

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte
Radioelektronikas institūts

Nikolajs Ponomarenko
Doktora studiju programmas "Elektronika" doktorants

**Ferītu materiālu un komponentu
magnētisko zudumu frekvenču un
mikrostruktūras atkarību pētījumi**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing., profesors
J. Jankovskis

Rīga 2014

UDK 621.318.13(043.2)
Po 525f

Ponomarenko, N. Ferītu materiālu un komponentu magnētisko zudumu frekvenču un mikrostruktūras atkarību pētījumi. Promocijas darba kopsavilkums.– Rīga: RTU Izdevniecība, 2014. 53 lpp.

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes „RTU P-08” 2014. gada 25. septembra lēmumu, protokols Nr. 23/1.



Šis darbs ir izstrādāts ar ESF atbalstu.

ISBN 978-9934-10-640-8

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU
DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ
UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada 8. janvārī Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē Āzenes ielā 16/20, 215. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Andris Ozols, profesors, Dr. habil. phys., RTU Tehniskās fizikas institūts

Juris Roberts Kalniņš, asoc. prof., Dr. habil. phys., Ventspils augstskolas Matemātikas un dabas zinātņu katedra

Vera Skvorcova, vad. pētniece., Dr. phys., LU Cietvielu fizikas institūts

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Nikolajs Ponomarenko (Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 5 pielikumus, 107 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 162 lappuses. Literatūras sarakstā ir 194 nosaukumi.

SATURS

1. DARBA VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS.....	6
1.1. IEVADS.....	6
1.2. POLIKRISTĀLISKO FERĪTU IZPĒTES AKTUALITĀTE	7
1.3. DARBA MĒRĶI	9
1.4. AIZSTĀVAMĀS TĒZES	10
1.5. DARBA REZULTĀTU APROBĀCIJA.....	10
1.6. DARBA STRUKTŪRA	12
2. FERĪTU RAKSTURLIELUMU KOPUMS ATKARĪBĀ NO FREKVENCES.....	13
2.1. MAGNĒTISKIE ZUDUMI; ZUDUMI SASKAŅĀ AR ŠTEINMECA VIENĀDOJUMU	13
2.2. KOMPLEKSĀ CAURLAIDĪBA	15
2.2.1. KOMPLEKSĀS CAURLAIDĪBAS (KSC) MODELĒŠANAS PROBLĒMAS	16
2.2.2. MIKROSTRUKTŪRAS IETEKME	17
2.2.2.1. Mikrostruktūras parametri.....	17
2.2.3. MIKROSTRUKTŪRAS IETEKMES UZ NO FREKVENCES ATKARĪGĀM PF ĪPAŠĪBĀM	19
2.2.4. KSC MODELĒŠANA, ŅEMOT VĒRĀ MIKROSTRUKTŪRAS EFEKTUS	21
2.3. FERĪTI IMPULSU BAROŠANAS AVOTOS.....	24
2.4. FERĪTU AUGSTFREKVENČU PROBLĒMU APSKATS	25
3. KRAMERSA-KRONIGA SAKARĪBU (KKS) PIELIETOŠANA KSC SPEKTRU IZVĒRTĒJUMOS.....	27
3.1. KSC SPEKTRU KVALITĀTES ANALĪZE NO KKS VIEDOKĻA	27
3.2. KSC SPEKTRU DEKOMPOZĪCIJAS	29
4. FERĪTU MIKROSTRUKTŪRAS (MST) ANALĪZE.	30
4.1. FERĪTU MIKROSTRUKTŪRAS STATISTISKIE PARAMETRI.	30
4.2. PARAUGU IZGATAVOŠANA AR VIENĀDU MST	31
5. FERĪTU MAGNĒTISKO UN DIELEKTRISKO PARAMETRU MĒRĪŠANA.....	34
5.1. KSC MĒRĪJUMU REZULTĀTI.....	34
5.2. KOMPLEKSĀS DIELEKTRISKĀS CAURLAIDĪBAS MĒRĪJUMI	36
6. MODEĻA UN EKSPERIMENTĀLO KSC KORELĀCIJAS IZPĒTE	37
6.1. KSC SIMETRISKO SPEKTRU IZPĒTE	37
6.2. MODEĻA PIELIETOJUMI ASIMETRISKO SPEKTRU PREZENTĀCIJAI.....	38
6.2.1. NIĶĒĻA FERĪTU KSC PREZENTĀCIJA	38
6.2.2. KSC PREZENTĀCIJA PARAUGIEM AR VIENĀDU MIKROSTRUKTŪRU	39
6.3. KSC PREZENTĀCIJA PARAUGIEM AR DIMENSIONĀLO REZONANSI	41
6.4. KSC KĀ PAŠPIEMĪTOŠA UN PAŠNEPIEMĪTOŠA ĪPAŠĪBA	45
7. SECINĀJUMI UN TURPMĀKIE PĒTĪJUMI	47
7.1. SECINĀJUMI	47
7.2. TURPMĀKIE PĒTĪJUMI	49
LITERATŪRAS SARAKSTS	50

Galvenie saīsinājumi

IBA – Impulsu barošanas avots

PF – Polikristālisks ferīts

PaI – pašpiemītoša īpašība

PnI – pašnepiemītoša īpašība

KSC – kompleksā sākuma caurlaidība

MST – mikrostruktūra

AKp – Absorbcijas komponente

DKp – Dispersijas komponente

DR – dimensionālā rezonanse

DSR – dabīgā spinu rezonanse

KKS – Kramersa-Kroniga sakarības

DS – domensiena

Galveno fizikālo lielumu saraksts

F – frekvence

$\mu(f)$ – kompleksā magnētiskā caurlaidība

$\mu'(f)$ – kompleksās caurlaidības reālā daļa

$\mu''(f)$ – kompleksās caurlaidības imaginārā daļa

$\tan\delta(f)$ – zudumu leņķa tangenss

$f_u - \mu''(f)$ – absorbcijas maksimuma frekvence

$\mu''_{max} - \mu''(f)$ – absorbcijas maksimālā vērtība

D_a – vidējais graudu izmērs

$f(D), f_n(D)$ – sadalījuma varbūtības blīvuma funkcijas

$\mu'_{model}(f), \mu''_{model}(f)$ – modeļa aproksimācijas reālā un imaginārā komponente

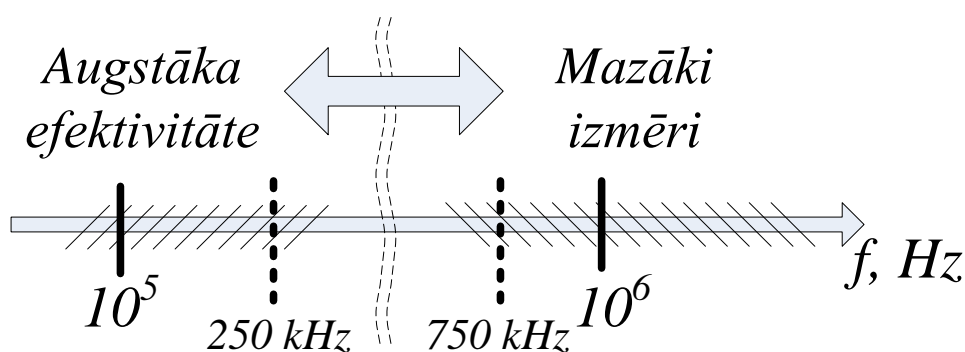
f_a, f_b – modeļa uzstādītie frekvences darba punkti

σ_a, σ_b – modelim noteiktās dispersijas darba punktus

1. DARBA VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS

1.1. Ievads

Mūsdienu tehnoloģijas un zinātne koncentrējas uz 3 globālām problēmām [53], tā ir: enerģija, apkārtējā vide un veselība. Magnētiskie materiāli noteiktu pozitīvu ieguldījumu spēj dot visās minētajās problēmās (piem., ļaujot izveidot: ierīces ar augstākiem lietderības koeficientiem, ar mazāku elektromagnētisko piesārņojumu apkārtējā vidē, ar efektīvākiem risinājumiem medicīnā). Tiem var būt arī īpaša nozīme noteiktās jomās, piem., magnētiski mīksti materiāli (tādi kā ferīti, elektromehāniskais tērauds, amorfie materiāli un citi) veido vienu no trim pīlāriem (t. i., pusvadītāji, kontrole un magnētika [49]), uz kuriem balstās spēka elektronika. Tāpēc magnētiski mīksto materiālu izpēte ir nozīmīga ne tikai mūsdienu spēka elektronikas attīstībā, kura tomēr ir galvenā šo materiālu patērētāja.



1.1. attēls. Power Integrations 500 W Hyper LCS saimes pārveidotāja efektivitātes un izmēru atkarība no frekvences (pēc [57] datiem)

Iezīmīga ir portatīvā elektronika, kura tiecas kļūt aizvien mazāka un vieglāka, taču vēlas saglabāt augstu lietderības koeficientu. Tajos signāla apstrādes daļa (mikroprocesori) pakļaujas Mūra likumam, toties barošanas bloku elektronika (balstoties uz pašiem efektīvākajiem konvertoriem – impulsu barošanas avotiem) attīstās daudz lēnāk: īpatnējā jauda dubultojas tikai 10 gados [13] (kopš 1970. gada). Taču arī šie rādītāji ir sasniegti vien ar iespēju izmantot augstāku darba frekvenci, kura pieaugusi aptuveni 10 reizes [13]. Augstas pārslēgšanās frekvences ietekmē gandrīz visus barošanas bloka raksturlielumus [54, 55], bet it īpaši tos, kas ir saistīti ar parazitiskām impedancēm, iespiesto plašu augstfrekvences efektiem, potenciāli lieliem sprieguma pīķiem (avotam pārslēdzoties), kā arī konduktīviem un izstarotiem elektromagnētiskajiem traucējumiem [43]. Tāpēc augsta pārslēgšanās frekvence bieži izraisa lietderības koeficienta samazināšanos (kā tas ir parādīts 1.1. att. Power Integrations 500 W Hyper LCS konvertoram [57]: redzams, ka starpība starp raksturojumiem ir ievērojama – mazākais konvertora tilpums pie 750 kHz vai lielākais lietderības koeficients

pie 250 kHz pārslēgšanas frekvences). Analogiskus rezultātus uzrādīja eksperimenti arī ar citiem [50] augstfrekvences DC/DC konvertoriem – sākot no noteiktas frekvences, lietderības koeficients krītas.

Pielietojumos tāpat ir jāmeklē kompromisi [41] – vai nu mazi izmēri un zems lietderības koeficients, vai otrādi. Jebkurā gadījumā augsta pārslēgšanas frekvence dod iespēju pielietot mazākus magnētiskus komponentus IBA (samazinot serdeņu izmērus). Polikristāliskie ferīti (PF) ir visatbilstošākie materiāli komponentu serdeņiem augsta lietderības koeficienta nodrošināšanai plašā frekvenču diapazonā.

1.2. Polikristālisko ferītu izpētes aktualitāte

Mūsdienās PF tiek pielietoti plaša spektra augstfrekvenču ierīcēs, piemēram, signālu elektronikā un impulsu barošanas avotos (IBA) – kā transformatori un induktīvie komponenti, elektromagnētiskās saderības ierīcēs, bezvadu barošanas blokos – kā augstfrekvences absorbējošie materiāli, elementi, komponenti utt. IBA progress ir būtiski saistīts ar PF magnētisko materiālu uzlabošanu. Tie – MnZn un NiZn ferīti – ir plaši pielietojami frekvenču diapazonā no dažiem kiloherciem līdz dažiem megaherciem. Šajā plašajā frekvenču diapazonā IBA izvirza paaugstinātas prasības induktīvo komponentu izmēriem, drošumam un stabilitātei. Tas nozīmē, ka jābūt vispusīgai informācijai, izvēloties PF (balstīta uz dziļāku izpratni par to būtību), ko diktē jaunās attīstības tendences, kurās PF joprojām ir galvenais materiāls augstas efektivitātes komponentu izgatavošanā. Bieži PF galvenais uzdevums ir koncentrēt un novadīt magnētisko plūsmu. Plūsmas blīvumu lielākā vai mazākā mērā nosaka gan PF *pašpiemītošās* īpašībās (*intrinsic*), gan arī *pašnepiemītošās* īpašības (*extrinsic*). Šajā darbā termins *pašpiemītošs* tiek izmantots, lai atšķirtu PF paraugu tās īpašības, kuras tieši ir atkarīgas no materiāla sastāva un struktūras, no *pašnepiemītošajām* īpašībām (t. i., tām PF īpašībām, kuras ir atkarīgas no materiāla daudzuma, magnētiskās ķēdes noslēgtības pakāpes u. c.). Noteikta PF īpašība, saskaņā ar teikto, var būt pašpiemītoša īpašība (PaI), vai arī pašnepiemītoša īpašība (PnI). Tomēr vēl arī ir jāatzīmē, kā faktiski nākas atšķirt divus PF PaI "pakāpes" saistībā ar to izgatavošanas tehnoloģiju un mikrostruktūru (MST): īstais "pašpiemītošs" gadījumā, kad MST graudiem nav iekšējie defekti, un parastais "pašpiemītošs", kad tie tomēr eksistē.

Vairākos PF pielietojumos mēs saskaramies ar to pašnepiemītošiem parametriem (šajā darbā: dimensionālo rezonansi, nemagnētiskās spraugas platuma ietekmi). Bet pamats, uz kā var vērtēt pašnepiemītošos parametrus, izriet no pašpiemītošo parametru pētniecības.

Atgriezoties pie iepriekšminētas plūsmas koncentrācijas, paši nozīmīgākie parametri ir relatīvā caurlaidība (kā statiskā $\mu(0)$, tā arī kompleksā $\hat{\mu}(f)$, definēta interesējošo frekvenču apgabalā) un piesātinājuma parametri (piesātinājuma indukcija B_s , vai magnetizācija M_s). Piesātinājuma parametri ir plaši pieejami un nav atkarīgi no PF apraksta veida – kā PaI vai arī kā PnI. Pretēji tam, kompleksā caurlaidība (KC) $\hat{\mu}(f) = \mu'(f) - j\mu''(f)$, kur $\mu'(f)$ ir tās dispersijas daļa (komponente, DKp) un $\mu''(f)$ ir absorbcijas daļa (komponente, AKp), ir sarežģītāks parametrs, kuru izgatavotāji parasti uzdod kā PaI relatīvi maziem serdeņiem [61], neskatoties uz to, ka faktiski KSC PaI un PnI parasti ievērojami atšķiras, un līdz ar to arī spēja koncentrēt plūsmu pie noteiktas f . Attiecībā uz zudumiem KC ir nozīmīgs raksturlielums, jo AF zudumi magnētiskajos materiālos ir tieši saistīti ar KC, piem., definējot magnētisko zudumu vērtību kā: $\tan\delta(f) = \mu''(f)/\mu'(f)$. Turklāt, lai iegūtu augstu efektivitāti pie lielām jaudām, ir jāizvēlas magnētiskās serdes ar ievērojami lielākiem izmēriem, nekā mazjaudas serdeņi (pieejamie dati, kopumā pārstāv mazjaudas specifikācijas). Bet ar lielākiem serdeņu izmēriem var rasties problēmas, ko nevar paredzēt, izmantojot tikai specifikācijas mazjaudas toroidālām serdēm. Viena šāda problēma ir saistīta ar t. s. dimensionālo rezonansi (DR) serdēs.

1.1. tabula

Pētāmo paraugu magnētiskie un ģeometriskie parametri.				
Grupa	№	Izmēri, mm	$\mu(0)$ (nom.)	Paraugu izgatavošana
	A1	R12 × 8 × 6	2000	
NiZn, 4S60 [21]	A2	R20 × 10 × 6	2000	Izgriezti no ferīta flīzes
	A3	R31.5 × 20.5 × 6	2000	
	A4	R40 × 23.5 × 6	2000	
	B1	R10 × 4.3 × 10	6000	
MnZn, 6000HM1 [69]	B2	R20 × 9.1 × 10	6000	Izgriezti no ferīta flīzes
	B3	R25 × 12 × 10	6000	
	B4	R30 × 14.3 × 10	6000	
	B5	R33 × 10 × 10	6000	
MnZn, T37 [19]	C1	R12.5 × 7.5 × 5	6500	Komerčiāli produkti
	C2	R20 × 10 × 7	6500	
	C3	R40 × 24 × 16	6000	

Konkrētie izpētes objekti darbā ir mangāna-cinka un niķeļa-cinka ferīti (1.1. tabula), jo tie visbiežāk tiek pielietoti kā signālu, tā arī spēka elektronikā. Lai izslēgtu nelinearitāti, paraugi tika pētīti vāju lauku iedarbībā (kad kompleksā caurlaidība tiek uzdots kā kompleksā sākuma caurlaidība); iegūtie rezultāti var tikt izmantoti kā bāze eksperimentiem stipros laukos un nesinusoidāliem ierosinājuma veidiem [63, 64].

No daudzajiem PF raksturojumiem šajā darbā galvenokārt tiek pētītas kompleksās sākuma magnētiskās caurlaidības frekvenču atkarības (sauktas arī par magnētiskiem spektriem, MS), to saistības ar PF mikrostruktūru (MST). Tātad šeit KSC galvenokārt parādās kā PaI, taču tiek sniegti arī eksperimentālie dati saistībā ar dimensionālo rezonansi, ar magnētiskās ķēdes nenoslēgtības pakāpes ietekmēm, utt. (tātad PnI).

Lai arī KSC, kā nozīmīgs PF raksturojums tiek pētīta jau desmitiem gadu, tomēr vēl joprojām tai nav izstrādāts fizikāli pamatots un eksperimentiem atbilstošs matemātiskais modelis; esošie tuvinājumi ir formāli un ar būtisku trūkumu – tie neietver sevī PF MST ietekmi. Būtiska loma šajā darbā ir eksperimentālajiem KSC spektriem: tie galvenokārt ir šā pētījuma ietvaros nomērītie, bet pasaules konteksta piesaistei tiek izmantoti arī citu publicētie dati (no kuriem dažkārt nākas atteikties, jo tie neatbilst pārbaudei pēc Kramersa-Kroniga sakarību (KKS) [65] kritērija; nereti šeit ir problēmas arī ar MST raksturojumu).

Darbā kompleksās caurlaidības analītiskā modelēšana (ko izstrādājis prof. Jankovskis un kas ir balstīta uz graudu izmēra sadalījuma efektu), ir analizēta un eksperimentāli pierādīta. Frekvenču diapazons mērīšanai ir izvēlēts tāds, lai tas aptvertu KSC lielas amplitūdas platjoslas absorbcijas apgabalu.

1.3. Darba mērķi

Darba mērķi izriet no pētījuma pamatuzdevuma: bāzējoties uz pamatgrupu (MnZn un NiZn) PF eksperimentāli iegūtiem KSC un MST datiem, pierādīt (vai arī noraidīt) izstrādāto (hipotētisko) KSC analītisko modeli, kas balstīts uz efektiem, kuri izriet no PF graudu izmēra faktiskā sadalījuma.

No iepriekšminētā pamatuzdevuma izriet šā darba mērķi:

- noskaidrot kompleksās sākuma caurlaidības prezentācijas problēmas (iekļaujot tajā lielās amplitūdas platjoslas dispersijas (domēnsienu) frekvenču apgabalu);
- PF mikrostruktūras izpēte, nolūkā izveidot pamatu kompleksās caurlaidības dziļākai izpratnei un modelēšanas iespējām;
- izpētīt kompleksās sākuma caurlaidības saistību ar mikrostruktūru (kas statistiski tiek saistīta ar vidējā grauda izmēru un izmēru sadalījuma dispersiju);

Darbā aktuālas ir arī problēmas, kas saistītas ar kompleksās magnētiskās caurlaidības mērīšanu, rezultātu ticamības novērtējumu un liela izmēra serdeņu izpēti (saistībā ar dimensionālo efektu). Spektru kvalitāte tiek pārbaudīta ar izstrādāto MATLAB programmu, balstoties uz Kramersa-Kroniga sakarībām.

1.4. Aizstāvamās tēzes

Šajā darbā tiek izvirzītas un aizstāvētas tēzes par to:

- ka zudumus, kuri ir saistīti ar ferīta materiāla magnētiskās caurlaidības frekvenču raksturliķnes galvenās (platjoslas) absorbcijas apgabalu, var analītiski aprakstīt, balstoties uz modelēšanu, kura ievēro efektus, izrietošus no polikristāla graudu izmēra sadalījuma likumsakarībām;
- ka komplekso sākuma caurlaidību kā pašpiemītošu īpašību polikristāliskiem NiZn un MnZn (maza izmēru) ferītiem ir iespējams prezentēt ar uz mikrostruktūras efektiem bāzētu modelēšanu;
- ka KSC kā pašnapiemītoša īpašība pietiekoši lieliem MnZn ferīta paraugiem uzrāda dimensionālo rezonansi, kura (kopā ar jau zināmiem faktoriem) ir atkarīga arī no mērtinuma vijumu skaita, turklāt spektru parametru izmaiņas neseko *Snoek* tipa likumsakarībām;
- ka Kramersa-Kroniga sakarības kopumā: gan ar to pielietošanu magnētisko spektru kvalitātes pārbaudei, gan ar iespējām summāro magnētisko spektru dekompozīcijā, ekstrapolācijā un fizikāli pamatotā interpretācijā, veido nozīmīgu KSC pētniecības līdzekli.

1.5. Darba rezultātu aprobācija

Galvenie darba rezultāti tika prezentēti 6 starptautiskās konferencēs:

- The 8th International Scientific and Practical Conference, Rēzekne, Latvija, 20.–22. jūnijs, 2011;
- The 7th International Conference on Functional Materials and Nanotechnologies (FM&NT), Rīga, Latvija, 17.–20. aprīlis, 2012;
- The 2nd International Conference on Materials and Applications for Sensors and Transducers (ICMAST), Budapešta, Ungārija, 24.–28. maijs, 2012;
- The 17th International Conference “Electronics’ 13”, Kaunas, Lietuva, 17.–19. jūnijs, 2013;

- The 8th International Conference on Functional Materials and Nanotechnologies (FM&NT), Tartu, Igaunija, 21.–24. aprīlis, 2013;
- The 21st International Conference on Soft Magnetic Materials (SMM-21), Budapešta, Ungārija, 1.–4. septembris, 2013.

Rezultāti ir apkopoti arī 6 publikācijās (konferenču rakstu krājumos un zinātniskajos žurnālos):

1. J. Jankovskis, N. Ponomarenko, P. Narica. An Investigation on High Frequency Permeability of Polycrystalline Ferrites. *Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference, Latvia, Rezekne, 20–22 June, 2011.* – pp. 194–201.
2. J. Jankovskis, N. Ponomarenko, N. Mironova-Ulmane, D. Jakovlevs. Dimensional Effects of Sample Geometry and Microstructure of MnZn and NiZn Ferrites. *2012 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **38** 012018 – pp. 1–4.
3. J. Jankovskis, N. Ponomarenko, D. Stepins. Frequency Dependence of Complex Permeability of Polycrystalline Ferrites Based on the Realities of Microstructure. *Key Engineering Materials*, *543*, 2013, – pp. 507–510.
4. J. Jankovskis, D. Stepins, N. Ponomarenko. Effects of Spread Spectrum on Output Filter of Buck Converter. *Electronics and Electrical Engineering*, 2013, Vol. 19, No. 5, pp. 45–48. e-ISSN 2029-5731. ISSN 1392-1215.
5. J. Jankovskis, N. Ponomarenko, N. Mironova-Ulmane, D. Jakovlevs. The study of Correlation Between Microstructure of Ferrites and Their Complex Permeability Spectra. *2013 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **49** 012045 – pp 1–4.
6. J. Jankovskis, N. Ponomarenko. Complex permeability of ferrites as intrinsic and extrinsic properties. *J. Chem. Chem. Eng.* 8 (2014) pp. 85–91.

