



Projekts: **Augstākā līmeņa fizikas studiju attīstība Latvijas Universitātē**
Projekta līguma Nr.: 2005/0114/VPD1/ESF/PIAA/04/APK/3.2.3.2/0009/0063
LU Reģistrācijas Nr.: ESS 2005/7

Latvijas Universitāte
Fizikas un matemātikas fakultāte
Fizikas maģistra programma

Fizi5010 : Nepārtrauktas vides fizikas laboratorija
Laboratorijas darba apraksts, autors Ansis Mežulis

Magnētisko īpašību pētīšana magnētiskajos šķidrumos



Versija 2.0
2012. gada 18. decembrī

Saturs

Ievads	2
Darba mērķi	2
1 Teorija: magnētisko šķidrumu vispārīgs raksturojums	6
1.1 Magnētiskā šķidruma definīcija	6
1.2 Magnētisko šķidrumu koloidālā stabilitāte	6
1.2.1 Sedimentācija un agregācija	6
1.2.2 Koloidālās stabilizācijas divi veidi:	8
1.3 Ieskats magnētisko šķidrumu pagatavošanā	10
1.4 Magnētisko šķidrumu magnētiskās īpašības	11
1.4.1 Dispersās fāzes magnētiskās īpašības	11
1.4.2 Koloidālo ferodaļiņu magnetizācijas kinētika.	14
2 Darba eksperimentālās iekārtas uzbūve	17
2.1 Magnētiskā šķidruma magnētiskās fāzes mērīšanas iespējas	17
2.2 Mēriekārtas sensors – induktivitātes spole	18
2.3 Eksperimentālās iekārtas kopējā shēma	21
3 Darba uzdevumi	21
4 Laboratorijas darba aprīkojums un materiāli	23
5 Laboratorijas darba izpildes gaita	23
5.1 Iepazīšanās ar pētāmo magnētisko šķidrumu	23
5.2 Laboratorijas darba iekārtas elektroniskās shēmas saslēgšana . . .	24
5.3 Frekvences mērījumu izdarīšana bez ārēja magnētiskā lauka . . .	24
5.4 Frekvences mērījumu izdarīšana solenoīda magnētiskajā laukā . .	25
5.5 Parauga temperatūras noteikšana, izmantojot tā piromagnētiskā koeficienta vērtību	25
5.6 Datu matemātiskā analīze	25
6 Protokola paraugs un tā noformēšana	28
7 Vispārizglītojošie materiāli	31
7.1 Specifiskie drošības noteikumi	31
7.2 Aparatūras raksturojums	31
8 Magnētisko šķidrumu pielietojumi un pielietošanas grūtības	32

Ievads

Latvijas Universitātes Fizikas institūtā ir uzkrāta plaša pieredze *magnētisko šķidrumu* zinātniskajos pētījumos. Šiem jaunajiem materiāliem ir unikālas fizikālās īpašības un plašas praktiskās pielietošanas iespējas. Patlaban pasaulē visizplatītākie magnētisko šķidrumu pielietojumi ir personālo datoru cieto disku hermetizēšana, akustisko skaļruņu dzesēšana, kā arī virkne specifisku pielietojumu vakuuma tehnoloģijā, kosmiskajās sistēmās, aparātūvniecībā un militārajā tehnikā. Šajās izstrādņēs izmanto galveno un arī visvienkāršāko ferokoloīdu makroskopisko īpašību – spēcīgu sadarbību ar ārēju magnētisko lauku. Beidzamajos gados pasaulē, tai skaitā arī Latvijā, tiek veikti padziļināti magnētisko šķidrumu pētījumi, ietverot parādības, kas saistītas ar koloīdu iekšējo struktūru, siltuma un masas pārnesei. LU Fizikas institūtā tiek meklētas iespējas radīt jaunus t.s. termojūtīgos magnētiskos šķidrumus ar spilgti izteiktām piromagnētiskām īpašībām (izteiktu magnetizācijas atkarību no temperatūras), kā arī noskaidrotas nanodaļiņu pārnesei īpatnības neizotermiskos apstākļos un spēcīga magnētiskā lauka ietekmē.

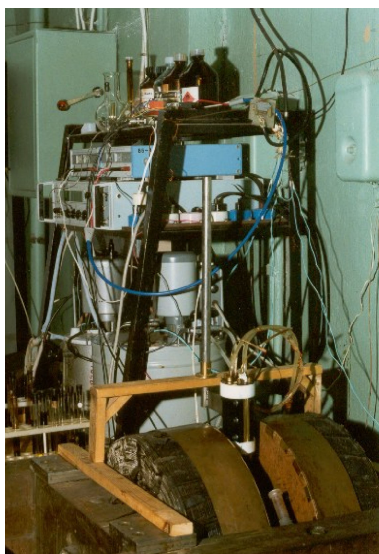
Magnētiskajos šķidrumos ir iespējams izraisīt intensīvu termomagnētisko konvekciju [1]. Latvijas, kā arī vairāku Japānas, Indijas u. c. valstu grupu zinātnisko pētījumu ietekmē viena no vadošām pasaules firmām “Ferrotec-USA” ir izvērsusi pētījumu darbus par ferošķidrumu izmantošanu elektrisko transformatoru dzesēšanai [2, 3]. LU Fizikas institūta “Siltuma un masa pārnesei” laboratorijas rezultāti un uzkrātā pieredze ļauj veikt kvalificētus lietišķos pētījumus termomagnētisko dzesēšanas sistēmu izstrādņē arī Latvijā. Mēs izvirzām jaunu priekšlikumu par magnētiski kontrolējama termosifonu izveidošanu un to izmantošanu miniatūru iekārtu dzesēšanai. Pētījumu praktiskais mērķis – noskaidrot iespējas izmantot termomagnētiskos sifonus datoru mikroprocesoru dzesēšanai kā alternatīvu šķidro metālu dzesēšanas sistēmām, ko izstrādā firma “Nanocoolers” (USA) [4]. Termomagnētiskām dzesēšanas sistēmām ir daudzas būtiskas priekšrocības: nav nepieciešama elektriska barošana, vienkāršāka konstrukcija, mazāki izmēri un svars, pašregulēšanās iespējas.

Nestacionāra magnētiskā lauka ietekmē ferodaļiņās var izraisīt enerģijas disipāciju un ar to saistītās dispersiju termiskās izmaiņas. Fizikas institūta fundamentālo pētījumu rezultātā ir uzkrāta bagāta pieredze šo parādību izskaidrošanā un termisko efektu prognozēšanā.

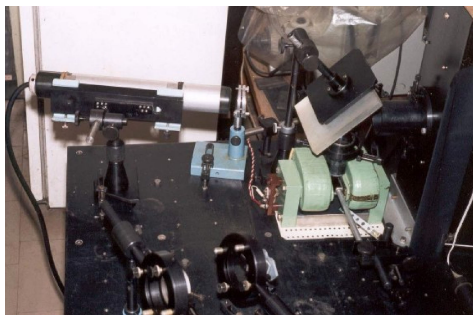
Darba mērķi

Laboratorijas darbu **“Magnētisko īpašību pētīšana magnētiskajos šķidrumos”** Latvijas Universitātes Fizikas institūta “Siltuma un masa pārnesei” laboratorija piedāvā LU fizikas studentiem ar sekojošiem mērķiem:

1. Iepazīstināt studentus ar magnētisko šķidrumu un tā svarīgāko fizikālo īpašību - magnētismu (superparamagnētismu).
2. Dot ieskatu magnētisko šķidrumu pagatavošanā un lietišķajos pielietojamos.
3. Izraisīt studentos interesi par magnētisko šķidrumu tematiku, kuras nozīme un aktualitāte aug kopā ar vispārējo tehnikas progresu. Ilustrēt LU FI “Siluma un masa pārnese” laboratorijas darbības novirzienus.



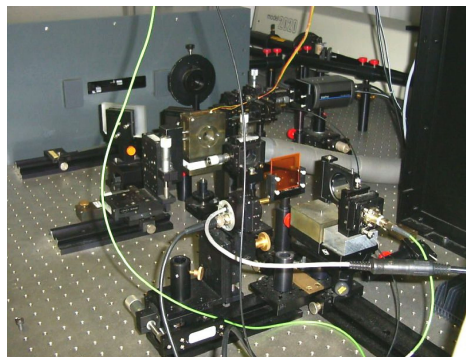
Termodifūzijas kolona – iekārta ferodaļiņu separācijai, izmantojot to migrēšanu temperatūras gradienta virzienā (Sorē efekts - *Soret effect*). Ievietojot kolonu starp magnēta poliem, tiek pētīta ārējā magnētiskā lauka iedarbība uz Sorē efektu.



Iekārta optiski inducēta temperatūras un ferodaļiņu koncentrācijas režģa pētīšanai plānā magnētiskā šķidruma parauga slānītī. Ar šo iekārtu iespējams veikt nanodaļiņu difūzijas un termodifūzijas (Sorē) koeficienta mērījumus un to atkarību no ārējā magnētiskā lauka.



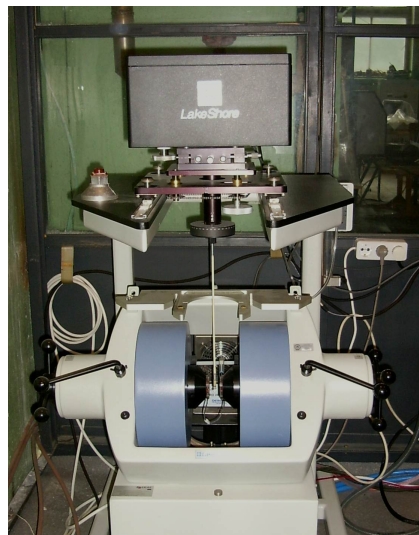
Termomagneto-osmozes iekārta, kas pēta, kā ferošķidrums sūcas caur porainu vidi (membrānu) temperatūras gradienta un ārēja magnētiskā lauka iedarbībā.



Jaunākais LU Fizikas institūta “Silvuma un masas pārnese” laboratorijas aprīkojums nodrošina iespēju pētīt magnētiskos šķidrumus ar optiskām metodēm atbilstoši mūsdienu prasībām: optiskais galds ar montāžas caurumiem, dažādas jaudas lāzери, prizmas, fotojūtīgie elementi, video kamera. Visiem svarīgākajiem mērinstrumentiem un video kamerai tiek nodrošināta saikne ar datoru.



Jaunākā un dārgākā Fizikas institūta aparatūra - firmas “Lake Shore” vibrācijas magnetometrs. Pētāmo paraugu iespējams ievietot augstas temperatūras krāsnī ($20 - 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) vai kriostatā (līdz N_2 vai He_2 sašķidrināšanās temperatūrai: 77 vai 4 K). Mēriekārtas jūtība ir ap $10^{-9}\text{ A} \cdot m^2$, magnētiskā lauka diapazons $0 \dots 1\text{ T}$. Magnetometra vadība ir pilnībā datorizēta, magnetizācijas līknes ir iespējams uzņemt dažādos režīmos un diapazonos.



“Lake Shore” vibrācijas magnetometra funkcionālais stends. Paraugs atrodas vertikāla stieņa apakšējā galā starp elektromagnēta poliem. Stieņa augšgals ir iestiprināts vibratorā.



LU Fizikas institūta jaunās ķīmijas laboratorijas iekārtošana. Laboratorijā būs viss nepieciešamais magnētisko šķidrumu pagatavošanai. Laboratorija ir apgādāta ar reaktoru, centrifūgu, smalcinātāju, maisītājiem, velkmes skapi u.c. darbam nepieciešamām iekārtām.



Ķīmijas laboratorijas galvenā iekārta - ķīmisko reakciju 8 l augstspiediena reaktors, kurā iespējams nodrošināt spiedienu līdz $400\text{--}600\text{ bar}$ temperatūrā līdz $350\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1 Teorija: magnētisko šķidrumu vispārīgs raksturojums

1.1 Magnētiskā šķidruma definīcija

Jēdziens **ferošķidrums** (*R. Rosensweig*, 1985) vai **magnētiskais šķidrums** (*Shliomis*, 1974) definē ultrastabili koloidāli izšķīdinātas *ferodaļiņas* (vai *magnētiskās daļiņas*) nesošajā šķidrumā (lai uzsvērtu ferodaļiņu izmēru, tās tiek sauktas arī par *nanodaļiņām*). Pateicoties Brauna kustībai, daļiņas nenosēžas gravitācijas vai magnētiskajā laukā. Lai novērstu daļiņu agregāciju (pārsvarā darbojoties van der Valsa spēkam), katru daļiņu pārklāj ar surfaktanta slāni (*surfaktētie ferošķidrums*) vai arī ap katru daļiņu izveido elektrostatisko dubultslāni (*joniskie ferošķidrums*).

