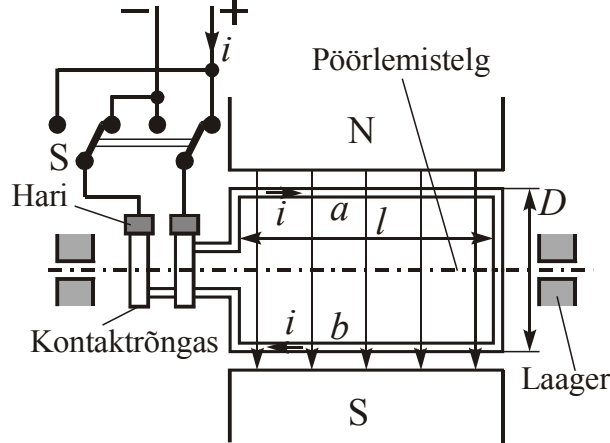


4. ELEKTRIMASINATE TALITLUSPÕHIMÕTTED JA NEIS TOIMUVAD PROTSESSID

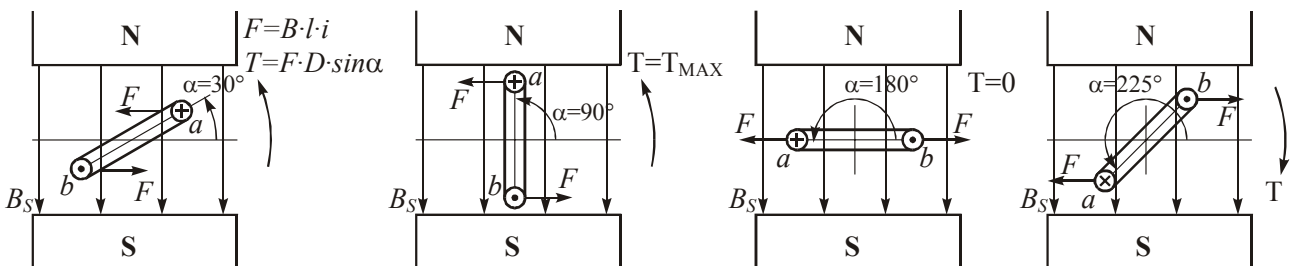
4.1. Pöördemomendi ja pinge tekitamine elektrimasinas ja pöörleva alalisvoolumasina tööpõhimõte

Pöördemomendi tekitamiseks kasutatakse vooluga juhtmeid ja magnetvälja. Vaatame magnetvälja asetatud pöörlevale raamile mõjuvaid jõude (joonis 4.1)



Joonis 4.1. Magnetvälja asetatud laagritel pöörlev vooluga raam külgsuunas

Vool juhitakse raami kahe kontaktrõnga abil, mis pöörlevad koos võlliga ja nende rõngaste vastu puutuvate liikumatute harjade abil. Raam saab ümber laagritele asetatud telje pöörelda. Raamil on kaks pikemat külge a ja b , mille pikkus on l . Küljes a läheb vool kontaktrõngastest eemale, kuid küljes b läheb vool kontaktrõngaste poole. Külgede vaheline kaugus on D . Raami läbiva voolu ja magnetvälja koostoimel indutseeritakse jõud kõikidesse raami külgedesse. Indutseeritud jõudude tõttu tekkiva pöörlemapaneva momendi seisukohalt on olulised siiski ainult küljed a ja b . Saab näidata, et teistele külgedele mõjuvate jõudude summaarne moment on igas raami asendis võrdne nulliga. Pöördemomendi teket on sobiv vaadelda raami teljega risti olevas tasapinnas.



Joonis 4.2. Pöördemomendi tekitavate jõudude rakenduspunktide ja suuna muutumine pöördtelje suhtes mitmesugustel raami asenditel

Joonise 4.2 on näidatud raami külgedele mõjuvad jõud F mitmesugustel raami pöördenurkadel α (vaade on kontaktrõngaste poolt, kuid kontaktrõngaid pole näidatud).

Ühele küljele mõjuva jõu suurus on

$$F = B_S \cdot l \cdot i, \quad (4.1)$$

kus B_S – magnetvoo tihedus;
 l – raami külje pikkus;
 i – voolu suurus raamis.

Konstantse voolu korral raami küljele mõjuva jõu F suurus ei muutu, kuid pöördenurga α muutumisel muutub jõupaari FF õlg. **Indutseeritud pöördemoment** T_{ind} sõltub pöördenurgast α järgnevalt

$$T_{ind} = F \cdot D \cdot \sin\alpha, \quad (4.2)$$

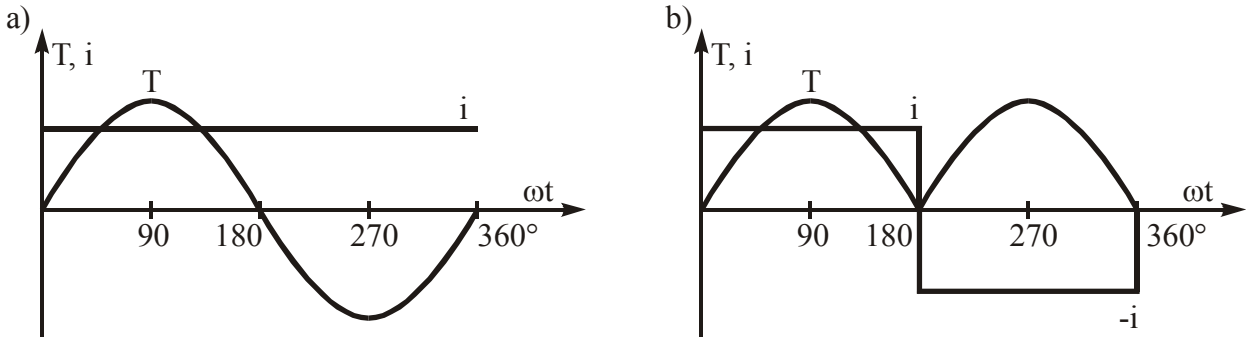
kus D on raami diameeter (külgede vaheline kaugus).

(4.1) ja (4.2) põhjal saame

$$T_{ind} = B_s l i D \cdot \sin\alpha = B_s \cdot i \cdot A \cdot \sin\alpha, \quad (4.3)$$

kus $A = l \cdot D$ on raami pindala.

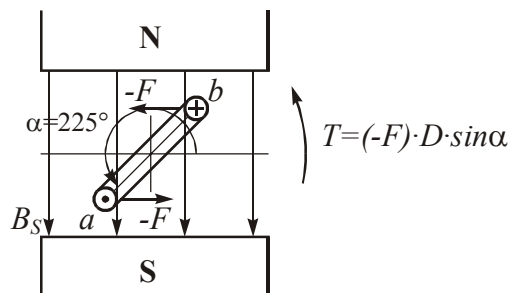
Kui voolu sisselülitamise momendil $\alpha = 0^\circ$, siis pöördemoment on võrdne nulliga ja raam jääb paigale. Kui aga algasendis on pöördenurk $\alpha = 30^\circ$, siis raam hakkab liikuma ja pöördenurk kasvama.



Joonis 4.3. Homogeenses magnetväljas juhtmekeerule indutseeritud momendi muutumine sõltuvalt pöördenurgast, kui voolu suund juhtmekeerus ei muutu (a) ja kui voolu suunda juhtmekeerus kommuteeritakse iga poolpöörde järel (b)

Moment saavutab maksimaalväärtuse kui $\alpha = 90^\circ$ ja edasi hakkab vähenema (joonis 4.3a). Pöördenurgal 180° muutub moment jälle nulliks, sest jõud F mõjuvad ühel sirgel (joonis 4.2). Kui raam läheb inertsiga sellest asendist üle, siis tekib esialgse suhtes vastupidine moment, mis püüab raami asendisse $\alpha = 180^\circ$ tagasi viia (joonisel 4.2 on näidatud asend $\alpha = 225^\circ$). Ühesuunalise voolu juures võib raam pöörduda ainult pool pööret ehk 180° .

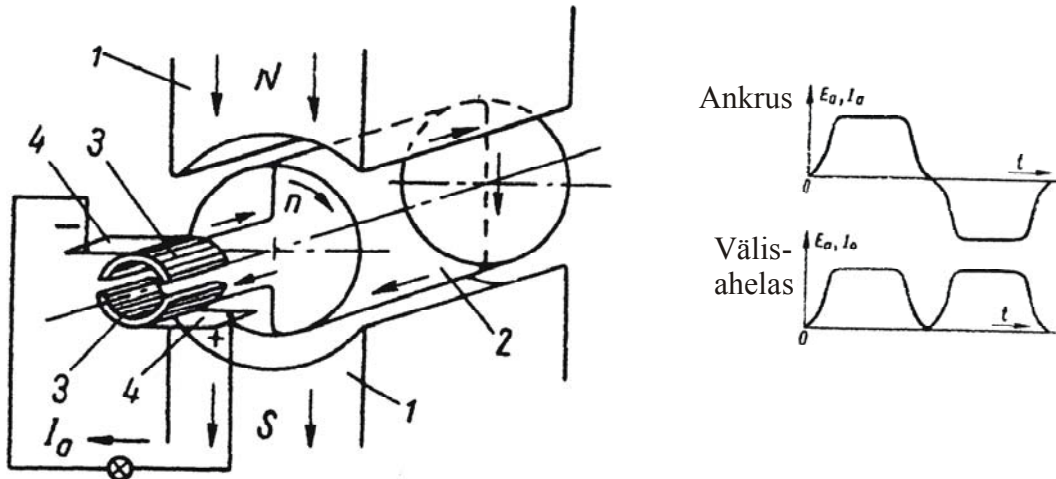
Üheks võimaluseks pideva pöörlemise saamiseks on voolu suuna muutmine raami asenditel 180° ja 0° . Põhimõtteliselt saab voolu suunda muuta joonisel 4.1 toodud ümberlüüti S abil. Selle põhimõtte tegelikul rakendamisel kasutatakse pooljuhtlüliteid (jõutransistore) ja mootori pöörleva osa ehk rootori asendiandureid. Asendianduri signaali järgi muudetakse voolu suund õigel pöördenurga väärtusel (antud näites 0° ja 180°). Sel põhimõttel töötavad niinimetatud **harjadeta alalisvoolu masinad** (brushless DC machines). Voolu suuna muutmise tulemusena arendab vooluga raam ühesuunalist pöördemomenti (joonis 4.3b). Voolu suuna muutmise muudab raami küljele mõjuva jõu suund ja sellega ka momendi suund vastupidiseks (joonis 4.4).



Joonis 4.4. Voolu suuna muutusega muutub raami pöördemomendi suund vastupidiseks

Pane tähele, et pöördemomendi suuna säilitamiseks joonisel 4.2 peab lõunapoolusele (S) lähemal oleva raami külje (kas a või b) voolu suund olema alati joonise tasapinnast välja. Sellepärast tuleb iga kord kui raam läbib horisontaalasendit (0° , 180° jne) vahetada voolu suunda.

Voolu suunda saab vahetada ka pöörleva raami völli paigutatud mehaanilise lülitusseadme abil, mida nimetatakse **kommutaatoriks**. Seda meetodit kasutatakse alalisvoolumasina konstruktsiooni juures, mille lihtsustatud variant on näidatud joonisel 4.5.



Joonis 4.5. Lihtsaim alalisvoolumasin: (1) – poolused; (2) – rootor ehk ankur, (3) – kommutaator; (4) – hari

Poolused 1 tekitavad magnetvoo, mis läbib kahte õhupilu ja nende vahel olevat pöörlevat elektrotehnilise terase lehtedest silindrit 2, mida nimetatakse **ankruks**. Voolujuhtiv raam moodustatakse mähisraadist, mis on paigutatud silindri välispinnal olevatesse soontesse, mida nimetatakse **uureteks**. Kommutaatoriks on lihtsaimal masinal kaks vasest kommutaatorilesta ehk **lamelli**, mis on omavahel ja völli isoleeritud. Lamellide külge on ühendatud ankrumähise otsad. Pöörleva kommutaatoriga puutuvad kokku kaks liikumatut **harja** 4, mille kaudu ankrumähise ühendatakse välisahelaga. See alalisvoolumasin võib töötada nii **generaatorina** kui **mootorina**. Joonisel 4.5 on näidatud generaatoritalitus. Nii generaatori- kui ka mootoritalitluses on **välisahelas alalisvool** ja mähisraadist **raamis** (mida nimetatakse ankrumähise pooliks) **vahelduvvool**. Voolu suund mähises muutub, kui pöörlamise tõttu harja kontakt ühe lamelliga kaob ja tekib kontakt teise lamelliga. Voolu suuna muutus, mida nimetatakse **kommutsiooniks**, toimub hetkel kui mähisepooli tasapind on risti pooluse telje suunaga (joonisel 4.5 on mähisepool siis horisontaalne). Joonisel 4.5 on näidatud ka elektromotoorjõu ja voolu hetkväärtuste kõverad ankrus ja välisahelas. Kõverate kuju erineb siinusest, sest masina pooluse otsa kuju ei ole tasapinnaline nagu joonisel 4.2 vaid kumer ja pooluste vahel asub silindrikujuline elektrotehnilisest terasest ankur. Selle tõttu moodustub õhupilu, kus magnetvoo tiheduse välja suund on risti mähise liikumise teekonnaga. Selles teekonna osas on vool, emj. ja moment ligikaudu konstantsed ja kõveratel tekib horisontaalne osa.

Generaatoritalituse korral tuleb elektrimasinale rakendada välist momenti ja masina ankur pöörlema panna. Pöörleva mähisraami ühe külje elektromotoorjõud, kui raam liigub õhupilus, on järgmine

$$E_{k\ddot{u}lg} = B_S \cdot l \cdot v, \quad (4.4)$$

kus $E_{k\ddot{u}lg}$ – elektromotoorjõud voltides [V];

B_S – staatori magnetvoo tiheduse välja tugevus veebrites ruutmeetritele [Wb/m^2];

l – juhtme pikkus meetrites [m];

v – juhtme liikumise kiirus [m/s].

Pöörlemisel liigub mähisraami ülemine külg paremalt vasakule (joonis 4.5), kuid alumine külg vasakult paremale. Sealjuures on staatori magnetvälja suund nii ülemises kui alumises õhupilus ülalt alla. Selle tõttu on mähisraami eri külgedele indutseeritud elektromotoorjõudude suunad

vastupidised (rakenda parema käe reeglit). Kui alumisel raami küljel on kommutaatoripoolsel otsal "+" potentsiaal, siis ülemisel raami küljel on kommutaatoripoolsel otsal "-" potentsiaal. Raami kahe külje elektromotoorjõud on seega järjestikku ja liituvad. Ühes keerus indutseeritud elektromotoorjõud on

$$E_{keer} = 2 B_S \cdot l \cdot v. \quad (4.5)$$

Generaatoritalituses töötab kommutaator alaldina. Ankrumähises on vahelduvelektromotoorjõud, kuid harjadele antava elektromotoorjõu polaarsus ei muutu.

Pöörleva masina jaoks ei ole avaldises (4.5) olev joonkiirus v sobiv. Punktis 1.5 on leitud, et joonkiirus on seotud nurkkiirusega ω järgnevalt

$$v = \omega \cdot r = \omega \cdot \frac{D}{2}, \quad (4.6)$$

kus r on liikuva punkti trajektoori raadius ja D on trajektoori diameeter (antud juhul ankru diameeter).

