

Teorētiskais pamatojums:

Magnētiskais šķidrums definē ultrastabili koloidāli izšķīdinātas ferodaļiņas (magnētiskās daļiņas) nesošajā šķīdumā. Pateicoties Brauna kustībai daļiņas nenosēžas gravitācijas vai magnētiskajā laukā. Lai novērstu daļiņu agregāciju, katru daļiņu pārklāj ar surfaktanta slāni vai arī ap katru daļiņu izveido elektrisko dubultslāni.

Katra ferodaļiņa (apmēram 10 nm diametrā) ir veidota no feromagnētiska materiāla (Fe, Ni, Co...) un, pateicoties pareizi izvēlētam izmēram, tiek uzskatīta par viendomēnu. Tāpēc, pietiekoši tālu no Kirī punkta, katru ferodaļiņu raksturo pastāvīgs magnētiskais moments:

$$m = M_S V,$$

kur M_S – daļiņas materiāla piesātinājuma magnetizācija, V – daļiņas tilpums.

Ārpus ārēja magnētiskā lauka iedarbības, pietiekoši liels magnētiskā šķidruma tilpums (kas satur daudzas daļiņas) nav makroskopiski magnetizēts, jo tā daļiņas ir orientētas brīvos virzienos. Ārējs magnētiskais lauks cenšas orientēt daļiņu magnētiskos momentus, kas izraisa magnētiskā šķidruma makroskopisku tilpuma magnetizāciju.

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

$$M = M_\infty (Cth(\xi) - 1/\xi),$$

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

$$\xi = \mu_0 \frac{mH}{k_B T}.$$

Ferošķidruma magnētiskā tilpuma koncentrācija φ_M vienmēr zemāka par nanodaļiņu koncentrāciju φ :

$$\varphi = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_M - \rho_0},$$

kur ρ , ρ_0 , ρ_M ir attiecīgi magnētiskā šķidruma, nesošā šķidruma un magnētiskā materiāla blīvums.

Lai pētītu ferošķidruma magnētiskās īpašības kā sensoru var izmantot indukcijas spoli, kas atrodas pētāmajā vidē, jo tā reaģē uz vides magnētiskās uzņēmības izmaiņām. Mainoties vides magnētiskajai uzņēmībai spole visefektīvāk no saviem raksturlielumiem maina induktivitāti. Šajā darbā tiek mērīta vienas spoles induktivitāte. 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. Kontūra frekvenci, spoles induktivitāti un to izmaiņas saista sakarība:

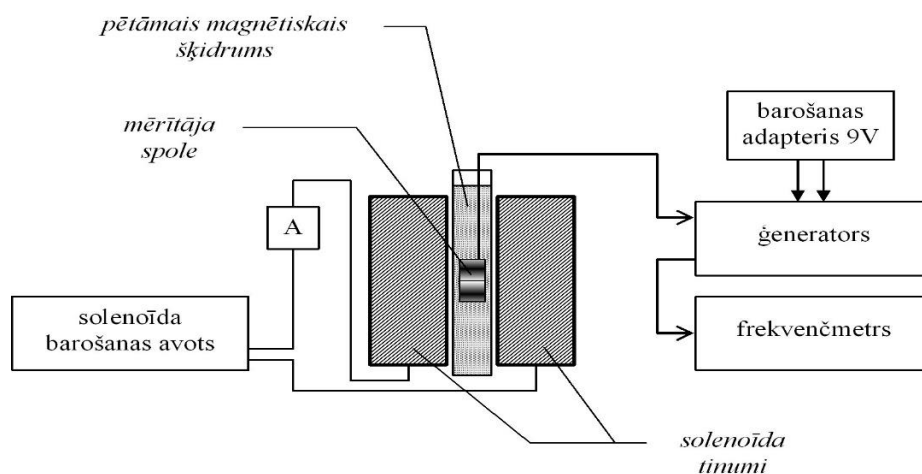
$$\Delta f/f \approx -0.5 \Delta L/L$$

Magnētiskā šķidruma magnetizāciju var aprēķināt sekojoši:

$$M(H) = k(\Delta L(0) - \Delta L(H))/L_0,$$

kur $k = 106 \text{ kA/m}$ un $\Delta L(0) = \Delta L(H = 0)$.

Darbā izmantotā eksperimentāla iekārta shematiski parādīta Attēlā 1.



Attēls 1. Laboratorijas darba eksperimentālā iekārta.