Pirmā publikācija ir indeksēta Rezekne Higher Educational Institution datubāzē (<http://zdb.ru.lv>) . Publikācijas – 2, 3, 4 un 5 – ir indeksētas SCOPUS un IOP datubāzēs. Sestā publikācija ir indeksēta Cambridge Science Abstracts (CSA); Ulrich's Periodicals Directory, Database of EBSCO, USA; Chinese Scientific Journals Database, VIP Corporation, Chongqing, China; Chinese Database of CEPS, American Federal Computer Library center (OCLC), USA; Chemical Abstracts Service (CAS); Google Scholar; Proquest, USA; CCRIS; ChemID Subset; DIRLINE; Gene-Tox, HSDB; TOXLINE/Subset; Publicon Science datubāzēs.

1.6. Darba struktūra

Pirmajā nodaļā ir parādītas galvenās problēmas, kas ir saistītas ar ferītu augstfrekvences pielietojumu.

Otrajā nodaļā tiek sniegts īss pārskats par ferītu zudumiem atkarībā no frekvences (histerēzes, virpuļstrāvas un anomālie zudumi). Šeit tiek aprakstīta gan Šteinmeca empīriskā pieeja, gan arī uz kompleksās caurlaidības balstīta analīze. Tiek sniegts arī modelēšanas teorētiskais pamatojums, kas balstās uz MST efektiem. Norādītas arī problēmas, kas ir saistītas ar PF pielietošanu impulsu barošanas avotos.

Trešā nodaļa tiek veltīta Kramersa-Kroniga sakarību pielietojumam - spektra kvalitātes noteikšanai, kā arī spektra dekompozīcijai un spektra komponentu novērtēšanai.

Ceturtajā nodaļā ir izklāstīta ferītu mikrostruktūras statistiskās analīzes būtība, pielietotās metodes, kā arī konkrēto pētāmo ferītu mikrostruktūras dati, kas iegūti pēc Saltikova metodes.

Piektā nodaļa ir veltīta kompleksās caurlaidības izpētei: tiek aprakstītas mērīšanas metodes, kā arī parādīti pētāmo ferītu eksperimentālie caurlaidības spektri; tiek veikta spektru kvalitātes pārbaude ar KKS. Pētījuma gaitā MnZn ferītos tika konstatēta dimensionālā rezonanse un atrasta tās atkarība no uztītā mērinstrumentu vijumu skaita.

Sestajā nodaļā tiek izmantoti dati no mikrostruktūras analīzes un izmērīti KSC spektri, kuri iegūti iepriekšējās nodaļās, lai praktiski pārbaudītu analītisko modeli. Papildus šajā nodaļā ir veikta arī eksperimentāla dimensionālās rezonanses izpēte.

Septītajā nodaļā ir dots rezultātu apkopojums un secinājumi, kā arī parādītas un apskatītas iespējas nākamajiem pētījumiem saistībā ar darba tēmu.

2. FERĪTU RAKSTURLIELUMU KOPUMS ATKARĪBĀ NO FREKVENCES

2.1. Magnētiskie zudumi; zudumi saskaņā ar Šteinmeca vienādojumu

Magnētisko komponentu raksturlielumu atkarība no frekvences ir jāņem vērā daudzos gadījumos (piem., projektējot barošanas blokus, jo šīs atkarības var ietekmēt visas iekārtas darbību EMS filtru projektēšanā, jo tie ietekmēs trokšņu slāpēšanu noteiktos frekvenču apgabalos utt.). Magnētiskajās komponentēs var izdalīt divu veidu zudumu avotus: zudumi tinumos un zudumi serdenī [15]. Zudumi tinumos ir samērā labi izpētīti [40, 68], bet serdeņos tas vēl joprojām ir aktuāli. Daudzos gadījumos zudumi serdenī ir jāminimizē, lai iegūtu augstu lietderības koeficientu [14]. Kopējos jaudas zudumus serdenī nosaka tās 3 sastāvdaļas [5, 51, 66]:

– kvazistatiskie histerēzes zudumi: $P_h = k_h f B_m^n$ (Šteinmeca forma); (2.1)

– klasiskie virpuļstrāvu zudumi: $P_e = \frac{\pi^2 d^2}{6 \rho} f^2 B_m^2$; (2.2)

– anomālie zudumi: $P_a = \text{const}(f B_m)^{3/2}$ metāliskiem materiāliem [4] (ferītiem nav vispārpieņemtas analītiskas izteiksmes)

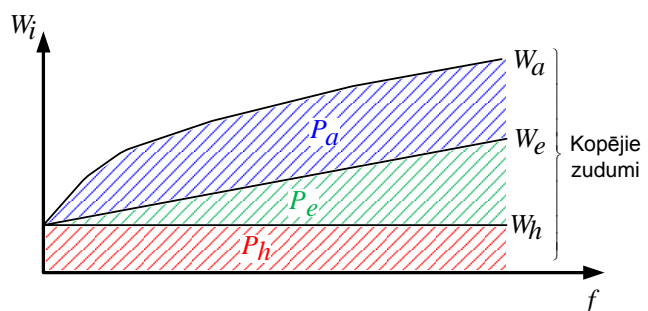
Minēto zudumu komponentu grafiskais attēlojums bieži [5, 51] tiek uzdots ar zuduma enerģiju palīdzību: $W_i = P_i/f$, kur P_i pārstāv konkrētos zudumus (2.1. att.) (zuduma enerģiju

W_i izmantošana ļauj pazemināt materiāla zudumu frekvences atkarību par vienu pakāpi). Līdz ar to zudumu grafiskā attēlošana kļūst uzskatāmāka (konstanta W_h , lineāri augoša W_e un anomālie, tādi kā W_a).

Parasti, saskaitot W_h un W_e , mēs iegūstam vērtību, kura ir mazāka

nekā eksperimentāli novērotā (kopējā) vērtība $W_{tot}(f) \equiv W_{exp}(f)$. Lai novērstu šo neatbilstību, bilancē tiek iekļauti anomālie zudumi: $W_a(f) = W_{exp}(f) - [W_h + W_e(f)]$.

Anomālie zudumi vēl joprojām nav strikti definēti gan fizikāli, gan matemātiski. Publikācijā [14] ir uzskaitīti vairāki iespējamie iemesli šai parādībai metāliskos feromagnētiķos: domēnu sienu veidošanās; nepietiekama plūsmas noslēgtība; mijiedarbība starp graudiem, graudu izmēri, graudu orientācija, un parauga biezums. Vairums šo iemeslu ir saistīti ar stipra lauka iedarbību (metāliskajos materiālos). Tomēr ferīti IBA frekvencēs, kas



Attēls 2.1. PF zudumu sadalījums, pēc [5] datiem.

augstākas par 500 kHz, parasti (sakarā ar straujo zudumu pieaugumu, paaugstinot frekvenci) tiek izmantoti relatīvi vājos laukos (~ 50 mT [6]) (t. i., laukos, kas būtiski ir vājāki par piesātinājuma lauku ~ 500 mT). Turklāt, kā seko no [75], ir sarežģīti P_e un P_a iegūt katru atsevišķi. Pēdējos gados aizvien biežāk secināts, ka liela daļa anomālo zudumu ir saistīti ar domēnsienu darbību ferīta graudos. To var izteikt ar kompleksās caurlaidības palīdzību (lit. [44] šie zudumi tiek saukti par relaksācijas/rezonanses zudumiem). Tāpēc kompleksās caurlaidības izpēte var sniegt uzskatāmāku izpratni par šo zudumu rašanās cēloņiem.

Kā attēlots 2.1. att., kopējie zudumi rodas no trim komponentēm: histerēzes zudumiem; virpuļstrāvas zudumiem un anomāliem zudumiem. No (2.1) un (2.2) vien. izriet, ka tad, kad $B_m \rightarrow 0$, tad atlikusī daļa ir anomālie zudumi. Anomālo zudumu tangensu apzīmēsim ar $\tan\delta_a$ ([66], bez zināmas analītiskas izteiksmes).

Kopējais magnētisko zudumu faktors (izmantojot zudumu komponentu izteiksmes [66]) tad ir:

$$\frac{\tan\delta_m}{\mu} = \frac{4k_h B_m}{3\pi\mu_0\mu^2} + \frac{\pi\mu_0\mu d^2 f}{\rho\beta} + \frac{\tan\delta_r}{\mu}, \quad (2.3)$$

kur k_h – histerēzes koeficients, B_m – maksimālā indukcija, μ_0 – vakuuma caurlaidība, μ – materiāla caurlaidība, d – diametrs (toroidāliem paraugiem), ρ – īpatnējā pretestība, β – konstante [66], f – sinusoidālā darba frekvence. Var secināt, ka zudumu komponentēm ir dažāda atkarība no f un B_m . Šis aspekts ir būtisks, projektējot jaunus barošanas avotus. Tālāk apskatīsim summāro zudumu analīzi, balstītu gan uz Šteinmeca pieeju (faktiski konkrētam materiālam, kam empīriski ir noteiktas atbilstošās konstantes, ierobežotā frekvenču un indukcijas apgabalos), gan uz komplekso caurlaidību bāzēto (ar būtiski universālākām frekvenču atkarībām, bet ierobežotākām lauka indukcijām).

Šteinmeca pieejā, ņemot vērā to, ka materiāla magnētisko zudumu sastāvdaļas nav labi atdalītas un abi – histerēzes un virpuļstrāvas – zudumi ir atkarīgi no frekvences un indukcijas, kopējos zudumus bieži vien joprojām pārstāv empīriskais Šteinmeca vienādojums (SE) (pazīstams arī kā Jaudas likuma vienādojums [14]):

$$P_{core} = k f^\alpha B_m^\beta, \quad (2.4)$$

kur P_{core} ir magnētiskās serdes vidējā izkliedētā jauda tilpuma vienībā; k, α, β ir no materiāla atkarīgie empīriskie koeficienti, kurus izvēlas, pamatojoties uz vislabāko sakrītību ar mērījumu datiem (ferītiem α ir starp 1.1 un 1.9, β ir diapazonā no 1.6 līdz 3 [9]). Tā oriģinālajā formā (2.4) ir izmantojams tikai sinusoidāliem signāliem, turklāt tā ir pareiza tikai ierobežotā frekvenču un plūsmas blīvuma diapazonā [72].

Principā Šteinmeca tipa sakarībai noteiktu fizikālo jēgu var piedot, salīdzinot to ar izteiksmēm, ko var iegūt no virknes ekvivalentās shēmas magnētiskai serdei ar ideālu tinumu (šī izteiksme ir īpaši ievērojama ar to, ka līdzīgu vienādojumu var iegūt, izmantojot elektromagnētiskā lauka pieeju, skat., piem., Landau-Lifšics [74]):

$$P = (\tan\delta/\mu_0\mu_r)\pi f B_m^2 \quad (2.5)$$

Aplūkojot šīs attiecības plašākā skatījumā, kad parametri var būt atkarīgi no f un B_m , t.i., $\tan\delta \equiv \tan\delta(f, B_m)$; $\mu_r \equiv \mu_r(f, B_m)$, un, zinot to konkrētās funkcijas, var iegūt Šteinmeca vienādības paveidus.

2.1. Kompleksā caurlaidība

Magnētiskā caurlaidība un magnētiskie zudumi ir būtiski faktori magnētisko komponentu projektēšanā [8]. Kopējie zudumi (shematiski atspoguļoti 2.1. att.) sastāv no virpuļstrāvas, histerēzes un anomāliem zudumiem. Virpuļstrāvas zudumi paaugstinās, pieaugot frekvencei, bet histerēzes zudumi pieaug, palielinoties AC lauka amplitūdai [8]. No iepriekšminētā izriet, ka anomālie zudumi nav matemātiski definēti un līdz ar to tos tiešāk nevar raksturot. Atbilstoši 2.1. att., anomālie zudumi ir atkarīgi no frekvences, tādējādi tos varam raksturot (vismaz daļēji) ar materiāla no frekvences atkarīgo raksturojumu – komplekso magnētisko caurlaidību (publikācijā [36] tika parādīts, ka zemās frekvencēs un vājos laukos anomālos zudums var raksturot ar komplekso sākuma caurlaidību).

Kompleksā caurlaidība $\dot{\mu}$ norāda uz to, ka mainīgais magnētiskais lauks $H = H_0 e^{j\omega t}$, padots uz ferīta materiālu, rada plūsmas blīvumu B , kas nosebo par fāzes leņķi δ magnetizācijas inerces (zudumu) dēļ:

$$\dot{\mu} = \frac{\dot{B}}{\dot{H}} = \frac{B_0 e^{j\omega t - j\delta}}{H_0 e^{j\omega t}} = \frac{B_0}{H_0} e^{-j\delta} = \frac{B_0}{H_0} \cos\delta - j \frac{B_0}{H_0} \sin\delta = \mu' - j\mu'' \quad (2.6)$$

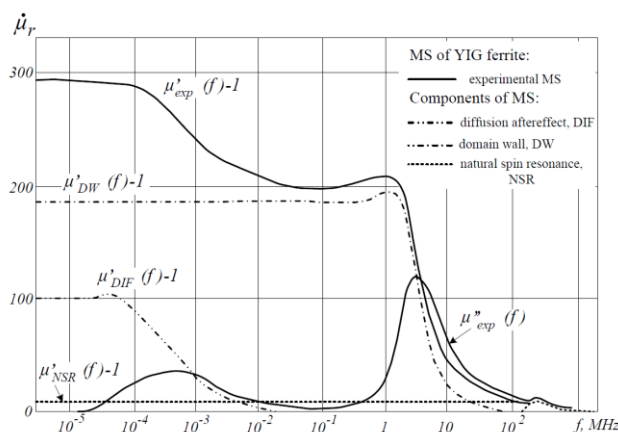
Vienādojumā (2.6) μ' – reālā daļa raksturo to B komponenti, kas ir fāzē ar H , bet imaginārā daļa – μ'' – to B komponenti, kas atpaliek par leņķi $\pi/2$ attiecībā pret H ; no (2.6) attiecīgi izriet, ka zudumus var raksturot ar: $\frac{\mu''}{\mu'} = \tan\delta$, kas ir pazīstams, kā zudumu leņķa tangenss.

Intensīvos pētījumos septiņdesmitajos un astoņdesmitajos gados (galvenokārt saistītiem ar A. Globusa un viņa kolēģu darbiem, piemēram, [21]), empīriski tika pierādīts, ka KSC noteikti ir atkarīga no mikrostrukturā īpašībām (konkrētāk – no vidējā graudu lieluma D_a) un ka dominējošais magnetizācijas mehānisms ir domēnsienu (DS) nobīde (pa retam, vēl joprojām, tomēr nepamatoti tiek apgalvots, ka dominējošais magnetizācijas process ir spinu rotācija [70]). Sekojot [26], varam apgalvot, ka magnētiskā spektra (MS) datos, kas ir uzdoti

plašā frekvenču diapazonā, vispārējā gadījumā var atrast trīs dispersijas apgabalu (2.2. att., eksperimentālie dati tiek ņemti no [26]):

- kHz diapazonā – relaksācijas tipa difūzijas pēcdarbība (kura eksistē, bet ne vienmēr parādās);
- dekādēs, kas piekļaujas blakus 1 MHz – lielas amplitūdas platjoslas dispersija, kas saistīta ar DS procesiem;
- dekādes ap 100 MHz – nelielas amplitūdas dispersija, kas saistīta ar dabīgo spina rezonansi (DSR, natural spin rezonanse, NSR).

DS nobīdes rezultātā rodas lielākas $\mu(f)$ komponentes nekā DSR, un tādēļ ferītos caurlaidība var būt augsta [8]. DSR kļūst nozīmīga speciālos augstfrekvences ferītos (> 100 MHz) [8]. Katra procesa tiešāku devumu visā KSC spektrā var noskaidrot, piem., pēc absorbcijas komponentes $\mu''_{exp}(f)$ sadalīšanas trijās iepriekš minētajās sastāvdaļās [36] (2.2. attēls) un $\mu'(f)$ DKp aprēķina katrai komponentei, izmantojot Kramersa-Kroniga sakarības (KKS), (3.1, 3.2).



2.2. attēls. KSC spektra dekompozīcija [36]: eksperimentāla AKp $\mu''(f)$ vispirms ir sadalīta trijās komponentēs, no kurām tika izskaitļotas DKp komponentes: $\mu'_{DW}(f)$ – DS komponente, $\mu'_{DIF}(f)$ – difūzijas komponente, $\mu'_{NSR}(f)$ – DSR komponente ar KKS palīdzību.

Radiofrekvenču diapazona ietvaros (pie istabas temperatūras) spineļa un granāta tipa PF (visbiežāk praksē izmantotie), parasti skaidri tiek novēroti DS un DSR dispersijas apgabali. Līdzīgi kā 2.2. att., DSR procesa ieguldījums parauga kopējā caurlaidībā $\mu(f)$ nereti ir mazs un nav atkarīgs no frekvences (līdz pat ļoti augstām frekvencēm). Tas ir tāpēc, kādēļ KSC modelēšana tiek ierobežota ar lielās amplitūdas platjoslas dispersijas apgabalu (aplūkots kā DS process). Kompleksās caurlaidības spektru modelēšana vājos laukos faktiski nozīmē arī anomālo zudumu analīzi [36].

2.1.1. Kompleksās caurlaidības (KSC) modelēšanas problēmas

Tipiska kompleksās caurlaidības spektra modelēšanā pastāv acīmredzamas grūtības to komponentu aprakstā (2.3. att.): DKp bieži piemīt rezonanses īpašības (pozitīvs kāpumus un negatīvs kritumus dispersijas apgabalā), AKp ir asimetriska gar $\log f$ asi un ir platjoslas (bieži

pārklājot vairākas f dekādes). Laika gaitā zinātnieki ir nomērījuši daudzas kompleksās caurlaidības spektrus, tādējādi ir iespējams runāt par to tipiskām īpašībām. Dažas MS iezīmes spēj atspoguļot aproksimācija ar vienkāršas relaksācijas sakarību [36]:

$$\mu'(f) = \frac{\mu_{stat}}{1+(\tau f)^2}; \mu'' = \frac{\mu_{stat}\tau f}{1+(\tau f)^2}, \quad (2.7)$$

kur μ_{stat} ir statistiskās KSC vērtība, τ – relaksācijas laiks, f – frekvence. Tomēr parasti DKp (2.3 att.) parādās arī rezonanses atribūti. Ja MS aproksimācija ir veikta ar vienkārša harmoniskā oscilatora sakarībām (kur f_0 ir rezonanses frekvence), tad:

$$\mu'(f) = \frac{\mu_{stat}f_0^2(f_0^2-f^2)}{(f_0^2-f^2)^2+4\xi^2f_0^2f^2}; \mu''(f) = \frac{2\mu_{stat}\xi f f_0^3}{(f_0^2-f^2)^2+4\xi^2f_0^2f^2}, \quad (2.8)$$

kurās ξ ir normalizēta rimšanas konstante (pielietojot $\xi < 0,5$ var atveidot rezonanses pazīmes [36], bet AKp tad sanāk pārāk šaurjoslas).

Palaikam tomēr dažās publikācijās tiek lietots formāls relaksācijas un rezonanses sakarību apvienojums. Galvenie trūkumi šādai pieejai ir tās formālums un PF mikrostruktūras ietekmes ignorēšana [26].

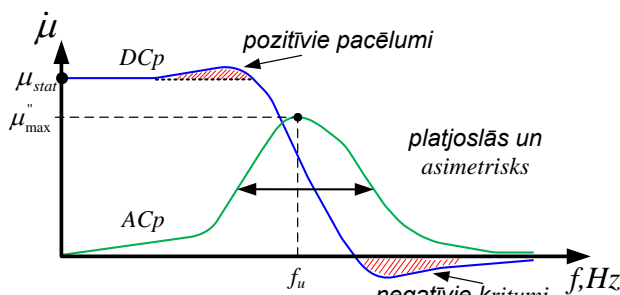
2.1.2. Mikrostruktūras ietekme

Neapšaubāmi, ka vairāki nozīmīgi PF parametri ir materiāla mikrostruktūras (MST) jutīgi (kompleksā sākuma caurlaidība $\dot{\mu}(f)$ ar tās atribūtiem: statistiskā sākuma caurlaidība $\mu(0)$; tipiskie AKp pārstāvji: μ''_{max} un f_u , u. c.). Lai izpētītu MST ietekmi uz šādiem parametriem (piem., KSC), ir vajadzīgs pietiekami detalizēts MST apraksts, kas ļautu veikt kvantitatīvo analīzi.

2.1.1.1 Mikrostruktūras parametri

Skaidrs, ka PF MST (2.4. att., a) ir aprakstāma ar tā graudu izmēra D sadalījumu. Balstoties uz [42], MST, kas iegūta normālā graudu augšanas procesā (NGA), gandrīz bez izņēmumiem var tikt aprakstīta ar lognormālo sadalījumu (neatkarīgi no parauga materiāla, izgatavošanas apstākļu specifiskajām detaļām, graudu lieluma un parauga blīvumu):

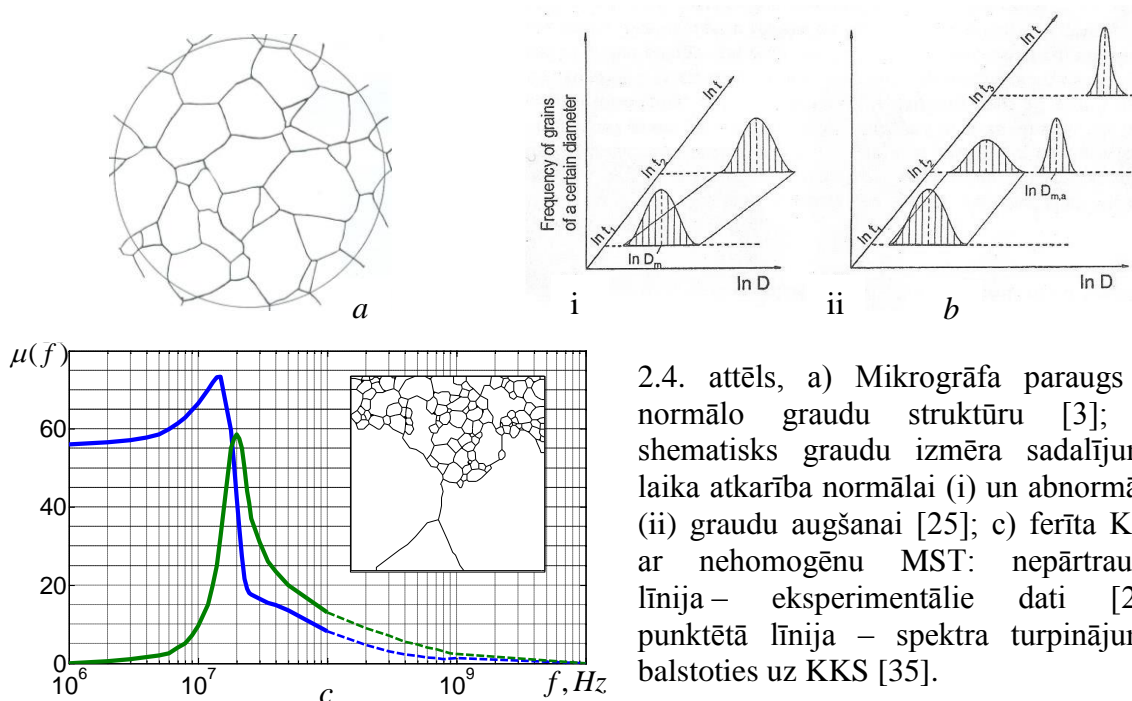
$$f_{ln}(D) = \left(\frac{1}{D\sigma_{ln}\sqrt{2\pi}}\right)e^{-\frac{(\ln D - \ln D_{med})^2}{2\sigma_{ln}^2}}; \quad f(D) = \left(\frac{\log e}{D\sigma_D\sqrt{2\pi}}\right)e^{-\frac{(\log D - \log D_{med})^2}{2\sigma_D^2}}, \quad (2.9)$$



2.3. attēls. Tipiskais KSC spektrs

kur $f_{ln}(D)$ un $f(D)$ ir varbūtības blīvuma funkcijas, D_{med} ir lnD vai $logD$ sadalījumu mediānas, bet standarta novirzes σ_{ln} un σ_D ir savstarpēji saistītas: $\sigma_{ln} = ln10\sigma_D = 2.3\sigma_D$. Balstoties uz [42], MST, kas iegūta NGA procesā, ferītiem raksturojas ar $\sigma_{ln} = 0.45 \dots 0.55$ (vai $\sigma_D = 0.2 \dots 0.24$).

