

# Virpuļstrāvas plānā elektrovadošā plāksnē

## Teorētiskais pamatojums

Praksē mainīgu magnētisko lauku izmanto metālu sildīšanai, kausēšanai inducējot tajos virpuļstrāvas. Lai sildītu plānas plakšnes, ir lietderīgi ar magnētisko lauku tās inducēt paralēli lielākajai skal-dnei. Šajā darbā tiek izmantots magnētiskais lauks, ko veido taisnstūra spole, kura lauku tuvināti var apskatīt kā lauku, ko rada bezgalīgi gari  $4n$  vadi, kuros plūst strāva.

Pēc cirkulācijas teorēmas, ja plāksnē plūst virpuļstrāva, kura kādā plaknes elementā raksturojās ar strāvas lineāro blīvumu  $j_l$ , tad magnētiskais lauka paralēlā komponente plāksnei:

$$j_e = \frac{2B_\tau}{\mu_0} \quad (1)$$

Tā kā magnētiskais lauks laikā mainās un tādēļ arī strāvu virzieni, tad nomērīt varam efektīvās vērtības, kura dod magnētiskā lauka efektīvo vērtību sekojošu:

$$B_{\tau,eff} = \frac{U}{Sn2\pi f} \quad (2)$$

Bez efektīvās magnētiskā lauka amplitūdas varam nomērīt arī inducēto strāvu fāzi pret spoles strāvu. Tā kā  $EDS$  saistās ar magnētisko lauku ar tā atvasinājumu pēc  $EDS = -i\omega BS$ , tad atkarībā kādā virzienā mēram spoles strāvu un  $EDS$  mums ir spēkā šāda vispārīga formula:

$$\phi = 360^\circ \cdot f \cdot \Delta t \pm 90^\circ \quad (3)$$

kur konkrēta zīmes vērtībā tiek noteikta izmērot fāzu nobīdi starp induktora strāvu un magnētiskā lauka sensoru,  $\Delta t$  attālums starp maksimumiem osciloskopā.

Pie pieņēmuma, ka sistēmu aprakstošie vienādojumi lineāri (Maksvella sistēma ir lineāra, bet jāņem vērā, ka  $j = \sigma E$  var neizpildīties pie lieliem laukiem), tad, ja mums zināms, kāds magnētiskā lauka sadalījums pie vieniem robežnosacījumiem, tad automātiski mums ir zināmi atrisnājumi pie robežnosacījumiem, kuri pariezināti ar konstanti, tādēļ ir lietderīgi izmērīto strāvu normēt un pēc vienošanās šādi:

$$j_e^{1A} = \frac{j_e}{I_{sp}} \quad (4)$$

## Inducēto strāvu novērtējums

Pieņemot, ka mums ir zināma strāvas lineārā blīvuma  $j_l$  maksimālā vērtība, tad varam novērtēt strāva, kura piedalās virpuļstrāvu veidošanā:

$$I_{pl} = \frac{j_l^{max} L}{2} \quad (5)$$

Pieņemot, ka summārais magnētiskais lauks spolē ir aptuveni konstants, tad varam iegūt sakarību starp strāvu, kura piedalās virpuļstrāvu veidošanā. Zinot, ka summārais magnētiskais lauks izsakās, kā summa starp spoles lauku un inducēto virpuļstrāvu lauku, tad varam iegūt aptuvenu sakarību virpuļstrāvai:

$$\frac{I_{pl}}{2I_{sp}} = \frac{i\Omega}{1 - i\Omega^2} \quad \Omega = \frac{1}{2}dL\sigma f\mu_0 \quad (6)$$

Tā kā modeli tiek pieņemts, ka magnētisko lauku rada divi pāri bezgalīgi gari vadi, tad, lai to sasītu ar esošo eksperimenta ģeometriju:

$$I_{sp} = N \cdot A \quad (7)$$

jeb jāpareizina ar  $N$  vijumiem, kuros pēc normēšanas plūst  $1A$  liela strāva. Tādēļ iegūstam sekojošu teorētisku novērtējumu strāvas linearajam blīvumam  $j_l^{max}$ :

$$j_l^{max} = \frac{4N}{L} \frac{i\Omega}{1 - i\Omega} \quad (8)$$

Tomēr reālā eksperimentā vadi nav bezgalīgi, kas samazina efektīvo  $N$  un strāva plāksnē  $I_{pl}$  ir arī ārpus spoles tādēļ sakarība (5) ir tikai aptuvena. Tādēļ eksperimentālie dati jāsalīdzina ar:

$$j_l^{max} = s \cdot \frac{i\Omega}{1 - i\Omega} \quad (9)$$

kur  $s$  ir eksperimentā piedzenamais parametrs, kuram jābūt mazākam par  $s < 4N/L$ .

## Mērijumi un apstrāde

Sensora šķersgriezuma laukums	$S = 26.5 \times 2.5mm^2$
Sensora vijumu skaits	$n = 154$
Alumīnija plāksnes biezums	$d = 2mm$
Alumīnija folijas biezums	$d = 0.01mm$
Attālums starp induktora spoles vadiem	$L = 14.6cm$
Alumīnija vadītspēja	$\sigma = 3.8 \cdot 10^7 S/m$
Fāzu nobīde starp $I_{SP}$ un sensora $E_{sp}$	$+90^\circ$
Induktora vijumu skaits	$N = 23$

## Alumīnija plāksnes sadalījumi

Magnētiskā lauka mērijumi alumīnija plāksnei  $f = 500Hz$ ,  $I_{SP} = 0.26A$

Nr	x+0,2, cm	U+0,06, mV	Bx, T	jy, A/m	j y 1A, A/m
----	-----------	------------	-------	---------	-------------

