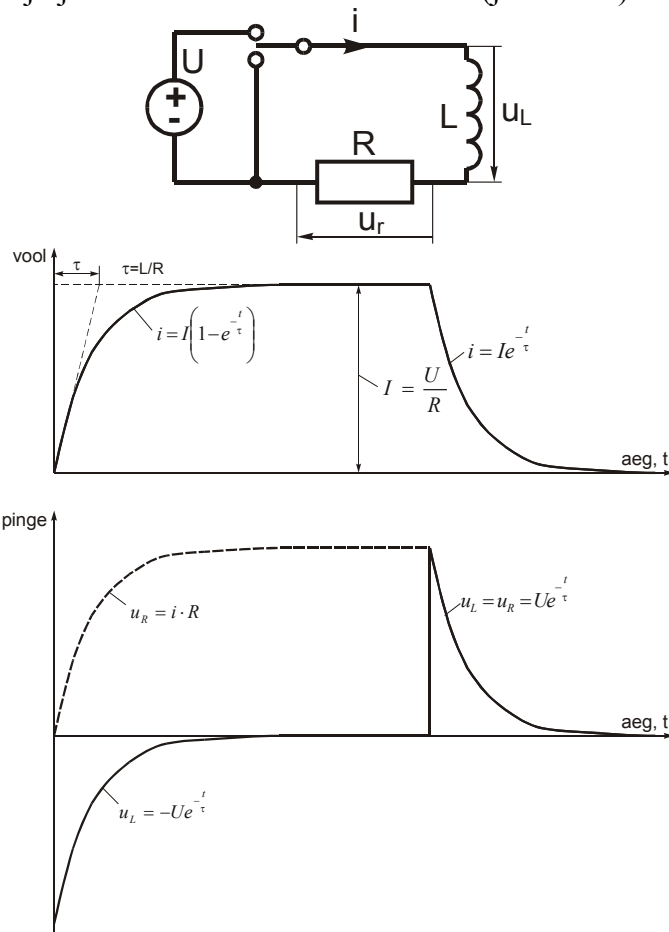


2.3. Energiasalvestuselementidega elektri ahelad

2.3.1. Induktiivsus ja mahtuvus alalisvoolu ahelas

Induktiivpoolil on alati takistus (kui just ei ole tegemist ülijuhtiva pooliga). Vaatame kuidas käitub induktiivsuse ja takistuse järjestikühendus alalisvoolu ahelas (joonis 3.1).



Joon. 2.27. RL-ahela sisse- ja väljalülitamine alalispingel

Kui ahelas on juba muutumatu suurusega vool, siis pinge induktiivsusel $U_L = L \frac{di}{dt} = 0$, sest $di=0$.

Siit järeldub, et muutumatu suurusega alalisvoolule induktiivsus mõju ei avalda. Ta nagu puuduks ahelas. Teistsugune on olukord ahela sisse- ja väljalülitamisel. Sisselülitamise momendil ahelas vool puudub ja pinge takistil $u_R = i \cdot R = 0$. Voolu kasvamise kiirus lülitusmomendil on $di/dt = U/L$. Vool tekitab takistil R pingelangu u_R ja pinge induktiivsusel u_L hakkab vähenema ($u_L = U - u_R$). Takistuse pinge u_R ja induktiivsuse pinge u_L kõverad on näidatud joonisel 2.27. Kuna pinge induktiivsusel väheneb, siis väheneb ka voolu kasvamise kiirus. Voolu kasvamine ajas toimub eksponentseduse järgi

$$i = I \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (3.1)$$

Siin i – voolu hetkväärtus;

I – voolu püsiväärtus peale voolu muutumisprotsessi lõppu;

τ – ahela ajakonstant.

Voolu püsiväärtus on leitav Ohmi seaduse põhjal ($I = U/R$). Püsivool ei sõltu induktiivsusest.

Ahela ajakonstandiks loetakse ühte tinglikku ajavahemikku Δt , mida tähistatakse tähega τ . τ on määratud järgmiste tingimuste järgi.

- Takisti R eemaldatakse ahelast ja rakendatakse pinge U .

- Leitakse ajavahemik Δt , mille jooksul vool jõuab ühtlaselt kasvades kuni väärtuseni $I=U/R$ (see on kuni voolu püsiväärtuseni).
- Leitud ajavahemikku Δt loetakse ajakonstandiks τ .

Ajakonstandi avaldise saab leida rakendades eeltoodud tingimusi voolu kasvamise kiiruse avaldamisel $di/dt=U/L$. Kui voolu juurdekasv $\Delta i=U/R$ ja selleks juurdekasvuks kuluv ajavahemik $\Delta t=\tau$, siis

$$\frac{U}{R \cdot \tau} = \frac{U}{L}.$$

Siit ajakonstant

$$\tau=L/R. \quad (3.2)$$

Juhul kui me joonisel kujutatud ümberlüüti viime kiiresti ülemisest asendist alumisse, siis tekib uus vooluring, kus pingeallikas U puudub. Vaatamata pingeallika puudumisele vool ahelas otsekohe ei lõpe. Pooli magnetvälja salvestatud energia mõjul tekib poolil pinge, mis esimesel ajamomendil hoiab voolu sama suurena kui ta oli eelmises lüüti asendis. Magnetvälja energia kahanemise tõttu hakkab vool mööda eksponenti langema. Vool muutub ligikaudu nulliks ajavahemiku $\Delta t=3..5\tau$ jooksul. Sama suur on antud näites ka voolu kasvamise aeg.

Voolu kasvamine ja kahanemine RL ahelas on analoogiline mehaanilise keha liikumise kiirendamise ja aeglustamisega (näiteks auto). Sealjuures on induktiivsus analoogiline massiga. Kui auto kiirendamiseks kulub 10 sekundit, siis voolu tekkimiseks alalisvoolu ahelas kulub umbes 1 millisekund. Kiirete protsesside juures osutub see lühike ajavahemik siiski üsna oluliseks.

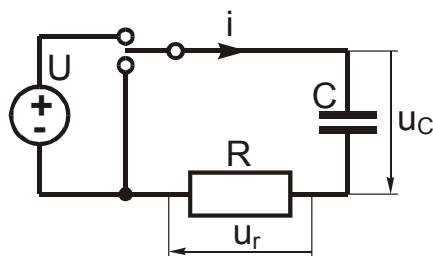
Juhul, kui meil on induktiivsuse asemel mahtuvus (joon. 3.2), siis on olukord hoopis teine. Lüüti viimisel ülemisse asendisse tekib vool hetkeliselt ja saavutab väärtuse $i=U/R$, sest kondensaatori pinge on algul võrdne nulliga. Voolu mõjul koguneb kondensaatorisse laeng ja kondensaatori pinge u_C hakkab tõusma. Samal ajal pinge takistil u_R hakkab langema, sest $u_R=U-u_C$. Koos sellega langeb vool ahelas. Vool langeb nulli mööda eksponenti. Mahtuvusliku ahela ajakonstandi väärtus on määratud avaldisega

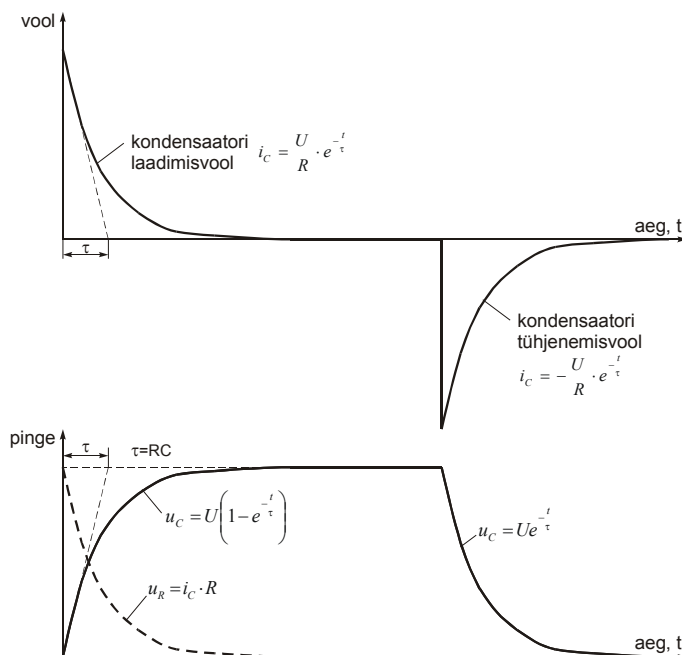
$$\tau=R \cdot C. \quad (3.3)$$

Püsiolukorras on ahela vool võrdne nulliga. Alalisvoolu ahelas olev kondensaator on nagu ahela katkestus. Pinge kondensaatoril U_C on püsiolekus võrdne toitepingega U . See ongi põhjuseks, miks ahelas vool puudub.

