

TARTU ÜLIKOOL

Teaduskool

Magnetism

Koostanud Urmo Visk

Tartu 2007

Sisukord

Voolude vastastikune mõju.....	2
Magnetinduktsioon.....	3
Ampere'i seadus.....	6
Lorentzi valem.....	9
Tsirkulatsiooniteoreem.....	13
Elektromagnetiline induktsioon.....	17
Pööriselektriväli.....	26
Endainduktsioon.....	27
Elektromagnetiline pomm.....	31
Magnetvälja energia.....	32
Kasutatud kirjandus.....	36
Materjalide suhtelisi magnetilisi läbitavusi.....	37
Ülesanded.....	38

Voolude vastastikune mõju

Üheks esimeseks magnetvälja tundma õppimise viisiks oli uurida, kui suure jõuga tõmbuvad kaks juhet, kui neid läbib elektri-vool. Aastal 1820 jõudis A. M. Ampère [ampe:r] järeldusele, et juht-mete vahel mõjub jõud

$$F = K \frac{I_1 I_2 l}{a} . \quad (1)$$

Siin on I_1 voolutugevus ühes ja I_2 voolutugevus teises juhtmes, l on vaatluse all oleva juhtmelõigu pikkus ja a on juhtmete kaugus teineteisest. Kui vool liikus mõlemas juhtmes samas suunas, siis juht-med tõukusid; kui voolud liikusid eri suundades, siis aga juhtmed tõmbusid. Valemis (1) on suurus K konstant, mille väärtus lõpmatult pikkade paralleelsete juhtmete korral on

$$K = \mu_0 / 2 \pi . \quad (2)$$

Konstandi K väärtus sõltub juhtmete pikkusest ja vooluringi kujust, kuid enamasti võib kasutada lõpmatult pikkade juhtmete jaoks kehti-vat väärtust. Ka μ_0 on konstant. Seda nimetatakse magnetiliseks konstandiks:

$$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} . \quad (3)$$

Magnetinduktsioon

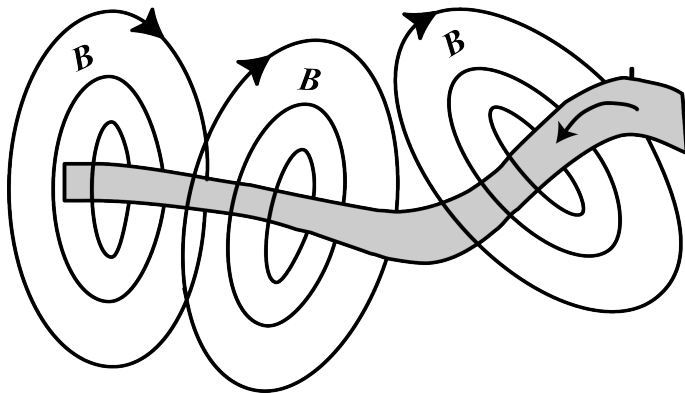
Elektrilaengud tekitavad enda ümber elektrivälja. Analoomiliselt tekitavad vooluga juhtmed enda ümber magnetvälja. Magnetvälja kirjeldamiseks tuleb valemis (1) vaadelda ühte juhet „välise“ magnetvälja tekitajana ja teist juhet asuvana esimese juhtme tekitatud magnetväljas. Välises väljas olevale juhtmele mõjuv jõud on seda suurem, mida pikem on juhe ja mida suurem on voolutugevus juhtmes. Kuna juhtmete vahel mõjuv jõud sõltub nii juhtmetes olevast voolutugevusest kui ka juhtmete pikkusest, siis jagatakse magnetvälja tugevuse leidmiseks kahe juhtme vahel mõjuv jõud F välises väljas oleva juhtme pikkusega l ja ka välises väljas oleva elektrivoolu tugevusega I_2 :

$$B = \frac{F}{I_2 l} = K \frac{I_1}{a} . \quad (4)$$

Leitud suurus B on **magnetiline induktsioon**, mis iseloomustab magnetvälja tugevust. Magnetilise induktsiooni ühik on 1 T [tesla]. $1 \text{ T} = 1 \text{ N}/(\text{A} \cdot \text{m}) = 1 \text{ kg}/(\text{A} \cdot \text{s}^2)$. Ühik on nime saanud horvaatia elektriinseneri Nikola Tesla järgi, kes leiutas rohkelt vahelduvvoolu ja elektromagnetlaineid kasutavaid seadmeid.

Kui elektrivälja jõujooned algasid laetud osakeselt ja lõppesid lõpmatuses, siis magnetilise induktsiooni jõujooned algavad ja lõpevad samas punktis, moodustades suletud silmuseid. Näiteks sirge

juhtme magnetilise induktsiooni jõujooned moodustavad juhtme ümber kontsentrilisi ringjooni.



Joonis 1: Elektri juhtme ümber oleva magnetinduktsiooni jõujooned, mis asuvad juhtme ümber kontsentriliste ringjoontena. Magnetilise induktsiooni jõujooned ei puuduta juhet ennast.

Magnetilise induktsiooni vektor on risti nii elektrivoolu suunaga juhtmetes kui ka juhtmete vahel mõjuva jõuga. Magnetilise induktsiooni suuna saab leida parema käe reegluga ehk kruvireegluga. Parema käsi tuleb panna rusikasse ja sirutada põial välja. Kui panna põial vooluga samasse suunda, siis näitavad ülejäänud sõrmed magnetilise induktsiooni suunda. Kehtib ka vastupidine: kui panna põial magnetilise induktsiooni suunas, siis näitavad teised sõrmed elektrivoolu suunda. Tähelepanu tuleb pöörata sellele, et elektrivoolu suund on positiivsete osakeste liikumise suund ehk vastupidine voolu teki-

tavate elektronide liikumisele.

Joonistel näidatakse magnetilise induktiooni suunda nooltega ning mõnikord on magnetinduktsioon suunatud paberi sisse või sellest välja. Kui magnetinduktsiooni vektor suundub paberi sisse, siis tähistatakse seda ringi sees oleva ristiga: $\otimes$. Kui magnetinduktsiooni vektor väljub paberist, siis märgib seda ringi keskel olev täpp: $\odot$. Täpp sümboliseerib paberist välja lendava noole otsa ja rist paberi sisse lendava noole saba.

Kui magnetväli eksisteerib mingis aines, mitte vaakumis, siis tuleb arvestada, et aine võib magnetvälja nõrgendada või tugevdada. Magnetinduktsiooni muutust aines kirjeldatakse suhtelise magnetilise läbitavusega μ , mis näitab, mitu korda on magnetinduktsioon aines **suurem** kui vaakumis. Elektrostaatikas kasutatav suhteline dielektriline läbitavus ϵ on analoogiline suhtelise magnetilise läbitavusega, kuid näitab, mitu korda on laengute vahel mõjuv jõud aines **väiksem** kui vaakumis.

Leidmaks jõudu ja magnetinduktsiooni aine sees, tuleb valemitesse (1) ja (4) lisada suhteline magnetiline läbitavus μ :

$$F = \mu K \frac{I_1 I_2 l}{a} \quad (5)$$

$$B = \mu \frac{F}{I_2 l} = K \frac{I_1}{a} . \quad (6)$$

Ained jagatakse magnetiliste omaduste järgi kolme rühma: dia-, para- ja ferromagneetikud. Diamagneetikutes on magnetiline induksioon väga vähe nõrgem kui vaakumis. Tavaliselt on diamagneetikute jaoks $\mu_{dia} = 0,9999 \div 0,9999999$. Paramagneetikud tugevdavad magnetilist induksiooni, kuid jällegi väga vähe: $\mu_{para} = 1,00000001 \div 1,01$. Enamasti võib ülesannete lahendamisel võtta para- ja diamagneetikute magnetilise läbitavuse üheks. Ferromagneetikud tugevdavad aga magnetilist induksiooni palju, sest nende korral on $\mu_{ferro} = 10^3 \div 10^6$. Lisaks sõltub ferromagneetikute suhteline magnetiline läbitavus magnetvälja tugevusest.

