

7. Feromagnetiko Kiuri temperatūros nustatymas

Užduotis:

- 1) Ištirti įtampos antrinėje transformatoriaus apvijoje ir magnetinio lauko indukcijos feromagnetike priklausomybes nuo feromagnetiko temperatūros.
- 2) Nustatyti Kiuri temperatūrą tiriamajam feromagnetikui.
- 3) Nustatyti feromagnetiko magnetinę skvarbą laboratorijos temperatūroje.

Pagrindiniai teoriniai klausimai:

- 1) Feromagnetikai ir jų magnetinės savybės.
- 2) Feromagnetinių savybių priklausomybė nuo temperatūros.
- 3) Feromagnetikų Kiuri temperatūra ir jos fizikinė prasmė.
- 4) Feromagnetiniai domenai.

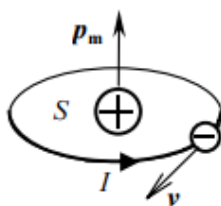
Teorinis įvadas:

Eksperimentai rodo, kad medžiagoje magnetinis laukas yra kitoks negu vakuume. Tai rodo, kad medžiaga, patekusi į išorinį magnetinį lauką, pati kuria savo magnetinį lauką, kuris vektoriškai sumuojasi su išoriniu lauku. Sakoma, kad medžiagos magnetiniame lauke įmagnetėja. Įmagnetėjančios medžiagos vadinamos magnetikais. Magnetinio srauto tankį vakuume pažymėkime \vec{B}_0 , medžiagos kuriamo lauko magnetinio srauto tankį – \vec{B}' , magnetinio srauto tankį medžiagoje \vec{B} . Tada

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' . \quad (1)$$

Žinome, kad laidininku tekanti elektros srovė kuria nuostovųjį magnetinį lauką. Kokios gi magnetikuose tekančios srovės sukuria lauką B' ? Tos srovės buvo pavadintos molekulinėmis srovėmis. Jų prigimtis gali būti tokia: i) elektronų sukimasis aplink branduolius, ii) elektronų sukimasis aplink savo ašis (elektronų sukiniai), iii) branduolius sudarančių protonų ir neutronų sukiniai. Aplink branduolį skriejantis elektronas kuria magnetinį lauką panašiai, kaip apskritas kontūras su srove. Jei elektrono sukimosi sąlygojamos srovės stipris I , o orbitos apjuosiamas plotas S , tai orbitinis magnetinis momentas

$$\vec{p}_m = I\vec{S} . \quad (2)$$



1 pav. Elektrono sukimosi apie branduolį sąlygojamas orbitinis magnetinis momentas.

Daugelio medžiagų atomai turi savo magnetinius momentus. Juos sąlygoja elektronų skriejimas aplink branduolius uždromis elipsinėmis orbitomis, taip pat elektronų sukiniai. Nesant išorinio magnetinio lauko, atomų magnetiniai išsidėsto netvarkingai, ir jų kuriamas magnetinis laukas pasinaikina. Išorinis magnetinis laukas stengiasi orientuoti atomų magnetinius momentus panašiai, kaip kontūrą su srove, todėl medžiaga įmagnetėja. Įmagnetėjimo didumą apibūdina medžiagos tūrio vieneto magnetinis momentas, vadinamas įmagnetėjimo vektoriumi:

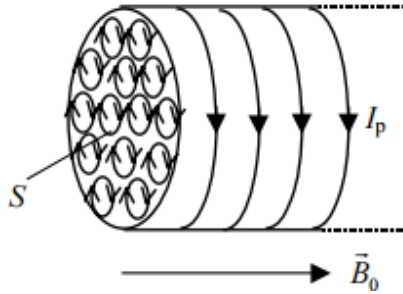
$$\vec{J} = \frac{\sum_i \vec{p}_{mi}}{V}. \quad (3)$$

Čia $\sum_i \vec{p}_{mi}$ yra V tūryje esančių atomų magnetinių momentų vektorinė suma.

