

Sustav za otkrivanje međuzavoynih kratkih spojeva namota sinkronih strojeva

Elez, Ante

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:168:622485>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-03**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA**

Ante Elez

**SUSTAV ZA OTKRIVANJE MEĐUZAVOJNIH
KRATKIH SPOJEVA NAMOTA SINKRONIH
STROJEVA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Zagreb, 2010

Doktorska disertacija izrađena je na Zavodu za rotacijske strojeve
KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d.

i

Zavodu za elektrostrojarstvo i automatizaciju
Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu

Mentori: Prof. dr. sc. Zlatko Maljković
Prof. dr. sc. Stjepan Car

Disertacija ima 245 stranica.

DOKTORSKA DISERTACIJA BR. _____

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Dr. sc. Ivan Gašparac, redoviti profesor
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
2. Dr. sc. Zlatko Maljković, redoviti profesor
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
3. Dr. sc. Stjepan Car, naslovni redoviti profesor na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, KONČAR – Institut za elektrotehniku Zagreb
4. Dr. sc. Ante Marušić, redoviti profesor
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
5. Dr. sc. Damir Ilić, izvanredni profesor
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Dr. sc. Ivan Gašparac, redoviti profesor
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
2. Dr. sc. Zlatko Maljković, redoviti profesor
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
3. Dr. sc. Stjepan Car, naslovni redoviti profesor na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, KONČAR – Institut za elektrotehniku Zagreb
4. Dr. sc. Ante Marušić, redoviti profesor
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
5. Dr. sc. Damir Ilić, izvanredni profesor
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva

Datum obrane doktorske disertacije: 14. Lipnja 2010. godine.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru Prof. dr. sc. Stjepanu Caru, na korisnim savjetima i razumjevanju tijekom izrade disertacije a i kroz cjelokupni radni staž proveden u tvrtci KONČAR-Institut za elektrotehniku d.d. U Vama sam uvijek imao osobu kojoj sam se mogao obratiti u vezi s bilo kojim problemom, znajući da ću dobiti pomoć. Profesore, velika Vam hvala na svemu.

Zahvaljujem se mentoru Prof. dr. sc. Zlatku Maljkoviću, s kojim surađujem još od izrade magistarskog rada. Vaši konkretni stručni savjeti uvijek su mi bili velika pomoć u radu. Hvala na korisnim savjetima i razumjevanju.

Puno hvala svim kolegama iz tvrtke KONČAR - Institut za elektrotehniku d.d. Tu posebno moram istaknuti Bakira Đonlagića, dipl. ing., Marijana Petrinića, dipl. ing. i Milana Kovačevića ing. s kojima je bilo zadovoljstvo surađivati i od njih učiti.

Hvala mojoj obitelji: mami Anđelki, tati Nikoli i sestri Marini. Hvala vam što ste me uvijek podržavali i vjerovali u mene. Bez vas ne bi bilo ove disertacije niti bilo kojeg mog uspjeha.

Posebnu zahvalnost dugujem supruzi Tatjani, koja je najbolje iskusila sve muke izrade ove disertacije. Hvala na strpljenju, ohrabrenju koje si mi pružala i radovanju svakom mom uspjehu.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. STANJE TEHNIKE	3
2.1. Inteligentni sustavi	5
2.1.1. Ekspertni sustav	5
2.1.1.1. Procesiranje znanja	7
2.1.1.2. Izrada ekspertnog sustava	8
2.1.2. Neuronske mreže	9
2.1.2.1. Izrada neuronske mreže	13
2.1.2.2. Mreža "širenje unatrag"	13
2.1.2.3. Učenje neuronske mreže	14
2.1.2.4. Provjera neuronske mreže	15
2.1.2.5. Prednosti neuronskog računarstva	16
2.1.2.6. Primjena neuronskih mreža	16
2.1.2.7. Primjena neuronske mreže u detekciji kvara na rotacijskom stroju	17
2.1.3. Bayesove mreže	18
2.1.3.1. Matematički model na kojem se temelje Bayesove mreže	18
2.1.3.2. Mreže za odlučivanje	23
2.1.3.3. Primjena Bayesovih mreža	24
2.1.4. Usporedba neuronske mreže, Bayesove mreže i ekspertnog sustava	25
3. TEORIJSKE PODLOGE ZA IZRAČUN MAGNETSKIH PRILIKA U ZRAČNOM RASPORU SINKRONOG STROJA	27
4. OBJEKT MJERENJA	39
4.1. Uzbudnik	41
4.2. Sustav uzbude	43
4.2.1. Regulator napona	44
4.2.2. Sklop za kompaundaciju	44
4.3. Priprema objekta mjerenja za ispitivanje	45
4.3.1. Ugradnja izvoda za kratko spajanje armaturnog namota	45
4.3.2. Ugradnja izvoda za kratko spajanje uzbudnog namota	51
5. MJERNA OPREMA	53
5.1. Prednji rub	53
5.1.1. Hallov senzor	54
5.1.1.1. Hallov efekt	54
5.1.1.2. Sastavni dijelovi Hallovog senzora	57
5.1.2. Mjerni svitak	58

5.1.3. Induktivni senzor	60
5.1.4. Ugradnja senzora na mjerni objekt.....	62
5.2. Procesne jedinice	65
5.2.1. Statorska procesna jedinica	67
5.2.2. Rotorska procesna jedinica.....	70
5.3. Jedinice za bežični prijenos podataka	71
5.4. Centralno računalo	72
6. PRORAČUN GENERATORA SGBP 160 M-4M METODOM KONAČNIH ELEMENATA.....	73
6.1. Rezultati proračuna za prazni hod.....	76
6.2. Rezultati proračuna za prazni hod, uz smanjeni iznos broja zavoja na jednom svitku uzbudnog namota.....	97
6.2.1. Utjecaj smanjenja iznosa broja zavoja svitka uzbudnog namota na magnetsku indukciju u zračnom rasporu.....	99
6.2.2. Utjecaj smanjenja iznosa broja zavoja svitka uzbudnog namota na magnetski tok u zubu statorskog paketa	113
6.2.3. Utjecaj smanjenja iznosa broja zavoja svitka uzbudnog namota na magnetski tok u jarmu statora	120
6.2.4. Utjecaj smanjenja iznosa broja zavoja svitka uzbudnog namota na magnetski tok jarma statora računat na dvostrukom polnom koraku	132
6.3. Rezultati proračuna za prazni hod, uz kratko spojene zavoje svitka namota armature	136
6.3.1. Utjecaj međuzavojnih kratkih spojeva svitka armaturnog namota na magnetsku indukciju u zračnom rasporu.....	141
6.3.2. Utjecaj međuzavojnih kratkih spojeva svitka armaturnog namota na magnetski tok u zubu statorskog paketa	150
6.3.3. Utjecaj međuzavojnih kratkih spojeva svitka armaturnog namota na magnetski tok u jarmu statora	153
6.3.4. Utjecaj međuzavojnih kratkih spojeva svitka armaturnog namota na magnetski tok jarma statora računat na dvostrukom polnom koraku	156
6.4. Rezultati proračuna za opterećeno stanje	159
6.5. Rezultati proračuna za opterećeno stanje, uz smanjeni iznos broja zavoja na jednom svitku uzbudnog namota	178
6.6. Rezultati proračuna za opterećeno stanje, uz prisutne međuzavojne kratke spojeve armaturnog namota	181
7. EKSPERIMENTALNI DIO RADA	183
7.1. Mehanička vrtnja	187
7.2. Prazni hod generatora.....	187

7.3. Prazni hod generatora uz prisutne međuzavojne kratke spojeve svitka uzbuđnog namota	194
7.4. Prazni hod generatora uz prisutne međuzavojne kratke spojeve svitka armaturnog namota	197
7.5. Opterećeno stanje generatora	202
7.6. Opterećeno stanje generatora uz prisutne međuzavojne kratke spojeve svitka armaturnog namota	207
8. USPOREDBA PODATAKA MJERENJA I PRORAČUNA	212
9. PRIMJENA BAYESOVIH MREŽA U DETEKCIJI KVAROVA NA ROTACIJSKOM STROJU	227
9.1. Izrada sustava za detekciju analiziranih kvarova	227
9.2. Izrada klasifikatora kvara	228
9.3. Izrada modula za odlučivanje	230
10. ZAKLJUČAK	233
LITERATURA	236
POPIS OZNAKA	238
SAŽETAK	242
ABSTRACT	243
ŽIVOTOPIS	244
CURRICULUM VITAE	245

1. UVOD

Promatrajući kroz povijest, od vremena kad su ljudi započeli s izradom strojeva za obavljanje raznih djelatnosti, sve do danas, postoji potreba za njihovim nadziranjem. Stoljećima su jedini način za stjecanje znanja o kvarovima nadziranih strojeva bila su biološka osjetila. Tako npr. promatranjem promjene oblika ili boje, osluškivanjem zvukova, dodirrom kako bi se osjetile vibracije, te putem osjeta mirisa detektirati prekomjerna zagrijanja dijelova stroja, metode su na osnovu kojih se donosila ocjena o stanju stroja. Kasnije je u taj proces uključena mjerna oprema koja je omogućila dobivanje točnijih informacija o promatranom parametru stroja. Međutim primijenjena mjerna oprema pokazala se sklona kvarovima, a njenom primjenom povećala se nesigurnost uslijed nepouzdanih alarma. Unošenje dodatne nesigurnosti u sustav posebno dolazi do izražaja kod primjene u automatiziranom procesu upravljanja. Značajan napredak uslijedio je pojavom računala kojima se povjerilo nadziranje i upravljanje strojem. Računala su omogućila integraciju informacija prikupljenih iz više raznovrsnih izvora i na taj način omogućila utvrđivanje neispravnog dijela u kompleksnom sustavu (npr. senzora koji daje nepouzdan alarme). Brzina računala omogućila je detekciju kvarova u početnoj fazi nastajanja, prije nego što prerastu u značajne poremećaje u radu stroja.

U samim počecima primjene, računala su bila kompleksna, skupa i zahtijevala su odgovarajuću radnu okolinu. Moglo ih se primijeniti na strojevima koji su sami po sebi kompleksni i skupi kako bi opravdali njihovu ugradnju. Velika industrijska postrojenja, kao što su elektrane, rafinerije, kemijska postrojenja, ljevaonice metala, tvornice papira, među prvima koji su bile opremljene kompjuteriziranim sustavom nadziranja stanja. Potom su uslijedile slične aplikacije na području transporta. U takvim sustavima centralno računalo prikuplja informacije od nekoliko stotina, a u kompleksnijim sustavima nekoliko tisuća ulaza, na osnovu kojih nadzire i upravlja stotinama procesa.

Pojavom mikroprocesora situacija se značajno promijenila. Procesori su postali dovoljno pristupačni da se mogu ugrađivati u raznovrsne uređaje, pri čemu su mogli djelovati u raznim uvjetima. Ovaj iskorak zajedno sa pojavom naprednih komunikacijskih sustava omogućio je decentralizaciju velikih sustava nadziranja i upravljanja. Još važnije, mikroračunala se pojavljuju u širokoj proizvodnji i primjeni, tako da ih se može pronaći u automobilima, uređajima za grijanje i hlađenje, kućanskim aparatima. Širom primjenom, nadziranje opreme putem računala postalo je sveprisutno u razvijenom potrošačkom društvu.

Sustavima za nadziranje stanja stroja moguće je detektirati nastali kvar putem mjernih senzora. Međutim, danas se sve više teži sustavima koji osim detekcije kvara na nadziranom objektu, daju i dijagnostiku kvara, odnosno mjesto i uzrok nastanka kvara. Takvi sustavi detekciju i dijagnostiku kvara obavljaju u realnom vremenu (*on line*) paralelnim ili slijednim procesiranjem. Također, u nadzornim sustavima uobičajeno je da detekcija kvara koja se obavlja kontinuirano, aktivira dijagnostiku koja se obavlja po potrebi. Metode detekcije i dijagnostike kvarova mogu se podijeliti na dvije grupe i to na one koje ne koriste matematičke modele sustava koje nadziru i one koje koriste matematički model. Ova doktorska disertacija obrađuje problematiku izgradnje sustava za detekciju i dijagnostiku kvara na osnovu matematičkog modela stroja kojeg analizira odnosno nadzire.

Doktorska disertacija ima sljedeća poglavlja:

- poglavlje 1. Uvod
- poglavlje 2. Ukazuje na potrebu praćenja stanja kritičnih strojeva nadzornim sustavima, te na prednosti takvih sustava. Prema opsežnoj studiji načinjenoj na uzorku od 1200 sinkronih generatora [1], dan je pregled najčešćih uzroka kvarova. Načinjena je usporedba nadzornih sustava koji procesiraju podatke - konvencionalni nadzorni sustavi, i sustava koji procesiraju "znanje"- inteligentni sustavi. Prikazana su i uspoređena tri koncepta inteligentnih sustava koji se mogu primijeniti u detekciji kvarnih stanja na rotacijskim strojevima.
- poglavlje 3. Daje pregled opće poznatih teorijskih jednadžbi za računanje magnetskih prilika u zračnom rasporu sinkronog stroja.
- poglavlje 4. Prikazuje objekt na kojem je obavljen eksperimentalni dio rada. Detaljno su opisani dijelovi stroja, te su prikazana mjesta od interesa, odnosno mjesta ugradnje mjernih senzora. Također su opisane i prikazane izmjene načinjene na stroju u svrhu ispitivanja, tj. mogućnosti simuliranja kvara.
- poglavlje 5. Opisuje tehnička rješenja korištena pri mjerenju u eksperimentalnom dijelu rada. Prikazani su korišteni senzori te mjesta i način njihove ugradnje na stroju.
- poglavlje 6. Elektromagnetskim proračunom korištenjem metode konačnih elemenata (MKE), izračunati su valni oblici magnetskog polja na mjestima ugradnje mjernih senzora na objektu mjerenja. Izrađeno je ukupno 22 modela stroja pomoću kojih su računati valni oblici u različitim pogonskim stanjima uključujući i kvarna stanja. Dobiveni rezultati analizirani su kako bi se omogućila detekcija kvarnih stanja, uzroka kvarnih stanja i mjesta nastanka istih.
- poglavlje 7. Prikazuje rezultate mjerenja obavljenih na sinkronom generatoru SGBP 160 M-4M.
- poglavlje 8. Uspoređeni su rezultati mjerenja s podacima dobivenim proračunom.
- poglavlje 9. Prikazuje sustav baziran na Bayesovim mrežama, primijenjen u detekciji kvarova na objektu mjerenja. Također su pripremljeni klasifikatori kvarova, na osnovu podataka proračuna i mjerenja, nužni za funkcioniranje sustava.
- poglavlje 10. Sadrži zaključke iz ovog rada, diskusiju o potrebi za daljnjim istraživanjima u području detekcije kvarova i prijedloge za poboljšanje istih.

2. STANJE TEHNIKE

Oslanjanje na rad i pouzdanost kritičnih strojeva svakodnevno je u proizvodnji električne energije, pumpnim i kompresorskim postrojenjima i u većini proizvodnih provesa. U svim navedenim slučajevima kvar na stroju nije samo tehnički problem nego i ekonomski. Dok sami troškovi popravka mogu biti veliki, djelomična ili čak ukupna šteta prestanka proizvodnje uslijed zatajenja kritičnog stroja, ponekad premašuje početnu vrijednost cjelokupne investicije tog postrojenja. Kad se radi o tako velikom riziku, nadziranje kritičnih strojeva je više nego samo dobra ideja, to je nužnost.

Strojevi koji sudjeluju u proizvodnji električne energije spadaju u kategoriju kritičnih strojeva. Zadatak im je proizvodnja električne energije prema zahtjevima koje postavlja elektroenergetski sustav, odnosno trenutna potreba za električnom energijom. Kako bi se udovoljili visoki zahtjevi tržišta energije na raspoloživost i pouzdanost, strojevi npr. generatori, često rade u stanjima koji za posljedicu imaju povećanje istrošenosti odnosno pad pouzdanosti i raspoloživosti pojedinih dijelova postrojenja. To smanjuje životni vijek i povećavaju se troškovi održavanja. Poznavanje stanja stroja, njegove raspoloživosti i mogućnosti preopterećenja od izuzetne važnosti. To se postiže uspostavljanjem trajnog nadzora generatora (*on-line monitoring*). Ranom detekcijom kvara sprječavaju se njihova veća oštećenja i neplanirani prekidi rada, a time i izbjegavanje značajnijih troškova i gubitaka u proizvodnji.

Kontinuirano praćenje kritičnih pokazatelja stanja stroja nadzornim sustavima dokazana je metoda za predviđanje i sprječavanje kvarova. Prvotni nadzorni sustavi pratili su stanje generatora na osnovu mjerenja vibracija. Mjerenje vibracija najučinkovitije je i daje najviše informacija. Tijekom vremena nadzorni sustavi su proširivani, te se uz vibracije prate i neke druge veličine kao što su magnetska polja, zračni raspored, linijske struje, parcijalna izbijanja u izolacijskom sustavu, temperature, pritiske i niz drugih veličina. Ovakvim proširenjem sustava obuhvaća se više parametara stroja na osnovu kojih se mogu detektirati novonastale promjene u radu stroja, odnosno detektirati uzroci mogućih kvarova.

Nadzorni sustav prikuplja i vrši obradu podataka koje mu prosljeđuju mjerni senzori ugrađeni na stroj. Ti podaci uspoređuju se s unaprijed zadanim granicama koje se uzimaju iz određenih normi, ukoliko iste postoje, odnosno određuju se na osnovu dugogodišnjeg iskustva osoblja koje sudjeluje u praćenju stanja stroja. Ukoliko se radi o novom stroju snima se početno stanje koje se ubuduće koristi kao referentno.

Bitna promjena vrijednosti jedne ili više mjerenih veličina, od onih kada je stroj bio ispravan, označavaju promjenu stanja stroja i iziskuju potrebne akcije kako bi se iste vratile u prvotno stanje. Osoblje zaduženo za praćenje stanja stroja s većom ili manjom točnošću na osnovu dugogodišnjeg iskustva, znanja i podataka mjerenja može detektirati uzrok nastale promjene. Detekcija uzroka iziskuje određeno vrijeme koje je potrebno uložiti u analizu podataka mjerenja. U današnje se vrijeme teži smanjenju broja osoblja zaduženog za praćenje stanja strojeva, a težište se stavlja na nadzorne sustave koji bi trebali zamijeniti dugogodišnje znanje i iskustvo.

Čitav niz kvarova uzrokovan različitim uzrocima može se pojaviti na stroju tijekom njegovog rada. ENEL-ova studija [1], izrađena početkom devedesetih godina prošlog stoljeća, na uzorku od 1200 hidro generatora daje pregled uzroka nastalih kvarova koji su se pojavili u periodu od 5 godina. Prema toj studiji uzroci kvarova poredani su po učestalosti na slijedeći način:

Tablica 1. Uzroci kvarova sinkronih generatora prema ENEL-ovoj studiji [1]

Olavavljenje štapa statorskog namota	16,3 %
Međuzavojni spoj uzbudnog namota	12,2 %
Prekomjerno zagrijavanje ležajeva	12,2 %
Povećana parcijalna izbijanja	10,2 %
Osovinske struje	9,2 %
Lokalno zagrijavanje	8,2 %
Kvarovi u sustavima za podmazivanje	8,2 %
Kvarovi na izolacijskom sustavu uslijed povećanja vibracija	6,1 %
Puknuće spojeva namota	6,1 %
Kvar na izolacijskom sustavu rotora	6,1 %
Olavavljenje magnetskih klinova	2 %
Olavavljenje kućišta statora	2 %
Vibracije glava namota	1 %
Ostali uzroci	0,2 %

Prema tablici 1 najučestaliji kvarovi na hidro generatorima, gotovo 50% od svih nastalih kvarova, nastaju na izolacijskom sustavu rotorskog i statorskog namota. Kvarovi na izolacijskom sustavu najčešće dovode do kratkih spojeva namota (spoj među zavojima, spoj među slojevima namota, međufazni kratki spoj, proboj na masu generatora). Detekcija kratkih spojeva namota u ranoj fazi nastajanja je od velikog značaja. Najzastupljenije metode korištene u detekciji kvarova na izolacijskom sustavu su praćenje linijskih struja stroja i parcijalnih izbijanja.

Područje interesa doktorske disertacije je detekcija kvarova izolacijskog sustava, odnosno detekcija međuzavojnih kratkih spojeva namota sinkronog generatora. Cilj radnje je poboljšati metode prepoznavanja kvarova statorskog i rotorskog namota stroja temeljem analize magnetskih polja.

Područje detekcije kvarova na strojevima u današnje vrijeme zauzima značajno mjesto u industriji. Istraživanjem teme nameće se činjenica da istraživači i znanstvenici imaju mnogo različitih ideja i tehnika korištenih pri detekciji kvarova, i da se na ovom području intenzivno radi.

Mnoge ideje i tehnička rješenja korištena u detekciji kvarova ugrađuju se u nadzorne sustave, čime takvi sustavi dobivaju na vrijednosti. Količina znanja koja se ugradi u takav sustav određuje njegove mogućnosti. Na taj način nadzorni sustav poprima značajke inteligentnog sustava koji ima sposobnost odlučivanja na osnovu znanja kojeg posjeduje.

2.1. Inteligentni sustavi

Umjetna inteligencija (engl. Artificial intelligence) je znanost izrade strojeva koji su sposobni za obavljanje aktivnosti koje zahtijevaju ljudsku inteligenciju (definicija: Minsky, 1968). Umjetna inteligencija polako se širi, izlazi iz ekskluzivnih laboratorija i pronalazi konkretnu primjenu u industriji. Razvoj moderne znanosti doveo je do pojave dva osnovna pravca razvoja umjetne inteligencije. Prvi je fiziološko i psihološko proučavanje ljudskog uma, dok je drugi tehnološki razvoj sofisticiranih sustava baziranih na računalu kao što su ekspertni sustavi, neuronske mreže i Bayesove mreže.

Ekspertni sustav je interaktivni alat baziran na računalu, koji pri rješavanju problema u procesu donošenju odluka, bira između pojedinih mogućnosti koristeći činjenice i hipoteze bazirane na prikupljenom znanju i iskustvu od eksperta. Ekspertni sustavi su relativno složeni sustavi koji, da bi ostvarili pouzdani rezultat u radu, zahtijevaju da se u njih unese velika količina znanja. Ipak treba napomenuti da ekspertni sustavi nemaju prave značajke umjetne inteligencije. To su sustavi koji sadrže određena specifična znanja iz jednog ili više određenih područja znanosti, na osnovu kojeg mogu zaključivati i donositi uporabljive zaključke, ali ne i samostalno učiti. Ekspertni sustavi od najveće su pomoći organizacijama koje imaju visok stupanj znanja i iskustva u direktnom i pravilnom rješavanju problema koje je teško prenosivo na druge članove te iste organizacije ili na nekog trećeg.

Nakon razvoja ekspertnih sustava uslijedio je razvoj neuronskih mreža. Njihov zadatak nije obavljanje određenih zadataka i postupaka kao kod ekspertnih sustava, nego učenje povezanosti ulaznih i izlaznih podataka. Neuronsku mrežu može se promatrati kao crnu kutiju koja ima sposobnost učenja. Uspješnost neuronske mreže direktno je vezana uz količinu ulaznih podataka tj. mreža je uspješnija što ima više ulaznih podataka. U slučaju nemogućnosti prikupljanja velikog broja ulaznih podataka, a uz posjedovanje određene količine znanja o problemu koji se rješava, prihvatljivo rješenje predstavljaju Bayesove mreže. Bayesove mreže su alat za predstavljanje nesavršenog znanja, tj. znanja koje sadrži nepouzdanost.

2.1.1. Ekspertni sustav

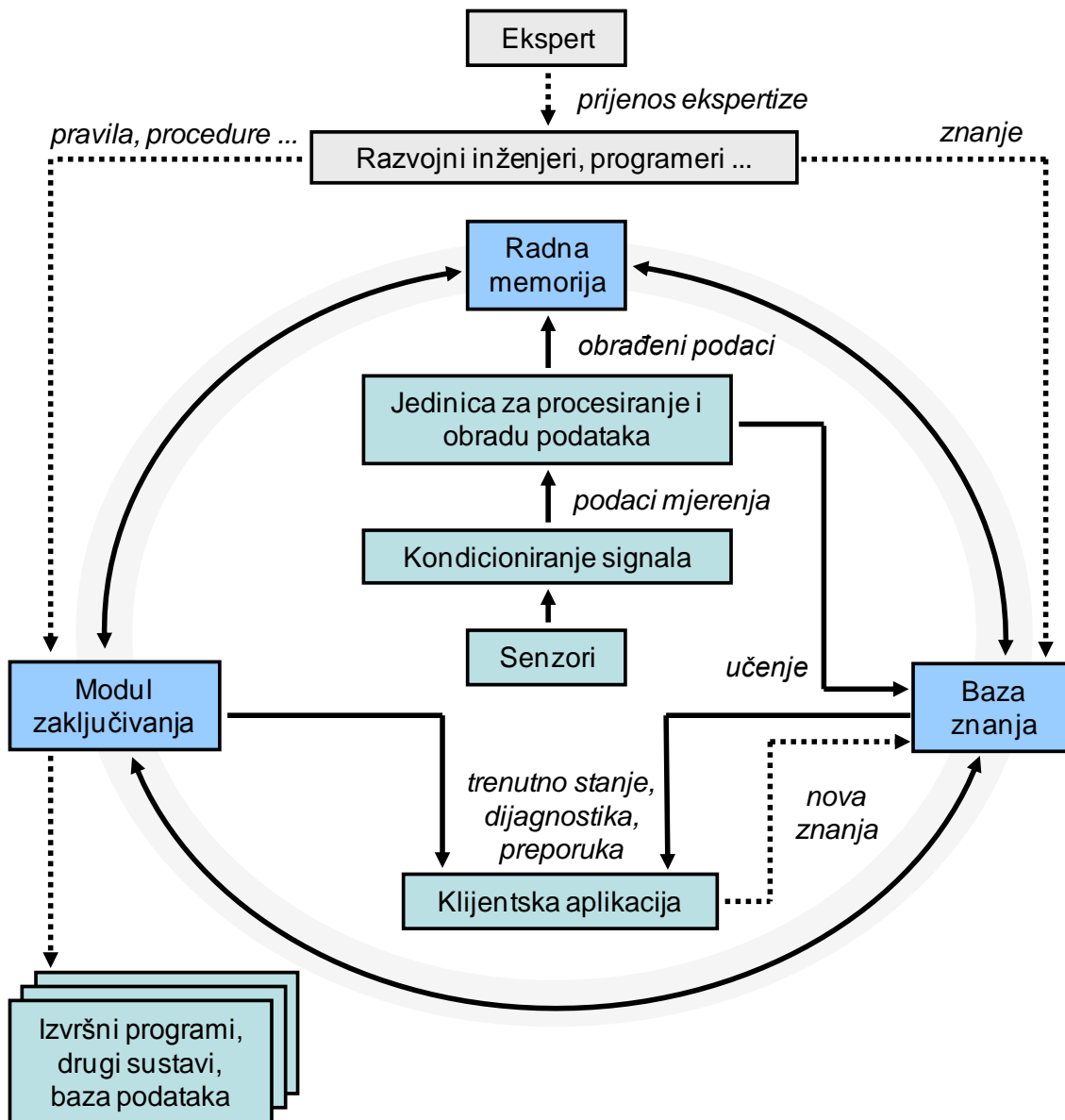
Ekspertne sustave često se naziva sustavima znanja jer njihova učinkovitost ovisi o količini znanja koje u njih unose eksperti. Uloga ekspertnog sustava je obrada informacija, interakcija s vanjskim svijetom (čovjekom i/ili s drugim sustavom), prikupljanje znanja (učenje), djelovanje i zaključivanje temeljeno na teoriji ili iskustvu. Kako bi prevladali ljudska ograničenja, ekspertni sustav udružuje dobre osobine ljudi (eksperta na određenom području) i veliku procesorsku moć jedinica za obradu podataka. Karakteristike ekspertnih sustava su:

- velika vjerojatnost, učestalost i dosljednost u donošenju ispravnih odluka,
- djelovanje u realnom vremenu,
- objektivnost u donošenju odluka bez moguće pristranosti vezane za osobne i emocionalne reakcije korisnika,
- modularnost strukture,
- oslobađa vrijeme korisnicima koje mogu provesti koncentrirajući se na kreativnije aktivnosti,
- potiče detaljnije istraživanje problema.

Da bi sustav (računalo) učinkovito koristio hipoteze, one moraju biti pohranjene i organizirane u lako dostupnom formatu koji se ističe među ostalim podacima. Zbog toga su podaci u ekspertnom sustavu organizirani u tri istaknute cjeline:

- baza znanja sadrži pravila za rješavanje problema, postupke i podatke vezane s područjem problema,
- radna memorija odnosi se na podatke koji se trenutno koriste za rješavanje problema koji se razmatra,
- modul zaključivanja pretražuje bazu znanja u potrazi za primjenjivim pravilima, i u određenom trenutku prezentira rješenje ili zaključak.

Slika 2.1 prikazuje dijelove ekspertnog sustava, te njihovu integraciju. Baza znanja je jezgra strukture ekspertnog sustava. U bazi su pohranjena znanja i iskustva stvarnog čovjeka – eksperta pretvorena od strane razvojnih inženjera i programera u pravila i strategiju koja se mijenja ovisno o prevladavajućem problemu. Baza znanja formira se unošenjem podataka dobivenih eksperimentalnim mjerenjem i proračunima.



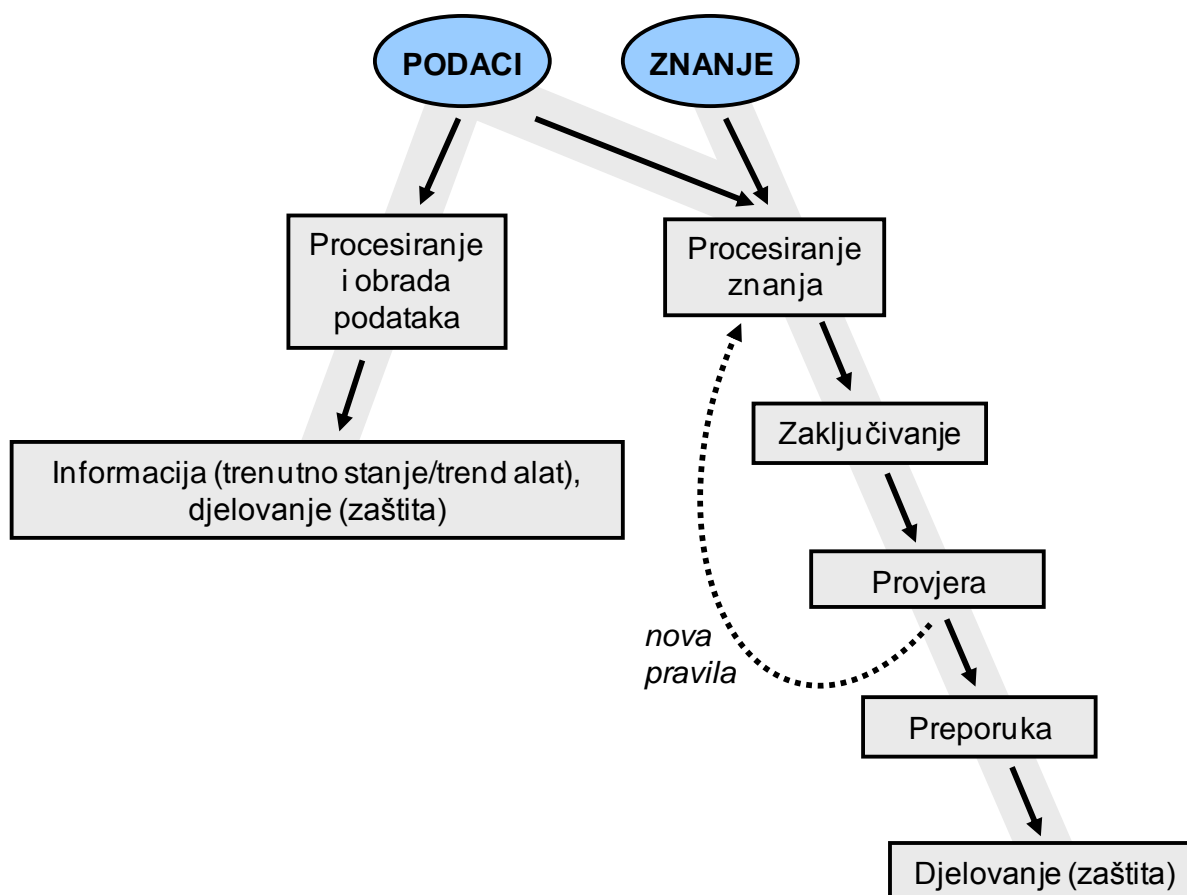
Slika 2.1. Integracija dijelova ekspertnog sustava

Od dobrog ekspertnog sustava očekuje se da se tijekom vremena proširuje i uči od povratne veze korisnika i mjerenja na stvarnom stroju. Ukoliko dođe do spoznaje o novom pravilu, informaciji ili podatku koji utječe na postojeće postupke rješavanja problema, bazu znanja ili postupke, potrebno je izmijeniti i/ili nadopuniti pravila modula zaključivanja. Prije provedbe promjena potrebno je oprezno procijeniti utjecaj promjena na sve moguće ishode, jer određeno pravilo za rješavanje problema može biti nevažno u jednoj situaciji, dok u drugoj situaciji može biti od ključne važnosti.

Uspješnost ekspertnog sustava izravno ovisi o kvantiteti i kvaliteti formiranih pravila i prikupljenih podataka. Baza znanja omogućuje ekspertnom sustavu mogućnost da korisniku predloži smjer u kojem je potrebno izvršiti ispitivanje. Ono također istražuje područje koje može biti povezano s određenim problemom, a da to korisniku nije naizgled povezano.

2.1.1.1. Procesiranje znanja

Ekspertni sustavi predstavljaju prijelaz sa tradicionalnog procesiranja podataka na procesiranje znanja. Slika 2.2 prikazuje odnos između postupka procesiranja podataka (nadzorni sustav) i znanja (ekspertni sustav) pri donošenju odluka.



Slika 2.2. Procesiranje znanja / procesiranje podataka

Prije djelovanja, kod procesiranja podataka, na osnovu ulaznih parametara (podaci mjernih senzora) provodi se eksplicitna analiza. U ovom slučaju vrši se

usporedba trenutne vrijednosti mjerene veličine s unaprijed zadanim granicama, te se donosi odluka o djelovanju. Granice se uzimaju iz određenih normi, ukoliko isti postoje, odnosno određuju se na osnovu dugogodišnjeg iskustva osoblja koje sudjeluje u praćenju stanja stroja ili referentnog stanja.

Kod ekspertnog sustava procesira se znanje koristeći dostupne ulazne podatke kao uzorak pretraživanja. Smisao procesiranja znanja je stvaranje novih znanja (pravila i postupaka) i donošenje valjanih zaključaka. Zaključivanje se donosi na dva načina:

- na osnovu pravila i uobičajeno prihvaćenih formula,
- na osnovu skupa reprezentativnih slučajeva koje imaju poznat ishod ili vrijednost izlaza. Baze znanja potrebno je puniti novim podacima, a u slučaju da se postigne određeni broj reprezentativnih slučajeva koji potvrđuju neku tezu, ti podaci se mogu početi koristiti kao pravila pri odlučivanju.

Prije donošenja odluke istu je potrebno provjeriti, odnosno potrebno je odrediti pripadnost određenog podatka skupu, koje može biti:

- izrazito (klasično) odnosno pripada ili ne pripada, DA ili NE, 0 ili 1,
- neizrazito (fuzzy) odnosno pomoću vjerojatnosti pripadanja skupu.

Način na koji ekspertni sustav pretražuje bazu znanja, provjerava odluke i daje rezultat, razlikuje se od sustava do sustava. Količina podataka koju sustav treba obraditi i točnost podataka često utječu na odabir metode pretraživanja. Modul zaključivanja je vrlo važan, a neuspjeh u njegovu organiziranju može ga učiniti neefikasnim i nepouzdanim. To su sve razlozi zbog čega su mehanizmi za pretraživanje tema kojoj je posvećeno najviše vremena na području umjetne inteligencije.

2.1.1.2. Izrada ekspertnog sustava

Izrada ekspertnog sustava uključuje sljedeće faze:

- analiza područja problema,
- projektiranje sustava,
- izrada programskog koda,
- provjera programa,
- primjena sustava,
- provjera sustava.

Analiza područja problema podrazumjeva fizikalno tumačenje manifestacije problema i prepoznavanja faktora (uzroka) koji su relevantni za problem. Postupak analize područja problema uključuje odabir mjerne metode, potrebnih senzora i mjerne opreme kako bi se na najkvalitetniji način uočila pojava koju se analizira., Kako bi se dobile karakteristične značajke promatrane pojave, potrebno je obraditi sirovi mjerni signal prikupljen mjernim sensorima. Postupak i način obrade sirovog signala odrediti će se u kasnijoj fazi. Nakon što se za promatranu pojavu prikupe značajke koje su za nju karakteristične, potrebno je izraditi programski kod koji će obavljati funkciju pronalaska određene pojave u mjerenom signalu, odnosno

izvršavati određene postupke i usporedbe s podacima u bazi podataka. Preduvjet za primjenu prototipa sustava na stroj je provjera postupka i programskog koda sa stvarnim podacima (verifikacija).

U realizaciji ekspertnog sustava uključeni su tri vrste pojedinaca:

- stručnjaci iz određenog područja koji unose svoje znanje i iskustvo uz pomoć razvojnih inženjera i programera,
- razvojni inženjeri i programeri koji sudjeluju u izgradnji, održavanju i prezentaciji znanja sustava korisniku,
- krajnji korisnici (klijenti) koji koriste sustav za rješavanje problema i kao pomoć pri donošenju odluka.

Pohranjivanjem znanja, postupaka i iskustva u ovakve sustave unesene od strane eksperata iz određenog područja, dolazi se korak bliže donošenju ispravne odluke o stanju u kojem se stroj nalazi. Nužnost za ovakvim sustavima nameće se zbog dosadašnje prakse donošenja odluka u vrlo kratkom vremenu, od strane pojedinaca koji su neposredno vezani uz svakodnevni rad stroja. Takvo odlučivanje podložno je nedostacima povezanih s ljudskim faktorom. Neki od razloga zbog kojih dolazi do pogrešaka pri odlučivanju su:

- ograničeno ljudsko znanje,
- nedovoljna količina iskustva,
- nemogućnosti obrade velike količine podataka u kratkom vremenu,
- pristranost pri djelovanju i donošenju odluka,
- ne mogućnosti pamćenja velike količine podataka,
- ograničena radna memorija,
- zaboravljanje važnih detalja problema,
- ne dosljednost u donošenju odluka,
- sporost pri prisjećanju zapamćenih podataka,
- umor od fizičkog i mentalnog rada.

2.1.2. Neuronske mreže

Neuronsko računarstvo inspiraciju i teorijsko ishodište pronalazi u ljudskom mozgu. Cilj ovakvog pristupa je udruživanje sposobnosti ljudi da dobro prepoznaju oblike, lica i glasove sa sposobnošću računala da izvršava numeričke proračune i radi s velikom količinom podataka. Način na koji ljudski mozak rješava probleme još uvijek je nedostižan cilj za računarsku znanost i znanstvenike. Mozak (slika 2.3) sastoji se od nekoliko desetaka milijardi neurona povezanih u mrežu koji mogu paralelno obrađivati informacije.

Neuron (slika 2.4) je osnovna jedinica živčanog sustava. Pojednostavljeno gledano, biološki neuron sastoji se iz tijela, aksona i mnoštva dendrita koji okružuju tijelo neurona. Uloga neurona je da prima informacije od drugih neurona putem dendrita, obrađuje ih, a zatim šalje impuls putem aksona i sinapsi drugim neuronima u mreži. Učenje se odvija mijenjanjem jačine sinaptičkih veza, odnosno težina u mreži.



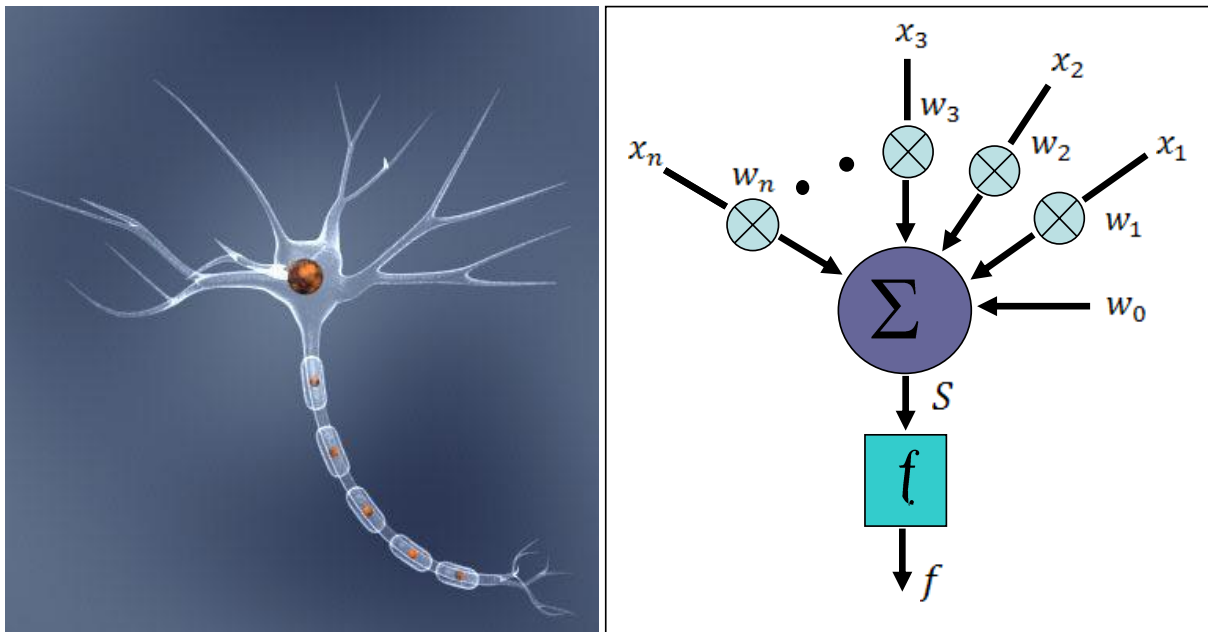
Slika 2.3. Mozak - središnji dio živčanog sustava čovjeka.

U umjetnoj neuronskoj mreži obrada informacija se također izvodi u jedinicama koje zovemo neuronima ili elementima za obradu [2]. Izraz neuron označava osnovnu jedinicu u modelu neuronske mreže koja je namijenjena obradi podataka. Umjetni neuron izrađen je s idejom da oponaša osnovne funkcije biološkog neurona. Tijelo neurona zamjenjuje se sumatorom, ulogu dendrita preuzimaju ulazi u sumator, izlaz sumatora je akson umjetnog neurona, a uloga praga osjetljivosti bioloških neurona preslikava se na tzv. aktivacijske funkcije.



Slika 2.4. Neuroni - osnovne jedinice živčanog sustava čovjeka.

Struktura umjetnog neurona prikazana je na slici 2.5. Funkcijske sinaptičke veze biološkog neurona s njegovom okolinom preslikavaju se na težinske faktore, preko kojih se i ostvaruje veza umjetnog neurona s njegovom okolinom.



Slika 2.5. Struktura neurona.

Gdje su:

$x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ - ulazni signal,

$w_1, w_2, w_3 \dots w_n$ - sinaptičke težine,

S - izlaz iz sumatora,

w_0 - prag,

f – aktivacijska funkcija,

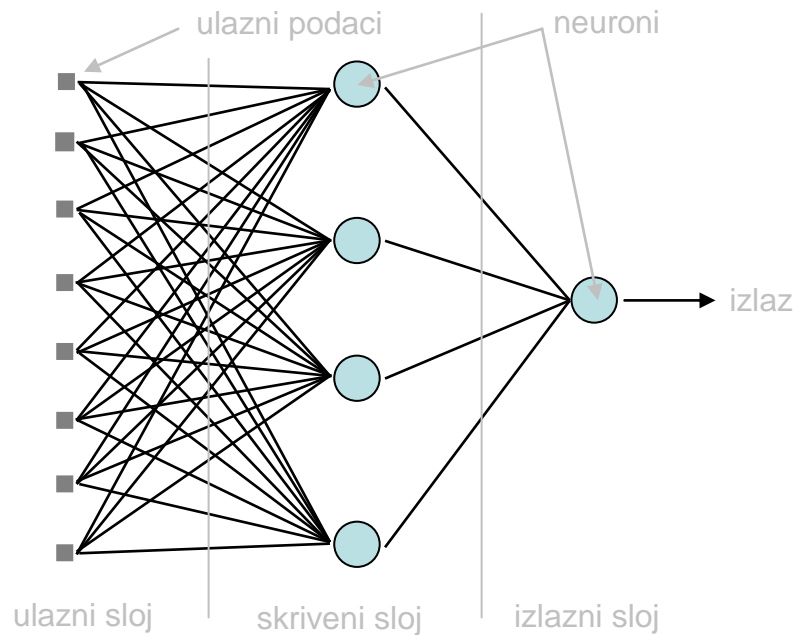
y - izlaz iz neurona.

Matematički model obrade informacija u računalnom neuronu je slijedeći. Ulazi u neurone indeksirani s $i = 1..n$ primaju ulazne vrijednosti x_i . Svaka ulazna vrijednost x_i množi se s težinskom vrijednošću w_i . Izlaz iz neurona y je:

$$y = f(S) \quad (2.1)$$

$$S = w_0 + w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 + \dots + w_n \cdot x_n = \sum_{i=0}^n w_i \cdot x_i + w_0 \quad (2.2)$$

Neuroni su spojeni u mrežu na način da izlaz svakog neurona predstavlja ulaz u jedan ili više drugih neurona. Neuroni su obično u umjetnoj neuronskoj mreži organizirani u grupe ili slojeve u kojima se informacije paralelno obrađuju. Tipična neuronska mreža (slika 2.6) sastoji se od nekoliko slojeva, najčešće dva vanjska, te od jednog ili više međuslojeva ili tzv. skrivenih slojeva. Vanjski slojevi su: ulazni sloj koji učitava podatke iz okoline i izlazni sloj koji prikazuje rezultat mreže za zadani ulaz. Skriveni sloj je onaj u kojem se uče međuzavisnosti u modelu. Ovdje se obrađuju informacije neurona i šalju se u neurone izlaznog sloja.



Slika 2.6. Neuronska mreža.

Kada ulazni sloj šalje podatke u prvi skriveni sloj, svaki neuron skrivenog sloja prima vagani ulaz iz ulaznog sloja (početne težine su postavljene slučajno, često u intervalu od -0.1 do 0.1) prema formuli:

$$S_j^{[s]} = \sum_i w_{ji}^{[s]} \cdot y_i^{[s-1]} \quad (2.3)$$

gdje su:

$S_j^{[s]}$ - ulaz u neuron j u sloju s ,

$w_{ji}^{[s]}$ - je težina veze od neurona j prema ulazu i u sloju $s-1$,

$y_i^{[s-1]}$ - ulaz i sloja $s-1$.

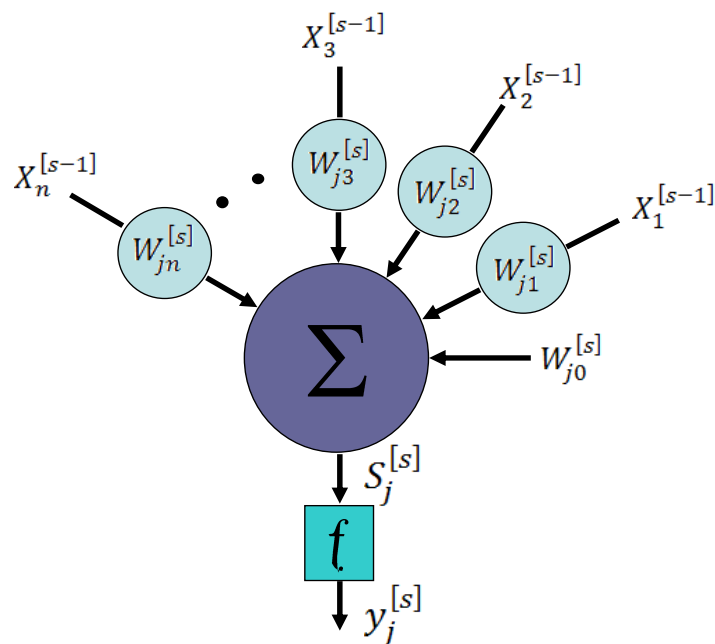
Neuroni u skrivenom sloju prenose svoje ulaze prema formuli:

$$y_j^{[s]} = f \left(\sum_i w_{ji}^{[s]} \cdot y_i^{[s-1]} \right) = f \left(S_j^{[s]} \right) \quad (2.4)$$

gdje su:

$y_j^{[s]}$ - izlaz neurona j u sloj s ,

f - je prijenosna funkcija (tangens - hiperbolna ili neka druga).



Slika 2.7. Neuron u neuronskoj mreži.

Ako postoji više od jednog skrivenog sloja, navedena prijenosna funkcija (2.4) upotrebljava se kroz sve skrivene slojeve sve dok se ne dostigne izlazni sloj. Uvođenjem skrivenog sloja u neuronsku mrežu postignuta je nelinearnost u mreži, i dokazano je da takve mreže mogu aproksimirati bilo koju kontinuiranu funkciju.

2.1.2.1. Izrada neuronske mreže

Proces izrade neuronske mreže sastoji se od sljedećih faza:

- zadavanje modela (izbor ulaznih i izlaznih varijabli, priprema ulaznih podataka),
- izbor najprikladnijeg algoritma (npr. "širenje unatrag"),
- raspoređivanje neurona u slojeve (izbor broja skrivenih slojeva, te broja neurona u svakom skrivenom sloju),
- određivanje tipa veze među neuronima, te prijenosnih funkcija između slojeva,
- izbor pravila učenja, te parametara koji utječu na brzinu i kvalitetu učenja,
- izbor mjerila za ocjenjivanje mreže (npr. RMS greška),
- provođenje postupka učenja,
- provjera mreže.

2.1.2.2. Mreža "širenje unatrag"

Razvijeni su brojni algoritmi za neuronske mreže, no najveću komercijalnu upotrebu do danas ima mreža "širenje unatrag" (*back propagation*). Algoritam mreže "širenje unatrag" bio je presudan za široku komercijalnu upotrebu neuronskih mreža u različitim područjima. U osnovi, ova mreža širi ulaz kroz mrežu od ulaznog do izlaznog sloja, a zatim određuje grešku i tu grešku širi unazad sve do ulaznog sloja ugrađujući je u formulu za učenje. Strukturu mreže čine ulazni

sloj, izlazni sloj i najmanje jedan skriveni sloj, s vezom unaprijed. Tok podataka kroz mrežu može se ukratko opisati u nekoliko koraka:

- od ulaznog sloja prema skrivenom sloju - ulazni sloj učitava podatke iz ulaznog vektora, i šalje ih u prvi skriveni sloj,
- u skrivenom sloju - neuroni u skrivenom sloju primaju vagani ulaz i prenose ga u naredni skriveni ili u izlazni sloj koristeći prijenosnu funkciju,
- kako informacije putuju kroz mrežu, računaju se sumirani ulazi i izlazi za svaki neuron,
- u izlaznom sloju - za svaki neuron, računa se lokalna greška koja se upotrebljava u određivanju povećanja ili smanjenja težina,
- širenje unazad od izlaznog sloja do skrivenih slojeva - lokalna greška, te povećanje ili smanjenje težina računa se za svaki sloj unazad, počevši od sloja neposredno ispod izlaznog sve do prvog skrivenog sloja, i težine se podešavaju.

Mreža "širenje unatrag" je univerzalni algoritam primjenjiv na probleme predviđanja, kod kojih je potrebno predvidjeti vrijednost jedne ili više izlaznih varijabli. Moguće ga je koristiti i za probleme klasifikacije, kod kojih se ulazni vektor raspoređuje u jednu od klasa zadanih na izlazu, npr. određivanje da li neka dionica pripada u grupu rastućih ili padajućih dionica u nekom razdoblju.

2.1.2.3. Učenje neuronske mreže

Učenje je proces mijenjanja težina u mreži, a odvija se kao odgovor na podatke izvana koji su predstavljeni ulaznom sloju i u nekim mrežama izlaznom sloju. Podaci koji se predstavljaju izlaznom sloju su željene vrijednosti izlaznih varijabli. Ukoliko su one poznate, radi se o tzv. nadgledanom učenju. Jedan od primjera nadgledanog algoritma učenja je mreža "širenje unatrag" koja se intenzivno koristi za različite klase problema.

Prije samog učenja potrebno je prikupiti podatke iz prošlosti na kojima će se primijeniti mreža. Prikupljene podatke treba podijeliti u dvije skupine (prva skupina su podaci za treniranje i druga skupina su podaci za provjeru). Ukoliko se za vrijeme učenja planiraju koristiti tehnike optimiranja, za određivanje duljine učenja i strukture mreže potrebno je podatke podijeliti na tri skupine: prva skupina su podaci za treniranje, druga skupina su podaci za provjeru i treća skupina su podaci za konačnu ocjenu. Pravila za ovu podjelu nema, osim što se preporuča najveći dio podataka ostaviti za treniranje mreže, a manji dio podataka za provjeru i ocjenu (npr. 70% za treniranje, 10% za provjeru i 20% za ocjenu).

Nakon što je određen model, pripremljeni ulazni podaci, izabran algoritam neuronske mreže, određeno pravilo učenja i potrebne funkcije, mrežu treba učiti ili trenirati na pripremljenim podacima iz prošlosti. Na taj način mreža prepoznaje vezu između podataka i u mogućnosti je da na osnovu ulaznih vrijednosti predviđa izlaze. Sama faza učenja je proces podešavanja težina u mreži i odvija se u više iteracija ili prolaza kroz mrežu. Jedna iteracija predstavlja učitavanje jednog promatranja iz podataka (jednog ulaznog i izlaznog vektora), ali se zbog povećanja brzine učenja ponekad preporuča učitati više promatranja odjednom, pri čemu se broj promatranja koji se obrađuju u jednoj iteraciji zove epoha. U svakoj iteraciji

računaju se nove težine, a kod nadgledanih algoritama i nova greška. Obično se mreža trenira u nekoliko tisuća iteracija.

Najvažnije pitanje u ovoj fazi je koliko dugo trenirati mrežu kako bi ona dala što bolji rezultat, odnosno najmanju grešku. Dužina treniranja nije unaprijed određena, te odgovor na ovo pitanje treba potražiti vlastitim eksperimentiranjem ili primjenom tehnika optimiranja kao što je npr. tehnika unakrsne provjere. Ova se tehnika može opisati u nekoliko koraka:

- mreža se najprije trenira na određenom broju iteracija (npr. 10000),
- tako naučena mreža se provjeriti na uzorku za provjeru i pohrani se dobiveni rezultat i mreža.
- mreža se zatim nastavlja trenirati na još tolikom broju iteracija (npr. još 10000), i dobiveni rezultat se uspoređuje s prethodno pohranjenim. Ukoliko je u ponovnom učenju dobiven bolji rezultat, pohranjuje se novi rezultat i nova mreža,
- postupak se ponavlja sve dok se rezultat prestane poboljšavati, a najbolja pohranjena mreža ulazi u daljnji postupak ocjenjivanja.

Matematički izrazi koji opisuju učenje mreže, odnosno jednadžbe koje određuju povratni postupak vraćanja informacije unutar mreže unazad počevši od izlaznog sloja su:

$$w_{ij} = w_{ij}^* + LR \cdot e_j \cdot X_i \quad (2.5)$$

$$e_j = Y_j \cdot (1 - Y_j) \cdot (d_j - Y_j) \quad (2.6)$$

gdje su:

- i - broj ulaza j-tog neurona,
- j - broj neurona
- w_{ij} - težina
- w_{ij}^* - korekcija težine određena u postupku učenja
- LR - iznos učenja (learning rate)
- e_j - iznos greške
- X_j - vrijednost i-tog ulaza
- Y_j - stvarni izlaz
- d_j - željeni izlaz

2.1.2.4. Provjera neuronske mreže

Provjera mreže je faza koja je odlučujuća kod ocjenjivanja mreže. Težine su fiksne i ne mogu se mijenjati u ovoj fazi. Takvoj mreži se predstavljaju novi ulazni vektori koji nisu sudjelovali u procesu učenja, a od mreže se očekuje da za predstavljen novi ulazni vektor proizvede izlaz. Ocjenjivanje mreže obavlja se izračunavanjem greške, na način da se izlaz mreže uspoređuje sa stvarnim izlazima.

Dobivena greška mreže na uzorku za ocjenjivanje je rezultat kojim se tumači uspješnost ili neuspješnost neuronske mreže i njezina korisnost u primjeni za predviđanje na budućim podacima. Najčešća greška koja se računa kod neuronskih mreža je srednja kvadratna greška RMS_E (*Root Mean Square error*), prema formuli (4.7).

$$RMS_E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (r_i - s_i)^2} \quad (2.7)$$

gdje su:

r_i - računati izlaz dobiven iz mreže za slučaj i (ulazni vektor),

s_i - stvarni (željeni) izlaz za slučaj i (ulazni vektor),

n - broj slučajeva u uzorku.

Greška se uprosječuje prema broju izlaznih varijabli i u odnosu na broj slučajeva u uzorku na kojem se računa. Kod problema klasifikacije se kao mjerilo ocjenjivanja mreže u većini istraživanja koristi stopa klasifikacije. Stopa klasifikacije prikazuje postotak ili udio ispravno klasificiranih promatranja.

2.1.2.5. Prednosti neuronskog računarstva

Razlike neuronskih mreža i tradicionalnog računarstva se mogu sažeti u nekoliko točaka:

- obrada kod tradicionalnog računarstva (uključujući i ekspertne sustave) je sekvencijalna, uz pomoć pravila i logike, dok je kod neuronskih mreža paralelna, uz pomoć prepoznavanja uzoraka,
- neuronske mreže imaju distribuiranu asocijativnu memoriju. Njihova memorija su težine među neuronima, a vrijednost težina predstavlja trenutno stanje znanja u mreži,
- neuronske mreže su sposobne prepoznati uzorke u većem stupnju od tradicionalnih statističkih sustava i ekspertnih sustava,
- neuronske mreže su u mogućnosti sintetizirati složene kontinuirane funkcije.

2.1.2.6. Primjena neuronskih mreža

Neuronske mreže uspješno su primijenjene u mnogim područjima, npr. zdravstvu, elektrotehnici, vojsci, poslovanju, obrazovanju i drugim. Neki od primjera su:

- otkrivanje eksploziva u prtljazi na aerodromima,
- identifikacija tipova oblaka na temelju satelitskih snimki,
- obrada video signala,
- dijagnostika problema rada avionskog motora,
- prepoznavanje govora s pomoću integriranih neuronskih mreža,
- prepoznavanje uzoraka kod sortiranje pošte prema poštanskim brojevima,

- pretvaranje teksta u govor,
- primjene u financijama (predviđanja na tržištima vrijednosnica, izbor portfelja, trgovanje na burzama, odluke o izdavanju kredita, procjene rizika),
- primjene u marketingu (segmentiranje kupaca, predviđanje izbora kupaca).

Zaključuje se da je na području istraživanja, usavršavanja i primjene umjetnih neuronskih mreža napredak nezaustavljiv. Iako se sve više primjenjuju u svakodnevnom životu, konkretne primjene premalo su predstavljene javnosti. Također, treba naglasiti da će na putu razvoja umjetne inteligencije biti još dosta poteškoća. Naime, najveći dio misaonih procesa mozga čovjeka obavijen je i dalje velom tajni, što je između ostalog, realni ograničavajući faktor za razvoj umjetnih neuronskih mreža i umjetne inteligencije uopće.

2.1.2.7. Primjena neuronske mreže u detekciji kvara na rotacijskom stroju

Iz do sad napisanog o neuronskim mrežama može se zaključiti da se iste mogu uspješno koristiti u detekciji značajki u nekom zapisu. Za potvrdu prikupljeno je nekoliko primjera na istu temu, u kojima je uspješno obavljena zadaća detekcije, a neki od njih su:

- klasifikacija EEG signala (prepoznavanje epilepsije u EEG signalu),
- prepoznavanja određenih slova u zvučnom zapisu,
- prepoznavanje vrste glazbe na temelju sadržaja,
- detekcija QRS kompleksa u valnom obliku EKG signala.

Prva faza u izradi neuronske mreže je izrada modela i priprema ulaznih podataka. Dostupan je velik broj modela koji ovisno o primjeni i zahtjevima, kao što su točnost, brzina, itd. daju bolje odnosno lošije rezultate. Konačan model, kao i tip učenja neuronske mreže, odabrat će se na način da će se mreža provjeriti pomoću podataka mjerenja, a onaj model koji bude imao najbolje rezultate bit će odabran. Ulazni podatci dobivaju se iz senzora koji su ugrađeni na stroj koji promatramo (npr. signal magnetske indukcije u zračnom rasporu).

Na ulaz neuronske mreže ne može se dovesti sirovi (neobrađeni) signal sa senzora i očekivati da mreža sama na osnovu tih podataka detektira nastali "kvar". To bi bilo odlično, međutim zasada još uvijek nemoguće. Javlja se dva bitna problema:

- u vremenskom području promatran signal senzora nije ništa više nego promjena amplituda u vremenu i samim time ne govori ništa. Potrebne su vremenski lokalizirane značajke i spektralne značajke da bi se opisao neki signal odnosno dio signala koji predstavlja "kvar",
- ekstrakcijom značajki iz signala, i njihovim spajanjem u ulazni vektor znatno smanjujemo vrijeme računanja potrebno da bi neuronska mreža dala odgovor, tj. dovođenjem na ulaz vektora značajki umjesto samog signala smanjujemo dimenzionalnost ulaza.

To bi značilo da se umjesto signala senzora koji može imati desetke tisuća podataka potrebnih za opis nekog događaja, koriste samo značajke tog događaja,

odnosno N -dimenzionalni originalni prostor značajki se transformira u novi M -dimenzionalni prostor značajki, pomoću funkcije ekstrakcije f .

$$f: R^N \rightarrow R^M, \text{ uz } M \ll N \quad (2.8)$$

Postupak ekstrakcije značajki iz mjernog signala od najveće su važnosti, jer uspjeh neuronske mreže u detekciji upravo ovisi o ovom zadatku. Koje značajke će se koristiti i na koji način će se obaviti klasifikacija podataka odrediti će se nakon eksperimentalnog dijela rada koji će pružiti potrebne ulazne podatke.

2.1.3. Bayesove mreže

Bayesove mreže su alat za predstavljanje nesavršenog znanja, tj. znanja koje sadrži nepouzdanost (*engl. uncertainty*). Svaki sustav koji je moguće predstaviti kao niz događaja ili činjenica između kojih postoje uzročno posljedične veze moguće je modelirati Bayesovim mrežama. To omogućuje ovim mrežama primjenjivost na velik broj sustava iz različitih područja djelovanja. Ispravno određivanje međudjelovanja u sustavu predstavlja problem kod određivanja ovisnosti u sustavu, a moguće je eventualno kod jednostavnijih tehničkih sustava kao što su automati. Za takve sustave moguće je izgraditi opis zasnovan na pravilima. Daleko češći slučaj je da međudjelovanja u sustavu nije moguće točno odrediti i to iz dva razloga:

- djelovanje mnogih sustava može biti stohastičko, a time točno određivanje međudjelovanja u sustavu nije moguće (npr. kod nasumičnog bacanja igračke kocke nikad se ne može sa sigurnošću tvrditi koji broj će se pojaviti),
- poznavanje sustava može biti nedostavno za točno određivanje međudjelovanja u sustavu.

Ukoliko točno određivanje ovisnosti u sustavu nema uspjeha, često je moguće odrediti uzročno-posljedične veze u sustavu tj. odrediti koji događaji utječu na druge, a koji su međusobno neovisni. Ako se mogu odrediti uzročno posljedične veze u sustavu, tada se nesavršenost našeg znanja o sustavu, kao i njegova stohastička priroda, može modelirati primjenom teorije vjerojatnosti.

Kako Bayesova mreža funkcionira pokazuje slijedeći primjer iz medicine [3]. Opće je poznato da je kašalj mogući simptom upale pluća, te se može odrediti uzročno posljedična veza od upale pluća kao uzroka prema kašlju kao posljedici. Pri tome veza upale pluća i kašlja neće biti određena kao: ako "*upala pluća*" onda "*kašalj*", već će njihova veza biti određena kao: ako "*upala pluća*" onda "*kašalj*" s vjerojatnošću p . Iz tog se može zaključiti da Bayesove mreže modeliraju sustav kao skup događaja s pripadnom vjerojatnošću njihovih interakcija.

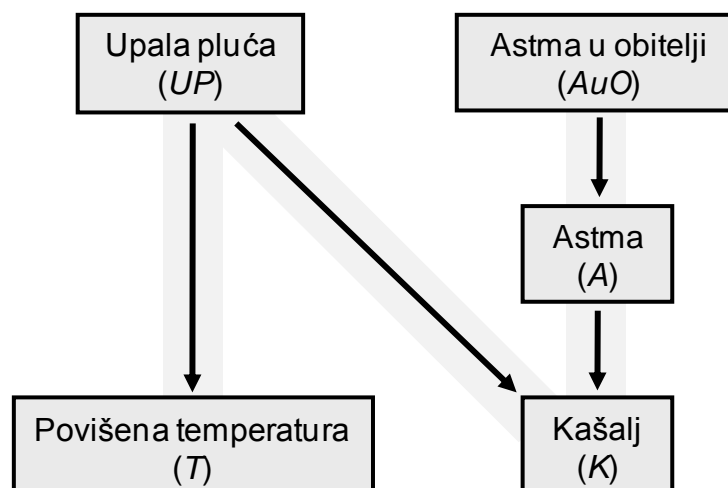
2.1.3.1. Matematički model na kojem se temelje Bayesove mreže

Razmotri li se mreža od N događaja (čvorova) od kojih svaki ima M diskretnih stanja. Pri tome čvorovi u mreži ne moraju imati isti broj diskretnih stanja, a također u mreži mogu postojati i čvorovi s kontinuiranim stanjima. Za potpuni opis sustava koji se sastoji od čvorova s više stanja potrebno je odrediti vezanu razdiobu

vjerojatnosti tj. vjerojatnost pojave svake kombinacije stanja. Za razmatrani sustav to bi značilo odrediti M^N vjerojatnosti. Zbog jednostavnosti, u ovim uvodnim razmatranjima ograničiti će se na slučaj mreže s čvorovima koji imaju isti broj diskretnih stanja.

Bayesove mreže najčešće se koriste za modeliranje sustava na osnovi znanja koje o tom sustavu posjeduju stručnjaci iz tog područja. Primjer je izrada ekspertnog sustava za pomoć u dijagnostici bolesti korištenjem znanja i iskustva više liječnika. Za takav slučaj odrediti M^N vjerojatnosti za imalo veću mrežu bilo bi prezahtjevan zadatak za stručnjake. Osim toga nije za očekivati da će ijedan stručnjak, bez obzira na znanje o sustavu, biti u stanju odrediti točnu vjerojatnost svih mogućih kombinacija stanja sustava. Tako na primjer teško je da će bilo koji liječnik, bez obzira na iskustvo, biti u stanju dati odgovor na pitanje: "Kolika je vjerojatnost da pacijent boluje od upale pluća ako ima povišenu temperaturu, ne kašlje i poznato je da mu otac boluje od astme?". Bayesove mreže ovom problemu pristupaju na drugi način.

Problem se raščlanjuje na čvorove koje se ovisno o njihovoj međusobnoj vezi može smatrati uzrocima i posljedicama. U prethodnom primjeru "upala pluća" i "astma u obitelji" su uzroci dok bi "povišena temperatura" i "kašalj" bile posljedice. Također javlja se novi čvor "astma" koji je istovremeno i uzrok i posljedica (posljedica "astme u obitelji" te uzrok "kašlja"). Svaki čvor ima dva stanja T i F tj. pojava koju čvor opisuje može biti prisutna ili ne. Nakon određivanja čvorova potrebno je odrediti njihove uzročno posljedične veze. Poznato je naime da upala pluća može uzrokovati povišenu temperature i kašalj, a da je astma nasljedna bolest koja uzrokuje kašalj, ali ne i povišenu temperaturu. Odrediti opisane uzročno posljedične veze ne bi trebao biti problem niti za laika, a pogotovo ne za liječnika. Shodno tome, promatrani problem mogao bi se predstaviti Bayesovom mrežom koju prikazuje slika 2.8 na kojoj su čvorovi predstavljeni pravokutnicima, a uzročno posljedične veze strelicama od uzroka prema posljedici.



Slika 2.8. Primjer Bayesove mreže za pomoć kod dijagnostike bolesti.

Čvorovi uzroci često se nazivaju roditelji, a čvorovi posljedice njihova djeca. Da bi mreža prikazana na slici 2.8 bila potpuna, potrebno je odrediti vjerojatnosti stanja čvorova. Moguće je uočiti da čvorovi UP i AuO nemaju roditelja, stoga

vjerojatnosti njihovih stanja ne ovisi o stanjima niti jednog drugog čvora u mreži. Vjerojatnost da pacijentu netko u obitelji boluje od astme može se, u nedostatku drugih informacija, odrediti na primjer na osnovi udjela astmatičara u ukupnom stanovništvu. Vjerojatnost upale pluća u startu određena je s 50% čime izražavamo neznanje o stvarnom stanju tog čvora. Ovakav pristup tretiranja neznanja osuđivan je od nekih autora i doveo je do pojave novih metoda za predstavljanje nesavršenog znanja.

Opisane vjerojatnosti označavaju vjerojatnost stanja promatranih čvorova bez uvida u bilo kakve dokaze, odnosno u danom primjeru simptome. Zbog toga se navedene vjerojatnosti nazivaju apriorne vjerojatnosti. Osim navedenih vjerojatnosti, potrebno je odrediti vjerojatnost pojave visoke temperature u slučaju upale pluća te u slučaju odsustva upale pluća (povišena temperatura iz nekog drugog razloga). Također je potrebno odrediti pojavu kašlja u slučaju upale pluća i astme i to razmatrajući sve kombinacije ovih dvaju uzroka. Ove vjerojatnosti mogao bi odrediti liječnik na temelju iskustva ili statističkih podataka. Osim toga potrebno je odrediti vjerojatnost nasljeđivanja astme u obitelji odnosno vjerojatnost da pacijent boluje od astme ako mu netko u obitelji boluje kao i u slučaju da nitko u obitelji ne boluje od astme, što je također moguće napraviti na temelju statističkih podataka. Opisane vjerojatnosti nazivaju se uvjetnim vjerojatnostima i predstavljaju vjerojatnost pojave određenog događaja ako je poznato da se dogodio jedan ili više događaja koji ga uvjetuju. Ako promatramo samo dva događaja A i B uvjetna vjerojatnost događaja A uz poznat događaj B određuje se kao:

$$P(A | B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (2.9)$$

gdje je $P(A \cap B)$ vjerojatnost događanja događaja A i događaja B , a $P(B)$ vjerojatnost događanja događaja B .

Stoga, za potpun opis mreže prikazane na slici 2.8. potrebno je odrediti sljedeće vjerojatnosti:

$$P(UP), P(AoU), P(T | UP), P(T | \neg UP), P(T | AoU), P(T | \neg AoU), \\ P(K | UP, A), P(K | UP, \neg A), P(K | \neg UP, A), P(K | \neg UP, \neg A) \quad (2.10)$$

Kod određivanja Bayesove mreže suma vjerojatnosti svih stanja nekog čvora mora biti 1, jer se čvor mora nalaziti u nekom stanju. Stoga u slučaju određivanja vjerojatnost za na primjer $P(UP)$ automatski je određena i vjerojatnost za $P(\neg UP) = 1 - P(UP)$. Dakle, Bayesova mreža prikazana na slici 2.8 potpuno je određena sa 10 vjerojatnosti (2.10).

Kao što je prethodno rečeno, potpuni opis razdiobe vjerojatnost za mrežu prikazanu na slici 2.8 zahtijevao bi određivanje vjerojatnosti za $2^5 = 32$ kombinacija danih čvorova. Zapravo trebalo bi odrediti $2^5 - 1 = 31$ vjerojatnosti jer i ovdje vrijedi da suma vjerojatnosti svih stanja mora biti 1. Dakle primjenom Bayesove mreže za opis promatranog sustava potrebno je odrediti 21 vjerojatnost manje. Pretpostavka o neovisnosti čvorova omogućuje Bayesovim mrežama uštedu kod određivanja razdiobe vjerojatnosti. Ako se vratimo na analizirani primjer i razmotrimo utjecaj čvora "astma u obitelji" na pojavu "kašlja", očito je da astma u obitelji utječe na pojavu kašlja jer povećava vjerojatnost pojave astme. Isto tako razmotrimo slučaj

da je pacijent podvrgnut prethodnim pretragama i da je sa sigurnošću utvrđeno da ima astmu. Tada prisutnost astme u obitelji ne utječe na vjerojatnost pojave kašlja. Astma je ta koja izravno utječe na kašalj i kad je jednom utvrđeno stanje tog čvora, njegovi uzroci više ne igraju ulogu. Ovo svojstvo omogućuje nam da kod stvaranja mreže odredimo samo vjerojatnosti stanja čvora uz sve kombinacije stanja njegovih roditelja što se često naziva lokalna vezana vjerojatnost.

Koristeći mrežu prikazanu na slici 2.8 i određene vjerojatnosti moguće je izračunati vjerojatnost bilo koje kombinacije stanja čvorova. Proračun će se pri tome bitno razlikovati ovisno o međusobnom položaju čvorova tj. ovisno o uzročno posljedičnim vezama između čvorova.

Pogledajmo za početak kolika je vjerojatnost pojave kašlja ako je poznato da u pacijentovoj obitelji netko boluje od astme. Drugim riječima traži se vjerojatnost $P(K | AuO)$ koju nismo specificirali kod stvaranja mreže. Vjerojatnost $P(K | AuO)$ izračunat će se kao zbroj vjerojatnosti svih kombinacija koje rezultiraju pojavom "kašlja" uzimajući pri tome da je vjerojatnost "astma u obitelji" jednaka 1.

$$\begin{aligned} P(K | AuO) &= P(K | UP, A) \cdot P(UP) \cdot P(A | AuO) \\ &= P(K | \neg UP, A) \cdot P(\neg UP) \cdot P(A | AuO) \\ &= P(K | UP, \neg A) \cdot P(UP) \cdot P(\neg A | AuO) \\ &= P(K | \neg UP, \neg A) \cdot P(\neg UP) \cdot P(\neg A | AuO) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Pogledajmo drugi primjer. Zanima nas vjerojatnost da pacijent ima upalu pluća ako kašlje, a nema povišenu temperaturu. Rješavanje ovog problema traži nešto drugačiji pristup nego kod računanja vjerojatnosti (2.11). Razlog tomu je što nas ovdje zanima vjerojatnost uzroka kada je poznata posljedica. U ovakvom pristupu čvorovi za koje se proračunava vjerojatnost često se nazivaju hipoteze, a čvorovi za koje je poznata vjerojatnost dokazi (*engl. evidence*). Za proračun vjerojatnosti u ovom slučaju moramo se poslužiti Bayesovim pravilom. Bayesovo pravilo proizlazi iz definicije uvjetne vjerojatnosti, a izraza (2.9) proizlazi:

$$P(A \cap B) = P(B) \cdot P(A | B) \quad (2.12)$$

za vjerojatnost vrijedi zakon komutacije, odnosno:

$$P(A \cap B) = P(B \cap A) = P(A) \cdot P(B | A) \quad (2.13)$$

iz izraza (2.12) i (2.13) proizlazi:

$$P(A | B) = \frac{P(A) \cdot P(B | A)}{P(B)} \quad (2.14)$$

Izraz (2.14) predstavlja Bayesovu formulu po kojoj su Bayesove mreže i dobile naziv.

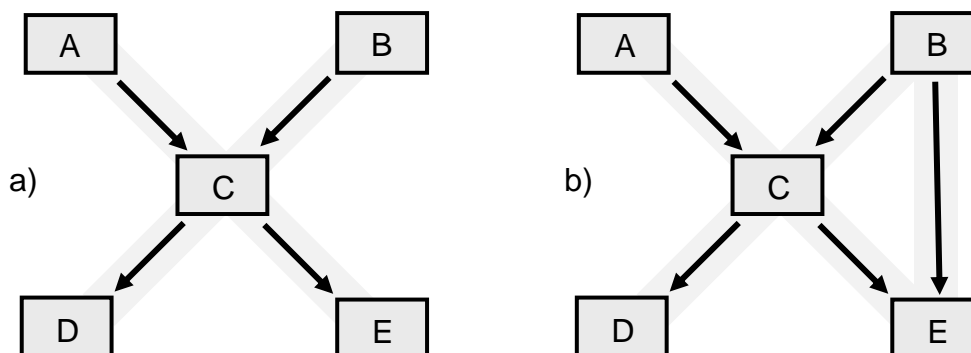
Najčešći primjer korištenja Bayesovih mreža je provjera vjerojatnosti hipoteze uz prisustvo dokaza. U primjeru prikazanom na slici 2.8 očito je da utvrđena pojava kašlja povećava vjerojatnost upale pluća i astme. Ako pacijent k tome ima i povišenu temperaturu jasno je da se povećava vjerojatnost da boluje od upale

pluća. Ova vjerojatnost naziva se aposteriorna vjerojatnost jer predstavlja vjerojatnost uz određena saznanja o sustavu. Pri tome vjerojatnost stanja čvorova u mreži se ne mijenja pri pojavljivanju pojedinih dokaza. Mijenja se njihova aposteriorna vjerojatnost odnosno uvjetna vjerojatnost uz prisustvo dokaza. Ova vjerojatnost ponekad se naziva vjerovanje čvorova (*engl. belief*) pa se u engleskoj literaturi Bayesove mreže često nazivaju i *Belief networks*.

Također je zanimljivo pogledati ovisnost čvorova "upala pluća" i "astma". Intuitivno je da su ova dva čvorova neovisna. No kod pacijenta može biti utvrđen kašalj i visoka temperatura. U tom slučaju porasti će vjerojatnost upale pluća, te vjerojatnost da upravo upala pluća uzrokuje kašalj čime će se smanjiti vjerojatnost astme. Dakle dva čvorova koja su apriori neovisna mogu uz prisustvo dokaza postati međusobno ovisni.

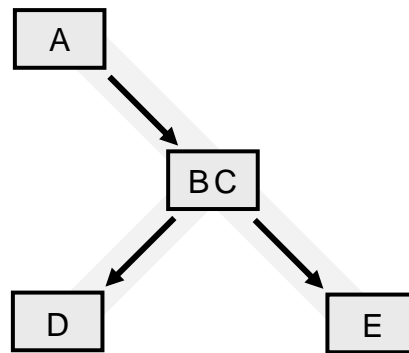
Kompleksnost izračuna vjerojatnosti hipoteze uz prisustvo dokaza korištenjem Bayesove formule dominantno je određeno topologijom mreže. Ova tvrdnja ilustrirat će se na dva primjera jednostavnih mreža prikazanih na slici 2.9. Kod obje mreže traži se vjerojatnost događaja C ako se dogodio događaj E .

Mreža prikazana na slici 2.9 – a) je jednostruko povezana. Jednostruka povezanost mreže znači da postoji samo jedan put između bilo koja dva čvorova. Ovo svojstvo omogućuje transformaciju mreže na jednostavniji oblik koji će odvojeno koristiti vjerojatnost pojavljivanja događaja C uz prisustvo događaja koji ga uvjetuju, te odvojeno uz prisustvo događaja koje on uvjetuje.



Slika 2.9. Primjeri mreža za ilustraciju proračuna aposteriorne vjerojatnosti

Mreža prikazana na slici 2.9 - b) nije jednostruko povezana tj. postoji više različitih putova između dva čvorova. Kao posljedica, pojavljivanje određenog događaja na više načina će utjecati na vjerojatnost drugog događaja. Konkretno, pojavljivanje događaja E izravno mijenja vjerojatnost događaja C , jer je E potomak od C . Isto tako mijenja se i vjerojatnost događaja B , koji je roditelj čvora E , ali i C , pa i to utječe na promjenu vjerojatnosti čvora C . Opisana situacija predstavlja najveći problem za proračun Bayesovih mreža. Rješenje ovog problema svodi se na transformaciju mreže na jednostruko povezanu te na primjenu algoritma za rješavanje jednostruko povezanih mreža. Transformirana mreža prikazana je na slici 2.10.



Slika 2.10. Transformacija višestruko povezane mreže na jednostruko povezanu

Određivanje međurazdiobe vjerojatnosti (*engl. Cross distribution*) čvorova *B* i *C*, pri transformaciji stvara najveću poteškoću. Algoritmi za učinkovitu transformaciju višestruko povezane mreže na jednostruko povezanu nisu do kraja poznati i komercijalni proizvođači inteligentnih sustava (npr. Hugin) ih štite. Postoji niz pristupa koji omogućuju približno izračunavanje Bayesovih mreža, jedan od njih jest slučajno uzorkovanje.

2.1.3.2. Mreže za odlučivanje

Poseban oblik Bayesovih mreža su mreže za odlučivanje (*engl. Influence diagrams*). Mreže za odlučivanje dobivaju se proširenjem Bayesovih mreža čvorovima odluke. Osnovne Bayesove mreže opisuju sustav kao skup više međudjelujućih stohastičkih događaja određenih svojim vjerojatnostima. Mreže za odlučivanje proširuju ovakav opis sustava uvođenjem čvorova koji predstavljaju naše intervencije u sustav.

Svaka intervencija uvjetovat će promjenu svojstava sustava tj. promjenu uvjetnih vjerojatnosti pojedinih događaja. Dodatni čvorovi koji se koriste za izgradnju mreža za odlučivanje nazivaju se čvorovima odluke pri čemu svaka odluka sadrži više mogućih stanja. U najjednostavnijem primjeru stanja mogu biti T i F tj. odluka se može donijeti ili ne donijeti, ali odluka može sadržavati i više stanja. Za razliku od čvorova događaja u Bayesovim mrežama, čvorovi odluke nisu određeni vjerojatnostima svojih stanja.

Kako odluke predstavljaju vanjsku intervenciju u sustav, razumno je pretpostaviti da nam sve odluke koje razmatramo stoje na raspolaganju s istom vjerojatnošću. Kada se odlučimo za jednu odluku, odnosno za jedno stanje neke odluke, vjerojatnost tog stanja postaje 1, a vjerojatnost ostalih 0. Mehanizam Bayesove mreže u ovom slučaju upravo i koristimo da bismo odredili koja nam je odluka najpovoljnija. Za kvantificiranje povoljnosti odluke ili kombinacije odluka potrebno je uvesti kriterij povoljnosti pojedine odluke. Kriterij povoljnosti (*engl. Utility*) određujemo kao numeričku težinu pojedinog stanja odnosno kombinacije stanja čvorova u mreži. Tako se u primjeru prikazanom na slici 2.9 može odrediti kriterij povoljnosti na način da pojavljivanju događaja *D* pridamo vrijednost 2000, a pojavljivanju događaja *E* 3000. U ovom slučaju očito bi se preferirale kombinacije odluka koje će povećati vjerojatnost pojavljivanja događaja *D* i smanjiti vjerojatnost pojavljivanja događaja *E*. Naravno, kriterij povoljnosti može biti izražen i složenijom

funkcijom stanja čvorova. Osim stanja čvorova u kriterij povoljnosti moguće je uključiti i cijenu pojedine odluke. Npr. ako razmatramo odluku o poduzimanju remonta postrojenja očito je da će njeno donošenje unijeti određene troškove dok ne donošenje neće (ali pretpostavljeno neće ni pridonijeti povećanju vjerojatnosti normalnog rada postrojenja). Kod proračuna mreže za odlučivanje razmatraju se sve kombinacije stanja svih određenih odluka te se računa vjerojatnost pojedinih događaja uz ovakve kombinacije stanja odluka. Nakon toga uzevši određeni izraz za kriterij povoljnosti računa se njegova očekivana vrijednost. U ovom smislu kao najpovoljnija kombinacija stanja odluka uzima se ona pri kojoj je očekivana vrijednost kriterija povoljnosti najveća.

Očigledno je za učinkovitu primjenu mreža za odlučivanje izrazito važno na pravi način odrediti kriterij povoljnosti. Za složeni sustav s puno međudjelovanja i mogućih akcija koje nam stoje na raspolaganju pravi izbor akcija vrlo je složen. S druge strane često je moguće u dosta dobroj mjeri modelirati utjecaj pojedinih akcija na pojedine dijelove (čvorove) sustava. Nakon toga mehanizam Bayesove mreže učinkovito može proračunati vladanje čitavog sustava uz ovakvu odluku. Stoga su mreže za odlučivanje vrlo učinkovit alat za pomoć pri donošenju odluka. U sljedećem poglavlju opisana je primjena mreža u detekciji kvarova na rotacijskim strojevima.

2.1.3.3. Primjena Bayesovih mreža

Bayesove se mreže mogu promatrati u svjetlu inteligentnih sustava, i to onih sustava koji su zasnovani na probabilističkoj teoriji. Ono što je svojstveno svim modelima zasnovanim na Bayesovim mrežama, jest mogućnost procjene vjerojatnosti čak i onda kada neke informacije nedostaju, primjerice one o inicijatoru kvara. Što je više informacija, to je procjena pouzdanija, no u slučaju nepostojanja određene informacije, model je ipak sposoban predviđati vjerojatnosti. Bayesove mreže uspješno su primijenjene u:

- medicini (dijagnostika bolesti kao što su bolesti mišića i živaca, respiratorne bolesti i slično),
- razvoju softvera (traženje pogrešaka u programu, programi za dijagnostiku problema kod eksternih jedinica kao što su pisači, programiranje pomoći u programima),
- proizvodnji (praćenje proizvodnih procesa, te sugestije za optimizaciju i izbjegavanje kvarova u sustavima),
- ekonomiji (procjena kreditnih rizika, segmentacija tržišta, analiza rizika općenito, ponašanje klijenata),
- vojnom sektoru (planiranje operacija, planiranje logističkih aktivnosti),
- poljoprivredi i stočarstvu (selekcija i uzgoj bilja i životinja, planiranje bakteriološke zaštite),
- farmaciji (istraživanje lijekova, istraživanje pojedinih sastojaka i njihovih kombinacija kod otkrivanja novih vrsta lijekova za određene tipove bolesti).

U poglavlju 9 ovog rada prikazati će se primjena Bayesove mreže u detekciji kvarova na sinkronom stroju.

2.1.4. Usporedba neuronske mreže, Bayesove mreže i ekspertnog sustava

Prikazana su tri koncepta inteligentnih sustava koja se mogu primijeniti u detekciji kvarova na rotacijskim sustavima (ekspertni sustav, neuronska mreža i Bayesova mreža). Usporedbom ova tri različita koncepta može se zaključiti da svaki od navedenih može dati prihvatljive i zadovoljavajuće rezultate, međutim među njima postoje određene razlike.

Ulazne podatke potrebno je prilagoditi, odnosno za svaki od sustava potrebno je obraditi sirove ulazne podatke i dobiti karakteristične značajke koje se koriste kao uzorak pretraživanja. Stoga, faza pripreme podataka tj. klasifikacija značajki je slična za sva tri tipa sustava. Što se kvalitetnije provedu klasifikacije značajki promatranog događaja, to će i sustav dati bolje rezultate u prepoznavanju istog. Iako su neuronske mreže u mogućnosti detektirati i same krivulje, u slučaju kad se radi o vrlo složenim funkcijskim ovisnostima (npr. magnetsko polje u zračnom rasporu generatora), još uvijek nisu u mogućnosti dati zadovoljavajuće rezultate prepoznavanja, odnosno još uvijek nemaju dovoljnu procesorsku moć za rad s tolikom količinom podataka. Također treba imati na umu da bi ovaj sustav trebao biti nadogradnja postojećeg monitoring sustava razvijenog u tvrtci KONČAR - Institut za elektrotehniku d.d. Stoga bi trebao komunicirati s istim na način da monitoring sustav vrši predviđene obrade podataka mjernih senzora i prosljeđuje ih u inteligentni sustav, koji će na osnovu tih podataka donijeti odluku o prisutnosti kvara.

Bitna razlika ovih sustava je način na koji se vrši detekcija određene pojave. Kod ekspertnog sustava obrada podataka je sekvencijalna, odnosno određeni podatak se slijedno procesira kroz određene postupke i pravila po principu: ako → test → onda. Kod neuronskih mreža, procesiranje podataka obavlja se paralelno s prepoznavanjem uzoraka, što ovaj koncept čini puno bržim. Kod Bayesovih mreža modelira se sustav kao skup događaja s pripadnom vjerojatnošću njihovih interakcija.

Također velike razlike vidljive su na području memorije, odnosno “znanja” pohranjenog u memoriji. U ekspertnim sustavima znanje je centralizirano, dok je kod neuronskih mreža memorija predstavljena težinama među neuronima, a vrijednost težina predstavlja “znanje”. Kod Bayesovih mreža znanje je pohranjeno u vjerojatnostima interakcija događaja u sustavu.

Ukoliko se od odabranog sustava očekuje da obavlja detekciju pojava koje nemaju iste karakteristične značajke (npr. različita mjerenja), radi se o zahtjevu koji je rješiv kod sva tri tipa sustava. Kod ekspertnih sustava to se rješava na način da se uključe nova pravila. U slučaju neuronskih mreža moguć je rad više mreža paralelno pri čemu svaka mreža rješava detekciju jednog tipa značajki, dok je kod Bayesovih mreža to omogućeno uključivanjem novih ovisnosti u sustavu.

