

**Veran Vasić
Đura Oros**

SKRIPTA

UVOD U ELEKTRIČNE MAŠINE

Novi Sad 2018.

SADRŽAJ

1. TOPLOTNI PROBLEMI U ELEKTRIČNIM MAŠINAMA.....	1
2. NAMOTI	2
2.1. Indukt i induktor. Oblici magnetnog kola	2
2.2. Navojak. Elektromotorna sila navojka	5
2.3. Sekcija. Elektromotorna sila sekcije.	9
2.4. Vrste namotaja	12
2.5. Impregnacija namotaja.....	19
3. INDUKOVANA ELEKTROMOTORNA SILA.....	20
3.1. Šematsko prikazivanje (u preseku, razvijenom preseku, razvijenom pogledu)	20
3.2. Uticaj oblika pola na raspodelu magnetne indukcije u vazdušnom zazoru.....	21
3.3. Indukovana elektromotorna sila u provodniku.....	22
3.4. Indukovana elektromotorna sila u navojku i sekciji	23
3.5. Indukovana elektromotorna sila pojasa (zone). Pojasni navojni sačinilac.....	24
3.6. Tetivne sekcije. Tetivni navojni sačinilac.....	29
3.7. Indukovana elektromotorna sila namota - faze	31
3.8. Eliminacija viših harmonika indukovano napona.....	33
3.9. Fluks po polu.....	36
4. MPS U VAZDUŠNOM ZAZORU ELEKTRIČNE MAŠINE.....	39
4.1. Skoncentrisan dijametralni namotaj	39
4.2. Skoncentrisan tetivni namotaj.....	44
4.3. Raspodeljen dijametralni namotaj	47
5. MPS U VAZDUŠNOM ZAZORU ELEKTRIČNE MAŠINE.....	50
6. MAŠINE NAIZMENIČNE STRUJE.....	70
6.1. Motori sa stalnim magnetima.....	70
6.1.1. PMSM sa površinskom montažom magneta.....	70
6.1.2. PMSM sa unutrašnjom montažom magneta	70

1. TOPLOTNI PROBLEMI U ELEKTRIČNIM MAŠINAMA

2. NAMOTI

Obrtni momenat kod rotacionih električnih mašina posledica je uzajamnog delovanja između magnetnog polja i struje koja protiče kroz namotaje mašine. Prema elektromagnetnim funkcijama koju imaju u mašini, namotaji se dele na:

- pobudni namotaj,
- armaturni namotaj,
- prigušni namotaj.

Pobudni namotaj i struja u njemu formiraju osnovni magnetni fluks potreban za elektromehaničku konverziju. Pobudni namotaj kod sinhronih mašina se nalazi na rotoru, dok je kod mašina jednosmerne struje smešten na stator. Pobudni namotaj se uobičajeno realizuje kao koncentrisan namotaj.

Usled relativnog kretanja magnetnog polja i armaturnog namotaja u provodnicima armaturnog namotaja se indukuje elektromotorna sila. Snaga koju električna mašina isporučuje ili uzima iz električne mreže je snaga koja prolazi kroz armaturni namotaj. Armaturni namotaj prenosi snagu između mehaničkog sistema (pogonska ili radna mašina) i električne mreže. Struja armaturnog namotaja stvara komponentu fluksa u vazдушnom zazoru koja je poznata kao reakcija armature. Armaturni namotaj kod sinhronih mašina nalazi se na statoru, dok je kod mašina jednosmerne struje na rotoru. Armaturni namotaj se realizuje kao raspodeljen namotaj.

Nemaju sve električne mašine zaseban pobudni namotaj. Magnetno pobuđivanje asinhronih mašina – obrtno magnetno polje, postiže se pomoću naizmeničnih struja iz mreže na koju je priključen namotaj statora. Međutim, u tom istom namotaju mora da se indukuje napon koji će držati ravnotežu nametnutom naponu mreže. Dakle, statorski namotaj asinhronih mašina objedinjuje u sebi obe funkcije: pobuđuje mašinu (funkcija pobudnog namotaja), i da se u njemu indukuje elektromotorna sila (funkcija armaturnog namotaja). Namotaj statora asinhronih mašina je sličan namotaju statora (armaturi) sinhronih mašina, ali nije definisan kao armaturni namotaj.

Prigušni namotaj sinhronih mašina ima primarnu funkciju da priguši oscilacije rotora do kojih dolazi pri nagloj promeni opterećenja sinhronih mašina, kao i da priguši inverzno polje u mašini. Sekundarna uloga prigušnog namotaja bi bila tokom asinhronog rada sinhronih mašina, koji postoji pri asinhronom pokretanju sinhronog motora, tada se prigušni namotaj ponaša kao kavezni namotaj asinhronih mašina.

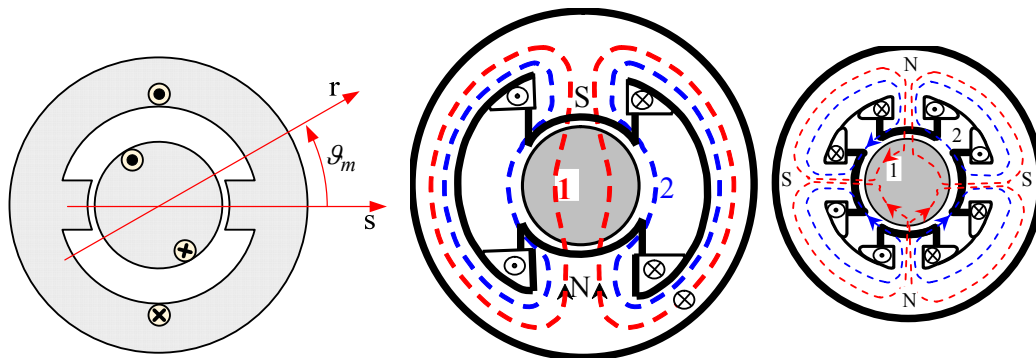
2.1. Indukt i induktor. Oblici magnetnog kola

Uporedo sa terminima pobudni i armaturni namotaj koriste se termini induktor i indukt. Induktor su magnetni polovi mašine. Magnetni polovi mogu biti realizovani kao stalni magneti, što se sreće nešto ređe, a znatno češće to su elektromagneti - pobudni namotaj na feromagnetnom jezgru. Po obodu električne mašine razmešteni su naizmenice jedan za drugim severni (**N**) i južni (**S**) magnetni pol. Broj N i S magnetnih polova je jednak, pa uobičajeno govorimo o broju pari polova. Broj pari polova se označava sa p .

Indukt je onaj deo mašine u kojem se indukuje napon. Sastoji se od armaturnog namotaja i feromagnetnog jezgra. Armaturni namotaj je smešten u žlebove feromagnetnog jezgra. Kroz armaturni namotaj teče struja koja je određena opterećenjem električne mašine. Svaki armaturni namotaj (indukt) sa strujom opterećenja deluje i kao induktor, odnosno utiče na ukupan magnetni fluks u mašini. Struja indukta stvara komponentu fluksa u vazдушnom zazoru koja je poznata kao reakcija indukta. Reakcija indukta i reakcija armature su sinonimi.

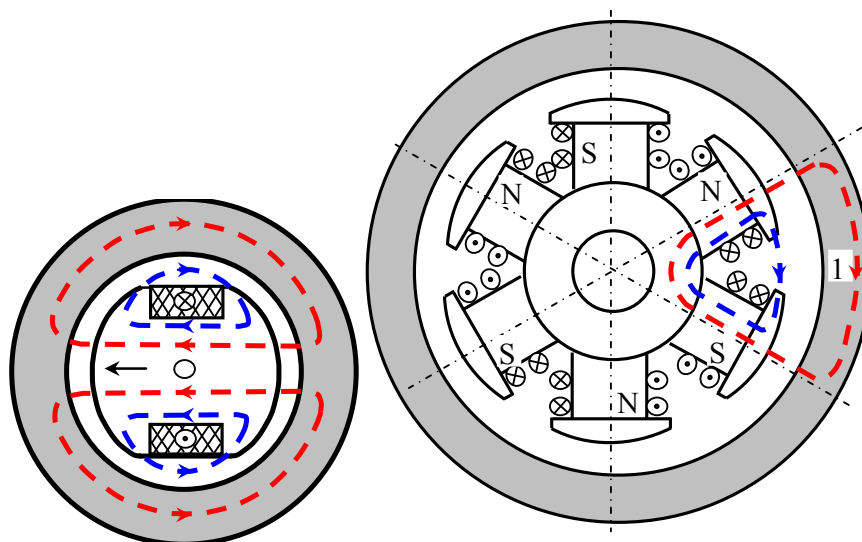
Na slici yy.1. su prikazana magnetna kola dvopolne ($p = 1$) i četvoropolne ($p = 2$) mašine sa pobudnim namotajem na istaknutim polovima na statoru i sa cilindričnim rotorom. Na slici je takođe označen i put silnica zajedničkog fluksa (1) i rasipnog fluksa (2). Zajednički fluks prolazi kroz rotor i njegov namotaj - armaturu. Određen broj silnica fluksa se direktno zatvara sa jednog na drugi pol statora zaobilazeći pri tome rotor, taj deo fluksa se naziva rasipni fluks pobude. Rasipni fluks pobude se zatvara samo oko pobudnog namotaja. Uopšteno kroz induktor prolazi zajednički i rasipni fluks, a armaturu prožima samo zajednički fluks. Ako po simetrali između susednih polova uočimo jedan par polova lako se zaključuje da je slika magnetnog polja pod drugim parom polova potpuno jednaka. Zato je pri razmatranju magnetnog kola sa više pari polova sasvim dovoljno izučiti jedan par polova, a dobijeni rezultat primeniti i na sve ostale parove polova.

Smer struje oko pola definiše njegovu magnetnu polarnost tj. da li će magnetni pol biti severni ili južni. Smer obilaska struje oko pola predložen je na uobičajeni način pomoću krstića $\otimes$ i tačkica $\odot$. Pomoću oznake $\otimes$ predstavljen je provodnik u kome struja ima smer od nas tj. struja uvire u papir, dok je sa oznakom $\odot$ predstavljen provodnik sa strujom ka posmatraču tj. struja izvire iz papira. Na slici 2.1. prikazan je induktor i magnetno kolo mašine jednosmerne struje.



Slika 2.1. Magnetno kolo sa pobudnim namotajem na istaknutim polovima statora dvopolne i četvoropolne mašine. Induktor mašine jednosmerne struje.

Na slici 2.2. su prikazana magnetna kola dvopolne ($p = 1$) i šestopolne ($p = 3$) mašine sa pobudnim namotajem na istaknutim polovima na rotoru i sa cilindričnim statorom. Ovom slikom je prikazan induktor sinhronne mašine sa istaknutim polovima. Ovakvo magnetno kolo imaju hidrogenatori.

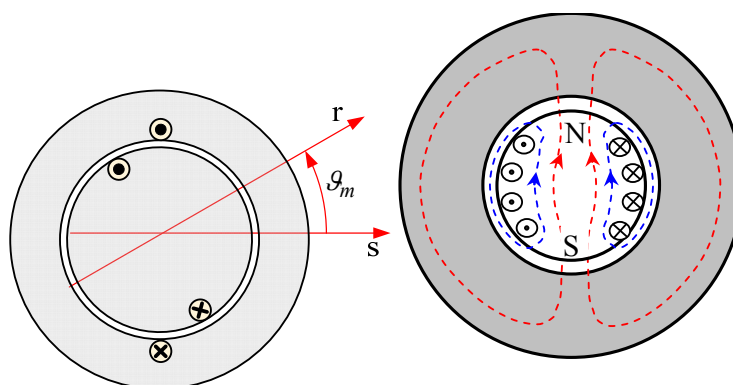


Slika 2.2. Magnetno kolo sa pobudnim namotajem na istaknutim polovima rotora dvopolne i šestopolne mašine. Induktor sinhrona mašine (hidrogenerator).

Za šestopolnu mašinu na slici 2.2. ucrtan je tok silnica između simetrala N i susednog S magnetnog pola. Ta slika bi se mogla preslikati između svake dve simetrale susednih polova.

U istom međupolnom prostoru nalaze se provodnici sa strujom istog smera pa se međupolni prostor može posmatrati kao jedan veliki žleb u kome je koncentrisana celokupna pobudna struja (magnetna pobuda, magnetopobudna sila) između dva pola. Svi navojci jednog pola namotani su jedan preko drugog oko iste ose i spojeni su na red. Magnetna osa navojaka poklapa se sa osom pola.

Magnetna pobuda (magnetopobudna sila) ne mora biti koncentrisana u jedan žleb nego može biti raspoređena u veći broj žlebova čime se dobija raspodeljena magnetna pobuda. Na slici 2.3. je prikazano magnetno kolo dvopolne ($p = 1$) mašine sa pobudnim namotajem na cilindričnom rotoru. Ovom slikom je prikazan induktor sinhrona mašine sa cilindričnim rotorom. Ovakvo magnetno kolo imaju turbogeneratori.



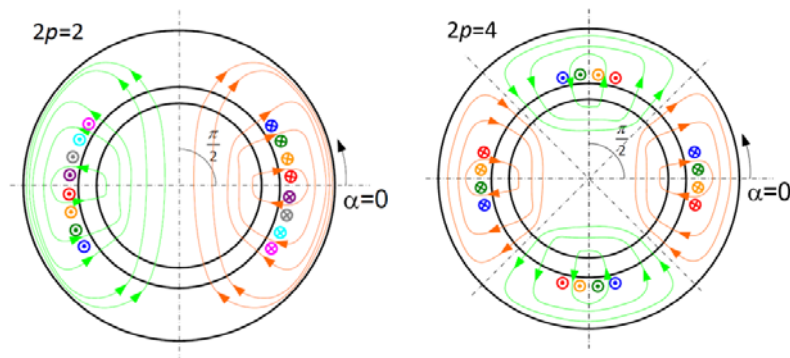
Slika 2.3. Magnetno kolo sa raspodeljenim pobudnim namotajem na cilindričnom rotoru dvopolne mašine. Induktor sinhrona mašine (turbogenerator).

Na slikama 2.1. – 2.3. su prikazani namotaji induktora – pobude rotacionih električnih mašina. Kroz namotaje induktora pritiče jednosmerna struja. Induktor se nalazi na statoru (kod mašina jednosmerne struje) ili na rotoru (kod sinhronih mašina). Namotaj induktora je

realizovani kao koncentrisan (mašine jednosmerne struje i hidrogeneratori) ili kao raspodeljen (turbogeneratori).

Namotaji indukta - armatura se nalazi na statoru (kod sinhronih mašina) ili na rotoru (kod mašina jednosmerne struje). Namotaji indukta se realizuju kao raspodeljeni namotaji. Na slici 2.4. su prikazana magnetna kola dvopolne ($p = 1$) i četvoropolne ($p = 2$) mašine sa raspodeljenim armaturnim namotajem na statoru i sa cilindričnim rotorom. Za indukovanje napona u namotaju armature merodavan je zajednički fluks od struja induktora. Rasipni fluks induktora zaobilazi namotaj armature pa on ne dovodi do indukovanja napona u armaturi.

Struja u armaturnom namotaju formira fluks od koga se najveći deo zatvara preko rotora čineći glavni fluks (fluks reakcije armature), a manji deo fluksa se zatvara samo oko namotaja armature predstavljajući fluks rasipanja armature. Na slici 2.4. je takođe označen i put silnica zajedničkog fluksa koji potiče od struje armature.



Slika 2.4. Magnetno kolo sa raspodeljenim armaturnim namotajem na cilindričnom statoru dvopolne i četvoropolne mašine. Indukt sinhronne mašine.

Rezultantni (ukupni fluks) u vazдушnom zazoru potiče kako od struje u induktoru tako i od struje indukta.

Armaturni namotaj je raspodeljen u određenom pojasu na statoru (kod sinhronih mašina) ili na rotoru (kod mašina jednosmerne struje). Raspodeljeni namotaj se smešta u žlebove koji su pravilno raspoređeni po obimu mašine.

2.2. Navojak. Elektromotorna sila navojka.

Prema Faradejevom zakonu elektromagnetne indukcije, indukovana elektromotorna sila (indukovani napon) u jednom provodniku, koji se nalazi u stranom magnetnom polju indukcije B , je:

$$e_1 = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} = Blv, \quad (2.1)$$

gde su: - B magnetna indukcija, potiče od induktora,

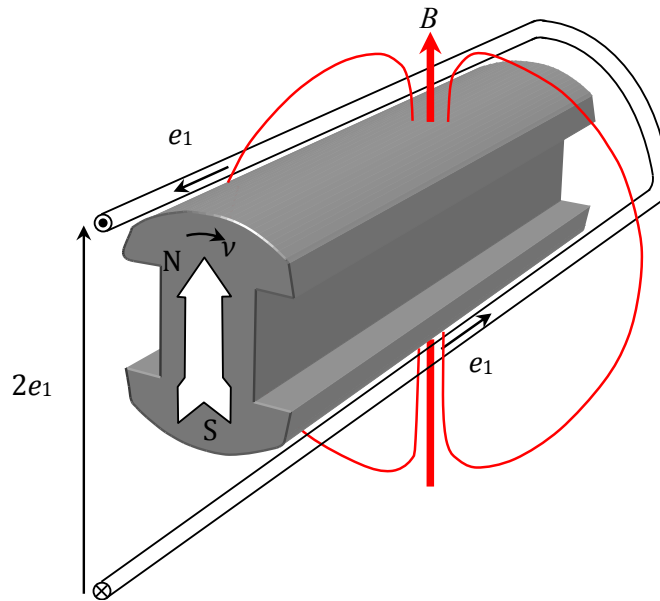
- l dužina provodnika,

- v relativna brzina kretanja provodnika u odnosu na magnetno polje. Smer kretanja $\vec{v}$ je onaj smer u kojem se provodnik kreće relativno prema magnetnom polju indukcije $\vec{B}$. Ako provodnik miruje a kreće se magnetno polje, smer kretanja $\vec{v}$ suprotan je smeru kretanja magnetskog polja.

U provodniku se indukuje napon kada se provodnik kreće u stranom magnetnom polju indukcije B , ali će se indukovani napon pojaviti i ako se magnetno polje kreće u odnosu na

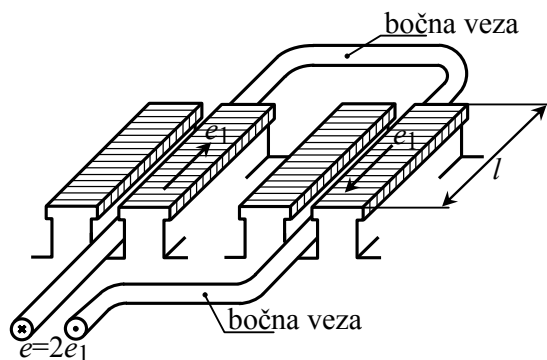
provodnik. Za pojavu indukovano napona u provodniku bitno je da postoji relativno kretanje provodnika i magnetnog polja. Ovaj indukovani napon ne može biti veliki. Brzina v je ograničena vrednošću mogućih centrifugalnih sila i mehaničkom čvrstoćom rotora. Magnetna indukcija je ograničena zasićenjem u gvožđu magnetnog kola, dok je dimenzija mašine određena njenom prihvatljivom cenom izrade. Radi superpozicije u smislu multiplikacije indukovanih napona provodnici se povezuju međusobno na način koji omogućuje takvu superpoziciju.

Na slici 2.5. prikazan je induktor na rotoru koji predstavlja magnet sa severnim i južnim magnetnim polom. Magnetna indukcija rotacionih električnih mašina je radijalnog pravca tj. okomita je na površinu feromagnetika a time i na provodnik statora. Zato se vektorski proizvod u polaznoj jednačini (yy.1) pretvara u običan proizvod. Na slici yy.5. je naznačen smer obrtanja rotora kao i referentni smer napona indukovano u provodniku.



Slika 2.5. Šematski izgled induktora sa naznačenim magnetnim polovima i provodnicima statora u kojima se indukuje napon. Pobudni namot nije prikazan.

Električna mašina koja bi imala samo jedan provodnik bila bi jako male snage. Potrebno je postaviti znatno više provodnika kako bi se dobio veći indukovani napon od onog što se indukuje u jednom provodniku. Indukovani napon pojedinačnih provodnika treba višestruko uključiti u strujni krug i to tako da se u strujni krug uključi više na red vezanih provodnika. Ako se pored jednog provodnika na unutrašnjem obodu statora doda još jedan provodnik smešten dijametralno u odnosu na prvi i oba provodnika spoje dobija se navojak (kontura, zavoj), kao što je prikazano na slici yy.5. Provodnici koji čine jedan navojak nalaze se pod raznoimenim magnetnim polovima. Navojak se smešta u jedan par žlebova kao što je prikazano na slici yy.6.