Ampere'i seadus

Avaldades valemist (4) magnetväljas olevale vooluga juhtmele mõjuva jõu, saame tulemuseks **Ampère'i seaduse**

$$F = I B l . \quad (7)$$

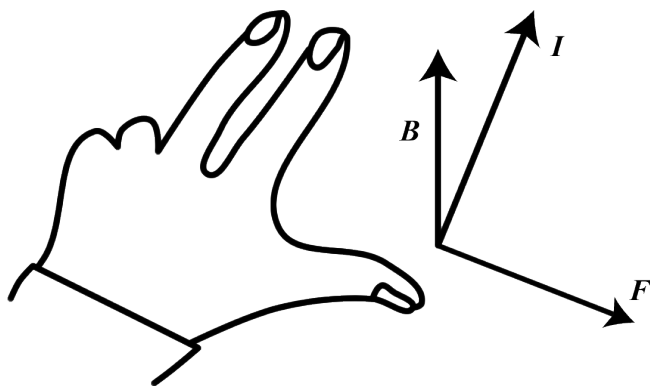
Siin on F juhtmele mõjuv jõud, I voolutugevus juhtmes, B välise magnetinduksiooni suurus ja l magnetväljas oleva juhtmelõigu pikkus. Nii magnetinduksioon, voolu suund (ehk juhtme suund) kui ka jõud on üksteisega ristuvad vektorid. Kui vooluga juhe pole mag-

netinduktsiooniga risti, siis tuleb arvestada vaid juhtmega ristuvat magnetinduktsiooni komponenti ning Ampère'i seadus omandab kuju

$$F = I B l \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

(α on nurk voolu suuna ja magnetinduktsiooni vahel). Kui magnetinduktsioon on vooluga samasuunaline, siis on Ampère'i jõud null.

Magnetväljas juhtmega voolule mõjuva jõu suund on määratud **vasaku käe reeglga**: kui kujutada ette, et magnetinduktsiooni vektor suundub vasaku käe peopessa ja voolu suund ühtib väljasirutatud sõrmede suunaga, siis näitab väljasirutatud põial jõu suunda. Kuna magnetväli ja jõud on omavahel risti, siis ei mõjuta magnetväli vooluga juhett mitte magnetvälja jõujoontega samas sihis, vaid risti jõujoontega.

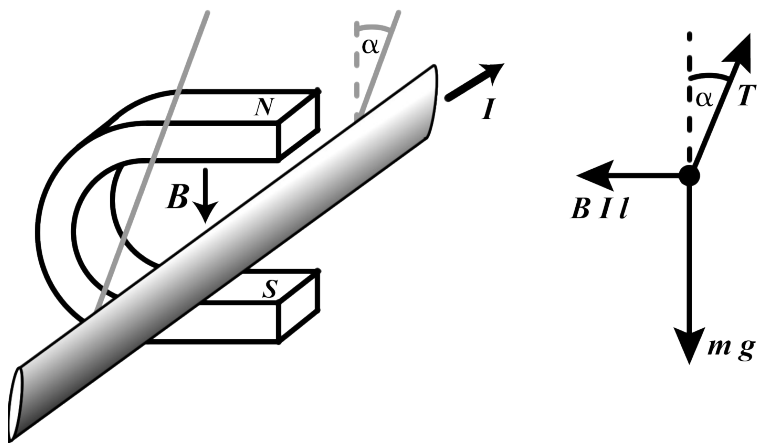


Joonis 2: Vasaku käe reegel: magnetinduktsiooni vektor $\mathbf{B}$ suundub peopessa, sõrmed näitavad voolu suunda $\mathbf{I}$ ja väljasirutatud põial näitab jõu $\mathbf{F}$ suunda.

Ampere'i seadus määrab vooluga juhtmele välises magnetväljas mõjuva jõu suuruse ja suuna. Ampere'i seaduses pole magnetinduktsiooni tekkepõhjus oluline, magnetinduktsioon peab vaid eksisteerima. Magnetvälja võib luua nii püsomagnet, elektrimootori mähis kui ka üksik vooluga juhe.

Näidisülesanne 1

Elektrijuhe ripub nõõride küljes U-kujulise magneti harude vahel. Magneti otse vahel on magnetinduktsiooni tugevus $B = 1 \text{ T}$. Magneti laius on $l = 10 \text{ cm}$. Juhtmes on voolutugevus $I = 2 \text{ A}$. Juhtme mass on $m = 100 \text{ g}$. Kas juhe tõukub magnetist eemale või tõmbub magneti poole? Millise nurga α võrra on juhet hoidvad nõõrid vertikaalteljest kõrvale kaldunud?



Joonis 3: U-kujulise magneti vahel asuv vooluga juhe on näidatud vasakul; juhet hoidvaid nõõre kujutavad hallid pidevjooned. Paremal on näidatud juhtmele mõjuvad jõud.

Juhtmele mõjub kolm jõudu: raskusjõud, Ampere'i jõud ja kahe nööri elastsusjõud. Kõigi jõudude summa on null. Lahutame nööriks mõjuva summaarse elastsusjõu T horisontaalseks ja vertikaalseks komponendiks:

$$T \sin \alpha = B I l$$

$$T \cos \alpha = m g$$

Nüüd jagame võrdused omavahel ja leiame nööri ning vertikaaltelje vahelise nurga α :

$$\tan \alpha = \frac{B I l}{m g} \quad \alpha = \arctan \left(\frac{B I l}{m g} \right).$$

Nurga leidmisel pole oluline mitte juhtme kogupikkus, vaid üksnes magneti harude vahel oleva juhtmelõigu pikkus, sest väljaspool magnetit magnetvälja pole ning seal juhtmele Ampere'i jõudu ei mõju.

Vasaku käe reegli järgi on B suunatud peopessa (peopesa on seega suunatud ülespoole) ja sõrmed näitavad voolu suunda (sõrmed on suunatud paberi sisse), mistõttu tõmbub juhe magneti poole.

Lorentzi jõud

Ampere'i seadus kehtib juhtmelõigu kohta, kus liigub palju elektrone. Samas on ka ühe elektroni liikumine elektrivool ja seetõttu peab magnetväljas liikuvale elektronile mõjuma jõud. Olgu elektronide suunatud liikumise kiirus juhtmes v , juhtme ristlõikepindala S , juhtme pikkus l , elektronide kogus ruumalaühikus n ja elektroni laeng e . Juhtme ruumala on

$$V = Sl = S v \Delta t, \text{ kus } \Delta t = l/v.$$

Suurus Δt on aeg, mis kulub elektronidel juhtme pikkuse l läbimiseks. Juhtmes olevate elektronide arv on $N = nV$ ja nende elektrilaeng on $q = enV$. Voolutugevus on siis juhtmes olevate elektronide laengu jagatis ajaga Δt :

$$I = \frac{q}{\Delta t} = \frac{enV}{\Delta t} = \frac{enSv\Delta t}{\Delta t} = enSv. \quad (9)$$

