
Latvijas Universitātē, Fizikas un matemātikas fakultātē, Fizikas nodaļa
Maģistra studiju programma
Laboratorijas darbu cikls “NEPĀRTRAUKTAS VIDES LABORATORIJA”
Andris Muižnieks

Skinefekts nemagnētiskā un feromagnētiskā materiālā



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

	$\sigma, S/m$	δ, mm 50 Hz	δ, mm 1 kHz
Dzelzs ($\mu=100$)	$1.0 \cdot 10^7$	2.25	0.50
Dūr-alumīnijs	$2.1 \cdot 10^7$	15.5	3.47
Alumīnijs	$3.7 \cdot 10^7$	11.7	2.62
Varš	$5.8 \cdot 10^7$	9.35	2.09
Sudrabs	$6.1 \cdot 10^7$	9.11	2.04
Zelts	$4.5 \cdot 10^7$	10.6	2.37

1-1. att. Ultraīsvīļņu radio 50 kW raidītāja svārstību kontūra spoles skinefekta dēļ tiek izgatavotas no ar sudraba kārtiņu pārklātām vara caurulēm. Dažādu materiālu vadītspējas un skinslāņa biezumi pie dažādām frekvencēm.

1. Darba mērķi

1. 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.
2. Iepazīties ar programmu paketi ANSYS skaitliski aprēķinātiem aksiāli simetriiskiem magnētiskā lauka sadalījumiem pie dažādām frekvencēm laboratorijas sistēmai, sastāvošai no induktora spoles un tajā ievietotas alumīnijs vai dzelzs caurules.

3. Iepazīties ar pašizgatavotiem maiņstrāvas magnētiskā lauka mērīšanas sensoriem, kuru darbība pamatojas uz Faradeja elektromagnētiskās indukcijas likumu.
4. Eksperimentāli pētīt skinefektu alumīnija caurulē, mērot tās spēju ekranēt ārējo magnētisko lauku atkarībā no strāvas frekvences un salīdzinot mērījumu rezultātus ar skaitliskās modelēšanas rezultātiem.
5. Eksperimentāli pētīt skinefektu dzelzs caurulē mērot magnētisko plūsmu tās skinslānī un nosakot dzelzs relatīvās magnētiskās caurlaidības atkarību no magnētiskā lauka intensitātes pie caurules virsma.

2. Teorētiskais apskats

2.1. Ievads

Ja vadošu ķermenī ievieto ārējā magnētiskajā laukā, kas ķermenī inducē virpuļstrāvas, vai arī, ja pa ķermenī laiž maiņstrāvu, tad augstāku frekvenču gadījumā gan strāva gan magnētiskais lauks ķermenī ir lokalizēts tikai ķermeņa virsma tiešā tuvumā, ķermeņa dziļumā nav ne magnētiskā lauka, ne elektriskās strāvas. Šo parādību sauc par SKINEFEKTU, un to var izmantot gan lai ar elektrisko strāvu uzkarsētu materiāla slāni tikai ķermeņa virsma tiešā tuvumā (to izmanto, piemēram, augstfrekvences rūdīšanā), gan lai aizsargātu kādus objektus no ārēja magnētiskā lauka – atliek tos ievietot vadošā materiāla čaulā. Skinefekta klātbūtne jāņem vērā arī pa vadiem pārvadot maiņstrāvu, jo augstāku frekvenču gadījumā strāva plūdīs tikai pa vadu virsma tiešā tuvumā un vadu aktīvā pretestība maiņstrāvai būs lielāka kā līdzstrāvas gadījumā.

2.2. Kvalitatīvs priekšstats par virpuļainu elektrisko lauku, virpuļstrāvām un skinefektu

Elektrodzinējspēks, kas darbojas kādā vadošā materiāla noslēgtā kontūrā L , cauri kuram uzstieptajai virsmai magnētiskā lauka plūsma mainīs laikā, tiek aprakstīts ar Faradeja likumu

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

EDS rašanās nozīmē, ka uz elementārlādiņiem vadoša materiāla kontūrā darbojas spēks, kas ir radies EM indukcijas parādības dēļ, pie kam šis spēks ir proporcionāls lādiņa lielumam. Šī spēka raksturošanai mēs varam ievest neelektrostatiskas dabas tā saucamo virpuļaino elektrisko lauku $\vec{E}_V = \vec{F}/q$, kas eksistē katrā kontūra punktā, pie kam ir spēkā

$$\mathcal{E} = \oint_L \vec{E}_V \cdot d\vec{l}, \text{ un } \oint_L \vec{E}_V \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Šis virpuļainais elektriskais lauks, līdzīgi kā elektrostatiskais lauks, ļauj aprēķināt spēku (kas darbojas uz kādu lādiņu telpas punktā, kur ir \vec{E}_V) pēc parastās formulas $\vec{F} = q\vec{E}$. Tikai elektrostatiskajā gadījumā lauks rodas tāpēc, ka tuvumā ir kādi citi lādiņi, bet elektromagnētiskās indukcijas gadījumā elektriskais lauks rodas tāpēc, ka kādā telpas daļā mainās magnētiskais lauks. Tādejādi tiek paplašināts elektriskā lauka jēdziens un turpmāk par elektrisko lauku sauc abus elektriskā lauka veidus, kā arī parasti nelieto speciālu indeksu virpuļainā lauka apzīmēšanai.

Šī virpuļainā elektriskā neelektrostatiskas 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. Šeit var saskatīt formālu līdzību ar cirkulācijas teorēmu magnētiskajam laukam $\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \iint_S \vec{j} d\vec{S}$.

No eksperimentālijiem 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.

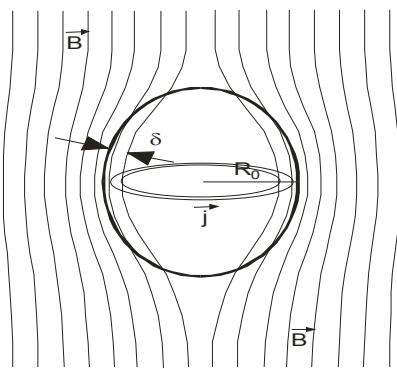
Ja mainīgā magnētiskā laukā, ko rada kāda spole, kurā plūst maiņstrāva (AC - *alternating current*), ko sauksim par primāro strāvu, ievieto masīvu vadošu ķermenī, tad tajā inducētais virpuļainais elektriskais lauks izraisīs sekundārās strāvas, kurām atbilstošie elektriskās strāvas tilpuma blīvuma vektori \vec{j} arī būs ar virpuļainu raksturu, un atbilstošās strāvas līnijas būs noslēgtas vadošā ķermeņa iekšpusē. Šīs strāvas mēdz saukt arī par Fuko strāvām. Bez tam, vadošais ķermenis var sajust 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 dzīlāk iekšpusē nav ne magnētiskā lauka ne strāvas, un sekundārā strāva plūst tikai šaurā slāni ķermeņa virsmas tiešā tuvumā. Šo slāni sauc par skinslāni. Rezultējošais magnētiskai lauks arī iespiežas ķermenī tikai šī skinslāņa robežās. Šo efektu sauc par skinefektu (skat. 2-2. att.). 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 (skat. punktu 2.4 un [1]), ka šie lielumi būs e reizes samazinājušies attālumā no virsmas

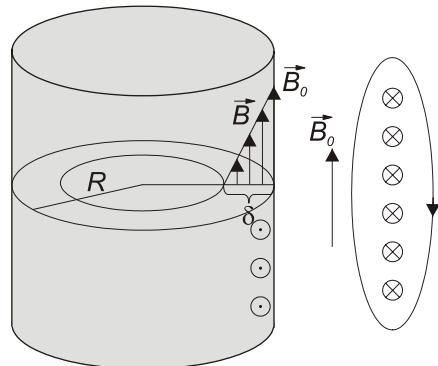
$$\boxed{\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0 f \sigma}}}.$$

Šo attālumu tad sauc par skinslāņa biezumu. Izteikts skinefekts būs tad, ja $\delta < R_0$, kur R_0 ir ķermeņa izmēri.

Latvijas Universitāte, Fizikas un matemātikas fakultāte, Fizikas nodaļa, Maģistra studiju programma Laboratorijas darbu cikls "NEPĀRTRAUKTAS VIDES LABORATORIJA". „Skinefekts nemagnētiskā un feromagnētiskā materiālā.” Andris Muižnieks.



2-2. att. Magnētiskā lauka izteikta skinefekta gadījumā shematisks attēls.



2-3. att. Skice skinslāņa biezuma tuvinātam izvedumam.

2.3. Tuvināts skinslāņa biezuma formulas izvedums

No fizikāliem apsvērumiem var tuvināti izvest skinslāņa biezuma δ formulu. Vienkāršojot aplūkosim garu vadošu cilindru, kas ievietots garā spolē, pa kuru plūst augstas frekvences maiņstrāva. Pieņemsim, ka magnētiskais lauks iespiežas vadošā materiālā dziļumā δ , lineāri dilstot no vērtības B_0 līdz nullei (skat. 2-3. att.).

Magnētiskā lauka plūsma skinslānī ir $\Phi = \frac{1}{2} B_0 \delta 2\pi R$. Šī magnētiskā lauka plūsma arī ir tā, kas inducē pie materiāla virsmas tā iekšpusē virpuļstrāvas. Elektriskā lauka intensitāte pie pašas vadītāja virsmas pēc indukcijas likuma $\oint \vec{E} d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$ izsakās no

$$2\pi R E = \omega \Phi = \frac{1}{2} \omega B_0 \delta 2\pi R, \text{ tātad } E = \frac{1}{2} \omega B_0 \delta.$$

Strāvas blīvums pie vadītāja virsmas ir $j = E\sigma = \frac{1}{2} \omega B_0 \delta \sigma$. Ja pieņemam, ka vidējais strāvas blīvums ir divreiz mazāks, tad skinslānī lineārais strāvas blīvums ir

$$j_{lin} = \frac{j}{2} \delta = \frac{1}{4} \omega B_0 \delta^2 \sigma.$$

Šis lineārais strāvas blīvums analogiski spoles vijumiem materiāla iekšpusē rada lauku, kam ir jābūt pretēji vērstam un pēc vērtības vienādam ar ārējo lauku (jo skinefekta gadījumā iekšpusē lauka nav). Tātad $j_{lin} \mu_0 = B_0$ un

$$\frac{1}{4} 2\pi f B_0 \delta^2 \mu_0 \sigma = B_0,$$

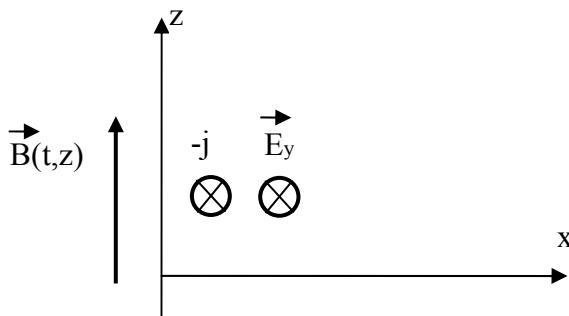
no kurienes var tuvināti izteikt skinslāņa biezumu:

$$\delta = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi \mu_0 f \sigma}}. \text{ Šis rezultāts tikai ar reizinātāju } \sqrt{2} \text{ atšķiras no precīzās formulas.}$$

2.4. Analītisks skinslāņa atrisinājums bezgalīgā pustelpā ar konstantām materiāla īpašībām

Pilns skinslāņa risinājums bezgalīgā pustelpā ar konstantām materiāla īpašībām ir dots laboratorijas darba „Augstfrekvences strāvu sadalījumu pētišana uz vadošu objektu virsmām” aprakstā [1], tāpēc šajā nodalā tiek dots tikai atrisinājuma kopsavilkums.

Skinslānis tiek analītiski aprēķināts vadošā pustelpā ($x > 0$), pie kam tiek pieņemts, ka magnētiskā lauka indukcijas vektors ir vērsts z ass virzienā un mainās laikā harmoniski (skat. 2-4. att.). Tieki pieņemts, ka visi lielumi ir atkarīgi tikai no laika un koordinātes x . No Maksvela vienādojumiem tādā gadījumā izriet, ka inducētais elektriskais virpuļlauks un strāva ir vērsti gar y asi.



2-4. att. Skice skinslāņa biezuma analītiskam izvedumam.

Var parādīt, ka šajā gadījumā magnētisko lauku skinslānī var aprakstīt ar sekojošu vienādojumu

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \mu_0 \mu \sigma \frac{\partial B_z}{\partial t}.$$

Tā kā šim vienādojumam atrisinājumu meklējam kā harmoniskas laika funkcijas, tad lietojam kompleksus mainīgos un vienādojuma atrisinājumu meklējam formā

$$B_C = B_{C0}(x) \cdot e^{i\omega t},$$

kur $B_{C0}(x)$ ir kompleksā amplitūda un ir atkarīga tikai no x koordinātes. Laikā periodiski mainīgā lauka eksponenciālais pieraksts ar imagināro vienību tiek lietots ērtības labad, jo šādai kompleksai funkcijai ērtāk ir veicamas atvasināšanas un citas matemātiskās darbības, kā arī pats pieraksts ir īsāks nekā lietojot trigonometriskās funkcijas. Tomēr jāatceras, ka fizikālo atrisinājumu nosaka tikai kompleksā atrisinājuma reālā daļa. Lai to iegūtu, jāveic pārveidojumus, kas atdala reālo un imagināro daļu

$$\begin{aligned} B_C &= B_{C0} e^{i\omega t} = (B_{C0,\text{Re}} + i \cdot B_{C0,\text{Im}}) \cdot (\cos \omega t + i \sin \omega t) = \\ &= B_{C0,\text{Re}} \cos \omega t - B_{C0,\text{Im}} \sin \omega t + i \cdot B_{C0,\text{Im}} \cos \omega t + i \cdot B_{C0,\text{Re}} \sin \omega t \end{aligned}$$

Nemot šī lieluma reālo daļu, iegūstam dotajā telpas punktā x magnētiskā lauka atkarību no laika

$$B(x, t) = B_{C0, \text{Re}}(x) \cdot \cos \omega t - B_{C0, \text{Im}}(x) \cdot \sin \omega t$$

Savukārt šo izteiksmi var pārrakstīt formā, izmantojot amplitūdu un sākuma fāzi

$$B(x, t) = B_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi),$$

kur magnētiskā lauka amplitūda (ne kompleksā!) un sākuma fāze ir

$$B_0(x) = \sqrt{B_{0\text{Re}}^2 + B_{0\text{Im}}^2}, \quad \varphi(x) = \arctan \frac{B_{C0, \text{Im}}}{B_{C0, \text{Re}}}.$$

Redzam, ka kompleksās amplitūdas $B_{C0}(x)$ reālā un imaginārā daļa ļauj aprēķināt gan magnētiskā lauka amplitūdu, gan arī sākuma fāzi. Piemēram, ja imaginārā daļa ir nulle, tad magnētiskais lauks svārstās kā kosinusa funkcija. Savukārt, ja reālā daļa ir nulle, tad magnētiskais lauks svārstās kā sinusa funkcija. Tāpēc skaitliskajās aprēķinu paketēs virpuļstrāvu aprēķinus parasti veic un rezultātus noglabā kompleksajos mainīgajos – kā reālo un imagināro daļu, no kurām tad aprēķina amplitūdu un fāzi, ja nepieciešams.

Vienādojuma magnētiskajam laukam skinslānī atrisinājums kompleksajai amplitūdai $B_{C0}(x)$ ir sekojošs [1], ja pieņem, ka ārējam magnētiskajam laukam pie vadītāja virsmas, t.i. robežnosacījumam no nulles ir atšķirīga tikai reālā daļa $B_{B, \text{Re}}$ un imaginārā daļa ir nulle

$$B_{C0}(x) = B_{B, \text{Re}} \exp\left[-\frac{x}{\delta}\right] \cdot \cos \frac{x}{\delta} - i \cdot B_{B, \text{Re}} \exp\left[-\frac{x}{\delta}\right] \cdot \sin \frac{x}{\delta}.$$

Ir redzams, ka virsmas slānī ar biezumu δ magnētiskā lauka vērtība (gan reālai, gan imaginārai daļai) ir kritisies e reizes. Izmantojot izteiksmi

$$B(x, t) = B_{C0, \text{Re}}(x) \cdot \cos \omega t - B_{C0, \text{Im}}(x) \cdot \sin \omega t$$

uzraksta atrisinājumu magnētiskajam laukam skinslānī

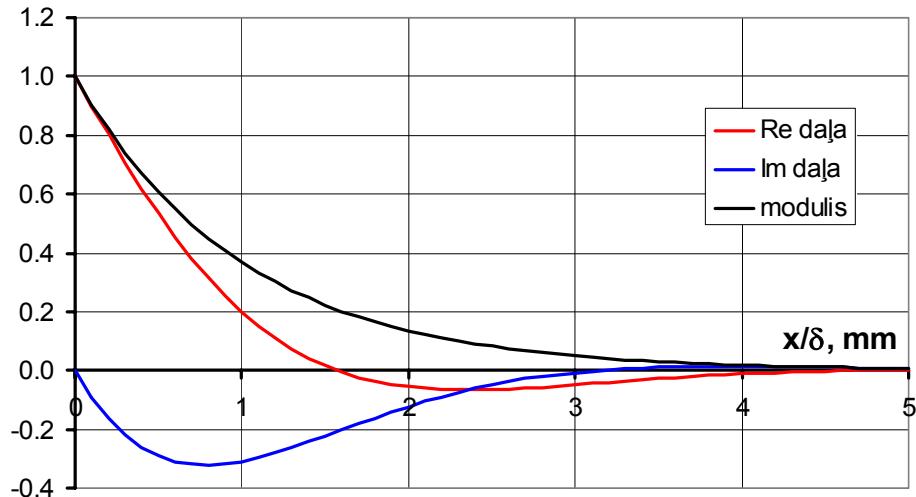
$$B(x, t) = B_{B, \text{Re}} \exp\left[-\frac{x}{\delta}\right] \cdot \left(\cos \frac{x}{\delta} \cdot \cos \omega t - \sin \frac{x}{\delta} \cdot \sin \omega t \right).$$

Amplitūdai (ne kompleksajai !!!) un fāzei iegūst (skat. grafisku attēlojumu 2-5. att.)

$$B_0(x) = B_{B, \text{Re}} \exp\left[-\frac{x}{\delta}\right],$$

Latvijas Universitāte, Fizikas un matemātikas fakultāte, Fizikas nodaļa, Maģistra studiju programma Laboratorijas darbu cikls „NEPĀRTRAUKTAS VIDES LABORATORIJA”. „Skinefekts nemagnētiskā un feromagnētiskā materiālā.” Andris Muižnieks. 6

$$\varphi(x) = \arctan \frac{-B_{B,\text{Re}} \exp\left[-\frac{x}{\delta}\right] \cdot \sin \frac{x}{\delta}}{B_{B,\text{Re}} \exp\left[-\frac{x}{\delta}\right] \cdot \cos \frac{x}{\delta}} = \frac{-\sin \frac{x}{\delta}}{\cos \frac{x}{\delta}} = -\frac{x}{\delta}$$



2-5. att. Magnētiskā lauka materiālā kompleksās amplitūdas reālā un imaginārā daļa un modulis jeb parastā amplitūda kā koordinātes x funkcija gadījumā, ja uz vadītāja virsmas $B_{B,\text{Re}} = 1$ un $B_{B,\text{Im}} = 0$.