(4.5) ja (4.6) kaudu saame keeru elektromotoorjõu nurkkiiruse kaudu

$$E_{keer} = 2 B_S \cdot l \cdot \frac{\omega}{2} \cdot D = B_S \cdot l D \cdot \omega. \quad (4.7)$$

Korrutis $B_S l D$ on võrdne keerdude läbiva magnetvooga Φ , sest $l \cdot D = A$ (A on keeru pindala) ja $B \cdot A = \Phi$ (magnetvoog on võrdne vootiheduse ja pindala korrutisega). Seega keeru elektromotoorjõud magnetvoo kaudu

$$E_{keer} = \Phi \cdot \omega. \quad (4.8)$$

Reaalses masinas on harilikult mitu keerdude järjestikku ja seda arvestatakse niinimetatud masina konstandiga k_E . Alalisvoolumasina elektromotoorjõu avaldiseks on

$$E = k_E \Phi \cdot \omega. \quad (4.9)$$

Seega pingetõstmise võimalused on järgmised: *kasutada suuremat keerdude arvu, teha suurem masin või ajada masinat kiiremini ringi.*

Mootoritalituses tekkiva pöördemomendi saame vaadeldava alalisvoolumasina jaoks leida eeltoodud avaldise (4.3) alusel. Sealjuures peame arvestama, et õhupilus liikumisel on magnetvoo tiheduse välja suund risti õhupiluga ja ka mähise liikumise teekonnaga. Selle tõttu on indutseeritud jõud õhupilus liikumisel õhupilu puutuva suunaline ja nurk α avaldises (4.3) on pidevalt 90° ($\sin \alpha = 1$). Selle tõttu ei ole nurka α vaja arvestada. Ühe keeru moment on

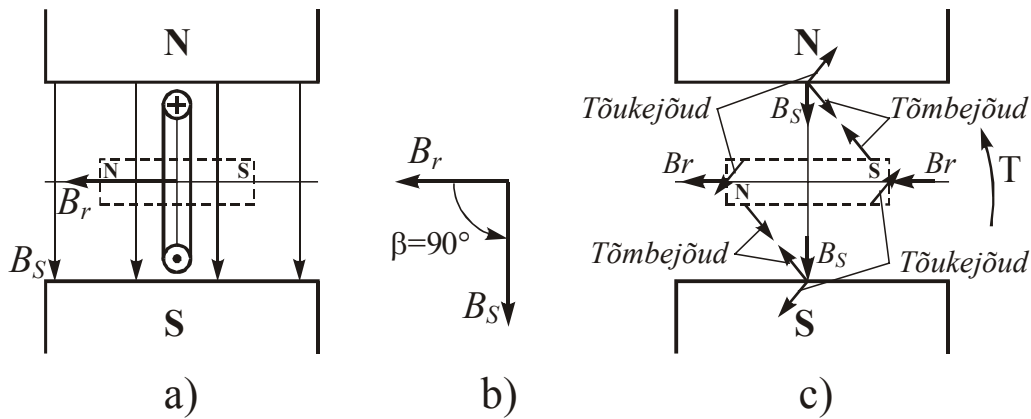
$$T_{keer} = B_S \cdot A \cdot i = \Phi \cdot i. \quad (4.10)$$

Avaldises (4.10) on voolu hetkväärtus i , mis annab ka momendi jaoks hetkväärtuse. Reaalses masinas, kus on palju keerde, on vool praktiliselt ühtlane alalisvool ja erinevus voolu hetkväärtuse i ja efektiivväärtuse I vahel praktiliselt puudub. Keerdude momendid summeeruvad ja seda võetakse arvesse masina konstandi k_I abil. Seega

$$T = k_I \Phi \cdot I \quad (4.11)$$

Meelespidamise hõlbustamiseks on kasulik tähele panna, et momendi avaldis on kujult sarnane elektromotoorjõu avaldisega ($E = k_E \Phi \cdot \omega$). Samuti on soovitatav meelde jätta, et **moment on proportsionaalne vooluga ja elektromotoorjõud on proportsionaalne kiirusega.**

Peale paigalseisvate pooluste magnetvälja, mida nimetatakse ka staatori magnetväljaks B_S tekitab oma magnetvälja B_r ka pöörleval rootoril olev mähis või lihtsalt vooluga raam. Joonisel 4.6 on näidatud nende väljade suunad, kui raami pöördemoment on maksimaalne.



Joonis 4.6. Staatori magnetvälja B_S ja rootori magnetvälja B_r vastastikune asend, kui elektromagnetiline pöördemoment on maksimaalne; (a) – rotorimähise keerd ja tema magnetväli; (b) – staatori ja rootori magnetväljade vektorid ja nendevaheline nurk; (c) – rotorimähise magnetvälja asendamine mõttelise püsिमagnetil väljaga ja magnetpooluste vahel tekkivad tõmbe- ja tõukejõud

Nagu eelpool nägime, pöördub raam joonisel 4.6a näidatud asendist veel edasi 90° ja peatub, kui voolu suunda ei muudeta.

Et paremini mõista pöördemomendi teket, võib ette kujutada, et vooluga pooli asemel on püsिमagnet, mis tekitab samasuunalise välja kui pool. Joonisel on see mõtteline püsिमagnet näidatud kriipsjoonega. Teatavasti püsिमagnetitel samanimelised poolused tõukuvad ja erinimelised tõmbuvad. Joonisel 4.6c on näidatud staatorivälja tekitavate püsिमagnetite ja rootorivälja imiteeriva püsिमagnetil vahelised tõmbe- ja tõukejõud. Jooniselt on näha, et need jõud püüavad rootorit keerata asendisse, kus põhja- ja lõunapoolused on vastastikku. Sellega muutuvad staatorivälja B_S jõujooned samasuunalisteks mõttelise püsिमagnetil sees olevate välja B_r jõujoontega. **Rootor püüab võtta asendit, kus rootori väli muutub staatori väljaga samasuunaliseks.** Siis muutub rootori ja staatori välja vaheline nurk β (joonis 4.6b) võrdseks nulliga ja ka pöördemoment muutub nulliks. Et pöörlemine ei peatuks, selleks muudetakse alalisvoolumasinas rootori voolu kommuteerimisega rootori välja suunda ja jälle tekib liikumapanev moment ühe poolpöörde ulatuses.

Vahelduvvoolu masinates lahendatakse rootori ja staatori magnetväljade vahel vajaliku nurga hoidmise probleem teisiti. Seal tekitatakse kolmefaasilise voolusüsteemi abil staatoris mitte paigalseisev vaid **ruumis pöörlev magnetväli**. Rootoris tekitatakse samuti magnetväli, kas püsिमagnetil või voolu abil. Rootori magnetväli püüab end orienteerida staatori väljaga samasuunaliseks, kuid staatori väli jookseb pöörlemise tõttu pidevalt eest ära. Selle tõttu esineb pidev pöördemoment ja rootor hakkab pöörlema. Ei mehaanilist ega elektroonilist ankruvoolu suuna muutmise kommutaatorit pole vaja. See on vahelduvvoolumasinate suur eelis. Mehaaniline kommutaator on väikese töökindlusega ja tõstab masina hinda. Ka elektrooniline kommutaator on suhteliselt keerukas ja kallis.

Vahelduvvoolumasinaid on kahte tüüpi. **Sünkroonmasinates** pöörleb rootor sünkroonselt paigalseisva staatori poolt tekitatud pöörleva väljaga. **Asünkroonmasinates** on rootori pöörlemiskiirus mõni protsent väiksem staatorivälja pöörlemiskiirusest.

Elektrimasinas tekkiva elektromehaanilise momendi T_{ind} saab avaldada ka staatori ja rootori magnetvoo tiheduse B_S ja B_r kaudu. Kui lähtuda avaldisest (4.3) ja arvestada, et rootori väli

$$B_r = i\mu/G, \quad (4.12)$$

kus μ on magnetiline läbitavus ja G raami kuju ja mõõtmeid arvestav tegur, siis peale teisendusi

$$T_{ind} = k \cdot B_r \cdot B_S \cdot \sin \beta, \quad (4.13)$$

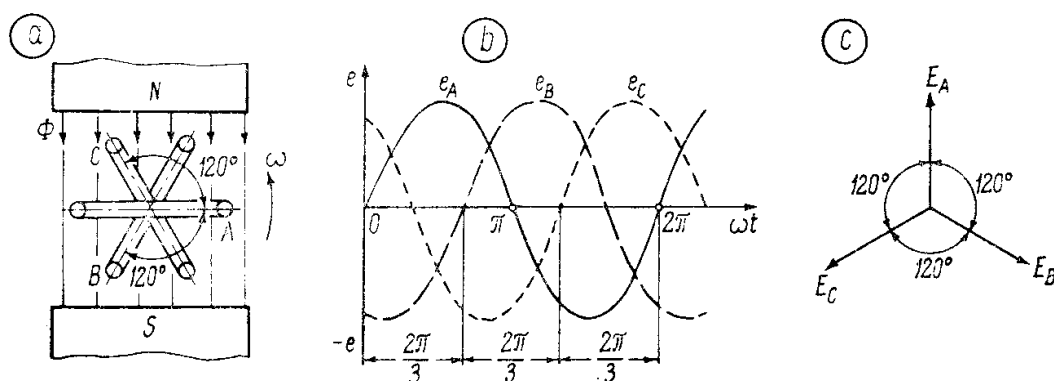
kus $k = A \cdot G / \mu$ (A on raami pindala). See tegur k iseloomustab masina konstruktsiooni.

Seega üldjuhul sõltub moment elektrimasinas neljast tegurist.

- Rootori magnetvälja tugevusest
- Staatori magnetvälja tugevusest
- Nende väljade suuna vahelise nurga siinusest
- Konstandist, mis on seotud masina konstruktsiooniga

4.2. Pöörlev magnetväli

Siinuselise elektromotoorjõu saab tekitada homogeenses magnetväljas pöörleva raami abil nagu on eelpool näidatud alapunktis 2.2.4 (joonis 2.21). Kui meil on ühe raami asemel kolm ühisel teljel pöörlevat raami ja need raamid on üksteisest nihutatud 120° (joonis 4.7a, kus raamid on näidatud lõikes), siis indutseeritakse elektromotoorjõud igas raamis.

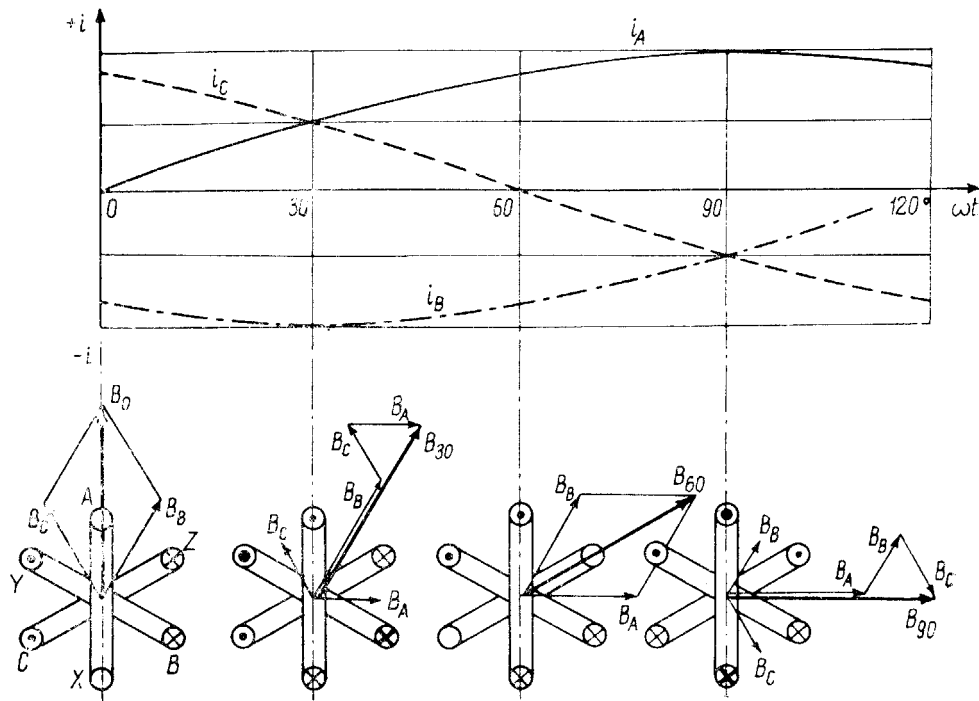


Joonis 4.7. Kolmefaasilise generaatori mudel (a), elektromotoorjõudude hetkväärtuste kõverad (b) ja elektromotoorjõudude faasordiagramm (c)

Raamide ruumilise paigutuse erinevuse tõttu on nende elektromotoorjõudude hetkväärtuste kõverad nihutatud ajas 120 elektrilise kraadi ulatuses (joonis 4.7b). Kolme võrdse suurusega ja võrdse sagedusega siinuspinget (või elektromotoorjõudu), mis on ajas nihutatud $1/3$ perioodi ehk 120° moodustavad **kolmefaasilise pingesüsteemi**. Tavaliselt kujutatakse kolmefaasilist pingesüsteemi faasordiagrammina (joonis 4.7c).

Joonisel 4.7 kujutatud generaatori mudelis saab kolmefaasilise pinge tekitada kahel erineval viisil. Võib panna pöörleva volujuhtivad raamid ehk mähised nagu näitab nool joonisel või jätta raamid paigale ja panna vastassuunas pöörleva magnetpoolused. Viimasel juhul indutseerib pöörlev magnetväli paigalseisvates mähistes kolmefaasilise pingesüsteemi. Kui mähised on ühendatud koormustakistitega, siis tekib ka kolmefaasiline vool.

Kui aga joonisel 4.7a magnetpoolused eemaldada ja lasta paigalseisvatesse poolidesse elektrivõrgust või eraldi generaatorist kolmefaasiline vool, siis tekib nende **paigalseisvate poolide ümber ruumis pöörlev magnetväli**, mille suurus on konstantne. Joonisel 4.8 on näidatud iga faasi mähise magnetvälja vektor ja summaarse magnetvälja vektor neljal ajamomendil, kui $\omega t=0, 30, 60$ ja 90° .



Joonis 4.8. Pöördmagnetvälja tekitamine

Punkt juhtmekeeru lõikes tähistab voolu suunda vaataja poole ja rist joonise poole. Joonisel 4.8 ei ole näidatud kolme pooli ühendust kolmefaasilise pingesüsteemiga, kusjuures need poolid võivad olla nii täht- kui ka kolmnurkühenduses.