31	-15	0,3	$9,54E - 06$	15,2	58,4
30	-14	0,36	$1,14E - 05$	18,2	70,1
29	-13	0,54	$1,72E - 05$	27,3	105,1
28	-12	0,69	$2,19E - 05$	34,9	134,3
27	-11	0,84	$2,67E - 05$	42,5	163,5
26	-10	1,08	$3,43E - 05$	54,7	210,2
25	-9	1,26	$4,01E - 05$	63,8	245,3
24	-8	1,44	$4,58E - 05$	72,9	280,3
23	-7	1,65	$5,25E - 05$	83,5	321,2
22	-6	1,32	$4,20E - 05$	66,8	256,9
21	-5	1,05	$3,34E - 05$	53,1	204,4
20	-4	0,78	$2,48E - 05$	39,5	151,8
19	-3	0,54	$1,72E - 05$	27,3	105,1
18	-2	0,39	$1,24E - 05$	19,7	75,9
17	-1	0,24	$7,63E - 06$	12,1	46,7
1	0	0,15	$4,77E - 06$	7,6	29,2
2	1	0,24	$7,63E - 06$	12,1	46,7
3	2	0,36	$1,14E - 05$	18,2	70,1
4	3	0,6	$1,91E - 05$	30,4	116,8
5	4	0,84	$2,67E - 05$	42,5	163,5
6	5	1,11	$3,53E - 05$	56,2	216,1
7	6	1,65	$5,25E - 05$	83,5	321,2
8	7	1,71	$5,44E - 05$	86,5	332,9
9	8	1,59	$5,06E - 05$	80,5	309,5
10	9	1,2	$3,82E - 05$	60,7	233,6
11	10	0,96	$3,05E - 05$	48,6	186,9
12	11	0,75	$2,38E - 05$	38	146
13	12	0,6	$1,91E - 05$	30,4	116,8
14	13	0,48	$1,53E - 05$	24,3	93,4
15	14	0,36	$1,14E - 05$	18,2	70,1

Magnētiskā lauka mērijumi alumīnija plāksnei  $f = 1000Hz$ ,  $I_{SP} = 0.26A$

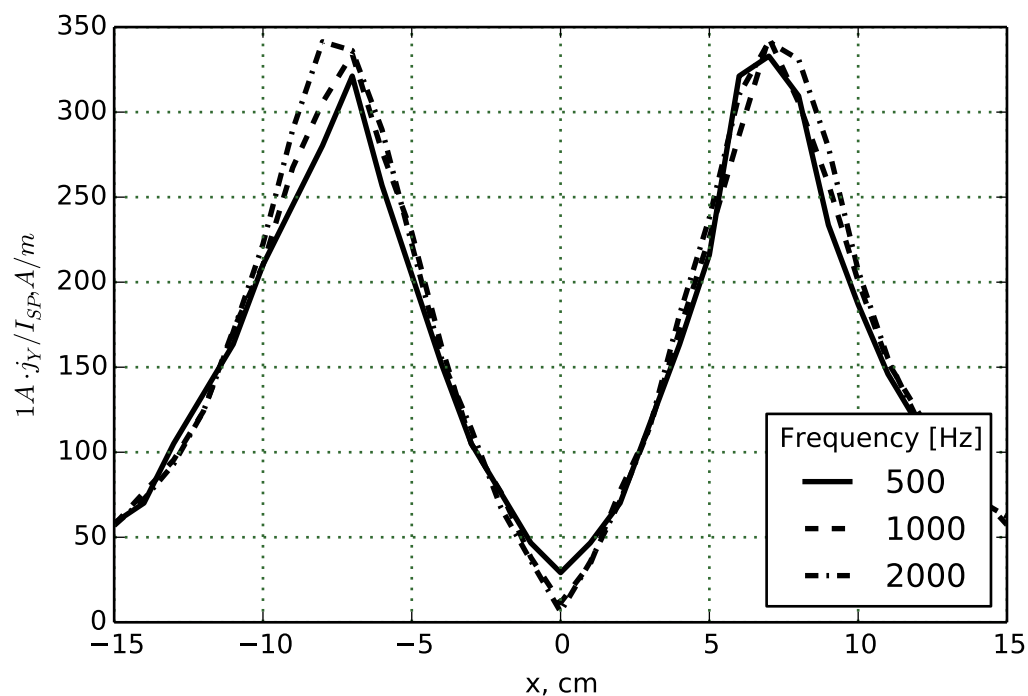
Nr	x+0,2, cm	U+0,06, mV	Bx, T	jy, A/m	j y 1A, A/m
31	-15	0,6	$9,36E - 06$	14,9	57,3
30	-14	0,8	$1,25E - 05$	19,9	76,4
29	-13	1	$1,56E - 05$	24,8	95,5
28	-12	1,3	$2,03E - 05$	32,3	124,1
27	-11	1,8	$2,81E - 05$	44,7	171,9

26	-10	2,2	$3,43E - 05$	54,6	210,1
25	-9	2,8	$4,37E - 05$	69,5	267,4
24	-8	3,2	$4,99E - 05$	79,4	305,6
23	-7	3,5	$5,46E - 05$	86,9	334,2
22	-6	2,9	$4,52E - 05$	72	276,9
21	-5	2,4	$3,74E - 05$	59,6	229,2
20	-4	1,7	$2,65E - 05$	42,2	162,3
19	-3	1,1	$1,72E - 05$	27,3	105
18	-2	0,8	$1,25E - 05$	19,9	76,4
17	-1	0,4	$6,24E - 06$	9,9	38,2
1	0	0,12	$1,87E - 06$	3	11,5
2	1	0,36	$5,62E - 06$	8,9	34,4
3	2	0,81	$1,26E - 05$	20,1	77,3
4	3	1,2	$1,87E - 05$	29,8	114,6
5	4	1,8	$2,81E - 05$	44,7	171,9
6	5	2,37	$3,70E - 05$	58,8	226,3
7	6	3	$4,68E - 05$	74,5	286,5
8	7	3,6	$5,62E - 05$	89,4	343,8
9	8	3,2	$4,99E - 05$	79,4	305,6
10	9	2,7	$4,21E - 05$	67	257,8
11	10	2,1	$3,28E - 05$	52,1	200,5
12	11	1,6	$2,50E - 05$	39,7	152,8
13	12	1,3	$2,03E - 05$	32,3	124,1
14	13	1	$1,56E - 05$	24,8	95,5
15	14	0,8	$1,25E - 05$	19,9	76,4
16	15	0,6	$9,36E - 06$	14,9	57,3