Lai noteiktu kopējo magnētiskā lauka plūsmu skinslānī, magnētiskā lauka reālā un imaginārā daļa ir jāintegri pa koordināti x . Ērtāk to ir darīt kompleksajai amplitūdai un pēc tam atdalīt reālo un imagināro daļu:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty B_{C0}(x) \cdot dx &= \int_0^\infty B_B \exp\left[-\frac{1}{\delta}(1+i) \cdot x\right] \cdot dx = B_B \exp\left[-\frac{1}{\delta}(1+i) \cdot x\right] \frac{-\delta}{1+i} \Big|_0^\infty \\ B_B \exp\left[-\frac{1}{\delta}(1+i) \cdot x\right] \frac{-\delta}{1+i} \Big|_0^\infty &= B_B \frac{\delta}{1+i} = B_B \frac{\delta(1-i)}{(1+i)(1-i)} = \frac{1}{2} B_B \delta - i \frac{1}{2} B_B \delta \end{aligned}$$

Redzam, ka nointegrēts pa dziļumu magnētiskais lauks dod plūsmu, kas ir atšķiras fāzē no magnētiskā lauka pie materiāla virsmas par 45° .

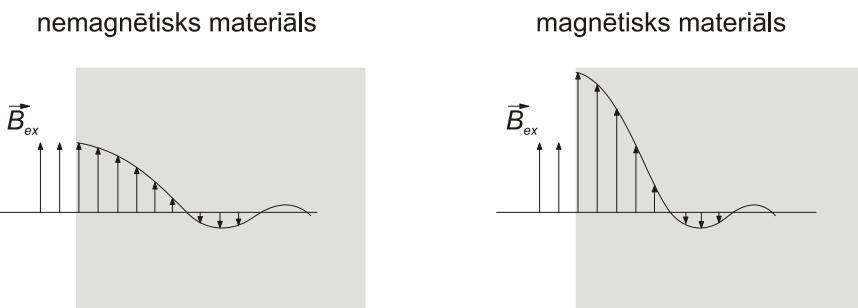
2.5. Skinslāņa tuvināts analītisks risinājums feromagnētiskam materiālam ar konstantām materiāla īpašībām

Ja aplūko magnētisku materiālu ar konstantu relatīvās magnētiskās caurlaidības μ vērtību, tad var izmantot iepriekš iegūtās sakarības analītiskajam risinājumam, jo šajā risinājumā pie reizinājuma $\mu_0\mu$ tiek norādīta relatīvās magnētiskās caurlaidības vērtība μ . Piemēram, aprēķinot skinslāņa biezumu elektrovadošā feromagnētiskā pēc formulas

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

iegūsim lielās μ vērtības dēļ (feromagnētiķiem simti vai tūkstoši) salīdzinoši mazu δ vērtību.

Bez tam ir jāņem vērā, ka magnētiskais lauks materiālā pie tā virsmas ir μ reižu lielāks kā ārējais lauks B_{ex} pie tā virsmas. No tā seko, ka arī strāvas blīvuma vērtība pie virsmas ir μ reižu lielāka kā nemagnētiska materiāla gadījumā. 2-6. att. kvalitatīvi parāda magnētiskā lauka sadalījumu salīdzinājumu nemagnētiskam un magnētiskam ($\mu>1$) materiālam.



2-6. att. Magnētiskais lauks nemagnētiskā un magnētiskā materiālā.

Feromagnētiskiem materiāliem μ tomēr ir atkarīgs no lauka B vērtības (skat. 2-7. att.). Skinslāņa gadījumā tas nozīmē, ka μ mainās gan laikā, gan arī atkarībā no attāluma līdz virsmai. Praksē tomēr bieži izmanto tuvinājumu, uzskatot, ka μ laikā ir nemainīgs un tā vērtība atbilst magnētiskā lauka uz vadītāja virsmas efektīvajai vērtībai.

Ja aplūko feromagnētiskas dzelzs cilindru ar rādiusu R_{Fe} , tad izteikta skinefekta gadījumā magnētiskā lauka plūsma skinslānī (pieņemot konstantu μ vērtību pa skinslāņa biezumu) ir (efektīvā vērtība)

$$\Phi_{in} = B_{ex}\mu \cdot 2\pi R_{Fe} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\mu f\sigma}} = \frac{B_{ex} 2\sqrt{\pi} R_{Fe} \sqrt{\mu}}{\sqrt{\mu_0 f\sigma}}.$$

Šī plūsma inducēs uz cilindra uztītā mērspolē ar N_{Fe} vijumiem spriegumu (efektīvā vērtība) $U_{Fe} = 2\pi f N_{Fe} \Phi_{in}$. Tātad izmērot U_{Fe} , var aprēķināt Φ_{in} . Savukārt no strāvas lineārā blīvuma j_{lin} indukcijas spolē var aprēķināt B_{ex} : $B_{ex} = \mu_0 j_{lin}$.

Tas ļauj aprēķināt dzelzs relatīvo magnētisko caurlaidību pie dotās B_{ex} vērtības:

$$\mu = \frac{\Phi_{in}^2 \mu_0 f \sigma}{B_{ex}^2 4\pi R_{Fe}^2}.$$

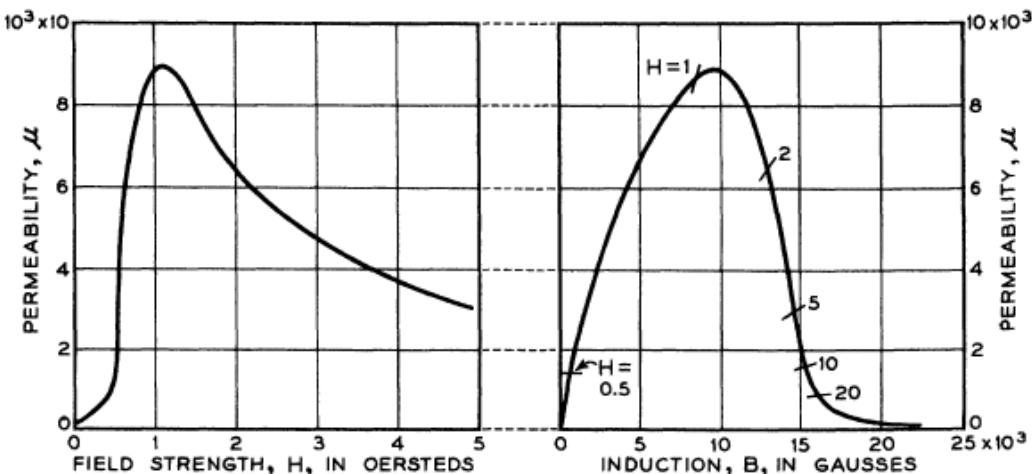


FIG. 1-5. Permeability curves of iron, with μ plotted against H and B . I and $B-H$ are also used as abscissae.

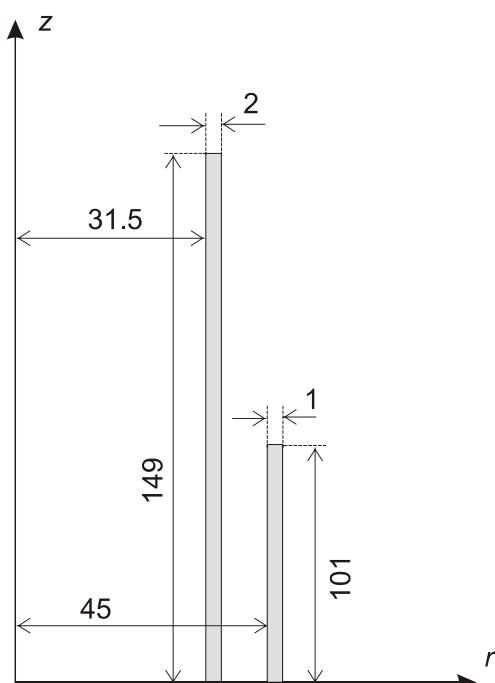
2-7. att. Piemērs relatīvās magnētiskās caurlaidības atkarībai no magnētiskā lauka intensitātes feromagnētiskai dzelzij.

2.6. Elektromagnētiskā lauka skaitlisks aprēķins laboratorijas sistēmā, kas sastāv tikai no spoles

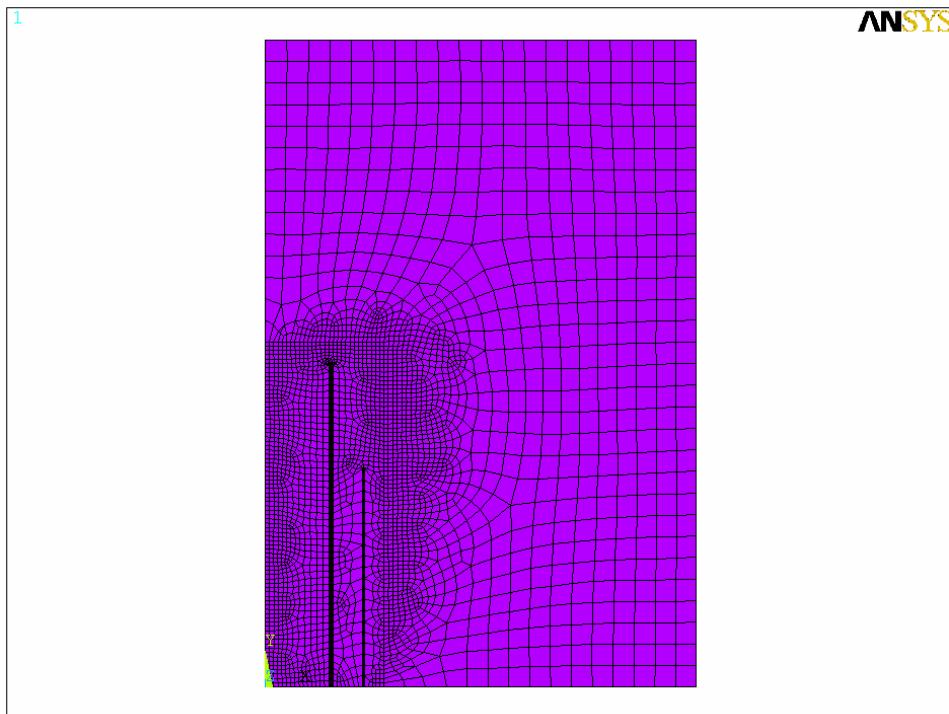
Laboratorijas sistēmas, kas sastāv no indukcijas spoles un tajā ievietotas alumīnija caurules, izmēri ir parādīti 2-8. att.. Izmantojot paketi ANSYS, vertikālā šķērsgriezumā tiek izveidots galīgo elementu režģis, skat. 2-9. un 2-10. att., pie kam izmantojot sistēmas simetrijas īpašības, tiek aprēķināts magnētiskais lauks tikai augšējā sistēmas pusē.

Šis galīgo elementu režģis tika lietots, lai aprēķinātu magnētisko lauku sistēmā, kas sastāv tikai no indukcijas spoles. Šim nolūkam tika veikts aprēķins pie strāvas frekvences $f=0$ Hz, jo līdzstrāvas gadījumā alumīnija caurulē virpuļstrāvas neinducējas un var uzskatīt, ka caurules klātbūtne magnētisko lauku neietekmē. Strāva spolē aprēķinā tika izvēlēta tā, ka lineārais strāvas blīvums ir $j_{lin}=1e-3$ A/m. Tika pieņemts, ka spolē plūstošai strāvai ir tikai reālā daļa atšķirīga no nulles, līdz ar to spoles radītais magnētiskais lauks arī ir ar tikai reālo daļu. 2-11. un 2-12. att. rāda aprēķinātā magnētiskā lauka līnijas un vektorus. Ir redzams, ka spoles centrā magnētisko lauku var labā tuvinājumā uzskatīt par homogēnu un vertikāli orientētu.

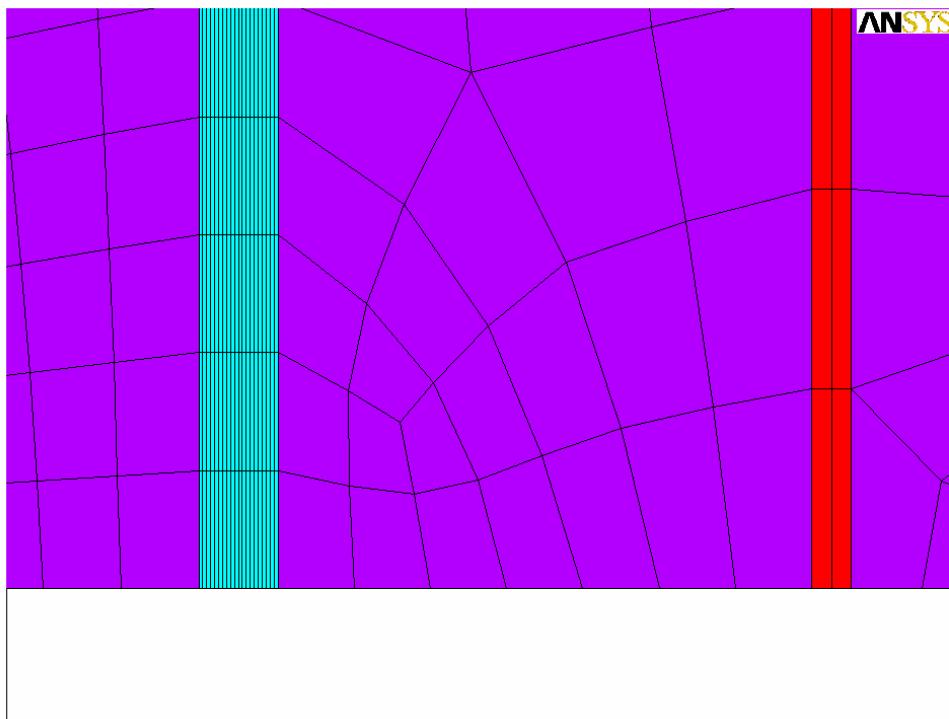
2-13. att. rāda spoles radītā magnētiskā lauka vertikālās komponentes sadalījums uz tās ass. No tā seko, ka magnētiskā lauka vērtība pie dotā strāvas lineārā blīvuma spoles centrā ir $1.118 \cdot 10^{-9}$ T. No formulas bezgalīgi garai spolei seko, ka tajā magnētiskajam laukam būtu jābūt $B_\infty = \mu_0 j_{lin} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-3} \approx 1.257 \cdot 10^{-9}$ T. Redzam, ka ir spēkā attiecība $B_{lab} / B_\infty = 1.118 / 1.257 \approx 0.89$, proti, magnētiskais lauks laboratorijas spoles centrā ir apmēram par 10% mazāks par bezgalīgi garas spoles lauku ar tādu pašu strāvu un vijumu skaitu uz garuma vienību.



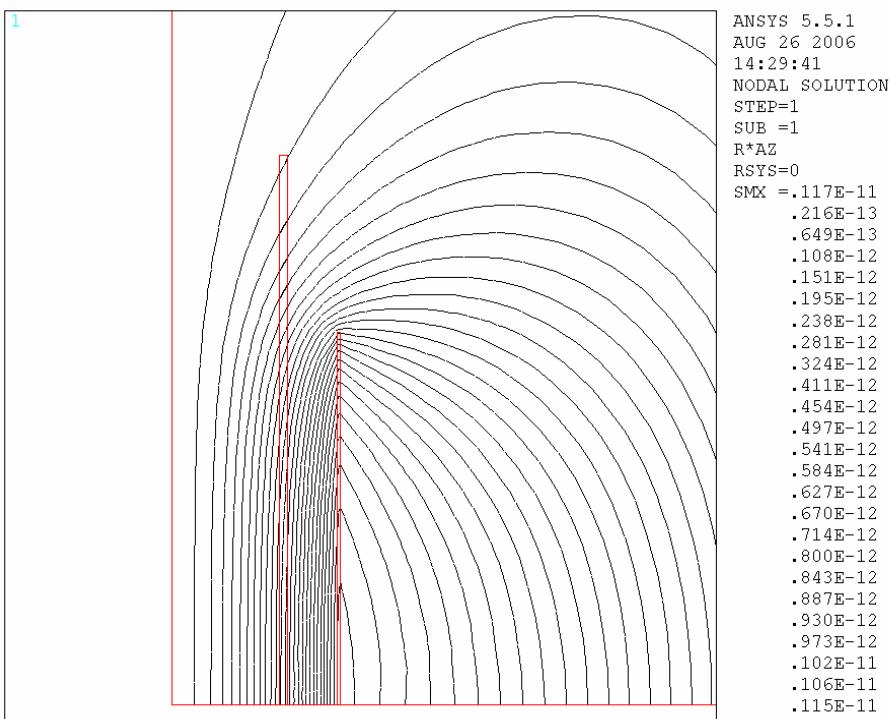
2-8. att. No alumīnija caurules un indukcijas spoles sastāvošas sistēmas izmēri (mm), vertikālajā šķērsgriezumā tiek parādīta tikai sistēmas augšējā puse.



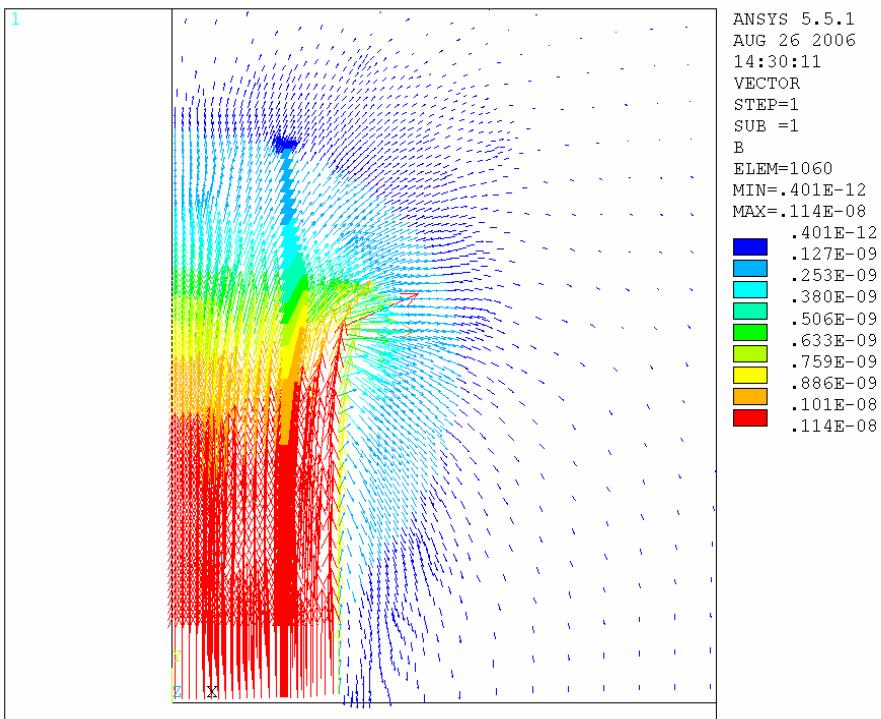
2-9. att. Galīgo elementu režģis vertikālā šķērsgriezumā sistēmai ar alumīnija cauruli un indukcijas spoli.



