

## 6 Vahelduvvool

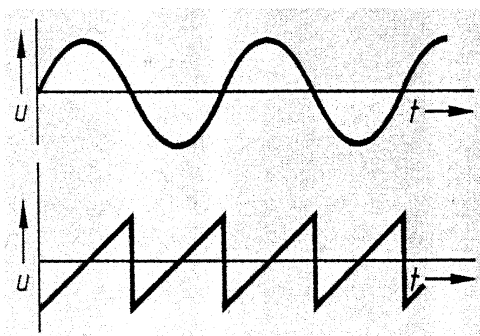
### 6.1 Vahelduvvoolu mõiste

Vahelduvvooluks nimetatakse voolu, mille suund ja tugevus ajas perioodiliselt muutub.

Tänapäeva elektrijaotusvõrkudes on kasutusel vahelduvvool. Alalisvoolu kasutatakse seal, kus on vaja võrgust sõltumatut toiteallikat – akut autol või taskutelefonis, toiteelementi käe- või seinakellas. Alalisvooluga töötab praegu veel enamus transpordivahendeid – elektrirong, tramm, trollibuss. Elektrienergia saadakse nende jaoks aga vahelduvvooluvõrgust alaldusalajaamade kaudu. Alalisvooluga töötavad ka elektrokeemilised ja galvaanikaseadmed.

Alalisvool, mida seni vaatlesime, on ajalooliselt varem tuntud ja lihtsam. Lihtsamad on ka teda kirjeldavad matemaatilised seosed. Paljud neist kehtivad ka vahelduvvoolu korral, palju on ka erinevusi.

Vahelduvvoolu saamiseks enamkasutatav on siinuspinge, raadiotehnikas kasutatakse näiteks ka saehammaspinget.



Käesolevas peatükis tuleb vaatluse alla siinuseline vahelduvvool.

Elektrienergia tootmise, jaotamise ja tarbimise seisukohalt on vahelduvvoolul alalisvoolu ees rida eeliseid:

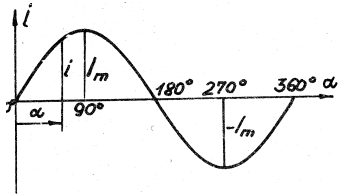
- vahelduvvoolugeneraatorite jõuahelad on kontaktivabad – seal puudub vajadus voolu ülekandeks pöörlevalt rootorilt
- vahelduvpinge lihtne muundamine trafoga kõrgepingeliseks ja tagasi vähendab oluliselt ülekandekadusid elektrivõrkudes
- vahelduvvoolumootorid on lihtsamad, odavamad ja töökindlamad kui alalisvoolumootorid; alates XX sajandi viimasest veerandist aga ka samahästi reguleeritavad.

## 6.2 Vahelduvvoolu periood ja sagedus

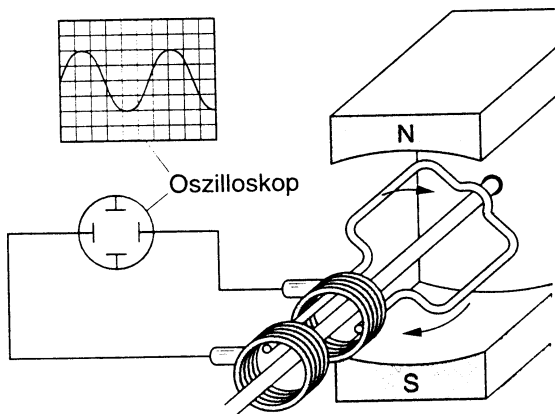
Siinuseline vahelduvvool on kirjeldatav võrrandiga

$$i = I_m \sin \alpha,$$

- $i$  voolu hetkväärtus amprites (A)  
 $I_m$  voolu maksimaalväärtus amprites (A)  
 $\alpha$  pöördenurk



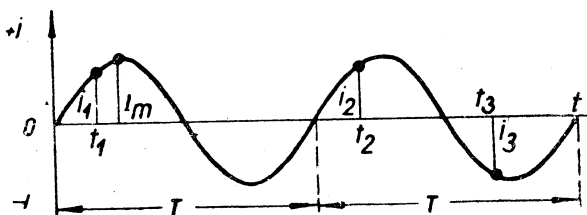
Seda tekitab siinuseline elektromotoorjõud, mis saadakse vahelduvvoolugeneraatoris. Siinuselise elektromotoorjõu generaatori mudelina võib vaadelda juhtmekeerdu magnetväljas:



Muutuva suuruse väärtus mingil hetkel kannab nimetust **hetkväärtus** ja seda tähistatakse väiketähega. Seega on  $i$  voolu hetkväärtuse tähis,  $u$  pinge hetkväärtuse tähis jne.

Perioodiliselt muutuva suuruse suurimat hetkväärtust nimetatakse maksimaalväärtuseks ehk amplituudiks ja tähistatakse suurtähega koos indeksiga  $m$ . Vooluamplituudi tähis on siis  $I_m$  ja pingeamplituudil  $U_m$ .

Ajavahemikku, mille vältel muutuv suurus teeb ühekordselt läbi kõik oma muutused, nimetatakse **perioodiks**, tähistatakse tähega  $T$  ja mõõdetakse sekundites.



Poolperioodi vältel kulgeb vool ühes (positiivses) suunas ja järgmise poolperioodi vältel vastassuunas (negatiivses suunas).

Perioodide arvu sekundis ehk perioodi pöördväärtust nimetatakse vahelduvvoolu **sageduseks** ja tähistatakse tähega  $f$ . Sageduse mõõtühikuks on herts (Hz) saksa füüsiku Heinrich Herti (1857-1894) auks.

$$f = \frac{1}{T}$$

$f$  sagedus hertsides (Hz)  
 $T$  periood sekundites (s)

Üks herts tähendab ühte perioodi sekundis. Suuremaid sagedusi mõõdetakse kilohertsides (kHz), megahertsides (MHz), gigahertsides (GHz) ja terahertsides (THz)

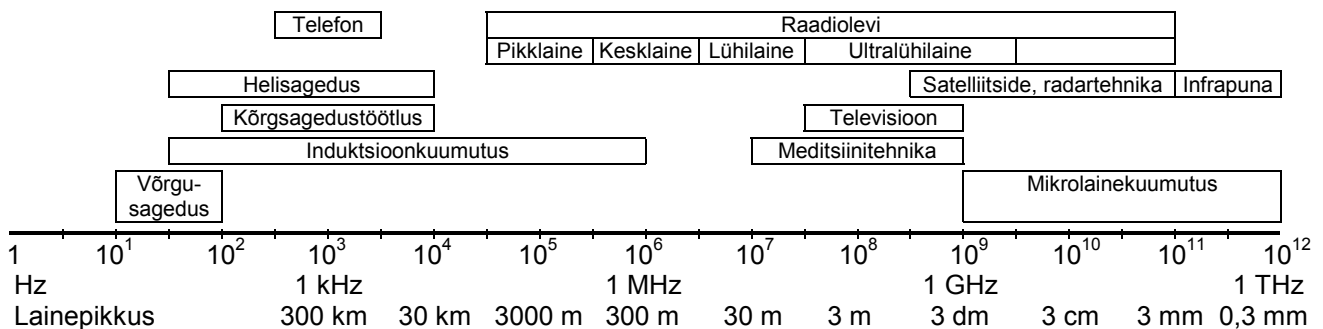
kiloherts 1 kHz =  $1 \cdot 10^3$  Hz = 1000 Hz  
 megaherts 1 MHz =  $1 \cdot 10^6$  Hz = 1000 000 Hz  
 gigaherts 1 GHz =  $1 \cdot 10^9$  Hz = 1000 000 000 Hz  
 teraherts 1 THz =  $1 \cdot 10^{12}$  Hz = 1000 000 000 000 Hz

Tööstusliku vahelduvvoolu sageduseks on Eestis ja enamikus Euroopa maades 50 Hz. Raadio- ja televisioonitehnikas on kasutusel palju kõrgemad sagedused. Ülevaate eri sagedusega voolude kasutusaladest saab alljärgnevalt jooniselt. Raadiotehnikas kasutatakse ka lainepikkuse mõistet. Lainepikkuseks  $\lambda$  (kreeka väiketäht *lambda*) nimetatakse kaugust, milleni levib elektromagnetiline laine perioodi  $T$  kestel

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}$$

$\lambda$  lainepikkus meetrites (m)  
 $c$  300 000 km/s – elektromagnetiliste lainete levimiskiirus vaakumis.

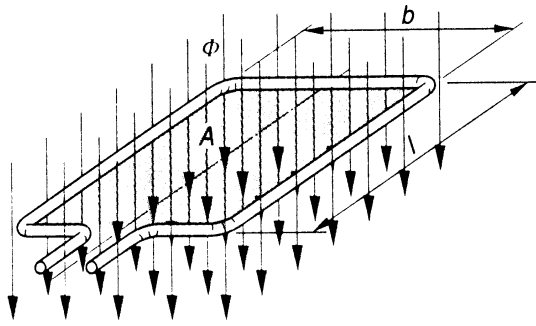
### Eri sagedusega vahelduvvoolu kasutusalad



### 6.3 Siinuselise elektromotoorjõu saamine

Siinuselektromotoorjõudu võib saada, kui homogeenses magnetväljas konstantse nurkkiirusega pöörata juhtmekeerdu ümber telje, mis on risti magnetjõujoonte suunaga

Kui juhtmekeeru pöörlemissagedus ehk **nurksagedus**  $\omega = \alpha/t$  ja kui alghetkel  $t = 0$  on keerd algasendis, nagu joonisel, horisontaalselt, siis keeru aktiivkülgedes indutseeritakse elektromotoorjõud



$$e_1 = e_2 = Blv \sin a = Blv \sin \omega t.$$

Kuivõrd keeru küljed on ühendatud jadamisi, siis keerus indutseeritud emj.

