

## 2. ELEKTROMAGNETISM

### 2.1. Magnetväli ja tema tekitamine

Magnetväli on elektromagnetilise välja üks komponent. Teine komponent on elektriväli. Elektromagnetiline väli on ruumi omaduste teatud muutus, mille sügavam olemus pole teada. Inimese meeleorganid tajuvad nähtavat valgust ja infrapunast soojuskiirgust, mis mõlemad on väga kõrge sageduse ja lühikese lainepikkusega elektromagnetilised väljad. Elektrimasinates kasutatav magnetväli on kas muutumatu suurusega staatiline väli (näiteks alalisvoolumasina ergutusväli) või siis suhteliselt väikese sagedusega (0,1 Hz ... 1 kHz) muutuv väli. Sellist välja inimese meeleorganid ei taju.

Magnetvälja ainsaks teadaolevaks põhjustajaks on elektrivälja muutus. Kui näiteks elektron liigub ruumis, siis tekib magnetväli, sest elektroni elektrivälja asend ruumis muutub. Elektrimasinates saadakse magnetväli mähiseid läbiva voolu abil. Elektrivool mähises on elektronide liikumine piki mähisetraati.

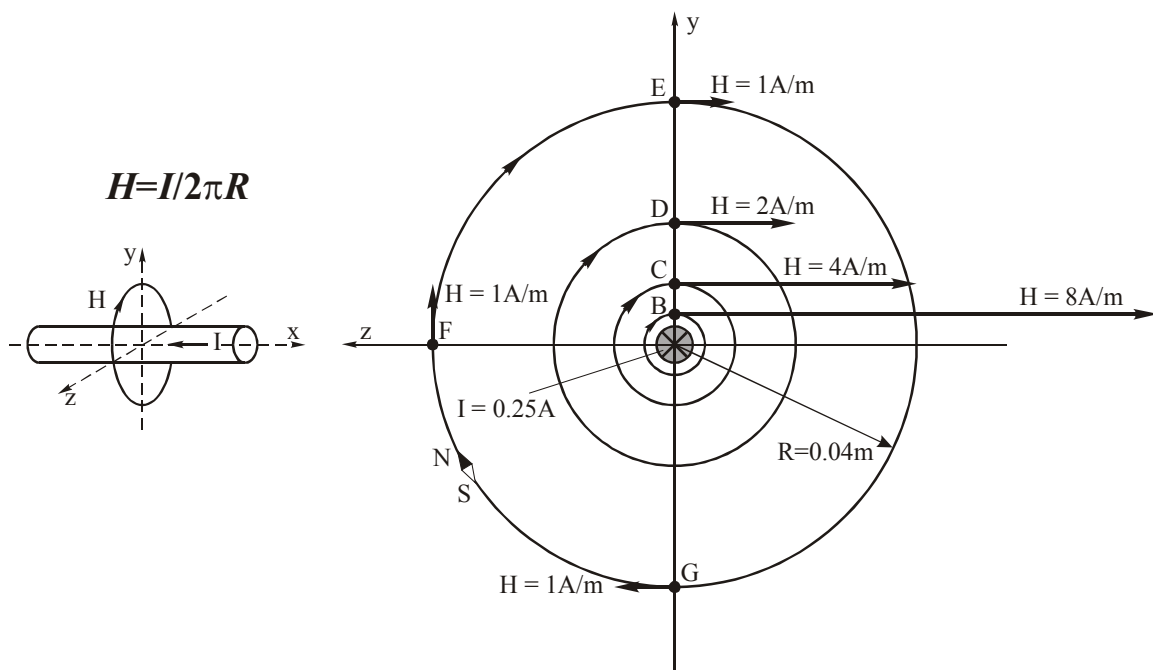
#### 2.1.1. Pika sirge juhtme magnetväli

Iga vooluga juhtme ümber on magnetväli. Pika ja sirge juhtme ümber oleva välja tugevuse saab leida järgnevalt:

$$H = i / 2\pi R, \quad (2.1)$$

kus  $H$  – magnetvälja tugevus, A/m,  
 $i$  – vool, A,  
 $R$  – kaugus juhtme teljest jõujooneni, m.

Valem (2.1) iseloomustab igat ruumipunkti juhtme ümbruses. Ta annab magnetvälja tugevuse jaotuse kirjelduse. Kui me tahaksime näiteks kirjeldada temperatuuri jaotust toas, siis saaksime seda teha temperatuurivälja kirjeldavate matemaatiliste avaldiste abil. Magnetvälja tuleb mõista kui teatud omadustega ruumi piirkonda. Magnetvälja võib käsitleda elektrivoolu nähtamatu koostisosana, mis on alati koos vooluga.



Joonis 2.1. Pika sirge juhtme väli, kui juhtmes on vool 0,25A

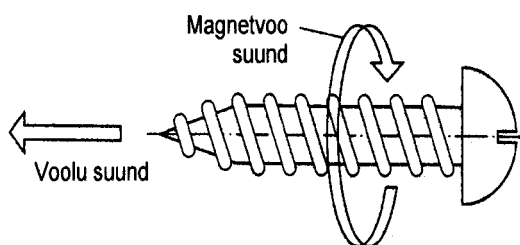
Mida tugevam on vool juhtmes ja mida ligemal on ruumpunkt juhtme pinnale, seda tugevam on väli. Kõige tugevam väli on juhtme pinnal.

Peale tugevuse iseloomustab magnetvälja **suund**. Magnetväli on **vektorväli**. Temperatuurile ei saa omistada suunda. Temperatuuriväli on skalaarväli. Magnetvälja suuna saab määrata näiteks väikese püsिमagneti abil. Maa magnetvälja suuna määramiseks kasutatavas kompassis on magnetnõel, mille üks ots pöörduv maa magnetilise põhjapooluse poole ja teine lõunapooluse poole. Magnetnõela suund näitab magnetvälja suunda. Kompassinõela põhjapoolus osutab Maa geograafilisele põhjapoolusele, mille vahetus läheduses on Maa magnetiline lõunapoolus.

Visuaalse ettekujutuse saamiseks ruumis oleva magnetvälja tugevusest ja suunast on kasutusele võetud magnetvälja **jõujoone** mõiste. Jõujoone suund näitab magnetvälja suunda.

Joonisel 2.1 on näidatud sirge juhtme välja jõujooned tasapinnal, mis on risti juhtme teljega. Jõujoonte suund näitab magnetvälja suunda. Magnetvälja tugevuse vektorid (punktides B, C, D, E, F, G) on jõujoonte puutuja suunalised. Mida tugevam on väli, seda tihedamalt paigutatakse jõujooned. Sellepärast on juhtmele ligemal jõujooned tihedamalt. Pika sirge juhtme magnetvälja jõujooned on ringjooned, mille keskpunkt asub juhtme teljel. Seega on *kõik jõujooned vooluga juhett haaravad kinnised kõverad*. Liikudes juhtme teljega paralleelselt välja tugevus ja suund ei muutu. Ülejäänud suundades liikudes aga juhtme väli muutub nii suuruselt kui suunalt. Sellist välja nimetatakse mittehomoogeenseks. Kui välja suund ja tugevus on teatud ruumi osas igal pool ühesugune, siis sellist välja nimetatakse **homoogeenseks**. Elektrimasinat õhupilu väli on ligikaudu homoogeenne.

Juhtme voolu suund ja magnetvälja suund on omavahel seotud kruvireegli kaudu. *Kui paremkeermega kruvi liigub voolu  $I$  suunas, siis kruvi pöörlemissuund ühtib juhett ümbritseva magnetvälja  $H$  jõujoonte suunaga*. See on näidatud joonisel 2.2.



Joonis 2.2. Kruvireegel

### 2.1.2. Magnetvootiheduse väli ja magnetvoog

Kui meil on kaks vooluga juhett, siis tekib nende juhtmete vahel mehaaniline jõud. Seda nimetatakse välja poolt indutseeritud (põhjustatud) jõuks. See on sarnane kahe püsिमagneti vahelisele jõule. Kui me valime sellise voolude vahekorra, et üks vool on hästi suur ja teine vool hästi väike, siis selle väikese voolu väli ei muuda märkimisväärselt suure voolu välja. See annab meil võimaluse suure voolu välja erinevaid punkte iseloomustada selle järgi kui tugevat jõudu avaldavad need punktid väikesemõõtmelisele ja nõrga väljaga juhtmele.

Erinevaid punkte mõõtes saame me ruumi iseloomustuse seal tekkiva mehaanilise jõu seisukohalt. See ruumi iseloomustus on väli. Antud juhul seda välja nimetatakse **magnetilise induktsiooni väljaks** või **magnetvootiheduse väljaks**. Kaks erinevat nimetust viitavad ühe ja sama nähtuse erinevatele külgedele. Induktsiooni väljaks nimetamine viitab sellele, et tegemist on indutseeritud jõu väljaga. Välja üheks avaldusvormiks on jõu teke.

Magnetvoo tiheduse väljaks nimetamine iseloomustab välja olemuslikku külge. Juhet läbiva voolu magnetväli tekitab juhet ümbritsevas ruumis **magnetvoo**. Magnetvoog on oma olemuselt sarnane elektrivoolule või vedeliku voolule. Elektrivool on elektronide liikumine. Vedeliku vool on molekulide liikumine. Magnetvoogu põhjustavaid osakesi on nimetatud hüpoteetilisteks magnetlaenguteks. Nende olemasolule viitab magnetvoo ja elektrivoolu omaduste sarnasus. Seni ei ole aga suudetud magnetlaengute olemasolu ei tõestada ega ümber lükata. Vaatamata sisemise ehituse tundmatusele on magnetvoo olemasolu siiski kindel.

**Magnetvootiheduse** saab avaldada seda esile kutsunud magnetvälja tugevuse kaudu järgnevalt

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.2)$$

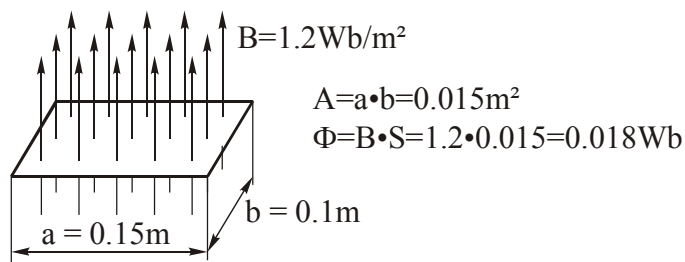
kus  $\mathbf{B}$  on magnetvootiheduse vektor, mis on igas ruumpunktis samasuunaline teda esile kutsuva magnetvälja suunaga. Magnetvootiheduse mõõtühikuks on **veebrit ruutmeetrile ( $\text{Wb}/\text{m}^2$ )**. Mõõtühiku  $\text{Wb}/\text{m}^2$  jaoks kasutatakse ka teist nimetust – tesla (tähis T).  $1\text{T} = 1\text{WB}/\text{m}^2$ .  $\mu$  kujutab endast keskkonda iseloomustavat tegurit, mida nimetatakse **magnetiliseks läbitavuseks** ehk **permeaabluseks**. Vaakumi permeaabluse tähiseks on  $\mu_0$  ja tema väärtuseks on  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ . Õhu permeaablus on küllalt suure täpsusega võrdne vaakumi permeaablusega.

Magnetväljatugevus  $H$  ja magnetvootihedus  $B$  iseloomustavad mingit ruumi **punkti**. Magnetvoog iseloomustab ruumis olevat **pinda**.

Kõige lihtsamal juhul, kui magnetvootiheduse  $B$  väli on homogeenne ja jõujooned on risti pinnaga  $A$  (joon. 2.3), saab magnetvoo (tema tähis on  $\Phi$ ) leida magnetvoo tiheduse ja pinna suuruse korrutisena

$$\Phi = B \cdot A. \quad (2.3)$$

Magnetvoo ühikuks on **veeber** (tähis **Wb**). Magnetvoogu vaadatakse piltlikult kui läbi mingi pinna minevate jõujoonte arvu. Tugevam väli annab rohkem jõujooni pinnauhikule.

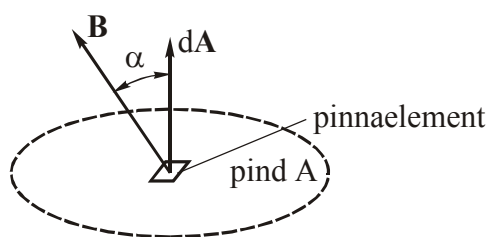


Joonis 2.3. Magnetvoog läbi pinna, kui magnetvootiheduse  $B$  väli on homogeenne ja pinnaga risti

Magnetvoole ei omistata suunda ruumis, magnetvoog on skalaar. Siiski magnetahelas eristatakse magnetvoo positiivset ja negatiivset suunda nii nagu elektrivoolulgi. Üldjuhul, kui väli on ebahühtlane ehk mittehomoogeenne ja ei ole pinnaga risti, saab magnetvoo leida integreerimisega üle pinna  $A$  (joonis 2.4).

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = \int_A B \cdot \cos \alpha \cdot dA, \quad (2.4)$$

kus  $d\mathbf{A}$  on pinna  $A$  elemendi vektor, mis on suunalt selle pinnaelemendiga risti,  $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$  on vektorite  $\mathbf{B}$  ja  $d\mathbf{A}$  skalaarkorrutis ja  $\alpha$  on vektorite  $\mathbf{B}$  ja  $d\mathbf{A}$  vaheline nurk.



