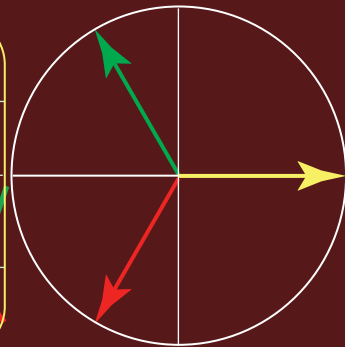
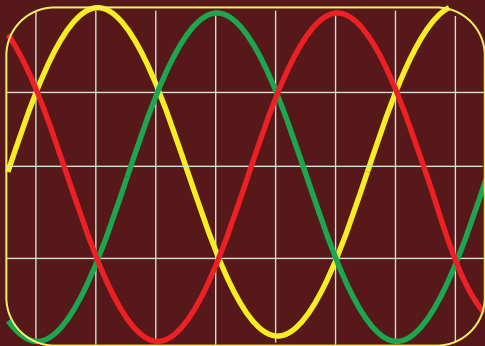
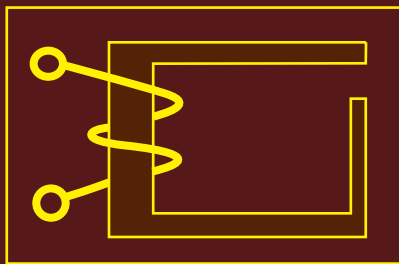


S.Masiokas

Elektro technika



5



VADOVĒLIS
AUKŠTOSIOMS
MOKYKLOMS

Magnetinės
grandinės
ir elektro-
magnetiniai
įtaisai

5.1. Magnetinės grandinės ir jų elementai 128

- 5.1.1. Magnetinis laukas / 128
- 5.1.2. Magnetinės medžiagos / 129
- 5.1.3. Magnetinių grandinių klasifikacija / 131

5.2. Nuolatinio magnetinio srauto magnetinių grandinių dėsniai 132

- 5.2.1. Magnetinės grandinės atstojamoji schema / 132
- 5.2.2. Omo dėsnis / 133
- 5.2.3. Kirchhofo dėsniai / 134

5.3. Nuolatinio magnetinio srauto grandinių tyrimas 135

- 5.3.1. Tiesioginis uždavinys / 136
- 5.3.2. Atvirkštinis uždavinys / 136
- 5.3.3. Charakteristikų sukirtimo metodas / 137
- 5.3.4. Elektromagneto traukos jėga / 138

5.4. Ideali ritė su magnetolaidžiu kintamosios srovės grandinėje 138

- 5.4.1. Tiesinė magnetinė grandinė / 139
- 5.4.2. Netiesinė magnetinė grandinė / 140
- 5.4.3. Vektorinė diagrama ir atstojamoji schema / 141
- 5.4.4. Energijos nuostoliai magnetolaidyje ir jų mažinimo būdai / 143

5.5. Reali ritė su magnetolaidžiu kintamosios srovės grandinėje 144

- 5.5.1. Atstojamoji schema ir vektorinė diagrama / 145
- 5.5.2. Ritė su oro tarpu magnetolaidyje / 146

Kontroliniai klausimai ir užduotys 147

5.1

Magnetinės grandinės ir jų elementai

Įvairiose technikos srityse plačiai naudojami elektromagnetiniai įtaisai. Tai elektromagnetai (kėlimo, stabdžių), relės ir kontaktoriai, transformatoriai ir magnetiniai stiprintuvai, elektros varikliai ir generatoriai, kai kurie matavimo prietaisai ir keitikliai, keičiantieji neelektrinius dydžius elektriniais, ir daug kitų. Visiems jiems berdra yra tai, kad juose vyksta elektromagnetiniai reiškiniai, sukuriama magnetiniai laukai.

5.1.1. Magnetinis laukas. Jis susidaro tarp nuolatinio magneto polių arba apie laidininkus, kuriais teka srovė (5.1 pav.). Magnetinis laukas grafiškai yra vaizduojamas uždaromis linijomis. Laikoma, kad susidaranti apie nuolatinį magnetą lauko linijos yra nukreiptos iš magneto šiaurinio poliaus N į pietinį polių S . Apie laidininką, kuriuo teka srovė, susidariusio magnetinio lauko linijų kryptis yra nusakoma dešiniojo sraigto taisykle.

Svarbiausias dydis, apibūdinantis magnetinio lauko kryptį ir intensyvumą kiekviename jo taške, yra magnetinės indukcijos vektorius \vec{B} . Jį galima nubraižyti kaip liestinę magnetinio lauko linijai nagrinėjamame taške (žr. 5.1 pav., b). Magnetinis laukas yra vienalytis (homogeninis), jei visuose jo taškuose indukcija yra vienodo didumo ir tos pačios krypties. Magnetinės indukcijos matavimo vienetą – tesla (T).

Magnetinis srautas Φ yra magnetinės indukcijos vektoriaus srautas pro kokį nors paviršių. Jo matavimo vienetą – vėberis (Wb).

Magnetinis srautas pro be galo mažo ploto dS paviršiaus elementą (5.2 pav.) apskaičiuojamas šitaip:

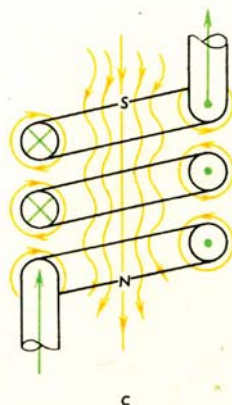
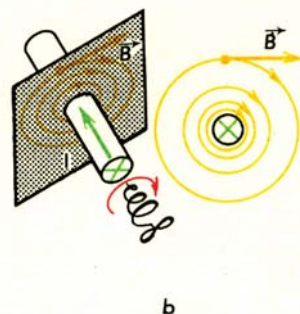
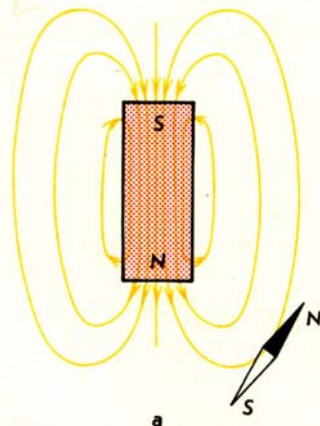
$$d\Phi = B \cos \alpha dS; \quad (5.1)$$

čia α – kampas tarp vektorių \vec{B} ir normalės \vec{n} plotui dS . Sandauga $B \cos \alpha$ yra vektoriaus \vec{B} projekcija į normalės \vec{n} kryptį.

Magnetinis srautas pro S ploto paviršių:

$$\int_S d\Phi = \int_S B \cos \alpha dS. \quad (5.2)$$

Jei paviršius plokščias, o magnetinis laukas vienalytis,



5.1 pav. Magnetinis laukas, kurį sukuria: a – nuolatinis magnetas; b – laidininku tekanti srovė ir c – rite tekanti srovė

$$\Phi = SB \cos \alpha. \quad (5.3)$$

Kai magnetinės indukcijos vektorius \vec{B} statmenas plokštumai ($\alpha=0$),

$$\Phi = SB. \quad (5.4)$$

Kiekviename magnetinio lauko taške magnetinė indukcija \vec{B} priklauso nuo aplinkos magnetinių savybių ir **magnetinio lauko stiprumo \vec{H}** :

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H}, \text{ arba skaliarine forma -}$$

$$B = \mu_a H; \quad (5.5)$$

čia μ_a – aplinkos medžiagos **absoliutinė magnetinė skvarba**. Jos matavimo vienetas – henris metrui (H/m). Magnetinio lauko stiprumo matavimo vienetas – amperas metrui (A/m).

Praktikoje dažniau naudojamosi **santykine magnetine skvarba μ_r** , kuri rodo, kiek kartų įvairių medžiagų μ_a yra didesnė ar mažesnė už tuštumos magnetinę skvarbą μ_0 :

$$\mu_r = \mu_a / \mu_0. \quad (5.6)$$

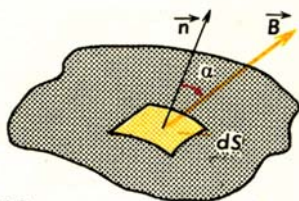
Paprastai μ_r pateikiamos žinynuose, o žinant, kad $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m (ji dar vadinama magnetine konstanta), iš (5.6) išraiškos galima apskaičiuoti medžiagos $\mu_a = \mu_r \mu_0$.

5.1.2. Magnetinės medžiagos. Apie medžiagos magnetinės savybes galima spręsti iš (5.5) lygtimi užrašytos indukcijos $B = f(H)$, kuri yra vadinama **įmagnetinimo charakteristika**. Iš (5.5) ir (5.6) lygybių ją galime užrašyti ir šitaip:

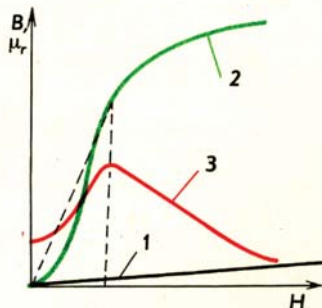
$$B = \mu_r \mu_0 H. \quad (5.7)$$

Pagal santykinės magnetinės skvarbos didumą visas medžiagas galima suskirstyti į dvi skirtingas grupes: **1) nemagnetines**, kurių μ_r šiek tiek mažesnė už vienetą (diamagnetikai) ar šiek tiek didesnė už vienetą (paramagnetikai); praktiškai galime laikyti, kad jų $\mu_r \approx 1$; **2) magnetines** (feromagnetikus ir ferimagnetikus), kurių $\mu_r \gg 1$ ir **priklauso nuo magnetinio lauko stiprumo: $\mu_r = f(H)$** .

Nemagnetinių medžiagų indukciją laikysime lygia tuštumos indukcijai: $B \approx B_0 = \mu_0 H$, o jų įmagnetinimo charakteristiką – tiesę (5.3 pav.).



5.2 pav.