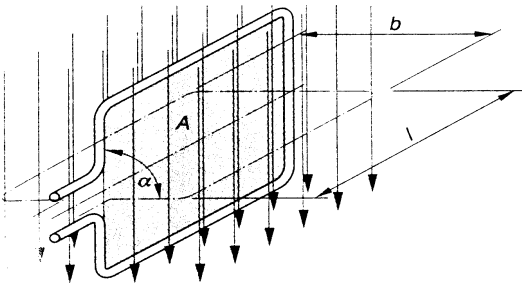
$$e = e_1 + e_2 = 2Blv \sin \omega t.$$

Kui keeru asemel on pool, millel on  $w$  keerdu, siis on summaarne emj.  $w$  korda suurem:

$$e = 2Blwv \sin \omega t.$$

Kui juhtmekeerd või pool on algasendis, siis  $\sin \omega t = 0$  ja  $e = 0$ .

Kui juhtmekeerd või pool on pöördunud 90 kraadi, siis  $\sin \omega t = 1$  ja emj. on maksimaalne:



$$E_m = 2Blwv.$$

Poolis indutseeritav elektromotoorjõud

$$e = E_m \sin \omega t$$

- $e$  elektromotoorjõu hetkväärtus voltides (V)
- $E_m$  elektromotoorjõu amplituudväärtus voltides (V)
- $\omega$  nurksagedus radiaanides sekundis (rad/s)
- $t$  aeg sekundites (s).

Pooli pöörlemisel konstantse kiirusega läbib elektromotoorjõud ühe pöörde ( $\alpha = 2\pi$ ) vältel terve tsükli, mis vastab ühele perioodile ( $t = T$ ), ja

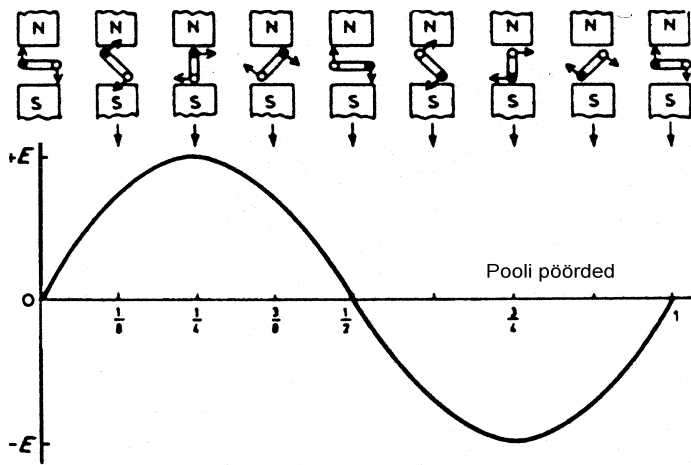
$$\text{pöörlemise nurkkiirus } \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f.$$

Analoogiliselt siinusvool

$$i = I_m \sin \omega t$$

ja siinuspinge

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

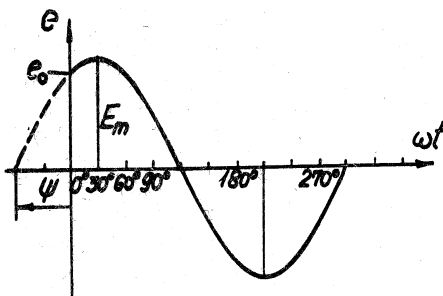


### 6.4 Faasinurk ja faasinihe

Võrkulülitamise hetkel kui  $t=0$ , ei pruugi võrgupinge omada nullväärtust. Küllalt suure tõenäosusega  $\alpha = \psi \neq 0$ , kus  $\psi$  (kreeka väiketäht *psi*) on algaasinurk ehk algaas. Siis

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

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

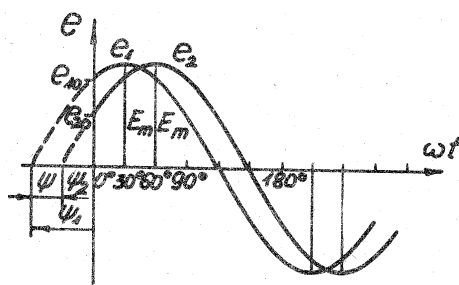


Ajahetkel  $t = 0$ , kui joonisel algab vaatlus, on elektromotoorjõu perioodi algusest on möödunud  $60^\circ$  ehk  $\pi/3$ . Selle emj. algaas on  $60^\circ$ .  $\omega t = 0$  ja elektromotoorjõu **alghetkväärtus**

$$e_0 = E_m \sin \psi.$$

Positiivne algaas jääb koordinaatide algpunktist vasakule, negatiivne – paremale.

Kui kaks sama sagedusega siinuskõverat on teineteise suhtes ajaliselt nihutatud, siis räägitakse faasinihkkest ja faasinihkenurgast.



Joonisel on kaks elektromotoorjõu sinusoidi algfaasiga  $\psi_1 = 60^\circ$  ja  $\psi_2 = 30^\circ$ . Nende hetkväärtused on

$$e_1 = E_m \sin(\omega t + \psi_1) \text{ ja}$$

$$e_2 = E_m \sin(\omega t + \psi_2).$$

Faasinihe

$$\psi = \psi_1 - \psi_2 = 60^\circ - 30^\circ = 30^\circ.$$

**Faasilt eesolev** 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 *fi*). See võib olla mõõdetud nii amplituudi- kui nullväärtuste vahel. Üldisemalt

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

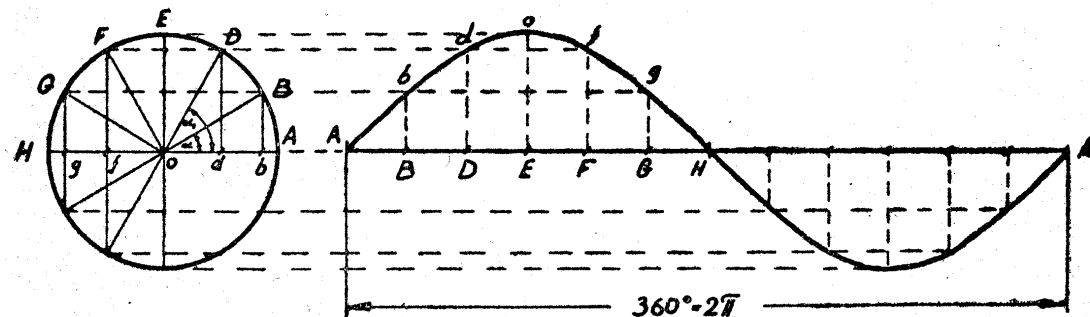
- $\varphi$  faasinihkenurk
- $\psi_1$  esimese, pinge siinuskõvera algfaas
- $\psi_2$  teise, voolu siinuskõvera algfaas

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**.

## 6.5 Vektordiagramm

Siinussuurus on määratud, kui on teada ta amplituudväärtus, sagedus ja algfaas. Graafiliselt kujutatakse siinussuursi kas sinusoidina, nagu eelpool, või pöörleva 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? Sinusoid kujutab vektori otsa liikumise projektsiooni püstteljel. Vektordiagramm tulenebki siinuskõvera joonestamise konstruktsioonist.



Olgu **vektoriks**, joonise mõõtkavas ringjoone raadiuseks, elektrilise suuruse, näiteks pinge amplituudväärtus ja ajamõõtmise alguseks hetk, kui see vektor on horisontaalasendis AO. Pinge hetkväärtus on siis null. Elektrikud vaatlevad seda

vektorit pöörlevana ühtlase kiirusega vastupäeva, positiivses st nurga kasvamise suunas. Vektoril OA kulub kaare AB läbimiseks samapalju aega kui kaare BD, DE jne läbimiseks. Siin on kaared ja nurgad valitud võrdsed, kõik  $30^\circ$  ehk  $\pi/6$ . Pöörlemisnurga suurenedes muutub vektori projektsioon vertikaalteljele ehk elektrilises tähenduses **hetkväärtus**. Asendis OF ( $90^\circ$  ehk  $\pi/2$ ) on hetkväärtus maksimaalne ehk **amplituudväärtus**, ning hakkab sealt edasi langema, jõudes poolpöördega asendis OH ( $180^\circ$  ehk  $\pi$ ) jälle tagasi nulliks. Edasi muutub hetkväärtus negatiivseks, saavutab amplituudväärtuse siis kui nurk on  $270^\circ$  ehk  $3\pi/2$  ja jõuab tagasi nulli täispöörde ehk **perioodi** ( $360^\circ$  ehk  $2\pi$ ) möödudes. Edasi kõik kordub.

Kui võrgusagedus on 50 hertsi, teeb pingektor nurksagedusega  $\omega = 2\pi f = 50$  pöört sekundis. Täisnurkses kolmnurgas OAB kujutab vertikaallõik AB (ja tema projektsioon sinusoidil ab) pinge hetkväärtust

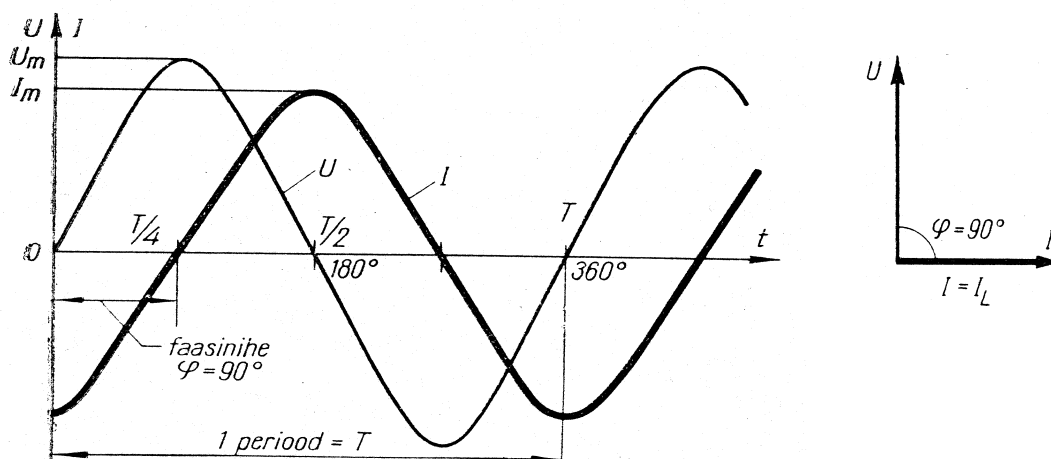
$$u = U_m \sin \alpha = U_m \sin \omega t.$$

Period		0	T/12	T/6	T/4	T/3	5T/12	T/2	7T/12	2T/3	3T/4	5T/6	11T/12	T
Nurk $\alpha$	kraadides	$0^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$150^\circ$	$180^\circ$	$210^\circ$	$240^\circ$	$270^\circ$	$300^\circ$	$330^\circ$	$360^\circ$
	radiaanides	0	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/2$	$2\pi/3$	$5\pi/6$	$\pi$	$7\pi/6$	$4\pi/3$	$3\pi/2$	$5\pi/3$	$11\pi/6$	$2\pi$
$\sin \alpha$		0	0,5	0,87	1	0,87	0,5	0	-0,5	-0,87	-1	-0,87	-0,5	0

Üht või mitut ühesuguse sagedusega siinussuurst kujutavat vektorit nimetatakse **vektordiagrammiks**. Vektordiagrammi moodustavate vektorite pöörlemisel jääb nende vastastikune asend muutmatuks.

