

# Numerički proračun utjecaja statorskog prigušnog namota na karakteristike turbogenerators

---

Čelić-Baran, Kristina

Doctoral thesis / Disertacija

2010

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:194478>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-07**



*Repository / Repozitorij:*

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

**Kristina Čelić**

**NUMERIČKI PRORAČUN UTJECAJA  
STATORSKOG PRIGUŠNOG NAMOTA NA  
KARAKTERISTIKE TURBOGENERATORA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Zagreb, 2010.

Doktorska disertacija je izrađena na Zavodu za osnove elektrotehnike i električna mjerenja Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu.

Mentor: **prof. dr. sc. Zijad Haznadar**

Rad ima 150 listova.

Rad br.

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Dr. sc. Sead Berberović, redoviti profesor  
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
2. Dr. sc. Zijad Haznadar, profesor emeritus (u miru)  
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
3. Dr. sc. Stjepan Car, naslovni profesor Sveučilišta u Zagrebu  
Končar – Institut za elektrotehniku Zagreb

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Dr. sc. Sead Berberović, redoviti profesor  
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
2. Dr. sc. Zijad Haznadar, profesor emeritus (u miru)  
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
3. Dr. sc. Stjepan Car, naslovni profesor Sveučilišta u Zagrebu  
Končar – Institut za elektrotehniku Zagreb
4. Dr. sc. Zlatko Maljković, redoviti profesor  
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
5. Dr. sc. Martin Dadić, docent  
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva

Datum obrane doktorske disertacije: 03. ožujka 2010. godine

# SADRŽAJ

1.	Uvod.....	1
2.	Opća teorija sinkronih strojeva i analitički izračun parametara.....	6
2.1.	Geometrija i namoti.....	6
2.2.	Magnetsko polje.....	7
2.2.1.	Magnetsko polje struje uzbudnog namota.....	8
2.2.2.	Magnetsko polje struje statorskog namota.....	9
2.2.3.	Magnetsko polje struja prigušnog namota rotora.....	12
2.2.4.	Magnetsko polje struja prigušnog namota statora.....	15
2.3.	Opći oblik diferencijalnih jednadžbi sinkronog stroja.....	15
2.3.1.	Ulančeni tokovi namota i induktiviteti.....	18
2.3.2.	Transformacija statorskog u rotorski koordinatni sustav.....	25
2.4.	Dijagram sinkronog stroja za simetričan sustav za stacionarno stanje sinkronog stroja.....	29
2.4.1.	Jednadžba momenata i elektromagnetski moment u stacionarnom stanju.....	31
2.4.2.	Jednadžbe sinkronog stroja za simetričan sustav u prijelaznim stanjima sinkronog stroja.....	31
2.5.	Osnove nadomjesnih shema - sustav relativnih vrijednosti.....	32
2.5.1.	Bazne vrijednosti.....	32
2.5.2.	Svođenje veličina uzbudnog i prigušnog namota.....	33
2.5.3.	Jednadžbe sinkronog stroja bez prigušnog namota rotora u relativnim vrijednostima.....	37
2.5.4.	Prijelazni magnetski otpor sinkronog stroja-reaktancija $x'_d$ i $x'_q$ .....	38
2.5.5.	Jednadžbe sinkronog stroja s uzbudnim i prigušnim namotom rotora u relativnim vrijednostima.....	40
2.5.6.	Početni magnetski otpor sinkronog stroja - reaktancija $x''_d$ i $x''_q$ .....	43
2.5.7.	Vremenske konstante.....	44
2.6.	Izračun osnovnih parametara sinkronog stroja preko geometrijskih veličina.....	47
2.6.1.	Utorsko rasipanje jednoslojnog namota.....	47
2.6.2.	Utorsko rasipanje dvoslojnog namota statora.....	48
2.6.3.	Rasipanje među vrhovima zubi statora odnosno rotora.....	49
2.6.4.	Diferencijalno ili dvostruko ulančeno rasipanje.....	50
2.6.5.	Rasipanje glava statorskog namota, glava rotorskog namota i kratkospojnog prstena.....	51
2.7.	Zaključak drugog poglavlja.....	52
3.	Prigušni namoti turbogeneratorskog stroja i njihov utjecaj na parametre stroja.....	54
3.1.	Karakteristike kavezno namota.....	55
3.2.	Prigušni namot rotora.....	59
3.2.1.	Osnovna područja djelovanja prigušnog namota rotora.....	60
3.2.2.	Parametri sinkronih strojeva na koje utječe prigušni namot rotora.....	63
3.2.3.	Nadomjesna shema prigušnog namota rotora turbogeneratorskog stroja.....	65
3.3.	Statorski prigušni namot kao novi konstrukcijski element i njegova uloga.....	70
3.3.1.	Djelovanje prigušnog namota statora.....	70
3.3.2.	Parametri sinkronih strojeva na koje utječe prigušni namot statora i nadomjesna shema prigušnog namota statora turbogeneratorskog stroja.....	71
3.4.	Zaključak trećeg poglavlja.....	73
4.	Primjena numeričkih metoda pri proračunu sinkronih strojeva.....	75
4.1.	Osnovne jednadžbe elektromagnetskog polja.....	76
4.1.1.	Osnovne jednadžbe statičkog i kvazistatičkog polja.....	77
4.1.2.	Uvjeti na granici.....	77
4.1.3.	Magnetski vektor potencijal.....	78
4.1.4.	Dvodimenzionalna polja.....	79
4.1.5.	Opći oblik jednadžbe za rješavanje statičkih i kvazistatičkih polja u električnom stroju.....	80
4.2.	Metoda konačnih elemenata (MKE).....	80
4.2.1.	Preprocesiranje i postprocesiranje.....	81

4.2.2.	Analiza modela koji opisuje turbogenerator .....	82
4.3.	Karakteristike ugrađenih materijala u modelu generatora .....	84
4.3.1.	Materijal limova statorskog paketa .....	84
4.3.2.	Materijal tijela rotora .....	85
4.3.3.	Materijal kućišta statora .....	86
4.3.4.	Materijali namota statora i rotora .....	87
4.3.5.	Ostali materijali glavnih dijelova turbogeneratora .....	88
4.4.	Proračun polja stroja ovisno o režimu rada .....	88
4.5.	Zaključak četvrtog poglavlja .....	90
5.	Rezultati izračuna polja u turbogeneratoru sa i bez statorskog prigušnog namota za dvopolni i četveropolni turbogenerator .....	92
5.1.	Proračun prigušnog namota statora kod dvopolnog turbogeneratora .....	93
5.2.	Proračun prigušnog namota statora kod četveropolnog turbogeneratora .....	103
5.2.1.	Modeli četveropolnog generatora samo s prigušnim namotom statora .....	104
5.2.2.	Modeli četveropolnog generatora s prigušnim namotom statora i trofaznim statorskim namotom .....	108
5.2.3.	Model četveropolnog generatora samo s prigušnim namotom statora, faznim namotom rotora i aksijalnim rashladnim kanalima u jarmu .....	113
5.3.	Ispitni rezultati gubitaka u paketu statora Generator 1 .....	117
5.4.	Zaključak petog poglavlja .....	117
6.	Elektromagnetska buka u turbogeneratorima .....	119
6.1.	Izvori zvuka kod električnih strojeva .....	120
6.2.	Način izračuna vlastitih vibracija učvršćenja jarma u kućištu .....	121
6.3.	Radikalne sile elektromagnetskog porijekla kao izvor vibracija .....	126
6.3.1.	Primjer izračuna buke klasičnim postupkom .....	129
6.4.	Sile između kućišta i paketa i frekventni spektar .....	130
6.5.	Zaključak šestog poglavlja .....	139
7.	Zaključak .....	141
	LITERATURA .....	143
	POPIS OZNAKA .....	146
	SAŽETAK .....	148
	ABSTRACT .....	149
	ŽIVOTOPIS .....	150

# 1. Uvod

Turbogeneratori predstavljaju trajni inženjerski izazov. Od 1901. godine kada je Charles Brown izumio cilindrični rotor za brzohodne generatore turbogenerator je jedinstveno rješenje za pretvorbu mehaničke energije dobivene u to vrijeme u parnim, a kasnije i plinskim turbinama u električnu energiju. Izum Ludwiga Roobela iz 1912. godine, kontinuirano transponiranih dionih vodiča u štapu, stvorio je preduvjet za izradu turbogeneratorskih velikih snaga. Već dvadesetih godina prošlog stoljeća osvojene su jedinične snage 100 MVA. Tada je izolacija statorskog namota bila na bazi mica-papira impregnirana asfaltom, a napon je dosežao 12 kV. Do kraja 30 tih turbogeneratorskih su projektirani s 2, 4 i 6 polova, ali zbog optimiranja rada parnih turbina na višim brzinama kasnije su sve rjeđe izvedbe sa šest polova.

Tridesetih godina prošlog stoljeća američki proizvođači uveli su novi rashladni medij – vodik. To je otvorilo mogućnost izrađivanja turbogeneratorskih sve većih jediničnih snaga zbog uvođenja direktnog hlađenja najprije namota rotora, a nakon toga i direktnog hlađenja namota statora. Na taj način bitno su se povećale granice specifičnih opterećenja ovih aktivnih dijelova. U ranim šezdesetim, uvođenjem demineralizirane vode za direktno hlađenje namota statora turbogeneratorskih su dosegli snage od 500 MVA. Slijedeći iskorak postignut je primjenom novih izolacijskih materijala na bazi impregnacije mica trake s sintetičkim lakom čime se omogućila izrada izolacije u toplinskoj klasi F, a granica zagrijavanja se podigla na 155°C. Ta izolacijska klasa se i do danas primjenjuje obzirom da toplinska klasa izolacije danas ne predstavlja projektno ograničenje, već su to mehanička svojstva materijala rotorskih kapa na temperaturama iznad B klase odnosno 130°C.

Paralelno razvoju sklopova samog turbogeneratorskih razvijali su se i pomoćni sustavi, odnosno sustav uzbude, regulacije i zaštite. Razvojem energetske elektronike klasična istosmjerna rotirajuća uzbuda zamijenjena je tiristorskom statičkom uzbudom i rotirajućom uzbudom sa sinkronim uzbunikom i rotirajućim ispravilačkim diodama (beskontaktna ili brushless izvedba). Svladavanje viših naponskih nivoa statorskih namota također je bio trajni izazov, međutim zbog učestalih kvarova pokušaji uvođenja visokih napona dugo nisu bili uspješni. Tek uvođenjem poluvodljive zaštite glava namota koja se dugi niz godina temeljila na azbestnoj traci kao nositelju, počeli su se izrađivati pouzdani 27 kV izolacijski sustavi statorskih namota.

U sedamdesetim je napravljen novi iskorak u osvajanju velikih jediničnih snaga. Šire korištenje nuklearne energetike doprinijelo je razvoju turbogeneratorskih koji su ugrađivani u nuklearne elektrane sa snagama od 1.200 MVA pri 3.000 rpm i 1.600 MVA pri 3.600 rpm na naponskim nivoima do 27 kV. Dimenzije rotora su dosegle krajnje fizikalne-mehaničke granice, a uvedeno je i hlađenje rotorskog namota vodom.

Osamdesetih godina razvoj je usmjeren na rješavanje specifičnih zahtjeva turbogeneratorskih koji se spajaju na plinske turbine. Do 1996. osvojene su snage od 300 MVA zrakom hlađenih turbogeneratorskih. Daljnji razvoj omogućio je uvođenje zrakom hlađenih turbogeneratorskih na onim jediničnim snagama koje su nekada bile hlađene vodikom. Uvođenjem novih materijala, novih konstrukcijskih rješenja i točnijih elektromagnetskih, mehaničkih, ventilacijskih i toplinskih proračuna i optimiranje tijekom dvadeset godina omogućile su skok jediničnih snaga s 200 MVA na 400 MVA. Korisnost zrakom hlađenih turbogeneratorskih na naponima do 21 kV dosegla je 98,8 %. Istovremeno turbogeneratorskih hlađeni vodikom nadtlaka 5,5 bara rade s jediničnim snagama od 500 MVA, a razvoj se kreće prema 600 MVA. Korisnost im je 99,0%.

Razvoj zrakom hlađenih turbogeneratorskih jedinica uvjetovan je direktno zahtjevima tržišta obzirom na visoku pouzdanost i odsustvo brojnih pomoćnih sustava. Konstantno poboljšanje aksijalnog hlađenja rotora i indirektnog hlađenja statora uvođenjem više kombiniranih rashladnih komora uz poboljšanje karakteristika izolacijskih materijala posebice njihove toplinske vodljivosti najviše je doprinijelo osvajanju snaga od 400 MVA. Razvoj je usmjeren na zrakom hlađene turbogeneratore osim zbog njihove jednostavnosti i zbog visoke raspoloživosti, manje građevinskih radova, manje cijevi i opreme za pripremu vodika koja kod zrakom hlađenih generatora nije potrebna. Također pomoćna oprema ne mora biti izvedena u protueksplozivnoj izvedbi. Danas su u radu najveće zrakom hlađene jedinice snaga do 500 MVA, ali njihova zagrijavanja više nemaju rezervu jedne toplinske klase. Rad turbogeneratorskih jedinica u toplinskoj klasi F omogućio je razvoj novog materijala za izradu rotorskih kapa (P2000).

Nagli razvoj plinskih turbina utjecao je na to da su 1980. turbogeneratorske jedinice za plinske turbine imale snage 40 MW, a danas se u jedinice manje snage ubrajaju standardizirani zrakom hlađeni turbogeneratorski 130-150 MW za rad i na 50 Hz/60 Hz elektroenergetskoj mreži. Ti turbogeneratorski ugrađuju se u zajedničke plinske module s turbinom, a jednostavni su za transport i montažu. Dizajn im je maksimalno pojednostavljen, izbačeni su svi nepotrebni dijelovi poput trećeg ležaja ili permanent-magnet generatora za početno uzbuđivanje kod beskontaktna (brushless) izvedbe. Iste jedinice su prilagođene i za spajanje na parnu turbinu.

Danas najveće turbogeneratorske jedinice rade u nuklearnim elektranama i elektranama koje kao gorivo koriste ugljen. Rashladni medij je vodik nadtlaka do 6 bara, dok se statorski namoti hlade direktno demineraliziranom vodom. Statorski namot je zbog mogućnosti direktnog hlađenja vodom, oblikovanja i preplitanja dionih vodiča, uvijek otvoren za poboljšanje dizajna. Snage dvopolnih generatora u komercijalnoj eksploataciji su od 500 MVA do 1.300 MVA. Ograničenja su vezana uz mehaničke karakteristike materijala koje promjer rotora ograničava na 1,25 m pri 50 Hz zbog mehaničkih naprezanja rotora i duljinu tijela rotora na preko 8 m zbog dinamičke stabilnosti linije agregata.

Četveropolni turbogeneratorski za ugradnju u nuklearnim elektranama imaju snage do 1.700 MVA pri 1.500 rpm. Očekuje se da će samo poboljšanje postojećeg dizajna omogućiti osvajanje jediničnih snaga od 2.000 MVA, dok se za sada smatra da je za osvajanje jediničnih snaga većih od 2.000 MVA potrebno riješiti pitanje supravodljivog rotora i smještaja statorskog namota u zračni raspored.

Obzirom na veličinu jedinica i ulogu u elektroenergetskom sustavu, rad turbogeneratorskih jedinica na mreži i njegovo ponašanje u uvjetima prijelaznih režima ili kvara od temeljnog je značaja za pouzdan rad sustava. I dok se tijekom razvoja s jedne strane nastojalo napraviti što veću jedinicu kojom će se pretvoriti mehanička u električnu snagu i na taj način optimirati energetska postrojenja održati gubitke, a samim tim i zagrijavanja i zadanim okvirima, točniji proračun elektromagnetskih parametara koji opisuju ponašanje stroja na mreži bio je drugi izazov. Turbogeneratorski su dugo vremena razvijani ponavljanjem ciklusa projektiranje-ispitivanje-prilagođavanje proračuna-ekstrapoliranje projekta. Tek uvođenjem računala ključne komponente poput proračuna magnetskog polja, nelinearnih rashladnih krugova i mehaničkih proračuna linije agregata detaljno su provjeravani. Kako bi se točnije ugodili ovi proračuni i nadomjesne sheme turbogeneratorskih jedinica temeljene su na izmjerenim vrijednostima te ovakvi proračuni i do danas egzistiraju kod proizvođača. Jednom kada su proračuni kalibrirani sukladno ispitivanjima njihova pouzdanost je bila visoka. Međutim, pouzdanost proračuna je visoka u onom opsegu u kojemu se održavaju slični geometrijski omjeri dijelova i istovjetne karakteristike materijala, odnosno materijali slični onima kod



ispitanih strojeva. Stoga su uvedene numeričke metode kojim se točnije mogu opisati i riješiti određeni problemi.

Rad se bavi istraživanjem pojava u dinamici prigušnih namota statora i rotora turbogeneratora koje nisu opisane klasičnim parametrima, a čiji bi se utjecaj trebao prepoznati i valorizirati već u fazi projektiranja novog stroja. Prilikom projektiranja sinkronih strojeva koji će raditi u elektroenergetskom sustavu bitno je ispuniti zahtjeve vezane uz parametre (reaktancije i vremenske konstante) koji opisuju stabilnost rada stroja na mreži u ustaljenom režimu kao i parametre kojima se određuju dinamička stabilnost sinkronog stroja u uvjetima prijelaznih režima rada i kvarova. Međutim i sama ispitivanja putem metoda propisanih standardima u slučaju najvećih jedinica često nije moguće realizirati upravo u uvjetima u kojima pojava nastaje, pogotovo ukoliko ta metoda po svom karakteru ima obilježja koja negativno utječu na stroj (pokusi kratkih spojeva ili ispitivanje inverzne komponente). Odstupanja ovih parametara su zbog ograničenja koja proizlaze iz mogućnosti njihovih točnih izračuna dana s relativno velikim tolerancijama. Dopunom analitičkih metoda numeričkim proračunom i izvođenjem zaključaka na temelju tako dobivenih rješenja može s dostatnom točnošću predvidjeti utjecaj pojedinog elementa, materijala ili geometrije.

Parametri koji određuju stabilnost sinkronog stroja ovise o omjeru strujnih i magnetskih opterećenja, geometriji i karakteristikama ugrađenih materijala. Raspodjela magnetskih opterećenja može se točnije odrediti primjenom numeričkih postupaka.

U disertaciji će biti predloženo rješenje i analizirano djelovanje novog konstrukcijskog elementa koji se ne susreće u literaturi sinkronih strojeva, ali koji je u opisanom obliku ugrađen u velike turbogeneratore i koji je nazvan prigušnim namotom statora ili kavezom statora.

Prigušni namot statora postavlja se u utore na vanjskom obodu statora generatora pri čemu se magnetsko polje pod djelovanjem induciranih struja tog namota potiskuje u aktivni dio stroja. Time se smanjuju gubici u konstrukcijskim dijelovima stroja. Osim toga, javljaju se i dodatni učinci na sile koje djeluju između paketa i kućišta statora, te smanjenje razine buke. U radu su načinjeni numerički proračuni i analiza utjecaja prigušnog namota statora. Rezultati proračuna uspoređeni su s raspoloživim rezultatima mjerenja.

## 2. Opća teorija sinkronih strojeva i analitički izračun parametara

U poglavlju je prikazana metodologiju klasičnog - analitičkog pristupa proračunu sinkronog stroja općenito i s posebnim osvrtom na strojeve s cilindričnim rotorom. Prikazana je dvoosna teorija sinkronih strojeva koja je utemeljena i razvijana u periodu tridesetih do pedesetih godina prošlog stoljeća, a na koju se i danas referiraju autori kada uvode novije (točnije) metode proračuna. Obzirom da je razvoj turbogeneratorskog vezan uz serijsku proizvodnju turbina tipskih snaga dobivamo zapravo izabrani spektar snaga za koje se radi određeni proizvod. Zbog ovoga je dobar dio razvoja turbogeneratorskog vezan uz eksperimentalno ispitivanje i mjerenje parametara novog proizvoda, koji su onda vlasništvo proizvođača. Dostupna literatura se dakle bavi postignutim rezultatima, parcijalnim informacijama kako se ostvario taj rezultat, ali ne i metodama koje su korištene pri izračunima tijekom modeliranja. Pri tome se navode tek pristupi proračunima pojedinih dijelova sklopova 3D numeričkim metodama.

Točnost klasičnih metoda proračuna je u velikom broju problema dostatna te se pri projektiranju stroja koristeći klasične analitičke metode dobivaju za određene veličine i režime rada kvalitetni i pouzdani rezultati. Međutim postoje problemi za koje je klasični pristup nedostatan i za koji se je potrebno provesti dodatne numeričke proračune koji će se kasnije uklopiti u sustav projektiranja klasičnim metodama, odnosno dati vrijednosti koje će se moći koristiti u analitičkim proračunima. Dakle numerička metoda proračuna koja se može okarakterizirati kao prezahtjevna za brzo variranje ulaznih parametara stroja tijekom projektiranja treba se uključiti u probleme koje analitički proračun ne pokriva kvalitetno, a ne biti samo sredstvo provjere i alternativna metoda. Jedan od problema gdje se numeričkom metodom mogu dobiti kvalitetni rezultati, a koji ne obuhvaća klasični proračun je izračun struja prigušnog namota odnosno struja kaveza statora.

### 2.1. Geometrija i namoti

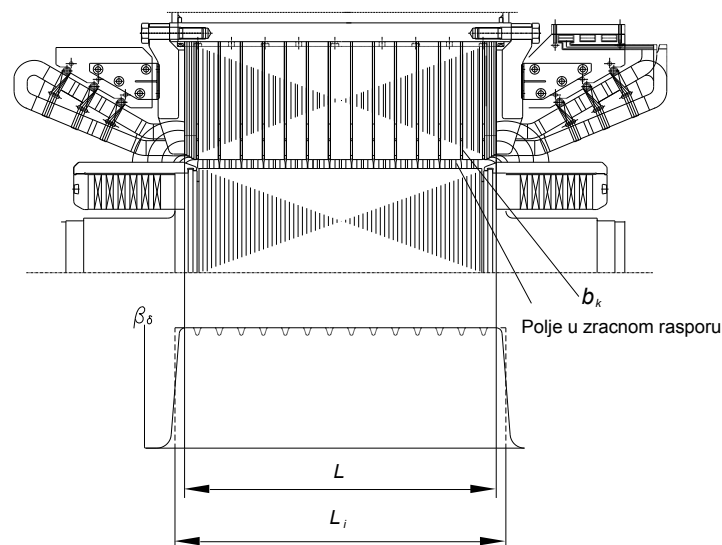
Sinkroni strojevi sastoje se od statora na kojem se nalazi **statorski namot** smješten u utorima raspoređenim po unutarnjem obodu – provrtu statora i rotora na kojem se nalazi **uzbudni namot**. Uzbudni namot proizvodi osnovno magnetsko polje, a smješten je na vanjskom promjeru rotora. Sinkrone strojeve po konstrukciji rotora možemo podijeliti u dvije osnovne grupe i to strojeve s istaknutim polovima na rotoru i strojeve sa cilindričnim rotorom kod kojih je namot smješten u utore slične onima kod statora. Rotori u geometrijskom (i fizikalnom) smislu imaju dvije osi simetrije. To su os koja se nalazi na sredini pola koju nazivamo direktna ili uzdužna os i koju obilježavamo slovom  $d$  i os koja se nalazi na sredini međupolnog prostora koju nazivamo poprečna os i obilježavamo slovom  $q$ . Kod generatora s cilindričnim rotorom  $d$  os se nalazi u simetrali pola ili geometrijski gledano u širokom zubu, a  $q$  os se nalazi u simetrali uskog zuba koji odvaja svitke dva namota koji pripadaju različitim polovima. Na rotoru sinkronog stroja smješten je i **prigušni namot rotora** koji je sličan kavezu kod kavezničkih asinkronih motora, pa često za njega koristimo naziv kavez. Prigušni namot rotora smješta se što je moguće bliže zračnom rasporu obzirom da se njegovo djelovanje očituje u prijelaznim režimima rada sinkronog stroja. Tako izvedeni prigušni namot rotora umiruje njihanje rotora prilikom odstupanja od sinkronizma, pri sinkronizaciji i asinkronim režimima s malim klizanjima i također prigušuje prenapone namota statora pri nesimetričnim kratkim spojevima obzirom da se njegovo djelovanje očituje u prijelaznim režimima rada. Kod strojeva koji imaju tijelo rotora izrađeno iz masivnog otkova željeza efekt prigušenja dobiva se od induciranih vrtložnih struja na površini rotora.

Broj statorskih namota određen je brojem faza  $m$ . Uobičajen je trofazni namot kod kojeg se pojedini namoti nalaze pod kutom od 120 električnih stupnjeva, a u općem slučaju su povezani u zvijezdu. Značajan geometrijski podatak koji opisuje statorski namot je broj utora po polu i fazi. Uzbudni namot u većini slučajeva izrađen je kao jednofazni koncentrični (istaknuti polovi) ili raspodijeljeni (cilindrični rotor). Kod motor-generatora velikih snaga izvodi se trofazni uzbudni namot. Broj faza prigušnog namota jednak je broju  $n$  paralelno postavljenih štapova (vodiča) na krajevima spojenim s kratkospojnim prstenima.

## 2.2. Magnetsko polje

Da bi se matematički opisao sinkroni stroj i odredili njegovi parametri neophodno je poznavati vrijednost i oblik magnetskog polja u određenom režimu rada. Nužno je usvojiti određena pojednostavljenja kako bi se u analitičkom proračunu matematički s dostatnom točnošću, a u slučaju proračuna numeričkom metodom vremenski učinkovito moglo opisati složeno magnetsko polje rotacijskih strojeva.

Magnetsko polje se proučava u stacionarnom stanju i u prijelaznim stanjima [1]. Stacionarno stanje je ono kod kojeg nema razlike između brzine polja i mehaničke brzine okretanja uzbudnog namota koji ga stvara, odnosno stanje kada se učestalost napona mreže na kojoj generator radi i kružna učestalosti brzine vrtnje uzbudnog namota čije struje induciraju napon na izvodima generatora poklapaju. U prijelaznim stanjima ovo nije slučaj, pa ovisno o karakteru prijelazne pojave i njenom trajanju postavljaju različiti parametri koji stroj opisuju. Pri tome je primijenjeni analitički model proračuna isti.



Slika 2.1 Raspodjela gustoće magnetskog toka u zračnom rasporu po uzdužnoj osi.

Za opću ocjenu pojednostavljenja koja se koriste pri postavljanju diferencijalnih jednadžbi klasičnog analitičkog proračuna sinkronog stroja, a također i određivanja induktiviteta neophodno je imati predstavu o karakteru magnetskog polja nastalom od struja koje protječu kroz različite namote stroja i o elektromotornim silama induciranim tim poljem. Za razmatranje je najvažnije polje koje se ulančuje između dva namota i pri tome prolazi kroz zračni raspor između statora i rotora – osnovno polje.

Oblik magnetskog polja definiran je geometrijom statora i rotora, a prvenstveno geometrijom utora, brojem utora, geometrijom namota te veličinom i oblikom zračnog

raspora. Magnetsko polje u zračnom rasporu između statora i rotora je različito u tri osi, odnosno promjenjivo je po poprečnom presjeku i po uzdužnom presjeku stroja.

Raspodjela gustoće magnetskog polja  $B_\delta$  u zračnom rasporu po uzdužnom presjeku stroja (osi vrtnje) nije konstantna slika 2.1. Na njen oblik utječe postojanje radijalnih rashladnih kanala  $b_k$  naspram kojih su u zračnom rasporu vrijednosti gustoće polja nešto niže od onih ispod dionog paketa željeza. Zbog utjecaja elektromotorne sile inducirane u glavama namota statora i polja u čeonom prostoru na induciranje elektromotorne sile, vrijednost indukcije ne pada odmah na nulu izvan aktivne duljine  $l$  željeza statora. U proračunima zato se uzimaju korekcije kojima se uključuje postojanje rashladnih kanala i djelovanje polja izvan željeza svodeći polje na pravokutnik visine  $B_\delta$  (kada ne bi bilo kanala) i duljine  $l_i$  (crtkana linija) čija je površina identična površini koja se nalazi ispod realne krivulje polja (puna linija). Utjecaj radijalnih rashladnih kanala uzima se u obzir pomoću Carterovog faktora pri izračunu idealne duljine stroja  $l_i$ .

Time se trodimenzionalni (3D) problem svodi na izračun stroja u dvije dimenzije (2D) poprečnog presjeka stroja. Pogreška koja tom prilikom nastaje reda je veličine tehnološke točnosti izrade (velikih) strojeva. Za dvije osi simetrije ( $d$  i  $q$ ) problemi osnovnog polja se razmatraju na razvijenoj duljini dvostrukog polnog koraka turbogeneratora, obzirom da se nakon toga slika u prostoru ponavlja.

Klasični pristup koristi analitičke tehnike za određivanje vodljivosti zračnog raspora i protjecanja (magnetomotornu silu) preko kojih se kasnije računaju gustoće toka i sila. Gustoća toka (indukcija)  $B$  u zračnom rasporu može se definirati kao:

$$B = \theta \cdot \Lambda, \quad (2.1)$$

gdje je  $\Lambda$  vodljivost zračnog raspora, a  $\theta$  protjecanje. Funkcije zračnog raspora (gustoća toka, vodljivost, magnetomotorna sila, gustoća sile) mogu se predstaviti harmonijskim redom sastavljenim od članova (valova), od kojih je svaki val opisan kao:

$$y(\alpha, t) = Y \cos(m\alpha + \alpha_0 - \omega_i t), \quad (2.2)$$

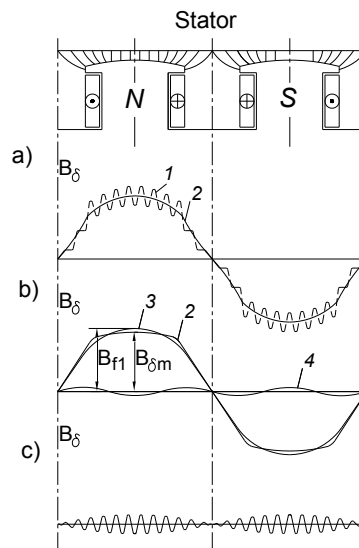
gdje je  $m$  prostorni red vala,  $\alpha_0$  fazni kut vala kada su  $t$  i  $\alpha$  jednaki nuli, i  $\omega_i$  je trenutačna kutna brzina vala izražena preko reda vala  $m$  i sinkrone brzine  $\omega$ ,  $\omega_i = m\omega$ .

Ovako prikazana funkcija vezana je uz statički referentni sustav i prikazuje prostorne veličine prije no što počnu varirati u vremenu i s kutnim položajem. Stoga da bi se odredili gustoća polja i gustoća sile u zračnom rasporu s određenom točnošću potrebno je odrediti komponente koje utječu na protjecanje i vodljivost i opisati ih preko funkcija oblika iz (2.2).

### 2.2.1. Magnetsko polje struje uzbuđenog namota

Na slici 2.2 prikazan je primjer raspodjele magnetskog polja u zračnom rasporu stvorenog strujom uzbuđenog namota. Oblik zračnog raspora uvjetuje oblik tog polja. Puna krivulja predstavlja polje kada bi stator bio gladak, a crtkana polje kada na statoru postoje utori. Krivulju polja možemo razložiti Fourierovom analizom na osnovni i više prostorne harmonike. Pri vrtnji rotora sinkronom brzinom svi harmonici uzbuđenog polja prostorno putuju brzinom koja je jednaka brzini vrtnje rotora. Pri tome prvi harmonik u namotu statora inducira elektromotornu silu osnovne učestalosti dok viši harmonici induciraju elektromotornu silu proporcionalno više učestalosti. Kod pravilno projektiranih strojeva udio viših harmonika u elektromotornoj sili namota statora je mali (niski sadržaj harmonika se postiže pravilnim izborom broja utora statora, veličinom utora statora te veličinom i oblikom

zračnog raspora). Zbog toga se u analitičkim proračunima s dostatnom točnošću dobivaju vrijednosti inducirane elektromotorne sile kada se ona računa preko vrijednosti osnovnog harmonika polja stvorenog strujom uzbuđenog namota. Ulančeni tok uzbuđenog namota (tok samoindukcije uzbuđenog namota) od silnica polja koje presijecaju zračni raspor i obuhvaćaju sve zavoje namota uzbuđe određuje se iz realne krivulje polja u rasporu. Magnetska os namota uzbuđe u praznom hodu poklapa se s direktnom osi  $d$ .



**Slika 2.2** Raspodjela gustoće magnetskog toka u zračnom rasporu duž provrta statora kada je  $B_\delta$  inducirana strujama uzbuđenog namota: a) oblik krivulje gustoće toka 1 – kada se uzme u obzir izobličenje zbog nazubljenosti statora; 2 - bez utjecaja utora statora. b) prostorna harmonijska raspodjela 3-osnovni harmonik; 4- treći harmonik. c) utjecaj utora statora na gustoću magnetskog polja u zračnom rasporu.

Međutim u praksi su česti slučajevi kada uslijed superponiranja neželjenog djelovanja viših utorskih harmonika, posebice u strojevima novije konstrukcije s proporcionalno malim zračnim rasporom i visokim magnetskim specifičnim opterećenjem, harmonijski sadržaj dovodi do izobličenja polja i posljedično neželjenih efekata kao što su povećane magnetske sile, vibracije, gubici i/ili povećana buka [32]. Stoga je opis magnetskog polja koji dobivamo koristeći analitičku metodu nedostatan da se sa visokom sigurnošću bez dodatnih razmatranja dobije uvid u to da li je stroj pravilno projektiran. Ovdje ćemo navesti primjer izbora omjera broja utora statora i rotora koji se bez dodatnih analiza stroja ne može adekvatno opisati analitičkim pristupom.

### 2.2.2. Magnetsko polje struje statorskog namota

Ako se pretpostavi da je magnetska vodljivost željeza  $\mu_{Fe} = \infty$  i da su polovi simetrični onda gustoća toka (indukcija)  $B_x$  na mjestu  $x$  u zračnom rasporu stvorena strujom namota statora (armature) može biti određena iz linearne funkcije:

$$B_x = \theta_x \cdot \lambda_x, \quad (2.1a)$$

gdje je  $\theta_x$  magnetomotorna sila ili protjecanje namota statora u danoj točki  $x$  na provrtu statora, a  $\lambda_x$  magnetska vodljivost zračnog raspora u točki  $x$  na provrtu statora. Ovom aproksimacijom izbjegavaju se teškoće koje bi unijela u proračun nelinearnost vezana uz zasićenje magnetskog kruga [33].

Analiza magnetskog polja u zračnom rasporu s dostatnom točnošću može se provesti uz pretpostavku da je stator gladak i da je tok rotora koncentriran na provrtu statora u točkama simetrale utora. Utjecaj utora uzima se u obzir pomoću Carterovog faktora. Pri tome protjecanje jedne faze namota statora predstavljeno je zbrojem prostornih harmonika od kojih osnovni harmonik ima valnu duljinu jednaku duljini dvostrukog polnog koraka na provrtu statora, a period promjene viših harmonika je  $\nu$  puta manji, gdje  $\nu$  predstavlja red pojedinog harmonika.

U slučaju trofaznog namota kroz koji protječe sinusna izmjenična struja prvi harmonik kretat će se sinkronom brzinom  $\omega_s$  u direktnom smjeru kao i rotor, treći harmonik će se poništiti, peti će se kretati brzinom  $-(1/5)\omega_s$  u smjeru suprotnom smjeru vrtnje rotora, harmonik  $(1/7)\omega_s$  u direktnom smjeru itd. Amplituda svakog harmonika rezultatnog rotacijskog polja bit će jednaka  $m/2$  (m broj faza) odnosno  $3/2$  amplitude odgovarajućeg harmonika polja pojedine faze trofaznog sustava. Magnetsko polje u zračnom rasporu na mjestu  $x$  nastalo od struje faznog namota određuje se preko (2.1a) za svaki harmonik polja zasebno pošto je magnetska vodljivost zračnog raspورا različita za različite harmonike polja.

Magnetska vodljivost zračnog raspورا u općem slučaju nije konstantna i može se predstaviti općom funkcijom prema (2.2). Kod velike većine sinkronih strojeva oblik oba pola je jednak i simetričan, pa se u klasičnoj teoriji to uzima u obzir kod izračuna vodljivosti utora i opći Fourierov red gubi neparne članove. Neka je u točki  $x$  zračnog raspورا, koja s  $d$  osi (simetralom pola) zatvara kut  $\alpha$  magnetska vodljivost  $\lambda_x$ . Magnetska vodljivost duž pola mijenja se periodički s periodom od 180 električnih stupnjeva, obzirom da se za iste točke nad drugim polom geometrija zračnog raspورا ponavlja. Ukoliko je pored toga zračni raspور simetričan u odnosu na os pola, što je slučaj kod većine sinkronih strojeva, pri promjeni znaka kuta  $\alpha$ , magnetska vodljivost  $\lambda_x$  neće mijenjati. Zbog toga funkcija koja opisuje promjenu vodljivosti zračnog raspورا  $\lambda_x$  sadrži samo parne, kosinusne harmonike:

$$\lambda_x = \lambda_0 + \lambda_2 \cos 2\alpha + \lambda_4 \cos 4\alpha \dots \quad (2.3)$$

gdje je:

$\lambda_x$  – ukupna magnetska vodljivost zračnog raspورا u točki  $x$

$\lambda_0$  – magnetska vodljivost zračnog raspورا u točki  $x$  za osnovni harmonik

$\lambda_2$  – magnetska vodljivost zračnog raspورا u točki  $x$  za drugi harmonik

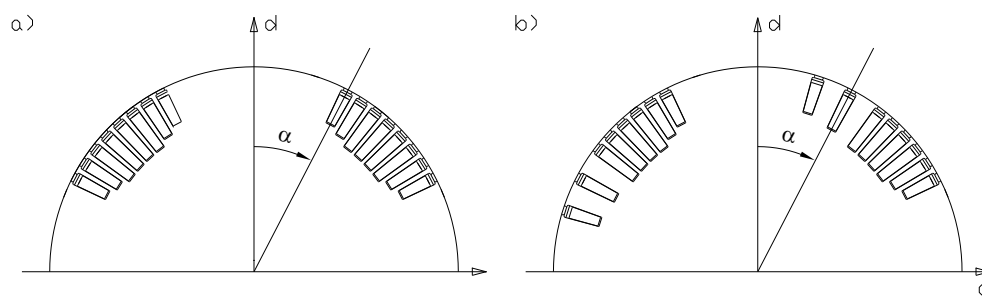
$\lambda_4$  – magnetska vodljivost zračnog raspورا u točki  $x$  za četvrti harmonik

$\alpha$  - kut koji zatvara točka  $x$  s  $d$  osi.

Dokazano je da je magnetsko polje u rasporu, koje inducira u namotu statora osnovni harmonik elektromotorne sile određeno s dostatnom točnošću s prva dva člana reda vodljivosti pa se u klasičnoj teoriji vodljivost predstavlja izrazom:

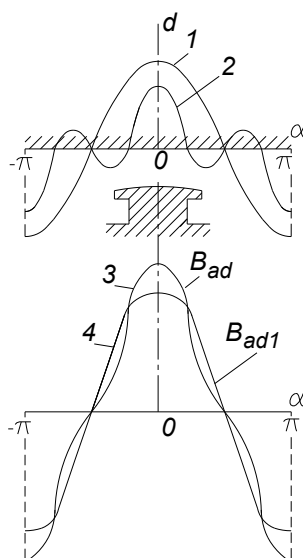
$$\lambda_x = \lambda_0 + \lambda_2 \cos 2\alpha . \quad (2.4)$$

Rotori turbogenerators najvećih snaga izvode se s asimetričnim rotorom (slika 2.3.b). U tom slučaju funkcija iz (2.2) imat će sve članove reda. Međutim u klasičnoj teoriji kod turbogenerators se često razmatra samo osnovni član vodljivosti zračnog raspورا.



**Slika 2.3 Rotor turbogenerators: a) simetrični rotor četverpolnog turbogenerators; b) asimetrični rotor četverpolnog turbogenerators.**

Zbog promjene vodljivosti  $\lambda_x$  zračnog raspora duž provrta statora, magnetsko polje stvoreno od osnovnog harmonika polja namota statora neće biti sinusoidalno. Na slici 2.4 prikazana je indukcija u zračnom rasporu stvorena osnovnim harmonikom protjecanja. Na gornjoj skici prikazana je raspodjela indukcije u zračnom rasporu uvjetovana utjecajem svakog od dva harmonijska člana vodljivosti zračnog raspora zasebno. Na donjoj skici predstavljen je oblik vala indukcije u zračnom rasporu  $B_{ad}$  određene ukupnom vodljivošću u  $d$  osi:  $\lambda_x = \lambda_0 \cos \alpha + \lambda_2 \cos 2\alpha \cos \alpha$  i  $B_{ad1}$  prvi harmonik tog rezultatnog vala. Polja viših prostornih harmonika indukcije stvorenih osnovnim harmonikom protjecanja mogu se zanemariti obzirom da ne ulančuju veliki tok u statorskom i rotorskom namotu. S jedne strane to proizlazi iz malih vrijednosti samih magnetskih tokova, a s druge strane zbog malih vrijednosti faktora statorskog namota koji za više harmonike polja imaju prigušene amplitude.



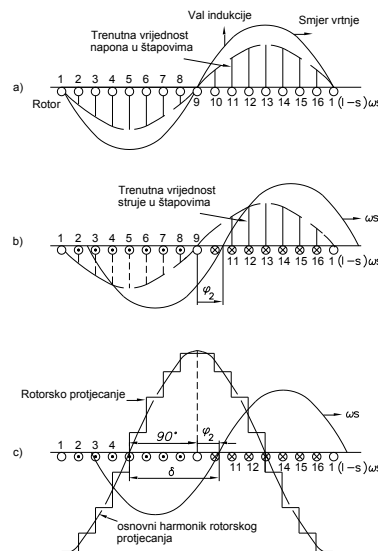
**Slika 2.4 Raspodjela gustoće magnetskog polja u zračnom rasporu u  $d$  osi stvorenog protjecanjem statorskog namota: 1. polje ovisno o vodljivosti  $\lambda_0$  2. polje ovisno o drugom članu vodljivosti  $\lambda_2 \cos 2\alpha$ ; 3 - rezultatno polje u  $d$  osi  $B_{ad}$ ; 4 - osnovni harmonik polja  $B_{ad1}$ .**

Viši prostorni harmonici protjecanja namota statora, također zbog promjenjive vodljivosti zračnog raspورا, stvaraju magnetsko polje koje u statoru inducira elektromotornu silu ne samo viših nego i harmonika osnovne učestalosti. To su oni harmonici polja koji se mijenjaju duž provrta statora brzinom  $v$  puta manjom od brzine osnovnog harmonika ali je i njihov polni korak  $v$  puta manji od polnog koraka osnovnog harmonika polja. Viši harmonici protjecanja reda  $v = 6k \mp 1 (k = 1, 2, 3, \dots)$  ne ulančuju samo  $v$ -ti harmonik polja nego  $v' = 6k \pm 1$  harmonik, pa tako induciraju u statoru i elektromotornu silu osnovne učestalosti. Isto tako 5-ti harmonik ulančuje 7-mi harmonik elektromotorne sile dok 7-mi harmonik ulančuje 5-ti itd. To je posljedica magnetske vodljivosti  $\Lambda_2 \cos 2\alpha$ .

Kod pravilno projektiranih sinkronih strojeva vrijednosti faktora statorskog namota viših harmonika protjecanja su relativno mala te su i amplitude ulančenih protjecanja male [3]. Stoga se uzima u analitičkom modelu da magnetsko polje stvoreno strujama namota statora inducira u njima elektromotornu silu osnovne učestalosti koja je u zračnom raspору sinusoidno raspodijeljena duž provrta statora s periodom jednakim dvostrukom polnom koraku stroja i naziva se polje reakcije namota statora (reakcija armature). Struje statorskog namota također stvaraju polje koje se ulančuje sa statorskim namotom, a koje nazivamo rasipno polje. Magnetske osi faznih namota u slučaju trofaznog namota prostorno su pomaknute za 120 električnih stupnjeva, tako što su namoti po provrtu statora geometrijski smješteni simetrično pod kutovima od 120 mehaničkih stupnjeva.

### 2.2.3. Magnetsko polje struja prigušnog namota rotora

Osnovni harmonik polja rotora stvoren strujama uzbudnog namota (vezan uz rotor) i osnovni harmonik okretnog polja stvoren strujama trofaznog statorskog namota, putuju duž zračnog raspورا statora istom sinkronom brzinom koja je jednaka brzini vrtnje rotora. Pri sinkronoj brzini vrtnje rotora ne postoji presijecanje linija magnetskog polja koje u prigušnom namotu rotora može inducirati elektromotornu silu, pa kroz taj namot ne teku struje.



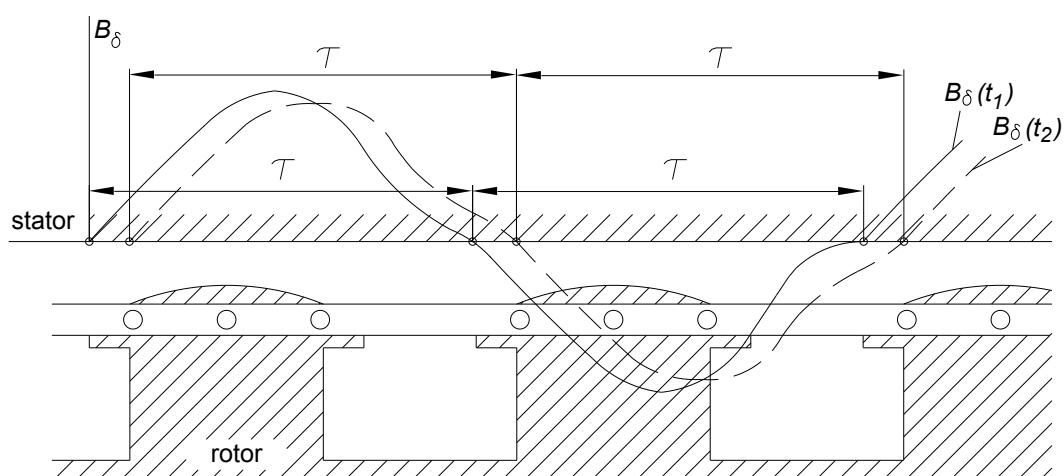
Slika 2.5 Reakcija kaveznog rotora u dvopolnom polju.

Međutim u krugovima prigušnog namota izvana inducirana elektromotorna sila (slika 2.5) može stvoriti magnetsko polje koje se ulančuje s prigušnim namotom u režimima rada koji odstupaju od sinkrone brzine vrtnje kao i za slučaj harmonijski razdjeljenoga vanjskog magnetskog polja u zračnom raspору koje se giba nekom brzinom prema rotoru. Raspodjela



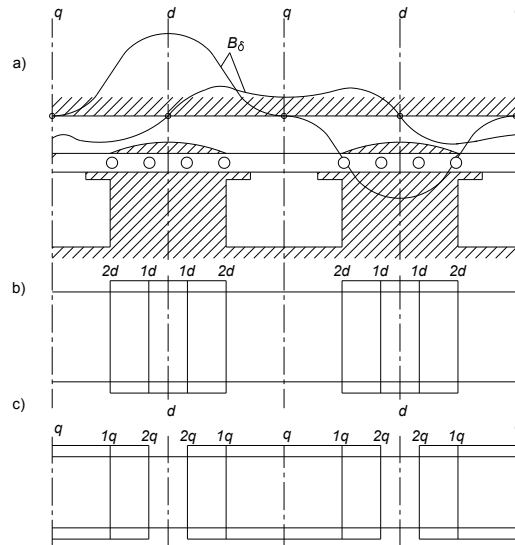
struja koje se javljaju u prigušnom namotu uslijed inducirane elektromotorne sile ima složeni karakter.

U općem slučaju realno magnetsko polje u zračnom rasporu u danom trenutku vremena imati će složenu raspodjelu duž provrta statora, koja se periodički ponavlja s periodom dvostrukog polnog koraka  $2\tau$ . Treba uočiti da bez obzira koliko se faza namota nalazi na rotoru (ili statoru) osnovni period promjene magnetskog polja uvijek će biti određen brojem polova odnosno dvostrukim polnim korakom. To znači da će u vremenu u trenutku  $t_1$  val indukcije u nekoj točki prolaziti kroz nulu i da će također prolaziti kroz nulu na rastojanju  $\tau$ . Za neki drugi trenutak vremena  $t_2$  po nekoj drugoj krivulji mijenjati će se oblik polja dok će prolasci kroz nulu biti prostorno jednako pomaknuti (slika 2.6). Drugim riječima egzistira prostorna periodičku promjena polja u vremenu. Prolazak vala indukcije kroz nulu „dijeli“ susjedne štapove namota u kojima struja protječe u dva suprotna smjera i to se ponavlja za svaki polni korak  $\tau$ .



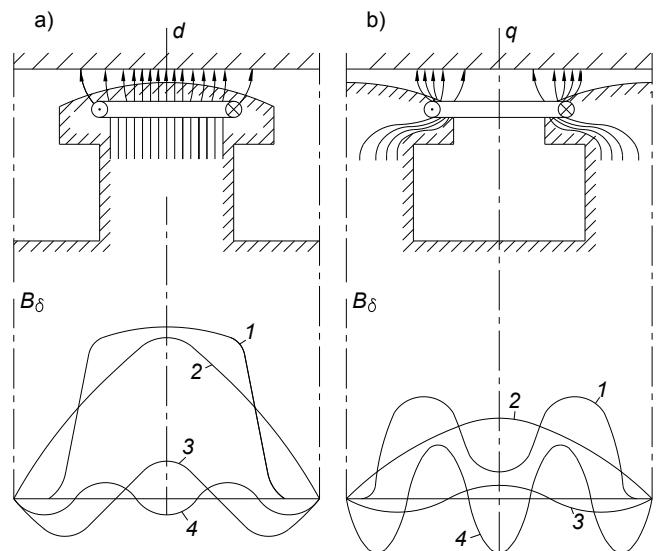
**Slika 2.6** Međusobni položaj gustoće magnetskog polja u zračnom rasporu i prigušnog namota u dva trenutka  $t_1$  i  $t_2$ .  $B_\delta(t_1)$  – raspodjela indukcije u zračnom rasporu duž provrta statora u trenutku  $t_1$ ;  $B_\delta(t_2)$  – raspodjela indukcije u zračnom rasporu duž provrta statora u trenutku  $t_2$ .

Matematički ovo magnetsko polje može se predstaviti s dva polja koji će kao i osnovno biti u funkciji vremena i imati raspodjelu u prostoru s periodom promjene  $2\tau$ . Ta su dva polja nepomična prema rotoru i međusobno, pa se na taj način rotacijsko polje zamjenjuje s dva pulzacijska polja. Ta dva polja su međusobno pomaknuta za  $\pi/2$  i svako od njih djeluje u  $d$  odnosno  $q$  osi simetrije. Vrijednost indukcije svakog od tih pulzacijskih polja je nula u točkama koje su na međusobnoj udaljenosti  $\tau$  i leže u osima simetrije (polje vezano uz  $d$  os prolazi kroz nulu u  $q$  osi). Svakom pulzacijskom polju pridružuje se zasebni namot kroz koji teku struje koje ga stvaraju. Izabrana geometrija treba biti takva da je međusobni utjecaj tih odvojenih namota zanemariv, što se postiže upravo postavljanjem osi simetrije ta dva namota pod kutom od  $\pi/2$  odnosno  $90$  električkih stupnjeva. Pri tome se u prvom slučaju cijeli kavez prigušnog namota razvija oko osi  $d$ , s prekidom kratko spojnog prstena između štapova na kojem indukcija prvog polja prolazi kroz nulu (slika 2.7.b).



**Slika 2.7** Shema razdijeljenog prigušnog namota i njegovo djelovanje: a) gustoća magnetskog polja u zračnom rasporedu nepomično prema osima  $d$  i  $q$ ; b) krugovi prigušnog namotaja  $d$  osi; c) krugovi prigušnog namotaja  $q$  osi.

U drugom slučaju se štapovi kaveza razvijaju oko osi simetrije  $q$  s prekidom kratko spojnog prstena na mjestu na kojem je indukcija drugog polja nula (slika 2.7.c). Na istoj slici (slika 2.7.a) prikazan je oblik dva pulzacijska polja u zračnom rasporedu koja bi ulančile struje koje protječu u prigušnom namotu sa simetrijom u  $d$  osi, i u prigušnom namotu sa simetralom u  $q$  osi, za slučaj glatke površine provrta statora (bez utora odnosno).

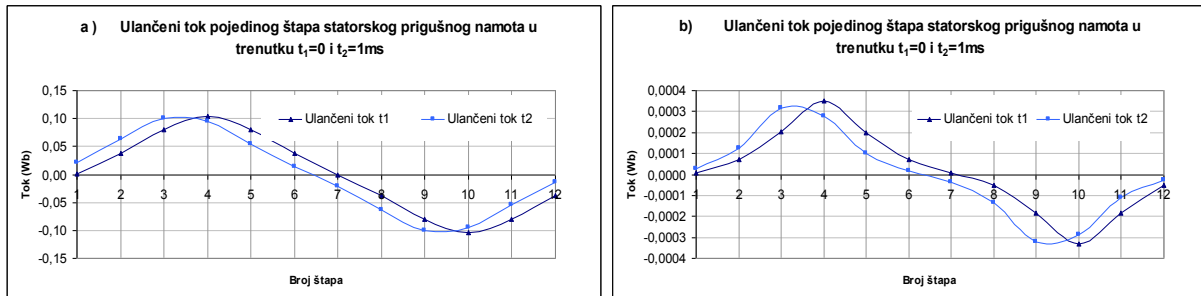


**Slika 2.8** Magnetsko polje stvoreno strujama prigušnog namotaja  $d$  i  $q$  osi. 1-oblik prostornog vala indukcije; 2, 3, 4 – osnovni, treći i peti harmonik razložene krivulje indukcije u  $d$  i  $q$  osi.

Na slici 2.8 nesinusoidalno polje prigušnog namota  $d$  i  $q$  osi prikazano je osnovnim i višim harmonicima. Kao i u slučaju ostalih namota potrebno je elektromotornu silu računati s faktorima namota pa će koeficijenti viših harmonika biti smanjeni. Samo u slučaju malog utorskog koraka prigušnog namota iznosi viših harmonika moraju se uzeti u obzir. Ulančeni tok samoindukcije prigušnog namota neophodno je izračunati s realnom krivuljom polja. Isto to vrijedi i za tok koji se ulančuje između prigušnog namota  $d$  osi i uzbudnog namota.

## 2.2.4. Magnetsko polje struja prigušnog namota statora

Prigušni namot statora novi je konstrukcijski element turbogeneratora koji ne poznaje i ne opisuje klasična teorija elektomagnetskih strojeva. Proučavanje i opis njegovog djelovanja je predmet ovoga rada.



Slika 2.9 Ulančeni tok u prigušnom namotu statora sa 12 štapova od djelovanja polja uzbudnog namota a) kada kroz štapove ne protječu struje; b) kada protječu struje u prigušnom namotu statora .

Prigušni namot statora smješten je po vanjskom obodu statora i nepomičan u odnosu na statorski fazni namot. Za razliku od prigušnog namota rotora ovaj namot djeluje ukoliko je bilo kojim od dva namota, uzbudnim ili faznim namotom statora, stvoreno promjenjivo magnetsko polje. Dakle i kod ovog namota slično prigušnom namotu rotora izvana inducirana elektomotorna sila stvara magnetsko polje koje se ulančuje s prigušnim namotom ovog puta u svim režimima rada, obzirom na činjenicu da u statoru egzistira isključivo izmjenično magnetsko polje. Raspodjela struja u prigušnom namotu statora ima složeni karakter i u prostoru će ovisiti o mjestu na kojem se određeni štاپ nalazi prema statorskom namotu, te o rezultatnom polju koje djeluje u jarmu rotora i ima periodu jednaku dvostrukom polnom koraku  $2\tau$  (slika 2.9).

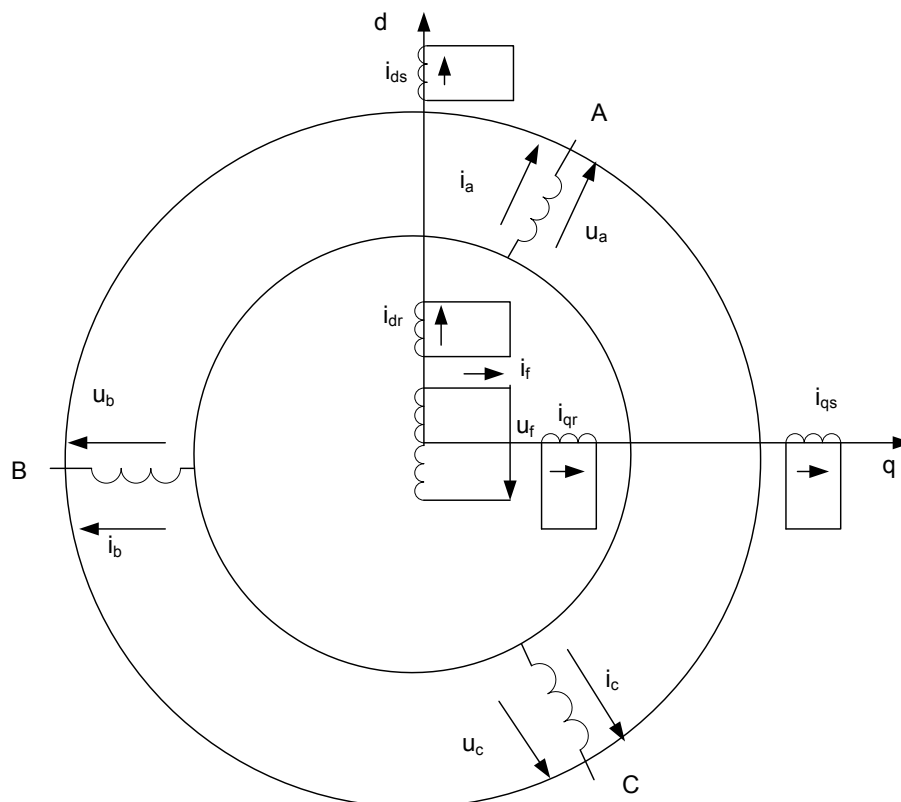
Štapovi prigušnog namota statora mogu, gledano po radijalnom presjeku stroja, biti smješteni iznad zuba ili iznad utora faznog namota statora. U slučaju beskonačne vodljivosti željeza položaj utora u koji je smješten prigušni namot statora ne bi utjecao na ulančeni tok, međutim u realnom stroju utjecaj geometrije statorskog paketa je vidljiv, a ispitivanjem numeričkim modeliranjem prigušnog namota statora pokazano je da struje inducirane u štapovima kratkospojenog prigušnog namota nisu jednake u svim štapovima ukoliko se oni geometrijski ne nalaze u identičnom položaju prema utoru statora. Kod prigušnog namota statora interesantno je ispitati utjecaj broja utora kaveza u odnosu na broj utora faznih namota statora odnosno na prilike u turbogeneratoru.

## 2.3. Opći oblik diferencijalnih jednadžbi sinkronog stroja

U klasičnoj teoriji sinkronih strojeva svaki namot može se opisati zasebnom jednadžbom [14]. Sustav jednadžbi koji se sastoji od tri jednadžbe za trofazni statorski namot, jedne jednadžbe za uzbudni namot i  $n$  jednadžbi za  $n$  fazni prigušni namot razvijen u  $d$  i  $n$  jednadžbi za namot u  $q$  osi sukladno gore opisanom djelovanju. Sustav jednadžbi trofaznog statorskog namota potrebno je svesti na rotor tako da se prikaže djelovanje u osi  $d$  i  $q$ . Za statorski prigušni namot bi se po klasičnoj metodologiji također mogao primijeniti isti postupak razvijanja kaveza u  $d$  i  $q$  osi kao za rotor opisan u poglavlju 2.2.3. Taj dodatni sustav jednadžbi bi se sastojao od onolikog broja jednadžbi u  $d$  i  $q$  osi koliko faza odnosno štapova ima statorski prigušni namot. Međutim udaljenost statorskog prigušnog namota od zračnog raspora je velika te sukladno pretpostavci da se za ovako postavljeni sustav jednadžbi uzima beskonačno velika vodljivost željeza klasični analitički pristup nije primjenjiv.

Ograničenja klasičnog analitičkog proračuna vezana su i uz izračun struja koje protječu u pojedinom štapu prigušnog namota rotora obzirom da se preko veličina čiju vrijednost mjerimo, u inverznom postupku ne može doći do točne raspodjele struja u pojedinom štapu već smo do srednje vrijednosti preko ukupnog zbroja svih struja.

Diferencijalne jednačbe kojima opisujemo rad sinkronog stroja prvi je postavio američki inženjer Park, dok ih je ruski znanstvenik Gorev matematički dokazao. Kasnije su ove jednačbe iz forme diferencijalnih jednačbi preslikane u kompleksno područje u kojem se bitno jednostavnije obrađuju dobiveni rezultati. Vrijednosti parametara iz tih jednačbi mogu se izmjeriti, pa je tako povezan izračun parametara s provjerom točnosti računa eksperimentalnim putem. Pri postavljenju ovih jednačbi uzimaju su određene pretpostavke koje odstupaju od procesa koji se događaju u realnom stroju, pa takav model nazivamo idealnim strojem.



**Slika 2.10** Namoti u sinkronom stroju čije je djelovanje svedeno u rotirajuće  $d$  i  $q$  osi.

Poznavanje i predviđanje ponašanja sinkronog stroja kako u ustaljenom režimu rada tako i prilikom prijelaznih procesa svodi se na poznavanje jakosti i oblika magnetskog polja u zračnom rasporu. To polje se pojavljuje kao rezultatno polje struja koje ga u nekom trenutku vremena u određenoj točki prostora stvaraju. Struje koje stvaraju ovo polje su struje uzbuđenog namota, armaturnog namota, prigušnog namota kao i vrtložne struje koje se pojavljuju u masivnim dijelovima strojeva i imaju zamjetljivi efekt. Da bi se matematički opisalo polje uzeta je pretpostavka da je vodljivost željeza  $\mu_{Fe} = \infty$ . Uvođenjem takve pretpostavke odnosi se lineariziraju i polje postaje proporcionalno strujama pojedinih strujnih krugova koje to polje stvaraju.

U realnom stroju vodljivost željeza je konačna i ovisna o zasićenju te je stoga i nelinearna. To znači da će se jedan dio toka potrošiti na svladavanje magnetskog pada napona u željezu. Stoga je za određivanje radne točke, odnosno uzbuđne struje potrebne za formiranje

takvog polja u stroju pri kojem će se na krajevima armaturnog namota dobiti nazivni napon i protjecati struja armature definirana nazivnim teretom (nazivna struja, nazivni faktor snage), u obzir mora uzeti nelinearnost magnetskog kruga. Tada se za izračun polja u željezu uzimaju u obzir karakteristike ugrađenih materijala. Parametri generatora prvo se razmatraju za nezasićeno stanje, odnosno za režime rada kada su odnosi u stroju linearni i ovise samo o geometriji. Kasnije se uvođenjem koeficijenata u analitičkom proračunu dobivaju zasićeni parametri stroja odnosno induktiviteti koji se razlikuju od onih za nezasićeni stroj. Zasićene vrijednosti parametara su niže od nezasićenih.

Bitno pojednostavljenje vezano je uz raspodjelu polja koji namot statora ulančuje sam sa sobom (polje samoinduktiviteta) namota statora i polja koje namot statora ulančuje s namotima rotora (polje međuinduktiviteta). Pretpostavlja se da je raspodjela ovih polja duž provrta statora sinusoidalna, a u proračunima se uzima samo prvi harmonik ove raspodjele.

Još jedna pretpostavka (koja je u mnogome točna obzirom na geometriju realnih strojeva) je da su fazni namoti simetrični, odnosno da imaju jednaki broj zavoja, jednake aktivne otpore te da su simetrični oko magnetskih osi. Isto to vrijedi i za prigušni namot rotora te vodljivost rotora u  $d$  i  $q$  osi.

Jednadžbe kojima se opisuju faze namota statora su.

$$\begin{aligned} -e_a &= p\psi_a + ri_a; \\ -e_b &= p\psi_b + ri_b; \\ -e_c &= p\psi_c + ri_c, \end{aligned} \tag{2.5a}$$

gdje je:

$e_a, e_b, e_c$  – fazni naponi na stezaljkama statora;

$\psi_a, \psi_b, \psi_c$  – ulančeni tok faza;

$i_a, i_b, i_c$  – inducirane struje u fazama statorskog namota.

$r$  – radni otpor faze namota;

$p$  – operator – derivacija po vremenu  $d/dt$ .

Jednadžba kojim se opisuje namot rotora:

$$-e_f = p\psi_f + r_f i_f, \tag{2.5b}$$

gdje je:

$e_f$  – uzбудni napon ;

$\psi_f$  – ulančeni tok od struje uzbudnog namota;

$i_f$  – struja uzbudnog namota.

$r_f$  – radni otpor uzbudnog namota;

$p$  – operator – derivacija po vremenu  $d/dt$ .

Jednadžbe kojim se opisuje prigušni namot rotora:

u  $d$  osi (n krugova)

$$\begin{aligned} 0 &= p\psi_{1d} + r_{11d}i_{1d} + r_{12d}i_{2d} + \dots + r_{1nd}i_{nd}; \\ 0 &= p\psi_{2d} + r_{21d}i_{1d} + r_{22d}i_{2d} + \dots + r_{2nd}i_{nd}; \\ &\dots\dots\dots \\ 0 &= p\psi_{nd}i_{nd} + r_{nd}i_{1d} + r_{nd}i_{2d} + \dots + r_{nnd}i_{nd}; \end{aligned} \tag{2.5c}$$



- prigušni namot  $d$  osi

$$\begin{aligned}\psi_{1d} &= M_{1da}i_a + M_{1db}i_b + M_{1dc}i_c + M_{1df}i_f + L_{1d}i_{1d} + M_{12d}i_{2d} + \dots + M_{1nd}i_{nd} \\ \psi_{2d} &= M_{2da}i_a + M_{2db}i_b + M_{2dc}i_c + M_{2df}i_f + M_{21d}i_{1d} + L_{2d}i_{2d} + \dots + M_{2nd}i_{nd}\end{aligned}\quad (2.7c)$$

.....  
- prigušni namot  $q$  osi

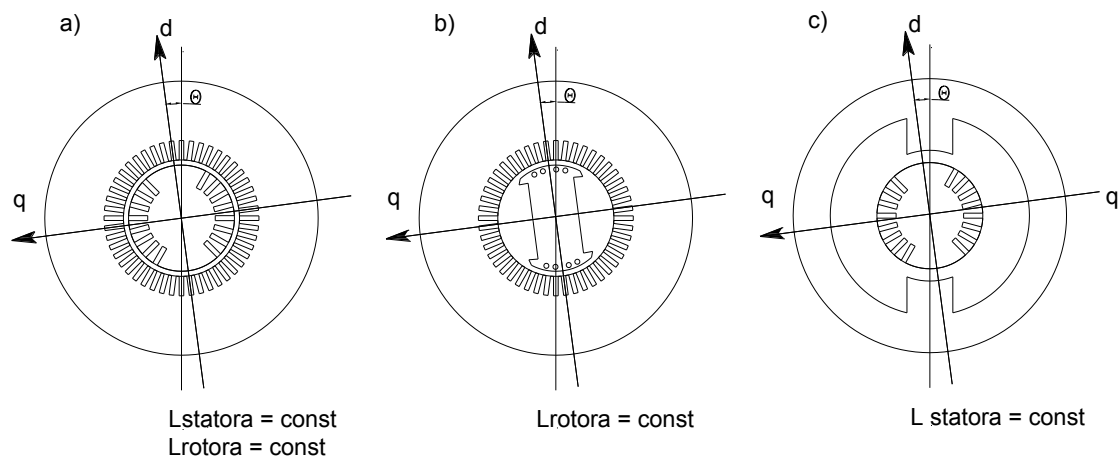
$$\begin{aligned}\psi_{1q} &= M_{1qa}i_a + M_{1qb}i_b + M_{1qc}i_c + L_{1q}i_{1q} + M_{12q}i_{2q} + \dots + M_{1nq}i_{nq} \\ \psi_{2q} &= M_{2qa}i_a + M_{2qb}i_b + M_{2qc}i_c + M_{21q}i_{1q} + L_{2q}i_{2q} + \dots + M_{2nq}i_{nq}\end{aligned}\quad (2.7d)$$

.....  
Međuinduktiviteti dva namota su jednaki  $M_{ab} = M_{ba}$  što proizlazi iz definicije samog međuinduktiviteta - parametra koji opisuje količinu toka koju će struja jednog namota (a) ulančiti u drugom namotu (b). Svi koeficijenti u jednadžbama (2.7 a-d) su funkcije prostornih koordinata.

Neki od parametra koje proučavamo (samoinduktiviteti i međuinduktiviti) su konstantni, a neki se mijenjaju obzirom da njihove vrijednosti ovise o geometrijskoj konfiguraciji stroja (slika 2.11.) Vrijednosti ovih parametara ovise o položaju rotora prema statoru. Tako su međuinduktiviteti rotorskih namota koji su nepomični jedni prema drugima (uzbudnog i prigušnog) uvijek konstantni. Induktiviteti rotorskih namota pod pretpostavkom glatkog statora su također konstantni u geometriji pod a) i b) sa slike 2.11, a statorskih za geometriju a) i c) pod uvjetom glatkog rotora. Ostali induktiviteti i međuinduktiviteti mijenjat će se ovisno o položaju statora prema rotoru.

