

Teorētiskais pamatojums:

Ja vadošu ķermeni ievieto ārējā magnētiskajā laukā, kas ķermenī inducē virpuļstrāvas, vai arī, ja pa ķermeni laiž maiņstrāvu, tad augstāku frekvenču gadījumā gan strāva, gan magnētiskais lauks ķermenī ir lokalizēts tikai ķermeņa virsmas tiešā tuvumā, ķermeņa dziļumā nav ne magnētiskā lauka, ne elektriskās strāvas. Šo parādību sauc par skinefektu.

Elektrodzinējspēks, kas darbojas kādā vadoša materiāla noslēgtā kontūrā L , cauri kuram uzstieptajai virsmai magnētiskā lauka plūsma mainās laikā, tiek aprakstīts ar Faradeja likumu: $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$. Šī virpuļainā elektriskā neelektrostatiskās dabas elektriskā lauka cirkulācija nav vienāda ar nulli, jo ir vienāda ar EDS dotajā kontūrā. Tāpēc šis lauks nav potenciāls lauks, un tā lauka līnijas ir noslēgtas. No eksperimentālajiem faktiem arī izriet, ka, lai rastos virpuļainais elektriskais lauks, nebūt nav nepieciešama vadoša materiāla noslēgta kontūra klātbūtne, proti, šis elektriskais lauks rodas telpā, ja telpā laikā mainās magnētiskais lauks.

Ja mainīgā magnētiskā laukā, ko rada kāda spole, kurā plūst maiņstrāva, ko sauksim par primāro strāvu, ievieto masīvu vadošu ķermeni, tad tajā inducētais virpuļainais elektriskais lauks izraisīs sekundārās strāvas, kurām atbilstošie elektriskās strāvas tilpuma blīvuma vektori \mathbf{j} arī būs ar virpuļainu raksturu, un atbilstošās strāvas līnijas būs noslēgtas vadošā ķermeņa iekšpusē. Bez tam, vadošais ķermenis var sajūst atgrūšanās spēku no spoles, jo augstāku frekvenču gadījumā inducētās strāvas vadošajā ķermenī kopumā ir katrā laika momentā pretēji vērstas kā strāvas spolē.

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.

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:

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

ko sauc par skinslāņa biezumu. Skinefekts ir izteikts, ja skinslāņa biezums ir mazāks par ķermeņa izmēru.

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 U_M atkarību no spoles strāvas frekvences f , izmantojot ģeneratoru Γ3-33. 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 1A. Grafiski attēlot lieluma $U_{M,1A}(f)/f$ atkarību no f , frekvencei lietot logaritmisko mērogu.
 - c) Veikt devēja rezonanses mērījumus, izmantojot signāļģeneratoru Γ 3-112. Izskaidrot iegūtās atkarības novirzi no lineāras augsto frekvenču gadījumā.
 - d) Aprēķināt magnētisko lauku spolē pie strāvas $I_{SP}=1A$ (efektīvā vērtība), izmantojot spoles vijumu skaitu uz garuma vienību $n_{SP}=1075$ vij./m un formulu bezgalīgi garai

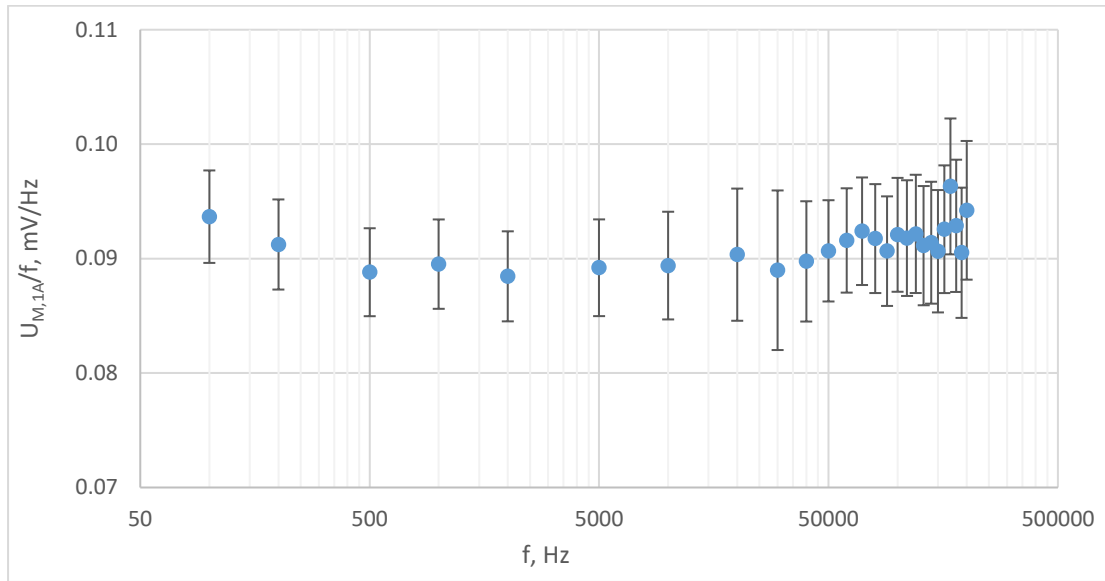
- spolei, kas izriet no cirkulācijas teorēmas. Koriģēt šo lauka vērtību izmantojot skaitliski aprēķināto (teorētiskajā pamatojumā) lauka vērtību galīga izmēra eksperimentā lietotai spolei,
- e) Grafika lineārajā daļā pārbaudīt lieluma $U_{M,1A}(f)/f$ atbilstību Faradeja indukcijas likumam, izmantojot magnētiskā aprēķināto magnētiskā lauka vērtību, kā inducētā EDS aprēķinus sensoram ar noteiktu šķēsgriezuma laukumu SM un sensora vijumu skaitu N_M .
 - 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: $U_{M,AI}$ - gadījumā, kad spolē ir ievietota alumīnija caurule un U_M - gadījumā, kad spolē nav ievietota alumīnija caurule. Tā kā sensora spriegums ir proporcionāls magnētiskā lauka vērtībai, tad attiecība $U_{M,AI}/U_M$ ir vienāda ar magnētiskā lauka vērtību attiecību. Strāvu spolē katrai frekvences vērtībai izvēlēties maksimāli iespējamo, ko nodrošina ģenerators.
 - b) Uzņemto atkarību $U_{M,AI}/U_M$ 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 pārlicināties, 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 uztītājā 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 $N_F = 66$, 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.