Mõjugu ühele elektronile magnetväljas jõud f . Kogu juhtmele mõjuv jõud on kõikidele elektronidele mõjuvate jõudude summa:

$$F = f n V = f n S l. \quad (10)$$

Asendame voolutugevuse (9) ja jõu (10) Ampere'i jõu valemisse (8) ning teisendame:

$$\begin{aligned} F &= I B l \cdot \sin \alpha \\ f n S l &= e n S v B l \cdot \sin \alpha \quad l \div V \\ f &= e v B \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (11)$$

Leitud valemit nimetatakse Lorentzi jõu valemiks. Mõnikord esitatakse **Lorentzi jõud** kujul

$$f = e v B \cdot \sin \alpha + e E^1. \quad (12)$$

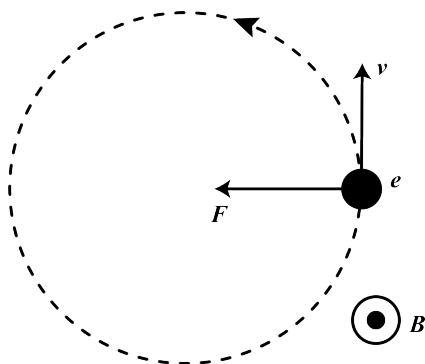
¹ Vektorkujul on Lorentzi jõu valem

$$\vec{f} = e \vec{v} \times \vec{B} + e \vec{E}$$

Siis on kokku liidetud nii magnetvälja kui ka elektrivälja poolt elektronile mõjuvad jõud. Lorentzi jõu valemis on kiiruse v suunaks elektrivoolu suund. Kui magnetväljas liigub elektron, siis on kiirus v vastupidine elektroni tegelikule liikumissuunale.

Lorentzi jõu f mõjumise suuna saab jällegi leida vasaku käe reeglga: magnetinduktsiooni vektor suundub peopessa, positiivse laenguga osakese liikumissuunda näitavad sõrmed ja jõu suunda osutab põial.

Kui kehale mõjuv jõud on risti keha liikumissuunaga, siis kallutab jõud keha algsest liikumissuunast kõrvale. Kuna Lorentzi jõud mõjub risti kiirusega, siis põhjustab Lorentzi jõud ringjoonelist liikumist, pöörates osakest kogu aeg ühes suunas, nii et trajektooriks on ringjoon. See ringjoon tekib samasse tasandisse osakese kiiruse ja Lorentzi jõuga ning on risti magnetinduktsiooni vektoriga.

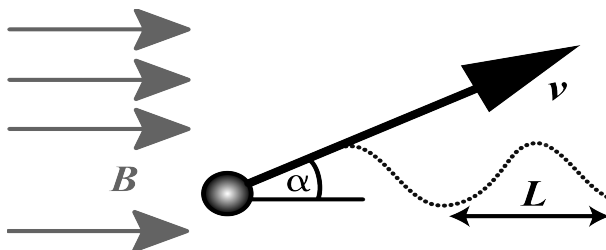


Joonis 4: Elektroni trajektoor magnetväljas. Elektron tiirleb paberi tasandis oleval ringjoonel.

Kui kiirus pole magnetinduktsiooni vektoriga risti, siis tuleb kiirus lahutada kaheks komponendiks, millest üks on magnetinduktsiooniga risti ja teine sellega paralleelne. Ringjoonelist liikumist põhjustab vaid magnetinduktsiooni vektoriga ristuv kiiruse komponent. Kiiruse teine komponent on paralleelne magnetinduktsiooni vektoriga ja sellele kiiruse komponendile Lorentzi jõud ei mõju. Seega ei muuda magnetinduktsiooniga samasuunaline kiirus magnetväljas oma suunda. Elektron liigub samaaegselt nii ringjoonel (B -ga ristuv kiirus) kui ka sirgjooneliselt (B -ga paralleelne kiirus) edasi. Nende kahe liikumise summaks on spiraal, mis kulgeb magnetväljaga paralleelse kiiruse komponendi suunas.

Näidisülesanne 2

Elektron liigub ruumis, kus on ühtlane magnetväli, kuid pole elektrivälja. Magnetilise induktsiooni vektori ja elektroni kiiruse vaheline nurk on α , mistõttu liigub elektron mööda spiraali. Kui suur on spiraali raadius R ja spiraali ruumiline periood L ?



Joonis 5: Elektroni liikumine ühtlases magnetväljas. Kuulike on elektron ja punktiir on elektroni trajektoir, millele on märgitud elektroni liikumise ruumiline periood L .

Jaotame elektroni kiiruse kaheks komponendiks: üks on risti magnetinduktsiooni vektoriga ($v_{risti} = v \sin \alpha$) ja teine sellega paralleelne ($v_{paral} = v \cos \alpha$). Kui magnetinduktsiooni vektor ja elektroni kiirus on paralleelsed, siis on Lorentzi jõud null.

Magnetväljaga ristuva kiiruse komponendi tõttu mõjub elektronile Lorentzi jõud, mis on risti nii magnetinduktsiooni kui ka kiirusega v_{risti} vektoriga. Lorentzi jõud tekitab ringliikumise, mida tasakaalustab kesktõmbekiirendus. Tasakaalu korral on mõlemad jõud võrdsed.

$$m \frac{v_{risti}^2}{R} = B v_{risti} e$$

$$R = \frac{m v_{risti}}{B e} = \frac{m v \sin \alpha}{B e}$$

Spiraali ruumiline periood on vahemaa, mille elektron läbib magnetinduktsiooni vektori sihis ühe täisringi tegemise aja jooksul. Elektron teeb ühe täisringi ajaga

$$T = \frac{2 \pi R}{v_{risti}} = \frac{2 \pi m v_{risti}}{B e v_{risti}} = \frac{2 \pi m}{B e} .$$

Selle ajaga liigub elektron edasi vahemaa

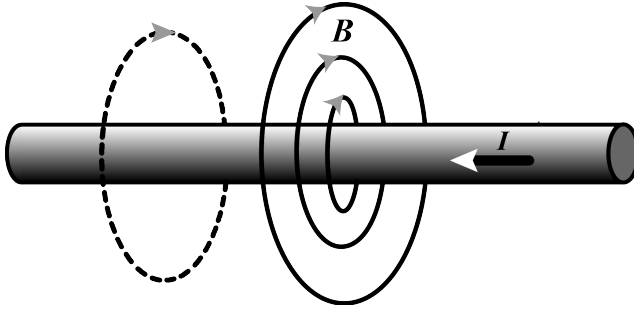
$$L = T v_{paral} = \frac{2 \pi m}{B e} v_{paral} = \frac{2 \pi m}{B e} v \cos \alpha .$$

Tsirkulatsiooniteoreem

Tsirkulatsiooniteoreem on valem, mille abil saab leida suvalise kujuga juhtme tekitatud magnetvälja. Tsirkulatsiooniteoreemi tuletamisel on lihtne lähtuda valemist (4). Esmalt leiame mag-

netinduktsiooni tugevuse juhtmest kaugusel a :

$$B = K \mu \cdot \frac{I}{a} = \frac{\mu \mu_0}{2 \pi a} \cdot I \quad (13)$$



Joonis 6: Vool I ja selle tekitatud magnetiline induksioon B sirgjuhtmes. Juhet ümbritsevat kujuteldavat kontuuri kujutakse punktiirjoonega.