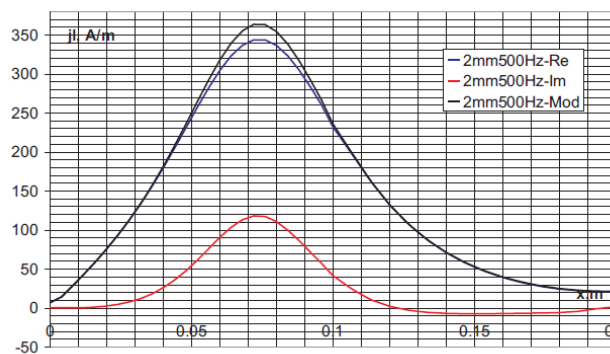
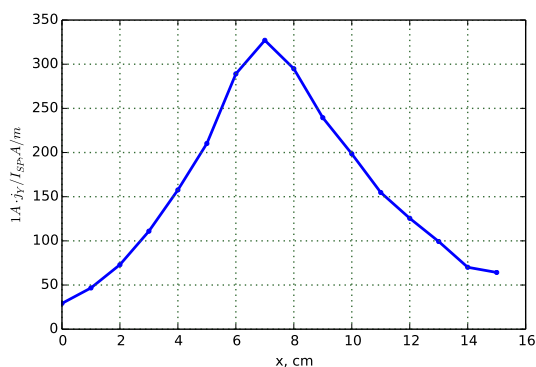
Magnētiskā lauka mērījumi alumīnija plāksnei  $f = 2000Hz$ ,  $I_{SP} = 0.24A$

Nr	x, cm	U, mV	Bx, T	jy, A/m	j y 1A, A/m
31	-15	1,1	$8,58E - 06$	13,7	56,9
30	-14	1,4	$1,09E - 05$	17,4	72,4
29	-13	1,8	$1,40E - 05$	22,3	93,1
28	-12	2,4	$1,87E - 05$	29,8	124,1
27	-11	3,3	$2,57E - 05$	41	170,7
26	-10	4,3	$3,35E - 05$	53,4	222,4
25	-9	5,6	$4,37E - 05$	69,5	289,7
24	-8	6,6	$5,15E - 05$	81,9	341,4
23	-7	6,5	$5,07E - 05$	80,7	336,2
22	-6	5,6	$4,37E - 05$	69,5	289,7

21	-5	4,3	$3,35E - 05$	53,4	222,4
20	-4	3	$2,34E - 05$	37,2	155,2
19	-3	2,2	$1,72E - 05$	27,3	113,8
18	-2	1,3	$1,01E - 05$	16,1	67,2
17	-1	0,7	$5,46E - 06$	8,7	36,2
1	0	0,12	$9,36E - 07$	1,5	6,2
2	1	0,69	$5,38E - 06$	8,6	35,7
3	2	1,38	$1,08E - 05$	17,1	71,4
4	3	2,22	$1,73E - 05$	27,6	114,8
5	4	3,5	$2,73E - 05$	43,4	181
6	5	4,6	$3,59E - 05$	57,1	237,9
7	6	6	$4,68E - 05$	74,5	310,3
8	7	6,6	$5,15E - 05$	81,9	341,4
9	8	6,4	$4,99E - 05$	79,4	331
10	9	5,4	$4,21E - 05$	67	279,3
11	10	4	$3,12E - 05$	49,7	206,9
12	11	3	$2,34E - 05$	37,2	155,2
13	12	2,3	$1,79E - 05$	28,6	119
14	13	1,7	$1,33E - 05$	21,1	87,9
15	14	1,4	$1,09E - 05$	17,4	72,4
16	15	1,2	$9,36E - 06$	14,9	62,1



1. att. Normētās strāvas lineārā blīvuma moduļa maksimālās vērtības sadalījums dažādām frekvencēm alumīnija plāksnei



2. att. Strāvas lineārā blīvuma sadalījuma salīdzinājums ar skaitliski aprēķināto sadalījumu alumīnija plāksnei  $f = 500\text{ Hz}$ .

## Alumīnija folijas sadalījumi

Magnētiskā lauka mērījumi alumīnija plāksnei  $f = 10kHz$ ,  $I_{SP} = 0.14A$

Nr	x, cm	U, mV	BX, T	jY, A/m	jY 1A, A/m
31	-15	3,6	$5,62E - 06$	8,94	63,8
30	-14	3,9	$6,08E - 06$	9,68	69,2
29	-13	4,8	$7,49E - 06$	11,92	85,1
28	-12	5,8	$9,05E - 06$	14,4	102,9
27	-11	6,7	$1,05E - 05$	16,63	118,8
26	-10	8	$1,25E - 05$	19,86	141,9
25	-9	8,7	$1,36E - 05$	21,6	154,3
24	-8	9	$1,40E - 05$	22,34	159,6
23	-7	8,8	$1,37E - 05$	21,85	156,1
22	-6	7,8	$1,22E - 05$	19,37	138,3
21	-5	6,4	$9,98E - 06$	15,89	113,5
20	-4	5,2	$8,11E - 06$	12,91	92,2
19	-3	3,6	$5,62E - 06$	8,94	63,8
18	-2	2,3	$3,59E - 06$	5,71	40,8
17	-1	1,1	$1,72E - 06$	2,73	19,5
1	0	0,4	$6,24E - 07$	0,99	7,1
2	1	1,6	$2,50E - 06$	3,97	28,4
3	2	3	$4,68E - 06$	7,45	53,2
4	3	4,4	$6,86E - 06$	10,92	78
5	4	5,8	$9,05E - 06$	14,4	102,9
6	5	7	$1,09E - 05$	17,38	124,1
7	6	8,3	$1,29E - 05$	20,61	147,2
8	7	9	$1,40E - 05$	22,34	159,6
9	8	8,4	$1,31E - 05$	20,86	149
10	9	7,8	$1,22E - 05$	19,37	138,3
11	10	6,9	$1,08E - 05$	17,13	122,4
12	11	6	$9,36E - 06$	14,9	106,4
13	12	4,8	$7,49E - 06$	11,92	85,1
14	13	4,2	$6,55E - 06$	10,43	74,5
15	14	3,9	$6,08E - 06$	9,68	69,2
16	15	3,3	$5,15E - 06$	8,19	58,5