Ipak količina ulaznih podataka koji su dobiveni izračunom i mjerenjem ograničavajući su faktor za neuronske mreže. Naime, neuronska mreža daje bolje rezultate što ima više ulaznih uzoraka, između kojih može tražiti prepoznavanje, a na osnovu kojih može dati točniji izlazni rezultat. Kako se u slučaju ove disertacije radi o istraživanju na području detekcije kvarova na izolacijskom sustavu rotacijskih

strojeva, pri čemu se detekcija kvarova vrši putem analize valnih oblika magnetskih polja, dostupnost podataka u literaturi je zanemariva, a na raspolaganju su samo podaci dobiveni istraživanjem u ovom radu. Ta količina podataka nije ni blizu dovoljna za postupak učenja neuronske mreže, stoga se neuronska mreža odbacuje kao mogući sustav koji će se koristiti u detekciji kvarova na rotacijskom stroju.

Prema gore navedenim podacima o različitim konceptima koji su primjenjivi u detekciji kvarova rotacijskih strojeva, u danim okolnostima Bayesove mreže predstavljaju optimalan izbor. Tehničko rješenje sustava za detekciju kvarova na rotacijskim strojevima koje se planira izraditi biti bazirano na tom konceptu.

3. TEORIJSKE PODLOGE ZA IZRAČUN MAGNETSKIH PRILIKA U ZRAČNOM RASPORU SINKRONOG STROJA

Teoretskim podlogama, obrađenim u ovom poglavlju, daje se uvid u analitički izračun magnetske indukcije u zračnom rasporu generatora s istaknutim polovima.

Započeti će se s rasporedom struja oko zračnog raspora sinkronog stroja, koje određuju magnetsko polje u zračnom rasporu [5, 6], odnosno:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I \quad (3.1)$$

Ako se zbog velikog iznosa permeabilnosti željeza zanemari magnetski pad napona u željezu, tada se na mjestu x oboda stroja približno može pisati:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \cong H_x \cdot \delta_x = \theta_x \quad (3.2)$$

pri čemu je jakost magnetskog polja \mathbf{H} na mjestu x :

$$H_x = \frac{\theta_x}{\delta_x} \quad (3.3)$$

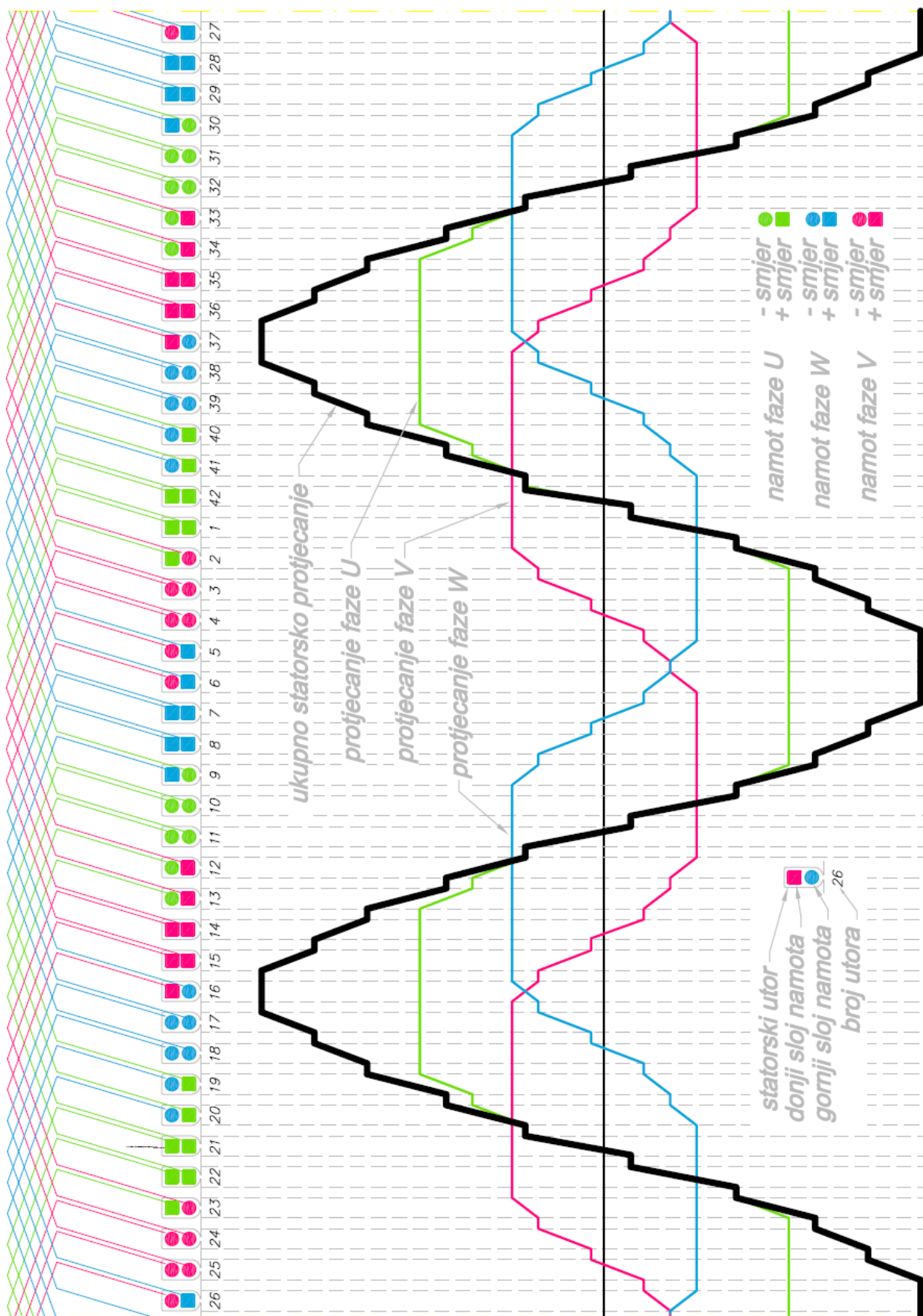
odnosno magnetska indukcije \mathbf{B} , na mjestu x iznosi:

$$B_x = \mu_0 \frac{\theta_x}{\delta_x} \quad (3.4)$$

Iz navedenog slijedi da za jednoliki zračni raspor, raspodjelu magnetske indukcije B_x , određuje raspodjela protjecanja θ_x , dok se za nejednoliki zračni raspor magnetska indukcija mijenja obrnuto proporcionalno veličini zračnog raspora δ_x .

Promotrimo li sinkroni generator kojem struje teku i u statorskom i rotorskom namotu, tada magnetska indukcija B na mjestu x oboda stroja ovisi o rotorskom θ_r i statorskom θ_s protjecanju koje stvaraju statorski i rotorski namot. Ukupno protjecanje θ jednako je zbroju protjecanja oba namota. Između statorskog i rotorskog protjecanja postoje određene razlike. Protjecanje statorskog namota je raspodijeljeno dok je protjecanje rotorskog namota koncentrirano. Za bolje razumijevanje na konkretnom primjeru prikazana su oba protjecanja. Generator SGBP 160 M-4M je objekt na kojem će se vršiti eksperimentalni dio ovog rada, stoga je najprikladnije da se na njemu i vrši analiza magnetske indukcije u zračnom rasporu.

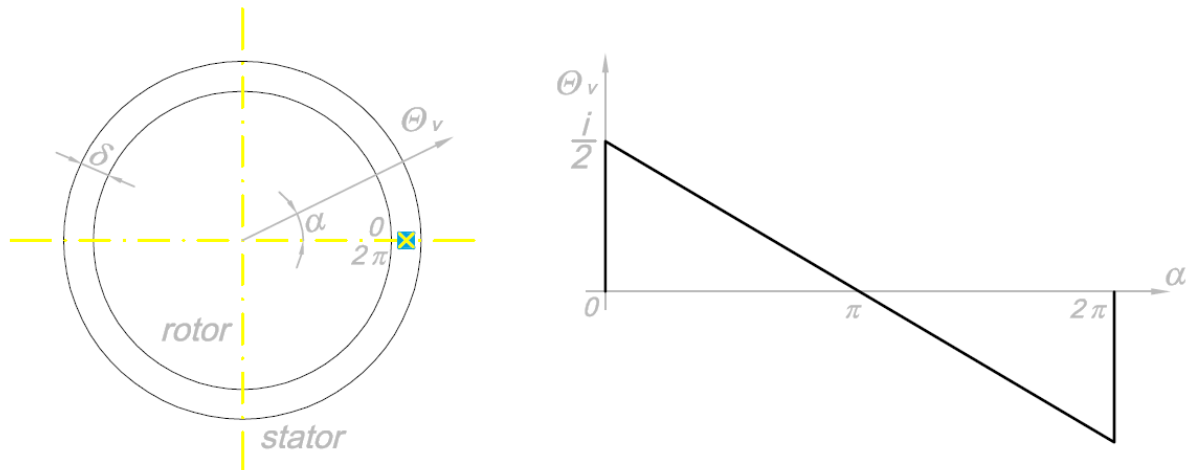
Slika 3.1 prikazuje statorsko protjecanje θ_s , koje je rezultat zbroja protjecanja faze U, faze V i faze W. Prostorna razdioba namota statora po obodu stroja daje raspodijeljeno protjecanje, pri čemu je uzeto da je struja svakog utora jednoliki raspoređena uzduž utorskog otvora. Slika 3.1 također prikazuje statorske utore, statorski namot, te referentne smjerove struja u namotu koji su nužni za određivanje raspodjele protjecanja. Statorski namot generatora SGBP 160 M-4M je dvoslojni petljasti sa 42 utora (shema namota i računski podaci generatora dani su u poglavlju 4.). Na slici 3.1 uočljivo je da su protjecanja faza U, V i W periodične funkcije s periodom $2\tau_p$ (dvostruki polni korak).



Slika 3.1. Prikaz statorskog protjecanja θ_s generatora SGBP 160 M-4M.

Rezultantno protjecanje statora crtano je za trenutak u kojem je struja u fazi U maksimalnog iznosa i referentnog smjera, dok su struje u druge dvije faze su $\frac{1}{2}$ maksimalne vrijednosti i smjera suprotnog referentnom smjeru.

Raspodijeljeno protjecanje statorskog namota kakvo je prikazano na slici 3.1. moglo bi se kao takvo analizirati prema Fourieru, međutim jednostavnije je razložiti protjecanje pojedinog svitka na harmoničke članove i potom vektorski zbrojiti harmonike istog reda svih svitaka. Da bi se to napravilo potrebno je započeti s analiziranjem protjecanja jednog vodiča protjecanog strujom i , smještenog unutar zračnog raspora δ kao na slici 3.2.



Slika 3.2. Prikaz protjecanja vodiča θ_v .

Raspodjela protjecanja prikazanog na slici 3.2 na intervalu $0 < \alpha < 2\pi$ može se prema Fourieru prikazati kao:

$$\theta_v(\alpha) = \frac{i}{\pi} \sum_{v=1}^{v=\infty} \frac{1}{v} \cdot \sin(v\alpha) \quad (3.5)$$

gdje je $v = 1, 2, 3, \dots$

Iz toga slijedi da je protjecanje zavoja θ_z jednako zbroju protjecanja dva vodiča postavljenim pod kutom α_y , pri čemu kroz oba vodiča protječu struje jednakog iznosa, ali suprotnog smjera.

$$\theta_z(\alpha) = \frac{2i}{\pi} \sum_{v=1}^{v=\infty} \frac{1}{v} \cdot \sin\left(\frac{v\alpha_y}{2}\right) \cdot \cos(v\alpha) \quad (3.6)$$

gdje je $v = 1, 2, 3, \dots$

Za slučaj dijametralnog koraka zavoja odnosno $\alpha_y = \pi$, iznos $\sin(v\alpha_y/2)$ jednak je 1 za sve neparne harmonike, odnosno 0 za sve parne harmonike. Prema tome, može se zaključiti da zavoji s dijametralnim korakom stvaraju samo neparne

harmoničke članove, dok zavoji sa skraćenim korakom stvaraju i parne i neparne harmoničke članove.

Ukupno protjecanje grupe θ_c načinjene od q zavoja međusobno zamaknutih za kut α_1 i protjecanih strujom i , jednako je zbroju protjecanja pojedinih zavoja. Prema relaciji (3.6) za svaki od zavoja se može izračunati protjecanje.

$$\theta_1(\alpha) = \frac{2i}{\pi} \sum_v \frac{1}{v} \cdot \sin\left(\frac{v\alpha_y}{2}\right) \cdot \cos(v\alpha_y) \quad (3.7)$$

$$\theta_2(\alpha) = \frac{2i}{\pi} \sum_v \frac{1}{v} \cdot \sin\left(\frac{v\alpha_y}{2}\right) \cdot \cos[v(\alpha - \alpha_1)] \quad (3.8)$$

$$\theta_3(\alpha) = \frac{2i}{\pi} \sum_v \frac{1}{v} \cdot \sin\left(\frac{v\alpha_y}{2}\right) \cdot \cos[v(\alpha - 2\alpha_1)] \quad (3.9)$$

⋮

$$\theta_K(\alpha) = \frac{2i}{\pi} \sum_v \frac{1}{v} \cdot \sin\left(\frac{v\alpha_y}{2}\right) \cdot \cos[v(\alpha - (q-1)\alpha_1)] \quad (3.10)$$

Ukupni zbroj protjecanja svih zavoja iznosi:

$$\begin{aligned} \theta_c(\alpha) &= \frac{2i}{\pi} \sum_{v=1}^{v=\infty} \frac{1}{v} \cdot \sin\left(\frac{v\alpha_y}{2}\right) \cdot \\ &\cdot \{ \cos[v\alpha(1 + \cos(v\alpha_1) + \cos(2v\alpha_1) + \dots + \cos(v\alpha_1(q-1)))] + \\ &+ \sin[v\alpha(\sin(v\alpha_1) + \sin(2v\alpha_1) + \sin(3v\alpha_1) + \dots + \sin(v\alpha_1(q-1)))] \} \end{aligned} \quad (3.11)$$

sređivanjem izraza (3.11) dobiva se:

$$\begin{aligned} \theta_c(\alpha) &= \frac{2i}{\pi} \sum_{v=1}^{v=\infty} \frac{1}{v} \cdot \sin\left(\frac{v\alpha_y}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{vq\alpha_1}{2}\right)}{\sin\left(\frac{v\alpha_1}{2}\right)} \cdot \\ &\cdot \left\{ \cos(v\alpha) \cos\left(\frac{v\alpha_1}{2}(q-1)\right) + \sin(v\alpha) \sin\left(\frac{v\alpha_1}{2}(q-1)\right) \right\} \end{aligned} \quad (3.12)$$

korištenjem pravila $\cos(\alpha - \beta) = \cos\alpha \cos\beta - \sin\alpha \sin\beta$ relacija (3.12) poprima sljedeći oblik:

$$\theta_c(\alpha) = \frac{2qi}{\pi} \sum_{v=1}^{v=\infty} \frac{1}{v} \cdot \sin\left(\frac{v\alpha_y}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{vq\alpha_1}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{v\alpha_1}{2}\right)} \cdot \cos\left\{v\left[\alpha - \left(\frac{\alpha_1}{2}(q-1)\right)\right]\right\} \quad (3.13)$$

ukoliko se uzme da je:

$$\alpha' = \alpha - \left(\frac{\alpha_1}{2}(q-1)\right) \quad (3.14)$$

može se pisati da je u koordinatnom sustavu pomaknutom za kut $(q-1)^{1/2}\alpha_1$ iznos protjecanja:

$$\theta_c(\alpha) = q \sum_{v=1}^{v=\infty} \frac{1}{v} \cdot \frac{\sin\left(\frac{vq\alpha_1}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{v\alpha_1}{2}\right)} \cdot \frac{2i}{\pi v} \cdot \sin\left(\frac{v\alpha_y}{2}\right) \cdot \cos(v\alpha') \quad (3.15)$$

Promotrimo slučaj s m grupa po q zavoja raspoređenih po obodu, međusobno zamaknutih za kut $2\pi/m$. Neka kroz svaki svitak protječe struja simetričnog m -sistema, amplitude $I/\sqrt{2}$ i frekvencije ω , pri čemu su struje fazno pomaknute za kut $2\pi/m$. Tada se za protjecanje grupe svitaka θ_m može pisati [8]:

$$\theta_m(\alpha) = \frac{2\sqrt{2}ql}{\pi} \sum_{v=1}^{v=\infty} \frac{1}{v} \cdot \sin\left(\frac{v\alpha_y}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{vq\alpha_1}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{v\alpha_1}{2}\right)} \cdot \left\{ \frac{\sin\left[\frac{(v+1)\pi}{m}\right]}{\sin\left[\frac{(v+1)\pi}{m}\right]} \cdot \sin\left[(\omega t + v\alpha) - (v+1)\frac{2\pi}{m}\right] + \frac{\sin\left[(v-1)\pi\right]}{\sin\left[\frac{(v-1)\pi}{m}\right]} \cdot \sin\left[(\omega t - v\alpha) + (v-1)\frac{2\pi}{m}\right] \right\} \quad (3.16)$$

Iz dosad prikazanih relacija može se zaključiti da su amplitude pojedinih harmonika funkcije kuteva α_y i α_1 .

α_y je kut između vodiča istog zavoja koji se uobičajeno naziva širinom svitka. Širina svitka iskazuje se brojem utora i označava s y . Ako stroj s p pari polova ima N jednoliko raspoređenih utora tada je:

$$\alpha_y = \frac{2\pi}{N}y \quad (3.17)$$

pri čemu je $2\pi/N$ utorski korak α_u .

Kako bi mogli usporediti karakteristike namota različitog broja polova i broja utora sve namote potrebno je pretvoriti u bazične. Pri tome parametre namota potrebno je preračunati s najvećim faktorom x za koje vrijede dane relacije. Primjerice, ako se trofazni namot s $N = 42$, $2p = 4$ i $y = 9$, pretvori u bazni pri čemu je $x = 2$, dobivaju se novi parametri stroja $N' = 21$, $2p' = 2$ i $y' = 9$ s kojima se može računati. Pri tome će harmonici reda $v = p = 2$, odgovarati baznim harmonicima reda $v' = v/x = 1$. Iz navedenog može se zaključiti da svaki namot koji se može pretvoriti u ekvivalentni bazni namot ima jednake značajke kao i bazni namot, pri čemu navedene relacije vrijede za bazni namot.

Utjecaj širine svitka y na red i amplitudu harmonika koji se pojavljuje u navedenim relacijama u obliku:

$$f_t' = \sin\left(\frac{v'\alpha_y'}{2}\right) \quad (3.18)$$

nazivamo tetivnim faktorom namota f_t .

Supstitucijom članova $\alpha_y' = 2\pi y/N$, $N' = N/x$, te $v' = v/x$, za izraz (3.18) dobiva se:

$$f_t = \sin\left(\frac{v y \pi}{N}\right) \quad (3.19)$$

Kao posljedica širine svitka y , slijedi da će svi harmonički članovi reda:

$$v = \frac{c N}{y} \quad (3.20)$$

uz $c = 0, 1, 2, \dots$ biti potisnuti, pošto je $f_t = 0$. Shodno tome slijedi da će za svitke dijametralnog koraka $y = \tau_p = N/2p$, svi harmonički članovi reda:

$$v = 2cp \quad (3.21)$$

uz $c = 0, 1, 2, \dots$ biti potisnuti.

Osim kuta α_y , kut α_1 također utječe na red i amplitudu harmonika, pri čemu je α_1 kut između susjednih vodiča iste grupe zavoja. Relacije (3.15) i (3.16) sadrže funkcijsku ovisnost o kutu α_1 u slijedećem obliku:

$$f_z = \frac{\sin\left(\frac{q v \alpha_1}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{v \alpha_1}{2}\right)} \quad (3.22)$$

Faktor f_z naziva se zonski faktor namota. Za grupu q može se pisati:

$$q = \frac{N}{2pm} \quad (3.23)$$

Uvrsti li se u relaciju (3.21) $\alpha_1 = 2\pi/N$, zonski faktor namota f_z poprima oblik:

$$f_z = \frac{\sin\left(\frac{q v \pi}{N}\right)}{q \sin\left(\frac{v \pi}{N}\right)} \quad (3.24)$$

Iz čega slijedi da će svi harmonički članovi reda

$$v = 2pm \quad (3.25)$$

biti potisnuti.

Osim zonskog i tetivnog faktora namota, u relaciji (3.16) pojavljuje se funkcijska ovisnost, koja za m fazni namot ima oblik:

$$f'_m = \frac{\sin[(v' \pm 1) \pi]}{\sin\left[\frac{(v' \pm 1)\pi}{m}\right]} \quad (3.26)$$

Namot kod kojeg je broj utora po polu i fazi cijeli broj može proizvesti samo harmonike reda:

$$v = p(cm \mp 1) \quad (3.27)$$

dok simetrični m fazni namoti mogu proizvesti samo harmonike reda:

$$v = p(2cm \mp 1) \quad (3.28)$$

gdje je $c = 0, 1, 2, \dots$

Izraz za protjecanje trofaznog namota dobiva se iz relacije (3.16) ako uvrstimo $m = 3$, a svi harmonici za koje vrijedi relacija (3.20) biti će potisnuti. Također za trofazne namote sa skraćenim korakom kod kojih je broj utora po polu i fazi cijeli broj, svaki šesterostruki harmonik prema relaciji (3.25) biti će potisnut. U slučaju simetričnog trofaznog namota kod kojeg je broj utora po polu i fazi cijeli broj mogu nastati prema relaciji (3.28) samo neparni harmonici, osim višekratnika broja 3.

Ako se uzmu u obzir relacije (3.16), (3.18), (3.24), (3.26) i (3.28), može se pisati da je raspodjela protjecanja za takav namot:

$$\theta_3(\alpha) = \frac{3\sqrt{2}qI}{\pi} \sum_{c=1}^{c=\infty} \frac{1}{p(6c \mp 1)} \cdot f_t \cdot f_z \cdot \sin[\omega t \pm (6c \mp 1)p\alpha] \quad (3.29)$$

obodna brzina protjecanja je:

$$\omega_v = \pm \frac{\omega}{(6c \pm 1)p} \quad (3.30)$$

pri čemu će se harmonici reda $(6c + 1)p$ (npr. $v = 7p, 13p, 19p \dots$) gibati u istom smjeru $(6c + 1)$ puta sporije od osnovnog člana $v = p$, dok će se harmonici reda $(6c - 1)p$ (npr. $v = 5p, 11p, 17p \dots$) gibati u suprotnom smjeru $(6c - 1)$ puta sporije od osnovnog člana.

Promotrimo sada protjecanje rotorskog namota. Slika 3.3 prikazuje rotorsko protjecanje θ_r , koje stvaraju koncentrično postavljeni svitci uzbudnog namota. Uzbudni namot generatora sastoji se od četiri uzbudna svitka spojena u seriju.

Na slici 3.3 može se vidjeti da silnice izlaze iz polne papuče i raspodijeljene su po cijelom polnom koraku τ_p (silnice se protežu između dvije neutralne zone), što rezultira zamišljenim pomicanjem vodiča s pola na rub neutralne zone. Na taj način raspodjela protjecanja ima pravokutni oblik na polnom koraku [5, 6].

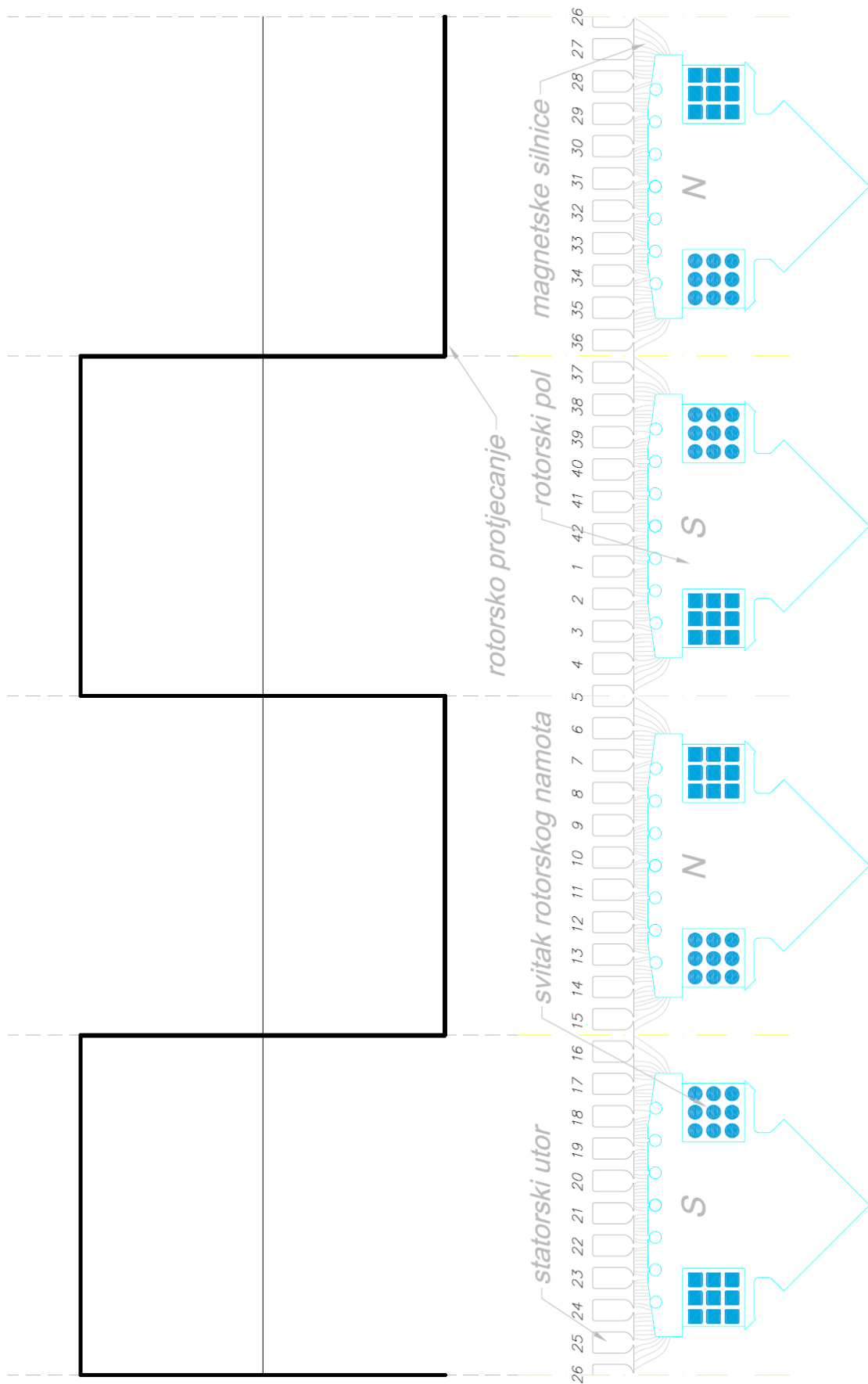
Prema Fourieru pravokutna ovisnost protjecanja θ_r o položaju x prikazana na slici 3.2, može se prikazati na slijedeći način:

$$\begin{aligned} \theta_r &= \theta_m \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{\tau_p} + \frac{1}{3} \cdot \theta_m \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sin \frac{3 \cdot \pi \cdot x}{\tau_p} + \frac{1}{5} \cdot \theta_m \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sin \frac{5 \cdot \pi \cdot x}{\tau_p} + \dots \\ &\dots + \frac{1}{v} \cdot \theta_m \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sin \frac{v \cdot \pi \cdot x}{\tau_p} + \dots \end{aligned} \quad (3.31)$$

odnosno:

$$\theta_r = \frac{4}{\pi} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} \cdot \theta_m \cdot \sin \frac{v \cdot \pi \cdot x}{\tau_p} \quad (3.32)$$

pri čemu je θ_m maksimalna vrijednost protjecanja rotora.



Slika 3.3. Prikaz rotorskog protjecanja θ_r generatora SGBP 160 M-4M.

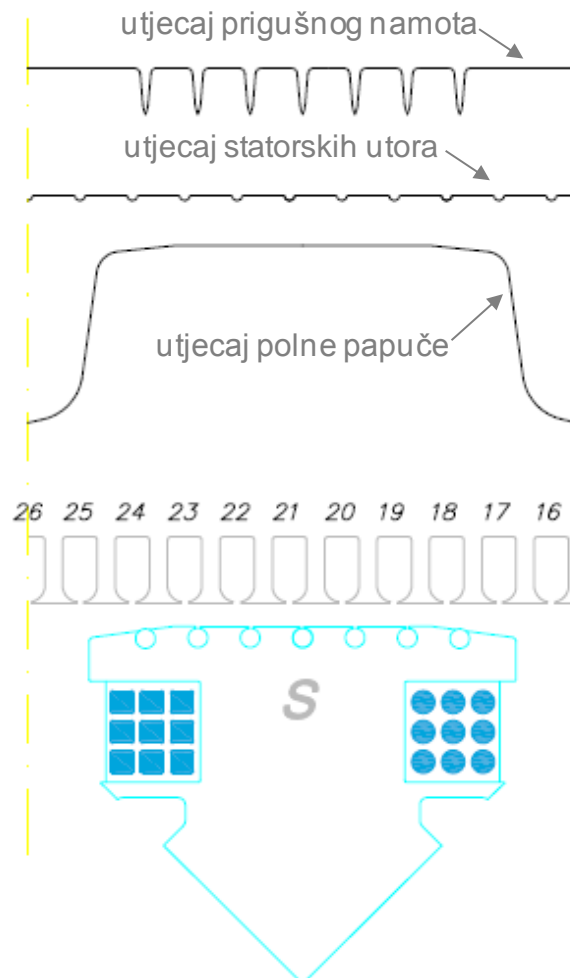
Vektorskim zbrojem rotorskog i statorskog protjecanja dobiva se resultantno protjecanje koje određuje magnetsku indukciju u rasporu. Osim protjecanja prema relaciji (3.4), magnetska indukcija također ovisi i o duljini zračnog raspora δ . Za konstantni zračni raspor, vektor magnetske indukcije i vektor protjecanja imaju istu fazu, a iznosi su im proporcionalni. U slučaju nejednolikog zračnog raspora, magnetska indukcija u svakoj točki oboda stroja, određena je omjerom protjecanja i duljine zračnog raspora u toj točki. Relaciju (3.4) može se pisati:

$$B_x = \Lambda_x \cdot \theta_x \quad (3.33)$$

gdje je Λ_x vodljivost raspora.

$$\Lambda_x = \frac{\mu_0}{\delta_x} \quad (3.34)$$

Vodljivost raspora je funkcija položaja po obodu stroja. Kod strojeva s istaknutim polovima na vodljivost zračnog raspora utječu statorski utori, prigušni namot, polna papuča i međupolni prostor, kako je prikazano na slici 3.4.



Slika 3.4. Utjecaj istaknutih polova, oblika polne papuče, statorskih utora i prigušnog namota na vodljivost zračnog raspora generatora SGBP 160 M-4M.

Istaknuti polovi s konstantnim rasporedom pod polnom papučom stvaraju pravokutnu ovisnost vodljivosti s dvije karakteristične vrijednosti [5, 6]. Jednu vrijednost vodljivost poprima pod polom, a drugu u međupolnom prostoru. Perioda osnovnog harmonika vodljivosti τ_p , dvostruko je kraća od periode osnovnog harmonika protjecanja, što nam govori da se radi o parnom članu drugog reda. Prema Fourieru, ova funkcija vodljivosti može se rastaviti na nulti član i parne više harmonike:

$$\Lambda_x = \sum_{v=0}^{\infty} \Lambda_{2v} \cdot \cos\left(\frac{2v\pi x}{\tau_p}\right) \quad (3.35)$$

Pored istaknutih polova na vodljivost zračnog rasporeda utječu i utori za smještaj namota. Ako je broj utora po polu $q_p = N/2p$, funkcijska ovisnost vodljivosti koja uvažava utore, je slična kao i kod one s istaknutim polovima, pri čemu je period osnovnog člana q_p puta kraći. Prema Fourieru može se pisati:

$$\Lambda_x = \sum_{v=0}^{\infty} \Lambda_{2v} \cdot \cos\left(\frac{2vq_p\pi x}{\tau_p}\right) \quad (3.36)$$

Opća funkcija napisana u relaciji (3.35) obuhvaća i utjecaj utora, ako se suma reda provede do člana $v = v'q_p$ i dalje, pri čemu je $v' = 1, 2, 3, \dots$. Mjesto na obodu statora x dano je za nepomični stator, međutim istaknuti polovi nalaze se na rotoru i rotiraju obodnom brzinom ω_m . Stoga je statorsko mjesto x potrebno pretvoriti u rotorsko x_1 .

$$x = x_1 + vt = x_1 + \frac{\tau_p k \omega t}{\pi} \quad (3.37)$$

pri čemu je $k = \omega_r/\omega$ odnos električne obodne brzine rotora i obodne brzine osnovnog člana protjecanja. Tada za promjenu vodljivosti na rotoru, pisanu u koordinatama čvrstog statora, može se pisati:

$$\Lambda_x = \sum_{v=0}^{\infty} \Lambda_{2v} \cdot \cos\left(\frac{2v\pi x}{\tau_p} - 2vk\omega t\right) \quad (3.38)$$

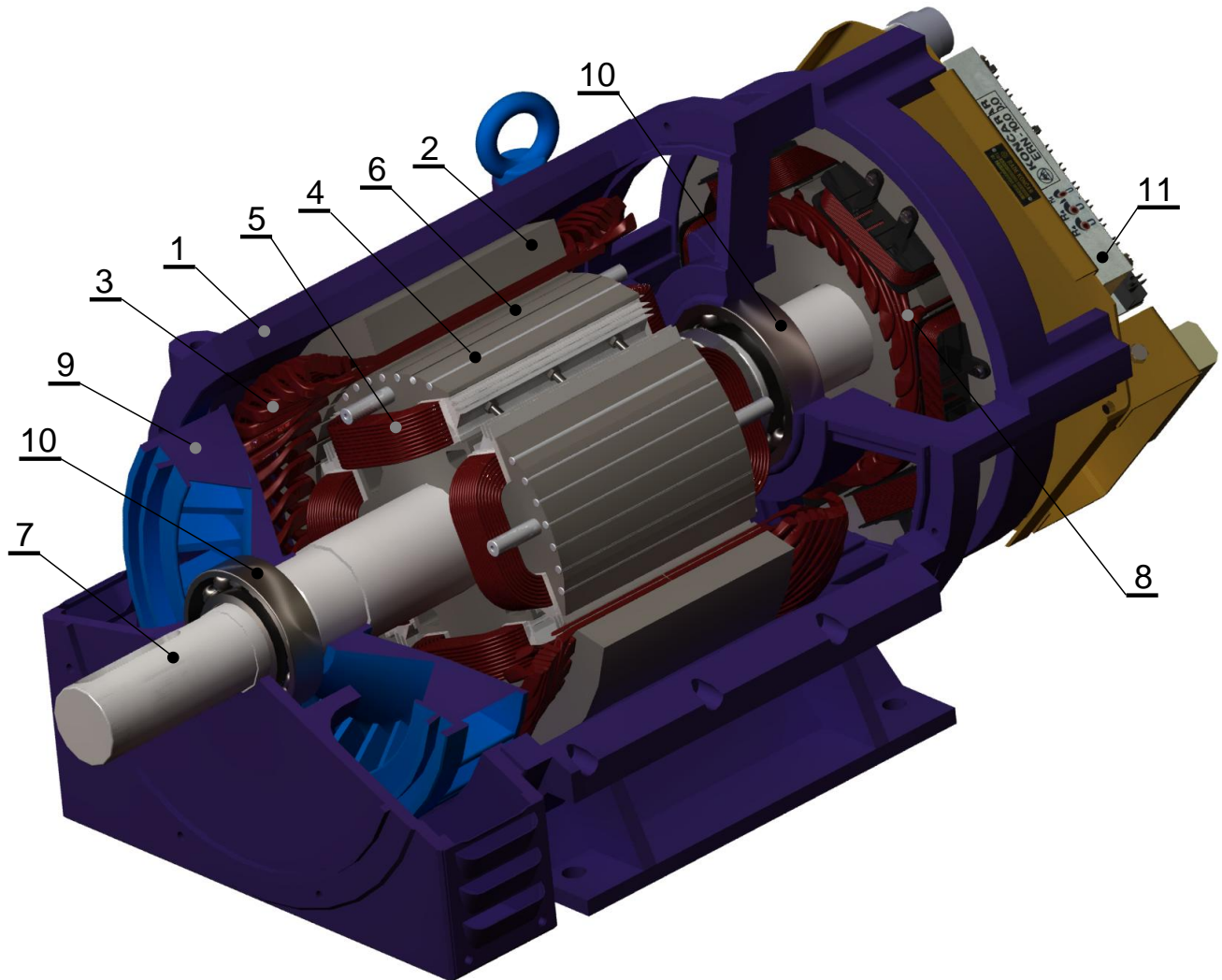
Konačno, za određivanje magnetske indukcije u zračnom rasporedu, potrebno je odrediti resultantno protjecanje, koje se zatim množi s vodljivošću zračnog rasporeda. Resultantno protjecanje statorskog i rotorskog namota dobiva se zbrajanjem relacija (3.16) i (3.32), a dobivenu sumu potrebno je pomnožiti s relacijom (3.38). Ukupni rezultat koji predstavlja magnetsku indukciju u zračnom rasporedu prikazuje relacija (3.39) i može se konstatirati da se radi o složenoj funkciji koja sadrži članove viših harmonika. Ti harmonici posljedica su diskretnog položaja namota, utjecaja istaknutih polova i utora na obodu stroja.

$$\begin{aligned}
 B_x = & \left\{ \frac{2\sqrt{2}ql}{\pi} \sum_{v=1}^{v=\infty} \frac{1}{v} \cdot \sin\left(\frac{v\alpha_y}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{vq\alpha_1}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{v\alpha_1}{2}\right)} \cdot \right. \\
 & \cdot \left[\frac{\sin[(v+1)\pi]}{\sin\left(\frac{(v+1)\pi}{m}\right)} \cdot \sin\left[\left(\omega t + v\alpha\right) - (v+1)\frac{2\pi}{m}\right] + \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\sin[(v-1)\pi]}{\sin\left[\frac{(v-1)\pi}{m}\right]} \cdot \sin\left[\left(\omega t - v\alpha\right) + (v-1)\frac{2\pi}{m}\right] \right] + \frac{4}{\pi} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{\theta_m}{v} \cdot \sin\frac{v\pi x}{\tau_p} \right\} \cdot \\
 & \cdot \sum_{v=0}^{\infty} \Lambda_{2v} \cdot \cos\left(\frac{2v\pi x}{\tau_p} - 2vk\omega t\right) \tag{3.39}
 \end{aligned}$$

Relacija (3.39) daje ovisnost magnetske indukcije o položaju u zračnom rasporu za sinkroni stroj s istaknutim polovima i simetričnim m faznim namotom. Pojavom nesimetrije (kvara) u bilo kojem od namota sinkronog stroja relacija (3.39) više nije primjenjiva. U tom slučaju relacija za izračun magnetske indukcije u zračnom rasporu poprima znatno složeniji oblik, te je izvan opsega ovog rada. Stoga se magnetska indukcija za kvarna stanja sinkronog stroja neće određivati analitičkim putem.

4. OBJEKT MJERENJA

Eksperimentalni dio rada obaviti će se na sinkronom generatoru tipa SGPB 160 M-4M prikazanom na slici 4.1. Radi se o sinkronom generatoru s beskontaktnim sustavom uzbude. To znači da se napajanje uzbude generatora ne vrši kliznim kontaktom preko kliznih kolotova i četkica, već se uzbuda generatora napaja iz uzbudnika. Uzbudnik je pomoćni stroj koji se nalazi na istoj osovini kao i generator, a njegova uloga je da napaja uzbudu generatora.



Slika 4.1. Generator SGPB 160 M-4M: 1 - kućište, 2 - statorski paket dinamolimova, 3 - armaturni namot, 4 - prigušni namot, 5 – uzbudni namot, 6 – rotorski paket dinamolimova, 7 – osovina, 8 – uzbudnik, 9 - ventilator, 10 – ležaj, 11 – sustav uzbude.

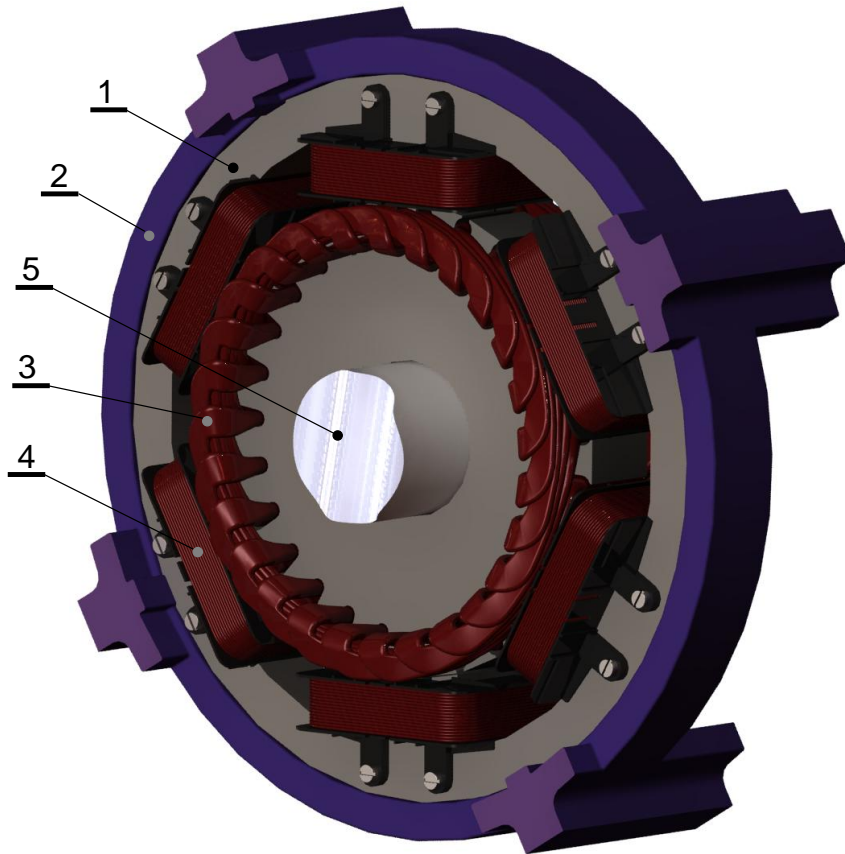
Detaljni podaci o rezu lima statora i rotora generatora, te o armaturnom, uzbudnom i prigušnom namotu generatora prikazani su u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Računski podaci sinkronog generatora SGBP 160 M-4M.

KONČAR INSTITUT za elektrotehniku				RAČUNSKI PODACI													
				TIP: SGBP 160 M-4M													
				3 fazni sinkroni generator													
U	400	I	23	n	1500	P	16	cosφ	0,8	u	24	i	24,4	f	50	intermit	
V		A		min ⁻¹		kVA				V		A		Hz			
Broj polova: 4				pogon: S1				zagrijavanje: 100/100 °C									
gl. dimenzije		Stator				Rotor											
		duljina željeza				145											
		Ø vanjski				raspor		198,4									
		Ø unutarnji				0,8		56									
		vrsta lima W/kg				TR 0,65 x 1000 MD FOSFATIR											
namot armature		vrsta namota				dvoslojni, ovalni, petljasti											
		način ugradnje		klin		usipni		DIN 40606 HGV									
		klasa izolacije				E											
		br. utora		presjek utora		42		99 mm ²									
		izolacija		ut. oblog		TR 0,22 x 900 EVI-THERM											
				međuslojna													
				glave						TR.SS 0,15 x 20EK 573,1 D							
		prikrata		korak		skoš.		9/10,5		1 - 10		1 - 42					
		vodiča u utoru		# žica		par. grane		2 x 15		2		2					
		vodič		neto masa		žica NC7114 0,85				4,65 kg							
srednja duljina zavoja		broj svitaka		722 mm				42									
q		otpor faze		3,5				0,596 Ω									
spoj		broj krajeva		///				6									
istak		impregnacija		60 mm				Za kl. F(2x)									
namot polova		klasa izolacije				E				Prazni hod		Kratki spoj					
		zavoja po polu		# žica		88		-									
		broj svitaka		par. grane		4		-		I _{u0}		8,37 A		I _{uk}		13,8 A	
		vodič		neto masa		žica 46416 Ø2,6				6,45 kg		P _{fe}		P _{k75}			
		spoj		broj izvoda		serijski				2		napomena: dodatno osigurati namote polova podvezivanjem					
		impregnacija		otpor		kompaktizirati				0,718 Ω							
prigušni namot		# štapa		dužina		7 / pol		151									
		materijal		OKR 5C.D3													
		profil spoja		Ecu 57 F30													
		materijal		LIM1C.D4.													
		Ø štapa		5 mm													

4.1. Uzbudnik

Uzbudnik je sinkroni generator smješten na istoj osovini kao i glavni stroj. Inverzne je izvedbe, tj. armaturni namot koji je kod klasičnog sinkronog generatora smješten na statoru, kod uzbudnika smješten je na rotoru. Shodno tome uzbudni namot smješten je na statoru. Na taj način moguće je na rotoru, bez kliznih koluta i četkica, dobiti potrebnu energiju za napajanje uzbude glavnog stroja. Slika 4.5 prikazuje uzbudnik.



Slika 4.5. Uzbudnik SU 160 - 6: 1 - kućište, 2 - statorski paket dinamolimova, 3 - armaturni namot, 4 - uzbudni namot, 5 – osovina.

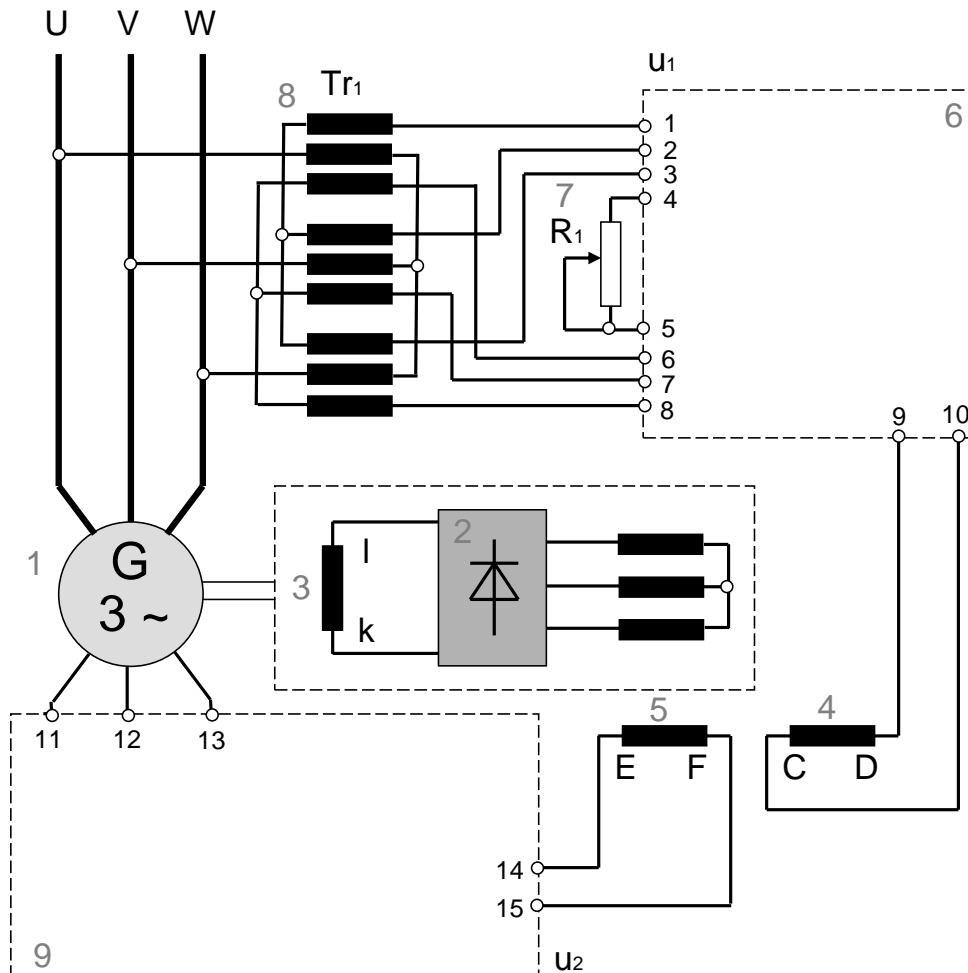
Detaljni podaci o rezu lima statora i rotora uzbudnika, te o armaturnom i uzbudnom namotu uzbudnika prikazani su u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Računski podaci uzбудnika SU 160 – 6

KONČAR INSTITUT za elektrotehniku		RAČUNSKI PODACI														
		TIP: SU 160 - 6														
		3 fazni sinkroni uzбудnik														
U	28,6	I	18,2	n	1500	P	0,8	$\cos\phi$	1	u	10	i	2,8	f	75	intermit
V		A		min^{-1}		kVA			V	17	A	2,8	Hz			
Broj polova: 6				pogon: S1				zagrijavanje: 100/100 °C								
gl. dimenzije		Stator				Rotor										
		duljina željeza				30										
		Ø vanjski		170		raspor		0,5						265		
		Ø unutarnji		56										171		
vrsta lima W/kg		TR V300-65A V15 1000 IZ 23A														
namot armature		vrsta namota				dvoslojni, ovalni, petljasti										
		način ugradnje		klin		usipni				DPOČ 2 DIN HGV						
		klasa izolacije				F										
		br. utora		presjek utora		42				99 mm ²						
		izolacija		ut. oblog		TR 0,22 x 900 EVI-THERM										
				međuslojna												
				glave												TR.SS 0,15 x 20EK 573,1 D
		pokrata		korak		skoš.		4/4,5				1 -5		-		
		vodiča u utoru		# žica		par. grane		2 x 8				3		-		
		vodič		neto masa		žica L1,2F 0,95 N.C7.				1,2 kg						
srednja duljina zavoja		broj svitaka		280 mm				9/1 +9/2								
q		otpor faze		1,5				0,163 Ω								
spoj		broj krajeva		///				3								
istak		impregnacija		27 mm				Za kl. F(2x)								
namot polova		klasa izolacije				F										
		zavoja po polu		#žica		200				-						
		broj svitaka		par. grane		6				-						
		vodič		neto masa		žica N.C7.114 Ø2,6				2,9 kg						
		spoj		broj izvoda		serijski				2						
		impregnacija		otpor		kompaktizirati				5,02 Ω						
				Prazni hod				Kratki spoj								
lu0		-		luk		-										
Pfe		-		Pk75		-										
napomena: mota se na tijelo namota na svaki pol																

4.2. Sustav uzbude

Sinkroni generator SGBP 160 M-4M ima beskontaktni sustav uzbude. Uzbudni namot generatora napaja se iz armaturnog namota uzbudnika, ispravljenog trofaznim diodnim mostom. Uzbudnik je izmjenični sinkroni generator kojem je uzbudni namot smješten na statoru, a trofazni armaturni namot na rotoru. Uzbuda uzbudnika napaja se iz vanjskog izvora. Slika 4.2 shematski prikazuje sustav uzbude.



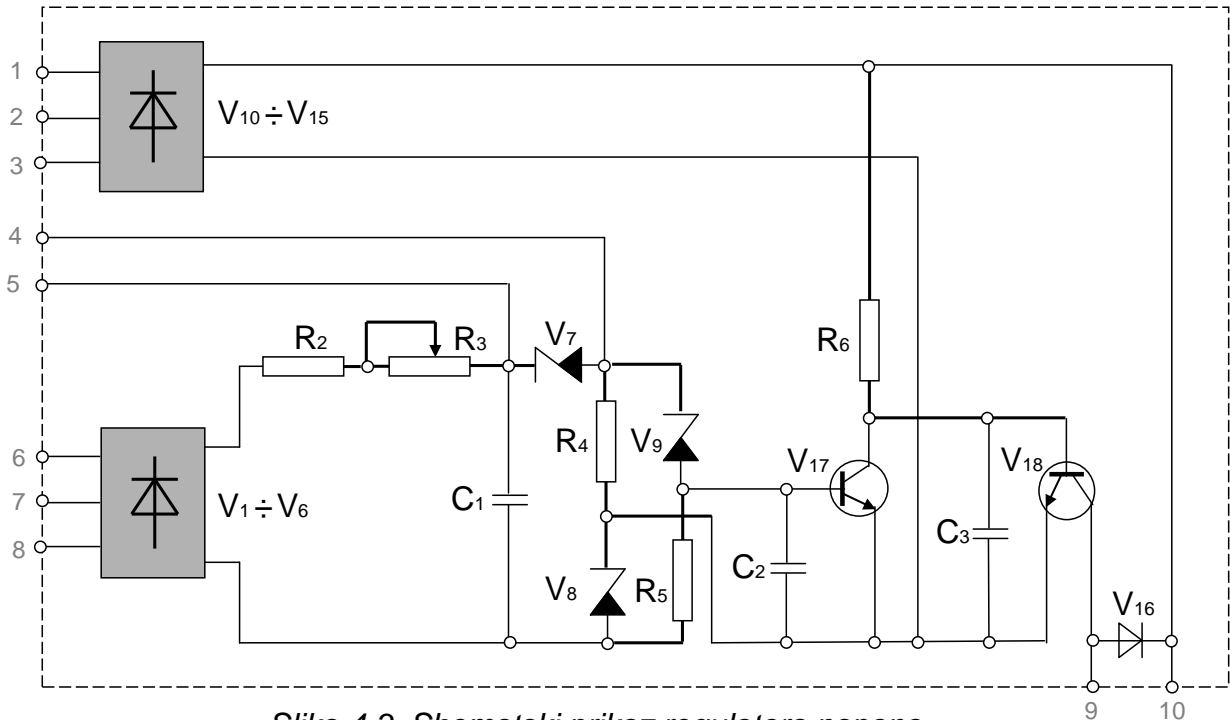
Slika 4.2. Shematski prikaz sustava uzbude: 1 - sinkroni generator, 2 – rotirajući diodni ispravljač, 3 – uzbudni namot glavnog stroja, 4 – uzbudni namot uzbudnika za prazni hod generatora, 5 - uzbudni namot uzbudnika za kompaundaciju, 6 – potencijometar za dovođenje regulatora u radnu točku, 7 – regulator napona, 8 - transformator za mjerenje napona i napajanje uzbude uzbudnika, 9 – sklop za kompaundaciju.

Kako se može primijetiti na slici 4.2 uzbudnik ima dva uzbudna namota (C – D i E – F). Namot C – D, s ukupno 80 zavoja po polu, služi za pokrivanje uzbude potrebne za prazni hod generatora. Namot C – D se preko regulatora napona u_1 , napaja iz transformatora Tr_1 , koji je primarno vezan za armaturne stezaljke generatora.

Namot E – F, s ukupno 180 zavoja po polu, služi za kompaundaciju, odnosno pokrivanje strujnog opterećenja generatora, a napaja se preko sklopa za kompaundaciju u_2 .

4.2.1. Regulator napona

Regulator napona sastoji se od regulacionog dijela i izlaznog stupnja. Slika 4.3. shematski prikazuje regulator napona.



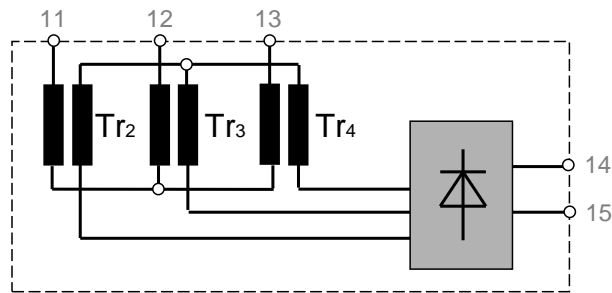
Slika 4.3. Shematski prikaz regulatora napona.

Napon uzbuđivača ispravlja se trofaznim diodnim mostom (diode $V_{10} - V_{15}$) i vodi se na uzbuđni namot C – D. Signal regulacije formira se u mjernom članu (Zenerov most), a ovisan je o naponu mjerenja, odnosno naponu generatora. Napon mjerenja ispravlja se trofaznim diodnim mostom (diode $V_1 - V_6$) i dovodi na Zenerov most. Most u svoje dvije grane ima naponski neovisne otpore R_4 i R_5 , a u druge dvije grane Zener diode V_8 i V_9 , kao naponski ovisne otpore. Izlaz Zenerovog mosta upravlja tranzistorom V_{17} u izlaznom stupanju.

Izlazni stupanj sastoji se od dva tranzistora, V_{17} i V_{18} koji su u sprezi. Tranzistor V_{18} nalazi se u krugu uzbuđivača, a vrši korekcije u skladu sa zahtjevom da se napon generatora održava konstantnim.

4.2.2. Sklop za kompaundaciju

Slika 4.4. shematski prikazuje sklop za kompaundaciju. Sklop za kompaundaciju sastoji se od tri strujna transformatora Tr_2 , Tr_3 i Tr_4 primarno spojenih u zvjezdište generatora. Sekundarna struja tih strujnih transformatora ispravlja se trofaznim diodnim mostom i vodi u uzbuđni namot E – F uzbuđnika.



Slika 4.4. Shematski prikaz sklopa za kompaundaciju.

4.3. Priprema objekta mjerenja za ispitivanje

Za realizaciju predviđenih ispitivanja mjerni objekt je dorađen kako bi se omogućila pojava predviđenih kvarova na zahtjev. Kvarovi koji će se analizirati obuhvaćaju pojavu jednog ili više kratko spojenih zavoja armaturnog i uzbudnog namota, te isključenje jednog od svitaka iz armaturnog namota. Iz tog razloga na armaturnom i uzbudnom namotu ugrađeni su izvodi za kratko spajanje.

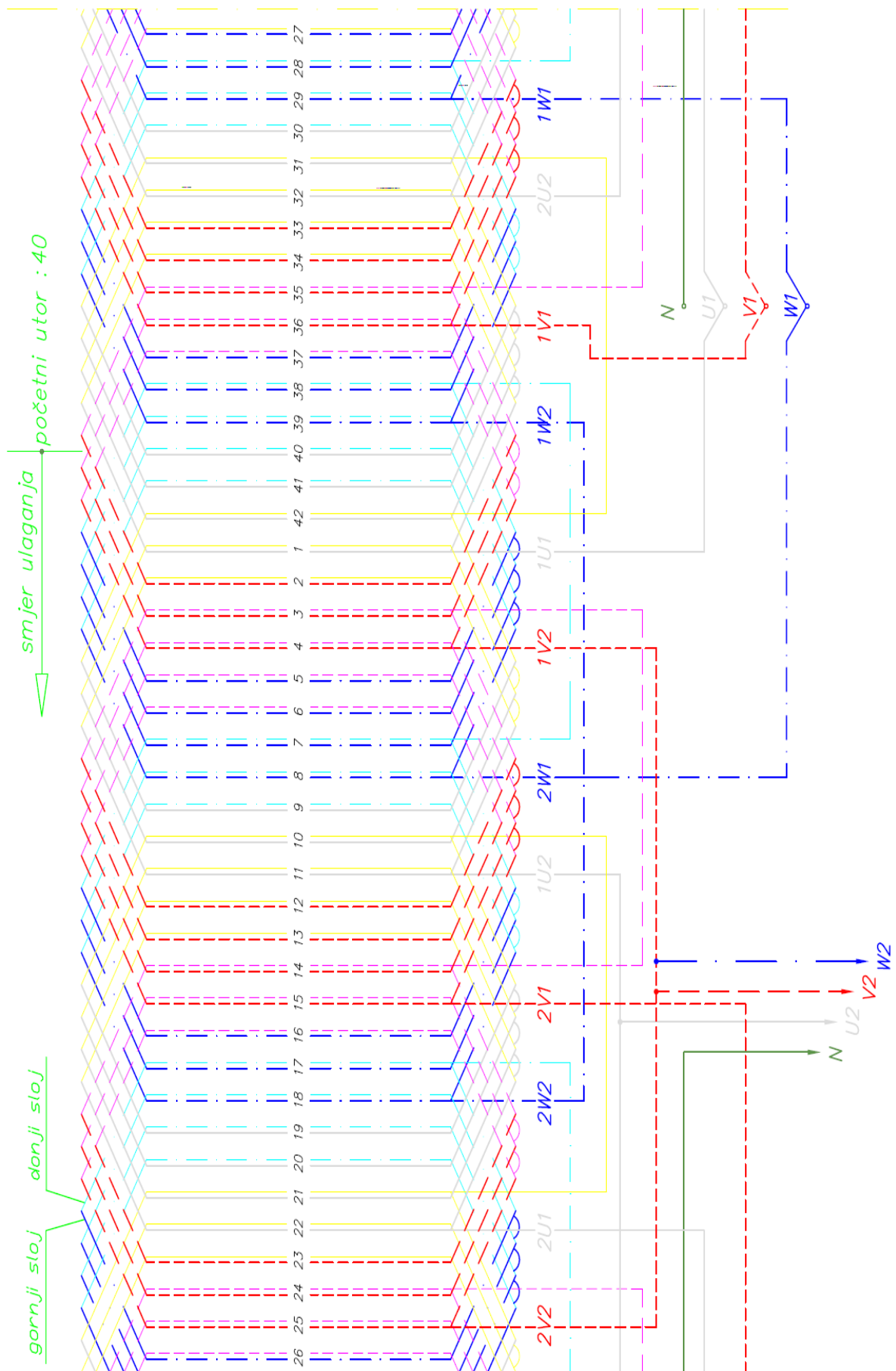
4.3.1. Ugradnja izvoda za kratko spajanje armaturnog namota

Pregledom armaturnog namota generatora utvrđeno je da se radi o usipnom namotu s okruglom žicom. Međutim, namot je impregniran smolom, te nije moguće na siguran i pouzdan način armaturnom namotu ugraditi izvode. Stoga se armaturni namot zamijenio novim, kojem su u postupku izrade ugrađeni potrebni izvodi.

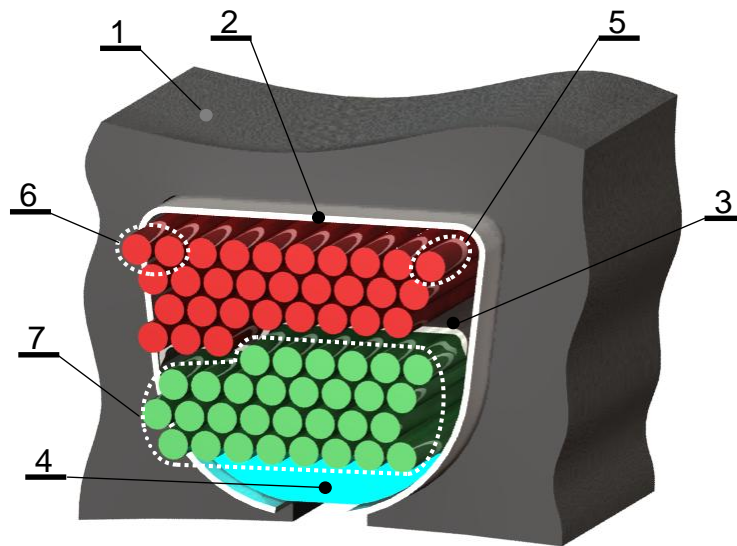
Kako bi se obavila potrebna zamjena namota, te ugradili izvodi za kratko spajanje namota, proučeni su računski podaci stroja (tablica 4.1) i razvijena shema namota armature (slika 4.5).

Iz računskih podataka stroja može se vidjeti da je armaturni namot dvoslojni petljasti s dvije paralelne grane. Namot sačinjavaju 42 svitka koji se usipanjem smještaju u poluotvorene utore. U svakom od 42 utora (slika 4.6) smješteno je 30 vodiča, a svaki vodič čine dvije bakrene žice promjera 0,85 mm.

Svaki od 42 svitka načinjen je tako da se dvije žice zajedno namataju 15 puta oko šablone koja ima korak 1-10. Tako izrađeni svitci se jedan po jedan usipanjem smještaju u predviđene utore.



Slika 4.5. Razvijena shema namota armature



Slika 4.6. Statorski utor generatora SGPB 160 M-4M: 1 – statorski paket dinamolimova, 2 – utorski oblog, 3 – međuslojna izolacija, 4 - klin, 5 – žica, 6 – vodič, 7 – svitak namota.

Cilj ovog istraživanja detekcija je početaka nastajanja kratkog spoja namota kojeg zaštite generatora u većini slučajeva ne mogu registrirati. Kako je ranije prikazano kvarovi na izolacijskom sustavu su najučestalijih od svih kvarova koji se javljaju na generatorima. Mogu započeti kao međuzavojni kratki spojevi i prerasti u spoj među slojevima iste faze, proboj na drugu fazu te dozemni spoj. Iz tog razloga, kao i iz činjenice da armaturni namoti "velikih" generatora u većini nemaju svitke (primjenjuju se štapni namoti), zaštitni releji generatora ograničeni su na detekciju dozemnog spoja, te nesimetrije među fazama, odnosno posljedica međuzavojnih kratkih spojeva. Naime, međuzavojni kratki spojevi mogu proizvesti značajne struje na mjestu nastanka kvara. Pri tome na stezaljkama generatora gdje zaštitni releji vrše mjerenja nije moguće detektirati problem, sve dok kvar ne preraste u međufazni ili dozemni spoj. Detekcija međuzavojnih kratkih spojeva predstavlja problem iz razloga što se struja koju ovaj kvar izaziva, zatvara u lokalnim petljama između zavoja koji su u kratkom spoju. U tom slučaju nema razlike između struja na početku i kraju namota, a zaštitni releji upravo na osnovu razlika struja detektiraju kvar. Eventualno, kod armaturnih namota s paralelnim granama, zaštitnim relejima omogućena je detekcija međuzavojnih kratkih spojeva, praćenjem razlika struja u paralelnim granama svake faze.

Iz navedenog slijedi zaključak da je detekcija međuzavojnih kratkih spojeva, odnosno početaka nastajanja istih, od izuzetne važnosti. Njihovim ranim otkrivanjem mogu se izbjeći veliki materijalni troškovi nastali izbijanjem stroja iz pogona i samim popravcima. Iz tog razloga u ovom radu upravo će se promatrati utjecaj kratkog spoja među zavojima svitaka namota armature. Strojevi koji imaju namote sa svitcima predstavljaju ciljanu grupu strojeva za primjenu znanja stečenog analizom u ovom radu.

Nadalje, generator male snage na kojem se radi analiza, potrebno je usporediti s generatorima velike snage, na kojima bi se mogla primjenjivati znanja stečena analizom. Iako generatori malih i velikih snaga rade na istom principu, tip armaturnog namota može se razlikovati. Tako u generatorima snage do 1 MVA

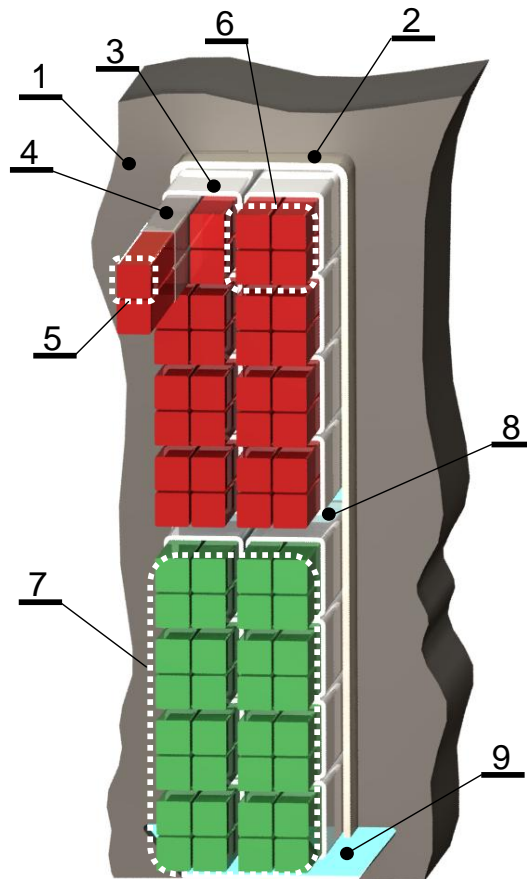
armaturni namot najčešće se izrađuje od okrugle žice i ima svitke (slika 4.6). Generatori snaga od 1MVA do 10 MVA najčešće imaju namot sa svitcima, međutim, umjesto okrugle žice koristi se profilna žica (slika 4.7). Generatori snaga iznad 10 MVA najčešće koriste štapne namote. Razlika između namota sa svitcima i štapnih namota je u broju vodiča u utoru. Kod štapnih namota broj vodiča u utoru je jedan, za jednoslojni, ili dva za dvoslojni namot, a pri tome svaki vodič može biti izrađen od više dionih vodiča koji su na krajevima kratko spojeni. Takvi namoti nemaju zavoje i stoga se na takvim strojevima neće moći primijeniti znanja stečena analizom na stroju koji ima zavoje. Osim štapnih, namoti mogu biti i sa svitcima. Sam naziv ukazuje da je namot izrađen od više svitaka, pri čemu namoti također mogu biti jednoslojni i dvoslojni. Kod jednoslojnih namota broj vodiča po utoru je veći ili jednak dva, a kod dvoslojnog namota broj vodiča po utoru uvijek je veći od dva. Vodiči jednoslojnog i dvoslojnog tipa mogu se sastojati od više dionih vodiča.

Prilikom odabira tipa namota na generatoru potrebno je razmotriti faktore kao što su: faktor punjenja utora, naponska napreznja u generatoru koja određuju izolacijska svojstva namota, tip hlađenja namota, stupanj složenosti izrade namota a time i cijena istog. Faktor punjenja utora je podatak koji nam daje omjer ukupne površine bakra u utoru i ukupne površine utora. Kod namota s okruglom žicom faktor punjenja utora znatno je niži nego kod namota s profilnom žicom, te je za postizanje jednake površine bakra u utoru, kod namota s okruglom žicom potrebno povećati površinu utora. Povećanjem dimenzija utora raste iznos magnetske indukcije u zubima statora ili jarmu, što uzrokuje povećanje gubitaka u željezu stroja. Moguće je povećati dimenzije stroja kako bi se zadržali iznosi magnetskih indukcija u stroju. Međutim, tada je potrebno utrošiti više željeza u izradi stroja. Ipak, upotreba okrugle žice je opravdana zbog niže cijene izrade namota. Kod namota s okruglom žicom nije moguće postići hlađenje kao kod namota s profilnom žicom, a posebice to dolazi do izražaja pri hlađenju glava namota. Nadalje okrugla žica koja se koristi u izradi namota, na površini ima nanesen sloj izolacijskog laka, za razliku od namota s profilnom žicom koji primjenjuju vodiče omotane izolacijskim trakama s preklopom. Za veće naponske razine, primjena vodiča samo s lak izolacijom nije iz sigurnosnih razloga primjenjiva. Nepovoljni slučaj kod namota s okruglom žicom također proizlazi iz proizvoljnog rasporeda vodiča u utoru, pri čemu izolacija može biti pod dodatnim napreznjem koje nije prisutno kod namota s profilnom žicom koji ima strogo određen raspored vodiča u utoru. Okrugla žica s lak izolacijom primjenjuje se za razine naponskih napreznja u iznosu do 1000 V, stoga se primjena namota s okruglom žicom i ograničava na generatore nižih snaga.

Namoti generatora većih snaga izrađuju se od profilne žice, a namot je moguće izraditi sa svitcima i sa štapovima, što potvrđuju i određeni primjeri iz prakse. U ovom slučaju, tip namota odabire se prema opredjeljenju investitora generatora, a prema podacima tvrtke KONČAR - Generatori i motori d.d. važe navedene podjele generatora s obzirom na tip primijenjenog namota.

Promotrimo li namot sa svicima izrađenim od profilne žice, kakav je prisutan kod generatora većih snaga, može se primijetiti određene razlike sa stajališta mogućnosti nastanka kratkog spoja. Kako je već rečeno, kod generatora SGBP 160 M-4M svitci se usipanjem smještaju u utore, te je moguće da su fizički smještene jedna pored druge žice početka i kraja svitka. Kod strojeva većih snaga, koji imaju namot sa svicima izraženim od profilne žice, raspored vodiča u svitku

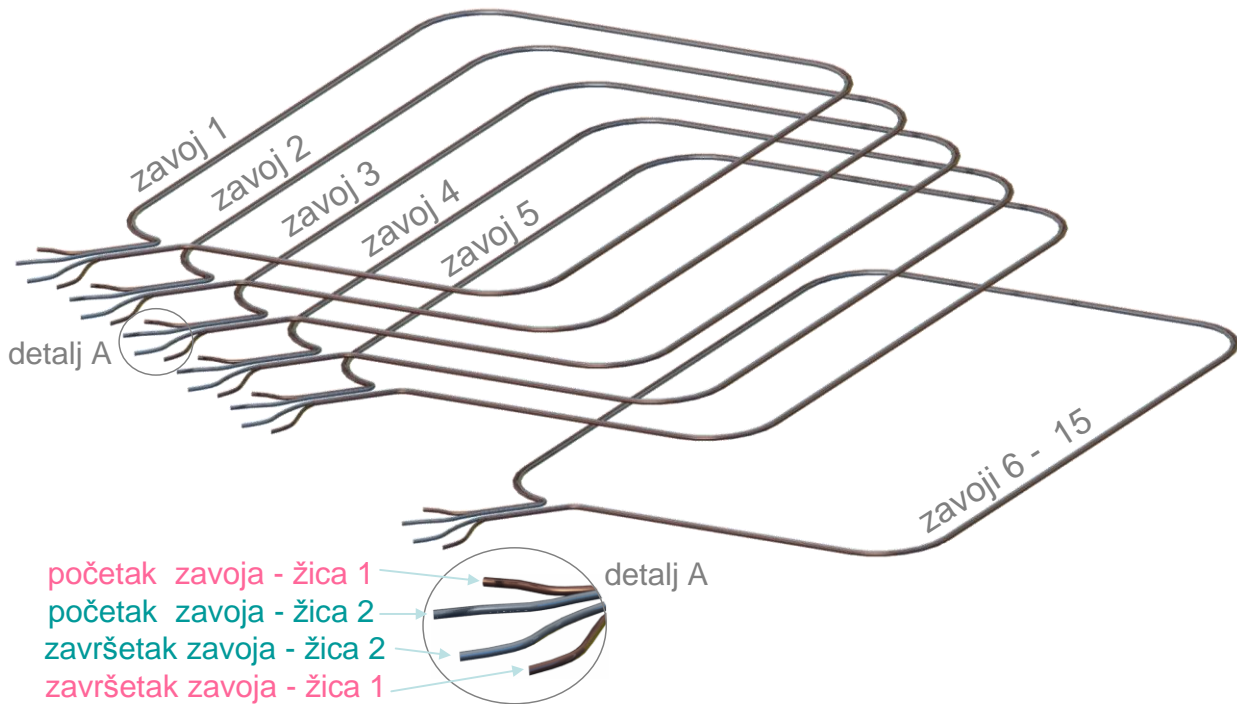
strogo je određen, stoga samo susjedni zavoji fizički mogu biti smješteni jedan pored drugog (vidi sliku 4.7).



Slika 4.7. Statorski utor generatora s dvoslojnim namotom sa svicima izrađenim od profilne žice: 1 – statorski paket dinamolimova, 2 – utorski oblog, 3 – izolacija vodiča, 4 – izolacija dionog vodiča, 5 – dioni vodič, 6 – vodič, 7 – svitak namota, 8 – međuslojna izolacija, 9 - klin.

Kod namota prikazanog na slici 4.7, četiri diona vodiča spojena su paralelno i čine jedan vodič, koji se namata u svitak s osam zavoja. U svaki utor smještaju se dva svitka (dvoslojni namot). Namot sa svicima izrađenim od profilne žice najčešće imaju jedan ili dva vodiča po širini utora, dok se broj vodiča po visini utora kreće u širem rasponu brojeva. Svaki vodič u utoru preko izolacije je u dodiru s tri odnosno pet vodiča, ovisno o njegovom smještaju. Stoga se može zaključiti da je kod većine namota ovakvog tipa, postojanjem jednog kratkog spoja u namotu, maksimalno moguće imati dva kratko spojena zavoja.

Da bi se djelomično omogućila detekcija nastanka kratkog spoja među zavojima svitkastog usipnog namota s okruglom žicom i potpuno kod svitkastog namota s profilnom žicom, na novo izrađenom armaturnom namotu, u svrhu analize, izrađeni su izvodi za pet zavoja koji se mogu kratko spajati (slika 4.8).



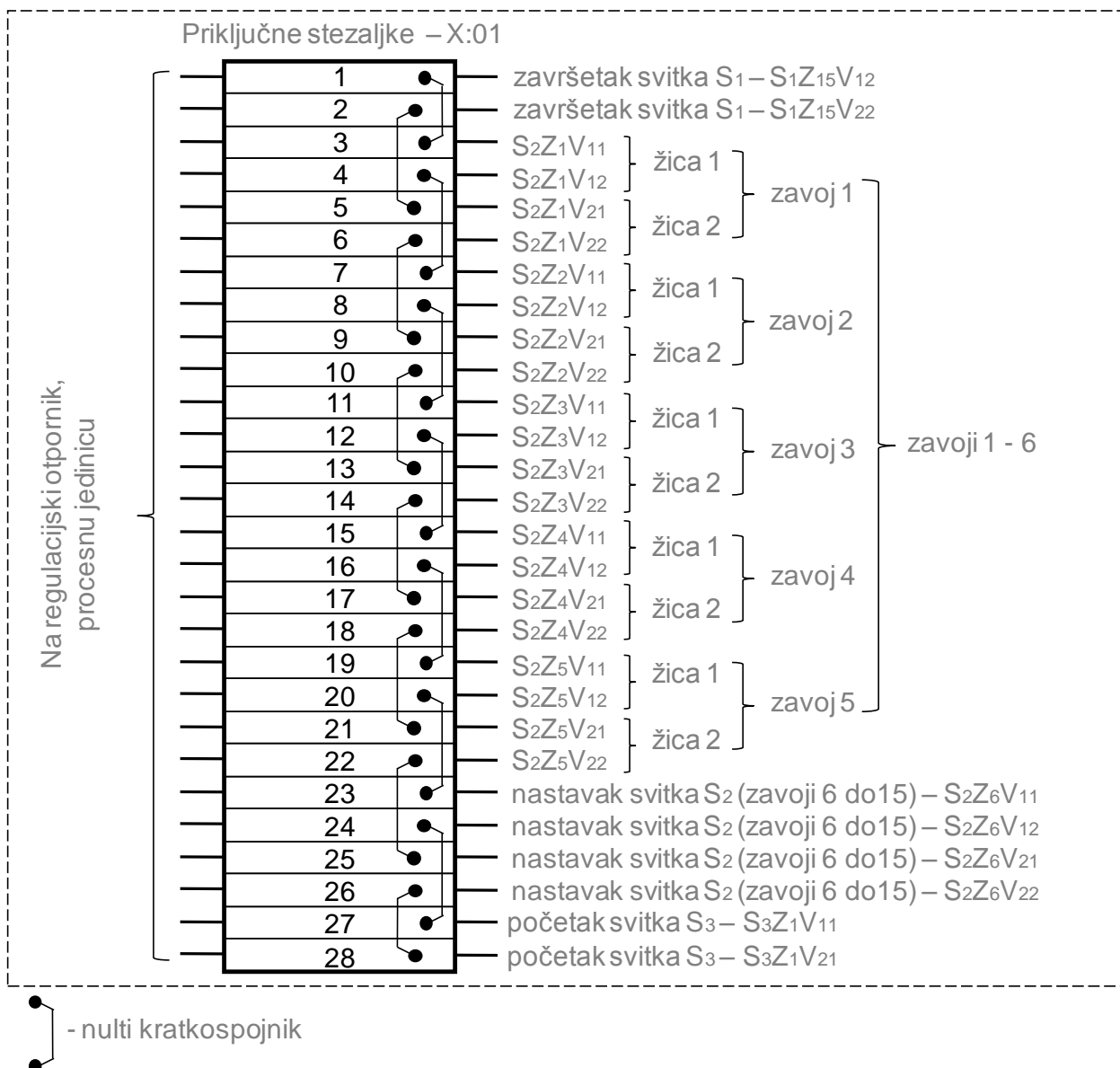
Slika 4.8. Svitak namota armature s izvodima za međuzavojno kratko spajanje

Svaki zavoj svitka namota armature izrađen je od dvije okrugle žice. Iz tog razloga potrebno je za svaki zavoj svitka kojeg želimo biti u mogućnosti kratko spojiti, izvući četiri žice u priključnu kutiju. Zbog velikog broja izvoda svitaka, svakom od izvoda dodijeljena je oznaka tipa $S_k Z_n V_{ij}$ gdje su:

- S svitak,
- k broj svitka (2 svitak s izvodima, 1 prethodni svitak ili 3 slijedeći svitak),
- Z zavoj,
- n broj zavoja (1 – 5),
- V vodič
- i broj žice u zavoju (1 ili 2),
- j početak ili kraj zavoja (1 početak, 2 završetak).

pa tako npr. početak žice 2 u zavoju 5 imati će oznaku $S_2 Z_5 V_{21}$.

Svi izvodi dovedeni su u priključnu kutiju $-U1$, te spojeni na redne stezaljke $-X01$. Redne stezaljke imaju mogućnost međusobnog spajanja umetanjem nultog kratkospojnika. Priključna kutija prikazana je na slici 4.9. Umetanjem svih nultih kratkospojnika namot nema međuzavojnih kratkih spojeva. S jedne strane priključne stezaljke dovedeni su izvodi namota, a s druge strane izvodi se spajaju na regulacijski otpornik i sklopnik koji će na zahtjev napraviti međuzavojni kratki spoj. Na ovaj način omogućen je velik broj različitih kombinacija međuzavojnih kratkih spojeva koji se tijekom eksperimentalnog dijela rada mogu provesti.

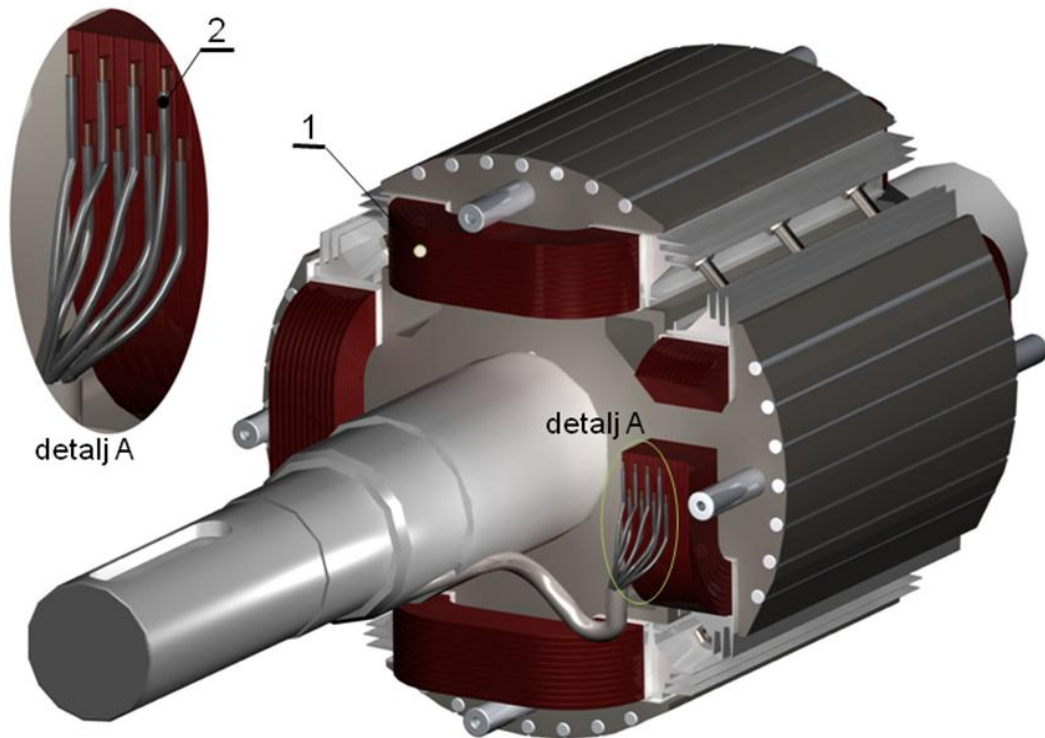


Slika 4.9. Priključna kutija -U1 s izvodima za kratko spajanje

U ovom radu također će se analizirati utjecaj isključenja jednog od svitaka iz namota (svitka br. 2). Ponekad se kod ispitivanja svitaka namota generatora utvrdi da unutar svitka postoje međuzavojni kratki spojevi, te se taj svitak ostavi otvoren i ne spaja se s ostatkom namota. Stoga bi bilo korisno promotriti kakav utjecaj ima namot bez jednog svitka na sliku raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu. Novoizrađen armaturni namot s izvodima omogućiti će i tu analizu.

4.3.2. Ugradnja izvoda za kratko spajanje uzbudnog namota

Generator SGPB 160 M-4M ima četiri pola, a na svaki pol smješten je svitak uzbudnog namota. Na jednom od četiri svitka uzbudnog namota ugradili su se izvodi koji će omogućiti međuzavojne kratke spojeve. Svaki svitak sačinjen je od 88 zavoja profilne žice. Rotor generatora prikazan je na slici 4.7.

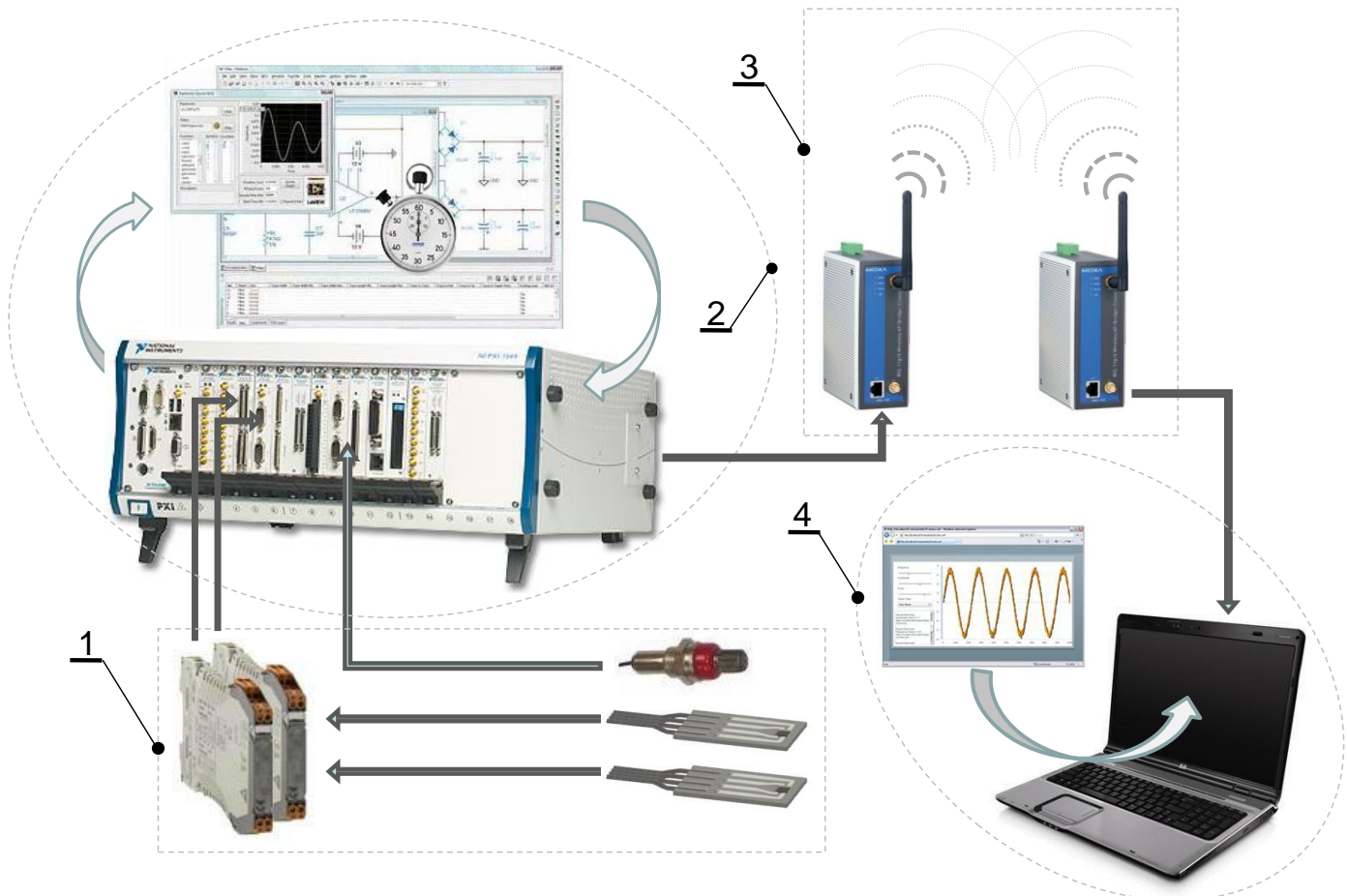


Slika 4.10. Rotor generatora SGBP 160 M-4M s izvodima za međuzavojno kratko spajanje : 1 – uzbudni namot, 2 – izvod za kratko spajanje prigradjen zavoju svitka uzbudnog namota.

