



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Elektrotehnika aluste ja elektrimasinate instituut

Kuno Janson

ELEKTRIMASINAD

Loengukonspekt

**Tallinn
2005**

SISUKORD

1. SISSEJUHATUS	4
1.1. Loengukursuse eesmärk	4
1.2. Elektrimasinad ja trafod meie igapäevases elus	4
1.3. Pöörleva liikumise seadused	5
1.4. Elektromehaaniline muundur	8
1.4.1. Elektrimasina koormus	10
1.5. Aktiivtakistusega alalisvooluahelate põhimõisted	11
1.5.1. Elektriliste protsesside interpreteerimine mehaaniliste vastetega	11
1.5.2. Ideaalne ja reaalne pingesallikas	14
1.5.3. Pingesallika aktiiv- ja passiivtalitus	14
1.6. Mida mõeldakse välja all	15
1.7. Elektriväli	15
1.8. Mida elektriväli ja magnetväli endast sisuliselt kujutavad?	19
2. ELEKTROMAGNETISM	22
2.1. Magnetväli ja tema tekitamine	22
2.1.1. Pika sirge juhtme magnetväli	22
2.1.2. Magnetvootiheduse väli ja magnetvoog	23
2.1.3. Magnetvoo, elektrivoolu ja vedeliku voolu tekkeprotsesside analoogia	25
2.1.4. Magnetvootiheduse välja põhiefektid	26
2.1.5. Elektrimasinate jaoks sobiv väli ja selle juhtimine õhupilusse	28
2.1.6. Koguvoolu seadus (Ampere'i seadus) ja pooli väli	28
2.1.7. Magnetahelate arvutus	30
2.1.8. Ferromagnetiliste materjalide magnetilised omadused	31
2.2. Ajas muutuva magnetvälja poolt indutseeritud pinge	34
2.2.1. Faraday seadus ja Lenzi seadus	34
2.2.2. Omainduktsioon ja induktiivsus	36
2.2.3. Induktiivpool on energiat salvestav element elektri ahelas	37
2.2.4. Ajas muutuva magnetvoo saamine homogeenses magnetväljas pöörleva raami abil	42
2.2.5. Faasordiagramm ehk vektordiagramm	44
2.2.6. Faasinurk ja faasinihe	45
2.3. Energiasalvestuselementidega elektri ahelad	46
2.3.1. Induktiivsus ja mahtuvus alalisvoolu ahelas	46
2.3.2. Induktiivsus ja mahtuvus vahelduvvoolu ahelas. Reaktans	48
2.3.3. Segataktistus vahelduvvoolu ahelas. Impedants	50
2.3.4. Vahelduvvoolu võimsus	52
2.3.5. Kolmefaasilised vahelduvvoolu ahelad	55
2.3.5.1. Kolmefaasilise süsteemi tähtühendus	55
2.3.5.2. Kolmefaasiline süsteem kolmnurkühenduses	56
2.4. Lineaarne DC-masin – lihtne näide	57
2.4.1. Lineaarse DC-masina käivitamine	58
2.4.2. Lineaarne DC-masin mootorina	58
2.4.3. Lineaarne DC-masin generaatorina	61
2.4.4. DC-masina käivitusvoolu piiramise vajadus	62
3. TRAFOD	63
3.1. Trafo töötamis põhimõte	63
3.1.1. Kadudeta trafo tühijooksul	63
3.1.2. Primaarvoolu koormuskomponendi tekkimine sekundaarvoolu mõjul	67

3.2. Trafode konstruktsioon, liigid ja kasutamine	69
3.2.1. Elektrienergia parameetrite valik ja muutumine	69
3.2.2. Trafode magnetahelad	72
3.2.2.1. Kolmefaasiliste trafode magnetahelad	76
3.2.3. Trafode mähised	77
3.3. Reaalse trafo parameetrid ja reaalse trafo mudel	78
3.4. Ideaaltrafo	80
3.4.1. Vool, pinge ja võimsus ideaaltrafos	80
3.4.2. Impedantsi ehk näivtakistuse muutmine ideaaltrafoabil	82
3.4.3. Ideaalset trafot sisaldava ahela arvutus	82
3.5. Trafo aseskeem	87
3.6. Mittesümmeetriline koormus ja kolmefaasiliste trafomähiste ühenduskeem	89
4. ELEKTRIMASINATE TALITLUSPÕHIMÕTTED JA NEIS TOIMUVAD PROTSESSID .	92
4.1. Pöördemomendi ja pinge tekitamine elektrimasinas ja pöörleva.....	92
alalisvoolumasina tööpõhimõte	92
4.2. Pöörlev magnetväli	97
4.3. Vahelduvvoolumasinate staator	99
4.4. Sünkroonmasinate konstruktsioon ja tööprintsip	101
4.4.1. Kahekihiline jaotatud mähis	104
4.4.2. Staatori- ja rootorivälja nihkumine masina koormamisel ja elektromagnetilise momendi teke	107
4.5. Asünkroonmasina konstruktsioon ja tööpõhimõte	109
4.6. Vahelduvvoolu servomootor ehk harjadeta alalisvoolumootor	114

1. SISSEJUHATUS

1.1. Loengukursuse eesmärk

1. Innovaatilise teaduslik-tehnilise maailmavaate omandamisele kaasaaitamine.
2. Üldkasutatavate magnetvälja vahendusel töötavate energiamuundurite (elektrimootorid, generaatorid, trafod) tööpõhimõtte, ehituse ja arvutuse aluste omandamine.

Laias laastus tehnikateadus tegeleb inimese poolt loodud objektidega ja loodusteadus nn. jumala poolt loodud objektidega. Uute objektide loomisel on aluseks loodusteadused, tehnikateadused ja loova isiksuse intuitsioon. Näiteks asünkroonmootor on loodud tehniliselt haritud leiutajate poolt. Sealjuures oli neil leiutajatel algul üsna puudulik ettekujutus kõikidest mootoris toimuvatest protsessidest. Peale leiutamist toimus pikka aega selle mootori uurimine ja täiustamine. Uute tehnikaobjektide loomine on innovaatiline tegevus. Tehnikaülikoolide eesmärgiks on anda innovaatilise tegevuse jaoks vajalik haridus. Juba olemasoleva tehnika tootmiseks ja korrashoiuks vajalike teadmiste andmine on rakenduskõrgkoolide või kutsekoolide eesmärk. Innovaatilise tegevuse jaoks on põhiline üldiste printsiipide igakülgne ehk kompleksne tundmine ja mitmesuguste mõistete sisu omandamine. Näiteks elektrimasinate juures on oluline magnetvälja mõiste. Peab teadma, mis on magnetväli ja kuidas seda saab energia muundamisel kasutada. Piisava hulga üldpõhimõtete teadmine annab orientatsiooni olemasolevate masinate osas ja võimaldab luua uusi. Näiteks praegu on päevakorras väga väikese pöörlemiskiirusega generaatorite loomine tuulejõujaamadele (umbes üks pööre sekundis). Kuid uus loodav objekt ei pea üldse elektrimasin olema.

Paljud elektrotehnika mõisted kuuluvad niinimetatud abstraktsete mõistete valdkonda (energia, magnetvoog, elektriväli). Elektrimasinate kursuses kasutatakse neid mõisteid ettekujutuse saamiseks elektrimasinates toimuvatest protsessidest. Abstraktsete mõistetega opereerimise oskus ei ole just kergesti omandatav, kuid ta on väga vajalik. Seda mitte ainult elektrotehnikas, vaid ka teistes valdkondades. Näiteks majanduse juhtimisel ja äris. Praktika näitab, et elektrotehnilise haridusega inimesed tegutsevad tihti edukalt ka neis valdkondades.

1.2. Elektrimasinad ja trafod meie igapäevases elus

Elektrimasin on seade, mis võib muundada mehaanilist energiat elektriliseks energiaks või elektrilist energiat mehaaniliseks energiaks. Kui sellist seadet kasutatakse mehaanilise energia muundamiseks elektriliseks energiaks, siis nimetatakse teda **generaatoriks**. Kui ta muundab elektrienergiat mehaaniliseks, siis nimetatakse teda **mootoriks**. Kuna kõik elektrimasinad võivad muundada energiat mõlemas suunas, siis võib neid kasutada nii mootorina kui ka generaatorina. Peaaegu kõik kasutatavad mootorid ja generaatorid muundavad energiat ühelt kujult teisele magnetvälja abil.

Tööpõhimõttelt on elektrimootori ja generaatoriga sarnaseks seadmeks transformator (trafo). **Trafo** on seade, mis muundab ühe pingetasemega AC elektrilist energiat teise pingetasemega AC elektriliseks energiaks. AC (Alternating current) ja DC (Direct current) on rahvusvaheliselt kasutatavad lühendid, mis tähendavad vastavalt vahelduvvoolu ja alalisvoolu, aga samuti ka vahelduv- ja alalispinget. Näiteks 12Vdc on 12-voldine alalispinge.

Enamus tänapäeval kasutatavatest mehhanismidest pannakse liikuma **elektrimootorite** jõul. Elektrimootor on puhas, lihtsalt käivitav ja reguleeritav. Elektrimootor ei vaja pidevat õhu ja kütuse lisamist nagu sisepõlemismootor. Ta sobib ka kohtades, kus põlemisega seotud heited ei ole soovitatavad. Soojusenergia või mehaanilise energia võib muundada elektrilisele kujule sobivas kohas ja saadud energia edastada kaugete vahemaade taha. Kadude vähendamiseks elektrienergia

edastamisel kasutatakse **trafosid**. Vajalik elektrienergia saadakse elektrijaamades olevatest **generaatoritest**. Elektrimootorid ja generaatorid on **pöörlevad elektrimasinad**, kuid trafodel pöörlevaid osi ei ole. Siiski loetakse trafosid elektrimootorite juurde kuuluvaks, sest energeetilised protsessid on sarnased.

