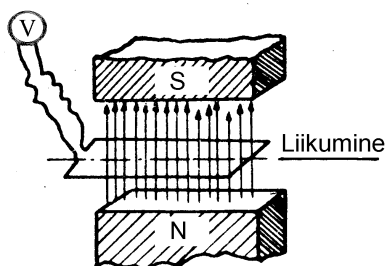


4 Elektromagnetiline induktsioon

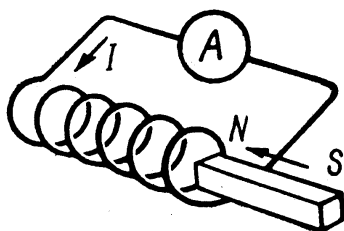
4.1 Elektromagnetilise induktsiooni mõiste

Elektromagnetiline induktsioon on nähtus, mille puhul magnetvälja toimet juhtmes indutseerub (tekib) elektromotoorjõud (emj.). Selle füüsilise nähtuse avastas inglise füüsik Michael Faraday 1831. aastal. Tüüpilisemad on kolm võimalust:

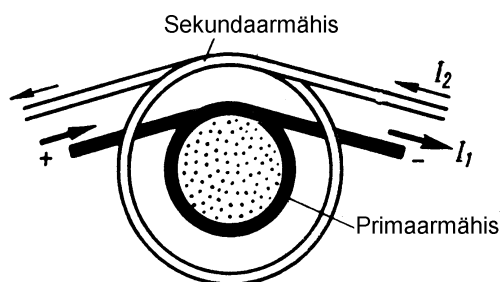
1) juhe liigub paigalseisva magnetvälja suhtes



2) magnetväli liigub paigalseisva juhtme suhtes



3) juhe ja magnetväli püsivad paigal, kuid magnetvoo tihedus muutub ajas

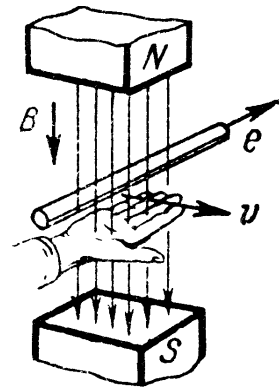


4.2 Juhtmes indutseeritav elektromotoorjõud

Igas juhtmes, mis magnetväljas liikudes lõikab jõujooni, tekib elektromotoorjõud (emj.); kui aga juhtmeotsad on omavahel ühendatud, s.t. vooluring on suletud, tekib selles vool.

Indutseeritava elektromotoorjõu suund määratakse **parema käe reegl**iga:

Kui jõujooned suunduvad peopessa ja põial näitab juhtme liikumise suunda, siis väljasirutatud sõrmed näitavad indutseeritud elektromotoorjõu suunda.



Parema käe reegel

Indutseeritav elektromotoorjõud on seda suurem, mida suurem on magnetvoo tihedus ja mida kiiremini juhe seda löikab:

$$E = Blv \sin \alpha$$

- E indutseeritav emj. voltides (V)
- B magnetvootihedus e. induksioon teslades (T)
- l juhtme aktiivpikkus meetrites (m)
- v juhtme liikumiskiirus magnetvälja suhtes m/s
- α juhtme liikumissuuna ja välja jõujoonte vaheline nurk.

Kui juhe liigub rööpselt jõujoontega, siis emj. ega voolu ei teki. ($\alpha = 0^\circ$, $\sin \alpha = 0$ või $\alpha = 180^\circ$, $\sin \alpha = 0$).

Indutseeritud emj. valemit väljendatakse sageli ka teisel kujul. Oletame, et juhe liigub väljajoontega risti olevas tasapinnas, siis tema nihkumisel Δs võrra ja Δt vältel indutseerub temas emj.

$$E = Blv = Bl \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Kuna induksiooni B ja pindala $\Delta S = l \Delta s$ korrutis $B \Delta S$ on võrdne magnetvooga, mida juhe liikumisel löikab $B \Delta S = \Delta \Phi$, siis juhtmes indutseeritav emj.

$$E = \frac{Bl \Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Juhtmes indutseeritav emj. on võrdeline kiirusega, millega juhe löikab magnetvoogu.

4.3 Lenzi reegel

Indutseeritava elektromotoorjõu ja voolu suunda saab määrata Lenzi reegli järgi:

Indutseeritava emj. poolt põhjustatava voolu suund on alati niisugune, et ta töötab vastu voolu tekitavale nähtusele, s.t. püüab säilitada väljakujunenud olukorda. See on sisuliselt inertsiseadus.

