

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 spole.

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 1 A. 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.

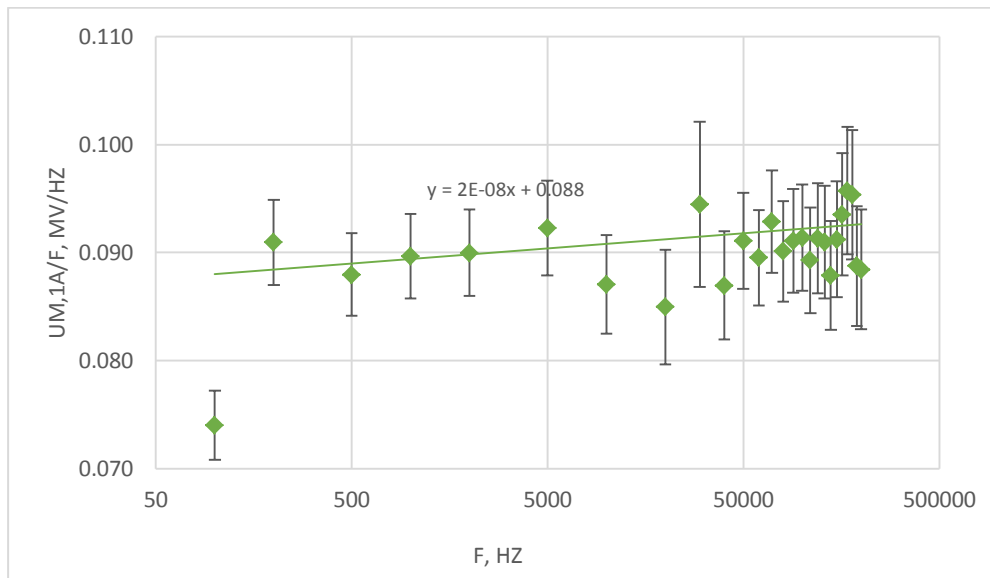
- d) Aprēķināt magnētisko lauku spolē pie strāvas $I_{SP} = 1\text{ A}$ (efektīvā vērtība), izmantojot spoles vijumu skaitu uz garuma vienību $n_{SP} = 1075\text{ vij./m}$ un formulu bezgalīgi garai spolei, kas izriet no cirkulācijas teorēmas. Koriģēt šo lauka vērtību izmantojot skaitliski aprēķināto (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 šķērsriezuma 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 uztītajā spolītē atkarību no strāvas spolē, pie 500 Hz strāvu mainīt robežās $0 - 0.3\text{ A}$ (efektīvā vērtība), pie 5000 Hz robežās $0 - 0.15\text{ A}$ (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	1.008	0.031	7.5	0.2	7.4	0.074	0.003	112
2	0.2	0.984	0.031	17.9	0.5	18.2	0.091	0.004	88
3	0.5	0.848	0.026	37.3	1.1	44.0	0.088	0.004	88
4	1	0.600	0.019	53.8	1.6	89.7	0.090	0.004	89
5	2	0.349	0.011	62.8	1.9	179.9	0.090	0.004	86
6	5	0.145	0.005	66.9	2.0	461.4	0.092	0.004	90
7	10	0.077	0.003	67.4	2.0	870.8	0.087	0.005	91
8	20	0.040	0.002	68.3	2.0	1699.5	0.085	0.005	88
9	30	0.022	0.002	63.0	1.9	2834.3	0.094	0.008	92
10	40	0.052	0.003	181.8	5.5	3478.8	0.087	0.005	92
11	50	0.116	0.004	530.5	15.9	4555.6	0.091	0.004	82
12	60	0.105	0.004	565.7	17.0	5371.4	0.090	0.004	91
13	70	0.089	0.004	579.8	17.4	6502.4	0.093	0.005	84
14	80	0.083	0.003	595.6	17.9	7210.8	0.090	0.005	85
15	90	0.074	0.003	606.3	18.2	8197.1	0.091	0.005	87
16	100	0.068	0.003	618.7	18.6	9139.2	0.091	0.005	83
17	110	0.064	0.003	627.0	18.8	9821.5	0.089	0.005	86
18	120	0.058	0.003	635.3	19.1	10957.8	0.091	0.005	83
19	130	0.054	0.003	635.3	19.1	11827.5	0.091	0.005	86
20	140	0.052	0.003	642.5	19.3	12306.0	0.088	0.005	85
21	150	0.048	0.002	655.9	19.7	13685.1	0.091	0.005	84
22	160	0.044	0.002	664.9	19.9	14968.3	0.094	0.006	85
23	170	0.042	0.002	681.1	20.4	16273.8	0.096	0.006	77
24	180	0.039	0.002	676.8	20.3	17162.8	0.095	0.006	78
25	190	0.040	0.002	679.0	20.4	16864.5	0.089	0.006	79
26	200	0.040	0.002	700.1	21.0	17688.5	0.088	0.006	76