Kui me viime lüüti liikuva kontakti alumisse asendisse (joon. 3.2), siis pinge kondensaatoril esialgu säilib. Läbi takisti R tekib kondensaatori tühjenemisvool, mis on vastupidine laadimisvoolule. $3..5\tau$ jooksul see vool muutub nulliks.

Ahelate sisse- ja väljalülitamisel tekkivaid protsesse, mida eelpool vaadeldi, nimetatakse **siirdeprotsessideks**.

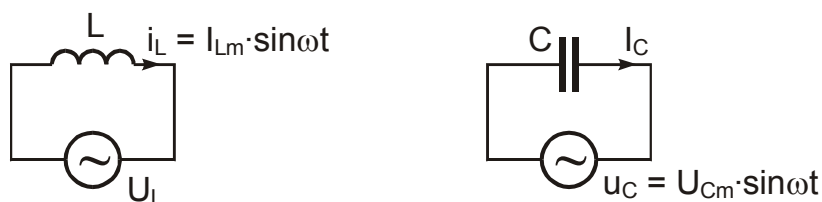




Joon. 2.28. Kondensaatori pingestamine ja tühjakslaadimine alalisvoolu ahelas

2.3.2. Induktiivsus ja mahtuvus vahelduvvoolu ahelas. Reaktans

Olgu meil kaks lihtsat ahelat. Üks on siinuspingele lülitatud induktiivsus L ja teine siinuspingele lülitatud mahtuvus C (joon. 3.3).



Joon. 2.29. Siinuspingele lülitatud induktiivsus ja mahtuvus

Meid huvitab, kuidas leida neis ahelates tekkivat voolu. Eelnevast on teada voolu ja pinge vahelised diferentsiaalsõltuvused. Induktiivsuse puhul $u=L \cdot di/dt$ ja mahtuvuse puhul $i=C \cdot du/dt$. Eeldame, et induktiivsusel on siinusvool

$$i_L = I_m \cdot \sin \omega t. \quad (3.4)$$

Induktiivsusel tekib sellise voolu tõttu pinge

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \cdot \sin \omega t)}{dt} = \omega L I_m \cos \omega t. \quad (3.5)$$

Mahtuvuse jaoks saame leida analoogiliselt tekkiva voolu

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \cdot \sin \omega t)}{dt} = \omega L I_m \cos \omega t. \quad (3.6)$$

Avaldised (3.5) ja (3.6) kirjeldavad siinussuurusid. Järelikult tekib nii induktiivsuses kui mahtuvuses siinusvool, kui nad on lülitatud siinuspingele. Kordajad avaldises (3.5) määravad ilmselt pinge amplituudväärtuse induktiivsusel

$$\omega L I_{Lm} = U_{Lm} \quad (3.7)$$

ja kordajad avaldises (3.6) voolu amplituudväärtuse kondensaatoril

$$\omega C U_{Cm} = I_{Cm}. \quad (3.8)$$

Diferentseerimisel tekkinud koosinusfunktsioonid saame me asendada siinusfunktsioonidega, sest $\cos \omega t = \sin(\omega t + \pi/2)$. Asendamisel saame (3.5) ja (3.6) kirjutada kujul

$$u_L = U_{Lm} \cdot \sin(\omega t + \pi/2), \quad (3.9)$$

$$i_C = I_{Cm} \cdot \sin(\omega t + \pi/2). \quad (3.10)$$

Avaldisest (3.9) järeldub, et induktiivahela pingefaasor \underline{U}_L on nurga $\pi/2$ võrra ees voolufaasorist \underline{I}_L , sest $i_L = I_{Lm} \cdot \sin \omega t$. Avaldisest (3.10) järeldub, et mahtuvusliku ahela voolufaasor \underline{I}_L on nurga $\pi/2$ võrra ees pingefaasorist \underline{U}_C . Seda on näidatud joonisel 3.4.



Joon. 2.30. Voolufaasorite asend pingefaasori suhtes induktiivses ja mahtuvuslikus ahelas

Avaldise (3.7) teisendamisel saame me induktiivse ahela pinge ja voolu amplituudväärtuste suhte, mille me võime edasi teisendada efektiivväärtuste suhteks

$$\frac{U_{Lm}}{I_{Lm}} = \frac{\sqrt{2}U_L}{\sqrt{2}I_L} = \omega L. \quad (3.11)$$

Avaldise (3.8) analoogilisel teisendamisel saame

$$\frac{U_C}{I_C} = \frac{1}{\omega C}. \quad (3.12)$$

Pinge ja voolu suhe määrab alalisvoolu ahelas takistuse. (3.11) ja (3.12) sisaldavad samuti pinge ja voolu suhet ning võrduses paremal pool olevad avaldised ωL ja $1/\omega C$ on seal seega vahelduvvoolu takistused ehk **reaktansid**. Neid reaktanse tähistatakse järgnevalt:

$$\omega L = x_L, \quad (3.13)$$

kus x_L on **induktiivtakistus** ehk **induktiivne reaktans** ja

$$\frac{1}{\omega C} = x_C, \quad (3.14)$$

kus x_C on **mahtuvustakistus** ehk **mahtuvuslik reaktans**.

Nii induktiivtakistust kui mahtuvustakistust nimetatakse ka **reaktiivtakistuseks** ehk lihtsalt reaktansiks ja tähistatakse x .

Avaldise (3.11) ja (3.12) võin kirjutada ka kujul

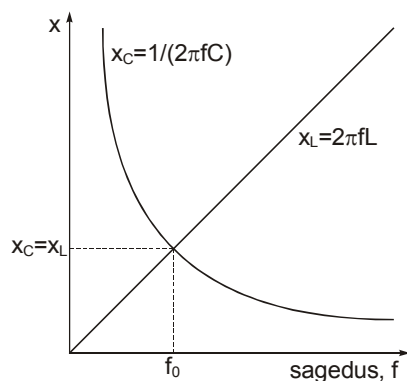
$$x_L = \frac{U_L}{I_L} \quad (3.15)$$

ja

$$x_C = \frac{U_C}{I_C}. \quad (3.16)$$

(3.15) ja (3.16) väljendavad Ohmi seadust vahelduvvoolu ahelas.

Induktiivtakistus x_L kasvab koos sageduse f kasvamisega (joonis 3.5). Mahtuvustakistus x_C aga langeb sageduse kasvamisel. Kui meil on mingi induktiivsus L ja mahtuvus C , siis alati leidub teatud sagedus f_0 , mille juures induktiivtakistus ja mahtuvustakistus saavad võrdseks. Seda sagedust nimetatakse **resonantssageduseks**.