4.4 Keerus ja poolis indutseeritav elektromotoorjõud

Kui kontuuri (näiteks keeru) liikumisel aja Δt vältel kontuuri läbiv magnetvoog muutub siis kontuuris indutseeritakse elektromotoorjõud

$$e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

kus

$$\Delta \Phi = \Phi_1 - \Phi_2.$$

Indutseeritud elektromotoorjõu tekkimise vältimatuks eelduseks keerus on seda keerdu läbiva (ehk keeruga aheldatud) magnetvoo muutus.

Juhtmekeerus indutseeritava elektromotoorjõu suurus võrdub keeruga aheldatud magnetvoo muutuse kiirusega.

Kui on tegemist jadamisi ühendatud w keerust koosneva pooliga, siis on indutseeritav emj. w korda suurem kui ühes keerus:

$$e = - w \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

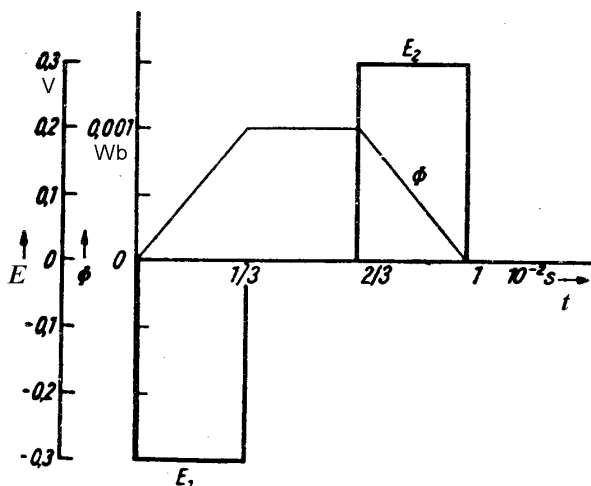
Keerdude arvu ja neid läbiva magnetvoo korrutist nimetatakse aheldusvooks ja tähistatakse tähega Ψ (kreeka suurtäht *psi*):

$$\Psi = w \Phi.$$

Poolis indutseeritav elektromotoorjõud on seega võrdeline aheldusvoo muutumise kiirusega:

$$e = - w \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{\Delta \Psi}{\Delta t}$$

Joonisel on näidatud, kuidas ehitada indutseeritava emj. graafikut, kui on antud pooli läbiva magnetvoo muutuse graafik.

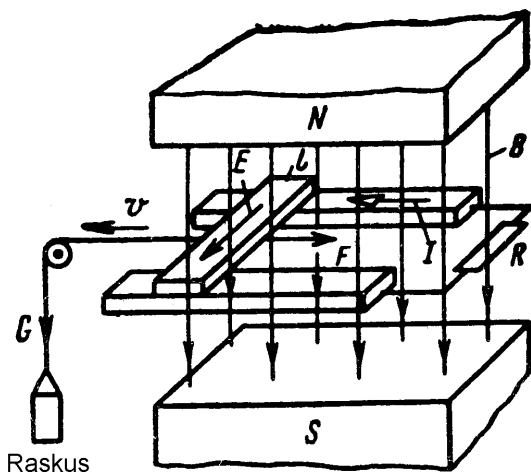


Ülesande lahendamisel on oluline pöörata tähelepanu asjaolule, et

- 1) indutseeritav emj. sõltub magnetvoo muutumise kiirusest
- 2) indutseeritav emj. on võrdne nulliga, kui magnetvoog ei muutu, s.t. tema graafik on rööpne ajateljega
- 3) magnetvoo suurenedes on emj. negatiivne, vähenedes aga positiivne.

4.5 Mehaanilise energia muundamine elektrienergiaks

Valdav enamus elektrienergia generaatoreid töötab elektromagnetilise induktsiooni põhimõttel.



Kui liigutada juhet magnetväljas kiirusega v , siis indutseeritakse juhtmes elektromotoorjõud $E = Blv$. Kui juhtme otstega on ühendatud välistakisti R , tekib suletud vooluringis vool I ja sellega kaasneb jõud

$$F = BIl,$$

mille suund määratakse **vasaku käe reegli**ga:

Kui magnetjõujooned on suunatud vasaku käe peopesa ja voolu suund juhtmes ühtib väljasirutatud sõrmede suunaga, siis näitab kõrvalesirutatud põial juhtmele mõjuva jõu suunda.