Attēls 1. Magnētiskā lauka sensora pārbaude.

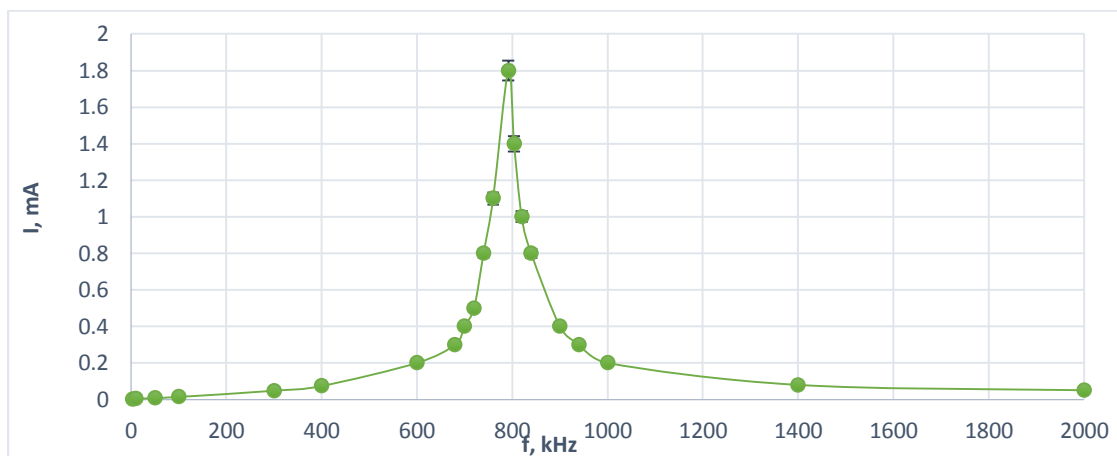
$$B_{SP} = 0.89n_{SP}I_{SP}\mu_0 = 0.89n_{SP}I_{SP}\mu_0 = 0.89 \cdot 1075 \cdot 1 \cdot \mu_0 = 1.20 \text{ mT}$$

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

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

Tabula 2. Devēja rezonanses mērījumi.

f, kHz	$I, \text{mA} \pm 3\%$	680	0.3	840	0.8	4000	0.02
3	0.002	700	0.4	900	0.4	5000	0.016
10	0.004	720	0.5	940	0.3	10000	0.008
50	0.008	740	0.8	1000	0.2		
100	0.014	760	1.1	1400	0.08		
300	0.048	792	1.8	2000	0.051		
400	0.074	804	1.4	3000	0.027		
600	0.2	820	1	840	0.8		