Promjena magnetske vodljivosti zračnog raspora uzrokovana utorima u kojima su smješteni namoti uzima se u obzir preko Carterovog faktora (slično kako se u obzir uzimaju rashladni kanali u uzdužnoj osi). Na taj način ostaje samo utjecaj istaknutih polova (poglavlje 2.2.2 jednadžbe (2.3) i (2.4)), pa induktiviteti ovise o kutu koji čine simetrale namota statora i rotora.

### 2.3.1.1. Induktivitet faznog namota



**Slika 2.11** Prikaz različitih geometrija statora i rotora i ovisnost promjene induktiviteta uz pretpostavku glatkih statora i rotora: a) stroj sa cilindričnim rotorom; b) stroj s istaknutim polovima na rotoru; c) stroj s istaknutim polovima statora.

**a) Samoinduktivitet faze statora**

Za slučaj pod (a) sa slike 2.11 (cilindrični rotor) vodljivost zračnog raspora  $\lambda_o$  se s dovoljnom točnošću može prikazati preko konstantnog zračnog raspora  $\delta_o$ , kao  $\lambda_o \propto \frac{\mu_o}{\delta_o}$  uzimajući u obzir Carterov faktor statora  $k_{cs}$  i Carterov faktor  $d$  osi rotora  $k_{csd}$  i  $q$  osi rotora  $k_{csq}$ :

$$\lambda_{od} \propto \frac{\mu_o}{\delta_o} k_{cs} k_{csd}; \quad (2.8)$$

$$\lambda_{oq} \propto \frac{\mu_o}{\delta_o} k_{cs} k_{csq}. \quad (2.9)$$

Kako bi se približili problemi izračuna vodljivosti zračnog raspora i posljedično induktiviteta, potrebno je razmotriti opći slučaj kada imamo nejednoliki zračni raspored, što je najrazvidnije kod strojeva s istaknutim polovima. Kada zračni raspored nije konstantan, magnetska vodljivost ima maksimalnu i minimalnu vrijednost. Maksimalna vodljivost bit će na mjestu najmanjeg zračnog raspora odnosno u  $d$  osi pola  $\lambda_d$ . Minimalna vodljivost biti će na mjestu najvećeg zračnog raspora u osi  $q$   $\lambda_q$ :

$$\lambda_d = \frac{\mu_o}{\delta_{\min}} k_s = \lambda_o + \lambda_2 \quad (2.10)$$

$$\lambda_q = \frac{\mu_o}{\delta_{\max}} k_s = \lambda_o - \lambda_2. \quad (2.11)$$

U praksi su jednadžbe 2.10 i 2.11 točne i za slučaj turbogeneratora i to ne samo zbog neravnomjerne nazubljenosti rotora u zonama oko  $d$  i  $q$  osi nego i zbog posljedične razlike elastičnosti rotora u ove dvije osi koja utječe na različiti progib rotora u tim osima u vrtnji.

Induktivitet jedne faze statorskog namota je dakle periodička funkcija kuta koji magnetska os te faze zatvara s  $d$  osi. Induktivitet se za svaki fazni namot predstavlja parnom funkcijom rotora te se slika ponavlja nad svakim polom. Također je u tom slučaju irelevantan smjer vrtnje rotora. Ta parna funkcija prikazuje se Fourierovim transformacijom pri čemu se s dostatnom točnošću u idealnom stroju zanemaruju svi članovi iza drugog člana reda:

$$L_a = (l_0 + l_2 \cos 2\gamma_a), \quad (2.12)$$

gdje je  $\gamma_a$  kut između simetrale faze  $a$  i simetrale pola ( $d$ -osi), a  $l_0$  i  $l_2$  Induktiviteti prva dva člana parnog reda. Za rotor koji se vrti sinkronom brzinom vrtnje kut  $\gamma$  je predstavljen kao:

$$\gamma = \int_0^t \omega dt + \gamma_0 = \omega t + \gamma_0, \quad (2.13)$$

gdje je  $\gamma_0$  početni kut za  $t=0$ .

Struja koja protječe kroz fazu  $a$  stvara sinusoidalni prostorni val protjecanja koji djeluje u simetrali faze  $a$ . Rezultantno djelovanje protjecanja  $\theta_a$  faze  $a$  može se razložiti na protjecanje u osi  $d$  i  $q$  osi preko, kuta  $\gamma$  koji os faze  $a$  zatvara s osi  $d$  i  $q$  (slika 2.12.b):



$$\begin{aligned}\theta_{ad} &= \theta_a \cos \gamma, \\ \theta_{aq} &= -\theta_a \sin \gamma.\end{aligned}\tag{2.14}$$

Magnetska indukcija u točki  $x$  udaljenoj za kut  $\alpha$  od osi  $d$ , uslijed polja koje u zračnom rasporu stvara struja faze  $a$  uz pretpostavku da su sve ostale struje jednake nuli za  $d$  os i  $q$  os je prema (2.1a) i (2.4):

$$\begin{aligned}B_{ad} &= [\theta_a (\cos \gamma) \cos \alpha] (\lambda_0 + \lambda_2 \cos 2\alpha); \\ B_{aq} &= [-\theta_a (\sin \gamma) \sin \alpha] (\lambda_0 + \lambda_2 \cos 2\alpha),\end{aligned}\tag{2.15}$$

gdje je  $\alpha$  prostorni kut u kojem je vodljivost zračnog raspora  $\lambda_x$ .

Ulančeni tok izračunavamo preko osnovnog člana indukcije  $B_{ad1}$  u  $d$  osi i  $B_{aq1}$  u  $q$  osi koji dobivamo iz 2.15:

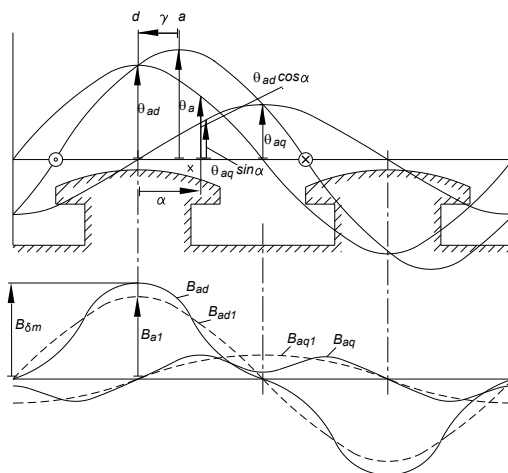
$$\begin{aligned}B_{ad1} &= [\theta_a (\cos \gamma) \cos \alpha] (\lambda_0 + \frac{1}{2} \lambda_2); \\ B_{aq1} &= [-\theta_a (\sin \gamma) \sin \alpha] (\lambda_0 - \frac{1}{2} \lambda_2),\end{aligned}\tag{2.16}$$

Za samoinduktivitet kut  $\alpha$  je jednak kutu  $\gamma$  pošto se tok stvoren namotom faze  $a$  ulančuje s istim tim namotima te je ulančeni tok faze  $a$  od polja raspoređenog u zračnom rasporu:

$$\begin{aligned}\psi_{a\delta} &= c \left[ \theta_a (\cos \gamma) (\lambda_0 + \frac{1}{2} \lambda_2 \cos 2\gamma) \cos \gamma \right] + c \left[ -\theta_a (\sin \gamma) (\lambda_0 - \frac{1}{2} \lambda_2 \cos 2\gamma) \sin \gamma \right] \\ \psi_{a\delta} &= c \theta_a (\lambda_0 + \frac{1}{2} \lambda_2 \cos 2\gamma),\end{aligned}\tag{2.17}$$

gdje je  $c$  koeficijent proporcionalnosti za prvi harmonik koji uzima u obzir geometriju namota, broj zavoja faze  $a$ ,  $N_a$ , idealnu duljinu stroja  $l_i$ , polni korak  $\tau$  i koeficijent namota faze statora za prvi harmonik  $k_{ws1}$ :

$$c = \frac{2}{\pi} d_i N_a k_{ws1}.\tag{2.18}$$



**Slika 2.12** Protjecanje i magnetsko polje u  $d$  i  $q$  osi stvoreno strujom faze namotaja statora: a) raspodjela protjecanja u prostoru; b) vektorski prikaz protjecanja(magnetomotorne sile), c) raspodjela indukcije i osnovni harmonik indukcije u  $d$  i  $q$  osi.

Induktivitet faze  $a$  (samoinduktivitet) jednog zavoja određen kao omjer ulančenog toka u zračnom rasporu i protjecanja  $\theta_a$  koje ga stvara:

$$L_{a\delta} = \frac{\psi_{a\delta}}{\theta_a} = c(\lambda_0 + \frac{\lambda_2}{2} \cos 2\gamma) \quad (2.19)$$

Tako izračunatom induktivitetu potrebno je dodati i induktivitet rasipnog polja. Induktivitet rasipanja  $L_\sigma$  praktički ne ovisi o kutu, pa se za ukupni induktivitet faznog namota vrijedi:

$$L_a = L_{a\delta} + L_\sigma = c'\lambda_0 + L_\sigma + c'\frac{\lambda_2}{2} \cos 2\gamma = l_0 + l_2 \cos 2\gamma, \quad (2.20)$$

gdje je koeficijent  $c' = cN_a$ , proporcionalan kvadratu zavoja faznog namota  $N_a^2 = N^2$ , što fizikalno predstavlja utjecaj struje jednog zavoja na samu sebe i sve ostale zavoje tog namota.

Za simetrični trofazni sustav samoinduktiviteti namota faza  $a$ ,  $b$ ,  $c$  su prostorno pomaknuti za  $120^\circ$ :

$$\begin{aligned} L_a &= l_0 + l_2 \cos 2\gamma; \\ L_b &= l_0 + l_2 \cos(2\gamma + 120); \\ L_c &= l_0 + l_2 \cos(2\gamma - 120). \end{aligned} \quad (2.21)$$

#### b) Međuinduktivitet faza statora

Međuinduktiviteti faza statorskog namota su također periodičke funkcije kuta koji rezultatna magnetska os dvije promatrane faze čini s  $d$  osi. Međuinduktiviteti statorskog namota su predstavljeni parnom funkcijom s periodom ponavljanja  $\tau$ . Također je i ovdje irelevantan smjer vrtnje rotora. Razvijanjem parne funkcije Fourierovim transformacijom dobivamo beskonačni red u kojem zanemarujemo sve članove iza drugog člana reda u slučaju idealnog stroja. Međuinduktivitet faza  $a$  i  $b$  u tom slučaju ima oblik:

$$\begin{aligned} M_{ab} &= (m_0 + m_2 \cos 2\gamma_{ab}); \\ \gamma_{ab} &= 60 - \gamma \end{aligned} \quad (2.22)$$

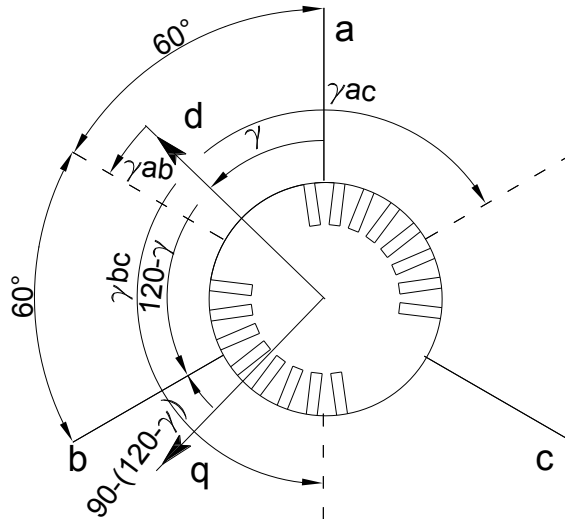
gdje je kut  $\gamma_{ab}$  između magnetske osi djelovanja faza  $a$  i  $b$  i  $d$  osi. Ovaj kut možemo izraziti preko kuta  $\gamma$  koji magnetska os faze  $a$  zatvara s  $d$  osi (slika 2.13).

Za izračun međuinduktiviteta polazi se od (2.16) samo sada je  $\alpha$  jednak kutu koju os faze  $a$  zatvara s kutom faze s kojom se faza  $a$  ulančuje (npr. fazom  $b$ ). Taj kut je od osi  $d$  pomaknut za  $120 - \gamma$ , a od osi  $q$  za  $90 - (120 - \gamma)$  stupnjeva (slika 2.13), pa izraz za ulančeni tok u namotu faze  $b$  od faze  $a$  dobiva oblik:

$$\begin{aligned} \psi_{ab\delta} &= c[\theta_a(\cos\gamma)(\lambda_0 + \lambda_2 \cos 2\gamma)\cos(120 - \gamma)] + c[-\theta_a(\sin\gamma)(\lambda_0 - \lambda_2 \cos 2\gamma)(\cos 90 - (120 - \gamma))] \\ \psi_{ab\delta} &= c\theta_a(-\frac{\lambda_0}{2} + \frac{\lambda_2}{2} \cos(120 - 2\gamma)) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Međuinduktivitet faza  $a$  i  $b$  je:

$$M_{ab\delta} = \frac{\psi_{ab\delta}}{\theta_a} = c(-\frac{\lambda_0}{2} + \frac{\lambda_2}{2} \cos(120 - 2\gamma)) \quad (2.24)$$



Slika 2.13 Prikaz položaja osi faza statorskog namot i kutovi preko kojih se određuje njihov međuinduktivitet.

Literatura pretpostavlja da ovom induktivitetu treba dodati i rasipni međuinduktivitet  $M_{\sigma}$  kako bi dobili ukupni međuinduktivitet faza  $a$  i  $b$ . I ovdje se radi o silnicama magnetskog polja koje ne prolaze kroz zračni raspoređ. Kod dvoslojnog namota to polje „rasipanja međuinduktiviteta“ povezano je sa smještajem različitih faza u iste utore. Rasipanje ili točnije poništavanje rasipnih polja ovisi o shemi namota. U literaturi se rijetko može naći definirano na taj način, međutim bez njega je teško shvatiti razliku između rasipanja namota statora kod direktnog i inverznog u odnosu na rasipanje nultog sustava struja. Međuinduktivitet postaje:

$$M_{ab} = M_{abd} + M_{\sigma} = -c' \frac{\lambda_0}{2} + M_{\sigma} + c' \frac{\lambda_2}{2} \cos(2\gamma - 120) = m_0 + m_2 \cos(2\gamma - 120) \quad (2.25)$$

gdje je koeficijent  $c'$  proporcionalan kvadratu zavoja faznih namota  $a$  i  $b$ ;  $N_a N_b = N^2$ .

Iz 2.20, 2.21 i 2.24 slijedi:

$$\begin{aligned} l_0 + 2m_0 &= L_{\sigma} + 2M_{\sigma}; \\ l_2 &= m_2. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Dobiveni rezultat je logičan obzirom da se simetrala faza  $a$  i  $b$  poklapa s magnetskom osi faze  $c$ , faza  $a$  i  $c$  s osi faze  $b$ , te faza  $b$  i  $c$  s osi faze  $a$ , te da je funkcija induktiviteta kao što smo ranije naveli parna. Kako je  $c' \frac{\lambda_0}{2} \gg M_{\sigma}$  može se s dostatnom točnošću računati

$m_0 \approx -c' \frac{\lambda_0}{2}$ . Izrazi za međuinduktivitet faza namota su:

$$\begin{aligned} M_{ab} &= m_0 + l_2 \cos(2\gamma - 120); \\ M_{ac} &= m_0 + l_2 \cos(2\gamma + 120); \\ M_{bc} &= m_0 + l_2 \cos(2\gamma). \end{aligned} \quad (2.27)$$

### c) Međuinduktivitet faze statora i uzbuđenog namota rotora

Međuinduktivitet faze statora i uzbuđenog namota rotora mijenjaju se pri vrtnji rotora po harmonijskom zakonu i najveće vrijednosti imaju kada se magnetska os rotora poklapa s magnetskom osi pojedinog faznog namota. U istom trenutku vremena u prostoru su vrijednosti međuinduktiviteta dane preko:

$$\begin{aligned}
M_{af} &= M_{afd} \cos\gamma; \\
M_{bf} &= M_{bfd} \cos(\gamma - 120); \\
M_{cf} &= M_{cfd} \cos(\gamma + 120).
\end{aligned}
\tag{2.28}$$

Međuinduktivitet faze statora na primjer  $a$  i namota rotora  $M_{afd}$  proporcionalan je broju zavoja namota faze i namota rotora, vodljivosti zračnog raspora i kosinusu kuta koji čine magnetske osi namota faze  $a$  i namota rotora. Može se izvesti na sličan način kao induktivitet pod a). Kako se os uzbudnog namota nalazi u osi  $d$  u drugom članu vodljivosti  $\cos 2\gamma = 1$  te je:

$$M_{afd} = \frac{2}{\pi} N_a k_{wa} N_f k_{wf} \tau_i \left( \lambda_0 + \frac{\lambda_2}{2} \right)
\tag{2.29}$$

#### d) Međuinduktivitet faze statora i prigušnog namota rotora

Analogno se mogu izraziti i međuinduktiviteti faznih namota i strujnih krugova prigušnog namota.

$$\begin{aligned}
M_{and} &= m_{and} \cos\gamma; \\
M_{bnd} &= m_{bnd} \cos(\gamma - 120); \\
M_{cnd} &= m_{cnd} \cos(\gamma + 120).
\end{aligned}
\tag{2.30}$$

Međuinduktivitet faze statora i  $n$ -tog kruga prigušnog namota rotora u  $d$  osi je proporcionalan broju zavoja namota faze, vodljivosti zračnog raspora i kosinusu kuta koji čine osi namota faze i os konture prigušnog namota.

$$\begin{aligned}
M_{anq} &= -m_{anq} \sin\gamma; \\
M_{bnq} &= -m_{bnq} \sin(\gamma - 120); \\
M_{cnq} &= -m_{cnq} \sin(\gamma + 120)
\end{aligned}
\tag{2.31}$$

Međuinduktivitet faze statora i  $n$ -tog kruga prigušnog namota rotora u  $q$  osi je proporcionalan broju zavoja namota faze, vodljivosti zračnog raspora i negativnoj vrijednosti sinusa kuta koji zatvaraju osi namota faze i os konture rotora.

### 2.3.1.2. Induktivitet uzbudnog namota

#### a) Samoinduktivitet uzbudnog namota

Na samoinduktivitet namota rotora utječe broj zavoja i geometrija zračnog raspora i vrijednost rasipnog induktiviteta:

$$L_f = L_{mf} + L_{\sigma f};
\tag{2.32}$$

$$L_{mf} = \frac{2}{\pi} (N_f k_{wf})^2 \tau_i \left( \lambda_0 + \frac{\lambda_2}{2} \right),
\tag{2.33}$$

Gdje je  $L_{mf}$  induktivitet proporcionalan kvadratu broja zavoja namota rotora, i vodljivosti zračnog raspora. Vodljivost zračnog raspora je ista ona koja se uzima za izračun međuinduktiviteta s fazom namota statora.  $L_{\sigma f}$  je rasipni induktivitet namota rotora.

### b) Međuinduktiviteti uzbuđenog namota i prigušnog namota rotora

$M_{fnd}$  - međuinduktivitet namota uzbuđenja i  $n$ -tog kruga prigušnog namota rotora u  $d$  osi je proporcionalan broju zavoja uzbuđenog namota i magnetske vodljivosti putova između uzbuđenog namota i  $n$ -tog kruga  $d$  osi.

#### 2.3.1.3. Induktivitet prigušnog namota rotora

##### a) Samoinduktivitet prigušnog namota rotora

Osim već definiranih međuinduktiviteta s uzbuđenim namotom u poglavlju 2.3.1.2 pod b), potrebno je definirati i samoinduktivitet prigušnog namota u  $d$  i  $q$  osi :

$$\begin{aligned} L_{nd} &= L_{mnd} + L_{ond}; \\ L_{nq} &= L_{mnq} + L_{onq}; \end{aligned} \quad (2.34)$$

Gdje je  $L_{mnd}$ ,  $L_{mnq}$  induktivitet proporcionalan kvadratu broja zavoja prigušnog namota rotora, i vodljivosti zračnog rasporeda. Vodljivost zračnog rasporeda je ista ona koja se uzima za izračun međuinduktiviteta s fazom namota statora.  $L_{ond}$  i  $L_{onq}$  je rasipni induktivitet  $n$ -tog kruga prigušnog namota u  $d$  i  $q$  osi.

##### b) Međuinduktivitet strujnih krugova prigušnog namota u $d$ i $q$ osi

$M_{nkd}$ ,  $M_{nkq}$  - međuinduktivitet  $n$ -tog kruga i  $k$ -tog kruga prigušnog namota rotora u  $d$  osi i u  $q$  osi. Proporcionalan je magnetskoj vodljivosti putova između  $n$ -tog i  $k$ -tog kruga  $d$  osi odnosno  $q$  osi.

#### 2.3.2. Transformacija statorskog u rotorski koordinatni sustav

U prethodnom poglavlju opisani su induktiviteti sinkronog stroja na način da su razdvojeni rasipni induktiviteti i oni koji ovise o magnetskom otporu (obliku) zračnog rasporeda. To upućuje na mogućnost izvođenja sustava jednadžbi pomoću kojeg će se formirati nadomjesne sheme slične nadomjesnoj shemi transformatora. Prikladnom transformacijom sustav jednadžbi iz (2.7 a-d) može se napisati tako da se dobiju parametri strujnih krugova neovisni o položaju rotora. To se postiže projekcijom trofaznog sustava u dvije osi.

Uvođenjem transformacije koja ostavlja mogućnost prepoznavanja fizikalnih veličina stroja koje su do sada razmatrane, dobiva se sustav jednadžbi u  $d$  i  $q$  osi. Sustav trofaznih struja statora transformira se u tri neovisna sustava direktni, inverzni i nulti:

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} [i_a \cos \gamma + i_b \cos(\gamma - 120) + i_c \cos(\gamma + 120)]; \\ i_q &= -\frac{2}{3} [i_a \sin \gamma + i_b \sin(\gamma - 120) + i_c \sin(\gamma + 120)]; \end{aligned} \quad (2.35a)$$

$$i_0 = \frac{1}{3} [i_a + i_b + i_c]$$

Odnosno:

$$\begin{aligned} i_a &= i_0 + i_d \cos \gamma - i_q \sin \gamma; \\ i_b &= i_0 + i_d \cos(\gamma - 120) - i_q \sin(\gamma - 120); \\ i_c &= i_0 + i_d \cos(\gamma + 120) - i_q \sin(\gamma + 120). \end{aligned} \quad (2.35b)$$

Koeficijenti  $2/3$  uz struje  $i_d$  i  $i_q$  izabrani su kako bi se dobilo jedinično rezultatno polje, a  $1/3$  uravnotežuje polje koje u slučaju simetričnog trofaznog opterećenja daje  $i_0 = 0$ . Na isti način postavljaju se transformacije za napone ( $e_q, e_d$  i  $e_0$ ) i ulančene tokove ( $\psi_d, \psi_q$  i  $\psi_0$ ):

$$\begin{aligned} -e_d &= \frac{2}{3}[e_a \cos \gamma + e_b \cos(\gamma - 120) + e_c \cos(\gamma + 120)]; \\ -e_q &= -\frac{2}{3}[e_a \sin \gamma + e_b \sin(\gamma - 120) + e_c \sin(\gamma + 120)]; \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} -e_0 &= \frac{1}{3}[e_a + e_b + e_c] \\ \psi_d &= \frac{2}{3}[\psi_a \cos \gamma + \psi_b \cos(\gamma - 120) + \psi_c \cos(\gamma + 120)]; \\ \psi_q &= -\frac{2}{3}[\psi_a \sin \gamma + \psi_b \sin(\gamma - 120) + \psi_c \sin(\gamma + 120)]; \\ \psi_0 &= \frac{1}{3}[\psi_a + \psi_b + \psi_c] \end{aligned} \quad (2.37)$$

Inducirane elektromotorne sile mogu se, koristeći se transformacijom i relacijama iz (2.7a), (2.21), (2.27), (2.30), (2.31) i (2.32), nakon sređivanja napisati preko ulančenih tokova  $d$  i  $q$  osi:

$$\begin{aligned} -e_d &= p\psi_d - \psi_q p\gamma + ri_d; \\ -e_q &= p\psi_q + \psi_d p\gamma + ri_q; \\ -e_0 &= p\psi_0 + ri_0 \end{aligned} \quad (2.38)$$

Ulančeni tokovi  $d$  i  $q$  osi se dobivaju linearnom transformacijom i u konačnici poprimaju oblik:

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + M_{afd} i_f + \sum_{k=1}^n m_{akd} i_{kd}; \\ \psi_q &= L_q i_q + \sum_{k=1}^n m_{akq} i_{kq}; \\ \psi_0 &= L_0 i_0, \end{aligned} \quad (2.39a)$$

pri čemu su koeficijenti:

$$\begin{aligned} L_d &= l_0 - m_0 + \frac{3}{2}l_2; \\ L_q &= l_0 - m_0 - \frac{3}{2}l_2; \\ L_0 &= l_0 + 2m_0. \end{aligned} \quad (2.40a)$$

Nakon transformacije izrazi za ulančene tokove namota rotora poprimaju slijedeći oblik:

$$\begin{aligned}\psi_f &= \frac{3}{2}M_{afd}i_d + L_f i_f + \sum_{k=1}^n M_{fkd}i_{kd}; \\ \psi_{nd} &= \frac{3}{2}m_{and}i_d + M_{fnd}i_f + \sum_{k=1}^n M_{nkd}i_{kd} + L_{nd}i_{nd}; \\ \psi_{nq} &= \frac{3}{2}m_{anq}i_q + \sum_{k=1}^n M_{nkq}i_{kq} + L_{nq}i_{nq}.\end{aligned}\tag{2.39b}$$

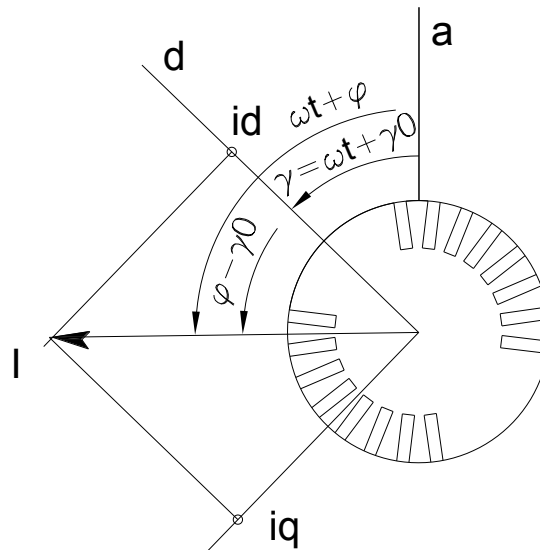
Ako se u (2.38) zamijene  $l_o$ ,  $m_o$  i  $m_2$  prema definiciji iz (2.20) i (2.25) slijedi:

$$\begin{aligned}L_d &= l_0 - m_0 + \frac{3}{2}l_2 = \frac{3}{2}c'(\lambda_0 + \lambda_2) + L_\sigma - M_\sigma; \\ L_q &= l_0 - m_0 - \frac{3}{2}l_2 = \frac{3}{2}c'(\lambda_0 - \lambda_2) + L_\sigma - M_\sigma; \\ L_0 &= l_0 + 2m_0 = L_\sigma + 2M_\sigma.\end{aligned}\tag{2.40b}$$

U izrazima za induktivitete  $L_d$  i  $L_q$  prepoznaje se magnetski otpor u osima  $d$  i  $q$  kako je napisan u (2.10) i (2.11) i rasipanje faznih namota, što ukazuje na to da se nije udaljilo od fizikalnih osnova objašnjenih u dosadašnjem izlaganju.

Za slučaj kada je  $i_f = 0$  polje u zračnom rasporedu uvjetovano je samo strujama namota statora i rotirajućim poljem koje one stvaraju. Ako su struje faza  $a$ ,  $b$ ,  $c$  dane izrazima:

$$\begin{aligned}i_a &= I_m \cos(\omega t + \varphi) \\ i_b &= I_m \cos(\omega t + \varphi - 120); \\ i_c &= I_m \cos(\omega t + \varphi + 120).\end{aligned}\tag{2.41}$$



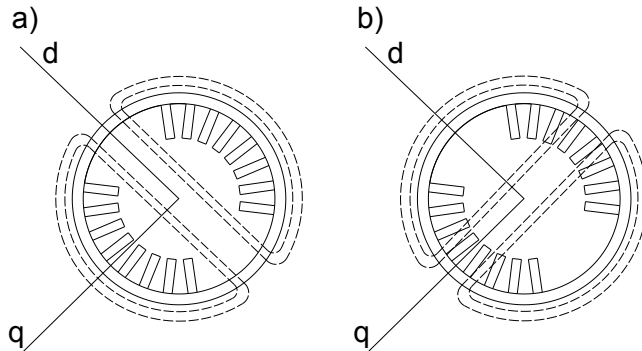
**Slika 2.14** Vektorsko određivanje struja  $i_d$  i  $i_q$  za slučaj stacionarnog simetričnog rada sinkronog stroja.

Kut  $\gamma$  sa slike 2.14. je  $\gamma = \omega t + \gamma_0$ , pa slijedi:

$$i_d = \frac{2}{3} \left[ I_m \cos(\omega t + \varphi) \cos \gamma + I_m \cos(\omega t + \varphi - 120) \cdot \cos(\gamma - 120) + I_m \cos(\omega t + \varphi + 120) \cos(\gamma + 120) \right] = I_m \cos(\varphi - \gamma_0);$$

$$i_q = -\frac{2}{3} \left[ I_m \cos(\omega t + \varphi) \sin \gamma + I_m \cos(\omega t + \varphi - 120) \cdot \sin(\gamma - 120) + I_m \cos(\omega t + \varphi + 120) \sin(\gamma + 120) \right] = I_m \sin(\varphi - \gamma_0); \quad (2.42)$$

$$i_0 = 0.$$



**Slika 2.15** a) slika polja kada je  $\psi_q = 0$  ; a) slika polja kada je  $\psi_d = 0$

Transformacijom trofaznog sustava u dvoosni dobivene su struje nepomične prema osima  $d$  i  $q$  koje ovise samo o početnom položaju i imaju amplitudu identičnu amplitudi faznih struja. Te struje i naponi mogu se predstavljati u kompleksnom području fazorima.

Ako se tijekom sinkrone vrtnje rotora i polja izabere trenutak u kojem se amplituda polja poklapa s osi  $d$  ( $\varphi - \gamma_0 = 0$ ), onda je za nezasićen stroj polje u  $q$  osi jednako nuli  $\psi_q = 0$  (slika 2.15), za simetrični sustav  $\psi_0 = 0$ , obzirom da  $i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) = 0$  pa iz (2.39a) slijedi:

$$L_d = \frac{\psi_d}{i_d}. \quad (2.43)$$

Ako se pak amplituda polja poklapa s osi  $q$ , tok osi  $d$ , nezasićenog stroja ( $\varphi - \gamma_0 = \frac{\pi}{2}$ ),  $\psi_d = 0$  za simetrični sustav  $\psi_0 = 0$ , te slijedi:

$$L_q = \frac{\psi_q}{i_q}. \quad (2.44)$$

Jednadžbom (2.43) opisan je ulančeni tok  $d$  osi od struje direktne osi. Kada su  $\psi_q = 0, i_q = 0, \psi_0 = 0, i_0 = 0$  onda iz (2.35b) slijedi:

$$L_d = \frac{\psi_d}{i_d} = \frac{\psi_d \cos \gamma}{i_d \cos \gamma} = \frac{\psi_a}{i_a}. \quad (2.45)$$



Treba imati u vidu da  $\frac{\psi_a}{i_a}$  ne daje induktivitet faze  $a$  neovisno o postojanju struja koje protječu kroz ostale faze. To znači da  $L_d$  predstavlja induktivitet faze sustava simetričnih sinusoidnih struja za stroj čiji se rotor vrti sinkronom brzinom i os faze  $a$  se poklapa s  $d$  osi stroja. Pripadajući induktivni otpor  $x_d = L_d \omega$  naziva se sinkronom reaktancijom  $d$  osi. Za proračun reaktancije  $x_d$  potrebno je postaviti rezultirajući vektor struja u direktnu os prema (2.36). Taj uvjet je ispunjen kada je  $\omega t = 0$  i trenutačne vrijednosti struja faza  $b$  i  $c$  faza jednake  $i_b = i_c = -\frac{i_a}{2}$ .

Analognim načinom određuje se i sinkrona reaktancija  $q$  osi kao  $x_q = L_q \omega$ . Struja u fazi  $a$  je jednaka je nula za  $\omega t = \frac{\pi}{2}$ . U trenutku kada je  $i_a = 0$  vrijednosti struja  $i_b = -i_c$  i rezultirajući vektor toka se nalazi u  $q$  osi.

Sinkrona reaktancija može se podijeliti na dva dijela prema (2.40b). Prvi dio čini magnetski otpor prolazu polja osnovnog harmonika kroz zračni raspor u  $d$  ( $q$ ) osi  $x_{ad}$  ( $x_{aq}$ ), a drugi dio otpor magnetskom polju rasipanja namota statora  $x_l$  ( $x_{ql} \cong x_{dl}$ ). Slijedi:

$$\begin{aligned} x_d &= x_{ad} + x_l; \\ x_q &= x_{aq} + x_l \end{aligned} \quad (2.46)$$

Induktivitet  $L_0$  određuje induktivitet sustava ako u statorskom namotu protječu struje koje su u fazi  $i_a = i_b = i_c = i$ , pa su  $i_d = i_q = 0$ . Iz ovoga slijedi da magnetsko polje ne prolazi kroz zračni raspor (za slučaj proučavanja samo osnovnog harmonika) odnosno  $\psi_d = \psi_q = 0$ .  $L_0$  računamo iz (2.35b) kada imamo  $i_a = i_b = i_c = I_m \cos(\omega t + \varphi)$ . U tom slučaju  $\psi_d = 0, i_d = 0, \psi_q = 0, i_q = 0, i_0 = I_m \cos(\omega t + \varphi)$ , a

$$L_k = \frac{\psi_k}{i_k} = \frac{\psi_0}{i_0} = L_0, k = a, b, c. \quad (2.47)$$

$L_0$  ne zavisi od promjene struja u vremenu. Induktivni otpor nultog sustava  $x_0 = L_0 \omega$  nazivamo nultom reaktancijom.

Iz sustava jednadžbi u (2.39a) i (2.39b) može se uočiti da se koeficijenti sveze glavnog polja, međuinduktiviteti  $M_{afd}$ ,  $m_{and}$ ,  $m_{anq}$  nakon transformacije sustava razlikuju za  $2/3$ . Ovo je posljedica različitog broja faza statora i rotora. Kako je sustav na statoru transformiran neovisno od rotora, prebacivanjem rotorskih jednadžbi u novi sustav pojavljuju se i različiti koeficijenti uz međuinduktivitete. U poglavlju 2.5. razložen je postupak svođenja rotorskih veličina na stator preko zajedničkih parametara glavnog polja te normiranje jednadžbi i njihovi svođenje na relativne odnose varijabli.

## 2.4. Dijagram sinkronog stroja za simetričan sustav za stacionarno stanje sinkronog stroja

U općem slučaju promjena toka nekog strujnog kruga sinkronog stroja je funkcija promjene kuta i vremena pa možemo pisati:

$$\Delta\psi = \frac{\partial\psi}{\partial\alpha} \Delta\alpha + \frac{\partial\psi}{\partial t} \Delta t. \quad (2.48)$$

Slijedi da je promjena toka u vremenu:

$$-\frac{d\psi}{dt} = -\frac{\partial\psi}{\partial\alpha} \omega_r - \frac{\partial\psi}{\partial t} = e_r + e_t, \quad (2.49)$$

odnosno da je ulančena ems jednaka zbroju ems rotacije  $e_r$  i ems transformacije  $e_t$ . Pri tome je  $\omega_r$  relativna brzina rotacije polja prema strujnom krugu. Stanje kada je  $\omega_r$  jednaka nuli (polje i rotor imaju istu brzinu vrtnje) nazivamo stacionarnim stanjem sinkronog stroja. Tada iz (2.49) slijedi da sinkroni stroj u stacionarnom stanju ima samo elektromotornu silu transformacije.

Za simetrični režim rada pod dosada uvažanim pretpostavkama o linearnosti magnetskog kruga  $i_0 = \psi_0 = e_0 = 0$  i za  $i_f = const$ , iz (2.38) slijedi  $p\psi_d = p\psi_q = 0, p\gamma = \omega_N$ :

$$\begin{aligned} -e_d &= -\psi_q \omega_N + ri_d = -x_q i_q + ri_d \\ -e_q &= \psi_d \omega_N + ri_q = x_d i_d + E_0 + ri_d \end{aligned} \quad (2.50)$$

pri čemu je  $E_0 = M_{afd} \omega_N i_f$  elektromotorna sila inducirana strujom rotorskog namota (osnovnim magnetskim tokom). Položaj vektora  $E_0$  određuje se iz uvjeta praznog hoda  $i_f \neq 0; i_d = i_q = 0$ . Slijedi da vektor elektromotorne sile uzbude praznog hoda leži na  $-q$  osi odnosno za  $\pi/2$  kasni u odnosu na  $d$  os. Ulančeni tok faze  $a$  izražen preko toka praznog hoda koji se nalazi u  $d$  osi u kojoj djeluje uzbudni namot:

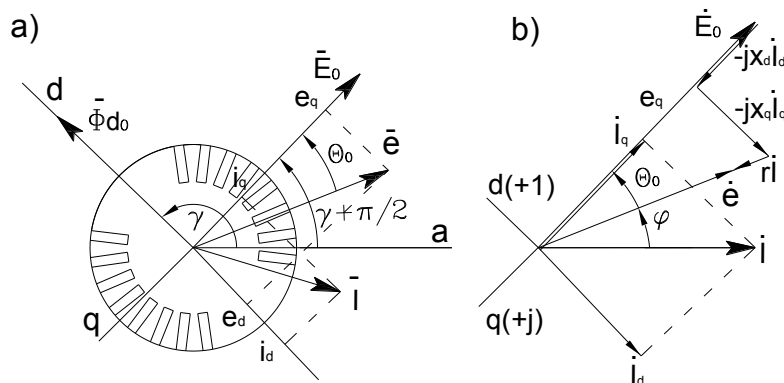
$$\psi_a = M_{afd} i_f \cos\gamma = \psi_{d0} \cos\gamma. \quad (2.51)$$

Vektor elektromotorne sile praznog hoda u fazi  $a$  inducira elektromotornu silu je:

$$e_a = -p\psi_a = \psi_{d0} \omega_N \cos(\gamma - \frac{\pi}{2}) = E_0 \cos(\gamma - \frac{\pi}{2}). \quad (2.52)$$

Položaj vektora prikazan je dijagramima na slici 2.16.

Za stacionarno stanje u prigušnom namotu ne inducira se elektromotorna sila. obzirom da nema promjene ulančenog toka (2.5c) i (2.5d).



Slika 2.16 Vektorski dijagram sinkronog stroja za stacionarni režim rada a) dijagram koji opisuje položaj vektora; b) dijagram u kompleksnoj ravnini.

### 2.4.1. Jednadžba momenata i elektromagnetski moment u stacionarnom stanju

Prema jednadžbi (2.6) zbroj svih momenata u nekom rotacijskom sustavu mora biti jednak zamašnim masama tog sustava. Mehanički moment  $M_m$  u generatorskom radu sinkronog stroja mora svladati moment sila magnetskog polja  $M_\psi$  i moment inercije kako bi u stacionarnom stanju rotor generatora rotirao sinkronom brzinom:

$$M_m = M_\psi + Jp\omega. \quad (2.53)$$

Izraz za elektromagnetski moment nakon transformacije koordinata postaje:

$$M_\psi = \frac{P_\psi}{\omega_N} = \frac{3}{2} [e_d i_d + e_q i_q + r(i_d^2 + i_q^2)] + 3(e_0 i_0 + i_0^2 r). \quad (2.54)$$

$e_d$  i  $e_q$  u stacionarnom režimu određeni su u (2.50). Za simetričan sustav  $e_0 = -ri_0$  ( $p\psi_0 = 0$ ), pa je elektromagnetski moment dan izrazom :

$$M_\psi = \frac{P_\psi}{\omega_N} = \frac{3}{2} (\psi_q i_d - \psi_d i_q). \quad (2.55)$$

Slijedi da je mehanički moment sinkronog stroja u generatorskom radu:

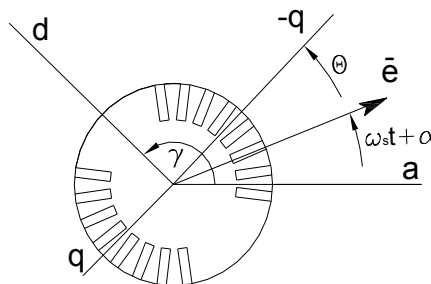
$$M_m = Jp\omega_N + \frac{3}{2} (\psi_q i_d - \psi_d i_q). \quad (2.56)$$

### 2.4.2. Jednadžbe sinkronog stroja za simetričan sustav u prijelaznim stanjima sinkronog stroja

Ukoliko je  $\omega r \neq 0$  različito od nule sustav jednadžbi dobiva složeni oblik u kojem se pojavljuju i elektromagnetska sila rotacije. Na slici 2.17 vidi se da vektor  $\bar{e}_o$  leži na  $q$  osi i orijentiran je u  $q$  smjeru.

Ako je stroj priključen na krutu mrežu onda vektor  $\bar{e}$  prema osi, a ima kut  $\omega_N t + \alpha$ . Kut  $\Theta$  koji vektor  $\bar{e}$  zatvara s  $q$  osi slika 2.17 je:

$$\begin{aligned} \Theta &= \gamma - \omega_N t - \alpha - \frac{\pi}{2}; \\ p\Theta &= p\gamma - \omega_N; \\ p^2\Theta &= p^2\gamma. \end{aligned} \quad (2.57)$$



Slika 2.17 Određivanje kuta  $\theta$



## 2.5.2. Svođenje veličina uzbuđnog i prigušnog namota

Za postavljanje jednoznačnog sustava pomoću kojeg će se moći u daljnjem računu predvidjeti ponašanje sinkronog stroja u radu potrebno je svesti elemente strujnih krugova ili na statorsku ili na rotorsku stranu. Kako su izabrane bazne vrijednosti statorskih veličina koje opisuju nazivne parametre stroja i sve ostale veličine reduciraju se na stator.

### 2.5.2.1. Svođenje struje uzbuđnog i prigušnog namota rotora na statorsku stranu sustavom baznih veličina koje je uveo Park

Postupak uvođenja jediničnih vrijednosti (normiranje jednadžbi) sastoji se u tome da se svaka fizička veličina reducira na jediničnu preko odgovarajuće bazne veličine. Naprijed su postavljene bazne veličine statora dok se za rotor uzima neka zajednička fizikalna veličina. Zato se za baznu veličinu rotorske struje uzima ona struja praznog hoda koja će na izvodima statorskog namota inducirati bazni napon:

$$\begin{aligned} e_B &= M_{afd} \omega_B i_{fB}; \\ e_{fB} &= r_f i_{fB} \\ \psi_{fB} &= L_f i_{fB}. \end{aligned} \quad (2.60a)$$

Ako normiramo sustav od  $n$  strujnih krugova onda za  $x$ -ti namot imamo:

$$\begin{aligned} e_{xB} &= \psi_{xB} \omega_B; \\ \psi_{xB} &= L_{xB} i_{xB}; \\ z_{xB} &= L_{xB} \omega_B; \\ S_{xB} &= e_{xB} i_{xB} = S_{1B}. \end{aligned} \quad (2.60b)$$

Normirati ćemo jednadžbe iz (2.39a) i (2.39b) na slijedeći način:

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + \left(\frac{3}{2}\right) M_{afd} \left(\frac{2}{3}\right) i_f + \sum_{k=1}^n \left(\frac{3}{2}\right) m_{akd} \left(\frac{2}{3}\right) i_{kd} \\ \psi_f &= \frac{3}{2} M_{afd} i_d + \left(\frac{3}{2}\right) L_f \left(\frac{2}{3}\right) i_f + \sum_{k=1}^n \left(\frac{3}{2}\right) M_{fkd} \left(\frac{2}{3}\right) i_{kd}; \\ \psi_{nd} &= \frac{3}{2} m_{and} i_d + \left(\frac{3}{2}\right) M_{fnd} \left(\frac{2}{3}\right) i_f + \sum_{k=1}^n \left(\frac{3}{2}\right) M_{nkd} \left(\frac{2}{3}\right) i_{kd} + \left(\frac{3}{2}\right) L_{nd} \left(\frac{2}{3}\right) i_{nd}. \end{aligned} \quad (2.61)$$

Ako su izabrane veličine baznog toka statora  $i_b, \psi_b, L_b$ ; baznog toka rotora  $i_{fb}, \psi_{fb}, L_{fb}$  i  $n$ -tog prigušnog kruga  $i_{nb}, \psi_{nb}, L_{nb}$  izraz :

$$\begin{aligned} \underline{\psi}_d &= \underline{L}_d \underline{i}_d + \underline{M}_{afd} \underline{i}_f + \sum_{k=1}^n \underline{m}_{akd} \underline{i}_{kd}; \\ \underline{\psi}_f &= \underline{M}_{afd} \underline{i}_d + \underline{L}_f \underline{i}_f + \sum_{k=1}^n \underline{M}_{fkd} \underline{i}_{kd}; \\ \dots\dots\dots \\ \underline{\psi}_{nd} &= \underline{m}_{and} \underline{i}_d + \underline{M}_{fnd} \underline{i}_f + \sum_{k=1}^{n-1} \underline{M}_{nkd} \underline{i}_{kd} + \underline{L}_{nd} \underline{i}_{nd}. \end{aligned} \quad (2.62)$$

Normirani parametri sada postaju:

$$\begin{aligned}
\underline{M}_{afd} &= \frac{3}{2} \frac{M_{afd}}{L_B} \begin{pmatrix} \frac{2}{3} i_{fB} \\ i_B \end{pmatrix}; \underline{m}_{akd} = \frac{3}{2} \frac{m_{akd}}{L_B} \begin{pmatrix} \frac{2}{3} i_{kB} \\ i_B \end{pmatrix}; \\
\underline{M}_{fkd} &= \frac{3}{2} \frac{M_{fkd}}{L_B} \begin{pmatrix} \frac{4}{9} i_{kb} i_{fB} \\ i_B \end{pmatrix}; \underline{M}_{nkd} = \frac{3}{2} \frac{M_{nkd}}{L_B} \begin{pmatrix} \frac{4}{9} i_{nb} i_{kB} \\ i_B \end{pmatrix}; \\
\underline{L}_f &= \frac{3}{2} \frac{L_f}{L_B} \begin{pmatrix} \frac{4}{9} i_{fB}^2 \\ i_B^2 \end{pmatrix}; \underline{L}_{nd} = \frac{3}{2} \frac{L_{nd}}{L_B} \begin{pmatrix} \frac{4}{9} i_{nB}^2 \\ i_B^2 \end{pmatrix}.
\end{aligned} \tag{2.63}$$

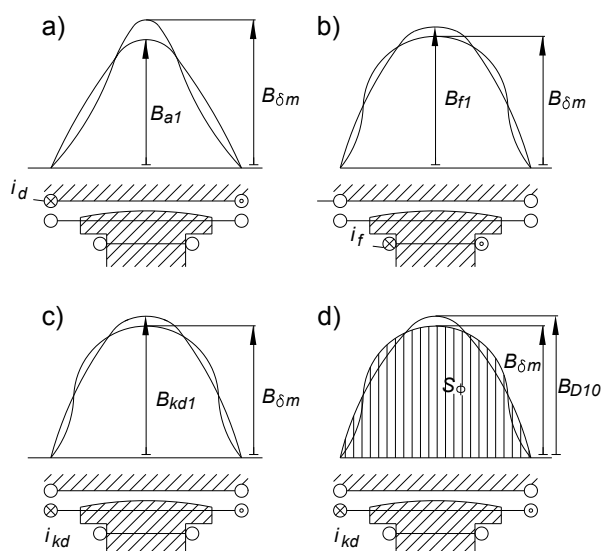
Dalje u izrazima za ulančene elektromotorne sile uzbuđnog i prigušnog namota normiramo tokove i aktivne otpore preko:

$$\begin{aligned}
\underline{e}_f &= \frac{e_f}{e_B} \begin{pmatrix} i_{fB} \\ \frac{3}{2} i_B \end{pmatrix}; \underline{\psi}_f = \frac{\psi_f}{\psi_{fB}} = \frac{\psi_f}{\psi_B} \begin{pmatrix} i_{fB} \\ \frac{3}{2} i_B \end{pmatrix}; \underline{r}_f = \frac{r_f}{Z_{fB}} = \frac{r_f}{Z_B} \begin{pmatrix} i_{fB}^2 \\ \frac{3}{2} i_B^2 \end{pmatrix}; \\
\underline{\psi}_{1d} &= \frac{\psi_{1d}}{\psi_{1B}} = \frac{\psi_{1d}}{\psi_B} \begin{pmatrix} i_{1B} \\ \frac{3}{2} i_B \end{pmatrix}; \underline{r}_{11d} = \frac{r_{11d}}{Z_{1B}} = \frac{r_{11d}}{Z_B} \begin{pmatrix} i_{1B}^2 \\ \frac{3}{2} i_B^2 \end{pmatrix}; \underline{r}_{1nd} = \frac{r_{1nd}}{Z_{1nB}} = \frac{r_{1nd}}{Z_B} \begin{pmatrix} i_{1b} i_{fB} \\ \frac{3}{2} i_B^2 \end{pmatrix} itd.
\end{aligned} \tag{2.64}$$

Taj sustav baznih vrijednosti ima široku primjenu i koristit će se pri definiranju parametara stroja s jednim namotom na rotoru. Treba uočiti da je u ovom slučaju sveza između statora i rotora dana preko  $\underline{M}_{afd} = \underline{x}_{afd}$ .

### 2.5.2.2. Načini svodenje struje uzbuđnog i prigušnog namota rotora na statorsku stranu

Za jediničnu struju uzbuđnog namota potrebno je izabrati onu struju koja će u zračnom rasporu ulančiti tok identičan toku koji ulančuje osnovni harmonik protjecanja armaturnog namota (reakcije armature) (slika 2.18). Nazivna struja uzbuđnog namota nije bazna struja  $I_{Nr} \neq I_B \neq 1 \text{ p.u.}$ . Bazna rotorska struja bit će uzbuđna struja praznog hoda potrebna za stvaranje polja koje će u statorskom namotu inducirati nazivni napon jednak  $x_{ad} i_B$ .



**Slika 2.18** Određivanje koeficijenta magnetskog polja koji su jednaki omjeru amplitude prvog harmonika i vrijednosti maksimalne indukcije u zračnom rasporu u direktnoj osi inducirane: a) strujom statorskog namotaja  $k_{d1} = B_{a1}/B_{\delta m}$ ; b) strujom uzbuđnog namotaja  $k_{f1} = B_{f1}/B_{\delta m}$ ; c) strujom prigušnog namotaja  $k_{kd1} = B_{kd1}/B_{\delta m}$ ; d) strujom prigušnog namotaja u  $d$  osi, ali se amplituda prvog harmonika polja  $B_{D10}$  određuje iz uvjeta jednakosti prvog harmonika i efektivnog toka (ploha  $S_{\phi}$  jednaka  $\frac{2}{\pi} B_{D10}$  pa  $k_{kD1} = B_{D10}/B_{\delta m}$ .

Omjer  $\frac{i_{fB}}{i_B}$  izračunava se iz jednakosti prvih harmonika indukcije u zračnom rasporu.

Amplituda prvog harmonika polja stvorenog uzbuđnom strujom  $i_{fB}$  jednaka je:

$$B_{f1} = \frac{(i_{fB} w_f k_{wf}) \mu_0}{\delta \cdot k_{\delta}} k_{f1}, \quad (2.65)$$

gdje je:

$k_{wf}$  - faktor uzbuđnog namota;

$\delta$  – zračni raspor (mm);

$k_{\delta}$  - koeficijent zračnog raspora;

$w_f$  – broj zavoja uzbuđnog namota po polu;

$k_{f1} = \frac{B_{f1}}{B_{\delta m}}$  – omjer amplitude prvog harmonika i maksimalne indukcije.

Amplituda prvog harmonika polja reakcije statora stvorena od amplitude struje statora  $i_B$ :

$$B_{a1} = \frac{1,35(i_B w_a k_{wa})}{\sqrt{2} \cdot p} \frac{\mu_0}{\delta \cdot k_{\delta}} k_{d1}, \quad (2.66)$$

gdje je:

$k_{wa}$  - faktor statorskog namota;

$k_{\delta}$  - koeficijent zračnog raspora;

$w_a$  – broj zavoja faznog namota po paralelnoj grani;

$k_{d1} = \frac{B_{a1}}{B_{\delta m}}$  – omjer amplitude prvog harmonika  $d$  osi i maksimalne indukcije.

Za  $B_{f1} = B_{a1}$  vrijede slijedeći koeficijent svođenja uzbudnog namota po struji:

$$k_{if} = \frac{i_{fB}}{i_B} = 1,91 \frac{w_a k_{wa}}{2p \cdot w_f} \frac{k_{d1}}{k_{f1}}. \quad (2.67)$$

Prigušni namot promatramo preko ekvivalentnog namota koji ima korak jednak polnom koraku i čija magnetska os leži u  $d$  osi. Primjenjujući analogni postupak dobivamo:

$$k_{ikd} = \frac{i_{prB}}{i_B} = 1,91 \frac{w_a k_{wa}}{2p \cdot w_{pr}} \frac{k_{d1}}{k_{kd1}}, \quad (2.68)$$

gdje je:

$k_{kd1}$  - omjer amplituda prvog harmonika uzbudnog polja prigušnog namota kada kontura prigušnog namota ima korak jednak polnom koraku, prema maksimalnoj vrijednosti tog polja. (praktično  $k_{d1} \approx k_{f1}$ )

$w_{pr}$  – broj zavoja prigušnog namota rotora po polu (praktično  $w_{pr} = 1$ ).

Za tako izabrane bazne struje rotora sveza je dana na način da je  $\underline{M}_{afd} = \underline{x}_{ad}$ . Taj način svođenja pojavljuje se pod nazivom „sustav  $x_{ad}$ “ i on će se koristiti za sustave u kojima se razmatra više namota na rotoru (kada postoji prigušni namot rotora).

Sličnim načinom mogu se svoditi veličine preko zajedničkog protjecanja ili sustavom jednakih međuinduktiviteta. Prikaz koeficijenata svođenja za sva tri navedena sustava prikazan je u tablici 2.1. Ta tri sustava su najčešće korištena u literaturi. Na slici 2.18 prikazani su oblici funkcija zračnog raspora koji uzrokuju razlike koeficijenata koji se nalaze u izrazima.

**Tablica 2.1 Sustavi svođenja baznih struja**

	Sustav $x_{ad}$	Sustav protjecanja	Sustav jednakih međuinduktiviteta
$i_{fB}/i_B$	$1,91 \frac{w_a k_{wa}}{2p \cdot w_f} \frac{k_{d1}}{k_{f1}}$	$\frac{1,5}{2} \frac{w_a k_{wa}}{p \cdot w_f}$	$\frac{1,5}{2} \frac{w_a k_{wa}}{p \cdot w_f} \frac{k_{D1}}{k_{D0}}$
$i_{kB}/i_B$	$1,91 \frac{w_a k_{wa}}{2p w_{pr}} \frac{k_{d1}}{k_{kd1}}$	$\frac{1,5}{2} \frac{w_a k_{wa}}{p w_{pr}}$	$\frac{1,5}{2} \frac{w_a k_{wa}}{p w_{pr}} \frac{k_{f1}}{k_{D0}}$

Za tako izabrane bazne struje rotora veza je dana preko  $\underline{M}_{afd} = \underline{x}_{ad}$ . Taj način svođenja pojavljuje se pod nazivom „sustav  $x_{ad}$ “ i on će se koristiti za sustave u kojima se razmatra više namota na rotoru (kada postoji prigušni namot rotora).

Kada se protjecanje namota statora određuje preko pravokutnog vala kako je slučaj u američkoj literaturi onda je reakcija statora po polu jednaka  $\frac{2,12(I w_a k_{wa})}{2p}$ , odnosno za  $\frac{4}{\pi}$  je manja u odnosu na prvi harmonik protjecanja  $\frac{2,7(I w_a k_{wa})}{2p}$ .



### 2.5.3. Jednadžbe sinkronog stroja bez prigušnog namota rotora u relativnim vrijednostima

Za stroj koji na rotoru ima samo jedan namot imamo slijedeći sustav jednadžbi:

$$\begin{aligned}
 -e_d &= (pL_d + r)i_d - L_q \omega_N (1+s)i_q + M_{afd} i_f; \\
 -e_q &= L_d \omega_N (1+s)i_d + (pL_q + r)i_q + M_{afd} \omega_N (1+s)i_f; \\
 e_f &= p \frac{3}{2} M_{afd} i_d + (pL_f + r_f)i_f; \\
 M_m &= J \omega_N p s - \frac{3}{2} [(L_d i_d + M_{afd} i_f)i_q - L_d i_d i_q]
 \end{aligned} \tag{2.69a}$$

U sustavu (2.69) induktivni otpori su:

$$L_d \omega_N = x_d; L_q \omega_N = x_q; M_{afd} \omega_N = x_{afd}; L_f \omega_N = x_f.$$

Koeficijenti koji karakteriziraju rasipanje energije u strujnom krugu su:

$\rho_d = \frac{r}{x_d}; \rho_q = \frac{r}{x_q}; \rho_f = \frac{r_f}{x_f}$ . Iznosi vrijednosti ovih rasipanja su veoma mali i kod većih generatora rasipanja uzbuđenog namota su ispod 1%.

Uvodi se još jedan koeficijent  $\mu = \frac{3}{2} \frac{x_{afd}^2}{x_d x_f}$  - koeficijent magnetske sveze. Taj koeficijent uveden je prema analogiji s koeficijentom koji opisuje svezu dva induktiviteta  $k = \frac{M_{12}^2}{L_1 L_2}$  gdje je  $M_{12}$  međuinuktivitet i za  $M_{12} = L_1 = L_2$ ;  $k=1$ .  $k$  je koeficijent rasipanja dva namota jednak je  $\sigma = 1 - k$ . Za  $k=1$  nema rasipnog toka pa  $\sigma=0$ . Obzirom da namoti sinkronog stroja  $L_d$  i  $L_f$  imaju međuinuktivitet  $\frac{3}{2} M_{afd}$  i  $M_{afd}$  nakon transformacije koordinata onda je  $\mu$  upravo rasipanje tokova ovih namota.

Sustav (2.69a) može se napisati i kao:

$$\begin{aligned}
 -e_d &= \left(\frac{p}{\omega_N} + \rho_d\right) x_d i_d - (1+s) x_q i_q + \frac{p}{\omega_N} x_{afd} i_f; \\
 -e_q &= (1+s) x_d i_d + \left(\frac{p}{\omega_N} + \rho_q\right) x_q i_q + (1+s) x_{afd} i_f; \\
 e_f \frac{x_{afd}}{x_f} &= \mu \frac{p}{\omega_N} x_d i_d + \left(\frac{p}{\omega_N} + \rho_f\right) x_{afd} i_f; \\
 M_m &= J \omega_N p s - \frac{3}{2} [(L_d i_d + x_{afd} i_f)i_q - L_d i_d i_q]
 \end{aligned} \tag{2.69b}$$

Svođenje (2.69b) na relativne vrijednosti se vrši preko uzbuđne bazne struje koja je potrebna za induciranje baznog napona na priključcima faznog namota statora u praznom hod.

$$e_B = x_{aB} i_{fB}; e_{fB} = i_{fB} r_f. \tag{2.70a}$$

Bazni napon uzbuđe je jednak:

$$e_{fB} \frac{x_{afd}}{r_f} = e_{fB} \frac{x_{afd}}{x_f \rho_f} = e_B \cdot \quad (2.70b)$$

Bazni tok namota uzbude:

$$\psi_{fB} = L_f i_{fB} \cdot \quad (2.70c)$$

$$\text{Snaga } P_B = \frac{3}{2} e_B i_B = M_B \omega_B = M_B \omega_N \cdot \quad (2.70d)$$

Operator  $\frac{p}{\omega_N} = \frac{d}{d(t\omega_N)} = \frac{d}{d\tau}$  označava diferenciranje po sinkronom vremenu.

Zamjenom veličina iz (2.70 a-d) u (2.69b) i uzimajući u obzir da je

$$\underline{E}_d = \underline{x}_d \underline{i}_d; \underline{E}_q = \underline{x}_q \underline{i}_q; \underline{E}_0 = \frac{E_0}{e_B} = \frac{X_{af} i_f}{e_B} = \underline{i}_f; H_j = \frac{J\omega_N^2}{S_B}, \text{ dobiva se:}$$

$$\begin{aligned} -\underline{e}_d &= (p + \rho_d)\underline{E}_d - (1 + s)\underline{E}_q + p\underline{E}_0; \\ -\underline{e}_q &= (1 + s)\underline{E}_d + (p + \rho_q)\underline{E}_q + (1 + s)\underline{E}_0; \\ \underline{e}_f \underline{\rho}_f &= \mu p \underline{E}_d + (p + \rho_f)\underline{E}_0; \end{aligned} \quad (2.71)$$

$$\underline{M}_m = H_j p s - \frac{3}{2} \left[ \frac{\underline{E}_q \underline{E}_0}{\underline{x}_q} - \left( \frac{1}{\underline{x}_q} - \frac{1}{\underline{x}_d} \right) \underline{E}_d \underline{E}_q \right].$$

Izrazi za ulančene tokove

$$\begin{aligned} \underline{\psi}_d &= \underline{E}_d + \underline{E}_0 = \underline{E}_d + \underline{i}_f; \\ \underline{\psi}_q &= \underline{E}_q; \\ \underline{\psi}_f &= \mu \underline{E}_d + \underline{E}_0 = \mu \underline{E}_d + \underline{i}_f. \end{aligned} \quad (2.72)$$

Vidi se da su inducirani napon uzbude  $E_0$  i uzbudna struja  $i_f$  u relativnim vrijednostima isti.

Konstanta  $H_j$  je jednaka baznom vremenu  $\tau$  za koje se klizanje s promijeni od -1 do 0. Obrazloženje fizikalne slike je slijedeće. Rotor se prilikom puštanja u rad ubrzava od klizanja  $s = -1$  do  $s = 0$  momentom koji je jednak baznom. Vrijeme potrebno da rotor dostigne sinkronu brzinu je vrijeme  $\tau$  u električnim radijanima. Iz (2.71)  $1 = H_j p s$ , pa nakon

integriranja  $\frac{\tau}{H_j} = s \Big|_{-1}^0$  slijedi  $H_j = \tau$ . Vremenska konstanta u sekundama jednaka je:

$$H_j = 2,74 \frac{mD^2 n_N^2}{S_B} 10^{-6}, \quad (2.73),$$

gdje je:

$mD^2$  - moment zamašnih masa u  $\text{kgm}^2$ ,

$n_N$  - sinkrona brzina vrtnje 1/min

$S_B$  - nazivna prividna snaga stroja u kVA

#### 2.5.4. Prijelazni magnetski otpor sinkronog stroja-reaktancija $x'_d$ i $x'_q$

Neka se sinkroni stroj nalazi u nekom prijelaznom režimu. Ako zanemarimo radni otpor uzbude ( $\rho_f = 0$ ) jednadžba uzbuđenog namota iz (2.71) dobiva oblik:

$$0 = \mu p E_d + p E_0, \quad (2.74)$$

iz kojeg slijedi da pri prijelaznom procesu:  $\Delta E_0 = -\mu \Delta E_d$ , pri čemu za  $t=0$ ,  $\Delta E_0 = \Delta E_d = 0$ ,

promjena ulančenog toka u direktnoj osi:  $\Delta \psi_d = \Delta E_d + \Delta E_0 = \sigma x_d \Delta i_d \Rightarrow \frac{\Delta \psi_d}{\Delta i_d} = \sigma x_d$ . Namot

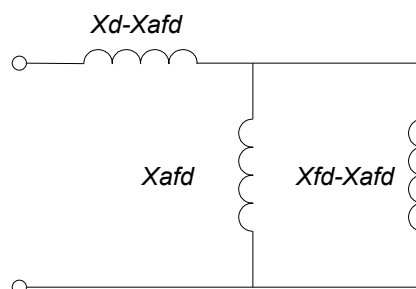
statora u direktnoj osi u prijelaznom režimu ima induktivni otpor  $x'_d = \sigma x_d$ . Kako je rasipanje manje od 1 to je i  $x'_d < x_d$ . Vidi se da vrijednost aktivnog otpora uzbudnog namota, bila ona jednaka nuli ( $r_f = 0$ ) ili različita od nule, ne utječe na početnu vrijednost struje u prijelaznom režimu. Fizikalna slika prijelazne reaktancije predstavlja induktivni otpor u direktnoj osi koji se suprotstavlja prodiranju toka kroz kratko spojeni uzbudni namot pri prijelaznom procesu, odnosno to je magnetski otpor koji će ograničiti vrijednost struje u kratko spojenom

statorskom namotu prilikom prijelaznih procesa:  $\mu = 1 - \sigma = \frac{x_d - x'_d}{x_d} = \frac{x^2_{afd}}{x_d x_f}$  (p.u.)

Nakon sređivanja gornje jednakosti dobiva se izraz:

$$x'_d = (x_d - x_{afd}) + \frac{1}{\frac{1}{x_{afd}} + \frac{1}{x_f - x_{afd}}}. \quad (2.75)$$

Taj izraz opisuje nadomjesnu shemu sinkronog stroja s jednim namotom na rotoru smještenom u  $d$  osi slika 2.19. u stacionarnom stanju.



**Slika 2.19** Nadomjesna shema sinkronog stroja s jednim namotom na rotoru u  $d$  osi u stacionarnom stanju

Može se pokazati da je pri iznenadnom trofaznom kratkom spoju, koji je nastao u trenutku kada je stroj imao nazivnu struju uzbuđene i nazivni napon, struja direktne osi simetričnog sustava:

$$i'_d = \frac{1}{x'_d}. \quad (2.76)$$

Za slučaj kada se u  $q$  osi na rotoru ne nalazi namot možemo zaključiti da će prijelazna reaktancija biti jednaka sinkronoj reaktanciji  $x'_q = x_q$ .

Izraz  $x_d - x_{afd}$  predstavlja rasipnu reaktanciju statorskog faznog namota. Kako je rasipna reaktancija bitna za ograničavanje prijelaznih pojava u početnom trenutku, faktori koji utječu na rasipanja namota su detaljnije opisani u poglavlju 2.6. Rasipna reaktancija statorskog namota sadržana je u svim reaktancijama sustava (direktni i inverzni) osim u nultom i za sve procese (stacionarni i prijelazni). Jedino je reaktancija nultog sustava manja od rasipne, o čemu će također biti riječi u tom poglavlju.

### 2.5.5. Jednadžbe sinkronog stroja s uzбудnim i prigušnim namotom rotora u relativnim vrijednostima

Kod sinkronih strojeva prigušni namot je postavljen ili u utore u kojima je smješten i uzbudni namot (generatori s cilindričnim rotorom) ili na polnom stopalu generatora s istaknutim polovima. On nije simetričan kao kavez asinkronog stroja nego je koncentriran u zoni oko  $q$  osi (strojevi s cilindričnim rotorom) i zoni oko  $d$  osi (istaknuti polovi). Postoje i konstrukcije kod kojih prigušni namoti na polovima nisu međusobno povezani (rešetka). Bez obzira na detalje konstrukcije električki promatrano u realnom stroju to je namot s  $n$  strujnih krugova.

Sustav jednadžbi sinkronog stroja s prigušnim namotom pretpostavlja da su uvedena određena pojednostavljenja u geometriji ovog namota (idealni stroj), odnosno da je po jedan ekvivalentan namot s korakom jednakim polnom koraku postavljen tako da im se magnetska os poklapa s  $d$  odnosno  $q$  osi. Jednadžba (2.59b) napisana za sustav s dva ekvivalentna namota glasi:

$$\begin{aligned}
 -e_d &= \frac{d\psi_d}{dt} - (1+s)\omega_N\psi_q + ri_d; \\
 -e_q &= (1+s)\omega_N\psi_d + \frac{d\psi_q}{dt} + ri_q; \\
 e_f &= p\psi_f + r_f i_f; \\
 0 &= p\psi_{kd} + r_{kd} i_{kd}; \\
 0 &= p\psi_{kq} + r_{kq} i_{kq}; \\
 M_m &= H_j ps + [\psi_q i_d - \psi_d i_q]
 \end{aligned} \tag{2.77}$$

gdje:

$$\begin{aligned}
 \psi_d &= L_d i_d + M_{afd} i_f + m_{akd} i_d; \\
 \psi_q &= L_q i_q + m_{akq} i_q; \\
 \psi_f &= \frac{3}{2} M_{afd} i_d + L_f i_f + M_{akd} i_{kd}; \\
 \psi_{kd} &= \frac{3}{2} m_{akd} i_d + M_{fnd} i_f + L_{kd} i_{kd}; \\
 \psi_{kq} &= \frac{3}{2} m_{akq} i_q + L_{kq} i_{kq}.
 \end{aligned} \tag{2.78}$$

Sustav jednadžbi u relativnim jedinicama se reducira preko „sustava  $x_{ad}$ “ koji je pogodniji u slučaju kada na rotoru imamo prigušni namot.

$$\begin{aligned}
 -e_d &= p\psi_d - (1+s)\psi_q + ri_d; \\
 -e_q &= (1+s)\psi_d + p\psi_q + ri_q; \\
 e_f &= p\psi_f + r_f i_f; \\
 0 &= p\psi_{kd} + r_{kd} i_{kd}; \\
 0 &= p\psi_{kq} + r_{kq} i_{kq}; \\
 M_m &= H_j ps + [\psi_q i_d - \psi_d i_q]
 \end{aligned} \tag{2.79}$$

Izrazi za ulančene tokove u relativnim vrijednostima su:

$$\begin{aligned}
\psi_d &= x_d i_d + x_{afd} i_f + x_{akd} i_k; \\
\psi_q &= x_q i_q + x_{akq} i_k; \\
\psi_f &= x_{afd} i_d + x_f i_f + x_{akd} i_k; \\
\psi_{kd} &= x_{akd} i_d + x_{fkd} i_f + x_{kd} i_k; \\
\psi_{kq} &= x_{akq} i_q + x_{kq} i_k.
\end{aligned} \tag{2.80}$$

Da bi se dobila slika o pojavama koje opisuje taj sustav uputno je razmotriti jedno idealizirano, ali u praksi primjenjivo razmatranje. Niz prijelaznih procesa može biti opisano na način da se zanemari radni otpor statorskog namota  $r = 0$ . U tom slučaju i u slučaju da je napon  $e = \text{const}$  iz prve dvije jednačbe (2.79) dobivamo:

$$e_d = \psi_q; -e_q = \psi_d. \tag{2.81}$$

Ulančeni tokovi namota statora za  $r = 0$  ovise samo o naponu na stezaljkama generatora. Izrazi su slični onima za stacionarno stanje s tom razlikom što kut  $\theta$  u izrazima za  $e_d$  i  $e_q$  nije konstantan nego ovisi o karakteru prijelaznog procesa.