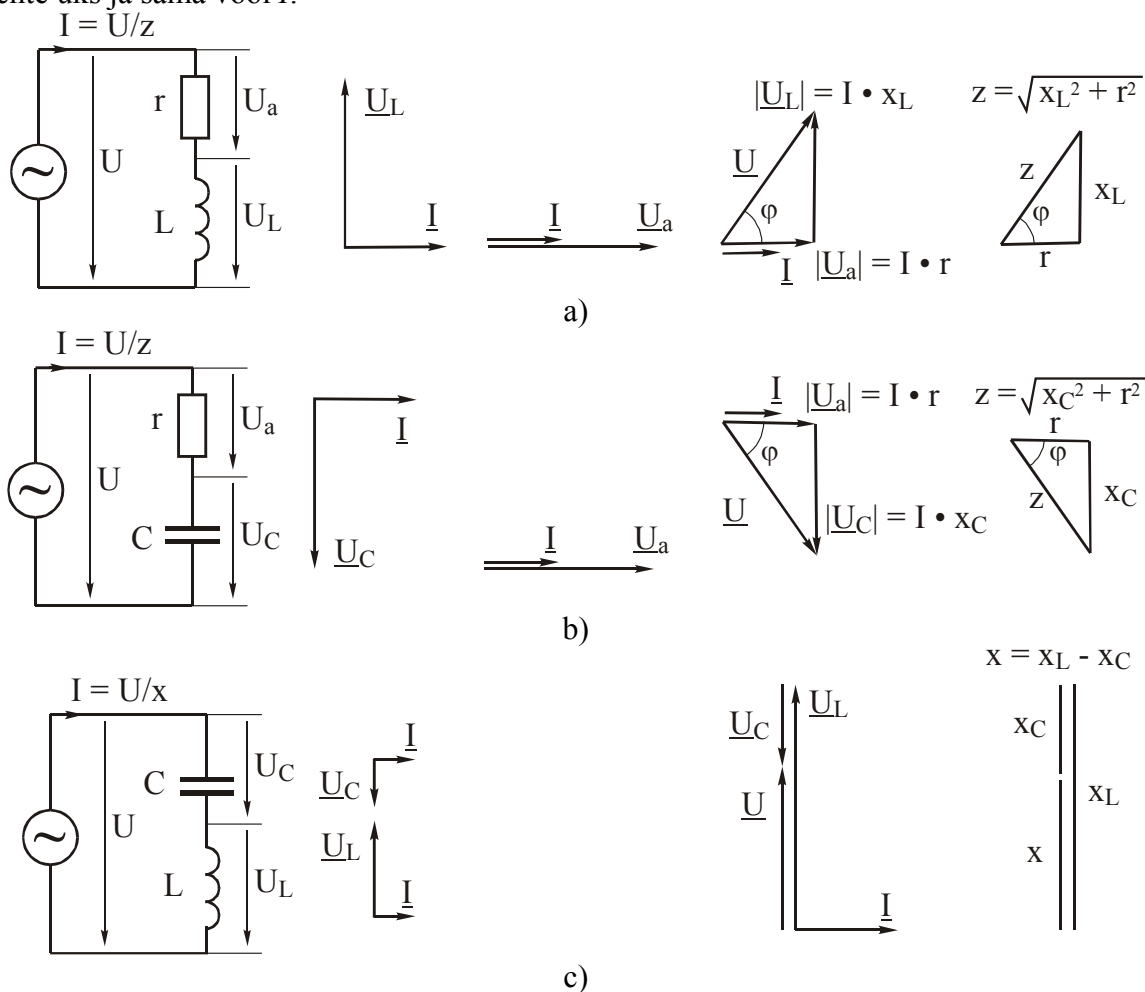


Joon. 2.31. Induktiiv- ja mahtuvustakistuse sõltuvus sagedusest

Nullsagedusel ehk alalispingel on induktiivtakistus võrdne nulliga ja mahtuvustakistus võrdne lõpmatuslega. Kõrgetel sagedustel on vastupidi. – induktiivtakistus muutub suureks ja mahtuvustakistus väikeseks.

2.3.3. Segatakistus vahelduvvoolu ahelas. Impedants

Kui järjestikku on ühendatud aktiivtakistus r ja induktiivtakistus L (joon. 3.6a), siis läbib neid elemente üks ja sama vool I .



Joon. 2.32. Aktiiv- ja induktiivtakistuse (a), aktiiv- ja mahtuvustakistuse (b) ning induktiiv- ja mahtuvustakistuse (c) järjestikühendus

See vool tekitab takistil r pingelangu $U_a = I \cdot r$. See pingelang on vooluga samas faasis (faasorid \underline{U}_a ja \underline{I} joonisel). Vool I tekitab induktiivsusel pingelangu $U_L = I \cdot x_L$. Induktiivsuse pingefaasor \underline{U}_L on voolu faasorist \underline{I} 90° ees. Järelikult on induktiivsuse ja takistuse pingefaasorid \underline{U}_L ja \underline{U}_a üksteise suhtes 90° nihutatud. Nende faasorite geomeetiline summa aga peab olema võrdne pingeaallika pingega \underline{U}

$$\underline{U}_L + \underline{U}_a = \underline{U}. \quad (3.17)$$

Geomeetrilisel liitmisel saame **pingete kolmnurga** (joon. 3.6a), kus \underline{U}_L ja \underline{U}_a on kaatetid ja \underline{U} on hüpotenuus. Selle kolmnurga põhjal

$$U = \sqrt{U_L^2 + U_a^2}. \quad (3.18)$$

Pingekolmnurgalt saame üle minna pingekolmnurgaga sarnasele **takistuste kolmnurgale**, kui me kõiki kolme pinget (U_L , U_a , U) jagame vooluga I . Sealjuures $U_L/I = x_L$, $U_a/I = r$ ja

$$\frac{U}{I} = z, \quad (3.19)$$

kus z on ahela **näivtakistus** ehk **impedants**. Näivtakistust mõõdetakse samuti oomides. Näivtakistus määrab ära ahelas tekkiva voolu. Näivtakistuse suuruse saab leida induktiivtakistuse x_L ja aktiivtakistuse r kaudu nende geomeetrilise summana

$$z = \sqrt{x_L^2 + r^2} \quad (3.20)$$

Voolu leidmiseks joonisel 3.4a kujutatud ahelas leiame algul (3.20) järgi impedantsi z ja seejärel (3.19) põhjal I .

Näide. Kui joonisel 3.6a kujutatud ahelas on pinge $U = 230\text{V}$, sageduse $f = 50\text{Hz}$, takistus $r = 45\Omega$ ja induktiivsus $L = 0,1\text{H}$, siis saame voolu I leida järgnevalt.

1. Leiame induktiivtakistuse

$$x_L = \omega L = 2\pi f L = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,1 = 31,4 \Omega.$$

2. Leiame impedantsi

$$z = \sqrt{x_L^2 + r^2} = \sqrt{31,4^2 + 45^2} = 54,9 \Omega.$$

3. Leiame voolu

$$I = U / z = 230 / 54,9 = 4,2 \text{ A}.$$

Faasinihkenurga φ pinge ja voolu vahel saame leida nii pingekolmnurgast kui ka takistuste kolmnurgast.

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{r}{z} \quad (3.21)$$

Kui järjestikku on ühendatud aktiivtakistus r ja mahtuvus C (joon. 3.6b), siis läbib neid elemente samuti üks ja sama vool. See vool tekitab samuti mõlemal elemendil pingelangu. Võrreldes eelneva juhuga on siin erinevuseks see, et mahtuvuse pingefaasor \underline{U}_C on voolu faasorist \underline{I} 90° järel. Mahtuvuse ja takistuse pingefaasorid \underline{U}_C ja \underline{U}_a on üksteise suhtes 90° nihutatud ja neid on vaja samuti liita geomeetriselt. Geomeetrilisel liitmisel saame pingete kolmnurga (joon. 3.4b) ja selle kaudu takistuste kolmnurga. Takistuste kolmnurgast saab leida analoogiliselt impedantsi

$$z = \sqrt{x_C^2 + r^2}. \quad (3.22)$$

Kui meil on järjestikku ühendatud mahtuvus ja induktiivsus (joon. 3.6c), siis läbib neid elemente jällegi üks ja seesama vool I . See vool tekitab neil elementidel pingelangud, kusjuures mahtuvuse pingefaasor \underline{U}_C on voolust 90° taga ja induktiivsuse pingefaasor \underline{U}_L voolust 90° ees. Faasorite \underline{U}_C ja \underline{U}_L omavaheline nihkenurk on seega kaks korda 90° ehk 180° . Faasorid \underline{U}_C ja \underline{U}_L on samasihilised kuid vastassuunalised. Nende faasorite summa peab võrduma toitepingega U

$$\underline{U}_C + \underline{U}_L = \underline{U}. \quad (3.23)$$

Faasorite liitmisel kolmnurka ei teki. Summaarse faasori moodul on võrdne liidetavate faasorite moodulite aritmeetilise vahega. Kokkuleppe kohaselt loetakse \underline{U}_L suund positiivseks ja \underline{U}_C suund negatiivseks. Seega efektiivväärtuste kaudu

$$U = U_L - U_C \quad (3.24)$$

Jagades avaldist (3.24) vooluga I saame

$$x = x_L - x_C, \quad (3.25)$$

kus $x = U/I$ on ahela reaktiivtakistus ehk reaktans. Kui induktiivtakistus on mahtuvustakistusest suurem ($x_L > x_C$), siis on reaktans positiivne ja summaarne ahel vastab induktiivsele ahelale. Ahela voolufaasor on siis pingefaasorist 90° taga (nagu joonisel 3.6c). Kui aga vastupidi, mahtuvustakistus on induktiivtakistusest suurem ($x_C > x_L$), siis vastab summaarne ahel mahtuvuslikule ahelale.

Kui $x_C = x_L$, siis on järjestikuse vahelduvvooluahela takistus võrdne nulliga.

Üldjuhul, kui järjestikahelas on nii aktiiv-, induktiiv- ja ka mahtuvustakistusi suuremal arvul, saame leida summaarse impedantsi kujul

$$z = \sqrt{(\sum r)^2 + (\sum x_L - \sum x_C)^2}. \quad (3.26)$$

2.3.4. Vahelduvvoolu võimsus

Vahelduvvoolu **hetkvõimsuseks** nimetatakse voolu ja pinge hetkväärtuste korrutist

$$p = u \cdot i. \quad (3.27)$$

Hetkväärtuste avaldised pingele ja voolule on

$$u = U_m \sin \omega t$$

ja

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t \pm \varphi).$$

Hetkvõimsuse üldavaldis on seega

$$p = U_m \cdot I_m \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t \pm \varphi). \quad (3.28)$$

Siinuste korrutist saab teisendada

$$\sin \omega t \cdot \sin(\omega t \pm \varphi) = \frac{1}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t \pm \varphi)]$$

ja

$$U_m \cdot I_m = 2U \cdot I.$$

Asendades saame

$$p = U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t \pm \varphi). \quad (3.29)$$

Perioodi keskmise võimsuse P saame ühe perioodi integreerimisel

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T [U \cdot I \cos \varphi - U \cdot I \cos(2\omega t \pm \varphi)] dt = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (3.30)$$

Seda keskmist võimsust nimetatakse **aktiivvõimsuseks** ja mõõteühikuks on vatt [W].

