

## Teorētiskais pamatojums:

No elektromagnētiskā lauka indukcijas likuma mainīgs magnētiskais lauks  $\vec{B}$  inducē virpuļainu elektrisku lauku, kas vadošā vidē rada elektrisko strāvu sadalījumu (virpuļstrāvas). Šīm strāvām plūstot vadošā vidē, izdalās Džoula-Lenca siltums, kuru var izmantot dažādu vadošu priekšmetu sildīšanai.

Priekšmetā inducētā elektriskā lauka EDS ir atkarīgs no EM lauka frekvences  $f$ , magnētiskā lauka indukcijas amplitūdas  $B$  un virsmas laukuma  $S$ , caur kuru priekšmetā iet magnētiskais lauks:  $EDS \sim fBS$ .

Ģenerētais siltums sildāmā priekšmetā ir atkarīgs no inducēto strāvu sadalījuma tajā. Praksē tas var būt ļoti sarežģīts. Praksē inducētās virpuļstrāvas mēra metāla priekšmetos. Tajos rodas magnētiskais lauks, kas summējas ar induktora magnētisko lauku. Mērot šo rezultējošo lauku ar kādu sensoru, vispārīgā gadījumā šos laukus nevar atdalīt. Taču noteiktās situācijās, gadījumos ar īpašu ģeometriju, induktora radīto magnētisko lauku un virpuļstrāvu radīto lauku var atdalīt.

Piemērs tam ir plāna elektrovadoša plāksne, kurai no abām pusēm ir pieliktas klāt divas identiskas, simetriski izvietotas spoles. Strāvas šajās spolēs plūst vienādā virzienā un ar vienādu stiprumu, un šo spoļu lauki arī ir vienādi vērsti. Simetrijas dēļ, šo divu spoļu ģenerētais lauks ir vērsts perpendikulāri plāksnes virsmas šīs virsmas tuvumā.

Izdalot mazu kontūru plāksnē ar platumu  $\Delta l$  un izmantojot cirkulācijas teorēmu, var sasaistīt magnētiskā lauka indukcijas tangenciālās komponentes vērtību pie plāksnes virsmas  $B_{pl,\tau}$  ar virpuļstrāvas, kas plūst caur kontūru, lineāro blīvumu  $j_l$ . Strāvas lineāro blīvumu iegūst pareizinot strāvas blīvumu plāksnē ar tās biezumu. No cirkulācijas teorēmas izriet, ka magnētiskā lauka indukcijas cirkulācija pa kontūru ir:  $\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I$ , kur  $I$  ir caur kontūra ierobežoto virsmu plūstoša strāva. Maziem  $\Delta l$  izpildās sekojoša sakarība:  $2\Delta l B_{pl,\tau} = \mu_0 j_l \Delta l$ , un  $B_{pl,\tau} = \frac{\mu_0 j_l}{2}$ . Tas nozīmē, ka, izmērot magnētiskā lauka indukcijas tangenciālo komponenti  $B_{pl,\tau}$  pie plāksnes virsmas, ir iespējams noteikt inducēto virpuļstrāvu lineāro blīvumu  $j_l$  plāksnē.

Analizējot šķērsindukcijas procesu un pieņemot, ka EM lauku plāksnē rada divas vienādas taisnstūrveida spoles, kurām viena mala ir daudz garāka par otru un, ka spoles atrodas ļoti tuvu plāksnes virsmai, var iegūt vienādojumu, kas saista strāvu spolē ar strāvu, kas plūst plāksnē:

$$I_{pl} = \frac{\sigma d L^2 i \omega}{8} \left( 4 \frac{\mu_0 I}{\pi L} + \frac{2 \mu_0 I_{pl}}{\pi L} \right) = i \Omega (2 I_{sp} + I_{pl}),$$

kur tika ieviests parametrs  $\Omega = \frac{d L \sigma \omega \mu_0}{4 \pi} = \frac{1}{2} d L \sigma f \mu_0$ , ko sauc par šķērsindukcijas bezdimensionālo frekvenci. Šis parametrs raksturo atgriezenisko saiti tam, ka strāvu plāksnē inducē rezultējošais lauks, ko rada gan spoles, gan pašas inducētās strāvas plāksnē.

Pārveidojot vienādojumu strāvām iegūst:

$$\frac{I_{pl}}{2 I_{sp}} = -\frac{\Omega^2}{1 + \Omega^2} + i \frac{\Omega}{1 + \Omega^2} \quad \text{un} \quad \left| \frac{I_{pl}}{2 I_{sp}} \right| = \frac{\Omega}{\sqrt{1 + \Omega^2}}$$