Nākamā MST svarīgā īpašība ir tās vidējais graudu izmērs: $D_a = D_{med}e^{0.5\sigma_D^2 ln^2 10}$. Atšķirībā no sadalījuma likuma, D_a ir atkarīgs no izgatavošanas procesa nosacījumiem (galvenokārt no apdedzināšanas temperatūras un laika). Tātad, NGA procesā vidējais graudu izmērs D_a palielinās nepārtraukti apdedzināšanas laikā. Pretēji tam abnormāla graudu augšana izraisa strauju izaugsmi tikai dažiem graudiem, kamēr citi graudi aug lēni vai vispār neaug [25], tādējādi izveidojas bimodālais sadalījums (2.4. att., b; viens sadalījums lēni augošiem graudiem, otrs – strauji augošiem). Lēni augošo graudu sadalījums paliek mazāks un pazūd (bez vidējā graudu lieluma izmaiņām), turpretī abnormālo graudu sadalījums (ar ievērojamu iekšgraudu porainību) – izmainās apdedzināšanas laikā, kamēr beidzas abnormālo graudu augšana (2.4.att., b) [25]. Šīs abnormālās graudu augšanas rezultātā veidojas nehomogēna MST, kas KSC spektram izmaina tipisko formu (2.4. att., c).



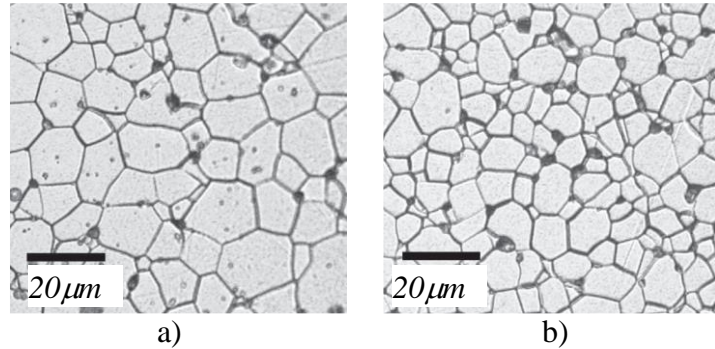
2.4. attēls, a) Mikrogrāfa paraugs ar normālo graudu struktūru [3]; b) shematisks graudu izmēra sadalījums, laika atkarība normālai (i) un abnormālai (ii) graudu augšanai [25]; c) ferīta KSC ar nehomogēnu MST: nepārtrauktā līnija – eksperimentālie dati [20], punktētā līnija – spektra turpinājums, balstoties uz KKS [35].

Vidēja graudu lieluma D_a būtiska nozīme kļūva skaidra, pateicoties A. Globusa, M. Guijota un viņu kolēģu izstrādātās speciālās tehnoloģijas PF pētījumiem (no daudzām publikācijām visaptverošākie: [21], [26]). Šī tehnoloģija ietver: PF kompozīciju no oksīdiem ar augstu tīrības pakāpi; nepiesārņojoša oksīdu sasmalcināšana (malšana); apdedzināšana pie salīdzinoši zemām temperatūrām; u. c. [21]. Tas viss rada augstākas kvalitātes PF paraugus:

ar homogēnu (t. i., lognormālo) MST, porainība praktiski ir tikai starp graudiem, un graudus bez porām. Šādai – starpgraudu porainībai ir nenozīmīga loma PF parauga magnetizācijā. Faktiski tikai šo speciālās tehnoloģijas PF paraugu pētījumi ļauj atklāt patieso, pašpiemītošo PF būtību (vairākās mūsu iepriekšējās publikācijās šie paraugi tika apzīmēti kā: *RSG* – *Reference Sample Group*, *IQG* – *Intrinsic Quality Group*, vai vienkārši par *Group One*, *PF1*).

Reālā MST kvalitāte lielā mērā ir atkarīga no konkrētās D_a vērtības paraugā, jo tā izriet no PF apstrādes tehnoloģijas un MST veidošanas procesa (piemēram, lit. [12] ir apgalvots, ka poru savstarpējais attālums būtiski nemainās, kad graudos notiek pāreja no starp- uz iekšgraudu porainību).

Piemēram, MST 2.5. att. parāda, ka iekšgraudu defekti ir tikai PF raupjākajiem graudiem (ar $D_a \approx 9 \mu m$, 2.5. att., a), bet tie gandrīz nav



2.5. attēls. (a) MB3 un (b) MBF4 ferīta materiāla mikrostruktūra [48] ar vidējo graudu lielumu $9 \mu m$ un $6 \mu m$,.

novērojami paraugā ar smalkākiem graudiem (ar $D_a \approx 6 \mu m$ 2.5. att., b). Apgrieztas segregācijas principi un veiktie eksperimenti ļauj secināt, ka mazākie graudi PF paraugos ($D < 3...5 \mu m$ [52]) ir gandrīz ideāli – ar niecīgu daļu slēgto defektu (piem., porainības). Raupjākiem graudiem aina ir ļoti atkarīga no tehnoloģijas.

2.1.2 Mikrostruktūras ietekmes uz no frekvences atkarīgām PF īpašībām

Prakse rāda, kā vairākas KSC īpašības (it īpaši $\mu(0) \equiv \mu_{stat}$ un f_u , 2.3. att.) ir savstarpēji saistītas. Šo attiecību izziņāšana ir ļoti svarīga KSC modelēšanā. Minēto attiecību noskaidrošanas process nav vienkāršs: nav iespējams balstīties uz teoriju (jo tādas nav). Tādēļ par pamatu tiek ņemti empīriskie statistiskie dati no liela skaita starptautisko publikāciju eksperimentāliem KSC spektriem. Šim nolūkam tika izanalizēti publikācijās [29, 31] uzrādītie vairāk nekā 100 PF paraugu dati.

Veiktās datu analīzes atklāja dažas regulāras tendences, kuras var pierakstīt ar empīrisko vienādojumu diviem pāriem, kuri attiecīgi atklāj “īstenās” pašpiemītošās un vienkārši pašpiemītošās PF īpašības:

$$\left. \begin{aligned} (\mu_s - 1)f_u D_a &= 12\pi M_s \\ \mu''_{max} f_u D_a &= (6 \dots 8)\pi M_s \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} (\mu_s - 1)f_u &= 4\pi M_s \\ \mu''_{max} f_u &= 2\pi M_s \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Var novērot, ka pirmais pāris pārveidojas otrajā, kad $D_a = (3 \dots 4)\mu m$. Lai interpretētu šos rezultātus, tajos ir lietderīgi ievest efektīvo graudu izmēru D_{eff} [29], kurš faktiski atspoguļo domēnsienu piesaisti PF graudos.

Gadījumā, kad DS tiek nostiprināta tikai uz grauda robežām (kā Globusa modelī [21], 2.7. att., a, b), kas tiek akceptēts "īsteni" pašpiemītošajiem PF paraugiem, $D_{eff} \approx D_a$ un tā tiek parādīta kā lineāra atkarība visiem D_a (2.6. att., No.1), krustojot D_a asi pie ļoti maziem monodomēna graudiem, D_{a0} . Šajā gadījumā visi ar DS saistītie magnetizācijas procesi ir atkarīgi no D_a : mikrostrukturā ietekme parādās pilnā mērā.

Turpretī parasto pašpiemītošo paraugu gadījumā (parastās keramiskās tehnoloģijas), parādās defekti graudos, kuriem piestiprinās DS (2.7. att., c).

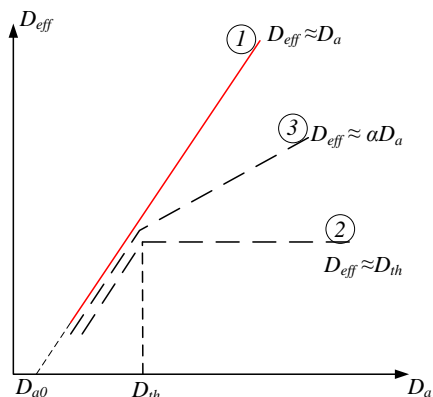
Tomēr, balstoties uz vairākiem eksperimentāliem datiem, ir iespējams apgalvot, ka mazie graudi arī šajā gadījumā (mazāki nekā $3 \dots 5 \mu m$ [52]) ir bez defektiem, tādēļ parādās sliekšņa graudu izmērs D_{th} . Iepriekš apskatītā parasto tehnoloģiju analīze nespecializētiem PF dod (vien. 2.10) $D_{th} = (3 \dots 4)\mu m$, bet specializētiem rezultāts var būt atšķirīgs (piemēram, speciāli optimizētam augstfrekvences MnZn jaudas ferītam $D_{th} < 6 \mu m$ [24], bet optimizētam attiecībā uz sākuma

caurlaidību, $D_{th} < 15 \mu m$ [12]).

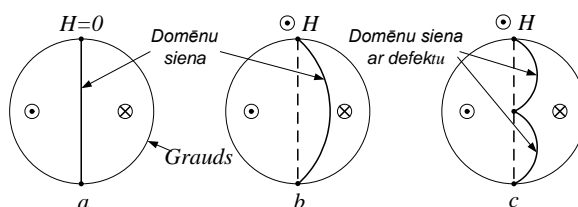
Ņemot vērā to, ka no poras līdz porai attālums var būt praktiski neatkarīgs no D [12], tad D_{eff} priekš $D > D_{th}$ var kļūt $D_{eff} \approx D_{th} = const$, pieņemot otrās atkarības veidu (2.6. att.); protams,

starp No.1 un No.2 atkarībām var būt arī kompromisa variants (No.3, 2.6. att.).

Acīmredzami, ka pēdējos divos gadījumos mikrostrukturā ietekme ir aizēnota, korektus rezultātus var iegūt tikai ar īsteni pašpiemītošās grupas paraugiem. Šajā gadījumā viennozīmīgi ir iespējams sasaistīt magnetizācijas procesu ar materiāla mikrostrukturū. Tālāk



2.6. attēls. Efektīva graudu izmēra D_{eff} koncepcija: iespējamās atkarības starp D_{eff} un D bāzētas uz domēnsienu procesiem graudos [29, 6 att.]



2.7. attēls. DS shematiska prezentācija graudā: a,b – Globusa modelis sfēriskam graudam bez un ar lauka iedarbi; c – ar lauka iedarbi un DS piestiprinājumu pie defekta grauda centrā.

kvantitatīvi var virzīties, piemērojot vispārējo koncepciju, ka parauga eksperimentāli novērotie raksturojumi patiesībā kā tādi parādās paraugu iekšējo parametru dabīgas vidējošanas procesā diapazonā, ko nosaka graudu sadalījums.

2.1.3. KSC modelēšana, ņemot vērā mikrostruktūras efektus

Vairumam KSC vispārējā forma ir līdzīga: tie izskatās kā relaksācijas (dispersija un absorbcija plašā frekvenču diapazonā) un rezonanses (pozitīvie kāpumi un negatīvie kritumi uz $\mu'(f)$ dispersijas līknes) atribūtu apvienojums. Šajā gadījumā vispiemērotāko aproksimāciju [23] var veidot kā absorbcijas procesa nehomogēno paplašināšanu, ko izraisa graudu izmēra sadalījums (2.9. att., a).

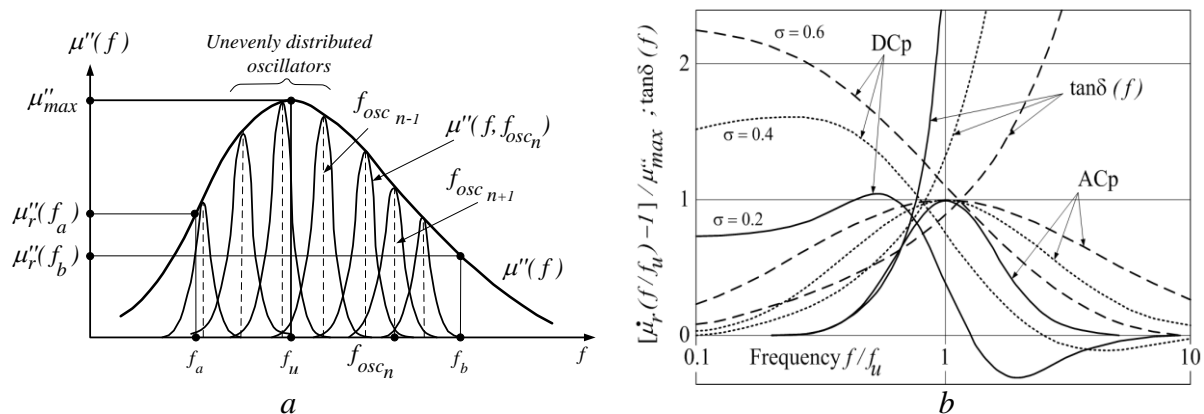
Šī koncepcija attiecībā uz MS pieļauj PaI grupas ferītiem pieņemt, ka katrs parauga polikristāliskais grauds ir kā oscilators ar maziem zudumiem (grauds ar domēnsienu, kurai $\mu_{stat} \propto D$ un rezonē uz frekvences $f_{osc} \propto 1/D^2$, kur D ir esošā grauda izmērs sadalījumā). Turpmākajā gaitā visa AKp līkne $\mu''(f)$ var tikt veidota no šo mazo oscilatoru absorbcijas līknēm ar nepārtraukti sadalītām f_{osc} (2.8. att., a, kurā tiek parādīts princips, kā ACp $\mu''(f)$ var tikt izveidota tikai ar dažu oscilatoru palīdzību). Turpmāk pieņemot, ka graudu blīvuma sadalījuma varbūtības funkcija ir lognormāla:

$$f(D) = (1/D\sigma_{\ln D}\sqrt{2\pi})\exp[-(\ln D - \ln D_{med})^2/2\sigma_{\ln D}^2], \quad (2.11)$$

kur D_{med} mediāna, un $\sigma_{\ln D}$ ir $\ln D$ standartnovirze, kuras lielums PF ar MST formētas NGA procesā (t. i., ar normālo MST) tuvojas lielumam [42]:

$$\sigma_{\ln D} \approx 0.5 \quad \text{vai} \quad \sigma_{\log} \equiv \sigma_D = \sigma_{\ln D}/\ln 10 \approx 0.22 \quad (2.11^*)$$

– pēdējais lielums rodas, kad (2.11) tiek attēlota decimāllogaritmiskajā skalā, kas ir vairāk piemērota KSC analīzei frekvenču f -apgabalā.



2.8. attēls. a) AKp nehomogēnā paplašināšana; b) normalizēts simetrisks KSC spektrs trim σ vērtībām, vien. (2.14), DKp daļa tiek iegūta ar KKS palīdzību (3.1).

Tiek pieņemts, ka izteiksmes, kas ataino magnetizācijas procesu elementārtilpumos – graudos, kā funkciju no D ir līdzīgas tām, ko iegūst no dažādu PF paraugu eksperimentālo datu analīzes attiecībā uz to vidējā graudu izmēru D_a . Šādā veida izteiksmes attiecībā pret D_a PaI grupai ir labi korelējošas: uzrāda linearitāti un pakļaujas modificētam Snoeka likumam [31]:

$$\mu(0) - 1 = C_1 D_a; \quad (2.12)$$

$$\mu''_{max} f_u D_a / M_s = 2\pi / \sigma, \quad (2.13)$$

kur C_1 – const.; σ – graudu sadalījuma dispersija. Tātad tikai PaI grupas ferīti vislabāk ir piemēroti teorētiskai analīzei. Turpretī ferītiem no tehniskās kvalitātes grupas nav tādas noteiktības, linearitātei (ja tāda vispār ir) ir jābūt saistītai ar kādu efektīvo graudu D_{eff} un tikai tad var izpildīties standarta Snoeka likums: $\mu(0) - 1 = C'_1 D_{eff}$; $\mu''_{max} f_u / M_s = C'_2$, kur C'_1 un C'_2 – const. atbilstošie vienādojumi tālāk tiek izmantoti, lai aprakstītu iekšējos procesus „īsteni” pašpiemītošajos (un arī vienkārši pašpiemītošajos) paraugos, tajos aizvietojo D_a ar tekošā grauda izmēru D .

No iepriekš minētā, it īpaši (2.12, 2.13), izriet, ka PaI grupas ferītos sadalījums ir ne tikai pēc graudu izmēra D , bet arī pēc ar graudiem saistītās frekvences f_{osc_n} vērtības (2.8. att., a). Šī frekvence rodas no DS rezonēšanas ar frekvenci f_{0DW} , kur $f_{0DW} \propto 1/D^2$, sasaistot grauda statisko caurlaidību ar grauda izmēru: $\mu_G(0) \propto D$ (kas izriet no tā, ka DS ir nostiprināta tikai gar grauda perimetru – atbilstoši Globusa modelim [21]).

Graudu caurlaidības absorbcijas statistiskā vidējošana (plašāk aprakstīta [28] PaI grupas ferītiem, bet tehniskās grupas ferītiem – [30]) ļauj iegūt parauga KSC AKp (kā pašpiemītošo):

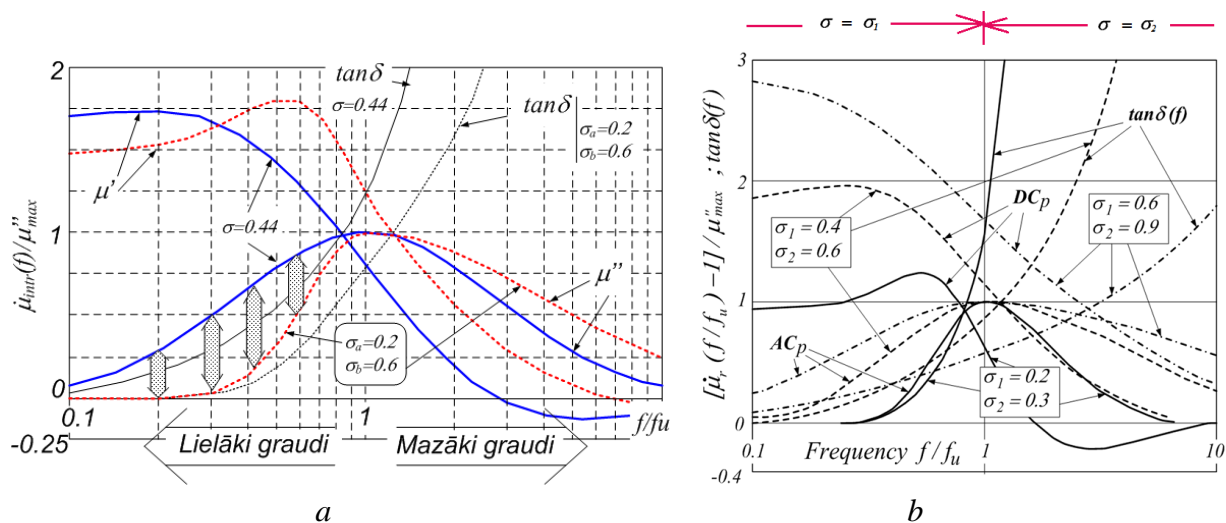
$$\mu''(f) = \mu''_{max} \exp[-(\log f - \log f_u)^2 / 2\sigma^2], \quad (2.14)$$

kur μ''_{max} un f_u , 2.8. att., a, raksturo absorbcijas maksimumu līknei $\mu''(f)$, bet $\sigma = 2\sigma_{log}$ PaI grupas un $\sigma = \sigma_{log}$ tehniskās grupas ferītiem. Vienādojums nosaka $\mu''(f)$ ar trim ACp parametriem: μ''_{max} , f_u , un σ ; tas ataino simetrisku magnētisko spektru (gar $\log f$ asi no $\mu''(f)$ viedokļa, 2.8. att., a).

Vienādojuma (2.14) potenciāls magnētiskā spektra prezentācijai (pie dažādām σ vērtībām) kā normalizētas līknes ir parādīts 2.8. att., b. Ir novērojams, ka mainot σ (t. n. graudu sadalījuma izmaiņu), – līknes ļauj attēlot spektrus gan ar relaksācijas ($\sigma = 0.6$), gan arī ar rezonanses ($\sigma = 0.2$) iezīmēm, pieņemot par robežvērtību lielumu ap 0,5 (attēlos KSC dispersijas komponente tika izskaitļota ar KKS palīdzību). Lai varētu konkrēto eksperimentālo spektru $\mu''_{exp}(f)$, aproksimēt ar 2.14 vien., ir jānosaka atbilstošā σ vērtība.

Šajā nolūkā var pieprasīt, lai dotais spektrs un tā teorētiskā aproksimācija dotu vienādu rezultātu pie kādas frekvences $f_a \neq f_u$; šādas prasības izpilde noved pie izteiksmes (kur frekvence $f_a < f_u$ vai $f_a > f_u$):

$$\sigma = |\log(f_u/f_a)| / \sqrt{2 \ln[\mu''_{max}/\mu''(f_a)]}. \quad (2.15)$$



2.9.attēls. a) Modeļa potenciālas iespējas pāriet no simetriskā uz asimetrisko veidu [32]; b) normalizētais asimetriskais KSC spektrs dažādām σ_a un σ_b vērtībām, (2.14) vien., DKp tiek iegūta ar KKS palīdzību (3.1).

Publicēto eksperimentālo KSC spektru analīze parāda, ka lielākoties tie ir asimetriski. Asimetrijas iemesls (balstoties uz [31]) ir defektu (poru) dēļ graudos, kuri reālos PF parādās lielākos graudos un izraisa domensienų papildu piestiprināšanos. Tātad vienas relatīvi zemas DS rezonanses frekvences vietā (kad tā ir nostiprināta tikai pa grauda robežu) parādās vairākas augstākas frekvences DS fragmentu rezonanses dēļ (2.7. att., b, c). Tādējādi KSC AKp pazeminās pie zemākām frekvencēm (2.9. att., a), bet var pieaugt pie augstākām – spektrs kļūst asimetrisks un ar izteiktāku rezonansi. Asimetriska spektra analītiskai reprezentācijai var arī izmantot 2.14 vien., bet ar divām σ vērtībām: viena, σ_a noteikta pie $f_a < f_u$ un otra, σ_b pie $f_b > f_u$. Tādējādi modificēta 2.14 vien. atbilstošās frekvenču atkarības ir parādītas 2.9.att., b. (normalizētā formā dažādām σ_a un σ_b kombinācijām (parasti $\sigma_a < \sigma_b$)) – tie daudz reālistiskāk atspoguļo tipisko eksperimentālo MS īpašības. Ir skaidri redzams no 2.9.att. b, ka ar $\sigma_a < 0,5$ vērtībām DKp parādās rezonanses atribūti pie frekvencēm $f < f_u$ un, pielietojot otro σ_b vērtību, kura ir lielāka par 0,5 – ir iespējams izveidot vairāk relaksējošo DKp pie $f > f_u$. Tas nozīmē, ka var veidot spektru, kas ir tuvs eksperimentālam, turklāt gan ar relaksācijas, gan arī ar rezonanses atribūtiem (pazīmēm) (2.9. att., b).

