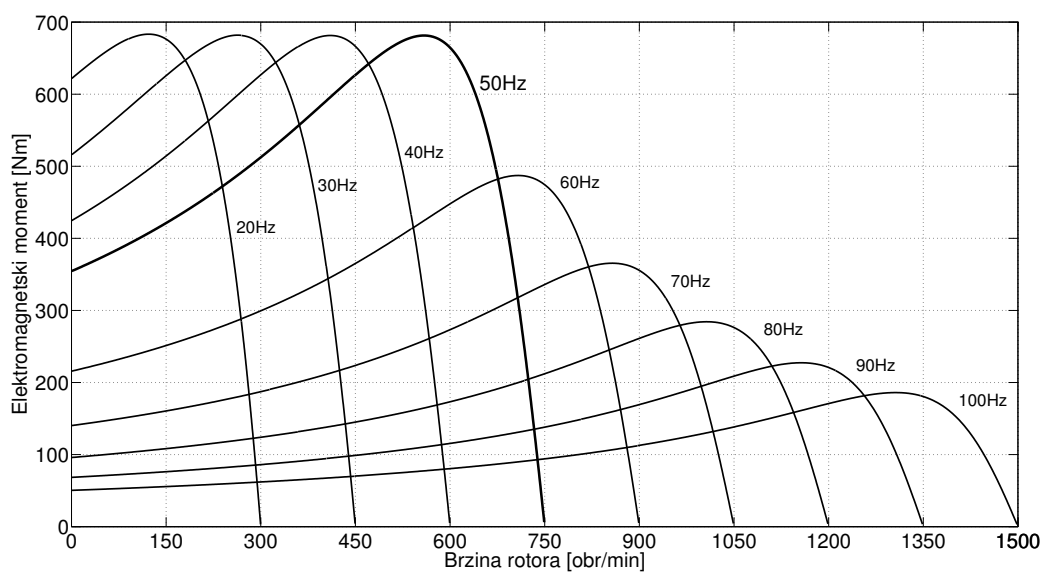


GOJKO JOKSIMOVIĆ

ASINHRONE MAŠINE



Narodna knjiga
2019.

GOJKO JOKSIMOVIĆ

ASINHRONE
MAŠINE

Narodna knjiga
2019.

Posvećeno sjenima oca Mija i majke Dragice

SADRŽAJ

UVOD	7
1. OBRтна MAGNETOMOTORNА SILА	8
1.1. FUNKCIЈА NAVOЈKA I FUNKCIЈА NAMOTAЈА	8
1.2. PREČNIČKA NAVOЈNA GRUPА	10
1.3. PULSIRAJUĆА MMS	12
1.4. DISTRIBUIRANI PREČNIČKI FAZNI NAMOTAЈ	15
1.5. TROFAZNI NAMOTAЈ SA PUNIM NAVOЈNIM KORAKOM	17
1.6. OBRтна MMS - ANALITIČKI POSTUPAK	21
1.7. TROFAZNI NAMOTAЈ SA SKRAĆENIM NAVOЈNIM KORAKOM	25
2. PRINCIP RADA ASINHRONOG MOTORA	28
3. EKVIVALENTNA ŠEMA ASINHRONE MAŠINE	33
3.1. OTVOREN NAMOTAЈ ROTORA	34
3.2. KRATKOSPOЈEN NAMOTAЈ ROTORA	35
4. ANALITIČKI MODEL ASINHRONE MAŠINE	39
5. STANDARDNI OGLEDI ASINHRONE MAŠINE	47
5.1. OGLED PRAZNOG HODA	48
5.2. OGLED KRATKOG SPOЈА	49
5.3. MJERENJE OTPORNOSTI NAMOTAЈА STATORА	50
5.4. RAZDVAЈANJE ROTACIONIH GUBITAKА I GUBITAKА U GVOŽĐU	51
6. TEVENINOVA ZAMJENSKА ŠEMA	54
7. SVOĐENJE KAVEZNOG NA TROFAZNI NAMOTAЈ	55
8. ELEKTROMAGNETSKI MOMENT	58
8.1. KLOSOVA FORMULA	64
9. ZAVISNOST STRUЈА OD KLIZANЈА	65
10. POKRETANJE ASINHRONOG MOTORA	69
10.1. POKRETANJE MOTORA SA NAMOTANIM ROTOROM	69
10.2. POKRETANJE MOTORA SA KAVEZNIM ROTOROM	72
10.2.1. POKRETANJE MOTORA PRI SNIŽENOM NAPONU	73
10.2.2. KONSTRUKTIVNE MJERE	76