Tavaliselt tuntakse huvi üksikute suuruste vahelise faasinihke vastu. See lubab vektordiagrammi koostamisel valida vabalt esimese vektori suuna, teised tuleb paigutada tema suhtes nurga alla, mis on võrdne selle suuruse faasinihkenurgaga.

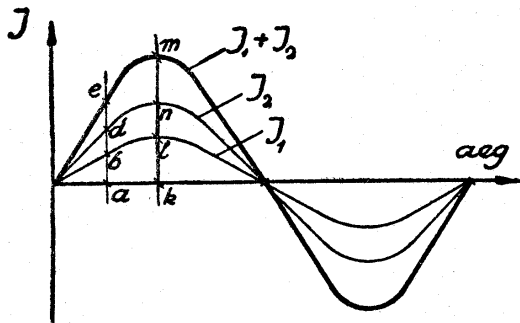
Järgnevalt näitena pinge- ja voolusiinused ja nende vektordiagramm:



## 6.6 Siinussuuruste liitmine

Vahelduvvooluahelate arvutamisel tuleb sageli liita siinuseliselst muutuvaid suurusid.

Kaht siinussuurust saab liita neid graafiliselt kujutavate sinusoidide liitmise teel. Kui näiteks on voolud **faasis**, siis mõjuvad nad alati üheaegselt ühes suunas ja nende summa on maksimaalne.



Siinuste liitmisel tuleb liita hetkväärtused. Ajahetkel  $a$  on summaarse voolu hetkväärtus

$$ae = ab + ad;$$

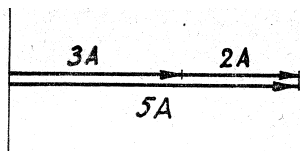
ajahetkel  $k$  aga

$$km = kl + kn.$$

Niiviisi voolude hetkväärtusi  $i_1$  ja  $i_2$  liites saab summaarse voolu  $i = i_1 + i_2$ , voolude amplituudväärtusi – vektoreid – liites aga koguvoolu vektori

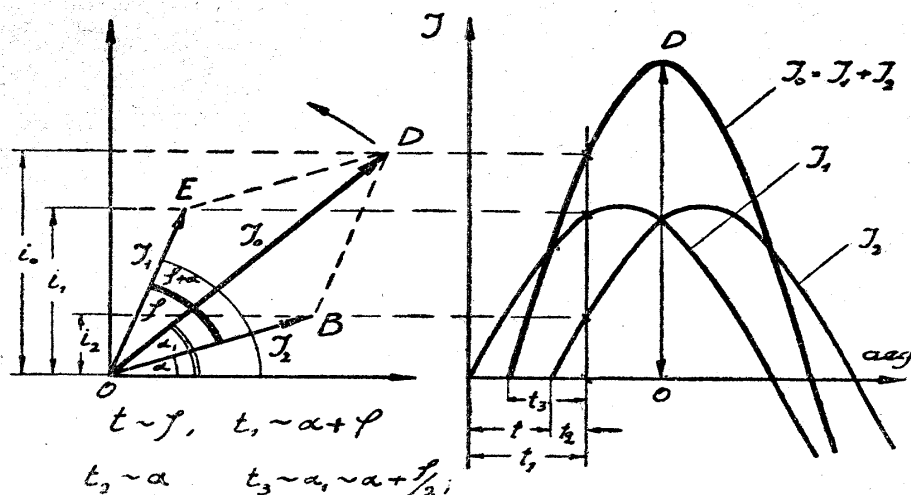
$$I = I_1 + I_2.$$

Kui  $I_1$  amplituud on näiteks 2 A ja  $I_2$  amplituud 3 A, siis vektordiagrammil väljenduks see nii:



Niisugune olukord esineb näiteks küttekehade rööplülitusel. Küttekehades on vool pingega faasis.

**Üldjuhul** võib vahelduvvooluahelas iga tarviti vool olla pinge suhtes erineva faasinihkega, näiteks nii, nagu kujutatud järgmisel joonisel.





Siin võib samamoodi graafilisel liitmisel saada koguvoolu väärtuse. Lihtsam on aga vooluväärtuste liitmine vektordiagrammis.

Siin on voolud  $I_1$  ja  $I_2$  faasis nihutatud nurga  $\varphi$  võrra. Nende voolude amplituudväärtusi ehk maksimaalväärtusi iseloomustavad vektorid OB ja OE. Voolude hetkväärtused  $i_1$  ja  $i_2$  vaadeldaval ajahetkel  $t_1$  võrduvad  $I_1$  ja  $I_2$  projektsioonidele. Neid projektsioone liites saab koguvoolu

$$i = i_1 + i_2.$$

Üksteisest nurga  $\varphi$  võrra nihutatud vektorite pööreldes nende projektsioonid  $i_1$  ja  $i_2$  muutuvad. Vaadeldaval ajahetkel  $t_1$  on koguvool  $i$  vektori OD projektsiooniks. Koguvoolu  $i$  sinusoidi annab vektori OD pöörlemisel selle vektori projektsiooni muutus. Nähtub, et voolude liitmiseks võib liita vooluvektoreid parallelogrammina. Resulteeriva voolu maksimaalväärtust  $I$  iseloomustab vektor OD, mis on saadud voolude  $I_1$  ja  $I_2$  samas mõõtkavas joonestatud vektorite OE ja OB summana. Vektordiagramm väljendab ka iga voolu faasi. Voolu  $I_1$  faasinurk on  $\alpha + \varphi$ , voolu  $I_2$  faasinurk aga  $\alpha$ .

Vektordiagrammis on siinussuuruste liitmine oluliselt lihtsam.

## 6.7 Voolu ja pinge keskväärtus ja efektiivväärtus

Vahelduvvoolu ja -pinge hetkväärtus muutub pidevalt. Vahelduvvoolu väärtuse hindamine on võimalik, kui lähtuda mingist keskmisest väärtusest. Siinussuuruste keskmine väärtus perioodi kohta on null, sest üks poolperiood on positiivne, teine, täpselt samasuurte hetkväärtustega, – negatiivne. Seepärast saab keskmisest ehk keskväärtusest rääkida vaid poolperioodi kohta.

Keskväärtus saadakse voolu hetkväärtuste aritmeetilise keskmisena. Voolu keskväärtus poolperioodi kohta väljendub graafiliselt ristküliku kõrgusena, mille alus võrdub poolperioodi pikkusega  $T/2$  ja ristküliku pindala võrdub voolukõvera poolt piiratud pindalaga.

Siinusvoolu kesk- ja maksimaalväärtuse vahel kehtib seos

$$I_k = \frac{2}{\pi} I_m = 0,637 I_m,$$

siinuspinge korral aga

$$U_k = \frac{2}{\pi} U_m = 0,637 U_m.$$

Sisuliselt tähendab keskväärtusest rääkimine sinusoidi poolperioodi asendamist ristkülikuga, mille kõrgus on 0,637 amplituudväärtusest.

Keskväärtusega arvestatakse vahelduvvoolu alaldamise korral. Poolperioodalaldi voolu keskväärtus

$$I_k = \frac{1}{\pi} I_m = 0,318 I_m,$$

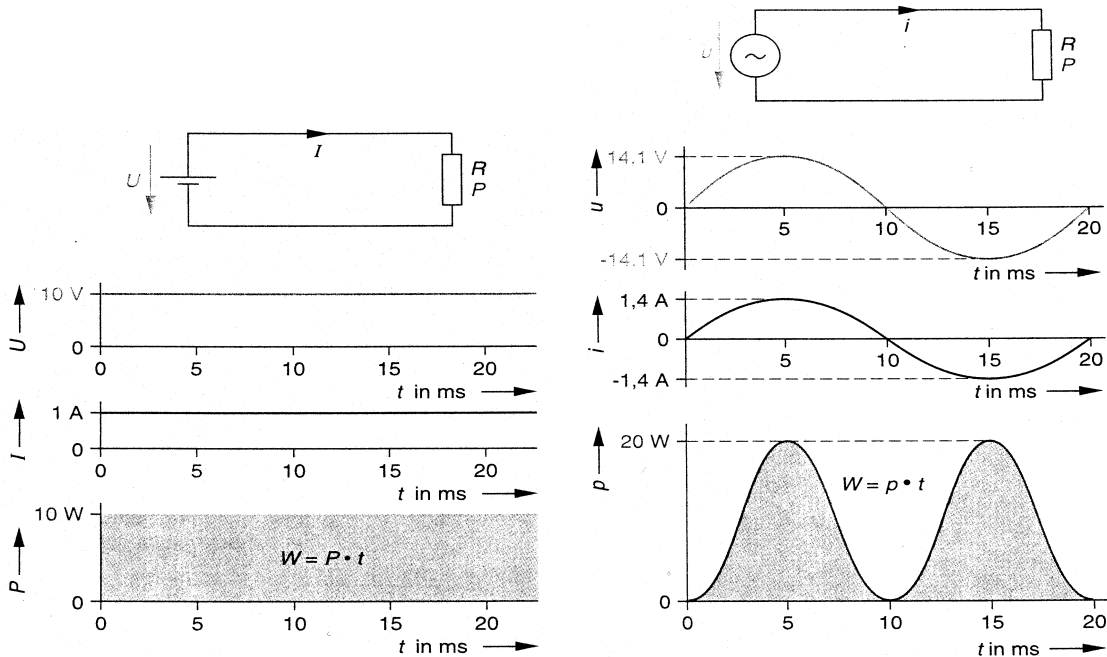
täisperioodalaldil aga

$$I_k = \frac{2}{\pi} I_m = 0,637 I_m.$$

Keskväärtuses ei iseloomusta vahelduvvoolu õigesti energeetilisest seisukohast. Selleks kasutatakse vahelduvvoolu efektiivväärtust.