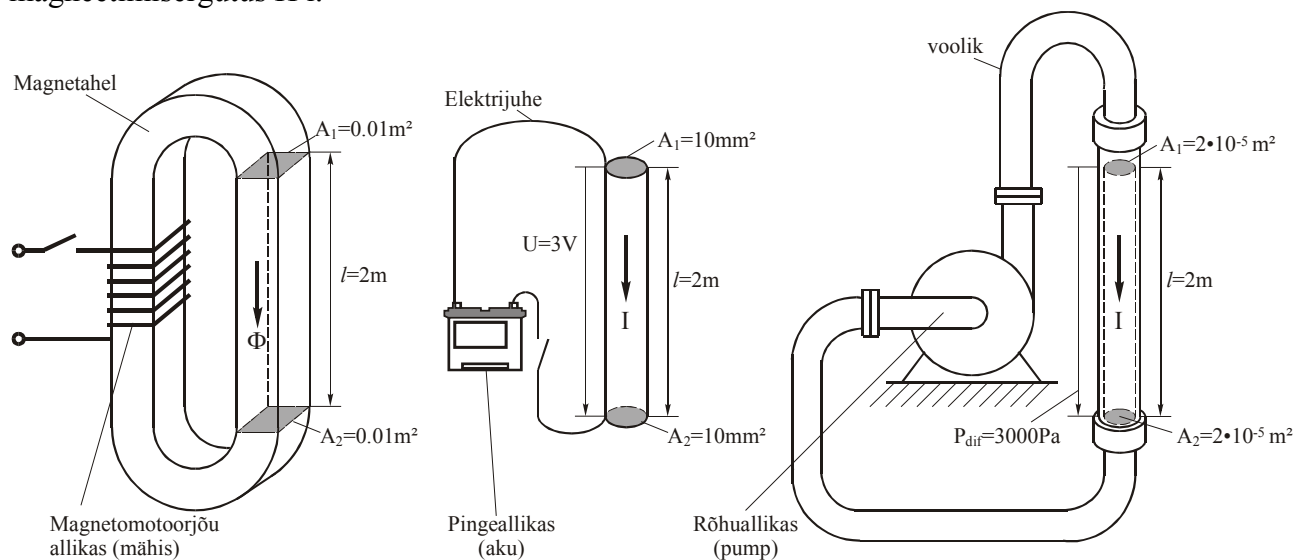
Joonis 2.4. Magnetvoo leidmine vektorite  $B$  ja  $dA$  skalaarkorrutise integreerimisega üle pinna  $A$

### 2.1.3. Magnetvoo, elektrivoolu ja vedeliku voolu tekkeprotsesside analoogia

Magnetvälja  $H$ , magnetvoo  $\Phi$  ja vootiheduse  $B$  mõisted on paremini arusaadavad, kui võrrelda magnetvoo tekkimise protsessi elektrivoolu ja vedeliku voolu tekkimise protsessiga (joonis 2.5). Magnetahela osas, mis asub ristlõigete  $A_1$  ja  $A_2$  vahel tekitatakse magnetvoog  $\Phi$  [Wb]. Magnetvoole analoogiliseks suuruseks elektri ahelas on vool  $I$  [A] ja hüdraulilises ahelas (torus) vedeliku vooluhulk  $Q$  [m<sup>3</sup>/s].

Magnetvälja tekitajat nimetatakse **magnetomotoorjõu allikaks**. Analoogiliselt nimetatakse elektrivälja tekitajat **elektromotoorjõu allikaks** või pingeallikaks. Konstruktiivselt on magnetomotoorse jõu allikas ümber magnetahela keritud elektrijuhe. Vool juhtmes tekitab magnetvälja.

30A voolu tekitamiseks malmvardas (joon. 2.5 ja tabel 2.1) on vaja 10mm<sup>2</sup> ristlõike juures elektriväljatugevust 1,5V/m. Analoogiliselt on toodud näites 0,014Wb suuruse magnetvoo saamiseks vaja rakendada magnetvälja tugevust 200A/m ja vedeliku vooluhulga 0,6 liitrit/s saamiseks on vaja rõhuvälja 1500Pa/m. Rõhuväli, elektriväli ja magnetväli on analoogilised mõisted. Need iseloomustavad **liikumapanevat mõju liikumise teekonna pikkusühiku (meetri) kohta**. Liikumapanev mõju kogu vaadeldava teekonna jaoks on vastavalt diferentsiaalrõhk, pinge ja magneetimisergutus  $H \cdot l$ .



Joonis 2.5. Magnetvoo, elektrivoolu ja vedeliku voolu tekitamine magnetvälja, elektrivälja ja rõhuvälja abil

## Magnetahela, elektriahela ja hüdraulilise ahela parameetrite vaheline analoogia

Magnetahel	Elektriahel	Vedeliku tsirkulatsiooni kontuur
1. Magnetahela ristlõige $A_1=A_2=0,01\text{m}^2$	1. Malmist varras ristlõikega $A_1=A_2=1\cdot 10^{-5}\text{m}^2$	1. Toru sisemine ristlõige $A_1=A_2=2\cdot 10^{-5}\text{m}^2$
2. Magnetahela pikkus ristlõigete $A_1$ ja $A_2$ vahel $l=2\text{m}$	2. Varda pikkus $l=2\text{m}$	2. Toru pikkus $l=2\text{m}$
3. Magnetahela terase magnetiline läbitavus $\mu=0,007\text{H/m}$	3. Varda eritakistus on $0,5\cdot 10^{-6}\Omega\cdot\text{m}$ (ehk $0,5\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ) ja erijuhtivus $\gamma=2\ 10^6\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$	3. Toru hüdrauliline eritakistus on $500\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ja erijuhtivus $\gamma_{\text{hyd}}=2\ 10^{-3}\text{m}^2/\text{Pa}\cdot\text{s}$
4. Poolile anti vool ja selle tulemusel rakendati ristlõigete $A_1$ ja $A_2$ vahele magneetimisergutus $H\ l=400\text{A}$	4. Akust anti varda otstele pinge $U=3\text{V}$	4. Pump käivitati ja toru ristlõigete $A_1$ ja $A_2$ vahele anti rõhkude erinevus (s.o. dünaamiline diferentsiaalrõhk) $P_{\text{dif}}=3000\text{Pa}$
5. Ühtlase ristlõike ja materjali tõttu tekkis homogeenne magnetväli, mille tugevus on $H = \frac{H \cdot l}{l} = \frac{400}{2} = 200\text{A/m}$	5. Varda ühtlase ristlõike ja materjali tõttu tekkis homogeenne elektriväli, mille tugevus on $E = \frac{U}{l} = \frac{3}{2} = 1,5\text{V/m}$	5. Ühtlase ristlõike tõttu tekib piki toru dünaamiline rõhuväli tugevusega $F$ (toru on horisontaalne) $F = \frac{P_{\text{dif}}}{l} = \frac{3000}{2} = 1500\text{Pa/m}$
6. Magnetväli põhjustas magnetvoo tekke. Magnetvootihedus on $B=\mu\cdot H=0,007\cdot 200=1,4\text{Wb}/\text{m}^2$	6. Elektriväli tekitas vardas voolu. Voolutihedus on $j=\gamma\cdot E=2\cdot 10^6\cdot 1,5=3\cdot 10^6\text{A}/\text{m}^2$	6. Rõhuväli pani vedeliku voolama. Vedeliku keskmine voolukiirus on $v=\gamma_{\text{hyd}}\cdot F=2\cdot 10^{-3}\cdot 1500=3\text{m}/\text{s}$
7. Kogu ahela ristlõiget läbiv magnetvoog on $\Phi=B\cdot A=1,4\cdot 0,01=0,014\text{Wb}$	7. Vool on $I=j\cdot A=3\cdot 10^6\cdot 1\cdot 10^{-5}=30\text{A}$	7. Vedeliku vooluhulk (kulu) on $Q=v\cdot A=3\cdot 2\cdot 10^{-5}=\ 6\cdot 10^{-5}\text{m}^3/\text{s}=0,6\text{liitrit}/\text{s}$

Keskkond avaldab liikumisele takistust. Magnetahelas arvestab keskkonna mõju magnetiline läbitavus  $\mu$ , elektriahelas erijuhtivus  $\gamma$  ja hüdraulilises ahelas on analoogiline suurus  $\gamma_{\text{hyd}} [\text{m}^2/\text{Pa}\cdot\text{s}]$ . Liikumapanev mõju tekitab voolu või voo. Voogu ristlõikpinna ühikule iseloomustab magnetahelas vootihedus  $B$  [ $\text{Wb}/\text{m}^2$ ]. Analoogiliseks suuruseks elektriahelas on voolutihedus  $j$  [ $\text{A}/\text{m}^2$ ] ja hüdraulilises ahelas vedeliku kiirus  $v$  [ $\text{m}/\text{s}$ ].

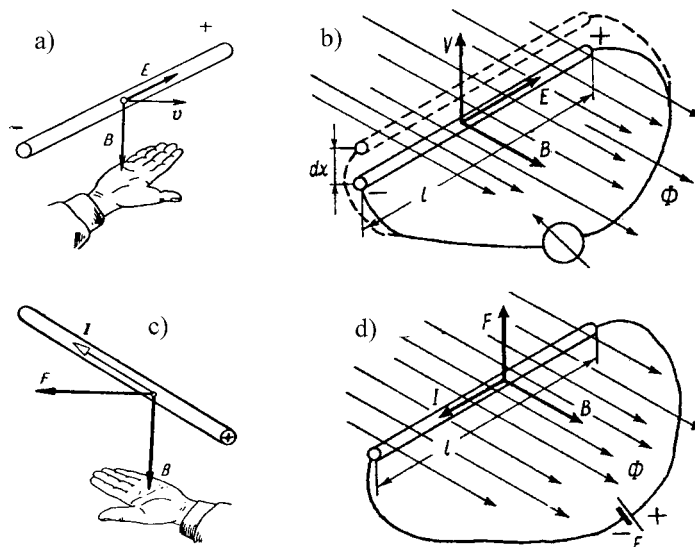
Hargnemisteta kontuuri puhul on magnetvoog  $\Phi$ , elektrivool  $I$  ja vedeliku vooluhulk  $Q$  kogu kontuuri osas konstantsed, kuid vootihedus  $B$ , voolutihedus ja vedeliku kiirus  $v$  võivad kontuuri erinevates osades olla erinevad, kui  $\mu$ ,  $\gamma$  või ahela ristlõige  $A$  on erinevad.

#### 2.1.4. Magnetvootiheduse välja põhiefektid

Magnetvoo tiheduse välja liikumine ruumis või muutumine ajas tekitab elektrijuhtmes pinget. Juhe muutub pingesallikaks. Teiseks, magnetväljas oleval vooluga juhtmel tekib mehaaniline jõud. *Pinge ja jõu teket nimetatakse magnetvoo tiheduse välja põhiefektideks.*

Pinge ja jõu tekkimine on tähtsad esiteks selle poolest, et see võimaldab magnetvälja olemasolu kindlaks teha. Teiseks on nad tähtsad selle poolest, et pinget tekkimist võib kasutada elektrienergia

saamiseks generaatorite abil ja jõu tekkimist võib kasutada mehaanilise energia saamiseks elektrimootorite abil. Pinge ja jõu teket on näidatud joonisel 2.6.



Joon. 2.6. Juhtmes indutseeritud pinge (b), vooluga juhtmes indutseeritud jõud (d) ja pinge ning jõu suuna määramine (a), (c)

Magnetvälja vahendusel tekitatavat pinget ja jõudu nimetatakse ka **indutseeritud pingeks** ja **indutseeritud jõuks**.

Kui pinge indutseeritakse suletud ahelas, siis tekib ka vool. Avatud ahela puhul voolu ei teki ja pinge on kõige kõrgem. Avatud ahela pinget nimetatakse **elektromotoorseks jõuks** (lühendatult emj.) ja seda tähistatakse  $E$ .

Indutseeritud pinge ja emj. korral ei ole oluline, kas magnetväli liigub paigalseisva juhtme suhtes või vastupidi, juhe liigub paigalseisvas magnetväljas.

Joonisel 2.6 on näidatud juhtum, kus juhe pikkusega  $l$  liigub kiirusega  $v$  homogeenses magnetvoo tiheduse väljas  $B$  risti jõujoontega. Selles juhtmes indutseeritud elektromotoorjõu saab leida avaldisega

$$E = B \cdot l \cdot v \quad (2.5)$$

Emj. suuna saab määrata **paremkäejuhise** abil (joon. 2.6a): *kui magnetvoo tiheduse vektor  $B$  on suunatud parema käe peopessa ja juhe liigub kõrvaleviidud pöidla suunas, siis juhtmes indutseeritud emj.  $E$  suund ühtib väljasirutatud sõrmede suunaga.*

Üldjuhul, kui kiirusvektor  $v$  ja vootiheduse vektor  $B$  ei ole omavahel risti ja juhtme suund ruumis ei ühti vektorkorrutise  $v \times B$  suunaga nagu joonisel 2.6, saab indutseeritud elektromotoorjõu leida järgnevalt

$$E = (v \times B) \cdot l \quad (2.6)$$

Juhtme pikkuse vektor  $l$  on juhtme suunas ja selle otsa poole, millel on vähim nurk vektori  $v \times B$  suhtes. Juhtme positiivne ots on see, millest vektor  $v \times B$  väljub.