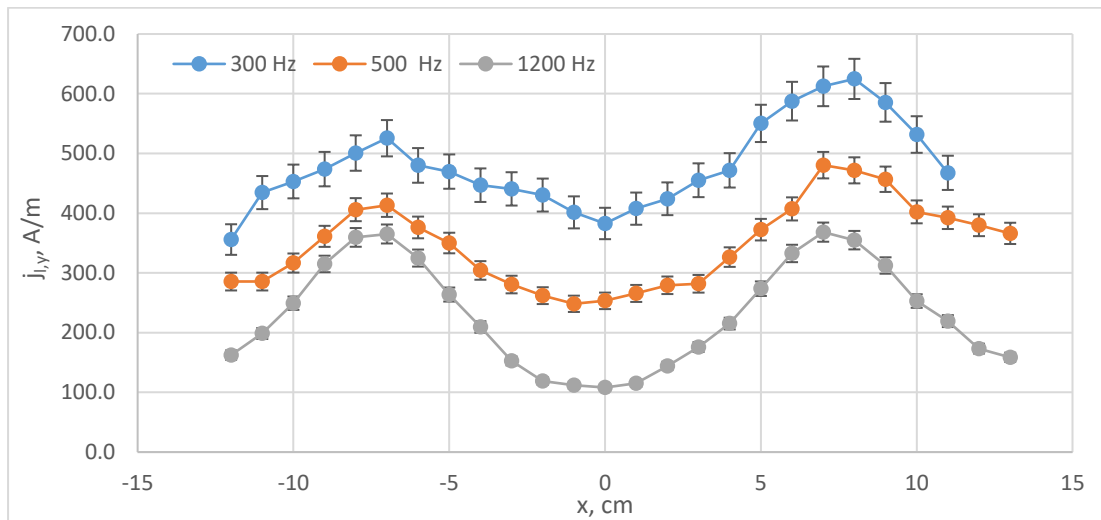
## Darba uzdevumi:

- 1) Magnētiskā šķērslauka inducētā strāvu sadalījuma pētīšana 2 mm biezai alumīnija plāksnei.
  - a) Ar magnētiskā lauka sensoru, kas novietots uz plāksnes virsmas, noteikt magnētiskā lauka  $x$  komponentes sadalījumu pa  $x$  asi ( $y = 0$ ) tuvu plāksnes virsmas. Šai nolūkā mērīt kontūrā inducēto EDS pie induktora strāvas efektīvās vērtības  $I_{sp-eff}=0,4\text{ A}$  un 3 pasniedzēja norādītām frekvences vērtībām no “komplekta” 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1500, 2000 Hz;
  - b) No izmērītajām sensora sprieguma vērtībām aprēķināt magnētiskā lauka  $x$  komponentes sadalījumu pa  $x$  asi pie plāksnes virsmas visām trim frekvencēm. No magnētiskā lauka sadalījuma aprēķināt lineārā strāvas blīvuma  $y$  komponentes efektīvās vērtības sadalījumu plāksnē pa  $x$  asi, proporcionāli pārrēķinot vērtības 1A induktora strāvai un attēlot strāvu  $j_{l,y,eff}(x)$  sadalījumus grafiski (3 līknes vienā grafikā).
  - c) Aprēķināt katrai frekvencei bezdimensionālo šķērslauka frekvenci  $\Omega$  un attēlot grafiski strāvas lineārā blīvuma moduļa maksimālās efektīvās vērtības atkarību no  $\Omega$ . Salīdzināt eksperimentāli iegūto atkarību (atsevišķi punkti grafikā katrai frekvencei) ar tuvinātajā šķersindukcijas analizē iegūto plāksnē inducētās strāvas atkarību no  $\Omega$ . Piezīme: veidot vienu grafiku 1c) un 2c) rezultātiem, vienādi mērogojot eksperimentālos punktus.
  - d) Salīdzināt eksperimentāli noteiktā un 1A induktora strāvai pārrēķinātā lineārā strāvas blīvuma moduļa  $y$  komponentes sadalījumu  $j_{l,y,eff}(x)$  plāksnē pa  $x$  asi ar datormodelēšanas rezultātiem 2000 Hz frekvencei.
- 2) Magnētiskā šķērslauka inducētā strāvu sadalījuma pētīšana 0.01 mm biezai alumīnija folijai.
  - a) Ar magnētiskā lauka sensoru, kas novietots uz plāksnes ar foliju virsmas, noteikt magnētiskā lauka  $x$  komponentes sadalījumu pa  $x$  asi ( $y = 0$ ) tuvu plāksnes virsmas. Šai nolūkā mērīt kontūrā inducēto EDS pie induktora strāvas efektīvās vērtības  $I_{sp-eff}=0,1\text{ A}$  un 3 pasniedzēja norādītām frekvences vērtībām no “komplekta” 10, 15, 20, 30, 50, 100 kHz. Izmantojot divstaru osciloskopu, kurā bez sensora signāla tiek attēlots arī induktora strāvas signāls, noteikt fāzu nobīdi starp magnētisko lauku un strāvu induktorā, tai sensora pozīcijai, kura atbilst maksimumam magnētiskā lauka sadalījumā;
  - b) No izmērītajām sensora sprieguma vērtībām aprēķināt magnētiskā lauka  $x$  komponentes sadalījumu pa  $x$  asi pie plāksnes virsmas visām trim frekvencēm. No magnētiskā lauka sadalījuma aprēķināt lineārā strāvas blīvuma  $y$  komponentes efektīvās vērtības sadalījumu plāksnē pa  $x$  asi, proporcionāli pārrēķinot vērtības 1A induktora strāvai un attēlot strāvu  $j_{l,y,eff}(x)$  sadalījumus grafiski (3 līknes vienā grafikā). Izmantojot iepriekš noteikto fāzu nobīdi starp strāvu induktorā un izmērīto magnētisko lauku punktā, kur ir lauka maksimums, noteikt lineārā strāvas blīvuma reālo  $j_{Re,l,y,eff}^{max}$  un imagināro  $j_{Im,l,y,eff}^{max}$  daļu (pieņemot, ka strāva induktorā ir tikai ar reālo komponenti) un attēlot grafiski.
  - c) Aprēķināt katrai frekvencei bezdimensionālo šķērslauka frekvenci  $\Omega$  un attēlot grafiski strāvas lineārā blīvuma moduļa maksimālās efektīvās vērtības atkarību no  $\Omega$ . Salīdzināt eksperimentāli iegūto atkarību (atsevišķi punkti grafikā katrai frekvencei) ar tuvinātajā šķersindukcijas analizē iegūto plāksnē inducētās strāvas atkarību no  $\Omega$ . Piezīme: veidot vienu grafiku 1c) un 2c) rezultātiem, vienādi mērogojot eksperimentālos punktus.
  - d) Salīdzināt eksperimentāli noteiktā un 1A induktora strāvai pārrēķinātā lineārā strāvas blīvuma moduļa  $y$  komponentes sadalījumu  $j_{l,y,eff}(x)$  plāksnē pa  $x$  asi ar datormodelēšanas rezultātiem 10kHz Hz frekvencei.