Darba uzdevumi:

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

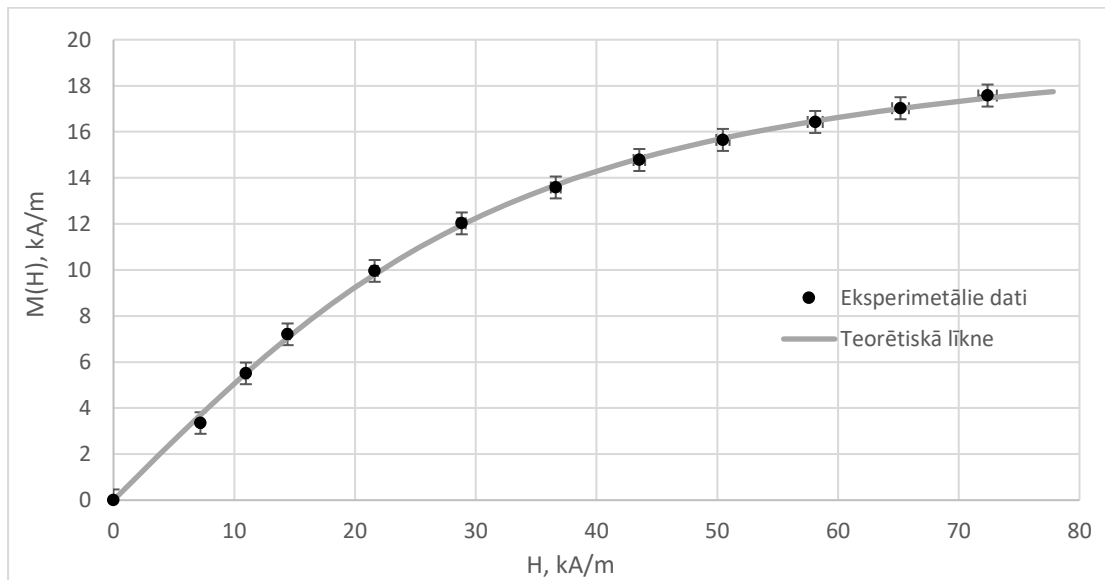
Mērījumu rezultāti un datu apstrāde:

Tabula 1. Ferošķidruma magnetizācija atkarībā no magnētiskā lauka intensitātes. Ar pelēku krāsu atzīmēts mērījums pie 60 °C lielas solenoīda virsmas temperatūras.

$I,$ A	$\Delta I,$ A	$f,$ kHz	$\Delta f,$ kHz	$H,$ kA/m	$\Delta H,$ kA/m	$\delta L,$ mH	$\Delta \delta L,$ mH	$M,$ kA/m	$\Delta M,$ kA/m
0.00	0.003	41.79	0.07	0.00	0.04	0.4391	0.0071	0.00	0.47
0.50	0.008	42.52	0.07	7.21	0.12	0.3664	0.0072	3.35	0.47
0.76	0.011	42.99	0.07	10.96	0.15	0.3196	0.0073	5.51	0.47
1.00	0.013	43.36	0.07	14.42	0.19	0.2828	0.0073	7.20	0.47
1.50	0.018	43.96	0.07	21.63	0.26	0.2230	0.0074	9.96	0.47
2.00	0.023	44.41	0.07	28.84	0.33	0.1782	0.0074	12.02	0.47
2.54	0.028	44.75	0.08	36.63	0.41	0.1444	0.0074	13.58	0.48
3.02	0.033	45.01	0.08	43.55	0.48	0.1185	0.0075	14.78	0.48
3.50	0.038	45.20	0.08	50.47	0.55	0.0996	0.0075	15.65	0.48
4.03	0.043	45.37	0.08	58.11	0.62	0.0826	0.0075	16.43	0.48
4.52	0.048	45.50	0.08	65.18	0.70	0.0697	0.0075	17.02	0.48
5.02	0.053	45.62	0.08	72.39	0.77	0.0577	0.0075	17.57	0.48
5.03	0.053	45.49	0.08	72.53	0.77	0.0707	0.0075	16.98	0.48

Tabula 2. Teorētiskās magnetizācijas līknes konstruēšana.

d_m, nm	φ_M	$H, kA/m$	ξ	$M_{teor}, kA/m$
9.788 ± 0.061	0.04395 ± 0.00037	0.00	0.00	0.00
		7.21	0.53	3.71
		10.96	0.80	5.51
		14.42	1.05	7.05
		21.63	1.58	9.81
		28.84	2.11	11.95
		36.63	2.67	13.69
		43.55	3.18	14.84
		50.47	3.68	15.72
		58.11	4.24	16.47
		65.18	4.76	17.01
		72.39	5.28	17.46



Attēls 2. Ferošķidruma magnetizācijas līkne.