Joonisel 2.6d on näidatud juhtum, kus liikumatus juhtmes pikkusega  $l$  on vool  $I$  ja see juhe asub magnetvoo tiheduse väljas  $B$  risti jõujoontega. Tekkiva jõu saab leida järgnevalt

$$F = Bli \quad (2.7)$$

Indutseeritud jõu suuna saab määrata **vasakkäejuhise** abil: *kui magnetvoo tiheduse vektor  $B$  on suunatud vasaku käe peopessa ja voolu  $i$  suund juhtmes ühtib väljasirutatud sõrmede suunaga, siis tekkiva jõu  $F$  suund ühtib kõrvaleviidud pöidla suunaga.*

Üldjuhul on indutseeritud jõu suurus

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}), \quad (2.8)$$

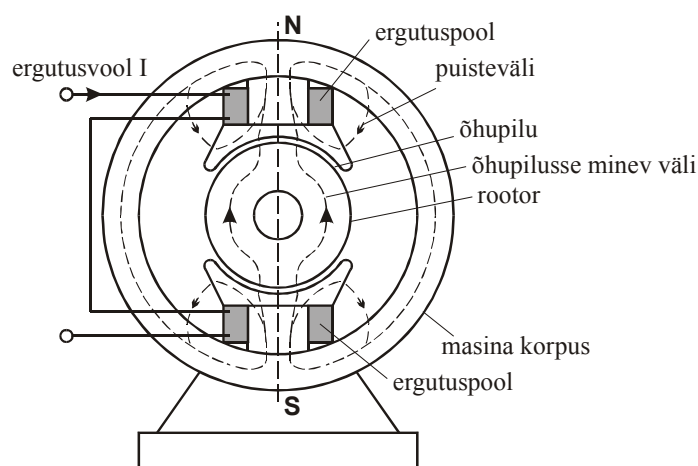
kus juhtme pikkuse vektori  $\mathbf{l}$  suund ühtib voolu suunaga.

### 2.1.5. Elektrimasinate jaoks sobiv väli ja selle juhtimine õhupilusse

Valemid (2.5) ja (2.7) näitavad, et juhtmes indutseeritud jõud ja pinge on seda suuremad, mida suurem on magnetvoo tihedus  $B$ . Suurema  $B$  korral kujunevad elektrimasinate kaal ja gabariidid väiksemaks. Ühe sirge juhtme väli ei ole eriti tugev ja ta ei ole ka homogeenne, mis on soovitatav elektrimasina õhupilu jaoks.

Tugeva homogeenne välja saamiseks õhupilus kasutatakse järgmisi meetodeid.

- **Mähisetraadist** valmistatakse **pool**. Võrreldes tavalise isoleeritud elektrijuhtmega on mähisetraadi **isolatsioonikiht** hästi õhuke (0,01 ... 0,1 mm). Pooli keerud on üksteise lähedal ja keerude väljad summeeruvad. Väli pooli sees tugevneb oluliselt.
- Pooli sisse pannakse **ferromagnetilisest aine**st **südamik**. Selle südamiku magnetiline läbitavus  $\mu$  on 2000...6000 korda suurem kui õhul. See aitab väga oluliselt suurendada elektrimasinates kasutatavat magnetvootihedust, sest  $B = \mu H$ .
- Pooli poolt tekitatud magnetväli juhitakse õhupilusse **magnetahela** abil. Pooli südamik ja magnetahel valmistatakse tavaliselt ühesugusest ferromagnetilisest materjalist. 50 Hz väljadel on selleks **elektrotehniline lehtteras**. Magnetahel juhivad magnetvälja ligikaudu sama moodi kui elektrijuhe juhivad elektrivoolu. Siiski läbib magnetväli õhku hoopis paremini kui elektrivool, mis õhku peaaegu üldse ei läbi. Selle tõttu sageli väike osa magnetvälja väljub magnetahelast õhku selleks mitte ette nähtud kohtades. Seda osa nimetatakse **puisteväljaks**.

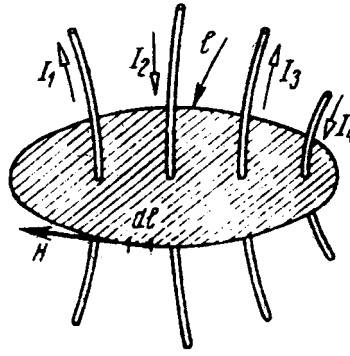


Joon.2.7. Alalisvoolu masina magnetahel

Joonisel 2.7 on näidatud alalisvoolu masina ergutusvälja magnetahel (masina pöörlemistelg on risti joonise tasapinnaga). Magnetvälja tekitab kahte ergutuspooli läbiv vool. Ergutuspoolide südamikud on osa magnetahelast. Pöörlev rootor moodustab teise osa magnetahelast. Ülejäänud osa magnetahelast moodustab masina korpus, kus magnetväli hargneb kahte ossa. Puistevälja jõujooned haaravad pooli keerde õhupilu läbimata. Need jõujooned ei teeni püstitatud eesmärki. Kasulikud jõujooned läbivad õhupilu.

### 2.1.6. Koguvoolu seadus (Ampere'i seadus) ja pooli väli

Mitme juhtme väljad summeeruvad ruumis. Kui suletud kontuuriga piiratud pinda läbib mitu juhet, siis nende juhtmete voolude algebralist summat nimetatakse seda pinda läbivaks **koguvooluks**  $\Sigma I$ .



Joon.2.8. Mitme vooluga juhtme poolt põhjustatud magnetvälja tugevuse leidmine

Joonisel 2.8  $\Sigma I = I_2 + I_4 - I_1 - I_3$ . Koguvoolu seadus seob magnetvälja tugevuse  $H$  mööda meelevaldset suletud kontuuri pikkusega  $l$  ja seda kontuuri läbiva koguvoolu  $\Sigma I$ . Koguvoolu seaduse kohaselt

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \Sigma I \quad (2.9)$$

kus  $\mathbf{H}$  on magnetvälja tugevuse suunaline vektor ja  $d\mathbf{l}$  on kontuuri suunaline vektor.

Kui suletud kontuur on võetud mööda magnetjõujoont, siis on  $\mathbf{H}$  ja  $d\mathbf{l}$  alati samas suunas ja nende vektorite vahelist nurka ei ole vaja arvestada. Sel juhul

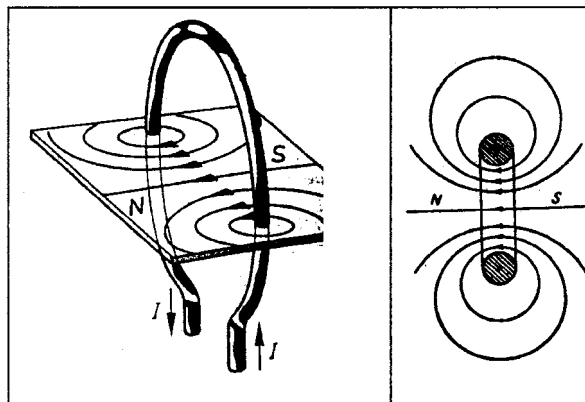
$$\int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \Sigma I \quad (2.10)$$

Kui on ainult üks sirge juhe, siis jõujoon on ringikujuline ja väljatugevus on igas jõujoone punktis ühesugune. Sellel juhul

$$H \int dl = I \text{ ehk } H \cdot l = I \quad (2.11)$$

Kui jõujoon asub juhtme teljest kaugusel  $R$ , siis  $l = 2\pi R$  ja me saame varem punktis 2.1.1 toodud valemi (2.1).

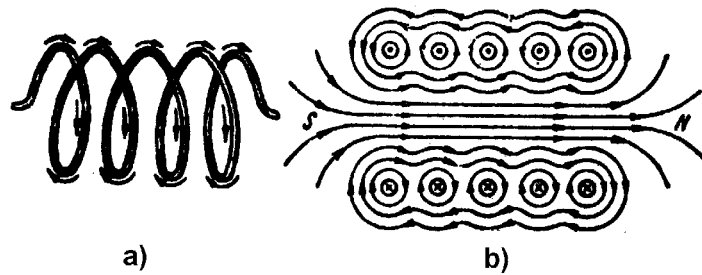
Kui meil on kaks võrdse ja vastassuunalise vooluga juhet, siis koguvool on võrdne nulliga ( $\Sigma I = 0$ ). Ometigi ei ole neid juhtmeid ümbritsevas ruumis väli võrdne nulliga. Sel juhul annab (2.9) vasakul pool olev integraal kontuuri ühes osas positiivse summa ja teises osas negatiivse summa. Näitena vaatame ringikujulist juhtmekeerdu ümbritsevat välja (joon. 2.9). Vool  $I$  läbib joonisel näidatud tasapinda keeru parempoolses osas alt üles ja vasakpoolses osas ülalt alla. Selle tõttu on parem- ja vasakpoolse osa jõujooned keeru sees samasuunalised. Summaarne väli (see on näidatud joonisel) on keeru sees tugevam, kui väljaspool keerdu.



Joon. 2.9. Ringikujulise juhtmekeeru väli

Veelgi tugevama välja saamiseks paigutatakse suurem arv samasuunalise vooluga kerde üksteise ligidale. Seda nimetatakse pooliks. Ühekihilise silinderpooli ehk solenoidi väli on näidatud joonisel 2.10.





Joon. 2.10. Solenoid (a) ja väli tema telge läbivas tasapinnas (b)

Pooli koguvool on võrdne voolu  $I$  ja keerdude arvu  $w$  korrutisega

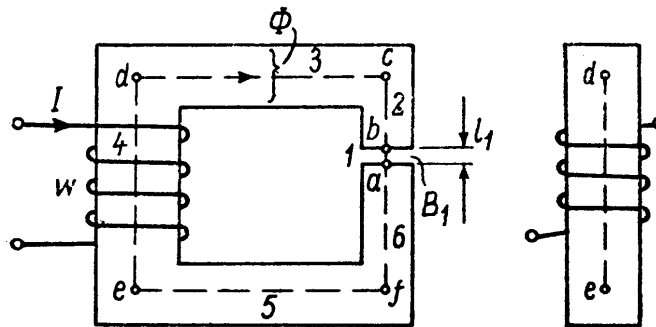
$$\Sigma I = I \cdot w \quad (2.12)$$

Pooli jaoks omandab valemiga (2.12) kirja pandud koguvoolu seadus kuju

$$\int H dl = I \cdot w \quad (2.13)$$

### 2.1.7. Magnetahelate arvutus

Magnetahelate korral on enamus juhtudel tegemist olukorraga, kus magnetahel koosneb mitmest eri pikkusega osast ( $l_1, l_2, l_3, \dots, l_k$ ) ja iga osa ulatuses on väljatugevus ligikaudu konstantne (joon. 2.11).



Joon. 2.11. Koguvooluseaduse rakendamine magnetahelale:

$$l_1 H_1 + l_2 H_2 + l_3 H_3 + l_4 H_4 + l_5 H_5 + l_6 H_6 = I \cdot w$$

Sellisel juhul saab (2.13) vasakul pool oleva integraali asendada summaga liidetavatest, mille arv on  $k$ .

$$\int H dl = \sum_1^k H_k l_k \quad (2.14)$$

ja koguvoolu seadus omandab kuju

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + \dots + H_k l_k = I w \quad (2.15)$$

Korrutist  $Iw$  nimetatakse ka **magnetomotoorseks jõuks** (tähis  $F_M$ ) ja tema ühikuks on amperkeerd (A·k). Korrutist  $H \cdot l$  nimetatakse **magneetimisergutuseks** ja tema ühikuks on amper. Magnetomotoorsel jõul on analoogiline funktsioon magnetahelas kui elektromotoorsel jõul elektri ahelas. Pooli poolt tekitatud magnetomotoorne jõud on magnetvälja allikas magnetahelas. Mida pikem on magnetahel, seda rohkem on vaja magnetomotoorset jõudu  $F_M$  teatud tugevusega välja tekitamiseks, sest

$$H = \frac{I \cdot w}{l} = \frac{F_M}{l} \quad (2.16)$$

Tihti on vaja leida magnetahelas tekkiva magnetvoo  $\Phi$  suurus, kui magneetimisergutus  $F_M$ , ahela ristlõige  $A$ , pikkus  $l$  ja materjali magnetiline läbitavus  $\mu$  on teada. Ühtlase ristlõike korral

$$B = \mu H = \mu \frac{F_M}{l} \quad (2.17)$$

ja

$$\Phi = B \cdot A = \mu \cdot A \frac{F_M}{l} = \frac{F_M}{l / \mu A}. \quad (2.18)$$

Suurust  $l/\mu A$  nimetatakse **magnetiliseks takistuseks** ehk **reluktantsiks**  $R_M$

$$R_M = \frac{l}{\mu A}. \quad (2.19)$$

Üldiselt on soovitatav, et magnetiline takistus  $R_M$  nii nagu elektritakistus  $R$  oleks hästi väike.  $R_M$  on seda väiksem, mida lühem on magnetahel, mida suurem on selle ahela ristlõige  $A$  ja mida suurem on ahela materjali magnetiline läbitavus  $\mu$ . Magnetilise takistuse avaldis (2.19) on analoogiline elektritakistuse avaldisega, kus juhtmaterjali eritakistuse  $\rho$  [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] asemel on kasutatud juhtmaterjali erijuhtivust  $\gamma$  [ $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ].  $\gamma = 1/\rho$ . Juhtme takistus on

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\gamma \cdot A}, \quad (2.20)$$

kus  $l$  on juhtme pikkus (meetrites) ja  $A$  juhtme ristlõige (ruutmeetrites). Avaldiste (2.19) ja (2.20) võrdlemine näitab, et magnetiline läbitavus  $\mu$  on analoogiline erijuhtivusega  $\gamma$ .