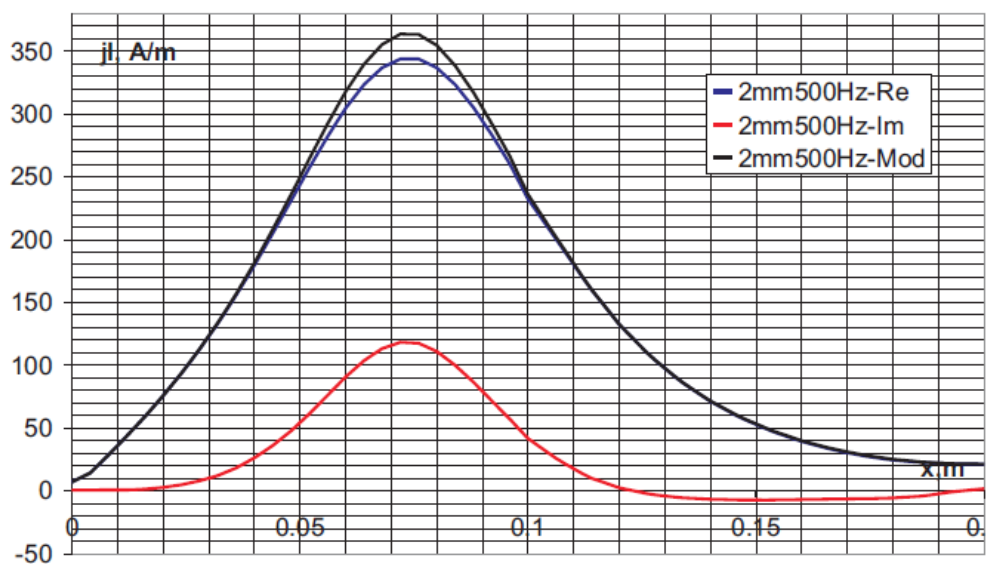
## Mērījumu rezultāti un datu apstrāde:

Tabula 1. Magnētiskā lauka mērījumi alumīnija plāksnei ( $d = 2 \text{ mm}$ ,  $I_{sp} = 0.4 \text{ A}$ ).