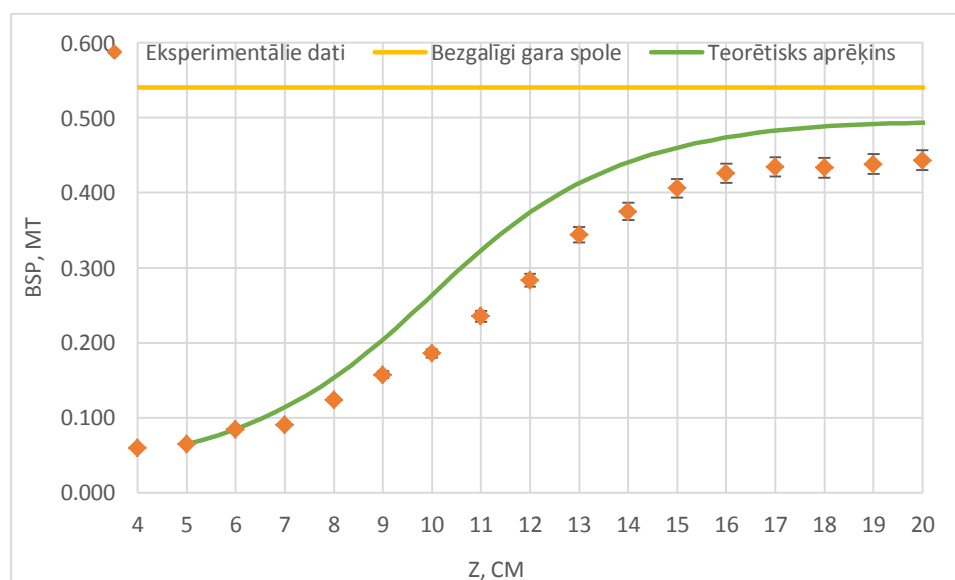
Attēls 2. Devēja rezonanses mērījumi.

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	35.8	1.1	0.028	0.443	0.013	0.567
2	19	35.4	1.1	0.028	0.438	0.013	
3	18	35.0	1.1	0.028	0.433	0.013	
4	17	35.1	1.1	0.028	0.435	0.013	
5	16	34.4	1.0	0.027	0.426	0.013	
6	15	32.8	1.0	0.026	0.406	0.012	
7	14	30.3	0.9	0.024	0.375	0.011	
8	13	27.8	0.8	0.022	0.344	0.010	
9	12	22.9	0.7	0.018	0.284	0.009	
10	11	19.0	0.6	0.015	0.235	0.007	
11	10	15.0	0.5	0.012	0.186	0.006	
12	9	12.7	0.4	0.010	0.157	0.005	
13	8	10.0	0.3	0.008	0.124	0.004	
14	7	7.3	0.2	0.006	0.090	0.003	
15	6	6.8	0.2	0.005	0.084	0.003	
16	5	5.2	0.2	0.004	0.064	0.002	
17	4	4.8	0.2	0.004	0.058	0.009	

Aprēķinu piemērs:

$$B_{SP_1} = \frac{U_{M,0.001A/m}}{2\pi f S_M N_M} = \frac{0.028/1000}{2\pi \cdot 1000 \cdot 6.625 \cdot 10^{-5} \cdot 154} = 0.443 \text{ mT}$$



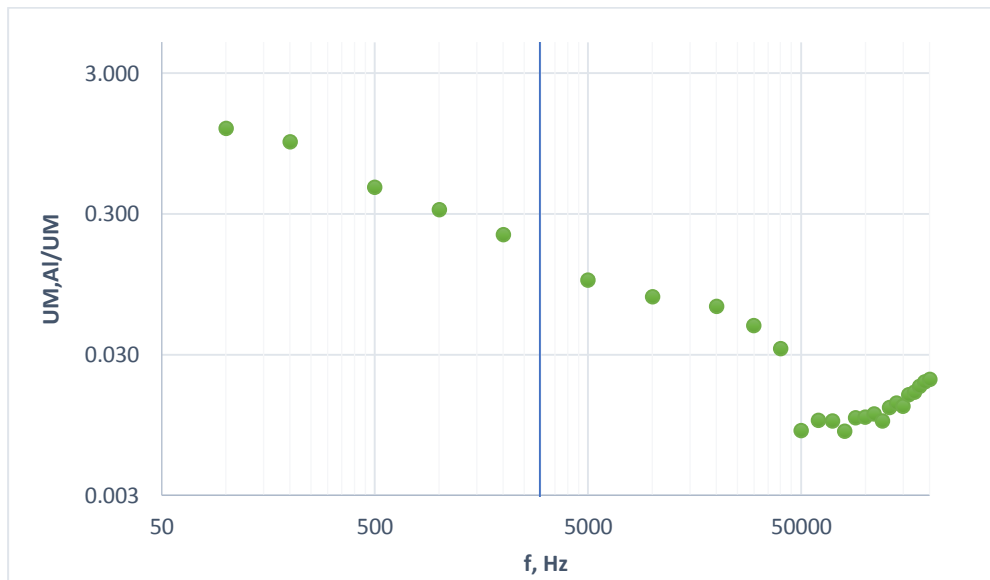
Attēls 3. Magnētiskā lauka sadalījums uz spoles ass.