1.3. Pöörleva liikumise seadused

Peaaegu kõik elektrimasinad pöörlevad oma telje ümber, seda telge nimetatakse masina **võlliks**. Kuna masinad pöörlevad, siis tutvume pöörleva liikumise põhimõistetega.

Üldjuhul kirjeldab objekti liikumist ruumis kolmemõõtmeline vektor. Kuid masina korral on tegemist pöörlemisega ümber fikseeritud telje, tema pöörlemine on seotud vaid ühe nurgamõõtmega. Masina pöörlemissuuna määramisel vaadeldakse teda võlli sihis ajamiotsa poolt mitteajamiotsa poole. Pöörlemissuund võib olla päripäeva (*CW – clockwise*) või vastupäeva (*CCW – counter-clockwise*). Siin loetakse vastupäeva pöörlemissuunda positiivseks suunaks ja päripäeva pöörlemissuunda negatiivseks suunaks. Laagrites fikseeritud võlli pöörlemise korral taanduvad kõik suurused skalaarideks.

Vaatleme pöörleva liikumise põhimõisteid.

Nurkasend θ

Objekti nurkasend θ on tema asendinurk, mida mõõdetakse mingi suvalise alguspunkti ehk referentspunkti suhtes. Nurkasendit mõõdetakse radiaanides või kraadides. Ta vastab lineaarsele kaugusmõistele mööda joont.

Nurkkiirus ω

Nurkkiirus (ehk kiirus) on nurkasendi muutumismäär ajas. Teda loetakse positiivseks, kui pöörlemine toimub vastupäeva. Nurkkiirus vastab kulgliikumise joonkiirusele. Joonkiirus on defineeritud valemiga

$$v = ds/dt \text{ meetrit sekundis} \quad (1.1)$$

ning nurkkiirus on defineeritud valemiga

$$\omega = d\theta/dt \quad (1.2)$$

Kui nurkasendi ühikuteks on radiaanid, siis nurkkiirust mõõdetakse radiaanides sekundi kohta (rad/s).

Harilike elektrimasinate korral kasutatakse võlli kiiruse kirjeldamisel lisaks rad/s ka teisi ühikuid. Sageli on kiiruse ühikuks pööret sekundis või pööret minutis. Kuna kiirus on väga tähtis suurus masinate uurimisel, siis kasutatakse erinevate ühikute korral erinevaid kiiruse sümboleid. Siin kasutame järgmisi sümboleid: ω_m nurkkiirus radiaani sekundis; f_m nurkkiirus pööret sekundis; n_m nurkkiirus pööret minutis.

Need võllikiirused on seotud omavahel järgmiste avaldistega:

$$n_m = 60 f_m; f_m = \omega_m / 2\pi; \omega_m = 2\pi f_m \quad (1.3)$$

Nende suuruste indeks m viitab mehaanilistele suurustele, vastandina elektrilistele suurustele. Kui mehaaniliste ja elektriliste suuruste segimineku ohtu ei ole, siis jäetakse indeks sageli ära.

Nurkkiirendus α

Nurkkiirendus on nurkkiiruse muutumismäär ajas. Teda loetakse positiivseks, kui nurkkiirus suureneb algebralises mõttes. Nurkkiirendus vastab lineaarsele kiirendusele kulgliikumisel. Ühemõõtmeline joonkiirendus on defineeritud valemiga

$$a = dv/dt \text{ m/s}^2 \quad (1.4)$$

ning nurkkiirendus on defineeritud valemiga

$$\alpha = d\omega/dt \quad (1.5)$$

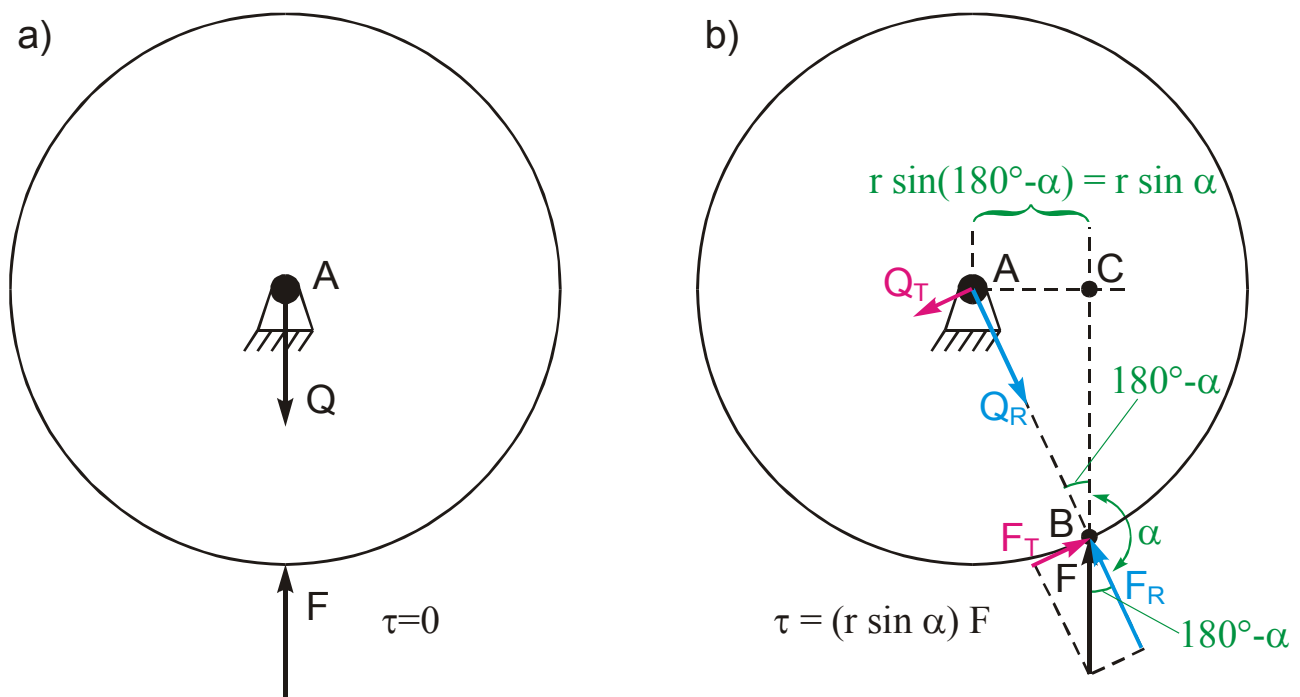
Kui nurkkiiruse ühikuks on rad/s, siis nurkkiirenduse ühikuks on radiaani ruutsekundi kohta

(rad/s²).

Moment T

Lineaarse liikumise korral tekitab objektile (kehale) rakendatud **jõud** kiiruse muutuse. Kui jõud puudub, siis keha kiirus on konstantne. Kui objekt on pöörlev, siis tema nurkkiirus on konstantne seni, kuni temale ei mõju **moment**. Mida suurem on objektile mõjuv moment, seda kiiremini muutub objekti nurkkiirus.

Mis on moment? Seda võib nimetada objekti "pööramisjõuks". Momendi mõistmiseks kujutame silindrit, mis saab pöörelda oma telje ümber. Kui sellele silindrile on rakendatud jõud nii, et tema mõjusuund läbib telje (joonis 1.1a), siis silinder ei hakka pöörelema. Kuid kui jõud on rakendatud nii, et ta mõjub teljest paremal pool (joonis 1.1b), siis silinder hakkab pöörelema vastupäeva. Moment või pöörav mõju silindrile sõltub (1) rakendatud jõu suurusest ja (2) kaugusest pöörlemistelje ja jõu mõjusuuna vahel.



Joonis 1.1. (a) Jõud on rakendatud silindrile nii, et ta läheb läbi pöörlemistelje; $T=0$. (b) Jõud on rakendatud silindrile nii, et tema mõjusuund ei ole pöörlemisteljel; T on vastupäeva.

Objekt ei saa hakata kulgevalt liikuma jõu F suunas (joonis 1.1a), sest liikumatu pöörlemistelg (punkt A joonisel) tekitab vastureaktsiooni jõu Q . Objektile ehk kehale punktis B mõjuva jõu F (joonis 1.1b) võib lahutada kaheks komponendiks, millest üks (F_R) mõjub raadiuse r suunas ja teine (F_T) on ringi puutuja suunaline. Joonisel 1.1a on puutujasuunaline komponent võrdne nulliga ja keha ei hakka pöörelema. Pöörelema paneb ainult puutujasuunaline komponent F_T , sest sellele jõukomponendile telje vastureaktsioon Q_T ei mõju vastu mitte otse, vaid raadiuse r kaugusel ja paralleelselt komponendiga F_T .

Võrreldes kulgliikumisega on pöörleva liikumise tekkimise eripäraks veel asjaolu, et oluline on ka kaugus jõu suuna ja pöörlemistelje vahel (lõik AC joonisel 1.1b). Seda kaugust nimetatakse jõu **õlaks**. Jõu ja jõu õla korrutist nimetatakse **pöördemomendiks** T . Pöördemoment iseloomustab pöörlemapanevat mõju täielikult. Mida suurem on jõu õlg, seda kergem on keha pöörelema panna. Mutrit on kergem lahti keerata, kui mutrivõtme saba on pikem.

Jõu õla saab leida joonisel 1.1b näidatud geomeetrilise konstruktsiooni põhjal nurga α kaudu. Nurk α asub jõu rakenduspunkti B tõmmatud raadiuse suuna ja jõu mõjusuuna vahel. Jõu õla saab avaldada korrutisega $r \cdot \sin\alpha$ ehk $r \cdot \sin(180^\circ - \alpha)$. Seega moment

$$T = F \cdot r \cdot \sin\alpha. \quad (1.6)$$

Jõu puutujasuunalise komponendi F_T saab samuti leida $\sin(180^\circ - \alpha)$ kaudu. Sellega

$$F_T = F \cdot \sin\alpha. \quad (1.7)$$

ja järelikult momendi saab leida ka järgnevalt

$$T = F_T \cdot r. \quad (1.8)$$

Suurem jõud F pöörlemisteljele lähemal avaldab samasugust mõju kui väiksem jõud F_T pöörlemisteljest kaugemal.