10.3. VRIJEME ZAleta ASINHRONOG MOTORA	79
10.4. STABILNOST RADA ASINHRONOG MOTORA	79
11. REGULACIJA BRZINE ASINHRONOG MOTORA	82
12. ASINHRONI GENERATOR	93
12.1. KAVEZNI ASINHRONI GENERATOR	93
12.2. DVOSTRANO NAPAJANI ASINHRONI GENERATOR	96
13. DINAMIČKI MODELI ASINHRONE MAŠINE	102
13.1. DINAMIČKI MODEL U PRIRODNOM SISTEMU KOORDINATA	102
13.2. dq DINAMIČKI MODEL ASINHRONE MAŠINE	105
13.2.1. KLARKINA ($\alpha\beta$) TRANSFORMACIJA	105
13.2.2. PARKOVA (dq) TRANSFORMACIJA	110
13.3. DINAMIČKI MODEL BAZIRAN NA FUNKCIJI NAMOTAJA	116
14. ANALIZA NESIMETRIČNIH RADNIH REŽIMA	124
14.1. SIMETRIČNI MOTOR NA NESIMETRIČNOJ NAPONSKOJ MREŽI	125
14.2. PREKID FAZE MOTORA	131
15. MONOFAZNI ASINHRONI MOTOR	134
15.1. PRINCIP RADA	134
15.2. ANALIZA RADA MOTORA U STACIONARNOM STANJU	137
15.3. VARIJANTE MONOFAZNIH ASINHRONIH MOTORA	139
16. EFEKTI VIŠIH PROSTORNIH HARMONIKA MMS	143
16.1. VIŠI VREMENSKI HARMONICI STRUJA ROTORA	143
16.2. ISKOŠENJE ŠTAPOVA ROTORA	145
16.3. MMS KAVEZNOG NAMOTAJA ROTORA	150
16.4. SPEKTRALNI SADRŽAJ STRUJE STATORA KAVEZNOG MOTORA	152
16.4.1. UTICAJ ROTOROVIH ŽLJEBNIH HARMONIKA	152
16.4.2. UTICAJ OŽLJEBLJENJA STATORA I ROTORA	154
16.4.3. UTICAJ ZASIĆENJA MAGNETSKOG KOLA	156
16.5. PULSACIONI MOMENTI KOD KAVEZNOG MOTORA	159
LITERATURA	166

PREDGOVOR

Dobro poznavanje materije iz oblasti konvencionalnih obrtnih električnih mašina jeste *conditio sine qua non* za formiranje kvalitetnog inženjera elektrotehnike energetske profilacije. To nije jednostavan zadatak, prije svega zbog složenosti i interdisciplinarne prirode materije što je posledica jednovremene prostorne i vremenske zavisnosti veličina od interesa kao i nelinearnih karakteristika feromagnetskih materijala.

Ovaj udžbenik predstavlja kompilaciju mog dugogodišnjeg naučno-istraživačkog i pedagoškog rada koji je dominantno posvećen električnim mašinama. Tokom niza godina izvođenja nastave na predmetima *Uvod u električne mašine i transformatori*, *Električne mašine u elektroenergetskim sistemima* i *Rotacione mašine*, na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta Crne Gore, pripremao sam materijal koji je studentima bio na raspolaganju u obliku skripti. Dio tog materijala sam sredio i on je sada pred čitaocima u obliku udžbenika. Udžbenik je namijenjen studentima elektrotehničkih fakulteta svih nivoa studija, ali i svim ostalim zainteresovanim za ovu problematiku.

Udžbenik je koncipiran tako da se čitalac postepeno uvodi u vrlo interesantnu oblast Asinhronih mašina, počev od osnovnih elemenata raspodjele magnetomotorne sile u vazдушnom procjepu i monofazne zamjenske šeme pa sve do dinamičkih modela asinhronne mašine, analize nesimetričnih radnih režima i uticaja viših prostornih harmonika talasa magnetske indukcije na njen rad.

Zahvaljujem recenzentima, svojim cijenjenim profesorima, Akademiku Momiru Đuroviću i Profesoru emeritusu Iliji Vujoševiću na sugestijama i komentarima koji su doprinijeli kvalitetnijem konačnom obliku udžbenika.