|                     | 300 Hz      |                    |                    |                    |                         |                                | 500 Hz      |                    |                    |                    |                         |                                | 1200 Hz     |                    |                    |                    |                         |                                |
|---------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|
| $x \pm 0,1$<br>, cm | $U$<br>, mV | $\Delta U$<br>, mV | $B_x$<br>, $\mu T$ | $j_{l,y}$<br>, A/m | $j_{l,y}^{1A}$<br>, A/m | $\Delta j_{l,y}^{1A}$<br>, A/m | $U$<br>, mV | $\Delta U$<br>, mV | $B_x$<br>, $\mu T$ | $j_{l,y}$<br>, A/m | $j_{l,y}^{1A}$<br>, A/m | $\Delta j_{l,y}^{1A}$<br>, A/m | $U$<br>, mV | $\Delta U$<br>, mV | $B_x$<br>, $\mu T$ | $j_{l,y}$<br>, A/m | $j_{l,y}^{1A}$<br>, A/m | $\Delta j_{l,y}^{1A}$<br>, A/m |
| -12                 | 1.72        | 0.11               | 89.4               | 142.3              | 356                     | 26                             | 2.30        | 0.10               | 71.8               | 114.2              | 286                     | 15                             | 3.14        | 0.12               | 40.8               | 65.0               | 162.4                   | 7.8                            |
| -11                 | 2.10        | 0.12               | 109.2              | 173.8              | 434                     | 28                             | 2.30        | 0.10               | 71.8               | 114.2              | 286                     | 15                             | 3.84        | 0.13               | 49.9               | 79.4               | 198.6                   | 9.2                            |
| -10                 | 2.19        | 0.12               | 113.9              | 181.2              | 453                     | 28                             | 2.55        | 0.10               | 79.6               | 126.6              | 317                     | 16                             | 4.82        | 0.16               | 62.7               | 99.7               | 249.3                   | 11.2                           |
| -9                  | 2.29        | 0.12               | 119.1              | 189.5              | 474                     | 29                             | 2.91        | 0.11               | 90.8               | 144.5              | 361                     | 18                             | 6.09        | 0.20               | 79.2               | 126.0              | 315.0                   | 13.8                           |
| -8                  | 2.42        | 0.12               | 125.8              | 200.3              | 501                     | 30                             | 3.27        | 0.12               | 102.0              | 162.4              | 406                     | 19                             | 6.95        | 0.22               | 90.3               | 143.8              | 359.5                   | 15.7                           |
| -7                  | 2.54        | 0.13               | 132.1              | 210.2              | 526                     | 30                             | 3.33        | 0.12               | 103.9              | 165.4              | 413                     | 20                             | 7.06        | 0.22               | 91.8               | 146.1              | 365.2                   | 15.9                           |
| -6                  | 2.32        | 0.12               | 120.6              | 192.0              | 480                     | 29                             | 3.03        | 0.11               | 94.5               | 150.5              | 376                     | 18                             | 6.28        | 0.20               | 81.6               | 129.9              | 324.8                   | 14.2                           |
| -5                  | 2.27        | 0.12               | 118.0              | 187.9              | 470                     | 29                             | 2.82        | 0.11               | 88.0               | 140.0              | 350                     | 17                             | 5.10        | 0.17               | 66.3               | 105.5              | 263.8                   | 11.8                           |
| -4                  | 2.16        | 0.12               | 112.3              | 178.8              | 447                     | 28                             | 2.45        | 0.10               | 76.4               | 121.7              | 304                     | 16                             | 4.05        | 0.14               | 52.6               | 83.8               | 209.5                   | 9.6                            |
| -3                  | 2.13        | 0.12               | 110.8              | 176.3              | 441                     | 28                             | 2.26        | 0.10               | 70.5               | 112.2              | 281                     | 15                             | 2.95        | 0.11               | 38.3               | 61.0               | 152.6                   | 7.4                            |
| -2                  | 2.08        | 0.12               | 108.2              | 172.1              | 430                     | 28                             | 2.11        | 0.09               | 65.8               | 104.8              | 262                     | 14                             | 2.30        | 0.10               | 29.9               | 47.6               | 119.0                   | 6.2                            |
| -1                  | 1.94        | 0.12               | 100.9              | 160.6              | 401                     | 27                             | 2.00        | 0.09               | 62.4               | 99.3               | 248                     | 14                             | 2.16        | 0.10               | 28.1               | 44.7               | 111.7                   | 6.0                            |
| 0                   | 1.85        | 0.11               | 96.2               | 153.1              | 383                     | 26                             | 2.04        | 0.09               | 63.6               | 101.3              | 253                     | 14                             | 2.09        | 0.09               | 27.2               | 43.2               | 108.1                   | 5.8                            |
| 1                   | 1.97        | 0.12               | 102.4              | 163.0              | 408                     | 27                             | 2.14        | 0.09               | 66.8               | 106.3              | 266                     | 14                             | 2.23        | 0.10               | 29.0               | 46.1               | 115.3                   | 6.1                            |
| 2                   | 2.05        | 0.12               | 106.6              | 169.7              | 424                     | 27                             | 2.25        | 0.10               | 70.2               | 111.7              | 279                     | 15                             | 2.79        | 0.11               | 36.3               | 57.7               | 144.3                   | 7.1                            |
| 3                   | 2.20        | 0.12               | 114.4              | 182.1              | 455                     | 28                             | 2.27        | 0.10               | 70.8               | 112.7              | 282                     | 15                             | 3.40        | 0.12               | 44.2               | 70.3               | 175.9                   | 8.3                            |
| 4                   | 2.28        | 0.12               | 118.6              | 188.7              | 472                     | 29                             | 2.63        | 0.11               | 82.1               | 130.6              | 326                     | 16                             | 4.16        | 0.14               | 54.1               | 86.1               | 215.2                   | 9.8                            |
| 5                   | 2.66        | 0.13               | 138.3              | 220.1              | 550                     | 31                             | 3.00        | 0.11               | 93.6               | 149.0              | 372                     | 18                             | 5.29        | 0.17               | 68.8               | 109.4              | 273.6                   | 12.2                           |
| 6                   | 2.84        | 0.13               | 147.7              | 235.0              | 588                     | 32                             | 3.28        | 0.12               | 102.3              | 162.9              | 407                     | 19                             | 6.43        | 0.21               | 83.6               | 133.0              | 332.6                   | 14.6                           |
| 7                   | 2.96        | 0.13               | 153.9              | 245.0              | 612                     | 33                             | 3.87        | 0.14               | 120.7              | 192.2              | 480                     | 22                             | 7.12        | 0.22               | 92.6               | 147.3              | 368.3                   | 16.0                           |
| 8                   | 3.02        | 0.13               | 157.0              | 249.9              | 625                     | 34                             | 3.80        | 0.13               | 118.6              | 188.7              | 472                     | 22                             | 6.86        | 0.22               | 89.2               | 141.9              | 354.8                   | 15.5                           |
| 9                   | 2.83        | 0.13               | 147.2              | 234.2              | 586                     | 32                             | 3.68        | 0.13               | 114.8              | 182.7              | 457                     | 21                             | 6.04        | 0.19               | 78.5               | 125.0              | 312.4                   | 13.7                           |
| 10                  | 2.57        | 0.13               | 133.6              | 212.7              | 532                     | 31                             | 3.24        | 0.12               | 101.1              | 160.9              | 402                     | 19                             | 4.89        | 0.16               | 63.6               | 101.2              | 252.9                   | 11.3                           |
| 11                  | 2.26        | 0.12               | 117.5              | 187.0              | 468                     | 29                             | 3.16        | 0.12               | 98.6               | 156.9              | 392                     | 19                             | 4.24        | 0.15               | 55.1               | 87.7               | 219.3                   | 10.0                           |
| 12                  |             |                    |                    |                    |                         |                                | 3.06        | 0.12               | 95.5               | 151.9              | 380                     | 18                             | 3.35        | 0.12               | 43.5               | 69.3               | 173.3                   | 8.2                            |
| 13                  |             |                    |                    |                    |                         |                                | 2.95        | 0.11               | 92.0               | 146.5              | 366                     | 18                             | 3.07        | 0.12               | 39.9               | 63.5               | 158.8                   | 7.6                            |



Attēls 1. 1 A lielai induktora strāvai atbilstošais strāvas lineārā blīvuma sadalījums alumīnija plāksnē.



