

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

Nepārtrauktās vides laboratorija

Laboratorijas darba nr. 8

*Skinefekts nemagnētiskā un feromagnētiskā
materiālā*

Darba mērķi

- Iegūt kvalitatīvu izpratni par skinefektu, iepazīties ar tuvinātu un analītiski precīzu skinslāņa atrisinājumu. Iepazīties ar skinslāņa analītiski precīzu atrisinājumu feromagnētiskam materiālam konstantas relatīvās magnētiskās caurlaidības gadījumā.
- Iepazīties ar programmu paketi *Mathematica* skaitliski aprēķinātiem aksiāli simetriskiem magnētiskā lauka sadalījumiem pie dažādām frekvencēm laboratorijas sistēmai, sastāvošai no induktora spoles un tajā ievietotas alumīnija vai dzelzs caurules.
- Iepazīties ar pašizgatavotiem maiņstrāvas magnētiskā lauka mērīšanas sensoriem, kuru darbība pamatojas uz elektromagnētiskās indukcijas likumu.
- Eksperimentāli pētīt skinefektu alumīnija caurulē mērot tās spēju ekranēt ārējo magnētisko lauku atkarībā no strāvas frekvences un salīdzinot mērījumu rezultātus ar skaitliskās modelēšanas rezultātiem.
- Eksperimentāli pētīt skinefektu dzelzs caurulē mērot magnētisko plūsmu tās skinslānī un nosakot dzelzs relatīvās magnētiskās caurlaidības atkarību no magnētiskā lauka intensitātes pie caurules virsmas.

Darba uzdevumi

1. Magnētiskā lauka sensoru pārbaude izmantojot Faradeja indukcijas likumu un cirkulācijas teorēmu magnētiskajam laukam.
 - a. Norādīto sensoru ievietot sensoru spoles centrā un ar milivoltmetru uzņemt sensora sprieguma UM atkarību no spoles strāvas frekvences f , izmantojot ģeneratoru $\Gamma 3-33$. Frekvenci mainīt robežās no 100 Hz līdz 200 kHz (vismaz 25 mērījumi) tā, lai iegūtu atkarību no frekvences visos tās apakšdiapazonos, izmantojot logaritmisko mērogu. Strāvu spolē ISP izvēlēties tā, lai ir ērti veikt mērījumu.
 - b. Proporcionāli pārrēķināt sensora spriegumu, kas atbilstu spoles strāvas vērtībai 1 A. Grafiski attēlot lieluma $UM, 1A(f)/f$ atkarību no f , frekvencei lietot logaritmisko mērogu.
 - c. Veikt devēja rezonanses mērījumus, izmantojot signāļģeneratoru ģeneratoru $\Gamma 3-112$. Izskaidrot iegūtās atkarības novirzi no lineāras augsto frekvenču gadījumā.
 - d. Aprēķināt magnētisko lauku spolē pie strāvas $ISP = 1A$ (efektīvā vērtība), izmantojot spoles vijumu skaitu uz garuma vienību $n_{SP} = 1075$ vij./m un formulu bezgalīgi garai spolei, kas izriet no cirkulācijas teorēmas. Koriģēt šo lauka vērtību izmantojot skaitliski aprēķināto (teorētiskajā pamatojumā) lauka vērtību galīgā izmēra eksperimentā lietotai spolei.
 - e. Grafika lineārajā daļā pārbaudīt lieluma $UM, 1A(f)/f$ atbilstību Faradeja indukcijas likumam, izmantojot magnētiskā aprēķināto magnētiskā lauka vērtību, kā inducētā EDS aprēķinus sensoram ar noteiktu šķērsriezuma laukumu SM un sensora vijumu skaitu NM .
 - f. Izmantojot divstaru osciloskopa noteikt fāzu nobīdi starp strāvu spolē un sensora spriegumu pie vairākām frekvencēm un izskaidrot to.