U nadi da će ovaj udžbenik imati značajan uticaj na obrazovanje i razvoj mladog inženjerskog kadra koji izlazi sa Elektrotehničkog fakulteta, ne samo onog koji je u sastavu Univerziteta Crne Gore, ostajem otvoren za svaku sugestiju u cilju poboljšanog i/ili proširenog drugog izdanja.

u Podgorici, aprila 2019. godine

Autor,

dr Gojko Joksimović

redovni profesor Univerziteta Crne Gore

UVOD

O značaju i rasprostranjenosti rotacionih električnih mašina generalno, a posebno o električnim motorima, vrlo slikovito govore podaci Međunarodne agencije za energiju prema kojima električni motori troše oko 45% globalno proizvedene električne energije. Bez velike greške, prethodna konstatacija mogla bi da se odnosi na asinhronne motore kao najzastupljeniju vrstu električnih motora.

Asinhrona mašina je obrtna električna mašina naizmjenične struje koja se može naći u ulozi motora, generatora, a u prelaznim režimima i u ulozi kočnice (protivstrujno kočenje). Ipak, ona se najčešće koristi kao motor, dominantno trofazni u industrijskim primjenama, ali i monofazni u primjenama manjih snaga. Danas se, zahvaljujući razvoju energetske elektronike, u mnogim primjenama mogu naći i asinhronne mašine sa brojem faza većim od tri, takozvane polifazne ili mnogofazne asinhronne mašine, [1], [2]. Na engleskom govornom području asinhronne mašine su poznate kao indukcione mašine, *induction machines*, dok je njemački naziv za njih *drehstrom asynchronmaschine*.

U ovoj knjizi je pažnja posvećena dominantno i danas najčešćoj, trofaznoj asinhronoj mašini.

Asinhronu mašinu čini cilindrični rotor kao i stator cilindričnog provrta što za posledicu ima uniformni vazdušni procjep duž oboda mašine.

U žljebove po obodu statora uz vazdušni procjep postavlja se simetrični trofazni namotaj koji se izvodi u skladu sa pravilima koja trebaju biti ispunjena u cilju formiranja obrtnog magnetskog polja. To znači da su tri fazna namotaja duž oboda statora prostorno pomjerena za po trećinu dvostrukog polnog koraka. Na njih se dovodi trofazni simetrični sistem naizmjeničnih napona što za posledicu ima struje u faznim namotajima koje su vremenski tj. fazno pomjerene za po trećinu periode. Kao rezultat prethodnog, duž oboda mašine formira se obrtno magnetsko polje koje rotira sinhronom brzinom, koja, pored broja pari polova mašine, p , zavisi i od učestanosti napona napajanja, f .

Tri fazna namotaja statora se sprežu ili u zvijezdu (Y) ili u trougao (D ili Δ), pri čemu su u priključnoj kutiji motora izvedeni krajevi (klemme) sva tri fazna namotaja, njih ukupno šest, koji se u samoj priključnoj kutiji prevezuju u zvijezdu ili u trougao.

Sa aspekta konstrukcije namotaja na rotoru (namotaj armature ili samo armatura), razlikuju se dva rešenja.

Jedno od njih je da se u žljebove rotora postavi namotaj sličan onom na statoru: simetričan trofazni namotaj, prostorno raspodijeljen, sa istim brojem pari polova kao i na statoru. Tri kraja faznih namotaja se interno spajaju u jednu tačku čime se dobija sprega zvijezda dok se tri preostala kraja izvode na prstenove koji su postavljeni na osovinu rotora. U normalnom radnom režimu, prstenovi su, preko grafitnih četkica, kratkospojeni. Prilikom puštanja motora u rad u kolo rotora se preko četkica mogu

ubacivati dodatni otpornici. U specijalnom slučaju tzv. dvostranog napajanja mašine, preko opisanih prstenova je u kolo rotora moguće „ubacivati“ napon odgovarajuće efektivne vrijednosti, faznog stava i učestanosti. Asinhronne mašine opisane konstrukcije namotaja rotora poznate su kao mašine sa namotanim rotorom (*wound rotor induction machine*) ili klizno-kolutne asinhronne mašine (*slip ring induction machine*).

U praksi je češće rešenje poznato kao kavezni namotaj na rotoru ili kraće, kavezni rotor (*squirrel cage* ili samo *cage rotor induction machine*). Namotaj kaveznog rotora čine provodni štapovi koji su izliveni u žljebove rotora i koji su kratkospojeni provodnim prstenovima sa obje čeonne strane rotora. Ovaj namotaj, posmatran izolovano od noseće strukture rotora, liči na vjeвериčji kavez, odakle mu i ime. Ova vrsta namotaja, očigledno, ne omogućava električni pristup u smislu u kom je to moguće kod namotanog rotora. Motori sa ovakvim namotajem na rotoru su najrobusnija i najjeftinija pa samim tim i najčešće korišćena vrsta električnih motora.