Katra ferodaļiņa (apmēram 10 nm diametrā) ir veidota no feromagnētiska materiāla (Fe, Ni, Co, $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3 \dots$) un, pateicoties pareizi izvēlētam izmēram, tiek uzskatīta par viendomēnu. Tāpēc, pietiekoši tālu no Kirī punkta, katru ferodaļiņu raksturo pastāvīgs magnētiskais moments m , kas ir proporcionāls daļiņas tilpumam V :

$$m = M_S V, \quad (1)$$

kur M_S ir daļiņas materiāla piesātinājuma magnetizācija. Parasti m kārtā ir 10^4 Bora magnetoni.

1.2 Magnētisko šķidrumu koloidālā stabilitāte

1.2.1 Sedimentācija un agregācija

Koloidālas sistēmas parasti ir pakļautas divu veidu nestabilitātēm. *Sedimentācija* ir daļiņu nosēšanās masas spēku iedarbībā (gravitācijas lauks, centrifūgēšana u.tml.), savukārt *agregācija* attiecas uz daļiņu savstarpēju lipšanu, ko izraisa starp tām pastāvošie pievilkšanās spēki.

Salīdzinot gravitacionālās sedimentācijas un termālās Brauna kustības enerģiju, ir iespējams atrast daļiņu maksimālo izmēru, kas apmierina sedimentālās stabilitātes nosacījumu:

$$\Delta\rho V g L \leq k_B T, \quad (2)$$

kur $\Delta\rho = \rho^p - \rho^s$ ir koloīda cietās fāzes un nesošā šķidrumablīvumu starpība, g brīvās krišanas paātrinājums, L augstums, kurā daļiņu koncentrācija samazinās e reizes, k_B Bolcmaņa konstante un T absolūtā temperatūra. Par cik sfēriskai daļiņai $V = \pi d^3/6$, daļiņas diametrs d , kas apmierina sedimentālās stabilitātes nosacījumu vien. (2), ir ierobežots no augšas:

$$d \leq \sqrt[3]{6k_B T / \pi \Delta \rho g L}. \quad (3)$$

Parastiem magnētiskajiem šķidrumiem šis nosacījums izpildās, ja $d < 20 \dots 15$ nm.

Gadījumā, ja uz daļiņu iedarbojas nehomogēns magnētiskais lauks, kopā ar smaguma spēku (2) jāņem vērā arī magnētiskā spēka F_m darbība:

$$\vec{F}_m = \mu_0 m \nabla H, \quad (4)$$

kur $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m ir vakuuma magnētiskā caurlaidība un H magnētiskā lauka intensitāte. Brauna kustība spēj nodrošināt vienmērīgu daļiņu sadalījumu tilpumā, ja:

$$k_B T \geq \mu_0 M_S H V, \quad (5)$$

kas dod sekojošu daļiņas diametra d ierobežojumu:

$$d \leq \sqrt[3]{6k_B T / \pi \mu_0 M_S H} \quad (6)$$

Lai nodrošinātu koloīda sedimentālo stabilitāti, abiem ierobežojumiem (3), (6) ir jābūt izpildītiem. Attiecība:

$$R = \frac{\Delta \rho g L}{\mu_0 M_S H} \quad (7)$$

rāda, kurš ierobežojums ir stingrāks. Ja $R > 1$, dominē gravitācijas sedimentācija; ja $R < 1$, izteiktāka ir magnētiskā sedimentācija.

Daļiņu agregācija notiek, darbojoties van der Valsa (*van der Waals*) pievilkšanās spēkam starp tuvākajām daļiņām. Mijiedarbības enerģija starp divām vienāda diametra d sfērām tiek aprakstīta kā (*H. C. Hamaker*, 1937):

$$E_W = -\frac{A_H}{6} \left(\frac{2}{l^2 + 4l} + \frac{2}{(l+2)^2} + \ln \frac{l^2 + 4l}{(l+2)^2} \right), \quad (8)$$

kur A_H ir Hamakera konstante un $l = 2s/d$, kur s ir attālums starp sfēru virsmām. Vienādojums (8) rāda, ka divu daļiņu tuvošanās gadījumā ($l \rightarrow 0$) $E_W \rightarrow \infty$, kas noved pie daļiņu salīpšanas. Daļiņu attālināšanās gadījumā E_W samazinās proporcionāli l^{-6} .

Magnētiskajos šķidrumos, it sevišķi koncentrētos, jāņem vērā arī magnētisko dipolu mijiedarbība. Punktveida dipola magnētiskā enerģija brīvi izvēlētā magnētiskajā laukā \vec{H}' ir:

$$E_M = -\mu_0 \int_0^{H'} \vec{m} d\vec{H} = -\mu_0 \vec{m} \vec{H}', \quad (9)$$

kur punktveida dipola magnētiskais moments \vec{m} tiek uzskatīts par pastāvīgu. Lai atrastu divu punktveida dipolu mijiedarbības enerģiju, brīvi izvēlēta magnētiskā lauka \vec{H}' vietā jāņem lauks \vec{H}_d , ko rada otrs dipols [5]:

$$\vec{H}_d = \frac{1}{4\pi} \left(-\frac{\vec{m}}{|\vec{r}|^3} + 3\frac{(\vec{m}\vec{r})\vec{r}}{|\vec{r}|^5} \right), \quad (10)$$

kur \vec{r} ir attālums starp dipolu centriem. Divu punktveida dipolu mijiedarbības enerģija $E_{d1,d2}$ ir izsakāma kā 1. dipola enerģija magnētiskajā laukā, ko rada 2. dipols. Šādam gadījumam (9), (10) dod atrisinājumu:

$$E_{d1,d2} = \frac{\mu_0}{4\pi |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3} \left(\vec{m}_1 \vec{m}_2 - 3 \frac{(\vec{m}_1(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)) (\vec{m}_2(\vec{r}_1 - \vec{r}_2))}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^2} \right). \quad (11)$$

No (11) redzams, ka divu punktveida dipolu mijiedarbības enerģija ir atkarīga no to savstarpējās orientācijas, un var būt pozitīva (atgrūšanās) kā arī negatīva (pievilkšanās).

Magnētiskās mijiedarbības enerģija variē proporcionāli r^{-3} (magnētiskās mijiedarbības izraisītajiem spēkiem atkarība no attāluma ir proporcionāla r^{-4}). Tāpēc magnētiskās mijiedarbības enerģija ir jūtama lielākā attālumā nekā van der Valsa spēku enerģija (l^{-6}).

1.2.2 Koloidālās stabilizācijas divi veidi:

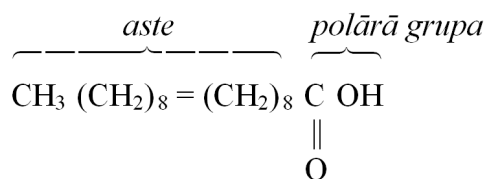
Surfaktētie magnētiskie šķidrumi. *Surfaktētajos magnētiskajos šķidrumos* agregācija tiek novērsta, katru daļiņu pārklājot ar papildus slāni, kas neļauj daļiņām satuvoties tik cieši, ka to pievilkšanās enerģija kļūst lielāka par termālo enerģiju. Šo slāni nodrošina *surfaktants* – surfaktētā magnētiskā šķidruma trešā komponente. Surfaktanta slāņa biezumam δ ir jābūt pietiekamam, lai nodrošinātu pretagregācijas stabilitātes nosacījumu:

$$|E_W + E_d| \leq k_B T. \quad (12)$$

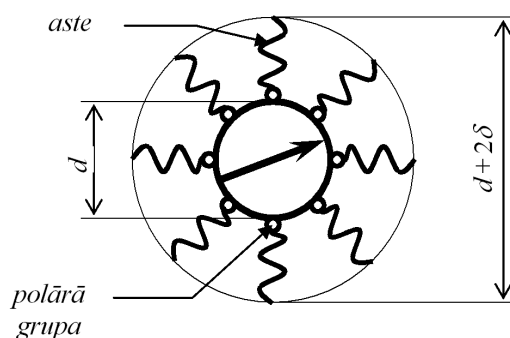
šis nosacījums parasti tiek apmierināts, ja $\delta \approx 1...3$ nm. Tāpēc kā surfaktantu var lietot dažādas organisko šķidrumu molekulas, kas sastāv no polārās grupas un pietiekoši garas astes, 1.att. Polārā grupa nodrošina kontaktu ar daļiņas virsmu fizikālā vai ķīmiskā veidā. Aste (apmēram 2 nm gara) ir pakļauta haotiskai termālai kustībai.

Viens no visbiežāk lietotajiem surfaktantiem ir oleīnskābe; tās molekulai ir sekojoša struktūra:

Surfaktēto magnētisko šķidrumu pagatavošanā svarīga ir surfaktanta pievienošana pareizā daudzumā. Surfaktanta iztrūkums dažas ferodaļiņas atstāj nestabilizētas. Pētījumi (*N. P. Matusevich, V. K. Rahuba, 1980*) rāda, ka pārāk liels



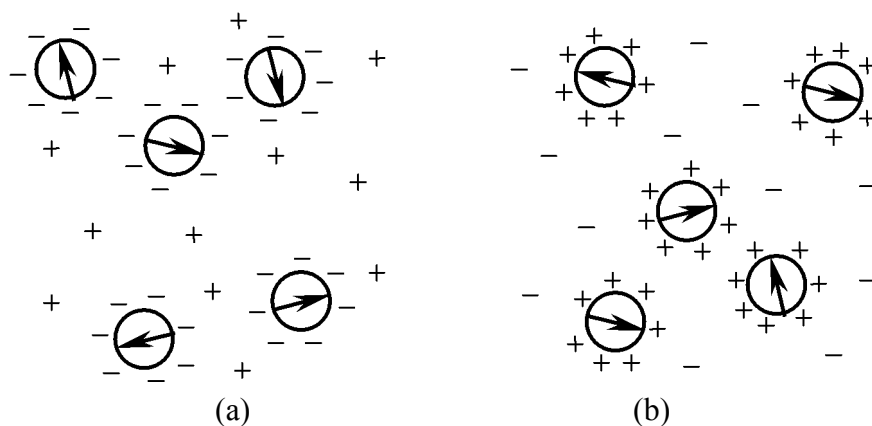
pievienotais surfaktanta daudzums arī samazina magnētiskā šķidruma koloidālo stabilitāti.



Att. 1: Surfaktēta daļiņa

Joniskie magnētiskie šķidrumi. *Joniskajos magnētiskajos šķidrumos* katras daļiņas virsma ir elektrostātiski uzlādēta. Daļiņu virsmu lādiņi ir vienādas zīmes, kas nodrošina daļiņu elektrostātisko atgrūšanos, šādā veidā novēršot arī to agregāciju. Lai nodrošinātu magnētiskā šķidruma kopējo elektrostātisko neitralitāti, nesošajam šķidrumam pievieno kontrjonus. Izšķir joniskos magnētiskos šķidrumus ar negatīvi lādētām daļiņām sārmainā vidē un ar pozitīvi lādētām daļiņām skābā vidē [6], 2.att.

Jonisko magnētisko šķidrumu pagatavošanai nepieciešama visai komplicēta ķīmiskās apstrādes tehnoloģija. Ferīta daļiņas, kas iegūtas ķīmiskās nosēdināšanas ceļā un karsētas sārmainā vidē, nevar tiešā veidā tikt izšķīdinātas ūdens bāzētā šķidrumā. Pārāk polarizējošiem primāriem kontrjoniem (tādi kā Na^+ , $(\text{CH}_3)\text{NH}_3^+$ vai NH_4^+), kas palikuši no ķīmiskās nosēdināšanas reakcijas, ir ekranējošs efekts, kā rezultātā daļiņu atgrūšanās nav pietiekami efektīva, lai novērstu to agregāciju [7]. Pētījumos (*R. Massart*) ir atrasts, ka neagregējoši joniskie magnētiskie šķidrumi var tikt iegūti, aizstājot augstāk minētos primāros kontrjonus ar mazāk polarizējošiem $\text{N}(\text{CH}_3)^+$ katjoniem un NO_3^- anjoniem vajadzīgajā koncentrācijā.