2. Magnētiskā lauka sadalījuma galīga garuma spolē mērīšana.
 - a. Ar doto sensoru izmērīt magnētiskā lauka aksiālās komponentes sadalījumu uz spoles ass visā tās garumā pie frekvences 1 kHz un strāvas spolē 0.4 A (efektīvā vērtība).
 - b. Grafiski salīdzināt izmērīto sadalījumu ar sadalījumu, kas iegūts ar *Mathematica* programmatūru, veicot integrēšanu galīga garuma spolei. Grafikā attēlot arī bezgalīgi garas spoles magnētiskā lauka vērtību.
3. Skinefekta pētīšana alumīnija caurules sienā eksperimentāli nosakot caurules sienas caurlaidību magnētiskajam laukam.
 - a. Izmantojot jūtīgāko magnētiskā lauka sensoru un ievietojot to spoles centrā aksiālā virzienā, uzņemt atkarību no frekvences f (frekvenci mainot robežās no 100 Hz līdz 20 kHz) attiecībai starp sensora divām sprieguma vērtībām: UM, AI - gadījumā, kad spolē ir ievietota alumīnija caurule un UM - gadījumā, kad spolē nav ievietota alumīnija caurule. Tā kā sensora spriegums ir proporcionāls magnētiskā lauka vērtībai, tad attiecība $UM, AI/UM$ ir vienāda ar magnētiskā lauka vērtību attiecību. Strāvu spolē katrai frekvences vērtībai izvēlēties maksimāli iespējamo, ko nodrošina ģenerators.
 - b. Uzņemto atkarību $UM, AI/UM$ no f attēlot grafiski, izmantojot logaritmisko mērogu abās asīm. Atzīmēt grafikā frekvenci, kurai atbilst tāds skinslāņa biezums alumīnijā, kas ir vienāds ar caurules sienas biezumu. Vai pie šīs frekvences var novērot atkarības rakstura izmaiņu?
 - c. Frekvencēm 100 Hz un 1000 Hz noteikt fāzu nobīdi starp strāvu spolē un magnētisko lauku alumīnija caurules iekšpusē spoles centrā, nosakot abu osciloskopa signālu nobīdi (vai arī izmantojot osciloskopa Lisažū figūru režīmu). Salīdzināt rezultātus ar datormodelēšanas rezultātiem.
4. Skinefekta pētīšana feromagnētiskas dzelzs caurules sienā eksperimentāli nosakot magnētiskā lauka plūsmu caurules sienā.
 - a. Ievietojot doto sensoru spoles centrā pārliecināties, ka dzelzs caurules siena nelaiž cauri magnētisko lauku (mērījumu jutības robežās) pie jebkuras pieejamās frekvences 100 Hz līdz 200 kHz.
 - b. Pie frekvencēm 500 Hz un 5000 Hz uzņemt sprieguma UF uz dzelzs caurules uztītajā spolītē atkarību no strāvas spolē, pie 500 Hz strāvu mainīt robežās 0 - 0.3 A (efektīvā vērtība), pie 5000 Hz robežās 0-0.15 A (efektīvā vērtība). Attēlot šo atkarību grafiski.
 - c. Izmantojot elektromagnētiskās indukcijas likumu un spoles uz caurules vijumu skaitu $NF=66$, aprēķināt magnētiskā lauka plūsmu skinslānī, attēlot to grafiski atkarībā no strāvas spolē.
 - d. Izmantojot bezgalīgi garas spoles formulu, aprēķināt spoles radītā magnētiskā lauka indukciju pie dzelzs caurules virsmas, kā arī atbilstošo magnētiskā lauka intensitāti visām strāvas vērtībām.
 - e. Aprēķināt magnētiskai plūsmai skinslānī atbilstošo laukumu, ja plūsmu veidotu magnētiskā lauka indukcija pie dzelzs caurules virsmas. No šī rezultāta novērtēt skinslāņa "gredzena" platumu.
 - f. Aprēķināt dzelzs relatīvo magnētisko caurlaidību visām strāvas vērtībām un attēlot grafiski kā funkciju no magnētiskā lauka intensitātes spolē pie caurules virsmas.
 - g. Izmantojot iegūtās dzelzs relatīvo magnētisko caurlaidības vērtības, aprēķināt skinslāņa biezumu visām strāvas vērtībām un attēlot grafiski kā funkciju no strāvas spolē.
 - h. Mērot strāvu spolē un spriegumu spolītē uz dzelzs caurules un nosakot abu osciloskopa signālu nobīdi (vai arī izmantojot osciloskopa Lisažū figūru

režīmu) noteikt magnētiskās plūsmas feromagnētiskajā skinslānī fāzu nobīdi attiecībā pret spoles magnētisko lauku pie 500 Hz un 5000 Hz, salīdzināt šos rezultātus ar teorētisko vērtību.