Selgub, et jõud on kiirusele vastassuunaline, seega pidurdav jõud. Järelikult tuleb juhtme liigutamiseks rakendada välist jõudu, mis on pidurdavale jõule vastassuunaline.

Vajalik mehaaniline võimsus

$$P_{meh} = \frac{A}{t} = \frac{Fs}{t} = Fv = BIlv = EI = P_{el},$$

s.t. jõumasina poolt arendatav mehaaniline võimsus võrdub elektrilise võimsusega suletud vooluringis ning vaadeldaval juhul muutub soojuseks $P_{el} = I^2 R$.

Järelikult võib magnetväljas asetsevat juhet vaadelda lihtsaima elektrigeneraatorina, milles mehaaniline energia muundub elektrienergiaks.

4.6 Elektrienergia muundamine mehaaniliseks energiaks

Kui vooluga juhe liigub elektromagnetilise jõu mõjul magnetväljas, toimub elektrienergia muundumine mehaaniliseks energiaks. Juhtmele mõjub jõud

$$F = BIl,$$

mille suund määratakse vasaku käe reeglina. Kui see jõud on suurem hõõrdejõust, hakkab juhe jõu suunas liikuma. Kui juhe liigub jõujoontega ristasapinnas kaugusele b , siis tehakse elektrienergia arvel mehaaniline töö

$$A_{meh} = Fb = BIlb,$$

samal ajal kulub osa energiat I^2Rt juhtme soojendamiseks. Siin R on vooluringi kogutakistus ja t juhtme edasiliikumise aeg.

Seega vooluga juhtme liikumisel magnetväljas muundub toiteallikast saadav elektrienergia välja jõudude mõjul mehaaniliseks energiaks ja soojusenergiaks.

Magnetväljas liikuvat juhet, mida toidetakse kõrvalisest toiteallikast, võib vaadelda kui lihtsaimat elektrimootorit.

4.7 Pöörivoolud

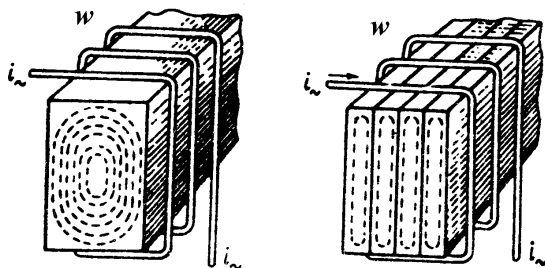
Elektrotehnikas on palju erinevaid aparate ja masinaid, millel on terassüdamikuga mähised. Nagu juhtmekeerus, indutseeritakse vahelduvas magnetväljas igas juhtivas materjalis, siis ka terassüdamikus voolud. Neid nimetatakse pöörivooludeks (ka Foucault' [fukoo] voolud – nende esimese uurija, prantsuse füüsiku Léon Foucault' (1819–1866) nime järgi).

Pöörivoolud kuumendavad metalli, milles nad kulgevad, ning tekitavad magnetvoo, mis Lenzi seaduse kohaselt toimivad vastu neid põhjustavale magnetvoole. Osa energiat muutub soojusenergiaks. Pöörivoolude tekitatud energiakadu nimetatakse pöörivoolukaoks.

Pöörivoolud on elektrimasinates ja aparaatides tavaliselt ebasoovitavad, kuna pöörivoolukadu kuumutab täiendavalt masinat ning halvendab kasutegurit. Lisaks toimivad pöörivoolud lahtimagneetivalt.

Pöörivoolukao vähendamiseks valmistatakse südamikud õhukestest (0,1...0,5 mm) üksteisest isoleeritud terasplekkidest, mis on magnetvoo sihis, see tähendab pöörivooludega risti.

Elektrotehnilisest plekist terase ehk elektrotehnilise lehtterase koostises on 0,5...5 % räni, mis tunduvalt vähendab elektrijuhtivust. See vähendab pöörivoolusid, kusjuures pleki magnetilised omadused ei halvene.



Pöörivoolusid rakendatakse kasulikult näiteks terasesemete pindkarastamisel, eriteraste ja värviliste metallide sulatamisel, mooteriistade mehhanismi käitamiseks või hoopis mooteriista osuti võnkumise summutamiseks.

4.8 Induktiivsus

Eespool (jaotises 4.4) selgus, et indutseeritav elektromotoorjõud on võrdeline aheldusvoo muutumise kiirusega:

$$e = -\frac{\Delta\Psi}{\Delta t},$$

kus aheldusvoog

$$\Psi = w\Phi,$$

sest üldjuhul võib magnetvoog Φ olla aheldatud kontuuriga, mis koosneb w keerust.