Att. 2: Joniskie magnētiskie šķidrumi: (a) - sārmais; (b) - skābs

1.3 Ieskats magnētisko šķidrumu pagatavošanā

Kā jau tekstā pieminēts, magnētisko šķidrumu pagatavošana ir visai komplicēts tehnoloģisks process. Ir zināmas daudzas atšķirīgas magnētisko šķidrumu iegūšanas metodes. Tās ir plaši aprakstītas literatūrā, un katrai no tām piemīt savi trūkumi un priekšrocības.

Magnētisko šķidrumu iegūšanas metodes pēc savas specifikas neietilpst dotā laboratorijas darba tematā. Tāpēc, lai gūtu vienīgi priekšstatu par magnētisko šķidrumu pagatavošanas procesu, īsi tiek apskatīta tehniski vienkāršākā un arī vecākā iegūšanas metode - *disperģēšanas* metode.

Disperģēšanas metodes pamatā ir feromagnētisko daļiņu mehāniska sasmalcināšana. Pirmais magnētiskais šķidrums, kuru pagatavoja S. Peipels (*S. S. Papell*) 1965. gadā, principā tika iegūts pēc šīs metodes.

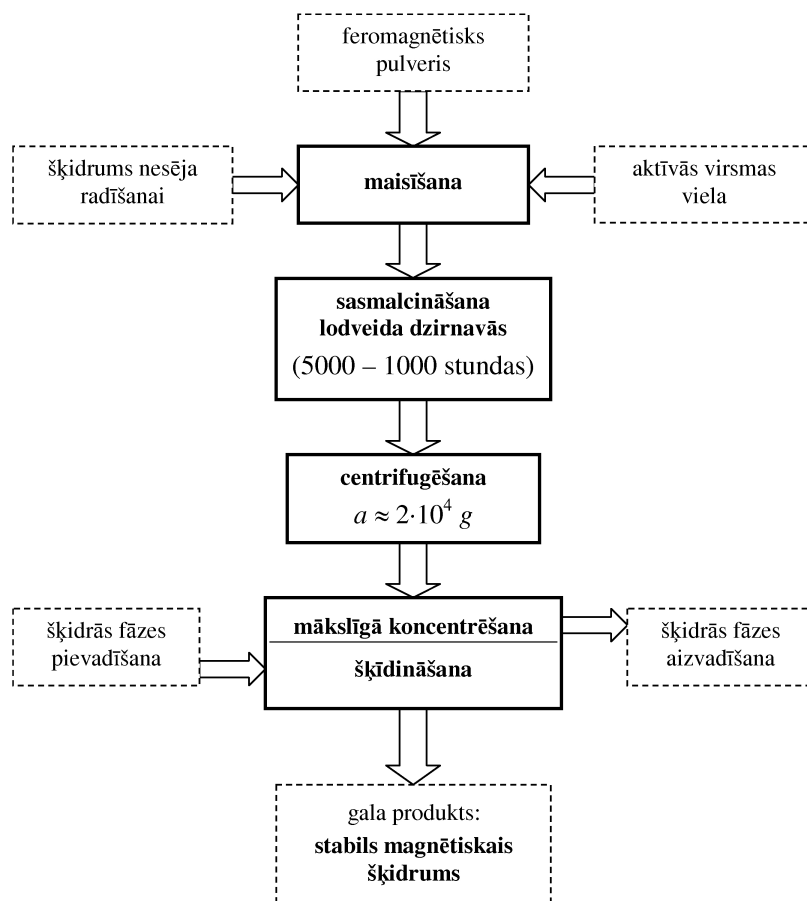
Disperģēšanas metodes realizācijas shēma ir parādīta 3.att. Topošā ferokoloīda nesošo šķidrumu izvēlas, ņemot vērā daudzus fizikālus un ķīmiskus apsvērumus. Viens no visplašāk lietotajiem magnētisko šķidrumu nesējiem ir petroleja. Nesējam pievieno virsmas aktīvu vielu (surfaktantu), parasti 10... 20 tilpuma procentu apmērā. Turpinot maisīšanu, šķidrumam pievieno feromagnētisko pulveri, līdz tas sasniedz attiecību 0,15... 0,20 kg/l. Pareizas feropulvera iemaisīšanas gadījumā virsmas aktīvās vielas šķidrums pārklāj katru pulvera daļiņu, novēršot to salipšanu vienā masā.

Centrifugēšanas procesā no kopējās masas izdalās lielākās daļiņas, kuras tiek aizvadītas atpakaļ uz papildus sasmalcināšanu. Pagatavošanas procesa beigu stadijā tiek veikta magnētiskā šķidruma koncentrēšana vai šķīdināšana. Tas tiek darīts, lai uzlabotu šķidruma sastāvu un tā fizikālās īpašības. Šo procesu rezultātā ferošķidruma magnetizācijas piesātinājuma vērtību iespējams paaugstināt pat par

kārtu (no 8 kA/m līdz 80 kA/m).

Apskatītajai disperģēšanas metodei ir ieviesti vairāki papildinājumi un uzlabojumi, bet to detalizēts izklāsts netiek iekļauts konkrētajā darba aprakstā.

No citām magnētisko šķidrumu pagatavošanas metodēm var nosaukt kondensācijas, ķīmiskās nosēdināšanas un elektrolīzes metodi.



Att. 3: Magnētiskā šķidruma pagatavošana pēc disperģēšanas metodes

1.4 Magnētisko šķidrumu magnētiskās īpašības

1.4.1 Dispersās fāzes magnētiskās īpašības

Kā iepriekš pieminēts, magnētiskajos šķidrumos katra daļiņa tiek uzskatīta par vienu domēnu. Katram domēnam piemīt konstants magnētiskais moments \vec{m} , kas var būt orientēts dažos virzienos, ko nosaka brīvās enerģijas minimumi (vieglās

magnetizācijas asis). Viegļās magnetizācijas asis ir atdalītas ar enerģijas potenciālām barjerām.

Ārpus ārēja magnētiskā lauka iedarbības, pietiekoši liels magnētiskā šķidruma tilpums (kas satur daudzas daļiņas) nav makroskopiski magnetizēts, jo tā daļiņas (domēni) ir orientēti brīvos virzienos. Ārējs magnētiskais lauks cenšas orientēt daļiņu magnētiskos momentus, kas izraisa magnētiskā šķidruma makroskopisku tilpuma magnetizāciju. Ferodaļiņu koercitāte ir maksimāla ($H_c \approx 8...80$ kA/m) pie sekojošiem daļiņu diametriem: *Fe* un *Co* 20 nm, *Ni* 50...60 nm [8]. Šo noteikto materiālu daļiņu diametru samazināšana noved pie koercitātes samazināšanās līdz pat nullei. Par cik plaši lietotajos magnētiskajos šķidrumos daļiņu diametrs nepārsniedz 15 nm, daļiņu koercitāti var neņemt vērā. Tā rezultātā magnētiskais šķidrums pakļaujas magnetizācijai (magnētiskā caurlaidība $\mu \gg 1$), lai arī tas neuzrāda histerēzi magnetizācijas dinamikā. Šo parādību sauc par *superparamagnetismu*.

Ja neņem vērā koloidālo daļiņu savstarpējo dipolu mijiedarbību, tad magnētiskā šķidruma magnetizācija M pakļaujas klasiskajam Lanževēna likumam, kas apraksta paramagnētiskas gāzes magnetizāciju:

$$M = M_\infty \left(\text{cth} \xi - \frac{1}{\xi} \right), \quad (13)$$

kur $M_\infty = \varphi_M \cdot M_S$ ir magnētiskā šķidruma piesātinājuma magnetizācija pie $H \rightarrow \infty$, φ_M ir ferošķidruma magnētiskās fāzes koncentrācija, un:

$$\xi = \mu_0 \frac{mH}{k_B T}, \quad (14)$$

ir Lanževēna funkcijas arguments. Lanževēna magnetizācijas līknes $M = M(H)$ forma ir parādīta 4.att.

Stiprā magnētiskajā laukā $H \rightarrow \infty$, un ferodaļiņu magnetizācija M asimptotiski tiecas uz piesātinājuma vērtību M_∞ . Leņķis χ_0 norāda sākotnējo magnētisko uzņēmību.

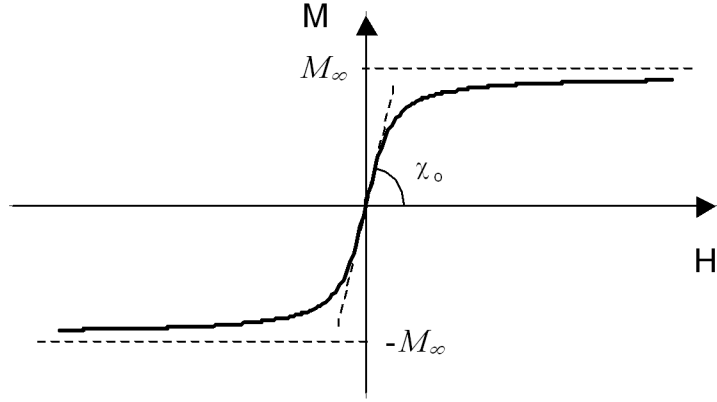
Vienādojumam (13) var viegli atrast lieluma ξ asimptotiskās vērtības (vājam un stipram magnētiskajam laukam). Vājam magnētiskajam laukam ($H \ll k_B T / \mu_0 m$) izvērziņums Teilora rindā dod:

$$\lim_{\xi \rightarrow 0} L(\xi) = \frac{\xi}{3}, \quad (15)$$

un sākotnējā magnētiskā uzņēmība $\chi_0 = M/H$ var tikt izteikta kā:

$$\chi_0 = \frac{\pi}{18} \frac{\mu_0 M_\infty M_S^2}{k_B T} d^3 \quad (\xi \ll 1). \quad (16)$$

Stipram magnētiskajam laukam ($H \gg k_B T / \mu_0 m$) (13) pārveidojas sekojoši:



Att. 4: Lanževēna magnetizācijas līkne

$$M = M_{\infty} - 6 \frac{M_{\infty} k_B T}{\pi \mu_0 M_S H d^3} \quad (\xi \gg 1). \quad (17)$$

Vienādojumi (16) un (17) norāda uz ievērojamu magnetizācijas atkarību no ferodaļiņu diametra d . Uz šī efekta tiek balstīta magnetogranulometrijas analīze, kas ļauj atrast ferodaļiņu izmēru sadalījumu no magnetizācijas līknes formas [5, 6]. Konstanta diametra d vietā ņemot daļiņu izmēru sadalījumu d_i , (13) pārvēršas formā:

$$M = M_{\infty} \sum_i n_i (d_i - 2a_0)^3 \cdot L\left\{\frac{\pi \mu_0 M_S H}{6 k_B T} (d_i - 2a_0)^3\right\} / \sum_i n_i d_i^3, \quad (18)$$

kur a_0 ir ferodaļiņas nemagnētiskā virsmas slāņa biezums (parasti vienāds ar vienu kristāliskā režģa periodu), un $L\{\xi\} \equiv \text{cth}\xi - 1/\xi$ ir Lanževēna funkcija. Daļiņu izmēru sadalījums d_i parasti tiek meklēts matemātiski, meklējot labāko atbilstību starp eksperimentāli iegūto un matemātiski izveidoto (vienādojums (18)) parauga magnetizācijas līkni.

Ferošķidruma magnētiskā tilpuma koncentrācija φ_M vienmēr ir zemāka par nanodaļiņu koncentrāciju φ , kas aprēķināta pēc raksturīgajiem blīvumiem:

$$\varphi = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_M - \rho_0}, \quad (19)$$

kur ρ , ρ_0 , ρ_M ir attiecīgi magnētiskā šķidruma, nesošā šķidruma un magnētiskā materiāla blīvums (surfaktanta blīvums tiek pieņemts kā pietiekoši tuvs ρ_0). Parasti $\varphi_M/\varphi = 0,7 \dots 0,9$. Ir divi galvenie iemesli, kāpēc $\varphi_M < \varphi$: pirmkārt, katrai daļiņai ir nemagnētisks virsmas slānis, otrkārt, vērā ņemams ferodaļiņu skaits zaudē feromagnētiskās īpašības ferošķidruma pagatavošanas procesā [8].