Magnētiskā lauka mērījumi alumīnija plāksnei  $f = 20kHz$ ,  $I_{SP} = 0.10A$

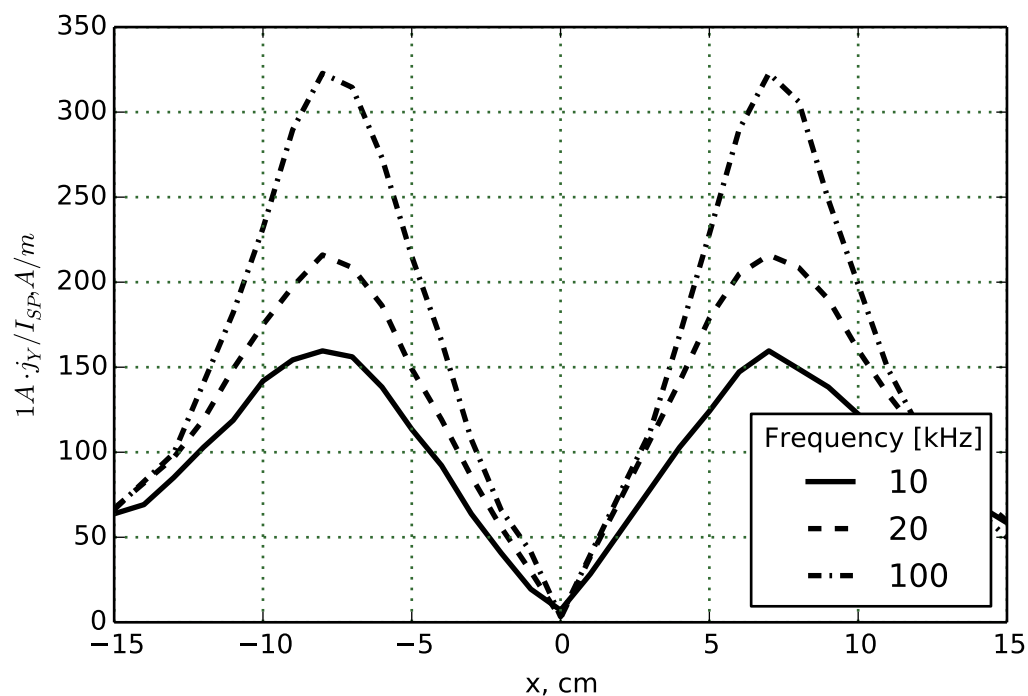
Nr	x, cm	U, mV	BX, T	jY, A/m	jY 1A, A/m
31	-15	5,4	$4,21E - 06$	6,7	67
30	-14	6,6	$5,15E - 06$	8,19	81,9
29	-13	7,8	$6,08E - 06$	9,68	96,8
28	-12	9,6	$7,49E - 06$	11,92	119,2
27	-11	12	$9,36E - 06$	14,9	149
26	-10	14,1	$1,10E - 05$	17,5	175
25	-9	15,9	$1,24E - 05$	19,74	197,4
24	-8	17,4	$1,36E - 05$	21,6	216
23	-7	16,8	$1,31E - 05$	20,86	208,6
22	-6	15	$1,17E - 05$	18,62	186,2
21	-5	12	$9,36E - 06$	14,9	149
20	-4	9,6	$7,49E - 06$	11,92	119,2
19	-3	6,9	$5,38E - 06$	8,57	85,7
18	-2	4,5	$3,51E - 06$	5,59	55,9
17	-1	2,4	$1,87E - 06$	2,98	29,8
1	0	0,2	$1,56E - 07$	0,25	2,5
2	1	3,1	$2,42E - 06$	3,85	38,5
3	2	5,8	$4,52E - 06$	7,2	72
4	3	8,6	$6,71E - 06$	10,68	106,8
5	4	11,4	$8,89E - 06$	14,15	141,5
6	5	14,4	$1,12E - 05$	17,88	178,8
7	6	16,5	$1,29E - 05$	20,48	204,8
8	7	17,4	$1,36E - 05$	21,6	216
9	8	16,8	$1,31E - 05$	20,86	208,6
10	9	15,3	$1,19E - 05$	18,99	189,9
11	10	12,9	$1,01E - 05$	16,01	160,1
12	11	10,8	$8,42E - 06$	13,41	134,1
13	12	9	$7,02E - 06$	11,17	111,7
14	13	7,2	$5,62E - 06$	8,94	89,4
15	14	6	$4,68E - 06$	7,45	74,5
16	15	4,8	$3,74E - 06$	5,96	59,6