Što se magnetskog kola asinhronne mašine tiče, i stator i rotor se formiraju slaganjem paketa međusobno galvanski izolovanih feromagnetskih limova čime se minimiziraju gubici u gvožđu.

1. OBRтна MAGNETOMOTORNA SILA

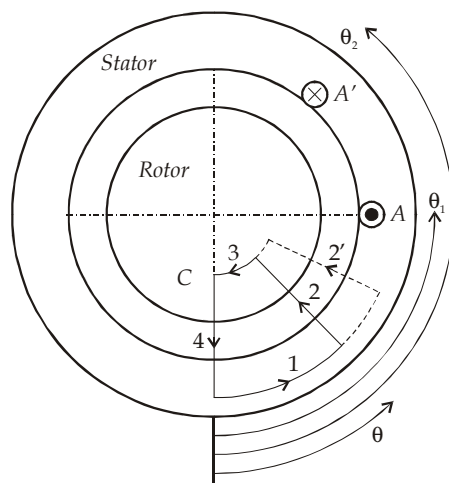
Princip rada asinhronne mašine se zasniva na formiranju obrtnog magnetskog polja – tzv. Teslinog obrtnog polja. Obrtno magnetsko polje je posledica obrtne magnetomotorne sile, mms. Iz tog razloga je korisno osvrnuti se na način formiranja obrtne mms koje je posledica toka vremenski (fazno) pomjerenih naizmjeničnih struja kroz nepokretne, prostorno pomjerene fazne namotaje. U tom cilju potrebno je upoznati se sa pojmom funkcije navojka (*turns function*) i funkcije namotaja (*winding function*), [3]-[7].

1.1. FUNKCIJA NAVOJKA I FUNKCIJA NAMOTAJA

Slika 1.1. prikazuje poprečni presjek primitivne mašine sa uniformnim vazдушnim procjepom. Na statoru je postavljena jedna navojna grupa (*coil, Spule, svitak*) sa N navojaka. Stranice navojne grupe su smještene u žljebovima čiji je položaj opisan mehaničkim ugaonim koordinatama θ_1 i θ_2 .

Zanemarujući postojanje žljebova i pretpostavljajući da je magnetska permeabilnost gvožđa beskonačno velika, funkcija navojka $n(\theta)$ definiše se na sledeći način, imajući na umu Amperov zakon i činjenicu da je ugaona koordinata stranice 2 konture C (po kojoj se traži cirkulacija vektora \mathbf{H}) sa slike promjenljiva, $0 < \theta \leq 2\pi$:

$$n(\theta) = \begin{cases} N, & \theta_1 < \theta \leq \theta_2 \\ 0, & \text{za ostalo } \theta \end{cases} \quad (1.1)$$



Slika 1.1. Uz definiciju funkcije navojka

Gornja definicija važi samo u slučaju kada se tangencijalna i aksijalna komponenta magnetskog polja u vazdušnom procjepu može zanemariti tj. kada postoji samo radijalna komponenta. Drugim riječima, prethodna definicija važi u slučaju kada je dužina vazdušnog procjepa mnogo manja od poluprečnika rotora, [8].

Moguće je dalje pokazati da se magnetomotorna sila (mms) navojne grupe sa slike 1.1 može definisati na sledeći način,

$$F(\theta) = [n(\theta) - \langle n(\theta) \rangle] \cdot i = N(\theta) \cdot i \quad (1.2)$$

gdje je,

$$N(\theta) = n(\theta) - \langle n(\theta) \rangle \quad (1.3)$$

funkcija namotaja. Ona je, očigledno, definisana preko funkcije navojka, a dobija se na način da se od funkcije navojka $n(\theta)$ oduzme njena srednja vrijednost, $\langle n(\theta) \rangle$. Iz izraza (1.2) je jasno da je funkcija namotaja ustvari magnetomotorna sila za jediničnu vrijednost struje.

Funkcija namotaja se može alternativno prikazati i na sledeći način,

$$N(\theta) = \begin{cases} N \left(1 - \frac{\alpha}{2\pi} \right), & \theta_1 < \theta \leq \theta_2 \\ -N \frac{\alpha}{2\pi}, & \text{za ostalo } \theta \end{cases} \quad (1.4)$$

gdje je α navojni korak navojne grupe u mehaničkim stepenima ili radijanima, $\alpha = \theta_2 - \theta_1$ a N je broj navojaka navojne grupe.