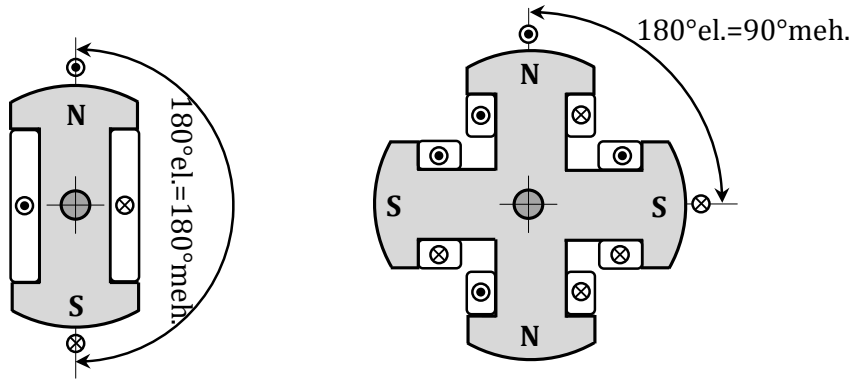
Slika yy.6. Skica navojka smeštenog u žlebove magnetnog kola. Strelice pokazuju smerove indukovanih napona u aktivnim delovima provodnika, tj. u provodnicima navojka.

Navojak se sastoji od dva aktivna dela - provodnika koji su smešteni u žlebove i međusobno su povezani bočnim vezama. Aktivni delovi navojka se nazivaju još aktivnim stranama navojka ili jednostavno provodnicima. Provodnici - aktivni delovi navojka se nalaze u žlebovima magnetnog kola i u njima se indukuje elektromotorna sila. Aktivni delovi navojka se nalaze pod raznoimenim magnetnim polovima tj. jedan aktivni deo je pod severnim polom, a drugi u istom ili približno istom položaju pod južnim magnetnim polom. Kako su aktivni delovi navojka vezani na red to se u njima indukovani naponi sabiraju. Bočne veze se nalaze izvan magnetnog kola, gde je $B = 0$, pa se u njima ne indukuje elektromotorna sila. Na prethodnoj slici sa l je označena dužina aktivnog dela (jednog) provodnika. To je onaj deo provodnika kojeg preseca magnetni fluks. Kod rotacionih električnih mašina to je dužina paketa limova statora i rotora u čije žlebove su smešteni provodnici. Na slici yy.6. je naznačen i referentni smer indukovane elektromotorne sile u provodniku e_1 , kao i u navojku e . Sa slika yy.5. i yy.6. je očigledno da je indukovana elektromotorna sila navojka jednaka zbiru indukovanih elektromotornih sila u oba provodnika:(2.2)

$$e = 2e_1. \quad (2.2)$$

Jedan aktivni deo navojka smeštena je u žleb naspram jednog magnetnog pola induktora, a drugi aktivni deo navojka je naspram drugog magnetnog pola induktora. Pri obrtanju pobuđenog rotora (induktora) magnetna indukcija (fluks) preseca obe strane navojka u kojima se usled toga indukuje napon. Smerovi indukovanih napona u provodnicima navojka su takvi da se jedan na drugi superponiraju (sabiraju). Kod dvopolnog namota (i induktora) aktivne strane navojka su međusobno pomerene za 180° tj. aktivne strane jednog navojka se nalaze na dijametru (prečniku). Na taj način je postignuto da se aktivne strane navojka nalaze ispod susednih raznoimenih magnetnih polova, kao što je prikazano na slici yy.7. Sa slike je očigledno da dok se jedan aktivni deo navojka nalazi naspram severnog magnetnog pola drugi aktivni deo je naspram južnog. Na slici yy.7. sa oznakama $\otimes$ i $\odot$ su predstavljeni provodnici navojka sa naznačenim smerom indukovano napona. Kod četvoropolne konstrukcije susedni magnetni polovi suprotne polarnosti su međusobno pomereni za 90° (mehaničkih), kao što je i prikazano na slici yy.7. Ugao između dva susedna magnetna pola suprotne polarnosti je 180° (električnih) bez obzira na broj polova, ovo predstavlja električni ugao između dva magnetna pola.

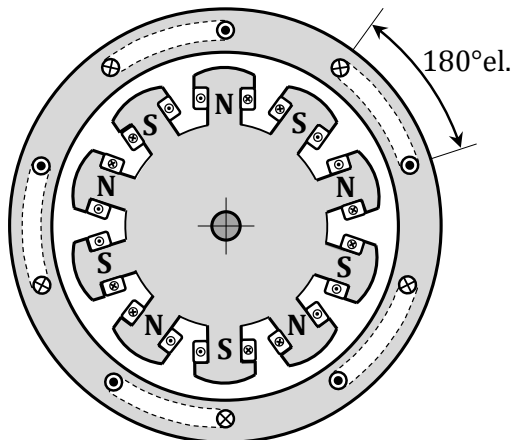
Aktivne strane navojka su međusobno pomerena za ugao π/p , gde je p broj pari polova za višepolnu konstrukciju. Ovakvim položajem aktivnih delova navojka postignuto je da se indukovani naponi u provodnicima sabiraju dajući indukovani napon navojka koji je dvostruko veći od indukovano napona u jednom aktivnom delu navojka.



Slika yy.7. Šema rasporeda provodnika navojka u odnosu na polove za slučaj dvopolnog i četvorpolnog induktora.

Jedna cela perioda indukovano napona postiže se za prolazak jednog para magnetnih polova pored navojka. Za dvopolnu konstrukciju, prikazanu na slici yy.7, da bi se dobila učestanost indukovano napona od 50 Hz potrebno je obrtati rotor sa 50 o/s, odnosno sa 3000 o/min.

Na slici yy.8. prikazan je desetopolni $p = 5$ indukt i induktor sa jednim faznim namotajem. Kada se obiđe obodom desetopolnog indukta prođe se naizmenice pet puta područjem severnog i pet puta područjem južnog magnetnog pola, dakle prođe se ispod pet pari magnetnih polova. Da bi se i u desetopolnoj konstrukciji namota indukovao napon koji je i dalje učestanosti 50 Hz potrebno je smanjiti mehaničku brzinu obrtanja rotora (induktora) na $3000/p = 3000/5 = 600$ o/min. Iako je mehanička brzina obrtanja smanjena p puta, brzina kojom magnetni polovi induktora prolaze pored namota je ostala ista i iznosi 3000 o/min. Ovu brzinu obično zovemo električnom brzinom.



Slika yy.8. Šematski izgled desetopolnog induktora i indukta sa jednim “faznim” namotom.

Rastojanje između žlebova u koje je smešten navojak predstavlja navojni korak (ili širinu navojka) i obeležava se sa y . Dok se rastojanje između osa susednih magnetnih polova naziva polnim korakom i obeležava se sa τ_p , što je ilustrovano na prethodnoj slici.

$$\tau_p = \frac{360^\circ}{2p} \text{ °mehaničkih.} \quad (2.1)$$

Bez obzira na broj pari polova p polnom koraku τ_p odgovara 180° električnih.

Polni korak kao i navojni korak obično se izražavaju brojem žlebova (zubaca):

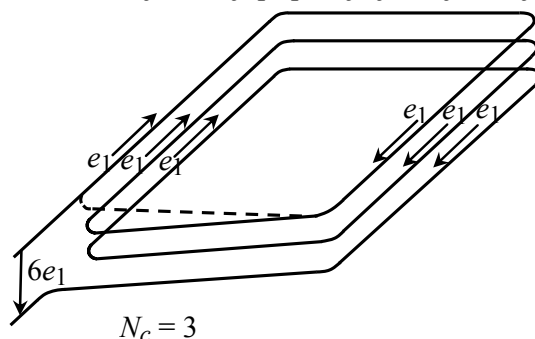
$$\tau_p = \frac{Z}{2p} \quad (2.2)$$

$$\tau_p = \frac{Z}{2p} \quad (2.1)$$

ili u električnim stepenima. Navojni korak predstavlja i širinu navojka. Uobičajeno se navojni korak iskazuje korakom namotavanja i to tako da se uzme redni broj žleba u kome se nalazi jedna aktivna strana i onaj žleb u koji je smeštena druga strana navojka. Tako da podatak o koraku namotavanja 1 - 11 znači da je navojni korak $y = 10$ žlebova. Navojni korak može biti jednak polnom koraku, ali takođe može biti i različit od polnog koraka.

2.3. Sekcija. Elektromotorna sila sekcije.

Više navojaka se, iz razloga dobijanja veće vrednosti indukovano napona, vezuje na red. Tako se formira sekcija (kanura, svitak, bobina, špulna) na način kao što je prikazano na slici yy.9. Sa slike je očigledno da se navojci u sekciji spajaju tako da se završetak prvog navojka vezuje sa početkom drugog, a završetak drugog sa početkom trećeg i tako do poslednjeg navojka koji pripada sekciji. Početak prvog navojka je početak sekcije, a završetak poslednjeg navojka predstavlja završetak sekcije. Ovako opisana sekcija od više navojaka praktično se izrađuje na šablonu i nema potrebe za bilo kakvim prekidom ili nastavkom provodnika između navojaka koji pripadaju jednoj sekciji.



Slika yy.9. Skica sekcije od tri navojka ili šest provodnika.

Sekcija se smešta u jedan par žlebova koji leže pod suprotnim magnetnim polovima. Sve što je rečeno o smeštanju navojka u žlebove važi i za smeštaj sekcije. Ako se broj navojaka u jednoj sekciji označi sa N_c , tada je ukupan broj provodnika u jednoj sekciji $2 \cdot N_c$. Sabiranjem indukovanih napona navojaka, odnosno pojedinih provodnika dobija se indukovani napon sekcije. Indukovani napon sekcije je $2 \cdot N_c$ puta veći od indukovano napona u jednom provodniku.

$$e_s = 2N_c \cdot e_1 \quad (yy.3)$$

Na ovaj način tj. vezivanjem više navojaka na red je postignuto povećanje indukovano napona u odnosu na napon indukovani u jednom provodniku.

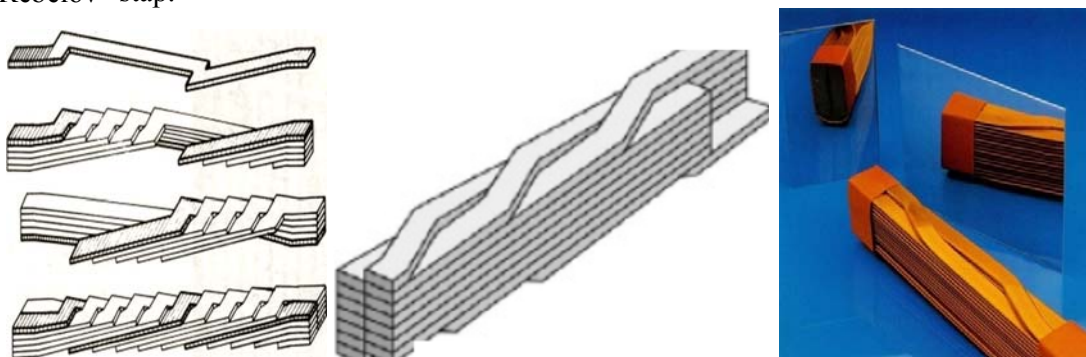
Prema broju provodnika u žlebu (sloju), odnosno načinu izvođenja sekcije, sekcije mogu biti kanuraste ili štapne. Kanurasta sekcija se sastoji od većeg broja navojaka, odnosno

u žlebu se nalaz veći broj provodnika. Kanurasta sekcija se izrađuje od bakarnog provodnika (žice) kružnog poprečnog preseka prečnika do 3 mm. Dimenzija (preseka) provodnika je određen strujom (snagom) za koju se izrađuje mašina. Bočne veze kanurastih sekcija se oblikuju nakon ulaganja u žlebove. Kanuraste sekcije se koriste za izradu namota asinhronih motora snage do 11 kW, tj. za niskonaponske namote. Na slici yy.10. prikazan je izgled jedne kanuraste sekcije pre ulaganja u žlebove, kao i deo namotaja trofaznog asinhronog motora sa oblikovanim bočnim vezama. Bočne veze formiraju glavu namota.



Slika yy.10. Izgled kanuraste sekcije i deo trofaznog namotaja sa kanurastim sekcijama uloženim u žlebove statora.

Za veće struje koristi se profilni provodnik pravougaonog poprečnog preseka. Ako su zbog vrednosti struje potrebni provodnici još većih preseka, tada se provodnik izrađuje od profilnih provodnika (žila) koje su međusobno električno izolovane, ali su na kraju galvanski spojene. Na taj način se formira provodnik u obliku štap - štapni provodnik, pa otud naziv za sekciju štapna sekcija. Usled postojanja rasipnog fluksa nije konstantna gustina naizmenične struje po visini provodnika, odnosno dubini žleba u koji se smešta štapni provodnik. Najveća gustina struje će biti prema površini provodnika i ona opada sa dubinom žleba tj. dolazi do potiskivanja struje prema površini provodnika. Da bi se suzbio efekat potiskivanja struje prema površini štapnog provodnika, potrebno je da se sve žile u štapnom provodniku po ukupnoj dužini nalaze u jednakim magnetnim uslovima. Zato se sprovodi transpozicija žila - promena položaja žila u štapu po dubini žleba, a po njihovoj ukupnoj dužini. Tako se postiže da svaka žila prolazi podjednako gornjim i donjim delom preseka provodnika (odnosno žleba) kao što je prikazano na slici yy.11. Ovakav štapni provodnik se zove "Rebelov" štap.



Slika yy.11. Ilustracija konstrukcije štapnog provodnika sa transpozicijom žila za suzbijanje potiskivanja struje. "Rebelov" štap.

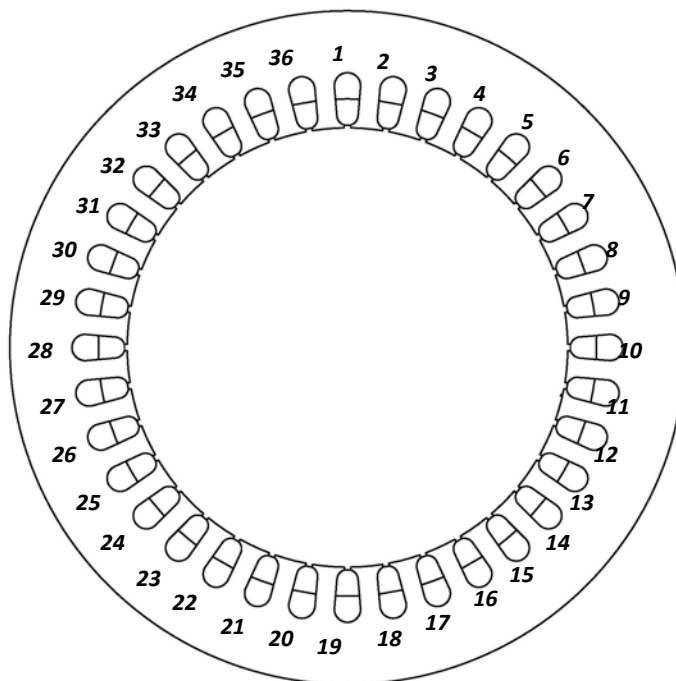
Na slici yy.12. prikazana je štapna sekcija sa Nc navojaka napravljena od izolovanog profilnog provodnika pravougaonog preseka. Štapna sekcija se oblikuje pre ulaganja u žlebove. Prvo se oblikuje neizolovani bakar, a zatim se vrši izolovanje.



Slika yy.12. Izgled štapne sekcije napravljene od profilnog provodnika pravougaonog preseka.

Ako je štapna sekcija izrađena od štapnog provodnika tada štapna sekcija ima samo jedan navojak.

Sekcije se ulažu u žlebove. Na narednoj slici je prikazan stator sa 36 žlebova.

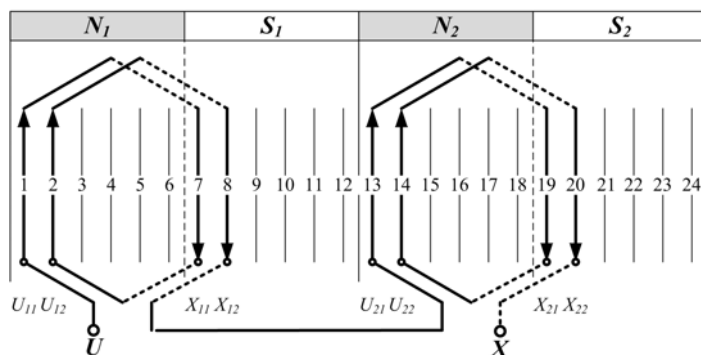


Slika yy. Stator sa $Z = 36$ žlebova.

2.4. Vrste namotaja

Prema načinu međusobnog spajanja sekcija namotaji se dele na petljaste (omčaste) i valovite namotaje. Spajanje sekcija petljastog namotaja je prikazano na slici yy.13, dok je na slici yy.14. prikazano vezivanje sekcija valovitog namotaja. Za predstavljanje namotaja na slikama yy.13 i yy.14. je korišćena razvijena šema. Razvijena šema namotaja se dobija kada se cilindrična površina statora ili rotora preseče po jednoj izvodnici i razvije u ravan. Time je postignuto da se provodnici koji se nalaze u žlebovima predstavljaju vertikalnim linijama. Bez obzira na broj navojaka u sekciji, u cilju preglednosti, namotaji se najčešće crtaju kao da imaju samo jedan navojak u sekciji. Na slici yy.13. iznad žlebova su nacrtane glave namota, a na delu ispod žleba je prikazano spajanje pojedinih sekcija (spojni vodovi). Na ovim šemama brojem su označeni žlebovi u koje su smešteni provodnici sekcija.

Petljasti namotaj se izrađuje pomoću sekcija sa više navojaka bilo da su one izrađene od provodnika okruglog poprečnog preseka bilo od profilnog provodnika pravougaonog preseka. Sa slike yy.13. se jasno vidi da je omčasti namotaj izveden na taj način što su sekcije međusobno spojene u obliku zamke ili omče, po čemu su ovi namotaji i dobili naziv. Kod petljastog namotaja kraj jedne sekcije je spojen sa početkom druge sekcije tako da su svi navojci koji pripadaju jednoj fazi i nalaze se pod jednim polom vezani na red.



Slika yy.13. Skica vezivanja sekcija u jednoj fazi petljastog namotaja.

Na slici yy.13. su prikazana $Z = 24$ žleba u koje se smešta trofazni, četvoropolni $p = 2$, petljasti namotaj. U preostale žlebove smeštaju se druge dve faze. Broj žlebova po polu i fazi je:

$$m = \frac{Z}{2pq} = \frac{24}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 2 \quad (\text{yy.4})$$

Dakle, m žlebova pod svakim polom pripada jednoj fazi. Strelicama je predložen smer indukovanih napona u provodnicima ispod pojedinih polova (N, S) induktora i o smeru indukovanih napona se mora voditi računa pri međusobnom povezivanju sekcija.

Petljasti namotaji su jednostavni za izradu jer sve sekcije imaju isti oblik i dimenzije, te se zbog toga mogu izvesti pomoću šablona.