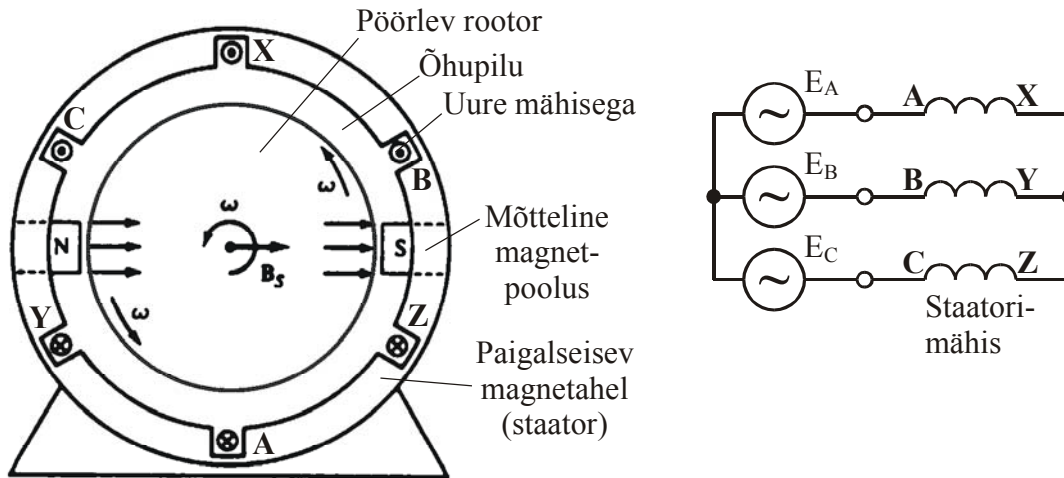
Hetkel, mil $\omega t=0$, on vool faasis A null, faasides B ja C on voolude hetkväärtused võrdsed, kuid voolud on vastassuunalised. Kruvireegli järgi saab leida voolude poolt tekitatud magnetvälja suuna. Joonisel 4.8 on need suunad määratud vootiheduse vektoritega, mis on risti vastava pooli tasapinnaga ja mitteferromagnetilises keskkonnas võrdelised vooluga. Et vaadeldaval hetkel $B_A=0$, siis resulteeriv vootiheduse vektor $\vec{B}_0 = \vec{B}_B + \vec{B}_C$, olles suunatud üles.

Järgmisel vaadeldaval hetkel, mil $\omega t=30^\circ$, on võrdsed voolude I_A ja I_C hetkväärtused, kusjuures need on pool amplituudiväärtusest, vool faasis B on maksimaalne. Määrates nende voolude poolt tekitatud magnetvälja suuna kruvireegli abil ja arvestades magnetvoo võrdelisust vooluga, saame resulteerivaks vootiheduseks vektori $\vec{B}_{30} = \vec{B}_A + \vec{B}_B + \vec{B}_C$, mis on pöördunud 30° päripäeva. Edasi vaatleme olukorda analoogiliselt hetkel, mil $\omega t=60^\circ$. Siis on I_C null ning $\vec{B}_{60} = \vec{B}_A + \vec{B}_B$, olles pöördunud veelgi 30° nurga võrra. Kui $\omega t=90^\circ$, on vool faasis C muutnud oma suunda ja seega muutub ka selle voolu poolt tekitatud magnetvälja suund, vool faasis A on maksimaalne. Resulteeriv vootihedus $\vec{B}_{90} = \vec{B}_A + \vec{B}_B + \vec{B}_C$ on nüüd suunatud paremale.

Arvutusest ilmneb, et *resulteeriv magnetvoo tihedus on konstantne suurus*, olles 1,5 korda suurem ühe pooli poolt tekitatud vootihedusest juhul, kui selles on maksimaalne vool (amplituud). Samal ajal pöördub resulteeriv vootiheduse vektor päripäeva ja teeb täispöörde ühe vahelduvvoolu tsükli (perioodi) jooksul. Järelikult on *välja pöörlemiskiirus võrdeline vahelduvvoolu sagedusega*. Kui sagedus on 50 Hz, siis pöörleb magnetväli ilmselt kiirusega 50 p/s ehk 3000 p/min.

4.3. Vahelduvvoolumasinate staator

Harilikult kasutatakse vahelduvvoolumähistes konstruktsiooni, kus pöörlev rootor asub staatori sees (joonis 4.9).



Joonis 4.9. Vahelduvvoolumasina staatori ristlõige ja toiteskeem; magnetvälja suund vastab ajahetkele, kui vool faasis A on maksimaalne

Paigalseisev staator tekitab ruumis pöörleva magnetvälja. Magnetvälja tekitamiseks kasutatakse terasplekkidest koostatud magnetahelat ehk **staatorisüdamikku** ja staatorisüdamiku uuresse paigutatud kolmefaasilist mähist. Joonisel 4.9a on näidatud lihtsaim kolmefaasiline mähis, kus igas faasis on üks keerd. Selle mähise magnetvälja võib ette kujutada ka pöörleva mõttelise põhjapooluse (mille väli väljub staatorist) ja pöörleva mõttelise lõunapooluse (mille väli siseneb staatorisse) abil. Need poolused teevad ruumis ühe täispöörde kolmefaasilise voolusüsteemi ühe perioodi jooksul.

Iga faasi poolil on kaks külge A ja X; B ja Y; C ja Z. Küljed A, B ja C on ühtlasi poolide algused. Nende kaudu saab mähis tähtühenduse korral toite (joonis 4.9). Küljed X, Y ja Z on ühtlasi faasipoolide lõpud, mis tähtühenduse korral kokku ühendatakse. Harilikult on reaalsel masinatel pooli keerdude arv suurem kui üks, kuid pöörleva magnetvälja suhtes ei ole see põhimõtteliselt oluline. Paneme tähele, et poolide külgede järjestus on magnetvälja pöörlemise suunas liikudes järgmine:

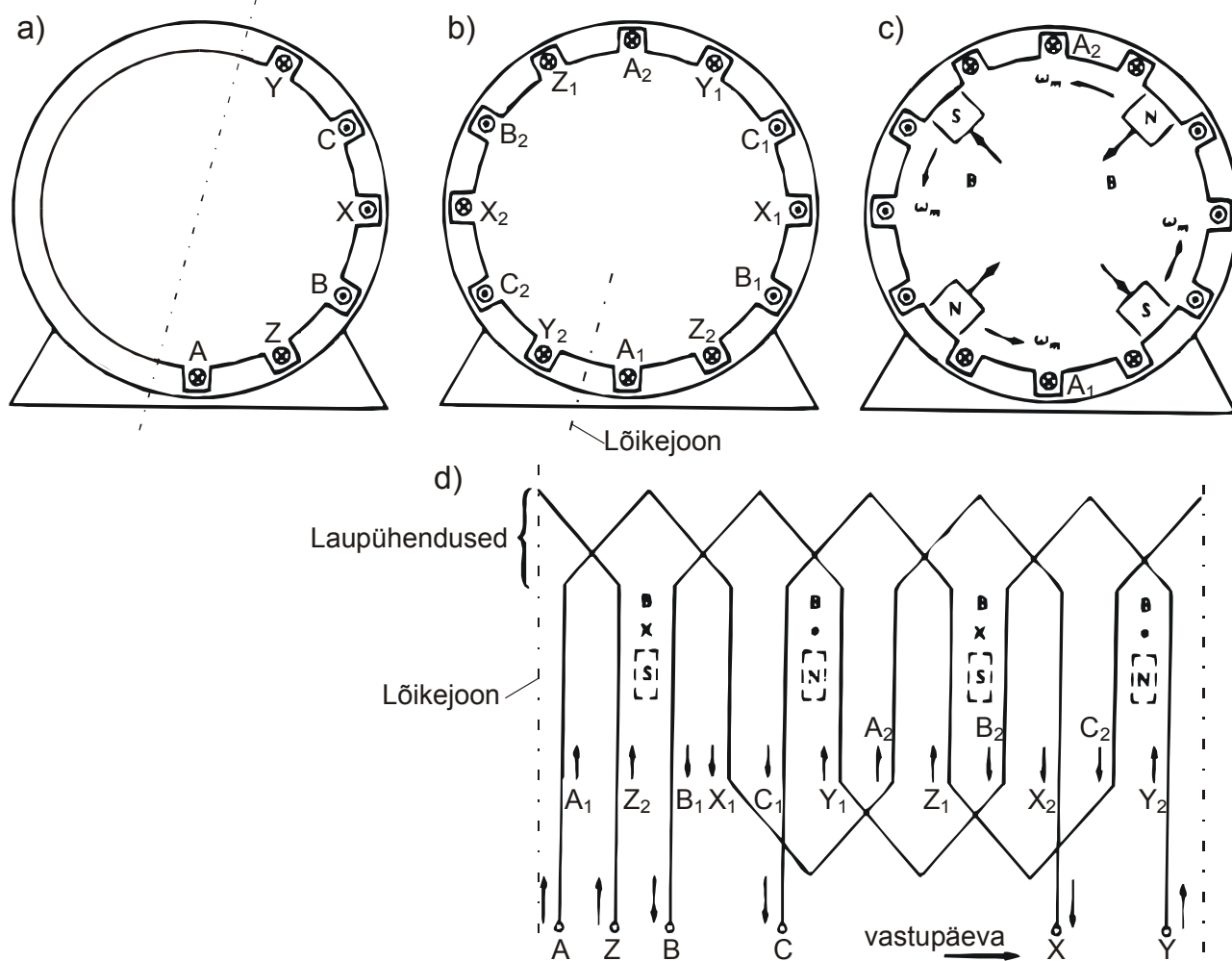
$$A - Z - B - X - C - Y - A.$$

50 Hz toitesageduse juures teeb ühe pooluspaariga magnetväli 60 sekundi ehk ühe minuti jooksul $50 \times 60 = 3000$ pöört. Selline pöörlemiskiirus on tihti liiga suur. Kiiruse vähendamiseks kaks korda kasutatakse järgmist võtet. Kolmefaasilist staatorimähiste komplekti ei jaotata mitte kogu staatori ümbermõõdule (see on mitte 360° peale) vaid poolele staatori ümbermõõdule (s.o. 180° peale) nagu on see näidatud joonisel 4.10a.

Sellisel mähiste paigutusel liigub magnetväli ühe vahelduvvoolu perioodi jooksul edasi ainult 180° ja välja liikumiskiirus on sellega kaks korda väiksem. Sellega on ka masina pöörlemiskiirus kaks korda väiksem. Kiiruse langemisega väheneb ka võimsus. Et seda ei juhtuks, selleks pannakse staatorile veel teine kolmefaasiline poolidekomplekt (joonis 4.10b), mis tõstab pöördemomenti kaks korda. Sellega võimsus jääb samaks, pöörlemiskiirus on kaks korda väiksem ja pöördemoment on kaks korda suurem (võrreldes joonisel 4.9 näidatud juhtumiga).

Kahe kolmefaasilise mähispoolide komplekti paigutamise staatorile tekib seal neli pöörlevat magnetpoolust (joonis 4.10c), mis järgnevad: N – S – N – S. Ühe ja sama faasi poolid, mis asuvad erinevates poolikomplektides, ühendatakse tavaliselt järjestikku ($A_1 - X_1 - A_2 - X_2$), nagu on näidatud tasapinnale laotatud mähiste skeemil (joonis 4.10d). See skeem on saadud staatori

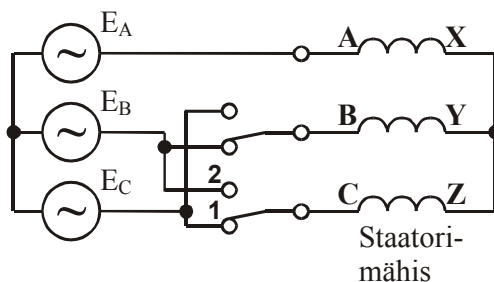
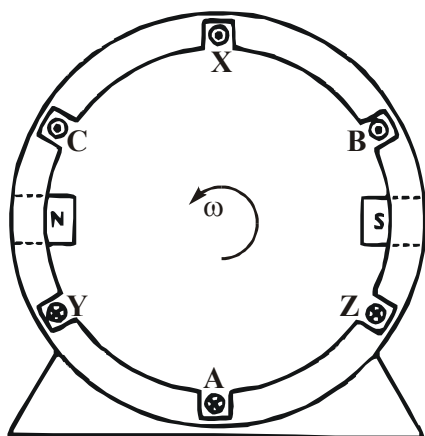
läbilõikamisega poolikülgede A_1 ja Y_2 vahelt. Väljapoole uuret jäävaid mähispoolide osi nimetatakse **laupühendusteks**. Laupühenduste kaudu läheb vool ühest uurdest teise. Staatorile paigutatud kolmefaasiliste poolidekomplektide arv võib olla ka kahest suurem, millega välja pöörlemiskiirus langeb veelgi.



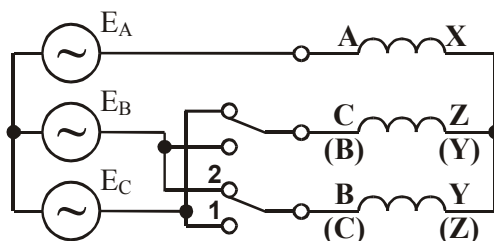
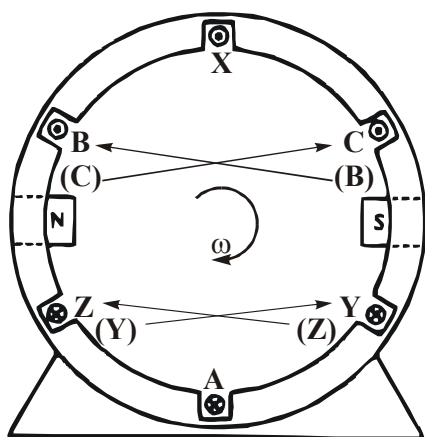
Joonis 4.10. Magnetvälja pöörlemiskiiruse aeglustamine kaks korda kolmefaasilise poolidekomplekti paigutamiseks ainult ühele staatori poolele – (a); teise kolmefaasilise poolidekomplekti lisamine pöördemomendi tõstmiseks kaks korda – (b); kahe poolidekomplekti poolt moodustatud neli mõttelist liikuvat poolust – (c); tasapinnale laotatud neljapooluselise masina staatorimähise skeem

Staatorivälja pöörlemis-suuna muutmiseks tuleb kolmest toitefaasi juhtmest kaks lüliti abil ringi vahetada, nagu on näidatud joonisel 4.11.