Korrutist UI nimetatakse **näivvõimsuseks** S

$$S = UI \quad (3.31)$$

ja näivvõimsuse mõõteühikuks on voltamper [V·A].

Aktiiv- ja näivvõimsuse suhet

$$\frac{P}{S} = \frac{UI \cos \varphi}{UI} = \cos \varphi \quad (3.32)$$

nimetatakse **võimsusteguriks**.

Korrutist

$$S \cdot \sin \varphi = Q \quad (3.33)$$

nimetatakse **reaktiivvõimsuseks** ja tema mõõteühik on varr [var].

Vahelduvvoolu ahelates vaadeldakse seega kolme erinevat võimsust, mis erinevad voolu ja pinge kõverate vahelise faasinihkenurga φ arvesse võtmise poolest.

$$S = U \cdot I$$

$$P = S \cdot \cos \varphi = UI \cos \varphi$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Faasiühkenurga tähtsuse mõistmiseks vaatame eraldi võimsust aktiivkoormusel (näiteks resistoril) ja **reaktiivkoormusel**, milleks on induktiivpool või kondensaator.

Aktiivtakistusel (resistoril) on vool pingega faasis. Seega $\varphi=0$ ja $\cos\varphi=1$. Selle tõttu

$$S=P=U \cdot I$$

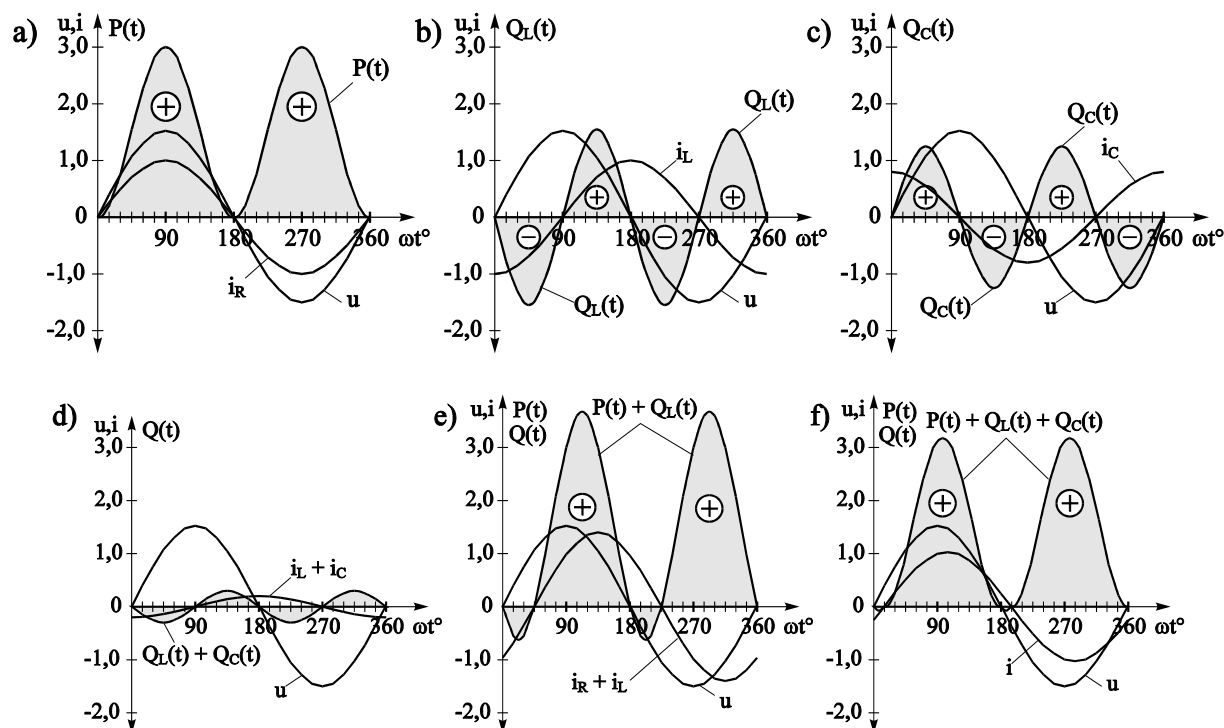
ja

$$Q=0. \quad (3.34)$$

Resistori puhul läheb kogu võimsus soojuseks. Energia väljub sellega elektriabelast ja antakse edasi ümbritsevasse keskkonda. Reaktiivvõimsus on võrdne nulliga. Aktiivvõimsus on siin soojusvõimsus ja see on võrdne ka näivvõimsusega.

Aktiivkoormuse hetkvõimsuse avaldise saame me (3.28) järgi, kui võtame $\varphi=0$. Seega

$$p=U_m \cdot I_m \cdot \sin^2 \omega t = 2U \cdot I \cdot \sin^2 \omega t = 2 \cdot P \sin^2 \omega t. \quad (3.35)$$



Joon. 2.33. Pinge, voolu ja võimsuse hetkväärtuste kõverad takisti (a), induktiivpooli (b), kondensaatori (c), pooli ja kondensaatori summa (d), pooli ja takisti summa (e), takisti, pooli ja kondensaatori summa (f) korral

Aktiivkoormuse hetkväärtuse kõver on näidatud joonisel 2.33a. Mõlema poolperioodi võimsus on positiivne. Võimsuse hetkväärtuse maksimum on 2 korda suurem võimsuse keskvaertusest (mis arvutatakse $P=UI$) ja hetkväärtuse miinimum on võrdne nulliga.

Juhul kui meil on tegemist induktiivpooliga, siis vool jääb pingest maha ja ideaalsel juhul $\varphi=90^\circ$. Siis $\cos\varphi=0$ ja $\sin\varphi=1$. Sel juhul

$$S=Q=UI$$

ja

$$P=0. \quad (3.36)$$

Aktiivvõimsus on võrdne nulliga, sest energia ei välju elektriabelast. Kogu võimsus on reaktiivvõimsus. Selle sisuliseks mõistmiseks vaatame võimsuse hetkväärtust, mille saame (3.28) järgi, kui võtame $\varphi=-90^\circ$.

$$p=U_m \cdot I_m \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - 90^\circ) = -U_m \cdot I_m \cdot \sin \omega t \cdot \cos \omega t.$$

Edasi teisendades saame

$$p = -U \cdot I \cdot \sin 2\omega t. \quad (3.37)$$

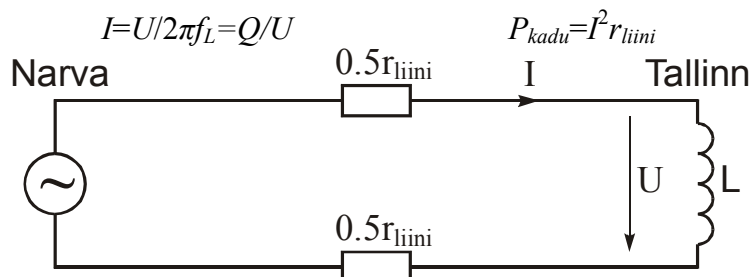
Induktiivvõimsuse hetkväärtuse kõver on antud joonisel 3.7b. Hetkvõimsus muutub võrgusagedusest 2 korda suurema sagedusega. Pinge esimese poolperioodi esimesel poolel (0° kuni

90°) on hetkvõimsus negatiivne ja selle poolperioodi teisel poolel (90° kuni 180°) on hetkväärtus positiivne. Järgmine poolperiood on analoogiline.

Negatiivse hetkvõimsuse juures on voolu suund vastupidine pinge suunale. See vastab pinge- või vooluallika aktiivtalitlusele. Negatiivne hetkvõimsus on siis kui vool induktiivsusel väheneb (vool tekkis eelneval poolperioodil, mida pole näidatud). Voolu vähenemisega magnetvälja energia väheneb ja see energia antakse toitevõrku. Sellega on seletatav induktiivsuse käitumine energiaallikana, mis avaldub negatiivses hetkvõimsuses.