Tabula 4. Alumīnija caurules sienīgas 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	10.25	0.31	8.4	0.3	1.2173	0.0516
2	0.2	15.40	0.46	15.7	0.5	0.9809	0.0416
3	0.5	18.40	0.55	39.5	1.2	0.4658	0.0198
4	1	17.10	0.51	52.7	1.6	0.3245	0.0138
5	2	13.00	0.39	60.6	1.8	0.2145	0.0091
6	5	6.84	0.21	66.9	2.0	0.1022	0.0043
7	10	5.05	0.15	65.2	2.0	0.0775	0.0033
8	20	4.60	0.14	69.4	2.1	0.0663	0.0028
9	30	3.15	0.09	65.2	2.0	0.0483	0.0020
10	40	5.84	0.18	175.9	5.3	0.0332	0.0014
11	50	4.68	0.14	537.2	16.1	0.0087	0.0004
12	60	5.80	0.17	568.2	17.0	0.0102	0.0004
13	70	5.95	0.18	586.2	17.6	0.0102	0.0004
14	80	5.10	0.15	597.1	17.9	0.0085	0.0004
15	90	6.50	0.20	605.9	18.2	0.0107	0.0005
16	100	6.66	0.20	614.9	18.4	0.0108	0.0005
17	110	7.05	0.21	621.8	18.7	0.0113	0.0005
18	120	6.46	0.19	639.2	19.2	0.0101	0.0004
19	130	8.01	0.24	636.1	19.1	0.0126	0.0005
20	140	8.76	0.26	642.1	19.3	0.0136	0.0006
21	150	8.43	0.25	655.1	19.7	0.0129	0.0005
22	160	10.33	0.31	663.9	19.9	0.0156	0.0007
23	170	11.22	0.34	687.1	20.6	0.0163	0.0007
24	180	12.19	0.37	683.1	20.5	0.0178	0.0008
25	190	13.10	0.39	682.1	20.5	0.0192	0.0008
26	200	14.00	0.42	699.9	21.0	0.0200	0.0008

Alumīnija caurules biezuma skinslānim atbilstošā frekvence:

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



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	36.6	210	1.01	49	204.8	85.8	39.3	145.3	0.590
2	73.7	413	1.99	100	200.1	83.8	79.2	138.6	0.605
3	112.0	509	2.45	151	162.3	68.0	120.4	91.2	0.745
4	164.0	816	3.94	222	177.6	74.4	176.3	109.3	0.681
5	188.9	1028	4.96	255	194.3	81.4	203.1	130.7	0.623
6	191.2	1124	5.42	258	209.9	87.9	205.5	152.5	0.576
7	235.0	1292	6.23	317	196.3	82.2	252.6	133.4	0.616
8	240.2	1501	7.24	324	223.1	93.4	258.2	172.3	0.542
9	273.9	1693	8.17	370	220.7	92.4	294.4	168.6	0.548
10	293.2	1883	9.08	396	229.3	96.0	315.2	182.0	0.528

Aprēķinu piemēri:

$$\phi_1 = \frac{U_F}{2\pi f N_F} = \frac{210/1000}{2\pi \cdot 500 \cdot 66} = 1 \mu Wb$$

$$B_{SP_1} = \mu_0 n_{sp} I_{SP} = \mu_0 \cdot 1075 \cdot 36.6/1000 = 49 \mu T$$

$$S_{bezFe_1} = \phi_1 / B_{SP_1} = 1/49 = 204.8 cm^2$$

$$d_{gredz_1} = S_{bezFe_1} / (2\pi R_{Fe}) = 204.8 / (10000 \cdot 2\pi \cdot 76/2000) = 85.8 mm$$

$$H_{SP_1} = B_{SP_1} / \mu_0 = 39.3 A/m$$

$$\mu_1 = \frac{\phi_1^2 \mu_0 f \sigma}{B_{SP}^2 4\pi R_{Fe}^2} = \frac{1^2 \mu_0 \cdot 500 \cdot 10^7}{49^2 \cdot 4\pi \cdot (76/2000)^2} = 145.3$$