Postupak ugradnje izvoda realiziran je na način da se na dijelu vodiča zavoja koji se želi kratko spajati, djelomično uklonila izolacija kako bi se došlo do samog vodiča. Na tom dijelu vodiča prigradili su se izvodi postupkom tvrdog lemljenja (slika 4.10 detalj A). Ukupno se prigradilo osam izvoda svitku namota uzbuđe. Izvodi su pričvršćeni i dovedeni do mjesta predviđenog za prespajanje. Na ovaj način, različitim spajanjem izvoda, moguće je postići međuzavojne kratke spojeve s različitim efektima (npr. kratki spoj dva susjedna zavoja, kratki spoj više zavoja istog sloja, kratki spoj slojeva namota).

5. MJERNA OPREMA

Za provedbu mjerenja u ovom radu korištene su tehnike i tehnička rješenja prisutna u monitoringu rotacijskih strojeva. Upotrijebljena je raznovrsna oprema, koju će se svrstati u slijedeće cjeline: prednji rub (*front end*), procesne jedinice, jedinice za bežični prijenos podataka i serversko računalo. Principna shema mjernog sustava prikazana je na slici 5.1.



Slika 5.1. Principna shema mjernog sustava: 1 – prednji rub, 2 – procesna jedinica, 3 – jedinice za bežični prijenos podataka, 4 – serversko računalo.

5.1. Prednji rub

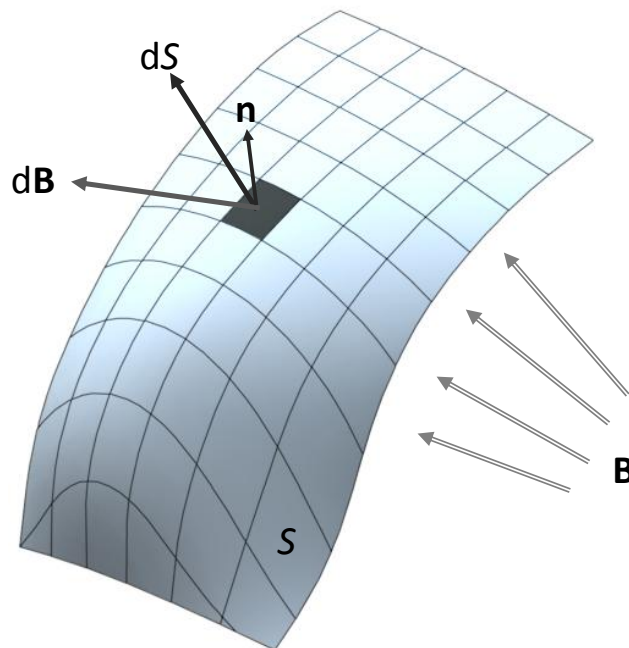
Podrazumijeva svu upotrijebljenu opremu do procesne jedinice. Prednji rub čine mjerni senzori, po potrebi izvori za napajanje senzora i jedinice za kondicioniranje signala (ovisno o tipu senzora i mjenom signala), te potrebno ožičenje. Mjerni senzori korišteni tijekom ispitivanja su:

- Hallovi senzori - koriste se za mjerenje magnetske indukcije.
- mjerni svitci (*search coils*) - mjere napon koji se po zakonu elektromagnetske indukcije inducira u svitku, uslijed promjenjivog magnetskog toka kojeg svitak obuhvaća.

- induktivni senzori – koriste se za određivanje trenutnog položaja rotora u odnosu na stator, u svrhu rekonstrukcije mjerenih signala kod analiziranja istih.

5.1.1. Hallov senzor

Hallov senzor primjenjuje se za mjerenje magnetske indukcije. Magnetskom indukcijom naziva se gustoća magnetskog toka i obično se označava s \mathbf{B} .



Slika 5.2. Definicija magnetske indukcije

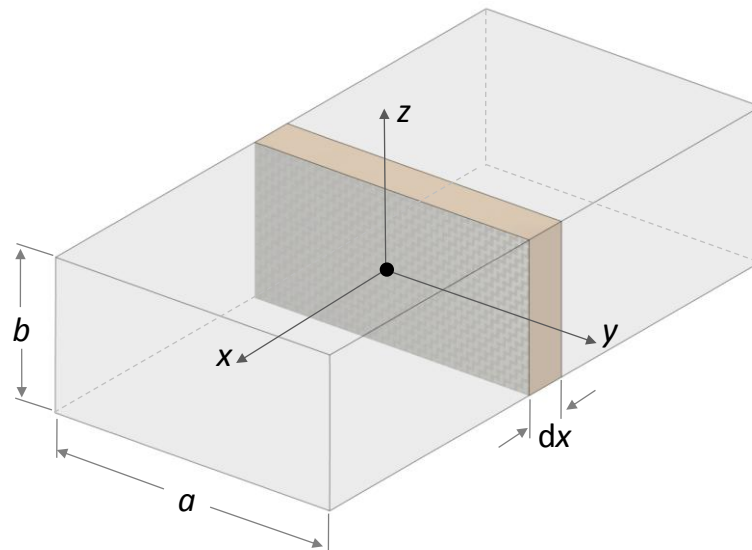
Magnetski tok Φ , definira se kao integral skalarnog produkta vektora diferencijala površine i vektora indukcije po promatranj površini (slika 5.2).

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \cdot dS \quad (5.1)$$

Hallov senzor primjenjuje Hallov efekt za mjerenje magnetske indukcije. Povijest Hallovog efekta započela je 1879. godine kad je Edwin H. Hall otkrio da se na tankoj metalnoj traci u magnetskom polju, kroz koju protječe struja, inducira mali poprečni napon.

5.1.1.1. Hallov efekt

Hallov efekt objasniti će se na elementu visine b i širine a prikazanom na slici 5.3. Elementu će se dodijeliti ime Hallov element i promatrati će se gibanje naboja q u elementu [9].

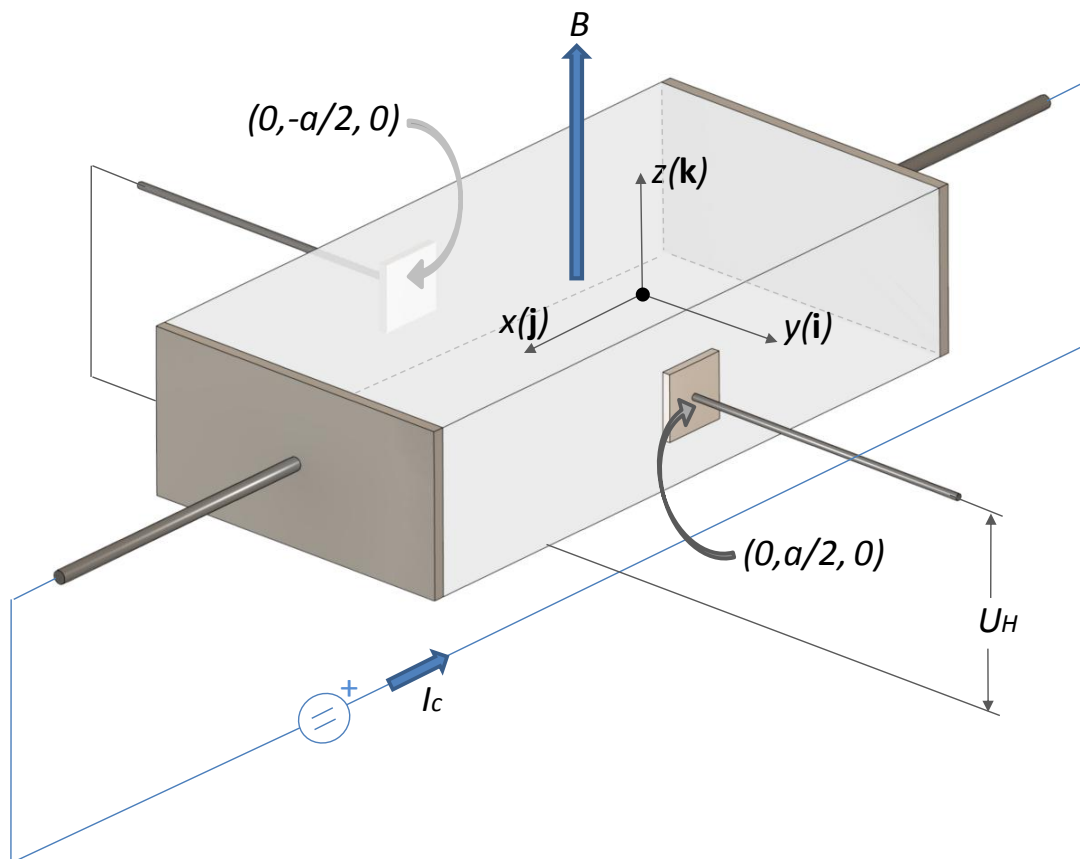


Slika 5.3. Hallov element

Ukoliko je u volumenu $a \cdot b \cdot dx$, količina naboja N , tada svaki djelić elementa duljine dx sadrži naboj Q .

$$dQ = N \cdot q \cdot a \cdot b \cdot dx \quad (5.2)$$

Spoji li se izvor napona na uzdužne priključke Hallovog elementa kao na slici 5.4, naboji u Hallovom elementu gibati će se u x smjeru.



Slika 5.4. Hallov element s priključcima

Prosječna brzina gibanja naboja je v_x . U vremenu dt naboji prijeđu put ds :

$$ds = v_x \cdot dt \quad (5.3)$$

Promjena naboja iznosi:

$$dQ = N \cdot q \cdot a \cdot b \cdot v_x \cdot dt \quad (5.4)$$

i za vremenski interval dt , ova količina naboja pređe iz svakog volumnog elementa u slijedeći. Gibanje naboja predstavlja struju I_c :

$$I_c = \frac{dQ}{dt} \quad (5.5)$$

Ako Hallov element smjestimo u magnetsko polje tada na naboje djeluje dodatna sila koja uzrokuje pomicanje naboja prema $-y$ kraju Hallovog elementa:

$$\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = -q \cdot v_x \cdot B_z \cdot \mathbf{j} \quad (5.6)$$

Pomaci naboja uzrokuju povećanje električkog polja E_y u $+y$ smjeru. Ovo polje izaziva silu na naboje, koja se suprotstavlja magnetskoj sili. Naboji nastavljaju s gibanjem prema $-y$ rubu Hallovog elementa, sve dok se ne izjednače sile koje djeluju na naboje, odnosno:

$$q \cdot E_y \cdot \mathbf{j} = q \cdot v_x \cdot B_z \cdot \mathbf{j} \quad (5.7)$$

uvrštenjem v_x iz relacije (5.4) dobiva se:

$$E_y = \frac{(I_c \cdot B_z)}{(N \cdot q \cdot a \cdot b)} \quad (5.8)$$

Polje E_y može se dobiti mjerenjem razlike potencijala, na poprečnim priključcima Hallovog elementa (vidi sliku 5.4). Razlika potencijala označiti će se s U_H , te proizlazi:

$$U_H = V_{(0, \frac{a}{2}, 0)} - V_{(0, -\frac{a}{2}, 0)} = - \int_{\frac{a}{2}}^{-\frac{a}{2}} E_y \cdot dy = - \frac{(I_c \cdot B_z)}{(N \cdot q \cdot b)} \quad (5.9)$$

U_H poznat je kao Hallov napon, i može se pisati:

$$B_z = - \frac{(b \cdot U_H)}{(R_H \cdot I_c)} \quad (5.10)$$

Faktor koji u cijelosti ovisi o materijalu koji sačinjava Hallov element naziva se Hallov koeficijent i označava se s R_H .

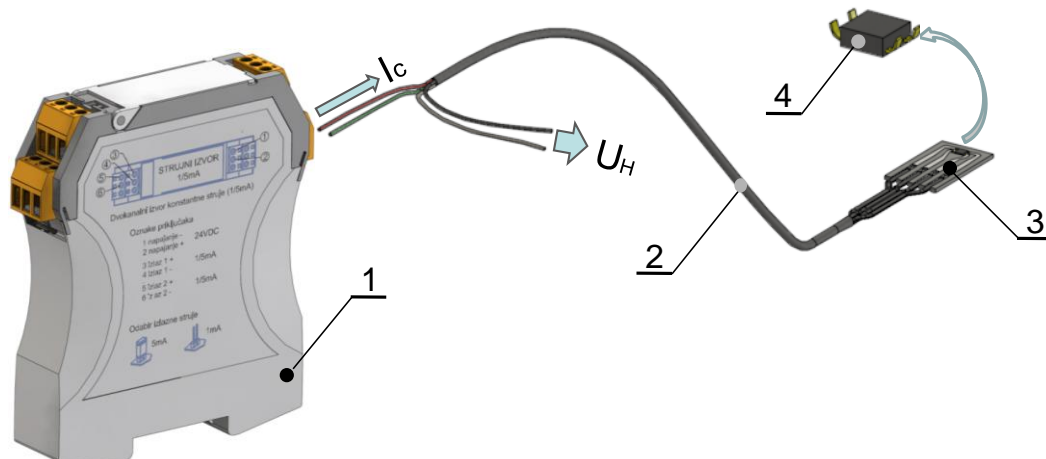
$$R_H = \frac{1}{(N \cdot q)} \quad (5.11)$$

Relacija (5.10) ne daje \mathbf{B} , već samo dio od \mathbf{B} koji je okomit na površinu Hallovog elementa, po imenu B_z .

5.1.1.2. Sastavni dijelovi Hallovog senzora

Hallov senzor sastoji se od Hallovog elementa, pločice za prihvat, signalnog kabela i izvora konstantne struje (slika 5.5). Kako je objašnjeno u poglavlju 5.1.1.1, da bi Hallov element mogao mjeriti potrebno mu je kroz strujne priključke tjerati struju I_c . Iznos struje I_c ovisi o tipu Hallovog elementa i kreće se u rasponu od 1 mA do 100 mA a stvara je izvor konstantne struje (slika 5.5-1). Također zbog zahtjeva za mjerenjem magnetske indukcije u zračnom rasporu od samo 0,8 mm, bilo je potrebno u obzir uzeti i dimenzije Hallovog elementa. Odabran je Hallov element proizvođača Lake Shore Cryotronics Inc. iznimno malih dimenzija (slika 5.5-4).

Direktno spajanje vodiča signalnog kabela na Hallov element teško je provedivo, zbog malih dimenzija priključaka, te velikog unosa topline u element tijekom lemljenja vodiča i priključaka elementa. Također se javlja problem pogreške kuta ugradnje. Naime Hallov element mjeri dio magnetske indukcije okomit na njegovu površinu. Stoga je Hallov element ugrađen u pločicu za prihvat (slika 5.5-3). Pločica za prihvat izrađena je tako da posjeduje utor za Hallov element, kanale za fiksiranje vodiča signalnog kabela, te vodljive veze koje spajaju priključke Hallovog elementa s vodičima. Na taj način riješen je problem fiksiranja, spajanja i kuta ugradnje Hallovog elementa.



Slika 5.5. Sastavni dijelovi Hallovog senzora: 1 – izvor konstantne struje, 2 – signalni kabel, 3 – pločica za prihvat, 4 – Hallov element.

Nakon odabira Hallovog elementa bilo je moguće odrediti iznos struje I_c , odnosno izvor konstantne struje (slika 5.5-1). Prema uputama proizvođača i mjernom području senzora odabrani iznos struje I_c je 5 mA. U tu svrhu izrađen je izvor konstantne struje s mogućnošću podešavanja izlazne struje. Princip rada

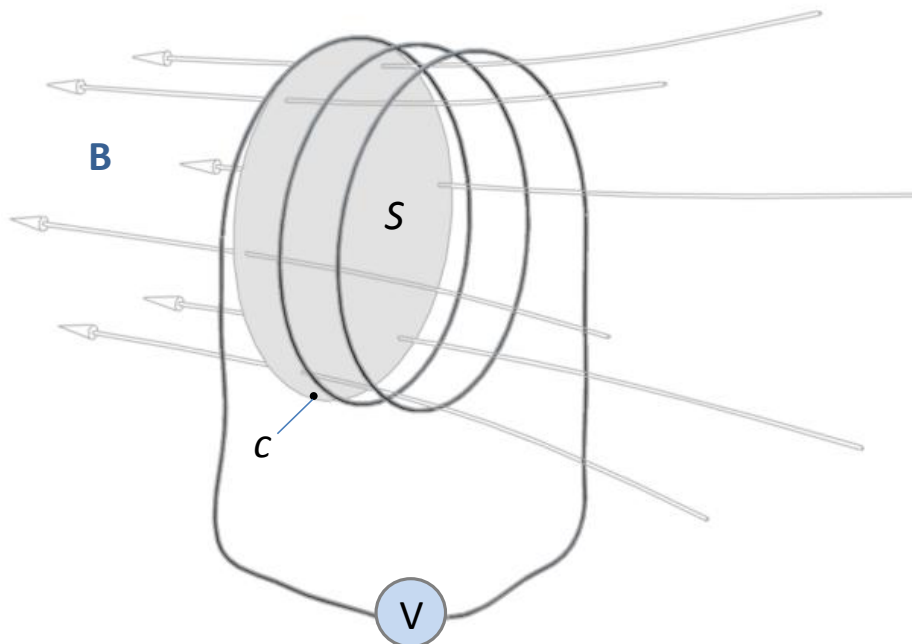
izvora zasnovan je na naponskoj referenci koja se često primjenjuje u mjernom instrumentariju.

Za pribavljene Hallove elemente nisu dostupne liste umjeravanja, te je svaki od njih potrebno umjeriti, odnosno odrediti izlaznu karakteristiku. Umjeravanje se vršilo u tvrtci KONČAR-Institut za elektrotehniku d.d. Iz izlaznih karakteristika može se zaključiti da Hallov senzor ima linearnu izlaznu karakteristiku, odnosno izlazni napon U_H proporcionalan je mjerenoj magnetskoj indukciji uz konstantnu struju I_c . Maksimalno odstupanje od linearnosti na mjernom području 0,01 – 1,6 T je 1%. To odstupanje posljedica je nesavršenosti izrade Hallovog elementa, klase točnosti instrumenta za očitavanje vrijednosti napona U_H , te stabilnosti izvora konstantne struje I_c .

Za struju u iznosu od 5 mA tipična osjetljivost Hallovog elementa je 1 V/T, što omogućuje direktno spajanje izlaza Hallovog senzora na jedinicu za procesiranje podataka mjerenja, tj. nije potrebna ugradnja pojačala za mjerne kanale s Hallovim senzorima.

5.1.2. Mjerni svitak

Mjerni svitak mjeri napon koji se po zakonu elektromagnetske indukcije inducira u svitku uslijed promjenjivog magnetskog toka kojeg mjerni svitak obuhvaća (slika 5.6). Zakon elektromagnetske indukcije kaže da je *inducirani napon u strujnom krugu jednak brzini kojom se mijenja magnetski tok ulančen strujnim krugom, a smjer inducirano napona je takav da protjera struje koje se protive promjeni toka* [10]. U daljnjem tekstu, za mjerne svitke pisati će se da mjere magnetski tok, umjesto inducirano napona uslijed promjene magnetskog toka.



Slika 5.6. Definicija elektromagnetske indukcije.

Inducirani napon u vodljivoj petlji površine S , koja je obrubljena konturom c , razmjeran je vremenskoj promjeni magnetskog toka kojeg petlja obuhvaća:

$$u_{ind} = \oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\phi}{dt} = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \cdot d\mathbf{S} \quad (5.12)$$

ako se uzme da se smjer polja podudara s normalom površine, u kojoj leži vodljiva petlja onda je:

$$u_{ind} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{dB}{dt} \cdot S \quad (5.13)$$

za vremensku promjenu magnetske indukcije:

$$B = B_m \sin(\omega \cdot t) \quad (5.14)$$

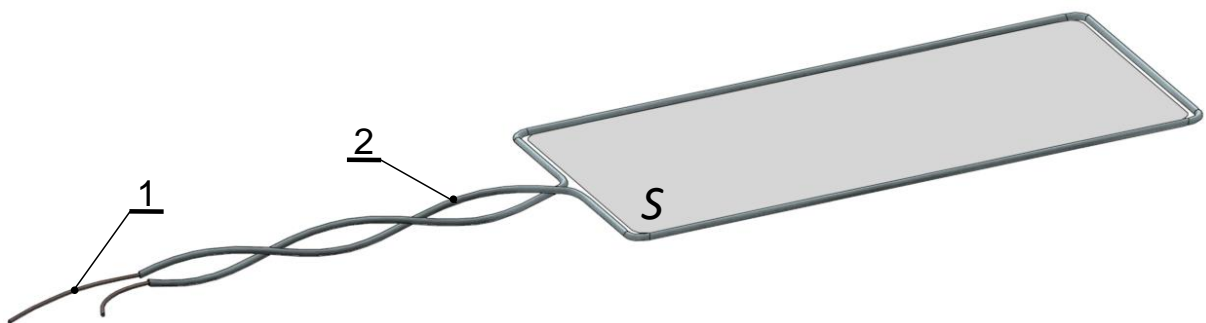
inducirani napon je:

$$u_{ind} = B_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot S \quad (5.15)$$

Za petlju s N zavoja, odnosno svitak, inducirani napon jednak je:

$$u_{ind} = B_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot S \cdot N \quad (5.16)$$

Tipičan mjerni svitak, kakav je ugrađen na mjernom objektu, prikazan je na slici 5.7. Mjerni svitak izrađen je od bakrene žice presvučene lakom, a dodatno je izoliran izolacijskim bužinom. Mjerni svitak postavlja se tako da najkraćom putanjom obuhvati mjernu površinu S . Također je bitno da se vodiči mjernog svitka, nakon što obuhvate mjernu površinu, uvrnu, i kao takvi vode do jedinice za procesiranje podataka mjerenja. Razlog zbog kojeg se vodiči mjernog svitka međusobno uvrću je kako bi se eliminirao napon koji se inducira na dijelu vodiča koji ne obuhvaća površinu S i pretstavlja smetnju.



Slika 5.7. Mjerni svitak: 1 – bakrena žica \varnothing 0,25 mm presvučena lakom, 2 – izolacijski bužir.

5.1.3. Induktivni senzor

U ovom radu induktivni senzori koriste se kao poveznica podataka mjerenja sa statora i rotora. Naime, mjerenja su se obavila s dvije procesne jedinice. Jedna je smještena na rotoru i mjeri rotorske veličine, a druga je smještena u neposrednoj blizini generatora i mjeri statorske veličine. Procesne jedinice neovisno jedna o drugoj procesiraju mjerenja i imaju vlastita interna vremena. Stoga je bilo potrebno na određen način i jednoj i drugoj procesnoj jedinici dati takt za sinkronizaciju. Takt omogućuje vremensko poravnavanje mjernih signala kod analize rezultata mjerenja.

Procesnim jedinicama takt se uvodi kao tipsko mjerenje na jednom od mjernih kanala. Namjera je za svaki okret rotora dobiti prepoznatljivi uzorak u mjernom signalu, koji će se nakon obrade u procesnoj jedinici koristiti kao takt. Kako imamo dvije procesne jedinice potrebna su nam i dva induktivna senzora. Jedan od senzora smjestit će se na rotor i nazvat će se rotirajući, a drugi izvan generatora i nazvat će se mirujuć sensor.

Induktivni senzori detektiraju prisutnost feromagnetika u neposrednoj okolini. To im omogućuje jezgra sa zavojnicom i elektroničko sklopovlje koje detektira poremećaje polja koje stvara jezgra uslijed prisutnosti feromagnetika (slika 5.8). Izlaz iz ovakvog senzora može biti digitalni (0 ili 1), ili analogni (tipične vrijednosti izlaza su 0 - 20 mA, 4 - 20 mA, 0 - 10 V, 2 - 10 V, 2 - 18 V...). Na tržištu su dostupne različite varijante ovih senzora.



Slika 5.8. Induktivni senzor: 1 – jezgra sa zavojnicom, 2 – elektroničko sklopovlje.

Upotrijebljeni senzor koristi se za mjerenje brzina vrtnje, te relativnih pomaka vratila generatora. Mjerno područje ovih senzora je 2,4 mm, a pokrivaju frekvencijsko područje do 10 kHz. Izlaz senzora je 2 – 18 V.

Za realizaciju mjerenja koji će dati taktove procesnim jedinicama potrebno je ugraditi nosače induktivnih senzora i dva markera. Markeri moraju u odnosu na induktivne senzore biti ugrađene tako da ih senzori pri prolasku detektiraju. Slika 5.8 prikazuje način na koji je realizirano davanje taktova.

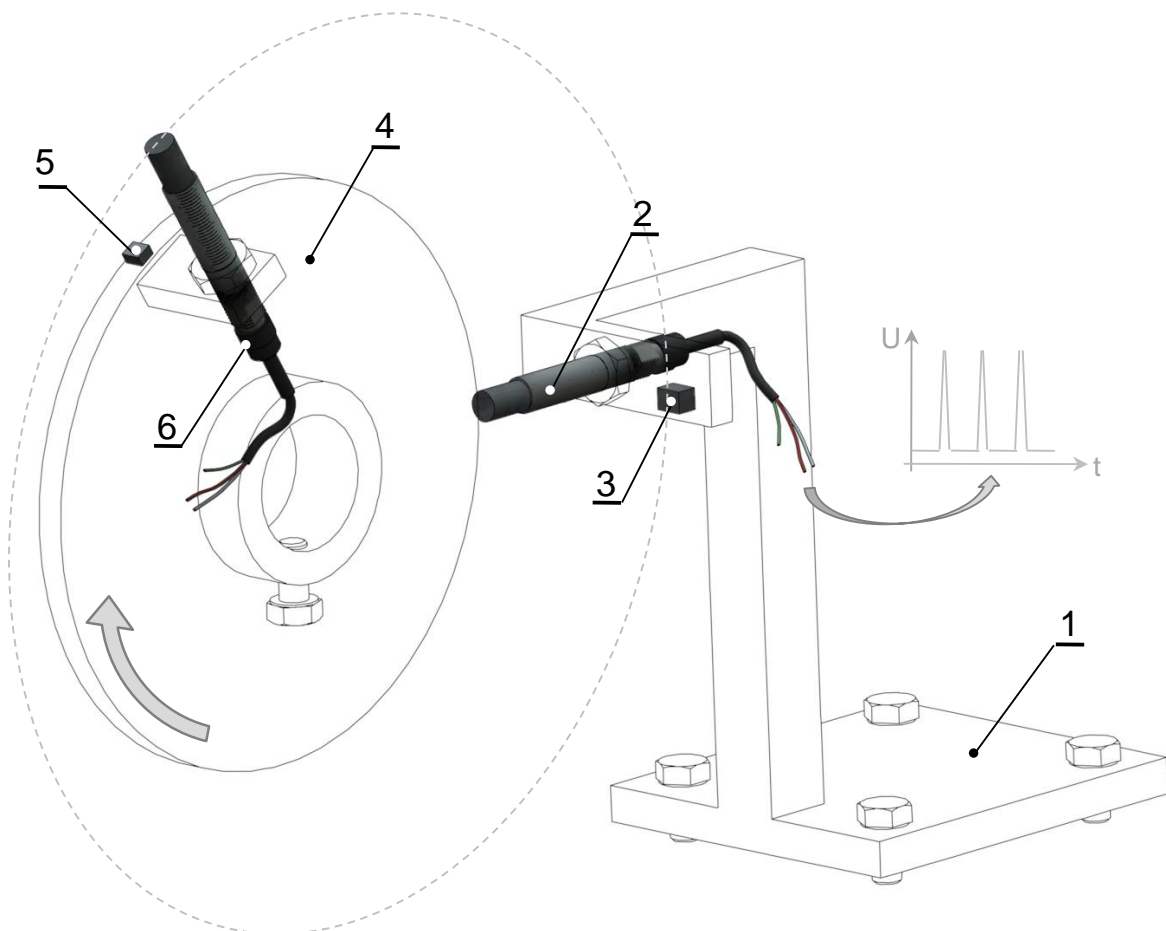
Na rotorsku osovinu potrebno je ugraditi nosač (slika 5.9-4) rotirajućeg senzora (slika 5.9-6). Taj nosač je diskastog oblika, a na obodu mu je prigraden marker (slika 5.9-5) koju detektira mirujuć sensor (slika 5.9-2).

Pored generatora potrebno je postaviti nosač (slika 5.9-1) mirujućeg senzora (slika 5.9-2), tako da senzor detektira prolaz markera (slika 5.9-5) na rotorskom nosaču. Na nosač (slika 5.9.-1) prigraden je marker (slika 5.9-3) koju detektira rotirajući senzor.

Induktivni senzor ima linearnu izlaznu karakteristiku, pri čemu je izlazni napon u ovisnosti o udaljenosti vrha senzora i metala. Ukoliko je metal izvan mjernog opsega senzora, senzor je u zasićenju a izlazni napon je jednak gornjoj granici, odnosno iznosi 18 V. Približavanjem metala unutar mjernog opsega senzora, izlazni napon linearno opada s udaljenošću vrha senzora i metala.

U ovom slučaju, kad marker naiđe na senzor, odnosno senzor na marker, izlazni napon senzora naglo će pasti. Iznos izlaznog napona ovisi o udaljenosti vrha senzora i markera. Udaljavanjem markera od senzora napon će porasti na napon zasićenja. Na ovaj način i rotirajući i mirujući senzor će za svaki okret dati jedan impuls, što će se koristiti kod usporedbe podataka mjerenja s rotora i statora. Vremenski razmaci impulsa ovise o brzini vrtnje generatora.

Mjerni signali koji se žele uspoređivati prvo će se odrezati između dva impulsa induktivnog senzora, te vremenski poravnati na način da se impulsi rotirajućeg i mirujućeg senzora poklapaju.



Slika 5.9. Prikaz ugradnje induktivnih senzora: 1 – nosač senzora (izvan generatora), 2 – induktivni senzor, 3 – marker, 4 – nosač senzora (na rotoru), 5 – marker, 6 – induktivni senzor.

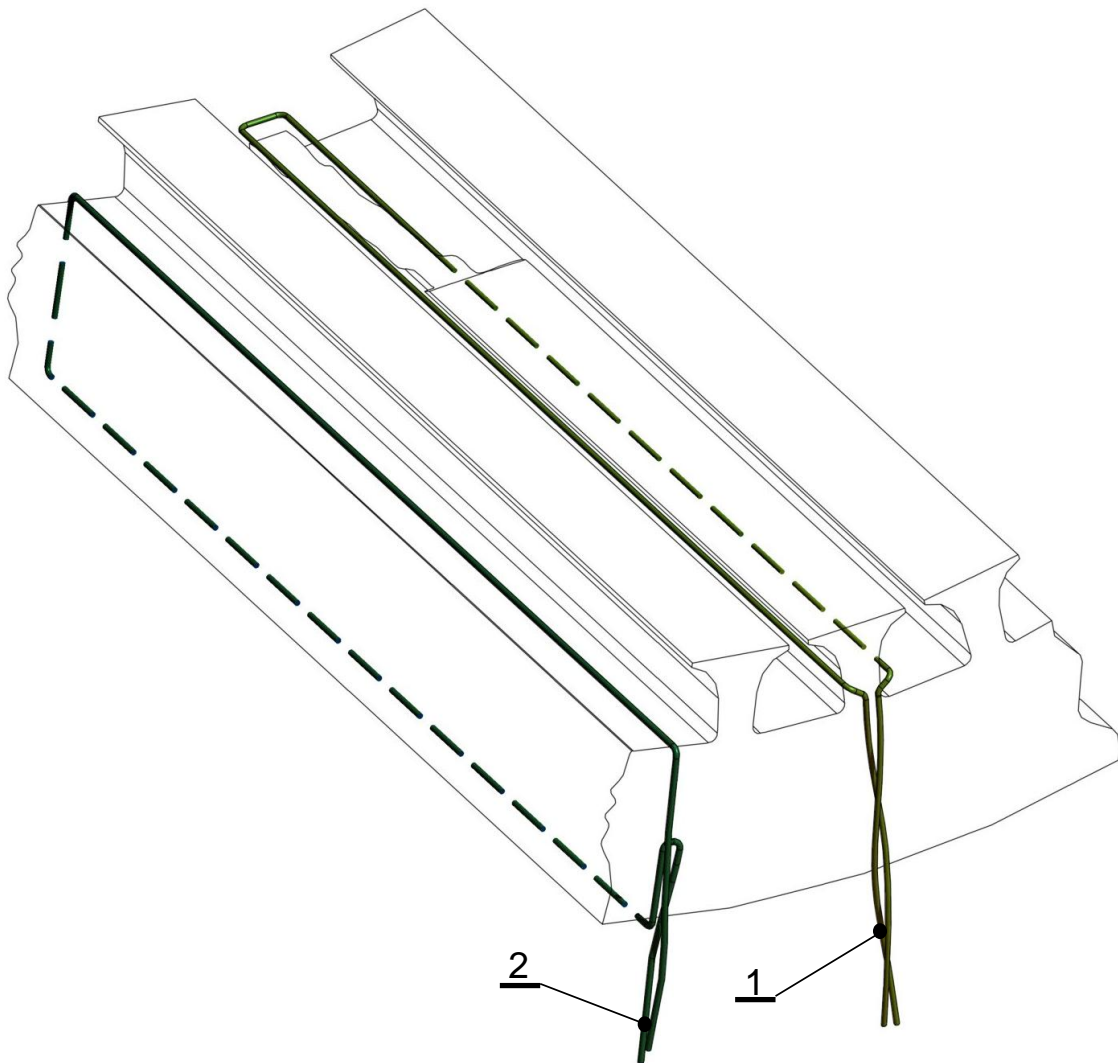
Također je potrebno uskladiti vremena procesnih jedinica na početku snimanja, a razilaženje tog vremena tijekom snimanja ne smije biti veće od vremena koje protekne za jedan okret rotora.

Na ovaj način, pri uspoređivanju rotorskih i statorskih podataka mjerenja, omogućena je usporedba događaja koji su se istovremeno dogodili.

5.1.4. Ugradnja senzora na mjerni objekt

Senzori su ugrađeni na mjesta od interesa, a ugradnja istih podijeljena je u tri faze s obzirom na dostupnost dijelova stroja na kojima se vrši ugradnja. Kako je prikazano u poglavlju 4, armaturni namot generatora zamijenio se novim. Stoga je ugradnja dijela senzora obavljena u fazi kad se postojeći namot izvadio, a prije umetanja novog namota. U prvoj fazi ugrađeno je ukupno četiri mjerna svitaka, i to:

- dva mjerna svitka koja mjere magnetski tok zuba statorskog paketa. Mjerni svitci ugrađeni su kao na slici 5.10-1, a obuhvaćaju zub na najmanjem presjeku. Jedan mjerni svitak ugrađen je tako da mu je jedna strana u utoru br. 6, a druga strana u utoru br. 7 i ima oznaku Ms_1 . Drugi mjerni svitak ugrađen je tako da mu je jedna strana u utoru br. 27, a druga strana u utoru br. 27 i ima oznaku Ms_2 .
- dva mjerna svitka koja mjere magnetski tok jarma statora. Mjerni svitci ugrađeni su kao na slici 5.10-2. Jedna strana svitka smještena je na dno utora br. 8, odnosno utora br. 29, a svitci obuhvaćaju statorski paket na najmanjem presjeku. Mjerni svitak koji je ugrađen u utoru br. 8 ima oznaku Ms_3 , dok mjerni svitak koji je ugrađen u utoru br. 29 ima oznaku Ms_4 .



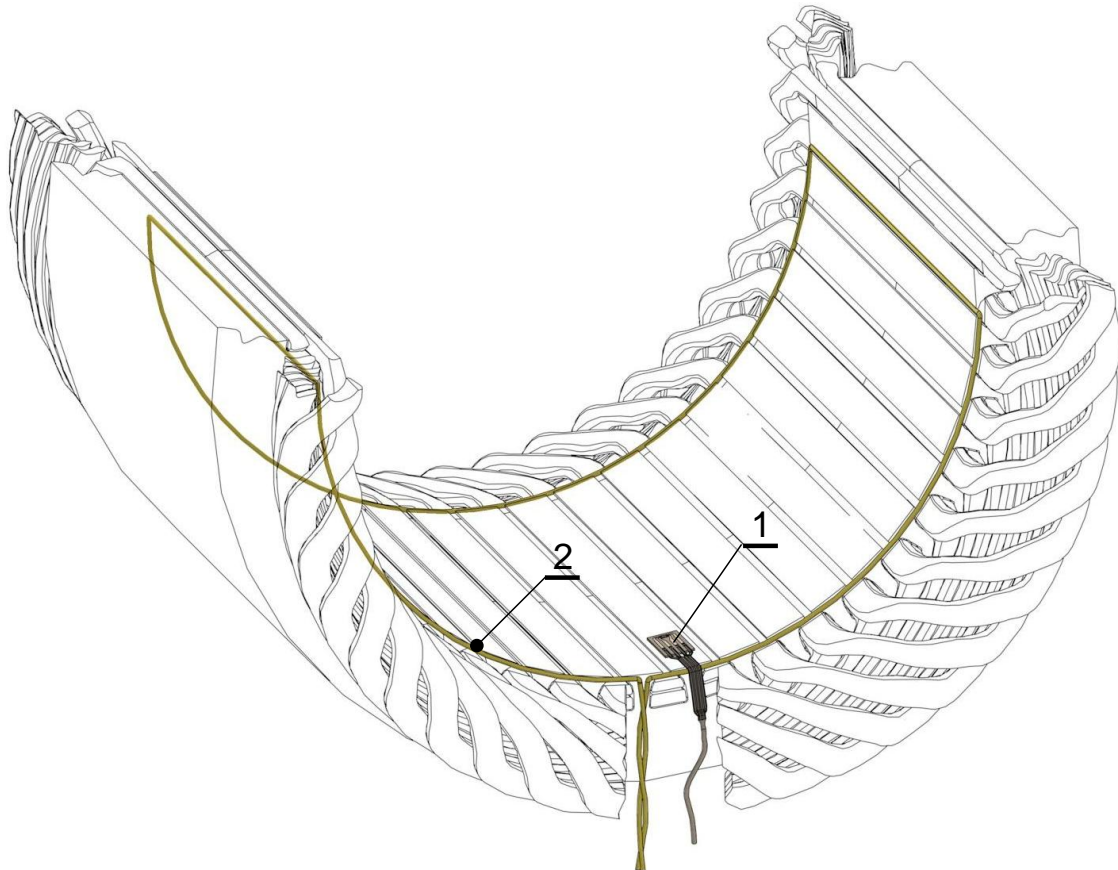
*Slika 5.10. Prikaz ugradnje svitaka za mjerenja magnetskog polja (prva faza):
1 – svitak za mjerenje magnetskog polja zuba, 2 – svitak za mjerenje magnetskog polja kroz statorski paket.*

Nakon ugradnje mjernih svitaka uložen je armaturni namot u statorske utore. Izvodi početaka i krajeva faznih namota armature, izvodi mjernih svitaka te izvodi za kratko spajanje namota izvučeni su izvan generatora i spojeni u priključnoj kutiji generatora. Izvodi za kratko spajanje namota spojeni su kao na slici 4.9, pri čemu armaturni namot nema kratkih spojeva. Potom je namot impregniran lakom za impregnaciju, te električki ispitan metodom udarnog napona. Valni oblici odziva faznih namota na udarni napon, međusobno su uspoređeni, pri čemu se krivulje odziva sve tri faze međusobno preklapaju. Prema tome, ugradnja izvoda za kratko spajanje armaturnog namota, nije dovela nesimetrije u impedanciji pojedinih namota, te do grešaka u izolaciji.

U drugoj fazi, ugrađena je grupa senzora smještenih unutar provrta generatora i to na statorski i rotorski dio stroja.

Senzori ugrađeni na stator stroja su:

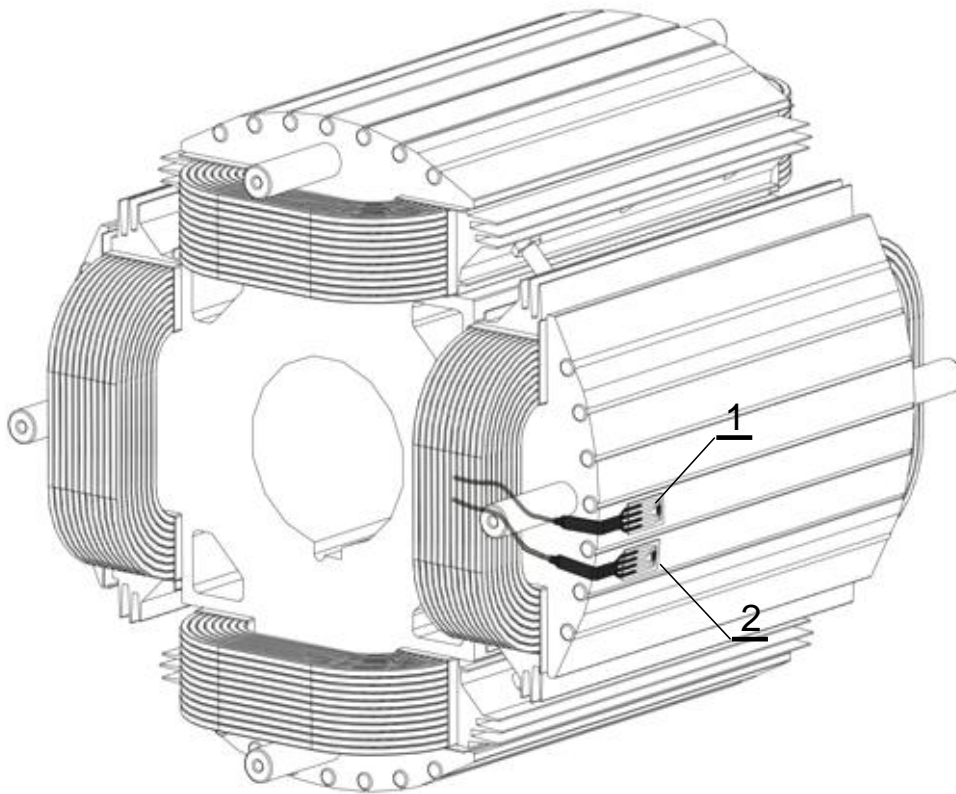
- Hallov senzor ugrađen na zub statorskog paketa. Senzor je ugrađen kao na slici 5.11.-2, na zub između utora br. 5 i 6, a ima oznaku H_7 . Senzor mjeri dio magnetske indukcije koji je okomit na površinu ugradnje senzora.
- mjerni svitak koji mjeri magnetski tok na dvostrukom polnom koraku. Svitak je ugrađen na klin namota kao na slici 5.11.-2, a označen je kao Ms_7 . U daljnjem tekstu ovaj svitak zvat će se svitak za mjerenje polja kvara.



Slika 5.11. Prikaz ugradnje senzora na statorski paket (druga faza): 1 – Hallov senzor ugrađen na zub statorskog paketa, 2 – svitak za mjerenje polja kvara.

Senzori ugrađeni na rotorski dio stroja su:

- dva Hallova senzora ugrađena na rotorsku polnu papuču. Senzori su ugrađeni na istu polnu papuču kako je prikazano na slici 5.12, s tim da je Hallov senzor koji ima oznaku H_3 ugrađen bliže sredini polne papuče. Drugi senzor ima oznaku H_4 i ugrađen je pored senzora H_3 na jednak način, ali nešto dalje od sredine polne papuče. Senzori mjere dio magnetske indukcije koji je okomit na površinu ugradnje senzora.



Slika 5.12. Prikaz ugradnje Hallovih senzora na polnu papuču rotora (druga faza):
1 – senzor H_3 , 2 – senzor H_4 .

Nakon ugradnje svih senzora u generatoru, generator je sastavljen i ugrađeni su preostali senzori (treća faza). U tu grupu senzora spadaju induktivni senzori. Njihova ugradnja prikazana je u poglavlju 5.1.3.

5.2. Procesne jedinice

Prednji rub omogućuje da se mjerena fizička veličina putem senzora i jedinica za kondicioniranje signala pretvori u mjerljivi strujni ili naponski signal koji se predaje procesnoj jedinici.

Procesna jedinica (PJ) putem ulaznih modula prikuplja mjerne signale, vrši njihovu obradu, a obrađene podatke putem računalne mrežne infrastrukture prosljeđuje u serversko računalo. Pored toga PJ može imati i zaštitnu ulogu, pri čemu osim ulaznih modula za prihvatanje mjernih signala, mora posjedovati i izlazne module s mogućnošću upozoravanja na određenu promjenu stanja. Stoga bitne funkcije PJ su [11]:

- analogno-digitalna pretvorba,
- (matematička) obrada digitaliziranih podataka,
- praćenje promjene mjerenih veličina,
- određivanje alarmnih stanja,
- izdavanje naloga upravljačkom sustavu.

Na PJ također se postavljaju zahtjevi kao što su sposobnost za rad u stvarnom vremenu, pouzdanost, fleksibilnost, nadogradivost i modularnost.

Uvažavajući zadane zahtjeve na PJ, tvrtka KONČAR-Institut za elektrotehniku d.d, razvila je vlastiti sustav monitoringa rotacijskih strojeva, a neka tehnička rješenja proizašla iz tog sustava primijenjena su u ovom radu.

Kako je već navedeno u ovom poglavlju, senzori su ugrađeni na rotoru i statoru generatora, što zbog rotiranja rotora predstavlja određenu poteškoću u realizaciji mjerenja. Postoje više načina kako bi se riješio problem prijenosa podataka iz rotirajućeg u nepomični dio stroja:

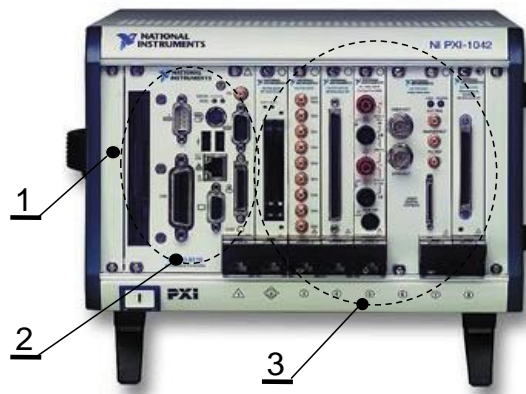
- Problem je rješiv upotrebom kliznih koluta i četkica. Na rotirajućem dijelu stroja ugrađuju se klizni koluti na koje su spojene veze prema sensorima, a na nepomičnom dijelu stroja potrebno je ugraditi držače četkica i četkice. Prijenos signala ostvaruje se klizanjem četkica po kliznim kolutima, pri čemu broj kliznih koluta držača četkica i četkica ovisi o broju signala koje se žele prenijeti iz rotirajućeg u nepomični dio stroja. Za prijenos jednog signala potreban je jedan par kliznih kolutova držača četkica i četkica. Na četkice su spojene veze prema PJ. Na ovaj način dovoljna je samo jedna PJ, koja mora biti u mogućnosti prihvatiti željeni broj mjernih signala.
- Umjesto kliznih koluta moguće je upotrijebiti jedinice za bežični prijenos mjernih signala. Na taj način, svaki od signala se bežičnim putem prenosi iz rotirajućeg u nepomični dio stroja. Pri tome je za svaki signal potreban prijemnik (*receiver*) i predajnik (*transmitter*). Ovo rješenje zahtjeva samo jednu PJ koja mora biti u mogućnosti prihvatiti željeni broj mjernih signala.
- Problem je moguće riješiti na način da se i na rotirajućem i nepomičnom dijelu stroja ugrade po jedna PJ, pri čemu je omogućeno direktno spajanje prednjeg ruba na PJ. Ovo rješenje moguće je primijeniti ukoliko je PJ smještena na rotirajućem dijelu, posjeduje memoriju za pohranu podataka mjerenja, odnosno da se podaci nakon obrade bežičnim putem prebace s rotirajućeg na nepomični dio stroja. Također treba voditi računa da je oprema ugrađena na rotirajućem dijelu stroja predviđena za rad u tim uvjetima.

Sva navedena rješenja prijenosa podataka iz rotirajućeg u mirujući dio stroja, imaju svoje prednosti i nedostatke. Tako npr. ugradnja kliznih koluta predstavlja značajan problem, pogotovo kod velikih strojeva. Također, veća grupa mjerenja iziskuje velik broj kliznih koluta, a ne treba zanemariti ni trošenje četkica i kontaminaciju prostora ugljenom prašinom. Uporabom jedinica za bežični prijenos signala, eliminirane su poteškoće koje stvaraju klizni kolutovi i četkice, međutim za prijenos određenog broja mjernih signala, potreban je jednak broj jedinica za bežični prijenos kao i kliznih kolutova. U slučaju većeg broja mjernih signala, zbog visoke cijene samih uređaja, upitna je isplativost ovakvog rješenja. Kao mogućnost nudi se rješenje s dvije procesne jedinice a bez ugradnje mehaničkih dijelova i velikog broja jedinica za bežični prijenos podataka. U tom slučaju svaka od jedinica može prikupiti određen broj mjernih signala, te ih nakon obrade pohraniti u vlastitu memoriju ili uporabom samo jednog para jedinica za bežični prijenos sve obrađene podatke prebaciti s rotirajućeg na nepomični dio stroja. Rješenje koje koristi dvije PJ odabrano je kao najprimjerenije za realizaciju potrebnih mjerenja u ovom radu.

PJ koja prihvaća mjerne signale s nepomičnog dijela stroja nazvati će se statorska, a PJ ugrađenu na rotirajućem dijelu stroja nazvati će se rotorska PJ.

5.2.1. Statorska procesna jedinica

Kao hardversko rješenje za statorsku PJ odabrano je ugradbeno računalo bazirano na PXI tipskom rješenju. Radi se o PC platformi upakiranoj u prihvatljivo industrijski optimizirano kućište (slika 5.13). PXI sastoji se od tri osnovna dijela: kućišta, kontrolera i perifernih modula.



Slika 5.13. PXI platforma za mjerenje; 1 – kućište, 2 – kontroler, 3 – ulazno/izlazni moduli

PXI koristi PCI sabirnicu velike brzine koja je pretstavlja tipsko rješenje u izradi hardvera i softvera za stolna računala. To omogućuje dobavljujivost dijelova od više različitih proizvođača, a tako i široku rasprostranjenost ove opreme.

Programiranje hardvera izvodi se iz programskog okruženja LabView (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*), razvijenog od tvrtke National Instruments. LabView je po prirodi grafičko programiranje. Umjesto pisanja tekstualne datoteke, kompajliranja i izrade izvršnoga koda, različiti grafički elementi poput kontrola, indikatora i čvorova povezuju se pomoću grafički reprezentiranih žica i na taj način tvore blok dijagram [11]. U LabVIEW programskom okruženju moguće je realizirati projekte na području mjerenja, simulacije kontrolnih sustava, obrade signala i slike, te industrijskog monitoringa i kontrole. Osnovno LabVIEW programsko okruženje može se proširiti modulima posebno namijenjenim za svako od navedenih područja primjene. LabVIEW Real-Time modul, proširuje LabVIEW grafičko programiranje na način da omogućuje stvaranje pouzdanih, determinističkih aplikacija. Podržani operativni sustav za rad PXI kontrolera u stvarnom vremenu (*real-time*) unutar LabVIEW Real-Time modula je Phar Lap ETS.

Zahtjev za rad u stvarnom vremenu nužan je ukoliko se od PJ očekuje zaštitna funkcija, odnosno ukoliko želimo osigurati postojanje krajnjeg vremena (*deadline*), u kojem PJ mora dati odziv na određenu pobudu. Osim mogućnosti određivanja vremena koje protekne od pobude do odziva PJ, rad u stvarnom vremenu dozvoljava dodjelu prioriteta zadacima koje PJ treba odraditi. To znači da zadatak

najvećeg prioriteta kada je potrebno može preuzeti kontrolu procesora. S obzirom na očekivani niz složenih, te vremenski i procesorski vrlo zahtjevnih matematičkih obrada poput digitalnog filtriranja, Fourierove analize, pri čemu je neke potrebno izvoditi konstantno u stvarnome vremenu, a neke u preostalom slobodnom vremenu procesora, evidentna je potreba za mogućnošću raspoređivanja zadataka (*task scheduling*) procesnoj jedinici. To nam omogućuju procesori visoke klase (*high-end processor*) za rad u stvarnome vremenu RTOS (*real-time operating system*) [11]. Takav procesor ugrađen je u kontroler statorske PJ.

Upotrijebljena PJ modularnog je tipa, pri čemu je raspoloživi broj utora za smještaj aplikativnih modula ovisan o tipu kućišta. U prvi utor smješta se kontroler, dok su ostala mjesta na raspolaganju aplikativnim modulima. Tvrtka National Instruments nudi više od 200 različitih tipova aplikativnih modula, a pošto je PJ izrađena po otvorenom standardu, ukupna ponuda modula svih proizvođača znatno je i veća.

Kako bi se odredili potrebni mjerni moduli za prihvat mjernog signala, isti je potrebno klasificirati. Mjerni signali klasificiraju se kao digitalni i analogni:

- digitalni ili binarni signal može imati samo dvije razine ili stanja, „on“ stanje u kojem je signal na najvećoj razini, i „off“ stanje, u kojemu je signal na najnižoj razini.
- analogni signali sadrže informaciju pohranjenu u promjeni amplitude signala u vremenu. Važne informacije sadržane u signalu ovise o tome da li se amplituda signala mijenja brzo ili polako u ovisnosti o vremenu, te o tome da li se signal promatra u vremenskom ili frekvencijskom području.

Analogni signal može biti istosmjerni (DC) i izmjenični (AC):

- istosmjerni signal je statički ili polako promjenjiv analogni signal. Informacija prenošena ovakvim tipom signala sačuvana je u razini amplitude signala u danom trenutku u vremenu i ne ovisi o tome kako se signal mijenja s vremenom.
- informacija prenošena izmjeničnim analognim signalom sačuvana je ne samo u razini amplitude signala u određenom trenutku, nego i u načinu na koji se amplituda mijenja u vremenu. Oblik signala, njegov nagib u određenom trenutku, frekvencija i lokacija vrhova, mogu pružiti informacije o samome signalu.

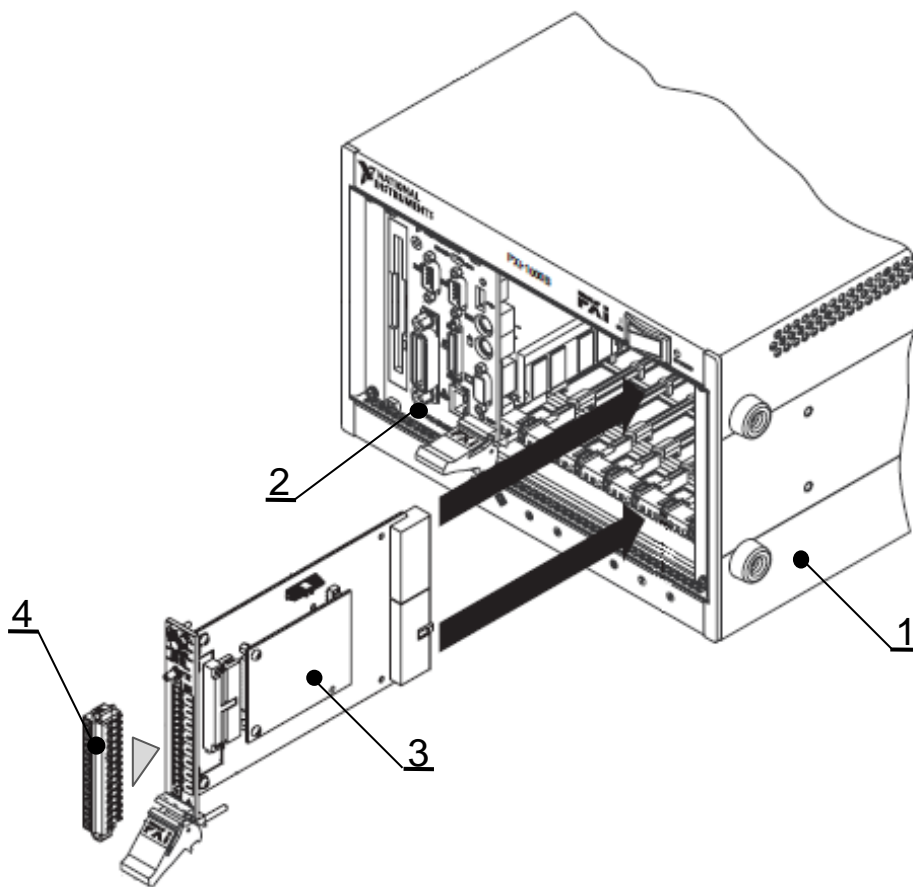
Pri odabiru mjernih modula potrebno je razmotriti zahtjeve senzora u pogledu mjernog raspona, osjetljivosti i točnosti:

- mjerni opseg određuje se kao minimum i maksimum mjernih vrijednosti varijable koju senzor mjeri, a unutar kojih postoje određene vrijednosti karakteristika poput osjetljivosti, preciznosti, itd.
- osjetljivost je definirana kao količina promjene izlaznoga signala senzora u odnosu prema točno određenoj promjeni varijable koju senzor mjeri.
- preciznost opisuje koliko je mjerenje blizu stvarnoj vrijednosti varijable koja se mjeri. Preciznošću se opisuje najveća pogreška koja se može očekivati pri mjerenju u bilo kojoj radnoj točki unutar radnog područja pretvornika.

Uvažavajući sve zahtjeve, odabrani su mjerni moduli s osam simultano uzorkovanih diferencijalnih mjernih kanala, slijedećih karakteristika [12]:

- mjerni opseg ± 100 V,
- osjetljivost 16 bit-na,
- frekvencija uzorkovanja / kanalu 22,2 kS/s
- ulazna impedancija $2 \text{ M}\Omega$
- točnost (puni mjerni opseg) 88 mV

Kontroler i mjerni moduli smještaju se u kućište PJ, a na konektore mjernih modula spaja se prednji rub (slika 5.14). Time je zadana statorska PJ.



Slika 5.14. PXI platforma za mjerenje; 1 – kućište , 2 – kontroler, 3 – mjerni modul, 4 - konektor za priključak prednjeg ruba

Nakon odabira hardvera potrebno je izraditi program za PJ. Prilikom izrade programa potrebno je uvažiti slijedeće zahtjeve [11]:

- potrebno je osigurati kontinuirano prikupljanje vremenskih signala. To znači da se analogni mjerni signali sa svih dostupnih senzora moraju prikupljati i digitalizirati bez ikakvih vremenskih prekida toga procesa,

- program na temelju korisničkih postavki zatim odlučuje koji su podaci relevantni za pohranu, a koji se odbacuju. Ovime su postavljeni zahtjevi za determinističku obradu podataka u stvarnome vremenu,
- program je potrebno izvesti tako da se unutar zadanog vremena osigura prikupljanje i obrada novopristiglih digitaliziranih podataka,
- program mora imati mogućnost automatskog starta prilikom uključivanja PJ,
- uspostava komunikacije između PJ i serverskog računala s bazom podataka mora biti automatska prilikom pokretanja programa ili gubitka veze.
- u slučaju gubitka komunikacije sa središnjim serverskim računalom s bazom podataka potrebno je omogućiti privremenu pohranu u lokalnoj trajnoj memoriji PJ,
- program mora biti koncipiran na principu programske modularnosti i proširivosti, kako bi se omogućilo jednostavno dodavanje novoga programskog koda vezanoga uz obrade ili dodavanje novih tipova mjernih akvizicijskih modula,
- od programa se traži da se samostalno i stabilno izvršava tokom dugog vremenskog razdoblja.

Ovaj zahtjev riješen je na način da se preuzeo gotovi program razvijen u tvrtci KONČAR-Institut za elektrotehniku d.d, za potrebe monitoring sustava rotacijskih strojeva.

5.2.2. Rotorska procesna jedinica

Pri mjerenju na rotirajućem dijelu stroja često se javlja problem ograničenog prostora predviđenog za ugradnju PJ. Tako je i u ovom slučaju. Naime, zbog malih dimenzija stroja na kojem se obavlja ovo eksperimentalno istraživanje, odlučeno je da se rotorska PJ smjesti na osovini, ali izvan generatora. Iz tog razloga rotorska PJ mora biti malih dimenzija, a također mora biti i kompaktne izvedbe zbog uvjeta u kojima treba obavljati svoju funkciju.

U funkcionalnom smislu rotorska PJ mora udovoljiti svim zahtjevima na hardver, danim u poglavlju 5.2. Uvažavajući postavljene zahtjeve i pregledom mjerne opreme dostupne na tržištu, odabrana je rotorska procesna jedinica prikazana na slici 5.15. Radi se o modularnoj PJ s kontrolerom kao glavnim dijelom, na koji se dodaju aplikativni moduli. PJ nema kućište, tako da dimenzije određuje kontroler i broj mjernih modula. Dimenzije kontrolera znatno su manje u usporedbi s PXI tipskim rješenjem.



Slika 5.15. Procesna jedinica; 1 – kontroler, 2 – mjerni modul.

Odabrana PJ je kompaktan PLC (*programmable logic controller*) visokih performansi. Kontroler je baziran na 533 Mhz Intel® IXP420 CPU procesoru [13]. Procesor radi pod Microsoft Windows CE operativnom sistemu, što mu omogućuje izvršavanje kompleksnih zadataka. Operativni sustav podiže se iz interne (*flash*) memorije. Zbog male potrošnje energije, ventilator za hlađenje nije potreban. Stoga su u kontroleru izostavljeni rotirajući dijelovi, što ga čini znatno otpornijim na utjecaj okoline.

U kontroleru je integriran mrežni preklopnik (*switch*), koji omogućuje lančano spajanje više ovakvih jedinica. Programiranje hardvera izvodi se iz TwinCAT okružja. TwinCAT je po prirodi grafičko programiranje.

Ova oprema u potpunosti ispunjava postavljene zahtjeve, poput sposobnosti za rad u stvarnom vremenu, fleksibilnosti, nadogradivosti i modularnosti.

Iz široke palete mjernih modula, a uvažavajući zahtjeve senzora, odabran je modul s dva simultano uzorkovana diferencijalna mjerna kanala, slijedećih karakteristika [14]:

- mjerni opseg ± 10 V,
- osjetljivost 16 bit-na,
- frekvencija uzorkovanja / kanalu 100 kS/s
- ulazna impedancija > 200 k Ω
- točnost (puni mjerni opseg) $\pm 1\%$

Program PJ izrađen je u TwinCAT okružju, uvažavajući sve dane zahtjeve na program PJ, danim u poglavlju 5.2.1.

5.3. Jedinice za bežični prijenos podataka

Koncept odabranog rješenja za prijenos mjernih signala iz rotirajućeg u nepomični dio stroja uključuje jedinice za bežični prijenos podataka (slika 5.16).

Naime, rotorska PJ putem ulaznih modula prikuplja mjerne signale s rotora, vrši njihovu obradu, a obrađene podatke Ethernet protokolom, putem LAN (*Local Area Network*) mreže prosljeđuje u jedinicu za bežični prijenos, smještenu na rotoru (predajnik). Izvan generatora na mirujućem dijelu stroja postavljena je druga jedinica (prijemnik), koja primljene podatke prosljeđuje Ethernet protokolom u serversko računalo. Prijenos podataka između predajnika i prijemnika omogućen je putem radio frekvencija (RF).

Pregledom dostupnih rješenja na tržištu i uzimajući u obzir zahtjeve opreme koja će se na njih spajati, te radne uvjete u kojim oprema treba obavljati svoju funkciju, odabrani su prijemnik i predajnik. Za predajnik odabran je uređaj oznake W315. To je malo kompaktno ugradbeno (*embedded*) računalo (slika 5.16-1) s Linux operativnim sustavom [15]. Posjeduje RS-232/422/485 port, kao i jedan Ethernet priključak. Jedinica je namijenjena za rad u teškim industrijskim uvjetima. Kao prijemnik koristit će se uređaj oznake AWK-1100. Radi se o klijentu za industrijske bežične mreže (slika 5.16-2). Prikupljeni podaci prosljeđuju se na Ethernet priključak.



Slika 5.16. Bežični prijenos podataka; 1 – predajnik, 2 – prijemnik.

5.4. Centralno računalo

Centralno računalo je središnje mjesto mjernog sustava u kojem se nalazi baza podataka. Svrha centralnog računala je da prihvaća podatke sa svih procesnih jedinica u sustavu, te iste pohrani u bazu podataka. Na server se spaja program za pregled i analizu podataka, a server mu mora omogućiti dohvat pohranjenih podataka u bazi.

6. PRORAČUN GENERATORA SGBP 160 M-4M METODOM KONAČNIH ELEMENATA

Poznavanje elektromagnetskih pojava rotacijskih strojeva važno je za njihovo racionalno projektiranje i određivanje granica dozvoljenih opterećenja u pojedinim eksploatacijskim pogonskim stanjima. Kod projektiranja rotacijskih strojeva danas se koriste moćni analitički alati, koji korištenjem metode konačnih elemenata (MKE), uz pretpostavljene početne i rubne uvjete, omogućuju izračune elektromagnetskih polja u realnim konstrukcijama strojeva i napona induciranih u namotima stroja. Moguće su i simulacije svih režima rada, uključujući i one kvarne. Pri tome, točnost izračuna ovisi o primjerenosti modela i odabranih početnih i rubnih uvjeta realnome objektu koji se projektira. Uz to, treba uzeti u obzir da određeni modeli i ulazne pretpostavke vrijede unutar određenog područja konstruktivnih izmjera realnog objekta. Stoga se nameće kao potreba:

- utvrđivanje točnosti izračuna elektromagnetskih pojava u odnosu na mjerenja istih,
- utvrđivanje područja variranja ulaznih podataka, unutar kojeg izračun ostaje unutar dovoljne točnosti u usporedbi s mjerenjima.

Programski paket Infolytica MagNet, u kojem su obavljene svi proračuni, omogućava da se modelom simuliraju valni oblici magnetske indukcije, magnetskog polja i induciranih napona na mjestu promatranja. Dobiveni rezultati će se u drugom dijelu rada usporediti s mjerenjima na generatoru SGBP 160 M-4M.

Za proračun primjenom MKE nužno je uvesti slijedeće pretpostavke:

- odnos dužine i promjera generatora omogućava primjenu dvodimenzionalnog modela,
- zanemaruje se utjecaj potiskivanja struje u vodičima armaturnog i uzbudnog namota,
- zanemaruje se električna vodljivost željeza čime se isključuje utjecaj vrtložnih i poprečnih struja,
- karakteristike ugrađenoga materijala su izotropne, zanemaruje se petlja histereze, a permeabilnost željeza je ovisna o jakosti magnetskoga polja,
- zanemaruje se promjena brzine vrtnje rotora tijekom trajanja prelazne pojave zbog velike zamašne mase,
- uzbudni namot stroja priključen je na idealni strujni izvor, i napaja se istosmjernom strujom.

Za rješavanje magnetskog polja na stroju, uvažavajući navedene pretpostavke vrijede izrazi [25]:

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \cdot d\mathbf{S} = - \frac{d}{dt} \int_s \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \cdot d\mathbf{S} \quad (6.1)$$

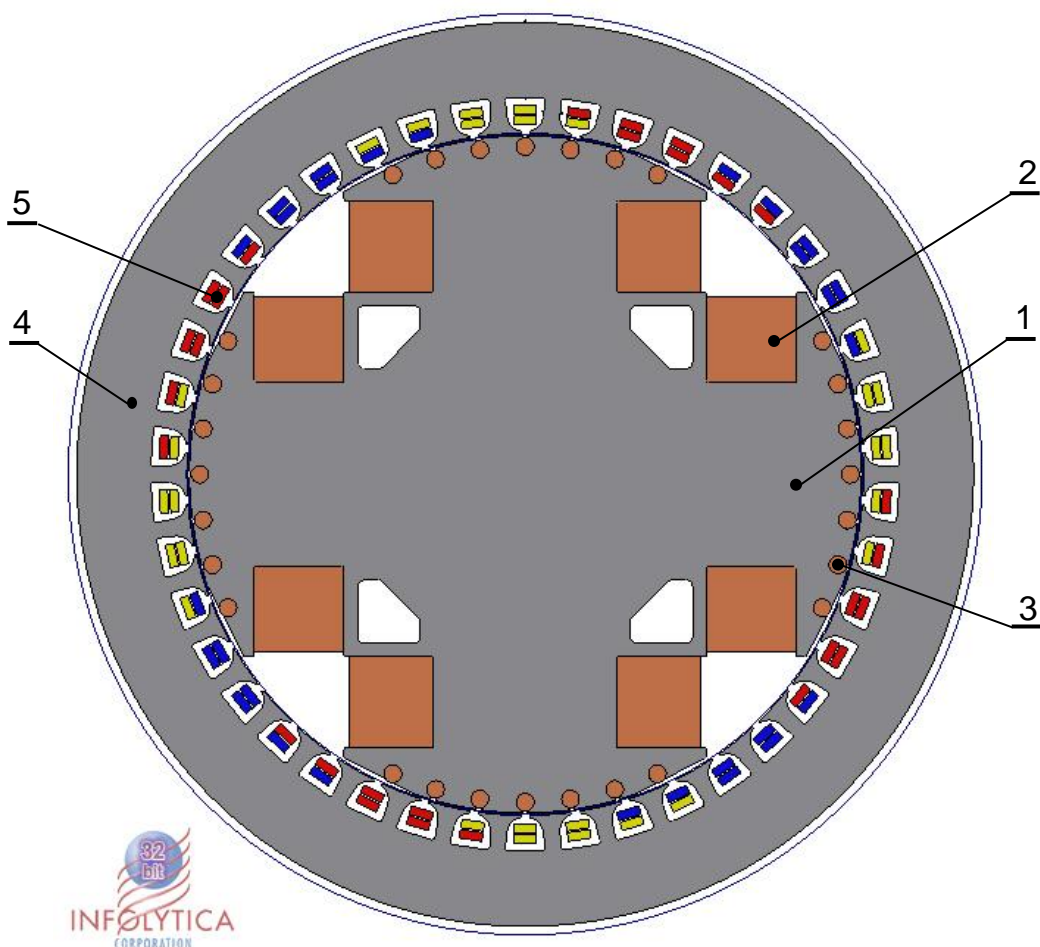
$$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} \cdot d\mathbf{S} \quad (6.2)$$

$$\int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \cdot dS = 0 \quad (6.3)$$

gdje su:

- E**- jakost električnoga polja u vodičima,
- B** - magnetska indukcija,
- J** - gustoća struje,
- c* – krivulja koja omeđuje plohu *S*,
- S* – ploha unutar koje se računa polje,
- n** – jedinični vektor normalan na površinu *S*.

Izračuni magnetskih indukcija, magnetskih polja i induciranih napona, obavljani su na 2D modelu prikazanom na slici 6.1.



Slika 6.1. Model generatora SGBP 160 M-4M korišten za proračun u programskom paketu Magnet Infolytica: 1 – rotorski paket, 2 – uzbudni namot, 3 – prigušni namot, 4 – statorski paket, 5 – armaturni namot.

U programskom paketu Infolytica MagNet koristiti će se programski modul koji uključuje vrtnju rotora, budući da položaj rotora utječe na magnetske prilike u stroju, a tako i na izlazni rezultat. Svi proračuni su obavljani uz gustoću mreže konačnih elemenata u modelu od 2 mm, te je uporabljena interpolacija po kvadratnom polinomu. Newton-Raphson-ova metoda primijenjena je za rješavanje raspodjele

magnetskih polja u stroju. U proračunu odabrana je točnost od 1600 točaka za puni okret rotora.

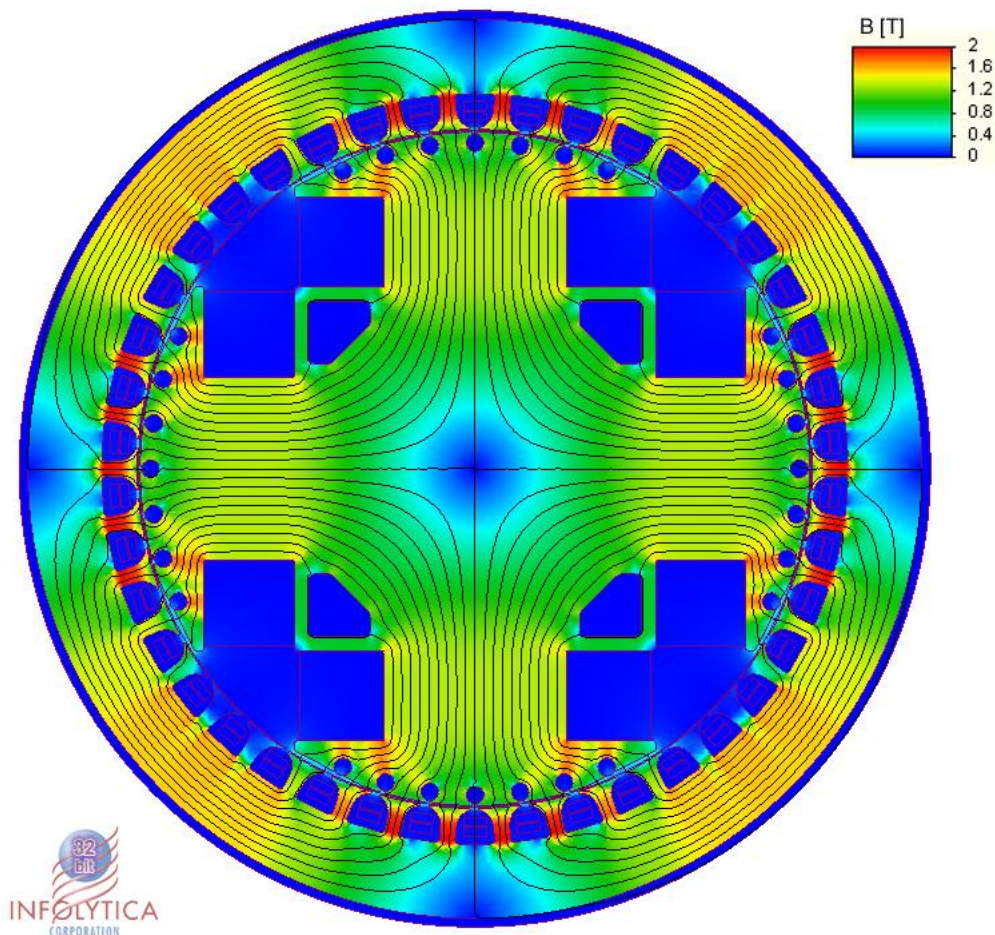
Valni oblici računati su radna stanja generatora navedena u tablici 6.1. Podaci su računati za sva radna stanja generatora u kojima su obavljena i mjerenja, radi moguće usporedbe rezultata.

Tablica 6.1. Pregled računatih radnih stanja generatora.

Radno stanje	Bez kvara	Kvar na svitku uzbudnog namota	Kvar na svitku armaturnog namota	Uzbudna struja		Opis izmjene modela
				Nazivna	Snížena	
Prazni hod generatora	•			•		
	•				•	
	•			•		bez prigušnog kaveza
	•			•		prigušni kavez od željeza
		•		•		10 % smanjen broj zavoja
		•			•	10 % smanjen broj zavoja
		•		•		5 % smanjen broj zavoja
		•			•	5 % smanjen broj zavoja
		•		•		2,5 % smanjen broj zavoja
		•			•	2,5 % smanjen broj zavoja
			•	•		14 kratko spojenih zavoja
			•	•		10 kratko spojenih zavoja
			•	•		5 kratko spojenih zavoja
		•	•		1 kratko spojenih zavoja	
Nazivno opterećen generator	•			•		
		•		•		10 % smanjen broj zavoja
		•		•		5 % smanjen broj zavoja
		•		•		2,5 % smanjen broj zavoja
			•	•		14 kratko spojenih zavoja
			•	•		10 kratko spojenih zavoja
			•	•		5 kratko spojenih zavoja
		•	•		1 kratko spojenih zavoja	

6.1. Rezultati proračuna za prazni hod

Magnet je kompleksni programski paket koji osim numeričkih izlaznih rezultata omogućuje i grafički prikaz magnetskog polja u stroju u određenom trenutku. Slika 6.2 prikazuje raspodjelu magnetskog polja u modelu generatora SGBP 160 M-4M pri praznom hodu za prikazani položaj rotora. Struja uzbude pri računanju postavljena je na vrijednost 8,7 A.

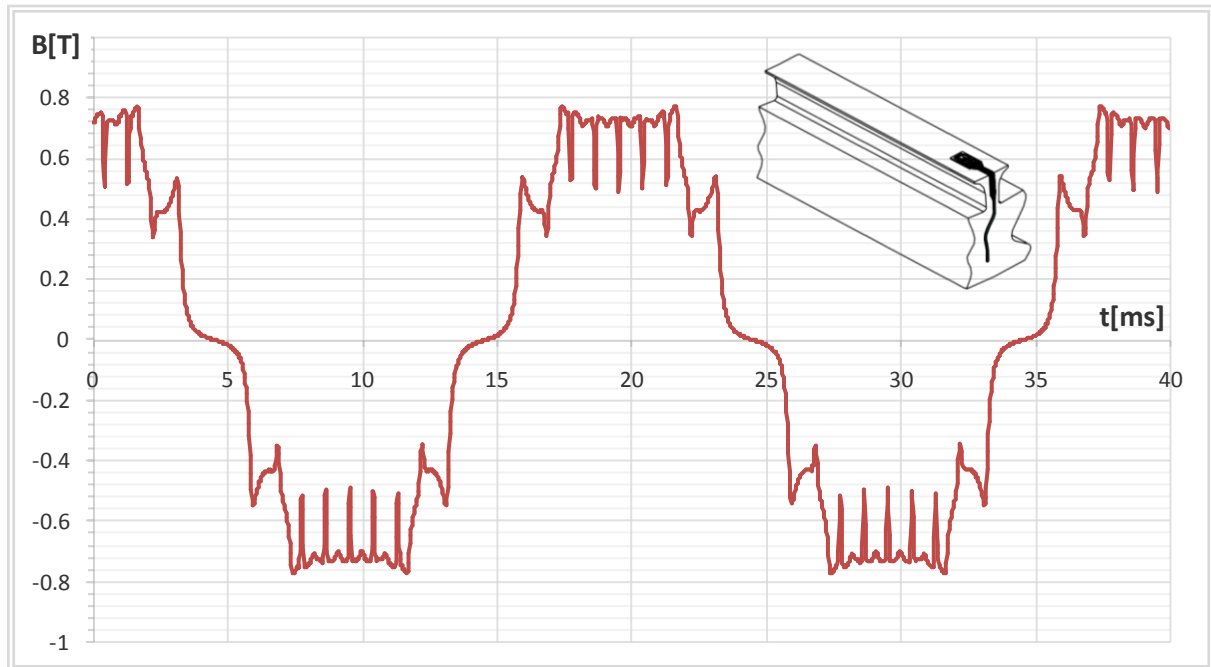


Slika 6.2. Raspodjela magnetskog polja u modelu generatora SGBP 160 M-4M pri praznom hodu.

Na slici 6.2 može se vidjeti da su dijelovi modela različitih boja, kako bi se vizualno mogla promatrati raspodjela gustoće magnetskih silnica na modelu. Boje se kreću od plave, koja predstavlja magnetsku indukciju iznosa 0 T, do crvene, koja predstavlja magnetsku indukciju iznosa 2 T.

Promotre li se silnice magnetskog polja u modelu generatora pri rotaciji rotora, može se uočiti da se raspodjela silnica magnetskog polja u jezgri pola ne mijenja, dok je raspodjela silnica magnetskog polja u statorskom paketu ovisna o položaju rotora. Kako se pomiče pol tako se premještaju silnice u zubima statorskog paketa (prate pol), što rezultira promjenom gustoće silnica magnetskog polja u zubima statorskog paketa od nule do maksimalnog iznosa, ovisno o položaju pola. Prema tome, magnetsko polje u zubima je radijalno, dok je u statorskom paketu magnetsko polje kombinacija radijalnog i tangencijalnog polja.

U programu MagNet na mjestima ugradnje Hallovih senzora na generatoru SGBP 160 M-4M (poglavlje 5.1.4), moguće je izračunati vremensku ovisnost magnetske indukcije pri vrtnji rotora. Slika 6.3 prikazuje raspodjelu magnetske indukcije u zračnom rasporu promatranu sa zuba statorskog paketa za prazni hod, pri struji uzbude od 8,7 A, za jedan puni okret rotora. Prikazana raspodjela magnetske indukcije računata je za mjesto Hallovog senzora ugrađenog na zub statorskog paketa generatora.



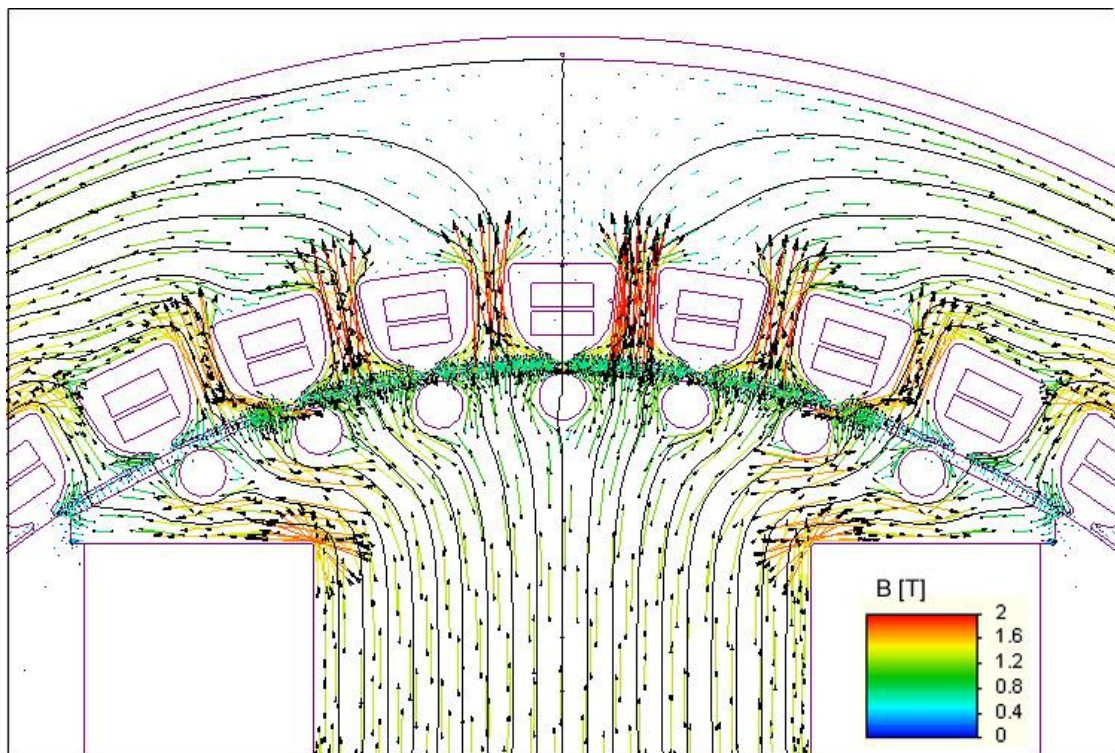
Slika 6.3. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatranu sa zuba statorskog paketa za prazni hod pri uzbudnoj struji od 8,7 A.

Za objašnjenje prikazane raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu, potrebno je napraviti njenu analizu i utjecaj svih elemenata stroja na njen oblik. Na slici 6.3 mogu se uočiti, osim osnovnog oblika magnetske indukcije i određena nadvišenja i propadi. Za objašnjenje istih potrebno je izraditi prikaz raspodjele magnetske indukcije pod polom, zajedno s konstrukcijskim izmjerama pola, što je prikazano na slici 6.4.



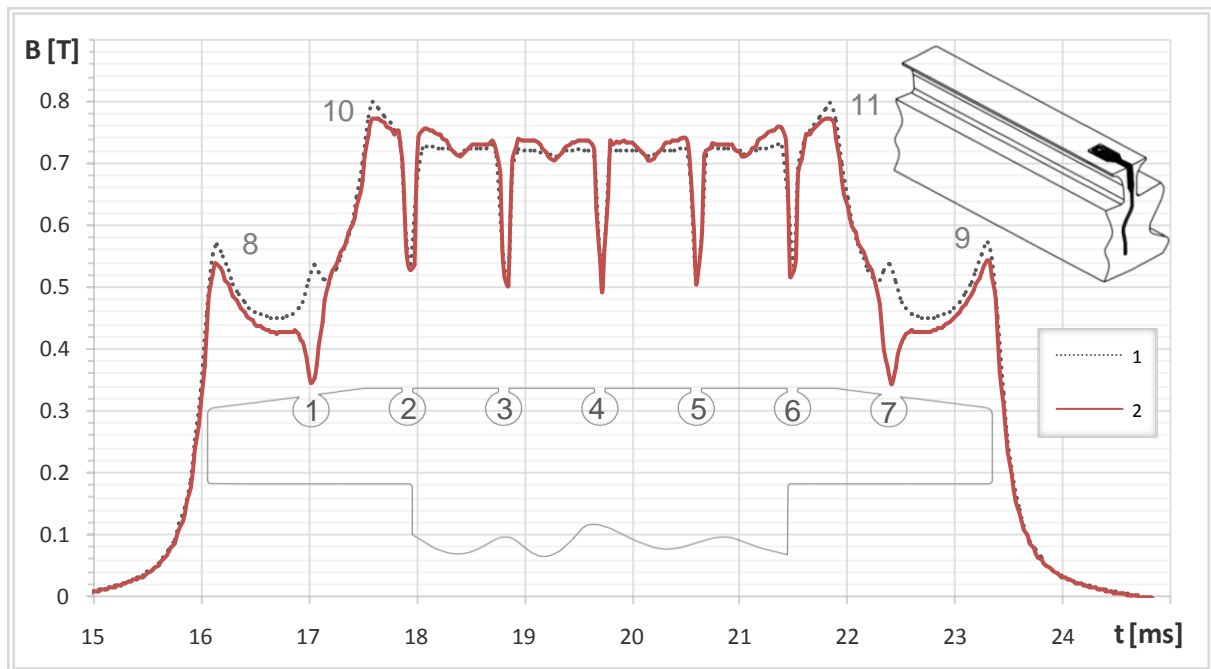
Slika 6.4. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana sa zuba statorskog paketa za prazni hod pri uzbudnoj struji od 8,7 A, prikazana zajedno s konstrukcijskim izmjerama pola rotora

Lokalizirana smanjenja magnetske indukcije, označena na slici 6.4 brojevima 1 do 7, uzrokovana su utjecajem prigušnog namota. Trenutke smanjenja magnetske indukcije određuje prostorni raspored štapova prigušnog namota u polnoj papučici. Magnetske silnice pri prolasku iz polne papuče u zube statorskog paketa, zaobilaze štapove prigušnog namota. Na slici 6.5 prikazan je raspored magnetskih silnica pri prelasku pola rotora u statorski paket.



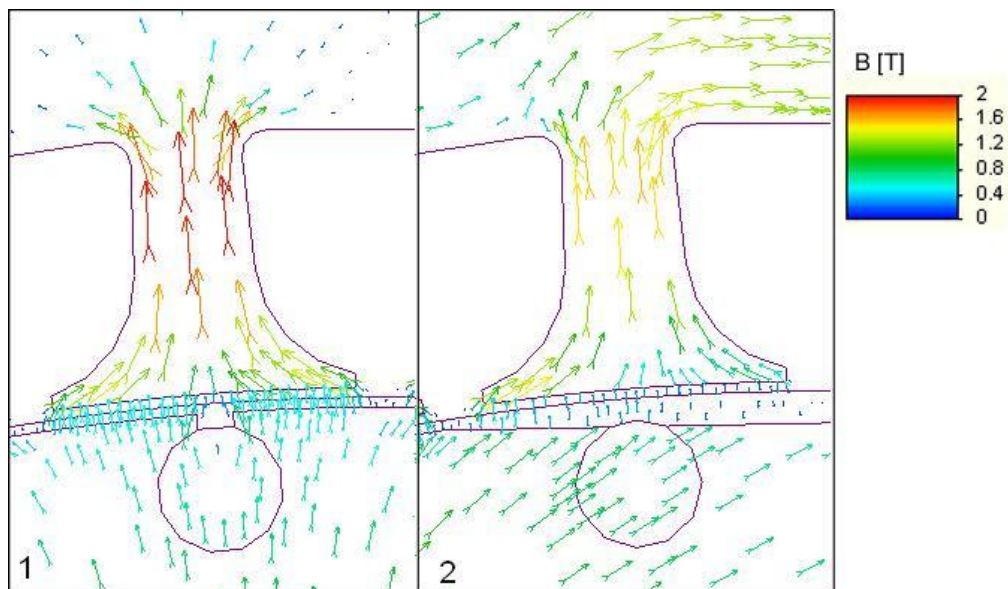
Slika 6.5. Raspodjela magnetskih silnica pri prelasku iz pola u statorski paket.

Za potvrdu te teze napravljen je novi model stroja u kojem je nemagnetski materijal štapova prigušnog namota zamijenjen magnetskim materijalom. U tom slučaju magnetske silnice neće zaobilaziti štapove prigušnog namota, već će prolaziti kroz njega, a time bi lokalizirana smanjenja magnetske indukcije trebala nestati. Međutim kako su utori za smještaj štapova prigušnog namota u polnoj papuči poluotvorenog tipa, magnetske silnice će zaobilaziti utore štapova prigušnog namota jer je na tim mjestima veća duljina zračnog raspora. Na slici 6.6 prikazana je raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana sa zuba statorskog paketa za prazni hod, pri struji uzbude od 8,7 A, sa štapovima prigušnog namota izrađenim od magnetskog materijala (krivulja 1), te štapovima prigušnog namota izrađenim od nemagnetskog materijala (krivulja 2).