Poolperioodi teisel osal (90° kuni 180°) vool kasvab ja sellega kasvab magnetvälja energia. See energia võetakse võrgust (vool ja pinge ostsillogrammil on samasuunalised). Seega reaktiivvõimsuse juures energia ei välju elektriabelast ja seda ei kulutata. Toimub ainult energia pendeldamine induktiivpooli ja pingeallika (elektrivõrgu) vahel.

Elektrivõrkude puhul püütakse reaktiivvõimsust tavaliselt vältida või vähendada.



Joon. 2.34. Reaktiivvõimsuse ülekandmisel tekiv liini kaovõimsus

Kui näiteks pingeallikas on Narvas ja induktiivpool Tallinnas, siis nende vahel on üle 200km liini (joon. 2.34), mille summaarne takistus on r_{liini} . Kui pool tarbib reaktiivvõimsust Q , siis läbib teda vool $I = Q / U$. See vool põhjustab liinis **kaovõimsuse** P_{kadu} , mis on avaldatav Joule-Lenzi seaduse põhjal

$$P_{\text{kadu}} = I^2 r_{\text{liini}}. \quad (3.38)$$

Suuremate elektritarbijate korral paigaldatakse lisaks **aktiivenergia** arvestile ka **reaktiivenergia** arvesti. Reaktiivenergia tarbimise eest võetakv tasu vastab liinis soojusena hajunud energiale. Tavaliselt on reaktiivenergia tasu umbes 10 korda väiksem aktiivenergia tasust, sest aktiivenergia läheb tarbijale 100%-liselt, kuid reaktiivenergia tõttu tekivad ainult ülekandekaod. Mõnede seadmete (näiteks asünkroonmootorid) on reaktiivvõimsus vajalik nende magnetväljade ülesehitamiseks.

Kui võrku on induktiivpooli asemel lülitatud kondensaator, siis tekib samuti voolu ja pinge vahele 90° faasinihe. Erinevus on siiski selles, et kondensaatori voolu faas on 90° ees pingest. See on näidatud joonisel 2.33c. Kondensaatori puhul on vool ja pinge samasuunalised võrgupinge poolperioodi esimesel poolel (0°...90°). Sel ajal kondensaatori laetakse ja tema energia suureneb. Võimsuse hetkväärtus on sel ajal positiivne ja energia liigub võrgust kondensaatorisse. Poolperioodi teisel poolel kondensaatorit tühjendatakse ja tema vool on vastassuunaline. Energiat antakse kondensaatorist võrku.

Seega ka kondensaatori võimsus on reaktiivvõimsus, kus toimub energia pendeldamine pingeallika ja kondensaatori vahel.

Kui võrrelda induktiivpooli ja kondensaatori võimsuse hetkväärtuse ja voolu hetkväärtuse kõveraid (joon. 2.33b ja 2.33c) siis näeme, et need kõverad on vastasfaasis (180° faasinihe). See võimaldab kondensaatoreid kasutada ülekandeliinide vabastamiseks induktiivsest reaktiivvõimsusest, mida tekitavad näiteks elektrimootorid. Seda võtet nimetatakse **reaktiivvõimsuse kompensatsiooniks**. Kompensatsiooni korral liini kaudu võetakv reaktiivvõimsus väheneb, mis on näidatud joonisel 2.33d. Induktiivpool ja kondensaator vahetavad omavahel ise energiat ja nad ei ole üksteisest

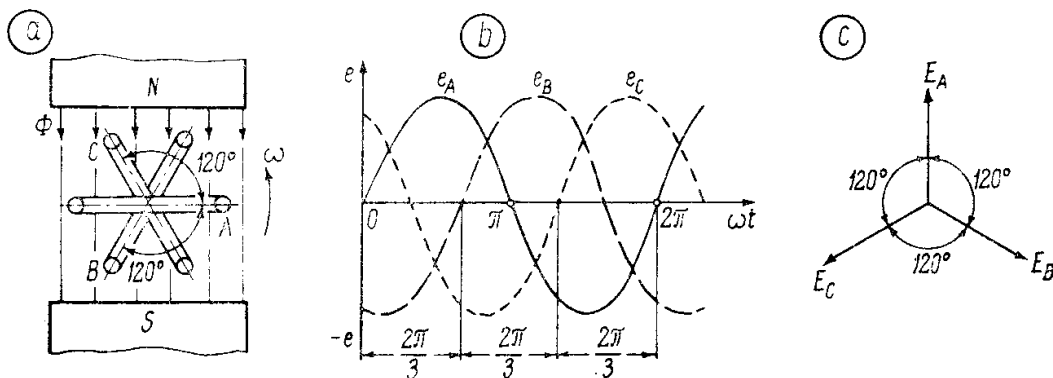
kaugel. Ettevõttel on seega vabadus valida, kas kompenseerida reaktiivenergia ise kondensaatorpatarei abil või osta see reaktiivenergia elektrivõrgult.

Kui reaktiivvõimsus on aktiivvõimsusest palju väiksem (joon. 2.33e), siis võib kondensaatorpatarei muretsemine ennast mitte õigustada. Kui aga kondensaatorpatarei siiski panna, võime me reaktiivvõimsuse kompenseerida (joon. 2.33f).

2.3.5. Kolmefaasilised vahelduvvoolu ahelad

Kolmefaasilised ahelad moodustatakse kolmest ühefaasilisest ahelast. Nende ühefaasiliste ahelate toitepingeid tekitatakse harilikult ühes ja samas vahelduvpinge generaatoris. Ajaliselt on eri faaside pinged ühe kolmandiku perioodi võrra nihutatud (joon. 2.35). Faase tähistatakse harilikult ladina tähtedega A, B ja C. Kolme faasi elektromotoorjõudude hetkväärtused on:

$$e_A = E_m \cdot \sin \varphi t; \quad e_B = E_m \cdot \sin(\varphi t - 120^\circ); \quad e_C = E_m \cdot \sin(\varphi t + 120^\circ) \quad (3.39)$$



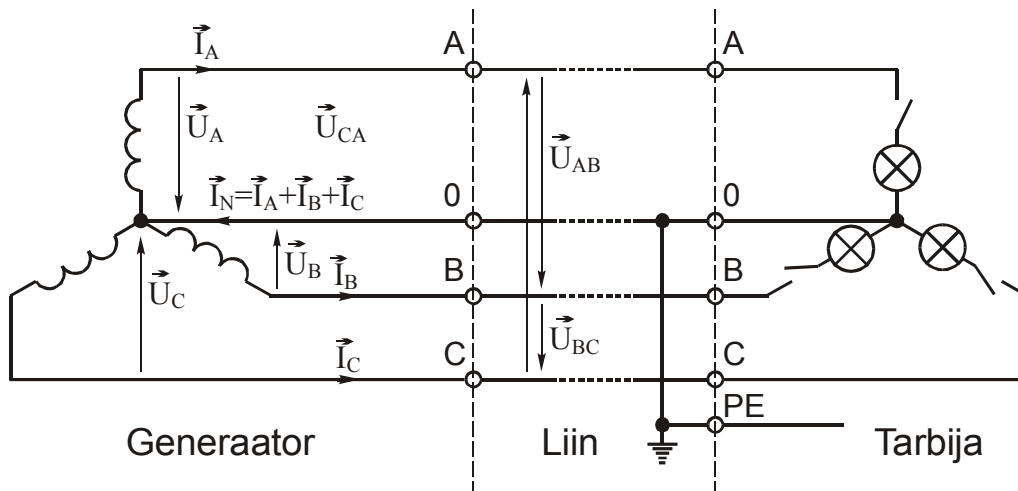
Joon. 2.35. Kolmefaasilise generaatori mudel (a), elektromotoorjõudude graafikud (b) ja vektordiagramm (c)

Kolme üksteisega seotud faasi nimetatakse kolmefaasiliseks süsteemiks.

2.3.5.1. Kolmefaasilise süsteemi tähtühendus

Kui me ühendame kolmefaasilise generaatori mähiste lõpud kokku, siis saame me neljajuhtmelise pingesüsteemi. Seal on faaside A, B, ja C väljundklemmid ja mähiste ühenduspunkt, mida nimetatakse **nullpunktiks** ehk **neutraaliks**.