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

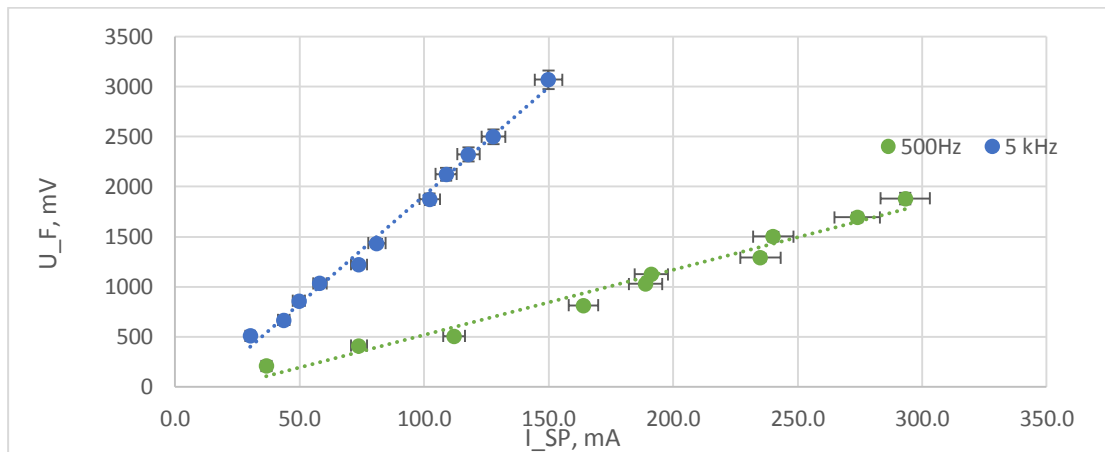
Nr. p. k.	ΔI_{SP} , mA	ΔU_F , mV	$\Delta \Phi$, μ Wb	ΔB_{SP} , μ T	ΔS_{bezFe} , cm^2	Δd_{gredz} , mm	ΔH_{SP} , A/m	$\Delta \mu$	$\Delta \delta$, mm
1	2.1	6	0.03	3	13.3	5.6	2.3	13.3	0.027
2	3.2	12	0.06	4	10.6	4.4	3.5	10.4	0.023
3	4.4	15	0.07	6	8.0	3.3	4.7	6.3	0.026
4	5.9	24	0.12	8	8.3	3.5	6.4	7.3	0.023
5	6.7	31	0.15	9	9.0	3.8	7.2	8.6	0.020
6	6.7	34	0.16	9	9.7	4.1	7.2	10.0	0.019
7	8.1	39	0.19	11	8.9	3.7	8.7	8.6	0.020
8	8.2	45	0.22	11	10.1	4.2	8.8	11.1	0.017
9	9.2	51	0.24	12	9.9	4.2	9.9	10.8	0.017
10	9.8	56	0.27	13	10.3	4.3	10.5	11.6	0.017