1.2. PREČNIČKA NAVOJNA GRUPA

Prečnička navojna grupa je ona grupa čiji je navojni korak $\alpha=\pi$ kod dvopolne mašine ili $\alpha=\pi/p$ kod mašine sa p pari polova. Ona se može definisati i na sledeći način: za nju važi da je navojni korak $y=\tau$, gdje je τ polni korak, $\tau=\pi D/2p$, ili u broju žljebova, $\tau=Q_s/2p$. U prethodnim izrazima D je prečnik provrta statora a Q_s je ukupan broj žljebova po obodu statora.

Za prečničku navojnu grupu u dvopolnoj mašini, $p=1$, za usvojeni referentni sistem prikazan slikom 1.2a, funkcija navojka i namotaja su:

$$n_A(\theta) = \begin{cases} N, & \frac{\pi}{2} < \theta \leq \frac{3\pi}{2} \\ 0, & \text{za ostalo } \theta \end{cases} \quad (1.5)$$

$$N_A(\theta) = \begin{cases} \frac{N}{2}, & \frac{\pi}{2} < \theta \leq \frac{3\pi}{2} \\ -\frac{N}{2}, & \text{za ostalo } \theta \end{cases} \quad (1.6)$$

Slika 1.2 prikazuje poprečni presjek primitivne dvopolne mašine sa uniformnim vazдушnim procjepom, talasni oblik funkcije navojka, talasni oblik funkcije namotaja zajedno sa osnovnim i prvim višim, trećim prostornim harmonikom kao i koeficijente Furijeovog razvoja funkcije namotaja tj. amplitude pojedinih prostornih harmonika. Jasno se uočava da su pored osnovnog prisutni i viši prostorni harmonici pri čemu su svi oni neparni. Amplituda osnovnog prostornog harmonika je 6.37 navojaka, za $N=10$, Slika 1.2b, tj ona je $4/\pi$ puta veća od maksimalne vrijednosti funkcije namotaja. Dakle, amplituda osnovnog harmonika mms,

$$F_{A_{\max 1}} = \frac{4}{\pi} \frac{NI}{2} \quad (1.7)$$

gdje je I intenzitet vremenski stalne struje kroz navojnu grupu. Amplituda višeg prostornog harmonika v -tog reda je v puta manja od amplitude osnovnog harmonika:

$$F_{A_{\max v}} = \frac{4}{\pi v} \frac{NI}{2} \quad (1.8)$$

Slika 1.3. prikazuje slučaj četvoropolne mašine, $p=2$, sa namotajem koji je izveden rednim vezivanjem dvije navojne grupe sa punim navojnim korakom. Puni navojni korak u ovoj mašini odgovara mehaničkom uglu od $\pi/2$ radijana.

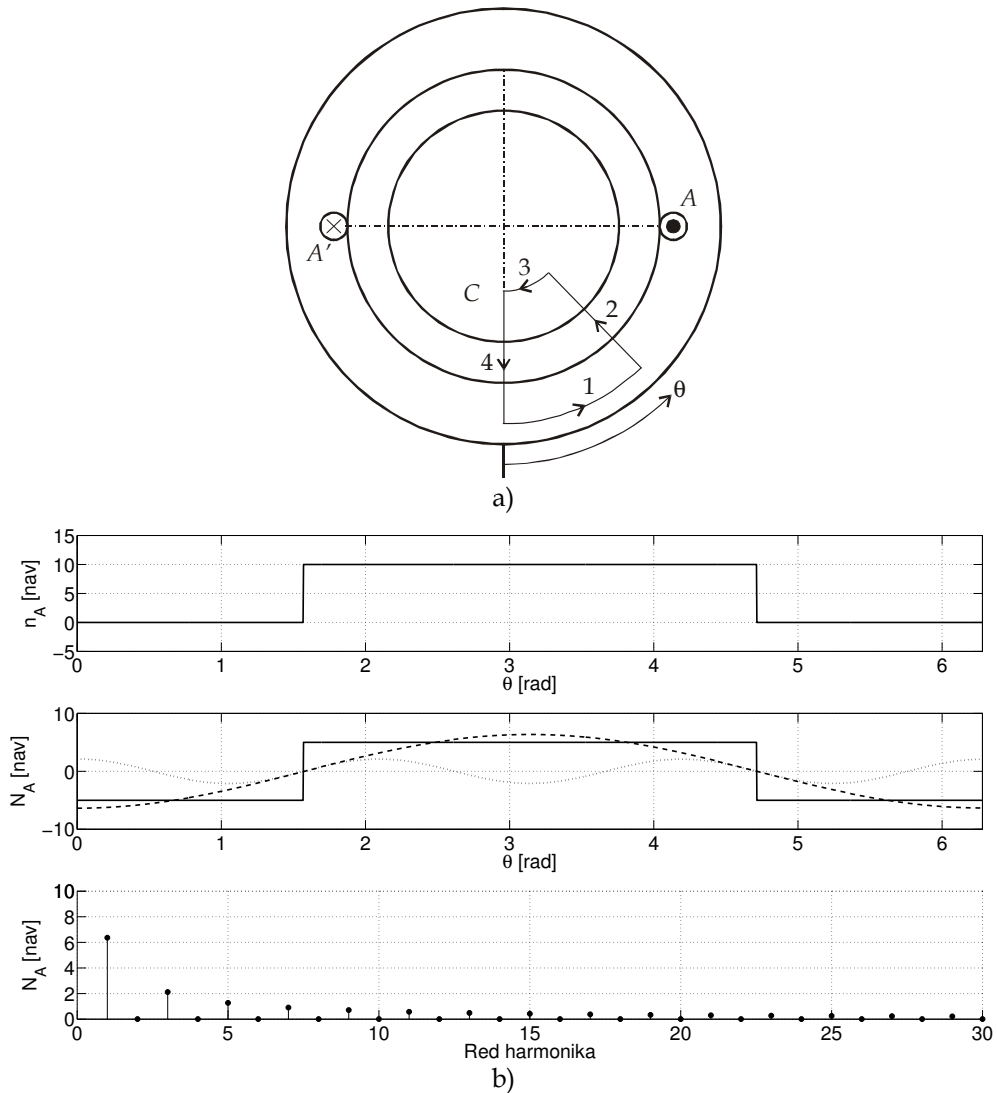
Ovdje se treba podsjetiti pojma mehanički i električni ugao: kod dvopolne mašine su ta dva pojma identična; kod mašine sa p pari polova, duž oboda mašine, $\theta \in (0, 2\pi)$, magnetske veličine doživljavaju p ciklusa, pa se električni ugao definiše kao $\theta_{el} = p\theta$.