Kui ümberlüüti on asendis 1, siis toiteemj. E_B on ühendatud masinal faasimähise B algusega ja toiteemj. E_C on ühendatud masinal faasimähise C algusega (joonis 4.11a). Väli pöörleb siis vastupäeva. Kui viime ümberlüüti asendisse 2, siis toiteemj. E_B ühendatakse mähisega, mis oli algusest C faasi mähis (esialgne faas on näidatud joonisel sulgudes). Sisuliselt vahetavad B ja C faasi mähised staatoril kohad. Endine C ja Z on nüüd B ja Y ja endine B ja Y on nüüd C ja Z. Kuna väli pöörleb staatoril suunas A – Z – B – X – C – Y – A (nagu eelpool nägime), siis joonisel 4.11b saame seda teed liikudes päripäevase pöörlemis-suuna, mis on vastupidine esialgsega.



a)

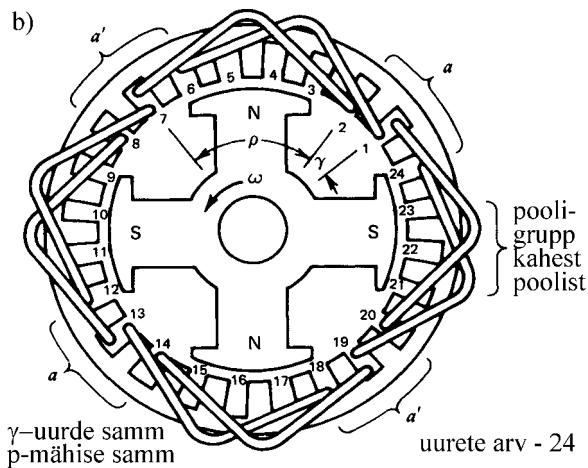
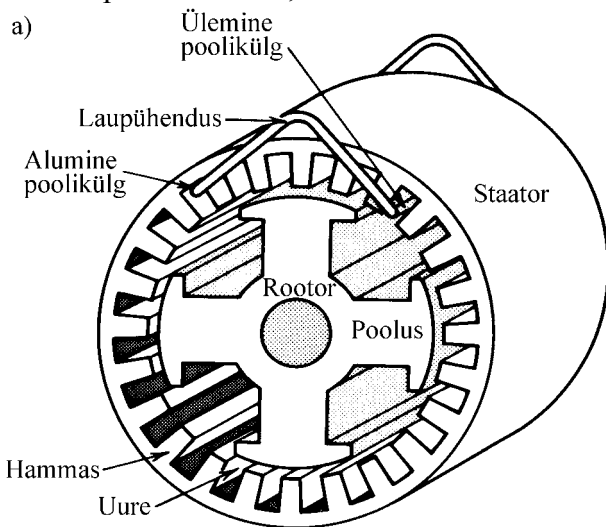


b)

Joonis 4.11. Vastupäeva pöörlemissuuna (a) asendamine päripäeva pöörlemissuunaga (b) kahe toitefaasi ümberlülitamise teel

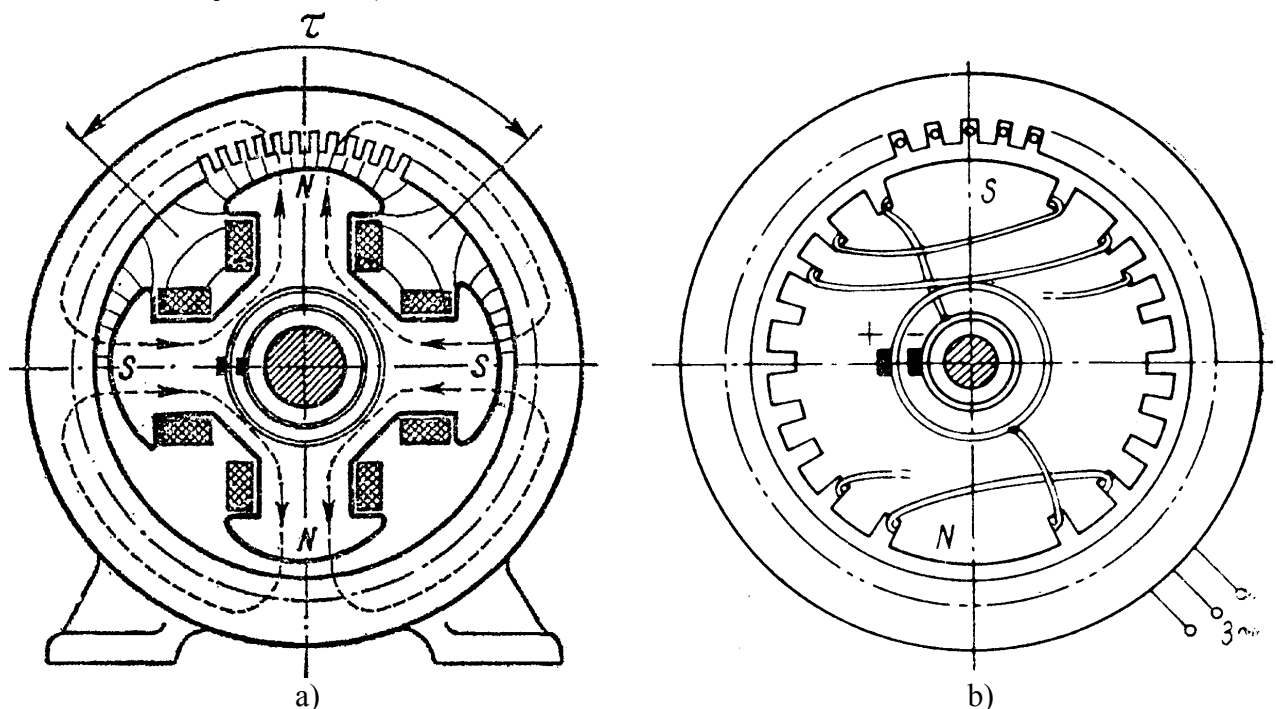
4.4. Sünkroonmasinate konstruktsioon ja tööprintsip

Staatore sisepind (joonis 4.12) on üleni kaetud **uuretega**, kuhu paigutatakse mähised. Kahe uure vahele jäävat magnetahelaosa nimetatakse **hambaks**. Hammaste kaudu läheb staatori magnetvoog läbi õhupilu rootorisse, mida sünkroonmasinal nimetatakse ka **induktoriks**.



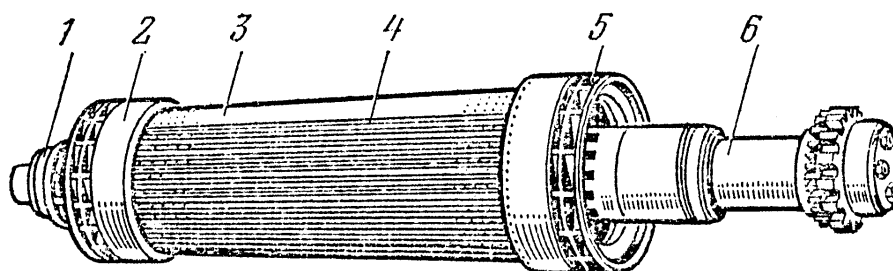
Joonis 4.12. Kahe pooluspaariga väljepoolustega sünkroonmasina konstruktsioon (a) ja kahekihilise mähise paigutus staatorile (b)

Induktor kujutab endast tavaliselt **elektromagnetit**, kuid vahel ka **püsimagnetit** (eriti just väikestel masinatel). Suurte sünkroonmasinate induktori elektromagneti juures kasutatakse kahte konstruktsiooni – väljepoolustega konstruktsioon (joonis 4.12 ja joonis 4.13a) ja peitpoolustega konstruktsioon (joonis 4.13b).



Joonis 4.13. Väljepoolustega (a) ja peitpoolustega (b) sünkroonmasin

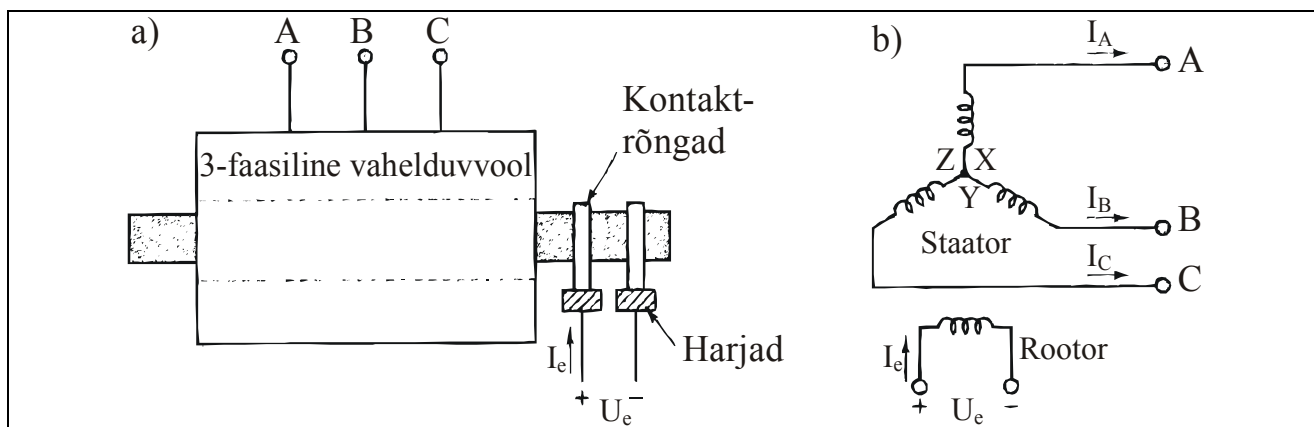
Väljepoolustega sünkroonmasinaid kasutatakse diisलगeneraatorites ja hüdrogeneraatorites, kus suhteliselt madala pöörlemiskiiruse tõttu on pooluste arv suur (kuni 100). Auru- või gaasiturbiiniga generaatorites (nn. **turbogeneraatorites**) on suure pöörlemiskiiruse tõttu ainult üks paar (harva ka kaks paari) pooluseid ja seal kasutatakse peitpoolustega rootorit. Joonisel 4.14 on näidatud peitpoolustega rootori väliskuju.



Joonis 4.14. Peitpoolustega rootor: 1 – kontaktrõngad; 2 – bandaaž; 3 – rootori massiivne magnetahel; 4 – rootori uuret kattev mittermagnetiline kiil; 5 – tsentrifugaalventilaator; 6 – turbiiniga sidestatud võlli ots

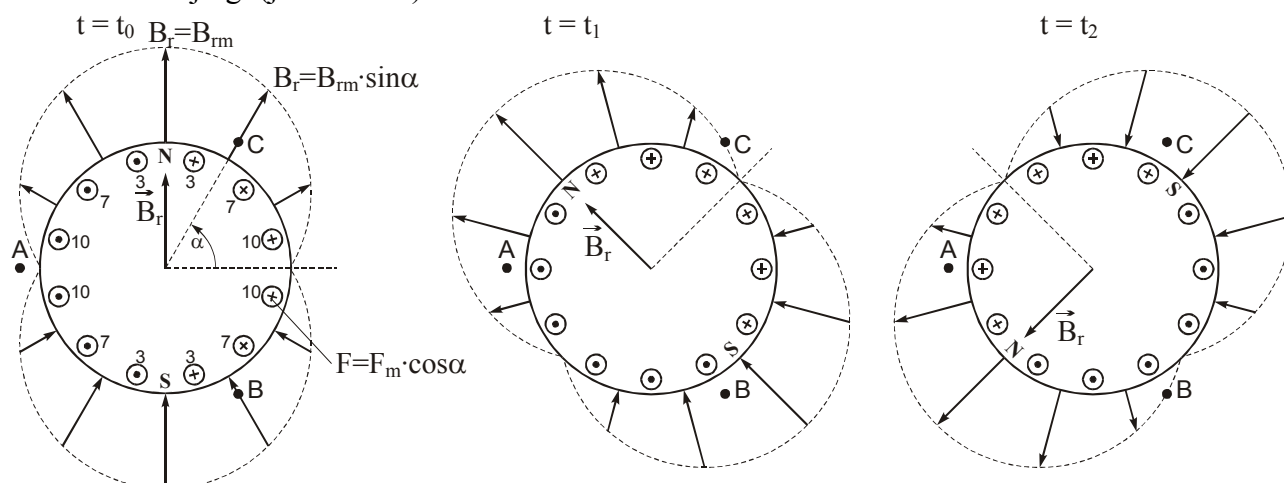
Selline rootor valmistatakse massiivsest terassepise, kuhu freesitakse uured. Massiivne terassepis annab suurte kiirekäiguliste rootorite jaoks vajaliku tugevuse. Rootori mehaaniline tugevus on generaatori maksimaalset võimsust piiravaks teguriks.

Sünkroonmasina rootoril olevat mähist nimetatakse **ergutusmähiseks**. Pöörleval rootoril olevat mähist toidetakse kahe koos võlliga pöörleva **kontaktrõnga** ja nende rõngastega kontaktis olevate liikumatute harjade kaudu (joonis 4.15).



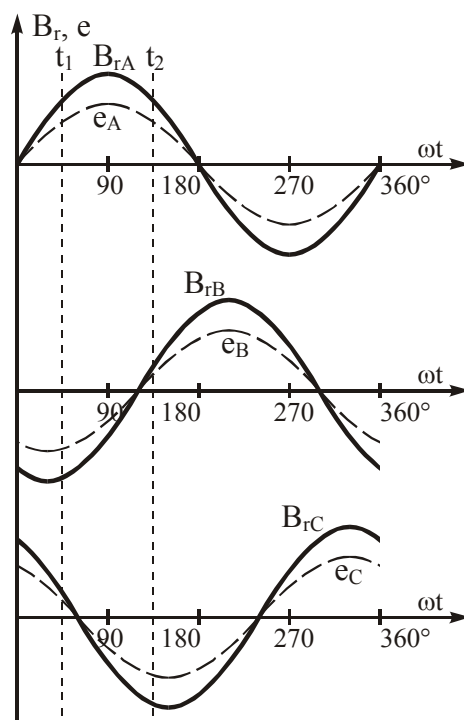
Joonis 4.15. Ergutusvoolu juhtimine sünkroonmasinasse (a) ja staatori ning rootorimähise skeem (b)

Kasutatakse ka keerukamat harjadeta ergutusmähise toidet, kus ergutusvool saadakse rootori võllil asuva väikese vahelduvvoolugeneraatori voolu aldamise teel. Väljepoolustega rootori igal poolusel on oma **ergutuspool**, mis joonisel 4.13a on näidatud lõikes. Joonisel 4.12a on väljepoolustega rootor näidatud ilma ergutusmähiseta. Peitpoolustega rootori ergutusmähis asub silindrilise rootori pinnal olevates uures (joonis 4.13b). Selleks et staatorimähistes indutseeritaks generaatoritalitluses siinuspinge, peab rootori vootihedus B_r muutuma piki rootori ümbermõõtu siinusseaduse järgi (joonis 4.16).



Joonis 4.16. Vajalik vootiheduse jaotus piki rootori pinda on siinuseline ja selle saavutamiseks peab magnetimisergutuse jaotus olema koosinusseaduse järgi ning sellise ruumis koos rootoriga pöörleva siinuslaine iseloomustamiseks kasutatakse ruumvektorit \vec{B}_r , mille suund ühtib põhjapooluselt väljuva siinuslaine amplituudi suunaga

Antud juhul on vootihedus ligikaudu proportsionaalne magnetimisergutusega. Siinuselise vootiheduse jaotuse saamiseks peab magnetimisergutus F (magnetimisergutus on võrdne keerdude arvu ja voolutugevuse korrutisega) jaotuma piki ümbermõõtu koosinusseaduse järgi. Seda saab teha näiteks uuresse paigutatud poolide keerdude arvu muutmise teel (3 keerust kuni 10 keeruni joonisel 4.16). Teiseks võimaluseks on uurde sammu muutmine, mis on näidatud joonisel 4.13b. Väljepoolustega rootori puhul saavutatakse siinuseline jaotus sel teel, et õhupilu on pooluse otsa (seda nimetatakse **poolusekingaks**) keskosas väiksem ja äärtel suurem (joonis 4.13a). Suuremal õhupilul on suurem magnetiline takistus ja seda läbib vähem jõujooni. Tegelik vootiheduse jaotus siiski erineb vähesel määral siinusest, mis põhjustab ka generaatori pingekõvera väikese moonutuse.