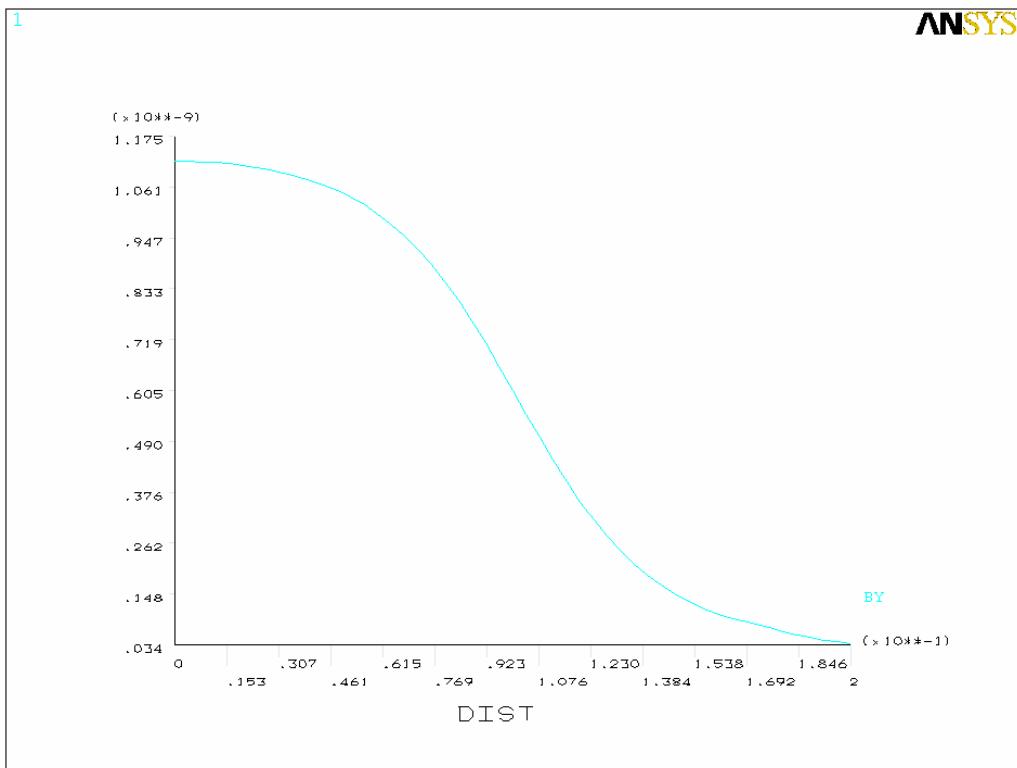
2-10. att. Galīgo elementu režģa palielināts fragments vertikālā šķērsgriezumā sistēmai ar alumīnija cauruli un indukcijas spoli, pa kreisi caurules sieniņa, pa labi indukcijas spole.



2-11. att. Vienas pašas spoles radītā magnētiskā lauka līnijas (tam ir tikai reālā daļa), attēlā ir parādīta arī vieta, kur tiks ievietota alumīnija caurule.



2-12. att. Spoles radītā magnētiskā lauka vektori.



2-13. att. Spoles radītā magnētiskā vertikālās komponentes sadalījums uz tās ass.

2.7. Elektromagnētiskā lauka skaitlisks aprēķins laboratorijas sistēmā, kas sastāv no spoles un tajā ievietotas alumīnija caurules skinefekta gadījumā

Aksiāli simetriskas sistēmas, kas sastāv no indukcijas spoles un tajā ievietotas alumīnija caurules, izmēri ir doti jau 2-8. att.. 2-9. un 2-10. att. parāda ar paketi ANSYS vertikālā šķērsgriezumā izveidoto galīgo elementu režģi.

Tika veikts aprēķins pie strāvas frekvencēm $f=100, 500, 1000, 5000$ un 20000 Hz. Tā kā caurule bija nevis no tīra alumīnija, bet gan sakausējuma, ko sauc par „duraluminum”, tad materiāla īpatnējā elektriskā pretestība ir $4.7e-8 \Omega\text{m}$. Tā kā tiek aplūkots lineārs uzdevums, tad strāvu spolē aprēķinā var patvērtīgi izvēlēties, tā tika izvēlēta tā, ka lineārais strāvas blīvums visos gadījumos ir $j_{lin}=1e-3 \text{ A/m}$. Tika pieņemts, ka spolē plūstošai strāvai ir tikai reāla daļa atšķirīga no nulles, līdz ar to spoles radītais magnētiskais lauks arī ir ar tikai reālo daļu. Imaginārā daļa magnētiskajam laukam parādās tikai tāpēc, ka alumīnija caurulē inducētajām virpuļstrāvām ir fāzu nobīde attiecībā pret strāvu spolē.

2-14. un 2-15. att. rāda pie $f = 500$ Hz aprēķinātā magnētiskā lauka reālo un imagināro daļu lauka līniju veidā, att. 2-16. att. rāda lauka reālo daļu vektoru veidā. Ir redzams, ka pie $f=500$ Hz alumīnija caurule sev cauri laiž tikai daļu magnētiskā lauka. Savukārt 2-17. att. un 2-18. att. parāda magnētiskā lauka vektoru sadalījuma caurules sieniņā un tās tiešā tuvumā reālo un imagināro daļu.

2-19. att. un 2-20. att. rāda magnētiskā lauka vertikālās komponentes reālās un imaginārās daļas sadalījumu uz sistēmas ass pie $f=500$ Hz. Atbilstošais modula sadalījums ir parādīts 2-21. att. Šis sadalījums ļauj izrēķināt, par cik ir pavājināts magnētiskā lauka modulis spoles centrā alumīnija caurules dēļ, salīdzinot ar gadījumu bez caurules, pie dotā lineārā strāvas blīvuma.

$$\frac{B_{Al}}{B_0} \approx \frac{4.382 \cdot 10^{-10}}{1.118 \cdot 10^{-9}} \approx 0.392$$

Šī attiecība tika izrēķināta arī pārējām minētajām frekvencēm, atbilstošos skaitliski aprēķinātos grafikus skat. 9. pielikumā. 2-22. att. parāda šīs attiecības atkarību no frekvences grafiski. Tabulas veidā šī attiecība ir parādīta 2-1. tabulā.

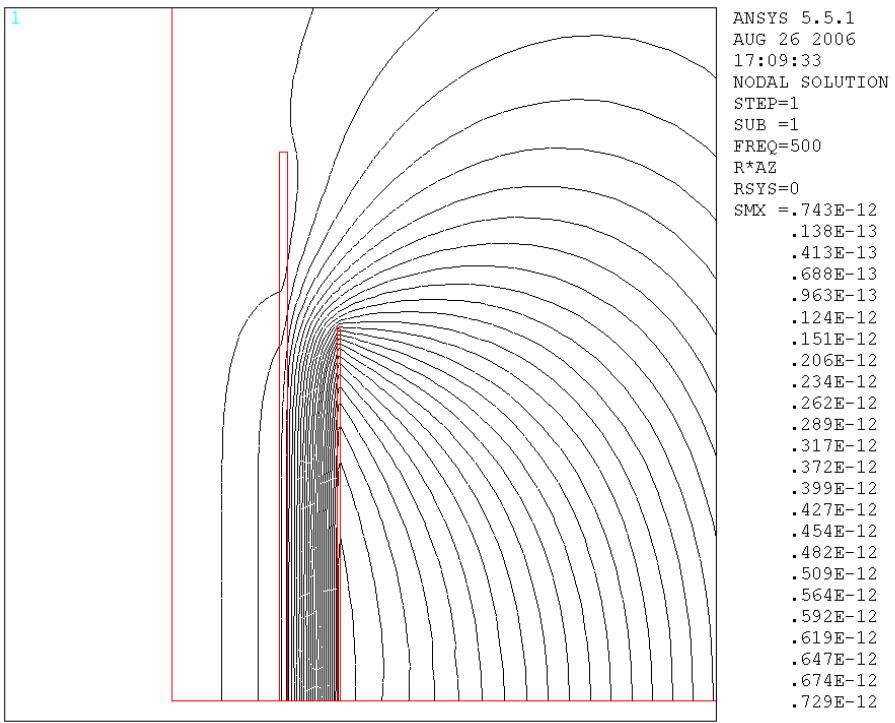
f , Hz	100	500	1000	5000	20000
B_{Al}/B_0	0.907	0.392	0.208	0.0401	0.00607

2-1. tab. Skaitliski aprēķinātā attiecība starp magnētiskā lauka vērtību spoles centrā gadījumā ar alumīnija cauruli un gadījumā ar vienu pašu indukcijas spoli.

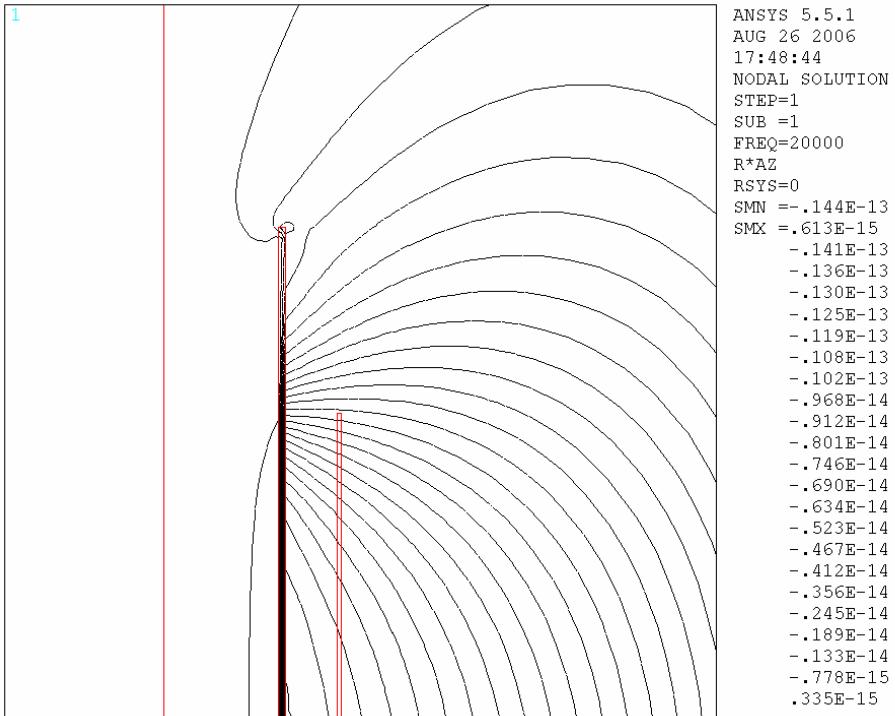
Skaitliski aprēķinātā magnētiskā lauka spoles centrā reālā un imaginārā daļa ļauj aprēķināt fāzu nobīdi starp magnētisko lauku caurules iekšpusē un strāvu spolē, skat. 2-2. tab.

f , Hz	100	500	1000	5000	20000
$\Delta\phi$, grādi	-26	-70	-84	63	-12

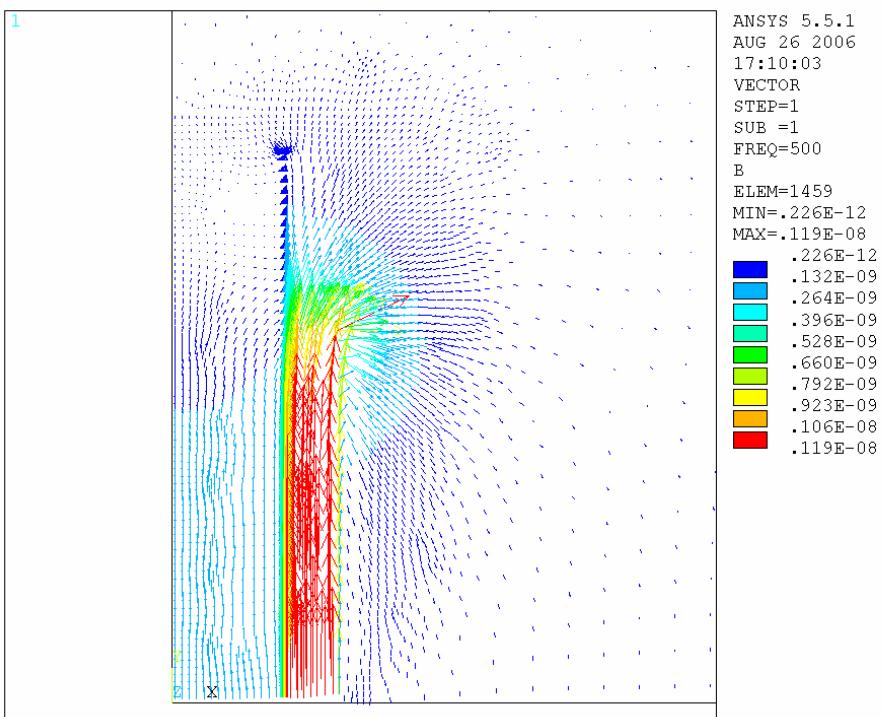
2-2. tab. No skaitliskiem aprēķiniem iegūtā fāzu nobīde starp magnētisko lauku caurules iekšpusē un strāvu spolē.



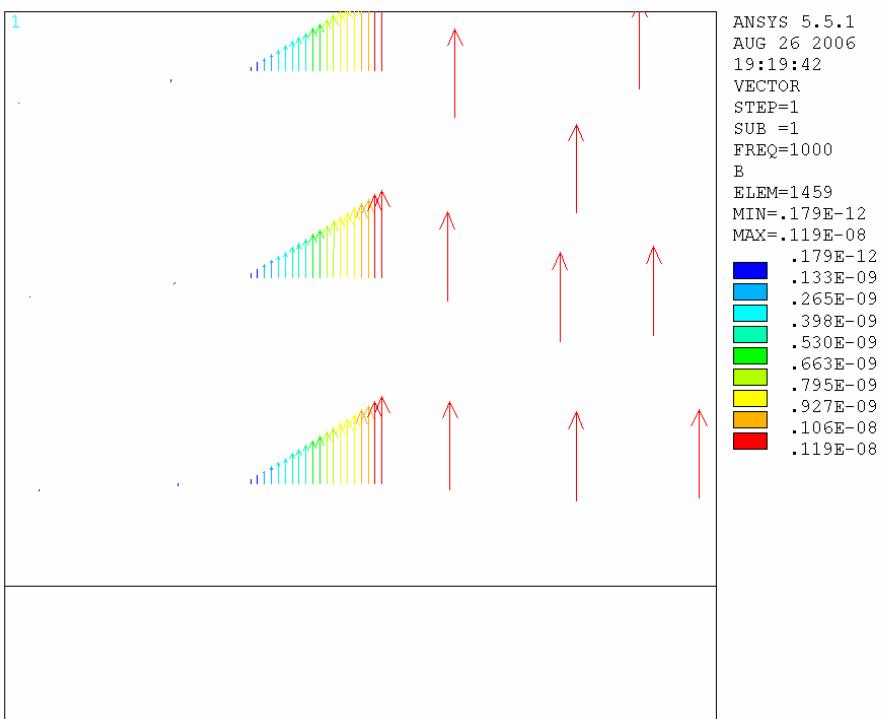
2-14. att. Aprēķinātā magnētiskā lauka reālās daļas lauka līnijas, $f=500$ Hz.



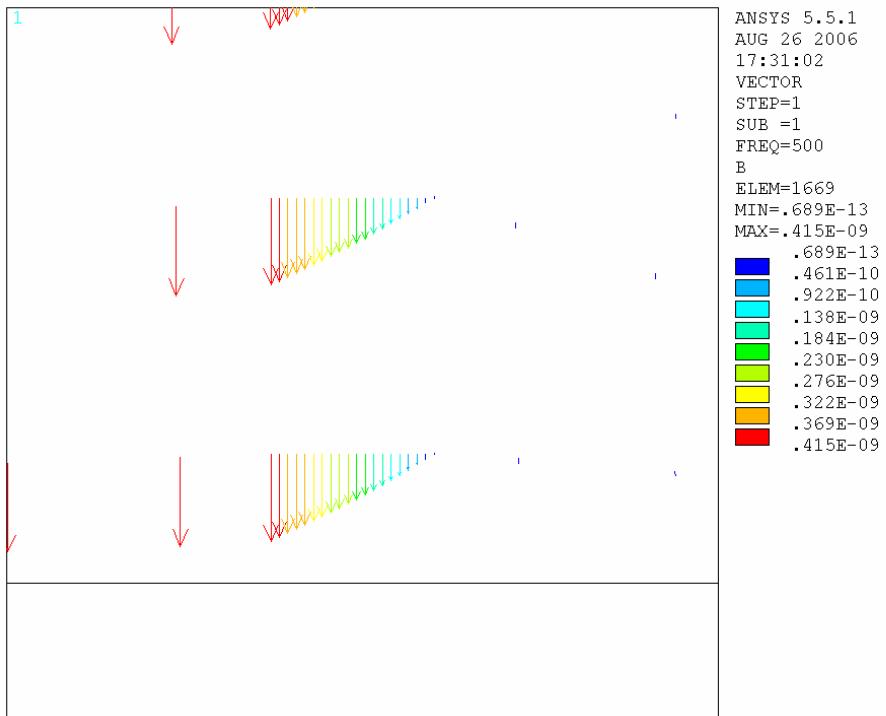
2-15. att. Aprēķinātā magnētiskā lauka imaginārās daļas lauka līnijas, $f=500$ Hz.



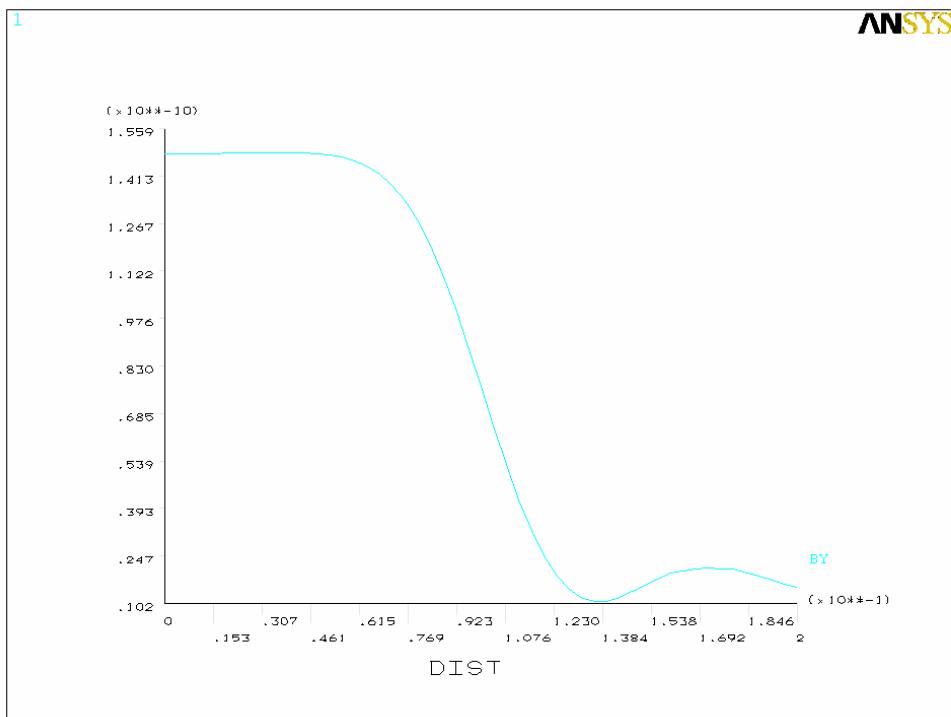
2-16. att. Aprēķinātā magnētiskā lauka reālās daļas vektori, $f=500$ Hz.



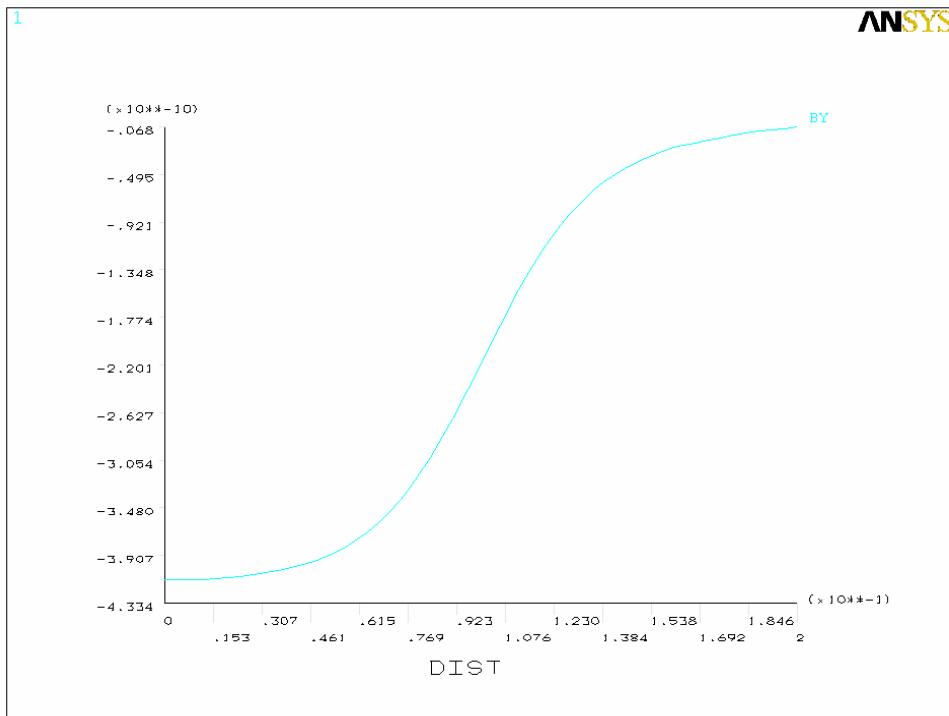
2-17. att. Aprēķinātā magnētiskā lauka reālās daļas vektori alumīnija caurules sieniņā un tās tuvumā, $f=500$ Hz.