*Slika 6.6. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana sa zuba statorskog paketa za prazni hod pri uzbudnoj struji od 8,7 A;
Krivulja 1 – štapovi prigušnog namota načinjeni od magnetskog materijala,
Krivulja 2 – štapovi prigušnog namota izrađeni od nemagnetskog materijala.*

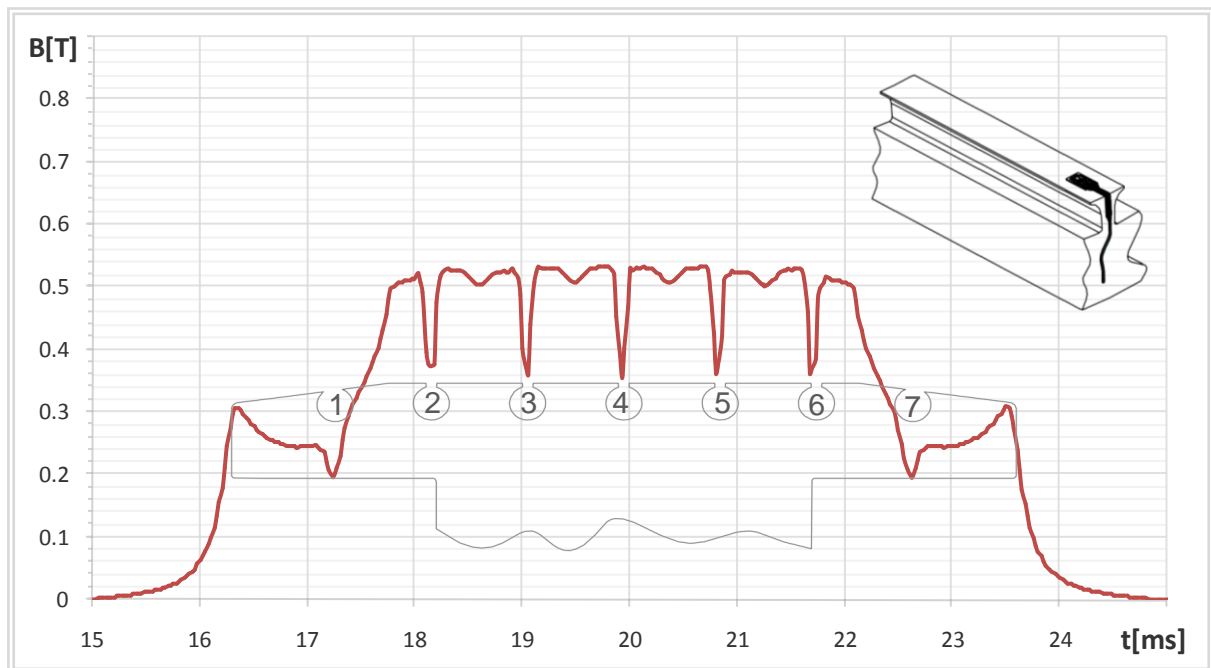
Prema slici 6.6, lokalizirana smanjenja magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporom, označena na slici 6.6 brojevima 2 do 6, nisu manjeg intenziteta ukoliko se za materijal štapova prigušnog namota upotrijebi magnetski materijal (slika 6.6 – krivulja 1). Uzrok su magnetske silnice koje zaobilaze otvore utora za smještaj štapova prigušnog namota, stoga je i iznos magnetske indukcije na tim mjestima nižeg iznosa. Suprotno tome, kod štapova prigušnog namota označenih na slici 6.6. brojevima 1 i 7, dolazi do pojave zasićenja magnetskim silnicama. Razlog tome je što štapovi broj 1 i 7 prigušnog namota, izviru izvan polne papuče, a pošto su sad načinjeni od magnetskog materijala, na tim mjestima je manji zračni raspor, stoga i veća gustoća magnetskih silnica. Slika 6.7 prikazuje raspodjelu magnetskih silnica u trenutku kad na mjesto promatranja magnetske indukcije naiđe utor štapa prigušnog namota (slučajevi za štapove broj 2 do 6), odnosno štap broj 1 ili 7.



Slika 6.7. Raspodjela magnetskih silnica pod zubom statorskog paketa;
 1- pri nailasku utora štapa prigušnog namota broj 2 do 6,
 2- pri nailasku štapa prigušnog namota broj 1 i 7.

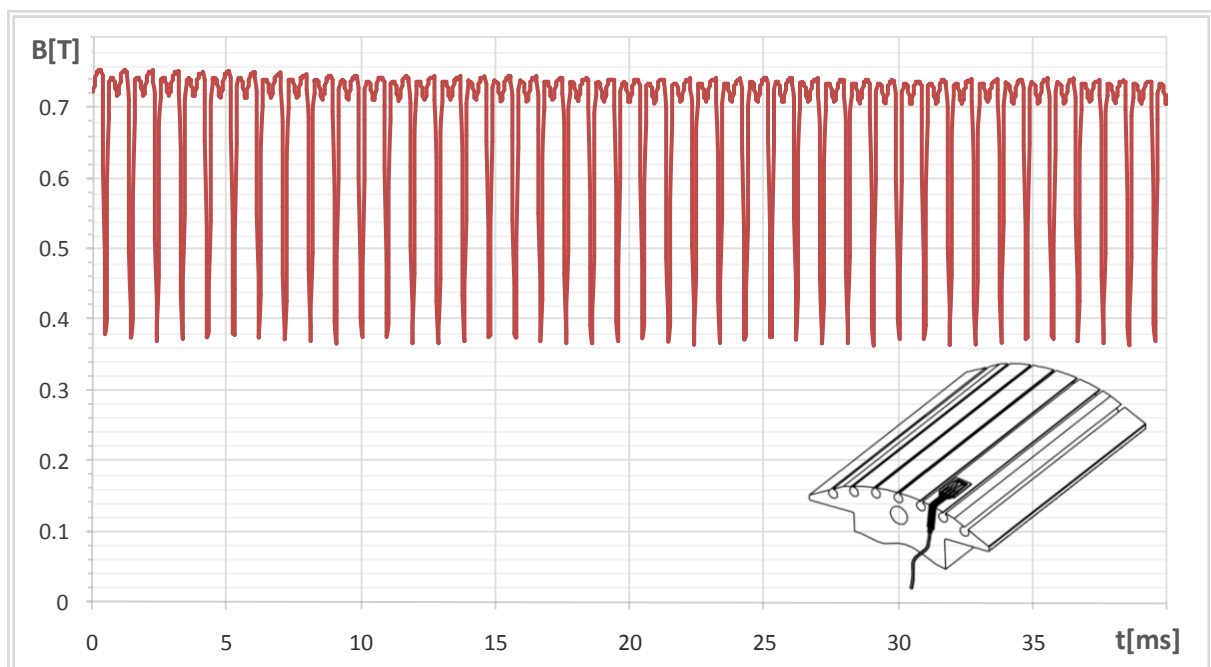
Prigušni namot određuje i valovitost magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporom. Zbog zaobilaženja štapova prigušnog namota, i otvora utora za smještaj štapova prigušnog namota, gustoća magnetskih silnica se povećava uz otvore utora na polnoj papuči. Kod modela sa štapovima prigušnog namota načinjenog od magnetskog materijala, spomenuta valovitost manjeg je intenziteta.

Na slici 6.6 – krivulja 1 i 2, vidljivo je da postoje i porasti magnetske indukcije označeni brojevima 8 do 11. Da bi se objasnili ti porasti, potrebno je pogledati raspodjelu magnetskih silnica u polnoj papuči prikazanoj na slici 6.5 i uočiti lokalna zasićenja. Tako se zasićenja označena brojevima 10 i 11 pojavljuju uslijed promjene oblika polne papuče. Na tim mjestima duljina zračnog raspora linearno se povećava do krajeva polne papuče, stoga je na tim mjestima gustoća magnetskih silnica velikog iznosa. Shodno tome, na rubovima polne papuče dolazi do značajne promjene iznosa zračnog raspora, što dovodi do povećanja gustoće magnetskih silnica na tim mjestima u polnoj papuči. Smanjenjem struje uzbude, spomenuta lokalizirana zasićenja trebala bi biti manje izražena nego kod modela s nazivnom uzbudom, što je i potvrđeno izradom proračuna pri sniženoj uzbudnoj struji, čiji su rezultati prikazani na slici 6.8.



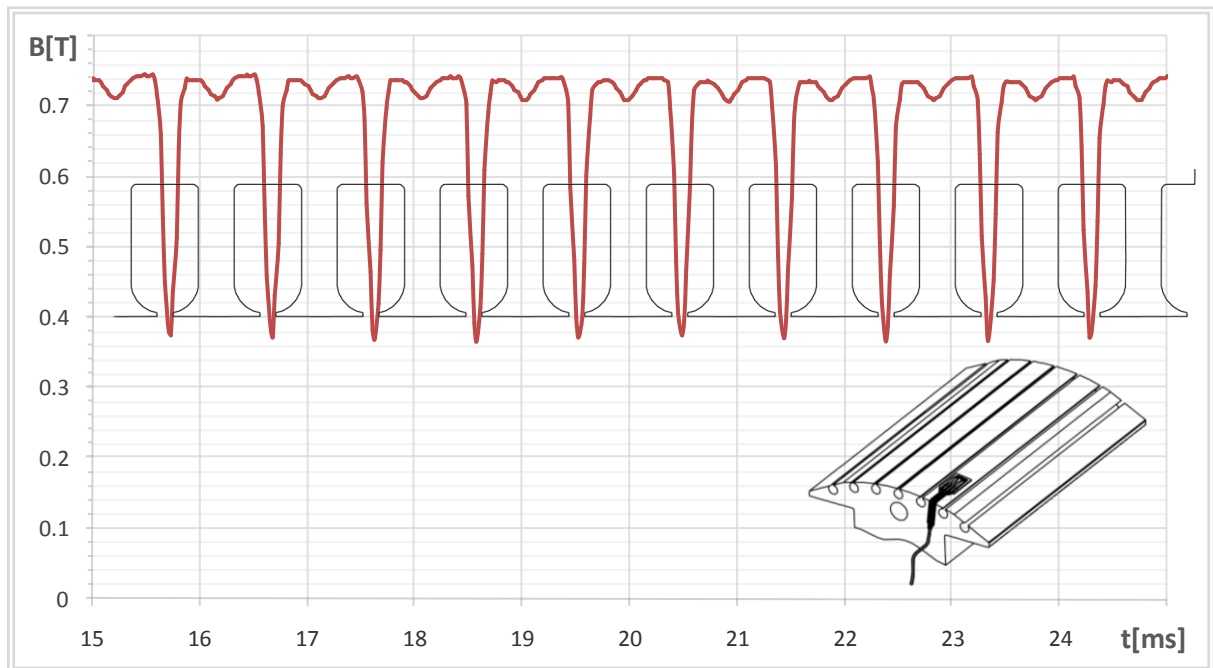
Slika 6.8. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana sa zuba statorskog paketa, za prazni hod pri uzbudnoj struji od 4 A.

Na generatoru će se mjeriti raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu senzorom smještenim i na polnoj papučici, stoga će se za to mjesto u programu Magnet ista izračunati i analizirati. Na slici 6.9 prikazana je raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s mjesta ugradnje senzora H_3 , u praznom hodu pri struji uzbude 8,7 A za jedan puni okret rotora.



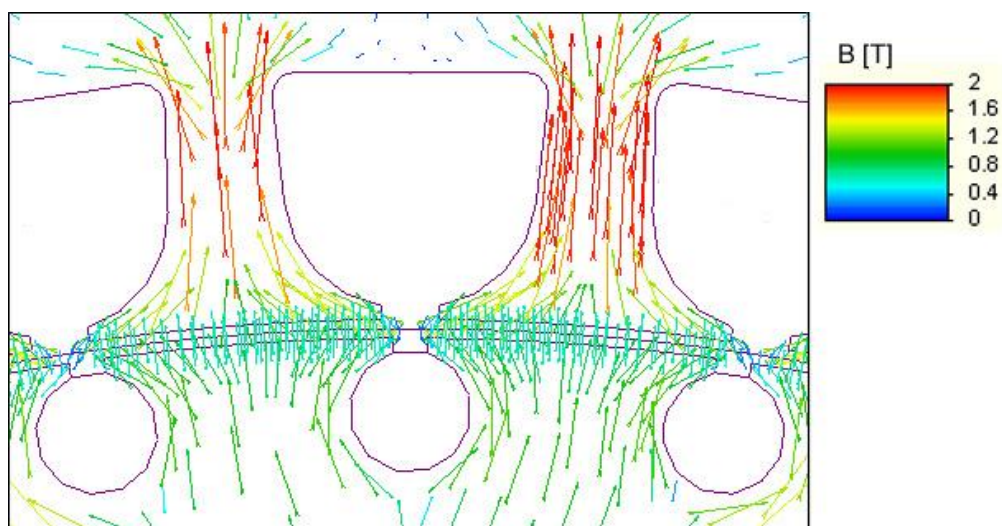
Slika 6.9. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papučice za prazni hod pri uzbudnoj struji od 8,7 A.

Detaljnija analiza raspodjele magnetske indukcije prikazane na slici 6.9, te povezivanje njenog oblika s konstrukcijskim izmjerama, ali u ovom slučaju statorskog paketa, omogućena je na slici 6.10.



Slika 6.10. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče za prazni hod pri uzbudnoj struji od 8,7 A.

Na slici 6.10 primjetno je da se lokalizirana smanjenja magnetske indukcije događaju u trenucima kada na mjesto promatranja magnetske indukcije naiđe utorski otvor. Također je moguće uočiti da magnetska indukcija na dijelu kojeg obuhvaća zub statorskog paketa nije uniformna. Za objašnjenje te pojave potrebno je pogledati raspodjelu magnetskih silnica na prijelazu iz polne papuče u zube statorskog paketa, prikazanu na slici 6.11.



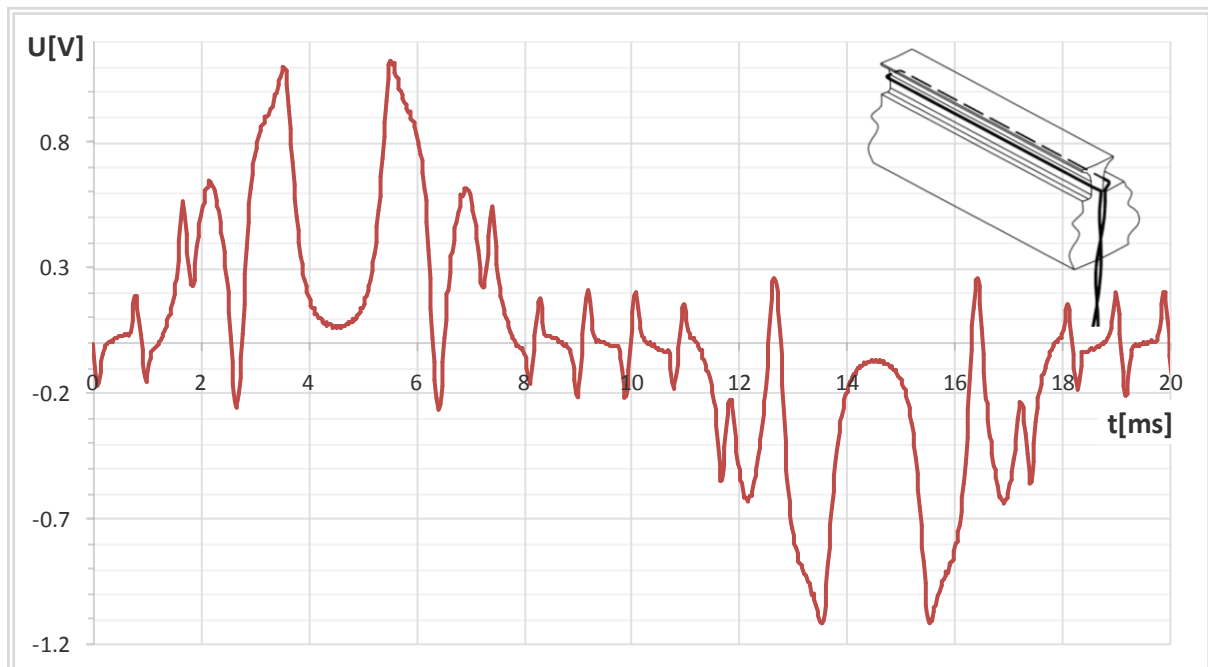
Slika 6.11. Raspodjela magnetskih silnica pri prelasku iz polne papuče u zube statorskog paketa.

Na slici 6.11, vidljivo je da magnetske silnice zaobilaze štapove prigušnog namota te statorske utore, što uzrokuje povećanu gustoću magnetskih silnica na dijelu zuba. Upravo iz tog razloga magnetska indukcija nije uniformna pod cijelom širinom zuba. Srednja vrijednost magnetske indukcije pod zubom sa slike 6.10 i srednja vrijednost magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporom, izuzev dijela sa štapovima prigušnog namota (slika 6.4), se podudaraju i imaju iznos 0,73 T.

Kako je spomenuto u uvodnom dijelu ovog poglavlja, programom Magnet moguće je računati i napone koji se induciraju u svitcima. U modelu za izračun ugraditi će se i svitci na istim pozicijama kao što su ugrađeni na generatoru SGBP 160 M-4M (poglavlje 5.1.4).

Započeti će se s analizom napona koji se inducira u mjernom svitku ugrađenom oko zuba statorskog paketa Ms_1 i Ms_2 , kako je prikazano na slici 5.10-1. Inducirani napon u mjernom svitku površine S , koja je obrubljena konturom c , razmjernan je vremenskoj promjeni magnetskog toka kojeg petlja obuhvaća prema relaciji (5.12). Najveća promjena magnetskog toka u vremenu kroz zub statorskog paketa događa se u trenutku kada polna papuča napušta zub oko kojeg je ugrađen mjerni svitak, te kada na zub s mjernim svitkom nailazi polna papuča. U tim trenucima magnetski tok mijenja se s maksimalne pozitivne na maksimalnu negativnu vrijednost i obratno. Zbog promjene magnetskog toka u mjernom svitku induciraju se "šiljci" prikazani na slici 6.12, koja prikazuje napon induciran u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , ugrađenom kao na slici 5.10-1.

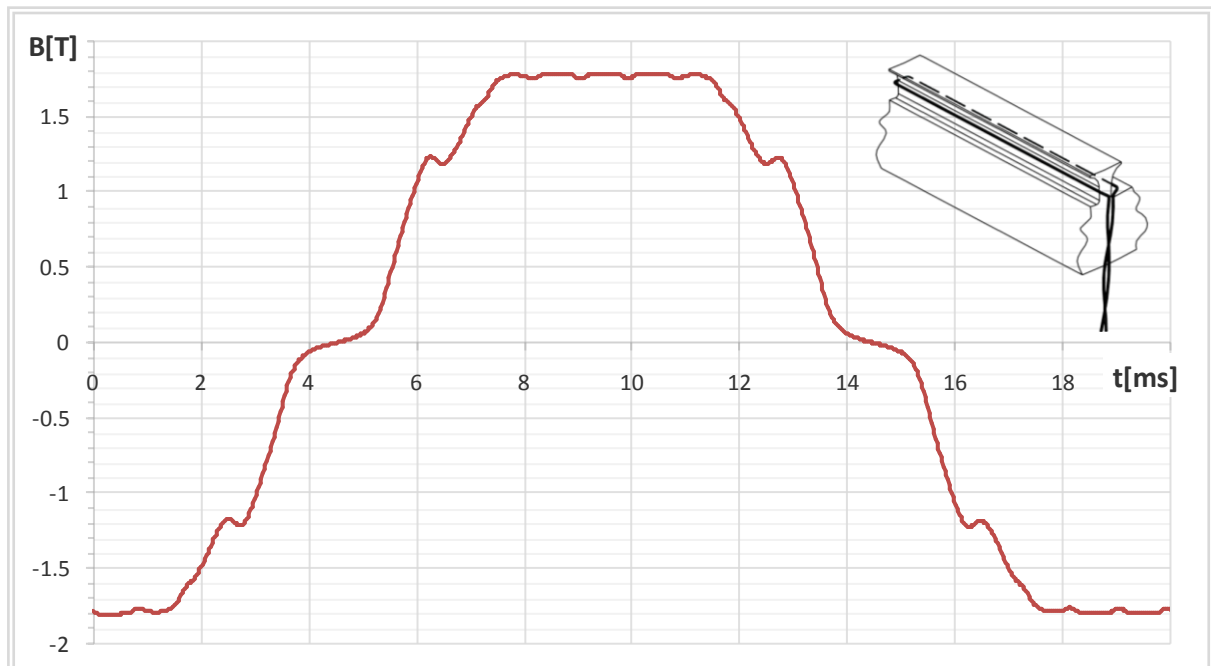
Oscilacije oko nule, prikazane na slici 6.12, rezultat su promjena magnetskog toka, čiji su uzrok prigušni namot i otvori utora za smještaj štapova prigušnog namota.



Slika 6.12. Napon induciran u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , ugrađenom kao na slici 5.10-1, za prazni hod pri uzbudnoj struji od 8,7 A.

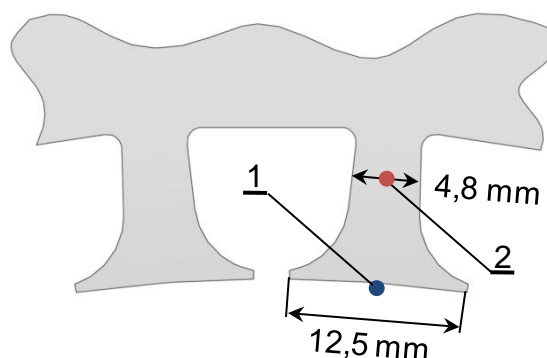
Integracijom napona induciranog u mjernom svitku prikazanom na slici 6.12, dobiva se vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetskog toka kojeg obuhvaća mjerni

svitak Ms_1 i Ms_2 . Primjenom relacije (5.13), uz površinu svitka $S = 700 \text{ mm}^2$, može se izračunati vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka, koja je prikazana na slici 6.13.



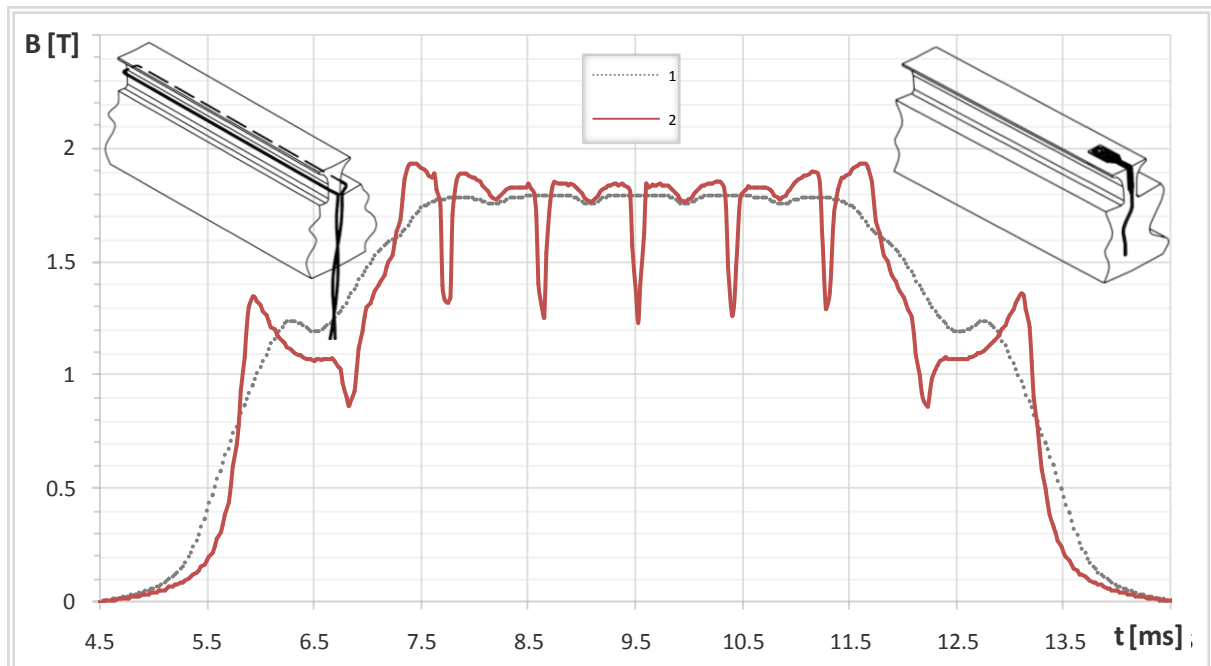
Slika 6.13. Raspodjela magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka, dobivena integracijom valnog oblika prikazanog na slici 6.12, te primjenom relacije (5.13).

Dobivenu raspodjelu magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka, moguće je usporediti s raspodjelom magnetske indukcije promatrane sa zuba statorskog paketa. Iako magnetske prilike na mjestima promatranja nisu identične, dobiveni rezultati mogu se usporediti, na način da se rezultati dobiveni na zubu statorskog paketa preračunaju na mjestu ugradnje mjernog svitka ili obratno. Presjek zuba statorskog paketa, odnosno šina zuba na mjestima promatranja određuje faktor kojim će se vršiti preračunavanje rezultata. Slika 6.14 prikazuje presjek zuba statorskog paketa.



Slika 6.14. Prikaz mjesta promatranja magnetske indukcije na zubu statorskog paketa, s pripadajućim dimenzijama zuba na tim mjestima.

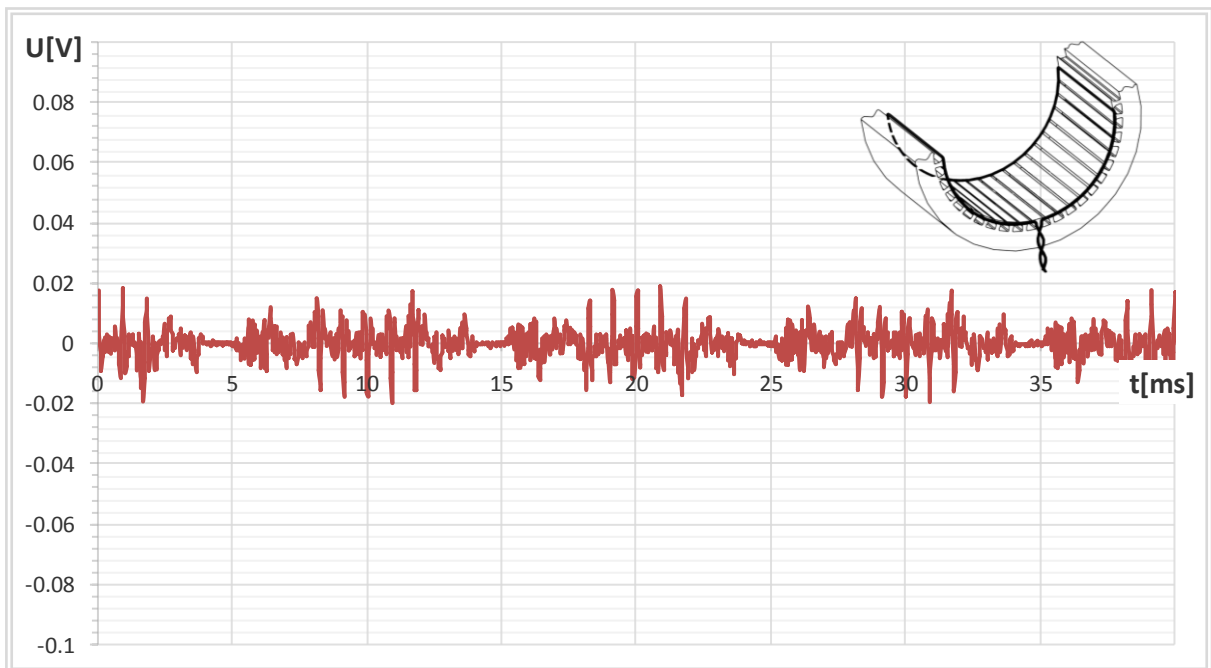
Slika 6.15 prikazuje raspodjelu magnetske indukcije promatranu sa zuba statorskog paketa (slika 6.14 – 1) preračunatu na mjesto ugradnje mjernog svitka, zajedno s raspodjelom magnetske indukcije dobivene integracijom napona induciranog u mjernom svitku, uz primjenu relacije (5.13). Slika 6.14 – 2 prikazuje mjesto na kojem se mjernim svitkom odredila raspodjela magnetske indukcije.



*Slika 6.15. Raspodjela magnetske indukcije;
Krivulja 1 – dobivena integracijom izračunatog induciranog napona u mjernom svitku,
uz primjenu relacije (5.13),
Krivulja 2 – preračunata raspodjela magnetske indukcije promatrane sa zuba
statorskog paketa, na mjesto ugradnje mjernog svitka.*

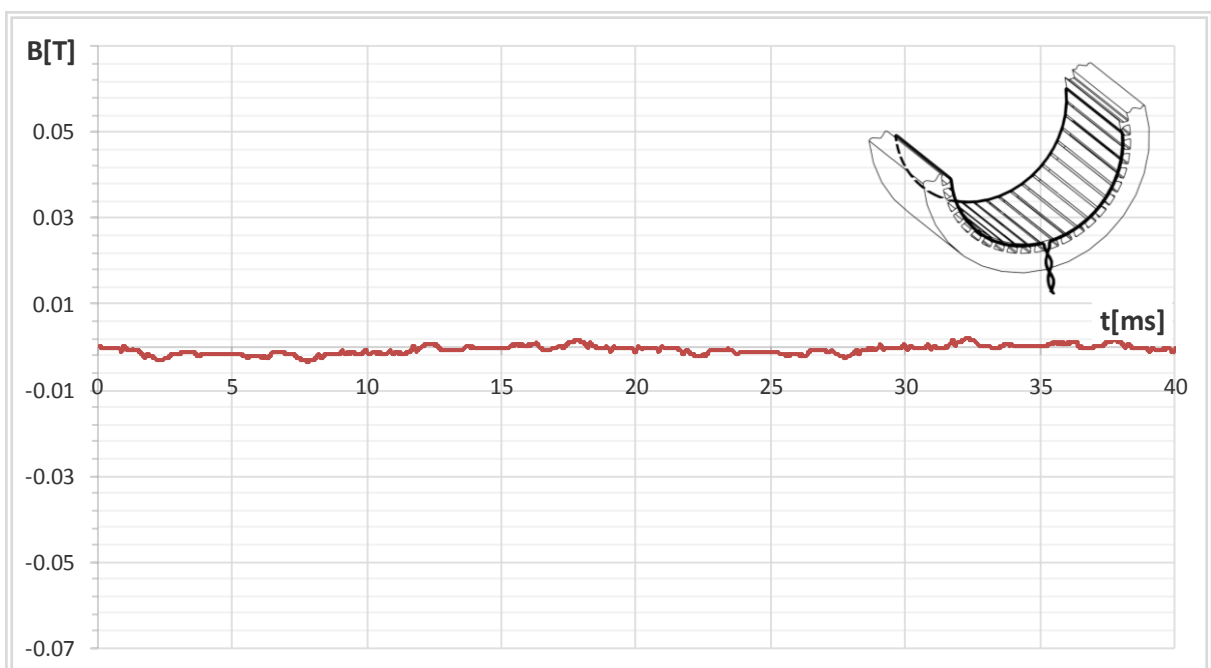
Prema slici 6.15, može se zaključiti da su rezultati raspodjele magnetske indukcije, dobivene iz mjernog svitka ugrađenog oko zuba statorskog paketa, manje osjetljivi na konstrukcijske utjecaje stroja. Razlog tome je što mjerni svitak obuhvaća ukupni magnetski tok koji prolazi kroz zub i ovisi o njegovoj srednjoj vrijednosti, dok su podaci prikazani na slici 6.15 – 2, računati za točno određeno mjesto u stroju.

Pored podataka dobivenih računanjem u mjernom svitku ugrađenom oko zuba statorskog paketa, računati su i valni oblici napona induciranih u preostalim mjernim svitcima, ugrađenim kako je prikazano u poglavlju 5.1.4. Valni oblik napona koji se inducira u mjernom svitku koji je ugrađen na dvostrukom polnom koraku Ms_7 , prikazan je na slici 6.16.



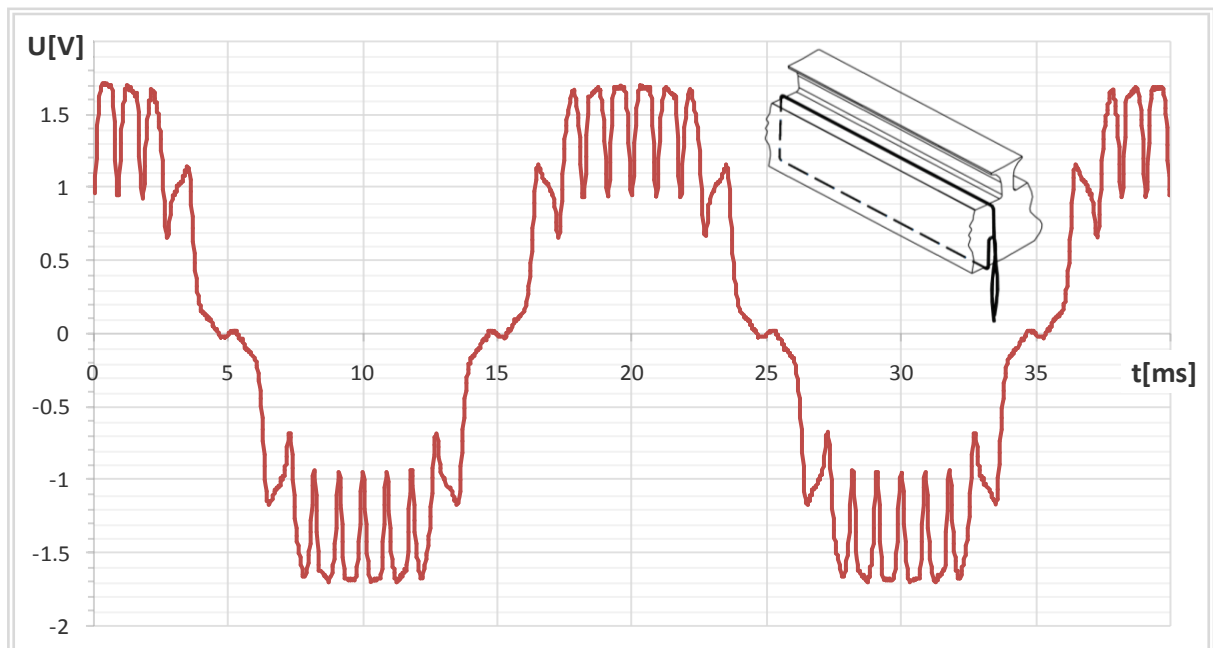
Slika 6.16. Napon induciran u mjernom svitku Ms_7 , ugrađen kao na slici 5.11-2, za prazni hod pri uzbudnoj struji od 8,7 A.

Integracijom napona induciranog u mjernom svitku prikazanom na slici 6.16, dobije se vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetskog toka kojeg obuhvaća mjerni svitak Ms_7 . Primjenom relacije (5.13), uz površinu svitka $S = 910 \text{ cm}^2$, može se izračunati vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka, koja je prikazana na slici 6.17.



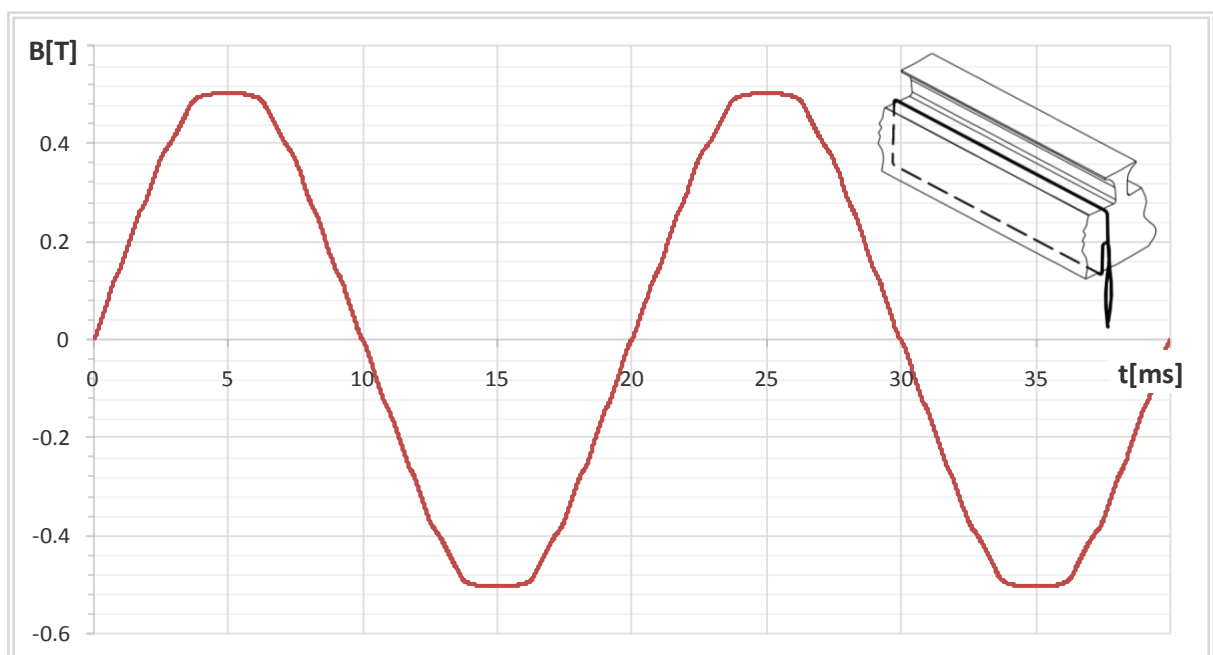
Slika 6.17. Raspodjela magnetske indukcije dobivena integracijom napona induciranog u mjernom svitku ugrađenom na dvostrukom polnom koraku, kako je prikazano na slici 5.11-2, za prazni hod pri uzbudnoj struji od 8,7 A.

Napon koji se inducira u mjernom svitku ugrađenom oko jarma statora Ms_3 i Ms_4 , kako je prikazano na slici 5.10-2, prikazuje slika 6.18.



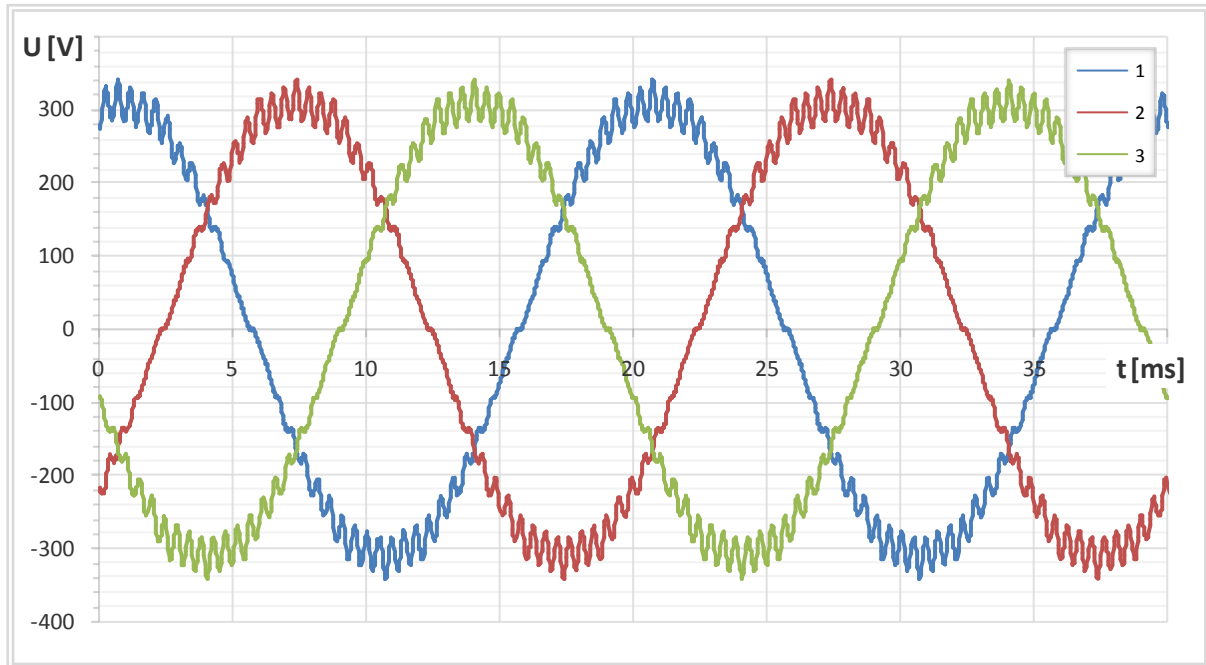
Slika 6.18. Napon induciran u mjernom svitku ugrađenom oko jarma statora, kako je prikazano na slici 5.10-2, za prazni hod pri uzbudnoj struji od 8,7 A.

Integracijom napona induciranog u mjernom svitku, prikazanom na slici 6.18, dobiva se vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetskog toka kojeg obuhvaća mjerni svitak Ms_3 i Ms_4 . Primjenom relacije (5.13), uz površinu svitka $S = 3200 \text{ mm}^2$, može se izračunati vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka, koja je prikazana na slici 6.19.



Slika 6.19. Raspodjela magnetske indukcije u jarmu statora, dobivena integracijom napona induciranog u mjernom svitku ugrađenom oko jarma statora, prikazanom na slici 6.18, te primjenom relacije (5.13).

Napon koji se inducira u vodiču mjernog svitka Ms_3 i Ms_4 , smještenog u utoru statorskog paketa, identičan je onom koji se inducira u vodiču namota armature. Vektorski zbroj napona induciranih u vodičima smještenim u utorima, a spojenim prema shemi namota, određuje ukupan napon koji se dobije na priključnim stezaljkama armature. Slika 6.20 prikazuje napon koji se inducira u faznim namotima armature, za prazni hod pri struji uzbude od 8,7 A.



Slika 6.20. Napon induciran u faznim namotima armature, za prazni hod pri struji uzbude od 8,7 A;
Krivulja 1- faza U, Krivulja 2 – faza V, Krivulja 3 – faza W.

Kako se može vidjeti na slici 6.20, napon koji se inducira u namotu svake faze, ima jednak oblik, dok prostorna razdioba faznih namota po obodu stroja, koju određuje shema namota prikazana na slici 4.5, uzrokuje fazni pomak napona iznosa $\pi/3$. Valovitost napona uzrokuju utori statorskog paketa, kao i prigušni namot, te otvori utora za smještaj štapova prigušnog namota.

Za svako radno stanje napraviti će se i frekvencijska analiza podataka dobivenih proračunom na mjestima ugradnje senzora na generatoru SGBP 160 M-4M. Naime, kako je u poglavlju 2. prikazano, detekcija oblika krivulje dobivene mjerenjem sensorima, te donošenje zaključaka o prisutnosti kvara na osnovu oblika iste, suviše je složena. Tako će inteligentni sustav na osnovu harmoničkog sastava promatranog valnog oblika, donositi odluku o prisutnosti kvara. Stoga je potrebno izraditi frekvencijsku analizu u svakom od radnih stanja uključujući i kvarna, popisati prisutne harmoničke članove kako bi se mogle načiniti potrebne usporedbe podataka te donijeti odgovarajući zaključci. Frekvencijska analiza vršit će se za sve valne oblike na periodu $\pi/2$, odnosno za polni korak.

Na slici 6.21 prikazana je frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije na polnom koraku, u zračnom rasporu promatrane sa zuba statorskog paketa, prikazane na slici 6.3.



Slika 6.21. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije na polnom koraku, u zračnom rasporu promatrane sa zuba statorskog paketa.

Na slici 6.21 može se vidjeti da je u valnom obliku raspodjele magnetske indukcije na polnom koraku, u zračnom rasporu prikazanoj na slici 6.3, dominantan osnovni harmonik, međutim prisutni su i viši harmonički članovi. U tablici 6.2 prikazani su iznosi amplituda izraženih harmoničkih članova.

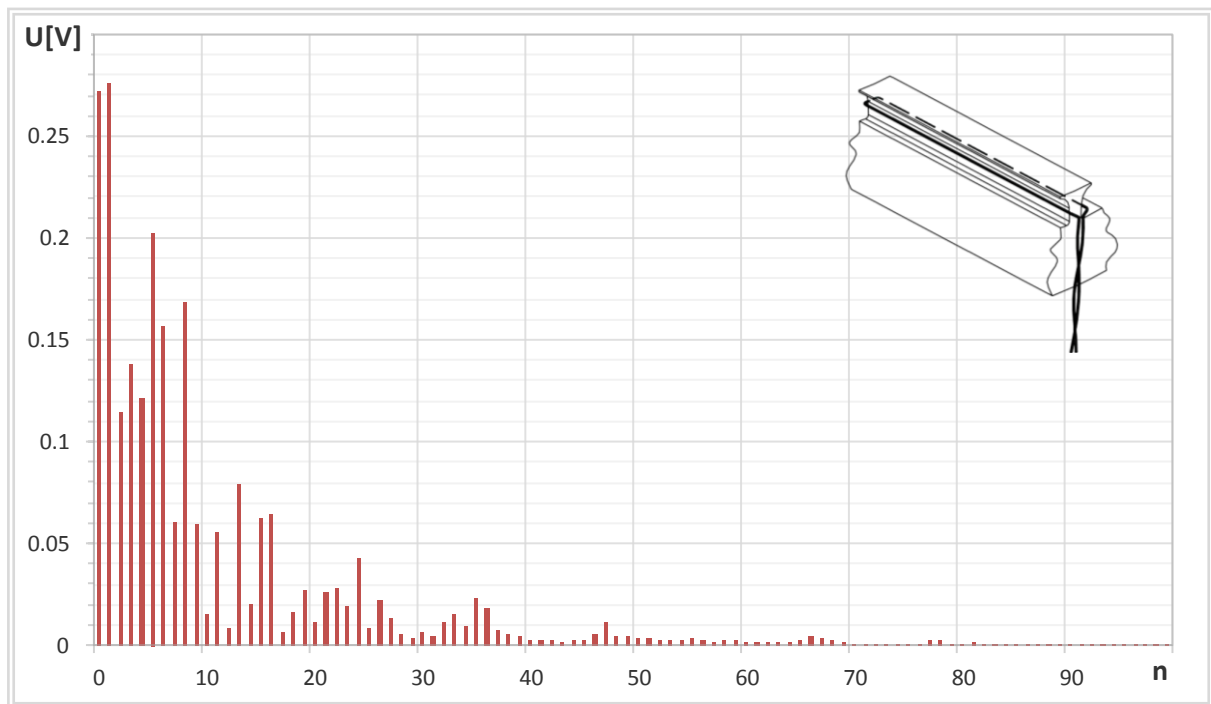
Tablica 6.2. Popis izraženih harmoničkih članova prikazanih na slici 6.19.

Harmonik broj	Amplituda B [T]
0	0,4727
1	0,3442
2	0,1247
3	0,0195
4	0,0356
5	0,0133

Harmonik broj	Amplituda B [T]
6	0,0555
7	0,0570
9	0,0317
10	0,0247
12	0,0226
14	0,0260

Harmonik broj	Amplituda B [T]
21	0,0179
22	0,0209
23	0,0209
34	0,0182
45	0,0164

Slika 6.22 prikazuje frekvencijsku analizu valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , na polnom koraku, prikazanog na slici 6.12.



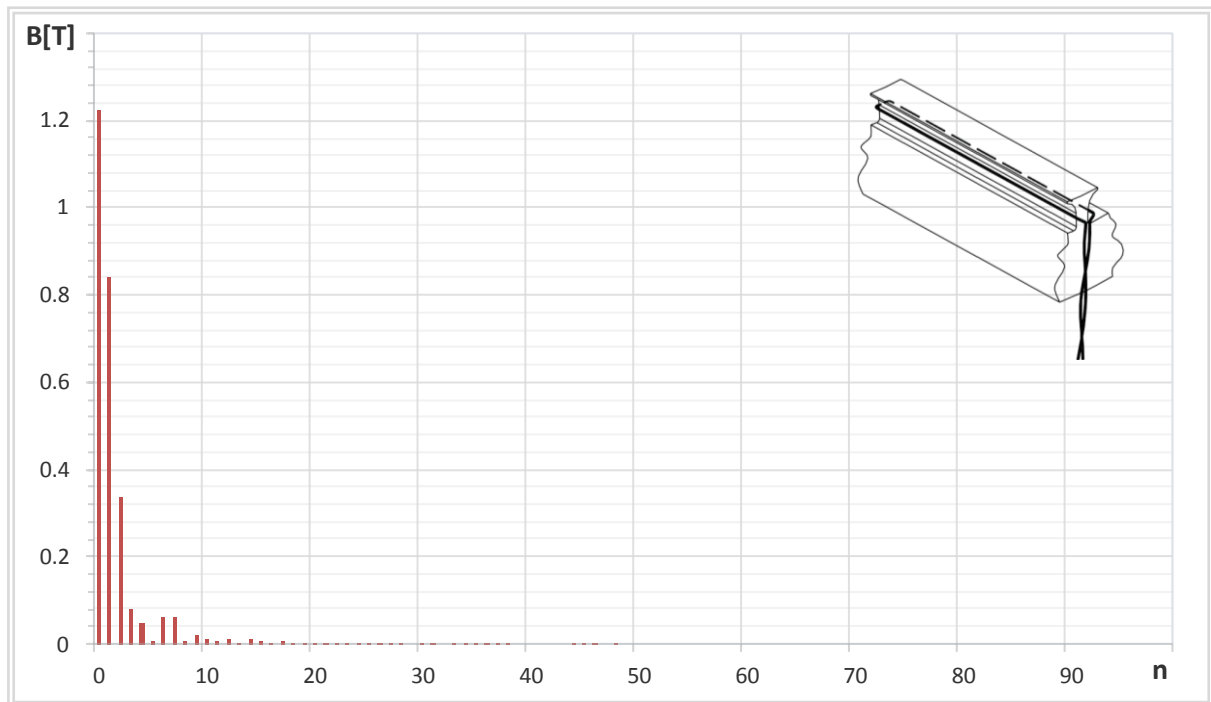
Slika 6.22. Frekvencijska analiza valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , na polnom koraku, prikazanog na slici 6.12.

Na slici 6.22 vidljivo je da pored osnovnog harmonika, koji je dominantan, prisutan i spektar viših harmonika u valnom obliku napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 . U tablici 6.3 prikazani su iznosi amplituda izraženih harmoničkih članova.

Tablica 6.3. Popis izraženih harmoničkih članova prikazanih na slici 6.20.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]
0	0,2719	10	0,0150	22	0,0281
1	0,2763	11	0,0549	23	0,0190
2	0,1144	13	0,0786	24	0,0429
3	0,1375	14	0,0203	26	0,0222
4	0,1208	15	0,0626	27	0,0130
5	0,2028	16	0,0640	32	0,0115
6	0,1561	18	0,0167	33	0,0153
7	0,0604	19	0,0266	34	0,0093
8	0,1679	20	0,0116	35	0,0234
9	0,0593	21	0,0262	36	0,0178

Slika 6.23 prikazuje frekvencijsku analizu valnog oblika dobivenog integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , na polnom koraku, prikazanog na slici 6.13.



Slika 6.23. Frekvencijska analiza valnog oblika dobivenog integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , na polnom koraku, prikazanog na slici 6.13.

Na slici 6.23 vidljivo je da pored osnovnog harmonika koji je dominantan prisutan i spektar viših harmonika u valnom obliku. U tablici 6.4 prikazani su iznosi amplituda izraženih harmoničkih članova.

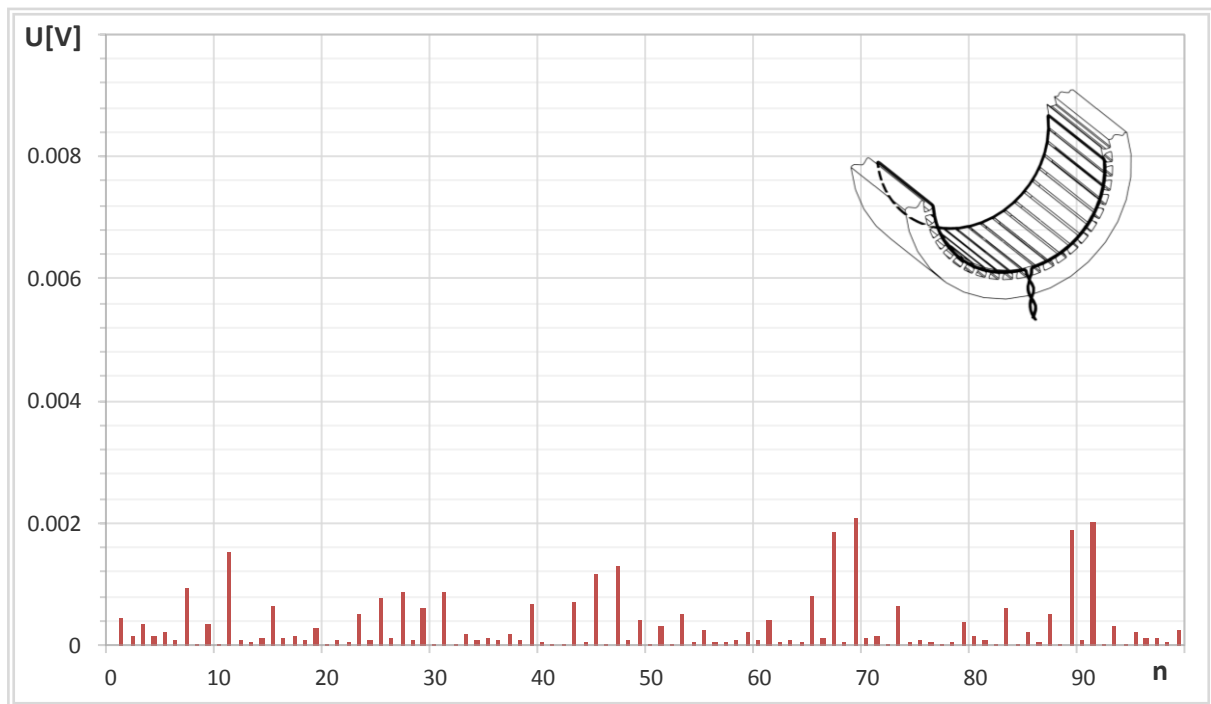
Tablica 6.4. Popis izraženih harmoničkih članova prikazanih na slici 6.21.

Harmonik broj	Amplituda B [T]
0	1,2216
1	0,8407
2	0,3353

Harmonik broj	Amplituda B [T]
3	0,0783
4	0,0471
6	0,0602

Harmonik broj	Amplituda B [T]
7	0,0599
9	0,0186

Slika 6.24 prikazuje frekvencijsku analizu valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku Ms_7 , na dvostrukom polnom koraku, prikazanog na slici 6.16.



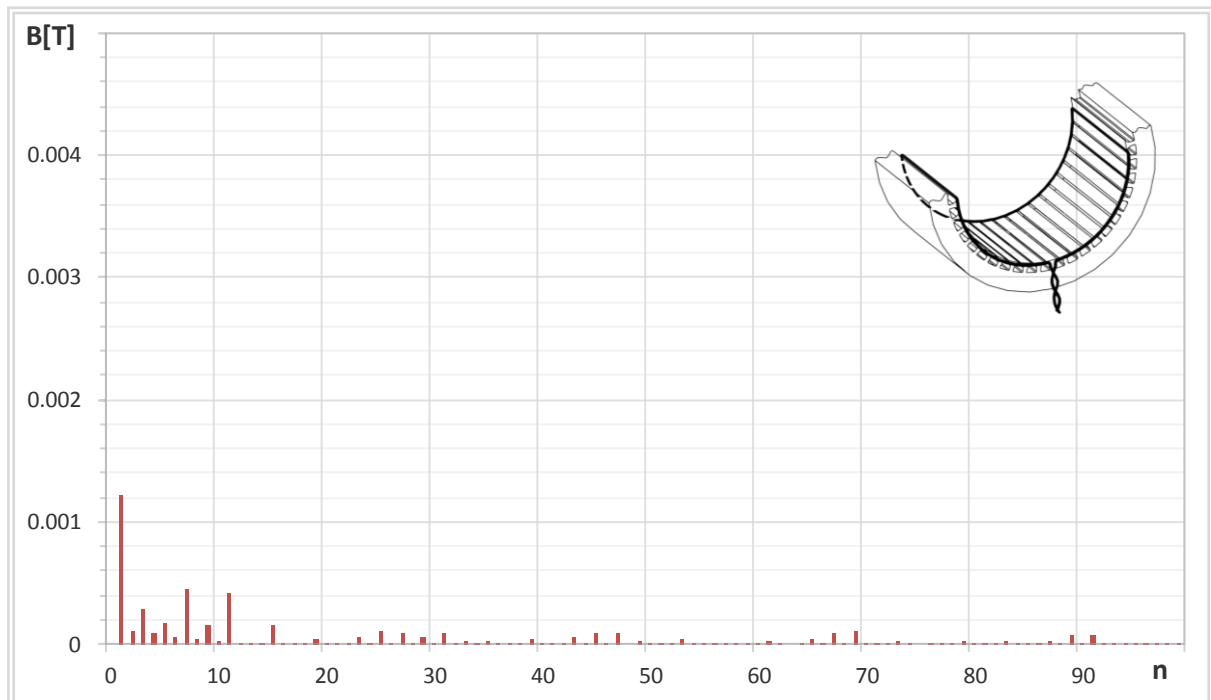
Slika 6.24. Frekvencijska analiza valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku Ms_7 , prikazanog na slici 6.16.

U tablici 6.5 prikazani su iznosi amplituda izraženih harmoničkih članova, sa slike 6.24.

Tablica 6.5. Popis izraženih harmoničkih članova prikazanih na slici 6.24.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]
0	-0,000038	19	0,00028	43	0,00071
1	0,00045	23	0,00049	45	0,0011
3	0,00033	25	0,00077	47	0,0013
7	0,00092	27	0,00086	65	0,00081
9	0,00034	29	0,00061	69	0,0021
11	0,0015	31	0,00088	89	0,0018
15	0,00064	39	0,00067	91	0,0021

Slika 6.25 prikazuje frekvencijsku analizu valnog oblika dobivenog integracijom napona inducirano u mjernom svitku Ms_7 , na dvostrukom polnom koraku, prikazanog na slici 6.17.



Slika 6.25. Frekvencijska analiza valnog oblika dobivenog integracijom napona inducirano u mjernom svitku Ms_7 , prikazanog na slici 6.17.

U tablici 6.6 prikazani su iznosi amplituda izraženih harmoničkih članova, sa slike 6.25.

Tablica 6.6. Popis izraženih harmoničkih članova prikazanih na slici 6.25.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]
0	-0,00075	7	-0,00013	15	-0,00011
1	0,00044	8	-0,00013	18	-0,00005
2	0,00053	9	-0,00009	28	0,00012
3	0,00046	11	-0,00011	31	-0,00029
4	0,00028	12	-0,00008	33	-0,00081
5	0,000063	13	-0,00011		

Slika 6.26 prikazuje frekvencijsku analizu valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku Ms_3 i Ms_4 , na polnom koraku, prikazanog na slici 6.18.



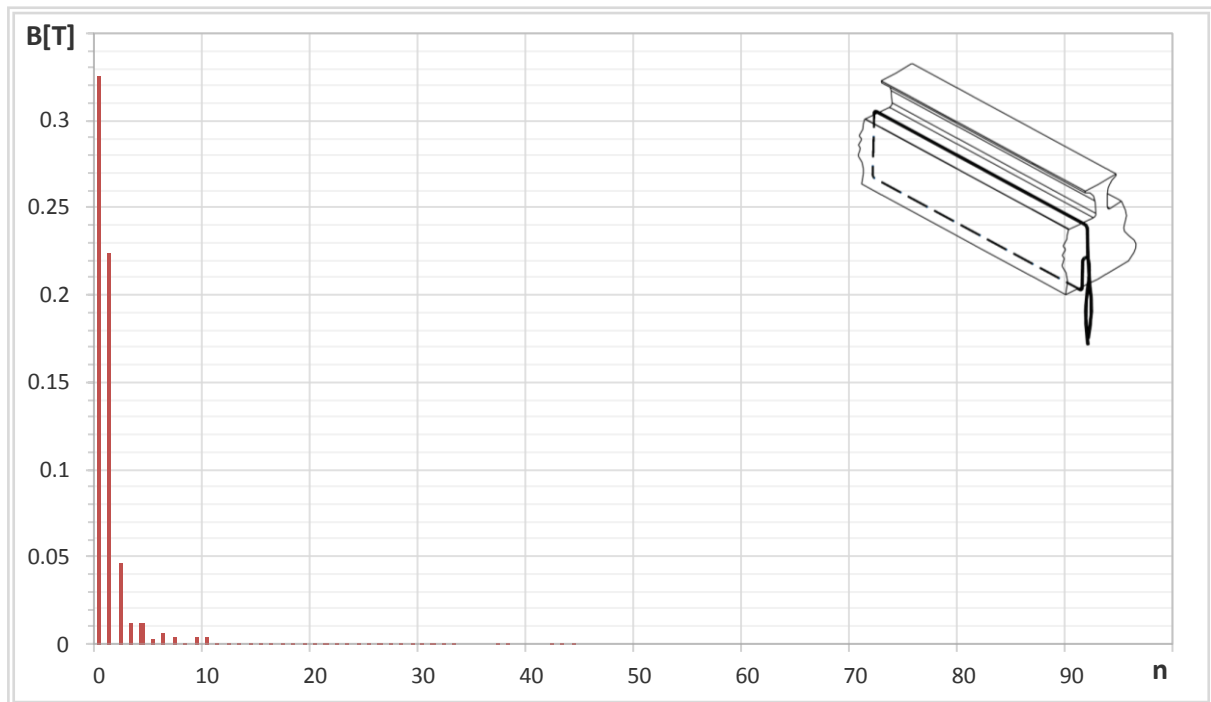
Slika 6.26. Frekvencijska analiza valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku Ms_3 i Ms_4 , prikazanog na slici 6.18.

U tablici 6.7 prikazani su iznosi amplituda izraženih harmoničkih članova, sa slike 6.26.

Tablica 6.7. Popis izraženih harmoničkih članova prikazanih na slici 6.26.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]
0	1,0053	9	0,0952	21	0,0576
1	0,7215	10	0,1498	22	0,0816
2	0,2827	11	0,1746	23	0,0505
3	0,0667	12	0,0862	33	0,0282
4	0,0495	14	0,0473	34	0,0247
6	0,0866	15	0,0286		
7	0,1146	17	0,0253		

Slika 6.27 prikazuje frekvencijsku analizu valnog oblika dobivenog integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_3 i Ms_4 , na polnom koraku, prikazanog na slici 6.19.



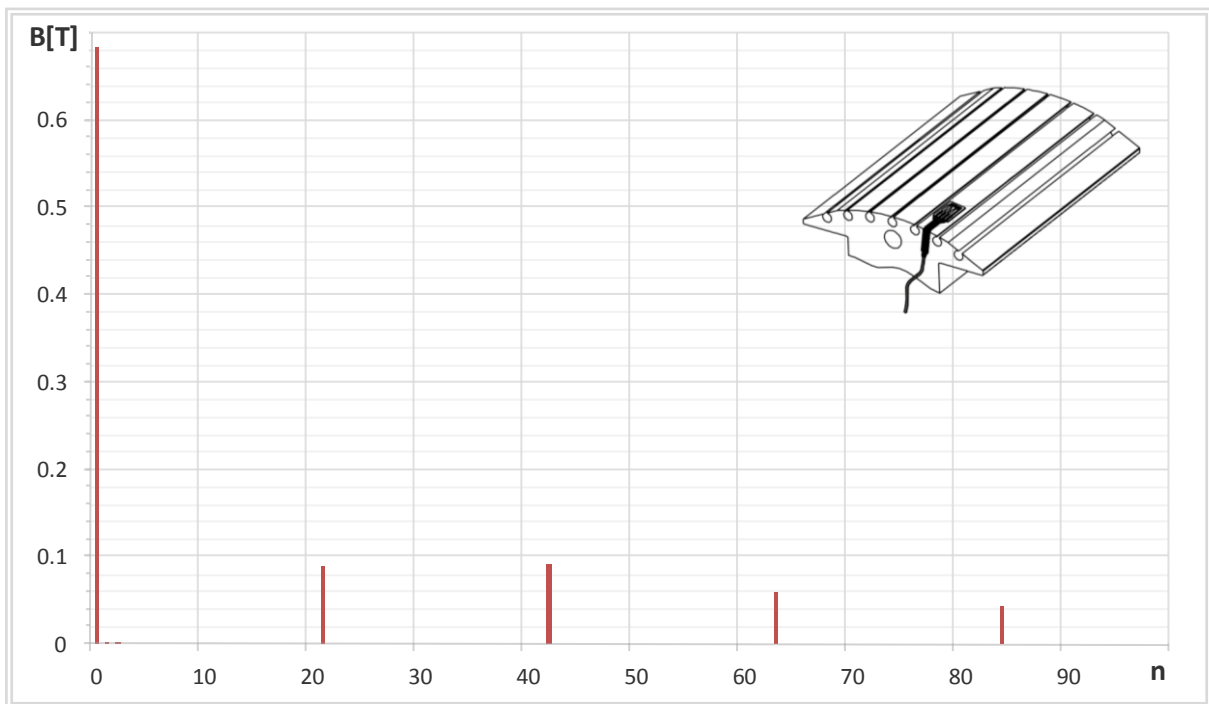
Slika 6.27. Frekvencijska analiza valnog oblika dobivenog integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_3 i Ms_4 , na polnom koraku, prikazanog na slici 6.19.

U tablici 6.8 prikazani su iznosi amplituda izraženih harmoničkih članova, sa slike 6.27.

Tablica 6.8. Popis izraženih harmoničkih članova prikazanih na slici 6.27.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]
0	0,3251	4	0,0123	7	0,0045
1	0,2233	5	0,0032	9	0,0041
2	0,0465	6	0,0068	10	0,0040
3	0,0124				

Na slici 6.28 prikazana je frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane s rotorske polne papuče, prikazane na slici 6.9.



Slika 6.28. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane sa zuba statorskog paketa.

Na slici 6.28 može se vidjeti da valni oblik raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu prikazan na slici 6.9, nema dominantnog harmonika, već samo više harmoničke članove. U tablici 6.9 prikazani su iznosi amplituda izraženih harmoničkih članova sa slike 6.28.

Tablica 6.9. Popis izraženih harmoničkih članova prikazanih na slici 6.28.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]
21	0,090	63	0,060	105	0,023
42	0,091	84	0,043	126	0,010

6.2. Rezultati proračuna za prazni hod, uz smanjeni iznos broja zavoja na jednom svitku uzbudnog namota

Za provedbu ovog proračuna izrađen je model kojem je na jednom svitku uzbudnog namota zadan manji broj zavoja nego na preostalim uzbudnim svitcima. Pri tome, struja kroz uzbudne svitke jednakog je iznosa i ne ovisi o broju zavoja svitka. Na taj način postignut je efekt kao da su u uzbudnom svitku prisutni međuzavojni kratki spojevi. Ovim modelom izračunati su valni oblici na istim mjestima kao i u poglavlju 6.1, kako bi se načinila usporedba rezultata dobivenih proračunom u ispravnom i kvarnom stanju, te donijeli određeni zaključci koji će pridonijeti detekciji ovog kvarnog stanja stroja.

Utjecaj smanjenja broja zavoja omotanih oko pola na magnetske prilike u zračnom rasporu stroja u praznom hodu, može se najjednostavnije analizirati ukoliko se promotri protjecanje u zračnom rasporu. Protjecanje koncentriranog uzbudnog namota prikazano je na slici 6.29. Smanjenje broja zavoja jednog od polova iznosa ΔN , razmatrati će se kao da je na taj pol omotan dodatni uzbudni svitak kroz kojeg protječe struja suprotnog smjera. Broj zavoja dodatnog svitka jednak je iznosu promjene ΔN . Protjecanje dodatnog svitka prikazano je na slici 6.29 i označeno crvenom bojom. Dodatni svitak omotan je oko pola broj 4, a njegovo protjecanje raspodijeljeno je po cijelom obodu zračnog raspora i za njega vrijede relacije:

$$\theta_{d1} \cdot \tau_p = \theta_{d2} \cdot 3 \cdot \tau_p \quad (6.4)$$

$$\theta_{d1} = 3 \cdot \theta_{d2} \quad (6.5)$$

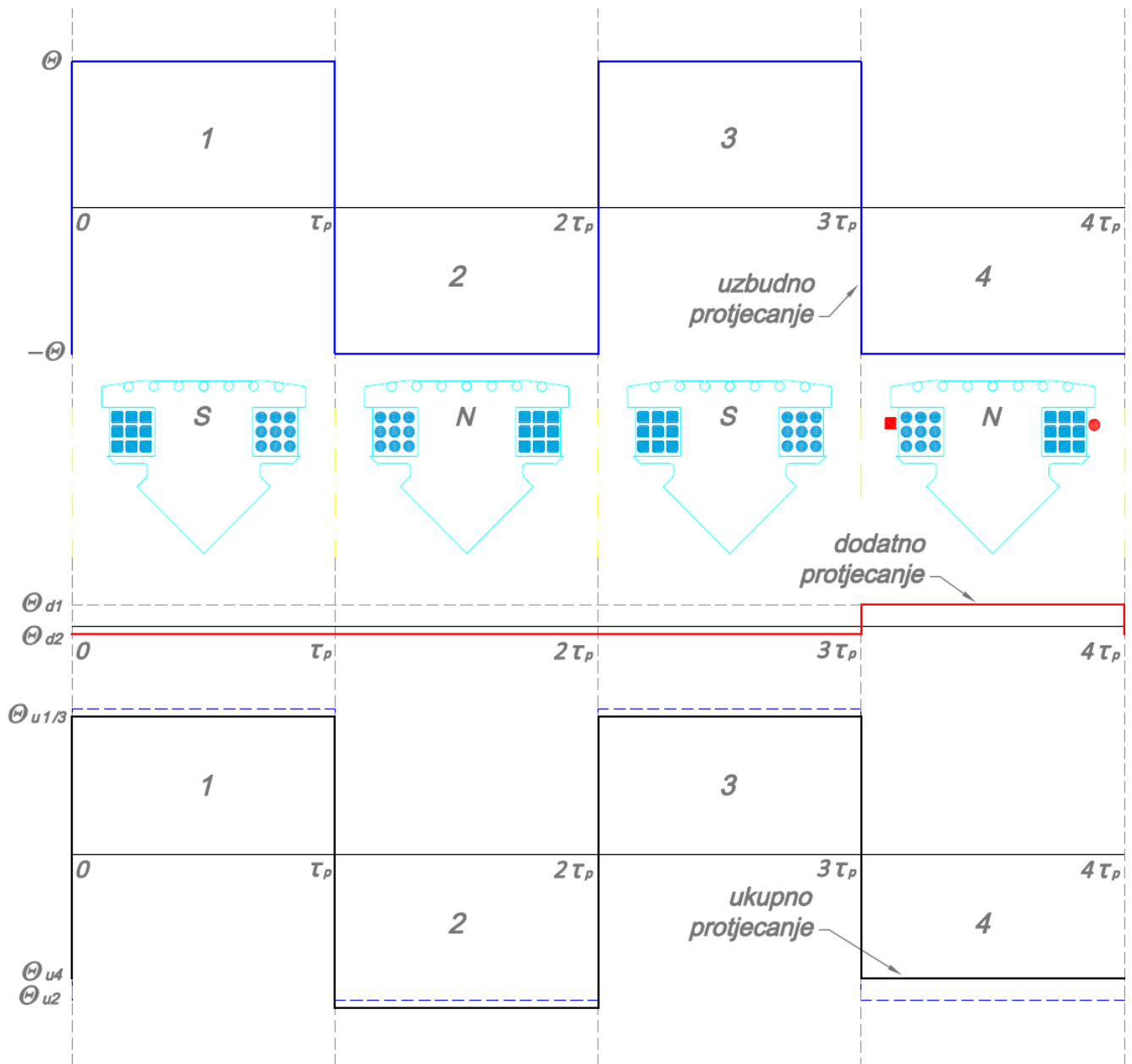
$$\theta_{d1} + \theta_{d2} = \theta \cdot \Delta N \quad (6.6)$$

Ukupno protjecanje u zračnom rasporu stroja u praznom hodu pri smanjenom iznosu broja zavoja jednog pola, rezultat je zbroja uzbudnog protjecanja i dodatnog protjecanja. Na slici 6.29 prikazano je ukupno protjecanje, iz kojeg se može uočiti da smanjenje broja zavoja na jednom polu utječe na protjecanje svih polova. Pri tome, protjecanje pola broj 1 i pola broj 3, odnosno θ_{u1} i θ_{u3} , smanjiti će se za iznos θ_{d2} . Protjecanje pola broj 2, odnosno θ_{u2} , povećati će se za iznos θ_{d2} , dok protjecanje pola broj 4, odnosno θ_{u4} , smanjiti će se za iznos θ_{d1} . Iz relacija (6.4), (6.5) i (6.6) slijede iznosi za protjecanja θ_{d1} , odnosno θ_{d2} :

$$\theta_{d1} = \frac{3}{4} (\theta \cdot \Delta N) \quad (6.7)$$

$$\theta_{d2} = \frac{1}{4} (\theta \cdot \Delta N) \quad (6.8)$$

Prema relacijama (6.7) i (6.8), vrijedi da se smanjenjem broja zavoja jednog od polova za 10%, protjecanje pola broj 1 i pola broj 3 smanji za 2,5 %, protjecanje pola broj 2 poraste za 2,5 %, dok se protjecanje pola broj 4 smanji za 7,5 %.

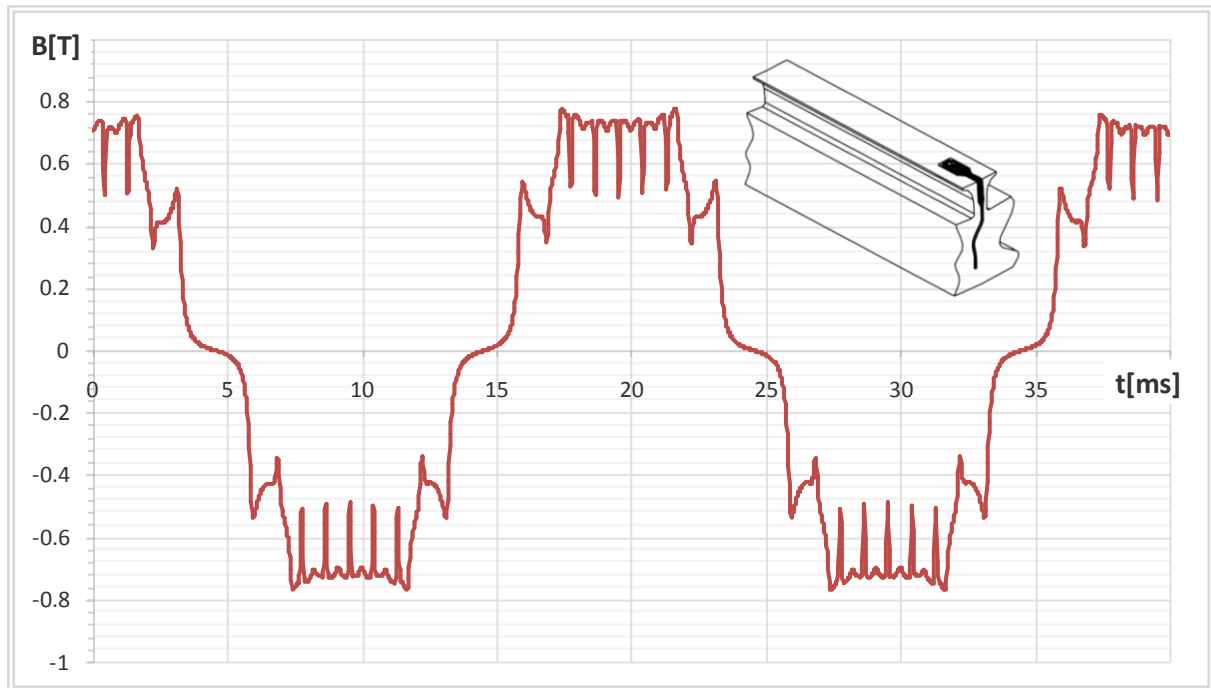


Slika 6.29. Protjecanje u zračnom rasporu stroja u praznom hodu pri smanjenom broju zavoja uzbuđnog svitka: Krivulja 1 – uzbuđno protjecanje, Krivulja 2 – dodatno protjecanje, Krivulja 3 – ukupno protjecanje.

Za provjeru ovih tvrdnji izračunat je valni oblik magnetske indukcije u zračnom rasporu pod svim polovima, pri smanjenom iznosu broja zavoja pola. Rezultati izračuna magnetske indukcije pod svakim polom međusobno su uspoređeni, a načinjena je i usporedba s podacima izračuna magnetske indukcije bez prisutnog smanjenja broja zavoja pola, što je prikazano u nastavku poglavlja.

6.2.1. Utjecaj smanjenja iznosa broja zavoja svitka uzbuđnog namota na magnetsku indukciju u zračnom rasporu

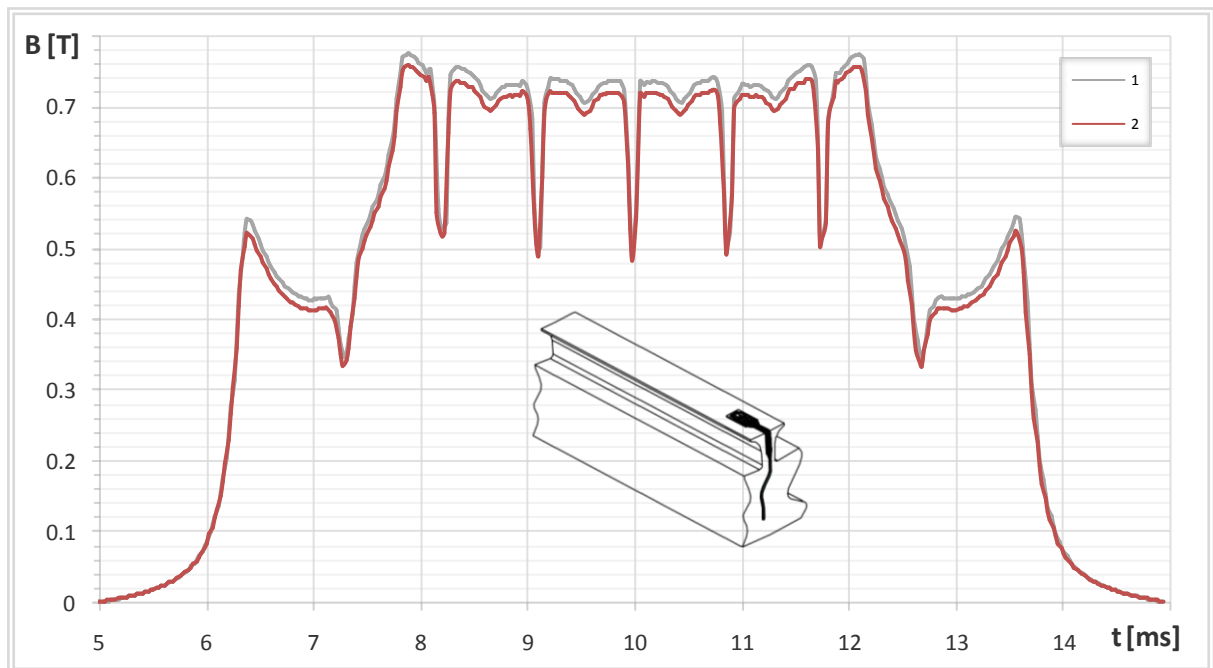
Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu, promatrana sa zuba statorskog paketa, za prazni hod, pri struji uzbuđe od 8,7 A, za jedan puni okret rotora prikazana je na slici 6.30. Prikazana raspodjela magnetske indukcije računata je za smanjeni broj zavoja na jednom od svitaka uzbuđnog namota u iznosu od 10 %.



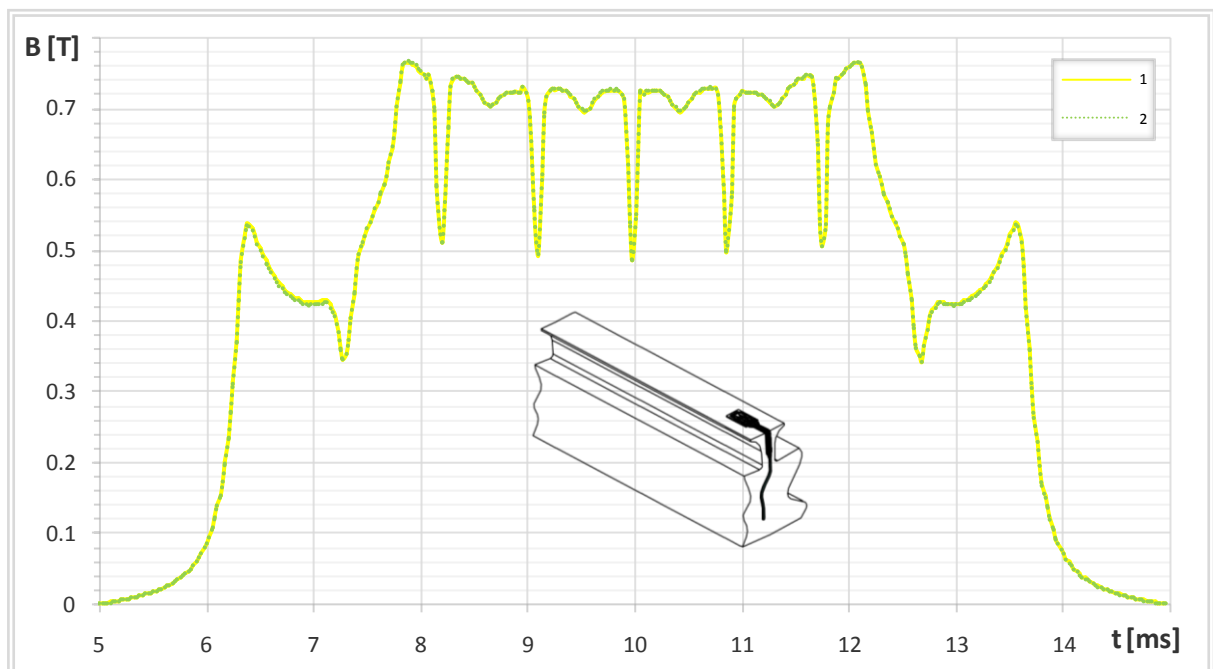
Slika 6.30. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana sa zuba statorskog paketa za prazni hod, uz smanjeni iznos broja zavoja jednog uzbuđnog svitka u iznosu od 10 %, pri uzbuđnoj struji od 8,7 A.

Valni oblik raspodjele magnetske indukcije pod polom s manjim iznosom broja zavoja, ne razlikuje se od raspodjele magnetske indukcije pod preostalim polovima. Međutim, među njima dolazi do odstupanja u iznosima magnetske indukcije. Tako srednja vrijednost magnetske indukcije pod polom s manjim iznosom broja zavoja (pol br. 4) ima i najmanji iznos, srednja vrijednost magnetske indukcije pod polovima br. 3 i 1 (susjedni polovi) imaju nešto veći iznos, dok pol br. 2 koji je dijametralno suprotan polu s manjim iznosom broja zavoja ima najvišu srednju vrijednost magnetske indukcije pod polom.

Slike 6.31 i 6.32 prikazuju raspodjelu magnetske indukcije na polnom koraku svih polova, za prazni hod pri struji uzbuđe od 8,7 A. Prikazana raspodjela magnetske indukcije računata je za smanjeni broj zavoja na jednom od svitaka uzbuđnog namota u iznosu od 10 %.

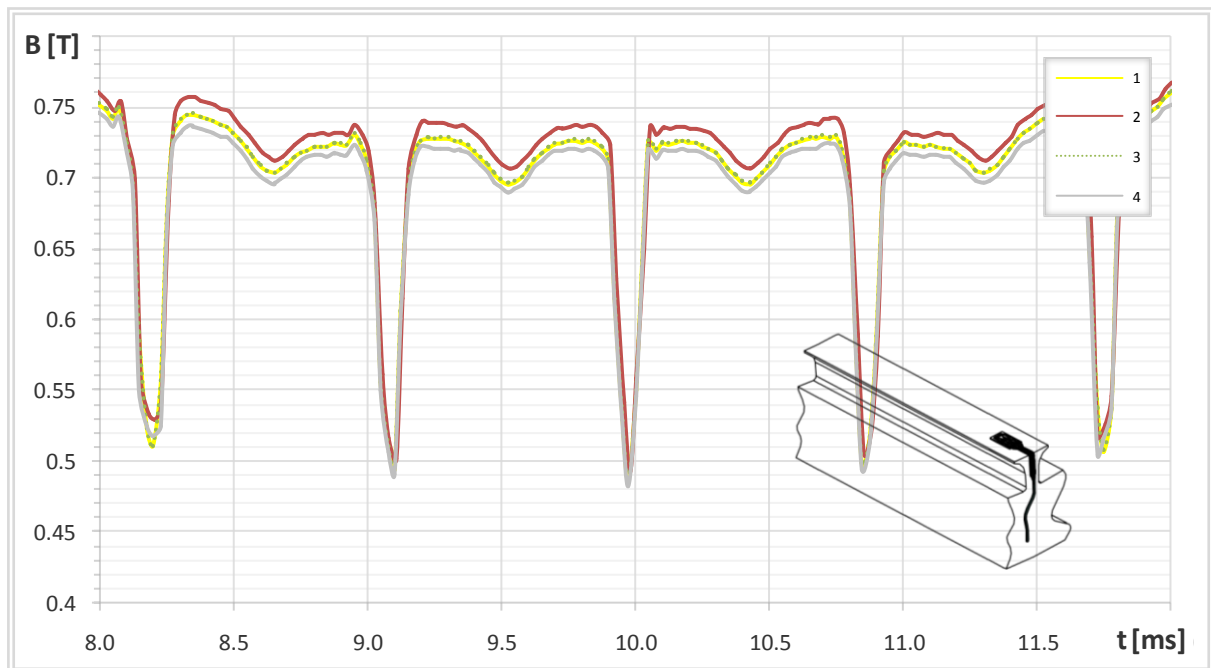


Slika 6.31. Raspodjela magnetske indukcije na polnom koraku, promatrana sa zuba statorskog paketa za prazni hod, pri uzbudnoj struji od 8,7 A:
 Krivulja 2 – za pol sa 10% manjim iznosom broja zavoja,
 Krivulja 1 – za dijametralno postavljene pol.



Slika 6.32. Raspodjela magnetske indukcije na polnom koraku, promatrana sa zuba statorskog paketa za prazni hod, pri uzbudnoj struji od 8,7 A:
 Krivulja 1 – za pol br. 1, Krivulja 2 – za pol br. 3.

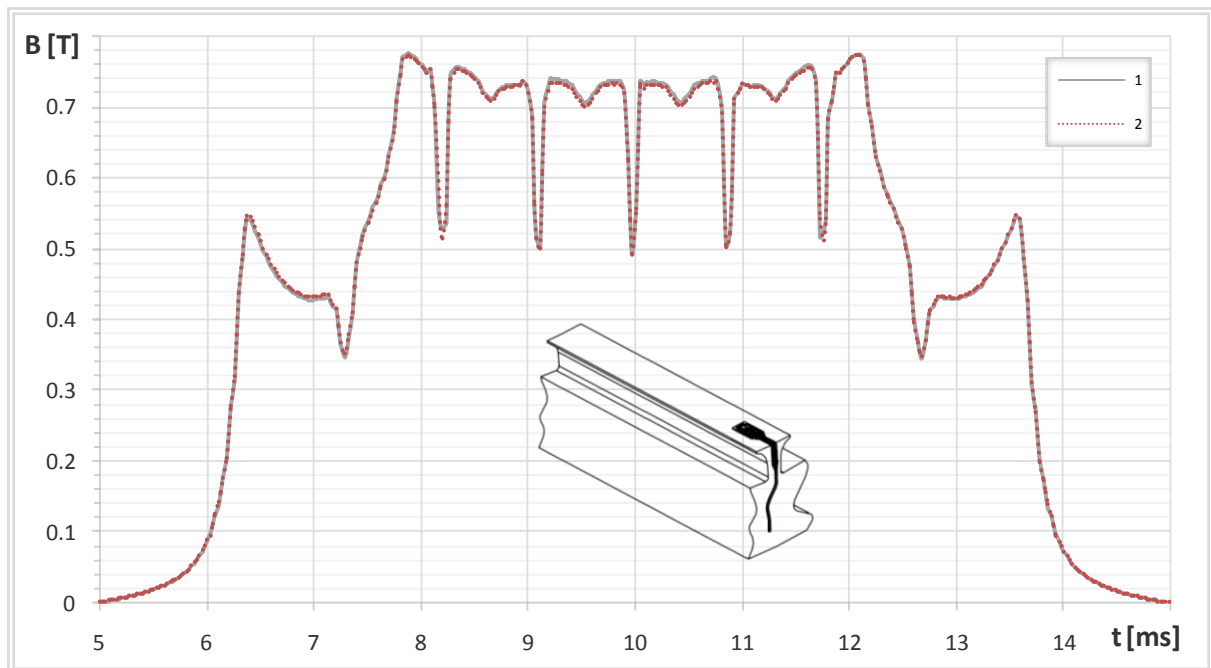
Slika 6.33 prikazuje raspodjelu magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporom za sva četiri pola.