Joonis 4.16a. Siinuselise vootiheduse jaotusega rootori pöörlemisel staatori punktides A, B ja C tekkivad vootiheduse muutused ja nendes punktides asuvates staatorimähiste osades indutseeritud elektromotoorjõudude muutused ajas

Siinuslainekujulise jaotusega magnetväli lõikab pöörlemisel staatorit. Selle tõttu indutseeritakse staatori kõikides uuretes olevates mähisetraatides **siinuseline elektromotoorjõud**. Eri uuretes asuvate mähisraatide elektromotoorjõud ei ole ühes ja samas faasis. Joonisel 4.16 on näidatud kolme eri uurede mähiste asukohad (punktid A, B ja C). Need punktid on omavahel nihutatud $1/3$ täispöörde ehk 120° ulatuses. Joonisel 4.16a on näidatud nendes punktides tekkivad vootiheduse muutused ajas ja samuti ka indutseeritud elektromotoorjõud (e_A , e_B ja e_C). Paneme tähele, et

- vootihedus ja elektromotoorjõud on pöörleva siinusvälja puhul ühes ja samas faasis ja
- eri uurete juhtmete elektromotoorjõudude ajaline faasinihe **elektrilistes kraadides** langeb kahe pooluse korral kokku nende uurete ruumilise paigutuse nihkega **pöördenurga kraadides**.

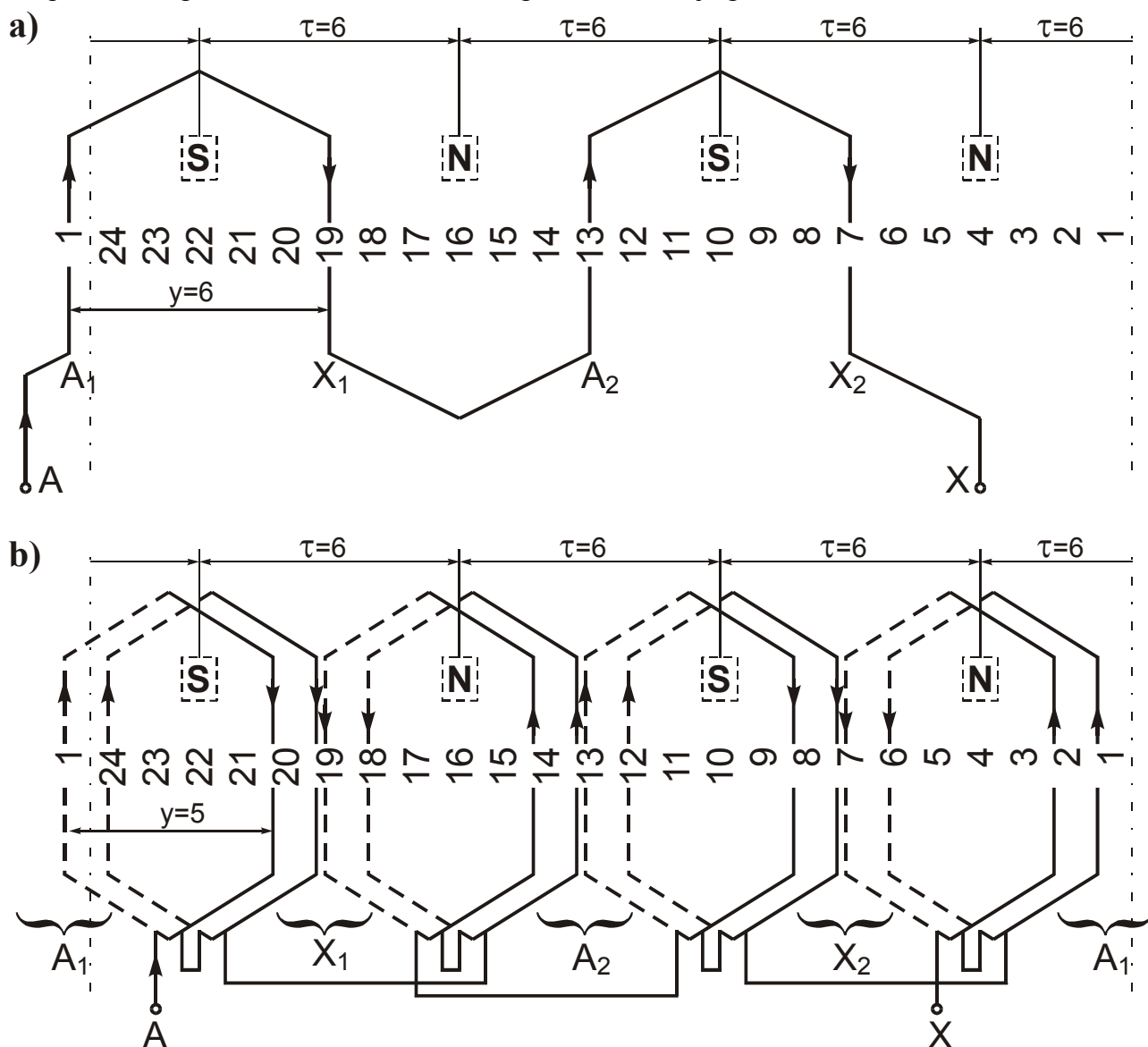
Vootihedus ja elektromotoorjõud on siin faasis sellepärast, et ruumis liikuva välja poolt indutseeritud elektromotoorjõud on leitav avaldise $E=B \cdot l \cdot v$ põhjal (vt. punkt 2.1.4). Ajas muutuv magnetvoog ja tema poolt indutseeritud pinge on aga faasis 90° nihutatud (Lenzi seadus $e=d\Phi/dt$) ja siin ei ole tegemist selle juhtumiga.

Pöörleva magnetvoo siinuslaine iseloomustamiseks kasutatakse vootiheduse ruumvektorit \vec{B}_r , mille suund ühtib põhjapooluselt väljuva siinuslaine amplituudi suunaga ja mille moodul on võrdne selle amplituudiga.

4.4.1. Kahekihiline jaotatud mähis

Vahelduvvoolumasinate kasutatakse tavaliselt **kahekihilisi mähiseid**. Kui ühekihilises mähises on uurdes ainult üks pooli külge (näiteks joonisel 4.9 ja 4.10), siis kahekihilistel mähistel on ühes uurdes kaks poolikülge, mis kuuluvad erinevatele poolidele. Sealjuures poolid koosnevad harilikult mitte ühest keerust vaid suuremast arvust keerdudest (mitukümmend keerdu) ja kõik poolid paigutatakse nii, et üks poolikülge pannakse uurde põhja (alumise poolikülge) ja teine poolikülge juba eelnevalt paigutatud teise pooli külge peale (ülemine poolikülge). Seda on näidatud joonisel 4.12.

Teiseks erinevuseks võrreldes lihtsaima kolmefaasilise mähisega (joonis 4.9 ja 4.10) on see, et igas faasis on ühe pooli asemel mitu pooli (2, 3, 4 jne.). Sellist mitme pooliga mähist nimetatakse **jaotatud mähiseks**. Joonisel 4.12 kujutatud masinal on staatoril 24 uuret ja iga pooluse kohta tuleb $24/4=6$ uuret (masinal on neli poolust). Pöördvälja saamiseks peab iga pooluse välja moodustamiseks kasutama kõigi kolme faasi voolu (nagu eelnevalt on näidatud). Sellega tuleb antud juhul ühe pooluse ühe faasi peale $6/3=2$ uuret. Joonisel 4.12b on näidatud ainult ühe faasi mähis. Iga pooluse üks faas on siin moodustatud kahepoolilisest pooligrupist. Kahekihilisel mähisel on uurete ja poolide arv võrdne (igal poolil on kaks külge ja igas uurdes on ka kaks poolikülge). Poolide ja uurete arvu suurendamine võimaldab vähendada uurete sügavust ja katta kogu staatori sisepind uuretega, mis on soodne kadude ning masina kaalu ja gabariitide vähendamise seisukohalt.



Joonis 4.17. Neljapooluselise masina A faasi mähis, kui see on teostatud lihtsaima ühekihilise mähisena (a) ja kui see on teostatud jaotatud kahekihilise mähisena (b)

Suure uurete arvu tõttu on mähise poolide paigutus ja ühendamine suhteliselt keerukas. Selle hõlbustamiseks kasutatakse mähise skeeme, mis kujutavad endast staatori sisepinda mähistega. Sealjuures on staator mõtteliselt lahti lõigatud ja tasapinnale laotatud. Joonisel 4.17b on toodud joonisel 4.12 näidatud staatori ühe faasi mähise skeem, kus staator on läbi lõigatud 1. ja 24. uure vahelt. Uurdeid ei ole välja joonistatud, kuid on ära toodud uurete numbrid. Alumised pooliküljed on skeemil näidatud kriipsjoontega. Joonisel 4.17 on kõik neli A faasi pooligrupi ühendatud järjestikku. Põhimõtteliselt on võimalik ka paralleel- ja segaühendus.

Poolide ühendusskeemi koostamisel tuleb jälgida, et poolikülgede voolude suunad oleksid samasugused, kui eelpool vaadatud lihtsaimal mähisel. Lihtsaima ühekihilise mähise paigutus 24 uurdega staatorile on näidatud joonisel 4.17a. Ühe faasi mähis hõivab seal 4 uuret ja kolme faasi mähis 12 uuret. 12 uuret jääb tühjaks, sest mähist ei jaotata (praktiliselt muidugi pole sellisel variandil mõtet, kuid see aitab selgitada mähise jaotamist). Kui me võrdleme joonisel 4.17 toodud jaotatud ja jaotamata mähist, siis jaotamata mähise neljale pooliküljele A_1, X_1, A_2, X_2 vastab jaotatud mähisel neli niinimetatud **faasitsooni** A_1, X_1, A_2, X_2 . Näiteks faasitsooniks X_1 on uuretes 18, 19 ja 20 olevad mähisepoolide küljed ja see faasitsoon on ekvivalentne jaotamata mähise 19-ndas uurdes olevale ühele pooliküljele. Jaotatud mähise kolmes uurdes on neli poolikülge. Kõigi nende poolikülgede vool on samasuunaline jaotamata mähise ühe poolikülje vooluga. Voolude samasuunalisus tagatakse mähisepoolide alguste ja lõppude vaheliste ühenduste sobiva valikuga. Jaotatud mähise voolud tekitavad rootori sisepinnal samasuguse magnetpooluste jaotuse, kui jaotamata mähise voolud.

Magnetpooluste vahekaugust piki staatori siseümberrõõru nimetatakse **poolusejaotuseks** ja selle tähis on τ . Poolusejaotust mõõdetakse nii meetritega, kui ka uurete arvuga. Poolusejaotus pikkusühikutes on

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad (4.14)$$

kus D – staatori siseläbimõõt;

p – pooluspaaride arv.

Poolusejaotus uurete arvu kaudu on

$$\tau = \frac{Z}{2p}, \quad (4.15)$$

kus Z on uurete arv. Joonisel 4.17 on näidatud $\tau = 6$ uuret.

Staatorimähist iseloomustab ka uurete arv pooluse faasi kohta q :

$$q = \frac{\tau}{m} = \frac{Z}{2pm}, \quad (4.16)$$

kus m on toitefaaside arv (tavaliselt $m=3$, kuid esineb ka $m=2$).

Joonisel 4.17 toodud mähisel $q=2$, kuid ühe faasitsooni mähis on paigutatud kolme uurdesse. Kui me vaatame faasitsooni X_1 , siis uurdes 18 on üks poolikülge, uurdes 19 on kaks poolikülge ja uurdes 20 on jälle üks poolikülge. Kui staatorile on paigutatud juba kõigi kolme faasi mähised, siis on 18-ndas uurdes A faasi poolikülje peale paigutatud C_1 faasitsooni poolikülge ja 20-ndas uurdes on A faasi poolikülje all B_1 faasitsooni poolikülge. Seega on uuretes 18 ja 20 kahe naabertsooni pooliküljed, kuid uurdes 19 kuuluvad mõlemad pooliküljed ühele faasitsoonile (vaata ka mähiste paigutust joonisel 4.12b).

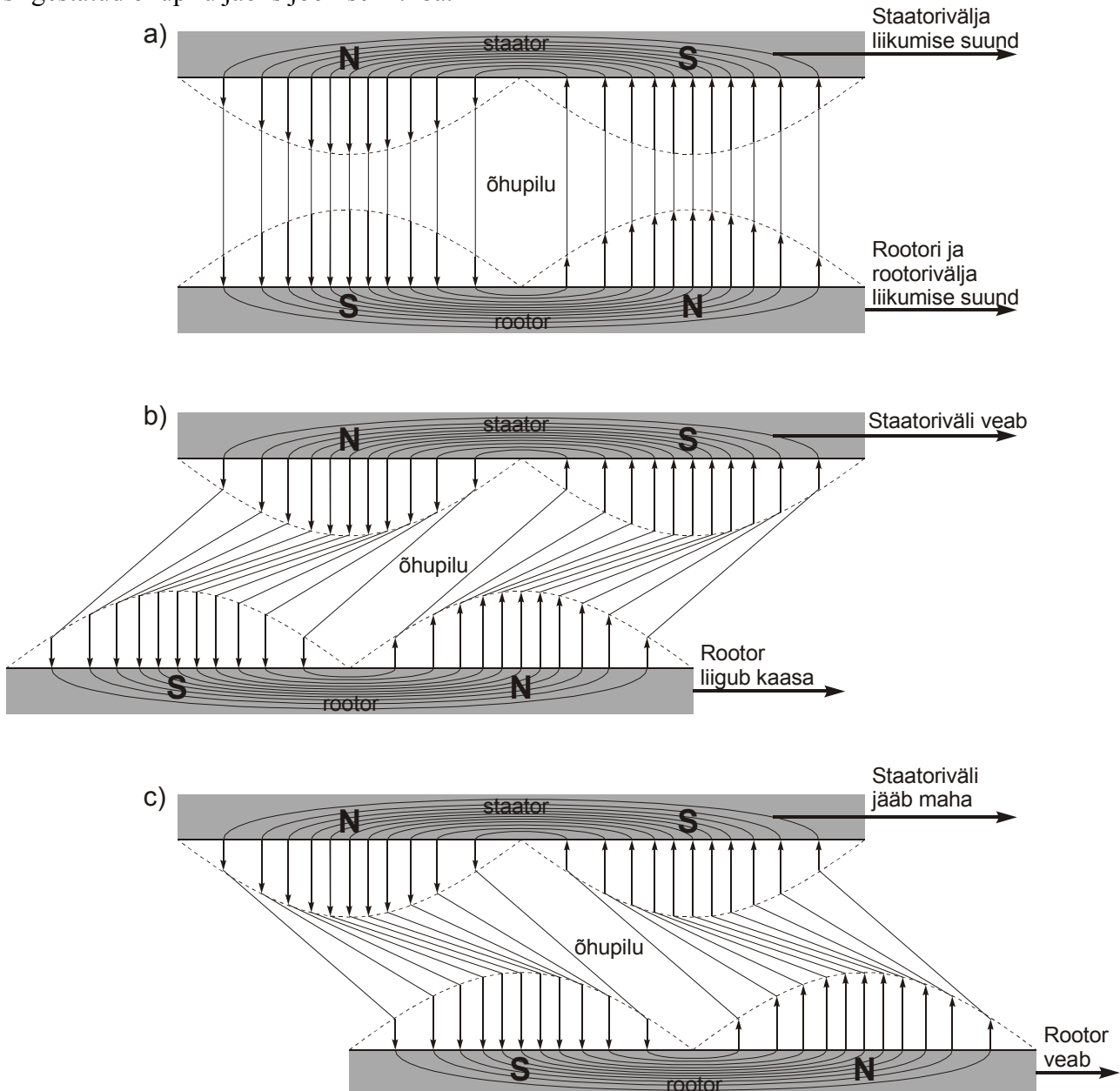
Ühe pooli kahe külje vahelist kaugust nimetatakse mähisesammuks y ja seda saab samuti mõõta nii pikkusühikutes kui ka uurete arvuga. Joonisel 4.17a toodud lihtsaimal mähisel on mähisesamm y võrdne poolusejaotusega τ . Sellist sammu nimetatakse **täissammuks**. Jaotatud mähiste puhul võib mähisesamm vähesel määral erineda poolusejaotusest. Tavaliselt tehakse mähisesamm veidi lühem kui poolusejaotus. Joonisel 4.17b on poolusejaotus $\tau = 6$, kuid mähisesamm $y = 5$. Sellist sammu nimetatakse **lühendatud mähisesammuks**. Kasutatakse ka suhtelise mähisesammu β mõistet

$$\beta = \frac{y}{\tau}. \quad (4.17)$$

Joonisel 4.17b toodud mähisel $\beta = 5/6 = 0,833$.