Darba piederumi

- Signāļģenerators Г3-33
- Divstaru oscilogrāfs BK PRECISION 2121
- Maiņstrāvas milivoltmets B3-38A
- Cilindriska indukcijas spole ar augstumu $H = 202\text{mm}$, iekšējo diametru $D_{in} = 90\text{mm}$, vijumu skaitu uz garuma vienību 1075, kopējo vijumu skaitu $N_{sp} = 217$.
- Dūralumīnija ($\rho = 4.7 * 10^{-7} (\Omega m)$) caurule ar augstumu $H = 298 (mm)$, ārējo diametru $D_{ex} = 63 (mm)$, sienas biezumu $d = 2 (mm)$.
- Feromagnētiskas ($\rho = 1.0 * 10^{-7} (\Omega m)$) dzelzs caurule ar augstumu $H = 298 (mm)$, ārējo diametru $D_{ex} = 76 (mm)$, sienas biezumu $d = 3 (mm)$. Uz dzelzs ir uzlīmēta mērspole ar 66 vijumiem.
- Magnētiskā lauka sensors ar spoles garumu 20mm : 77 vijumi ar vada diametru $D = 0.25\text{mm}$, šķēsgriezuma laukums 2.3mm x 26.5mm.

Teorijas apskats

Tā kā augstāku frekvenču gadījumā ķermenī inducētā strāva ir galvenokārt pretēja primārajai, tad tās magnētiskais lauks samazina primārās magnētisko lauku. Inducētā strāva var kļūt pat tik liela, ka tās magnētiskais lauks pilnībā kompensē primārās strāvas magnētisko lauku ķermeņa iekšpusē. Tādā gadījumā ķermenī dziļāk iekšpusē nav ne magnētiskā lauka, ne strāvas, un sekundārā strāva plūst tikai šaurā slānī ķermeņa virsmas tiešā tuvumā. Šo slāni sauc par skinslāni. **Rezultējošais magnētiskais lauks arī iespiežas ķermenī tikai šī skinslāņa robežās. Šo efektu sauc par skinefektu.** Ja skinefekts ir stipri izteikts un vadītāja virsma ir plakana, tad gan magnētiskais lauks, gan strāvas blīvums skinslānī attālinoties no vadītāja virsmas dilst eksponenciāli, pie kam var analītiski izvest, ka šie lielumi būs e reizes samazinājušies attālumā no virsmas

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

σ – ķermeņa vadītspēja,

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

μ – relatīvā magnētiskā caurlaidība

f – frekvence

Darba dati un to apstrāde

- 1.daļa

Tabula 1

f, Hz	Δf , Hz	I_S , A	ΔI_S , A	U_M , mV	ΔU_M , mV	U, mV	ΔU , mV
100	1	0.4800	0.0120	3.8	0.1	7.9	0.3
200	2	0.4700	0.0118	7.5	0.2	16.0	0.6
400	4	0.4400	0.0110	12.6	0.3	28.6	1.0
800	8	0.3400	0.0085	19.8	0.5	58.2	2.1
1600	16	0.2100	0.0053	25.2	0.6	120.0	4.2
3200	32	0.1700	0.0043	44.0	1.1	258.8	9.2
5000	50	0.1020	0.0026	45.0	1.1	441.2	15.6
12000	120	0.1140	0.0029	114.0	2.9	1000.0	35.4
24000	240	0.0540	0.0014	111.0	2.8	2055.6	72.7
48000	480	0.0280	0.0007	111.0	2.8	3964.3	140.2
100000	1000	0.0090	0.0002	120.0	3.0	13333.3	471.4
200000	2000	0.0138	0.0003	141.0	3.5	10217.4	361.2

Tabula 2

f, Hz	Δt , s	φ , deg
100	-2.7E-03	-97
400	-7.0E-04	-101
1600	-1.6E-04	-92
5000	-5.6E-05	-101
24000	-1.1E-05	-95
100000	-2.8E-06	-101
200000	9.0E-07	65

Tabula 3 frekvences, strāvas un sprieguma relatīvās kļūdas

r_f	1%
r_I	2.50%
r_U	2.50%

Visas kļūdas tiek aprēķinātas izmantojot relatīvo kļūdu saskaitīšanas metodi.

Kļūdas tiek iegūtas no aprātu aprakstiem (skat. izmantotā literatūra).