5.3 pav. Nemagnetinės (1) ir magnetinės (2) medžiagos pradinio įmagnetinimo charakteristikos $B = f(H)$ ir magnetinės medžiagos $\mu_r = f(H)$ (3)

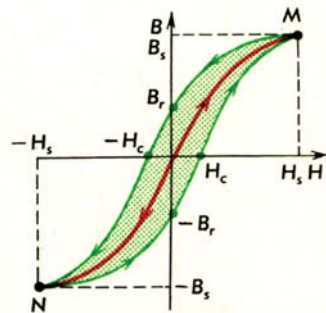
Magnetinių medžiagų magnetinė skvarba priklauso nuo lauko stiprumo: kai pastarasis didėja, ji taip pat gana sparčiai didėja. Pasiekusi maksimumą μ_{rmax} , ji pradeda mažėti, kol medžiaga išotinama. Išotintą magnetiką galime laikyti nemagnetiku, nes jo μ_r labai sumažėja. Neišotintų magnetinių medžiagų magnetinė indukcija, esant tam pačiam lauko stiprumui H , esti daug (šimtus ar tūkstančius) kartų didesnė nei nemagnetinių.

Magnetinę medžiagą cikliška magnetinant kintamo stiprumo ir krypties magnetiniu lauku (tokie reiškiniai vyksta, kai elektromagneto vijomis teka kintamoji srovė), $B = f(H)$ kreivė yra uždara magnetinės histerezės kilpa (5.4 pav.). Jos dalys OM ir ON , prasidedančios iš koordinatinių pradžių, yra pradinio įmagnetinimo kreivės. Jei magnetinė medžiaga įmagnetinama iki soties, tai $H_{max} = \pm H_s$ ir $B_{max} = \pm B_s$. Pašalinus magnetinį lauką, magnetinėje medžiagoje lieka liktinė indukcija $\pm B_r$, kurią galima panaikinti lauko stiprumu $\mp H_c$. Jis vadinamas koerciniu magnetinio lauko stiprumu. **Histerezės kilpos plotas proporcingas magnetinės histerezės nuostoliams, t. y. energijai, kuri suvartojama medžiagos vienkartiniam permagnetinimui.**

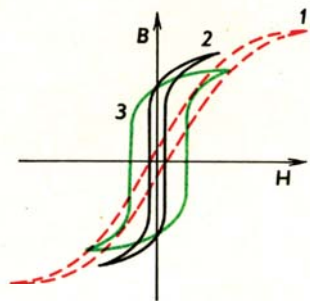
Pagal histerezės kilpos formą magnetinės medžiagos yra skirstomos į minkštamagnetes ir kietamagnetes (5.5 pav.). **Minkštamagnetė kilpa siaura ir didelė** (μ_{rmax} ; jos išimagnetina iki soties arba persimagnetina silpnuose laukuose. Jų magnetinės indukcijos pakankamai didelės, koercityvioji jėga $|H_c| \leq 4$ kA/m, o magnetinės histerezės nuostoliai maži. Kietamagnetė – kilpa plati; jos pasižymi stipriu koercityviuoju lauku ($|H_c| \geq 4$ kA/m) ir gana didele liktine indukcija. Jų histerezės nuostoliai dideli.

Dažniausiai naudojami feromagnetikai yra geležis, nikelis, kobaltas ir specialūs jų lydiniai. Nors jų specifinė elektrinė varža gana didelė, bet jie yra laidininkai, todėl permagnetinant juose gaunami dar papildomi nuostoliai dėl sūkurinių srovių.

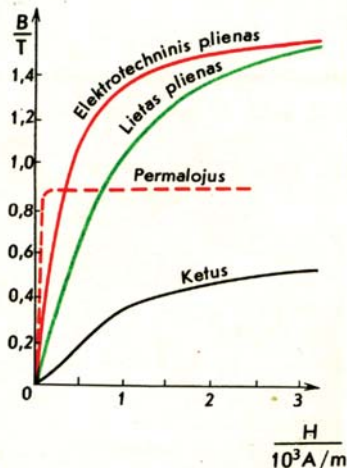
Minkštamagnetė feromagnetikai yra naudojami transformatorių, elektros variklių, generatorių ir kitų pramoninio dažnio elektros aparatų magnetolaidžiams. Tai įvairūs elektrotechniniai plienai ir permalojus (geležies ir nikelio lydinys), kurio histerezės kilpa yra beveik stačiakampė ir labai siaura. Kai kurių iš jų pradinio įmagnetinimo kreivės pateiktos 5.6 paveiksle. **Kietamagnetė feromagnetikai naudojami nuolatiniams magnetams** (matavimo prietaisuose, elektros varikliuose), kur reikalingas didelis koercinis magnetinio lauko stiprumas, o permagnetinimo nuostoliai reikšmės neturi.



5.4 pav. Magnetinės medžiagos histerezės kilpa



5.5 pav. Minkštamagnetės (1, 2) ir kietamagnetės (3) medžiagos histerezės kilpos



5.6 pav. Kai kurių medžiagų pradinio įmagnetinimo charakteristikos

Ferimagnetikai yra kristalinės medžiagos, susidedančios iš cheminių elementų joninių junginių. Didžiausią jų grupę sudaro **minkštąmagnetiniai feritai**, kurių koercinis magnetinio lauko stiprumas mažas ir termagnetinio nuostoliai nedideli. Jų specifinė elektrinė varža didelė, todėl juose nuostoliai dėl sukurtųjų srovių labai maži. Jie naudojami tais atvejais, kai magnetinis laukas kinta dideliu dažniu, ričių, transformatorių magnetolaidžiams ir antenoms radiotechnikoje. **Gaminami minkštąmagnetiniai feritai su beveik stačiakampe histerezės kilpa.** Jų magnetinės indukcijos kryptis, pakeitus išorinio magnetinio lauko kryptį, pakinta beveik šuoliu. Jie naudojami ESM loginiuose ir atminies elementuose, automatikos bekontaktėse relėse.

Minkštąmagnetės medžiagos yra ir magnetodielektrikai, kurie gaminami iš feromagnetikų (permalojaus arba geležies) ir dielektrinės medžiagos mišinių taip, kad kiekviena feromagnetiko dalelė padengiama dielektrine plėvele. Jų santykinė magnetinė skvarba nėra labai didelė (nuo keleto iki kelių dešimčių). Šios medžiagos naudojamos tais atvejais, kai reikia turėti tiesinę $B=f(H)$ priklausomybę.

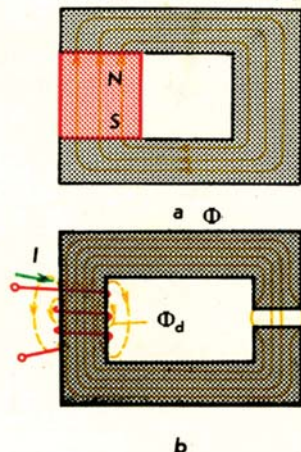
5.1.3. Magnetinių grandinių klasifikacija. Magnetinė grandinė vadinasi visuma elementų, tarp kurių yra magnetikų ir kuriuose susidaro magnetinis laukas. Panašiai kaip elektrinėje, joje galima išskirti dvi dalis (5.7 pav.): 1) magnetovaros jėgos (MVJ) šaltinį, sudarantį magnetinį lauką; 2) dalį, kurioje tas laukas sudaromas. Jei ji pagaminta iš magnetinės medžiagos, tai vadinama magnetolaidžiu. Magnetinėje grandinėje vykstančius elektromagnetinius reiškinius galima apibūdinti ryšiais tarp MVJ, magnetinio srauto ir magnetinių potencialų skirtumo.

Reikiamos konfigūracijos magnetinis laukas gaunamas, parenkant magnetolaidžio geometrinius parametrus. Dalis magnetinio lauko susidaro ore apie magnetolaidį (žr. 5.7 pav., b). Tai vadinamasis **sklaidos magnetinis laukas**. **Sklaidos magnetinis srautas Φ_d esti tuo didesnis lyginant su magnetolaidžio magnetiniu srautu Φ , kuo indukcija yra artimesnė magnetinės šoties indukcijai.**

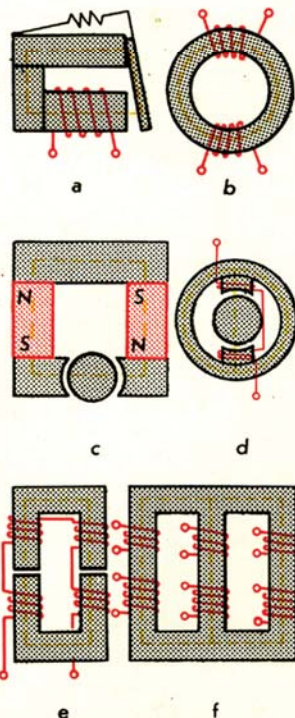
Magnetinės grandinės gali neturėti oro tarpo arba jį turėti (žr. 5.7 pav.). Kadangi oras yra nemagnetikas, tai net ir visai nedidelis (dešimtųjų ar šimtųjų milimetro dalių) oro tarpas labai pablogina magnetines savybes.

Kaip ir elektrinės grandinės, magnetinės grandinės gali būti: a) **nešakotos**, kai grandinė turi vieną kontūrą ir magnetinis srautas visose jos dalyse vienodas (5.8 pav., a, b, c, e); b) **šakotos**, kai grandinėje yra kelios šakos su skirtingais magnetiniais srautais (5.8 pav., d, f). Ir vienos, ir kitos gali turėti po vieną ar po kelis MVJ šaltinius.

Pagal MVJ pobūdį magnetinės grandinės gali būti klasifikuojamos taip: a) **nuolatinės MVJ** (su nuolatiniu magnetu arba rite, kuria teka nuolatinė srovė); b) **kintamosios MVJ** (su rite, kuria teka kintamoji srovė); c) **mišriosios MVJ**, kurią sukuria nuolatinės ir kintamosios MVJ šaltiniai.



5.7 pav. Magnetinės grandinės: a – su nuolatiniu magnetu – MVJ šaltiniu; b – elektromagneto



5.8 pav. Kai kurių elektrinių įrenginių magnetinės grandinės

Nuolatinio magnetinio srauto magnetinių grandinių dėsniai

Pastebėta, kad ryšiai tarp svarbiausių dydžių (5.1 lentelė) elektrinėje ir magnetinėje grandinėje yra panašūs. Dėl to sakoma, kad magnetinės grandinės yra analogiškos elektrinėms ir jas galima tirti elektrinių grandinių tyrimo metodais. Žinoma, svarbu nepamiršti, kad ši analogija yra tik formali, nes magnetinėse ir elektrinėse grandinėse vyksta visiškai skirtingi fiziniai procesai. Magnetinių grandinių tyrimui palengvinti sklaidos laukų dažniausiai nepaisoma. Jei to padaryti negalima, sklaidos įtaka paprastai įvertinama tam tikru santykiu padidinant ar sumažinant skaičiavimo rezultata.