Kujutame ette, et juhe on ümbritsetud ringjoone kujulise kontuuriga, mille raadius on a . Siis on tegur $2 \pi a$ kujuteldava kontuuri ümbermõõt. Korrutame kontuuri ümbermõõduga valemi mõlemat poolt:

$$\begin{aligned} B \cdot 2 \pi a &= \mu_0 \mu I \\ B C_{\text{ümberrõõt}} &= \mu_0 \mu I \end{aligned} \quad (14)$$

Leitud valemis on $C_{\text{ümberrõõt}}$ juhete ümbritseva kontuuri ümbermõõt. Seega on magnetinduktsiooni ja juhete ümbritseva ringjoone pikkuse korrutis võrdeline ringi sees oleva voolutugevusega. Valemit (14) saab kasutada ka siis, kui juhe on ümbritsetud suvalise kujuga suletud kontuuriga. Reeglina on siis kontuuri eri osades magnetindukt-

siooni tugevus erinev ja liita tuleb korrutised $B \Delta C$, kus ΔC on kontuuri selle osa pikkus, kus B väärtus on ühesugune. Lisaks läheb arvesse vaid kontuuriga paralleelne magnetinduktsioon. Kui magnetinduktsiooni vektor pole kontuuriga paralleelne, siis tuleb leida selle vektori projektsioon kontuurile ja kasutada magnetinduktsiooni na hoopiski viimase projektsiooni. Valemi (14) üldistust suvalise kontuuri jaoks nimetataksegi **tsirkulatsiooniteoreemiks**:

$$\sum B \cdot \Delta C = \mu_0 \mu \sum I. \quad (15)$$

Näidisülesanne 3

Juhtmes, mille läbimõõt on D , on vool tugevusega I . Kui suur on magnetinduktsioon juhtme sees kaugusel r juhtme tsentrist?

Kasutame ülesande lahendamiseks tsirkulatsiooniteoreemi. Joonistame ümber juhtme keskpunkti kujuteldava ringjoone raadiusega r . Selle ringjoone sees on voolutugevus $i = \pi r^2 \rho$,

kus ρ on voolutihedus ehk voolutugevus juhtme pindalaühiku kohta ($\rho = I / (0,25 \pi D^2)$). Tsirkulatsiooniteoreemi parem pool

on $T_s = \mu \mu_0 i$. Tavaliselt on elektrit juhtivates ainetes $\mu = 1$.

Magnetinduktsioon on kujuteldaval ringjoonel kõikjal ühesuguse väärtusega (ringjoon on oma tsentri suhtes sümmeetriline, mistõttu on kõik ringjoonel olevad punktid üksteisega võrdväärsed ja magnetinduktsioon neis punktides peab olema ühesuguse väärtusega). Kui ringjoone ümbermõõt

on $2 \pi r$ ja magnetinduktsioon on B , siis tsirkulatsiooniteoreemi vasak pool on $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$.

Võrdsustame tsirkulatsiooniteoreemi mõlemad pooled ja avaldame magnetinduktsiooni.

$$2 \pi r B = \mu_0 i$$

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 i}{2 \pi r} = \frac{\mu_0 (\pi r^2 \rho)}{2 \pi r} = 0,5 \mu_0 r \rho = \\ &= 0,5 \mu_0 r \frac{I}{0,25 \pi D^2} = 2 \mu_0 r \frac{I}{\pi D^2} \end{aligned}$$

Juhtme sees kasvab magnetinduktsioon võrdeliselt kaugusega juhtmest. Väljaspool juhet väheneb magnetinduktsioon pöördvõrdeliselt kaugusega juhtmest, vt valem (13).

Elektromagnetiline induktsioon

Kui elektrivool tekitab magnetvälja, siis peaks magnetväli tekitama ka elektrivoolu. Aastal 1831 üritas inglase M. Faraday [färæ-di] katses näidata, et magnetväli tekitab elektrivoolu. Eksperimendis olid kohakuti asetatud kaks pooli: ühes liikus elektrivool, mis tekitas magnetvälja, ja teises poolis mõõdeti magnetvälja tekitatud elektrivoolu tugevust. Eksperimendist ilmnes, et teises poolis tekkis vool vaid siis, kui magnetvälja tekitavas poolis lülitati elektrivool sisse või välja. Muutuv magnetväli tekitab elektrivoolu, kuid konstantne magnetväli voolu ei põhjustanud.

Faraday ja teiste teadlaste katsetulemuste üldistamisel selgus, et oluline pole mitte magnetinduktsiooni muutus, vaid magnetvoo muutus. Kui ümbritseda elektrijuhtmega ala, mille pindala on S , siis on magnetvoog Φ seda ala läbiva ja pinnaga ristuva magnetilise induktsiooni B kogus:

$$\Phi = B S \cos \alpha \quad (16)$$

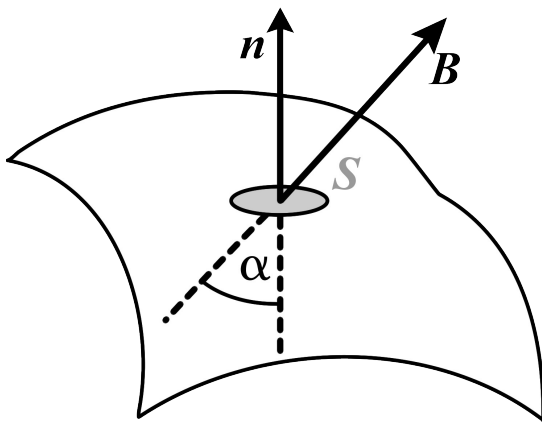
(α on nurk magnetinduktsiooni vektori ja pinnaga ristuva sirge vahel). Magnetvoo ühik on 1 Wb [veeber]. Ühik on nime saanud saksa füüsiku Wilhelm Weberi järgi. Tema saavutuste hulka kuulub näiteks telegraafi ehitamine 1833. aastal.

Kui magnetvoo tekitab mähis, milles on n juhet, siis nimetatakse magnetvoogu aheldusvooks Ψ ja see on n korda tugevam kui

magnetvoog:

$$\Psi = n B S \cos \alpha \quad (17)$$

Ka aheldusvoo ühik on 1 Wb.



Joonis 7: Magnetvoog läbi pinna. Pinnaga ristuv sirge ehk pinnanormaal on $\mathbf{n}$, magnetinduktsiooni vektor on $\mathbf{B}$, nurk magnetinduktsiooni ja pinnanormaali vahel on α ning S on juhtmega ümbritsetud ala pindala.

Elektromagnetiliseks induksiooniks nimetatakse elektromotoorjõu tekkimist suletud kontuuris, kui kontuuri läbiv magnetvoog muutub. Elektromagnetilise induksiooni elektromotoorjõud

$\mathcal{E}_{ind}$ avaldub järgmiselt:

$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \text{või} \quad \mathcal{E}_{ind} = -\frac{\Delta \Psi}{\Delta t}, \quad (18)$$

kus $\Delta\Phi$ ja $\Delta\Psi$ on vastavalt magnet- ja aheldusvoo muutused aja Δt jooksul. Kui muutub suletud kontuuri läbiv magnetvoog, siis tekitab elektromagnetilise induksiooni tõttu esmalt elektromotoorjõud, mis omakorda tekitab kontuuris induksioonvoolu. Induksioonvoolu tekkimiseks võib muutuda nii magnetinduksiooni tugevus kontuuris, kontuuri pindala kui ka magnetinduksiooni vektori ja kontuuri pinnanormaali vaheline nurk.

Induksioonvoolu suund on alati selline, et induksioonvoolu tekitatud magnetvoog kompenseeriks välise magnetvoo muutust. Kui kontuuri läbiv väline magnetvoog kahaneb, siis induksioonvool tekitab kontuuris sellise sisemise magnetvoo, mis suurendab välist magnetvoogu. Induksioonvoolu mõju on seega vastupidine magnetvoo muutusele, mistõttu on ka valemities (18) miinusmärk. Induksioonivoolu suuna määramisel oli suur roll Tartus tegutsenud füüsikul Emil Lenzil [lents], kelle auks nimetatakse induksioonvoolu suuna määramise reeglit **Lenzi reegliks**.

