

Latvijas Universitāte  
Fizikas un matemātikas fakultāte  
Fizikas maģistra 1.kursa students  
Raimonds Narņickis (rn11038)

# Nepārtrauktās vides fizikas laboratorija

Laboratorijas darba nr. 10

*Augstfrekvences strāvu sadalījumu pētīšana  
uz vadošu objektu virsmām*

## Darba uzdevumi

1. Magnētiskā lauka sadalījuma uz spoles ass noteikšana tukšai spolei un gadījumam ar tajā ievietotu tīģeli ar 12 spraugām:
  - a) Izmerīt ar magnētiskā lauka sensoru lauka vertikālās komponentes sadalījumu uz spoles ass pie frekvences 50 kHz tukšai spolei un spolei, ar tajā ievietotu tīģeli ar 12 spraugām.
  - b) Izmērītos sadalījumus salīdzināt ar datormodelēšanas rezultātiem.
2. Tīģeļa caurlaidības magnētiskajam laukam atkarības no spraugu skaita (2, 6, 12 un 48) noteikšana.
  - a) Ievietojot magnētiskā lauka sensoru spoles centrā, izmērīt magnētiskā lauka indukcijas vērtību gadījumam ar BT un bez B0 tīģeļa visiem četriem tīģeļiem. Šos mērījumus veikt pie frekvencēm 10 kHz un 200 kHz. Katrai frekvencei izvēlēties maksimāli iespējamo strāvu spolē, ko nodrošina ģenerators.
  - b) Aprēķināt visiem gadījumiem tīģeļa magnētisko caurlaidību BT/B0, un no tās aprēķināt eksperimentālo efektīvo tīģeļa konstanti KEF.
  - c) Atlikt abām frekvencēm grafiski KEF 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.
  - d) Abām frekvencēm iegūtos efektīvo spraugas platumus salīdzināt ar ģeometrisko spraugas platumu un skinslāņa biezuma summu.
3. Spoles impedances izmaiņas dēļ tajā ievietota alumīnija cilindra un feromagnētiskas dzelzs caurules noteikšana.
  - a) Izmērīt strāvu spolē un spriegumu uz tās, kā arī fāzu nobīdi starp strāvu un spriegumu tukšai spolei. Izmantot 10 kHz frekvenci.
  - b) 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.
  - c) 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.

## Darba piederumi

- Signāļģenerators Г3-33.
- Divstaru oscilogrāfs BK PRECISION 2121.
- Maiņstrāvas milivoltmeters B3-38A.
- Cilindriska indukcijas spole ar augstumu  $H = 51 \text{ mm}$ , vijumu diametru  $D_{in} = 88 \text{ mm}$ , vijumu skaitu uz garuma vienību 1137, kopējo vijumu skaitu  $N_{sp} = 58$ .
- Feromagnētiskas dzelzs ( $\rho = 10 - 7 (\Omega m)$ ) caurule ar augstumu
- $H = 200 \text{ mm}$ , ārējo diametru  $D_{ex} = 76 (\text{mm})$ , sienas biezumu  $b = 3 (\text{mm})$ .
- Alumīnija cilindrs ar augstumu  $H = 120 \text{ mm}$ , diametru  $D_{ex} = 60 (\text{mm})$
- Vairākas sekcionētas alumīnija caurules ar augstumu  $H = 120 (\text{mm})$ , ārējo diametru  $D_{ex} = 80 (\text{mm})$ , sienas biezumu  $d = 5 (\text{mm})$ , spraugas platumu  $0.5 (\text{mm})$  un sekciju (spraugu) skaitu: 2; 6; 12; un 48.
- Magnētiskā lauka sensors ar spoles šķērsriezuma laukumu  $2,0 \text{ mm} \times 25,7 \text{ mm}$  un spoles garumu 20 mm: 138 vijumi ar vada diametru  $D=0,12 \text{ mm}$ .