(2.18) ja (2.19) põhjal saab otsitava magnetvoo suuruse leida järgnevalt

$$\Phi = \frac{F_M}{R_M}, \quad (2.21)$$

kus  $F_M$  on magnetomotoorne jõud (amperkeerdukes) ja  $R_M$  on reluktans (magnetiline takistus). Avaldis (2.20) on analoogiline elektriahelates kasutatava Ohmi seadusega ( $I=U/R$ ). Magnetvoog  $\Phi$  [Wb] on voolu  $I$  [A] analoog, magnetomotoorne jõud  $F_M$  [A·k] on pinge  $U$  [V] analoog ja reluktans  $R_M$  [A·k/Wb] on takistuse  $R$  [ $\Omega$ ] analoog. Valemit (2.21) nimetatakse **magnetahela Ohmi seaduseks**.

### 2.1.8. Ferromagnetiliste materjalide magnetilised omadused

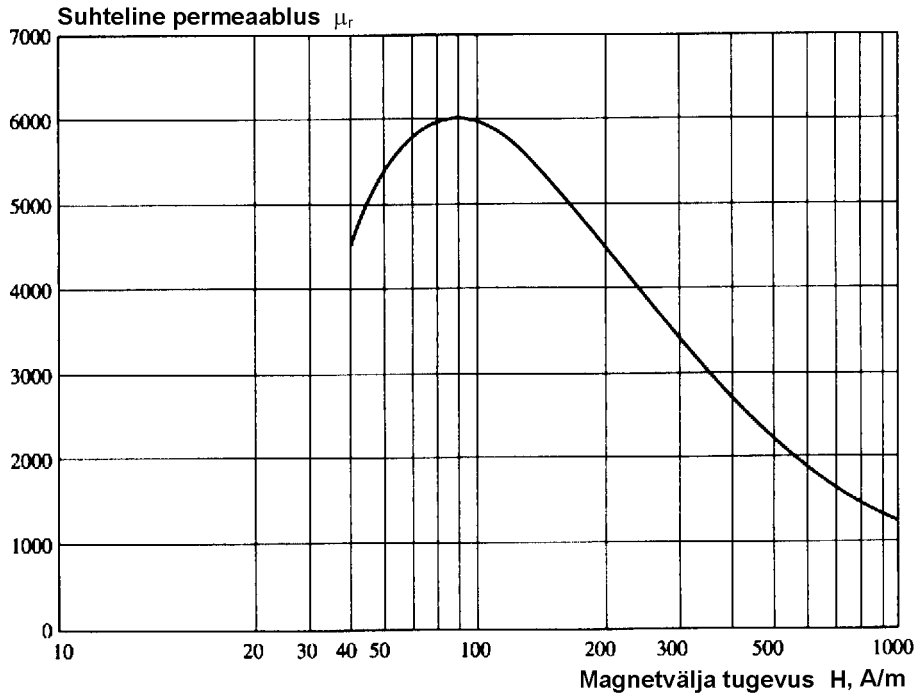
Erinevate materjalide magnetilise läbitavuse  $\mu$  iseloomustamiseks kasutatakse **suhtelise magnetilise läbitavuse (permeaabluse)**  $\mu_r$  mõistet

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (2.22)$$

kus  $\mu_0$  on vaakumi magnetiline läbitavus.

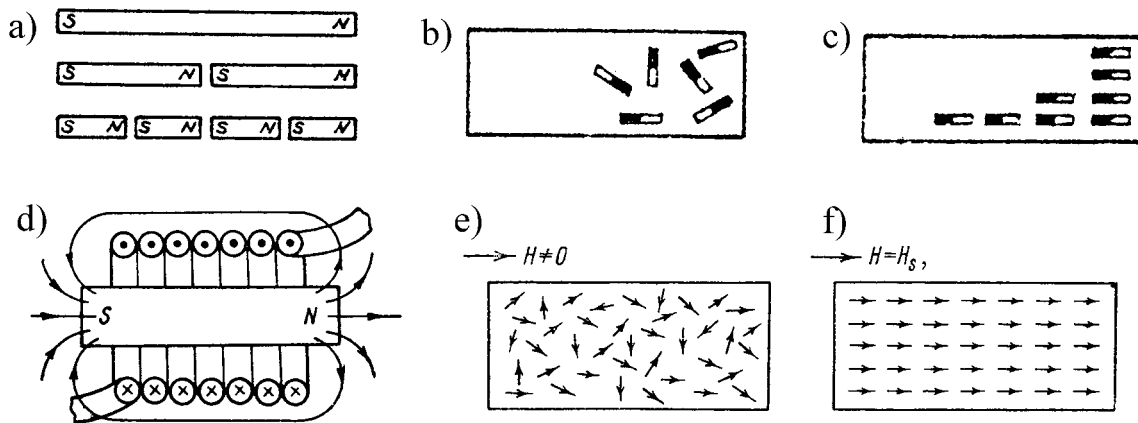
Enamuse materjalide magnetiline läbitavus erinev väga vähe vaakumi läbitavusest ja nende puhul  $\mu_r \approx 1$ . Erandi moodustavad raud, nikkell, koobalt, mõned haruldased metallid ja nende sulamid. Nende magnetiline läbitavus on palju suurem. Teraste puhul  $\mu_r = 200 \dots 6000$  või veelgi rohkem. Neid materjale nimetatakse **ferromagneetikuteks**. Ferromagnetilised omadused püsivad kuni temperatuurini  $800^\circ\text{C}$ , kõrgematel temperatuuridel need kaovad.

Vaakumi magnetiline läbitavus  $\mu_0$  on konstantne, kuid ferromagnetilistel materjalidel mitte. Terasse suhtelise magnetilise läbitavuse  $\mu_r$  sõltuvus väljatugevusest  $H$  on näidatud joonisel 2.12.



Joon. 2.12. Terasse suhtelise magnetilise läbitavuse sõltuvus väljatugevusest

Kõveralt on näha, et väljatugevuse kasvamisel magnetiline läbitavus väheneb. Seda nähtust seletatakse ferromagnetilise materjali struktuuriga. Rauda ja teiste ferromagneetikute aatomitel on magnetväli. Lähestikku olevate aatomite magnetväljad püüavad orienteeruda ühesuunaliselt. Aatomite magnetväljad liituvad. Siiski on ühesuunalise väljaga piirkonnad, mida nimetatakse **domeenideks**, väga väikesed. Kui me püsिमagnetit murrame pooleks, siis me ei saa eraldi põhja ja lõunapoolust, vaid kaks lühemat püsिमagnetit (joon. 2.13a). See näitab, et püsिमagnet koosneb väikestest ühesuunalistest magnetitest. Domeenid sarnanevad üliväikeste püsिमagnetitega. Tavaliselt on domeenid ruumis orienteeritud kaootiliselt (joon. 2.13b ja e) ja summaarne väli on väga väike.



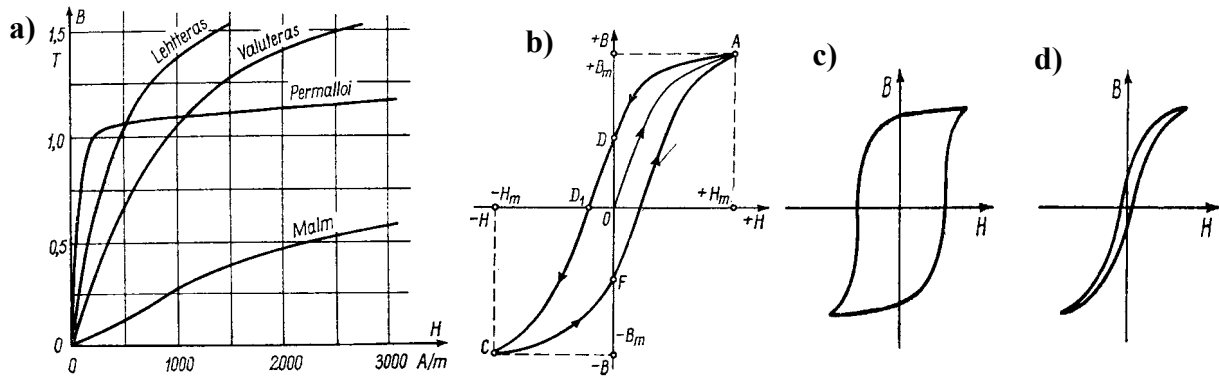
Joon. 2.13. Magneeditud terasvarda poolitamine (a), magneetimata terases domeenide kaootiline orientatsioon (b, e) ja nende orientatsioon tugeva välise magnetvälja korral (c, f) ning terasvarda magneetimine pooli magnetväljas (d)

Siiski ei ole domeenid alati kaootiliselt orienteeritud. Välise magnetvälja rakendamisel (seda saab teha pooliga nagu on näidatud joonisel 2.13d) hakkavad domeenide väljad pöörduma välise välja suunas. Tulemusena pooli väli ja domeenide väli liitub (joon. 2.13c ja f).

Teatud väljatugevuste piirkonnas (50 kuni 150A/m joonisel 2.12) on  $\mu_r$  muutused küllalt väikesed. Selles piirkonnas õiges suunas orienteeritud domeenide arv ja nende väli kasvab ligikaudu võrdeliselt välise väljaga. Mida rohkem väline väli kasvab, seda suurem on ära pööratud domeenide arv. Lõpuks pole enam domeene, mida veel pöörata. Domeenide väli ei kasva enam ja  $\mu_r$  muutub väikeseks. Seda nimetatakse **magnetiliseks küllastuseks**.

Materjalide magneetimise iseloomustamiseks kasutatakse rohkem kõveraid kujul  $B=f(H)$ , nagu on näidatud joonisel 2.14a. Sel juhul vastab suuremale  $\mu$  väärtusele kõvera järsem tõus. Mõnel materjalil (näiteks permalloi) muutub kõvera tõus ja koos sellega  $\mu$  väga järsult. Järsk muutus kõveral näitab kiiret küllastumist. Järsu muutumise piirkonda (200...300A/m permalloil) nimetatakse **magneetimiskõvera põlveks**. Magneetimiskõvera ligikaudu horisontaalset osa nimetatakse **küllastuspiirkonnaks**. Küllastamine on elektrotehnilistel terastel piirkonnas 1,0...1,8 Wb/m<sup>2</sup>. Suuremaid magnetvootihedusi pole elektrimasinates üldjuhul võimalik kasutada. Erandiks on üljuhtpoolidega masinate väli, kus on magnetvootihedused 2...10 Wb/m<sup>2</sup>.

Kui me kasutame alalsivoolu välja asemel vahelduvvoolu välja, siis me saame magneetimiskõvera asemel magneetimissilmuse ehk hüstereesi silmuse (joon. 2.14b).



Joon. 2.14. Ferromagnetiliste materjalide magneetimiskõverad (a), ferromagnetilise materjali übermagneetimine (b), magnetkõva (c) ja magnetpehme (d) materjal

Silmus tekib järgnevalt. Kui vool oli algselt null ja suureneb esimest korda, siis toimub vootiheduse  $B$  kasv kõvera  $OA$  kohaselt. Kui me nüüd hakkame voolu ja koos sellega  $H$ -i vähendada, siis toimub  $B$  langemine kõvera  $AD$  järgi. Voolu vähenemisele ja kasvamisele vastavad erinevad kõverad.

Punktis  $D$  on väline väli viidud nulliks, kuid südamikus on alles **jääkmagnetvoog** ja vootiheduse väli. See näitab, et mitte kõik domeenid ei ole võtnud tagasi endist juhuslikku orientatsiooni. Osa domeene säilitab endise välise välja orientatsiooni (mälu efekt). Miks on see nii? Aga seepärast, et aatomite pööramiseks domeenides tuleb kulutada energiat. Kui enne seda kasutati välise magnetvälja energiat aatomite orienteerimiseks välja suunas, siis pärast välja eemaldamist puudub energiaallikas, mis kõik domeenid tagasi pöörab. Kui domeenid on juba kord joondunud ühes suunas, siis teatud osa neist säilitab oma orientatsiooni nii kaua, kui välise energia allikas ei muuda seda orientatsiooni. Sel põhjusel saadakse püsomagnet, millel on jääkmagnetvoog.

Selleks, et jõuda punktist  $D$  punkti  $D_1$  (joon. 2.14b), kus jääkmagnetvoog on null, tuleb rakendada vastassuunaline väli. Selle välja tekitamiseks vajalikku magnetomotoorset jõudu nimetatakse **koertsitiivjõuks**. Välise energia allikaks võib olla ka tugev mehaaniline löök ja kuumutamine. Kui püsomagnet kukub põrandale, võib ta osaliselt kaotada oma magnetilised omadused.

