | <b>82</b>  |
| <b>5.2</b> | <b>Određivanje grupne brzine ultrazvuka u materijalu.....</b>  | <b>87</b>  |
| <b>5.3</b> | <b>Određivanje fazne brzine ultrazvuka u materijalu .....</b>  | <b>91</b>  |
| <b>5.4</b> | <b>Analiza rezultata za određivanje utjecaja uređaja .....</b>   | <b>93</b>  |
| 5.4.1      | Prikaz rezultata mjerenja za određivanje utjecaja uređaja .....  | 96         |
| <b>6.</b>  | <b>ANALIZA UTJECAJA HRAPAVOSTI NA ULTRAZVUČNO MJERENJE DEBLJINE .....</b>                                  | <b>107</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Plan i metodologija određivanja utjecaja hrapavosti na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine.....</b> | <b>108</b> |

---

---

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>6.2</b> | <b>Analiza rezultata za određivanje utjecaja hrapavosti na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine.....</b>   | <b>109</b> |
| <b>7.</b>  | <b>PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI MONTE CARLO SIMULACIJOM .....</b>   | <b>112</b> |
| <b>7.1</b> | <b>Monte Carlo simulacija.....</b>  | <b>113</b> |
| <b>7.2</b> | <b>Proračun mjerne nesigurnosti primjenom Monte Carlo simulacije .....</b>  | <b>114</b> |
| <b>7.3</b> | <b>Procjena mjerne nesigurnosti ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke.....</b>  | <b>117</b> |
| <b>7.4</b> | <b>Nesigurnost mjerenja vremena proleta ultrazvučnog impulsa.....</b>   | <b>120</b> |
| <b>7.5</b> | <b>Nesigurnost korekcije brzine .....</b>   | <b>122</b> |
| <b>7.6</b> | <b>Nesigurnost uslijed debljine i vrste kontaktnog sredstva i ultrazvučne sonde .....</b>   | <b>123</b> |
| 7.6.1      | Nesigurnost uslijed interakcije debljine kontaktnog sredstva i širine frekvencijskog spektra iz regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog (gel) sredstva i vrste sonde..... | 124        |
| 7.6.2      | Nesigurnost uslijed interakcije širine frekvencijskog spektra i nazivne frekvencije iz regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva i vrste sonde.....                | 125        |
| 7.6.3      | Procjena nesigurnosti uslijed utjecaja kontaktnog sredstva (ulje) i vrste sonde ....  | 126        |
| 7.6.4      | Procjena nesigurnosti uslijed utjecaja kontaktnog sredstva (gel) i vrste sonde .....  | 127        |
| 7.6.5      | Procjena nesigurnosti uslijed utjecaja kontaktnog sredstva (voda) i vrste sonde ..  | 128        |
| <b>7.7</b> | <b>Nesigurnost uslijed utjecaja ultrazvučnog uređaja i ultrazvučne sonde .....</b>  | <b>129</b> |
| 7.7.1      | Nesigurnost uslijed interakcije napona pobudnog impulsa i širine frekvencijskog spektra iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde .....                   | 129        |
| 7.7.2      | Nesigurnost uslijed interakcije napona pobudnog impulsa i prigušnog otpora iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde .....                                | 130        |

---

---

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 7.7.3      | Nesigurnost uslijed interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde .....    | 131        |
| 7.7.4      | Nesigurnost uslijed interakcije širine frekvencijskog spektra i nazivne frekvencije iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde ..... | 132        |
| 7.7.5      | Nesigurnost uslijed interakcije nazivne frekvencije i prigušnog otpora iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde .....              | 133        |
| 7.7.6      | Procjena nesigurnosti uslijed utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde.....  | 134        |
| 7.7.7      | Doprinosi mjernoj nesigurnosti ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke.....   | 135        |
| <b>7.8</b> | <b>Mjerna nesigurnost ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke.....</b>  | <b>139</b> |
| <b>8.</b>  | <b>ZAKLJUČAK .....</b>  | <b>141</b> |
| <b>9.</b>  | <b>LITERATURA .....</b>   | <b>143</b> |
| <b>10.</b> | <b>PRILOG .....</b>   | <b>148</b> |
|            | <b>ŽIVOTOPIS</b>  |            |
|            | <b>BIOGRAPHY</b>  |            |

---

**POPIS SLIKA**

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Slika 1.</b> Primjena ultrazvučnog mjerenja debljine .....   | 13 |
| <b>Slika 2.</b> Princip ultrazvučne tehnike odjeka .....  | 13 |
| <b>Slika 3.</b> Ultrazvučni uređaj za mjerenje debljine s numeričkim prikazom .....   | 17 |
| <b>Slika 4.</b> Ultrazvučni uređaj za mjerenje debljine s numeričkim i A prikazom.....  | 17 |
| <b>Slika 5.</b> Ultrazvučni uređaj za detekciju nepravilnosti u ispitnom uzorku.....  | 18 |
| <b>Slika 6.</b> Prikaz fazne i grupne brzine .....  | 19 |
| <b>Slika 7.</b> Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 1.....   | 23 |
| <b>Slika 8.</b> Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 2.....   | 24 |
| <b>Slika 9.</b> Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 3.....   | 24 |
| <b>Slika 10.</b> Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 4.....  | 25 |
| <b>Slika 11.</b> Shematski prikaz ravne ultrazvučne sonde .....   | 26 |
| <b>Slika 12.</b> Shematski prikaz dvostruke ultrazvučne sonde .....   | 26 |
| <b>Slika 13.</b> Valni oblik ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni .....   | 28 |
| <b>Slika 14.</b> Frekvencijski spektar ultrazvučnog impulsa.....  | 29 |
| <b>Slika 15.</b> Pojave na granici dvaju sredstava .....  | 33 |
| <b>Slika 16.</b> Referentni uzorci i etaloni.....   | 39 |
| <b>Slika 17.</b> Shematski prikaz podešavanja mjernog područja .....  | 40 |
| <b>Slika 18 a)</b> Radni etalon br. 1 .....   | 41 |
| <b>Slika 19. a)</b> Radni etalon br. 2 .....  | 41 |
| <b>Slika 20.</b> Utjecaji koji doprinose nesigurnosti rezultata u postupku ultrazvučnog mjerenja<br>debljine stijenke.....                                    | 44 |
| <b>Slika 21.</b> Naprava za prihvat sonde.....  | 53 |
| <b>Slika 22.</b> Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka regresijskog modela za procjenu<br>debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo ulje .....   | 59 |
| <b>Slika 23.</b> Dijagram ostatka prema rednom broju izvođenja regresijskog modela za<br>procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo ulje..... | 60 |

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Slika 24.</b> Dijagram ostatka u zavisnosti o očekivanim vrijednostima regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo ulje .....                            | 60 |
| <b>Slika 25.</b> Grafički prikaz interakcije nazivne frekvencije i širine frekvencijskog spektra pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10 $\mu\text{m}$ (ulje) .....                         | 61 |
| <b>Slika 26.</b> Grafički prikaz interakcije nazivne frekvencije i širine frekvencijskog spektra pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50 $\mu\text{m}$ (ulje) .....                         | 61 |
| <b>Slika 27.</b> Konturni prikaz regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo ulje pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10 $\mu\text{m}$ .....         | 63 |
| <b>Slika 28.</b> Konturni prikaz regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo ulje pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50 $\mu\text{m}$ .....         | 63 |
| <b>Slika 29.</b> Prikaz odzivne površine regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo ulje pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10 $\mu\text{m}$ ..... | 64 |
| <b>Slika 30.</b> Prikaz odzivne površine regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo ulje pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50 $\mu\text{m}$ ..... | 64 |
| <b>Slika 31.</b> Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo gel .....   | 68 |
| <b>Slika 32.</b> Dijagram ostatka prema rednom broju izvođenja regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo gel .....  | 68 |
| <b>Slika 33.</b> Dijagram ostatka u zavisnosti o očekivanim vrijednostima regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo gel .....                             | 69 |
| <b>Slika 34.</b> Grafički prikaz interakcije nazivne frekvencije i širine frekvencijskog spektra pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10 $\mu\text{m}$ (gel) .....                          | 69 |
| <b>Slika 35.</b> Grafički prikaz interakcije nazivne frekvencije i širine frekvencijskog spektra pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50 $\mu\text{m}$ (gel) .....                          | 70 |
| <b>Slika 36.</b> Konturni prikaz regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo gel pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10 $\mu\text{m}$ .....          | 71 |
| <b>Slika 37.</b> Konturni prikaz regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo gel pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50 $\mu\text{m}$ .....          | 71 |
| <b>Slika 38.</b> Prikaz odzivne površine regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo gel pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10 $\mu\text{m}$ .....  | 72 |

---

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Slika 39.</b> Prikaz odzivne površine regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo gel pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50 $\mu\text{m}$ .....  | 72 |
| <b>Slika 40.</b> Papir vjerojatnosti normalne razdiobe ostataka regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo voda .....                                      | 76 |
| <b>Slika 41.</b> Dijagram ostatka prema rednom broju izvođenja regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo voda .....                                       | 76 |
| <b>Slika 42.</b> Dijagram ostatka u zavisnosti o očekivanim vrijednostima regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo voda .....                            | 77 |
| <b>Slika 43.</b> Grafički prikaz interakcije nazivne frekvencije i širine frekvencijskog spektra pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10 $\mu\text{m}$ (voda) .....                         | 78 |
| <b>Slika 44.</b> Grafički prikaz interakcije između nazivne frekvencije i širine frekvencijskog spektra pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50 $\mu\text{m}$ (voda) .....                  | 78 |
| <b>Slika 45.</b> Konturni prikaz regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo voda pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10 $\mu\text{m}$ .....         | 79 |
| <b>Slika 46.</b> Konturni prikaz regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo voda pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50 $\mu\text{m}$ .....         | 80 |
| <b>Slika 47.</b> Prikaz odzivne regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo voda pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10 $\mu\text{m}$ .....          | 80 |
| <b>Slika 48.</b> Prikaz odzivne površine regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo voda pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50 $\mu\text{m}$ ..... | 81 |
| <b>Slika 49.</b> Ekranski prikaz pobudnog impulsa pri minimalnoj („ <i>low</i> “) vrijednosti napona pobudnog impulsa .....   | 84 |
| <b>Slika 50.</b> Ekranski prikaz pobudnog impulsa pri maksimalnoj („ <i>high</i> “) vrijednosti napona pobudnog impulsa .....   | 84 |
| <b>Slika 51.</b> Razine mjerenja vrijednosti ultrazvučne brzine .....   | 89 |
| <b>Slika 52.</b> Točke mjerenja vremena proleta na preklopljenim signalima .....  | 89 |
| <b>Slika 53.</b> Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za ultrazvučni uređaj .....   | 97 |
| <b>Slika 54.</b> Dijagram ostatka prema rednom broju izvođenja regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za ultrazvučni uređaj.....   | 97 |

---

---

|   |     |
|---|-----|
| <b>Slika 55.</b> Dijagram ostatka u zavisnosti o očekivanim vrijednostima regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za ultrazvučni uređaj .....                           | 98  |
| <b>Slika 56.</b> Dijagram vjerojatnosti normalne razdiobe regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za ultrazvučni uređaj .....   | 99  |
| <b>Slika 57.</b> Grafički prikaz interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 4 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 135 V.....         | 99  |
| <b>Slika 58.</b> Grafički prikaz interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 5 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 135 V.....         | 100 |
| <b>Slika 59.</b> Grafički prikaz interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 4 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 332 V.....         | 100 |
| <b>Slika 60.</b> Grafički prikaz interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 5 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 332 V.....         | 101 |
| <b>Slika 61.</b> Konturni prikaz interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 4 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 135 V.....         | 102 |
| <b>Slika 62.</b> Konturni prikaz interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 5 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 135 V.....         | 102 |
| <b>Slika 63.</b> Konturni prikaz interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 4 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 332 V.....         | 103 |
| <b>Slika 64.</b> Konturni prikaz interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 5 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 332 V.....         | 103 |
| <b>Slika 65.</b> Prikaz odzivne površine interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 4 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 135 V..... | 104 |

---



---

|  |     |
|--|-----|
| <b>Slika 66.</b> Prikaz odzivne površine interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 5 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 135 V ..... | 104 |
| <b>Slika 67.</b> Prikaz odzivne površine interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 4 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 332 V ..... | 105 |
| <b>Slika 68.</b> Prikaz odzivne površine interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 5 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 332 V.....  | 105 |
| <b>Slika 69.</b> Uzorci s različitim vrijednostima hrapavosti površine .....   | 108 |
| <b>Slika 70.</b> Uzorci za utvrđivanja utjecaja hrapavosti na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine .....  | 108 |
| <b>Slika 71.</b> Monte Carlo simulacija mjernog sustava .....  | 113 |
| <b>Slika 72.</b> Shematski prikaz proračuna mjerne nesigurnosti MCS metodom.....   | 116 |
| <b>Slika 73.</b> Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(\delta TOF)$ .....  | 121 |
| <b>Slika 74.</b> Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(\delta v_{cor})$ .....  | 123 |
| <b>Slika 75.</b> Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(\delta s_c B_W)$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva i vrste sonde .....                          | 124 |
| <b>Slika 76.</b> Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(\delta B_{Wf})$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva i vrste sonde .....                           | 125 |
| <b>Slika 77.</b> Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(d_{ulje})$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja kontaktnog sredstva (ulje) i vrste sonde .....                                  | 126 |
| <b>Slika 78.</b> Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(d_{gel})$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja kontaktnog sredstva (gel) i vrste sonde.....                                     | 127 |
| <b>Slika 79.</b> Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(d_{voda})$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja kontaktnog sredstva (voda) i vrste sonde .....                                  | 128 |
| <b>Slika 80.</b> Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(\delta U_p B_W)$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde .....                                  | 130 |
| <b>Slika 81.</b> Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(\delta U_p R_p)$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde .....                                  | 131 |
| <b>Slika 82.</b> Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(\delta B_W R_p)$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde .....                                  | 132 |

---

---

|  |     |
|--|-----|
| <b>Slika 83.</b> Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(\delta B_{wf})$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde ..... | 133 |
| <b>Slika 84.</b> Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(\delta f R_p)$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde .....  | 134 |
| <b>Slika 85.</b> Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(d_{Ur})$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja uređaja i vrste sonde .....                     | 135 |
| <b>Slika 86.</b> Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(d_{st})$ .....  | 140 |

---

**POPIS TABLICA**

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Tablica 1.</b> Parametri odabranih sonde za određivanje utjecaja kontaktnog sredstva .....   | 53 |
| <b>Tablica 2.</b> Shema plana pokusa .....  | 54 |
| <b>Tablica 3.</b> Analiza varijance modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva (ulje) i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine .....                 | 56 |
| <b>Tablica 4.</b> Kvaliteta izrađenog regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva (ulje) i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine .....  | 57 |
| <b>Tablica 5.</b> Prikaz procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena pogreška, donje i gornje granice intervala povjerenja za svaki član modela (ulje) .....    | 58 |
| <b>Tablica 6.</b> Parametri sonde kojom je ostvaren rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine najbliži referentnoj vrijednosti (ulje) .....                                   | 62 |
| <b>Tablica 7.</b> Analiza varijance modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva (gel) i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine .....                  | 65 |
| <b>Tablica 8.</b> Nastavak .....  | 66 |
| <b>Tablica 9.</b> Kvaliteta izrađenog regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva (gel) i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine .....   | 66 |
| <b>Tablica 10.</b> Prikaz procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena pogreška, donje i gornje granice intervala povjerenja za svaki član modela (gel) .....    | 67 |
| <b>Tablica 11.</b> Parametri sonde kojom je ostvaren rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine najbliži referentnoj vrijednosti (gel) .....                                   | 70 |
| <b>Tablica 12.</b> Analiza varijance modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva (voda) i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine .....                | 73 |
| <b>Tablica 14.</b> Kvaliteta izrađenog regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva (voda) i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine ..... | 74 |
| <b>Tablica 15.</b> Prikaz procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena pogreška, donje i gornje granice intervala povjerenja za svaki član modela (voda) .....   | 74 |
| <b>Tablica 16.</b> Parametri sonde kojom je ostvaren rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine najbliži referentnoj vrijednosti (voda) .....                                  | 79 |

---

|  |     |
|--|-----|
| <b>Tablica 17.</b> Parametri postavke napona pobudnog impulsa na ultrazvučnom uređaju .....  | 85  |
| <b>Tablica 18.</b> Shema plana pokusa za određivanje utjecaja uređaja .....  | 86  |
| <b>Tablica 19.</b> Parametri sonde za određivanje ultrazvučne brzine.....  | 88  |
| <b>Tablica 20.</b> Rezultati mjerenja vremena proleta ultrazvučnog impulsa u materijalu .....  | 90  |
| <b>Tablica 21.</b> Rezultati izmjerene grupne brzine ultrazvuka u materijalu .....   | 91  |
| <b>Tablica 22.</b> Rezultati izračunate fazne brzine ultrazvuka u materijalu.....  | 92  |
| <b>Tablica 23.</b> Analiza varijance modela za određivanje utjecaja uređaja i vrste sonde na<br>ultrazvučno mjerenje debljine stijenke .....   | 94  |
| <b>Tablica 24.</b> Kvaliteta izrađenog regresijskog modela za određivanje utjecaja uređaja i vrste<br>sonde na ultrazvučno mjerenje debljine .....   | 95  |
| <b>Tablica 25.</b> Prikaz procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena pogreška, donje i<br>gornje granice intervala povjerenja za svaki član modela (uređaj) .....   | 95  |
| <b>Tablica 26.</b> Parametri uređaja i sonde s kojima je ostvaren rezultat ultrazvučnog mjerenja<br>debljine najbliži referentnoj vrijednost.....  | 101 |
| <b>Tablica 27.</b> Nazivne dimenzije uzoraka za utvrđivanje utjecaja hrapavosti na rezultat<br>ultrazvučnog mjerenja debljine .....  | 109 |
| <b>Tablica 28.</b> Vrijednosti hrapavosti uzoraka za utvrđivanje utjecaja hrapavosti na rezultat<br>ultrazvučnog mjerenja debljine .....   | 109 |
| <b>Tablica 29.</b> Rezultati mjerenja debljine ultrazvukom za utvrđivanje utjecaja hrapavosti na<br>rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine ( $d = 10$ mm) .....   | 110 |
| <b>Tablica 30.</b> Rezultati mjerenja debljine ultrazvukom za utvrđivanje utjecaja hrapavosti na<br>rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine ( $d = 20$ mm) .....   | 110 |
| <b>Tablica 31.</b> Odabrane vrijednosti funkcije gustoće vjerojatnosti $g(\delta_{TOF})$ .....   | 120 |
| <b>Tablica 32.</b> Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine<br>$\delta_{TOF}$ .....   | 121 |
| <b>Tablica 33.</b> Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine<br>$\delta v_{cor}$ .....   | 122 |
| <b>Tablica 34.</b> Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine<br>$\delta s_{cBw}$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva i<br>vrste sonde..... | 124 |
| <b>Tablica 35.</b> Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine<br>$\delta B_{wf}$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva i<br>vrste sonde.....  | 125 |

---

---

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tablica 36.</b> Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine $d_{ulje}$ kada se kao vrsta kontaktnog sredstva koristi gel.....  | 126 |
| <b>Tablica 37.</b> Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine $d_{gel}$ kada se kao vrsta kontaktnog sredstva koristi voda .....                                       | 127 |
| <b>Tablica 38.</b> Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine $d_{voda}$ kada se kao vrsta kontaktnog sredstva koristi voda.....                                       | 128 |
| <b>Tablica 39.</b> Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine $\delta U_p B_w$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde ..... | 129 |
| <b>Tablica 40.</b> Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine $\delta U_p R_p$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde ..... | 130 |
| <b>Tablica 41.</b> Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine $\delta B_w R_p$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde ..... | 131 |
| <b>Tablica 42.</b> Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine $\delta B_w f$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde .....   | 132 |
| <b>Tablica 43.</b> Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine $\delta f R_p$ iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde .....   | 133 |
| <b>Tablica 44.</b> Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine $d_{Ur}$ .....   | 134 |
| <b>Tablica 45.</b> Doprinosi mjernoj nesigurnosti ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke .....   | 136 |

## POPIS KRATICA

---

|              |   |
|--------------|---|
| <b>ANOVA</b> | <i>Analysis of variance</i> (Analiza varijance)   |
| <b>EMAT</b>  | <i>Electromagnetic Acoustic Transducer</i> (Elektromagnetsko-ultrazvučna metoda)                        |
| <b>FFT</b>   | <i>Fast Fourier Transformation</i> (Brza Fourierova transformacija)                                     |
| <b>GUM</b>   | <i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i> (Upute za iskazivanje mjerne nesigurnosti) |
| <b>MCS</b>   | <i>Monte Carlo Simulation</i> (Monte Carlo simulacija)  |
| <b>PT</b>    | <i>Proficiency Testing</i> (Usporedbena mjerenja)   |
| <b>PE</b>    | <i>Pulse-Echo</i> (Tehnika odjeka)  |
| <b>RSM</b>   | <i>Response Surface Methodology</i> (Metodologija odzivne površine)                                     |
| <b>TOF</b>   | <i>Time of Flight</i> (Vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa)  |
| <b>UTM</b>   | <i>Ultrasonic Thickness Measurement</i> (Ultrazvučno mjerenje debljine)                                 |

---

**POPIS OZNAKA**


---

|                 |                   |   |
|-----------------|-------------------|---|
| $A$             | m                 | amplituda   |
| $B_W$           | %                 | širina frekvencijskog spektra   |
| $D$             | mm                | nazivni promjer sonde   |
| $d$             | mm                | debljina mjerene komponente   |
| $d_{st}$        | mm                | stvarna debljina mjerene komponente   |
| $d_{gel}$       | mm                | izlazna vrijednost regresijskog modela za utvrđivanje utjecaja vrste kontaktnog sredstva (gel) i vrste sonde      |
| $d_{ulje}$      | mm                | izlazna vrijednost regresijskog modela za utvrđivanje utjecaja vrste kontaktnog sredstva (ulje) i vrste sonde     |
| $d_{voda}$      | mm                | izlazna vrijednost regresijskog modela za utvrđivanje utjecaja vrste kontaktnog sredstva (voda) i vrste sonde     |
| $d_{Ur}$        | mm                | izlazna vrijednost regresijskog modela za utvrđivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde                 |
| $f$             | MHz               | nazivna frekvencija   |
| $f_p$           | MHz               | vršna frekvencija   |
| $f_c$           | MHz               | centralna frekvencija   |
| $f_l$           | MHz               | donja frekvencija   |
| $f_u$           | MHz               | gornja frekvencija  |
| $R$             |                   | Koeficijent refleksije  |
| $R_p$           | $\Omega$          | prigušni otpor  |
| $T$             |                   | koeficijent transmisije   |
| $t_{PD}$        | s                 | vrijeme trajanja impulsa  |
| $t_{TOF}$       | s                 | vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa od primopredajnika do zadnje stijenke mjerene komponente                     |
| $\bar{t}_{TOF}$ |                   | aritmetička sredina vremena proleta ultrazvučnog impulsa od primopredajnika do zadnje stijenke mjerene komponente |
| $U_p$           | V                 | napon pobudnog impulsa  |
| $v$             | m/s               | brzina ultrazvuka u materijalu mjerene komponente   |
| $v_{cal}$       | m/s               | kalibrirana brzina L-vala preko etalonu   |
| $v_{mat}$       | m/s               | brzina L-vala u materijalu  |
| $Z$             | Ns/m <sup>3</sup> | specifična akustička impedancija  |

---

---

|                   |                   |  |
|-------------------|-------------------|--|
| $\beta_{B_w}$     |                   | procijenjeni koeficijent regresijskog modela uz parametar $B_w$                  |
| $\beta_f$         |                   | procijenjeni koeficijent regresijskog modela uz parametar $f$                    |
| $\beta_{s_c}$     |                   | procijenjeni koeficijent regresijskog modela uz parametar $s_c$                  |
| $\beta_{R_p}$     |                   | procijenjeni koeficijent regresijskog modela uz parametar $R_p$                  |
| $\beta_{U_p}$     |                   | procijenjeni koeficijent regresijskog modela uz parametar $U_p$                  |
| $\beta_{B_w f}$   |                   | procijenjeni koeficijent regresijskog modela interakciju parametara $B_w f$      |
| $\beta_{B_w R_p}$ |                   | procijenjeni koeficijent regresijskog modela interakciju parametara $B_w R_p$    |
| $\beta_{f R_p}$   |                   | procijenjeni koeficijent regresijskog modela interakciju parametara $f R_p$      |
| $\beta_{s_c B_w}$ |                   | procijenjeni koeficijent regresijskog modela interakcije parametara $s_c B_w$    |
| $\beta_{U_p B_w}$ |                   | procijenjeni koeficijent regresijskog modela interakcije parametara $U_p B_w$    |
| $\beta_{U_p R_p}$ |                   | procijenjeni koeficijent regresijskog modela interakciju parametara $U_p R_p$    |
| $\rho$            | kg/m <sup>3</sup> | gustoća sredstva   |
| $\delta B_w$      |                   | utjecaj širine frekvencijskog spektra  |
| $\delta C_E$      |                   | utjecaj kontaktnog sredstva  |
| $\delta D_E$      |                   | utjecaj ultrazvučnog uređaja   |
| $\delta f$        |                   | utjecaj nazivne frekvencije sonde  |
| $\delta R_p$      |                   | utjecaj prigušnog otpora   |
| $\delta U_p$      |                   | utjecaj napona pobudnog impulsa  |
| $\delta s_c$      |                   | utjecaj debljine kontaktnog sredstva   |
| $\delta t$        |                   | utjecaj temperaturne razlike etalona u odnosu na 20°C                            |
| $\delta B_w f$    |                   | utjecaj interakcije širine frekvencijskog spektra i nazivne frekvencije sonde    |
| $\delta B_w R_p$  |                   | utjecaj interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora             |
| $\delta f R_p$    |                   | utjecaj interakcije nazivne frekvencije sonde i prigušnog otpora                 |
| $\delta s_c B_w$  |                   | utjecaj interakcije debljine kontaktnog sredstva i širine frekvencijskog spektra |
| $\delta U_p B_w$  |                   | utjecaj interakcije napona pobudnog impulsa i širine frekvencijskog spektra      |
| $\delta U_p R_p$  |                   | utjecaj interakcije napona pobudnog impulsa i prigušnog otpora                   |
| $\delta TOF$      |                   | utjecaj vremena proleta ultrazvučnog impulsa                                     |

---



## SAŽETAK

---

Kao dio upravljanja kvalitetom postrojenja i sustava često se provodi ultrazvučno mjerenje debljine (Ultrasonic Thickness Measurement, UTM) za čiju je primjenu dovoljan pristup s jedne strane mjerene komponente. Ova široko primjenjiva ultrazvučna tehnika daje kvantitativnu informaciju o debljini stijenke i kao takva pripada području mjeriteljske djelatnosti.

U radu je provedeno istraživanje i karakterizacija utjecajnih faktora i značajki elemenata ultrazvučnog mjernog sustava na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke. Teorijskim razmatranjem i provedbom eksperimenata analizirana je značajnost utjecaja pojedinih parametara i njihovih interakcija. Primjenom planova pokusa i odgovarajuće metodologije za analizu rezultata eksperimenata stvoreni su preduvjeti za procjenu mjerne nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke. Da bi se procijenila mjerna nesigurnost, analizirani su utjecajni faktori na točnost i preciznost ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke. Razvijen je i matematički model za procjenu mjerne nesigurnosti te je kvantificiran doprinos karakterističnih članova regresijskog modela. Temeljem provedenih istraživanja iskazana je mjerna nesigurnost rezultata mjerenja kod primjene odabranog ultrazvučnog mjernog sustava. Procjena mjerne nesigurnosti u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke provedena je primjenom Monte Carlo simulacija (MCS).

**Ključne riječi:** ultrazvučno mjerenje debljine, Monte Carlo simulacija, mjerne nesigurnosti, plan pokusa.

## SUMMARY

---

Ultrasonic thickness measurement (UTM) is used as a part of structure and component integrity assessment. UTM requires access from one side of measured component. This widely used ultrasonic technique provides quantitative information about the material thickness so consequently, UTM belongs to a field of measurements activities.

The work presents an experimental research and characterization of influential factors and characteristics of ultrasonic measurements system on ultrasonic thickness measurement results. Using theoretical and experimental analysis, a significance of influential factors and their interactions was examined. With the goal to estimate the measurement uncertainty of the ultrasonic thickness measurement, design of experiments is applied and methodology for experiment results analysis is created. In order to estimate the measurement uncertainty of ultrasonic thickness measurements, all factors that influence accuracy and precision were analysed. The mathematical model for ultrasonic thickness measurement uncertainty estimation was developed and contribution of particular parameters of regression models was quantified. The measurement uncertainty of specific ultrasonic measurement system was presented in accordance to the research. Monte Carlo simulation was used for ultrasonic thickness measurement uncertainty estimation.

**Key words:** ultrasonic thickness measurement, Monte Carlo Simulation, measurement uncertainty, design of experiments.

# 1. UVOD

Ultrazvučno mjerenje debljine stijenke (Ultrasonic Thickness Measurement, UTM) ima posebnu važnost u primjeni i tijekom izgradnje i tijekom životnog vijeka konstrukcije. Ultrazvučno mjerenje debljine, kao jedna široko primjenjiva ultrazvučna tehnika, omogućava uvid u stvarno stanje stijenke komponente koja u uvjetima eksploatacijskog rada može promijeniti lokalnu debljinu i time ozbiljno ugroziti pouzdani rad čitavog postrojenja. Stoga se ultrazvučno mjerenje debljine stijenke provodi na kritičnim mjestima komponente kako bi se dokazala pouzdana funkcionalnost mjerene komponente s određenom razinom pouzdanosti u predviđenom vijeku eksploatacijskog rada.

S današnje točke gledišta, na području mjeriteljske djelatnosti normama su definirani zahtjevi za iskazivanjem mjerne nesigurnosti, dok su se u prošlosti primjenjivale tradicionalne metode koje su se temeljile na znanju i iskustvu osobe koja je provodila mjerenja [1]. Načini obrade rezultata nisu bili ujednačeni, nego su ovisili o vlastitom razumijevanju autora što je onemogućavalo provođenje usporedbenih mjerenja radi poboljšavanja mjernih metoda i smanjenja mjerne nesigurnosti.

Na području ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke rezultat se prikazuje bez pripadajuće mjerne nesigurnosti tako da ne postoji određena sumnja u dobiveni rezultat mjerenja. Kako bi se mjerna nesigurnost mogla sveobuhvatno procijeniti, potrebno je istražiti i utvrditi sve izvore nesigurnosti dobivenog rezultata mjerenja.

Dosadašnja istraživanja UTM-a bazirala su se na određivanju razina utjecajnosti pojedinih faktora sustava zasebno. Temeljem takvih oskudnih saznanja teško je zaključiti da li i u kojoj mjeri njihovo međudjelovanje utječe na varijabilnost rezultata. Mnogi su se autori bavili problematikom određivanja razina utjecajnosti pojedinih faktora sustava zasebno, ali nitko nije sveobuhvatno istražio te procijenio iznos mjerne nesigurnosti rezultata dobivenog postupkom ultrazvučnim mjerenjem debljine.

Stoga je glavni cilj ovog doktorskog rada biti istraživanje utjecaja svih elemenata ultrazvučnog mjernog sustava na rezultat mjerenja. Tako će se ostvariti osnovni preduvjet za određivanje i procjenu mjerne nesigurnosti.

## 1.1 Motivacija

Danas se velika važnost pridaje ispitivanjima materijala koji u uvjetima eksploatacije moraju zadržati određena svojstva. Ispitivanjem se dokazuje sposobnost materijala za preuzimanje unaprijed projektiranih opterećenja. Niz je postupaka i metoda kojima se utvrđuju uporabna svojstva materijala, gdje svaka vrsta ispitivanja pruža određena saznanja o njegovoj kvaliteti u odnosu na zadane kriterije. U svrhu uspostavljanja te osiguravanja integriteta konstrukcija i komponenata, pojedina ispitivanja provode se prije puštanja u eksploataciju, dok se druga provode periodički po relevantnim fazama eksploatacijskog procesa s točno definiranom učestalošću ispitivanja. Stoga je važno, prije početka uspostave sustava osiguravanja kvalitete, jasno definirati koja metoda ispitivanja slijedi u pojedinoj fazi nastajanja konstrukcija, a koja je predodređena za potvrđivanje tehničkih zahtjeva te primjerenosti i sposobnosti nastavka rada nakon određenog perioda eksploatacije.

Ultrazvučno mjerenje debljine ima značajnu ulogu tijekom izrade konstrukcija i postrojenja (*pre-service*), a posebno je značajno za periodične provjere njihova integriteta tijekom životnog vijeka (*in-service*). Ultrazvučna mjerenja debljine često su potrebna u procesno energetskim kao i nuklearnim postrojenjima, i to na kritičnim mjestima gdje može doći do degradacije materijala uslijed korozije, erozije i sl. S ciljem osiguravanja kvalitete, UTM ima iznimno važnu ulogu u održavanju pomorskih konstrukcija (plovila, platforme) te objekata vezanih uz eksploataciju, proizvodnju i transport nafte (cisterne, naftovodi, spremnici), a primjenjuje se i u farmaceutskoj te prehrambenoj industriji.

Poznato je da na svaki mjerni sustav djeluju razni faktori koji po svojoj značajnosti mogu više ili manje utjecati na točnost i preciznost dobivenog rezultata. U postojećoj praksi ne vodi se dovoljno računa o točnosti i preciznosti ultrazvučnog mjerenja debljine i još uvijek nije istraženo složeno sinergijsko djelovanje zasebnih utjecajnih elemenata [2].

Danas se primjenom ultrazvučne metode za mjerenje debljine stijenke često iskazuje mjerni rezultat bez odgovarajuće mjerne nesigurnosti čime rezultat nije sljediv niti cjelovit, te je onemogućeno njegovo pouzdano tumačenje s poznatom razinom povjerenja. Općenito, mjerni rezultat bilo koje veličine ovisi o čitavom nizu utjecajnih faktora.

Utjecajne faktore moguće je procijeniti i kvantificirati kroz dobro postavljene eksperimente, te provedena ponovljena mjerenja u uvjetima ponovljivosti i obnovljivosti. Izvori mjerne nesigurnosti mogu biti slučajne i sustavne pogreške, a procjenjuju se u skladu s

međunarodno priznatim postupkom koji se naziva Vrednovanje mjernih podataka - Uputa za iskazivanje mjerne nesigurnosti (Evaluation of measurement data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM) [3]. Slučajne pogreške nastaju uslijed nepredvidivih ili slučajnih vremenskih ili prostornih promjena utjecajnih veličina, dok su sustavne pogreške posljedica utvrđenog djelovanja utjecajnih veličina na mjerni rezultat. Djelovanje sustavnih pogrešaka moguće je smanjiti primjenom faktora ispravaka ili korekcija.

Kako je procjenjivanje mjerne nesigurnosti jedan od osnovnih zahtjeva na području mjeriteljstva i nezaobilazni je uvjet za laboratorije koji žele postati ili ostati u sustavu akreditiranih laboratorija, sve se veća važnost pridaje iskazivanju mjerne nesigurnosti dobivenog rezultata mjerenjem. Laboratorij svojom akreditacijom dokazuje da se metoda izvodi prema odobrenom postupku i u skladu sa zahtjevima norme EN ISO/IEC 17 025 [4] i/ili ISO/IEC 17 020 [5]. No procjena mjerne nesigurnosti vrlo je zahtjevna i često rezultira širokim intervalom čime postaje beskorisna. Izvješća o rezultatima ultrazvučnog mjerenja debljine obično se daju bez pripadajuće mjerne nesigurnosti [6].

Poznato je da elementi mjernog sustava UTM-a zasebno utječu na procjenu mjerne nesigurnosti, ali još uvijek nije kvantificiran pojedinačni utjecaj elemenata. Također nije istraženo na koji način podešavanje i odabir mjernih parametara utječu na rezultat dobiven postupkom UTM-a te postoji li interakcija pojedinih parametara. Da bi se smanjio utjecaj zasebnih elemenata, ne smije se zanemariti sinergijsko djelovanje parametara. Stoga je osim zasebnih utjecaja potrebno istražiti i kvantificirati sinergijsko djelovanje između parametara i analizirati razinu značajnosti interakcija. Time će se stvoriti osnovni preduvjet za smanjenje mjerne nesigurnosti. U tom smislu potrebno je osmisliti plan istraživanja te provesti određena teorijska razmatranja i eksperimentalna mjerenja kako bi se osigurali i prikupili rezultati potrebni za provedbu procjene i proračuna mjerne nesigurnosti [7].

## **1.2 Trenutno stanje razvoja predmetnog područja**

UTM prema svojoj primjeni pripada nerazornim metodama ispitivanja, međutim specifičnost UTM-a je prikazivanje rezultata mjerenja čime se približava području mjeriteljstva. Poznato je da na svaki mjerni sustav djeluju razni faktori koji po svojoj značajnosti mogu više ili manje utjecati na točnost i preciznost dobivenog rezultata. U postojećoj praksi ne vodi se dovoljno računa o točnosti i preciznosti ultrazvučnog mjerenja debljine, a još uvijek nije istražen složeni sinergijski utjecaj zasebnih utjecajnih elemenata.

Fowler i suradnici [8] sažeto su prikazali neke od glavnih utjecajnih faktora na točnost mjerenja debljine primjenom ultrazvučne metode. Diskutirali su na teorijskoj razini kako pojedini faktor utječe na rezultat mjerenja, ali ni jedan od faktora nije kvantificiran te nije predložen model za smanjenje njihovih utjecaja. U normi EN 14127 (Non-destructive testing. - Ultrasonic thickness measurement) [9] navedeni su i neki od utjecajnih faktora na točnost ultrazvučnog mjerenja debljine, ali nije razrađen model za procjenu mjerne nesigurnosti. Nadalje, nisu obrazložene ni spomenute značajnosti utjecaja parametara pojedinih elemenata na rezultat mjerenja.

Markučić i suradnici [10] procijenili su mjernu nesigurnost u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke primjenom simulacije Monte Carlo. Analizirali su postupak ultrazvučnog određivanja debljine na temelju čega su postavili jednostavan model u kojem je mjerena debljina funkcionalno povezana s odabranim utjecajnim faktorima mjernog sustava. Međutim, u proračun mjerne nesigurnosti nisu uzeli u obzir sve parametre koji utječu na rezultat mjerenja dobivenog postupkom UTM-a.

U svojem je istraživanju Hammond [11] proučavao neke od mogućih izvora pogrešaka pri ultrazvučnom mjerenju debljine, te na koji način pojedini faktori mogu utjecati na točnost i rezoluciju. U tom smislu detaljnije je razradio samo pojedine izvore mjerne nesigurnosti, ali nije procijenio i ukupnu mjernu nesigurnost ultrazvučnog mjernog sustava. Naveo je i koji je najveći izvor mjerene nesigurnosti UTM sustava u njegovom istraživanju.

Osnova ultrazvučnog mjerenja debljine temelji se na principu mjerenja vremena proleta ultrazvučnog impulsa kroz materijal od trenutka odašiljanja pa do povratka reflektiranog impulsa od zadnje stijenke. U pogledu procjene mjerne nesigurnosti UTM sustava potrebno je poznavanje točne brzine ultrazvuka u materijalu. Stoga često autori [12], [13] i [14] u člancima istražuju i razvijaju nove metode za određivanje ultrazvučne brzine, međutim izostavljaju prikaz mjernog rezultata s pripadajućom mjernom nesigurnošću.

Brzina ultrazvuka važan je akustički parametar koji je svojstven svakom materijalu i kao takav ne ovisi o odabranoj nazivnoj frekvenciji ultrazvučne sonde [15]. Brzina ultrazvuka u materijalu određena je vrstom i stanjem materijala te vanjskim utjecajima kao što su temperatura i naprezanje. Prije početka svakog mjerenja ultrazvukom potrebno je na odgovarajući način podesiti odnosno kalibrirati i provjeriti mjerni sustav. To se prije svega odnosi na podešavanje brzine ultrazvuka u materijalu koji se mjeri, te je nezaobilazni uvjet da

materijal komponente koja se mjeri bude približno jednake strukture kao etalon na kojem se podešava uređaj. Ovaj uvjet je važan kako bi se u što većoj mjeri izbjegla pogreška pri mjerenju uzrokovana razlikama u brzini između etalona i mjerne komponente.

He [16] se bavio problematikom mjerenja brzine ultrazvuka u materijalu tako da je istovremeno mjerio i brzinu ultrazvuka i debljinu materijala na nekoliko različitih cijevi. U tu svrhu provodio je analizu vremenske i frekvencijske domene dobivenih signala. Naveo je što sve u teoriji utječe na točnost mjerenja brzine ultrazvuka, ali eksperimentalno nije odredio niti procijenio odstupanja od stvarne vrijednosti. Mjerenjem longitudinalne i transverzalne brzine ultrazvuka u etalonskom bloku bavio se i Ali [17] na temelju čega je određivao mehanička svojstva referentnog etalona te je izračunavao module elastičnosti materijala referentnog etalona. Isto je tako određivao koeficijent prigušenja ultrazvučnog impulsa gdje koeficijent prigušenja prikazao kao funkciju debljine materijala i amplitudnog odziva.

Mnogi su se autori bavili problematikom mjerenja brzine ultrazvuka u različitim vrstama materijala i na taj način prikazali kako se promjene u mikrostrukturi odražavaju na razlike u brzini propagacije ultrazvučnih impulsa. Gur i suradnici [18] mjerili su razlike u brzini ultrazvuka u materijalu uzrokovane promjenama u mikrostrukturi. S tim ciljem izradili su uzorke od dviju vrsta čelika koje su podvrgnuli različitim toplinskim obradama te su na taj način dobili različite mikrostrukture: martenzitnu, bainitnu te perlitno-feritnu mikrostrukturu finog i grubog zrna. Na svakom od uzoraka mjerili su brzinu longitudinalnog i transverzalnog vala. Dobivenim su rezultatima prikazali kako se mijenja brzina ultrazvuka u materijalu u ovisnosti o mikrostrukturi i tvrdoći. Razlika u brzini između uzoraka posljedica je promjene u elastičnim svojstvima materijala zbog različitih mikrostrukture. Osim o samoj mikrostrukturi, brzina ultrazvuka u materijalu ovisi i o stupnju deformacije kristalne rešetke kao i o anizotropnosti mikrostrukture, tj. orijentaciji zrna. Uzimajući u obzir razliku u brzini i prigušenju ultrazvučnih valova između uzoraka uslijed razlike u mikrostrukturi, Freitas i suradnici [19] bavili su se karakterizacijom materijala.

Problematikom mjerenja brzine ultrazvuka u materijalu bavili su se Lukomski i suradnici [20] te su proveli eksperimentalni dokaz da je moguće vrednovati tvrdoću martenzitnog čelika na temelju brzine ultrazvučnih valova u materijalu i ograničene informacije o kemijskom sastavu. Za takav dokaz bilo je potrebno što točnije i preciznije odrediti brzinu ultrazvuka u materijalu, a to su dobili mjerenjem nekoliko sukcesivnih odjeka od zadnje stijenke. Za određivanje brzine longitudinalnih valova koristili su imerzijsku sondu nazivne frekvencije 3,5

MHz, dok su za potrebe određivanja transverzalne brzine koristili specijalnu beskontaktnu EMAT (Electromagnetic Acoustic Transducer) sondu.

Međutim nitko nije procijenio iznos mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja brzine ultrazvuka u materijalu te kolika je pogreška u rezultatima mjerenja ultrazvučne brzine ako materijali etalona i mjerene komponente nisu približno jednake strukture.

Utjecaj hrapavosti odzivne površine na točnost mjerenja ultrazvukom u svom radu eksperimentalno je istražio i teorijski opisao Gmyrin [21]. Naime, on je promatrao kako hrapavost odzivne površine utječe na amplitudu reflektiranog ultrazvučnog impulsa. U svom daljnjem istraživanju eksperimentalno je proveo usporedbu dviju metoda ultrazvučnog mjerenja debljine [22]. Prva ultrazvučna metoda mjeri ultrazvučni put pomoću signala prvog odjeka od zadnje stijenke, dok druga mjeri isti put između signala dobivenih od dvaju susjednih odjeka od zadnje stijenke materijala komponente. Rezultati eksperimentalnog istraživanja pokazuju sličnost pogreške nastale uslijed hrapavosti odzivne površine neovisno o odabiru navedenih ultrazvučnih metoda mjerenja.

Barkhatov [23] je razvio metodu za proračun ultrazvučnog polja ravne sonde za slučaj odašiljanja transverzalnih odnosno longitudinalnih valova. U tom smislu prikazao je ovisnost svih relevantnih veličina za matematičku analizu ultrazvučnog polja te je razvio računalni program koji na temelju utvrđenog matematičkog modela opisuje dobivene rezultate. Naime, program simulira rad određene vrste sonde koje odašilju određenu vrstu valova te za istu daje prikaz geometrije ultrazvučnog polja. Geometrija ultrazvučnog polja utječe na amplitudni odziv s različitih udaljenosti što je usko povezano s principom UTM-a. A kako se mijenja amplitudni odziv iz ultrazvučnog polja s obzirom na odabrane mjerne parametre uređaja, prikazali su u svom radu Mihaljević i suradnici [24].

Primjenom ultrazvučne tehnike odjeka, gdje se mjeri amplituda reflektiranog impulsa od zadnje stijenke ili od nepravilnosti u materijalu, značajne se promjene događaju s ultrazvučnim impulsom za vrijeme prolaska kroz kontaktno sredstvo. Utjecaje kontaktnog sredstva na mjerenje visine amplitude proučavali su Budenkov i suradnici [25] te su prikazali proračun propusnosti kontaktnog sredstva kao funkciju njegove debljine. Proračunali su i propusnost kontaktnog sredstva dovodeći u vezu njegovu debljinu s materijalom zaštitne folije sonde, i to i za ravnu i za kutnu sondu.



Poznato je da temperatura mjerene komponente utječe na ultrazvučno mjerenje debljine odnosno s promjenom temperature dolazi i do promjene brzine ultrazvuka u materijalu. Ovom problematikom bavili su se Burrows i suradnici [26] te su u svom radu prikazali kako se mijenja brzina ultrazvuka u materijalu u ovisnosti o promjeni temperature mjerene komponente. Istom problematikom određivanja utjecaja temperature na brzinu proleta ultrazvučnog impulsa kroz materijal bavili su se i Periyannan i suradnici [27].

### **1.3 Cilj i hipoteze istraživanja**

Cilj rada jest istraživanje i karakterizacija pojedinih utjecajnih faktora odnosno pojedinih mjernih parametara i značajki elemenata mjernog sustava na rezultate ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke, kvantificiranje njihovih mogućih interakcija te utvrđivanje razina značajnosti. Teorijskim razmatranjem i provedbom eksperimenta analizirat će se značajnost utjecaja faktora na preciznost i točnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke. Time će se ostvariti osnovni preduvjet za određivanje i procjenu mjerne nesigurnosti te će prema zahtjevima norme [4] prikaz mjernog rezultata biti s pripadajućom mjernom nesigurnošću. Temeljem tako iskazanog mjernog rezultata stvorit će se nužan preduvjet za sudjelovanje laboratorija u usporedbenim mjerenjima (*Proficiency Testing*).

#### Hipoteze doktorske disertacije glase:

1. Razvojem matematičkog modela i simulacijom procesa ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke moguće je utvrditi utjecajne parametre na točnost i preciznost rezultata mjerenja.
2. Teorijskom i eksperimentalnom analizom utjecajnih parametara na proces ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke moguće je kvantificirati te potom i smanjiti njihov utjecaj da bi se smanjila mjerna nesigurnost rezultata mjerenja.

## 1.4 Metodologija i plan istraživanja

Za uspješnu primjenu UTM-a potrebno je dobro poznavati ograničenja pojedinih elemenata ultrazvučnog mjernog sustava. U užem smislu to su:

- uređaj
- sonda
- etalon
- kontaktno sredstvo.

Za svaki od elemenata ultrazvučnog sustava svojstven je niz parametara koji mogu na određeni način utjecati na varijabilnost rezultata mjerenja.

S tim ciljem u teorijskom dijelu rada prikazane su osnovne značajke ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke te su objašnjene osnovne karakteristike i specifičnosti elemenata koji sačinjavaju sustav ultrazvučnog mjerenja. Eksperimentalnom analizom predložen je model mjerne nesigurnosti rezultata, a u tom smislu istraženo je i eventualno postojanje i značajnost interakcija parametara pojedinih faktora. Svaki od ustanovljenih utjecajnih faktora teorijski je razrađen što predstavlja temelj za minimiziranje njegovog utjecaja na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine.

U cilju procjenjivanja mjerne nesigurnosti rezultata kroz eksperimentalnu analizu i adekvatno postavljeni plan pokusa osigurani su podaci za kvantifikaciju utjecajnih faktora na rezultat dobiven postupkom UTM-a. Pomoću dobivenih rezultata eksperimenta za pojedini je faktor određena značajnost njegova utjecaja na mjerni rezultat UTM-a kao i interakcija te je predloženo postupanje radi smanjivanja značajnih utjecaja na rezultat mjerenja. Preliminarno je istraživana značajnost utjecaja sljedećih elemenata mjernog sustava: kontaktno sredstvo, uređaj, sonda i materijal mjerene komponente.

Kako se svaki od navedenih faktora sastoji od niza svojstvenih parametara koji se odabiru i/ili postavljaju prije svakog ultrazvučnog mjerenja, preliminarnim je istraživanjem ustanovljena značajnost svojstvenih parametara [24]. U tom smislu izdvojeni utjecajni parametri kontaktnog sredstva jesu njegova *debljina* i *vrsta* (gel, ulje, voda); parametri uređaja su *napon pobudnog impulsa* i *prigušni otpor* u krugu oscilatora; dok su parametri sonde njezina *nazivna frekvencija* i pripadajuća *širina frekvencijskog spektra*, odnosno oblik ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni.

Za odabrane parametre navedenih faktora osmišljen je plan pokusa i eksperimentalna provedba laboratorijskih mjerenja. Da bi se odredila utjecajnost parametara kontaktnog sredstva kao i parametara sonde osmišljena je naprava za prihvatanje sonde pomoću koje je moguće provoditi ultrazvučno mjerenje debljine na različitim razinama debljine kontaktnog sredstva. Mjerenja su se ponavljala 5 puta te se postavljeni plan pokusa sastoji od 20 stanja pokusa za sva tri kontaktna sredstva. Sonde koje se koriste na dvije su razine *nazivne frekvencije*, 4 MHz i 5 MHz, te na dvije razine *širine frekvencijskog spektra*, 25% i 70%. Nadalje, *debljina kontaktnog sredstva* ukupno je na 5 razina, odnosno mjerenja su se provodila na razini 10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$ , 40  $\mu\text{m}$  i 50  $\mu\text{m}$ . S obzirom na ulazne parametre i njihove odabrane razine, primijenjen je generalni faktorski plan pokusa s različitim brojem razina.

*Napon pobudnog impulsa*, kao jedan od potencijalno utjecajnih parametara uređaja, svojom promjenom utječe na vrijeme trajanja i vrijeme porasta pobudnog impulsa, odnosno na oblik ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni. *Napon pobudnog impulsa* kao parametar uređaja na dvije je razine čije su vrijednosti određene pomoću digitalnog osciloskopa. Promjenom vrijednosti parametra *prigušnog otpora* dolazi do promjene u amplitudnom odzivu ultrazvučnog impulsa te da bi se kvantificirala utjecajnost uređaja na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke spomenuti parametar varira na dvije razine. Postavljeni plan pokusa sastoji se od dvaju parametara uređaja i dvaju parametara sonde te su svi navedeni parametri na dvije razine. Mjerenja su se ponavljala 5 puta što je rezultiralo s 16 stanja pokusa te je primijenjen faktorski plan pokusa  $2^4$ .

Kroz osmišljene planove pokusa, a da bi se kvantificirala utjecajnost faktora UTM sustava i njihovih parametara na rezultat dobiven ultrazvučnim mjerenjem debljine, provedena je analiza varijance (ANOVA) čime se odredila značajnost komponenti modela. Nadalje, matematički model (odzivna funkcija) oblikovan je kroz regresijsku analizu. Pri izvođenju eksperimenta primijenjen je princip slučajnog redoslijeda izvođenja da bi se otklonio utjecaj nekontroliranih poremećaja uvjeta mjerenja.

Mjerenja za procjenu razine utjecajnosti faktora provedena su mjerenjem odziva (lokalne debljine) na materijalu radnog etalona br. 1 čija je mikrostruktura i debljina određena normom EN 12223 [28]. Radi smanjivanja odstupanja referentne vrijednosti debljine etalona od nazivne, dimenzija odabranog mjernog mjesta, određena je na mjernoj granitnoj ploči digitalnim visinomjerom čija je rezolucija 0,0001 mm u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina na Sveučilištu u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje.