Magnētiskā lauka mērījumi alumīnija plāksnei  $f = 100kHz$ ,  $I_{SP} = 0.03A$

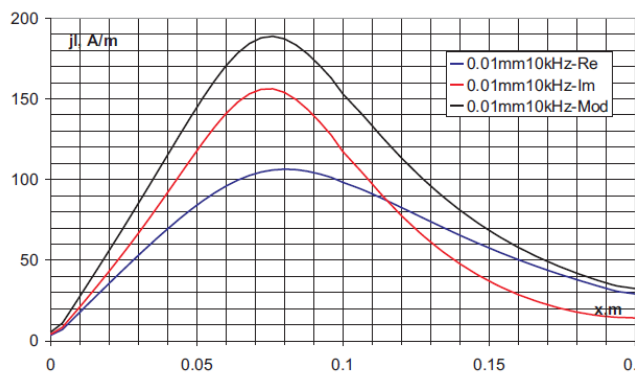
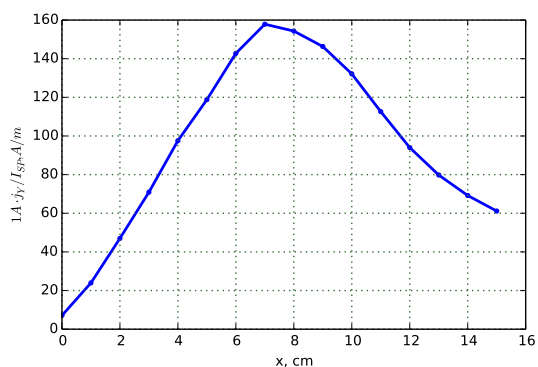
Nr	x, cm	U, mV	BX, T	jY, A/m	jY 1A, A/m
31	-15	8	$1,25E - 06$	1,99	66,2
30	-14	10	$1,56E - 06$	2,48	82,8



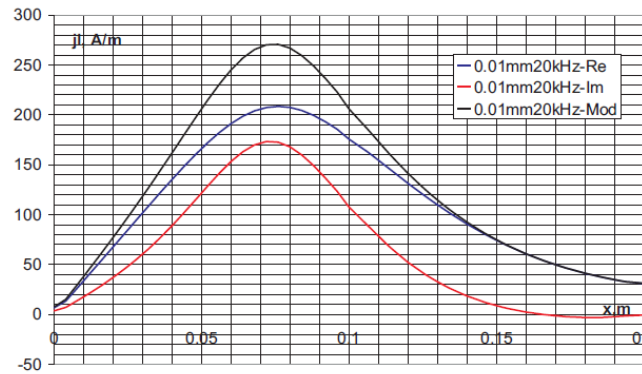
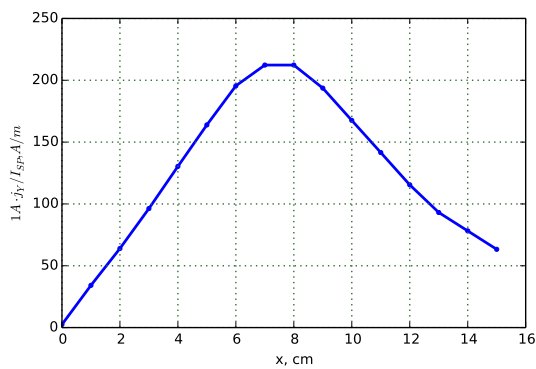
29	-13	12	$1,87E - 06$	2,98	99,3
28	-12	17	$2,65E - 06$	4,22	140,7
27	-11	22	$3,43E - 06$	5,46	182,1
26	-10	28	$4,37E - 06$	6,95	231,7
25	-9	35	$5,46E - 06$	8,69	289,7
24	-8	39	$6,08E - 06$	9,68	322,8
23	-7	38	$5,93E - 06$	9,43	314,5
22	-6	33	$5,15E - 06$	8,19	273,1
21	-5	26	$4,06E - 06$	6,46	215,2
20	-4	20	$3,12E - 06$	4,97	165,5
19	-3	13	$2,03E - 06$	3,23	107,6
18	-2	8	$1,25E - 06$	1,99	66,2
17	-1	5	$7,80E - 07$	1,24	41,4
1	0	0,4	$6,24E - 08$	0,1	3,3
2	1	4,8	$7,49E - 07$	1,19	39,7
3	2	9,2	$1,44E - 06$	2,28	76,1
4	3	13,5	$2,11E - 06$	3,35	111,7
5	4	20,4	$3,18E - 06$	5,06	168,8
6	5	27,6	$4,31E - 06$	6,85	228,4
7	6	35	$5,46E - 06$	8,69	289,7
8	7	39	$6,08E - 06$	9,68	322,8
9	8	37	$5,77E - 06$	9,19	306,2
10	9	30	$4,68E - 06$	7,45	248,3
11	10	24	$3,74E - 06$	5,96	198,6
12	11	18	$2,81E - 06$	4,47	149
13	12	14	$2,18E - 06$	3,48	115,9
14	13	10	$1,56E - 06$	2,48	82,8
15	14	8	$1,25E - 06$	1,99	66,2
16	15	6	$9,36E - 07$	1,49	49,7



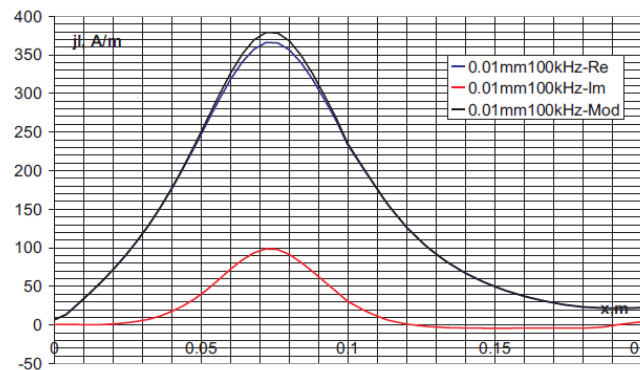
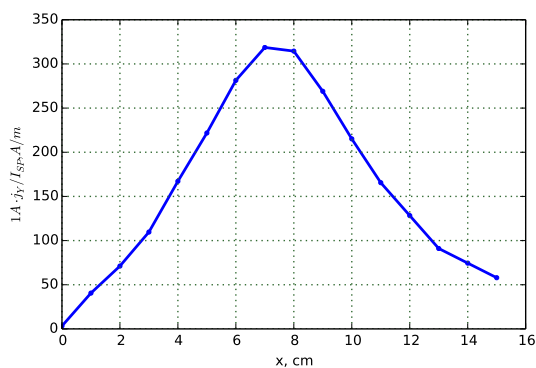
3. att. Normētās strāvas lineārā blīvuma moduļa maksimālās vērtības sadalījums dažādām frekvencēm alumīnija folijai



4. att. Strāvas lineārā blīvuma sadalījuma salīdzinājums ar skaitliski aprēķināto sadalījumu alumīnija plāksnei  $f = 10\text{ kHz}$ .