4.4.2. Staatori- ja rootorivälja nihkumine masina koormamisel ja elektromagnetilise momendi teke

Sünkroonmasinas pöörlevad staatoriväli ja rootoriväli koos ja püsitalitluses üksteise suhtes liikumatult. Üheskoos moodustavad nad resulteeriva välja, mis staatori suhtes pöörleb, kuid rootori suhtes on liikumatu. Koormuse muutumisel staatoriväli ja rootoriväli nihkuvad üksteise suhtes. Tühijooksul pöörlemisel on staatori põhjapooluse vastas teisel pool õhupilu rootori lõunapoolus ja nende pooluste telgede vaheline nurk on nulli lähedane. Selline olukord on näidatud mõtteliselt sirgestatud õhupilu jaoks joonisel 4.18a.

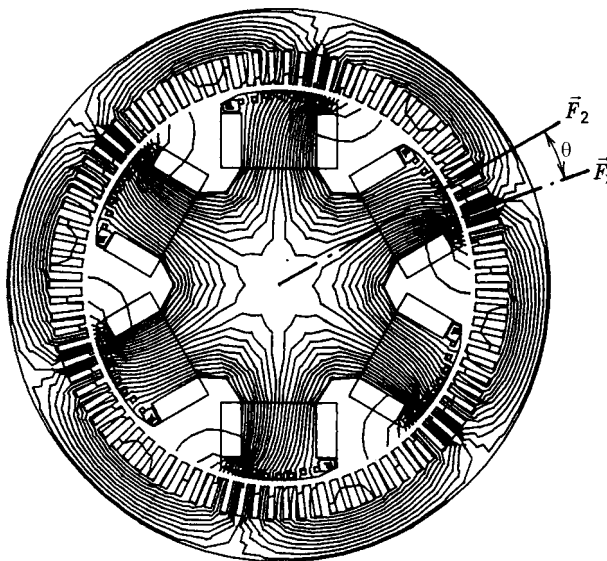


Joonis 4.18. Sünkroonmasina staatori ja rootori magnetväljade vastastikune asend ideaalsel tühijooksul (a), mootoritalitluses (b) ja generaatoritalitluses (c), kui nende väljade vastastikusest mõjust tingitud väljapildi muutust ignoreeritakse

Kui põhjapoolus ja lõunapoolus on vastastikku, siis on staatori ja rootori välja jõujooned ühesuunalised, sest jõujooned väljuvad põhjapooluselt ja sisenevad lõunapoolusesse. Nagu eelpool punktis 4.1 näidati, on elektromagnetiline moment sellisel juhul võrdne nulliga.

Kui staator on lülitatud kolmefaasilisele pingele ja me püüame sünkroonselt pöörlevat rootorit koormusmomendi tekitamisega pidurdada, siis jääb rootor staatoriväljast teatud nurga võrra maha. Joonisel 4.18b on näidatud rootori mahajäämus 90° võrra. Lihtsuse ja arusaadavuse huvides on sellel joonisel ignoreeritud staatori ja rootori väljade vastastikusest mõjust tingitud jõujoonte jaotuse ja suuna teatud muutusi, mis tegelikkuses esinevad. Rotori mahajäämise korral tekib välja pöörlemise suunas mõjuv elektromagnetiline moment, mis kasvab koos staatori ja rootori pooluste telgede vahelise nurga kasvuga (vt. punkt 4.1 avaldis (4.13)). Poolused nihkuvad seni, kuni masina elektromagnetiline moment saab võrdseks koormusmomendiga. Võib ette kujutada, et joonisel 4.18 näidatud jõujooned on elastsed kummipaelad. Rotori koormamisel need kummipaelad venivad pikemaks ja veavad rootorit kaasa. Sünkroonmasinat võib koormata kuni maksimaalse momendini, mida masin suudab arendada. Veel suuremal koormusel staatori ja rootori magnetväljade sünkroonne pöörlemine lõpeb ja seda nimetatakse **sünkronismist väljalangemiseks**. Selline talitus on masinale üldiselt ohtlik ja seda püütakse vältida. Sünkroonmasinale pöörlemist takistava koormusmomendi rakendamisel läheb sünkroonmasin mootoritalitluse ja võtab võrgust voolu. Võrgust võetav vool tekitabki elektromagnetilise momendi, mis tasakaalustab takistusmomendi.

Kui me püüame kolmefaasilisele võrgupingele lülitatud sünkroonmasina pöörlevat rootorit välise jõumasina momendi (näiteks auruturbiini poolt tekitatud momendi) abil panna sünkroonkiirusest kiiremini pöörlema, siis läheb rootor staatoriväljast teatud nurga võrra ette. Selle tõttu aga tekib pidurdav elektromagnetiline moment (nurk β tuleb avaldises (4.13) märgiga miinus), mille peab tasakaalustama töömasin. Töömasin annab elektrimasinale energiat ja elektrimasina staatorimähisest antakse võrku kolmefaasilist voolu. Võrku antava voolu tõttu tekibki pidurdav elektromagnetiline moment.

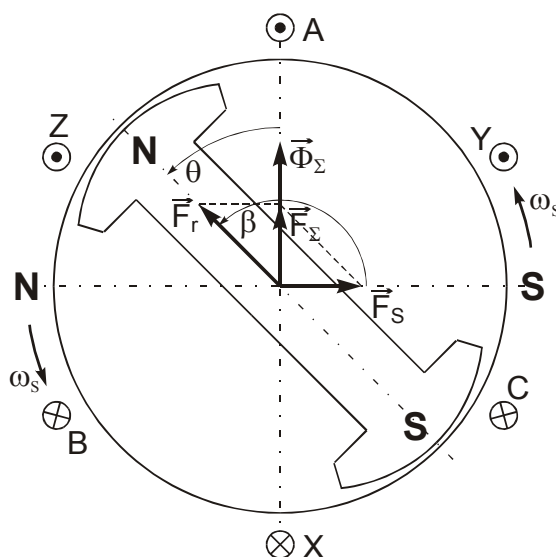


Joonis 4.19. Koormatud sünkroonmasina magnetvälja pilt

Koormatud sünkroonmasina tegelik väljapilt erineb joonisel 4.18 toodud pildist esiteks selle poolest, et välja jõujooned on sujuvad kõverad ja teiseks selle poolest, et koormamisel jõujoonte ja ka pooluste asukohad rootori ja staatori pinda mööda mõnevõrra nihkuvad. Kuuepooluselise väljapoolustega koormatud sünkroongeneraatori väljapilt (see on saadud arvuti abil) on toodud joonisel 4.19. On näha, et väli ei ole kõige tugevam mitte pooluste keskel, vaid ühe ääre all.

Ülevaate saamiseks rootori ja staatori sünkroonselt pöörlevate väljade omavahelisest nihkest masina koormamisel kasutatakse neid välja iseloomustavaid pöörlevaid ruumvektoreid. Joonisel 4.20 on näidatud kahepooluselise väljapoolustega masina rootori magnetomotoorse jõu välja vektor \vec{F}_r , mille suund ühtib rootori poolusteljega ja staatori magnetomotoorse jõu välja vektor \vec{F}_s , mille suund on määratud staatorimähiste voolu faasiga (näidatud on hetk, kui vool on A faasis

maksimaalne). Samuti on näidatud summaarse magnetomotoorse jõu välja vektor \vec{F}_Σ , mis on saadud vektorite \vec{F}_r ja \vec{F}_s liitmisel. Vektoriga \vec{F}_Σ on samasuunaline magnetvoo välja vektor $\vec{\Phi}_\Sigma$. Kuna rotoriväli on pöörlemisel staatoriväljast ees, siis on siin tegemist generaatoritalitlusega. Nurka θ vektorite \vec{F}_Σ ja \vec{F}_r vahel nimetatakse **koormusnurgaks**.

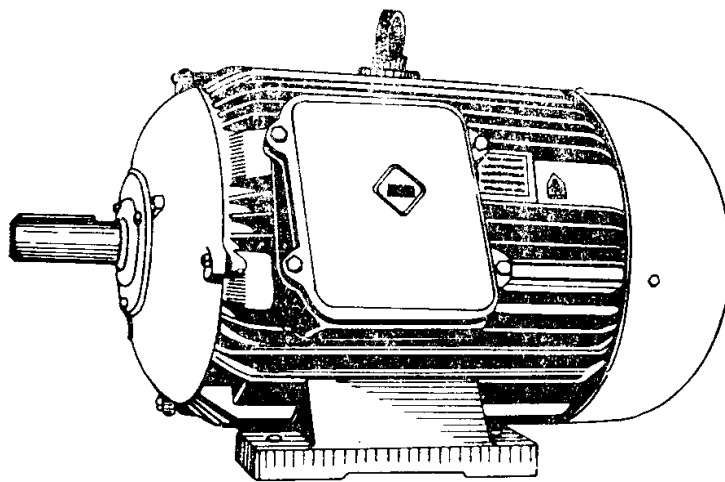


Joonis 4.20. Staatori magnetimisergutuse vektori \vec{F}_s , rootori magnetimisergutuse vektori \vec{F}_r ja resulteeriiva magnetimisergutuse vektori \vec{F}_Σ vahelised nurgad generaatoritalitluses

4.5. Asünkroonmasina konstruktsioon ja tööpõhimõte

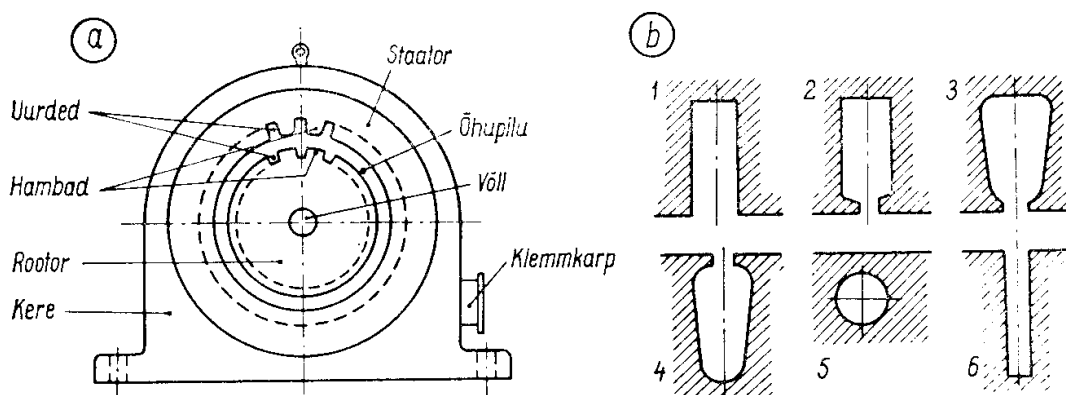
Asünkroonmootori ja ka kolmefaasilise energiasüsteemi idee on pärit Jugoslaavia insenerilt Nikola Tesla'lt, kes patenteeris selle süsteemi 1888. aastal. Hiljem töötas ta USA-s ja esimeseks suureks kolmefaasilise energiasüsteemi rakenduseks oli Niagara kose hüdroelektrijaam 1895. aastal. Kolmefaasiline energiasüsteem koos asünkroonmootoriga on hea lahendus. Pole vaja käivituse aparatuuri ega muundurit. Lülita lihtsalt võrku ja mootor töötab.

Asünkroonmasinat kasutatakse eelkõige mootorina, kuid ta võib teatud tingimustel töötada ka generaatorina. Kõige levinumad elektrimootorid üldse on kolmefaasilised asünkroonmootorid. Teiste mootoritega võrreldes on nad kõige lihtsama ehitusega, suhteliselt odavad ja töökindlad. Ühe 7,5 kW võimsusega asünkroonmootori üldvaade on joonisel 4.21.



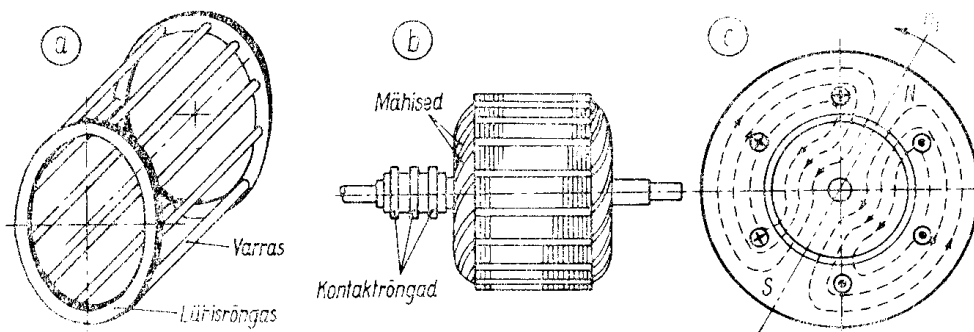
Joonis 4.21. Asünkroonmootor

Asünkroonmootori staator ja staatorimähised ei erine põhimõtteliselt sünkroonmasina staatorist ja staatorimähistest. Mõlemal juhul tekitatakse staatoris pöördmagnetväli. Staatori uured võivad olla väga erineva kujuga (näiteks uured 1,2 ja 3 joonisel 4.22b). Staator on kinnitatud (näiteks pressimisega) mootori kerele.



Joonis 4.22. Asünkroonmootori skemaatiline lõige (a) ja uurete kujud (b)

Asünkroonmootori pöörlev rootor kujutab endast võllile paigaldatud teraslehtedest silindrit. Rootori välispinnal on uured. Rootori uures asub mähis (uurete võimalikud kujud 4, 5, 6 on joonisel 4.22b). Rootori teraslehtedest konstruktsioon on mõeldud pöörisvoolukao vähendamiseks nagu staatorilgi. Rootorimähis võib olla valmistatud **lühismähisena** (joonis 4.23a) või staatorimähisega sarnasest kolmefaasilisest mähisest, mis koosneb rootorist isoleeritud mähispoolidest (joonis 4.23b). Esimesel juhul on tegemist **lühisrootoriga asünkroonmootoriga** ja teisel juhul **faasirootoriga asünkroonmootoriga**. Enam on levinud lühisrootoriga asünkroonmootorid. Nende lühismähis koosneb varrastest ja neid ühendavatest lühisrõngastest. Selline mähis valmistatakse alumiiniumist survevalu meetodil. Valamisel täituvad üheaegselt kõik isoleerimata uured ja moodustuvad ka lühisrõngad koos ventilatsiooniks vajalike tiivikulabadega nende küljes. Seda mähist nimetatakse ka oravikmähiseks.