1.4.2 Koloidālo ferodaļiņu magnetizācijas kinētika.

Aplūkosim magnetizācijas relaksācijas procesu (sākot no laika momenta, kad ārējs magnētiskais lauks tiek izslēgts). Ferošķidruma magnetizācija izzūd laikā eksponenciāli:

$$M(t) = M_S e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (20)$$

kur τ ir relaksācijas laiks.

No mikroskopiskā viedokļa, relaksācijas procesā ferodaļiņu magnētiskais moments \vec{m} var mainīt savu sākotnējo orientāciju divos atšķirīgos veidos. Pirmkārt, ferodaļiņas magnētiskais moments maina savu orientāciju, pateicoties daļiņas Brauna rotācijai nesošajā šķidrumā. Otrkārt, ferodaļiņas magnētisko momentu var mainīt termālās fluktuācijas pašas daļiņas iekšienē. Abi pieminētie efekti raksturojas katrs ar savu relaksācijas laiku.

Koloidālas daļiņas Brauna rotācijas relaksācijas laiks τ_B tiek uzdots kā:

$$\tau_B = 3V\eta_0/k_BT, \quad (21)$$

kur η_0 ir nesošā šķidruma dinamiskā viskozitāte.

Magnētiskie domēni, kuriem ir tikai viena magnetizācijas ass, veido vienkāršāko gadījumu: magnētiskais moments \vec{m} var būt orientēts tikai divos virzienos, t.i., abos pa šo asi. Vienkāršākā modeļa ietvaros, potenciālā barjera E_a var tikt izteikta ar vienas anizotropijas konstanti K_a :

$$E_a = K_a V. \quad (22)$$

Termālās fluktuācijas var mainīt magnētiskā momenta \vec{m} orientāciju, ja to enerģija pārsniedz potenciālo barjeru, $k_BT > E_a$ (*L. Néel*, 1949). Pretējā gadījumā ($k_BT < E_a$) daļiņas magnētiskā momenta orientācija var tikt mainīta tikai rotējot daļiņai.

Saskaņā ar \vec{m} diskreto orientāciju modeli, Nīla relaksācijas laiks τ_N tiek uzdots kā:

$$\tau_N = \tau_0 e^{\frac{E_a}{k_BT}}, \quad (23)$$

kur laika konstanti τ_0 nosaka magnētiskā momenta \vec{m} Larmora precesija ap magnetizācijas asi. Parasti lielums τ_0 ir ar kārtu 10^{-9} s.

Magnetizācijas kinētikā dominē efekts, kura relaksācijas laiks τ ir īsāks. Ja $\tau_N \ll \tau_B$, magnetizācijas relaksācijas process notiek pārsvarā dēļ Nīla efekta. Šis gadījums ir raksturīgs viskoziem magnētiskajiem šķidrumiem, jo $\tau_B \rightarrow \infty$ kad $\eta_0 \rightarrow \infty$, vienādojums (21). Ja $\tau_N \gg \tau_B$, par galveno magnētiskās relaksācijas cēloni jāuzskata Brauna rotācija. Par cik τ_N ir atkarīgs no daļiņas diametra

d , ir iespējams dotai ferodaļīnai izrēķināt kritisko diametru d^* , pie kura $\tau_N = \tau_B$. Aprēķini (M. A. Marcenyuk, Yu. L. Raiher, M. I. Shliomis, 1973) dod $d^* = 4$ nm kobalta daļiņām un $d^* = 8$ nm dzelzs daļiņām (petrolejā, istabas temperatūrā). Relaksācijas laiku novērtējums atkarībā no daļiņas diametra (petrolejā, istabas temperatūrā) ir parādīts 1.tabulā [8]:

daļiņas diametrs d (nm)	Nīla relaksācijas laiks τ_N (s)	Brauna relaksācijas laiks τ_B (s)
8	10^{-18}	$3,5 \cdot 10^{-7}$
10	10^{-9}	$7,6 \cdot 10^{-7}$
12.5	1	$1.5 \cdot 10^{-6}$

Tabula 1: Relaksācijas laiku novērtējums atkarībā no daļiņas diametra

Kā redzams no tabulas datiem, Nīla relaksācijas laiks var atrasties ļoti plašā laika intervālā.

Viena no ferodaļiņu relaksācijas laiku eksperimentālajām noteikšanas metodēm ir kompleksās magnētiskās uzņēmības noteikšana pie mainīgas ārēja magnētiskā lauka mainīšanās frekvences. Paaugstinot frekvenci, ferodaļiņu magnetizācija sāk atpalikt fāzē no ārējā magnētiskā lauka, jo daļiņu magnētisko momentu maiņa notiek ar galīgu ātrumu. ņemot to vērā, var uzskatīt, ka magnētiskā uzņēmība pieņem matemātiski kompleksa lieluma formu:

$$\tilde{\chi} = \chi' - \chi'' \quad (24)$$

Pēc Debaja teorijas:

$$\chi' = \chi_0 \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad \chi'' = \chi_0 \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (25)$$

kur χ_0 ir statiskā magnētiskā uzņēmība (nemainīga magnētiskajā laukā). No (25) redzams, ka χ'' eksistē maksimums pie $\omega\tau = 1$. Šo maksimumu meklē eksperimentāli, mainot frekvenci ω . Kad maksimums ir atrasts, no izteiksmes (25) nosaka τ . Eksperimenti (M. M. Maiorov, 1979) rāda, ka χ'' maksimuma frekvence ω_0 parasti ir meklējama intervālā 30 kHz... 100 kHz. Tika noskaidrots, ka mazāka izmēra daļiņām frekvence ω_0 ir augstāka, kas atbilst pieņemtajai teorijai.

Nepieciešams atzīmēt, ka ārējā magnētiskajā laukā ferodaļiņas saņem papildus magnētisko enerģiju $E_m = -\mu_0 \vec{m} \vec{H}$, kas izmaina potenciālās barjeras E_a augstumu un, sakarā ar to, arī Nīla relaksācijas laiku τ_N . Cits svarīgs efekts attiecas uz daļiņu agregāciju, kas ļoti ievērojami palielina Brauna rotācijas relaksācijas laiku

τ_B . Magnētiskā šķidruma paraugs, kuram agregācija pilnībā nav novērsta, dod plašu Brauna rotācijas relaksācijas laiku spektru.

2 Darba eksperimentālās iekārtas uzbūve

2.1 Magnētiskā šķidruma magnētiskās fāzes mērīšanas iespējas

Lai pētītu ferošķidruma magnētiskās īpašības, nepieciešams izvēlēties mērīšanas sensoru un mēriekārtu, kas pētāmo signālu pārveido mērījumu veikšanai ērtā formā [11]. Praktiski izgatavojams sensors, kas reaģē uz vides magnētiskās uzņēmības izmaiņām, ir indukcijas spole, kas atrodas pētāmajā vidē. Ja pētāmā vide ir šķidrums, racionālāk ir spoli iegremdēt mēģenē ar pētāmo šķidrumu, nevis aptīt to ap mēģeni, jo pēdējā gadījumā spoles radītās magnētiskā lauka līnijas nav noslēgtas šķidruma ieņemtajā tilpumā, kas samazina sensora jūtību un palielina tā nestabilitāti pret ārējiem traucējumiem.

Izmainoties vides magnētiskajai uzņēmībai, spole no saviem raksturlielumiem visefektīvāk maina induktivitāti, tāpēc mēriekārtas darbību visracionālāk ir balstīt uz sensora spoles induktivitātes mērīšanu. Induktivitātes mērīšanai izšķir divus spoļu slēguma veidus [12, 13].

Pie pirmā veida pieskaita divu vienādu spoļu *diferenciālo slēgumu* (t.sk. arī tilta slēgumu). Šajā gadījumā tiek mērīta starpība starp abu spoļu induktivitātēm, kas sākuma stāvoklī ir vienāda ar nulli. Spoles parasti novieto tā, lai fizikālais process, kas vienas spoles induktivitāti palielina, tikpat lielā mērā otras spoles induktivitāti samazinātu. Galvenā diferenciālās shēmas priekšrocība ir tās stabilitāte pret ārējiem faktoriem, kas izmaina abu spoļu induktivitāti vienādā mērā, jo tas neizsauc induktivitātes starpības izmaiņu. Sevišķi tas attiecas uz temperatūras izmaiņu, kas elektroniskajās shēmās rada “nulles dreifu”. Šis mērīšanas veids laboratorijas darba iekārtai netiek pielietots, jo konkrētais fizikālais process (parauga magnetizācija) iedarbojas vienādi uz visu pētāmā šķidruma tilpumu, kas liedz iespēju izmantot diferenciālo mērīšanas principu.

Otrs mērīšanas veids ir *unitārais* – tiek mērīta vienas spoles induktivitāte. Saprātams, ka šajā gadījumā grūtības rada pietiekamas noturības panākšana pret destabilizējošiem faktoriem, kas izsauc induktivitātes izmaiņu neatkarīgi no pētāmā fizikālā lieluma. Konkrētajā gadījumā unitārā induktivitātes mērītāja labākais risinājums ir LC kontūra izveidošana, kur L ir mērāmā induktivitāte, C – kontūra kapacitāte, kas tiek uzturēta konstanta. Mērīta tiek kontūra rezonanses frekvence, kas, izmainoties spoles induktivitātei par mazu lielumu ΔL , mainās pēc sakarības:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta Q/Q}{Q^2 - 1} - \frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L}, \quad (26)$$

kur Q un ΔQ ir attiecīgi kontūra labums un tā izmaiņa. No sakarības redzams, ka frekvences f atkarību no induktivitātes L var uzskatīt par lineāru, ja $\Delta Q \ll Q$. Mēriekārta tiek veidota tā, lai šis nosacījums izpildītos.

2.2 Mēriekārtas sensors – induktivitātes spole

Par mērītāja sensoru tiek izmantota *solenoidāla induktivitātes spole*, kas ir pilnībā iegremdēta pētāmajā magnētiskajā šķidrumā. Spole veido LC svārstību kontūru ar kondensatoru, kura kapacitāte ir konstanta. Uz šī kontūra bāzes tiek izveidots LC sinusoidālu svārstību ģenerators, kura frekvence tiek mērīta. Pētāmā parauga magnētiskās uzņēmības maiņa izraisa spoles induktivitātes maiņu, kā rezultātā atbilstoši (26) mainās ģenerācijas frekvence, ko mēra ar frekvenčmetru.

Induktivitātes spoles parametru izvēli nosaka vairāki apsvērumi. Eksistē karkasa un bezkarkasa spoles. Bezkaraka spoles izgatavošana, ja vijumu skaits ir liels un aizņem vairākus slāņus, saistās ar tehniskām grūtībām. Tāpēc mērītāja spole ir izgatavota uz plastmasas karkasa, kura sienas ir plānas, lai tās aizņemtu pēc iespējas mazāku pētāmā šķidruma tilpumu.

Tinot spoli, ir svarīgi zināt, kāda būs tās darba frekvence (vai frekvences josla). Šajā gadījumā frekvences joslu nosaka pētāmā magnētiskā šķidruma magnetizācijas kinētikas īpašības – frekvencei ir jābūt pietiekoši zema, lai parauga magnētiskā uzņēmība nekļūtu par kompleksu lielumu, citiem vārdiem sakot, lai parauga magnetizācijas relaksācijas laiks τ būtu mazāks par $1/f$. Šo robežfrekvenci ir viegli noskaidrot eksperimentāli, mērot Q -metra (modelis E9-4) etalonspoles labumu, par tās serdi izmantojot mēģeni, kas ir pildīta ar pētāmo magnētisko šķidrumu. Labumu mēra, paaugstinot frekvenci, līdz novēro labuma samazināšanos. Uzskatot, ka labuma samazināšanos izraisa serdes magnētiskās īpašības (etalonspoles paškapacitāte ir pietiekoši maza), var secināt, ka ir sasniegta meklētā robežfrekvence. Pēc veikto mērījumu rezultātiem, pētāmā magnētiskā šķidruma parauga P-32 robežfrekvence ir ap 50 kHz.