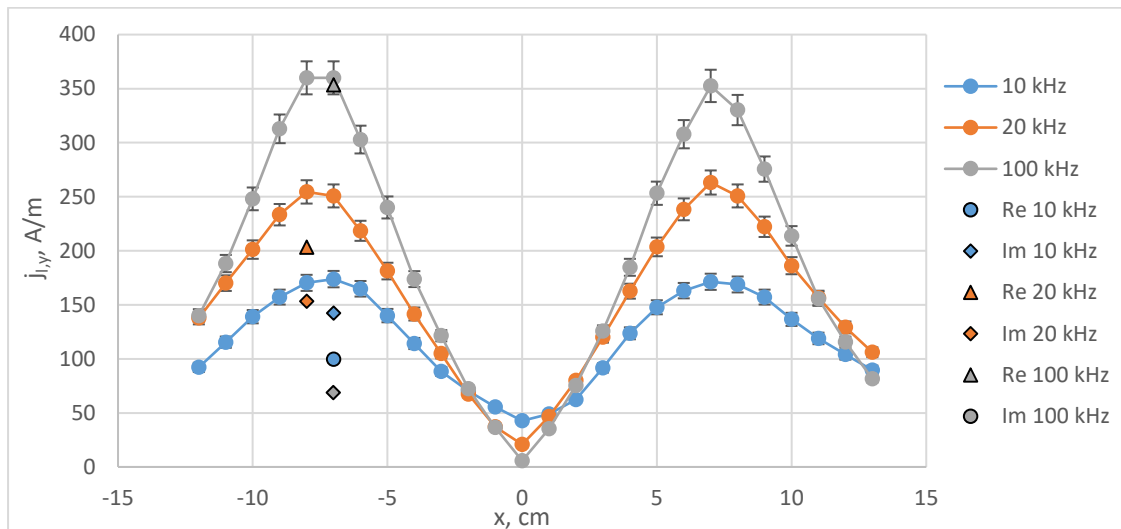
Attēls 2. Datormodelēšanas rezultāts alumīnija plāksnes strāvas lineārā blīvuma sadalījumam pie 1 A induktora strāvas.

Tabula 2. Magnētiskā lauka mērījumi alumīnija folijai ( $d = 0,01 \text{ mm}$ ,  $I_{sp} = 0.1 \text{ A}$ ).