Mērījumu rezultāti un datu apstrāde:

Tabula 1. Magnētiskā lauka sensora pārbaude.

Nr. p.k.	f , kHz	I_{SP} , A	ΔI_{SP} , A	U_M , mV	ΔU_M , mV	$U_{M,1A}$, mV	$U_{M,1A}/f$, mV/Hz	$\Delta U_{M,1A}/f$, mV/Hz	$\Delta\varphi$ $\pm 2, ^\circ$
1	0.1	1.010	0.031	9.5	0.3	9.4	0.094	0.004	110
2	0.2	0.981	0.030	17.9	0.5	18.2	0.091	0.004	90
3	0.5	0.840	0.026	37.3	1.1	44.4	0.089	0.004	87
4	1	0.601	0.019	53.8	1.6	89.5	0.090	0.004	90
5	2	0.355	0.012	62.8	1.9	176.9	0.088	0.004	86
6	5	0.150	0.006	66.9	2.0	446.0	0.089	0.004	89
7	10	0.075	0.003	67.4	2.0	893.9	0.089	0.005	90
8	20	0.038	0.002	68.3	2.0	1806.9	0.090	0.006	86
9	30	0.024	0.002	63.0	1.9	2669.5	0.089	0.007	90
10	40	0.049	0.002	177.0	5.3	3590.3	0.090	0.005	90
11	50	0.118	0.005	535.0	16.1	4533.9	0.091	0.004	84
12	60	0.103	0.004	566.0	17.0	5495.1	0.092	0.005	92
13	70	0.090	0.004	584.0	17.5	6467.3	0.092	0.005	84
14	80	0.081	0.003	596.0	17.9	7339.9	0.092	0.005	88
15	90	0.074	0.003	607.0	18.2	8158.6	0.091	0.005	84
16	100	0.067	0.003	616.0	18.5	9207.8	0.092	0.005	83
17	110	0.062	0.003	624.0	18.7	10097.1	0.092	0.005	87
18	120	0.058	0.003	637.0	19.1	11059.0	0.092	0.005	85
19	130	0.054	0.003	635.0	19.1	11847.0	0.091	0.005	84
20	140	0.050	0.003	641.0	19.2	12794.4	0.091	0.005	87
21	150	0.048	0.002	654.0	19.6	13596.7	0.091	0.005	85
22	160	0.045	0.002	665.0	20.0	14810.7	0.093	0.006	83
23	170	0.042	0.002	686.0	20.6	16372.3	0.096	0.006	80
24	180	0.041	0.002	682.0	20.5	16715.7	0.093	0.006	78
25	190	0.040	0.002	681.0	20.4	17197.0	0.091	0.006	78
26	200	0.037	0.002	701.0	21.0	18844.1	0.094	0.006	76



Attēls 1. Magnētiskā lauka sensora pārbaude.

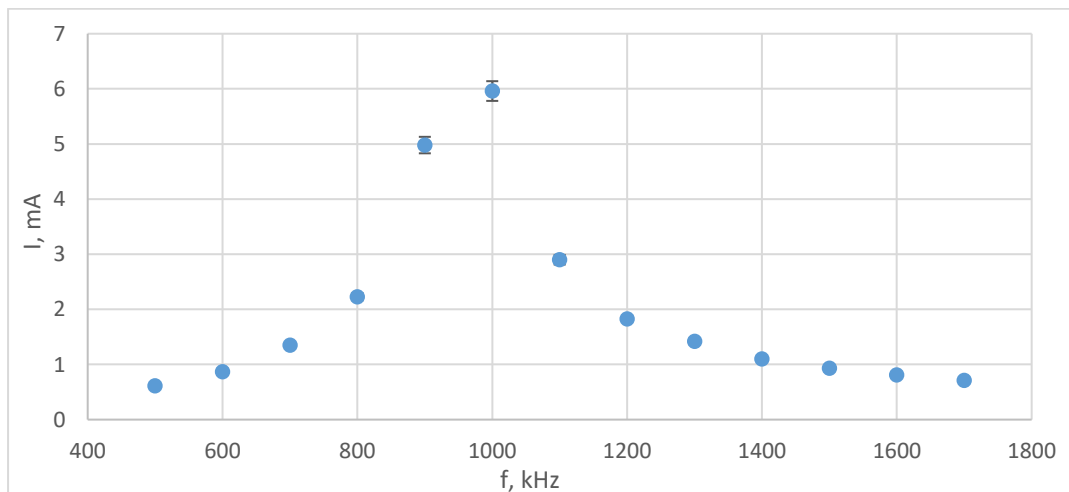
$$B_{SP} = 0.89 n_{SP} I_{SP} \mu_0 = 0.89 n_{SP} I_{SP} \mu_0 = 0.89 \cdot 1075 \cdot 1 \cdot \mu_0 = 1.20 \text{ mT}$$