Slika 6.33. Raspodjela magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom, promatrana sa zuba statorskog paketa za prazni hod, pri uzbudnoj struji od 8,7 A: Krivulja 1 – za pol br. 1, Krivulja 2 – za pol br. 2, Krivulja 3 – za pol br. 3, Krivulja 4 – za pol br. 4.

Na slici 6.33 može se uočiti da pol s manjim iznosom broja zavoja (pol br. 4, krivulja 4) ima i najnižu srednju vrijednost magnetske indukcije pod polom. Također, može se uočiti da ostali polovi iako imaju jednak broj zavoja omotanih oko pola, imaju različite iznose magnetske indukcije pod polom. Razlog postojanja razlika u iznosima magnetske indukcije, je taj što je magnetsko polje pola s manjim iznosom broja zavoja ulančeno s dva susjedna pola prema slici 6.2, i tako utječe na iznos magnetske indukcije pod tim polovima. Uslijed smanjenja broja zavoja pola broj 4, smanjila se i gustoća magnetskih silnica u polovima broj 1 i 3, a time dolazi do smanjenja magnetskog otpora u tim polovima. Stoga uzbudni svitak pola, dijametralno postavljenog polu sa smanjenim brojem zavoja, mora svladati manji magnetski otpor, te postiže veći iznos magnetske indukcije u polu. Za potvrdu ove teze potrebno je usporediti rezultate izračuna magnetske indukcije na polnom koraku za pol koji je dijametralno postavljen polu sa smanjenim iznosom broja zavoja, s računatim iznosima magnetske indukcije na polnom koraku dobivenih s modelom iz poglavlja 6.1, odnosno pri računanju s jednakim svitcima uzbudnog namota. Za očekivati je da uslijed smanjenja broja zavoja pola od 10 %, iznos magnetske indukcije pod polom koji je dijametralno postavljen (pol broj 2) treba porasti za 2,5 %. Rezultati usporedbe prikazani su na slici 6.34.

Iz podataka prikazanih na slici 6.34, moguće je uočiti da među uspoređenim valnim oblicima magnetske indukcije na polnom koraku, nema predviđenog odstupanja od 2,5 %, već je prisutno odstupanje od 0,6 %. Razlog zbog kojeg ne dolazi do predviđenog iznosa porasta magnetske indukcije pod polom broj 2, je zasićenje u željezu. Za potvrdu ove teze potrebno je izračunati raspodjelu magnetske indukcije pod polovima kod nezasićenog stroja, odnosno pri sniženoj struji uzbuđe.



Slika 6.34. Raspodjela magnetske indukcije na polnom koraku, promatrana sa zuba statorskog paketa za prazni hod, pri uzbudnoj struji od 8,7 A:

Krivulja 1 – za pol dijametralno postavljen polu s manjim iznosom broja zavoja,
Krivulja 2 – za pol iz modela koji ima jednake sve svitke uzbudnog namota.

Kako smanjenje iznosa broja zavoja na polu utječe na iznos magnetske indukcije na polnom koraku, može se izračunati ukoliko se usporede iznosi magnetske indukcije pod svim polovima. U tablici 6.10 prikazane su srednje vrijednosti magnetske indukcije sa slike 6.33, na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom, izuzev dijelova s prigušnim namotom. Također su prikazane i relativne vrijednosti istih u odnosu na srednju vrijednost magnetske indukcije pod polom broj 4, te usporedba s podacima bez prisutnog smanjenja broja zavoja pola.

Tablica 6.10. Srednje vrijednosti magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom izuzev dijelova s prigušnim namotom, pri 10 % smanjenom iznosu broja zavoja na polu broj 4, te uzbudnoj struji od 8,7 A.

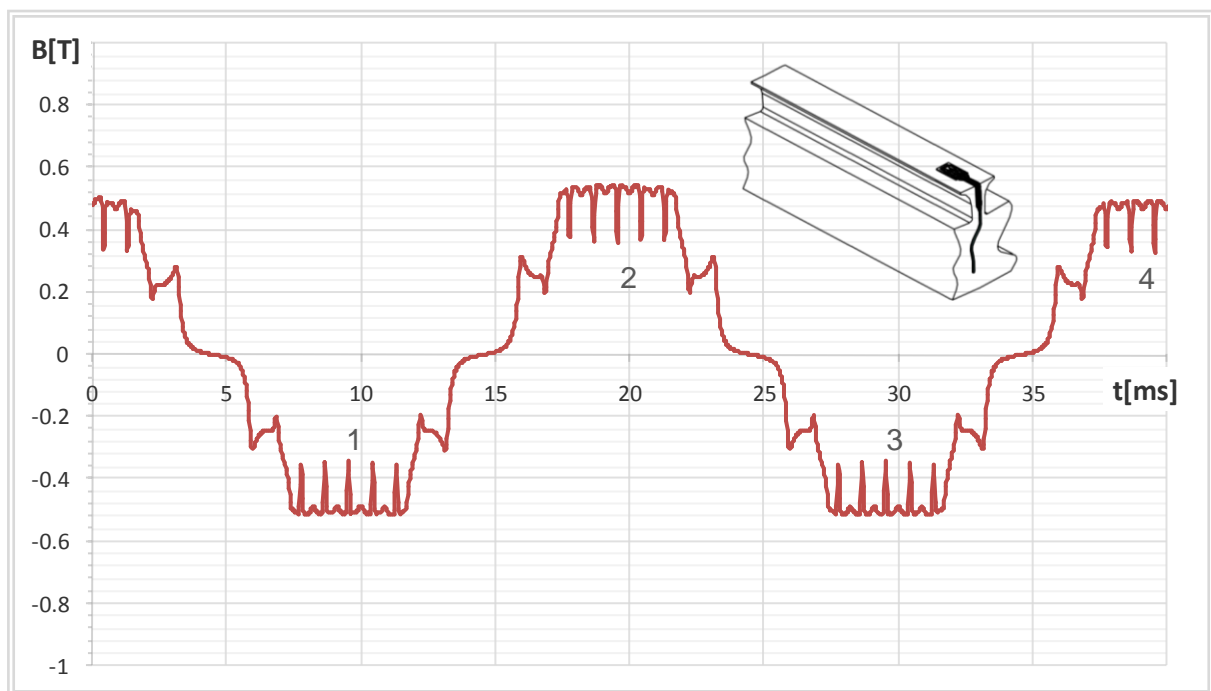
Pol	B_{SR} [T]	B_{SR}/B_{SR2}	ΔB_{SR} [%]
1	0,721	0,987	- 0,62
2	0,730	1,000	+ 0,69
3	0,721	0,987	- 0,62
4	0,713	0,977	- 1,64

Iz izračunatih podataka proizlazi da se smanjenjem iznosa broja zavoja omotanih oko pola za 10 %, iznos magnetske indukcije tog pola smanji za 1,64 %. Također iz podataka proizlazi da porast magnetske indukcije na polu broj 2 iznosi 0,69 %, dok se za iznos od 0,62 % smanje magnetske indukcije pod polovima broj 1 i 3. Relativni omjer magnetske indukcije pod polom broj 2 i polom broj 4 iznosi 2,33 %. Iznosi promjena magnetske indukcije pod polovima uslijed smanjenja broja zavoja pola

broj 4, nije u skladu s očekivanim iznosima. Razlog odstupanja od očekivanih iznosa je zasićenje magnetskog kruga stroja.

Očekivana odstupanja magnetske indukcije uslijed 10 % smanjenja broja zavoja pola broj 4, je -7,5 % za pol broj 4, -2,5 % za pol broj 1 i pol broj 3, te 2,5 % za pol broj 2.

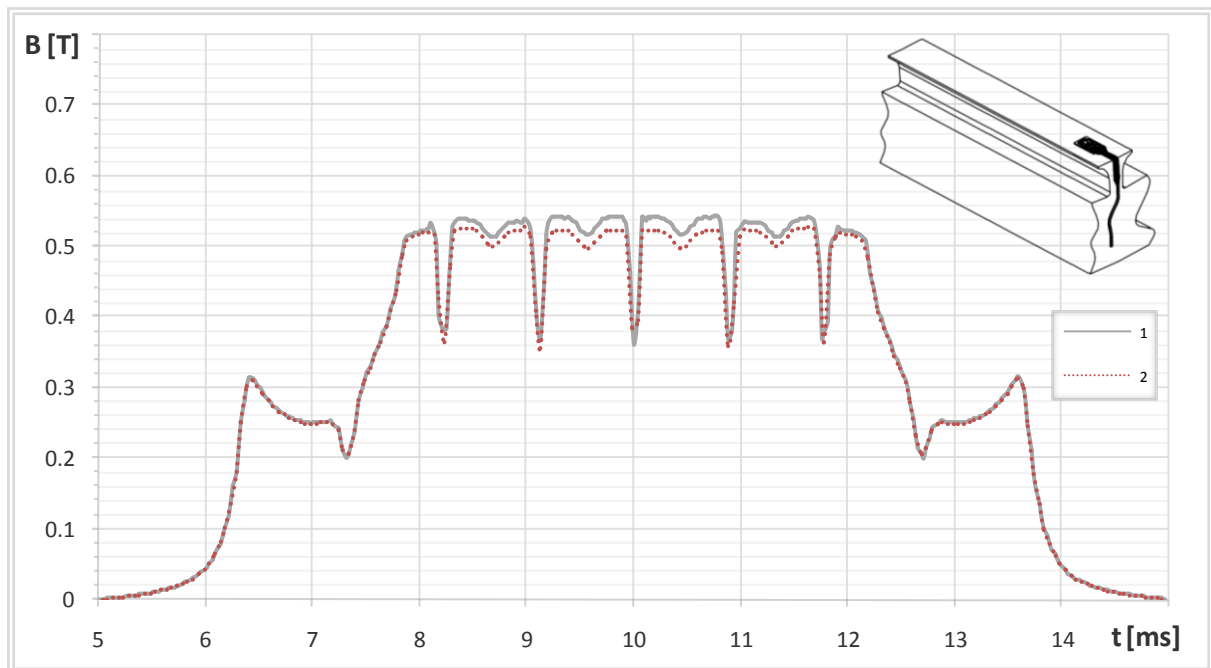
Za provjeru ove teze izračunata je raspodjela magnetske indukcije pri sniženom iznosu uzbudne struje. Slika 6.35 prikazuje raspodjelu magnetske indukcije u zračnom rasporu promatranu sa zuba statorskog paketa za prazni hod, pri struji uzbude od 4 A, za jedan puni okret rotora. Prikazana raspodjela magnetske indukcije računata je za smanjeni broj zavoja na jednom od svitaka uzbudnog namota u iznosu od 10 %.



Slika 6.35. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatranu sa zuba statorskog paketa za prazni hod, uz smanjeni iznos broja zavoja jednog uzbudnog svitka u iznosu od 10 %, pri uzbudnoj struji od 4 A.

Nadalje uspoređeni su rezultati izračuna magnetske indukcije na polnom koraku za pol koji je dijametralno postavljen polu sa smanjenim iznosom broja zavoja, s računatim iznosima magnetske indukcije na polnom koraku dobivenih s modelom iz poglavlja 6.1, odnosno pri računanju s jednakim svitcima uzbudnog namota pri sniženoj struji uzbude. Za očekivati je da uslijed smanjenja broja zavoja pola od 10 %, iznos magnetske indukcije pod polom koji je dijametralno postavljen (pol broj 2) treba porasti za 2,5 %. Rezultati usporedbe prikazani su na slici 6.36.

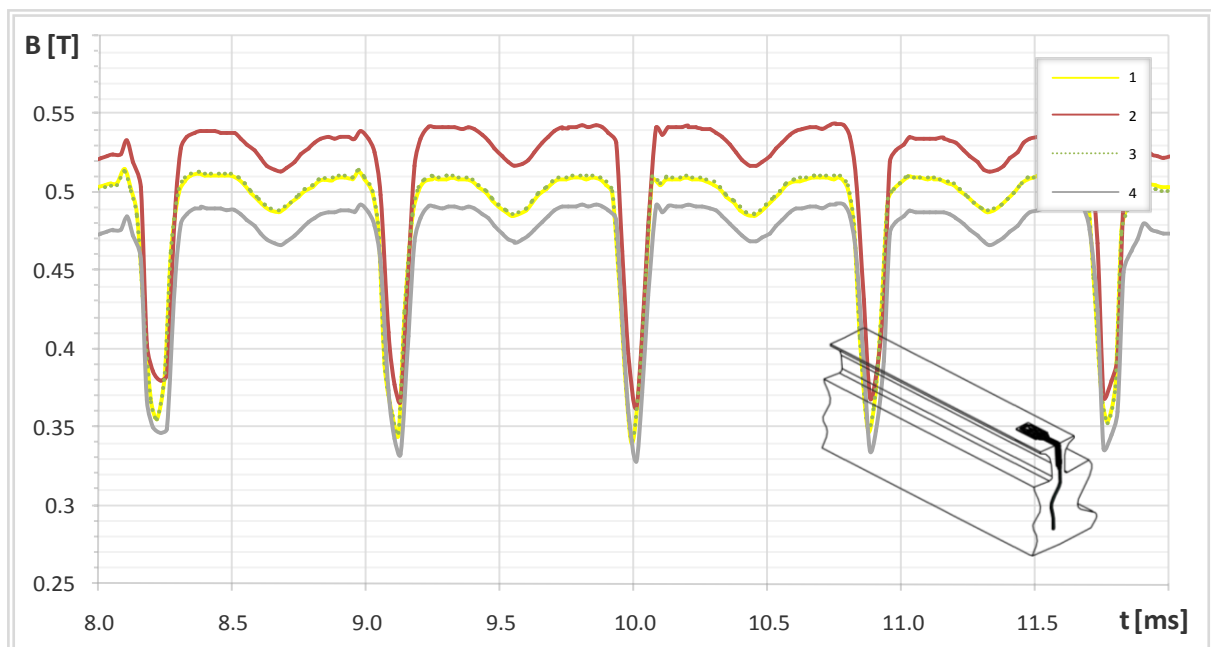
Iz podataka prikazanih na slici 6.36, moguće je uočiti da među uspoređenim valnim oblicima magnetske indukcije na polnom koraku, postoji predviđeno odstupanje u iznosima magnetske indukcije od 2,5 %. Kako kod struje uzbude od 4 A magnetski krug stroja nije zasićen, uslijed smanjenja broja zavoja na polu broj 4, dolazi do očekivanog porasta iznosa magnetske indukcije pod polom broj 2.



Slika 6.36. Raspodjela magnetske indukcije na polnom koraku, promatrana sa zuba statorskog paketa za prazni hod, pri uzбудnoj struji od 4 A:

Krivulja 1 – za pol dijametralno postavljen polu s manjim iznosom broja zavoja,
Krivulja 2 – za pol iz modela koji ima jednake sve svitke uzбудnog namota.

Slika 6.37 prikazuje raspodjelu magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom za sva četiri pola, uz 10 % smanjeni broj zavoja na polu broj 4, pri uzбудnoj struji od 4 A.



Slika 6.37. Raspodjela magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom, promatrana sa zuba statorskog paketa za prazni hod, pri uzбудnoj struji od 4 A: Krivulja 1 – za pol br. 1, Krivulja 2 – za pol br. 2, Krivulja 3 – za pol br. 3, Krivulja 4 – za pol br. 4.

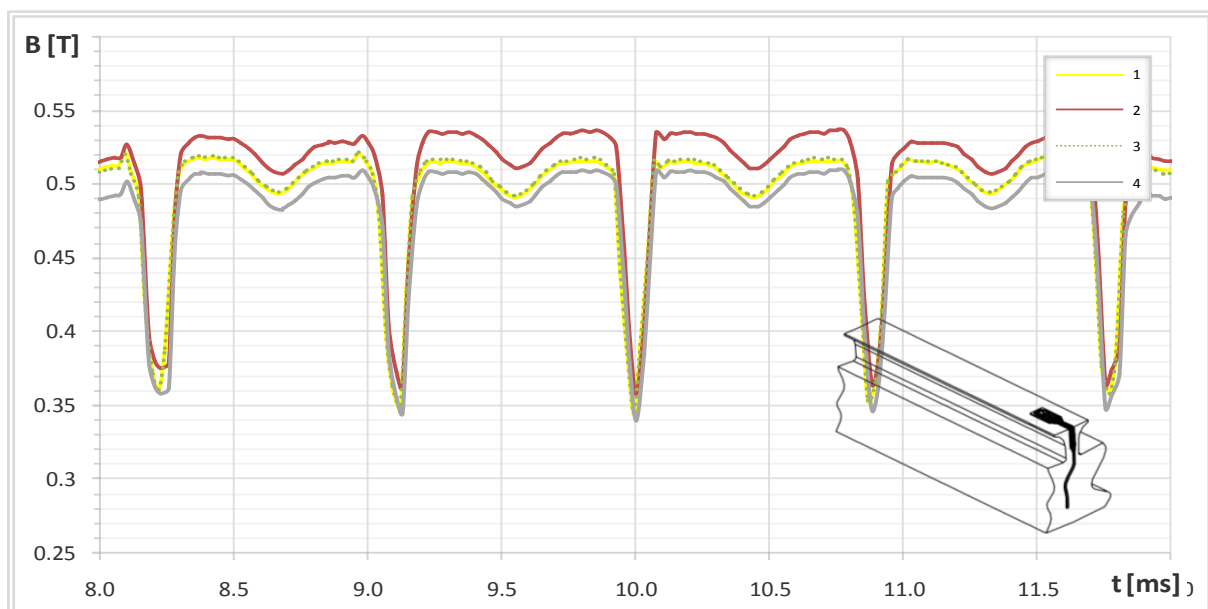
Tablica 6.11 prikazuje srednje vrijednosti magnetske indukcije sa slike 6.37, na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom, izuzev dijelova s prigušnim namotom, izračunate pri uzbuđnoj struji od 4 A, uz smanjeni iznos broja zavoja pola broj 4 u iznosu od 10 %. Također su prikazane i relativne vrijednosti istih u odnosu na vrijednost magnetske indukcije pod polom broj 4.

Tablica 6.11. Srednje vrijednosti magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom izuzev dijelova s prigušnim namotom, pri 10 % smanjenom iznosu broja zavoja pola broj 4, te uzbuđnoj struji od 4 A.

Pol	B_{SR} [T]	B_{SR}/B_{SR2}	ΔB_{SR} [%]
1	0,508	0,951	-2,49
2	0,535	1,000	+2,53
3	0,508	0,951	-2,49
4	0,482	0,902	-7,54

Iz izračunatih podataka proizlazi da se pri sniženoj struji uzbude, smanjenjem iznosa broja zavoja omotanih oko pola za 10 %, iznos magnetske indukcije pod polom smanji se za 7,54 %. Također iz podataka proizlazi da porast magnetske indukcije na polu broj 2 iznosi 2,53 %, dok se iznos magnetske indukcije pod polovima broj 1 i 3 smanje za 2,49 %. Relativni omjer magnetske indukcije pod polom broj 2 i polom broj 4 iznosi 10,07 %. Iznosi promjena magnetske indukcije pod polovima uslijed smanjenja broja zavoja pola broj 4, u skladu su s očekivanim iznosima danim u uvodnom dijelu ovog poglavlja, te relacijama (6.7) i (6.8).

Vrijede li dane relacije, uz 5 % smanjeni broj zavoja pola broj 4, može se provjeriti izračuna li se raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporedu za nezasićeni magnetski krug stroja. Rezultati izračuna prikazani su na slici 6.38.



Slika 6.38. Raspodjela magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom, promatrana sa zuba statorskog paketa za prazni hod, pri uzbuđnoj struji od 4 A: Krivulja 1 – za pol br. 1, Krivulja 2 – za pol br. 2, Krivulja 3 – za pol br. 3, Krivulja 4 – za pol br. 4.

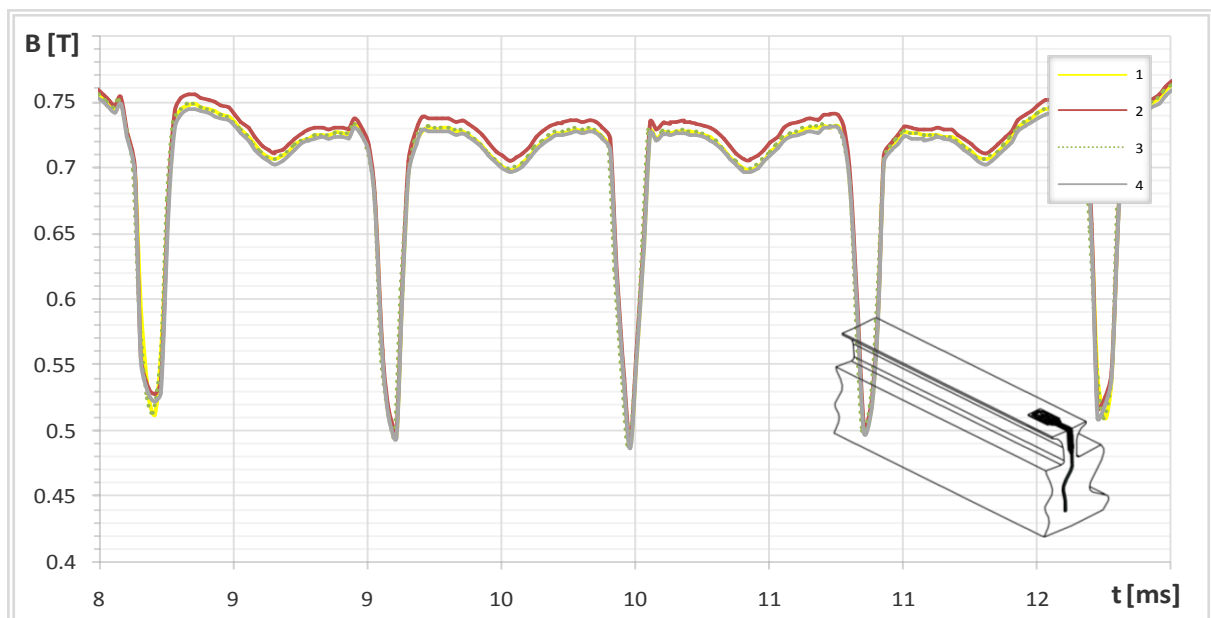
Tablica 6.12 prikazuje srednje vrijednosti magnetske indukcije sa slike 6.38, na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim raspорom, izuzev dijelova s prigušnim namotom, izračunate pri uzbuđnoj struji od 4 A, uz smanjeni iznos broja zavoja pola broj 4 u iznosu od 5 %. Također su prikazane i relativne vrijednosti istih u odnosu na vrijednost magnetske indukcije pod polom broj 4.

Tablica 6.12. Srednje vrijednosti magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim raspорom izuzev dijelova s prigušnim namotom, pri 5 % smanjenom iznosu broja zavoja na polu broj 4, te uzbuđnoj struji od 4 A.

Pol	B_{SR} [T]	B_{SR}/B_{SR2}	ΔB_{SR} [%]
1	0,515	0,975	- 1,27
2	0,528	1,000	+ 1,23
3	0,515	0,975	- 1,27
4	0,502	0,951	- 3,76

Iz izračunatih podataka proizlazi da se smanjenjem iznosa broja zavoja omotanih oko pola za 5 %, iznos magnetske indukcije tog pola smanji za 1,27 %, pri struji uzbude od 4 A. Ovim je potvrđena teza da će se u nezasićenom stroju promjenom iznosa broja zavoja omotanih oko pola za određeni iznos, magnetska indukcija pod svim polovima promijeniti u skladu s relacijama (6.7) odnosno (6.8). Odnos smanjenja iznosa magnetske indukcije uslijed promjene broja zavoja jednog od polova u skladu je s navedenim relacijama sve do pojave zasićenja u magnetskom krugu stroja.

Izračunata je i raspodjela magnetske indukcije na polnom koraku za sve polove, pri smanjenju broja zavoja pola broj 4 za iznos od 5 %, u praznom hodu pri struji uzbude od 8,7 A, a rezultati proračuna prikazani su na slici 6.39.



Slika 6.39. Raspodjela magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim raspорom, promatrana sa zuba statorskog paketa za prazni hod, pri uzbuđnoj struji od 8,7 A: Krivulja 1 – za pol br. 1, Krivulja 2 – za pol br. 2, Krivulja 3 – za pol br. 3, Krivulja 4 – za pol br. 4.

Tablica 6.13 prikazuje srednje vrijednosti magnetske indukcije sa slike 6.39, na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom, izuzev dijelova s prigušnim namotom, izračunate pri uzbudnoj struji od 8,7 A, uz smanjeni iznos broja zavoja pola broj 4 u iznosu od 5 %. Također su prikazane i relativne vrijednosti istih u odnosu na vrijednost magnetske indukcije pod polom broj 4.

Tablica 6.13. Srednje vrijednosti magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom izuzev dijelova s prigušnim namotom, pri 5 % smanjenom iznosu broja zavoja na polu broj 4, te uzbudnoj struji od 8,7 A.

Pol	B_{SR} [T]	B_{SR}/B_{SR2}	ΔB_{SR} [%]
1	0,722	0,991	- 0,52
2	0,729	1,000	+ 0,41
3	0,722	0,991	- 0,52
4	0,718	0,985	- 1,10

Iz izračunatih podataka proizlazi da se smanjenjem iznosa broja zavoja omotanih oko pola za 5 %, iznos magnetske indukcije tog pola smanji za 1,1 %, pri struji uzbude od 8,7 A. Porast magnetske indukcije na polu broj 2 iznosi 0,41 %, dok se za iznos od 0,52 % smanje magnetske indukcije pod polovima broj 1 i 3. Relativni omjer magnetske indukcije pod polom broj 2 i polom broj 4 iznosi 1,51 %. U ovom slučaju također zasićenje magnetskog kruga stroja utječe na iznos promjene magnetske indukcije pod polom uzrokovane smanjenjem broja zavoja pola.

Usporedbom podataka prikazanih u tablici 6.10, 6.11, 6.12 i 6.13 može se zaključiti da odnos promjene broja zavoja omotanih oko pola i promjene iznosa magnetske indukcije pod polom uzrokovane promjenom broja zavoja ovisi o uzbudnoj struji. Naime njihovu ovisnost određuje nagib krivulje praznog hoda u točki promatranja, a ta ovisnost biti će u skladu s relacijama (6.7) i (6.8), sve dok je magnetski krug stroja nezasićen. Slika 6.40 prikazuje ovisnost promjene broja zavoja omotanih oko pola i promjene iznosa magnetske indukcije pod svakim od polova uzrokovanih promjenom broja zavoja, za različite iznose promjene broja zavoja pri različitim iznosima uzbudne struje.

Na slici 3.40 može se uočiti da najveći nagib ima pravac broj 2, koji daje omjer promjene broja zavoja omotanih oko pola broj 4 u iznosu od 10 % i promjene iznosa magnetske indukcije pod istim polom, pri struji uzbude od 4 A. Shodno tome, najmanji nagib ima pravac koji daje omjer promjene broja zavoja omotanih oko pola broj 4, u iznosu od 5 % i promjene iznosa magnetske indukcije pod polom broj 1, 2 i 3, pri struji uzbude od 8,7 A, što je i pravcem 3 i 1.

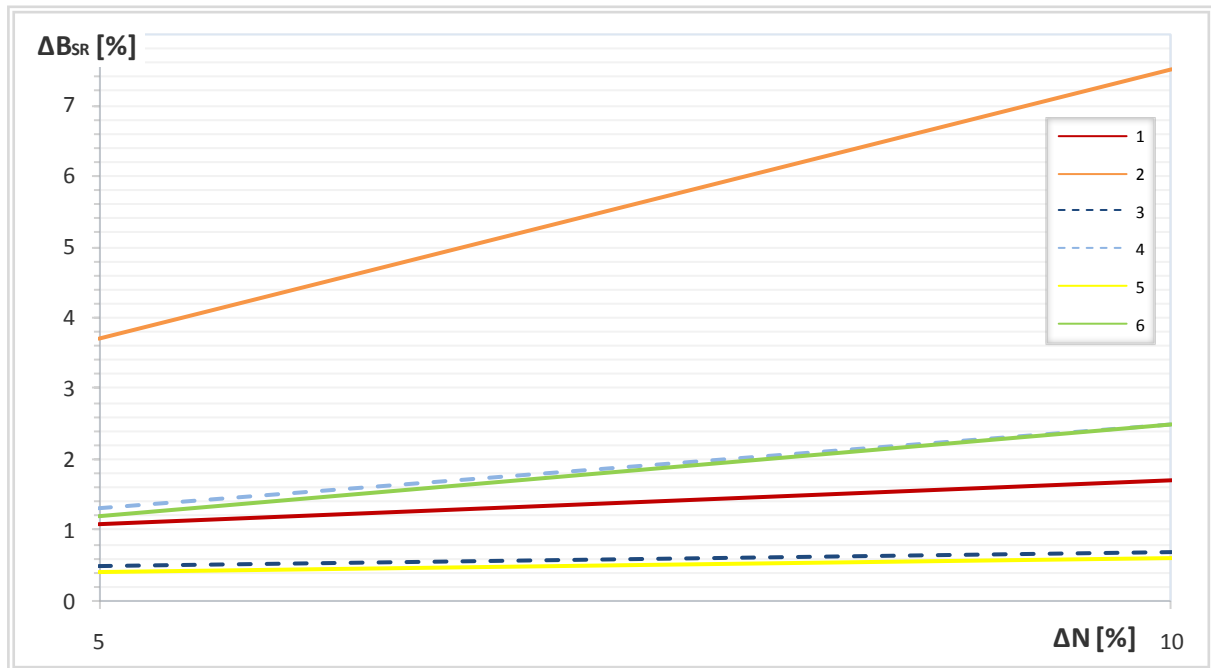
Iz podataka prikazanih na slici 3.40, za stroj s $2p$ polova, za promjenu magnetske indukcije pod polom uzrokovane promjenom broja zavoja ΔN pola n , može se pisati:

$$\Delta B_{SRn} = -\frac{2p-1}{2p} \cdot \Delta N \cdot k_{ph} \quad (6.9)$$

$$\Delta B_{SR(n\pm i)} = -\frac{1}{2p} \cdot \Delta N \cdot k_{ph} \quad (6.10)$$

$$\Delta B_{SR(n\pm j)} = + \frac{1}{2p} \cdot \Delta N \cdot k_{ph} \quad (6.11)$$

gdje je: $i = 1, 3, 5 \dots p$, $j = 2, 4 \dots p - 1$, k_{ph} faktor koji je određen nagibom krivulje praznog hoda u točki promatranja magnetske indukcije. Za nezasićeni magnetski krug stroja $k_{ph} = 1$, a kako magnetski krug stroja postaje zasićen faktor k_{ph} poprima vrijednosti manje od 1.



Slika 6.40. Ovisnost promjene broja zavoja ototanih oko pola i promjene iznosa magnetske indukcije pod svakim od polova uzrokovanih promjenom broja zavoja:
 1 – za pol broj 4 uz promjenu broja zavoja pola broj 4 od 5 %, pri struji uzbude 8,7 A,
 2 – za pol broj 4 uz promjenu broja zavoja pola broj 4 od 5 %, pri struji uzbude 4 A,
 3 – za pol broj 1 i 3 uz promjenu broja zavoja pola broj 4 od 10 %, pri struji uzbude 8,7 A,
 4 – za pol broj 1 i 3 uz promjenu broja zavoja pola broj 4 od 5 %, pri struji uzbude 4 A,
 5 – za pol broj 2 uz promjenu broja zavoja pola broj 4 od 10 %, pri struji uzbude 8,7 A,
 6 – za pol broj 2 uz promjenu broja zavoja pola broj 4 od 5 %, pri struji uzbude 4 A.

Iz prikazanih podataka može se zaključiti da promjena broja zavoja na nekom od polova ne uzrokuje promjenu valnog oblika magnetske indukcije, već samo promjene u amplitudi. Iznos promjene amplitude magnetske indukcije ovisi o iznosu promjene broja zavoja ototanih oko pola, te o iznosu struje uzbude. U praksi smanjenje broja zavoja na polu, uslijed međuzavojnih kratkih spojeva, najčešće iznosi samo nekoliko postotaka. Stoga promjena iznosa magnetske indukcije uslijed promjene iznosa broja zavoja pola, najuočljivija je kod nezasićenog stroja, odnosno pri sniženoj uzbudnoj struji. Kako magnetski krug stroja postaje zasićen promjena iznosa magnetske indukcije, uslijed promjene iznosa broja zavoja na polu, postaje sve manje izražena. Ukoliko se uvažava i moguće razlike među polovima koje nastaju u proizvodnji istih kao što su npr. dopuštena odstupanja dimenzija, upotrijebljeni materijal u izradi, detekcija promjene amplitude valnog oblika u vremenskom području kao faktora za utvrđivanje prisutnosti smanjenog broja zavoja (međuzavojnih kratkih spojeva) na nekom od polova, u stroju sa zasićenim magnetskim krugom nije pouzdana. Kontinuirana frekvencijska analiza valnog oblika i donošenje odgovarajućih zaključaka na osnovu

promjena u frekvencijskom sastavu istog, metoda je koja daje pouzdanije rezultate. Na osnovu promjena u harmoničkom sastavu analiziranog valnog oblika moći će se jednoznačno utvrditi da li je u nekom od svitaka uzbudnog namota smanjen iznos broja zavoja, odnosno da li su u nekom od svitaka uzbudnog namota prisutni međuzavojni kratki spojevi.

Na slici 6.41 prikazana je frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije na polnom koraku pola broj 4, u zračnom rasporu promatrane sa zuba statorskog paketa (prikazane na slici 6.3), uz smanjeni broj zavoja jednog pola za 10 %, pri struji uzbude od 8,7 A.



Slika 6.41. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije na polnom koraku pola broj 4, u zračnom rasporu promatrane sa zuba statorskog paketa, uz sniženi broj zavoja pola broj 4 od 10 %, pri uzbudnoj struji 8,7 A.

Popisani su svi izraženi harmonički članovi sa slike 6.41, te su uspoređeni s harmoničkim članovima prisutnim u valnom obliku magnetske indukcije na polnom koraku pola broj 2. Rezultati usporedbe amplituda izraženih harmoničkih članova prikazani su u tablici 6.14.

Tablica 6.14. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, pri uzbudnoj struji od 8,7 A.

Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]	Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]	Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]
0	-2,6814	6	-2,7410	21	-6,6893
1	-1,9377	7	-2,4999	22	-3,5837
2	-4,2530	9	-1,3053	23	-0,5769
3	-17,607	10	-9,8362	34	-2,4294
4	-2,3880	12	0,5980	45	-2,3234
5	3,9498	14	-4,1816		

Na jednak način načinjena je frekvencijska analiza valnog oblika magnetske indukcije na polnom koraku u zračnom rasporu, uz sniženi iznos broja zavoja pola od 10 %, pri sniženom iznosu struje uzbude, čiji rezultati su prikazani na slici 6.42.



Slika 6.42. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije na polnom koraku pola broj 4, u zračnom rasporu promatrane sa zuba statorskog paketa, uz sniženi broj zavoja pola broj 4 od 10 %, pri uzbudnoj struji 4 A.

Uspoređeni su izraženi harmonički članovi dobiveni frekvencijskom analizom valnog oblika magnetske indukcije na polnom koraku pola broj 4 i pola broj 2, pri sniženoj struji uzbude. Rezultati usporedbe prikazani su u tablici 6.15.

Tablica 6.15. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, pri uzbudnoj struji od 4 A.

Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]	Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]	Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]
0	-10,339	7	-11,349	22	-10,475
1	-9,9071	9	-9,0192	23	-9,362
2	-11,167	10	-13,206	34	-10,298
4	-7,7321	12	-10,001	45	-10,038
5	-10,313	14	-11,979		
6	-10,132	21	-11,806		

Podaci prikazani u tablici 6.14 i 6.15, ukazuju da se promjena iznosa broja zavoja pola ne odražava jednako na sve izražene harmoničke članove. Stoga je potrebno izdvojiti samo one harmoničke članove, kod kojih je promjena amplitude uzrokovana promjenom iznosa broja zavoja pola, u skladu s ranije donesenim zaključcima, te samo njih koristiti kao indikatore prisutnosti smanjenja broja zavoja uzbudnog svitka.

Harmonički članovi kod kojih je promjena amplitude uslijed smanjenog iznosa broja zavoja pola iznad očekivanih vrijednosti, neće se koristiti kao indikatori prisutnosti smanjenja broja zavoja uzbuđenog svitka iz razloga što njihova promjena značajno varira pri različitim iznosima struje uzbuđenja. Odnosno, nije pouzdano na osnovu njihove promjene donositi zaključke o prisutnosti smanjenog iznosa broja zavoja uzbuđenog svitka.

Rezultati frekvencijske analize valnog oblika magnetske indukcije prikazani u tablici 6.14 i 6.15, vršeni su za vremenski period koji odgovara polnom koraku τ_p . Međutim prema slici 6.29 moguće je uočiti da će se uslijed smanjenja broja zavoja na jednom od polova, značajno promijeniti prvi harmonički član ukoliko se frekvencijska analiza vrši na vremenskom periodu $2p\tau_p$. Također će se promijeniti i amplituda trećeg harmoničkog člana. Rezultati usporedbe amplituda izraženih harmoničkih članova pri različitim strujama uzbuđenja prikazani su u tablici 6.16 i 6.17.

Tablica 6.16. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, pri uzbuđnoj struji od 8,7 A.

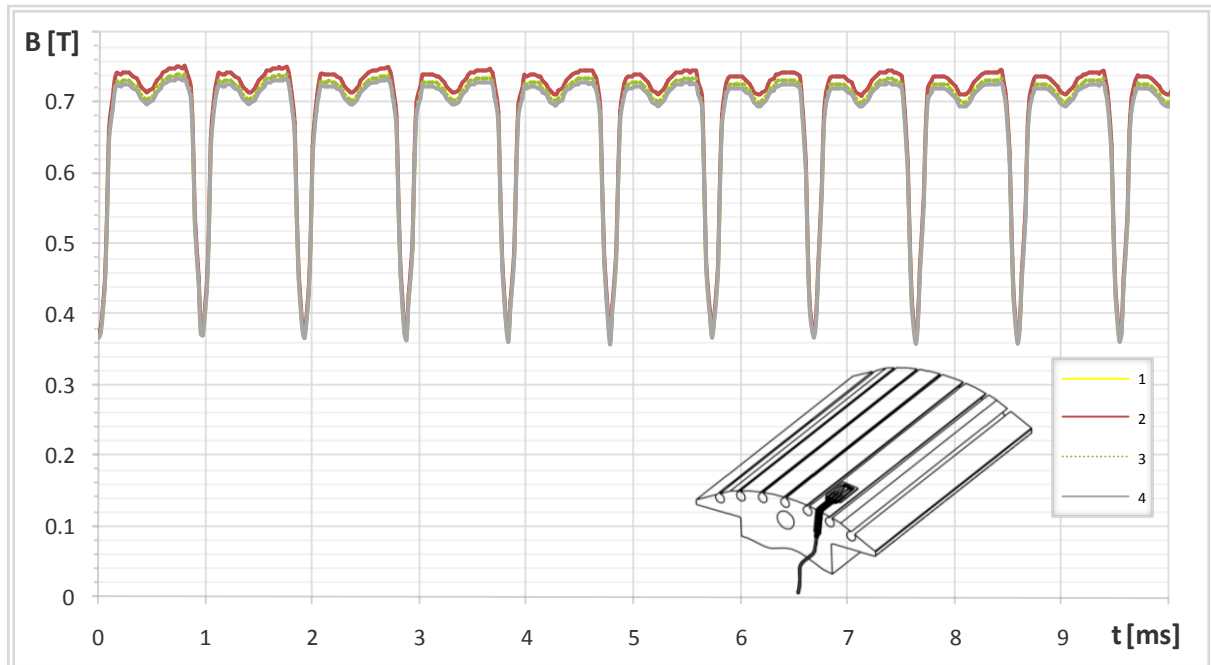
Harmonik broj	Amplituda B [T]	
	bez smanjenja broja zavoja	smanjen broj zavoja 10 %
1	0,00018	0,0058
2	0,751	0,757
3	0,00029	0,00326

Tablica 6.17. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, pri uzbuđnoj struji od 4 A.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	
	bez smanjenja broja zavoja	smanjen broj zavoja 10 %
1	0,000034	0,0142
2	0,515	0,502
3	0,00025	0,0094

Iz rezultata prikazanih u tablici 6.16 i 6.17 uočljivo je da se drugi harmonički član uslijed promjene iznosa broja zavoja pola, promjeni za očekivani iznos u skladu s ranije donesenim zaključcima. Značajna promjena prvog i trećeg harmoničkog člana direktna je posljedica promjene protjecanja prikazanog na slici 6.29. Ova promjena amplituda harmoničkih članova dobivenih FFT analizom valnog oblika magnetske indukcije, može se pored ostalih navedenih indikatora, upotrijebiti u detekciji smanjenja broja zavoja svitka uzbuđenog namota.

Analizom raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane sa zuba statorskog paketa, moguće je utvrditi prisutnost smanjenja broja zavoja svitka uzbudnog namota rotora. Međutim, ukoliko se ista promatra s polne papuče, prisutnost smanjenog iznosa broja zavoja na nekom od polova, nije u potpunosti moguće. Za pojašnjenje te teze potrebno je razmotriti valni oblik raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče, pri smanjenom broju zavoja jednog pola od 10 %, u praznom hodu pri struji uzbude od 8,7 A.

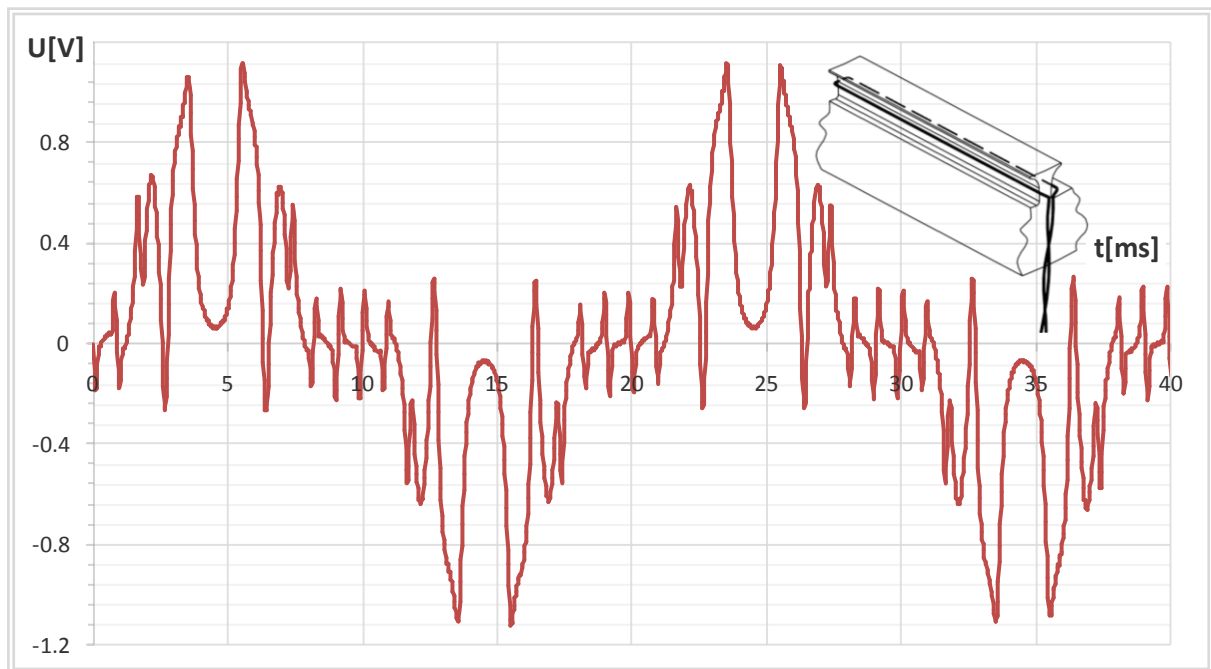


Slika 6.43. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče svakog pola, pri smanjenom broju zavoja jednog pola od 10 %, uz struju uzbude od 8,7 A.

Iz podataka prikazanih na slici 6.43 može se zaključiti da promjena broja zavoja jednog od polova rotora, uzrokuje promjenu iznosa magnetske indukcije pod svim polovima. Međusobna odstupanja magnetske indukcije u skladu su s odstupanjima prisutnim pri promatranju raspodjele magnetske indukcije sa zuba statorskog paketa, uz jednako smanjenje broja zavoja pola i pri istoj struji uzbude. Međutim ukoliko se raspodjela magnetske indukcije promatra samo s jedne polne papuče nije moguće utvrditi da li je razlog promjene iznosa magnetske indukcije uzrokovan smanjenjem broja zavoja pola ili promjenom struje uzbude. Stoga je potrebno pratiti raspodjelu magnetske indukcije sa svih polova, a međusobnim uspoređivanjem podataka je moguće detektirati smanjenje broja zavoja jednog od polova. Pošto strojevi u praksi često imaju broj polova veći od 2, bilo bi potrebno pratiti raspodjelu magnetske indukcije na polnoj papuči svakog pola. U tom slučaju potreban je i veći broj senzora, odnosno $2p$ senzora. Stoga se za detekciju smanjenog broja zavoja u uzbudnom namotu neće primjenjivati senzor koji mjeri raspodjelu magnetske indukcije u zračnom rasporu promatranu s polne papuče. Iz tog razloga neće se ni analizirati izračunate raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane s polne papuče za detekciju smanjenog iznosa broja zavoja pola rotora.

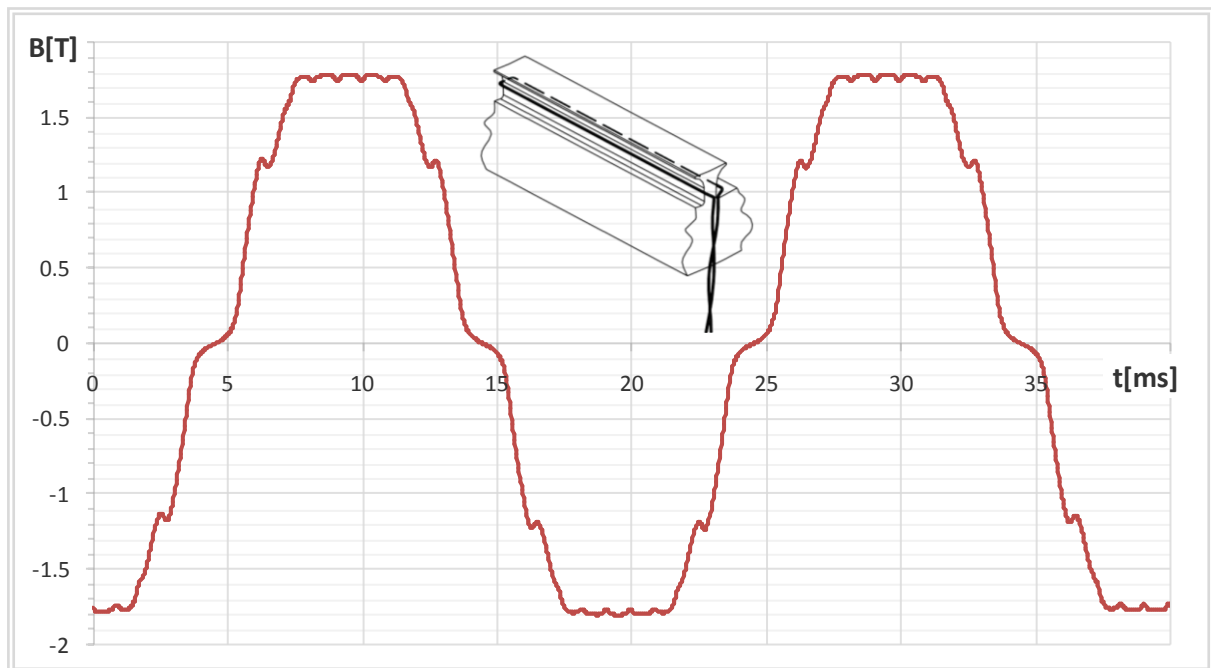
6.2.2. Utjecaj smanjenja iznosa broja zavoja svitka uzbuđnog namota na magnetski tok u zubu statorskog paketa

Na sličan kao i u poglavlju 6.2.1 potrebno je napraviti analizu podataka dobivenih izračunom napona induciranih u mjernim svitcima koji su ugrađeni u modelu za izračun MKE na istim pozicijama kao što su ugrađeni na generatoru SGBP 160 M-4M (poglavlje 5.1.4). Započeti će se s analizom napona koji se inducira u mjernom svitku ugrađenom oko zuba statorskog paketa Ms_1 i Ms_2 , uz smanjeni iznos broja zavoja na jednom polu od 10%, u praznom hodu pri struji uzbuđne od 8,7 A. Rezultati izračuna prikazani su na slici 6.44. Mjerni svitci Ms_1 i Ms_2 ugrađeni su kako je prikazano na slici 5.10-3.

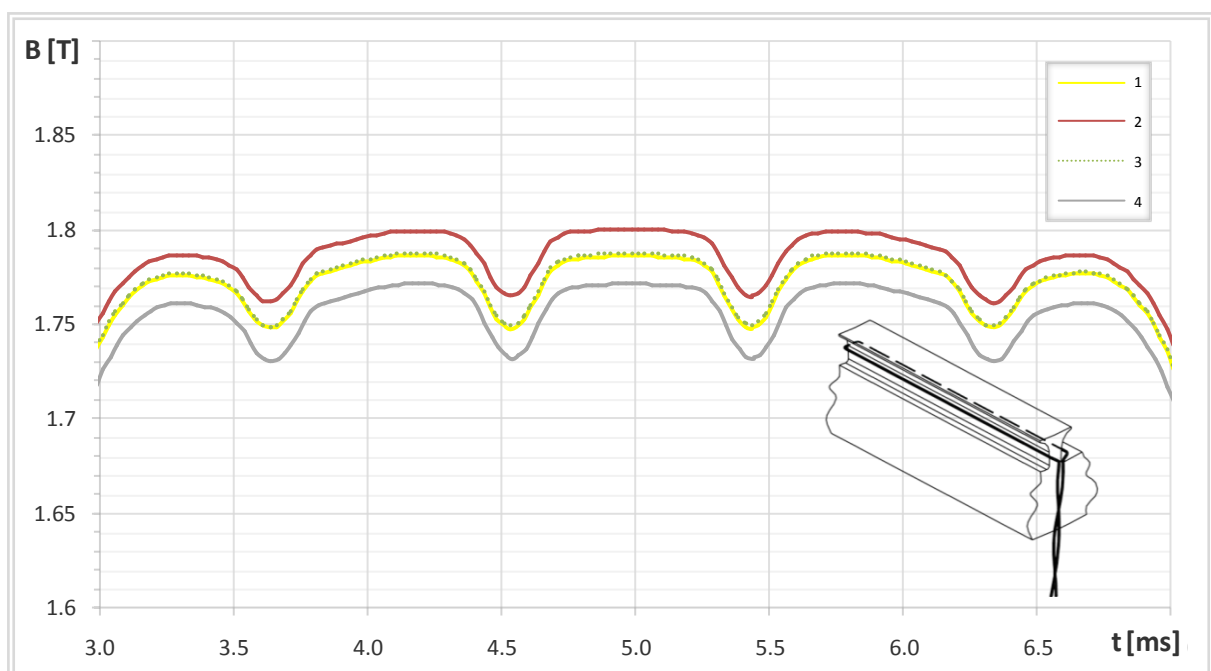


Slika 6.44. Napon induciran u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , za prazni hod pri uzbuđnoj struji od 8,7 A, uz smanjeni iznos broja zavoja jednog pola za 10 %.

Detaljnijom analizom podataka prikazanih na slici 6.44 nisu utvrđena jednoznačna odstupanja u valnom obliku koja bi ukazala na prisutnost smanjenja broja zavoja na nekom od polova, stoga je analiziran valni oblik dobiven integracijom napona induciranih u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , prikazan na slici 6.45 i slici 6.46.



Slika 6.45. Raspodjela magnetske indukcije dobivena integracijom napona inducirano u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , za prazni hod pri uzbudnoj struji od 8,7 A, uz smanjeni iznos broja zavoja jednog pola za 10 %.



Slika 6.46. Raspodjela magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom, dobivena integracijom napona inducirano u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , za prazni hod pri uzbudnoj struji od 8,7 A: Krivulja 1 – za pol br. 1, Krivulja 2 – za pol br. 2, Krivulja 3 – za pol br. 3, Krivulja 4 – za pol br. 4.

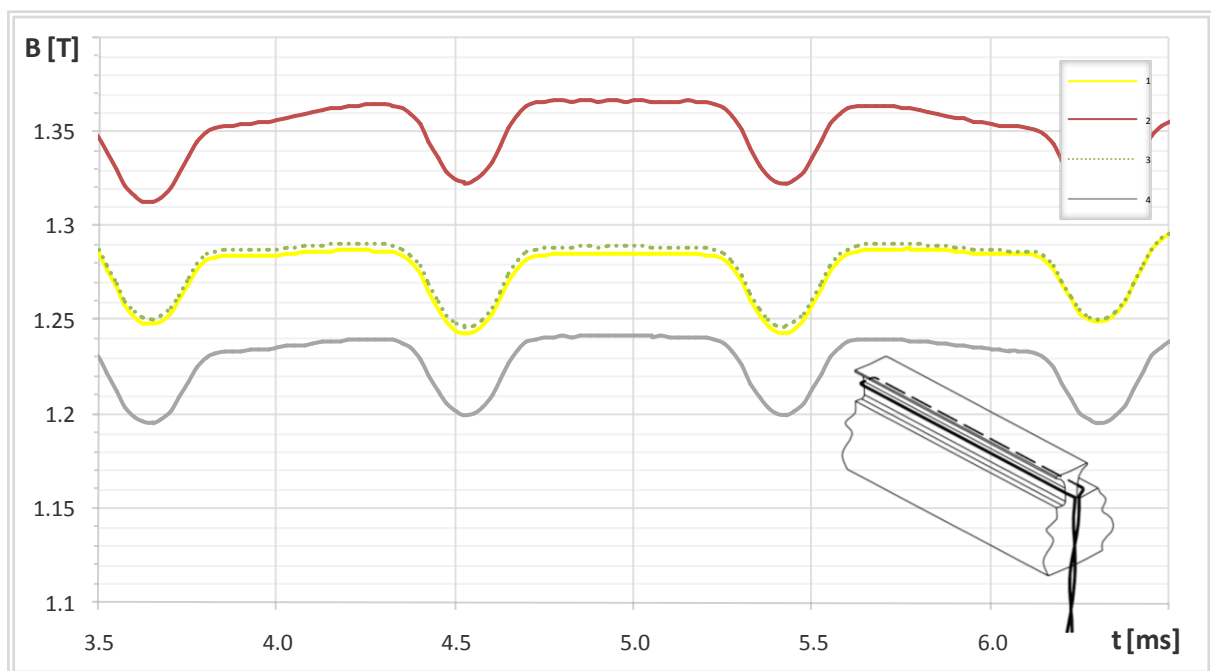
Kako smanjenje iznosa broja zavoja na polu utječe na iznos magnetske indukcije na polnom koraku dobivene mjernim svitcima Ms_1 i Ms_2 , može se izračunati ukoliko se usporede iznosi magnetske indukcije pod svim polovima. U tablici 6.18 prikazane su srednje vrijednosti magnetske indukcije sa slike 6.46, na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom, izuzev dijelova s prigušnim namotom. Također su

prikazane i relativne vrijednosti istih u odnosu na srednju vrijednost magnetske indukcije pod polom broj 4.

Tablica 6.18. Srednje vrijednosti magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom izuzev dijelova s prigušnim namotom, pri 10 % smanjenom iznosu broja zavoja na polu broj 4, te uzbuđnoj struji od 8,7 A.

Pol	B_{SR} [T]	B_{SR}/B_{SR2}	ΔB_{SR} [%]
1	1,782	0,993	-0,39
2	1,795	1,000	0,34
3	1,782	0,993	-0,39
4	1,766	0,984	-1,29

Iz izračunatih podataka proizlazi da se smanjenjem iznosa broja zavoja omotanih oko pola za 10 %, iznos magnetske indukcije promatrane u zubu statora pod polom sa smanjenim brojem zavoja, smanji za 1,29 %. Porast iznosa magnetske indukcije u zubu statora pod polom broj 2, iznosi 0,34 %, dok se magnetska indukcija u zubu statora pod polovima broj 1 i 3 smanji za 0,39 %. I u ovom slučaju zasićenje magnetskog kruga stroja utječe na iznos promjene magnetske indukcije uzrokovane promjenom iznosa broja zavoja svitka uzbuđnog namota. Kako promjena iznosa broja zavoja na polu utječe na promjenu iznosa magnetske indukcije u zubu statora pri sniženom iznosu struje uzbuđne prikazuje slika 6.47. Prikazana raspodjela magnetske indukcije računata je za smanjeni broj zavoja na jednom od svitaka uzbuđnog namota u iznosu od 10 %, pri struji uzbuđne 4 A.



Slika 6.47. Raspodjela magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom, dobivena integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , za prazni hod pri uzbuđnoj struji od 4 A: Krivulja 1 – za pol br. 1, Krivulja 2 – za pol br. 2, Krivulja 3 – za pol br. 3, Krivulja 4 – za pol br. 4.

U tablici 6.19 prikazane su srednje vrijednosti magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom, izuzev dijelova s prigušnim namotom, izračunate pri smanjenom iznosu broja zavoja od 10 %, pri struji uzbude od 4 A. Također su prikazane i relativne vrijednosti istih u odnosu na srednju vrijednost magnetske indukcije pod polom broj 4.

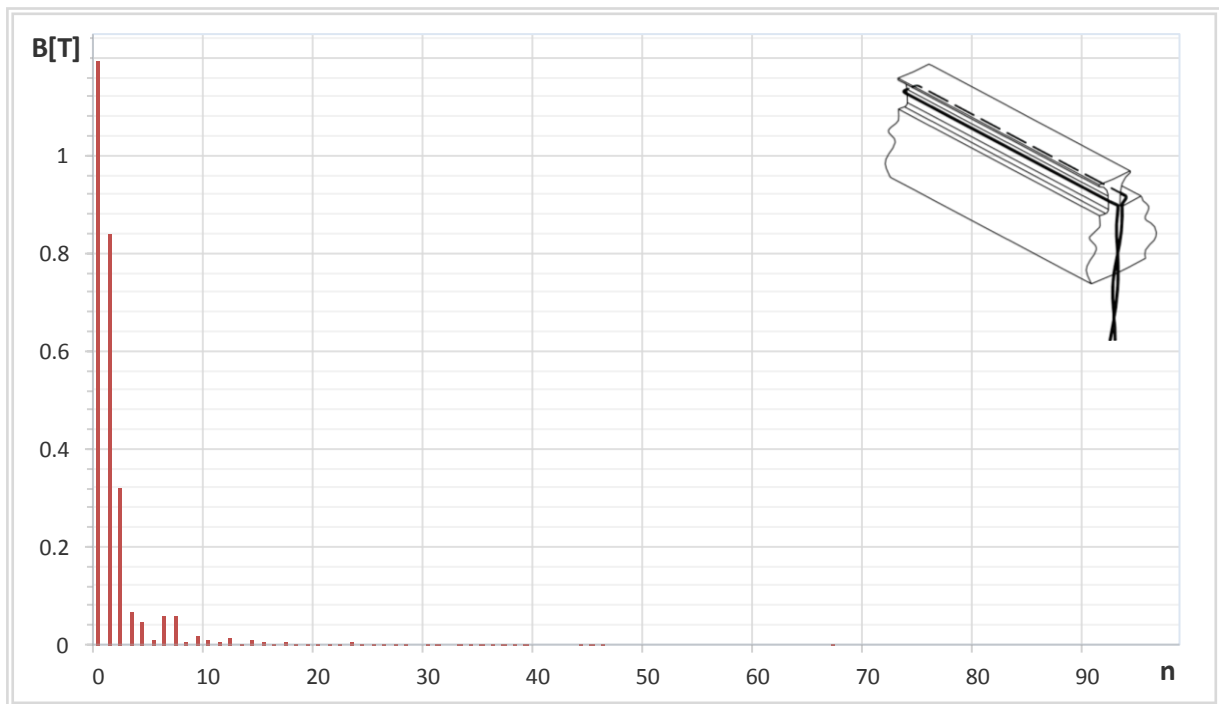
Tablica 6.19. Srednje vrijednosti magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom izuzev dijelova s prigušnim namotom, pri 10 % smanjenom iznosu broja zavoja na polu broj 4, te uzbudnoj struji od 4 A.

Pol	B_{SR} [T]	B_{SR}/B_{SR2}	ΔB_{SR} [%]
1	1,273	0,951	-2,57
2	1,338	1,000	2,45
3	1,273	0,951	-2,57
4	1,207	0,902	-7,58

Iz izračunatih podataka proizlazi da se pri sniženoj struji uzbude smanjenjem iznosa broja zavoja omotanih oko pola za 10 %, iznos magnetske indukcije u zubu statora pod polom sa smanjenim brojem zavoja, smanji za 7,58 %. Porast iznosa magnetske indukcije u zubu statora pod polom broj 2, iznosi 2,45 %, dok se magnetska indukcija u zubu statora pod polovima broj 1 i 3 smanji za 2,57 %.

Prema tome, može se zaključiti da je valni oblik dobiven integracijom napona koji se inducira u mjernom svitku ugrađenom oko zuba statorskog paketa, osjetljiv u dovoljnoj mjeri za uočavanje promjene na valom obliku uzrokovane smanjenjem broja zavoja na nekom od polova. Također, iz prikazanih podataka moguće je zaključiti da je kod nezasićenog magnetskog kruga stroja promjena amplitude promatrane magnetske indukcije u skladu s očekivanim, a ranije donesenim zaključcima. Nasuprot tome, kod zasićenog magnetskog kruga stroja odstupanja iznosa magnetske indukcije uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola, nešto su niže nego kod magnetske indukcije promatrane u zračnom rasporedu. Razlog tih odstupanja je vrlo visoko zasićenje u zuba statora, pri čemu vršna vrijednost magnetske indukcije u zubu statora iznosi 1,8 T. Već ranije uočeno je da zasićenje magnetskog kruga stroja utječe na iznos promjene magnetske indukcije uslijed smanjenog iznosa broja zavoja pola. Kako magnetski krug stroja postaje zasićen promjena iznosa magnetske indukcije uslijed promjene iznosa broja zavoja na polu postaje sve manje izražena. Promjena magnetske indukcije u zubu statora uslijed smanjenja broja zavoja pola, u skladu je s relacijama (6.9), (6.10) i (6.11).

Pri primjeni mjernog svitka postavljenog oko zuba statora, u detekciji smanjenog broja zavoja svitka uzbudnog namota, kao faktor za detekciju upotrijebiti će se promjena u frekvencijskom sastavu analiziranog valnog oblika dobivenog mjernim svitkom. Stoga je načinjena frekvencijska analiza promatranih valnih oblika. Na slici 6.48 prikazana je frekvencijska analiza valnog oblika dobivenog integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , prikazanog na slici 6.45, uz smanjeni broj zavoja jednog pola za 10 %, pri struji uzbude od 8,7 A.



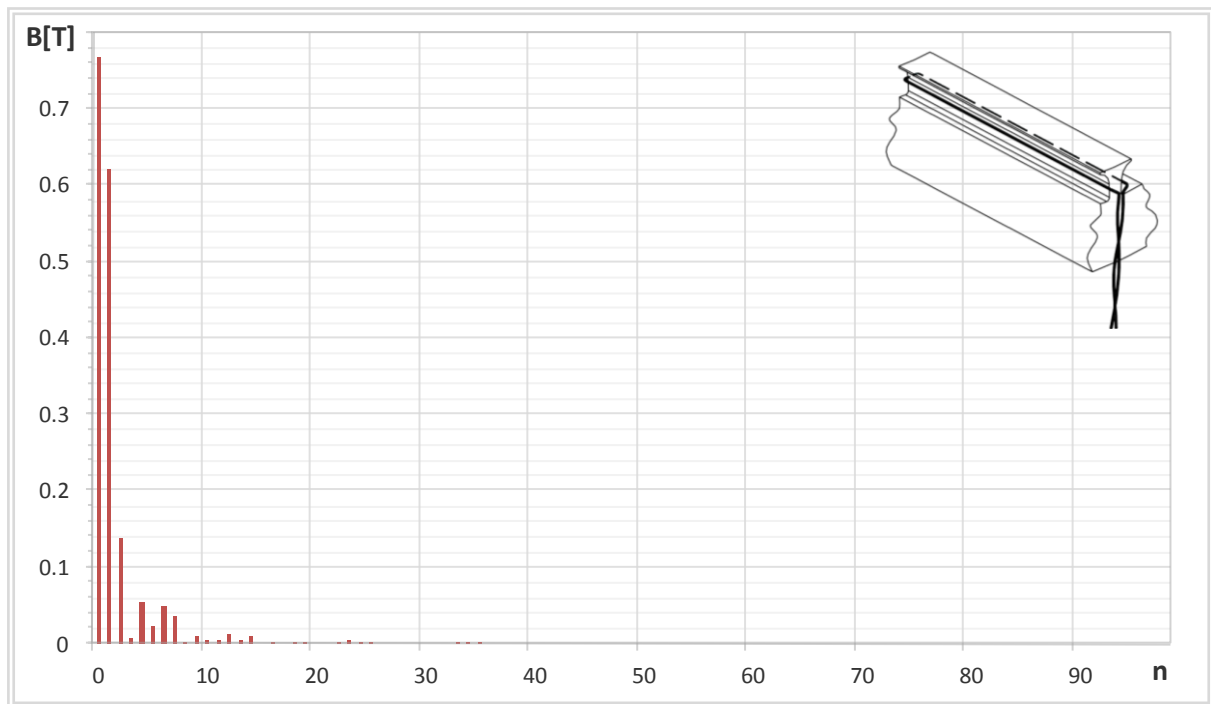
Slika 6.48. Frekvencijska analiza valnog oblika dobivenog integracijom napona inducirano u mjernom svitku M_{s1} i M_{s2} , na polnom koraku pola broj 4, uz sniženi broj zavoja pola broj 4 od 10 %, pri uzbudnoj struji 8,7 A.

Popisani su svi izraženi harmonički članovi sa slike 6.48, te su uspoređeni s harmoničkim članovima prisutnim u valnom obliku na polnom koraku pola broj 2. Rezultati usporedbe amplituda izraženih harmoničkih članova prikazani su u tablici 6.20.

Tablica 6.20. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, pri uzbudnoj struji od 8,7 A.

Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]	Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]	Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]
0	-2,2316	4	4,3187	9	1,3420
1	-1,1143	5	47,877	10	-6,3198
2	-4,5931	6	0,0033	12	9,6737
3	-12,729	7	0,2566	14	4,5921

Na slici 6.49 prikazana je frekvencijska analiza valnog oblika dobivenog integracijom napona inducirano u mjernom svitku M_{s1} i M_{s2} , prikazanog na slici 6.45, uz smanjeni broj zavoja jednog pola za 10 %, pri struji uzbude od 4 A.



Slika 6.49. Frekvencijska analiza valnog oblika dobivenog integracijom napona inducirano u mjernom svitku M_{s1} i M_{s2} , na polnom koraku pola broj 4, uz sniženi broj zavoja pola broj 4 od 10 %, pri uzbudnoj struji 4 A.

Popisani su svi izraženi harmonički članovi sa slike 6.49, te su uspoređeni s harmoničkim članovima prisutnim u valnom obliku na polnom koraku pola broj 2. Rezultati usporedbe amplituda izraženih harmoničkih članova prikazani su u tablici 6.21.

Tablica 6.21. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, pri uzbudnoj struji od 8,7 A.

Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]	Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]	Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]
0	-9,3138	4	-5,2849	9	-9,7437
1	-8,8217	5	-9,0855	11	-6,4570
2	-10,511	6	-7,5043	12	-5,2211
3	58,518	7	-11,303	14	-8,6842

Podaci prikazani u tablici 6.20 i 6.21, prikazuju promjenu određenog harmoničkog člana uslijed promjene iznosa broja zavoja na nekom od polova. Kako se može vidjeti, promjena se ne odražava jednako na sve izražene harmoničke članove. Stoga je i u ovom slučaju potrebno izdvojiti samo one harmoničke članove, kod kojih je promjena amplitude uzrokovana promjenom iznosa broja zavoja pola, u skladu s ranije donesenim zaključcima. Samo ti harmonički članovi koristiti će se kao indikatori prisutnosti smanjenja broja zavoja uzbudnog svitka.

Harmonički članovi kod kojih je promjena amplitude uslijed smanjenog iznosa broja zavoja pola iznad očekivanih vrijednosti, neće se koristiti kao indikatori prisutnosti smanjenja broja zavoja uzbuđenog svitka iz razloga što njihova promjena značajno varira pri različitim iznosima struje uzbuđenja. Odnosno, nije pouzdano na osnovu njihove promjene donositi zaključke o prisutnosti smanjenog iznosa broja zavoja uzbuđenog svitka.

Rezultati frekvencijske analize valnog oblika dobivenog integracijom napona induciranog u mjernom svitku M_{s1} i M_{s2} , prikazani u tablici 6.20 i 6.21, vršeni su za vremenski period koji odgovara polnom koraku τ_p . Međutim i u ovom slučaju uslijed smanjenja broja zavoja na jednom od polova, značajno će se promijeniti prvi i treći harmonički član ukoliko se frekvencijska analiza vrši na vremenskom periodu $2p\tau_p$. Rezultati usporedbe amplituda izraženih harmoničkih članova pri različitim strujama uzbuđenja prikazani su u tablici 6.22 i 6.23.

Tablica 6.22. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, pri uzbuđnoj struji od 8,7 A.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	
	bez smanjenja broja zavoja	smanjen broj zavoja 10 %
1	0,00043	0,0129
2	1,944	1,930
3	0,00054	0,0059

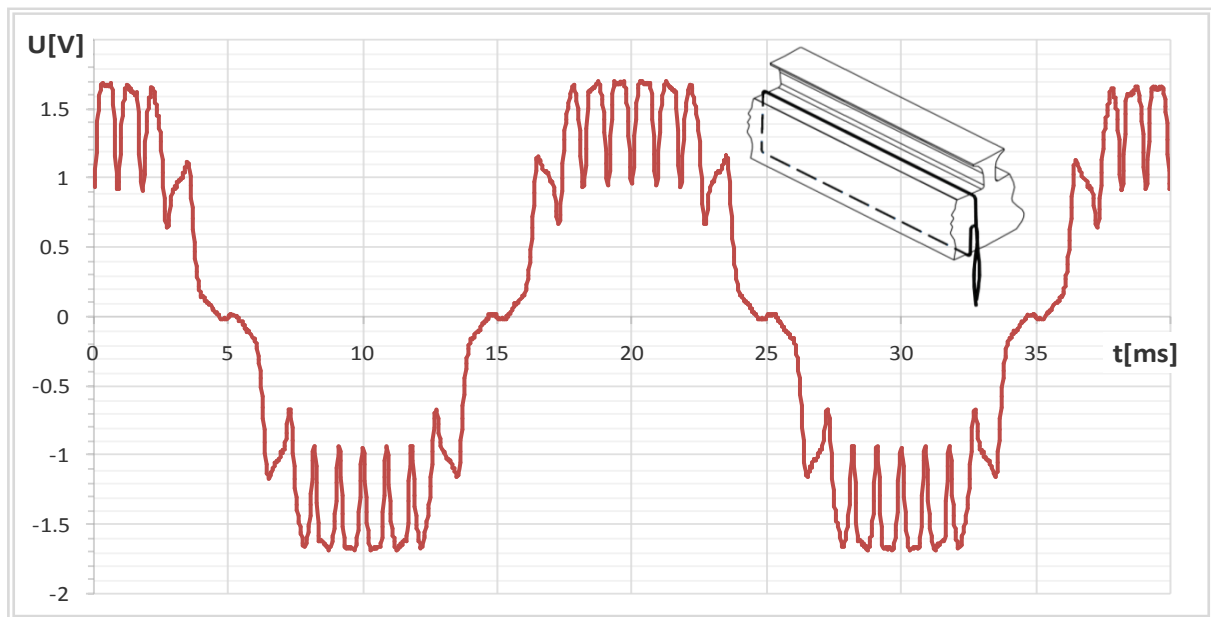
Tablica 6.23. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, pri uzbuđnoj struji od 4 A.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	
	bez smanjenja broja zavoja	smanjen broj zavoja 10 %
1	0,000053	0,0374
2	1,351	1,317
3	0,00067	0,0241

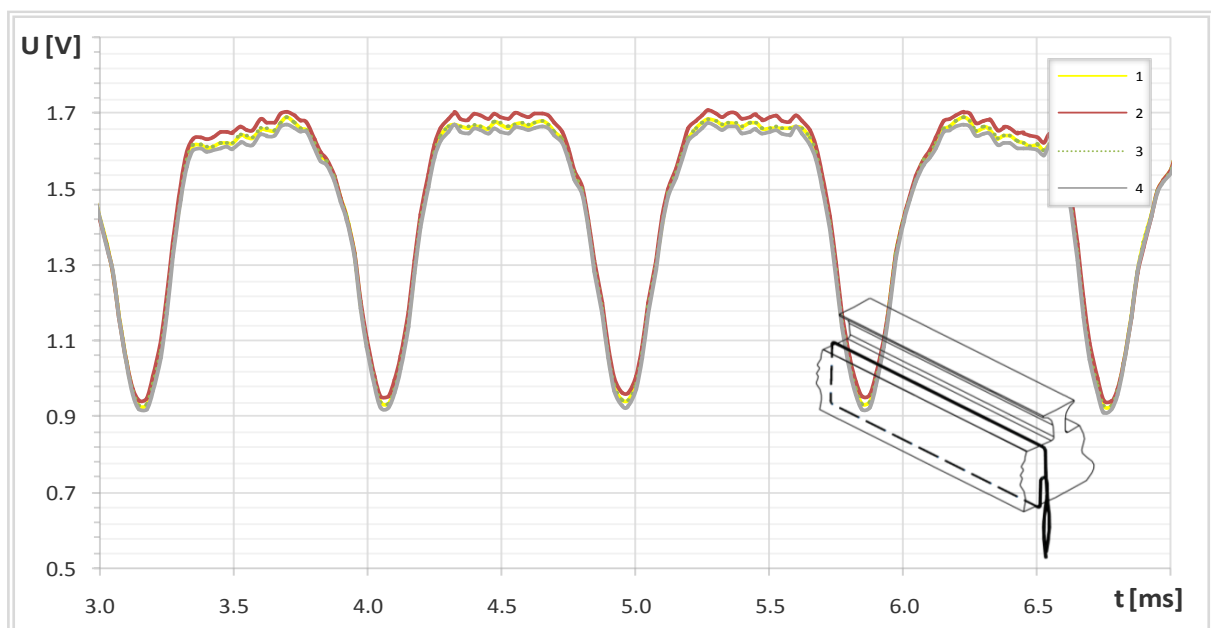
Iz rezultata prikazanih u tablici 6.22 i 6.23 uočljivo je da se harmonički član broj 2 uslijed promjene iznosa broja zavoja pola, promjeni za očekivani iznos u skladu s ranije donesenim zaključcima. Utjecaj izrazito visokog zasićenja u zubu statora, pri smanjenju broja zavoja pola, znatno smanjuje osjetljivost drugog harmoničkog člana. Značajna promjena prvog i trećeg harmoničkog člana direktna je posljedica promjene analiziranog valnog oblika uslijed pojave smanjenja broja zavoja svitka. Ova promjena amplituda harmoničkih članova dobivenih FFT analizom valnog oblika magnetske indukcije, može se pored ostalih navedenih indikatora, upotrijebiti u detekciji smanjenja broja zavoja svitka uzbuđenog namota.

6.2.3. Utjecaj smanjenja iznosa broja zavoja svitka uzbuđnog namota na magnetski tok u jarmu statora

Razmotriti će se i utjecaj smanjenja iznosa broja zavoja jednog od polova na valni oblik napona, koji se inducira u mjernom svitku ugrađenom oko jarma statora kako prikazuje slika 5.10-2. Valni oblik napona koji se inducira u mjernom svitku postavljenom oko jarma statora Ms_3 i Ms_4 , uz smanjeni iznos broja zavoja na jednom polu od 10%, u praznom hodu pri struji uzbude od 8,7 A, prikazan je na slici 6.50 i slici 6.51.



Slika 6.50. Napon induciran u mjernom svitku Ms_3 i Ms_4 , za prazni hod pri uzbuđnoj struji od 8,7 A, uz smanjeni iznos broja zavoja jednog pola za 10 %.



Slika 6.51. Napon induciran u mjernom svitku Ms_3 i Ms_4 , za prazni hod pri uzbuđnoj struji od 8,7 A, uz smanjeni iznos broja zavoja jednog pola za 10 %, prikazan za dio polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom.

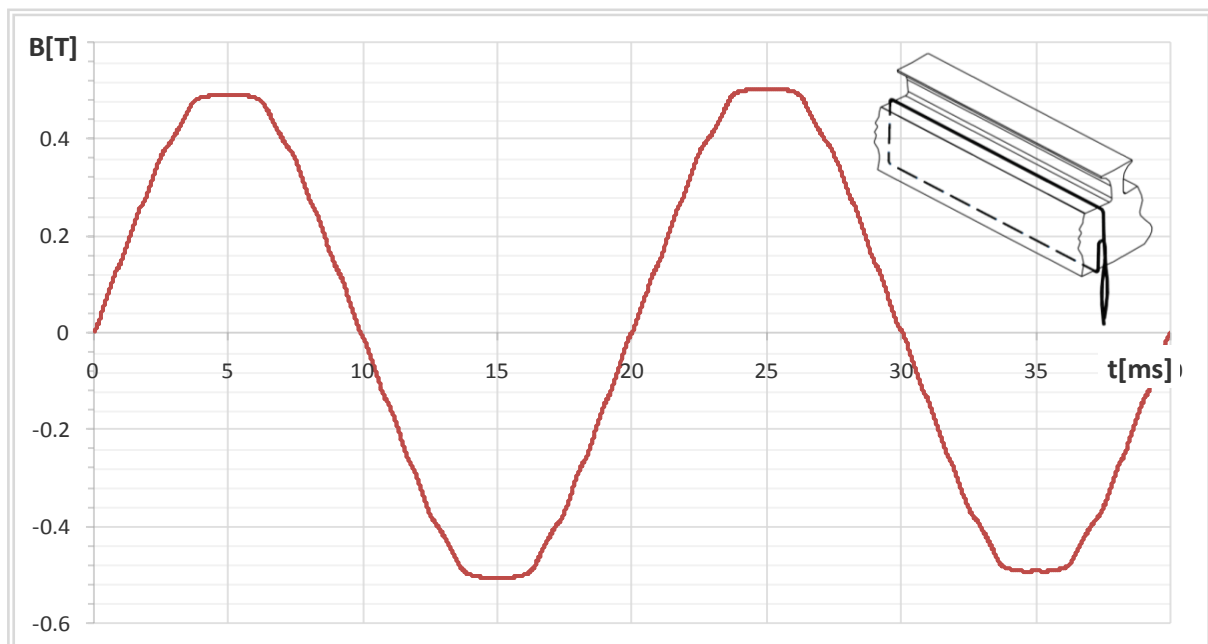
Detaljnijom analizom valnog oblika prikazanog na slici 6.51 utvrđena su odstupanja u valnom obliku koja ukazuju na prisutnost smanjenja broja zavoja na nekom od polova. U tablici 6.24 prikazane su srednje vrijednosti napona koji se inducira u mjernom svitku sa slike 6.51, na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom, izuzev dijelova s prigušnim namotom. Također su prikazane i relativne vrijednosti istih u odnosu na srednju vrijednost napona koji se inducira u svitku pod polom broj 4.

Tablica 6.24. Srednje vrijednosti napona induciranog u mjernom svitku M_{s3} i M_{s4} , na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom izuzev dijelova s prigušnim namotom, pri 10 % smanjenom iznosu broja zavoja na polu broj 4, te uzbudnoj struji od 8,7 A.

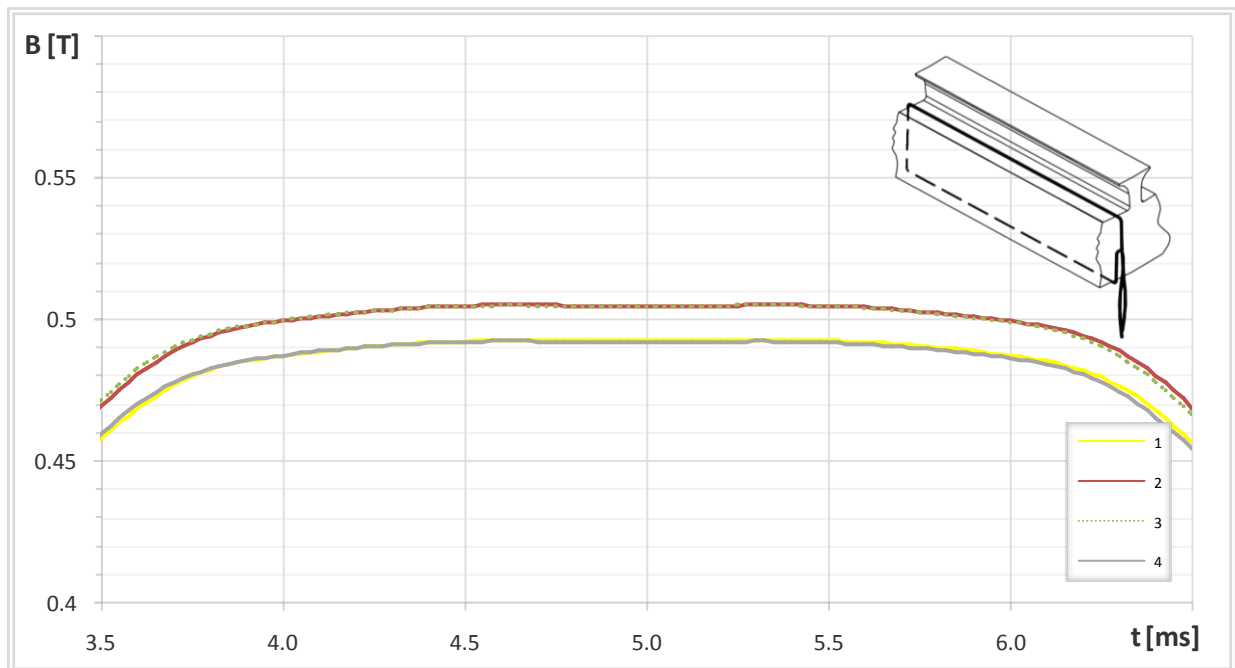
Pol	U_{SR} [V]	U_{SR}/U_{SR2}	ΔB_{SR} [%]
1	1,674	0,989	-0,48
2	1,692	1,000	0,59
3	1,674	0,989	-0,48
4	1,654	0,978	-1,66

Iz izračunatih podataka proizlazi da se smanjenjem iznosa broja zavoja omotanih oko pola za 10 %, iznos napona koji se inducira u mjernom svitku omotanom oko jarma statora, smanji za 1,66 % pod polom sa smanjenim brojem zavoja. Porast iznosa induciranog napona u mjernom svitku pod polom broj 2, iznosi 0,59 %, dok se iznos napona induciranog u mjernom svitku pod polovima broj 1 i 3 smanji za 0,48 %.

Razmotriti će se i utjecaj smanjenja iznosa broja zavoja na valni oblik dobivenog integracijom valnog oblika napona koji se inducira u mjernom svitku M_{s3} i M_{s4} , a prikazan je na slici 6.52 i 6.53.



Slika 6.52. Raspodjela magnetske indukcije dobivena integracijom napona induciranog u mjernom svitku M_{s3} i M_{s4} , za prazni hod pri uzbudnoj struji od 8,7 A, uz smanjeni iznos broja zavoja jednog pola za 10 %.



Slika 6.53. Raspodjela magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom, dobivena integracijom napona inducirano u mjernom svitku Ms_3 i Ms_4 , za prazni hod pri uzбудnoj struji od 8,7 A: Krivulja 1 – za pol br. 1, Krivulja 2 – za pol br. 2, Krivulja 3 – za pol br. 3, Krivulja 4 – za pol br. 4.

Analizom valnog oblika prikazanog na slici 6.53 utvrđena su odstupanja u valnom obliku koja ukazuju na prisutnost smanjenja broja zavoja na nekom od polova. U tablici 6.25 prikazane su maksimalne vrijednosti magnetske indukcije u jarmu statora dobivene mjernim svitkom sa slike 6.53. Također su prikazane i relativne vrijednosti istih u odnosu na maksimalnu vrijednost magnetske indukcije pod polom broj 4.

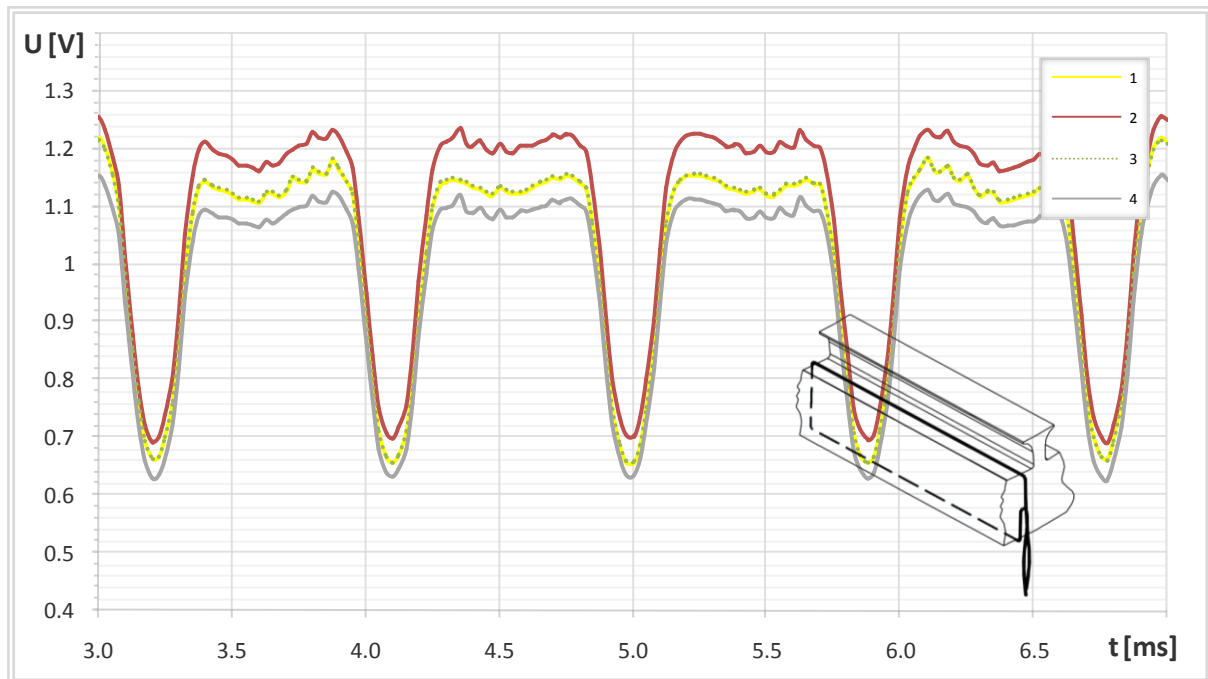
Tablica 6.25. Maksimalne vrijednosti magnetske indukcije sa slike 6.53, pri 10 % smanjenom iznosu broja zavoja na polu broj 4, te uzбудnoj struji od 8,7 A.

Pol	B_{SR} [T]	B_{SR}/B_{SR2}	ΔB_{SR} [%]
1	0,492	0,975	-2,15
2	0,505	1,000	0,36
3	0,505	1,000	0,36
4	0,492	0,975	-2,15

Iz izračunatih podataka proizlazi da se smanjenjem iznosa broja zavoja omotanih oko pola za 10 %, iznos magnetske indukcije u jarmu statora, smanji za 2,15 % pod polom broj 1 i 4. Porast magnetske indukcije u jarmu statora pod polom broj 2 i 3 iznosi 0,36 %.

Ovdje je moguće uočiti određena odstupanja dobivenih rezultata u odnosu na ranije dobivene rezultate izračuna. Naime, ranije dobiveni rezultati ukazivali su da smanjenje broja zavoja pola, ima jednak utjecaj na promjenu iznosa magnetske indukcije $|\Delta B_{SR}|$ pod polom broj 1 2 i 3, pri čemu su bile zadovoljene relacije (6.9), (6.10) i (6.11). U ovom slučaju navedene relacije nisu zadovoljene.

Kako promjena iznosa broja zavoja na polu utječe na promjenu iznosa napona induciranog u mjernom svitku pri sniženom iznosu struje uzbude prikazuje slika 6.54. Prikazani valni oblik induciranog napona u mjernom svitku računat je za smanjeni broj zavoja na jednom od svitaka uzbudnog namota u iznosu od 10 %, pri struji uzbude 4 A.



Slika 6.54. Napon induciran u mjernom svitku Ms_3 i Ms_4 , za prazni hod pri uzbudnoj struji od 4 A, uz smanjeni iznos broja zavoja jednog pola za 10 %, prikazan za dio polne papuče s konstantnim zračnim rasporom.