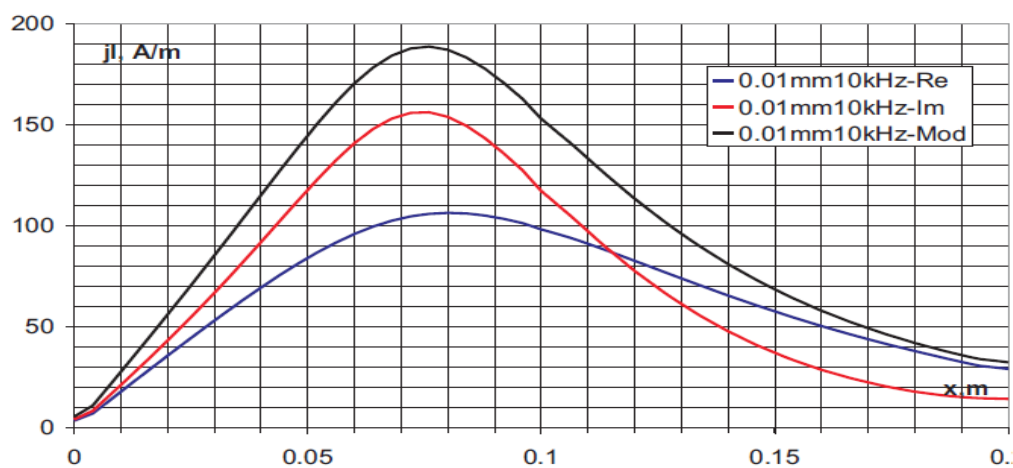
|                     | 10 kHz      |                    |                    |                    |                         |                                | 20 kHz      |                    |                    |                    |                         |                                | 100 kHz     |                    |                    |                    |                         |                                |
|---------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|
| $x \pm 0,1$<br>, cm | $U$<br>, mV | $\Delta U$<br>, mV | $B_x$<br>, $\mu T$ | $j_{l,y}$<br>, A/m | $j_{l,y}^{1A}$<br>, A/m | $\Delta j_{l,y}^{1A}$<br>, A/m | $U$<br>, mV | $\Delta U$<br>, mV | $B_x$<br>, $\mu T$ | $j_{l,y}$<br>, A/m | $j_{l,y}^{1A}$<br>, A/m | $\Delta j_{l,y}^{1A}$<br>, A/m | $U$<br>, mV | $\Delta U$<br>, mV | $B_x$<br>, $\mu T$ | $j_{l,y}$<br>, A/m | $j_{l,y}^{1A}$<br>, A/m | $\Delta j_{l,y}^{1A}$<br>, A/m |
| -12                 | 3.71        | 0.13               | 5.8                | 9.2                | 92.1                    | 4.3                            | 11.10       | 0.33               | 8.7                | 13.8               | 137.8                   | 5.9                            | 56.40       | 1.69               | 8.8                | 14.0               | 140.0                   | 5.9                            |
| -11                 | 4.65        | 0.16               | 7.3                | 11.5               | 115.4                   | 5.2                            | 13.70       | 0.41               | 10.7               | 17.0               | 170.1                   | 7.2                            | 75.80       | 2.27               | 11.8               | 18.8               | 188.2                   | 8.0                            |
| -10                 | 5.60        | 0.18               | 8.7                | 13.9               | 139.0                   | 6.1                            | 16.20       | 0.49               | 12.6               | 20.1               | 201.1                   | 8.5                            | 99.90       | 3.00               | 15.6               | 24.8               | 248.0                   | 10.5                           |
| -9                  | 6.33        | 0.20               | 9.9                | 15.7               | 157.2                   | 6.9                            | 18.80       | 0.56               | 14.7               | 23.3               | 233.4                   | 9.9                            | 126.00      | 3.78               | 19.7               | 31.3               | 312.8                   | 13.3                           |
| -8                  | 6.86        | 0.22               | 10.7               | 17.0               | 170.3                   | 7.4                            | 20.50       | 0.62               | 16.0               | 25.4               | 254.5                   | 10.8                           | 145.00      | 4.35               | 22.6               | 36.0               | 360.0                   | 15.3                           |
| -7                  | 7.00        | 0.22               | 10.9               | 17.4               | 173.8                   | 7.6                            | 20.20       | 0.61               | 15.8               | 25.1               | 250.8                   | 10.6                           | 145.00      | 4.35               | 22.6               | 36.0               | 360.0                   | 15.3                           |
| -6                  | 6.64        | 0.21               | 10.4               | 16.5               | 164.9                   | 7.2                            | 17.60       | 0.53               | 13.7               | 21.8               | 218.5                   | 9.3                            | 122.00      | 3.66               | 19.0               | 30.3               | 302.9                   | 12.9                           |
| -5                  | 5.64        | 0.18               | 8.8                | 14.0               | 140.0                   | 6.2                            | 14.60       | 0.44               | 11.4               | 18.1               | 181.2                   | 7.7                            | 96.70       | 2.90               | 15.1               | 24.0               | 240.1                   | 10.2                           |
| -4                  | 4.60        | 0.15               | 7.2                | 11.4               | 114.2                   | 5.1                            | 11.40       | 0.34               | 8.9                | 14.2               | 141.5                   | 6.0                            | 70.00       | 2.10               | 10.9               | 17.4               | 173.8                   | 7.4                            |
| -3                  | 3.56        | 0.13               | 5.6                | 8.8                | 88.4                    | 4.1                            | 8.45        | 0.26               | 6.6                | 10.5               | 104.9                   | 4.5                            | 48.90       | 1.47               | 7.6                | 12.1               | 121.4                   | 5.2                            |
| -2                  | 2.83        | 0.11               | 4.4                | 7.0                | 70.3                    | 3.5                            | 5.43        | 0.17               | 4.2                | 6.7                | 67.4                    | 2.9                            | 29.10       | 0.87               | 4.5                | 7.2                | 72.2                    | 3.1                            |
| -1                  | 2.23        | 0.10               | 3.5                | 5.5                | 55.4                    | 2.9                            | 3.00        | 0.09               | 2.3                | 3.7                | 37.2                    | 1.6                            | 14.70       | 0.44               | 2.3                | 3.6                | 36.5                    | 1.5                            |
| 0                   | 1.72        | 0.09               | 2.7                | 4.3                | 42.7                    | 2.5                            | 1.68        | 0.06               | 1.3                | 2.1                | 20.9                    | 1.0                            | 2.30        | 0.07               | 0.4                | 0.6                | 5.7                     | 0.2                            |
| 1                   | 1.97        | 0.09               | 3.1                | 4.9                | 48.9                    | 2.7                            | 3.75        | 0.12               | 2.9                | 4.7                | 46.6                    | 2.0                            | 14.20       | 0.43               | 2.2                | 3.5                | 35.3                    | 1.5                            |
| 2                   | 2.51        | 0.10               | 3.9                | 6.2                | 62.3                    | 3.2                            | 6.45        | 0.20               | 5.0                | 8.0                | 80.1                    | 3.4                            | 30.30       | 0.91               | 4.7                | 7.5                | 75.2                    | 3.2                            |
| 3                   | 3.69        | 0.13               | 5.8                | 9.2                | 91.6                    | 4.3                            | 9.68        | 0.29               | 7.6                | 12.0               | 120.2                   | 5.1                            | 50.60       | 1.52               | 7.9                | 12.6               | 125.6                   | 5.3                            |
| 4                   | 4.98        | 0.16               | 7.8                | 12.4               | 123.6                   | 5.5                            | 13.10       | 0.39               | 10.2               | 16.3               | 162.6                   | 6.9                            | 74.40       | 2.23               | 11.6               | 18.5               | 184.7                   | 7.8                            |
| 5                   | 5.95        | 0.19               | 9.3                | 14.8               | 147.7                   | 6.5                            | 16.40       | 0.49               | 12.8               | 20.4               | 203.6                   | 8.6                            | 102.00      | 3.06               | 15.9               | 25.3               | 253.2                   | 10.7                           |
| 6                   | 6.57        | 0.21               | 10.2               | 16.3               | 163.1                   | 7.1                            | 19.20       | 0.58               | 15.0               | 23.8               | 238.3                   | 10.1                           | 124.00      | 3.72               | 19.3               | 30.8               | 307.9                   | 13.1                           |
| 7                   | 6.90        | 0.22               | 10.8               | 17.1               | 171.3                   | 7.5                            | 21.20       | 0.64               | 16.5               | 26.3               | 263.2                   | 11.2                           | 142.00      | 4.26               | 22.2               | 35.3               | 352.6                   | 15.0                           |
| 8                   | 6.80        | 0.22               | 10.6               | 16.9               | 168.8                   | 7.4                            | 20.20       | 0.61               | 15.8               | 25.1               | 250.8                   | 10.6                           | 133.00      | 3.99               | 20.7               | 33.0               | 330.2                   | 14.0                           |
| 9                   | 6.33        | 0.20               | 9.9                | 15.7               | 157.2                   | 6.9                            | 17.90       | 0.54               | 14.0               | 22.2               | 222.2                   | 9.4                            | 111.00      | 3.33               | 17.3               | 27.6               | 275.6                   | 11.7                           |
| 10                  | 5.50        | 0.18               | 8.6                | 13.7               | 136.6                   | 6.0                            | 15.00       | 0.45               | 11.7               | 18.6               | 186.2                   | 7.9                            | 86.10       | 2.58               | 13.4               | 21.4               | 213.8                   | 9.1                            |
| 11                  | 4.79        | 0.16               | 7.5                | 11.9               | 118.9                   | 5.3                            | 12.60       | 0.38               | 9.8                | 15.6               | 156.4                   | 6.6                            | 62.70       | 1.88               | 9.8                | 15.6               | 155.7                   | 6.6                            |
| 12                  | 4.19        | 0.14               | 6.5                | 10.4               | 104.0                   | 4.7                            | 10.40       | 0.31               | 8.1                | 12.9               | 129.1                   | 5.5                            | 46.60       | 1.40               | 7.3                | 11.6               | 115.7                   | 4.9                            |
| 13                  | 3.61        | 0.13               | 5.6                | 9.0                | 89.6                    | 4.2                            | 8.55        | 0.26               | 6.7                | 10.6               | 106.1                   | 4.5                            | 32.90       | 0.99               | 5.1                | 8.2                | 81.7                    | 3.5                            |