SI-süsteemis on momendi ühikuks njuutonmeeter (N·m).

Newtoni teine seadus pöörlevale liikumisele. Newtoni seadus objektile, mis liigub mööda sirgjoont kirjeldab seost objektile rakendatud jõu ja tekkiva kiirenduse vahel. See seos on antud valemiga

$$a = F/m, \quad (1.9)$$

kus F on objektile rakendatud jõud, m on objekti mass ja a on tekkiv kiirendus.

SI ühikutes mõõdetakse jõudu njuutonites, massi kilogrammides ja kiirendust m/s^2 .

Samasugune valem kirjeldab seost objektile rakendatud momendi ja tekkiva nurkkiirenduse vahel. Seda seost nimetatakse Newtoni pöörlemisseaduseks ja ta esitatakse valemiga

$$\alpha = T/J, \quad (1.10)$$

kus T on rakendatud netomoment njuuton-meetrites ja α on tekkiv nurkkiirendus rad/s^2 . Teguril J on sama tähendus kui objekti massil lineaarse liikumise korral. Teda nimetatakse objekti **inertsmomendiks** (*moment of inertia*) ning tema ühik on $\text{kg}\cdot\text{m}^2$.

Inertsmomenti defineeritakse mehaanikas valemiga

$$J = m \cdot r_i^2, \quad (1.11)$$

kus m – pöörleva keha mass, kg;

r_i – keha inertsraadius, m.

Inertsraadius iseloomustab pöörleva massi keskmist kaugust pöörlemisteljest. Hooratta inertsmoment püütakse teha võimalikult suur. Selleks viiakse mass välisläbimõõdu lähedale ja sisse jäetakse ainult kodarad. Inertsraadiuse määramist siin ei käsitleta.

Joonkiirus

Pöörleva keha punktidel on ka joonkiirus. Joonkiirus sõltub vaadeldava punkti kaugusest pöörlemisteljest. See kaugus on vaadeldava punkti liikumise trajektoori raadiuseks r (punkt B joonisel 1.1a). Võlli ühe täispöördega läbib punkt B teepikkuse $s = 2\pi r$. Täispöörde tegemiseks kuluv aeg on (1.2) põhjal $t = \theta/\omega = 2\pi/\omega$. Siit saab leida nurkkiiruse ja joonkiiruse vahelise seose

$$v = \frac{s}{t} = \frac{2\pi r}{2\pi/\omega} = \omega \cdot r. \quad (1.12)$$

Pöörleva keha erinevatel punktidel on erinevad joonkiirused, kuid kõikide punktide nurkkiirused on ühesugused. Ratta välispinna punktide joonkiirus on kõige suurem, telje joonkiirus võrdub alati nulliga.

Töö W

Lineaarse liikumise korral on töö defineeritud kui jõu integraal mingil vahemaal. Valemi kujul

$$W = \int F ds, \quad (1.13)$$

mille korral eeldatakse, et jõud on kolineaarne (samasuunaline) liikumise suunaga. Erijuhtumil, kui **konstantne** jõud on rakendatud liikumissuunaga kollineaarselt, saame valemi kujul

$$W = F s. \quad (1.14)$$

Töö ühikud on džaulid (J) SI mõõtühikute süsteemi korral.

Pöörleva liikumise korral on töö momendi integraal mingil nurgal ning töö valem on

$$W = \int T d\theta \quad (1.15)$$

ning konstantse momendi korral

$$W = T\theta. \quad (1.16)$$

Võimsus P

Võimsus on töö tegemise määr, ehk ajaühikus tehtav töö. Võimsuse valem on

$$P = dW/dt. \quad (1.17)$$

Teda mõõdetakse harilikult džaulides sekundi kohta (J/s) ehk vattides (W), aga võib kasutada ka hobujõude (HJ). $1\text{J/s}=1\text{W}$; $1\text{HJ}=735,5\text{W}$.

Rakendades seda definitsiooni ja eeldades, et jõud on konstantne ja kollineaarne liikumissuunaga, saame võimsuse

$$P = dW/dt = d(Fs)/dt = F(ds/dt) = Fv. \quad (1.18)$$

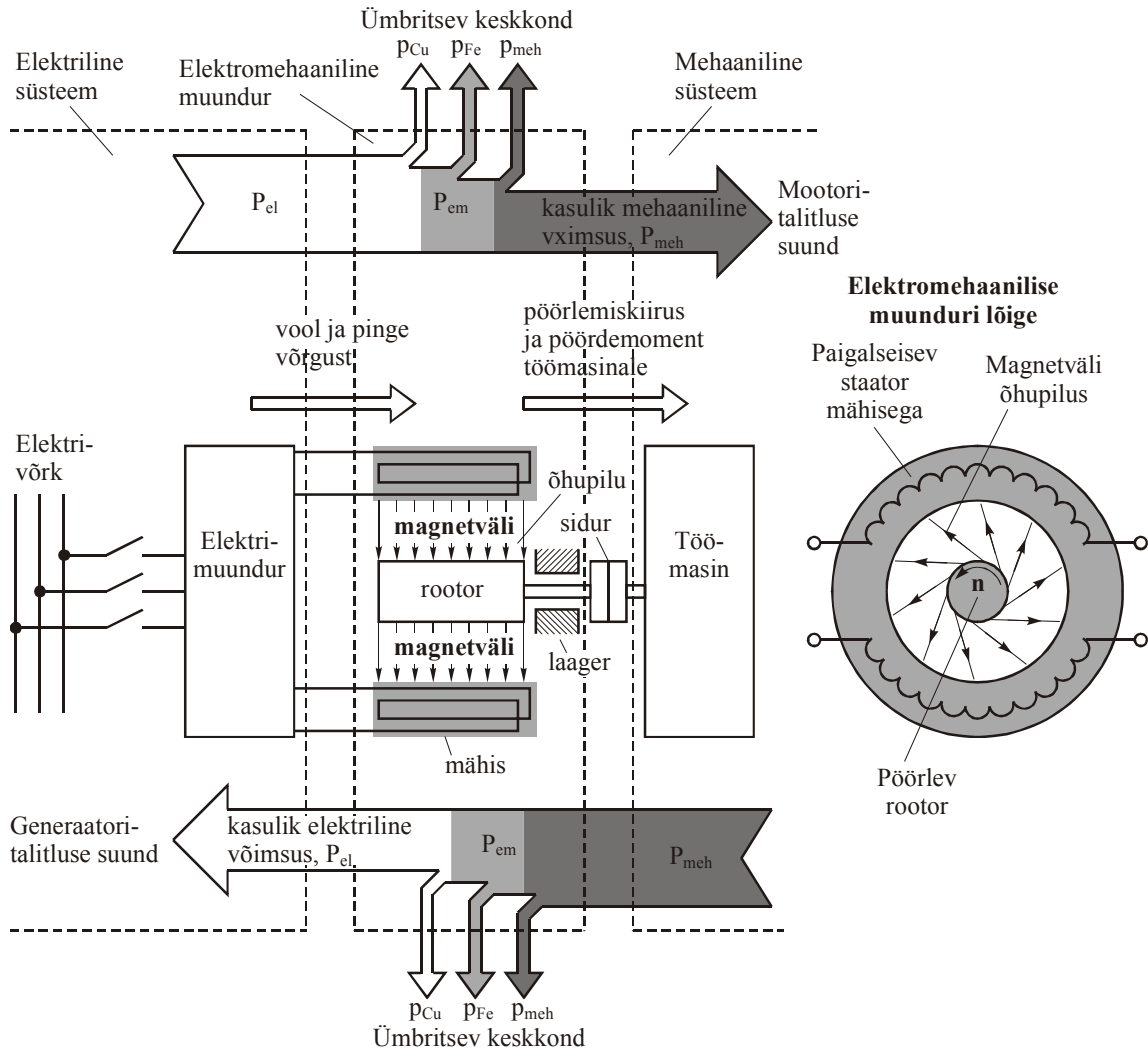
Samal viisil, kui eeldame, et moment on konstantne, saame võimsuse pöörleva liikumise korral

$$P = dW/dt = d(dT)/dt = T(d\theta/dt) = T\omega; \quad P = T\omega. \quad (1.19)$$

Saadud valem $P = T\omega$ on väga tähtis elektrimasinate uurimisel, kuna selle abil saame leida mehaanilise võimsuse mootori või generaatori völlil. Selles valemis kasutatakse ühikuid P (vattid), T (njuuton-meetrid) ja ω (rad/s), teiste ühikute kasutamisel tuleb valemisse lisada tegurid ühikute teisendamiseks.

1.4. Elektromehaaniline muundur

Üks ja sama pöörlev elektrimasin võib üldiselt töötada nii generaatorina kui ka mootorina. Pöörlevad elektrimasinad on pööratavad **elektromehaanilised energia muundurid**. Kui anname elektrivõrgust masinale voolu, siis ta hakkab pöörlema. Kui paneme välise seadme (näiteks auruturbiini) abil masina pöörlema, siis ta annab ise voolu.



Joonis 1.2. Energiavahetus elektrilise ja mehaanilise süsteemi vahel muunduris oleva magnetvälja vahendusel

Muundamine toimub erilise keskkonna vahendusel, milleks on **magnetväli** (vt.joon.1.2). Magnetväli avaldab üheaegselt mõju nii **elektrilisele** süsteemile kui ka **mehaanilisele** süsteemile.

Elektriline süsteem koosneb tavaliselt elektrimasinas olevast **mähisest**, ühendusjuhtmetest, **muundurist** pinge ja voolu muundamiseks ja toitvast **elektrivõrgust**. Lihtsamatel juhtudel elektriline muundur puudub (näiteks kui mootori kiirust pole vaja reguleerida) ja elektrimasin on ühendatud otse võrguga. Elektrilise süsteemi seisundit iseloomustavad **pinge**, **vool** ja teised **elektrilised suurused**.