**Vahelduvvoolu efektiivväärtus** on võrdne niisuguse alalisvooluga, mis samas takistis sama aja jooksul eraldab vahelduvvooluga võrdse soojushulga.

Võrdleme olukorda 10-oomise takistiga  $R$  alalisvoolu- ja vahelduvvooluahelas.



Eralduvat soojushulka iseloomustab võimsus, mis igal hetkel on pinge ja voolu hetkväärtuste korrutis.

$$p = u i.$$

Soojushulk on võimsuse ja aja korrutis.

Efektiivväärtus, kui kõige sagedamini kasutatav, tähistatakse sama tähega ilma indeksita ja kujutab siinussuuruste korral ruutkeskmist väärtust:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m;$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 U_m.$$

Ja vastupidi:

$$I_m = I \sqrt{2} = 1,41 I;$$

$$U_m = U \sqrt{2} = 1,41 U.$$

Vahelduvvoolu mõõteriistade enamus näitab efektiivväärtust.

Efektiivväärtuse ja keskvväärtuse suhet nimetatakse **kujuteguriks**  $k_f$ .

$$\frac{I}{I_k} = k_f.$$

Siinussuuruse korral on kujutegur

$$k_f = \frac{I}{I_k} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi}{2I_m} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11.$$

Maksimaalväärtuse ehk amplituudväärtuse ja efektiivväärtuse suhet nimetatakse **amplituuditeguriks**  $k_a$ .

$$\frac{I_m}{I} = k_a.$$

Siinussuuruse amplituuditegur

$$k_a = \frac{I_m}{I} = I_m \frac{\sqrt{2}}{I_m} = \sqrt{2} = 1,41.$$

## 6.8 Aktiivtakistusega vooluring

Kui alalispinge puhul on tegemist lihtsalt ühe takistusega  $R$ , siis vahelduvpinge puhul tekib tunne, et Ohmi seadus ei kehtigi. Kui mõõta mähise oomilist takistust ning, teades pinget, arvutada vool ning siis lülitada see mähis pinge alla, näitab ampermeeter vähem. Seda põhjustavad nähtused, mis tekivad seoses voolu suuna muutumisega igal poolperioodil.

Seepärast, et eristada takistust vahelduvvoolule takistusest alalisvoolule, mis avaldub valemiga

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

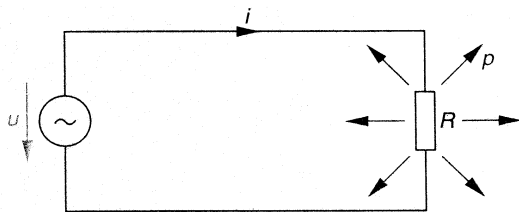
tähistatakse oomilist takistust vahelduvvooluahelas tähega  $r$  ja nimetatakse **aktiivtakistuseks**.

Seejuures

$$r > R.$$

Aktiivtakistuses eraldub energia ainult soojusena. Ainult aktiivtakistust omavateks tarvititeks võib lugeda kõiki neid, kus induktiivsus ja mahtuvus on tühised. Need on hõõglambid, küttekehad, takistid ja reostaadid. 50...60 Hz võrgusageduse või veel madalama sageduse juures on aktiivtakistus  $r$  praktiliselt võrdne sama keha takistusega alalisvoolule  $R$ .

Sageduse suurenedes suureneb aktiivtakistus pindefekti mõjul – juhtmes indutseeritud pöörivoolude mõjul kulgeb vool rohkem pinnakihtides. Juhtme südamik jääb põhiliselt kasutamata, seetõttu juhtme ristlõikepind näivald väheneb ja takistus suureneb.

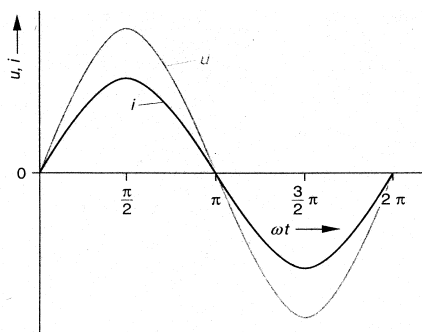


Kui aktiivtakistusega vooluringis on siinuspinge

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

siis tekib Ohmi seaduse põhjal ka siinusvool:

$$i = \frac{u}{r} = \frac{U_m}{r} \sin \omega t = I_m \sin \omega t.$$



Aktiivtakistust läbiv vool on alati faasis takistile rakendatud pingega.

Efektiivväärtuste jaoks, jagades maksimaalväärtuse

avaldise  $I_m = \frac{U_m}{r}$  mõlemad pooled läbi

amplituuditeguriga  $\sqrt{2}$ , saab Ohmi seaduse

efektiivväärtuste jaoks  $I = \frac{U}{r}$ .

**Võimsuse** hetkväärtus võrdub pinge ja voolu hetkväärtuste korrutisega

$$p = ui = U_m I_m \sin^2 \omega t.$$

Graafikust nähtub, et toiteallikast ei saabu võimsus ühtlase voona, vaid kahe impulsina perioodi vältel. Keskmiist võimsust perioodi vältel nimetatakse aktiivvõimsuseks ja tähistatakse tähega  $P$ .

$$P = \frac{P_m}{2} = \frac{U_m I_m}{2} = \frac{U_m I_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} = U I.$$

Kuna  $U = I r$ , siis

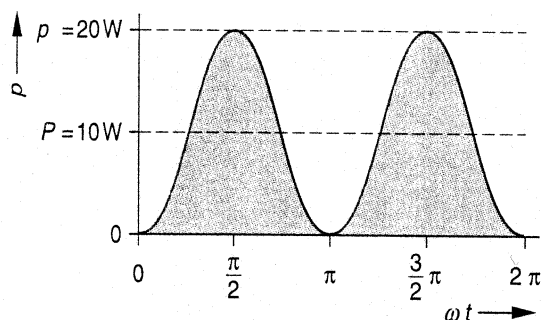
$$P = U I = I^2 r.$$

- P aktiivvõimsus vattides (W)
- U pinge efektiivväärtus voltides (V)
- I voolu efektiivväärtus amprites (A)

Aktiivvõimsuse mõõtühikuks on vatt (W).

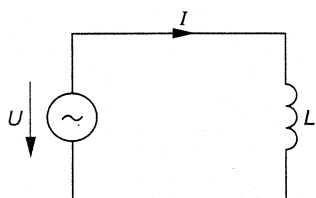
Aktiivvõimsuse maksimaalväärtus on keskvaartusest kaks korda suurem:

$$P_m = U_m I_m = U \sqrt{2} \cdot I \sqrt{2} = 2U I = 2P.$$



## 6.9 Induktiivtakistusega vooluring

Vaatleme idealiseeritud juhust, kus poolil on induktiivsus  $L$ , tema aktiivtakistus on aga nii väike, et seda ei pruugi arvestada ( $r = 0$ ).



Ohmi seaduse järgi peaks nüüd poolis tekkima ülisuur vool, sest

$$I = \frac{U}{r} = \frac{U}{0} = \infty.$$

Tegelikult mõõtes võib veenduda, et vool on kindla suurusega. See näitab, et vahelduvvoolule avaldab takistust mingi muu põhjus.

Induktiivsusega vooluringis on selleks põhjuseks voolu takistav endainduktsiooni elektromotoorjõud. Lenzi seaduse kohaselt tekib voolu kasvamisel elektromotoorjõud, mis on võrdeline voolu

muutumise kiirusega  $\frac{di}{dt}$ :

$$e_L = -L \frac{di}{dt},$$

mis takistab voolu kasvamist; voolu vähenemisel tekib aga elektromotoorjõud  $e_L$ , mis takistab voolu vähenemist. Seega mõjub endainduktsioon vahelduvvooluringis omamoodi takistusena, mis takistab nii voolu suurenemist kui ka vähenemist, ehk teiste sõnadega suurendab inertsi. Kuivõrd alalisvool ei muutu, siis alalisvooluahelas vastuelektromotoorjõudu ei teki.

Induktiivsus  $L$  on elektrilise inertsi mõõduks.

Endainduktsiooni elektromotoorjõud jääb voolust

maha  $90^\circ$  ehk  $\frac{\pi}{2}$  võrra.

Kirchhoffi teise seaduse kohaselt

$$u + e_L = i r = 0.$$

Kui  $i = I_m \sin \omega t$  siis pinget ahela klemmidel

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

on igal ajahetkel võrdne elektromotoorjõuga ning on

voolust  $90^\circ$  ehk  $\frac{\pi}{2}$  võrra ees.