Kad būtų paprasčiau skaičiuoti, imkime ilgo ritinio formos magnetiko gabalėlį. Tarkime, kad išorinis magnetinis laukas \vec{B}_0 yra lygiagretus su ritinio ašimi, o atomų magnetiniai momentai orientuoti viena kryptimi. Ant elektronų orbitų pažymėtos rodyklės rodo skriejančių elektronų sąlygotos elektros srovės kryptį. Jei medžiaga vienalytė, tūryje esančių kaimyninių atomų srovės „teka“ priešingomis kryptimis, todėl jų sukurti magnetiniai laukai vienas kitą kompensuoja. Tokios kompensacijos nėra atomams, esantiems prie ritinio šoninio paviršiaus. Todėl galima tarti, kad aplink ritinį teka tam tikra paviršinė srovė I_p , kuri ir sukuria magnetinį lauką \vec{B}' . To lauko magnetinio srauto tankį galima apskaičiuoti pagal solenoido formulę, vietoj IN įrašant I_p :

$$B' = \frac{\mu_0 I_p}{L} = \mu_0 j_p. \quad (4)$$

Čia $j_p = I_p/L$ – paviršinė srovė, tenkanti ritės ilgio vienetu, dar vadinama paviršinės srovės tankiu. Ritinio skerspjūvio plotą pažymėkime S . Tada paviršinės srovės sąlygotas ritinio magnetinis momentas $p_{m(\text{ritinio})} = I_p S$.



2 pav. Paviršinė srovė magnetike.

Tuomet įmagnetėjimo vektoriaus modulis:

$$J = \frac{p_{m(ritinio)}}{V} = \frac{I_p S}{LS} = \frac{I_p}{L} = j_p. \quad (5)$$

Taigi, \$\vec{B}' = \mu_0 \vec{J}\$ ir įrašę į (1) gauname

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{J}. \quad (6)$$

Čia \$\mu_0\$ – magnetinė konstanta (arba vakuomo magnetinė skvarba). Nors skaičiavimus atlikome tarę, kad magnetikas yra ilgo cilindro formos, tačiau jie tinka ir magnetiku užpildytai begalinei aplinkai.

Medžiagos įmagnetėja veikiant išoriniam magnetiniam laukui, todėl \$\vec{J} \sim \vec{B}_0\$. Proporcingumo koeficientas priklauso nuo medžiagos rūšies. Kad jis būtų nedimensinis dydis, užrašoma taip:

$$\vec{J} = \frac{\chi}{\mu_0} \vec{B}_0. \text{ Dydis } \chi \text{ vadinamas magnetiniu jautriu.}$$

Įrašę į (6) gauname

$$\vec{B} = (1 + \chi) \vec{B}_0. \quad (7)$$

Medžiagų magnetinėms savybėms apibūdinti naudojamas ir kitas dydis, vadinamas magnetine skvarba (\$\mu\$). Jis parodo, kiek kartų magnetinio srauto tankis medžiagoje yra didesnis negu vakuume:

$$\mu = \frac{\vec{B}}{B_0}. \text{ Iš čia } \mu = 1 + \chi. \quad (8)$$

Feromagnetikai – tai medžiagos, kurių magnetinė skvarba bei magnetinis jautris labai dideli (\$\mu \gg 1\$, \$\chi \gg 0\$). Feromagnetikai yra kai kurie metalai (Fe, Ni, Co, Gd) bei junginiai (Fe₃O₄,

CrTe, MnSe ir kt.). Feromagnetinių medžiagų įmagnetėjimas aiškinamas domenų teorija. Feromagnetikuose yra nedidelės savaiminio įmagnetėjimo sritys, vadinamos domenais. Domenų įmagnetėjimą sąlygoja elektronų magnetiniai momentai, kurie, medžiagos temperatūrai esant 0 K, orientuojami viena kryptimi. Taigi, domenai įmagnetėja savaime iki išotinimo. Taip yra dėl to, kad elektronų magnetiniai momentai tarpusavyje sąveikauja ir jiems orientavusis lygiagrečiai vieniems kitų atžvilgiu, pasiekama mažiausios pilnutinės sistemos energijos būseną.

Kylant medžiagos temperatūrai, savaiminis įmagnetėjimas mažėja, kol pasiekus temperatūrą, vadinamą **Kiuri temperatūra**, įvyksta fazinis virsmas – medžiaga netenka savo feromagnetinių savybių ir tampa paprastu paramagnetiku. Tai įsivyravusio šiluminio molekulių judėjimo, kuris nustelbia domenų tarpusavio sąveiką, pasekmė.

