

## Teorētiskais pamatojums:

Rūpniecībā dažādu materiālu kausēšanai plaši tiek pielietota t.s. induktīvā metode. Šajā metodē tiek izmantots induktors, kas vienkāršākajā gadījumā sastāv no neliela vijumu skaita un kam pieslēgts vidējas (piemēram, 10 kHz) vai augstas frekvences maiņspriegums. Induktora mainīgajā magnētiskajā laukā ievietotā elektrovadošā objektā rodas virpuļstrāvas, kā rezultātā objekts sasilst un var arī tikt izkausēts.

Aukstā tīģeļa metodē no metāla, piemēram, vara. Vara nokļūšana kausējumā ir mazāk bīstama kā, piemēram, keramikas, jo parasti tā kušanas temperatūra ir zemāka kā kausējamam materiālam, tāpēc tā daļiņas izšķīst kausējumā, un izgatavotajos lējumos neveidojas lielāka izmēra ieslēgumi. Tomēr, lai pats tīģelis netiktu izkausēts, tas ir intensīvi jādzesē, tādēļ tajā tiek iestrādāti kanāli pa kuriem plūst ūdens, kas aizvada siltumu. Lai augstfrekvences magnētiskais lauks nokļūtu tīģeļa iekšpusē, nevis tikai plānā slānī uz tā virsmas, skinefeka dēļ, tajā nepieciešams izveidot nemetāliska materiāla spraugas.

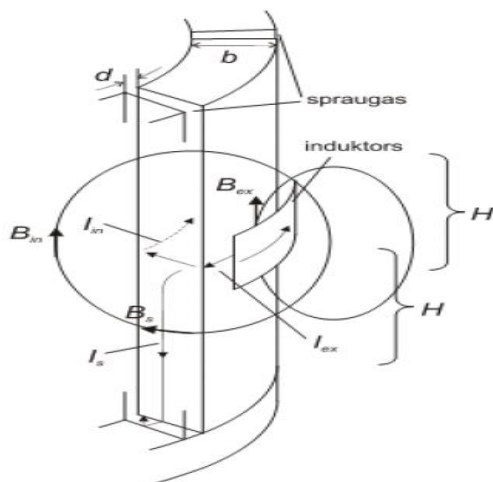
Aukstā tīģeļa sienīnās izveidojas trīsdimensionāls virpuļstrāvu sadalījums, ko vispārīgā gadījumā nevar noteikt ar analītiskām metodēm. Taču ir iespējams izveidot tuvinātu modeli, kas ļauj iegūt priekšstatus un vienkāršas kvantitatīvas sakarības par virpuļstrāvu sadalījumu un magnētisko lauku tīģeļa iekšpusē, kā arī attiecību  $\eta$  starp magnētisko lauku  $B_{in}$  induktora vidū gadījumā, kad induktorā ievietots tīģelis, un  $B_{ex}$  - bez tīģeļa. Iegūst sakarības:

$$\eta = B_{in}/B_{ex} = K/(K + 1),$$

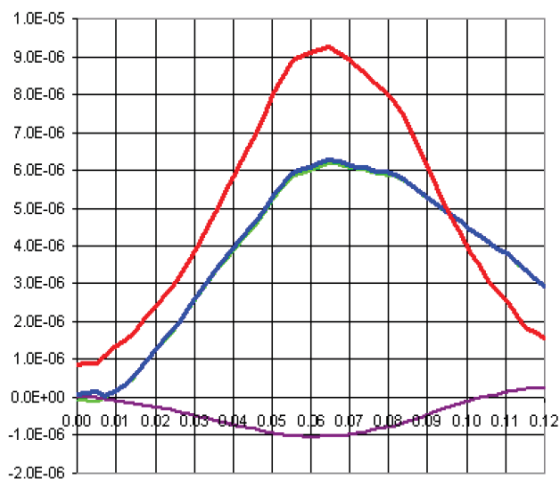
$$K = dH^2N/(b\pi R^2),$$

kur N – spraugu skaits, H – induktora augstums, d- spraugas platums, b – sekcijas sienīnās biezums, R – tīģeļa rādiuss (Attēls 1). Iegūst arī aptuvenu novērtējumu efektīvajam spraugas platumam:  $d_{eff} = d_{geom} + \delta$ , kur  $d_{geom}$  – ģeometriskais spraugas platums,  $\delta$  – skinslāņa biezums.