Mehaaniline süsteem koosneb harilikult elektrimasina **rootorist**, mis pöörleb **laagritel**, elektrimasinat töömasinaga ühendavast **sidurist** ja **töömasinast**. Mehaanilise süsteemi seisundit iseloomustavad **pöörlemiskiirus**, **pöördemoment** ja teised **mehaanilised suurused**.

Magnetväli asub **õhupilus**, mis on pöörleva rootori ümber. Magnetvälja vahendusel toimub pidev elektriliste ja mehaaniliste parameetrite vastastikune mõjutamine. Näiteks pinge suurenemisel kasvab pöörlemiskiirus, töömasina takistusmomendi suurenemisel kasvab vool jne. Õhupilu magnetvälja tekitamiseks kasutatakse **magnetahelat**, mida joonisel 1.2 ei ole näidatud.

Magnetvälja vahendusel kantakse **elektriline võimsus** P_{el} üle **mehaaniliseks võimsuseks** P_{meh} , kui on tegemist **mootoritalitlusega**. Mootoritalitluses elektrivool masina mähistes tekitab õhupilus magnetvälja ja magnetvälja jõud panevad pöörlema elektrimasina rootori. Magnetvälja võimsust (ehk energiavoogu) nimetatakse **elektromagnetiliseks võimsuseks** P_{em} .

Generaatoritaltluse puhul on võimsuse suund vastupidine, mehaaniline võimsus läheb elektromagnetilise võimsuse kaudu elektriliseks võimsuseks. Sel juhul paneb töömasin rootori pöörlema. Rootori magnetväli hakkab liikuma. Liikuv väli indutseerib mähises pinge. Pinge mõjul tekib vool, mis antakse võrku.

Muundamisel läheb osa energiast kaduma, mis eraldub soojusena ümbritsevasse keskkonda (vt. joon. 1.2). Elektrilises süsteemis esinevad kaod mähise elektritakistuse tõttu. Voolu läbiminekul mähisest mähis soojeneb. Neid kadusid nimetatakse ka **vaseskadudeks** P_{cu} , sest mähised on tihti vasest. Magnetväli kulgeb masinas suures osas mööda magnetahelat, mis on valmistatud elektrotehnilisest terasest. Muutuv magnetväli kutsub esile hüstereesi ja pöörisvoolud. Selle tulemusena magnetahel soojeneb. Neid kadusid nimetatakse **rauaskadudeks** P_{Fe} . Kaod on ka mehaanilises süsteemis esineva hõõrdumise tõttu. Eristatakse kadusid laagrites ja kadusid ventilatsioonile. Neid nimetatakse **mehaanilisteks kadudeks** P_{meh} .

Kadusid iseloomustab **kasutegur** η . Mootoritaltluse kasutegur

$$\eta_m = \frac{P_{meh}}{P_{el}} \quad (1.13)$$

ja generaatoritaltluse kasutegur

$$\eta_g = \frac{P_{el}}{P_{meh}}. \quad (1.14)$$

Elektrimasinate kasutegur nimitaltluses (s.o. nimipöördemomendil ja nimikiirusel) on enamasti vahemikus 0,7...0,9. Kasutegur sõltub masina tüübist ja suurusest. Väga suurte masinate kasutegur võib olla isegi üle 0,98. Väikeste, alla 10 W võimsusega masinate kasutegur on alla 0,5.

Elektromehaanilisteks muunduriteks on ka **elektromagnetid**. Neid kasutatakse laialt **releedes** ja **kontaktorites**, mis kujutavad endast elektrisignaali abil juhitavaid lüliteid. Elektromehaanilisi muundureid kasutatakse ka **andurites** ehk **mõõtemuundurites**, mis mehaanilise liikumise korral väljastavad elektrisignaali.

Elektromehaaniliste muundurite kirjeldamiseks on vaja kasutada tervet rida elektrilisi, mehaanilisi ja magnetilisi parameetreid.

Ehkki elektrimasinales on võimsuse voo suund muudetav, ehitatakse generaatorid ja mootorid siiski veidi erinevalt. Generaatori kasulikuks võimsuseks on elektriline võimsus P_{el} , mis alalisvoolu generaatori puhul on leitav generaatori klemmidel oleva pinge U ja voolu I kaudu.

$$P_{el} = U \cdot I \quad (1.15)$$

Vahelduvvoolu generaatorid on enamasti kolmefaasilised ja nende võimsus on avaldatav järgnevalt

$$P_{el} = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \cos \varphi \quad (1.16)$$

Siin U_l ja I_l on liinipinge ja liinivoolu generaatori klemmidel ja $\cos \varphi$ on siin võimsustegur.

Mootori kasulikuks võimsuseks on mehaaniline võimsus tema võllil, mis on avaldatav nurkkiiruse ja momendi kaudu

$$P_{meh} = T \omega \quad (1.17)$$

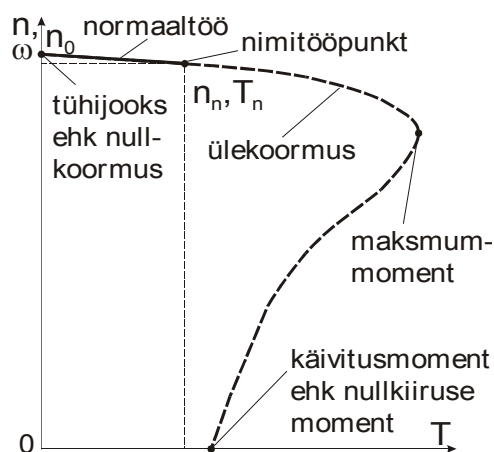
Elektrimootor paneb käima mingi töömasina. Töömasina käivitamiseks vajalik moment ja vajalik töömasina kiirus on aluseks mootori võimsuse valikul.

1.4.1. Elektrimasina koormus

Elektrimootori koormuse all mõeldakse tema võllilt võetavat võimsust või momenti. Generaatori koormust vaadeldakse eelkõige koormusvooluna. Vahel mõeldakse koormuse all ka masina kasulikku võimsust. Tegelikus tööolukorras võib elektrimasina koormus olla palju väiksem

nimikoormusest. Masina koormus võib olla ka nimikoormusest suurem, kuid reeglina ainult lühiajaliselt. Nimikoormusest suuremat koormust nimetatakse **ülekoormuseks**. Ülekoormuse korral kasvab vool üle nimivoolu, kaod soojusele suurenevad ja tekib isolatsiooni ülekuumenemise oht.

Olukorda, kus elektrimootori võllilt momenti ei võeta (takistusmoment on võrdne nulliga) nimetatakse **tühijooksuks**. Generaatori tühijooks on siis, kui generaatorist voolu ei võeta. Tühijooksu parameetrite tähistamiseks kasutatakse indeksit 0 ja nimitalitluse tähistamiseks indeksit n . Näiteks nimipöörlemissagedus on n_n ja tühijooksu pöörlemissagedus on n_0 . Koormamisel pöörlemissagedus reeglina langeb. Mootori koormusmomenti ja kiiruse vahelist sõltuvust nimetatakse mootori **mehaaniliseks karakteristikuks**. Joonisel 1.3 on näiteks toodud asünkroonmootori mehaaniline karakteristik. Nimipöörlemissagedusele n_n ja nimimomendile T_n vastavat punkti nimetatakse **nimitööpunktiks**. Nullkiirusele ehk paigalolekule vastavat momenti nimetatakse **käivitusmomentiks**.



Joonis 1.3. Asünkroonmootori mehaaniline karakteristik

Elektrimootori momendi määrab ära töömasin. Kui me paneme näiteks kohviveskisse kohviube, siis mootori töö muutub raskemaks ja mootori pöörded langevad veidi. Kui me teame töömasina momenti, siis me saame mehaaniliselt karakteristikult leida mootori pöörlemiskiiruse. Samuti vastupidi.

1.5. Aktiivtakistusega alalisvooluahelate põhimõisted

1.5.1. Elektriliste protsesside interpreteerimine mehaaniliste vastetega

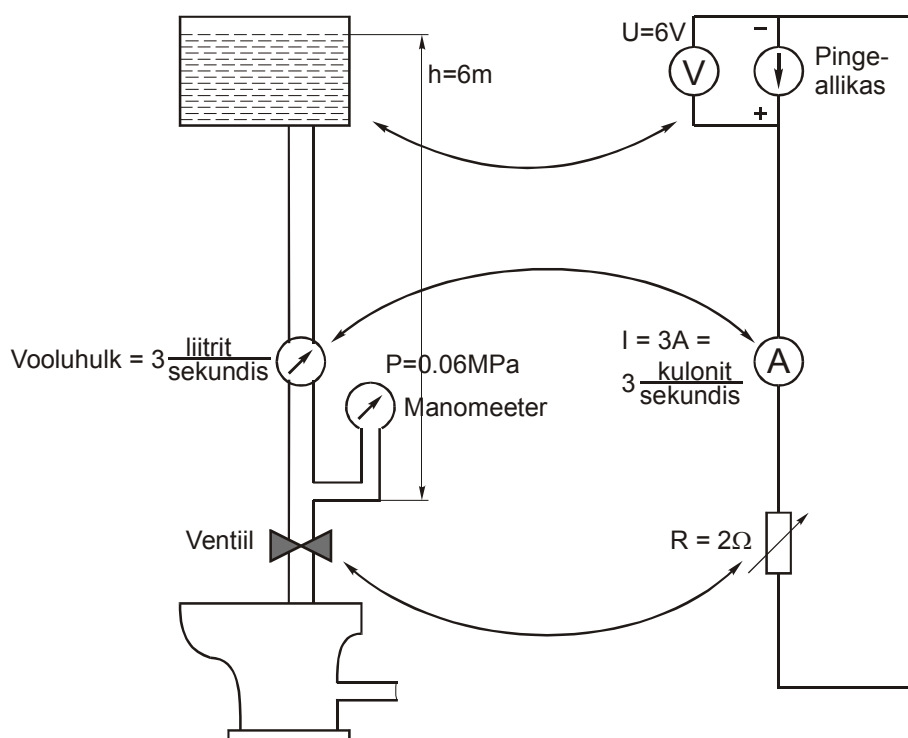
Inimene tajub ainult elektrivoolu läbimist oma kehas. See on üldiselt ebameeldiv. Vool 0,1A on inimesele surmav kui see ei ole just väga lühiajaline. Voolu, pinget, takistust, aga ka magnetvälja ja elektrivälja saab üldiselt kindlaks teha ainult vastavate mõõteriistadega. Et paremini aru saada elektrilastest mõistetest on soovitatav kasutada piltlikke mehaanilisi vasteid. Joonisel 1.4 on interpreteeritud Ohmi seadust, mis avaldub matemaatiliselt järgnevalt

$$I = U / R, \quad (1.18)$$

kus U - pinge [V],

I - vool [A],

R - takistus [Ω].