Sada je amplituda osnovnog harmonika data drugim članom Furijeovog razvoja, amplituda trećeg harmonika je data šestim članom Furijeovog razvoja itd. Jednostavno je zaključiti da je amplituda osnovnog harmonika sada,

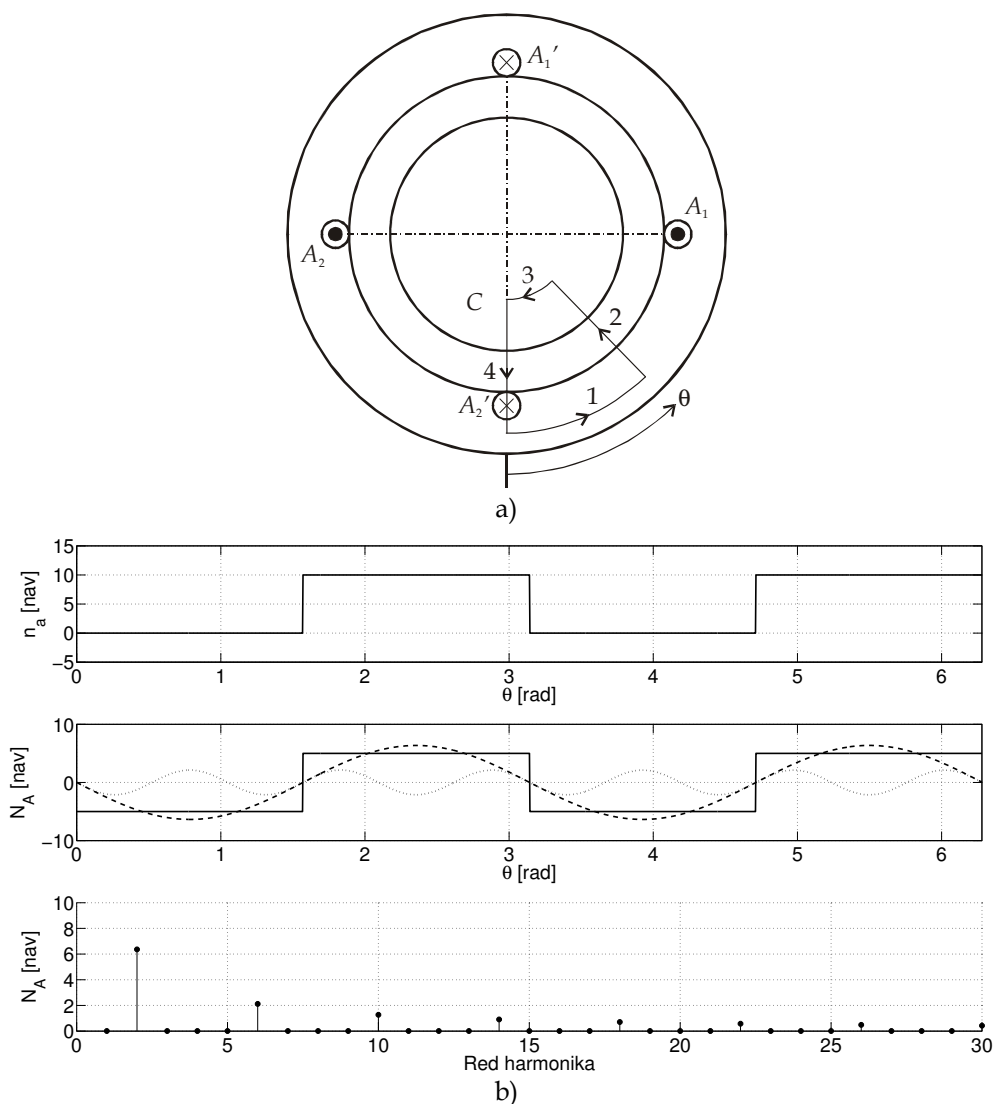
$$F_{A_{\max 1}} = \frac{4 NI}{\pi 2p} \quad (1.9)$$