Na slici yy.14. je prikazano kako se formira valovit namotaj. Kod valovitog namotaja ne spajaju se susedne sekcije na red već najpre se vezuju prve sekcije svih pari polova, a onda sve druge, i tako svih m sekcija. Kada se načini p koraka obiđe se obim mašine jednom. Valoviti namotaj se dobija rednim spajanjem provodnika (ili sekcija) ispod svih polova uz neprekidno obilaženje obima statora ili rotora. Ovakvim načinom spajanja provodnika bočne

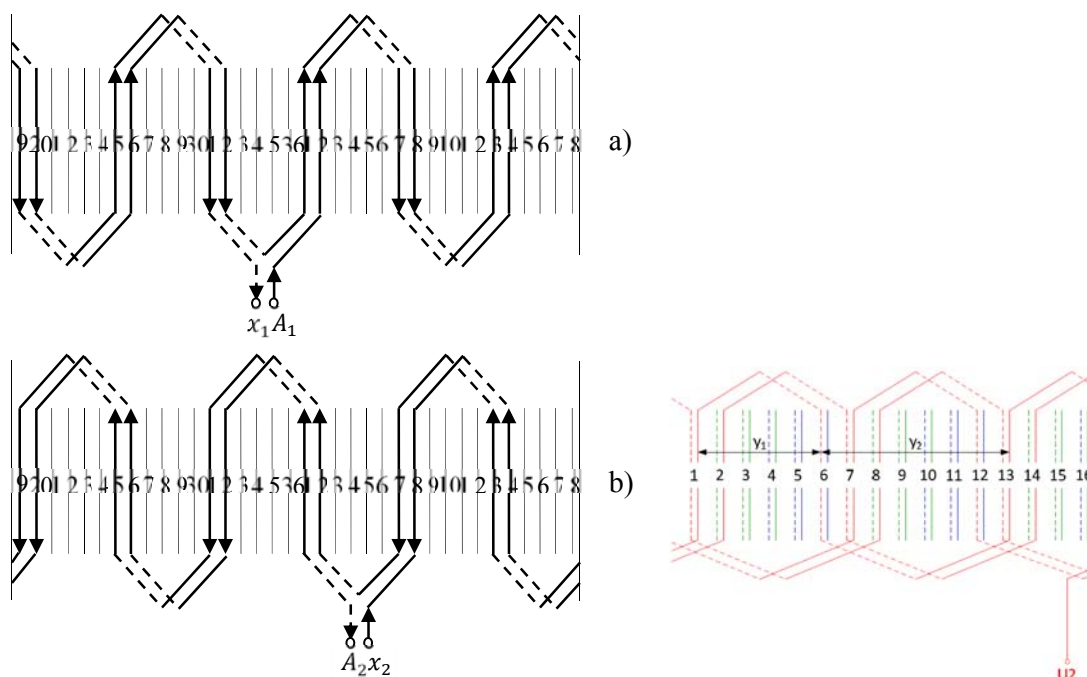
veze dobijaju valoviti oblik prelaza od jednog provodnika do drugog, po čemu su ovi namotaji i dobili naziv.

Valovit namotaj se izrađuju štapnim provodnicima uloženim u žlebove. Prvi štap u žlebu se spaja sa štapom koji je od njega odmaknut za navojni korak y_1 . Sledeći štap se spaja sa štapom odmaknutim za spojni korak y_2 , ovaj drugi štap je od prvog štapa odmaknut za dvostruki polni korak kao što je prikazano na slici yy.14.

Da bi se dobio valoviti namotaj naizmenične struje definiše se ukupni navojni korak koji zapravo predstavlja dvostruki polni korak:

$$y = \frac{Z}{p} = 2\tau_p$$

Ovaj ukupni navojni korak se deli na delimične y_1 (navojni) i y_2 (spojni). Kada je navojni korak jednak polnom koraku tada je $y_1 = \tau_p = y/2$.

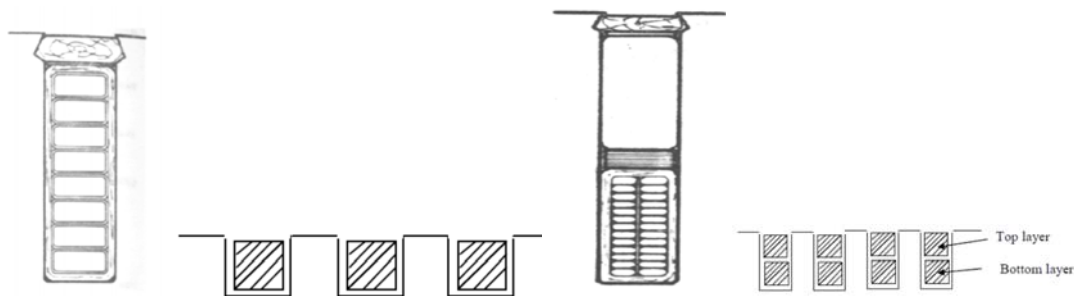


Slika yy.14. Skica vezivanja sekcija u jednoj fazi valovitog namota.

a) prva polovina namota faze A b) druga polovina namota faze A

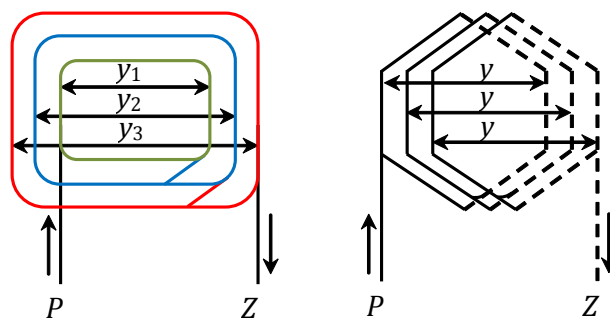
Prilikom jednog obilaska oko obima dobija se lanac navojaka koji imaju isti korak. Valoviti namotaji se najčešće primenjuju za statorske namotaje velikih sinhronih generatora kao i za najveće asinhronne motore. Rotorski namotaji kliznokolutnih asinhronih mašina se takođe izrađuju kao valoviti i obično su tada izvedeni sa navojnim korakom jednakim polnom koraku.

Kada se u žlebovima nalaze samo provodnici koji pripadaju jednoj sekciji tada se formira jednoslojni namotaj, dok ako se u žlebovima nalaze provodnici koji pripadaju dvema različitim sekcijama tada se formira dvoslojni namotaj. Dakle, prema broju sekcija koje se nalaze u žlebovima namoti se dele na jednoslojne i dvoslojne. Na slici yy.15. prikazani su žlebovi u koje se smešta jednoslojni, odnosno dvoslojni namotaj.



yy.15. Skica žleba jednoslojnog i dvoslojnog namotaja.

Više sekcija koje se nalaze pod jednim parom polova (m) vezanih na red čine **Polno Faznu Grupu** (PFG). PFG se još naziva i navojni deo. PFG može da čini i samo jedna sekcija.



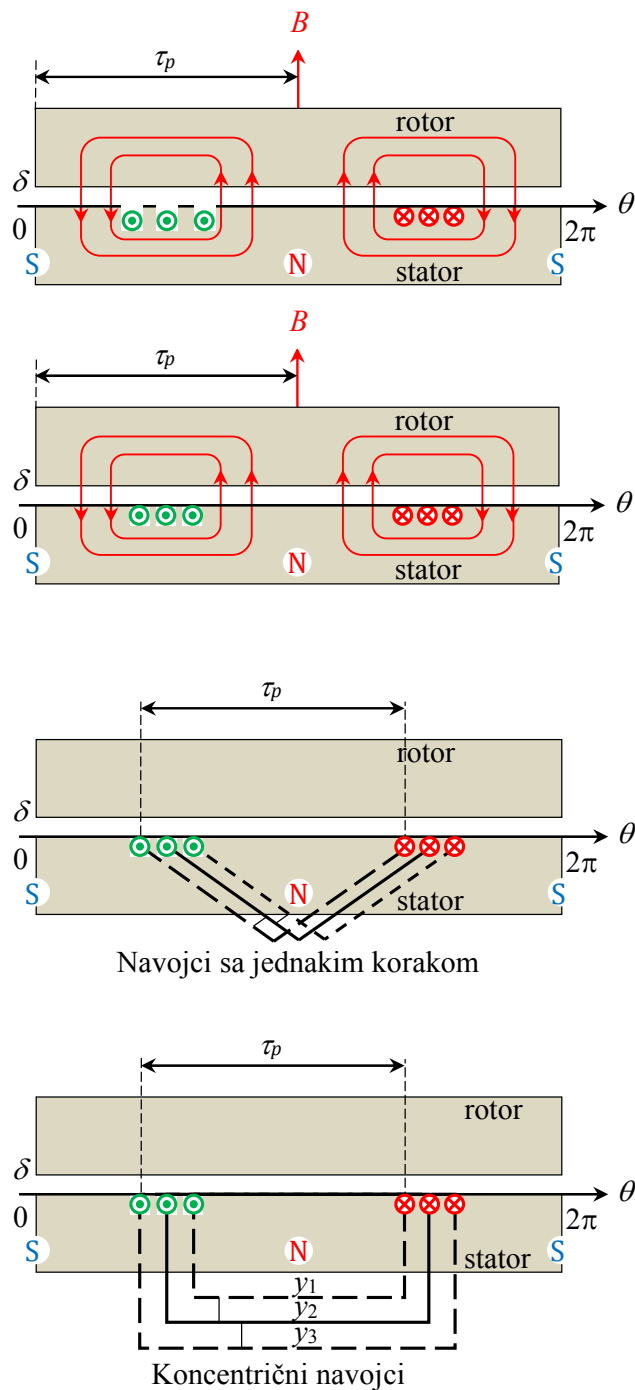
Slika yy.16. Skica polno fazne grupe a) jednoslojnog koncentričnog namotaja, b) jednoslojnog namotaja sa jednakim sekcijama c) dvoslojnog namotaja sa jednakim sekcijama.

Na slici yy.16. pod a) je prikazana PFG jednoslojnog, koncentričnog namotaja koja se sastoji od tri sekcije vezane na red. Sekcije koncentričnog namotaja imaju različit korak namotavanja (y_1 , y_2 , y_3), kao što je naznačeno na slici yy.16. pod a). Očigledno je da se magnetne ose koncentričnih sekcija koje pripadaju istoj PFG poklapaju.

Jednoslojni namotaj može biti izrađen i sa sekcijama koje imaju isti korak tj. sa jednakim sekcijama. Na slici yy.16. pod b) je prikazana PFG jednoslojnog namotaja sa tri identične sekcije. Sa slike je očigledno da se magnetne ose sekcija koje pripadaju istoj PFG ne poklapaju.

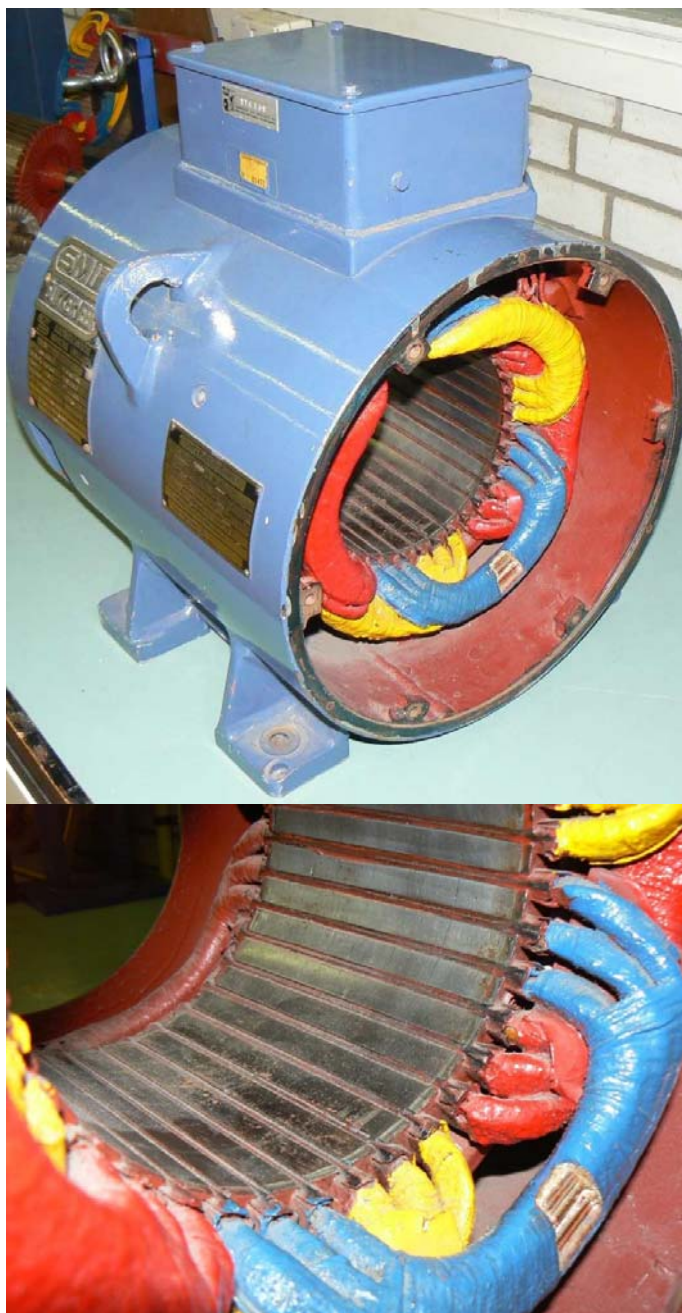
Na slici yy.16. pod c) je prikazana PFG dvoslojnog namotaja sa jednakim sekcijama. Punom linijom je prikazana aktivna strana na vrhu žleba, dok je isprekidanom linijom prikazana aktivna strana koja se nalazi na dnu žleba.

Jednoslojni namotaj se može izraditi sa koncentričnim sekcijama ili sa sekcijama jednakog navojnog koraka. Kod jednoslojnog namotaja u svakom žlebu se nalaze provodnici koji pripadaju samo jednoj sekciji. Ukupna broj sekcija jednoslojnog namotaja je $Z/2$ gde je Z broj žlebova. Broj PFG jednoslojnog namotaja jednak je broju pari polova tj. p . Jednom PFG formira se jedan par magnetnih polova. Jednoslojni namotaj se koristi samo kod malih mašina naizmenične struje snage do 7,5 kW. Na slici yy.17. u razvijenom preseku su prikazane silnice magnetne indukcije usled struje u provodnicima. Naznačene su struje u provodnicima kao i bočne veze kojima se ukazuje da li je jednoslojni namotaj sa koncentričnim sekcijama ili sa sekcijama jednakog navojnog koraka. Na raspodelu magnetne indukcije po obodu mašine ne utiče da li je jednoslojni namotaj sa koncentričnim sekcijama ili je sa sekcijama jednakog navojnog koraka.

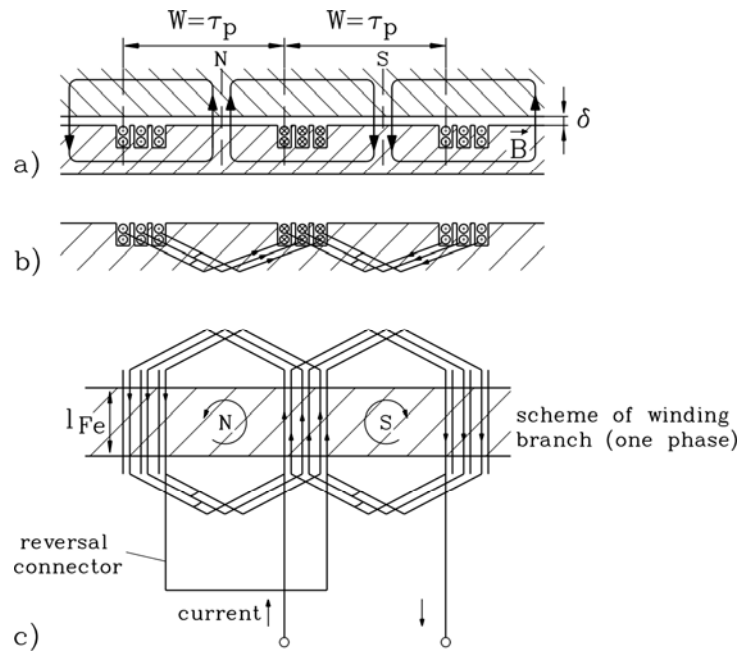


yy.17. Jednoslojni namot. Prikaz silnica magnetne indukcije u razvijenom preseku.

Na slici yy.17a. je prikazana presek stator i rotora sa sekcijama koje formiraju magnetno polje. Na slikama su simbolično naznačene bočne veze koje se u ovakvom preseku nevide. navojcima koji u koga je smešten trofazni, jednoslojni, koncentrični namotaj. Fazni namotaji su izvedeni sa dve PFG pa je broj pari polova $p = 2$.

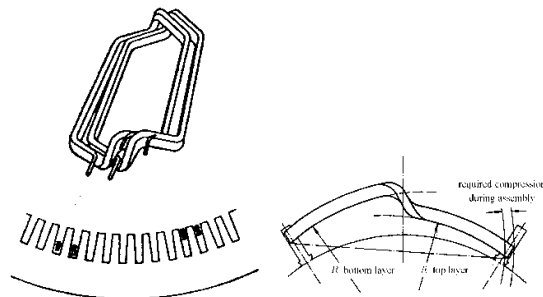


Kod dvoslojnog namotaja u svakom žlebu se nalaze aktivne strane od dve različite sekcije. Sekcija se svojom jednom aktivnom stranom nalazi u donjoj polovini žleba, a drugom aktivnom stranom u gornjoj polovini drugog žleba. U nepopunjeni deo žlebova smeštaju se aktivne strane drugih sekcija. Broj sekcija dvoslojnog namotaja jednak je broju žlebova tj. Z . Broj PFG dvoslojnog namotaja jednak je broju polova tj. $2p$. Jedan para polova (severni i južni magnetni pol) dvoslojnog namotaja se formira pomoću dve PFG. Na slici yy.18. u razvijenom preseku su prikazane silnice magnetne indukcije usled struje u jednoj fazi dvoslojnog namotaja. Naznačene su struje u provodnicima kao i bočne veze. Prikazane su i dve PFG sa naznačenim magnetnim polovima koji potiču od struja u sekcijama.



Slika yy.18. Dvoslojni namotaj. Prikaz silnica magnetne indukcije u razvijenom preseku.

Na slici yy.19. su prikazane oblikovane sekcije dvoslojnog namotaja. Štapne sekcije dvoslojnog namotaja se oblikuju pre umetanja u žlebove. Usled karakterističnog “S” oblika bočnih veza štapnih sekcija, nema ukrštanja tj. prepletanja sekcija u glavi namotaja. Oblikovana sekcija dvoslojnog namotaja smešta se u žlebove, sa aktivnom stranom (levo) na dnu žleba i drugom aktivnom stranom smeštenom na vrh žleba.



Slika yy.19. Ilustracija. Položaj provodnika sekcija u žlebovima dvoslojnog namotaja.

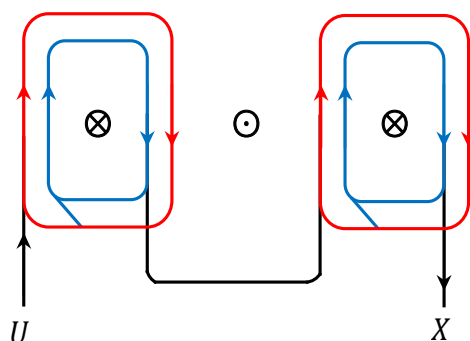
Dvoslojni namotaj se uobičajeno koristi kod električnih mašina za snage preko 5 kW, kao i za mašine najvećih snaga i najviših napona do 30 kV.

Upotreba dvoslojnog namotaja ima niz prednosti u odnosu na jednoslojni namotaj:

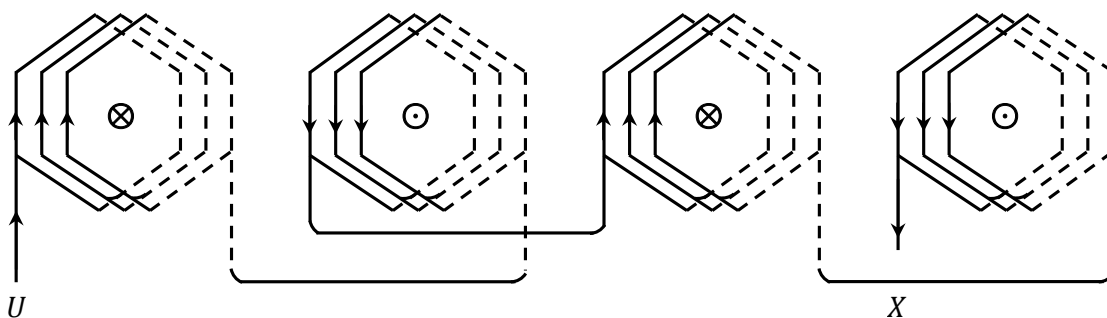
- sekcije su jednakih dimenzija što daje jednostavniju izradu i jeftiniji namotaj u odnosu na namotaj sa koncentričnim sekcijama,
- moguće je skraćanja koraka sekcije i izrada tetivnog namotaja,
- dobija se bolji talasni oblik indukovane elektromotorne sile što je bitno za generatore,
- manje su reaktanse rasipanja što daje bolje performanse električnih mašina.

Dvoslojni namotaj ima lošije punjenje žleba bakrom tj. u žlebu se nalazi manje provodnika u odnosu na jednoslojni namotaj zbog neminovne upotrebe međuslojne izolacije.