Kui vahelduvvoolu väli saavutab oma negatiivse maksimumi  $-H_m$  (joon. 2.14b), siis magnetvoo tihedus saavutab samuti oma negatiivse maksimumi (punkt  $C$ ). Kui vahelduvvoolu väli muutub  $-H_m$

väärtuselt tagasi väärtusele  $+H_m$ , siis toimub übermagneetimine mööda kõverat  $CFA$ . Iga vahelduvvoolu perioodi korral toimub übermagneetimine mööda hüstereesisilmust  $ADD_1CFA$ .

Püsimagneti jaoks on hea suur jääkvälja tihedus ja koertsitiivjõud. Püsimagneti materjali hüstereesisilmus on lai (joon. 2.14c). Sellist materjali nimetatakse **magnetiliselt kõvaks**.

See fakt, et domeenide pööramine rauas vajab energiat, tekitab energiakaod masinate ja trafode magnetahela osas, kus on vahelduv magnetväli. Võib näidata, et terase hüstereesisilmuse pindala on võrdeline domeenide pööramiseks ühes tsüklis kulutatud energiaga. Mida kitsam on hüstereesisilmus, seda väiksemad on übermagneetimiskaod. Neid kadusid nimetatakse ka **hüstereesikadudeks**. Vahelduvas magnetväljas töötamiseks mõeldud materjalidel on kitsas hüstereesisilmus (joon. 2.14d). Selliseid materjale nimetatakse **magnetpehmeteks** materjalideks.

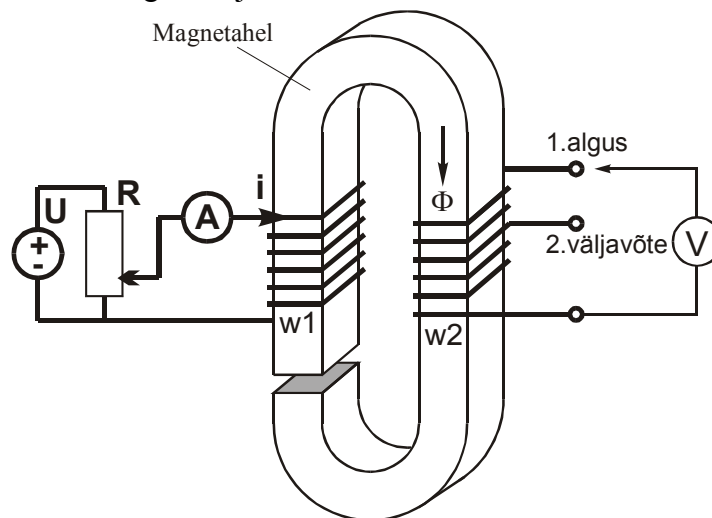
Südamikus esineb ka teist liiki kadu, mida samuti tekitab muutuv magnetväli. See kadu on **pöörivoolukadu**. Hüstereesikadusid ja pöörivoolukadusid koos nimetatakse **südamikukadudeks** ehk **teraseskadudeks**.

## 2.2. Ajas muutuva magnetvälja poolt indutseeritud pinge

### 2.2.1. Faraday seadus ja Lenzi seadus

Eelnevalt vaatlesime me magnetväljas liikuvat elektrijuhis tekkivat pinget ja elektromotoorjõudu.

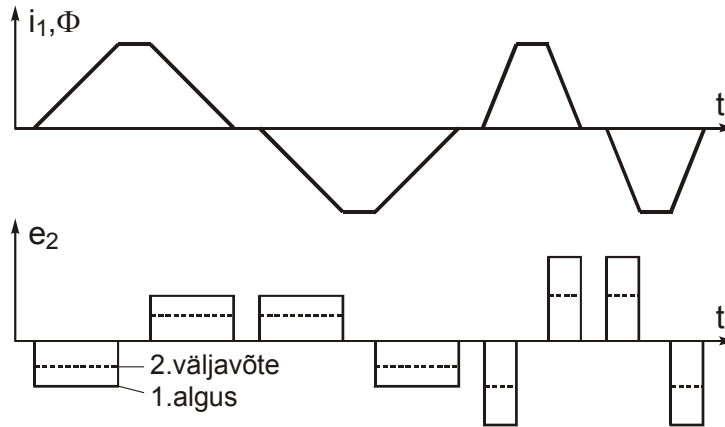
Nüüd vaatame ajas muutuvat magnetvälja.



Joon. 2.15. Ajas muutuva magnetvoo tekitamine ja selle voo abil elektromotoorjõu indutseerimine.

Ajas muutuva magnetvoo saamiseks võib muuta magnetahela ümber olevat mähist läbivat voolu. Mähise  $w_1$  voolu saab muuta reostaadi  $R$  takistuse muutmisega (joon. 2.15). Reostaat on reguleeritav takistus. Kui magnetahelal on veel teine mähis  $w_2$ , siis tekitab muutuv magnetvoog  $\Phi$  temas elektromotoorjõu  $e$ . Seda näitab voltmeeter. Meid huvitab  $\Phi$  ja  $e$  vaheline sõltuvus. Magnetvoo otsene mõõtmine on tülikas. Lihtsam on mõõta mähise voolu ampermeetriga. Kui magnetahelas on õhupilu, siis muutub magnetvoog ligikaudu võrdeliselt vooluga.

Kui me muudame voolu ja kasutame isekirjutavat ampermeetrit ja voltmeetrit, siis saame joonisel 2.16. toodud kõverad. Selliseid ajas muutuvaid kõveraid nimetatakse ka ostsillogrammideks.



Joon. 2.16. Muutuva magnetvoo poolt mähises  $w_2$  indutseeritud elektromotoorjõud

Ostsillogrammidelt on näha, et emj. mähises  $w_2$  tekib ainult siis, kui magnetvoog muutub. Konstantse magnetvoo korral on emj. võrdne nulliga.

Indutseeritud emj. suund on magnetvoo kasvamisel ja kahanemisel erinevad. Emj. sõltub magnetvoo kasvamise kiirusest. Kui voog kasvab kiiremini, siis on emj. suurem. Emj. kasvab ka koos keerdude arvu kasvuga. Lülituses 1 on voltmeetri pinge kaks korda suurem kui lülituses 2, kus keerdude arv on 2 korda väiksem.

Indutseeritud elektromotoorjõud on üldjuhul määratud **Faraday seadusega**. See seadus ütleb, et *kui muutuv magnetvoog läbib juhtmekeerdu, siis indutseeritakse selles keerus pinge, mille suurus on võrdeline voo muutumisega ajas.*

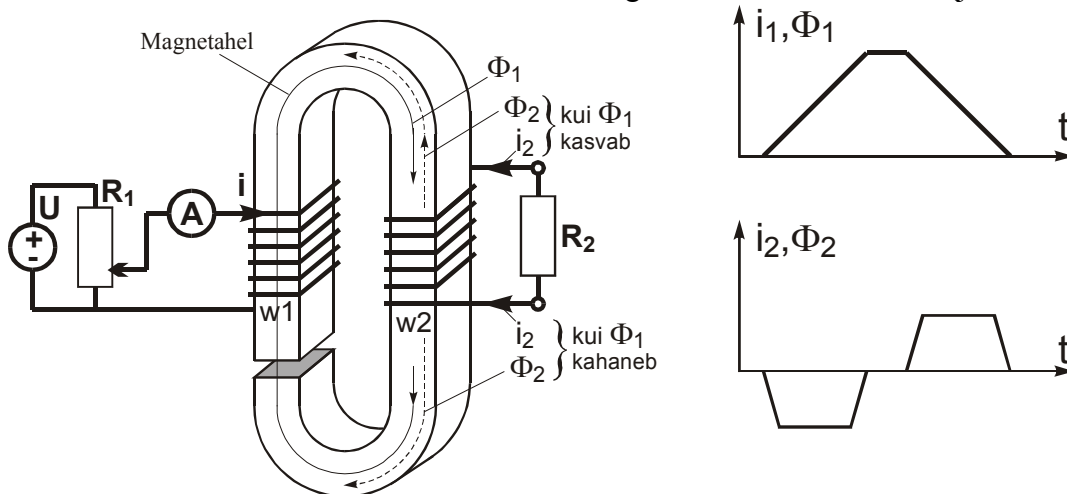
Valemi kujul on see seadus järgmine.

$$e = -d\Phi / dt, \quad (2.22)$$

kus  $e$  on tekkiv elektromotoorjõud ja  $\Phi$  magnetvoog.

Valemis olev miinusmärk tuleneb Lenzi seadusest. **Lenzi seadus** väidab, et *poolil tekkiva pinge suund on alati selline, et pinge mõjul tekkiva voolu väli püüab vähendada algset voomuutust* (algelt suurenevat voogu vähendatakse tekkiva voolu välja tõttu ja algelt vähenevat voogu suurendatakse tekkiva välja tõttu).

Mähises  $w_2$  indutseeritud voolu saamiseks on selle mähisega ühendatud resistor  $R_2$  (joon. 2.17).

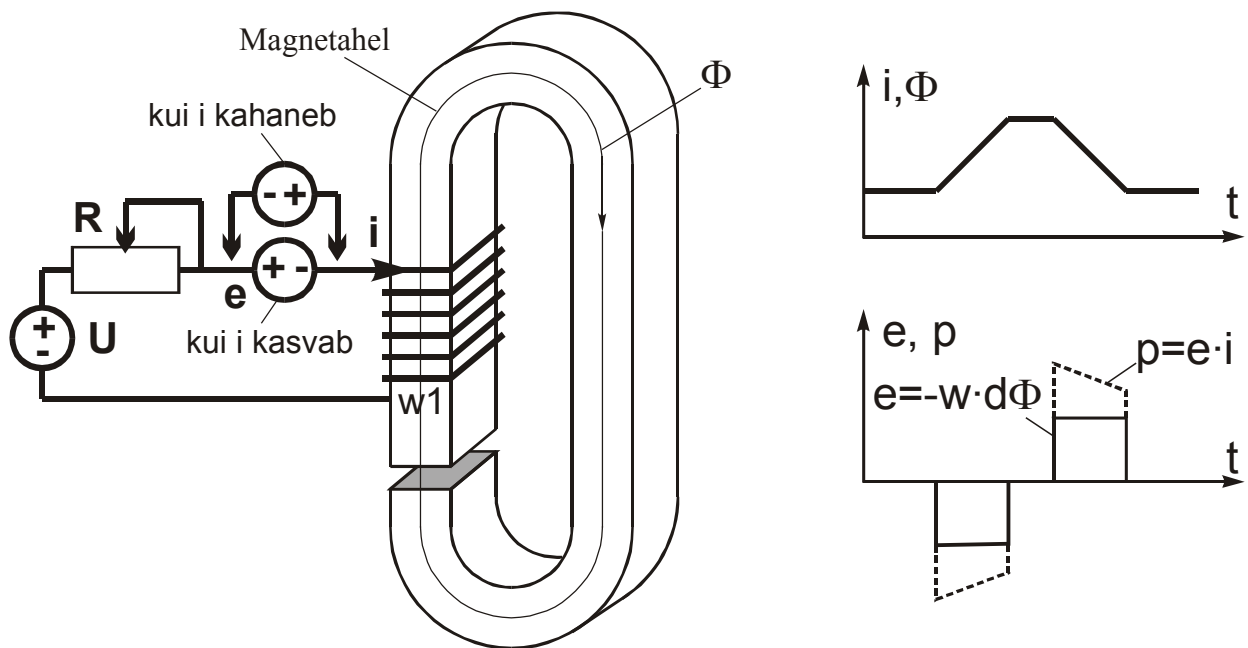


Joon. 2.17. Põhimagnetvoo  $\Phi_1$  muutumisele vastupidiselt mõjuva voo  $\Phi_2$  tekkimine, mida põhjustab indutseeritud vool

Tekkiva indutseeritud pinge ja voolu ( $i_2$ ) suund on selline, et voolust  $i_2$  põhjustatud magnetvoo  $\Phi_2$  suund on vastupidine põhivoole  $\Phi_1$ , kui põhivoog kasvab. Kui põhivoog kahaneb, siis on indutseeritud voolu voog põhivooga samasuunaline. Indutseeritud voolu voog püüab takistada põhivoo muutumist.

### 2.2.2. Omainduktsioon ja induktiivsus

Poolid  $w_1$  ja  $w_2$  (joon. 2.17) on mõlemad ühel ja samal magnetahelal. Selles magnetahelas magnetvoog muutub. Tekib küsimus, kas voo muutus indutseerib elektromotoorjõu ainult mähises  $w_2$  või ka mähises  $w_1$ . Asja lähemal uurimisel selgub, et elektromotoorjõud indutseeritakse tõepoolest mõlemas mähises. See ei ole oluline, et mähis  $w_1$  on ise selle muutuva magnetvoo  $\Phi_1$  põhjustaja. Mähises  $w_1$  tekkivat elektromotoorjõudu nimetatakse **omainduktsiooni elektromotoorjõuks**. Tekkivat omainduktsiooni elektromotoorjõudu võib arvesse võtta mähisega järjestikku lülitatud pingeallika  $e$  kujul (joon. 2.18).