Soties atveju įmagnetėjimo išraiška pagal (6) formulę gali būti užrašoma taip:

$$J_s = \frac{B_s}{\mu_0} - H_s. \quad (9)$$

Čia H_s -magnetinio lauko stiprio vertė vakuume, B_s -magnetinės indukcijos soties vertė medžiagoje. Be to, $\vec{B}_s = \mu\mu_0\vec{H}_s$ ir $\frac{\vec{B}_s}{\mu_0} = \mu\vec{H}_s$.

Kadangi feromagnetinėms medžiagoms $\mu \gg 1$, tai galima teigti, kad

$$\frac{B_s}{\mu_0} \gg 1 \text{ ir } J_s \approx \frac{B_s}{\mu_0}. \quad (10)$$

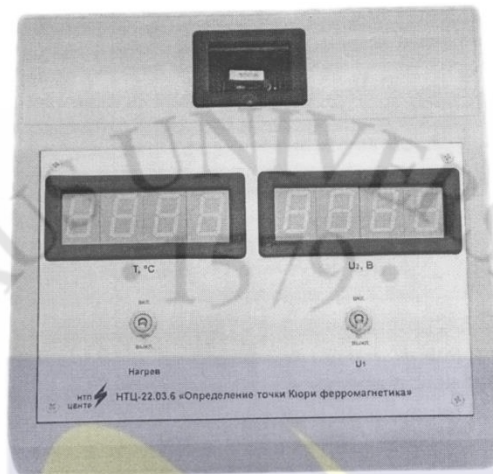
Eksperimento metodika

Tiriamasis bandinys – transformatoriaus šerdis, pagaminta iš mangano – cinko ferito. Šiai medžiagai būdinga žema Kiuri temperatūra, dėl to ji puikiai tinka Kiuri temperatūros nustatymui mokomosios laboratorijos sąlygomis.

Darbo įranga susideda iš transformatoriaus šerdies ir prietaisų skydelio, kurį sudaro termometras, voltmetras ir jungikliai – vienas, skirtas feromagnetiko kaitinimo įjungimui/išjungimui, o kitas įtampos tiekimui į pirminę transformatoriaus apviją.

Tiriamasis transformatorius su feromagnetine šerdimi susideda iš dviejų apvijų – įmagnetinančios N1 ir matuojamosios N2. Įjungus jungiklį U1 įtampa tiekama pirminei apvijai (įtampa pastovi viso eksperimento metu). Įtampa, indukuota antrinėje apvijoje, fiksuojama voltmetru U2.

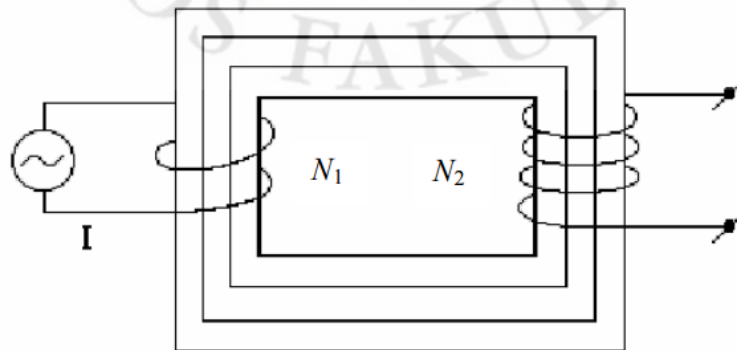
Transformatoriaus šerdies temperatūra matuojama temperatūros jutikliu. Analoginis signalas iš jutiklio perduodamas į matavimo prietaisą esantį keitiklį, kuris signalą paverčia skaitmeniniu. Matavimo duomenys registruojami Celsijaus laipsniais (absoliutinė temperatūros matavimo paklaida $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$). Matuojamų dydžių (temperatūros T ir įtampos antrinėje apvijoje U_2) vertės rodomos prietaiso ekrane.



3 pav. Laboratorinio darbo maketas.

Kaitinimas pradamas atitinkamą jungiklį perjungus į padėtį „Kaitinimas“. Kaitinimo temperatūra apribota iki 100°C . Įtampos tiekimas į pirminę transformatoriaus apviją įjungiamas analogiškai – tam skirtą jungiklį perjungus į padėtį „U1“.

Kylant temperatūrai, įtampa antrinėje apvijoje mažėja – tai susiję su šerdies feromagnetinių savybių silpnėjimu dėl temperatūros didėjimo.



4 pav. Tiriamo transformatoriaus schema.