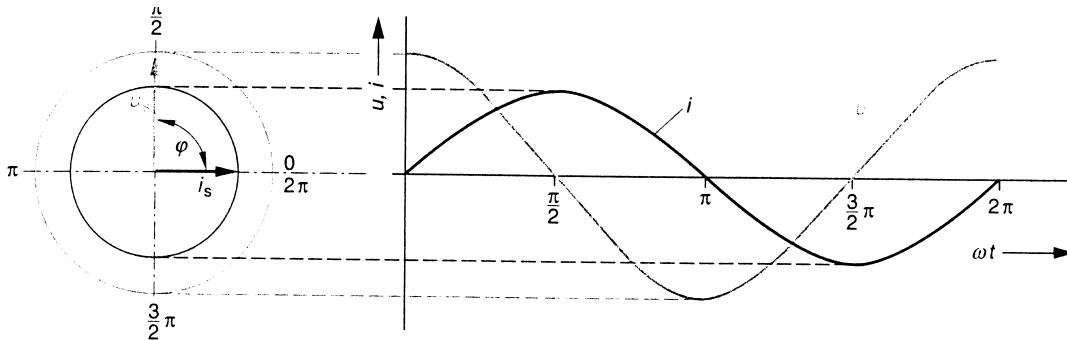
Samamoodi võib öelda, et **vool jääb pingest  $90^\circ$**

**ehk  $\frac{\pi}{2}$  võrra maha.**

See tähendab, et pinget muutub koosinusfunktsiooni järgi, sest

$$\sin(\alpha + 90^\circ) = \cos \alpha, \text{ järelikult ka}$$

$$\sin(\omega t + 90^\circ) = \cos \omega t.$$



Induktiivsuse mõjul tekkivat takistust nimetatakse **induktiivtakistuseks** (ehk induktantsiks) ja tähistatakse  $x_L$

$$x_L = 2\pi f L$$

$x_L$  induktiivtakistus oomides ( $\Omega$ )

$f$  sagedus hertsides (Hz)

$L$  induktiivsus henrides (H)

Kontrollime induktiivtakistuse ühikut:

$$x_L \approx \omega \cdot L = \frac{1}{s} \cdot H = \frac{1}{s} \cdot \Omega \cdot s = \Omega.$$

Induktiivtakistus on seda suurem, mida suurem on sagedus.

Ideaalses induktiivtakistusega vooluringis kehtib Ohmi seadus efektiivväärtuste kohta:

$$I = \frac{U}{x_L}.$$

NB! Hetkväärtuste  $u$  ja  $i$  kohta see ei kehti!

**Võimsuse hetkväärtus**

$$p = u i = U_m \cos \omega t \cdot I_m \sin \omega t.$$

Matemaatikast on teada, et

$$\sin \alpha \cdot \cos \alpha = \frac{\sin 2\alpha}{2}.$$

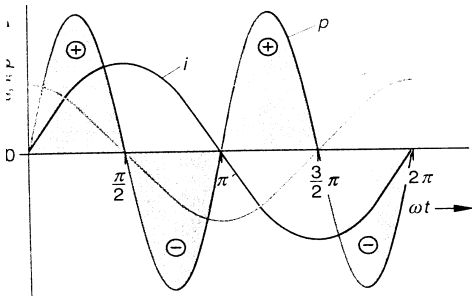
$$\text{Siis ka } \sin \omega t \cdot \cos \omega t = \frac{\sin 2\omega t}{2}$$

ja võimsuse hetkväärtus

$$p = ui = \frac{U_m I_m \sin 2\omega t}{2} = U I \sin 2\omega t,$$

sest

$$\frac{U_m I_m}{2} = \frac{U \sqrt{2} \cdot I \sqrt{2}}{2} = U I.$$



Induktiivsusega vooluringis muutub võimsus voolu või pingega võrreldes kahekordse sagedusega ja jõuab igal poolperioodil korra maksimumini

$$U I = I^2 \omega L$$

ja korra samasuure negatiivse väärtuseni. Täisperioodi vältel kordub see siis kaks korda.

Voolu ja magnetvoo kasvamisel esimese ja kolmanda veerandperioodi vältel kasvab magnetvälja energia nullist maksimaalväärtuseni

$$W_m = \frac{1}{2} L I_m^2 = L I^2.$$

See energia tuleb generaatorist (elektrivõrgust). Vooluring töötab tarbijana ja võimsus on positiivne.

Voolu ja magnetvoo vähenemisel teise ja neljanda veerandperioodi vältel muutub magnetvälja energia maksimaalväärtusest nullini. Energia tagastatakse generaatorile (elektrivõrku). Võimsuse keskvärtus  $P$  on puhtinduktiivses vooluringis võrdne nulliga, sest toimub perioodiline energiavahetus vooluringi magnetvälja ja generaatori vahel.

Niisuguse vahetusenergia suurust iseloomustatakse induktiivse vooluringi hetkvõimsuse maksimaalväärtusega, mida nimetatakse induktiivseks reaktiivvõimsuseks ehk induktiivvõimsuseks, tähistatakse  $Q_L$ :

$$Q_L = \frac{1}{2} U_m I_m = U I = I^2 x_L.$$

Reaktiivvõimsuse mõõtühik on **varr**, lühend var on tuletatud sõnadest *volt-amper-reaktiivne*.





## 6.10 Mahtuvusega vooluring

Eespool, jaotises 5.5 on vaadeldud kondensaatori laadimist alalisvooluahelas. Seal on vool võimalik vaid lühiajaliselt, seni kuni kondensaator laetakse või tühjendatakse.

Rakendades kondensaatori klemmidele vahelduvpinge

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

tekib tema plaatidel laeng

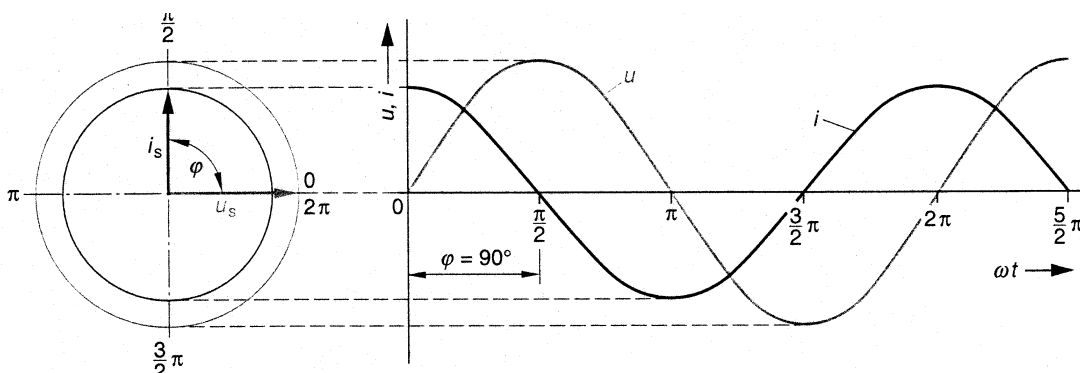
$$q = C u = C U_m \sin \omega t$$

mis muutub võrdeliselt pingega.

Vool kondensaatori vooluringis on võrdeline kondensaatori laengu muutumise kiirusega, see tähendab, et ka kondensaatori klemmipinge muutub kiirusega:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}.$$

Siinuspinge suurim kiirusemuutus on nullväärtuse läbimise hetkel, siis on vool maksimaalne. Kui aga pinge saavutab maksimaalväärtuse, sel hetkel on tema muutumiskiirus ja siis ka vool võrdne nulliga.



Vool kondensaatori vooluringis

$$i = C \frac{du}{dt} = C U_m \frac{d(\sin \omega t)}{dt} = C \omega U_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

muutub siinuseliselt, kusjuures **vool on pingest 90°**

ehk  $\frac{\pi}{2}$  võrra ees.

### Mahtuvustakistus

Mahtvusliku voolu maksimaalväärtus on

$$I_m = \omega C U_m,$$

efektiivväärtus

$$I = \omega C U = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U}{x_C}.$$

Suurust  $x_C$  nimetatakse mahtuvustakistuseks või mahtuvuslikuks reaktiivtakistuseks:

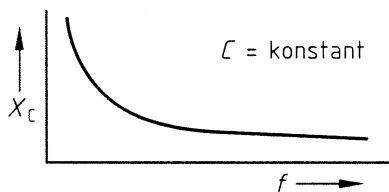
$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

Mahtuvustakistuse mõõtühik on oom ( $\Omega$ ).

Kontrollime mahtuvustakistuse ühikut:

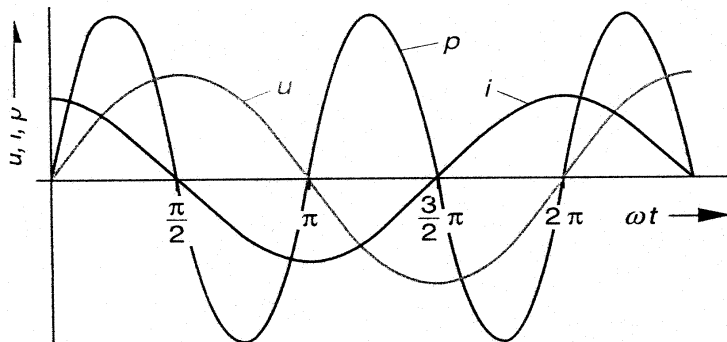
$$x_C \approx \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\frac{1}{s} \cdot \frac{1}{F}} = s \cdot \frac{1}{\frac{As}{V}} = s \cdot \frac{V}{As} = \frac{V}{A} = \Omega$$

Mahtuvustakistus on pöördvõrdeline mahtuvusega ja vahelduvvoolu sagedusega. Sageduse muutumisel nullist (alalisvoolust) lõpmatuseni muutub mahtuvustakistus  $x_C$  lõpmatusest nullini:



### Võimsuse hetkväärtus

$$p = u i = U_m \sin \omega t \cdot I_m \cos \omega t = U I \sin 2\omega t$$



Nagu induktiivsusega vooluringiski, muutub võimsus kahekordse sagedusega: jõuab igal poolperioodil korra positiivse maksimumini

$$U I = I^2 \omega C$$

ja korra samasuure negatiivse väärtuseni. Pinge täisperioodi vältel kordub see kaks korda.

Pinge kasvamisel esimesel ja kolmandal veerandperioodil suureneb elektrivälja energia generaatorist (elektrivõrgust) saadava energia arvel nullist maksimaalväärtuseni

$$W_m = \frac{C U_m^2}{2} = C U^2$$

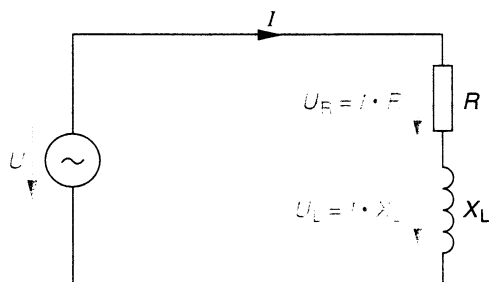
ja pinge vähenemisel teisel ja kolmandal veerandperioodil väheneb energia maksimaalväärtusest nullini – tagastatakse generaatorile või elektrivõrku.