Tabula 3. Alumīnijā inducētās strāvas lineārā blīvuma moduļa atkarība no bezdimensionālās šķērslauka frekvences.

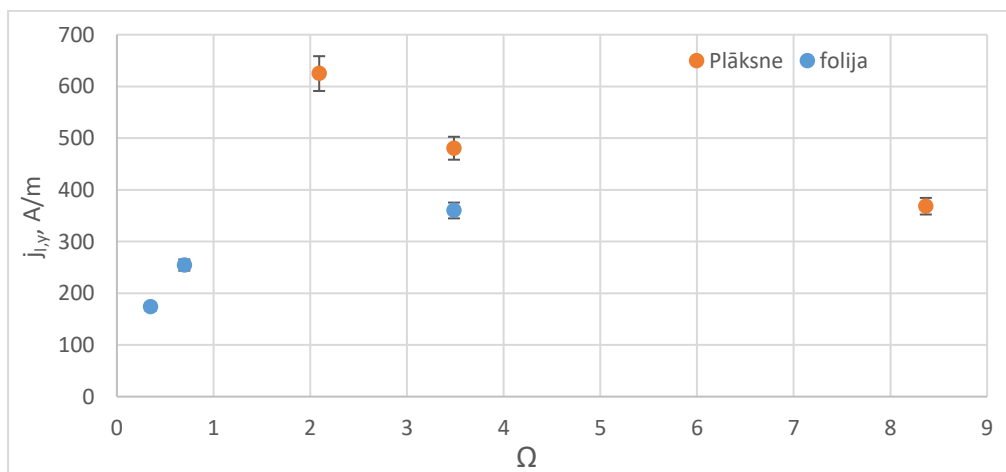
|         | $f$<br>, kHz | $\Omega$ | $j_{l,y}^{1A,max}$<br>, A/m | $\Delta j_{l,y}^{1A,max}$<br>, A/m | $\Delta\varphi$<br>$\pm 3, ^\circ$ | $j_{Re,l,y}^{1A,max}$<br>, A/m | $\Delta j_{Re,l,y}^{1A,max}$<br>, A/m | $j_{Im,l,y}^{1A,max}$<br>, A/m | $\Delta j_{Im,l,y}^{1A,max}$<br>, A/m |
|---------|--------------|----------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| Folija  | 10           | 0.34     | 173.8                       | 7.6                                | 55                                 | 99.7                           | 7.5                                   | 142.4                          | 5.2                                   |
|         | 20           | 0.70     | 254.5                       | 10.8                               | 37                                 | 203.2                          | 8.0                                   | 153.2                          | 10.6                                  |
|         | 100          | 3.49     | 360.0                       | 153                                | 11                                 | 353.4                          | 3.6                                   | 68.7                           | 18.5                                  |
| Plāksne | 0.3          | 2.09     | 624.8                       | 33.6                               |                                    |                                |                                       |                                |                                       |
|         | 0.5          | 3.49     | 480.4                       | 22.2                               |                                    |                                |                                       |                                |                                       |
|         | 1.2          | 8.37     | 368.3                       | 16.0                               |                                    |                                |                                       |                                |                                       |



Attēls 3. 1 A lielai induktora strāvai atbilstošais strāvas lineārā blīvuma sadalījums alumīnija folijā.