Precīzi aprēķināt strāvu un magnētiskā lauka sadalījumu var tikai izmantojot skaitliskas elektromagnētisko lauku aprēķina metodes. Attēlā 2 dots ar galīgo elementu paketi ANSYS aprēķināts magnētiskā lauka sadalījums induktora iekšpusē vertikālā virzienā. Ar zilu – gadījums, kad induktorā ievietots tīģelis ar 12 spraugām, ar sarkanu – bez tīģeļa.



Attēls 1. Shematiskais aukstā tīģeļa fragments.



Attēls 2. Magnētiskā lauka sadalījums induktorā.

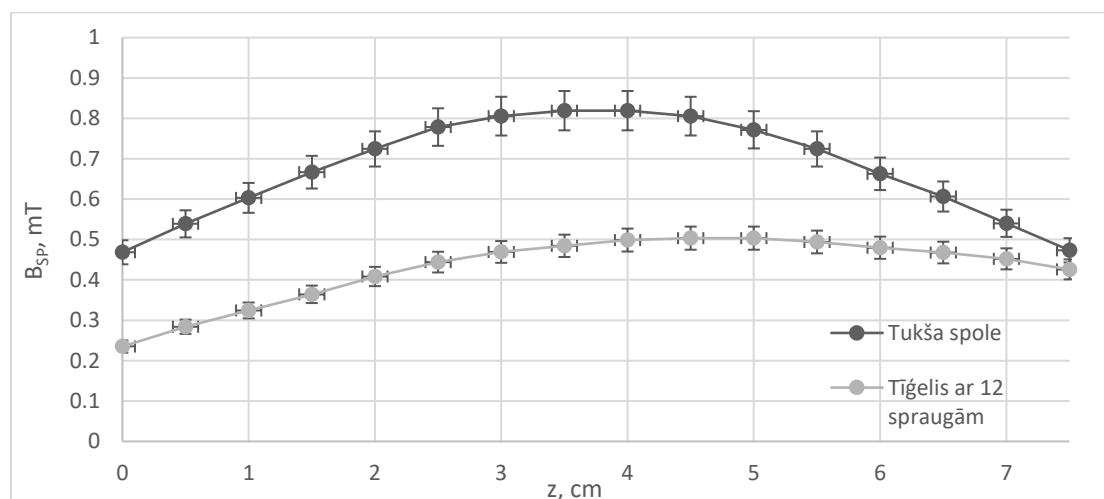
### Darba uzdevumi:

1. Magnētiskā lauka sadalījuma uz spoles ass noteikšana tukšai spolei un gadījumam ar tajā ievietotu tīģeli ar 12 spraugām.
  - 1.1. Izmērīt ar magnētiskā lauka sensoru lauku vertikālās komponentes sadalījumu uz spoles ass pie frekvences 50 kHz tukšai spolei un spolei ar tajā ievietotu tīģeli ar 12 spraugām.
  - 1.2. Izmērītos sadalījumus salīdzināt ar datormodelēšanas rezultātiem
2. Tīģeļa caurlaidības magnētiskajam laukam atkarības no spraugu skaita (2, 6, 12 un 48) noteikšana.
  - 2.1. Ievietojot magnētiskā lauka sensoru spoles centrā izmērīt magnētiskā lauka indukcijas vērtību gadījumam ar un bez tīģeļa visiem četriem tīģeļiem. Šos mērījumus veikt pie frekvencēm 10 kHz un 200 kHz. Katrai frekvencei izvēlēties maksimāli iespējamo strāvu spolē, ko nodrošina ģenerators.
  - 2.2. Aprēķināt visiem gadījumiem tīģeļa magnētisko caurlaidību  $B_T/B_0$  un no tās aprēķināt eksperimentālo efektīvo tīģeļa konstanti  $K_{EF}$ .
  - 2.3. Atlikt abām frekvencēm grafiski  $K_{EF}$  atkarību no spraugu skaita tīģelī. Šo atkarību aproksimēt ar taisni un no tās slīpuma koeficienta noteikt spraugas efektīvo platumu abām frekvencēm 10 kHz un 200 kHz.
  - 2.4. Abām frekvencēm iegūtos efektīvos spraugas platumus salīdzināt ar ģeometriskās spraugas platuma un divu skinslāņu biezumu summu.
3. Spoles impedances izmaiņas dēļ tajā ievietota alumīnija cilindra un feromagnētiskas dzelzs caurules noteikšana.
  - 3.1. Izmērīt strāvu spolē un spriegumu uz tās, kā arī fāzu nobīdi starp strāvu un spriegumu tukšai spolei. Izmantot 10 kHz frekvenci.
  - 3.2. Izmērīt strāvu spolē un spriegumu uz tās, kā arī fāzu nobīdi starp strāvu un spriegumu spolei, kurā ir ievietota feromagnētiskas dzelzs caurule. Aprēķināt spoles impedanci. Izmantot 10 kHz frekvenci.
  - 3.3. Izmērīt strāvu spolē un spriegumu uz tās, kā arī fāzu nobīdi starp strāvu un spriegumu spolei, kurā ir ievietots alumīnija cilindrs. Aprēķināt spoles impedanci. Izmantot 10 kHz frekvenci. Izskaidrot atšķirību no gadījuma ar ievietotu alumīnija cilindru.