Neka određeni prijelazni proces u statoru izazove naglu promjenu toka:

$$\begin{aligned}
\psi_d - \psi_{d0} &= -(e_q - e_{q0}), \\
\psi_q - \psi_{q0} &= -(e_d - e_{d0}),
\end{aligned}$$

koji djeluje tako da se tokovi mogu neprekinuto mijenjati u vremenu. Zanemari li se promjena brzine ( $1 + s \approx 1$ ) i postojanje viših harmonika uz  $r = 0$  dobiti će se tok nepromjenjive amplitude na statoru. Ukoliko  $r \neq 0$  onda je tok prigušen u vremenu. Odgovarajuće tokove  $\psi_q, \psi_d$  sada čine tok osnovne učestalosti u rotoru i aperiodički i tok dvostruke učestalosti u statoru. Ovo vodi zaključku da će struje dobivene iz jednačbi (2.79) prilikom prijelaznog procesa biti nepravilne.

Iz dosada uvedenih pojednostavljenja slijedi da prijelazni procesi u namotima koji se nalaze u  $d$  osi ne utječu na one u osi  $q$ , pa se problem može rješavati preko dva odvojena sustava za namote koji se nalaze u  $d$  odnosno  $q$  osi. Da bi se u potpunosti opisala prijelazna pojava neophodno je poznavati i početne uvjete. To znači da je za definiranje prijelaznog procesa bitno poznavati stanje u kojem se stroj nalazio neposredno prije događaja koji je izazvao prijelazni proces. Zbog toga se može pisati za:

$$e_d = e_{d0} + \Delta e_d; \psi_d = \psi_{d0} + \Delta \psi_d; i_d = i_{d0} + \Delta i_d \dots$$

gdje su:

$e_{d0}, \psi_{d0}, i_{d0}$ : vrijednosti ems, toka, struje određeni početnim stanjem ili pretpostavljenim veličinama parametara pri  $\tau = 0$ ,

$\Delta e_d, \Delta \psi_d, \Delta i_d$ : odstupanja od početnih vrijednosti koja se javljaju u funkciji vremena, no za  $\tau = 0$  ona su jednake nuli.

Sustav jednačbi iz (2.79) napisan preko promjena veličina je:

$$\begin{aligned}
-\Delta e_d &= p\Delta\psi_d - (1+s)\Delta\psi_q + r\Delta i_d; \\
-\Delta e_q &= (1+s)\Delta\psi_d + p\Delta\psi_q + r\Delta i_q; \\
\Delta e_f &= p\Delta\psi_f + r_f\Delta i_f; \\
0 &= p\Delta\psi_{kd} + r_{kd}\Delta i_{kd}; \\
0 &= p\Delta\psi_{kq} + r_{kq}\Delta i_{kq}.
\end{aligned} \tag{2.82}$$

U praksi se takvi sustavi rješavaju prevođenjem funkcije originala  $\varphi(\tau)$  u sliku  $\varphi(p)$  preko Carson-Heavisideove transformacije:

$$\varphi(p) = p \int \varepsilon^{-p\tau} \varphi(t) d\tau.$$

Jednadžbe sustava imaju oblik sličan onima od prije samo se sada umjesto u funkciji vremena javljaju u funkciji kompleksne varijable  $p$  koja se pojavljuje kao množitelj. Za  $\tau = 0$  funkcije moraju imati početni oblik.

Najprije će se postaviti problem za slučaj kada je klizanje konstantno. Promjena ulančenog toka osi  $d$  ovisi o promjenama struje osi  $d$ , struje uzbudnog i prigušnog namota (promjena ovog toka je najinteresantnija za proučavanje obzirom da se stroj promatra kao dio elektroenergetskog sustava):

$$\Delta\Psi_d = x_d\Delta i_d + x_{afd}\Delta i_f + x_{akd}\Delta i_{kd}; \tag{2.83a}$$

$$\Delta e_f = px_{afd}\Delta i_d + (px_f + r_f)\Delta i_f + px_{akd}\Delta i_{kd}; \tag{2.83b}$$

$$0 = px_{akd}\Delta i_d + px_{fkd}\Delta i_f + (px_{kd} + r_{kd})\Delta i_{kd}. \tag{2.83c}$$

Jednadžbe (2.83a-c) se nazivaju karakterističnom jednadžbom sustava. Iz ovih algebarskih jednadžbi izračunava se promjena struje  $d$  osi preko:

$$\Delta i_d = \frac{\Delta\psi_d M_1(p) - \Delta e_f M_2(p)}{D(p)}, \tag{2.84}$$

gdje su:

$D(p)$  – determinanta sustava (2.83)

$$D(p) = \begin{vmatrix} x_d & x_{afd} & x_{akd} \\ px_{afd} & (px_f + r_f) & px_{akd} \\ px_{akd} & px_{fkd} & (px_{kd} + r_{kd}) \end{vmatrix}$$

$M_1$  i  $M_2$  -minori sustava (2.83)

$$M_1(p) = (px_f + r_f)(px_{akd} + r_{kd}) - p^2 x_{fkd}^2;$$

$$M_2(p) = x_{afd}(px_{kd} + r_{kd}) - px_{akd}x_{fkd}.$$

Kada se izračuna struja može se odrediti i promjena toka kao:

$$\Delta\psi_d = \Delta i_d X_d(p) - \Delta e_f G(p); \tag{2.85}$$

$X_d(p)$  operator induktivnog otpora  $d$  osi (operatorska reaktancija):

$$X_d(p) = \frac{D(p)}{M_1(p)} = x_d - \frac{p^2(x_{kd}x_{afd}^2 - 2x_{fkd}x_{afd}x_{akd} + x_f x_{akd}^2)}{p^2(x_{kd}x_f - x_{fkd}^2) + p(x_{kd}r_f + x_f r_{kd}) + r_f r_{kd}} + \frac{p^2(x_{afd}^2 r_{kd} + r_f x_{akd}^2)}{p^2(x_{kd}x_f - x_{fkd}^2) + p(x_{kd}r_f + x_f r_{kd}) + r_f r_{kd}}. \quad (2.86)$$

G(p) operator vodljivosti:

$$G(p) = \frac{M_2(p)}{M_1(p)}.$$

Kada se rješava sustav u  $q$  osi, rješava se poznati problem sustava s dva namota:

$$\Delta\psi_q = \Delta i_q X_q(p) \quad (2.87)$$

$X_d(p)$  operator induktivnog otpora  $q$  osi (operatorska reaktancija):

$$X_q(p) = x_q - \frac{px_{akq}^2}{px_{kq} + r_{kq}} \quad (2.88).$$

Sustav se može riješiti po naponima i strujama, a u općem slučaju kada klizanje nije konstantno jednadžbe sinkronog stroja glase:

$$\begin{aligned} -\Delta e_d &= [pX_d(p) + r]\Delta i_d + pG(p)\Delta e_f - X_q(p)\Delta i_q(1+s); \\ -\Delta e_q &= X_d(p)\Delta i_d(1+s) + G(p)\Delta e_f(1+s) + [pX_q(p) + r]\Delta i_q. \end{aligned} \quad (2.89)$$

Iz jednadžbi (2.91) mogu se izračunati struje  $\Delta i_d, \Delta i_q$  u funkciji napona uzbuđe. Ukoliko je uzbuđa konstanta  $e_f = const$  onda u izrazu za struje  $\Delta e_f = 0$ . To je slučaj kada ne postoji regulator uzbuđe u uzbuđnom krugu.

Istim načinom preko operatora može se riješiti sustav s  $n$  namota. U tom se slučaju mijenjaju operatori  $X_d(p); X_q(p)$  i  $G(p)$  dok ostali izrazi ostaju nepromijenjeni.

Iz (2.86) i (2.87) mogu se izračunati parametri sustava kada nema prigušnog namota ( $r_{kd} = r_{lq} = \infty$ ):

$$\begin{aligned} X_d(p) &= x_d - \frac{px_{afd}^2}{px_f + r_f}; \\ G(p) &= x_d - \frac{x_{afd}}{px_f + r_f}; \\ X_q(p) &= x_q. \end{aligned} \quad (2.90)$$

Razmatranjem dva granična slučaja kada je  $p=0$  i  $p=\infty$  dobivaju se vrijednosti:

1.  $p = 0$  stacionarno stanje  $X_d(0) = x_d; X_q(0) = x_q$ .
2.  $p = \infty$  početno stanje  $X_d(\infty) = x'_d; X_q(\infty) = x_q$ .

### 2.5.6. Početni magnetski otpor sinkronog stroja - reaktancija $x''_d$ i $x''_q$

Prigušni namot je smješten blizu zračnog raspora pa će njegov utjecaj na prijelazni proces biti će dominantan u prvim trenucima neke prijelazne pojave. Zbog toga je magnetski otpor stroja u početnom trenutku upravo određen karakteristikama prigušnog namota. Osim

rasipnih tokova armaturnog namota koji definiraju početnu reaktanciju, na nju će utjecati i rasipni tokovi stvoreni strujom koja će u nekom početnom trenutku prijelaznog procesa poteći prigušnim namotom. Taj magnetski otpor naziva se početnom reaktancijom.

Neka su radni otpori namota  $r_f = r_{kd} = r_{kq} = 0$  i neka je  $e_f = 0$  iz (2.83) slijedi sustav jednadžbi za  $d$  os:

$$\begin{aligned}\Delta\Psi_d &= x_d\Delta i_d + x_{afd}\Delta i_f + x_{akd}\Delta i_{kd}; \\ 0 &= px_{afd}\Delta i_d + px_f\Delta i_f + px_{akd}\Delta i_{kd}; \\ 0 &= px_{akd}\Delta i_d + px_{fkd}\Delta i_f + px_{kd}\Delta i_{kd}.\end{aligned}\tag{2.91}$$

i sustav jednadžbi za  $q$  osi:

$$\begin{aligned}\Delta\Psi_q &= x_q\Delta i_q + x_{akq}\Delta i_{kq}; \\ 0 &= px_{akq}\Delta i_q + px_{kq}\Delta i_{kq}.\end{aligned}\tag{2.92}$$

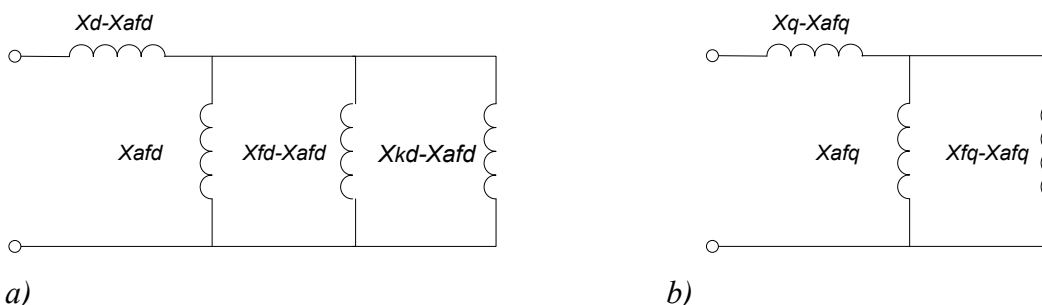
Nakon sređivanja i uvođenja pojednostavljenja  $x_{afd} \cong x_{akd} \cong x_{fkd}$  dobiva se:

$$x_d'' = (x_d - x_{afd}) + \frac{1}{\frac{1}{x_{afd}} + \frac{1}{x_{fd} - x_{afd}} + \frac{1}{x_{kd} - x_{afd}}},\tag{2.93}$$

početna reaktancija sinkronog stroja u  $d$  osi, slika 2.20a.;

$$x_q'' = (x_q - x_{akq}) + \frac{1}{\frac{1}{x_{akq}} + \frac{1}{x_{kq} - x_{akq}}},\tag{2.94}$$

početna reaktancija sinkronog stroja u  $q$  osi sinkronog stroja, slika 2.20b.



**Slika 2.20** Nadomjesna shema idealnog sinkronog stroja s a) dva namotom na rotoru u osi  $d$ ; b) jednim namotom na rotoru u  $q$  osi.

Pri udarnom trofaznom kratkom spoju koji je nastao u trenutku kada je stroj imao nazivnu struju uzbude i nazivni napon, struja direktne osi simetričnog sustava je:

$$i_d'' = \frac{1}{x_d''} \text{ (p.u.)}.\tag{2.95}$$

### 2.5.7. Vremenske konstante

Korijeni karakteristične jednadžbe linearnog fizikalnog sustava daju informaciju o ponašanju sustava u neustaljenim režimima [17]. Korijeni karakteristične jednadžbe linearnog fizikalnog sustava su upravo vremenske konstante tog sustava.



Ako se polinom koji opisuje promjenu struje napiše u obliku  $\varphi(p) = \frac{B(p)}{D(p)}$  za preslikavanje u vremensko područje koristi se Hevisideov razvoj koji glasi:

$$\varphi(\tau) = \frac{B(0)}{D(0)} + \sum_k \frac{B(p_k)}{p_k D'(p_k)} e^{p_k \tau},$$

gdje je:

$p_k$  - korijen determinante  $D(p) = 0$ .

$D'(p_k)$  - vrijednost prvog izvoda funkcije  $D(p)$  za  $p = p_k$ .

Omjer  $B(0)/D(0)$  koji predstavlja prvi član reda opisuje početne uvjete odnosno stanje svih varijabli u trenutku  $\tau = 0$  početka prijelaznog procesa. Korijeni determinante sustava  $p_k$  predstavljaju vremenske konstante. Pri tome vremenske konstante kratko spojenih ili otvorenih namota u sustavima nisu jednake. Preko vremenskih konstanti prepoznajemo duljinu trajanja utjecaja pojedinih namota na prijelazni proces. Vremenske konstante nekog sustava mogu se izračunati i preko operatorskih nadomjesnih shema slika 2.21.

Operatorske impedancije armaturnog namota podrazumijevaju da je uzbudni namot kratko spojen ( $U_f = 0$ ). Na temelju jednadžbi iz sustava (2.83) za slučaj konstantne brzine vrtnje stroja za  $r = 0$  vrijede jednadžbe iz (2.81). Uzima se da prijelazne pojave ne ovise o naponu rotacije, odnosno operatorsku impedanciju čine oni dijelovi sheme na kojima vlada napon  $d\psi/dt = p\psi$ . U tom slučaju vrijedi:

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d(p)i_d; \\ \psi_q &= L_q(p)i_q. \end{aligned} \tag{2.96}$$

$L_d(p)$  i  $L_q(p)$  su operatorski induktiviteti u  $d$  i  $q$  osi. Pripadajuće operatorske impedancije glase  $Z_d(p) = pL_d(p)$  i  $Z_q(p) = pL_q(p)$ . Ovdje će se prikazati izračun vremenskih konstanti u  $q$  osi primjenom Laplaceove transformacije na shemi sa slike 2.21b. Preko posljednje jednadžbe iz (2.82) uz početni uvjet  $\psi_{kq}(0) = 0$  dobiva se jednadžba:

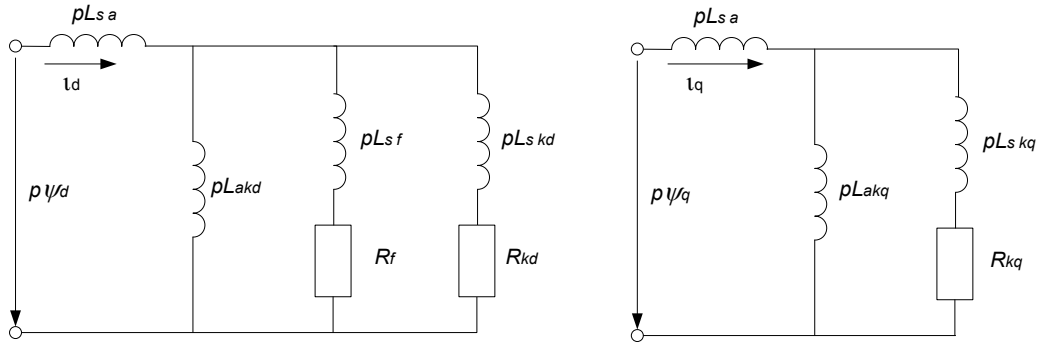
$$0 = R_{kq}i_{kq} + p(L_{kq}i_{kq} + L_{akq}i_q);$$

iz koje se može izraziti ovisnost struje  $i_{kq}$  u prigušnom namotu u funkciji  $i_q$ , odnosno struje statora u  $q$  osi:

$$i_{kq} = -\frac{pL_{akq}}{R_{kq} + pL_{kq}}i_q.$$

Ulančeni tok statora prema (2.82) je  $\psi_q = (L_q - \frac{pL_{akq}^2}{R_{kq} + pL_{kq}})i_q$ , te se na temelju usporedbe s (2.96) dobiva impedancija nadomjesne sheme:

$$L_q(p) = L_q - \frac{pL_{akq}^2}{R_{kq} + pL_{kq}} = \frac{L_q R_{kq} + p(L_q L_{kq} - L_{akq}^2)}{R_{kq} + pL_{kq}} = L_q \frac{1 + p \frac{(L_q L_{kq} - L_{akq}^2)}{R_{kq} L_q}}{1 + p \frac{L_{kq}}{R_{kq}}} = L_q \frac{1 + p T_q''}{1 + p T_{q0}''}.$$



Slika 2.21 Operatorska nadomjesna shema sinkronog stroja : a) za uzdužnu b) za poprečnu os.

Impedanciju nadomjesne sheme slična je onoj iz (2.94) odnosno (2.75). Vremenske konstante su dane kao početna vremenska konstanta sinkronog stroja u  $q$  osi za otvoreni armaturni namot:

$$T_{q0}'' = \frac{L_{kq}}{R_{kq}}; \quad (2.97)$$

i kao početna vremenska konstanta sinkronog stroja u  $q$  osi za kratko spojeni armaturni namot:

$$T_q'' = \frac{(L_{kq} - L_{akq}) + (L_q - L_{akq}) \frac{L_{akq}}{L_q}}{R_{kq}} = \frac{L_{\sigma a} + L_{\sigma kq} \frac{L_{akq}}{L_q}}{R_{kq}} = \frac{L_{\sigma a} + \frac{L_{\sigma kq} L_{akq}}{L_{\sigma kq} + L_{akq}}}{R_{kq}} = \frac{L_{kq}''}{R_{kq}}, \quad (2.98)$$

gdje je:

$L_{kq}$  - induktivitet prigušnog namota rotora u  $q$  osi;

$L_{akq}$  - induktivitet glavnog polja u  $q$  osi;

$L_{\sigma a} = L_{kq} - L_{akq}$  - rasipni induktivitet armaturnog namota u  $q$  osi;

$L_q$  - induktivitet stroja u  $q$  osi;

$L_{\sigma kq} = L_q - L_{akq}$  - rasipni induktivitet prigušnog namota rotora u  $q$  osi;

$R_{kq}$  - radni otpor prigušnog namota rotora u  $q$  osi.

Ako se razmotre još jedanput jednadžbe iz (2.94) i (2.75) može se zaključiti da jednadžba (2.94) opisuje početno stanje u  $q$  osi, a jednadžba (2.75) opisuje prijelazno stanje  $d$  osi. Oblik jednadžbi je identičan što slijedi iz metodologije izračuna kada postoji jedan namot na rotoru. To znači da početni trenutak neke prijelazne pojave određuju strujni krugovi koji se nalaze najbliže zračnom rasporu. Kod kratko spojenog namota rasipne reaktancije određuju vremenski konstantu.

Cilj projektanta je optimirati stroj po količini i kvaliteti utrošenih materijala i visokoj korisnosti. U razmatranjima je razvidna i oprečnost zahtijeva za što manjom početnom reaktancijom vezanom uz učinkovitiju pretvorbu energije. Njenim smanjivanjem utječe se na povećanje udarnih vrijednosti struje kratkog spoja (2.95). Na njeno smanjivanje direktno utječe smanjivanje rasipnih reaktancija. Da bi se početne reaktancije u nekom stroju održale na potrebnom nivou u suvremenim generatorima u kojima se zbog smanjenja gubitaka ugrađuju nemagnetski materijali koji često imaju relativno visoku električnu vodljivost neophodno je povećati specifična strujna opterećenja i izabrati adekvatan smještaj, materijal i geometriju prigušnog namota.

## 2.6. Izračun osnovnih parametara sinkronog stroja preko geometrijskih veličina

U prethodnim poglavljima prikazana je klasična metodologija kojom se opisuje ponašanje sinkronog stroja. Stroj je, dakle opisan preko induktiviteta koje smo definirali kao „glavne“ samoinduktivitete namota koje ovise o zračnom rasporu, međuinduktivitete koji također ovise o zračnom rasporu i rasipne induktivitete koji ovise o geometriji samog namota i okruženju u kojem se nalaze (obliku utora, izvedbi namota, materijalu bliskih sklopova i zračnostima). Pri proučavanju prijelaznih procesa upravo su rasipna polja ta kojima se ostvaruje magnetska inercija stroja koja ne dopušta da pri naglim promjenama stanja dođe do razornih prenapona, struja i momenata. Zbog toga je bitni dio izučavanja sinkronog stroja upravo vezan za definiranje rasipnih reaktancija.

Rasipni induktivni otpor namota statora u ustaljenom režimu rada može se podijeliti na:

1. induktivni otpor rasipanja utorskog dijela statorskog namota;
2. induktivni otpor rasipanja glava namota statora;
3. diferencijalno rasipanje.

Induktivni otpor namota rotora u ustaljenom režimu rada može se podijeliti na:

1. induktivni otpor rasipanja utorskih dijelova namota rotora;
2. induktivni otpor rasipanja glava namota rotora.

Kod prigušnog namota – kaveza statora ili rotora razlikuju se:

1. induktivni otpori rasipanja štapova;
2. induktivni otpori kratko spojenog prstena;
3. diferencijalno rasipanje.

U ovom poglavlju dati će se kratak osvrt na način izračuna rasipnih reaktancija namota.

### 2.6.1. Utorsko rasipanje jednoslojnog namota

Na slici 2.19 prikazan je rasipni tok utora trapeznog oblika. Neka je  $h_u$  ukupna visina utora. U utoru se nalazi jednoslojni namot. Pretpostaviti ćemo da je struja ravnomjerno raspoređena po presjeku vodiča, da je gustoća struje u bilo kojoj točki presjeka konstantna, da je magnetska vodljivost željeza beskonačna te da su magnetske linije rasipnog toka u utoru pravocrtne i pod pravim kutom s osi utora. Svi parametri će biti svedeni na jediničnu duljinu. Promatra se element visine  $d_x$  koji se nalazi na visini  $h_x$  od dna utora. Tok tog element po jedinici duljine je  $d\Phi_{\alpha x}$ . On je ulančen od  $N_x$  vodiča smještenih u donjem dijelu utora. Ukupni tok je tada:  $d\psi_x = d\Phi_{\alpha x} N_x$ . Za slučaj nezasićenog željeza odnosi su linearni i da je pad magnetskog napona nastao samo u utoru obzirom na pretpostavku o beskonačnoj vodljivosti željeza.

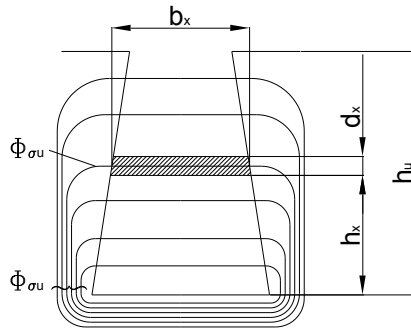
$$d\Phi_{\alpha x} = \mu_0 F_x d\Lambda_x, \quad (2.99)$$

gdje je:

$d\Lambda_x = dx/b_x$  - magnetska vodljivost izabranog elementa utora;

$b_x$  – širina utora na visini  $x$ ;

$F_x = IN_x$  – magnetomotorna sila (protjecanje) visini  $x$ .



**Slika 2.22 Rasipno polje utora**

Ulančeni rasipni tok utora sada je:

$$\psi_u = \mu_0 I \int_0^{h_u} N_x^2 \frac{dx}{b_x}. \quad (2.100)$$

Rasipna induktivna reaktancija po jedinici duljine je:

$$x_{\sigma u} = \omega L_u = \omega \frac{\psi_u}{I} = \omega \mu_0 \int_0^{h_u} N_x^2 \frac{dx}{b_x} = \omega \mu_0 N_u^2 \int_0^{h_u} \left(\frac{N_x}{N_u}\right)^2 \frac{dx}{b_x}. \quad (2.101)$$

Iz (2.101) izraza može se izdvojiti podužna vodljivost utora:

$$\lambda_u = \int_0^{h_u} \left(\frac{N_x}{N_u}\right)^2 \frac{dx}{b_x}. \quad (2.102)$$

Pri ravnomjernoj gustoći struje u utoru vrijedi  $\frac{N_x}{N_u} = \frac{s_x}{s_u}$  gdje su  $s_x$  i  $s_u$  presjek vodiča u utoru na visini  $x$  i ukupni presjek vodiča u utoru.

Izračun rasipanja jednoslojnog namota primjenjuje se kod izračuna rasipanja prigušnog namota statora i rotora i utorskog rasipanja uzbuđenog namota turbogeneratora.

Utjecaj potiskivanja struje na neravnomjernu raspodjelu indukcije i veličinu utorskog rasipanja može se za osnovno polje zanemariti. Taj je utjecaj vezan uz dimenzije vodiča za frekvenciju od 50 Hz, odnosno 60 Hz te kod standardno projektiranih statorskih namota iz dionih vodiča nema većeg utjecaja na rasipanje. To rasipanje može doći do izražaja kod viših harmonijskih članova, odnosno pri prijelaznim procesima u kavezu rotora. Obzirom na dimenzije i izvedbu kaveza statora utjecaj potiskivanja na rasipanje može se s dostatnom točnošću zanemariti.

### 2.6.2. Utorsko rasipanje dvoslojnog namota statora

Za dvoslojni namot kod izračuna rasipne reaktancije statorskog namota mora se voditi računa o shemi namota i položaju faza u utorima. Isto tako rasipanja neće biti jednaka u slučaju da kroz namot protječu struje nultoga sustava.

Rasipne tokove namota u utoru možemo podijeliti na tri dijela slika 2.20:

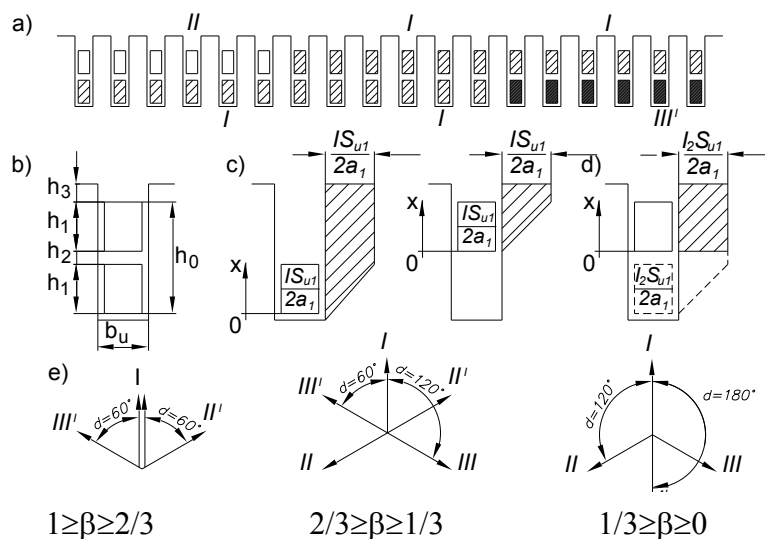
- rasipni tok samoindukcije donjeg vodiča,
- rasipni tok samoindukcije gornjeg vodiča,
- rasipni tok međuindukcije donjeg (gornjeg) vodiča koji nastaje od struje gornjeg (donjeg) vodiča.

Prva dva rasipna toka stvaraju rasipnu reaktanciju samoinduktiviteta za vodiče koji pripadaju istoj fazi ( $L_{\sigma l}, L_{\sigma g}$ ). Treći rasipni tok je tok međuinuktiviteta ( $2M_{\sigma lg}$ ). Rasipni međuinuktivitet je najveći kada su u utoru vodiči iste faze. Ukoliko su u utoru vodiči različitih faza taj tok manji. On ovisi o koraku skraćivanja namota  $\beta=y/3q$  gdje je  $y$  korak namota,  $q$  broj utora po polu i fazi. Koeficijent  $\beta$  pokazuje u koliko će utora biti struje pod kutom  $\alpha \in \{0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ\}$ . Ako su struje pod kutom  $\alpha=0^\circ$  tokovi se zbrajaju, za  $\alpha=60^\circ$  poništi se  $1/4$  toka, za  $\alpha=120^\circ$  poništi se  $3/4$  toka. Kada u utoru protječu struje pod kutom od  $180^\circ$  imamo potpuno poništavanje rasipnih polja i međuinuktivitet utora postaje jednak 0.

Kada kroz namot koji ima dijametralni korak protječu struje simetričnog trofaznog sustava koeficijent je jednak jedinici, a za  $\beta=2/3$  koeficijent je 0,75.

Ako kroz namot protječe nulti sustav struja postoje samo dvije mogućnosti  $\alpha \in \{0^\circ, 180^\circ\}$ . Za korak skošenja  $\beta=1$  u svim utorima protječu struje pod kutom  $0^\circ$  pa je koeficijent 1, a za  $\beta=2/3$  u svim utorima protječu struje pod kutom od  $180^\circ$  pa je koeficijent 0. To znači da je međuinuktivitet cijelog namota jednak nuli.

Kod standardnih generatora korak namota statora se kreće oko  $4/5$  što znači da će rasipanje utorskog dijela namota uvijek biti manje za nulti sustav struja od onog za trofazni simetrični [3]. Zbog toga je nulta reaktancija stroja najmanja reaktancija.



Slika 2.23 a) Prikaz rasporeda faznih vodiča dvoslojnog statorskog namotaja s korakom skraćivanja  $\beta=2/3$ ,  $q=12$ , b) Skica utora s veličinama preko kojih se računa utorsko rasipanje; c) Izračun samoinduktiviteta namota; d) Izračun međuinuktiviteta namota; e) Kutovi struja u utoru kod različitog skraćivanja koraka.

### 2.6.3. Rasipanje među vrhovima zubi statora odnosno rotora

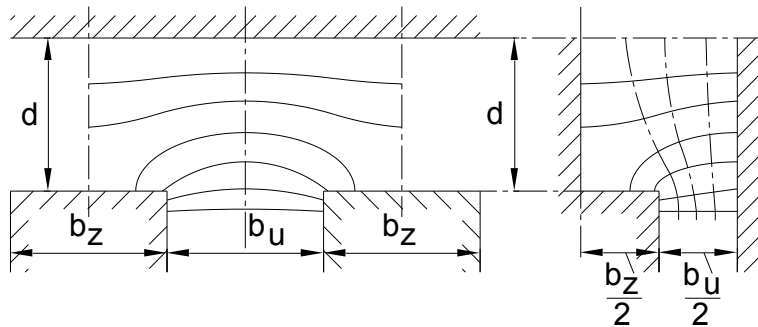
Rasipanje zubi statora/rotora ovisi o omjeru zuba, utora i zračnog raspore. To rasipanje je bitno kod većih zračnih raspore. Rasipno polje zubi statora/rotora proučava se na sličan način na koji se na koji se proučava utjecaj radijalnih kanala i utora na glavno polje odnosno pomoću Carterovog faktora. Rasipanja se računaju za stator i rotor odvojeno, pri čemu se uzima da je površina na suprotnoj strani zračnog raspore glatka (slika 2.21). Formula za izračun rasipne vodljivosti vrhova utora statora:

$$\lambda_z = \frac{5 \cdot \frac{\delta'}{b_u}}{5 + 4 \cdot \frac{\delta'}{b_u}}, \quad (2.103)$$

a za izračun rasipne vodljivosti vrhova zubi rotora :

$$\lambda_z = 0,2 + \frac{\delta}{2t_s}, \quad (2.104)$$

gdje su  $\delta' = k_c \delta$  širina zračnog raspora korigirana Carterovim faktorom  $k_c$ ,  $\delta$  širina zračnog raspora  $b_u$  širina utora statora i  $t_s$  utorski korak rotora.



Slika 2.24 Tok utorskog rasipanja

Kod dvoslojnih namota rasipanje zuba ovisi o koraku namota koji utječe na veličinu rasipnog polja pojedinog utora što se također odražava i na rasipanje zuba. Slijedi da je najveće rasipanje za utore u kojima se ulančuje najveći rasipni tok, a to su oni utori u kojima su struje u donjem i gornjem vodiču u fazi.

#### 2.6.4. Diferencijalno ili dvostruko ulančeno rasipanje

Diferencijalno rasipanje nastaje od viših harmonika protjecanja pojedinog namota. Iz teorije slijedi da se u slučaju glavnog polja proučava samo polje osnovnog harmonika dok sva ostala polja viših harmonika induciraju isključivo rasipne tokove.

Prostorna raspodjela gustoće polja preslikava se u vremenski promjenjivu elektromotornu silu. Pri tome bez obzira od kojeg je harmonika ulančena elektromotorna sila ima učestalost osnovne frekvencije obzirom da se  $\nu$ -ti harmonik koji se kreće brzinom  $\nu$  puta većom od brzine osnovnog harmonika "vidi"  $\nu$  puta veći broj polova. Polni korak tog harmonika je  $\nu$  puta manji od polnog koraka stroja  $\tau_p$  ( $\tau_p / \nu$ ), pa se može pisati:

$$\frac{E_\nu}{E_1} = \frac{1}{\nu} \left( \frac{k_{w\nu}}{k_w} \right) \frac{B_\nu}{B_1}; \quad (2.105)$$

gdje su  $k_{w\nu}$  faktora namota za  $\nu$ -ti harmonik, a  $k_w$  faktor namota za osnovni harmonik.

Gustoća polja je proporcionalna protjecanju  $\theta$ , pa kada se ukupno protjecanje razloži Fourierovim redom za  $\nu$ -ti harmonik amplituda protjecanja je  $\nu$  puta manja.

$$\frac{E_\nu}{E_1} = \frac{1}{\nu^2} \left( \frac{k_{w\nu}}{k_w} \right)^2. \quad (2.106)$$

Prema definiciji reaktancija reakcije armature osnovnog harmonika je  $x_{ad} = E_1/I$ , a reaktancija  $\nu$ -tog harmonika  $x_\nu = E_\nu/I$ , pa iz 2.106 slijedi:

$$x_\nu = x_{ad} \frac{1}{\nu^2} \left( \frac{k_{w\nu}}{k_w} \right)^2. \quad (2.107)$$

Ukupna reaktancija diferencijalnog rasipanja namota dobit će se kada se zbroje svi harmonijski članovi.

U trofaznom okretnom protjecanju gube se svi članovi elektromotorne sile djeljivi s 3, pa je  $\nu = 6k \pm 1; k = 1, 2, 3, \dots$

$$x_{av} = \sum_{\substack{\nu=6k\pm1 \\ k=1}}^{\infty} x_\nu = x_{ad} \cdot \sum_{\nu=6k\pm1}^{\infty} \frac{1}{\nu^2} \left( \frac{k_{w\nu}}{k_w} \right)^2. \quad (2.108)$$

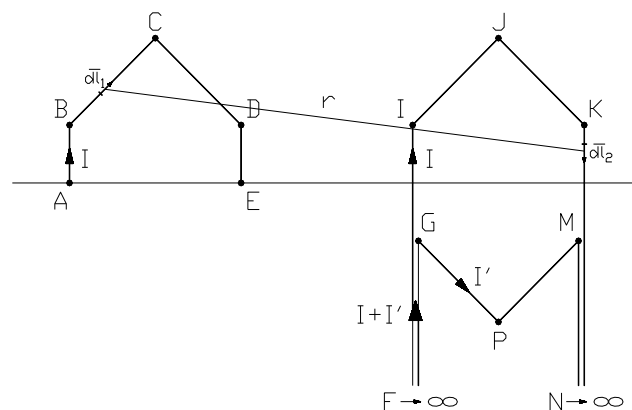
Kod kaveznog  $N$  faznog namota postoji osnovno polje koje ima okretno polje namota statora  $\nu = k \frac{N}{p} \pm 1, k = 1, 2, 3, \dots$  Faktor namota za kavez  $f_w = f_{w\nu} = 1$ , zbog jednog štapa po fazi, te izraz za diferencijalno rasipanje prigušnog namota postaje:

$$x_{kv} = x_{ad} \cdot \left( \sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{1}{\left( k \frac{N}{p} + 1 \right)^2} + \sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{1}{\left( k \frac{N}{p} - 1 \right)^2} \right). \quad (2.109)$$

## 2.6.5. Rasipanje glava statorskog namota, glava rotorskog namota i kratkospojnog prstena

### 2.6.5.1. Rasipanje glava statorskog namotana

Utorsko rasipanje predstavlja veći dio rasipanja namota statora i rotora. Rasipna vodljivost glava namota ili kratkospojnih prstena bitno je manja zbog toga što se nalaze u zraku. Ukoliko u stroju postoje nemagnetski zaslони, tlačne ploče ili nemagnetske rotorske kape rasipanja glava namota su dodatno smanjena. Geometrija glava namota je složena trodimenzionalna forma, a obzirom da je točnost analitičkog proračuna visoka pogotovo ukoliko su krajevi paketa i ostali dijelovi u čeonom prostoru izrađeni od nemagnetskog materijala tako izračunata rasipanja će se koristiti i u numeričkom proračunu..



Slika 2.25 Principni model glava namota za proračun međuinduktiviteta.

Za međuinuktivitet može se pisati

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi l} \int_{ABCDE} \left[ I \int_{GLJKM} \frac{d\vec{l}_1 d\vec{l}_2}{r} + I' \int_{GPM} \frac{d\vec{l}_1 d\vec{l}_2}{r} + (I + I') \left( \int_{FG} \frac{d\vec{l}_1 d\vec{l}_2}{r} + \int_{MN} \frac{d\vec{l}_1 d\vec{l}_2}{r} \right) \right] \quad (2.110)$$

F → ∞                      N → ∞

Trodimensionalna kontura glave namota se nadomješta proizvoljnim brojem ravnih dijelova. Tada se integrali u jednadžbi (2.110) izražavaju kao suma integrala tipa (Neumannov integral)

$$N = \cos\varphi \int_A^B dl_1 \int_a^b \frac{dl_2}{r} \quad (2.111)$$

za sve moguće kombinacije ravnih segmenata u oba svitka na slici 2.22. Kut  $\varphi$  u jednadžbi (2.111) predstavlja kut između vektora smjera pravaca na kojima leže ravni segmenti za koje se računa Neumannov integral.

Vrijednosti rasipanog induktiviteta glava statorskog namota izračunati na ovdje opisan način pomoću [10] i [15] koristit će se i u numeričkom 2D modelu.

### 2.6.5.2. Rasipanja glava uzbudnog namota

Kod turbogeneratora s nemagnetskim kapama rasipanje glava uzbudnog namota je malo i praktično ga je moguće zanemariti. Jedna od empirijskih formula koju je moguće s dostatnom točnošću koristiti glasi:

$$\lambda_{gu} = \frac{0,16 \cdot q_r \cdot D_r}{p^2 L_p}; \quad (2.112)$$

gdje je  $q_r$  broj namotanih utora po polu,  $D_r$  promjer rotora,  $p$  broj pari polova,  $L_p$  duljina pola.

### 2.6.5.3. Rasipanje kratkospojnog prstena kaveza statorskog i rotorskog prigušnog namota

Rasipna podužna vodljivost prstena za prvi harmonik s dostatnom točnošću može se računati preko jednadžbe:

$$\lambda_p = 0,48 \log \frac{2,35 D_{pr}}{2a + b}, \quad (2.113)$$

gdje je  $a$  širina prstena, a  $b$  visina prstena kojom je u kontaktu s tijelom rotora odnosno statora dok je  $D_{pr}$  srednji promjer prstena.

Vrijednosti rasipnih induktiviteti kratkospojnog prstena kao i rasipani induktivitet glava statorskog namota izračunati na ovdje opisan način koristit će se i u numeričkom 2D modelu.

## 2.7. Zaključak drugog poglavlja

U klasičnim proračunima uzimaju se određena pojednostavljena vezana uz proračun polja u zračnom rasporu. Ona se odražavaju i na točan izračun parametara stroja. Numeričkim izračunom se relativno jednostavnom statičkom simulacijom mogu izračunati reaktancije



stroja  $q$  i  $d$  osi u stacionarnom stanju koristeći se sustavom (2.39) i transformacijama (2.35), (2.36), (2.37) i (2.38). Pri tome se dobiva točna slika polja i ulančenih tokova, a unose se realne vrijednosti struja i materijali sa svojim stvarnim karakteristikama. Adekvatnom postavkom problema mogu se izračunati i reaktancije u prijelaznim režimima rada [19]. Za izračun reaktancija dovoljna je 2D slika stroja obzirom da su namoti pod pravim kutom u odnosu na presjek stroja, paralelni s uzdužnom osi. Aproksimacija koja se uvodi u proračunu treće - podužne dimenzije polja, jednaka je onoj iz klasičnog proračuna – izračun idealne duljine stroja preko Carterovog faktora. Proračun obuhvaća i dio rasipne reaktancije u željezu dok se proračun rasipanja glava statorskog namota radi se analitičkim postupkom i ta vrijednost se dodaje na izračunatu vrijednost reaktancija. Samo rasipanje armaturnog namota ukoliko se želi kao podatak za sebe izračunati numeričkom metodom, računa se na analogan način na koji se ta reaktancija mjeri [20]. Prema IEC normi [15] rasipna reaktancija se mjeri bez rotora u provrtu statora kada je na statorski namot narinut napon, te se od tako dobivenih vrijednosti oduzima tok koji se zatvara kroz provrt stroja.

Numerička metoda zbog unošenja kompletne geometrije stroja, odnosno dijela stroja nije dovoljno fleksibilna za korištenje tijekom projektiranja – npr. varijacije broja utora statorskog namota ili geometrije pojedinog dijela. Međutim postoje određeni problemi izračuna raspodjele magnetskog polja u kojima se jedino korištenjem ove metode može doći do pouzdanih rezultata – npr. problem izračuna polja u jarmu statora [12].

Metodologija pristupa projektiranju kombiniranjem klasične i numeričke metode (dostupne u komercijalnim programima) je još u razvoju. Razvoj metodologije koja se koristiti pri projektiranju sinkronih strojeva i točnijem određivanju njihovih parametara danas treba tražiti u kombiniranju izračuna parametara stroja klasičnim analitičkim i numeričkim metodama i to na način na koji se koriste prednosti numeričkih proračuna prilikom određivanja polja zračnog rasporeda, jarma statora, rotora isl. te prednosti klasičnih izračuna parametara krugova čija je geometrija složena, a utječe na izbor projektnog rješenja, odnosno kada se želi napraviti niz varijacija projektnih rješenja [25].

### 3. Prigušni namoti turbogenerators i njihov utjecaj na parametre stroja

Način konstrukcije električnih rotacijskih strojeva uvjetovan je brojem polova. U teoriji električnih strojeva pa tako i u propisanim standardima, zbog specifičnosti konstrukcije napravljen je zaseban pristup prema generatorima s cilindričnim rotorima. Konstrukcijske karakteristike turbogenerators koje određuju njegove posebnosti u odnosu na druge rotacijske električne strojeve su:

- Cilindrično tijelo rotora iz jednodijelnog masivnog otkova na kojem su otvoreni utori za smještaj rotorskih namota;
- Konstantni zračni raspor;
- Koncentrični uzbudni rotorski namot smješten u utore raspoređene po obodu rotora;
- Rotorske kape navučene preko glava namota rotora i oslonjene na tijelo rotora;
- Veliki istak glava namota statora koji je posljedica koraka namota koji obuhvaća približno polovicu odnosno četvrtinu kruga po obodu statora;
- Blizina konstrukcijskih dijelova kućišta aktivnom dijelu statora.

Navedene konstrukcijske karakteristike, među ostalim utječu na vrijednosti parametara turbogenerators i na dopuštena specifična opterećenja određenih dijelova stroja. Znajući da mehanička svojstva materijala otkova rotora definiraju maksimalne promjere rotora, a dinamička stabilnost rotirajućeg sustava određuje maksimalnu duljinu cilindra jasno je da su dimenzije rotora turbogenerators unaprijed zadane. Stoga trendovi daljnjeg razvoja turbogenerators, pretočeni u projektnu zadaću predstavljaju zahtjev da se u zadanom volumenu napravi veća i efikasnija pretvorba mehaničke snage u električnu.

Iskorištavanje raspoloživog volumena u pretvorbi energije tada ovisi o mogućnosti povećanja specifičnih elektromagnetskih i strujnih opterećenja [24]. Pri takvim zahtjevima potrebno je napraviti adekvatnu ravnotežu po mjestima i režimima nastajanja gubitaka te odvođenja topline. Težnja da se u danom volumenu pretvori maksimalna energija prisutna je i na konvencionalnim snagama i tijesno je vezana uz ekonomsku isplativost i visoku korisnost stroja.

No, ne smiju se zaboraviti ostali efekti koji proizlaze iz visokih specifičnih opterećenja, a koji mogu narušiti ravnotežu i koji se u slučaju nekorektno izabranih parametara i geometrije višestruko povećavaju [27]. Problemi povećanih strujnih opterećenja utječu na porast elektromagnetskih sila među štapovima namota i na statičku i dinamičku stabilnost stroja. Posebni problemi u slučaju većih specifičnih magnetskih opterećenja javljaju se obzirom da se sve geometrijske “nepravilnosti” i nesimetrije preslikavaju u izlaznom naponu te utječu na izobličavanje naponskog izlaza i pojavu višestruko većeg harmonijskog sadržaja [35]. Osim izobličavanja napona javljaju se dodatni gubici, a samim tim i dodatna zagrijavanja, mehaničke vibracije i porast buke elektromagnetskog porijekla.

Problemi do kojih dovodi povećanje specifičnih magnetskih opterećenja u istom volumenu za istu brzinu vrtnje mogu se riješavati:

- ugradnjom materijala boljih magnetskih, strujnih, izolacijskih, mehaničkih i termičkih karakteristika;
- ugradnjom novih konstrukcijskih elemenata;
- točnijim izračunom karakterističnih veličina i optimiranjem geometrije.

Te tri mogućnosti su osobito bitne kod revitalizacije postojećih strojeva [28]. Stoga iako će zaključci ovog rada biti prvenstveno izvedeni za dvopolne i četveropolne

turbogeneratore s masivnim cilindričnim rotorom u konačnici ne moraju se odnositi samo na njih.

Od posebnog interesa za ovaj rad je ugradnja i djelovanje kaveznih namota. Kod turbogeneratora se relativno kasno, praktički tek s razvojem tipskih turbogeneratora za plinske turbine počeo ugrađivati prigušni namot rotora u obliku kaveznog namota. Smatrano je da je efekt prigušenja masivnog tijela rotora dostatan da turbogenerator radi pouzdano u uvjetima prijelaznih stanja. Prigušni namot statora pak ne može se naći opisan i proučavan u literaturi, ali se slični konstrukcijski sklop, koji će ovdje biti opisan, susreće u određenim tipskim rješenjima najvećih turbogeneratorskih jedinica proizvođača poput Westinghouse i Alstom.

Ovo poglavlje sadržava opis konstrukcije i uloge kaveza rotora i statora kao i njihov utjecaj na parametre turbogeneratora. Opisat će se struktura kaveza prigušnog namota. Koristeći opći klasični teorijski pristup proučavanju pojava u sinkronim strojevima iz prethodnih poglavlja, razmotriti će se parametri koji opisuju sinkroni stroj, a na koje djeluje kavez rotora. Dat će se osvrt na značaj prigušenja elektromagnetskih pojava koje nastupaju u prijelaznim režimima rada, te prednosti i mane ugradnje kaveza na rotoru. Preko primjera nadomjesne sheme koja se koristi za određivanje parametara pri projektiranju turbogeneratora približit će se problem točnog određivanja tijeka prijelazne pojave. Sukladno klasičnoj analitičkoj teoriji postaviti će se i nadomjesna shema kojom bi se opisalo djelovanje kaveza statora. Odrediti će se mogućnost njenog korištenja u cilju izračuna struja prigušnog kaveza. Opisati će se prednost korištenja metode konačnih elemenata za rješavanje problema vezanih izračun struja u kavezu.

### **3.1. Karakteristike kaveznog namota**

Strukturno gledano, prigušni namoti izrađuju se u obliku kaveza. Sastoje se od štapova čiji su krajevi sa svake strane kratko spojeni prstenom. Kavezi prigušnog namota nisu izolirani, pa se s njih dobro odvodi toplina na metalne dijelove koji ih okružuju. Prigušni namot je višefazni namot koji ima onoliko faza koliko ima štapova  $n_f = n_s = N$ . Broj zavoja po fazi kaveznog namota je  $w = 1/2$  obzirom da postoji samo jedan vodič (štap) po fazi. U prigušnim kavezima rotora i statora ne postoji galvanski izvor, već se oni induktivno napajaju. Kroz njih će proteći struje tek kada su kratko spojeni. U mirujućem kavezu inducirani napon ovisit će o promjeni toka koji ulančuje određena kontura u promjenjivom magnetskom polju:

$$e(t) = d\psi / dt . \quad (3.1)$$

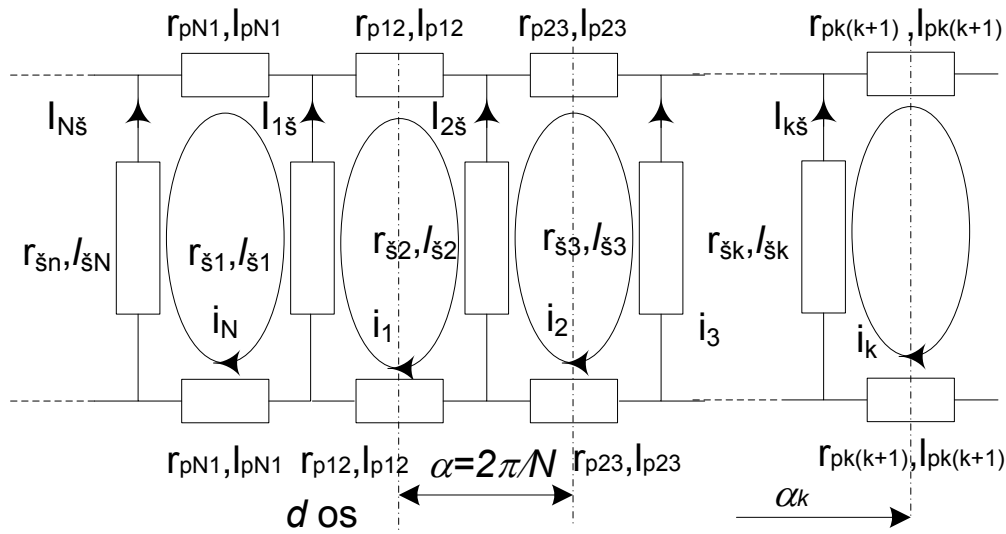
Kod prigušnog namota koji rotora, inducirani napon u štapu kaveza ovisi o relativnoj brzini štapa u odnosu na brzinu magnetskog polja:

$$e(t) = lvB(x) . \quad (3.2)$$

U konstrukciji sinkronih strojeva srećemo simetrične i nesimetrične kaveze. U četveropolne lamelirane turbogeneratore najvećih snaga (reda veličine 65 MVA) ugrađuje se potpuni simetrični kavez identičan onom kod asinkronog motora. Štapovi prigušnog namota nalaze se ravnomjerno raspoređeni u polu i zubima, a broj im je jednak diobenom broju utora rotora  $N_r$ . To su tipska rješenja za turbogenerator plinskih turbina, ali se ugrađuju i u parne agregate zbog svoje manje cijene i kraćeg roka izrade. Prigušni namot je dakle dimenzioniran da zaleti plinski agregat.

Rotori turbogeneratora s masivnim tijelom rotora imaju nesimetričan prigušni namot. Razlog tome je smještaj namota u iste utore u koje se smješta i koncentrični uzбудni namot. Kod takvih namota razlikujemo konstrukciju kod koje se može definirati broj namotanih utora

$N_r$  i diobeni broja utora rotora  $N'_r$  kada su kutovi između svih namotanih utora rotora isti. Ako to nije slučaj imamo složenu shemu nesimetričnog prigušnog namota. Na slici 3.1 shematski je prikazana razvijena mreža prigušnog namota.



**Slika 3.1** Mreža ekvivalentnih impedancija prigušnog namota, gdje su:  $r_{pk(k+1)}$  i  $l_{pk(k+1)}$  - otpor i rasipni induktivitet kratkospojnog prstena;  $r_{š}$  i  $l_{š}$  - otpor i rasipni induktivitet štapova prigušnog namota;  $i_1 - i_N$  struje strujnih krugova za  $N$  štapova prigušnog namota;  $\alpha_k = k \cdot \alpha$  - kut od simetrale pola do simetrale  $k$ -tog strujnog kruga.

Općenita mreža sa slike 3.1 može se pojednostaviti za slučaj simetričnog namota. Tada su razmaci između štapova jednaki, kao i svi radni i induktivni otpori štapova i prstena. Za statorski prigušni namot je upravo interesantan taj slučaj pa će ovdje biti detaljnije opisan.

Pri konstantnoj brzini inducirani napon u prigušnom namotu preslikava krivulju raspodjele gustoće polja  $B$  u zračnom rasporu kao funkciju prostorne koordinate  $x$ . Osnovni član indukcije na mjestu  $x$  je dan izrazom:  $B_x = B_1 \sin \frac{\pi}{\tau_p} x$ , pa se u štapu inducira napon  $e_1 = lvB_1 \sin(p\omega_m t)$ , gdje je  $\omega_m$  kutna brzina relativnog kretanja između štapa i polja, a frekvencija induciranih napona  $f = \frac{p\omega_m}{2\pi}$ .

Sinusni izmjenični napon u drugom štapu zaostaje za prvim štapom za električni kut  $\alpha$  koji je proporcionalan broju pari polova stroja i geometrijskom kutu između susjednih štapova  $\alpha = p\alpha_g$ . Za simetričan namot  $\alpha = p\alpha_g = p \frac{2\pi}{N}$ . Stoga je inducirani napon u drugom štapu:

$$e_2 = lvB_1 \sin(p\omega_m t - \alpha). \quad (3.3)$$

Vektori napona čine zvijezdu napona  $n$ -faznog simetričnog sustava:

$$\begin{aligned} \underline{E}_1 &= E \\ \underline{E}_2 &= E e^{-j\alpha} \\ \underline{E}_i &= E e^{-j(i-1)\alpha} \\ \underline{E}_N &= E e^{-j(N-1)\alpha} \end{aligned} \quad (3.4)$$

U svakom štapu protječe struja simetričnog  $n$  faznog sustava, a svaki se štap nalazi u položaju prethodnog kada polje prema njemu pređe električni kut  $\alpha$ . To znači da će se i vrijednost inducirane struje ponavljati u dva susjedna štapa s pomakom jednakom električnom kutu  $\alpha$ . Veza između struje dva susjedna štapa je:

$$\begin{aligned} \underline{I}_2 &= \underline{I}_1 e^{-j\alpha} \\ \underline{I}_i &= \underline{I}_{i-1} e^{-j\alpha} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Struja u dijelu kaveza između dva štapa je:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{23} &= \underline{I}_{12} e^{-j\alpha} \\ \underline{I}_{i(i+1)} &= \underline{I}_{(i-1)i} e^{-j\alpha} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Promatranjem bilo kojeg čvora (na primjer 2. štapa) dobiva se:

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{23} - \underline{I}_{12} \quad (3.7)$$

Neka je struja u prvom štapu  $\underline{I}_s$ , u odsječku prstena između prvog i drugog štapa  $\underline{I}_p$  pa se izraz iz (3.7) može napisati kao:

$$\underline{I}_s e^{-j\alpha} = \underline{I}_p e^{-j\alpha} - \underline{I}_p \quad (3.8)$$

Nakon sređivanja dobivamo za struju štapa:

$$I_s = I_p 2 \sin \frac{p\pi}{N} \quad (3.9)$$

Faktor preračunavanja struje prstena na struju štapa je  $k_p = 2 \sin \frac{p\pi}{N}$ , [6]. To je koeficijent je za osnovni harmonik. Polje prostornog harmonijskog člana reda koji se vrti  $\mu$  puta većom brzinom prolazi  $\mu$  puta više polova, pa koeficijent za pojedini prostorni harmonik postaje:  $k_{p\mu} = 2 \sin \frac{p\pi\mu}{N}$ . Slijedi da je struja u prstenu bitno veća od onog u štapu, što je očekivani rezultat.

Za proračun struja u kavezu numeričkom metodom potrebno je izračunati radni otpor i induktivitet prstena prigušnog namota. Radni otpori štapa  $r_s$  i prstena  $r_p$  su:

$$\begin{aligned} r_s &= \rho_s \frac{l_s}{q_s}, q_s = \frac{D_s^2 \pi}{4} \\ r_p &= \rho_p \frac{l_p}{q_p}; l_p = \frac{D_{psr} \pi}{N}; q_p = ab \end{aligned} \quad (3.10)$$

gdje su  $l_s, D_s$  duljina i promjer štapa,  $l_p$  duljina prstena između dva štapa,  $q_s, q_p$  poprečni presjek štapa i prstena,  $N$  broj štapova,  $D_{psr}$  srednji promjer prstena,  $a$  širina prstena, a  $b$  visina prstena prigušnog namota,  $\rho_s, \rho_p$  specifični otpor materijala štapa i prstena.

Dok su štapovi višefaznog namotaj spojeni u zvijezdu, prsten čini poligon. Iz energetskog razmatranja nalazi se ekvivalentni fazni otpor:

$$I_s^2 R = I_s^2 r_s + I_p^2 2r_p \quad (3.11)$$

Kada se u gornju jednadžbu uvrste ranije izvedene međuovisnosti vrijednosti struje krakospojnog prstena i struje u štapu dobiva se:

$$r_k = r_s + \frac{2r_p}{\left(2 \sin \frac{p\pi}{N}\right)^2}. \quad (3.12)$$

U fizikalnom smislu jednadžba (3.12) predstavlja ukupni otpor jedne strujne petlje sveden na štap. Isti zaključak vrijedi i za reaktancije, te je ukupni rasipna reaktancija jedne petlje svedena na štap:

$$x_{\sigma k} = x_s + \frac{2x_p}{\left(2 \sin \frac{p\pi}{N}\right)^2}. \quad (3.13)$$

Analitički izraz za reaktanciju  $x_s$  štapa je:

$$x_s = 0.4\pi^2 10^{-4} \frac{f}{50} l_i (\lambda_u + \lambda_z + \lambda_d), \quad (3.14)$$

gdje su  $\lambda_u$  rasipna vodljivosti utora, rasipna vodljivost zuba  $\lambda_z$  i diferencijalno rasipanje  $\lambda_d$  iz poglavlja 2.6. Reaktancija prstena je dana izrazom:

$$x_p = 0.4\pi^2 10^{-4} \frac{f}{50} l_p \lambda_p, \quad (3.15)$$

gdje je  $\lambda_p$  rasipna vodljivosti prstena koja se kao i ostale rasipne reaktancije računa na način prikazan u poglavlju 2.6.

Otpori  $r_s, r_p$  te induktiviteti  $L_s, L_p$  su isti za bilo koji harmonik (ako zanemarimo potiskivanje struje kod viših frekvencija), ali ukupni otpor i reaktancija se mogu bitno razlikovati i ovisiti o redu  $\mu$  harmonijskog člana:

$$r_{k\mu} = r_s + \frac{2r_p}{\left(2 \sin \frac{p\mu\pi}{N}\right)^2}, \quad (3.16)$$

$$x_{\sigma k\mu} = x_s + \frac{2x_p}{\left(2 \sin \frac{p\mu\pi}{N}\right)^2}. \quad (3.17)$$

Aproksimacija koja je uvedena zanemarivanjem potiskivanja struje na višim frekvencijama ne utječe na točnost proračuna u režimima rada koji će se proučavati, a vezani su uz statorski prigušni namot. Na prikazani način definirani su svi parametri simetričnog kaveza, potrebni za izračun struja. Kada su elementi mreže sa slike 3.1 različiti potrebno je postaviti  $N$  dimenzionalne matrice otpora kaveznog namota  $\mathbf{R}_k$  i induktiviteta  $\mathbf{L}_k$ . Opći oblik jednadžbe koja opisuje kavezni namot u matričnom obliku je:

$$0 = \mathbf{R}_k \mathbf{i}_k + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_k}{dt};$$

gdje je  $\mathbf{i}_k$  matrica struja, a  $\boldsymbol{\Psi}_k$  matrica ulančenih tokova.

Ulančeni tok bilo koje strujne konture sa slike 3.1 može se izračunati preko gustoće toka duž jednog utorskog koraka prigušnog namota. U prostoru, za  $k$ -tu konturu, ovaj kut se kreće od  $\alpha_k$  do  $\alpha_{k+1}$  pa je izraz za ulančeni tok:

$$\psi_k = r \cdot L_i \sum_{n=1, n_B}^{\alpha_{k+1} + \omega t} \int_{\alpha_k + \omega t} \hat{B} \cos(\mu_n \theta + \theta_{0n} - \omega_m t) d\theta, \quad (3.18)$$

gdje je:  $\psi_k$  - ulančeni tok  $k$ -te konture;  $r$  - promjer na kojem se kavez nalazi;  $L_i$  - idealna duljina stroja;  $\omega$  - kutna sinkrona brzina;  $\mu$  - prostorni red harmonika;  $n_B$  - ukupni red harmonika indukcije;  $\hat{B}$  - amplituda gustoće toka na srednjem promjeru štapa;  $\Theta_{0n}$  - početni fazni kut  $n$ -tog harmonika;  $\omega_m$  - trenutna kutna brzina vala izražena preko prostornog reda vala i osnovne učestalosti.

Kada je poznata raspodjela gustoće polja  $B_x$  na konturi između dva štapa, može se odrediti ulančeni tok. Preko ulančenog toka te uz poznate vrijednosti parametara ekvivalentnog kruga radnih otpora i rasipnih induktiviteta mogu se izračunati inducirani naponi, odnosno struje u krugovima sa slike 3.1.

### 3.2. Prigušni namot rotora

Prigušni namot rotora nije uvijek ugrađivan u električne strojeve kao zaseban konstrukcijski element. U početku, obzirom da su i kod strojeva s istaknutim polovima, polovi bili masivni nije prepoznata potreba njegove ugradnje. Tek kasnije, kod većih jedinica s lameliranim polovima, ustanovljen je nestabilan rad generatora na mreži, te visoki prenaponi slobodne faze kod nesimetričnih opterećenja u uvjetima kvara u mreži. U okviru rada mreže koja se usložnjavala, razvijala i povezivala razmatraju se i problemi stabilnosti. Mreža mora ostati u pogonu u praktično svim uvjetima rada, pa tako i prilikom ispada velikih generatorskih jedinica, pri njihanjima snage, u uvjetima kratkih spojeva i sličnih neželjenih režima rada. Stoga se, prvenstveno zbog pouzdanog rada u mreži, iako konstrukcijski zahtijevan, a ekonomski element koji poskupljuje i povećava gabarite stroja, prigušni namot rotora počeo obvezno ugrađivati u hidrogeneratore.

Ugradnja prigušnog namota rotora kod turbogeneratora počela je bitno kasnije i zapravo je tek razvoj plinskih turbina i režima rada pri pokretanju agregata koji je jednak zaletu asinkronog motora do sinkronizacije na mrežu utjecao na ugradnju robusnih prigušnih namota rotora u turbogeneratore. Još jedan razlog osim efekta prigušenja masivnog tijela rotora zaslužan je za kasnije prepoznavanje uloge prigušnog namota rotora kod turbogeneratora. Naime nekada se ispod klinova kojima su zaklinjavani utori uzbudnog namotaja postavljao takozvani perni lim, odnosno tanki bakreni lim koji se protezao cijelom duljinom rotora i služio za lakše zaklinjavanje. Preko njega su klinovi bili električki kratko spojeni. Slični lim se nalazio i ispod rotorske kape i omogućavao njeno lakše navlačenje preko glava uzbudnog namota. Na taj način zapravo je postignut efekt prigušnog namota rotora. Kada se razvojem izolacijskih materijala lim zamijenio izolacijskom podlogom zabilježene su pojave električnog preskoka između klinova i u okolici nalijeganja kape na tijelo rotora. Na tim generatorima je utvrđeno postojanje mjesta lokalnih pregrijavanja, promjene boje i pojave inicijalnih pukotina na zubima.

Isto tako turbogeneratori su posebno osjetljivi na rad u asinkronom režimu ili kada rade s inverznom komponentom. Dimenzije su relativno male uz visoka specifična opterećenja i dolazi do naglog zagrijavanja rotora zbog malog toplinskog kapaciteta.

Ugradnjom prigušnog namota rotora – niskootpornog kaveza – proširuje se opseg rada turbogeneratorskog u ovim uvjetima.

No nije svako djelovanje prigušnog namota pozitivno. Obzirom da se princip njegovog djelovanja suprotstavljanje svakoj promjeni nastaloj u magnetskom polju ovaj namot nepovoljno djeluje na brzu regulaciju i forsiranja uzbude. Isto tako se njegovim djelovanjem koje se suprotstavlja prodiranju polja izvan zračnog rasporeda smanjuju rasipanja što dovodi do povećanja vrijednosti udarnih struja kratkih spojeva.

Može se konstatirati da se odluka o ugradnji prigušnog namota kod turbogeneratorskog s masivnim polovima više temelji na potrebi njegovog unutarnjeg zaštitnog djelovanja u nestacionarnim i nesimetričnim uvjetima, nego što na to utječu zahtjevi pouzdanijeg rada na mreži. Kod tih generatora, kod kojih je rotor mehanički najopterećeniji, smještaj prigušnog namota osobiti je problem, te se kod najvećih jedinica koje rade u baznom režimu on ne ugrađuje.

### 3.2.1. Osnovna područja djelovanja prigušnog namota rotora

Prigušni namot rotora sinkronog stroja je nepomičan prema uzbudnom namotu, pa na njega najveći utjecaj imaju promjene u statorskom namotu. Stoga u praznom hodu ovaj namot nije interesantan za razmatranje. Prigušni namot rotora sinkronog stroja je u stacionarnom režimu rada simetrično opterećen. Međutim u slučaju bilo kakvih odstupanja od stacionarnog režima rada kao što su nesimetrična opterećenja, promjena tereta, odstupanju od sinkronizma, ovaj namot “prigušuje” nastale promjene odnosno protivi se uzroku njihovog nastajanja. Tada se u kratkospojenom prigušnom namotu induciraju struje koje reaktivno djeluju na glavno polje i s njime proizvode dodatne momente vrtnje. Zbog boljeg odziva idealan smještaj štapova prigušnog namota rotora bio bi u zračnom rasporedu. Međutim, udaljenost štapova prigušnog namota od zračnog rasporeda, odnosno dubina njegove ugradnje u polu određena je mehaničkim naprezanjima uvjetovanim obodnim brzinama rotora na brzini pobjega, te konstrukcijskom izvedbom rotora, a raste s povećanjem promjera, dimenzijama utora i masom bakra u utoru.

Temeljna područja djelovanja prigušnog namota rotora, kod sinkronih generatora mogu se svrstati u tri grupe:

1. *Uravnoteženje nesimetričnog opterećenja:* Kod nesimetričnih opterećenja prigušni namot rotora prigušuje inverznu komponentu i otklanja negativne posljedice u uvjetima nesimetričnog rada. Njegovim se utjecajem sprječava izobličenje krivulje napona koja praktički ostaje sinusoidalna, a trofazni naponski sustav simetričan. Ova uloga je bitna za vrijeme nesimetričnih kratkih spojeva npr. kod međufaznog kratkog spoja kada napon slobodne faze može u prvom trenutku prijelazne pojave poprimiti visoke vrijednosti.

2. *Prigušenje njihanja:* Za kratkotrajne utjecaje uzrokovane prolaznim stanjima u mreži, vrijeme nakon poremećaja je prekratko da bi do izražaja došlo mehaničko prigušenje uslijed djelovanja turbinskog regulatora. Te se promjene prigušuju djelovanjem električnih krugova u stroju. U uvjetima u kojima dolazi do odstupanja od sinkronizma prigušni namot rotora djeluje sinkronizacijskim momentom. To djelovanje prigušnog namota očituje se kod njihanja snage, udara tereta, pri sinkronizaciji generatora na mrežu kada sinkronizacijski moment prigušnog namota omogućava lakšu sinkronizaciju. Međutim njihanje može imati i trajni karakter osobito kada dolazi sa strane pogonskog stroja ili kada su vremena djelovanja regulatora uzbude i turbine neusklađena.