Tabula 4

U/f, V/Hz	ΔU/f, V/Hz	B _{exp} , T	ΔB _{exp} , T
7.92E-05	2.9E-06	2.497E-09	9.17E-11
7.98E-05	2.9E-06	2.516E-09	9.25E-11
7.16E-05	2.6E-06	2.258E-09	8.30E-11
7.28E-05	2.7E-06	2.296E-09	8.44E-11
7.50E-05	2.8E-06	2.365E-09	8.69E-11
8.09E-05	3.0E-06	2.551E-09	9.37E-11
8.82E-05	3.2E-06	2.783E-09	1E-10
8.33E-05	3.1E-06	2.628E-09	9.66E-11
8.56E-05	3.1E-06	2.701E-09	9.92E-11
8.26E-05	3.0E-06	2.605E-09	9.57E-11
1.33E-04	4.9E-06	4.205E-09	1.55E-10
5.11E-05	1.9E-06	1.611E-09	5.92E-11

Magnētiskā lauka vērtības tika pārveidotas pret datormodelēšanā izmantoto strāvas vērtību.

$$B_{exp} = \frac{U_M}{2 \pi f S_M N_M} \frac{I_{dat}}{I_S}$$

$$I_{dat} = \frac{j}{N} = \frac{(1 \cdot 10^{-3})}{1075} = 9.3 \cdot 10^{-7} \text{ (A)} - \text{datormodelēšanas vērtība}$$

$$N_M = 77 - \text{mērspoles vijumi}$$

$$S_M = 60.95 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2\text{)} - \text{mērspoles laukums}$$

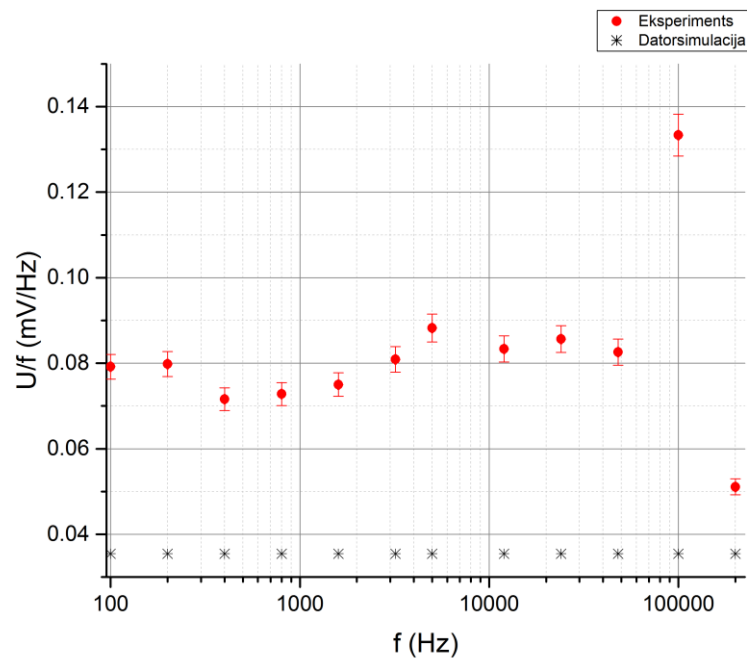
Tika aprēķināta datorsimulācijas $\frac{U_m}{f}$ attiecība pret vienu ampēru

$$\frac{U_m}{f} = 2 \pi B_{dat} S_M \frac{N_M}{I_{dat}}$$

Datorsimulācijā izmantotā magnētiskā lauka indukcija

$$B_{dat} = 1.18 \cdot 10^{-9} \text{ (T)}$$

$$\left(\frac{U_m}{f} \right)_{dat} = 3.54 \cdot 10^{-5} \left(\frac{V}{Hz} \right)$$