## Mērījumu rezultāti un datu apstrāde:

Tabula 1. Magnētiskā lauka sadalījums uz spoles ass pie signālgeneratora frekvences 50 kHz.

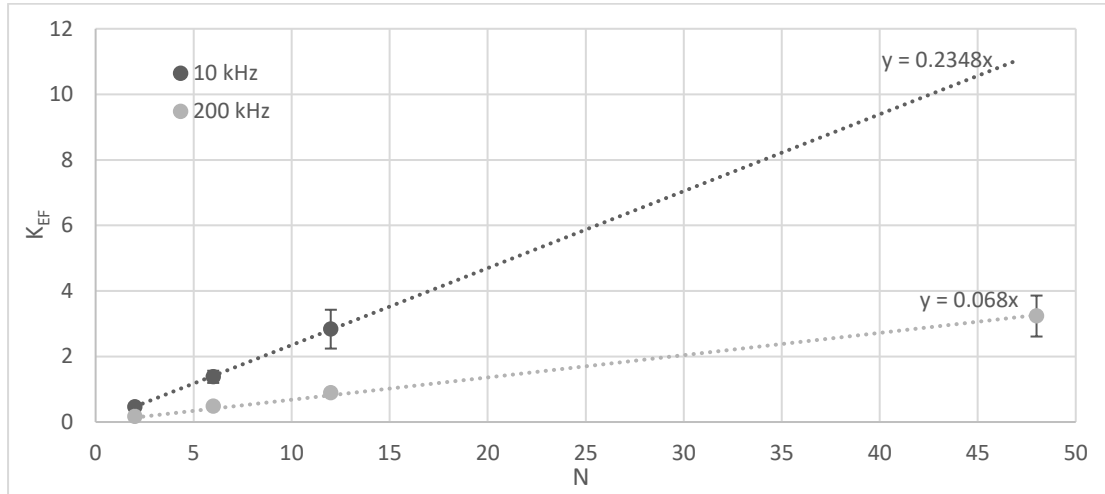
	$I_{SP} = 66.3 \pm 3.0, mA$ , Tukša spole				$I_{SP} = 94.5 \pm 3.8, mA$ , Spole ar tīģeli			
$Z \pm 0.1, cm$	$U_M, mV$	$\Delta U_M, mV$	$B_{SP}, mT$	$\Delta B_{SP}, mT$	$U_M, mV$	$\Delta U_M, mV$	$B_{SP}, mT$	$\Delta B_{SP}, mT$
0.0	69.2	3.1	0.468	0.030	49.5	2.5	0.235	0.015
0.5	79.6	3.4	0.539	0.034	59.8	2.8	0.284	0.018
1.0	89.1	3.7	0.603	0.037	68.3	3.0	0.324	0.020
1.5	98.5	4.0	0.667	0.040	76.7	3.3	0.364	0.022
2.0	107.0	4.2	0.724	0.044	86.0	3.6	0.408	0.024
2.5	115.0	4.5	0.778	0.046	93.5	3.8	0.444	0.026
3.0	119.0	4.6	0.805	0.048	98.8	4.0	0.469	0.027
3.5	121.0	4.6	0.819	0.049	102.0	4.1	0.484	0.028
4.0	121.0	4.6	0.819	0.049	105.0	4.2	0.499	0.028
4.5	119.0	4.6	0.805	0.048	106.0	4.2	0.503	0.029
5.0	114.0	4.4	0.772	0.046	106.0	4.2	0.503	0.029
5.5	107.0	4.2	0.724	0.044	104.0	4.1	0.494	0.028
6.0	97.9	3.9	0.663	0.040	101.0	4.0	0.480	0.027
6.5	89.6	3.7	0.606	0.037	98.5	4.0	0.468	0.027
7.0	79.8	3.4	0.540	0.034	95.2	3.9	0.452	0.026
7.5	69.9	3.1	0.473	0.030	89.7	3.7	0.426	0.025