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

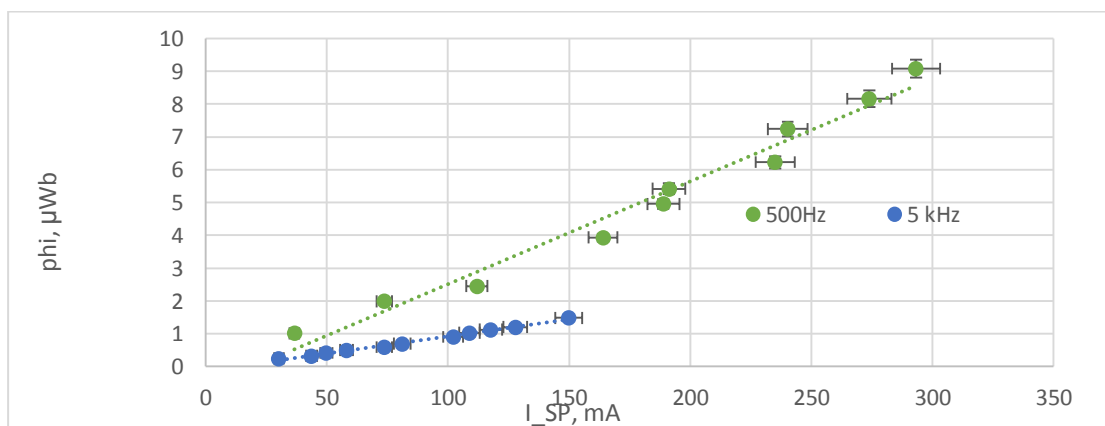
Nr. p. k.	I_{SP} , mA	U_F , mV	Φ , μ Wb	B_{SP} , μ T	S_{bezFe} , cm^2	d_{gredz} , mm	H_{SP} , A/m	μ	δ , mm
1	30.2	510	0.246	40.8	60.3	25.3	32.5	125.9	0.201
2	43.7	667	0.322	59.0	54.5	22.8	47.0	102.8	0.222
3	49.7	859	0.414	67.1	61.7	25.8	53.4	131.8	0.196
4	58.1	1035	0.499	78.5	63.6	26.6	62.5	140.1	0.190
5	73.7	1222	0.589	99.6	59.2	24.8	79.2	121.3	0.204
6	81.0	1436	0.693	109.4	63.3	26.5	87.1	138.7	0.191
7	102.2	1875	0.904	138.1	65.5	27.4	109.9	148.6	0.185
8	108.8	2127	1.026	147.0	69.8	29.2	117.0	168.7	0.173
9	117.7	2324	1.121	159.0	70.5	29.5	126.5	172.1	0.172
10	127.8	2500	1.206	172.6	69.8	29.3	137.4	168.9	0.173
11	149.9	3070	1.481	202.5	73.1	30.6	161.1	185.1	0.165

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

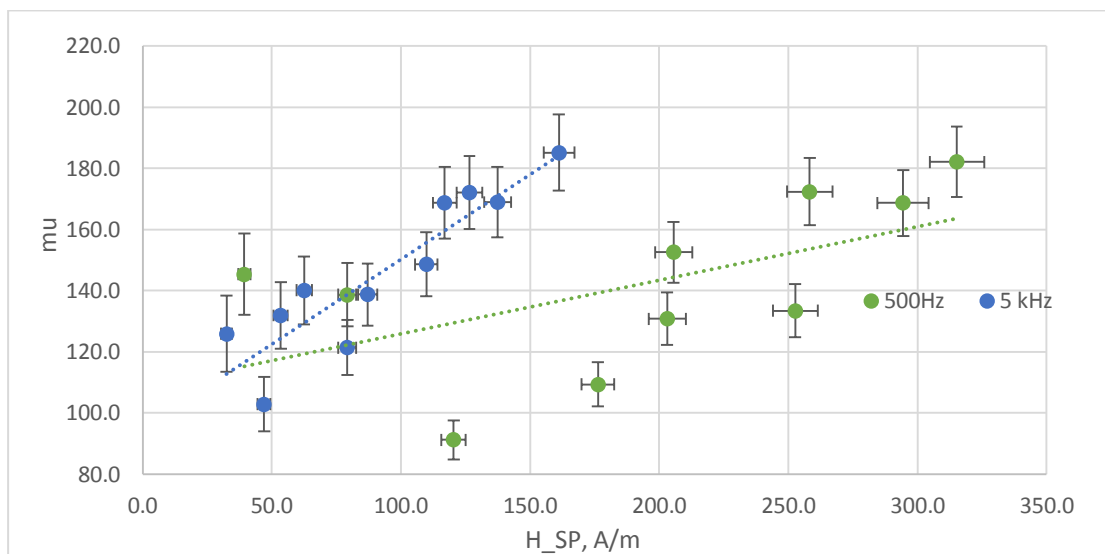
Nr. p. k.	ΔI_{SP} , mA	ΔU_F , mV	$\Delta \Phi$, μ Wb	ΔB_{SP} , μ T	ΔS_{bezFe} , cm^2	Δd_{gredz} , mm	ΔH_{SP} , A/m	$\Delta \mu$	$\Delta \delta$, mm
1	1.9	15	0.007	2.6	4.2	1.8	2.0	12.4	0.010
2	2.3	20	0.010	3.1	3.3	1.4	2.5	8.8	0.010
3	2.5	26	0.012	3.4	3.6	1.5	2.7	10.9	0.008
4	2.7	31	0.015	3.7	3.6	1.5	2.9	11.1	0.008
5	3.2	37	0.018	4.3	3.1	1.3	3.5	9.1	0.008
6	3.4	43	0.021	4.6	3.3	1.4	3.7	10.2	0.007
7	4.1	56	0.027	5.5	3.3	1.4	4.4	10.5	0.007
8	4.3	64	0.031	5.8	3.4	1.4	4.6	11.8	0.006
9	4.5	70	0.034	6.1	3.4	1.4	4.9	11.9	0.006
10	4.8	75	0.036	6.5	3.4	1.4	5.2	11.5	0.006
11	5.5	92	0.044	7.4	3.5	1.5	5.9	12.4	0.006