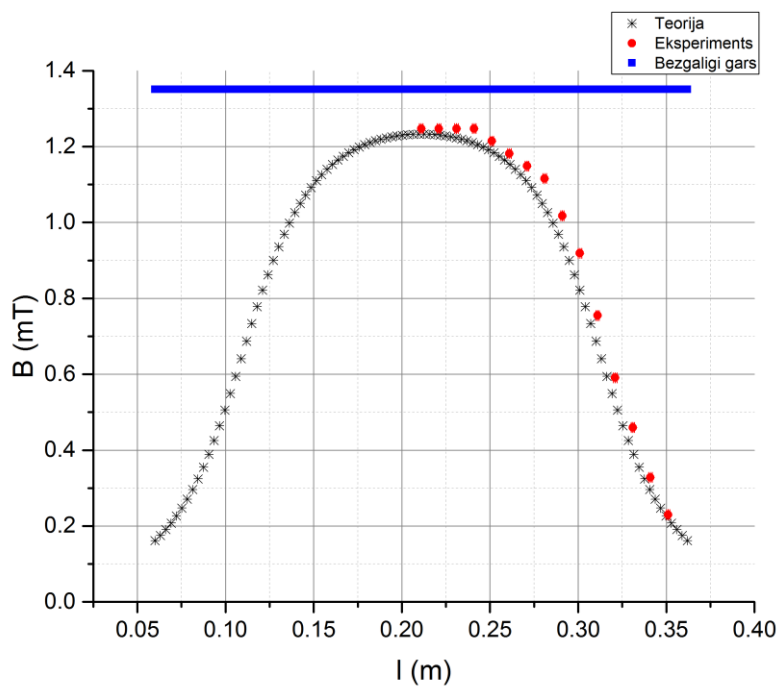


Grafiks 1

- 2.daļa

Tabula 5 Šeit tika l pārveidots lai sakristu koordināte ar Mathematica izmantoto, jo mērījumi tika sākti no centra ar koordināti $l = 0$.

l, m	U_M, V	$\Delta U_M, \text{V}$	f, Hz	B_{exp}, T	$\Delta B_{\text{exp}}, \text{T}$
0.211	0.0380	0.0010	1033.2	1.25E-03	3.4E-05
0.221	0.0380	0.0010		1.25E-03	3.4E-05
0.231	0.0380	0.0010		1.25E-03	3.4E-05
0.241	0.0380	0.0010		1.25E-03	3.4E-05
0.251	0.0370	0.0009		1.21E-03	3.3E-05
0.261	0.0360	0.0009		1.18E-03	3.2E-05
0.271	0.0350	0.0009		1.15E-03	3.1E-05
0.281	0.0340	0.0009		1.12E-03	3.0E-05
0.291	0.0310	0.0008		1.02E-03	2.7E-05
0.301	0.0280	0.0007		9.2E-04	2.5E-05
0.311	0.0230	0.0006		7.5E-04	2.0E-05
0.321	0.0180	0.0005		5.9E-04	1.6E-05
0.331	0.0140	0.0004		4.6E-04	1.2E-05
0.341	0.0100	0.0003		3.3E-04	9E-06
0.351	0.0070	0.0002		2.3E-04	6E-06



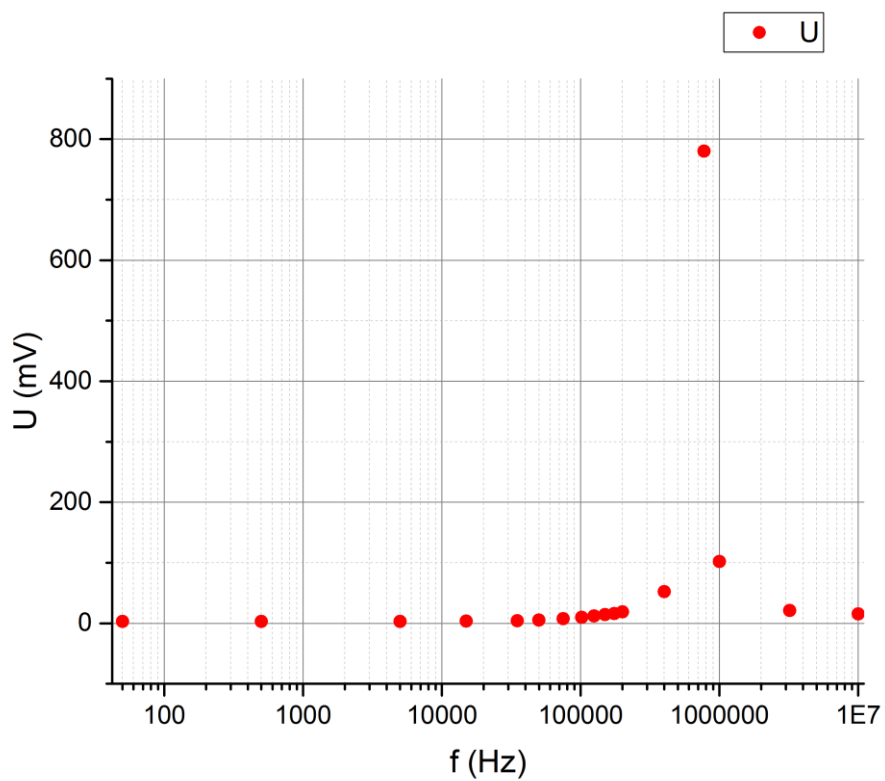
Grafiks 2 Lauka sadalījums atkarībā no attāluma, kā teorija tika izmantoti datorsimulācijas rezultāti