Lai mērītājam būtu pēc iespējas labāka linearitāte (vienādojums (26)) un efektīvāks pārveidojums induktivitāte-frekvence, LC svārstību kontūrs jācenšas izveidot ar pēc iespējas lielāku labumu, ko definē vispārīga formula:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (27)$$

kur R ir kontūra kopējā omiskā pretestība. No (27) redzams, ka LC kontūru labāk ir veidot ar mazāku kapacitāti un lielāku induktivitāti. Eksistē arī citi kritēriji par labu šādam apsvērumam. Lielāka induktivitāte tiek sasniegta ar lielāka izmēra spoli, kas paaugstina mērījumu jutību, jo liela spole izmanto pētāmā šķidruma enerģiju no lielāka tilpuma, un šis enerģijas blīvums ir konstants. Kondensatora kapacitāti ir atļauts samazināt, līdz LC ģenerators ģenerē frekvenci (pēc Tomsona formulas $\omega = 1/\sqrt{LC}$, kas tuva pētāmā parauga robežfrekvencei. Jāatzīmē, ka pārlika kapacitātes samazināšana nav ieteicama arī no elektrotehniskiem apsvērumiem, jo tad vērā ņemamu daļu no kopējās kontūra kapacitātes veido parazītiskās kapacitātes (pašas indukcijas spoles, koaksiālā kabeļa un pārējas montāžas), kuras

var izrādīties nestabilas pret dažādiem faktoriem.

ņemot vērā iepriekšminētos apsvērumus, laboratorijas iekārtai tika uztīta cilindriska spole ar sekojošiem parametriem: vijumu skaits $w = 750$, vijumu slāņa biezums $b = 3,5$ mm, vijumu vidējais diametrs $D_v = 11,0$ mm, stieples diametrs $d = 0,30$ mm. Lai samazinātu spolītes paškapacitāti, tā ir divsekciju, kur sekcijas atdala $l' = 1$ mm bieža starplika, un katras sekcijas garums $l_s = 9,0$ mm. Šādas ģeometrijas spoles induktivitāti tuvināti var aprēķināt pēc empīriskas formulas [14]:

$$L_T = \frac{0,08 D_v^2 w^2}{3 D_v + 9(l_s + l' + l_s) + 10b}, \quad (28)$$

kur D_v , l_s , l' un b ir jāievieto centimetros, un L_T iegūst mikrohenrijos. Ievietojot dotos spoles parametrus, iegūst $L_T = 2,28$ mH. Spoles induktivitāte tika mērīta arī eksperimentāli (mēriekārta E7-11). Mainot frekvenci 1... 200 kHz diapazonā, tās induktivitāte iekļāvās robežās 2,25... 2,35 mH. Rezultātā tiek uzskatīts, ka dotās spoles induktivitāte vakuumā ir **$L_0 = 2,3 \pm 0,1$ mH**.

Spoles omisko pretestību var aprēķināt pēc formulas:

$$R_{Cu} = \rho_{Cu} \frac{D_v w}{(d/2)^2}, \quad (29)$$

kur $\rho_{Cu} = 0,017 \cdot 10^{-6} \Omega/m$ ir vara īpatnējā pretestība (laboratorijas temperatūrā). Ievietojot (29) zināmos lielumus, iegūst $R_{Cu} = 6,23 \Omega$. Omiskās pretestības mērījums (E7-11) dod 6,20... 6,30 Ω , atkarībā no temperatūras un pievadu kontaktiem. Var uzskatīt, ka laboratorijas temperatūrā spoles omiskā pretestība (kopā ar koaksiālo kabeli) ir **$R_0 = 6,3 \pm 0,1 \Omega$** .

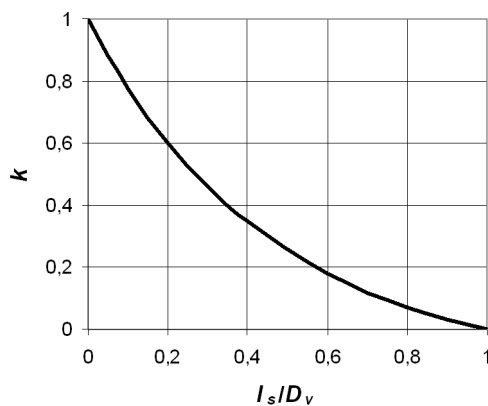
Spoles paškapacitāti var tuvināti noteikt pēc empīriskas formulas [14]:

$$C_T = 2(n + 2k(n - 1)) \frac{l_s b}{d^2} \frac{1}{\sqrt{f}}, \quad (30)$$

kur lielumu mērvienības ir: C_T [pF], l_s , b un d [mm], svārstību frekvence f [kHz]. Spoles sekciju skaits $n=2$, koeficientu k nosaka pēc grafika [14], 5.att.

Darba frekvencei ap 45 kHz no (30) iegūst $C_T = 220$ pF. Eksperimentāli spoles paškapacitāte pie dažādām frekvencēm tika noteikta ar Q-metru (E9-4), un iegūta ļoti laba atbilstība starp E9-4 mērījumiem un teorētiski aprēķināto C_T – starpība nepārsniedza 5 pF. Tāpēc ar pietiekamu precizitāti var uzskatīt, ka spolei **$C_0 = 220 \pm 5$ pF**.

Svarīgi ir novērtēt spoles pašrezonanses frekvenci un pārliicināties, ka tā krietni pārsniedz LC kontūra (un līdz ar to arī pašas spoles) darba frekvenci (ap 45 kHz), tādējādi neietekmējot mērījumu linearitāti. Jāatzīmē, ka šim novērtējumam



Att. 5: Līkne koeficienta k noteikšanai spoles paškapacitātes aprēķinam

nav korekti lietot C_0 , jo (30) rāda, ka C_0 ir atkarīgs no spoles darba frekvences. Korektam novērtējumam ir matemātiski jāatrod tāda paškapacitāte C'_0 , kuras aprēķinam pēc (30) būtu izmantota pašrezonanses frekvence f_R . Šāds novērtējums dod:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C'_0}} \approx 380 \text{ kHz},$$

kas daudzkārt pārsniedz LC kontūra darba frekvenci.

Sensora spoles un LC kontūra parametru analīzes beigās ir jānoskaidro LC kontūra labums, lai novērtētu, cik daudz tas ietekmē frekvences izmaiņu atkarībā no spoles induktivitātes maiņas saskaņā ar (26). Kontūra labumu Q iespējams precīzāk uzzināt pēc Q -metra mērījumiem, nekā rēķināt pēc (27), jo šai vienādojumā R ietver kontūra rezultatīvo omisko slodzi, kas ir atkarīga arī no ģenerators elektroniskās shēmas pieslēguma LC kontūram. Q -metra E9-4 mērījums dod $Q \approx 9,5$ un ΔQ darba režīmā 0,97... 0,90. Novērtējot skaitliski (26) pirmo un otro saskaitāmo:

$$\frac{\Delta Q/Q}{Q^2 - 1} \approx \frac{1/9,5}{9,5^2 - 1} \approx 0,001$$

$$\frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L} \approx \frac{1/0,5}{2 \cdot 2,3} \approx 0,1,$$

redzam, ka pirmais saskaitāmais ir apm. 100 reizes mazāks, tāpēc laboratorijas darba precizitātes robežās (pieļaujot 1% papildus kļūdu) LC kontūra labumu var uzskatīt par pietiekoši augstu, lai (26) vietā varētu lietot vienkāršoto sakarību:

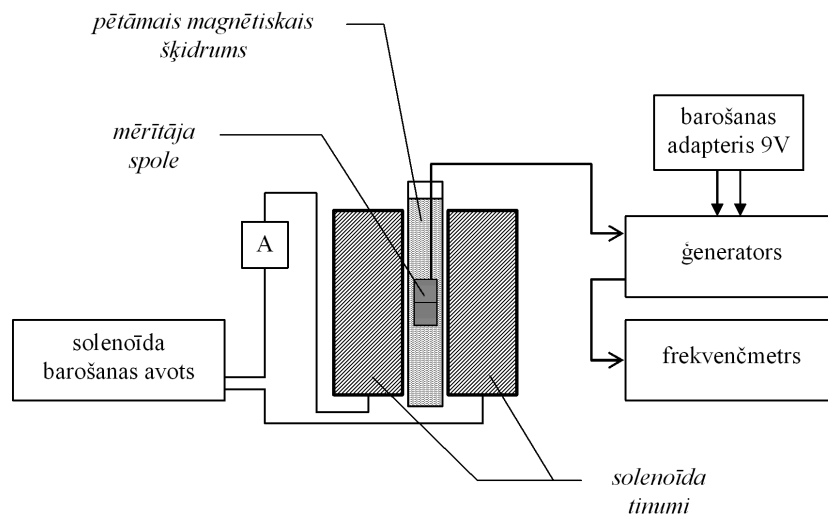
$$\frac{\Delta f}{f} \approx -\frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L} \quad (31)$$

2.3 Eksperimentālās iekārtas kopējā shēma

Laboratorijas darba “Magnētisko īpašību pētīšana magnētiskajos šķidrumos” kopējā eksperimentālā iekārta ir parādīta 6.att. Mērītāja sensors – spole atrodas mēģenē ar pētāmo magnētisko šķidrumu. Mēģene ir ievietota solenoīdā, kas nodrošina ārēja magnētiskā lauka klātbūtni pētāmajam šķidrumam. Magnētiskā lauka intensitāte H solenoīda centrā, kur atrodas spole, ir tieši proporcionāla solenoīda tinumu barošanas strāvai I . Ar pietiekošu precizitāti var pieņemt šādu graduācijas sakarību:

$$H[kA/m] = 14,42 \cdot I[A] \quad (32)$$

Barošanas strāva tiek mērīta ar barošanas ķēdē ieslēgtu ampērmetru “A”, 6.att. Ģenerators, kas mēra LC kontūra rezonanses frekvenci, ir veidots pēc kapacitīvā trīspunkta shēmas. Ģenerators elektroniskajā shēmā tiek lietots paaugstinātas precizitātes un temperatūras stabilizācijas kondensators C , lai LC kontūra rezonanses frekvences izmaiņu noteiktu tikai mērītāja spoles induktivitātes L izmaiņa. Barošanas adapteris nodrošina ģenerators elektroniskās shēmas barošanai nepieciešamo 9 V līdzspriegumu.



Att. 6: Laboratorijas darba eksperimentālā iekārta



Att. 7: Laboratorijas darba eksperimentālās iekārtas fotogrāfija

3 Darba uzdevumi

1. Veikt LC ģenerators frekvences mērījumus, mēģenei ar magnētisko šķidrumu un sensora spoli atrodoties dažādas intensitātes magnētiskajā laukā H , ko nodrošina solenoīds.
2. Veikt frekvences mērījumu pārrēķinu, kā rezultātā uzzīmēt eksperimentāli iegūtu parauga magnetizācijas līkni $M = M(H)$.
3. Veikt teorētiskās magnetizācijas līknes $M_{teor}(H)$ konstruēšanu, izmantojot Lanževēna funkciju, par variējamiem parametriem atstājot ferrodaļiņas vidējo magnētisko diametru d_m un magnētiskās fāzes koncentrāciju φ_m .
4. Uzklāt $M_{teor}(H)$ līkni uz $M = M(H)$ līknes un veikt variējamo parametru d_m un φ_m optimizāciju.
5. Izrēķināt nanodaļiņu tilpuma koncentrāciju φ , atrast attiecību φ_m/φ , no kuras secināt, cik lielai daļai no magnētiskā šķidruma cietās fāzes piemīt feromagnētiskās īpašības.
6. Pieņemot par zināmu daļiņu feromagnētiskā materiāla magnetizācijas atkarību no temperatūras (t.s. piromagnētisko koeficientu) $\frac{1}{M} \frac{\partial M}{\partial T} =$

0,003 $\frac{1}{K}$, novērtēt, par cik grādiem ir uzsilis magnētiskais šķidrums mēģenē, sildot solenoīda spoli ar barošanas strāvu $5A$ (sildot nepārsniegt $T = 60\text{ }^{\circ}C$ uz spoles vijumu ārējās virsmas).