Joon. 1.4. Elektrilisi suurusi iseloomustavad piltlikud mehaanilised vasted

Pinget võib võrrelda vee survega, elektrivoolu võib võrrelda vee vooluga ja elektri ahelas olevat muudetavat takistust veekraaniga, mida saab rohkem või vähem lahti keerata.

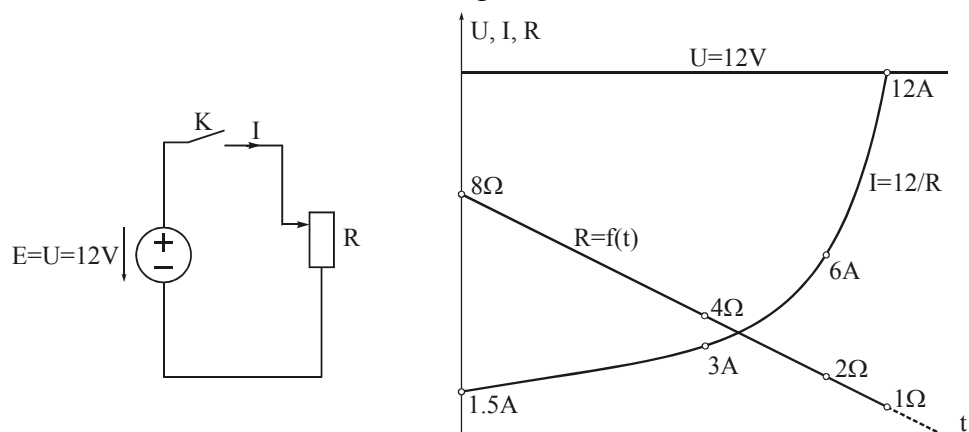
Ka Ohmi seadust võib mehhaaniliselt interpreteerida.

Näiteks; vett voolab torust välja seda rohkem, mida suurem on surve ja mida rohkem on lahti keeratud kraan (ehk mida väiksem on väljavoolu takistus).

Elektri ahelas on voolutugevus seda suurem, mida suurem on pinge ja mida väiksem on takistus.

1.5.2. Ideaalne ja reaalne pingeaallikas

Vaatleme alisvooluahelat (joonis 1.5), mis koosneb pingeaallikast ($U=12V$), tarbijast (reguleeritav takisti R), ühendusjuhtmetest ja lülitist (K). Lülitit sulgemisel saame suletud vooluahela, milles tekkiva voolu suurus on määratud Ohmi seadusega



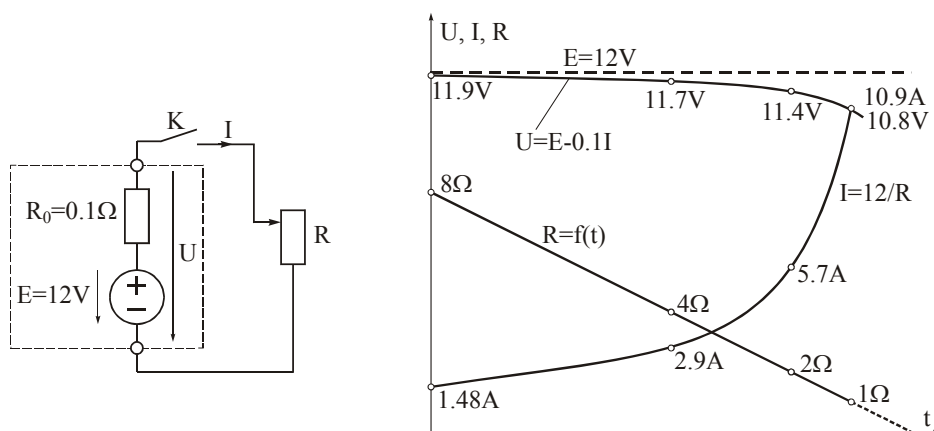
Joon. 1.5. Ideaalse pingeaallika koormamine

Joonisel 1.5 on näidatud ka ahela voolu muutused, kui me takistit R reguleerime piirides $8\Omega \dots 1\Omega$. Vool kasvab reguleerimisel 1,5 amprist kuni 12 amprini. Sealjuures pingevalik pinget ei sõltu voolust ja jääb võrdseks 12 voldiga. Sellist pingevalikat nimetatakse **ideaalseks pingevalikaks**. Kui me takistit R vähendame nullini, siis me peaksime valemi (1.18) järgi saama lõpmata suure voolu. Tegelikult lõpmata suuri voolusid ei esine. Selleks on kaks põhjust. Esiteks ei suuda me ahela takistust viia võrdseks päris nulliga. Ka ühendusjuhtmetel on takistus. Näiteks on 1m pikkusel ja $1,5\text{mm}^2$ ristlõikega vaskjuhtme takistus umbes $0,0115\ \Omega$. Teiseks, **reaalsete pingevalikate** pinget hakkab vooluga koormamisel langema. Üldiselt on pingevalika sees voolu juhtivad osad ja neil on takistus. Kuid pinget langeb ka teistel põhjustel.

Pingevalika sisemise pingelangu arvesse võtmiseks loetakse, et koormamisel tekkiva pinget vähenemine on täies ulatuses tingitud mingist hüpoteetilisest takistusest R_0 , mida nimetatakse **sisetakistuseks**. Samuti loetakse, et sisetakistusega on järjestikku ideaalne pingevalikas. Selle ideaalse pingevalika pinget nimetatakse ka **elektromotoorseks jõuks** (emj.), mille tähis on E . Reaalse pingevalika aseseem on näidatud joonisel 1.6 kriipsjoonega eraldatud osas. Seal on sisetakistus R_0 ja emj. allikas E . Reaalse pingevalika klemmpinge on

$$U = E - IR_0. \quad (1.19)$$

Joonisel 1.6 on näidatud ka reaalse allika pinget muutus (kui sisetakistus $R_0 = 0,1\ \Omega$). Kui me siin vaadeldaval juhul resistori R takistuse nulli viime, siis on tekkiva voolu suurus $I = E/R_0 = 12/0,1 = 120\text{A}$. See vastab ligikaudu akule. Taskulambipatarei lühistamisel saadakse ainult mõne amprine vool, sest patarei sisetakistus on suurem.



Joon.1.6. Reaalse pingevalika koormamine

Vaadeldavas ahelas toimuvad ka energia muundamise protsessid. Voolu läbiminekul takistist R , see takisti soojeneb. Toimub elektrienergia muundamine soojusenergiaks. Ajahüki (näiteks sekund) kohta tulevat energia kogust nimetatakse **võimsuseks**

$$P = A/t, \quad (1.20)$$

kus P – võimsus vattides [W],

A – töö ehk energia džaulides [J],

t - aeg sekundites [s].

Takistis ehk **resistoris** eralduva **soojusvõimsuse** P saab leida Joule-Lenzi seaduse põhjal

$$P = R \cdot I^2. \quad (1.21)$$

Kasutades Ohmi seadust saame resistori soojusvõimsuse avaldada veel kahel järgneval kujul

$$P = U \cdot I \quad (1.22)$$

ja

$$P = U^2/R \quad (1.23)$$

Soojusvõimsuse saamiseks vajalik elektrivõimsus saadakse pingevalikast, täpsemalt pingevalika sees olevast elektromotoorjõu allikast. See elektrivõimsus on leitav avaldisega (1.22) analoogiliselt

$$P = E \cdot I \quad (1.24)$$

Pingevalika sisetakistusel eralduv soojusvõimsus $I^2 R_0$ on üldiselt kasutu ja seda nimetatakse allika **kaovõimsuseks**.

Joonisel 1.6 kujutatud elektri ahela talitus on tüüpiline enamusele elektrikasutamise juhtudele. Seda talitlust võib iseloomustada järgnevalt.

- Ahela takistus muutub mingi välise teguri tõttu ja tihti ettearvamatult. Üldjuhul pinge ja vool takistuse suurus ei muuda.
- Pinge harilikult valitakse kas elektriohutuse või mõne muu kriteeriumi põhjal. Toitepinge suurus ei sõltu palju ei voolust ega takistusest.
- Vool on kõige sagedamini muutuv parameeter, mis sõltub nii takistusest kui pingest. Tema hoidmisega teatud piirides võib olla sageli probleeme.