Utjecaj materijala, odnosno razlike u ultrazvučnoj brzini između etalona za podešavanje (radni etalon br. 1) i materijala u kojem su se provodila mjerenja, implementiran je kao korekcija u matematičkom modelu. Brzina ultrazvuka u materijalu važan je akustički parametar koji ne ovisi o nazivnoj frekvenciji odabrane ultrazvučne sonde. Međutim, podešavanjem vrijednosti parametra brzine na ultrazvučnom uređaju prije početka svakog mjerenja moguće je unijeti određenu pogrešku u vidu odstupanja postavljene vrijednosti brzine od stvarne vrijednosti brzine prostiranja ultrazvuka u materijalu. Kako bi se umanjila pogreška uslijed razlike u postavljenoj brzini na uređaju i stvarne brzine u materijalu mjerene komponente, pomoću digitalnog osciloskopa određena je brzina ultrazvuka u materijalu sukladno zahtjevima norme [28] uz pripadajuću procijenjenu pogrešku mjerenja.

Razvojem matematičkog modela stvoren je osnovni preduvjet za procjenu mjerne nesigurnosti rezultata za odabrani sustav ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke. S tim ciljem primijenjena je Monte Carlo simulacija (MCS) [29], [30] i [31] koja pomoću generiranja slučajnih brojeva i odgovarajućih distribucija vjerojatnosti za svaku slučajnu varijablu generira niz kombinacija vrijednosti slučajnih varijabli za koje se izračuna funkcija graničnog stanja simulacije [32], [33], [34] i [35].

Vrijednost Monte Carlo simulacije leži u tome što kao rezultat izračunava sve moguće ishode, ali i vjerojatnosti pojavljivanja svakog od tih ishoda. Pomoću navedene metode moguće je riješiti probleme koji se zasnivaju na generiranju velikog broja slučajnih brojeva te je moguće provesti analizu osjetljivosti kako bi se identificirali faktori koji najviše utječu na ishod postavljenog modela.

Za potrebe provođenja eksperimenata koristila se raspoloživa oprema Laboratorija za nerazorna ispitivanja na Sveučilištu u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, te se vodilo računa o svim specifičnostima koja su svojstvena za ultrazvučno mjerenje debljine. Time su provedena laboratorijska mjerenja, kao i analiza utjecaja pojedinih mjernih parametara i elemenata ultrazvučnog mjernog sustava na varijabilnost rezultata, primjenjiva i u širem kontekstu [36] i [37].

## **1.5 Očekivani znanstveni doprinos**

Očekivani znanstveni doprinosi ove doktorske disertacije su sljedeći:

1. Karakterizacija pojedinih mjernih parametara i značajki elemenata mjernog sustava te njihov utjecaj na rezultate ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke.
2. Kvantificiranje utjecaja pojedinih faktora te mogućih interakcija.
3. Procjena mjerne nesigurnosti odabranog sustava za ultrazvučno mjerenje debljine stijenke metodom Monte Carlo simulacija (MCS).

## **2. ULTRAZVUČNO MJERENJE DEBLJINE STIJENKE**

S ubrzanim razvojem tehnologije, uz sve veća tehnološka saznanja, raste i potreba za razvojem kontrole kvalitete komponenti i postrojenja da bi se potvrdili predodređeni tehnički zahtjevi. Brojne su metode nerazornih ispitivanja koje daju kvantitativnu informaciju o stanju komponente pri čemu neće doći do promjene uporabnih svojstva u daljnjem eksploatacijskom radu. Ultrazvučno mjerenje debljine stijenke kao jedna od nerazornih metoda ispitivanja često se koristi radi procjene integriteta pojedinih komponenti i čitavih konstrukcija za pouzdan rad u uvjetima eksploatacije.

Uspješnost ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke ovisi o specifičnim karakteristikama odabranog ultrazvučnog mjernog sustava koje je potrebno uskladiti i adekvatno podesiti. Kriterij izbora ultrazvučnog mjernog sustava kao i sama provedba mjerenja u velikoj mjeri ovisi o osobi koja ga provodi. Naime, svojim iskustvom i stečenim vještinama osoba koja provodi ultrazvučna mjerenja debljine može značajno utjecati na vjerodostojnost iskazanog rezultata.

Za pouzdanu primjenu UTM-a potrebno je dobro poznavati ograničenja elemenata mjernog sustava. U užem smislu to su uređaj, sonda, etalon i kontaktno sredstvo. Svakome elementu ultrazvučnog sustava svojstven je niz parametara koji mogu na određeni način utjecati na varijabilnost rezultata mjerenja. Sustavnim pristupom analizi utjecajnih faktora na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine može se značajno podići razina pouzdanosti u dobiveni rezultat mjerenja.

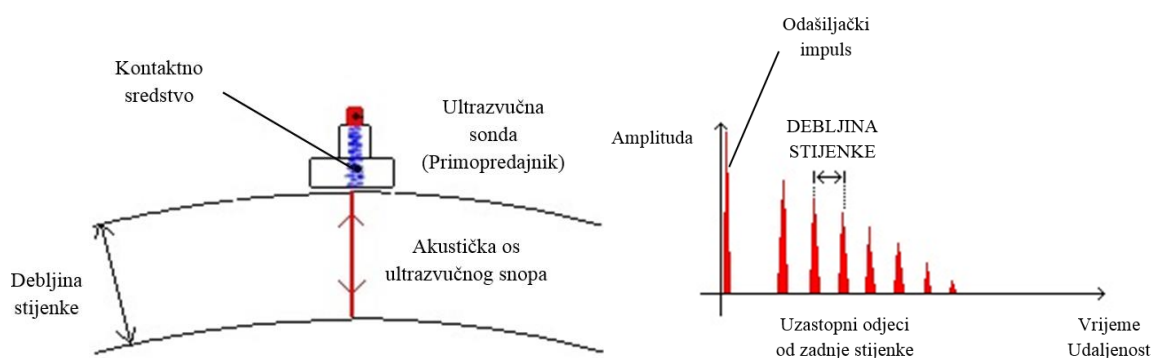
### **2.1 Osnove ultrazvučnog mjerenja debljine**

Ultrazvučno mjerenje debljine stijenke često se primjenjuje za osiguravanje kvalitete konstrukcija i postrojenja pri čemu neće nastati oštećenja mjerene komponente, te mogu nastaviti daljnji eksploatacijski rad. Podjednako je zastupljena u pojedinim fazama izgradnje konstrukcija kao i tijekom njezina životnog vijeka (slika 1).



**Slika 1.** Primjena ultrazvučnog mjerenja debljine [38], [39] i [40]

Osnovni princip ultrazvučnog mjerenja debljine bazira se na tehnici odjeka (*PE, Pulse-Echo*) ultrazvučnog impulsa od zadnje stijenke mjerene komponente (slika 2). Longitudinalni ultrazvučni valovi koje emitira primopredajnik (ultrazvučna sonda) odašilju se kroz materijal mjerene komponente. Nailaskom ultrazvuka na granicu dvaju sredstava općenito će doći do pojave refleksije i transmisije ultrazvučnih valova. Pojave refleksije i transmisije nastaju uslijed različitih akustičkih impedancija između materijala kroz koje se ultrazvučni valovi prostiru. Prema tome, nailaskom ultrazvuka na granicu dvaju sredstava dio ultrazvučnih valova će se reflektirati, dok će preostali dio ultrazvučnih valova biti transmitiran u drugo sredstvo. Mjerenjem vremena proleta reflektiranih valova uz poznatu brzinu longitudinalnih valova može se jednostavno odrediti debljina mjerene komponente za određeni materijal.



**Slika 2.** Princip ultrazvučne tehnike odjeka [41]

## 2.2 Elementi ultrazvučnog mjernog sustava

Općenito možemo reći kako je mjerna oprema ključna za postizanje točnih i preciznih rezultata i kao takva vrlo značajna za pouzdanost dobivenog rezultata u postupku mjerenja. Za potrebe provođenja ultrazvučnog mjerenja debljine oprema se sastoji od nekoliko zasebnih elemenata koji se odabiru ovisno o zahtjevu ultrazvučnog mjernog postupka.

Odabirom odgovarajućih elemenata ultrazvučnog mjernog sustava i njihovim adekvatnim podešavanjem može se znatno utjecati na dobiveni rezultat mjerenja. Odabir elemenata ultrazvučnog mjernog sustava zavisi o komponenti koju mjerimo, vrsti i svojstvima materijala mjerene komponente, nazivnoj debljini mjerene komponente, stanju kontaktne i odzivne površine mjerene komponente te uvjetima provođenja ultrazvučnog mjernog postupka.

Različita je značajnost utjecaja i predznak djelovanja pojedinih elemenata ultrazvučnog mjernog sustava. Rasponi unutar kojih se kreće varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine s obzirom na promjenu parametara osnovnih elemenata ultrazvučnog mjernog sustava nisu jasno definirani ni kvantificirani.

Osnovni elementi sustava za ultrazvučno mjerenje debljine jesu:

- uređaj
- sonda
- kontaktno sredstvo
- etalon.

Za uspješnu primjenu ultrazvučne tehnike odjeka potrebno je poznavati mogućnosti i ograničenja svakog od odabranog elementa ultrazvučnog mjernog sustava. U tom smislu, parametri pojedinog elementa moraju biti odabrani u skladu s mjerenom komponentom kako bi se ostvarilo njihovo sinergijsko djelovanje na konačan rezultat ultrazvučnog mjerenja. Nadalje, odabrani elementi ultrazvučnog sustava za mjerenje debljine moraju osigurati određenu vjerodostojnost mjernog rezultata što je moguće odrediti ponovljenim mjerenjima u uvjetima ponovljivosti i obnovljivosti [2]. U skladu s time ni jedan od elemenata ultrazvučnog mjernog sustava ne smije imati značajan utjecaj na dobiveni rezultat mjerenja.



Odgovarajuća priprema ultrazvučnog mjernog sustava važan je preduvjet za ostvarivanje visoke razine povjerenja u dobiveni rezultat mjerenja. U tom smislu priprema ultrazvučnog mjernog sustava koja se provodi prije svakog početka mjerenja sastoji se od:

- provjere elemenata mjernog sustava
- podešavanja parametara
- podešavanje mjernog područja.

Normama EN ISO 16810 [42] i EN ISO 16811 [43] općenito je definirano kako se u postupku ultrazvučnog ispitivanja odabiru osnovni elementi ultrazvučnog sustava te kako se određeni parametri elemenata podešavaju i provjeravaju prije početka ispitivanja. Definiran je i način provjeravanja postavki ultrazvučnog sustava tijekom ispitivanja i po njegovom završetku. Nadalje, naznačeno je pod kojim je sve uvjetima potrebno provoditi ponovno podešavanje čitavog ultrazvučnog sustava.

Ultrazvučno mjerenje debljine stijenke u smislu podešavanja i provjere ultrazvučnog mjernog sustava podliježe jednakim uvjetima kao i ultrazvučno ispitivanje što je definirano normom EN 14127 [9]. Ono što se ističe kao problem u vjerodostojnosti dobivenog rezultata mjerenja jest pogreška uzrokovana uslijed periodičkog mjerenja iste mjerene komponente. Naime, poznato je kako se ultrazvučno mjerenje debljine stijenke, kao dio osiguravanja kvalitete, provodi periodično za provjeru integriteta komponente tijekom životnog vijeka u točno definiranim vremenskim intervalima.

Problematika vezana uz točno definirane principe i načine podešavanja ultrazvučnog mjernog sustava, ako se mjerenja iste komponente provodi u određenom vremenskom razmaku, nije definirana postupcima ni normama tako da je značajno narušeno povjerenje u dobiveni rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine. Da bi rezultati bili usporedivi, potrebno je točno definirati parametre ultrazvučnog mjernog sustava.

### ***2.2.1 Uredaj za ultrazvučno mjerenje debljine stijenke***

Ultrazvučno mjerenje debljine stijenke mogu provoditi samo one osobe koje su prošle postupak kvalifikacije i certifikacije kompetentnosti za provođenje aktivnosti u području osiguravanja i kontrole kvalitete prema zahtjevima norme EN ISO 9712 [44]. No za kvalitetno provođenje ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke, osim poznavanja fizikalnih i tehničkih načela ultrazvučne metode, potrebno je poznavati postavljeni mjerni sustav u cijelosti i iz

neposrednog iskustva. Za iskustvo je potrebno dugogodišnje mjerenje određenim mjernim sustavom čime se stječe cjelokupni dojam o pouzdanosti mjerenja i uzrocima varijabilnosti dobivenog rezultata. U tom smislu mjeritelj mora imati odgovarajuća znanja i prikladne vještine kako bi temeljem stečenog iskustva adekvatno postavio čitavi ultrazvučni mjerni sustav.

Normom EN 14127 [9] definirani su osnovni principi ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke u pogledu odabira ultrazvučnog mjernog sustava. Odabir ultrazvučnog mjernog sustava temelji se na specifikacijama komponente koju mjerimo. U tom smislu odabir se bazira na vrsti materijala mjerene komponente, dimenziji i konfiguraciji mjerene komponente, a ovisi i o uvjetima na kontaktnoj i odzivnoj površini.

Uređaji za ultrazvučno mjerenje debljine primjenjuju se u raznim industrijskim granama. Odabir ultrazvučnog uređaja prije svega ovisi o željenoj točnosti i preciznosti mjernog rezultata s obzirom na zahtijevanu pouzdanost eksploatacijskog rada mjerene komponente odnosno čitave konstrukcije ili pak postrojenja.

S jedne strane danas na tržištu postoje ultrazvučni uređaji za mjerenje debljine koji se sastoje od niza podesivih parametara čije se vrijednosti odabiru ovisno o zahtjevima i cilju praćenja kvalitete. Postoje i uređaji koji prikazuju numeričku vrijednost izmjerene lokalne debljine mjernog mjesta, bez mogućnosti podešavanja parametara na ultrazvučnom mjernom uređaju. Uređaji koji nemaju mogućnost podešavanja parametara često nemaju ni mogućnost zamjene ultrazvučne sonde, već je ona sastavni dio uređaja. Nadalje, podešavanje uređaja koji imaju numerički prikaz izmjerene vrijednosti često se provodi na radnom etalonu koji je također sastavni dio uređaja. Dimenzija radnog etalona, kao i ultrazvučna brzina u materijalu radnog etalona, propisana je od proizvođača. U užem smislu, parametre ultrazvučnog mjernog uređaja možemo sistematizirati obzirom na:

- oblik pobudnog impulsa
- oblik ultrazvučnog impulsa.

Tehničke specifikacije uređaja koje propisuju proizvođači ne navode kako određeni parametri uređaja utječu na oblik pobudnog impulsa i oblik ultrazvučnog impulsa. Nadalje, nigdje se na navodi točan raspon varijabilnosti rezultata dobivenog ultrazvučnim mjerenjem debljine uslijed promjene vrijednosti parametara na uređaju.

Sa stajališta ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke gdje je potrebno osigurati visoko povjerenje u dobiveni rezultat ultrazvučnog mjerenja, uređaji s podesivim parametrima bit će zasigurno pouzdaniji i precizniji. Time raste značaj ultrazvučnih mjernih uređaja s podesivim parametrima u pogledu procjene mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja. Stoga će predmet ovog istraživanja biti procjena mjerene nesigurnosti rezultata za odabrani ultrazvučni mjerni sustav sa širokim spektrom podesivih parametara na ultrazvučnom mjernom uređaju te će se provoditi i istraživanja zamjenjivih parametara ultrazvučne sonde. Prema normi EN 14127 [9] ultrazvučno mjerenja debljine općenito je moguće provesti korištenjem sljedećih tipova uređaja:

- a) Ultrazvučni uređaj za mjerenje debljine s numeričkim prikazom mjerene vrijednosti (slika 3)



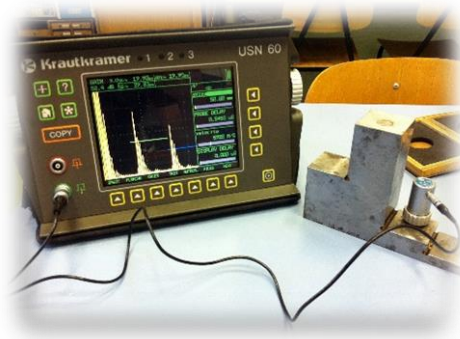
**Slika 3.** *Ultrazvučni uređaj za mjerenje debljine s numeričkim prikazom [45]*

- b) Ultrazvučni uređaj za mjerenje debljine s numeričkim prikazom mjerene vrijednosti i pripadajućim A prikazom (slika 4)



**Slika 4.** *Ultrazvučni uređaj za mjerenje debljine s numeričkim i A prikazom*

- c) Ultrazvučni uređaj čija je primarna namjena detekcija nepravilnosti u ispitnom uzorku, a koji ujedno sadrži i numerički prikaz izmjerene debljine komponente (slika 5).



**Slika 5.** Ultrazvučni uređaj za detekciju nepravilnosti u ispitnom uzorku

### 2.2.1.1 Princip ultrazvučnog mjerenja debljine

Ultrazvučno mjerenje debljine tehnikom odjeka zasniva se na principu mjerenja vremena proleta koje je potrebno da kratki ultrazvučni impuls generiran od strane primopredajnika (sonde) prijeđe kroz čitavu debljinu mjerne komponente jednom, dva puta ili više puta.

Teorijska podloga za utvrđivanje debljine stijenke ultrazvučnom tehnikom odjeka temelji se na izrazu:

$$d = \frac{v_g \cdot t_{\text{TOF}}}{n} \quad (2-1)$$

pri čemu je:

$d$  ... debljina mjerene komponente izmjerena ultrazvukom, mm

$v_g$  ... grupna brzina ultrazvuka u materijalu mjerene komponente, m/s

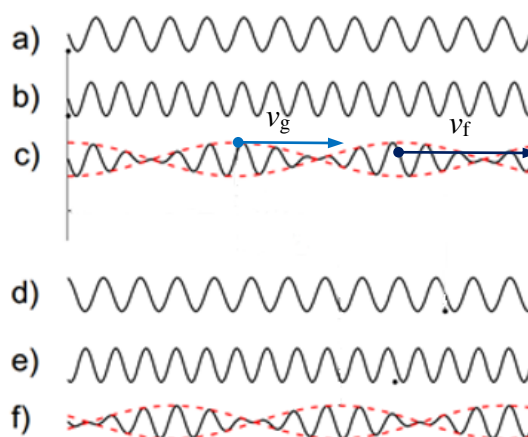
$t_{\text{TOF}}$  ... vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa od primopredajnika do zadnje stijenke mjerne komponente, s

$n$  ... broj prolaza ultrazvučnog impulsa kroz mjernu komponentu

2.2.1.2 Fazna i grupna brzina ultrazvuka

Brzina propagiranja ultrazvučnog impulsa svojstvena je svakom materijalu i kao takva ne ovisi o odabranoj nazivnoj frekvenciji ultrazvučne sonde. Podešavanje ultrazvučnog mjernog sustava u osnovi se bazira na podešavanju grupne brzine propagiranja ultrazvučnog impulsa u materijalu. Grupna brzina određuje se mjerenjem vremena proleta kratkog ultrazvučnog impulsa od trenutka odašiljanja do trenutka prijema reflektiranog signala od zadnje stijenke mjerene komponente uz uvjet da poznajemo debljinu mjerene komponente.

Ultrazvučni impulsi sastoje se od skupa monokromatskih valova čijom superpozicijom dobivamo ultrazvučni impuls. Svaki pojedinačni val propagira vlastitom brzinom koju nazivamo faznom brzinom, dok se impuls giba grupnom brzinom (slika 6).



**Slika 6.** Prikaz fazne i grupne brzine

Na slici 6a) i 6b) prikazana su dva sinusoidalna putujuća vala različitih frekvencija u trenutku  $t=0$ . Na slici 6c) prikazana je superpozicija navedenih valova. Slike 6d) i 6e) predstavljaju ista dva sinusoidalna putujuća vala u nekom kasnijem trenutku  $t > 0$ , te možemo uočiti kako dva putujuća vala imaju različite fazne brzine. Pomak faze razmjernan je faznoj brzini  $v_f$ . Na slici 6f) prikazana je superpozicija valova u trenutku  $t > 0$ . Grupa se pomaknula puno manje nego faza pojedinih valova. Grupna brzina,  $v_g$ , razmjerna je pomaku maksimuma envelope .

**Fazna brzina.** Oscilatorni fenomen koji se u vremenu širi sredstvom noseći impuls i energiju nazivamo putujućim valovima. Putujućim valovima šire se u otvorenim sustavima koji nemaju granice. Da bi putujućim valovima mogao započeti svoje propagiranje kroz otvoreni sustav potreban je izvor koji će generirati oscilacije. Ako izvor oscilira harmonijskim gibanjem nastat

će harmonijski putujući val. Pretpostavimo jednodimenzionalni sustav koji se sastoji od kontinuirane homogene žice rastegnute od  $z = 0$  do  $z = \infty$ . U točki  $z = 0$  žica je pričvršćena na izvor prisilnih oscilacija koji odašilje putujući val duž žice pri čemu vrijedi izraz za pomak [46]:

$$D(t) = A \cos \omega t \quad (2-2)$$

pri čemu je:

$A$  ... amplituda putujućeg vala, m

$\omega$  ... kutna frekvencija,  $s^{-1}$

Zanima nas pomak žice od ravnotežnog položaja na bilo kojoj udaljenosti duž osi  $z$ . Budući da je žica povezana s izvorom prisilnih oscilacija u točki  $z = 0$  vrijedi da je njezin pomak  $\psi(0,t)$  jednak pomaku  $D(t)$ , te pišemo:

$$\psi(0,t) = D(t) = A \cos \omega t \quad (2-3)$$

Poznato je da putujući valovi propagiraju konstantnom brzinom sve dok ne dođe do promjene svojstava sredstva. Promatrajući harmonijske putujuće valove brzinu propagiranja nazivamo faznom brzinom  $v_f$ . Gibanje putujućeg vala na poziciji  $z$  u trenutku  $t$  jednako je gibanju dijela na poziciji  $z = 0$  u nekom ranijem trenutku  $t'$  pri čemu  $t'$  prethodi trenutku  $t$  u kojem se val nalazi na udaljenosti  $z$  sa brzinom  $v_f$ :

$$t' = t - \frac{z}{v_f} \quad (2-4)$$

Oblik sinusoidalnog putujućeg vala sad možemo zapisati kao:

$$\psi(z,t) = \psi(0,t')$$

$$\psi(z,t) = A \cos \omega t'$$

$$\psi(z,t) = A \cos \omega \left( t - \frac{z}{v_f} \right)$$

$$\psi(z,t) = A \cos \left( \omega t - \frac{\omega z}{v_f} \right) \quad (2-5)$$

Iz izraza (2–5) možemo zaključiti kako je za nepromijenjeni  $z$ , pomak  $\psi(z,t)$  harmonijsko osciliranje u vremenu te je također za nepromijenjeno vrijeme  $t$  pomak  $\psi(z,t)$  sinusoidalno osciliranje u prostoru. Obje tvrdnje vrijede za sinusoidalni stojni val oblika (uz konstantnu  $\alpha$ ):

$$\psi(z,t) = B \cos \omega t \cos(\alpha - kz) \quad (2-6)$$

pri čemu je:

$B$  ... amplituda stojnog vala, m

$k$  ... valni vektor

Za nepromijenjeno vrijeme, ovisnost pomaka putujućeg vala dana je jednadžbom (2–5) te ima isti oblik kao i stojni val opisan jednadžbom (2–6). Ako bi se putujući val opisao jednadžbom:

$$\psi(z,t) = A \cos(\omega t - kz) \quad (2-7)$$

tada možemo koristiti isti koncept valnog vektora  $k$  [46] za sinusoidalne putujuće valove u nepromijenjenom vremenu kao što je slučaj i za stojne valove:

$$k = \frac{\omega}{v_f} \quad (2-8)$$

odnosno, fazna brzina dana je izrazom:

$$v_f = \frac{\omega}{k} \quad (2-9)$$

ili budući da je  $\omega = 2\pi\nu$  i  $k = 2\pi/\lambda$  možemo pisati:

$$v_f = \lambda\nu \quad (2-10)$$

odnosno, budući da je  $\nu = \lambda/T$

$$v_f = \frac{\lambda}{T} \quad (2-11)$$

pri čemu je:

$T$  ... period, s

**Grupna brzina.** Zamislimo sredstvo na čijem početku imamo dvije pogonske sile koje titraju s različitim frekvencijama, ali istim amplitudama. Odmah u izvoru imamo tipičnu situaciju udara:

$$\psi(0,t) = \psi(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) = 2\psi \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \cos \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \quad (2-12)$$

Iz jednadžbe (2-12) vidimo da drugi kosinus titra usrednjenom frekvencijom, dok sve ostalo predstavlja modulacijski faktor čime izraz poprima sljedeći oblik:

$$\psi(0,t) = \psi_{\text{mod}}(t) \cos \omega_{\text{srednje}} \quad (2-13)$$

Promatrat ćemo slučaj u kojem titranja različitim frekvencijama imaju preko disperzijske relacije različitu brzinu širenja pojedinih frekvencija, te možemo zapisati da je:

$$\psi(z,t) = \psi \left[ \cos\left(\omega_1 t - \frac{\omega_1}{v_1} z\right) + \cos\left(\omega_2 t - \frac{\omega_2}{v_2} z\right) \right] \quad (2-14)$$

U izrazu (2-14) vidimo da u točki  $z$  od izvora dolaze titranja dviju komponenti s dvije različite faze, te ga možemo zapisati i kao:

$$\psi(z,t) = 2\psi \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t - \frac{k_1 - k_2}{2} z\right) \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t - \frac{k_1 + k_2}{2} z\right) \quad (2-15)$$

odnosno:

$$\psi(z,t) = 2\psi \cos(\omega_{\text{mod}} t - k_{\text{mod}} z) \cos(\omega_{\text{srednje}} t - k_{\text{srednje}} z) \quad (2-16)$$

Iz izraza (2-16) uočljivo je da sredstvom propagira val nosač koji titra usrednjenom frekvencijom i usrednjenim valnim brojem dok njihov omjer predstavlja brzinu širenja brzih oscilacija:

$$v_{\text{srednje}} = \frac{\omega_{\text{srednje}}}{k_{\text{srednje}}} \quad (2-17)$$



Svakako se može zaključiti da moduliranje vala nosača putuje međutim drugom brzinom, koja se naziva grupna brzina:

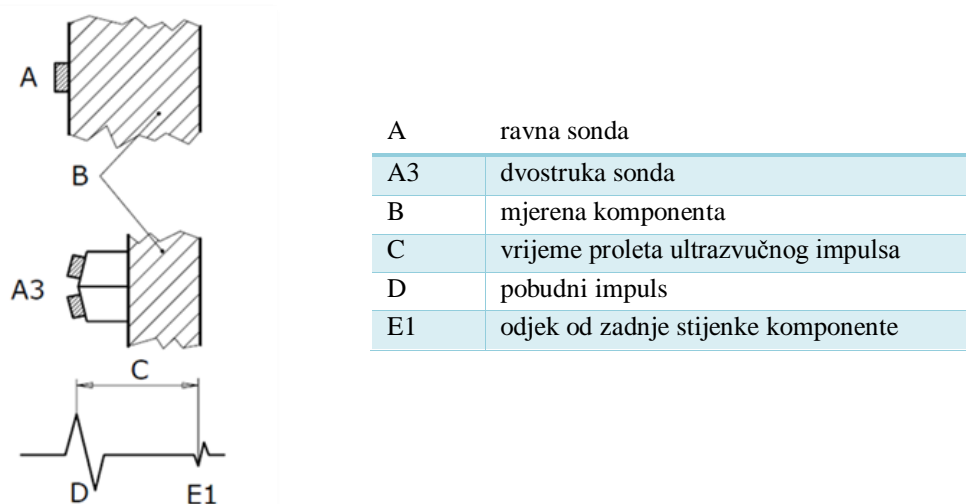
$$v_g = \frac{\omega_{\text{mod}}}{k_{\text{mod}}} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} \quad (2-18)$$

### 2.2.1.3 Osnovni principi ultrazvučnog mjerenja debljine

Uređaji za ultrazvučno mjerenje debljine stijenke tehnikom odjeka mogu koristiti razne načine mjerenja debljine. Ultrazvučno mjerenje debljine u osnovi se bazira na principu mjerenja vremena proleta ultrazvučnog impulsa odaslanog iz sonde u materijal komponente koju mjerimo pod pretpostavkom da je brzina ultrazvuka u materijalu konstantna.

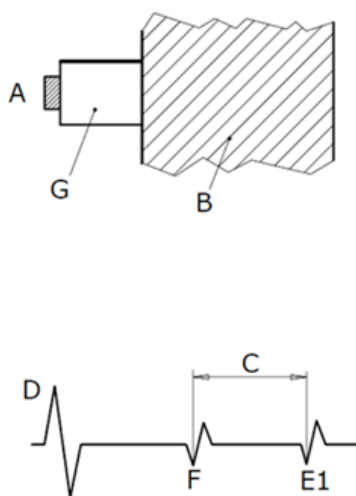
Normom su definirana 4 osnovna principa mjerenja debljine ultrazvučnom tehnikom odjeka koji ujedno predstavljaju i modove mjerenja [9]:

Mod 1. Mjerenje vremena proleta od pobudnog impulsa do prvog odjeka od zadnje stijenke mjerene komponente, umanjeno za korekciju na nulu (*zero correction*) koju je potrebno uzeti u obzir uslijed debljine zaštite pretvornika i kontaktnog sredstva (slika 7).



**Slika 7.** Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 1 [9]

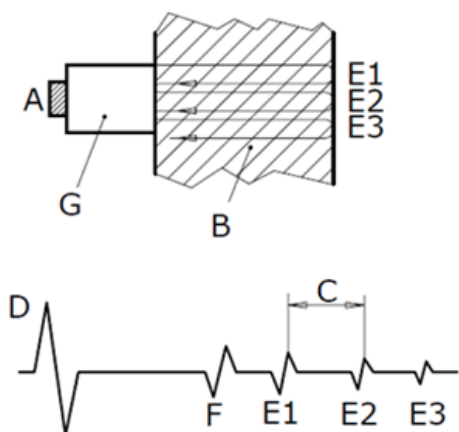
Mod 2. Mjerenje vremena proleta ultrazvučnog impulsa od kraja bloka za kašnjenje do kašnjenje do prvog odjeka od zadnje stijenke mjerene komponente (slika 8).



|    |   |
|----|---|
| A  | ravna sonda   |
| G  | blok za kašnjenje   |
| B  | mjerena komponenta  |
| C  | vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa                          |
| D  | pobudni impuls  |
| F  | prvi odjek ultrazvučnog impulsa od zadnje stijenke komponente |
| E1 | odjek od zadnje stijenke komponente                           |

**Slika 8.** Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 2 [9]

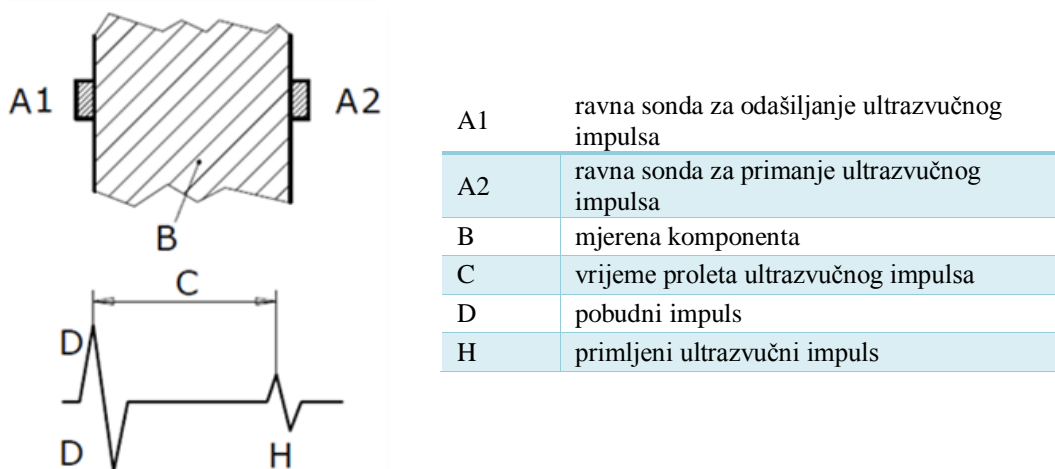
Mod 3. Mjerenje vremena proleta ultrazvučnog impulsa između dvaju susjednih odjeka od zadnje stijenke mjerene komponente (slika 9). Pri odabiru moda 3 kao princip mjerenja moguće je koristiti i blok za kašnjenje.



|       |   |
|-------|---|
| A     | ravna sonda   |
| G     | blok za kašnjenje   |
| B     | mjerena komponenta  |
| C     | vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa                          |
| D     | pobudni impuls  |
| F     | prvi odjek ultrazvučnog impulsa od zadnje stijenke komponente |
| E1-E3 | odjeci od zadnje stijenke komponente                          |

**Slika 9.** Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 3 [9]

Mod 4. Mjerenje vremena proleta impulsa od predajnika do prijemnika koji je u kontaktu sa zadnjom stijenkom (slika 10).



**Slika 10.** Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 4 [9]

Odabir tipa ultrazvučnog uređaja za mjerenje debljine stijenke kao i odabir moda mjerenja ovisi o svrsi i željenom cilju provođenja kontrole debljine stijenke. Nadalje, odabir vrste ultrazvučnog uređaja i moda mjerenja ovisi o karakteristikama mjerne komponente koja može biti ograničavajući faktor pri njihovom odabiru.

### 2.2.2 Sonde za ultrazvučno mjerenje debljine

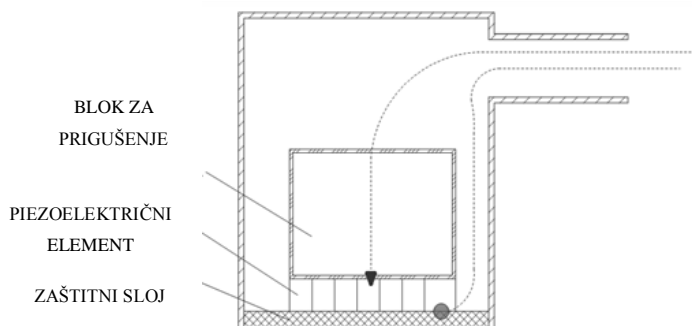
Ključan element svakog sustava za provedbu ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke je ultrazvučna sonda odnosno njezine specifične karakteristike. Izbor ultrazvučne sonde za mjerenje debljine stijenke ovisi o vrsti opreme s kojom se provode mjerenja, debljini i konfiguraciji komponente koja se mjeri, stanju kontaktne i odzivne površine mjerene komponente te eventualnoj prevlaci na kontaktnoj površini.

Ultrazvučne sonde koje se koriste za ultrazvučno mjerenje debljine primjenom tehnike odjeka dijele se na:

- ravna ultrazvučna sonda
- dvostruka ultrazvučna sonda.

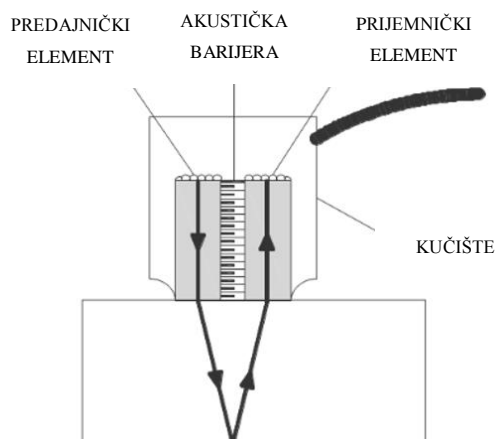
Kao izvor ultrazvučnih valova najčešće se koriste materijali koji imaju piezoelektrična svojstva odnosno svojstvo pretvaranja električne energije u mehaničko titranje i obrnuto.

Ravna ultrazvučna sonda sastoji se od jednog piezoelektričnog elementa koji odašilje ultrazvučne impulse u materijal te ujedno i prima odjeke od zadnje stijenke komponente koju mjerimo (slika 11).



**Slika 11.** Shematski prikaz ravne ultrazvučne sonde

Dvostruka ultrazvučna sonda, za razliku od ravne ultrazvučne sonde, ima dva piezoelektrična elementa od kojih jedan služi kao odašiljač ultrazvučnih impulsa u materijal, dok drugi prima odjeke od zadnje strane komponente koju mjerimo (slika 12). Dvostruka ultrazvučna sonda generirane ultrazvučne impulse iz predajnika šalje u komponentu koju mjerimo kroz blok za kašnjenje. Prijemnik, koji je odvojen akustičnom barijerom od predajnika, primiće reflektirani impuls od zadnje stijenke komponente koju mjerimo.



**Slika 12.** Shematski prikaz dvostruke ultrazvučne sonde

Sonde za ultrazvučno mjerenje debljine složeni su akustički sklop koji odašilje i prima ultrazvučne impulse okomito na kontaktnu plohu. Sonde za ultrazvučno mjerenje debljine pripadaju skupini ravnih ultrazvučnih sondi kojima je izlazni kut  $0^\circ$  u odnosu na okomicu izlazne plohe. Osnovni dijelovi ravnih sondi koje se najčešće koriste za ultrazvučno mjerenje debljine stijenke u užem smislu jesu:

- piezoelektrični element
- blok za prigušenje
- zaštitni sloj.

Blok za prigušenje kod ravne jednostruke sonde smješten je u unutrašnjosti ultrazvučne sonde, neposredno iza piezoelektričnog elementa. Osnovna uloga bloka za prigušenje jest prigušenje ultrazvučnih valova koji se šire u unutrašnjost sonde.

Zaštitni sloj na ultrazvučnoj sondi nalazi se s vanjske strane pretvornika. Sonde za ultrazvučno mjerenje debljine s vanjske strane pretvornika imaju zaštitni sloj (prevlaka) koji osim zaštite piezoelektričnog elementa služi i za prijenos ultrazvučnog impulsa (generiran od piezoelektričnog elementa) u materijal komponente koju mjerimo.

Ultrazvučna sonda s obzirom na svoje specifične karakteristike utječe na oblik ultrazvučnog impulsa. Karakteristike ultrazvučne sonde svojstvene su svakoj sondi zasebno te su propisane od proizvođača. Ultrazvučne sonde međusobno se razlikuju po nazivnim vrijednostima koje je potrebno pravilno odabrati kako bismo ostvarili što točniji rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine.

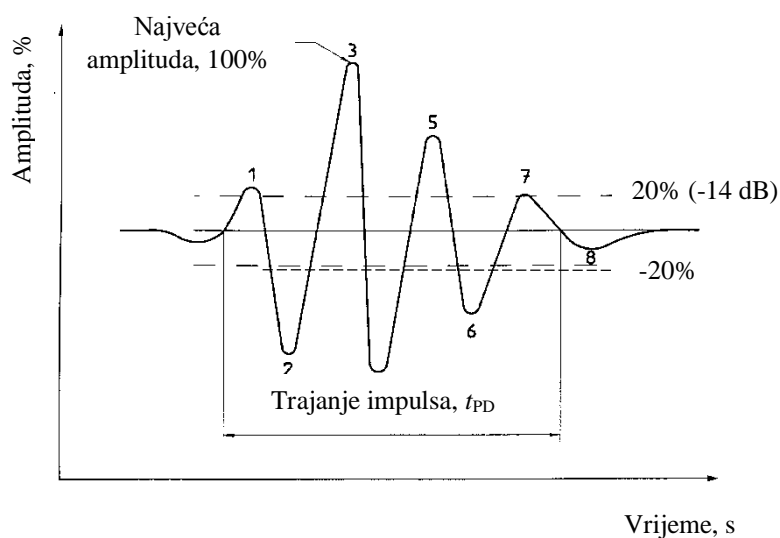
Za svaku seriju ultrazvučnih sondi jednakih nazivnih vrijednosti proizvođač definira skup karakterističnih specifikacija. Karakteristike ultrazvučnih sondi definirane su kombinacijom parametara sonde i akustičkim svojstvima mjerene komponente s kojom je sonda u kontaktu. Karakteristike ultrazvučnih sondi sastoje se od čitavog niza specifičnosti temeljem kojih se pravilnim odabirom može provesti pouzdano mjerenje. Najrelevantnije karakteristike ultrazvučnih sondi jesu:

- oblik ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni koja je uvjetovana:
  - nazivnom frekvencijom pretvornika
  - širinom frekvencijskog spektra

- duljina bliskog polja koja je uvjetovana:
  - nazivnom frekvencijom pretvornika
  - nazivnom dimenzijom pretvornika
- efektivna dimenzija pretvornika.

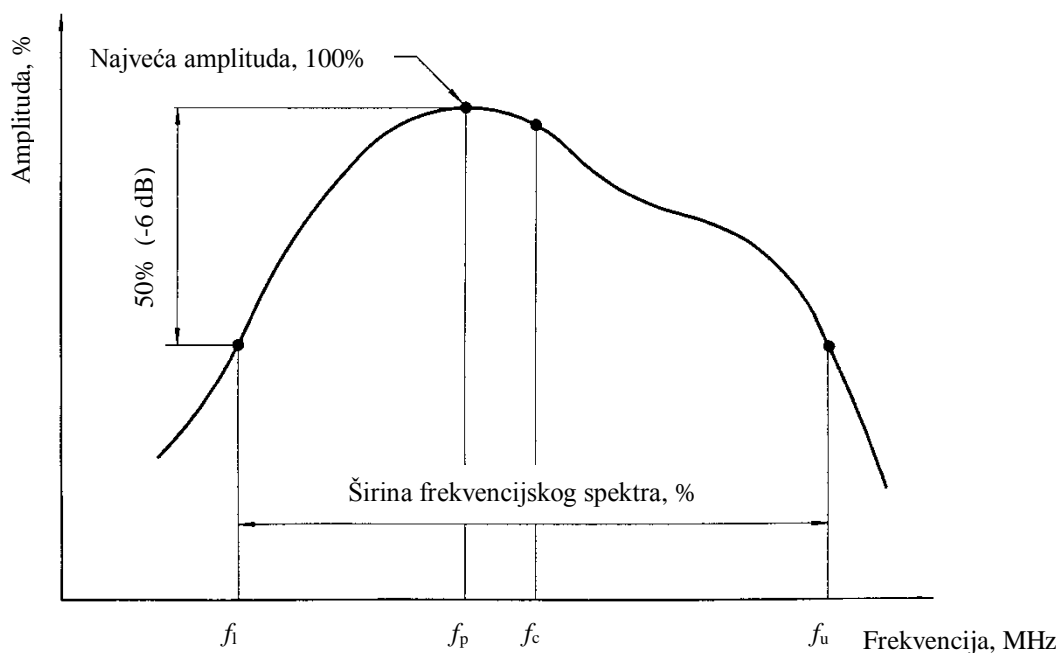
Za potrebe određivanja frekvencijskih karakteristika ultrazvučne sonde moguće je na osciloskopu snimiti odjek impulsa od reflektora u vremenskoj domeni (slika 13). Za primjenu ultrazvučne tehnike odjeka kao reflektor odabire se zadnja površina komponente (beskonačni reflektor) čija je udaljenost propisana normama. Svaki ultrazvučni impuls dobiven pomoću osciloskopa u vremenskoj domeni prikazuje promjenu amplitude impulsa u zavisnosti o vremenu.

Ultrazvučni impuls, prikazan u vremenskoj domeni, definiran je vremenom trajanja impulsa  $t_{PD}$  [2]. Početak i kraj valnog oblika ultrazvučnog impulsa definiran je u poluperiodama koje imaju amplitudu veću ili jednaku 20% (-14 dB) od najvišeg vrha impulsa. Prema tome, vrijeme trajanja impulsa određeno je kao vrijeme od početka prvog vrha poluperiode do kraja zadnjeg vrha poluperiode (slika 13).



**Slika 13.** Valni oblik ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni [2]

Za definiranje frekvencijskog sadržaja ultrazvučnog impulsa najčešće se koristi numerička metoda, brza Fourierova transformacija (FFT), kojom je moguće valni oblik iz vremenske domene transformirati u frekvencijsku domenu (slika 14)



**Slika 14.** Frekvencijski spektar ultrazvučnog impulsa [2]

Određivanjem frekvencijskog spektra ultrazvučnog impulsa moguće je odrediti parametre ultrazvučne sonde, a to su:

- *vršna frekvencija* ( $f_p$ ) - frekvencija najviše amplituda u frekvencijskoj domeni
- *gornja* ( $f_u$ ) *i donja* ( $f_l$ ) *frekvencija* - frekvencije pri kojima je amplituda u frekvencijskoj domeni 50% niža (–6 dB) od najviše amplitude, a koje definiraju *centralnu frekvenciju* ( $f_c$ ) pomoću sljedećeg izraza:

$$f_c = \frac{f_u + f_l}{2} \quad (2-19)$$

- *širina frekvencijskog spektra* ( $B_w$ ) - raspon frekvencija u kojemu su amplitude veće od 50% najveće amplitude, a računa se prema sljedećem izrazu:

$$B_w = \frac{f_u - f_l}{f_c} \cdot 100 \quad (2-20)$$

### 2.2.3 *Kontaktno sredstvo*

Prije početka provođenja postupka ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke potrebno je razmotriti i prikladno pripremiti kontaktnu i odzivnu površinu (ako joj je omogućen pristup). Ultrazvučno mjerenje debljine stijenke često se provodi u procesno energetske i nuklearne postrojenjima, i to na kritičnim mjestima gdje može doći do degradacije materijala uslijed korozije ili erozije. U tom smislu potrebno je ukloniti sve vrste korozivskih produkata s kontaktne površine na mjestima gdje će se provoditi postupak ultrazvučnog mjerenja. Veličina površine područja koje je potrebno očistiti mora biti najmanje dva puta veća od veličine pretvornika. Ako se na kontaktnoj površini nalaze metalne ili nemetalne prevlake u svrhu provođenja postupka ultrazvučnog mjerenja debljine, nije ih potrebno ukloniti [9]. Pri čišćenju kontaktne površine mogu se koristiti samo ona sredstva koja će ukloniti nečistoće i korodirane produkte, a da pri tome ne oštete i samu površinu mjerene komponente kako se ne bi promijenila zahtijevana uporabna svojstva.

Prema normi EN 583-1 [47] kao vrste kontaktnog sredstva mogu se koristiti razne vrste tekućih materijala kao što su:

- gel
- ulje
- voda
- celulozna pasta i dr.

U postupku ultrazvučnog mjerenja debljine važno je naglasiti da karakteristike odabrane vrste kontaktnog sredstva moraju ostati nepromijenjene tijekom provođenja mjerenja. Isto je tako potrebno voditi računa o temperaturi kontaktne površine koja će biti jedan od kriterija za odabir vrste kontaktnog sredstva. U tom smislu kontaktno sredstvo koje se primjenjuje u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine smije se nanositi na kontaktnu površinu čija je temperatura unutar temperaturnog raspona za koje je odabrano kontaktno sredstvo predviđeno. Kriterij odabira kontaktnog sredstva ovisi o temperaturi kontaktne površine, ali isto tako i o stanju kontaktne površine. Prema tome, važan kriterij za izbor vrste kontaktnog sredstva jest stanje kontaktne površine što podrazumijeva hrapavost, mehanička oštećenja i neravnine kao i oštećenja površine uslijed korozije. Na kontaktnim površinama koje su oštećene ili pak imaju određene neravnine potrebno je primijeniti kontaktna sredstva veće viskoznosti. Viskoznost tekućina definirana je kao mjera otpora tečenju tekućina. Stoga je pri ultrazvučnom mjerenju debljine na oštećenim i neravnim kontaktnim površinama potrebno koristiti kontaktna sredstva



veće viskoznosti. Odabirom kontaktnog sredstva veće viskoznosti moguće je provoditi ultrazvučna mjerenja debljine pri većim vrijednostima debljine kontaktnog sredstva. U konačnici će kontaktna sredstva veće viskoznosti popuniti sve neravnine i omogućiti prolazak ultrazvučnog impulsa u materijal mjerene komponente.

Kontaktno sredstvo općenito služi za prijenos ultrazvučne energije iz sonde u materijal mjerene komponente i obratno, te će količina prenesene energije iz ultrazvučne sonde u mjerenu komponentu ovisiti o debljini i vrsti odabranog kontaktnog sredstva. U tom smislu bilo kakav zračni raspodjeljivost uzrokovan stanjem kontaktne površine znatno može utjecati na varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine. Zračni raspodjeljivost je nepovoljan stoga što je specifična akustička impedancija između zraka i krute tvari velika (npr. karakteristične zvučne impedancije između zraka i čelika međusobno se približno odnose kao 1:10<sup>5</sup>) čime dolazi do prijenosa neznatne količine ultrazvučne energije u materijal i obratno.

### 2.2.3.1 Specifična akustička impedancija

Značaj specifične akustičke impedancije dolazi do izražaja pri prostiranju ultrazvučnog impulsa kroz medij. Specifična akustička impedancija važna je akustička veličina koja služi za:

- određivanje faktora refleksije i faktora transmisije pri nailasku ultrazvučnog vala na granicu dvaju sredstava različitih specifičnih akustičkih impedancija
- konstrukciju ultrazvučnih sondi.

Specifična akustička impedancija ( $Z$ ) kao veličina ovisi o svojstvima materijala, a definirana je kao umnožak gustoće materijala u kojem se ultrazvučni impuls prostire i brzine rasprostiranja ultrazvučnog impulsa u materijalu:

$$Z = \rho \cdot v_g \quad (2-21)$$

pri čemu je:

$Z$  ... specifična akustička impedancija, Ns/m<sup>3</sup>

$\rho$  ... gustoća sredstva, kg/m<sup>3</sup>

### 2.2.3.2 Pojave na granici sredstava

Ultrazvučne valove možemo promatrati kao putujuće valove jer se radi o oscilatornom fenomenu koji se u vremenu prostire kroz materijal, a prenosi impuls i energiju [49].

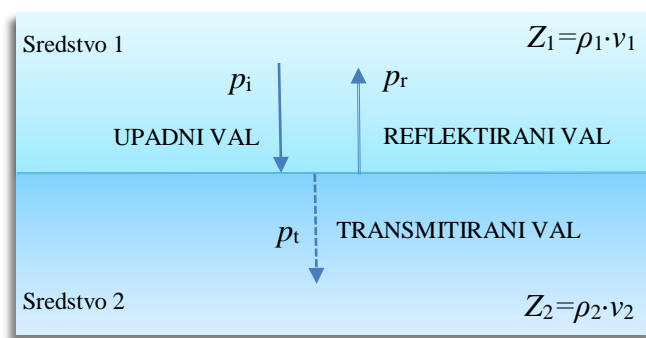
Nailaskom ultrazvučnih valova na granicu dvaju sredstava općenito dolazi do pojave refleksije i transmisije ultrazvučne energije.

*Refleksija* je pojava koja nastaje uslijed različitih specifičnih akustičkih impedancija sredstava kroz koje ultrazvučni impuls propagira. Nailaskom ultrazvučnog impulsa na granicu dvaju sredstava različitih specifičnih akustičkih impedancija dio energije reflektirat će se na granici, a preostali dio nastaviti će propagaciju kroz drugo sredstvo. Ako ultrazvučni impuls naiđe na granicu dvaju sredstava pod pravim kutom, reflektirani dio energije neće promijeniti svoj pravac gibanja nego samo smjer.

*Transmisija* je pojava koja nastaje nailaskom ultrazvučnog impulsa na granicu dvaju sredstava koji imaju različite specifične akustičke impedancije. Ako ultrazvučni impuls propagira kroz dva sredstva različitih specifičnih akustičkih impedancija, dio energije prenosi se u drugi materijal. Ako ultrazvučni impuls naiđe na granicu dvaju sredstava pod pravim kutom, transmitirani dio energije neće promijeniti pravac ni smjer gibanja.

Upad ultrazvučnih valova na granicu dvaju sredstava može biti okomit ili pod određenim kutom. Ovisno o kutu upada ultrazvučnih valova može doći i do refrakcije (lom) valova. Ako je kut upada ultrazvučnih valova različit od  $0^\circ$  uslijed refrakcije iz generiranog longitudinalnog vala, pri transmisiji će doći do pojave konverzije, odnosno iz generiranog longitudinalnog vala nastat će longitudinalna i transverzalna komponenta. Ovisno o vrsti materijala iz kojeg ultrazvučni valovi nailaze na granicu dvaju sredstava i materijalu u kojeg se transmitiraju, kutovi loma valova određuju se sukladno Snellovom zakonu loma.

Pri ultrazvučnom mjerenju debljine ultrazvučni valovi nailaze na granicu dvaju sredstava pod okomitim upadom, pri čemu odnos reflektirane i transmitirane energije ovisi o akustičkoj impedanciji obaju sredstava i vrsti ultrazvučnih valova (slika 15).