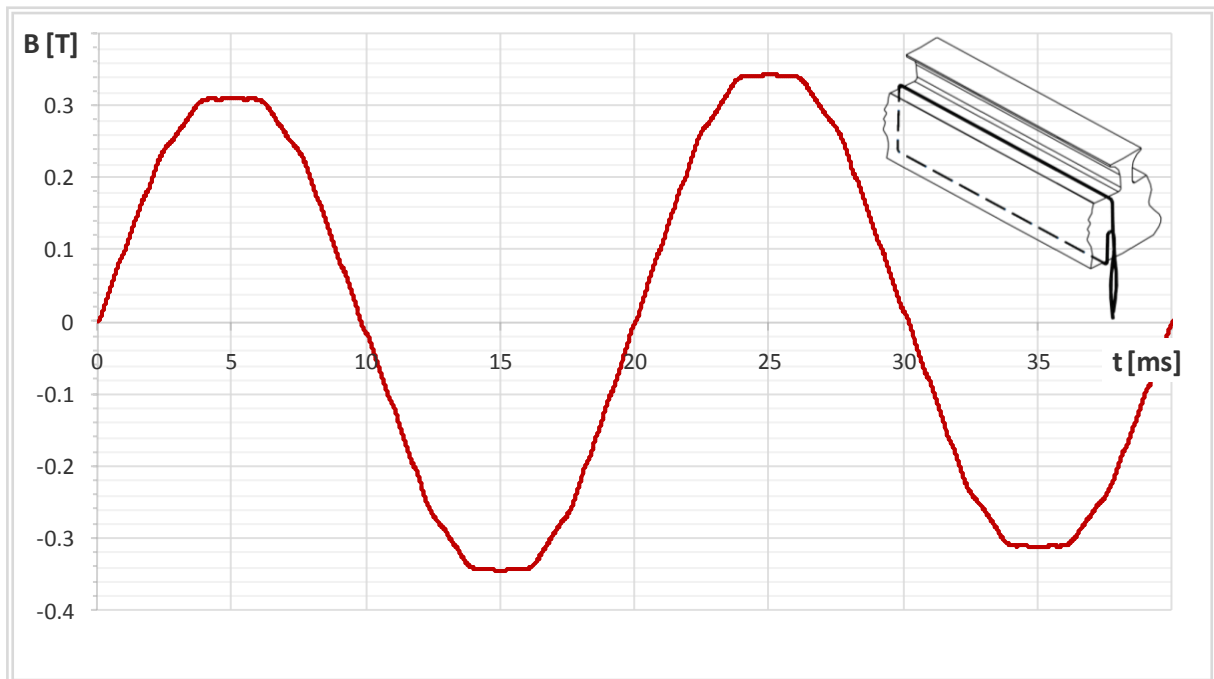
U tablici 6.26 prikazane su srednje vrijednosti napona koji se inducira u mjernom svitku sa slike 6.54, na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporom, izuzev dijelova s prigušnim namotom. Također su prikazane i relativne vrijednosti istih u odnosu na srednju vrijednost napona koji se inducira u svitku pod polom broj 4.

Tablica 6.26. Srednje vrijednosti napona induciranog u mjernom svitku na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporom izuzev dijelova s prigušnim namotom, pri 10 % smanjenom iznosu broja zavoja na polu broj 4, te uzbudnoj struji od 4 A.

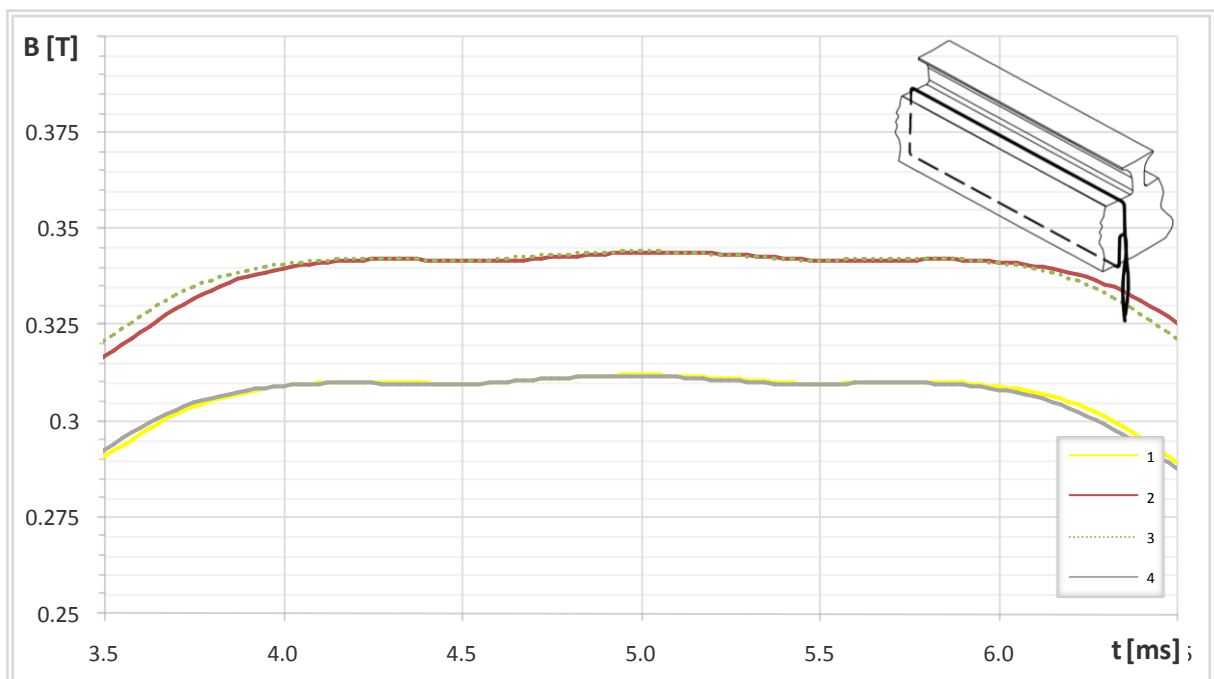
Pol	U_{SR} [V]	U_{SR}/U_{SR2}	ΔU_{SR} [%]
1	1,130	0,950	-2,59
2	1,190	1,000	2,59
3	1,130	0,950	-2,59
4	1,080	0,908	-6,9

Iz izračunatih podataka proizlazi da se smanjenjem iznosa broja zavoja omotanih oko pola za 10 %, pri sniženoj struji uzbude, iznos napona koji se inducira u mjernom svitku omotanom oko jarma statora, smanji za 6,9 % pod polom sa smanjenim brojem zavoja. Porast iznosa induciranog napona u mjernom svitku pod polom broj 2, iznosi 2,59 %, dok se iznos napona induciranog u mjernom svitku pod polovima broj 1 i 3 smanji za 2,59 %.

Utjecaj smanjenja iznosa broja zavoja na valni oblik dobiven integracijom valnog oblika napona koji se inducira u mjernom svitku M_{s3} i M_{s4} , pri sniženoj struji prikazan je na slici 6.55 i 6.56.



Slika 6.55. Raspodjela magnetske indukcije dobivena integracijom napona induciranog u mjernom svitku M_{s3} i M_{s4} , za prazni hod pri uzbudnoj struji od 4 A, uz smanjeni iznos broja zavoja jednog pola za 10 %.



Slika 6.56. Raspodjela magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom, dobivena integracijom napona induciranog u mjernom svitku M_{s3} i M_{s4} , za prazni hod pri uzbudnoj struji od 4 A: Krivulja 1 – za pol br. 1, Krivulja 2 – za pol br. 2, Krivulja 3 – za pol br. 3, Krivulja 4 – za pol br. 4.

Analizom valnog oblika prikazanog na slici 6.56 utvrđena su odstupanja u valnom obliku koja ukazuju na prisutnost smanjenja broja zavoja na nekom od polova. U tablici 6.27 prikazane su maksimalne vrijednosti magnetske indukcije u jarmu statora dobivene mjernim svitkom sa slike 6.56. Također su prikazane i relativne vrijednosti istih u odnosu na maksimalnu vrijednost magnetske indukcije pod polom broj 4.

Tablica 6.27. Maksimalne vrijednosti magnetske indukcije sa slike 6.56, pri 10 % smanjenom iznosu broja zavoja na polu broj 4, te uzbudnoj struji od 4 A.

Pol	B_{SR} [T]	B_{SR}/B_{SR2}	ΔB_{SR} [%]
1	0,311	0,904	-7,52
2	0,344	1,000	2,29
3	0,344	1,000	2,29
4	0,311	0,904	-7,52

Iz izračunatih podataka proizlazi da se smanjenjem iznosa broja zavoja omotanih oko pola za 10 %, iznos magnetske indukcije u jarma statora, smanji za 7,52 % pod polom broj 1 i 4. Porast magnetske indukcije u jarmu statora pod polom broj 2 i 3 iznosi 2,29 %.

Stoga je moguće zaključiti da je napon koji se inducira u mjernom svitku i integrirani oblik tog napona, osjetljivi u dovoljnoj mjeri za uočavanje promjena u valom obliku uzrokovanih smanjenjem broja zavoja na nekom od polova. Pri tome, promjene valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku uslijed promjena iznosa broja zavoja pola u skladu su s ranije dobivenim rezultatima pri čemu vrijede relacije (6.9), (6.10) i (6.11). Dok promjene u valnom obliku dobivenom integracijom napona induciranog u mjernom svitku odstupaju od promjena ranije dobivenih rezultata, pri čemu relacije (6.9), (6.10) i (6.11) ne vrijede.

Pri primjeni mjernog svitka postavljenog oko jarma statora, u detekciji smanjenog broja zavoja svitka uzbudnog namota, kao faktor za detekciju upotrijebiti će se promjena u frekvencijskom sastavu analiziranog valnog oblika dobivenog mjernim svitkom. Stoga je načinjena frekvencijska analiza promatranih valnih oblika. Na slici 6.57 prikazana je frekvencijska analiza valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku Ms_3 i Ms_4 , prikazanog na slici 6.50, uz smanjeni broj zavoja jednog pola za 10 %, pri struji uzbude od 8,7 A.



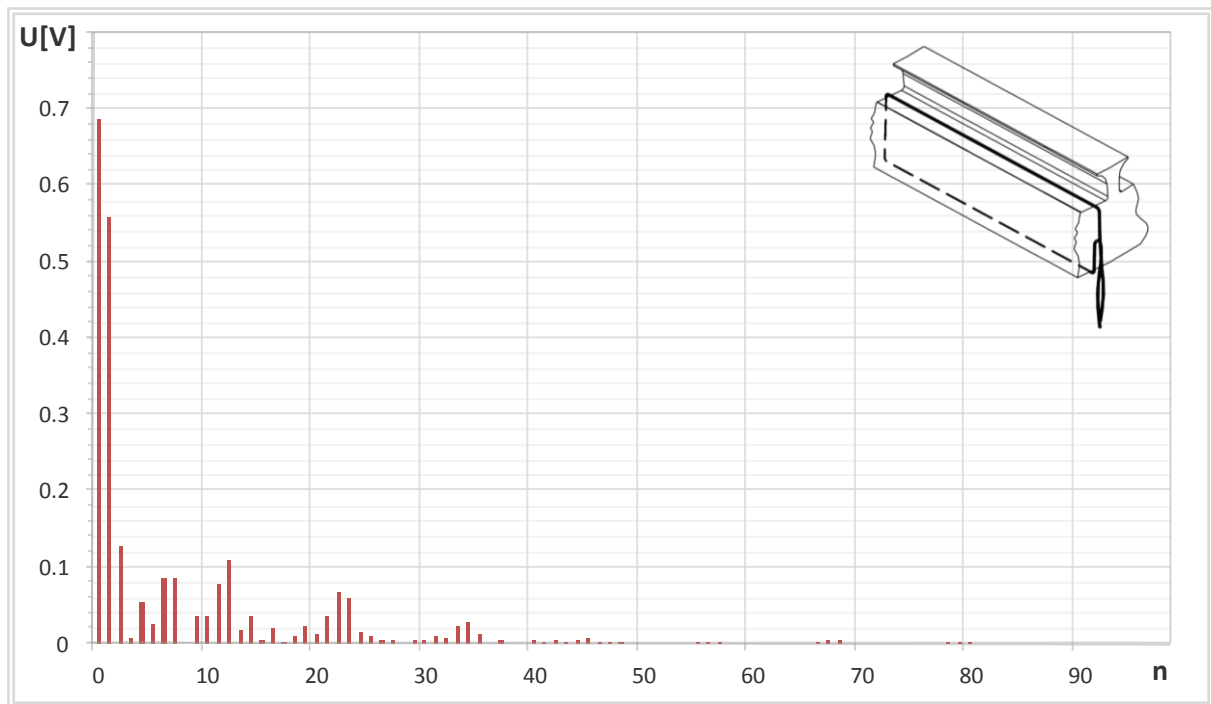
Slika 6.57. Frekvencijska analiza valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku M_{s3} i M_{s4} , na polnom koraku pola broj 4, uz sniženi broj zavoja pola broj 4 od 10 %, pri uzbudnoj struji 8,7 A.

Popisani su svi izraženi harmonički članovi sa slike 6.57, te su uspoređeni s harmoničkim članovima prisutnim u valnom obliku na polnom koraku pola broj 2. Rezultati usporedbe amplituda izraženih harmoničkih članova prikazani su u tablici 6.28.

Tablica 6.28. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, pri uzbudnoj struji od 8,7 A.

Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]	Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]	Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]
0	-2,5073	4	3,6155	10	-6,5981
1	-1,7466	6	0,5484	11	-3,2705
2	-4,5020	7	0,7220	12	0,7343
3	-12,676	9	-0,5186	13	42,826

Na slici 6.58 prikazana je frekvencijska analiza valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku M_{s3} i M_{s4} , prikazanog na slici 6.54, uz smanjeni broj zavoja jednog pola za 10 %, pri struji uzbude od 4 A.



Slika 6.58. Frekvencijska analiza valnog oblika napona inducirano u mjernom svitku M_{s3} i M_{s4} , na polnom koraku pola broj 4, uz sniženi broj zavoja pola broj 4 od 10 %, pri uzbudnoj struji 4 A.

Popisani su svi izraženi harmonički članovi sa slike 6.58, te su uspoređeni s harmoničkim članovima prisutnim u valnom obliku na polnom koraku pola broj 2. Rezultati usporedbe amplituda izraženih harmoničkih članova prikazani su u tablici 6.29.

Tablica 6.29. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, pri uzbudnoj struji od 4 A.

Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]	Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]	Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]
0	-9,3644	5	-10,378	10	-17,967
1	-8,9898	6	-7,1764	11	-11,547
2	-10,659	7	-10,527	12	-5,5241
4	-5,5843	9	-12,314	14	-9,8245

Podaci prikazani u tablici 6.28 i 6.29, prikazuju promjenu određenog harmoničkog člana uslijed promjene iznosa broja zavoja na jednom od polova. Kako se može vidjeti promjena se ne odražava jednako na sve izražene harmoničke članove. Stoga je i u ovom slučaju potrebno izdvojiti samo one harmoničke članove, kod kojih je promjena amplitude uzrokovana promjenom iznosa broja zavoja pola, u skladu s ranije donesenim zaključcima. Samo ti harmonički članovi koristiti će se kao indikatori prisutnosti smanjenja broja zavoja uzbudnog svitka.

Rezultati frekvencijske analize valnog napona induciranog u mjernom svitku M_{s3} i M_{s4} , prikazani u tablici 6.28 i 6.29, vršeni su za vremenski period koji odgovara polnom koraku τ_p . Međutim ukoliko se frekvencijska analiza vrši na vremenskom periodu $2p\tau_p$, uslijed smanjenja broja zavoja na jednom od polova, promijeniti će se amplituda prvog i trećeg harmoničkog člana. Rezultati usporedbe amplituda izraženih harmoničkih članova pri različitim strujama uzbude prikazani su u tablici 6.30 i 6.31.

Tablica 6.30. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, pri uzbudnoj struji od 8,7 A.

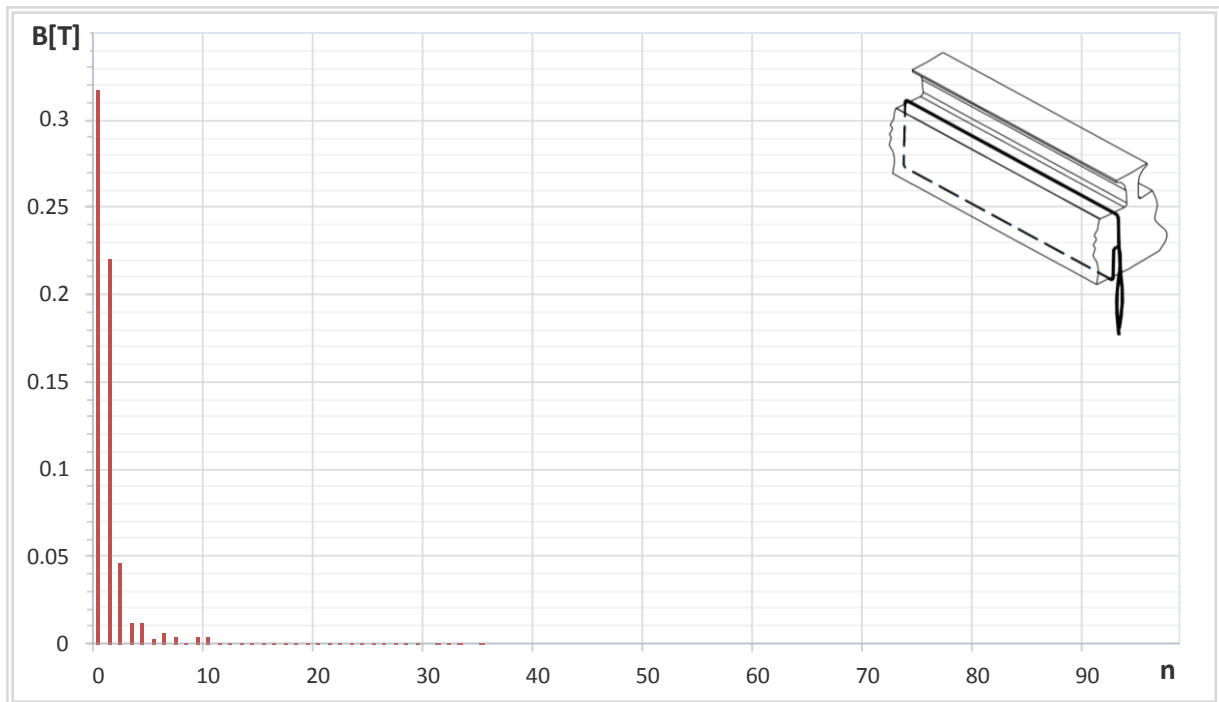
Harmonik broj	Amplituda B [T]	
	bez smanjenja broja zavoja	smanjen broj zavoja 10 %
1	0,00031	0,0121
2	1,611	1,598
3	0,00057	0,0061

Tablica 6.31. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, pri uzbudnoj struji od 4 A.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	
	bez smanjenja broja zavoja	smanjen broj zavoja 10 %
1	0,000039	0,0305
2	1,098	1,071
3	0,00055	0,0199

Iz rezultata prikazanih u tablici 6.30 i 6.31, uočljivo je da se harmonički član broj 2, uslijed promjene iznosa broja zavoja pola, promjeni za očekivani iznos u skladu s ranije donesenim zaključcima. Također, znatno je izražena i promjena prvog i trećeg harmoničkog člana. Pri upotrebi valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku postavljenom oko jarma statora, ovi indikatori se mogu, pored ostalih navedenih, upotrijebiti u detekciji smanjenja broja zavoja svitka uzbudnog namota.

Načinjena je i frekvencijska analiza valnih oblika dobivenih integracijom napona induciranih u mjernom svitku M_{s3} i M_{s4} , prikazanih na slici 6.52 i 6.55. Na slici 6.59 prikazana je frekvencijska analiza valnog oblika dobivenog integracijom napona induciranih u mjernom svitku M_{s3} i M_{s4} , prikazanog na slici 6.52, uz smanjeni broj zavoja jednog pola za 10 %, pri struji uzbude od 8,7 A.



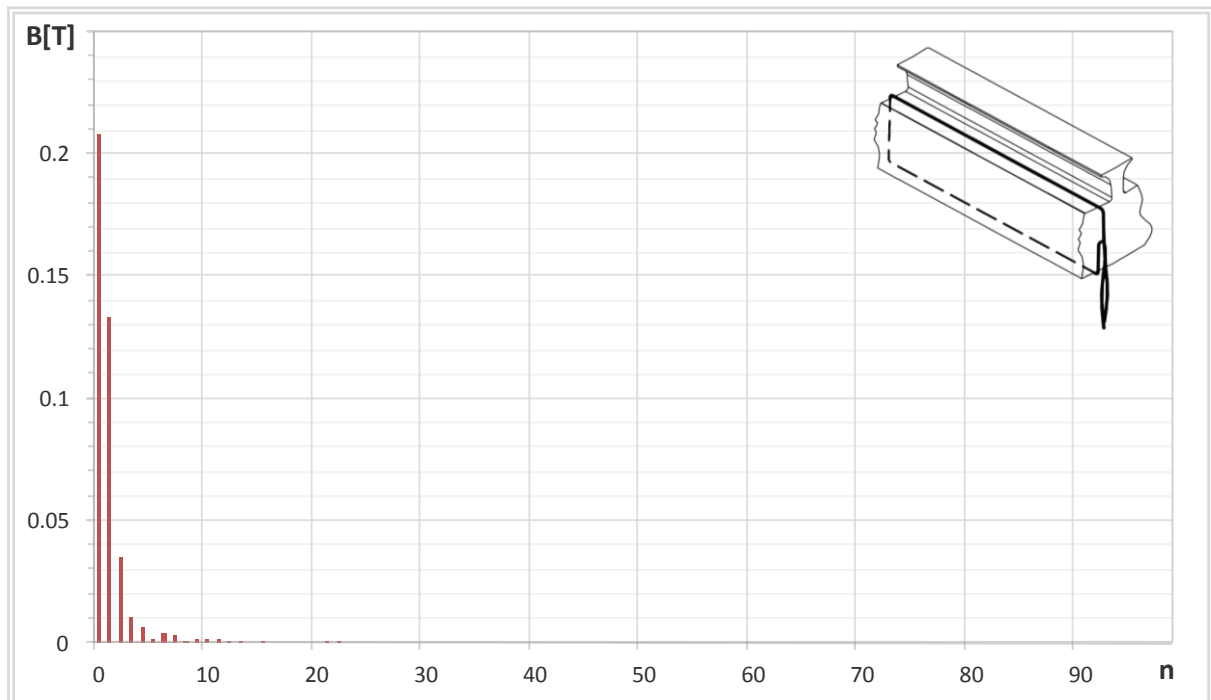
Slika 6.59. Frekvencijska analiza valnog oblika dobivenog integracijom napona induciranih u mjernom svitku M_{s3} i M_{s4} , na polnom koraku pola broj 4, uz sniženi broj zavoja pola broj 4 od 10 %, pri uzbudnoj struji 8,7 A.

Popisani su svi izraženi harmonički članovi sa slike 6.59, te su uspoređeni s harmoničkim članovima prisutnim u valnom obliku na polnom koraku pola broj 2. Rezultati usporedbe amplituda izraženih harmoničkih članova prikazani su u tablici 6.32.

Tablica 6.32. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, pri uzbudnoj struji od 8,7 A.

Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]	Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]	Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]
0	-3,1229	4	-2,4400	9	-2,7344
1	-1,3505	5	-3,6847	10	-2,6138
2	-0,6530	6	-0,8704		
3	-0,3662	7	-1,6074		

Na slici 6.61 prikazana je frekvencijska analiza valnog oblika dobivenog integracijom napona inducirano u mjernom svitku M_{s3} i M_{s4} , prikazanog na slici 6.55, uz smanjeni broj zavoja jednog pola za 10 %, pri struji uzbude od 4 A.



Slika 6.61. Frekvencijska analiza valnog oblika dobivenog integracijom napona inducirano u mjernom svitku M_{s3} i M_{s4} , na polnom koraku pola broj 4, uz sniženi broj zavoja pola broj 4 od 10 %, pri uzbudnoj struji 4 A.

Popisani su svi izraženi harmonički članovi sa slike 6.61, te su uspoređeni s harmoničkim članovima prisutnim u valnom obliku na polnom koraku pola broj 2. Rezultati usporedbe amplituda izraženih harmoničkih članova prikazani su u tablici 6.33.

Tablica 6.33. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, pri uzbudnoj struji od 4 A.

Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]	Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]	Harmonik broj	Promjena amplitude ΔA [%]
0	-9,6319	4	-6,0526	9	-20,317
1	-8,3992	5	-23,285	10	-7,7249
2	-6,1900	6	-16,378		
3	-4,6540	7	-3,9990		

Podaci prikazani u tablici 6.32 i 6.33, prikazuju promjenu određenog harmoničkog člana uslijed promjene iznosa broja zavoja na nekom od polova. Kako se može vidjeti, promjena se ne odražava jednako na sve izražene harmoničke članove. Stoga je i u ovom slučaju potrebno izdvojiti samo one harmoničke članove, kod kojih je promjena amplitude uzrokovana promjenom iznosa broja zavoja pola, u skladu s

ranije donesenim zaključcima. Samo ti harmonički članovi koristiti će se kao indikatori prisutnosti smanjenja broja zavoja uzbuđenog svitka.

Harmonički članovi kod kojih je promjena amplitude uslijed smanjenog iznosa broja zavoja pola značajno varira pri različitim iznosima struje uzbuđenja, neće se koristiti kao indikatori prisutnosti smanjenja broja zavoja uzbuđenog svitka.

Rezultati frekvencijske analize valnog oblika dobivenog integracijom napona induciranog u mjernom svitku M_{s3} i M_{s4} , prikazani u tablici 6.32 i 6.33, vršeni su za vremenski period koji odgovara polnom koraku τ_p . Međutim, i u ovom slučaju, uslijed smanjenja broja zavoja na jednom od polova, značajno će se promijeniti prvi i treći harmonički član ukoliko se frekvencijska analiza vrši na vremenskom periodu $2p\tau_p$. Rezultati usporedbe amplituda izraženih harmoničkih članova pri različitim strujama uzbuđenja prikazani su u tablici 6.34 i 6.35.

Tablica 6.34. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, pri uzbuđnoj struji od 8,7 A.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	
	bez smanjenja broja zavoja	smanjen broj zavoja 10 %
1	0,0075	0,00031
2	0,509	0,513
3	0,0011	0,00017

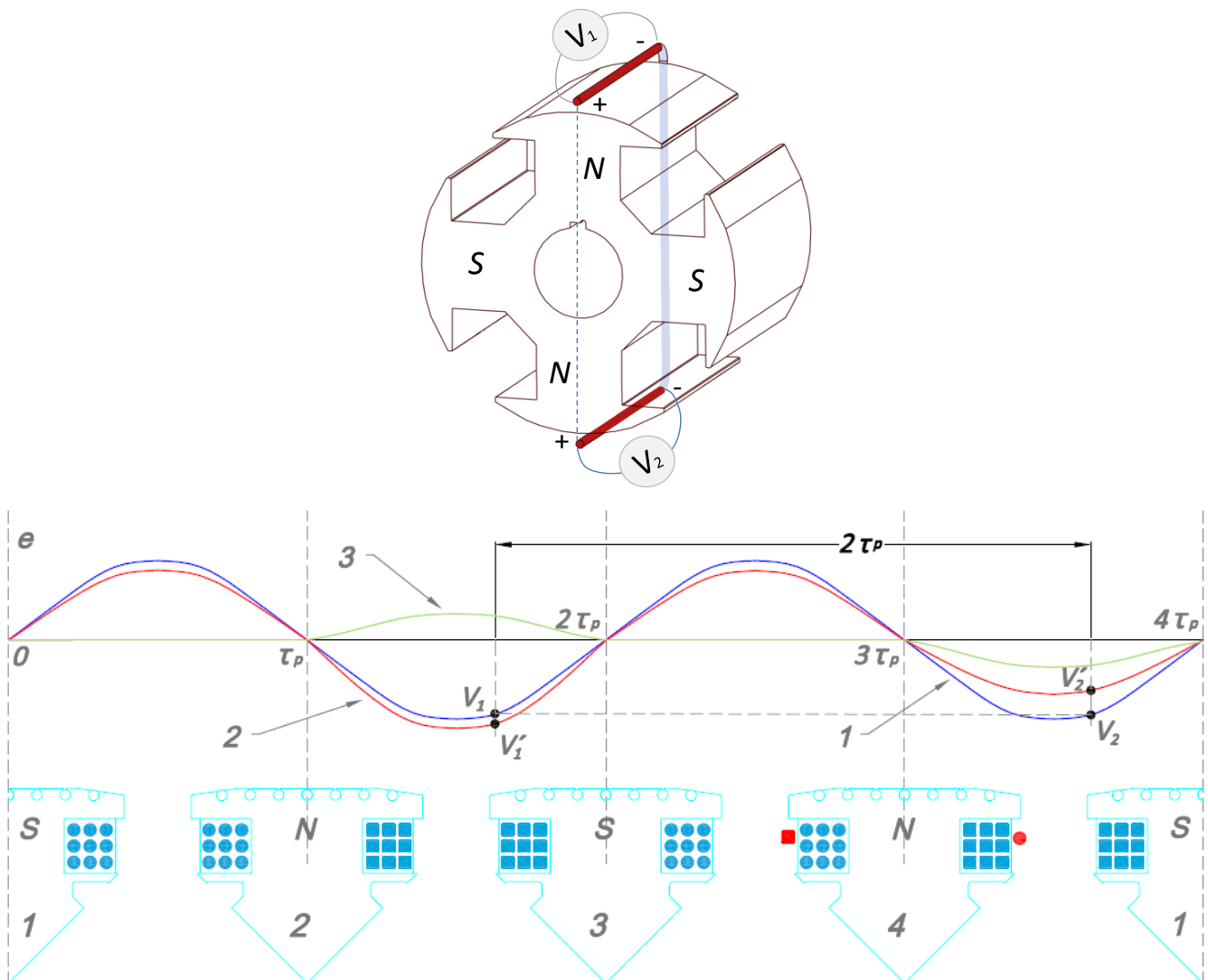
Tablica 6.35. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, pri uzbuđnoj struji od 4 A.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	
	bez smanjenja broja zavoja	smanjen broj zavoja 10 %
1	0,00017	0,0193
2	0,3498	0,341
3	0,00018	0,0041

Iz rezultata prikazanih u tablici 6.34 i 6.35, uočljivo je da se harmonički član broj 2, uslijed promjene iznosa broja zavoja pola, promjeni za očekivani iznos u skladu s ranije donesenim zaključcima. Također, znatno je izražena i promjena prvog i trećeg harmoničkog člana. Pri upotrebi valnog oblika dobivenog integracijom napona induciranog u mjernom svitku postavljenom oko jarma statora, ovi indikatori se mogu pored ostalih navedenih, upotrijebiti u detekciji smanjenja broja zavoja svitka uzbuđenog namota.

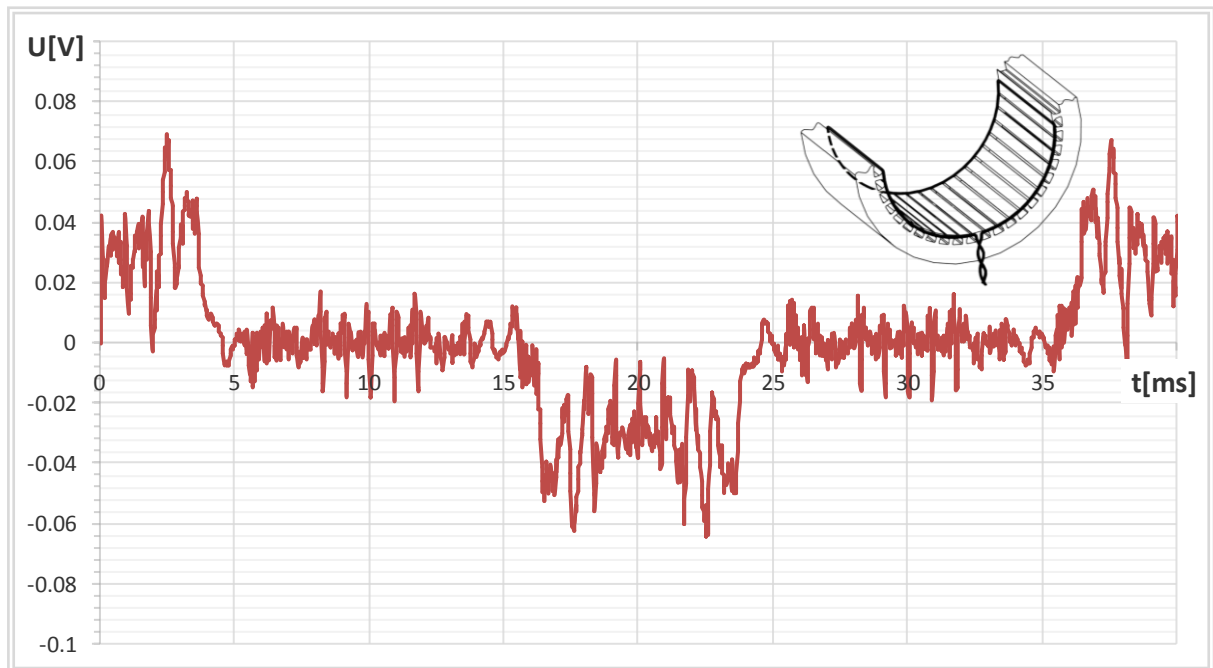
6.2.4. Utjecaj smanjenja iznosa broja zavoja svitka uzbuđnog namota na magnetski tok jarma statora računat na dvostrukom polnom koraku

Mjerni svitak M_{s7} ugrađen je kao na slici 6.62, na način da su vodiči svitka koji su položeni na klin utora statorskog namota, međusobno razmaknuti za dvostruki polni korak $2\tau_p$. U slučaju da generator ima 4 pola kao što je SGBP 160M-4M, vodiči leže na istom dijametru (dijametralni korak). U vodičima će se u praznom hodu inducirati jednaki naponi $V_1 = V_2$, jer se vodiči nalaze u jednakim uvjetima (slika 6.62 – krivulja 1). Tada će i napon na krajevima međusobno spojenih vodiča ΔU biti jednak nuli. Ukoliko se na bilo koji način poremeti ravnoteža u stroju, odnosno pojavi nesimetrija, vodiči neće biti u jednakim uvjetima a napon na krajevima međusobno spojenih vodiča više neće biti jednak nuli (slika 6.62 – krivulja 3). Upravo taj efekt će se iskoristiti u detekciji smanjenja broja zavoja svitka uzbuđnog namota.



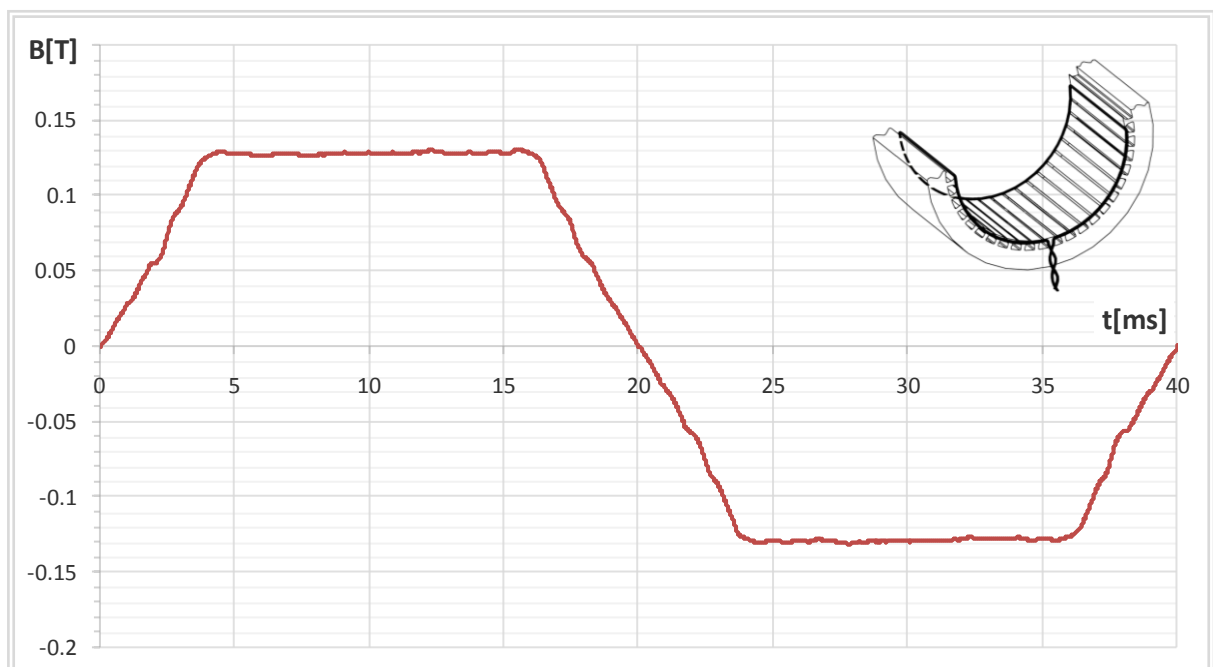
Slika 6.62. Napon induciran u vodičima postavljenim na dvostrukom polnom koraku:
 Krivulja 1 – bez prisutnog smanjenja broja zavoja svitka uzbuđnog namota,
 Krivulja 2 – uz prisutno smanjenje broja zavoja svitka uzbuđnog namota,
 Krivulja 3- razlika napona $\Delta U = V_2 - V_1$ uz prisutno smanjenje broja zavoja svitka uzbuđnog namota

Započeti će se s analizom napona koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 , uz smanjeni iznos broja zavoja na polu broj 4 od 10%, u praznom hodu pri struji uzbuđe od 8,7 A. Rezultati izračuna prikazani su na slici 6.44.



Slika 6.63. Napon induciran u mjernom svitku Ms_7 za prazni hod pri uzbuđnoj struji od 8,7 A, uz smanjeni iznos broja zavoja jednog pola za 10 %.

Valni oblik prikazan na slici 6.63 nije prikladan za analizu stoga će se analizirati njegov integrirani oblik prikazan na slici 6.64.



Slika 6.63. Raspodjela magnetske indukcije dobivena integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_7 , za prazni hod pri uzbuđnoj struji od 8,7 A, uz smanjeni iznos broja zavoja jednog pola za 10 %,

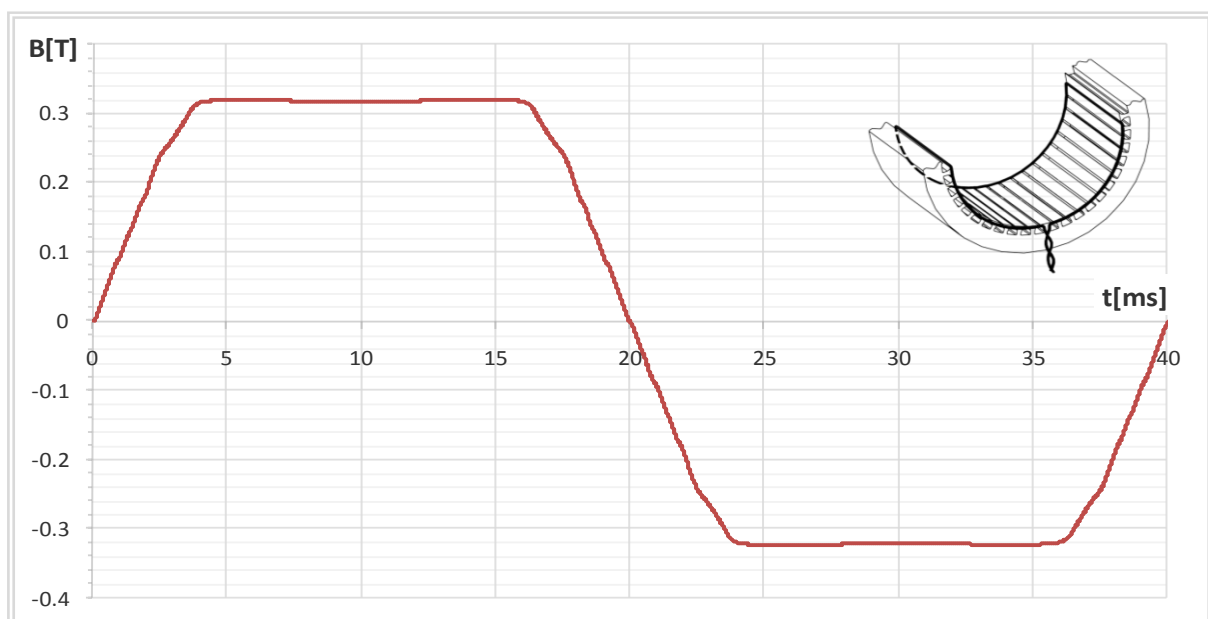
Analizom valnog oblika prikazanog na slici 6.63, te njegovom usporedbom s valnim oblikom izračunatim bez prisutnog smanjenja broja zavoja pola, utvrđena su odstupanja koja ukazuju na prisutnost smanjenja broja zavoja na nekom od polova. U tablici 6.36 prikazana je maksimalna vrijednosti magnetske indukcije dobivena mjernim svitkom Ms_7 . Također je prikazan i iznos promjene nastao uslijed smanjenja broja zavoja pola.

Tablica 6.36. Maksimalna vrijednost magnetske indukcije sa slike 6.63, pri 10 % smanjenom iznosu broja zavoja na polu broj 4, te uzbudnoj struji od 8,7 A.

Smanjenje iznosa broja zavoja [%]	B_{MAX} [T]	ΔB_{MAX} [%]
0	0,0013	9784,6
10	0,1291	

Iz podataka prikazanih u tablici 6.36, može se uočiti da magnetska indukcija uslijed smanjenja broja zavoja jednog pola za 10 %, poraste za 107,3 %. Također je moguće uočiti da magnetska indukcija izračunata bez prisutnog smanjenja broja zavoja pola ne iznosi 0 T, već ima oblik prikazan na slici 6.63, pri čemu mu maksimalna vrijednost iznosi 0,062 T. Jedan od razloga zbog kojeg se u mjernom svitku bez prisutnog smanjenja broja zavoja pola inducira napon različit od nule, je taj što vodiči mjernog svitka nisu postavljeni na istom dijametru, već postoji određeno odstupanje nastalo prilikom crtanja vodiča mjernog svitka u modelu za izračun. Iznos magnetske indukcije izračunate bez prisutnog smanjenja broja zavoja pola je vrijednost koju je potrebno uzeti kao referentnu, te odstupanja u magnetskoj indukciji uslijed smanjenja broja zavoja pola računati u odnosu na tu referentnu vrijednost.

Kako promjena iznosa broja zavoja na polu utječe na promjenu iznosa magnetske indukcije izračunate u mjernom svitku pri sniženom iznosu struje uzbude prikazuje slika 6.64.



Slika 6.64. Raspodjela magnetske indukcije dobivena integracijom napona inducirano u mjernom svitku Ms_7 , za prazni hod pri uzbudnoj struji od 4 A, uz smanjeni iznos broja zavoja jednog pola za 10 %.

U tablici 6.37 prikazana je maksimalna vrijednosti magnetske indukcije dobivena mjernim svitkom Ms₇. Također je prikazan i iznos promjene nastao uslijed smanjenja broja zavoja pola od 10 %, pri sniženoj struji uzbude.

Tablica 6.37. Maksimalna vrijednost magnetske indukcije sa slike 6.63, pri 10 % smanjenom iznosu broja zavoja na polu broj 4, te uzbudnoj struji od 4 A.

Smanjenje iznosa broja zavoja [%]	B_{MAX} [T]	ΔB_{MAX} [%]
0	0,0025	12580,0
10	0,317	

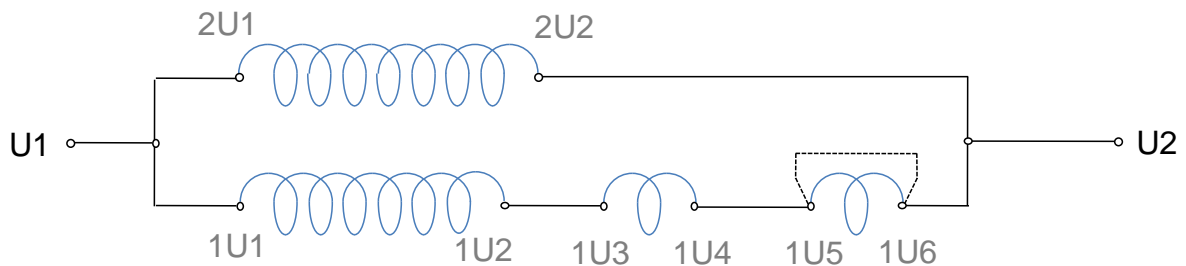
Iz podataka prikazanih u tablici 6.37 može se uočiti da magnetska indukcija uslijed smanjenja broja zavoja jednog pola za 10 %, pri sniženoj struji uzbude, poraste za 411,3 %. Stoga pri primjeni mjernog svitka kojemu su vodiči postavljeni na dvostrukom polnom koraku u detekciji smanjenja broja zavoja svitka uzbudnog namota, dovoljno je pratiti vršnu vrijednost napona induciranog u mjernom svitku, odnosno valnog oblika dobivenog integracijom napona induciranog u mjernom svitku. Na osnovu promjene te vrijednosti, u odnosu na referentnu odnosno vrijednost dobivenu bez prisutnog smanjenja broja zavoja svitka uzbudnog namota, moguće je donositi zaključak o prisutnosti smanjenja broja zavoja svitka uzbudnog namota.

6.3. Rezultati proračuna za prazni hod, uz kratko spojene zavoje svitka namota armature

Za provedbu ovog proračuna potrebno je izmijeniti model korišten za proračun generatora u praznom hodu, i omogućiti kratko spajanje dijela faznog namota. Tako je izrađen novi model kojem je namot faze U , sačinjen od dvije paralelne grane s po sedam svitaka pri čemu svaki svitak ima 15 zavoja, podijeljen na četiri dijela:

- paralelna grana broj 2 s oznakama $2U1$ i $2U2$,
- šest svitaka paralelne grane broj 1 s oznakama $1U1$ i $1U2$,
- $(15 - N)$ zavoja sedmog svitka paralelne grane broj 1 s oznakama $1U3$ i $1U4$,
- N zavoja sedmog svitka paralelne grane broj 1 s oznakama $1U5$ i $1U6$

gdje je N broj zavoja svitka koji će se kratko spojiti ($1 \leq N \leq 15$). Za $N = 15$ cijeli svitak namota je u kratkom spoju. Slika 6.65 shematski prikazuje izmijenjeni namot faze U .

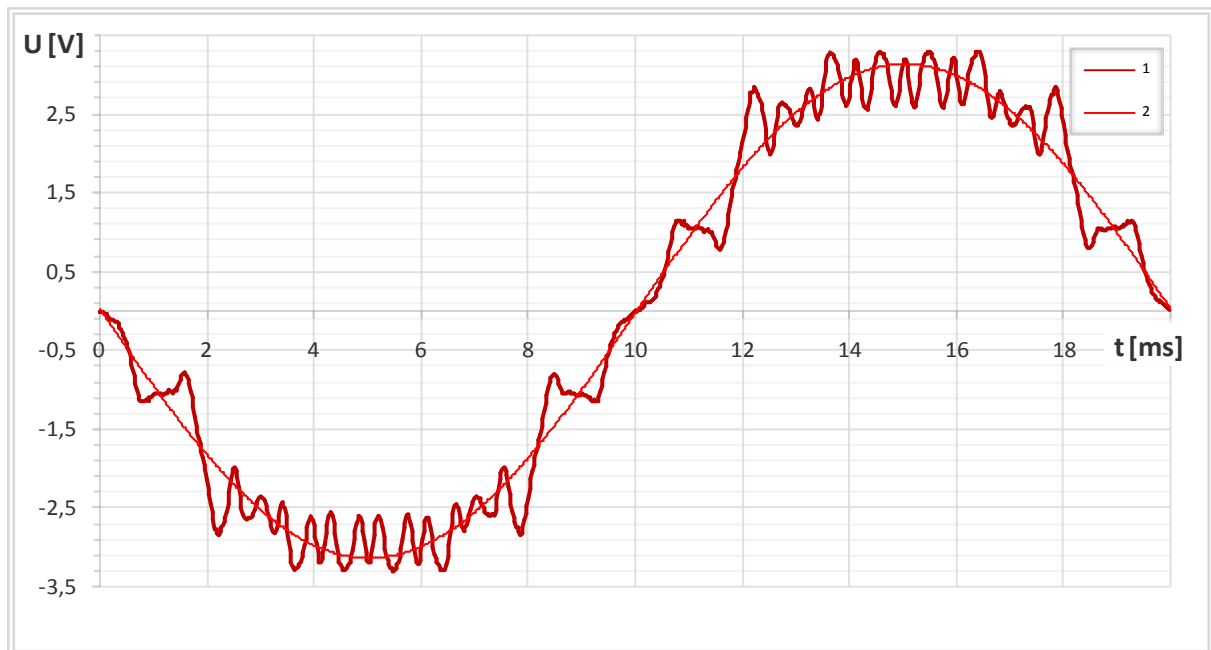


Slika 6.65. Shematski prikaz izmijenjenog namota faze U kojim je omogućeno kratko spajanje zavoja svitka armaturnog namota.

Započeti će se s analizom jednog kratko spojenog zavoja svitka armaturnog namota u generatoru koji radi u praznom hodu. Kroz armaturni namot generatora u praznom hodu ne teku struje, a na stezaljkama armaturnog namota inducira se napon u svakoj od faza. Fazni napon generatora jednak je vektorskom zbroju svih napona koji se induciraju u vodičima jedne paralelne grane faznog namota. Ukoliko je u faznom namotu prisutan međuzavojni kratki spoj, tada će kroz kratko spojeni zavoj poteći struja. Pri tome struja stvara vlastito magnetsko polje koje se svojim djelovanjem suprotstavlja pojavi koja ga je izazvala, a to je promjena uzbudnog protjecanja.

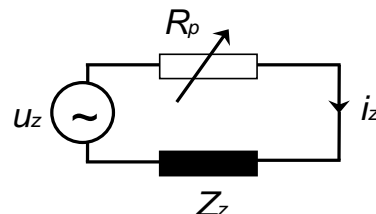
Struja u kratko spojenom zavoju i_z ovisi o impedanciji tog zavoja Z_z , naponu koji se inducira u tom zavoju u_z , te prijelaznom otporu mjesta kratkog spoja R_p . Impedancija zavoja može se izračunati iz tehničkih podataka stroja koji se analizira. Napon koji se inducira u zavoju ovisi o uzbudnom protjecanju i brzini vrtnje rotora. Slika 6.66 prikazuje valni oblik napona koji se inducira u jednom zavoju svitka faznog namota.

Efektivna vrijednost struje kroz kratko spojeni zavoj analiziranog stroja iznosi 25 A. Taj iznos je dva puta veći od iznosa struje u armaturnom namotu kod nazivno opterećenog stroja, i kratkotrajno je moguće da ta struja teče kroz kratko spojeni zavoj bez većih posljedica po životni vijek stroja. Međutim kako ne bi došlo do uništenja namota armature potrebno je stroj isključiti te otkloniti nastali kvar (međuzavojni kratki spoj).



Slika 6.66. Valni oblik napona inducirano u zavoju svitka faznog namota, te njegovog osnovnog harmoničkog člana, u praznom hodu pri uzbudnoj struji od 8,7 A.

Prijelazni otpor mjesta kratkog spoja nije uzet u obzir pri izračunu struje kroz kratko spojeni zavoj. Iznos prijelaznog otpora međuzavojnog kratkog spoja od početne vrijednosti od nekoliko $M\Omega$ opada i teži vrijednosti 0Ω . Iz toga slijedi da pri nastanku međuzavojnog kratkog spoja struja kroz kratko spojeni zavoj, postepeno kako se mijenja prijelazni otpor, mijenja iznos od vrijednosti 0 A do vrijednosti određene iznosom napona inducirano u kratko spojenom zavoju i impedancijom zavoja. Slika 6.67 prikazuje nadomjesnu shemu kratko spojenog zavoja generatora u praznom hodu.

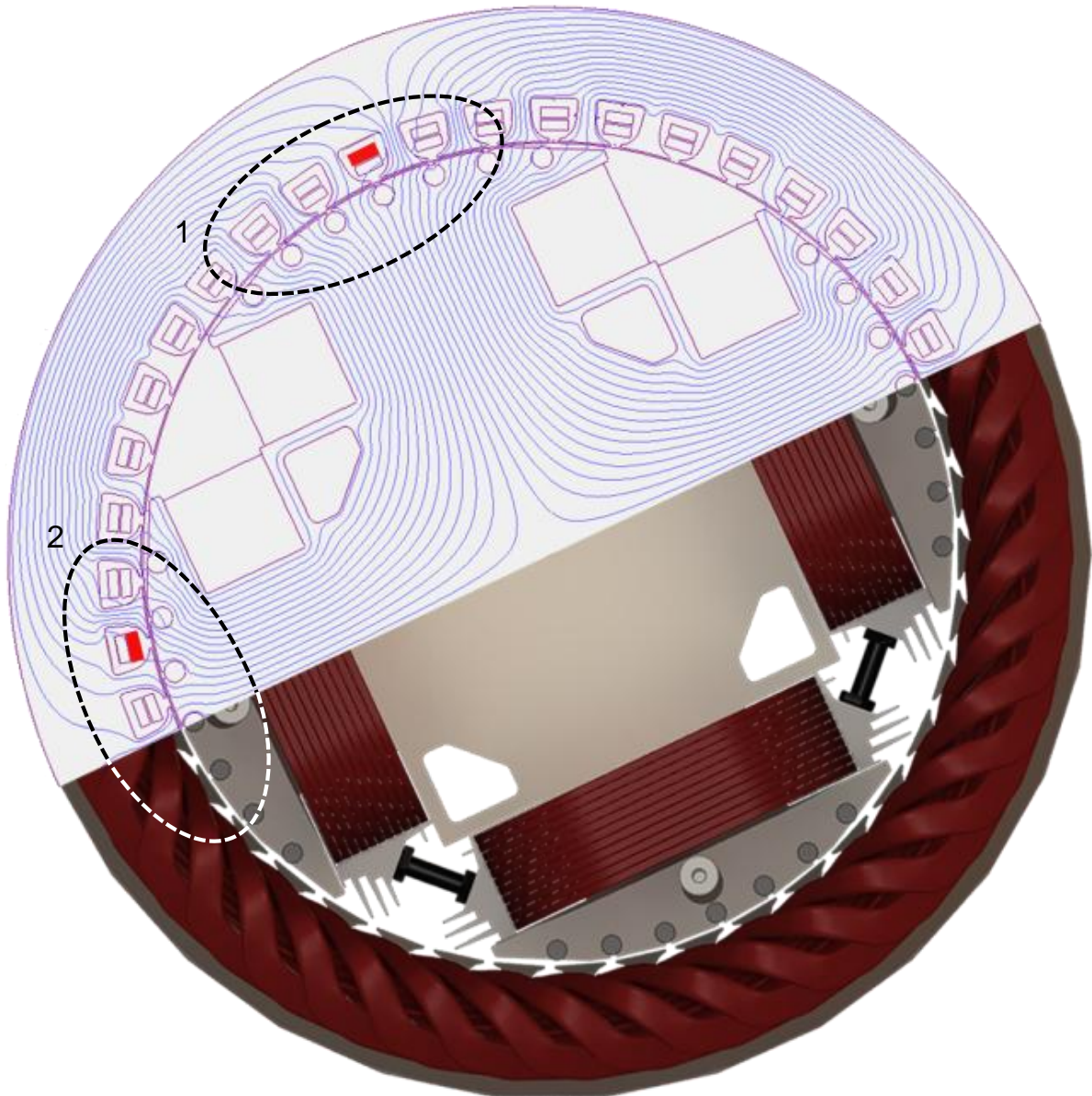


Slika 6.67. Nadomjesna shema kratko spojenog zavoja generatora u praznom hodu.

Kako djelovanje međuzavojnog kratkog spoja utječe na magnetsko polje generatora, koji radi u praznom hodu, prikazano je na slici 6.68. Svitak s kratko spojenim zavojem označen je crvenom bojom. Jedna strana svitka s kratko spojenim zavojem smještena je u utoru broj 4, dok je druga strana smještena u utoru broj 13.

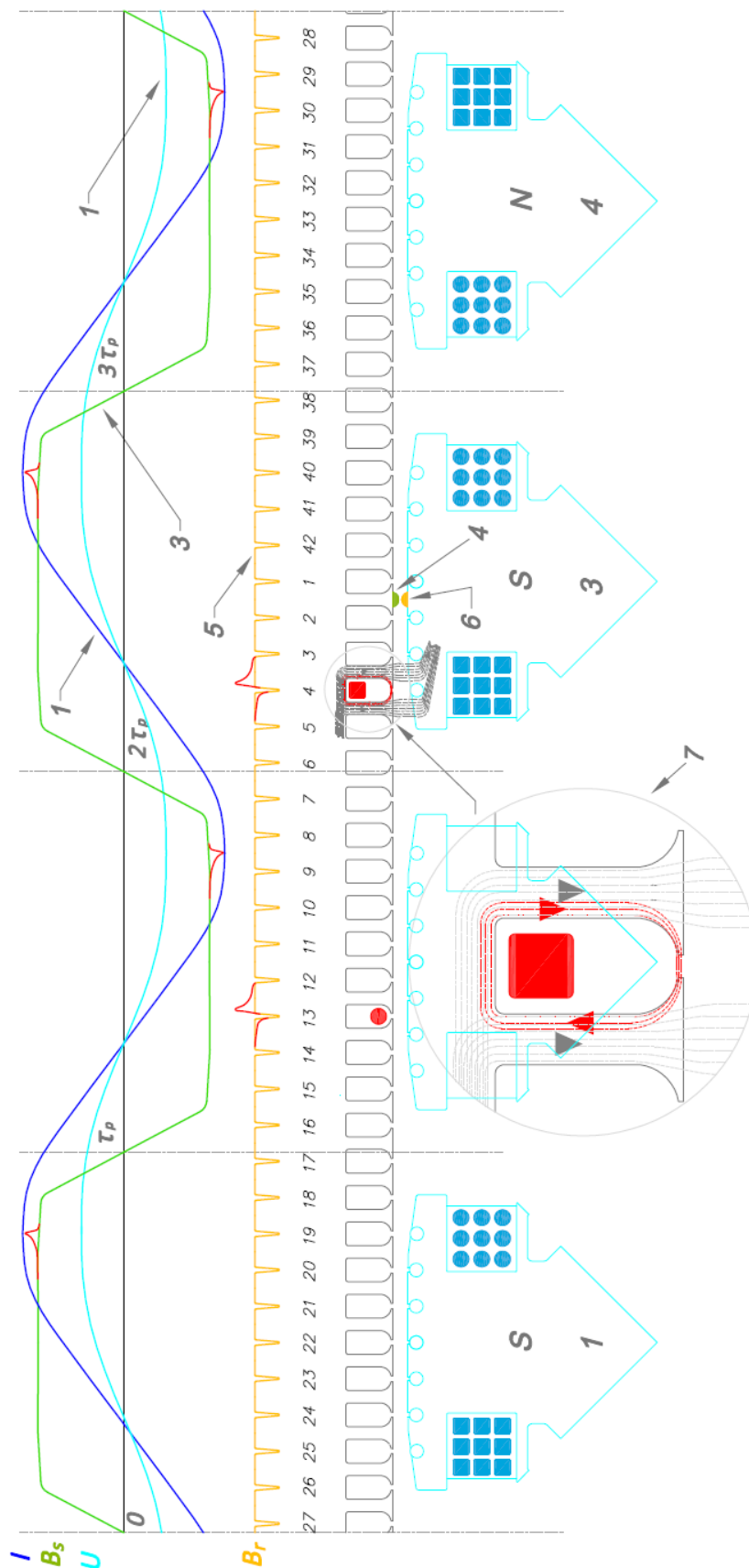
Magnetsko polje struje kratko spojenog zavoja uzrokuje poremećaj magnetskog polja u stroju, kojeg je moguće uočiti ukoliko se promotri raspored silnica u zubima statorskog paketa između kojih je smješten svitak s kratko spojenim zavojem. Kako se može vidjeti na slici 6.68 detalj 1 i 2, gustoća silnica magnetskog polja između utora broj 3 i 4 veća je od one u zubu između utora broj 4 i 5. Jednaka pojava prisutna je u zubima oko utora broj 13, u kojem je smještena druga strane svitka s međuzavojnim kratkim spojem. Razlog toga je što magnetsko polje kratko spojenog zavoja i magnetsko polje uzbudnog namota, u zubu s desne strane utora broj 4 i 13,

imaju isti smjer i potpomažu se, dok u zubu s lijeve strane utora broj 4 i 13 maju suprotni smjer i međusobno se oduzimaju.



Slika 6.68. Prikaz magnetskog polja u modelu generatora u praznom hodu uz prisutni međuzavojni kratki spoj svitka namota armature.

Koliki će biti intenzitet poremećaja magnetskog polja u stroju, uzrokovan međuzavojnim kratkim spojem, ovisi o iznosu struje i_z te o broju zavoja koji sudjeluju u kratkom spoju. Ovaj efekt moguće je uočiti, na realnom stroju, ukoliko se promotri raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu. Slika 6.69 prikazuje kako pojava međuzavojnog kratkog spoja utječe na raspodjelu magnetske indukcije u zračnom rasporu, promatranu sa zuba statora. Krivulja 1 na slici 6.69, prikazuje osnovni harmonik napona induciranog u zavoju, a krivulja 2 prikazuje osnovni harmonik struje kratko spojenog zavoja. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana sa zuba statora, odnosno pozicije označene brojem 5, prikazana je krivuljom broj 3. Krivulja broj 4, prikazuje raspodjelu magnetske indukcije u zračnom rasporu promatranu s polne papuče rotora, odnosno pozicije označene brojem 6.



Slika 6.69. Prilike u generatoru pri međuzavojnom kratkom spoju armaturnog namota:
 1 – inducirani napon zavoju, 2 – struja u kratko spojenom zavoju, 3 – raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana sa zuba statorskog paketa,
 4 – raspodjela magnetske indukcije promatrana s polne papuče.

Na slici 6.69, detalj 7, prikazano je magnetsko polje kratko spojenog zavoja i magnetsko polje uzbuđenog namota, u zubima koji okružuju svitak s međuzavojnim kratkim spojem.

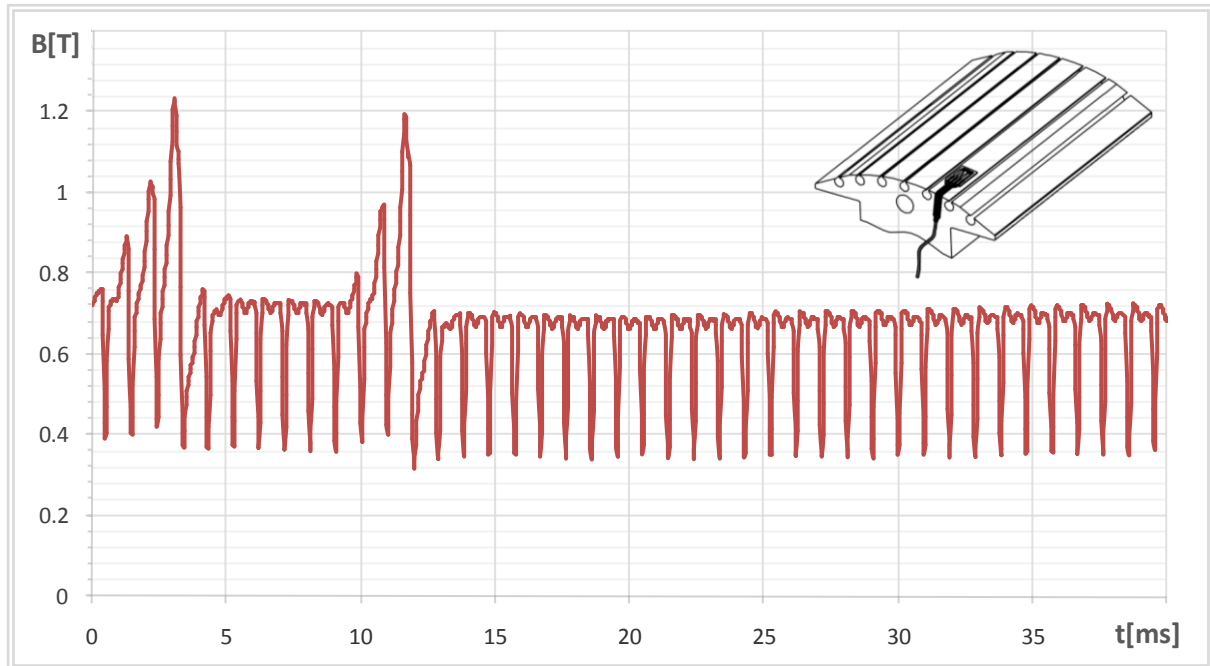
Moguće je uočiti da će analizirani poremećaj biti najviše uočljiv u trenutku kad se mjesto promatranja magnetske indukcije u zračnom rasporu, s polne papuče rotora, označeno brojem 6, premjesti pod zub između utora broj 3 i 4, odnosno utora broj 12 i 13. Taj trenutak ujedno je i trenutak kad struja u kratko spojenom zavoju postiže maksimalnu vrijednost.

Poremećaj magnetskog polja u stroju uzrokovan međuzavojnim kratkim spojem u namotu armature, može se uočiti i sa zuba statora. Međutim u tom slučaju udaljenost mjesta promatranja raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu, od utora u kojim su smješteni vodiči kratko spojenog zavoja, ima veliki značaj. Što je mjesto promatranja magnetske indukcije bliže utoru s vodičem kratko spojenog zavoja to je poremećaj više izražen. Kako se povećava udaljenost mjesta promatranja i utora s vodičem kratko spojenog zavoja poremećaj je sve manje izražen, a time i teže uočljiv. Ukoliko je udaljenost mjesta promatranja magnetske indukcije i utora u kojem je smješten vodič kratko spojenog zavoja veća od polnog koraka, tada poremećaj magnetskog polja u zračnom rasporu uzrokovan međuzavojnim kratkim spojem namota ne utječe na magnetsku indukciju na mjestu promatranja. Iz tog proizlazi da bi za detekciju ovog poremećaja trebalo magnetsku indukciju istovremeno promatrati s $2p$ mjesta jednoliko raspoređenih po obodu zračnog raspora. Međutim kako je navedeno, udaljenost mjesta promatranja magnetske indukcije u zračnom rasporu od utora s vodičem kratko spojenog zavoja značajno utječe na uočljivost poremećaja, stoga je poremećaj uslijed međuzavojnih kratkih spojeva namota armature, najpraktičnije promatrati s polne papuče.

Za provjeru ovih tvrdnji izračunat je valni oblik magnetske indukcije u zračnom rasporu generatora promatran sa zuba statorskog paketa te s polne papuče, uz prisutne međuzavojne kratke spojeve armaturnog namota generatora u praznom hodu. Također su izračunati pri navedenom poremećaju i radnom stanju, valni oblici napona induciranih u mjernim svitcima. Načinjena je analiza rezultata izračuna, i usporedba s podacima izračuna magnetske indukcije i magnetskih polja bez prisutnih međuzavojnih kratkih spojeva armaturnog namota, o čemu se izvještava u nastavku ovog poglavlja.

6.3.1. Utjecaj međuzavojnih kratkih spojeva svitka armaturnog namota na magnetsku indukciju u zračnom rasporu

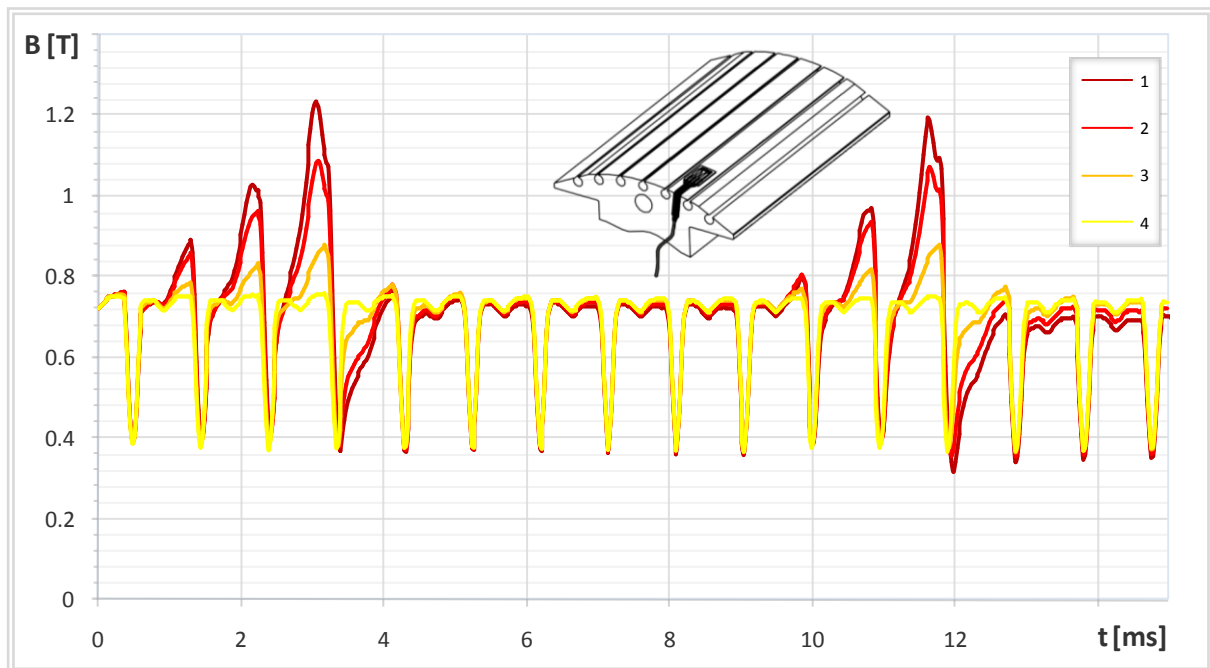
Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu, uz prisutne međuzavojne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature generatora koji radi u praznom hodu, prikazana je na slici 6.70. Prikazana raspodjela magnetske indukcije računata je pri struji uzbude od 8,7 A, za jedan puni okret rotora, na mjestu Hallovoeg senzora H_3 , ugrađenog na polnu papuču rotora prema slici 5.12.



Slika 6.70. Raspodjela magnetske indukcije promatrana s polne papuče, uz prisutni kratki spoj 14 zavoja svitka namota armature generatora u praznom hodu, pri uzbudnoj struji od 8,7 A.

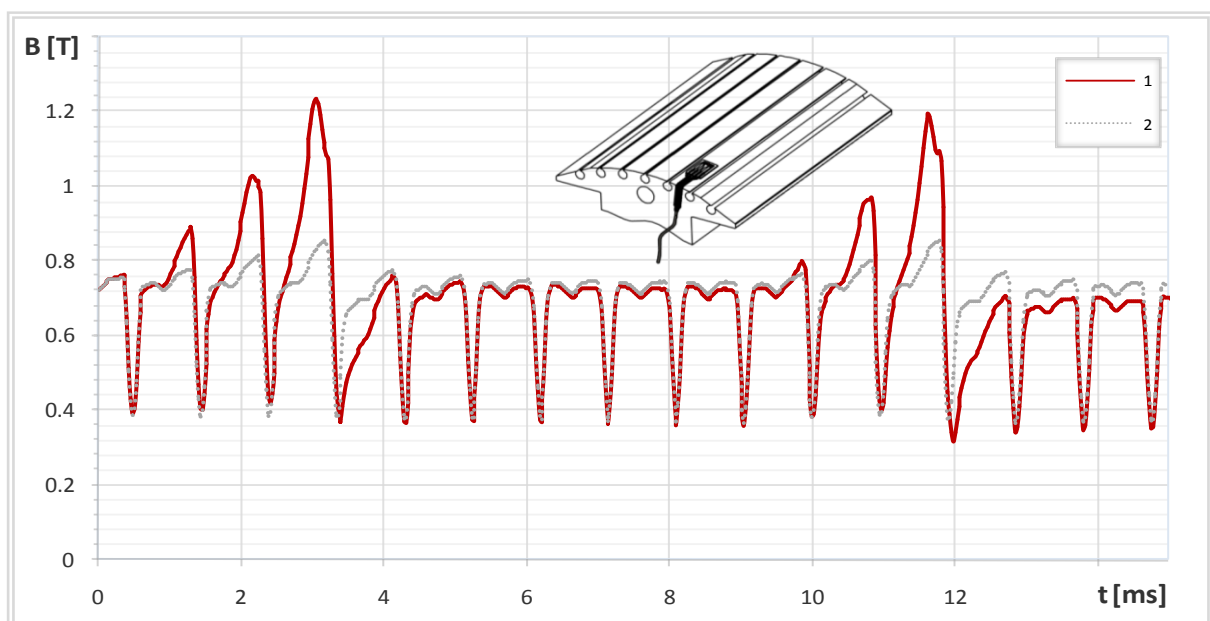
U trenutku $t = 0$, položaj rotora je takav da se mjesto promatranja magnetske indukcije u zračnom rasporu s polne papuče poklapa sa simetralom utora broj 1, kako je i prikazano na slici 6.69. Kratko spojeni zavoji smješteni su u utore broj 4 i 13. Zakretanjem rotora mjesto promatranja magnetske indukcije približava se utoru broj 4, te je moguće uočiti poremećaj u magnetskom polju. Jednak poremećaj magnetskog polja moguće je uočiti kad se rotor zakrene i približi utoru broj 13. Na slici 6.70 moguće je uočiti, da se kod 14 kratko spojenih zavoja svitka namota armature, kroz koje protječe nazivna struja, poremećaj može uočiti na više zubi statorskog paketa.

Raspodjela magnetske indukcije promatrana s polne papuče rotora, izračunata pri 14, 10, 5 i 1 kratko spojeni zavoj, prikazana je na slici 6.71.



Slika 6.71. Raspodjela magnetske indukcije promatrana s polne papuče, uz prisutne kratke spojeve svitka namota armature generatora u praznom hodu, pri uzbudnoj struji od 8,7 A: Krivulja 1- 14 kratko spojenih zavojica, Krivulja 2 – 10 kratko spojenih zavojica, Krivulja 3 – 5 kratko spojenih zavojica, Krivulja 4 – 1 kratko spojeni zavoj.

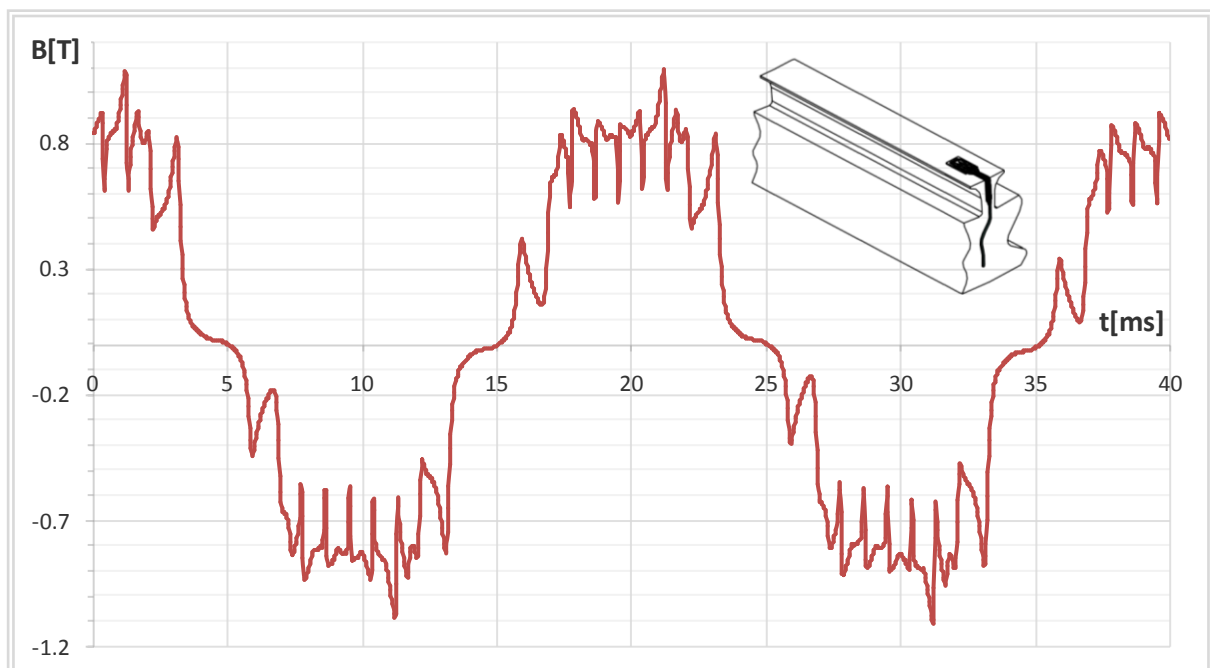
Na slici 6.71 može se uočiti da broj zavojica koji sudjeluju u kratkom spoju, uz jednaku struju kroz kratko spojene zavojice, određuje intenzitet poremećaja magnetskog polja. Također i otpor mjesta kratkog spoja određuje intenzitet poremećaja. Slika 6.72 prikazuje raspodjelu magnetske indukcije uz prisutne kratke spojeve 14 zavojica svitka namota armature pri različitim vrijednostima otpora mjesta kratkog spoja.



Slika 6.72. Raspodjela magnetske indukcije promatrana s polne papuče, uz prisutne kratke spojeve 14 zavojica svitka namota armature generatora u praznom hodu, za različite vrijednosti otpora mjesta kratkog spoja: Krivulja 1- za R_p , Krivulja 2 – za $10R_p$.

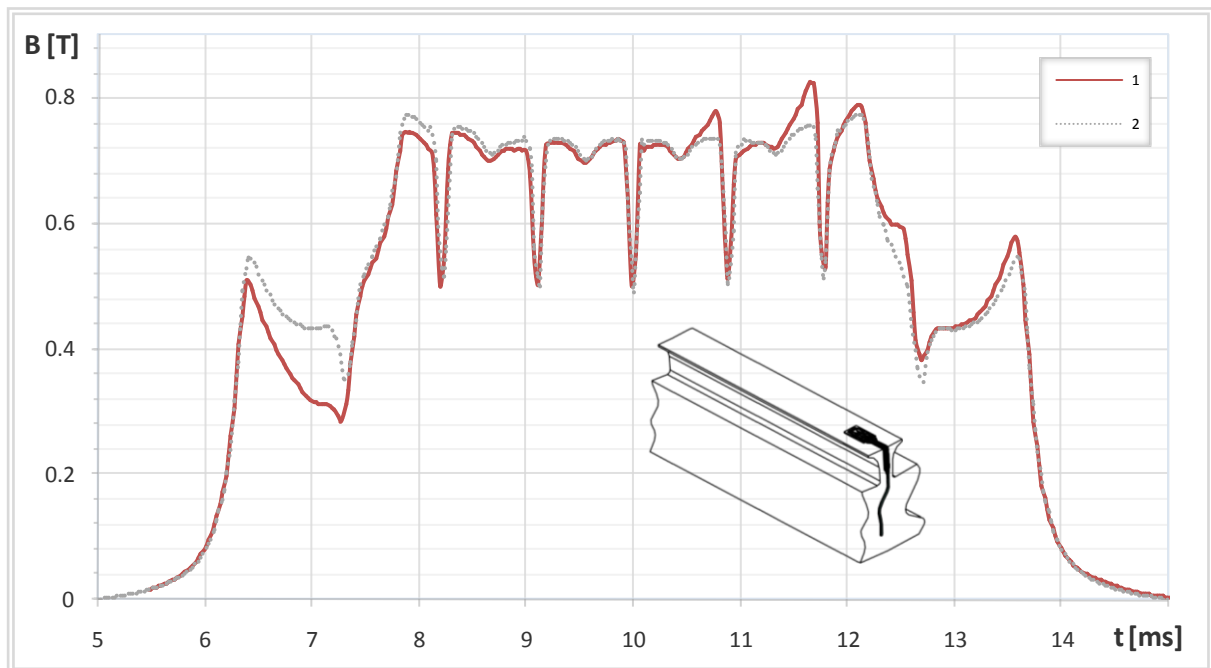
Iz rezultata prikazanih na slici 6.71 i 6.72 može se zaključiti da otpor mjesta kratkog spoja i broj zavoja koji sudjeluju u kratkom spoju, uzrokuju jednak poremećaj magnetskog polja u stroju. Kako su svi vodiči jedne strane svitka namota armature smješteni u isti utor, pri međuzavojnom kratkom spoju, promatranjem raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu nije moguće utvrditi koliko je zavoja u kratkom spoju. Razlog tome je što otpor mjesta kratkog spoja nije poznat. Tako je moguće da pri kratkom spoju jednog zavoja poremećaj magnetskog polja u stroju bude jednak kao i pri kratkom spoju više zavoja. U tom slučaju otpor mjesta kratkog spoja jednog zavoja manji je nego otpor mjesta kratkog spoja više zavoja i to u omjeru broja zavoja koji sudjeluju u kratkom spoju.

Izračunat je i valni oblik raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatran sa zuba statorskog paketa, uz prisutan kratki spoj 14 zavoja namota armature generatora u praznom hodu, a rezultati izračuna prikazani su na slici 6.73.



Slika 6.73. Raspodjela magnetske indukcije promatrana sa zuba statorskog paketa, uz prisutne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature generatora u praznom hodu, pri uzbuđnoj struji od 8,7 A.

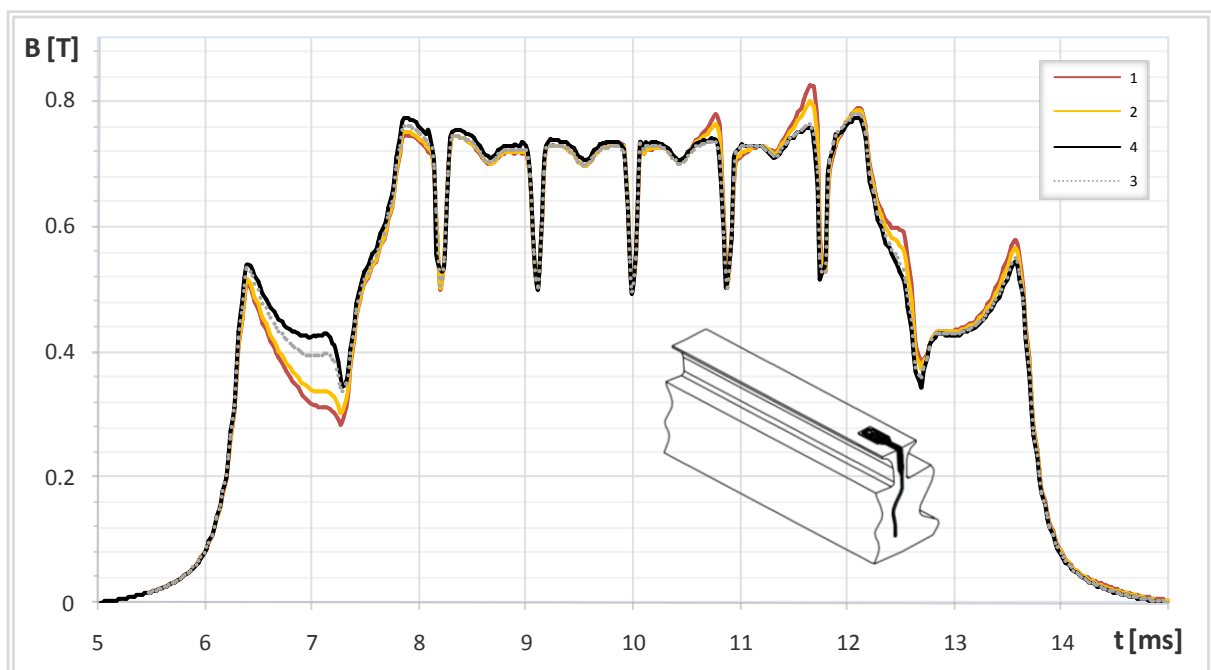
Mjesto promatranja magnetske indukcije u zračnom rasporu, sa zuba statorskog paketa, udaljeno je dva utorska koraka od zuba koji obuhvaća kratko spojeni zavoj, što je i prikazano na slici 6.69. Zakretanjem rotora struja u kratko spojenom zavoju mijenja iznos prema krivulji prikazanoj na slici 6.69 - 2. Kad struja u kratko spojenom zavoju postigne maksimalni iznos, poremećaj u magnetskom polju najviše je izražen. Poremećaj magnetskog polja ponavlja se za svaki polni korak. Usporedbom valih oblika magnetske indukcije u zračnom rasporu uz prisutne međuzavojne kratke spojeve i bez istih, moguće je uočiti da je poremećaj magnetskog polja prisutan na cijelom polnom koraku pri čemu je najviše izražen u trenutku kad struja u kratko spojenom zavoju postigne maksimalni iznos, što je i prikazano na slici 6.73.



Slika 6.74. Raspodjela magnetske indukcije promatrana sa zuba statorskog paketa, generatora u praznom hodu, pri uzbudnoj struji od 8,7 A:

Krivulja 1- uz prisutne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature,
Krivulja 2 – bez prisutnih međuzavojnih kratkih spojeva.

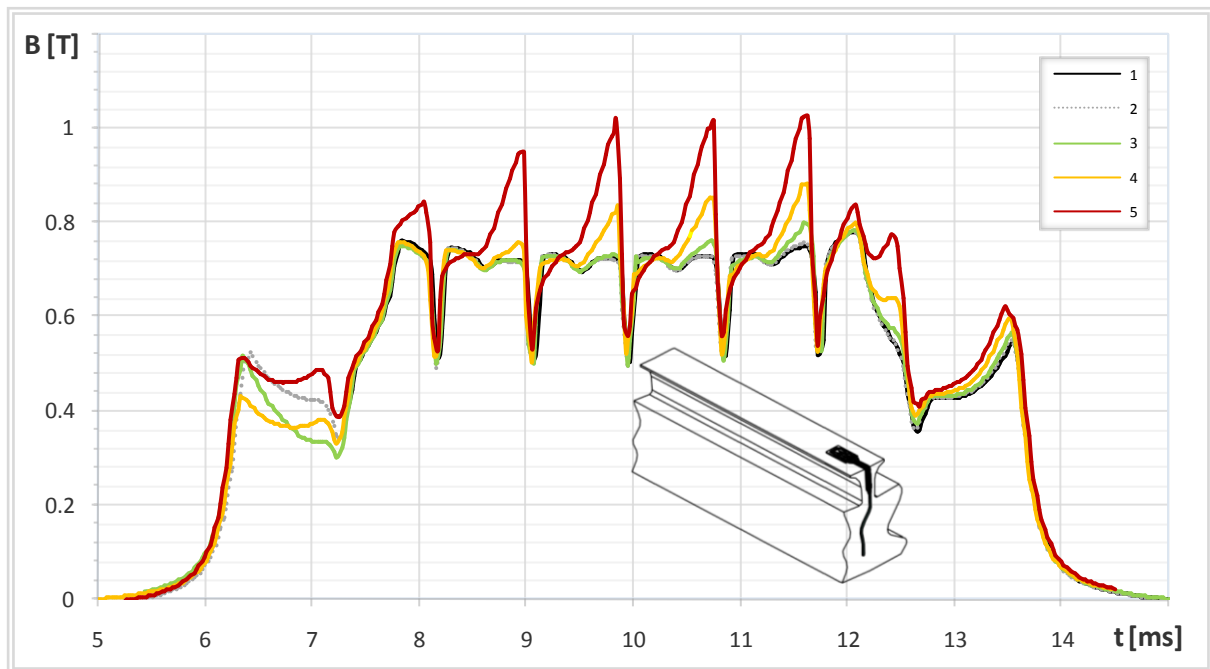
Raspodjela magnetske indukcije promatrana sa zuba statorskog paketa, izračunata pri 14, 10, 5 i 1 kratko spojeni zavoj, prikazana je na slici 6.75.



Slika 6.75. Raspodjela magnetske indukcije promatrana sa zuba statorskog paketa, uz prisutne kratke spojeve svitka namota armature generatora u praznom hodu:

Krivulja 1- 14 kratko spojenih zavoja, Krivulja 2 – 10 kratko spojenih zavoja,
Krivulja 3 – 5 kratko spojenih zavoja, Krivulja 4 – 1 kratko spojeni zavoj.

Slike 6.71 i 6.75 prikazuju raspodjelu magnetske indukcije u zračnom rasporu, uz prisutne kratke spojeve 14, 10, 5 i 1 zavoja svitka namota armature generatora koji radi u praznom hodu. S tim da je na slici 6.71 magnetska indukcija promatrana s polne papuče, a na slici 6.75 sa zuba statorskog paketa. Usporedbom intenziteta poremećaja izazvanog međuzavojnim kratkim spojevima svitka namota armature, može se zaključiti da je poremećaj magnetskog polja u stroju većeg intenziteta ukoliko se pojava promatra s polne papuče. Razlog tome je što je mjesto promatranja magnetske indukcije u zračnom rasporu sa zuba statorskog paketa udaljeno dva utorska koraka od svitka s međuzavojnim kratkim spojem. Ukoliko se mjesto promatranja magnetske indukcije približi mjestu kvara, tada će i intenzitet poremećaja biti veći, što je i prikazano na slici 6.76.



Slika 6.76. Raspodjela magnetske indukcije promatrana sa zuba statorskog paketa, uz prisutne kratke spojeve 10 zavoja svitka namota armature generatora u praznom hodu, pri uzbudnoj struji od 8,7 A:

Krivulja 1- mjesto promatranja udaljeno 9/2 utorskog koraka, Krivulja 2 – mjesto promatranja udaljeno 7/2 utorskog koraka, Krivulja 3 – mjesto promatranja udaljeno 5/2 utorskog koraka, Krivulja 4 – 1 mjesto promatranja udaljeno 3/2 utorskog koraka, Krivulja 5 - mjesto promatranja udaljeno 1/2 utorskog koraka.