Spajanjem PFG koja pripada jednom paru polova sa drugim PFG koje pripadaju drugim parovima polova formira se jedan fazni namotaj višefaznog namotaja. PFG se najčešće spajaju na red kao što je prikazano na slikama yy.20.

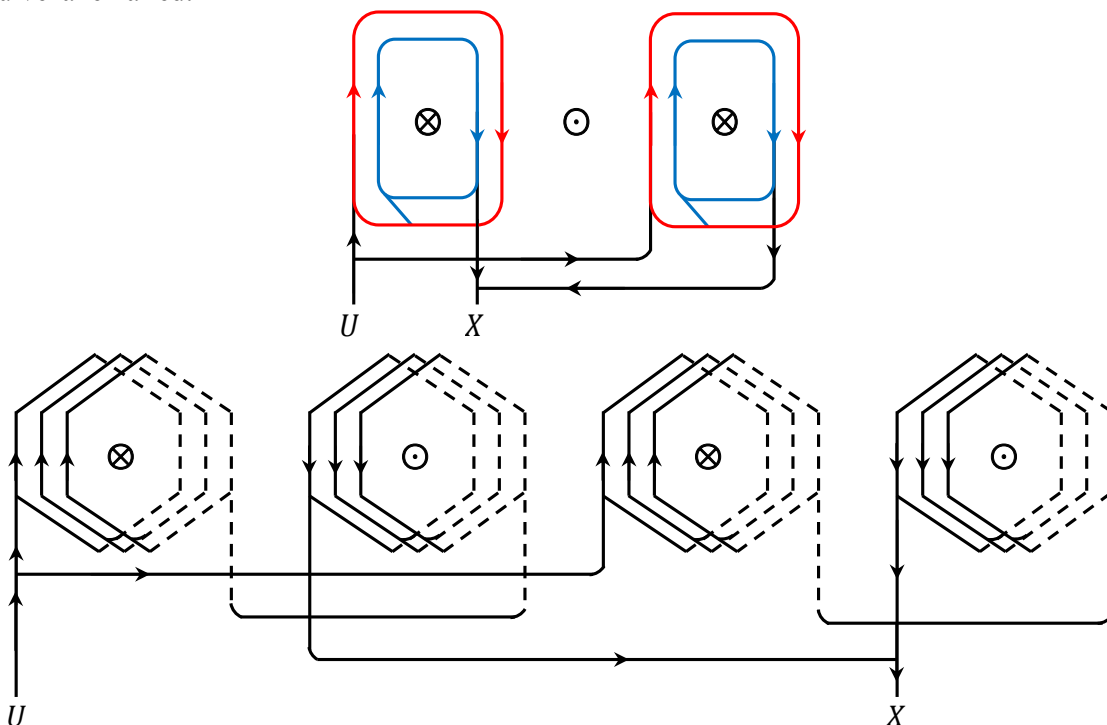


Slika yy.20. Skica jednog jednoslojnog namotaja koji se sastoji od dve PFG vezane redno.



Slika yy.21. Skica jednog dvoslojnog namotaja koji se sastoji od četiri PFG vezane redno.

Kod većih električnih mašina primenjuje se i paralelno spajanje PFG. Tada takav namotaj ima paralelne grane. Paralelna grana se sastoji od jedne ili više PFG vezanih na red. Broj paralelnih grana se označava sa a . Na slici yy.22. pod a) su prikazane dve paralelne grane koncentričnog namotaja gde se svaka grana sastoji od po jedne PFG sa dve sekcije. Na slici yy.22. pod b) su prikazane dve paralelne grane. Svaka grana se sastoji od dve PFG koje su vezane na red.



Slika yy.22. Ilustracija namotaja sa paralelnim granama
a) koncentričnog namotaja b) dvoslojnog petljastog namotaja.

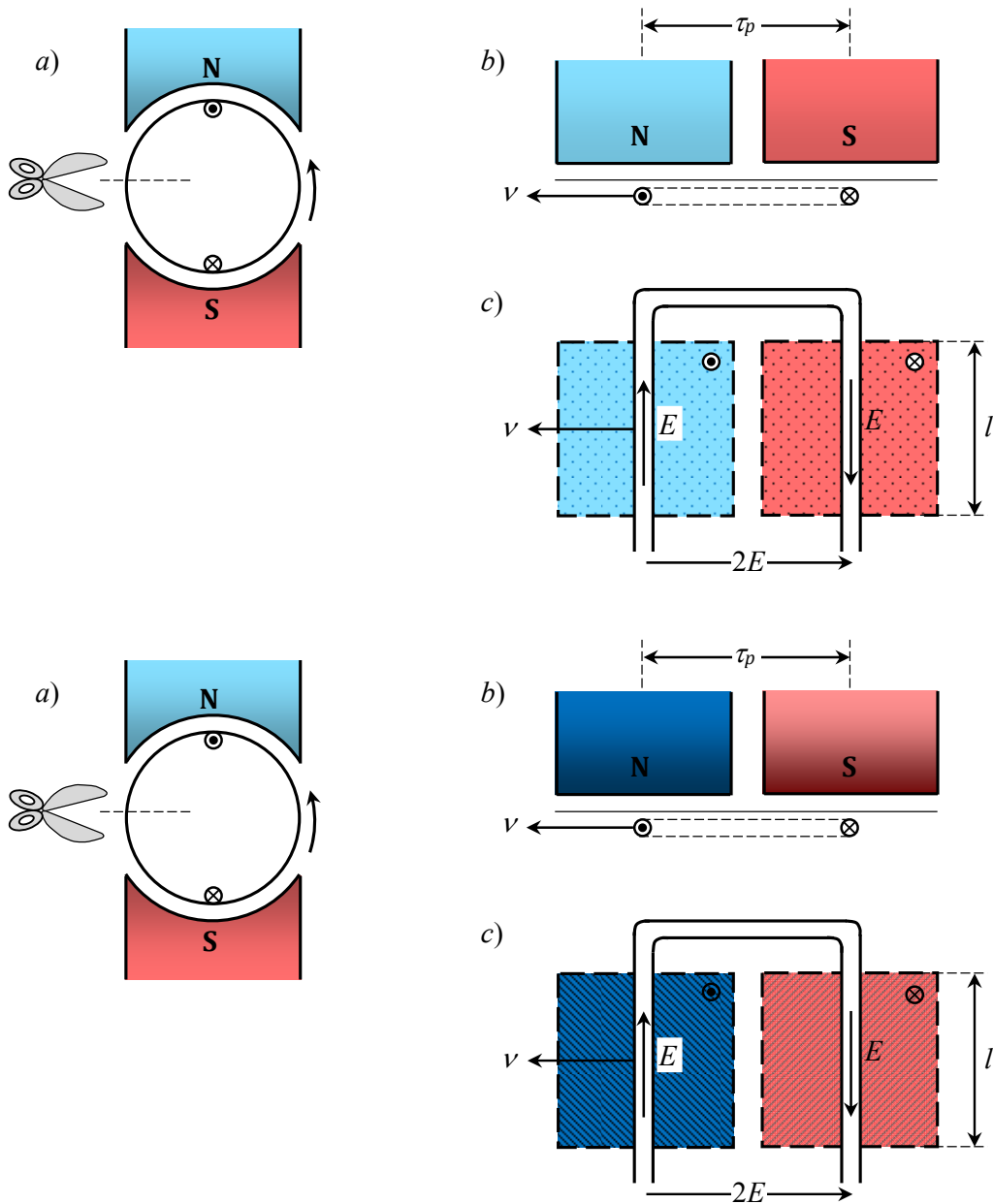
Kada bi se sve PFG vezale paralelno dobio bi se namot sa najvećim mogućim brojem paralelnih grana. Najveći mogući broj paralelnih grana jednoslojnog namota je jednak broju pari polova $a = p$, dok je kod dvoslojnog namota najveći mogući broj paralelnih grana jednak broju polova $a = 2p$. Da bi se bilo koja dva dela namota smela spojiti paralelno naponi indukovani u njima moraju biti jednaki po iznosu i po faznom stavu.

2.5. Impregnacija namotaja

Namotaji mogu biti namotani na istaknute polove ili smešteni u žlebove koji su aksijalno postavljeni po obimu induktora ili indukta, s tim da su namotaji za naizmeničnu struju uvek raspoređeni u žlebove. Za predstavljanje namota upotrebljavaju se razvijene i kružne šeme.

3. INDUKOVANA ELEKTROMOTORNA SILA

3.1. Šematsko prikazivanje (u preseku, razvijenom preseku, razvijenom pogledu)



Raspored polova i provodnika u: a) preseku, b) razvijenom preseku c) razvijenom pogledu

3.2. Uticaj oblika pola na raspodelu magnetne indukcije u vazдушnom zazoru

Prema Faradejevom zakonu elektromagnetne indukcije napon indukovao u jednom provodniku pri njegovom kretanju brzinom v u magnetnom polju indukcije B :

$$e_1 = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} = Blv,$$

direktno je srazmeran vrednosti indukcije u vazдушnom zazoru na mestu na kojem se provodnik u tom trenutku nalazi. Pri kretanju provodnika po obodu vazдушnog zazora talasni oblik indukovano napona verno prati prostornu raspodelu magnetne indukcije po obimu vazдушnog zazora. Prostorna raspodela magnetne indukcije po obimu mašine se preslikava u vremensku zavisnost indukovano napona. Da bi se dobila prostoperiodična vremenska zavisnost indukovano napona potrebno je obezbediti prostoperiodičnu raspodelu indukcije po obodu vazдушnog zazora.

Na prostornu raspodelu magnetne indukcije u vazдушnom zazoru može se uticati širinom vazдушnog zazora ispod pola. Između fluksa, magnetopobudne sile koja tera fluks i reluktanse magnetnog kola postoji veza data drugim Kirhofom zakonu za magnetno kolo, odnosno Kap Hopkinsonovim zakonom:

$$\Phi = \frac{NI}{\mathcal{R}_m}$$

Ako se zanemari reluktansa feromagnetnih delova magnetnog kola i uvaži da je:

$$\mathcal{R}_m = \frac{\delta}{\mu_0 S}$$

gde je δ širina vazдушnog zazora dobija se:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{\delta}$$

Konstantna širina vazдушnog zazora $\delta = \text{const.}$ daje konstantu indukciju ispod pola odnosno u vazдушnom zazoru po obimu mašine:

$$B = B_m = \text{const}$$

kao što je prikazano na narednoj slici pod a). Ovo predstavlja poželjnu raspodelu indukcije po obimu vazдушnog zazora kod mašina jednosmerne struje. Raspodela indukcije po obimu treba da omogući postizanje što veća srednje vrednosti indukovano napona u provodniku armature.

Ako se širina vazдушnog zazora tj. rastojanje između statora i polnog nastavka menja prema sledećoj relaciji:

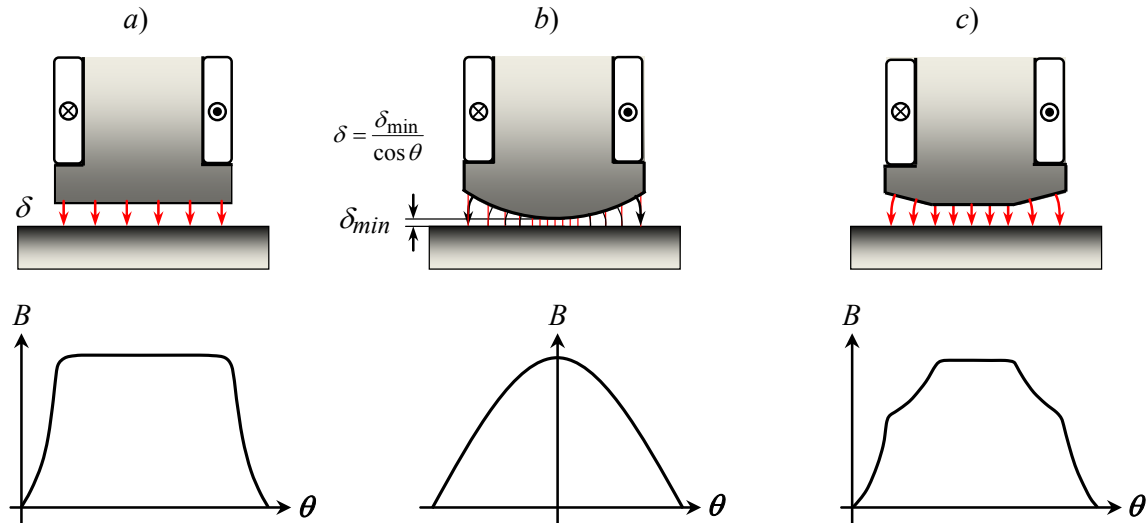
$$\delta = \frac{\delta_{min}}{\cos\theta}$$

gde su: - δ_{min} minimalna širina vazдушnog zazora ispod pola,
- θ ugaona koordinata posmatrane tačke u vazдушnom zazoru merena od ose pola,

tada se u vazдушnom zazoru ostvaruje prostoperiodična raspodela indukcije ispod pola, odnosno u vazдушnom zazoru po obimu mašine:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{\delta_{min}} \cos \theta = B_m \cos \theta$$

što je prikazano na narednoj slici pod b). Ovo predstavlja poželjnu raspodelu indukcije po obimu vazdušnog zazora kod rotacionih električnih mašina naizmjenične struje.

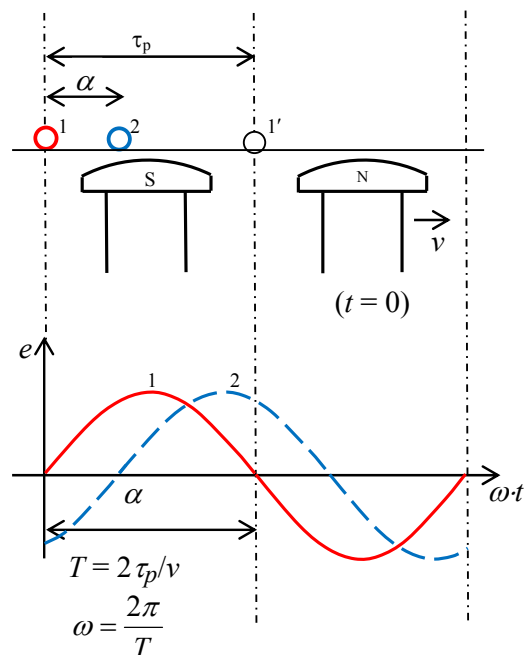


Uticaj oblika pola na raspodelu indukcije: a) konstantan vazdušni zazor, b) neravnomeran vazdušni zazor, c) konstantan vazdušni zazor sa podreznim rubovima pola

Izrada pola koji bi izgledao kao prema slici pod b) je zahtevna i komplikovana zato se kod sinhronih mašina sa istaknutim polovima pol izrađuje kao prema slici pod c) usled čega raspodela indukcije u vazдушnom zazoru po obimu mašina nije prostoperiodična, odnosno može se smatrati da pored osnovnog harmonika postoje i viši harmonični članovi.

3.3. Indukovana elektromotorna sila u provodniku

U prethodnom delu je pokazano da se pomoću istaknutih polove adekvatnog oblika postiže u vazдушnom zazoru prostoperiodična raspodela magnetne indukcije po obimu mašine tj. postignuta je prostoperiodična prostorna raspodela indukcije. Ako se istaknuti polovi rotora kreću obodnom brzinom v tada se u provodniku 1, koji se nalazi na statoru, indukuje napon približno sinusnog talasnog oblika, tj. prostoperiodična prostorna raspodela magnetne indukcije se preslikava u prostoperiodičnu vremensku zavisnost indukovnog napona, kao što je prikazano na narednoj slici.



Indukovana elektromotorna sila u provodnicima statora.

Jedna cela oscilacija indukovano napona nastaje za vreme potrebno da rotor pređe dvostruki polni korak, odnosno jedan ceo okretaj ako se radi o dvopolnom rotoru. Kod mašina sa p pari polova puna perioda indukovano napona odgovara zakretu rotora za jedan par polova, a to je $1/p$ od punog okreta.

Uz prostoperiodičnu raspodelu magnetne indukcije u vazдушnom zazoru u jednom provodniku na statoru se indukuje napon prostoperiodičnog oblika efektivne vrednosti:

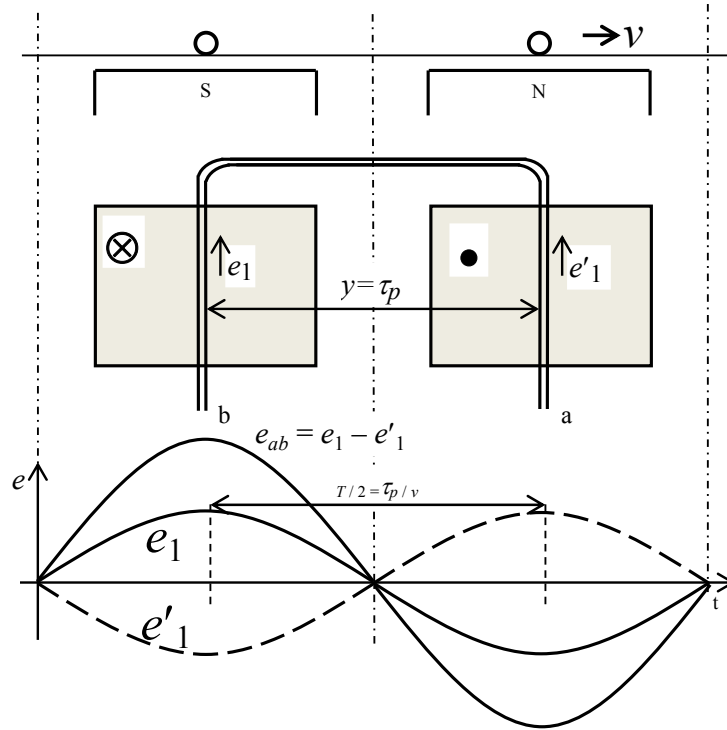
$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} B_m l v,$$

gde su: - B_m maksimalna vrednost magnetne indukcije,
 - l dužina provodnika (osna dužina, dužina paketa limova),
 - v obodna brzina istaknutih polova.

U drugom provodniku koji je u odnosu na prvi provodnik prostorno pomeren za ugao α indukovaće se napon isti kao u prvom provodniku, samo fazno pomeren za ugao α .

3.4. Indukovana elektromotorna sila u navojku i sekciji

Dva provodnika razmaknuta za polni korak τ_p , na prethodnoj slici to su provodnici 1 i 1', možemo spojiti u navojak kao što je prikazano na narednoj slici. Na slici je prikazan međusoban odnos provodnika i magnetnih polova u razvijenom preseku i razvijenom pogledu kao i indukovani naponi u provodniku, odnosno navojku. Magnetni polovi svojim oblikom obezbeđuju prostoperiodičnu raspodelu magnetne indukcije po obimu mašine, ali su ovde i na slikama koje slede u cilju preglednosti prikazani kao da je vazdušni zazor konstantan.



Indukovana elektromotorna sila u navojku statora.