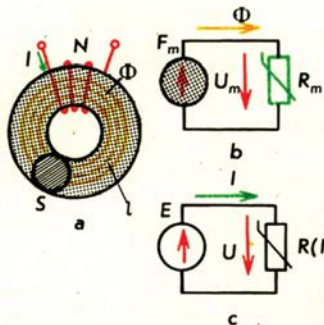
5.2.1. Magnetinės grandinės atstojamoji schema. Atsižvelgiant į magnetinių ir elektrinių grandinių formalią analogiją, kiekvienai magnetinei grandinei galima nubraižyti atstojamąją schemą. Joje vaizduojamas MVJ šaltinis ir kiti elementai, laikant, kad jie turi magnetinę varžą R_m magnetiniam srautui Φ . Visų magnetikų, kurių įmagnetinimo charakteristikos $B=f(H)$ yra netiesinės, magnetinė skvarba, taigi ir magnetinė varža, priklauso nuo magnetinio lauko stiprumo. Tokie magnetikai schemoje vaizduojami kaip netiesiniai elementai. Magnetikai, kurių $B=f(H)$ yra tiesės, taip pat visi nemagnetikai (pavyzdžiui, oras, bronzos, aliuminis, kartonas ir kt.), kurių magnetinė skvarba yra pastovi, vaizduojami kaip tiesiniai elementai.

Paprasčiausia magnetinė grandinė yra vienalytė. Tai nešakota be oro tarpo magnetinė grandinė (5.9 pav.), kurios magnetolaidis padarytas iš vienodo skerspjūvio to paties magnetiko. Dažniausiai magnetolaidžio magnetinė skvarba nėra pastovi, todėl atstojamojoje schemoje yra vaizduojamas netiesinis elementas R_m , o jai analogiškoje elektrinėje – netiesinis rezistorius $R(I)$.

Nevienalytės magnetinės grandinės gali būti įvairios. Jos gali turėti oro tarpą ar jo neturėti, jų magnetolaidžio dalys gali būti nevienodo skerspjūvio ar iš nevienodo magnetiko. Pavyzdžiui, išpjovus dalį vienalytės grandinės magnetolaidžio, susidaro oro tarpas ir gaunama nevienalytė magnetinė grandinė (5.10 pav.). Kadangi oro tarpas yra nemagnetikas ($\mu_r \approx 1$), jis atstojamojoje schemoje yra vaizduojamas tiesiniu elementu R_{m0} (elektrinėje – R_1), o mag-

5.1 lentelė. Analogiški elektriniai ir magnetiniai dydžiai bei jų matavimo vienetai

Elektriniai dydžiai	Magnetiniai dydžiai
EVJ E (V)	MVJ F_m (A)
Srovė I (A)	Srautas Φ (Wb)
Elektrinė varža R (Ω)	Magnetinė varža R_m (H^{-1})
Įtampa U (V)	Magnetinė įtampa U_m (A)



5.9 pav. Vienalytė magnetinė grandinė (a), jos atstojamoji (b) ir jai analogiškos elektrinės grandinės (c) schema

netikas, kurio $\mu_r = \text{var}$, – netiesiniu elementu R_m (elektrinėje – $R_2(I)$). 5.9 ir 5.10 pav. schemose sužymėti magnetiniai ir jiems analogiški elektriniai dydžiai.

5.2.2. Omo dėsnis. Paprastumo dėlei pasirinkime vienalytę magnetinę grandinę (žr. 5.9 pav.). Nuolatinė srovė, tekanti rite, sukuria magnetolaidyje nuolatinį magnetinį srautą Φ . Nepaisydami sklaidos srauto, galime laikyti, kad Φ yra vienodas visame magnetolaidyje. **Grandinės MVJ yra lygi ritės vijų skaičiaus N ir rite tekančios srovės I sandaugai:**

$$F_m = NI. \quad (5.8)$$

Vienalytei magnetinei grandinei analogiška nešakota elektrinė grandinė, kuriai galime Omo dėsnį užrašyti šitaip: $I = E/R$. **Pakeisime elektrinius dydžius jiems analogiškais magnetiniais: srovę – magnetiniu srautu, EVJ – MVJ, elektrinę varžą – magnetinę.** Tuo būdu vienalytei magnetinei grandinei Omo dėsnį galėsime užrašyti šitaip:

$$\Phi = F_m/R_m. \quad (5.9)$$

Grandinės **magnetinė varža**

$$R_m = l/(\mu_a S); \quad (5.10)$$

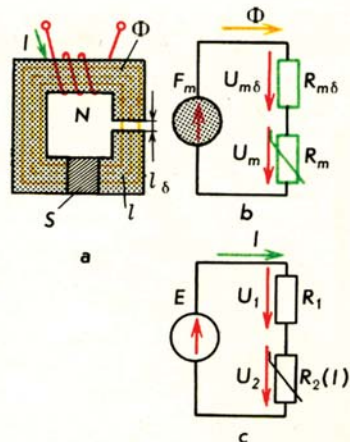
čia l – vidurinė magnetinės linijos ilgis, μ_a – medžiagos magnetinė skvarba, S – magnetolaidžio skerspjūvis.

Kaip matome, magnetinės varžos išraiška panaši į elektrinės: $R = l/(\gamma S)$.

Magnetinis laidumas yra atvirkščias magnetinei varžai dydis:

$$\Lambda = 1/R_m = \mu_a S/l. \quad (5.11)$$

Magnetolaidžiai naudojami daugelyje elektromagnetinių įtaisų. Kad galėtume įsivaizduoti, kodėl taip yra, palyginkime dvi rites. Tarkime, kad kiekvienos ritės vijų skaičius yra N ir teka srovė I , todėl abiejų ričių MVJ yra vienodos: $F_m = NI$. Pirmoji ritė magnetolaidžio neturi. Jos magnetinis laukas sudaromas ore ir magnetinis srautas $\Phi_\delta = F_m/R_{m\delta}$. Antroji ritė turi neįsotinto magnetiko magnetolaidį, kurio magnetinė skvarba daug didesnė negu oro: $\mu_a \gg \mu_0$. Magnetolaidžio magnetinė varža daug ma-



5.10 pav. Nevienalytė magnetinė grandinė (a), jos atstojamoji (b) ir jai analogiškos elektrinės grandinės (c) schema

žesnė negu oro: $R_m \ll R_{m0}$. Matome, kad magnetolaidžio magnetinis srautas $\Phi = F_m/R_m$ ir yra daug didesnis: $\Phi \gg \Phi_0$. Kaip tik dėl to kartais sakoma, kad magnetolaidis „sustiprina“ magnetinį srautą.

Praktiškai dažniausiai reikia sudaryti elektromagnetinio įtaiso tam tikrą magnetinį srautą. Panaudojus magnetolaidį, jį galima sukurti esant mažesnei MVJ. Vadinasi, ritės laidų skerspjūvis arba vijų skaičius gali būti mažesni. Tokio įtaiso srovė mažesnė, todėl mažesni ir energijos nuostoliai.

Iš pilnutinės srovės dėsnio:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = NI. \quad (5.12)$$

Nagrinėjamos vienalytės grandinės indukcija B yra pastovi, lauko stiprumas H taip pat pastovus. Kairiąją (5.12) lygties pusę galime užrašyti šitaip:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \oint H \cos(\vec{H}, \vec{l}) dl = H \oint dl = HI.$$

Irašę gautą sandaugą į (5.12) ir pasinaudoję (5.8) bei (5.9) lygtimis, turime: $IH = R_m \Phi$. Matome, kad abi šios sandaugos gali būti vadinamos **magnetine įtampa**, kuri dažniausiai apskaičiuojama šitaip:

$$U_m = IH. \quad (5.13)$$

Vienalytės magnetinės grandinės $F_m = R_m \Phi$, todėl:

$$F_m = IH. \quad (5.14)$$

Jei magnetinė grandinė nevienalytė (magnetolaidis ne iš vienos medžiagos ar nevienodo skerspjūvio), indukcijos ir magnetinio lauko stiprumai atskirose jos dalyse yra nevienodi. Tokioms grandinėms tirti taikomas II Kirchhofo dėsnis.

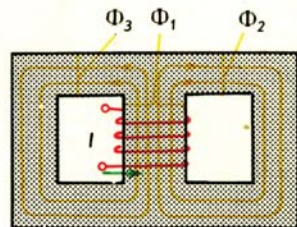
5.2.3. Kirchhofo dėsniai. I. Kiekvieno šakotos magnetinės grandinės mazgo magnetinių srautų algebrinė suma lygi nuliui:

$$\Sigma \Phi = 0. \quad (5.15)$$

5.11 paveikslo magnetinei grandinei

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0 \quad \text{arba} \quad \Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3.$$

II. Magnetinės grandinės kontūro magnetinių įtampų algebrinė suma yra lygi magnetovaros jėgų algebrinei su-



5.11 pav. Dviejų mazgų šakota magnetinė grandinė

mai. Šis dėsnis išplaukia iš pilnutinės srovės dėsnio. Kai MVJ yra kelios,

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \Sigma F_m,$$

o pakeitus integralo ženklą sumos ženklu,

$$\Sigma (IH) = \Sigma F_m. \quad (5.16)$$

Pavyzdžiui, 5.10 pav. magnetinei grandinei II Kirchhofo dėsnį galime užrašyti šitaip:

$$IH + I_\delta H_\delta = F_m; \quad (5.17)$$

čia I ir I_δ – vidurinės magnetinės linijos ilgis magnetike ir oro tarpe,

H ir H_δ – magnetiko ir oro tarpo magnetinio lauko stiprumas.

Prisiminę, kad $IH = R_m \Phi$ ir $I_\delta H_\delta = R_{m\delta} \Phi$, gausime $(R_m + R_{m\delta})\Phi = F_m$, arba

$$\Phi = NI / (R_m + R_{m\delta}). \quad (5.18)$$

Grandinės magnetinę varžą sudaro magnetolaidžio ir oro tarpo varžos R_m ir $R_{m\delta}$. Kadangi oro tarpo magnetinė skvarba daug mažesnė už magnetiko ($\mu_0 \ll \mu_a$), tai paprastai $R_{m\delta} \gg R_m$. Vadinasi, magnetinėje grandinėje padarius net labai nedidelį oro tarpą, gali tekti gana žymiai padidinti MVJ (nekeičiant vijų skaičiaus, – ritės srovę), norint, kad magnetinis srautas nepakistų.