## Teorijas apskats

Ievietojot vadītāju augstfrekvences magnētiskajā laukā magnētiskais lauks tiek izspiests no vadītāja tilpuma un koncentrējas skinslānī uz tā virsmas biezumā

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \pi f \sigma}}$$

$$\mu_0 = 4 \pi * 10^{-7} \left( \frac{H}{m} \right)$$

$f$  – frekvence

$\sigma$  – ķermenā elektrovadītspēja.

Ja materiāls tiek kausēts ar magnētisko lauku un tīģeļa materiāls arī ir vadītspējīgs, tad, lai magnētiskais lauks iespiestos arī kausējamajā materiālā, ir nepieciešams izveidot tīģeļa sienās spraugas. Attiecību starp magnētisko lauku tīģeļa iekšpusē un magnētisko lauku tā ārpusē sauc par tīģeļa caurlaidību.

$$\frac{B_{in}}{B_{ex}} = \eta = \frac{K}{1 + K'}$$

kur  $K$  ir tīģeļa konstante, ko savukārt var aprēķināt no

$$K = \frac{dH^2 N}{b\pi R^2}$$

$$K_{ef} = \frac{\eta}{1 - \eta}$$

Zinot efektīvās tīģeļa konstantes atkarību no spraugu skaita  $N$ , var aprēķināt efektīvo spraugas platumu

$$d_{ef} = p \frac{b\pi R^2}{H^2}$$

Kur  $p = \frac{dK_{ef}}{dn}$  – pieskare funkcijai  $K(n)$ .

## Darba dati un to apstrāde

Tabula 1 Bez tīģeļa

Nr.	Z ± 0.1, cm	U, V	ΔU, V	B, T	ΔB, T
1	0.0	0.2500	0.0075	1.12E-04	3.5E-06
2	1.0	0.2400	0.0072	1.08E-04	3.4E-06
3	2.0	0.2000	0.0060	8.98E-05	2.8E-06
4	3.0	0.1500	0.0045	6.73E-05	2.1E-06
5	4.0	0.1000	0.0030	4.49E-05	1.4E-06
6	5.0	0.0700	0.0021	3.14E-05	9.9E-07
7	6.0	0.0500	0.0015	2.24E-05	7.1E-07
8	7.0	0.0300	0.0009	1.35E-05	4.3E-07
9	8.0	0.0200	0.0006	8.98E-06	2.8E-07

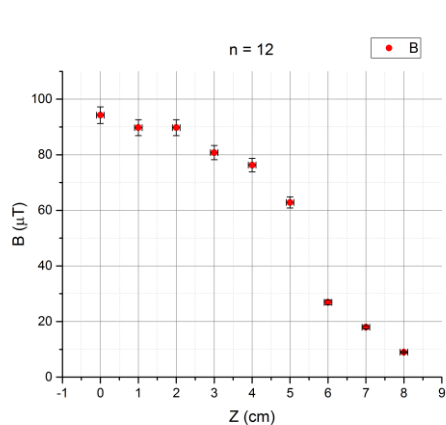
r <sub>U</sub>	3.00%
r <sub>f</sub>	1.00%
r <sub>B</sub>	3.16%

Tabula 2 Ar tīģeli (n = 12)

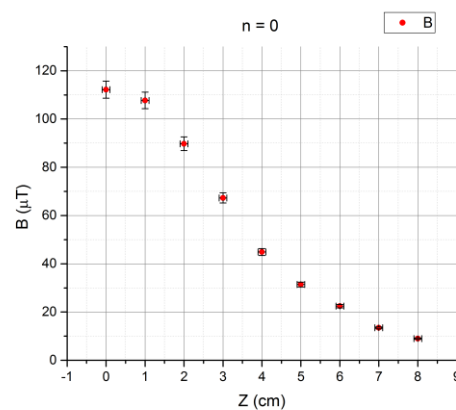
Nr.	Z ± 0.1, cm	U, V	ΔU, V	B, T	ΔB, T
1	0.0	0.2100	0.0063	9.42E-05	3.0E-06
2	1.0	0.2000	0.0060	8.98E-05	2.8E-06
3	2.0	0.2000	0.0060	8.98E-05	2.8E-06
4	3.0	0.1800	0.0054	8.08E-05	2.6E-06
5	4.0	0.1700	0.0051	7.63E-05	2.4E-06
6	5.0	0.1400	0.0042	6.28E-05	2.0E-06
7	6.0	0.0600	0.0018	2.69E-05	8.5E-07
8	7.0	0.0400	0.0012	1.80E-05	5.7E-07
9	8.0	0.0200	0.0006	8.98E-06	2.8E-07