Kada su dva provodnika spojena u navojak indukovani napon navojka iznosi:

$$e_{ab} = e_1 - e'_1.$$

Indukovani napon e'_1 u provodniku 1' koji je prostorno pomeren za polni korak od provodnika 1, je fazno pomeren za π u odnosu na e_1 tj. u protiv fazi je sa naponom e_1 indukovanim u provodniku 1, pa je njihova razlika zapravo zbir apsolutnih vrednosti. Indukovani napon e_{ab} navojka sa navojnim korakom τ_p jednak je dvostrukoj vrednosti indukovnog napona u jednom provodniku E_1 :

$$E_{ab} = 2E_1.$$

Ako je u žlebove umesto jednog navojka smeštena sekcija koja ima N_c navojaka tada je ukupan broj provodnika u jednoj sekciji $2 \cdot N_c$. Sabiranjem indukovanih napona navojaka odnosno pojedinih provodnika dobija se indukovani napon sekcije. Indukovani napon sekcije je $2 \cdot N_c$ puta veći od indukovnog napona u jednom provodniku:

$$E_s = E_{ab} = 2E_1 \cdot N_c.$$

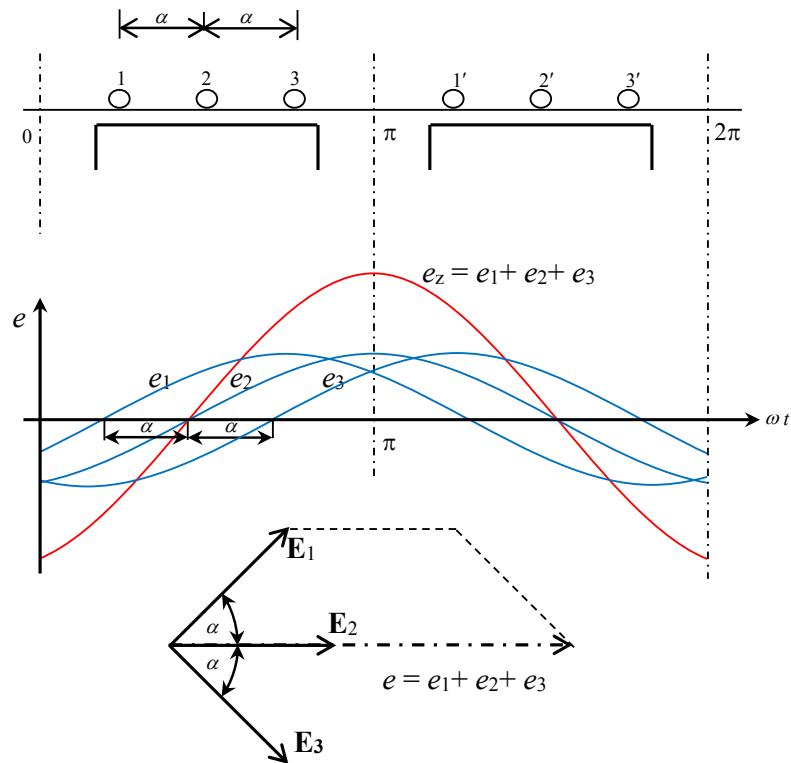
U literaturi se često broj provodnika u jednom žlebu označava sa z_1 pa je očigledno da je indukovani napon sekcije sa z_1 provodnika u žlebu:

$$E_s = E_{ab} = 2E_1 \cdot z_1.$$

3.5. Indukovana elektromotorna sila pojasa (zone). Pojasni navojni sačinilac

Kao što je ranije navedeno više sekcija vezanih na red čine jednu PFG. Na narednoj slici prikazana je jedna PFG sa tri sekcije smeštene u žlebove 1 - 1', 2 - 2' i 3 - 3'. Električni ugao između susednih žlebova je α . Bez gubitka opštosti neka su sekcije izvedene sa samo

jednim navojkom. Rednim vezivanjem sekcija ostvareno je da su svi provodnici vezani serijski u okviru jedne PFG. Indukovani napon svih u seriju spojenih provodnika može se sabirati bilo kojim redosledom. Odaberimo takav redosled da se prvo sabere napon svih provodnika koji leže pod jednim polom tj. čine jednu zonu (pojas).



Na slici su prikazani vremenske zavisnosti indukovanih napona u provodnicima 1, 2 i 3. Ove tri indukovane elektromotorne sile su pomerene u fazi za ugao α , isti onaj ugao koji postoji između dva susedna žleba. Sve tri elektromotorne sile sabrane u svakom trenutku vremena dāće resultantnu elektromotornu silu pojasa, odnosno zone:

$$e_z = e_1 + e_2 + e_3.$$

Treba primetiti da zbog fazne pomenosti indukovanih napona indukovani napon zone nije trostruka vrednost indukovano napona u jednom provodniku.

Drugi naćin da se dođe do elektromotorne sile zone je da se indukovane elektromotorne sile prikažu odgovarajućim fazorima. Ako se pretpostavi da u zoni ima m žlebova:

$$\mathbf{E}_1 = E_1$$

$$e_1 = E_1 \sin(\omega t)$$

$$\mathbf{E}_2 = E_1 \angle -\alpha$$

$$e_1 = E_1 \sin(\omega t - \alpha)$$

$$\mathbf{E}_3 = E_1 \angle -2\alpha$$

$$e_3 = E_1 \sin(\omega t - 2\alpha)$$

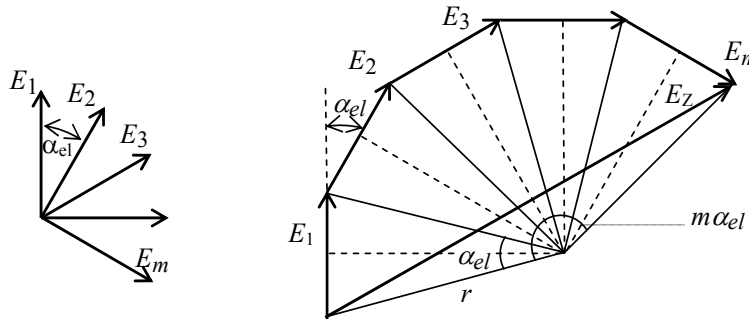
$$\mathbf{E}_m = E_1 \angle -(m-1)\alpha$$

$$e_m = E_m \sin(\omega t - (m-1)\alpha)$$

Vektorskim sabiranjem fazora indukovanih napona u pojedinim provodnicima zone dobija se ukupan indukovani napon zone, koji je uvek manji od algebarske sume svih pojedinačnih napona.

$$|\mathbf{E}_z| = |\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_m| < E_1 + E_2 + \dots + E_m$$

Na narednoj slici je prikazano kako se fazori napona u pojedinim žlebovima koji pripadaju jendnom pojasu sabiraju u ukupni napon zone E_z .



Pojasni navojni sačinilac. Fazori indukovanih *ems*.

Ako sve fazore indukovanih elektromotornih sila jedne zone nadovežemo jedan na drugi i ako opišemo kružnicu kojoj je poluprečnik r , sa prethodne slike može se napisati:

$$E_1 / 2 = r \sin(\alpha / 2),$$

a budući da je središnji ugao za ceo napon zone $m \cdot \alpha$, važi:

$$E_z / 2 = r \sin(m \cdot \alpha / 2).$$

Pojasni navojni sačinilac k_p definiše se kao odnos stvarnog napona jedne zone E_z , i algebarskog zbira napona svih žlebova u zoni $m \cdot E_1$:

$$k_p = \frac{E_z}{m \cdot E_1} = \frac{\sin\left(m \frac{\alpha}{2}\right)}{m \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}.$$

Pojasnim navojnim sačinioem uvažena je geometrija namota preko konstruktivnih parametara mašine (α - ugao između dva susedna žleba, m - broja žlebova po polu i fazi). Pojasni navojni sačinilac se naziva i zonskim navojnim sačinioem.

Pojasni navojni sačinilac omogućuje da se izračuna elektromotorna sila zone sa m žlebova. Indukovana elektromotorna sila zone je:

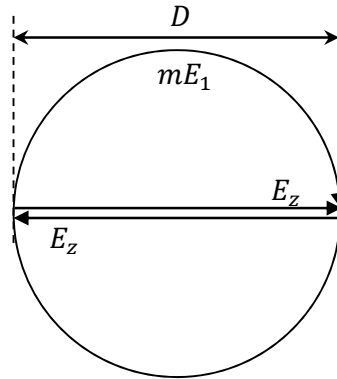
$$E_z = m \cdot E_1 \cdot k_p,$$

gde je E_1 efektivna vrednost indukovane elektromotorne sile u provodnicima jednog žleba.

Pretpostavimo li beskonačni broj žlebova, poligon elektromotornih sila navojaka se pretvara u krug. Kada pojedine provodnike spajamo tako da kraj jednog provodnika vežemo sa krajem drugog, u stvari okrećemo jedan fazor za 180° . Kod jednoslojnog namota se na taj način dobija, uz podelu kruga u dve zone, maksimalna elektromotorna sila $2E_z$, slika 8, što odgovara dvostrukom prečniku kruga. Algebarski zbir elektromotornih sila navojaka daje veću vrednost koja je jednaka poluobimu kruga. Odnos maksimalnog napona prema algebarskom zbiru nazivamo pojasnim navojnim sačinioem i on u ovom slučaju iznosi:

$$k_p = \frac{E_z}{mE_1} = \frac{D}{D\pi/2} = \frac{2}{\pi} = 0,637$$

gde je D prečnik kruga.

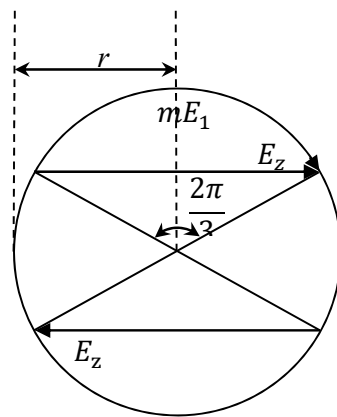


Slika 8. Indukovana elektromotorna sila zone ($m\alpha = \pi$)

Iz prethodnog izraza vidimo da je ukupna elektromotorna sila 63,7% algebarskog zbira elektromotornih sila svih provodnika. Sa slike 8 se vidi da jedan deo fazora doprinosi vrlo malo ukupnoj elektromotornoj sili, pa se jednofazni namot često izvodi sa samo $2/3$ namotanog statora, prikazanog na slici 9. U tom slučaju pojasni navojni sačinilac iznosi

$$k_p = \frac{E_z}{mE_1} = \frac{2r \sin \frac{\pi}{3}}{\frac{2r\pi}{3}} = \frac{\sin \frac{\pi}{3}}{\frac{\pi}{3}} = 0.827$$

gde je r poluprečnik kruga.

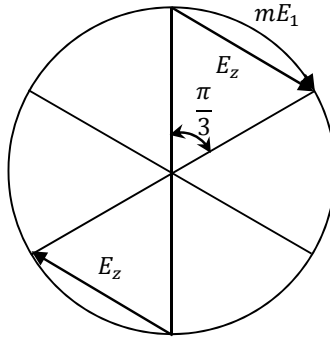


Slika 9. Indukovana elektromotorna sila zone ($m\alpha = 2\pi/3$)

Stoga, ukupna elektromotorna sila je $100\% \cdot 0.827 \cdot \frac{2}{3} = 55.1\%$ od algebarske sume elektromotornih sila. Zbog visoke cene bakra, kod jednofaznih motora se koristi izrađivanje namota koji popunjavaju samo $\frac{2}{3}$ obima statora jer se uz uštedu bakra od 33% dobije samo $100 \cdot (63.7 - 55.1)/63.7 = 13.5\%$ manja elektromotorna sila.

Trofazni namot se izvodi sa tri ili šest zona pa svakoj fazi pripada zona od trećine obima ili dve šestine obima koje stoje nasuprot, slika 10. U prvom slučaju, kada svakoj fazi pripada zona od trećine obima, pojasni navojni sačinilac će iznositi isto kao i u prethodnom primeru jednofaznog namota smeštenog na $2/3$ obima tj. $k_p = 0,827$, dok će uz zonu od dve šestine obima pojasni navojni sačinilac iznositi

$$k_p = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} = 0.955$$

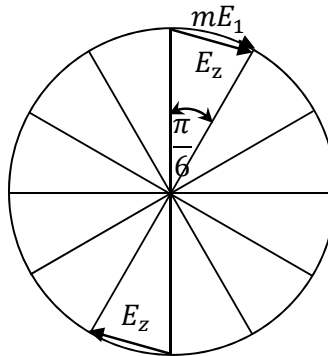


Slika 10. Indukovana elektromotorna sila zone ($m\alpha = \pi/3$)

Očigledno je da drugi način izvođenja trofaznog namota bolji pa se u praksi on gotovo uvek i primenjuje.

Kod slučaja najvećih generator ponekad se primenjuje i trofazni namot kod koga je zona namotavanja $m\alpha = 2\pi/12 = \pi/6$ što daje još povoljniji pojasni navojni sačinilac, slika 11.

$$k_p = \frac{\sin \frac{\pi}{12}}{\frac{\pi}{12}} = 0.989$$



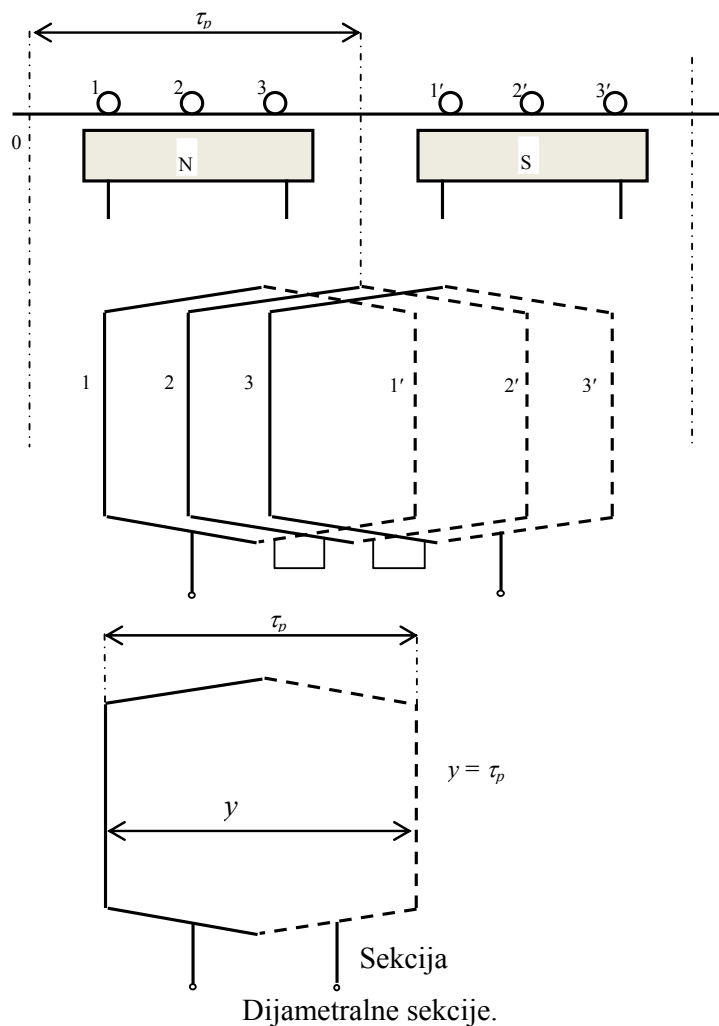
Slika 11. Indukovana elektromotorna sila zone ($m\alpha = \pi/6$)

Ako upoređujemo jednofazni generator sa trofaznim, jasno je da će snaga jednofaznog generator biti manja upravo za odnos pojasnih navojnih sačinilaca uz pretpostavku iste količine bakra u mašini, tj. jednake struje, a snaga će zavisiti od napona (elektromotorne sile):

$$\frac{S_{1-fazno}}{S_{3-fazno}} = \frac{\frac{2}{3} k_{t1f}}{k_{t2/6}} = \frac{\frac{2}{3} \cdot 0.827}{0.955} = 0.577$$

3.6. Tetivne sekcije. Tetivni navojni sačinilac

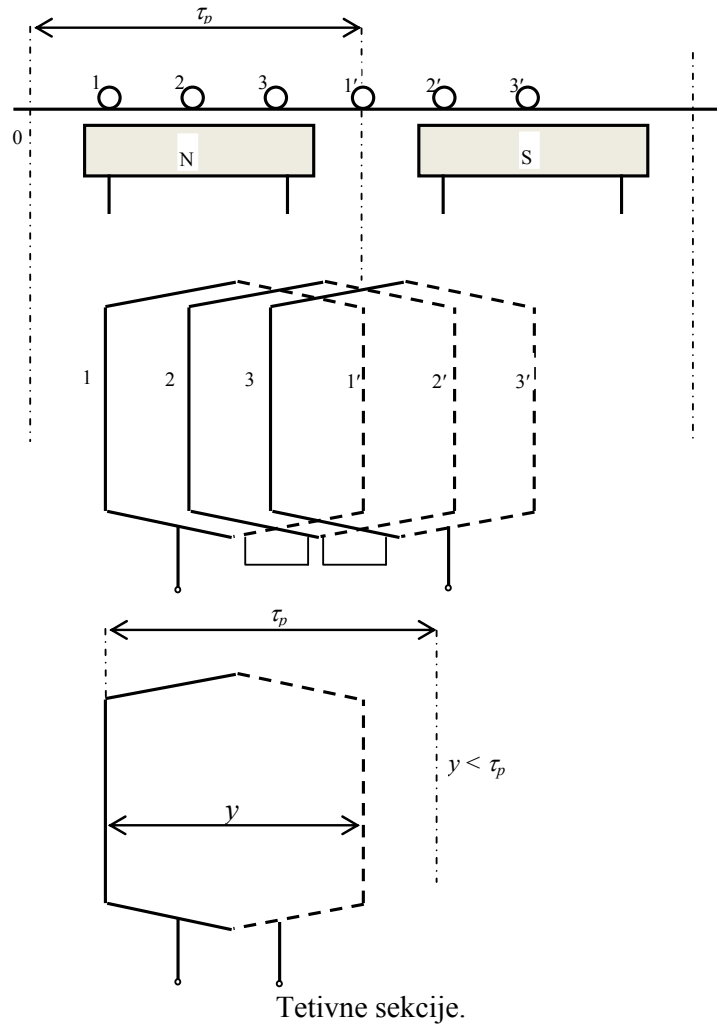
Ranije je navedeno da navojni korak sekcije y može biti jednak polnom koraku τ_p , ali takođe može biti i različit od polnog koraka. Ako je navojni korak sekcije jednak polnom koraku tj. $y = \tau_p$, takve sekcije se nazivaju dijametralnim jer se žlebovi, u koje su smešteni provodnici sekcije, nalaze na dijametru dvopolne mašine. Žlebovi u koje se smešta dijametralna sekcija grade ugao π kod dvopolne mašine ili ugao π/p kod višepolne mašine. Na narednoj slici su prikazane tri dijametralne sekcije vezane na red tj. prikazana je jedna PFG.



Često se izrađuju i sekcije kod kojih je navojni korak manji od polnog koraka $y < \tau_p$, to su sekcije sa skraćenim korakom. Žlebovi u koje se smešta sekcija sa skraćenim korakom se nalaze na tetivi kružnice pa otud naziv tetivna sekcija. Na narednoj slici su prikazane tri skraćene sekcije vezane na red tj. prikazana je jedna PFG.

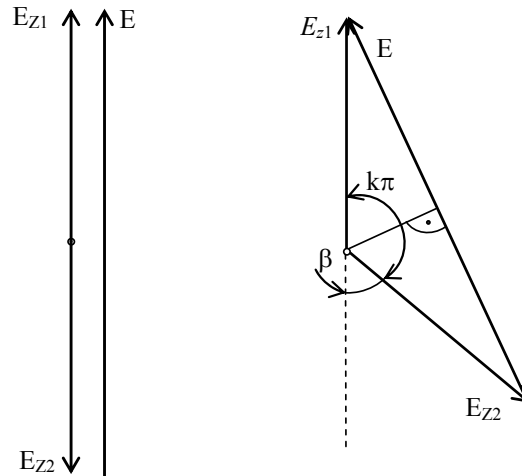
Odnos širine sekcije i polnog koraka je skraćenje ili prikrata sekcije:

$$k = \frac{y}{\tau_p}. \quad (37.10)$$



U prethodnom delu videli smo kako se iz indukovanih napona pojedinih aktivnih strana sekcija računa elektromotorna sila zone. Suprotne strane tih istih sekcija čine drugi pojas, pod drugim polom. Ako su sekcije dijametralne napon druge strane sekcije pomaknut je za ugao π prema naponu prve strane. To vredi za svaku sekciju u zoni pa prema tome i za indukovani napon zona. Dakle, ako su sekcije dijametralne tada je indukovani napon druge zone pomeren za ugao π prema naponu prve zone, kao što je prikazano na narednoj slici. Ukupan indukovani napon redne veze dijametralnih sekcija (odnosno namota) je vektorska razlika fazora elektromotornih sila zona i on iznosi:

$$E = 2E_z$$



Elektromotorne sile zona i namota a) dijametralni namot, b) skraćeni namot.

Kod tetivne sekcije indukovani napon druge strane fazno zaostaje prema indukovanom naponu prve strane za ugao:

$$k \cdot \pi = \frac{y}{\tau_p} \cdot \pi.$$

Ovo vrijedi za svaku sekciju u zoni, pa prema tome indukovana elektromotorna silu druge zone zaostaje za navedeni ugao prema indukovanoj elektromotornoj sili prve zone. Ukupan indukovani napon redne veze tetivnih sekcija (odnosno namota) je vektorska razlika fazora elektromotornih sila zona i on iznosi:

$$E = 2E_z \sin(k \cdot \pi / 2).$$

Odnos tog ukupnog napona i algebarskog zbira elektromotornih sila zona $2E_z$ predstavlja tetivni navojni sačinilac.

$$k_t = \frac{E}{2E_z} = \sin \frac{y}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}.$$

Tetivni navojni sačinilac pokazuje koliko se puta smanjio zbir zonskih napona zato što strane navojaka u dvopolnom prikazu mašine ne leže na dijametri već na tetivi kružnice.