4 Laboratorijas darba aprīkojums un materiāli

Darba veikšanai nepieciešamo aprīkojumu ilustrē laboratorijas darba eksperimentālās iekārtas shēma 6.att. un fotogrāfija 7.att. Kā nepieciešamo aprīkojumu var izdalīt:

- a) solenoīds, kas karkasa centrā nodrošina magnētiskā lauka intensitāti līdz apmēram $H = 75kA/m$
- b) solenoīda barošanas avots, kas nodrošina solenoīda tinumiem nepieciešamo līdzstrāvu (0... 5 A), strāvas stipruma mērīšanai izmanto barošanas avota iebūvēto ampērmetru
- c) ar pētāmo magnētisko šķidrumu piepildīta mēģene
- d) mēriekārtas sensors – induktivitātes spole, kas ievietota mēģenē
- e) LC kontūra rezonanses frekvences kapacitīvā trišpunkta ģenerators
- f) frekvenčmetrs LC kontūra rezonanses frekvences mērīšanai (izmanto multimetru TENMA 72-7745)
- g) temperatūras mēriekārta ar termopāra sensoru (izmanto multimetru TENMA 72-7745)
- h) 9 V līdzsprieguma adapteris ģenerators barošanai

Bez augstāk minētā, darba veikšanai nepieciešams *ar mēriekārtu elektroniski nesaistīts* dators nolasīto datu pierakstam un analīzei.

Laboratorijas darba materiāls ir pētāmais magnētiskais šķidrums, kas atrodas jau iepildīts mēģenē.

BRĪDINĀJUMS: neņemot no mēģenes ārā aizbāzni un neveikt nekādu magnētiskā šķidruma pārliešanu! Magnētiskais šķidrums NAV INDĪGS vai citādi kaitīgs veselībai, bet tā traipus ir ļoti grūti iztīrīt no apģērba u.c. virsmām, bez tam teflona aizbāzņa hermētiska iestiprināšana mēģenē ir visai sarežģīta operācija.



Att. 8: Mēģene ar magnētisko šķidrumu un sensora spoli

5 Laboratorijas darba izpildes gaita

5.1 Iepazīšanās ar pētāmo magnētisko šķidrumu

Uzmanīgi paņemt pirkstos mēģeni aiz tās augšdaļas (ne aiz baltā teflona aizbāžņa vai mērītāja sensora kabeļa!) un izvilkt to no solenoīda karkasa. Negāžot mēģeni pārāk slīpi (lai magnētiskais šķidrums nemērcētu aizbāžni), viegli to paskalināt, skat. 8.att. Skatoties uz mēģenes sienām, pārliecināties, ka pētāmais materiāls ir tumši brūns šķidrums ar vāju caurspīdību.

Uzmanīgi ievietot mēģeni atpakaļ solenoīda karkasā.

5.2 Laboratorijas darba iekārtas elektroniskās shēmas saslēgšana

Pārbaudīt, vai laboratorijas darba iekārtas elektroniskā shēma ir saslēgta kā 6.att. Solenoīda zilo kontaktligzdu ieteicams savienot ar barošanas avota “-” spaili, pelēko ar “+”. Pārbaudīt, vai ģenerators divās kontaktligzdās vadi ir sasprausti pareizi.

5.3 Frekvences mērījumu izdarīšana bez ārēja magnētiskā lauka

Ieslēgt 9 V barošanas adapteri un frekvenčmetru. Neieslēgt solenoīda barošanas avotu. Mērījumu lielākās kļūdas cēlonis ir magnētiskā šķidruma silšana no solenoīda tinumiem, kad tie ir uzsīluši no plūstošās barošanas strāvas. Par cik magnētiskajam šķidrumam piromagnētiskais koeficients dM/dT ir atšķirīgs no nulles, temperatūra izmaina parauga magnētiskās īpašības. Tāpēc nulles lauka mērījumi jāveic, pirms solenoīds ir sācis silt (barošanas strāva vēl nav tikusi ieslēgta) un tālākie mērījumi ārējā magnētiskā laukā jācenšas veikt iespēju robežās ātri.

Pagaidīt līdz frekvences rādījums nostabilizējas un veikt uzrādītās frekvences $f(H = 0)$ pierakstu – vēlams kādā datorprogrammā, ar kuru tālāk būs iespējams veikt pierakstīto datu matemātisku analīzi (piem. Microsoft Excel).

Papildus uzdevums: atkārtot frekvences mērījumus, atvienojot vienu vadu no solenoīda barošanas avota. Vai ir konstatējama frekvences izmaiņa? Ja jā, pacentieties atrast tam fizikālu izskaidrojumu! Kuru frekvences mērījums bez magnētiskā lauka vajadzētu izmantot laboratorijas darba $f(H)$ līknei?

5.4 Frekvences mērījumu izdarīšana solenoīda magnētiskajā laukā

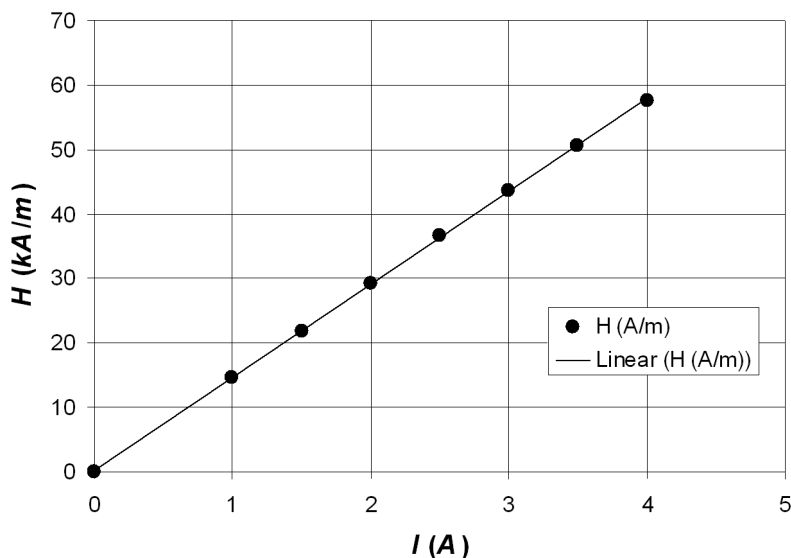
Kad mērījums $f(0)$ ir veikts, ieslēgt solenoīda barošanas avotu un, iestādot dažādas barošanas strāvas vērtības, pierakstīt $f(H)$ mērījumus. Vēlams veikt $f(H)$ mērījumus pie sekošām barošanas strāvām (A): 0,5-0,75-1-1,5-2-2,5-3-3,5-4-4,5-5. Katras barošanas strāvas vērtības iestādīšanai un frekvences nolasīšanai vēlams patērēt ne vairāk par 20... 30 sek, lai līdz mērījumu veikšanas beigām solenoīds nepaspētu ievērojami uzsildīt pētāmo magnētisko šķidrumu (skat. iepriekšējā paragrāfā).

5.5 Parauga temperatūras noteikšana, izmantojot tā piromagnētiskā koeficienta vērtību

Kad veikti iepriekšējā punktā paredzētie mērījumi, uzstādīt solenoīda barošanas strāvu 5A stabilizētas strāvas avota režīmā un sildīt solenoīdu līdz vijumu virsma sasniedz temperatūru $T = 60^{\circ} C$ (**nepārsniegt!**). Nolasīt ģenerators frekvenci.

5.6 Datu matemātiskā analīze

1. Lai veiktajiem frekvences mērījumiem $f(H)$ no strāvas I vērtībām iegūtu magnētiskā lauka intensitātes H vērtības, nepieciešams zināt solenoīda graduācijas formulu. Veicot magnētiskā lauka mērījumus ar Holla sensoru, dotā solenoīda graduēšana ir parādīta 1.att.



Att. 9: Solenoīda magnētiskā lauka atkarība no barošanas strāvas

Iegūto mērījumu punktu lineārā aproksimācija dod sakarību:

$$H[kA/m] \approx 14,42 \cdot I(A) \quad (33)$$

2. Pieņemot par zināmu, ka LC kontūra rezonanses frekvence, sensora spolei atrodoties vakuumā, ir $f_0=46,200 \text{ kHz}$, katrai H vērtībai aprēķināt $\Delta L(H)$, vienādojums (31):

$$\Delta L(H) = -2 \frac{\Delta f}{f_0} L_0, \quad (34)$$

kur $\Delta f = f(H) - f_0$ un $L_0=2,3 \text{ mH}$.

3. Izmantojot pirmā tuvinājuma sakarību [10]:

$$M(H) = \frac{\Delta L(0) - \Delta L(H)}{L_0} k, \quad (35)$$

kur $k \approx 106 \text{ kA/m}$ ir eksperimentāli iegūta konstante un $\Delta L(0) = \Delta L(H=0)$, pēc iegūtajiem $\Delta L(H)$ uzzīmēt magnetizācijas līkni $M = M(H)$.

4. Tālākā datu apstrāde paredz magnetizācijas līknes M_{teor} konstruēšanu, izmantojot Lanževēna funkciju, par variējamiem parametriem atstājot ferodaļiņas vidējo magnētisko diametru d_m un magnētiskās fāzes koncentrāciju φ_m . Līkne M_{teor} tiks uzklāta uz eksperimentāli iegūtās magnetizācijas līknes (vienādojums (34)), un variējamie parametri d_m un φ_m piemeklēti tā, lai iegūtu maksimāli labu abu magnetizācijas līkņu sakritību.

Lanževēna funkcijas argumentam ξ izteiksmē (14) pieņem, ka eksperiments tiek veikts temperatūrā $T=300 \text{ K}$, bet daļiņas magnētisko momentu m rēķina pēc (1). Uzskatot par zināmu ferodaļiņu materiālu (magnetīts), par zināmu jāņem daļiņas materiāla piesātinājuma magnetizācija $M_s=490 \text{ kA/m}$. Savukārt ferodaļiņas tilpums V tiek rēķināts pēc lodes tilpuma formulas, iekļaujot pirmo variējamo parametru d_m :

$$V = \frac{1}{6} \pi d_m^3. \quad (36)$$

Par cik d_m tiks meklēts robežās $5 \dots 20 \text{ nm}$, ieteicams, lai tā variēšanas sākuma vērtība tiktu izvēlēta no šī diapazona.

Kad matemātiski ir aprakstīts Lanževēna funkcijas arguments $\xi(H)$, katrai eksperimentā izmantotajai H vērtībai izrēķina M (t.i., M_{teor}) pēc (13). (Strādājot ar Microsoft Excel, hiperbolisko kotangensu var rakstīt kā $1/\tanh(\dots)$.) Vienādojumā (13) magnētiskā šķidruma piesātinājuma magnetizācija M_∞ satur otru variējamo parametru φ_M – kas tiks meklēts robežās $0,02 \dots 0,1$.

5. M_{teor} magnetizācijas līkni uzklāj uz eksperimentāli iegūtās magnetizācijas līknes, vienādojums (34). Variējot parametrus d_m un φ_m , novēro, ka φ_m nosaka līknes amplitūdu (kas arī viegli redzams no (13)), savukārt d_m nosaka līknes izliekumu. Panākt maksimālu abu magnetizācijas līkņu sakritību, variēšanas ceļā atrodot d_m un φ_m vērtības pētāmajam magnētiskā šķidruma paraugam.
6. Pēc (19) izrēķināt nanodaļiņu koncentrāciju φ , uzskatot par zināmiem aprēķinam nepieciešamos komponentu blīvumus:

$$\rho = 1,06 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_0 = 0,850 \text{ g/cm}^3 \text{ (petroleja laboratorijas temperatūrā)}$$

$$\rho_M = 5,25 \text{ g/cm}^3 \text{ (magnetīts)}$$

Atrast attiecību $\varphi_m \varphi$, kas rāda, cik lielai daļai no magnētiskā šķidruma cietās fāzes piemīt feromagnētiskās īpašības.