Magnetinduksiooni nähtus on mõneti sarnane inertsile mehaanikas. Kui auto sõidab teel ja selle mootor välja lülitada, siis puudub jõud, mis autot edasi viiks. Auto peaks kohe seisma jääma, kuid inerts tõttu liigub mõne aja ka seisva mootoriga. Elektromagnetilisel induksioonil on ka inerts: kui magnetvoog muutub, siis üritab elektromagnetiline induksioon endist olukorda säilitada, tekitades

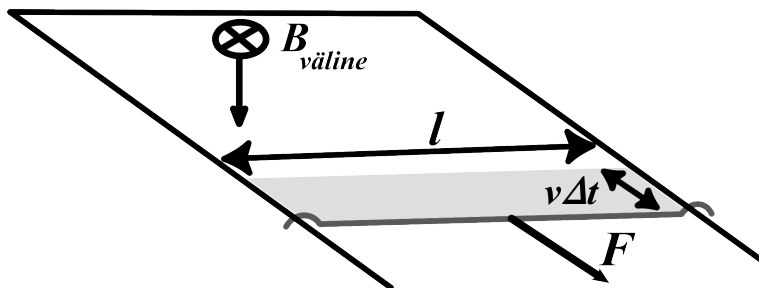
selleks induksioonvoolu, mille magnetvoog kompenseerib välise magnetvoo muutust. Elektromagnetilise induksiooni tulemusena muutub magnetvoog aeglasemalt kui ilma elektromagnetilise induksioonita.

Kui juhtmes on vahelduvvool, siis muutub voolutugevus ja ka magnetvoog kogu aeg. Nii kaasneb vahelduvvooluga alati elektromagnetiline induksioon. Seda omadust kasutavad trafod vahelduvvoolu pinget muutmiseks. Lihtsaimaks trafoks on kaks pooli, mille sees on ferromagneetikust südamik. Kui ühes poolis on vahelduvvool, siis põhjustab see muutuva magnetvoo mõlemas poolis. Teises poolis tekitab muutuv magnetvoog vahelduvvoolu. Pinget teises poolis sõltub traadikeerdude arvust mõlema pooli ümber ja võib olla nii suurem, väiksem kui ka võrdne pingega esimesel poolil.

Trafos olev muutuv magnetvoog tekitab induksioonvoolu ka poolide sees olevais südamikes. Sellist induksioonvoolu nimetatakse Foucault' [fukə] vooluks ehk pöörisvooluks. Nimi tuleb sellest, et elektrivool trafo südamikus liigub mööda ringjoont. Pöörisvoolud on kahjulikud, kuna osa trafos muundatavast elektrienergiast kulub pöörisvoolu tekitamiseks. Foucault' voolude pärssimiseks valmistatakse trafo südamik õhukestest elektriliselt isoleeritud teraslehtedest: siis tekib igas teraslehes nõrk pöörisvool, mitte aga tervet trafo südamikku läbiv üks tugev Foucault' vool.

Näidisülesanne 4

Joonisel 8 näidatud horisontaalne ristkülikukujuline raam asub vertikaalses magnetväljas. Raami pikemaid külgi ühendab varras, mille pikkus on l ja mass on m . Millise kiirusega liigub varras, kui seda tõmmata jõuga F joonisel 8 näidatud suunas? Tõmbamise alguses toimuvat kiirendamist pole vaja arvestada. Varda ja raami vaheline hõõrdetegur on μ . Raami elektritakistus on R .



Joonis 8: Välises magnetväljas paiknev elektrit juhtiv raam. Halliga kujutatakse kontuuri pindala muutust aja Δt jooksul.

Juhtme tõmbamisel suureneb kontuuri läbiv magnetvoog. Seega tekib juhtmes induksioonvool, mille tekitatud magnetväli on vastupidine välisele magnetväljale (ehk B_{ind} vektor tuleb paberist välja). Parema käe reegli järgi leiame induksioonvoolu suuna: vool liigub vardas vasakult paremale. Ampere'i seaduse järgi mõjutab induksioonvool juhet jõuga $F_B = B_{väljne} I_{ind} l$, mis on suunalt vastupidine jõule F . Viimasega on vastassuunaline ka raami ja juhtme vahel mõjuv hõõrdejõud $F_H = \mu m g$. Tasakaalu korral on kõigi jõudude summa null:

$$F - \mu m g - B_{väljne} I_{ind} l = 0.$$

Induksioonvoolu leiame Ohmi seaduse ja valemi (18) abil.

$$I_{ind} = \frac{\mathcal{E}_{ind}}{R} \rightarrow I_{ind} = \frac{1}{R} \cdot \left(- \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right)$$

Magnetvoog muutus, kuna kontuuri pindala kasvas. Kontuuri pindala suureneb aja Δt jooksul $\Delta S = l v \Delta t$ võrra, kus v on varda kiirus ja l varda pikkus. Seega

$$\Delta \Phi = B_{väline} l v \Delta t \quad \text{ja} \\ I_{ind} = \frac{1}{R} \cdot \left(\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right) = \frac{1}{R} \cdot \left(\frac{B_{väline} l v \Delta t}{\Delta t} \right) = \frac{B_{väline} l v}{R} .$$

Elektromagnetilise induksiooni valemis (18) tähistab miinusmärk voolu suunda. Kuna voolu suund on juba leitud parema käe reeglist, siis ei pea valemi (18) märki enam arvestama. Asendame induksioonvoolu tugevuse jõudude tasakaaluvõrrandisse:

$$F - \mu m g - B_{väline} I_{ind} l = 0$$

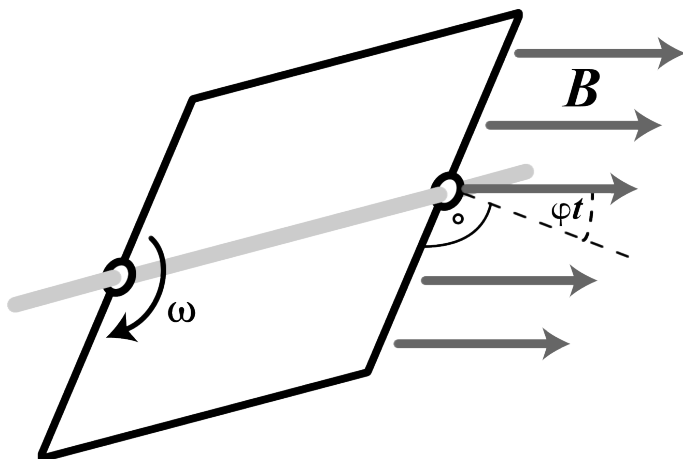
$$F - \mu m g - B_{väline}^2 v l^2 / R = 0 \quad \text{kust}$$

$$v = \frac{F - \mu m g}{B_{väline}^2 l^2} \cdot R$$

Juhtme kiirus on seda väiksem, mida suurem on magnetinduksioon. Tulemus on igati loogiline, sest tugevam magnetinduksioon tekitab suurema induksioonvoolu, mis omakorda põhjustab Ampere'i seaduse järgi suurema takistava jõu.

Näidisülesanne 5

Vaatleme elektrigeneraatori lihtsustatud mudelit, kus mootoriks on ühtlases magnetväljas pöörlev ristkülikukujuline raam. Kuidas muutub voolutugevus raamis selle pöörlemisel? Raam pöörleb nurkkiirusega ω ja alghetkel oli raam risti magnetinduktsiooni vektori B suunaga. Raami elektritakistus on R ja ristlõikepindala on S .