Primicanjem mjesta promatranja mjestu kvara poremećaj postaje izraženiji što je i prikazano na slici 6.76. Iz tog proizlazi da je poremećaj uzrokovan međuzavojnim kratkim spojevima svitka namota armature na jednak način moguće detektirati promatrajući raspodjelu magnetske indukcije u zračnom rasporu ili sa zuba statorskog paketa ili s polne papuče.

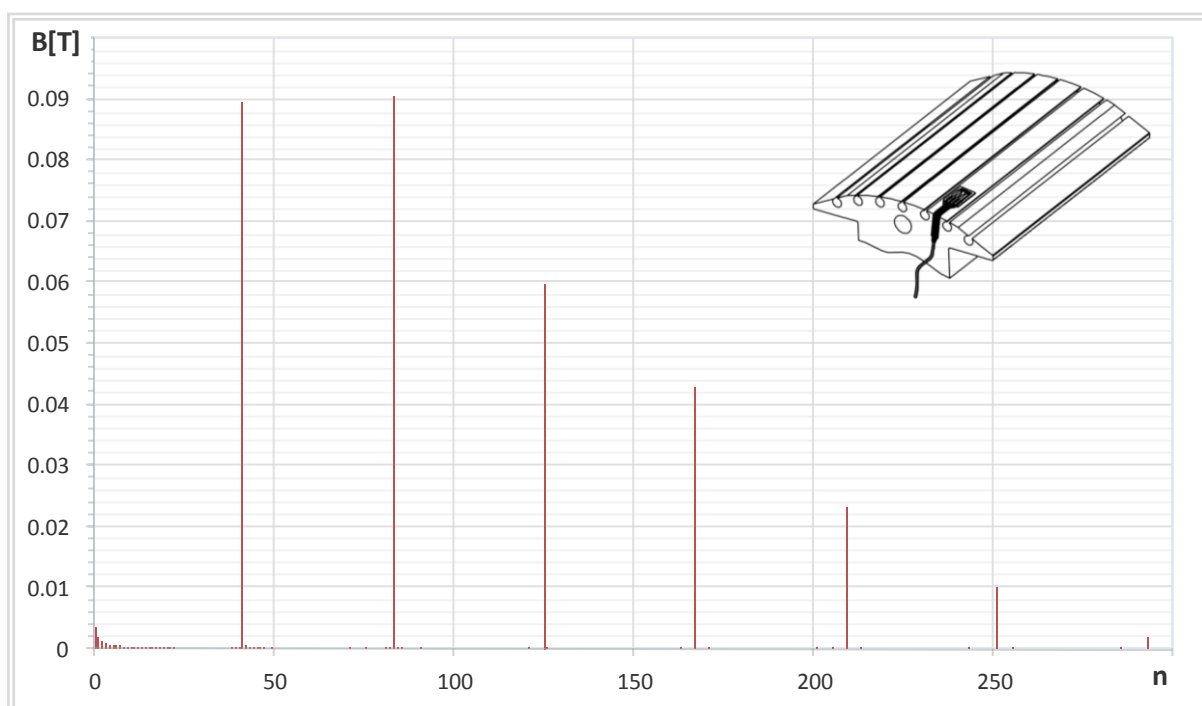
Iako je rezultatima izračuna pokazano da je detekciju međuzavojnih kratkih spojeva svitka namota armature moguće detektirati i sa zuba statorskog paketa i s polne papuče, postoje značajne razlike u primjeni ovih metoda. Za detekciju kvara na stroju s pole papuče rotora, dovoljno je na bilo koju polnu papuču ugraditi senzor za

mjerenje magnetske indukcije. Kako se rotor okreće, a tim i senzor za mjerenje, pri nailasku na kvar iz podataka mjerenja može se detektirati kvar.

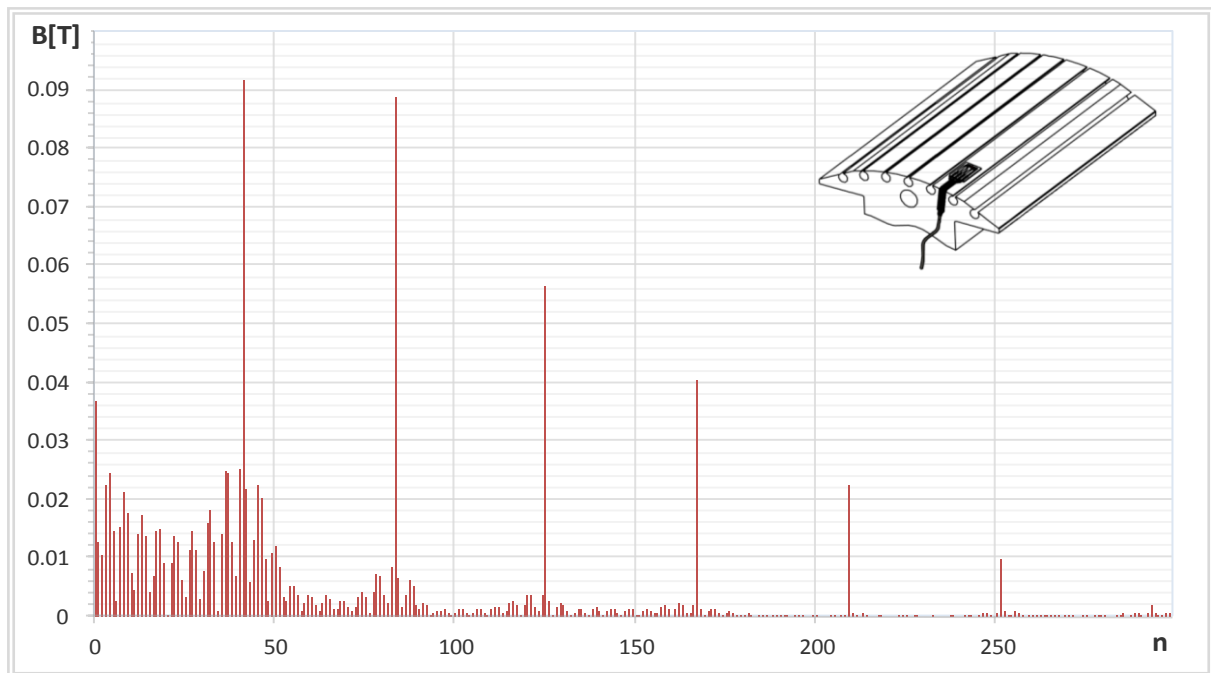
Međutim ukoliko se putem mjerenja magnetske indukcije, senzorom ugrađenim na zub statorskog paketa, želi detektirati kvar nastupaju poteškoće. Razlog tome je što uspješnost detekcije kvara ovisi o blizini mjernog senzora i mjesta nastanka kvara. Rotacijski strojevi imaju velik broj zubi, tako da je potrebno ugraditi velik broj senzora na međusobnoj udaljenosti koja osigurava detekciju kvara. Iz tog razloga detekcija međuzavojnih kratkih spojeva svitka namota armature, u ovom radu, vršit će se mjerenjem magnetske indukcije u zračnom rasporu s polne papuče. U nastavku ovog pod poglavlja vršit će se samo analiza podataka izračuna magnetske indukcije s polne papuče rotora.

Promjena harmoničkih članova u frekvencijskom sastavu analiziranog valnog oblika metoda je koja će se primijeniti i u analizi međuzavojnih kratkih spojeva svitka namota armature. Na osnovu promjena u harmoničkom sastavu analiziranog valnog oblika može se jednoznačno utvrditi da li je u nekom od svitaka armaturnog namota prisutan međuzavojni kratki spoj.

Na slici 6.77 i 6.78 prikazane su frekvencijske analize raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane s polne papuče, uz prisutne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature i bez prisutnosti istih. Prikazane frekvencijske analize računane su za vremenski period kojem odgovara jedan puni okret rotora.



Slika 6.77. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče generatora u praznom hodu, bez prisutnosti kratkih spojeva zavoja svitka namota armature.



Slika 6.78. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče generatora u praznom hodu, uz prisutne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature.

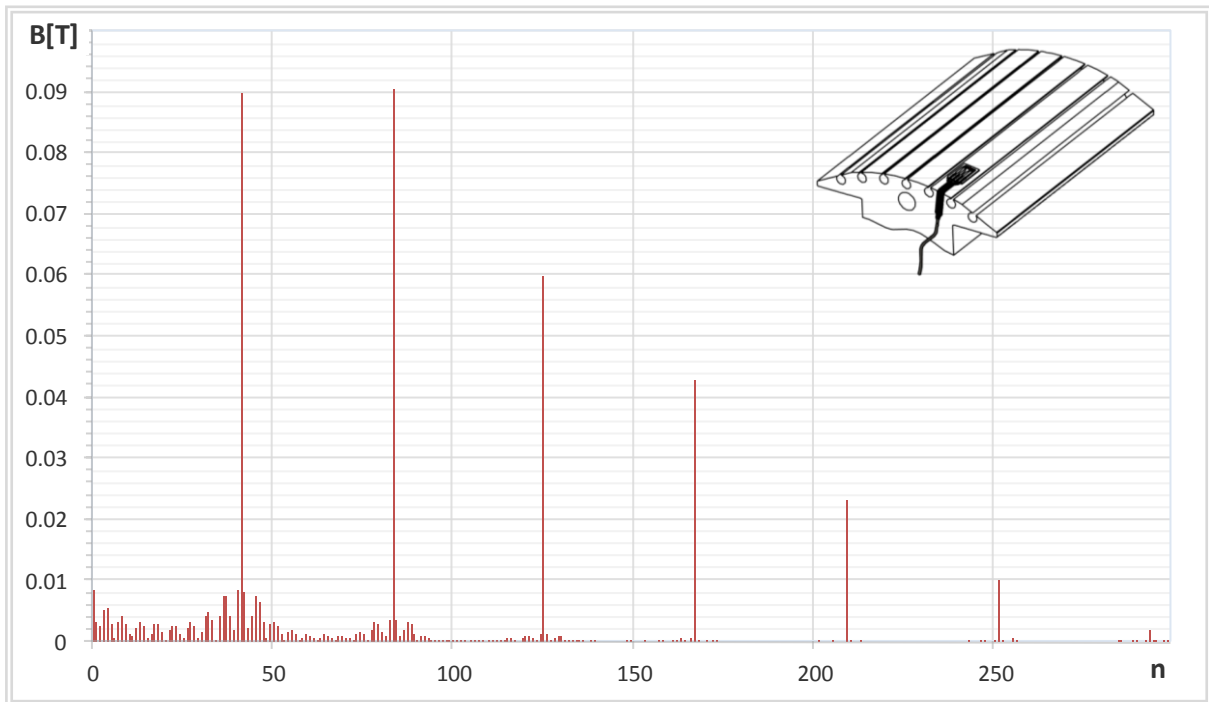
Kako se može uočiti na slici 6.78 pojavom kratkih spojeva svitka namota armature, u frekvencijskom sastavu pojavit će se čitav niz harmoničkih članova. Promjena amplituda harmoničkih članova, uzrokovana kratkim spojevima 14 zavoja svitka namota armature, prikazana je u tablici 6.38.

Tablica 6.38. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed kratkog spoja 14 zavoja svitka namota armature.

Harmonik broj	B [T]		Promjena amplitude ΔA (%)
	Bez kratkog spoja	Uz kratki spoj	
0	0,68249	0,66386	2,806
1	0,00346	0,03681	961,13
4	0,00089	0,02255	2423,81
5	0,00079	0,02444	2962,11
8	0,00062	0,01539	2423,42
9	0,00044	0,02114	4624,66
10	0,00039	0,01752	4283,86
14	0,00026	0,01743	6396,36
19	0,00021	0,01506	7055,75
32	0,00012	0,01591	13077,11
37	0,00013	0,02481	17859,61
38	0,00012	0,02458	18995,07
41	0,00045	0,02532	5517,01
42	0,08952	0,09193	2,681
43	0,00054	0,02188	3919,47
46	0,00021	0,02260	11000,08

Ukoliko se određeni harmonički član sa slike 6.78 podjeli sa istim harmoničkim članom sa slike 6.77, koji ima vrijednost približno nula, tada će rezultat biti izrazito velik. Upravo iz tog razloga promjene amplitude harmoničkih članova, uslijed pojave međuzavoynih kratkih spojeva namota, postižu vrijednosti prikazane u tablici 6.37.

Na jednak način načinjena je frekvencijska analiza valnog oblika magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane s polne papuče, uz prisutne kratke spojeve 5 zavoja svitka namota armature, koja je prikazana na slici 6.79.



Slika 6.79. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče generatora u praznom hodu, uz prisutne kratke spojeve 5 zavoja svitka namota armature.

Na slici 6.79, može se uočiti da će se pojavom kratkih spojeva svitka namota armature u frekvencijskom sastavu analiziranog valnog oblika magnetske indukcije pojaviti čitav niz harmoničkih članova.

Promjena amplituda harmoničkih članova, uzrokovana kratkim spojevima 5 zavoja svitka namota armature, prikazana je u tablici 6.39.

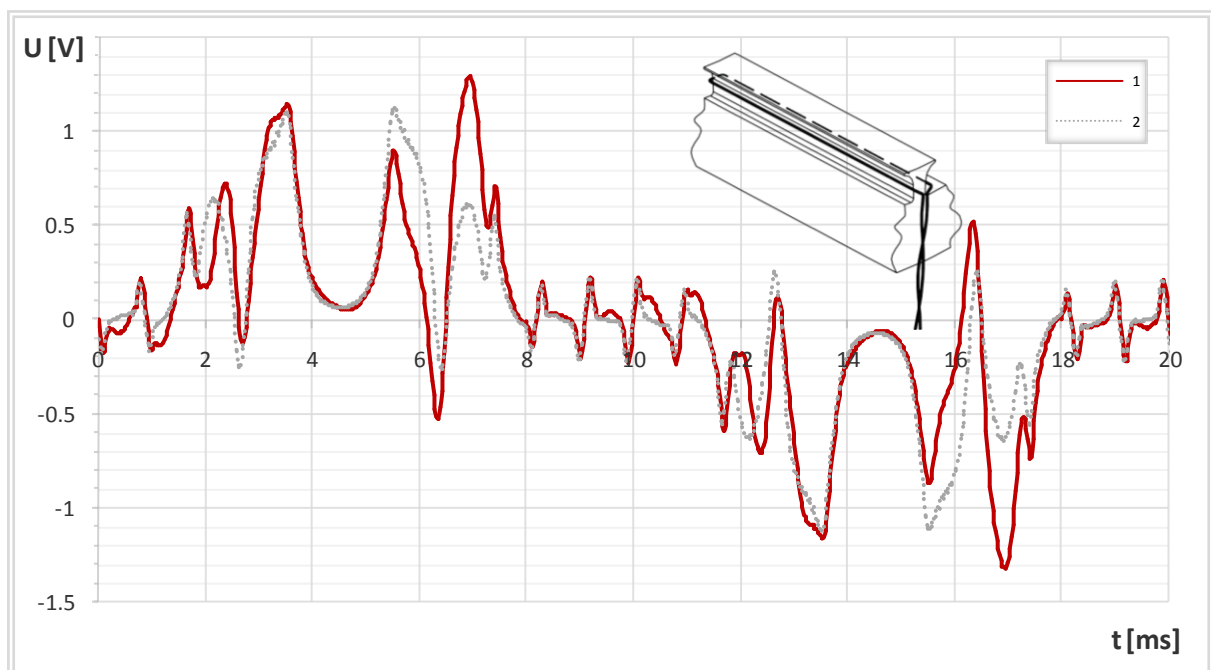
Tablica 6.39. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed kratkog spoja 5 zavoja svitka namota armature.

Harmonik broj	B [T]		Promjena amplitude ΔA (%)
	Bez kratkog spoja	Uz kratki spoj	
1	0,00346	0,00854	146,51
4	0,00089	0,00511	472,57
5	0,00079	0,00541	577,19
8	0,00062	0,00331	443,45
9	0,00044	0,00409	814,91
10	0,00039	0,00311	675,73
14	0,00026	0,00312	1064,82
19	0,00021	0,00282	1241,1
32	0,00012	0,00409	3294,63
37	0,00013	0,00759	5397,03
38	0,00012	0,00763	5832,73
41	0,00045	0,00853	1791,92
42	0,08952	0,08992	0,449
43	0,00054	0,00823	1412,22
46	0,00021	0,00764	3655,18

Promjena amplituda harmoničkih članova navedenih u tablici 6.39, može se upotrijebiti za detekciju kvara na stroju.

6.3.2. Utjecaj međuzavojnih kratkih spojeva svitka armaturnog namota na magnetski tok u zubu statorskog paketa

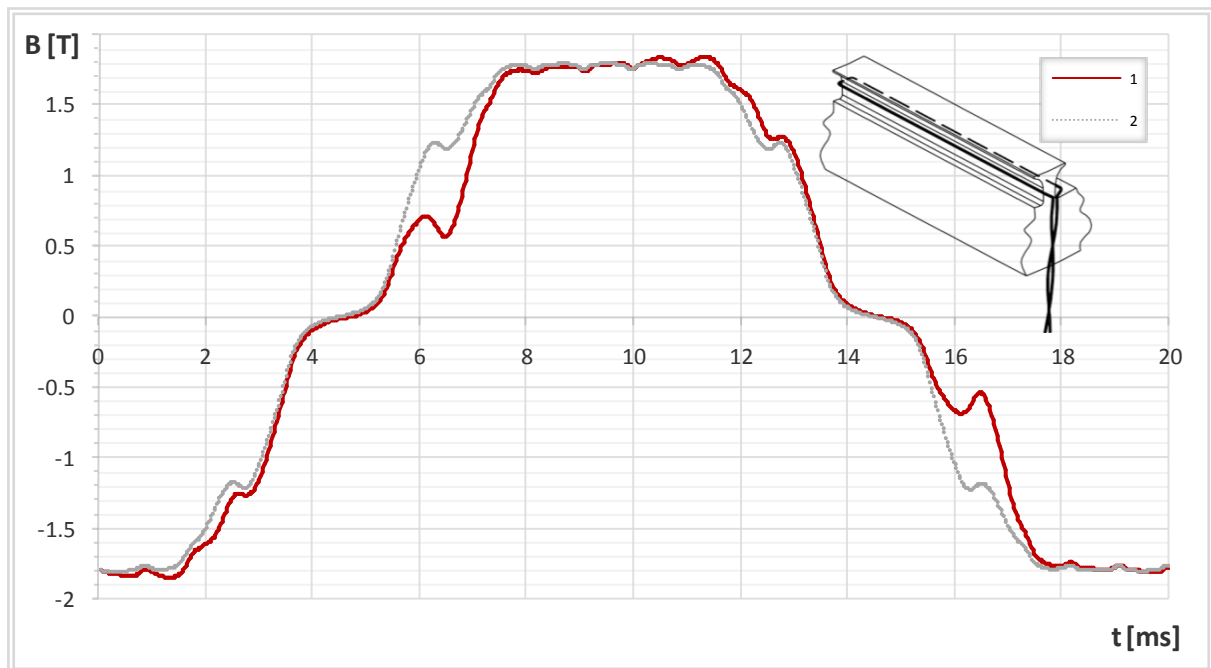
Kratke spojeve zavoja svitka namota armature moguće je detektirati mjernim svitkom, ugrađenim oko zuba statorskog paketa. Mjerni svitak na svojim krajevima daje napon koji se inducira u svitku uslijed promjene magnetskog toka u zubu. Napon koji se inducira u mjernom svitku, uz prisutne međuzavojne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature generatora koji radi u praznom hodu, prikazan je na slici 6.80 – krivulja 1. Inducirani napon računat je pri struji uzbude od 8,7 A, za jedan puni okret rotora, na mjestu ugradnje mjernog svitka Ms_1 , ugrađenog oko zuba statora, prema slici 5.10. Kratki spoj 14 zavoja svitka zaključen je s otporom tako da je struja kratko spojenog zavoja ograničena na nazivnu vrijednost.



*Slika 6.80. Napon induciran u mjernom svitku Ms_1 , za prazni hod generatora:
Krivulja 1 - uz prisutne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature,
Krivulja 2 – bez prisutnih kratkih spojeva namota armature.*

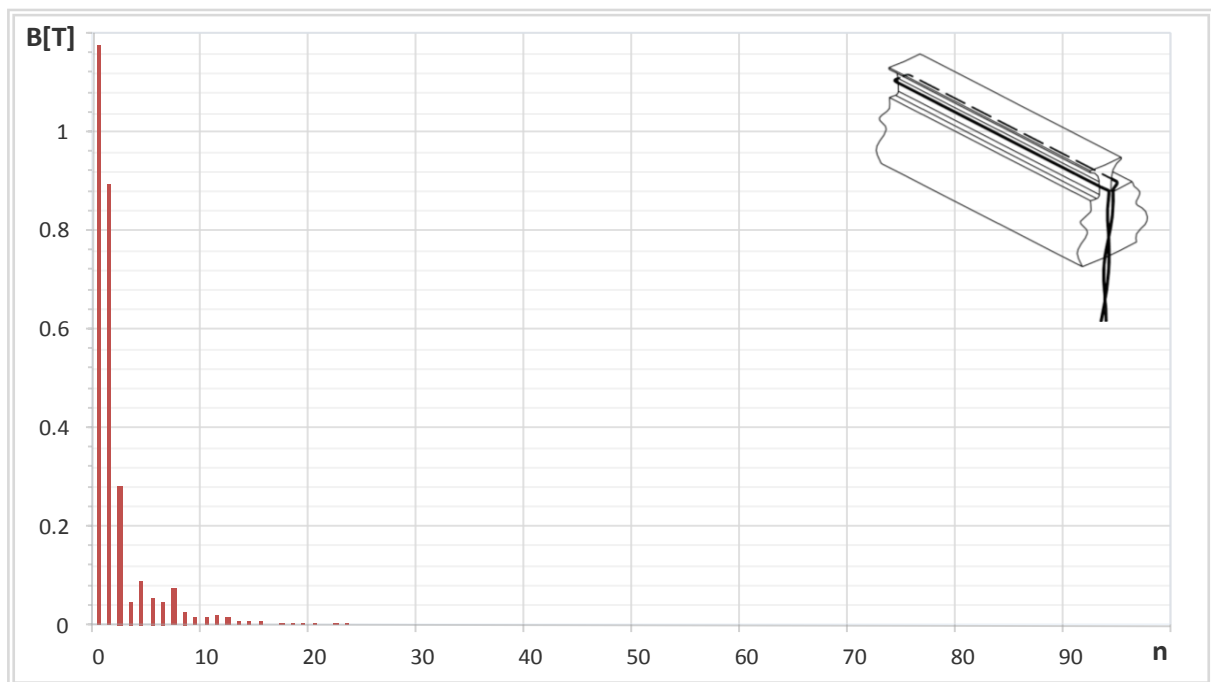
Kako se može uočiti na slici 6.80, međuzavojni kratki spojevi uzrokuju značajnu promjenu valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 . Zbog složenosti valnog oblika napona i znatnog broja harmoničkih članova, analizirat će se integrirani valni oblik napona koji je pogodniji za analizu utjecaja međuzavojnih kratkih spojeva, a prikazan je na slici 6.81 – krivulja 1.

Poremećaj magnetskog polja u zubu, uzrokovan međuzavojnim kratkim spojem, ponavlja se pri prolasku svakog pola, kako je prikazano na slici 6.80. Stoga je valni oblik dovoljno analizirati na polnom koraku τ_p .



Slika 6.81. Raspodjela magnetske indukcije dobivena integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 , za prazni hod generatora:
Krivulja 1 - uz prisutne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature,
Krivulja 2 – bez prisutnih kratkih spojeva namota armature.

Na slici 6.82 prikazana je frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije, dobivene integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 , uz prisutne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature. Prikazana frekvencijska analiza računata je za vremenski period kojem odgovara polni korak τ_p .



Slika 6.82. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije, dobivene integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 , uz prisutne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature.

Promjena amplituda izraženih harmoničkih članova, uzrokovana kratkim spojevima 14 zavoja svitka namota armature, prikazana je u tablici 6.40.

Tablica 6.40. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed kratkog spoja 14 zavoja svitka namota armature.

Harmonik broj	B [T]		Promjena amplitude ΔA (%)
	Bez kratkog spoja	Uz kratki spoj	
0	1,2216	1,1752	-3,79
1	0,8407	0,8954	6,51
2	0,3353	0,2838	-18,16
3	0,0783	0,0489	60,12
4	0,0471	0,0896	90,35
5	0,0075	0,0536	615,49
6	0,0602	0,0480	-25,48
7	0,0599	0,0726	21,31
8	0,0085	0,0282	232,94
11	0,0069	0,0190	174,12

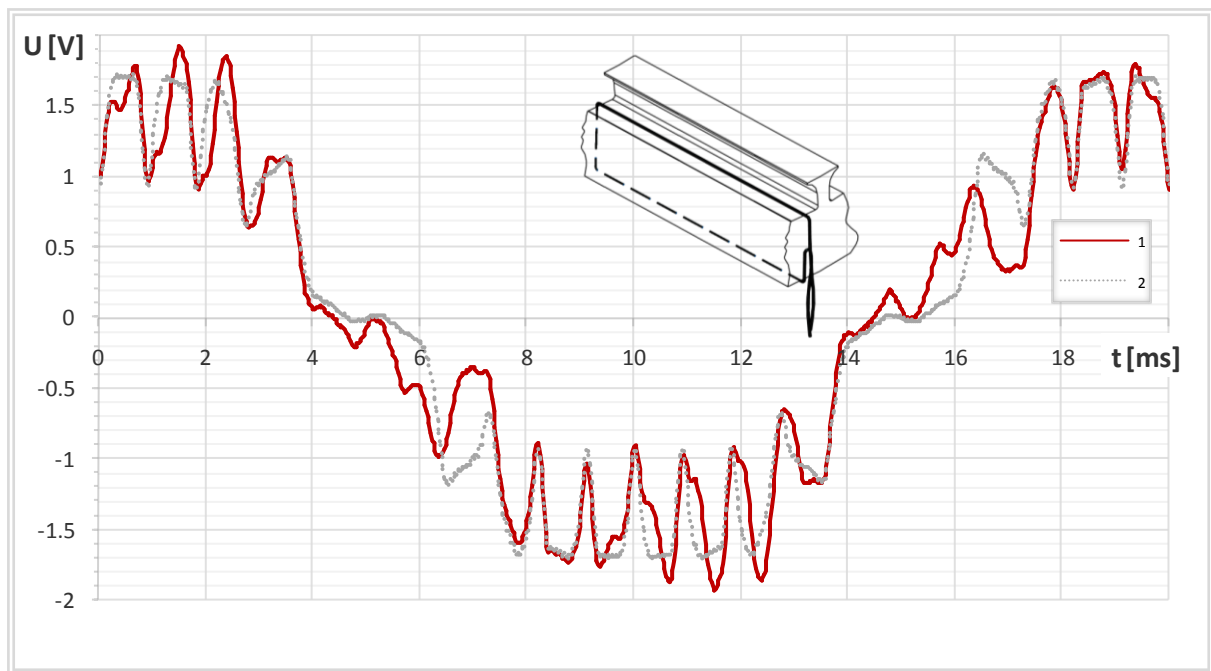
Iz podataka prikazanih u tablici 6.40 može se uočiti da se 3, 4, 5, 8 i 11 harmonički članovi značajno promijene pri nastanku međuzavojnog kratkog spoja u namotu armature. Za manji broj zavoja u kratkom spoju, nego je analizirano, nastali poremećaj magnetskog polja biti će manjeg intenziteta. Također udaljenost mjesta ugradnje mjernog svitka i mjesta nastanka kvara određuju intenzitet poremećaja u analiziranom valnom obliku. Tako da je za očekivati da će navedeni harmonički članovi imati manje promjene amplituda što manji broj zavoja sudjeluje u kratkom spoju, te što je veća udaljenost mjesta promatranja kvara i mjesta nastanka kvara.

Prikazani rezultati analize ukazuju da se međuzavojni kratki spojevi namota armature, mjerenjem promjene magnetskog toka u zubu, mjernim svitkom, mogu efikasno detektirati. Ipak detekcija međuzavojnih kratkih spojeva, mjernim svitkom ugrađenim oko zuba statorskog paketa, u ovom radu neće se upotrijebiti, iz razloga što bi za potpunu pokrivenost nastanka kvara u bilo kojem od 42 utora, bilo potrebno ugraditi velik broj mjernih svitaka.

Ukoliko mjerenje i detekcija međuzavojnih kratkih spojeva sa rotirajućeg dijela nije moguće, tada primjena mjernih svitaka, ima određene prednosti u odnosu na Hallove senzore zbog njihove niske cijene i jednostavne ugradnje u fazi ulaganja namota armature u tvornici.

6.3.3. Utjecaj međuzavojnih kratkih spojeva svitka armaturnog namota na magnetski tok u jarmu statora

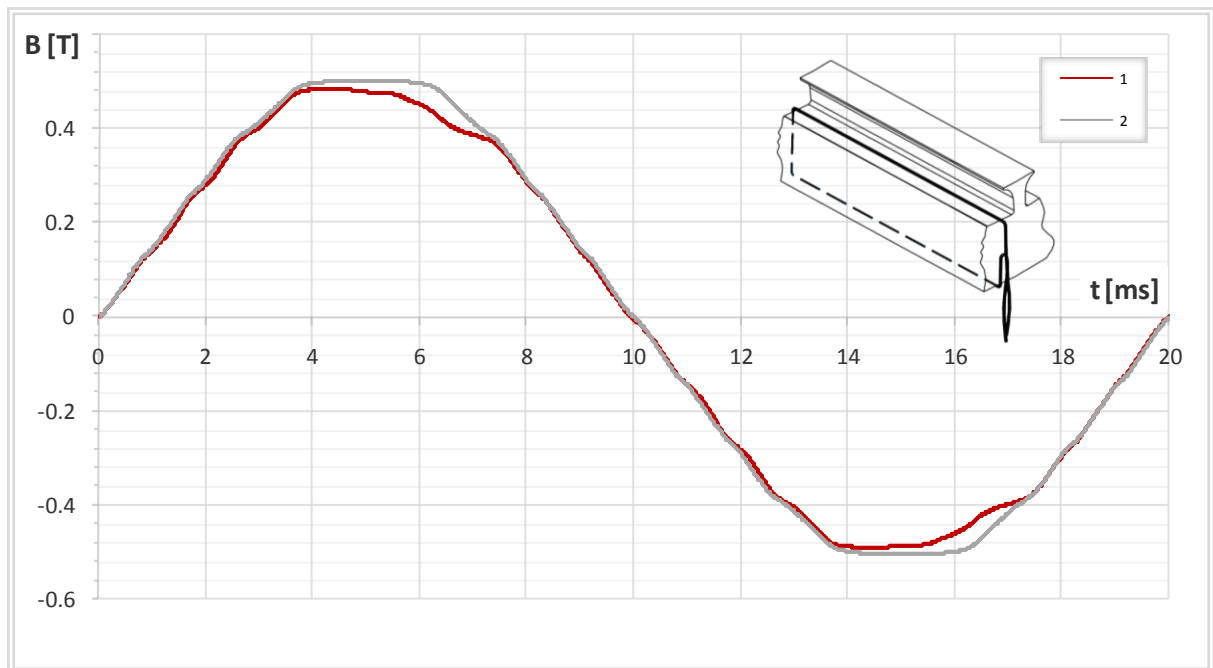
Kratke spojeve zavoja svitka namota armature moguće je detektirati mjernim svitkom, ugrađenim oko jarma statora. Mjerni svitak na svojim krajevima daje napon koji se inducira u svitku uslijed promjene magnetskog toka u jarmu statora. Napon koji se inducira u mjernom svitku, uz prisutne međuzavojne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature generatora koji radi u praznom hodu, prikazan je na slici 6.83 – krivulja 1. Inducirani napon računat je pri struji uzbude od 8,7 A, za jedan puni okret rotora, na mjestu ugradnje mjernog svitka Ms_3 , ugrađenog oko jarma statora, prema slici 5.10. Kratki spoj 14 zavoja svitka zaključen je s otporom tako da je struja kratko spojenog zavoja ograničena na nazivnu vrijednost.



*Slika 6.83. Napon induciran u mjernom svitku Ms_3 , za prazni hod generatora:
Krivulja 1 - uz prisutne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature,
Krivulja 2 – bez prisutnih kratkih spojeva namota armature.*

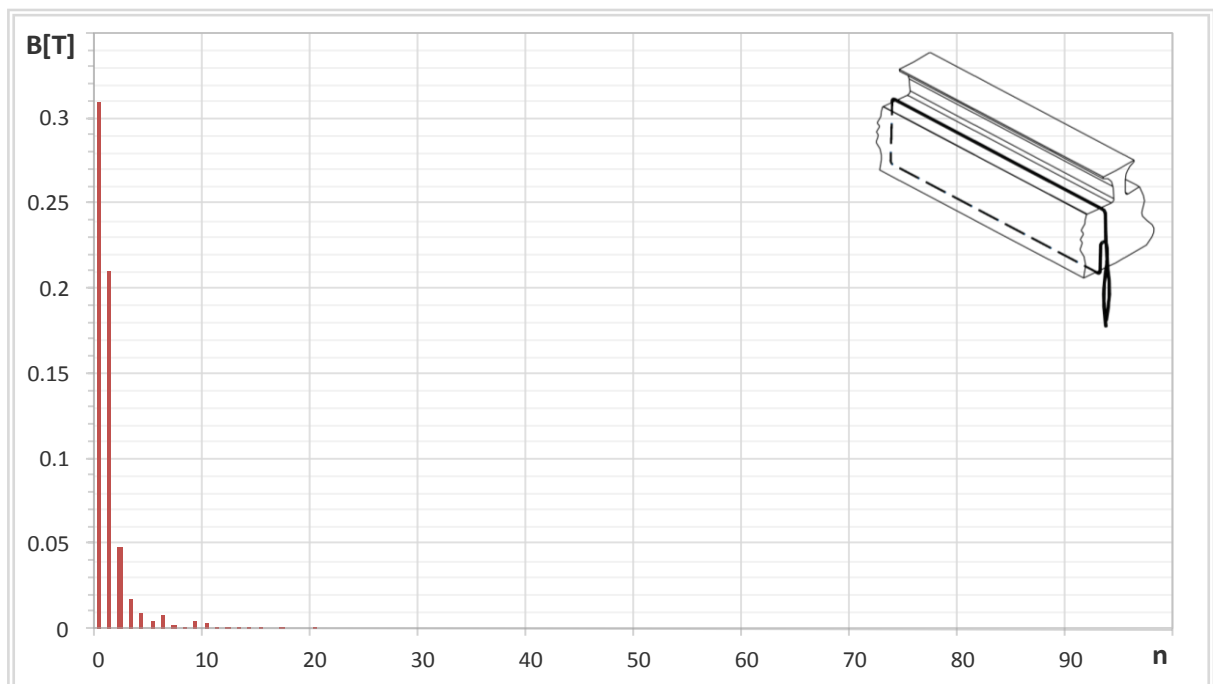
Kako se može uočiti na slici 6.83, valni oblik napona induciranog u mjernom svitku Ms_3 , osjetljiv je na promjene magnetskog polja u jarmu statora kojeg uzrokuju međuzavojni kratki spojevi. Zbog složenosti valnog oblika napona i znatnog broja harmoničkih članova, analizirat će se integrirani valni oblik napona koji je pogodniji za analizu utjecaja međuzavojnih kratkih spojeva, a prikazan je na slici 6.84 – krivulja 1.

Poremećaj magnetskog polja u jarmu statora, uzrokovan međuzavojnim kratkim spojem, ponavlja se pri prolasku svakog pola, kako je prikazano na slici 6.83. Stoga je valni oblik dovoljno analizirati na polnom koraku τ_p .



Slika 6.84. Raspodjela magnetske indukcije dobivena integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_3 , za prazni hod generatora:
Krivulja 1 - uz prisutne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature,
Krivulja 2 – bez prisutnih kratkih spojeva namota armature.

Na slici 6.85 prikazana je frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije, dobivene integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 , uz prisutne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature. Prikazana frekvencijska analiza računata je za vremenski period kojem odgovara polni korak τ_p .



Slika 6.85. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije, dobivene integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_3 , uz prisutne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature.

Promjena amplituda izraženih harmoničkih članova, uzrokovana kratkim spojevima 14 zavoja svitka namota armature, prikazana je u tablici 6.41.

Tablica 6.41. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed kratkog spoja 14 zavoja svitka namota armature.

Harmonik broj	B [T]		Promjena amplitude ΔA (%)
	Bez kratkog spoja	Uz kratki spoj	
0	0,3100	0,3251	-4,88
1	0,2108	0,2233	-5,93
2	0,0482	0,0465	3,61
3	0,0169	0,0124	36,07
4	0,0087	0,0123	-41,61
5	0,0047	0,0032	46,86
6	0,0078	0,0068	15,21
7	0,0023	0,0045	-94,04

Iz podataka prikazanih u tablici 6.41 može se uočiti da se amplitude harmoničkih članova promijene pri nastanku međuzavojnog kratkog spoja u namotu armature. Za očekivati je da će za navedene harmoničke članove promjena amplituda biti manja, što manji broj zavoja sudjeluje u kratkom spoju, te što je veća udaljenost mjesta ugradnje mjernog svitka i mjesta nastanka kvara.

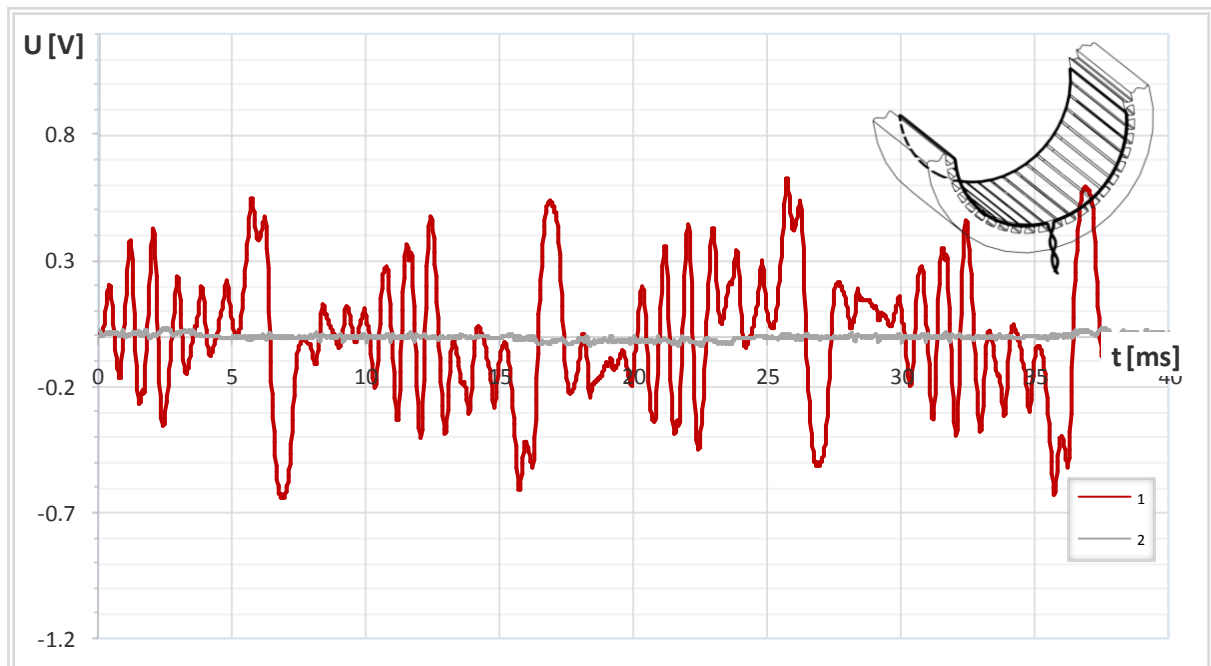
Analiza rezultata ukazuje da se međuzavojni kratki spojevi namota armature, mjerenjem promjene magnetskog toka u jarmu statora, mjernim svitkom, mogu efikasno detektirati. Ipak detekcija međuzavojnih kratkih spojeva, mjernim svitkom ugrađenim oko jarma statora, u ovom radu neće se upotrijebiti, iz razloga što bi za potpunu pokrivenost nastanka kvara u bilo kojem od 42 utora, bilo potrebno ugraditi velik broj mjernih svitaka.

Ukoliko mjerenje i detekcija međuzavojnih kratkih spojeva sa rotirajućeg dijela stroja nije moguće, tada primjena mjernih svitaka, ima određene prednosti u odnosu na Hallove senzore zbog njihove niske cijene i jednostavne ugradnje u fazi ulaganja namota armature u tvornici.

6.3.4. Utjecaj međuzavojnih kratkih spojeva svitka armaturnog namota na magnetski tok jarma statora računat na dvostrukom polnom koraku

Mjerni svitak M_{s7} ugrađen je kao na slici 6.62, pri čemu su vodiči mjernog svitka međusobno razmaknuti za dvostruki polni korak $2\tau_p$. U vodičima će se u simetričnom stanju stroja inducirati jednaki naponi, pa će na krajevima mjernog svitka biti približno jednak nuli. Ukoliko se na bilo koji način poremeti ravnoteža u stroju, odnosno pojavi nesimetrija kakva je prisutna pri pojavi međuzavojnih kratkih spojeva namota, inducirani naponi u vodičima mjernog svitka više neće biti jednaki. Pa će i na krajevima mjernog svitka biti prisutan napon.

Napon koji se inducira u mjernom svitku, uz prisutne međuzavojne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature generatora koji radi u praznom hodu, prikazan je na slici 6.86 – krivulja 1. Inducirani napon računat je pri struji uzbude od 8,7 A, za jedan puni okret rotora, na mjestu ugradnje mjernog svitka M_{s7} , ugrađenog prema slici 5.10. Kratki spoj 14 zavoja svitka zaključen je s otporom tako da je struja kratko spojenog zavoja ograničena na nazivnu vrijednost.

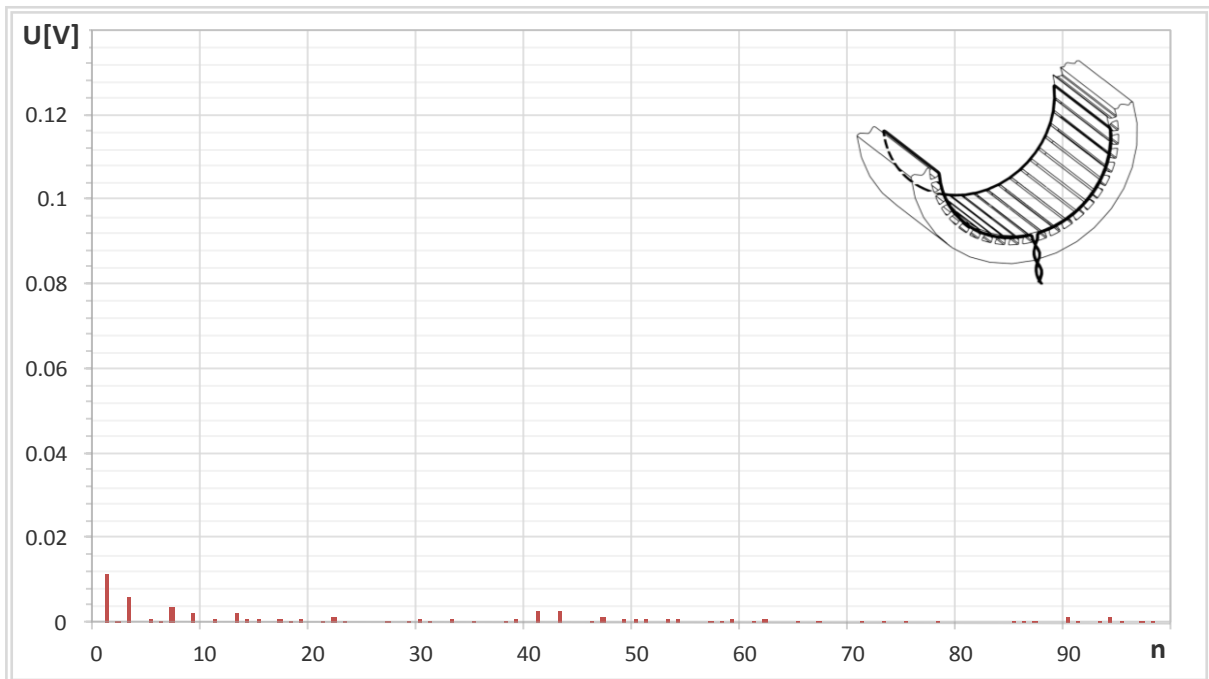


Slika 6.86. Napon induciran u mjernom svitku M_{s7} , za prazni hod generatora:
Krivulja 1 - uz prisutne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature,
Krivulja 2 – bez prisutnih kratkih spojeva namota armature.

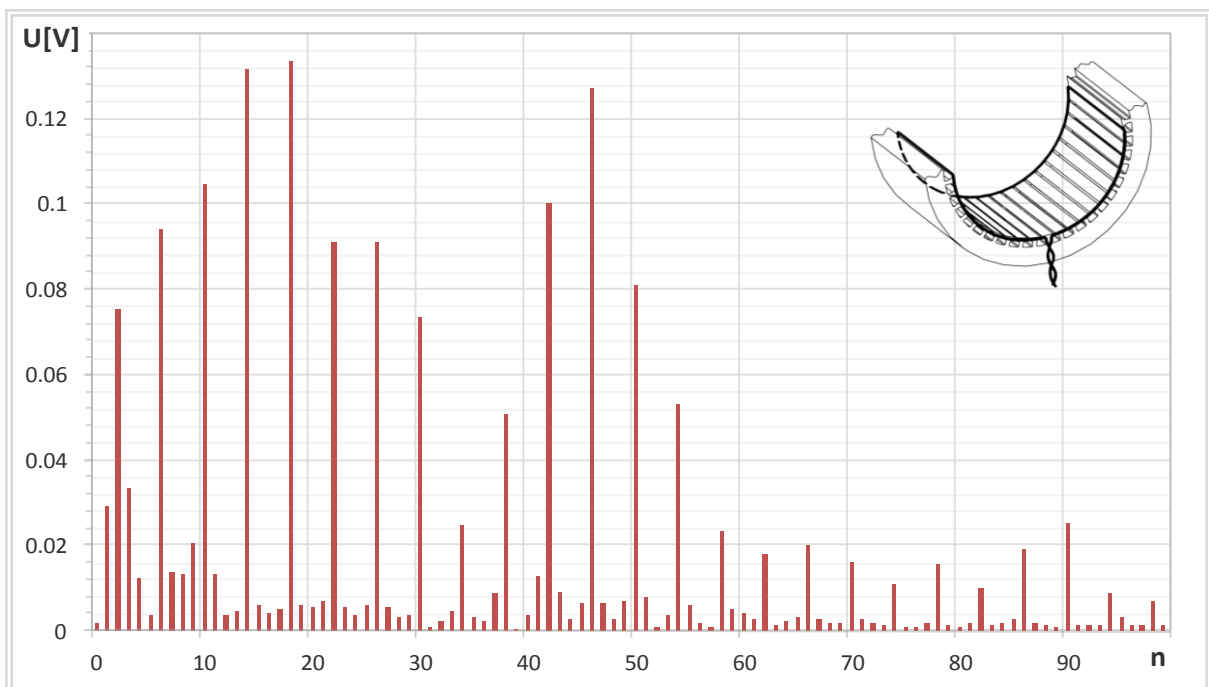
Kako se može uočiti na slici 6.86, valni oblik napona induciranog u mjernom svitku M_{s7} , osjetljiv je na promjene magnetskog polja u jarmu statora kojeg uzrokuju međuzavojni kratki spojevi.

Poremećaj magnetskog polja u jarmu statora uzrokovan međuzavojnim kratkim spojem, a promatran na dvostrukom polnom koraku, ponavlja se pri prolasku para polova, kako je prikazano na slici 6.86. Stoga je valni oblik potrebno analizirati na dvostrukom polnom koraku $2\tau_p$.

Na slici 6.87 i 6.88 prikazane su frekvencijske analize raspodjele magnetske indukcije dobivene integracijom napona inducirano u mjernom svitku Ms_7 , uz prisutne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature i bez prisutnosti istih. Prikazane frekvencijske analize računane su za vremenski period kojem odgovara jedan puni okret rotora.



Slika 6.87. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije dobiven integracijom napona inducirano u mjernom svitku Ms_7 , generatora u praznom hodu, bez prisutnosti kratkih spojeva zavoja svitka namota armature.



Slika 6.88. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije dobiven integracijom napona inducirano u mjernom svitku Ms_7 , generatora u praznom hodu, uz prisutne kratke spojeve zavoja svitka namota armature.

Kako se može uočiti na slici 6.88 pojavom kratkih spojeva svitka namota armature, u frekventijskom sastavu pojaviti će se čitav niz harmoničkih članova. Promjena amplituda izraženih harmoničkih članova, uzrokovana kratkim spojevima 14 zavoja svitka namota armature, prikazana je u tablici 6.42.

Tablica 6.42. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed kratkog spoja 14 zavoja svitka namota armature.

Harmonik broj	B [T]		Promjena amplitude ΔA (%)
	Bez kratkog spoja	Uz kratki spoj	
0	-0,00003	-0,00180	6079,45
1	0,01155	0,02926	153,38
2	0,00036	0,07563	20998,24
3	0,00600	0,03348	457,95
6	0,00026	0,09410	35464,45
9	0,00213	0,02041	857,58
10	0,00022	0,10494	46895,07
14	0,00088	0,13198	14880,19
18	0,00037	0,13345	35704,35
22	0,00147	0,09107	6079,06
26	0,00004	0,09111	235941,4
30	0,00070	0,07356	10466,96
34	0,00013	0,02478	19598,68
38	0,00028	0,05097	17840,36
42	0,00016	0,10024	63694,31
46	0,00049	0,12717	3447,83
50	0,00079	0,08117	10190,97

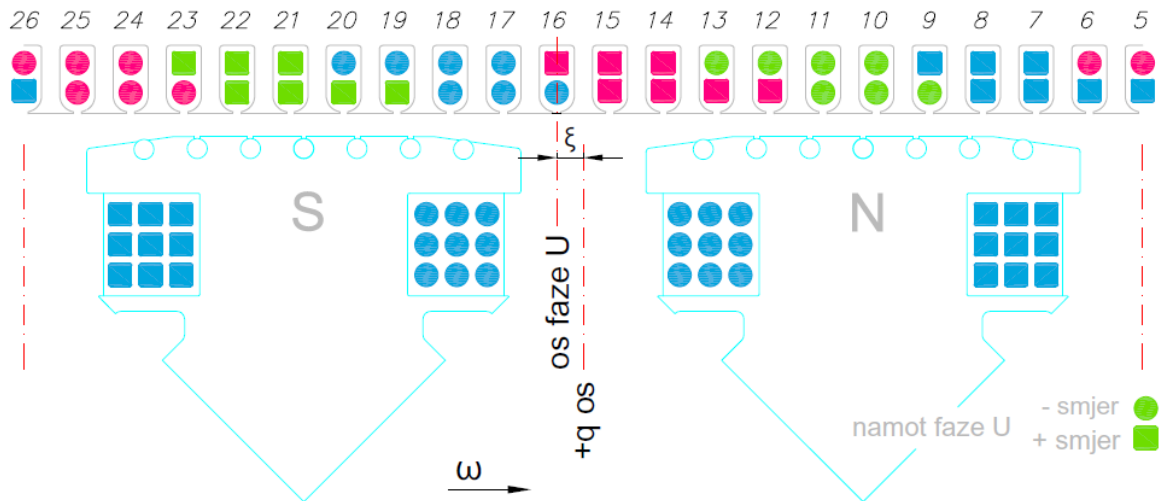
Ukoliko se određeni harmonički član sa slike 6.88 podjeli s istim harmoničkim članom sa slike 6.87, koji ima vrijednost približno nula, tada će rezultat biti izrazito velik. Upravo iz tog razloga promjene amplitude harmoničkih članova, uslijed pojave međuzavojnih kratkih spojeva namota, postižu vrijednosti prikazane u tablici 6.42.

Analiza rezultata ukazuje da se međuzavojni kratki spojevi namota armature, mjerenjem promjene magnetskog toka u jarmu statora mjernim svitkom, postavljenim na dvostrukom polnom koraku, mogu efikasno detektirati. Ipak ova metoda ima određena ograničenja koja su vezana za broj polova stroja koji se analizira. Naime za potpunu pokrivenost nastanka kvara u bilo kojem od utora, stroja sa p polova, bilo bi potrebno ugraditi potrebno ugraditi $p/2$ mjernih svitaka. U slučaju da stroj ima 4 pola, kao generator SGBP -160M-4M, potreban je samo jedan mjerni svitak.

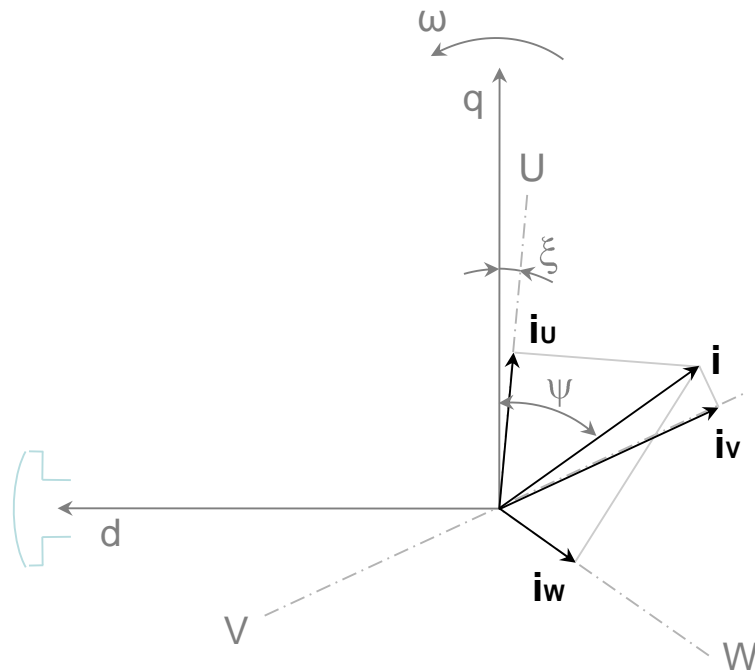
Pri detekciji međuzavojnih kratkih spojeva namota armature, primjena mjernih svitaka ugrađenih na dvostrukom polnom koraku, imaju prednost pred mjernim svitcima ugrađenim oko zuba i jarma statora. Razlog je taj što poremećaj magnetskog polja u stroju višestruko je puta izraženiji pri detekciji na dvostrukom polnom koraku, a potrebno je manji broj mjernih svitaka ugraditi u stroj za detekciju kvara.

6.4. Rezultati proračuna za opterećeno stanje

Proračun magnetskog polja za određenu radnu točku opterećenog generatora, metodom konačnih elemenata, iterativni je postupak približnog određivanja uzbudne struje i položaja rezultirajućeg vektora struje armature. Pri tome inducirani napon u_i i njegov fazni pomak u odnosu na struju φ_i po svom iznosu treba odgovarati stanju generatora u promatranoj radnoj točki [28]. Za prikazani položaj rotora na slici 6.89, u promatranom trenutku $t = 0$, rezultirajući vektor struje armature, te njegove projekcije na osi faza U, V i W, koje predstavljaju trenutne vrijednosti struja faza, prikazani su na slici 6.90.



Slika 6.89. Prikaz položaja rotora u trenutku $t = 0$ s referentnim smjerovima struja faza U, V i W.



Slika 6.90. Prikaz rezultirajućeg vektora struje armature te njegovih projekcija na osi faza U, V i W u trenutku $t = 0$.

Trenutne vrijednosti struja u vodičima faza su:

$$i_u = I_m \cos(\omega t - \psi - \xi) \quad (6.12)$$

$$i_v = I_m \cos\left(\omega t - \psi - \xi - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (6.13)$$

$$i_w = I_m \cos\left(\omega t - \psi - \xi - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (6.14)$$

gdje je I_m maksimalni iznos struje u vodiču armaturnog namota za promatranu radnu točku generatora, a ψ kut između rezultirajućeg vektora struje armaturne i q osi.

$$I_m = \frac{\sqrt{2} I_n}{a} i \quad (6.15)$$

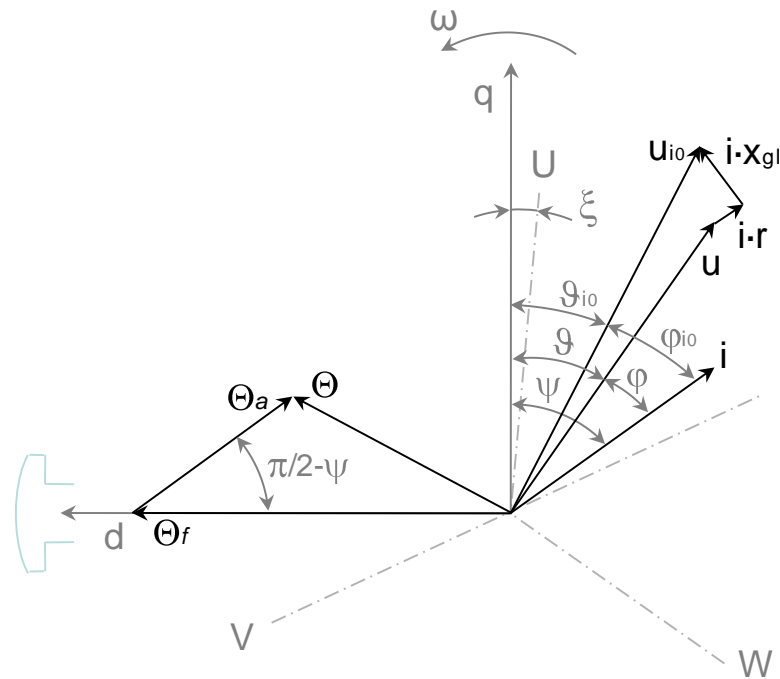
Inducirani napon u namotu armature izračunat metodom konačnih elemenata ne obuhvaća pad napona na radnom otporu r i rasipnoj reaktanciji x_{gl} glava statorskog namota. Zbog toga, za napon U na stezaljkama generatora i njegov fazni pomak φ prema struji armature treba odrediti vrijednosti induciranog napona U_{i0} i faznog pomaka φ_{i0} prema slici 6.91, koji se ujedno i računaju proračunom metodom konačnih elemenata.

$$u_{i0} = \sqrt{(u \cos \varphi + i r)^2 + (u \sin \varphi + i x_{gl})^2} \quad [\text{p. u.}] \quad (6.16)$$

$$\varphi_{i0} = \arctg\left(\frac{u \sin \varphi + i x_{gl}}{u \cos \varphi + i r}\right) \quad (6.17)$$

$$U_{i0} = u_{i0} U_n \quad [\text{V}] \quad (6.18)$$

Relativne vrijednosti radnog otpora r i reaktancije x_{gl} određuju se klasičnim elektromagnetskim proračunom. Proračun uzbude za određenu radnu točku opterećenog generatora je iterativni postupak, u kojem se promjenama vrijednosti uzbudne struje i struja u fazama armaturnog namota dobivaju tražene vrijednosti induciranog napona U_{i0} i faznog kuta φ_{i0} . Inducirani napon generatora je složena funkcija uzbudne struje I_f i kuta ψ , od kojih svaki utječe istovremeno na njegov iznos U_i i fazni pomak φ_i . Promjenom uzbudne struje mijenja se iznos osnovnog harmonika uzbudnog protjecanja θ_f , a promjenom kuta ψ mijenja se položaj osnovnog harmonika armaturnog protjecanja armature θ_a . O rezultatnom protjecanju θ koje je vektorski zbroj protjecanja θ_f i θ_a , ovise iznos i fazni pomak induciranog napona.



Slika 6.91. Vektorsko fazorski dijagram za određenu radnu točku opterećenog generatora u trenutku $t = 0$.

Približne vrijednosti uzbudne struje i i kuta ψ za prvu iteraciju mogu se procijeniti, ili se koriste rezultati klasičnog elektromagnetskog proračuna. Parametri stroja korišteni u prvoj iteraciji proračuna, a dobiveni klasičnim elektromagnetskim proračunom, prikazani su u tablici 6.43.

Tablica 6.43. Parametri stroja korišteni u prvoj iteraciji proračuna.

Parametar	Iznos
X_{gl}	0,0267 [p.u.]
r	0,0413 [p.u.]
I_{fn}	24,47 [A]
ψ	53,05 [°]

Za zadane vrijednosti uzbudne struje i i kuta ψ (iz tablice 6.43), kao rezultat proračuna MKE dobiva se valni oblik induciranog napona iz kojeg se računaju Fourierovi koeficijenti a_1 i b_1 osnovnog harmonika.

$$u_i = a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t = U_i \cos(\omega t - \vartheta) \quad [\text{V}] \quad (6.19)$$

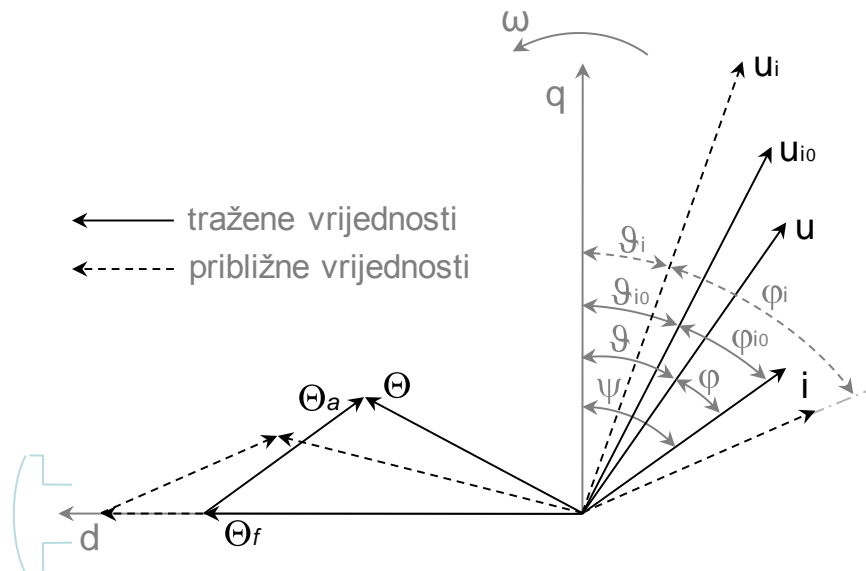
$$U_i = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad [\text{V}] \quad (6.20)$$

$$\vartheta_i = \arctg\left(\frac{a_1}{b_1}\right) \quad [\text{rad}] \quad (6.21)$$

gdje je U_i amplituda osnovnog harmonika induciranog napona, a ϑ_i fazni pomak osnovnog harmonika induciranog napona u odnosu na q os. Fazni pomak induciranog napona i struje armature računa se:

$$\varphi_i = \psi - \vartheta_i \quad [\text{rad}] \quad (6.22)$$

Slika 6.92 prikazuje vektorsko fazorski dijagram za trenutak $t = 0$ s približnim i traženim veličinama u iterativnom postupku.



Slika 6.92. Vektorsko fazorski dijagram za određenu radnu točku opterećenog generatora u trenutku $t = 0$ s približnim i traženim vrijednostima.

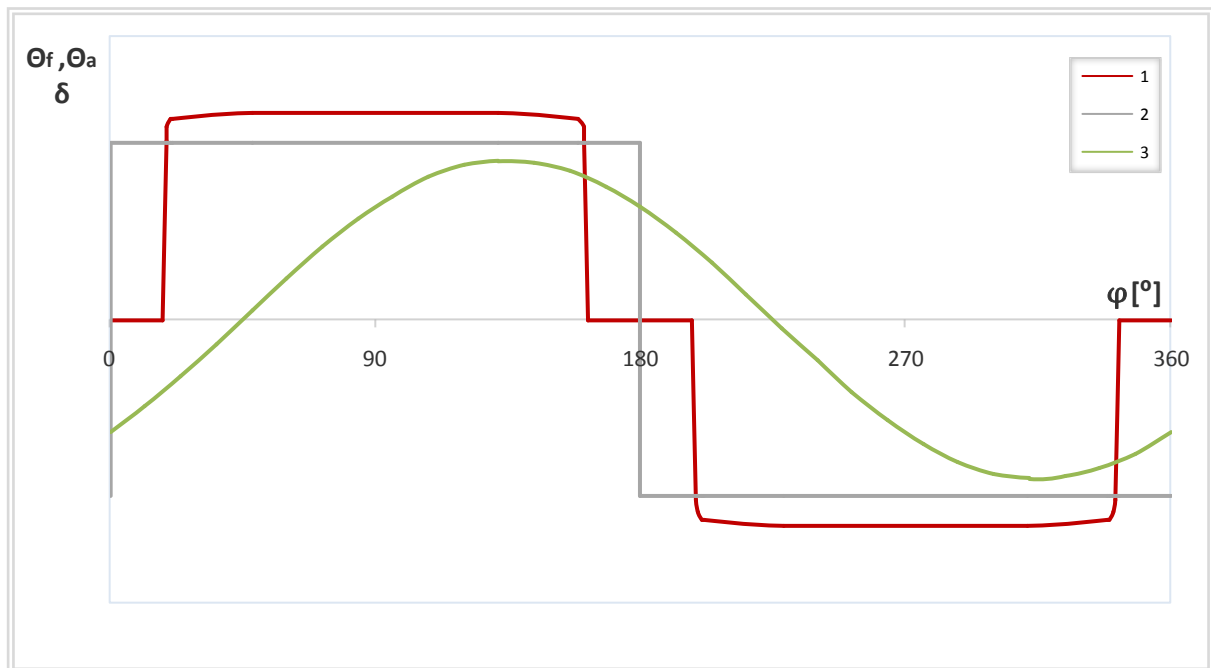
Odstupanja iznosa induciranog napona U_i i njegovog faznog pomaka φ_i od traženih vrijednosti, dobivenih u n -toj iteraciji su:

$$\Delta u_i = \frac{U_i - U_{i0}}{U_{i0}} 100 \quad [\%] \quad (6.23)$$

$$\Delta \varphi_i = \frac{\varphi_i - \varphi_{i0}}{\varphi_{i0}} 100 \quad [\%] \quad (6.24)$$

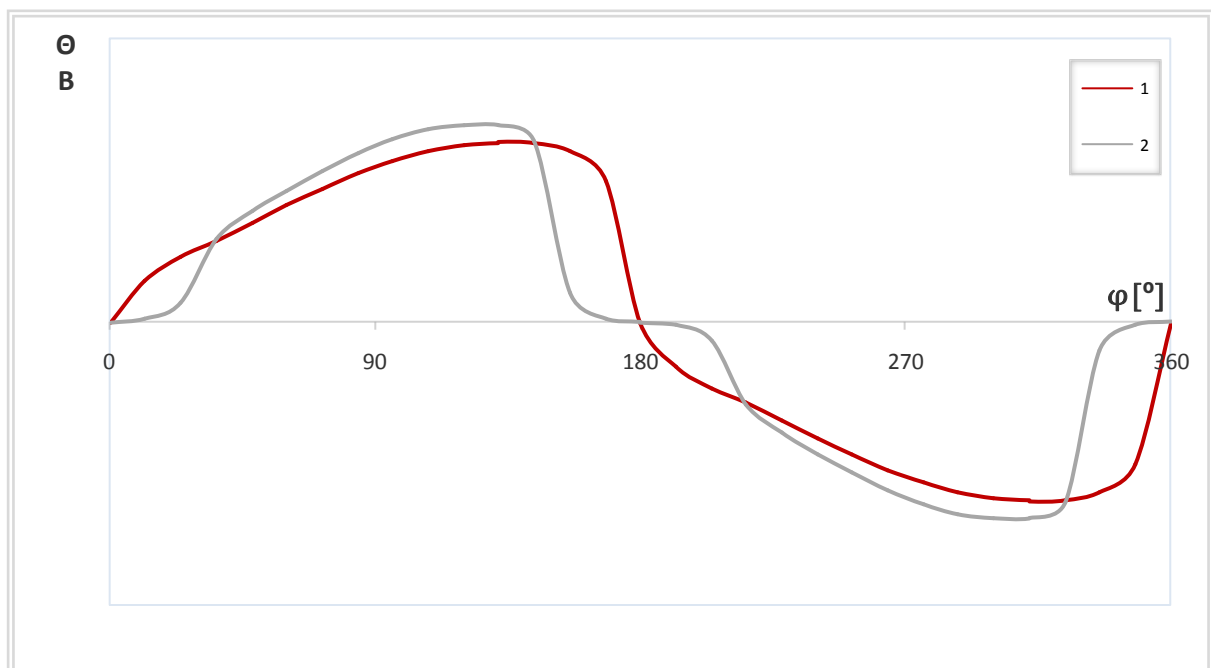
Ako su odstupanja veća od željenih (npr. $\Delta u_i \leq 0,1 \%$ i $\Delta \varphi_i \leq 0,3 \%$) iterativni postupak se ponavlja sve dok se ne postignu odstupanja u skladu sa zadanim. Vrijednosti uzbudne struje, kuta opterećenja i dugih veličina iz zadnje iteracije smatraju se rezultatima proračuna MKE za određenu radnu točku opterećenog generatora.

Kod opterećenog generatora struje u armaturnom namotu stvaraju armaturno protjecanje koje zajedno s uzbuđenim protjecanjem i vodljivošću zračnog raspore, određuje valni oblik magnetske indukcije u zračnom rasporu generatora. Slika 6.93 prikazuje uzbuđeno protjecanje, armaturno protjecanje i vodljivost zračnog raspore za opterećeni generator (na slici 6.93, 6.94 i 6.95 zanemaruje se utjecaj prigušnog namota te utjecaj utorskih harmonika).



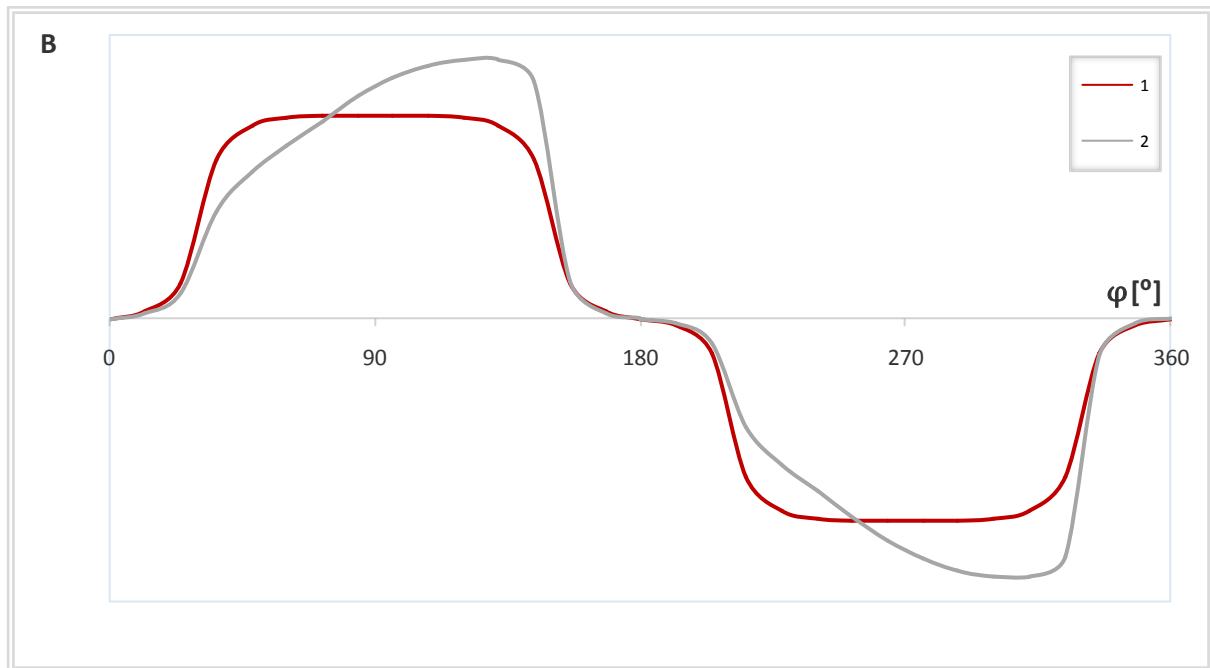
Slika 6.93. Valni oblici veličina koje određuju magnetsku indukciju u zračnom rasporu opterećenog generatora: Krivulja 1 – vodljivost zračnog raspora, Krivulja 2 – uzbudno protjecanje, Krivulja 3 – armaturno protjecanje.

Uzбудno i armaturno protjecanje međusobno su fazno pomaknuti za kut $\pi/2 - \psi$. Zbrajanjem uzbudnog i armaturnog protjecanja dobiva se rezultantno protjecanje prikazano na slici 6.94 – krivulja 1. Umnožak rezultantnog protjecanja i vodljivosti zračnog raspora daje magnetsku indukciju u zračnom rasporu generatora, koja je prikazana na slici 6.94 – krivulja 2.



Slika 6.94. Valni oblik: Krivulja 1 – rezultantno protjecanje, Krivulja 2 - magnetske indukcije u zračnom rasporu opterećenog generatora.

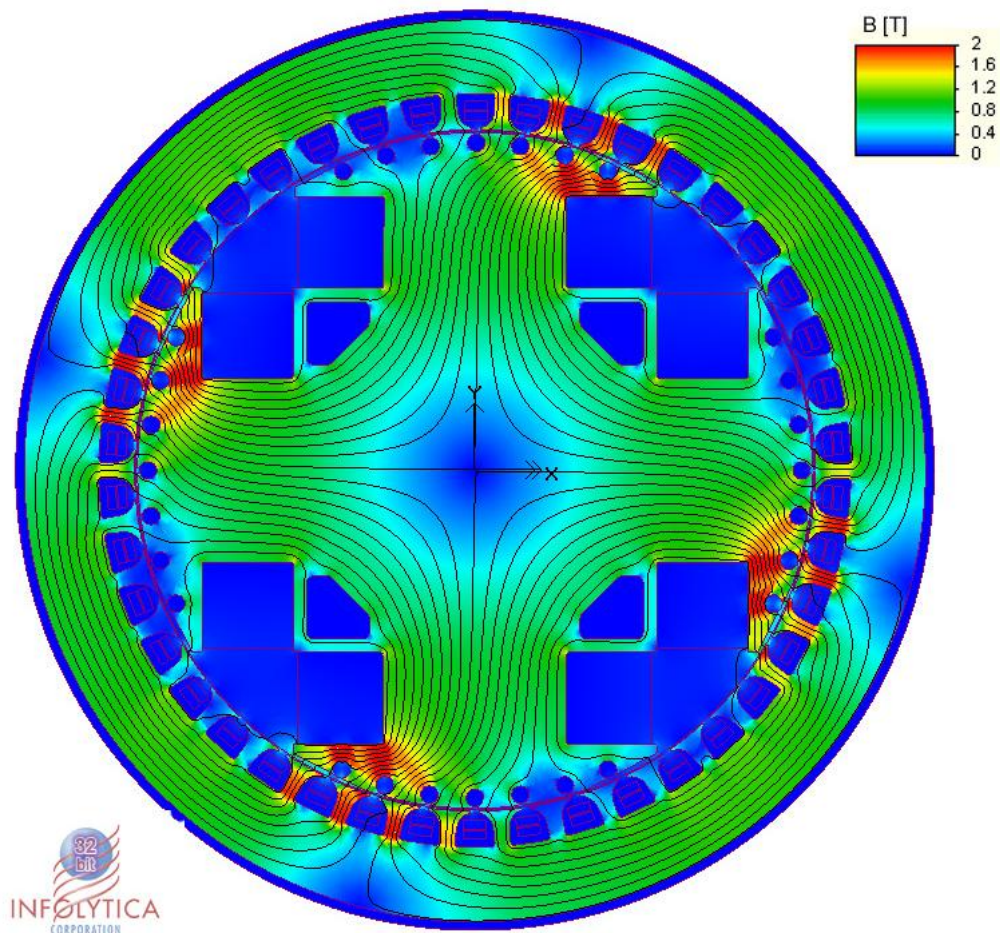
Armaturno protjecanje značajno utječe na oblik magnetske indukcije u zračnom rasporu. Tako valni oblik magnetske indukcije u zračnom rasporu generatora u praznom hodu, kojeg određuju protjecanje rotora i vodljivost zračnog raspora, uslijed armaturnog protjecanja poprima prikazani oblik. Slika 6.95 prikazuje magnetsku indukciju u zračnom rasporu za generator u praznom hodu i opterećenom stanju.



Slika 6.95. Valni oblik magnetske indukcije u zračnom rasporu generatora:
Krivulja 1 – za prazni hod, Krivulja 2 – opterećeno stanje.

Programom MagNet, u iterativnom postupku za određene vrijednosti struje uzbude i kuta ψ , izračunate su vrijednosti induciranog napona U_i i njegovog faznog pomaka φ_i unutar zadanih granica odstupanja. Izračunati parametri stroja primijeniti će se pri računanju magnetskih prilika u opterećenom stroju.

Slika 6.96 prikazuje raspodjelu magnetskog polja u modelu generatora SGBP 160 M-4M za prikazani položaj rotora opterećenog generatora, dobivenu programom MagNet. Struja uzbude pri računanju postavljena je na 18 A.

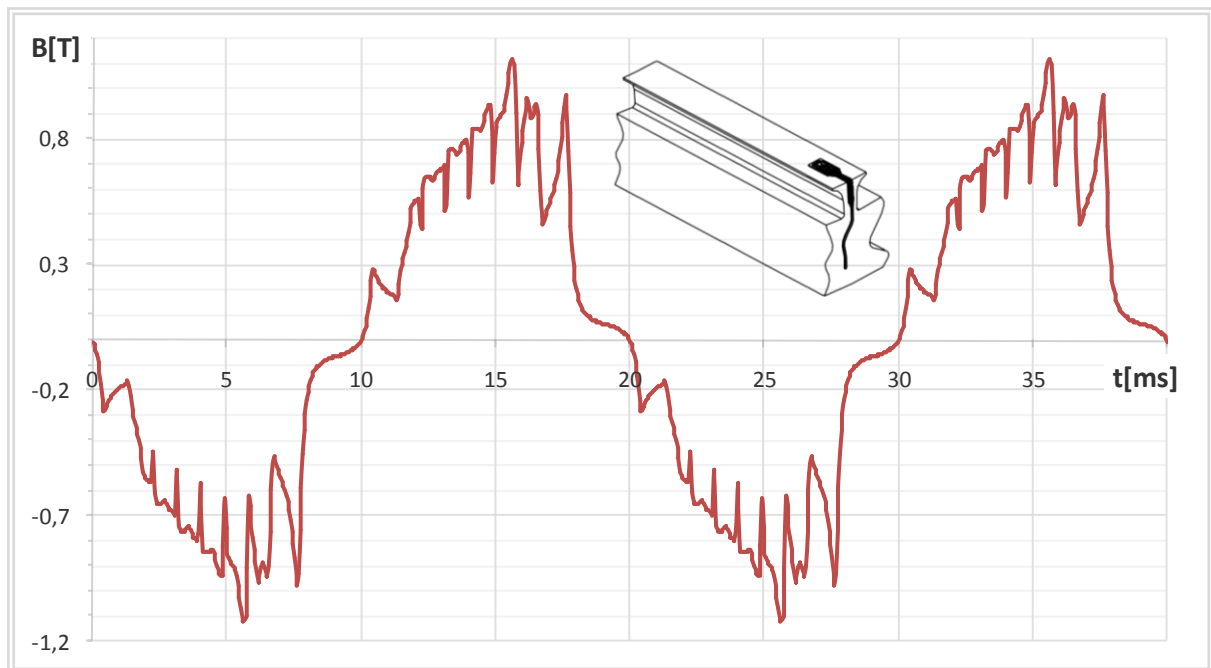


Slika 6.96. Raspodjela magnetskog polja u modelu opterećenog generatora SGBP 160 M-4M.

Na slici 6.96 dijelovi modela različitih su boja kako bi se vizualno mogla promatrati raspodjela gustoće magnetskih silnica na modelu. Boje se kreću od plave koja predstavlja magnetsku indukciju iznosa 0 T, do crvene koja predstavlja magnetsku indukciju iznosa 2 T.

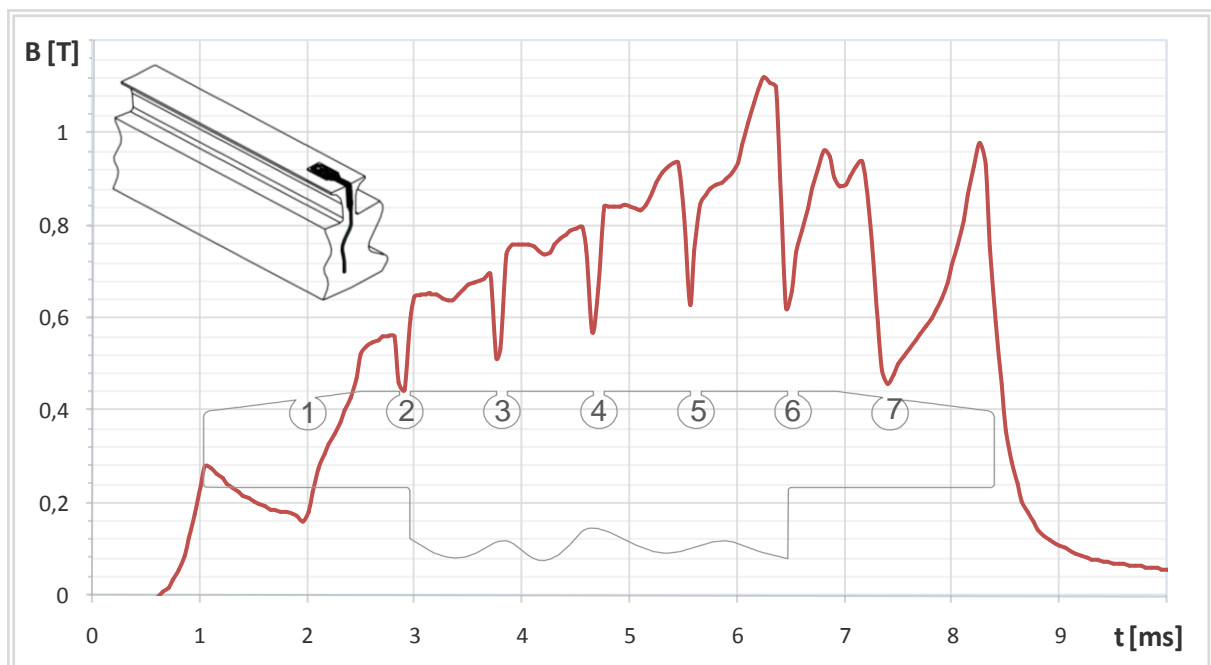
Na samom modelu moguće je uočiti da je za opterećeni generator jedna strana polne papuče više zasićena magnetskim silnicama, što je direktna posljedica reakcije armaturnog namota. Tako se maksimum valnog oblika magnetske indukcije u zračnom rasporu generatora, a promatran na polnom koraku, pomiče od simetrale polne papuče prema mjestu veće gustoće magnetskih silnica u polnoj papučici, što je i prikazano na slikama 6.94 i 6.95.

Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatranu sa zuba statorskog paketa za opterećeni generator izračunata je programom MagNet i prikazana na slici 6.97. Prikazana raspodjela magnetske indukcije računata je pri struji uzbude od 24 A, za jedan puni okret rotora na mjestu Hallovo senzora ugrađenog na zub statorskog paketa prema slici 5.11.



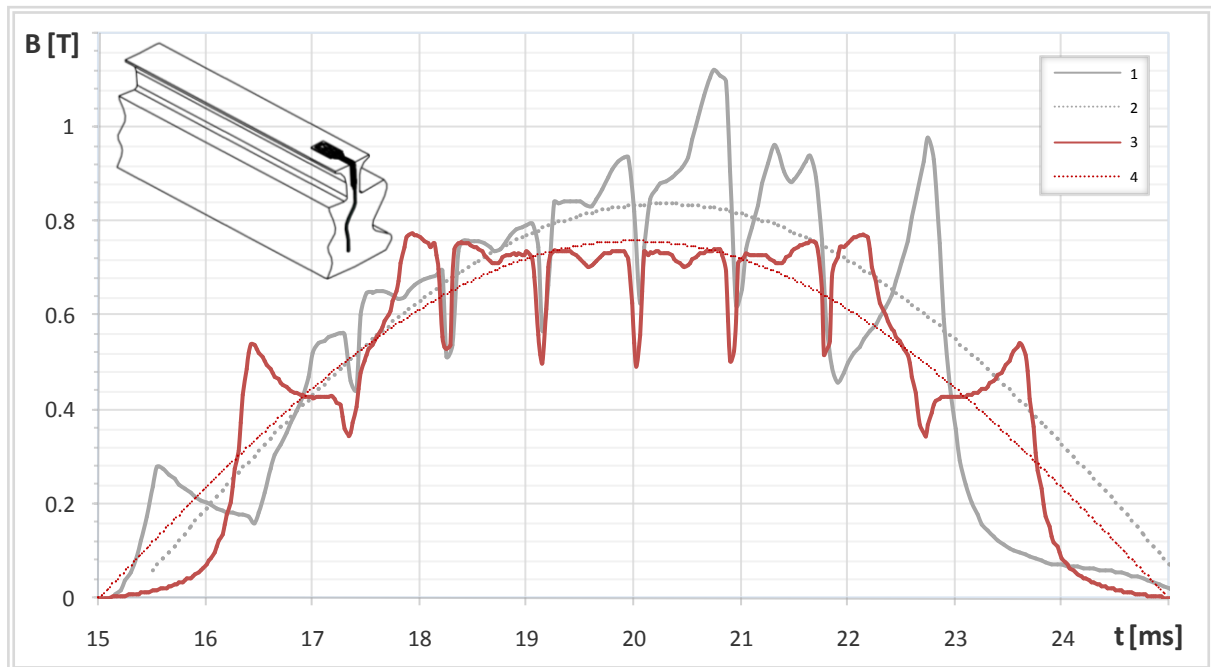
Slika 6.97. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana sa zuba statorskog paketa za opterećeni generator pri uzbudnoj struji od 24 A.

Na prikazanom valnom obliku magnetske indukcije može se uočiti da su lokalizirani propadi uzrokovani poluotvorenim utorima prigušnog namota i prigušnim namotom prisutni međutim različiti od onih u praznom hodu generatora. Slika 6.98 prikazuje raspodjelu magnetske indukcije pod polom, zajedno s konstrukcijskim izmjerama pola.



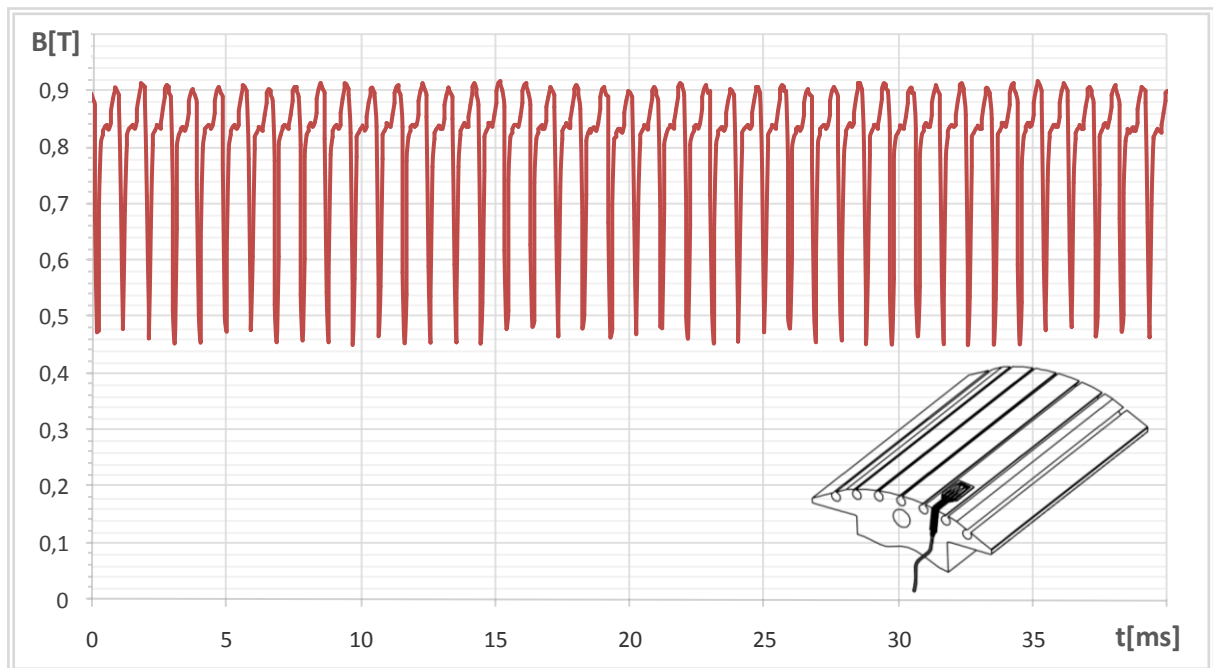
Slika 6.98. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana sa zuba statorskog paketa za nazivno opterećeni generator, prikazana zajedno s konstrukcijskim izmjerama pola rotora.

Na slici 6.98 može se uočiti da prostorni raspored štapova prigušnog namota u polnoj papuči određuje lokalizirana smanjenja magnetske indukcije označene brojevima 1 do 7 i kod opterećenog generatora. Također je moguće uočiti da se osnovni harmonik valnog oblika magnetske indukcije fazno pomiče uslijed armaturnog protjecanja. Slika 6.99 prikazuje valne oblike magnetske indukcije te njihove osnovne harmoničkih članove za nazivno opterećen generator, te generator u praznom hodu.