$$U_{M,1A}/f_{\text{teorētiski}} = 2\pi B_{SP} S_M N_M = 2\pi \cdot 1.2 \cdot 10^{-3} \cdot 6.625 \cdot 10^{-5} \cdot 154$$

$$= 0.077 \text{ mV/Hz}$$

Tabula 2. Devēja rezonanses mērījumi.

f, kHz	$I, \text{mA} \pm 3\%$	f, kHz	$I, \text{mA} \pm 3\%$
500	0.61	1200	1.83
600	0.87	1300	1.42
700	1.35	1400	1.10
800	2.23	1500	0.93
900	4.98	1600	0.81
1000	5.96	1700	0.71
1100	2.90		



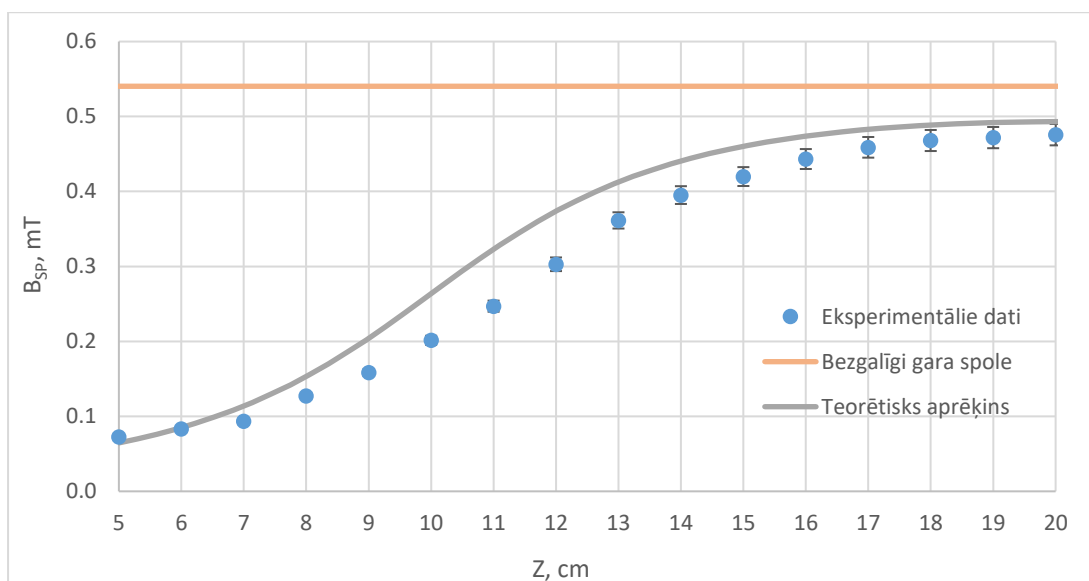
Attēls 2. Devēja rezonanses mērījumi.

Tabula 3. Magnētiskā lauka sadalījums uz spoles ass, $I_{SP} = 0.4 \text{ A}$, $f = 1 \text{ kHz}$.

Nr. p. k.	$Z \pm 0.2$, cm	U_M , mV	ΔU_M , mV	$U_{M,0.001A/m}$, mV	B_{SP} , mT	ΔB_{SP} , mT	$B_{SP\infty}$, mT
1	20	36.6	1.1	0.031	0.476	0.014	0.540
2	19	36.3	1.1	0.030	0.472	0.014	
3	18	36.0	1.1	0.030	0.468	0.014	
4	17	35.3	1.1	0.029	0.459	0.014	
5	16	34.1	1.0	0.028	0.443	0.013	
6	15	32.3	1.0	0.027	0.420	0.013	
7	14	30.4	0.9	0.025	0.395	0.012	
8	13	27.8	0.8	0.023	0.361	0.011	
9	12	23.3	0.7	0.019	0.303	0.009	
10	11	19.0	0.6	0.016	0.247	0.007	
11	10	15.5	0.5	0.013	0.201	0.006	
12	9	12.2	0.4	0.010	0.159	0.005	
13	8	9.8	0.3	0.008	0.127	0.004	
14	7	7.2	0.2	0.006	0.094	0.003	
15	6	6.4	0.2	0.005	0.083	0.002	
16	5	5.6	0.2	0.005	0.073	0.002	

Aprēķinu piemērs:

$$B_{SP_1} = \frac{U_{M,0.001A/m}}{2\pi f S_M N_M} = \frac{0.031/1000}{2\pi \cdot 1000 \cdot 6.625 \cdot 10^{-5} \cdot 154} = 0.476 \text{ mT}$$



Attēls 3. Magnētiskā lauka sadalījums uz spoles ass.