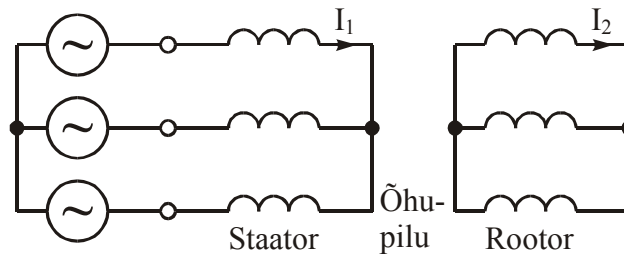


Joonis 4.23. Asünkroonmootori lühismähis (a), faasimähisega rootor (b) ja kahepooluselise magnetvoo väljapilt (c)

Faasirootori korral on kolme faasi mähised ühendatud tavaliselt tähte ja mähiste algused on ühendatud võllil asuva kolme isoleeritud kontaktrõngaga. Kontaktrõngastega kontaktis olevate harjade kaudu on rootorimähis ühendatud välisahelaga, kus asub kiiruse reguleerimise skeem. Viimasel ajal kasutatakse faasirootoriga asünkroonmootori asemel sageli lühisrootoriga mootorit koos sagedusmuunduriga, mis samuti võimaldab kiirust reguleerida.

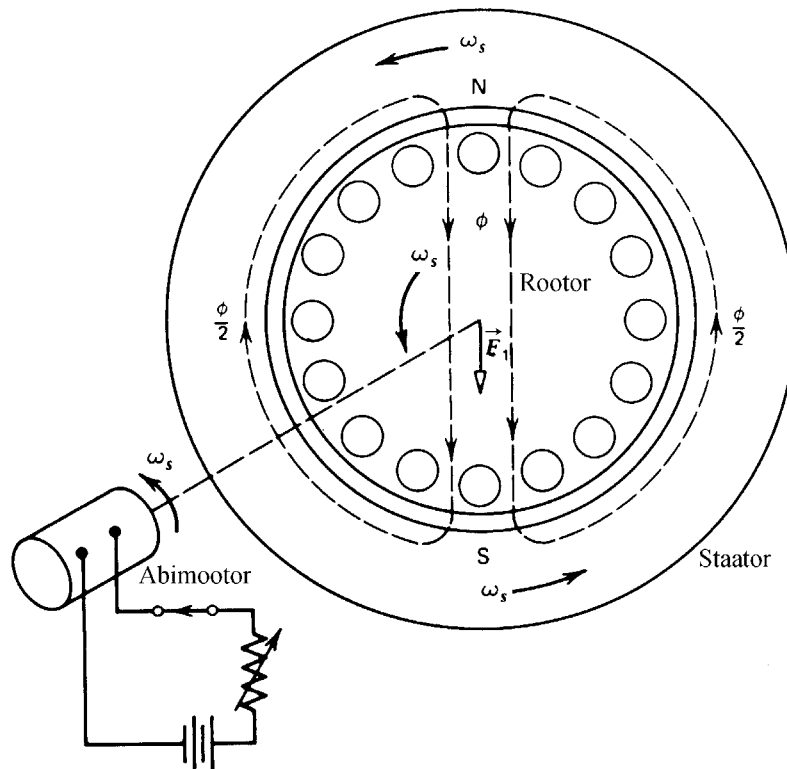
Asünkroonmootori tööpehmoõttes selgusele jõudmiseks on kasulik alustada kahest äärmuslikust talitlusest, milleks on **paigalseis** ja **ideaalne tühijooks**. Kui asünkroonmootori rootor on kinni pidurdatud ja ei saa pöörelda, siis töötab asünkroonmootor trafona. Staatorimähise võrku lülitamisel

tekib vool. Staatorimähise vahelduvväli läbib õhupilu ja indutseerib rootorimähises pinget. Kui rootoril on lühismähis, siis on olukord analoogiline kolmefaasilise trafo lühistalitlusele (joonis 4.24). Rotorimähises tekib pinge ja vool, mille sagedus on võrdne toitepinge sagedusega.



Joonis 4.24. Pidurdatud lühisrootoriga asünkroonmootor töötab nagu lühistatud trafo

Kui asünkroonmootori rootor panna välise jõuallika poolt pöörlema täpselt sama kiirusega ja samas suunas, kui staatorimähise magnetväli pöörleb, siis rootorimähises pinget ei indutseerita, sest staatorimähise väli seisab rootori suhtes paigal (paigalseisev väli ei indutseeri juhtmetes pinget). Pinge puudumisel ei teki ka rootorimähises voolu (joonis 4.25).



Joonis 4.25. Asünkroonmasin, mida välisest jõuallikast hoitakse sünkroonkiirusel ehk ideaalsel tühijooksul

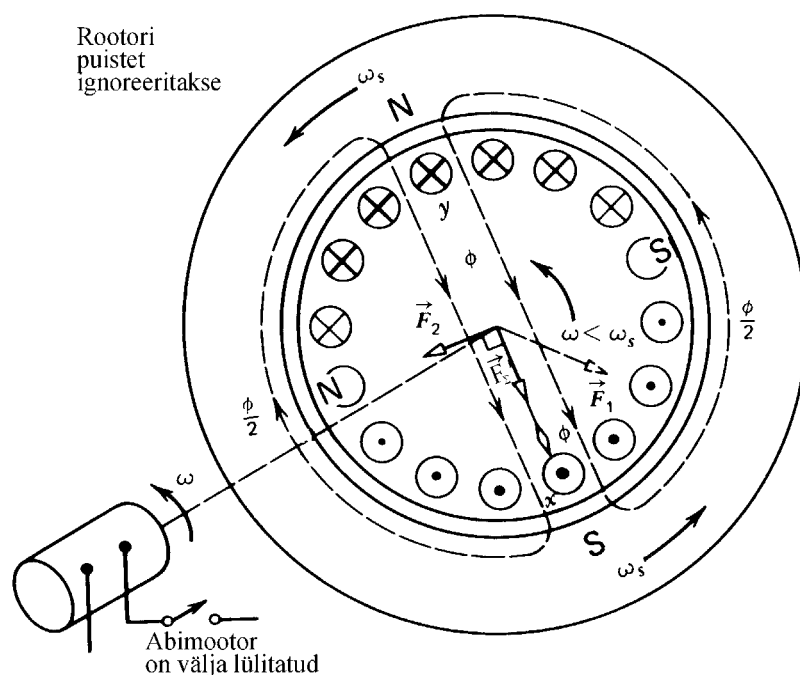
Sellist rootori pöörlemiskiirust nimetatakse **sünkroonkiiruseks** (analoogia põhjal sünkroonmasinaga). Sünkroonkiirusel on asünkroonmasin absoluutse tühijooksu talitluses, sest rootorimähise voolu puudumise tõttu puudub ka elektromagnetiline moment. Staatorimähises on samal ajal aga vool, mis vastab trafo tühijooksuvoolule. **Seega vastab pidurdatud rootoriga asünkroonmootor lühistatud trafole ja ideaalsel tühijooksul olev asünkroonmootor trafo tühijooksule.** Asünkroonmootori tühijooksuvool on siiski trafo tühijooksuvoolust mitu korda suurem, sest asünkroonmootoril on õhupilu, mida trafol ei ole. Tühijooksuvoolu vähendamiseks püütakse asünkroonmootori õhupilu teha hästi väike (umbes 0,5 mm).

Kui joonisel 4.25 näidatud väline jõuallikas välja lülitatakse, siis tekib uus olukord, mis on näidatud joonisel 4.26. Hõõrdumise ja õhutakistuse tõttu hakkab rootori kiirus tasapisi vähenema. Sellega

hakkavad rootorimähise juhtmed sünkroonkiirusel pöörleva staatorivälja suhtes tagurpidi libisema ja neis indutseeritakse väike pinge. Lühismähise takistus on väike ja juba väike pinge põhjustab märkimisväärse voolu. Vastavalt parema käe reeglile on voolu suund joonisel põhjapooluse vastas olevates juhtmetes suunatud joonise tasapinna sisse ja lõunapooluse vastas olevates juhtmetes joonise tasapinnast välja. Rotorivoolu mõjul tekib

- rootorijuhtmetel indutseeritud jõud ja jõumoment ning
- rootorimähise magnetväli (joonisel 4.26 poolused N ja S rootoril).

Indutseeritud jõu suund on selline, et tekiv jõumoment on staatorivälja pöörlemise suunas (jõu suuna saab vasaku käe reeglga, joonisel ei ole jõudu näidatud). See jõumoment panebki asünkroonmasina pöörlema. Seega *staatorimähise väli indutseerib asünkroonmähise rootorijuhtmetele nii elektromotoorjõu kui ka mehaanilise jõu* (kui rootorimähiste voolukontuur on suletud).



Joonis 4.26. Kergelt koormatud asünkroonmootor

Kui asünkroonmootor on ainult kergelt koormatud, siis erineb rootori nurkkiirus ω väga vähe sünkroonkiirusest ω_s (näiteks $\omega=0,999\omega_s$). Rotorimähises indutseeritakse elektromotoorjõud, millel on väga väike nurksagedus ω_2 . See nurksagedus on kahepooluselisel mootoril võrdne rootori **suhtelise** kiirusega pöörleva staatorivälja suhtes. Kui rootoriväli pöörleb sünkroonse nurkkiirusega ω_s ja rootori nurkkiirus paigalseisva staatori suhtes on ω , siis on rootori nurkkiirus (ω_2) staatorivälja suhtes

$$\omega_2 = \omega_s - \omega \quad (4.18)$$

ehk

$$n_2 = n_s - n, \quad (4.19)$$

kui pöörlemiskiirust mõõdetakse pööretes minuti kohta. Rotori suhtelisi kiirusi staatorivälja suhtes ω_2 ja n_2 nimetatakse ka **libistuskiirusteks**. Suhtelist libistuskiirust staatorivälja kiiruse suhtes nimetatakse **libistuseks** s

$$s = \frac{n_2}{n_s} = \frac{\omega_2}{\omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega}. \quad (4.20)$$

Kui 50 Hz toitel on kaks pooluspaari, siis on sünkroonkiirus $n=3000$ p/min ja kui mootori kiirus $n=0,999n_s$, siis libistuskiirus $n_2=n_s-0,999n_s=0,001n_s=0,001 \cdot 3000=3$ p/min.

Seega rootor libiseb pöörleva välja suhtes aeglaselt tagasi nii, et minutiga saab ainult kolm täispöört. Rootori kiirus paigalseisva staatori suhtes on aga samaaegselt $n=n_s-n_2=3000-3=2997$ p/min. Libistus on antud juhul $s=n_2/n_s=3/3000=0,001$ ehk 0,1%. Libistuse avaldist (4.20) võib teisendada ka kujule

$$n_2=sn_s \text{ ehk } \omega_2=s\omega_s. \quad (4.21)$$

Sünkroonkiirus ω_s , mis väljendab staatorivälja pöörlemiskiirust radiaanides sekundis sõltub pooluspaaride arvust p ja toitepinge nurksagedusest $\omega_1=2\pi f_1$, kus f_1 on võrgu sagedus.

$$\omega_s = \frac{\omega_1}{p} = \frac{2\pi f_1}{p}. \quad (4.22)$$

Analoogiliselt

$$n_s = \frac{n_1}{p} = \frac{60 f_1}{p}. \quad (4.23)$$

Alltoodud tabelis on toodud rida asünkroonmootorite sünkroonkiirusi ja nimikiirusi n_n (juhule, kui nimilibistus on 4% ja $f_1=50$ Hz) sõltuvalt pooluspaaride arvust p .

p	1	2	3	4	6
n_s [p/min]	3000	1500	1000	750	500
n [p/min]	2880	1440	960	720	480

Kui võrgusagedus on 60 Hz, siis on pöörlemiskiirused suuremad (näiteks $p=1$ korral $n_s=3600$ p/min).

Pooluspaaride arvu muutmine ei muuda aga staatorivoolu sageduse f_1 ja rootorivoolu sageduse f_2 vahekorda. Sõltumatult pooluspaaride arvust

$$f_2 = s f_1. \quad (4.24)$$

Nõrgalt koormatud asünkroonmootori korral ($s=0,1\%$) on rootorivoolu sagedus väga väike ($f_2=0,001 \cdot 50=0,05$ Hz). Sellisel sagedusel on rootorimähise induktiivtakistus ($x_2=2\pi f_2 L_{s2}$) suurus ka väga väike. Selle tõttu on rootori vool ja pinge praktiliselt faasis. Rootori voolu poolt tekitatud magnetvälja suund (seda näitab magnetomotoorse jõu vektor \vec{F}_2) erineb siis staatori ja rootori resulteeriva magnetvälja suunast (vektor $\vec{\Phi}$, mis tekitab elektromotoorjõu ja ka voolu laine) umbes 90° (joonis 4.25).

Asünkroonmootorilt võetava koormusmomendi suurendamisel toimuvad järgmised protsessid.