3. *Zaštitno djelovanje:* Kod promjena u magnetskom polju koje dolaze sa strane statora ili rotora prigušni namot rotora štiti onu drugu stranu nastojeći zadržati stanje koje je



bilo neposredno prije promjene. Naravno ovdje se podrazumijeva da je prigušni kavez rotora smješten između statorskog i uzbuđenog namota. Međutim sličnu ulogu ima i prigušni kavez koji se ugrađuje između paketa i kućišta statora. Ovakav kavez smješten po vanjskom obodu paketa statora prigušuje promjene magnetskog polja koje dolaze od statora i rotora i prenose se na kućište.

### **3.2.1.1. Nesimetrično opterećenje**

Nesimetrično opterećenje u principu je posljedica odstupanja od normalnog režima rada zbog uvjeta u mreži te vanjskog ili unutarnjeg kvara generatora. Međutim postoje minimalni zahtjevi na trajni rad generatora s nesimetričnim opterećenjem koji je propisan standardom IEC 60034-1. Te zahtjeve je praktički nemoguće ispuniti bez ugradnje prigušnog namota rotora u modernim specifično visoko opterećenim strojevima, prilikom modernizacija postojećih generatora kao i kod posebno specifikiranih zahtjeva vezanih uz povećano trajno nesimetrično opterećenje

Posljedice rada tijekom nesimetričnih opterećenja mogu biti pojava nejednakih i nesinusoidalnih napona na stezaljkama generatora, induciranih struja u prigušnom i manjoj mjeri uzbuđenom namotu zbog velikog induktiviteta tog namota. Zbog nesimetrije se razvijaju dodatni gubici u stroju koji ne postoje ili su zanemarivo mali u simetričnom režimu rada. Ta opterećenja preuzima na sebe prigušni namot rotora koji ujedno i ograničava mogućnost rada u nesimetričnom režimu (veličinu nesimetrije i vrijeme njenog trajanja). Vrijeme trajanja nesimetričnih režima je u većini slučajeva dovoljno dugo da upravo u tim režimima može doći do ranije opisanih pojava pregrijavanja i preskoka. Naime u kratkotrajnim prolaznim procesima kod turbogeneratora veličina struja faze je ograničena prigušnim djelovanjem masivnog rotora, ali one zbog malog toplinskog kapaciteta rotora zapravo pogoršavaju situaciju u duljem vremenskom periodu nesimetrične pojave ili asinkronog rada.

Nesimetrično opterećenje statorskog namota može se, koristeći se pravilima za simetrične komponente, prikazati preko dva simetrična sustava: direktnog i inverznog te preko nulte komponente. Direktni sustav stvara magnetski tok koji se vrti u istom smjeru i istom brzinom kao i rotor i u prigušnom namotu ne inducira struje. Inverzni sustav stvara magnetski tok koji se vrti brzinom glavnog polja, ali u suprotnom smjeru. Relativna brzina tog polja u odnosu na rotor jednaka je dvostrukoj brzini vrtnje rotora te će se u prigušnom namotu statora inducirati struje dvostruke frekvencije. Pulsacijsko polje ulančeno tim strujama vrti se s rotorom. Polje sa sinisnom raspodjelom u prostoru i sinusoidalnom promjenom u vremenu može se razložiti na dva polja koja se obrću u suprotnim smjerovima s polovicom amplitude i istom kružnom učestalošću. Komponenta polja rotora koja se okreće u direktnom smjeru u statoru će ulančiti tokove trostruke frekvencije i dok će druga komponenta ulančiti tokove inverznog polja osnovne frekvencije. Inverzni sustav će dakle u prigušnom namotu inducirati struje koje će nastojati prigušiti inverznu komponentu reakcije armature.

Zbog nesimetrije pojavljuju se u naponu i struji neparni harmonijski članovi čiji iznos ovisi o odnosu početnih reaktancija u direktnoj i poprečnoj osi. Ovaj odnos ima bitnu ulogu za ocjenu prigušnog namota rotora. U faznom naponu nesimetrično opterećenog generatora pojaviti će se i naponi trećeg harmonijskog člana čija će veličina ovisiti o razlici početnih reaktancija [2]. Struje trećeg harmonika razvijaju dodatne gubitke u statoru, pa je cilj da razlika početnih reaktancija bude što manja.

### **3.2.1.2. Njihanje**

Ugradnja prigušnog namota utječe na magnetsku tromost generatora. Za neke primjene prigušni namot je projektiran prema njegovom utjecaju na stabilnost sustava, ali u mnogim primjenama on postoji iz drugih razloga. Prema razlogu zbog kojeg je ugrađen prigušni namot ima manji ili veći utjecaj na stabilnost.

Prema trajanju pojave razlikujemo dva tipa njihanja:

- prolazna - uzrokovana promjenama tereta i
- postojana – uzrokovana pogonskim strojem ili pulsirajućim teretom mreže.

Dugotrajnije njihanje većeg intenziteta generatora u paralelnom radu na mreži je u svakom slučaju nepoželjno. Utjecaj na njihanje generatora je složena funkcija titrajnih sustava: mreže, generatorskog i turbinskog regulatora i uzбудnika. Ukoliko nisu dobro ugođeni svaki od ovih sustava može dodatno pobuditi njihanje stroja.

Kod promatranja stabilnosti mreže bitno je kako se odvija promjena neposredno nakon poremećaja. Mehaničko prigušenje turbine preko turbinskog regulatora ima puno veću vremensku konstantu odziva u odnosu na promjenu polja, odnosno elektromagnetskih prilika u generatoru. Tada dolazi do izražaja električno prigušenje odnosno asinkroni moment koji se stvara u generatoru.

U samom generatoru njihanje proizvodi dodatne gubitke, mehanički opterećuje rotor i može biti dodatni izvor buke. Kod turbogeneratora čiji su polovi masivni prigušenje nastaje i od induciranih površinskih vrtložnih struja, čiji je utjecaj na prigušenje njihanja dostatan, pa bi se moglo zaključiti da ugradnja prigušnog namota u ovom slučaju nije neophodna. Međutim iako inducirane struje strujnih krugova masivnih dijelova rotora reagiraju u prvom trenutku, prigušni namot je taj koji će na sebe preuzeti strujna opterećenja i zaštititi površinu rotora od razvijanja dodatnih gubitaka (specifični gubici u prigušnom namotu pri prolasku struje su manji od onih na površini rotora). Tok koji se ulančuje u prigušnom namotu niske otpornosti je približno konstantan, a namot ima relativno veliki toplinski kapacitet. Zbog toga on štiti površinu pola kod pojava koje traju dulje vrijeme.

### **3.2.1.3. Zaštitno djelovanje**

S obzirom da kavez reagira na svaku promjenu elektromagnetskih prilika u stroju on će sprječavati da se neka pojava proširi sa statora na rotor i obrnuto. Ovo svojstvo je nepovoljno kada zahtijevamo brzi odziv na promjenu uzbude (na primjer kod forsiranja uzbude). Međutim najznačajnije djelovanje koje razmatramo kod prigušnog namota je u slučaju nastanka udarnih kratkih spojeva. Intenzitet početnih vrijednosti struja ili napona ovisiti će o magnetskoj tromosti odnosno o veličini rasipnih tokova u generatoru. Najveće početne reaktancije imat će strojevi s lameliranim rotorom, slijede strojevi s masivnim polovima, dok strojevi s ugrađenim prigušnim namotom imaju najmanje početne reaktancije. Smanjivanje vrijednosti početnih reaktancija utječe na povećanje početnih vrijednosti struja, a time i napona kratkih spojeva.

Sam početni trenutak prijelazne pojave nije toliko interesantan za određivanje rasklopne moći generatorskog prekidača, koliko činjenica da početne vrijednosti struja kratkih spojeva izazivaju sile i momente višestruko veće od nazivnih, koje se prenose na statorski namot, rotor, spojku, ležajeve, kućište, temelje, te se prema njihovoj veličini i intenzitetu moraju dimenzionirati konstrukcijski dijelovi generatora. Zbog toga bez obzira na brzi prolazak pojave smanjenje početnih reaktancija nepovoljno utječe jer povećava vrijednosti udarnih struja kratkih spojeva.

Iako u modernim turbogeneratorima velikih snaga rasipanja, a time i početne reaktancije mogu biti iznimno niske, zbog postojanja masivnog tijela rotora ugradnja prigušnog namota rotora ne mora nužno nepovoljno utjecati na prvi trenutak prijelazne pojave. Razlog leži u konstrukciji prigušnog namota koji se smješta u utore u kojima se nalazi i uzбудni namot i to neposredno ispod klinova kojim su ovi namoti zaklinjeni i osigurani. Zbog blizine zračnog raspora i razlike dubine prodiranja vala u željezu i nemagnetskim klinovima prigušni efekt masivnog rotora doći će prvi do izražaja. To znači da će u samom početku pojave iznos početne reaktancije odrediti prigušni efekt vrtložnih struja masivnih dijelova rotora.

Općenito, kada u stroju ne postoji prigušni namot rotora i/ili prigušno djelovanje masivnih dijelova rotora jedini namot koji može utjecati na prijelaznu pojavu je uzbudni namot. U tom slučaju maksimalni napon slobodne faze poprimit će vrijednost:

$$u_{\max} = \sqrt{2}U_n \left( \frac{2x_d}{x'_d} - 1 \right), \quad (3.19)$$

gdje je  $U_n$  nazivni napon, a  $x_d, x'_d$  su sinkrona i prijelazna reaktancija u  $d$  osi. Ukoliko pak postoji prigušni namot izraz za maksimalni napon slobodne faze postaje

$$u_{\max} = \sqrt{2}U_n \left( \frac{2x''_q}{x''_d} - 1 \right), \quad (3.20)$$

gdje su  $x''_d, x''_q$  početne reaktancije u  $d$  i  $q$  osi. Izrazi su napisani za napone bez dekrementa. Najveći iznos struje i napona neke faze nastaju ako se kratki spoj dogodi u trenutku najvećeg ulančenja toka s tom fazom. Tjeme napona kasni pol periode, pa se uzima da dekrement uzima 10%. No bez obzira na smanjenje kod generatora bez prigušnog namota vrijednosti napona mogu poprimiti vrijednosti koje mogu oštetiti izolaciju. Osobito je opasan međufazni kratki spoj koji se dogodi na vodu koji polazi od generatora, a slobodna faza se odspoji od mreže i pri tome ima veliki kapacitet (dugi vodovi). Pri tome maksimalni naponi mogu poprimiti i veće odnosno razornije iznose, od onog iz (3.19).

### 3.2.2. Parametri sinkronih strojeva na koje utječe prigušni namot rotora

Stanja i odvijanje pojava u sinkronim strojevima, sukladno klasičnoj teoriji, opisana su reaktancijama i vremenskim konstantama. Reaktancije i vremenske konstante određuju namoti ugrađeni u generatoru i njihova konstrukcijska rješenja. Efekti prigušenja elektromagnetskih pojava se ocjenjuju i mjere preko početnih (subtranzijentnih) reaktancija generatora u dvije osi, inverzne reaktancije i početnih vremenskih konstanti. To su ujedno i parametri koji se koriste u proračunima mreže i za dimenzioniranje ostale generatorske opreme, prvenstveno rasklopne, zaštitne i mjerne.

U slučaju turbogeneratora s masivnim rotorom u obzir se mora uzeti površinsko djelovanje vrtložnih struja [11]. Kod takvih strojeva uvijek razlikujemo početne i prijelazne reaktancije u obadvije osi bez obzira da li postoji ugrađen prigušni namot rotora. Kada je prigušni namot rotora ugrađen, po svojoj strukturi obično predstavlja nesimetričan kavez, obzirom da se smješta u utore u kojima se nalazi uzbudni namot. Ako turbogenerator treba raditi s velikom inverznom komponentom [34], tada se na polu dodatno izrađuju posebni utori za smještaj prigušnog namota. Ovi utori u polu imaju i povoljni mehanički utjecaj na izjednačavanje modula elastičnosti u dvije osi, te zbog toga njihova izrada ne predstavlja veliko dodatno poskupljenje. Naime problem izjednačavanja modula elastičnosti tijela rotora u dvije osi ionako se mora rješavati njegovom strojnom obradom.

Prigušno djelovanje masivnog tijela rotora i/ili prigušnog namota može se sukladno teoriji sinkronih strojeva nadomjestiti s dva okomita namota (poglavlje 2.2.3). Zbog nesimetrije zračnog raspora parametri dvije osi će se međusobno razlikovati. Parametri generatora na koje utječe prigušni namot su:

**a) Početne (subtranzijentne) reaktancije stroja u obje osi  $x_d''$ ,  $x_q''$ .**

Načelno ugradnjom prigušnog namota statora one se smanjuju. Razlog tome je što prigušni namot rotora ne dopušta dublje prodiranje polja i ograničava ga na zračni raspor u početnom trenutku neke promjene. Potpuni prigušni namot u obliku kaveza, za razliku od onog nepotpunog u obliku rešetki na polovima hidrogeneratora jače prigušuje prijelaznu pojavu, odnosno smanjuje razliku početnih reaktancija u  $q$  osi.

U konstrukcijskom smislu potrebno je osigurati dobro povezivanje (nalijeganje) kratkospojnog prstena i vodiča prigušnog namota. Tada on bez obzira na svoju nesimetričnu izvedbu i konstrukciju približava vrijednosti početnih reaktancija u  $d$  i  $q$  osi tako da su one praktički jednake. Omjeri izmjerenih početnih reaktancija kod turbogeneratora koji nemaju ugrađen prigušni namot kreću se:  $X_q''/X_d'' = 1,36 - 1,5$ . Taj omjer prvenstveno ovisi o geometriji zračnog raspora odnosno omjeru broja namotanih utora  $N_r$  i diobenog broja utora rotora  $N_r'$ . Ukoliko je diobeni broj utora veći za isti broj namotanih utora veći će biti omjer početne reaktancije u  $q$  prema onoj u  $d$  osi.

U suvremenim turbogeneratorima u kojima je ugrađen prigušni namot vrijednost  $x_d''$  bliži se rasipnoj reaktanciji statorskog namota zbog malih rasipanja polja kod kojih je većina konstrukcijskih sklopova bliskih zračnom rasporu iz nemagnetskih materijala.

**b) Inverzna reaktancija  $x_2$**

Kada u namotu statora protječe inverzna struje  $I_2$  rasipna reaktancija namota statora ostaje ista kao i kod direktnog sustava  $x_{\sigma a}$ . U zračnom rasporu polje stvoreno inverznim strujama vrti se dvostrukom sinkronom brzinom prema rotoru i ulančuje tok u masivnom tijelu rotora i prigušnom namotu. Vrijednosti reaktancije se mijenjaju između  $x_d''$  one u  $d$  i  $x_q''$  one u  $q$  osi. Inverzna reaktancija je srednja vrijednost početnih reaktancija dvije osi za sinusoidalni napon  $x_2 = (x_d'' + x_q'')/2$ . Kada uz sinusoidalni napon postoji i inverzni napon

$$x_2 = \frac{2x_d x_q}{x_d + x_q}. \text{ Za dvofazni kratki spoj na stazaljicama generatora } x_2 = \sqrt{x_d'' \cdot x_q''}, \text{ a u slučaju}$$

jednofaznog kratkog spoja u zvjezdištu  $x_2 = \sqrt{(x_d'' + \frac{x_0}{2}) \cdot (x_q'' + \frac{x_0}{2})} - \frac{x_0}{2}$ . Kod nezasićenih reaktancija omjeri se kreću:  $x_q'' = 1,4x_d'' \rightarrow x_2 = 1,18x_d''$ ; dok su zasićene vrijednosti:  $x_q'' = 1,5x_d'' \rightarrow x_2 = 1,22x_d''$

Za turbogeneratore s kompletnim prigušnim namotom smještenim i u polu rotora inverzna reaktancija se smanjuje na:  $x_2 = (1,05 - 1,1)x_d$  [13]. Inverzna reaktancija se smanjuje ugradnjom prigušnog namota

**c) Inverzni radni otpor  $r_2$**

Općenito taj otpor može biti veći ili manji nakon ugradnje prigušnog namota, a ovisi od vrijednosti otpora prigušnog namota, odnosno da li je on niskootporni ili visokootporni.

Prigušni namot koji ima mali radni otpor proizvodi najveći moment na malim klizanjima, dok je kod prigušnih namota velike otpornosti maksimalni prigušni moment nastaje kod velikih klizanja. Površina masivnog tijela rotora ima karakteristike visokoomskog prigušnog namota. Kod kaveza rotora ovaj otpor treba biti čim manji.

#### d) Početne vremenske konstante $T_d''$ , $T_q''$ , $T_{d0}''$ , $T_{q0}''$

Početne vremenske konstante ovise o geometriji odnosno od vrijednosti radnog otpora i ekvivalentne induktivnosti prigušnog namota. Također vrijednosti početnih vremenskih konstanti sukladno definiciji ovise o tome da li je namot statora otvoren  $T_{d0}''$ ,  $T_{q0}''$  ili kratko spojen  $T_d''$ ,  $T_q''$ . Vrijednost početne vremenske konstante u  $d$  osi kada je statorski namot otvoren iznosi  $T_{d0}'' = 0,01 - 0,09$  s, a za kratko spojen statorski namot  $T_d'' = 0,1 - 0,17$  s. Vrijednost početne vremenske konstante u  $q$  osi kada je statorski namot otvoren iznosi  $T_{q0}'' = 0,01 - 0,5$  s [13].

Tijek prijelazne pojave se odvija na slijedeći način. Na samom početku inducirane struje na površini masivnog tijela rotora prve će se suprotstaviti promjeni toka koja dolazi sa strane statora. Polje na površini rotora za frekvenciju od 50 Hz se prigušuje na dubini od oko približno 2 mm. Vrijeme u kojem se zamjećuje djelovanje isključivo prigušnog efekta masivnih dijelova rotora je vrlo kratko obzirom na relativno mali reaktivni i visoki radni otpor površine željeza. Paralelno tok prodire u klinove koji imaju manji radni otpor. Za razliku od željeza polje u rotorskim klinovima koji se izrađuju iz aluminijske ili bronzne prodire bitno dublje (tablica 3.1). Ti klinovi su iz mehaničkih razloga, ovisno o promjeru rotora i otvoru utora rotora visine preko 10 mm. Prigušni kavez rotora je smješten neposredno ispod klinova što znači da će njegova reakcija vremenski kasniti. Klinovi i kavez rotora koji se mogu promatrati kao jedna cjelina, imaju mali reaktivni i mali radni otpor, pa ovaj dio prijelazne pojave traje dulje od prethodne, ali još uvijek se radi o stotim dijelovima sekunde. Nakon toga polje počinje dublje prodirati te se zamjećuje i utjecaj uzbuđenog namota. Prigušenje se nastavlja po funkciji čije trajanje je reda veličine nekoliko sekundi obzirom na veliki induktivitet uzbuđenog namota i njegov relativno mali radni otpor. Stroj je u prijelaznom dijelu pojave koji karakterizira prijelazna sinkrona reaktancija. Po isteku vremena određenog prijelaznom vremenskom konstantom nastupa stacionarno stanje definirano sinkronim reaktancijama u dvije osi.

Treba konstatirati da na prijelazni proces kod turbogeneratorskog utjecaju i ostali dijelovi bliski zračnom rasporu osim površine tijela rotora i rotorskih klinova. Zbog relativno malih konstrukcijskih razmaka i malih radijusa utjecaj dijelova poput rotorskih kapa ili tlačnih ploča nije zanemariv.

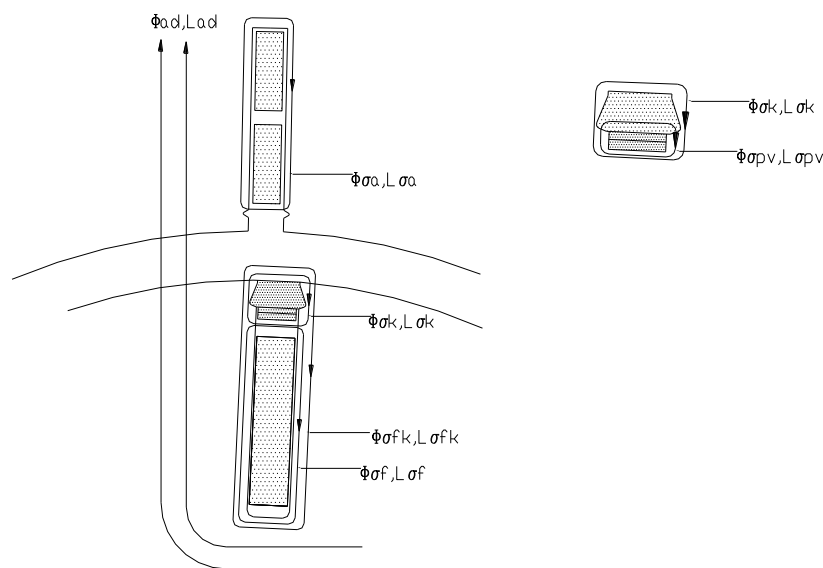
Korištenjem operatorskih jednadžbi u poglavlju 2.5.7. za izračun vremenskih konstanti i unošenjem parametara koji opisuju efekt masivnog tijela rotora u operatorske nadomjesne sheme rješavanje sustava se bitno usložnjava.

### 3.2.3. Nadomjesna shema prigušnog namota rotora turbogeneratorskog

Zbog specifičnosti konstrukcije turbogeneratorskog s masivnim rotorom i relativno malog volumena u kojem se vrši pretvorba energije, tijekom početka prijelazne pojave definiraju različiti strujni krugovi čiji se utjecaj javlja s različitim vremenskim pomacima. Ukupno vrijeme početka prijelazne pojave o kojima je veličine par desetaka milisekundi te je jasno da se takva osjetljiva dinamika može teško provjeriti ispitivanjima.

U uvodu je rečeno da je izračun elemenata nadomjesnih shema u projektnom smislu zahtjevan, odnosno da proizvođači koriste modele koji proizlaze iz izmjerenih veličina tipskih turbogeneratora. Međutim i metode koje su dostupne za ova mjerenja su složene u primjeni, a većina njih ima i destruktivni karakter. Posljedica toga je da su i dalje tolerancije za početne i prijelazne reaktancije relativno velike, te da se nisu mijenjale usprkos mogućnostima točnijih izračuna.

Magnetsku inerciju stroja opisuju rasipanja njegovih aktivnih dijelova. Na slici 3.2. predstavljeno je glavno polje i rasipna polja u blizini zračnog raspora. Na shemama poput ove ne vide se rasipanja nastala od induciranih vrtložnih struja, ali se jasno može razdvojiti glavni tok koji je ulančuje namote od rasipnih tokove pojedinih namota. Tokovi rasipanja između uzbudnog i prigušnog namota interesantni su kada promjena stanja – ulančenog toka dolazi od promjene struje uzbudnog namota. Tada se prigušni namot suprotstavlja promjeni toka koju izaziva promjena uzbudne struje. Kada promjena dolazi sa statorske strane to međudjelovanje se može zanemariti, što je najčešći slučaj u razmatranjima.



**Slika 3.2** Glavni i rasipni tokovi i induktiviteti namota generatora u blizini zračnog raspora:

$\Phi_{ad}, L_{ad}$  - glavni tok i induktivitet stroja u  $d$  osi;

$\Phi_{\sigma a}, L_{\sigma a}$  - rasipni tok i induktivitet statorskog namota;

$\Phi_{\sigma f}, L_{\sigma f}$  - rasipni tok i induktivitet uzbudnog namota rotora;

$\Phi_{\sigma k}, L_{\sigma k}$  - ukupni rasipni tok i induktivitet vodiča prigušnog namota rotora i klinova;

$\Phi_{\sigma f k}, L_{\sigma f k}$  - ukupni rasipni induktivitet uzbudnog namota rotora i prigušnog namota rotora;

$\Phi_{\sigma p v}, L_{\sigma p v}$  - rasipni induktivitet vodiča prigušnog namota rotora.

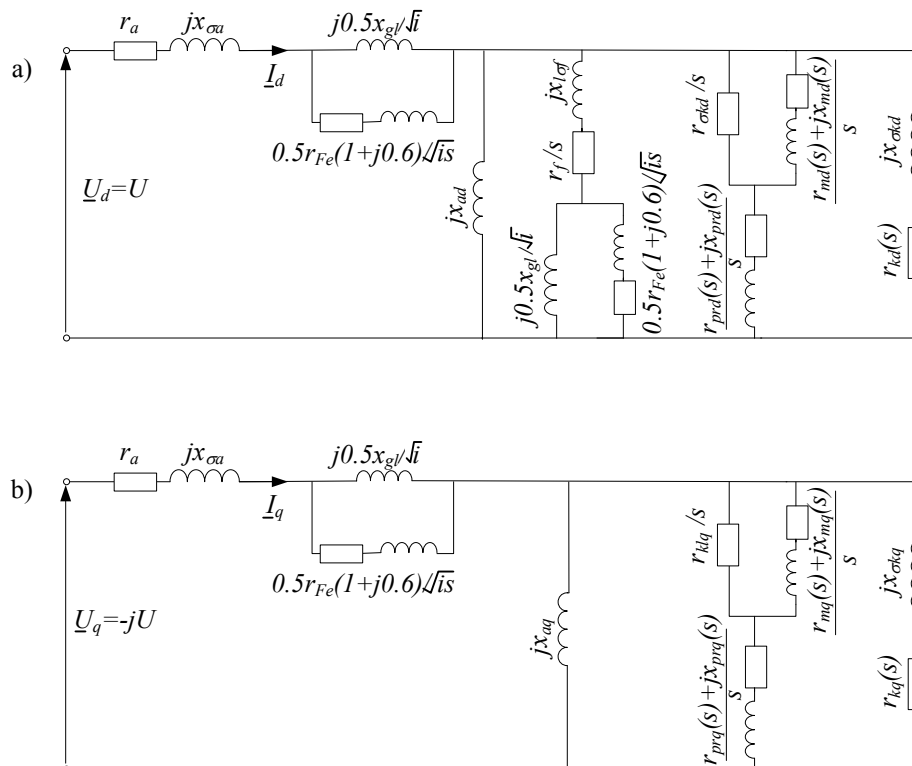
Konstruktivski dijelovi ovisno o materijalu od kojih su izrađeni i geometriji manje ili više utječu na prijelazne pojave. Polje određene frekvencije prodire u materijal do dubine određene njegovom vodljivošću i permeabilnosti [9]. Dubina prodiranja se računa prema izrazu (3.21) i predstavlja dubinu na kojoj se val priguši na 36.8 % početne vrijednosti. Na dubini  $3d_k$  val se priguši na približno 5 % početnog iznosa:

$$d_k \approx \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \kappa}}. \quad (3.21)$$

**Tablica 3.1 Dubine prodiranja sinusnog polja u bakar, lamelirani statorski lim i čelik rotora pri frekvenciji 50 Hz**

Bakar (20 °C)	Klinovi rotora (20 °C)	Lamelirani lim (20 °C)	Rotorske kape P900 (20 °C)	Rotorske kape P2000 (20 °C)	Čelik rotora (20 °C)
$\kappa=57 \text{ Sm/mm}^2$	$\kappa=17\text{-}37 \text{ Sm/mm}^2$	$\kappa=4 \text{ Sm/mm}^2$	$\kappa= 1,37 \text{ -}1,4 \text{ Sm/mm}^2$	$\kappa= 1,020 \text{ Sm/mm}^2$	$\kappa=7,7 \text{ Sm/mm}^2$
$\mu_r=1$	$\mu_r=1$	$\mu_r=2000\text{-}6978$	$\mu_r=1,004$	$\mu_r=1,0018$	$\mu_r=994$
$dk \approx 9,4 \text{ mm}$	$dk \approx 17,2\text{-}11,7 \text{ mm}$	$dk \approx 0,796 \text{ -}0,426 \text{ mm}$	$dk \approx 60.1 \text{ mm}$	$dk \approx 70.4 \text{ mm}$	$dk \approx 0,81 \text{ mm}$

Rasipanja glava namota bit će veća ili manja ovisno o materijalu konstrukcijskih dijelova koji ih okružuje. Ukoliko u turbogeneratoru postoje zasloni koji štite krajeve statorskog paketa od pregrijavanja u kapacitivnom režimu rada kada se generator uzbuđuje strujama statorskog namota, rasipanja su najmanja. Rasipanja glava namota statora u tom slučaju se mogu računati s  $\mu_r = 0$ , što znači da se prodiranju polja u zaslonu suprotstavljaju inducirane struje. Ukoliko generator ima i nemagnetske rotorske kape za isti omjer magnetskih i strujnih specifičnih opterećenja, rasipanja su najmanja. Kada su tlačne ploče rotora od nemagnetskih materijala rasipanja glava namota se mogu računati s  $\mu_r = 1$ , a za tlačne ploče od magnetskih materijala rasipanja se povećavaju, pa se treba računati i s većom relativnom magnetskom permeabilnošću.



**Slika 3.3 Nadomjesna shema turbogeneratora u asinkronom režimu rada a) d osi, b) q osi.**  
 $r_a$  - radni otpor statorskog namota;

$x_{\sigma a}$  - rasipna reaktancija statorskog namota;  
 $x_{gl}$  - dodatni utjecaj tijela rotora i rotorskih kapa na povećanje rasipanja glava namota;  
 $r_{fe} = f(x_{gl})$ , empirijski dobivena ovisnost parametara;  
 $x_{ad}; x_{aq}$  - induktivni otpor reakcije armature za osnovni harmonik u  $d$  i  $q$  osi ;  
 $x_{mfe} / r_{mfe} = 0,6$  empirijski dobiven omjer induktivnih i radnih otpora masivnog željeza;  
 $x_{md}; x_{mq}$  - induktivni otpori željeza pola u  $d$  i  $q$  osi ;  
 $x_{prd}; x_{prq}$  - induktivni otpori kratkospojnog prstena preko željeza  $d$  i  $q$  osi ;  
 $s$  - klizanje;  
 $i$  - omjer struja  $I / I_n$  ;  
 $r_f$  - radni otpor uzbuđenog namota;  
 $x_{\sigma f}$  - rasipna reaktancija uzbuđenog namota;  
 $x_{\sigma kd}; x_{\sigma kq}$  - rasipne reaktancije prigušnog namota-kaveza u  $d$  i  $q$  osi ;  
 $r_{kld}; r_{klq}$  - radni otpor klinova u  $d$  i  $q$  osi ;  
 $r_{\sigma kd}; r_{\sigma kq}$  - radni otpor kaveza u  $d$  i  $q$  osi ;  
 $U_d; U_q$  - naponi  $d$  i  $q$  osi .

Jedna od projektantskih nadomjesnih shema turbogeneratora prikazana je na slika 3.3 [4]. Utjecaj masivnog tijela rotora i glava namota promatra se u serijskoj vezi s rasipnom reaktancijom statorskog namota. Na shemi su uzeta u obzir i prigušna djelovanja pasivnih konstrukcijskih elemenata poput rotorskih kapa i rotorskih klinova. Problem ovakvog prikaza nastaje kada se rasipna reaktancija statora mjeri bez rotora sukladno [IEC 600034-2] kao i kada se mjere početne reaktancije sukladno istom standardu. Temeljem tih mjerenja ne može se odvojiti prigušenje samog kaveza bez utjecaja prigušnog djelovanja masivnog tijela rotora. Zbog toga se parametri izračunavaju empirijski preko veličine strujnog obloga.

Utjecaj klinova može se promatrati zajedno s prigušnim namotom na način kao što je to slučaj kod dvostrukog kavezu asinkronog motora [17]. Fizikalna slika podupire ovu tvrdnju obzirom da su klinovi kratko spojeni tako što im je površina međusobnog nalijeganja povećana te da se vodiči prigušnog namota nalazi neposredno ispod njih. Gornji kavez dakle čine klinovi, a donji vodiči prigušnog namota. Donji kavez obuhvaćaju tokovi  $\phi_{\sigma k}$  i  $\phi_{\sigma pv}$  sa slike 3.2, a gornji  $\phi_{\sigma k}$ . Kavezi su spojeni zajedničkim kratkospojnim prstenom kroz koji ulančuje jedinstveni tok oba kaveza. Impedancija štapova dvostrukog kaveza može se izračunati preko:

$$Z_{\sigma s} = jx_{\sigma kl} + \frac{1}{\frac{1}{R_{kl}} + \frac{1}{R_{pv} + jx_{\sigma pv}}}; \quad (3.22)$$

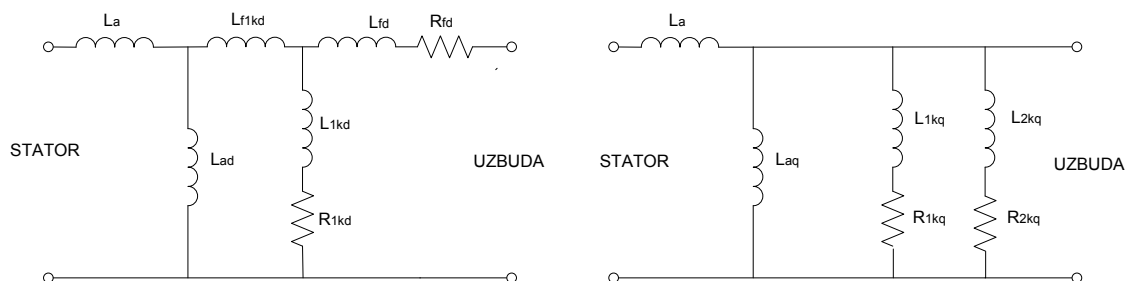
gdje su  $x_{\sigma kl}$  rasipna reaktancija u koju je uključeno rasipanje vrha utora, rasipanje prstena i diferencijalno rasipanje,  $r_{\sigma kl}$  radni otpor štapa klinova,  $x_{\sigma pv}$  rasipna reaktancija donjeg štapa od toka koji se zatvara u prostoru koji pripada vodiču kaveza i  $r_{pv}$  radni otpor vodiča prigušnog namota. Izračun prijelazne pojave preko dvostrukog kaveza je bitan obzirom da se na taj način može uzeti u obzir potiskivanje struje u kavezu. Izračun preko dvostrukog kaveza omogućava točniju simulaciju zaleta.



Za definiranje pojava neposredno nakon što se dogodio poremećaj sa strane mreže, dovoljno je uzeti u obzir prigušno djelovanje masivnog tijela rotora na polu i zubima, s njegovom rasipnim reaktancijama. Ovaj početak bi trebalo odvojiti od drugog dijela prijelazne pojave u kojoj dominira prigušenje dvostrukog kaveza. U tom slučaju govorimo o tri vremenske konstante u pojedinoj osi, odnosno sub-subtranzijentnoj, subtranzijentnoj i tranzijentnoj. Objektivni problem nastaje u mjerenju ovih konstanti.

Cilj je što točnije predvidjeti ponašanje pri radu turbogeneratorsa na mreži i "rekonstruirati" cijelu prijelaznu pojavu. Jedna od metoda kojom se s dostatnom točnošću određuju parametri i simulira prijelazna pojava je metoda napajanja različitom frekvencijom [16] generatora u mirovanju (eng. Standstill Frequency Response (SSFR test)). Pri simulaciji prijelaznih pojava razmatraju se nadomjesne sheme u pojedinoj osi različitog stupnja složenosti. Nadomjesne sheme sinkronih strojeva iz navedenog standarda predviđaju međudjelovanja maksimalno tri ekvivalentna prigušna kruga u  $q$  osi i dva u  $d$  osi. Sukladno metodi na statorski namota odspojenog generatora narinu se naponi i struje malog intenziteta ( $\pm 60\text{A}$ ;  $\pm 20\text{V}$ ). Test se izvodi s širokim rasponom frekvencija. Najniža frekvencija mjerenja treba imati periodu za red veličine manju od periode prijelazne vremenske konstante otvorenog namota (oko 0,1 Hz), dok se najviše narinute frekvencije nalaze između dvostruke i trostruke nazivne frekvencije generatora. Mjerenja se izvode s rotorom u mirovanju čija je os postavljena u  $d$  i  $q$  os faze na kojoj je narinut ispitni napon. Iz snimke odziva stroja korištenjem sofisticirane metodologije na primjer neuronskih mreža mogu se odrediti na učinkovit i ekonomičan način osnovne veličine strujnih krugova [23].

Na slici 3.4. prikazana je nadomjesna shema drugog reda preko koje se mjerenjem sukladno definicijama iz standarda IEEE Std. 115 [16], određuju parametri generatora u dvije osi. Induktivitet  $L_{f1kd}$  predstavlja diferencijalno rasipanje sa slike 3.2.



**Slika 3.4 Potpuna nadomjesna shema drugog reda u  $d$  i  $q$  osi prema IEEE 115 kojom se primjenom SSFR testa određuju parametri sinkronih strojeva.**

Osnovni nedostatak metode je taj što se mjerenja izvode s rotorom u mirovanju. Veliki broj električnih kontakata u rotoru turbogeneratorsa s masivnim rotorom je izveden na temelju nalijeganja. To su spojevi među klinovima, prigušnim vodičima i kratkospojenim prstenom. U rotaciji između ovih dijelova se ostvaruje "prisniji" spoj i smanjuje se radni otpor koji pak utječe na vremensku konstantu dvostrukog kaveza. Pri mjerenjima se koriste računске vrijednosti koje se nakon mjerenja prilagođavaju.

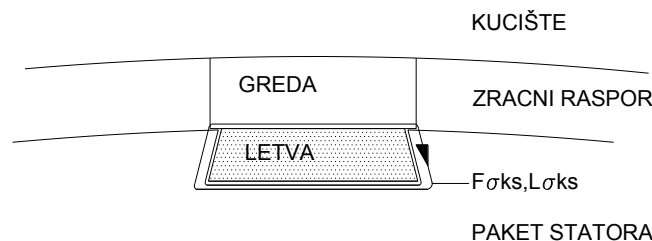
Pojave koje su dugotrajne, a u kojima do izražaja dolazi uloga prigušnog namota od najvećeg interesa su nesimetrična opterećenja. Analitički pristup izračunu struja u kavezu svodi se na definiranje inverzne komponente struje statora i izbor adekvatnog presjeka prigušnog namota koji bi na sebe preuzeo dugotrajno nesimetrično opterećenje bez prekoračenja dopuštenih granica zagrijavanja.

Međutim ukupna struja se neće ravnomjerno raspodijeliti u svim vodičima. U prigušnom namotu će protjecati različite struje zbog različitih vrijednosti ulančenih tokova

osnovnog i viših harmonika, koji su određeni vodljivošću zračnog raspora, položaju štapa i razmaku između dva promatrana štapa. Problem izračuna struje kroz pojedini štap kaveza je dakle vezan uz točno određivanje ulančenih tokova pojedine konture prigušnog kaveza na rotoru [26].

### 3.3. *Statorski prigušni namot kao novi konstrukcijski element i njegova uloga*

Prigušni namot statora novi je konstrukcijski element čiji se efekti ugradnje mogu teorijski razmatrati tek uz pomoć numeričkih metoda proračuna. Prigušni namot statora nalazi se na vanjskom obodu statora i smješten je u odgovarajuće utore slično kavezu asinkronih rotora. U električnom smislu postoji potpuna analogija. Konstrukcijski, štapovi prigušnog namota statora su letve kojima se osigurava mehanička veza između paketa statora i kućišta. Letve imaju oblik trapeza i smještene su u trapezne utore (slika 4.5) koji su oformljeni od limova statorskog paketa i simetrično raspoređeni po obodu statora. Zbog toga što se paketi statorskog namota slažu od segmentnih limova broj utora koji se nalaze u paketu vezan je uz broj segmenata limova po obodu generatora, broj utora statora i izabrani preklop kod slaganja segmenata limova. Letve koje u mehaničkom smislu nose paket, a u električnom predstavljaju štapove prigušnog namota, pričvršćuju se na grede koje su ovisno o tipu konstrukcije dio kućišta ili takozvanog korzeta. U slučaju kada su letve dio prigušnog namota statora one moraju biti izrađene od električki vodljivog materijala, za što su prikladne legure aluminija visokih mehaničkih karakteristika. Kako bi se postigao puni efekt prigušnog kaveza, letve se na krajevima spajaju kratkospojnim prstenom od istog materijala. Kod velikih turbogeneratorskih konstrukcija, konstrukcijski ovaj prsten može mehanički osiguravati krajeve statorskog paketa.



**Slika 3.5** Shematski prikaz štapa (letva) statorskog prigušnog namota;  $\Phi_{\sigma ks}, L_{\sigma ks}$  - rasipni tok i induktivitet statorskog prigušnog namota.

Poprečni presjek letve i njihov broj određen je maksimalnim mehaničkim opterećenjima koja mogu nastati u uvjetima udarnog dvofaznog kratkog spoja. Pokazat će se da izbor presjeka nije uvjetovan električnim opterećenjima, ali da se promjenom broja štapova prigušnog namota može utjecati na harmonijski sadržaj elektromagnetske sile koja se javlja između paketa i kućišta.

#### 3.3.1. **Djelovanje prigušnog namota statora**

Prigušni namot statora djeluje pri svakoj promjeni gustoće polja u jarmu statora. Iako se statorski namot nalazi u jarmu statorskog paketa, on je zapravo fizički dio kućišta. Između štapova prigušnog namota i paketa statora nalazi se određena zračnost, dok su letve učvršćene i naliježu jednom svojom stranom na čelične grede kućišta statora. Statorski prigušni namot reagira na svaku promjenu magnetskog polja ne dopuštajući da polje iz statorskog paketa

prodre u konstrukcijske dijelove kućišta. Samim tim smanjuje se rasipanje glavnog polja. Ovo djelovanje prigušnog namota je zamjetno u svim režimima rada generatora.

Potiskivanje glavnog polja u paket statora rasterećuje uzbudni namot rotora, te smanjuje gubitke u željezu obzirom da se rasipni dio toka zatvara na mjestu specifično manjih gubitaka.

Statorski prigušni namot reagira i u uvjetima kvara u kojima gustoća polja u jarmu trenutačno poprima visoku vrijednost. Njegovim djelovanjem smanjuju se sile udarnih kratkih spojeva koje se prenose na kućište. Također se smanjuju i sile elektromagnetskog porijekla koje se prenose na kućište u ustaljenim režimima rada. Obzirom da djelovanje prigušnog namota najveći utjecaj ima na jaram statora on ujedno djeluje na vibracije i smanjenje buke elektromagnetskog porijekla. Stoga taj namot ima utjecaj na elastično učvršćenje statorskog paketa u kućištu.

Statorski prigušni namot reagira na svaku promjenu polja u jarmu, a reakcija je proporcionalna veličini promjene. Doprinos prigušnog namota statora i njegovo djelovanje biti će prikazano na modelu s ugrađenim prigušnim namotom i uspoređeno s parametrima modela bez njega.

### **3.3.2. Parametri sinkronih strojeva na koje utječe prigušni namot statora i nadomjesna shema prigušnog namota statora turbogeneratora**

Slijedeći klasičnu teoriju za određivanje parametara generatora s ugrađenim statorskim prigušnim namotom bilo bi potrebno postaviti odgovarajući sustav diferencijalnih jednažbi iz kojeg bi se generirala nadomjesna shema, sukladno poglavlju 2.5. Ne postoji zapreka da se nadomjesna shema prigušnog namota statora prikaže i u dvije osi, preko Parkovih jednažbi. Pri tome se svi namoti, trofazni namot statora i  $n$ -fazni prigušni namot transformiraju u dvofazne. Za stacionarno stanje promatra se međudjelovanje onih strujnih krugova čije osi međusobno u vremenu čine različite kuteve.

Prigušni namot statora reagira na svaku promjenu toka koja se dogodi u jarmu statora. U praznom hodu magnetsko polje u jarmu statora stvoreno je djelovanjem uzbudnog namota. Glavno polje se kreće sinkronom brzinom  $\nu$ , a magnetska indukcija na mjestu  $x$  u jarmu statora je  $B_j(x)$ . U prigušnom namotu statora inducira se napon rotacije koji je proporcionalan  $e(t) = l\nu B_j(x)$ . U praznom hodu je statorski namot koji se nalazi između uzbudnog namota i prigušnog namota statora neopterećen, kroz njega ne protječu struje i on nema utjecaja na polje u generatoru. Kroz kratkospojeni prigušni namot će proteći struje koje će ovisiti o vodljivosti jarma na mjestu ugradnje štapa, što znači da nije svejedno da li je utor statorskog prigušnog u simetrali zuba ili utora. To su dva krajna slučaja razlike vodljivost jarma statora.

U režimu kratkog spoja statorskog namota, kada kroz trofazni statorski namot protječu struje kratkog spoja, resultantno polje  $\psi_j(t, x)$  u jarmu statora na mjestu  $x$  je vremenski promjenljivo, ali bitno slabije od onog u praznom hodu. Trofazni statorski namot je nepomičan prema prigušnom namotu te se u njemu inducira napon transformacije. U štapovima prigušnog namota poteći će struje koje ovise o vodljivosti jarma statora na mjestu ugradnje, ali i od mjesta na kojem se određeni štap nalazi prema pojedinoj fazi statorskog namota.

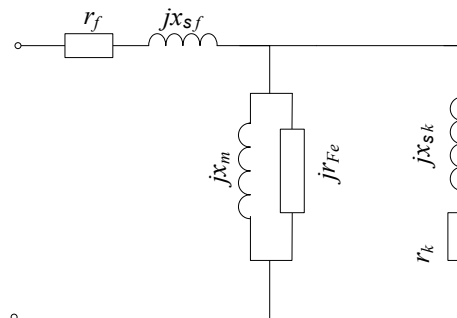
U generatoru koji radi s teretom polje u jarmu te resultantno polje nastalo superponiranjem djelovanja uzbudnog namota i reakcije armature. Magnetska indukcija u jarmu je većeg intenziteta nego u praznom hodu pa će i struje koje protječu kroz prigušni namot imati veće vrijednosti.

Za proučavanje utjecaja prigušnog namota najjednostavnije je poći od praznog hoda i sheme u kojoj se nalaze samo dva namota: uzbudni namot rotora i prigušni namot statora. Ovakav model je interesantan za ispitivanje utjecaja viših harmonika nastalih u zračnom rasporu. Sustav jednažbi napisan u matričnom obliku koji opisuje ovakav model sukladno klasičnoj teoriji je:

$$\begin{aligned} \Psi_k &= \mathbf{L}_k \mathbf{i}_k + \mathbf{L}_{kf} \mathbf{i}_f; \\ 0 &= \mathbf{R}_k \mathbf{i}_k + \frac{d\Psi_k}{dt} \end{aligned} \quad (4.18)$$

gdje je:  $\Psi_k$  – vektor ulančenog toka u pojedinoj konturi kaveza,  $\mathbf{R}_k$  – matrica otpora kaveznog namota statora,  $\mathbf{L}_k$  – matrica induktiviteta kaveznog namota statora,  $\mathbf{i}_k$  – vektor struja kaveza,  $\mathbf{L}_{kf}$  – matrica međuinuktiviteta rotorskog namota i kaveza statora,  $\mathbf{i}_f$  – vektor struje uzbuđe.

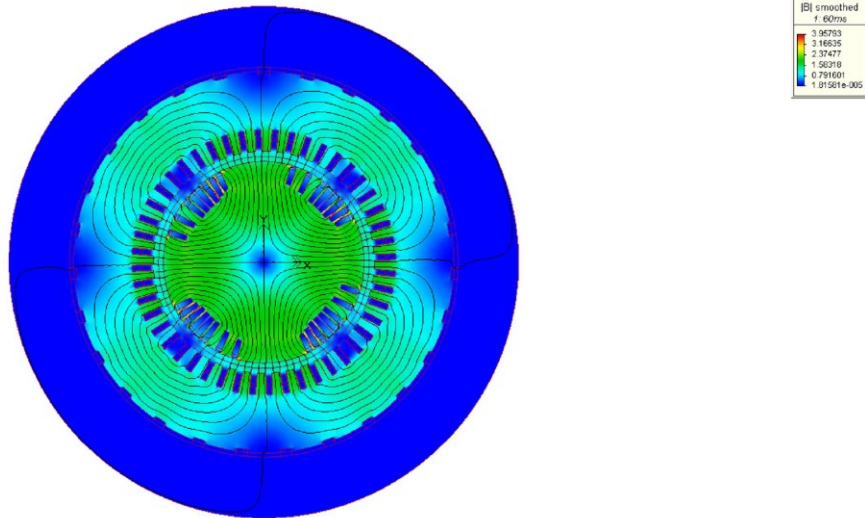
Na slici 3.6 prikazana je nadomjesna shema generatora sa statorskim prigušnim namotom u praznom hodu. Uzbudni namot je smješten u  $d$  os, ali obzirom da se radi o turbogeneratoru kod kojih se u literaturi često zanemaruje razlika induktiviteta dvije osi  $L_d \approx L_q$ , te na činjenicu da je statorski namot simetričan za potrebe ovog razmatranja nije nužno identificirati određenu os. Elementi sheme sa slike 3.6 koji se ujedno mogu izračunati klasičnim pristupom su parametri uzbuđnog i prigušnog namota statora,  $r_f, x_{sf}, r_k, x_{sk}$ , odnosno radni i rasipni induktivni otpori. Magnetska vodljivost zračnog raspora kao i reaktancija  $x_m$  su također poznati. Protjecanje kroz granu koja predstavlja otpor željeza  $r_{fe}$  u ovom slučaju ne može se zanemariti, obzirom da se veliki dio toka u jarmu zatvori prije no što obuhvati štapove uzbuđnog namota smještene na vanjskom obodu statora. Kod klasične teorije strojeva ova grana se obično zanemaruje i susreće iznimno u analizama asinkronih strojeva sa zatvorenim utorima.



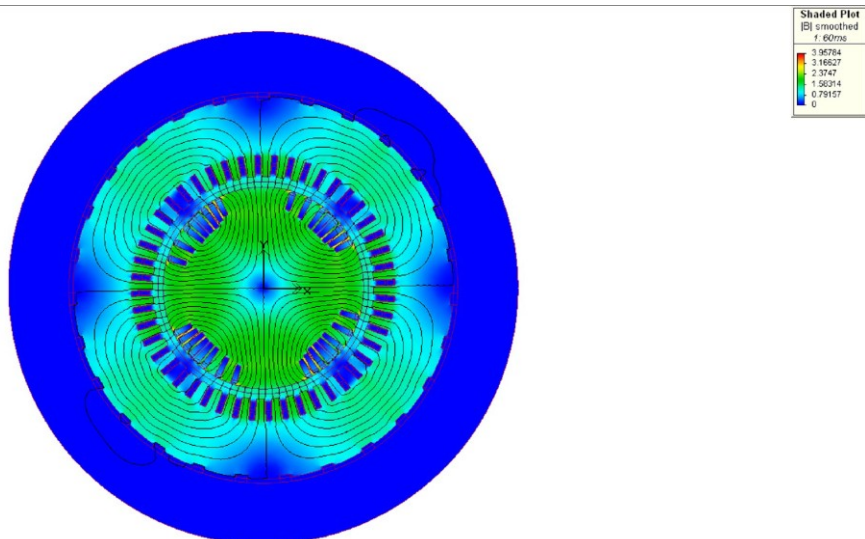
Slika 3.6 Nadomjesna shema generatora s prigušnim namotom statora u praznom hodu.

Otpor grane  $r_{fe}$  koji predstavlja otpor željeza je relativno mali i kroz tu granu će se zatvoriti veći dio toka. To je razlog zbog kojeg se kod prigušnog namota statora ne može klasičnim analitičkim postupkom odrediti ulančeni tok  $\Psi_k$  u strujnom krugu između dva štapa prigušnog namota koji se nalaze pod kutevima  $\alpha_k$  i  $\alpha_{k+1}$  u odnosu na  $d$  os. Jaram statora je potrebno po visini podijeliti na dijelove na kojima bi se računao pad magnetskog napona.

Proizlazi da se jedino numeričkom metodom konačnih elemenata može točno odrediti polje na vanjskom promjeru statora, pa tako i ulančeni tok  $\Psi_k$ . Za razliku od nadomjesnih shema koje daju samo srednje vrijednosti struja u štapovima prigušnog namota može se također odrediti i oblik i intenzitet struje u svakom štapu prigušnog namota koristeći se 2D dinamičkom simulacijom.



a) prigušni namot statora nije spojen



b) prigušni namot statora kratko spojen

**Slika 3.7** Gustoća polja i ulančeni tokovi generatora kada bi u njemu bila ugrađena samo dva namota: uzбудni namot rotora i prigušni namot statora: a) kada je prigušni namot otvoren i b) kada je prigušni namot kratko spojen.

Kako bi se ocjenio utjecaj kaveza statora na uzbudni namot dinamičkom simulacijom pomoću metode konačnih elemenata, proračuni će se napraviti za glatki stator, odnosno generator koji nema utore za smještaj trofaznog statorskog namota (slika 3.7). Na taj način se mogu izračunati inducirane struje u štapovima prigušnog namota statora. Rezultati detaljne provjere da li je njihov intenzitet dostatan da se utjecaj prepozna i u zračnom raspore, dani su u Poglavlju 5.

### 3.4. Zaključak trećeg poglavlja

Ugradnja prigušnih namota utječe na magnetsku tromost generatora.

Za neke primjene prigušni namot rotora je projektiran prema njegovom utjecaju na stabilnost sustava, ali u mnogim aplikacijama on postoji iz drugih razloga. Prema razlogu zbog kojeg je ugrađen prigušni namot ima manji ili veći utjecaj na stabilnost rada generatora.

Za procese unutar samoga stroja prigušni namot rotora ima puno složeniju ulogu koja nije nužno uvijek pozitivna. Obzirom na prigušno djelovanje masivnog tijela rotora negativni učinak koji imaju male vrijednosti početnih reaktancija prigušnog namota na povećanje vrijednosti udarnih struja kratkih spojeva ne dolaze do izražaja. Ugradnja prigušnog namota na rotoru povećava dimenzije rotora i cijenu generatora. Međutim u slučaju turbogeneratorske neosporan je doprinos prigušnog namota rotora u proširenju područja rada u nesimetričnim opterećenjima, zaštiti rotora te omogućavanju rada u asinkronim režimima, pa čak i zaleta generatora s masivnim rotorom.

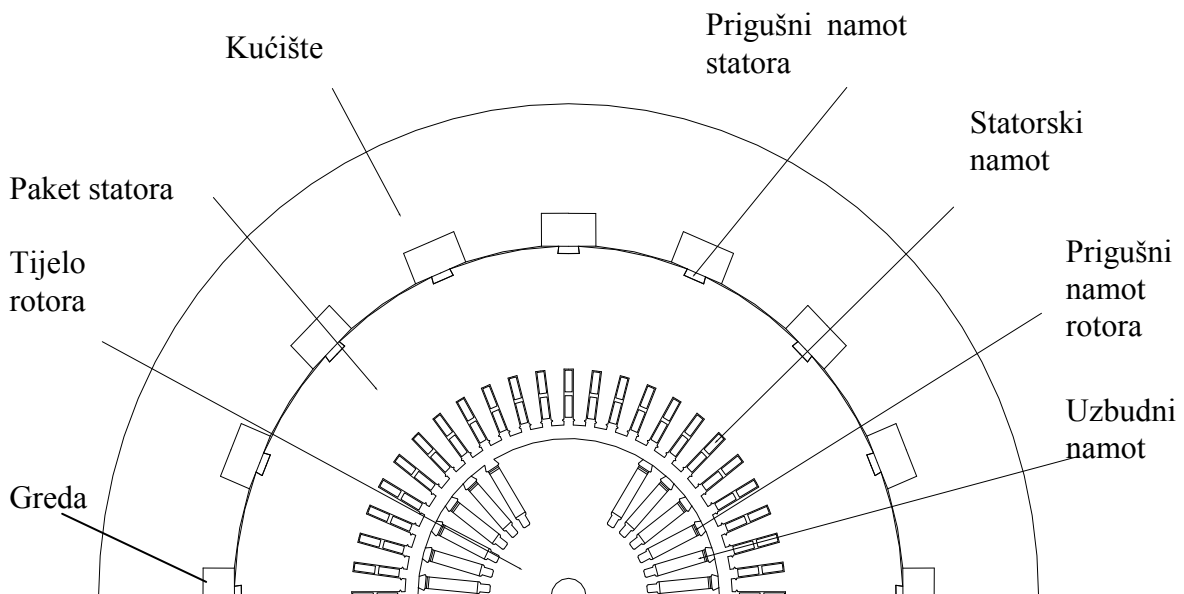
Na tragu uloge koju ima prigušni namot rotora i istraživanja koja su do sada provedena može se zaključiti da pristup izračunu određenih stanja u stroju nije jednoznačan i da se vrijednosti dobivene izračunom moraju kritički promatrati. Za izračun parametara pri projektiranju generatora i za tumačenja mjerenja bitno je poznavati materijale aktivnih i pasivnih dijelova ugrađenih u generator u blizini zračnog raspora. Tumačenje mjerenja i njihova usporedba s projektnim podacima i prilagodba parametara nije moguća bez informacije o konstrukcijskoj izvedbi pojedinog sklopa. Bez toga je rekonstruiranje početnog odvijanja prijelazne pojave i zahtjeva koji proističu na ostalu opremu bez obzira na točnost metode mjerenja nepotpuno i nedostatno.

Osim točnijim proračunima i novim materijalima poboljšanje dizajna se temelji i na novim konstrukcijskim elementima. Poznavanje utjecaja takvog sklopa i njegovog doprinosa ukupnom dizajnu je nužno. Kako bi se opisao statorski prigušni namot koriste se svi elementi proračuna razvijeni do sada kao i spoznaje o dinamici električnih strojeva. Ideja slijedi iz činjenice da se kavez suprotstavlja promjeni polja i prigušuje elektromagnetske pojave između dva sklopa. Ukoliko postoji statorski prigušni namot ugrađen u generatoru u statoru će biti veća jakost polja nego u slučaju kada on nije ugrađen obzirom da će se struje ulančene u kavezu suprotstaviti prelasku polja sa statora na kućište. To znači da će se za istu uzbudnu struju u praznom hodu u statorskom namotu ulančiti veći tok, zbog smanjivanja rasipnog toka. Osim kod specifično visoko opterećenih strojeva ugradnja prigušnog namota statora može biti interesantna kod svih generatora kod kojih je visina jarma statora definirana prvenstveno gustoćom polja, kao i u slučajevima kada se u cilju povećanja snage postojećeg generatora treba rasteretiti rotor i/ili smanjiti buka.

## 4. Primjena numeričkih metoda pri proračunu sinkronih strojeva

U ovom poglavlju objasnit će se uloga numeričkog proračuna u rješavanju problema vezanih uz točniji izračun magnetskih prilika u turbogeneratoru. Također će biti prezentirano kako se, koristeći dostupan komercijalni numerički program [29], određuje utjecaj prigušnog namota statora na prilike u stroju.

Za izračun polja u turbogeneratoru s prigušnim namotom statora koristi se dvodimenzionalni model generatora s elementima prikazanim na slici 4.1. Model stroja je realna fizikalna slika i opisuje stvarni izgled stroja koji je nacrtan jednostavnim ravnim linijama i lukovima. Geometrijskim područjima koja predstavljaju pojedine dijelove pridružuju se materijali od kojih se ti dijelovi izrađuju. Svaki materijal opisan je preko specifičnih koeficijenata koji opisuju fizikalna svojstva (otpornost, permeabilnost, temperaturna vodljivost, mehanička čvrstoća i drugi) ili karakteristične nelinearne funkcije (na primjer B-H krivulja magnetiziranja željeza). Disertacija se temelji na određivanju elektromagnetskih prilika u stroju, pa se koriste vrijednosti koje se nalaze u jednadžbama elektromagnetskog polja ili indirektno utječu na njih (na primjer otpor u zagrijanom i hladnom stanju) [5]. Međutim ovisno o vrsti problema isti model može se koristiti i za druge proračune poput toplinskog ili mehaničkog s opisom fizikalnih svojstava materijala iz tih područja. Danas se na tržištu mogu naći različiti programski paketi koji imaju mogućnost kompleksnih izračuna, a jedan od njih korišten u ovom radu je MagNet (Infolytica).



**Slika 4.1** Presjek jednog dvopolnog turbogeneratora i elementi korišteni za izračun 2D elektromagnetskog polja

Izračun djelovanja prigušnog namota statora rađen je u dvije dimenzije 2D metodom konačnih elemenata. Rješavanje problema elektromagnetskog polja u stroju u tri dimenzije 3D metodom je vremenski i procesorski zahtjevno i nepotrebno za većinu problema iz prakse što se može jednostavno objasniti. U dijelu koji se bavi analitičkim proračunom konstatirano

je da je polje koje se nalazi u stroju praktički homogeno u podužnoj osi  $z$ . Kako su namoti fizički postavljeni paralelno s osi  $z$ , a silnice polja paralelne i pod pravim kutom u odnosu na tu os odstupanja koja nastaju u statoru s radijalnim rashladnim kanalima su zanemariva, a ostaje problem rasipanja polja na krajevima stroja.

Unatoč izračunu polja u dvije dimenzije, svi modeli za numerički proračun moraju biti predstavljeni trodimenzionalno. Duljina sinkronog stroja je s dostatnom točnošću predstavljena idealnom duljinom statora dobivenom iz analitičkog proračuna. Kako model stroja ne poznaje vrijednosti parametara izvan zadanih dimenzija u strujne krugove koje kreiramo dodatno se unose vrijednost rasipnih induktiviteta i radnih otpora glava namota i kratkospojnog prstena prigušnih kavezova. Te vrijednosti se s dostatnom točnošću mogu analitički izračunati pogotovo za glave namota i kratkospojne prstene koji se nalaze u zraku [3]. Također se vrijednosti narinutih napona ili struje unose u strujne krugove kao naponski odnosno strujni izvor.

Za proračun polja u čeonom prostoru samo 3D metoda daje pouzdane rezultate i realnu sliku polja. Međutim izračun polja u čeonom prostoru je zaseban problem koji u teoriji električnih strojeva odnosno pri projektiranju generatora dobiva na značaju kada se razmatraju uvjeti rada generatora u kapacitivnom režimu, odnosno kada statorski namot djeluje kao uzbudni namot. Tada dolazi do povećanog rasipanja polja u čeonom prostoru i povećanog zagrijavanja krajeva paketa, obzirom da je statorski namot raspodijeljen u utorima na provrtu statora, a glave istaknute. Kod turbogeneratora ova pojava najviše izražena zbog velikih glava namota koje obuhvaćaju približno polovicu odnosno četvrtinu kruga [10]. Stoga se proučavanje ovog režima rada generatora i pojava u čeonom prostoru treba računati u tri dimenzije kako bi se rasipna polja glava namota i dodatna zagrijavanja koja ona u čeonom prostoru uzrokuju mogli točno izračunati.

#### 4.1. Osnovne jednadžbe elektromagnetskog polja

Osnovne jednadžbe koje opisuju elektromagnetska polja čini reducirani sustav Maxwellovih jednadžbi:

$$\begin{aligned}
 \operatorname{rot} \bar{H} &= \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}, \\
 \operatorname{rot} \bar{E} &= -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \\
 \operatorname{div} \bar{J} &= -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \\
 \bar{D} &= \varepsilon \bar{E}, \\
 \bar{B} &= \mu \bar{H}, \\
 \bar{J} &= \kappa \bar{E}.
 \end{aligned}
 \tag{4.1, a-f}$$

Sustav se sastoji od 16 jednadžbi u kojima se pojavljuje pet vektorskih  $\bar{E}, \bar{B}, \bar{D}, \bar{H}, \bar{J}$  i jedna skalarna funkcija  $\rho$  koje treba odrediti. Da bi se određeni problem riješio potrebno je za svaku od jednadžbi zadati rubne (prostorne) i početne (vremenske) uvjete. Broj potrebnih rubnih uvjeta je različit i ovisi o prostoru unutar kojeg se promatra polje, o raspodjeli veličina  $\bar{E}, \bar{B}, \bar{D}, \bar{H}, \bar{J}$  i  $\rho$  unutar tog prostora i o načinu na koji je zadana raspodjela po rubnim plohama tog prostora u jednom trenutku promatranja [21].



#### 4.1.1. Osnovne jednadžbe statičkog i kvazistatičkog polja

U sinkronim strojevima rješavamo statička magnetska polja i kvazistatička magnetska polja kod kojih je promjena polja harmonijska. Elektromagnetsko polje u vodičima se temelji na magnetskom polju. Zato se zanemaruju struje pomaka i skalar potencijal. I kod proračuna indukcije u statoru zanemaruju se struje pomaka  $\partial \bar{D} / \partial t$  zbog niske frekvencije i zbog toga što djeluju radijalno u izolacijskim materijalima. Zato u modelu nije potrebno označavati izolacijske materijale, a prostor koji bi oni zauzeli ispunjava se zrakom.

Izvori statičkog magnetskog polja u stroju mogu biti istosmjerne struje ili permanentni magneti. Jednadžbe koje opisuju magnetsko polje su:

Amperov zakon:

$$\text{rot } \bar{H} = \bar{J}, \text{ u vektorskom obliku } \nabla \times \bar{H} = \bar{J} \quad (4.2)$$

i Gaussov zakon:

$$\text{div } \bar{B} = 0, \text{ u vektorskom obliku } \nabla \cdot \bar{B} = 0, \quad (4.3)$$

gdje je  $\bar{H}$  vektor jakosti magnetskog polja, a  $\bar{J}$  predstavlja gustoću struje.  $\bar{B}$  je vektor magnetske indukcije. Međusobno su dvije veličine  $\bar{B}$  i  $\bar{H}$  koje opisuju magnetsko polje povezane karakteristikama prostora u kojem se problem rješava preko:

$$\bar{B} = \mu_r \mu_0 \bar{H}, \quad (4.4)$$

gdje je  $\mu_r \mu_0$  magnetska permeabilnost.

Stoga za kvazistatičko magnetsko polje vrijedi Faradayev zakon:

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \quad (4.5)$$

uslijed promjene magnetskog polja na krajevima vodiča stvara se razlika potencijala, a kada vodiče kratko spojimo u njima protječe struja proporcionalna induciranom električnom polju  $\bar{E}$  i električnoj vodljivosti  $\kappa$ :

$$\bar{J}_i = \kappa \bar{E}. \quad (4.6)$$

Statičko polje opisuje jedan “zamrznuti” trenutak odnosno stacionarno stanje u stroju poput rada u praznom hodu ili u stacionarnom stanju na sinkronoj brzini vrtnje. Za ostale prijelazne režime rada u obzir se mora uzeti efekt induciranih struja.

#### 4.1.2. Uvjeti na granici

Maxwlove jednadžbe opisuju točke u prostoru okoliša u kojem se svojstva materijala mijenjaju kontinuirano. To znači da se i problem rješava zasebno unutar okoliša točke u kojem možemo smatrati prostor homogenim. Međutim u jednoj domeni postoji jedinstveno magnetno polje i nema diskontinuiteta na granicama. Stoga je poseban problem rješavanje polja s dvije strane plohe diskontinuiteta.

Općenito na granicama materijala različitih svojstava događa se nagla promjena značajki  $\varepsilon$ ,  $\mu$ ,  $\kappa$ , koje opisuju elektromagnetsko polje. Nakon primjene Maxwellovih jednadžbi u integralnom obliku s obje strane diskontinuiteta:

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} \rightarrow \oint_l \bar{H} d\bar{l} = \int_s \bar{J} n dS, \quad (4.7)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = \bar{0} \rightarrow \oint_s \bar{B} n dS = 0. \quad (4.8)$$

Dobivamo:

$$\bar{n} \times (\bar{H}_2 - \bar{H}_1) = \bar{K}, \quad (4.9)$$

$$\bar{n} \cdot (\bar{B}_2 - \bar{B}_1) = 0. \quad (4.10)$$

Izraz 4.3 govori da tangencijalna komponenta vektora  $\bar{H}$  na prijelazu između dvije površine čini skok za iznos gustoće slobodnih plošnih struja  $\bar{K}$  (često nazivanih strujni oblog). Izraz 4.4 opisuje da normalna komponenta od  $\bar{B}$  prelazi plohu kontinuirano. Zakon loma za linije vektora  $\bar{B}$  govori da su tangensi ulaznog i izlaznog kuta proporcionalni permeabilnosti materijala iz kojeg  $\bar{B}$  izlazi i onog u koji ulazi:

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}. \quad (4.11)$$

Ako je pak materijal konačne vodljivosti ne može biti plošne struje  $\bar{K} = 0$  što znači da na površini vodiča

$$\bar{n} \times (\bar{H}_2 - \bar{H}_1) = 0. \quad (4.12)$$

U idealnom vodiču svi slobodni naboji moraju se raspodijeliti tako da su tangencijalna komponenta električnog polja na površini i ukupno polje u vodiču nula. Dobri vodiči poput bakra i aluminija u proračunima MKE se tretiraju kao idealni pri razmatranju elektromagnetskog polja izvan vodiča. Na površini idealnog vodiča u elektromagnetskom polju ne može biti normalne komponente od  $\bar{B}$ .

### 4.1.3. Magnetski vektor potencijal

U elektromagnetskim poljima obično je najpogodniji matematički opis problema preko parcijalnih diferencijalnih jednadžbi oblika  $F\varphi = g$  koje predstavljaju opći izraz fizikalnih zakona. Funkcija  $\varphi$  može biti skalarni električni potencijal ( $\varphi$ ) ili vektorski magnetski potencijal ( $\bar{A}$ ). Te veličine su općenito funkcije triju koordinata prostora ( $x, y, z$ ) i vremena ( $t$ ). Pogodnost rješavanja problema magnetskih polja MKE preko  $\bar{A}$  je u tome što vektorski magnetski potencijal prelazi granicu dva različita materijala kontinuirano..