Aprēķinu piemēri:

- 1) Strāvas stipruma kļūda (0.5 A lielai strāvai):

$$\Delta I = 0.01I + 0.003 = 0.01 \cdot 0.5 + 0.003 = 0.008 \text{ A}$$

- 2) LC kontūra rezonanses frekvences kļūda:

$$\Delta f = 0.001f + 0.03 = 0.001 \cdot 42.52 + 0.03 = 0.07 \text{ kHz}$$

- 3) Solenoīda radītā magnētiskā lauka intensitāte:

$$H = 14.42 \cdot I = 14.42 \cdot 0.5 = 7.21 \text{ kA/m}$$

- 4) Spoles induktivitātes izmaiņa:

$$\delta L = -2 \frac{f(H) - f_0}{f_0} L_0 = -2 \frac{42.52 - 46.2}{46.2} 2.3 = 0.3664 \text{ mH}$$

- 5) Ferošķidruma magnetizācija:

$$M = \frac{\delta L_{H=0} - \delta L}{L_0} k = \frac{0.4391 - 0.3664}{2.3} 106 = 3.35 \text{ kA/m}$$

- 6) Lanževēna funkcijas arguments:

$$\xi = \frac{\mu_0 \pi d_m^3 M_S H}{6 T k_B} = \frac{\mu_0 \pi d_m^3 \cdot 490 \cdot 7.21 \cdot 10^6}{6 \cdot 300 \cdot k_B} = 0.53$$

- 7) Ferošķidruma magnetizācija teorētiski:

$$M_{teor} = \varphi_M M_S \left(Cth(\xi) - \frac{1}{\xi} \right) = 0.04395 \cdot 490 \left(Cth(0.53) - \frac{1}{0.53} \right) = 3.71 \text{ kA/m}$$

- 8) Nanodaļiņu koncentrācija ferošķidrumā:

$$\varphi = \frac{1.06 - 0.85}{5.25 - 0.85} = 0.0477$$

- 9) Ferošķidruma cietās fāzes daļa, kam piemīt feromagnētiskās īpašības:

$$\frac{\varphi_M}{\varphi} = \frac{0.04395}{0.0477} = 0.9208$$

10) Ferošķidruma temperatūras izmaiņa uzsildot spoli līdz 60 °C (I=5A):

$$\Delta T = \frac{M - M_{60^{\circ}\text{C}}}{0.003M_{60^{\circ}\text{C}}} = \frac{M - \frac{\delta L_{H=0} - \delta L_{60^{\circ}\text{C}}}{L_0} k}{0.003M_{60^{\circ}\text{C}}} = \frac{17.57 - \frac{0.4391 - 0.0707}{2.3} 106}{0.003 \frac{0.4391 - 0.0707}{2.3} 106} = 11.71 \text{ K}$$

Rezultāti:

$$\begin{aligned} d_m &= (9.788 \pm 0.061) \text{ nm}, r = 0.62\% \\ \varphi_M &= (0.04395 \pm 0.00037), r = 0.84\% \\ \varphi_M/\varphi &= (0.9209 \pm 0.0077), r = 0.84\% \\ \Delta T &= (11.71 \pm 0.40), r = 3.42\% \end{aligned}$$

Secinājumi:

Laboratorijas darbā tika uzņemta magnētiskā šķidruma magnetizācijas līkne, kuru izmantojot noteikts ferodaļiņas vidējais magnētiskais diametrs un magnētiskās fāzes koncentrācija šķidrumā. Aprēķināta arī ferošķidruma temperatūras izmaiņa, kad to aptverošās spoles, kas rada magnētisko lauku šķidrumā, virsmas temperatūra palielināta līdz 60 °C.

Magnetizācijas līknes uzņemšana parādīta Tabulā 1. Izmantojot iegūtos datus, tiem tika piedzīta teorētiski sagaidāmā Lanževēna funkcija, kā rezultātā tika iegūtas vērtības ferodaļiņas vidējam magnētiskajam diametram un magnētiskās fāzes koncentrācijai (Tabula 2). Iegūtā diametra vērtība atbilst tipiskām magnētiskajos šķidrumos sastopamajām (5-20 nm). Izmantojot magnētiskās fāzes koncentrācijas vērtību aprēķināts cik lielai daļai no ferošķidruma cietās fāzes piemīt feromagnētiskās īpašības, iegūta vērtība – 0.92. Tas nozīmē, ka ne visa šķidrumā esošā individuālā daļiņa ir feromagnētiska, kas ir saprotams ar to, ka ap daļiņu ir surfaktanta – vielas, kas neļauj ferodaļiņām savā starpā salipt – slānis. Attēlā 2 uzskatāmi attēlota eksperimentāli iegūtās magnetizācijas līknes sakritība ar teorētiski piedzīto. Novērojams, ka sākumā (pie mazām magnētiskā lauka vērtībām) līknei ir lineārs raksturs. Arvien palielinot lauku, magnetizācijas izmaiņas ātrums samazinās (tiecas uz piesātinājumu). Šī magnetizācijas tieksme uz konstantu vērtību skaidrojama ar to, ka pie pietiekami lielās magnētiskā lauka intensitātes pilnīgi visas ferodaļiņas ir orientētas lauka virzienā un vairs nav iespēju palielināt magnetizāciju.