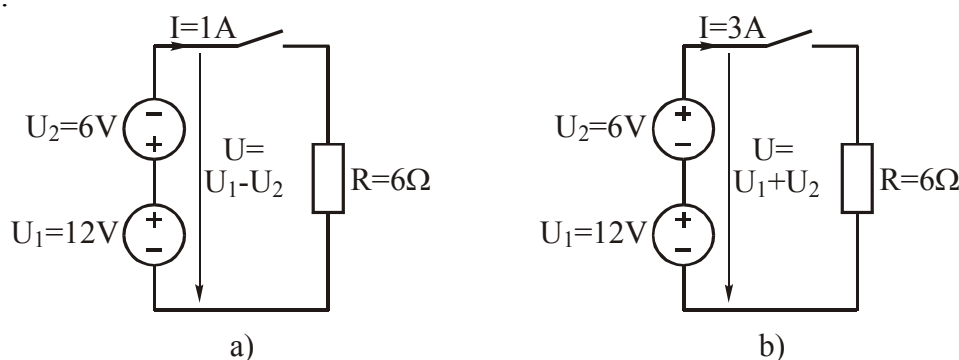
Siiski esineb märkimisväärsel hulgal ka eeltoodust erinevaid talitlusi (pidevalt reguleeritavad pingevalikad, püsivooluallikad jm.).

1.5.3. Pingevalika aktiiv- ja passiivtalitus

Joonisel 1.5 kujutatud lihtsaimas elektri ahelas on voolu suund väljaspool pingevalikat olevas ahelas "+" klemmilt "-" klemmidele ja pingevalika sees "-" klemmilt "+" klemmidele. Selline voolu suund vastab positiivsete laengute liikumise suunale. Formaalset loetakse, et laengukandjad kannavad positiivset laengut. Asjaolu, et elektronid on negatiivse laengu kandjad, ignoreeritakse ajaloolistel põhjustel.

Kui voolu suund pingevalika sees on "-" klemmilt "+" klemmidele, siis see pingevalikas on **aktiivtalitus**. *Aktiivtalitus tähendab seda, et pingevalikast võetakse energiat ja antakse välisahelasse.*

Pingevalikas võib olla ka **passiivtalitus**. Seda on näidatud joonisel 1.7a. Seal on kaks pingevalikat U_1 ja U_2 , mis on lülitatud järjestikku, kuid pingevalika U_2 pinge on vastupidine pingevalika U_1 pingele. Summaarne pinge on võrdne nende pingevalikate pingete vahega. Joonisel näidatud konkreetsel juhul summaarne pinge $U = U_1 - U_2 = 12 - 6 = 6\text{V}$ ja summaarse pingepolaarsus vastab U_1 polaarsusele.



Joon.1.7. Pingevalika U_2 passiivtalitus (a) ja aktiivtalitus (b)

Summaarse pingepolaarsus määrab tekkiva voolu suuna. Vool läbib allikat U_1 klemmilt "-" klemmidele "+" ja see vastab aktiivtalitlusele. Allikat U_2 aga läbib vool "+" klemmilt "-" klemmidele. Samuti on voolu suund plussilt miinusele takistis R . Nii pingevalikale U_2 kui takistile R antakse energiat. Takistile antav energia muutub soojuseks. Kui pingevalikas U_2 on aku, siis toimub energia salvestamine sellesse akusse ehk aku laadimine. *Allikas U_2 võtab välisahelast energiat ja on passiivtalitus.* Takisti on alati passiivtalitluses sõltumata voolu suunast. Takistit loetakse

passiivemendiks. Kui pingeallika U_2 polaarsus muuta vastupidiseks (joon. 1.7b), siis on mõlemad pingeallikad aktiivtalitluses ja summaarne pinge on võrdne pingeallika U_1 ja U_2 pingete summaga. Kondensaator on ka energiat salvestav element nagu akumulaator. Kondensaatori laadimisel võtab ta energiat välisahelast ja on passiivtalitluses (joonis 1.8a)



Joon.1.8. Kondensaatori laadimine on passiivtalitus (a) ja tühjendamine on aktiivtalitus (b)

Kondensaatori mahalaadimisel on ta aktiivtalitluses (joonis 1.8b). Kondensaatori laeng lõpeb mahalaadimisel suhteliselt kiiresti. Pingeallikast erineb kondensaator selle poolest, et ta ei sisalda "pumpa", mis lahkuvate laengute asemele uued pumpaks. Akus suunatakse uued laengud klemmidele keemiliste jõudude mõjul, generaatoris elektromagnetiliste jõudude mõjul.

1.6. Mida mõeldakse välja all

Olgu meil näiteks vaja uurida toa välisseina temperatuuri. Me võime kontaktermomeetriga mõõta seina punktide temperatuuri ja kanda saadud mõõtetulemused paberile joonistatud seina plaanile. Ilmselt on lae all soojem, kui põranda ligidal ja aknaklaas on hoopis jahe. Me saame ülevaate kuidas temperatuur on jagunenud seina peal. Sellist temperatuuride kirjeldust nimetatakse kahedimensiooniliseks temperatuuriväljaks (2D-väli). Dimensioonid on siin laius ja kõrgus. Kui meid huvitab õhu temperatuur kõikides toa ruumi punktides ja me selle ära mõõdame, siis me saame kolmedimensioonilise temperatuurivälja (3D-väli). Temperatuuril ei ole suunda. Ilma suunata väljasid nimetatakse **skalaarväljades**.

Kui toas on uks ja aken lahti ja väljas on tuul, siis tekib toas tuuletõmbus. Me võime ära mõõta õhu liikumiskiiruse igas ruumipunktis ja me saame õhu liikumiskiiruse kolmedimensioonilise välja. Siin on oluline, mis suunas õhk liigub. Kiirus on suunaga suurus ehk vektorsuurus. Õhu liikumise kohta me saame **3D-vektorvälja**. Elektrimasinates olevad magnetväljad on samuti 3D-vektorväljad. Magnetväljast paremaks arusaamiseks võime omale ette kujutada, et see on müstiline "magnettuul".

Oma tähelepanekutest me teame, et ega tuul alati ühtemoodi ei puhu. Kord on tugevam, kord nõrgem ja vahel kaob üldse. Sama asi on ka tõmbetuulega toas. Järelikult me saame tuule kiiruse toas fikseerida ainult mingi kindla ajamomendi jaoks. Näiteks riputame toa täis väikseid elektrilisi tuule kiiruse mõõtjaid, millel kõigil on juhtmed järel ja juhtmed lähevad arvutisse. Arvuti registreerib kiiresti ja perioodiliselt kõikides valitud ruumipunktides õhu liikumiskiiruse ja suuna. Siis me saame 3D-vektorvälja muutumise ajas. Ka elektrimasinates esineb nii ajas muutuvaid ruumilisi magnetvälju kui ka ajas muutumatuid ehk staatilisi välju.

1.7. Elektriväli

Iga keha koosneb molekulidest, aatomitest ja teistest elementaarosakestest. Mõnel elementaarosakesel on eriline omadus. Nad muudavad elementaarosakese läheduses oleva tühja ruumi omadusi. Nad tekitavad **elektrilaengu** abil **elektrivälja**. Elektron omab negatiivset laengut, mille suurus on

$$q_e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C},$$

kus q_e – elektroni laeng;

C – laenguühiku tähis, mida nimetatakse kuloniks.

Protoni laeng on sama suur kui elektronil, kuid pluss märgiga. Protoni laeng on positiivne. Normaalses aatomis ja ka molekulis on positiivseid ja negatiivseid laenguid võrdselt. Selle tõttu on keha summaarne laeng tavaliselt võrdne nulliga ja elektriväli on väljaspool keha märkamatu.

Elektronid on aatomite ja molekulidega suhteliselt nõrgalt seotud ja võivad teatud tingimustel (näiteks hõõrdumisel) ühelt kehalt teisele üle hüpata. Siis omandab keha, millel on elektronide liig negatiivse laengu ja keha, millel on elektronide puudujääk – positiivse laengu. Selliseid kehasid nimetatakse **laetud kehadeks**. Laenguga aatomeid ja molekule nimetatakse **ioonideks**. Laetud keha ümber olevas tühjas ruumis (ja ka dielektrikus) muutub elektriväli märgatavaks. Märgatavaks muutub väli sellega, et kaks keha, millest ühel on negatiivne laeng ja teisel positiivne, avaldavad teineteisele tõmbe**jõudu**. Samanimelised laengud seevastu tõukavad teineteist. Gaasides ja vedelikes olevad ioonid ja metallides olevad elektronid saavad elektrivälja jõu mõjul liikuda. Need on **juhtivad kehad**. **Elementaarosakeste** kindlasuunalist liikumist elektriväljas nimetatakse **elektrivooluks**.

Elektrivälja tugevust iseloomustatakse jõuga, mida ta avaldab ühikulisele laengule

$$E = \frac{F}{q}. \quad (1.25)$$

Elektriväljatugevuse mõõtühikuks võib kasutada njuutonit kulonile (N/C), kuid põhilist kasutamist leiab mõõtühik V/m. Need mõõtühikud on võrdsed.

$$1 \text{ N/C} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{C} \cdot \text{m} = 1 \text{ J} / \text{C} \cdot \text{m} = 1 \text{ V/m},$$

siin 1 V (volt) on definitsiooni kohaselt võrdne 1 J/C (džauli kulonile) Potentsiaali 1 V defineeritakse kui niisuguse punkti potentsiaali, kus laengu 1 C viimiseks punkti, mille potentsiaal on null, elektrivälja jõud teevad tööd 1 J.

Mingis ruumi osas elektrivälja tekitamiseks on vaja kasutada energiat. Elektriväli on **energiakandja**. Elektrivälja energia salvestamiseks mõeldud seadet nimetatakse **kondensaatoriks**. Kondensaatori moodustavad kaks juhtivat keha, mille vahel on dielektrik. **Dielektrikuks** nimetatakse mittejuhtivat keha, milles laetud osakesed ei saa vabalt liikuda. Õhk ja vaakum on ka dielektrikud.