Attēls 3. Magnētiskā lauka sadalījums uz spoles ass.

Tabula 2. Tīģeļa magnētiskās caurlaidības mērījumi, efektīvā tīģeļa konstante.

	$I_{SP} = 402 \pm 13, mA$ , 10 kHz $U_{M0} = 138.0 \pm 5.1, mV$						$I_{SP} = 50.2 \pm 2.5, mA$ , 200 kHz $U_{M0} = 508.0 \pm 16.2, mV$					
N	$U_{MT}, mV$	$\Delta U_{MT}, mV$	$\eta$	$\Delta \eta$	$K_{EF}$	$\Delta K_{EF}$	$U_{MT}, mV$	$\Delta U_{MT}, mV$	$\eta$	$\Delta \eta$	$K_{EF}$	$\Delta K_{EF}$
2	43.6	2.3	0.316	0.020	0.46	0.04	74.3	3.2	0.146	0.008	0.17	0.01
6	80.0	3.4	0.580	0.033	1.38	0.19	165.0	6.0	0.325	0.016	0.48	0.03
12	102.0	4.1	0.739	0.040	2.83	0.59	240.0	8.2	0.472	0.022	0.90	0.08
48	132.0	5.0	0.957	0.051	22.00	26.77	388.0	12.6	0.764	0.035	3.23	0.62



Attēls 4. Efektīvās tīģeļa konstantes atkarība no spraugu skaita tīģelī.

Tabula 3. Efektīvais tīģeļa spraugas platums un tā teorētiskais novērtējums.

	$p$	$\Delta p$	$d_{ef}, mm$	$\Delta d_{ef}, mm$	$d_{ef_{teor}}, mm$
10 kHz	0.2348	0.0077	2.824	0.093	2.807
200 kHz	0.0680	0.0043	0.818	0.052	0.666

Tabula 4. Spoles impedances mērījumi pie signālgeneratora frekvences 10 kHz.

Serde	$I_{SP}, mA$	$\Delta I_{SP}, mA$	$U_{SP}, V$	$\Delta U_{SP}, V$	$Z, \Omega$	$\Delta Z, \Omega$	$\phi \pm 2, ^\circ$
Nav	276	9	4.80	0.14	17.39	0.78	-100
Fe caurule	246	8	4.90	0.15	19.92	0.90	-126
Al cilindrs	290	10	3.55	0.11	12.24	0.55	-100

Aprēķinu piemēri:

- 1) Magnētiskā lauka sensora sprieguma kļūda ( $f=50$  kHz,  $z=0$  cm, tukša spole):  
 $\Delta U_M = 0.03 \cdot U_M + 0.1/1000 = 0.03 \cdot 69.2/1000 + 0.1/1000 = 3.1$  mV
- 2) Sensora spriegumam atbilstošā magnētiskā lauka indukcija ( $f=50$  kHz,  $z=0$  cm, tukša spole):  
 $B_{SP} = U_{M0}/(2\pi f S_M N_M) = 0.0031/(2\pi \cdot 50000 \cdot 0.0000514 \cdot 138) = 0.468$  mT
- 3) Tīģeļa magnētiskā caurlaidība ( $f=10$  kHz,  $N=2$ ):  
 $\eta = B_T/B_0 = U_{MT}/U_{M0} = 43.6/138 = 0.316$
- 4) Efektīvā tīģeļa konstante ( $f=10$  kHz,  $N=2$ ):  
 $K_{EF} = \eta/(1 - \eta) = 0.316/(1 - 0.316) = 0.46$
- 5) Efektīvās tīģeļa konstantes kļūda ( $f=10$  kHz,  $N=2$ ):  
 $\Delta K_{EF} = \frac{\partial K_{ef}}{\partial \eta} \Delta \eta = \frac{\Delta \eta}{(1 - \eta)^2} = \frac{0.002}{(1 - 0.316)^2} = 0.04$
- 6) Efektīvais tīģeļa spraugas platums ( $f=10$  kHz):  
 $d_{ef} = pb\pi R^2/H^2 = 0.2348 \cdot 0.005 \cdot \pi \cdot 0.035^2/0.04^2 = 2.824$  mm
- 7) Teorētiskais novērtējums efektīvajam tīģeļa spraugas platumam ( $f=10$  kHz):  
 $d_{ef_{teor}} = d + 1/\sqrt{\pi\mu_0 f/\rho} = 0.0005 + 1/\sqrt{\pi \cdot 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot 10000 \cdot 10^7/3} = 2.807$  mm
- 8) Spoles impedance (bez serdes):  
 $Z = U_{SP}/I_{SP} = 4.8 \cdot 1000/256 = 17.39$   $\Omega$