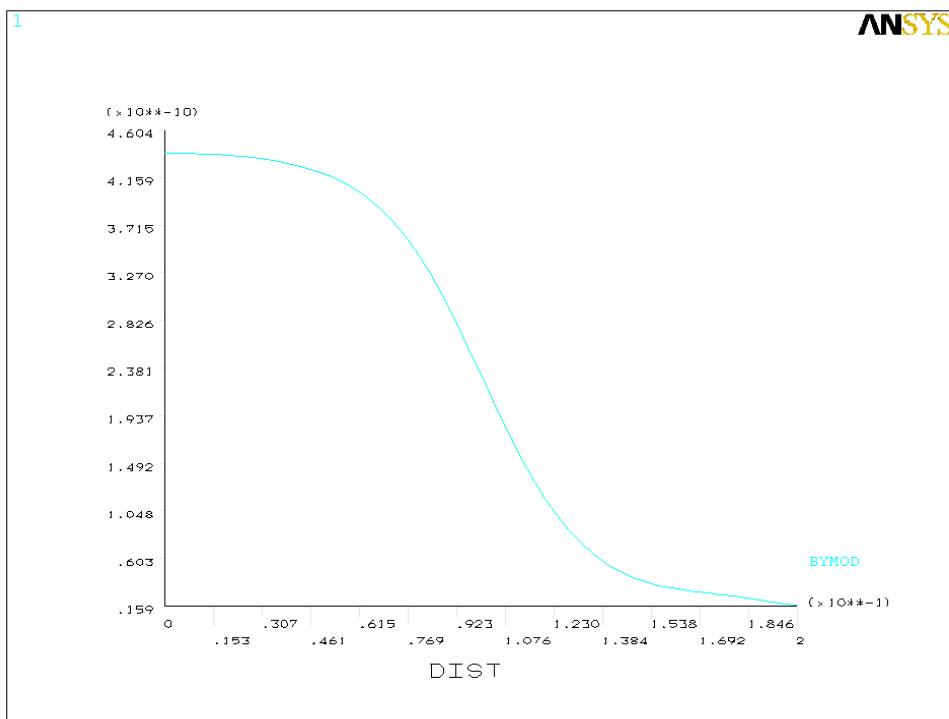
2-18. att. Aprēķinātā magnētiskā lauka imaginārās daļas vektori alumīnija caurules sieniņā un tās tuvumā, $f=500$ Hz.



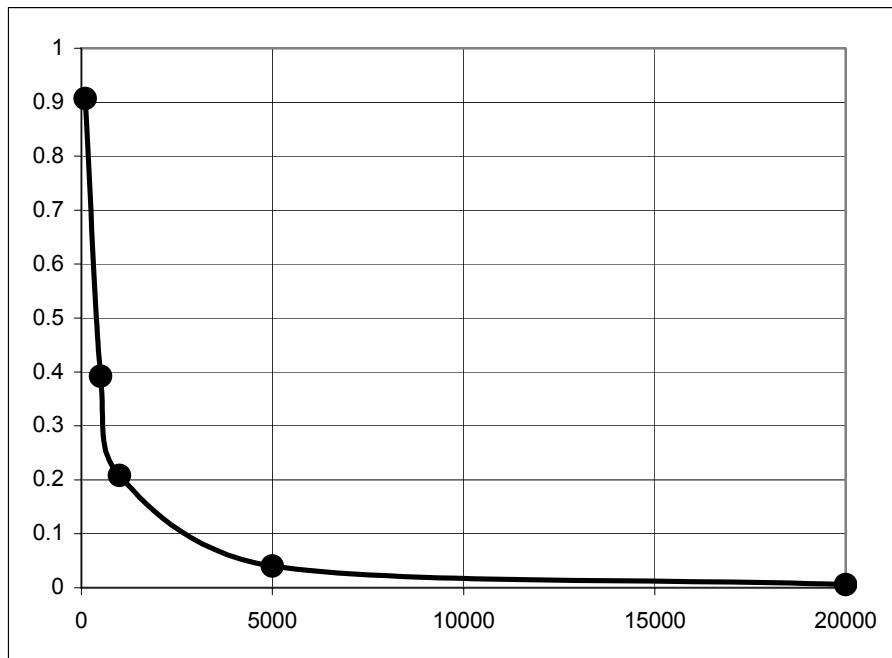
2-19. att. Magnētiskā lauka vertikālās komponentes reālās daļas sadalījums uz sistēmas ass, $f=500$ Hz.



2-20. att. Magnētiskā lauka vertikālās komponentes imaginārās daļas sadalījums uz sistēmas ass, $f=500$ Hz.



2-21. att. Magnētiskā lauka vertikālās komponentes moduļa sadalījums uz sistēmas ass, $f=500$ Hz.



2-22. att. Attiecības, par cik ir pavājināts magnētiskā lauka modulis spoles centrā alumīnija caurules dēļ, salīdzinot ar gadījumu bez caurules, pie dotā lineārā strāvas blīvuma, atkarība no frekvences.

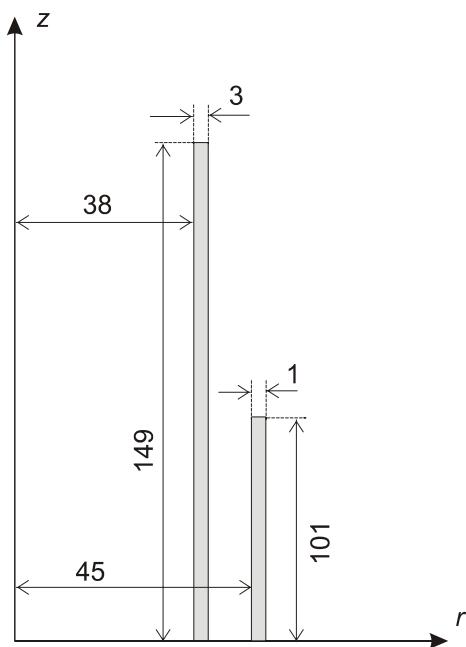
2.8. Elektromagnētiskā lauka skaitlisks aprēķins sistēmai, kas sastāv no spoles un tajā ievietotas dzelzs caurules skinefekta gadījumā.

Aksiāli simetriskas sistēmas, sastāvošas no dzelzs caurules un indukcijas spoles izmēri ir doti 2-22. att. Izmantojot paketi ANSYS vertikālā šķērsgriezumā tiek izveidots galīgo elementu režģis, skat. 2-23. att., pie kam izmantojot sistēmas simetrijas īpašības, tiek aprēķināts magnētiskais lauks tikai augšējā sistēmas pusē. Savukārt 2-24. att. rāda šī režģa palielinātu izgriezumu ar dzelzs caurules sienīnas un spoles fragmentu.

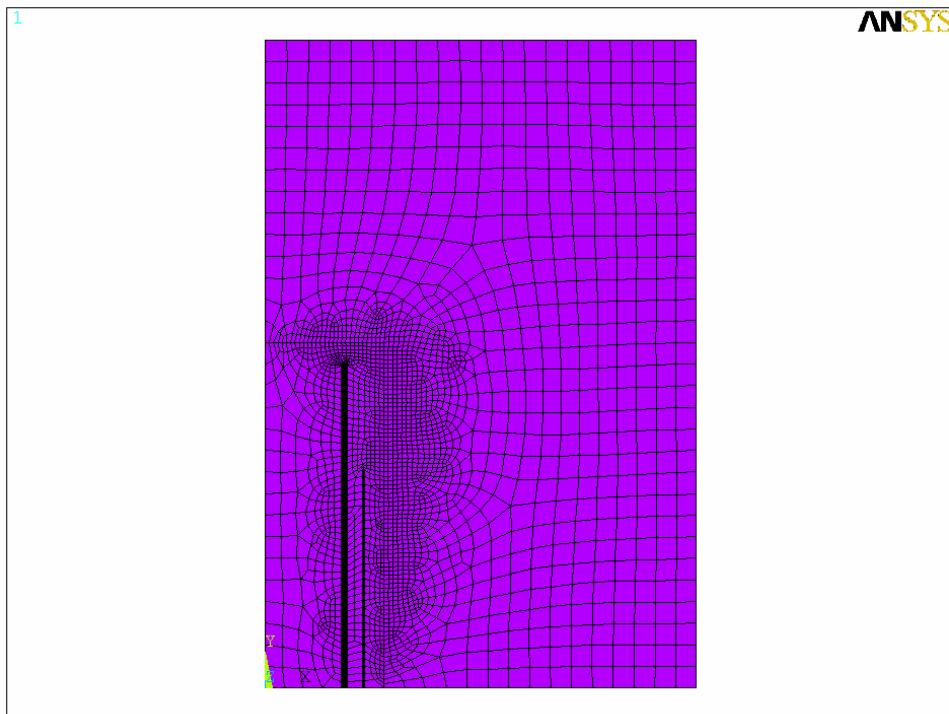
Tika veikts aprēķins pie strāvas frekvences $f=500$ Hz, pieņemot, ka dzelzs relatīvā magnētiskā caurlaidība ir $\mu=100$ un īpatnējā elektriskā vadītspēja ir $\sigma=1e7$ S/m. Tā kā aprēķins tiek veikts ar fiksētu magnētisko caurlaidību, tad strāvu spolē aprēķinā var patvaiši izvēlēties, tā tika izvēlēta tā, ka lineārais strāvas blīvums ir $j_{lin}=0.001$ A/m. Tika pieņemts, ka spolē plūstošai strāvai ir tikai reālā daļa atšķirīga no nulles, līdz ar to spoles radītais magnētiskais lauks arī ir ar tikai reālo daļu. Imaginārā daļa magnētiskajam laukam parādās tāpēc, ka dzelzs caurulē inducētajām virpuļstrāvām ir fāzu nobīde attiecībā pret strāvu spolē.

2-25. un 2-26. att. rāda aprēķinātā magnētiskā lauka reālo un imagināro daļu lauka līniju veidā. Ir redzams, ka dzelzs caurule sev cauri magnētisko lauku praktiski nelaiž. Savukārt 2-27. un 2-28. att. parāda magnētiskā lauka vektoru sadalījumu caurules sienīnā un tās tiešā tuvumā. Šis lauka sadalījums tiek parādīts arī kā magnētiskā lauka

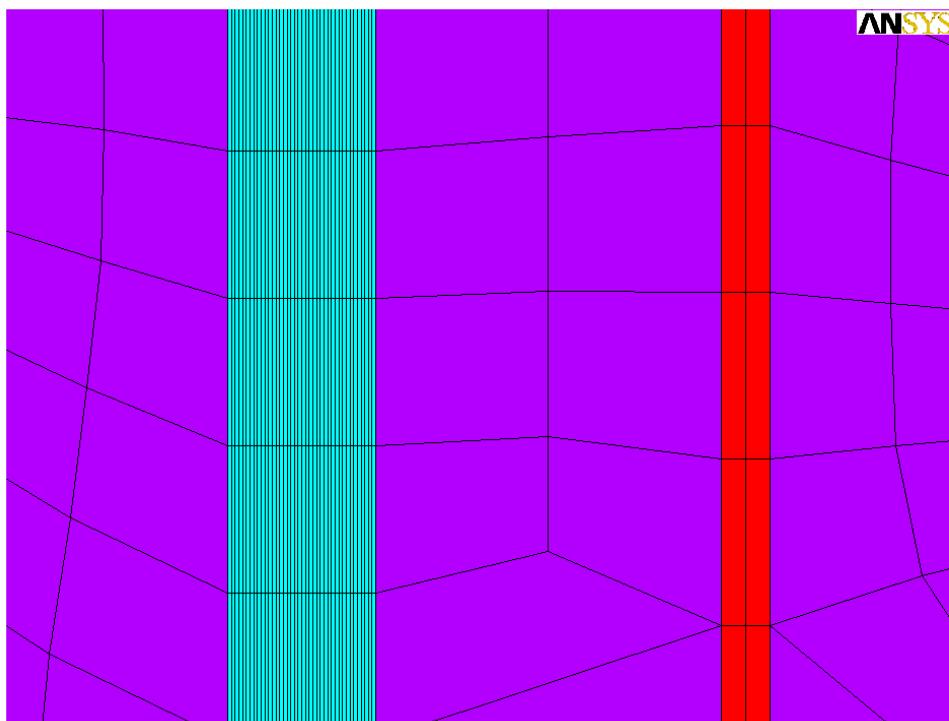
vertikālās komponentes radiāls sadalījums 2-29. un 2-30. att. Redzams, ka lauka sadalījums sieniņā labi atbilst analītiskā atrisinājuma raksturam.



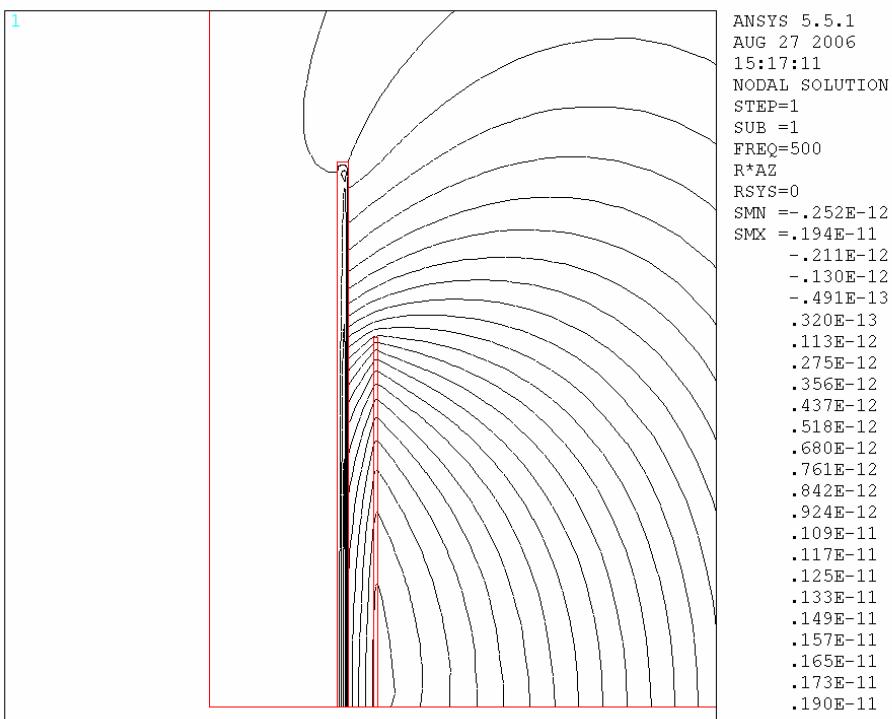
2-22. att. No dzelzs caurules un indukcijas spioles sastāvošas sistēmas izmēri (mm).



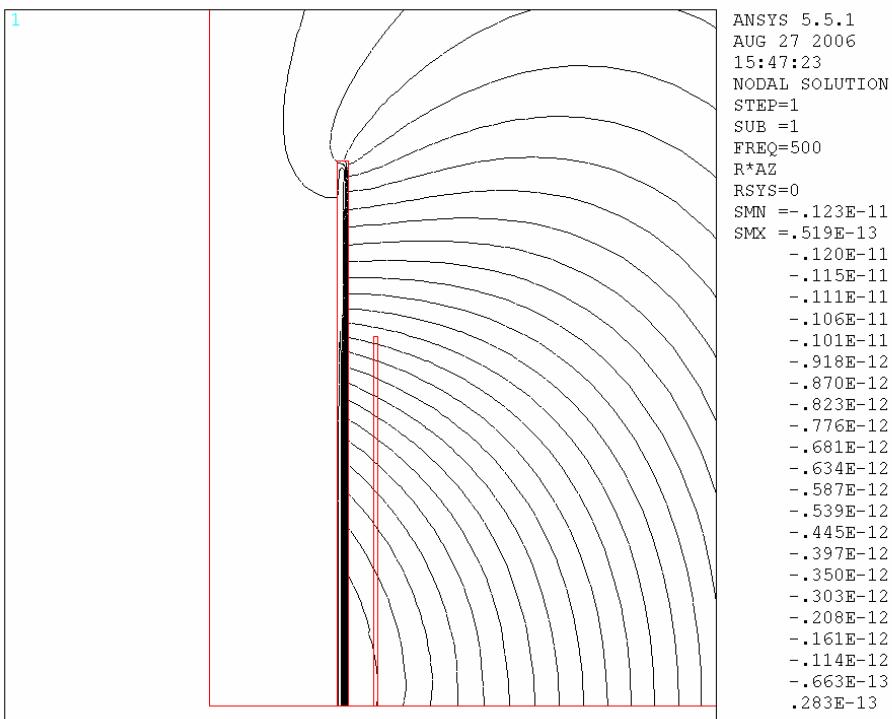
2-23. att. Galīgo elementu režģis vertikālā šķērsgriezumā sistēmai ar dzelzs cauruli un indukcijas spoli.



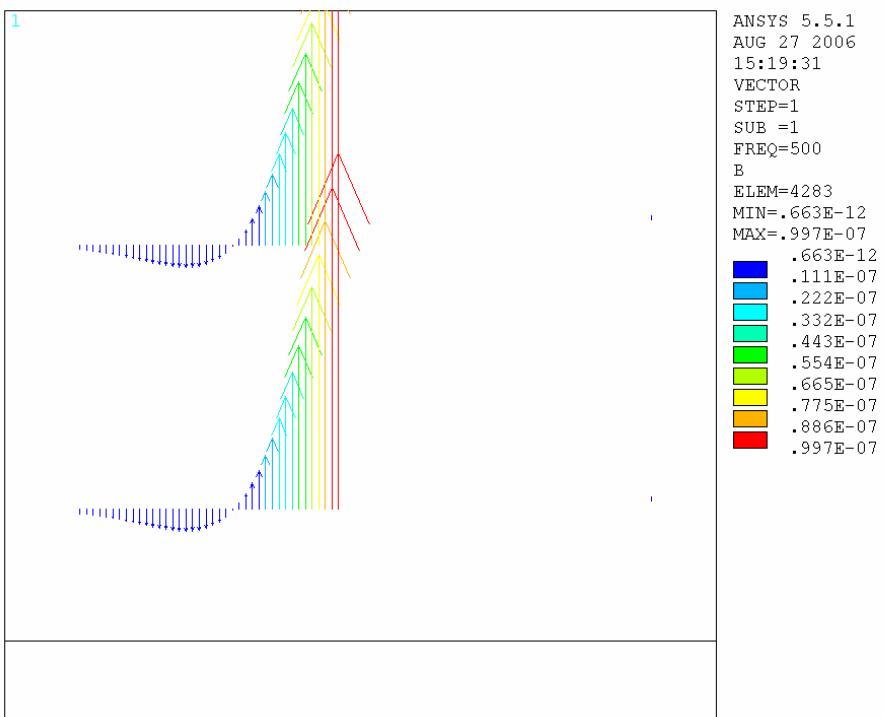
2-24. att. Galīgo elementu režģa palielināts fragments vertikālā šķērsgriezumā sistēmai ar dzelzs cauruli un indukcijs spoli, pa kreisi caurules sieniņa, pa labi induktors.