5.3

Nuolatinio magnetinio srauto grandinių tyrimas

Išnagrinėsime nešakotos nevienalytės magnetinės grandinės tyrimo metodus, kurie gali būti taikomi ir sudėtingesniems magnetinėms grandinėms tirti. **Laikysime, kad magnetolaidis yra idealus:** nėra iš anksto įmagnetintas, oro tarpe ir jo pakraščiuose magnetinio lauko linijos yra lygiagrečios, sklaidos srauto nėra. Grandinėje yra vienas MVJ šaltinis.

5.3.1. Tiesioginis uždavinys. Žinomi magnetolaidžio matmenys, medžiaga ir magnetinis srautas Φ . Reikia nustatyti MVJ.

Iš (5.16) II Kirchhofo dėsnio:

$$l_1 H_1 + l_2 H_2 + \dots + l_8 H_8 = F_m. \quad (5.19)$$

Apskaičiavę iš (5.4) lygybės magnetinės grandinės dalių indukcijos vertes: $B_1 = \Phi/S_1$; $B_2 = \Phi/S_2$; ... $B_8 = \Phi/S_8$, magnetinio lauko stiprumą $H_1, H_2 \dots$ galime atskaityti iš žinyuose rastų magnetikų įmagnetinimo charakteristikų $B=f(H)$. Oro tarpo magnetinio lauko stiprumas:

$$H_8 = B_8/\mu_0 = 0,8 \cdot 10^6 B_8. \quad (5.20)$$

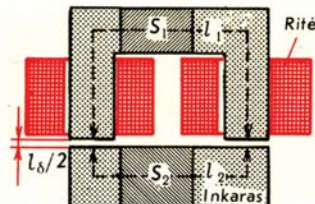
5.1 pavyzdys. Vienalytės magnetinės grandinės (žr. 5.9 pav.), kurios lieto plieno magnetolaidžio skerspjūvio plotas $S=9 \text{ cm}^2$, vidurinės magnetinės linijos ilgis yra 60 cm. Magnetinis srautas – $1,08 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$. Apskaičiuokime MVJ.

Sprendimas. Iš (5.4) lygybės $B = \Phi/S = 1,08 \cdot 10^{-3}/(9 \cdot 10^{-4}) = 1,22 \text{ T}$. Iš įmagnetinimo charakteristikos (žr. 5.6 pav.)* atskaitome: $H = 1300 \text{ A/m}$. Iš (5.14) lygybės: $F_m = IH = 60 \cdot 10^{-2} \cdot 1300 = 780 \text{ A}$.

5.2 pavyzdys. Elektromagneto (5.12 pav.) magnetolaidis, kurio $S_1 = 10 \text{ cm}^2$, $S_2 = 12 \text{ cm}^2$, $l_1 = 20 \text{ cm}$, $l_2 = 8 \text{ cm}$, pagamintas iš lakštinio elektrotechninio plieno. Ritė turi 1000 vijų. Apskaičiuokime, kokia turi būti ritės srovė, kad magnetinis srautas būtų $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$, kai oro tarpo l_8 lygus: 1) nuliui; 2) 0,1 mm; 3) 1,0 mm.

Sprendimas. $B_1 = B_8 = \Phi/S_1 = 1,4 \cdot 10^{-3}/(10 \cdot 10^{-4}) = 1,4 \text{ T}$; $B_2 = \Phi/S_2 = 1,4 \cdot 10^{-3}/(12 \cdot 10^{-4}) = 1,17 \text{ T}$. Iš 5.6 pav. atskaitome: $H_1 = 1200 \text{ A/m}$, $H_2 = 500 \text{ A/m}$. 1) Kai oro tarpo nėra, iš (5.19) lygybės: $F_m = l_1 H_1 + l_2 H_2 = 20 \cdot 10^{-2} \cdot 1200 + 8 \cdot 10^{-2} \cdot 500 = 280 \text{ A}$. Kai oro tarpas yra, skaičiuojant MVJ reikia pridėti oro tarpo magnetinę įtampą $l_8 H_8$. Oro tarpo lauko stiprumas iš (5.20): $H_8 = 0,8 \cdot 10^6 \cdot 1,4 = 1,12 \cdot 10^6 \text{ A/m}$. 2) $l_8 H_8 = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,12 \cdot 10^6 = 112 \text{ A}$. 3) $l_8 H_8 = 1,0 \cdot 10^{-3} \cdot 1,12 \cdot 10^6 = 1120 \text{ A}$. Elektromagneto ritės srovę apskaičiuosime iš (5.8) lygties. Skaičiavimo rezultatai surašyti 5.2 lentelėje.

Kaip matome, atitraukus elektromagneto judamąją dalį – inkarą – tiek, kad abu oro tarpai sudarytų po 0,05 mm, srovė turi būti 1,4 karto didesnė. Kai inkaras yra 0,5 mm atstumu nuo šerdies, srovė turi būti 5 kartus didesnė, kad magnetinis srautas liktų toks pat, kaip be oro tarpo.



5.12 pav.

5.2 lentelė. 5.2 pavyzdžio skaičiavimo rezultatai

l_8 mm	$(l_1 H_1 + l_2 H_2)$ A	$l_8 H_8$ A	F_m A	I A
0	280	0	280	0,280
0,1	280	112	392	0,392
1,0	280	1120	1400	1,40

5.3.2. Atvirkštinis uždavinys. Žinomi magnetinės grandinės matmenys, medžiaga ir MVJ. Reikia nustatyti magnetinį srautą.

Kadangi yra nežinomi visi (5.19) lygties kairiosios pusės nariai, o žinoma tik jų suma, tai magnetinį srautą galima skaičiuoti priartėjimo keliu, taikant tiesioginio uždavinio sprendimo būdą. Spėtinai pasirinkus ieškomojo mag-

* Nubraižytomis įmagnetinimo charakteristikomis naudosis sprendami pavyzdžius tik dėl vaizdumo. Iš tiesų 5.6 pav. kreivių tikslumas skaičiavimams yra nepakankamas, todėl reikia naudotis žinyuose pateiktomis $B=f(H)$ kreivėmis arba lentelėmis.

netinio srauto vertę, apskaičiuojama tiriamosios magnetinės grandinės MVJ, kuri sukuria pasirinktą magnetinį srautą. Be abejo, gauta MVJ bus kitokia, negu nurodyta uždavinio sąlygoje. Po to tenka pasirinkti kitą Φ vertę ir, vėl išsprendus tiesioginį uždavinį, gauti kitą MVJ vertę. Tai kartojama keletą kartų, kol gaunama tiriamosios magnetinės grandinės magnetinio srauto priklausomybė nuo MVJ: $\Phi = f(F_m)$ (5.13 pav.). Kreivę galima nubraižyti tuo tiksliau, kuo daugiau jos taškų apskaičiuota ir kuo jie artimesni sprendinio koordinatėms. Pasinaudojus uždavinio sąlygoje nurodyta MVJ, iš kreivės $\Phi = f(F_m)$ atskaitomas ieškomas magnetinis srautas.

Neturint magnetinių grandinių tyrimo patirties, būna nelengva pasirinkti pirmąjį Φ vertę, kuri nelabai skirtusi nuo ieškosios. Tarkime, kad tiriami 5.10 pav. magnetinė grandinė. Jai tinka (5.18) Omo dėsnio išraiška. Paprastai $R_m \ll R_{m\delta}$, todėl pradžioje patartina nepaisyti magnetiko magnetinės varžos ($R_m \approx 0$) ir apskaičiuoti magnetinį srautą $\Phi' = NI/R_{m\delta}$ naudojantis žinoma MVJ verte. Iš tiesų šis srautas yra šiek tiek didesnis už tikrąjį, bet, išsprendus tiesioginį uždavinį, galima apskaičiuoti šį srautą kuriančią MVJ F_m' ir gauti pirmąjį $\Phi = f(F_m)$ tašką. Po to reikia parinkti kitą magnetinio srauto vertę $\Phi'' < \Phi'$ taip, kad žinoma MVJ būtų mažesnė už apskaičiuotą F_m' . Jei norime nubraižyti $\Phi = f(F_m)$ tiksliau, galime pasirinkti dar keletą magnetinio srauto verčių, kurios būtų mažesnės už Φ' , bet didesnės už Φ'' . Paprastai tikslumas būna pakankamas, jei yra apskaičiuojamos trijų keturių taškų koordinatės, t. y. tiesioginis uždavinys išsprendžiamas 3–4 kartus. Skaičiavimams tikslinga taikyti ESM.

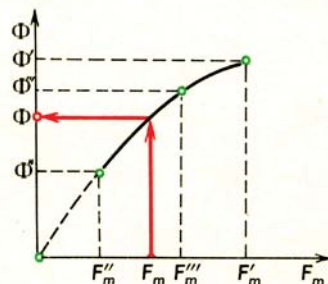
5.3.3. Charakteristikų sukirtimo metodas. Tai netiesinių elektrinių ir magnetinių grandinių tyrimo metodas, kurį pailiustruosime 5.14 pav., a pavaizduotos grandinės tyrimu. Grandinė sudaryta iš netiesinio (magnetikas) ir tiesinio (oro tarpas) elementų. Oro tarpo magnetinę varžą sutarkime laikyti MVJ šaltinio vidine varža. Panašiai kaip ir elektrinei grandinei (žr. 1.7.3), sudarome dviejų lygčių sistemą:

$$\begin{cases} (1) & U_m = f(\Phi), \\ (2) & U_m = F_m - R_{m\delta} \Phi; \end{cases} \quad (5.21)$$

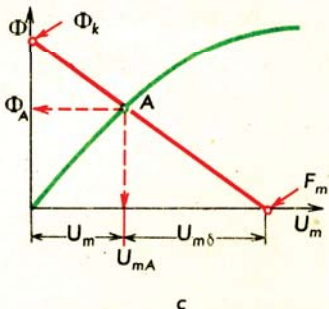
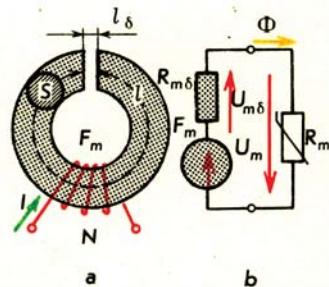
čia $U_m = IH$ – netiesinio elemento magnetinė įtampa, lygi MVJ ir oro tarpo magnetinės įtampos skirtumui.