Vooluringi keskmine ehk aktiivvõimsus on võrdne nulliga. Niisuguse generaatori kondensaatori vahetusenergia suurust iseloomustatakse mahtuvusliku vooluringi hetkvõimsuse maksimaalväärtusega, mida nimetatakse mahtuvuslikuks reaktiivvõimsuseks ja tähistatakse  $Q_C$ :

$$Q_C = UI = U^2 \omega C.$$

## 6.11 Aktiiv- ja induktiivtakistus vahelduvvooluringis

Tegelikuses esineb harva puhast induktiivsust, enamasti ei saa jätta arvestamata pooli mähisetraadi aktiivtakistust. Kuigi induktiivsus ja aktiivtakistus on ühe ja sama aparadi või tarviti omadused, vaadeldakse parema ettekujutuse saamiseks pooli kui aktiiv- ja induktiivtakistuse jadaühendust. See hõlbustab asja mõistmist.



Jadaühendust iseloomustab ühine vool kogu vooluringis. Küll aga on vooluringi eri osadel erinevad pinged. Vaadeldaval juhul on tegelikult tegemist ju üheainsa objekti – pooliga. Vahelduvvoolutehnikas on seepärast kasutusele võetud aktiiv- ja induktiivpinge mõiste.

Pinget  $U$  võib vaadelda koosnevana aktiivpingest

$$U_a = I r,$$

mis on vooluga faasis, ja induktiivpingest

$$U_L = I x_L,$$

mis on voolust  $90^\circ$  faasilt ees.

NB! Siin nii  $U_a$  kui  $U_L$  on efektiivpinge.

Pinge hetkväärtus

$$u = u_a + u_L.$$

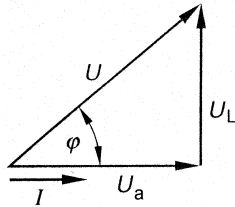
Siinussuurustest lihtsama pildi saamiseks kujutatakse neid vektoritena.

### Meeldetuletus trigonomeetriast: Pythagorase teoreem

Täisnurkse kolmnurga kaatetite ruutude summa võrdub hüpoteenuusi ruuduga

$$a^2 + b^2 = c^2$$

Nii liidetakse trigonomeetriliselt ka pinged



$$U_a^2 + U_L^2 = U^2,$$

millest

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}.$$

Vooluringi klemmpinge on aktiivpingest ning sellega faasis olevast voolust ees nihkenurga  $\varphi$  võrra. Tavaliselt öeldakse vastupidi:

**vool jääb pingest nurga  $\varphi$  võrra maha.**

Nihkenurk saab olla vahemikus  $0^\circ$  (kui induktiivsus puudub) kuni  $90^\circ$  (kui aktiivtakistus on induktiivtakistusega võrreldes kaduvväike).

Vahelduvvoolutehnikas kasutataksegi induktiivsuse osatähtsuse iseloomustamiseks voolu- ja pingevektori vahelist nurka  $\varphi$ , mis on ühtlasi klemmpinge- ja aktiivpingevektori vaheline nurk. Sagedamini kasutakse mõistet **koosinus *fii***

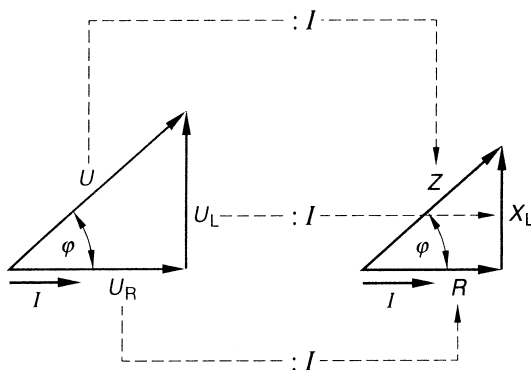
$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U}.$$

$U_a$  aktiivpinge voltides (V)

$U$  klemmpinge voltides (V)

### Takistuskolmnurk

Kui pingekolmnurga kõik küljed vooluga  $I$  läbi jagada, saadakse pingekolmnurgaga sarnane **takistuskolmnurk**.



Eelnevast on teada, et

$$\frac{U_a}{I} = r \text{ on aktiivtakistus,}$$

$$\frac{U_L}{I} = x_L \text{ on induktiivtakistus.}$$

Takistuskolmnurga kolmas külg – hüpotenuus – tähistatakse tähega  $z$  ja kannab nime **näivtakistus**.

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}$$

$z$  näivtakistus oomides ( $\Omega$ )  
 $r$  aktiivtakistus oomides ( $\Omega$ )  
 $x_L$  induktiivtakistus oomides ( $\Omega$ ),

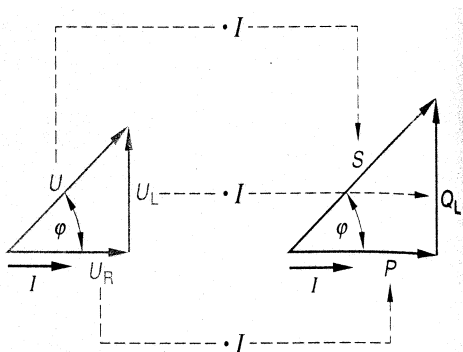
$$x_L = 2\pi f L.$$

Analoogselt pingekolmnurgale võib ka takistuskolmnurga järgi määrata  $\cos \varphi$ :

$$\cos \varphi = \frac{r}{z}.$$

### Võimsus

Pingekolmnurga külgede korrutamisel vooluga saadakse sellega sarnane **võimsuskolmnurk**.



Eelnevast on teada, et

$$U_a I = P \text{ on aktiivvõimsus,}$$

$$U_L = Q_L \text{ on reaktiivvõimsus.}$$

Võimsuskolmnurga kolmas külg – hüpotenuus – tähistatakse tähega  $S$  ja kannab nime **näivvõimsus**.

$$S = U I$$

$S$  näivvõimsus voltamprites (VA)  
 $U$  klemmipinge või võrgupinge voltides (V)  
 $I$  vool amprites (A).

Võimsuskolmnurgast saab välja kirjutada ka, et

$$S = \sqrt{P^2 + Q_L^2}$$

$S$  näivvõimsus voltamprites (VA)  
 $P$  aktiivvõimsus vattides (W)  
 $Q_L$  induktiivvõimsus varides (var)

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

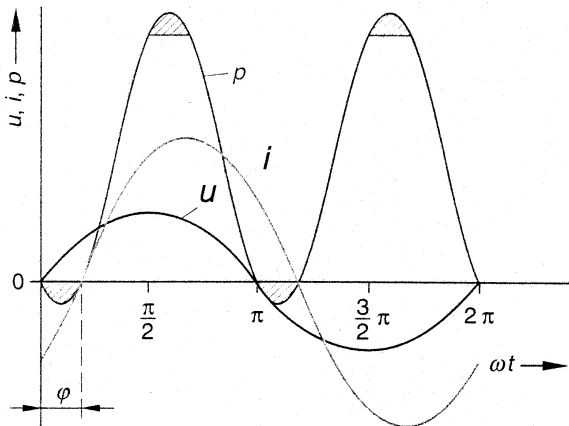
$\cos \varphi$  kannab nimetust **võimsustegur**.

Võimsuskolmnurgast võib näivvõimsuse ja faasinihkenurga  $\varphi$  kaudu avaldada ka

$$P = S \cos \varphi = U I \cos \varphi$$

$$Q_L = S \sin \varphi = U I \sin \varphi$$

Hetkväärtusena on võimsuse kui pinge ja voolu hetkväärtuse korrutis sinusoid, mille sagedus on pinge sagedusest kaks korda suurem, nagu induktiivahela korralgi. Erinevana aktiivahelast pole võimsuse kõver enam kogu perioodi vältel positiivne, erinevana induktiivahelast pole ta enam ajatelje suhtes sümmeetriline. Ta on nende kahe vahel.



Analüütiliselt

$$p = u i = U_m \sin(\omega t + \varphi) I_m \sin \omega t.$$

Võttes appi trigonomeetriast tuntud seose

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

ning teades, et

$$\frac{I_m}{\sqrt{2}} = I \text{ ja } \frac{U_m}{\sqrt{2}} = U, \text{ saab}$$

$$p = U I \cos \varphi - U I \cos(2\omega t + \varphi).$$

See valem koosneb kahest liikmest: ajast sõltumata alaliskomponendist  $U I \cos \varphi$  ja siinuselisest vahelduvkomponendist  $U I \cos(2\omega t + \varphi)$ .

Võimsuse keskvärtus perioodi vältel on võrdne alaliskomponendiga  $U I \cos \varphi$ , sest siinusfunktsiooni keskvärtus perioodi kohta on null:

$$P = U I \cos \varphi.$$

Kui võrd  $U \cos \varphi = U \frac{r}{z} = I r = U_a$ , siis

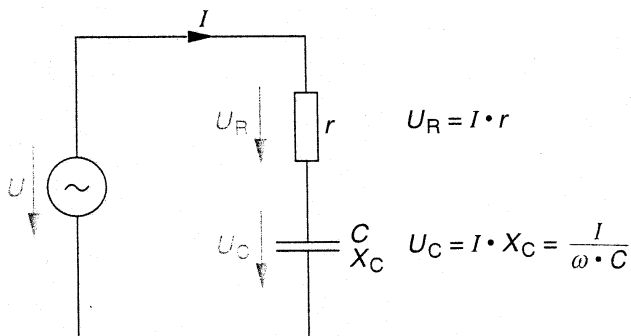
$$P = U_a I = I^2 r.$$

See tähendab, et vooluringi keskmine võimsus on võrdne aktiivtakistusel eralduva võimsuse keskvärtusega. Mistahes vooluringi keskmist võimsust nimetatakse seepärast ka aktiivvõimsuseks.