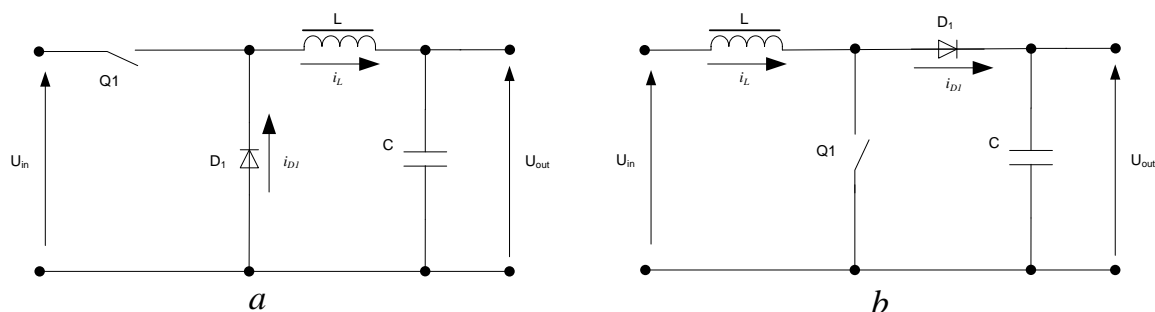
Magnētisko spektru modelēšana, ņemot vērā PF mikrostruktūru, piedāvā fizikālu pamatu kā priekš statistiskās magnētiskās caurlaidības, tā arī kompleksās magnētiskās

caurlaidības atkarību no mikrostruktūras. Modelī ietvertais pieņēmums, ka DS ir zemu zudumu rezonatori, piedāvā universalitāti: šaurs graudu sadalījums ($\sigma < 0,5$) sniedz iespēju prezentēt rezonanses tipa MS, bet plašs sadalījums ($\sigma > 0,5$) – relaksācijas tipa MS. KSC spektra analīze, izmantojot mikrostruktūras parametrus, ļauj secināt, ka: simetriskus spektrus pārstāv PF paraugi ar gandrīz ideāliem graudiem; asimetrisks spektrs norāda uz to, ka paraugā ir daudz iekšgraudu defektu.

2.2. Ferīti impulsu barošanas avotos

Impulsu barošanas avoti (IBA, angliki – Switch Mode Power Supply, SMPS), nodrošina efektīvu enerģijas pārveidošanu (efektivitāte šobrīd sasniedz pat 97–98 % [57]), un, ja tiek izmantotas augsta komutācijas frekvence, IBA konstrukcija kļūst kompaktāka un vieglāka. Taču tā rada paaugstinātus elektromagnētiskos traucējumus. Nākas pielietot filtrēšanu, elektromagnētiskās interferences (EMI) un radiofrekvenču traucējumu (RFI) nospiešanu, kas konstrukciju padara sarežģītāku. Lai samazinātu slodzes nelinearitātes ietekmi uz elektrotīklu, ir jāizmanto jaudas faktora korektori (PFC), kas vēl vairāk papildina sarežģītību un izmaksas. Bet šīs prasības ir nepieciešamas izpildīt, lai iekļautos starptautiskajos normatīvos [48, 67].

Lielākā daļa no IBA topoloģijām balstās uz trim neizolētām (t. i., beztransformatora) saslēgumiem: pazeminošo (buck, (2.10. att., a)), paaugstinošo (boost, (2.10.att., b)) un kombinēto (buck-boost). Šajās topoloģijās ir neliels komponentu skaits (tranzistori, diodes, kondensatori, spoles, utt.).



2.10. attēls. Vienkāršotās paaugstinošā (a) un pazeminošā (b) konvertoru topoloģijas [48].

Lai paplašinātu topoloģiju daudzveidību, var tikt pielietots transformators. Tas piedāvā ieeju izolēt no izejas; mainot transformatora vijumu attiecību, var optimizēt transformatora darba režīmu un samazināt pīķa strāvas; vairākas izejas var tikt izveidotas no vairākiem sekundāriem tinumiem; var arī izvēlēties izejas polaritāti attiecībā pret primāro. Tomēr parādās arī trūkumi: papildus laukums transformatoram, svara palielināšanās un jaudas zudumi.

Magnētiskās serdes veido būtisku IBA daļu. Tās var izgatavot no dažādiem materiāliem, un būt atšķirīgas pēc formas. Magnētiskās serdes var iedalīt trīs galvenās kategorijās: lentes serdeņi, pulvera serdeņi un ferīti. Ferīti, ar tiem piemītošo lielo īpatnējo pretestību, ir visatbilstošākie materiāli augstās frekvencēs. Tiek pielietoti visdažādākie serdeņa tipi. Visbiežāk RF lieto toroidālus serdeņus; tiem ir minimālas izkliedes induktivitātes salīdzinot ar citu serdeņu veidiem (tādiem kā RM, P, EP u. c.)

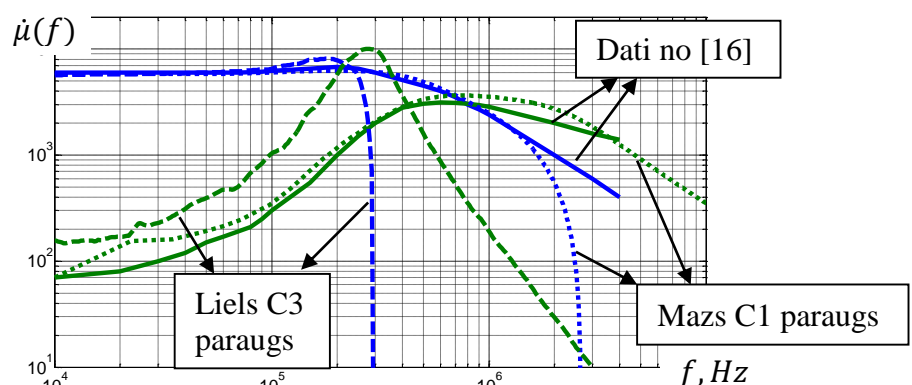
Sinfāzo traucējumu nomākšanai izmanto sinfāzo traucējumu droseles. Diferenciālam signālam tās praktiski nerada nekādu pretestību (droseles magnētīvadā diferenciālais signāls rada vienlīdzīgas, bet pretēji vērstas magnētiskās plūsmas, kas savstarpēji kompensējas), bet rada lielu pretestību sinfāziem traucējumiem (kuru gadījumā magnētiskās plūsmas summējas). Serdeņa materiālam jābūt izvēlētam no augstas caurlaidības ferītiem, jo serdenim ir jāspēj darboties arī vājos laukos un vajadzīgā induktivitāte ir jāiegūst ar minimālu vijumu skaitu. Magnetodielektriķu pielietojums ir nelietderīgs mazās magnētiskās caurlaidības un augstākas par ferītiem cenas dēļ.

Diferenciālais troksnis izplatās pa signāllīniju vienā virzienā ar derīgo signālu. Šo troksni var nomākt ar droselēm, kas uzstādītas uz signāla līnijas. Šeit, kopā ar zemas amplitūdas troksni, pastāv arī lielas amplitūdas 50 Hz barošanas avota strāva (kas ir salīdzināma ar līdzstrāvu šajos apstākļos). Serdeņa materiāls var būt izvēlēts no ferītiem ar nemagnētisko spraugu jeb magnetodielektriķi.

2.3. Ferītu augstfrekvenču problēmu apskats

Galvenā problēma, ar ko jāsaprotas, izstrādājot jaunu magnētisko komponentu pielietojumu, ir savākt atbilstošus datus par materiāliem, kas tiks izmantoti [61–63, 66].

Ražotāji izgatavo lielu daudzumu dažādu serdeņu. Parasti tiek doti raksturlielumi, kas uzņemti maza izmēra toroidālām serdēm, kas ne vienmēr tieši atbilst praksei: tā paša



2.11. attēls. KSC izmērīta un dota [16] EPCOS T-35 materiāla serdeņiem

materiāla lielizmēra serdeņiem var atbilst pavisam citi raksturlielumi (2.11. att.). Tāpēc pieejamās informācijas pielietošana ir jāpārbauda; jāpārzina arī informācija par cīņu ar

parauga izmēra efektiem [61]. Problēmas aktualitāte labi redzama 2.11. att.– pie lielāka serdeņa izmēra ir stiprāk novērojami izteikti ekstrēmumi un ir samazināts darba frekvenču apgabals.

Nozīmīgas ir problēmas, kas saistītas ar jaudas zudumu samazināšanu MnZn ferītos un barošanas avotu efektivitātes palielināšanu [24]. Tādam nolūkam ir izstrādāti daudzi jauni materiāli, kas atbilst mūsdienu barošanas avotu dizaineru prasībām. Galvenie virzieni ferīta materiālu izstrādē ir: ferīti ar paaugstinātu magnētisko indukciju, ferīti augstfrekvences pielietojumam, mazzuduma ferīti un ferīti ar uzlabotu temperatūras atkarību [51].

Ferīta īpašību uzlabošanā nav universālas pieejas. Zudumi ir atkarīgi no daudziem faktoriem (ne tikai no sastāva, bet arī mikrostruktūras [24, 77], piem., zemfrekvences histerēzes zudumi ir atkarīgi no mikrostruktūru defektiem, porainības; augstfrekvences virpuļstrāvas zudumus var samazināt ar lielāku elektrisko pretestību starp graudu robežām un mazāka izmēra graudiem [77], utt.) . Taču graudu lielumu samazināšanā ir ierobežojumi, jo, kā ir norādīts [24], pie 100 kHz minimālais graudu diametrs ir $6 \mu m$, un turpmāka graudu lieluma samazināšana rezultējas ar palielinātiem zudumiem serdē un samazinātu $\mu(0)$.

Barošanas avotu miniaturizācija galvenokārt ir panākta, palielinot to komutācijas frekvenci, f_{sw} , bet tas bieži rada EMI problēmas. EMI samazinājumu ir iespējams panākt gan ar tradicionālām pasīvām metodēm (filtrēšanu, ekranēšanu, zemēšanu, pareizu PCB dizainu u. c.), kā arī aktīvu – izkļiedētā spektra tehnoloģiju (IST) [69].

Veiktā analīze [38] liecina, ka EMC uzlabošana pārveidotājiem, izmantojot IST, vēl rada papildu spriedzi uz izejas filtra komponentēm L_F un C_F . Abām komponentēm pārslēgšanas modulācija rada papildus jaudas zudums (pretstatā nemodulētam gadījumam), kas palielinās līdz ar frekvences deviācijas pieaugumu $\pm \Delta f_{sw}$. Šajā gadījumā vairāk enerģijas tiek izkļiedēts $-\Delta f_{sw}$ laikā, nekā tiek atgūts (salīdzinājumā ar f_{sw0}) $+\Delta f_{sw}$ laikā. Šis efekts nav spēcīgs, un to ir iespējams kompensēt ar nelielu f_{sw0} paaugstināšanu, tādējādi saglabājot augstu pārveidotāja efektivitāti, izmantojot IST. IST lietošana var radīt arī magnētiskās serdes piesātinājumu. Tas atspoguļojas kā straujš strāvas pieaugums spēka induktorā un attiecīgi palielinātiem zudumiem induktorā. Tātad, izstrādājot FM impulsveida pārveidotāju, tā minimālā komutācijas frekvence ir jāizvēlas tā, lai novērstu serdeņa piesātinājumu.

Rezumējot varam uzskatīt, ka KSC spektra pētījumi saistībā ar MST var radīt labāku izpratni par PF magnetizācijas procesiem, sniegt KSC labāku frekvences atkarības matemātisku prezentāciju un plašākas iespējas PF optimālam pielietojumam.

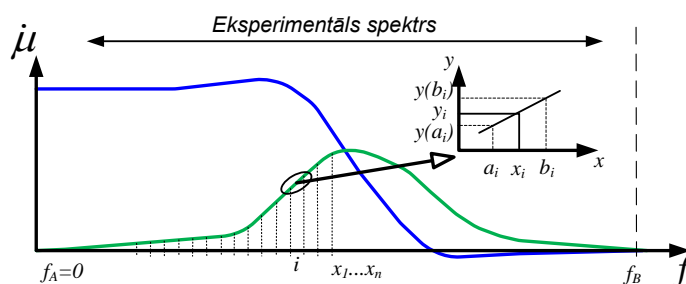
3. KRAMERSA-KRONIGA SAKARĪBU (KKS) PIELIETOŠANA KSC SPEKTRU IZVĒRTĒJUMOS

Kramersa–Kroniga sakarības (KKS) saista kompleksas analītiskās funkcijas reālo un imagināro daļu. Kā konkrēta funkcija šajā darbā tiek izmantota KSC:

$$\mu'(f) - 1 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{x\mu''(x)}{x^2 - f^2} dx ; \quad (3.1)$$

$$\mu''(f) = -\frac{2}{\pi} f \int_0^{\infty} \frac{\mu'(x)}{x^2 - f^2} dx . \quad (3.2)$$

Vien (3.1) un (3.2) apraksta savstarpējo saistību starp reālo un imagināro KSC daļu. Redzams, ka reālā un imaginārā daļas ir atkarīgas viena no otras, un principā katru no daļām var rekonstruēt, ja kaut viena no daļām ir dota visā frekvenču diapazonā. Lai arī integrēšanā ir bezgalīga robeža, tomēr realitātē KSC sastāvdaļām varam izmantot galīgas robežas (no frekvences $f_A = 0$ līdz f_B , kuru



3.1. attēls. Kramers–Kroniga attiecību pielietošana izmērītai KSC

pārsniedzot, AKp ir praktiski nulle, 3.1. att.). Lai šīs integrālās sakarības varētu pielietot eksperimenta rezultātiem, ir lietderīgi aizstāt integrēšanu ar summēšanu:

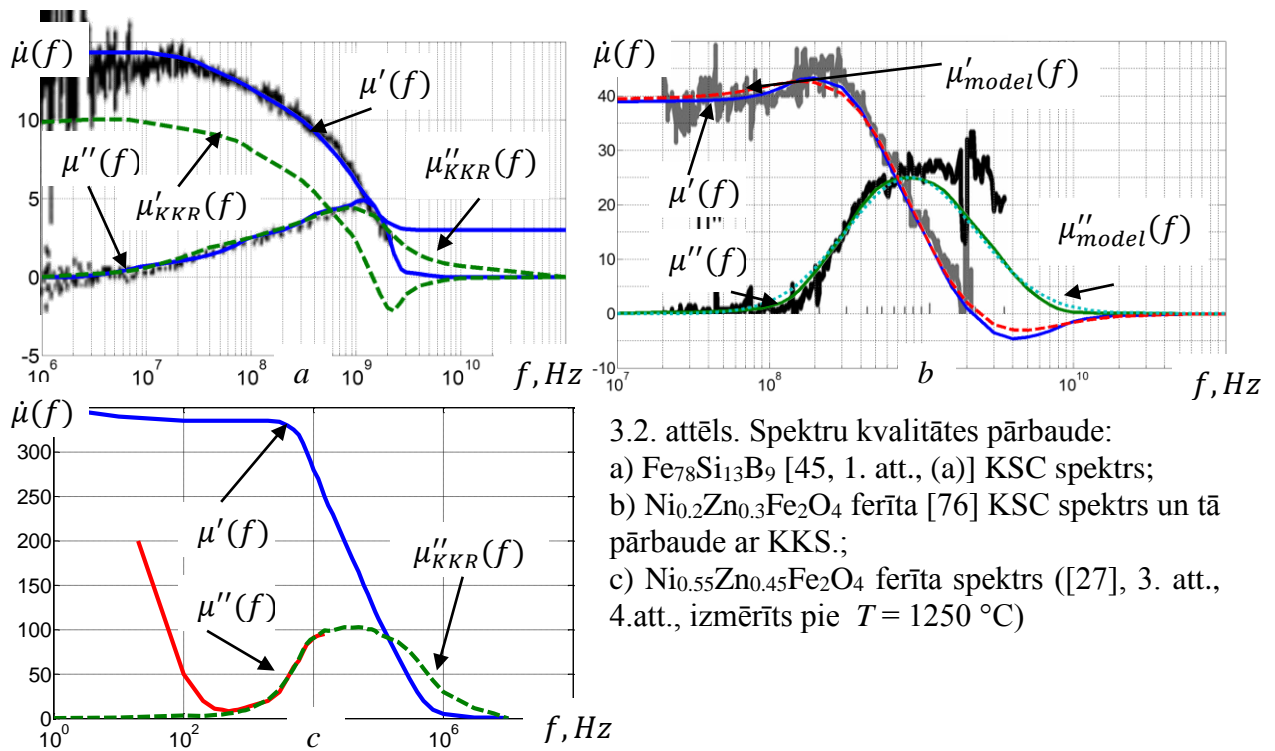
$$\mu'(f) - 1 = \frac{2}{\pi} \sum_i \left(m_i (b_i - a_i) - \frac{m_i f}{2} \ln \frac{|f - a_i|(b_i + f)}{(f + a_i)|b_i - f|} + \frac{c_i}{2} \ln \frac{|b_i^2 - f^2|}{|f^2 - a_i^2|} \right) ; \quad (3.3)$$

$$\mu''(f) = \frac{2}{\pi} \sum_i \left(-\frac{m_i f}{2} \ln \frac{|b_i^2 - f^2|}{|f^2 - a_i^2|} + \frac{c_i}{2} \ln \frac{|f - a_i|(b_i + f)}{(f + a_i)|b_i - f|} \right) , \quad (3.4)$$

kur $m_i = \frac{y(b_i) - y(a_i)}{b_i - a_i}$ un $c_i = \frac{y(a_i)b_i - y(b_i)a_i}{b_i + a_i}$ ir aproksimācijas koeficienti, kas aprēķināti no eksperimentāla KSC spektra datiem.

3.1. KSC spektru kvalitātes analīze no KKS viedokļa

Nereti eksperimentālie magnētiskie spektri nerada uzticamību. Lit. [80] ir ieteikts izmantot Kramersa–Kroniga sakarības kā atbilstošu matemātisko instrumentu magnētisko spektru novērtēšanai. Piemēram, *Doka van Lī (Dok Won Lee)* u.c. prezentētais spektrs ([45]: 1. att, 2. att, 3. att.) ir trokšņains zemās frekvencēs (no 1 līdz ~ 50 MHz) (3.2, a attēls, melnā līkne), tāpēc ir grūti atrast pareizo vērtību. Pielietojot Kramersa–Kroniga sakarības (3.2 a att., zaļā punktētā līnija) iepriekšminētajām caurlaidības līknēm (3.2, a att., zila nepārtraukta līnija) atklājas patiesās vērtības trokšņu apgabalā datiem (vienlaikus sniedzot informāciju, ka ([45] 1.att) izmērītās caurlaidības spektrs nav korekts).



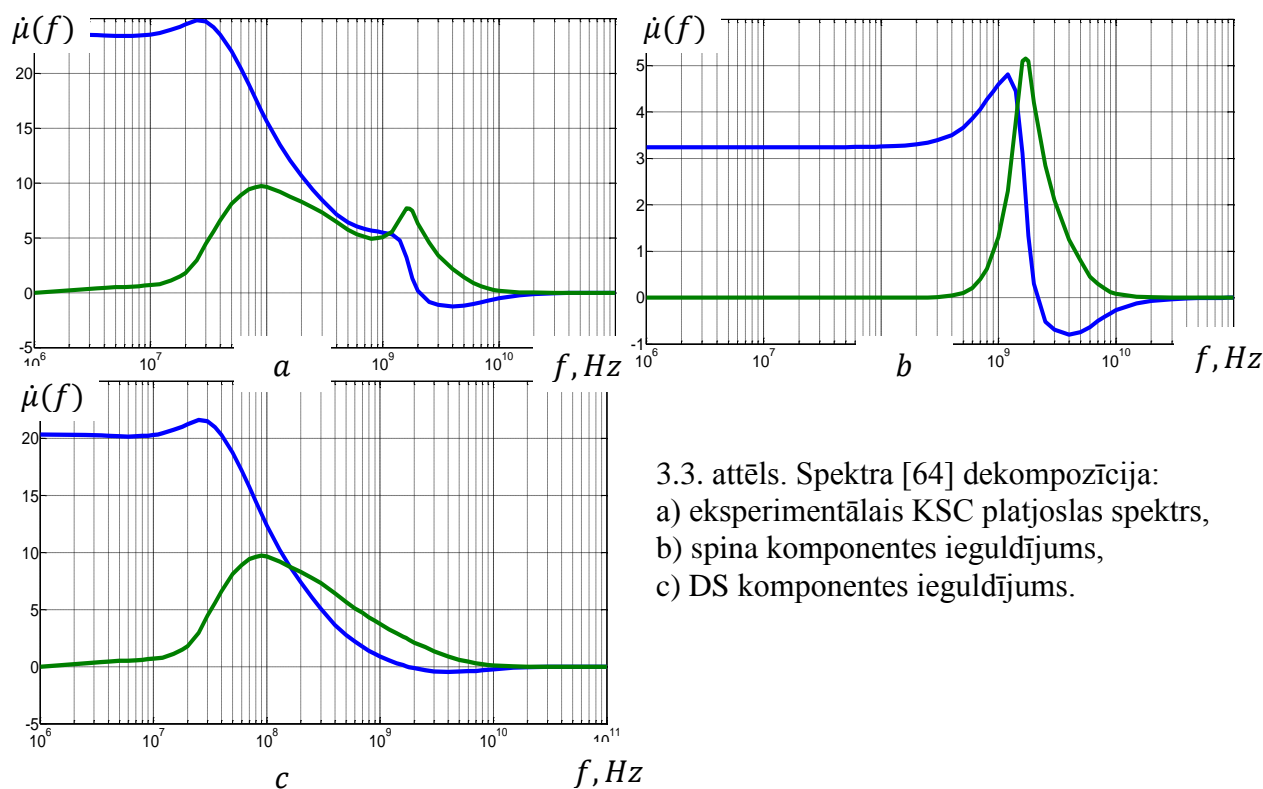
3.2. attēls. Spektu kvalitātes pārbaude:
 a) $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{13}\text{B}_9$ [45, 1. att., (a)] KKS spektrs;
 b) $\text{Ni}_{0.2}\text{Zn}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferīta [76] KKS spektrs un tā pārbaude ar KKS.;
 c) $\text{Ni}_{0.55}\text{Zn}_{0.45}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferīta spektrs ([27], 3. att., 4.att., izmērīts pie $T = 1250^\circ\text{C}$)

Līdzīgs KKS pielietojums trokšņaino datu novērtējumam ir parādīts arī 3.2. att., b. Piedāvātais [76] lit. KKS spektrs $\text{Ni}_{0.2}\text{Zn}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferītam ir diezgan trokšņains un nepilnīgs (pieejamie dati ir $2 \times 10^7 < f < 3 \times 10^9$ frekvenču diapazonā). Tādēļ korektam spektra novērtējumam AKp tika interpolēta līdz 0 uz abām pusēm. AKp labās puses slīpums tika izvēlēts tāds, lai pēc KKS pielietošanas izrēķinātais DKp slīpums būtu līdzīgs eksperimentālam. Analīze rāda, ka pieejamie dati līdz 2 GHz ir pietiekami uzticami.