7. Pēc vienādojuma (33) atrast magnētiskā lauka intensitātes vērtību H_T , pie kuras magnētiskajam šķidrumam ir mainīta temperatūra. No iepriekš iegūtajiem rezultātiem atrast šim laukam atbilstošo parauga magnetizācijas vērtību $M_T = M(H_T)$. Pēc frekvences mērījumiem (ar uz bez lauka) saskaņā ar vienādojumiem (34), (35) atrast parauga magnetizācijas izmaiņu ΔM_T . Pēc piromagnētiskā koeficienta definīcijas formulas $\frac{1}{M_T} \frac{\Delta M_T}{\Delta T} = 0.003$ aprēķināt ΔT . Novērtēt atšķirību, par cik grādiem ir uzsilis solenoīds un magnētiskā šķidruma paraugs mēģenē.
8. Noformēt M un M_{teor} magnetizācijas līknes, un skaitliski iegūtos d_m , φ_m , φ_m/φ , ΔT kā laboratorijas darba “Magnētisko īpašību pētīšana magnētiskajos šķidrumos” iegūtos rezultātus.

6 Protokola paraugs un tā noformēšana

Protokola tabulu paraugos doti dati, kas neattiecas uz laboratorijas darba konkrēto magnētiskā šķidruma paraugu

Protokola pirmā tabula ietver no eksperimenta pierakstītos un izrēķinātos datus, kas nepieciešami magnetizācijas līknes konstruēšanai pēc sakarības (35):

pierakstītie dati		izrēķinātie dati		
I (A)	f (kHz)	H (kA/m) vien. (33)	ΔL (mH) vien. (34)	$M(H)$ (kA/m) vien. (35)
0	42,005	0	0,417684	0
0,5	43,676	7,21	0,251307	7,667792
0,75	44,181	10,815	0,201026	9,985108
1	44,511	14,42	0,168169	11,49939
1,5	44,871	21,63	0,132325	13,15134
2	45,059	28,84	0,113606	14,01403
2,5	45,172	36,05	0,102355	14,53255
3	45,251	43,26	0,094489	14,89506
3,5	45,306	50,47	0,089013	15,14745
4	45,348	57,68	0,084831	15,34017
4,5	45,383	64,89	0,081346	15,50078
5	45,406	72,1	0,079056	15,60632

Tabula 2: Protokola 1. tabula

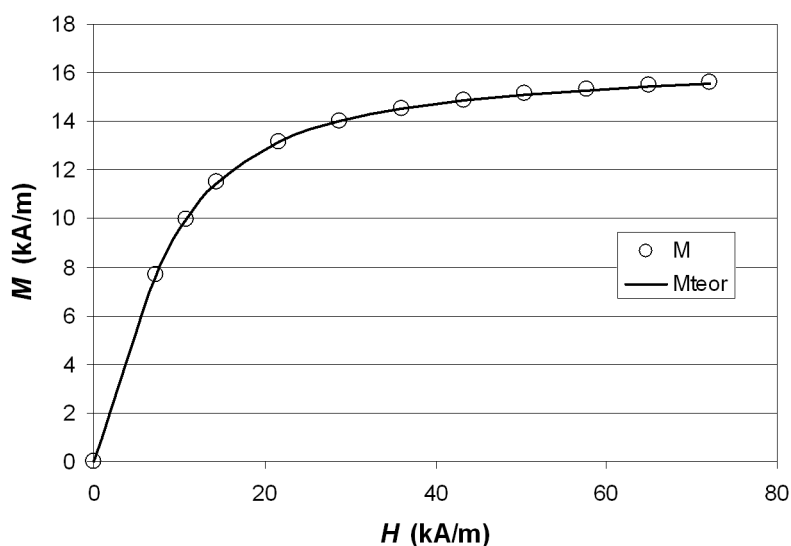
Protokola otrā tabula ietver datus, kas nepieciešami magnetizācijas līknes konstruēšanai M_{teor} pēc Lanževēna funkcijas:

variējamie parametri		izrēķinātie dati		
d (nm)	φ_m	H (kA/m) vien. (33)	ξ vien. (14)	M_{teor} (kA/m) vien (13)
14,2	0,036	0	0	0
		7,21	1,611183	7,656832
		10,815	2,416775	9,973584
		14,42	3,222367	11,47363
		21,63	4,83355	13,13604
		28,84	6,444734	13,99054
		36,05	8,055917	14,50437
		43,26	9,6671	14,84697
		50,47	11,27828	15,09169
		57,68	12,88947	15,27523
		64,89	14,50065	15,41798
		72,1	16,11183	15,53218

Tabula 3: Protokola 2. tabula

Magnetizācijas līkņu grafiks rāda eksperimentāli iegūtās magnetizācijas līknes $M(H)$ un teorētiski izveidotās $M_{teor}(H)$ sakritību:

Kā pierāda novērtējums un kontrolmērījumi, izstrādājamā laboratorijas darba vislielāko mērījumu/aprēķinu kļūdu rada parauga magnetizācijas izmaiņas dēļ tā piromagnētiskā koeficienta $\frac{1}{M} \frac{\delta M}{\delta t} \neq 0$. Mērījumu izdarīšanas gaitā barošanas strāva silda solenoīda tinumus, kas savukārt silda paraugu mēģenē. Ilgstoši laižot caur solenoīda tinumiem maksimālo barošanas strāvu, ir iespējams uzsildīt paraugu par 20₀ C virs laboratorijas temperatūras, kas izmaina mērāmo frekvenci par apm. 1 kHz. Tāpēc mērījumi, it sevišķi pie lielām solenoīda barošanas strāvām, ir izdarāmi ātri (skat. *Frekvences mērījumu izdarīšana bez ārēja magnētiskā lauka un Frekvences mērījumu izdarīšana solenoīda magnētiskajā laukā*). Ja kāds no šiem mērījumiem ir prasījis daudz laika (vairāk par 100 sek.), ieteicams atkārtot visu mērījumu sēriju, lai iegūtu frekvenču rādījumus apm. vienā parauga temperatūrā. Tādā gadījumā jāatkārto arī $f(H = 0)$ mērījums (skat. *Frekvences mērījumu izdarīšana bez ārēja magnētiskā lauka*).



Att. 10: Magnetizācijas līkņu grafiks

7 Vispārizglītojošie materiāli

7.1 Specifiskie drošības noteikumi

Laboratorijas darbs “Magnētisko īpašību pētīšana magnētiskajos šķidrumos” neietilpst bīstamo darbu kategorijā, kuru veikšanai būtu strikti jāievēro specifiski drošības noteikumi. Šajā darbā pielietotie elektriskie spriegumi ir mazāki par 30 V, nav arī augstu temperatūru klātbūtne.

Konkrētā magnētiskā šķidruma parauga sastāvdaļas ir petroleja un magnetīts, kas nav pieskaitāmas pie indīgām vielām. Tomēr noteikti jāievēro, ka aizliegts ņemt no mēģenes ārā aizbāzni un veikt jebkādu magnētiskā šķidruma pārliešanu! Magnētiskā šķidruma traipus ir ļoti grūti iztīrīt no apģērba u.c. virsmām.

7.2 Aparatūras raksturojums

Laboratorijas darbā tiek izmantota gan standarta aparatūra, gan LU Fizikas institūta “Siltuma un masas pārnese” laboratorijas spēkiem izveidotā. Pie standarta aparatūras pieskaitāms solenoīda barošanas avots “NSP-2050”, multimetri “TEN-MA 72-7745” un ģenerators barošanas 9V adapteris. Pašrocīgi izveidots ir kapacitatīvā trīspunkta LC ģenerators, sensora spole un solenoīds ar tā karkasu un pamatni.

Neviens no aparatūras elementiem nav raksturojams kā tāds, kas laboratorijas darba sekmīgai veikšanai prasītu specifiskas zināšanas par tā uzbūvi un darbības

principu.

Barošanas avota “NSP-2050” instrukcija atrodama laboratorijas darba LU e-studiju materiālos. Tā var noderēt konstantas strāvas režīma nodrošināšanai.

8 Magnētisko šķidrumu pielietojumi un pielietošanas grūtības

Daži magnētisko šķidrumu pielietojumi tika minēti jau ievada daļā, saistībā ar Latvijas Universitātes Fizikas institūta “Siltuma un masa pārnese” laboratorijas darba tematiku. Šai darba daļā tiek dots plašāks magnētisko šķidrumu pielietojumu apraksts, dalot to pēc pielietojuma tematikas.

Magnētisko šķidrumu izmantošana kļūst par arvien aktuālāku pielietojamo zinātņu jomu. Ir iespējams izdalīt divus galvenos magnētisko šķidrumu pielietojumu novirzienus: inženierzinātnes un biomedicīna.

Vienkāršākie magnētisko šķidrumu pielietojumi inženierzinātnēs saistās ar to mehānisko īpašību izmantošanu. Uz ūdens bāzēts magnētiskais šķidrums var tikt sasaldēts, un tā abrazīvo ferodaļiņu sadalījums var tikt vadīts saldēšanas procesā ar ārēju magnētisko lauku. Pētījumi šai jomā [8] dod daudzsološus rezultātus. Cits plaši izmantojams pielietojums attiecas uz magnētiskā šķidruma blīvslēgiem [15, 16]. Blīvēšana ar magnētisko šķidrumu ir jauns inženiertehniskais risinājums, kas sola atrisināt daudzas parastās blīvēšanas problēmas attiecībā uz statisko un dinamisko tehniskās iekārtas darba režīmu. Feromagnētiskais blīvslēgs sastāv no pastāvīgā magnēta, ferošķidruma un ass, kas tiek blīvēta. Salīdzinājumā ar parastiem blīvslēgiem, magnētiskā šķidruma blīvslēgam ir daudzas svarīgas priekšrocības: augsts hermētiskums, niecīga noplūde, mazs viskoza berzes spēks, maza smērēšana un ilgs kalpošanas laiks. Dažās tehniskās iekārtās magnētisko šķidrumu blīvslēgi jau tiek plaši lietoti, piem., datoru cieto disku hermetizēšanā un vakuuma hermetizēšanā.

Magnētisko šķidrumu lietošana augstas jaudas skaļruņos arī ir guvusi pielietojumu komerciālās izstrādēs (*Telefunken*, *Philips* u.c.). Iegremdējot skaļruņa galviņas spoli magnētiskajā šķidrumā, var tikt uzlabotas divas svarīgas skaļruņa tehniskās īpašības: nogludināta skaļruņa frekvenču raksturlielne (apslāpējot rezonanses pīķus) un nodrošināta daudz efektīvāka skaļruņa galviņas dzesēšana.

Uz eļļas bāzēti magnētiskie šķidrumi var tikt lietoti kā dzesējošais šķidrums mehāniskās griešanas un urbšanas procesos. Salīdzinot parastas minerāleļļas un magnētiskā šķidruma lietošanu šādos gadījumos, pētījumu autori nonāk pie rezultāta, ka uz eļļas bāzētu magnētisko šķidrumu lietošana ir apmēram divas reizes efektīvāka [17].

Ferošķidruma magnētiskās īpašības dod iespēju realizēt t.s. magnetodensimetrijas separāciju, kur šķidruma cēlājspēks ārēja magnētiskā lauka iedarbībā var tikt mainīts ļoti plašā diapazonā [18, 19]. Citi pielietojumi ir balstīti uz magneto-viskozo (magneto-reoloģisko) efektu: amortizatori, trieciena absorbētāji, bremzes un līdzīgas tehniskas izstrādnes [20, 21, 22, 23].

Magnētiskie šķidrumi tiek lietoti kā darba ķermenis dažādās mēriekārtās. Paāt-

rinājuma mērītājs (*R. E. Rosensweig*, 1969) tiek uzskatīts par pirmo šādu mēriekārtu. Tas sastāv no caurules, kas pildīta ar ferošķidrumu, un tajā peldošu pastāvīgo magnētu. ārējās induktivitātes spoles spēj reģistrēt pastāvīgā magnēta paātrinātu kustību ar relatīvo precizitāti līdz 10^{-4} ... 10^{-5} . Bez paātrinājuma mērītāja plaši pazīstams ir līmeņrādis, kuru veido ar magnētisko šķidrumu līdz pusei piepildīta caurulīte. Ja caurulīte neatrodas pilnīgi horizontālā stāvoklī, tās galos ir atšķirīgs magnētiskā šķidruma daudzums. Šī atšķirība var viegli un precīzi tikt mērīta ar uztītām induktivitātes spolēm caurulītes galos, izveidojot spoļu diferenciālo slēgumu.