Transformatoriaus veikimo principas pagrįstas Faradėjaus elektromagnetinės indukcijos dėsniu, kuris teigia, jog uždarame kontūre indukuota elektrovara yra proporcinga magnetinio srauto, kertančio tą kontūrą, kitimo spartai, o dėl šios elektrovaros kontūre atsiradusios elektros srovės kryptis yra tokios krypties, kad jos kuriamas magnetinis laukas mažintų ją sukėlusio magnetinio lauko kitimą. Transformatorių sudaro dvi apvijos – pirminė ir antrinė suvytos ant feromagnetinės šerdies (4 pav.). Panagrinėkime neapkrautą transformatorių, t.y. tokį, kurio antrinės apvijos grandinė nesujungta. Jei pirminė apvija prijungta prie kintamosios įtampos U_1 šaltinio, tai joje ima tekėti kintamoji elektros srovė I , kuri šerdyje kuria kintamąjį magnetinį lauką. Priėmus prielaidą, kad transformatoriuje magnetinės sklaidos nėra, magnetinis srautas, kertantis abi apvijas yra toks pats. Tuomet elektrovaros, indukuotos pirminėje ir antrinėje apvijose gali būti užrašytos pasinaudojus Faradėjaus elektromagnetinės indukcijos dėsniu:

$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}.$$

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}.$$

Čia N_1 ir N_2 - pirminės ir antrinės transformatoriaus apvijų vijų skaičiai.

Užrašykime lygtį pagal antrąją Kirchhofo taisyklę pirminės apvijos grandinei: $U_1 + \varepsilon_1 = I(X_1 + R_1)$. X_1 – grandinės reaktyvioji varža. R_1 – grandinės aktyvioji (ominė) varža. Tokiu atveju, kai $\varepsilon_1 \gg I(X_1 + R_1)$, galima užrašyti, kad $U_1 \approx -\varepsilon_1$. Kadangi antrinėje apvijoje elektros srovė neteka, tai $U_2 = -\varepsilon_2$. Tokiu būdu transformacijos koeficientas k yra lygus:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (11)$$

Formulė išvesta tobulam transformatoriui, kai visas magnetinis srautas eina per abi apvijas. Ši formulė ima nebegalioti Kiuri taško aplinkoje, nes susilpnėjus šerdies magnetinėms savybėms atsiranda magnetinio srauto sklaida – ji nebeužtikrina vienodo srauto, kertančio abi apvijas. Dėl šios priežasties stebimas įtampos mažėjimas antrinėje apvijoje, nors pirminės apvijos įtampa pastovi.

Įjungus elektros srovę pirminėje transformatoriaus apvijoje, ji ima kurti magnetinį lauką, dėl kurio įsimagnetina feromagnetinė šerdis. Tokiu atveju magnetinio lauko, kuriamo pirminės apvijos, stipris yra lygus magnetinio lauko, esančio feromagnetinėje šerdyje, stipriui. Kiekybiškai šį dydį galima aprašyti pasinaudojus solenoido formule:

$$H = \frac{IN_1}{L} = In_1. \quad (12)$$

Čia I -pirminė apvija tekančios elektros srovės stipris, N_1 -pirminės apvijos vijų skaičius, L -apvijos ilgis, n_1 -vijų skaičius tenkantis ilgio vienetui.

Kadangi pirminė apvija įjungta į kintamosios srovės šaltinį, tai srovės stiprio joje priklausomybė nuo laiko yra harmoninė funkcija:

$$I(t) = I_{\max} \sin(\omega t), \quad (13)$$

kur $\omega = 2\pi\nu$, $\nu = 50$ Hz (tinklo dažnis).

Magnetinis srautas, kertantis feromagnetinės šerdies skerspjūvį, turi kisti pagal tą patį dėsnį:

$$\phi(t) = \phi_{\max} \sin(\omega t). \quad (14)$$

Maksimalus magnetinis srautas, kertantis feromagnetinės šerdies skerspjūvį, gali būti išreikštas per magnetinio lauko indukcijos šerdyje maksimalią vertę ir šerdies skerspjūvio plotą: $\phi_{\max} = B_{\max} S$.