Cita publikācija, *Islam R.* [27], prezentēja pretrunīgus datus par $\text{Ni}_{0.55}\text{Zn}_{0.45}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferīta KKS atkarību no temperatūras. Saskaņā ar to ([27], 4. att., 3. att.) ACp ir straujš kāpums zemākās frekvencēs (sarkanā līkne 3.2. att. c), taču DCp neuzrāda nekādus rezonanses atribūtus šajās frekvencēs, bet paliek aptuveni *const.* Šo līkņu analīze ar Kramersa–Kroniga sakarību palīdzību parāda neatbilstību starp eksperimentālajām komponentēm (3.2. att., c). Arī uzrādītais frekvenču diapazons nebija pietiekams, lai atbilstoši piemērotu KKS (gala frekvence ir 12 kHz). Tātad, lai novērtētu imagināro daļu (raustītā zaļā līnija), DKp (nepārtrauktā zilā līnija) tika pagarināta līdz 5 MHz (sarkanā līnija ir izmērītie ACp dati). Arī šajā gadījumā Kramersa–Kroniga sakarību piemērošana eksperimentāliem datiem sniedz informāciju par mērījumu datu kvalitāti, norāda uz neskaidriem rezultātiem un palīdz novērtēt neskaidrus, trokšņainus datus.

3.2. KSC spektru dekompozīcijas

Izmantojot Kramersa-Kroniga sakarības, var iegūt datus, ko citādi ir grūti novērtēt tieši. Piemēram: *J. Slama*, u. c. [64] spektram ACp ir ar diviem pacēlumiem (rezonansēm): domēnsienas rezonanse pie $f \approx 90 \text{ MHz}$ un spina rezonanse pie $f \approx 160 \text{ MHz}$.



3.3. attēls. Spektra [64] dekompozīcija:
a) eksperimentālais KSC platjoslas spektrs,
b) spina komponentes ieguldījums,
c) DS komponentes ieguldījums.

Spektru dekompozīcijas rezultāti rāda, ka:

- ir iespējams atšķirt DS un DSR komponentu ietekmi uz kopējo spektru;
- AKp maksimuma un attiecīgās frekvences reālās vērtības var tikt precizētas ar dekompozīciju.

Tādējādi spektru dekompozīcija pa atsevišķām komponentēm ļauj novērtēt komponentu ieguldījumu visā KSC, ko nevar izmērīt tieši. Pielietojot inverso procesu (6.1 att.), var novērtēt arī iztrūkstošās komponentes ieguldījumu (šajā gadījumā DSR) visam spektram un tad novērtēt spektra kvalitāti kopumā. Šī konkrētā spektra izpēte (dekompozīcija) liecina, ka pat zemas caurlaidības spektra gadījumā DSR ieguldījums $\mu(0)$ ir jūtami mazāks par 20 % (augstākas caurlaidību gadījumā DSR ieguldījums ir vēl mazāks – nereti to DS dispersijas apgabalā var tuvināti pat neievērojot, skat., piem., 2.2. att.).

4. FERĪTU MIKROSTRUKTŪRAS (MST) ANALĪZE

Matemātiskās statistikas metodes tiek izmantotas, lai aprakstītu PF mikrostruktūras (MST) parametrus [42, 56], ko var raksturot ar vidējo aritmētisko vērtību, standartnovirzi vai dispersiju u. c. Būtisku MST raksturojumu var dot graudu izmēra varbūtības blīvuma sadalījuma funkcija. Mikrostruktūru var raksturot arī ar vidējo graudu izmēru, ar sadalījuma dispersiju. Eksperimenti liecina, ka graudu izmērs pakļaujas log-normālai sadalījuma funkcijai [79]; no šīs funkcijas var viegli noteikt MST statistiskos parametrus.

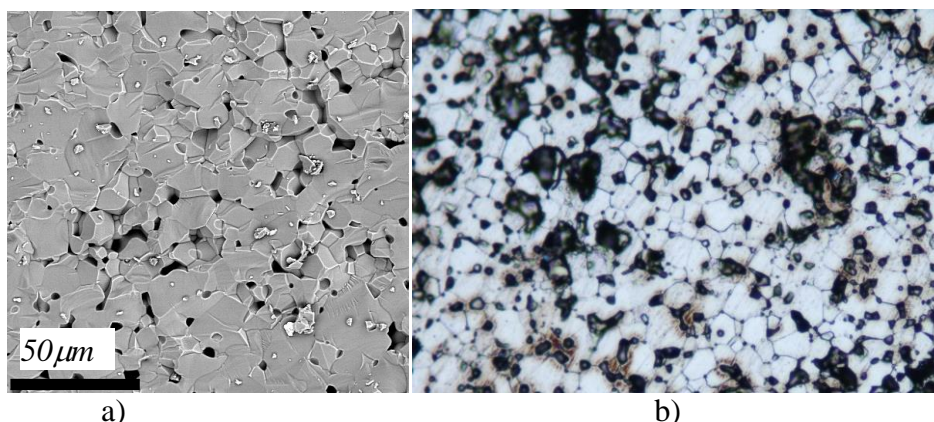
4.1. Ferītu mikrostruktūras statistiskie parametri.

MST raksturojumu iegūšana pētāmiem ferītiem tika veikts ar Saltikova metodi [56, 59]. Šī metode balstās uz stereometriskajām attiecībām 3D, kas tiek atsegtas ar mikroslīpējuma palīdzību. Lai iegūtu MST statistiskos parametrus: vidējo diametru, \bar{D} , diametra standarta novirzi, $\sigma(D)$ un $\sigma(\ln D) - \ln D$ standarta novirzi, ir nepieciešams atšifrēt mikroslīpējumu. Lai MST dati būtu precīzāki, mikroslīpējumi tika ņemti no dažādiem parauga apgabaliem.

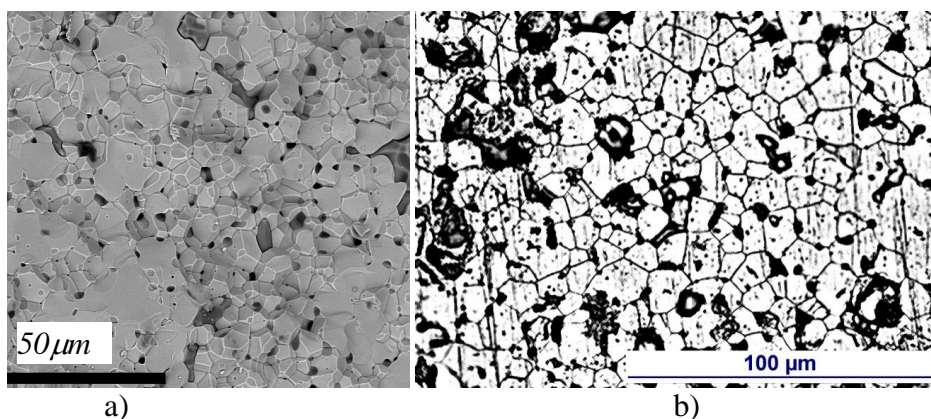
Kā redzams no 4.1. līdz 4.3. att., diezgan grūti iegūt augstu kvalitāti mikroslīpējumiem graudu izkrišanas (izdrupuma) un poru dēļ (mikrogrāfa atšifrējums balstās arī uz izdrupumu skaita un lieluma atrašanu). Var konstruēt lognormālo graudu sadalījuma funkciju:

$$N_i = \frac{N\Delta}{\sqrt{2\pi}D_i\sigma(\ln D)} e^{-\left(\frac{(\ln D_i - \overline{\ln D})^2}{2\sigma^2(\ln D)}\right)}, \quad (4.1)$$

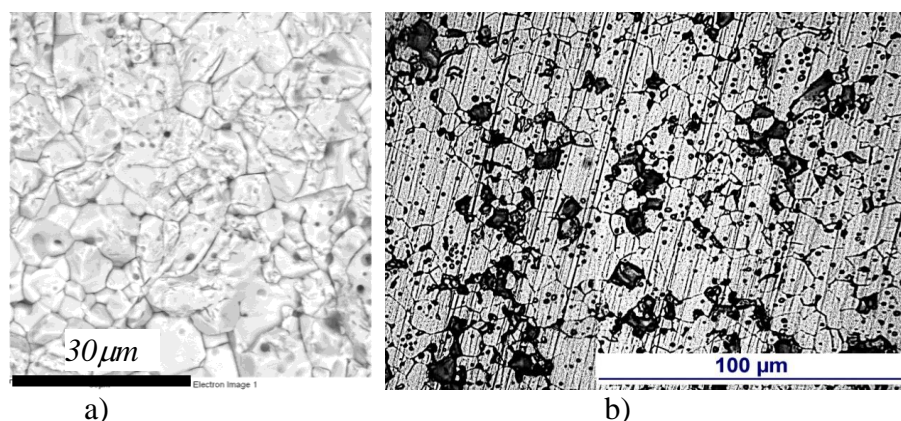
kur $\overline{\ln D}$ – vidējais grauda diametra logaritms, N – graudu D skaits.



4.1. attēls. MnZn ferīta mikrogrāfi (6000HM-1): a) skenējoša elektroniskā mikroskopa (SEM) attēls, b) kodināta virsma



4.2. attēls. MnZn ferīta mikrogrāfi (T37): a) SEM attēls, b) kodināta virsma



4.3. attēls. NiZn ferīta mikrogrāfi: a) SEM attēls, b) kodināta virsma

Iegūtie dati liecina, ka MST ir radusies graudu normālās augšanas procesā visā ferīta paraugā (jo σ_{mD} tiecas uz 0,5, kā tas ir MST ar lognormālo graudu sadalījumu [28, 42]). Tomēr no mikrogrāfiem ir skaidri samānāms, ka visiem pētītajiem ferītu paraugiem ir defekti graudos.

4.2. Paraugu izgatavošana ar vienādu MST

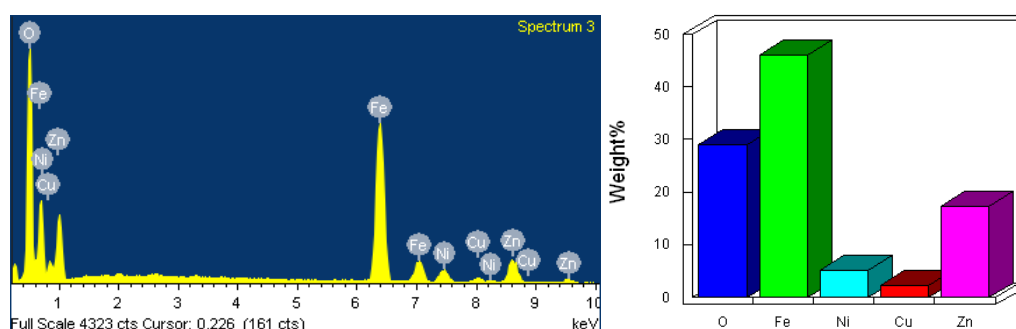
Lai pilnībā izpētītu paraugus, ir jāveic eksperimentu sērija katrai pētāmo ferītu grupai. MST kvalitāte norāda uz materiāla kvalitāti kopumā.

Turpmākajos MST un KSC spektru korelācijas izmeklējumos ir nepieciešams risināt divas problēmas:

- 1) noteikt KSC spektra korelāciju ar parauga MST.
- 2) KSC spektru saistību ar dažādu ģeometrisku izmēru serdeņiem, kuriem ir viena un tā pati MST;

Pirmajā gadījumā var izmantot standarta tehnoloģijas serdeņus, kuriem ir nomērīta KSC un analizēta to MST.

Otrajā gadījumā pastāv nepieciešamība pēc paraugiem ar vienādu sastāvu un MST, bet ar dažādu ģeometriju. Labākais veids, kā iegūt vienādu MST pētāmajiem paraugiem, ir tos izgriezt no ferīta plāksnītes (flīzes), kas atradusies vienādos sacēpināšanās apstākļos (protams, noteikta sastāva materiālam). Pārbaudāmie paraugi tika izgriezti ar abrazīvas ūdens strūkļas (Waterjet) tehnoloģiju. Tās priekšrocības (salīdzinot ar mehānisko, lāzera vai plazmas griešanu) [39, 70, 71]: tehnoloģijas procesā nenotiek materiāla pārkarsēšana, griezums ir samērā šaurs, tiek ekonomēts materiāls, netiek ienesti netīrumi, ir augsts griešanas ātrums, un principā var izgatavot jebkuras formas paraugus. Vienīgā problēma ir iegūt atbilstošu strūkļas spiedienu – tādu, lai izgrieztais paraugs netiktu salauzts.



4.4. attēls. NiZn paraugu elementu analīze [34]

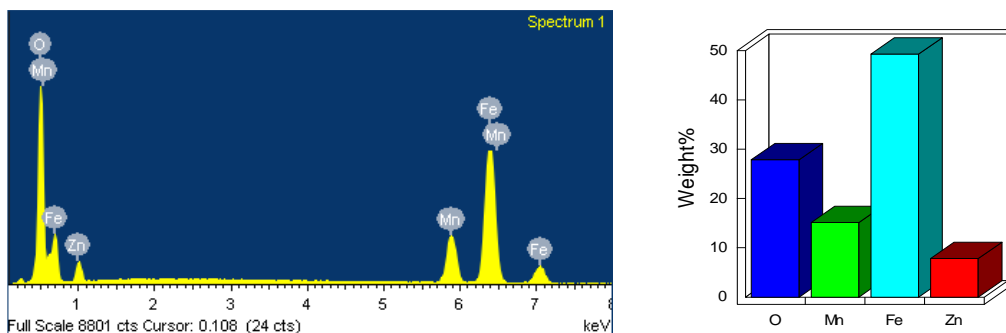
4.1. tabula

Paraugu MST ģeometriskie un statistiskie parametri

Group	№	Dimensions, mm	A, mm ²	$\mu(0)$	$\mu(0)_{exp}$	$D_a, \mu m$	σ_{lnD}
NiZn, 4S60 [21]	A1	R12 × 8 × 6	12	2000	2200	7.9	0.55
	A2	R20 × 10 × 6	30	2000	2100	7.9	0.55
	A3	R31.5 × 20.5 × 6	33	2000	2125	7.9	0.55
	A4	R40 × 23.5 × 6	51	2000	2140	7.9	0.55
MnZn, 6000HM1 [69]	B1	R10 × 4.3 × 10	28.5	6000	6750	12.9	0.53
	B2	R20 × 9.1 × 10	54.5	6000	6530	12.9	0.53
	B3	R25 × 12 × 10	65	6000	6650	12.9	0.53
	B4	R30 × 14.3 × 10	78.5	6000	6850	12.9	0.53
	B5	R33 × 10 × 10	115	6000	5523	12.9	0.53

Ekspperimentiem tika izgatavotas 2 ferīta serdeņu grupas ar dažādiem ārējiem/iekšējiem diametriem. Pirmā – Ferroxcube 4S60 un otrā – NevaFerrit 6000HM-1. Šo paraugu ķīmiskā

analīze (4.4. att.) griezumos neatklāja nekādus materiāla piesārņojumus. Pētāmo paraugu ģeometriskos un MST statistiskos parametrus var apskatīt 4.1. tabulā.



4.5. attēls. MnZn paraugu elementu analīze [34]

Iegūtie dati liecina, ka mikrostruktūra – polikristālisko graudu veidojums – visiem paraugiem ir radies graudu normālas augšanas procesā (jo $\sigma(\ln D) \approx 0,5$). Tomēr no mikroslīpējumiem ir redzams, ka visos ferītos ir defekti daudzos graudos, kas izraisa kompleksas magnētiskās caurlaidības spektru asimetrijas.

5. FERĪTU MAGNĒTISKO UN DIELEKTRISKO PARAMETRU MĒRĪŠANA

Mūsu KSC mērījumiem mēs izmantojam toroidālos ferīta paraugus ar vienā kārtā vienmērīgi uzlītu tinumu. Tiek izmantotas dažādi mērītāji un metodes, lai iegūtu KSC spektrus. Zemākās frekvencēs (līdz 2MHz) mēs izmantojam vairākus specializētus mērītājus (piemēram, Q-metru, fāzes mērītāju, LRC tiltu u. c.), kā arī ķēžu vektorialo analizatoru (angl. v.: vector network analyzer, VNA ZVR-E) palīdzību [1,2]; augstākās frekvencēs mēs izmantojam ZVR-E ar saīsināto koaksiālo līniju [80] (mūsu VNA ZVR-E strādā frekvenču diapazonā no 9 kHz līdz 4 GHz). No daudziem ar dažādiem mērītājiem iegūtiem eksperimentāliem datiem tika konstatēts, ka pastāv korekta atbilstība starp dažādi iegūtajiem rezultātiem. Lai samazinātu trokšņa līmeni, tika ekranēts savienojums ZVR-E ferīta pieslēgumiem, ar iespēju pieslēgties ZVR-E vienam vai diviem portiem. KSC iegūst, izmērot kompleksās vērtības S11, S12, S21, S22 parametru diviem portiem, un pēc tam, pārejot uz Z parametriem, lai iegūtu kompleksās pretestības vērtību \dot{Z}_{in} :

$$\dot{Z}_{in} = \dot{Z}_{11} - \frac{\dot{Z}_{12}\dot{Z}_{21}}{\dot{Z}_{22} + Z_0}, \quad (5.1)$$

kur $Z_0 = 50 \Omega$ ir testa porta raksturīgā pretestība; tad KSC var iegūt kā:

$$\dot{\mu}(f) = 1 + \frac{\dot{Z}_{in}}{j2\pi f L_0}, \quad (5.2)$$

kur L_0 – nomērītā induktivitāte bez magnētiskā parauga.

Galvenais nosacījums mērījumos ar fāzes mērītājiem ir, ka nepieciešams noturēt izejas spriegumu vienā līmenī visā mērījumu frekvenču diapazonā. Izmērot spriegumu pirms parauga (U_{in} , avota spriegums), spriegumu pēc parauga (U_{out} , spriegums uz zināmas slodzes R), fāzes nobīdi starp šiem diviem spriegumiem un pielietojot formulas [189], iegūstam:

$$\mu' = L/L_0 = \frac{U_{in}R\sin(\varphi)}{U_{out}\omega L_0}; \quad \mu'' = R_m/\omega L_0 = \frac{U_{in}R\cos(\varphi) - U_{out}R}{U_{out}\omega L_0}. \quad (5.3)$$

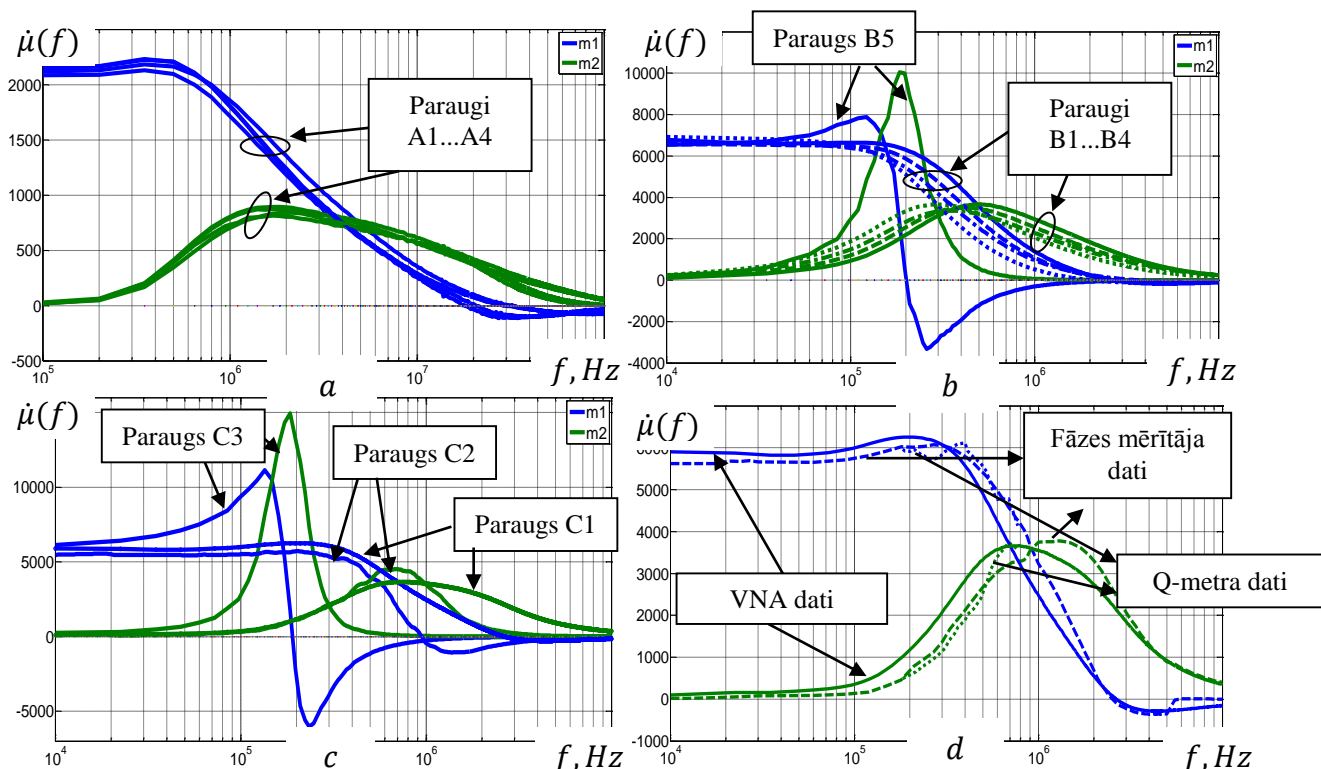
Tātad ir iespējams izveidot KSC spektru ar fāzes mērītāja palīdzību.

5.1. KSC mērījumu rezultāti

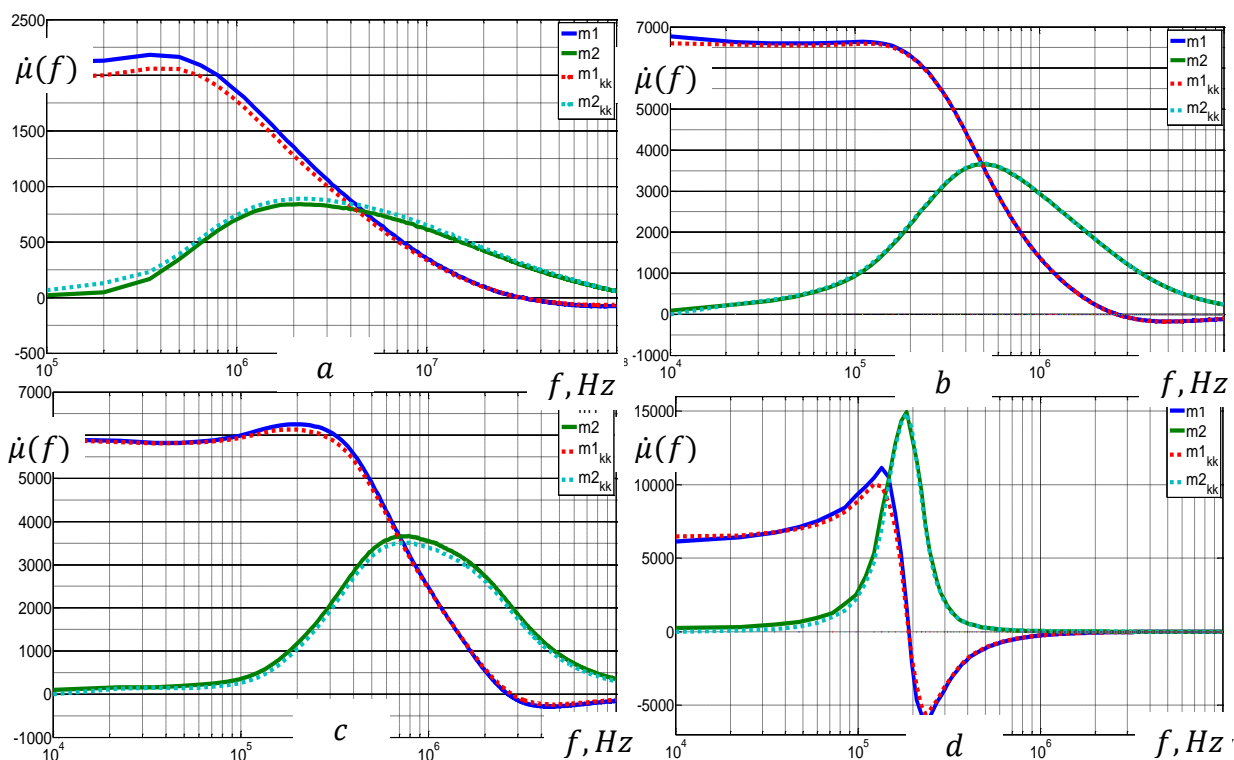
KSC tika noteikts visiem pētāmajiem ferītiem, kas tika sadalīti trijās grupās: A, B, C. Rezultāti parāda KSC atkarību no frekvences un sekojošā analizē, arī no MST.