Kondensaatori energia salvestamise võimet iseloomustatakse kondensaatori **mahtuvusega**. Kui kahel kondensaatori moodustaval juhtival kehal on võrdsed ja vastandmärgilised laengud, siis moodustatud kondensaatori mahtuvus võrdub ühe keha laengu ja nende kehade vahelise pinge jagatisega

$$C = \frac{q}{U}, \text{ F} \quad (1.26)$$

kus C – kondensaatori mahtuvus faradites (F),

q – kondensaatori laeng kulonites (C),

U – kondensaatori pinge voltides (V).

Kondensaatori **elektrivälja energia** avaldub valemiga

$$W = \frac{CU^2}{2}, \text{ J}. \quad (1.27)$$

Kondensaatori energia on proportsionaalne kondensaatori mahtuvuse ja tema pinge ruuduga.

Kondensaatori juures vajalikud juhtivad kehad valmistatakse harilikult õhukesest alumiiniumlehest. Alumiiniumlehtede vahel on tavaliselt õhuke plastmasskile, mis on isolaatoriks. Alumiiniumlehed koos plastmasskiledelga keritakse rulli. Sellise kondensaatori mahtuvus avaldub valemiga

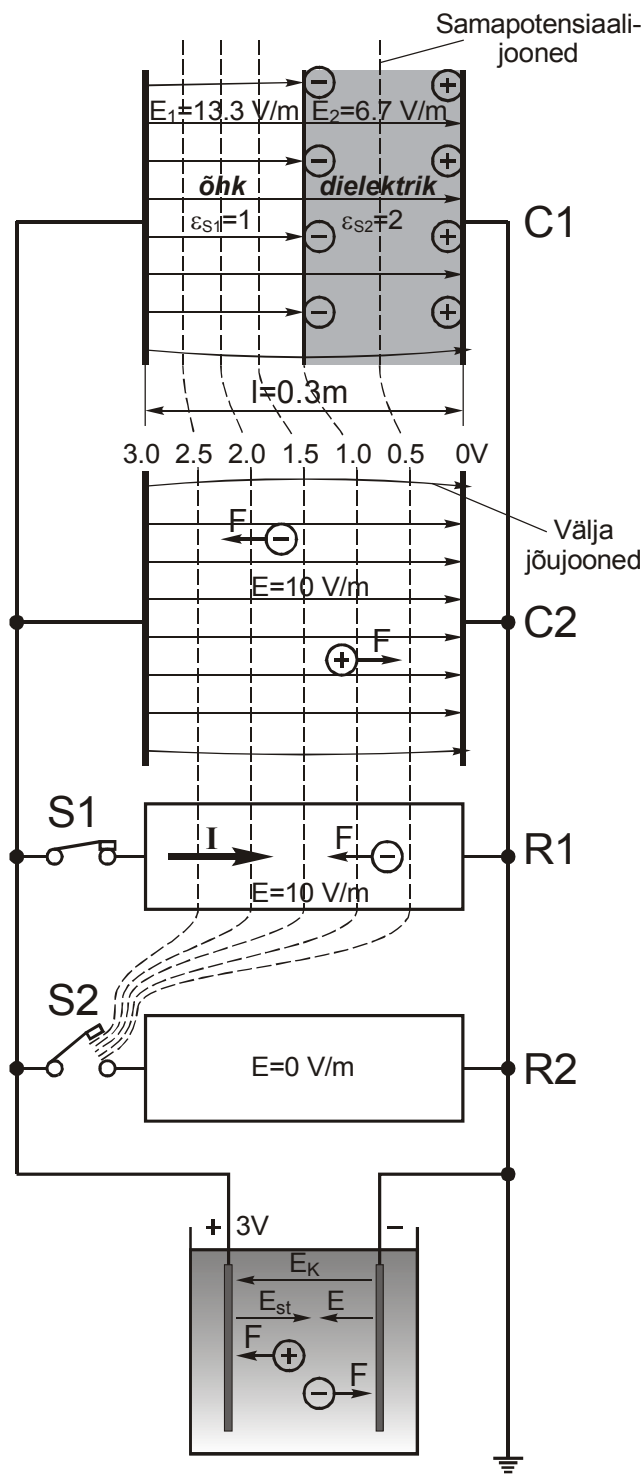
$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{b}, \quad (1.28)$$

kus ε – dielektriku materjali iseloomustav tegur, mida nimetatakse dielektriliseks läbitavuseks,
 A – ühe plaadi pindala, m^2 ,
 b – plaatidevahelise dielektriku paksus, m.

Suure mahtuvuse saamiseks on vaja suurt plaatide pindala ja väikest plaatidevahelist kaugust.

Mahtuvus ei ole mitte ainult kirjeldatud konstruktsiooniga kondensaatoril, vaid ükskõik millise kahe juhtiva keha vahel. Näiteks kahe liinijuhtme vahel on samuti mahtuvus. Kui juhtivate kehade vaheline pinge ei muutu, siis on ka nende kehade vahel olev elektriväli muutumatu. Sellist elektrivälja nimetatakse **staatiliseks**.

Joonisel 1.9 on näidatud mõned tüüpilised staatilise elektrivälja pildid. Keemilise vooluallika klemmidega on ühendatud takistid R1 ja R2 ja kondensaatorid C1 ja C2. Takistiga järjestikku ühendatud lüliti S1 on suletud ja takistit läbib vool I . Takisti R2 ees olev lüliti S2 on avatud ja selles takistis vool puudub. Kondensaator C1 on õhkdielektrikuga. Kondensaatori C2 plaatide vahel on pooles ulatuses õhk ja teises pooles tahke dielektrik, mille suhteline dielektriline läbitavus ε_{s2} on kaks korda suurem kui õhul. Vooluallika miinusklemm on maandamise teel viidud nullise potentsiaali alla. Vooluallika sees olevas elektrolüüdis on kaks elektrivälja komponenti. Staatilise välja komponent E_{st} on põhjustatud vooluallika elektrodide vahel olevast pingest ($U=3V$). Elektrokeemilised jõud tekitavad teise komponendi E_k , mis on vastupidine esimesele. Summaarne väli E on võrdne nende komponentide vahega. Selle summaarse välja mõjul, mis on vastupidine staatilisele väljale, liiguvad elektrolüüdis olevad "+" ioonid positiivsele elektrodile ja "-" ioonid negatiivsele. Negatiivselt elektrodilt liiguvad miinuslaengut kandvad elektronid läbi elektrijuhtmete ja läbi takisti R1 positiivsele elektrodile, kus toimub positiivsete ja negatiivsete laengute neutraliseerimine. Keemiline vooluallikas töötab elektrilaengute pumbana. Laengud liiguvad elektrivälja jõudude mõjul. Juhtmetes ja takistis liiguvad elektronid vastupidi **kokkuleppelist voolu suunda**. Kokkuleppeline suund on pingesallika plussklemmilt miinusklemmidele. Kokkuleppeline voolu suund valiti enne elektronide avastamist ja hiljem pole seda muudetud. Takisti R1 sees on staatiline elektriväli, sest selle takisti klemmidele on rakendatud pinge. Kui selle takisti pikkus on 0,3 m (nagu joonisel 1.9) ja rakendatud pinge on 3 V, siis elektriväljatugevus takisti sees $E=3V/0,3m=10$ V/m. Takisti sees olev elektriväli paneb liikuma elektronid, mis avaldub elektrivooluna.



Joonis 1.9. Alalispinge allika mõjul tekkinud staatiline elektrivälja

Takisti R2 sees väli puudub. Kogu takisti R2 on nullpotentsiaali all, sest tema parempoolne ots on selle potentsiaaliga ühendatud. Elektrivälja puudub kõikides juhtivates kehtes, kui seal voolu ei ole. Vooluallika pinge on rakendatud takisti R2 ees oleva lüliti klemmidele. Kui lüliti klemmide vahekaugus on 3 mm, siis on klemmide vahelises õhkvahekes vältatugevus $E=3\text{V}/0,003\text{m}=1000\text{V/m}$.

Kondensaatori C1 plaatide vahel olevas õhus on elektrivältatugevus $E=3\text{V}/0,3\text{m}=10\text{V/m}$. Seda välja iseloomustatakse elektrivälja jõujoontega, mis algavad plussplaadilt ja lõpevad miinusplaadiga ning on risti plaatide pinnaga. Kui plaatidevahelises ruumis on miinuslaengut omav tolmutera, siis mõjub sellele tolmuterale elektrostaatiline jõud F ja see tolmutera hakkab liikuma mööda jõujoont

plussplaadi suunas. Plusslaengut omab tolmutera hakkab liikuma vastassuunas. Igal kondensaatoriplaatide vahelise elektrivälja punktil on oma potentsiaal. Sama potentsiaaliga punktid moodustavad **samapotentsiaalipinna**. Samapotentsiaalipinnad on jõujoontega risti. Joonisel 1.9 on näidatud samapotentsiaalipindade lõikejooned joonise tasapinnaga. Samapotentsiaalipinnad on näidatud iga 0,5 voldise potentsiaalierinevuse järel. Plaatidevahelises õhus on samapotentsiaalipinnad ühesuguste vahekaugustega. Seal on elektriväli ligikaudu ühtlane ehk homogeenne.

Kondensaatori C2 plaatide vahel on samapotentsiaalipinnad õhus tihedamalt kui dielektrikus. Näidatud juhul on dielektriku suhteline dielektriline läbitavus ϵ_{s2} kaks korda suurem kui õhu suhteline dielektriline läbitavus ϵ_{s1} . Selle tõttu on elektriväljatugevus dielektrikus kaks korda väiksem kui õhus (6,7 V/m ja 13,3 V/m vastavalt).

Takistit R1 ümbritsevas ruumis tekib takistit läbiva voolu I mõjul **magnetväli**, mida me vaatame detailsemalt edaspidi. Elektriväli ja magnetväli on ühtse **elektromagnetvälja** kaks komponenti.