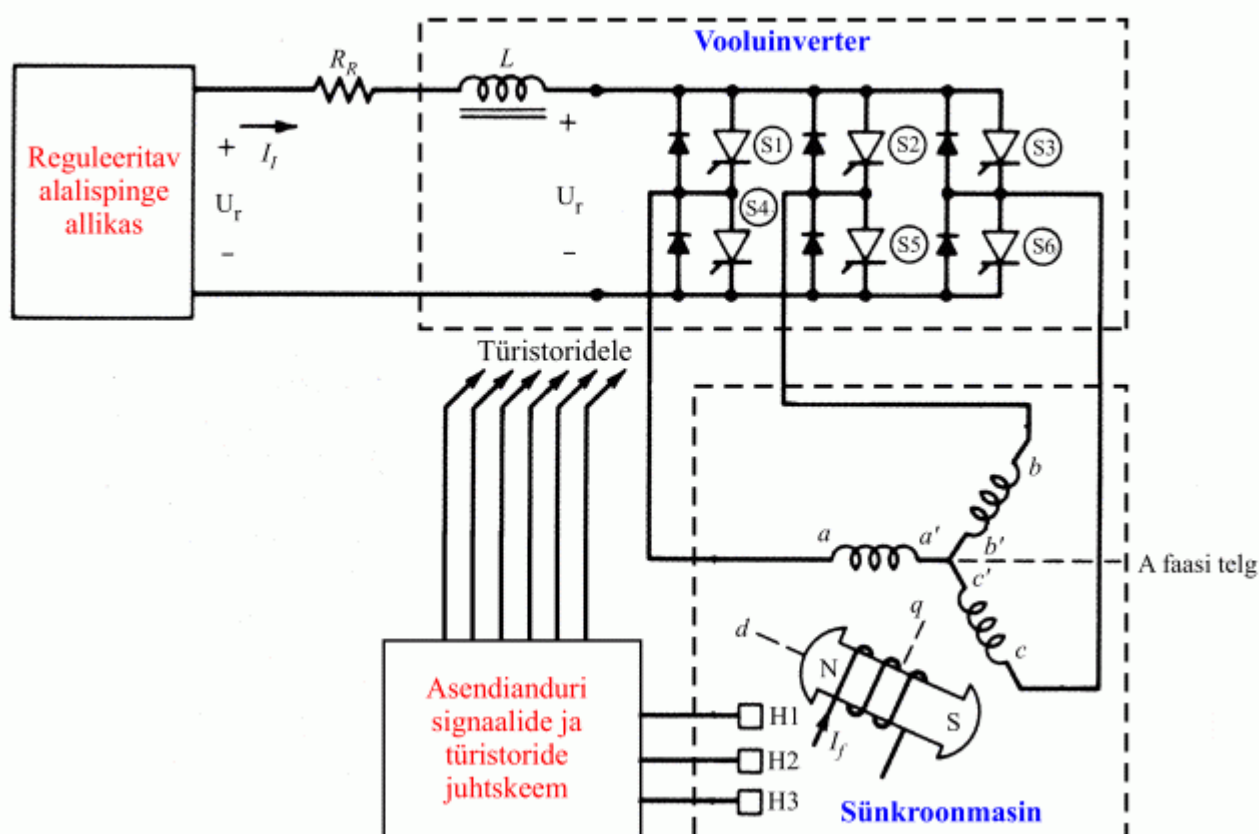
1. Rootori kiirus langeb, millega libistus ja rootorivoolu sagedus suurenevad.
2. Koos sagedusega suureneb indutseeritud elektromotoorjõud ja selle tõttu kasvab rootorivool.
3. Rootorivoolu kasvuga suureneb masina elektromagnetiline moment, mis tasakaalustab koormusmomendi kasvu.

Sageduse kasvuga aga hakkab ka rootorimähise induktiivtakistus x_2 kasvama, millega rootorivoolu kasv aeglustub. Alates teatud libistuse suurusest (orianteeruvalt 25%) mootori moment enam ei kasva. Seega asünkroonmootori kiirus sõltub koormusest. Siiski on kiiruse muutus nimikoormuse piirkonnas tavaliselt ainult mõned protsendid ja kiirus on suhteliselt lähedane staatorivälja pöörlemiskiirusele. *Pöörlev asünkroonmootor kujutab endast transformaatorit, mille primaarmähis ja sekundaarmähis üksteise suhtes liiguvad ja selle tõttu on primaarsagedus ja sekundaarsagedus erinevad. See transformaator on aga ka nii konstrueeritud, et sekundaarvoolud tekitavad koos primaarvoolu magnetväljaga vajaliku pöördemomendi.*

4.6. Vahelduvvoolu servomootor ehk harjadeta alalisvoolumootor

Konstruksioonilt on see masin sarnane sünkroonmasinale. Erinevuseks on see, et masina sisaldab ka rootori asendi andurit. Staatorimähis on kolmefaasiline nagu tavalisel sünkroonmasinal, kuid seda toidetakse vaheldist, mida juhitakse rootori asendi anduri signaalidega. Sealjuures hoitakse ruuminurk rootori põhjapooluse telje ja staatorivälja põhjapooluse telje vahel ligikaudu konstantne. See valitakse harilikult piirides $60...90^\circ$. Selle tõttu muutuvad masina omadused sarnasteks alalisvoolu masina omadustega, kus kommutaatori toimel rootori ja staatori väljade vaheline ruuminurk on pidevalt 90° (selline ruuminurk tagab maksimaalse pöördemomendi). Sarnaste omaduste tõttu nimetatakse vahelduvvoolu servomootorit ka harjadeta alalisvoolumootoriks. Harjadeta alalisvoolumootoris on voolu mehaaniline kommutatsioon asendatud elektroonilise. Kommutatsiooni teostab asendianduri poolt juhitud vaheldi. Peale selle on ergutusvälja tekitaja viidud staatorilt rootorile ja selleks kasutatakse tavaliselt püsिमagneteid. Kommuteeritav mähis on aga viidud rootorilt staatorile. Seda nimetatakse pöördkonstruktsiooniks. Elektroonilise kommutaatori lihtsustamise huvides on kasutatud ainult kolme mähisesektsiooni. Tavalises alalisvoolumasinas kutsub nii väike sektsioonide arv esile lubamatult suure pinge kommutaatorilestade vahel. Elektroonilises kommutaatoris hoitakse aga liigpinge teke ära vastava skeemiga. Sisseehitatud asendianduri tõttu on masinat lihtne kasutada teekonnajuhtimisega ajamites ja järgivajamites. Selle tõttu kasutatakse nimetust vahelduvvoolu servomootor (ing.k. AC-servo motor).

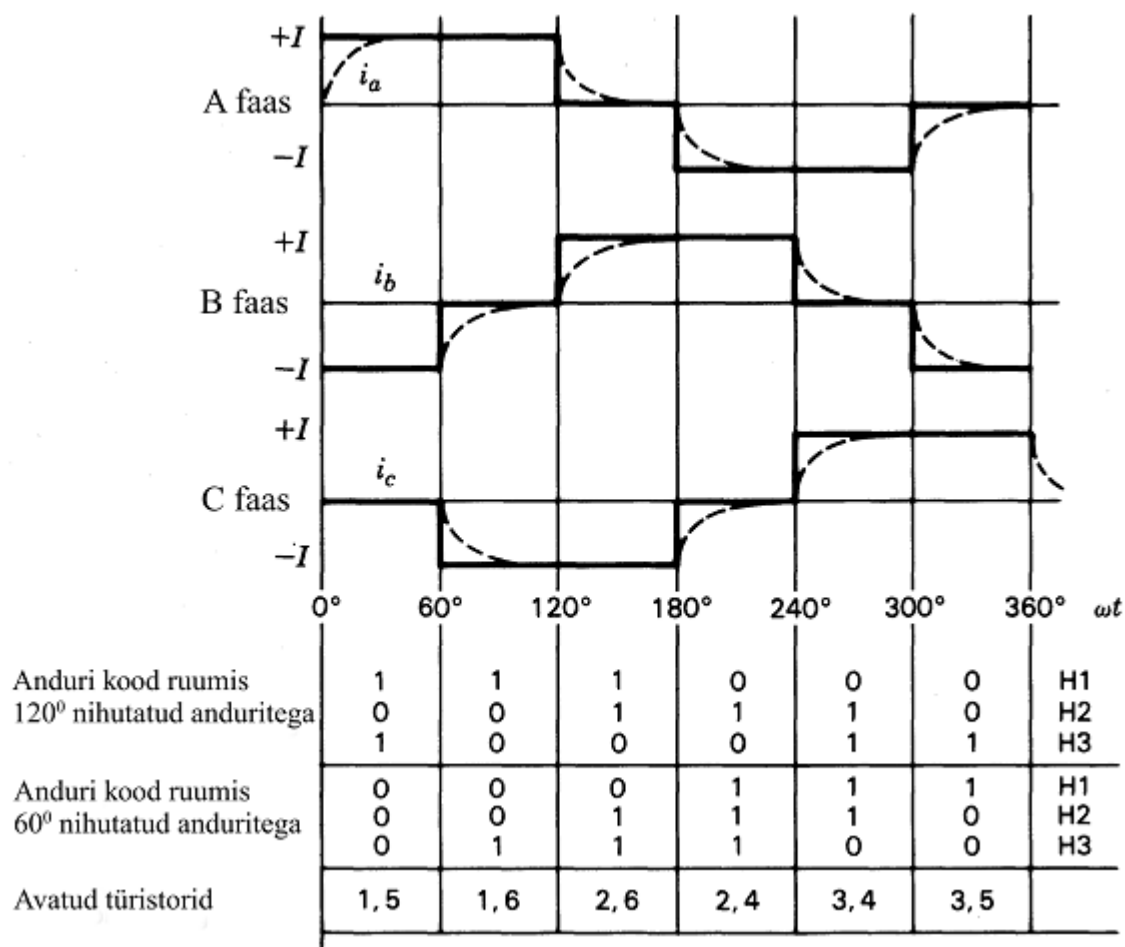
Vahelduvvoolu servomootori (ehk harjadeta alalisvoolumootori) skeem



Joonis 4.27. Vahelduvvoolu servomootori ja seda toitva vaheldi skeem

Servomootori toidetakse reguleeritava pingega alalisvoolu allikast läbi vaheldi (joonis 4.27). Suurematel võimsustel on kasutusel türistorvaheldi koos alalisvooludrosseliga (L joonisel 4.27), mis moodustab vooluverteri. Väiksematel võimsustel on jõutransistoridega pingeinverter. Vaheldisse antava alalispinge U_I muutmisel muutub mootori kiirus nagu alalisvoolumootori ankrupinge

muutumisel. Vaheldi türistoridega S1...S6 on paralleelselt lülitatud vastuvoolu diodid. Türistori sulgemisel mootori mähise vool ei saa kaduda hetkeliselt, sest selle vooluga on seotud staatori magnetvälja energia. Vastuvoolu diodi kaudu saab mähise vool jätkuda, kuni kogu magnetvälja energia on viidud vaheldi alalisvoolu poolele tagasi.

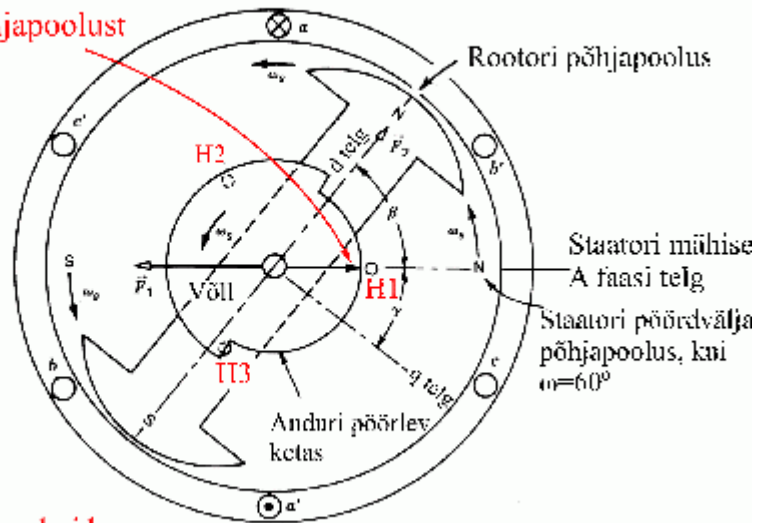


Joonis 4.28. Servomootori faasivoolude hetkväärtuste kõverad ja nende voolude saamiseks kasutatavate türistoride numbrid ja anduri koodid

Mootori kõigi kolme faasi voolukõverate kujud on joonisel 4.28. Pidevjoonega on näidatud idealiseeritud voolukõverad, kus vool tekib ja kaob hetkeliselt. Kriipsjoonega on näidatud tegelikud voolukõverad, kus voolu kasv ja langus toimub mööda eksponenti. Voolukõverate lame horisontaalne osa on tingitud skeemis olevast alalisvooludrosselist L . Drosselit L läbiva voolu suuruse määrab ühelt poolt alalispinge allika pingeline U_R ja teiselt poolt seda tasakaalustav sünkroonmootori elektromotoorjõud ja vaheldi ventiilide pingelang. Türistorvaheldi kasutamisel on sünkroonmasin otstarbekas üle ergutada nii, et voolu faas oleks pingeline faasist ees. See on soodne türistoride sulgemisel. Sel eesmärgil valitakse staatori ja rootori väljade vaheline nurk veidi väiksem kui 90° (nurk β joonisel 4.29).

Väikestes servomootorites kasutatakse pingeinvertoreid, kus drossel L puudub. Rootoril on enamuse juhitudel püsomagnetid. Vaheldi ja mootori mähise vooluga ülekoormamise vältimiseks kasutatakse pingeline impulsslaiuismodulatsiooni kas toitealaldis või vaheldis (S4, S5 ja S6 joonisel 4.27), kus türistoride asemel on jõutransistorid. Normaaltalitluses reguleeritakse impulssmodulatsiooni abil aga kiirust. Väga väikeste masinate puhul võib vaheldi ja juhtskeem olla üks integraallülitus.

Nool mis pöörleb koos võlliga ja alati näitab staatori välja põhjapoolust



H1, H2, H3: valgus andurid

Näidatud on ajamoment $\omega t = 60^\circ$, kus anduri kood 101 asendub koodiga 100

Joonis 4.29. Servomootori rootori ja kodeerimisketta asend ajamomendil kui staatorivool kommuteeritakse B faasist C faasi

Vaheldi juhtimine toimub rootori asendi andurite järgi. Kasutatakse valgusdioodidega andureid või Halli andureid. Kasutusel on kaks põhimõtteliselt võrdväärset andurite paigutust ruumis – kas kolm andurit iga 120 elektrilise kraadi tagant (H_1 , H_2 ja H_3 joonisel 4.29) või kolm andurit iga 60° tagant. Nende andurite signaalide paralleelkood ja igale koodikombinatsioonile vastavad sisselülitatud türistoride numbrid on toodud joonisel 4.28.

Joonisel 4.29 on näidatud valgusdioodidega variant. Koos võlliga pöörlev valgust mitteläbilaskev kodeerimisketas on sellise kujuga, et 180° ulatuses ta ei takista valguse jõudmist valgusdioodilt valgustundlikule andurile ja ülejäänud 180° ulatuses takistab. Valgustatud anduri loogikanivoo on „1“ ja valgustamata anduril „0“. Joonisel on näidatud ajahetk, kus anduri kood 101 asendub koodiga 100. Enne seda ajahetke juhtisid türistorid 1 ja 5 ning vool sisenes A faasi algusest ning väljus B faasi algusest. C faasis voolu ei olnud. Peale seda ajamomenti lülitati türistor 5 välja ja türistor 6 sisse. Selle tõttu hakkas B faasi vool kahanema ja liikus läbi vastuvoolu diodi toiteallika „+“ klemmidele. C faasi vool hakkas aga kasvama. Voolu üleviimine ehk kommutatsioon faasist B faasi C muudab staatorivälja suunda 120° . Staatori väli pöörleb samas suunas ja sama nurga võrra, kui seda teeb kodeerimisketas ja sellega jäigalt ühendatud rootor koos oma magnetväljaga. Selle tõttu nurk staatori ja rootori magnetväljade vahel säilib sellisena, et pidevalt indutseeritakse pöördemoment (see nurk on 90° lähedane). Tavalises alalisvoolumootoris hoolitseb nurga säilimise eest mehaaniline kommutaator, mis koosneb kollektri lamellidest ja harjadest. Siin teostab sama operatsiooni türistorsild, mida võib nimetada elektrooniliseks kommutaatoriks. Kodeerimiskettale kantakse tavaliselt vool, mis näitab alati staatorivälja põhjapooluse poole. Staatoriväli pöörleb sünkroonselt rootoriväljaga nagu igas sünkroonmasinas. Erinevalt sünkroonmasinast ei ole aga masina pöörlemiskiirus ja staatorivoolu sagedus konstantsed.