**Lõppevas jaotises saadud seosed ja võrrandid on vahelduvvoolu teooria põhiosa. Need on kasutusel enamiku tarvitite puhul ja kehtivad põhimõtteliselt ka mahtuvuslike vooluringide puhul.**

## 6.12 Aktiivtakistus ja kondensaator vahelduvvooluringis

Vahelduvpingel toimub kondensaatori laadimine, tühjakslaadimine ja ümberlaadimine. Kondensaator juhib elektrivoolu näivalt, tegelikult ju elektrivool plaatidevahelist dielektrikut eri läbi.



Erinevalt induktiivsest vooluringist on mahtvuslikus vooluringis vool pingest ees. Kui  $R = 0$ , siis on vool pingest faasilt  $90^\circ$  ees ehk pinge jääb faasilt  $90^\circ$  maha.

Pinget  $U$  võib vaadelda koosnevana kahest osast: aktiivpingest

$$U_a = I r,$$

mis on vooluga faasis, ja pingest kondensaatoril

$$U_c = I x_c,$$

mis jääb voolust  $90^\circ$  maha.

Mahtvuslik takistus

$$x_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

$x_c$  mahtvustakistus ehk kapatsitants oomides ( $\Omega$ )

$f$  sagedus hertsides (Hz)

$C$  mahtvus faradites (F)

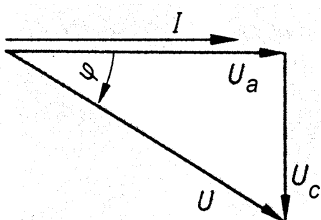
Mahtvustakistus on sagedusega pöördvõrdeline. Alalisvoolu puhul on takistus lõpmata suur. Sageduse suurenedes takistus väheneb.

Pinge hetkväärtus

$$u = u_a + u_c.$$

Siinussuurustest pildi saamiseks kujutatakse neid vektoritena.

Mahtvuslikus vooluringis on pingekolmnurgas mahtvuslik pinge suunatud induktiivse pingega võrreldes vastassuunas.



$$U = \sqrt{U_a^2 + U_c^2}$$

Võimsustegur

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U}$$

$U_a$  aktiivpinge voltides (V)  
 $U$  klemmpinge voltides (V)

Faasinurk  $\varphi$  on induktiivsega võrreldes vastasuunaline.

Takistuskolmnurgast

$$z = \sqrt{r^2 + x_c^2}$$

ja

$$\cos \varphi = \frac{r}{z}$$

Võimsus

$$S = \sqrt{P^2 + Q_c^2}$$

$S$  näivvõimsus voltamprites (VA)  
 $P$  aktiivvõimsus vattides (W)  
 $Q_c$  mahtuvusvõimsus varides (var)

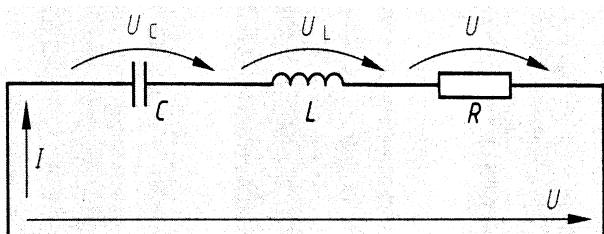
$$S = UI$$

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

$$Q_c = S \sin \varphi = UI \sin \varphi$$

### 6.13 Induktiivsuse ja mahtuvuse jadaühendus. Pingeresonants

Pooli ja kondensaatori jadaühendusel tuleb lähtuda vooluringi ühisest voolust. Seejuures tuleb silmas pidada, et vooluringis on ka aktiivtakistus.



$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}}$$

Nagu eespool vaadeldud vooluringide korral, saab ka siin vajalikud andmed vektordiagrammist ning takistus-, ping- ja võimsuskolmnurgast.

Aktiivpingevektor on vooluvektoriga faasis, see tähendab samasuunaline. Reaktiivpingevektorid on vooluvektoriga suhtes pööratud  $90^\circ$  ettepoole (induktiivpinge) või  $90^\circ$  tahapoole (mahtuvuspinge). Seejuures kõikide pingevektorite geomeetriline summa on võrdne klemmpinge vektoriga:



$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2}$$

$$U_a = I r,$$

$$U_L = I x_L,$$

$$U_C = I x_C$$

### Pingeresonants

Mäletatavasti induktiivtakistus sageduse kasvades suureneb:

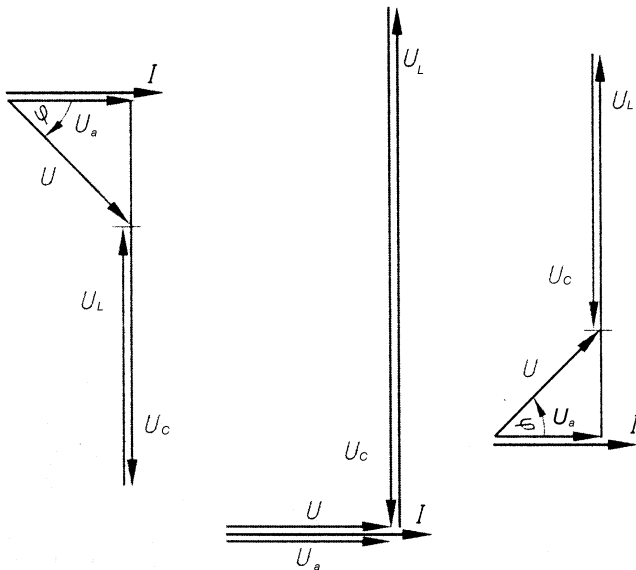
$$x_L = 2\pi f L,$$

mahtuvustakistus aga sageduse kasvades väheneb:

$$x_C = \frac{1}{2\pi f C}.$$

See tähendab, et madala sageduse juures on ülekaalus mahtuvustakistus ja kõrge sageduse juures induktiivtakistus. Sujuval sageduse muutmisel võib leida sageduse, mille juures  $x_L = x_C$ , siis ka  $U_L = U_C$ . See tähendab, et  $U_L - U_C = 0$ . Pingekolmnurk taandub sirglõiguks. Vool on pingega faasis. ja vooluringi kogutakistuse määrab ainult aktiivtakistus.

Niisugust olukorda nimetatakse pingeresonantsiks ja sagedust resonantssageduseks.



$$X_L < X_C$$

$$X_L = X_C$$

$$X_L > X_C$$

Madal sagedus

Resonantssagedus

Kõrge sagedus

Resonantssagedusel  $f_0$  on  $x_L = 2\pi f_0 L$  ja

$$x_C = \frac{1}{2\pi f_0 C}.$$

See tähendab, et  $2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C},$

## Millest resonantssagedus

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

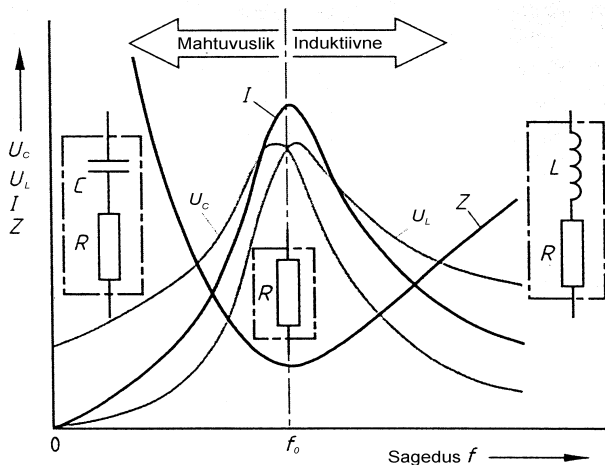
$f_0$  resonantssagedus hertsides (Hz)  
 $L$  induktiivsus henrides (H)  
 $C$  mahtuvus faradites (F)

Seda seost tuntakse maailmas Thomsoni valemina.

William Thomson, lord Kelvin (1824—1907) oli inglise füüsik, termodünaamika rajajaid, elektri-võnkumiste teooria rajaja.

Kontrollime ühikut:

$$[f_0] = \frac{1}{\sqrt{\frac{\text{Vs} \cdot \text{As}}{\text{A} \cdot \text{V}}}} = \frac{1}{\text{s}} = \text{Hz}$$



Resonantsi saavutamiseks võib muuta

- pooli induktiivtakistust  $x_L$  näiteks teras-südameku õhupilu suuruse muutmisega
- mahtuvustakistust  $x_C$  näiteks pöördkondensaatori või rööbiti ühendatavate kondensaatoritega
- sagedust

Resonantsnurksagedus

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Resonantssagedusele vastav reaktiivtakistus

$$x_C = x_L = \omega_0 L = \frac{L}{\sqrt{LC}}$$

ei sõltu sagedusest ja seda nimetatakse lainetakistuseks

$$z_{laine} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

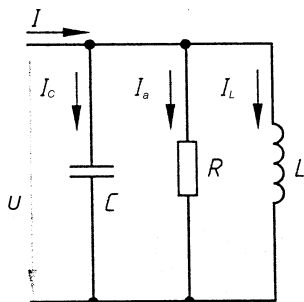
Kui lainetakistus on aktiivtakistusest suurem ( $z_{\text{laine}} > r$ ), siis on pinge reaktiivtakistusel suurem toiteallika pingest.

Pingeresonantsi puhul on vool määratud ainult vooluringi aktiivtakistusega. Kui see on küllalt väike, näiteks ainult poolijuhtme takistus, võib tekkida suur vool. Pingeresonantsi veel suuremaks ohuks võivad saada võimalikud kõrged pinged  $U_L = I x_L$  ja  $U_C = I x_C$ .

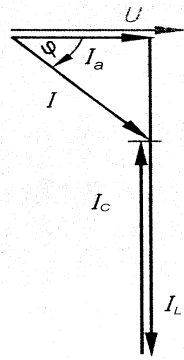
Pingeresonantsi heaks kasutusnäiteks on raadiovastuvõtja häälestamine mingile sagedusele sisendsignaali pinge tugevdamisega. Antenniahelasse ühendatud pöördkondensaatoriga häälestatakse vooluringi resonantsi saatja sagedusele. Tulemuseks saab antenni kogupingest  $U$  mitu korda suurema sisendpinge  $U_L$ .