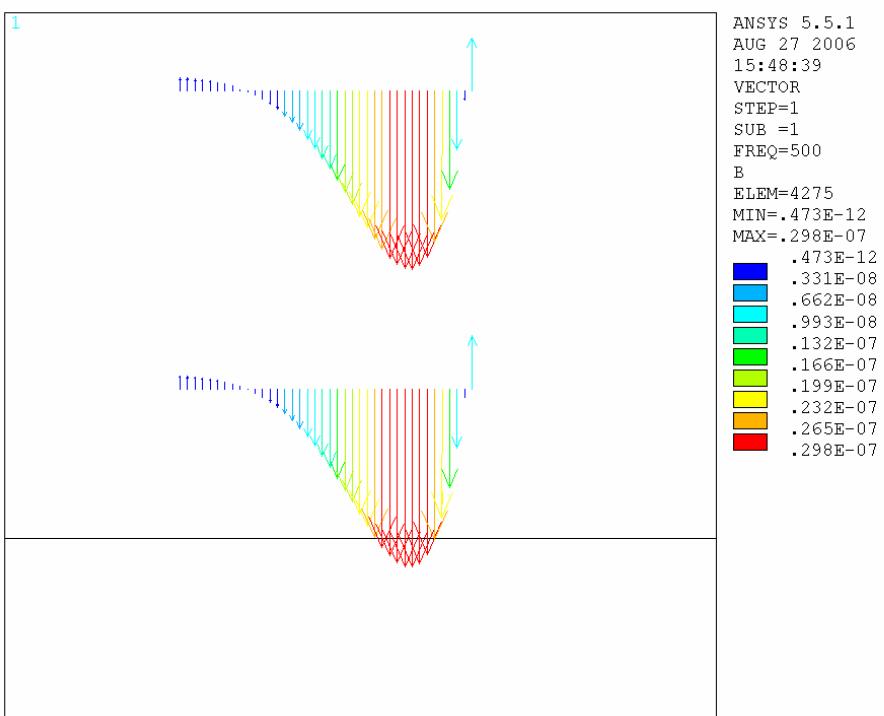
2-25. att. Aprēķinātā magnētiskā lauka reālās daļas lauka līnijas.



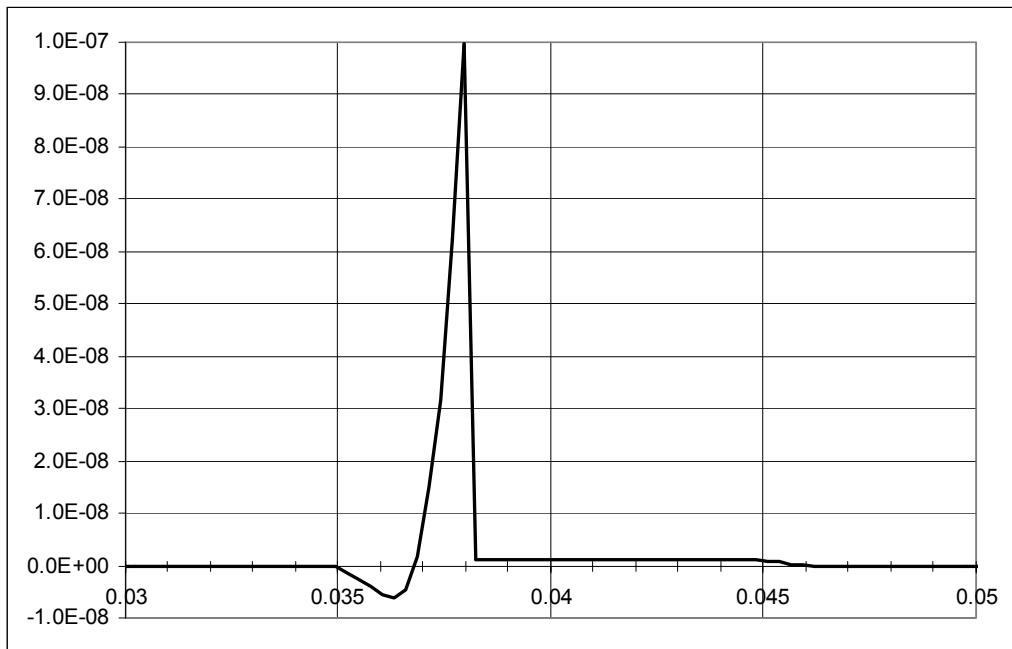
2-26. att. Aprēķinātā magnētiskā lauka imaginārās daļas lauka līnijas.



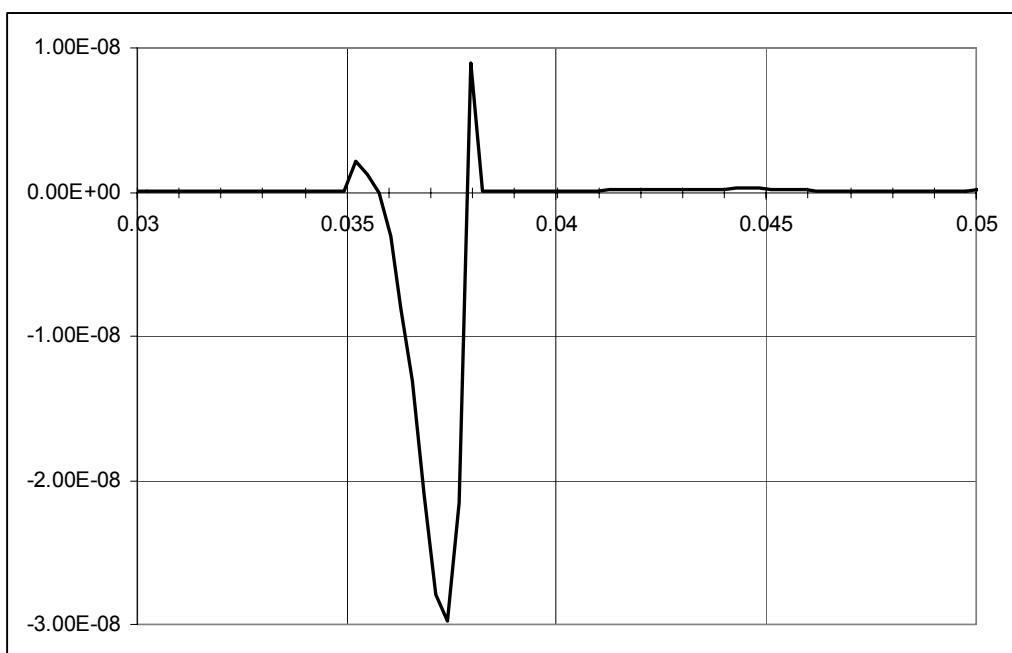
2-27. att. Magnētiskā lauka reālā daļa dzelzs caurules sieniņā un tās tuvumā.



2-28. att. Magnētiskā lauka imaginārā daļa dzelzs caurules sieniņā un tās tuvumā.



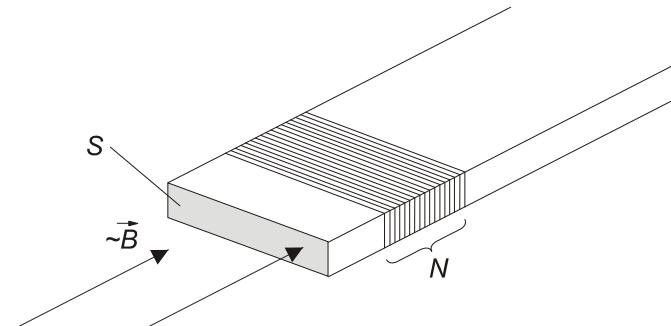
2-29. att. Magnētiskā lauka vertikālās komponentes reālās daļas sadalījums radiālā virzienā.



2-30. att. Magnētiskā lauka vertikālās komponentes imaginārās daļas sadalījums radiālā virzienā.

2.9. Magnētiskā lauka sensoru aprēķins

Laboratorijas darbā izmantotie magnētiskā lauka sensori mēra magnētisko lauku, nosakot spriegumu, ko maiņstrāvas lauks inducē sensoru spolītē. Tieks izmantotas spolītes ar taisnstūrveida šķērsgriezumu S_M un N_M vijumiem, skat. 2-31. att.



2-31. att. Magnētiskā lauka sensora shematisks attēls.

Spolītē tiek inducēts maiņspriegums, pie kam magnētiskā lauka B , frekvences f un maiņsprieguma U efektīvās vērtības saista formula, kas izriet no Faradeja elektromagnētiskās indukcijas likuma:

$$U_M = 2\pi f B S_M N_M .$$

3. Darba uzdevumi

3.1. Magnētiskā lauka sensoru pārbaude, izmantojot Faradeja indukcijas likumu un cirkulācijas teorēmu magnētiskajam laukam.

- a) Katram no trim dotajiem sensoriem ievietot sensoru spoles centrā un uzņemt sensora sprieguma U_M atkarību (ar oscilogrāfu) no frekvences f strāvai spolē robežas no 100 Hz līdz 200 kHz, strāvu spolē I_{SP} izvēloties tā, lai ir ērti veikt mērījumu.
- b) Proporcionali pārrēkināt sensora spriegumu spoles strāvas vērtībai 1 A un atkarību $U_{M,1A}(f)$ attēlot grafiski. Attēlot grafiski atkarību lielumam $U_{M,1A}(f)/f$ no f . Izskaidrot atkarības $U_{M,1A}(f)$ novirzi no lineāras augsto frekvenču gadījumā.
- c) Aprēķināt magnētisko lauku spolē pie strāvas $I_{SP} = 1$ A (efektīvā vērtība), izmantojot spoles vijumu skaitu uz garuma vienību $n_{SP} = 1075$ vij./m un formulu bezgalīgi garai spolei, kas izriet no cirkulācijas teorēmas. Korigēt šo lauka vērtību izmantojot skaitliski aprēķināto (teorētiskajā pamatojumā) lauka vērtību galīga izmēra eksperimentā lietotai spolei.
- d) Pārbaudīt eksperimentāli iegūtās vērtības $U_{M,1A}(f)/f$ (konstantajā daļā) atbilstību Faradeja indukcijas likumam, izmantojot iepriekš aprēķināto magnētiskā lauka vērtību, sensora šķērsgrēzuma laukumu S_M un sensora vijumu skaitu N_M .
- e) Izmantojot divstaru oscilogrāfu, noteikt fāzu nobīdi starp strāvu spolē un sensora spriegumu pie vairākām frekvencēm un izskaidrot to.

3.2. Magnētiskā lauka sadalījuma galīga garuma spolē mērīšana.

- a) Izmērīt ar jutīgāko magnētiskā lauka sensoru magnētiskā lauka aksiālās komponentes sadalījumu uz spoles ass no spoles centra virzienā uz vienu spoles galu pie frekvences 1 kHz. Strāvu spolē izvēlēties tā, lai ir ērti veikt mērījumu.
- b) Grafiski salīdzināt izmērīto sadalījumu ar datormodelēšanas rezultātiem gadījumam bez alumīnija cilindra, mērījumus pārrēķinot lineārajam strāvas blīvumam spolē 0.001 A/m. Salīdzināt izmērīto magnētiskā lauka vērtību spoles centrā ar rezultātu, ko iegūtu bezgalīgi garai spolei.

3.3. Skinefekta pētīšana alumīnija caurules sieniņā, eksperimentāli nosakot caurules sieniņas caurlaidību magnētiskajam laukam.

- a) Izmantojot jutīgāko magnētiskā lauka sensoru un ievietojot to spoles centrā aksiālā virzienā, uzņemt atkarību no frekvences f (frekvenci mainot robežas no 100 Hz līdz 20 kHz) attiecībai starp sensora divām sprieguma vērtībām: $U_{M,Al}$ - gadījumā, kad spolē ir ievietota alumīnija caurule un U_M - gadījumā, kad spolē nav ievietota alumīnija caurule. Tā kā sensora spriegums ir proporcionālas magnētiskā lauka vērtībai, tad attiecība $U_{M,Al}/U_M$ ir vienāda ar magnētiskā lauka vērtību attiecību. Strāvu spolē katrai frekvences vērtībai izvēlēties maksimāli iespējamo, ko nodrošina ģenerators.

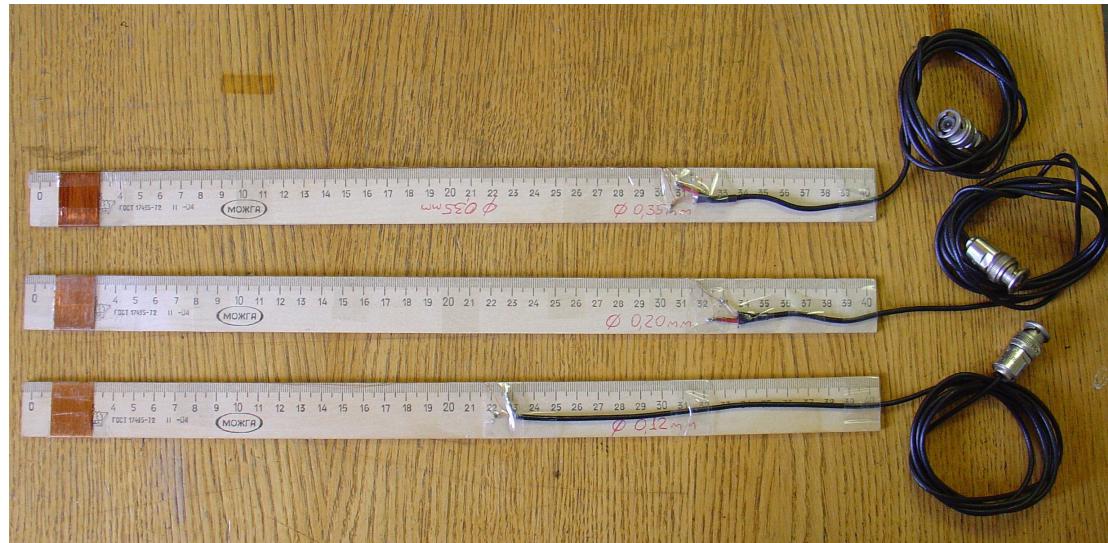
- b) Uzņemto atkarību $U_{M,Al}/U_M$ no f attēlot grafiski. Atzīmēt grafikā frekvenci, kurai atbilst tāds skinslāņa biezums alumīnijā, kas ir vienāds ar caurules sieniņas biezumu. Grafikā salīdzināt uzņemto atkarību ar datormodelēšanas rezultātiem.
- c) Frekvencēm 100 Hz un 1000 Hz noteikt fāzu nobīdi starp strāvu spolē un magnētisko lauku alumīnija caurules iekšpusē spoles centrā, nosakot abu oscilogrāfa signālu nobīdi. Salīdzināt rezultātus ar datormodelēšanas rezultātiem.

3.4. Skinefekta pētišana feromagnētiskas dzelzs caurules sieniņā eksperimentāli nosakot magnētiskā lauka plūsmu caurules sieniņās.

- a) Ievietojot jūtīgāko magnētiskā lauka 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 frekvences 500 Hz un 5000 Hz uzņemt sprieguma U_F uz dzelzs caurules uztītajā spolitē atkarību no strāvas spolē, strāvu mainīt robežās no nulles līdz maksimālajai vērtībai. 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 dzelzs relatīvo magnētisko caurlaidību visām strāvas vērtībām un attēlot grafiski kā funkciju no magnētiskā lauka intensitātes spolē pie caurules virsmas.
- f) Aprēķināt skinslāņa biezumu visām strāvas vērtībām un attēlot grafiski kā funkciju no magnētiskā lauka intensitātes spolē pie caurules virsmas.
- g) Aprēķināt magnētiskai plūsmai skinslānī atbilstošo laukumu, ja plūsmu veidotu magnētiskā lauka indukcija pie dzelzs caurules virsmas. Salīdzināt to ar skinslāņa laukumu.
- h) Mērot strāvu spolē un spriegumu spolitē uz dzelzs caurules un nosakot abu oscilogrāfa signālu nobīdi noteikt magnētiskās plūsmas feromagnētiskajā skinslānī fāzu nobīdi attiecībā pret spoles magnētisko lauku pie 500 Hz un 5000 Hz, salīdzināt šos rezultātus ar teorētisko vērtību.

4. Darba piederumi

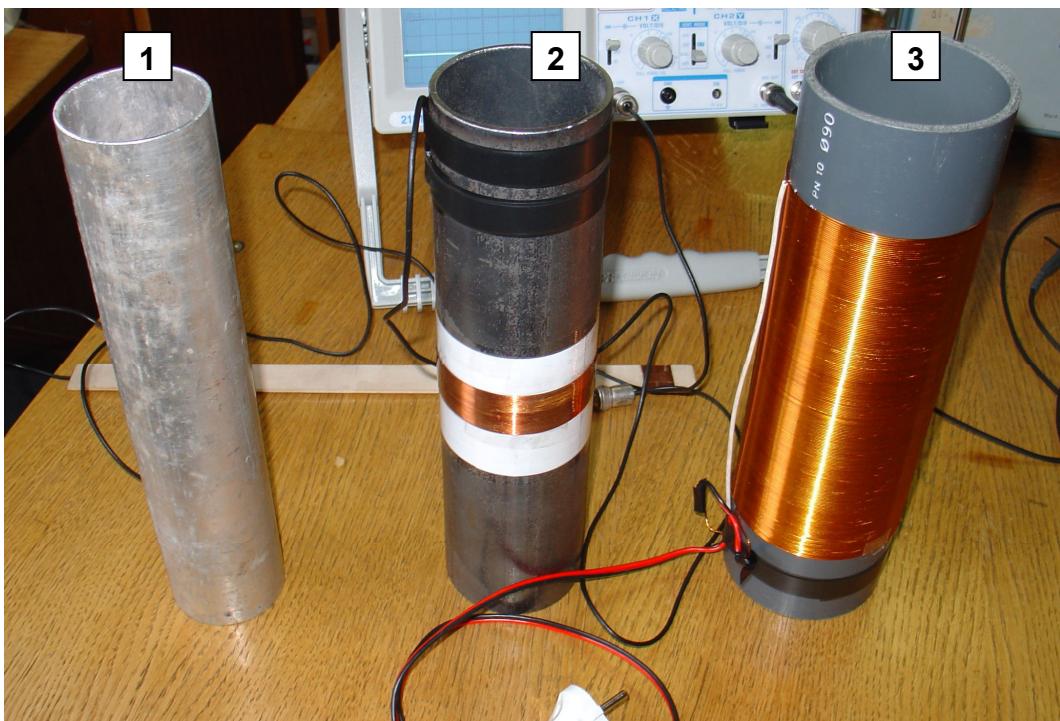
1. Signālgenerators *I3-33*. Skat. 4-2. att.
2. Divstaru oscilogrāfs *BK PRECISION 2121*. Skat. 4-4., 4-5. att.
3. Maiņstrāvas milivoltmetrs *B3-38A*. Skat. 4-2. att.
4. Cilindriska indukcijas spole ar augstumu $H=202$ mm, iekšējo diametru $D_{in}=90$ mm, vijumu skaitu uz garuma vienību 1075, kopējo vijumu skaitu $N_{sp}=217$. Skat. 4-3. att.
5. Dūralumīnija ($\rho = 4.7 \cdot 10^{-8} \Omega m$) caurule ar augstumu $H=298$ mm, ārējo diametru $D_{ex}=63$ mm, sienīnas biezumu $d=2$ mm. Skat. 4-3. att.
6. Feromagnētiskas dzelzs ($\rho = 1 \cdot 10^{-7} \Omega m$) caurule ar augstumu $H=298$ mm, ārējo diametru $D_{ex}=76$ mm, sienīnas biezumu $d=3$ mm. Uz dzelzs caurules ir uztīta mērspole ar 66 vijumiem. Skat. 4-3. att.
7. Vairāki magnētiskā lauka sensori ar spoles garumu 20 mm (skat. 4-1. att.):
 - 1) 55 vijumi ar vada diametru $D=0.35$ mm, šķērsgriezuma laukums $2.5\text{mm} \times 26.5$ mm
 - 2) 77 vijumi ar vada diametru $D=0.25$ mm, šķērsgriezuma laukums $2.3\text{mm} \times 26.5$ mm
 - 3) 154 vijumi ar vada diametru $D=0.125$ mm, šķērsgriezuma laukums $2.5\text{mm} \times 26.5$ mm