Kako jednadžba 4.3 ukazuje na solenoidni oblik polja, vektor  $\bar{B}$  može prikazati kao rotor drugog vektora, odnosno vektorskog magnetskog potencijala  $\bar{A}$ :

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A}. \quad (4.13)$$

Iz jednadžbi 4.2 i 4.3 slijedi:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_r \mu_0} \nabla \times \bar{A} \right) = \bar{J}. \quad (4.14)$$

Ta jednadžba se rješava numerički preko metode konačnih elemenata (MKE).

Važna veličina u magnetskim poljima koju koristimo u analitičkom proračunu je magnetski tok  $\phi$  koji se definira kao:

$$\phi = \int_S \bar{B} \cdot \bar{n} S, \quad (4.15)$$

i predstavlja tok, odnosno količinu magnetskih silnica koja prelaze kroz neku površinu. Ova je veličina osobito značajna za rješavanje problema preko približne analitičke metode magnetskih krugova. Kada se u 4.15 izrazi  $\bar{B}$  preko  $\bar{A}$  dobiva se:

$$\phi = \int_S \nabla \times \bar{A} \cdot \bar{n} S = \oint_l \bar{A} \cdot d\bar{l}. \quad (4.16)$$

Gornja jednakost slijedi iz primjene Stokesova teorema. Pri prijelazu granice između dva magnetska materijala na kojima nema slobodnih plošnih struja mora biti zadovoljen uvjet kontinuiranosti tangencijalne i okomite komponente vektorskog magnetskog potencijala.

#### 4.1.4. Dvodimenzionalna polja

Polja koja se rješavaju u dvije dimenzije su statička polja i kvazistatička sinusoidalna promjenjiva magnetska polja u kojima promjene koje se događaju u z osi ne utječu na raspodjelu polja u ravni x-y. Ranije smo konstatali da je to slučaj u sinkronim strojevima.

U 2D sustavu magnetski vektorski potencijal ima korisna svojstva. U translatornoj geometriji pravocrtnom x-y koordinatnom sustavu struja pa tako i  $\bar{A}$  su u z osi ( $A = A_z$ ). Komponente od  $\bar{B}$  dane su kao

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y}; B_y = -\frac{\partial A}{\partial x}. \quad (4.17)$$

Kod statičkih polja sve su veličine neovisne o vremenu pa su potencijali realne funkcije  $A_z = A_z(x, y)$  u fazorskoj ravni. Kod sinusoidalno promjenjivih polja uvodi se kompleksno  $e^{j\omega t}$  pa se potencijal računa preko kompleksne funkcije:

$$\underline{A}_z = A_{zR}(x, y) + jA_{zI}(x, y). \quad (4.18)$$

Stoga se MKE proračun statičkih polja vrši se u realnom, a sinusoidalno promjenjivih odnosno kvazistatičkih polja u fazorskom području.

Skalarnu vrijednost  $A$  određuje magnetski potencijal. Magnetski tok između dvije točke u x-y ravni je

$$\phi = d(A_1 - A_2), \quad (4.19)$$

gdje je  $d$  dubina po z osi između točaka 1 i 2, a  $A_1$  i  $A_2$  vrijednosti magnetskog vektor potencijala u tim točkama. Iz ovoga slijedi da je  $A$  tok magnetskih silnica po metru, a jedinica Wb/m.

Za rotacionu geometriju i r-z cilindrični koordinatni sustav koristi se funkcija:

$$V = rA, \quad (4.20)$$

gdje je  $r$  udaljenost od centra. Tada su linije konstantnog  $V$  su linije toka magnetskih silnica, a on se između dvije točke izračunava preko:

$$\phi = 2\pi(V_1 - V_2). \quad (4.21)$$

Tako  $V$  zapravo predstavlja tok po radijanu (Wb/rad).

#### 4.1.5. Opći oblik jednadžbe za rješavanje statičkih i kvazistatička polja u električnom stroju

Jednadžbe kojim se rješavaju različiti složeni problema dvodimenzionalnih elektromagnetskih polja preko vektorskog potencijala su dvodimenzionalne linearne eliptičke diferencijalne jednadžbe. Te jednadžbe u prostoru ispunjenom homogenim materijalom glase:

$$\frac{\partial^2 \underline{A}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{A}_z}{\partial y^2} + \underline{F} = 0, \quad (4.22)$$

gdje je  $F$  funkcija koja ima različite oblike ovisno o problemu koji se rješava. Isto tako u funkciji  $F$  mogu biti sadržane realne ili kompleksne funkcije ili realni i kompleksni koeficijenti (konstante). U nastavku je dan mogući oblik funkcije  $F$ .

Za vodič priključen na zadani napon  $U_1$  u kojem se uzima u obzir skin efekt rješavamo Helholtzovu jednadžbu obzirom da je:

$$\underline{F} = -j\omega\mu\kappa \underline{A}_z + \mu\sigma U_1. \quad (4.23)$$

Za vodič u kojem se zanemaruje skin efekt rješava se Poissonova jednadžba:

$$\underline{F} = \mu\kappa U_1, \quad (4.24)$$

Za pasivni vodič u kojem se induciraju vrtložne struje rješava se Helholtzova jednadžba:

$$\underline{F} = -j\omega\mu\kappa \underline{A}_z. \quad (4.25)$$

Za prostor koji nije vodljiv  $\kappa = 0$ ,  $F = 0$ , rješava se Laplaceova jednadžba.

Elektromagnetska polja rješavaju se parcijalnim diferencijalnim jednadžbama oblika (4.22), koje pripadaju općoj jednadžbi eliptičkog tipa. Pridruživanjem rubnih uvjeta iz svih ili gotovo svih mogućih rješenja jednadžbi odabire se ona kombinacija rješenja koja zadovoljava postavljene rubne uvjete.

#### 4.2. Metoda konačnih elemenata (MKE)

Nepoznata funkcija magnetskog polja rješava se u domeni (modelu) koja je obuhvaćena zatvorenim rubnom plohom koja obuhvaća model. Metoda konačnih elemenata temelji se na dva osnovna koraka u rješavanju sustava diferencijalnih jednadžbi [18]:

- podjela domene na elemente u kojima rješavamo nepoznatu funkciju,
- približavanje nepoznatoj funkciji na svakom elementu.

Pri postavljanju problema potrebno je voditi računa da među elementima nema preklapanja, da ne postoje nepokrivena područja (rupe) te da se unutar jednog elementa značajke materijala i izvori se ne smiju razlikovati. Pravila se mogu zadovoljiti ako je geometrija analitički definirana. Točke kojima je definirana geometrija elemenata nazivaju se geometrijski čvorovi. Ti čvorovi pripadaju elementu i njegovoj granici. Najjednostavniji geometrijski elementi su trokuti koji imaju sa susjednim elementom zajednička dva čvora. Slijedi postupak prebacivanja stvarnih elemenata i referentne elemente bezdimenzionalnog koordinatnog sustava. Osnovna značajka MKE je ovisnost približenja funkcije na elementu samo o vrijednostima funkcije u interpolacijskim čvorovima koji pripadaju tom elementu. Jednadžbe koje smo zadali u stvarnoj domeni prebacujemo u referentnu i u njoj iterativnim

postupkom rješavamo sustav linearnih algebarskih jednadžbi. Točnost i opseg primjene metode su u biti ograničeni samo veličinom sustava koji računalo kojim raspolažemo može riješiti

#### 4.2.1. Preprocesiranje i postprocesiranje

Prilikom rješavanja zadanog problema potrebno je postaviti model u MKE. Postavljanje modela sastoji se od slijedećih koraka:

- Analiza geometrije i formiranje modela koji predstavlja dovoljno približavanje problemu koji se razmatra:

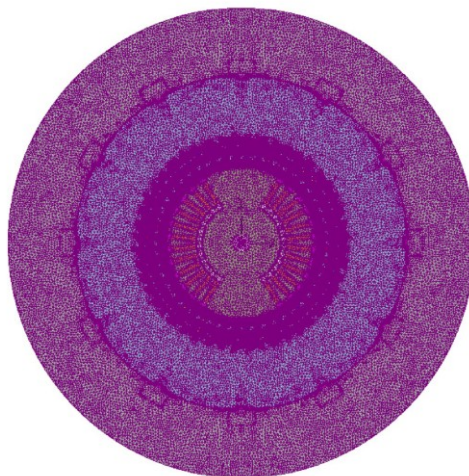
U komercijalnim programima nakon što se nacrtava oblik tijela i pridružene realne dimenzije, dobivena je domena i rub domene u kojoj će se rješavati jednadžbe. Geometrijski lik treba predstaviti nizom pravih i zakrivljenih linija, a sva područja koje one opisuju i dijele moraju biti zatvorena. Model mora sadržavati osnovne značajke koje utječu na točnost rješenja i iz njega se trebaju izostaviti svi elementi koji opterećuju procesor, a bitno ne doprinose točnosti.

- Pridruživanje karakteristika materijala područjima koja predstavljaju različite elemente i/ili materijale:

Područjima odvojena zatvorenim linijama dodjeljuju se karakteristike materijala od kojih su izrađeni dijelovi domene. U našem slučaju dijelovi su statorski paket, tijelo rotora, namoti i kućište, a opisuju ih magnetske karakteristike i vodljivosti.

- Generiranje mreže konačnih elemenata:

Jedan od preduvjeta kvalitetnog izračuna polja numeričkom metodom je i izbor adekvatne mreže za proračun. Kako bi se osigurala točnost i brzi izračun postavlja se gušća mreža u područjima gdje je promjena polja veća, što je slučaj u zračnom rasporu, u zubima statora i rotora u zoni statorskog prigušnog namota odnosno na mjestima diskontinuiteta materijala. U aplikacijama korisnik ima mogućnost izabrati fizičku veličinu elementa i mrežu zadati automatski, a program sam optimira njen izgled. Koliko se na ovaj način točnost povećava dovoljno govori činjenica da u klasičnom proračunu magnetskih krugova u iterativnom postupku računa indukciju u zubu ili u polu na tri visine (dno, sredina, vrh), a u jarmu svega na jednoj i to isključivo u simetrali elementa.



**Slika 4.2 Automatski generirana mreža za izračun dvopolnog turbogeneratorskog rotora s 48 utora i zadanom maksimalnom veličinom elementa u zračnom rasporu 5 mm, a ostalim dijelovima 15 mm.**

Mreža se može generirati automatski, automatski uz zadanu maksimalnu veličinu elementa ili unošenjem maksimalne veličine elementa za svako definirano područje ovisno.

- Definiranje rubnih uvjeta i njihovo unošenje u sustav jednažbi:

Za numeričko rješavanje eliptičkih jednažbi nužno je da rub bude zatvoren, odnosno da ima konačnu ploštinu i da su u svim točkama rubne krivulje propisani odgovarajući rubni uvjeti. Područje promatranja problema je zatvoreno kada je potpuno okružimo rubovima na kojima propisujemo takozvane rubne uvjete. U 2D proračunima rubni uvjeti se postavljaju duž zatvorene linije koja obuhvaća domenu u kojoj se problem promatra bilo da se nalazi na vanjskim plohama samog geometrijskog oblika ili da je izvan njega. Razlikujemo:

a) Diricketove rubne uvjete na kojima je tok tangencijalan. Funkcija toka ( $A$  ili  $V$ ) je konstantna na bilo kojem dijelu ruba pod ovim uvjetima, pa taj dio ruba postaje dijelom linije toka. Matematički ovaj uvjet zapravo znači da je  $\overline{A} = 0$  na dijelu ruba na kojem vrijedi Diricletov uvjet.

b) Neumannovi ili normalni uvjeti polja koji govore da  $\overline{B}$  djeluje pod pravim kutom na bilo kojem dijelu ruba tako da linije toka ulaze pod pravim kutom na tom dijelu ruba. Matematički ovaj uvjet zapravo znači da je  $\frac{\partial \overline{A}}{\partial n} = 0$  na dijelu ruba za koji vrijedi Neumannov uvjet.

c) Churchillov unutrašnji problem govori da na dijelu ruba mogu postojati takvi uvjeti da funkcija koja ih opisuje može biti linearna kombinacija prethodna dva uvjeta.

Iako je određivanje ispravnih rubnih uvjeta, koji će dati jedinstveno rješenje, matematički problem, u praktičnim situacijama nam pomaže fizikalno tumačenje. Za dobro formulirani problem postoji rješenje, ono je jedinstveno i stabilno. Kada postoji jedan ili više identičnih dijelova modela koji se ponavljaju po krugu ili translatorno, na tim dijelovima se slika polja ponavlja, te se numerički proračun može napraviti samo za taj dio. Stoga treba voditi računa o ravninama simetrije i o razdiobi svih primarnih izvora uzbude (namoti i magneti). Na ravninama simetrije definiraju se takozvani promjenjivi parni ili neparni rubni uvjeti.

Postupak koji je do sada opisan je zapravo priprema za rješavanje matematičkog problema odnosno preprocesiranje, a dio programskih sustava koji ga podržava je preprocesor.

Rješavanje sustava jednažbi MKE obavlja jezgra programskih sustava i rezultat koji dobivamo je niz vrijednosti nepoznate funkcije u čvorovima koji definiraju njezino matematičko približavanje.

Kako je numerička metoda zapravo izračun niza brojeva koji su matematičko približavanje rezultatu, oni bi bez dalje obrade bili nepogodni za korištenje u inženjerskoj praksi. Stoga posebni dijelovi programskih sustava, postprocesori omogućavaju grafički prikaz rezultata, funkcije lokalnih naprezanja i ostalih podataka iz inženjerske prakse.

#### 4.2.2. Analiza modela koji opisuje turbogenerator

Kod crtanja modela turbogeneratora treba imati u vidu kako se računaju sile preko MKE. Sila na vodič kroz koji protječe struja u magnetskom polju opisana je Lorencovom jednažbom:

$$\overline{F} = \int \overline{J} \times \overline{B} dv, \quad (4.26)$$

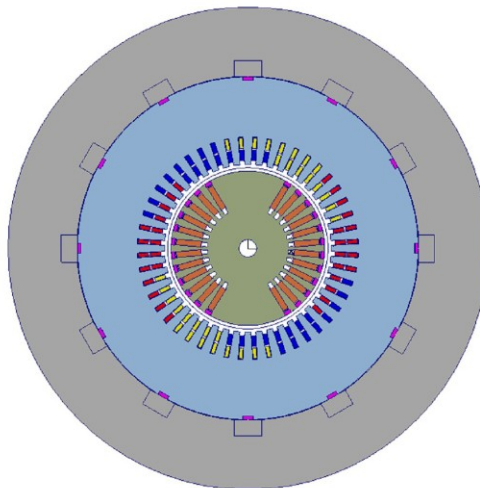
gdje je sila  $\vec{F}$  na vodič kroz koji protječe struja  $\vec{J}$  u elementu volumenu  $dv$  u kojem vlada polje  $B$ . U programu MagNet sila se računa za:

- 1.) dio povezanih područja koji su u potpunosti okruženi zrakom;
- 2.) bilo koje područje (vodiči) kroz koje protječe struja.

Ako su vodiči sastavni dio magnetskih područja onda vrijedi kao pod 1.).

U modelu turbogeneratorskog koji je korišten u proračunu štapovi statorskog namota čine zasebnu cjelinu s kućištem, što je realna situacija obzirom da između limova statora i letvi odnosno kućišta postoji zračni raspor, dok su letve čvrsto spojene s gredama koje su zavarene u kućištu.

U realnom modelu zračni raspor između paketa i kućišta je na mjestima između paketa i letvi odnosno greda veoma mali (u toleranciji paketiranja do 0,5 mm). Paket praktički naliježe na korzet, a zasebna težina svakog elementa se mjeri u tonama kod turbogeneratorskih velikih snaga. Za prijelaz s magnetski vodljive sredine na zrak, veličina zračnog raspora i kvaliteta materijala s druge strane zračnog raspora, u ovom slučaju kućišta, imaju relativno mali utjecaj na sama rasipanja. Međutim vrijednost ulančenog toka i tako nastalih gubitaka u kućištu usko su povezani s visinom indukcije u jarmu statora, udaljenošću kućišta od paketa, te s postojanjem prigušnog namota, što će se u daljnjoj razradi pokazati.



**Slika 4.3 Model dvopolnog turbogeneratorskog s 48 utora trofaznog namota statora i 12 štapova prigušnog namota statora.**

Iako su statorski i uzбудni namoti isto okruženi zrakom za razmatranja su relevantna dva zračna raspora i to onaj između statora i rotora u kojem se odvija pretvorba energije i između statora i kućišta koji je bitan za izračun utjecaja statorskog prigušnog namota.

U modelu kreiramo četiri odvojena namota: statorski, rotorski, prigušni namot rotora i prigušni namot statora. Namotima se definiraju strane svitka, svici, brojevi zavoja i spojevi svitaka. Statorski namot jedne faze spaja se u seriju, a za vezu u zvijezdu se po jedan kraj svake faze kratko spaja, sukladno shemi namota. Uzбудni namot se također spaja u seriju tako da obrezuje sjeverni i južni pol. I kod modeliranja prigušnih namota preslikava se realna geometrija i štapovi se paralelno spajaju s dva kratkospojna prstena sa svake strane tako da obrazuju kavez.

Utjecaj prigušnog namota statora dobiva se usporedbom rezultata proračuna za modele:

- Kada štapovi statorskog namota nisu spojeni – prigušni efekt ne postoji pa je to slučaj modela bez prigušnog namota statora.
- Kada su štapovi prigušnog namota kratko spojeni – model sa prigušnim djelovanjem namota.

Na sredini zračnog rasporeda postavlja se kružnica koja raspored dijeli na pola i na taj način omogućava izvođenje proračuna polja kada se rotor vrti. Zračni raspored sa strane bliže rotoru putuje sa svim rotirajućim dijelovima, a statorski dio zračnog rasporeda stoji. Vrtanju čini niz diskretnih koraka koji su tim gušći što je zadano vrijeme između dva koraka kraće.

### 4.3. Karakteristike ugrađenih materijala u modelu generatora

Glavnim dijelovima sa slike 4.1 pridružujemo materijale od kojih su oni izrađeni. Području rotora i statora zadaje se konstantna permeabilnost u slučaju linearne analize i karakteristika magnetiziranja u slučaju nelinearne analize. Za materijal od kojega je načinjen namot zadaje se vodljivost.

#### 4.3.1. Materijal limova statorskog paketa

U statorske pakete turbogeneratora ugrađuju se orijentirani i neorijentirani limovi. Kako je prikazano u tablici 4.1 postoje više kvaliteta limova koji se razlikuju po debljini i specifičnim gubicima, ali moraju zadovoljiti iste minimalne uvjete krivulje magnetiziranja. Za neorijentirani lim u biti postoji samo jedna debljina i kvaliteta materijala koja se ugrađuje u turbogeneratorima.

Tablica 4.1 Standardne karakteristike limova statorskog paketa koji se ugrađuju u turbogeneratore

Gubici 1.5 T 50 Hz W/kg	SURA Grade EN10106 -1995	Debljina (mm)	Min magnetska polarizacija J* (T) na 2500 A/m	Min magnetska polarizacija J* (T) na 5000 A/m	Min magnetska polarizacija J* (T) na 10.000 A/m
2,35	M235-35A	0,35	1,49	1,6	1,7
2,5	M250-35A	0,35	1,49	1,6	1,7
2,7	M270-35A	0,35	1,49	1,6	1,7
2,5	M250-50A	0,5	1,49	1,6	1,7
2,7	M270-50A	0,5	1,49	1,6	1,7
2,9	M290-50A	0,5	1,49	1,6	1,7

\*)  $J=B-\mu_0H$

Orijentirani lim je anizotropni materijal i ima različita svojstva u uzdužnoj osi – osi smjera valjanja i u poprečnoj osi. Magnetske karakteristike lima u smjeru okomitom na smjer valjanja slične su onima kod neorijentiranog lima. Za smjer osi valjanja propisuju se karakteristike navedene u tablici 4.2.

Tablica 4.2 Standardne karakteristike limova statorskog paketa koji se ugrađuju u turbogeneratore

Gubici 1,5 T 50 Hz W/kg	Gubici 1,7T 50 Hz W/kg	SURA Grade EN 10107	Debljina (mm)	Min magnetska polarizacija J* (T) na 800A/m	Gustoća (kg/dm <sup>3</sup> )
1,11	1,65	M111-35A	0,35	1,75	7,65

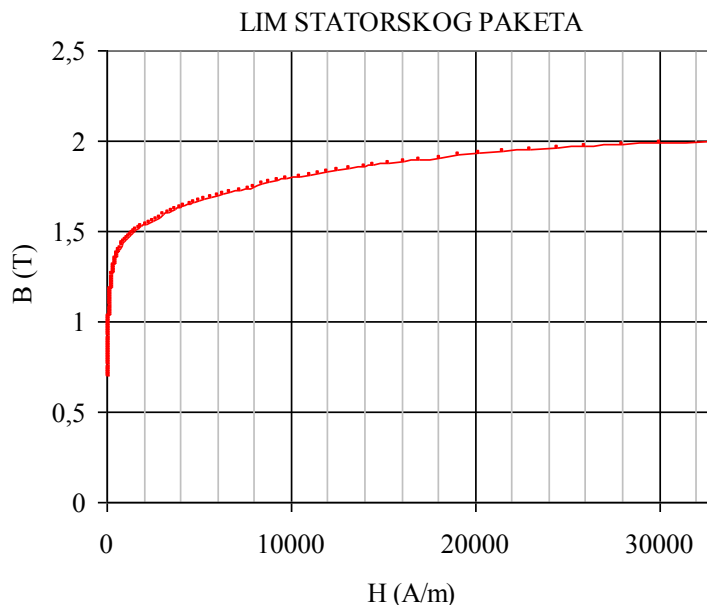
\*)  $J=B-\mu_0H$



Orijentirani lim se ugrađuje prvenstveno u novije tipove dvopolnih turbogenerators, međutim kod dvopolnih i četveropolnih generators najvećih snaga statori se izrađuju od neorijentiranih limova. Razlozi su prije svega komercijalnog karaktera, obzirom da je ugradnja orijentiranih limova tehnološki zahtjevnija, a lim skuplji.

U statoru generators orijentirani lim se ugrađuje tako da se smjer valjanja poklapa sa smjerom polja u jarmu. Obzirom na dužinu puta koji silnice u jarmu prolaze i veliku masu jarma statora kod dvopolnih i četveropolnih generators ugradnjom tog materijala smanjuje se uzbudna struja za istu vrijednost ulančenog toka kao i gubici u jarmu statora.

U radu se koristi krivulja magnetiziranja standardnog neorijentiranog lima koja je prikazana na slici 4.4.

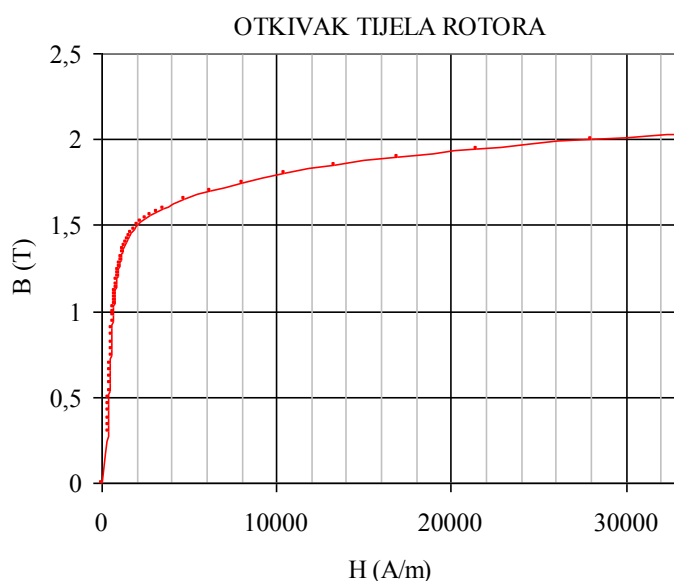


**Slika 4.4** Standardna krivulja magnetiziranja neorijentiranog lima statorskog paketa korištena u proračunu

#### 4.3.2. Materijal tijela rotora

Tijelo rotora turbogenerators izrađuje se od čeličnog otkivka visokih mehaničkih, kemijskih, magnetskih i toplinskih svojstava. Ove uvjete zadovoljavaju visokolegirani nikal-krom-molibdenski čelici. Posebno je zahtjevno na najvećim otkivcima zadovoljiti postavljene zahtjeve vezane uz mehaničku čvrstoću, no to ne umanjuje značaj visokih magnetskih karakteristika ovog dijela stroja. Kao i kod statorskih limova i za otkivke tijeka rotora propisuju se minimalne vrijednosti gustoće polja koja se mora doseći za određenu vrijednost narinute uzbuđe u karakterističnim točkama. Kako je rotor specifično najopterećeniji dio generators sigurno je da će poboljšanje magnetskog karakteristika materijala rotorskih otkivaka doprinijeti daljnjem razvoju turbogenerators.

Krivulja magnetiziranja za čelik rotora u razmatranim primjerima prikazana na slici 4.5.



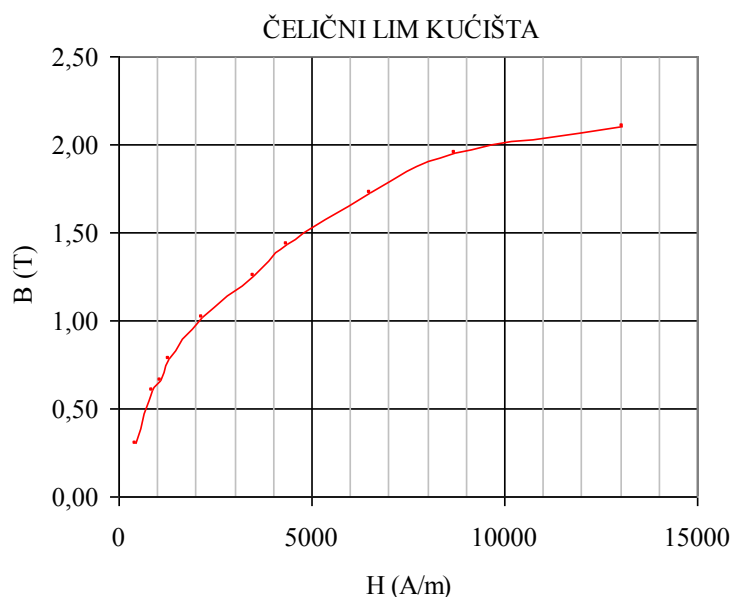
Slika 4.5 Standardna krivulja magnetiziranja rotorskog čelika korištena u proračunu.

#### 4.3.3. Materijal kućišta statora

Za potrebe rada napravljena su mjerenja B-H krivulje materijala lima od kojeg se izrađuju kućišta statora turbogeneratora. Mjerenja su rađena na prstenastom čeličnom uzorku, Vanjski promjer prstena je 110 mm, debljina 10 mm a visina 5 mm. Na prsten je namotano 1500 zavoja promjera 0,8 mm, otpornosti na  $R_{25^{\circ}\text{C}} = 2,7 \Omega$ .

Tablica 4.3 Izmjerene vrijednosti magnetski karakteristika prstenastog uzorka lima kućišta generatora.

Mjereno			Izračunato		
I (A)	U (V)	$U_i$ (V)	H (A/m)	B (T)	$\mu_r$
0,1	5	4,99	435	0,30	548,8
0,2	10	9,99	870	0,60	548,8
0,25	11	10,98	1087	0,66	482,8
0,3	13	12,97	1304	0,78	475,4
0,5	17	16,95	2174	1,02	372,6
0,8	21	20,89	3478	1,25	287,0
1	24	23,85	4348	1,43	262,1
1,5	29	28,72	6522	1,72	210,4
2	33	32,56	8696	1,96	178,9
3	36	35,08	13043	2,11	128,5



**Slika 4.6 Ispitana krivulja magnetiziranja čeličnog lima kućišta statora.**

Za vrijednost relativne permeabilnost možemo uzeti konstantnu vrijednost od  $\mu_r = 548,8$  obzirom da će indukcija u kućištu biti ispod 0,6 T.

#### 4.3.4. Materijali namota statora i rotora

Materijali namota statora i rotora su dio ulaznih podataka za proračun.

**Tablica 4.4 Standardne karakteristike materijala namota.**

Namot	Oznaka materijala	Električna vodljivost Sm/mm <sup>2</sup>	Gustoća Kg/dm <sup>3</sup>
Fazni statorski	ECu 58	57,7	8,9
Uzbudni	CuAg0,1P F25	57	8,9
Prigušni statora	AlMg5F30	37	2,7
Prigušni rotora	CuAg0.1P F25	57	8,9

##### 4.3.4.1. Statorski namot

Vodiči statorskog namota podijeljeni su na dione vodiče i po dubini utora cijelom duljinom statora translaterani tako da čine tzv, Röebl štap. Kod direktno hlađenih statorskih namota manji broj dionih vodiča je šupalj (izrađen od bakra ili nemagnetskog čelika). Oznaka bakra dionog vodiča je ECu 58. Magnetsko polje proučavamo izvan vodiča, te postojanje dionih vodiča nije od značaja za sami izračun polja. Cijeli štap se promatra kao teoretski idealan vodič, odnosno kao da unutar njega ne postoji polje.

##### 4.3.4.2. Uzbudni namot rotora

Vodiči uzbudnog namota su izrađeni od profiliranog srebrom legiranog bakra (CuAg0.1P F25. DIN 17666. DIN 46433). Ugradnjom ovog materijala poboljšavaju se mehanička svojstva i otpornost prema puzanju. Električna vodljivost je dana u tablici 4.4.

#### **4.3.4.3. Prigušni namot statora**

Statorski prigušni namot je izrađen u obliku kaveza, Letve su izrađene od aluminija, visokih mehaničkih svojstava obzirom da čine vezu između paketa i kućišta statora. Materijal trapeznih letvi je oznake AlMg5F30. Na oba kraja paketa trapezne letve su električno kratko spojene prstenima, koji se sastoje od segmentnih aluminijskih (Al 99.5.24) limova.

#### **4.3.4.4. Prigušni namot rotora**

Na vrhu utora neposredno ispod rotorskih klinova smještaju se vodiči prigušnog namota, Oni se izrađuju od profiliranog bakra legiranog srebrom (CuAg0.1P F25. DIN 17666. DIN 46466), iste kvalitete kao i uzbudni namot.

Vodiči uzbudnog i prigušnog namota su čvrsto zaklinjeni u utoru nemagnetskim klinovima (EN-CuNi2Si, EN Nr, CW111C). Klinovi su složeni duž utora, pa u određenim uvjetima pogona ukoliko nema vodiča prigušnog namota da ih električki kratko spoji može doći do preskoka između klinova u dva susjedna utora. Pojava je opasna zbog visokih lokalnih zagrijavanja koja tada nastaju i potencijalnog induciranja pukotine u zubu rotora. Električna svojstva klinova također utječu na prijelazne pojave pa ih se prikazuje u nadomjesnim shemama.

#### **4.3.5. Ostali materijali glavnih dijelova turbogeneratorsa**

Iako se ne koriste u samom elektromagnetskom proračunu, neki od dijelova generatora imaju veliki utjecaj, prvenstveno na rasipanja u generatoru. To su metalni dijelovi koji čine paket i dijelovi koji se nalaze u čeonom prostoru. Svi metalni materijali poput odstoynih profila statorskog paketa, tlačnih prstiju, zaslona, privoda ventilatora, ventilatora idr su od nemagnetskih materijala. Isto su tako svi materijali koji se koriste za učvršćivanje statorskog namota nemagnetski. Tlačne ploče su lamelirane ili su izrađene od nemagnetskih materijala na primjer austenitnih čelika, a mogu biti i odljevi mjedi poput materijala G-CuZn40A/2.

Na rotoru se nalaze i nemagnetske rotorske kape koje su specifično mehanički najopterećeniji dio generatora. One moraju izdržati centrifugalne sile nastale u vrtnji uslijed masa glava rotorskog namota, sile vlastite težine i sile nastale kao posljedica zagrijavanja. Rotorske kape su izrađene od nemagnetskog čelika velike čvrstoće tip X8CrMn1818 prema DIN-u koji odgovara materijalu A 289 prema ASTM. Svojstvo ovog materijala je velika otpornost prema napetosnoj koroziji i visoka pukotinska žilavost, odnosno vrlo niska brzina propagiranja pukotina.

Podaci o nemagnetskim materijalima koji se nalaze u čeonom prostoru potvrđuju stav da se problem glava u čeonom prostoru može s dostatnom točnošću uzet u obzir kao da su okružene samo zrakom, pa je relativna magnetska permeabilnost  $\mu_r = 1$ .

### **4.4. Proračun polja stroja ovisno o režimu rada**

Razlike magnetskog polja u dvije osi stroja ( $d$  i  $q$ ) koje su opisane u 2. poglavlju su najveće za nezasićeni stroj odnosno točku gdje krivulji magnetiziranja stroja (krivulja praznog hoda) prelazi u zasićenje. Tada su i sva odstupanja od apsolutne simetrije kao i efekt neželjenih propratnih utjecaja najveći. Kada magnetsko polje ulazi u zasićenje i ove neželjene pojave poput povećanih sila magnetskog privlačenja ili magnetske buke postaju slabije. Silnice polja imaju tendenciju širenja iz zasićenih područja gdje su gušće u područja gdje ih ima manje, pa tako i razlike zbog geometrijske nesimetrije manje dolaze do izražaja.

Kod sinkronih generatora proučavamo tri karakteristična radna stanja:

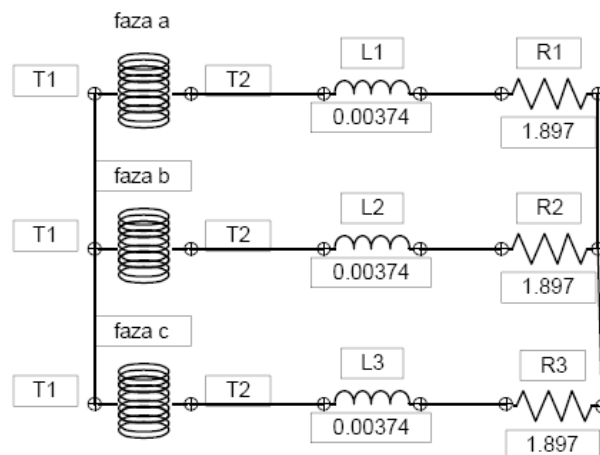
1. Prazni hod je stanje kada su krajevi statorskog namota otvoreni, a uzbuđeni rotor se vrti sinkronom brzinom. Kroz uzbuđni namot protječe istosmjerna struja. Dvodimenzionalni nelinearni tranzijentni proračun vrši se uz konstantnu brzinu vrtnje, s rotorom u gibanju, pri čemu se za različite vrijednosti uzbuđnih struja na krajevima faznog i prigušnog statorskog namota induciraju različiti naponi.
2. Kratki spoj je stanje kada su krajevi statorskog namota kratko spojeni. Rotor se vrti sinkronom brzinom, a struja uzbuđnog namota stvara polje. Proračun se vrši uz konstantnu brzinu vrtnje. Kako bi se vrijednost struje kratkog spoja ograničila u vanjskom krugu dodaju vrijednosti radnog i induktivnog otpora glava namota i kratkospojnog prstena prigušnog namota statora. Vanjski krug je izvan zadanog modela stroja za numerički proračun.
3. Nazivna radna točka je stanje kada kroz statorski namot protječe nazivna struja pri čemu generator radi na mreži. Rotor se pri tome vrti sinkronom brzinom, a nazivna struja uzbuđnog namota stvara uzbuđno magnetsko polje u aktivnim dijelovima stroja. U ovom slučaju u vanjski krug statorskog namota se uključuje nominalni teret:

$$Z_T = \frac{U_f}{I_f}, \quad (4.31)$$

a radni i induktivni otpor tereta su:

$$\begin{aligned} R_T &= Z_T \cdot \cos\varphi \\ X_T &= Z_T \cdot \sin\varphi \end{aligned} \quad (4.32)$$

gdje je  $\cos\varphi$  nominalni faktor snage. Sličnim postupkom može se izračunati bilo koje radno stanje [29].



**Slika 4.7** Simulacija nominalno opterećenog dvopolnog turbogeneratora u nazivnoj radnoj točki 49,4 MVA;  $\cos\varphi=0,85$ ;  $U_n=10500$  V.

Magnetsko polje u stroju je kvazistatičko, ali ovisno o nastanku polja može se konstatirati sljedeće:

- Promjenjivo sinusoidalno magnetsko polje stvoreno strujama uzbuđnog namota koji se vrti sinkronom brzinom inducira u strujnim krugovima na statoru (armaturni statorski namot i prigušni statorski namot) napone odnosno struje. U ovom slučaju prigušni namot rotora miruje u odnosu na uzbuđni namot pa se u njemu ne induciraju struje.

- Kada kroz armaturni statorski namot protječu izmjenične sinusoidalne struje, u prigušnom namotu statora, ali i prigušnom namotu rotora ako se rotor ne vrti sinkronom brzinom induciraju se naponi i ukoliko su namoti kratko spojeni protječu struje. Inducirane struje u prigušnom namotu statora su pulzacijske struje pošto je promjena samo vremenska odnosno val ne putuje u prostoru.

Kako je ranije navedeno sve reaktancije osim nulte mogu se predstaviti u obliku:

$$X \approx X_L + X_V, \quad (4.23)$$

gdje je  $X_L$  - rasipna reaktancija statorskog namota  $X_V$  - dio reaktancije koji se odnosi na razmatrano stanje ( $x_{ad}, x_{aq}$  za stacionarno,  $x'_{ad}, x'_{aq}$  prijelazno,  $x''_{ad}, x''_{aq}$  početno), sustav (direktni, inverzni) odnosno os koordinatnog sustava (uzdužnu, poprečnu). Model računa sve parametre osim rasipanja glava statorskog namota i kratkospojnog prstena čiji se induktiviteti i otpori trebaju dodati u vanjskom krugu, a na shemi sa slike 3.6 uneseni su u karakteristike namota faza  $a, b$  i  $c$  između priključaka T1 i T2.

Što se tiče sinkronih reaktancija one se određuju u stacionarnom stanju odnosno stacionarnom modelu. Sukladno definiciji sinkrone reaktancije resultantno polje statora mora djelovati u onoj osi u kojoj se računa reaktancija. Iz jednačbi (2.39)  $d$ - $q$  koordinatnog sustava slijedi da se polje nalazi u  $d$  osi ako je  $i_b = i_c = -\frac{i_a}{2}$ , a rotor je na modelu postavljenu svojom  $d$  osi u simetralu faze  $a$ . Tada je omjer toka  $\psi_d$  i struje u  $I_d$  u osi  $d$  daje reaktanciju reakcije armature  $x_{ad} = 2\pi f l_i \frac{\psi_d}{a_p i_d}$ , gdje je  $a_p$  broj paralelnih grana. Sinkrona reaktancija u  $q$  osi izračunava se kada se  $q$  os poklapa sa simetralom namota  $a$ , a struje koje protječu kroz statorski namot su  $i_a = 0, i_b = -i_c$  odnosno  $q$  os leži u simetrali faze  $a$ . Reaktancija reakcije armature u  $q$  osi se izračunava preko  $x_{aq} = 2\pi f l_i \frac{\psi_q}{a_p i_q}$ .

Izračun početnih i prijelaznih reaktancija radi se preko rješavanja vremensko harmonijskog modela. Vrijednosti su neovisne o vremenskim konstantama namota već su u suglasnosti s definicijom kojom opisuju djelovanje uzbudnog odnosno prigušnog rotorskog namota. Za određivanje tih reaktancija izvor sinusnog napona postavlja se između dvije faze statorskog namota vezanog u zvijezdu, dok je treća grana slobodna. U svakoj fazi su definirani rasipni induktivitet i radni otpor glava namota. Izvor izmjeničnog napona je  $U$ , a prijelazna (početna) sinkrona reaktancija se dobivaju kao omjer narinutog napona i maksimuma inducirane struje kada računamo reaktancije u  $d$  osi:  $x_d = \frac{U}{2I_d}$ , odnosno minimuma struje kada računamo indukcije u  $q$  osi:  $x_q = \frac{U}{2I_q}$ .

#### 4.5. Zaključak četvrtog poglavlja

Postavljanje modela generatora za proračun parametara metodom konačnih elemenata je zahtjevno obzirom na složenu geometriju stroja. Pojednostavljenja modela su moguća kada postoji simetrija, pa se tako mogu u slučaju turbogeneratora generirati za pola odnosno četvrtinu stroja ako su u pitanju dvopolni ili četveropolni generatori. Zbog prigušnog namota

statora s neparnim brojem štapova ovo pojednostavljenje nije bilo moguće na svim modelima. Stoga su svi proračuni rađeni na modelu cijelog stroja.

Pri postavljanju modela potrebno je definirati režim rada u kojem se ispituju pojave u generatoru. Problem se rješava za stroj u praznom hodu, kratkom spoju ili pod teretom, a parametri se izračunavaju sukladno definicijama iz klasične analitičke teorije.

Zbog složenog modela i slabe mogućnosti brze varijacije dimenzija i oblika dijelova kojima se dodjeljuju određene karakteristike, metoda nije pogodna za inicijalno projektiranje, bez obzira na korisničke pakete koji su dostupni na tržištu. Međutim metoda je nezamjenjiva u slučaju kada se trebaju računati specifična opterećenja dijelova po presjeku stroja. U slučaju prigušnog namota statora to je ujedno i jedini način na koji se može s dostatnom točnošću prikazati njegov utjecaj u stroju.

## 5. Rezultati izračuna polja u turbogeneratoru sa i bez statorskog prigušnog namota za dvopolni i četveropolni turbogenerator

Izračun utjecaja prigušnog namota statora kod turbogeneratora napravljen je na primjeru dvopolnog i četveropolnog generatora.

Osnovni podaci dvopolnog generatora:

GENERATOR 1.

Snaga	$S_n = 49,4 \text{ MVA}$
Napon	$U_n = 10500 \text{ V}$
Faktor snage	$\cos \varphi_n = 0,85$
Frekvencija	$f = 50 \text{ Hz}$
Brzina vrtnje	$n = 3000 \text{ min}^{-1}$
Broj faza	$m = 3$
Duljina statorskog paketa	$l_i = 2305 \text{ mm}$
Broj paralelnih grana	$a_p = 1$
Nazivna struja praznog hoda	$I_u = 226 \text{ A}$

Osnovni podaci četveropolnog generatora:

GENERATOR 2.

Snaga	$S_n = 1034 \text{ MVA}$
Napon	$U_n = 21000 \text{ V}$
Faktor snage	$\cos \varphi_n = 0,876$
Frekvencija	$f = 50 \text{ Hz}$
Brzina vrtnje	$n = 1500 \text{ min}^{-1}$
Broj faza	$m = 3$
Duljina statorskog paketa	$l_i = 6150 \text{ mm}$
Broj paralelnih grana	$a_p = 2$
Nazivna struja praznog hoda	$I_u = 3375 \text{ A}$

U modelima turbogeneratora koji su korišteni za proračun štapovi statorskog namota čine cjelinu s kućištem, što je realna situacija obzirom da između limova statora i letvi odnosno kućišta postoji zračni raspor. Rasipne reaktancije i aktivni otpori glava statorskog namota i kratkospojnog prstena izračunati su preko analitičkih formula i vrijednosti su unesene u numerički model.

U realnom modelu zračni raspor između paketa i letvi koje su preko greda učvršćene na kućište je mali (u toleranciji paketiranja do 0,5 mm). Korzet praktički naliježe na paket, a njegova težina se kod turbogeneratora velikih snaga mjeri u tonama. Za prijelaz polja s magnetski vodljive sredine paketa statora na zrak, veličina zračnog raspora i kvaliteta



materijala s druge strane zračnog raspora, odnosno materijal kućišta, imaju relativno mali utjecaj na sama rasipanja. Međutim vrijednost ulančenog toka i tako nastalih gubitaka u kućištu usko su povezani s visinom indukcije u jarmu statora, udaljenošću kućišta od paketa, te s postojanjem prigušnog namota statora, što će se u daljnjoj razradi pokazati.

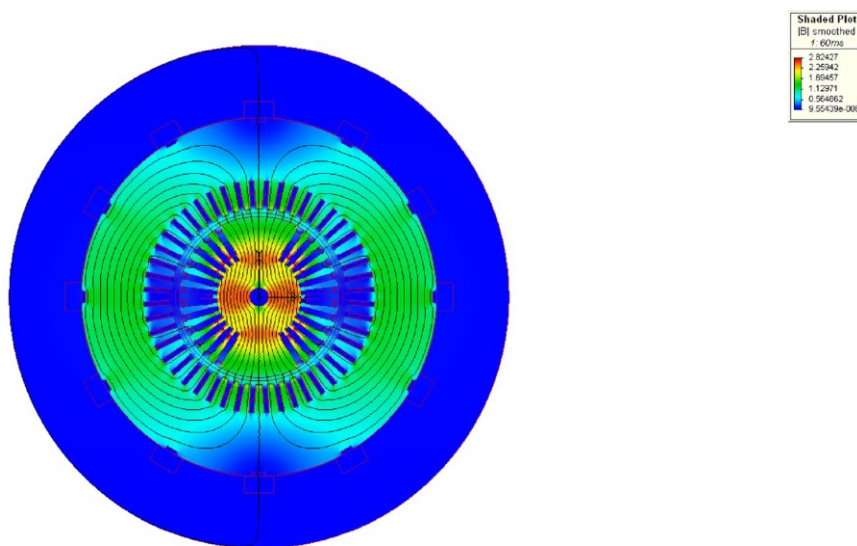
Model je najprije postavljen za slučaj kada su letve kojima je paket učvršćen u kućište izrađene od željeza, što je standardni materijal od kojeg se, kod turbogeneratorskih srednjih snaga, ovaj dio izrađuje. U tom slučaju, obzirom na način na koji se postavlja model za numerički proračun, ne mogu se dobiti svi podaci potrebni za određivanje utjecaja prigušnog namota statora, poput toka koji ulančuje ove letve. Stoga se utjecaj prigušnog namota statora dobiva se usporedbom rezultata proračuna za modele:

1. Kada aluminijske letve koje čine štapove statorskog prigušnog namota nisu spojene – prigušni efekt ne postoji pa je to slučaj modela bez prigušnog namota statora.
2. Kada su aluminijske letve koje čine štapove statorskog prigušnog namota kratko spojene – model sa prigušnim namotom.

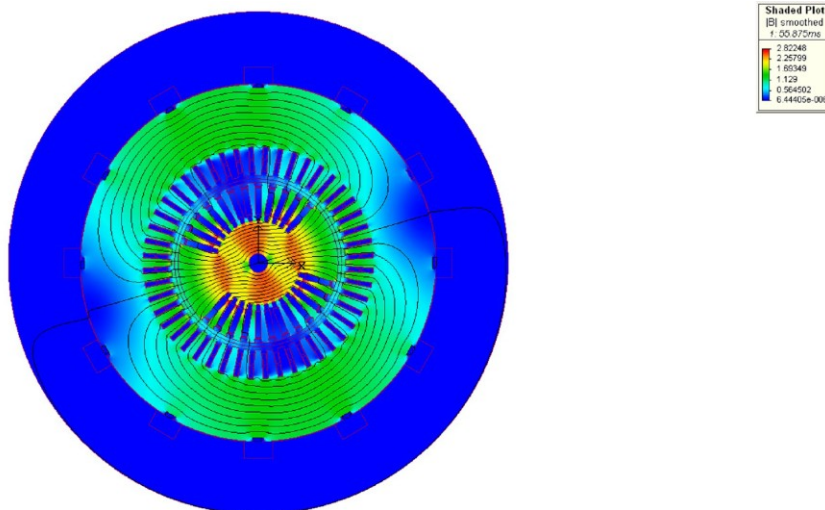
### 5.1. Proračun prigušnog namota statora kod dvopolnog turbogeneratorskog

Tablica 5.1 Modeli korišteni za proračun i usporedbu

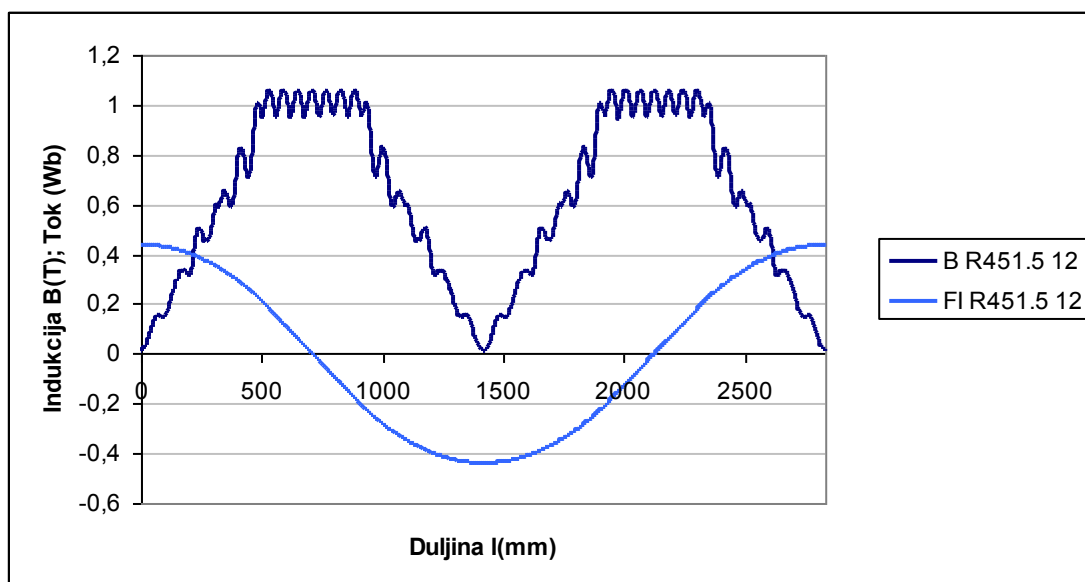
Model	Broj polova	Broj utora statora	Režim rada	Broj štapova prigušnog namota statora
1	2	48	Prazni hod	12
2	2	48	Prazni hod	15
3	2	48	Nazivni teret	12



Slika 5.1 Polje dvopolnog generatora s 12 štapova prigušnog namota statora koji nisu spojeni u trenutku  $t = 60$  ms pri nazivnoj struji praznog hoda ( $I_n = 226$  A).



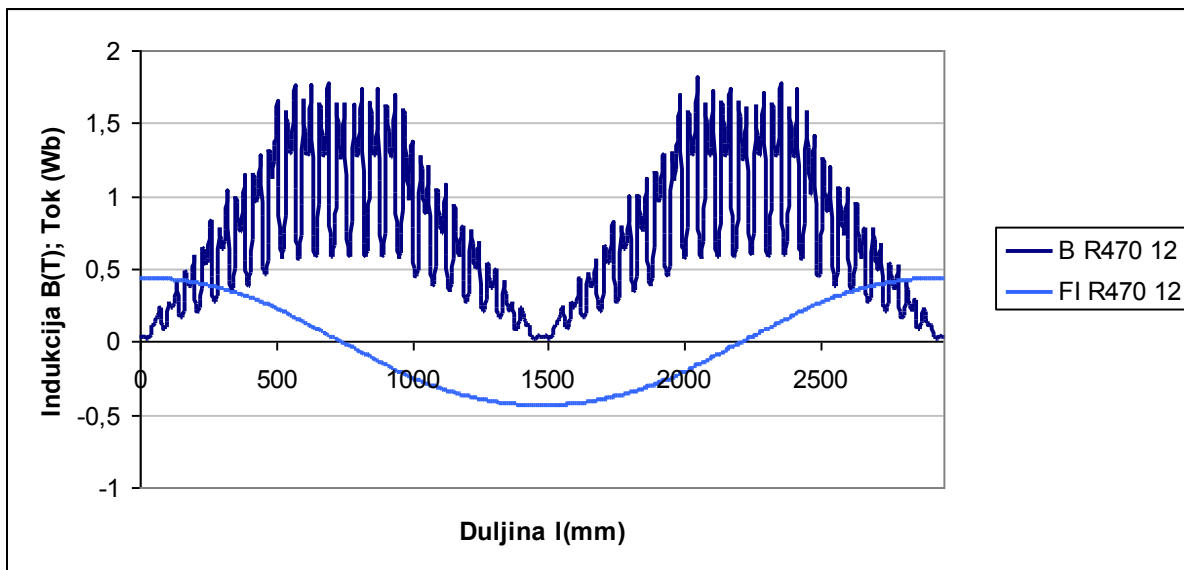
**Slika 5.2** Polje dvopolnog generatora s 12 štapova prigušnog namota statora koji su kratko spojeni u trenutku  $t = 55.875$  ms pri nazivnoj struji praznog hoda ( $I_u = 226$  A).



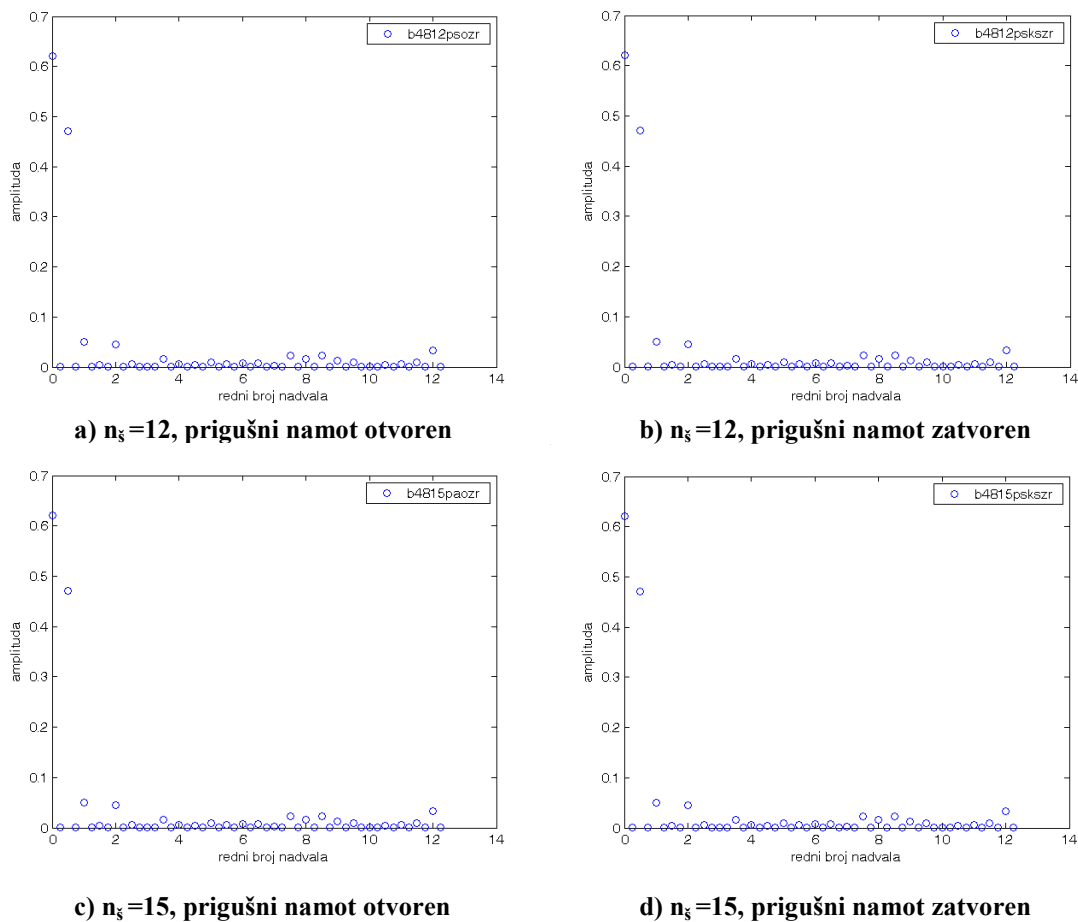
**Slika 5.3** Raspodjela indukcije i toka na sredini zračnog raspora generatora s 12 štapova prigušnog namota statora u praznom hodu ( $I_u = 226$  A;  $t = 60$  ms).

Na slici 5.3 prikazane su funkcije raspodjele indukcije i toka po razvijenoj srednjoj liniji zračnog raspora  $R = 451,6$  mm. Neovisno o tome da li je prigušni namot statora otvoren ili kratko spojen dobivene su iste funkcije iz čega se može zaključiti da je utjecaj prigušnog namota statora ne prenosi u zračni raspor. Maksimalna vrijednost toka za promatrani generator u praznom hodu je  $\Phi_{zrmax} = 0,4379$  Wb.

Slično vrijedi i za izračunate vrijednosti indukcije i toka na provrtu statora, na promjeru  $R = 470$  mm, koje su prikazane na slici 5.4. Niti ovdje se ne uočava razlika vrijednosti gustoće polja kada je prigušni namot statora otvoren odnosno kratko spojen.

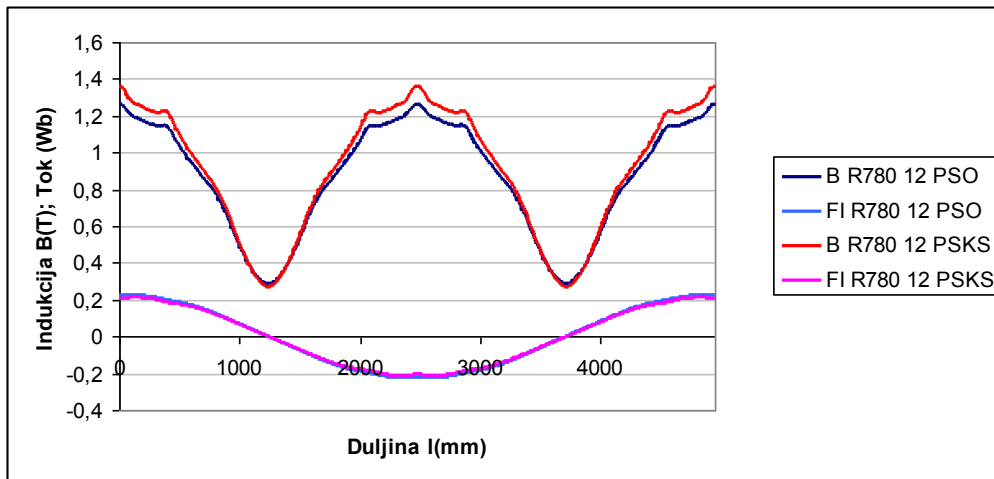


Slika 5.4 Raspodjela indukcije i toka na provrtu statora generatora s 12 štapova prigušnog namota statora u praznom hodu ( $I_u = 226 \text{ A}$ ;  $t = 60 \text{ ms}$ ).



Slika 5.5 Harmonijska analiza prostornih harmonika magnetskog polja u zračnom rasporeu za dvopolni generator, ( $I_u = 226 \text{ A}$ ;  $t = 60 \text{ ms}$ ).

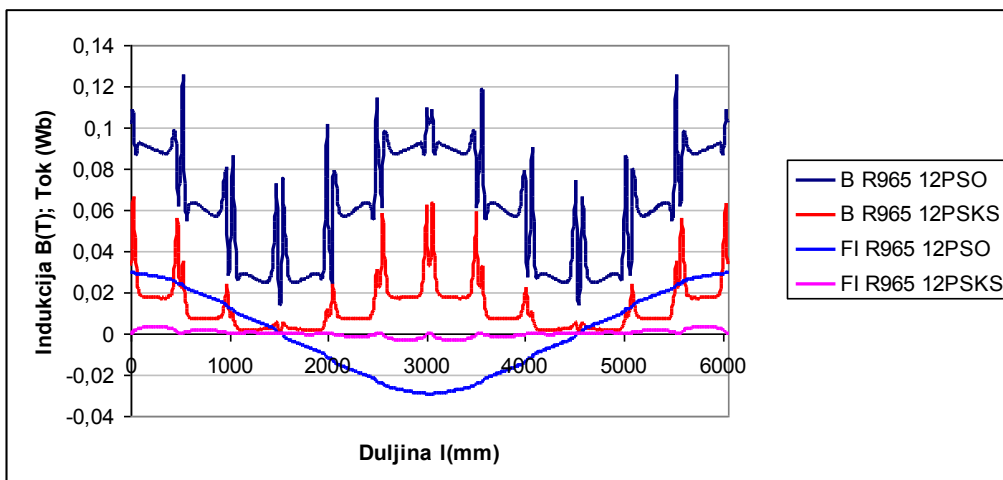
Na slici 5.5 prikazane su vrijednosti amplituda pojedinih prostornih harmonika indukcije u zračnom rasporeu. Može se zaključiti da na njihovu vrijednost ne utječe statorski prigušni namot.



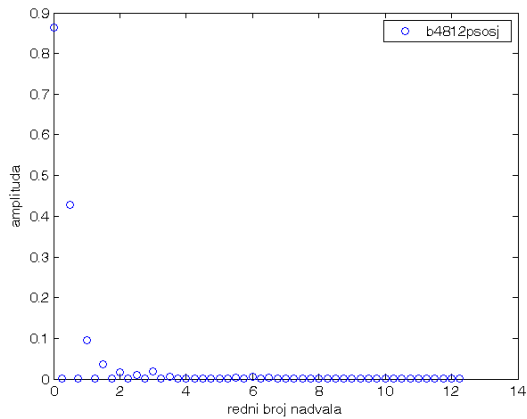
Slika 5.6 Raspodjela indukcije i toka na sredini jarma generatora s 12 štapova prigušnog namota statora u praznom hodu ( $I_u = 226$  A;  $t = 60$  ms).

Na razvijenoj srednjoj liniji jarma statora  $R = 780$  mm na slici 5.6 razvidan je utjecaj kratko spojenog prigušnog kaveza statora (PSKS) u odnosu na slučaj kada je on otvoren (PSO). Tada je pri nižoj vrijednosti ulančenog toka u jarmu ostvarena je veća gustoća polja. To je rezultat djelovanja prigušnog kaveza kroz koji protječu struje ulančene osnovnim poljem. Dio toka zatvori se u jarmu prije no što prodire do dubine na kojoj obuhvaća prigušni namot statora. Taj dio toka osnovnog polja inducira u prigušnom namotu elektromotornu silu, a u slučaju kada je prigušni namot kratko spojen kroz njega će teći struje. Tok koji ove struje stvaraju će potisnuti osnovno polje prema sredini jarma i veći broj silnica toka će se zatvoriti u jarmu nego u slučaju kada namot nije kratko spojen. Samim tim će i gustoća polja u jarmu biti veća. Maksimalna vrijednost toka u jarmu kada je kavez otvoren je  $\Phi_{jPSOmax} = 0,225$  Wb, a kada je kratkospojen  $\Phi_{jPSKSmax} = 0,213$  Wb. Srednja vrijednosti indukcije u jarmu s otvorenim kavezom je  $B_{jPSOsr} = 0,864$  T, a s kratkostoženim  $B_{srjPSKSsr} = 0,91$  T.

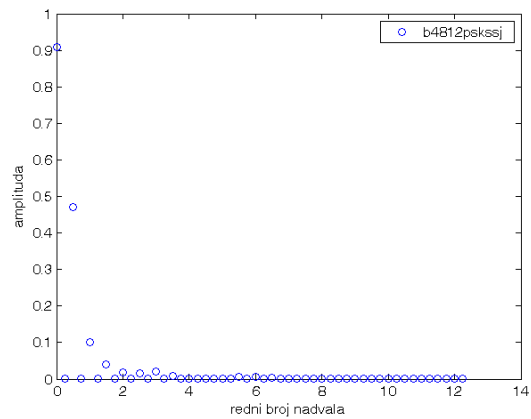
Slijedi da će, kako se može vidjeti na slici 5.7 gustoća polja u kućištu za slučaj otvorenog prigušnog namota statora biti veća u odnosu na onu kada je u stroju kratkospojeni kavez. Kada je kavez kratko spojen i ulančeni tok u kućištu bitno je manji. Maksimalna vrijednost toka koji je na unutarnjem provrtu kućišta je  $\Phi_{kPSOmax} = 0,0295$  Wb kada kavez nije kratko spojen, dok je za kratkospojeni namot ta vrijednost  $\Phi_{kPSKSmax} = 0,00345$  Wb.



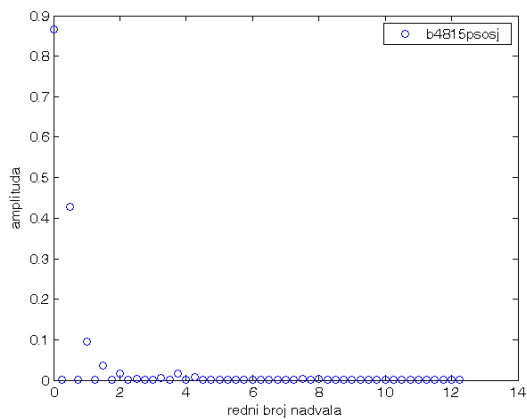
Slika 5.7 Raspodjela indukcije i toka na unutarnjem promjeru kućišta generatora s 12 štapova prigušnog namota statora ( $I_u = 226$  A;  $t = 60$  ms).



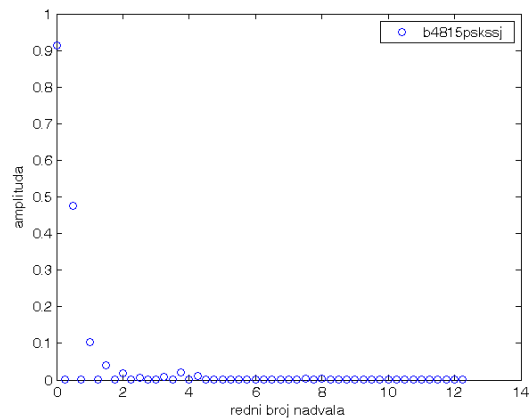
a)  $n_s=12$ , prigušni namot otvoren



b)  $n_s=12$ , prigušni namot zatvoren



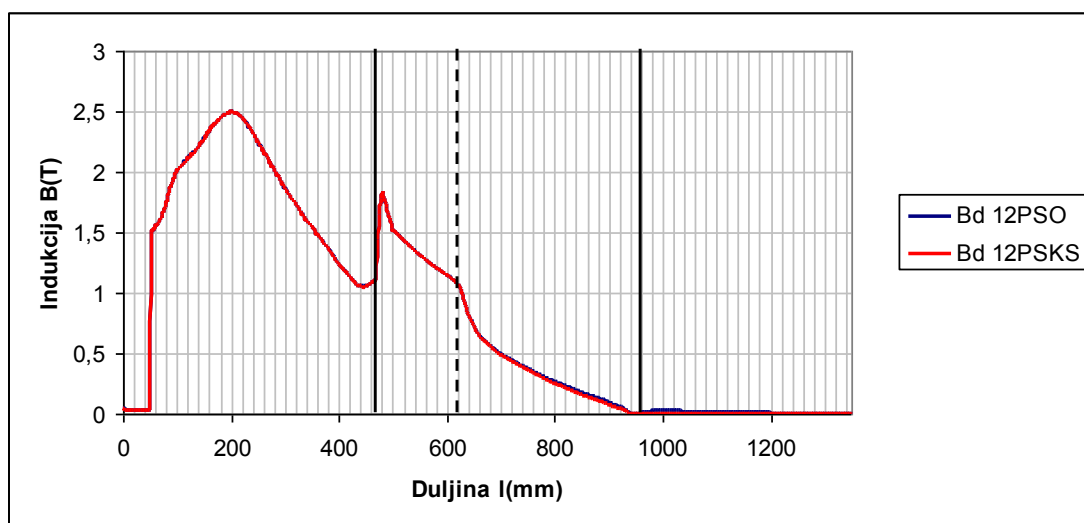
c)  $n_s=15$ , prigušni namot otvoren



d)  $n_s=15$ , prigušni namot zatvoren

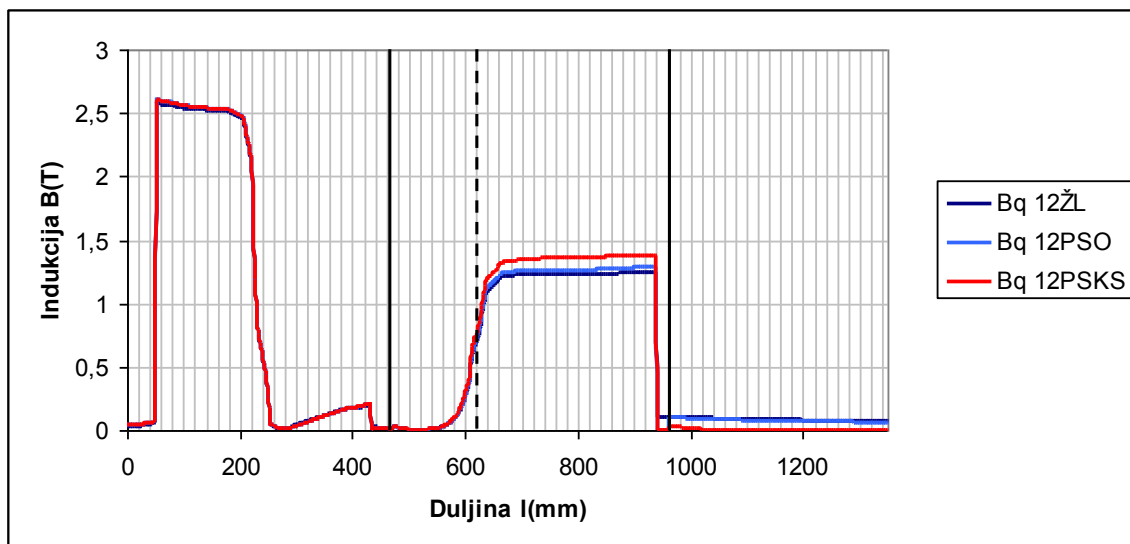
Slika 5.8 Harmonijska analiza prostornih harmonika magnetskog polja u jarmu statora za dvopolni generator, ( $I_u = 226$  A;  $t = 60$  s).

Na slici 5.8 prikazane su vrijednosti amplituda pojedinih prostornih harmonika indukcije u jarmu statora. Harmonijski sadržaj polja se razlikuje, što je posljedica djelovanja prigušnog namota statora.