**Slika 15.** *Pojave na granici dvaju sredstava*

Sa stajališta prijenosa ultrazvučne energije u materijal mjerene komponente, refleksija je nepovoljan fenomen, dok nam s druge strane taj isti fenomen omogućava određivanje debljine mjerene komponente. Nailaskom ultrazvučnog impulsa na granicu dvaju sredstava jedan dio energije će se transmitirati u drugo sredstvo, a drugi dio će se reflektirati. Ako postoji i treće sredstvo, tada će se transmitirani dio energije u drugom sredstvu djelomično reflektirati nailaskom na granicu s trećim sredstvom, dok će se preostali dio energije transmitirati u treće sredstvo. Količina reflektirane odnosno transmitirane energije ovisi upravo o specifičnoj akustičkoj impedanciji. U tom smislu što je veća razlika u specifičnoj akustičkoj impedanciji između dvaju materijala kroz koje se prostire ultrazvučni impuls, to će se veći dio energije reflektirati na granici dvaju sredstava.

Pri ultrazvučnom mjerenju debljine, s ciljem prijenosa ultrazvučne energije u materijal komponente koju mjerimo, nanosi se kontaktno sredstvo u tankom sloju između primopredajnika i mjernog mjesta. Nanošenjem kontaktnog sredstva između ultrazvučne sonde i mjernog mjesta ultrazvučni će valovi prelaziti kroz tri sredstava različitih akustičkih impedancija. Prva će granica biti između sonde i kontaktnog sredstva, dok će druga granica biti između kontaktnog sredstva i materijala komponente koju mjerimo.

### 2.2.3.3 Refleksija i transmisija na granici dvaju sredstava pri okomitom upadu

Pri ultrazvučnom mjerenju debljine ultrazvučni valovi nailaze na granicu dvaju sredstava okomitim upadom uslijed čega ne dolazi do konverzije već samo do refleksije i transmisije. Ultrazvučni valovi odaslani iz sonde prolazit će kroz više planparalelnih slojeva različitih akustičkih svojstava [48].

Pretpostavimo da vanjski izvor emitira prisilne harmonijske oscilacije u obliku putujućeg monokromatskog vala koji se prostire sredstvom akustičke impedancije  $Z_1$  u smjeru osi  $z = -\infty$  do  $z = 0$ . Odašiljač emitira putujući val iz smjera  $+z$  u trenutku  $z = -\infty$ . U trenutku  $z = 0$  putujući val nailazi na sredstvo akustičke impedancije  $Z_2$  pri čemu je  $Z_1 \neq Z_2$ . Gibanje upadnog vala opisano je izrazom [46]:

$$\psi_1(z,t) = A \cos(\omega t - kz) \quad (2-22)$$

pri čemu je:

$\psi_1$  ... pomak od ravnotežnog položaja uslijed djelovanja upadne vanjske sile

Nailaskom upadnog vala na granicu dvaju sredstava u trenutku  $z = 0$  valna jednadžba iz izraza (2-22) poprima sljedeći oblik:

$$\psi_1(0,t) = A \cos \omega t \quad (2-23)$$

**Rubni uvjeti: pojave na mjestu promjene impedancije.** U točki  $z = 0$  putujući val upada na granicu dvaju sredstava gdje je zadovoljeno da je  $Z_1 \neq Z_2$ . Uz pretpostavku da se sredstvo 2 akustičke impedancije  $Z_2$  proteže u beskonačnost, osigurano je da nema reflektirajućih valova. Za postavljeni slučaj izvor prisilnih harmonijskih oscilacija djeluje na medij  $Z_1$  pri čemu je zadovoljena sljedeća jednakost:

$$F_{po} = -Z_1 \frac{\partial \psi_1(0,t)}{\partial t} \quad (2-24)$$

pri čemu je:

$F_{po}$  ... sila prisilnih oscilacija čiji je smjer djelovanja od medija prema izvoru oscilacija, N

$t$  ... vrijeme, s

Stvarnu silu  $F$  možemo promatrati kao superpoziciju sile prisilnih oscilacija i sile zaslužne za apsorpciju upadnog vala  $F_{ab}$ . Sila apsorpcije generira putujući val koji propagira u smjeru osi  $-z$ , a nazivamo ga reflektirani val  $\psi_r(z,t)$ . U točki upada putujućeg vala na granicu dvaju sredstava  $z = 0$  mora biti zadovoljena jednakost:

$$F_{ab} = Z_1 \frac{\partial \psi_r(0,t)}{\partial t} \quad (2-25)$$

Stvarna sila  $F$  je superpozicija sile koja proizvodi prisilne oscilacije i sile zaslužne za apsorpciju:

$$F = F_{po} + F_{ab} \quad (2-26)$$

Udruživanjem izraza (2-24), (2-25) i (2-26) dobivamo sljedeći izraz:

$$F = -Z_1 \frac{\partial \psi_i(0,t)}{\partial t} + Z_1 \frac{\partial \psi_r(0,t)}{\partial t} \quad (2-27)$$

Brzina je superpozicija doprinosa brzine ulaznog i brzine reflektiranog vala:

$$\frac{\partial \psi(0,t)}{\partial t} = \frac{\partial \psi_i(0,t)}{\partial t} + \frac{\partial \psi_r(0,t)}{\partial t} \quad (2-28)$$

Prema tome, otpor sredstva akustičke impedancije  $Z_2$  dan je izrazom:

$$F = -Z_2 \frac{\partial \psi(0,t)}{\partial t} = -Z_2 \frac{\partial \psi_i(0,t)}{\partial t} - Z_2 \frac{\partial \psi_r(0,t)}{\partial t} \quad (2-29)$$

Izjednačavanjem desne strane jednadžbe (2-27) i (2-28) u točki upada putujućeg vala na granicu dvaju sredstava ( $z = 0$ ) dobivamo sljedeći izraz:

$$-Z_1 \frac{\partial \psi_i}{\partial t} + Z_1 \frac{\partial \psi_r}{\partial t} = -Z_2 \frac{\partial \psi_i}{\partial t} - Z_2 \frac{\partial \psi_r}{\partial t} \quad (2-30)$$

$$\frac{\partial \psi_r(0,t)}{\partial t} = \left[ \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right] \frac{\partial \psi_i(0,t)}{\partial t} \quad (2-31)$$

**Koeficijent refleksije.** Integriranjem jednadžbe (2-31) uz pretpostavku da nema integracijske konstante dobivamo sljedeći izraz :

$$\psi_{ref}(0,t) = R_{12} \psi_i(0,t) = R_{12} A \cos(\omega t + kz) \quad (2-32)$$

pri čemu je  $R_{12}$  koeficijent refleksije za pomak  $\psi$  kojeg zapisujemo kao:

$$R_{12} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2-33)$$


---

Budući da je reflektirani val sinusoidalni putujući val koji propagira u smjeru osi  $-z$ , njegov oblik za  $z < 0$  dobiven je iz njegova oblika za  $z = 0$  zamjenom varijabli  $z = 0, t$  s varijablama  $z, t + \frac{z}{v_f}$ , gdje je  $v_f$  veličina fazne brzine. Prema tome slijedi:

$$\psi_r(z, t) = R_{12} A \cos \left[ \omega \left( t + \frac{z}{v_f} \right) \right] = R_{12} A \cos(\omega t + kz) \quad (2-34)$$

Elongacija  $\psi(z, t)$  dana je superpozicijom:

$$\psi(z, t) = \psi_i(z, t) + \psi_r(z, t) \quad (2-35)$$

odnosno:

$$\psi(z, t) = A \cos(\omega t - kz) + R_{12} A \cos(\omega t + kz) \quad (2-36)$$

**Povratna sila i pomak reflektiraju s različitim predznacima.** Promatrajući jednadžbe (2-29) i (2-32) zaključujemo kako brzina putujućeg vala  $\frac{\partial \psi(z, t)}{\partial t}$  ima jednaki koeficijent refleksije kao i pomak putujućeg vala  $\psi(z, t)$ . Međutim, koeficijent refleksije od povratne sile  $-T_0 \frac{\partial \psi(z, t)}{\partial z}$  po iznosu jednaka je koeficijentu refleksije za  $\frac{\partial \psi}{\partial t}$  ali suprotnog smjera djelovanja:

$$\psi_i = A \cos(\omega t - kz) \quad \psi_r = R_{12} A \cos(\omega t + kz) \quad (2-37)$$

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial t} = -\omega A \sin(\omega t - kz) \quad \frac{\partial \psi_r}{\partial t} = R_{12} [-\omega A \sin(\omega t + kz)] \quad (2-38)$$

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial z} = kA \sin(\omega t - kz) \quad \frac{\partial \psi_r}{\partial z} = -R_{12} [kA \sin(\omega t + kz)] \quad (2-39)$$

Iz gore navedenih jednadžbi možemo definirati koeficijente refleksije na sljedeći način:

$$R_\psi = R_{\frac{\partial \psi}{\partial t}} = R_{12} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2-40)$$

$$R_{\frac{\partial \psi}{\partial z}} = -R_{12} \quad (2-41)$$

Razmatranjem svih mogućih kombinacija vrijednosti za akustičke impedancije vidimo da se vrijednost koeficijenta refleksije kreće između  $-1$  i  $+1$ .

**Refleksija na granici disperzivnih medija.** Pretpostavimo da se sredstvo 1 akustičke impedancije  $Z_1$  proteže od  $z = -\infty$  do  $z = 0$ . U točki  $z = 0$  graniči sa sredstvom 2 akustičke impedancije  $Z_2$  koje se proteže od  $z = 0$  do  $z = +\infty$ . Koeficijenti refleksije iz izraza (2–40) i (2–41) daju nam reflektirani val u sredstvu 1, te zaključujemo da je  $R_{21} = -R_{12}$  odnosno zamjenom svojstava dvaju medija predznak koeficijenta refleksije je suprotan.

**Transmisija na granici disperzivnih medija.** Uslijed djelovanja prisilnih harmonijskih oscilacija u sredstvu 1 u trenutku  $z = 0$  prisutan je upadni val i reflektirani val od granice dvaju sredstava. Odnosno medij 1 možemo promatrati kao izvor prisilnih oscilacija.

Rubni uvjeti. Pretpostavimo da je  $\psi(z,t)$  pomak nepromijenjen odnosno jednak je za male pomake lijevo i desno u odnosu na granicu dvaju sredstava. Svakako da su i brzina  $\frac{\partial\psi(z,t)}{\partial t}$  kao i  $-T_0 \frac{\partial\psi(z,t)}{\partial z}$  također nepromijenjeni. Kako bismo dokazali da je povratna sila nepromijenjena zamislimo da na granici dvaju sredstava u točki  $z = 0$  imamo infinitezimalni element. Transverzalna sila koja će djelovati na element od strane sredstva 1 je  $-T_1 \frac{\partial\psi_1}{\partial z}$  dok će na element od strane sredstva 2 djelovati sila  $+T_2 \frac{\partial\psi_2}{\partial z}$ . Superpozicijom dvaju valova dobivamo sljedeći izraz:

$$-T_1 \frac{\partial\psi_1}{\partial z} + T_2 \frac{\partial\psi_2}{\partial z} = 0 \quad (2-42)$$

pri čemu je:

$T_1$ ...napetost ravnotežnog položaja u sredstvu 1

$T_2$ ... napetost ravnotežnog položaja u sredstvu 2

**Amplituda koeficijenta transmisije.** Pretpostavimo da  $\varphi(z,t)$  predstavlja bilo koju od tri valnih veličina: pomak, brzinu ili povratnu silu. U sredstvu 1 valna funkcija  $\varphi_1(z,t)$  je superpozicija:

$$\varphi_1(z,t) = \varphi_0 \cos(\omega t - k_1 z) + R\varphi_0 \cos(\omega t + k_1 z) \quad (2-43)$$

Prema jednadžbama (2–40) i (2–41) koeficijent refleksije jednak je  $R_{12} \equiv \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$  ako  $\varphi(z,t)$  predstavlja pomak ili brzinu, dok za slučaj da predstavlja povratnu silu koeficijent refleksije

jednak je  $-R_{12}$ . U sredstvu 2 isti putujući val propagirat će u smjeru osi  $z = 0$  (uz pretpostavku da je izvor prisilnih oscilacija smješten u  $z = -\infty$ ) Izvor prisilnih oscilacija proizvodi upadni val. Diskontinuitet će uzrokovati refleksiju i transmisiju vala. Budući da ne postoji prepreka koja može uzrokovati putujući val u smjeru osi  $-z$  u sredstvu 2, možemo pisati:

$$\varphi_2(z,t) = T\varphi_0 \cos(\omega t - k_2 z) \quad (2-44)$$

Uzimajući u obzir rubne uvjete na granici dvaju sredstava u točki  $z = 0$  pri čemu je  $\varphi(z,t)$  nepromijenjen, dobivamo da je:

$$\varphi_2(0,t) = \varphi_{12}(0,t) \quad (2-45)$$

$$T\varphi_0 \cos \omega t = \varphi_0(1 + R) \cos \omega t \quad (2-46)$$

$$T = 1 + R \quad (2-47)$$

Faktor refleksije kreće se unutar intervala  $\langle -1, +1 \rangle$  dok se faktor transmisije kreće unutar intervala  $\langle 0,2 \rangle$  te je uvijek pozitivan.

#### 2.2.4 Etalon

Za mjeriteljsku djelatnost općenito je poznato da rezultat dobiven u postupku mjerenja mora biti sljediv. Mjeriteljska sljedivost definirana je kao postupak kod kojeg se prikazivanje rezultata mjerenja dovodi u vezu s referentnim etalonima neprekinutim lancem usporedba koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti. Referentni etalon definira se kao mjera, mjerilo ili mjerni sustav namijenjen definiranju, ostvarenju ili obnavljanju jedinice odnosno jedne ili više poznatih vrijednosti fizikalne veličine radi prenošenja usporedbom tih vrijednosti na druga mjerila [50].

Sa stajališta ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke sljedivost se osigurava podešavanjem ultrazvučnog mjernog sustava prema referentnim uzorcima i etalonima čije su specifikacije propisane normama (slika 16).





**Slika 16.** Referentni uzorci i etaloni [51]

Da bi se postigla što veća točnost i preciznost rezultata dobivenog pomoću ultrazvučnog mjerenja debljine, potrebno je na odgovarajući način odabrati i pravilno podesiti elemente ultrazvučnog mjernog sustava. Elementi ultrazvučnog mjernog sustava odabiru se ovisno o zahtjevima za mjerenje i konfiguraciji komponente koja se mjeri. Odabir elemenata ultrazvučnog mjernog sustava s obzirom na konfiguraciju mjerene komponente bazira se na:

- debljini komponente koju mjerimo
- vrsti materijala mjerene komponente.

Raspon mjernog područja unutar kojeg je moguće pouzdano izmjeriti debljinu ultrazvučnom tehnikom odjeka ovisi o vrsti uređaja i odabranom principu mjerenja. Minimalna i maksimalna vrijednost mjernog područja ovisi o izboru nazivne frekvencije ultrazvučne sonde i brzini propagacije ultrazvučnog impulsa u materijalu mjerene komponente. Svaki proizvođač propisuje koje je minimalno odnosno maksimalno mjerno područje unutar kojeg je moguće provoditi mjerenja te se referenciraju na čelik kao vrstu materijala mjerene komponente. Nadalje, proizvođači uređaja propisuju koliki je minimalni odnosno maksimalni iznos ultrazvučne brzine koji se može podesiti na ultrazvučnom uređaju ako se mjerenja provode na materijalima čija je brzina različita od ultrazvučne brzine u čeliku.

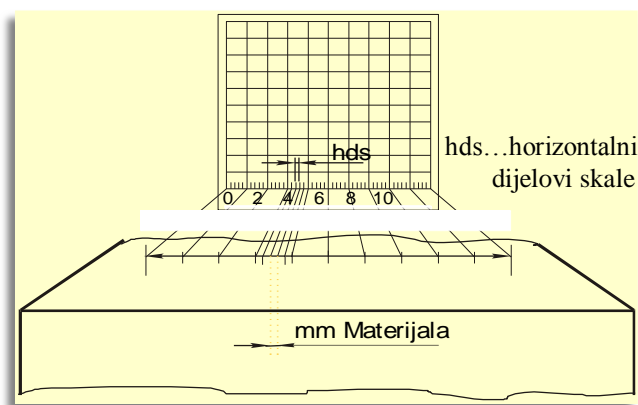
Nedvojbeno je da se u procesu podešavanja karakteristika ultrazvučnog mjernog sustava najviše može utjecati na točnost i preciznost rezultata mjerenja. Neadekvatnim podešavanjem ultrazvučnog mjernog uređaja raste sumnja u vjerodostojnost rezultata dobivenog u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine što se reflektira i na povećanju procijenjene mjerne nesigurnosti

rezultata. Pod pojmom „podešavanje“ karakteristika ultrazvučnog mjernog sustava obuhvaćena su dva osnovna aspekta:

1. Karakterizacija ultrazvučnog mjernog sustava, odnosno provjera horizontalne linearnosti
2. Podešavanje mjernog područja.

Postupkom provjere horizontalne linearnosti dokazujemo da se ultrazvučni odjeci od zadnje stijenke mjerene komponente pojavljuju ekvidistantno na horizontalnoj osi zaslona ultrazvučnog uređaja.

Podešavanje mjernog područja (slika 17) postupak je kojim se na primopredajniku (ultrazvučnoj sondi) postiže linearno pridruživanje dimenzija mjerene komponente horizontalnoj skali zaslona [15].



**Slika 17.** Shematski prikaz podešavanja mjernog područja [15]

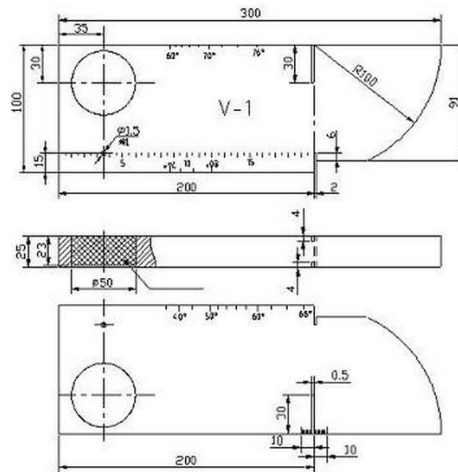
Postupak podešavanja ultrazvučnog mjernog područja može se provesti na dva načina:

1. Pomoću poznate nazivne debljine etalona ili referentnog uzorka
2. Pomoću poznate nazivne brzine ultrazvuka u etalonu ili referentnom uzorku.

Dva su osnovna etalona, radni etalon br. 1 (slika 18) i radni etalon br. 2 (slika 19), koji se koriste za podešavanje ultrazvučnog sustava općenito čije su tehničke specifikacije propisane normama [28] i [52].



a)



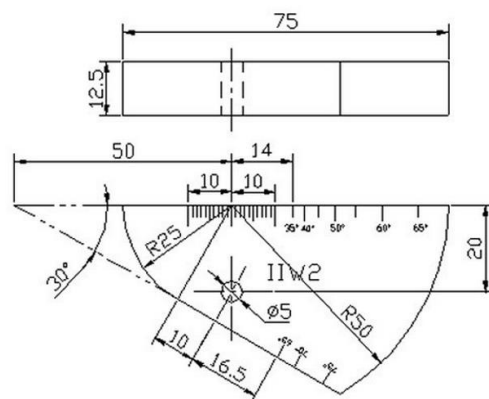
b)

**Slika 18 a)** Radni etalon br. 1 [53]

b) Tehničke specifikacije radnog etalona br. 1 [28]



a)



b)

**Slika 19. a)** Radni etalon br. 2 [54]

b) Tehničke specifikacije radnog etalona br. 2 [52]

Poželjno je da struktura materijala komponente koju mjerimo odgovara strukturi materijala referentnog uzorka ili etalona na kojem se podešava ultrazvučni mjerni sustav kako bi se smanjila pogreška mjerenja nastale uslijed razlike u ultrazvučnoj brzini. Isto je tako poželjno da debljina etalona približno odgovara debljini mjerene komponente čime bi se izbjegla pogreška nastala uslijed veće razlike u debljinama. U pogledu smanjenja pogreške nastale uslijed veće razlike između debljine na kojoj se provodi podešavanje mjernog područja i debljine mjerene komponente primjenjujući dvostruku sondu, često se koriste stepeničasti referentni uzorci. Stepeničasti referentni uzorci sastoje se od više različitih nazivnih debljina pa

se podešavanje mjernog područja provodi na debljini čija će dimenzija približno odgovarati dimenziji komponente koju mjerimo.

Da bi se osigurala homogenost etalona i referentnih uzoraka, zahtijevana je točno propisana toplinska obrada materijala etalona i referentnih uzoraka kako bi se osigurala jednolika mikrostruktura. Glavni razlog postizanja jednolike mikrostrukture jest smanjenje razlika u ultrazvučnoj brzini po čitavom presjeku etalona i referentnih uzoraka, a sastoji se od sljedećih faza:

- kaljenje na temperaturi od 920°C u vremenu od 30 minuta
- brzo hlađenje u vodi
- popuštanje u trajanju od 3 sata na temperaturi od 650°C
- hlađenje na temperaturi okoliša.

Osim propisane toplinske obrade, propisane su i ostale tehničke specifikacije etalona i referentnih uzoraka:

- dimenzije etalona
- brzina ultrazvučnih valova:
  - brzina longitudinalnih valova mora iznositi  $5920 \text{ m/s} \pm 30 \text{ m/s}$
  - brzina transverzalnih valova mora iznositi  $3255 \text{ m/s} \pm 15 \text{ m/s}$
- hrapavost površine  $R_a$  koja ne smije biti veća od  $0,8 \text{ } \mu\text{m}$
- dopušteno odstupanje dimenzija koja smiju iznositi  $\pm 0,1 \text{ mm}$
- etaloni i referentni uzorci moraju biti homogeni bez diskontinuiteta te se diskontinuiteti otkrivaju ultrazvučnom metodom.

### **3. KONCEPTUALIZACIJA EKSPERIMENTA**

Da bi se procijenila mjerna nesigurnost rezultata u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke, potrebno je prije svega istražiti kolika je značajnost pojedinih mjernih parametara i karakteristika elemenata mjernog sustava na varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke.

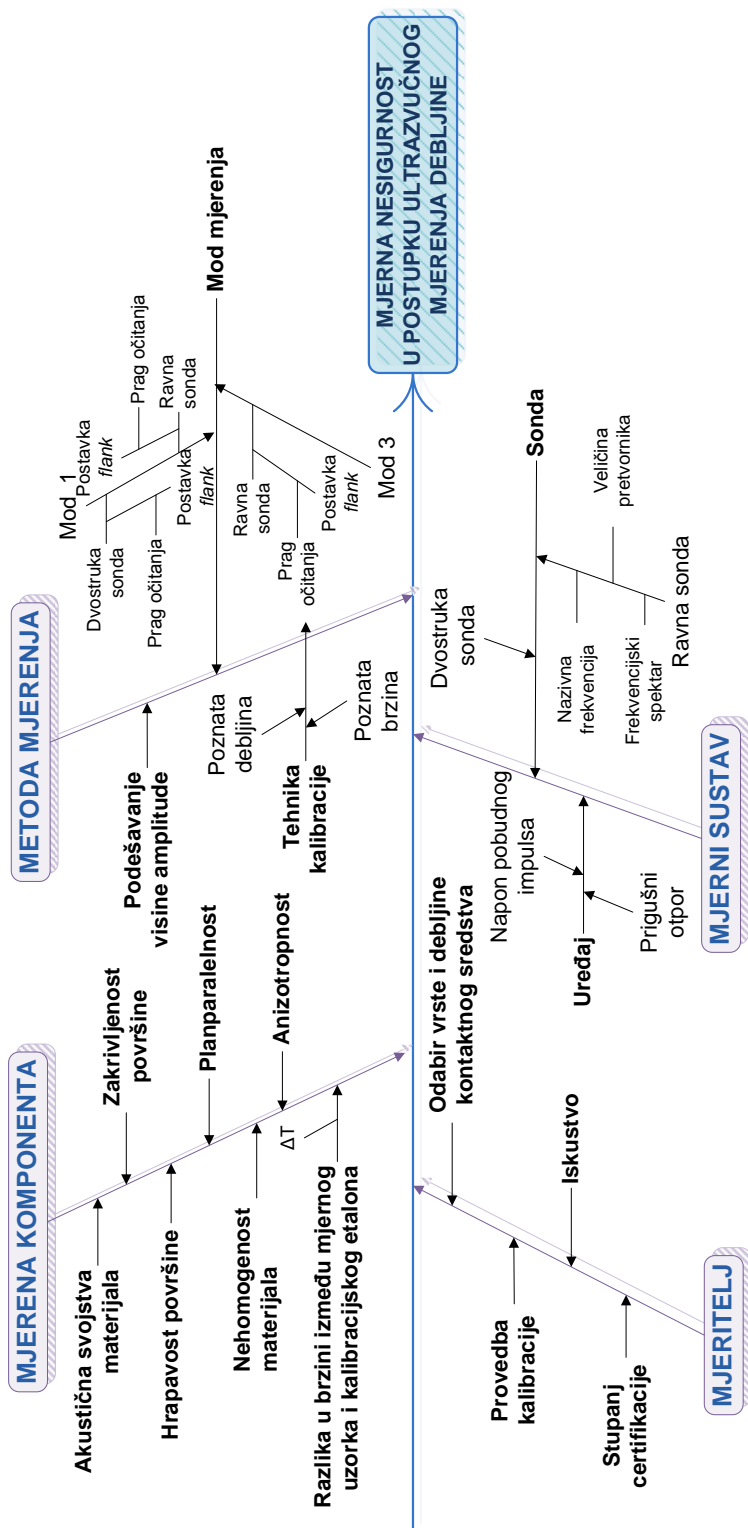
Općenito, svaki element ultrazvučnog mjernog sustava svojim specifičnim karakteristikama doprinosi određenom nepovjerenju u rezultat mjerenja. Elementi ultrazvučnog mjernog sustava sastavljeni su od niza svojstvenih parametara koji se interakcijskim djelovanjem mogu približiti odnosno udaljiti od stvarne vrijednosti debljine mjernog mjesta.

U ovom poglavlju diskutirani su i raščlanjeni odabrani parametri koji utječu na točnost i preciznost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine. Za potrebe testiranja predloženih hipoteza doktorskog rada provedena je eksperimentalna analiza kroz adekvatno postavljene planove pokusa.

#### **3.1 Definiranje utjecajnih čimbenika**

Općenito je prvi korak za definiranje utjecajnih čimbenika na varijabilnost rezultata mjerenja identificiranje uzroka i posljedica njihova djelovanja na postavljeni mjerni sustav. Pri analizi identificiranih uzroka i posljedica važno je ustanoviti za koje se uzroke mogu poduzeti odgovarajuće mjere i prikladne aktivnosti, a sve s toga da bi se uklonio ili barem smanjio njihov doprinos na rezultat mjerenja [55].

Utjecaji koji doprinose mjernoj nesigurnosti rezultata u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke prikazani su u Ishikawa dijagramu poznatog po nazivu „Dijagram uzrok-posljedica“ (slika 20).



Slika 20. Utjecaji koji doprinose nesigurnosti rezultata u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke

Temeljem preliminarnih istraživanja sistematizirani su glavni i sekundarni uzroci varijabilnosti rezultata u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke. Kao glavni uzroci istaknuli su se:

1. Mjerena komponenta
2. Metoda mjerenja
3. Mjerni sustav
4. Mjeritelj.

Svaki od navedenih glavnih uzroka varijabilnosti rezultata u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke sastoji se od niza sekundarnih uzroka varijabilnosti rezultata. U pogledu procjene mjerne nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke, sekundarni su uzroci predmet istraživanja u okviru ovog doktorskog rada. Sekundarni uzroci na varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine izvori su mjerne nesigurnosti rezultata, a razlikuju se po svome značaju. Sveobuhvatnom analizom ultrazvučnog mjernog sustava svaki će sekundarni uzrok u većoj ili manjoj mjeri doprinijeti procijenjenoj mjernoj nesigurnosti rezultata odabranog ultrazvučnog mjernog sustava.

Za odabrane sekundarne uzroke varijabilnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine predložen je način uklanjanja ili smanjenja njihova utjecaja na dobiveni rezultat u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke.

## **3.2 Značajke utjecajnih čimbenika**

Značajan je broj čimbenika koji doprinose mjernoj nesigurnosti rezultata proizašlih iz vrste materijala i konfiguracije mjerene komponente kako je prikazano Ishikawa dijagramom (slika 20). Prostiranje ultrazvuka u materijalu nastaje mehaničkim i elastičnim titranjima čestica materijala odnosno prijenosom energije s jedne čestice na drugu. S obzirom na strukturu materijala mjerene komponente ultrazvučni impuls će se kretati točno određenom brzinom. Ultrazvučni impuls propagiranjem kroz materijal mjerene komponente mijenjat će svoj oblik u vremenskoj domeni, dok će promjena u obliku ultrazvučnog impulsa najviše ovisiti o mikrostrukturi i mehaničkim svojstvima materijala mjerene komponente. Nadalje, promjena u obliku ultrazvučnog impulsa ovisi i o vanjskim utjecajima kao što su temperatura i naprezanje.

#### 3.2.1 Utjecaj glavnog uzroka „Mjerena komponenta“

Da bi se procijenila mjerna nesigurnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine u Ishikawa dijagramu, kao jedan od glavnih uzroka koji doprinose varijabilnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine jest „Mjerena komponenta“. Mjerena komponenta kao glavni uzrok sastavljen je od niza sekundarnih utjecaja na varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine. Utjecaj pojedinih sekundarnih uzroka rezultat je utjecaja izobličenja ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni. Sekundarni čimbenici koji doprinose promjeni oblika ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni te ga više ili manje izobličuju jesu:

- akustička svojstva materijala
- anizotropnost materijala
- nehomogenost materijala
- planparalelnost kontaktne i odzivne površine
- zakrivljenost kontaktne i/ili odzivne površine
- hrapavost kontaktne i/ili odzivne površine.

Brzina je jedna od akustičkih parametara materijala čiji je iznos ovisan o mehaničkim svojstvima, mikrostrukturi, gustoći, anizotropnosti i stupnju nehomogenosti materijala. Utjecaj ultrazvučne brzine rezultat je razlike ultrazvučne brzine između materijala mjerene komponente i materijala referentnog etalona.

Do izobličenja ultrazvučnog impulsa doći će uslijed utjecaja geometrije mjerene komponente. Što je veća razlika u obliku odaslanog ultrazvučnog impulsa u materijal mjerene komponente i reflektiranog ultrazvučnog impulsa od zadnje stijenke mjerene komponente, to će varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine biti veća. Hrapavost površine utječe na izobličenje ultrazvučnog impulsa neovisno o tome da li se radi o kontaktnoj ili odzivnoj površini. Nailaskom ultrazvučnog impulsa na granicu kontaktnog sredstva i površine mjerene komponente ili na odzivnu površinu doći će do pojave refleksije koja će u ovisnosti o hrapavosti površine izobličiti ultrazvučni impuls[56].

Do promjene brzine ultrazvuka u materijalu doći će i promjenom temperature mjerene komponente. Općenito, s porastom temperature materijala u kojem se prostire ultrazvučni impuls smanjit će se brzina propagacije ultrazvuka i obrnuto.



#### 3.2.2 Utjecaj glavnog uzroka „Metoda mjerenja“

Sljedeći u nizu glavnih uzroka varijabilnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine jest „Metoda mjerenja“ gdje su se istaknula tri sekundarna uzroka:

1. Podešavanje visine amplitude
2. Mod mjerenja
3. Tehnika podešavanja ultrazvučne brzine na uređaju.

Preliminarnim je istraživanjima u uvjetima ponovljivosti i obnovljivosti ustanovljena značajna varijabilnost rezultata mjerenja debljine ultrazvučnom tehnikom odjeka ako se očitavanje mjerene vrijednosti provodi pri različitim visinama amplitudnog prikaza. S tim saznanjem mjerenja će se provoditi pri istoj razini visine amplitude na ekranu. Na taj je način smanjen utjecaj sekundarnog uzroka podešavanja visine amplitude na varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine.

Preliminarnim je istraživanjima također ustanovljeno kako odabrani mod mjerenja kao sekundarni utjecaj unutar glavnog utjecaja pod nazivom „Metoda mjerenja“ ima značajan doprinos na varijabilnost rezultata mjerenja u pogledu podešavanja praga očitavanja („*gate threshold*“) izmjerene vrijednosti ultrazvučnom tehnikom odjeka. Osim praga očitavanja, važno je naglasiti kako na varijabilnost rezultata utječe i postavka mjesta očitavanja na amplitudi. U tom smislu neće se postići jednak rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine ako se izmjerena vrijednost očitava na vrhu amplitude („*peak*“) ili na presjecištu amplitude i praga očitavanja („*flank*“). S ciljem minimiziranja utjecaja praga i mjesta očitavanja, mjerenja su se provodila pri istoj razini praga očitavanja te je prag očitavanja izmjerene vrijednosti podešen na vrhu amplitude („*peak*“).

U procesu podešavanja ultrazvučnog sustava općenito moguće su dvije osnovne tehnike:

1. Pomoću nazivne ultrazvučne brzine u etalonu
2. Pomoću nazivne ultrazvučne debljine etalona.

Svaka tehnika podešavanja u konačnici rezultira podešavanjem brzine u etalonu. U tom smislu utjecaj tehnike podešavanja na varijabilnost rezultata mjerenja ultrazvučnom metodom očitovat će se kao pogreška nastala uslijed razlike između stvarne ultrazvučne brzine u materijalu etalona i podešene ultrazvučne brzine na uređaju. Nadalje, s pogreškom koja je

nastala uslijed kalibriranja ultrazvučnog mjernog sustava ulazimo u proces ultrazvučnog mjerenja debljine komponente čija je ultrazvučna brzina različita od one koju smo podesili na ultrazvučnom uređaju. Dakle, u pogledu procjene mjerne nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine, kroz sami postupak ultrazvučnog mjerenja debljine unosimo dvije nesigurnosti u dobiveni rezultat uzrokovane različitim brzinama propagacije ultrazvučnog impulsa. S ciljem minimiziranja utjecaja razlike u brzinama propagacije ultrazvučnog impulsa u matematičkom modelu bit će unesena korekcija brzine, te će se procijeniti doprinos mjernoj nesigurnosti uslijed utjecaja korekcije brzine.

#### **3.2.3 Utjecaj glavnog uzroka „Mjerni sustav“**

Ultrazvučni mjerni sustav najsloženiji je glavni uzrok varijabilnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine i kao takav zahtijeva najviše pozornosti pri izboru pojedinih parametara sekundarnih uzroka. Dva su osnovna sekundarna uzroka koji utječu na varijabilnost rezultata mjerenja unutar ultrazvučnog mjernog sustava:

1. Ultrazvučni mjerni uređaj
2. Ultrazvučna sonda.

Ultrazvučni mjerni uređaji razlikuju se po opsegu podesivih parametara. U tom smislu složeniji ultrazvučni mjerni uređaji imaju široki spektar podesivih parametara. Pojedini su podesivi parametri ultrazvučnog mjernog uređaja u postupku provedbe plana pokusa za određivanje utjecaja kontaktnog sredstva i ultrazvučnog uređaja držani pod kontrolom, a spomenuti su u prethodnim točkama. Preliminarnim je istraživanjima ustanovljeno da postoje dva parametra uređaja koji značajno doprinose varijabilnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine, a to su:

1. Prigušni otpor
2. Napon pobudnog impulsa.

Kroz provedena istraživanja utvrđena je značajnost u varijabilnosti rezultata mjerenja debljine ultrazvukom ako se mjerenja provode na različitim podesivim razinama spomenutih parametara ultrazvučnog uređaja. Spomenuti parametri ultrazvučnog uređaja mijenjaju oblik ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni što rezultira s promjenom visine amplitudnog odjeka od zadnje stijenke mjerene komponente. Stoga se varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine uslijed utjecaja ultrazvučnog uređaja promatra u okviru variranja podesivih

razina parametara uređaja - *prigušni otpor* i *napon pobudnog impulsa*. Da bi se procijenila mjerna nesigurnost ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke za odabrani ultrazvučni mjerni sustav, korišten je uređaj koji ima široki spektar podesivih parametara.

U planovima pokusa preliminarnog istraživanja utvrđen je značajan utjecaj različitih vrsta sonde na rezultate ultrazvučnog mjerenja debljine. Dva su parametra ultrazvučne sonde utvrđena kao značajna, a to su:

1. Nazivna frekvencija sonde
2. Širina frekvencijskog spektra.

Navedeni parametri ultrazvučne sonde utječu na oblik ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni. Veličina sonde kao jedan od parametara sonde utječe na točnost i preciznost mjerenog rezultata ako se mjerenja provode na zakrivljenim komponentama. Ultrazvučnim mjerenjem debljine stijenke na zakrivljenim površinama poput cijevi može doći do ostvarenja nepotpunog kontakta između ultrazvučne sonde i kontaktne površine. No smanjivanje varijabilnosti rezultata mjerenja na zakrivljenim površinama moguće je korištenjem prikladnih ultrazvučnih sonde s obzirom na veličinu pretvornika o čemu se vodilo računa za procjenu mjerne nesigurnosti u okviru ovog doktorskog rada.

Kako bi se kvantificirao utjecaj ultrazvučne sonde na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine, utjecajni parametri ultrazvučne sonde varirani su unutar postavljenog plana pokusa za određivanje utjecajnosti kontaktnog sredstva i odabranog ultrazvučnog mjernog uređaja.

#### **3.2.4 Utjecaj glavnog uzroka „Mjeritelj“**

Cilj svakog ultrazvučnog mjerenja debljine jest što točnije odrediti pravu vrijednost lokalne debljine mjerene komponente. Izmjerena vrijednost u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine gotovo nikad nije jednaka pravoj vrijednosti, nego više ili manje odstupa od prave vrijednosti. Na iznos odstupanja rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine od stvarne vrijednosti, osim konfiguracije mjerene komponente i odabira mjernog sustava općenito, utječe i mjeritelj koji prethodno mjerenju podešava ultrazvučni mjerni sustav te provodi sama mjerenja. Pri provođenju mjerenja mjeritelj utječe na varijabilnost rezultata mjerenja, a to je primarno povezano s vrijednostima debljine kontaktnog sredstva pri očitavanju rezultata mjerenja.

Uspješnost svakog mjerenja direktno ovisi o sposobnostima osobe koja provodi postupak mjerenja. Kako bi mjeritelj uspješno proveo mjerenje fizikalne veličine, treba poznavati mjerni postupak, principe rada i karakteristike mjerne opreme. Svojom stručnošću i zalaganjem savjestan mjeritelj ima velik utjecaj na tijek i uspjeh cijelog mjernog postupka, obrade i tumačenje mjernih rezultata. Osim toga, osoba koja provodi mjerenja mora imati dovoljno teoretskog znanja da bi pravilno odredila i primijenila mjernu metodu te kako bi smanjila utjecaj sustavnih i slučajnih pogrešaka u mjernom postupku, ne čineći pri tome grube pogreške.

Utjecaj mjeritelja na varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine moguće je istražiti u okviru opsežnih međulaboratorijskih usporedbenih mjerenja (*PT-Proficiency Testing*) ili pak postupkom obnovljivosti rezultata mjerenja. Kako bi mjeritelj uspješno proveo ultrazvučno mjerenje debljine stijenke, potrebno je poznavati osnovna načela ultrazvučne metode mjerenja i karakteristike mjerne opreme. Osim stručnog poznavanja ultrazvučne metode, potrebno je poznavanje ultrazvučnog mjernog sustava i s iskustvene strane. Za stjecanje iskustva potrebno je uložiti veliki trud i napor u svakodnevna mjerenja tijekom godina kako bi se sveobuhvatno moglo utjecati na postavke ultrazvučnog mjerenog sustava. Isto je tako potrebno da mjeritelj bude savjestan kako bi svojim zalaganjem i stečenim vještinama odabrao, podesio i prilagodio ultrazvučni mjerni sustav uvjetima mjerenja. Svakako će utjecaj mjeritelja biti izraženiji ako se koristi složeniji ultrazvučni mjerni sustav pri čemu mjeritelj mora imati pod kontrolom više podesivih parametara.

U okviru ovog doktorskog rada istražen je, a potom i kvantificiran sekundarni utjecaj mjeritelja, tj. *kontaktnog sredstva*. Utjecaj kontaktnog sredstva na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine očituje se uslijed varijabilnosti debljine kontaktnog sredstva u trenutku očitavanja rezultata mjerenja.

## 4. ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA UTJECAJA KONTAKTNOG SREDSTVA

Kroz koncept planiranja pokusa koji se temelji na mogućnosti kontrole utjecajnih faktora u istraživačkom procesu u poglavlju 4 određen je utjecaj pojedinih parametara ultrazvučnog mjernog sustava. Kao osnovni alat u planiranju i analizi pokusa primijenjena je metodologija odzivne površine (engl. *Response Surface Methodology, RSM*) [57].

Za analizu rezultata eksperimenata provedenih za određivanje utjecaja pojedinih odabranih parametara ultrazvučnog mjernog sustava primijenjen je faktorski plan pokusa. Analiza rezultata provedena je pomoću programskog paketa Design Expert, te je testirana valjanost eksperimentalno dobivenih rezultata u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine. U cilju dobivanja regresijskog modela (odzivne funkcije) [58], odnosno funkcije zavisnosti izlazne varijable o ulaznim varijablama, sve su ulazne varijable prikazane kao numeričke kontinuirane veličine.

Temeljem dobivenih rezultata kroz postavljene planove pokusa osigurana je procjena varijabilnosti odabranih parametara ultrazvučnog mjernog sustava za procjenu mjerne nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke.

Sekundarni utjecaji na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine su parametri kontaktnog sredstva kako je prikazano Ishikawa dijagramom (slika 20) u poglavlju 3. S ciljem kvantifikacije utjecaja kontaktnog sredstva na rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke u poglavlju 4.1 opisan je plan pokusa za provedbu eksperimenta.

Kroz provedenu analizu rezultata iz poglavlja 4.2, 4.3 i 4.4 dobiveni su regresijski modeli za tri vrste kontaktnog sredstva zasebno, te su regresijski modeli primjenjivi na rasponu debljine kontaktnog sredstva od 10  $\mu\text{m}$  do 50  $\mu\text{m}$ . Pomoću dobivenih regresijskih modela za sva tri kontaktna sredstva stvorena je podloga za razvoj matematičkog modela u cilju procjene mjerne nesigurnosti rezultata dobivenog ultrazvučnim mjerenjem debljine.

## 4.1 Plan pokusa za kvantificiranje utjecaja kontaktnog sredstva

Kontaktno sredstvo kao jedan od ključnih elemenata ultrazvučnog mjernog sustava utjecajni je faktor koji doprinosi varijabilnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine. Utjecaj kontaktnog sredstva na točnost i preciznost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine manji je ako se koristi princip mjerenja vremena proleta ultrazvučnog impulsa između dvaju susjednih odjeka od zadnje stijenke mjerene komponente što odgovara modu 3. Ultrazvučnim mjerenjem debljine stijenke pomoću moda 3 također postoji utjecaj kontaktnog sredstva, ali njegov doprinos procijenjenoj mjernoj nesigurnosti rezultata nije značajan u odnosu na druge načine mjerenja. Kod svih ostalih načina mjerenja debljine stijenke ultrazvukom kontaktno sredstvo značajno utječe na točnost i preciznost dobivenog rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine. Za određivanje utjecaja kontaktnog sredstva na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine pri provedbi eksperimenta korišten je princip mjerenja u modu 1.

S porastom debljine kontaktnog sredstva raste i pogreška ultrazvučnog mjerenja debljine, a uzrok pogreške u najvećoj je mjeri posljedica propagacije ultrazvučnog impulsa kroz kontaktna sredstva različitih ultrazvučnih brzina. Ostvarene vrijednosti debljine kontaktnog sredstva pri kojem se očitava rezultat mjerenja prije svega ovisi o mjeritelju koji provodi mjerenja, odnosno o njegovoj sili pritiska na sondu koja je u kontaktu s površinom mjerene komponente.

Za potrebe određivanja utjecaja vrste i debljine kontaktnog sredstva kao i parametara sonde (*nazivna frekvencija* i *širina frekvencijskog spektra*) na ultrazvučno mjerenje debljine osmišljena je naprava za prihvatanje sonde (slika 21).



**Slika 21.** Naprava za prihvat sonde

Pomoću naprave za prihvat sonde moguće je provoditi ultrazvučno mjerenje debljine pri različitim vrijednostima debljina kontaktnog sredstva. Za postavljeni eksperiment mjerenja su provedena na radnom etalonu br. 1 na jednom mjernom mjestu čija je referentna vrijednost izmjerena na mjernoj granitnoj ploči digitalnim visinomjerom „Mitotoyo“ rezolucije  $0,1 \mu\text{m}$ . Referentna vrijednost debljine mjernog mjesta iznosi  $25,001 \text{ mm}$ . Mjerenja su provedena u modu 1, tj. mjereno je vrijeme proleta od pobudnog impulsa do prvog odjeka od zadnje stijenke.

Da bi se proučila varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine u ovisnosti o debljini kontaktnog sredstva postavljen je plan mjerenja koji se bazira na varijaciji razina debljine kontaktnog sredstva pri kojima su se provodila očitavanja rezultata mjerenja. U postavljenom planu pokusa zastupljene su ultrazvučne sonde na dvije razine širine frekvencijskog spektra i dvije razine nazivne frekvencije, a koje se koriste u realnim uvjetima mjerenja debljine stijenke. Dakle, mjerenja su provedena s četiri vrste sonde oznaka MB4S, K4N, MB5S i K5NF koje imaju jednake nazivne veličine pretvornika  $D = 10 \text{ mm}$  (tablica 1).

**Tablica 1.** Parametri odabranih sonde za određivanje utjecaja kontaktnog sredstva

| Oznaka sonde | $f$ , MHz | $B_w$ , % | $D$ , mm |
|--------------|-----------|-----------|----------|
| MB4S         | 4         | 25        | 10       |
| K4N          | 4         | 70        | 10       |
| MB5S         | 5         | 25        | 10       |
| K5N          | 5         | 70        | 10       |

Osim kvantificiranja varijabilnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine u ovisnosti o debljini kontaktnog sredstva, cilj je i istražiti postoji li interakcija između parametra sonde i same debljine kontaktnog sredstva. Za analizu samostalnih faktora (*debljina kontaktnog sredstva, nazivna frekvencija sonde i širina frekvencijskog spektra*) i njihovih interakcija odabran je generalni faktorski plan pokusa za sva tri kontaktna sredstva (ulje, gel, voda). U generalnom faktorskom planu pokusa za odabrane faktore moguće je odabrati različiti broj razina.

Parametri sonde kao i njihove razine odabrani su radi istraživanja utjecajnosti *nazivne frekvencije i širine frekvencijskog spektra* na ultrazvučno mjerenje debljine stijenke u ovisnosti o *debljini kontaktnog sredstva*. Odabir parametara kontaktnog sredstva (*vrsta i debljina kontaktnog sredstva*) temelje se na iskustvu kao najčešće korišteni pri realnom ultrazvučnom mjerenju debljine stijenke.

Za svaku kombinaciju ulaznih parametara mjerenja su ponavljana pet puta. Da bi se dobile odzivne površine i zavisnosti izmjerene debljine ultrazvukom kao izlazne varijable o ulaznim vrijednostima parametara, svi odabrani parametri prikazani su kao kontinuirane numeričke varijable s pripadajućim rasponima vrijednosti (tablica 2).

**Tablica 2.** Shema plana pokusa

|   | Nazivna frekvencija ( $f$ ), MHz           |    |  |    |
|---|--|----|--|----|
|   | 4  |    | 5  |    |
|   | Širina frekvencijskog spektra ( $B_w$ ), % |    | Širina frekvencijskog spektra ( $B_w$ ), % |    |
| Debljina kontaktnog sredstva, $\mu\text{m}$ | 25   | 70 | 25   | 70 |
| 10  |  |    |  |    |
| 20  |  |    |  |    |
| 30  |  |    |  |    |
| 40  |  |    |  |    |
| 50  |  |    |  |    |

Pri izvođenju pokusa primijenjen je princip slučajnog redosljeda izvođenja da bi se otklonio utjecaj nekontroliranih poremećaja. S obzirom na pet ponovljenih mjerenja za svaku



kombinaciju parametara, rezultati eksperimenta baziraju se na 100 eksperimentalnih točaka odnosno 20 stanja pokusa. Opisani plan pokusa proveden je s tri vrste kontaktnog sredstva zasebno:

- ulje
- gel
- voda.

Odabrani faktori u postavljenom planu pokusa za analizu sva tri kontaktna sredstva na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine jesu:

- faktor A – debljina kontaktnog sredstva
- faktor B – širina frekvencijskog spektra
- faktor C – nazivna frekvencija sonde.

Izlazna varijabla u postavljenom planu pokusa za analizu utjecaja sva tri kontaktna sredstva i vrste sonde na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine jest:

- izmjerena debljina ultrazvučnom tehnikom odjeka.

## 4.2 Utjecaj kontaktnog sredstva - ulje

### 4.2.1 Analiza rezultata – kontaktno sredstvo ulje

Da bi se eliminirao utjecaj nekontroliranih poremećaja okoline primijenjen je princip potpune randomizacije odnosno slučajnog redoslijeda izvođenja pokusa. Rezultati mjerenja prikazani su u prilogu A-1. Statističkom obradom rezultata dobivenih ultrazvučnim mjerenjem debljine korištenjem ulja kao vrste kontaktnog sredstva pristupilo se izradi matematičkog modela za opisivanje utjecaja vrste i debljine kontaktnog sredstva, te parametara sonde na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine.

Tablica analize varijance prikazuje utjecajne članove modela koji su dok članovi koji nisu uzeti u obzir posljedica su šuma uslijed čega su sastavni dio komponente ostatka. Analiza varijance provedenog eksperimenta kada se kao kontaktno sredstvo koristi ulje upućuje na značajnost postavljenog modela. Rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine kao izlazna varijabla u ovisnosti o ulaznim varijablama, odnosno *debljini kontaktnog sredstva* i parametrima sonde

(nazivna frekvencija i širina frekvencijskog spektra) može se najbolje opisati modelom koji uključuje dva glavna efekta (članovi modela) i dvije interakcije (tablica 3).

Na značajnost modela upućuje pripadajuća F-vrijednost koja iznosi 107,62, a predstavlja omjer procijenjene varijance člana modela i procijenjene varijance ostataka. Nadalje, na značajnost modela kao i pojedinih faktora te njihovih interakcija navodi nas i vrijednost  $P$  koja mora biti manja od 0,05 za odbacivanje hipoteza  $H_0$ . Hipoteza  $H_0$  za postavljeni plan pokusa glasi: vrsta i debljina kontaktnog sredstva u zavisnosti o vrsti ultrazvučne sonde ne utječu na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine.

F-vrijednost komponente "Odstupanje od modela" stavlja u odnos varijaciju spomenute komponente i varijaciju proizašlu iz šuma. F-vrijednost komponente „Odstupanje od modela“ za promatrani model iznosi 1,48 uz pripadajuću vrijednost  $P$  od 0,1367 koja upućuje na to da je odstupanje od modela posljedica šuma.

**Tablica 3.** Analiza varijance modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva (ulje) i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine

| Izvor varijacije     | Suma kvadrata odstupanja | Broj stupnjeva slobode | Srednji kvadrat odstupanja | F-vrijednost | $P$ -vrijednost | Značajnost    |
|----------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------|--------------|-----------------|---------------|
| Model                | 0,040                    | 5                      | $8,018 \times 10^{-3}$     | 107,62       | < 0,0001        | značajan      |
| Članovi modela       |                          |                        |                            |              |                 |               |
| A                    | 0,031                    | 1                      | 0,031                      | 409,46       | < 0,0001        | značajan      |
| B                    | $9,0 \times 10^{-6}$     | 1                      | $9,0 \times 10^{-6}$       | 0,12         | 0,7289          | nije značajan |
| C                    | $2,401 \times 10^{-3}$   | 1                      | $2,401 \times 10^{-3}$     | 32,23        | < 0,0001        | značajan      |
| AC                   | $6,125 \times 10^{-4}$   | 1                      | $6,125 \times 10^{-4}$     | 8,22         | 0,0051          | značajan      |
| BC                   | $6,561 \times 10^{-3}$   | 1                      | $6,561 \times 10^{-3}$     | 88,07        | < 0,0001        | značajan      |
| Ostatak              | $7,003 \times 10^{-3}$   | 94                     | $7,45 \times 10^{-5}$      |              |                 |               |
| Odstupanje od modela | $1,443 \times 10^{-3}$   | 14                     | $1,031 \times 10^{-4}$     | 1,48         | 0,1367          | nije značajan |
| Čista greška         | $5,56 \times 10^{-3}$    | 80                     | $6,95 \times 10^{-5}$      |              |                 |               |
| Ukupno               | 0,047                    | 99                     |                            |              |                 |               |

Koeficijent determinacije  $R^2$ , prilagođeni koeficijent determinacije  $R_{adj}^2$  te predviđeni koeficijent determinacije  $R_{pre}^2$  za opisivanje kvalitete izrađenog regresijskog modela pokazuju da je model bitno različit od slučajnih pojava (tablica 4). Zadovoljen je nužan preduvjet da razlika između prilagođenog i predviđenog koeficijenta determinacije ne smije biti veća od 0,2 [59]. Za postavljeni regresijski model razlika između prilagođenog i predviđenog koeficijenta determinacije iznosi 0,01 što upućuje na adekvatnost izrađenog regresijskog modela, odnosno 85,13% varijacije podataka objašnjeno je preko postavljenog regresijskog modela.