Tabula 4. Alumīnija caurules sienas magnētiskā lauka caurlaidība atkarībā no lauka frekvences.

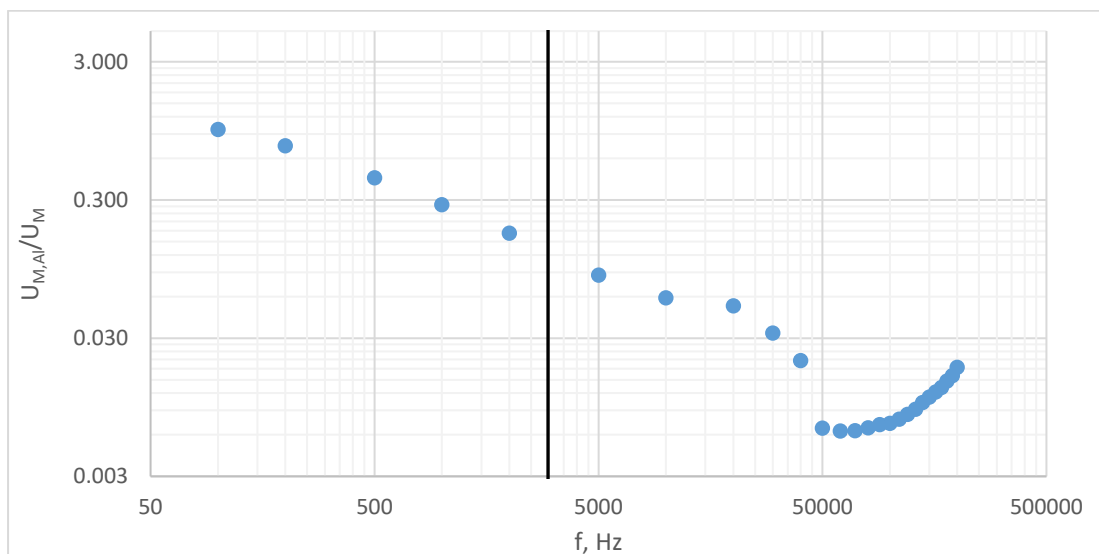
Nr. p. k.	f, kHz	$U_{M,Al}, \text{mV}$	$\Delta U_{M,Al}, \text{mV}$	U_M, mV	$\Delta U_M, \text{mV}$	$U_{M,Al} / U_M$	$\Delta U_{M,Al} / U_M$
1	0.1	9.15	0.27	9.5	0.3	0.9672	0.0410
2	0.2	13.20	0.40	17.9	0.5	0.7374	0.0313
3	0.5	16.20	0.49	37.3	1.1	0.4343	0.0184
4	1	14.90	0.45	53.8	1.6	0.2770	0.0118
5	2	10.80	0.32	62.8	1.9	0.1720	0.0073
6	5	5.74	0.17	66.9	2.0	0.0858	0.0036
7	10	3.95	0.12	67.4	2.0	0.0586	0.0025
8	20	3.50	0.11	68.3	2.0	0.0512	0.0022
9	30	2.05	0.06	63.0	1.9	0.0325	0.0014
10	40	3.64	0.11	177.0	5.3	0.0206	0.0009
11	50	3.58	0.11	535.0	16.1	0.0067	0.0003
12	60	3.60	0.11	566.0	17.0	0.0064	0.0003
13	70	3.75	0.11	584.0	17.5	0.0064	0.0003
14	80	4.00	0.12	596.0	17.9	0.0067	0.0003
15	90	4.30	0.13	607.0	18.2	0.0071	0.0003
16	100	4.46	0.13	616.0	18.5	0.0072	0.0003
17	110	4.85	0.15	624.0	18.7	0.0078	0.0003
18	120	5.36	0.16	637.0	19.1	0.0084	0.0004
19	130	5.81	0.17	635.0	19.1	0.0091	0.0004
20	140	6.56	0.20	641.0	19.2	0.0102	0.0004
21	150	7.33	0.22	654.0	19.6	0.0112	0.0005
22	160	8.13	0.24	665.0	20.0	0.0122	0.0005
23	170	9.02	0.27	686.0	20.6	0.0131	0.0006
24	180	9.99	0.30	682.0	20.5	0.0146	0.0006
25	190	10.90	0.33	681.0	20.4	0.0160	0.0007
26	200	12.90	0.39	701.0	21.0	0.0184	0.0008

Fāzu nobīde pie 100 Hz: 80° (datormodelēšanas rezultāts: -26°)

Fāzu nobīde pie 1000 Hz: 15° (datormodelēšanas rezultāts: -84°)

Alumīnija caurules biezuma skinslānim atbilstošā frekvence:

$$f_{dAl} = \frac{1}{d^2 \pi \mu_0 \sigma} = \frac{1}{(2/1000)^2 \pi \mu_0 \cdot 10^8 / 4.7} = 2976 \text{ Hz}$$



Attēls 4. Alumīnija caurules sienas magnētiskā lauka caurlaidība atkarībā no lauka frekvences.