Lauks bezgalīgi garai spolei tika aprēķināts ar :

$$B = \mu_0 N I_{apr} = 1.351 * 10^{-3} \text{ (T)}$$

Tabula 6

f, Hz	U , mV
50	3.0
500	3.0
5000	3.0
15000	3.2
35000	4.3
50000	5.4
75000	7.4
102000	9.8
125000	12.0
150000	14.0
175000	16.0
200000	19.0
400000	52.0
773000	780.0
1000000	102.0
3200000	21.0
10000000	15.6



Grafiks 3 Devēja sprieguma atkarība no frekvences (LC kontūrs) redzams, ka pie 77300 hz ir pīķis

- 3.daļa

Tabula 7

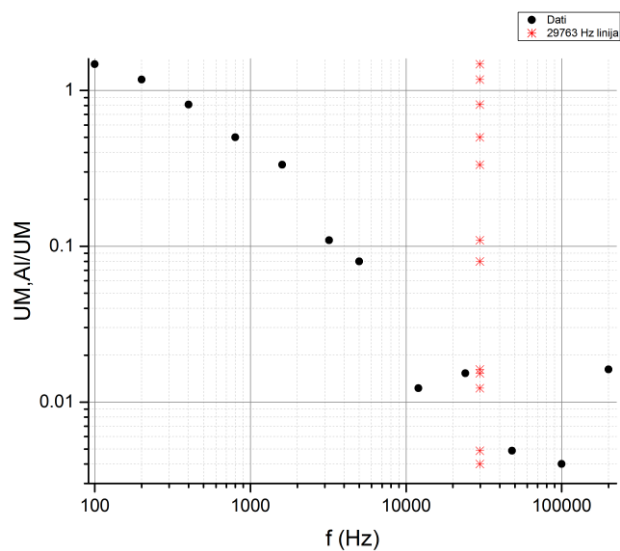
f, Hz	I _s , A	U _M , mV	I _{Al} , A	U _{M,Al} , mV	U _{M,Al} /U _M	Δ(U _{M,Al} /U _M)
100	0.48	3.8	0.66	5.6	1.4737	0.0521
200	0.47	7.5	0.64	8.8	1.1733	0.0415
400	0.44	12.6	0.6	10.2	0.8095	0.0286
800	0.34	19.8	0.54	9.9	0.5000	0.0177
1600	0.21	25.2	0.42	8.4	0.3333	0.0118
3200	0.17	44	0.26	4.8	0.1091	0.0039
5000	0.102	45	0.174	3.6	0.0800	0.0028
12000	0.114	114	0.072	1.4	0.0123	0.0004
24000	0.054	111	0.096	1.7	0.0153	0.0005
48000	0.028	111	0.048	0.54	0.0049	0.0002
100000	0.009	120	0.022	0.48	0.0040	0.0001
200000	0.0138	141	0.004	2.28	0.0162	0.0006

Tabula 8

f, Hz	Δt, s	φ, deg
1000	-0.00049	-176.4
100	-0.0035	-126

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0 f \sigma}} \rightarrow f = \frac{1}{\delta^2 \pi \mu_0 \sigma}, \sigma = \frac{1}{4.7 * 10^{-7}} \left(\frac{S}{m} \right)$$