Joon. 2.18. Omainduktsiooni elektromotoorjõu tekkimine magnetvoo muutumisel ja sellega kaasnev energiavahetus magnetvälja ja elektri ahela vahel

Voolu kasvamisel on  $e$  suunatud vastupidi toitepingega  $U$ . Voolu kahanemisel on  $U$  ja  $e$  samasuunalised. Voolu kasvamisel siseneb vool  $i$  pingeallika  $e$  positiivse pooluse kaudu. Selline voolu suund vastab energia andmisele pingeallikasse. Antud juhul antakse energiat magnetvälja, sest pingeallika pingeks on mähise omainduktsiooni elektromotoorjõud  $e$ . Magnetvälja suunduva energiavoo võimsuse hetkväärtus  $p$  on

$$p = i \cdot e \quad (2.23)$$

Voolu kahanemisel on pingeallika polaarsus voolu suhtes vastupidine. Vool väljub pingeallika positiivsest poolusest. Selline voolu suund vastab energia võtmisele pingeallikast (joon. 2.18). Antud juhul võetakse magnetvälja salvestatud energiat ja antakse see elektri ahelasse tagasi. Energiavahetus magnetvälja ja elektri ahela vahel toimub omainduktsiooni elektromotoorjõu kaudu. Märk miinus valemis (2.22) näitab tekkiva omainduktsiooni elektromotoorjõu suunda toitepinge suhtes. Sageli jäetakse see märk miinus siiski ära ja leitakse hiljem õige elektromotoorjõu suund teiste kriteeriumide järgi.

Mitme keeruga pooli puhul on indutseeritud pinge

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.24)$$

Pooli läbiva magnetvoo  $\Phi$  ja pooli keerdude arvu korrutist nimetatakse **aheldusvooks**  $\psi$ .

$$\psi = w \cdot \Phi \quad (2.25)$$

Aheldusvoo ühikuks on **veeberkeerd** [Wb·k]. Aheldusvoo mõiste kasutamise korral omandab valem (2.24) kuju

$$e = -\frac{d\psi}{dt} \quad (2.26)$$

Kui keskkonnas ei ole ferromagneetiku, siis on pooli magnetvoog ja aheldusvoog  $\psi$  proportsionaalsed pooli läbiva vooluga  $i$ . Võrdetegurit aheldusvoo ja magnetimisvoolu vahel ehk jagatist

$$\frac{\psi}{i} = L \quad (2.27)$$

nimetatakse **induktiivsuseks** ja tema ühikuks on veebrit amprile [Wb/A]. Rohkem kasutatakse siiski mõõteühikut henri [H].  $1\text{H}=1\text{Wb/A}$ . Avaldise (2.26) põhjal on aheldusvoog võrdne voolu ja induktiivsuse korrutisega.

Avaldise (2.3), (2.16), (2.19), (2.24), (2.25) ja (2.27) teisendamistega saab leida induktiivsuse jaoks ka järgneva avaldise.

$$L = w^2 / R_M, \quad (2.28)$$

kus  $R_M$  on magnetahela magnetiline takistus.

(2.28) näitab, et pooli induktiivsus on võrdeline keerdude arvu ruuduga ja pöördvõrdeline magnetahela magnetilise takistusega. Magnetiline takistus sõltub keskkonna magnetilisest läbitavusest  $\mu$  ja magnetahela geomeetristest mõõdetest. Poolil võib ka magnetahel puududa. Siis sõltub induktiivsus ainult pooli keerdude arvust ja geomeetristest mõõdetest. Seega induktiivsuse suurus on määratud pooli konstruktsiooniga ja keskkonna omadustega. Induktiivsus on ka tavalisel sirgel elektrijuhtmel, mis ei ole keritud pooliks. Sellise juhtme induktiivsus on siiski väike. Sirgest juhtmest pooli valmistamise tulemusena kasvab induktiivsus väga palju.

### 2.2.3. Induktiivpool on energiat salvestav element elektriahelas

Avaldise (2.27) põhjal on aheldusvoog võrdne voolu ja induktiivsuse korrutisega

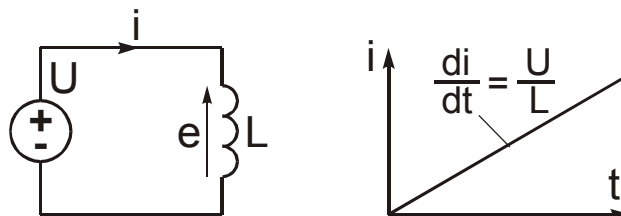
$$\psi = iL \quad (2.29)$$

Võrdse voolu korral on selle pooli aheldusvoog suurem, mille induktiivsus on suurem. *Induktiivsus iseloomustab pooliga seotud magnetvoo kogust.*

Omainduktsiooni elektromotoorjõu võib avaldada induktiivsuse kaudu. Mitteferromagneetilises keskkonnas  $\mu$  on konstantne ja ka induktiivsus  $L$  on konstantne. Sel juhul

$$u = e = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d(iL)}{dt} = L \frac{di}{dt}. \quad (2.30)$$

Pooli elektromotoorjõu  $e$  peab tasakaalustama elektriahela pingesallikas, mille pinge on  $U$ . See on näidatud joonisel 2.19, kus  $U=e$ .



Joon. 2.19. Voolu kasvamise kiiruse selgituseks

Pingesallika pinge määrab voolu kasvukiiruse

$$\frac{di}{dt} = \frac{U}{L}. \quad (2.31)$$



Induktiivse ahela voolu muutumise kiirus on võrdeline rakendatud pingega ja pöördvõrdeline induktiivsusega. Kui ahelas puudub aktiivtakistus, siis kasvab vool lõpmata suureks. Reaalsuses on aktiivtakistus alati olemas ja see piirab voolu kasvu. Väljakujunenud oleku ehk püsitalitluse voolu saab leida Ohmi seaduse järgi ( $I=U/R$ ).

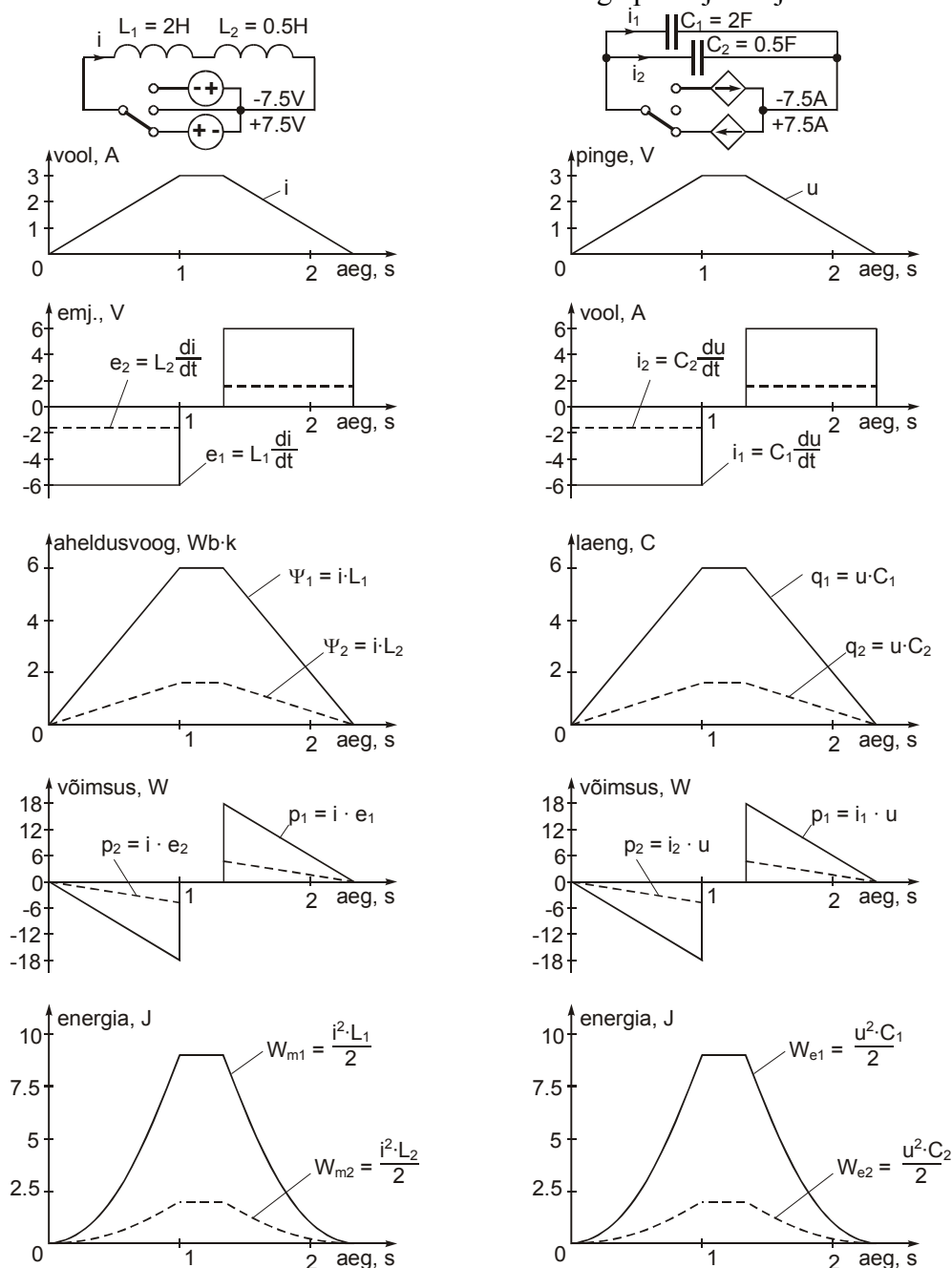
Pool on energiat salvestav elektri ahela element. Pooli induktiivsus iseloomustab selle pooli energiamahukust. Pooli salvestatava magnetvälja energia  $W_m$  saab leida pooli antava hetkvõimsuse  $p$  integreerimisega ajas

$$W_m = \int p dt = \int u \cdot i dt. \quad (2.32a)$$

Võttes arvesse avaldist (2.30) ja seda, et  $u=e$  saame (2.32a) viia kujule

$$W_m = \int i L \frac{di}{dt} \cdot dt = L \int i di = \frac{Li^2}{2}. \quad (2.32b)$$

Pooli induktiivsusel tekkinud elektromotoorjõud, pooli läbiv aheldusvool, pooli energia ja selle muutumise võimsus on näidatud kahe erineva induktiivsusega pooli jaoks joonisel 2.20.



Joon. 2.20. Induktiivpoolidesse ja kondensatoritesse energia salvestamine

Pane tähele, et elektromotoorjõu (mis on sisuliselt pinge) ja voolu kõverate kujud on joonisel 2.20 erinevad. See tuleneb diferentsiaalsõltuvusest avaldises (2.30). Aheldusvoog  $\psi$  sõltub voolust lineaarselt, kuid energia ja voolu vahel on ruutsõltuvus. See tuleneb hetkvõimsuse  $p$  muutumisest ajas.

Magnetvälja energia arvutusvalem on sarnane elektrivälja energia  $W_e$  arvutusvalemiga, mis on järgmine

$$W_e = \frac{Cu^2}{2}. \quad (2.33)$$

Siin  $C$  on kondensaatori mahtuvus ja  $u$  on kondensaatori pinge.

Kondensaatori mahtuvus iseloomustab selle kondensaatori energiamahtuvust, nii nagu pooli induktiivsus iseloomustab pooli energiamahtuvust.

Joonisel 2.20 on näidatud ka kahe kondensaatori  $C_1$  ja  $C_2$  laadimine konstantse vooluga. Induktiivse ja mahtuvusliku ahela ostsillogrammid on sarnased. Voolule vastab pinge ja ka vastupidi. Aheldusvoole  $\psi$  vastav laeng  $q$ . Arvutusvalemid on analoogilised. Mahtuvuslik ahel ja induktiivne ahel on duaalsed ahelad. Induktiivpool ja kondensaator või siis mingi elektriseadme osa induktiivsus ja mahtuvus on energia salvestid. Seevastu takisti või mingi elektriseadme osa takistus on elektrienergia muundurid soojusenergiaks.




Takisti, induktiivpool ja kondensaator on elektrotehnika põhiobjektid. Need objektid on käegakatsutavalt materiaalsed.