5. att. Strāvas lineāra blīvuma sadalījuma salīdzinājums ar skaitliski aprēķināto sadalījumu alumīnija plāksnei  $f = 20 kHz$ .

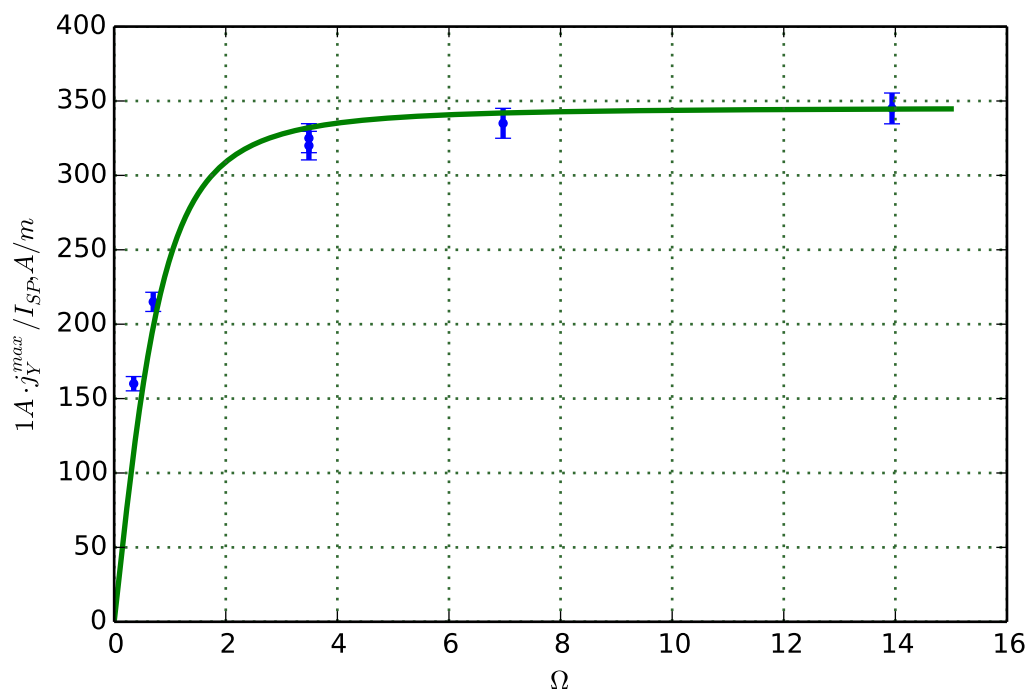


6. att. Strāvas lineāra blīvuma sadalījuma salīdzinājums ar skaitliski aprēķināto sadalījumu alumīnija plāksnei  $f = 100 kHz$ .

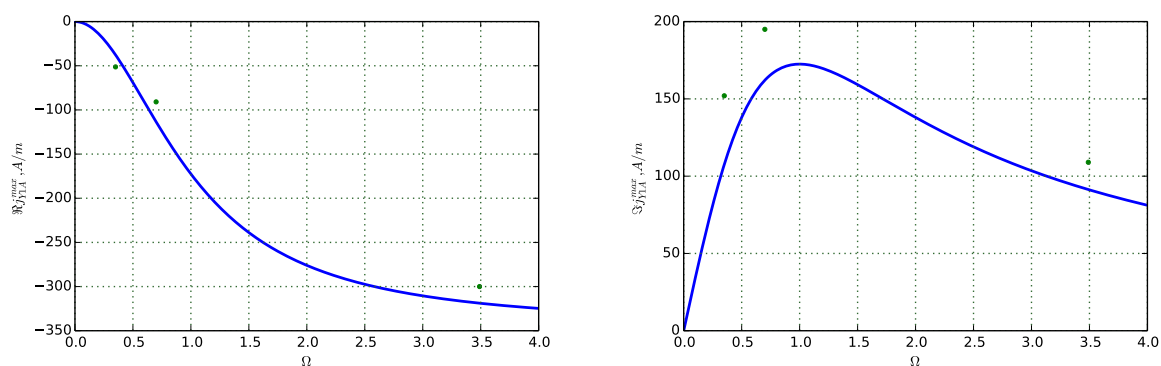
## Strāvas blīvuma maksimumu analīze

7. tabula. Strāvas maksimumi pie dažādām frekvencēm Alumīnija folijai  $f = 1,2,10kHz$  un plāksnei  $f = 0.5,1,2kHz$

$f, Hz$	$j_{Y1A}^{max} \pm 3.5\%, A/m$	$\Delta t \pm 5\%, \mu sec$	$\phi, deg$	$\Omega$	$\Re j_{Y1A}^{max}, A/m$	$\Im j_{Y1A}^{max}, A/m$
10000	160	5.0	108	0.35	-51.3	152
20000	215	3.5	115	0.70	-90.9	195
100000	320	2.0	160	3.49	-300	109
500	325	-	-	3.49	-	-
1000	335	-	-	6.97	-	-
2000	345	-	-	13.94	-	-



7. att. Strāvas lineārā blīvuma moduļa maksimālās vērtība atkarība no bezdimensionālās šķēr-sindukcijas frekvences. Salīdzinājums veikts ar sakarību (9), kurai piedzītais parametrs noteikts  $s = 345 \pm 12 A/m$ .