$$f = \frac{4.7 * 10^{-7}}{4\pi^2 * 10^{-7} * (0.002)^2} = 29763 \text{ (Hz)}$$

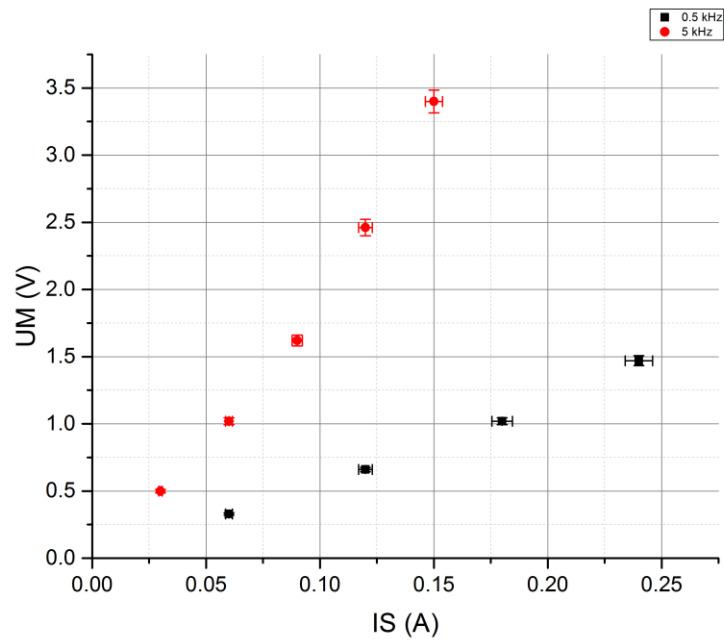


Grafiks 4 Var redzēt ka pie 29763 Hz frekvences mainās nomērītā sprieguma sakarība.

- 4.daļa

Tabula 9

f, Hz	I _s , A	U _f , V	Φ, Wb	ΔΦ, Wb	H, A/m	ΔH, A/m
500	0.06	0.33	1.59E-06	4.3E-08	64.5	1.6
	0.12	0.66	3.18E-06	8.6E-08	129.0	3.2
	0.18	1.02	4.92E-06	1.3E-07	193.5	4.8
	0.24	1.47	7.09E-06	1.9E-07	258.0	6.5
5000	0.03	0.50	2.41E-07	6.5E-09	32.3	0.8
	0.06	1.02	4.92E-07	1.3E-08	64.5	1.6
	0.09	1.62	7.81E-07	2.1E-08	96.8	2.4
	0.12	2.46	1.19E-06	3.2E-08	129.0	3.2
	0.15	3.40	1.64E-06	4.4E-08	161.3	4.0



Grafiks 5

$$\Phi = \frac{U_f}{2\pi * f * N_F}$$

$$H = n * I_s$$

$$N_F = 66$$

Tabula 10

f, Hz	B, T	S, m ²	d, m	Δd, m	μ	Δμ
500	8.1E-05	0.020	0.0822	0.0029	133.5	6.8
	1.6E-04	0.020	0.0822	0.0029	133.5	6.8
	2.4E-04	0.020	0.0847	0.0030	141.7	7.2
	3.2E-04	0.022	0.0916	0.0032	165.6	8.4
5000	4.1E-05	0.006	0.0249	0.0008	122.6	6.3
	8.1E-05	0.006	0.0254	0.0009	127.5	6.5
	1.2E-04	0.006	0.0269	0.0010	143.0	7.3
	1.6E-04	0.007	0.0307	0.0011	185.5	9.5
	2.0E-04	0.008	0.0339	0.0012	226.8	11.6

$$d = \frac{S}{\pi D_F}$$

d – cilindra biezums

$$D_F = 0.076 \text{ (m)}$$

$$S = \frac{\Phi}{B}$$

$$B = \mu_0 * H$$

$$\mu = S^2 \frac{\mu_0 * f * \sigma}{\pi * D_F^2}$$

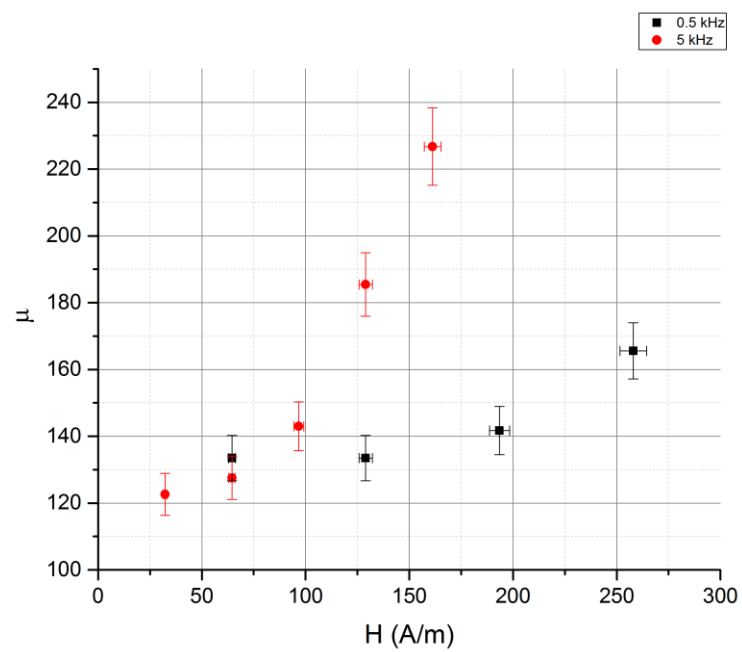
$$\delta_{Fe} = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0 \mu f \sigma}}$$