Paprastai žinynuose pateikiamos magnetikų įmagnetinimo charakteristikos $B = f(H)$. Kadangi $B = \Phi/S$, o $IH = U_m$, įmagnetinimo charakteristiką nesunku perskaiciuoti į $\Phi = f(U_m)$, kuri yra tokio pat pobūdžio, kaip $B = f(H)$.

Antroji lygtis yra MVJ šaltinio išorinė charakteristika, kuri yra tiesė ir braižoma per du „tuščiosios eigos“ ir „trumpojo jungimo“ režimų taškus: 1) $\Phi_0 = 0$; $U_{m0} = F_m$; 2) $U_{mk} = 0$; $\Phi_k = F_m/R_{m\delta}$. Abiejų charakteristikų sankir-



5.13 pav. $\Phi = f(F_m)$, gaunama sprendžiant atvirkštinį uždavinį



5.14 pav. Nevienalytė magnetinė grandinė (a), jos atstojamoji schema (b) ir grafinis tyrimas (c)

tos koordinatės Φ_A ir U_{mA} yra lygčių sistemos sprendiniai. Magnetinio lauko stiprumas magnetolaidyje $H_1 = U_{mA}/l_1$, o magnetinė indukcija $B = \Phi_A/S$. Oro tarpo $H_2 = (U_{m0} - U_{mA})/l_2 = (F_m - U_{mA})/l_2$, o magnetinė indukcija yra tokia pat.

Kai magnetinę grandinę sudaro ne vienas, o keli magnetikai, jų $\Phi = f(U_m)$ charakteristikas galima susumuoti ir gauti atstojamąją (žr. 1.7.4), ir po to taikyti charakteristikų sukirtimo metodą.

5.3.4. Elektromagneto traukos jėga. Nuolatiniai elektromagnetai naudojami daiktams iš magnetinių medžiagų pakelti arba perkelti, tvirtinti detalėms metalo apdirbimo staklėse ir pan.

Dažnai tenka spręsti nuolatinio elektromagneto jėgos skaičiavimo uždavinius, kurie iš esmės yra magnetinių grandinių tyrimo uždaviniai. Priklausomai nuo to, kokie magnetinės grandinės parametrai yra žinomi, **mechaninę traukos jėgą galima apskaičiuoti šitaip:**

$$F_{mec} = S_\delta B_\delta H_\delta / 2 = S_\delta B_\delta^2 / (2\mu_0) = 0,4 \cdot 10^6 S_\delta B_\delta^2; \quad (5.22)$$

čia S_δ , B_δ , H_δ , μ_0 – oro tarpo geometriniai ir magnetiniai parametrai.

Nors iš (5.22) išraiškos tiesiogiai nematome traukos jėgos atvirktinės priklausomybės nuo oro tarpo l_δ , bet, kaip žinome, nuo oro tarpo didumo labai priklauso magnetinės grandinės varža. Kuo oro tarpas didesnis, tuo didesnė magnetinė varža. Esant tai pačiai MVJ, gaunama mažesnė indukcija, taigi ir traukos jėga.

5.4

Ideali ritė su magnetolaidžiu kintamosios srovės grandinėje

Daugumoje elektrotechninių įrenginių yra naudojami įtaisai su kintamosios srovės elektromagnetais. Tai įvairūs droseliai, traukos elektromagnetai, relės, kontaktoriai, neelektrinių dydžių keitikliai, transformatoriai, kintamosios srovės elektros mašinos. Visuose šiuose įrenginiuose yra kintamosios srovės magnetovaros jėgos šaltinis ir magnetinės medžiagos magnetolaidis. **Visi elektriniai – $u(t)$, $i(t)$, $e(t)$ – ir magnetiniai – $\Phi(t)$, $B(t)$, $H(t)$ – dydžiai yra kintamieji.** Kintamojo magnetinio lauko

grandinėse atsiranda specifiniai reiškiniai, nebūdingi nuolatinio srauto magnetinėms grandinėms.

Idealia rite vadinsime tokią, kurios aktyvioji varža $R = 0$, sklaidos srautas $\Phi_d = 0$. Praktiškai ritę galima laikyti idealia, kai $R \ll X_L$ ir $\Phi_d \ll \Phi$. Laikysime, kad ritės magnetinė grandinė yra vienalytė (5.15 pav.).

5.4.1. Tiesinė magnetinė grandinė. Tiesine vadinama magnetinė grandinė, kurios magnetolaidžio įmagnetinimo charakteristika $B=f(H)$ yra tiesė. (Tarkime, kad magnetolaidyje nėra nuostolių dėl sukurinių srovių).

Kadangi $B=\Phi/S$, o $IH=Ni$ (žr. (5.4), (5.8) ir (5.13) lygtis), magnetolaidžio vėberamperinė charakteristika $\Phi=f(i)$ yra tokia pat pobūdžio kaip ir $B=f(H)$, t.y. tiesė (5.16 pav.). Ritės pilnutinis srautas

$$\Psi = N\Phi. \quad (5.23)$$

Prisiminę, kad $\Psi=Li$ (žr. (2.17)), vėberamperinę charakteristiką galime užrašyti šitaip: $\Phi=(L/N)i$. Žinodami, kad $\Phi=F_m/R_m$, o $F_m=Ni$ (žr. (5.9) ir (5.8)), ritės induktyvumą L galime išreikšti šitokia formule:

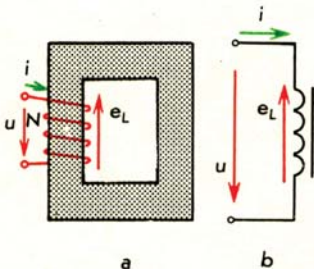
$$L = N^2/R_m. \quad (5.24)$$

Magnetiko įmagnetinimo charakteristika $B=\mu_a H$ yra tiesė, kai jo magnetinė skvarba $\mu_a = \text{const}$. Vadinasi, nagrinėjamos magnetinės grandinės $R_m = \text{const}$ (žr. (5.10)) ir ritės induktyvumas $L = \text{const}$. Kai rite tekančios srovės dažnis pastovus, ritės induktyvioji varža $X_L = \omega L$ taip pat pastovi. Tokios ritės voltamperinė charakteristika $U=f(i)$ yra tiesė (žr. 5.16 pav.), todėl nagrinėjamoji ritė kintamosios srovės grandinėje yra idealus induktyvusis tiesinis imtuvas.

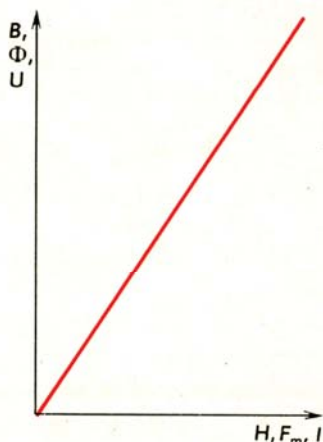
Antra vertus, magnetiko magnetinė skvarba paprastai esti daug didesnė negu oro ($\mu_a \gg \mu_0$), todėl ritės su magnetolaidžiu magnetinės grandinės varža (žr. (5.10)) yra daug mažesnė. Dėl to ritės induktyvumas, vadinasi, ir induktyvioji varža, yra daug didesni. Prijungę prie kintamosios įtampos tinklo ritę su magnetolaidžiu ir tokią pat ritę be jo, pastebėsime, kad pirmąja teka silpnesnė srovė: $I = \underline{U}/(jX_L)$. Srovė bus tuo silpnesnė, kuo magnetolaidžio magnetinės savybės geresnės – kuo didesnė jo magnetinė skvarba.

Nagrinėjamos ritės srovė, įtampa ir EVJ yra sinusiniai dydžiai, kuriuos galime užrašyti šitaip (žr. 2.3):

$$\begin{aligned} i &= I_m \sin \omega t; & u &= U_m \sin(\omega t + \pi/2); \\ e_L &= E_m \sin(\omega t + \pi/2). \end{aligned} \quad (5.25)$$



5.15 pav. Idealos ritės su idealiu magnetolaidžiu magnetinė grandinė (a) ir elektrinė schema (b)



5.16 pav. Idealos ritės, kurios magnetinė grandinė tiesinė, įmagnetinimo, vėberamperinė ir voltamperinė charakteristika

Magnetinis srautas

$$\Phi(t) = (L/N)i = (L/N)I_m \sin \omega t = \Phi_m \sin \omega t \quad (5.26)$$

yra proporcingas srovei ir sutampa su ja faze.

Užrašysime visus dydžius kompleksine forma:

$$\begin{aligned} \underline{\Phi} &= \Phi; \quad \underline{I} = I; \quad \underline{U} = jU = U e^{j90^\circ}; \\ \underline{E}_L &= jE_L = E_L e^{j90^\circ} \end{aligned} \quad (5.27)$$

ir pavaizduosime juos grafiškai (5.17 pav.).

Magnetinio srauto amplitudę galime išreikšti iš (5.26) lygties. Prisiminę, kad pagal Omo dėsnį $I_m = U_m/(\omega L)$, galime parašyti: $\Phi_m = LI_m/N = LU_m/(N\omega L)$. Iš čia:

$$\Phi_m = U_m/(\omega N). \quad (5.28)$$

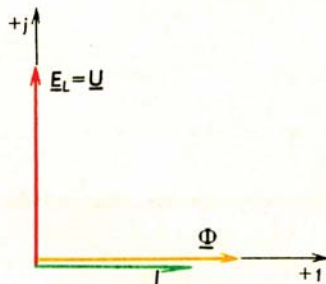
Ritės magnetinis srautas yra proporcingas jos įtampai, kai dažnis ω yra pastovus.