3.7. Indukovana elektromotorna sila namota - faze

Tetivni navojni sačinilac omogućuje da se odredi ukupni indukovani napon redne veze sekcija koje pripadaju jednoj fazi i nalaze se pod jednim parom polova.

$$E = 2 \cdot E_z \cdot k_t = 2 \cdot m \cdot E_1 \cdot k_p \cdot k_t = \sum E_1 \cdot k_n$$

Ukupnim navojnim sačinioem k_n obuhvaćen je uticaj geometrije namota na indukovani napon. U dosadašnjim razmatranjima sekcija se sastoji od samo jednog navojka sa dve aktivne strane u kojima se indukuje napon E_1 , gde je E_1 napon provodnika. Proširimo rezultate na sekcije sa više navojaka (N_c) tj. neka u svakom žlebu leži z_1 provodnika i neka su sve sekcije jednog namota – faze vezane serijski. Tada je ukupan indukovani napon namota - jedne faze sa p pari polova uz sve provodnike vezane serijski:

$$E = p \cdot 2 \cdot m \cdot z_1 \cdot E_1 \cdot k_n = 2 \cdot N_a \cdot E_1 \cdot k_n$$

gde su: - z_1 broj provodnika u žlebu,
 - N_a ukupan broj navojaka jedne faze,
 - $p \cdot m = Z/2q$ broj sekcija po fazi jednoslojnog namota.

Ako je namot izveden sa paralelnim granama tada u prethodnu jednačinu za N_a treba uvrstiti rezultatni broj navojaka po fazi. Rezultatni broj navojaka po fazi jednoslojnog namota je:

$$N_a = \frac{p \cdot m \cdot z_1}{a} = \frac{p \cdot m \cdot N_c}{a},$$

dok je rezultatni broj navojaka dvoslojnog namota:

$$N_a = \frac{p \cdot m \cdot z_1}{a} = \frac{p \cdot m \cdot 2N_c}{a},$$

Ilustracija za rezultatni broj navojaka po fazi: Za četvoropolni namot $2p = 4$, sa 2 žleba po polu i fazi $m = 2$ odrediti rezultatni broj navojaka. Sekcije ovog namota imaju 11 navojaka $N_c = 11$.

Ako je ovaj četvoropolni namot izveden kao jednoslojni on ima dve PFG koje mogu biti vezane na red i tada one čine jednu granu $a = 1$ ili te dve PFG mogu biti vezane paralelno pa je $a = 2$. Rezultatni broj navojaka po fazi jednoslojnog namota u zavisnosti od broja paralelnih grana iznosi:

$$a = 1 \quad N_a = \frac{p \cdot m \cdot N_c}{a} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 11}{1} = 44,$$

$$a = 2 \quad N_a = \frac{p \cdot m \cdot N_c}{a} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 11}{2} = 22.$$

Ako je ovaj četvoropolni namot izveden kao dvoslojni on ima četiri PFG koje mogu biti vezane na red i tada one čine jednu granu $a = 1$. Moguće je po dve PFG vezati na red da čine granu, a zatim ove dve grane paralelno pa je $a = 2$. Konačno, moguće je sve četiri PFG vezati paralelno pa je $a = 4$. Rezultatni broj navojaka po fazi dvoslojnog namota u zavisnosti od broja paralelnih grana iznosi:

$$a = 1 \quad N_a = \frac{p \cdot m \cdot 2N_c}{a} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 11}{1} = 88,$$

$$a = 2 \quad N_a = \frac{p \cdot m \cdot 2N_c}{a} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 11}{2} = 44,$$

$$a = 4 \quad N_a = \frac{p \cdot m \cdot 2N_c}{a} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 11}{4} = 22.$$

3.8. Eliminacija viših harmonika indukovano napona

U provodnicima smeštenim u žlebove indukuje se napon koji se menja u vremenu kao što se prostorno menja magnetna indukcija u vazдушnom zazoru. U prethodnom delu je objašnjen uticaj oblika pola na raspodelu magnetne indukcije u vazдушnom zazoru. Kako se oblikom pola ne postiže da se veličina vazdušnog zazora između statora i polnog nastavka menja prema sledećoj relaciji:

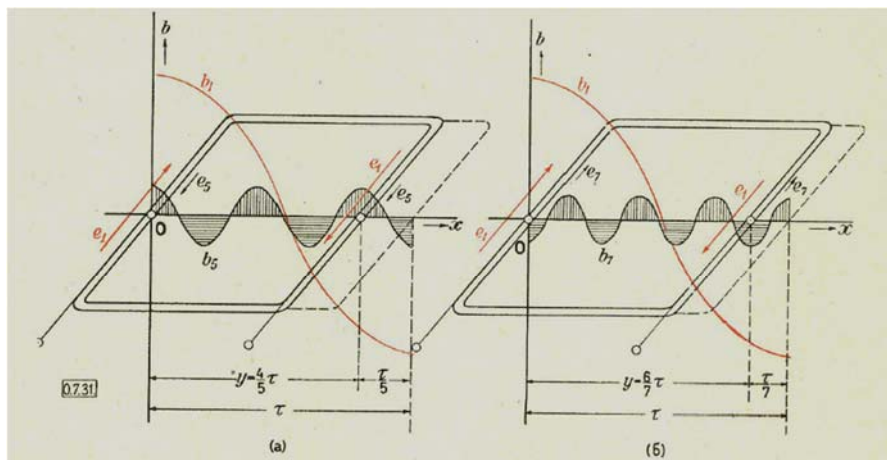
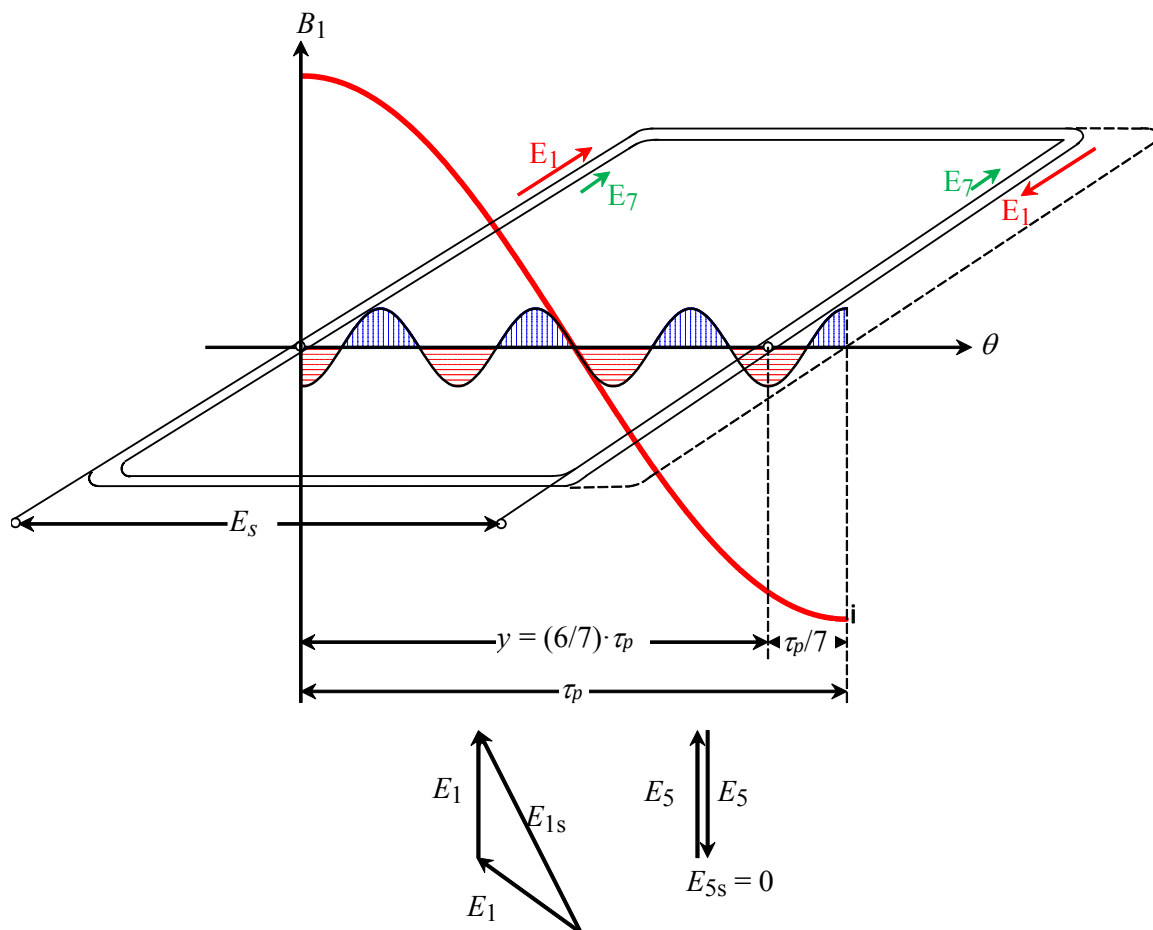
$$\delta = \frac{\delta_{min}}{\cos\theta}$$

gde su: - δ_{min} minimalna širina vazdušnog zazora ispod pola,

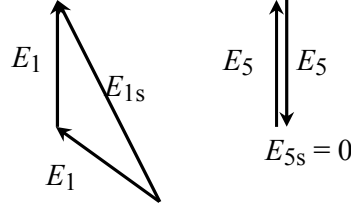
- θ ugaona koordinata posmatrane tačke u vazдушnom zazoru merena od ose pola,

to raspodela indukcije u vazдушnom zazoru po obimu mašina nije prostoperiodična. Takva neharmonična raspodela magnetne indukcije se može predstaviti kao suma osnovne harmonične komponente i viših harmoničnih komponenti. Učestanost ν -te harmonične komponente je ν puta veća od učestanosti osnovne. Sve harmonične komponente magnetne indukcije će indukovati odgovarajuće komponente elektromotorne sile.

Skraćanjem koraka sekcije poboljšava se oblik indukovano napona. Na slici su prikazani dijametralna i tetivna sekcija u magnetnom polju koje ima osnovnu i petu harmoničnu komponentu magnetna indukcija pod a) odnosno osnovnu i sedmu harmoničnu komponentu magnetna indukcija pod b).



31. сл.— Избегаване хармоничних вишега реда скраћењем навојног корака: (а) избегавање хармоничне 5 реда усвајањем навојног корака за $\tau/5$ мањег од полнога; (б) избегавање хармоничне 7 реда усвајањем навојног корака за $\tau/7$ мањег од полнога.



Aktivne strane dijametralne sekcije leže pod raznoimenim polovima magnetne indukcije osnovne harmonične komponente, ali isti zaključak vredi i za svaku drugu komponentu magnetne indukcije. Skraćenjem koraka sekcije na $y = (1 - 1/\nu)\tau_p$ obe strane sekcije leže pod raznoimenim polovima osnovne harmonične komponente indukcije, ali pod istoimenim polovima magnetne indukcije ν -te komponente magnetne indukcije, kao što se vidi na slici. Indukovana elektromotorna sila sekcije ν -te komponente, je razlika indukovanih napona u aktivnim stranama sekcije i ona iznosi $E_\nu = 0$. Time je potpuno eliminisana komponenta napona reda ν na račun malog smanjenja ukupnog indukovnog napona sekcije. Na slici su prikazani i fazori napona prvog i petog harmonika napona indukovanih u provodniku i sekciji kada je skraćenje sekcije $y/\tau_p = 4/5$ čime je postignuta eliminacija petog harmonika indukovnog napona. Kada navojak ne bi bio skraćen u njemu bi se indukovao i peti harmonik napona.

Sa slike je očigledno da je polni korak ν -tog harmonika ν puta manji od polnog koraka osnovnog harmonika:

$$\tau_{p\nu} = \frac{1}{\nu} \tau_{p1}.$$

Perioda ν -tog harmonika napona je ν puta manja od periode prvog harmonika napona, pa je električni ugao za ν -ti harmonik ν puta veći u odnosu na ugao za prvi harmonik:

$$\alpha_\nu = \nu \cdot \alpha_1.$$

Po analogiji sa osnovnim harmonikom, i za više harmonike napona definišu se pojasni i tetivni navojni sačinilac:

$$k_{p\nu} = \frac{\sin\left(m \frac{\nu \cdot \alpha}{2}\right)}{m \cdot \sin\left(\frac{\nu \cdot \alpha}{2}\right)},$$

$$k_{t\nu} = \sin\left(\nu \frac{y}{\tau_p} \frac{\pi}{2}\right).$$

Zbog geometrije sistema, postoje smo neparni harmonici pa je očigledno da se sa skraćenom sekcijom koraka $y = (1 - 1/\nu)\tau_p$ eliminiše ν -ti harmonik napona, jer je:

$$k_{t\nu} = \sin\left((\nu - 1) \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0.$$

Aдекватnim skraćenjem sekcije može se postići potpuna eliminacija višeg harmonika napona, ali to je praćeno i smanjenjem ostalih harmonika kao što je prikazano u Tabeli.

y/τ_p	1	2/3	4/5	6/7
$\nu=1 \quad 2E_1 \times$	1	0,87	0,95	0,97
$\nu=3 \quad 2E_3 \times$	1	0	0,59	0,78
$\nu=5 \quad 2E_5 \times$	1	0,87	0	0,43
$\nu=7 \quad 2E_7 \times$	1	0,87	0,59	0

U Tabeli je prikazano kako skraćenje sekcije utiče na harmonike u smislu eliminacije pojedinih ili smanjenja ostalih harmonika.

Prema rezultatima iz tabele, ako je skraćenje sekcije $y/\tau_p = 4/5$ postignuta je eliminacija petog harmonika i smanjenje sedmog harmonika napona na 0,59 od vrednosti u dijametralnoj sekciji. Ovim skraćenjem osnovni harmonik napona je smanjen na 0,95 od vrednosti u dijametralnoj sekciji.

Za skraćenje sekcije $y/\tau_p = 6/7$ postignuta je eliminacija sedmog harmonika i smanjenje petog harmonika napona na 0,43 od vrednosti u dijametralnoj sekciji. Ovim skraćenjem osnovni harmonik napona je smanjen na 0,97 od vrednosti u dijametralnoj sekciji.

Skraćenjem koraka sekcije postiže se ušteda u dužini glava namotaja (ušteda bakra) i lakši smeštaj namotaja.

3.9. Fluks po polu

Magnetno polje se može na očigledan način predstaviti pomoću linija polja – silnica. Uopšte za vektorsko polje, skup linija polja koje prolaze kroz neku površ naziva se fluks vektorskog polja kroz tu površ. Magnetno polje je primer vektorskog polja, pa se ukupni broj silnica kroz zadanu površ zove magnetni fluks, Φ .

Gustina linija magnetnog polja predstavlja magnetnu indukciju (*flux density*), B . Dakle, tamo gde su silnice gušće veća je vrednost magnetne indukcije.

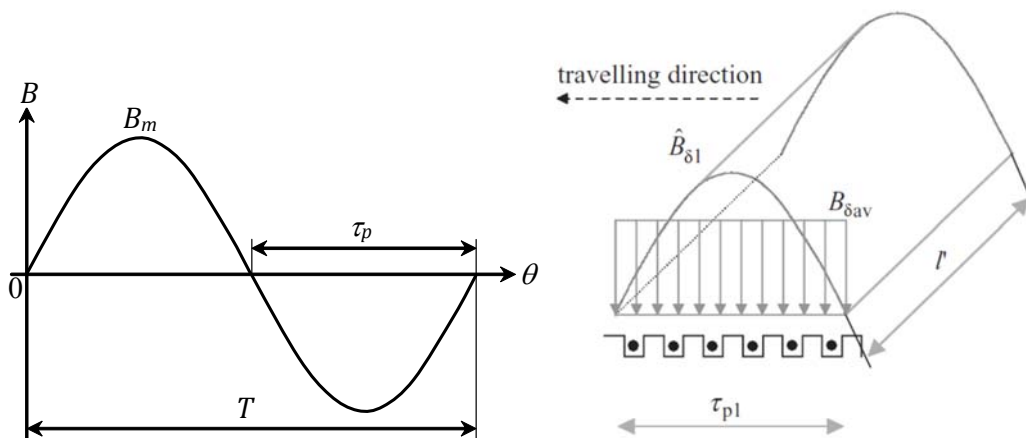
~~Moguće je magnetno polje predstaviti tako da broj linija vektora magnetne indukcije po jedinici površine odgovara vrednosti magnetne indukcije na tom mestu.~~

Kako je magnetni fluks definisan kao:

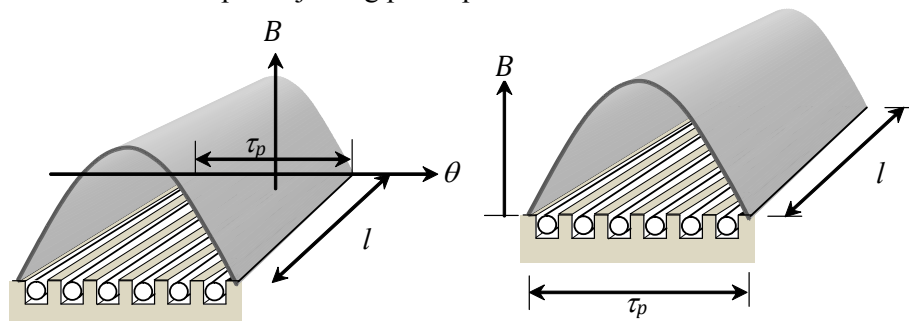
$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

to se jednostavno može zaključiti da je magnetni fluks kroz neku površinu S jednak je ukupnom broju linija magnetne indukcije koje prodiru kroz tu površinu.

Kod transformatora su u datom trenutku vremena svi navojci, smešteni na jednom stubu, prožeti istom magnetnom indukcijom. Kod rotacionih električnih mašina sa harmonijskom raspodelom magnetne indukcije po obimu mašine, provodnici indukta koji su smešteni u žlebove, se u datom trenutku vremena nalaze pod različitom magnetnom indukcijom B , kao što je prikazano na narednoj slici.

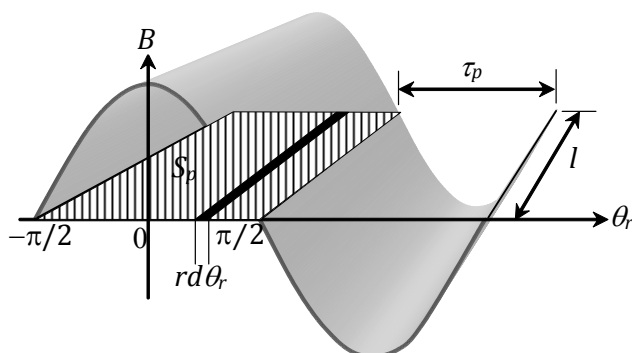


Raspodela magnetne indukcije u vazдушnom zazoru po obimu mašine. Raspodela indukcije preko jednog pola i provodnika u žlebovima.



Zbog toga se određuje prosečna vrednost magnetne indukcije, jedinstvena za sve provodnike koji se nalaze pod jednim polom.

Obodno (lučno) rastojanje između dva susedna prolaza magnetne indukcije kroz nulu predstavlja polni korak. Fundamentalni period je $2\tau_p$ i on odgovara električnom uglu od 2π . Na slici je u razvijenom prikazu data raspodela magnetne indukcije preko dva pola tj. na dvostrukom polnom koraku.



Fluks po polu.

Raspodela indukcije u vazдушnom zazoru po obimu mašine je prostoperiodična:

$$B = B_m \cos(p \cdot \theta_r),$$

gde je θ_r jedna od koordinata date tačke u vazдушnom zazoru. Elementat površine dS je:

$$dS = l \cdot rd\theta_r,$$

gde r poluprečnik, druga od koordinata date tačke u vazdušnom zazoru, a l je dužina paketa limova (osna dužina).