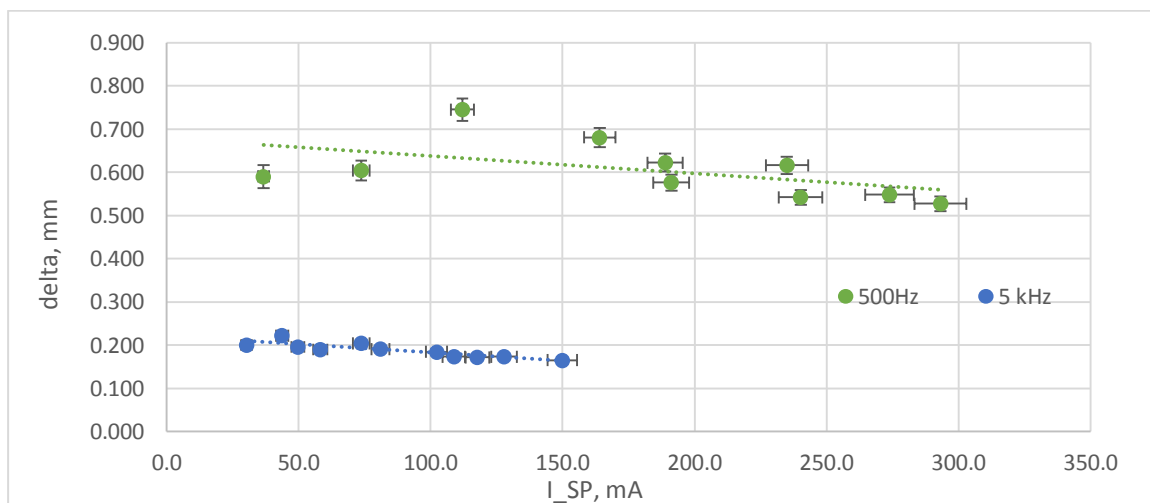
Attēls 5. U_F atkarībā no I_{SP} .