## **Secinājumi:**

Laboratorijas darbā noteikts magnētiskā lauka sadalījums uz spoles ass tukšai spolei un gadījumam ar tajā ievietotu tīģeli ar 12 spraugām. Noteikta tīģeļa caurlaidība magnētiskajam laukam atkarībā no spraugu skaita tajā un novērotas spoles impedances izmaiņas dēļ tajā ievietota alumīnija cilindra uz feromagnētiskas dzelzs serdes.

Apskatot rezultātus magnētiskā lauka sadalījuma mērījumiem, redzams, ka tukšas spoles gadījumā tas ir simetrisks un sasniedz vislielāko vērtību apmēram tajā augstumā, kurā atradās spole (Attēls 3). Induktorā ievietojot tīģeli magnētiskais lauks “nobīdās” uz tīģeļa augšpusi. Šis novērojums varētu būt skaidrojams ar to, ka tīģeļa apakšdaļā atsevišķās sekcijas ir savienotas. Redzams, ka maksimālā magnētiskā lauka indukcijas vērtība ir apmēram 2 reizes mazāka kā gadījumā bez tīģeļa. Salīdzinot eksperimentāli iegūto sadalījumu ar teorētisko aprēķinu (Attēls 2), redzams, ka kvalitatīvi tie sakrīt, ņemot vērā ka teorētiski apskatīts sadalījums plašākā z koordinātas mērogā. Teorētiskā aprēķina gadījumā atšķirība starp maksimumiem ar un bez tīģeļa ir tikai 1.5 reizes liela.

Nākamajā darba daļā iegūtie rezultāti magnētiskās caurlaidības atkarībai no spraugu skaita tīģelī attēloti Tabulā 2. Redzams, ka magnētiskā caurlaidība palielinās līdz ar spraugu skaitu, savukārt lielāka magnētiskā lauka frekvence samazina caurlaidības vērtību. No tīģeļa magnētiskā lauka caurlaidības aprēķināta efektīvā tīģeļa konstante, tās atkarība no spraugu skaita tīģelī attēlota Attēlā 4. Aprakstot šo atkarību ar lineāru sakarību (10 kHz gadījumā netika ņemts vērā punkts, kas atbilst 48 spraugām tīģelī, tā lielās kļūdas dēļ) iegūtas efektīvās tīģeļa spraugas platuma vērtības (Tabula 3). Salīdzinot iegūtās vērtības ar tuvinātu teorētisko novērtējumu, redzams, ka 10 kHz gadījumā tiek iegūta sakritība kļūdas robežās, savukārt 200 kHz gadījumā iegūta lielāka vērtība, kā to paredz teorija. Iespējamais nesakritības iemesls 200 kHz gadījumā varētu būt saistīts ar to, ka efektīvās spraugas platuma aprēķins balstās uz pieņēmumu, ka tīģeļa iekšpusē šķērsgrizumā ir homogēns magnētiskais lauks, lai gan realitātē novērojams tā sadalījums.

Rezultāti spoles impedances atkarībai no serdes materiāla un formas atainoti Tabulā 4. Redzams, ka dzelzs caurule palielina impedanci, savukārt alumīnija cilindrs to samazina. Dzelzs caurule dod papildus nobīdi fāzē starp spriegumu un strāvu uz spoles, alumīnija cilindrs neatstāj nekādu ietekmi uz fāzi.