Vektor magnetne indukcije i vektor površine su radijalnog pravca odnosno, međusobom su kolinearni. Sada se skalarni proizvod može zameniti običnim proizvodom. Kada je raspodela magnetne indukcije poznata fluks po polu se može odrediti integracijom indukcije preko površine pola:

$$\Phi_p = \int_{-\pi/2p}^{+\pi/2p} \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_{-\pi/2p}^{+\pi/2p} B_m \cos(p \cdot \theta_r) \cdot l \cdot r d\theta_r = \frac{B_m \cdot l \cdot D}{p}.$$

Fluks po polu se može odrediti i kao proizvod površine pola i srednje vrednosti magnetne indukcije:

$$\Phi_p = \tau_p \cdot l \cdot B_{sr}.$$

Od ukupnog obima vazdušnog zazora polnom koraku pripada deo, i on naravno zavisi od broja polova:

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2p}.$$

Ako se indukcija menja po harmoničnoj promeni, tada je poznata veza između srednje vrednosti indukcije nad polnim korakom i maksimalna vrednosti indukcije:

$$B_{sr} = \frac{2}{\pi} \cdot B_m.$$

$$\Phi_p = \tau_p \cdot l \cdot B_{sr} = \frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot l \cdot \frac{2}{\pi} \cdot B_m = \frac{B_m \cdot l \cdot D}{p}$$

Maksimalna indukcija određena preko fluksa po polu je:

$$B_m = \frac{p \cdot \Phi_p}{D \cdot l}$$

Uvrštavanjem B_m i v u jednačinu za indukovani napon jednog provodnika E_1 a zatim uvrštavanjem toga u jednačinu za ukupni napon namota dobija se efektivna vrednost indukovnog napona u fazi mašine.

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \Phi_p \frac{p \cdot n}{60} \cdot N_a \cdot k_n = 4,44 \cdot \Phi_p \cdot f \cdot N_a \cdot k_n$$

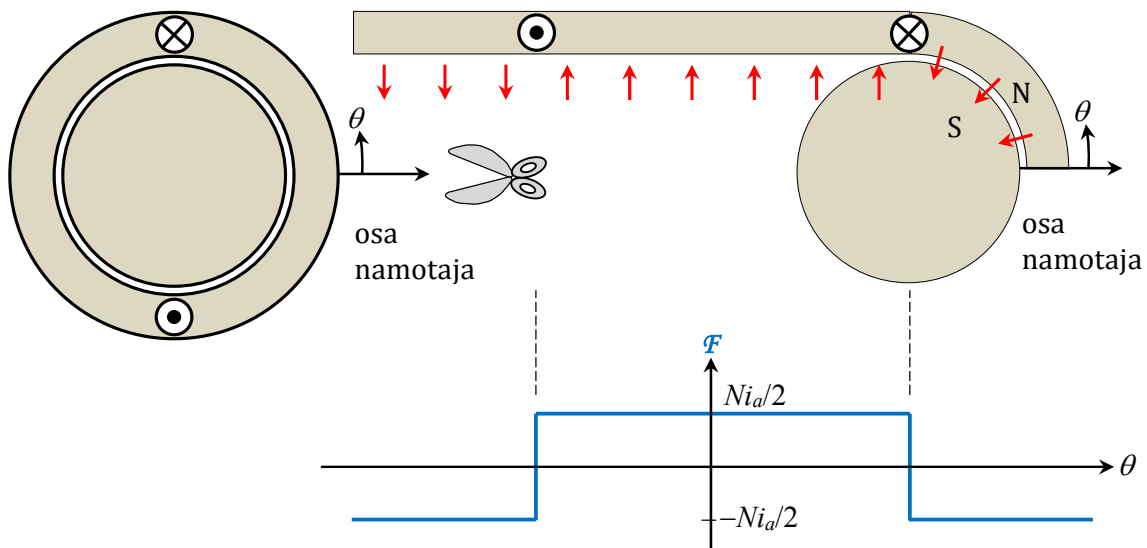
Indukovani napon je određen fluksom po polu.

4. MPS U VAZDUŠNOM ZAZORU ELEKTRIČNE MAŠINE

Magnetno polje u vazdušnom zazoru određeno je raspodelom struja oko vazdušnog zazora. Ako je vazdušni zazor ravnomeran to je magnetna otpornost konstantna, tada B (odnosno H) u zazoru imaju isti oblik kao MPS. Proučavanje oblika B , H u zazoru svodi se na proučavanje raspodele MPS. Za to sagledavanje MPS dovoljno je ucrtati u preseku raspored struja u žlebovima i njen smer.

4.1. Skoncentrisan dijametralni namotaj

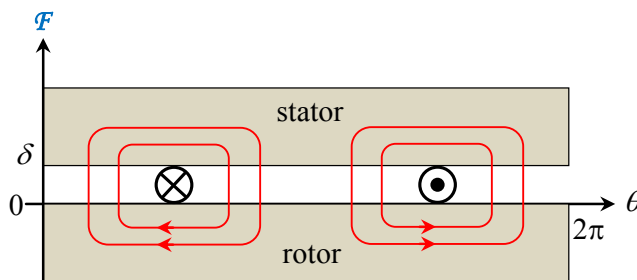
Najpre će se odrediti MPS od skoncentrisanog namotaja, što je zapravo jedne dijametralna sekcija, sa strujom. Sekcija ima N navojaka kroz koje teče struja i_a . Ova struja i_a stvara magnetno polje koje se može predložiti linijama fluksa, kao što je prikazano na slici. Na polovini obima provrta statora linije fluksa izviru formirajući severni (N) magnetni pol, a na drugoj polovini obima uviru formirajući južni magnetni pol (S), kao što je prikazano na slici. Struja u sekciji prouzrokuje magnetno polje koje u vazdušnom zazoru ima radijalan pravac. Usled simetrije magnetnog kola, magnetno polje u vazdušnom zazoru na naspramnim tačkama ima istu vrednost, ali suprotan smer. Razvijen prikaz raspodele MPS po obimu vazdušnog zazora može se dobiti ako se stator razreže i razmota kao što je prikazano na slici.



Magnetno polje duž zatvorene konture prema Amperovom zakonu određeno je ukupnom strujom obuhvaćenom tom konturom tj. sa MPS.

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \mathcal{F}.$$

Svakom konturom koja se poklapa sa silnicom fluksa obuhvaćena je celokupna MPS skoncentrisan u žlebu tj. Ni_a , kao što je prikazano na slici.



$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = H_{Fe} l_{Fe} + 2H \cdot \delta = Ni$$

Duž uočene konture sa prethodne slike, magnetna indukcija je konstantna tj. ima istu vrednost u gvožđu i u vazдушnom zazoru:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \frac{B}{\mu_{Fe}} l_{Fe} + 2 \frac{B}{\mu_0} \cdot \delta = Ni.$$

Kako je $\mu_{Fe} \gg \mu_0$, to je opravdano pretpostaviti da je magnetna otpornost gvožđa značajno manja od magnetne otpornosti vazduha, što dovodi do rezultata da je linijski integral $\vec{H}$ unutar gvožđa zanemarivo mali. Razumno je zanemariti padove magnetnog napona na delovima magnetnog kola unutar gvožđa.

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = 2H \cdot \delta = Ni.$$

Sada je jačina magnetnog polja u vazдушnom zazoru:

$$H = \frac{Ni}{2\delta},$$

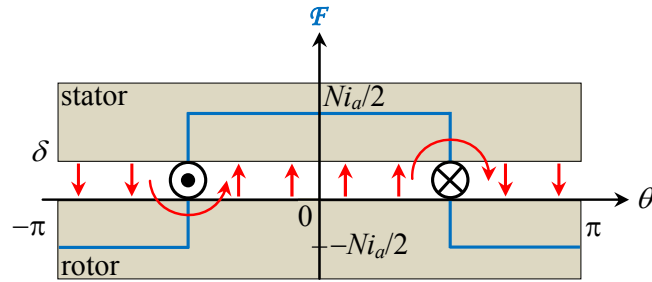
gde je δ veličina vazdušnog zazora.

Duž konture MPS se troši da bi se savladao pad magnetnog napona. Kako je pretpostavljeno da je magnetna provodnost gvožđa $\mu_{Fe} \gg \mu_0$, to MPS pokriva pad magnetnog napona vazdušnog zazora. Kako linija polja kroz vazdušni zazor prolazi dva puta, to je pad magnetnog napona na vazдушnom zazoru $Ni/2$.

Magnetna indukcija duž konture:

$$B = \frac{\mu}{\delta} \frac{Ni}{2}.$$

Ovim jednačinama je pokazano da magnetno polje u svim tačkama vazdušnog zazora ima istu vrednost tj. da je ravnomerno. Kako je mašina heteropolarna (ima magnetne polove suprotne magnetne polarnosti) to je na polovini obima provrta magnetno polje jedne polarnosti (znaka) (N magnetni pol), a na drugoj polovini obima suprotne polarnosti (S magnetni pol). Očigledno je da istu ovakvu raspodelu po obimu vazdušnog zazora ima i MPS. Na slici je prikazana raspodela MPS po obimu mašine skoncentrisanog namotaja. Raspodela MPS po obimu vazdušnog zazora je pravougaona.



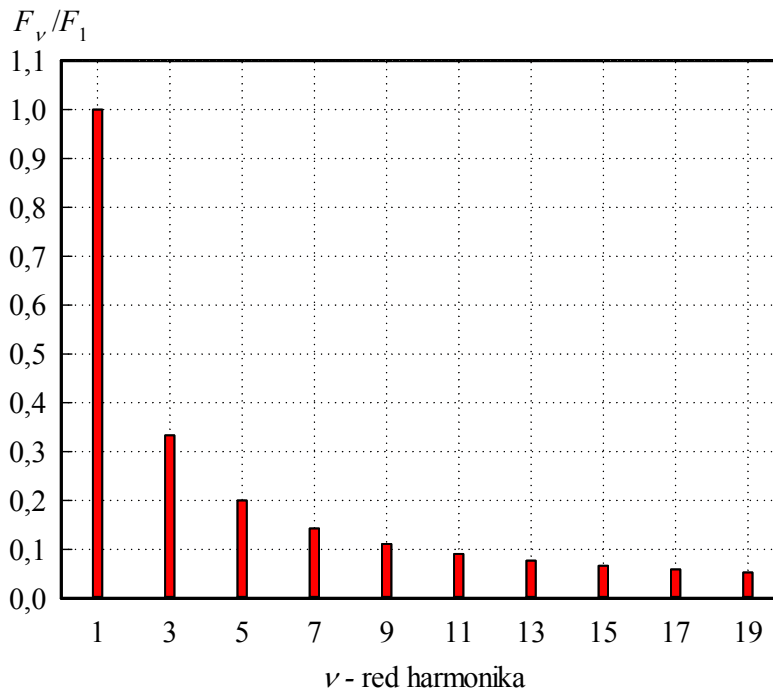
Raspodela MPS je periodična funkcija po uglu θ koji predstavlja koordinatu tačke u vazdušnom zazoru. Raspodela MPS se veoma često aproksimira Furijeovim redom (beskonačnom sumom harmoničnih komponenti):

$$F = \frac{Ni_a}{2} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{Ni_a}{2} \cdot \left[\cos\theta - \frac{1}{3}\cos3\theta + \frac{1}{5}\cos5\theta - \frac{1}{7}\cos7\theta \dots \right].$$

Amplituda harmonične komponente – harmonika opada kako raste red komponente:

$$F_v = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{Ni_a}{2} \cdot \frac{1}{v}, \quad v = 1, 3, 5, 7, \dots$$

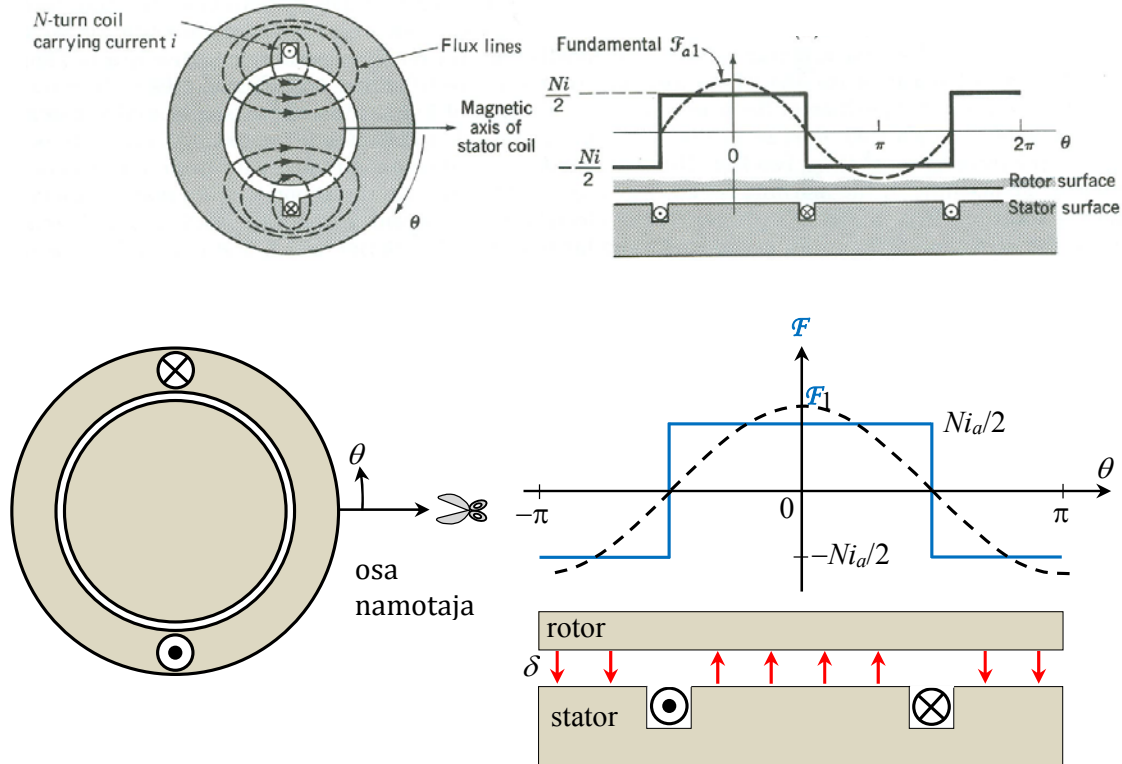
Amplituda v -tog harmonika je v puta manja od amplitude prvog harmonika. Perioda v -tog harmonika je v puta manja od periode osnovnog harmonika. Prema tome za v -ti harmonik mašina ima $v\varphi$ pari polova. Spektar harmonika je prikazan na slici.



Amplituda prvog harmonika (osnovni harmonik, fundamental) je $4/\pi$ puta veća od amplitude prostorne raspodele MPS ($Ni_a/2$). Prostorna raspodela po obodu vazdušnog zazora, osnovnog harmonika MPS je:

$$\mathcal{F}_1(\theta) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{Ni_a}{2} \cdot \cos \theta.$$

Na slici je prikazana prostorna raspodela MPS i prvog harmonika MPS po obimu vazdušnog zazora.



Nezavisno od karaktera struje (jednosmerna ili naizmjenična) prostorna raspodela MPS je nepokretna u prostoru. Kada je struja u namotaju jednosmerna I , raspodela MPS u prostoru ima vremenski konstantnu amplitudu:

$$\mathcal{F} = \frac{NI}{2},$$

dok je amplituda prvog harmonika MPS:

$$\mathcal{F}_1 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{NI}{2}.$$

Sa jednosmernom strujom u namotaju dobijena je prostorno nepokretna i vremenski konstantna raspodela MPS po obimu vazdušnog zazora.

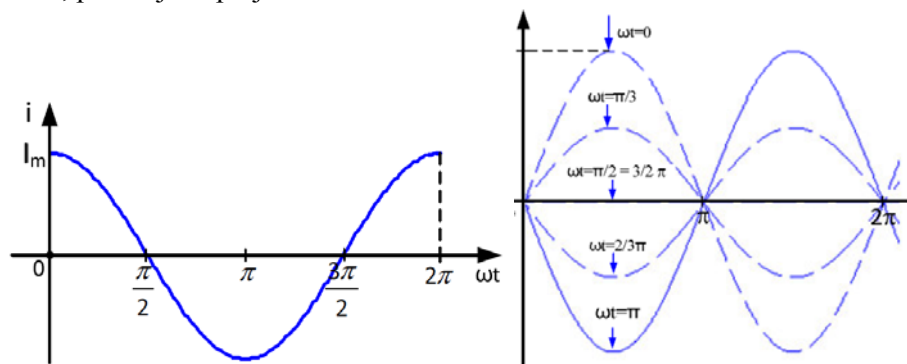
Kada je struja u namotaju naizmjenična i prostoperiodična, $i_a = \sqrt{2} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\omega t)$, prostorna raspodela MPS je naravno nepokretna u prostoru, ali ima vremenski promenljivu vrednost:

$$\mathcal{F} = \frac{Ni_a}{2}.$$

Amplituda prvog harmonika MPS je:

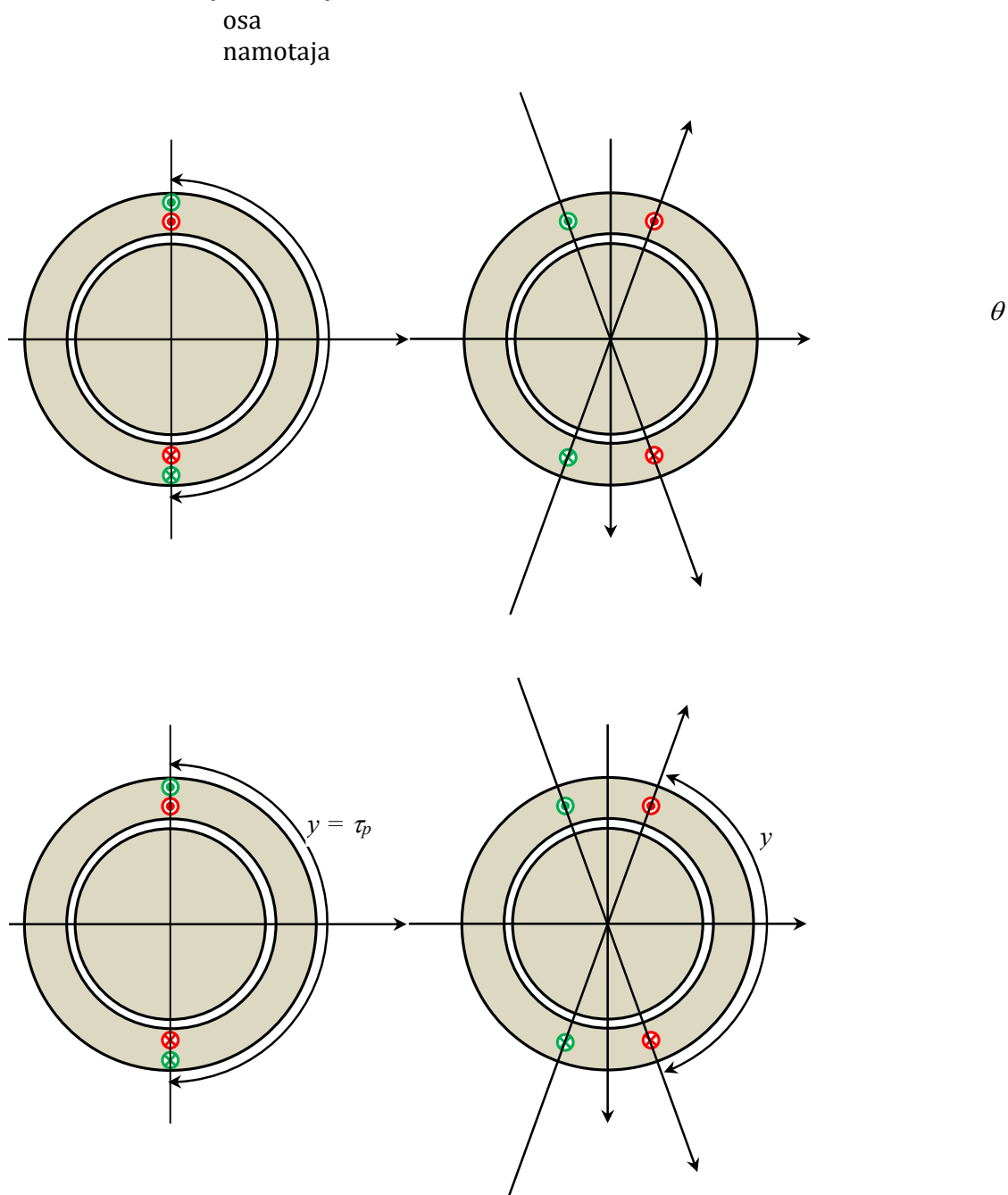
$$\mathcal{F}_1 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{N\sqrt{2}I_{eff}}{2}.$$