Vrijednost adekvatna preciznost (tablica 4) definira odnos signal-šum, a kako bi bila zadovoljavajuća, mora iznositi više od 4. Za odabrani regresijski model vrijednost adekvatne preciznosti iznosi 35,663. Navedene vrijednosti pokazuju da postoji primjeren signal te da se model može koristiti za analizu u eksperimentalnom prostoru.

**Tablica 4.** *Kvaliteta izrađenog regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva (ulje) i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine*

|  |                        |
|--|------------------------|
| Standardna devijacija, mm                                | $8,631 \times 10^{-3}$ |
| Aritmetička sredina, mm                                  | 25,03                  |
| Koeficijent varijacije, %                                | 0,034                  |
| $SKO_{pred}$ (predviđena suma kvadrata ostataka), $mm^2$ | $7,964 \times 10^{-3}$ |
| $R^2$ - koeficijent determinacije                        | 0,8513                 |
| $R_{adj}^2$ - prilagođeni koeficijent determinacije      | 0,8434                 |
| $R_{pre}^2$ - predviđeni koeficijent determinacije       | 0,8309                 |
| Adekvatna preciznost                                     | 35,663                 |

Tablica 5 prikazuje procjene koeficijenata, stupnjeve slobode, procijenjene pogreške, te donje i gornje granice intervala povjerenja na razini 95% kada se koristi ulje kao vrsta kontaktnog sredstva.

**Tablica 5.** Prikaz procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena pogreška, donje i gornje granice intervala povjerenja za svaki član modela (ulje)

| Član modela   | Procjena koeficijenta | Stupnjevi slobode | Standardna pogreška    | 95%-tni interval povjerenja donja granica | 95%-tni interval povjerenja gornja granica |
|---------------|-----------------------|-------------------|------------------------|---|--|
| Slobodni član | 25,03                 | 1                 | $8,631 \times 10^{-4}$ | 25,03                                     | 25,03                                      |
| A             | 0,025                 | 1                 | $1,221 \times 10^{-3}$ | 0,022                                     | 0,027                                      |
| B             | $3,0 \times 10^{-4}$  | 1                 | $8,631 \times 10^{-4}$ | $-1,414 \times 10^{-3}$                   | $2,014 \times 10^{-3}$                     |
| C             | $4,9 \times 10^{-3}$  | 1                 | $8,631 \times 10^{-4}$ | $3,186 \times 10^{-3}$                    | $6,614 \times 10^{-3}$                     |
| AC            | $3,5 \times 10^{-3}$  | 1                 | $1,221 \times 10^{-3}$ | $1,076 \times 10^{-3}$                    | $5,924 \times 10^{-3}$                     |
| BC            | $8,1 \times 10^{-3}$  | 1                 | $8,631 \times 10^{-4}$ | $6,386 \times 10^{-3}$                    | $9,814 \times 10^{-3}$                     |

#### 4.2.2 Analiza utjecaja ulja kao vrste kontaktnog sredstva

Regresijskom analizom određuje se funkcionalna zavisnost između dviju ili više varijabli, a dobiveni analitički izraz spomenutih zavisnosti nazivamo regresijski model. Na osnovi rezultata dobivenih eksperimentom procijenjeni su koeficijenti regresijskog modela, pri čemu je korištena metoda najmanjih kvadrata. Metoda najmanjih kvadrata zasniva se na načelu da su najbolji oni koeficijenti za koje je suma kvadrata odstupanja najmanja.

Sukladno rezultatima provedenog eksperimenta postavljen je regresijski model (u kodiranim vrijednostima) za procijenu debljine mjerene komponente koja je u zavisnosti o debljini i vrsti kontaktnog sredstva i parametara sonde:

$$d_{ulje} = 25,03 + 0,025A + 3 \times 10^{-4}B + 4,9 \times 10^{-3}C + 3,5 \times 10^{-3}AC + 8,1 \times 10^{-3}BC \quad (4-1)$$

Regresijski model s kodiranim vrijednostima članova modela iz izraza (4-1) prevodi se u model sa stvarnim vrijednostima članova modela prema izrazu:

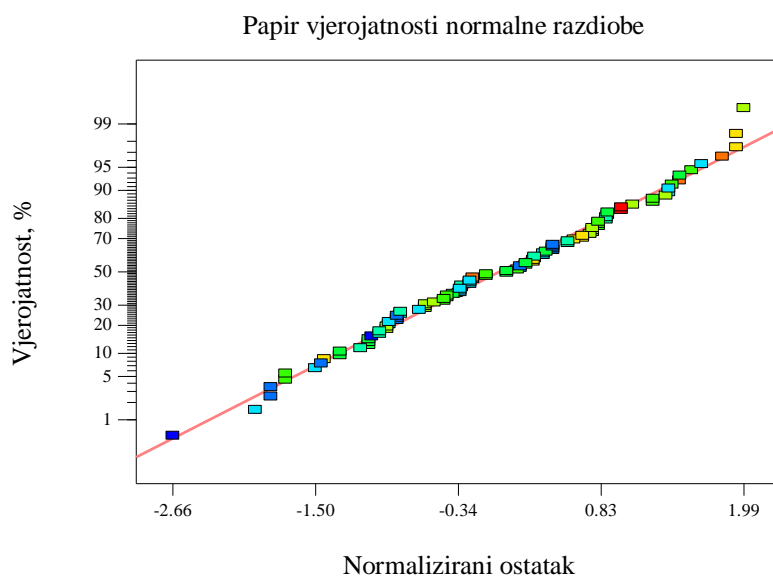
$$d_{ulje} = 25,15 - 3,4 \times 10^{-4}s_c - 3,22667 \times 10^{-3}B_w - 0,0349 \times 10^{-3}f + \\ + 3,5 \times 10^{-4}s_c f + 7,2 \times 10^{-4}B_w f \quad (4-2)$$

gdje je:

$d_{ulje}$  ... procijenjena vrijednost prema regresijskom modelu za kontaktno sredstvo ulje, mm

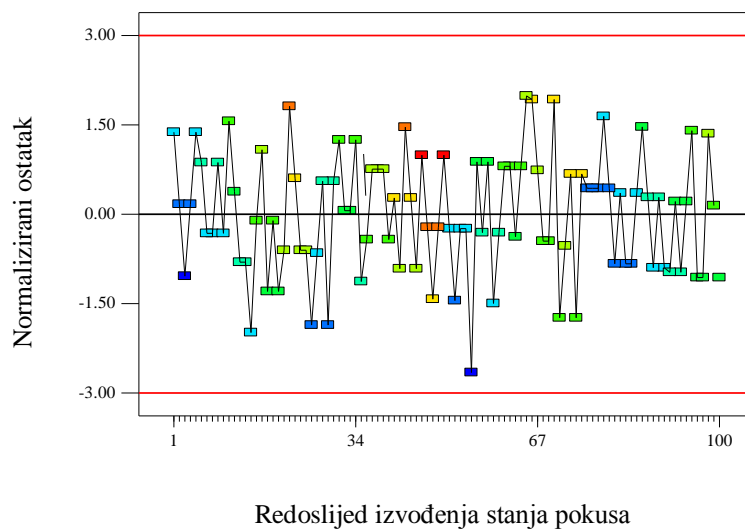
Analiza varijance pretpostavlja kako su podaci svakog uzorka distribuirani normalno i nezavisno s istim varijancama za svaku razinu faktora. Navedene se pretpostavke provjeravaju analizom ostataka, odnosno reziduala. Stoga možemo reći kako ostaci igraju važnu ulogu u određivanju adekvatnosti regresijskog modela. Analiza ostataka provodi se pregledom odstupanja ostataka od linije normalne razdiobe gdje točke moraju pratiti njezin trend. Ako ostaci opisuju jasno uočljivu krivulju te ne prate trend normalne razdiobe, tada je potrebno korigirati model.

Testiranje regresijske funkcije provedeno je testiranjem ostataka papirom vjerojatnosti normalne razdiobe. Za provedeni eksperiment test u papiru vjerojatnosti pokazuje kako nije potrebna korekcija rezultata te da je postavljen odgovarajući regresijski model (slika 22).



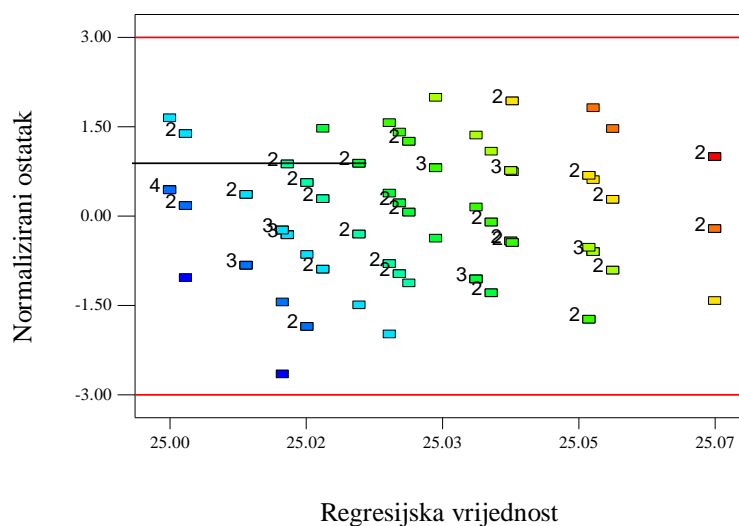
**Slika 22.** Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo ulje

Dijagram koji prikazuje rezultate  $t$  testa ostataka prema rednom broju izvođenja pokusa pokazuje moguće postojanje sustavne pogreške (slika 23). Za promatrani model nema značajnog odstupanja jer su vrijednosti  $t$  za sve točke mjerenja unutar područja  $\pm 3\sigma$ .



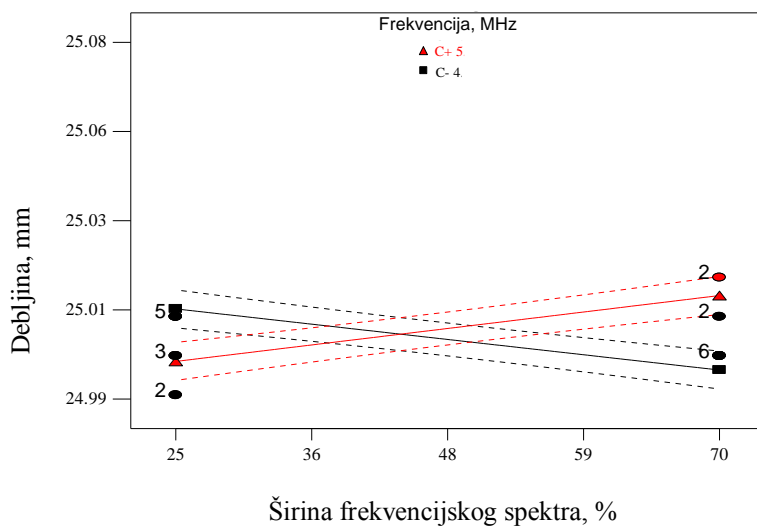
**Slika 23.** Dijagram ostatka prema rednom broju izvođenja regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo ulje

Još jedna provjera dobivenih rezultata koja se provodi prema Studentovoj  $t$  razdiobi, gdje se vrijednosti ostatka moraju nalaziti unutar izračunatog intervala, odnosno za  $|t| = 3$  razina povjerenja  $P$  iznosi 0,9973 – prema podacima u statističkim tablicama (slika 24). Provjerom rezultata prema Studentovoj  $t$  razdiobi dodatno potvrđujemo da je model odgovarajuće postavljen jer su rezultati jednoliko raspoređeni unutar područja očekivanih vrijednosti.

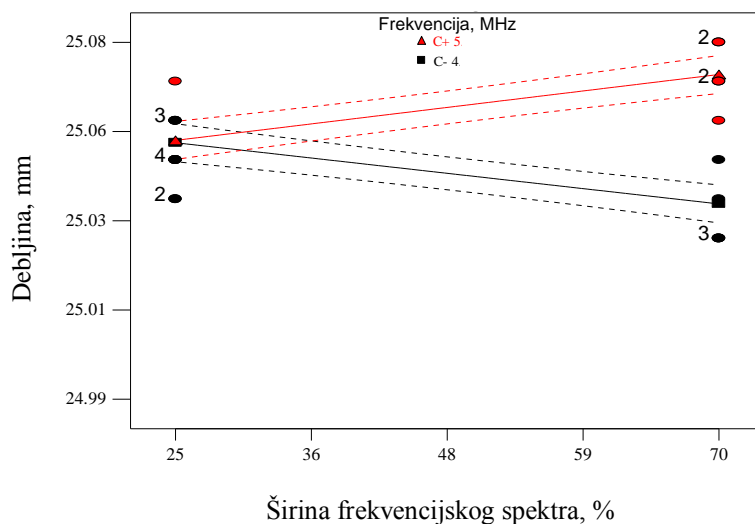


**Slika 24.** Dijagram ostatka u zavisnosti o očekivanim vrijednostima regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo ulje

Dobiveni rezultati upućuju na značajnost interakcije parametara ultrazvučne sonde odnosno pripadajuće širine frekventijskog spektra i pripadajuće nazivne frekvencije (slika 25 i slika 26). Sama nazivna frekvencija također ima značajan utjecaj na model, dok parametar sonde širina frekventijskog spektra kao samostalni član nije značajan.



**Slika 25.** Grafički prikaz interakcije nazivne frekvencije i širine frekventijskog spektra pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10 μm (ulje)



**Slika 26.** Grafički prikaz interakcije nazivne frekvencije i širine frekventijskog spektra pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50 μm (ulje)

Za postavljeni model rezultat najbliži referentnoj vrijednosti izmjerene debljine ultrazvukom (slika 25) ostvaren je pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10  $\mu\text{m}$  korištenjem ultrazvučne sonde oznake K4N (tablica 6).

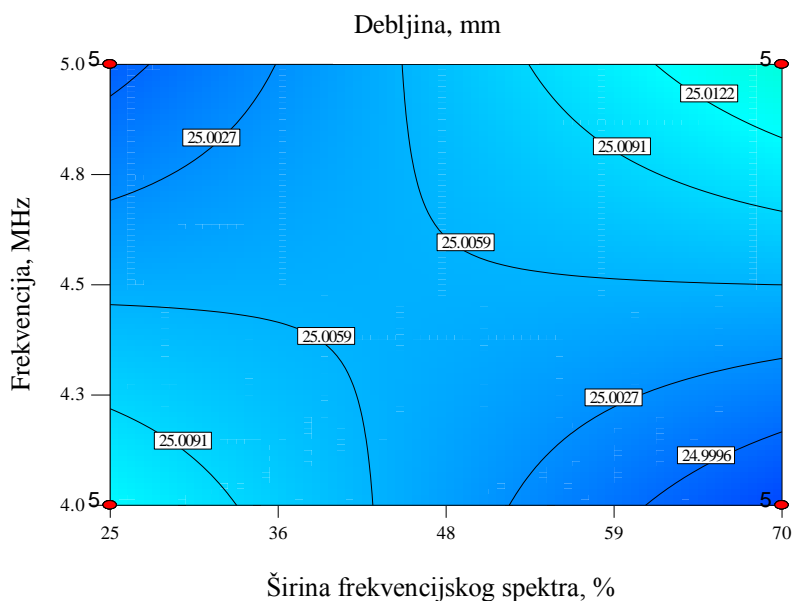
**Tablica 6.** Parametri sonde kojom je ostvaren rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine najbliži referentnoj vrijednosti (ulje)

| Oznaka sonde | $f$ , MHz | $B_w$ , % |
|--------------|-----------|-----------|
| K4N          | 4         | 70        |

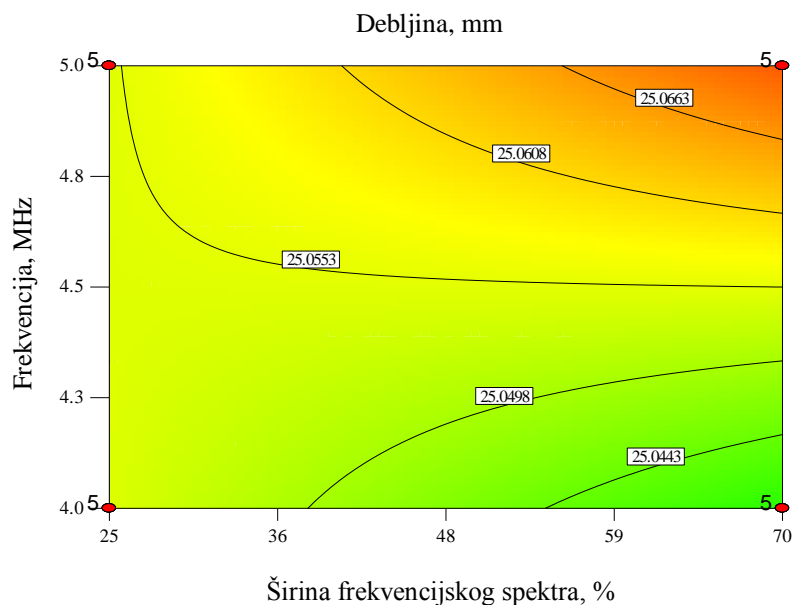
Odabirom navedenih parametara ultrazvučne sonde postiže se minimalna razlika između očitane vrijednosti pomoću ultrazvuka i referentne vrijednost mjernog mjesta. Referentna vrijednost mjernog mjesta iznosi 25,001 mm.

Konturni prikaz postavljenog regresijskog modela ultrazvučnog mjerenje debljine kada se očitavanje rezultata provodi pri razini debljine kontaktnog sredstva 10  $\mu\text{m}$  (slika 27) odnosno 50  $\mu\text{m}$  (slika 28) prikazuje linije konstantnog odziva u ravni parametara ultrazvučne sonde *širina frekvencijskog spektra* i *nazivna frekvencija*. Svaka kontura odgovara određenoj vrijednosti (visini) odzivne površine (rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine). Prikaz kontura koristan je u proučavanju promjena razina parametara ultrazvučne sonde koje rezultiraju promjenom oblika ili visine odzivne površine.



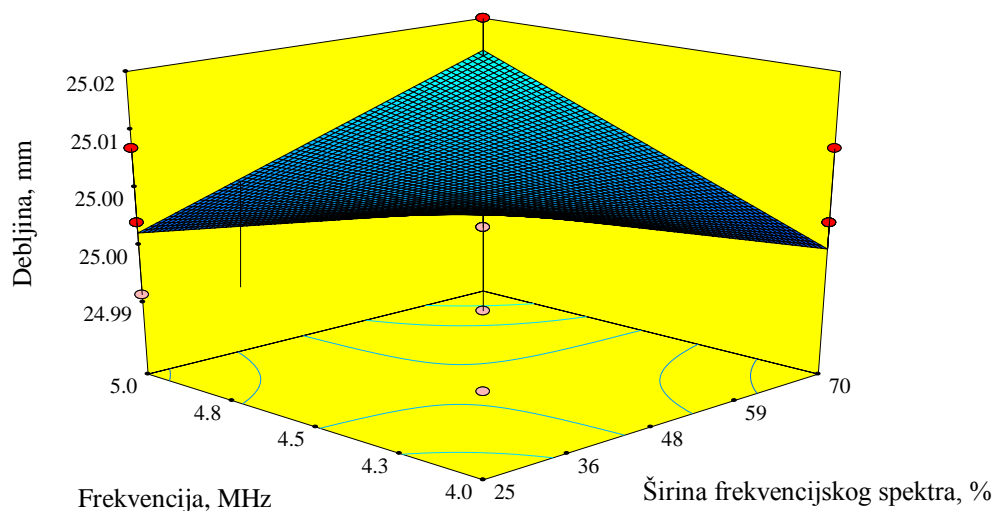


**Slika 27.** Konturni prikaz regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo ulje pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10  $\mu\text{m}$

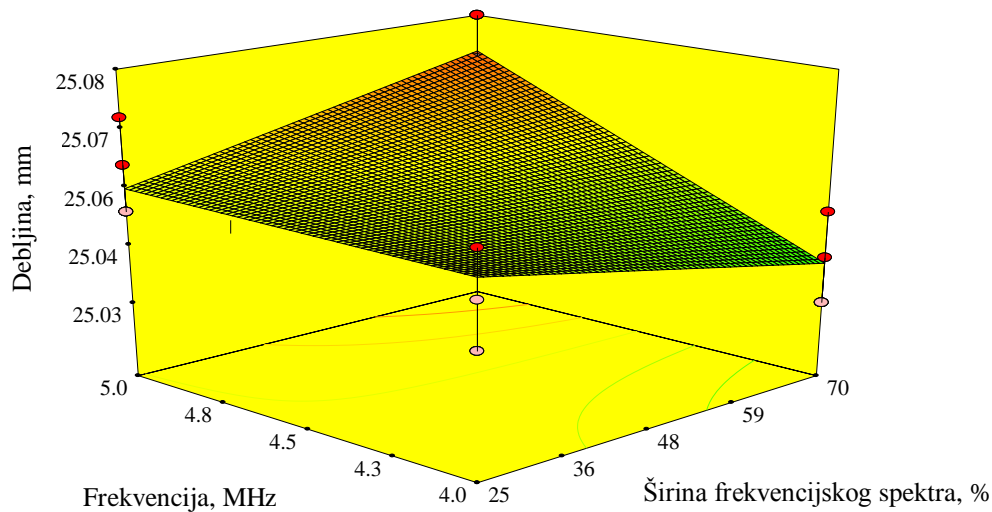


**Slika 28.** Konturni prikaz regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo ulje pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50  $\mu\text{m}$

Jasno je uočljiv različiti oblik odzivne površine promatrajući interakciju širine frekventijskog spektra i nazivne frekvencije sonde u ovisnosti o razini debljine kontaktnog sredstva (ulje), 10  $\mu\text{m}$  (slika 29) odnosno 50  $\mu\text{m}$  (slika 30).



**Slika 29.** Prikaz odzivne površine regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo ulje pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10  $\mu\text{m}$



**Slika 30.** Prikaz odzivne površine regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo ulje pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50  $\mu\text{m}$

Temeljem provedene analize i postavljanja regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva kada se kao vrsta koristi ulje utvrđeno je da postoje četiri glavna efekta koji najbolje opisuju model. Sukladno tome, za provedeni eksperiment značajan doprinos varijabilnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine ima faktor *debljina kontaktnog sredstva*

i faktor *nazivna frekvencija* sonde te su značajne dvije interakcije faktora, a to su *širina frekvencijskog spektra* i *nazivna frekvencije* sonde, te interakcija *debljine kontaktnog sredstva* i nazivne *frekvencije* sonde.

### 4.3 Utjecaj kontaktnog sredstva - gel

#### 4.3.1 Analiza rezultata - kontaktno sredstvo gel

Slučajan redoslijed izvođenja generalnog faktorskog plana pokusa primijenjen je za određivanje utjecaja gela kao vrste kontaktnog sredstva. Rezultati mjerenja prikazani su u prilogu A-2.

Analiza varijance provedenoga eksperimenta, kada se koristi gel kao vrsta kontaktnog sredstva, također upućuje na značaj postavljenog modela (tablica 7).

Na značaj modela upućuje pripadajuća F-vrijednost koja iznosi 71,31. Nadalje F-vrijednost komponente „Odstupanje od modela“ za postavljeni model iznosi 1,74 uz vrijednost  $P$  od 0,0634 koja upućuje na to da je odstupanje od modela posljedica šuma.

**Tablica 7.** Analiza varijance modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva (gel) i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine

| Izvor varijacije | Suma kvadrata odstupanja | Broj stupnjeva slobod | Srednji kvadrat odstupanja | F -vrijednost | P - vrijednost | Značajnost    |
|------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------|----------------|---------------|
| Model            | 0,033                    | 5                     | $6,533 \times 10^{-3}$     | 71,31         | < 0,0001       | značajan      |
| Članovi modela   |                          |                       |                            |               |                |               |
| A                | 0,027                    | 1                     | 0,027                      | 296,32        | < 0,0001       | značajan      |
| B                | $1,023 \times 10^{-4}$   | 1                     | $1,023 \times 10^{-4}$     | 1,12          | 0,2933         | nije značajan |
| C                | $2,401 \times 10^{-3}$   | 1                     | $2,401 \times 10^{-3}$     | 26,21         | < 0,0001       | značajan      |
| AB               | $8,450 \times 10^{-5}$   | 1                     | $8,450 \times 10^{-5}$     | 0,92          | 0,3393         | nije značajan |
| BC               | $2,809 \times 10^{-3}$   | 1                     | $2,809 \times 10^{-3}$     | 30,66         | < 0,0001       | značajan      |

**Tablica 8.** Nastavak

| Izvor varijacije     | Suma kvadrata odstupanja | Broj stupnjeva slobod | Srednji kvadrat odstupanja | F -vrijednost | P -vrijednost | Značajnost    |
|----------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Ostatak              | $8,611 \times 10^{-3}$   | 94                    | $9,161 \times 10^{-5}$     |               |               |               |
| Odstupanje od modela | $2,011 \times 10^{-3}$   | 14                    | $1,436 \times 10^{-4}$     | 1,74          | 0,0634        | nije značajan |
| Čista greška         | $6,6 \times 10^{-3}$     | 80                    | $8,250 \times 10^{-5}$     |               |               |               |
| Ukupno               | 0,041                    | 99                    |                            |               |               |               |

Iz koeficijenta determinacije koji pokazuju određenu kvalitetu izrađenog modela zaključujemo da je 79,14% podataka objašnjeno preko postavljenog modela te da je F razlika između prilagođenog i predviđenog koeficijenta 0,01 što upućuje na vjerodostojnost podataka i izrađenog regresijskog modela (tablica 9). Zadovoljavajuća je i vrijednost adekvatne preciznosti koja definira odnos signal-šum i iznosi 29,687.

**Tablica 9.** Kvaliteta izrađenog regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva (gel) i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine

|  |                        |
|--|------------------------|
| Standardna devijacija, mm                                | $9,571 \times 10^{-3}$ |
| Aritmetička sredina, mm                                  | 25,03                  |
| Koeficijent varijacije, %                                | 0,038                  |
| $SKO_{pred}$ (predviđena suma kvadrata ostataka), $mm^2$ | $9,715 \times 10^{-3}$ |
| $R^2$ - koeficijent determinacije                        | 0,7914                 |
| $R_{adj}^2$ - prilagođeni koeficijent determinacije      | 0,7803                 |
| $R_{pre}^2$ - predviđeni koeficijent determinacije       | 0,7646                 |
| Adekvatna preciznost                                     | 29,687                 |

Tablica 10 prikazuje procjene koeficijenta, stupnjeve slobode, procijenjene pogreške te donje i gornje granice intervala povjerenja za svaki član modela kada se koristi gel kao vrsta kontaktnog sredstva.

**Tablica 10.** *Prikaz procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena pogreška, donje i gornje granice intervala povjerenja za svaki član modela (gel)*

| Član modela   | Procjena koeficijenta | Stupnjevi slobode | Standardna pogreška    | 95%-tni interval povjerenja donja granica | 95%-tni interval povjerenja gornja granica |
|---------------|-----------------------|-------------------|------------------------|---|--|
| Slobodni član | 25,29                 | 1                 | 0,015                  | 25,26                                     | 25,32                                      |
| A             | 0,29                  | 1                 | 0,017                  | 0,25                                      | 0,32                                       |
| B             | 0,016                 | 1                 | 0,015                  | -0,014                                    | 0,046                                      |
| C             | $4,9 \times 10^{-3}$  | 1                 | $9,571 \times 10^{-4}$ | $3,0 \times 10^{-3}$                      | $6,8 \times 10^{-3}$                       |
| AC            | 0,016                 | 1                 | 0,017                  | -0,017                                    | 0,049                                      |
| BC            | $5,3 \times 10^{-3}$  | 1                 | $9,571 \times 10^{-4}$ | $3,4 \times 10^{-3}$                      | $7,2 \times 10^{-3}$                       |

### 4.3.2 Analiza utjecaja gela kao vrste kontaktnog sredstva

Regresijskom analizom dobiveni su procijenjeni koeficijenti za postavljanje regresijskog modela koji u kodiranim vrijednostima glasi:

$$d_{\text{gel}} = 25,29 + 0,29A + 0,016B + 4,9 \times 10^{-3}C + 0,016AB + 5,3 \times 10^{-3}BC \quad (4-3)$$

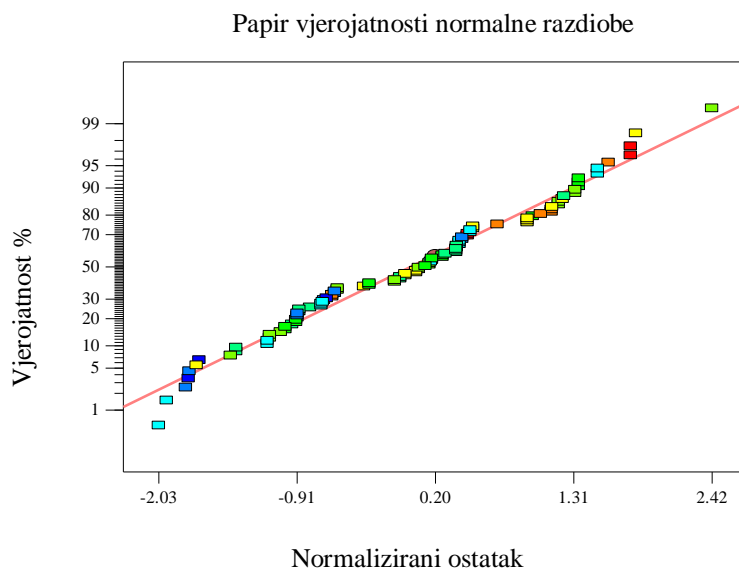
Regresijski model s kodiranim vrijednostima članova modela iz izraza (4-3) prevodi se u model sa stvarnim vrijednostima članova modela prema izrazu:

$$d_{\text{gel}} = 25,0521 + 1,02778 \times 10^{-3}s_c - 2,14 \times 10^{-3}B_W - 0,012578f + \\ + 2,88889 \times 10^{-6}s_c B_W + 4,71111 \times 10^{-4}B_W f \quad (4-4)$$

gdje je:

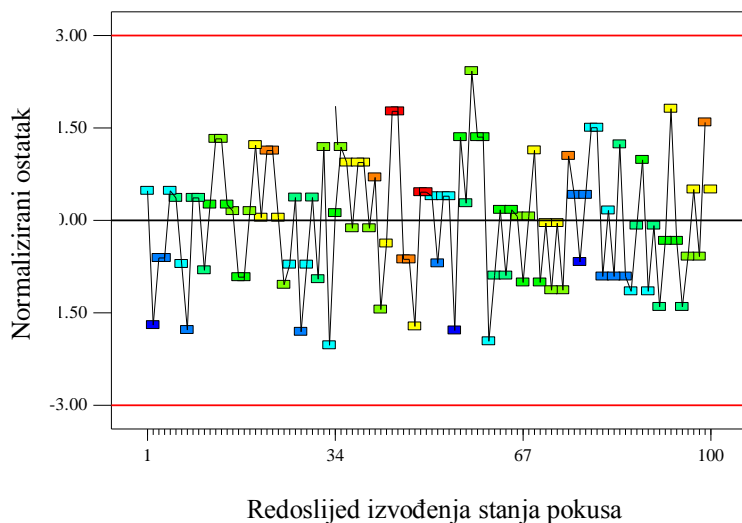
$d_{\text{gel}}$  ... procijenjena vrijednost prema regresijskom modelu za kontaktno sredstvo gel, mm

Analizom ostataka dokazano je da su podaci svakog uzorka distribuirani normalno i nezavisno s jednakim varijancama za svaku razinu faktora (slika 31). Model je odgovarajuće postavljen te ga nije potrebno korigirati.

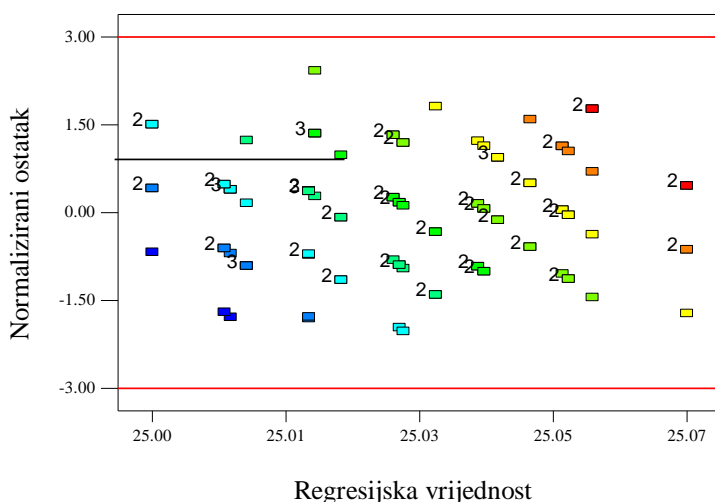


**Slika 31.** Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo gel

Pri izvođenju plana pokusa nije došlo do systemske pogreške uslijed čega odabrani model nema značajnog odstupanja (slika 32) te su rezultati Studentove  $t$  razdiobe jednoliko raspoređeni unutar područja očekivanih vrijednosti (slika 33).

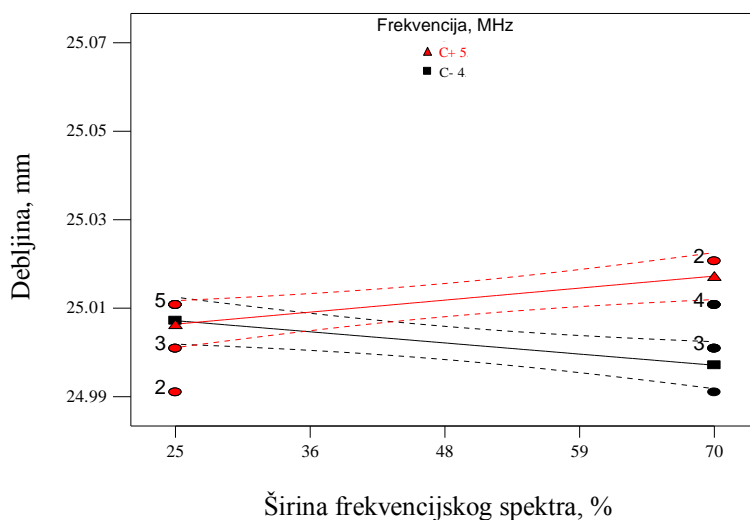


**Slika 32.** Dijagram ostatka prema rednom broju izvođenja regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo gel

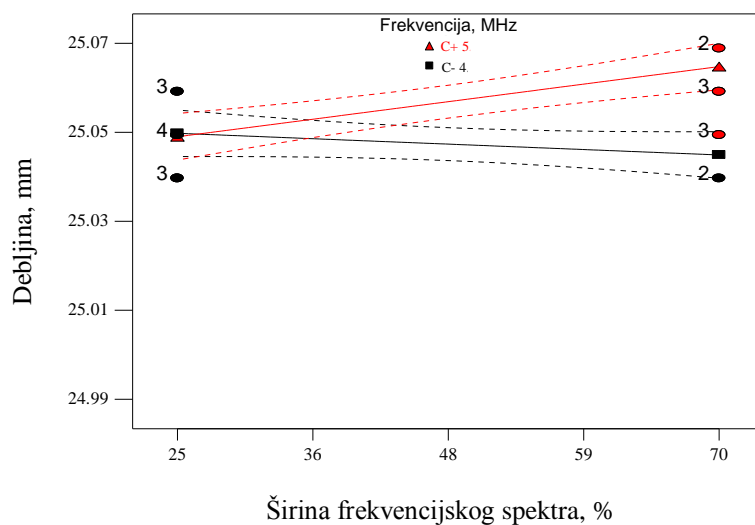


**Slika 33.** Dijagram ostatak u zavisnosti o očekivanim vrijednostima regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo gel

Prema rezultatima eksperimenta za određivanje utjecaja gela kao vrste kontaktnog sredstva kao značajna istaknula se interakcija nazivne frekvencije i širine frekvencijskog spektra (slika 34 i slika 35). Iz toga zaključujemo kako je sonda značajna kao faktor.



**Slika 34.** Grafički prikaz interakcije nazivne frekvencije i širine frekvencijskog spektra pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10  $\mu\text{m}$  (gel)



**Slika 35.** Grafički prikaz interakcije nazivne frekvencije i širine frekvencijskog spektra pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50  $\mu\text{m}$  (gel)

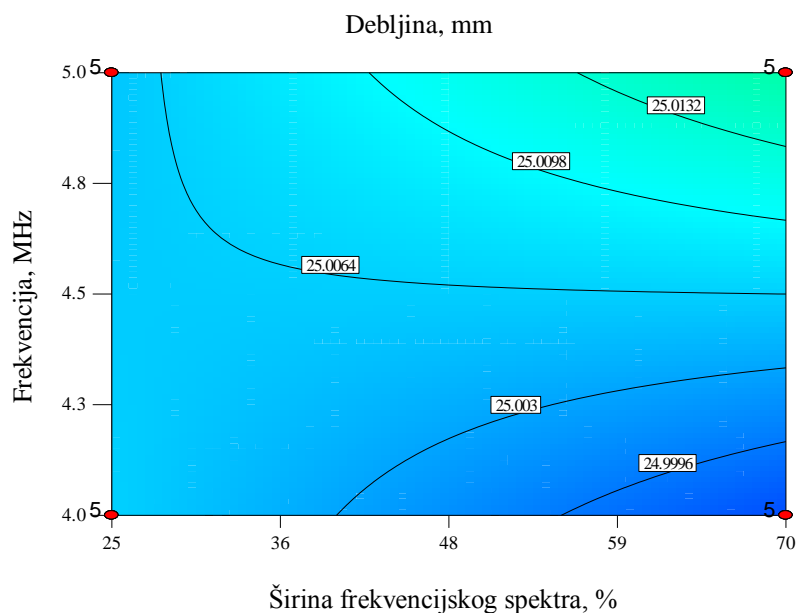
Za postavljeni model rezultat najbliži referentnoj vrijednosti izmjerene debljine ultrazvukom (slika 34) ostvaren je pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10  $\mu\text{m}$  korištenjem ultrazvučne sonde oznake K4N (tablica 11).

**Tablica 11.** Parametri sonde kojom je ostvaren rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine najbliži referentnoj vrijednosti (gel)

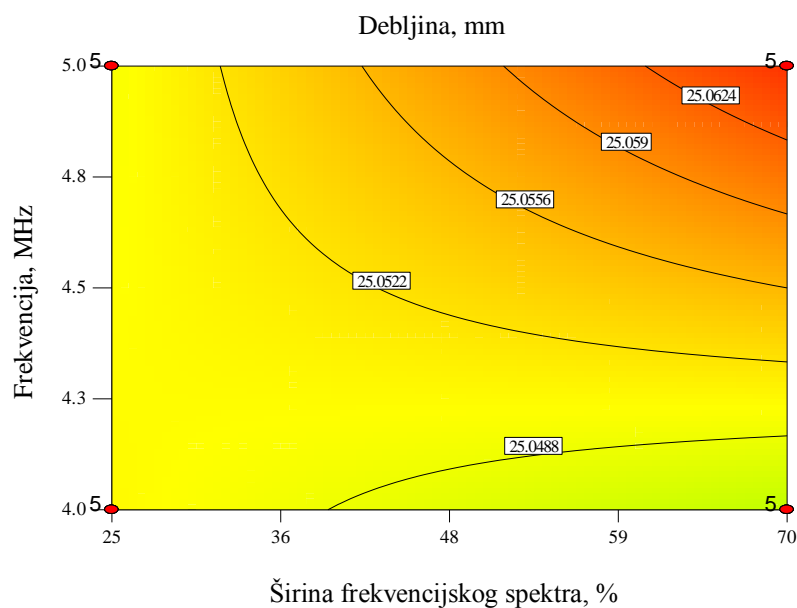
| Oznaka sonde | $f$ , MHz | $B_w$ , % |
|--------------|-----------|-----------|
| K4N          | 4         | 70        |

Konturni prikaz postavljenog regresijskog modela ultrazvučnog mjerenje debljine kada se očitavanje rezultata provodi pri razini debljine kontaktnog sredstva 10  $\mu\text{m}$  (slika 36) odnosno 50  $\mu\text{m}$  (slika 37) prikazuje linije konstantnog odziva u ravnini parametara ultrazvučne sonde *širina frekvencijskog spektra* i *nazivna frekvencija*.



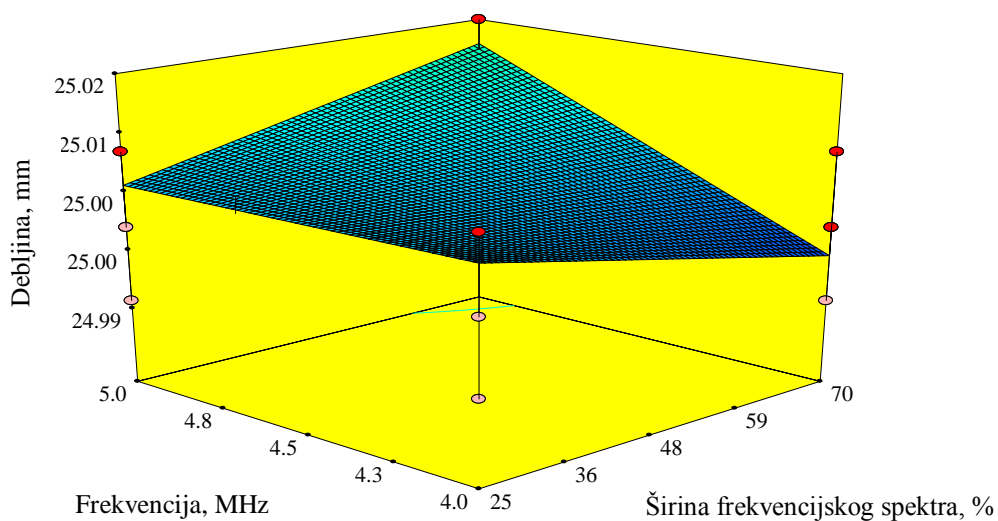


**Slika 36.** Konturni prikaz regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo gel pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10  $\mu\text{m}$

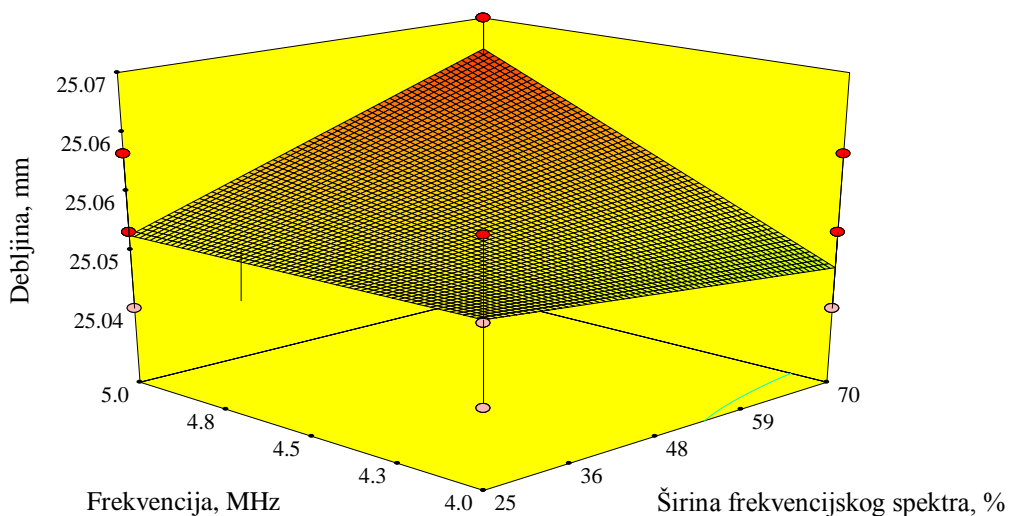


**Slika 37.** Konturni prikaz regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo gel pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50  $\mu\text{m}$ .

Odzivne površine prikazuje kako se mijenja rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine varirajući parametre sonde, odnosno nazivnu frekvenciju i širinu frekvencijskog spektra kada je razina debljine kontaktnog sredstva 10  $\mu\text{m}$  (slika 38) odnosno 50  $\mu\text{m}$  (slika 39).



**Slika 38.** Prikaz odzivne površine regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo gel pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10  $\mu\text{m}$



**Slika 39.** Prikaz odzivne površine regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo gel pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50  $\mu\text{m}$

Koristeći gel kao vrstu kontaktno sredstvo analizirani rezultati provedenog eksperimenta upućuju na značaj utjecaja zasebnih parametara *debljina kontaktnog sredstva* i *nazivna frekvencija sonde*. Značajan utjecaj ima i interakcija *nazivne frekvencije sonde* i *širine frekventijskog spektra*.

## 4.4 Utjecaj kontaktnog sredstva - voda

### 4.4.1 Analiza rezultata - kontaktno sredstvo voda

Generalni faktorski plan pokusa proveden je za određivanje utjecaja vode kao vrste kontaktnog sredstva sa slučajnim redoslijedom izvođenja (prilog A-3).

Koristeći vodu kao vrstu kontaktnog sredstva za provedeni eksperiment, analizirana je varijanca te je potvrđena značajnost postavljenog modela (tablica 12).

Na značajnost modela upućuje pripadajuća F-vrijednost koja iznosi 80,26, dok je F-vrijednost komponente „Odstupanje od modela“ za postavljeni model 1.74 uz vrijednost  $P$  od 0,0634 koja upućuje na to da je bilo kakvo odstupanje od modela posljedica šuma.

**Tablica 12.** Analiza varijance modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva (voda) i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine

| Izvor varijacije     | Suma kvadrata odstupanja | Broj stupnjeva slobode | Srednji kvadrat odstupanja | F - vrijednost         | P - vrijednost | Značajnost    |
|----------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Model                | 0,04                     | 5                      | $8,066 \times 10^{-3}$     | 80,26                  | < 0,0001       | značajan      |
| Članovi modela       |                          |                        |                            |                        |                |               |
| A                    | 0,032                    | 1                      | 0,032                      | 313,44                 | < 0,0001       | značajan      |
| B                    | $1,0 \times 10^{-6}$     | 1                      | $1,0 \times 10^{-6}$       | $9,950 \times 10^{-3}$ | 0,9208         | nije značajan |
| C                    | $6,514 \times 10^{-3}$   | 1                      | $6,514 \times 10^{-3}$     | 64,82                  | < 0,0001       | značajan      |
| AC                   | $4,205 \times 10^{-4}$   | 1                      | $4,205 \times 10^{-4}$     | 4,18                   | 0,0436         | značajan      |
| BC                   | $6,561 \times 10^{-3}$   | 1                      | $6,561 \times 10^{-3}$     | 65,28                  | < 0,0001       | značajan      |
| Ostatak              | $9,447 \times 10^{-3}$   | 94                     | $1,005 \times 10^{-4}$     |                        |                |               |
| Odstupanje od modela | $2,207 \times 10^{-3}$   | 14                     | $1,576 \times 10^{-4}$     | 1,74                   | 0,0632         | nije značajan |
| Čista greška         | $7,24 \times 10^{-3}$    | 80                     | $9,05 \times 10^{-5}$      |                        |                |               |
| Ukupno               | 0,05                     | 99                     |                            |                        |                |               |

Koeficijenti za kvalitetu izrađenog modela pokazuju da je 81,02% podataka objašnjeno preko postavljenog modela te je razlika između prilagođenog predviđenog koeficijenta determinacije 0,02 čime je potvrđena vjerodostojnost podataka (tablica 13). Vrijednost  $P$ , koja definira odnos signal-šum, zadovoljavajuća je i iznosi 30,542.

**Tablica 13.** *Kvaliteta izrađenog regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva (voda) i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine*

|   |        |
|---|--------|
| Standardna devijacija, mm   | 0,010  |
| Aritmetička sredina, mm   | 25,03  |
| Koeficijent varijacije, %   | 0,04   |
| $SKO_{pred}$ (predviđena suma kvadrata ostataka), mm <sup>2</sup> | 0,011  |
| $R^2$ - koeficijent determinacije                                 | 0,8102 |
| $R_{adj}^2$ - prilagođeni koeficijent determinacije               | 0,8001 |
| $R_{pre}^2$ - predviđeni koeficijent determinacije                | 0,7843 |
| Adekvatna preciznost  | 30,524 |

Tablica 14 prikazuje procjene koeficijenata, stupnjeve slobode, procijenjene pogreške te donje i gornje granice intervala povjerenja za svaki član modela.

**Tablica 14.** *Prikaz procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena pogreška, donje i gornje granice intervala povjerenja za svaki član modela (voda)*

| Član modela   | Procjena koeficijenta   | Stupnjevi slobode | Standardna pogreška    | 95%-tni interval povjerenja donja granica | 95%-tni interval povjerenja gornja granica |
|---------------|-------------------------|-------------------|------------------------|---|--|
| Slobodni član | 25,03                   | 1                 | $1,205 \times 10^{-3}$ | 25,03                                     | 25,03                                      |
| A             | 0,025                   | 1                 | $1,418 \times 10^{-3}$ | 0,022                                     | 0,028                                      |
| B             | $-1,667 \times 10^{-4}$ | 1                 | $1,671 \times 10^{-3}$ | $-3,484 \times 10^{-3}$                   | $3,151 \times 10^{-3}$                     |
| C             | $9,7 \times 10^{-3}$    | 1                 | $1,205 \times 10^{-3}$ | $7,308 \times 10^{-3}$                    | 0,012                                      |
| AC            | $2,9 \times 10^{-3}$    | 1                 | $1,418 \times 10^{-3}$ | $8,503 \times 10^{-5}$                    | $5,715 \times 10^{-3}$                     |
| BC            | 0,014                   | 1                 | $1,671 \times 10^{-3}$ | 0,010                                     | 0,017                                      |

#### 4.4.2 Analiza utjecaja vode kao vrste kontaktnog sredstva

Temeljem provedene regresijske analize dobiveni su procijenjeni regresijski koeficijenti za postavljanje regresijskog model koji u kodiranim vrijednostima glasi:

$$d_{\text{voda}} = 25,03 + 0,025A - 1,667 \times 10^{-4}B + 9,7 \times 10^{-3}C + 2,9 \times 10^{-3} + 0,014BC \quad (4-5)$$

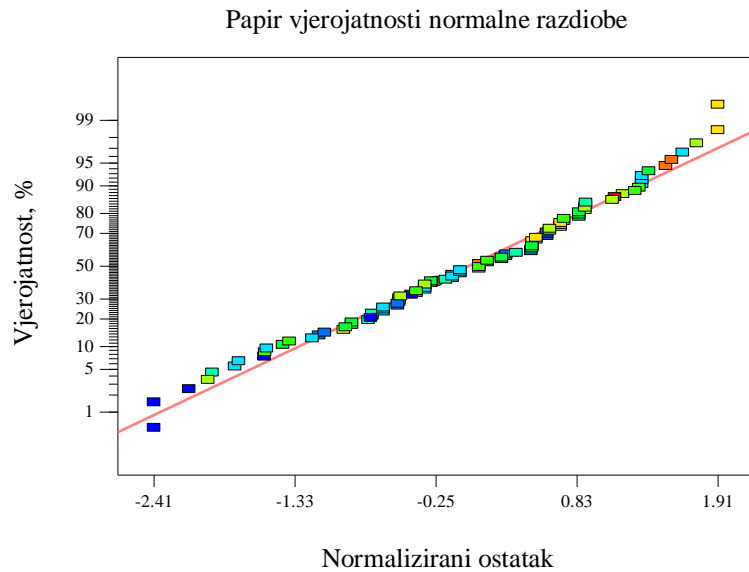
Regresijski model s kodiranim vrijednostima članova modela iz izraza (4-5) prevodi se u model sa stvarnim vrijednostima članova modela prema izrazu:

$$d_{\text{voda}} = 25,15 - 5 \times 10^{-5}s_c - 3,24444 \times 10^{-3}B_W - 0,0343f + 2,9 \times 10^{-4}s_c + 7,2 \times 10^{-4}B_Wf \quad (4-6)$$

gdje je:

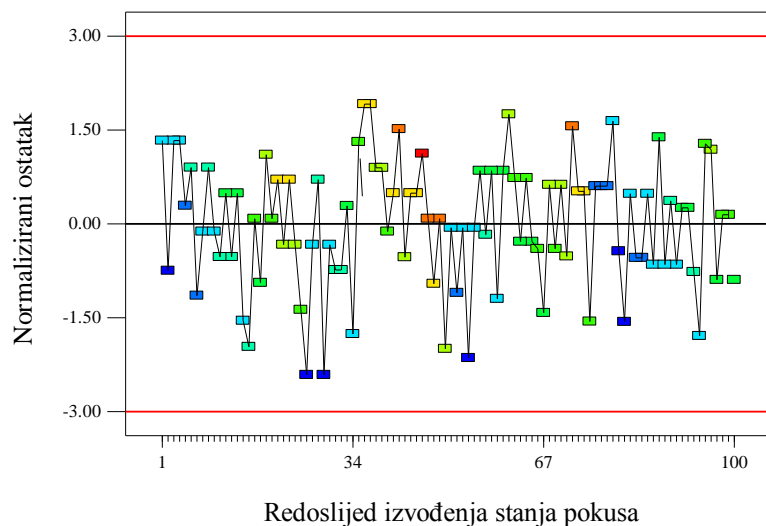
$d_{\text{voda}}$  ... procijenjena vrijednost prema regresijskom modelu za kontaktno sredstvo voda, mm

Rezultati analize ostatka provedenog eksperimenta, kada se kao vrsta kontaktnog sredstva koristi voda, ne odstupaju od linije normalne razdiobe i jasno opisuju njezin trend te nije potrebno provoditi korekciju rezultata mjerenja (slika 40).