gdje je N ukupan broj redno vezanih navojaka faznog namotaja. Amplituda višeg prostornog harmonika reda v je v puta manja:

$$F_{A_{\max v}} = \frac{4 1 NI}{\pi v 2p} \quad (1.10)$$



Slika 1.2. a) Poprečni presjek primitivne dvopolne mašine; b) Funkcija navojka i funkcija namotaja sa dva najznačajnija prostorna harmonika i koeficijenti Furijeovog razvoja funkcije namotaja: $p=1$, $y=\tau$, $N=10$.



Slika 1.3. a) Poprečni presjek primitivne četvoropolne mašine; b) Funkcija navojka i funkcija namotaja sa dva najznačajnija prostorna harmonika i koeficijenti Furijeovog razvoja funkcije namotaja: $p=2$, $y=\tau$, $N=2 \times 10=20$.

1.3. PULSIRAJUĆA MMS

Ono što je bitno napomenuti u vezi sa prethodnim slikama je sledeće: slike 1.2b i 1.3b prikazuju funkciju namotaja. Mms namotaja će biti identična toj funkciji samo ako kroz namotaj protiče vremenski stalna struja intenziteta 1A. Ukoliko je struja jačine 10A, amplituda mms namotaja će biti deset puta veća.

Ako kroz namotaj protiče naizmjenična struja, tada je amplituda, u opštem slučaju, v -tog harmonika mms,

$$F_{A_{\max v}} = \frac{4}{\pi} \frac{1}{2} \frac{N}{p} I \sqrt{2} \quad (1.11)$$

gdje je I u prethodnom izrazu efektivna vrijednost naizmjenične struje. Dakle, oblik mms je identičan obliku funkcije namotaja sa prethodne dvije slike samo u onom vremenskom trenutku kada je maksimalna vrijednost naizmjenične struje jednaka $1A$. U ostalim trenucima mms je jednaka funkciji namotaja različitih amplituda, a u onim trenucima vremena kada struja promijeni znak mijenja ga i mms: funkcija namotaja se preslika u odnosu na θ osu. Drugim riječima, naizmjenična struja kroz namotaj produkuje pulsirajuću mms, slika 1.4.

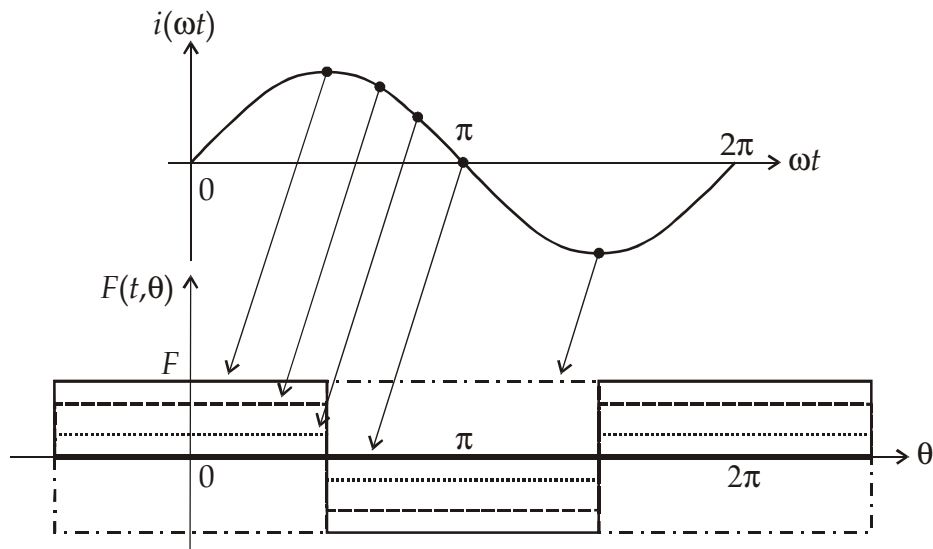
Naime, mms postaje funkcija dvije promjenljive: prostorne koordinate i vremena.