Generaatorist läheb tarbijatele neljajuhtmeline liin, kus on kolm liinijuhet A, B ja C ja null ehk neutraaljuhe. Voolusid I_A , I_B , I_C nimetatakse liinivooludeks.



$$U_A = U_B = U_C = 220\text{V}; U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 380\text{V}$$

Joon. 2.36. Kolmefaasiline süsteem tähtühenduses

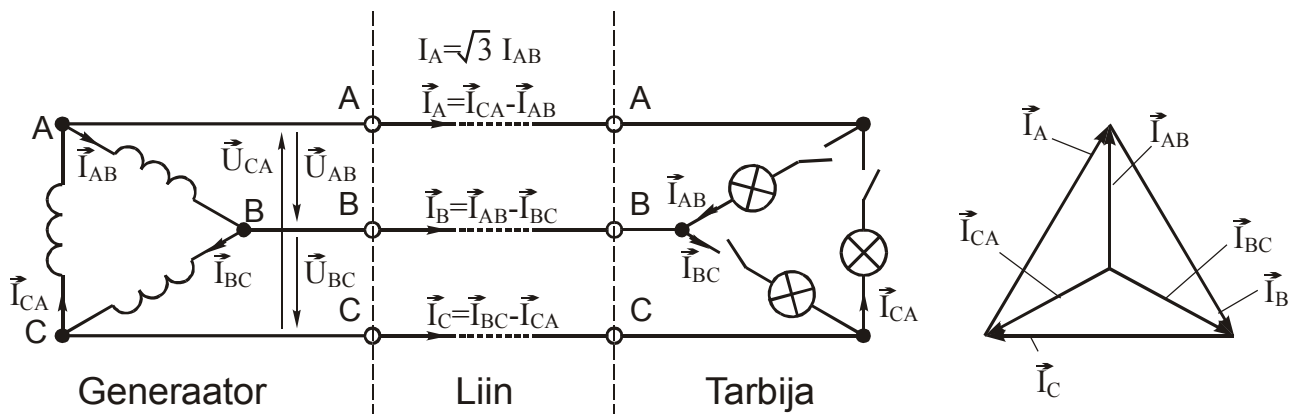
Kui kõikides faasides on ühesugused võrdse võimsusega tarbijad, siis on voolud I_A , I_B , I_C võrdsed ja üksteisest faasis 120° nihutatud. Nende voolude summa on võrdne nullliga. Sellist juhtu nimetatakse sümmeetriliseks koormuseks. Sümmeetrilisel koormusel nulljuhtmes vool puudub ja nulljuhtme võib ära jätta. Siis on tegemist kolmejuhtmelise kolmefaasilise süsteemiga. Seda kasutatakse ülekandeliinides.

Tootmishoonete ja elumajade madalpingevõrgud on tavaliselt viiejuhtmelised: faasid A, B ja C, nulljuhe ja viiendaks on maatühendusjuhe (kaitsemaandus). Nulljuhe ühendatakse kaitsemaandusega (PE) ühes punktis hoonesse sisenemisel, kuid edasi kulgevad nulljuhe (sinist värvi) ja kaitsemaandus (kollase ja roheline triibuline) eraldi ja isoleeritult. Kaitsemaanduse juhe ei ole normaalolukorras vooluga koormatud. Pinged liinijuhtmete vahel (tähis U_l) on $\sqrt{3}$ korda suuremad kui pinged nulljuhtme ja liinijuhtme vahel (seda väiksemat pinget nimetatakse faasipingeks U_f)

$$U_l = \sqrt{3} U_f. \quad (3.40)$$

Euroopa maades ja ka Eestis on kasutusel süsteem, kus faasipinge $U_f = 230\text{V}$ ja liinipinge $U_l = 400\text{V}$ (N Liidu aegadel oli $U_f = 220\text{V}$ ja $U_l = 380\text{V}$). Need pingete väärtused on nimipinged: tegelik pinge võrgus harilikult erineb nimiväärtusest, kuid pingeerinevus peab jääma lubatud piiridesse. Lubatud pingeerinevus on $\pm 10\%$ nimipingest.

2.3.5.2. Kolmefaasiline süsteem kolmnurkühenduses



$$I_{CA} = I_{AB} = I_{BC} = 1\text{A}, I_A = I_B = I_C = 1,73\text{A}.$$

Joon. 2.37. Kolmefaasiline süsteem kolmnurkühenduses

Generaatori mähistel võib ühendada ka ühe faasi lõpu järgmise faasi algusega (joon. 2.37). Nii saadakse kolmnurkühendus. Kolmnurkühenduses puudub nulljuhe. Tarbijad on ühendatud faasijuhtmete vahele. Pinged liinijuhtmete vahel on võrdsed tarbijate pingetega. Kuid voolud liinis (I_A, I_B, I_C) on suuremad kui faasivoolud (I_{AB}, I_{BC}, I_{CA}).

$$I_l = \sqrt{3}I_f, \quad (3.41)$$

kus I_l - liinivool,
 I_f - faasivool.

Põhjus on selles, et liinivool saadakse kahe 120° -se nurga all oleva faasivoolu liitmisest (vektordiagramm joonisel 2.37).

Kolmefaasilise süsteemi võimsus P on võrdne kolme faasi võimsuste summaga.

$$P = 3P_f = 3 \cdot U_f I_f \cos \varphi. \quad (3.42)$$

Võimsuse arvutamiseks saab kasutada ka liinisuurusi. Tähtühenduse korral on liini- ja faasivoolud võrdsed, kuid pinged erinevad. Järelikult

$$P = 3 \cdot \frac{U_l}{\sqrt{3}} \cdot I_l \cdot \cos \varphi = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi \quad (3.43)$$

Kolmnurkühenduse korral on liini- ja faasipinged võrdsed, kuid voolud erinevad. Järelikult

$$P = 3 \cdot U_l \cdot \frac{I_l}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi \quad (3.44)$$

Seega kujuneb arvutusvalem mõlemal ühendusviisil ühesuguseks. Avaldised (3.43) ja (3.44) kehtivad ainult sümmeetriliste tarbijate korral, kus kõikide faaside voolud on võrdsed.

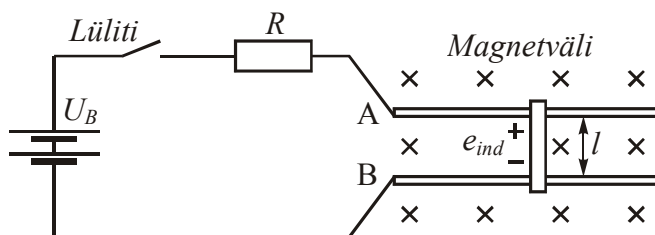
Näivvõimsuse S ja reaktiivvõimsuse Q võib sümmeetriliste tarbijate puhul kolmefaasilises süsteemis leida järgnevalt

$$S = \sqrt{3}UI, \quad (3.45)$$

$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi. \quad (3.46)$$

2.4. Lineaarne DC-masin – lihtne näide

Lineaarne DC-masin (*a linear dc machine*) on lihtsaim ja kõige kergemini arusaadavam DC masin, kuid ta töötab samadel põhimõtetel ja tal on samad omadused kui reaalsel generaatoritel ja mootoritel. Lineaarsed masinad annavad kulgliikumise, tavalised pöörleva liikumise.



Joonis 2.38. Lineaarne DC-masin. Magnetväli on suunatud lehele ülalt alla

Lineaarset DC-masinat toidetakse patareist resistori R kaudu (joonis 2.38). Pinge antakse punktides A ja B siledale hõõrdevabale relsipaarile. Piki seda relsiteed on konstantne ühtlane magnetväli, mis on suunatud ülalt alla risti joonise tasapinnaga. Relstee peale risti on pandud voolu juhtiv metall-latt.

Selle lati liikumine põhineb neljal masina põhivalemil:

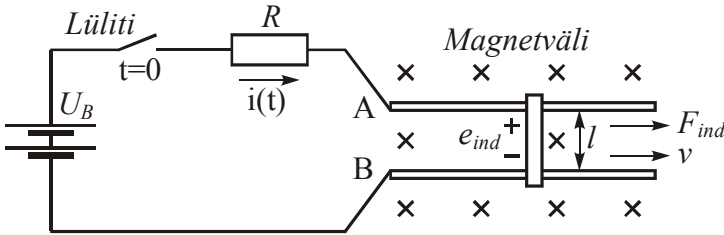
1. Võrrand juhtmele mõjuva jõu kohta magnetvälja olemasolu korral: $F = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$, kus F on juhtmele mõjuv jõud; i on voolu suurus juhtmes; \mathbf{l} on juhtme pikkus, tema suund on defineeritud voolu suunaga; \mathbf{B} on magnetvootiheduse vektor.
2. Võrrand pinge kohta, mis indutseeritakse magnetväljas liikuvast juhtmes: $e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}$, kus e_{ind} on juhtmes indutseeritud pinge; \mathbf{v} on juhtme kiirus; \mathbf{B} on magnetvootiheduse vektor; \mathbf{l} on juhtme

pikkus magnetväljas.

3. Kirchhoffi pingeseadus selle masina kohta. Jooniselt saame $U_B - iR - e_{ind} = 0$, kus U_B on patarei pinge ja R resistori takistus. Teisendamisel $U_B = e_{ind} + iR$.
4. Newtoni seadus lati kiirenduse kohta: $F = ma$, kus F on latile mõjuv jõud, m on lati mass ja a on lati kiirendus.