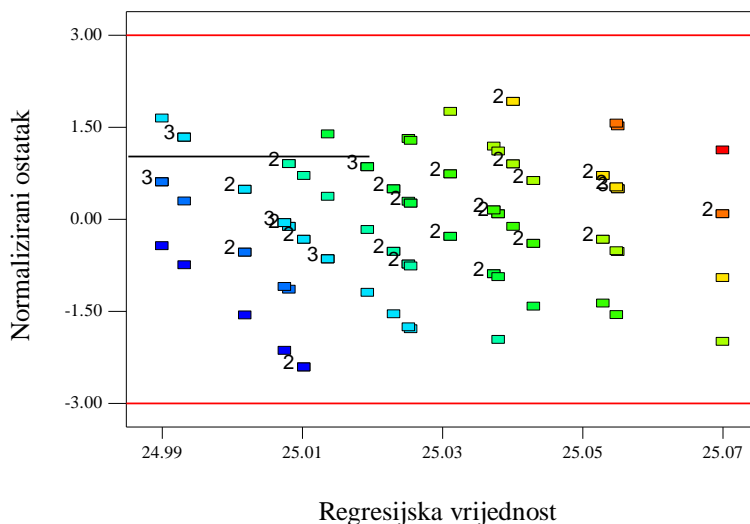
**Slika 40.** *Papir vjerojatnosti normalne razdiobe ostataka regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo voda*

Rezultati  $t$  testa ostataka prema rednom broju izvođenja pokusa koji upućuju na mogućnost postojanja sistemske pogreške, za promatrani model nemaju značajno odstupanje (slika 41).



**Slika 41.** *Dijagram ostataka prema rednom broju izvođenja regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo voda*

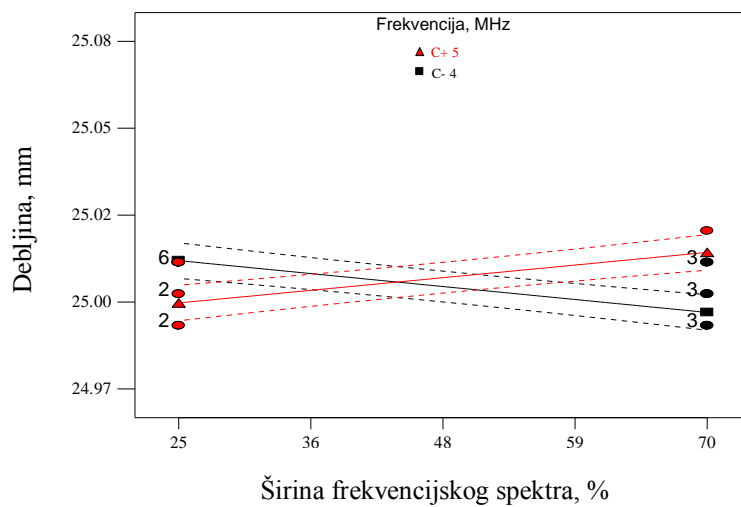
Nadalje, rezultati Studentove  $t$  razdiobe jednoliko su raspoređeni unutar područja očekivanih vrijednosti (slika 42).



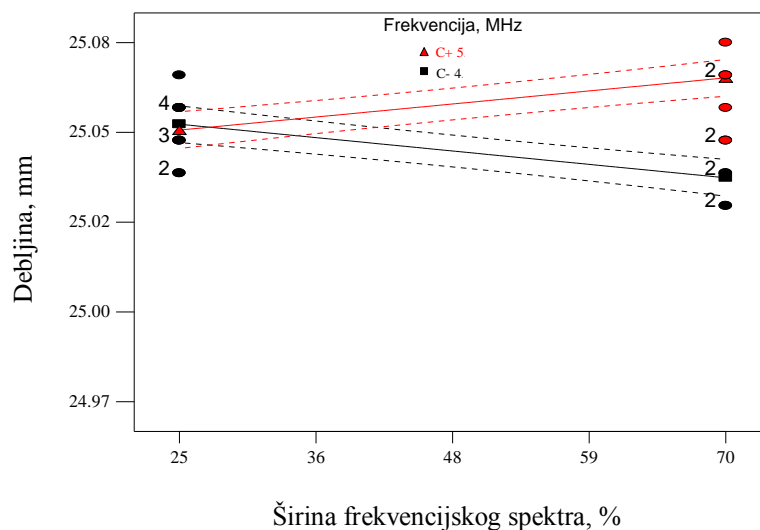
**Slika 42.** Dijagram ostataka u zavisnosti o očekivanim vrijednostima regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo voda

Analizom utjecajnih faktora na ultrazvučno mjerenje debljine kada se koristi voda kao vrsta kontaktnog sredstva, kao najznačajniji faktor istaknula se *debljina kontaktnog sredstva*. Prema značajnosti slijedi *nazivna frekvencija sonde* te interakcija *širine frekvencijskog spektra i nazivne frekvencije sonde* (slika 43 i slika 44).

Dijagram interakcije pokazuje značajnu razliku u dobivenom rezultatu izmjerene debljine ultrazvukom promjenom razine debljine kontaktnog sredstva u trenutku očitavanja rezultata mjerenja te promjenom vrste sonde.



**Slika 43.** Grafički prikaz interakcije nazivne frekvencije i širine frekvencijskog spektra pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10 µm (voda)



**Slika 44.** Grafički prikaz interakcije između nazivne frekvencije i širine frekvencijskog spektra pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50 µm (voda)

Za postavljeni model, rezultat najbliži referentnoj vrijednosti izmjerene debljine ultrazvukom (slika 43) ostvarena je pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10 µm korištenjem ultrazvučnih sondi oznaka K4N (tablica 15).

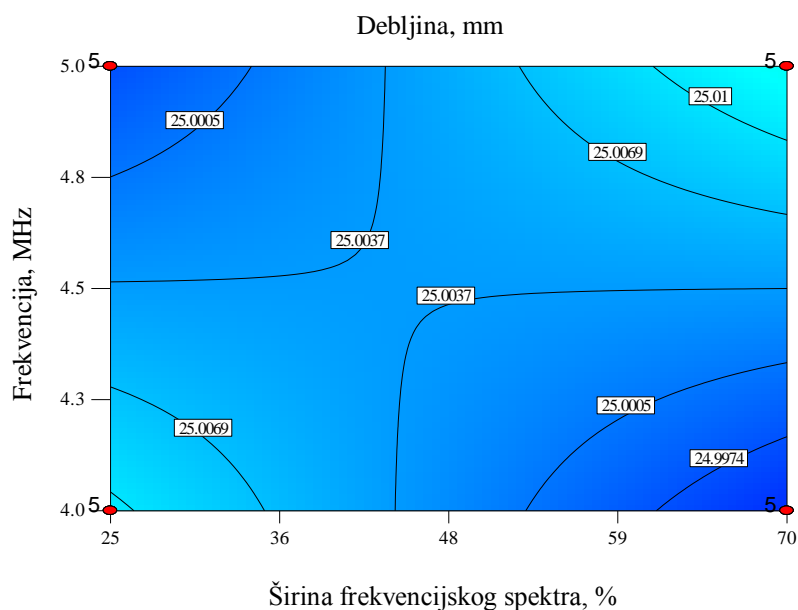


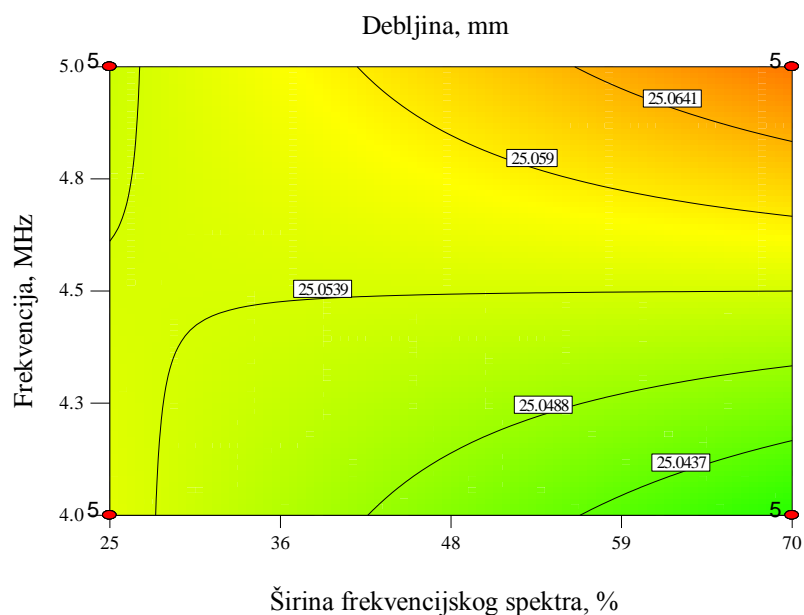
**Tablica 15.** Parametri sonde kojom je ostvaren rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine najbliži referentnoj vrijednosti (voda)

| Oznaka sonde | $f$ , MHz | $B_w$ , % |
|--------------|-----------|-----------|
| K4N          | 4         | 70        |

Odabirom navedenih parametara ultrazvučne sonde postiže se minimalna razlika između rezultata debljine izmjerene ultrazvukom i referentne debljine mjernog mjesta. Referentna debljina mjernog mjesta iznos 25,001 mm.

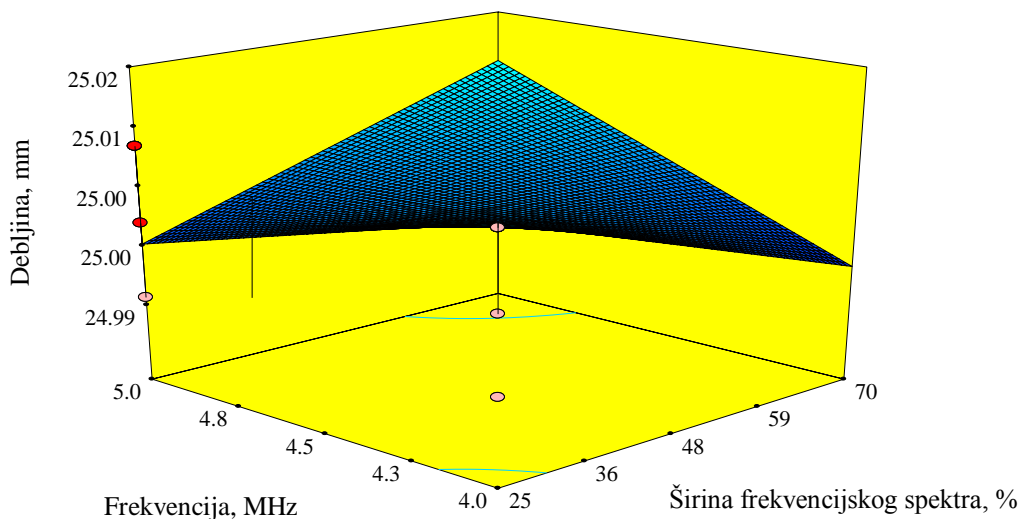
Za postavljeni regresijski model ultrazvučnog mjerenja debljine konturni prikaz rezultata mjerenja kada se očitavanje provodi pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10  $\mu\text{m}$  (slika 45) odnosno 50  $\mu\text{m}$  (slika 46) iscrtava linije konstantnog odziva u ravnini parametara ultrazvučne sonde širina frekvencijskog spektra i nazivna frekvencija sonde.

**Slika 45.** Konturni prikaz regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo voda pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10  $\mu\text{m}$

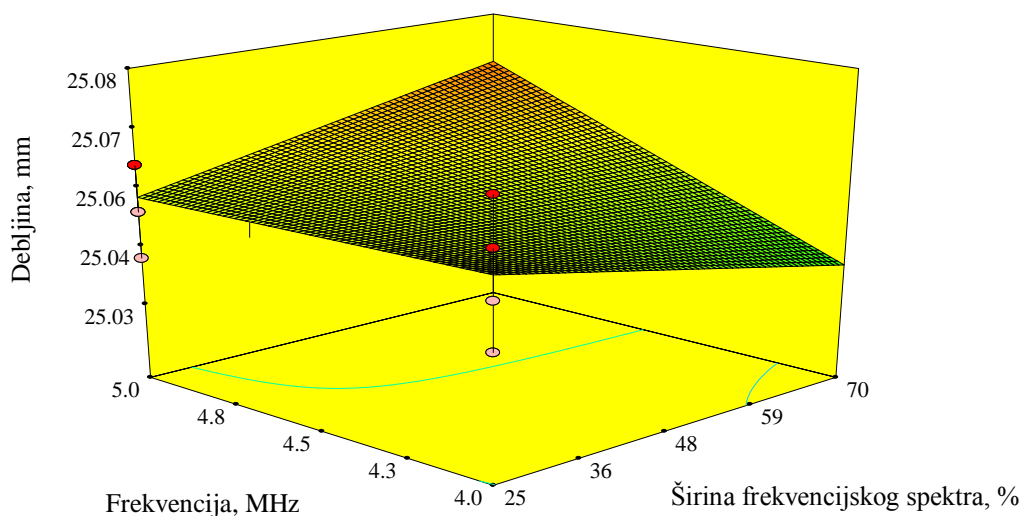


**Slika 46.** Konturni prikaz regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo voda pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50  $\mu\text{m}$

Odzivne površine provedenog eksperimenta prikazuju razlike u vrijednosti izmjerene debljine ultrazvukom za različite kombinacije razina odabranih faktora pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10  $\mu\text{m}$  (slika 47) i 50  $\mu\text{m}$  (slika 48).



**Slika 47.** Prikaz odzivne regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo voda pri razini debljine kontaktnog sredstva od 10  $\mu\text{m}$



**Slika 48.** Prikaz odzivne površine regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za kontaktno sredstvo voda pri razini debljine kontaktnog sredstva od 50  $\mu\text{m}$

Analiza varijance provedenog eksperimenta kada se kao vrsta kontaktnog koristi voda ukazuje na značajnost četiri glavna efekta. Zasebni faktori koji su se istaknuli kao značajni su *debljina kontaktnog sredstva* i *nazivna frekvencija sonde*. Značajne interakcije u regresijskom modelu su *širina frekvencijskog spektra* i *nazivna frekvencija sonde*, te interakcija *debljine kontaktnog sredstva* i *nazivna frekvencija sonde*.

## **5. ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA UTJECAJA ULTRAZVUČNOG UREĐAJA**

Općenito možemo reći kako su karakteristike ultrazvučnog uređaja za mjerenje debljine ključne za postizanje točnih i preciznih rezultata i kao takva vrlo značajna za pouzdanost dobivenog rezultata u postupku mjerenja. Tip ultrazvučnog uređaja potrebno je odabrati u ovisnosti o zahtjevu ultrazvučnog mjernog postupka. Odabirom odgovarajućeg tipa ultrazvučnog uređaja za postupak ultrazvučnog mjerenja debljine uz adekvatno podešavanje, znatno se može utjecati na dobiveni rezultat mjerenja.

Preliminarna istraživanja upućuju da ultrazvučni uređaj ima značajan utjecaj na varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine [24]. U poglavlju 5 prikazani su parametri uređaja koji su se istaknuli kao najznačajniji, te je razrađen plan pokusa za razvoj regresijskog modela. U poglavlju 5.1. prikazan je postupak određivanja referentnih vrijednosti parametara uređaja dok je problematika mjerenja ultrazvučne brzine (s ciljem podešavanja ultrazvučnog mjernog sustava) razrađena i opisana u poglavlju 5.2.

S ciljem razvoja matematičkog modela za procjenu mjerne nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine, rezultati provedenog eksperimenta za određivanje utjecaja parametara uređaja na varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine prikazani su u poglavlju 5.3. Dobiveni regresijski model podloga je za procjenu mjerne nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja uslijed utjecaja ultrazvučnog uređaja.

### **5.1 Plan pokusa za kvantificiranje utjecaja parametara ultrazvučnog uređaja**

Ultrazvučno mjerenje debljine stijenke izravno ovisi o sposobnosti opreme i njezinim radnim karakteristikama, te o pomoćnim sredstvima koja služe za podešavanje sustava i analizu dobivenih rezultata mjerenja. Važan preduvjet za pouzdano provođenje ultrazvučnog mjerenja debljine jest stabilnost karakteristika uređaja tijekom duljeg vremena mjerenja.

Za kvalitetno provođenje ultrazvučnog mjerenja potrebno je poznavanje karakteristika uređaja i njegovih postavki i s fizikalne i s iskustvene strane. Za iskustvo je potrebno

dugogodišnje mjerenje na ultrazvučnom mjernom uređaju kako bi se stekao cjelokupni dojam o pouzdanosti mjerenja i varijabilnosti rezultata. Stoga mjeritelj općenito svojim iskustvom i načinom podešavanja parametara uređaja utječe na varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke.

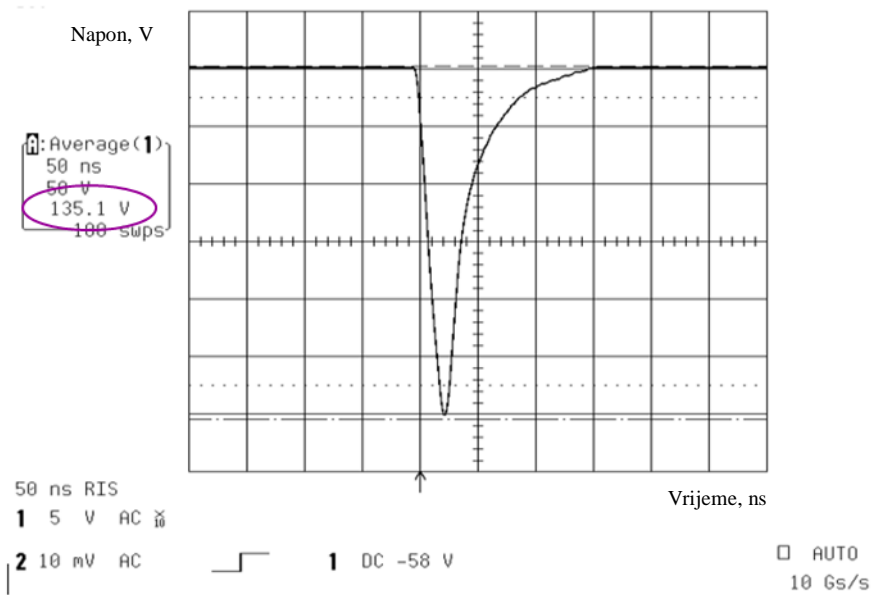
Iz definiranja problema istraživanja jasno se upućuje na problem vezan uz postavljanje ultrazvučnog mjernog sustava koji najčešće ovisi o kombinaciji praktičnog iskustva i teoretskih saznanja samog mjeritelja. Provedena su brojna preliminarna istraživanja pojedinih utjecajnih faktora prije nego što su se odredili faktori koji svojim utjecajem doprinose varijabilnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke. Time je postavljeni eksperiment proveden iterativnim postupkom čime se na odgovarajući način utjecajnim faktorima odredio raspon unutar kojih su varirani, odgovarajući broj razina koje se koriste i odgovarajuće mjerne jedinice.

Pri ultrazvučnom mjerenju debljine za pobuđivanje ultrazvučnog impulsa mogu se koristiti naponi pobudnog impulsa različitih vrijednosti što je predodređeno samim uređajem. Pobudni impuls sastoji se od triju parametara:

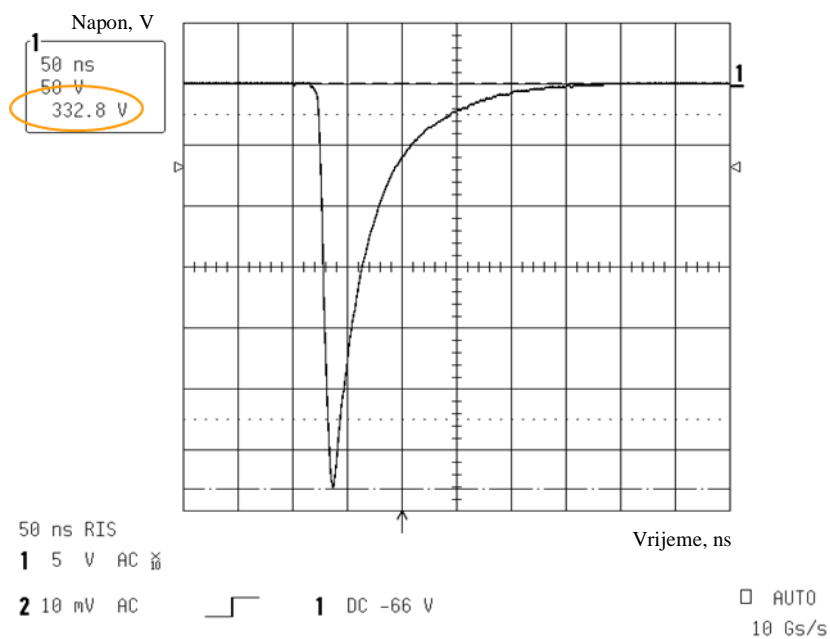
- vrijeme porasta impulsa, ns
- vrijeme trajanja impulsa, ns
- amplituda napona, V.

Promjenom postavki vrijednosti napona pobudnog impulsa moguće je mijenjati vrijeme trajanja i vrijeme porasta pobudnog impulsa. Za odabrani ultrazvučni uređaj USN60, na kojem su provedena mjerenja, pobuđivanje impulsa moguće je podesiti na maksimalnu (*high*) i minimalnu (*low*) vrijednost. Postavkom napona pobudnog impulsa na maksimalnu vrijednost povećava se osjetljivost ultrazvučnog mjernog sustava jer se postiže veća energija generiranih ultrazvučnih valova, dok se minimalna vrijednost napona pobudnog impulsa koristi za sonde koje imaju široki frekvencijski spektar.

Da bi se kvantificirao utjecaj ultrazvučnog uređaja na rezultat mjerenja debljine, potrebno je odrediti referentne vrijednosti postave napona na razinu „*high*“ odnosno na razinu „*low*“. Vrijednost amplitude napona izmjerena je pomoću digitalnog osciloskopa LeCroy 9310AM pri minimalnoj vrijednosti (slika 49) odnosno maksimalnoj (slika 50) vrijednosti napona pobudnog impulsa.



**Slika 49.** Ekranski prikaz pobudnog impulsa pri minimalnoj („low“) vrijednosti napona pobudnog impulsa



**Slika 50.** Ekranski prikaz pobudnog impulsa pri maksimalnoj („high“) vrijednosti napona pobudnog impulsa

Temeljem snimljenih pobudnih impulsa određena je referentna vrijednost napona (tablica 16) pri standardnom zaključnom opterećenju odašiljačkog sklopa od  $50 \Omega$  što je u skladu s ASTM E 1324-11 [60].

**Tablica 16.** Parametri postavke napona pobudnog impulsa na ultrazvučnom uređaju

| Postavka uređaja | Napon izmjeren osciloskopom $U_p$ , V |
|------------------|---------------------------------------|
| „low“            | 135                                   |
| “high“           | 332                                   |

Osim parametra uređaja *napon pobudnog impulsa*, kao utjecajni faktor istaknuo se i parametar uređaja *prigušni otpor* u oscilatornom krugu ultrazvučnog uređaja. Budući da su preliminarna istraživanja dokazala značajnost postavke *prigušnog otpora*, odabrani faktor analiziran je u planu pokusa za određivanje utjecaja uređaja na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine.

Za odabrani ultrazvučni uređaj USN60, vrijednost parametra uređaja *prigušni otpor* podesiv je na sljedeće vrijednosti:  $50 \Omega$ ,  $75 \Omega$ ,  $150 \Omega$  i  $1000 \Omega$ . Postavkom na vrijednost od  $1000 \Omega$  postiže se najmanje prigušenje s prikazom visokih i širokih amplituda, dok se postavkom na vrijednost od  $50 \Omega$  reduciraju najviše frekvencije što rezultira s uskom amplitudom visoke rezolucije [61].

Kroz analizu preliminarnih istraživanja ustanovljeno je da parametar ultrazvučne sonde *širina frekvencijskog spektra* značajno utječe na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine. *Širina frekvencijskog spektra* ovisi o mehaničkom prigušenju slobodnih oscilacija pretvornika. S jačim prigušenjem impuls će biti kraći, dok će *širina frekvencijskog spektra* biti veća. Sa slabijim prigušenjem impuls će biti dužeg trajanja s užim frekvencijskim spektrom.

Budući da je tip sonde utjecajni faktor, mjerenja su se provodila s ultrazvučnim sondama različitih nazivnih karakteristika. U tom smislu za postavljeni plan pokusa koristile su se ultrazvučne sonde oznaka MB4S, K4N, MB5S i K5N, za koje je karakteristična različita kombinacija parametara sonde, *nazivna frekvencija* i *širina frekvencijskog spektra* (tablica 1).

Za postavljeni plan pokusa mjerenja su se provodila na radnom etalonu br. 1 na jednom mjernom mjestu čija je referentna vrijednost izmjerena na mjernoj granitnoj ploči digitalnim visinomjerom „Mitotoyo“ rezolucije 0,1  $\mu\text{m}$ . Referentna vrijednost debljine mjernog mjesta iznosi 25,04 mm. Odabran je princip mjerenja u modu 3.

Da bi se dobile odzivne površine i zavisnosti izmjerene debljine ultrazvukom kao izlazne varijable o ulaznim vrijednostima parametara, svi navedeni parametri prikazani su kao kontinuirane numeričke veličine s pripadajućim rasponima vrijednosti (tablica 17).

**Tablica 17.** Shema plana pokusa za određivanje utjecaja uređaja

|                           | Nazivna frekvencija, MHz         |      |                          |      |                                  |      |                          |      |
|---------------------------|----------------------------------|------|--------------------------|------|----------------------------------|------|--------------------------|------|
|                           | 4                                |      |                          |      | 5                                |      |                          |      |
|                           | Širina frekventijskog spektra, % |      |                          |      | Širina frekventijskog spektra, % |      |                          |      |
|                           | 25                               |      | 70                       |      | 25                               |      | 70                       |      |
|                           | Prigušni otpor, $\Omega$         |      | Prigušni otpor, $\Omega$ |      | Prigušni otpor, $\Omega$         |      | Prigušni otpor, $\Omega$ |      |
| Napon pobudnog impulsa, V | 50                               | 1000 | 50                       | 1000 | 50                               | 1000 | 50                       | 1000 |
| 135                       |                                  |      |                          |      |                                  |      |                          |      |
| 332                       |                                  |      |                          |      |                                  |      |                          |      |

Za potrebe određivanja utjecaja uređaja na točnost i preciznost ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke u ovisnosti o parametrima sonde postavljen je model provedbe mjerenja temeljem rezultata preliminarnih istraživanja. Budući da se postavljeni eksperiment sastoji od ukupno četiri faktora od kojih svaki ima 2 razine, proveden je faktorski plan pokusa  $2^4$ . Za svaku kombinaciju ulaznih parametara (stanja pokusa) mjerenja su ponavljana pet puta ( $n = 5$ ). Analiza rezultata temelji se na ukupno 16 stanja pokusa odnosno 80 rezultata eksperimenta. Da bi se smanjio utjecaj kontaktnog sredstva na rezultate eksperimenta, odabran je princip mjerenja u modu 3.

U procesu podešavanja ultrazvučnog sustava općenito, moguće su dvije osnovne tehnike podešavanja:

- pomoću nazivne ultrazvučne brzine u etalonu
- pomoću nazivne debljine etalona.



S jedne strane norma definira parametre ultrazvučne sonde kojom se provodi određivanje ultrazvučne brzine, dok s druge strane ne definira postavke parametara uređaja. Preliminarnim je istraživanjima ustanovljena značajna razlika dobivenih rezultata mjerenja ultrazvučne brzine s obzirom na postavke parametara ultrazvučnog uređaja. Stoga je u postupku kvantificiranja utjecaja parametara ultrazvučnog uređaja i parametara ultrazvučne sonde na rezultat mjerenja debljine potrebno ultrazvučnu brzinu odrediti točnijom metodom kako bi se minimizirao utjecaj ultrazvučne brzine na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine.

## 5.2 Određivanje grupne brzine ultrazvuka u materijalu

Brzina ultrazvučnog impulsa u materijalu općenito, važan je podesivi parametar na ultrazvučnom mjernom uređaju, a kao takav ima značajan doprinos varijaciji rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine. Ultrazvučni su impulsi mehanička i elastična titranja čestica u materijalu, pa će oblik ultrazvučnog impulsa ovisiti i o mikrostrukturi i o mehaničkim svojstvima materijala. Sukladno tome vrsta materijala mjerene komponente značajno doprinosi promjeni brzine ultrazvuka. Nadalje, brzina ultrazvuka ovisit će i o gustoći materijala mjerene komponente i elastičnim svojstvima kao i unutarnjim naprezanjima te se značajno mijenja i s promjenom temperature materijala. Brzina propagiranja ultrazvučnog impulsa u materijalu ne ovisi o nazivnoj frekvenciji odabrane ultrazvučne sonde. Međutim, podešavanjem vrijednosti ultrazvučne brzine na uređaju prije početka svakog mjerenja, moguće je unijeti određenu pogrešku u vidu odstupanja postavljene ultrazvučne brzine na uređaju u odnosu na stvarnu vrijednosti. Preliminarna su istraživanja pokazala da postoji značajna razlika između rezultata dobivenih u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine pri istoj podešenoj brzini, ali različitim parametrima uređaja. Kako bi se mogla utvrditi varijabilnost uređaja, potrebno je smanjiti utjecaj brzine, što je moguće samo uz njezino točno određivanje preciznijom metodom.

Trend današnjih istraživanja u pogledu određivanje brzine ultrazvuka dovodi nas do razvoja mnogobrojnih metoda koje se baziraju na obradi ultrazvučnog signala. U skladu s time, brzinu ultrazvuka moguće je odrediti pomoću osciloskopa na materijalu čija je debljina poznata. Za potrebe analize utjecaja metode mjerenja ultrazvučne grupne brzine odabrane su dvije metode mjerenja, pomoću digitalnog osciloskopa odnosno metoda preklapanja signala („*pulse overlap*“) i metoda mjerenja vremena proleta između dvaju ekvidistantna vrha susjednih odjeka od zadnje stijenke („*peak to peak*“). Temeljem snimljenih impulsa odjeka od zadnje stijenke u

vremenskoj domeni definira se vrijeme između dvaju susjednih signala što nam predstavlja temelj za određivanje grupne brzine ultrazvuka.

Mjerenje vremena proleta ultrazvučnog impulsa da bi se odredila brzine ultrazvuka, provedena su na radnom etalonu br. 1 čija je referentna debljina izmjerena na mjernoj granitnoj ploči digitalnim visinomjerom „Mitotoyo“ rezolucije  $0,1 \mu\text{m}$  i iznosi 25,04 mm. Mjerenja grupne brzine ultrazvuka provedena su sukladno zahtjevima norme [28] u pogledu odabranih parametar ultrazvučne sonde.

Normom su definirani sljedeći parametri ultrazvučne sonde:

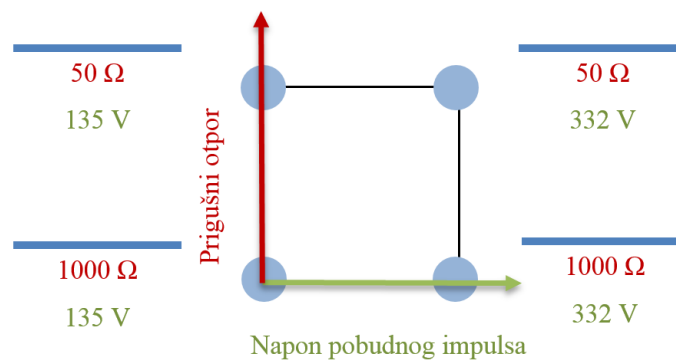
- nazivna frekvencija sonde: minimalno 5 MHz
- širina frekvencijskog spektra: širokopolasna
- veličina pretvornika: 10 mm do 15 mm.

Za potrebe određivanja ultrazvučne grupne brzine odabrana je sonda oznake G5KB (tablica 18) čije tehničke specifikacije zadovoljavaju zahtjeve u pogledu određivanja ultrazvučne brzine.

**Tablica 18.** *Parametri sonde za određivanje ultrazvučne brzine*

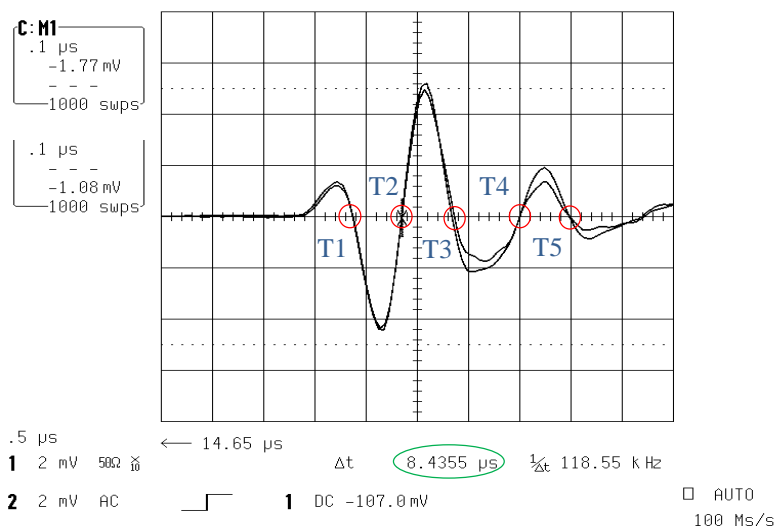
| Oznaka sonde | $f$ , MHz | $B_w$ , % | $D$ , mm |
|--------------|-----------|-----------|----------|
| G5KB         | 5         | 100       | 10       |

Budući da normom nije definirana razina parametara ultrazvučnog uređaja za određivanja ultrazvučne grupne brzine u materijalu, ultrazvučna grupna brzina određena je pri svakoj kombinaciji podesivih razina parametara uređaja (*prigušni otpor, napon pobudnog impulsa*) (slika 51).



Slika 51. Razine mjerenja vrijednosti ultrazvučne brzine

Vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa (TOF – *Time Of Flight*) mjereno je metodom preklapanja signala („*pulse overlap*“) jer su preliminarna istraživanja pokazala manja rasipanja rezultata oko srednje vrijednosti u odnosu na metodu „*peak to peak*“. Mjerenje je provedeno na preklopljenim signalima u pet točaka (T1, T2, T3, T4, T5) uz tri ponavljanja  $n = 3$  (slika 52). Dobiveni rezultati na osciloskopu prikazuju vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa od trenutka ulaska ultrazvučnog impulsa u materijal do trenutka kada se prvi reflektirani impuls vratio natrag u ultrazvučnu sondu (tablica 19). Mjerenja su ponavljana 3 puta.



Slika 52. Točke mjerenja vremena proleta na preklopljenim signalima

**Tablica 19.** Rezultati mjerenja vremena proleta ultrazvučnog impulsa u materijalu

| Napon pobudnog impulsa, V | Prigušni otpor, $\Omega$ | Točke preklapanja signala | Broj ponavljanja mjerenja ( $n$ )  |               |               |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--|---------------|---------------|
|                           |                          |                           | 1  | 2             | 3             |
|                           |                          |                           | Vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa ( $t_{\text{TOF}}$ ), $\mu\text{s}$ |               |               |
| 135                       | 50                       | T1                        | 8,4100   | 8,4110        | 8,4060        |
|                           |                          | T2                        | 8,4100   | 8,4105        | 8,4105        |
|                           |                          | T3                        | 8,4020   | 8,3990        | 8,4000        |
|                           |                          | T4                        | 8,3915   | 8,3965        | 8,3960        |
|                           |                          | T5                        | 8,4250   | 8,4185        | 8,4130        |
|                           |                          | $\bar{t}_{\text{TOF}}$    | <b>8,4077</b>  | <b>8,4071</b> | <b>8,4051</b> |
|                           |                          | $s_{(\text{TOF})}$        | <b>0,012</b>   | <b>0,009</b>  | <b>0,007</b>  |
|                           | 1000                     | T1                        | 8,4105   | 8,4135        | 8,4140        |
|                           |                          | T2                        | 8,4030   | 8,4070        | 8,4060        |
|                           |                          | T3                        | 8,3895   | 8,3890        | 8,3870        |
|                           |                          | T4                        | 8,4100   | 8,4170        | 8,4150        |
|                           |                          | T5                        | 8,4235   | 8,4170        | 8,4140        |
|                           |                          | $\bar{t}_{\text{TOF}}$    | <b>8,4047</b>  | <b>8,4087</b> | <b>8,4078</b> |
|                           |                          | $s_{(\text{TOF})}$        | <b>0,0088</b>  | <b>0,0120</b> | <b>0,0106</b> |
| 332                       | 50                       | T1                        | 8,4150   | 8,4140        | 8,4160        |
|                           |                          | T2                        | 8,4140   | 8,4130        | 8,4140        |
|                           |                          | T3                        | 8,4020   | 8,4030        | 8,4020        |
|                           |                          | T4                        | 8,3960   | 8,3960        | 8,3940        |
|                           |                          | T5                        | 8,4140   | 8,4160        | 8,4130        |
|                           |                          | $\bar{t}_{\text{TOF}}$    | <b>8,4082</b>  | <b>8,4084</b> | <b>8,4078</b> |
|                           |                          | $s_{(\text{TOF})}$        | <b>0,0087</b>  | <b>0,0086</b> | <b>0,0094</b> |
|                           | 1000                     | T1                        | 8,4170   | 8,4170        | 8,4180        |
|                           |                          | T2                        | 8,4100   | 8,4110        | 8,4110        |
|                           |                          | T3                        | 8,3940   | 8,3930        | 8,3940        |
|                           |                          | T4                        | 8,4050   | 8,4060        | 8,4050        |
|                           |                          | T5                        | 8,4240   | 8,4220        | 8,4260        |
|                           |                          | $\bar{t}_{\text{TOF}}$    | <b>8,4100</b>  | <b>8,4098</b> | <b>8,4100</b> |
|                           |                          | $s_{(\text{TOF})}$        | <b>0,0115</b>  | <b>0,0112</b> | <b>0,0111</b> |

Grupna brzina ultrazvuka u materijalu etalona uz poznatu lokalnu debljinu određuje se pomoću izraza:

$$v_g = \frac{d}{t_{\text{TOF}}} \quad (5-1)$$

Budući da se mjerilo vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa od trenutka ulaska u materijal pa sve do povratka prvog reflektiranog signala u sondu, prijeđeni put ultrazvučnog impulsa jednak je dvostrukoj debljini mjernog mjesta te iznosi 50,08 mm.

Tablica 20 prikazuje iznos aritmetičkih sredina grupne brzine ultrazvuka s pripadajućim skupnim standardnim odstupanjem [GUM H.3.6] za svaku od kombinacija podesivih razina parametara uređaja.

**Tablica 20.** Rezultati izmjerene grupne brzine ultrazvuka u materijalu

| Napon pobudnog impulsa, V | Prigušni otpor, $\Omega$ | Broj ponavljanja mjerenja   |                                 |                                 | Aritmetička sredina grupne brzine ultrazvuka s pripadajućim skupnim standardnim odstupanjem, m/s |             |
|---------------------------|--------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|--|-------------|
|                           |                          | 1   | 2                               | 3                               |  |             |
|                           |                          | Grupna brzina proleta ultrazvučnog impulsa ( $v_g$ ) i standardno odstupanje, m/s |                                 |                                 |  |             |
| 332                       | 50                       | $v_g = 5956$<br>$s(v_g) = 6,15$   | 5956<br>$s(v_g) = 6,07$         | 5956<br>$s(v_g) = 6,69$         | $\bar{v}_g$  | <b>5956</b> |
|                           |                          |   |                                 |                                 | $s_p$  | <b>6,31</b> |
|                           | 1000                     | $v_g = 5955$<br>$s(v_g) = 8,12$   | $v_g = 5955$<br>$s(v_g) = 7,91$ | $v_g = 5955$<br>$s(v_g) = 7,84$ | $\bar{v}_g$  | <b>5955</b> |
|                           |                          |   |                                 |                                 | $s_p$  | <b>7,96</b> |
| 135                       | 50                       | $v_g = 5956$<br>$s(v_g) = 8,71$   | $v_g = 5957$<br>$s(v_g) = 6,48$ | $v_g = 5958$<br>$s(v_g) = 5,03$ | $\bar{v}_g$  | <b>5957</b> |
|                           |                          |   |                                 |                                 | $s_p$  | <b>6,91</b> |
|                           | 1000                     | $v_g = 5959$<br>$s(v_g) = 6,24$   | $v_g = 5956$<br>$s(v_g) = 8,33$ | $v_g = 5956$<br>$s(v_g) = 7,51$ | $\bar{v}_g$  | <b>5957</b> |
|                           |                          |   |                                 |                                 | $s_p$  | <b>7,41</b> |

### 5.3 Određivanje fazne brzine ultrazvuka u materijalu

U poglavlju 2 opisana je i teorijski razrađena osnovna razlika između fazne i grupne brzine ultrazvuka u materijalu. Na mjerenje fazne brzine značajno utječe anizotropnost materijala odnosno orijentacija kristala, neparalelnost kontaktne i odzivne površine mjerene komponente i ostale sustavne pogreške [62].

Ultrazvučna tehnika odjeka najčešće je korišteni princip za određivanje fazne brzine ultrazvuka u materijalu, a prednost joj je u odnosu na ostale tehnike što je ponovljiva s visokom točnošću. Temeljem određivanja ultrazvučne grupne brzine u materijalu moguće je procijeniti faznu brzinu ultrazvuka pomoću disperzijske relacije za stojne valove koja je primjenjiva i za sinusoidalne putujuće valove iz izraza (2–10).

Fazna brzina određena je za najnepovoljniji slučaj koji predstavlja sustavnu pogrešku mjerenja za valnu duljinu fazne brzine. Fazna brzina ultrazvuka u materijalu određena je za svaku od kombinacija podesivih razina parametara uređaja (*prigušni otpor, napon pobudnog impulsa*) (tablica 21).

**Tablica 21.** Rezultati izračunate fazne brzine ultrazvuka u materijalu

| Napon pobudnog impulsa, V | Prigušni otpor, $\Omega$ | Broj ponavljanja mjerenja                                       |                                |                                | Aritmetička sredina fazne brzine ultrazvuka s pripadajućim skupnim standardnim odstupanjem, m/s |                |
|---------------------------|--------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|---|----------------|
|                           |                          | 1   | 2                              | 3                              |   |                |
|                           |                          | Fazna brzina ultrazvuka ( $v_f$ ), i standardno odstupanje, m/s |                                |                                |   |                |
| 332                       | 50                       | $v_f=5956,09$<br>$s(v_f)=6,15$                                  | $v_f=5956,13$<br>$s(v_f)=6,07$ | $v_f=5956,37$<br>$s(v_f)=6,69$ | $\bar{v}_f$   | <b>5956,19</b> |
|                           |                          |   |                                |                                | $s_p$   | <b>6,31</b>    |
|                           | 1000                     | $v_f=5954,99$<br>$s(v_f)=8,12$                                  | $v_f=5955,13$<br>$s(v_f)=7,91$ | $v_f=5954,99$<br>$s(v_f)=7,84$ | $\bar{v}_f$   | <b>5955,04</b> |
|                           |                          |   |                                |                                | $s_p$   | <b>7,96</b>    |
| 135                       | 50                       | $v_f=5956,44$<br>$s(v_f)=8,71$                                  | $v_f=5956,87$<br>$s(v_f)=6,48$ | $v_f=5958,29$<br>$s(v_f)=5,03$ | $\bar{v}_f$   | <b>5957,2</b>  |
|                           |                          |   |                                |                                | $s_p$   | <b>6,91</b>    |
|                           | 1000                     | $v_f=5958,58$<br>$s(v_f)=6,24$                                  | $v_f=5955,74$<br>$s(v_f)=8,33$ | $v_f=5956,37$<br>$s(v_f)=7,51$ | $\bar{v}_f$   | <b>5956,89</b> |
|                           |                          |   |                                |                                | $s_p$   | <b>7,41</b>    |

Sukladno dobivenim rezultatima grupne brzine ultrazvuka (tablica 20) i fazne brzine (tablica 21) moguće je odrediti kolika je najveća razlika dviju brzina. Za najnepovoljniji slučaj razlika između grupne i fazne brzine ultrazvuka iznosi 0,44 m/s. S obzirom na rezoluciju očitavanja instrumenta od 1 m/s izračunom dobivene vrijednosti fazne brzine ultrazvuka u materijalu ne odstupaju značajno od grupne brzine pa će se daljnja mjerenja provoditi s obzirom na grupnu brzinu.

Dobiveni rezultati ultrazvučne grupne brzine korišteni su u daljnjem istraživanju utjecaja ultrazvučnog uređaja i ultrazvučne sonde na rezultat mjerenja. Tako da bi se podesio ultrazvučni mjerni sustav, kalibriranje se provodilo pomoću poznate grupne brzine ultrazvuka.

Kroz postavljeni plan pokusa, mjerenja za utvrđivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i ultrazvučne sonde na varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine provedena su pri svakoj od kombinacija razina odabranih parametara ultrazvučne sonde (*nazivna frekvencija* i

širina frekvencijskog spektra) i uređaja (napon pobudnog impulsa i prigušni otpor). Da bi se smanjio utjecaj ultrazvučne brzine, podešavanje uređaja provedeno je pri svakoj od kombinacija ulaznih parametara tako da se podesila pripadajuća brzina izmjerena pomoću osciloskopa. Ulazne varijable u postavljenom planu pokusa za analizu utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine jesu:

- faktor A – napon pobudnog impulsa
- faktor B – širina frekvencijskog spektra
- faktor C – nazivna frekvencija sonde
- faktor D – prigušni otpor

Izlazna varijabla u postavljenom planu pokusa za analizu utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine je:

- izmjerena debljina ultrazvučnom tehnikom odjeka

## 5.4 Analiza rezultata za određivanje utjecaja uređaja

Prilikom izvođenja plana pokusa za kvantificiranje utjecaja uređaja i vrste sonde na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine primijenjen je princip slučajnog redoslijeda izvođenja s ciljem minimiziranja utjecaja nekontroliranih poremećaja. Obzirom na pet ponovljenih mjerenja za svaku kombinaciju parametara, rezultati eksperimenta baziraju se na 80 eksperimentalnih točaka odnosno 16 stanja pokusa. Rezultati mjerenja prikazani su prilogu B.

Na značajnost modela kao i pojedinih faktora te njihovih interakcija navodi nas vrijednost  $P$  koja mora biti manja od 0,05 za odbacivanje hipoteza  $H_0$ . Hipoteza  $H_0$  za postavljeni plan pokusa glasi: ultrazvučni uređaj u zavisnosti o vrsti ultrazvučne sonde ne utječu na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine.

Analiza varijance provedenog eksperimenta za određivanje utjecaja uređaja i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine pokazuje značajnost postavljenog modela (tablica 22). F-vrijednost koja predstavlja omjer procjenjene varijance člana modela i procjenjene varijance ostataka za postavljeni model iznosi 77,89 te uz vrijednost  $P < 0,0001$  pokazuje značajnost modela.

F-vrijednost komponente "Odstupanje od modela" stavlja u odnos varijaciju spomenute komponente i varijaciju proizašlu iz šuma. F-vrijednost komponente "Odstupanje od modela" za postavljeni model iznosi 0,95 uz vrijednost  $P$  od 0,4666 koja upućuje na to da je odstupanje od modela posljedica šuma.

**Tablica 22.** Analiza varijance modela za određivanje utjecaja uređaja i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine stijenke

| Izvor varijacije     | Suma kvadrata odstupanja | Broj stupnjeva slobod | Srednji kvadrat odstupanja | F -vrijednost | $P$ - vrijednost | Značajnost    |
|----------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------|------------------|---------------|
| Model                | 0,04                     | 9                     | $4,459 \times 10^{-3}$     | 77,89         | < 0,0001         | značajan      |
| Članovi modela       |                          |                       |                            |               |                  |               |
| A                    | $1,711 \times 10^{-3}$   | 1                     | $1,711 \times 10^{-3}$     | 29,89         | < 0,0001         | značajan      |
| B                    | 0,013                    | 1                     | 0,013                      | 222,73        | < 0,0001         | značajan      |
| C                    | 0,02                     | 1                     | 0,02                       | 352,16        | < 0,0001         | značajan      |
| D                    | $6,125 \times 10^{-5}$   | 1                     | $6,125 \times 10^{-5}$     | 1,07          | 0,3045           | nije značajan |
| AB                   | $3,612 \times 10^{-4}$   | 1                     | $3,612 \times 10^{-4}$     | 6,31          | 0,0143           | značajan      |
| AD                   | $6,612 \times 10^{-4}$   |                       | $6,612 \times 10^{-4}$     | 11,55         | 0,0011           | značajan      |
| BC                   | $1,531 \times 10^{-3}$   |                       | $1,531 \times 10^{-3}$     | 26,75         | < 0,0001         | značajan      |
| BD                   | $2,531 \times 10^{-3}$   |                       | $2,531 \times 10^{-3}$     | 44,21         | < 0,0001         | značajan      |
| CD                   | $3,613 \times 10^{-4}$   | 1                     | $3,613 \times 10^{-4}$     | 6,31          | 0,0143           | značajan      |
| Ostatak              | $4,008 \times 10^{-3}$   | 70                    | $5,725 \times 10^{-5}$     |               |                  |               |
| Odstupanje od modela | $3,275 \times 10^{-4}$   | 6                     | $5,458 \times 10^{-5}$     | 0,95          | 0,4666           | nije značajan |
| Čista greška         | $3,68 \times 10^{-3}$    | 64                    | $5,75 \times 10^{-5}$      |               |                  |               |
| Ukupno               | 0,044                    | 79                    |                            |               |                  |               |

Iz koeficijenta determinacije koji pokazuje određenu kvalitetu izrađenog modela zaključujemo da je 90,92% podataka objašnjeno preko postavljenog modela te da je F razlika između prilagođenog i predviđenog koeficijenta determinacije 0,016 što upućuje na vjerodostojnost podataka i izrađenog regresijskog modela (tablica 23).

Također je vrijednost adekvatne preciznosti koja definira odnos signal-šum zadovoljavajuća i iznosi 25,7.



**Tablica 23.** *Kvaliteta izrađenog regresijskog modela za određivanje utjecaja uređaja i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine*

|  |                        |
|--|------------------------|
| Standardno odstupanje, mm  | $7,566 \times 10^{-3}$ |
| Aritmetička sredina, mm  | 25,04                  |
| Koeficijent varijacije, %  | 0,03                   |
| $SKO_{\text{pred}}$ (predviđena suma kvadrata ostataka), $\text{mm}^2$ | $5,234 \times 10^{-3}$ |
| $R^2$ - koeficijent determinacije                                      | 0,9092                 |
| $R_{\text{adj}}^2$ - prilagođeni koeficijent determinacije             | 0,8975                 |
| $R_{\text{pre}}^2$ - predviđeni koeficijent determinacije              | 0,8814                 |
| Aдекватna preciznost   | 25,7                   |

Tablica 24 prikazuje procjene koeficijenata, stupnjeve slobode, procijenjene pogreške, te donje i gornje granice intervala povjerenja na razini 95% za svaki član modela.