Kā redzams (5.1. att., a-c), paraugiem A1... A4 ar vienādu MST nav reālas atšķirības KSC spektros atkarībā no serdeņa izmēra; līdzīgiem MnZn paraugiem B1... B5 KSC AKp maksimums kļūst nedaudz atkarīgs no frekvences (B1... B4), bet, B5 paraugā sāk parādīties dimensionālā rezonanse. Rezultāti C1... C3 komerciāliem MnZn paraugiem (1.1. tab.) parāda, ka dimensionālā rezonanse būtiski ietekmē ferīta serdes KSC: pieaugot serdes izmēram,

dimensionālā rezonanse kļūst aizvien izteiktāka, un tās absorbcijas maksimuma frekvence samazinās.



5.1. attēls. Izmērītie KSC a) A1...A4 paraugiem, b) B1... B5 paraugiem, c) C1...C3 paraugiem (m_1, m_2 ir $\mu'(f)$ un $\mu''(f)$), d) VNA mērījumu salīdzinājums ar citām mērīšanas metodēm



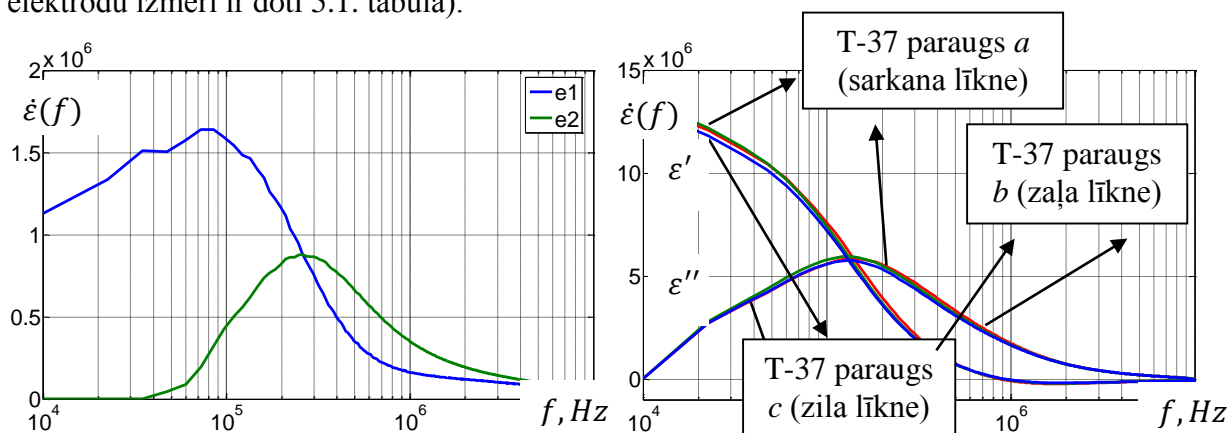
5.2. attēls. Spektru pārbaude ar KKS a) A1 paraugam, b) B1 paraugam, c) C1 paraugam, d) C3 paraugam

VNA mērījumu pārbaudei tika izmantotas klasiskie fāzes mērītāja un Q-metra mērījumi. Lai salīdzinātu datus, ir izvēlēta C1 parauga KSC (5.1. att., d). Kā redzams 5.1. att., d, datiem, kas iegūti no VNA un fāzes mērītāja mērījumiem, ir laba atbilstība. Iegūtie dati ar Q-metru ir ar atšķirīgu kvalitāti: tie labi korelē ar KSC spektru tikai zemākās frekvencēs; bet augstākās frekvencēs, parazītisko parametru dēļ, rodas atšķirības.

Iegūto spektru kvalitāte tika testēta arī ar KKS – no 5.2. att. (kur ar m1, m2 ir apzīmēti eksperimentālie $\mu'(f)$ un $\mu''(f)$; ar m1kk un m2kk ir KKS no $\mu'(f)$ un $\mu''(f)$) var secināt, ka eksperimentālie dati ir atbilstoši KKS pārbaudei. Tātad visi iegūtie rezultāti iztur KKS pārbaudi, kas apliecina, ka eksperimenti ir veikti korekti un iegūtos rezultātus var izmantot spektra interpretācijās.

5.2. Kompleksās dielektriskās caurlaidības mērījumi

Kompleksās uzņēmības $\epsilon_r(f)$ mērījumi tika veikti MnZn plakanparalēliem paraugiem (izgrieztiem no attiecīgiem serdeņiem) ar uzputinātiem plāniem vara elektrodiem (paraugu un elektrodu izmēri ir doti 5.1. tabulā).



5.3. attēls. Izmērītā dielektriskā uzņēmība 6000HM-1 MnZn ferītam (ϵ_1 ir ϵ' un ϵ_2 ir ϵ'') un T-37 MnZn ferītam

5.1. tabula

Dielektriskās caurlaidības mērīšanas paraugu parametri			
Materiāls	Paraugu izmērs, mm	Metalizācijas apgabals, mm	$\epsilon_r(0)$
6000HM-1	$11 \times 11 \times 2$	8.5×9	1.6×10^6
T-37 <i>a</i>	$16 \times 8 \times 1.1$	4×9.6	13.3×10^6
T-37 <i>b</i>	$16 \times 8 \times 0.9$	3.5×9.5	13.5×10^6
T-37 <i>c</i>	$16 \times 8 \times 0.8$	4×7	13.1×10^6

Rezultāti parādīja, ka pētāmiem MnZn ferītiem ir liela dielektriskā caurlaidība. Tādējādi var īstenoties nosacījumi dimensionālai rezonansei.

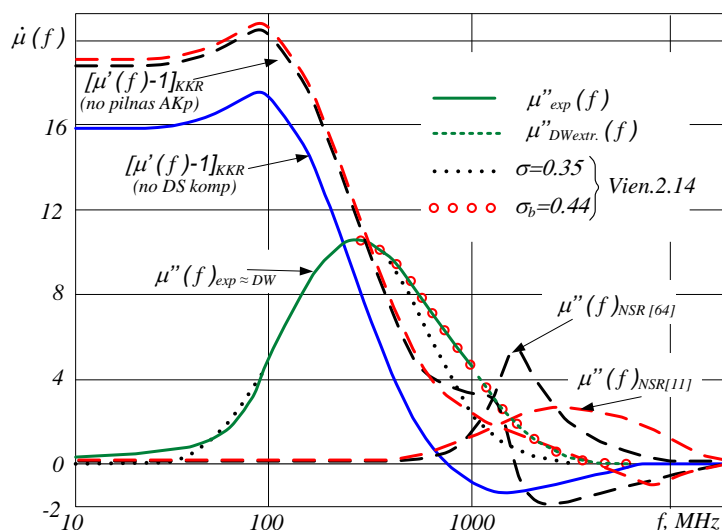
6. MODEĻA UN EKSPERIMENTĀLO KSC KORELĀCIJAS IZPĒTE

Attiecībā uz 2.14 vien. praktisko pielietojumu konkrētam MS ir jāatgādina, ka pamatmodelēšana tika izstrādāta paraugiem no PaI grupas (vēlāk modificēta arī tehniskās kvalitātes grupas ferītiem) un frekvencēm, kas atbilst lielās amplitūdu dispersijas frekvenču apgabalam. Detalizētai modeļa pareizības analīzei tika izmantoti KSC spektri, gan no mūsu paraugiem, gan arī no starptautiskām zinātniskām publikācijām (no pieejamās lielās PF spektru kolekcijas ar dažādiem sastāviem mēs vispirms izmantojām divu veidu starptautiski plaši pētīto ferītu: itrija-dzelzs granātu, YIG, un niķeļa; NiFe_2O_4 [58] ferītus).

6.1. KSC simetrisko spektru izpēte

Tā kā minēto niķeļa ferītu grupu ietvaros praktiski nav simetriski MS, mēs meklējām spektru, kurš ir vissimetriskākais. Šādus paraugus, lai pārbaudītu 2.14 vien., jāmeklē starp tiem PF, kuri tika apdedzināti salīdzinoši zemās temperatūrās (lai izvairītos no defektiem graudos [20], kas ir viens no priekšnoteikumiem modelim). Liels daudzums šādu paraugu ir

gatavoti pēc A. Globusa metodes [20–23]. Tomēr arī šeit pastāv neliela asimetrija KSC spektru AKp (kas liecina, ka tomēr graudos ir vismaz daži defekti). Taču jebkurā gadījumā tie ir labākie pieejamie pārstāvji. Turpmāk kā $\mu_{exp}(f)$ eksperimentālais kvazisimetriskais prototips no līkņu kopuma tiek ņemta NiFe_2O_4 ferīta platjoslas AKp



Attēls.6.1. Eksperimentāla $\mu''_{exp}(f)$ spektra [20] analīze ($[\mu'(f) - 1]_{KRR}$ izrēķināts ar KKS [33]).

ar samērā nelielu asimetriju (6.1 att.) [20, a] ($D_a = 1.8 \mu\text{m}$ un AKp ir izmērīta robežās no 0,01...1 GHz). Šī spektra kvalitātes pārbaudei ar KKS ir nepieciešams pilns absorbcijas spektrs. Tādēļ tas tiek pagarināts aiz 1 GHz, pievienojot nākamo tipisko absorbcijas apgabalu – dabīgo spina rezonansi (DSR), kas ņemta no citiem eksperimentāliem datiem un pievienota $\mu''_{exp}(f)$ kā papildinājums (6.1. att.). Šīs DSR komponentes (apzīmētas kā $\mu''(f)_{NSR}$) tika iegūtas no divu jaunāko publikāciju datiem [64, 2. att.] un [11, 3.1. att.] pēc

atbilstošo spektru dekompozīcijas. Šādi sastādīts spektrs, izmantojot KKS un jebkuru no diviem minētājiem $\mu''(f)_{NSR}$, dod gandrīz tādu pašu $\mu(0) - 1$ vērtību un $\mu'(f)$, kas atšķiras no eksperimentālās vērtības tikai DSR reģionā. Tāpēc ir iespējams pieņemt, ka $\mu''(f)$ DS komponente ir izmērīta (pie $f \leq 1$ GHz) un pagarināta pareizi (pie $f \geq 1$ GHz), un to var izmantot, lai pārbaudītu (2.14).

Balstoties uz $\mu''_{DW}(f)$ augošās daļas novērtējumu pēc (2.15), iegūstam $\sigma = 0,35$, kas ļauj izveidot simetrisku spektru (6.1. att., melnie punkti), kas atšķiras no $\mu''_{DW}(f)$ tikai pie augstākām frekvencēm. Ja tiek izmantotas $\sigma_a = \sigma$ un $\sigma_b = 0,44$ (dilstošai $\mu''_{DW}(f)$ daļai), tad modeļa aproksimācija dod labu sakritību gar visu $\mu''_{DW}(f)$ līkni. Tādējādi šajā gadījumā, spektra samērā nelielās asimetrijas dēļ, arī σ vērtības atšķiras nedaudz: $\sigma_a = 0,35$ un $\sigma_b = 0,44$; to izmantošana ļauj aptvert visu AKp (ar ļoti precīzu tuvinājumu gan augošai, gan dilstošai AKp daļai, 6.1. att.). Atšķirīgās σ_a un σ_b vērtības tomēr liecina par nelieliem defektiem vismaz lielākajos graudos (neskatoties uz autoru apgalvojumu, ka PF ir no PaI grupas). Tas nozīmē, ka σ_a vērtība ir nedaudz zemāka un σ_b vērtība ir nedaudz lielāka nekā īstenai PaI grupai. Šo spektru ir iespējams raksturot ar vidējo dispersiju $\sigma_{av} = (\sigma_a + \sigma_b)/2 = 0,4$, jo šī spektra asimetrija ir maza. Pielietojot (2.11*), tas šajā gadījumā dod vērtību graudu sadalījumam $\sigma_{lnD} = 0,46$; tādējādi šī vērtība parāda, ka pētāmā PF MST patiešām ir tuvu normālai (jo lit. [42], normālai MST tika uzradīts kritērijs: $\sigma_{lnD} \approx 0,5$).

6.2. Modeļa pielietojumi asimetrisko spektru prezentācijai

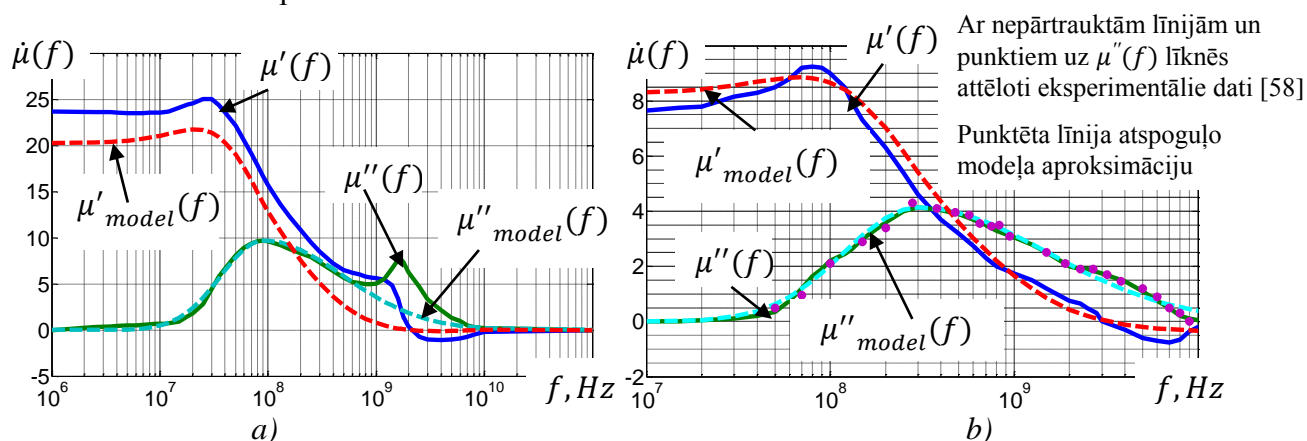
Kā tas tika minēts iepriekš, eksperimentāli KSC spektri gandrīz bez izņēmumiem ir asimetriski. To prezentāciju iespēju analīze ir balstīta uz modificētā modeļa bāzes (§ 2.2.4) un ir pielietota gan niķeļa ferītu eksperimentālajiem datiem no dažādām starptautiskām publikācijām (§ 6.2.1), gan arī datiem, kas iegūti no mūsu paraugiem.

6.2.1. Niķeļa ferītu KSC prezentācija

Ja līdzīgai analīzei (kā tas bija simetriskam spektram) tiek pakļauts cits, ar tādu pašu sastāvu kā iepriekš [64] (6.2. att.) niķeļa ferīta paraugs, bet ar acīmredzamu tendenci piederēt pie tehniskās grupas, jo tā KSC spektrs ir ar būtiski asimetrisks, tad ir iespējams iegūt šādus datus: $\sigma_a = 0,35$, $\sigma_b = 0,79$, $\sigma_{av} = 0,57$ (6.2. att. a).

DKp (6.2 att; $\mu'_{model}(f)$, kas ir iegūts, izmantojot KKS), kā atbilstoša DS dispersijas apgabalam $\mu''_{model}(f)$, korekti kopē mērījuma datus (līdz ~ 300 MHz, kad DSR sastāvdaļas ietekmē kļūst nozīmīga), tādējādi modeļa piemērošana DS absorbcijas sastāvdaļai ir

veiksmīga. Šī spektra σ_{av} vērtība norāda uz pazeminātāku MST kvalitāti, nekā tas bija ferītam ar simetrisku spektru.



6.2. attēls. Modeļa pielietošana: a) platjoslas NiFe₂O₄-ferīta spektram [60];
b) NiFe₂O₄ ferīta spektram [58]

Cita NiFe₂O₄ ferīta KSC [58] (6.2. att., b) aproksimācija ar modeli uzrāda labu korelāciju ar mērījumu datiem par visu izmērīto KSC apgabalu ar parametriem: $\sigma_a = 0,42$, $\sigma_b = 0,68$, $\sigma_{av} = 0,55$. Acīmredzot, šis ferīts ir ar smalkākiem graudiem, salīdzinot ar iepriekš analizēto paraugu (jo ir zemāka $\mu(0)$ vērtība un augstāka f_u vērtība). Tomēr raksturīgā saistība ar MST, kāda ir parasto keramikas tehnoloģiju paraugiem, saglabājas.

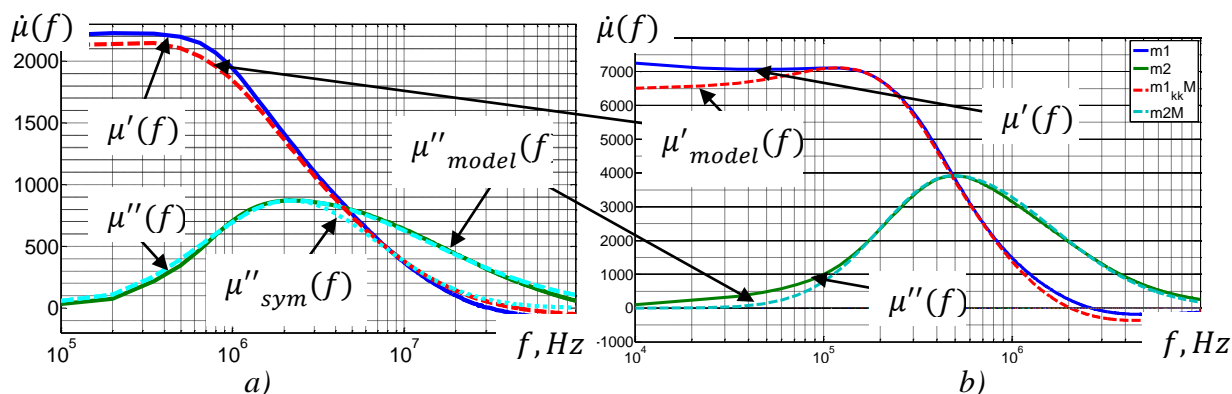
6.2.2. KSC prezentācija paraugiem ar vienādu mikrostruktūru

KSC spektru analīze iepriekš minētajiem ferītiem liecina, ka to spektri būtiski ir atkarīgi no konkrētā parauga MST. Rūpnieciskās kategorijas paraugu gadījumā MST var ievērojami atšķirties paraugam no parauga, līdz ar to arī to spektri. Gadījumā, ja paraugiem ir vienāda MST, spektriem arī vajadzētu būt vienādiem. Lai pierādītu šo hipotēzi (kas dotu būtisku apstiprinājumu modelim), ir nepieciešami paraugi ar līdzīgu MST.

Lai iegūtu vienādas MST paraugu grupai, tika izgatavoti šādi paraugi (4.2.§) ar dažādiem iekšējiem/ārējiem diametriem (6.1. tab.) no atbilstošām ferīta flīzēm. 6.3.(a) attēlā ir redzams MS vienam pārstāvim no šīs grupas (toroidāls paraugs A1 NiZn-ferīta Ferroxcube 4S60). Pielietojot modeli, pirmkārt, kā simetrisku aproksimāciju ar vienu $\sigma = \sigma_a = 0,51$ vērtību, tas dod labu korelāciju tikai $f < f_u$ apgabalā. Tāpat spektrs ir asimetrisks (6.3. att., punktētā līkne); pielietojot tam aproksimāciju ar $\sigma_a = 0,51$ un $\sigma_b = 0,81$ var iegūt ļoti tuvu sakritību visai līknei, bet $\sigma_{av} = 0,66$ ir diezgan augsts (arī mikrogrāfs 4. nodaļā (4.3. att.) uzrāda defektus graudos, kuru $D_a \approx 7,5 \mu m$).

Identiski asimetriski spektri tika iegūti arī pārējiem 3 paraugiem no NiZn ferīta grupas ar vienādu MST (6.1. tab., A grupa), un arī modeļa vērtības ir līdzīgas (6.1. tab.). Visai šai

grupai σ_{av} vērtības pārsniedz 0,5, kas ļauj secināt, ka šo paraugu MST ir normāla, bet ar defektiem, kas ir arī saskaņā ar mikrogrāfiem (4. nodaļa, 4.3. att.). Tas liecina par to, ka hipotēze par līdzīgiem spektriem gadījumos, kad paraugiem ir līdzīgas MST, ir pareiza, vismaz NiZn-ferītiem.



6.3. attēls. Paraugu spektri: a) A1 un tās aproksimācijas; b) B1 un tās aproksimācijas

6.1.tabula

Pētāmo ferītu paraugu un modeļa pielietojuma parametri

Grupa	№	σ_{lnD}	σ_a	σ_b	σ_{av}	Paraugu izgatavošana
NiZn, 4S60	A1	0.55	0.51	0.81	0.66	<i>Izgriezti no ferīta flīzes</i>
	A2	0.55	0.50	0.80	0.65	
	A3	0.55	0.52	0.81	0.66	
	A4	0.55	0.52	0.84	0.68	
MnZn, 6000HM1	B1	0.53	0.41	0.53	0.47	<i>Izgriezti no ferīta flīzes</i>
	B2	0.53	0.43	0.55	0.49	
	B3	0.53	0.44	0.54	0.49	
	B4	0.53	0.44	0.57	0.50	
	B5	0.53	←	DR	→	
MnZn, TDK T37	C1	0.53	0.39	0.50	0.44	<i>Izgatavoti rūpnieciski</i>
	C2	0.52	←	DR	→	
	C3	0.53	←	DR	→	

Lai pierādītu šo hipotēzi, arī MnZn-ferītiem tika izpētīta MnZn ferītu grupa (izmēri 4.1. tab.) ar vienādu MST: B grupa, MnZn 6000HM-1 toroidālie ferīta serdeņi (6.1. tab.). Modeļa parametri B1 paraugam (6.3. att. (b)) ir $\sigma_a = 0,41$ $\sigma_b = 0,53$, $\sigma_{av} = 0,47$. Aproksimācija parādīja labu korelāciju ar eksperimentāliem datiem (tieša mikrostruktūras analīze dod $\sigma_{lnD} = 0,53$, kas labi korelē ar no spektra iegūto σ_{av} vērtību). Principā tas norāda uz normālu mikrostruktūru, tomēr lielākiem graudiem ir iekšgraudu defekti. SEM mikrogrāfi

(4. nodaļas 4.1 att., a) liecina par to, ka defektu ir maz, taču porainības līmenis ir liels. Tomēr cieša korelācija starp modeļa un mikrostrukturāras parametriem liecina, ka pieņēmums, ka lielas amplitūdas absorbcijas reģionu nosaka DS procesi, ir patiess.