Kļūdas tiek aprēķinātas ar relatīvo kļūdu saskaitīšanas metode, relatīvās kļūdas tika paņemtas no aparātu aprakstiem (skat. izmantotā literatūra)

$$B_{SP} = \frac{U}{2 \pi f S_M N_M}$$



Grafiks 1 Magnētiska lauka atkarība no attāluma ar tīģeli (n=12)



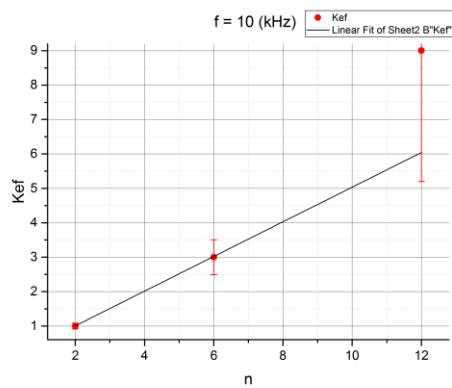
Grafiks 2 Magnētiska lauka atkarība no attāluma bez tīģeļa

Tabula 3 Efektīvās tīģeļa konstantes aprēķins

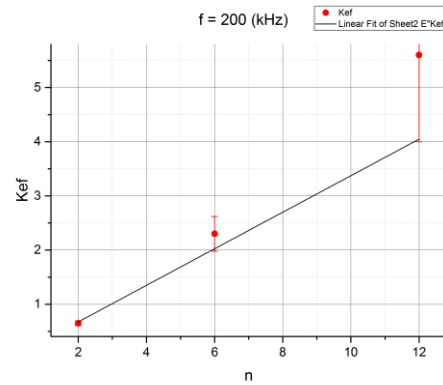
U, V	ΔU, V	B, T	ΔB, T	η	K <sub>ef</sub>	ΔK <sub>ef</sub>	f, kHz	n
0.20	0.0060	4.49E-04	1.4E-05	1.00	-	-	10	-
0.10	0.0030	2.24E-04	7.1E-06	0.50	1.00	0.09		2
0.15	0.0045	3.37E-04	1.1E-05	0.75	3.00	0.51		6
0.18	0.0054	4.04E-04	1.3E-05	0.90	9.00	3.80		12
0.20	0.0060	4.49E-04	1.4E-05	1.00	-	-		48
0.66	0.0198	7.40E-05	2.3E-06	1.00	-	-	200	-
0.26	0.0078	2.92E-05	9.2E-07	0.39	0.65	0.05		2
0.46	0.0138	5.16E-05	1.6E-06	0.70	2.30	0.32		6
0.56	0.0168	6.28E-05	2.0E-06	0.85	5.60	1.60		12
0.68	0.0204	7.63E-05	2.4E-06	1.03	-	-		48

$$\eta = \frac{B_0}{B_i}$$

$$K_{ef} = \frac{\eta}{1 - \eta}$$



Grafiks 3 Efektīvās tīģeļa konstantes atkarība no spraugu skaita (f = 10 (kHz))



Grafiks 4 Efektīvās tīģeļa konstantes atkarība no spraugu skaita (f = 200 (kHz))

Tabula 4 Lineārās regresijas kopsavilkums (no 3. un 4. grafika)

y = p*x		
p vērtība	Standartnovirze	f (khz)
0.50355	0.02091	10
0.33739	0.02072	200