Joonis 9: Elektrimootori lihtsustatud mudel. Magnetväljas olev raam pöörleb oma telje ümber (joonisel hall).

Kuna raam pöörleb, siis muutub nurk raami tasandi ja magnetinduktsiooni vektori vahel. Ajahetkel t on nurk pinnanormaali ja magnetinduktsioonivektori vahel ωt ja magnetvoog läbi raami on $\Phi_1 = BS \cos(\omega t)$. Väga lühikese ajavahemiku Δt võrra hiljem on nurk $\omega(t + \Delta t)$ ja raami läbib magnetvoog $\Phi_2 = BS \cos(\omega(t + \Delta t))$. Leiame magnetvoo muutuse ajavahemiku Δt jooksul.

$$\begin{aligned}\Delta \Phi &= \Phi_1 - \Phi_2 = BS [\cos(\omega(t + \Delta t)) - \cos(\omega t)] = \\ BS [-2 \sin\{0,5(\omega(t + \Delta t) + \omega t)\} \cdot \sin\{0,5(\omega(t + \Delta t) - \omega t)\}] &= \\ = BS \left[-2 \sin\left(\omega t + \frac{\omega \Delta t}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\omega \Delta t}{2}\right) \right]\end{aligned}$$

Koosinuse vahe teisendasime korrutiseks vastavalt valemile

$$\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right).$$

Kuna $\Delta t \ll t$, siis $\sin(\omega t + 0,5 \omega \Delta t) \approx \sin \omega t$ ja $\sin(0,5 \omega \Delta t) \approx 0,5 \omega \Delta t$ ($\sin x \approx x$): Magnetvoo muutus on seega

$$\Delta \Phi = BS [-2 \sin(\omega t) \cdot 0,5 \omega \Delta t] = -BS \sin(\omega t) \omega \Delta t.$$

Magnetvoo muutus tekitab elektromotoorjõu

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{-BS \sin(\omega t) \omega \Delta t}{\Delta t} = BS \omega \sin(\omega t).$$

Raamis tekkiva induktsoonivoolu tugevus on

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{BS \omega}{R} \sin(\omega t).$$

Voolutugevus on suurim, kui raam on samas sihis magnetinduktsiooni vektoriga ehk raami pinnanormaal on risti magnetinduktsiooni vektoriga. Magnetvoo muutuse leidmiseks ei pea koosinuste vahet kokku korrutama, vaid võib võtta ka tuletise magnetvoost üle aja t ehk leida $d\Phi/dt$.

Näidisülesanne 6

Reisilennuk lendab kiirusega $v = 800 \text{ km/h}$. Kui suur pinge tekib lennuki tiivaotste vahel, kui Maa magnetvälja vertikaalse komponendi tugevus on $B = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ ja lennuki siruulatus on $l = 30 \text{ m}$.

Siin ülesandes pole magnetväljas olevat suletud kontuuri, mille pindala muutuks lennuki lendamisel. Küll aga võime ette kujutada kontuuri, mille laius võrdub lennuki tiibade siruulatusega ja mis ulatub kaugele lennuki taha. Kontuuri läbiv magnetvoog muutub, kuna lennuki liikudes suureneb kujuteldava kontuuri pindala. Leiame kontuuri pindala muutuse aja Δt jooksul. Selle ajaga läbib lennuk teepikkus $L = v \Delta t$ ja kontuuri pindala kasvab $S = Ll = l v \Delta t$ võrra. Magnetvoo muutus aja Δt jooksul oli

$$\Delta \Phi = BS = Blv \Delta t .$$

Lennuki tiivaotste vahel tekkis pinge

$$\epsilon = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right| = \left| \frac{Blv \Delta t}{\Delta t} \right| = |Blv| . \quad (19)$$

$$\epsilon = 330 \text{ mV}$$

Elektromagnetilise induktsiooni elektromotoorjõu tekkeks pole seega vaja suletud kontuuri olemasolu, vaid piisab lihtsalt magnetväljas liikumisest. Valem (19) kehtib alati, kui keha liikumisel magnetväljas pole reaalselt kontuuri.

Pööriselektiväli

Kui elektromagnetiline induksioon tekib elektriahela suuruse või asendi muutumise tõttu, siis on elektromotoorjõu põhjuseks Lorentzi jõud. Nii kontuuri asendi kui ka suuruse muutumisel liigub ka elektriahel ning selles olevad elektronid. Kuna kontuur on magnetväljas, siis mõjub liikuvatele elektronidele Lorentzi jõud, mis sunnib elektrone juhtmes edasi liikuma. Tulemuseks on elektronide suunatud liikumine ja elektromotoorjõu ning voolu teke.

Kui muutub magnetinduktsiooni tugevus, siis on induksiooni elektromotoorjõu tekkepõhjus teistsugune. Muutuv magnetinduktsioon tekitab uue välja: pööriselektivälja.

Pööriselektivälja jõujooned moodustavad suletud kõveraid nagu magnetinduktsioonigi jõujooned. Kui laeng liigub tavalises elektriväljas, siis sõltub elektrivälja poolt laengu liigutamiseks tehtud töö vaid laengu alg- ja lõpp-punktist, mitte aga sellest, kuidas elektrilaeng ühest punktist teise jõudis. Pööriselektivälja korral sõltub laengu liigutamiseks tehtud töö ka laengu trajektooriga.

Kui elektroni trajektooriga on ringjoon, siis on tavalise elektrivälja töö null, kuid mitte pööriselektivälja töö. Pööriselektiväljas mõjuvad laengutele jõud välja jõujoonte sihis ja kuna pööriselektivälja jõujoonteks on silmused nagu magnetväljalgi, siis sunnib pööriselektiväli elektrone ringiratast ühes suunas liikuma. Seega on elektronide liikumine vooluahelas suunatud ja selles tekivad nii elektromotoorjõud kui ka induksioonvool.

Endainduktsioon

Endainduktsiooniks nimetatakse induktsiooni elektromotoorjõu tekkimist elektriahelas, kui voolutugevus muutub samas ahelas. Kui vooluringis muutub voolutugevus, siis muutub ka voolu tekitatud magnetinduktsioon ja magnetvoog. Viimase muutus põhjustab juhtmes endas induktsiooni elektromotoorjõu, mida nimetataksegi **endainduktsiooniks**.

Tsirkulatsiooniteoreemi (15) järgi on magnetiline induktsioon võrdeline voolutugevusega kontuuris. Järelikult on ka magnetvoog, mille tekitab endainduktsioon, võrdeline voolutugevusega kontuuris:

$$\Phi = B S \cos \alpha \quad \text{ja} \quad B \propto I, \quad \text{millest}$$

$$\Phi \propto I \quad \text{ehk} \quad \Phi = L I \quad (20)$$

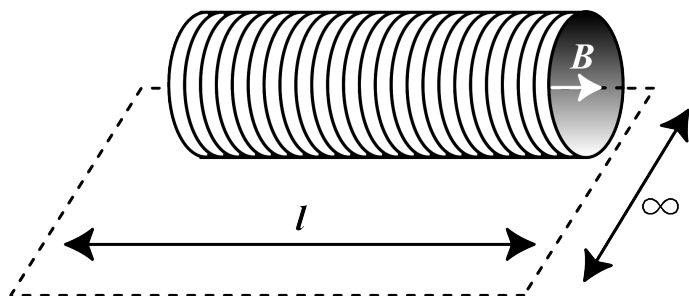
Siin on L võrdetegur, mida nimetatakse **induktiivsuseks**. Kontuuri induktiivsus sõltub kontuuri kujust: kas juhe on sirge, pool või mõne muu kujuga. Pooli induktiivsus on seda suurem, mida rohkem on poolis juhtmekeerde. Ka sõltub induktiivsus materjalide suhtelisest magnetilisest läbitavusest. Kui pooli sisemus on valmistatud ferromagneetikust, siis on pooli induktiivsus palju suurem seest tühja pooli induktiivsusest.