Nüüd vaatleme lihtsa DC-masina põhiomadusi, kasutades neid nelja põhivalemit.

2.4.1. Lineaarse DC-masina käivitamine



Joonis 2.39. Lineaarse DC-masina käivitamine

Masina käivitamiseks tuleb lülitata ta sisse. Nüüd tekib latis vool, mille saab arvutada Kirchhoffi pingeseaduse järgi: $i = (U_B - e_{ind})/R$. Kuna esialgu lattu ei liigu, siis $e_{ind} = 0$ ja $i = U_B/R$. Vool latis on suunatud plussilt miinusele. Valemi (2.7) alusel, kui juhtmes on vool ja ta asub magnetväljas, siis magnetväli indutseerib juhtmes jõu. See jõud on

$$F_{ind} = ilB \text{ (suunaga paremale joonisel 2.39).}$$

Seega lattu saab kiirenduse paremale (Newtoni seaduse järgi $a = F/m$). Lati liikumisel indutseeritakse latis pinge $e_{ind} = vBl$ (pluss on üleval otsas).

Selle pinge mõjul vool väheneb $i \downarrow = (U_B - e_{ind} \uparrow)/R$. Kui suureneb e_{ind} , siis vool i väheneb.

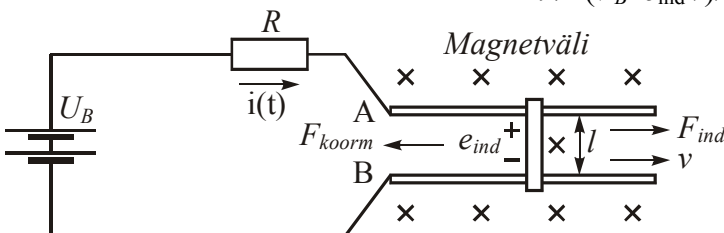
Selle tulemusel saavutab lattu lõpuks konstantse püsikiiruse, mil latile mõjuv neto-jõud on null. Sel juhul on indutseeritud pinge e_{ind} võrdne pinge U_B väärtusega. Sel juhul lattu liigub kiirusega, mille saame valemist: $U_B = e_{ind} = v_0Bl$, saame $v_0 = U_B/Bl$.

Lattu jätkab liikumist selle tühijooksukiirusega (*no-load speed*) seni, kuni temale ei hakka mõjuma mingi väline jõud. Pärast mootori käivitamist on tal kiirus v , indutseeritud pinge e_{ind} , vool $i = 0$, ja indutseeritud jõud $F_{ind} = 0$, nagu on näidatud joonisel 2.41. See on niinimetatud ideaalne tühijooks, kus hõõrdekadusid ei arvestata.

2.4.2. Lineaarne DC-masin mootorina

Oletame, et lineaarne masin töötab esialgu tühijooksu püsioleku tingimustes, nagu on kirjeldatud eespool. Nüüd rakendatakse masinale väline koormus, milleks on latile mõjuv jõud F_{koorm} (liikumisele vastassuunas, vt joonis 2.40). Nüüd mõjub latile tema liikumise vastassuunas neto-jõud $F_{net} = F_{koorm} - F_{ind}$. See jõud püüab vähendada lati kiirust. Kuid kiiruse vähendamisel väheneb ka indutseeritud pinge $e_{ind} \downarrow = v \downarrow Bl$. Indutseeritud pinge vähenemisel suureneb latis vool

$$i \uparrow = (U_B - e_{ind} \downarrow)/R.$$



Joonis 2.40. Lineaarne DC-masin mootorina

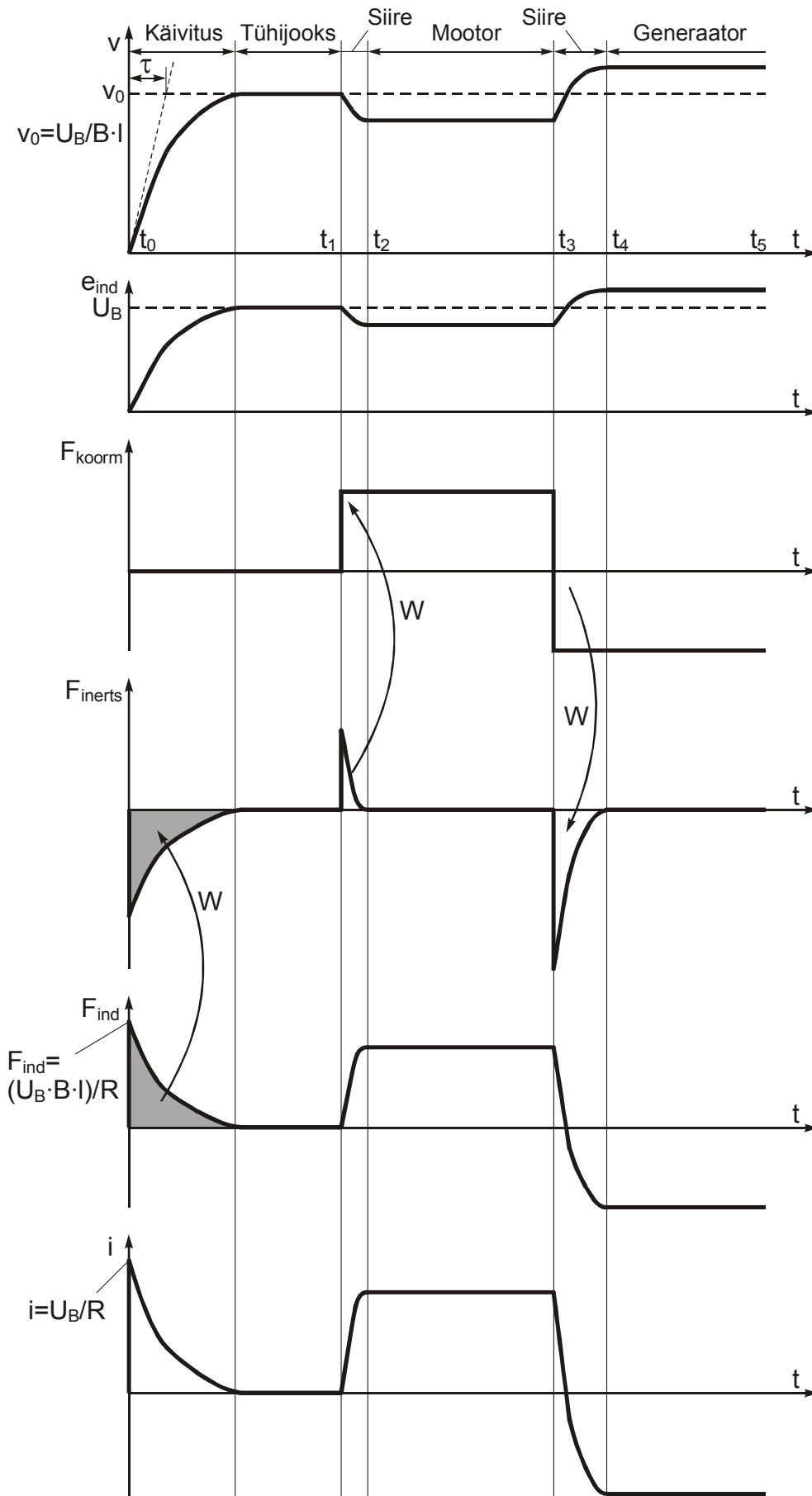
Sellega suureneb ka indutseeritud jõud $F_{ind} = i \uparrow l B$. Lõpptulemusena suureneb indutseeritud jõud seni, kuni ta saab võrdseks koormusjõuga, nüüd liigub latt püsikiirusega, kuid natuke madalama kiirusega. Kui latile rakendatakse jõud, siis tema kiirus v , indutseeritud pinge e_{ind} , vool i ja indutseeritud jõud F_{ind} muutuvad vastavalt joonisele 2.41, ajaintervall t_1, t_3 .

Nüüd mõjub latile indutseeritud jõud tema liikumise suunas ning võimsus muundatakse elektriliselt kujult mehaanilisele kujule, et hoida lati liikumist. Muudetav võimsus on

$$P_{conv} = e_{ind} i = F_{ind} v.$$

Latilt võetakse elektrilist võimsust $e_{ind} i$ ja asendatakse mehaanilise võimsusega $F_{ind} v$. Kuna võimsus muundatakse elektriliselt mehaanilisele kujule, siis latt toimib mootorina. Selle toime võime võtta kokku järgmiselt:

1. Rakendatakse jõud F_{koorm} vastu liikumissuunale, see jõud tekitab neto-jõu F_{net} vastu liikumissuunale.
2. Tekkiv kiirendus $a = F_{net}/m$ on negatiivne, lati liikumine aeglustub ($v \downarrow$).
3. Pinge $e_{ind} = v \downarrow l B$ väheneb ja seepärast $i = (V_B - e_{ind} \downarrow)/R$ suureneb.
4. Indutseeritud jõud $F_{ind} = i \uparrow l B$ suureneb seni, kuni $|F_{ind}| = |F_{koorm}|$ madalamal kiirusel v .
5. Elektriline võimsus, mis võrdub $e_{ind} i$, muundatakse mehaaniliseks võimsuseks, mis võrdub $F_{ind} v$, ja masin toimib mootorina.