Tabula 5. Mērspoles sprieguma atkarība no strāvas indukcijas spolē pie $f=500$ Hz un aprēķini.

Nr. p. k.	I_{SP} , mA	U_F , mV	Φ , μWb	B_{SP} , μT	S_{bezFe} , cm^2	d_{gredz} , mm	H_{SP} , A/m	μ	δ , mm
1	45.4	208	1.00	61	163.6	68.5	48.8	92.6	0.740
2	79.2	406	1.96	107	183.0	76.7	85.1	116.0	0.661
3	101.0	514	2.48	136	181.7	76.1	108.6	114.3	0.666
4	153.0	826	3.98	207	192.7	80.7	164.5	128.6	0.628
5	179.0	1010	4.87	242	201.4	84.4	192.4	140.5	0.600
6	200.0	1140	5.50	270	203.5	85.2	215.0	143.4	0.594
7	224.0	1300	6.27	303	207.2	86.8	240.8	148.7	0.584
8	249.0	1500	7.23	336	215.1	90.1	267.7	160.2	0.562
9	275.0	1680	8.10	371	218.1	91.3	295.6	164.7	0.555
10	302.0	1880	9.07	408	222.2	93.1	324.7	171.0	0.544

Aprēķinu piemēri:

$$\phi_1 = \frac{U_F}{2\pi f N_F} = \frac{208/1000}{2\pi \cdot 500 \cdot 66} = 1 \mu Wb$$

$$B_{SP_1} = \mu_0 n_{SP} I_{SP} = \mu_0 \cdot 1075 \cdot 45.4/1000 = 61 \mu T$$

$$S_{bezFe_1} = \phi_1 / B_{SP_1} = 1/61 = 163.6 cm^2$$

$$d_{gredz_1} = S_{bezFe_1} / (2\pi R_{Fe}) = 163.6 / (10000 \cdot 2\pi \cdot 76/2000) = 68.5 mm$$

$$H_{SP_1} = B_{SP_1} / \mu_0 = 61 / (1000000 \mu_0) = 48.8 A/m$$

$$\mu_1 = \frac{\phi_1^2 \mu_0 f \sigma}{B_{SP}^2 4\pi R_{Fe}^2} = \frac{1^2 \mu_0 \cdot 500 \cdot 10^7}{61^2 \cdot 4\pi \cdot (76/2000)^2} = 92.6$$

Tabula 6. Kļūdu aprēķins mērspoles sprieguma atkarībai no strāvas indukcijas spolē pie $f=500$ Hz.

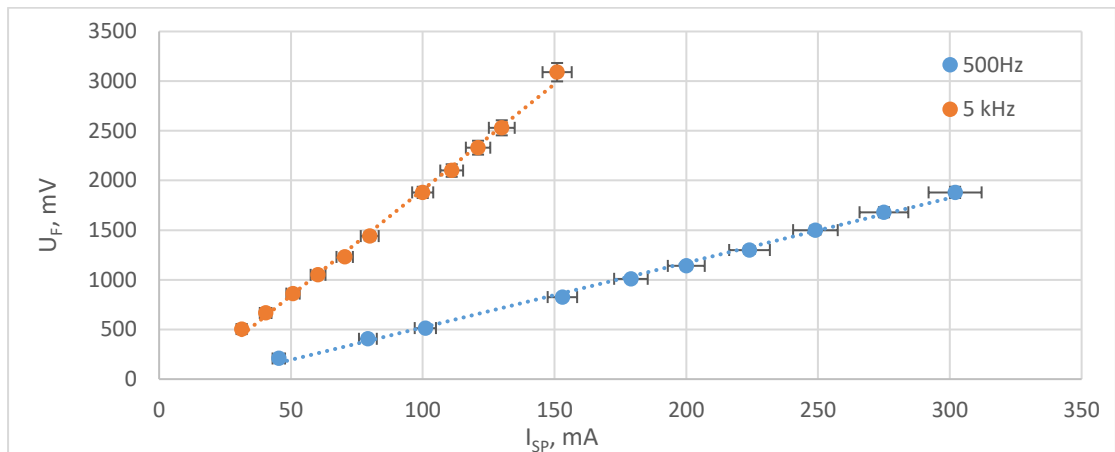
Nr. p. k.	ΔI_{SP} , mA	ΔU_F , mV	$\Delta \Phi$, μWb	ΔB_{SP} , μT	ΔS_{bezFe} , cm^2	Δd_{gredz} , mm	ΔH_{SP} , A/m	$\Delta \mu$	$\Delta \delta$, mm
1	2.4	6	0.03	3	9.8	4.1	2.5	7.9	0.031
2	3.4	12	0.06	5	9.5	4.0	3.6	8.5	0.024
3	4.0	15	0.07	5	9.1	3.8	4.3	8.1	0.024
4	5.6	25	0.12	8	9.1	3.8	6.0	8.6	0.021
5	6.4	30	0.15	9	9.4	3.9	6.8	9.2	0.020
6	7.0	34	0.16	9	9.4	3.9	7.5	9.3	0.019
7	7.7	39	0.19	10	9.5	4.0	8.3	9.6	0.019
8	8.5	45	0.22	11	9.8	4.1	9.1	10.3	0.018
9	9.3	50	0.24	12	9.8	4.1	9.9	10.5	0.018
10	10.1	56	0.27	14	10.0	4.2	10.8	10.8	0.017

Tabula 7. Mērspoles sprieguma atkarība no strāvas indukcijas spolē pie $f=5$ kHz un aprēķini.