Bez mēriekārtām jāatzīmē arī fizikālo lielumu pārveidotāji (konvertieri), kuros tiek izmantots magnētiskais šķidrums, piem., pārveidotājs no pieliktās strāvas uz spēku [24].

Specifisks magnētisko šķidrumu pielietošanas veids ir to izmantošana par darba vidi dažādās eksperimentāli pētnieciskās iekārtās. Piemēram, dažām pētnieciskām iekārtām ir nepieciešami šķidruma virsmas viļņi. Magnētiskajā šķidrumā viļņu ģenerēšana ir iespējama bez mehāniskas iedarbības, ar ārēju magnētisko lauku, kas sniedz daudzas priekšrocības. Magnētiskā šķidruma viļņu ģeneratori jau tiek izmantoti eksperimentālā iekārtā, kas pēta okeāna viļņu elektrostacijas darbību un lietderību [25].

Attiecībā uz ekoloģijas problēmām, kā galvenā jāpiemin ūdens attīrīšana no naftas produktu piesārņojuma. Attīrīšanas ideja balstās uz feropulvera iesmidzināšanu naftas produktu plēvē uz ūdens virsmas. Tādā veidā izveidojas ferošķidruma analogs, ko iespējams visai efektīvi savākt no ūdens virsmas ar magnēta palīdzību (uz attīrīšanas kuģiem uzstādītām lielām magnētiskām lentām). Veiktajos pētījumos [26] uz ūdens virsmas tika izvietota naftas produktu plēve 0,4... 3 mm biezā kārtā. Labākie plēves savākšanas rezultāti tika iegūti, izveidojot plēvē “erošķidrumu” ar apm. 1 kA/m piesātinājuma magnetizāciju un savākšanai izmantojot magnētus ar 0,15 T magnētisko indukciju. Pētījumu autori raksturo šādu ūdens attīrīšanas principu kā ļoti efektīvu.

Magnētiskā šķidruma bioloģiskie pielietojumi attiecas gan uz augiem, gan dzīvniekiem un cilvēkiem. Izmēģinājumi ar augiem pierāda, ka ferošķidrumi var aizvietot lielu daļu biostimulatīvo vielu [27]. Ievērojami var tikt uzlabota auga augšanas un attīstības regulēšana. Magnētisko šķidrumu pielietošanu dzīvo organismu terapijā ierobežo to iedarbība uz dzīvo organismu šūnu līmenī. Tomēr ir atrasti gadījumi, kad magnētisko šķidrumu pielietošana attaisnojas pēc iedarbības efektivitātes un nav destruktīva. Ir veikti dzīvnieku (zirgu, hiēnu, suņu) rētu dziedēšanas eksperimenti ar ferofluīda pielietošanu. Pētījuma autori [28] publicē sekojošu rezultātu – rētas sadziedēšanu 9 dienās ar ferošķidruma pielietošanu pret 12 dienām ar medicīniski klasisko dziedēšanas pulvera *Manis pulvis* lietošanu.

Pēdējā laikā tiek veikti plaši pētījumi vēža šūnu iznīcināšanā dzīvajos organismos ar hipertermijas palīdzību. Ir zināms, ka vēža šūnas atmirst 44... 47 °C

temperatūrā. Terapijas ideja ir injicēt dzīvajā organismā magnētisko šķidrumu un aizvadīt to (ar magnētiem) līdz vietai, kur atrodas iznīcināmās vēža šūnas. Uz šo organisma vietu iedarbojas ar spēcīgu rotējošu magnētisko lauku, kas izraisa ferodaļiņu rotēšanu. Enerģijas disipācijas rezultātā terapijai pakļautā vieta var tikt sasildīta līdz temperatūrai, kas iznīcina vēža šūnas.

Magnētisko šķidrumu pielietošana saistās ar daudzām grūtībām. Dažādās tehniskā ierīcēs galvenā neērtība ir graduācijas nelinearitāte attiecībā pret pētāmo lielumumu. Magnētiskā šķidruma magnetizācija ir atkarīga no magnētiskā lauka intensitātes, kas rada nelinearitāti magnētiskā spēka izteiksmē $F = \mu_0 M \Delta H$.

Otrs būtiskākais trūkums ir magnētiskā šķidruma fizikālo īpašību maiņa ilgākā laika periodā. Sevišķi tas attiecas uz koncentrētiem šķidrumiem, kuriem, tos ilgstoši lietojot, mainās viskozitāte un magnetizācija. Vienīgais veids šāda trūkuma novēršanai ir regulāra magnētiskā šķidruma nomaiņa pret svaigāku, kas bieži saistās ar lielām tehniskām grūtībām. Bez tam daudzos gadījumos tehniskā iekārta pēc magnētiskā šķidruma nomaiņas ir jāpārregulē vai jāpārgraduē. Pēdējos gados tiek izgatavoti magnētiskie šķidrumi ar daļiņām, kurām ir raksturīga ļoti vāja savstarpējā mijiedarbība, kas ievērojami palielina fizikālo īpašību noturību ilgstošā laika periodā.

Grūtības rada arī magnētiskā šķidruma brīvā virsma, kas veidojas daudzās ierīcēs. Brīvās virsmas īpašības principiāli atšķiras no paša šķidruma īpašībām. Daudzos sensoros tiek izmantota caurulīte, kas daļēji pildīta ar magnētisko šķidrumu, un uz šādu sistēmu iedarbojas magnētiskais lauks – paralēli vai perpendikulāri caurulītei. Pietiekami spēcīgs magnētiskais lauks, kas vērsts perpendikulāri caurulītei, var izjaukt magnētiskā šķidruma virsmas radiālo simetriju tik lielā mērā, ka sistēma var zaudēt kapilārās īpašības. Caurulītei paralēls magnētiskais lauks veidojas, ja ap to ir aptīta solenoidāla spolīte. Šajā gadījumā tiek izliekta šķidruma brīvā virsma, saglabājot radiālo simetriju.

Augstāk aprakstītās ir galvenās magnētisko šķidrumu pielietošanas grūtības. Bez tām var rasties vēl dažas specifiskas grūtības, kas ir tieši saistītas ar konkrēto ierīci. Tāpēc, konstruējot kādu iekārtu ar magnētiskā šķidruma pielietojumu, jāņem vērā arī nevēlamie efekti, kurus rada magnētiskā šķidruma īpašības.

Tomēr var secināt, ka magnētisko šķidrumu izmantošana principā ir iespējama ļoti daudzās jomās. Laboratoriju skaits pasaulē, kas veic zinātniskos un lietišķos pētījumus magnētisko šķidrumu tematikā, nemitīgi aug. Progresē arī magnētisko šķidrumu pagatavošanas tehnoloģija un kvalitāte.

Literatūras saraksts

- [1] E. Blums, A. Cebers, M. M. Maiorov, *Magnetic Fluids*, Walter de Gryuter, Berlin, New-York, 1997.
- [2] G. Kronkalns, *Formation and magnetic properties of Mn-Zn ferrites nanoparticles*, J. Magnetohydrodynamics, Vol. 39, No. 2, 215-223, 2003.
- [3] <http://www.ferrotecusa.com/>
- [4] <http://www.nanocoolers.com/>
- [5] Rosensweig R. E., *Ferrohydrodynamics*, Cambridge University press, 1985
- [6] J. P. Jolivet, R. Massart and J.-M. Fruchart, *Synthese et etude physicochimique de colloides magnetiques non surfactes en milieu aqueux*, Nouv. Journ. Chim., 1983, 7, N5, p. 325.
- [7] R. Massart, *Preparation of aqueous magnetic liquids in alkaline and acidic media*, IEEE Trans. Magn., 1981, MAG-17, p. 1247.
- [8] V. E. Fertman, *Magnitnye zhidkosti*, Vyshejschaya Shkola, Minsk, 1988.
- [9] M. Maiorov, E. Blums, H. Hanson, C. Johanson, *High Field Magnetization of the Colloidal Mn-Zn Ferrite*, J. Magn. and Magn. Materials, 1999, 201, p. 95-97.
- [10] I. Grants, A. Irbitis, G. Kronkalns, M. M. Maiorov, *Rheological Properties of Magnetite Magnetic Fluid*, J. Magn. and Magn. Materials, 1990, 85, p. 129-132.
- [11] Chechernikov V. I., *Magnitnie izmereniya*, Moskva, Moskovskii universitet, 387 lapp., 1969.
- [12] Nubert G. P., *Izmeritelnie preobrazovateli neelektricheskikh velichin*, Moskva, Energiya, 360 lapp., 1970.
- [13] Tarasov S. I., *Izmerenie parametrov magnitnih serdechnikov*, Moskva, Vichislitel'nyi centr AH CCCP, 108 lapp., 1967.
- [14] *Malogabaritnaya radioapparatura: spravochnik radiolyubitelya*, Kiev, Naukova dumka, 479 lapp., 1972.
- [15] E. Salje and R. Paulmann, *Proc. Annals of the CIRP*, 1988, 37, 2, p. 641-648.

- [16] Li Decai, Yuan Zuyi, *The theoretical study of reciprocating axle magnetic fluid seal*, J. Mech. Engineering, 1998, 1.
- [17] R. Moscovitz, *Dynamic sealing with magnetic fluid*, ALSE, 1974, 18 (2), p. 1150-1156.
- [18] V. V. Podgorkov, S. N. Smirnov, *The influence of magnetic fluids on metals machining*, In: 8th International Conference on Magnetic Fluids ICMF 8, Timisoara, Romania, June 29 - July 3, 1998, Abstracts, p. 385.
- [19] U. Andres, *Magnetohydrodynamic and Magnetohydrostatic Methods of Mineral Separation*, Wiley, New York, 1976.
- [20] Y. Zimmels, Y. Tuval and I. J. Lin, IEEE Trans. Magn., MAG-13 (4), 1977, p. 1045.
- [21] W. I. Kordonsky, *Magnetorheological effect as a base of new devices and technologies*, J. Magn. and Magn. Materials, 1993, 122, p. 395-398.
- [22] 22. D. Calarasu, C. Cotae and R. Olaru, *Magnetic fluid brake*, In: 8th International Conference on Magnetic Fluids ICMF 8, Timisoara, Romania, June 29 - July 3, 1998, Abstracts, p. 405.
- [23] V. G. Mogilevskij, *Elektromagnitnye poroshkovye mufty i tormoza*, Nauka, Moskwa, 1964.
- [24] J. D. Carlson, *Low-Cost MR Fluid Devices*, Proceedings of Actuator '98 - 6th Int. Conf. on New Actuators, H. Borgmann, ed., Bremen, 17-19 June 1998.
- [25] R. Olaru, D. Calarasu and C. Cotae, *Magnetic Fluid Application in Current to Force Converter*, In: 8th International Conference on Magnetic Fluids ICMF 8, Timisoara, Romania, June 29 - July 3, 1998, Abstracts, p. 402.
- [26] 26. N. C. Popa, L. Jorat, A. Sibli, *Ocean Waves Hydro-Electric Power Station. Experimental Model for Gravitational Electrical Generator on Magnetic Liquid Cushion*, In: 8th International Conference on Magnetic Fluids ICMF 8, Timisoara, Romania, June 29 - July 3, 1998, Abstracts, p. 419-422.
- [27] N. A. Morozov, Yu. I. Stradomsky, Yu. Ya. Chtchelykalov, *Cleaning of the Water Surface from Petroleum Products by means of Magnetization of them*, In: 8th International Conference on Magnetic Fluids ICMF 8, Timisoara, Romania, June 29 - July 3, 1998, Abstracts, p. 400. N. A. Morozov, Yu. I. Stradomsky, Yu. Ya. Chtchelykalov, *Cleaning of the Water Surface from Petroleum Products by means of Magnetization of them*, In: 8th International

Conference on Magnetic Fluids ICMF 8, Timisoara, Romania, June 29 - July 3, 1998, Abstracts, p. 400.

- [28] 28. F. Sala, M. Goian, Doina Bica, *Changes induced by magnetic fluids in some horticultural species while passing through the phenologic stages*, USAMVB, Agricultura, vol. XXIX, Timisoara 1997.