1.8. Mida elektriväli ja magnetväli endast sisuliselt kujutavad?

Elektriväljast, magnetväljast ja ka elektrivoolust sisulise arusaamisega on sageli raskusi. Esiteks on need asjad väljaspool inimese meelte tajumisvõimet. Teiseks, mis veelgi halvem, ei elektrivälja ega magnetvälja sisemise ehituse kohta ei oska teadus tänase päevani midagi olulist öelda. Neid välju käsitletakse kui tühja ruumi omaduste teatud muutust, mis avaldub ainult teatud eriolukordades (näiteks laetud tolmutera liikuma hakkamine elektriväljas).

Tavakäsitluses ei saa tühjal ruumil üldse mingeid omadusi olla, sest seal polegi ju midagi. Tühjale ruumile mingite omaduste andmine on vastuolus tavakogemusega. Ei saa omandada teadmisi, mis on vastuolus seniste tõekspidamistega. Inimesel on vajadus luua maailmast terviklik pilt. Kuidas luua terviklik maailmapilt, milles on ruumi ka elektrotehnika põhimõistetele? Selleks tuleb loobuda ettekujutusest, et tühjas ruumis pole midagi ja hakata uskuma, et **tühi ruum kujutab endast väga suurt valdkonda, mille kohta inimkonnal teaduslikud teadmised seni puuduvad**. Elektrotehnika mõisted on selle suure tundmatu valdkonna piiril ja osaliselt ulatuvad selle sisse.

Tühja ruumi ehituse kohta on hüpoteese, mida pole tõestatud ega ümber lükatud. Üks võimalus on oletada, et ruum, mida me käsitleme täiesti tühjana (vaakum) ei ole siiski päris tühi, vaid seal on siiski mingid kujutlematult väikesed ja hõredalt asuvad objektid, mis moodustavad nn. "peenmateriat". "Peenmateriat" tundmisega peaks saama seletada selliseid mõisteid nagu aeg, ruum, energia, gravitatsiooniväli ja elektromagnetiline väli.

Kaasaegses ühiskonnas on kahjuks valdavalt levinud tõekspidamine, et inimkond juba teab looduse kohta peaaegu kõike ja mida pole teaduslikult tõestatud, seda pole ka olemas. Sisuliselt ei ole see seisukoht teaduslik. Teaduse eesmärk just ongi tundmatute asjade uurimine. Erinevalt kaasaegsest ühiskonnast, on inimkonna arengu varasematel etappidel "peenmateriale" valdkonna abil seletatud loodusnähtusi ja loodud ka vastav maailmapilt. Elektrotehnika õppijale on selline maailmapilt mugav, sest seal on ruumi nii pingele, voolule kui ka elektromagnetväljadele.

Esitame siinkohal antropoloogiliste uurimuste põhjal restaureeritud ja tänapäeva inimesele mugandatud muinasaja inimese maailmapildi. Arvatakse, et selline maailmapilt oli valdav 30000...40000 aastat tagasi ja tänapäeval on see nn šamanistlik maailmapilt säilinud ainult tsivilisatsiooniga vähe kokku puutunud ühiskondades. Eesti aladel on šamanism ehk mausk hääbunud pikkamisi, algul ristiusu ja hiljem ateismi survele. Veel 17. sajandil olid selle usu traditsioonid levinud ja need pole päris kadunud tänaseni. Seda maailmapilti võiks lühidalt iseloomustada järgnevalt.

1. Inimese jaoks tavalise ja tunnetatava maailma sees eksisteerib terve rida maailmu, mida inimene tavaliselt ei tunnetata. Oletatakse, et need maailmad koosnevad niivõrd väikestest senitundmata osakestest ja senitundmata väljadest, et nad võivad vabalt läbida tavalist tahket keha nagu valgus klaasi. Teatavasti on kaugused tahke keha sees olevate elementaariosakeste (elektronid, prootonid, neutronid) vahel väga suured nende osakeste mõõdetega võrreldes. Põhimõtteliselt on ruumi nende teiste maailmade jaoks piisavalt. Neid maailmu nimetatakse sageli teispoolseteks peenmateriaalseteks maailmadeks. Nad on teisel pool tavatunnetust. Peenmateriaalne maailm läbib iga kõva keha ja ka meie keha nagu tuul puhub läbi metsa. Teispoolsetes maailmades on oma objektid. Neid on palju, nad liiguvad ja ka "elavad". Tühi ruum ehk vaakum ei ole tegelikult tühi. Füüsikast on teada fakt, et tühjas ruumis võib iseenesest tekkida elektroni ja positroni paar.
2. Tavamaailm ja tunnetamata maailmad mõjutavad üksteist vastastikku. Tavamaailmas klassifitseeritakse seda mõju juhuseks. Juhus ei allu tavamaailma seadustele põhimõtteliselt. Tõenäosus ei tule siin arvesse. Pimesoole põletikku sureb tänapäeval ainult mõni protsent haigestunutest, kuid kes sureb, see sureb sajabrotsendilisel. Inimese elu ja tervis on sõltuvad teispoolsetes maailmades toimuvatest sündmustest. Need sündmused määravad selle juhuse, kes sureb pimesoolepõletikku, kes mitte.

Aatomituuma ehitust ei saa muidu selgitada, kui võtta kasutusele elementaariosakeste vahelise vastumõju mõiste. Nende vastumõjude mehhanism asub peenmateriaalses maailmas. Tavamaailm ei ole üldse võimeline ilma peenmateriaalsetel tasanditel toimuvate protsessideta koos püsima. Peenmateriaalsete protsesside tulemusel võib aga kõva keha tekkida.

3. Teispoolsetes maailmades on teistsugused aja ja ruumi suhted. Informatsioon oleviku, mineviku ja tuleviku kohta on põhimõtteliselt korruga kättesaadav. Kui aeg ei ole tähtis, siis ei ole ka kaugused tähtsad. Võib üheaegselt jälgida seda, mis on Maa peal ja Marsi peal. Arvatakse, et eksisteerib ka üks informatsiooni sisaldav maailm ehk kosmiline informatsiooniväli. Selle välja kaudu toimub informatsiooni vahendus eri tasandite peenmateriaalsete maailmade ja ka tavamaailma vahel. Selles väljas on muuhulgas ka informatsioon tavamaailma mineviku, oleviku ja tuleviku kohta.
4. Kõikidel inimestel, loomadel ja taimedel on võime nii neid teisi maailmu tunnetada, sealt informatsiooni koguda, kui ka seal aktiivselt tegutsedes muuta tavamaailma sündmusi. See on võimalik otsekohe, siin ja praegu. Selleks peab muutma oma teadvusseisundit. Teadvusseisundi muutmist võib võrrelda kanali vahetusega televiisoris. Erinevus on siin esiteks selles, et televiisori maailm jääb alati väljapoole vaatajat. Teadvusseisundite vahetamisel "hüppab" vaatleja aga ühest maailmast teise. Teiseks, televiisori kanalivahetus ei ole kellelegi probleemiks. Tahtlikku teadvusseisundite vahetamist on aga üldiselt vaja õppida. Võime teadvusseisundit vahetada on nii inimestel kui loomadel kaasa sündinud. Kuid inimesed ei ole seda võimet viimastel ajaloojarkudel piisavalt kasutanud ja see on mandunud. Loomad tajuvad teispoolsust paremini ja käituvad mõnedes situatsioonides inimesest targemini. Teadvusseisundite vahetamise õppimine on nagu klaverimängu õppimine. Mingi taseme saavutab suure vaevaga igatüks, kuid meistriks saamiseks peab olema kaasasündinud anne. Teispoolsust vahendas vanal ajal šamaan. Šamaaniks õpiti, kuid igatühest õiget šamaani ei saanud. Kui šamaan sooritas vajalikke toiminguid teispoolses maailmas, siis samal ajal lamas tema tavamaailmas olev materiaalne keha põrandal transiseisundis.
5. Loomulik teadvusseisundite vaheldumine toimub igal inimesel uinumisel ja ärkamisel. Tavalise une seisund erineb ärkveloleku seisundist, kuid šamaanide poolt kasutatavad teadvusseisundid erinevad omakorda tavalise une seisundist. Teatud seisundites võivad šamaanid näha tavamaailma ja teispoolseid maailmu koos. Inimesel on peale tavalise materiaalse keha veel ka kehad teistes maailmades. Suudetakse näha seitset keha, vahel ka rohkem. Need niinimetatud

astraalkehad paiknevad üksteise sees ja tavalise keha sees. Kuid inimese astraalkehad on eri suurustes ja tavakehast suuremad. Nad ulatuvad tavakehast välja mõnest millimeetrist kuni poole meetrini. Suremisel väiksemad astraalkehad hävivad koos füüsilise kehaga, kuid suuremad lahkuvad. Imikute suuremad astraalkehad pidid vahel mõneks ajaks imiku maha jätma ja ringi kolama. On olemas ka teadvusseisundeid, kus inimest nähakse helendava kerana.

Ateismi vaimus kasvanud inimesel on esimene tutvus ülaltoodud maailmapildiga reeglina šokeeriv ja tõrjuv. Selle maailmapildi adekvaatsuses võib kahelda. Selle õigsust ei ole tõestatud ega ümber lükatud. Sellise maailmapildi objektiivsuse kasuks räägib siiski fakt, et see on saadud mitmes maakera eri paigas olevate rahvaste uurimisel (Siberis, Austraalias ja Lõuna-Ameerikas). Nende rahvaste maailmapildid olid väga sarnased ja nende rahvaste vahel pole olnud kontakte.

Ateistid arvavad, et peenmateriaalne maailm puudub. Peenmateriaalse maailma puudumist ei saa aga kuidagi tõestada. Ateistide arvamusel puudub teaduslik põhjendus. Nende arvamus on ka ainult usk. Ateism on religiooni eriliik, mis ei tarvitse maausust parem olla. Elektrimasinate õppimisel on šamanistlik maailmapilt soodsam kui ateistlik. Miks siis mitte käia ka veidi esiisade jälgedes ja uskuda, et tühi ruum on midagi enam kui ainult koht asjade panemiseks.