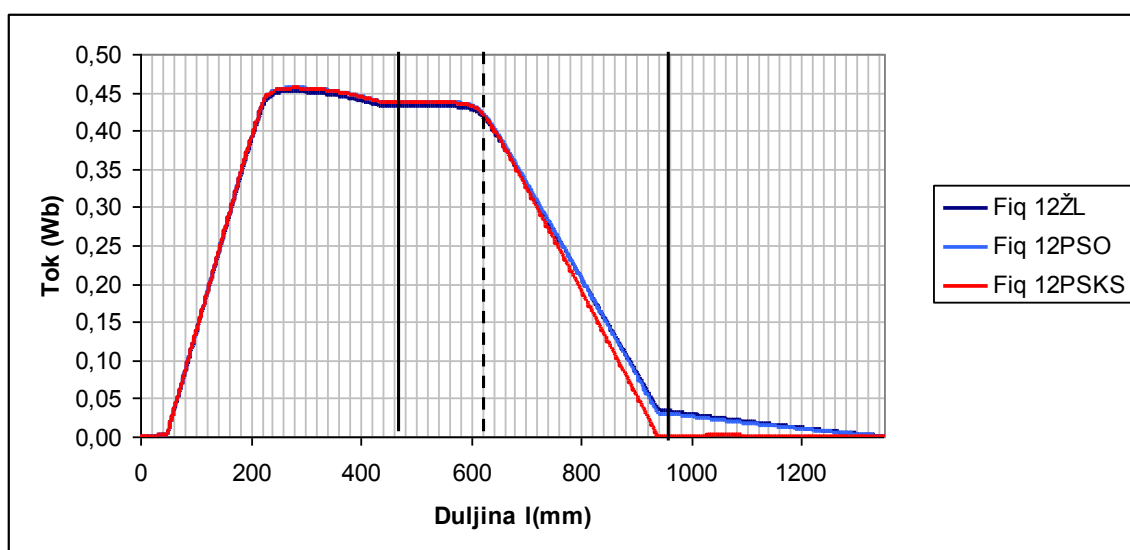
Slika 5.9 Raspodjela indukcije u  $d$  osi po presjeku generatora od centra rotora do vanjskog promjera kućišta generatora s 12 štapova prigušnog namota statora ( $I_u = 226$  A;  $t = 60$  ms).

Na slici 5.9 dvije deblje crne linije označavaju unitarni i vanjski promjer kućišta. Crna crtkana linija označava visinu zubi, odnosno unutarnji promjer jarma. Vrijednost toka u  $d$  osi je nula. Gustoća polja u  $d$  osi je dana na slici 5.9. Indukcija u jarmu je relativno niska obzirom da je indukcija u jarmu najveća u  $q$  osi, ali se ipak može zamijetiti utjecaj prigušnog namota statora.



Slika 5.10 Raspodjela indukcije u  $q$  osi po presjeku generatora od centra rotora do vanjskog promjera kućišta generatora s 12 štapova prigušnog namota statora ( $I_u = 226$  A;  $t = 60$  ms).

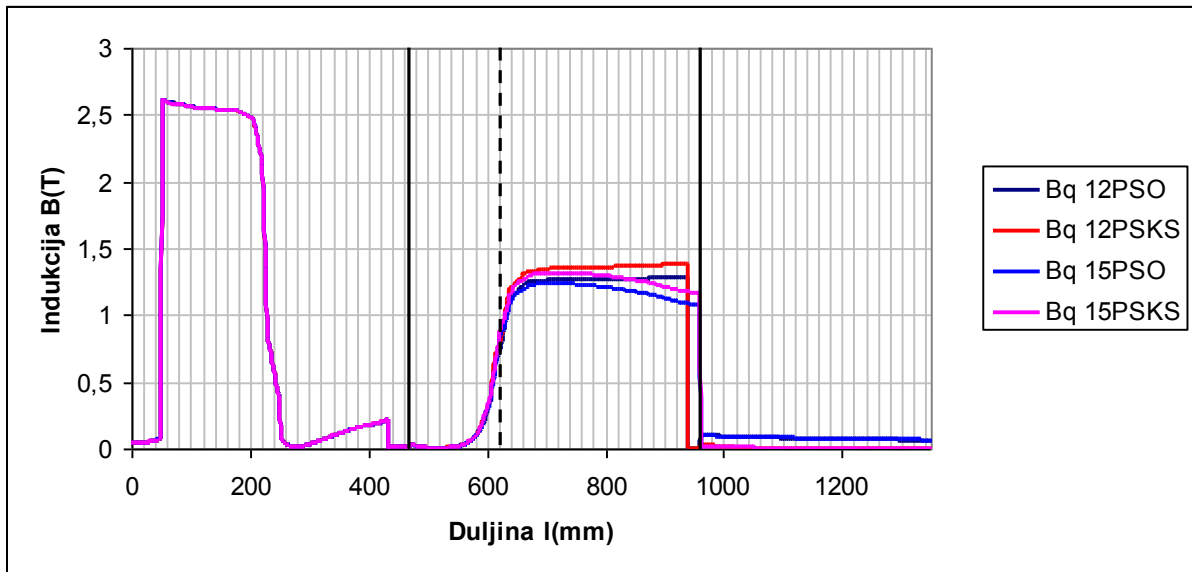
Na slici 5.10 prikazana je indukcija po presjeku  $q$  osi. Krivulja  $B_q$  12ŽL predstavlja indukciju kada su letve izrađene od magnetskog materijala, dok druge dvije krivulje predstavljaju otvoren (PSO) i kratko spojen (PSKS) kavez. Vidi se do koje dubine seže utjecaj prigušnog kaveza statora kada je kavez kratko spojen. Indukcija pada na nulu prije vanjskog promjera statora zbog toga što se u primjeru 12 štapova sa slike 5.1 i slike 5.2 štapovi nalaze i u  $d$  i u  $q$  osi. Obzirom da su iz vodljivog materijala polje je u njima jednako nuli. Za razliku od njih kada je letva željezna u njoj egzistira polje koje je prošlo kroz zračni raspor između paketa i kućišta.



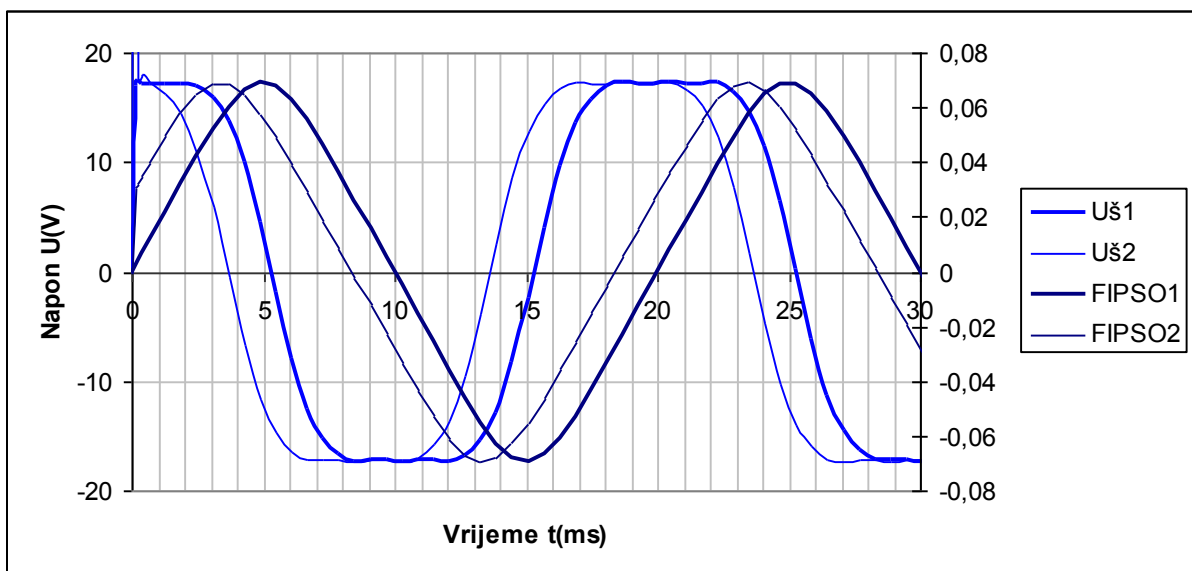
Slika 5.11 Tok u  $q$  osi po presjeku generatora od centra rotora do vanjskog promjera kućišta generatora s 12 štapova prigušnog namota statora ( $I_u = 226$  A;  $t = 60$  ms).

Tok ulančen osnovnim poljem u  $q$  osi u praznom hodu ima maksimalne vrijednosti. Kao i u slučaju indukcije utjecaj prigušnog namota se prepoznaje praktično po cijeloj visini jarma. Pri tome za manji tok su veće vrijednosti indukcije, što je posljedica prigušnog djelovanja kaveza statora. Tok osnovnog polja koji prelazi na kućište je praktički sveden na minimum.

Slijedeći dijagram prikazuje usporedbu dva modala s različitim brojem štapova u kavezu. Za slučaj kada u kavezu postoji 15 štapova u  $q$  osi se ne nalazi štap, pa je i raspodjela indukcije po presjeku različita. Polje se prostire do samog vanjskog promjera statorskog paketa, a njegova gustoća je veća kada je namot kratko spojen. Rasipanja u kućište su u oba slučaja praktički jednaka.



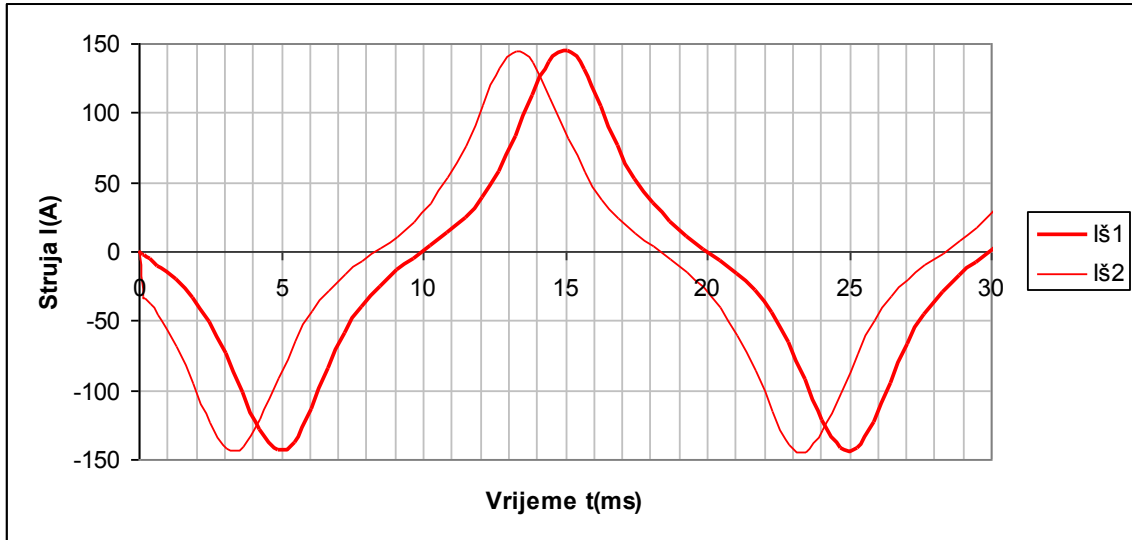
Slika 5.12 Indukcija u  $q$  osi po presjeku generatora od centra rotora do vanjskog promjera kućišta za generator s 12 štapova prigušnog namota statora i generator s 15 štapova prigušnog namota statora ( $I_u = 226$  A;  $t = 60$  ms).



Slika 5.13 Tokovi i inducirani naponi u prvom i drugom štapu otvorenog prigušnog namota statora ( $I_u = 226$  A).

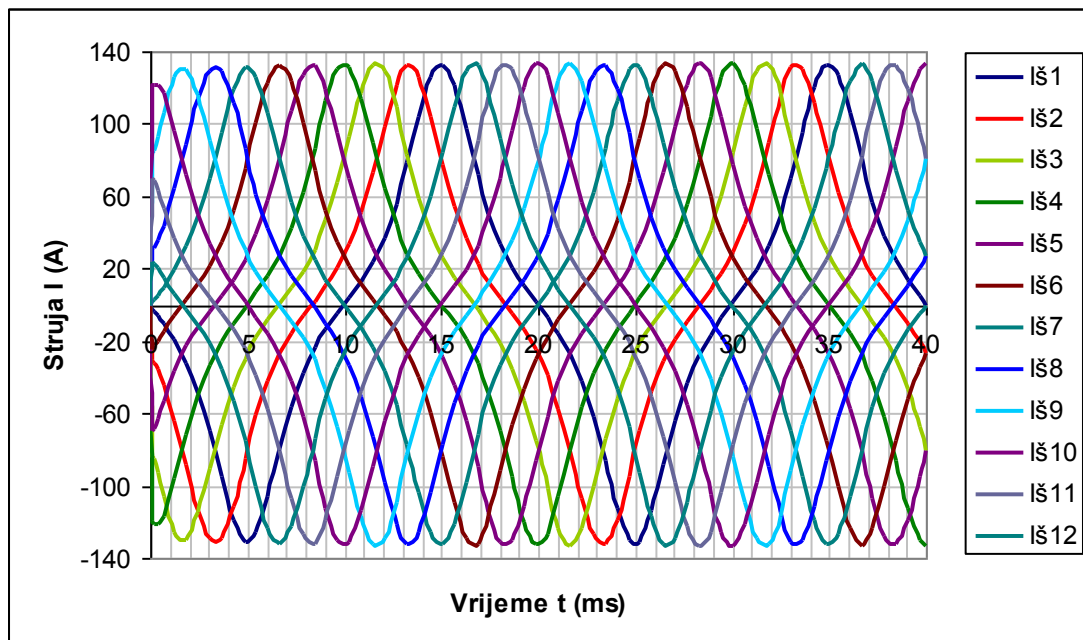
Do sada su razmatrane vrijednosti koje opisuju polje u prisustvu prigušnog namota statora u jednom izabranom trenutku vremena, odnosno za  $t = 60$  ms od početka pojave. Na

slici 5.13 prikazana je vremenska funkcija tokova koji ulančuju prvi i drugi štapa, te u njima induciraju napone kada su im krajevi otvoreni. Prvi štapa je smješten u  $d$  osi. Uočljiv je vremenski pomak toka proporcionalam električnom kutu. Geometrijski kut kaveza je  $\alpha_{g12} = 30^\circ$ , a za dvopolni generator jednak je električnom, pa je vremenski pomak jednak  $t_{12} = 1,666$ . ms.



Slika 5.14 Struje koje protječu u prvom i drugom štapa kratko spojenog prigušnog namota statora ( $I_u = 226$  A).

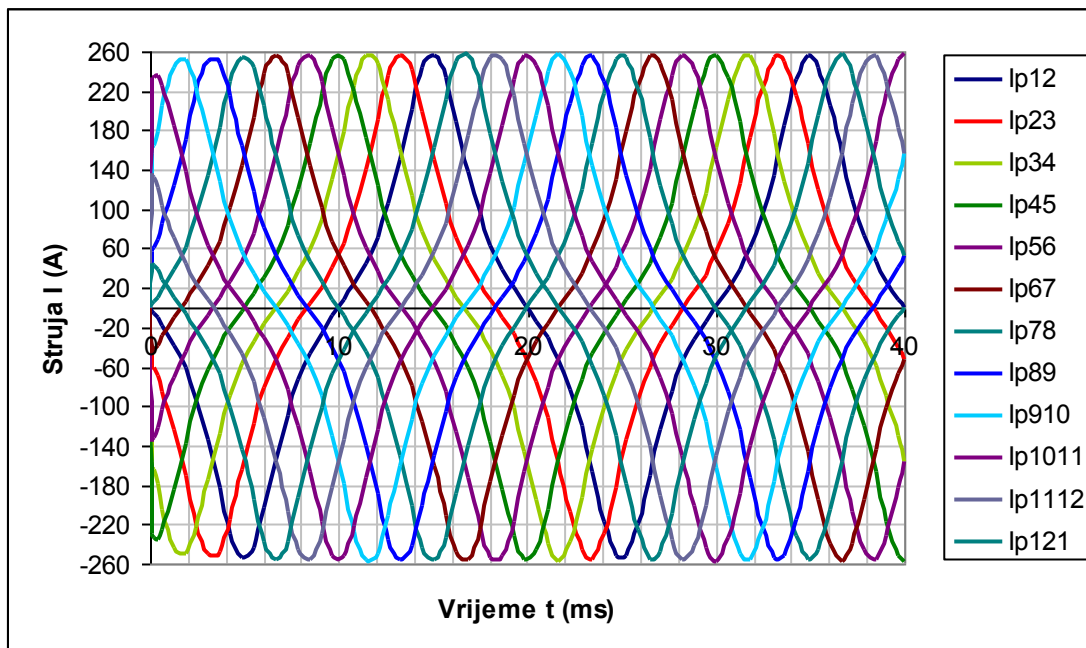
Struje koje protječu kroz kratko spojeni kavez u dva susjedna štapa također kasne za električni kut, odnosno vrijeme pomaka je  $t_{12} = 1,666$ . ms.



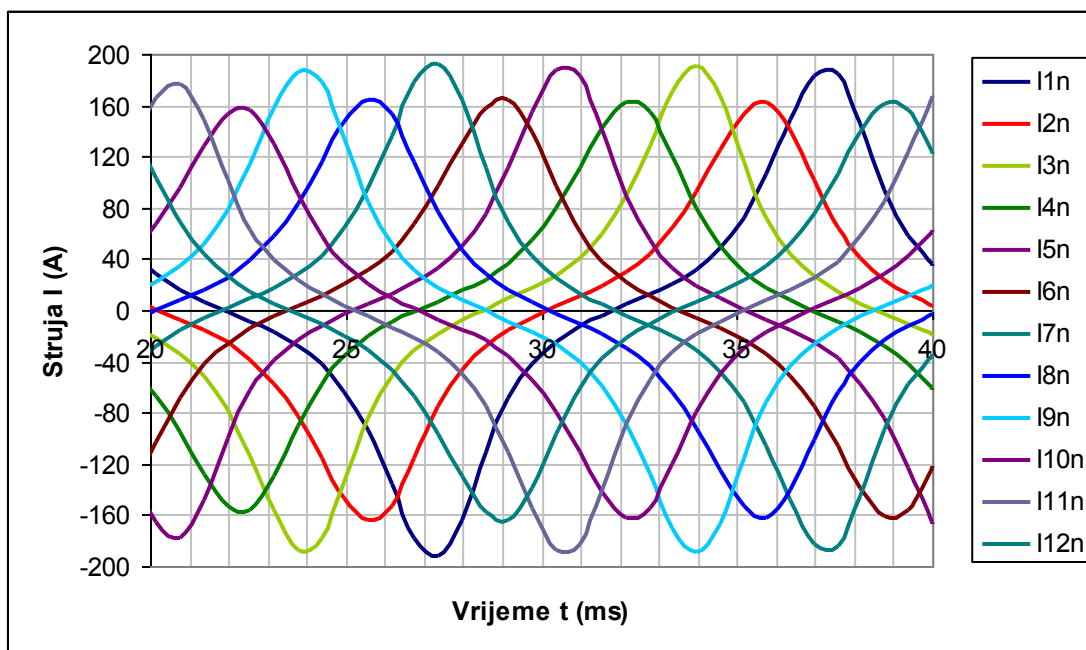
Slika 5.15 Struje koje protječu u 12 štapa prigušnog namota statora u praznom hodu ( $I_u = 226$  A).

Maksimalna vrijednost struje štapa je  $I_{s\max} = 132$  A, a maksimalna vrijednost struje pristana je  $I_{s\max} = 255$  A. Zbog simetrije, odnosno istog položaja svih štapa prema utorima statorskog trofaznog namota odnosno jednake magnetne vodljivosti jarma, u praznom hodu su sve struje u štapovima prigušnog namota statora jednakih vrijednosti.





Slika 5.16 Struje koje protječu dijelom prstena prigušnog namota statora između dva štapa ( $I_u = 226$  A).



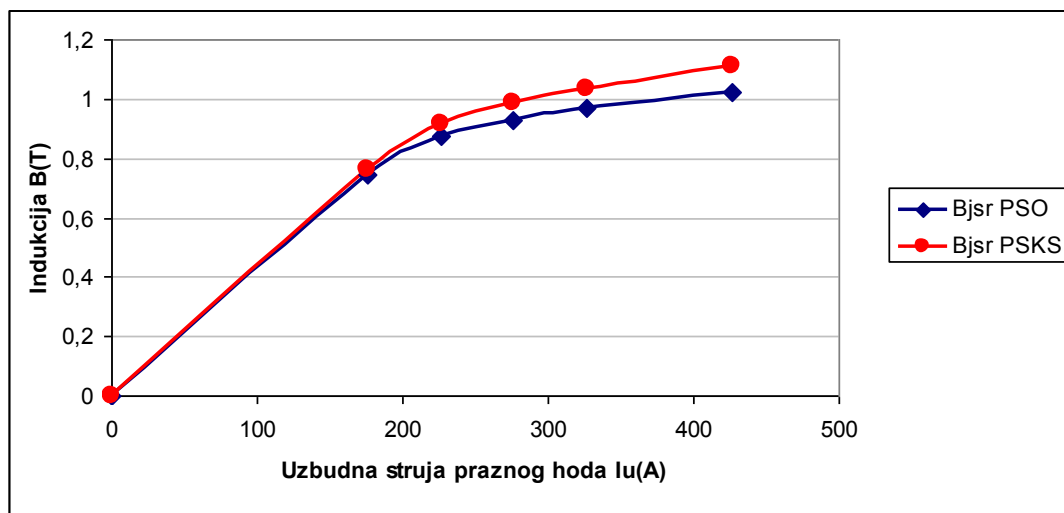
Slika 5.17 Struje koje protječu u štapovima prigušnog namota statora pri nazivnom teretu i nazivnoj struji uzbude ( $I_u = 604$  A).

Za razliku od struja koje protječu u prigušnom namotu statora u praznom hodu generatora sa slike 5.16, koje su istog intenziteta, pod teretom ove struje se razlikuju, slika 5.17. Ovisno o položaju prema statorskom faznom namotu u pojedinim štapovima će se ulančiti veći ili manji tokovi. To su štapi koji se nalaze iznad utora u kojima su smješteni vodiči različitih faza.

Može se zaključiti da struje koje ulančuju osnovno polje u prigušnom namotu statora imaju značajne vrijednosti već za srednje vrijednosti gustoće toka na srednjoj liniji jarma statora od  $B_{jsr} = 0,85$  T. Sa slike 5.11 također je razvidno da kavez statora sprječava prijelaz toka u kućište. U modelima dvopolnog generatora je između paketa i kućišta statora izabran

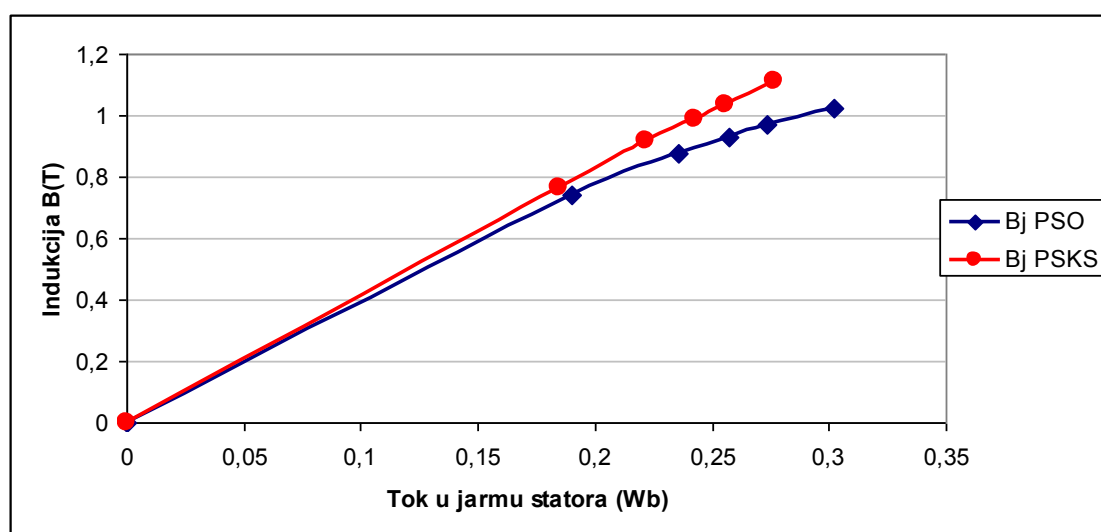
konstantni zračni raspor veličine 0,5 mm. Sličan rezultat je dobiven i kada je kućište odmaknuto od statora kao u primjeru četveropolnog generatora. Vrijednost toka koji prelazi na kućište odnosno onog koji ulančuje štapove prigušnih namota se bitno ne razlikuje u ta dva slučaja. Zračni raspor između trapezne letve i paketa statora u oba slučaja je 0,5 mm, iako zbog trapeznog oblika letvi limovi dobrim dijelom naliježu na njih u radu generatora. To znači da je rasipanje toka kada su letve od željeza nešto veće od izračunatog, ali utjecaj kada je u pitanju nemagnetski materijal je zanemariv.

Prigušni namot statora utječe na smanjivanje pada magnetskog napona u jarmu kućišta i time doprinosi rasterećenju uzbuđnog namota što se može vidjeti na krivuljama sa slika 2.18, 2.19 i 2.20.



Slika 5.18 Krivulja praznog hoda na srednjoj liniji jarma statora za otvoreni i kratko spojeni prigušni namot ovisno o uzbuđnoj struji praznog hoda.

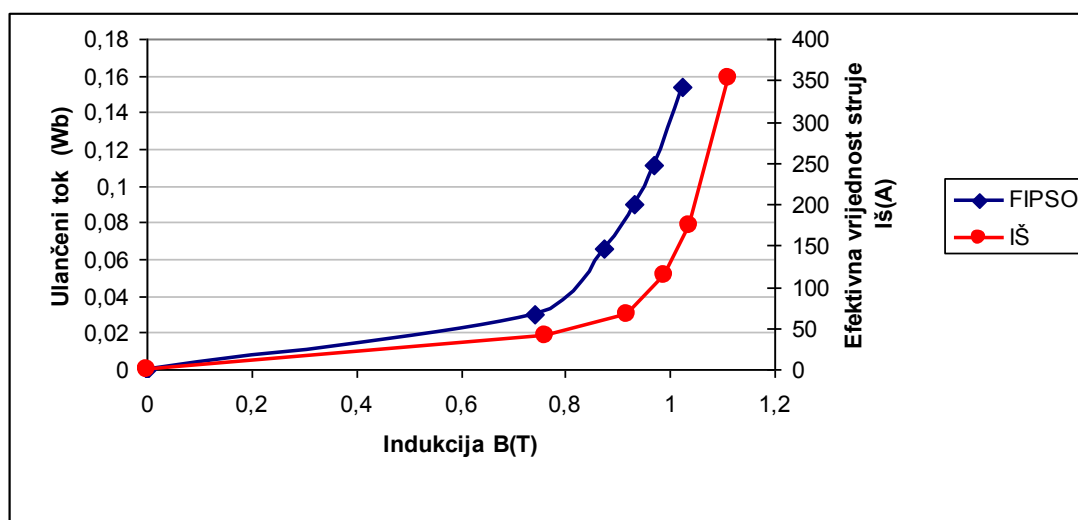
Na slici 5.18 prikazana je funkcija magnetiziranja jarma statora u praznom hodu ovisno o vrijednosti uzbuđne struje. U obzir je uzeta srednja vrijednost indukcije na srednjoj liniji zračnog raspore. Vidi se da se istom vrijednosti uzbuđne struje postiže veća gustoća polja u jarmu statora kada je prigušni namot kratko spojen.



Slika 5.19 Magnetska indukcija na sredini jarma u funkciji ulančenog toka za otvoreni i kratko spojeni prigušni namot.

Na slici 5.19 prikazana je srednje vrijednost indukcije u jarmu statora za otvoreni i kratko spojeni prigušni namot u funkciji maksimalne vrijednosti ulančenog toka osnovnog polja. I u ovom slučaju je osnovno polje ulančeno različitim vrijednostima struja uzbudnog namota koje su prikazane na slici 5.18.

Na slici 5.20 prikazan je ulančeni tok u funkciji srednje vrijednost indukcije na srednjoj liniji jarma kada je otvoren prigušni namot, odnosno efektivna vrijednost struje koja protječe u štapovima kaveza u funkciji srednja vrijednost indukcije na srednjoj liniji jarma statora za kratko spojeni prigušni namot, za različite vrijednosti uzbudne struje praznog hoda.



Slika 5.20 Funkcija ulančenog toka u otvorenom i struje u kratko spojenom prigušnom namotu statora ovisno o srednjoj vrijednosti magnetske indukcije na srednjoj liniji jarma statora.

## 5.2. Proračun prigušnog namota statora kod četveropolnog turbogeneratora

Model četveropolnog generatora s uzбудnim namotom i prigušnim namotom statora ispitivan je za dva tipa rotora:

- asimetričan;
- simetričan.

Izračun je napravljen za dva različita statorska prigušna namota:

- s 27 štapova
- s 24 štapa.

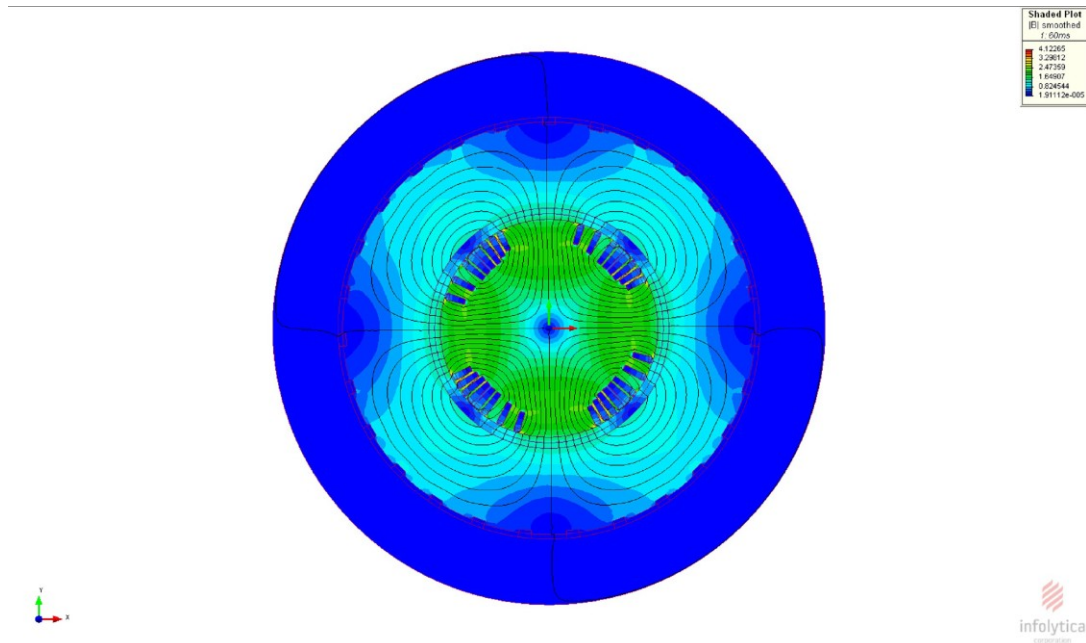
U svim modelima proračun je izveden s uzбудnom strujom praznog hoda generatora. Cilj istraživanja je bio izračunati struju u štapovima i prstenu prigušnog namota statora te odrediti osjetljivost na promjenu geometrije i magnetskih opterećenja paketa statora.

Tablica 5.2 Modeli korišteni za proračun i usporedbu

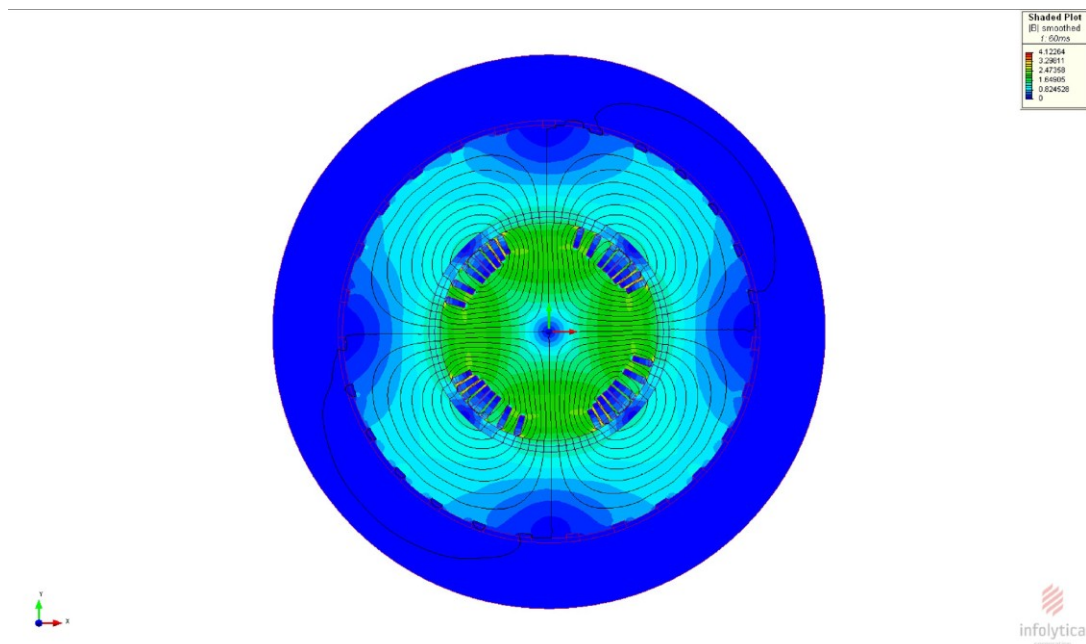
Model	Broj polova	Broj utora statora	Rotor	Statorski utori	Rashladni kanali u statoru
1	4	48	Simetričan –S	NE	NE
2	4	48	Asimetričan – AS	NE	NE
3	4	48	Simetričan –S	DA	NE
4	4	48	Asimetričan – AS	DA	NE
5	4	48	Asimetričan -AS	DA	DA

### 5.2.1. Modeli četveropolnog generatora samo s prigušnim namotom statora

Na jednostavnim modelima bez faznog statorskog namota ispitivan je utjecaj prigušnog namota statora kao i utjecaj različite vodljivosti zračnog raspora za različitu geometriju rotora. U jednom slučaju radi se o simetričnom rotoru slika 2.3.a, a u drugom asimetričnom slika 2.3.b. Pri tome statorski paket je gladak, bez utora, te nema upliva na vodljivost zračnog raspora. Uzbudna struja je za sve slučajeve ista i ima vrijednost izmjerene struje praznog hoda originalnog generatora.

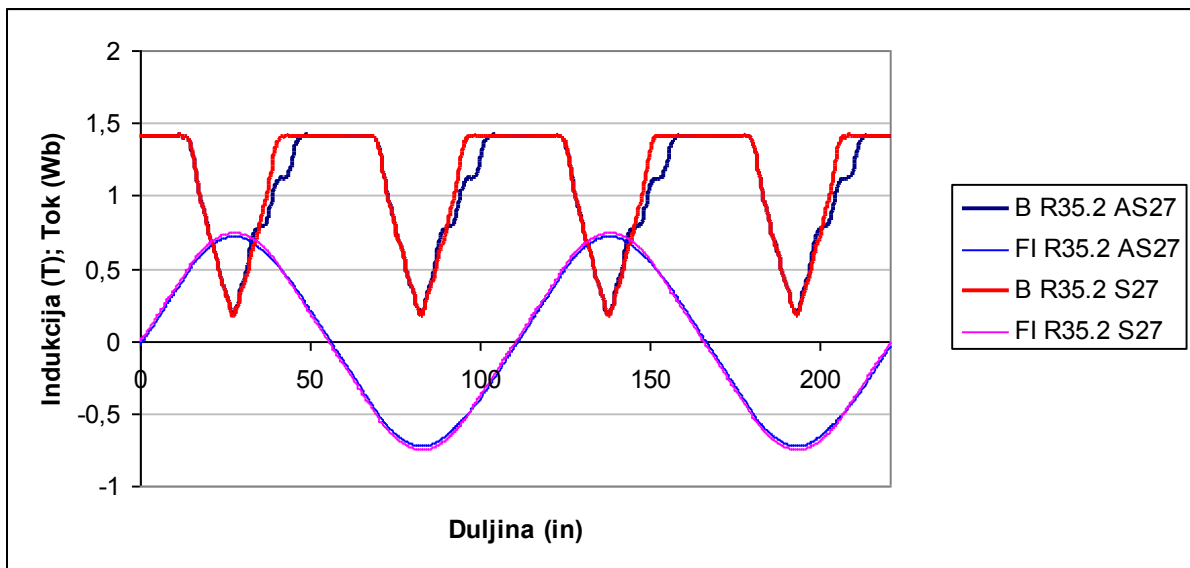


Slika 5.21 Polje četveropolnog generatora s asimetričnim rotorom, bez statorskih utora i 27 štapa prigušnog namota koji nisu spojeni ( $I_u = 3375$  A;  $t = 60$  ms).



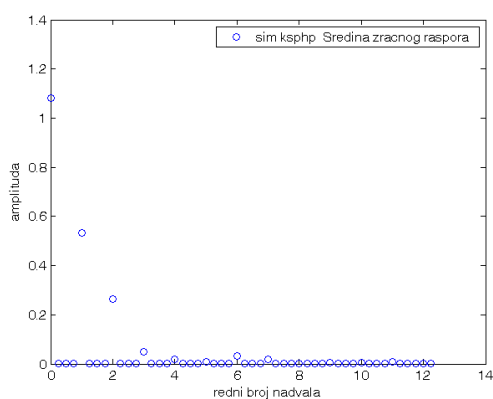
Slika 5.22 Polje četveropolnog generatora s asimetričnim rotorom, bez statorskih utora i 24 štapa prigušnog namota koji su kratko spojeni ( $I_u = 3375$  A;  $t = 60$  ms).

Na slikama 5.21 i 5.22 zamjećuje se utjecaj prigušnog namota, te kako je polje u kućištu potisnuto djelovanjem štapova u kojima protječu struje. Na slikama 3.7. a. i b. prikazan je model sa simetričnim rotorom i statorskim prigušnim namotom koji ima 27 štapova.

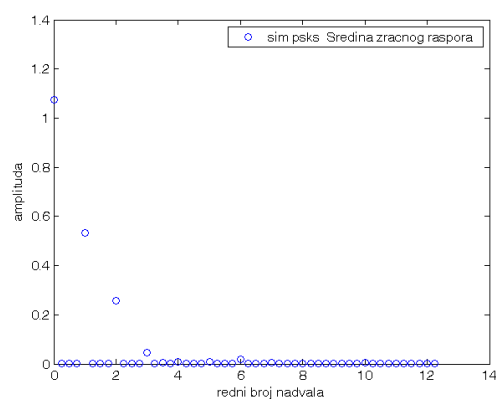


**Slika 5.23** Funkcija toka i indukcije na sredini zračnog raspora za asimetričan (AS) i simetričan (S) rotor, za generator s 27 štapova prigušnog namota statora ( $I_u = 3375$  A,  $t = 60$  ms).

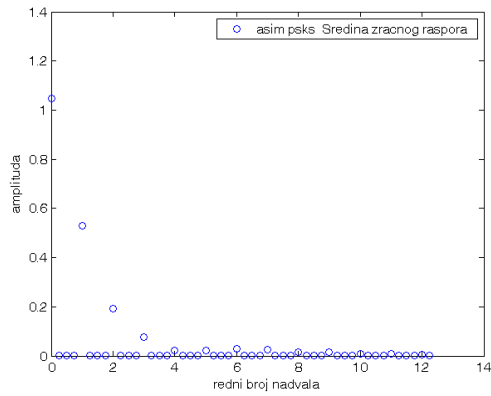
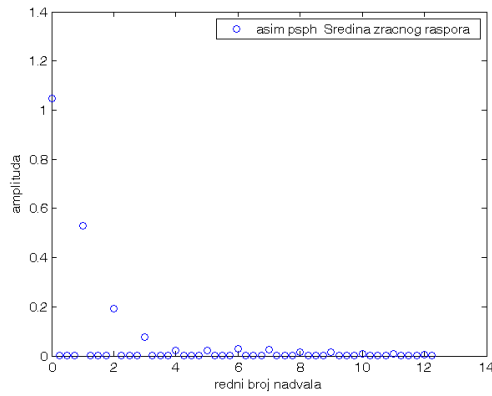
Na slici 5.23. prikazane su funkcije indukcije i toka duž razvijene duljine srednje linije zračnog raspora za simetričan i asimetričan rotor. Uočljiva je razlika u krivuljama gustoće polja. Iako je uzbudna struja ista u oba slučaja može se vidjeti da je ulančeni tok veći kada je rotor simetričan. Srednja vrijednost indukcije u zračnom rasporu za simetričan rotor je  $B_{zrS} = 1,0823$  T, a za asimetričan  $B_{zrAS} = 1,047$  T. U pitanju je dakle razlika vezana uz vodljivost zračnog raspora. Na slici 5.24 prikazane su vrijednosti amplituda pojedinih prostornih harmonika indukcije u zračnom rasporu. Može se zaključiti da na njihovu vrijednost ne utječe statorski prigušni namot.



**a) rotor simetričan, otvoren prigušni namot**



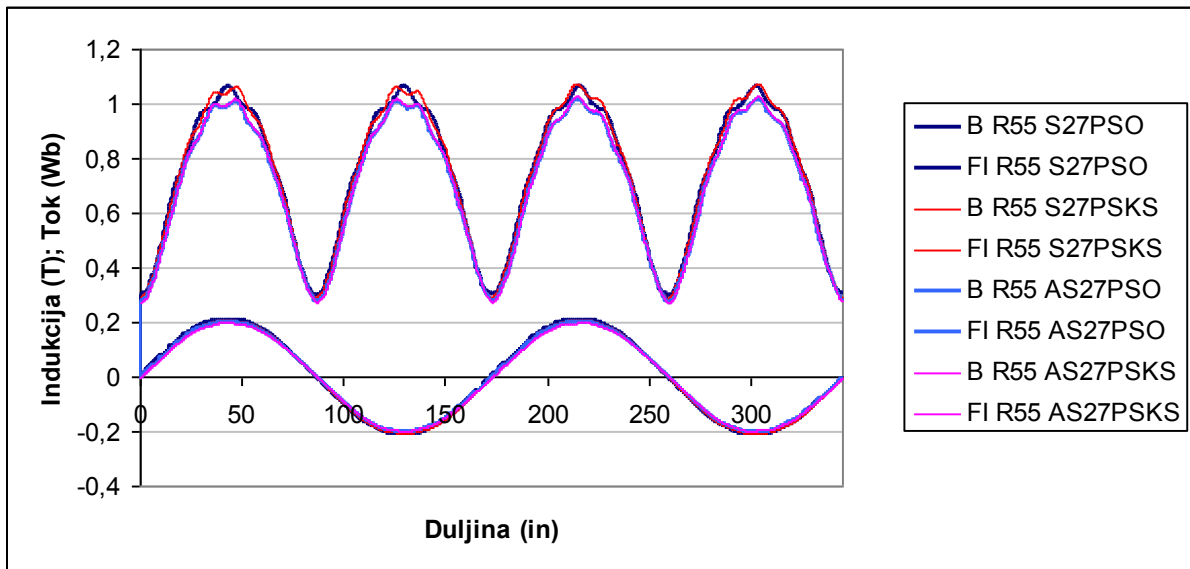
**b) rotor simetričan, kratkospojen prigušni namot**



a) rotor asimetričan, otvoren prigušni namot

b) rotor asimetričan, kratkospojen prigušni namot

Slika 5.24 Prostorni harmonici indukcije u zračnom raspore za četveropolni generator s 27 štapova prigušnog namota, ( $I_u = 3375$  A;  $t = 60$  ms).



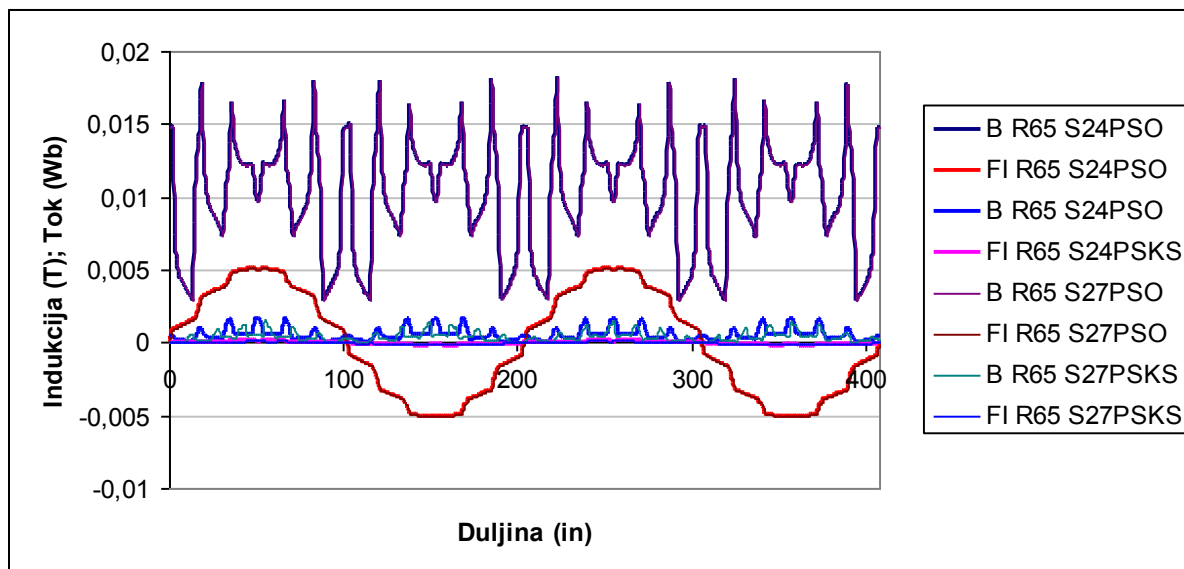
Slika 5.25 Indukcija na srednjoj liniji jarma statora (R=55 in) za asimetrični (AS) i simetrični (S) rotor, za kavez s 27 štapova ( $I_u = 3375$  A;  $t = 60$  ms).

I kod ovog jednostavnog četveropolnog modela razvidno je djelovanje kaveza statora. Međutim radi se o malim iznosima razlike gustoće polja kako je prikazano u tablici 5.3 i na slici 5.25. Iako na vrijednosti indukcije u jarmu više utječe geometrija zračnog raspore odnosno da li je rotor simetričan ili asimetričan, utjecaj prigušnog kaveza je prepoznatljiv, jer je gustoća polja u jarmu nešto viša kada je on kratko spojen. Za letve od standardnog materijala, odnosno čelika, ove bi razlike bile veće kako je prikazano na primjeru dvopolnog generatora.

Tablica 5.3 Srednja vrijednost indukcije na srednjoj liniji jarma statora generatora s asimetričnim i simetričnim rotorom i prigušnim namotom statora.

$B_{jsr}$ prigušni otvoren	asimetričan 24 štapova	simetričan 24 štapova	asimetričan 27 štapova	simetričan 27 štapova
(T)	0,703947	0,737036	0,703947	0,737036
$B_{jsr}$ prigušni kratko spojen	asimetričan 24 štapova	simetričan 24 štapova	asimetričan 27 štapova	simetričan 27 štapova
(T)	0,706095	0,741336	0,707975	0,743226

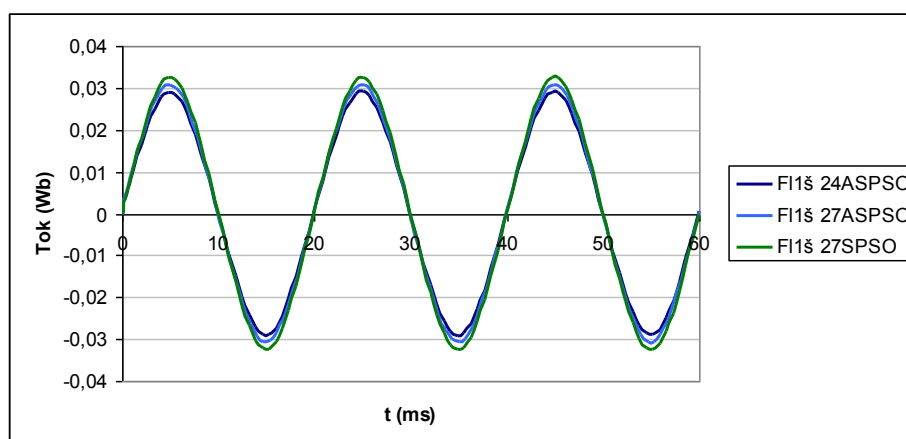
Srednja indukcije na radijusu kućišta  $R = 65$  in sa slike 5.24. za simetrični rotor je  $B_{kPSO24} = 0,01$  T za otvoren i  $B_{kPSKS24} = 0,00044$  T za kratko spojen prigušni namot koji ima 24 štapa. Sličan se rezultat dobiva i za prigušni s 27 štapova:  $B_{kPSO27} = 0,01$  T  $B_{kPSKS27} = 0,000542$  T.



Slika 5.26 Indukcija i tok na unutarnjem promjeru kućišta za simetrični (S) rotor i kavez s 24 i 27 štapova prigušnog namota ( $I_u = 3375$  A;  $t = 60$  ms).

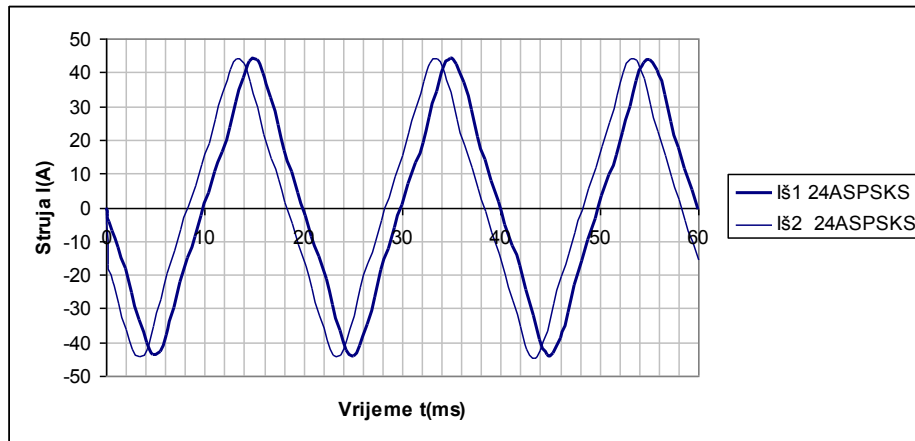
Tokovi ulančeni u štapu broj 1 koji se nalazi u simetrali  $d$  osi u vremenskoj domeni prikazani su na slici 5.27. Razvidna je razlika ulančenih tokova za različitu vrijednost indukcije u jarmu i geometriju prigušnog namota statora s 24 odnosno 27 utora, kao što je prepoznatljiv utjecaj geometrije rotora.

Na slici 5.28. vidi se vremenski pomak struje proporcionalam električnom kutu. Geometrijski kut kaveza je  $\alpha_{g24} = 15^\circ$ , a električni za četveropolni generator  $\alpha_{24} = 30^\circ$ , pa su struje u dva susjedna štapa vremenski pomaknute za  $t_{24} = 1,666$  ms.



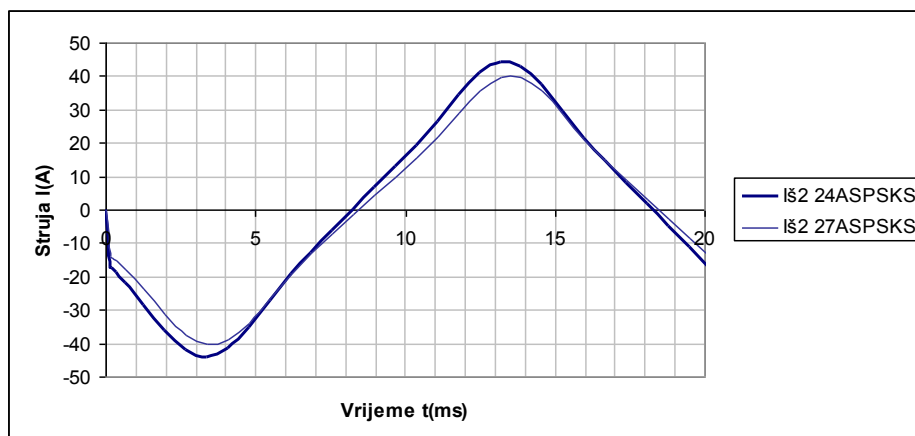
Slika 5.27 Tokovi ulančeni u prvom štapu prigušnog statorskog namota četveropolnog generatora s asimetričnim i simetričnim rotorom ( $I_u = 3375$  A).





Slika 5.28 Struje u prvom i drugom štapu prigušnog statorskog namota četveropolnog generatora s asimetričnim rotorom i 24 štapa prigušnog namota koji su kratko spojeni ( $I_u = 3375$  A).

Na slici 5.29 uspoređene su struje u prigušnom namotu statora sa 24 i 27 štapova. Vidi se da su struje fazno pomaknute. Geometrijski i električni kut kaveza s 27 letvi je manji  $\alpha_{g27} = 13,3^\circ$ ;  $\alpha_{27} = 26,6^\circ$ ;  $t_{27} = 1,48$  ms. Razlika u pomaku je  $\Delta t = 0,185$  ms. Vrijednost struje viša u štapu 24 fazog kaveza što je logično obzirom na manji broj štapova ulančuje približno isti tok.

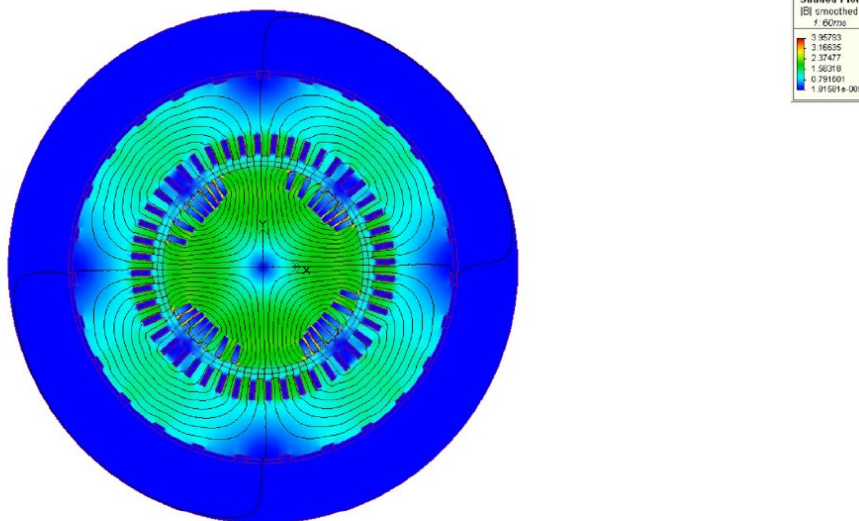


Slika 5.29 Usporedba struja u štapu prigušnog statorskog namota četveropolnog generatora s asimetričnim rotorom i 24 odnosno 27 štapova prigušnog namota jeni ( $I_u = 3375$  A).

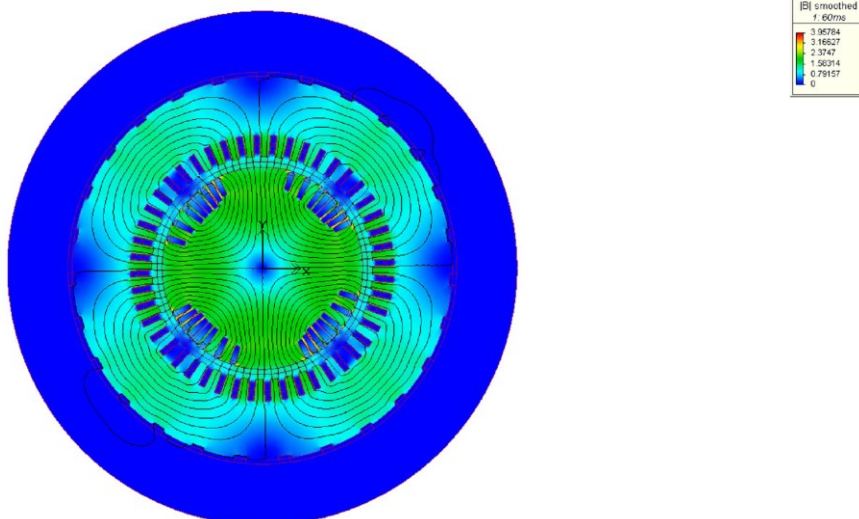
### 5.2.2. Modeli četveropolnog generatora s prigušnim namotom statora i trofaznim statorskim namotom

Slijedeća grupa proračuna napravljena je na modelima sa statorskim namotom za generator u praznom hodu. Iako originalni generator ima aksijalne rashladne kanale na statoru, u ovim modelima će oni biti zanemareni. Također je pretpostavljeno da se štاپ broj 1. prigušnog namota statora koji je smješten u os  $d$  nalazi naspram zuba statora. Model generatora u praznom hodu također je ispitivan za asimetričan i simetričan rotor. Izračun je napravljen i za dva različita prigušna namota s 27 i 24 štapova. Broj utora statora je 48.

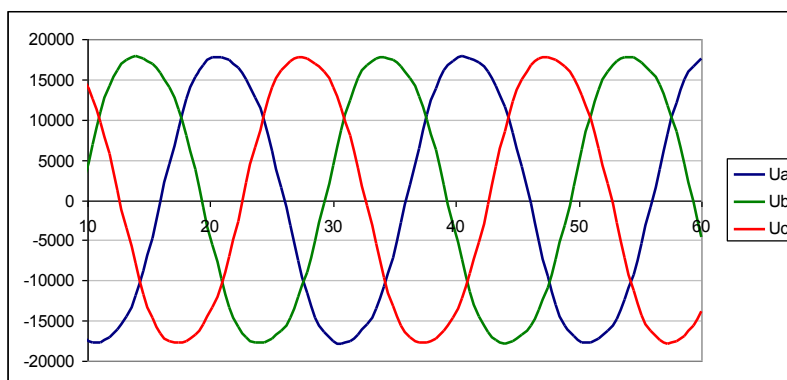




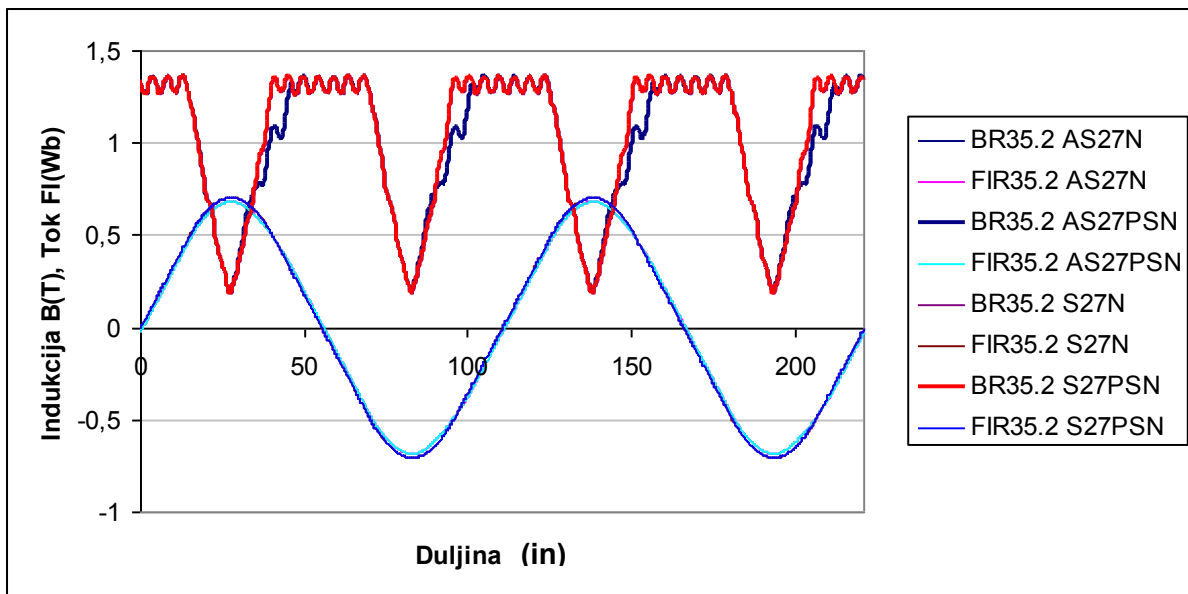
Slika 5.30 Polje četveropolnog generatora s asimetričnim rotorom, 48 statorskih utora i 27 štapova prigušnog namota koji nisu spojeni ( $I_u = 3375$  A;  $t = 60$  ms).



Slika 5.31 Polje četveropolnog generatora s asimetričnim rotorom, 48 statorskih utora i 27 štapova prigušnog namota koji su kratkospojeni ( $I_u = 3375$  A;  $t = 60$  ms).

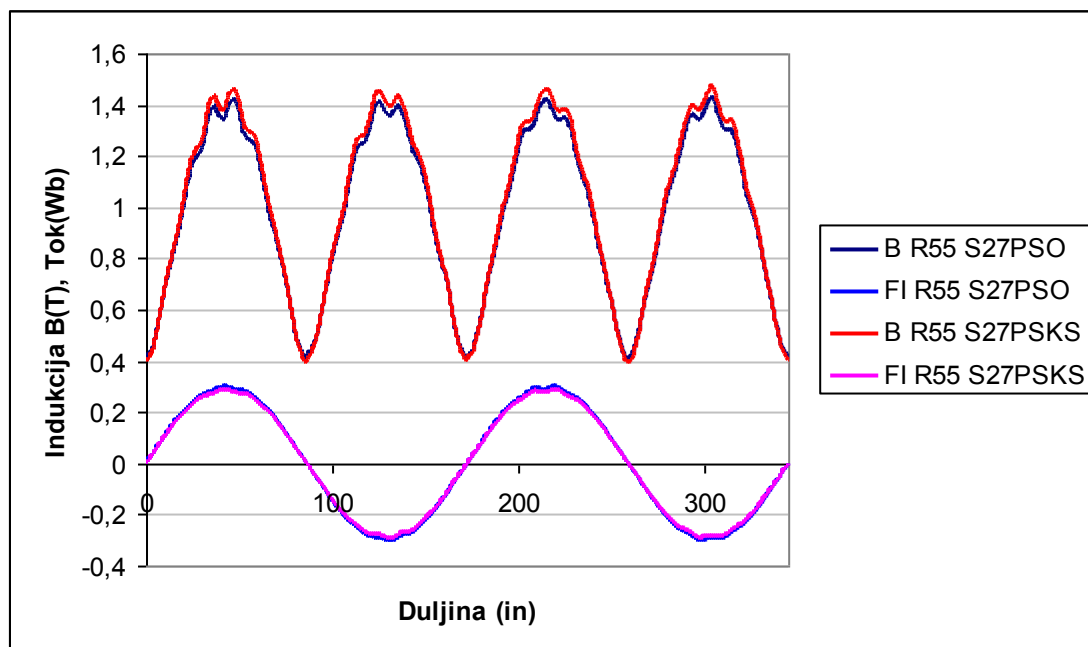


Slika 5.32 Fazni naponi praznog hoda generatora ( $I_u = 3375$  A) u vremenskoj domeni.



Slika 5.33 Prostorna raspodjela indukcije i toka na srednjoj liniji zračnog raspora u praznom hodu ( $I_u = 3375$  A) za modele s asimetričnim (AS) i simetričnim (S) rotorom i prigušnim namotom koji je otvoren i kratko spojen.

Srednja vrijednost indukcije u praznom hodu za simetričan rotor je  $B_{zrS} = 1,024$  T, a za asimetričan  $B_{zrAS} = 0,992$  T. Vrijednosti gustoće polja su niže od onih u modelu bez statorskih utora. Ulančeni tok u zračnom rasporu za simetričan rotor kao i u prošlom primjeru je nešto veći od onog za asimetričan. To znači da ista uzbudna struja u slučaju simetričnog rotora ulančuje veći tok i veću indukciju zbog veće vodljivosti zračnog raspora u slučaju simetričnog rotora.



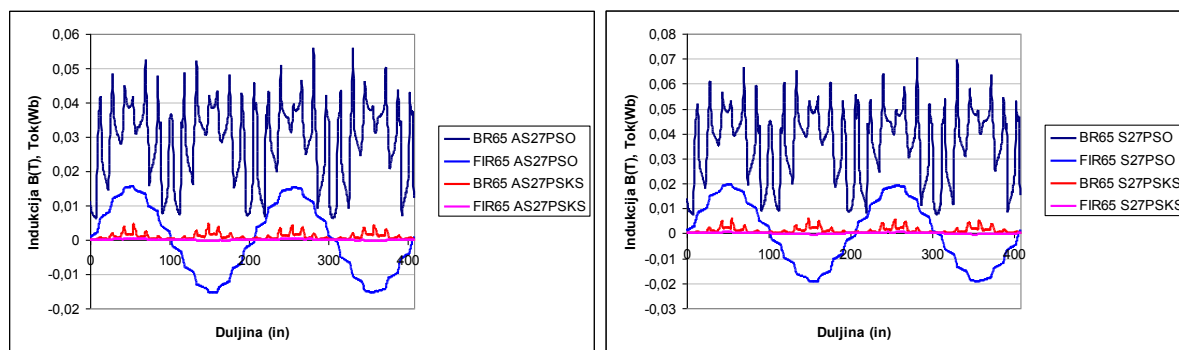
Slika 5.34 Indukcija i tokovi u jarmu statora za simetrični (S) rotor, za kavez s 27 štapova, ( $I_u = 3375$  A;  $t = 60$ ms), za kratko spojeni i otvoreni prigušni namot.

Srednja gustoća polja u jarmu statora razlikuje se za sva četiri ispitana slučaja. Razlike su relativno male oko 2% ali potvrđuju djelovanje kaveza statora obzirom da je u oba slučaja

polje gušće u jarmu kada je namot kratkospojen bilo da se radi o asimetričnom ili simetričnom rotoru, tablica 5.4.

**Tablica 5.4** Indukcije u jarmu za model s faznim i prigušnim namotom na statoru za asimetričan i simetričan rotor

$B_{jsr}$ prigušni otvoren	Asimetričan 27 štapova	Simetričan 27 štapova
(T)	0,956522	0,988686
$B_{jsr}$ prigušni kratko spojen	Asimetričan 27 štapova	Simetričan 27 štapova
(T)	0,972829	1,008632

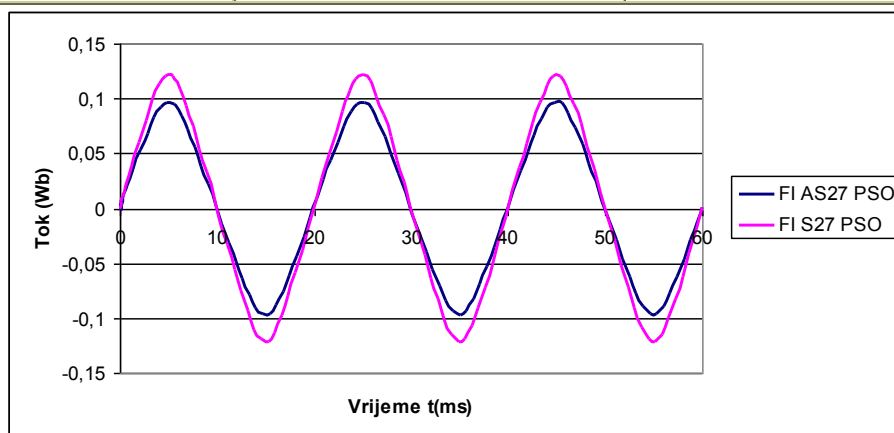


**Slika 5.35** Prostorna raspodjela indukcije i toka na unutarnjem promjeru kućišta za asimetričani i simetričan rotor, kavez s 27 štapova prigušnog namota ( $I_u = 3375$  A;  $t = 60$  ms).

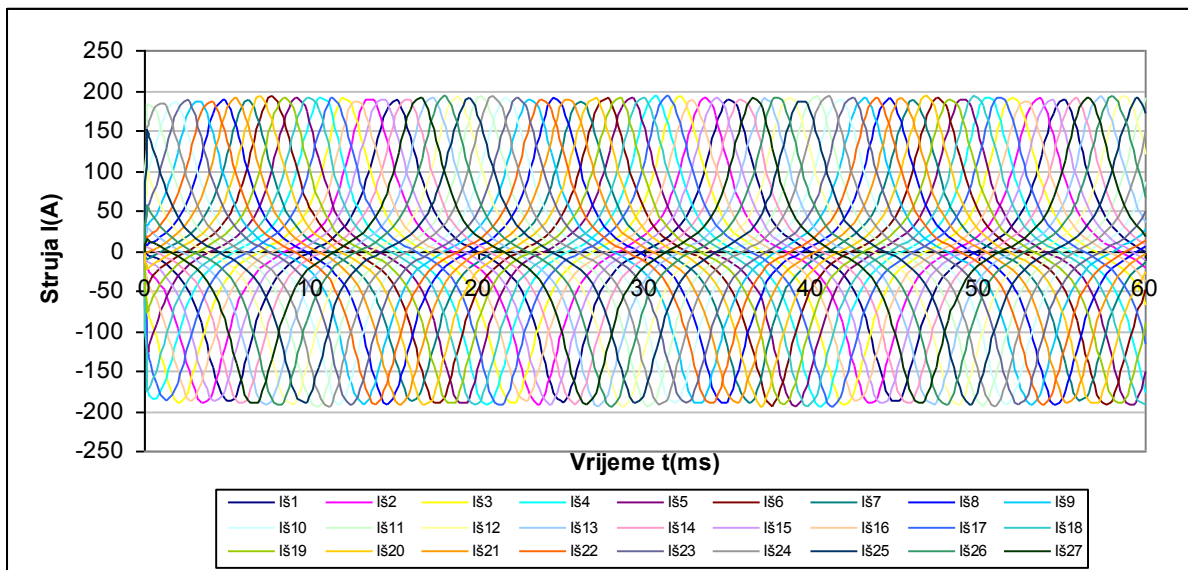
Također se usporedbom rezultata s prijašnjih modela može zaključiti da je djelovanje prigušnog namota statora interesantno tek kod viših indukcija. U prigušnom namotu statora se ulančuje bitno veći tok, slika 5.35,  $\Phi_{ks} = 0,1216$  Wb za model sa simetričnim rotorom i  $\Phi_{kAS} = 0,0968$  Wb za model s asimetričnim rotorom. Promjena toka od 3,3% na liniji jarma statora na razini indukcije u blizini 1T dovodi do promjene ulančenog toka u prigušnom namotu statora od cca 25%.