**Tablica 24.** *Prikaz procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena pogreška, donje i gornje granice intervala povjerenja za svaki član modela (uređaj)*

| Član modela   | Procjena koeficijenta   | Stupnjevi slobode | Standardna pogreška    | 95%-tni interval povjerenja donja granica | 95%-tni interval povjerenja gornja granica |
|---------------|-------------------------|-------------------|------------------------|---|--|
| Slobodni član | 25,04                   | 1                 | $8,459 \times 10^{-4}$ | 25,04                                     | 25,04                                      |
| A             | $-4,625 \times 10^{-3}$ | 1                 | $8,459 \times 10^{-4}$ | $-6,312 \times 10^{-3}$                   | $-2,938 \times 10^{-3}$                    |
| B             | -0,013                  | 1                 | $8,459 \times 10^{-4}$ | -0,014                                    | -0,011                                     |
| C             | 0,016                   | 1                 | $8,459 \times 10^{-4}$ | 0,014                                     | 0,018                                      |
| D             | $-8,75 \times 10^{-4}$  | 1                 | $8,459 \times 10^{-4}$ | $-2,562 \times 10^{-3}$                   | $8,122 \times 10^{-4}$                     |
| AB            | $-2,125 \times 10^{-3}$ | 1                 | $8,459 \times 10^{-4}$ | $-3,812 \times 10^{-3}$                   | $-4,378 \times 10^{-4}$                    |
| AD            | $-2,875 \times 10^{-3}$ | 1                 | $8,459 \times 10^{-4}$ | $-4,562 \times 10^{-3}$                   | $-1,188 \times 10^{-3}$                    |
| BC            | $4,375 \times 10^{-3}$  | 1                 | $8,459 \times 10^{-4}$ | $2,688 \times 10^{-3}$                    | $6,062 \times 10^{-3}$                     |
| BD            | $5,625 \times 10^{-3}$  | 1                 | $8,459 \times 10^{-4}$ | $3,938 \times 10^{-3}$                    | $7,312 \times 10^{-3}$                     |
| CD            | $2,125 \times 10^{-3}$  | 1                 | $8,459 \times 10^{-4}$ | $4,378 \times 10^{-4}$                    | $3,812 \times 10^{-3}$                     |

### 5.4.1 Prikaz rezultata mjerenja za određivanje utjecaja uređaja

Nakon provedenog eksperimenta prema planu pokusa  $2^4$  regresijskom analizom rezultata mjerenja dobiveni su procijenjeni koeficijenti za postavljanje regresijskog modela koji opisuje kako se mijenja vrijednost ultrazvučnog mjerenja debljine u zavisnosti o ulaznim parametrima uređaja i ultrazvučne sonde.

U kodiranim vrijednostima regresijski model glasi:

$$d_{Ur} = 25,04 - 4,625 \times 10^{-3}A - 0,013B + 0,016C - 8,75 \times 10^{-4}D - \\ - 2,125 \times 10^{-3}AB - 2,875 \times 10^{-3}AD + 4,375 \times 10^{-3}BC + 5,625 \times 10^{-3}BD + \\ + 2,125 \times 10^{-3}CD \quad (5-2)$$

Regresijski model s kodiranim vrijednostima članova modela iz izraza (5-2) prevodi se u model sa stvarnim vrijednostima članova modela prema izrazu:

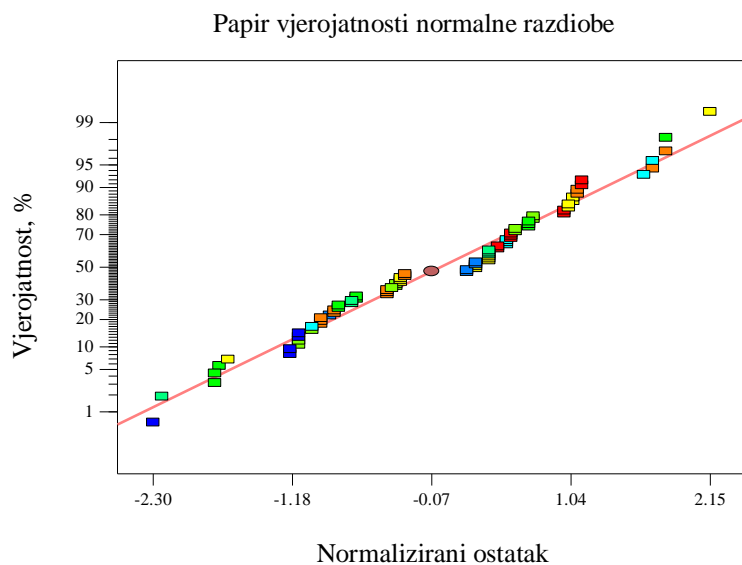
$$d_{Ur} = 25,03280 + 3,08502 \times 10^{-5}U_p - 2,3635 \times 10^{-3}B_W + 8,58041 \times 10^{-3}f \\ - 5,27571 \times 10^{-5}R_p - 9,58827 \times 10^{-7}U_p B_W - 6,1448 \times 10^{-8}U_p R_p \\ + 3,88889 \times 10^{-4}B_W f + 5,26316 \times 10^{-7}B_W R_p + 8,94737 \times 10^{-6}f R_p \quad (5-3)$$

gdje je:

$d_{Ur}$  ... procijenjena vrijednosti prema regresijskom modelu za ultrazvučni uređaj, mm

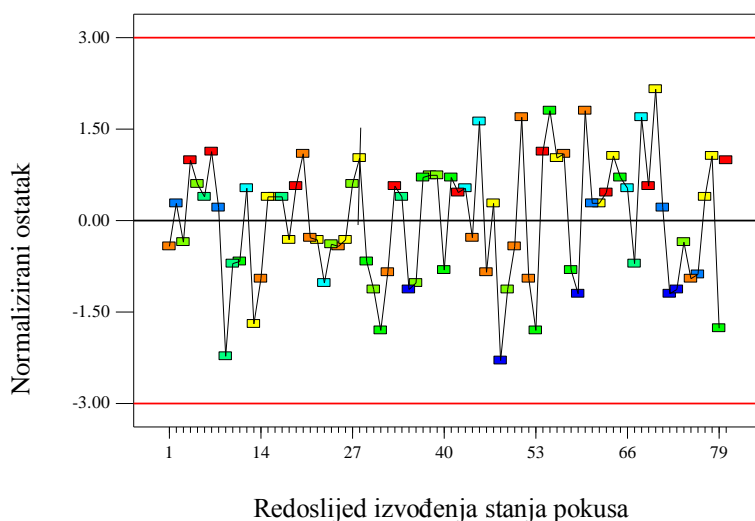
Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka u odnosu na vrijednost predviđenog odziva pokazuje postoji li obrazac razdiobe prikazanih ostataka u odnosu na vrijednosti izračunatog (predviđenog) odziva.

Analizom ostataka dokazano je da su podaci svakog uzorka distribuirani normalno i nezavisno s jednakim varijancama za svaku razinu faktora (slika 53). Budući da je papir vjerojatnosti ostataka većinom raspodijeljen po normalnoj razdiobi model je odgovarajuće postavljeni i nije ga potrebno korigirati.

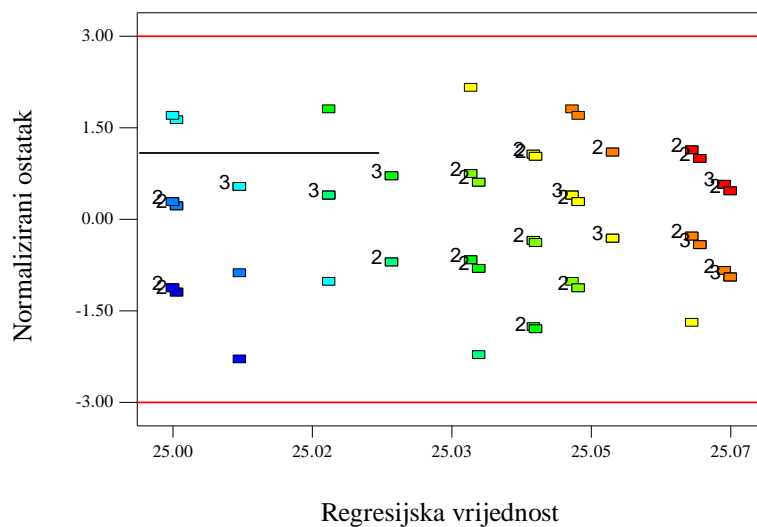


**Slika 53.** Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za ultrazvučni uređaj

Postojanje sustavne pogreške koja bi mogla utjecati na izlaznu varijablu postavljenog regresijskog modela tijekom izvođenja pokusa, provjerava se dijagramom ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa. Prilikom izvođenja plana pokusa za određivanje utjecaja uređaja i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine nije došlo do sustavne pogreške uslijed čega odabrani model nema značajnog odstupanja (slika 54) te su rezultati Studentove  $t$  razdiobe jednoliko raspoređeni unutar područja očekivanih vrijednosti (slika 55).



**Slika 54.** Dijagram ostataka prema rednom broju izvođenja regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za ultrazvučni uređaj

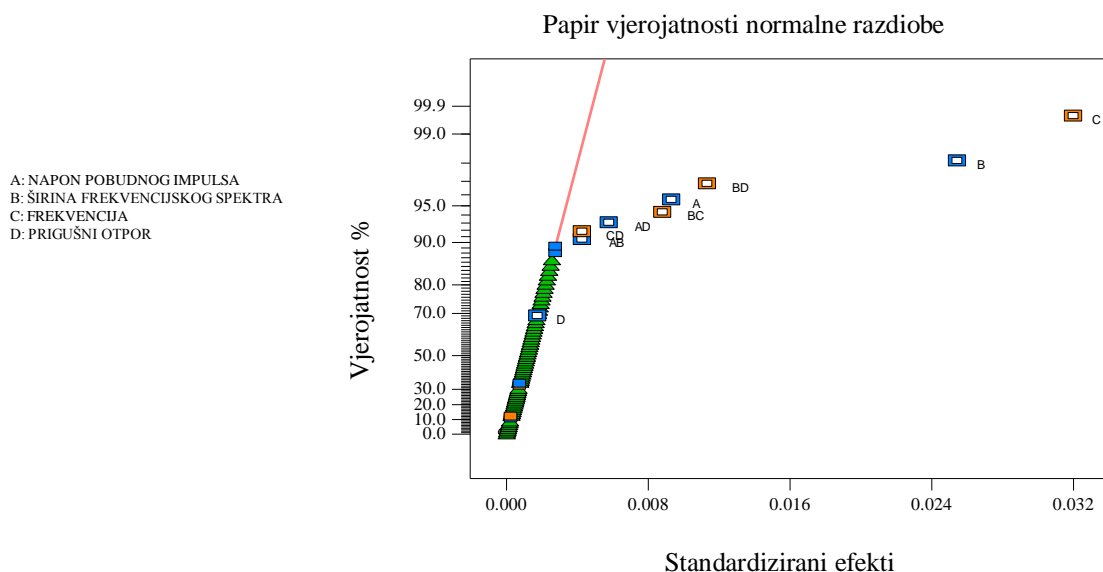


**Slika 55.** Dijagram ostataka u zavisnosti o očekivanim vrijednostima regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za ultrazvučni uređaj

Rezultati provedenog eksperimenta za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine pokazuju značajnost parametara ultrazvučne sonde, *nazivna frekvencija* i *širina frekvenzijskog spektra* te na parametar ultrazvučnog uređaja, *napon pobudnog impulsa* kao tri samostalna utjecajna faktora. Osim navedenih faktora značajne su i dvije interakcije:

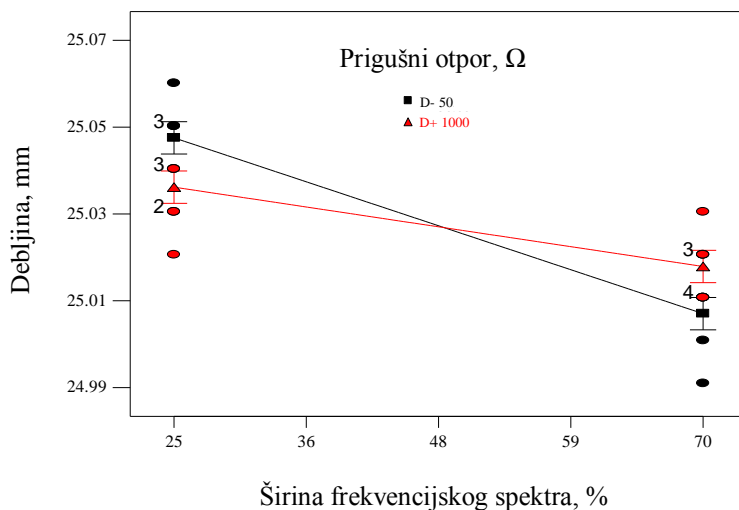
- širina frekvenzijskog spektra i prigušni otpor
- širina frekvenzijskog spektra i nazivna frekvencija.

Dijagram koji jasno prikazuje postojanost signifikantnih utjecaja samostalnih faktora i interakcija u provedenom eksperimentu je dijagram vjerojatnosti normalne razdiobe. Za sve faktore i interakcije koji ne leže na pravcu, koji prikazuje vjerojatnost normalne raspodjele podataka, i znatno odstupanje od njega može se utvrditi da imaju značajan utjecaj na izlaznu varijablu. Dijagram vjerojatnosti normalne razdiobe za postavljene regresijski model jasno prikazuje značajan utjecaj samostalnih faktora A, B i C kao i interakcija BD, BC, AD, CD i AB (slika 56).

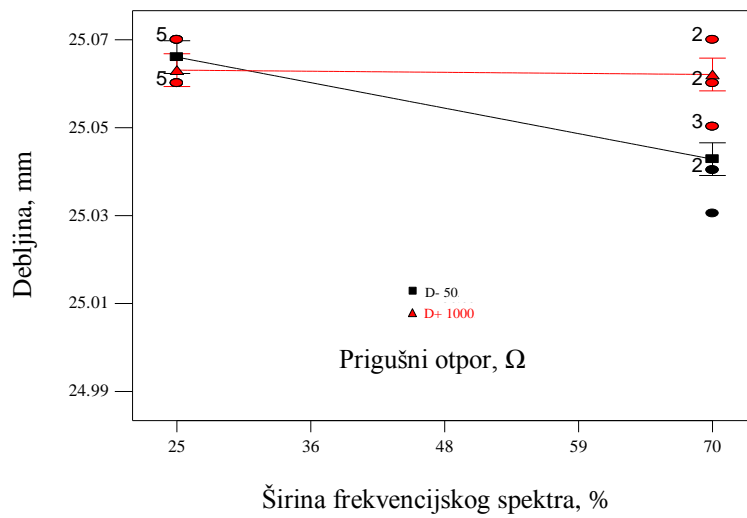


**Slika 56.** Dijagram vjerojatnosti normalne razdiobe regresijskog modela za procjenu debljine mjerene komponente za ultrazvučni uređaj

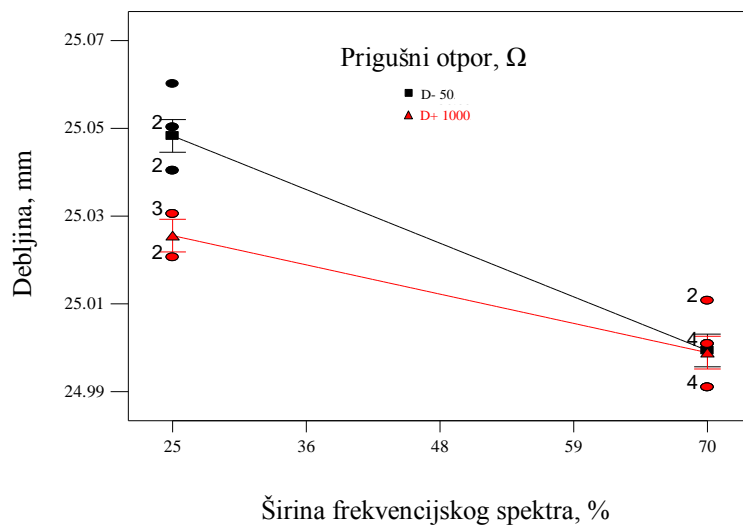
Za provedeni eksperiment s ciljem određivanja utjecaja uređaja i vrste sonde na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine kao najznačajnija interakcija istaknula se interakcija širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora (slika 57 - slika 60).



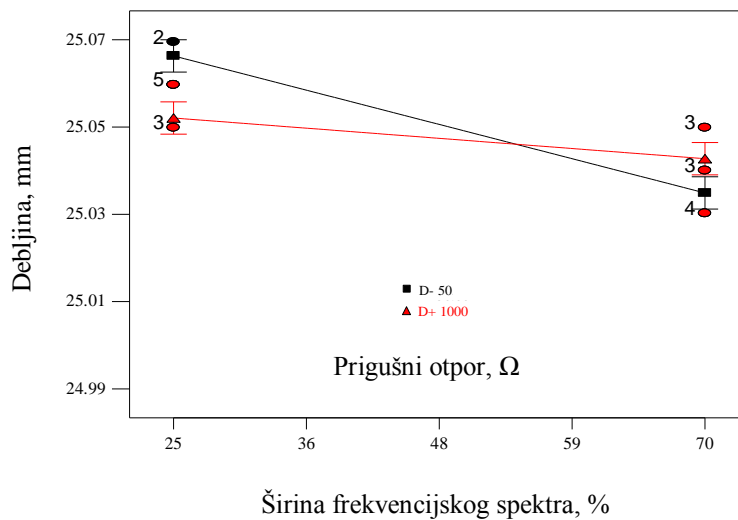
**Slika 57.** Grafički prikaz interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 4 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 135 V



**Slika 58.** Grafički prikaz interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 5 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 135 V



**Slika 59.** Grafički prikaz interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 4 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 332 V



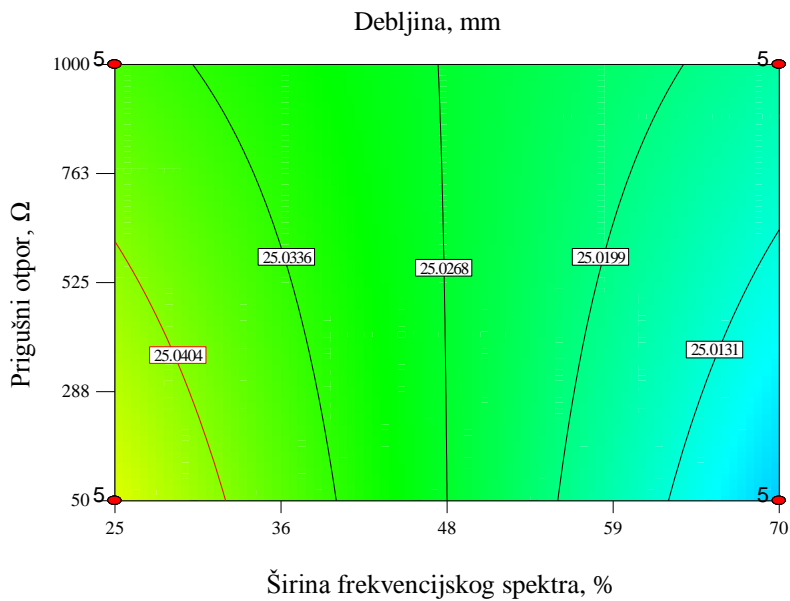
**Slika 60.** Grafički prikaz interakcije širine frekventijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 5 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 332 V

U tom smislu rezultat najbliži referentnoj vrijednosti izmjerene debljine ultrazvukom ostvaren je korištenjem sonde oznake K5N (slika 60) pri sljedećim postavkama parametara uređaja (tablica 25):

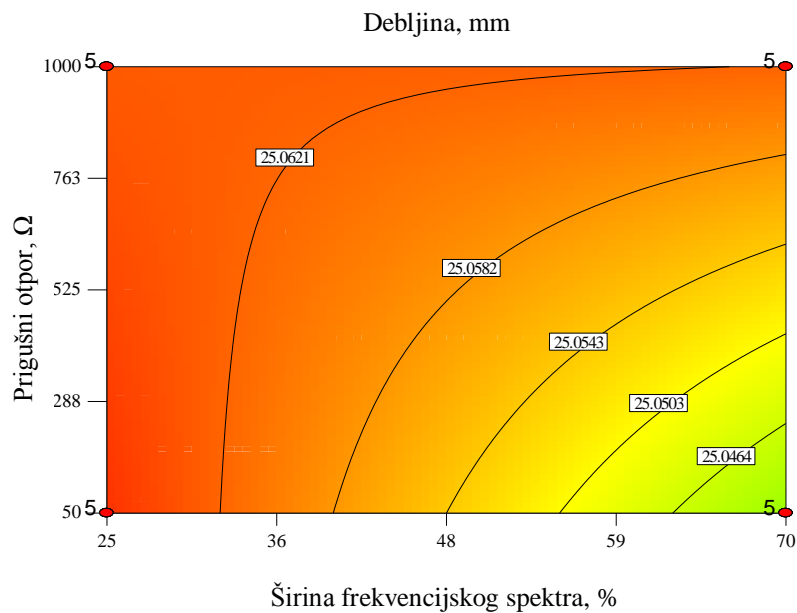
**Tablica 25.** Parametri uređaja i sonde s kojima je ostvaren rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine najbliži referentnoj vrijednost

| Oznaka sonde | $f$ , MHz | $B_w$ , % | $U_p$ , V | $R_p$ , $\Omega$ |
|--------------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| K5N          | 5         | 70        | 332       | 1000             |

Konturni prikazi interakcije širina frekventijskog spektra i prigušni otpor prikazuju rezultate ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke pri svim kombinacijama razina parametara uređaja i parametara sonde (slika 61-slika 68).

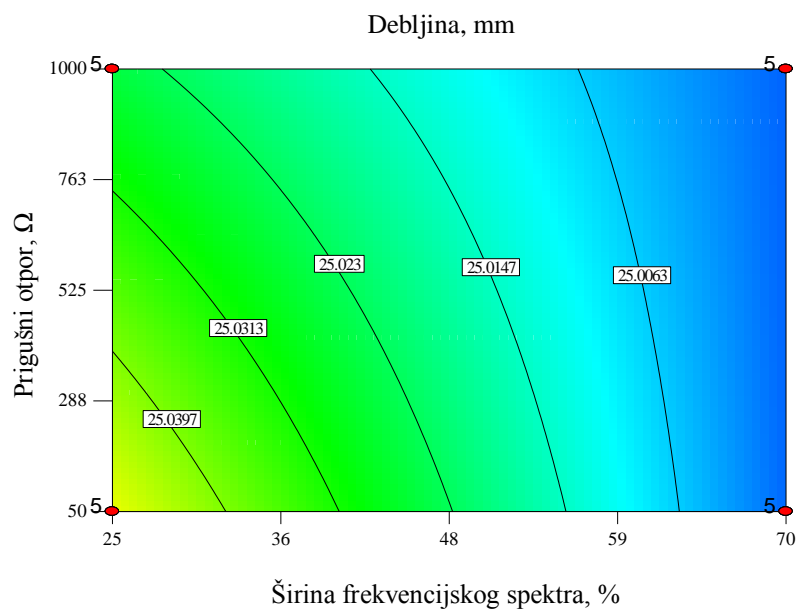


**Slika 61.** Konturni prikaz interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 4 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 135 V

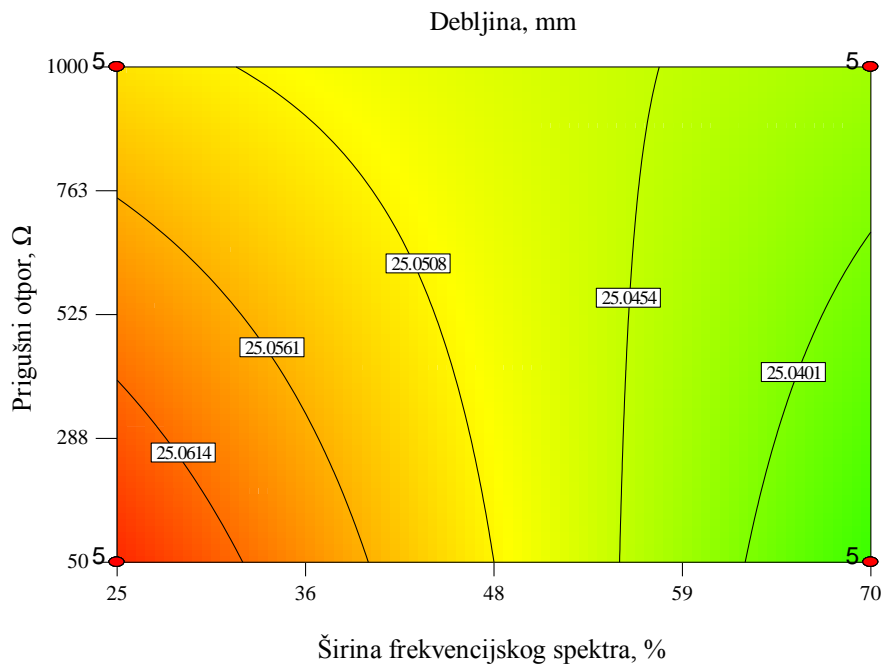


**Slika 62.** Konturni prikaz interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 5 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 135 V



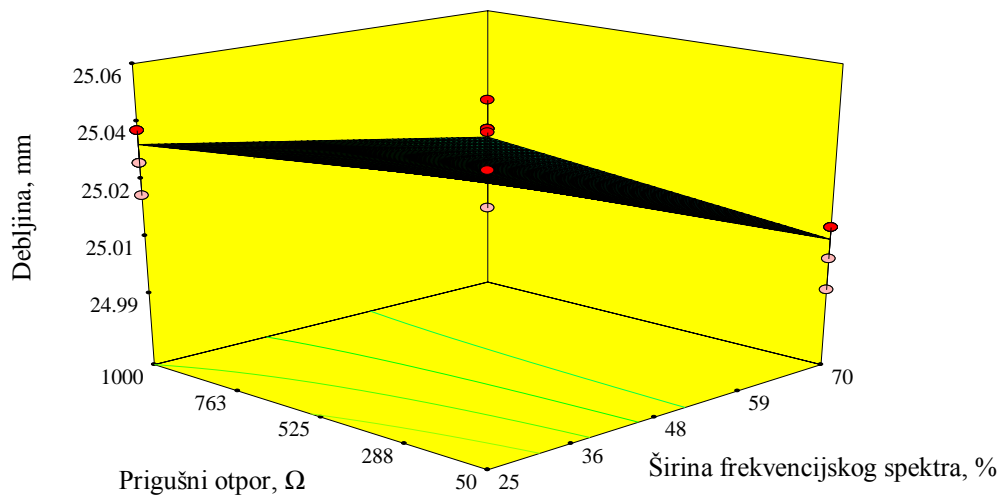


**Slika 63.** Konturni prikaz interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 4 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 332 V

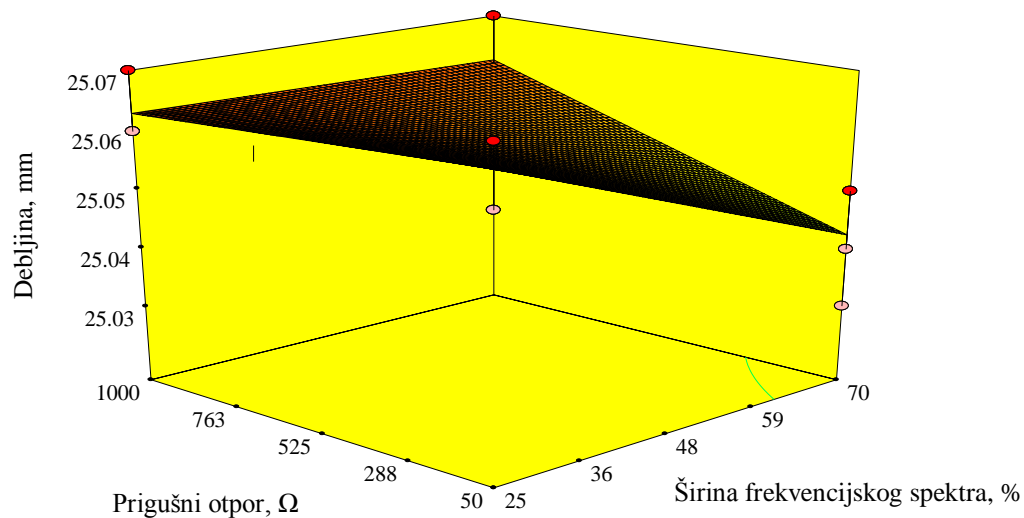


**Slika 64.** Konturni prikaz interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 5 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 332 V

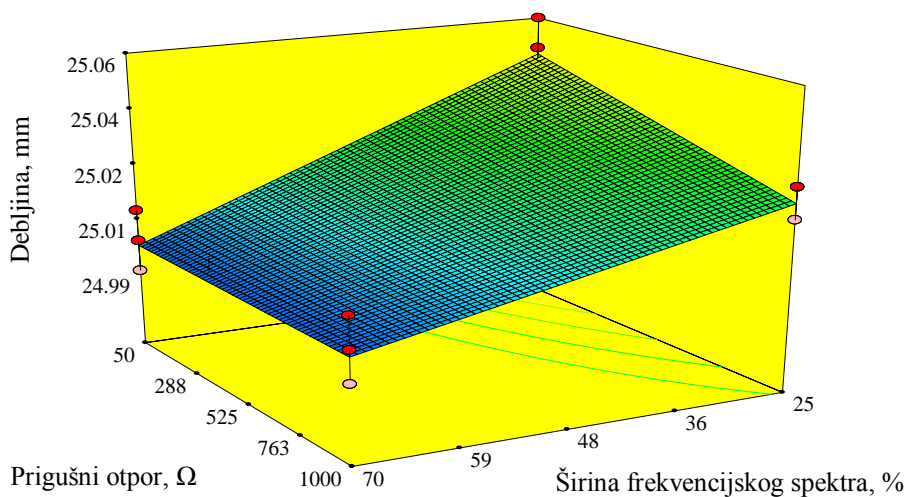
Odzivna površina postavljenog regresijskog modela prikazuju odnos utjecajnih (nezavisnih) parametara uređaja i parametara sonde na zavisnu varijablu (debljina izmjerena ultrazvukom) kroz odzivnu funkciju za sve kombinacije razina parametara (Slika 65 - Slika 68)



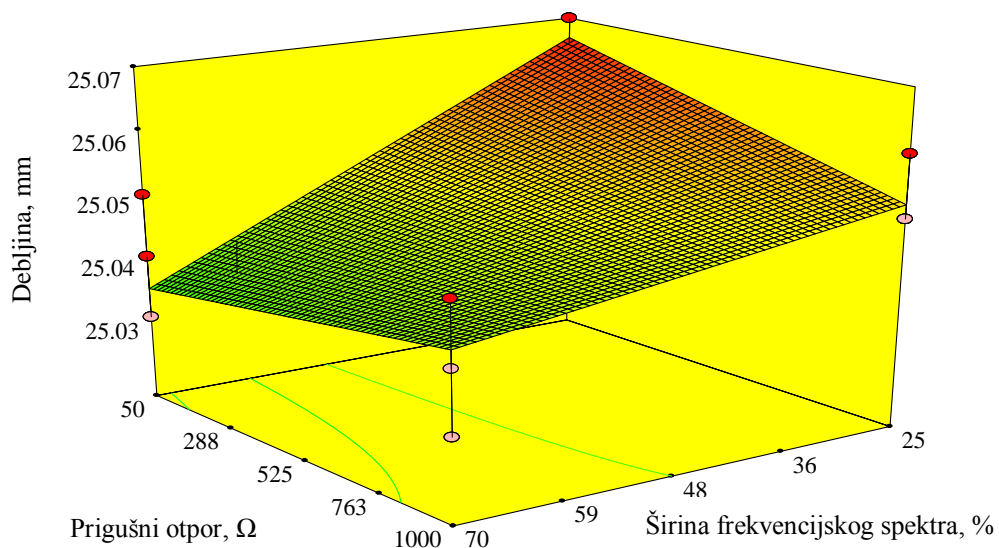
**Slika 65.** Prikaz odzivne površine interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 4 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 135 V



**Slika 66.** Prikaz odzivne površine interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 5 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 135 V



**Slika 67.** Prikaz odzivne površine interakcije širine frekventijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 4 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 332 V



**Slika 68.** Prikaz odzivne površine interakcije širine frekventijskog spektra i prigušnog otpora korištenjem sonde nazivne frekvencije 5 MHz pri naponu pobudnog impulsa od 332 V

Rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine kao izlazna varijabla u ovisnosti o ulaznim varijablama, odnosno parametrima uređaja (*napon pobudnog impulsa* i *prigušni otpor*) i vrsti sonde (*nazivna frekvencija* i *širina frekventijskog spektra*) može se najbolje opisati modelom koji uključuje tri glavna efekta i pet interakcija.

Značajni glavni efekti u regresijskom modelu su: *napon pobudnog impulsa*, *širina frekvencijskog spektra* i *nazivna frekvencija sonde*. Interakcije koje su se istaknule kao značajne su: interakcija *napona pobudnog impulsa* i *širine frekvencijskog spektra*, interakcija *napona pobudnog impulsa* i *prigušnog otpora*, interakcija *širine frekvencijskog spektra* i *nazivne frekvencije sonde*, interakcija *širine frekvencijskog spektra* i *prigušnog otpora* te interakcija *nazivne frekvencije sonde* i *prigušnog otpora*.

## 6. ANALIZA UTJECAJA HRAPAVOSTI NA ULTRAZVUČNO MJERENJE DEBLJINE

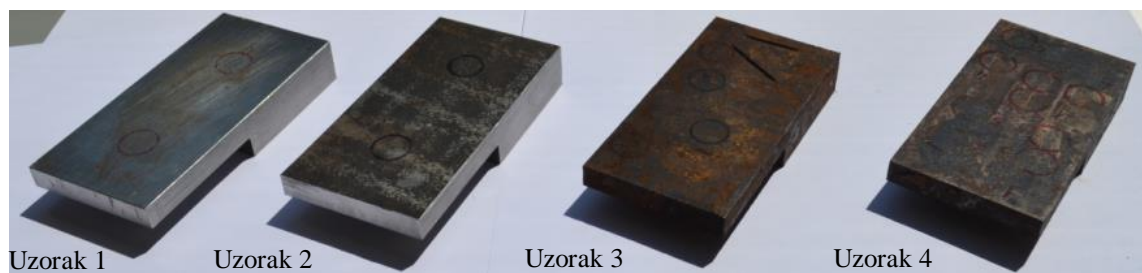
Hrapavost površine, kako kontaktne tako i odzivne površine, utječe na varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine neovisno o odabranom modu mjerenja [21] i [22]. Hrapavost kontaktne površine važan je kriterij za izbor vrste kontaktnog sredstva, a direktno utječe i na debljinu kontaktnog sredstva pri kojem se provodi očitavanje mjernog rezultata. Na hrapavijim površinama očitavanje mjernog rezultata provodi se pri većim debljinama kontaktnog sredstva kako bi se popunile neravnine i omogućio prolazak ultrazvučnog impulsa u materijal mjerne komponente. Normom je definirana zahtjev za hrapavost površine radnog etalona ( $R_a$ ) za podešavanje ultrazvučnog sustava koja ne smije biti veća od  $0,8 \mu\text{m}$ . Međutim, ustanovljeno je da hrapavost etalona i referentnih uzoraka često odstupa od specifikacija navedenih u normama [63]. Nadalje, nigdje se u propisima ili normama ne navodi kolika je dozvoljena maksimalna hrapavost kontaktne i odzivne površine za pouzdano provođenje ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke.

U cilju ostvarivanja što točnijeg rezultata mjerenja koristimo se kvantitativnim parametrima mjernog sustava pod nazivom mjerna ponovljivost i mjerna obnovljivost. Preciznost rezultat definiramo kao bliskost očitavanja ponovljenih mjerenja na istom uzorku pod jednakim uvjetima.

*Ponovljivost mjerenja* definiramo kao usko slaganje između rezultata uzastopnih mjerenja u uvjetima ponovljivosti. Uvjet ponovljivosti odnosi se na iste mjerene veličine izvedenih pri istim mjernim uvjetima (isti mjerni postupak, isti mjeritelj, isto mjerilo upotrebljavano u istim uvjetima, isto mjerno mjesto, ponavljanje u kratkom vremenu).

Za procjenu mjerne nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine uslijed utjecaja hrapavosti odzivne i/ili kontaktne površine, primijenit će metoda bazirana na statistici u uvjetima ponovljivosti.

S ciljem analize utjecaja hrapavosti izrađeni su uzorci jednakih nazivnih dimenzija (slika 69) koji imaju različite vrijednosti hrapavosti površina, kako kontaktnih tako i odzivnih.

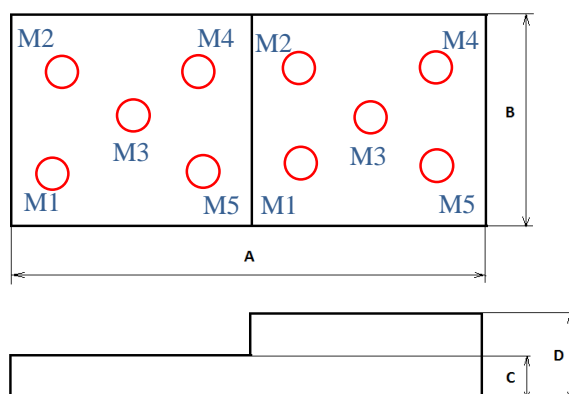


**Slika 69.** Uzorci s različitim vrijednostima hrapavosti površine

## 6.1 Plan i metodologija određivanja utjecaja hrapavosti na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine

Da bi se proučio utjecaj stanja površina mjerene komponente (hrapavost), mjerenja su se provodila na izrađenim uzorcima u uvjetima ponovljivosti. Istraživanja u ovom doktorskom radu nisu usredotočena na izučavanje utjecaja različitih ultrazvučnih uređaja već se istraživanje bazira na razvoju metodologije za procjenu mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja odabranim mjernim sustavom. Stoga se mjerenja za određivanje utjecaja hrapavosti nisu provodila u uvjetima obnovljivosti već samo u uvjetima ponovljivosti.

Uzorci za utvrđivanja utjecaja hrapavosti na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine jednakih su dimenzija (slika 70). Mjerenja su se provodila na dvije nazivne debljine uzorka, odnosno na debljini od 10 mm i 20 mm (tablica 26).



**Slika 70.** Uzorci za utvrđivanja utjecaja hrapavosti na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine

**Tablica 26.** Nazivne dimenzije uzoraka za utvrđivanje utjecaja hrapavosti na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine

| Kota uzorka | Nazivna dimenzija, mm |
|-------------|-----------------------|
| A           | 120                   |
| B           | 60                    |
| C           | 10                    |
| D           | 20                    |

S ciljem istraživanja utjecaja realnih uvjeta stanja površine mjerenja su provedena na uzorcima gdje se variralo pozicioniranje ultrazvučne sonde na površinama različitih vrijednosti hrapavosti kontaktne i odzivne površine (tablica 27).

**Tablica 27.** Vrijednosti hrapavosti uzoraka za utvrđivanje utjecaja hrapavosti na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine

|  | UZORAK 1 | UZORAK 2 | UZORAK 3 | UZORAK 4 |
|--|----------|----------|----------|----------|
| Hrapavost kontaktne površine $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ] | 0,5      | 1,5      | 4,5      | 0,5      |
| Hrapavost odzivne površine $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]   | 0,5      | 0,5      | 4,5      | 1,5      |

Mjerenja su se provodila na ukupno pet mjernih mjesta s tri ponovljena mjerenja. Mjerna mjesta označena su ručno i obilježavaju nešto veću površinu od kontaktne površine ultrazvučne sonde.

Odabrani je način mjerenja vremena proleta ultrazvučnog impulsa od pobudnog impulsa do prvog odjeka od zadnje stijenke mjerene komponente što prema normi [9] odgovara modu 1.

## 6.2 Analiza rezultata za određivanje utjecaja hrapavosti na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine

Jednaki principi mjerenja provedeni su pri mjerenju debljine uzoraka nazivnih debljina  $d = 10$  mm (tablica 28) i nazivnih debljina uzoraka  $d = 20$  mm (tablica 29). Za svaku razinu mjerenja određena je aritmetička sredina rezultata ponovljenih mjerenja uz procijenjenu varijancu odnosno standardno odstupanje ponovljenih mjerenja.

**Tablica 28.** Rezultati mjerenja debljine ultrazvukom za utvrđivanje utjecaja hrapavosti na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine ( $d = 10$  mm)

|  | UZORAK 1                           | UZORAK 2     | UZORAK 3     | UZORAK 4     |
|--|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Hrapavost kontaktne površine $R_a$ , $\mu\text{m}$ | 0,5                                | 1,5          | 4,5          | 0,5          |
| Hrapavost odzivne površine $R_a$ , $\mu\text{m}$   | 0,5                                | 0,5          | 4,5          | 1,5          |
| Mjerno mjesto                                      | Debljina izmjerena ultrazvukom, mm |              |              |              |
| M1   | 10,37                              | 10,56        | 10,27        | 10,43        |
|  | 10,35                              | 10,58        | 10,32        | 10,45        |
|  | 10,33                              | 10,54        | 10,29        | 10,43        |
| M2   | 10,33                              | 10,53        | 10,55        | 10,44        |
|  | 10,37                              | 10,60        | 10,30        | 10,41        |
|  | 10,30                              | 10,59        | 10,22        | 10,41        |
| M3   | 10,37                              | 10,50        | 10,20        | 10,38        |
|  | 10,35                              | 10,49        | 10,17        | 10,42        |
|  | 10,27                              | 10,47        | 10,17        | 10,41        |
| M4   | 10,34                              | 10,50        | 10,27        | 10,43        |
|  | 10,37                              | 10,47        | 10,31        | 10,41        |
|  | 10,31                              | 10,53        | 10,31        | 10,39        |
| M5   | 10,37                              | 10,53        | 10,24        | 10,38        |
|  | 10,36                              | 10,53        | 10,22        | 10,38        |
|  | 10,30                              | 10,53        | 10,25        | 10,35        |
| $\bar{d}_{10}$                                     | <b>10,34</b>                       | <b>10,53</b> | <b>10,27</b> | <b>10,41</b> |
| $s_{(d)}$  | <b>0,032</b>                       | <b>0,040</b> | <b>0,091</b> | <b>0,026</b> |

**Tablica 29.** Rezultati mjerenja debljine ultrazvukom za utvrđivanje utjecaja hrapavosti na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine ( $d = 20$  mm)

|  | UZORAK 1                           | UZORAK 2     | UZORAK 3     | UZORAK 4     |
|--|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Hrapavost kontaktne površine $R_a$ , $\mu\text{m}$ | <b>0,5</b>                         | <b>1,5</b>   | <b>4,5</b>   | <b>0,5</b>   |
| Hrapavost odzivne površine $R_a$ , $\mu\text{m}$   | 0,5                                | 0,5          | 4,5          | 1,5          |
| Mjerno mjesto                                      | Debljina izmjerena ultrazvukom, mm |              |              |              |
| M1   | 20,55                              | 21,15        | 20,58        | 21,07        |
|  | 20,59                              | 21,24        | 20,62        | 21,08        |
|  | 20,60                              | 21,18        | 20,58        | 21,07        |
| M2   | 20,59                              | 21,15        | 20,73        | 21,06        |
|  | 20,63                              | 21,22        | 20,61        | 21,06        |
|  | 20,54                              | 21,20        | 20,60        | 21,06        |
| M3   | 20,61                              | 21,19        | 20,66        | 21,03        |
|  | 20,58                              | 21,20        | 20,82        | 21,06        |
|  | 20,61                              | 21,15        | 20,87        | 21,05        |
| M4   | 20,61                              | 21,19        | 20,60        | 21,03        |
|  | 20,60                              | 21,26        | 20,62        | 21,06        |
|  | 20,62                              | 21,19        | 20,68        | 21,04        |
| M5   | 20,60                              | 21,10        | 20,57        | 21,03        |
|  | 20,59                              | 21,15        | 20,57        | 21,05        |
|  | 20,59                              | 21,15        | 20,58        | 21,07        |
| $\bar{d}_{20}$                                     | <b>20,59</b>                       | <b>21,18</b> | <b>20,65</b> | <b>21,05</b> |
| $s_{(d)}$  | <b>0,024</b>                       | <b>0,041</b> | <b>0,093</b> | <b>0,016</b> |



U cilju procjene mjerne nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine uslijed utjecaja hrapavosti kontaktne i/ili odzivne površine su rezultati mjerenja na uzorku čija je hrapavost odzivne i kontaktne površine  $R_a = 4,5 \mu\text{m}$ . Za spomenuti uzorak vidljivo je najveće standardno odstupanje što će više utjecati na procjenu mjerne nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine u odnosu na ostale razine hrapavosti površine.

Budući da će se mjerna nesigurnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine odabranog ultrazvučnog mjernog sustava iskazivati za debljinu od 25 mm, odabrani su rezultati utjecaja hrapavosti pri nazivnoj debljini od 20 mm.

## 7. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI MONTE CARLO SIMULACIJOM

Pri iskazivanju rezultata mjerenja bilo koje fizikalne veličine potrebno je količinski pokazati kvalitetu iskazanog rezultata, a sve radi procjene njegove pouzdanosti. Rezultate mjerenja bez prikazane razine pouzdanosti nije moguće uspoređivati ni međusobno ni s referentnim vrijednostima. Kako bi se lakše primjenjivali, razumjeli i uopće prihvaćali postupci za opis kvalitete rezultata mjerenja nužan je preduvjet izračunati i iskazati pripadajuću mjernu nesigurnost. Mjernu nesigurnost možemo definirati kao kvantifikaciju sumnje u rezultat mjerenja, dok pogrešku nastalu u procesu mjerenja definiramo kao razliku između mjerene i stvarne vrijednosti. Danas je široko prihvaćeno da kad se izračunaju sve poznate ili sumnjive sastavnice pogreške i primijene svi ispravci, još uvijek ostane određena nesigurnost oko ispravnosti iskazanog rezultata mjerenja, odnosno još uvijek postoji sumnja koliko dobro rezultat mjerenja prikazuje vrijednost veličine koja se mjeri. Najbolja metoda za izračun i iskazivanje mjerne nesigurnosti rezultata u osnovi bi trebala biti primjenjiva na sve vrste mjerenja i sve vrste ulaznih podataka koji se pri mjerenju upotrebljavaju. Mjerna nesigurnost rezultata općenito se sastoji od nekoliko sastavnica koje se prema načinu na koji se procjenjuje njihova brojčana vrijednost mogu razvrstati u dvije osnovne grupe:

- A** sastavnice koje se izračunavaju statistički metodama
- B** sastavnice koje se izračunavaju na drugi način.

Procjene mjerne nesigurnosti tipa A procjene su koje koriste statističke alate te se najčešće temelje na više ponovljenih mjerenja. Nesigurnosti tipa A opisuju se procijenjenim varijancama  $s_i^2$  ili procijenjenim standardnim odstupanjima  $s_i$ .

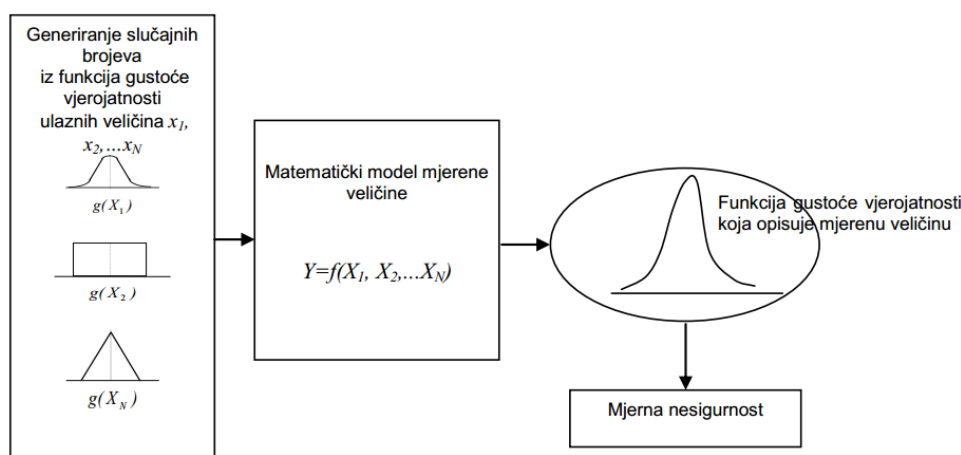
Procjene mjerne nesigurnosti tipa B procjene su koje se temelje na informacijama koje nisu vezane uz ponovljena mjerenja. Izvori informacija mogu biti:

- prethodno iskustvo ili prethodni mjerni podaci o ponašanju relevantnih materijala ili instrumenata
- iz vanjskih umjernica ili iz drugih izvješća
- iz tehničkih specifikacija proizvođača ili iz proračuna
- iz objavljenih izvora (članaka, knjiga), itd.

Nesigurnosti tipa B trebale bi se opisivati veličinama  $u_j^2$ , koje se mogu smatrati približnim vrijednostima odgovarajućih varijanci, čije se postojanje pretpostavlja. Veličine  $u_j^2$  mogu se obrađivati kao varijance, a veličine  $u_j$  kao standardna odstupanja [3].

## 7.1 Monte Carlo simulacija

Monte Carlo metoda je probabilistički računalni algoritam u kojem se vrijednost jedne ili više slučajnih varijabli zadaje funkcijom gustoće, a kojem je cilj predvidjeti moguće ishode eksperimenta na koji je primijenjen i vjerojatnosti njihova pojavljivanja (slika 71) [34]. Pojedini autori Monte Carlo simulacijama zovu bilo koju vrstu programa koji se koristi slučajnim brojevima. Za potrebe ovog rada termin MCS upotrijebit će se samo za simulacije kod kojih se u rješavanju problema koristi stvaranje uzoraka iz razdioba slučajnih varijabli.



**Slika 71.** Monte Carlo simulacija mjernog sustava [64]

Vrijednost Monte Carlo simulacije leži u tome što kao rezultat daje sve moguće ishode, ali i vjerojatnosti pojavljivanja svakog od tih ishoda. Pomoću navedene metode moguće je riješiti probleme koji se oslanjaju na generiranje velikog broja slučajnih brojeva te je moguće provesti analizu osjetljivosti kako bi se identificirali faktori koji najviše utječu na ishod postavljenog eksperimenta [31].