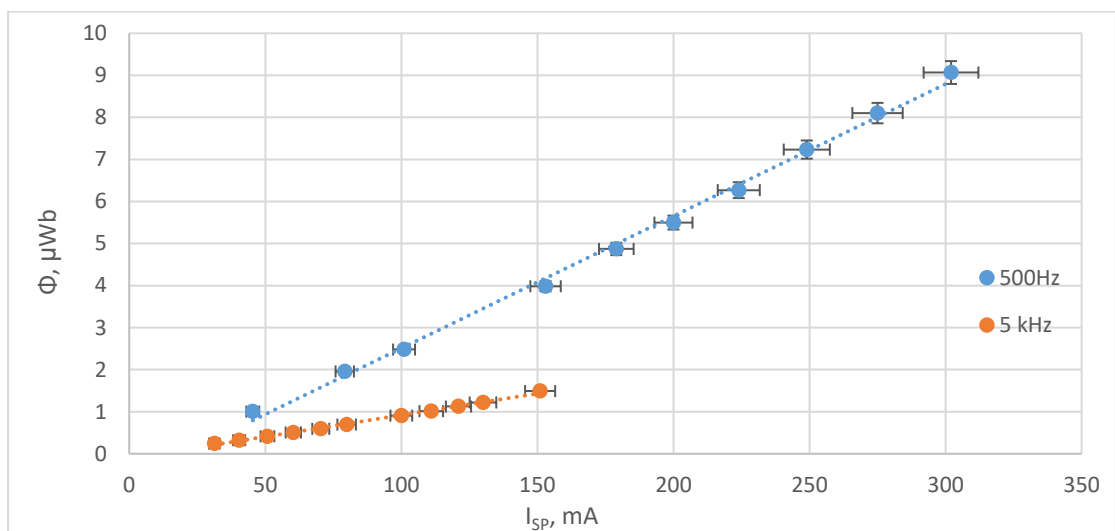
Nr. p. k.	I_{SP} , mA	U_F , mV	Φ , μWb	B_{SP} , μT	S_{bezFe} , cm^2	d_{gredz} , mm	H_{SP} , A/m	μ	δ , mm
1	31.3	504	0.243	42.3	57.5	24.1	33.6	114.4	0.210
2	40.4	666	0.321	54.6	58.9	24.7	43.4	119.9	0.206
3	50.8	861	0.415	68.6	60.5	25.3	54.6	126.8	0.200
4	60.3	1050	0.506	81.5	62.2	26.0	64.8	133.8	0.195
5	70.4	1230	0.593	95.1	62.4	26.1	75.7	134.7	0.194
6	79.9	1440	0.694	107.9	64.3	26.9	85.9	143.4	0.188
7	100.0	1880	0.907	135.1	67.1	28.1	107.5	156.0	0.180
8	111.0	2100	1.013	149.9	67.5	28.3	119.3	158.0	0.179
9	121.0	2330	1.124	163.5	68.7	28.8	130.1	163.7	0.176
10	130.0	2530	1.220	175.6	69.5	29.1	139.8	167.2	0.174
11	151.0	3090	1.490	204.0	73.1	30.6	162.3	184.8	0.166

Tabula 8. Kļūdu aprēķins mērspoles sprieguma atkarībai no strāvas indukcijas spolē pie $f=5$ kHz.