Kui pole ferromagnetilist südamikku, siis magnetvoog ja järelikult ka aheldusvoog on võrdeline vooluga I kontuuris (poolis).

Võrdetegurit aheldusvoo ja magneetimisvoolu vahel ehk jagatist

$$\frac{\Psi}{I} = L,$$

nimetatakse **induktiivsuseks** ehk omainduktiooniteguriks.

Induktiivsuse ühik on henri (H).

Pooli induktiivsus on 1 henri, kui 1-amprise voolu korral on pooli aheldusvoog 1 veeber.

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{Wb}{A} = \frac{V \cdot s}{A} = \Omega \cdot s = H.$$

Kuna henri on väga suur ühik, siis kasutatakse sageli palju väiksemaid:

$$1 \text{ millihenri} = 10^{-3} H = \frac{1}{1000} H = 1 \text{ mH}$$

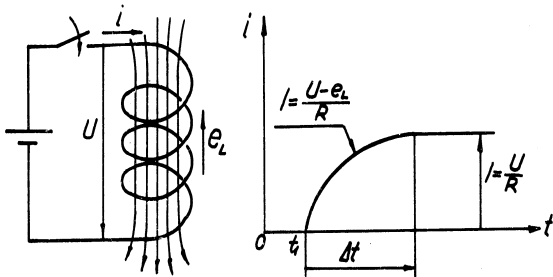
$$1 \text{ mikrohenri} = 10^{-6} H = \frac{1}{1000000} H = 1 \mu H$$

Poolis indutseeritava elektromotoorjõu avaldise võib nüüd kirjutada induktiivsuse kaudu:

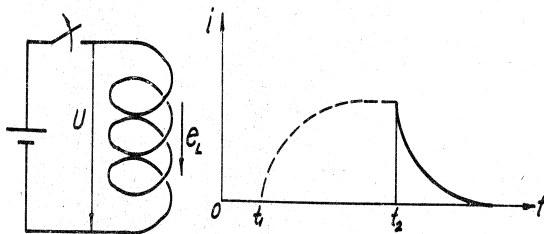
$$e = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Seda nimetatakse endainduktsiooni elektromotoorjõuks. Sisuliselt on see vastu-elektromotoorjõud, sest Lenzi reegli kohaselt voolu suurenedes on endainduktsiooni elektromotoorjõud suunatud teda tekitavale voolule vastu, mida näitab ka miinusmärk valemis.

Joonisel on näidatud voolu muutus ajas sisselülitamise hetkest t_1 .



Voolu vähendamisel või väljalülitamisel püüab endainduktsiooni elektromotoorjõud voolu säilitada. Lülitil avamisel ajahetkel t_2 vähenevad vool ja magnetvoog nullini. Voolu muutumine indutseerib poolis endainduktsiooni elektromotoorjõu e_L , mis on toiteallika vooluga samasuunaline ning püüab takistada voolu vähenemist. Seepärast vool ei vähene hetkeliselt vaid eksponentsiaalselt, nagu näha järgneval joonisel.



Ahela katkestamise hetkel on lüliti kontaktide vahel pinge

$$U + e_L,$$

mis võib mitmekordselt ületada toiteallika pinget. Seetõttu võib lüliti kontaktide vahel tekkida kaarleek, mis ioniseerib õhu ja võimaldab pärast kontaktide avanemist voolu kestmist veel mõne hetke.

Sädelemine või kaarleek kahjustab lüliti kontakte. Seepärast on mehaanilised lülitid enamasti varustatud vedruga, mis väljalülitamisel kiirendab kontaktide eemaldumist.

Mistahes pooli induktiivsus sõltub tema kujust ja on võrdeline keerdude arvu ruuduga. Pooli põhilisteks tunnussuurusteks on aktiivtakistus R ja induktiivsus L .

4.9 Magnetvälja energia

Magnetvälja tekitamiseks tuleb kulutada elektrienergiat ja vastupidi: kadumisel indutseerib magnetväli elektromotoorjõu ja voolu, see tähendab, et magnetvälja energia muundub elektrienergiaks.

Energia, mis salvestub magnetväljas voolu suurenemisel nullist I -ni, väljendub valemiga

$$W_M = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Psi I}{2}$$

W_M magnetvälja energia džaulides (J)

L induktiivsus henrides (H)

I vool amprites (A)

Ψ aheldusvoog veebrites (Wb).