## 7.2 Proračun mjerne nesigurnosti primjenom Monte Carlo simulacije

Glavne faze proračuna mjerne nesigurnosti sastoje se od modeliranja mjernog sustava, prijenosa razdioba i prikaza podataka u sažetom obliku [3]:

a) U fazi modeliranja mjernog sustava:

- 1) određuje se izlazna veličina  $Y$ , tj. ona koja se namjerava mjeriti (mjerena veličina)
- 2) određuju se ulazne veličine  $X = (X_1, \dots, X_N)^T$  o kojima ovisi  $Y$
- 3) razvija se model koji povezuje  $Y$  i  $X$

4) na temelju dostupnog znanja ulaznim se veličinama  $X_i$  dodjeljuju funkcije gustoće vjerojatnosti - Gaussova (normalna), pravokutna itd. Međutim onim veličinama  $X_i$  koje nisu neovisne dodjeljuje se zajednička funkcija gustoće vjerojatnosti.

b) U fazi prijenosa razdioba:

- provodi se prijenos funkcija gustoće vjerojatnosti slučajnih veličina  $X_i$  kroz model kako bi se dobila funkcija gustoće vjerojatnosti slučajne veličine  $Y$ .

c) U fazi prikaza podataka u sažetom obliku:

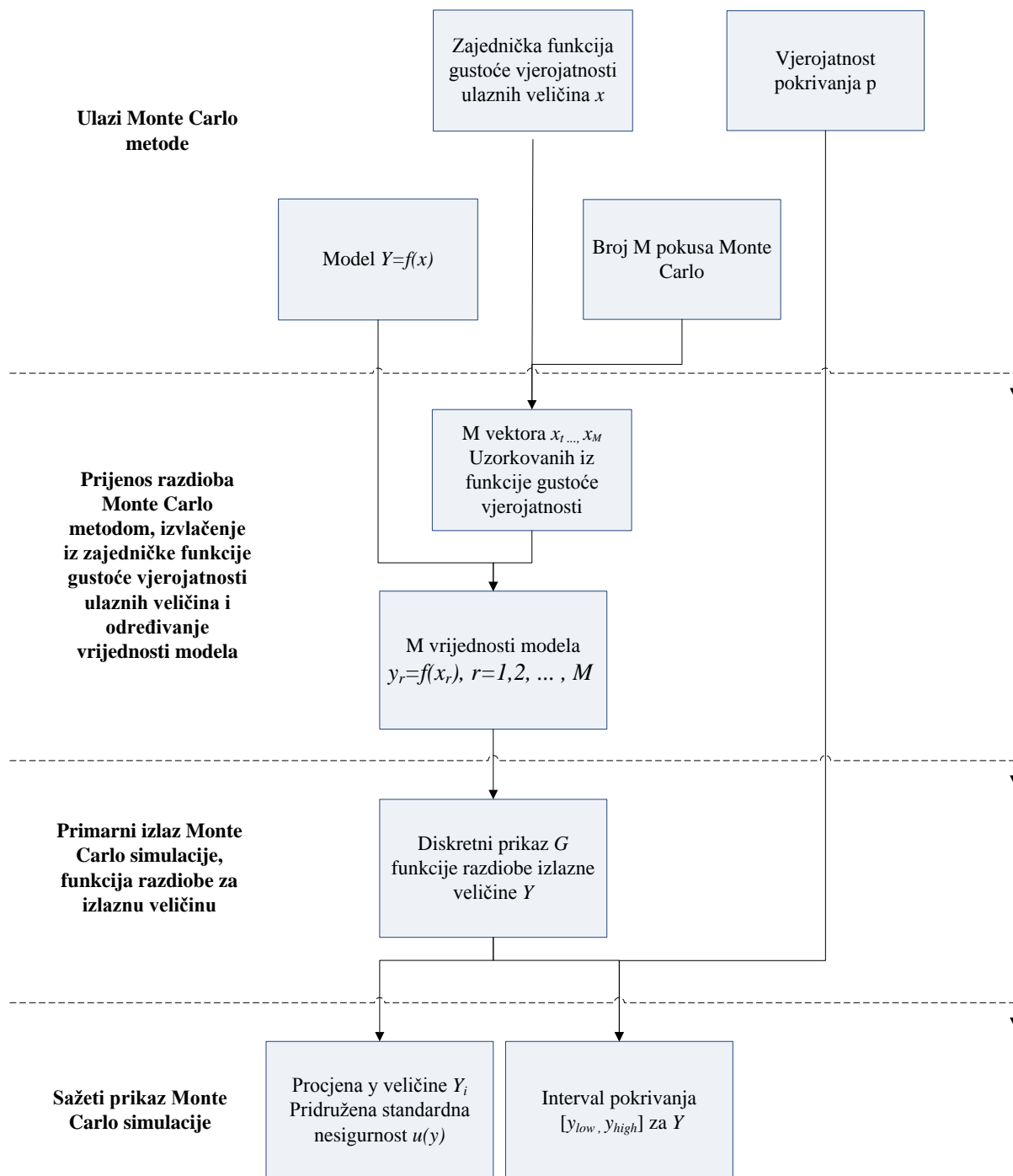
- funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $Y$  upotrebljava se za dobivanje:
  - 1) očekivanja izlazne veličine  $Y$  koje se smatra procjenom  $y$  te veličine
  - 2) standardnog odstupanja izlazne veličine  $Y$  koje se smatra standardnom nesigurnošću  $u(y)$  pridruženoj procjeni  $y$
  - 3) intervala pokrivanja koji sadržava izlaznu veličinu  $Y$  sa specificiranom vjerojatnošću (vjerojatnošću pokrivanja)

MCS metoda temelji se na generiranju slučajnih brojeva iz funkcije gustoće vjerojatnosti za svaku ulaznu veličinu  $x_i$  i stvaranju eksperimentalne funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $Y$  kombinirajući različite razdiobe kojima su definirane ulazne veličine (slika 72). Postupak se ponavlja  $M$  puta te se na taj način stvara eksperimentalna funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine koja se temelji na  $M$   $Y$  vrijednosti. Iz

eksperimentalne funkcije gustoće vjerojatnosti slijedi procjena izlazne veličine  $y$ , procijenjeno standardno odstupanje, te procjena intervala  $\left( Y_{\left(\frac{1-P}{2}, M\right)}, Y_{\left(\frac{1+P}{2}, M\right)} \right)$  [1].

Metoda MCS može se opisati kao postupak korak po korak na sljedeći način [3]:

- a) odabere se broj  $M$  pokusa Monte Carlo koje je potrebno izvesti
- b) uzorkovanjem se generira  $M$  vektora iz dodijeljenih funkcija gustoće vjerojatnosti kao ostvarenja (skupa od  $N$ ) ulaznih veličina  $X_i$ .



**Slika 72.** Shematski prikaz proračuna mjerne nesigurnosti MCS metodom [65]

### 7.3 Procjena mjerne nesigurnosti ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke

U postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke niz je utjecajnih veličina koje značajno doprinose nesigurnosti rezultata mjerenja. Utjecajni faktori koji doprinose varijabilnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine prikazani su u Ishikawa dijagramu (slika 20) i opisani u poglavlju 3. Navedeni utjecajni faktori mogu se izraziti algebarski i međusobno kombinirati s ciljem dobivanja matematičkog modela koji opisuje proces ultrazvučnog mjerenja debljine. Uvođenjem svih utjecajnih veličina u postupku ultrazvučnog merenja debljine stijenke postavljen je opći matematički model prema izrazu:

$$d_{st} = \frac{t_{TOF} \cdot v_{cal}}{2} \cdot \left( 1 + \frac{v_{mat} - v_{cal}}{v_{cal}} \right) + \delta C_E + \delta D_E + \delta t + \delta h_a \quad (7-1)$$

gdje je:

$d_{st}$ ... debljina mjerene komponente

$t_{TOF}$ ... vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa

$v_{cal}$ ... podešena brzina L-vala na uređaju

$v_{mat}$ ... brzina L-vala u materijalu

$\delta C_E$  ... utjecaj kontaktnog sredstva

$\delta D_E$  ... utjecaj ultrazvučnog uređaja

$\delta t$  ... utjecaj temperaturne razlike etalona u odnosu na 20°C

$\delta h_a$  ... utjecaj hrapavosti kontaktne i/ili odzivne površine

U eksperimentalnom dijelu rada proveden je generalni faktorski plan pokusa s različitim brojem razina za određivanje utjecaja vrste i debljine kontaktnog sredstva u zavisnosti o vrsti sonde na varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine.

U eksperimentalnom dijelu rada proveden je faktorski plan pokusa  $2^4$  za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde na varijabilnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine.

Kroz provedenu analizu rezultata eksperimenata procijenjen je regresijski model koji je sastavljen od utjecajnih članova modela od kojih svaki član doprinosi nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine. Uzimajući u obzir regresijski model dobiven za određivanje

utjecaja vrste i debljine kontaktnog sredstva u zavisnosti o vrsti sonde iz izraza (4–2) te regresijski model dobiven za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde iz izraza (5–3) određen je opći matematički model za procjenu mjerne nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine.

Opći matematički model iz izraza (7–1) proširen regresijskim modelima iz izraza (4–2) i (5–3) poprima sljedeći oblik:

$$\begin{aligned}
 d_{st} = & \frac{t_{TOF} \cdot v_{cal}}{2} \cdot \left( 1 + \frac{v_{mat} - v_{cal}}{v_{cal}} \right) + \beta_{S_c}^C \delta s_c - \beta_{B_w}^C \delta B_w - \beta_f^C \delta f + \beta_{S_c}^C \delta s_c B_w + \\
 & + \beta_{B_w f}^C \delta B_w f + \beta_{U_p}^D \delta U_p - \beta_{B_w}^D \delta B_w + \beta_f^D \delta f - \beta_{R_p}^D \delta R_p - \beta_{U_p B_w}^D \delta U_p B_w - \\
 & - \beta_{U_p R_p}^D \delta U_p R_p + \beta_{B_w f}^D \delta B_w f + \beta_{B_w R_p}^D \delta B_w R_p + \beta_{f R_p}^D \delta f R_p + \delta t + \delta h_a
 \end{aligned} \tag{7-2}$$

gdje je:

|                         |  |
|-------------------------|--|
| $\delta s_c \dots$      | utjecaj debljine kontaktnog sredstva   |
| $\delta f \dots$        | utjecaj nazivne frekvencije sonde  |
| $\delta B_w \dots$      | utjecaj širine frekvencijskog spektra  |
| $\delta U_p \dots$      | utjecaj napona pobudnog impulsa  |
| $\delta R_p \dots$      | utjecaj prigušnog otpora   |
| $\delta s_c B_w \dots$  | utjecaj interakcije debljine kontaktnog sredstva i širine frekvencijskog spektra |
| $\delta B_w f \dots$    | utjecaj interakcije širine frekvencijskog spektra i nazivne frekvencije sonde    |
| $\delta U_p B_w \dots$  | utjecaj interakcije napona pobudnog impulsa i širine frekvencijskog spektra      |
| $\delta U_p R_p \dots$  | utjecaj interakcije napona pobudnog impulsa i prigušnog otpora                   |
| $\delta B_w R_p \dots$  | utjecaj interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora             |
| $\delta f R_p \dots$    | utjecaj interakcije nazivne frekvencije sonde i prigušnog otpora                 |
| $\beta_{s_c} \dots$     | procijenjeni koeficijent regresijskog modela uz parametar $s_c$                  |
| $\beta_{B_w} \dots$     | procijenjeni koeficijent regresijskog modela uz parametar $B_w$                  |
| $\beta_f \dots$         | procijenjeni koeficijent regresijskog modela uz parametar $f$                    |
| $\beta_{s_c B_w} \dots$ | procijenjeni koeficijent regresijskog modela interakcije parametara $s_c B_w$    |
| $\beta_{U_p} \dots$     | procijenjeni koeficijent regresijskog modela uz parametar $U_p$                  |
| $\beta_{R_p} \dots$     | procijenjeni koeficijent regresijskog modela uz parametar $R_p$                  |
| $\beta_{U_p B_w} \dots$ | procijenjeni koeficijent regresijskog modela interakcije parametara $U_p B_w$    |
| $\beta_{U_p R_p} \dots$ | procijenjeni koeficijent regresijskog modela interakcije parametara $U_p R_p$    |
| $\beta_{B_w f} \dots$   | procijenjeni koeficijent regresijskog modela interakcije parametara $B_w f$      |



|                         |   |
|-------------------------|---|
| $\beta_{B_w R_p} \dots$ | procijenjeni koeficijent regresijskog modela interakcije parametara $B_w R_p$   |
| $\beta_{f R_p} \dots$   | procijenjeni koeficijent regresijskog modela interakcije parametara $f R_p$   |
| EkspONENT $C$           | odnosi se na regresijske koeficijente dobivenih iz plana pokusa za određivanje utjecaja kontaktnog sredstva i vrste sonde na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine  |
| EkspONENT $D$           | odnosi se na regresijske koeficijente dobivenih iz plana pokusa za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine |

Opći matematički model iz izraza (7–2) predstavlja specifični oblik za odabrani ultrazvučni mjerni sustav uz točno definirane vrijednosti ulaznih parametara definiranih u poglavlju 4 i poglavlju 5.

Općenito, proces procjene mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja odnosi se za specifični i odabrani mjerni postupak te nije primjenjiv u širem kontekstu. Prije procjenjivanja mjerne nesigurnosti rezultata potrebno je specifičnost mjernog postupka i utjecajnih faktora jednoznačno definirati [1]. Stoga za procjenu mjerne nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke primjenom Monte Carlo simulacije moraju biti zadovoljene sljedeće pretpostavke:

- etaloni i referentni uzorci moraju biti izrađeni u skladu sa zahtjevima norme [28]
- etaloni, referentni uzorci i mjerene komponente moraju biti izrađeni od čelika
- raspon ultrazvučne brzine u mjerenoj komponenti mora biti unutar  $5920 \text{ m/s} \pm 30 \text{ m/s}$
- hrapavost kontaktne i odzivne površine mjerene komponente ne smije biti veća od  $R_a = 6,2 \text{ } \mu\text{m}$
- raspon debljina stijenke kreće se od 10 mm do 40 mm
- mjerenja se provode u laboratoriju čiji uvjeti i praksa osiguravaju mjerenje bez grubih pogrešaka
- mjerenja se provode sondama nazivnih frekvencija 4 MHz i 5 MHz
- veličina pretvornika  $D$  za odabrane sonde iznosi 10 mm
- širina frekvencijskog spektra odabranih sondi kreće se u rasponu od 25% do 70%
- odabran je ultrazvučni uređaj Krautkramer USN60
- napon pobudnog impulsa kreće se u granicama od 135 V do 332 V
- prigušni otpor u oscilatornom krugu kreće se u rasponu od  $50 \text{ } \Omega$  do  $1000 \text{ } \Omega$
- kao vrsta kontaktnog sredstva koristi se gel.

Uvođenjem svih utjecajnih veličina u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke opisanih u poglavlju 3 te uz definirane pretpostavke, procijenjena je mjerna nesigurnosti rezultata mjerenja uslijed djelovanja pojedinih članova matematičkog modela iz izraza (7–2). Procjena mjerne nesigurnosti provedena je pomoću programskog paketa Mathcad.

## 7.4 Nesigurnost mjerenja vremena proleta ultrazvučnog impulsa

Mjerenje vremena proleta ultrazvučnog impulsa razrađeno je i prikazano u poglavlju 5.2. Izlazna veličina vremena proleta opisana je izrazom:

$$\delta TOF = \frac{t_{TOF} \cdot v_{cal}}{2} \quad (7-3)$$

gdje je:

$\delta TOF$ ... utjecaj vremena proleta ultrazvučnog impulsa

Raspon brzine longitudinalnih valova propisane normom [28] iznosi  $5920 \text{ m/s} \pm 30 \text{ m/s}$ . Vrijednosti aritmetičke sredine i standardne devijacije rezultata mjerenja vremena proleta ultrazvučnog impulsa  $t_{TOF}$  za mjerenja pri svim kombinacijama razina parametara uređaja prikazana su u poglavlju 5.2 (tablica 19). Vrijednosti aritmetičke sredine i standardne devijacije rezultata mjerenja vremena proleta ultrazvučnog impulsa  $t_{TOF}$  odabrane su za slučaj mjerenja vremena proleta pri razini parametara uređaja čiji rezultati pokazuju najveće rasipanje oko aritmetičke sredine (tablica 30).

**Tablica 30.** Odabrane vrijednosti funkcije gustoće vjerojatnosti  $g(\delta TOF)$

| Napon pobudnog impulsa, V | Prigušni otpor, $\Omega$ | Točke preklapanja signala | Vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa ( $t_{TOF}$ ), $\mu\text{s}$ |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---|
| 135                       | 1000                     | T1                        | 8,4135  |
|                           |                          | T2                        | 8,407   |
|                           |                          | T3                        | 8,389   |
|                           |                          | T4                        | 8,417   |
|                           |                          | T5                        | 8,417   |
|                           |                          | $\bar{t}_{TOF}$           | <b>8,4087</b>   |
|                           |                          | $s_{(TOF)}$               | <b>0,012</b>  |

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta TOF)$  simulirana je Monte Carlo metodom na osnovi izraza (7–3).

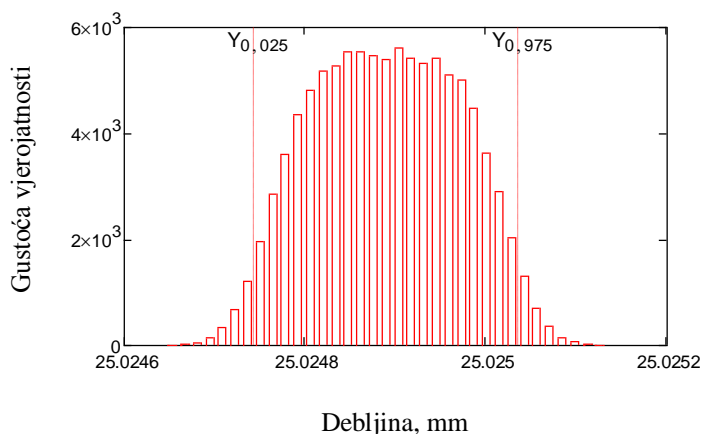
Ulazne veličine  $x_i$  definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti  $g(x_i)$  (tablica 31).

**Tablica 31.** Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine  $\delta TOF$

| Ulazna veličina $x_i$                 | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ |  |
|---------------------------------------|---|--|
| Brzina ultrazvuka podešena na uređaju | $v_{cal}$                               | Pravokutna razdioba (M; 5890 m/s; 5950 m/s)          |
| Vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa  | $t_{TOF}$                               | Normalna razdioba (M; 8,4087 $\mu$ s; 0,012 $\mu$ s) |

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta TOF)$  dobivena je uz  $M = 100000$  simulacija (slika 73). Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine  $\delta TOF$  iznosi 0,00008 mm. Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta TOF)$  očitani su intervali unutar kojih se nalazi izlazna veličina  $\delta TOF$  :

$$( Y_{0,025} = 25,02474 \text{ mm} ; Y_{0,975} = 25,02504 \text{ mm} ) \text{ uz } P = 95\%$$



**Slika 73.** Funkcija gustoće vjerojatnosti  $g(\delta TOF)$

Funkcija gustoće vjerojatnosti  $g(\delta TOF)$  opisuje normalnu raspodjelu (slika 73).

Proširena mjerna nesigurnost vremena proleta ultrazvučnog impulsa iznosi:

$$U(\delta TOF) = 1,5 \times 10^{-4} \text{ mm}; k = 2; P = 95 \%$$

## 7.5 Nesigurnost korekcije brzine

Podešavanje ultrazvučnog sustava bazira se prije svega na podešavanju ultrazvučne brzine na uređaju. U tom smislu, pogreška mjerenja debljine ultrazvukom bit će manja što je manja pogreška između stvarne brzine ultrazvuka u materijalu mjerene komponente i brzine ultrazvuka podešene na ultrazvučnom uređaju.

Korekcija brzine definirana je izrazom:

$$\delta v_{\text{cor}} = \frac{t_{\text{TOF}} \cdot v_{\text{cal}}}{2} \cdot \frac{v_{\text{mat}} - v_{\text{cal}}}{v_{\text{cal}}} \quad (7-4)$$

gdje je:

$\delta v_{\text{cor}}$  ... iznos korekcije brzine

Raspon brzine longitudinalnih valova propisane normom [28] iznosi 5920 m/s  $\pm$  30 m/s dok je odabrani raspon brzine ultrazvuka u materijalu od 5700 m/s do 6100 m/s.

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta v_{\text{cor}})$  simulirana je Monte Carlo metodom na osnovi izraza (7-4).

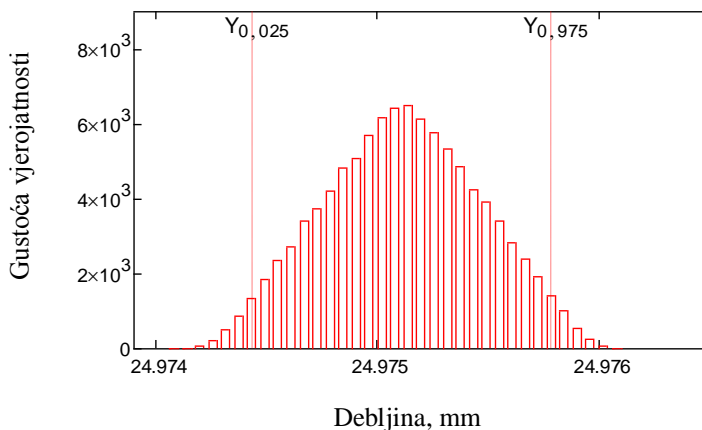
Ulazne veličine  $x_i$  definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti  $g(x_i)$  (tablica 32).

**Tablica 32.** *Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine  $\delta v_{\text{cor}}$*

| Ulazna veličina $x_i$                          |                  | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$              |
|--|------------------|--|
| Brzina ultrazvuka podešena na uređaju          | $v_{\text{cal}}$ | Pravokutna razdioba (M; 5890 m/s; 5950 m/s)          |
| Vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa           | $t_{\text{TOF}}$ | Normalna razdioba (M; 8,4087 $\mu$ s; 0,012 $\mu$ s) |
| Stvarna brzina u materijalu mjerene komponente | $v_{\text{mat}}$ | Trokutasta razdioba (M; 5700 m/s; 6100 m/s)          |

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta v_{\text{cor}})$  dobivena je uz  $M = 100000$  simulacija (slika 74). Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine  $\delta v_{\text{cor}}$  iznosi 0,00035 mm. Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta v_{\text{cor}})$  očitani su intervali unutar kojeg se nalazi izlazna veličina  $\delta v_{\text{cor}}$ :

$$( Y_{0,025} = 24,97444 \text{ mm} ; Y_{0,975} = 24,97578 \text{ mm} ) \text{ uz } P = 95\%$$



Slika 74. Funkcija gustoće vjerojatnosti  $g(\delta v_{cor})$

## 7.6 Nesigurnost uslijed debljine i vrste kontaktnog sredstva i ultrazvučne sonde

Nesigurnost rezultata uslijed debljine i vrste kontaktnog sredstva u ovisnosti o vrsti ultrazvučne sonde temelji se na planu pokusa postavljenog i opisanog u poglavlju 4. Temeljem provedenog plana pokusa dobiven je regresijski model sastavljen od utjecajnih članova modela od kojih svaki doprinosi nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine. Odabrani opći oblik regresijskog modela za procjenu nesigurnosti uslijed debljine i vrste kontaktnog sredstva u ovisnosti o vrsti ultrazvučne sonde jest:

$$d_{gel} = d + 1,02778 \times 10^{-3} s_c - 2,14 \times 10^{-3} B_W - 0,012578 f + 2,88889 \times 10^{-6} s_c B_W + 4,71111 \times 10^{-4} B_W f \quad (7-5)$$

Koeficijenti pridruženi članovima regresijskog modela iz izraza (7-2) određeni su kroz postavljeni plan pokusa obrađenog u poglavlju 4 iz izraza (4-4). Kao vrsta kontaktnog sredstva odabran je gel jer je gel kao vrsta kontaktnog sredstva najčešće korišten u realnoj primjeni.

Kako bi se odredili najznačajniji doprinosi funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $d_{gel}$  Monte Carlo simulacija provedena je za svaku interakciju zasebno uz pripadajuće funkcije gustoće vjerojatnosti ulaznih veličina.

### 7.6.1 Nesigurnost uslijed interakcije debljine kontaktnog sredstva i širine frekvencijskog spektra iz regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog (gel) sredstva i vrste sonde

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta s_c B_w)$  simulirana je Monte Carlo metodom uz  $M = 100000$  simulacija.

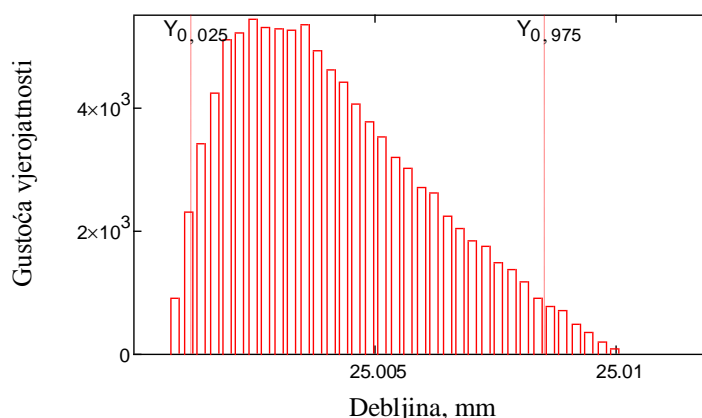
Ulazne veličine  $x_i$  definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti  $g(x_i)$  (tablica 33). Funkcija gustoće vjerojatnosti debljine kontaktnog sredstva opisana je gama razdiobom jer se očitavanje rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine češće provodi pri manjim vrijednostima debljine kontaktnog sredstva.

**Tablica 33.** Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine  $\delta s_c B_w$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva i vrste sonde

| Ulazna veličina $x_i$         |       | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$   |
|-------------------------------|-------|---|
| Debljina kontaktnog sredstva  | $s_c$ | Gama razdioba (M; 10 $\mu$ m; 50 $\mu$ m) |
| Širina frekvencijskog spektra | $B_w$ | Pravokutna razdioba (M; 25 %; 70 %)       |

Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta s_c B_w)$  dobivene Monte Carlo simulacijom (slika 75) procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine  $\delta s_c B_w$  iznosi 0,00199 mm. Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta s_c B_w)$  očitani su intervali unutar kojeg se nalazi izlazna veličina  $\delta s_c B_w$ :

$$( Y_{0,025} = 25,00120 \text{ mm} ; Y_{0,975} = 25,00853 \text{ mm} ) \text{ uz } P = 95\%$$



**Slika 75.** Funkcija gustoće vjerojatnosti  $g(\delta s_c B_w)$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva i vrste sonde

### 7.6.2 Nesigurnost uslijed interakcije širine frekvencijskog spektra i nazivne frekvencije iz regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva i vrste sonde

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta B_{Wf})$  simulirana je Monte Carlo metodom uz  $M = 100000$  simulacija.

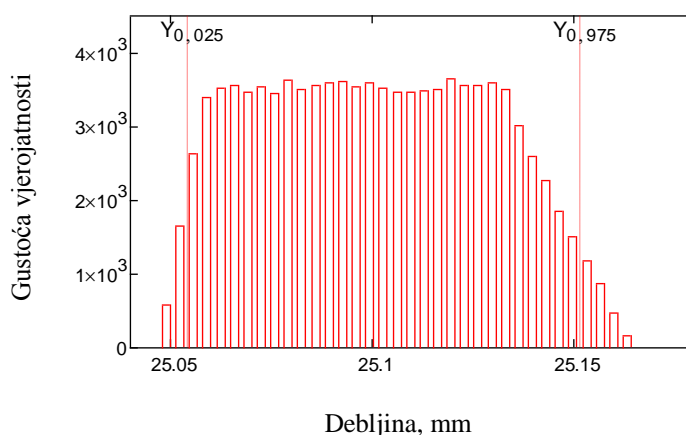
Ulazne veličine  $x_i$  definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti  $g(x_i)$  (tablica 34).

**Tablica 34.** Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine  $\delta B_{Wf}$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva i vrste sonde

| Ulazna veličina $x_i$         |       | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ |
|-------------------------------|-------|---|
| Širina frekvencijskog spektra | $B_W$ | Pravokutna razdioba (M; 25 %; 70 %)     |
| Nazivna frekvencija           | $f$   | Pravokutna razdioba (M; 4 MHz; 5 MHz)   |

Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta B_{Wf})$  dobivene Monte Carlo simulacijom (slika 76), procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine  $\delta B_{Wf}$  iznosi 0,02829 mm. Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta B_{Wf})$  očitani su intervali unutar kojeg se nalazi izlazna veličina  $\delta B_{Wf}$ :

$$( Y_{0,025} = 25,05442 \text{ mm} ; Y_{0,975} = 25,15194 \text{ mm} ) \text{ uz } P = 95\%$$



**Slika 76.** Funkcija gustoće vjerojatnosti  $g(\delta B_{Wf})$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja debljine kontaktnog sredstva i vrste sonde

### 7.6.3 Procjena nesigurnosti uslijed utjecaja kontaktnog sredstva (ulje) i vrste sonde

U postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke tehnikom odjeka za procijenjeni regresijski model iz izraza (4–2) procijenjeno je standardno odstupanje izlazne veličine  $d_{ulje}$  ako se kao kontaktno sredstvo koristi ulje. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(d_{ulje})$  simulirana je Monte Carlo metodom na osnovi izraza (4–2).

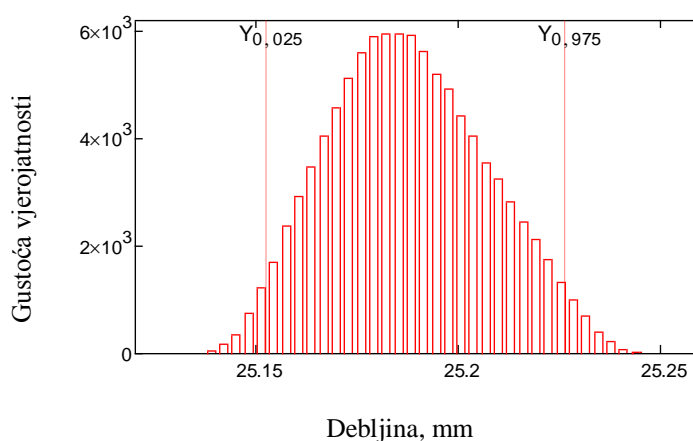
Ulazne veličine  $x_i$  definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti  $g(x_i)$  (tablica 35).

**Tablica 35.** Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine  $d_{ulje}$  kada se kao vrsta kontaktnog sredstva koristi gel

| Ulazna veličina $x_i$         |       | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ |
|-------------------------------|-------|---|
| Debljina kontaktnog sredstva  | $s_c$ | Gama razdioba (M; 10 $\mu$ ; 50 $\mu$ ) |
| Širina frekvencijskog spektra | $B_w$ | Pravokutna razdioba (M; 25 %; 70 %)     |
| Nazivna frekvencija           | $f$   | Pravokutna razdioba (M; 4 MHz; 5 MHz)   |

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(d_{ulje})$  dobivena je uz  $M = 100000$  simulacija (slika 77). Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine  $d_{ulje}$  iznosi 0,08553 mm. Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(d_{ulje})$  očitani su intervali unutar kojih se nalazi izlazna veličina  $d_{ulje}$ :

$$( Y_{0,025} = 25,15262 \text{ m/s} ; Y_{0,975} = 25,22657 \text{ m/s} ) \text{ uz } P = 95\%$$



**Slika 77.** Funkcija gustoće vjerojatnosti  $g(d_{ulje})$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja kontaktnog sredstva (ulje) i vrste sonde



### 7.6.4 Procjena nesigurnosti uslijed utjecaja kontaktnog sredstva (gel) i vrste sonde

U postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke tehnikom odjeka za procijenjeni regresijski model iz izraza (4–4) procijenjeno je standardno odstupanje izlazne veličine  $d_{gel}$  ako se kao kontaktno sredstvo koristi gel.

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(d_{gel})$  simulirana je Monte Carlo metodom na osnovi izraza (4–4).

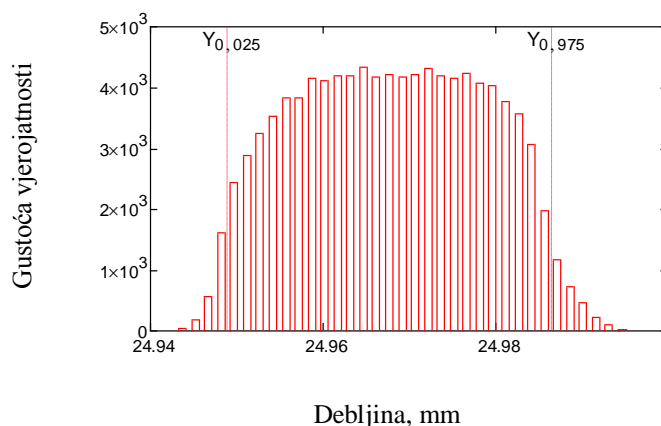
Ulazne veličine  $x_i$  definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti  $g(x_i)$  (tablica 36).

**Tablica 36.** Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine  $d_{gel}$  kada se kao vrsta kontaktnog sredstva koristi voda

| Ulazna veličina $x_i$         |       | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ |
|-------------------------------|-------|---|
| Debljina kontaktnog sredstva  | $s_c$ | Gama razdioba (M; 10 $\mu$ ; 50 $\mu$ ) |
| Širina frekvencijskog spektra | $B_W$ | Pravokutna razdioba (M; 25 %; 70 %)     |
| Nazivna frekvencija           | $f$   | Pravokutna razdioba (M; 4 MHz; 5 MHz)   |

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(d_{gel})$  dobivena je uz  $M = 100000$  simulacija (slika 78). Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine  $d_{gel}$  iznosi 0,01084 mm. Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(d_{gel})$  očitani su intervali unutar kojeg se nalazi izlazna veličina  $d_{gel}$ :

$$( Y_{0,025} = 24,94901 \text{ mm} ; Y_{0,975} = 24,98661 \text{ mm} ) \text{ uz } P = 95\%$$



**Slika 78.** Funkcija gustoće vjerojatnosti  $g(d_{gel})$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja kontaktnog sredstva (gel) i vrste sonde

### 7.6.5 Procjena nesigurnosti uslijed utjecaja kontaktnog sredstva (voda) i vrste sonde

U postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke tehnikom odjeka za procijenjeni regresijski model iz izraza (4–6) procijenjeno je standardno odstupanje izlazne veličine  $d_{\text{voda}}$  ako se kao kontaktno sredstvo koristi voda. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(d_{\text{voda}})$  simulirana je Monte Carlo metodom na osnovi izraza (4–6).

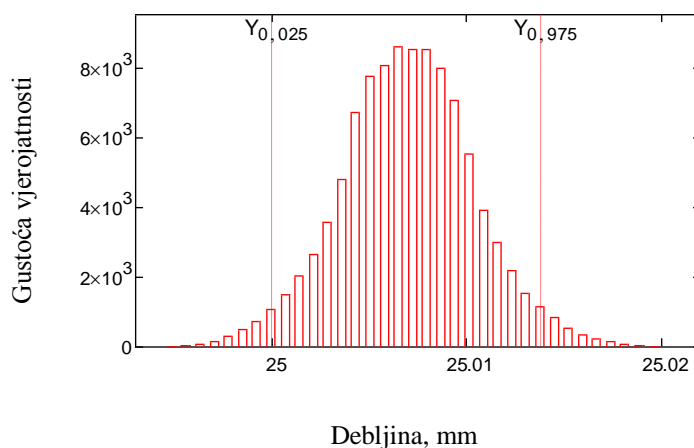
Ulazne veličine  $x_i$  definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti  $g(x_i)$  (tablica 37).

**Tablica 37.** Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine  $d_{\text{voda}}$  kada se kao vrsta kontaktnog sredstva koristi voda

| Ulazna veličina $x_i$         |       | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ |
|-------------------------------|-------|---|
| Debljina kontaktnog sredstva  | $s_c$ | Gama razdioba (M; 10 $\mu$ ; 50 $\mu$ ) |
| Širina frekvencijskog spektra | $B_W$ | Pravokutna razdioba (M; 25 %; 70 %)     |
| Nazivna frekvencija           | $f$   | Pravokutna razdioba (M; 4 MHz; 5 MHz)   |

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(d_{\text{voda}})$  dobivena je uz  $M = 100000$  simulacija (slika 79). Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine  $d_{\text{voda}}$  iznosi 0,00340 mm. Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(d_{\text{voda}})$  očitani su intervali unutar kojeg se nalazi izlazna veličina  $d_{\text{voda}}$ :

$$( Y_{0,025} = 25,00005 \text{ mm} ; Y_{0,975} = 25,01384 \text{ mm} ) \text{ uz } P = 95\%$$



**Slika 79.** Funkcija gustoće vjerojatnosti  $g(d_{\text{voda}})$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja kontaktnog sredstva (voda) i vrste sonde

## 7.7 Nesigurnost uslijed utjecaja ultrazvučnog uređaja i ultrazvučne sonde

Nesigurnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine uslijed utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde temelji se na planu pokusa postavljenog i opisanog u poglavlju 5. Temeljem provedenog plana pokusa dobiven je regresijski model sastavljen od utjecajnih članova modela od kojih svaki doprinosi nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine. Opći oblik regresijskog modela za procjenu nesigurnosti ultrazvučnog mjerenja debljine uslijed utjecaja ultrazvučnog uređaja i ultrazvučne sonde jest:

$$d_{Ur} = d + 3,08502 \times 10^{-5} U_p - 2,3635 \times 10^{-3} B_W + 8,58041 \times 10^{-3} f - 5,27571 \times 10^{-5} R_p - 9,58827 \times 10^{-7} U_p B_W - 6,1448 \times 10^{-8} U_p R_p + 3,88889 \times 10^{-4} B_W f + 5,26316 \times 10^{-7} B_W R_p + 8,94737 \times 10^{-6} f R_p \quad (7-6)$$

Koeficijenti pridruženi članovima regresijskog modela iz izraza (7-6) određeni su preko postavljenog plana pokusa obrađenog u poglavlju 5 (5-3).

Kako bi se odredili najznačajniji doprinosi funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $d_{Ur}$  simulacija je provedena za svaku interakciju zasebno uz pripadajuće funkcije gustoće vjerojatnosti ulaznih veličina.

### 7.7.1 Nesigurnost uslijed interakcije napona pobudnog impulsa i širine frekvencijskog spektra iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta U_p B_W)$  simulirana je Monte Carlo metodom uz  $M = 100000$  simulacija.

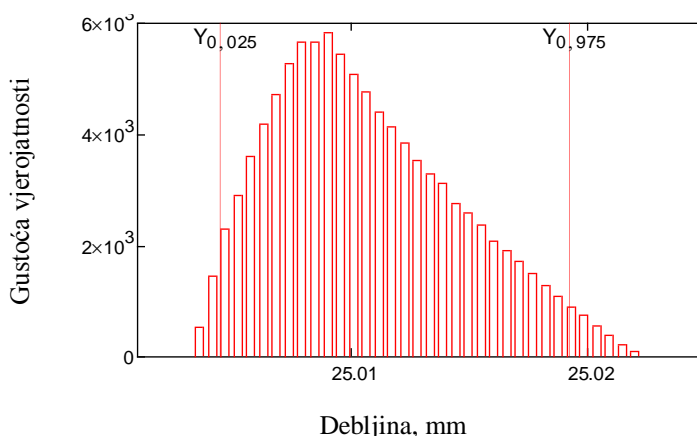
Ulazne veličine  $x_i$  definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti  $g(x_i)$  (tablica 38).

**Tablica 38.** Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine  $\delta U_p B_W$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde

| Ulazna veličina $x_i$         |       | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ |
|-------------------------------|-------|---|
| Napon pobudnog impulsa        | $U_p$ | Pravokutna razdioba (M; 135 V; 332 V)   |
| Širina frekvencijskog spektra | $B_W$ | Pravokutna razdioba (M; 25%; 70%)       |

Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta U_p B_W)$  dobivene Monte Carlo simulacijom (slika 80) procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine  $\delta U_p B_W$  iznosi 0,00395 mm. Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta U_p B_W)$  očitani su intervali unutar kojeg se nalazi izlazna veličina  $\delta U_p B_W$

$$( Y_{0,025} = 25,00448 \text{ mm} ; Y_{0,975} = 25,01926 \text{ mm} ) \text{ uz } P = 95\%$$



**Slika 80.** Funkcija gustoće vjerojatnosti  $g(\delta U_p B_W)$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde

### 7.7.2 Nesigurnost uslijed interakcije napona pobudnog impulsa i prigušnog otpora iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta U_p R_p)$  simulirana je Monte Carlo metodom uz  $M = 100000$  simulacija.

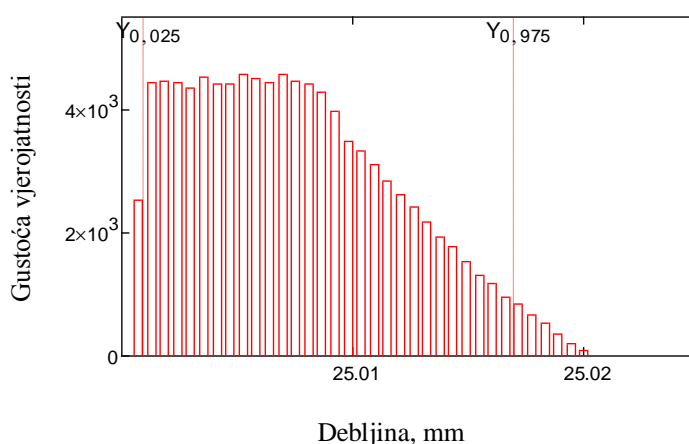
Ulazne veličine  $x_i$  definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti  $g(x_i)$  (tablica 39).

**Tablica 39.** Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine  $\delta U_p R_p$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde

| Ulazna veličina $x_i$  |       | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$               |
|------------------------|-------|---|
| Napon pobudnog impulsa | $U_p$ | Pravokutna razdioba (M; 135 V; 332 V)                 |
| Prigušni otpor         | $R_p$ | Pravokutna razdioba (M; 50 $\Omega$ ; 1000 $\Omega$ ) |

Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta U_p R_p)$  dobivene Monte Carlo simulacijom (slika 81) procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine  $\delta U_p R_p$  iznosi 0,00442 mm. Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta U_p R_p)$  očitano je interval unutar kojeg se nalazi izlazna veličina  $\delta U_p R_p$ :

$$( Y_{0,025} = 25,00099 \text{ mm} ; Y_{0,975} = 25,01699 \text{ mm} ) \text{ uz } P = 95\%$$



**Slika 81.** Funkcija gustoće vjerojatnosti  $g(\delta U_p R_p)$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde

### 7.7.3 Nesigurnost uslijed interakcije širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta B_W R_p)$  simulirana je Monte Carlo metodom uz  $M = 100000$  simulacija.

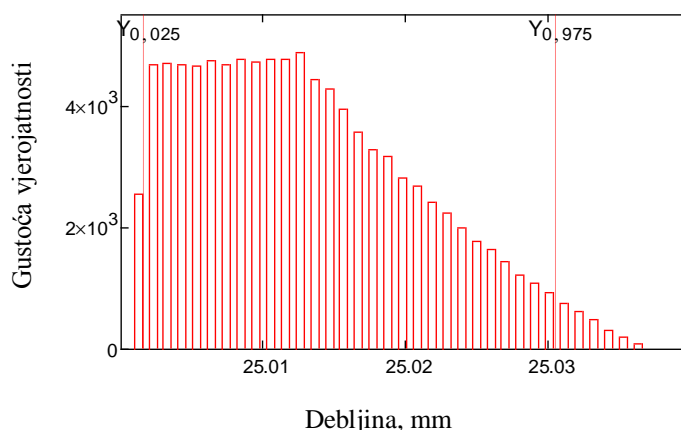
Ulazne veličine  $x_i$  definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti  $g(x_i)$  (tablica 40).

**Tablica 40.** Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine  $\delta B_W R_p$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde

| Ulazna veličina $x_i$         |       | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$               |
|-------------------------------|-------|---|
| Širina frekvencijskog spektra | $B_W$ | Pravokutna razdioba (M; 25 %; 70 %)                   |
| Prigušni otpor                | $R_p$ | Pravokutna razdioba (M; 50 $\Omega$ ; 1000 $\Omega$ ) |

Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta B_W R_p)$  dobivene Monte Carlo simulacijom (slika 82) procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine  $\delta B_W R_p$  iznosi 0,00795 mm. Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta B_W R_p)$  očitani su intervali unutar kojeg se nalazi izlazna veličina  $\delta B_W R_p$ :

$$( Y_{0,025} = 25,00169 \text{ mm} ; Y_{0,975} = 25,03057 \text{ mm} ) \text{ uz } P = 95\%$$



**Slika 82.** Funkcija gustoće vjerojatnosti  $g(\delta B_W R_p)$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde

#### 7.7.4 Nesigurnost uslijed interakcije širine frekventijskog spektra i nazivne frekvencije iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta B_W f)$  simulirana je Monte Carlo metodom uz  $M = 100000$  simulacija.

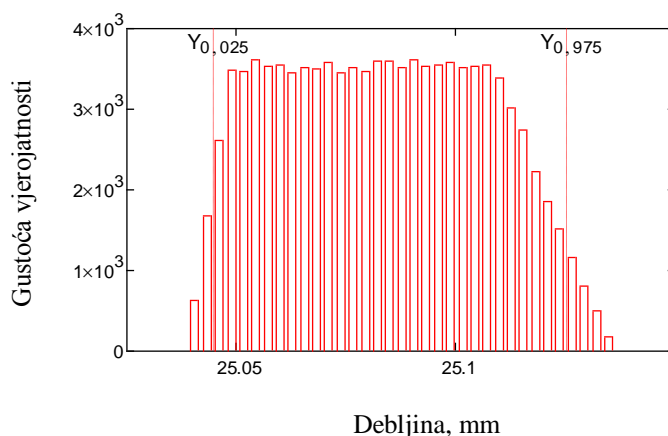
Ulazne veličine  $x_i$  definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti  $g(x_i)$  (tablica 41).

**Tablica 41.** Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine  $\delta B_W f$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde

| Ulazna veličina $x_i$         |       | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ |
|-------------------------------|-------|---|
| Širina frekventijskog spektra | $B_W$ | Pravokutna razdioba (M; 25 %; 70 %)     |
| Nazivna frekvencija           | $f$   | Pravokutna razdioba (M; 4 MHz; 5 MHz)   |

Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta B_{wf})$  dobivene Monte Carlo simulacijom (slika 83) procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine  $\delta B_{wf}$  iznosi 0,02337 mm. Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta B_{wf})$  očitani su intervali unutar kojih se nalazi izlazna veličina  $\delta B_{wf}$ :

$$( Y_{0,025} = 25,04488 \text{ mm} ; Y_{0,975} = 25,12528 \text{ mm} ) \text{ uz } P = 95\%$$



**Slika 83.** Funkcija gustoće vjerojatnosti  $g(\delta B_{wf})$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde

#### 7.7.5 Nesigurnost uslijed interakcije nazivne frekvencije i prigušnog otpora iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta f R_p)$  simulirana je Monte Carlo metodom uz  $M = 100000$  simulacija.

Ulazne veličine  $x_i$  definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti  $g(x_i)$  (tablica 42).

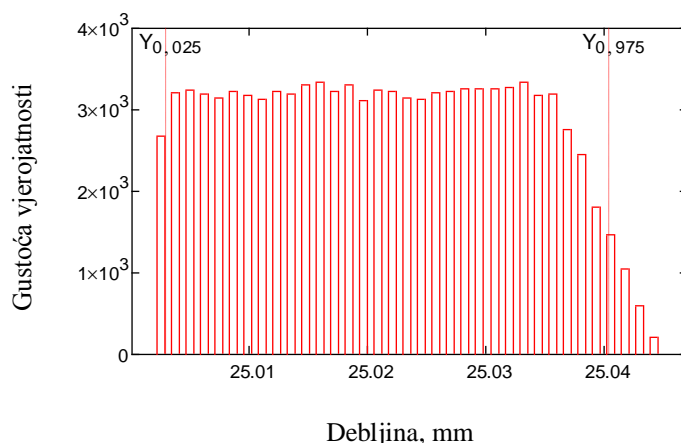
**Tablica 42.** Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine  $\delta f R_p$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde

| Ulazna veličina $x_i$ |       | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$               |
|-----------------------|-------|---|
| Nazivna frekvencija   | $f$   | Pravokutna razdioba (M; 4 MHz; 5 MHz)                 |
| Prigušni otpor        | $R_p$ | Pravokutna razdioba (M; 50 $\Omega$ ; 1000 $\Omega$ ) |

Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta f R_p)$  dobivene Monte Carlo simulacijom (slika 84) procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine  $\delta f R_p$  iznosi

0,01113 mm. Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(\delta f R_p)$  očitano je interval unutar kojeg se nalazi izlazna veličina  $\delta f R_p$ :

$$( Y_{0,025} = 25,00297 \text{ mm} ; Y_{0,975} = 25,04044 \text{ mm} ) \text{ uz } P = 95\%$$



**Slika 84.** Funkcija gustoće vjerojatnosti  $g(\delta f R_p)$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde

### 7.7.6 Procjena nesigurnosti uslijed utjecaja ultrazvučnog uređaja i vrste sonde

U postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke tehnikom odjeka za procijenjeni regresijski model iz izraza (5–3) procijenjeno je standardno odstupanje izlazne veličine  $d_{Ur}$ . Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(d_{Ur})$  simulirana je Monte Carlo metodom na osnovi izraza (5–3).

Ulazne veličine  $x_i$  definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti  $g(x_i)$  (tablica 43).

**Tablica 43.** Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine  $d_{Ur}$

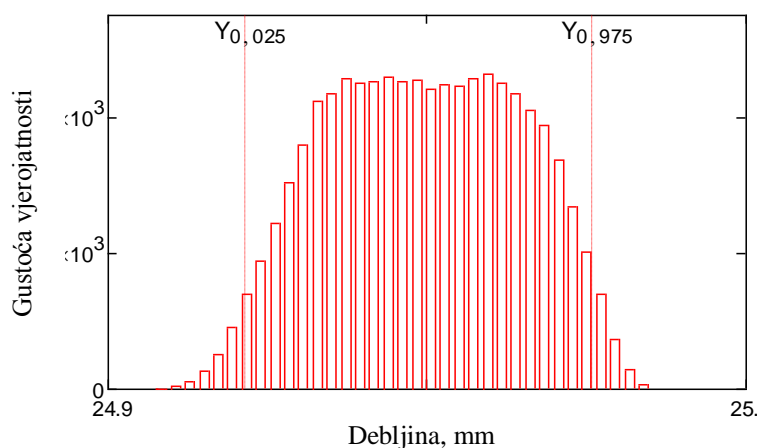
| Ulazna veličina $x_i$         |       | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$               |
|-------------------------------|-------|---|
| Prigušni otpor                | $R_p$ | Pravokutna razdioba (M; 50 $\Omega$ ; 1000 $\Omega$ ) |
| Napon pobudnog impulsa        | $U_p$ | Pravokutna razdioba (M; 135 V; 332 V)                 |
| Širina frekvencijskog spektra | $B_w$ | Pravokutna razdioba (M; 25 %; 70 %)                   |
| Nazivna frekvencija           | $f$   | Pravokutna razdioba (M; 4 MHz; 5 MHz)                 |



Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(d_{Ur})$  dobivena je uz  $M = 100000$  simulacija (slika 85). Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine  $d_{Ur}$  iznosi 0,03049 mm.

Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(d_{Ur})$  očitano je interval unutar kojeg se nalazi izlazna veličina  $d_{Ur}$ :

$$( Y_{0,025} = 24,94347 \text{ mm} ; Y_{0,975} = 25,05220 \text{ mm} ) \text{ uz } P = 95\%$$



**Slika 85.** Funkcija gustoće vjerojatnosti  $g(d_{Ur})$  iz regresijskog modela za određivanje utjecaja uređaja i vrste sonde

### 7.7.7 Doprinosi mjernoj nesigurnosti ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke

Tablica 44 sadrži zbirni prikaz doprinosa mjernoj nesigurnosti rezultata u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke. Analiza doprinosa mjernoj nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke prikazana je za karakteristične interakcije iz matematičkog modela prema izrazu (7-2).