Tabula 5 Skinslāņa un efektīvā spraugas platuma kopsavilkums

$d_{ef}, \text{ mm}$	$\Delta d_{ef}, \text{ mm}$	$\delta, \text{ mm}$	$\Delta \delta, \text{ mm}$	$d_{eft}, \text{ mm}$	$\Delta d_{eft}, \text{ mm}$	$d_{ef}/d_{eft}$
6.056	0.251	2.757	0.014	6.013	0.028	1.01
4.058	0.249	0.616	0.003	1.733	0.006	2.34

$$d_{ef} = p * \frac{b\pi R^2}{H^2}$$

$b = 0.005 \text{ (m)}$  – sienas biezums,  $R = 0.035 \text{ (m)}$  – tīģeļa iekšējais rādiuss,

$H = 0.04 \text{ (m)}$  – tīģeļa augstums

$p$  tiek ņemts no 4. tabulas

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \pi f \sigma}}$$

$$\mu_0 = 4 \pi * 10^{-7} \left( \frac{H}{m} \right)$$

$$\sigma = \frac{1}{3 * 10^{-7}} \left( \frac{s}{m} \right)$$

$$d_{eft} = 2 * \delta + d, \quad d = 0.0005 \text{ (m)} - \text{spraugas platums}$$

Tabula 6 Impedances aprēķins un fāzu nobīde

	$I, \text{ mA}$	$U, \text{ V}$	$Z, \text{ k}\Omega$	$t, \mu\text{s}$	$\varphi, \text{ deg}$
tukša spole	0.46	7.2	15.6	26	93.6
ar Fe	0.4	7.6	19.0	34	122.4
ar Al	0.48	5.2	10.8	26	93.6

$$Z = \frac{U}{I}$$

## Secinājumi

1. un 2. grafikā redzāmais magnētiskā lauka vertikālās komponentes sadalījums pēc formas sakrīt ar teorētiskā apraksta doto. Bez tīģeļa grafikā redzams ka magnētiskais lauks ir lielāks nekā ar tīģeli.

3. Tabulā redzams, ka pie  $n = 48$  tīģeļa magnētiskā caurlaidība ir jau tāda pati kā bez tīģeļa tādēļ tā netika ņemta vērā. 3. un 4. grafikā redzams pie  $n = 12$  efektīvā tīģeļa konstante atšķirās ļoti no lineārās taisnes, jo tai ir liela kļūda.

5. tabulā ir saskatāms, tas ka pie 10 kHz efektīvais spraugas platums labi sakrīt ar teorētisko. ( $d_{eft}$  un  $d_{ef}$ ). Pie 200 kHz sarēķinātais efektīvais spraugas platums ir divreiz lielāks par teorētisko, kļūdas ir pārāk mazas, lai izskaidrotu šo iznākumu. Iespējams, ka pie lielākas frekvences magnētiskais lauks vairāk iespiežas un jāizmanto precīzāka skinslāņa formula vai arī kāds papildus process netiek ņemts vērā.

No impedances aprēķina (6. tabula) impedance ievietojot dzelzs cauruli palielinās, bet ievietojot alumīnija cauruli samazinās salīdzinot ar impedenci tukšai spolei. Tas ir skinslāņa efekts. Dzelzim ir apmēram trīs reizes mazāka nekā alumīnijam elektriskā vadītspēja. Tāpēc arī skinslānis lielāks un ar to lielāka impedance. Jāņem arī vērā, ka alumīnijs arī ir paramagnētiķis un dzelzs ferromagnētiķis.

## Izmantotā literatūra

- Darba apraksts
- BK PRECISION 2121 apraksts  
[https://bkpmedia.s3.amazonaws.com/downloads/datasheets/en-us/21xxC\\_datasheet.pdf](https://bkpmedia.s3.amazonaws.com/downloads/datasheets/en-us/21xxC_datasheet.pdf)
- B3-38A apraksts (<http://zapadpribor.com/en/v3-38a/>)