Idealios ritės įtampa ir EVJ yra tos pačios fazės vienodų amplitudžių sinusiniai dydžiai, nes pagal II Kirchhofo dėsnį: $u = e_L$. Iš čia: $U_m = E_m$. Pagal (5.28) lygtį:

$$U_m = E_m = \omega N \Phi_m = 2\pi f N \Phi_m. \quad (5.29)$$

Efektinė EVJ vertė: $E = E_m/\sqrt{2} = (2\pi/\sqrt{2})fN\Phi_m$ arba

$$E = 4,44fN\Phi_m. \quad (5.30)$$

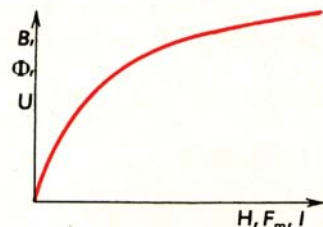


5.17 pav. Idealios ritės, kurios magnetinė grandinė tiesinė, vektorinė diagrama

5.4.2. Netiesinė magnetinė grandinė. Daugumos elektromagnetinių įrenginių magnetolaidžiai yra gaminami iš minkštamagnečių medžiagų. Pastarųjų histerezės kilpa yra siaura, todėl dažnai galima laikyti, kad jos plotas yra lygus nuliui. Antra vertus, magnetinės grandinės sudaromos taip, kad magnetinė indukcija būtų pakankamai didelė, todėl yra išnaudojama įmagnetinimo charakteristikos $B=f(H)$ netiesinė dalis.

Kai magnetinės grandinės magnetiko įmagnetinimo charakteristika $B = \mu_a H$ yra netiesinė, jo magnetinė skvarba ir magnetinė varža yra nepastovios ir priklauso nuo magnetinio lauko stiprumo: $\mu_a = f(H)$; $R_m = f(H)$ (žr. 5.1 ir 5.2). Kadangi $IH = Ni$, tai magnetinio lauko stiprumas H , o dėl to ir ritės induktyvumas L bei induktyvioji varža $X_L = \omega L$ priklauso nuo rite tekančios srovės. Tokia ritė yra idealus induktyvusis netiesinis imtuvas kintamosios srovės grandinėje. Ritės voltamperinė charakteristika yra netiesinė – jos pobūdis toks pat kaip magnetiko $B=f(H)$ (5.18 pav.).

Pagal Omo dėsnį $i = u/(\omega L)$. Matome, kad esant $L =$



5.18 pav. Idealios ritės, kurios magnetinė grandinė netiesinė, įmagnetinimo, vėberamperinė ir voltamperinė charakteristika

=var, prijungus ritę prie sinusinės įtampos tinklo, srovė nėra tiesinė įtampos funkcija. Vadinasi, jos forma kitokia negu įtampos. **Ritė teka nesinusinė srovė.**

Sudarysime ritę tekančios srovės kreivę $i=f(t)$ grafiškai, laikydami magnetinį srautą sinusiniu: $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$. Tarkime, kad ritės magnetolaidžio įmagnetinimo charakteristika yra histerezės kilpa.

Nubraižysime ritės magnetolaidžio vėberamperinę charakteristiką $\Phi = f(i)$, kuri, kaip žinome, yra tokio pat pobūdžio kaip $B = f(H)$. Greta nubraižysime sinusinę $\Phi = f(t)$ (5.19 pav.). Abiejų funkcijų ordinačių – Φ – masteliai turi būti vienodi. Pasirinkdami vieną po kito laiko momentus 0, 1, 2, 3 ..., atskaitome atitinkamas magnetinio srauto Φ vertes ir jas atitinkančias srovės i vertes. Atidėję gautas $i=f(t)$, matome, kad ritės srovės kreivės forma yra nesinusinė. Ji iškreipoma tuo labiau, kuo netiesiškesnė yra $B=f(H)$. Be to, srovė pralenkia magnetinį srautą fazę, ir tas fazių skirtumas yra tuo didesnis, kuo platesnė magnetolaidžio histerezės kilpa.

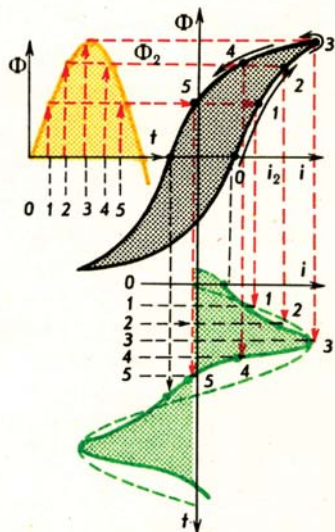
Grandinės, kuriomis teka nesinusinė srovė, tirti yra sudėtingiau (žr. 2.9). Kartais, kai srovės kreivės forma yra artima sinusinei, aukštesniųjų harmonikų galima nepaisyti. Laikoma, kad ritė teka tik pagrindinė srovės harmoninė dedamoji, kurios dažnis yra toks pat kaip įtampos. Kitais atvejais tokios grandinės tiriamos pakeitus nesinusinius dydžius ekvivalentiniais sinusiniais.

Toliau visas elektromagnetinių įrenginių elektrines grandines tirsime, laikydami, kad jomis teka ekvivalentinės sinusinės srovės. Taikysime išnagrinėtus sinusinės srovės grandinių tyrimo metodus, sinusinius dydžius užrašysime kompleksiniais dydžiais ir braižysime vektorines diagramas.

5.4.3. Vektorinė diagrama ir atstojamoji schema. Norėdami nubraižyti ritės su realiu magnetolaidžiu vektorinę diagramą, turime parašyti elektrinių dydžių – u , i , e_L – ir magnetinio srauto $\Phi(t)$ momentines išraiškas.

Realaus magnetolaidžio įmagnetinimo charakteristika yra histerezės kilpa. Kai ritė teka kintamoji srovė, magnetolaidis kiekvieną jos periodą yra permagnetinamas. Tam yra suvartojamas tam tikras elektros energijos kiekis, kuris magnetolaidyje paverčiamas šiluma. Tai yra energijos nuostoliai, proporcingi histerezės kilpos plotui. Kita realaus magnetolaidžio savybė yra ta, kad kintamasis magnetinis srautas jame indukuoja sūkurines EVJ. Dėl to šerdimi teka sūkurinės srovės, ir elektros energija taip pat paverčiama šiluma.

Dėl to, kad histerezės ir sūkurinių srovių nuostoliams suvartojamas tam tikras elektros energijos kiekis, ideali ritė, kurios $R=0$, turi aktyviąją galią. Ji vadinama magnetinių nuostolių galia ir apskaičiuojama šitaip: $P_{dm} =$



5.19 pav. Idealios ritės srovės $i=f(t)$ kreivės sudarymas iš magnetinio srauto $\Phi=f(t)$ bei vėberamperinės charakteristikos $\Phi=f(i)$

$= UI \cos \varphi$; čia φ – fazių skirtumas tarp ritės įtampos ir srovės.

Matome, kad realaus magnetolaidžio atveju $P_{dm} \neq 0$. Iš čia gauname, kad $\cos \varphi \neq 0$, todėl $\varphi \neq \pi/2$ ir srovė atsilieka nuo įtampos fazė $\varphi < \pi/2$. Laikydami, kad ritės įtampa $u = U_m \sin(\omega t + \pi/2)$, srovę galime užrašyti šitaip: $i = I_m \sin(\omega t + \pi/2 - \varphi) = I_m \sin(\omega t + \delta)$.

Magnetinį srautą galime užrašyti iš saviindukcijos EVJ išraiškos. Prisiminę, kad $e_L = d\Psi/dt$ ir $\Psi = N\Phi$ (žr. (2.18) ir (5.23)), gauname:

$$e_L = Nd\Phi/dt. \quad (5.31)$$

Pagal II Kirchhofo dėsnį $e_L = u = U_m \sin(\omega t + \pi/2)$. Įrašę šią e_L į (5.31) ir išreiškę magnetinį srautą, gauname:

$$\Phi(t) = (1/N) \int U_m \sin(\omega t + \pi/2) dt = (U_m/(\omega N)) \sin \omega t.$$

Kaip matome, magnetinio srauto pradinė fazė yra lygi nuliui: $\Phi(t) = \Phi_m \sin \omega t$. Kaip ir tiesinio magnetolaidžio atveju, magnetinis srautas proporcingas įtampai: $\Phi_m = U_m/(\omega N)$, o EVJ $E = 4,44fN\Phi_m$.

Visus dydžius užrašysime kompleksine forma:

$$\underline{\Phi} = \Phi; \quad \underline{I} = Ie^{j\delta}; \quad \underline{U} = Ue^{j90^\circ}; \quad \underline{E}_L = E_L e^{j90^\circ} \quad (5.32)$$

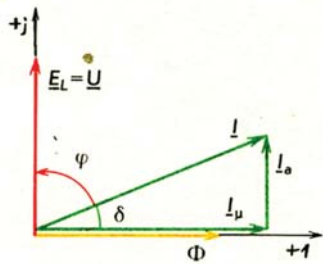
ir pavaizduosime juos grafiškai (5.20 pav.).

Srovė, tekanti rite, pralenkia magnetinį srautą fazė δ , kuri yra vadinama **nuostolių kampu**. Srovės vektorių \underline{I} galime suskaidyti į dvi dedamąsias. Ta dedamoji, kuri sutampa fazė su įtampa, yra aktyvioji – \underline{I}_a , o ta, kuri atsilieka nuo įtampos fazė $\pi/2$, – reaktyvioji. Ji paprastai vadinama **įmagnetinimo srove** ir žymima \underline{I}_μ .

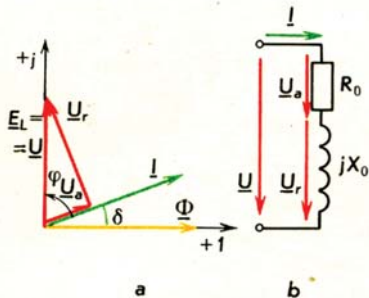
Kuo didesnė nuostolių galia $P_{dm} = \underline{U}\underline{I}_a$, tuo didesnė $I_a = I \sin \delta = I \cos \varphi$; tuo didesnis nuostolių kampas δ ir mažesnis fazių skirtumas tarp įtampos ir srovės. **Kai magnetiko histerezės kilpa yra siaura ir magnetolaidis surenkamas iš lakštų sukūriniams srovėms mažinti, šis nuostolių kampas esti gana nedidelis – nuo 5 iki 10°.**

Idealią ritę, tūtinčią realų magnetolaidį, galima pavaizduoti atstojamąja schema grandinės, kuriai tiktų 5.20 pav. nubraižyta vektorinė diagrama. Tokia grandinė gali būti sudaryta iš lygiagrečiai arba nuosekliai sujungtų aktyvaus ir induktyvaus pobūdžio imtuvų.