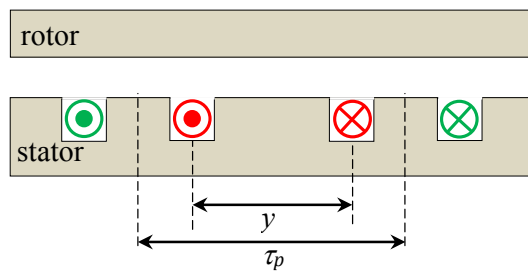
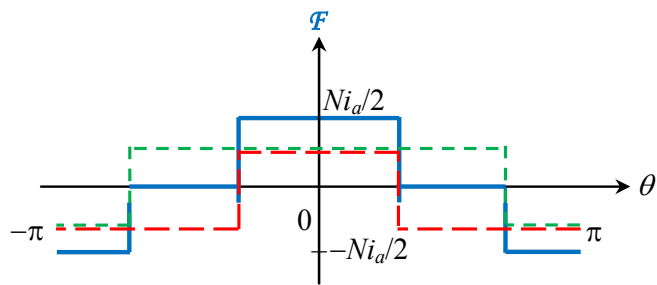
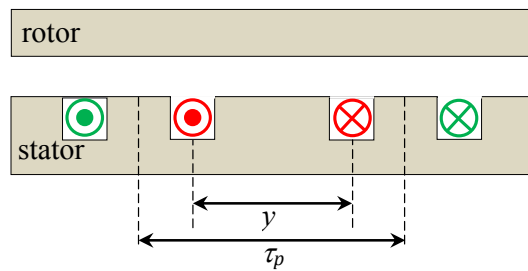
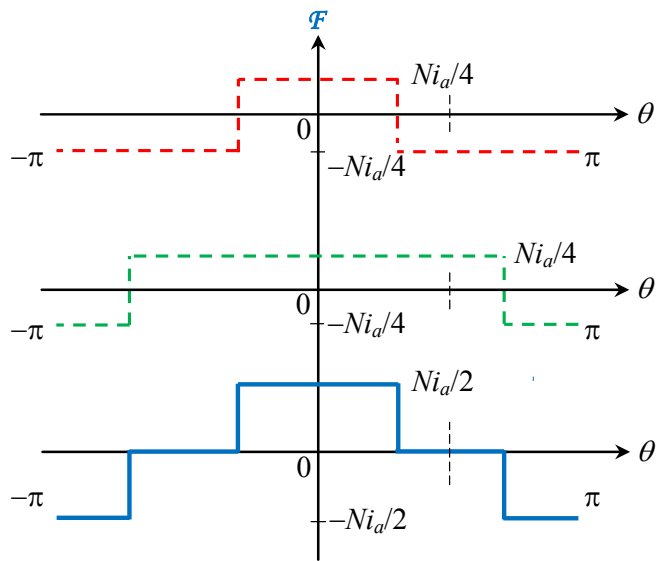
Sa naizmeničnom strujom u namotaju dobijena je prostorno nepokretna, ali vremenski promenljiva raspodela MPS po obimu vazdušnog zazora. Vremenska promenljivost se ogleda u tome što se sa promenom struje u vremenu menja i amplituda MPS. Ovo je pulsirajuća MPS odnosno, pulsirajuće polje.

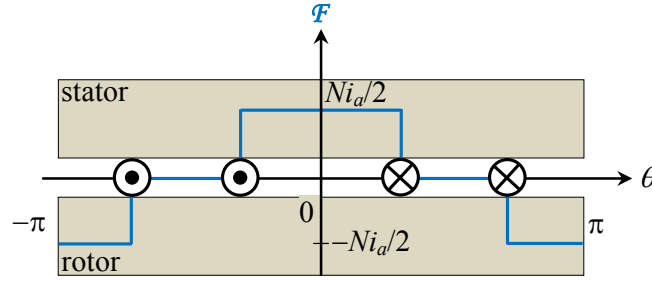


4.2. Skoncentrisan tetivni namotaj

Tetivni namotaj je takav namotaj kod kojeg je rastojanje između aktivnih strana – navojni korak y , manje od rastojanja između osa polova – polnog koraka, τ_p . Tetivni namotaj se uobičajeno zove namotaj sa skraćenim korakom. Samo se dvoslojni namotaj može izvesti kao tetivni. Jednoslojni namotaj se ne može realizovati sa skraćenim korakom.







Pravougaona raspodela MPS skoncentrisanog tetivnog namotaja sa slike može se aproksimirati Furijeovim redom. Amplituda ν -tog harmonika je:

$$F_\nu = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{Ni_a}{2} \cdot \frac{1}{\nu} \sin\left(\nu \cdot \frac{y}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right), \quad \nu = 1, 3, 5, 7, \dots$$

Poređenjem sa jednačinom za amplitudu harmonika dijametralnog namotaja uvodi se sačinilac zbog skraćenja koraka namotaja – tetivni sačinilac:

$$k_{t\nu} = \sin\left(\nu \cdot \frac{y}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right).$$

MPS tetivnog namotaja se računa isto kao i u dijametralnog, ali uz uvažavanje tetivnog sačinioća. Treba primetiti da se isti tetivni sačinilac javlja i kod izračunavanja indukovane elektromotorne sile.

Očigledno je da se sa skraćanjem sekcije za $1/\nu$ od τ_p

$$y = \left(1 - \frac{1}{\nu}\right) \cdot \tau_p.$$

eliminiše ν -ti harmonik MPS jer je tetivni navojni sačinilac za peti harmonik:

$$k_{t\nu} = \sin\left(\nu \cdot \frac{y}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left((\nu-1) \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0 \quad \nu = 3, 5, 7, \dots$$

Primer: Ako se navojni korak skрати za $1/5$ od polnog koraka, tada je $y/\tau_p = 4/5$, pa je tetivni navojni sačinilac za peti harmonik:

$$k_{t5} = \sin\left(5 \cdot \frac{4}{5} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0.$$

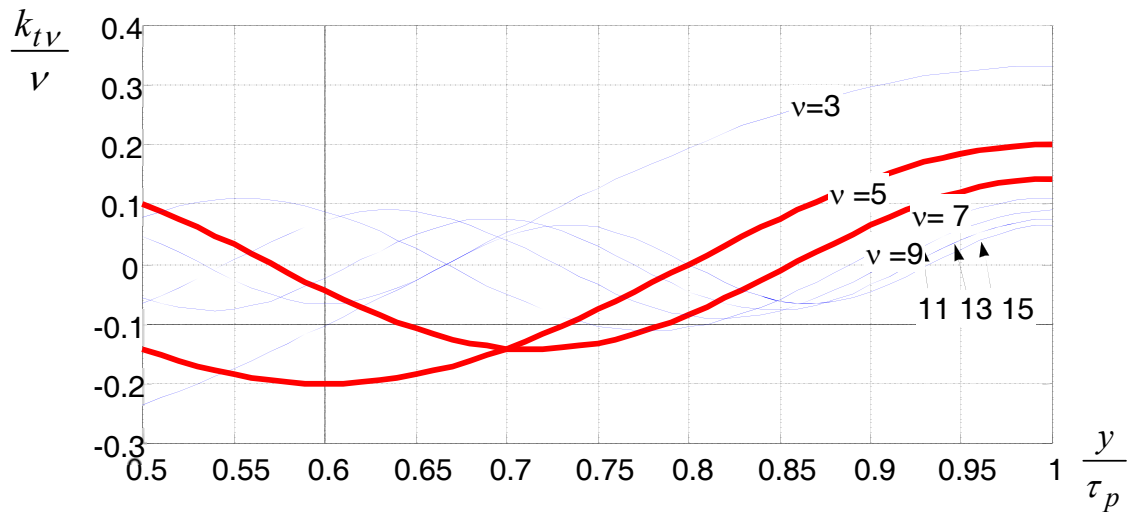
Skraćenjem sekcije za $1/5$ od polnog koraka eliminisan je peti harmonik MPS, naravno eliminisan je i peti harmonik EMS.

Ako se navojni korak skрати za $1/7$ od polnog koraka, tada je $y/\tau_p = 6/7$, pa je tetivni navojni sačinilac za sedmi harmonik:

$$k_{t7} = \sin\left(7 \cdot \frac{6}{7} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0.$$

Skraćenjem sekcije za $1/7$ od polnog koraka eliminisan je sedmi harmonik MPS, naravno eliminisan je i sedmi harmonik EMS.

Na slici je prikazano kako tetivni navojni sačinilac za više harmonike normalizovan redom harmonika, $k_{t\nu}$, zavisi od skraćanja, y/τ_p .

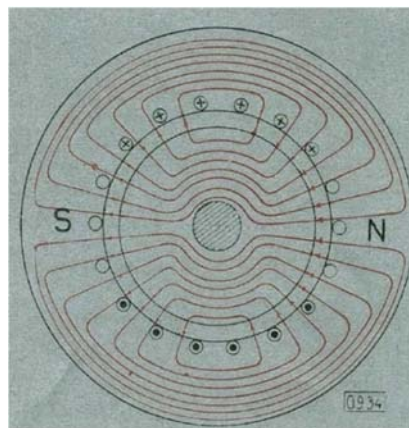


Tetivni sačinilac viših harmonika u funkciji skraćenja.

Kako amplituda harmonika opada sa $1/v$, gde je v red harmonika, to najveće vrednosti imaju najniži harmonici tj. treći, peti, sedmi. Zato se pribegava njihovoj eliminaciji ili smanjenju, adekvatnim skraćanjem sekcije. Kroz dva prethodna primera je pokazano kako se eliminiše peti ili sedmi harmonik. U stvarnosti se pribegava skraćanju sekcije između $1/7$ i $1/5$ u odnosu na polni korak, tada je y/τ_p između $4/5$ i $6/7$. Kao što se vidi na slici Ovim skraćanjem nije eliminisan ni jedan harmonik, ali je postignuto smanjenje i petog i sedmog harmonika.

4.3. Raspodeljen dijametralni namotaj

Imperativ pri konstrukciji namotaja mašina naizmenične struje je dobiti harmoničnu raspodelu MPS po obimu vazdušnog zazora, što garantuje istu takvu raspodelu magnetnog polja. Zato se umesto skoncentrisanog namotaja, sa samo jednom sekcijom smeštenom u jedan par žlebova, koristi raspodeljen namotaj. Raspodeljeni namotaj ima više sekcija koji se smeštaju u više žlebova. Na slici je prikazan raspodeljen namotaj sa šest sekcija. Kao što se sa slike vidi, žlebovi u koje su smeštene sekcije jednog faznog namotaja formiraju dve zone – pojasa. Svaka od tih zona se nalazi pod magnetnim polom suprotne polarnosti.



Struja u svih m žlebova jedne zone je istog smera, a u žlebovima sledeće zone je smer struje suprotan, pa su magnetne silnice najgušće između dve zone jer svaka silnica koja na tom mestu prolazi vazdušni zazor obuhvata sve struje jedne zone. Između susednih zona magnetna indukcija je maksimalna. U sredini svake zone magnetna indukcija je jednaka nuli.

Sada će biti objašnjen uticaj raspodeljenog namotaja na raspodelu MPS a time i na magnetno polje u mašini. Na slici je prikazan fazni namotaj a dvopolne trofazne mašine. Faze b i c se smeštaju u prazne žlebove. Namotaj je dvoslojni, i svaka sekcija se ima n_c navojaka.

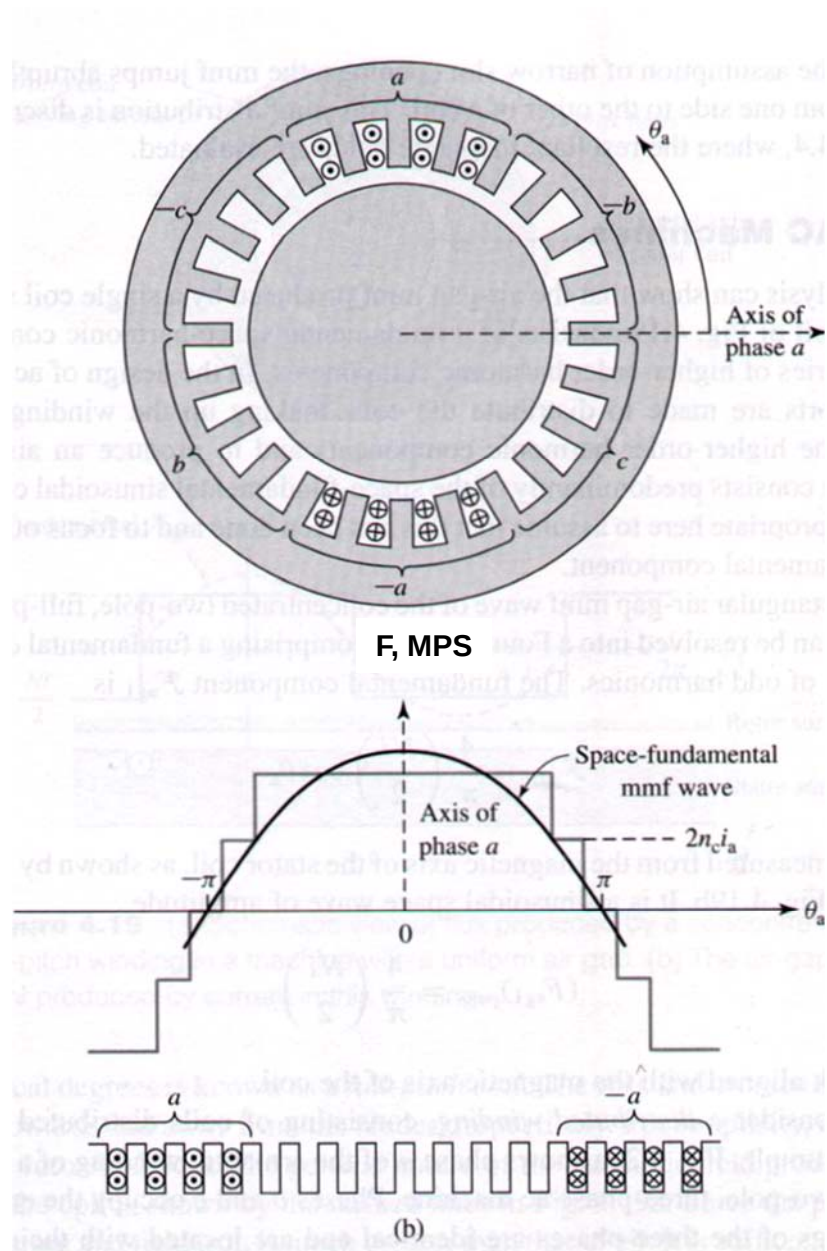


Figure 4.20 The mmf of one phase of a distributed two-pole, three-phase winding with full-pitch coils.

5. MPS U VAZDUŠNOM ZAZORU ELEKTRIČNE MAŠINE

Neka se posmatra mašina sa cilindričnim statorom i rotorom i sa po jednim namotajem na statoru i rotoru. Neka su namotaji raspodeljeni tako da su njihove MPS prostoperiodično raspodeljene po obimu.

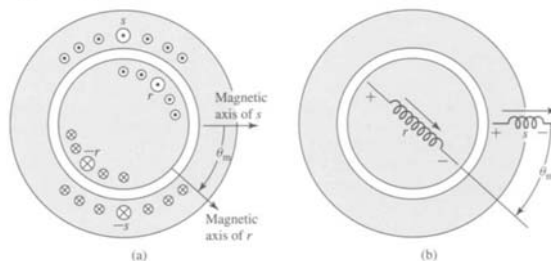
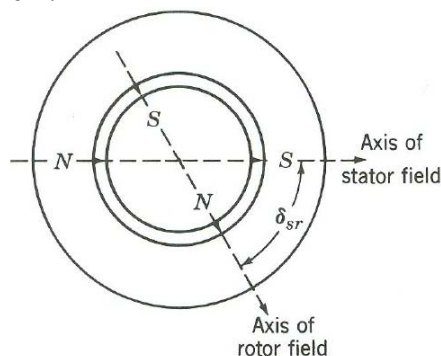


Figure 4.34 Elementary two-pole machine with smooth air gap: (a) winding distribution and (b) schematic representation.

Proticanje struje kroz namotaje na statoru i rotoru praćeno je pojavom MPS odnosno magnetnog fluksa, što se može ekvivalentirati sa stalnim magnetima postavljenim na statoru i rotoru mašine. Ovi magnetni bi bili postavljeni u pravac magnetne ose polja statora i rotora, kao što je prikazano na slici, za dvopolnu mašinu cilindričnim rotorom i statorom, odnosno konstantnim vazдушnim zazorom.



Usled tendencije da se poklope raznorodni magnetni polovi statora i rotora razvija se momenat. Momenat se javlja kao rezultat interakcije magnetnih polja statora i rotora pa otud naziv elektromagnetni momenat. Elektromagnetni momenat je mera mehaničke interakcije statora i rotora. Ovaj momenat je proporcionalan sa proizvodom amplituda MPS statora i rotora i takođe je funkcija ugla između magnetnih osa statora i rotora. U nastavku će biti pokazano je kod mašina sa konstantnim vazдушnim zazorom elektromagnetni momenat srazmeran sa $\sin \delta_{sr}$.

Usled struja statora i rotora uspostaviće se zajednički fluks i fluks rasipanja. Samo je zajednički fluks merodavan za generisanje momenta.

MPS struja statorskog i rotorskog namotaja mogu se posmatrati kao prostoperiodično raspodeljene funkcije po obimu vazdušnog zazora. Ove MPS se mogu interpretirati prostornim vektorima F_s i F_r duž osa magnetnog polja statora i rotora. U vazdušnom zazoru postoji rezultantna MPS F_{sr} koja je, takođe prostoperiodično raspodeljena po obimu vazdušnog zazora. Rezultantna MPS F_{sr} je merodavna za magnetno polje u mašini.

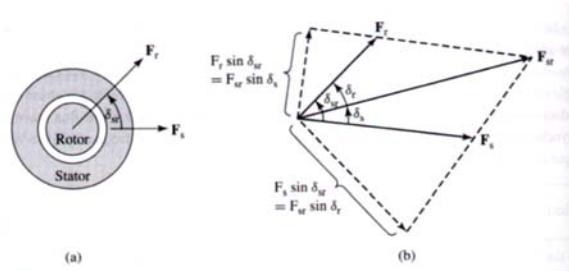


Figure 4.35 Simplified two-pole machine: (a) elementary model and (b) vector diagram of mmf waves. Torque is produced by the tendency of the rotor and stator magnetic fields to align. Note that these figures are drawn with δ_{sr} positive, i.e., with the rotor mmf wave F_r leading that of the stator F_s .

Rezultanta MPS je određena vektorskom sumom MPS statora i rotora. Može se odrediti primenom kosinusne teoreme:

$$F_{sr}^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_s \cdot F_r \cos \delta_{sr}.$$

Jačina magnetnog polja u vazдушnom zazoru je:

$$H_m = \frac{F_{sr}}{\delta}.$$

Gustina energije magnetnog polja:

$$w = \frac{\mu_0}{2} H^2 = \frac{\mu_0}{2} \left(\frac{H_m}{\sqrt{2}} \right)^2 = \frac{\mu_0}{4} \left(\frac{F_{sr}}{\delta} \right)^2.$$

Ukupna energija magnetnog polja:

$$W = w \cdot V_{\text{vazdušnog zazora}}.$$

$$W = \frac{\mu_0}{4} \left(\frac{F_{sr}}{\delta} \right)^2 \cdot \pi \cdot D \cdot l \cdot \delta = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot D \cdot l}{4\delta} F_{sr}^2.$$

$$W = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot D \cdot l}{4\delta} (F_s^2 + F_r^2 + 2F_s \cdot F_r \cos \delta_{sr}).$$

Elektromagnetni momenat je:

$$m_e = \frac{\partial W}{\partial \delta_{sr}} = -p \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot D \cdot l}{2\delta} F_s \cdot F_r \sin \delta_{sr}.$$

$$m_e = -p \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot D \cdot l}{2\delta} F_s \cdot F_{sr} \sin \delta_s.$$

$$m_e = -p \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot D \cdot l}{2\delta} F_r \cdot F_{sr} \sin \delta_r.$$

$$m_e = -p \frac{\pi \cdot D \cdot l}{2} B_m \cdot F_r \sin \delta_r.$$

$$m_e = -\frac{\pi}{2} p^2 \cdot \Phi_p \cdot F_r \sin \delta_r.$$