Induktiivsuse ühik on 1 H [henri]. Ühik on nime saanud

USA füüsiku Joseph Henry järgi, kes 1832. aastal avastas end-
ainduktsiooni. Kontuuri induktiivsus on üks henri, kui voolutugevus
üks amper tekitab juhtme ümber magnetvoo üks veeber. $1 \text{ H} =$
 $1 \text{ Wb/A} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2/\text{A}$.

Näidisülesanne 7

Kui suur on pooli induktiivsus L ? Poolil on N traadikeerdude, pooli
pikkus on l ja südamiku ristlõikepindala on S . Südamiku
suhteline magnetiline läbitavus on μ .



Joonis 10: Pooli induktiivsuse leidmine tsirkulatsiooniteoreemi kasutades. Kujuteldav kontuur on märgitud punktiiriga.

Induktiivsuse otseseks leidmiseks pole õppematerjalis ühtegi
valemit, kuid ülesanne pole siiski võimatu, sest induktiivsuse
saab leida pooli tekitatud magnetvoo abil. Pooli induktiivsuse
leiame aheldusvoo kaudu valemist (17):

$$\Psi = L I \rightarrow L = \Psi / I$$

Aheldusvoo leiame omakorda tsirkulatsiooniteoreemist.
Paigutame pooli tekitatud magnetvälja kujuteldava ristküliku-

kujulise kontuuri. Selle üks külg ühtib pooli teljega ja on sama pikk kui pool; ristküliku vastaskülg asub väljaspool pooli viimasest lõpmatult kaugel. Kontuuri raadiuse sihis asuvad kaks ülejäänud külge.

Viimased on risti magnetinduktsiooni vektoriga, mistõttu on nende tsirkulatsioon $B \cdot l_\infty = 0$ (l_∞ on raadiusesihiliste külgede pikkus). Poolist lõpmatult kaugel on magnetinduktsiooni tugevus null, nii et ka lõpmatuses oleva lõigu panus tsirkulatsiooni on olematu. Pooli sees oleva lõigu jaoks on tsirkulatsioon $B \cdot l$. Seega

$$B l = \mu_0 \mu N I \rightarrow B = \mu_0 \mu N I / l$$

(voolutugevus on korrutatud poolis olevate juhtmekeerdu arvuga N). Pooli ühte keerdu läbiv magnetvoog Φ on

$$\Phi = B S = \mu_0 \mu N I S / l$$

Kuna poolis on N keerdu, siis on aheldusvoog poolis

$$\Psi = N \Phi = \mu_0 \mu N^2 I S / l$$

Pooli induktiivsus on

$$L = \Psi / I = \mu_0 \mu N^2 \frac{I S}{l I} = \mu_0 \mu N^2 \frac{S}{l}$$

Induktiivsuse saab esitada ka pooli ruumala $V = l S$ kaudu:

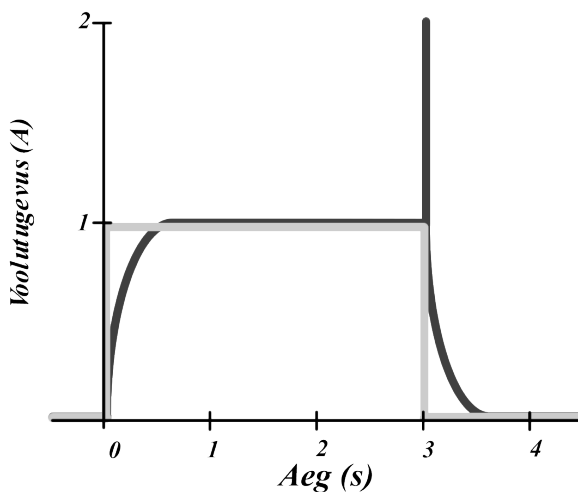
$$L = \mu_0 \mu N^2 \frac{S}{l} = \mu_0 \mu \left(\frac{N}{l} \right)^2 V = \mu_0 \mu n^2 V,$$

kus n on juhtmekeerdu arv ühe meetri kohta.

Induktiivsust kasutades saab leida elektromagnetilisel induksioonil tekkiva elektromotoorjõu magnetvoogu teadmata:

$$\varepsilon_{ind} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{\Delta (L I)}{\Delta t} = - L \frac{\Delta I}{\Delta t} . \quad (21)$$

Kui vooluring suletakse, siis tekib vooluringis elektrivool ja magnetvoog. Viimase kasv tekitab induksioonvoolu, mis üritab magnetvoo kasvu pidurdada ja säilitada olukorda, kus vooluringis magnetvoogu polnud. Aja jooksul induksioonvoolu tugevus väheneb nullini ja ahelas on sama suur voolutugevus kui endainduksiooni puudumisel. Nii kasvab voolutugevus ahela sulgemisel sujuvalt. Ana-



Joonis 11: Voolutugevuse muutus vooluringi sulgemisel ja avamisel. Halli joonega on kujutatud voolutugevuse muutus elektri-ahelas, kus pole induktiivsust. Musta joonega on näidatud voolutugevuse muutus induktiivsusega vooluringis.

loogiliselt toimub voolu väljalülitamisel voolutugevuse vähenemine samuti sujuvalt. Vooluringi avamine erineb vooluringi sulgemisest vaid selle poolest, et vahetult pärast voolu väljalülitamist tekib väga tugev induktsoonvoolu impulss, mis võib ahela avanud lüliti juures tekitada sädeme või koguni kaarleegi ning lüliti läbi põletada. Kui vooluringis pole induktiivsust, siis muutub voolutugevus ahela sulgemisel ja avamisel hüppeliselt.

Eneseinduktsiooni kasutatakse elektrimootorite käivitamisel, sest käivitamisel peab voolutugevus mootoris olema väiksem kui töötamisel. Elektrimootorite induktiivsused on suured, mistõttu tekib tugev induktsoonvool ja summaarne voolutugevus kasvab käivitamisel aeglaselt.

Elektromagnetiline pomm

Tegu pole tavalises mõttes pommiga, sest suurt pauku ei kosta ja plahvatust pole ka näha. Elektromagnetiline pomm tekitab lühiajalise ja väga tugeva magnetvälja. Inimesi ega ehitisi magnetväli ei kahjusta, küll aga hävitab elektriseadmed. Kiire ja suur magnetinduktsiooni muutus tekitab elektriseadmetes induktsoonvoolu, mis on palju kordi suurem aparaatidele ettenähtud voolutugevusest ja seadmed hävivad ülekoormuse tõttu. Häving ei piirdu üksnes plahvatuse lähedal olevate elektriseadmete purunemisega, sest magnetvoo muutus indutseerib voolu ka elektriliinides ja plahvatuse mõju liigub kaugele. Kahju tekitab ka indutseeritud

voolutugevuse hääbumine, sest sellega kaasneb samuti suur magnetvoo muutus ja induktioonvool.