**Tablica 5.5** Indukcije u kućištu za model s faznim i prigušnim namotom na statoru za asimetričan i simetričan rotor

$B_{ksr}$ prigušni otvoren	Asimetričan 27 štapova	Simetričan 27 štapova
(T)	0,02853	0,03565
$B_{ksr}$ prigušni kratko spojen	Asimetričan 27 štapova	Simetričan 27 štapova
(T)	0,000944	0,001145

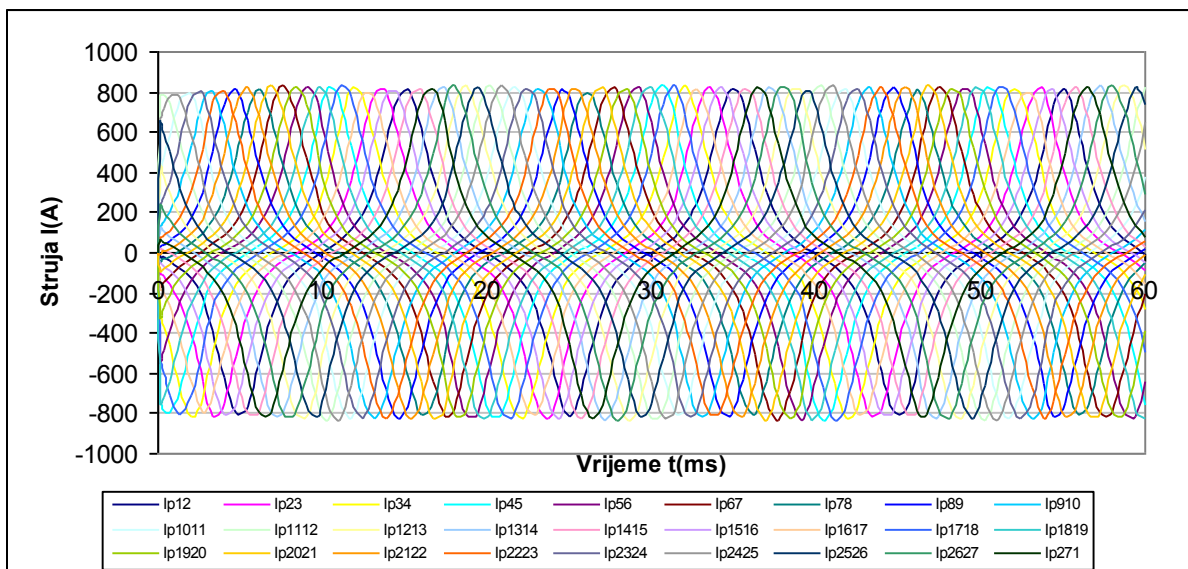


**Slika 5.36** Ulančeni tok u štapovima otvorenog prigušnog namota, uspoređeni za asimetričani i simetričan rotor, za kavez s 27 štapova prigušnog namota ( $I_u = 3375$  A).



Slika 5.37 Struje u štapovima prigušnog namota, asimetrični rotor, za kavez s 27 štapova prigušnog namota ( $I_u = 3375$  A).

Kada se uspoređi ulančeni tok modela bez utora statora kada je indukcija u jarmu imala vrijednosti iz tablice 5.3, a ulančeni tok dijagramu sa slike 5.27, vidi se da je ulančeni tok za relativno malu promjenu indukcije poprimio višestruko veću vrijednost. Struja je proporcionalna ulančenom toku pa su izračunate vrijednosti struja prikazane na slici 5.37.

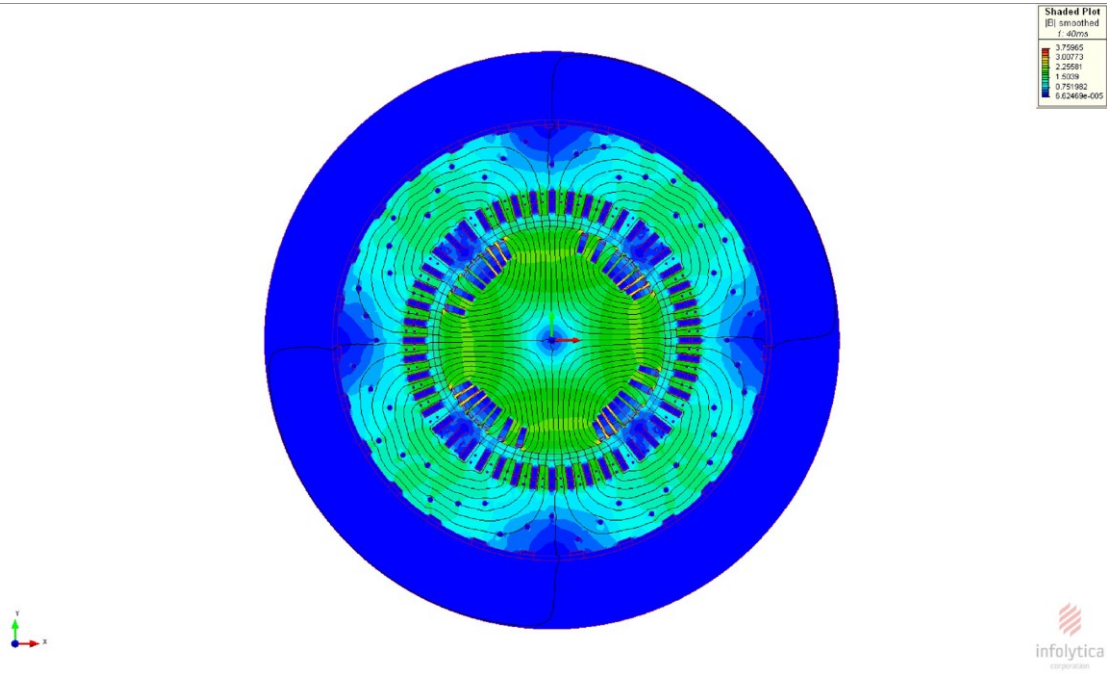


Slika 5.38 Struje u dijelovima prstena prigušnog namota, asimetrični rotor, za kavez s 27 štapova prigušnog namota ( $I_u = 3375$  A).

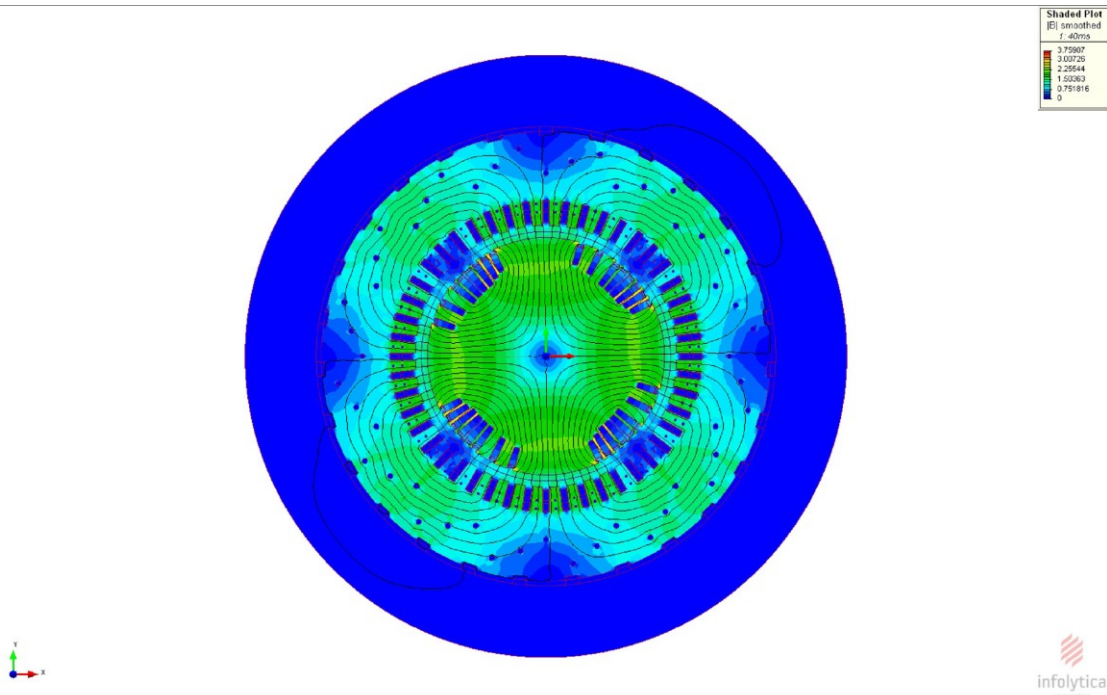
Na slici 5.38 sukladno jednačbi (3.9) izračunate su struje u dijelovima prstena između dva štapa.

### 5.2.3. Model četveropolnog generatora samo s prigušnim namotom statora, faznim namotom rotora i aksijalnim rashladnim kanalima u jarmu

Model 5. iz tablice 5.2, s aksijalnim rashladnim kanalima u statoru, predstavlja originalni generator. Na ovome modelu se štap prigušnog namota broj 1 nalazi u osi  $d$  naspram utora statorskog namoota.

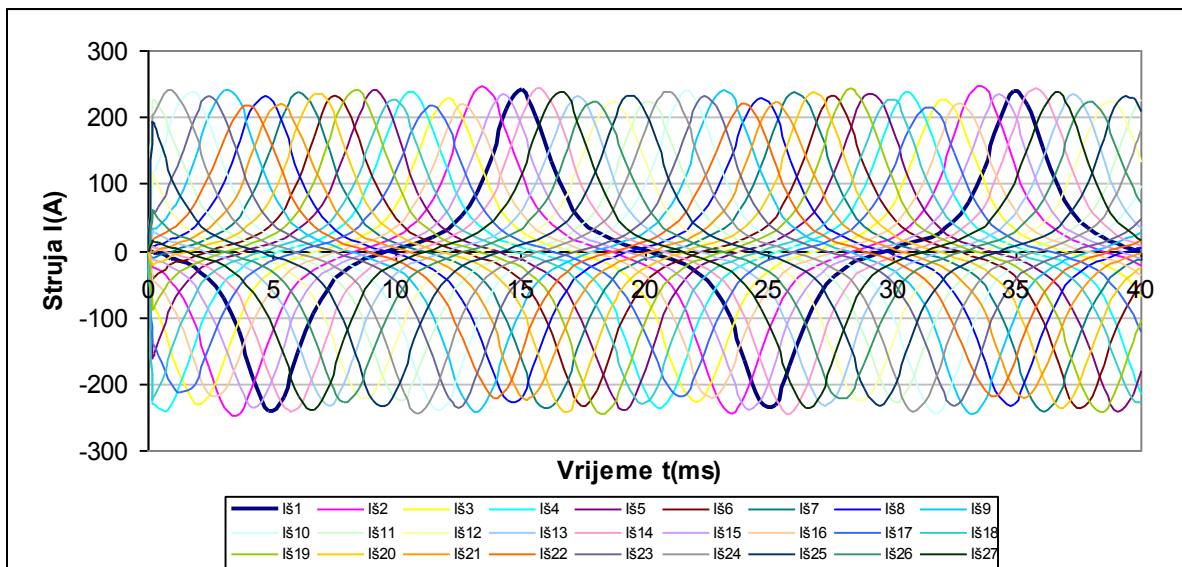


Slika 5.39 Polje četveropolnog generatora s 48 statorskih utora i 27 štapova prigušnog namota koji nisu spojeni ( $I_u = 3375$  A;  $t = 60$  ms).



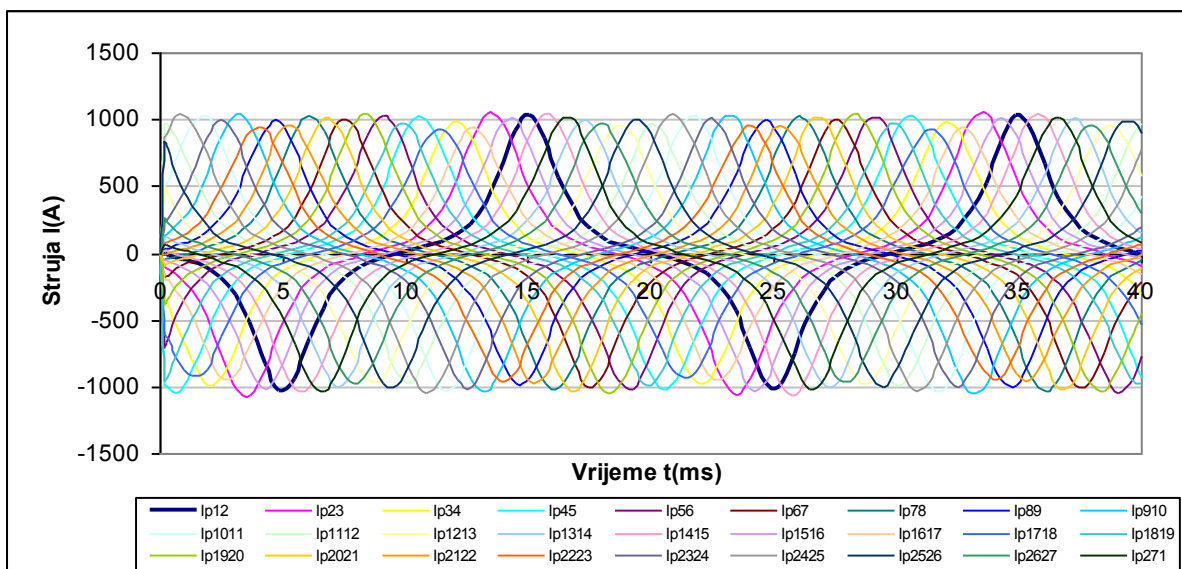
Slika 5.40 Polje četveropolnog generatora s 48 statorskih utora i 27 štapova prigušnog namota koji su kratko spojeni ( $I_u = 3375$  A;  $t = 60$  ms).





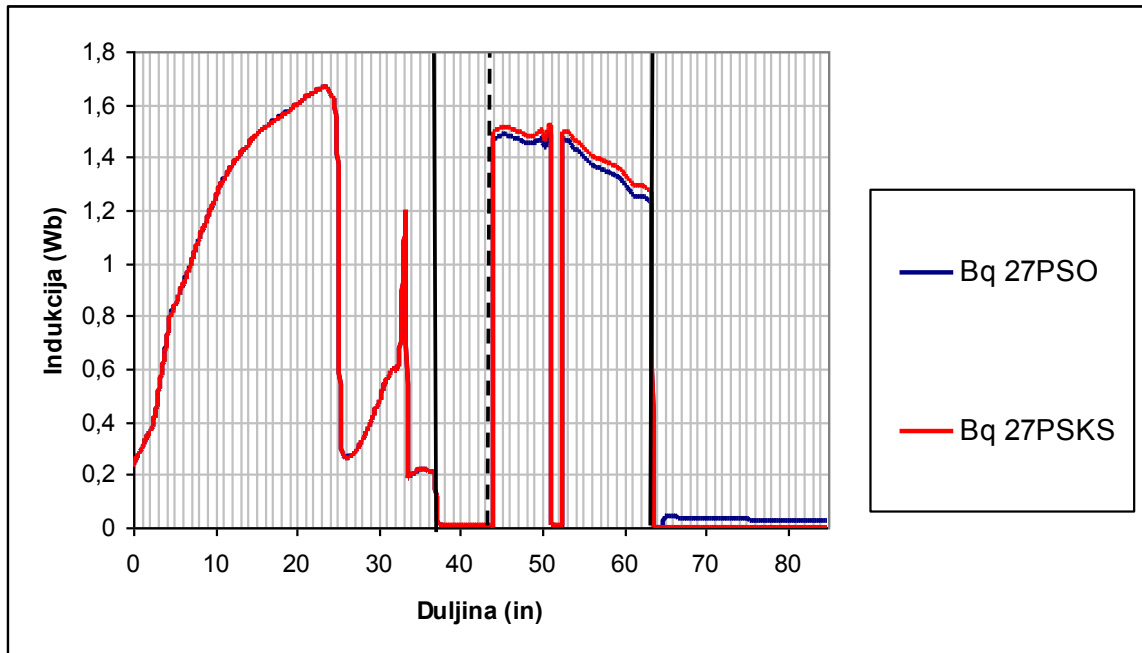
Slika 5.41 Struje u štapovima prigušnog namota, asimetrični rotor, za kavez s 27 štapova prigušnog namota ( $I_u = 3375$  A) – originalna konstrukcija s aksijalnim kanalima.

Dodatno povećanje indukcije u jarmu izaziva dodatno povećanje ulančenog toka zbog kojeg će kroz kratkospojeni prigušni namot proteći veće struje. Zbog postojanja aksijalnih rashladnih kanala vodljivost jarma je različita pa su i maksimalne vrijednosti struja pojedinog štapa različite. Na primjer štapovi 17 i 21 ulančuju manje struje obzirom da se nalaze iznad zuba i da između ne postoji rashladni kanal. Za razliku od njih štap broj 1 u  $d$  osi nalazi se naspram utora i između postoji rashladni kanal, te je i indukcija na tom presjeku viša od prethodne.

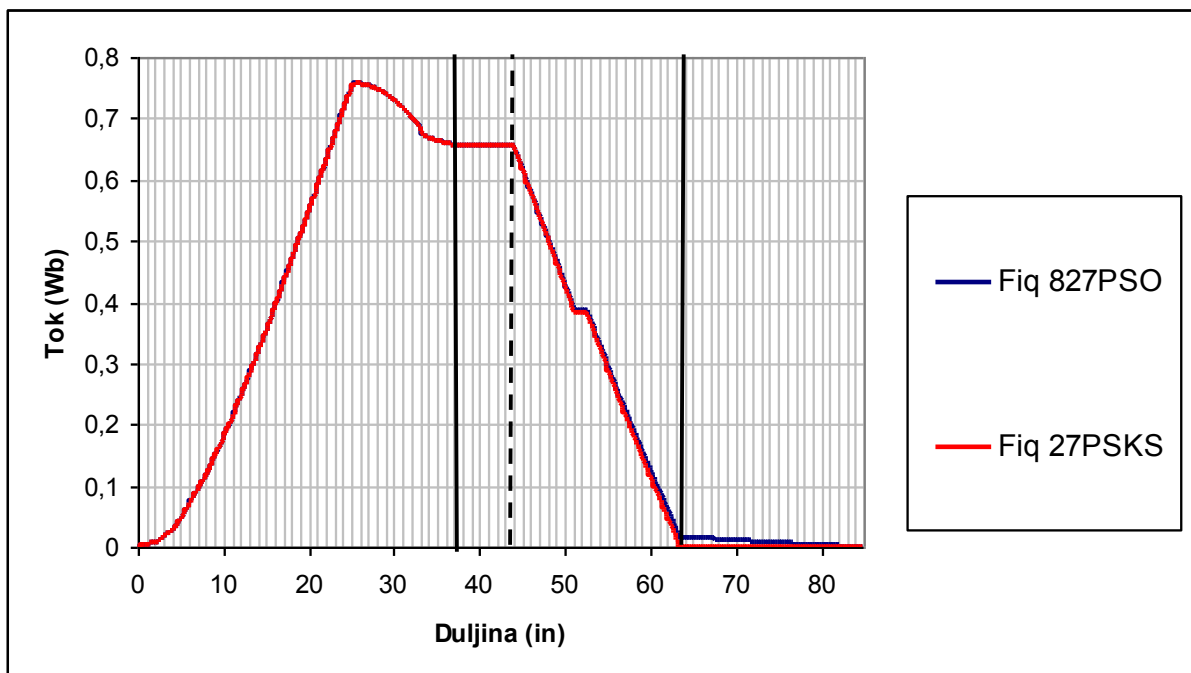


Slika 5.42 Struje u dijelovima prstena prigušnog namota, asimetrični rotor, za kavez s 27 štapova prigušnog namota ( $I_u = 3375$  A) – originalna konstrukcija s aksijalnim kanalima.

Kao i kod dvopolnog generatora prikazani su indukcija i tok u  $q$  osi za generator s rashladnim kanalima u jarmu. Dvije pune crte označavaju unutarnji i vanjski promjer paketa, a crtkana linija unutarnji promjer jarma.

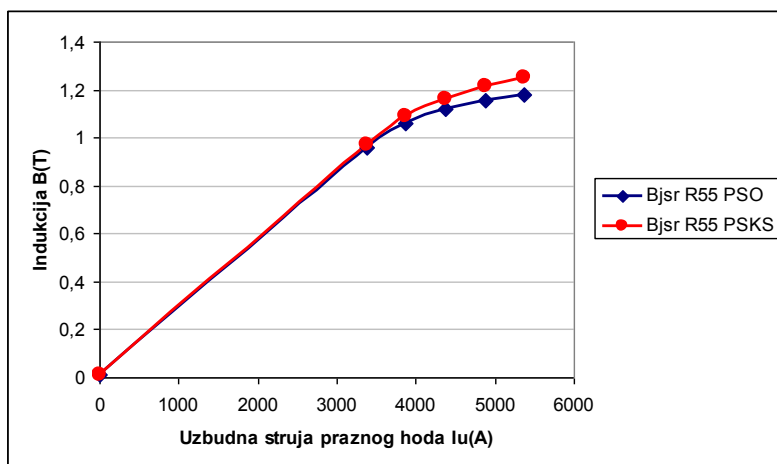


Slika 5.43 Indukcija i  $q$  osi po presjeku generatora od centra rotora do vanjskog promjera kućišta generatora s 27 štapova prigušnog namota statora ( $I_u = 3375$  A)– originalna konstrukcija s aksijalnim kanalima.



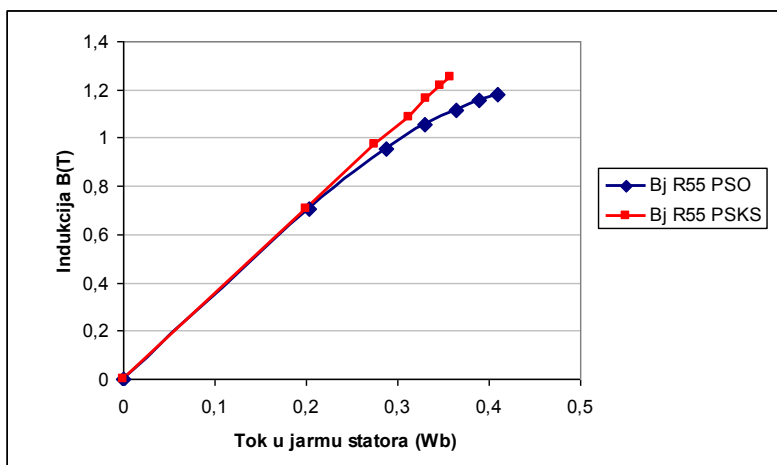
Slika 5.44 Tok u  $q$  osi po presjeku generatora od centra rotora do vanjskog promjera kućišta generatora s 27 štapova prigušnog namota statora ( $I_u = 3375$  A) – originalna konstrukcija s aksijalnim kanalima.

Varijacijama uzbudne struje ispitane su prilike u jarmu za otvoreni i kratko spojeni prigušni namot. Na slici 5.45 dane su funkcije srednje vrijednosti gustoće polja na srednjoj liniji jarma statora  $R = 55$  in. Kada je prigušni namot kratko spojen za istu vrijednost uzbudne struje indukcija je viša nego kada je namot otvoren.

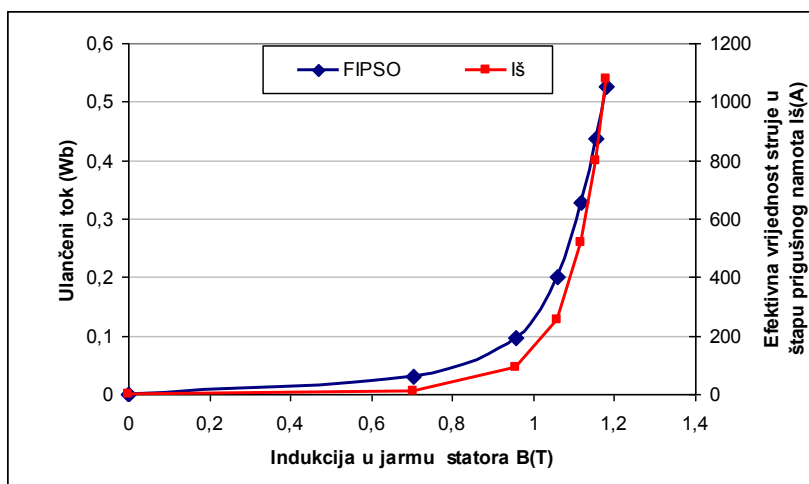


Slika 5.45 Krivulja praznog hoda na srednjoj liniji jarma statora za otvoreni i kratko spojeni prigušni namot.

Na slijedećoj slici prikazana je gustoća polja u funkciji toka jarma statora na srednjem promjeru jarma. Uz manju vrijednost toka u jarmu kod kratko spojenog kaveza statora ostvaruju se veće indukcije, a karakteristika se linearizira.



Slika 5.46 Indukcija na sredini jarma u funkciji ulančenog toka za otvoreni i kratko spojeni prigušni namot.



Slika 5.47 Funkcija ulančenog toka u otvorenom i struje u kratko spojenom prigušnom namotu statora ovisno o srednjoj vrijednosti indukcije na sredini jarmu statora.



Za srednje vrijednosti indukcija na sredini jarma statora iznad 0,9 T počinje zasićenje i induciraju se u prigušnom namotu statora nazanemarivi tokovi, a samim tim počinju teći i značajne struje čije su efektivne vrijednosti poprimaju iznose sa slike 5.47. Za usporedbu je korištena srednja linija visine statora obzirom da je ona relevantna i za razmatranja vezana uz elektromagnetsku buku.

Projektni pristup se unekoliko razlikuje od klasične analize parametara. Međutim izračun srednje vrijednosti indukcije koji se ne može odrediti klasičnom metodom u ovom slučaju je efikasniji nego analiza preko maksimuma funkcija. Indukcija je uvijek veća od nule i mijenja se u prostoru za razliku od toka koji je prostorno promjenjiv, a čija je srednja vrijednost jednaka nuli. Stoga je funkcija ulančenog toka prikazana preko maksimalnih vrijednosti. Struja je predstavljena preko efektivnih vrijednosti.

### 5.3. *Ispitni rezultati gubitaka u paketu statora Generator 1*

Ispitivanja kojima je provjeren utjecaj prigušnog namota statora provedena su tijekom pokusa magnetiziranja paketa statora na dvopolnom turbogeneratoru (GENERATOR 1).

Pokus magnetiziranjem paketa statora provodi se u cilju potvrđivanja kvalitete dinamo limova paketa te određivanja eventualnih toplih mjesta. Ispitivanja se provode sa ili bez kućišta na tehnološki završenom paketu u kućištu statora, bez rotora u provrtu i prije ulaganja namota. Za primjer dvopolnog generatora koji je ispitivan s otvorenim i kratko spojenim prigušnim namotom stator paketa je ulagan u kućištu generatora tako da je ispitivanje provedeno zajedno s njim.

Da bi se u jarmu ostvarila zadana prosječna indukcija koju će stroj imati u radu od 1T - 1,5 T, potrebno je oko paketa postaviti uzбудni ispitni namot. Uzбудni namot se postavlja tako da njegovi zavoji obuhvaćaju paket aksijalno, tj. da prolaze kroz provrt i preko vanjske strane paketa ponovno ulaze u provrt. Zavoji se približno jednoliko raspoređuju po obodu paketa.

Uzбудni namot se priključuje na regulirani izvor izmjeničnog napona, koji se polagano diže od nule do iznosa koji odgovara zadanoj indukciji. Tijekom ispitivanja u mjernom krugu, mjere se napon, struja i snaga na uzbudnom namotu, te kontrolira temperatura. Iznos indukcije u jarmu se izračunava. Rezultati mjerenja su dani u tablici 5.6.

**Tablica 5.6**      **Rezultati mjerenja gubitaka u paketu statora tijekom pokusa magnetiziranja**

Prigušni kavez statora	Gustoća polja	Specifični gubici
otvoren	1,16 T	19,96 W
kratko spojen	1,173 T	18,288 W

Za mjerenja provedena s istim ulaznim parametrima uzbudnog ispitnog namota dobivene su različite vrijednosti gustoće polja u statoru i izmjereni manji gubici. Izmjerena razlika gustoće polja je reda veličine one na ispitanim modelima.

### 5.4. *Zaključak petog poglavlja*

Uloga prigušnog namota statora, odnosno njegov utjecaj na elektromagnetske prilike kod turbogeneratora može se podijeliti u četiri osnovne grupe:

- Smanjanje rasipanja toka u kućište statora;
- Preraspodjela toka u područje manjih specifičnih gubitaka;

- Smanjenje elektromagnetskih sila koje se prenose na temelje generatora u trenutku nastanka udarnog dvofaznog kratkog spoja;
- Smanjenje vibracija koje se s paketa prenose na kućišta i buke elektromagnetskog porijekla – prigušni namot statora je u funkciji elastičnog učvršćenja paketa u kućištu.

U ovom poglavlju je na primjerima dvopolnog i četveropolnog generatora i pripadajućim modelima dokazan i vrednovan utjecaj prigušnog namota statora. Izračunate su struje za različite geometrijske konfiguracije, potvrđene su postavke klasične teorije i dobiveni su očekivani rezultati. Porast srednje gustoće polja u jarmu statora iznad 1T bitno povećava ulančeni tok u štapovima statorskog kaveza usljed kojih protječu struje reda veličine stotinu ampera (utorski korak prigušnog namota 350 mm-500 mm). Stoga će prigušni namot djelovati intenzivno u svim uvjetima u stroju u kojima je magnetna indukcija u jarmu visoka. Prigušni namot statora nema zamjetan utjecaj u uvjetima koje opisuje pokus kratkog spoja, obzirom da je tada indukcija u jarmu statora niska. Bez obzira na tu činjenicu prigušni kavez statora suprotstavlja se svakoj promjeni polja, što znači da će ukoliko nastupi kvar odreagirati i prigušiti pojavu.

U slijedećem poglavlju će se analizirati utjecaj prigušnog namota statora na elektromagnetske sile između kućišta i statorskog paketa.

## 6. Elektromagnetska buka u turbogeneratorima

Bilo koje mehaničke promjene sustava manifestiraju se kao izvor zvučnih valova. Ovisno o učestalosti promjene  $f$  (Hz) i medija kroz koji se prostiru valne duljine zvuka  $\lambda$  (m) se razlikuju:

$$\lambda = c / f, \quad (6.1)$$

gdje  $c$  (m/s) označava brzinu prostiranja zvučnog vala. U zraku je ova brzina ovisna o temperaturi  $t$  (°C) pa je tako vrijedi  $c = 331,4 + 0,6t$  (m/s). Na 20°C brzina zvuka je 343 m/s. U čvrstim tijelima brzina zvuka za longitudinalne valove definirana je preko Youngovog modula elastičnosti i gustoće medija  $\rho$  (kg/m<sup>2</sup>s):

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (6.2)$$

Rasprostiranje zvučnog vala definirano je preko jakosti zvučnog vala odnosno zvučnog intenziteta  $I$  (W/m<sup>2</sup>) i predstavlja energiju koju zvučni val prenese u jedinici vremena kroz jediničnu površinu okomitu na smjer širenja zvuka. Jedinica je watt po četvornom metru. Zvučni intenzitet sinusoidnog vala jednak je:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \frac{p^2}{\rho \cdot c}, \quad (6.3)$$

gdje je  $p$  amplituda promjenjivog zvučnog tlaka u N/m<sup>2</sup>,  $\rho$  gustoća medija, a  $c$  brzina zvuka kroz promatrani medij. Konstanta  $\rho \cdot c$  predstavlja specifični akustični otpor neke sredine čija je standardna vrijednost za zrak na 20°C, 410 kg/m<sup>2</sup>s.

Najmanji zvučni tlak (prag čujnosti)  $p$  kojega ljudsko uho može zamijetiti (čuti kao zvuk) iznosi oko  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa pri 1000 Hz. Tu je vrijednost Internacionalna standardizacijska organizacija (ISO) odabrala kao referentnu veličinu – referentni zvučni tlak. Najveći zvučni tlak kojega ljudsko uho može podnijeti bez oštećenja je milijun puta veći od referentnoga, odnosno 20 Pa (prema  $10^6 \times 2 \cdot 10^{-5}$ ).

Ako se umjesto  $p$  u jednadžbu (6.3) uvrsti referentni zvučni tlak, može se izračunati i referentni zvučni intenzitet, koji iznosi  $9,76 \cdot 10^{-13}$ , odnosno, približno  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>. Na isti način, kada se u formulu za intenzitet uvrsti maksimalna veličina zvučnog tlaka kojeg čovjek može podnijeti dobit će se zvučni intenzitet od 1 W/m<sup>2</sup>.

Jedinica za subjektivnu razinu glasnoće zvuka (osjet jakosti u uhu) je fon. Raspon ljudskog sluha je velik; najmanji i najveći zvučni tlak kojeg uho može registrirati odnose se kao  $1:10^6$ , a zbog toga što intenzitet zvuka ovisi o kvadratu zvučnog tlaka, najmanji i najveći zvučni intenzitet odnose se kao  $1:10^{12}$ . Osjetljivost uha proporcionalna je logaritmu snage zvuka. Decibel se definira kao veličina koja predstavlja logaritam odnosa dvaju intenziteta. Broj decibela izračunava se prema:

$$n = 10 \log(I_1 / I_2). \quad (6.4)$$

Budući da je decibel definiran preko odnosa intenziteta, a intenzitet zvuka ovisi o kvadratu zvučnog tlaka, u slučaju kad se u decibelima želi izraziti odnos dvaju zvučnih tlakova, formula poprima oblik:

$$n = 20 \log(p_1 / p_2). \quad (6.5)$$

Skala jakosti definirana je preko jakosti osnovnog tona od 1000 Hz prema pragu čujnosti pri zvučnom tlaku od  $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$ , odnosno intenzitetu zvuka od  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ :

$$L = 20 \log \frac{P}{2 \cdot 10^{-5}} = 10 \log \frac{I}{10^{-12}}. \quad (6.6)$$

Slijedi da je 0 dB proporcionalno pragu čujnosti, a 120 dB pragu boli. Dvostruki intenzitet predstavlja povećanje intenziteta od približno 3 dB, a dvostruki zvučni tlak predstavlja povećanje zvučnog tlaka od 6 dB. Ukupna buka iz više izvora računa se preko slijedeće relacije:

$$L = 10 \log \frac{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2}{2 \cdot 10^{-5}} = 10 \log \frac{I_1 + I_2 + I_3}{10^{-12}}. \quad (6.7)$$

Zbrajanje izvora zvuka potrebno je raditi postupno. Ukoliko se frekvencija zvuka razlikuje od 1000 Hz uho će te tonove bez obzira na isti intenzitet zvuka u dB razlikovati. Stoga je potrebno složeni zvuk koji se sastoji od izvora različitih frekvencija prikazati preko spektrograma. Izračun zvučnog tlaka i intenziteta zvuka za određenu frekvenciju  $f$  (Hz) dobiva se iz formule:

$$p = \rho \cdot c \cdot \dot{y}, \quad (6.8)$$

gdje je  $p$  izmjenični tlak u N/m,  $\dot{y}$  brzina vibriranja površine u m/s, a  $\rho \cdot c$  specifični akustički otpor sredine. Intenzitet zvuka  $I$  ( $\text{W/m}^2$ ) za sinusoidni oblik vala iz (6.3) postaje:

$$I = \frac{1}{2} p \cdot \dot{y} \cdot 10^{-11}. \quad (6.9)$$

Kako je brzina promjene  $\dot{y}$  efektivna vrijednost, maksimalna amplituda vibracija za sinusoidni val iznosi  $\sqrt{2}\dot{y}$ . Za referentnu razinu tlaka od  $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$  brzina promjene vibrirajuće površine je  $\dot{y} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ . Slično vrijedi za pomak  $y$  i ubrzanje  $\ddot{y}$ . Kod razmatranja vibracija preko pomaka, brzine ili ubrzanja u relativnim jedinicama polazi se od (6.4). Veza među amplitudama pomaka, brzine i ubrzanja harmonika u jednoj točki koji se mijenjaju kružnom frekvencijom  $\omega$  dana je preko:

$$\dot{y} = \omega \cdot y \quad (6.10)$$

$$\ddot{y} = \omega^2 \cdot y. \quad (6.11)$$

Slijedi da je za osnovnu frekvenciju od 1000 Hz amplituda pomaka iznosi  $y_0 = 8 \cdot 10^{-12} \text{ m}$ , a ubrzanje harmonika vibracija je  $\ddot{y}_0 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2$ .

S obzirom da se zvučni tlak smanjuje obrnuto proporcionalno udaljenosti, a intenzitet zvuka obrnuto proporcionalno kvadratu udaljenosti, referentna razina glasnoće zvuka je propisana na udaljenosti 1 m od izvora zvuka. Kada su u pitanju mjerenja na generatoru buka se mjeri u točkama zamišljenog žičanog modela koji na udaljenosti 1 m okružuje kućište generatora.

## 6.1. Izvori zvuka kod električnih strojeva

Kod električnih strojeva razlikujemo slijedeće izvore buke:

1. Elektromagnetske - izazvane djelovanjem elektromagnetskih sila;

2. Mehaničke - među koje spadaju izvori buke u ležajevima ovisno o tipu i kvaliteti njihove izrade, mehanički neuravnoteženi (nebalansiran) rotor osobito kod brzohodnih strojeva poput turbogeneratorskih, te trenje četkica u kliznokolutnom uređaju;
3. Aerodinamične - izazvane djelovanjem aerodinamičnih sila koje ovise o konstrukciji ventilatora i ventilacijskih rashladnih kanala.

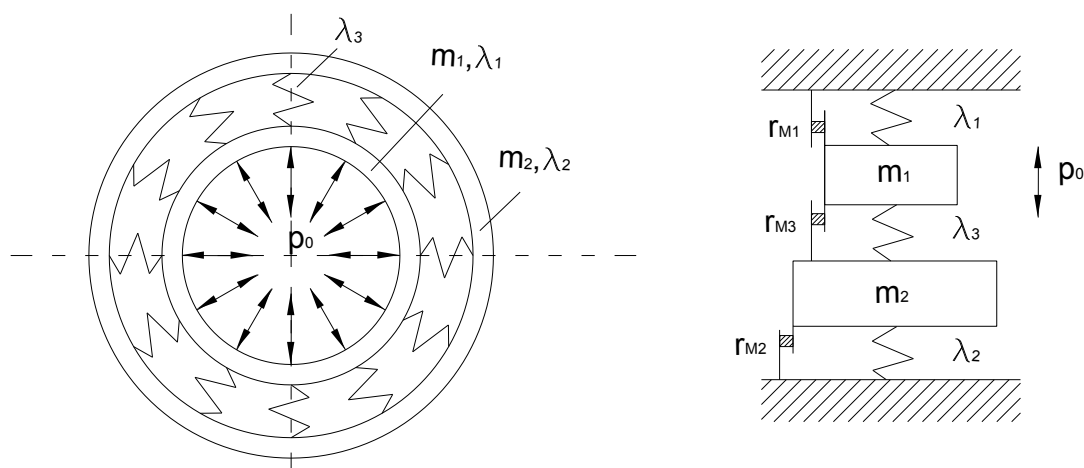
Neželjeno akustičko zračenje, odnosno buka elektromagnetskog porijekla nastaje kod električnih strojeva uslijed titranja statorskog paketa uzrokovanog magnetskim silama. Radikalno titranje pojaviti će se na frekvencijama određenim frekvencijskim sastavom pobudne sile, a njegova razina određena je osim razinom pobudne sile i mehaničkim svojstvima statorskog paketa [22]. Razina zvučnog tlaka u slobodnom prostoru bit će nadalje određena osim navedenom titrajnom brzinom i efikasnošću zračenja stroja kao akustičkog emitera, te njegovom efektivnom površinom zračenja.

Zbog frekvencijski ovisne osjetljivosti ljudskog uha i zbog eventualnog poklapanja vlastitih frekvencija mehaničkog sustava i pojedinih harmonika pobudne sile, od posebnog je interesa frekvencijski sastav elektromagnetske buke koji je određen frekvencijskim spektrom pobudne sile [31]. Elektromagnetske sile koje su izvor buke djeluju u zračnom rasporu električnih strojeva i mogu imati obrtni ili pulsirajući karakter. Veličina tih sila ovisi o elektromagnetskom opterećenju i određenim konstrukcijskim karakteristikama stroja. Veličina vibracija izazvana elektromagnetskim silama ovisi pak o karakteristikama statora kao vibracijskog sustava koji je manje ili više podložan vibracijama. Kod velikih strojeva vibracije se nalaze u opsegu 100-4000 Hz. Pri projektiranju statora mora se voditi računa da računski i konstrukcijski parametri budu takvi da osiguraju minimalno prenošenje elektromagnetskih sila na kućište stroja. Potrebno je naglasiti da je buka elektromagnetskog porijekla koja nastaje uslijed vibriranja kućišta dominantna kod električnih strojeva sa zatvorenim sustavima hlađenja.

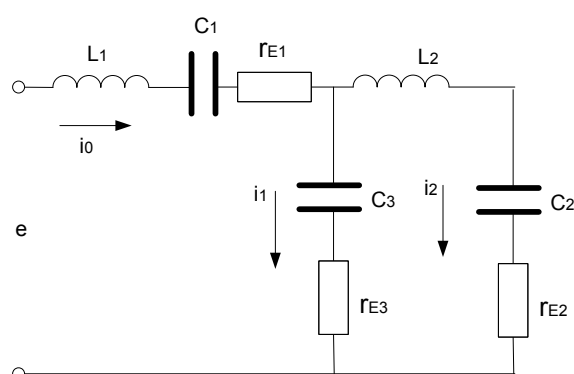
## **6.2. Način izračuna vlastitih vibracija učvršćenja jarma u kućištu**

Vibracije pojedinih elemenata konstrukcije električnih strojeva mogu se računati prema analogiji s električnim krugovima. I dok su elementi električnih krugova aktivni otpor  $r_E$ , induktivitet  $L$  i kapacitet  $C$ , kod translatorskih vibracija u mehaničkim sustavima mehaničke parametre predstavljaju otpori trenja  $r_M$ , mase  $m$  i elastičnosti elementa  $\lambda_M$ . Rješavanjem diferencijalnih jednadžbi mogu se izračunati vibracije sustava sukladno izračunu električnih veličina. Dok u električnim krugovima struje ovise o narinutom naponu u mehaničkom translatorskom sustavu pomaci su proporcionalni mehaničkim silama.

Kod turbogeneratorskih kućište može biti kruto ili elastično povezano sa statorskim paketom, dok je veza kućišta prema temeljima kruta (kruto temeljenje). Titrajni sustav paketa statora koji je elastično povezan s kućištem, je stoga dvomasni sustav shematski prikazan na slici 6.1. Parametri mehaničkog sustava su masa statora (ukupna masa s namotom)  $m_1$  i njegova elastičnost  $\lambda_1$ , kućište mase  $m_2$  i elastičnosti  $\lambda_2$ , te elastični spoj ostvaren preko letvi elastičnosti  $\lambda_3$ . Kada je paket kruto spojen s kućištem onda nema paralelne grane sa slike 6.2 koja predstavlja elastično učvršćenje, pa se elementi kućišta i statora zbrajaju.



Slika 6.1 Shematski prikaz učvršćenja paketa statora u kućištu i nadomjesna mehanička shema.



Slika 6.2 Analogna električna shema mehaničkom sustavu učvršćenja paketa statora u jarmu.

Mehanički sustav sa slike 6.1 predstavljen je sustavom jednadžbi koji svaku granu opisuje mehaničkom impedancijom:

$$\begin{aligned}
 Z_{M_1} &= j\omega m_1 + \frac{1}{j\omega\lambda_1} + r_{M_1}; \\
 Z_{M_2} &= r_{M_3} + \frac{1}{j\omega\lambda_3}; \\
 Z_{M_3} &= j\omega m_2 + \frac{1}{j\omega\lambda_2} + r_{M_2}.
 \end{aligned}
 \tag{6.12}$$

Analogni električni krug predstavljan je na slici 6.2.:

$$\begin{aligned}
 Z_{E_1} &= j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + r_{E_1}; \\
 Z_{E_2} &= r_{E_3} + \frac{1}{j\omega C_3}; \\
 Z_{E_3} &= j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + r_{E_2}.
 \end{aligned}
 \tag{6.13}$$

Brzine vibracija (titranja) u mehaničkom sustavu odgovaraju strujama koje protječu u određenoj grani sheme na slici 6.1, a rješenja jednadžbi imaju sličan oblik. Struje u pojedinoj grani sheme su:

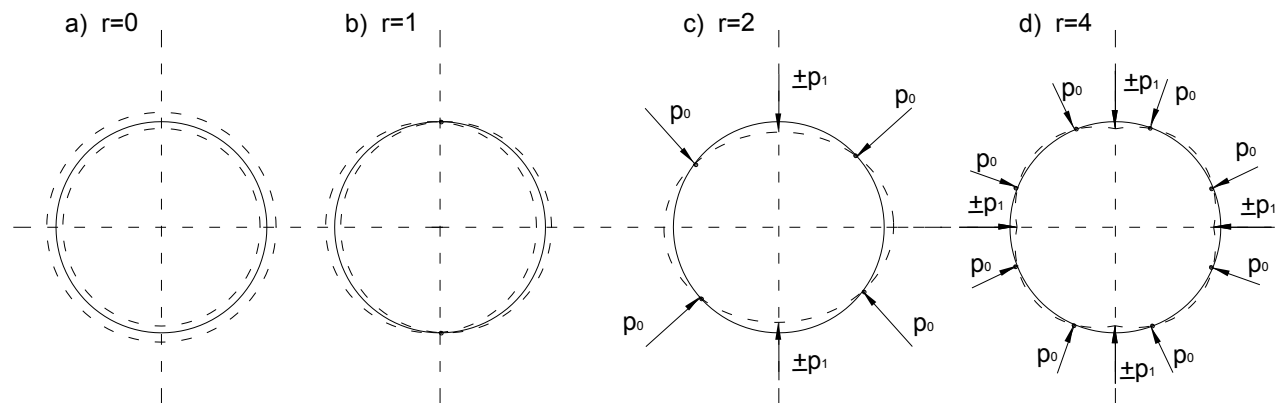
$$\begin{aligned}
i_0 &= \frac{e \cdot (Z_{E_2} + Z_{E_3})}{Z_{E_2} Z_{E_3} + Z_{E_3} Z_{E_1} + Z_{E_1} Z_{E_2}}; \\
i_1 &= \frac{e \cdot Z_{E_3}}{Z_{E_2} Z_{E_3} + Z_{E_3} Z_{E_1} + Z_{E_1} Z_{E_2}}; \\
i_2 &= \frac{e \cdot Z_{E_2}}{Z_{E_2} Z_{E_3} + Z_{E_3} Z_{E_1} + Z_{E_1} Z_{E_2}}.
\end{aligned}
\tag{6.14}$$

Analogno, brzine vibracija određenog mehaničkog sklopa su:

$$\begin{aligned}
\dot{y}_0 &= \frac{p_0 \cdot (Z_{M_2} + Z_{M_3})}{Z_{M_2} Z_{M_3} + Z_{M_3} Z_{M_1} + Z_{M_1} Z_{M_2}}; \\
\dot{y}_1 &= \frac{p_0 \cdot Z_{M_3}}{Z_{M_2} Z_{M_3} + Z_{M_3} Z_{M_1} + Z_{M_1} Z_{M_2}}; \\
\dot{y}_2 &= \frac{p_0 \cdot Z_{M_2}}{Z_{M_2} Z_{M_3} + Z_{M_3} Z_{M_1} + Z_{M_1} Z_{M_2}}.
\end{aligned}
\tag{6.15}$$

Kod izračuna vibracija sustava nastalih od rezonantnih frekvencija gubici trenja  $r_M$  mogu se zanemariti. Rezonantne frekvencije mehaničkog sustava su one frekvencije koje odgovaraju rezultantom valu reda  $r$ , koji je kod sinkronih strojeva vezan uz broj polova.

Najveći izvor magnetske buke javlja se kod statora električnih strojeva, zbog vibriranja jarma statora. To je slučaj i kod turbogeneratora. Vibracije zubi su 10 do 100 puta manje od onih u jarmu. Zbog toga se izračun magnetske buke u biti svodi na proučavanje izobličenja paketa statora predstavljenog ekvivalentnim cilindrom od djelovanja magnetskih sila u zračnom rasporu.



**Slika 6.3**      **Forme vibriranja električnih strojeva**

Na jaram statora kao ekvivalentni cilindar djeluju sustav simetrično raspodijeljenih radijalnih i tangencijalnih sila koji se periodički mijenja u vremenu, a koji se razlikuju po redu  $r$  rezultatnog vala [7]. Red vala utječe na geometriju izobličenja, pa se tako razlikuje više rezultatnih djelovanja:

a) za slučaj kada je  $r = 0$  stator vibrira kao cilindar koji pulsira odnosno steže se i rasteže. Učestalost vlastitih vibracija cilindra statora je jednaka:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{E \cdot h}{m \cdot R_c^2}}; \quad (6.16)$$

b) za slučaj kada je  $r = 1$  sve sile uzbude svedene su u jednu obrtnu silu koja djeluje u težištu stroja. Tada stator vibrira oko centra bez izmjene oblika. Vlastita frekvencija ovisi o kutu  $\alpha$  između učvršćenja u temelje, a koji se kreće od  $180^\circ$  (temelji na polovici cilindra) do  $360^\circ$  (temeljenje u jednoj točki). Pri tome je  $f(180^\circ)$  preko tri puta veće od  $f(360^\circ)$ .

$$\omega_0 = f(\alpha) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot h^3}{12 \cdot m \cdot R_c^4}}; \quad (6.17)$$

c) za slučaj  $r \geq 2$  stator vibrira eliptično, a ovisno o redu, odnosno djelovanju resultantne sile po obodu, nastaju dva, tri, četiri i više maksimuma. Ovi slučajevi se najčešće javljaju u praksi, a frekvencije vlastitih vibracija statora računaju se prema slijedećem izrazu koji u obzir uzima elastični cilindar određene debljine:

$$\omega_0 = \frac{r(r^2 - 1)}{\sqrt{r^2 + 1}} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot h^3}{12 \cdot m \cdot R_c^4}} \quad (6.18)$$

U gornjim formulama  $m$  ( $kg \cdot s^2 / m$ ) je masa svedena na  $1 m^2$  srednje površine cilindra jarma uključujući masu zubi i namota,  $h$  ( $m$ ) je visina jarma statora,  $R_c$  ( $m$ ) srednji radijus cilindra;  $E$  modul elastičnosti koji za paket izrađen od segmenata limova iznosi  $1,2 \cdot 10^{10} kg / m^2$ .

Iz gornjih relacija vidi se da s porastom radijusa jarma pada frekvencija vlastitih vibracija. To znači da će amplituda vibracija, a posljedično i nivo magnetske buke za istu pobudnu silu i istu frekvenciju, biti veća kod strojeva koji imaju veći promjer. Stoga je za izbor visine jarma statora, osobito kod dvopolnih turbogeneratora, mehanički kriterij oštrij od veličine specifičnog magnetskog opterećenja.

Za izračun vibracija potrebno je znati parametre sustava sa slike 6.1. Masa po jedinici površine koja vibrira izračunava se preko:

$$m_s = \frac{G_s}{2\pi R_j l_j g}; m_k = \frac{G_k}{2\pi R_k l_k g}, \quad (6.19)$$

gdje su  $G_s, G_k$  težine statora odnosno kućišta,  $R_j, R_k$  srednji polumjer jarma i kućišta,  $l_j, l_k$  duljina jarma i kućišta, a  $g$  gravitacijska konstanta.

$$\text{Za } r = 0, \lambda_c = \frac{R_c^2}{Eh}; \quad (6.20)$$

$$\text{a za } r \geq 2, \lambda_c = \frac{12R_c}{E} \left( \frac{R_c}{h} \right)^3 \frac{r^2 + 1}{r^2(r^2 - 1)^2}; \quad (6.21)$$

gdje je  $R_c$  srednji polumjer jarma ili kućišta.

Mehanička impedancija paketa statora pri frekvenciji pobudnih sila  $\omega$  uz zanemarivanje trenja je:



$$z_s = \omega m_s - \frac{1}{\omega \lambda_s} . \quad (6.22)$$

Brzina vibracija na površini statora:

$$\dot{y} = \frac{p_0}{z_s} , \quad (6.23)$$

gdje je  $p_0$  specifična sila koja djeluje na stator na polumjeru  $R_s$ , a izračunava se preko specifične sile u zračnom rasporu  $p_{01}$  koja djeluje na polumjeru  $R_0$ :

$$p_0 = p_{01} \frac{R_0}{R_s} . \quad (6.24)$$

Emisija zvučne energije kućišta strojeva zavisi od veličine stroja i prostorne promjene oblika. Gornje jednačbe mogu se koristiti ukoliko su dimenzije stroja velike prema valnoj duljini zvuka  $\lambda$ . Tada kućište razmatramo kao ravni izvor.

Frekvencije koje kod električnih strojeva izazivaju čujni zvuk i interesantne su za razmatranje buke se nalaze u rasponu od 100 Hz do 4000 Hz i imaju valnu duljinu od 0,343 m do 0,086 m. Kod malih strojeva, kućište kao izvor zvuka može se promatrati kao kuglasti izvor kod kojeg akustična svojstva ovise o prostornom obliku promjene i redu valne deformacije. Ovisno o redu deformacije, maksimalna snaga zvuka dobivena za ravni izvor, kod kuglastog se smanjuje. Međutim kod velikih promjera kućišta u koje spadaju turbogeneratori deformacije nižeg reda se ne prigušuju, pa svojstva kućišta električnih strojeva, kao sustava koji oscilira i daje akustično zračenje, imaju odlučujući utjecaj na stvaranje buke.

Mehanička impedancija kućišta pri frekvenciji pobudnih sila  $\omega$  uz zanemarivanje trenja je:

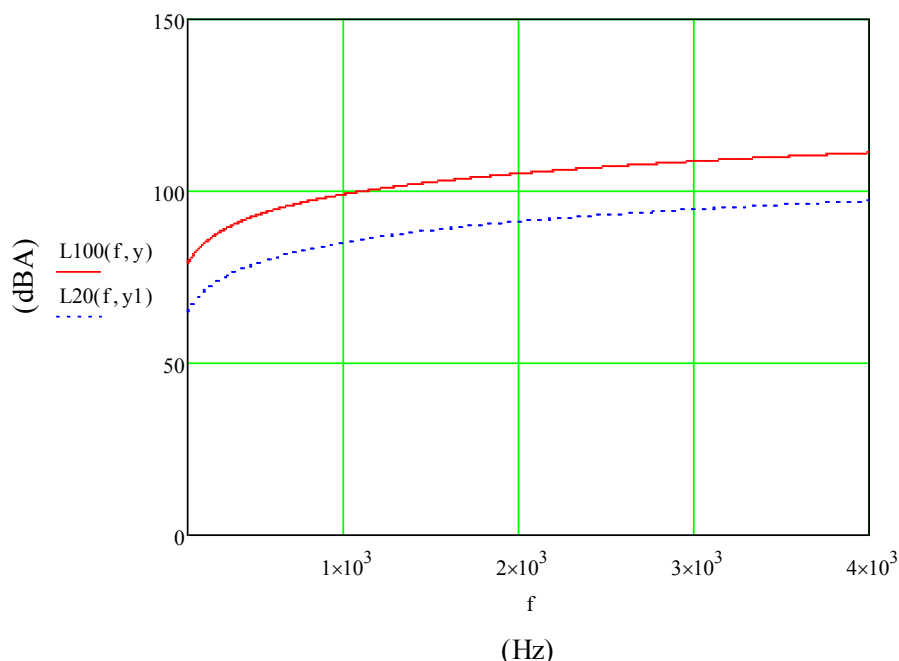
$$z_k = \omega m_k - \frac{1}{\omega \lambda_k} . \quad (6.25)$$

Kada je paket statora čvrsto paketiran (kruti spoj) u kućištu onda se brzina vibracija može izračunati preko:

$$\dot{y}_{kr} = \left| \frac{p_0}{z_s + z_k} \right| . \quad (6.26)$$

Kada postoji elastična veza paketa i kućišta, što je slučaj kod velikih turbogeneratora, rješava se sustav sa slika 6.1 odnosno 6.2. sukladno jednačbi 6.15. Nivo vibracija kućišta ovisi o uzbudnim elektromagnetskim silama koje se prenose s paketa. Za njihovo određivanje neophodno je znati oblik magnetskog polja u zračnom rasporu. Pri određivanju elektromagnetskih sila treba imati u vidu da nije nužna velika točnost njihovog izračuna obzirom da 25% pogreške u izračunu sile utječe sa svega 2 dB na izračun buke, što je u opsegu točnosti mjerenja. Međutim bitno je u spektru definirati veličinu onih harmonika elektromagnetske sile koji mogu utitrati s mehaničkom pobudom. Obzirom na složenost titrajnih krugova veliki utjecaj na smanjenje buke se postiže provedbom postupaka za smanjenje vibracija u smislu izbora adekvatne geometrije zračnog raspora, broja utora, geometrije namota - prvenstveno statora, izbora dimenzija statora, simetrije i kvalitete izrade dijelova i dosjednih spojeva.

Dopuštena brzina vibracija (srednja vrijednost) kućišta prema ISO 10816-2 je za generatore čija je brzina vrtnje 1500-1800 o/min 2,8 mm/s, a za brzinu vrtnje 3000-3600 o/min 3,8 mm/s. Ne propisuje se veličina pomaka, ali se smatra da su dopušteni pomaci kućišta reda veličine 18-20  $\mu\text{m}$ .



Slika 6.4 Razina buke za različite frekvencije ovisno o pomacima kućišta a) L20 dopušteni pomaci kućišta (ležajeva), b) L100 maksimalni pomaci kućišta koji se sreću u praksi kada su vlastite frekvencije statorskog paketa i njegovog učvršćenja u kućištu bliske pobudnim frekvencijama elektromagnetske sile.

### 6.3. Radijalne sile elektromagnetskog porijekla kao izvor vibracija

Radijalna sila koja djeluje u zračnom rasporu na površinu statora jednaka je:

$$p_R(\alpha, t) = \frac{B^2(\alpha, t)}{2\mu_0}, \quad (6.27)$$

gdje je  $\alpha$  kut po obodu rotora,  $B$  magnetska indukcija, a  $t$  vrijeme.

Tangencijalna sila u zračnom rasporu ovisi o opterećenju i jednaka je:

$$p_\tau(\alpha, t) = AB(\alpha, t), \quad (6.28)$$

gdje je  $A$  strujni oblog. Ova sila ima manji utjecaj na razinu elektromagnetske buke, pa se može zanemariti njeno djelovanje.

Radijalna sila polja osnovnog harmonika izražena preko magnetske indukcije je:

$$p_1 = P_1 \cos(2p\theta - 2\omega_1 t - 2\varphi_{0r}) = \frac{B_{rad}^2}{2\mu_0} \cdot \frac{1}{2} [1 + \cos(2p\theta - 2\omega_1 t - 2\varphi_{0r})] = p_0 + p_1; \quad (6.29)$$

gdje je  $P_{1a} = \frac{B_{rad}^2}{4\mu_0}$  amplituda sile osnovnog harmonika. Sila osnovnog harmonika ima red  $r = 2p$  i frekvenciju  $2\omega_1$ . Na slici 6.3 shematski je prikazano djelovanje sile osnovnog polja  $p_0$  i  $p_1$  za pod c) dvopolni i pod d) četveropolni generator.

Od polja viših harmonika djeluju sile:

$$p_{\nu\mu} = P_{\nu\mu} \cos[(\nu \pm \mu)\theta - (\omega_{\mu} \pm \omega_1)t - (\varphi_{\mu r} \pm \varphi_{\nu r})], \quad (6.30)$$

Amplituda sile od  $\nu$ -tog i  $\mu$ -tog harmonika je  $P_{\mu\nu} = \frac{B_{\nu}B_{\mu}}{2\mu_0}$ , faze  $\varphi_r = \varphi_{\mu r} \pm \varphi_{\nu r}$  reda vala:

$$r = \nu \pm \mu.$$

Za poznavanje sila nužno je znati gustoću magnetskog polja u zračnom rasporu. Rezultantno magnetsko polje u zračnom rasporu sukladno funkciji iz (2.2) nakon što se uzmu u obzir protjecanja statorskog i rotorskog namota može se napisati u obliku:

$$b = b_1 + \sum_n b_n + \sum_m b_m = B_1 \cos(p\theta - \omega_1 t - \varphi_{0r}) + \sum_n B_n \cos(\nu\theta - \omega_1 t - \varphi_{nr}) + \sum_m B_m \cos(\mu\theta - \omega_m t - \varphi_{mr}) \quad (6.31)$$

Rezultantno polje se sastoji od:

a) osnovnog polja  $b_1$ :

$$b_1 = B_1 \cos(p\theta - \omega_1 t - \varphi_{0r}); \quad (6.32)$$

čija je amplituda približno jednaka indukciji u zračnom rasporu  $B_1 \approx B_{\delta 1n}$ ;

b) polja viših harmonika statora:

$$b_{\nu} = B_{\nu} \cos(\nu\theta - \omega_1 t - \varphi_1); \quad (6.33)$$

Amplituda indukcije  $\nu$ -tog harmonika polja statora izračunava se kao:

$$B_{\nu} = \left(\frac{p}{\nu} \cdot \frac{k_{w\nu}}{k_{w1}}\right) x_{ad} B_{\delta 1m}; \quad (6.34)$$

gdje su  $k_{w\nu}, k_{w1}$  faktori statorskog namota za  $\nu$ -ti i prvi harmonik, a  $x_{ad}$ , reakcija armature. Toj indukciji je potrebno dodati i harmonik indukcije uslijed nazubljenosti statora:

$$b_{z\nu} = B_{z1} \cos(\nu_z\theta - \omega_1 t - \varphi_{0r}). \quad (6.35)$$

Izračun te indukcije prikazan je u [7].

Red harmonika  $\nu$  ovisi o broju polova, ali se kod trofaznog simetričnog namota svi harmonici djeljivi s tri poništavaju. Za trofazni namot sa cijelim brojem utora po polu i fazi  $q$  pojavljuju se viši harmonici reda  $\nu$  s brojem pari polova:

$$\nu = (6q' + 1)p; q' = 0 \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots \quad (6.36)$$

Kutna brzina  $\nu$ -tog harmonika prema namotu statora je:

$$\omega_{\nu} = \frac{\omega_1}{6q' + 1} \quad (6.37)$$

Za izračun buke osobito su interesantni harmonici reda  $q' = \pm q; \pm 2q; \pm 3q; \dots$  Za njih je  $r = \nu - \mu = (6q + 1)p - p = \frac{kN_s}{p}$ ;  $k = \pm 1; \pm 2; \pm 3, \dots$  gdje je  $N_s$  broj utora statora. Kod

generatora s razlomljenim brojem utora po polu i fazi  $q = b + \frac{c}{d}$  osnovno polje izazivaju i harmonici reda  $v = \left(6\frac{k}{d} + 1\right)p; k = \pm 1; \pm 2; \pm 3 \dots$ . To znači da se pojavljuju subharmonijske vibracije reda  $r < 2p$ . Za dvoslojni statorski trofazni namot osobito su izražene frekvencije reda  $r = v - \mu = (6k/d + 1)p - p = 6kp/d; k = 1, 2, 3 \dots$ . Stoga harmonici ovog reda imaju veći utjecaj na vibracije i buku.

c) polja viših harmonika rotora

$$b_\mu = B_\mu \cos(v\theta - \omega_m t - \varphi_2). \quad (6.38)$$

Za turbogenerator s masivnim rotorom  $\mu$ -ti harmonik polja rotora u nezasićenom stanju se može računati preko:

$$B_\mu = \frac{4}{\mu\pi} \left[ \frac{\sin \mu\pi \left(\frac{b_{z2}/t_2}{2N'_r}\right)}{N_2 \sin^2 \mu\pi \frac{1}{2N'_r}} \cdot \sin \mu\pi \frac{N_2}{2Z'_2} + \frac{\sin \mu\pi \left(\frac{1-b_{z2}/t_2}{2N'_r}\right)}{\sin \mu\pi \frac{1}{2N'_r}} \cdot \cos \mu\pi \frac{N_2}{2N'_r} \right]; \quad (6.39)$$

gdje je  $N_r / N'_r$  odnos broja namotanih utora prema diobenom broju utora, a  $b_{z2}/t_2$  omjer širine zuba prema širini utorskog koraka. Broj pari polova polja rotora:

$$\mu = p(2q'' + 1); q'' = 1; 2; 3 \dots \quad (6.40)$$

Slijedi da će na stator djelovati elektromagnetske sile reda  $r$ , od kojih će najveće vibracije izazvati upravo one s nižim redom [31]. Vibracije za strojeve s cijelobrojnim  $q$  mogu biti jednake nuli ili višekratnik broja polova i imaju slijedeći red:

$$\begin{aligned} r &= 2p[(q'' + 3q') + 1]; r = v + \mu; \\ r &= 2p(q'' - 3q'); r = v - \mu. \end{aligned} \quad (6.41)$$

U tom slučaju učestalosti vibracija za koje se provjerava buka su:

$$\begin{aligned} f &= 2f_n(q'' + 1); r = v + \mu; \\ f &= 2f_n(q''); r = v - \mu. \end{aligned} \quad (6.42)$$

Kod turbogeneratora vibracije viših frekvencija su bitno niže nego kod sinkronih strojeva s istaknutim polovima. Razlog tome je relativno veliki zračni raspor i prigušenja polja zbog djelovanja masivnog tijela rotora. Za dvopolni turbogenerator sa slike 6.3.c djeluje sila  $p_1$ , a  $r = 2$ . Harmonici koji daju resultantno polje koje putuje u smjeru vrtnje smjeru vrtnje su:  $v = 7; \mu = -5; r = p \cdot (v + \mu) = 2$ , a oni suprotno smjeru vrtnje  $v = 9; \mu = 7; r = p(v - \mu) = -2$ . Resultantna frekvencija ovih valova je  $f = 200$  Hz

Za četveropolni turbogenerator red je dvostruko veći, odnosno  $r = 4$ . U smjeru vrtnje se kreće resultantni harmonik  $v = 7; \mu = -5; r = p \cdot (v + \mu) = 4$ , a suprotno smjeru vrtnje  $v = 9; \mu = 7; r = p(v - \mu) = -4$ . Frekvencija koja utirava sustav je  $f = 400$  Hz. Ukoliko su vlastite frekvencije paketa statora odnosno kućišta iste ili se nalaze u blizini ovih vrijednosti sustav će biti u rezonanciji i doći će do porasta vibracija, i posljedično buke.

### 6.3.1. Primjer izračuna buke klasičnim postupkom

Primjer izračuna buke klasičnim postupkom napravljen je za dvopolni generator (generator 1 iz poglavlja 5.). Dvopolni turbogenerator 40 MVA, 32 MW, revitaliziran je [36], te mu je aktivna snaga povećana turbogeneratorske na 42 MW odnosno za 32%. Revitalizacija je obuhvatila zamjenu statorskog paketa u postojećem kućištu i za postojeći rotor. Revitalizacija je ostvarena reprojektiranjem statorskog paketa, ugradnjom prigušnog namota statora [37] i suvremenih magnetskih i izolacijskih materijala. Pri revitalizaciji je bilo nužno zadržati postojeće parametre generatora odnosno sinkronu reaktanciju, razinu buke, opseg regulacije napona i frekvencije, reaktivnu snagu te zagrijavanje u B klasi.

Prividna snaga je generatora je povećana na 49,4 MVA i sukladno zahtjevu ta istu sinkronu reaktanciju nužno je bilo povećati indukciju u zračnom rasporu, kao i strujni oblog generatora. Povećanje indukcije reflektira u zračnom rasporu sukladno (6.29) doprinosi povećanju buke. U nastavku je izračunata buka za stari i novi statorski paket u postojećem kućištu.

Osnovni ulazni podaci starog/novog statora:

Težina statora dvopolnog generatora je:  $G_s = 37622 \text{ kg}$

Polumjer statora:  $R_s = 0,47 \text{ m}$

Srednji polumjer jarma statora  $R_j = 0,7895 \text{ m}$

Visina jarma  $h_j = 0,341 \text{ m}$

Duljina jarma  $l_j = 2,305 \text{ m}$

Indukcija u zračnom rasporu za 40 MVA:  $B_{\delta 40} = 0.74 \text{ T}$

Za red  $r=2$  frekvencija vibriranja je  $\omega_r = 2\pi f_n r = 628 \text{ Hz}$ .