Joonis 2.41. Elektrimasina tööprotsessid

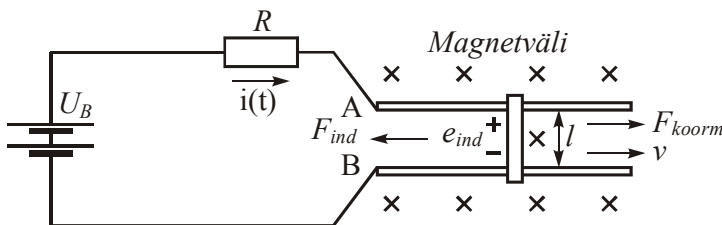
Reaalne DC-mootor toimib koormamisel samal viisil: koormuse lisamisel võllile algab kiiruse vähenemine, mille tulemusel väheneb masinasisene pinge ning suureneb vool. Voolu suurenemisel suureneb indutseeritud moment seni, kuni indutseeritud moment võrdub koormusmomendiga uuel madalamal kiirusel.

Märgime, et elektriliselt kujult mehaanilisele muundatava võimsuse saame selle lineaarse mootori korral valemiga $P_{conv}=F_{ind}v$. Realse pöörleva mootori korral saame muundatava võimsuse valemiga $P_{conv}=T_{ind}\omega$, milles indutseeritud moment T_{ind} on indutseeritud jõu F_{ind} pöörlemise analoog, ja nurkkiirus ω on lineaarse kiiruse v pöörlemise analoog.

2.4.3. Lineaarne DC-masin generaatorina

Seekord rakendame latile jõu F_{koorm} tema liikumise suunas. Nüüd hakkab latt kiirenema liikumise suunas ja lati kiirus v suureneb. Kiiruse suurenemisel suureneb $e_{ind}=v\uparrow Bl$, mis muutub patarei pingest suuremaks. Kuna $e_{ind}>U_B$, siis vool muudab suunda ja avaldub nüüd valemiga

$$i=e_{ind}-U_B/R.$$



Joonis 2.42. Lineaarne DC-masin generaatorina

Kuna nüüd on voolu suund latis alt ülespoole (joonisel 2.42), siis latile indutseeritud jõud $F_{ind}=iB$ mõjub vasakule. Indutseeritud jõu suuna saab määrata parema käe reegluga. Indutseeritud jõud mõjub vastu latile rakendatud jõule.

Lõpuks saab indutseeritud jõud võrdseks ja vastassuunaliseks rakendatud jõuga ja latt liigub kõrgema kiirusega kui enne (ajaintervall t_3, t_5 joonisel 2.41). Veenduge, et nüüd toimub patarei laadimine. Nüüd toimib lineaarmasin generaatorina, muundades mehaanilist võimsust $F_{ind}v$ elektriliseks võimsuseks $e_{ind}i$.

Selle toime võime võtta kokku järgmiselt:

1. Rakendatakse jõud F_{koorm} liikumise suunas, tekib neto-jõu F_{net} liikumise suunas.
2. Kiirendus $a=F_{net}/m$ on positiivne, lati kiirus suureneb ($v\uparrow$).
3. Pinge $e_{ind}=v\uparrow Bl$ suureneb ja seepärast $i=(U_B-e_{ind})/R$ suureneb.
4. Indutseeritud jõud $F_{ind}=i\uparrow B$ suureneb seni, kuni $|F_{ind}|=|F_{koorm}|$ kõrgemal kiirusel v .
5. Mehaaniline võimsus, mis võrdub $F_{ind}v$, muundatakse nüüd elektriliseks võimsuseks, mis võrdub $e_{ind}i$, ja masin toimib generaatorina.

Jällegi, reaalne DC-generaator toimib samal viisil: kui võllile rakendatakse moment liikumise suunas, siis võlli kiirus suureneb, sisemine pinge suureneb ja tekib vool generaatorist koormusele.

Mehaanilise võimsuse, mis muundatakse elektrilisele kujule, saame reaalses pöörlevas generaatoris jälle valemiga

$$P_{conv}=T_{ind}\omega.$$

Huvitav on märkida, et sama masin toimib nii mootorina kui ka generaatorina. Ainuke erinevus seisneb selles, kas väline rakendatud jõud on liikumise suunas (generaatori korral) või liikumisele vastassuunas (mootoril). Elektrilisest seisukohast, kui $e_{ind}>U_B$, siis masin toimib generaatorina ning kui $e_{ind}<U_B$, siis mootorina. Mõlemal juhul tekib nii indutseeritud jõud (mootori toime) kui ka indutseeritud pinge (generaatori toime). Sama kehtib ka teiste masinate kohta – alati esinevad

mõlemad toimed ja ainult väliste jõudude suunad liikumissuuna suhtes määravad masina toime mootorina või generaatorina.

Teiseks huvitavaks asjaoluks on see, et vaadeldud masina kiirus oli suurem generaatorina töötamisel ja väiksem mootorina töötamisel, aga mõlemal juhul oli pöörlemissuund sama. Kui tudeng arvab, et mootor pöörleb ühes suunas, aga generaator teises suunas, siis ta eksib. Erinevuseks on vaid väike kiirusemuutus.

Lihtsa lineaarse masina näite põhjal võime teha ka järgmised tähelepanekud.

- Kiiruse muutus ei ole kunagi hüppeline. Põhjuseks on masina mehaaniline inert. Kiiruse muutumisel muutub liikuvatesse osadesse salvestatud kineetiline energia. Käivitamisel võetakse see energia toiteallikast (viirutatud pinnad joonisel 2.41). Kiiruse langemisel antakse kineetiline energia kas koormusse (üldjuhul töömasinasse) või elektriskeemi tagasi. Olukorda, kus kiirus ei muutu, nimetatakse **püsitalitluseks**. Püsitalitlused võivad olla tühijooks, mootoritalitus, generaatoritalitus või mõni muu talitus. Ühelt talitlusest teisele üleminekut nimetatakse **siirdeprotsessiks** ehk **siirdeks**. Joonisel 2.41 näidatud käivitus on siire paigalseisult tühijooksule.
- Indutseeritud elektromotoorjõu (e_{ind}) ja kiiruse (v) ostsillogrammid on sarnased, kui induktsioon (B) ei muutu, sest $e_{ind}=Blv$. Kiirus ja emj. muutuvad alati koos ja ühes suunas. Liikumis- (või pöörlemis-) suunda saab muuta toitepinge polaarsuse muutmisega.
- Indutseeritud jõu (F_{ind}) ja voolu (i) ostsillogrammid on samuti sarnased, sest $F=Blv$. Jõud (või moment pöörleval liikumisel) ja vool muutuvad alati koos ja ühes suunas.
- Kui mootoritalitluses on vool positiivne, siis generaatoritalitluses muutub ta negatiivseks. Kui vool on null ja masin liigub, siis on tegemist ideaalse tühijooksuga. Tühijooks ei kuulu ei mootoritalitluse ega generaatoritalitluse.
- Generaatori- ja mootoritalitus võivad esineda masina mõlemal pöörlemissuunal (päripäeva või vastupäeva). Seega on kokku neli erinevat talitlust: päripäeva mootoritalitus, päripäeva generaatoritalitus, vastupäeva mootoritalitus ja vastupäeva generaatoritalitus.

2.4.4. DC-masina käivitusvoolu piiramise vajadus

Vaatleme masinat, mille toitepinge on 250 V dc ja sisetakistus 0.10 Ω (need on keskmise võimsusega DC-masina andmed).

Käivitustingimistel on kiirus null ja $e_{ind}=0$ ning tekib vool $i_{start}=U_B/R=250\text{ V}/0,1\ \Omega=2500\text{ A}$. See vool on väga suur, ta ületab määratud voolu (*rated current*) ehk nimivoolu üle 10 korra. Nii suur vool võib vigastada mootorit.

Kõige lihtsamaks voolu piiramise viisiks käivitamisel on lisatakistuse R_{start} ühendamine ahelasse. Kiiruse kasvamisel suureneb e_{ind} ja lisatakistuse võib eemaldada.