Kadangi abi transformatoriaus apvijas kerta vienodas magnetinis srautas, tai dėl jo kitimo antrinėje apvijoje indukuotą elektrovarą galima užrašyti taip:

$$\varepsilon = -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 \frac{d(\phi_{\max} \sin(\omega t))}{dt} = -N_2 \frac{d(B_{\max} \sin(\omega t))}{dt} = -N_2 \omega B_{\max} S \cos(\omega t). \quad (15)$$

Amplitudinė indukuotos elektrovaros vertė:

$$\varepsilon_{\max} = N_2 \omega B_{\max} S. \quad (16)$$

Iš čia:

$$B_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max}}{N_2 \omega S}. \quad (17)$$

Prie antrinės apvijos prijungtas voltmetras rodo ne amplitudinę įtampos vertę, o efektingę $U_2 \approx \varepsilon_{\text{ef}}$, tad

$$B_{\max} = \frac{U_2 \sqrt{2}}{N_2 \omega S} = \frac{U_2 \sqrt{2}}{2\pi\nu S N_2}. \quad (18)$$

Taip yra todėl, nes $\varepsilon_{\max} = \varepsilon_{\text{ef}} \sqrt{2}$.

Tyrimo eiga:

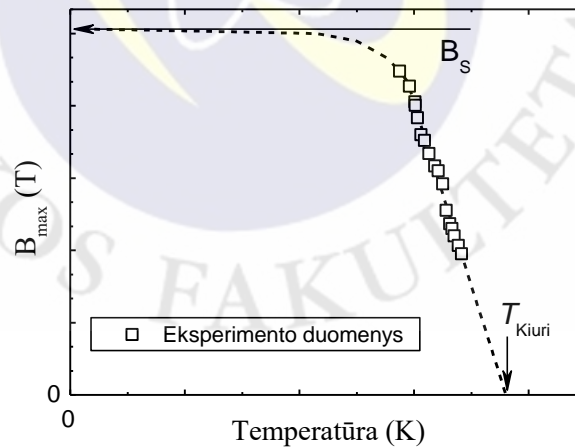
- 1) Įjunkite stendą į vienfazės kintamosios 220 V įtampos tinklą.
- 2) Jungikliu, esančiu skydelio gale, įjunkite stendo maitinimą.
- 3) Jungikliais „Kaitinimas“ ir „U1“ įjunkite kaitinimą ir įtampos tiekimą pirminei apvijai.
- 4) Temperatūros T , °C ir įtampos U_2 duomenis rašykite į lentelę.

Nr.	T , °C	T ,K	U_2 , V	B_{\max} , T
1.				
2.				
3.				

- 5) Nubrėškite efektinės įtampos vertės U_2 antrinėje apvijoje priklausomybę nuo temperatūros (Kelvino skalėje) $U_2=f(T)$.
- 6) Pagal (18) formulę apskaičiuokite magnetinės indukcijos B_{\max} vertes kiekviename temperatūroje.

S – feromagnetinės šerdies skerspjūvio plotas; $S=18 \text{ mm}^2$, N_2 – antrinės apvijos vijų skaičius; $N_2=500$.

- 7) Nubrėškite magnetinės indukcijos B_{\max} priklausomybę nuo temperatūros.



5 pav. Magnetinės indukcijos soties vertės ir Kiuri temperatūros nustatymo pavyzdys.

8) Ekstrapoliuokite B_{\max} priklausomybę nuo temperatūros iki susikirtimo su temperatūros ašimi ir nustatykite Kiuri temperatūrą tiriamajai medžiagai. Pavyzdys pateiktas 5 paveiksle.

9) Pagal (11) formulę nustatykite vijų skaičių pirminėje apvijoje:

Skaičiavimams imkite įtampos U_2 vertę pradinėje temperatūroje.

$N_2=500$, $U_1=12$ V.

10) Apskaičiuokite magnetinio lauko stiprį feromagnetinėje šerdyje, esant pradinei (laboratorijos) temperatūrai:

$$H = \frac{IN_1}{L};$$

N_1 – pirminės apvijos vijų skaičius;

I – apvija tekančios srovės stipris*;

L – apvijos ilgis; $L=2$ cm.

*Srovės, tekančios pirmine apvija, stipris suskaičiuojamas pagal Omo dėsnį: $I = \frac{U_1}{R}$;

R – pirminės apvijos varža; $R=300 \Omega$.

11) Apskaičiuokite tiriamo feromagnetiko magnetinę skvarbą esant pradinei (laboratorijos) temperatūrai:

$$\mu = \frac{B_{\max}}{\mu_0 H}.$$

Atlikę eksperimentą nepamirškite išjungti stendo maitinimo!