Ja aplūko šīs grupas citu paraugu spektrus (6.3. att., b), tad ir iespējams pamanīt, ka absorbcijas maksimuma frekvence f_u pakāpeniski pārbīdās uz zemākām frekvencēm līdz ar paraugu izmēru palielināšanos (6.1. tab., B grupa). Tomēr vispārējais B1...B4 paraugu spektru izskats ir līdzīgs, un tos ir iespējams aproksimēt ar līdzīgiem modeļa parametriem (šie parametri acīmredzot pārstāv MST). Turpretī B5 parauga spektrs (6.3. att., b) ir jau kaut kas cits – tas ir izteikti rezonējošs, gandrīz simetrisks un šaurs. Acīmredzot šeit parādās dimensionālā rezonanse (DR, 6.3. §); šo spektru nevar tieši saistīt ar MST. DR neliela sastāvdaļa iespējams ir galvenais cēlonis f_u pārbīdei paraugos B1...B4.

6.3. KSC prezentācija paraugiem ar dimensionālo rezonansi

Dimensionālās rezonances parādība nav vispusīgi izpētīta, un, jo īpaši efekti, kas ir saistīti ar šo parādību (tie dažkārt netiek ievēroti arī IBA magnētisko komponentu gala aprēķinos [61-63]). Šos efektus ir nepieciešams pārzināt, jo tie ne tikai izmaina KSC spektru (t. i., $\dot{\mu}_{int}(f)$ uz $\dot{\mu}_{ext}(f)$), bet var arī sagraut ierīces (radīdama vibrācijas un plaisas), ja serde ir ierosināti uz DR frekvencēm f_{DR} . Balstoties uz tuvināto DR teoriju [10, 61, 66], ir vairāki nosacījumi, lai dimensionālā rezonanse parādītos ferītos:

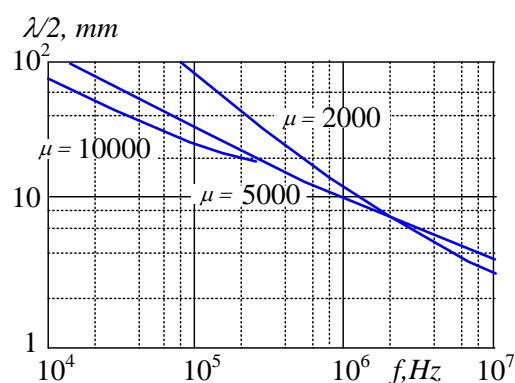
- liela magnētiskās caurlaidības vērtība,
- liela dielektriskās caurlaidības vērtība,
- viens no serdeņa šķērsgriezuma izmēriem ir salīdzināms ar pusviļņa garumu.

Tātad, ja serdeņa izmēri ir proporcionāli pusviļņa garumam, var rasties dimensionālā rezonanse, kura viļņa garumu (materiālā ar zudumiem) var uzrakstīt kā [66]:

$$\lambda/2 = \sqrt{(c_0^2/2f^2) / [|\mu||\varepsilon| + \mu'\varepsilon'(1 - \tan\delta_m \tan\delta_d)]}, \quad (6.1)$$

kur $c_0 = 1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$ – elektromagnētisko viļņu ātrums vakuumā. Tas nozīmē, ka ferīta serdeņos viļņa garums ir samazināts, tāpēc trešo kritēriju var viegli sasniegt MnZn ferītos.

Pamatojoties uz 6.1 vien. un trīs definētiem nosacījumiem, ņemot tipiskos parametrus MnZn ferītiem [66]: $\varepsilon \approx 10^5$, un trīs dažādas $\mu(0)$ vērtības (2000, 5000,



6.4. attēls. Dimensionālās rezonances atkarība no $\frac{\lambda}{2}$ un f [66]

10 000), var izskaitļot DR atkarībā no viļņu garuma un frekvences (6.4. att.). Kā redzams, DR rezonanses frekvence kļūst mazāka augstākas caurlaidības ferītiem. Tātad ferītam ar $\mu = 5000$ un $L = 10$ mm, DR var rasties 1 MHz frekvences tuvumā. Tas nozīmē, ka liela izmēra MnZn serdes nevar izmantot AF [61, 66]. DR efekta samazināšanai tiek piedāvāts [66] izmantot nemagnētisko spraugu ferīta serdenī (tādējādi zaudējot augstas caurlaidības vērtību). Efektīvākais veids – nodrošināt, lai šķērsriezuma izmēri ir daudz mazāki nekā puse no viļņu garuma (6.1).

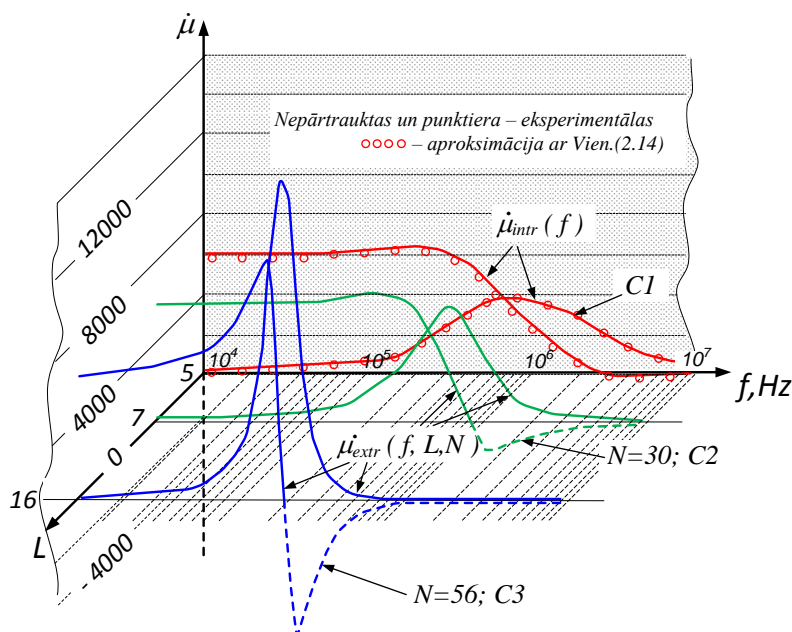
DR eksperimentāliem pētījumiem tika izvēlētas rūpnieciski izgatavotas toroidālās MnZn serdes (TDK firmas, ferīts T37), ar izmēriem $R12.5 \times 7.5 \times 5$, $R20 \times 10 \times 7$, $R40 \times 24 \times 16$ (6.2. tab.). Šī materiāla dielektriskā caurlaidība $\epsilon_r(f)$ tika mērīta plāksnītēm, kas izgrieztas no C3 (lielākā) serdeņa, un ar uzputinātiem vara elektrodiem (5.2. §). Līdzīgā veidā tika iegūta $\epsilon_r(f)$ arī otram pētījamam materiālam 6000HM-1. Izmērītie $\epsilon_r(f)$ lielumi abiem pētāmajiem ferīta materiāliem ir ļoti augsti (ar vērtībām $\epsilon_r(0) = 1,5 \cdot 10^6$ 6000HM-1 materiālam un $\epsilon_r(0) = 13,5 \cdot 10^6$ T37 materiālam (6.2. tab.)). Ar šādām augstām $\epsilon_r(0)$ vērtībām nosacījumi DR var īstenoties paraugā pat ar vidējiem izmēriem.

6.2. tabula

MnZn ferītu paraugu parametri								
Grupa	№	Dimensijas, mm	A, mm ²	$\epsilon_r(0)$	$\mu(0)$	$\mu(0)_{exp}$	$D, \mu m$	σ_{lnD}
MnZn 6000HM-1	B1	R10×4.3×10	28.5	1.5×10^6	6000	6750	12.9	0.53
	B2	R20×9.1×10	54.5	1.5×10^6	6000	6530	12.9	0.53
	B3	R25×12×10	65	1.5×10^6	6000	6650	12.9	0.53
	B4	R30×4.3×10	78.5	1.5×10^6	6000	6850	12.9	0.53
	B5	R33×10×10	115	1.5×10^6	6000	6523	12.9	0.53
MnZn, T37	C1	R12.5×7.5×5	12.5	13.5×10^6	6500	5800	10.7	0.53
	C2	R20×10×7	35	13.5×10^6	6500	5900	12.7	0.52
	C3	R40×24×16	128	13.5×10^6	6000	6000	13.4	0.53

Paraugi tika veidoti tā, lai tinumi aptvertu lielāko daļu no ferīta serdes virsmas. Dimensionālā rezonanse tika novērota ferīta serdeņos ar salīdzinoši lielu šķērsriezuma laukumu (C2 un C3 serdeņi) MHz frekvenču apgabalos (6.5. att.), bet C1 paraugā DR neparādījās. Šajā materiālā noteicošais faktors, lai izveidotos DR ir izmērs L : 6.5. att. parāda, ka DR neparādās, ja L ir neliels (paraugā C1), bet ar L palielināšanu DR parādās un palielinās

(paraugos C2 , C3) – f_{DR} pāriet uz zemākām frekvencēm un $\dot{\mu}_{ext}(f)$ rezonanses atribūti kļūst arvien izteiktāki. Zīmīgi, ka šajos procesos saglabājas $\mu(0) \approx const$, ka $\dot{\mu}_{ext}(f)$ komponentes paliek savstarpējā saistībā caur KKS, ka liela ietekme uz DR nāk no vījuma skaita N (6.7. att.). Tika pārbaudīts, ka ietekme no N nerodas no izkliedes induktivitātes (izmērītie KSC spektri ar vara folijas tinumu ($N = 7$) un vada tinumu ($N = 10$))

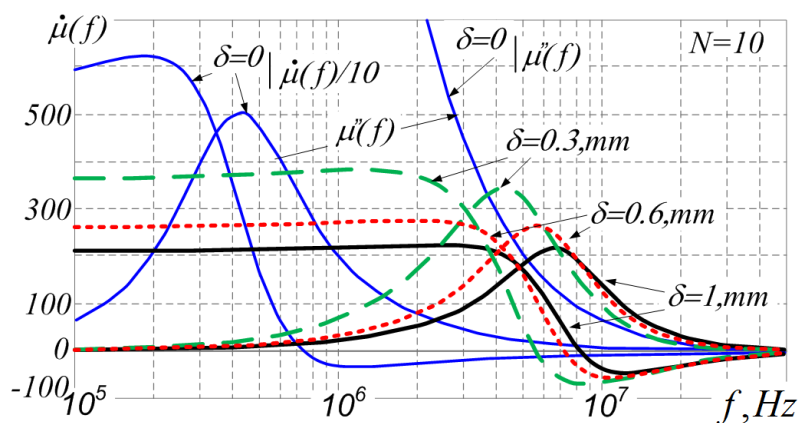


uzrādīja identiskus rezultātus visā izmērītā frekvenču

6.5. attēls. DR attīstība C1...C3 paraugos attiecībā uz L un N

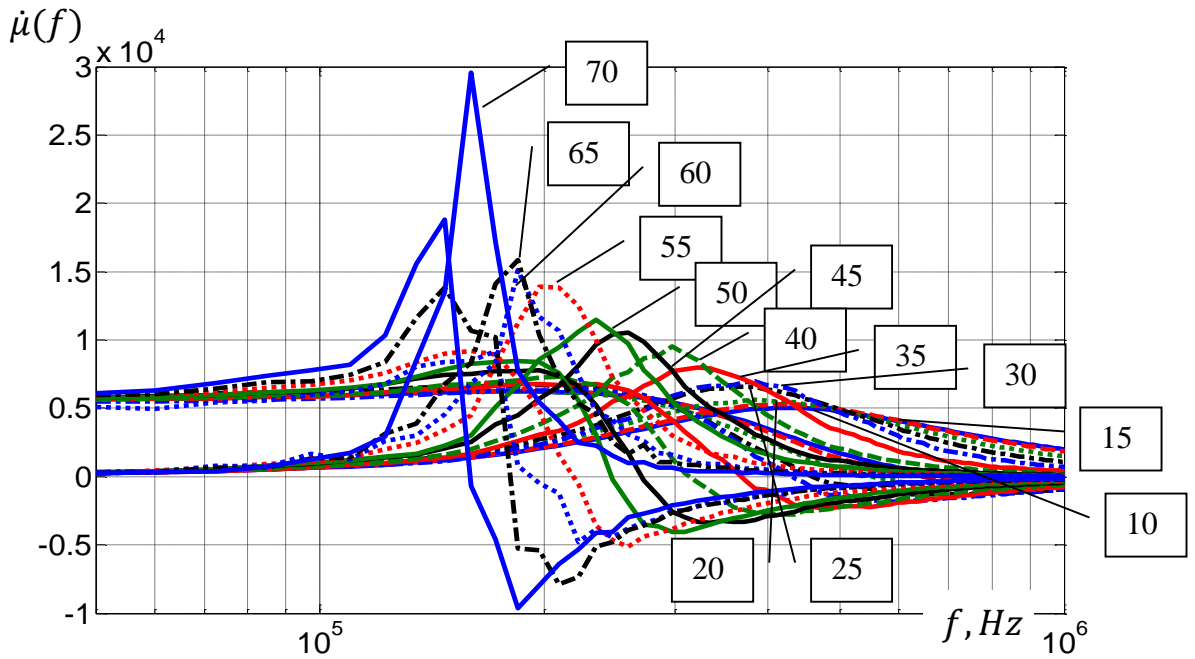
diapazonā). Eksperimentāli, tika iegūtas līknes pie dažādiem N (6.7. att.). No līknēm ir redzams, ka N būtiski ietekmē $\dot{\mu}_{extr}(f, L)$ – ar mazāku tinumu skaitu DR efekts kļūst vājāks, un DR maksimuma frekvence pārbīdās uz augstākām frekvencēm (6.7. att.).

DR atkarību no N var mēģināt izskaidrot, balstoties uz (6.1). Ja induktīvo PF ierīci darbina ar *const.* spriegumu, tad pie lielāka N tinuma induktīvā pretestība palielinās kā N^2 , kas rezultējas samazinātā magnētiskajā laukā H un līdz ar to samazinās magnētiskie zudumi, tāpēc no (6.1) izriet, ka λ aug un f_{DR} tiek pārvietots uz zemākām frekvencēm.

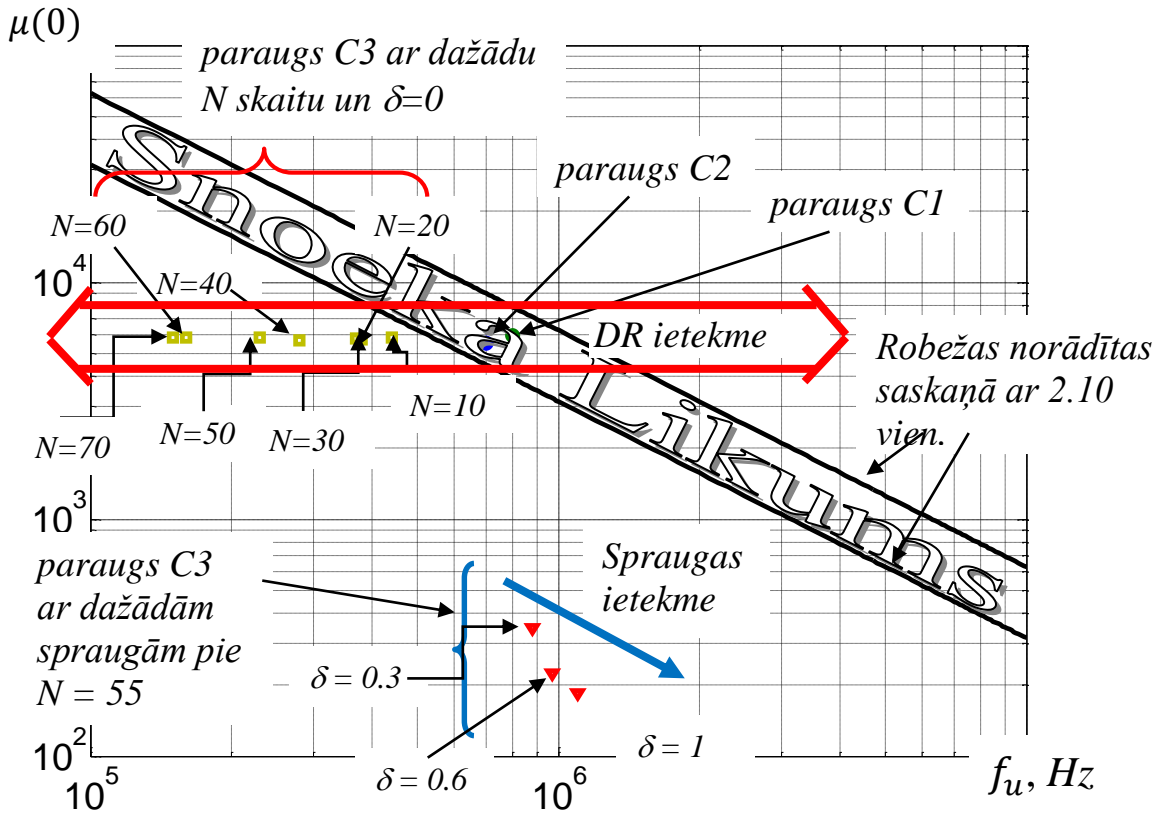


6.6. attēls. DR atkarība no nemagnētiskās spraugas izmērā δ , C3 paraugā

Nemagnētiskas spraugas ieviešana tajā pašā C3 serdē, kā tas parasti notiek, pārbīda KSC spektru uz augstākām frekvencēm kopā ar dimensionālo rezonansi (6.6. att.). Amplitūda



6.7. attēls. DR atkarība no vijumu skaita N paraugā C3

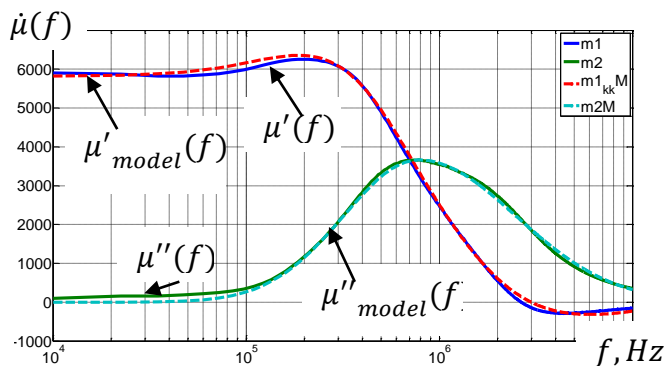


6.8. attēls. T37 ferīta paraugu grupas C KSC analīze attiecībā pret: DR, nemagnētisko spraugu δ un dažādu vijumu skaitu N

klūst mazāka un f_{DR} palielinās līdz ar lielāku spraugas izmēru. DR atkarība no N paliek spēkā arī pie dažādiem spraugas izmēriem.

No 6.6. attēla var redzēt, ka novirze ir izteiktāka $\mu''_{ext}(f)$ augošai daļai (ko kontrolē raupjākie graudi) nekā dilstošai (nodrošina smalkākie graudi). Tas (līdzīgi kā modelēšanas $\dot{\mu}_{int}(f)$) liecina par to, ka raupjākie graudi, kas ir ar lielāku caurlaidību un mazāku koercivitāti, ir jutīgāki pret ierosinājumiem, šoreiz pret atmagnetizēšanas lauka iedarbību.

T37 ferīta KSC datu kopums gan korelē, gan arī atšķiras no standarta Snoeka vienādojuma (Vien. 2.10; zona 6.8. att.). Parauga C1datus var pieņemt kā atskaiti (bez DR un uztīto vijumu skaita N ietekmes, pārstāvot



Attēls 6.9. Modeļa pielietošana C1 paraugam

paša materiāla īpašības; 6.9. att.). Modeļa parametri C1 paraugam ir: $\sigma_a = 0,39$ $\sigma_b = 0,50$, $\sigma_{av} = 0,44$, un tas norāda uz labu MST kvalitāti. No microgrāfa iegūtie dati šim paraugam $\sigma_{lnD} = 0,53$ labi korelē ar no spektra iegūto σ_{av} (skatīt 6.1. tab. un 6.2. tab.). Tomēr asimetriskais raksturs KSC spektram un tomēr atšķirība starp σ_{av} un σ_{lnD} norāda uz to, ka ir defekti graudos.

6.8. attēlā paraugs C1 atrodas Snoeka likuma zonā (atzīmēts kā zilais punkts). Lielāka izmēra paraugiem (piemēram, C3), ir redzama skaidri izteikta novirze no Snoeka likuma tipa sakarībām atkarībā no N izmaiņām (6.8. att.). Tas vēlreiz pierāda to, ka DR vispirms pārstāv ferītu kā elektromagnētisko rezonatoru, nevis kā materiālu. Savukārt, atkarībā tikai no δ , šķiet seko Snoeka likuma tipa sakarībām (6.8 att., paraugs C3, $N = \text{const}$).

No iepriekš minētajiem novērojumiem ir iespējams secināt, ka no DR nevar izvairīties, ievēdot nemagnētisko spraugu serdē, sprauga tikai pārbīda DR uz AF kopā ar samazinātu μ''_{max} (6.6. attēls). Arī mainot tinuma vijumu skaitu, ir iespējams vadīt DR: ar mazāku vijumu skaitu DR efekts kļūst mazāk izteikts (μ''_{max} mainās no 15 000 pie $N = 70$ līdz 5000 ar $N = 10$).

6.4. KSC kā pašpiemītoša un pašnepiemītoša īpašība

Modeļa pielietošana KSC eksperimentāliem spektriem kā pašpiemītošai īpašībai kopumā parādīja labu korelāciju starp modeli un nomērītiem KSC spektriem un mikrostruktūru. Dati, kas iegūti ar modeļa pielietojumu mūsu pētītajiem paraugiem, ir apvienoti 6.1. tabulā. Modelēšanas rezultātam – σ_{lnD} veiksmīgam kvantitatīvam

novērtējumam no KSC spektriem – ir galvenā nozīme, kas parāda, ka ir saikne starp KSC īpašībām un MST. Citu pētnieku nomērīto KSC spektru analīze parādīja, ka vairums no šiem spektriem pieder pie tehniskās kvalitātes grupas (t. i., [26, 58, 64] u. c.), bet var atrast arī dažus paraugus, kas ir tuvu pie PaI grupas (ar gandrīz simetrisku KSC spektru un $\sigma \approx 0,5$ vērtību [17, 20, 67]).

Tajā pašā laikā KSC izpēte kā pašnepiemītošā īpašībā $\dot{\mu}_{ext}(f)$, atklāja, ka tās reakcija uz ietekmes parametriem būtiski atšķiras no pašpiemītošām īpašībām $\dot{\mu}_{int}(f)$. Tie rāda, ka $\dot{\mu}_{ext}(f)$ ir tikai netieša atkarība no faktoriem, kuri ietekmē pašpiemītošās īpašības, piemēram, no pētāmo paraugu mikrostruktūras. Taču KSC kā pašnepiemītošai īpašībai ir noteikta atkarība no parauga izmēriem un uzlīto mērīšanas vijumu skaita (t. i., neraksturīgiem faktoriem attiecībā uz $\dot{\mu}_{int}(f)$). Nemagnētiskās spraugas ietekmes analīze uz DR liecināja, ka neatkarīgi no spraugas lieluma, DR serdenī tomēr īstenojas. Tādējādi vienīgais iespējamais risinājums DR ietekmes samazināšanai uz KSC, ir samazināt mērīšanas tinuma vijumu skaitu. Pat šādā veidā nav iespējams pilnībā novērst šo parādību (kā tas ir redzams 6.8. attēlā: starp C1 un C3 paraugu datiem atšķirības saglabājas arī pie maza N). Tāpēc B5, C2 un C3 paraugos ir dimensionālā rezonanse, un KSC tiek kontrolēta ne ar PaI raksturīgiem faktoriem (skat. 6.4. nodaļu). Tas padara neiespējamu modeli pašreizējā formā izmantot spektriem ar neraksturīgo faktoru ietekmi.