## 6.14 Induktiivsuse ja mahtuvuse rööpühendus. Vooluresonants

Pooli ja kondensaatori rööpühendusel tuleb lähtuda vooluringi ühisest klemmipingest. Kummaski harus on oma vool, mida võib arvutada eelmistes jaotistes olevate valemitega. Seejuures tuleb silmas pidada, et poolil on induktiivtakistusele lisaks ka juhtmetraadi aktiivtakistus, mida siinkohal ei arvestata.



Vektordiagrammi joonestamist alustatakse pingvektorist  $U$ . Selle vektori asend on vabalt valitav, meie joonisel on ta horisontaalne. Pingega on faasis aktiivvoolu  $I_a$  vektor. Vektorite liitmine on kõige lihtsam ja arusaadavam kui järgmist vektorit alustada eelmise lõpust. Siin on aktiivvooluvektori lõpust joonestatud pingest  $90^\circ$  mahajääv induktiivvoolu  $I_L$  vektor. Selle lõpust on joonestatud mahtuvusvoolu  $I_C$  vektor, mis on täpselt vastupidise suunaga ehk  $90^\circ$  pingest ees. Kuivõrd kõik voolud on kantud vektordiagrammile, saab koguvoolu vektori kui ühendada koordinaatide algpunkt viimasena joonestatud vooluvektori lõpuga. Koguvoolu  $I$  vektor on pingest nurga  $\varphi$  võrra mahajääv. Joonestamisel tuleb kasutada muidugi kõigi vooluvektorite jaoks ühist mõõtkava.



Voolukomponendid

Aktiivvool  $I_a = \frac{U}{r}$  on pingega faasis,

induktiivvool  $I_L = \frac{U}{x_L}$  jääb pingest  $90^\circ$  maha,

mahtuvusvool  $I_C = \frac{U}{x_C}$  on pingest  $90^\circ$  ees.

Koguvool on avaldatav ka Pythagorase teoreemiga

$$I = \sqrt{I_a^2 + (I_L - I_C)^2}$$

Induktiivvoolu ja mahtuvusvoolu vahet (või vastupidi, sõltuvalt sellest, kumb on suurem) nimetatakse ka reaktiivvooluks või voolu reaktiivkomponendiks  $I_r$ .

$$I_r = I_L - I_C.$$

Faasinihkenurk leitakse avaldisest

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{I}$$

$$\text{või } \sin \varphi = \frac{I_r}{I} = \frac{I_L - I_C}{I},$$

kusjuures  $\varphi$  on positiivne, kui vool jääb pingest maha (nagu joonisel), s.t. et  $I_L > I_C$  ja  $\varphi$  on negatiivne, kui vool on pingest ees, s.t. et  $I_C > I_L$ .

Rööpühendusel pole takistuskolmnurka kogu vooluahela kohta (nagu oli jadaühendusel), sest voolukolmnurga külgede jagamisel pingega saab tulemuseks juhtivused, mitte takistused.

Võimsuskolmnurk saadakse voolukolmnurga külgede korrutamisel pingega, just niisama, nagu jadaühendusel. Ka võimsuste arvutus on samasugune.

### Vooluresonants

Vooluresonantsiks nimetatakse olukorda kui  $I_L = I_C$ , mis tekib siis kui  $x_L = x_C$ . Niisugusel juhul võivad haruvoolud olla suuremad kui koguvool.

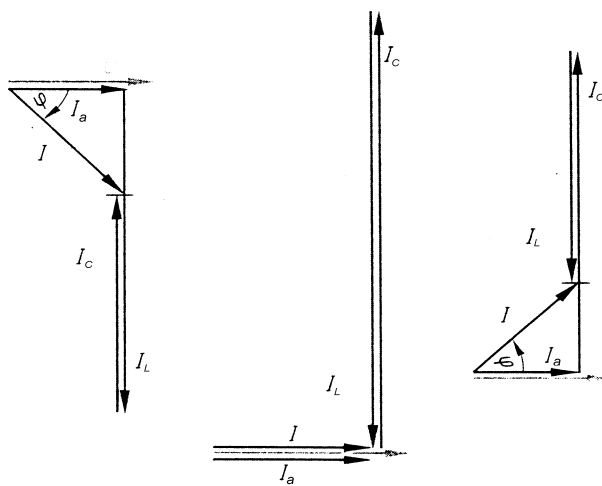
Vooluresonants tekib kindlal sagedusel. Kui  $x_L < x_C$ , siis madalatel sagedustel on induktiivvool  $I_L$  suurem kui mahtuvusvool  $I_C$ . Sageduse suurendamisel võib jõuda olukorrani, mil  $x_L = x_C$ . Sel juhul

$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C},$$

$$(2\pi f_0)^2 = \frac{1}{LC} \text{ ehk}$$

$$2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ ja resonantssagedus}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$



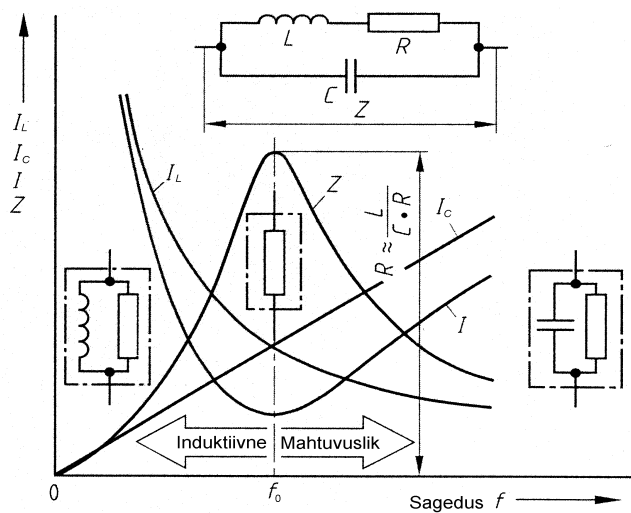
$x_L < x_C$

$x_L = x_C$

$x_L > x_C$

Madal sagedus Resonantssagedus Kõrge sagedus

Sageduse suurendamisel muutub induktiivtakistus mahtuvustakistusest suuremaks:  $x_L > x_C$ , ja mahtuvusvool siis induktiivvoolust suuremaks:  $I_C > I_L$ .



Voolresonants on rakendatav mitmesugustes võnkeringides. Resonantsi korral tekib vooluringis suur kogutakistus.

## 6.15 Võimsustegur

Võimsuskolmnurgast on teada, et

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$S$  näivvõimsus voltamprites (VA)

$P$  aktiivvõimsus vattides (W)

$Q$  reaktiivvõimsus varides (var)

ja võimsustegur

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Näivvõimsuse ja faasinihkenurga  $\varphi$  kaudu on võimsuse avaldisteks

$$P = S \cos \varphi = U I \cos \varphi$$
$$Q = S \sin \varphi = U I \sin \varphi$$

Võimsustegur  $\cos \varphi$  on oluline näitaja elektrienergia ülekandel.

Generaatori võimsus, kui ta töötab nimipingel  $U_n$  nimivooluga  $I_n$  on seda suurem, mida suurem on võimsustegur  $\cos \varphi$ .

Võimsusteguri suurus sõltub tarvititest. Tarviti vool on seda suurem, mida väiksem on tema võimsustegur ehk teisiti öeldes:  $\cos \varphi$  vähenemisel tarviti vool kasvab. See vool saadakse generaatorist juhtmete kaudu. Sama kasuliku võimsuse juures väike võimsustegur  $\cos \varphi$  suurendab voolu juhtmetes. Seepärast püütakse võimsusteguri hoida lähedane ühele.

Reaktiivvool on vältimatult vajalik enamlevinud vahelduvvoolumootorites – asünkroonmootorites – magnetvälja loomiseks. Niisuguse mootori võimsustegur sõltub oluliselt koormusest ning võib muutuda vahemikus  $\cos \varphi = 0,1 \dots 0,3$  tühijooksul kuni  $\cos \varphi = 0,8 \dots 0,9$  nimikoormusel.

Induktiivvoolu vähendamiseks elektriliinides võib niisuguste mootoritega rööbiti ühendada kondensaatorid. Niisugust tegevust nimetatakse võimsusteguri parendamiseks.

## 6.16 Aktiiv- ja reaktiivenergia

Energia on võimsuse ja aja korrutis. Nii nagu vahelduvvoolu puhul räägitakse aktiiv- ja reaktiivvõimsusest, nii tuleb rääkida ka aktiiv- ja reaktiivenergiast.

Aktiivenergia

$$W_a = Pt = U I t \cos \varphi$$

$W_a$  aktiivenergia vatt-tundides (Wh)

$P$  aktiivvõimsus vattides (W)

$t$  aeg tundides (h)

Aktiivenergiat mõõdetakse aktiivenergia arvestiga. Seejuures kasutatakse enamasti süsteemivälisest

ühikut vatt-tund, enamasti selle kordseid ühikuid kilovatt-tund ja megavatt-tund.

1 kilovatt-tund =  $10^3$  vatt-tundi =  $3600 \cdot 10^3$  vattsekundit

1 megavatt-tund =  $10^6$  vatt-tundi =  $10^3$  kilovatt-tundi.

Reaktiivenergia

$$W_r = Q t = U I t \sin \varphi$$

$W_a$  reaktiivenergia vartundides (varh)

$P$  reaktiivvõimsus varides (var)

$t$  aeg tundides (h)

Reaktiivenergiat mõõdetakse reaktiivenergia arvestiga. Seejuures kasutatakse enamasti süsteemiväliselt ühikut vartund, enamasti sellest tuhat või miljon korda suuremaid ühikuid

1 kilovartund =  $10^3$  vartundi =  $3600 \cdot 10^3$  vartundit

1 megavartund =  $10^6$  vartundi =  $10^3$  kilovartundi.

Energeetikas hinnatakse keskmist võimsustegurit mingi ajavahemiku (päeva, kuu, aasta) jooksul. See avaldub valemiga

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}}$$

Tõestame!

$$\frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{U I t \cos \varphi}{\sqrt{(U I t \cos \varphi)^2 + (U I t \sin \varphi)^2}} = \frac{U I t \cos \varphi}{U I t \sqrt{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}} = \frac{U I t \cos \varphi}{U I t \cdot 1} = \cos \varphi.$$