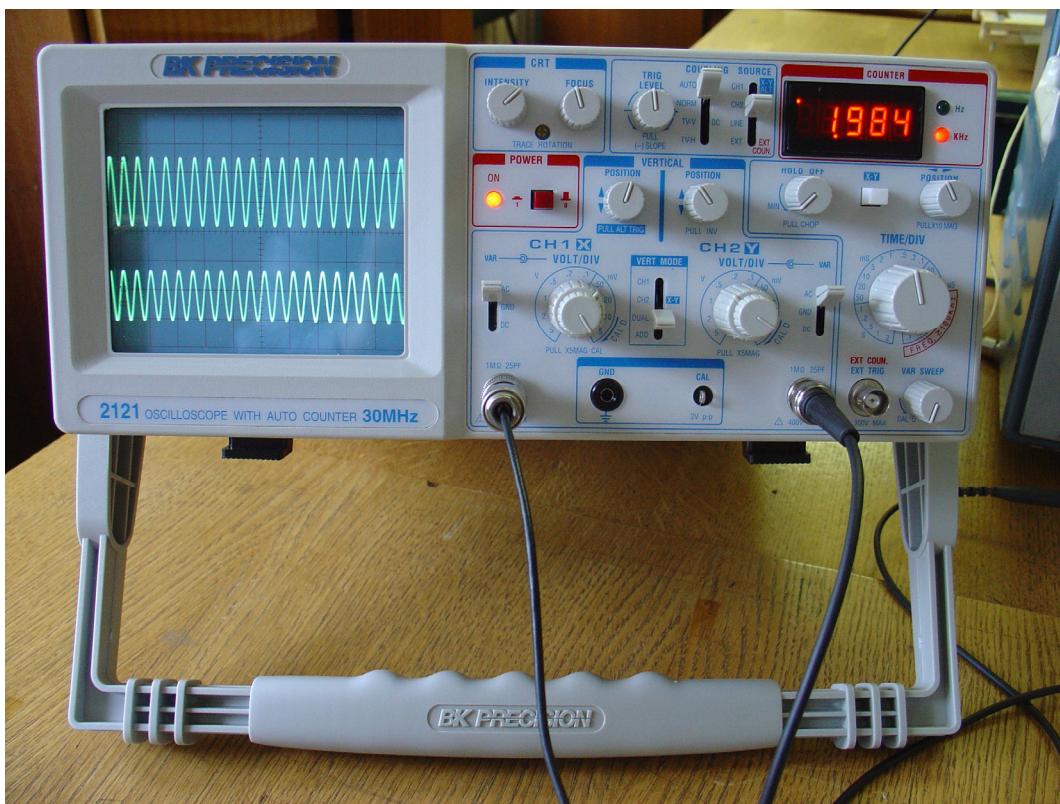
4-1. att. Pašizgatavoti magnētiskā lauka sensori ar dažādu vada diametru un vijumu skaitu.



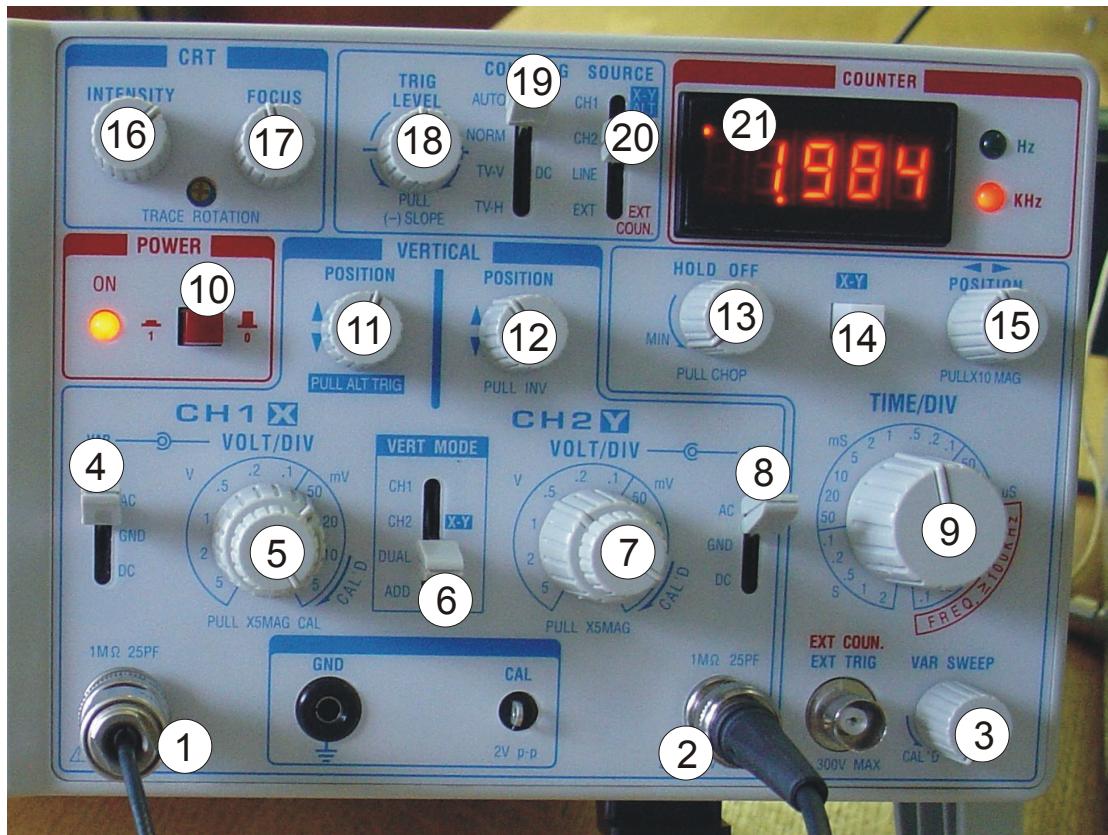
4-2. att. Signālgenerators un milivoltmetrs. Apzīmējumi: milivoltmetram 1 - ieeja, 2 - sprieguma diapazona pārslēgs; signālgeneratoram 3 - izejas pretestības iestādīšana, 4 - izeja, 5 un 6 - frekvences regulēšana, 7 - izejas sprieguma regulēšana. **IEVĒROT!!!** Izejas pretestības slēdzis 3 jāiestāda pozīcijā "600" un virs tā esošais sprieguma diapazona slēdzis jāiestāda tā, lai lodziņa augšējā rindā būtu "3 V".



4-3. att. Eksperimenta piederumi. Apzīmējumi: 1 - alumīnija caurule, 2 - dzelzs caurule ar mērspoli, 3 - indukcijas spole.



4-4. att. Oscilogrāfs ar ekrānā redzamiem signāliem no abām ieejām.



4-5. att. Oscilogrāfa vadības panelis. Apzīmējumi: 1 - 1/X ieeja, 2 - 2/Y ieeja, 4 un 8 - 1. un 2. iejas režīmu pārslēgi (darbā jābūt "AC" režīmā), 5 un 7 - 1. un 2. ieejas sprieguma skalas iedaļas vērtības (viena lielā rūtiņa ekrānā vertikālā virzienā) iestādīšana, 6 - attēlojamo signālu izvēle (darbā jābūt "DUAL" režīmā - rādīti tiek signāli no abām ieejām), 9 - laika skalas iedaļas vērtības (viena lielā rūtiņa ekrānā horizontālā virzienā) iestādīšana, 10 - ieslēgšana/izslēgšana, 11 un 12 - 1. un 2. ieejas signālu vertikāla pārbīdīšana ekrānā, 15 - signālu horizontāla pārbīdīšana ekrānā, 16 un 17 - attēla kvalitātes regulēšana, 18 un 20 - izvērses ģeneratora regulēšana (lauj stabilizēt signāla attēlu), 21 - signāla frekvences skaitītājs. **IEVĒROT!!! Mēriju mu laikā regulatoram 3 un regulatoriem pārslēgu 5 un 7 galos jāatrodas fiksētajā stāvoklī "uz klikšķi". Frekvences skaitītājs atsevišķos gadījumos var nerādīt pareizo frekvenci.**

5. Darba veikšanas apraksts

5.1. Magnētiskā lauka sensoru pārbaude

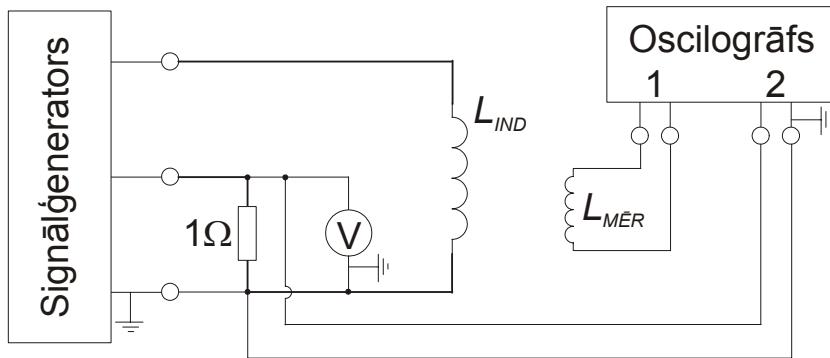
Lai uzņemtu sensora sprieguma atkarību no frekvences, jāizmanto iekārtu slēgums, kas parādīts 5-1. un 5-2. att. Oscilogrāfam pēc kārtas jāpieslēdz visi trīs sensori. Katrs sensors ir jānovieto aptuveni indukcijas spoles centrā un jāuzņem tā sprieguma U_M atkarība no signālgeneratora frekvences f . Jāatceras, ka oscilogrāfa ekrānā redzamās sinusoīdas augstumam atbilstošais iedaļu skaits pareizināts ar iedaļas vērtību (V) ir t.s. "peek to peek" spriegums U_M^{P-P} . Sprieguma amplitūda ir vienāda ar $U_M^{P-P}/2$ un sprieguma efektīvā vērtība ir vienāda ar $U_M^{P-P}/2\sqrt{2}$. **IEVĒROT!!! Darbā visi sprieguma mērijumi ar oscilogrāfu ir jāpārrēķina uz efektīvajām vērtībām, tālāk visos aprēķinos un formulās ir jālieto efektīvās vērtības.** Iestādīto frekvenci f var redzēt uz signālgeneratora paneļa, kā arī uz oscilogrāfa (Nr. 21, 4-5. att.).

Strāva spolē I_{SP} tiek mērīta voltmetru, kas mēra sprieguma kritumu uz 1Ω lielas pretestības, t.i. $I_{SP}[A] = U[V]/R[\Omega] = U[V]/1\Omega$. Jāatceras, ka ar voltmetru tiek nomērīta sprieguma krituma (strāvas) efektīvā vērtība. Spriegums uz 1Ω pretestības (strāva) tiek attēlots arī oscilogrāfa ekrānā. Mēriju laikā strāvu indukcijas spolē vēlams turēt konstantu, ja tas nav iespējams, jāpieraksta strāvas vērtība katram mērijuam. Tā kā sensora spriegums U_M ir proporcionāls indukcijas spoles magnētiskajam laukam, kurš savukārt ir proporcionāls spolē plūstošajai strāvai I_{SP} , lai pārrēķinātu sensora spriegumu 1A liela strāvai spolē, izmanto formulu:

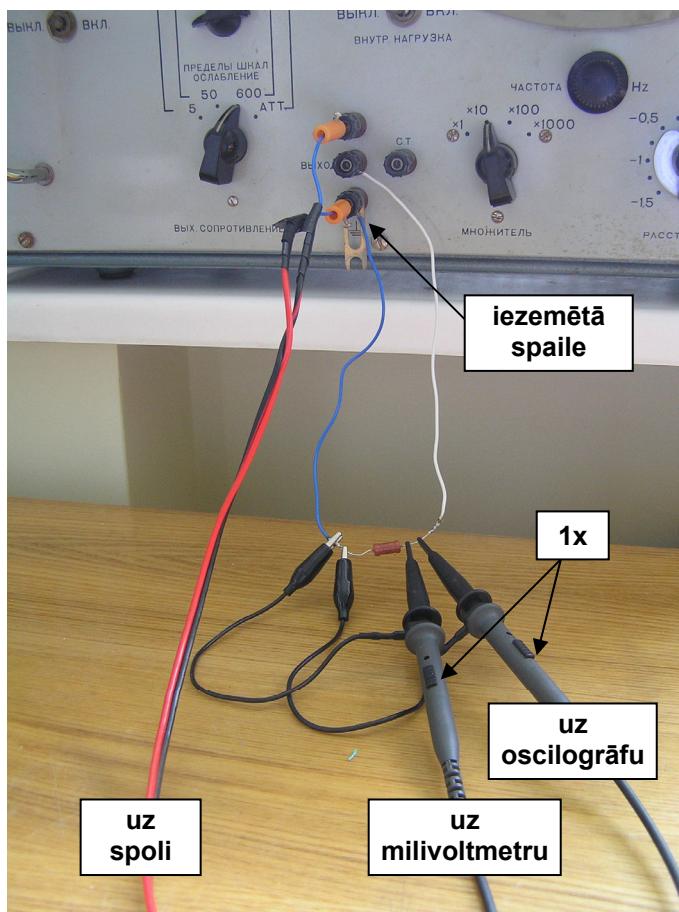
$$U_{M,1A} = U_M \frac{1A}{I_{SP}}.$$

Ja ir zināma strāva spolē I_{SP} , magnētisko lauku tās centrā bezgalīgi gara solenoīda tuvinājumā var aprēķināt pēc formulas $B_{SP} = \mu_0 n_{SP} I_{SP}$, kur n_{SP} - spoles vijumu skaits uz garuma vienību. Savukārt magnētiskajam laukam atbilstošo sensora spriegumu var aprēķināt pēc formulas $U_M = 2\pi B_{SP} S_M N_M$ (skat. teorētisko apskatu). Aprēķinos jāizmanto spoles strāvas efektīvā vērtība.

Fāzu nobīdi starp strāvu spolē un sensora spriegumu var noteikt ar oscilogrāfu, novietojot abu signālu sinusoīdas vienu uz otras un nomērot to nobīdi t uz laika skalas, piemēram, starp diviem blakus maksimumiem. Zinot signālu frekvenci f , var aprēķināt fāzu starpību grādos $\varphi = 360 \cdot t f$. Mērot fāzu nobīdi, ieteicams oscilogrāfa ekrānā attēlot ne vairāk kā vienu signāla periodu, lai nodrošinātu augstāku precizitāti.



5-1. att. Shēma ar eksperimenta iekārtu slēgumu. Apzīmējumi: L_{IND} - indukcijas spole (Nr. 3., 4-3. att.), L_{MER} - sensora spole (4-1. att.) darba uzdevumos 3.1 a) - 3.4 a), spole uz dzelzs caurules (Nr. 2, 4-3. att.) darba uzdevumos 3.4 b) - 3.4 h). **IEVĒROT!!! Signālgeneratora, milivoltmetra un oscilogrāfa iezemētajām spailēm jābūt savstarpēji savienotām, skat. 5-2. att.**



5.2. att. Fotogrāfija eksperimenta iekārtu slēgumam pie signālgeneratora. **IEVĒROT!!! Slēdziem koaksiālo kabeļu galos jābūt pozīcijā "1x" nevis "10x". Ja tiek izmantoti citi kabeli nekā attēlā redzamie, noskaidrot iezemēto spaili.**

5.2. Magnētiskā lauka sadalījuma galīga garuma spolē mērīšana

Magnētiskā lauka sadalījuma uz spoles ass mērīšanai, jāizmanto iekārtu slēgums, kas parādīts 5-1. un 5-2. att. Lai salīdzinātu nomērīto sadalījumu ar datormodelēšanas rezultātiem, vispirms sensora sprieguma sprieguma efektīvā vērtība jāpārrēķina 0.001 A/m lineāram strāvas blīvumam spolē: $U_{M,0.001A/m} = U_M \frac{0.001 \text{ A/m}}{I_{SP} \cdot n_{SP}}$. Tad var noteikt sensora spriegumam atbilstošo magnētisko lauku: $B_{SP} = \frac{U_{M,0.001A/m}}{2\pi f S_M N_M}$. Jāatceras, ka sensors mēra to magnētiskā lauka komponenti, kas ir vērsta paralēli tā spoles asij (un inducē tajā spriegumu). Tādēļ, lai nomērītu indukcijas spoles magnētiskā lauka aksiālo komponenti sensors jānovieto paralēli indukcijas spoles asij.

5.3. Skinefekta pētīšana alumīnija caurules sieniņā

Alumīnija caurules sieniņas caurlaidības noteikšanai, jāizmanto iekārtu slēgums, kas parādīts 5-1. un 5-2. att. Pie katras frekvences ir jānomēra sensora spriegums ar un bez spolē ievietotas alumīnija caurules. Strāva indukcijas spolē pie katras frekvences jāizvēlas maksimālā, jo tas nodrošina vislielāko mērījumu precizitāti.

Skinslāņa biezumu alumīnija caurules sieniņā aprēķina pēc formulas $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0 \sigma}}$, izmantojot dūralumīnija elektrovadītspēju $\sigma = 1/\rho$, $\rho = 4.7 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$.

Fāzu nobīdi starp strāvu spolē un magnētisko lauku caurules iekšpusē (t.i. sensora spriegumu) nosaka kā aprakstīts punktā 5.1.

5.4. Skinefekta pētīšana feromagnētiskas dzelzs caurules sieniņā

Vispirms indukcijas spolē jāievieto dzelzs caurule, izmantojot iepriekšējo iekārtu slēgumu (5-1. un 5-2. att.), ar magnētiskā lauka sensoru jāpārbauda, vai magnētiskais laiks (sesnora spriegums) dzelzs caurules iekšpusē pie visām frekvencēm 100 Hz līdz 200 kHz ir prakstiski vienāds ar nulli.

Tālāk sensora vietā oscilogrāfam ir jāpieslēdz mērspole, kas ir uztīta uz dzelzs caurules. Kā aprakstīts teorētiskajā apskatā, šī spole ļauj nomērīt magnētiskā lauka plūsmu dzelzs caurules sieniņā: $\Phi_{in} = \frac{U_F}{2\pi f N_F}$, kur U_F - izmantojot oscilogrāfu noteiktais mērspoles spriegums.

Indukcijas spoles radītā magnētiskā lauka indukciju pie dzelzs caurules virsmais bezgalīgi gara solenoīda tuvinājumā var aprēķināt pēc formulas $B_{SP} = \mu_0 n_{SP} I_{SP}$,

savukārt tai atbilstošo magnētiskā lauka intensitāti: $H_{SP} = \frac{B_{SP}}{\mu_0\mu} = \frac{n_{SP}I_{SP}}{\mu}$, kur $\mu = 1$, ja aplūko vakuumu (gaisu).

Ja ir nomērīta magnētiskā lauka plūsma Φ_{in} un aprēķināts indukcijas spoles magnētiskais lauks B_{SP} pie dzelzs caurules sieniņas, iespējams noteikt dzelzs relatīvo magnētisko caurlaidību: $\mu = \frac{\Phi_{in}^2 \mu_0 f \sigma}{B_{SP}^2 4\pi R_{Fe}^2}$, kur dzelzs elektrovadītspēja $\sigma = 1/\rho$, $\rho = 1 \cdot 10^{-7} \Omega m$. Tālāk iespējams aprēķināt skinslāņa biezumu $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\mu_0\sigma}}$.