Tādējādi secinājumi par modeļa praktisko pielietojumu ir šādi:

(1) pašpiemītošās KSC $\dot{\mu}_{intr}(f)$ modelēšana, balstīta uz efektiem, kuri izriet no graudu izmēra sadalījuma un defektiem (īsāk: MBSD – modelēšana, balstīta uz sadalījumiem un defektiem), labi darbojas praksē;

(2) MBSD modeļa izmantošana sniedz iespēju apgalvot, ka KSC spektru var izmantot kā kvalitatīvu nesagraujošo metodi MST novērtēšanai: ACp platums parasti ir (σ vienībās): $\sigma_{av} = 0,4 \dots 0,5$ augstas kvalitātes laboratorijas paraugiem, bet ar lielākām vērtībām rūpnieciskiem paraugiem;

(3) PaI grupas paraugiem DCp ir ar izteikti negatīvām vērtībām ($f > f_u$), bet tie ir mazi tehniskās kvalitātes paraugiem (ja tos nenomaskē DSR dispersija);

(4) DS procesi tiešām ir saistīts ar KSC spektra lielās amplitūdas dispersijas apgabalu;

(5) ja magnētiskais spektrs ir ar vienu absorbcijas un dispersijas apgabalu (ja dispersijas no DS un DSR procesiem pārklājas), parametri σ_a un σ_b (2.14) ir ar ierobežotu precizitāti (it īpaši σ_b), un tāpēc ir nepieciešams veikt detalizētāku pētījumu (ar mērķi skaidrāk izdalīt DS un DSR komponentes).

7. SECINĀJUMI UN TURPMĀKIE PĒTĪJUMI

7.1. Secinājumi

Promocijas darbā KSC spektriem atbilstošākās analītiskās prezentācijas iespējas tika pētītas divējādi: gan kā pašpiemītoša, gan arī kā pašnepiemītoša īpašība PF materiāliem. Ievērojama daļa no šī darba ir veltīta kompleksās magnētiskās caurlaidības eksperimentāliem mērījumiem MnZn un NiZn ferīta paraugiem (kā rūpnieciski izgatavotiem, tā arī toroidāliem paraugiem, izgrieztiem no flīzēm). Darba rezultātā ir pierādītas visas izvirzītās tēzes. Īsumā šā darba galvenos rezultātus var rezumēt šādi:

1. Visi eksperimenti tika veikti vājos ierosmes laukos, tādējādi izmērītie dati ir KSC spektri. NiZn (4S60) un MnZn (6000Hm-1 un T37) ferītu KSC spektri tika mērīti plašā frekvenču diapazonā (no 10^3 – 10^4 līdz 10^7 – 10^8 Hz), tādā veidā aptverot lielās amplitūdas absorbcijas apgabalu pilnā mērā (lai korekti varētu novērtēt DS ieguldījumu). Taču rezultātus var izmantot ne tikai zemas jaudas IBA (SMPS) pielietojumos (tādos kā sinfāzo traucējumu filtros), bet arī to augstfrekvences magnētiskajās spēka komponentēs.

2. KSC mērīšanai tika izmantotas gan "klasiskās", gan arī darbu vairāk taupošas metodes. KSC spektri, kas tika iegūti ar VNA, tika salīdzināti ar KSC spektriem, kas iegūti ar klasiskajām mērīšanas metodēm, piemēram, ar fāzes mērītāju vai Q-metru mērījumiem, un parādīja labu korelāciju starp tiem. Visu iegūto KSC spektru kvalitāte tika pārbaudīta ar Kramersa-Kroniga sakarībām. Visiem pētītajiem paraugiem KSC spektru atbilstība KKS kritērijam izrādījās laba, kas pierāda, ka izmantotās mērīšanas metodes ir atbilstošas un ar augstu uzticamības līmeni. Tādējādi var secināt, ka eksperimentālie KSC dati ir pareizi un analīze, kas balstīta uz šo datu izmantošanu, ir patiesa.

3. Abrazīvas ūdens strūklas Water-jet tehnoloģijas izmantošana paraugu izgriešanai no ferīta flīzēm var tikt atzīta par pareizu un veiksmīgu izvēli. SEM ķīmisko elementu analīze izgrieztajiem paraugiem neatklāja nekādu piesārņojumu un mikrostruktūras izmaiņu pazīmes.

4. Pētāmo ferītu paraugu mikrostruktūra tika analizēta eksperimentāli. To raksturīgā iezīme ir, ka graudu lieluma D logaritma standarta novirzes (σ_{lnD}) vērtības ir tuvu 0,5. Šī aptuvenā vienlīdzība ir spēkā daudziem dažāda sastāva ferītiem (arī citu autoru paraugiem). Tādējādi šī vērtība $\sigma_{lnD} \approx 0,5$ ir raksturīga ferītiem ar normālu MST, un tā var norādīt uz MST viendabīgumu.

5. Pētījumā NiZn un MnZn ferītiem ar vienādu MST tika atklāts, ka:

– NiZn 4S60 ferītu MST ir ar mērenu defektu skaitu graudos, bet tiem ir augsts porainības līmenis (saskaņā ar mikrogrāfiem). Arī modeļa piemērošana šo ferītu KSC

spektriem uzrādīja, ka ir mikrostruktūras defekti (raksturojas ar σ_{av} vērtību lielāku par 0,5). NiZn ferītiem KSC spektri paliek nemainīgi (neatkarīgi no pārbaudītā parauga izmēriem), ja MST ir vienādas;

– gan MST, gan arī modeļa parametri MnZn ferītiem (maza izmēra paraugiem) uzrādīja labāku mikrostruktūras kvalitāti (σ_{av} tuvu 0,5). Vienādu MST MnZn (6000HM-1) ferītiem KSC salīdzinoši mazu un vidēju izmēru ferīta serdeņiem ir līdzīgas, bet, pakāpeniski palielinot parauga izmērus, f_u pārbīdās uz zemākām frekvencēm. Pakāpenisko f_u pārbīdi vistīcāmāk izraisa DR ietekme. Lielākā izmēra pārbaudītais paraugs uzrādīja skaidras DR īpašības KSC spektrā.

6. Kramersa-Kroniga sakarību pielietojuma optimizācija lieliem datu apjomiem veiksmīgi īstenojās ātrdarbīgā MATLAB® programmā. KKS pielietojumi pierādīja, ka:

– izmantojot Kramersa-Kroniga sakarības, var novērtēt KSC spektra kvalitāti (t. i., izvērtēt AKp un DCp komponentu savstarpējo atbilstību), precizēt trokšņainus mērījumu datus un kopā ar KSC spektra analītisko modeli dod iespēju veikt spektru rekonstrukcijas, kas ir būtisks aspekts tad, ja mērīšanas iekārtas nenosedz visu vajadzīgo frekvenču diapazonu (vai gadījumos, kad KSC datus no dažādām publikācijām vajag apvienot);

– KKS var izmantot KSC spektra sadalīšanai pa komponentēm (piem., DS un DSR), kas ļauj atsevišķi novērtēt spektra sastāvdaļas un to ieguldījumu visā KSC spektrā;

7. KSC kā PnI, piem., $\dot{\mu}_{ext}(f)$ eksperimentālie pētījumi (galvenokārt MnZn T37 materiāla lielākajiem toroidāliem serdeņiem) atklāj savu būtisko atšķirību no $\dot{\mu}_{int}(f)$, to atkarības no ietekmes parametriem. Rezultāti liecina:

– ka dimensionālā rezonanse patiesībā ir atkarīga arī no uztīto vijumu skaita un no nemagnētiskās spraugas;

– nemagnētiskās spraugas ieviešana neatbrīvo no DR – viss KSC spektrs transformējas uz augstākām frekvencēm kopā ar DR;

– KSC spektri, kuros ir DR, kopumā neseko Snoek tipa likuma sakarībām;

– analītiskais modelis ir labi izmantojams ferītiem ar normālu mikrostruktūru līdz situācijai, kad parādās DR, kad KSC tiešā atkarība no MST zūd.

Iepriekšminētie rezultāti var tikt izmantoti:

– elektromagnētisko traucējumu nospiedējelementu – caurvada ferītelementu (angl. v.: *ferrite beads*) aktīvās daļas tiešam aprēķinam (imagināro daļu – izmantojot KKS);

– jauna veida sinfāzu trokšņa filtru projektēšanā labākas elektromagnētiskās saderības nodrošināšanai;

- uz modeļa bāzētiem sinfāzo droseļu optimizētiem aprēķiniem mūsdienu IBA;
- magnētisko komponentu bojājumu novēršanai dimensionālās rezonanses dēļ.

Būtiska nozīme ir arī tam, ka veiktā analīze atsedz PF KSC spektru fizikālo būtību; turklāt, analītiskais modelis un KKS ļauj spektrus analizēt arī kvantitatīvi (ko, spriežot pēc publikācijām, nevar izdarīt citi pētnieki).

7.2. Turpmākie pētījumi

Kompleksā magnētiskā caurlaidība tika pētīta kā KSC, tādēļ kā nākamais solis varētu būt eksperimenti stiprākos magnētiskos laukos, lai iegūtu atkarības, kas tiešāk ir saistītas ar IBA (SMPS) augstfrekvences spēka elementiem. Turklāt KSC spektru modelēšanai tiek izmantota virkne empīrisku parametru, piemēram, statiskā caurlaidība $\mu(0)$. Tomēr tai vēl joprojām nav viennozīmīgas teorijas (par efektiem, kuri īstenībā nosaka šo vērtību). Tādējādi pētījumi arī šajā jomā būtu ļoti aktuāli.

Pretēji KSC spektriem, kuri darbā tika plaši izpētīti un aprakstīti, dimensionālās rezonanses parādības galvenokārt tika pētītas eksperimentāli. Viens no iespējamiem dimensionālās rezonanses tālākiem pētījumiem varētu būt tās izpēte no elektrodinamikas viedokļa. Šiem pētījumiem varētu būt arī nozīmīgs praktisks pielietojums nākotnē (kā regulējamiem augstfrekvences rezonatoriem).

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Agilent: Vector analyzer basics, 2004
2. Agilent: Анализаторы цепей: полная характеристика линейных цепей.
3. ASTM Standards, Part 11: Metallography; Nondestructive Testing // Philadelphia, Pa. 19103, 1979, p. 205–237
4. Bertotti G. Hysteresis in magnetism. // Accd. Press, San Diego, CA, 1998.
5. Bishop J. E. L. Enchanted Eddy Current Loss due to Domain Displacement. // J. Magn. Mag. Mat. No. 49, 1985, pp. 241–249.
6. Boerekamp J. G., Visser E. G. grain size dependency of the Steinmetz coefficient of soft ferrite power losses // J. PHYS. IV France.– 1997.– Vol. 7. p.– C1-125–C1-126.
7. Borah S., Bhattacharyya N. S. Broadband measurement of complex permittivity of composite at microwave frequencies using scalar scattering parameters // Progress in electromagnetics research M.– 2010.– Vol. 13.– 53–68 p.
8. Brabers V. A. M. Ferrimagnetic Insulations. // In: Handbook of Magnetism and Advanced Materials. Eds. H. Kronmüller, S. Parkin; vol. 4: Novel Materials, 2007. J. Wiley&Sons, 2079–2097.
9. Brander T., Gefer A., Rall B. Trilogy of magnetics. // 4thEd., Würth Elektronik, 2009.– 704 p.
10. Brockmeyer A., Experimental Evaluation of the Influence of DC-Premagnetization on the Properties of Power Electronic ferrites. // APEC'96 Conf. Proc., Vol. 1, 1996, 454–460pp.
11. Cruickshank D. B., Microwave materials for wireless applications, // Artech House, 2011; – 221 p.
12. Drofenik M., Znidarsic A., Makovec D. Use of the retarded solution – reprecipitation process to attain a higher initial permeability of MnZn ferrites // J. Anc. Ceram. Soc., 2003, v. 86, pp. 1601–1604
13. Drofenik U., Kolar J. W., Biela J., Heldwein M. L., Ertal H., Friedli T., Round S. D. PWM converter power density barriers // Power Conversion Conference (PCC'07), Nagoya (Japan), April 2007, pp. 9–29.
14. Dunlop C. J. Modeling Magnetic Core Loss for Sinusoidal Waveforms. // Naval Engineer and Master Thesis. Massachusetts, 2008.
15. Eichhorn T. Estimate Inductor Losses Easily in Power Supply Designs. // J. Power Electronics Technology, 2005, pp. 14–24.
16. Epcos Databook, 2008
17. Epstein D. J., Franckiewicz B. Temperature-Dependent lag in polycrystalline Yttrium-Iron Garnet // J. Appl. Phys, 1959, Suppl. to v. 30, No. 4, 295S–296S
18. Ferroxcube, "3F45 Material specification" – Data, pp. 188–190, 2008
19. Fiorillo F., Beatrice C., Bottaccio O., Mauzin A. Approach to magnetic losses and their frequency dependence in Mn-Zn ferrites // Applied Physics Letters, v. 89, 2006
20. Gieraltowski J., Globus A., Domain wall size and magnetic losses in frequency spectra of ferrites and garnets, // IEEE Trans. Magn., vol. MAG-13, no. 5, pp. 1359, 1977.
21. Globus A. Some physical considerations about the domain wall size theory of magnetization mechanisms // Journal de Physique, 1977, v. 38, No. 4, 1–15.
22. Globus A., Duplex P., Initial susceptibility of ferromagnetic materials and topography of DW // Phys. stat. sol. Vol. 31, no. 2, pp. 765–774, 1969.
23. Globus A., Guyot M., Control of the susceptibility spectrum in polycrystalline ferrite materials and frequency threshold of the losses, // IEEE Trans. Magn. Vol. 6, no 3, pp. 614–617, 1970.

24. Gotoh S., Otake T., Fukuda Y., Togawa J. High Performance MnZn Ferrites for Transformer Core Used in Forward Mode Switching Power Supply. // JFE Techn. Rep. No. 16, 2011.
25. Gottstein G. Physical Foundations of Materials Science // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004, pp. 303–307.
26. Guyot M., Merceron T., Cagan V., Messeker A., Mobility and/or damping of the DW, // Phys. stat. sol. (a), vol. 106, no. 2, pp. 595–612, 1988.
27. Islam R., Rahman Md O., Hakim M. A., Saha D. K., Saiduzzaman, Noor S., Al-Mamun M. Effect of Sintering temperature on Structural and Magnetic Properties of $\text{Ni}_{0.55}\text{Zn}_{0.45}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Ferrites. // Materials Sciences and Applications, 2012, 3, 326–331
28. Jankovskis J. Complex permeability of ferrites correlated with their microstructure // Advances in Sc. & Techn., 2006, v. 45, 2560–2565.
29. Jankovskis J. Empirical Relations. Analogous to Snoek's Law, for Account of Polycrystalline Ferrites Grain Size Effects. // RTU Proc. Series 7., Telecom. and Electr., 2002, pp. 68–76.
30. Jankovskis J. Modelling of Frequency Dependence of Complex Permeability Based on Statistics from Polycrystalline Ferrites Microstructure. // Ferrites: Proc. 8th Int. Conf. (ICF8), pp. 319–321, 2000.
31. Jankovskis J. Presentation of complex permeability spectra of polycrystalline ferrites based on grain size distribution, // J. Magn. Magn. Mat., vol. 272–276, pp. e1847–1849, 2006.
32. Jankovskis J. Relations analogous to Snoek's one, for domain wall processes, // J. Magn. Magn. Mat., vol. 304, pp. e492–e494, 2006.
33. Jankovskis J., Ponomarenko N. Complex permeability of ferrites as intrinsic and extrinsic properties. // J. Chem. Chem. Eng. Vol. 8, 2014, p. 85–91.
34. Jankovskis J., Ponomarenko N., Mironova-Ulmane N., Jakovlevs D. Dimensional effects of sample geometry and microstructure of MnZn and NiZn ferrites. // 2012 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 38 012018.
35. Jankovskis J., Ponomarenko N., Mironova-Ulmane N., Jakovlevs D. The study of correlation between microstructure of ferrites and their complex permeability spectra. // 2013 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 49 012045.
36. Jankovskis J., Ponomarenko N., Narica P. An Investigation on High Frequency Permeability of Polycrystalline Ferrites. // Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference, Latvia, 20.–22. June, 2011.– pp 194–201.
37. Jankovskis J., Ponomarenko N., Stepins D. Frequency Dependence of Complex Permeability of Polycrystalline Ferrites Based on the Realities of Microstructure. // 2013, Key Engineering Materials, 543, 507.
38. Jankovskis J., Stepins D., Ponomarenko N. Effects of Spread Spectrum on Output Filter of Buck Converter. // Electronics and Electrical Engineering, 2013, Vol. 19, No. 5, pp. 45–48. e-ISSN 2029-5731. ISSN 1392-1215.
39. Jet Edge waterjet systems. How a Water Jet Machine Works, / http://www.jetedge.com/content.cfm?fuseaction=dsp_applications_101
40. Kazimierczuk. High-Frequency Magnetic Components. Wiley, 2009.
41. Keeping S. design Trade-offs in Integrating an inductor into a Power Module. // Journal of Power solutions, 2011.
42. Kurtz S. K., Carpay F. M. A. Microstructure and normal grain growth in metals and ceramics. Pt. 1. // J. Appl. Phys., 1980, v. 51, No. 11, 5725–5744.
43. Laflin M. High frequency implications for switch-mode DC/DC converter design. // Empirion Design Article, 11 pp., 2007.

44. Lebourgeois R. J.-P. G., Lloret B. High Frequency Mn-Zn Power Ferrites // J. Phys. IV, France 1997, pp. C1-105–C1-108
45. Lee D. W., Wang S. X., Tang Y. J., Hong J. I., Berkowitz A. E. Permeability of Fine Magnetic Particles: Measurements, Calibration, and Pitfalls. // IEEE Trans. Magn., Vol. 42, No. 10, 2006.
46. Lomovs. S. Increasing of accuracy for experimental magnetic spectra of high-permeability ferrites // RTU.– 2003. 71 p.
47. Meuche H., Esguerra M. Correlation between losses, complex permeability and electron diffusion in power ferrites // J. PHYS. IV France.– 1997.– Vol. 7.– C1-95–C1-98. p
48. Microchip. Switch mode power supply (SMPS) topologies Part 1 AN1114 [102]
49. Mitchell D. M., Book Review: Introduction to Power Electronics by Daniel W. Hart, Prentice-Hall Inc., 1997. // IEEE Power Electronics Society Newsletter, July 2000.
50. Mochizuki T., Hirohashi T., Tsumura T., Sasaki I. A multiple-output 400 kHz switching power supply using a new ferrite material H63A // IEEE Trans. Mangetics, Vol. MAG-23, No. 5, September 1987
51. Moses A. J. Advanced soft magnetic materials for power applications. // In: Handbook of Magnetic and Advanced Magnetic Materials, Eds. H. Kronmüller, S. Parkin; vol. 4: Novel Materials, 2007. J. Wiley&Sons, 1926–1942.
52. Mossman P., Deakin I. R., High quality, high stability Manganese-Zinc ferrites. // Ferrites: Proc. Int. Conf., 1970, Japan, pp. 199–202.
53. Mpenou X. 20th Soft Magnetic Materials SMM20 Abstract Book.
54. Nowarowski R., King B. Challanges of designing high-frequency, high-input-voltage DC/DC converters. // Texas Instruments, Analog Applications Journal, vol. 20, pp. 28–31, 2Q 2011.
55. ON Semiconductor. Effects of High Switching frequency on buck regulators. // TND338-D
56. Postupolski T. Topological-and-geometrical approach to the determination of spatial features of granular structure // Prace ITR, 1987, z.107/87, 2–49.
57. Power Perspective Journal. Resonant Converter IC. EPN issue No. 11, 2011, p. 46.
58. Rado G. T. Magnetic spectra of ferrites // Rev. Mod. Phys., 1953, v. 25, No. 1, 81–89.
59. Radonič V., Blaž N., Živanov Lj. Measurement of complex permeability using short coaxial line reflection method // ACTA PHYSICA POLONICA A,– 2010.– Vol. 117 No. 5.– 820.–824. p.
60. Roess E., Magnetic properties and microstructure of high permeability Mn-Zn ferrites. // Ferrites: Proc. Int. Conf. (Japan), 1970, pp. 203–209
61. Skutt G. R., High-frequency dimensional effects in ferrite-core magnetic devices. // Ph. D. Dissertation. Blacksburg, Virginia, 1996.
62. Skutt G. R., Lee F. C. Characterization of dimensional effects in ferrite-core magnetic devices // IEEE 0-7803-3500-7/96.– 49–54 p.
63. Skutt G. R., Lee F. C., Breslin J. G. Measurement issues in the characterization of ferrite magnetic material // VPEC seminar series.– 1996.– 1–9 p.
64. Slama J., Shiroky P., Shoka M., et. al., Frequency analysis of nickel based magnetic dielectrics // J.Electr. Eng., vol. 60, no1, pp. 39–42, 2009.
65. Smith J., Wijn H. P. J. "Ferrites" // Philip's Tehn. library, Eindhoven, 1959.– 313 p.
66. Snelling. E. C., Soft Ferrites: properties and applications. Second edition. // Batterworth&Co. Ltd. 1988
67. Standley K., J. Oxide Magnetic Materials // Oxford, At the Clarendon Press, 1962
68. Van der Bosshe A., Valchev V. C., Inductors and Transformers for Power Electronics. // Taylor and Francis, 2005.

69. Varshney D., Verma K., Kumar A. Structural and vibrational properties of $Zn_xMn_{1-x}Fe_2O_4$ ($x = 0.0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0$) mixed ferrites. // *Mat. Chem. Phys.* No. 131, 2011, p. 413–419.
70. Visser E. G., Johnson M. T., P. J. van der Zaag. A new interpretation of the permeability of ferrite polycrystals // In: *Ferrites. Proc. 6th Int. Conf. Ferrites, Tokyo, 1992*, 807–811.
71. WARDjet waterjet univercity / <http://www.wardjet.com/waterjet-university.html>
72. Waseem R. A Practical, Accurate and Very General Core Loss Model for Nonsinusoidal Waveforms. // *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 22, No. 1, 2007
73. Waseem R. Ferrite Core Loss for Power Magnetic Components Design. // *IEEE Trans. Magn.* Vol. 27, No. 6, 1991
74. WaterJets.org, / http://waterjets.org/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1
75. Yamada S., Otsuki E. Analysis of eddy current loss in MnZn ferrites for power supply // *J. Applied Phys.*, 1997, vol. 81, No. 8, pp. 4791–4793.
76. Yoshida S., Kondo K., Kubodera T. Suppression of GHz Noise Emitted From a Four-Layered PWB With Ferrite-Plated Inner Ground Layer // *IEEE Trans. Magn.* Vol. 44, No. 11, 2008
77. Znidarsic A., Drofenik M. Soft Magnetic Ferrite Materials. // *Materiali in Tehnologije*, 37, 2003, pp. 87–90.
78. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Том 8: Электродинамика сплошных сред. // Москва, Наука, 1982.
79. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. Москва, Металлургия 1976
80. Юршевич В. В. Температурные измерения в магнитных спектрах Ni-Zn и Mn-Zn ферритов для Индуктивных элементов // РТУ.– 1987. 185 с.