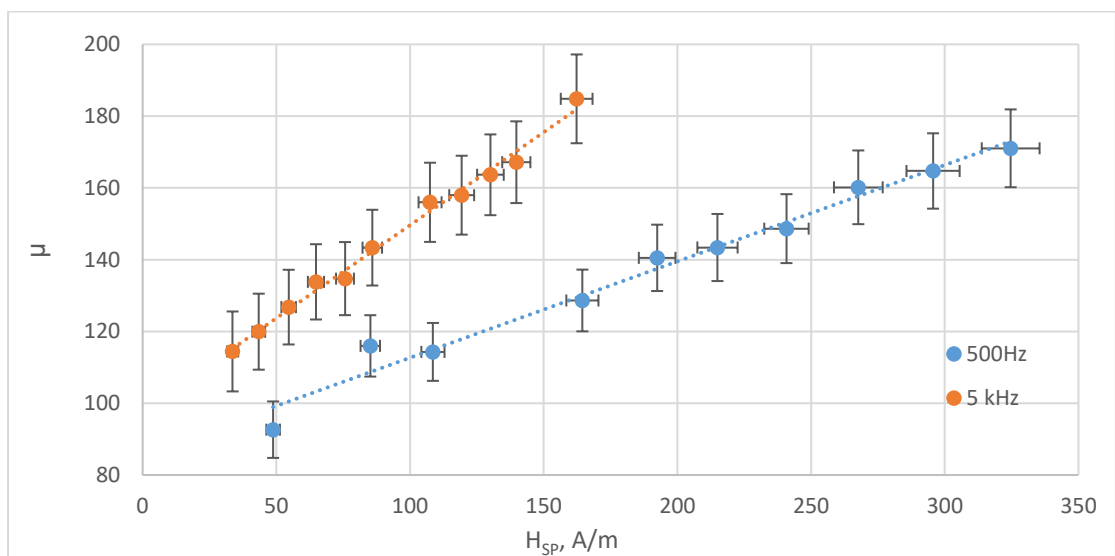
Nr. p. k.	ΔI_{SP} , mA	ΔU_F , mV	$\Delta \Phi$, μWb	ΔB_{SP} , μT	ΔS_{bezFe} , cm^2	Δd_{gredz} , mm	ΔH_{SP} , A/m	$\Delta \mu$	$\Delta \delta$, mm
1	1.9	15	0.007	2.6	4.0	1.7	2.1	11.1	0.010
2	2.2	20	0.010	3.0	3.7	1.5	2.4	10.6	0.009
3	2.5	26	0.012	3.4	3.5	1.5	2.7	10.4	0.008
4	2.8	32	0.015	3.8	3.4	1.4	3.0	10.5	0.008
5	3.1	37	0.018	4.2	3.3	1.4	3.3	10.2	0.007
6	3.4	43	0.021	4.6	3.3	1.4	3.7	10.5	0.007
7	4.0	56	0.027	5.4	3.4	1.4	4.3	11.0	0.006
8	4.3	63	0.030	5.8	3.3	1.4	4.7	11.0	0.006
9	4.6	70	0.034	6.3	3.3	1.4	5.0	11.3	0.006
10	4.9	76	0.037	6.6	3.3	1.4	5.3	11.4	0.006
11	5.5	93	0.045	7.5	3.5	1.4	5.9	12.4	0.006



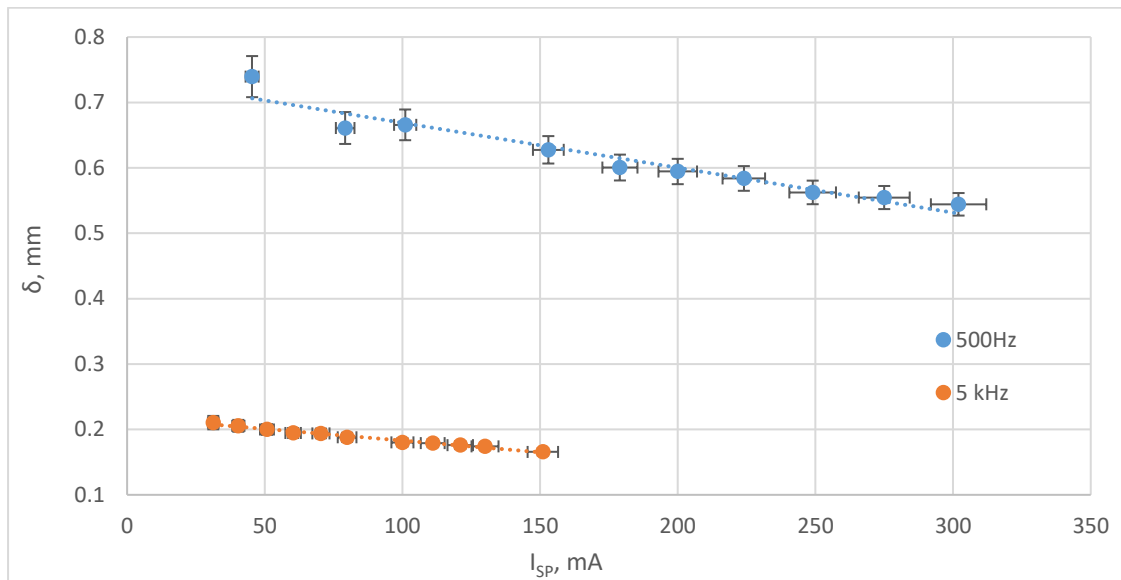
Attēls 5. U_F atkarībā no I_{SP} .



Attēls 6. Φ atkarībā no I_{SP} .



Attēls 7. μ atkarībā no H_{SP} .



Attēls 8. δ atkarībā no I_{SP} .

Tabula 9. Mērspoles sprieguma atkarība no strāvas frekvences indukcijas spolē.