Mērspoles nomērīto magnētiskā lauka plūsmu nosaka magnētiskā lauka indukcijas sadalījums skinslānī dzelzs caurules sieniņā. Kā paskaidrots teorētiskajā apskatā, sieniņas iekšpusē magnētiskajam laukam ir lēciens materiāla feromagnētiskās dabas dēļ, un pēc tam tas strauji samazinās. Taču varam iedomāties, ka dzelzs caurules nav (t.i. mērspole ir uztīta uz kartona pamatnes un ievietota indukcijas spolē), un pieņemt, ka magnētisko lauku indukcijas spoles iekšpusē nosaka tajā plūstošā strāva. Zinot reālo nomērīto magnētisko plūsmu Φ_{in} , varam aprēķināt tai atbilstošo laukumu $S_{bezFe} = \frac{\Phi_{in}}{B_{SP}}$. Tas būs daudzāk lielāks par īstajai plūsmai skinslānī atbilstošo laukumu $S_{arFe} \approx 2\pi R_{Fe} \delta$, kur R_{Fe} - dzelzs caurules rādiuss. Šādi varam pārliecināties par magnētiskā lauka pastiprināšanos feromagnētiskā materiālā.

Fāzu nobīdi starp strāvu spolē un magnētisko plūsmu skinslānī (t.i. mērspoles spriegumu) nosaka kā aprakstīts punktā 5.1.

6. Darba uzdevumiem atbilstošo nepieciešamo mērījumu, tabulu, grafiku, aprēķinu un pierakstu uzskaitījums

Darba uzdevumi 3.1.

Tabula: sensora sprieguma atkarība no signālgeneratora frekvences un aprēķini.

Nr.	$f \pm \Delta$, Hz	$I_{SP} \pm \Delta$, A	$U_M^{P-P} \pm \Delta$, mV	$U_M \pm \Delta$, mV	$U_{M,IA} \pm \Delta$, mV	$U_{M,IA}/f \pm \Delta$, mV/Hz
1.						
.....						

Fāzu nobīde starp strāvu spolē un sensora spriegumu (pie vairākām frekvencēm):

Grafiks: $U_{M,IA}$ atkarība no f .

Grafiks: $U_{M,IA}/f$ atkarība no f .

Magnētiskā lauka aprēķins spolē ($I_{SP}=1A$), izmantojot bezgalīgi gara solenoīda tuvinājumu, korekcija galīga garuma spolei.

$U_{M,1A}/f$ vērtības teorētisks aprēķins.

Darba uzdevumi 3.2.

Strāva spolē: $I_{SP}= \dots$

Signālgeneratora frekvence: $f= \dots$

Tabula: Sensorsa sprieguma atkarība no vertikālās koordinātes un aprēķini.

Nr.	$z \pm \Delta$, cm	$U_M^{p-p} \pm \Delta$, mV	$U_M \pm \Delta$, mV	$U_{M,0.001A/m} \pm \Delta$, mV	$B_{SP} \pm \Delta$, T
1.					
.....					

Grafiks: B_{SP} atkarībā no z, salīdzinājums ar skaitliskajiem aprēķiniem.

Nomērītā magnētiskā lauka spoles centrā salīdzinājums ar teorētisko rezultātu bezgalīgi garai spolei.

Darba uzdevumi 3.3.

Tabula: sensorsa sprieguma atkarība no signālgeneratora frekvences un aprēķini.

Nr.	$f \pm \Delta$, Hz	$U_M^{p-p} \pm \Delta$, mV	$U_{M,AI}^{p-p} \pm \Delta$, mV	$U_{M,AI}^{p-p} / U_M^{p-p}$ $\pm \Delta$
1.				
.....				

Fāzu nobīde starp strāvu spolē un magnētisko lauku caurules iešpusē (pie vairākām frekvencēm):

Grafiks: $U_{M,AI}/U_M$ atkarībā no f, salīdzinājums ar skaitliskajiem aprēķiniem. Frekvences aprēķins, pie kuras skinslāņa biezums sakrīt ar sieniņas biezumu.

Darba uzdevumi 3.4.

Magnētiskā lauka dzelzs caurules iekšpusē pārbaude pie vairākām frekvencēm.

Signālgeneratora frekvence: $f = \dots$

Tabula: mērspoles sprieguma atkarība no strāvas indukcijas spolē un aprēķini.

Nr.	$I_{SP} \pm \Delta$, A	$U_F^{p-p} \pm \Delta$, mV	$U_F \pm \Delta$, mV	$\Phi_{in} \pm \Delta$, Wb	$B_{SP} \pm \Delta$, T
1.					
.....					

Nr.	$H_{SP} \pm \Delta$, A/m	$\mu \pm \Delta$	$\delta \pm \Delta$, mm	$S_{bez\ Fe} \pm \Delta$, cm ²
1.				
.....				

Signālgeneratora frekvence: $f = \dots$

Tabula: mērspoles sprieguma atkarība no strāvas indukcijas spolē un aprēķini.

Nr.	$I_{SP} \pm \Delta$, A	$U_F^{p-p} \pm \Delta$, mV	$U_F \pm \Delta$, mV	$\Phi_{in} \pm \Delta$, Wb	$B_{SP} \pm \Delta$, T
1.					
.....					

Nr.	$H_{SP} \pm \Delta$, A/m	$\mu \pm \Delta$	$\delta \pm \Delta$, mm	$S_{bez\ Fe} \pm \Delta$, cm ²
1.				
.....				

Fāzu nobīde starp strāvu spolē un magnētisko plūsmu skinslānī (pie vairākām frekvencēm): \dots

Grafiks: U_F atkarībā no I_{SP} (pie vairākām frekvencēm).

Grafiks: Φ_{in} atkarībā no I_{SP} (pie vairākām frekvencēm).

Grafiks: μ atkarībā no H_{SP} (pie vairākām frekvencēm).

Grafiks: δ atkarībā no H_{SP} (pie vairākām frekvencēm).

7. Literatūra

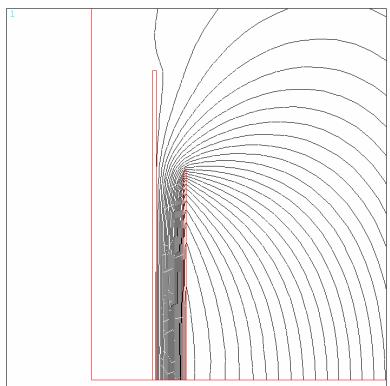
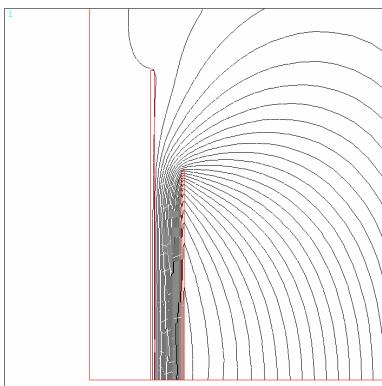
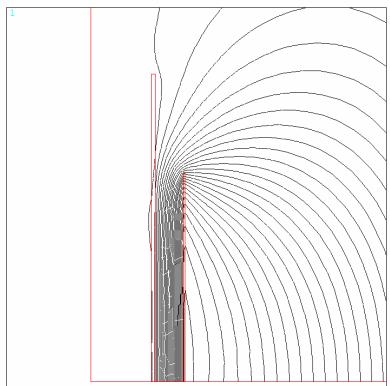
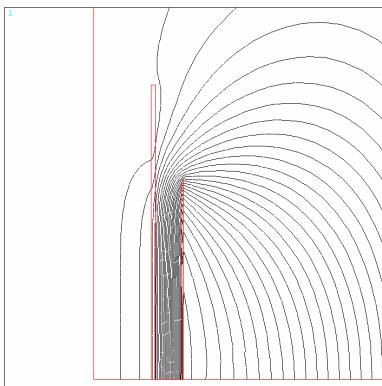
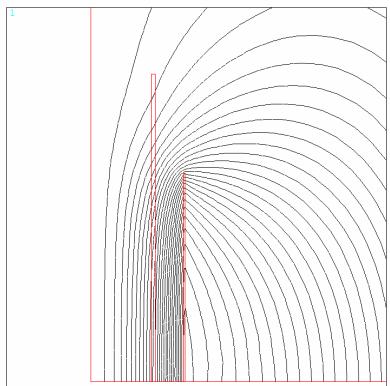
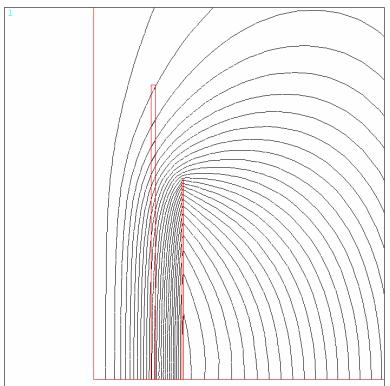
1. Muižnieks A. Laboratorijas darba apraksts „Augstfrekvences strāvu sadalījumu pētīšana uz vadošu objektu virsmām”. Latvijas Universitāte, Fizikas un matemātikas fakultāte, Fizikas nodaļa, Maģistra studiju programma, Laboratorijas darbu cikls “NEPĀRTRAUKTAS VIDES LABORATORIJA”.
2. Halliday, Resnick, Walker, "Fundamentals of Physics", 6th edition, John Wiley & Sons Inc., 2001.

8. Kontroljautājumi

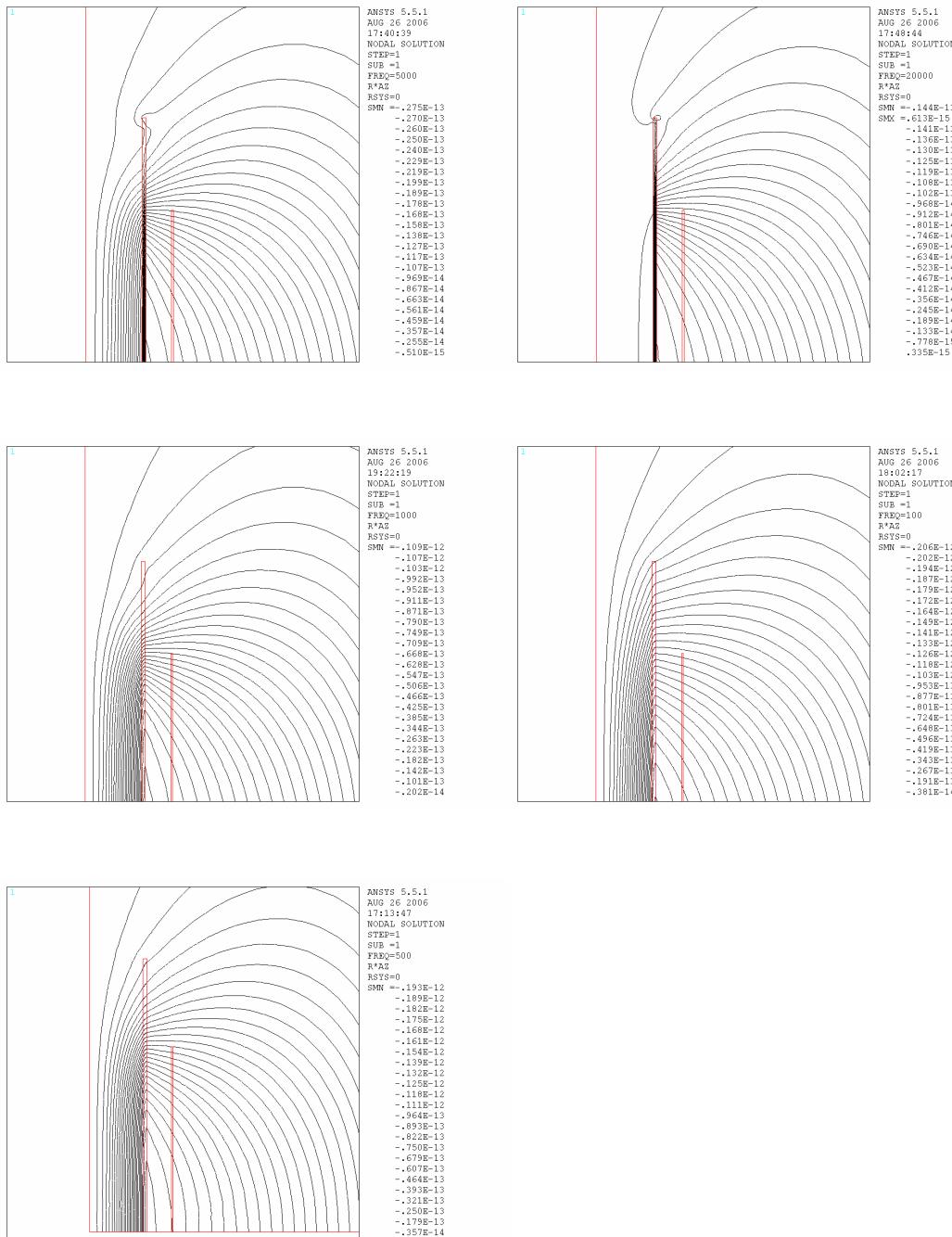
Katram jautājumam ir jāizvēlas viena pareizā atbilde. Skaitliskas atbildes gadījumā rezultāts ir jānoapaļo.

1. Ja mainīgā magnētiskā laukā ievieto masīvu vadošu ķermenī, tad:
 - a) ķermenī plūdīs virpuļstrāvas,
 - b) uz ķermenī darbojas spēks,
 - c) ķermenis var sasilt,
 - d) visas atbildes ir pareizas.
2. Mainīgā magnētiskā laukā ievieto vadošu ķermenī. Skinefekts ir izteiktāks, ja:
 - a) magnētiskā lauka frekvence ir mazāka,
 - b) ķermeņa izmēri ir mazāki,
 - c) ķermeņa elektrovadītspēja ir lielāka.
3. Feromagnētiska vadītāja iekšienē, tā virsmas tiešā tuvumā, ja tas ir ievietots ārējā mainīgā magnētiskā laukā:
 - a) magnētiskais lauks vienmēr ir vienāds ar nulli,
 - b) magnētiskais lauks ir vienāds ar ārējo lauku.
 - c) magnētiskais lauks ir lielāks par ārējo lauku,
 - d) magnētiskais lauks ir mazāks par ārējo lauku.
4. Nemagnētiska vadītāja čaulas iekšpusē, ja tā ir ievietota ārējā mainīgā magnētiskā laukā:
 - a) magnētiskais lauks vienmēr ir vienāds ar nulli,
 - b) magnētiskais lauks ir tāds pats kā ārpusē,
 - c) magnētiskais lauks ir lielāks nekā ārpusē,
 - d) magnētiskais lauks ir mazāks nekā ārpusē.
6. Bezgalīgi garā solenoīdā magnētiskais lauks būtu:
 - a) vienāds ar nulli,
 - a) tāds pats kā galīga garuma solenoīda centrā,
 - b) lielāks nekā galīga garuma solenoīda centrā,
 - c) mazāks nekā galīga garuma solenoīda centrā.
5. Feromagnētiskā materiāla ar relatīvo magnētisko caurlaidību 100 un īpatnējo pretestību $10^{-7} \Omega\text{m}$ plāksnē tiek inducētas virpuļstrāvas ar frekvenci 50 Hz. Skinslāņa biezums šajā plāksnē ir:
 - a) 1.2 m,
 - b) 1.2 mm,
 - c) 3.2 mm,
 - d) 0.32 mm.

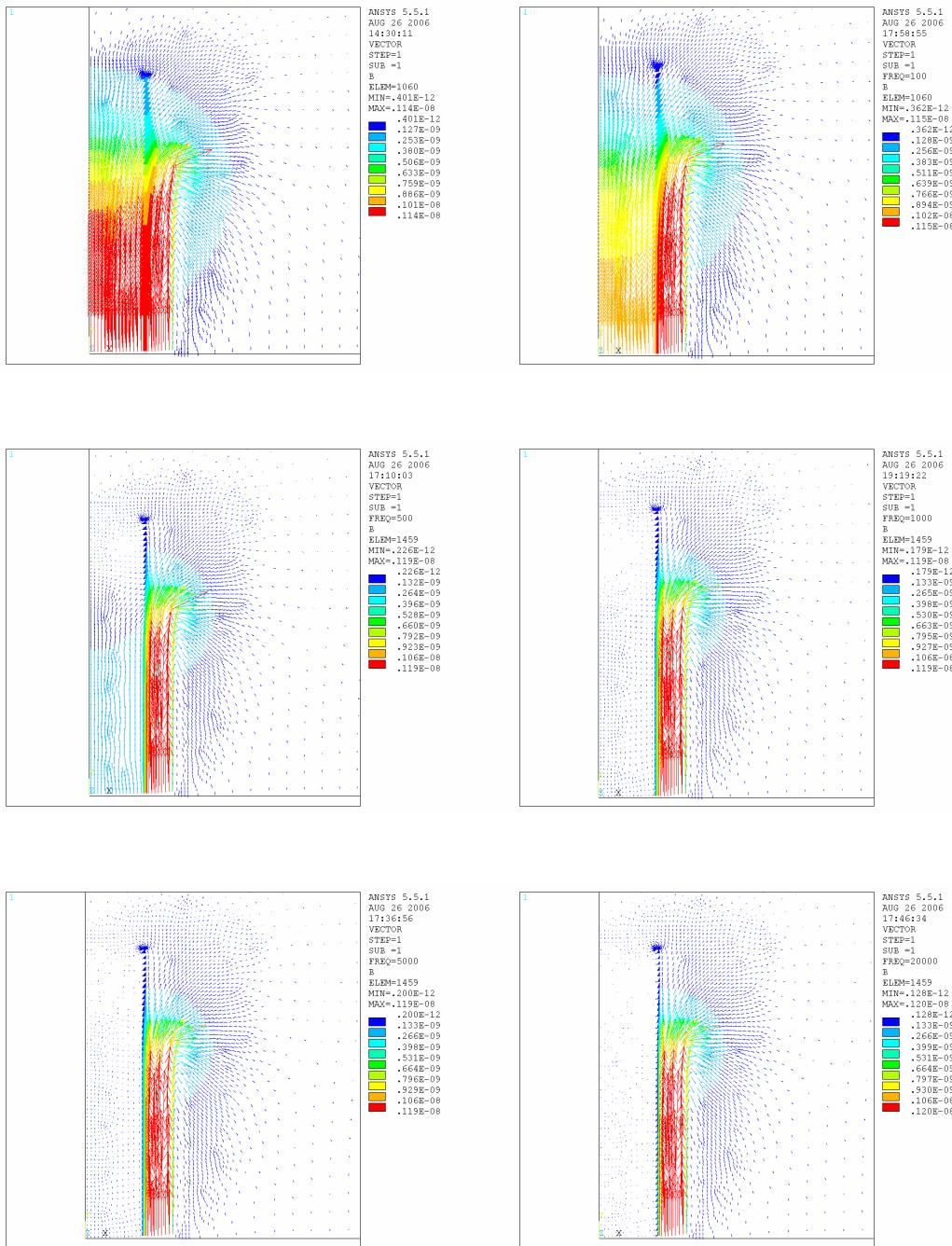
1. pielikums. Skaitliski aprēķinātas magnētiskā lauka reālās daļas līnijas sistēmā ar alumīnija cauruli pie frekvencēm 0, 100, 500, 1000, 5000 un 20000 Hz.