Norėdami nagrinėjimą ritę pakeisti nuosekliai sujungtų elementų grandine, išskaidysime vektorinės diagramos \underline{U} vektorių į aktyviają (sutampa fazė su srove) ir reaktyviają (pralenkia srovę $\pi/2$) dedamąsias: $\underline{U} = \underline{U}_a + \underline{U}_r$ (5.21 pav.). Nuosekliai sujungtų imtuvų varžos:



5.20 pav. Idealios ritės su realiu magnetolaidžiu vektorinė diagrama



5.21 pav. Idealios ritės su realiu magnetolaidžiu vektorinė diagrama (a) ir atstojamoji nuosekliai sujungtų elementų schema (b)

$$R_0 = U_a/I; \quad X_0 = U_r/I; \quad Z_0 = R_0 + jX_0; \quad (5.33)$$

čia $U_a = U \sin \delta = U \cos \varphi$; $U_r = U \cos \delta = U \sin \varphi$.

Magnetinių nuostolių galia (aktyvioji ritės galia):

$$P_{dm} = UI_a = U_a I = UI \cos \varphi = UI \sin \delta = R_0 I^2. \quad (5.34)$$

Reaktyvioji ritės galia:

$$Q_L = UI_\mu = U_r I = UI \sin \varphi = UI \cos \delta = X_0 I^2. \quad (5.35)$$

5.4.4. Energijos nuostoliai magnetolaidyje ir jų mažinimo būdai. Ritės, turinčios realių magnetolaidį, aktyvioji galia yra magnetinių nuostolių galia:

$$P_{dm} = P_{dh} + P_{dF}; \quad (5.36)$$

čia P_{dh} ir P_{dF} – histerezės ir sūkurinių (Fuko) srovių nuostolių galia.

Histerezės nuostoliai gaunami dėl plieno permagnetinimo kiekvieną srovės periodą. Kaip jau buvo minėta, jų galia yra proporcinga histerezės kilpos plotui:

$$P_{dh} = V \oint H dB; \quad (5.37)$$

čia V – magnetolaidžio tūris.

Praktiškai histerezės nuostolių galia dažniausiai apskaičiuojama šitaip:

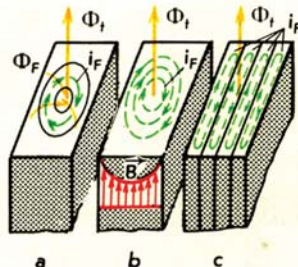
$$P_{dh} = C_h f B_m^2 m; \quad (5.38)$$

čia C_h – koeficientas, kurio vertė priklauso nuo magnetolaidžio medžiagos, f – ritės srovės dažnis, B_m – magnetinės indukcijos amplitudė, m – magnetolaidžio masė.

Laispnio rodiklis $n=1,6$, kai $B_m < 1$ T, ir $n=2$, kai $B_m > 1$ T.

Sūkurinės srovės magnetolaidžiu teka, kai jį veria ritės kintamasis magnetinis srautas, kuris indukuoja magnetolaidyje sūkurines EVJ (5.22 pav.). Išskirkime masiviame vientisame magnetolaidyje tiriamąjį uždara laidininką, kurį veria didėjantis magnetinis srautas Φ_r . Laidininke indukuojama EVJ, kuri sukuria jame sūkurinę srovę i_F , o pastaroji – magnetinį srautą Φ_F . Kaip žinome srauto Φ_F yra tokios krypties, kad priešintųsi magnetinio srauto Φ_r kitimui (Lenco principas).

Dėl sūkurinių srovių magnetolaidžio indukcija B sumažėja ir pasiskirsto jo skerspjūvyje nevienodai. Dėl to, norint gauti reikiamą vidutinę indukciją, tenka padidinti magnetinio lauko stiprumą, didinant magnetovaros jėgą. Tai tolygu magnetiko histerezės kilpos praplatinimui. Kai sūkurinių srovių nėra, kilpa yra siauresnė ir vadinama statine. Kai sūkurinių srovių efektas pasireiškia, ji platesnė



5.22 pav. Sūkurinės srovės išskirtajame laidininke (a), masiviame (b) ir lakštiniame (c) magnetolaidyje, kai $d\Phi/dt > 0$

ir vadinama **dinamine** (5.23 pav.). Dinaminės ir statinės histerezės kilpų plotų skirtumas yra proporcingas sukuriųjų srovių nuostolių galiai P_{dF} .

Sūkurinių srovių visiškai išvengti neįmanoma, bet jas ir neigiamą jų poveikį galima sumažinti, didinant magnetolaidžio elektrinę varžą. Ją galima padidinti dviem būdais: padidinti magnetiko specifinę elektrinę varžą ir sumažinti skerspjuvį kontūro, kuriuo teka sūkurinė srovė. Plieno specifinė elektrinė varža padidinama silicio priemaišomis, todėl elektrotechninio plieno sudėtyje yra nuo 0,5 iki 4,5% silicio, kuris neblogina plieno magnetinių savybių. Sūkurinės srovės kontūro skerspjuvis sumažinamas, surenkant magnetolaidį iš lakštų.

Magnetolaidis surenkamas taip, kad magnetinis srautas būtų nukreiptas išilgai lakštų, todėl sūkurinės srovės turi tekėti labai mažais jų skerspjuviais. Kad sūkurinės srovės netekėtų tarp lakštų, šių paviršius izoliuojamas laku, dažais, plonu popieriumi, termiškai arba chemiškai apdorojamas taip, kad lakštų paviršiaus varža būtų didelė.

Pramoninio dažnio (50 Hz) elektrinių įrenginių magnetolaidžiai gaminami iš 0,35–0,50 mm storio elektrotechninio plieno lakštų. Kai srovės dažnis didesnis, sūkurinės srovės yra stipresnės, todėl lakštai turi būti plonesni: nuo 0,05 iki 0,2 mm.

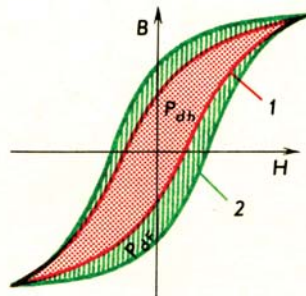
Sūkurinių srovių nuostolių galia apskaičiuojama šitaip:

$$P_{dF} = C_F f^2 B_m^2 \Delta^2 m; \quad (5.39)$$

čia C_F – koeficientas, kurio vertė priklauso nuo magnetolaidžio medžiagos ir konstrukcijos, f – srovės dažnis, B_m – magnetinės indukcijos amplitudė, Δ – lakšto storis, m – magnetolaidžio masė.

Paprastai žinyuose pateikiama įvairių medžiagų magnetinių nuostolių santykinė galia. Elektrotechniniam plienui, kai $B_m = 1$ T, $f = 50$ Hz, $\Delta = 0,5$ mm, ji sudaro nuo 1 iki 4 W/kg.

Kaip matome (žr. (5.38) ir (5.39)), magnetinių nuostolių galia yra proporcinga magnetinės indukcijos kvadratui: $P_{dm} \sim B^2$. Kadangi $B = \Phi/S$, o magnetinis srautas proporcingas įtampai (žr. (5.28)), tai magnetinių nuostolių galia $P_{dm} \sim U^2$. Be to, magnetiniai nuostoliai tuo didesni, kuo didesnis rite tekančios srovės dažnis.



5.23 pav. Statinė (1) ir dinaminė (2) histerezės kilpa

5.5

Reali ritė su magnetolaidžiu kintamosios srovės grandinėje

Laikydami ritę idealia, nepaisėme jos apvijų aktyviosios varžos ir sklaidos magnetinio srauto. Iš tiesų elektri-

nių įrenginių **apvijos turi aktyviąją varžą**. Jų magnetolaidžio indukcija esti gana artima soties magnetinei indukcijai todėl tenka įvertinti ir **sklaidos magnetinio lauko įtaką**.

Išnagrinėsime realios ritės su magnetolaidžiu savybes, laikydami, kad ritės aktyvioji varža yra R , o sklaidos magnetinis srautas – Φ_d .

5.5.1. Atstojamoji schema ir vektorinė diagrama. Sudarant realios ritės atstojamąją schemą, apvijų aktyvioji varža yra vaizduojama rezistoriumi R (5.24 pav.). **Skaidos magnetinis srautas Φ_d , verdamas ritės apvijas, indukuoja jose EVJ, kuri yra vadinama sklaidos EVJ ir žymima e_d** . Prisiminę, kad dėl pagrindinio magnetinio lauko kitimo dar yra indukuojama saviindukcijos EVJ e_L , realiai ritei II Kirchhofo dėsnį galime užrašyti šitaip:

$$u = e_L + Ri + e_d. \quad (5.40)$$

Skaidos EVJ $e_d = L_d di/dt$ (žr. (2.18)); čia L_d – **ritės skaidos induktyvumas. Jį galime laikyti pastoviu** (žr. (5.24)), nes didžioji skaidos srauto kelio dalis yra nemagnetikas – oras, kurio magnetinė varža yra pastovi.

Įrašę e_d į (5.40), turime:

$$u = e_L + Ri + L_d di/dt. \quad (5.41)$$

Iš II Kirchhofo dėsnio $e_d = u_d$, todėl trečiąjį (5.41) lygties dešinėsios pusės narį galime pakeisti skaidos induktyviąja įtampa: $u_d = \omega L_d i$.

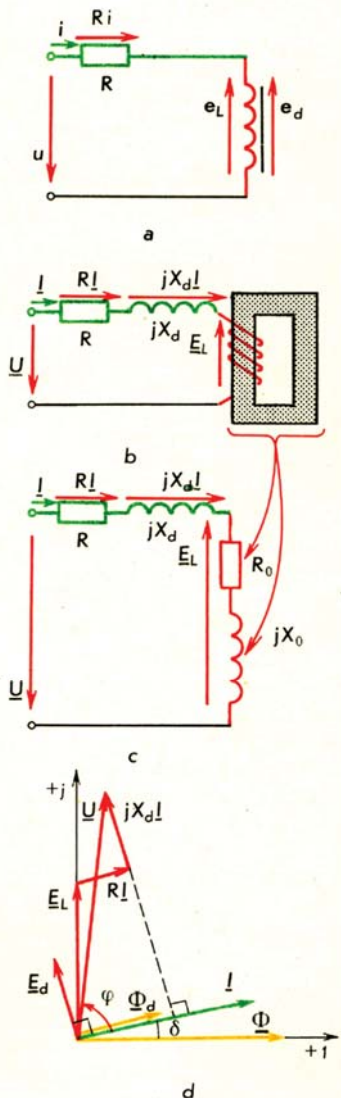
Tokiu būdu realios ritės **atstojamąją schemą** galime sudaryti iš trijų elementų: idealios ritės su realiu magnetolaidžiu, rezistoriaus R ir idealios ritės be magnetolaidžio, kurios induktyvioji varža $X_d = \omega L_d$. Savo ruožtu idealią ritę su magnetolaidžiu galime pakeisti nuosekliai (žr. 5.21 pav.) (ar lygiagrečiai) sujungtų elementų grandine.