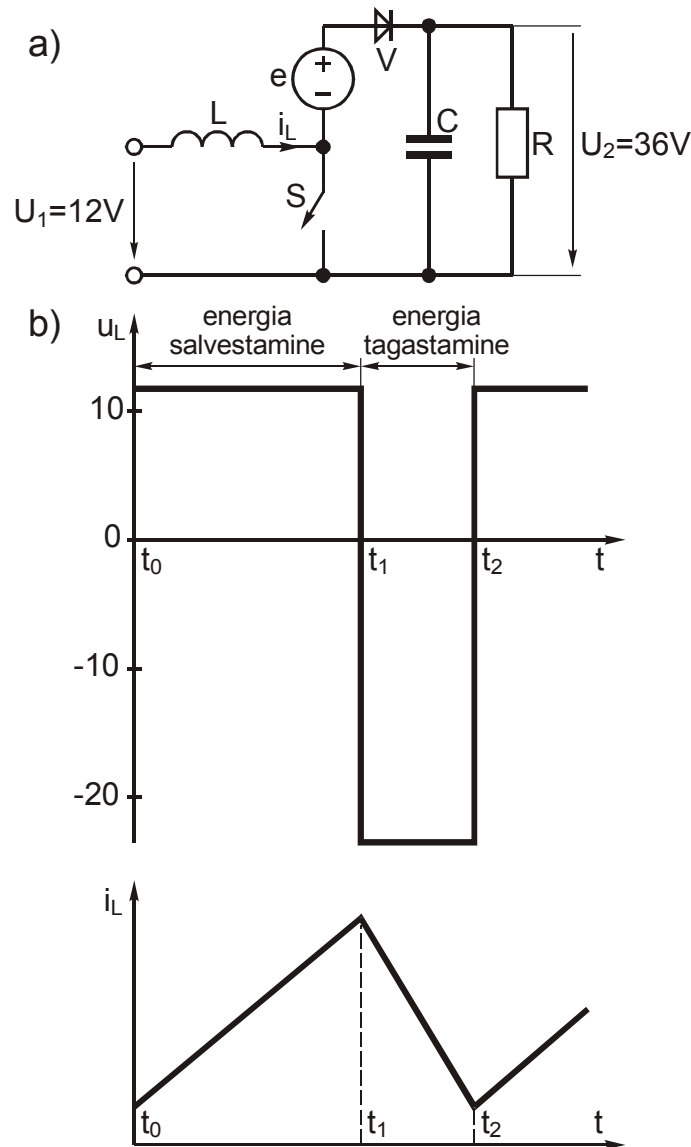
Vool, magnetvoog, magnetväli ja elektriväli on samuti objektid, kuid nende materiaalsus ei ole käegakatsutav. Neid võib lugeda materia erivormiks, kuid nad erinevad tavaliselt kõvast kehast.

Ruum, aeg ja energia esinevad elektrotehnilistes põhiseostes samuti objekti funktsioonis. Näiteks juhtmes indutseeritud pinge suurus on otseses sõltuvuses ruumist ja ajast (juhtme pikkusest ja tema liikumiskiirusest). Elektrotehnika põhiobjektid on toodud tabelis 1. Seal on toodud ka nende objektide lühiiseloomustus, põhiparameetrid ja nende mõõtühikud.

Mahtuvusi ja induktiivsusi kasutatakse elektrienergia muundamisel. Elektrienergia salvestamist pooli magnetvälja võib teostada ühel pingel (näiteks  $U_1$ ), kuid pooli salvestatud energia tagastamist magnetväljast elektriahelasse võib teostada ükskõik millisel teisel pingel. Seda võimalust kasutatakse alalispinge muundamiseks. Peale induktiivsuse  $L$  kasutatakse sellises muunduris (joonis 2.21a) lüliti  $S$ . Kui lüliti  $S$  on suletud, siis on pool  $L$  lülitatud toiteallika pingele  $12\text{ V}$ . Vool poolis kasvab ja voolu kasvukiirus  $di_L/dt = U_1/L$ . Selline olukord kestab ajamomendist  $t_0$  kuni  $t_1$  (vt. joonis 2.,21b).

## Elektrotehnika põhiobjektid

Objekti liik	Materiaalne			Mittemateriaalne						
Objekt	Takisti	Induktiivpool	Kondensaa- tor	Vool	Magnetvoog	Magnetväli	Elektriväli	Ruum	Aeg	Energia
Objekti iseloomustus	Muundab elektri-energia soojus-energiaks. Tekitab voolu mõjul pingelangu	Magnetvälja energia salvesti	Elektri-välja energia salvesti	Elektri-laengute liikumine ruumis. Tekitab magnetvälja	Hüpoteetiliste magnet-laengute liikumine ruumis	Ruumi omaduste muutus, mis avaldub induktseeritud jõu ja pingetekkes	Ruumi omaduste muutus, mis avaldub laetud osakestele mõjuva jõuna	—	—	—
		Tekitab vahelduvvoolu mõjul pingelangu								
Elektriskeemitingmärk										
Põhiparameetrid	Takistus	Induktiivsus Induktiivtakistus	Mahtuvus Mahtuvustakistus	Voolutugevus Voolutihedus	Magnetvootugevus Magnetvootihedus	Magnetväljatugevus Magneetimisergutus Magnetomotoorjõud	Elektriväljatugevus Pinge Elektromotoorjõud	Pikkus Pindala Ruumala	Ajaintervall Sagedus Nurksagedus Periood	Energia Võimsus
Parameetrite tähised	$R$	$L, x_L$	$C, x_C$	$I, j$	$\Phi, \vec{B}$	$\vec{H}, H_I, F_M$	$\vec{E}, U, E$	$\vec{l}, A, V$	$\Delta t, f, \omega, T$	$W, P$
Mõõtühik	oom	Henri oom	Farad oom	Amper Amprit ruutmeetrile	Veeber Veebrit ruutmeetrile	Amprit meetrile Amper Amper-keerd	Volti meetrile Volt Volt	Meeter Ruut-meeter Kuup-meeter	Sekund Herts Radiaani sekundis Sekund	Džaul Vatt
Mõõtühiku tähis	$\Omega$	H, $\Omega$	F, $\Omega$	A, A/m <sup>2</sup>	Wb, Wb/m <sup>2</sup>	A/m <sup>2</sup> , A	V/m, V, V	m, m <sup>2</sup> , m <sup>3</sup>	s, Hz, rad/s, s	J, W



Joonis 2.21. Magnetvälja kasutamine pinget tõstvas impulssmuunduris

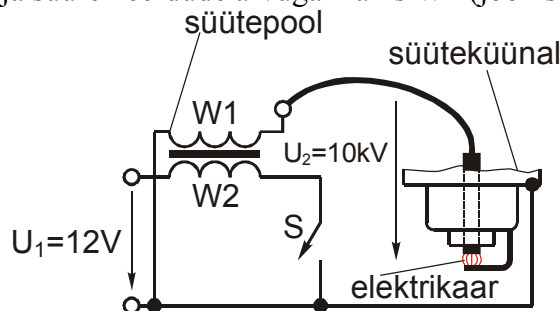
Ajamomendil  $t_1$  lülitatakse  $S$  avatakse. Pooli vool ( $i_L$ ) ei saa hetkeliselt muutuda, sest see vool on seotud magnetvälja energiaga. Küll aga saab pooli omainduktsiooni elektromotoorjõud  $e$  hetkeliselt muutuda (Lenzi seaduse kohaselt). Kui vool  $i$  püüab peale lülituse avamist vähenema hakata, siis sellega tekib hüppeliselt omainduktsiooni elektromotoorjõud  $e$ , mis on joonisel 2.21a näidatud virtuaalse pingeaallikana. Tekkiv elektromotoorne jõud on täpselt nii suur, et lülitusmomendile  $t_1$  eelnenud ajamomendi vool ( $i_L$ ) säilitab ka lülitusmomendile  $t_1$  järgneval ajamomendil oma väärtuse. Lülitusmomendile  $t_1$  järgneval ajamomendil kulgeb see vool aga uues ahelas, mis on järgmine: pingeaallika  $U_1$  plussklemm – pool  $L$  – virtuaalne pingeaallikas  $e$  – diod  $V$  avatud suunas – kondensaator  $C$  ja koormustakisti  $R$  paralleelselt – pingeaallika  $U_1$  miinus klemm. See vool väljub virtuaalse pingeaallika plussklemmist, mis näitab et energiat viiakse pooli magnetväljast välja. Virtuaalse pingeaallika elektromotoorse jõu suurus on Kirchhoffi pingeseaduse kohaselt võrdne kondensaatori  $C$  pinge (see on muunduri väljundpinge  $U_2 = 36\text{V}$ ) ja muunduri sisendpinge  $U_1 = 12\text{V}$  vahega. Seega antud juhul  $e = U_2 - U_1 \approx 24\text{V}$  (kui väikest pingelangu avatud diodil  $V$  mitte arvestada). Vool poolis kahaneb ja voolu kahanemise kiirus  $di/dt = (U_1 - U_2)/L$ .

Ajamomendil  $t_2$  suletakse lülitus uuesti ja tsükkel kordub. Magnetvälja hakatakse uuesti energiat andma ja pooli vool hakkab jälle kasvama. Seega toimub tsükliliselt pooli magnetvälja energia

andmine ühel ajaintervallil ühel pingel ja magnetvälja energia tagastamine elektriahelasse teisel ajaintervallil teisel pingel. Sellist muundurit nimetatakse pinget tõstvaks impulssmuunduriks (ing. k. Boost converter).

Pinge, millel toimub energia tagastamine magnetväljast elektriahelasse ei ole määratud ei pooli induktiivsuse ega ka pooli vooluga. Selle pinge määrab elektriahel, millesse pooli energiat antakse. Kui elektriahela pinge on väga kõrge, siis on voolu kahanemise kiirus väga suur ja vool muutub kiiresti nulliks. Olukord esineb elektriahela katkestamisel tavalise kontaktidega lüliti abil. Igas elektriahelas on induktiivsus ja ahela katkestamisel tekib lüliti kontaktidel nii kõrge pinge, et avanevate kontaktide vahel toimub õhus läbilöök (tekib lühiajaline elektrikaar ehk säde).

Mõnedel juhtudel on vaja tekitada teatud kindlal otstarbel sädet. Näiteks autodel kasutatavates bensiinimootorites. Selle juures kasutatakse kahemähiselist pooli (nn. süütepooli), millel on väikese keerdude arvuga mähis  $W_2$  ja suure keerdude arvuga mähis  $W_1$  (joonis 2.22).

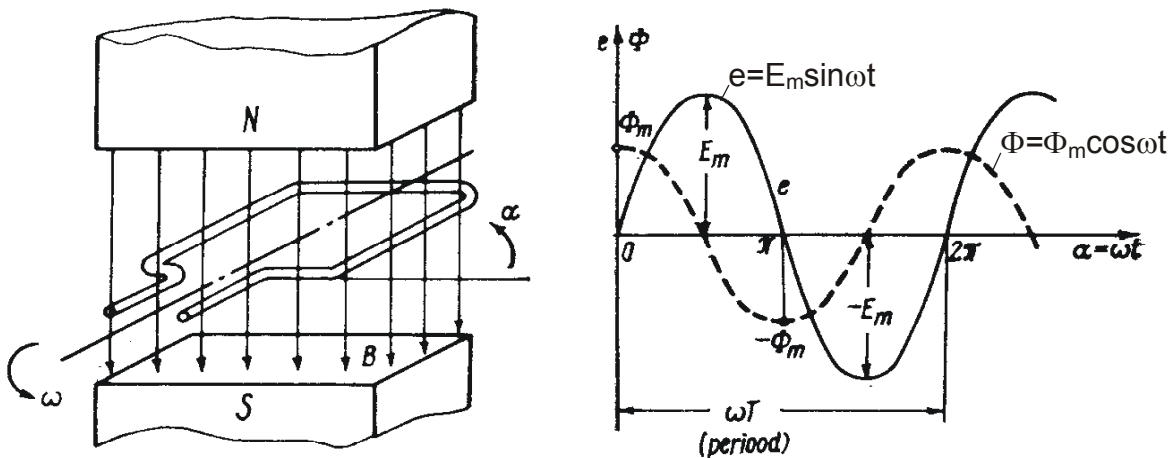


Joon. 2.22. Bensiinimootori süüteküünla sädeme tekitamine magnetvälja salvestatud energia arvel

Mähis  $W_1$  lülitatakse 12-voldisele akupingele, kui lüliti  $S$  (see on katkesti kontakt või transistorlüliti) on sisse lülitatud. Siis toimub energia viimine akust süütepooli magnetvälja. Lüliti  $S$  avanemisel tekib nii mähises  $W_1$  kui  $W_2$  pinge. Kuna mähise  $W_2$  keerdude arv on palju suurem (umbes 100 korda), siis tekib läbilöök enne süüteküünla elektroodide vahel kui lülitis  $S$ . Sellega viiakse magnetvälja energia poolist välja mähise  $W_2$  voolu abil, ehkki energia viiakse sinna eelmisel ajaintervallil mähise  $W_1$  voolu abil.

#### 2.2.4. Ajas muutuva magnetvoo saamine homogeenes magnetväljas pöörleva raami abil. Siinuspinge ja siinusvool

Tavaliselt kasutatakse elektriahelates siinuspinget. Siinuspinge tekib, kui homogeenes magnetväljas pöörleb konstantse kiirusega  $\omega$  pool (joon. 2.23 kujutab ühekeerulise pooli pöörlemist).



## Joon. 2.23. Siinuselektromotoorjõu tekkimine

Pooli läbiva magnetvoo suurus muutub pöörlemisel. Kui pooli tasapind on paralleelne magnetvälja jõujoontega, siis pooli läbiv magnetvoog on võrdne nulliga

$$\Phi=0.$$

Kui pooli tasapind on risti jõujoontega, siis on magnetvoog maksimaalne

$$\Phi_m=B \cdot A. \quad (2.34)$$

kus  $B$  – magnetvoo tihedus,  $\text{Wb/m}^2$ ;

$A$  – pooli pindala,  $\text{m}^2$ ,

$\Phi_m$  – magnetvoo maksimaalväärtus,  $\text{Wb}$ .