Attēls 4. Datormodelēšanas rezultāts alumīnija folijas strāvas lineārā blīvuma sadalījumam pie 1 A induktora strāvas.



Attēls 5. 1 A induktora strāvai atbilstošais maksimālais strāvas lineārā blīvuma modulis alumīnijā atkarībā no bezdimensionālās šķerslauka frekvences.

Aprēķinu piemēri:

- 1) Magnētiskā lauka x komponente alumīnija folijai ( $x=0$  cm,  $f=10$  kHz):

$$B_x = U/(2\pi S n f) = 1.72/(1000 \cdot 2\pi \cdot 6.63 \cdot 10^{-5} \cdot 154 \cdot 10^4) = 2.7 \mu T$$

- 2) Lineārā virpuļstrāvas blīvuma y komponente alumīnija folijai ( $x=0$  cm,  $f=10$  kHz):

$$j_{l,y} = 2B_x/\mu_0 = 4.27 A/m$$

- 3) Lineārā virpuļstrāvas blīvuma y komponente alumīnija folijai uz 1A lielu induktora strāvu ( $x=0$  cm,  $f=10$  kHz):

$$j_{l,y}^{1A} = j_{l,y}/I_{sp} = 4.27/0.1 = 42.7 A/m$$

- 4) Kļūda lineārās virpuļstrāvas blīvuma y komponentei alumīnija folijai uz 1A lielu induktora strāvu ( $x=0$  cm,  $f=10$  kHz):

$$\Delta j_{l,y}^{1A} = j_{l,y}^{1A} \sqrt{(\Delta U/U)^2 + (\Delta I/I)^2} = 42.7 \sqrt{(0.09/1.72)^2 + (0.003/0.1)^2} = 2.5 A/m$$

- 5) 10 kHz frekvencei atbilstošā bezdimensionālā šķērslauka frekvence:

$$\Omega = \mu_0 d L \sigma f / 2 = \mu_0 0.01 \cdot 10^{-3} \cdot 0.146 \cdot 3.8 \cdot 10^7 \cdot 10000 / 2 = 0.34$$

- 6) Lineārā virpuļstrāvas blīvuma y komponentes maksimuma reālā daļa:

$$j_{Re,l,y}^{1A,max} = \Delta j_{l,y}^{1A,max} \cdot \cos(\Delta\varphi) = 173.8 \cdot \cos(55^\circ) = 99.7 A/m$$

- 7) Lineārā virpuļstrāvas blīvuma y komponentes maksimuma imaginārā daļa:

$$j_{Im,l,y}^{1A,max} = \Delta j_{l,y}^{1A,max} \cdot \sin(\Delta\varphi) = 173.8 \cdot \sin(55^\circ) = 142.4 A/m$$

## Secinājumi:

Laboratorijas darbā tika veikta magnētiskā šķērslauka inducētā strāvu sadalījuma pētīšana alumīnija folijā un plāksnē.

Salīdzinot rezultātus alumīnija plāksnei 500 Hz frekvencei (Attēls 1) ar datormodelēšanas iegūto virpuļstrāvu sadalījumu (Attēls 2), redzams, ka eksperimentālie dati ir “pacelti uz augšu”. Tas ir, pie koordinātas  $x=0$  cm eksperimentāli iegūtā vērtība strāvas lineāram blīvumam ir apmēram 250 A/m, savukārt datormodelēšanas ceļā iegūta vērtība 0 A/m. Pie 300 Hz frekvences strāvas lineārais blīvums pie  $x=0$  cm ir vēl lielāks kā 500 gadījumā, savukārt pie 1200 Hz mazāks. Šie rezultāti liek domāt, ka pie mazām induktora strāvas frekvencēm tā radītais magnētiskais lauks (bez pašu virpuļstrāvu radītā lauka) pie plāksnes virsmas nav tai perpendikulārs. Rezultātā induktora radīto magnētisko lauku un virpuļstrāvu radīto lauku nevar atdalīt.

Rezultāti alumīnija folijai (Attēls 3) apliecina iepriekšējo spriedumu – arī šeit palielinoties induktora strāvas frekvencei virpuļstrāvas pie  $x=0$  cm samazinās. Novērojams, ka lielāku frekvenču gadījumā virpuļstrāvas ir stiprākas, kas sakrīt ar faktu, ka magnētiskā lauka inducētais EDS proporcionāls lauka frekvencei. Salīdzinot sadalījuma 10 kHz gadījumā ar datormodelēšanas rezultātu (Attēls 4), redzams, ka eksperimentāli tiek iegūta lielāka strāvas lineārā blīvuma, bet saistība starp strāvas lineārā blīvuma moduli, reālo un imagināro daļu kvalitatīvi sakrīt.

Apskatot Attēlu 5, redzams ka maksimālais strāvas lineārā blīvuma modulis alumīnijā folijā palielinās līdz ar bezdimensionālo šķērslauka frekvenci, savukārt, plāksnē samazinās. No vienādojuma  $|I_{pl}/2I_{sp}| = \Omega/\sqrt{1+\Omega^2}$  izriet, ka virpuļstrāvām vajadzētu palielināties līdz ar  $\Omega$ , kā tas arī ir novērojams folijas gadījumā. Alumīnija plāksnes virpuļstrāvu samazināšanās palielinoties  $\Omega$  rodas dēļ iepriekš apskatītās nespējas atdalīt induktora radīto magnētisko lauku un virpuļstrāvu radīto lauku.