Laikydami, kad 5.24 pav., *c* pavaizduotos grandinės įtampa yra sinusinė, o srovę pakeitėme ekvivalentine sinusine, II Kirchhofo dėsnį galime užrašyti kompleksine forma šitaip:

$$\underline{U} = \underline{E}_L + \underline{R}I + jX_d I; \quad (5.42)$$

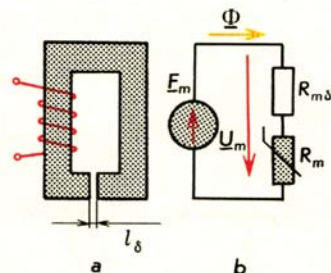
čia X_d – ritės skaidos induktyvioji varža.

Vektorinei diagramai nubraižyti pasirinkame magnetinio srauto pradinę fazę lygią nuliui: $\Phi = \Phi e^{j\omega t} = \Phi$. Srovė I pralenkia fazę δ magnetinį srautą Φ (δ – magnetinių nuostolių kampas). Kadangi oras yra nemagnetikas, galime laikyti, kad skaidos srautas Φ_d yra tos pačios fazės kaip srovė I . Įtampos \underline{U} vektorius sudaromas, atliekant (5.42)



5.24 pav. Realios ritės su realiu magnetolaidžiu elektrinė (a) bei atstojamosios (b, c) schemas ir vektorinė diagrama (d)

lygtimi užrašytus veiksmus grafiškai. EVJ E_L ir E_d pralenkia $\pi/2$ fazę jas kuriančius magnetinius srautus Φ ir Φ_d . Įtampos kritimas dėl aktyviosios ritės varžos R_I sutampa faze su srove, o įtampos kritimas dėl sklaidos induktyviosios varžos $jX_d I'$ pralenkia srovę fazę $\pi/2$.



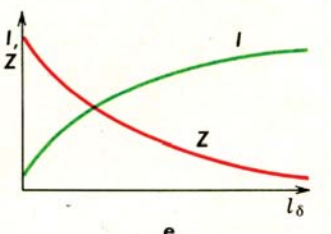
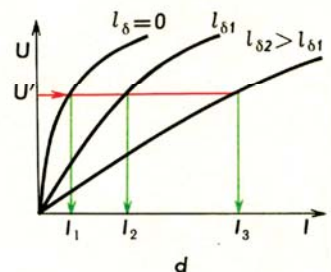
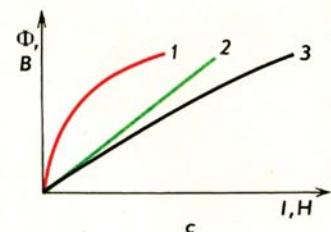
5.5.2 Ritė su oro tarpu magnetolaidyje. Praktikoje yra nemažai elektromagnetinių įtaisų, kurių magnetinėse grandinėse oro tarpas yra būtinas, kad jie galėtų veikti (pavyzdžiui, elektros varikliai), arba reikia, kad jų ritės induktyvumas būtų reguliuojamas tam tikrose ribose (pavyzdžiui, suvirinimo agregatai). Kartais maži oro tarpai yra technologškai neišvengiami (pavyzdžiui, susidaro lakštų sandūrose, surenkant transformatoriaus magnetolaidį). **Oro tarpo savybės turi ir kitoks nemagnetinis magnetolaidžio intarpas:** kartonas, bronzos, varis, aliuminis ir panašios medžiagos.

Pradėdami nagrinėti tarkime, kad elektromagneto ritė (5.25 pav.) yra ideali: $R=0$, $X_d=0$, o magnetolaidyje nuostolių nėra. Tokio magnetiko įmagnetinimo charakteristika yra $B=f(H)$ kreivė (1). Oro tarpo $B=f(H)$ yra tiesė (2). Kaip žinome, įmagnetinimo charakteristikas galime pakeisti vėberamperinėmis, kurių pobūdis yra toks pat. Ritės magnetinę grandinę galime pavaizduoti nuosekliai sujungtų netiesinio ir tiesinio imtuvų schema ir tirti ją charakteristikų sumavimo metodu (žr. 1.7.4). Suminė grandinės vėberamperinė charakteristika (3) artimesnė tiesinei, todėl **ritėje, kurios magnetolaidis turi oro tarpą, srovės kreivės forma yra artimesnė sinusinei.**

Prisiminę, kad idealios ritės su magnetolaidžiu voltamperinės charakteristikos yra tokio pobūdžio kaip vėberamperinės, galime sudaryti visą $U=f(I)$ šeimą priklausomai nuo oro tarpo didumo. Žinodami ritės įtampą U , galime atskaityti ritės srovės vertes I_1 , I_2 , I_3 , esant įvairaus didumo oro tarpui. Patogu sudaryti tiriamosios grandinės srovės arba pilnutinės elektrinės varžos priklausomybę nuo oro tarpo: $I=f(l_\delta)$ arba $Z=f(l_\delta)$ (žr. 5.25 pav., c).

Kaip matome, **esant pastoviai ritės įtampai, ritės pilnutinė varžą, tuo pačiu ir srovę, galima reguliuoti, keičiant oro tarpą.**

Realių ričių, turinčių magnetolaidį su oru tarpu (jos vadinamos droseliais), magnetines grandines tirti yra daug sudėtingiau. Norint sudaryti jų voltamperines charakteristikas, reikia dar įvertinti ritės aktyviają varžą, magnetinio srauto sklaidą, histerezės bei sukurinių srovių įtaką. Dėl to droselių grandinės paprastai tiriamos apytiksliai, jas idealizuojant. Gauti rezultatai tikslinami eksperimentiškai.



5.25 pav. Nevienalytė magnetinė grandinė (a), jos atstojamoji schema (b), magnetolaidžio (1), oro tarpo (2) ir suminė (3) įmagnetinimo bei vėberamperinės charakteristikos (c), voltamperinių charakteristikų šeima (d), srovės ir pilnutinės varžos priklausomybės nuo oro tarpo didumo (e)

Kontroliniai klausimai ir užduotys

- 5.1. Paaiškinkite, kas tai yra:
- magnetinė indukcija, srautas, lauko stiprumas;
 - absoliutinė, santykinė magnetinė skvarba;
 - magnetinė, nemagnetinė medžiaga;
 - minkštamagnetė, kietamagnetė medžiaga;
 - vienalytė magnetinė grandinė, magnetolaidis;
 - sklaidos srautas, EVJ, varža;
 - histerezės ir sukurinių srovių nuostoliai.
- 5.2. Kaip galima spręsti apie magnetinės medžiagos permagnetinimo nuostolius pagal jos histerezės kilpą? Kokios medžiagos naudojamoms kintamosios srovės elektromagnetinių aparatų magnetolaidžiams ir kodėl?
- 5.3. Nubraižykite paprasčiausios magnetinės grandinės atstojamą ir jai analogiškos elektrinės grandinės schemą. Sužymėkite magnetinius ir jiems analogiškus elektrinius dydžius.
- 5.4. Parašykite magnetinės varžos matematinę išraišką. Ar tokia pat magnetinė varža medinio ir plieninio strypo, kai jų matmenys vienodi? Kodėl?
- 5.5. Užrašykite Omo dėsnį magnetinei grandinei. Ar bus toks pat magnetinis srautas, jei ritės plieninį magnetolaidį pakeisime mediniu, bet nepakeisime srovės? Kodėl?
- 5.6. Kokią įtaką magnetolaidžio magnetinei varžai turi oro tarpas? Ar pasikeis plieninio magnetolaidžio magnetinė varža, jei dalį magnetolaidžio išpjausime ir padarysime oro tarpą?
- 5.7. Užrašykite I ir II Kirchhofo dėsnį magnetinei grandinei. Kokiai grandinei taikomas kiekvienas iš jų?
- 5.8. Kaip sprendžiamas tiesioginis uždavinys tiriant magnetinę grandinę?
- 5.9. Kodėl magnetinę grandinę tirti kebliau, kai reikia spręsti atvirkštinį uždavinį? Kaip tai daroma?
- 5.10. Kaip tiriama magnetinė grandinė charakteristikų sukirtimo metodu?
- 5.11. Nuo ko priklauso elektromagneto traukos jėga? Kaip ji kinta mažėjant oro tarpui ir kodėl?
- 5.12. Kokią elektromagnetinę ritę, kuria teka kintamoji srovė, laikome idealia ir kokią – realia?
- 5.13. Parašykite ritės induktyvumo išraišką ir paaiškinkite, kaip nuo magnetolaidžio savybių priklauso, kada ritė yra tiesinis ir kada netiesinis kintamosios srovės grandinės elementas?
- 5.14. Kodėl idealioje ritėje su netiesine magnetine grandine srovė nesisūtinėja, nors ritė prijungta prie sinusinės įtampos? Kaip tą įrodyti grafiškai?
- 5.15. Nubraižykite idealios ritės su netiesine magnetine grandine vektorinę diagramą ir elektrinę atstojamą schemą. Paaiškinkite, kaip braižomas kiekvienas vektorius.
- 5.16. Kodėl idealios ritės srovė nesutampa faze su magnetiniu srautu? Kodėl tas fazių skirtumo kampas vadinamas nuostolių kampu?
- 5.17. Kokie energijos nuostoliai yra magnetolaidyje, kai jį veria kintamasis magnetinis srautas? Nuo ko jie priklauso ir kaip juos sumažinti?
- 5.18. Parašykite lygtį pagal II Kirchhofo dėsnį realios ritės elektrinei grandinei, nubraižykite jos vektorinę diagramą ir elektrinę atstojamą schemą.
- 5.19. Kaip ir kokių tikslu drošelio elektrinė varža keičiama magnetinės grandinės oro tarpu?
- 5.20. Kas yra statinė ir dinaminė histerezės kilpa? Kuo jos skiriasi ir kodėl?