To se jasno vidi i iz sledećih analitičkih izraza. Neka je funkcija namotaja opisana samo svojim osnovnim harmonikom,

$$N_A(\theta) = \frac{4}{\pi} \frac{N}{2} \cos(p\theta) \quad (1.12)$$

i neka kroz namotaj teče naizmjenična struja:

$$i_A(t) = \sqrt{2} I \cos(\omega t) \quad (1.13)$$



Slika 1.4. Pulsirajuća magnetomotorna sila duž oboda mašine

Tada je osnovni harmonik mms funkcija i vremena i ugaone koordinate, tj. ona je pulsirajuća mms:

$$F_{A1}(t, \theta) = N_A(\theta) \cdot i_A(t) = \frac{4}{\pi} \frac{N}{2p} \sqrt{2} I \cos(p\theta) \cos(\omega t) = F_{A_{\max 1}} \cos(\omega t) \cos(p\theta) \quad (1.14)$$

Štaviše, razlaganjem proizvoda kosinusa u zbir, pokazuje se da se pulsirajuća mms može razložiti na dva obrtna talasa mms, direktni i inverzni, istih amplituda, koji rotiraju u suprotnim smjerovima identičnom brzinom,

$$F_{A1}(t, \theta) = \frac{F_{A_{\max 1}}}{2} \cos(\omega t - p\theta) + \frac{F_{A_{\max 1}}}{2} \cos(\omega t + p\theta) = F_{A1d} + F_{A1i} \quad (1.15)$$

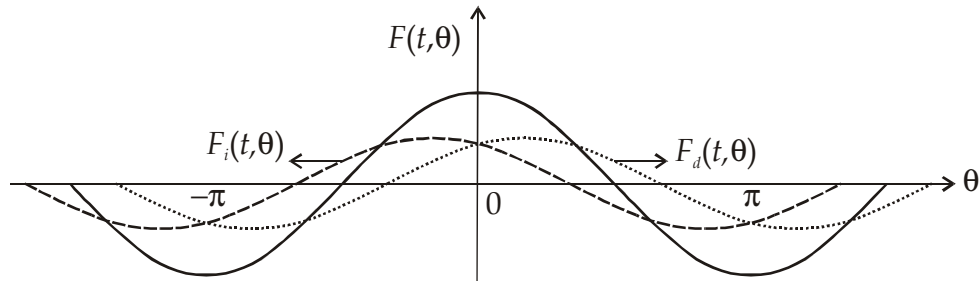
slika 1.5, slika 1.6.

Brzina rotacije ovih talasa se može odrediti na sledeći način - posmatrajmo direktni talas:

$$F_d(t, \theta) = F_{d_{\max}} \cos(\omega t - p\theta) = F_{d_{\max}} \cos(\omega t - p\omega_{meh} t) \quad (1.16)$$

U različitim trenucima vremena gornji talas će imati maksimum u različitim tačkama po obodu statora tj. imaće konstantnu vrijednost u tim tačkama:

$$F_d(t, \theta) = F_{d_{\max}} \cos(\omega t - p\omega_{meh} t) = const \Rightarrow (\omega - p\omega_{meh})t = const \quad (1.17)$$



Slika 1.5. Pulsirajuća mms ekvivalentna je zbiru dvije obrtne mms: direktne i inverzne

Prethodni uslov je ispunjen samo onda kada je,

$$\omega - p\omega_{meh} = 0 \quad (1.18)$$

pa je ugaona mehanička brzina:

$$\omega_{meh} = \frac{\omega}{p} \quad (1.19)$$

Za inverzni talas brzina je ista samo što on rotira u suprotnom smjeru u odnosu na direktni.

Prethodni izraz se može prikazati i ovako,

$$\omega_{meh} = \omega_{sin} = \frac{2\pi f}{p} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (1.20)$$