Nr. p. k.	f , Hz	U_F , mV	Φ , μWb	B_{SP} , μT	S_{bezFe} , cm^2	d_{gredz} , mm	H_{SP} , A/m	μ	δ , mm	$\Delta\varphi \pm 1, ^\circ$
1	100	260	6.270	202.6	309.4	129.6	161.3	66.3	1.95	61
2	200	438	5.281	202.6	260.6	109.2	161.3	94.1	1.16	58
3	400	692	4.172	202.6	205.9	86.2	161.3	117.4	0.73	59
4	700	1010	3.479	202.6	171.7	71.9	161.3	142.9	0.50	55
5	1000	1260	3.038	202.6	149.9	62.8	161.3	155.7	0.40	49
6	2000	1540	1.857	202.6	91.6	38.4	161.3	116.3	0.33	45
7	4000	2740	1.652	202.6	81.5	34.1	161.3	184.1	0.19	48
8	6000	3250	1.306	202.6	64.5	27.0	161.3	172.7	0.16	46
9	8000	3840	1.157	202.6	57.1	23.9	161.3	180.8	0.13	45
10	10000	4260	1.027	202.6	50.7	21.2	161.3	178.0	0.12	40

Tabula 10. Kļūdu aprēķins mērspoles sprieguma atkarībai no strāvas frekvences indukcijas spolē.

Nr. p. k.	ΔU_F , mV	$\Delta\Phi$, μWb	ΔB_{SP} , μT	ΔS_{bezFe} , cm^2	Δd_{gredz} , mm	ΔH_{SP} , A/m	$\Delta\mu$	$\Delta\delta$, mm
1	8	0.188	7.4	14.7	6.1	5.9	4.4	0.07
2	13	0.158	7.4	12.3	5.2	5.9	6.3	0.04
3	21	0.125	7.4	9.8	4.1	5.9	7.9	0.02
4	30	0.104	7.4	8.1	3.4	5.9	9.6	0.02
5	38	0.091	7.4	7.1	3.0	5.9	10.4	0.01
6	46	0.056	7.4	4.3	1.8	5.9	7.8	0.01
7	82	0.050	7.4	3.9	1.6	5.9	12.3	0.01
8	98	0.039	7.4	3.1	1.3	5.9	11.6	0.01
9	115	0.035	7.4	2.7	1.1	5.9	12.1	0.00
10	128	0.031	7.4	2.4	1.0	5.9	11.9	0.00

Secinājumi:

Laboratorijas darbā veikta magnētiskā lauka sensora pārbaude, spoles magnētiskā lauka sadalījuma mērīšana, kā arī pētīts skinefekts alumīnija un dzelzs cauruļu sienīnās.

Pirmās darba daļas - magnētiskā lauka sensora pārbaudes rezultāti attēloti Tabulā 1 un Attēlā 1. Redzams, ka sensora sprieguma attiecība pret spoles strāvas frekvenci kļūdu robežās paliek nemainīga mainot strāvas frekvenci. Šis novērojums ir saskaņā ar Faradeja indukcijas likumu, tomēr, teorētiski aprēķinot šo attiecību, izmantojot sensora spoles vijumu skaitu un šķērsriezuma laukumu, iegūst vērtību 0.077 mV/Hz, kas ir mazāka par eksperimentāli novēroto (apmēram 0.091 mV/Hz). Redzams, ka fāzu nobīde starp strāvu spolē un sensora spriegumu tiecas samazināties palielinot strāvas frekvenci. Papildus tika veikti devēja rezonanses mērījumi (Attēls 2). Var secināt, ka rezonanses parādības neietekmē šī darba rezultātus, jo rezonanse parādās pie apmēram 1000 kHz, kas ir daudz lielāka frekvence kā lielāka šai darbā izmantotā (200 kHz).

Otrajā darba daļā mērīts magnētiskā lauka sadalījums pa spoles asi un salīdzināts ar teorētiski aprēķināto un bezgalīgi garas spoles sadalījumu (Attēls 3). Teorētiski aprēķinātās lauka vērtības caurmērā ir lielākas kā eksperimentāli noteiktās, kas varētu būt skaidrojams ar sensora neatrašanos precīzi uz spoles ass.

Pētot skinefektu alumīnija caurules sienīnā, mērīta caurules sienīņas caurlaidība magnētiskajam laukam atkarībā no spoles strāvas frekvences. Rezultāts attēlots Attēlā 4. Pie zemākajām apskatītajām frekvencēm caurlaidība samazinās līdz ar frekvenci, ko var skaidrot ar skinslāņa sašaurināšanos un magnētiskā lauka koncentrēšanos pie caurules sienām. Alumīnija caurules biezumam atbilstošs skinslānis veidojas, ja spoles strāva mainās ar frekvenci 2976 Hz. Redzams, ka pie šīs frekvences kvalitatīva maiņa magnētiskā lauka caurlaidībai nav novērojama, tomēr pie apmēram 50 kHz sāk palielināties alumīnija caurulītes caurlaidība magnētiskajam laukam.

Pētot skinefektu dzelzs caurules sienīnā, eksperimentāli noteikta magnētiskā lauka plūsma caurules sienīnās. Rezultāti attēloti Tabulās 5,6,7,8,9,10 un Attēlos 5,6,7,8. Redzams, ka sakarības starp visiem grafikos apskatītajiem lielumiem ir lineāras. Aprēķinot skinslāņa "gredzena" platumu, izmantojot magnētiskai plūsmai skinslānī atbilstošo laukumu, ja plūsmu veidotu magnētiskā lauka indukcija pie dzelzs caurules virsmas, tiek iegūtas vērtības, kas pārsniedz pašas dzelzs caurules rādiusu. Šis novērojums ir apliecinājums, ka feromagnētiskā materiālā magnētiskais lauks tiek pastiprināts.