Rezultati izračuna:

Masa svedena na površinu cilindra jarma statora  $m_s = \frac{G_s}{2\pi R_j l_j g} = 0,477 \frac{\text{ts}^2}{\text{m}^2}$

Podatljivost statora  $\lambda_s = \frac{12R_j^4}{E_p h_j^3} \cdot \frac{r^2 + 1}{r^2(r^2 - 1)^2} = 2,661 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{N}}$ ;

Mehanička impedancija statora kada se zanemari otpor trenja:

$$z_s = \omega_r \cdot m_s - \frac{1}{\omega_r \lambda_s} = -298.462 \frac{\text{Ns}}{\text{m}};$$

Specifična pobudna sila svedena na srednji cilindar jarma:  $p = \frac{B_{\delta}^2}{4\mu_0} \frac{R_s}{R_j} = 8.357 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ ;

Mehanička impedancija kućišta kada se zanemari otpor trenja:

$$z_k = \omega_r \cdot m_k - \frac{1}{\omega_r \lambda_k} = -82.204 \frac{\text{Ns}}{\text{m}}.$$

Kada je stator kruto spojen s kućištem brzina vibracija na površini kućišta se dobiva kao serijska veza mehaničkih otpora prema jednadžbi 6.26:

$$\dot{y}_g = 8,1 \text{ mm} / \text{s}.$$

Razinu buke izračunavamo kao omjer ubrzanja vala generatora za iz jednadžbe:

$$L = 20 \log \frac{\ddot{y}_g}{\ddot{y}_0} = 20 \log \frac{\omega \dot{y}_g}{3 \cdot 10^{-4}}.$$

Razina buke generatora prije revitalizacije s povećanjem snage izračunata klasičnim postupkom je  $L_{stari} = 82,4 \text{ dB}$ .

Stroj je revitaliziran, indukcija u zračnom rasporu je povećana na  $B_{\delta 49,4} = 0,84T$ , dok su ostali parametri koji utječu na razinu magnetske buke zadržani. U staro kućište je ugrađen novi statorski paket istih dimenzija.

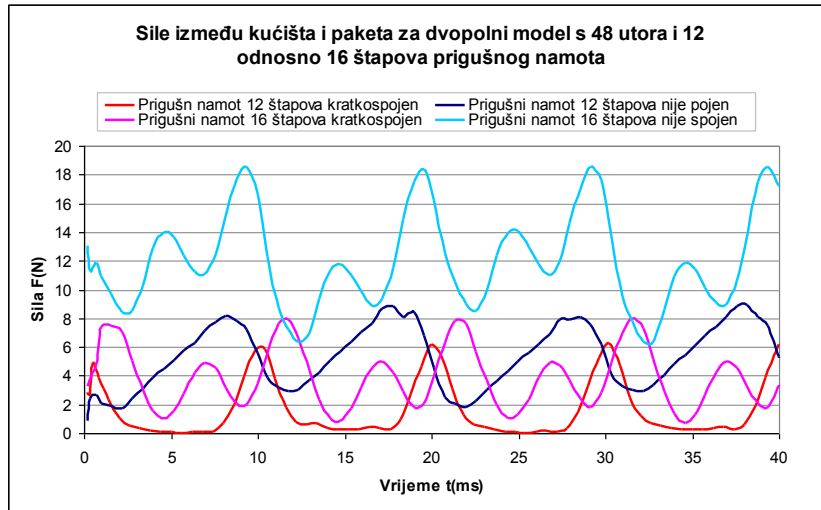
Razina buke generatora nakon revitalizacije izračunata klasičnim postupkom je  $L_{novi} = 84,6 \text{ dB}$ .

#### 6.4. Sile između kućišta i paketa i frekventni spektar

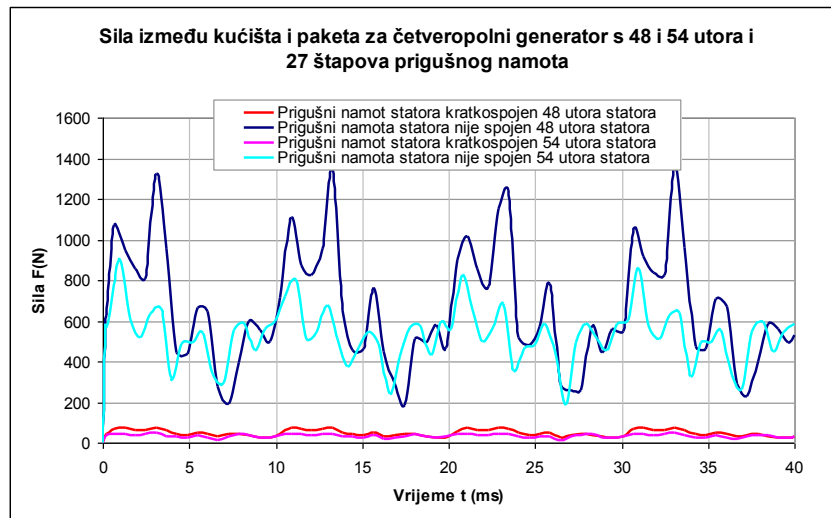
Slike 6.5 u 6.6 prikazuju elektromagnetske sile između kućišta i paketa statora u vremenskoj domeni. U svrhu provođenja frekvencijske analize odabran je u svim navedenim primjerima vremenski odsječak od 20 ms do 40 ms, u kojemu su prijelazne pojave završene i vremenski oblik sile poprima stacionarno stanje, a koji po duljini odgovara periodu osnovnog harmonika struje od 50 Hz. S obzirom na nejednoliko uzorkovanje signala u vremenskoj domeni, navedeni su signali interpolirani primjenom kubičnog splinea na uniformno uzorkovanje frekvencije 2 kHz u programskom sustavu MATLAB. Primjenom diskretne Fourierove transformacije (DFT) određen je spektar efektivnih vrijednosti sile [8]. Budući da je u interpoliranom signalu sile ukupno 40 uzoraka, frekvencijska rezolucija u dvostranom spektru će biti 50 Hz, a frekvencija najvišeg prikazanog harmonika 950 Hz. Zbog logaritamske karakteristike ljudskog sluha, spektri su prikazani s razinama u decibelskoj skali, a istosmjerni član nije prikazivan jer ne doprinosi akustičkom zračenju. Frekvencijska analiza također je provedena u programskom sustavu MATLAB. Za svaki od primjera izračunat je omjer u decibelima ukupne snage u svim harmoničkim članovima za slučaj otvorenog prigušnog namota statora u odnosu na zatvoreni prigušni namot  $\Delta = 10 \log(P_{Otv.PNS} / P_{Zatv.PNS})$ . Navedene razine može se sistematizirati tablicom 6.1, dok su navedeni spektri prikazani slikama 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 i 6.11. Za 4-polni generator i oba prikazana primjera vidljivo je znatno smanjenje sila, kako po ukupnoj efektivnoj vrijednosti čistog izmjeničnog dijela, tako i po svim harmoničkim komponentama.

Tablica 6.1 Prigušenje uslijed djelovanja prigušnog namota statora

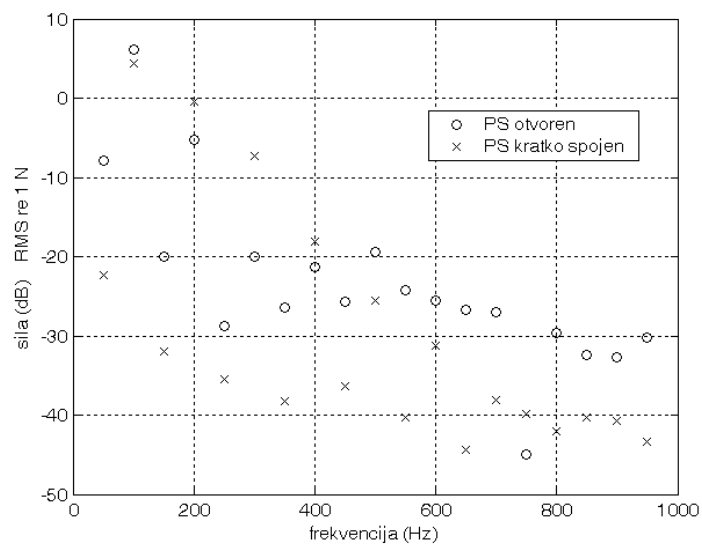
$\Delta$ (dB)	Broj polova	Broj utora	Broj štapova prigušnog namota statora
0,8	2	48	12
1,4	2	48	15
4,2	2	48	16
30,4	4	48	27
23,7	4	54	27



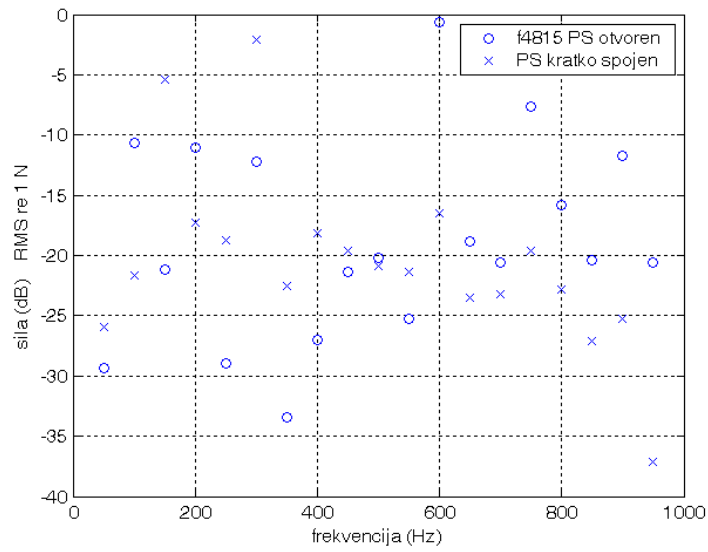
Slika 6.5 Sila između kućišta i paketa za dvopolni generator u vremenskoj domeni.



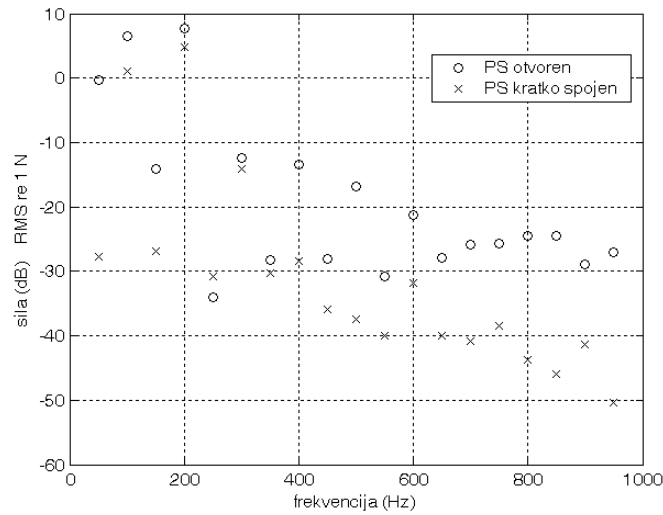
Slika 6.6 Sila između kućišta i paketa za četveropolni generator u vremenskoj domeni.



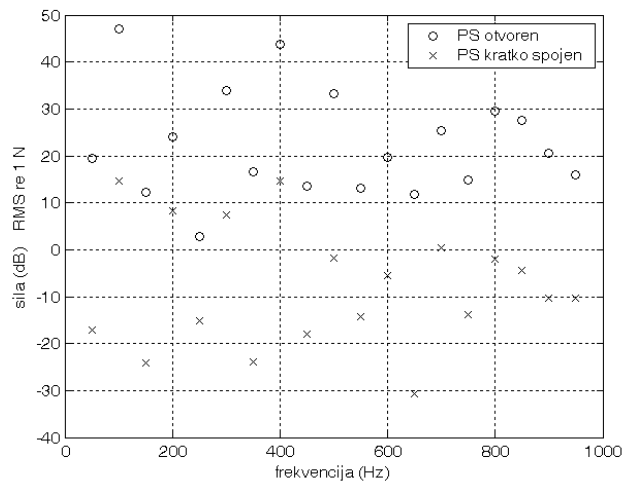
Slika 6.7 DFT spektar sile za 2 polni stroj s 48 utora i 12 štapova prigušnog namota.



Slika 6.8 DFT spekter sile za 2 polni stroj s 48 utora i 15 štapova prigušnog namota.

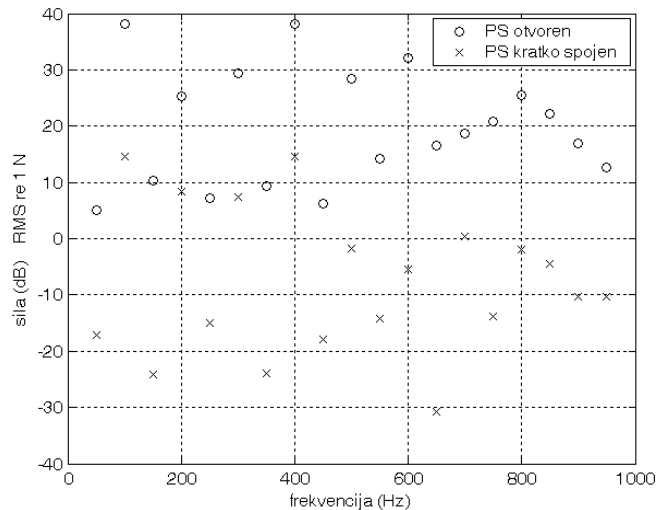


Slika 6.9 DFT spekter sile za 2-polni stroj s 48 utora i 16 štapova prigušnog namota



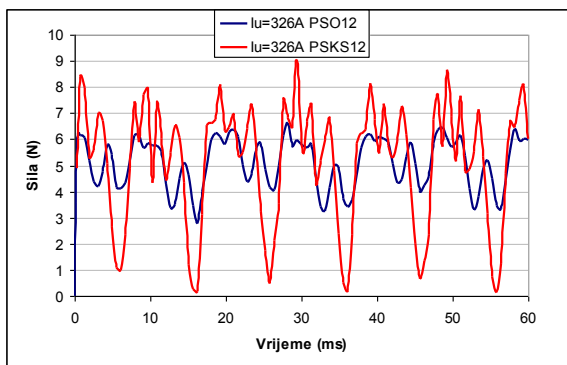
Slika 6.10 DFT spekter sile za 4-polni stroj s 48 utora i 27 štapova prigušnog namota.



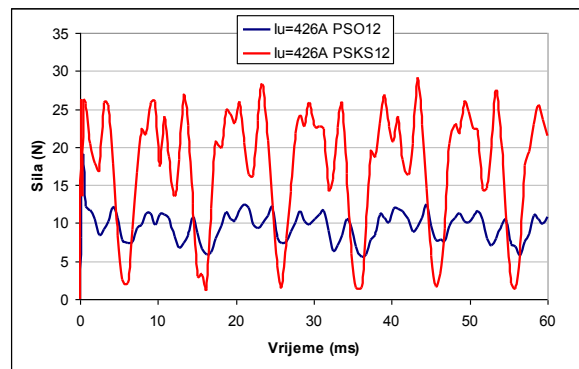


Slika 6.11 DFT spektar sile za 4-polni stroj s 54 utora i 27 štapova prigušnog namota.

Na slikama 6.12 i 6.13 prikazane su sile između paketa statora i kućišta u vremenskoj domeni za dvopolni generator na kojem je ugrađen prigušni namot statora s 12 i 15 štapova. Struje za koje su napravljeni izračuni su veće od nazivne struje praznog hoda.

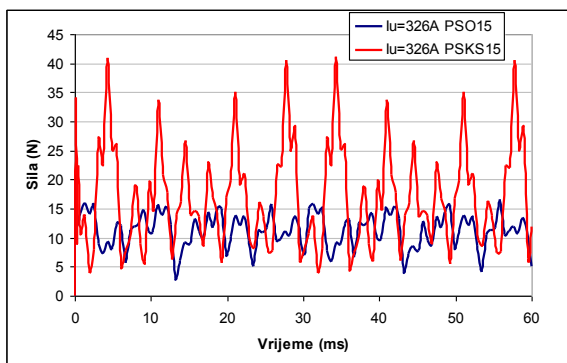


a) Uzbudna struja:  $I_u=326A$

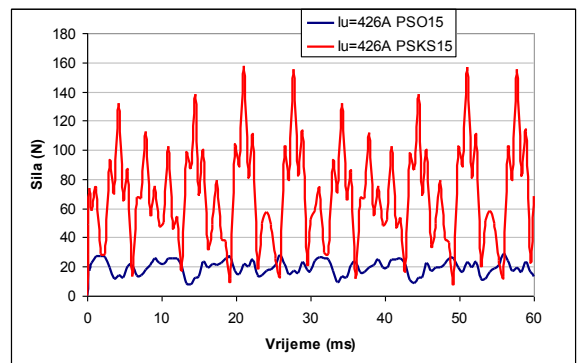


b) Uzbudna struja:  $I_u=426A$

Slika 6.12 Sile između paketa i kućišta dvopolnog generatora s prigušnim namotom statora koji ima 12 štapova kada je prigušni namot otvoren (PSO) i kratko spojen (PSKS) u vremenskoj domeni.



a) Uzbudna struja:  $I_u=326A$



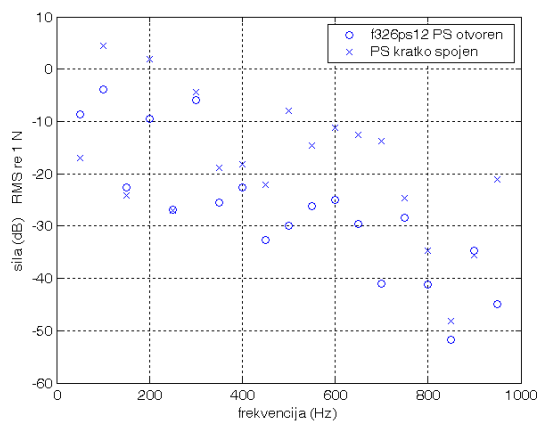
b) Uzbudna struja:  $I_u=426A$

Slika 6.13 Sile između paketa i kućišta dvopolnog generatora s prigušnim namotom statora koji ima 15 štapova kada je prigušni namot otvoren (PSO) i kratko spojen (PSKS) u vremenskoj domeni.

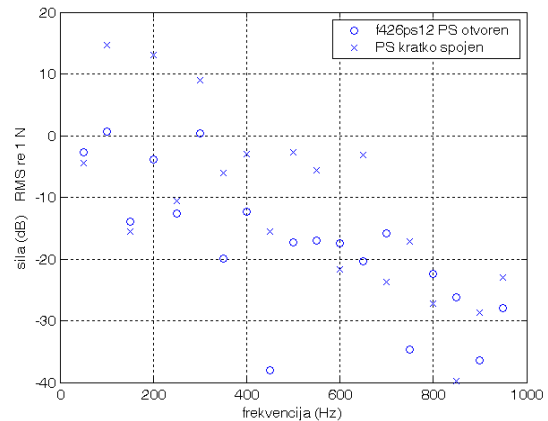
Temeljem dobivenih rezultata izračunat je omjer u decibelima ukupne snage u svim harmoničkim članovima, za slučaj otvorenog u odnosu na zatvoreni prigušni namot statora, za različite vrijednosti uzbudnih struja u praznom hodu. Navedene razine mogu se sistematizirati tablicom 6.2 dok su navedeni spektri prikazani na slici 6.14. Izračun je rađen za uzbudne struje koje imaju veće vrijednosti od nazivnih struja praznog hoda. Kod dvopolnog generatora dobivena su negativna prigušenja.

**Tablica 6.2 Prigušenje uslijed djelovanja prigušnog namota statora**

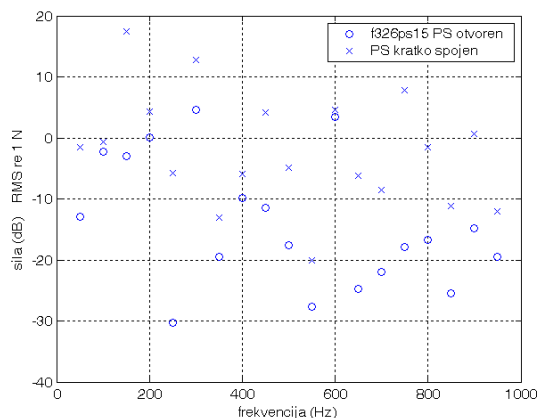
$\Delta$ (dB)	Uzбудna struja	Broj polova	Broj štapova prigušnog namota statora
0,8	226	2	12
-7,3	326	2	12
-12,4	426	2	12
1,4	226	2	15
-10,9	326	2	15
-17,6	426	2	15



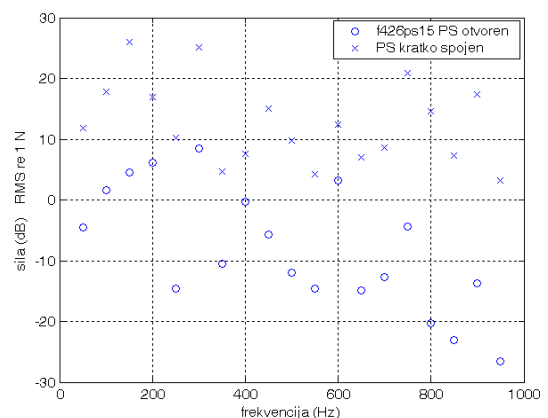
**a) Uzбудna struja:  $I_u=326$  A**



**b) Uzбудna struja:  $I_u=426$  A**



**c) Uzбудna struja:  $I_u=326$  A**

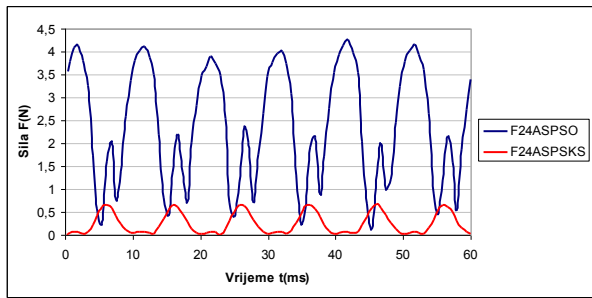


**d) Uzбудna struja:  $I_u=426$  A**

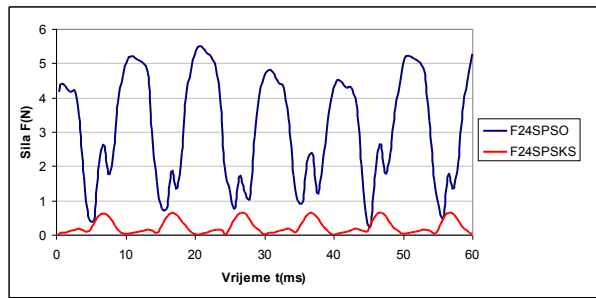
**Slika 6.14 DFT spektrar sile za 2-polni stroj s 48 utora za: a) i b) 12 štapova prigušnog namota; c) i d) 15 štapova prigušnog namota.**

Analiza frekventnog spektra kod četveropolnog generatora napravljena je za jednostavne modele iz tablice 5.3 koji imaju samo jedan namot na statoru – prigušni namot statora. Pri tome kroz uzбудni namot protječe struja praznog hoda  $I_u = 226$  A. Analiza je

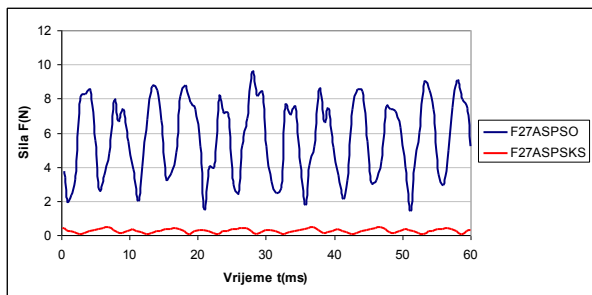
napravljena za simetričan i asimetričan rotor te za prigušni namot koji ima 24 odnosno 27 štapova.



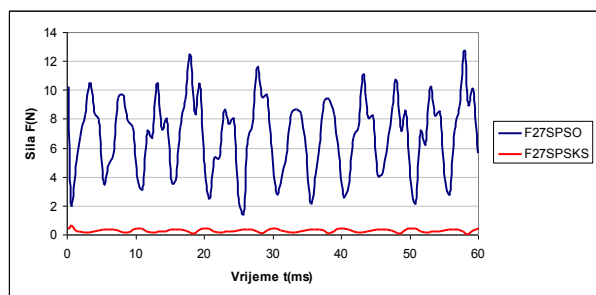
a)  $n_s = 24$ , simetričan rotor



b)  $n_s = 24$ , asimetričan rotor

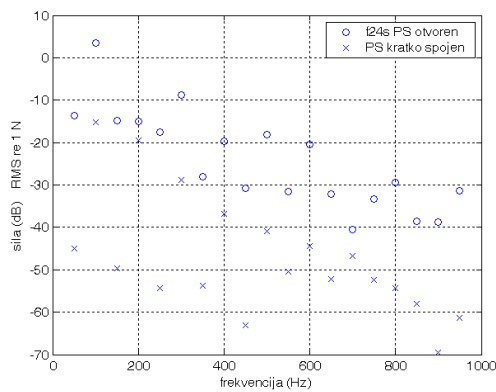


a)  $n_s = 27$ , simetričan rotor

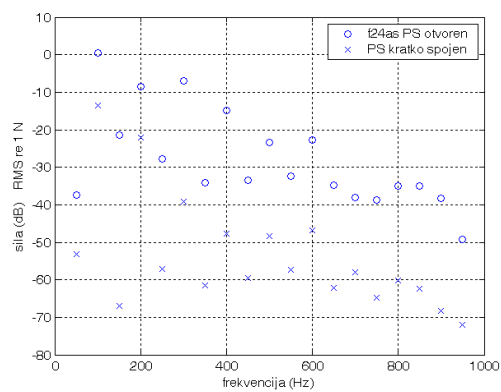


b)  $n_s = 27$ , asimetričan rotor

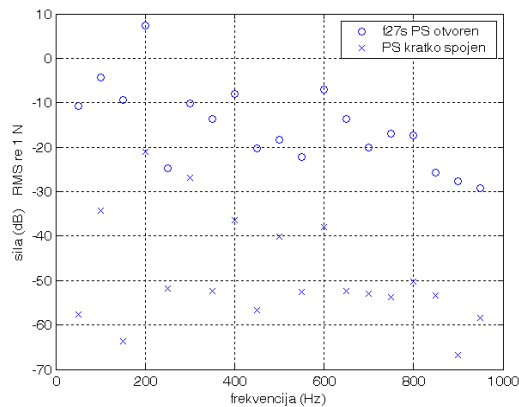
Slika 6.15 Sila između kućišta i paketa za četverpolni generator bez faznog statorskog namota u vremenskoj domeni za iste vrijednosti uzbudne struje.



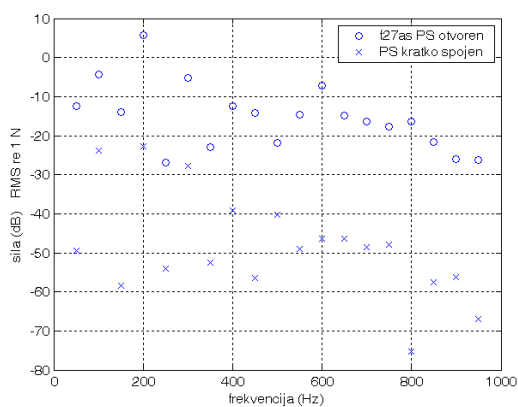
a)  $n_s = 24$ , simetričan rotor



b)  $n_s = 24$ , asimetričan rotor



a)  $n_s = 27$ , simetričan rotor



b)  $n_s = 27$ , asimetričan rotor

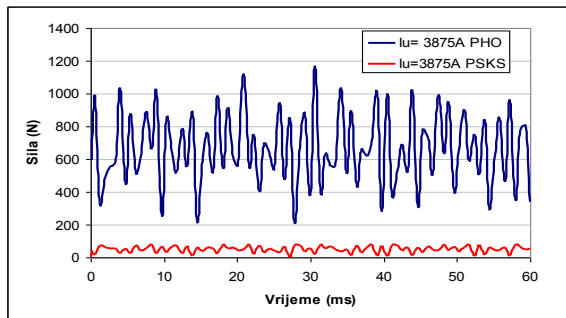
Slika 6.16 DFT spektr sila za 4-polni generator bez faznog statorskog namota

Na slici 6.15 prikazane su sile između kućišta i paketa za slučaj različite geometrije rotora i prigušnog namota statora. Vrijednosti sila se razlikuju kao i harmonički sadržaj dobivenih funkcija čiji je DFT spektar prikazan na slici 6.16. U tablici 6.3 dan je omjer prigušenja ukupne snage u svim harmoničkim članovima za slučaj otvorenog i kratko spojenog prigušnog namota.

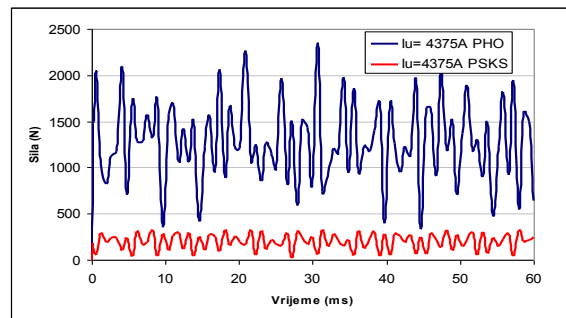
**Tablica 6.3 Prigušenje uslijed djelovanja prigušnog namota statora**

$\Delta$ (dB)	Uzбудna struja	Broj polova	Rotor	Broj štاپova prigušnog namota statora
17,8	226	4	Simetričan (S)	24
14,7	226	4	Asimetričan (AS)	24
27,9	226	4	Simetričan (S)	27
26,4	226	4	Asimetričan (AS)	27

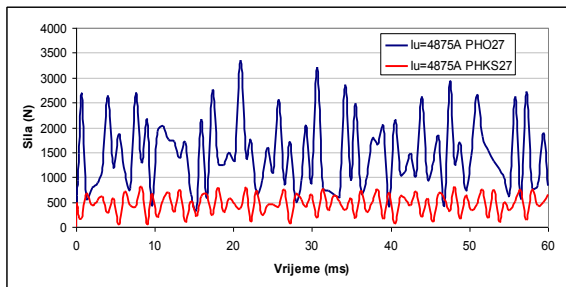
Slika 6.17 prikazuje elektromagnetske sile između kućišta i paketa statora četveropolnog generatora u vremenskoj domeni za različite vrijednosti uzбудne struje veće od nazivne struje praznog hoda.



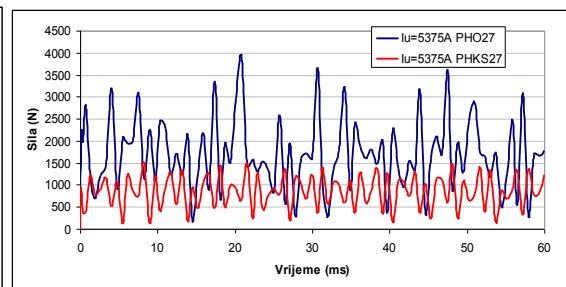
a) Uzбудna struja:  $I_u=3875$  A



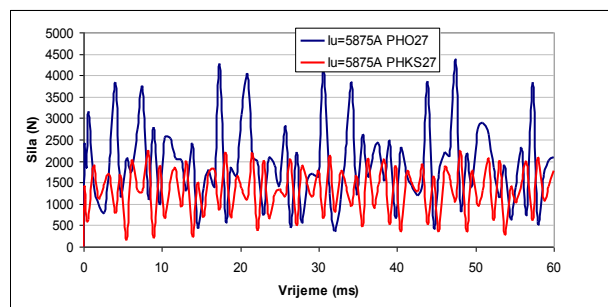
b) Uzбудna struja:  $I_u=4375$  A



c) Uzбудna struja:  $I_u=4875$  A



d) Uzбудna struja:  $I_u=5375$  A



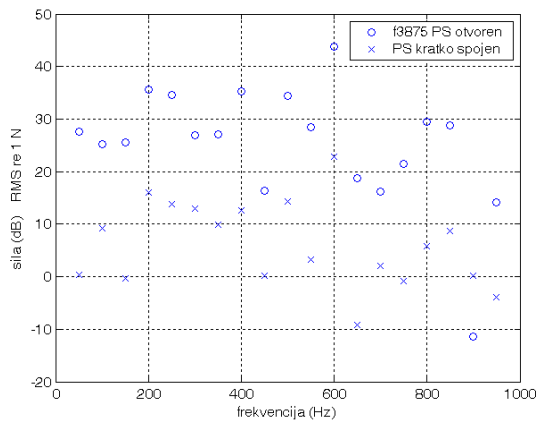
e) Uzбудna struja:  $I_u=5875$  A

**Slika 6.17 Sile između paketa i kućišta četveropolnog generatora s prigušnim namotom statora s 27 štاپova kada je prigušni namot otvoren (PHO) i kratko spojen (PHKS) u vremenskoj domeni.**

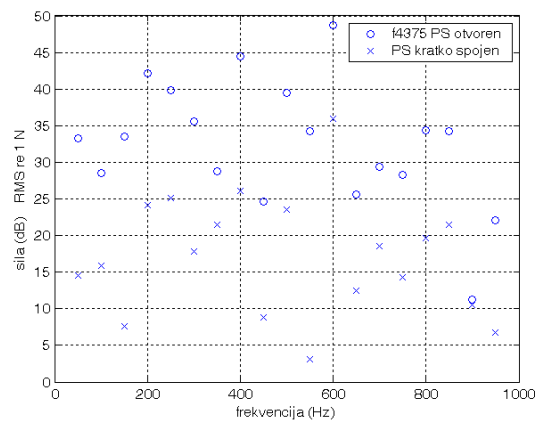
Omjer u decibelima ukupne snage u svim harmoničkim članovima, za slučaj otvorenog u odnosu na zatvoreni prigušni namot statora, za različite vrijednosti uzбудnih struja u praznom hodu kod četveropolnog generatora daje pozitivna prigušenja. Razina prigušenja sistematizirna je tablicom 6.3 dok su navedeni spektri prikazani na slici 6.18. Uzбудne struje imaju veće vrijednosti od nazivne, a sa zasićenjem jarma amplitude sila se više bitno ne povećavaju (slika 6.17 d) i e)), dok se razlika prigušenja između otvorenog i kratko spojenog prigušnog namota smanjuje.

**Tablica 6.4 Prigušenje uslijed djelovanja prigušnog namota statora**

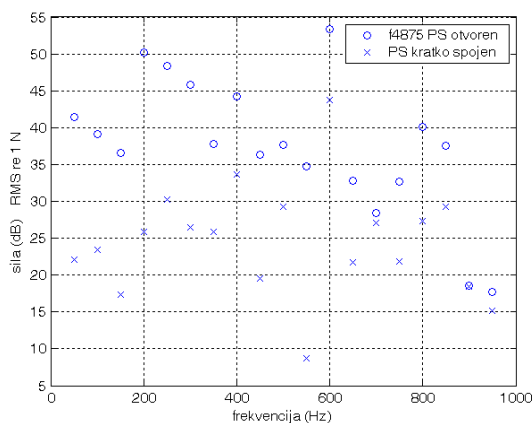
$\Delta$ (dB)	Uzбудna struja	Broj polova	Broj štapova prigušnog namota statora
30,4	3375	4	27
20,6	3875	4	27
14,3	4375	4	27
12,1	4875	4	27
8,3	5375	4	27
5,8	5875	4	27



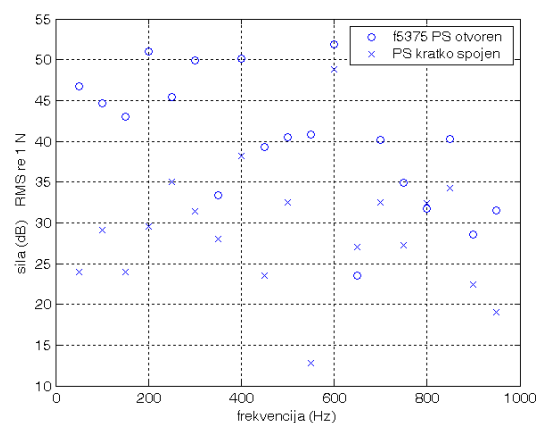
**a) Uzбудna struja:  $I_u=3875$  A**



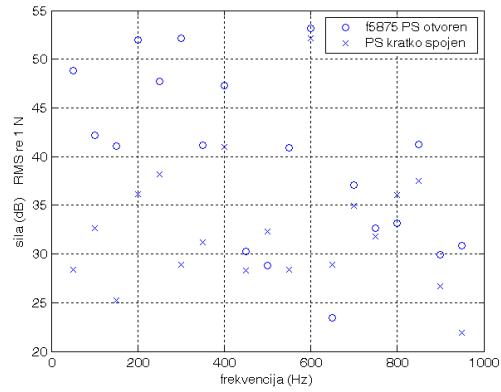
**b) Uzбудna struja:  $I_u=4375$  A**



**c) Uzбудna struja:  $I_u=4875$  A**

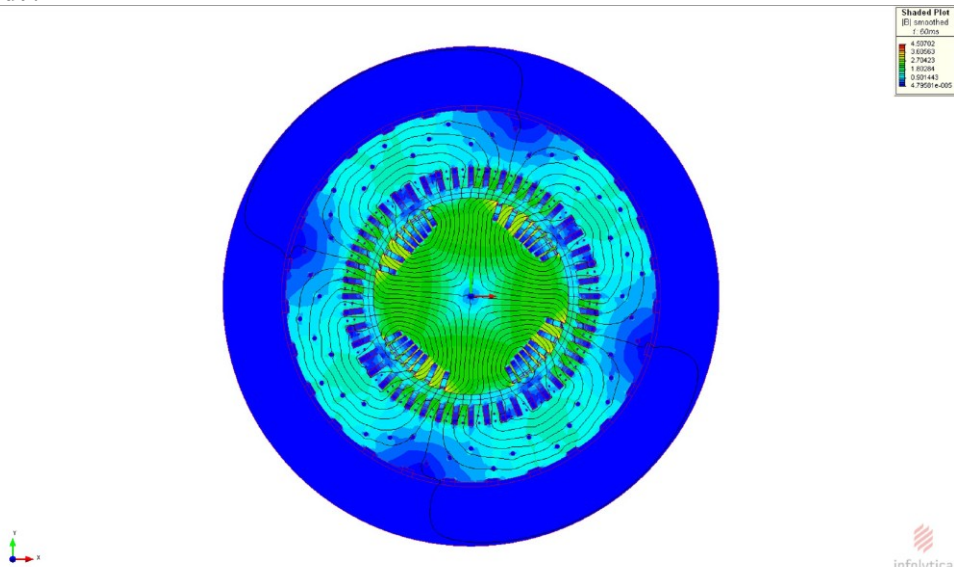


**d) Uzбудna struja:  $I_u=5375$  A**

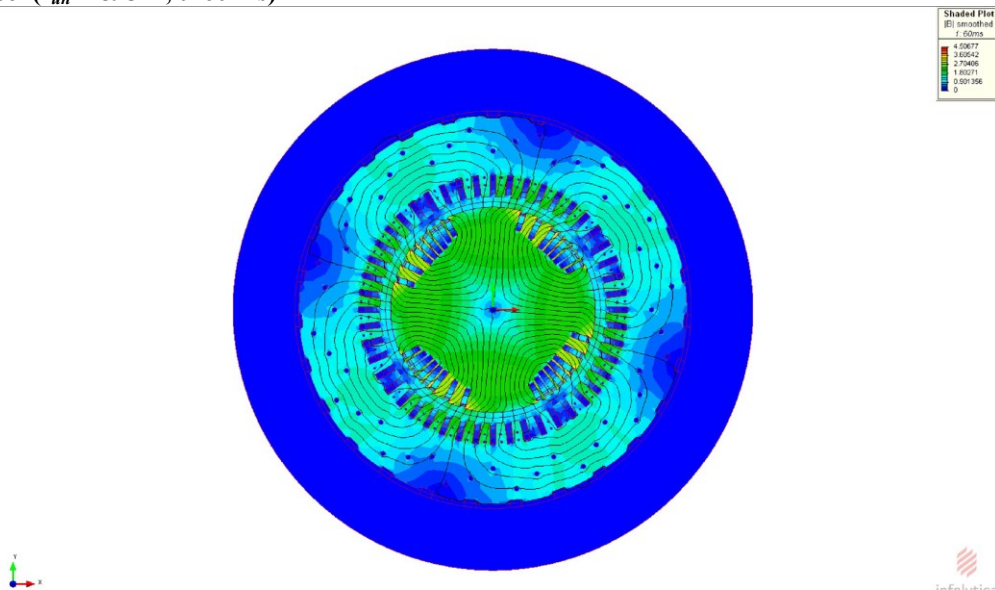


e) **Uzбудna struja:  $I_u=5875$  A**

Slika 6.18 DFT spektar sile za 4-polni stroj s 48 utora i 27 štاپova prigušnog namota statora u praznom hodu.

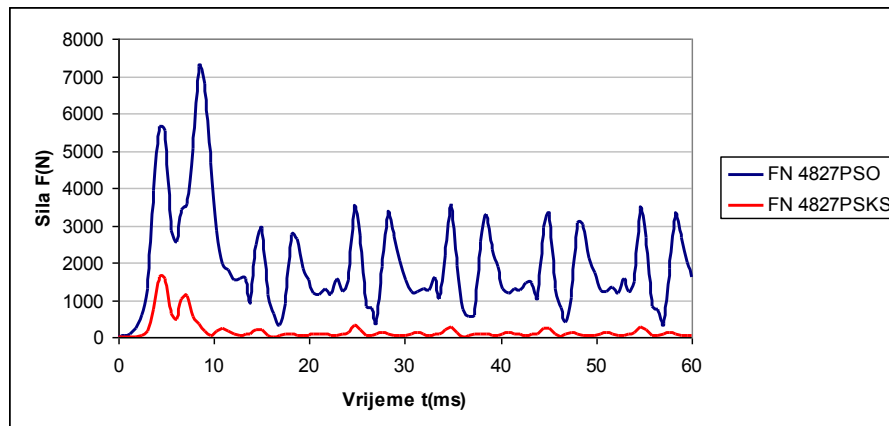


Slika 6.19 Polje četveropolnog generatora s otvorenim prigušnim namotom statora u nazivnoj radnoj točki ( $I_{un}=7895$  A,  $t=60$  ms)

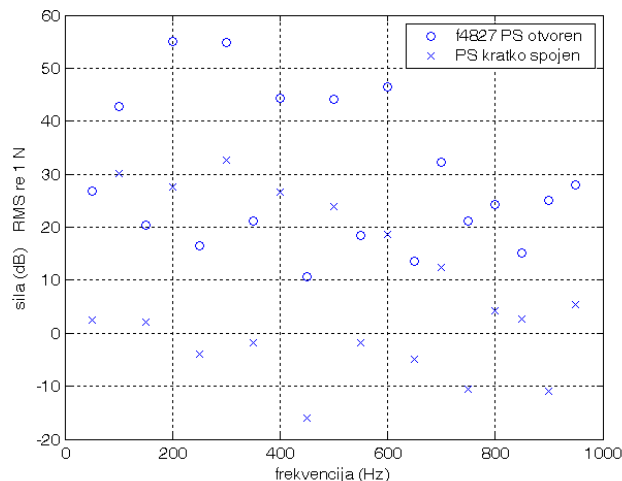


Slika 6.20 Polje četveropolnog generatora s kratko spojenim prigušnim namotom statora u nazivnoj radnoj točki ( $I_{un}=7895$  A,  $t=60$  ms)

Na slikama 6.19 i 6.20 prikazano je polje u trenutku  $t = 60$  ms na modelima bez i s kratko spojenim prigušnim namotom. Izračunate sile u vremenskoj domeni prikazane su na slici 6.21.



**Slika 6.21** Sile između paketa i kućišta četveropolnog generatora u vremenskoj domeni u nazivnoj radnoj točki.



**Slika 6.22** DFT spektar sile za 4 -polni generator s 48 utora i 27 štapova prigušnog namota statora u nazivnoj radnoj točki.

Na slici 6.22 prikazani su rezultati analize sile između statorskog paketa i kućišta za slučaj kada generator radi u nazivnoj radnoj točki, s nazivnom strujom uzbude  $I_{un} = 7895$  A. Omjer u decibelima ukupne snage u svim harmoničkim članovima, za slučaj otvorenog u odnosu na kratkospojeni prigušni namot statora u nazivnoj radnoj točki je 22,37dB, što znači da prigušni namot u ovom slučaju utječe na smanjenje buke elektromagnetskog porijekla.

## 6.5. Zaključak šestog poglavlja

Numerički proračuni pokazuju da prigušni namot statora utječe u razmatranim slučajevima na smanjenje: elektromagnetskih sila između paketa statora i kućišta te posljedično na smanjenje buke elektromagnetskog porijekla. Vrijednosti smanjenja su u radu kvantificirane na modelima dva tipska turbogeneratora na kojima su razmatrani različiti brojevi štapova (letvi) prigušnog namota statora. Minimalni broj štapova je određen mehaničkim proračunom učvršćenja statorskog paketa. Međutim broj štapova utječe na to da li će se postići adekvatan efekt prigušenja. Variranjem broja štapova utvrđeno je da se mogu

postići efektivno visoka smanjenja sila između paketa i kućišta. Također je ustanovljeno da se s povećanjem uzbudne struje i struje u štapovima pozitivni efekt prigušenja smanjuje.

Dobiveni rezultati interesantni su i s naslova mehaničkog ponašanja stroja obzirom da se idealni cilindar zamjenjuje realnim paketom statora gdje geometrija i broj utora imaju značajno mjesto. Optimalan broj štapova kao i njihov utorski korak u korelaciji s brojem statorskih utora, dimenzijama vanjskog promjera paketa statora i valnoj duljini izabranog harmonika mogući je predmet daljnjih istraživanja.



## 7. Zaključak

U ovoj disertaciji predložen je novi aktivni konstrukcijski element sinkronih generatora – prigušni namot statora. On utječe na elektromagnetske prilike u jarmu statora te između statorskog paketa i kućišta u svim režimima rada stroja. Utjecaj takvog statorskog prigušnog namota istraživao je na dvopolnim i četveropolnim generatorima, a razmatranja vrijede za bilo koji stroj na kojem bi se ugradio statorski prigušni kavez .

Jakost struje koja će proteći kroz prigušni namot statora ovisi prvenstveno o vrijednosti magnetske indukcije u jarmu statora te o geometriji i broju štapova prigušnog namota, dok je utjecaj blizine dijelova kućišta i magnetske karakteristike materijala bitno slabiji. Kao i u klasičnoj teoriji, dublji i uži utori imat će veća rasipanja, odnosno ulančit će veći tok i struju. Ukupni ulančeni tok ovisi o tome koliko se toka zatvara kroz okolne dijelove, zračni prostor između kućišta i kroz samo kućište, pa je za prigušni namot s različitim brojem štapova iste geometrije, omjer struja koje protječu kroz njih približno proporcionalan omjeru broja štapova, bez obzira na to da li su ostali elementi poput veličine zračnog rasporeda ili materijala kućišta jednaki. Za veći broj štapova omjeri se praktički lineariziraju.

Prigušni namot statora djeluje u svim režimima rada obzirom da on reagira na bilo koju promjenu polja koja se događa u jarmu statora. Istraživanja koja su provedena u praznom hodu generatora pokazala su, da uslijed djelovanja prigušnog namota statora neće doći do promjena oblika ili jakosti polja u zračnom rasporedu. Međutim prigušni namot utječe na vrijednosti uzbudne struje kojom se magnetizira jaram statora. Pad magnetskog napona u jarmu manji je ukoliko je u stroju ugrađen prigušni namot statora. Taj utjecaj prigušnog namota statora značajan je za sve vrste generatora kod kojih se javljaju relativno visoke gustoće polja u jarmu i za koje su vanjske dimenzije bilo rotora ili statora u unaprijed zadanim granicama. Za turbogeneratore kod kojih su dimenzije rotora ograničavajući čimbenik za povećanja specifičnih opterećenja, djelovanje prigušnog namota statora doprinosi pretvorbi veće snage u istom volumenu, odnosno istom uzbudnom strujom postiže se veći efekt magnetiziranja. Osim kod turbogeneratora ovaj efekt može biti značajan i kod cijevnih generatora kod kojih su također izraženi problemi vezani uz dimenzioniranje i smještaj uzbudnog namota zbog karakteristične konstrukcije tih sporohodnih strojeva koja zahtijeva relativno male promjere i veće duljine paketa od standardnih vertikalnih izvedbi. Ugradnja prigušnog namota statora s naslova smanjenja opterećenja uzbudnog namota osobito je interesantna kod revitalizacija već postojećih objekata kada im se povećava snaga.

Kod projektiranja novih generatora interesantnije je djelovanje prigušnog namota statora vezano uz smanjivanje gubitaka praznog hoda. Osim rasterećenja uzbudnog namota zbog manjeg pada magnetskog napona, silnice polja se zatvaraju na mjestu na kojem su manji specifični gubici magnetiziranja. Specifični gubici u konstrukcijskim magnetskim materijalima limova i greda su višestruko veći od onih u lameliranim limovima paketa statora. Gubici praznog hoda kako je pokazao pokus magnetiziranja statorskog paketa s prigušnim kavezom statora su za oko 10% manji kada je efektivna vrijednost indukcije u jarmu oko 1T. Kako su gubici praznog hoda u jarmu statora prisutni u svim režimima rada stroja ugradnjom prigušnog namota statora dobiva se bolja korisnost u svim režimima rada. Prigušni namot statora dodatno smanjuje i gubitke pod teretom.

Provedenim numeričkim proračunima na modelima, utvrđeno je da statorski prigušni namot ima značajno djelovanje za srednje vrijednosti indukcija koje su na srednjoj liniji jarma statora reda veličine 0,8 T i više.

U prijelaznim pojavama prigušni namot statora odreagirat će prije bilo koje zaštite, te će prigušiti elektromagnetske prijelazne pojave koje bi se prenijele sa statora na kućište. Također će utjecati na prigušenje svih pojava nesimetrije koje nastaju unutar aktivnih dijelova generatora, a prenijele bi se na kućište.

Svojstvo prigušnog namota statora da potiskuje polje u aktivne dijelove ima negativno djelovanje kod naglog rasterećenja stroja. i tada se prigušni namot suprotstavlja pojavi koja dovodi do povećanja magnetske indukcije u jarmu statora. Prigušni namot će spriječiti dodatno rasipanje polja, pa će porast napona na stezaljkama statorskog namota biti veći nego što bi bio da ne postoji prigušni namot .

Istraživanjem je također potvrđen i valoriziran utjecaj prigušnog namota na smanjenje razine elektromagnetske buke u stroju. Pokazano je da je utjecaj na smanjenje buke osobito izražen kod četveropolnog generatora velike snage. Uzročnici elektromagnetske buke su nepravilnosti u geometriji odnosno nazubljenost statora i rotora te učestalost kojom se ponavljaju prostorne raspodjele u kojima se multiplicira dominacija određenog harmonika. Jaram statora i kućište su dijelovi koji se pod djelovanjem tih sila ovisno o redu rezultatnog vala „izobličavaju“. Djelovanjem prigušnog namota statora mijenja se harmonijski sadržaj u jarmu statora kao i amplitude pojedinih harmonijskih članova. Samim tim utječe se na sile koje se prenose s paketa na kućište. Postavljanjem modela u kojem je statorski prigušni namot dio kućišta izračunate su vrijednosti sila i njihov harmonijski sadržaj za slučaj kada je statorski prigušni namot kratko spojen i kada je otvoren. Utjecaj prigušnog namota statora na vibracije statorskog paketa i kućišta, a posljedično i na razinu elektromagnetske buke predmet su daljeg proučavanja, interesantan kako za velike tako i za strojeve manje snage koji dolaze u režime u kojima se pojačava djelovanje određenog harmonika polja nastalog zbog nazubljenosti statora i rotora.

Elementi u električnim strojevima koji utječu na razinu elektomagnetske buke vezani su uz geometrijski oblik, ali i dimenzije stroja, pa tako kod većih geometrija praktično već postoji očekivana razina elektromagnetske buke. Stoga je bitno, osobito kada se u novim projektima koji zbog svoje zahtijevnosti traže nestandardna rješenja, pribjeći dodatnim proračunima kako bi se otkrili mogući uzročnici neželjenih propratnih efekata pri izboru projektnog rješenja. Dodatni proračuni vezani su prvenstveno uz određivanje harmonijskog sadržaja funkcija pojedinih fizikalnih veličina poput gustoće polja, magnetske vodljivosti i magnetomotorne sile. I dok određeni efekti ne dolaze do izražaja u projektima u kojima su korišteni standardni omjeri geometrijskih veličina aktivnih dijelova, u projektima kod kojih se iz nekog razloga mora odstupati od takvog izbora postoji rizik da se pojave neželjeni propratni efekti vezani uz povećane vibracije i elektromagnetsku buku.

Metoda konačnih elemenata je odgovarajući alat za analizu projektnih rješenja kojima se mogu locirati i odrediti potencijalni problemi, uzrokovani izabranom geometrijom električnog stroja, a prije svega izborom oblika zračnog rasporeda. Analiziranjem sukladno postavljenog modela mogu se donijeti zaključci o eventualnoj potrebi ugradnje statorskog prigušnog namota s naslova smanjenja buke elektromagnetskog porijekla.

## LITERATURA

- [1] A.E.Fitzgerald, C.Kingsley, *Electric Machinery*, New York, Toronto, London McGraw-Hill Book Company 1952
- [2] E.W.Kimbark, *Power System stability*, John Wiley&Sons, New York 1957
- [3] I.M.Postnikov: *Proektirovanie električeskih mašin*, Gosudarstvennoe izdateljstvo tehničeskoj literaturi, Kiev1960.
- [4] V.V.Titov, *Turbogeneratori, Raščet i konstrukcia*, Energia, Leningradskoe otdelenie 1967.
- [5] T.Bosanac, *Teoretska elektrotehnika I*, Tehnička knjiga, Zagreb,1970.
- [6] R.Wolf, *Ispitivanje električnih strojeva*, Zagreb, Elektrotehnički fakultet Zagreb1970.
- [7] I.G. Šubov, *Noise and vibration of electrical machines*, Energia, Leningradskoe otdelenie, 1974.
- [8] A. Oppenheim, RW. Schafer, *Digital signal processing*, London: Prentice-Hall International (UK), 1975.
- [9] T.Bosanac, *Vrtložne struje strujni krugovi*, Zagreb, Elektrotehnički fakultet Zagreb1975
- [10] M.F.Odov, *Vibracije i deformacije obmotk statorov i sinkronnkronih mašin*, Moskva Energia, 1986
- [11] V.I.Postnikov, *Volnovie parametrie massibno-rotornih električeskih mašin*, Kiev, Naukova dumka 1986
- [12] Akademia nauk SSSR, redaktor Я. B. Danilevič, *Čislennie metody analiza električeskih mašin Leningrad*, "Nauka"Leningratskoe otdelenie, 1988.
- [13] A.I.Abramov, V.I.Izvekov, N.A.Serihin, *Proektiovanie turbogeneratorov*, Moskva Viša škola, 1990.
- [14] R. Wolf, *Osnove električnih strojeva*, Školska knjiga Zagreb, 1995.
- [15] IEC 60034-4, *Rotating Electrical Machines, Part 4: Methods for Determining SynchronousMachine Quantities From Tests*, CEI 1995.
- [16] IEEE Std 115-1995(R2002)
- [17] M.Jadrić, B. Frančić, *Dinamika električnih strojeva*, Graphis 1997, Zagreb
- [18] Z.Haznadar, Ž. Štih, *Elektromagnetizam*, Školska knjiga 1997, Zagreb
- [19] Z. Maljković, D. Žarko and K.Čelić-Baran, "The Application of Finite Element Method for More Accurate Calculation And Analysis of Turbogenerator Parameters, Manufacture in Modern Industry", 3rd International Conference DESIGN TO MANUFACTURE IN MODERN INDUSTRY, Portorož,1997.
- [20] D. Žarko, *Analiza zasićenih reaktancija turbogeneratora metodom konačnih elemenata*, magistarski rad, FER Zagreb, 1999.
- [21] Z.Haznadar, Z. Stih, *Electromagnetic Fields, Waved and Numerical Methods*, IOS-press, Amsterdam, Berlin, Oxford, Tokyo, Washington DC,2000.

- [22] M.N.Anwar, *Radial Force Calculation and Acoustic Noise Prediction in Switched Reluctance Machines*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no.6, 2000, pp.1589-1597.
- [23] M.Calvo, *Synchronous Machines Parameter Estimation Using Artificial Neural Networks*, Dissertation, The University of Calgary, April 2000.
- [24] K. Čelić, *Domaći zrakom hlađeni turbogeneratori velikih snaga primjer: 80MVA za TE-TO Zagreb*, peto savjetovanje hrvatskog komiteta CIGRE, Cavtat 2001.
- [25] I.Mandić, M.Pužar and M.Petrinić, *Optimization of Large Salient Pole Synchronous Generators*, COMPEL, MCB University Press, Bradford, England, Volume 20, Number 3, 2001, 813-827
- [26] H.Karmaker, *Combined Analytical and Finite element Modeling for Negative Sequence Studies in Saliient Pole Synchronous Machines*, *IEEE Transactions*, 2002
- [27] A.M.Knight, H.Karmarker, K.Weber, *Use of a Permeance Model to Predict Force Harmonic Components and Damper Winding Effects in Saliient-Pole Synchronous Machines*, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.17, NO. 4, December 2002
- [28] IEC TS60034-23 first edition 2003-2
- [29] MagNet, Version 6.14, Transient 2D with Motion, Tutorial, Infolytica, February 3, 2004
- [30] H.Karmarker, C.Mi, *Improving the starting Performance of Large Saliient-Pole Synchronous machines*, *IEEE Transactions on magnetics*, Vol. 40, NO.4, July 2004
- [31] M.Dadic, B.Somek, J.Ostojić, *Calculation of Magnetic Noise of Induction Motors Using Vibration Measurements*, *Proceedings of Second Congress of Alps-Adria Acoustics Association and First Congress of Acoustical Society of Croatia / Horvat, Marko ; Jambrošić, Kristijan (ur.). - Zagreb : Acoustical Society of Croatia (ASC) , 2005. 441-445., Opatija, Hrvatska, 23-24.06.2005.*
- [32] H.Karmarker, A.M.Knight, *Investigation and Simulation of Fields in large Saliient-Pole Synchronous machines With Skewed Stator Slots*, *IEEE Transactions on energy conversion*, Vol.20, NO.3, September 2005
- [33] D.Žarko, D.Ban, T.A.Lipo, *Analytical Calculation of Magnetic Field Distribution in the Slotted Air Gap of a Surface Permanent-Magnet Motor Using Complex Relative Air-Gap Permeance*, *IEEE Transactions on magnetics*, Vol. 42, NO.7, July 2006
- [34] K.Čelić, M.Puzar, S.Berberovic, *Design of 40 MVA Two-pole Two-speed Generator for Special Purposes in Testing Laboratory*, *The Eleventh International Middle-East. Power Conference. MEPCON'2006*, IEEE sponsorship. December 19-21, 2006.
- [35] K.Čelić, S.Berberović, M.Pužar, *Optimizing electric parameters and operation range of hydro-generator in refurbishing*, *Cigre Symposium*, paper 0703, Zagreb 2007
- [36] K.Čelić, Z.Haznadar, S.Berberović, *Turbogenerator refurbishment with up-rating based on embedding stator damper winding and modern electromagnetic materials*, *The IEEE International Electric Machines and Drives Conference – IEMDC 2007 Antalya: IEEE , 2007. 1003-1007.*
- [37] K.Čelić, M.Dadić, *Utjecaj prigušnog namota statora na elektromagnetske prilike kod turbogeneratora*, 16. međunarodni "Elektroinžinjerski simpozij" Dani Josipa Lončara, Šibenik 05-07.05.2008. ES-4

- [38] K.Čelić, M.Pužar, S.Berberović, *Two-speed Synchronous Generator for Special Purposes*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'09)Valencia : European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality , 2009.

## POPIS OZNAKA

$\Lambda$	vodljivost zračnog raspora
$\theta$	protjecanje
$m$	prostorni red vala
$\alpha_0$	fazni kut vala kada su $t$ i $\alpha$ jednaki nuli
$\omega_t$	trenutačna kutna brzina vala
$\lambda_x$	ukupna magnetska vodljivost zračnog raspora u točki $x$
$\lambda_0$	magnetska vodljivost zračnog raspora u točki $x$ za osnovni harmonik
$\lambda_2$	magnetska vodljivost zračnog raspora u točki $x$ za drugi harmonik
$\lambda_4$	magnetska vodljivost zračnog raspora u točki $x$ za četvrti harmonik
$\alpha$	kut koji zatvara točka $x$ s $d$ osi.
$e_a, e_b, e_c$	fazni naponi na stezaljkama statora
$\psi_a, \psi_b, \psi_c$	ulančeni tok faza
$i_a, i_b, i_c$	inducirane struje u fazama statorskog namota
$r$	radni otpor faze namota
$p$	operator - derivacija po vremenu d/dt
$\psi_f$	ulančeni tok od struje uzbuđenog namota
$i_f$	struja uzbuđenog namota
$r_f$	radni otpor uzbuđenog namota
$\psi_{nd}, \psi_{nq}$	ulančeni tok $n$ -tog kruga u direktnoj i poprečnoj osi
$i_{nd}, i_{nq}$	struja $n$ -tog kruga prigušnog namota
$r_{nd}, r_{nq}$	radni otpor $n$ -tog kruga struji $d$ i $q$ osi
$r_{ind}, r_{inq}$	radni otpor $i$ -tog kruga struji $d$ i $q$ osi
$J$	moment inercije rotora
$\omega$	kutna brzina
$L_{mf}$	-induktivitet uzbuđenog namota
$M_{fnd}$	- međuinduktivitet namota uzbuđenja i $n$ -tog kruga prigušnog namota rotora u $d$
$L_{mnd}, L_{mnq}$	induktivitet prigušnog namota u $d$ i $q$ osi
$L_{\sigma nd}, L_{\sigma nq}$	rasipni induktivitet $n$ -tog kruga prigušnog namota u $d$ i $q$ osi
$M_{nkd}, M_{nkq}$	- međuinduktivitet $n$ -tog kruga i $k$ -tog kruga prigušnog namota rotora u $d$ i u $q$ osi
$L_{kq}$	- induktivitet prigušnog namota rotora u $q$ osi
$L_{akq}$	- induktivitet glavnog polja u $q$ osi
$L_{\sigma a}$	rasipni induktivitet armaturnog namota u $q$ osi
$L_d, L_q$	- induktivitet stroja $d$ i u $q$ osi
$L_{\sigma kq}$	rasipni induktivitet prigušnog namota rotora u $q$ osi
$R_{kq}$	radni otpor prigušnog namota rotora u $q$ osi

$r_a$	radni otpor statorskog namota
$x_{\sigma a}$	rasipna reaktancija statorskog namota
$x_{gl}$	dodatni utjecaj tijela rotora i rotorskih kapa na povećanje rasipanja glava namota
$r_{fe}$	radni otpor željeza
$x_{ad}; x_{aq}$	induktivni otpor reakcije armature za osnovni harmonik u $d$ i $q$ osi
$x_{mfe}$	induktivnih i radnih otpora masivnog željeza
$x_{md}; x_{mq}$	induktivni otpori željeza pola u $d$ i $q$ osi
$x_{prd}; x_{prq}$	induktivni otpori kratkospojnog prstena preko željeza $d$ i $q$ osi
$s$	klizanje
$x_{\sigma f}$	rasipna reaktancija uzbuđenog namota
$x_{\sigma kd}; x_{\sigma kq}$	rasipne reaktancije prigušnog namota-kaveza u $d$ i $q$ osi
$r_{kld}; r_{klq}$	radni otpor klinova u $d$ i $q$ osi
$r_{\sigma kd}; r_{\sigma kq}$	radni otpor kaveza u $d$ i $q$ osi
$U_d; U_q$	naponi $d$ i $q$ osi
$p$	amplituda promjenjivog zvučnog tlaka
$\rho$	gustoća medija
$c$	brzina zvuka kroz promatrani medij
$L$	buka
$I$	zvučni intenzitet sinusnog vala
$p_R$	radijalna sila
$p_\tau$	tangencijalna sila
$z_k$	mehanička impedancija kućišta
$E$	modul elastičnosti

## SAŽETAK

### NUMERIČKI PRORAČUN UTJECAJA STATORSKOG PRIGUŠNOG NAMOTA NA KARAKTERISTIKE TURBOGENERATORA

U disertaciji je predloženo rješenje i analizirano djelovanje novog aktivnog konstrukcijskog elementa sinkronih generatora - prigušnog namota statora. Njegov utjecaj na karakteristike turbogeneratora istraživao je na primjeru dvopolnog i četveropolnog generatora, a razmatranja vrijede za bilo koji stroj u koji bi se ugradio taj namot.

Djelovanje prigušnog namota statora sagledano je u okviru klasične dvoosne teorije električnih strojeva dok je analiza provedena 2D metodom konačnih elemenata uz korištenje analitički izračunatih rasipnih reaktancija za dijelove namota u čeonom prostoru.

Dokazano je da prigušni namot statora djeluje u svim režimima rada obzirom da on reagira na bilo koju promjenu magnetskog polja koja se događa u jarmu statora na čijem je vanjskom obodu smješten. On utječe na vrijednosti uzbudne struje kojom se magnetizira stator kao i na harmonički sadržaj polja u jarmu statora. Utjecaj prigušnog namota statora na smanjenje buke elektromagnetskog porijekla analiziran je primjenom diskretne Fourierove transformacije (DTF). Iako značajan, taj utjecaj nije jednoznačan i ovisi o geometriji kako samog stroja tako i prigušnog namota statora, te ga je potrebno sagledati za svaki konkretni slučaj.

Provedenim mjerenjima gubitaka u statorskom paketu dokazan je i utjecaj prigušnog namota statora na smanjenje gubitaka praznog hoda. Ugradnja tog elementa osobito je interesantna zbog smanjenja opterećenja uzbudnog namota kod revitalizacija s povećavanjem snage, kod generatora kod kojih se zahtijeva visoki stupanj korisnosti, te kod strojeva najvećih jediničnih snaga.

Ključne riječi: prigušni namot statora, turbogenerator, metoda konačnih elemenata, rasipna elektromagnetska polja, elektromagnetska buka



# ABSTRACT

## NUMERICAL COMPUTATION OF INFLUENCE OF STATOR DAMPING WINDING ON TURBOGENERATOR CHARACTERISTICS

In this Dissertation a solution of new active construction element of stator damper winding is proposed and analyzed. Its influence on turbogenerator characteristics was investigated on an example of two and four pole generators, but the conclusions are valid for each machine with embedded stator damper winding.

The activity of stator damper winding is elaborated according to classical two-axe theory while the analysis is performed with 2D finite element method with analytical calculation of leakage reactance for end winding parts.

It is proved that the stator damper winding acts in all operation regimes because of its nature to react on each disturbance of magnetic field in stator yoke on which periphery is embedded. It influences the excitation current value for stator magnetizing and harmonic contents in stator yoke magnetic field. The influence of stator damper winding on reducing the acoustic noise of electromagnetic origin is analyzed with discrete Fourier transformation. There is no unique influence and it depends on geometry of the machine as well as on stator damper winding and it needs to be calculated for each case separately to make proper conclusion.

The measurements of losses in stator package have proved the influence of stator winding on no load losses reduction. The installation of the mentioned element is especially interesting because of the load reduction of excitation winding at revitalizations with power increase, at generators that are required to have high efficiency level and at machines of the biggest units.

Key words: stator damper winding, turbogenerator, finite element method, leakage magnetic fields, acoustic noise of electromagnetic origin

## **ŽIVOTOPIS**

Kristina Čelić je rođena 14.05.1962. u Sremskoj Mitrovici, gdje je završila osnovnu i srednju školu. 1987. godine diplomirala je na Energetskom odsjeku Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, a 2002. godine magistrirala na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. Od 1987. radi u tvornici Končar Generatori d.o.o. najprije kao projektant velikih hidrogenatora, a zatim i asinkronih strojeva i turbogeneratora. Vodila je niz projekata, razvila tvorničke programe revitalizacije i modernizacije postojećih generatora, te od 2003. godine bila direktor Poslovne jedinice servis i turbogeneratori. 2006. prelazi na mjesto tehničkog direktora u tvrtku Komperg d.o.o.. U Ministarstvu gospodarstva rada i poduzetništva zapošljava se 2007. godine gdje do danas radi kao načelnica Odjela za strateška planiranja i energetske bilance.

2005. godine stječe naslov višeg predavača na Veleučilištu Velika Gorica. U znanstveno istraživačkom radu bavi se analizom električnih strojeva velikih snaga klasičnim i numeričkim metodama. Autor je više članaka, elaborata, ekspertiza i projekata iz područja električnih strojeva. Govori i piše engleski, služi se ruskim jezikom. Udana, majka troje djece.

## **BIOGRAPHY**

Kristina Čelić was born on May, 14th 1962. in Sremska Mitovica where she attended elementary and secondary school. She graduated at the Faculty of Electrical Engineering, University of Belgrade and received her M.Sc. degree in 2002 from the Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb. Since 1987. she is an employee of Končar – Generators Inc, first as a Designer for Large Hydrogenerators and than as a Designer for Induction Machines and Turbine Generators. She was a Project Manager for numerous projects; she developed the factory Programs for Revitalization and Modernization of existing generators and since 2003. she was the Director of the Business Unit Service and Turbine Generators. She became the Technical Director in Komperg Inc Company in 2006. Since 2007. she is employed as a Head of Department for Strategic Planning and Energy Balance in the Ministry of Economy, Labour and Entrepreneurship.

From 2005. she is Senior Lecturer at Polytechnic College Velika Gorica. Her major field of scientific interest is analytical and numerical analysis of design of electrical machines. She is married and mother of three kids.