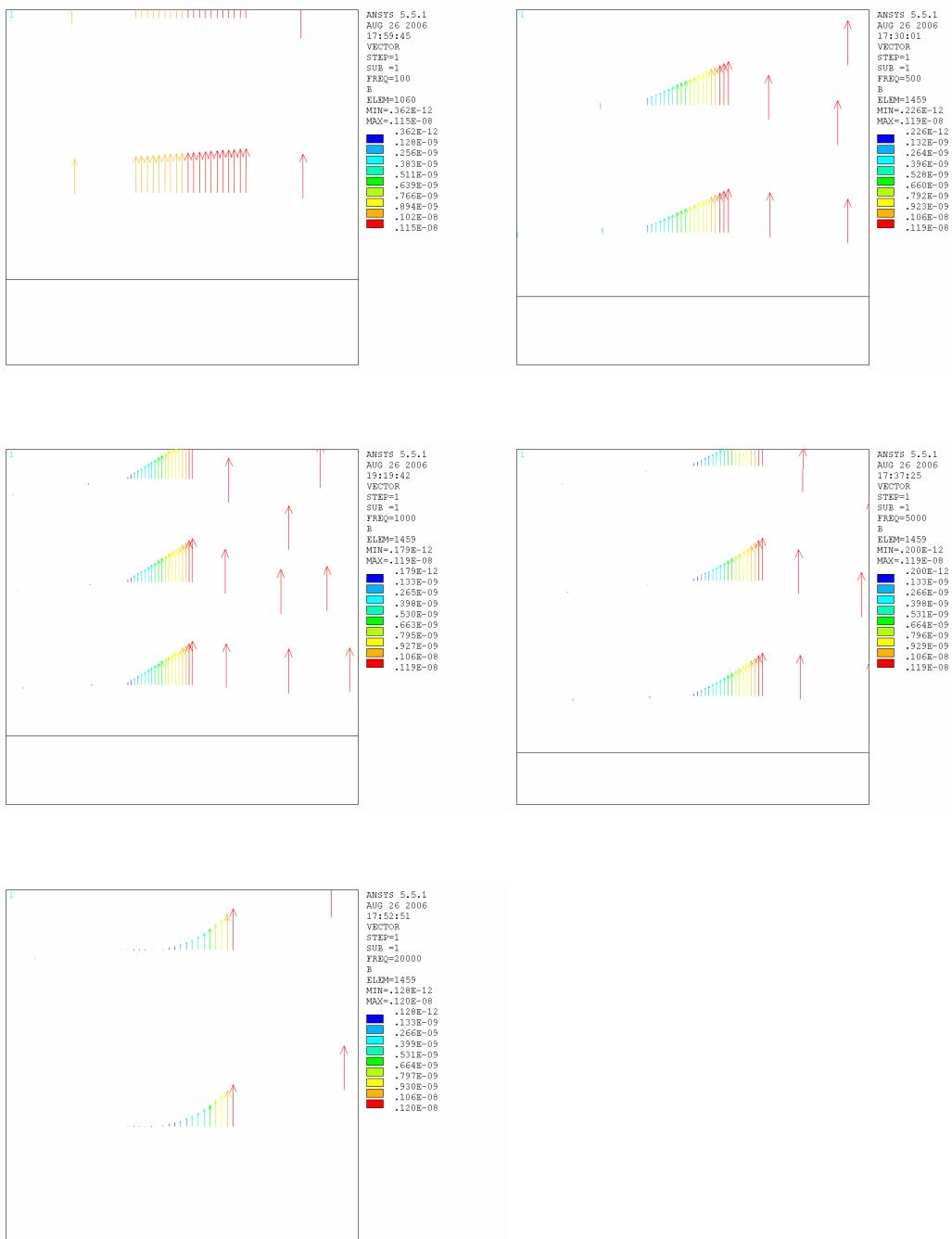
2. pielikums. Skaitliski aprēķinātas magnētiskā lauka imaginārās daļas līnijas sistēmā ar alumīnija cauruli pie frekvencēm 100, 500, 1000, 5000 un 20000 Hz.



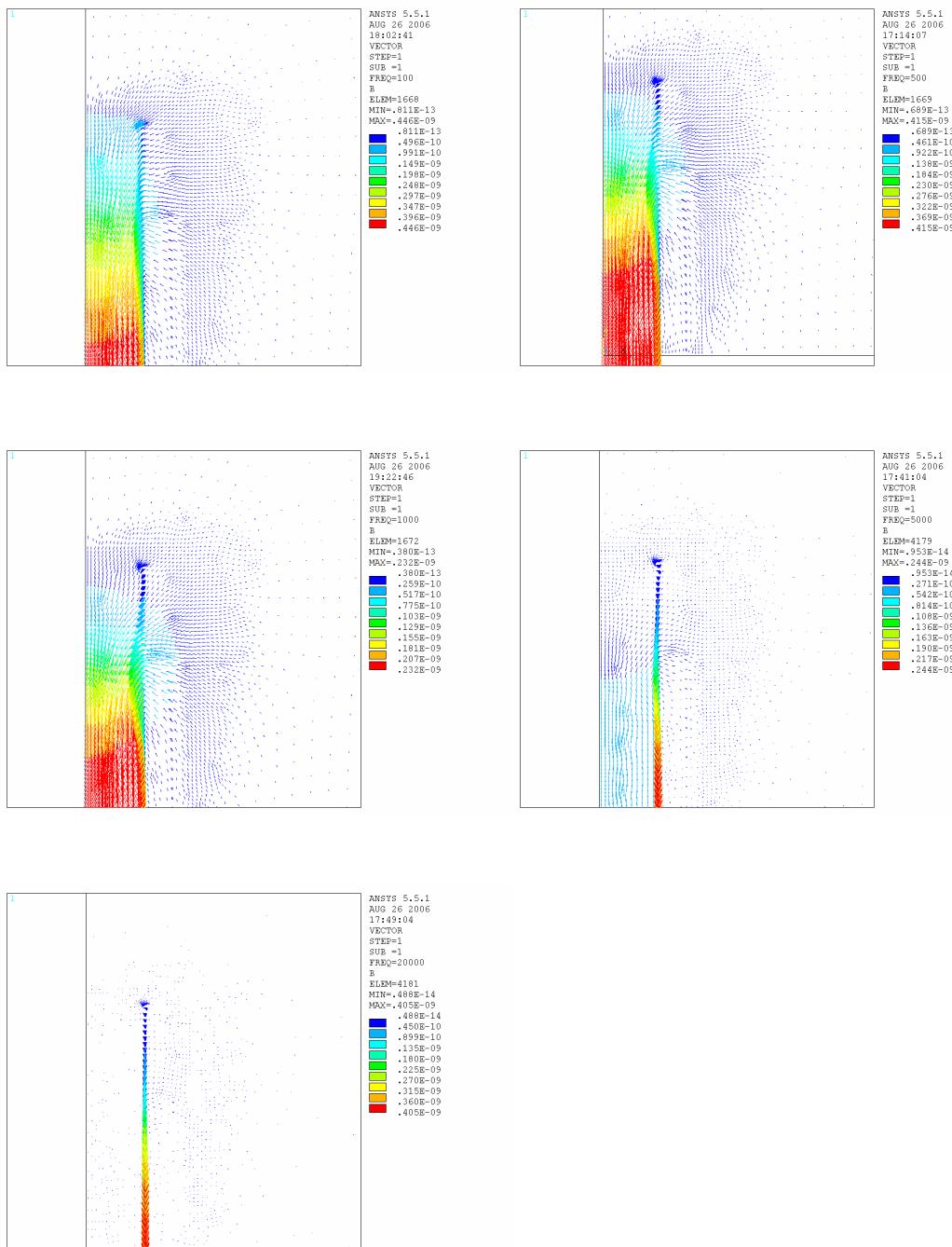
3. pielikums. Skaitliski aprēķināti magnētiskā lauka reālās daļas vektori sistēmā ar alumīnija cauruli pie frekvencēm 0, 100, 500, 1000, 5000 un 20000 Hz.



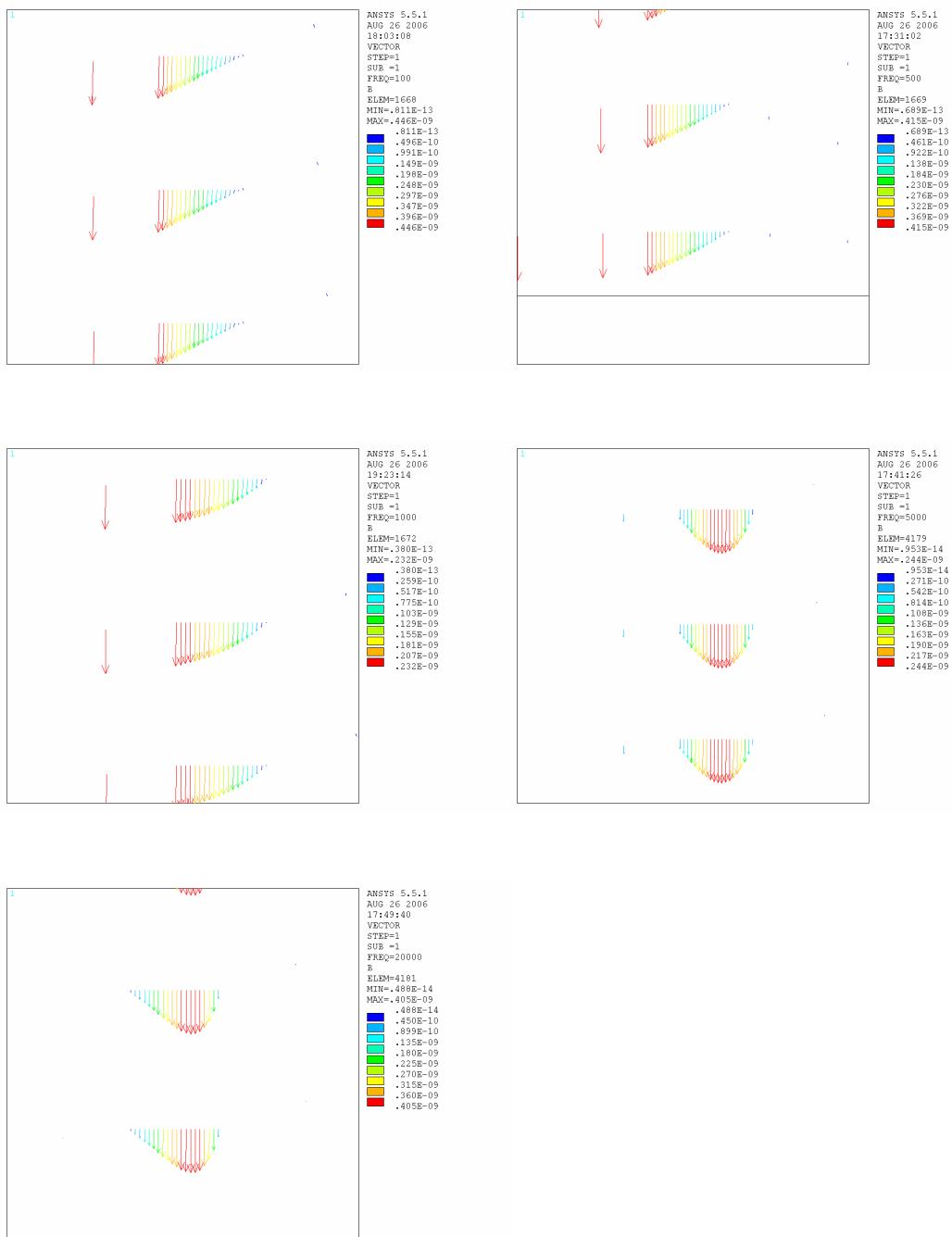
4. pielikums. Skaitliski aprēķināts magnētiskā lauka reālās daļas sadalījums caurules sieniņā un tās tiešā tuvumā sistēmā ar alumīnija cauruli pie frekvencēm 100, 500, 1000, 5000 un 20000 Hz.



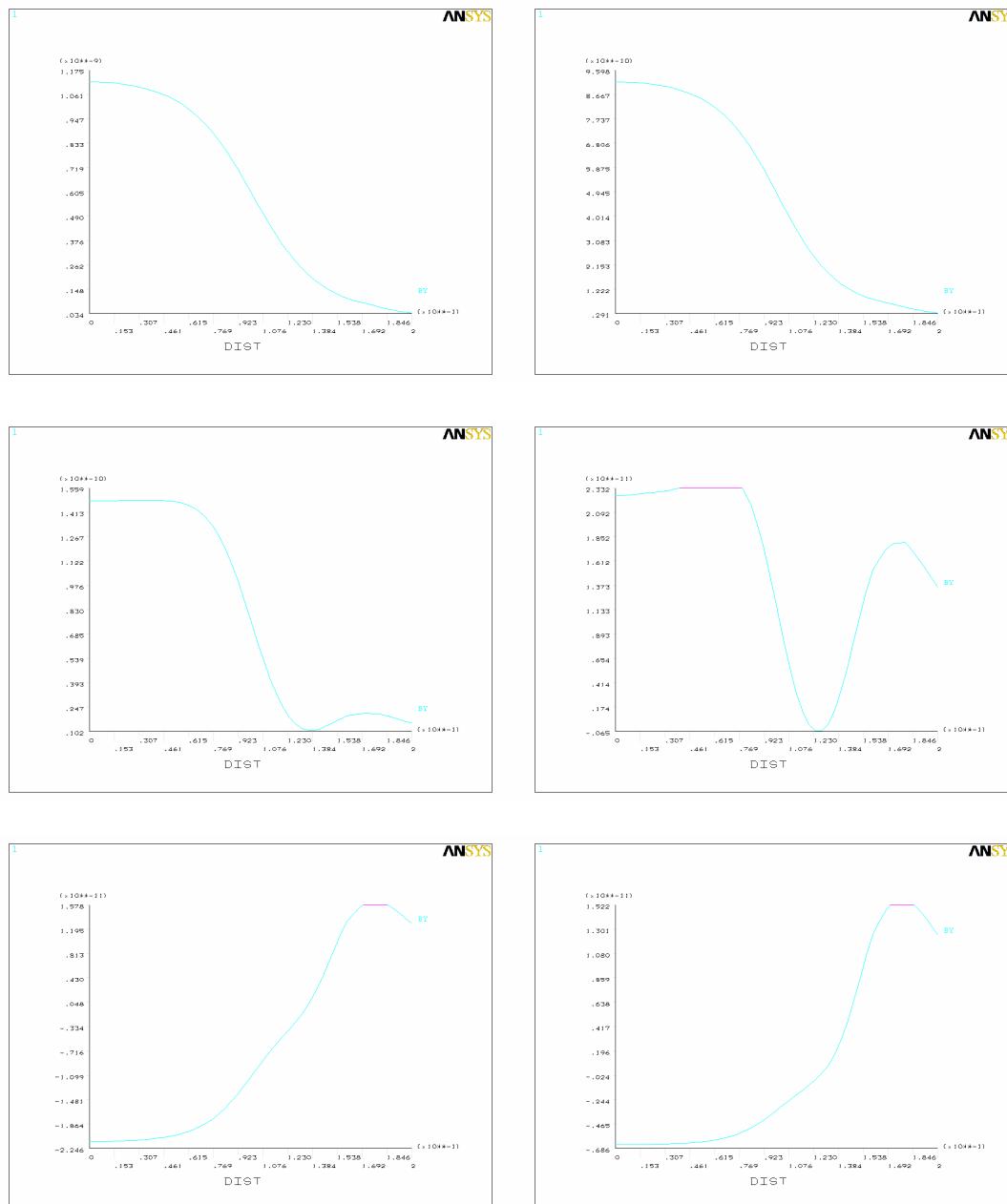
5. pielikums. Skaitliski aprēķināti magnētiskā lauka imaginārās daļas vektori sistēmā ar alumīnija cauruli pie frekvencēm 100, 500, 1000, 5000 un 20000 Hz.



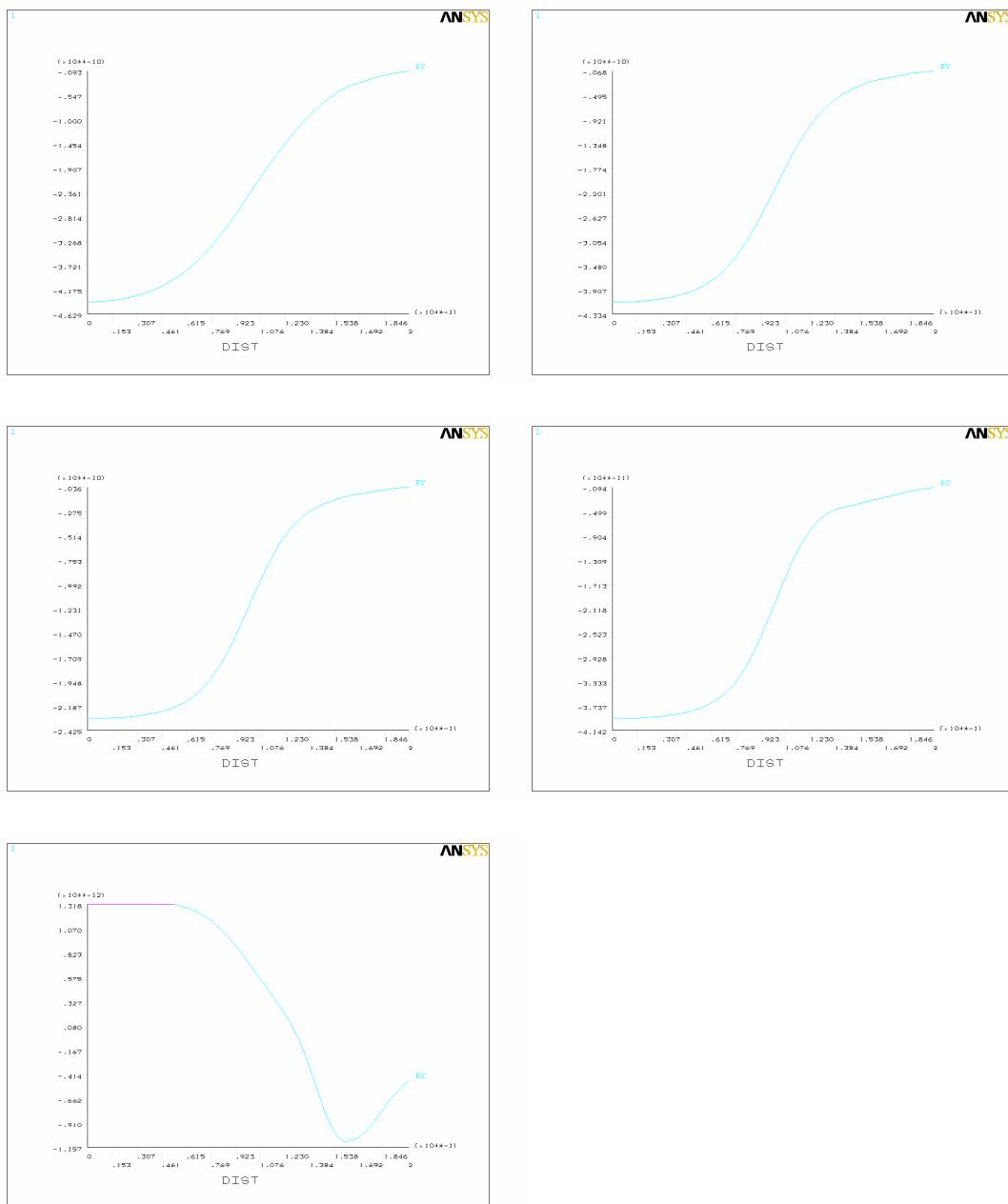
6. pielikums. Skaitliski aprēķināts magnētiskā lauka imaginārās daļas sadalījums caurules sieniņā un tās tiešā tuvumā sistēmā ar alumīnija cauruli pie frekvencēm 100, 500, 1000, 5000 un 20000 Hz.



7. pielikums. Skaitliski aprēķināts magnētiskā lauka reālās dajas sadalījums uz spoles ass no centra uz tās vienu galu pie frekvencēm 0, 100, 500, 1000, 5000 un 20000 Hz.



8. pielikums. Skaitliski aprēķināts magnētiskā lauka imaginārās dajas sadalījums uz spoles ass no centra uz tās vienu galu pie frekvencēm 0, 100, 500, 1000, 5000 un 20000 Hz.



9. pielikums. Skaitliski aprēķināts magnētiskā lauka moduļa sadalījums uz spoles ass no centra uz tās vienu galu pie frekvencēm 0, 100, 500, 1000, 5000 un 20000 Hz.