Tabula 11

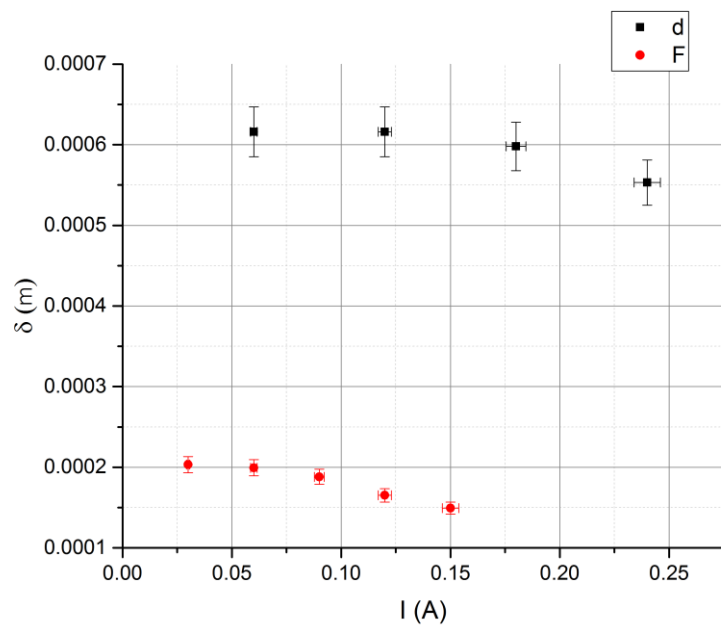
f, Hz	Δt, s	φ, deg	δ _{Fe} , m	Δ(δ _{Fe}), m	φ _{teor} , deg
500	-0.00072	-129.6	6.16E-04	3.10E-05	-279.0
			6.16E-04	3.10E-05	-279.0
			5.98E-04	3.00E-05	-287.5
			5.53E-04	2.80E-05	-310.7
5000	-0.000076	-136.8	2.03E-04	1.00E-05	-234.4
			1.99E-04	1.00E-05	-217.5
			1.88E-04	9.40E-06	-166.8
			1.65E-04	8.30E-06	-40.0
			1.49E-04	7.50E-06	-290.0

$$\varphi_{teor} = -\frac{180}{\pi} \frac{b}{d}$$

$b = 0.003 \text{ (m)}$ – caurules sienas biezums



Grafiks 6



Grafiks 7 Ar sarkano – 5000 (Hz) , Ar melno – 500 (Hz)

Secinājumi

Pēc 1. grafika ir redzams, ka sprieguma un frekvences atkarība nav tāda kā teorētiski paredzēta un atšķirība ir divreiz lielāka. Atšķirība neietilpst kļūdas robežās. Iespēj

2.grafikā ir redzams, ka eksperimentā nomērītais magnētiskā lauka sadalījums uz spoles ass labi sakrīt ar datormodelēšanas rezultātu.

No 3. grafika redzams, ka devējs veido LC kontūru un notiek rezonanse veidojas rezonanse. Tas izskaidro, kāpēc fāzu nobīde maina zīmi pēc frekvences 100000 Hz.

No 4. grafika var redzēt, ka pieaugot frekvencei spriegums uz sensora alumīnija caurules samazinās salīdzinot ar gadījumu bez caurules. Tātad arī magnētiskais lauks samazinās alumīnija caurules gadījumā, jo lauks proporcionāls spriegumam. Pie skinslāņa frekvences ir izteikta izmaiņa grafikā.

No 10. tabulas redzams, ka materiāla relatīvā magnētiskā caurlaidība sanāk aptuveni 100-200, kas ir par kārtu mazāk nekā vajadzētu būt. Jaatzīmē, ka magnētiskā caurlaidība ir ļoti atkarīga no tā kāds dzelzs sakausējums tiek izmantots cilindram. 99.8 % tīram dzelzs materiālam $\mu = 5000$. Iespējams, ka materiāls kaut kādā veidā ticis demagnetizēts.

7.grafikā redzams, ka skinslānis samazinās atkarībā no strāvas spolē un ir mazāks pie lielākas frekvences.

Izmantotā literatūra

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