Pooli suvalise asendi puhul on pooli läbiva magnetvoo suurus

$$\Phi=\Phi_m \cos \alpha. \quad (2.35)$$

Nurka  $\alpha$  määratakse järgnevalt. Kui pooli tasapind on risti jõujoontega, siis  $\alpha=0^\circ$  ja  $\cos \alpha=1$ . Kui aga pooli tasapind on paralleelne jõujoontega, siis  $\alpha=90^\circ$  ja  $\cos \alpha=0$ .

Nurk  $\alpha$  kasvab ajas ühtlaselt. Nurga üldavaldis on

$$\alpha=\omega t, \quad (2.36)$$

kus  $\omega$  on pöörlemise nurkkiirus  $\text{rad/s}$ .

Ühe pöörde jooksul on nurga  $\alpha$  muutus  $2\pi$  radiaani. Ühe pöörde tegemiseks kuluv ajavahemik on

$$t_{1\text{pöörde}}=\frac{\alpha}{\omega}=\frac{2\pi}{\omega}=T. \quad (2.37)$$

Ühe pöörde sooritamiseks kuluvat aega nimetatakse ka **perioodiks** (tähis on  $T$ ). Perioodi pikkust mõõdetakse sekundites. Perioodi pöördväärtust nimetatakse **sageduseks**

$$f=\frac{1}{T} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (2.38)$$

Sageduse mõõtühikuks on **herts [Hz]**.  $1\text{Hz}=1\text{s}^{-1}$ .

Sagedus näitab perioodide arvu ühes sekundis, mis antud juhul on poolikeeru pöörete arv sekundis. Pooli läbiva magnetvoo avaldise võime kirjutada ka kujul, kus nurk  $\alpha$  on asendatud ajaga  $t$  ja nurksagedusega  $\omega$ .

$$\Phi=\Phi_m \cos \omega t. \quad (2.39)$$

Keeru läbiva magnetvoo muutus tekitab selles keerus emj.

$$e=-\frac{d\Phi}{dt}.$$

Kuna magnetvoog muutub meil (2.39) kohaselt, siis selles keerus indutseeritud emj. avaldis kujuneb järgnevaks

$$e=-\frac{d(\Phi_m \cos \omega t)}{dt}=\omega \Phi_m \sin \omega t. \quad (2.40)$$

Kui  $\sin \omega t=1$ , siis on emj. maksimaalne.

$$E_m=\omega \Phi_m, \quad (2.41)$$

kus  $E_m$  on siinuselektromotoorjõu **amplituudväärtus**. Mingil ajamomendil olevat emj. väärtust  $e$  nimetatakse **hetkväärtuseks**

$$e=E_m \sin \omega t. \quad (2.42)$$

Kui siinuselektromotoorjõu allikat koormata näiteks aktiivtakistusega, siis tekib ahelas siinusvool, mille kõver on kirjeldatav analoogiliselt

$$i=I_m \sin \omega t. \quad (2.43)$$

Vahelduvvoolu ja pinget hetkväärtused muutuvad pidevalt nulli ja amplituudväärtuse vahel. Olukord on alalisvooluga võrreldes erinev. Praktikas on sageli vaja alalisvoolu ja vahelduvvoolu mõju efektiivsust võrrelda. Näiteks põleb tavaline hõõglamp nii alalisvoolu kui ka vahelduvvoolu korral. Kui lambi nimivool on alalisvoolul näiteks  $1\text{A}$ , siis sama võimsuse saamiseks peab vahelduvvoolu amplituudväärtus olema suurem. Probleemi lahenduseks on kasutusele võetud vahelduvvoolu **efektiivväärtuse** mõiste. See on defineeritud järgnevalt. *Vahelduvvoolu efektiivväärtus on võrdne*

niisuguse alalisvooluga, mis samas takistis sama ajavahemiku jooksul eraldab sama suure soojushulga.

On võimalik näidata, et siinusvoolu korral on efektiivväärtus  $I_{ef}$  ja amplituudväärtus  $I_m$  seotud järgnevalt

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707I_m. \quad (2.44)$$

Analoogiliselt kasutatakse ka siinuspinge efektiivväärtust

$$U_{ef} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707U_m. \quad (2.45)$$

Harilikult Euroopa maades jäetakse indeks  $ef$  ära. Voolu efektiivväärtus on lihtsalt  $I$  ja pinge  $U$ . Ameerikas siiski kasutatakse efektiivväärtust näitavat indeksit (inglise keeles  $rms$  ehk root-mean-square) sagedamini, näiteks  $I_{rms}$  tähistab voolu efektiivväärtust. Kui vahelduvvoolu võrgupinge on 230V, siis selle pinge amplituudväärtus on  $U_m = \sqrt{2} \cdot U = \sqrt{2} \cdot 230 = 325 \text{ V}$ .

Kui sama sagedusega siinuskõverad on võrdse algfaasiga, siis öeldakse, et **nad on faasis**. Kui algfaaside vahe on  $\pm \pi$ , siis öeldakse, et **nad on vastufaasis**.

*Siinussuurus on määratud, kui on teada ta amplituudväärtus, sagedus ja algfaas.*

### 2.2.5. Faasordiagramm ehk vektordiagramm

Graafiliselt kujutatakse siinussuursi kas sinusoidina, nagu eelpool, või pöörleva faasorina ehk vektorina. Sinusoidi joonestamine on tülikam. Pealegi kaob ülevaatlikkus, kui sinusoidide on palju. Seepärast kasutavad elektrikud enamasti vektordiagrammi, mis on sinusoididest lihtsam ja ülevaatlikum.

Milline on seos sinusoidi ja vektori vahel?

Sinusoidil on ajatelg. Aja voolu kujutatakse kulgliikumisena mööda x-telge. Lõigud AB, BC jne. joonise 2.24 x-teljel kujutavad endast ajaintervalle. Siinuskõvera punktide kaugused x-teljest bB, cC jne. näitavad pinge hetkväärtust.

Vektordiagrammil on aja kulgliikumine asendatud pöörleva liikumisega. Aeg on pandud pöörlema. Ajaintervalle kujutavad **pöörleva pingevektori** ehk **faasori**  $U_m$  poolt moodustatud nurgad (joonisel nurk  $\alpha$ ) ja samaväärselt ka pöörleva pingevektori otsa poolt läbitud teepikkused (kaar AB). Joonisel on kaar AB pikkuselt võrdne x-telje lõiguga AB. Pinge hetkväärtust näitab pöörleva vektori otspunkti kaugus x-teljest (lõigud Bb, Cc jne.) Pöörleva vektori otspunkti kaugus x-teljest muutub siinuseaduse järgi. Näiteks joonisel oleva geomeetrilise konstruktsiooni põhjal:

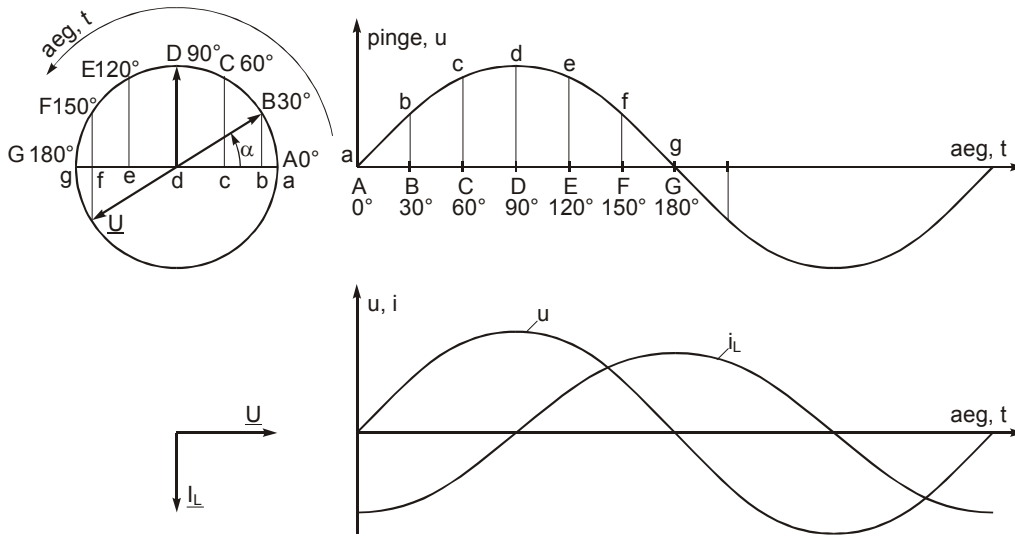
$$\text{lõik Bb} = U_m \sin \alpha = U_m \sin 30^\circ = 0,5 U_m;$$

$$\text{lõik Cc} = U_m \sin 60^\circ = 0,866 U_m;$$

$$\text{lõik Dd} = U_m \sin 90^\circ = U_m \text{ (pinge amplituudväärtus).}$$

Siin  $U_m$  on vektori pikkus joonisel, mis on seotud pingega mõõdutegur kaudu. Näiteks mõõdutegur  $m_U = 10 \text{ V/mm}$ . Vektorit vaadeldakse pöörlevana ühtlase kiirusega **vastupäeva**. Võib ka ette kujutada, et vektor on paigal, aga joonise tasapind pöörleb päripäeva. Sisuliselt on see sama. Pöörlemiskiiruse määrab vahelduvvoolu sagedus. 50Hz juures teeb pingevektor 50 pööret sekundis ja läbib seejuures nurga 314 radiaani ehk 18000°.

Tavaliselt tuntakse huvi üksikute suuruste vahelise faasinihke vastu. See lubab vektordiagrammi koostamisel vabalt valida esimese vektori suuna. Teised vektorid tuleb pöörata tema suhtes nurga võrra, mis on võrdne selle suuruse faasinihkega.



Joon. 2.24. Siinuskõverate asendamine faasorigega

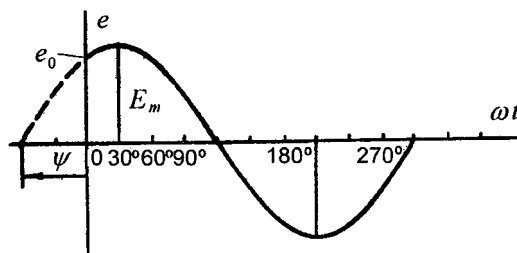
Vektordiagrammil saab erinevate algfaaside ja amplituudidega vektoreid liita vektoralgebra meetoditega. See on palju lihtsam kui kahe voolu- või pingekõvera järgi kolmanda konstrueerimine.

### 2.2.6. Faasinurk ja faasinihke

Võrkulülitamise hetkel kui  $t=0$ , ei pruugi võrgupinge omada nullväärtust. Küllalt suure tõenäosusega  $\alpha \neq 0$ , vaid on mingi muu nurk. Selle nurga tähis on harilikult  $\psi$  ja teda nimetatakse **algfaasiks** ehk **algfaasinurgaks**. Siis

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi). \quad (2.46)$$

*Algfaasinurgaks ehk algfaasiks nimetatakse elektrilist nurka  $\psi$ , mis on möödunud perioodi algusest vaatluse alghetkeni, mida tähistab teljestiku nullpunkt.*



Joon. 2.25. Siinuskõvera algfaas  $\psi$

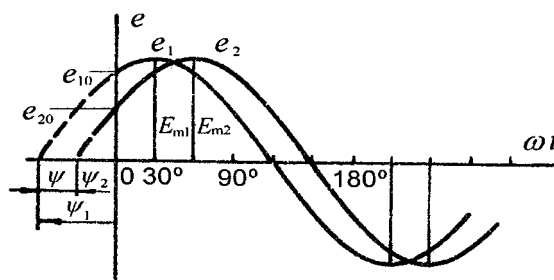
Ajahetkel  $t=0$ , kui joonisel algab vaatlus, on elektromotoorjõu perioodi algusest möödunud  $60^\circ$  ehk  $\pi/3$ . Sel hetkel  $\omega t=0$  ja elektromotoorjõu **alghetkväärtus**

$$e_0 = E_m \sin \psi. \quad (2.47)$$

Positiivne algfaas jääb koordinaatide algpunktist vasakule, negatiivne – paremale.

Kui kaks sama sagedusega siinuskõverat (näiteks kahe erineva generaatori pinged) on teineteise suhtes ajaliselt nihutatud, siis räägitakse faasinihkest ja faasinihkenurgast.





Joon. 2.26. Faasinihe kahe siinusemj. kõvera vahel

Faasinihe joonisel 2.26 on  $30^\circ$ .

**Faasilt esolev** on see siinus, mille periood algab varem ja **faasilt mahajääv** on see, mille periood algab hiljem. Siin siis on  $e_1$  faasilt ees  $e_2$ st või teisiti öeldes  $e_2$  jääb  $e_1$ st faasilt maha.

Faasinihkenurka pinge ja voolu vahel tähistatakse  $\varphi$  (kreeka väiketäht fii). See võib olla mõõdetud nii amplituudi- kui nullväärtuste vahel. Üldisemalt

$$\varphi = \psi_1 - \psi_2.$$

Siin  $\varphi$  – faasinihkenurk;

$\psi_1$  – pinge siinuskõvera algfaas;

$\psi_2$  – voolu siinuskõvera algfaas