8. att. Strāvas lineārā blīvuma reālās un imaginārās daļas salīdzinājums ar tuvināto sakarību (9) izmantojot piedzīto parametru  $s = 345 A/m$ .

## Secinājumi

Veicot darba uzdevumus ir iegūti virpuļstrāvu sadalījumi pie dažādiem alumīnija plāksņu biezumiem un frekvencēm. Frekvences un biezumi darba uzdevumu izpildes laikā tika izvēlēti tādi, lai nepārsniegtu skinslāņa biezumu  $\delta = 1/\sqrt{\pi f \sigma \mu_0}$ , kas bija nepieciešams, lai pieņemtu, ka inducētās strāvas pa visu biezumu plūst vienā virzienā<sup>1</sup> vai citiem vārdiem sekundiārās strāvas neinducē jaunas. Pie pieņēmuma, ka alumīnija vadītspēja  $\sigma$  un magnētiskā caurlaidība  $\mu$  paliek nemainīga arī pie lieliem laukiem, varēja iegūtās magnētiskā lauka vērtības normēt iegūstot eksperimentālas vērtības pie 1A strāvas induktora spolē.

Attēlojot šo strāvu sadalījumus pa visu šķēsgriezumu var ieraudzīt divus pīkus vienādā attālumā no centra (Piemēram *attēls 1*). Turklāt eksperimentāli pārbaudīts, ka pīki savstarpēji atšķiras fāzē par  $\pi$ , kas dod pamatojumu, ka plāksnē ir izveidojies virpuļstrāvu sadalījums. Šis sadalījums tiek salīdzināts ar datormodelēšanas rezultātiem piemēram *attēlā 2, 4, 5, 6*.

Pie alumīnija plāksnes ar biezumu *plāksne* novērojama ļoti laba atbilstība ar datormodelēšanas rezultātiem pie  $f = 500\text{Hz}$ . Novērojama arī sadalījuma asimetrija, kas liek apšaubīt strāvas aprēķināšas formulu  $I_{pl} = j_l^{max} L/4$ . Papildus tam redzams, ka sadalījums nav būtiski atkarīgs no sadalījuma frekvences, kas skaidrojams ar piesātinājuma iestāšanos, jo lielas bezdimensionālās frekvences  $\Omega$ , ko pamato strāvas blīvumu maksimumu analīze *7. attēlā*.

Pie alumīnija plāksnes ar biezumu *folija* pretstatā novērojama būtiska sadalījuma atkarība no frekvences, kuru paredzēja datormodelēšanas rezultāti. Salīdzinot tos ar datormodelēšanas rezultātiem redzama sakritība, kura sāk pazust pie lielām induktora frekvencēm. Iespējamais cēlonis tam ir skinefekta radīšanās sensora vijumos, kas palielina sensora spoles aktīvo pretestību un tādēļ ietekmē voltmetra nolasītos mērījumus. Cita iespēja ir apšaubīt datormodelēšanas rezultātus, jo pie lielākām frekvencēm nepieciešami vairāk elementi<sup>2</sup>, kuri varētu būt izvēlēti ar nepietiekamu skaitu.

Lai veiktu vienkāršotā modeļa, kurā 2 induktori tiek aizvietoti ar 4 bezgalīgiem vadiem, salīdzināšanu ar reālo eksperimentu tiek izmantota strāvas lineārā blīvuma maksimālās vērtība  $j_l^{max}$  kā raksturojošs lielums plāksnē plūstošajai strāvai  $I_{pl}$ . Spolē plūstošā strāva pēc normēšanas ir 1A, kurā ir 23 vijumi, tādēļ šajā modelī vados plūst 23A. Šī modeļa ietvaros var novērtēt maksimāli iespējamo strāvas blīvumu pie piesātinājuma iestāšanos kā:

$$j_l^{max} \stackrel{\Omega \rightarrow +\infty}{=} \frac{4N}{L} \cdot 1A = 630A/m \quad (10)$$

kas ir gandrīz 2 reizes lielāks jeb  $345A/m$  nekā tas, ko iegūst piedzenot datus *attēlā 7*. Atšķirības iemesls ir gan neprecizitāte, kura rodas izmantojot formulu  $I_{pl} = j_l^{max} L/4$ , gan modeļa pieņēmumā, ka sadalījums plāksnē aizstājama ar strāvu, kas plūst vadā ar radiusu  $L/2$ . Modelis arī paredzēja fāzi, kurā strāva pie konkrētās frekvences svārstās, kura sakrīt ar eksperimentāli noteiktajiem datiem pēc *8. attēla*. Tādēļ var secināt, ka modelis ir pietiekami labs, lai ar to pētītu virpuļstrāvu īpašības.

<sup>1</sup>Skatīt "Augstfrekvences sadalījumu pētīšanas ..." teorētisko pamatojumu. Magnētiskā lauka sadalījumam ir reizinātājs  $\cos(x/\delta)$ , kas maina lauka virzienu pa dziļumu

<sup>2</sup>Pieminēts konspektā

# Pielikums

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Sat Oct 25 12:40:04 2014

5  @author: akels
    """
    # %%

import matplotlib as mpl
10  #from matplotlib.pylab import rc
    #rc('grid', color='#316931', linewidth=1, linestyle='-')
    mpl.rcParams['lines.linewidth'] = 2
    mpl.rcParams['axes.grid'] = True
    mpl.rcParams['grid.linestyle'] = ':'

15  from pandas import read_excel

df = read_excel('data/Book12.xlsx', 'nr1.1')
#df.fill(inplace=True)
20  plt.gray()

import pylab as plt
plt.plot(df[[1]], df[[5]])