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	210	5.064	202.6	249.9	104.7	161.3	43.3	2.42	59
2	200	413	4.980	202.6	245.7	102.9	161.3	83.6	1.23	55
3	400	509	3.069	202.6	151.4	63.4	161.3	63.5	1.00	57
4	700	816	2.811	202.6	138.7	58.1	161.3	93.3	0.62	55
5	1000	1028	2.479	202.6	122.3	51.2	161.3	103.6	0.49	46
6	2000	1124	1.355	202.6	66.9	28.0	161.3	62.0	0.45	47
7	4000	1292	0.779	202.6	38.4	16.1	161.3	40.9	0.39	45
8	6000	1501	0.603	202.6	29.8	12.5	161.3	36.8	0.34	45
9	8000	1693	0.510	202.6	25.2	10.5	161.3	35.1	0.30	46
10	10000	1883	0.454	202.6	22.4	9.4	161.3	34.8	0.27	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	6	0.152	7.4	11.8	5.0	5.9	2.9	0.08
2	12	0.149	7.4	11.6	4.9	5.9	5.6	0.04
3	15	0.092	7.4	7.2	3.0	5.9	4.3	0.03
4	24	0.084	7.4	6.6	2.8	5.9	6.3	0.02
5	31	0.074	7.4	5.8	2.4	5.9	6.9	0.02
6	34	0.041	7.4	3.2	1.3	5.9	4.2	0.02
7	39	0.023	7.4	1.8	0.8	5.9	2.7	0.01
8	45	0.018	7.4	1.4	0.6	5.9	2.5	0.01
9	51	0.015	7.4	1.2	0.5	5.9	2.4	0.01
10	56	0.014	7.4	1.1	0.4	5.9	2.3	0.01

Secinājumi:

Laboratorijas darbā tika pārbaudīts magnētiskā lauka sensors, izmērīts spoles magnētiskā lauka sadalījums, kā arī novērota skinefekta parādība alumīnija uz dzelzs cauruļu sienīņās.

Aplūkojot magnētiskā lauka sensora pārbaudes datus, kas redzami tabulā 1 un attēlā 1 novērojams, ka sensora sprieguma un spoles strāvas frekvences attiecība kļūdas robežās ir nemainīga. Tas arī ir sagaidāms novērojums, kas atbilst Faradeja indukcijas likumam. Salīdzinot iegūtās attiecības vērtību ar teorētisko (kas izrēķinātā no sensora spoles parametriem) iegūst vērtību 0.077 mV/Hz, kas ir mazāka kā eksperimentā novērotā (~ 0.09 mV/Hz). Palielinot strāvas frekvenci fāzu nobīde starp strāvu spolē un sensora spriegumu samazinās.

Attēlā 2 redzami devēja rezonanses mērījumi, no kuriem var secināt, ka rezonanse neietekmē darba rezultātus, jo maksimālā izmantotā frekvence šajā darbā ir 200kHz (rezonanse parādās pie ~ 1000 kHz)

Salīdzinot eksperimentāli iegūtā magnētiskā lauka sadalījumu ar teorētiski aprēķināto un bezgalīgas spoles gadījumu (Attēls 3) redzama kvalitatīva sakritība. Eksperimentāli noteiktās vērtības ir mazākas kā teorētiski aprēķinātās, kas iespējams skaidrojams ar magnētiskā lauka sensora novirzi no spoles ass.

Mērot caurules sienīņas caurlaidību magnētiskajam laukam atkarībā no spoles strāvas frekvences tika pētīts skinefekts alumīnija caurulē. Iegūtie rezultāti redzami attēlā 4, kur novērojams, ka caurlaidība samazinās pie zemākām frekvencēm. Tas skaidrojams ar magnētiskā lauka koncentrēšanos pie caurules sienām un skinslāņa samazināšanos. Ja spoles strāva mainās ar frekvenci ~ 2976 Hz, tad veidojas alumīnija caurules biezumam atbilstošs skinslānis. Pie apmēram 50kHz alumīnija caurules caurlaidība magnētiskajam laukam sāk palielināties.

Tabulās 5-10 un attēlos 5-8 redzamas eksperimentāli aprēķinātās magnētiskā lauka plūsmas caurules sienīņās. Atmetot kļūdainos punktus, grafikos aplūkotās atkarības ir lineāra rakstura. Veicot aprēķinus skinslāņa platumam, izmantojot magnētiskai plūsmai atbilstošo skinslāņa laukumu un pieņemot, ka ja plūsma veidotos no magnētiskā lauka indukcijas pie caurules virsmas, iegūtās vērtības pārsniedz dzelzs caurules rādusu. Tas ir apstiprinājums, ka magnētiskais lauks tiek pastiprināts feromagnētiskos materiālos.