Za pojedine regresijske modele dobivenih preko postavljenih planova pokusa opisanih u poglavlju 4 i poglavlju 5 procijenjena je mjerna nesigurnost rezultata.

| Tablica 44. Doprinosi mjernoj nesigurnosti ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke   |                   |   |   |
|--|-------------------|---|---|
| Ulazne veličine $x_i$  |                   | Procijenjeno standardno odstupanje i interval pokrivanja, $P = 95\%$                                  | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ |
| Nesigurnost mjerenja vremena proleta ultrazvučnog impulsa  | $\delta_{TOF}$    | $s = 0,00008 \text{ mm}$<br>( $Y_{0,025} = 25,02474 \text{ mm}$ ; $Y_{0,975} = 25,02504 \text{ mm}$ ) |   |
| Nesigurnost korekcije brzine   | $\delta v_{cor}$  | $s = 0,00035 \text{ mm}$<br>( $Y_{0,025} = 24,97444 \text{ mm}$ ; $Y_{0,975} = 24,97578 \text{ mm}$ ) |   |
| Nesigurnost uslijed djelovanja članova regresijskog modela za određivanje utjecaja kontaktnog sredstva i vrste ultrazvučne sonde |                   |   |   |
| Ulazne veličine $x_i$  |                   | Procijenjeno standardno odstupanje i interval pokrivanja, $P = 95\%$                                  | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ |
| Nesigurnost uslijed interakcije debljine kontaktnog sredstva i širine frekvencijskog spektra                                     | $\delta s_c B_w$  | $s = 0,00199 \text{ mm}$<br>( $Y_{0,025} = 25,00120 \text{ mm}$ ; $Y_{0,975} = 25,00853 \text{ mm}$ ) |   |
| Nesigurnost uslijed interakcije širine frekvencijskog spektra i nazivne frekvencije  | $\delta B_w f$    | $s = 0,02829 \text{ mm}$<br>( $Y_{0,025} = 25,05442 \text{ mm}$ ; $Y_{0,975} = 25,15194 \text{ mm}$ ) |   |
| Nesigurnost uslijed vrste i debljine kontaktnog sredstva i vrste ultrazvučne sonde   |                   |   |   |
| Ulazne veličine $x_i$  |                   | Procijenjeno standardno odstupanje i interval pokrivanja, $P = 95\%$                                  | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ |
| Nesigurnost uslijed utjecaja kontaktnog sredstva (ulje) i vrste ultrazvučne sonde  | $\delta d_{ulje}$ | $s = 0,08553 \text{ mm}$<br>( $Y_{0,025} = 25,15262 \text{ mm}$ ; $Y_{0,975} = 25,22657 \text{ mm}$ ) |   |

Tablica 45. Nastavak

| Nesigurnost uslijed vrste i debljine kontaktnog sredstva i vrste ultrazvučne sonde  |  |   |
|---|--|---|
| Ulazne veličine $x_i$   | Procijenjeno standardno odstupanje i interval pokrivanja, $P = 95\%$   | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ |
| Nesigurnost uslijed debljine kontaktnog sredstva (gel) i vrste ultrazvučne sonde  | $\delta d_{gel}$<br>$s = 0,01084 \text{ mm}$<br>( $Y_{0,025} = 24,94901 \text{ mm}$ ; $Y_{0,975} = 24,98661 \text{ mm}$ )  |   |
| Nesigurnost uslijed debljine kontaktnog sredstva (voda) i vrste ultrazvučne sonde   | $\delta d_{voda}$<br>$s = 0,00340 \text{ mm}$<br>( $Y_{0,025} = 25,00005 \text{ mm}$ ; $Y_{0,975} = 25,01384 \text{ mm}$ ) |   |
| Nesigurnost uslijed djelovanja članova regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i ultrazvučne sonde |  |   |
| Ulazne veličine $x_i$   | Doprinos mjernoj nesigurnosti  | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ |
| Nesigurnost uslijed interakcije napona pobudnog impulsa i širine frekventijskog spektra                                     | $\delta U_p B_w$<br>$s = 0,00395 \text{ mm}$<br>( $Y_{0,025} = 25,00448 \text{ mm}$ ; $Y_{0,975} = 25,01926 \text{ mm}$ )  |   |
| Nesigurnost uslijed interakcije napona pobudnog impulsa i prigušnog otpora  | $\delta U_p R_p$<br>$s = 0,00442 \text{ mm}$<br>( $Y_{0,025} = 25,00099 \text{ mm}$ ; $Y_{0,975} = 25,01699 \text{ mm}$ )  |   |
| Nesigurnost uslijed interakcije širine frekventijskog spektra i prigušnog otpora  | $\delta B_w R_p$<br>$s = 0,00795 \text{ mm}$<br>( $Y_{0,025} = 25,00169 \text{ mm}$ ; $Y_{0,975} = 25,03057 \text{ mm}$ )  |   |
| Nesigurnost uslijed interakcije širine frekventijskog spektra i nazivne frekvencije   | $\delta B_w f$<br>$s = 0,02337 \text{ mm}$<br>( $Y_{0,025} = 25,04488 \text{ mm}$ ; $Y_{0,975} = 25,12528 \text{ mm}$ )    |   |

Tablica 45. Nastavak

| Nesigurnost uslijed djelovanja članova regresijskog modela za određivanje utjecaja ultrazvučnog uređaja i ultrazvučne sonde |                 |   |   |
|---|-----------------|---|---|
| Ulazne veličine $x_i$   |                 | Doprinos mjernoj nesigurnosti   | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ |
| Nesigurnost uslijed interakcije nazivne frekvencije i prigušnog otpora  | $\delta f R_p$  | $s = 0,01113 \text{ mm}$<br>$( Y_{0,025} = 25,00297 \text{ mm} ; Y_{0,975} = 25,04044 \text{ mm} )$ |   |
| Nesigurnost uslijed ultrazvučnog uređaja i vrste ultrazvučne sonde  |                 |   |   |
| Nesigurnost uslijed ultrazvučnog uređaja i vrste sonde  | $\delta d_{Ur}$ | $s = 0,03049 \text{ mm}$<br>$( Y_{0,025} = 24,94347 \text{ mm} ; Y_{0,975} = 25,05220 \text{ mm} )$ |   |

Iz funkcija gustoće vjerojatnosti regresijskih modela za određivanje utjecaja vrste i debljine kontaktnog sredstva ustanovljeno je da voda kao vrsta kontaktnog sredstva ima u odnosu na ulje ili gel najmanji doprinos mjernoj nesigurnosti:

$$U(d_{\text{voda}}) = 0,007 \text{ mm};$$

$$U(d_{\text{gel}}) = 0,012 \text{ mm};$$

$$U(d_{\text{ulje}}) = 0,036 \text{ mm};$$

Ostvareni rezultati eksperimenta za određivanje utjecaja vrste i debljine kontaktnog sredstva, a s obzirom na zakonitosti promjene funkcije gustoće vjerojatnosti, upućuju na značajan utjecaj akustičkih svojstava kontaktnog sredstva na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine.

## 7.8 Mjerna nesigurnost ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke

U postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke tehnikom odjeka za postavljeni matematički model iz izraza (7-2) procijenjeno je standardno odstupanje izlazne veličine  $d_{st}$ .

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(d_{st})$  simulirana je Monte Carlo metodom.

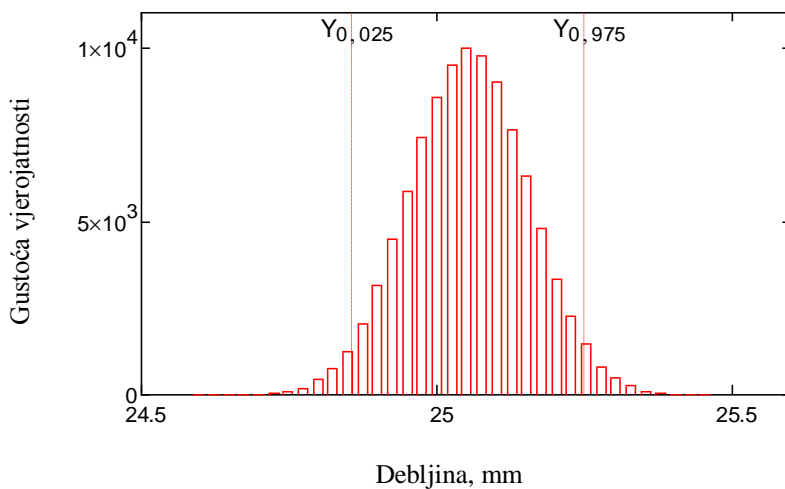
Ulazne veličine  $x_i$  definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti  $g(x_i)$  (tablica ). Utjecaj temperaturne razlike etalona u odnosu na 20° C ( $\delta t$ ) ne doprinosi značajno mjernoj nesigurnosti stoga nije uvedena kao sastavnica u matematičkom modelu za procjenu mjerne nesigurnosti ultrazvučnog mjerenja debljine.

**Tablica 46.** *Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine  $d_{st}$*

| Ulazna veličina $x_i$                          |           | Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$               |
|--|-----------|---|
| Brzina ultrazvuka podešena na uređaju          | $v_{cal}$ | Pravokutna razdioba (M; 5890 m/s; 5950 m/s)           |
| Vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa           | $t_{TOF}$ | Normalna razdioba (M; 8,4087 $\mu$ s; 0,012 $\mu$ s)  |
| Stvarna brzina u materijalu mjerene komponente | $v_{mat}$ | Trokutasta razdioba (M; 5700 m/s; 6100 m/s)           |
| Debljina kontaktnog sredstva                   | $s_c$     | Gama razdioba (M; 10 $\mu$ m; 50 $\mu$ m)             |
| Širina frekvencijskog spektra                  | $B_W$     | Pravokutna razdioba (M; 25 %; 70 %)                   |
| Nazivna frekvencija                            | $f$       | Pravokutna razdioba (M; 4 MHz; 5 MHz)                 |
| Napon pobudnog impulsa                         | $U_p$     | Pravokutna razdioba (M; 135 V; 332 V)                 |
| Prigušni otpor                                 | $R_p$     | Pravokutna razdioba (M; 50 $\Omega$ ; 1000 $\Omega$ ) |
| Hrapavost kontaktne i odzivne površine         | $h_a$     | Normalna razdioba (M; 20 $\mu$ m; 0,093 $\mu$ m)      |

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(d_{st})$  dobivena je uz  $M = 100000$  simulacija (slika 86). Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine  $d_{st}$  iznosi 0,10042 mm. Iz funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine  $g(d_{st})$  očitani su intervali unutar kojih se nalazi izlazna veličina  $d_{st}$ :

$$( Y_{0,025} = 24,85671 \text{ mm} ; Y_{0,975} = 25,24932 \text{ mm} ) \text{ uz } P = 95\%$$



**Slika 86.** Funkcija gustoće vjerojatnosti  $g(d_{st})$

Funkcija gustoće vjerojatnosti  $g(d_{st})$  opisuje normalnu raspodjelu (slika 86).

Proširena mjerna nesigurnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke iznosi:

$$U(d_{st}) = 0,20 \text{ mm}; \text{ uz } k = 2 \text{ i } P = 95\%$$

## 8. ZAKLJUČAK

U teorijskom dijelu rada prikazane su osnovne značajke ultrazvučnog mjerenja debljine. Prikazane su i objašnjene osnovne karakteristike i specifičnosti elemenata koji sačinjavaju sustav ultrazvučnog mjerenja.

Postavljeni cilj ovog doktorskog rada je karakterizacija utjecajnih faktora i kvantificiranje interakcija, te analiza značajnosti njihova utjecaja na točnost i preciznost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke. Svaki od ustanovljenih utjecajnih faktora teorijski je razrađen što predstavlja temelj za minimiziranje utjecaja na rezultat mjerenja.

U cilju procjenjivanja mjerne nesigurnosti kroz eksperimentalnu analizu i adekvatno postavljeni plan pokusa osigurani su podaci za kvantifikaciju utjecajnih faktora na mjerni rezultat. U eksperimentalnoj analizi procijenjeni su regresijski koeficijenti za određivanje utjecaja vrste i debljine kontaktnog sredstva u ovisnosti o ultrazvučnoj sondi, te utjecaj ultrazvučnog uređaja i vrste sonde na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine. Razvojem općeg oblika matematičkog modela i simulacijom procesa ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke utvrđeni su utjecajni parametri na točnost i preciznost rezultata mjerenja. Opći oblik matematičkog modela sastavljen je od samostalnih članova i pojedinih interakcija čiji su doprinosi mjernoj nesigurnosti analizirani i kvantificirani.

Na osnovu teorijskih razmatranja i eksperimentalnih rezultata predložen je model mjerne nesigurnosti za odabrani ultrazvučni mjerni sustav. Odabrani model analiziran je Monte Carlo simulacijom te je procijenjena mjerna nesigurnost rezultata u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke čime je potvrđena je hipoteza 2.

Temeljem provedenih istraživanja u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke, za odabrani mjerni sustav, ostvarena je i iskazana sljedeća mjerna nesigurnost:

$$U(d_{st}) = 0,20 \text{ mm}; \text{ uz } k = 2 \text{ i } P = 95\%$$

Utvrđeni su i kvantificirani ključni izvori mjerne nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke tehnikom odjeka kako slijedi: hrapavost kontaktne i/ili odzivne površine, debljina i vrsta kontaktnog sredstva, prigušni otpor i napon pobudnog impulsa, frekvencija sonde i širina frekvencijskog spektra, interakcija debljine kontaktnog sredstva i širine frekvencijskog spektra, interakcija širine frekvencijskog spektra i nazivne frekvencije, interakcija napona pobudnog impulsa i širine frekvencijskog spektra, interakcija napona

pobudnog impulsa i prigušnog otpora, interakcija širine frekvencijskog spektra i prigušnog otpora, te interakcija nazivne frekvencije i prigušnog otpora.

Primjenom metodologije odzivne površine dobiveni su regresijski modeli za procjenu mjerne nesigurnosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine. Sukladno provedenoj procjeni mjerne nesigurnosti regresijskih modela za određivanje utjecaja vrste i debljine kontaktnog sredstva, metodom Monte Carlo simulacije, ustanovljeno je da voda kao vrsta kontaktnog sredstva ima najmanji doprinos mjernoj nesigurnost u odnosu na ulje ili gel:

$$U(d_{\text{voda}}) = 0,007 \text{ mm};$$

$$U(d_{\text{gel}}) = 0,012 \text{ mm};$$

$$U(d_{\text{ulje}}) = 0,036 \text{ mm};$$

Slijedom stečenih saznanja, a u cilju smanjenja mjerne nesigurnosti očekuju se daljnji pravci istraživanja u smjeru utvrđivanja zakonitosti promjene funkcija gustoće vjerojatnosti u ovisnosti o akustičkim svojstvima kontaktnog sredstva te istraživanja složene refleksije koja nastaje nailaskom ultrazvučnog impulsa na granicu dvaju sredstava nepravilnog oblika (uslijed korozije ili hrapavosti kontaktne i/ili odzivne površine).

U okviru ovog doktorskog rada procijenjena je mjerna nesigurnost ultrazvučnog mjerenja debljine kako bi se moglo sudjelovati u međulaboratorijskim usporedbenim mjerenjima. S tim ciljem razvijen je matematički model unutar kojeg se provodi korekcija brzine čime se smanjio utjecaj razlike između fazne i grupne brzine. Preporuka za daljnje istraživanje odnosi se na razvoju matematičkog modela pomoću kojeg bi bilo moguće kvantificirati utjecaj razlike između fazne i grupne brzine kada se mjerenja provode na materijalima različitih debljina.

S ciljem validacije matematičkog modela za procjenu mjerne nesigurnost Monte Carlo simulacijom u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine, pri jednakim odabranim parametrima elemenata mjernog sustava provedena su mjerenja koja su uspješno potvrdila postavljenu hipotezu ove doktorske disertacije.

S navedenom mjernom nesigurnošću Laboratorij za nerazorna ispitivanja može se ravnopravno uključiti u europsko i svjetsko usporedbeno mjerenje debljine ultrazvučnom tehnikom odjeka.



## 9. LITERATURA

- [1] B. Runje, Istraživanje mjernih nesigurnosti u postupcima umjeravanja etalona duljine, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska, doktorska disertacija, 2002.
- [2] D. Markučić, Razvoj metodologije ultrazvučne kontrole podvodnih konstrukcija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska, doktorska disertacija, 1998.
- [3] JCGM 100:2008: Vrednovanje mjernih podataka - Uputa za iskazivanje mjerne nesigurnosti, 2008.
- [4] ISO/IEC 17025:2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
- [5] ISO/IEC 17020:2012, Conformity assessment -- Requirements for the operation of various types of bodies performing inspection.
- [6] D. Markučić, V. Krstelj, Accreditation of Ultrasonic Thickness Measurement Methods – Practical Aspects, 5th International Conference on Certification and Standardization in NDT, 2007.
- [7] K. Chatterjee, M. Modarres, A probabilistic approach for estimating defect size and density considering detection uncertainties and measurement errors, Journal of Risk and Reliability, Vol. 227, No. 1, pp 28-40, 2013.
- [8] K.A. Fowler, G.M. Elfbaum, K.A. Smith, T.J. Nelligan, Theory and Application of Precision Ultrasonic Thickness Gaging, The eJournal of Nondestructive Testing, <http://www.ndt.net/article/wt1097/panam/panam.htm>, 1997.
- [9] EN 14127:2011, Non-destructive testing – Ultrasonic thickness measurement.
- [10] D. Markučić, B. Runje, J. Stepanić, Assesment of Uncertainty in Modelled Ultrasonic Thickness Measurement, MP Materials Testing 53; pp 233-237, 2011.
- [11] P. Hammond, On Resolution, Accuracy and Calibration of Digital Ultrasonic Thickness Gauges, NDTnet, Vol. 2, No. 10, 1997.
- [12] M. Loosvelt, P. Lasaygues, A Wavelet-Based Processing method for simultaneously determining ultrasonic velocity and material thickness, Ultrasonics 51, pp 325–339, 2011.
- [13] Y. Zhao, L. Lin, X.M. Li, M.K. Lei, Simultaneous determination of the coating thickness and its longitudinal velocity by ultrasonic nondestructive method; NDT&E International 43, pp 579–585, 2010.

- 
- [14] S. Kummritz, M. Wolf, E. Kuhnicke, Simultaneous Determination of Thickness and Sound Velocity in Layered Structures; 11th. European Conference on Non-Destructive Testing, Prague, Czech Republic, 2014.
- [15] V. Krstelj, Ultrazvučna kontrola, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva I brodogradnje, 953-6313-54-5, Zagreb (2003).
- [16] Ping He, Simultaneous measurement of sound velocity and wall thickness of a tube; Ultrasonics 39, pp 407-411, 2001.
- [17] M.G.S Ali, Ultrasonic Attenuation and Velocity in Steel Standard Reference Blocks; Romanian Journal of Acoustics and Vibration, Vol.10; ISSUE:1; ISSN 1584-7284, 2013.
- [18] C. Hakan Gur, O.B. Tuncer, Characterization of microstructural phases of steels by sound velocity measurement; Materials Characterization 55, pp 160– 166, 2005.
- [19] V.L. Araújo Freitas, V.H.C. Albuquerque, E. Macedo Silva, A. Almeida Silvaa, R.S.J.M. Tavares, Nondestructive characterization of microstructures and determination of elastic properties in plain carbon steel using ultrasonic measurements, Ultrasonics 52, pp 117–124, 2012.
- [20] T. Lukomski, T. Stepinski, Steel hardness evaluation based on ultrasound velocity measurements, Insight, Vol. 52, No. 11, 2010.
- [21] S.Y. Gmyrin, Influence of roughness of the bottom surface of a testpiece on the parameters of ultrasound and the readings of ultrasonic thickness gauges; Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 30, ISSUE: 11, 1995.
- [22] S.Y. Gmyrin,; Uncertainty in Ultrasonic Thickness Measurements Based on the Spacing between the First and Second Bottom Reflected Signals. II. Rough Bottom Surface. Irregularities with Rectangular profiles; Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 36; No. 9, pp 685-689, 2000.
- [23] V.A Barkhatov, Calculation of the Ultrasonic Field of a Probe in the Pulsed Mode; Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 41, No. 7, pp 413-420, 2005.
- [24] M. Mihaljević, D. Markučić, J. Stepanić, Statistical Analysis of ultrasonic reflector response, Annals of DAAAM for 2010 and Proceedings, Vienna, 1453-1454, 2010.
- [25] G.A. Budenkov, O.V. Nedzvetskaya, S.I. Shishkina, G.A. Polyankin, Stabilization of Acoustic Coupling for Ultrasonic Testing, Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 36, No.12, pp 910 –915, 2000.
-

- 
- [26] S.E. Burrows, Y. Fan, S. Dixon, High temperature thickness measurements of stainless steel and low carbon steel using electromagnetic acoustic transducers, *NDT&E International*, Vol. 68, pp 73–77, 2014.
- [27] S. Periyannan, K. Balasubramaniam, Temperature Gradients and Materials Properties Measurements using Ultrasonic Guided Waves, 11th European Conference on Non-Destructive Testing, Prague, Czech Republic, 2014.
- [28] EN 12223:2000, Non-destructive testing. Ultrasonic examination. Specification for calibration block No.1.
- [29] S. Medić, Ž. Kondić, B. Runje, Validation of the realised measurement uncertainty in process of precise line scales calibration, *Tehnički vjesnik*, Vol. 19, No. 2, pp 333-339, 2012.
- [30] K. Chatterjee, M. Modarres, A probabilistic approach for estimating defect size and density considering detection uncertainties and measurement errors, *Journal of Risk and Reliability*, Vol. 227, No. 1, pp 28–40, 2012.
- [31] B. Runje, M Mažar, G. Baršić, Statistical tolerancing using Monte Carlo Simulation, 13th International Scientific Conference on Production Engineering CIM, Biograd, Croatia, 2011.
- [32] Y. Pu, Monte Carlo Simulation Method for Structural Reliability, *Structural Risk & Reliability Course*, Glasgow, 2011.
- [33] P.M. Harris, C.E. Matthews, M.G. Cox, A.B. Forbes, Summarizing the output of a Monte Carlo method for uncertainty evaluation, *Metrologia*, Vol. 51, pp 243-252, 2014.
- [34] R.Y. Rubinstein, D.P Kroese, *Simulation and the Monte Carlo Method*, Wiley Series in Probability and Statistics, Second Edition, 2008.
- [35] P.J. Scott, A.B. Forbes, Mathematics for modern precision engineering, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 370, pp 4066–4088, 2012.
- [36] A.B. Forbes, Approaches to evaluating measurement uncertainty, *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, Vol. 3, pp 71-77, 2012.
- [37] P.M. Harris, C.E. Matthews, M. G. Cox, A.B. Forbes, Summarizing the output of a Monte Carlo method for uncertainty evaluation, *Metrologia*, Vol. 51, pp 243-252, 2014.
- [38] ... <http://elimp.hr/asd>, prosinac 2014.
- [39] ... [http://www.bas.gov.ba/pages/page\\_1300.html](http://www.bas.gov.ba/pages/page_1300.html), prosinac 2014.
- [40] ... <http://www.idef.hr/ultrazvucni%20defektoskopi>, prosinac 2014.
- [41] ... <http://www.unicorn-automation.co.uk/Theory.htm>, siječanj 2015.
-

- 
- [42] EN ISO 16810:2014, Non-destructive testing. Ultrasonic examination. General principles.
- [43] EN ISO 16811:2014, Non-destructive testing. Ultrasonic examination. Sensitivity and range setting.
- [44] EN ISO 9712:2012, Non-destructive testing - Qualification and certification of NDT personnel.
- [45] ... <http://www.ideal.hr/ultrazvucni-mjerac-deblji>, ožujak 2015.
- [46] F. S. Crawford Jr, Waves, Berkeley physics course, Vol 3, Mcgraw-hill book company, 1968.
- [47] EN 583-1:1999, Non-destructive testing. Ultrasonic examination. General principles.
- [48] J. Stepanić, Ispitivanje svojstava ukopanih objekata primjenom ultrazvuka, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska, doktorska disertacija, 2003.
- [49] J. Krautkramer, H. Krautkramer, Ultrasonic Testing of Materials, Springer-Verlag, 3-540-117334-4, Berlin, Heidelberg, New York, (1983).
- [50] Ž. Alar, Analiza utjecajnih faktora na mjernu nesigurnost etalonskog tvrdomjera, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska, doktorska disertacija, 2008.
- [51] ... <http://www.rsindt.com/ultrasonic.asp>, ožujak 2015.
- [52] HRN EN ISO 7963:2010, Specification for calibration block No. 2 for ultrasonic examination of welds.
- [53] ... <http://www.bergeng.com/ULTFCTB-cat.html>, veljača 2015.
- [54] ... <http://www.ajrtrade.com/products/calibration-block.html>, veljača 2015.
- [55] ... <http://svijet-kvalitete.com/index.php/upravljanje-kvalitetom/1255-ishikawa-dijagram>, veljača 2015.
- [56] P. B. Nagy, L. Adler: Surface roughness induced attenuation of reflected and transmitted ultrasonic waves, Journal of Acustical Society of America, 82(1), pp 197-197, 1987.
- [57] H. Cajner, Višekriterijsko adaptivno oblikovanje planova pokusa, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska, doktorska disertacija, 2011.
- [58] H. Cajner, N. Šakić, P. Čosić: Improvement of experimental plans using multi-criteria approach, Tehnički vjesnik/Technical Gazette 19(2012), 3; str. 601-606
- [59] ... <http://www.statease.com/dx9.html>, travanj 2015.
- [60] ASTM E 1324-11, Standard Guide for Measuring Some Electronic Characteristics of Ultrasonic Testing Instruments.
- [61] Krautkramer, Technical Reference and Operating Manual, Issue 01, 02/2001.
-

- [62] R. Zhang, B. Jiang, W. Cao, Influence of sample size on ultrasonic phase velocity measurements in piezoelectric ceramics, *Journal of applied physics*, Vol. 91, No. 12, 2002.
- [63] D. Markučič, V. Mudronja, S. Mahović, B. Runje, Quality Requirements for Ultrasonic Testing Calibration Blocks, *European Conference on Nondestructive Testing*, Barcelona (Spain), June 17-21, 2002.
- [64] G. Baršić, Razvoj etalona hrapavosti za nanomjeriteljstvo, *Fakultet strojarstva i brodogradnje*, Zagreb, Hrvatska, doktorska disertacija, 2011.
- [65] S. Medić, Razvoj sustava za umjeravanje mjernih skala, *Fakultet strojarstva i brodogradnje*, Zagreb, Hrvatska, doktorska disertacija, 2011.

## 10. PRILOG

**Prilog A-1.** Rezultati mjerenja debljine po stanjima pokusa kada se koristi ulje kao kontaktno sredstvo

| Redoslijed izvođenja | Članovi modela                                   |                                       |                                     | Izmjerena debljina ultrazvukom, mm |
|----------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
|                      | A<br>Debljina kontaktnog sredstva, $\mu\text{m}$ | B<br>Širina frekvencijskog spektra, % | C<br>Nazivna frekvencija sonde, MHz |                                    |
| 85                   | 10   | 25                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 8                    | 10   | 25                                    | 5                                   | 25,00                              |
| 38                   | 10   | 25                                    | 5                                   | 24,99                              |
| 72                   | 10   | 25                                    | 5                                   | 25,00                              |
| 7                    | 10   | 25                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 15                   | 20   | 25                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 55                   | 20   | 25                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 27                   | 20   | 25                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 43                   | 20   | 25                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 75                   | 20   | 25                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 25                   | 30   | 25                                    | 5                                   | 25,04                              |
| 57                   | 30   | 25                                    | 5                                   | 25,03                              |
| 100                  | 30   | 25                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 4                    | 30   | 25                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 48                   | 30   | 25                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 93                   | 40   | 25                                    | 5                                   | 25,04                              |
| 51                   | 40   | 25                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 60                   | 40   | 25                                    | 5                                   | 25,03                              |
| 94                   | 40   | 25                                    | 5                                   | 25,04                              |
| 80                   | 40   | 25                                    | 5                                   | 25,03                              |
| 37                   | 50   | 25                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 81                   | 50   | 25                                    | 5                                   | 25,07                              |
| 65                   | 50   | 25                                    | 5                                   | 25,06                              |
| 11                   | 50   | 25                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 46                   | 50   | 25                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 47                   | 10   | 70                                    | 5                                   | 25,00                              |
| 64                   | 10   | 70                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 86                   | 10   | 70                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 45                   | 10   | 70                                    | 5                                   | 25,00                              |
| 26                   | 10   | 70                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 14                   | 20   | 70                                    | 5                                   | 25,04                              |
| 91                   | 20   | 70                                    | 5                                   | 25,03                              |
| 62                   | 20   | 70                                    | 5                                   | 25,03                              |
| 67                   | 20   | 70                                    | 5                                   | 25,04                              |
| 21                   | 20   | 70                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 88                   | 30   | 70                                    | 5                                   | 25,04                              |
| 83                   | 30   | 70                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 1                    | 30   | 70                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 22                   | 30   | 70                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 9                    | 30   | 70                                    | 5                                   | 25,04                              |
| 53                   | 40   | 70                                    | 5                                   | 25,06                              |
| 19                   | 40   | 70                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 12                   | 40   | 70                                    | 5                                   | 25,07                              |

**Prilog A-1. Nastavak**

| Redoslijed izvođenja | Članovi modela                                   |                                       |                                     |                                    |
|----------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
|                      | A<br>Debljina kontaktnog sredstva, $\mu\text{m}$ | B<br>Širina frekventijskog spektra, % | C<br>Nazivna frekvencija sonde, MHz | Izmjerena debljina ultrazvukom, mm |
| 39                   | 40   | 70                                    | 5                                   | 25,06                              |
| 49                   | 40   | 70                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 95                   | 50   | 70                                    | 5                                   | 25,08                              |
| 29                   | 50   | 70                                    | 5                                   | 25,07                              |
| 74                   | 50   | 70                                    | 5                                   | 25,06                              |
| 52                   | 50   | 70                                    | 5                                   | 25,07                              |
| 70                   | 50   | 70                                    | 5                                   | 25,08                              |
| 36                   | 10   | 25                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 79                   | 10   | 25                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 42                   | 10   | 25                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 78                   | 10   | 25                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 96                   | 10   | 25                                    | 4                                   | 24,99                              |
| 2                    | 20   | 25                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 31                   | 20   | 25                                    | 4                                   | 25,02                              |
| 56                   | 20   | 25                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 3                    | 20   | 25                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 18                   | 20   | 25                                    | 4                                   | 25,02                              |
| 23                   | 30   | 25                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 20                   | 30   | 25                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 68                   | 30   | 25                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 87                   | 30   | 25                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 92                   | 30   | 25                                    | 4                                   | 25,05                              |
| 90                   | 40   | 25                                    | 4                                   | 25,06                              |
| 35                   | 40   | 25                                    | 4                                   | 25,05                              |
| 97                   | 40   | 25                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 13                   | 40   | 25                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 59                   | 40   | 25                                    | 4                                   | 25,06                              |
| 63                   | 50   | 25                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 89                   | 50   | 25                                    | 4                                   | 25,05                              |
| 77                   | 50   | 25                                    | 4                                   | 25,06                              |
| 58                   | 50   | 25                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 50                   | 50   | 25                                    | 4                                   | 25,06                              |
| 54                   | 10   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 66                   | 10   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 32                   | 10   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 82                   | 10   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 71                   | 10   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 99                   | 20   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 16                   | 20   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 40                   | 20   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 24                   | 20   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 28                   | 20   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 34                   | 30   | 70                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 61                   | 30   | 70                                    | 4                                   | 25,02                              |
| 76                   | 30   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 10                   | 30   | 70                                    | 4                                   | 25,02                              |
| 17                   | 30   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |

**Prilog A-1. Nastavak**

| Redoslijed izvođenja | Članovi modela                                   |                                       |                                     |                                    |
|----------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
|                      | A<br>Debljina kontaktnog sredstva, $\mu\text{m}$ | B<br>Širina frekventijskog spektra, % | C<br>Nazivna frekvencija sonde, MHz | Izmjerena debljina ultrazvukom, mm |
| 73                   | 40   | 70                                    | 4                                   | 25,02                              |
| 30                   | 40   | 70                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 69                   | 40   | 70                                    | 4                                   | 25,02                              |
| 98                   | 40   | 70                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 44                   | 40   | 70                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 5                    | 50   | 70                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 33                   | 50   | 70                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 84                   | 50   | 70                                    | 4                                   | 25,05                              |
| 41                   | 50   | 70                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 6                    | 50   | 70                                    | 4                                   | 25,03                              |

**Prilog A-2. Rezultati mjerenja debljine po stanjima pokusa kada se koristi gel kao kontaktno sredstvo**

| Redoslijed izvođenja | Članovi modela                                   |                                       |                                     |                                    |
|----------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
|                      | A<br>Debljina kontaktnog sredstva, $\mu\text{m}$ | B<br>Širina frekventijskog spektra, % | C<br>Nazivna frekvencija sonde, MHz | Izmjerena debljina ultrazvukom, mm |
| 53                   | 10   | 25                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 83                   | 10   | 25                                    | 5                                   | 24,99                              |
| 97                   | 10   | 25                                    | 5                                   | 25,00                              |
| 30                   | 10   | 25                                    | 5                                   | 25,00                              |
| 99                   | 10   | 25                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 6                    | 20   | 25                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 95                   | 20   | 25                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 86                   | 20   | 25                                    | 5                                   | 25,00                              |
| 69                   | 20   | 25                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 91                   | 20   | 25                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 20                   | 30   | 25                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 50                   | 30   | 25                                    | 5                                   | 25,03                              |
| 35                   | 30   | 25                                    | 5                                   | 25,04                              |
| 61                   | 30   | 25                                    | 5                                   | 25,04                              |
| 46                   | 30   | 25                                    | 5                                   | 25,03                              |
| 15                   | 40   | 25                                    | 5                                   | 25,04                              |
| 9                    | 40   | 25                                    | 5                                   | 25,03                              |
| 7                    | 40   | 25                                    | 5                                   | 25,03                              |
| 23                   | 40   | 25                                    | 5                                   | 25,04                              |
| 40                   | 40   | 25                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 22                   | 50   | 25                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 27                   | 50   | 25                                    | 5                                   | 25,06                              |
| 25                   | 50   | 25                                    | 5                                   | 25,06                              |
| 12                   | 50   | 25                                    | 5                                   | 25,05                              |



## Prilog A-2. Nastavak

| Redosljed izvođenja | Članovi modela                                      |  |   |                                       |
|---------------------|---|--|---|---------------------------------------|
|                     | A<br>Debljina<br>kontaktnog sredstva, $\mu\text{m}$ | B<br>Širina<br>frekvencijskog spektra, % | C<br>Nazivna<br>frekvencija<br>sonde, MHz | Izmjerena debljina<br>ultrazvukom, mm |
| 37                  | 50  | 25                                       | 5   | 25,04                                 |
| 32                  | 10  | 70                                       | 5   | 25,01                                 |
| 84                  | 10  | 70                                       | 5   | 25,02                                 |
| 68                  | 10  | 70                                       | 5   | 25,00                                 |
| 58                  | 10  | 70                                       | 5   | 25,01                                 |
| 39                  | 10  | 70                                       | 5   | 25,02                                 |
| 3                   | 20  | 70                                       | 5   | 25,02                                 |
| 38                  | 20  | 70                                       | 5   | 25,04                                 |
| 90                  | 20  | 70                                       | 5   | 25,01                                 |
| 98                  | 20  | 70                                       | 5   | 25,03                                 |
| 18                  | 20  | 70                                       | 5   | 25,04                                 |
| 48                  | 30  | 70                                       | 5   | 25,05                                 |
| 78                  | 30  | 70                                       | 5   | 25,04                                 |
| 74                  | 30  | 70                                       | 5   | 25,05                                 |
| 73                  | 30  | 70                                       | 5   | 25,05                                 |
| 54                  | 30  | 70                                       | 5   | 25,04                                 |
| 57                  | 40  | 70                                       | 5   | 25,06                                 |
| 70                  | 40  | 70                                       | 5   | 25,04                                 |
| 47                  | 40  | 70                                       | 5   | 25,05                                 |
| 28                  | 40  | 70                                       | 5   | 25,07                                 |
| 24                  | 40  | 70                                       | 5   | 25,07                                 |
| 29                  | 50  | 70                                       | 5   | 25,06                                 |
| 31                  | 50  | 70                                       | 5   | 25,06                                 |
| 96                  | 50  | 70                                       | 5   | 25,05                                 |
| 11                  | 50  | 70                                       | 5   | 25,07                                 |
| 49                  | 50  | 70                                       | 5   | 25,07                                 |
| 42                  | 10  | 25                                       | 4   | 25,01                                 |
| 44                  | 10  | 25                                       | 4   | 25,00                                 |
| 45                  | 10  | 25                                       | 4   | 25,01                                 |
| 52                  | 10  | 25                                       | 4   | 25,01                                 |
| 14                  | 10  | 25                                       | 4   | 24,99                                 |
| 17                  | 20  | 25                                       | 4   | 25,03                                 |
| 66                  | 20  | 25                                       | 4   | 25,02                                 |
| 64                  | 20  | 25                                       | 4   | 25,04                                 |
| 89                  | 20  | 25                                       | 4   | 25,03                                 |
| 51                  | 20  | 25                                       | 4   | 25,03                                 |
| 72                  | 30  | 25                                       | 4   | 25,01                                 |
| 2                   | 30  | 25                                       | 4   | 25,02                                 |
| 55                  | 30  | 25                                       | 4   | 25,03                                 |
| 59                  | 30  | 25                                       | 4   | 25,02                                 |
| 87                  | 30  | 25                                       | 4   | 25,03                                 |
| 5                   | 40  | 25                                       | 4   | 25,04                                 |
| 62                  | 40  | 25                                       | 4   | 25,03                                 |
| 34                  | 40  | 25                                       | 4   | 25,04                                 |
| 94                  | 40  | 25                                       | 4   | 25,05                                 |
| 1                   | 40  | 25                                       | 4   | 25,03                                 |
| 77                  | 50  | 25                                       | 4   | 25,05                                 |
| 92                  | 50  | 25                                       | 4   | 25,04                                 |

**Prilog A-2. Nastavak**

| Redosljed izvođenja | Članovi modela                                   |                                       |                                     |                                    |
|---------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
|                     | A<br>Debljina kontaktnog sredstva, $\mu\text{m}$ | B<br>Širina frekvencijskog spektra, % | C<br>Nazivna frekvencija sonde, MHz | Izmjerena debljina ultrazvukom, mm |
| 26                  | 50   | 25                                    | 4                                   | 25,05                              |
| 80                  | 50   | 25                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 56                  | 50   | 25                                    | 4                                   | 25,06                              |
| 43                  | 10   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 93                  | 10   | 70                                    | 4                                   | 24,99                              |
| 60                  | 10   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 36                  | 10   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 71                  | 10   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 10                  | 20   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 82                  | 20   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 85                  | 20   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 76                  | 20   | 70                                    | 4                                   | 25,02                              |
| 4                   | 20   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 100                 | 30   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 16                  | 30   | 70                                    | 4                                   | 25,02                              |
| 21                  | 30   | 70                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 88                  | 30   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 33                  | 30   | 70                                    | 4                                   | 25,02                              |
| 13                  | 40   | 70                                    | 4                                   | 25,02                              |
| 81                  | 40   | 70                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 67                  | 40   | 70                                    | 4                                   | 25,05                              |
| 79                  | 40   | 70                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 19                  | 40   | 70                                    | 4                                   | 25,02                              |
| 75                  | 50   | 70                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 41                  | 50   | 70                                    | 4                                   | 25,05                              |
| 8                   | 50   | 70                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 63                  | 50   | 70                                    | 4                                   | 25,06                              |
| 65                  | 50   | 70                                    | 4                                   | 25,05                              |

**Prilog A-3. Rezultati mjerenja debljine po stanjima pokusa kada se kao kontaktno sredstvo koristi voda**

| Redosljed izvođenja | Članovi modela                                   |                                       |                                     |                                    |
|---------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
|                     | A<br>Debljina kontaktnog sredstva, $\mu\text{m}$ | B<br>Širina frekvencijskog spektra, % | C<br>Nazivna frekvencija sonde, MHz | Izmjerena debljina ultrazvukom, mm |
| 66                  | 10   | 25                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 76                  | 10   | 25                                    | 5                                   | 24,99                              |
| 19                  | 10   | 25                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 16                  | 10   | 25                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 21                  | 10   | 25                                    | 5                                   | 25,00                              |
| 61                  | 20   | 25                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 17                  | 20   | 25                                    | 5                                   | 25,00                              |
| 18                  | 20   | 25                                    | 5                                   | 25,01                              |

## Prilog A-3. Nastavak

| Redoslijed izvođenja | Članovi modela                                   |                                       |                                     |                                    |
|----------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
|                      | A<br>Debljina kontaktnog sredstva, $\mu\text{m}$ | B<br>Širina frekvencijskog spektra, % | C<br>Nazivna frekvencija sonde, MHz | Izmjerena debljina ultrazvukom, mm |
| 91                   | 20   | 25                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 44                   | 20   | 25                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 36                   | 30   | 25                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 96                   | 30   | 25                                    | 5                                   | 25,03                              |
| 25                   | 30   | 25                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 93                   | 30   | 25                                    | 5                                   | 25,03                              |
| 98                   | 30   | 25                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 64                   | 40   | 25                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 46                   | 40   | 25                                    | 5                                   | 25,04                              |
| 63                   | 40   | 25                                    | 5                                   | 25,03                              |
| 72                   | 40   | 25                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 88                   | 40   | 25                                    | 5                                   | 25,04                              |
| 1                    | 50   | 25                                    | 5                                   | 25,06                              |
| 40                   | 50   | 25                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 51                   | 50   | 25                                    | 5                                   | 25,06                              |
| 84                   | 50   | 25                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 41                   | 50   | 25                                    | 5                                   | 25,04                              |
| 7                    | 10   | 70                                    | 5                                   | 24,99                              |
| 73                   | 10   | 70                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 14                   | 10   | 70                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 56                   | 10   | 70                                    | 5                                   | 24,99                              |
| 78                   | 10   | 70                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 15                   | 20   | 70                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 48                   | 20   | 70                                    | 5                                   | 25,02                              |
| 2                    | 20   | 70                                    | 5                                   | 25,03                              |
| 81                   | 20   | 70                                    | 5                                   | 25,01                              |
| 29                   | 20   | 70                                    | 5                                   | 25,04                              |
| 99                   | 30   | 70                                    | 5                                   | 25,06                              |
| 62                   | 30   | 70                                    | 5                                   | 25,06                              |
| 32                   | 30   | 70                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 86                   | 30   | 70                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 22                   | 30   | 70                                    | 5                                   | 25,04                              |
| 37                   | 40   | 70                                    | 5                                   | 25,06                              |
| 3                    | 40   | 70                                    | 5                                   | 25,07                              |
| 49                   | 40   | 70                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 70                   | 40   | 70                                    | 5                                   | 25,06                              |
| 23                   | 40   | 70                                    | 5                                   | 25,06                              |
| 35                   | 50   | 70                                    | 5                                   | 25,08                              |
| 45                   | 50   | 70                                    | 5                                   | 25,07                              |
| 24                   | 50   | 70                                    | 5                                   | 25,06                              |
| 26                   | 50   | 70                                    | 5                                   | 25,07                              |
| 74                   | 50   | 70                                    | 5                                   | 25,05                              |
| 55                   | 10   | 25                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 75                   | 10   | 25                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 4                    | 10   | 25                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 77                   | 10   | 25                                    | 4                                   | 24,99                              |
| 65                   | 10   | 25                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 47                   | 20   | 25                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 39                   | 20   | 25                                    | 4                                   | 25,02                              |

**Prilog A-3. Nastavak**

| Redoslijed izvođenja | Članovi modela                                   |                                       |                                     |                                    |
|----------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
|                      | A<br>Debljina kontaktnog sredstva, $\mu\text{m}$ | B<br>Širina frekvencijskog spektra, % | C<br>Nazivna frekvencija sonde, MHz | Izmjerena debljina ultrazvukom, mm |
| 50                   | 20   | 25                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 92                   | 20   | 25                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 12                   | 20   | 25                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 94                   | 30   | 25                                    | 4                                   | 25,05                              |
| 90                   | 30   | 25                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 53                   | 30   | 25                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 27                   | 30   | 25                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 8                    | 30   | 25                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 13                   | 40   | 25                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 38                   | 40   | 25                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 79                   | 40   | 25                                    | 4                                   | 25,05                              |
| 89                   | 40   | 25                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 71                   | 40   | 25                                    | 4                                   | 25,05                              |
| 100                  | 50   | 25                                    | 4                                   | 25,05                              |
| 34                   | 50   | 25                                    | 4                                   | 25,07                              |
| 97                   | 50   | 25                                    | 4                                   | 25,06                              |
| 5                    | 50   | 25                                    | 4                                   | 25,06                              |
| 60                   | 50   | 25                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 9                    | 10   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 10                   | 10   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 28                   | 10   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 11                   | 10   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 83                   | 10   | 70                                    | 4                                   | 24,99                              |
| 43                   | 20   | 70                                    | 4                                   | 24,99                              |
| 87                   | 20   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 54                   | 20   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 52                   | 20   | 70                                    | 4                                   | 25,00                              |
| 80                   | 20   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 58                   | 30   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 69                   | 30   | 70                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 82                   | 30   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 59                   | 30   | 70                                    | 4                                   | 25,02                              |
| 30                   | 30   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 20                   | 40   | 70                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 31                   | 40   | 70                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 67                   | 40   | 70                                    | 4                                   | 25,02                              |
| 68                   | 40   | 70                                    | 4                                   | 25,01                              |
| 85                   | 40   | 70                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 33                   | 50   | 70                                    | 4                                   | 25,05                              |
| 6                    | 50   | 70                                    | 4                                   | 25,03                              |
| 95                   | 50   | 70                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 57                   | 50   | 70                                    | 4                                   | 25,04                              |
| 42                   | 50   | 70                                    | 4                                   | 25,03                              |

**Prilog B.** Rezultati mjerenja debljine po stanjima pokusa za određivanje utjecaja uređaja i vrste sonde na ultrazvučno mjerenje debljine

| Redoslijed izvođenja | Član modela                                |                                       |                                     |                     |                                    |
|----------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------------|
|                      | A<br>Napon pobudnog impulsa, $\mu\text{m}$ | B<br>Širina frekvencijskog spektra, % | C<br>Nazivna frekvencija sonde, MHz | D<br>Prigušni otpor | Izmjerena debljina ultrazvukom, mm |
| 16                   | 135  | 25                                    | 4                                   | 50                  | 25,05                              |
| 60                   | 135  | 25                                    | 4                                   | 50                  | 25,06                              |
| 36                   | 135  | 25                                    | 4                                   | 50                  | 25,04                              |
| 77                   | 135  | 25                                    | 4                                   | 50                  | 25,05                              |
| 15                   | 135  | 25                                    | 4                                   | 50                  | 25,05                              |
| 49                   | 332  | 25                                    | 4                                   | 50                  | 25,04                              |
| 62                   | 332  | 25                                    | 4                                   | 50                  | 25,05                              |
| 30                   | 332  | 25                                    | 4                                   | 50                  | 25,04                              |
| 47                   | 332  | 25                                    | 4                                   | 50                  | 25,05                              |
| 51                   | 332  | 25                                    | 4                                   | 50                  | 25,06                              |
| 12                   | 135  | 70                                    | 4                                   | 50                  | 25,01                              |
| 48                   | 135  | 70                                    | 4                                   | 50                  | 24,99                              |
| 43                   | 135  | 70                                    | 4                                   | 50                  | 25,01                              |
| 76                   | 135  | 70                                    | 4                                   | 50                  | 25,00                              |
| 66                   | 135  | 70                                    | 4                                   | 50                  | 25,00                              |
| 59                   | 332  | 70                                    | 4                                   | 50                  | 24,99                              |
| 71                   | 332  | 70                                    | 4                                   | 50                  | 25,01                              |
| 72                   | 332  | 70                                    | 4                                   | 50                  | 25,00                              |
| 45                   | 332  | 70                                    | 4                                   | 50                  | 25,01                              |
| 8                    | 332  | 70                                    | 4                                   | 50                  | 24,99                              |
| 69                   | 135  | 25                                    | 5                                   | 50                  | 25,08                              |
| 33                   | 135  | 25                                    | 5                                   | 50                  | 25,08                              |
| 32                   | 135  | 25                                    | 5                                   | 50                  | 25,07                              |
| 46                   | 135  | 25                                    | 5                                   | 50                  | 25,07                              |
| 19                   | 135  | 25                                    | 5                                   | 50                  | 25,08                              |
| 52                   | 332  | 25                                    | 5                                   | 50                  | 25,07                              |
| 42                   | 332  | 25                                    | 5                                   | 50                  | 25,08                              |
| 75                   | 332  | 25                                    | 5                                   | 50                  | 25,07                              |
| 14                   | 332  | 25                                    | 5                                   | 50                  | 25,07                              |
| 63                   | 332  | 25                                    | 5                                   | 50                  | 25,07                              |
| 79                   | 135  | 70                                    | 5                                   | 50                  | 25,05                              |
| 78                   | 135  | 70                                    | 5                                   | 50                  | 25,06                              |
| 74                   | 135  | 70                                    | 5                                   | 50                  | 25,05                              |
| 64                   | 135  | 70                                    | 5                                   | 50                  | 25,05                              |
| 3                    | 135  | 70                                    | 5                                   | 50                  | 25,06                              |
| 29                   | 332  | 70                                    | 5                                   | 50                  | 25,05                              |
| 38                   | 332  | 70                                    | 5                                   | 50                  | 25,04                              |
| 70                   | 332  | 70                                    | 5                                   | 50                  | 25,04                              |
| 39                   | 332  | 70                                    | 5                                   | 50                  | 25,05                              |
| 11                   | 332  | 70                                    | 5                                   | 50                  | 25,05                              |
| 58                   | 135  | 25                                    | 4                                   | 1000                | 25,03                              |
| 5                    | 135  | 25                                    | 4                                   | 1000                | 25,04                              |
| 27                   | 135  | 25                                    | 4                                   | 1000                | 25,04                              |
| 40                   | 135  | 25                                    | 4                                   | 1000                | 25,03                              |
| 9                    | 135  | 25                                    | 4                                   | 1000                | 25,02                              |
| 41                   | 332  | 25                                    | 4                                   | 1000                | 25,03                              |
| 67                   | 332  | 25                                    | 4                                   | 1000                | 25,02                              |
| 37                   | 332  | 25                                    | 4                                   | 1000                | 25,03                              |
| 10                   | 332  | 25                                    | 4                                   | 1000                | 25,02                              |

**Prilog B. Nastavak**

| Redoslijed izvođenja | Član modela                                |                                       |                                     |                     |                                    |
|----------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------------|
|                      | A<br>Napon pobudnog impulsa, $\mu\text{m}$ | B<br>Širina frekvencijskog spektra, % | C<br>Nazivna frekvencija sonde, MHz | D<br>Prigušni otpor | Izmjerena debljina ultrazvukom, mm |
| 65                   | 332  | 25                                    | 4                                   | 1000                | 25,03                              |
| 55                   | 135  | 70                                    | 4                                   | 1000                | 25,01                              |
| 6                    | 135  | 70                                    | 4                                   | 1000                | 25,02                              |
| 17                   | 135  | 70                                    | 4                                   | 1000                | 25,02                              |
| 23                   | 135  | 70                                    | 4                                   | 1000                | 25,03                              |
| 34                   | 135  | 70                                    | 4                                   | 1000                | 25,02                              |
| 68                   | 332  | 70                                    | 4                                   | 1000                | 24,99                              |
| 2                    | 332  | 70                                    | 4                                   | 1000                | 25,01                              |
| 73                   | 332  | 70                                    | 4                                   | 1000                | 25,00                              |
| 61                   | 332  | 70                                    | 4                                   | 1000                | 25,00                              |
| 35                   | 332  | 70.                                   | 4                                   | 1000                | 24,99                              |
| 50                   | 135  | 25                                    | 5                                   | 1000                | 25,07                              |
| 80                   | 135  | 25                                    | 5                                   | 1000                | 25,07                              |
| 25                   | 135  | 25                                    | 5                                   | 1000                | 25,08                              |
| 4                    | 135  | 25                                    | 5                                   | 1000                | 25,06                              |
| 1                    | 135  | 25                                    | 5                                   | 1000                | 25,07                              |
| 18                   | 332  | 25                                    | 5                                   | 1000                | 25,06                              |
| 22                   | 332  | 25                                    | 5                                   | 1000                | 25,05                              |
| 26                   | 332  | 25                                    | 5                                   | 1000                | 25,05                              |
| 20                   | 332  | 25                                    | 5                                   | 1000                | 25,06                              |
| 57                   | 332  | 25                                    | 5                                   | 1000                | 25,06                              |
| 7                    | 135  | 70                                    | 5                                   | 1000                | 25,07                              |
| 21                   | 135  | 70                                    | 5                                   | 1000                | 25,07                              |
| 54                   | 135  | 70                                    | 5                                   | 1000                | 25,06                              |
| 13                   | 135  | 70                                    | 5                                   | 1000                | 25,06                              |
| 44                   | 135  | 70                                    | 5                                   | 1000                | 25,07                              |
| 56                   | 332  | 70                                    | 5                                   | 1000                | 25,05                              |
| 31                   | 332  | 70                                    | 5                                   | 1000                | 25,04                              |
| 24                   | 332  | 70                                    | 5                                   | 1000                | 25,05                              |
| 53                   | 332  | 70                                    | 5                                   | 1000                | 25,03                              |
| 28                   | 332  | 70                                    | 5                                   | 1000                | 25,05                              |

## KRATKI ŽIVOTOPIS

---

Morana Mihaljević (rođ. Lisičar) rođena je 14. svibnja 1982. godine u Zagrebu gdje je završila osnovnu školu i VIII gimnaziju. Školovanje je nastavila na Sveučilištu u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. Diplomirala je 2007. godine završivši program proizvodnog smjera sveučilišnog dodiplomskog studija. Svoj prvi radni odnos zasnovala je na Hrvatskom mjeriteljskom institutom 2007. godine odmah nakon završetka studija. Drugi radni odnos zasnovala je 1. travnja 2008. godine na Sveučilištu u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zaposlena je na Katedri za nerazorna ispitivanja kao znanstveni novak i asistent. Poslijediplomski studij, smjer Industrijsko inženjerstvo i menadžment upisuje akademske godine 2008/2009. Aktivno sudjeluje u znanstveno-istraživačkom radu, angažirana je u izvođenje nastave kolegija Katedre za nerazorna ispitivanja, te je uključena u stručne aktivnosti Laboratorija za nerazorna ispitivanja što obuhvaća i suradnju s gospodarstvom. Članica je Centra za nerazorna ispitivanja. Autorica je i koautorica 8 radova u znanstvenim časopisima te međunarodnim i domaćim znanstvenim skupovima. Govori i služi se engleskim jezikom. Udata je i majka dvoje djece.

## **BIOGRAPHY**

---

Moran Mihaljević (b. Lisičar) was born on May 14th 1982 in Zagreb where she attended the elementary school, followed by VIII gymnasium. She continued her education at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. She graduated in 2007, after she completed the program of Production engineering of University undergraduate studies. Her first employment was on the Croatian Metrology Institute in 2007, immediately after graduation. Another working relationship, from April 1st 2008 till now, is on the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. She is employed at the Chair for non-destructive testing as a research assistant and assistant. Postgraduate studies, majoring in Industrial Engineering and Management, she enrolled in the academic year 2008/2009. She actively participates in scientific research, engaged in teaching courses of the Department of non-destructive testing, and is involved in professional activities of the Laboratory of non-destructive testing, which includes cooperation with industry. She is a member of the Centre for non-destructive testing. She is the author and co-author of 8 papers in scientific journals and international and national scientific conferences. She speaks English. She is married and the mother of two children.