Tundlikemad on elektromagnetilise pommi suhtes pooljuhtseadmed, mis töötavad milli- ja mikroamprilistel voolutugevustel (selliste seadmete hävitamiseks piisab ka töötava mikrolaineahju ukse avamisest). Mootorid ja trafod on palju töökindlamad, kuna neis on voolutugevus ka tavaliselt suur.

Elektromagnetilises pommis kasutatakse ülijuhtidest tehtud pooli, milles tekitatakse lühiajaliselt voolutugevus umbes 10^6 A (välgus on tavaliselt voolutugevus 20 kA). Nii suurel voolutugevusel hävivad ka juhtmed pommis endas. Teiseks võimaluseks elektromagnetilise pommi efekti saamiseks on aatompommi lõhkamine kõrgel atmosfääris. Plahvatusel tekkinud gammakiirgus ioniseerib atmosfääris hapniku ja lämmastiku aatomeid, millest vabanenud elektronid tekitavad vastasmõjus Maa magnetväljaga tugeva vahelduvvoolu ja muutuva magnetvälja maapinnal. Elektromagnetilise pommi idee tekkiski pärast esimesi tuumapommikatsetusi, kui Vaikse ookeani kohal atmosfääris toimunud plahvatus lõhkus samaaegselt Hawaii tänavavalgustuse ja halvas raadioside Austraalias.

Magnetvälja energia

Kui vooluringis poleks endainduktsiooni, siis tekiksid elektriahelas hetkeliselt sama tugev vool ja magnetväli kui endainduktsiooniga ahelas pärast endainduktsiooni sumbumist. Endaindukt-

siooni olemasolul kasvavad vool ja magnetväli aeglaselt (vaata joonist 11), sest nende suurenemist takistab endainduktsiooni elektromootorjõu põhjustatud vool. Seega tuleb magnetvälja loomisel teha tööd endainduktsiooni elektromootorjõu vastu. Tehtud töö kulub magnetvälja loomiseks vooluahela ümber ehk endainduktsiooni ületamiseks tehtud töö muundub magnetvälja energiaks. Selle arvel tekitab endainduktsioon pärast elektriahela avamist ahelas uuesti induktsioonvoolu.

Endainduktsiooni $\mathcal{E}_{ind}$ vastu tehti ahela sulgemisel tööd:

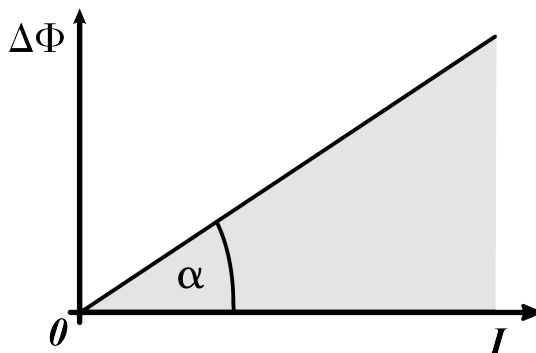
$$A = \mathcal{E}_{ind} I_{ind} \Delta t \quad (22)$$

(A on töö, mis tehakse endainduktsiooni vastu; I_{ind} on voolutugevus, mis teeb tööd endainduktsiooni vastu; Δt on aeg, mis kulub endainduktsiooni elektromootorjõu sumbumiseks). Asendame valemisse (22) endainduktsiooni elektromootorjõu valemist (21):

$$A = \mathcal{E}_{ind} I_{ind} \Delta t = L \frac{\Delta I_{ind}}{\Delta t} I_{ind} \Delta t = L \Delta I_{ind} I_{ind} = \Delta \Phi I_{ind}. \quad (23)$$

Antud valemi tuletamisel kasutati ka seost (20), mille järgi on magnetvoog võrdeline induktiivsuse ja voolutugevusega:

$$\Phi = L I \quad \text{ehk} \quad \Delta \Phi = L \Delta I. \quad (20)$$



Joonis 12: Magnetvoo muutuse sõltuvus voolutugevusest. Nurk α iseloomustab elektriahela induktiivsust

$$\tan \alpha = \Delta \Phi / I = (L I - 0) / I = L \cdot$$

Magnetvälja energia leidmine valemi (23) järgi on tülikas, kuna selle valemi paremal poolel olev magnetvoog ise sõltub ka sama valemi paremal poolel olevast induksioonvoolust. Magnetvälja energia leitakse sellisel juhul graafiliselt, kujutades joonisel magnetvoo muutuse sõltuvust induksioonvoolust (vaata joonist 13). Graafikualune pindala on tegurite selline korrutis, kus arvestatakse, et magnetvälja energia sõltub induksioonvoolust mõlema teguri kaudu. Graafikuks on kolmnurk, mille alus on induksioonvoolu suurim väärtus.

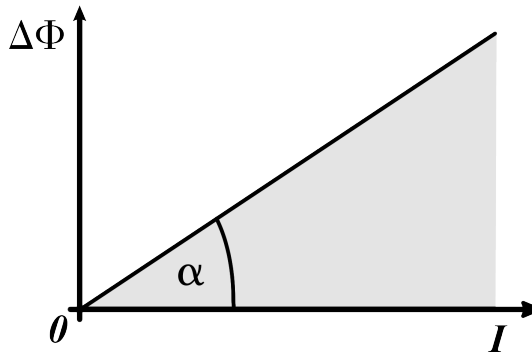
Kuna vooluringi sulgemisel kasvab voolutugevus sujuvalt ilma järskude hüpeteta, siis peab vahetult pärast elektriahela sulgemist olema induksioonvool sama tugev kui voolutugevus elektri-

ahelas pärast endainduktsioon sumbumist. Seega $I_{ind}=I$ ja $\Delta \Phi = L I$. Graafikualune pindala ehk magnetvälja energia on:

$$A = \frac{\Delta \Phi \cdot I_{ind}}{2} = \frac{L I^2}{2} . \quad (24)$$

Magnetvälja energia leidmiseks polegi vaja teada magnetvälja omadusi, vaid hoopis vooluringi iseloomustavaid induktiivsust ja voolutugevust. Elektriahela ümber oleva magnetvälja energia ei sõltu magnetvälja enda omadustest, kuna magnetvälja tekitas ju vooluring endainduktsiooni abil.

Valem (24) ei kehti püsिमagnetite korral, mille magnetvälja ei tekita mitte elektrivool, vaid aatomite spinnid. Ka ei kehti valem (24) elektromagnetlaine jaoks, kuna see on võimeline eksisteerima ka iseseisvalt ilma vooluringita.



Joonis 13: Magnetvoo muutuse sõltuvus voolutugevusest. Nurk α iseloomustab elektriahela induktiivsust

$$\tan \alpha = \Delta \Phi / I = (L I - 0) / I = L \cdot$$

Kasutatud kirjandus

Saveljev, I., Füüsika üldkursus II, Tallinn, Valgus, 1979

Isaacs, A. (editor), Dictionary of Physics, 4th ed, Oxford, Oxford University Press, 2003

Kudu, K., Üldfüüsika ülesannete kogu, 4. trükk, Tartu, Tartu Riiklik Ülikool, 1981

Harris, T., „How E-Bombs Work“, [<http://science.howstuffworks.com/e-bomb.htm/printable>], 18.07.2006

Materjalide suhtelisi magnetilisi läbitavusi

<i>Materjal</i>	<i>Suhteline magnetiline läbitavus</i>
Diamagneetikud	
Hõbe	0,999976
Kuld	0,999966
Vask	0,9999903
Vesi	0,999991
Paramagneetikud	
Alumiinium	1,000021
Hapnik	1,0000019
Ferromagneetikud	
Nikkel	600
Raud	5000
Supermalloi (79% Ni, 5% Mo, 16% Fe)	10 ⁶