25  from monochrome import setFigLinesBW

# %%
30  #import pylab as plt

fig1 = plt.figure()

sheets = ["nr1.1", "nr1.2", "nr1.3"]
35  freq = [500, 1000, 2000]

for sheet, f in zip(sheets, freq):
    df = read_excel('data/Book12.xlsx', sheet)
    plt.plot(df[[1]], df[[5]], label=f)
40

setFigLinesBW(fig1)

plt.legend(loc=4, title="Frequency [Hz]")
plt.xlabel("x, cm")
45  plt.ylabel(r"$1A \cdot j_Y/I_{\{SP\}}, A/m$")

# %%
fig2 = plt.figure()
50

sheets = ["nr2.1", "nr2.2", "nr2.3"]
freq = [10, 20, 100]

for sheet, f in zip(sheets, freq):
55  df = read_excel('data/Book12.xlsx', sheet)
    plt.plot(df[[1]], df[[5]], label=f)

setFigLinesBW(fig2)

60  plt.legend(loc=4, title="Frequency [kHz]")
    plt.xlabel("x, cm")
    plt.ylabel(r"$1A \cdot j_Y/I_{\{SP\}}, A/m$")

# %%
65
```

```
fig32 = plt.figure()

df = read_excel('data/Book12.xlsx', 'nr1.1')

70 from numpy import interp, linspace
   x = df.ix[:,1]
   y = df.ix[:,5]

   xx = linspace(0,15,16)
75 yy = (interp(xx, x, y) + interp(-xx, x, y))/2
   plt.plot(xx,yy,'.-')

   plt.xlabel("x, cm")
   plt.ylabel(r"$1A \cdot j_Y/I_{\{SP\}}, A/m$")
80 # %%
   fig81 = plt.figure()

   df = read_excel('data/Book12.xlsx', 'nr2.1')
85 from numpy import interp, linspace
   x = df.ix[:,1]
   y = df.ix[:,5]

90 xx = linspace(0,15,16)
   yy = (interp(xx, x, y) + interp(-xx, x, y))/2

   #from scipy.optimize import curve_fit
   #from scipy import exp
95 #
   #def f(x,a,b):
   #    return a*x**2*exp(-x**2/b)
   #par,cov = curve_fit(f,xx,yy)
   #x = linspace(0,15,200)
100 #plt.plot(x,f(x,*par), '--')

   plt.plot(xx,yy,'.-')
   plt.xlabel("x, cm")
105 plt.ylabel(r"$1A \cdot j_Y/I_{\{SP\}}, A/m$")

   # %%
   fig91 = plt.figure()

110 df = read_excel('data/Book12.xlsx', 'nr2.2')

   from numpy import interp, linspace
   x = df.ix[:,1]
   y = df.ix[:,5]
115 xx = linspace(0,15,16)
   yy = (interp(xx, x, y) + interp(-xx, x, y))/2
   plt.plot(xx,yy,'.-')

120 plt.xlabel("x, cm")
   plt.ylabel(r"$1A \cdot j_Y/I_{\{SP\}}, A/m$")

   # %%
125 fig101 = plt.figure()

   df = read_excel('data/Book12.xlsx', 'nr2.3')

   from numpy import interp, linspace
130 x = df.ix[:,1]
   y = df.ix[:,5]

   xx = linspace(0,15,16)
```



```

yy = (interp(xx, x, y) + interp(-xx, x, y))/2
135 plt.plot(xx,yy,'.-')

plt.xlabel("x, cm")
140 plt.ylabel(r"$1A \cdot j_Y/I_{\{SP\}}, A/m$")

# %% Skersindukcija

fig77 =plt.figure()
145 omega = [0.35,0.70,3.49,3.49,6.97,13.94]
jmax = [160,215,320,325,335,345]

omega, jmax = array(omega),array(jmax)
150 from scipy import array,absolute

plt.errorbar(omega,jmax,yerr=0.03*array(jmax),fmt='.')

155 from scipy.optimize import curve_fit

def f(omega,s):
    return s*absolute(1j*omega/(1-1j*omega))

160 par,cov = curve_fit(f,omega,jmax)

omx = linspace(0,15,200)
plt.plot(omx,f(omx,*par))
plt.xlabel(r"$\Omega$")
165 plt.ylabel(r"$1A \cdot j^{\{max\}}_Y/I_{\{SP\}}, A/m$")

# %% Imagināras un reālas daļas

170 from numpy import real,imag
figlim = plt.figure()
omegax = linspace(0,4,200)

plt.plot(omegax,345*real(1j*omegax/(1-1j*omegax)))
175 plt.plot([0.35,0.70,3.49],[-51.3,-90.9,-300],'.')

plt.xlabel(r"$\Omega$")
plt.ylabel(r"$\text{Re } j_{Y \ 1A}^{\{max\}}, A/m$ ")
180 # %%

from numpy import real,imag
figire = plt.figure()
185 omegax = linspace(0,4,200)

plt.plot(omegax,345*imag(1j*omegax/(1-1j*omegax)))

plt.plot([0.35,0.70,3.49],[152,195,109],'.')
190 plt.xlabel(r"$\Omega$")
plt.ylabel(r"$\text{Im } j_{Y \ 1A}^{\{max\}}, A/m$ ")

195 # %%
try:
    saving
except NameError:
    saving=False
200

```

```
if saving==True:
    from matplotlib.backends.backend_pdf import PdfPages
205     with PdfPages('results/figs.pdf') as pdf:
        pdf.savefig(fig1)
        pdf.savefig(fig2)
210     pdf.savefig(fig32)
        pdf.savefig(fig81)
        pdf.savefig(fig91)
        pdf.savefig(fig101)
        pdf.savefig(fig77)
215     pdf.savefig(figlim)
        pdf.savefig(fig1re)
```