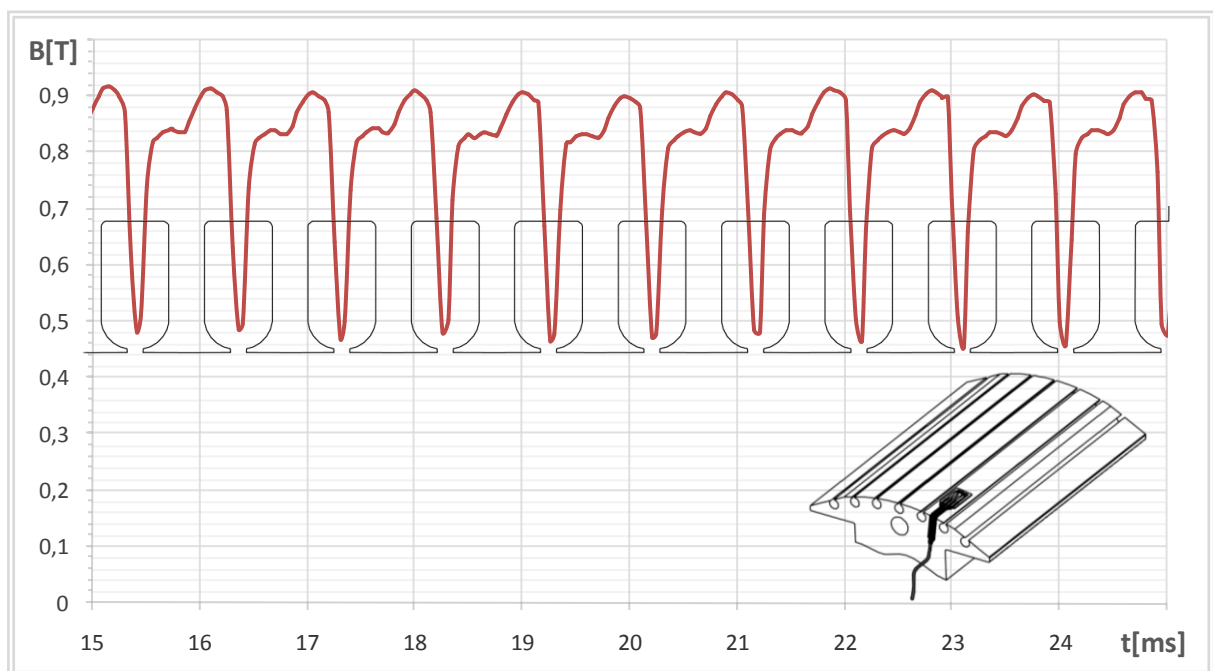
Slika 6.99. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana sa zuba statorskog paketa: Krivulja 1 - za nazivno opterećeni generator, Krivulja 2 – osnovni harmonički član magnetske indukcije za nazivno opterećeni generator, Krivulja 3 – za generator u praznom hodu, Krivulja 4 - osnovni harmonički član magnetske indukcije za nazivno opterećeni generator.

Za opterećeni generator izračunati i prikazati će se valni oblici na mjestima ugradnje svih senzora ugrađenih na mjernom objektu. Započeti će se s valnim oblikom raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane s polne papuče, za jedan puni okret rotora koju prikazuje slika 6.100.



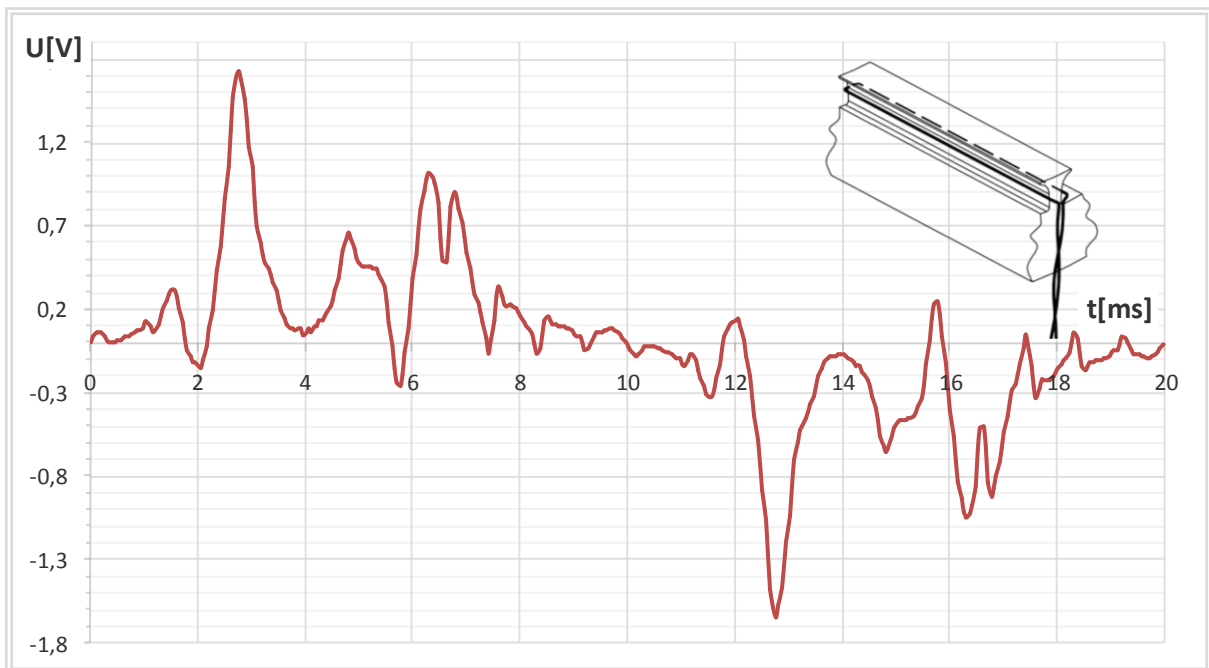
Slika 6.100. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče za nazivno opterećeni generator.

Detaljnija analiza raspodjele magnetske indukcije prikazane na slici 6.100 i povezivanje njenog oblika s konstrukcijskim izmjerama statorskog paketa, omogućena je na slici 6.101.



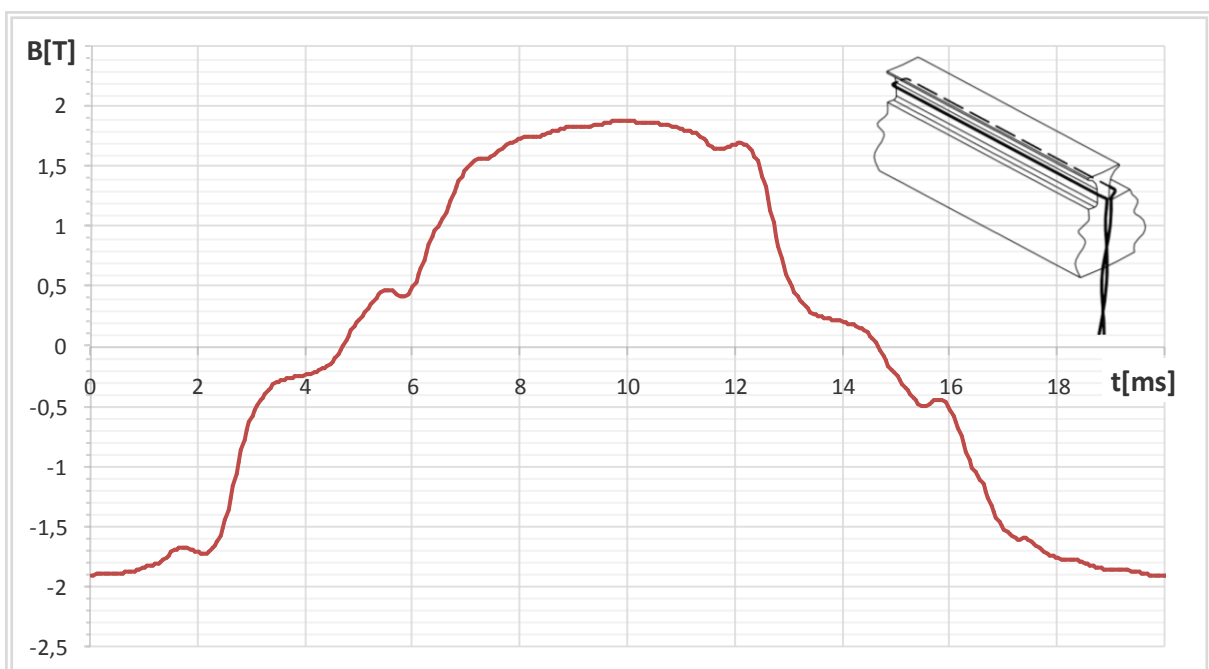
Slika 6.101. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče za nazivno opterećeni generator.

Slika 6.102 prikazuje napon koji se inducira u mjernom svitku ugrađenom oko zuba statorskog paketa M_{s1} i M_{s2} , kako je prikazano na slici 5.10-3. Inducirani napon u mjernom svitku površine S , koja je obrubljena konturom c , razmjeran je vremenskoj promjeni magnetskog toka kojeg petlja obuhvaća prema relaciji (5.12).



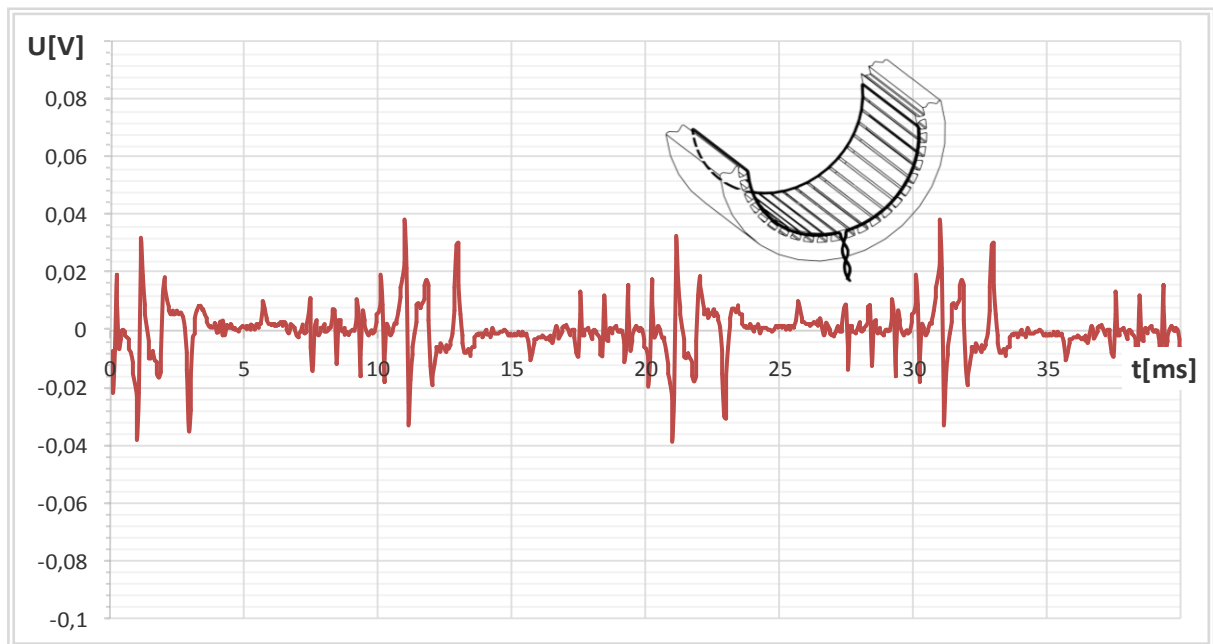
Slika 6.102. Napon induciran u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , ugrađenom kao na slici 5.10-3, za nazivno opterećeni generator.

Integracijom napona induciranog u mjernom svitku prikazanom na slici 6.102, dobiva se vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetskog toka kojeg obuhvaća mjerni svitak Ms_1 i Ms_2 . Primjenom relacije (5.13), uz površinu svitka $S = 700 \text{ mm}^2$, može se izračunati vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka, koja je prikazana na slici 6.103.



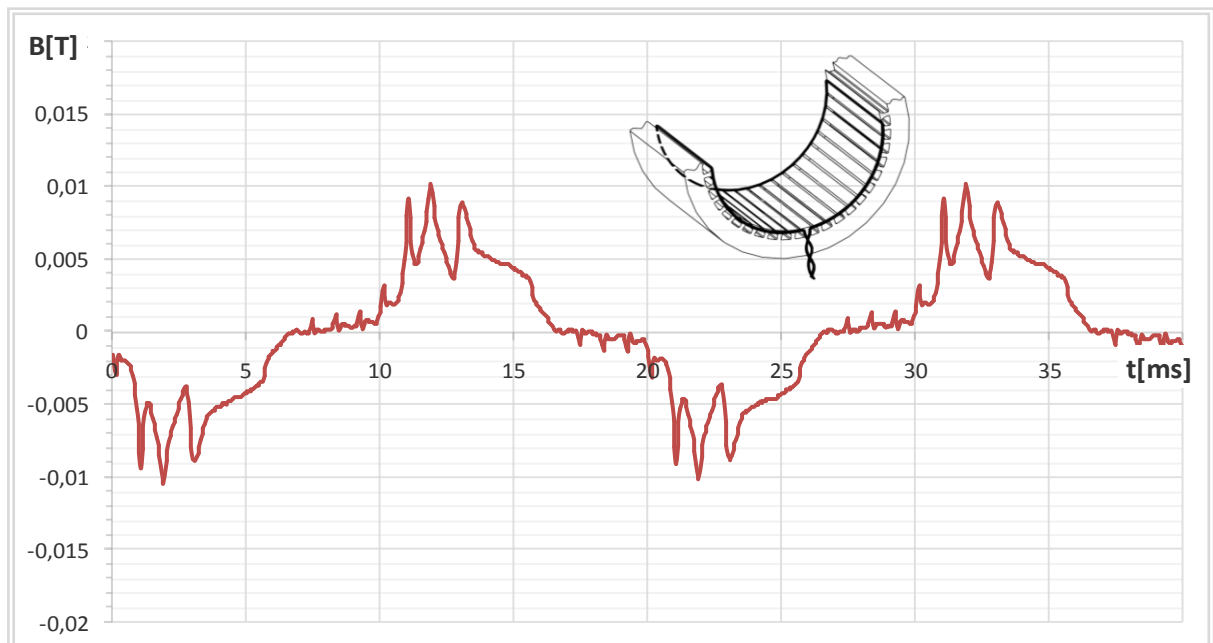
Slika 6.103. Raspodjela magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka, dobivena integracijom valnog oblika prikazanog na slici 6.101, te primjenom relacije (5.13).

Valni oblik napona koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 , koji je ugrađen na dvostrukom polnom koraku, prikazan je na slici 6.104.



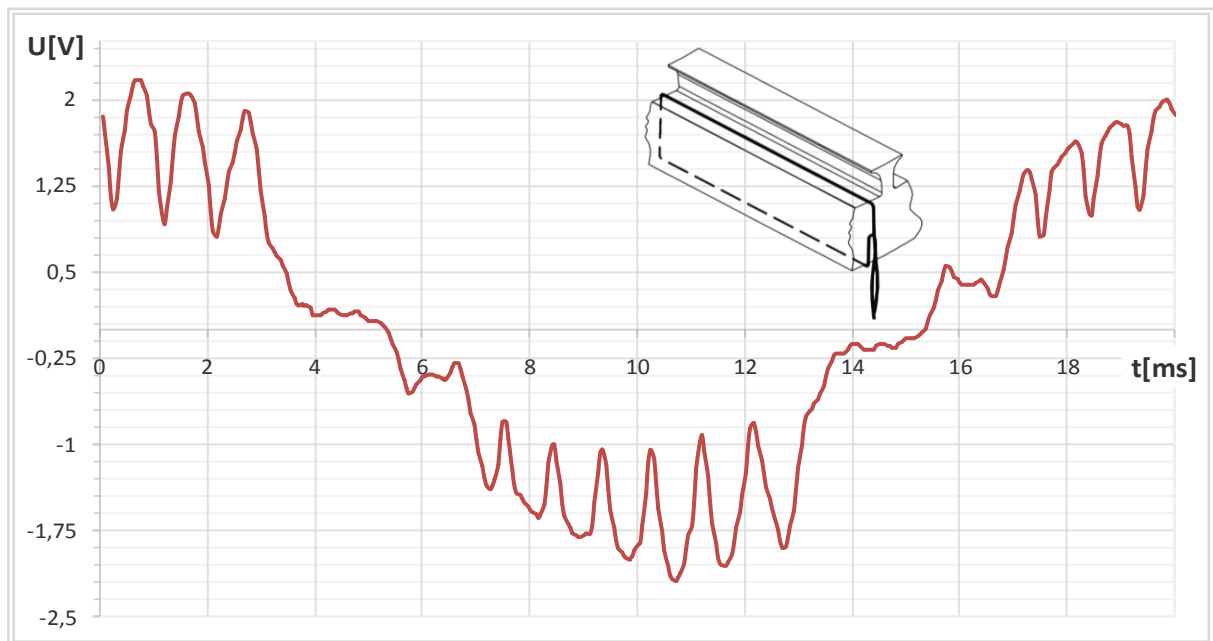
Slika 6.104. Napon induciran u mjernom svitku Ms_7 , ugrađen kao na slici 5.10-3, za nazivno opterećeni generator.

Integracijom napona induciranog u mjernom svitku, prikazanom na slici 6.104, dobiva se vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetskog toka kojeg obuhvaća mjerni svitak Ms_7 . Primjenom relacije (5.13), uz površinu svitka $S = 910 \text{ cm}^2$, može se izračunati vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka, koja je prikazana na slici 6.105.



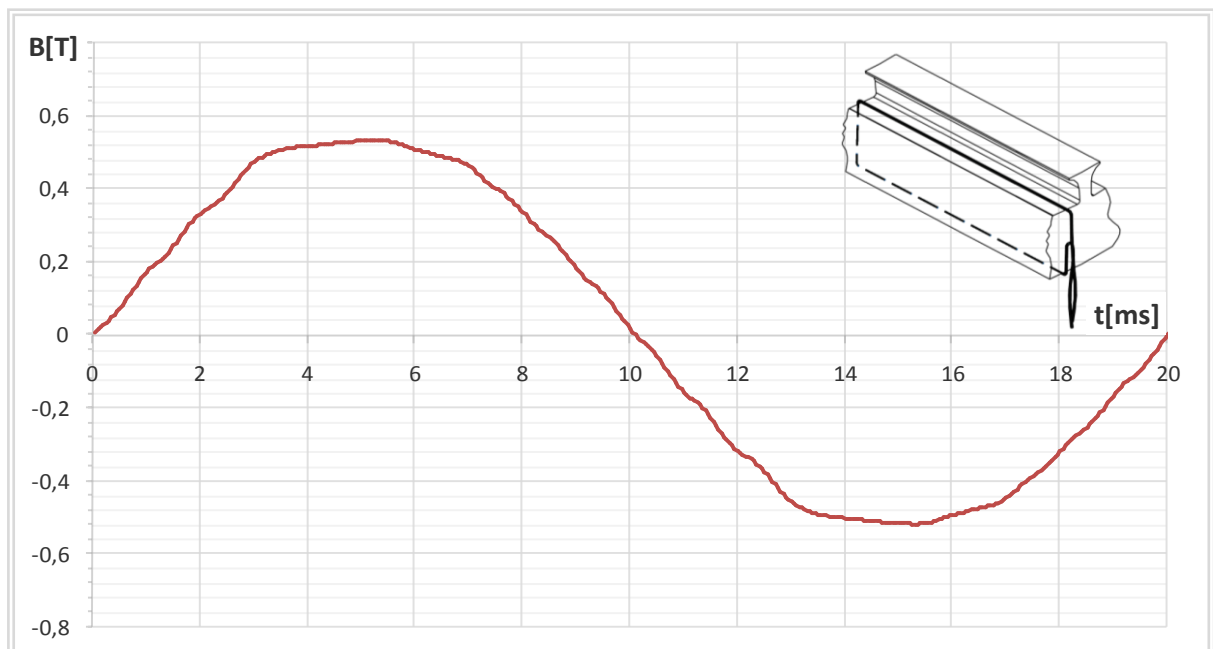
Slika 6.105. Raspodjela magnetske indukcije dobivena integracijom napona induciranog u mjernom svitku ugrađenom na dvostrukom polnom koraku, kako je prikazano na slici 5.11, za nazivno opterećeni generator.

Napon koji se inducira u mjernom svitku ugrađenom oko jarma statora Ms_3 i Ms_4 , kako je prikazano na slici 5.10-2, prikazuje slika 6.106.



Slika 6.106. Napon induciran u mjernom svitku ugrađenom oko jarma statora, kako je prikazano na slici 5.10-2, za nazivno opterećeni generator.

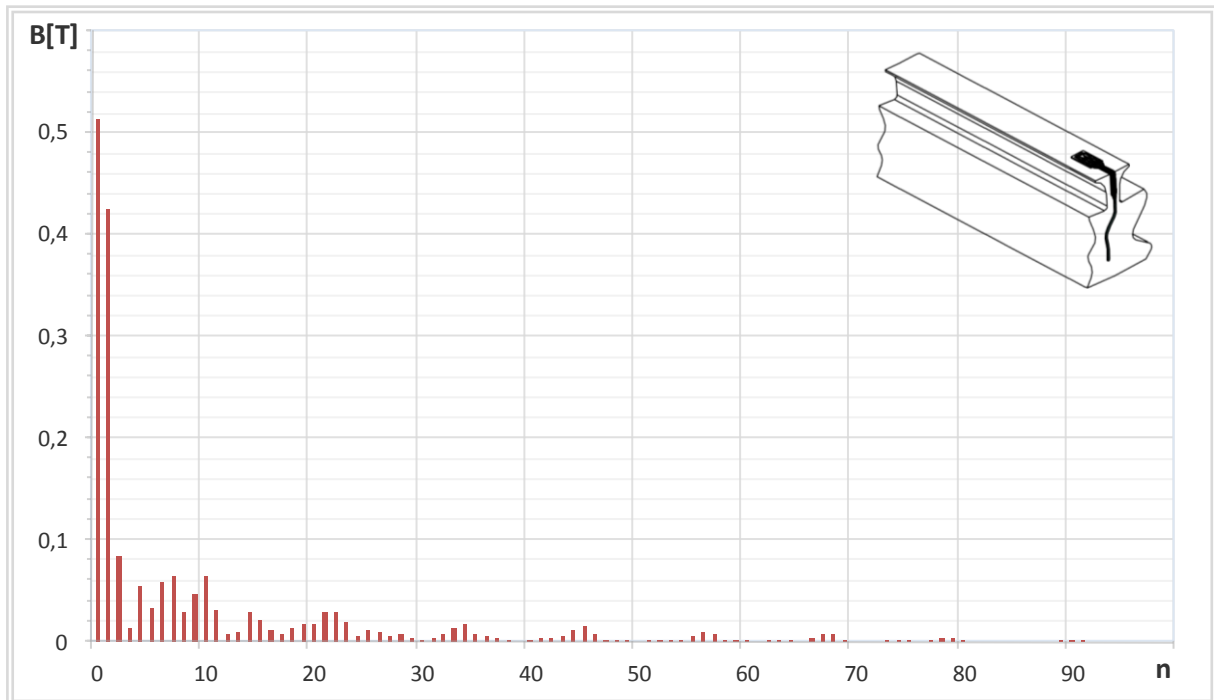
Integracijom napona induciranog u mjernom svitku prikazanom na slici 6.106, dobiva se vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetskog toka kojeg obuhvaća mjerni svitak Ms_3 i Ms_4 . Primjenom relacije (5.13), uz površinu svitka $S = 3200 \text{ mm}^2$, može se izračunati vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka, koja je prikazana na slici 6.107.



Slika 6.107. Raspodjela magnetske indukcije u jarmu statora, dobivena integracijom napona induciranog u mjernom svitku ugrađenom oko jarma statora, prikazanom na slici 6.106, te primjenom relacije (5.13).

Za nazivno opterećeni generator napraviti će se frekvencijska analiza podataka dobivenih proračunom na mjestima ugradnje senzora na generatoru SGBP 160 M-4M. Frekvencijska analiza vršit će se za sve valne oblike na periodu $\pi/2$, odnosno za polni korak.

Na slici 6.108 prikazana je frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije na polnom koraku, u zračnom rasporu promatrane sa zuba statorskog paketa, prikazane na slici 6.97.



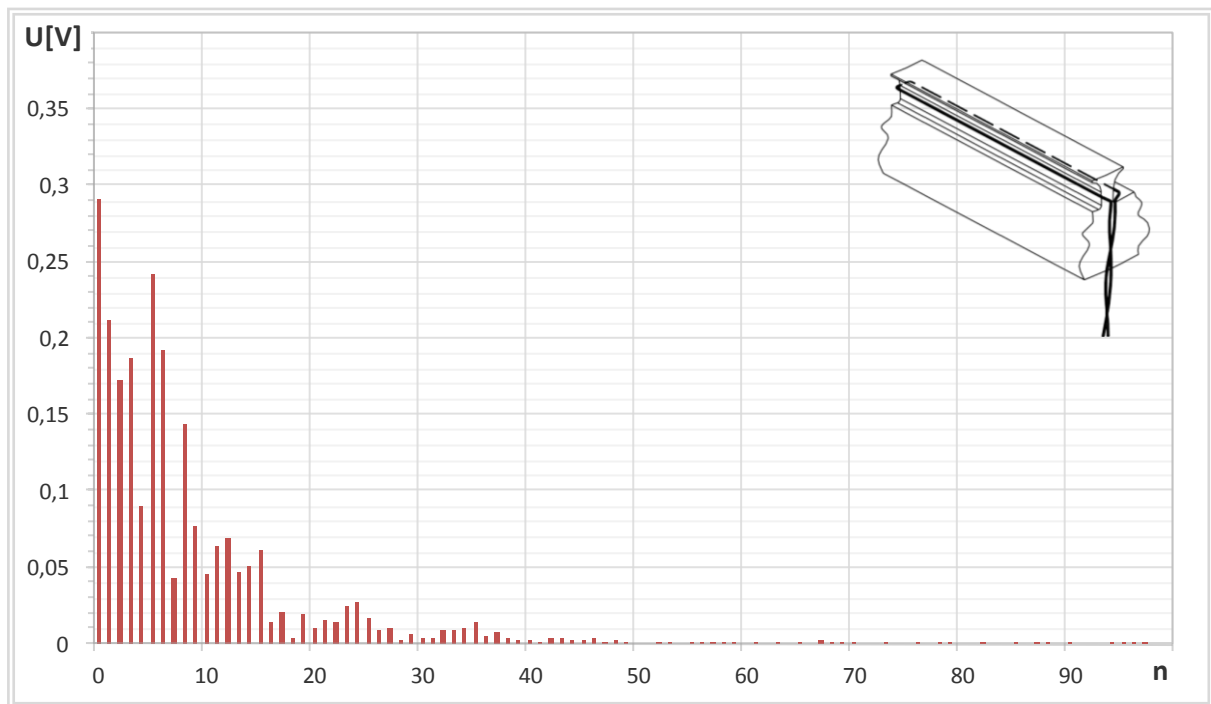
Slika 6.108. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije na polnom koraku, u zračnom rasporu promatrane sa zuba statorskog paketa za opterećeni generator.

Na slici 6.108 može se vidjeti da je u valnom obliku raspodjele magnetske indukcije na polnom koraku, u zračnom rasporu prikazanoj na slici 6.97, dominantan osnovni harmonik, uz prisutne više harmoničke članove. U tablici 6.44 prikazani su iznosi amplituda izraženih harmoničkih članova.

Tablica 6.44. Popis izraženih harmoničkih članova prikazanih na slici 6.108.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]
0	0,5132	7	0,0646	15	0,0222
1	0,4261	8	0,0287	19	0,0183
2	0,0845	9	0,0477	20	0,0167
4	0,0547	10	0,0650	21	0,0300
5	0,0347	11	0,0309	22	0,0290
6	0,0594	14	0,0300		

Slika 6.109 prikazuje frekvencijsku analizu valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , na polnom koraku, prikazanog na slici 6.102.



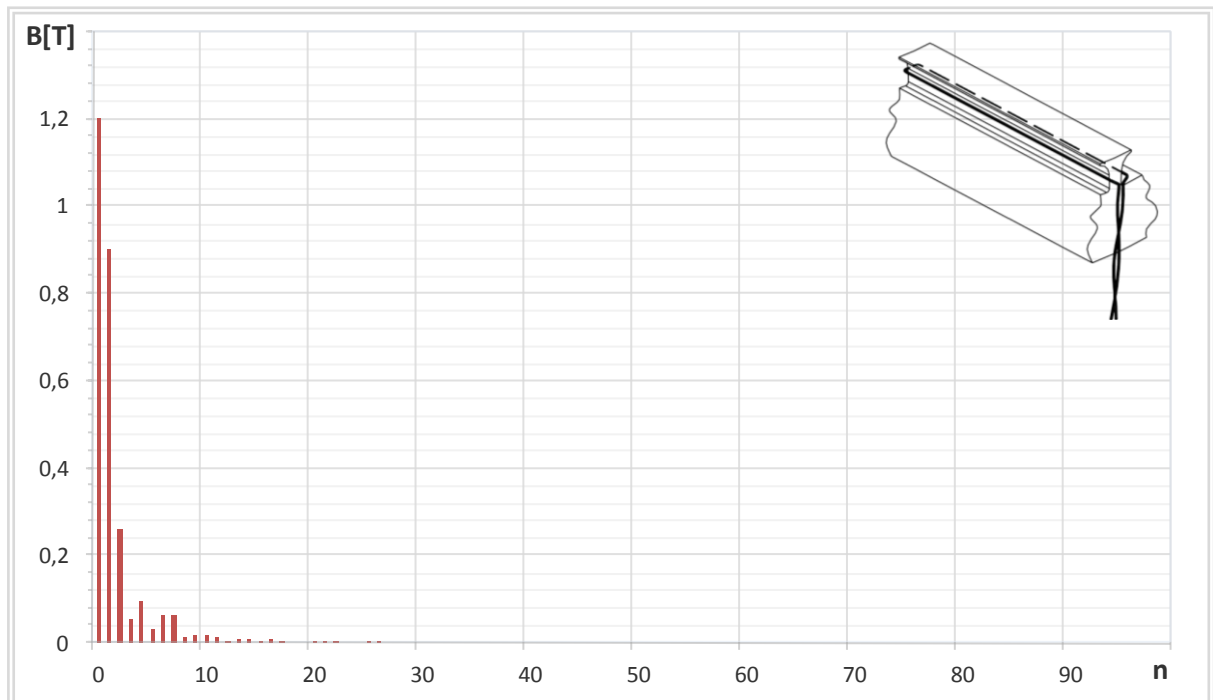
Slika 6.109. Frekvencijska analiza valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , na polnom koraku, prikazanog na slici 6.102.

Na slici 6.109 vidljivo je da pored osnovnog harmonika koji je dominantan prisutan i spektar viših harmonika u valnom obliku napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 . U tablici 6.45 prikazani su iznosi amplituda izraženih harmoničkih članova.

Tablica 6.45. Popis izraženih harmoničkih članova prikazanih na slici 6.109.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]
0	0,2919	10	0,0454	22	0,0144
1	0,1728	11	0,0642	23	0,0251
2	0,1728	13	0,0473	24	0,0272
3	0,1867	14	0,0507	26	0,0090
4	0,0896	15	0,0609	27	0,0104
5	0,2419	16	0,0147		
6	0,1926	18	0,0038		
7	0,0429	19	0,0196		
8	0,1442	20	0,0110		
9	0,0765	21	0,0152		

Slika 6.110 prikazuje frekvencijsku analizu valnog oblika dobivenog integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , na polnom koraku, prikazanog na slici 6.103.



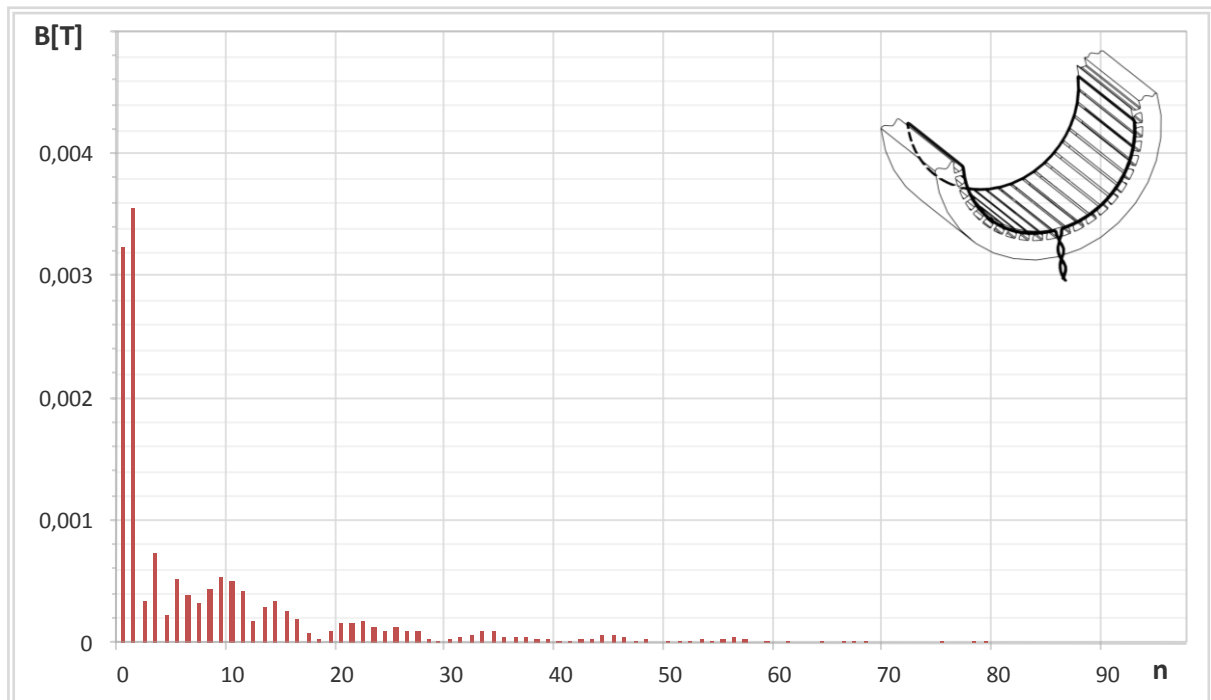
6.110. Frekvencijska analiza valnog oblika dobivenog integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 i Ms_2 , na polnom koraku, prikazanog na slici 6.103.

Na slici 6.110 vidljivo je da pored osnovnog harmonika koji je dominantan prisutan i spektar viših harmonika u valnom obliku. U tablici 6.46 prikazani su iznosi amplituda izraženih harmoničkih članova.

Tablica 6.46. Popis izraženih harmoničkih članova prikazanih na slici 6.110.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]
0	1,2012	3	0,0546	6	0,0646
1	0,9008	4	0,0984	7	0,0646
2	0,2607	5	0,0318	9	0,0202

Slika 6.111 prikazuje frekvencijsku analizu valnog oblika dobivenog integracijom napona inducirano u mjernom svitku Ms_7 , na dvostrukom polnom koraku, prikazanog na slici 6.105.



Slika 6.111. Frekvencijska analiza valnog oblika dobivenog integracijom napona inducirano u mjernom svitku Ms_7 , prikazanog na slici 6.105.

U tablici 6.47 prikazani su iznosi amplituda izraženih harmoničkih članova, sa slike 6.108.

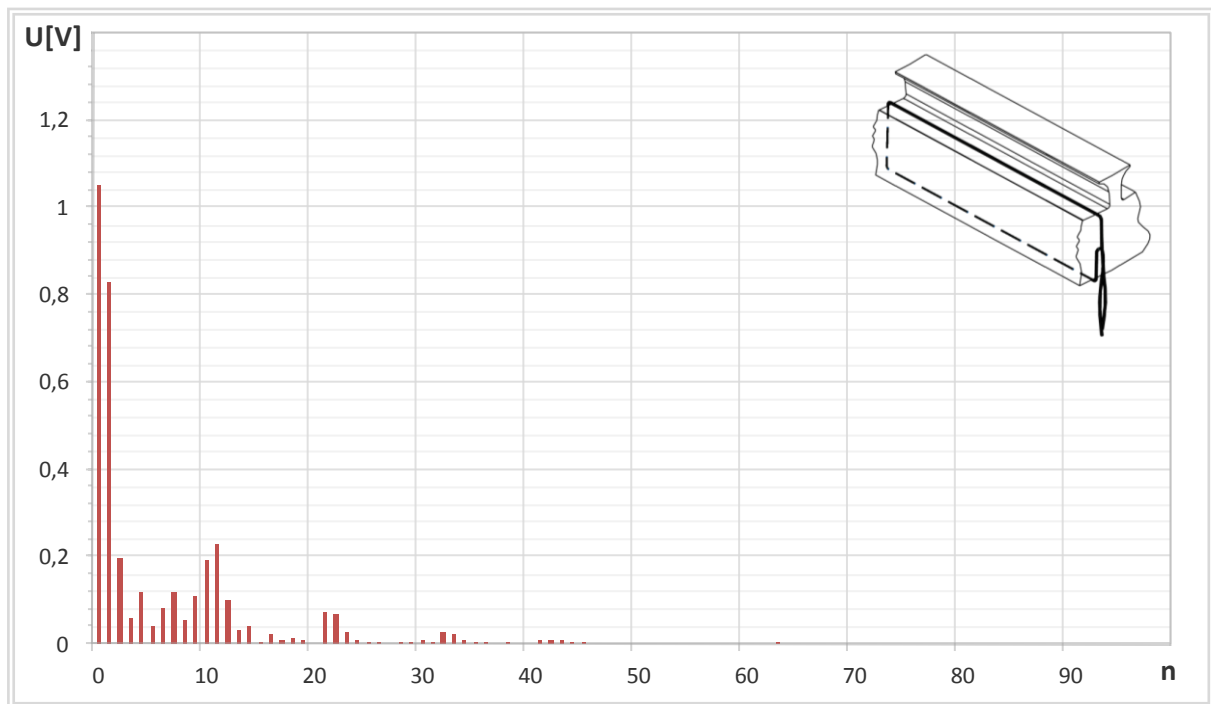
Tablica 6.47. Popis izraženih harmoničkih članova prikazanih na slici 6.111.

Harmonik broj	Amplituda B [T]
0	0,0032
1	0,0036
2	0,0003
3	0,0007
5	0,0005
6	0,0004

Harmonik broj	Amplituda B [T]
7	0,0003
8	0,0004
9	0,0005
10	0,0005
11	0,0004
13	0,0003

Harmonik broj	Amplituda B [T]
14	0,0003
15	0,0003

Slika 6.112 prikazuje frekvencijsku analizu valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku Ms_3 i Ms_4 , na polnom koraku, prikazanog na slici 6.106.



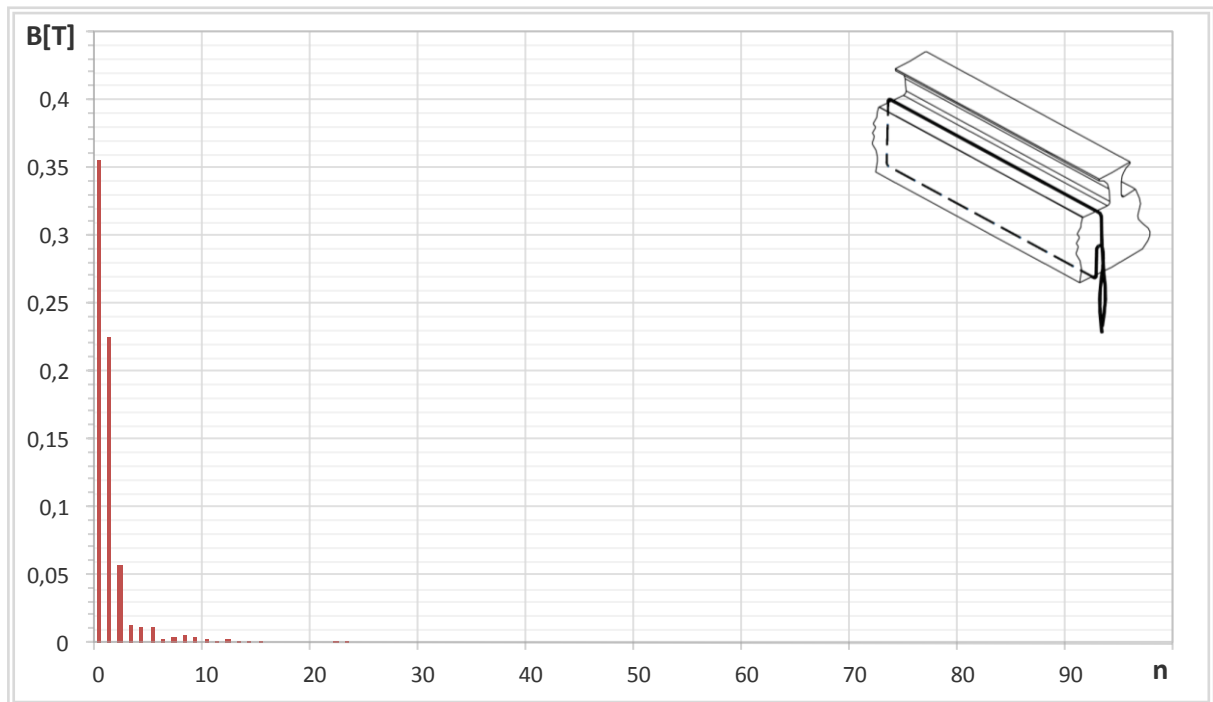
Slika 6.112. Frekvencijska analiza valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku Ms_3 i Ms_4 , prikazanog na slici 6.106.

U tablici 6.48 prikazani su iznosi amplituda izraženih harmoničkih članova, sa slike 6.105.

Tablica 6.48. Popis izraženih harmoničkih članova prikazanih na slici 6.112.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]
0	1,0506	7	0,1199	16	0,0214
1	0,8282	8	0,0553	21	0,0716
2	0,1983	9	0,1098	22	0,0681
3	0,0576	10	0,1909		
4	0,1204	11	0,2300		
5	0,0433	12	0,1023		
6	0,0842	13	0,0311		

Slika 6.113 prikazuje frekvencijsku analizu valnog oblika dobivenog integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_3 i Ms_4 , na polnom koraku, prikazanog na slici 6.107.



Slika 6.113. Frekvencijska analiza valnog oblika dobivenog integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_3 i Ms_4 , na polnom koraku, prikazanog na slici 6.107.

U tablici 6.49 prikazani su iznosi amplituda izraženih harmoničkih članova, sa slike 6.113.

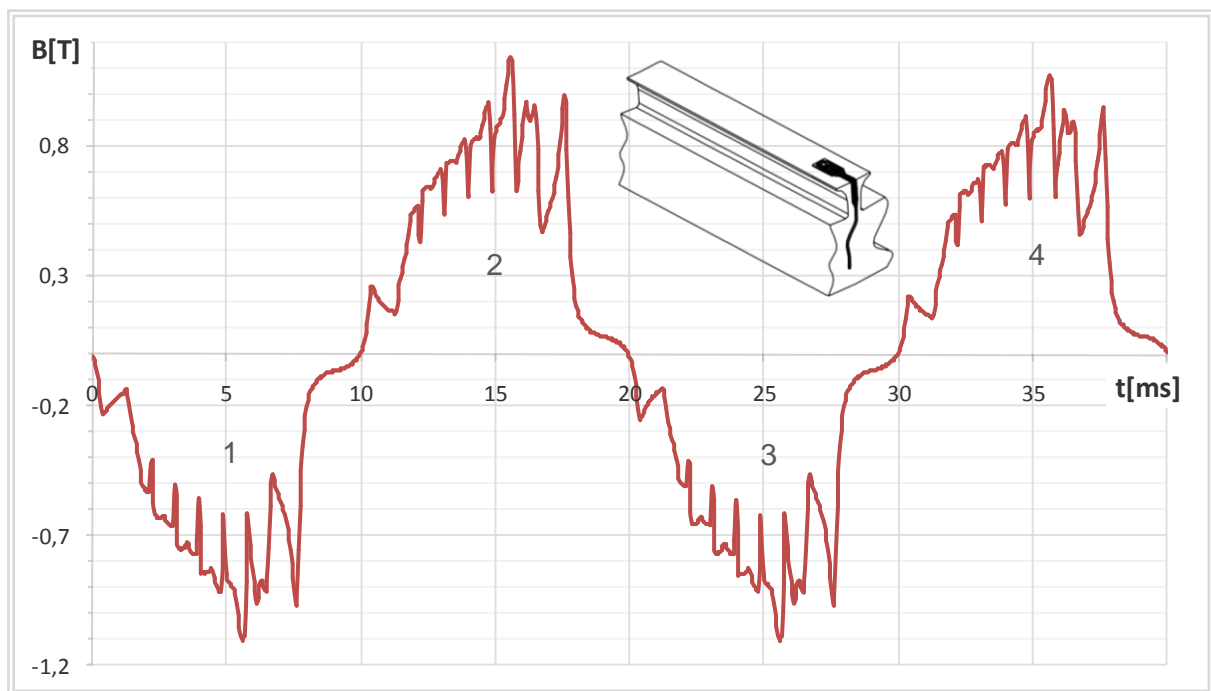
Tablica 6.49. Popis izraženih harmoničkih članova prikazanih na slici 6.113.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]	Harmonik broj	Amplituda B [T]
0	0,3556	4	0,0111	7	0,0037
1	0,2250	5	0,0114	9	0,0055
2	0,0576	6	0,0027	10	0,0029
3	0,0139				

6.5. Rezultati proračuna za opterećeno stanje, uz smanjeni iznos broja zavoja na jednom svitku uzbudnog namota

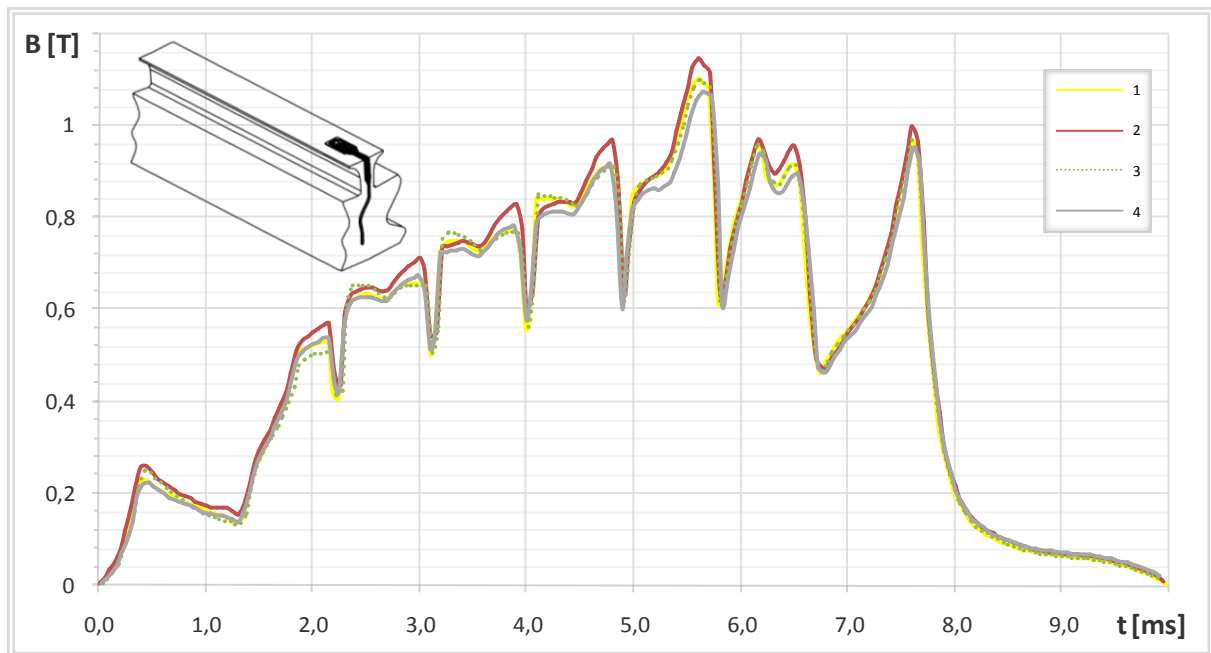
Za provedbu ovog proračuna korišten je model nazivno opterećenog generatora, kojem je na jednom svitku uzbudnog namota zadan manji broj zavoja nego na preostalim uzбудnim svitcima. Pri tome, struja kroz uzбудne svitke jednakog je iznosa i ne ovisi o broju zavoja svitka. Na taj način postignut je efekt kao da su u uzбудnom svitku prisutni mađuzavojni kratki spojevi. Ovim modelom izračunati su valni oblici na istim mjestima kao i u poglavlju 6.1, kako bi se načinila usporedba rezultata dobivenih proračunom u ispravnom i kvarnom stanju, te donijeli određeni zaključci koji će pridonijeti detekciji ovog kvarnog stanja stroja.

Započet će se s analizom raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu, promatrane sa zuba statorskog paketa, za jedan puni okret rotora, prikazane na slici 6.114. Prikazana raspodjela magnetske indukcije računata je za smanjeni broj zavoja svitka pola broj 4 u iznosu od 10 %.



Slika 6.114. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana sa zuba statorskog paketa za nazivno opterećeni generator, uz smanjeni iznos broja zavoja jednog uzbudnog svitka u iznosu od 10 %.

Slika 6.115 prikazuje raspodjelu magnetske indukcije na polnom koraku svih polova, sa slike 6.114.



Slika 6.115. Raspodjela magnetske indukcije na polnom koraku, promatrana sa zuba statorskog paketa za nazivno opterećeni generator: Krivulja 1 – za pol broj 1, Krivulja 2 – za pol broj 2, Krivulja 3 – za pol broj 4, Krivulja 4 – za pol broj 4.

Iz podataka prikazanih na slici 6.115, može se uočiti da se valni oblik magnetske indukcije na polnom koraku svih polova ne podudara. Međusobna odstupanja valnih oblika upućuju na nesimetriju izazvanu smanjenjem broja zavoja svitka uzbuđenog namota. Iznos međusobnih odstupanja valnih oblika, znatno je ovisan o zasićenju magnetskog kruga stroja koje je kod opterećenog generatora znatno veće nego kod generatora u praznom hodu. Također, moguće je uočiti da magnetska indukcija pod polom broj 4, slika 6.115 – krivulja 4, ima najniži iznos, što je i očekivano jer pol broj 4 ima najmanji broj zavoja. Prema tome zaključci konstatirani u poglavlju 6.2.1 vrijede i u slučaju opterećenog generatora.

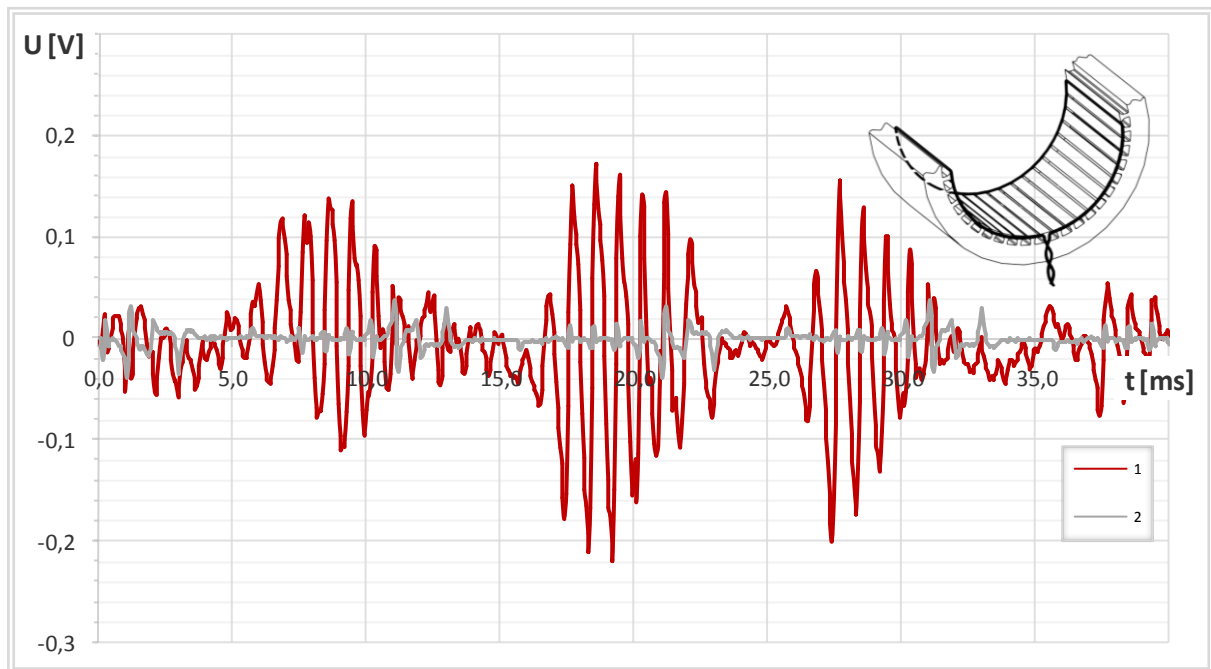
Uz prisutno smanjenje broja zavoja jednog svitka uzbuđenog namota opterećenog generatora, načinjena je frekvencijska analiza valnog oblika magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane sa zuba statorskog paketa. Za očekivati je da će se uslijed smanjenja broja zavoja jednog svitka uzbuđenog namota, pojaviti značajna promjena prvog i trećeg harmoničkog člana ukoliko se frekvencijska analiza vrši za vremenski period $2\tau_p$. Rezultati usporedbe navedenih harmoničkih članova, uz prisutno smanjenje broja zavoja i bez istog, prikazani su u tablici 6.50.

Tablica 6.50. Prikaz promjena amplituda harmoničkih članova uslijed smanjenja iznosa broja zavoja pola od 10 %, za nazivno opterećeni generator.

Harmonik broj	Amplituda B [T]	
	bez smanjenja broja zavoja	smanjen broj zavoja 10 %
1	0,0008	0,0083
2	0,8386	0,8276
3	0,0010	0,0066

Iznos promjene drugog harmoničkog člana očekivano je niži nego kod generatora u praznom hodu, odnosno kod manje zasićenog generatora. Znatna promjena prvog i trećeg harmoničkog člana, dobivenih FFT analizom valnog oblika magnetske indukcije, može se upotrijebiti u detekciji smanjenja broja zavoja svitka uzbudnog namota.

Razmotriti će se i valni oblik napona koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 , uz prisutno smanjenje broja zavoja svitka uzbuđene. Valni oblici induciranog napona uz prisutno smanjenje broja zavoja pola, te bez prisutnosti istog, prikazani su na slici 6.116.



Slika 6.116. Napon induciran u mjernom svitku Ms_7 , ugrađen kao na slici 5.10-3, za nazivno opterećeni generator:

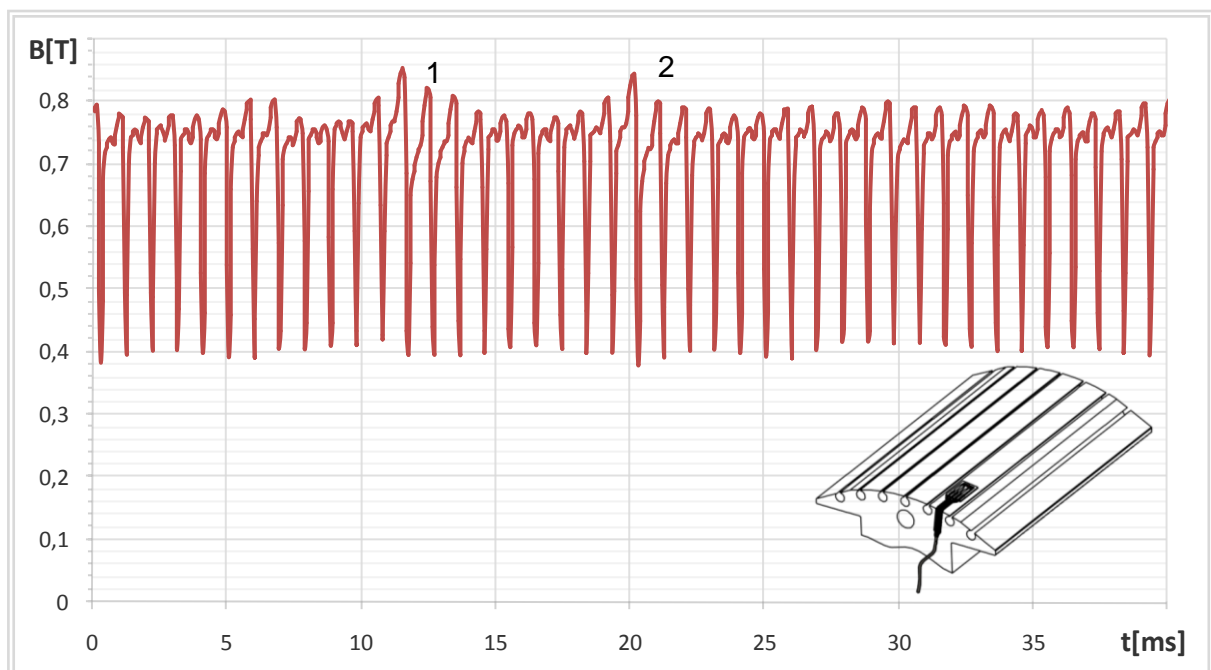
Krivulja 1 – uz prisutno smanjenje broja zavoja pola od 10 %,
Krivulja 2 – bez prisutnog smanjenja broja zavoja pola.

Kako se može uočiti na slici 6.116, pri pojavi smanjenja broja zavoja na jednom polu, razlika napona induciranih u vodičima mjernog svitka Ms_7 , postavljenih na dijametralnom koraku, postaje izraženija. Taj efekt može se upotrijebiti kao indikator u detekciji smanjenja broja zavoja svitka uzbudnog namota.

6.6. Rezultati proračuna za opterećeno stanje, uz prisutne međuzavojne kratke spojeve armaturnog namota

Za provedbu ovog proračuna korišten je model nazivno opterećenog generatora, koji u jednom svitku armaturnog namota ima prisutne međuzavojne kratke spojeve. Ovim modelom izračunati su valni oblici na istim mjestima kao i u poglavlju 6.1, kako bi se načinila usporedba rezultata dobivenih proračunom u ispravnom i kvarnom stanju, te donijeli određeni zaključci koji će pridonijeti detekciji ovog kvarnog stanja stroja. Iz podataka izračuna dobivenih u prethodnim poglavljima i donesenih zaključaka težište u detekciji ovog kvarnog stanja stavlja se na rezultate izračuna raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane s polne.

Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu, promatrana s polne papuče rotora, uz prisutni kratki spoj 1 zavoja svitka armaturnog namota, prikazana je na slici 6.117.

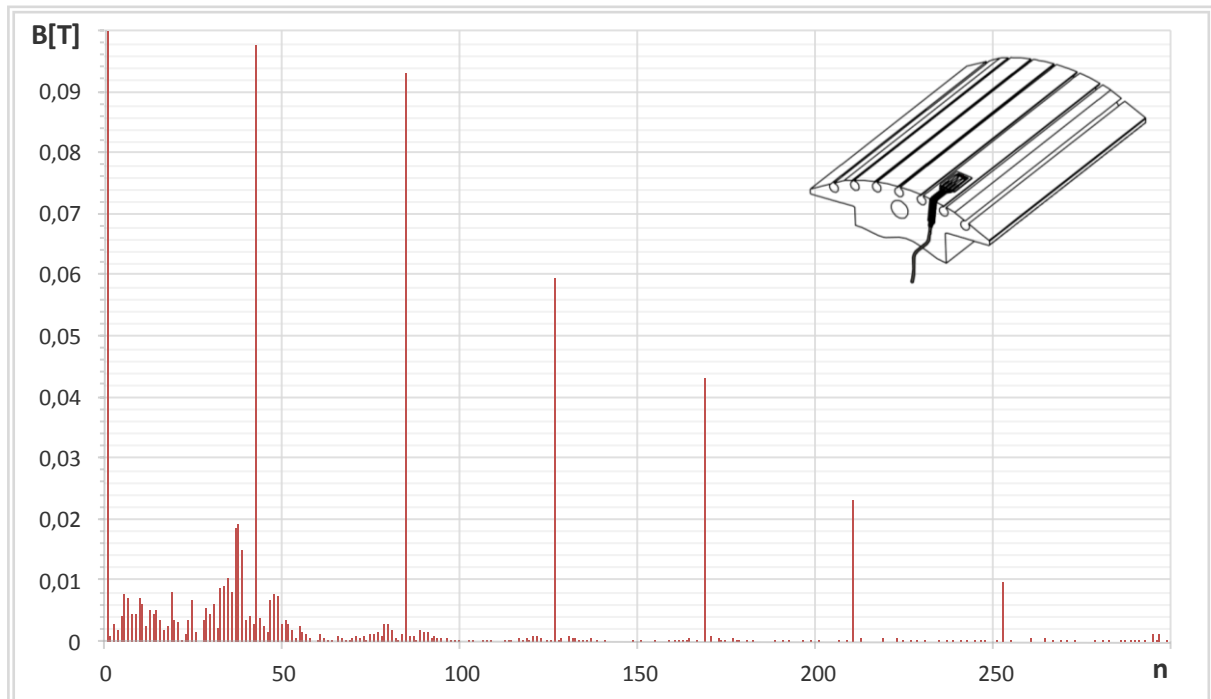


Slika 6.117. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče rotora, za nazivno opterećeni generator, uz prisutni kratki spoj 1 zavoja svitka armaturnog namota.

Usporedi li se valni oblik raspodjele magnetske indukcije prikazane na slici 6.117 s valnim oblikom raspodjele magnetske indukcije prikazane na slici 6.100, izračunate bez međuzavojnih kratkih spojeva svitka namota armature, a u istim radnim uvjetima, mogu se uočiti značajna odstupanja. Bez prisutnih međuzavojnih kratkih spojeva u namotu armature, valni oblik raspodjele magnetske indukcije je periodična funkcija za svaki zub odnosno utor statora. Pri tom magnetska indukcija pod svim zubima statora jednakog je iznosa. Pojavom međuzavojnih kratkih spojeva, u svitku namota armature, iznos magnetske indukcije nije jednak pod svim zubima statora, a u valnom obliku prisutni su harmonički članovi nižeg reda. Također je moguće uočiti dva karakteristična propada, odnosno nadvišenja magnetske indukcije, označena brojevima 1 i 2, uzrokovana kratko spojenim zavojima svitka u namotu armature. Međusobna udaljenost karakterističnih propada magnetske indukcije iznosi 10

utorskih koraka, što odgovara koraku namota armature odnosno koraku svitka za kratko spajanje. Prema tome, može se potvrditi teza dana u poglavlju 6.3 i zaključiti da magnetsko polje struje kroz kratko spojeni zavoj uzrokuje poremećaj magnetskog polja u zračnom rasporu i kod opterećenog stroja.

Frekvencijski sastav valnog oblika raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane s rotorske polne papuče uz prisutne međuzavojne kratke spojeve prikazuje slika 6.118.



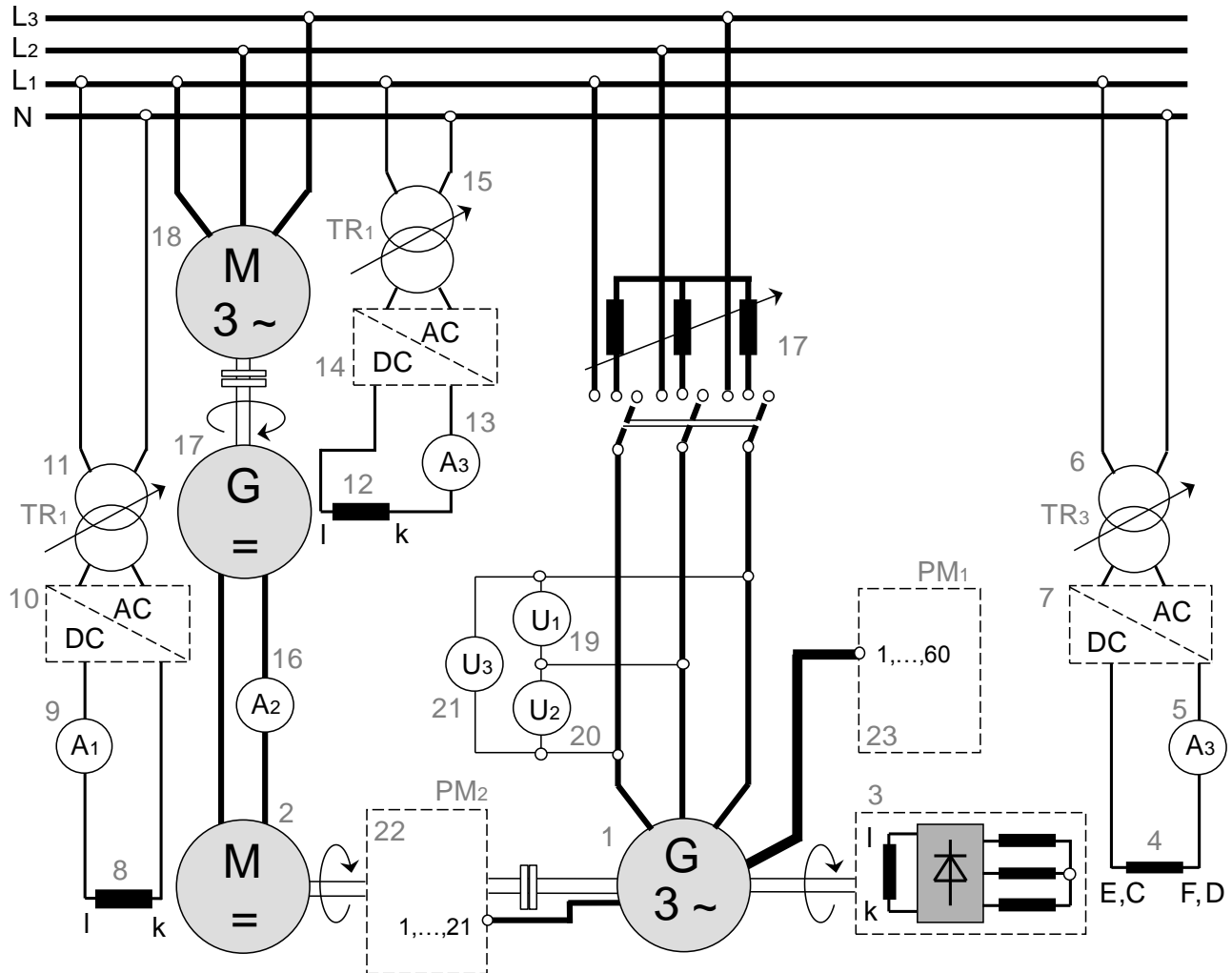
Slika 6.118. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s rotorske polne papuče uz prisutne međuzavojne kratke spojeve 5 zavoja svitka namota armature, za opterećeni generator.

U frekvencijskom sastavu valnog oblika raspodjele magnetske indukcije, prikazane na slici 6.118, dominantan je nulti harmonički član, 42 harmonički član te njegovi viši harmoničkih članovi koji su određeni brojem statorskih utora.

Uslijed pojave međuzavojnih kratkih spojeva u namotu armature, najveće promjene amplituda prisutne su kod harmoničkih članova nižeg reda što se može primjeniti u detekciju kvara na stroju.

7. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

Nakon ugradnje sve predviđene mjerne opreme na ispitivani generator, započeta su eksperimentalna mjerenja koja trebaju potvrditi dane teze i rezultate dobivene proračunima. Principna shema mjerenja prikazana je na slici 7.1. Kao pogonski stroj koristiti će se istosmjerni motor, napajan iz stabilnog napona dobivenog iz istosmjernog generatora. Korištena pogonska grupa sprječava mogući prodor smetnji u ispitivani objekt preko vratila.

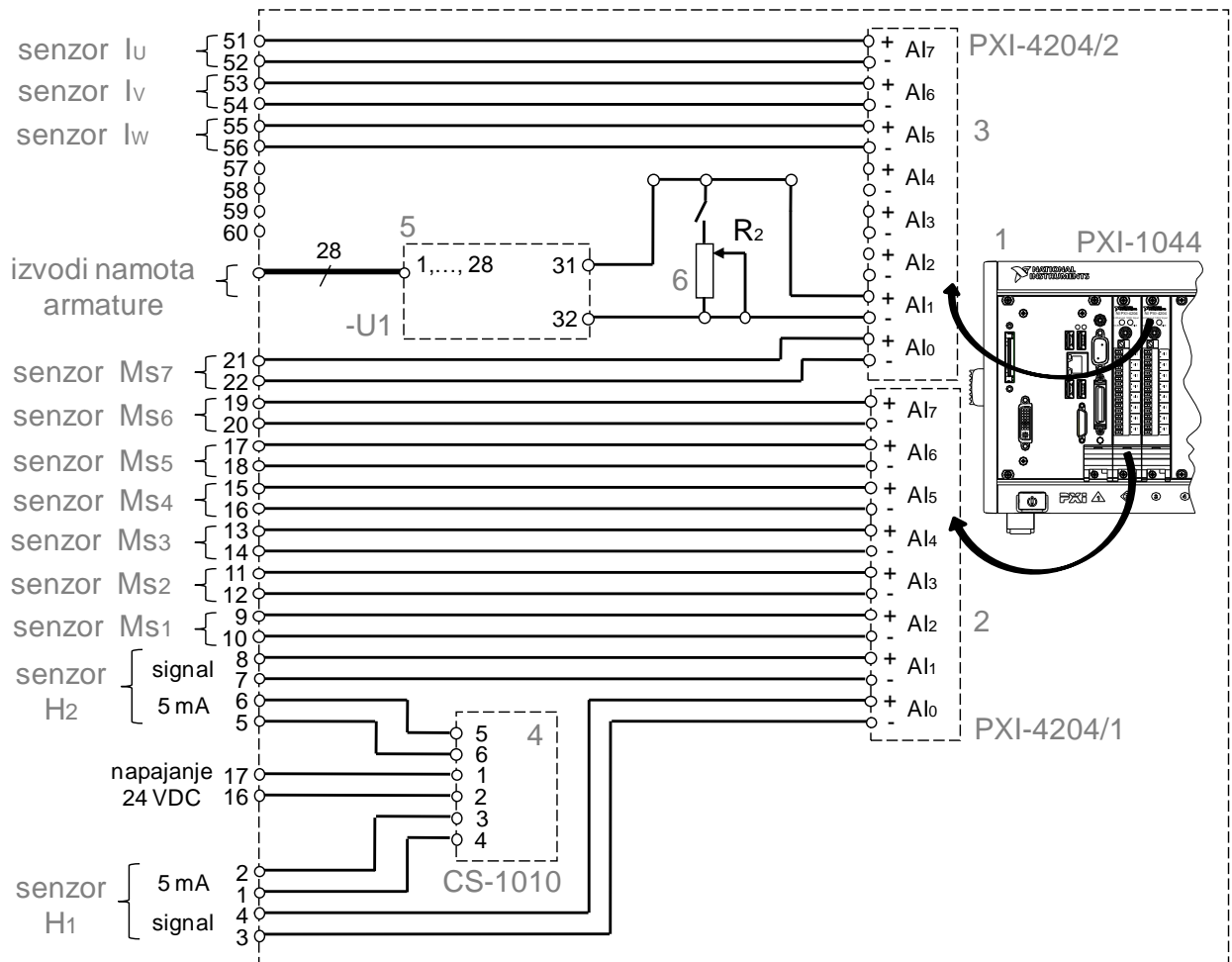


Slika 7.1. Principna shema spoja: 1 - sinkroni generator, 2 – istosmjerni motor, 17 – istosmjerni generator, 18 – trofazni asinkroni motor, 3 – rotirajući diodni ispravljač, 4 – uzbudni namot uzбудnika, 8 – uzbudni namot istosmjernog motora, 12 – uzbudni namot istosmjernog generatora, 7 – priključno mjesto PM₂, 5, 9, 13, 16 – ampermetar, 8 – priključno mjesto PM₁, 7, 10, 14 – AC/DC pretvarač, 6, 11, 15 – regulacijski transformator.

PM₁ i PM₂ označavaju priključna mjesta, koja su ujedno i mjesta smještaja mjerne opreme. Tako PM₁ označava opremu za mjerenje statorskih veličina, dok PM₂ označava opremu za mjerenje rotorskih veličina.

Slika 7.2 prikazuje spojnu shemu priključnog mjesta PM_1 . Oprema za mjerenje statorskih veličina obuhvaća:

- procesnu jedinicu s kontrolerom,
- dva mjerna modula,
- dvokanalni strujni izvor (za napajanje Hallovih senzora),
- priključnu kutiju $-U_1$ (mjesto za kratko spajanje armaturnog namota),
- regulacioni otpornik R_2 (ograničava struju međuzavojnog kratkog spoja),
- potrebno ožičenje.



Slika 7.2. Spojna shema priključnog mjesta PM_1 : 1 – procesna jedinica 2, 3 – mjerni modul, 4 – strujni izvor, 5 – priključna kutija U_1 , 6 – regulacijski otpornik za ograničenje struje međuzavojnog kratkog spoja.

Na mjerne module 2 i 3 sa slike 7.2 priključeni su senzori, a njihov raspored prikazan je u tablicama 7.1 i 7.2.

Tablica 7.1. Raspored senzora priključenih na mjerni modul PXI-4204/1

Br.	SENZOR		PROCESNA JEDINICA	
	Oznaka senzora	Vrsta senzora	Oznaka kanala	Broj utora
1	H1	Hallov senzor	AI0	1
2	H2	Hallov senzor	AI1	1
3	Ms1	mjerni svitak	AI2	1
4	Ms2	mjerni svitak	AI3	1
5	Ms3	mjerni svitak	AI4	1
6	Ms4	mjerni svitak	AI5	1
7	Ms5	mjerni svitak	AI6	1
8	Ms6	mjerni svitak	AI7	1

AI (*analog input*)

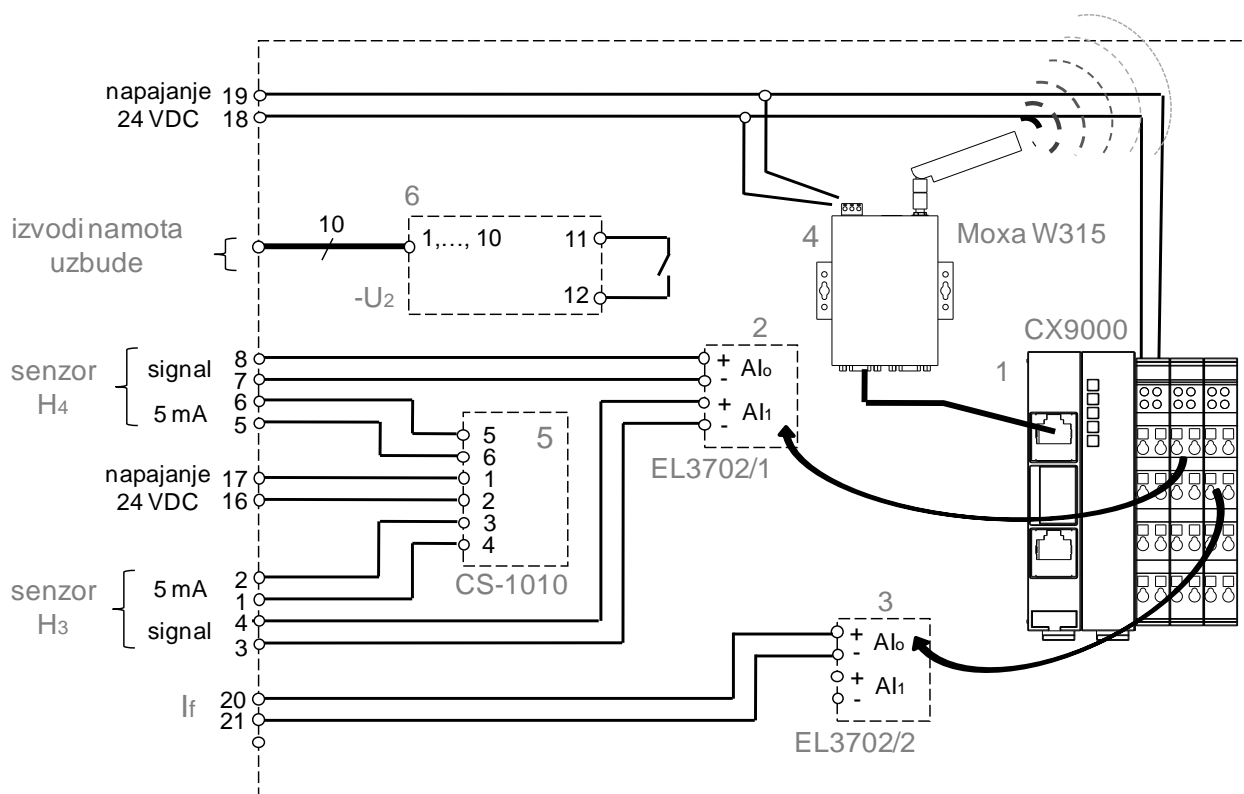
Tablica 7.2. Raspored senzora priključenih na mjerni modul PXI-4204/2

Br.	SENZOR		PROCESNA JEDINICA	
	Oznaka senzora	Vrsta senzora	Oznaka kanala	Broj utora
1	Ms7	mjerni svitak	AI0	2
2	UR ₂	otpornik	AI1	2
3	/	/	AI2	2
4	/	/	AI3	2
5	/	/	AI4	2
6	Iw	strujna kliješta	AI5	2
7	Iv	strujna kliješta	AI6	2
8	Iu	strujna kliješta	AI7	2

AI (*analog input*)

Slika 7.3 prikazuje spojnu shemu priključnog mjesta PM₂, odnosno opreme korištene za mjerenje rotorskih veličina. Priključno mjesto PM₂ obuhvaća:

- procesnu jedinicu,
- dva mjerna modula,
- RF predajnik,
- dvokanalni strujni izvor (za napajanje Hallovih senzora),
- priključnu kutiju –U₂ (mjesto za kratko spajanje uzbuđenog namota),
- potrebno ožičenje.



Slika 7.3. Spojna shema priključnog mjesta PM_2 : 1 – procesna jedinica, 2,3 – mjerni modul, 4 – predajnik, 5 – strujni izvor, 6 – priključna kutija U_2 .

Na mjerne module 2 i 3 sa slike 7.3 priključeni su senzori, a njihov raspored prikazan je u tablicama 7.3 i 7.4.

Tablica 7.3. Raspored senzora priključenih na mjerni modul EL3702/1

Br.	SENZOR		PROCESNA JEDINICA	
	Oznaka senzora	Vrsta senzora	Oznaka kanala	Broj utora
1	H3	Hallov senzor	Al0	1
2	H4	Hallov senzor	Al1	1

AI (analog input)

Tablica 7.4. Raspored senzora priključenih na mjerni modul EL3702/2

Br.	SENZOR		PROCESNA JEDINICA	
	Oznaka senzora	Vrsta senzora	Oznaka kanala	Broj utora
1	H3	Hallov senzor	Al0	1
2	H4	Hallov senzor	Al1	1

AI (analog input)

Eksperimentalni dio rada provest će se na način da će se parametri generatora mjeriti u ispravnom stanju (bez međuzavoynih kratkih spojeva), a potom u “kvarnom” stanju, kako bi se mogla napraviti analiza podataka mjerenja te usporedba istih. To omogućuje detekciju karakterističnih promjena u mjenom signalu nastalih uslijed pojave kvara. Eksperimentalni dio rada na sinkronom generatoru SGBP 160 M-4M proveden je kroz sljedeće faze ispitivanja:

- mehanička vrtnja,
- prazni hod,
- prazni hod s prisutnim međuzavoynim kratkim spojevima uzbuđnog namota,
- prazni hod s prisutnim međuzavoynim kratkim spojevima armaturnog namota,
- opterećeno stanje generatora,
- opterećeno stanje s prisutnim međuzavoynim kratkim spojevima armaturnog namota.

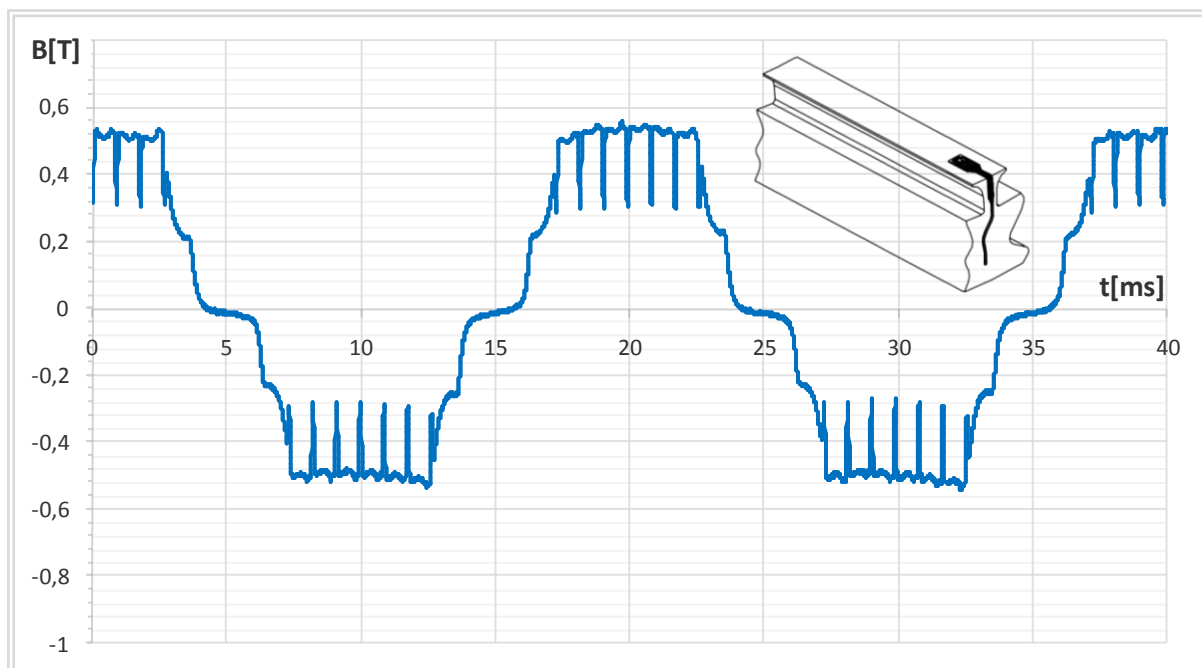
7.1. Mehanička vrtnja

Ova faza ispitivanja podrazumijeva vrtnju rotora ispitivanog generatora putem pogonskog stroja, bez uzbude i uz otvorene armaturne stezaljke. Brzina vrtnje pogonskog stroja regulira se od $n = 0$ [min^{-1}] do $n = n_n$. Cilj ove faze ispitivanja je provjera učvršćenja pojedinih dijelova ugrađenih na ispitivani generator pri nazivnoj brzini vrtnje. Također, u ovoj fazi provesti će se balansiranje rotora, nužno zbog debalansa izazvanog ugradnjom procesne jedinice na rotor.

7.2. Prazni hod generatora

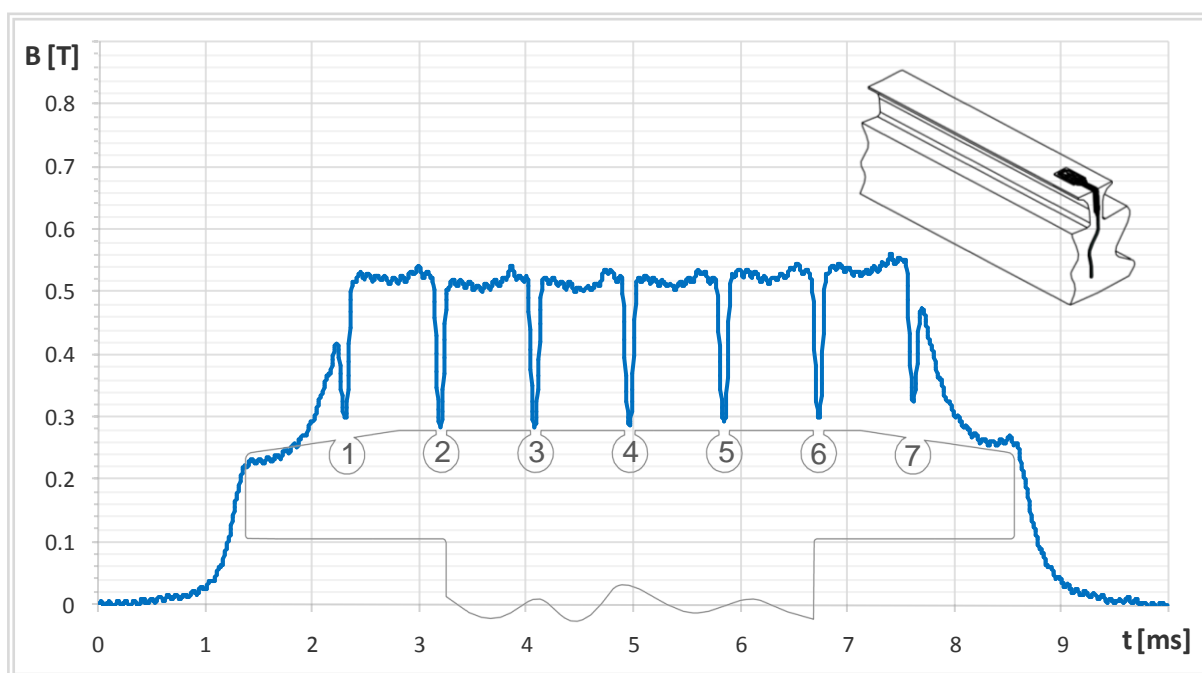
Prazni hod generatora provodi se na način da se pogonskim strojem zarotira rotor ispitivanog generatora na željenu brzinu vrtnje, te se postepeno podiže uzbuđna struja uzbuđnika putem regulacijskog transformatora. Regulaciju uzbuđne struje može obaviti i sustav automatske regulacije, koji je sastavni dio uzbuđnika, na osnovu iznosa napona na armaturnim stezaljkama. Međutim kako će se parametri stroja mjeriti pri sniženom iznosu struje uzbude, automatski sustav regulacije uzbuđne struje će se isključiti a regulacija iste vršiti će se putem regulacijskog transformatora iz AC/DC pretvarača.

Rezultati mjerenja dobiveni u ovoj fazi ispitivanja prikazat će se u nastavku ove točke. Započet će se s prikazom raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu koja je mjerena Hallovim senzorom H_1 smještenim na zub statorskog paketa, pri struji uzbude od 4 A, za jedan puni okret rotora (slika 7.4). Hallov senzor H_1 ugrađen je kako je prikazano na slici 5.11-1.



Slika 7.4. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerena sa zuba statorskog paketa, za prazni hod pri uzbudnoj struji od 4 A.

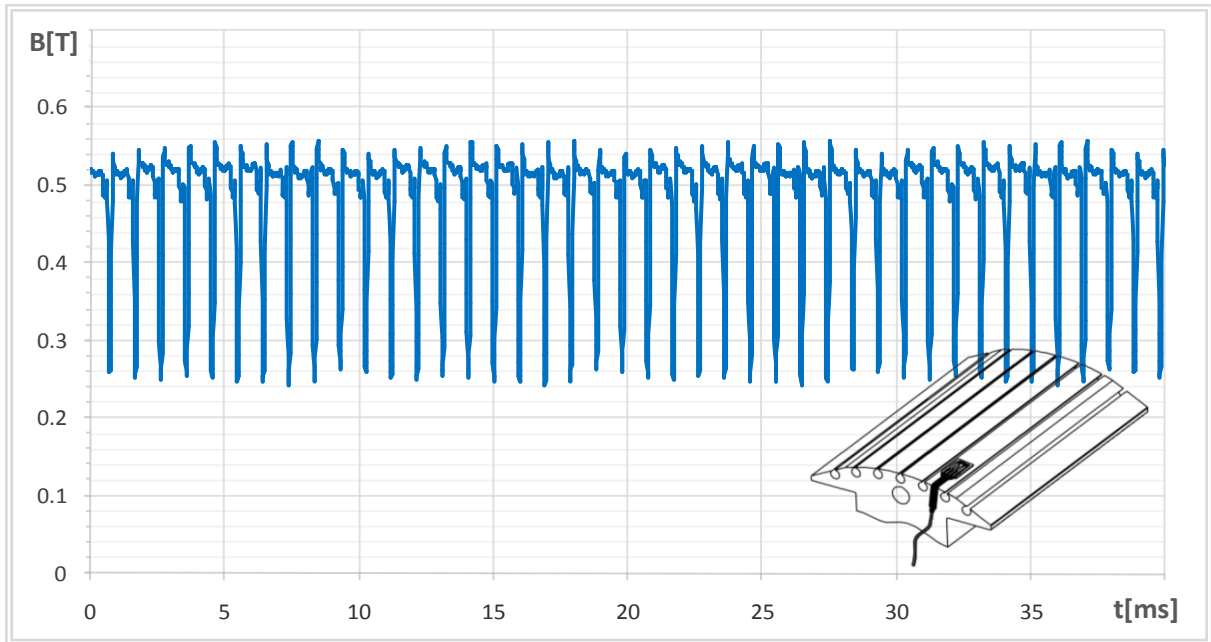
Valni oblik raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu, prikazan na slici 7.4, komentiran je u poglavlju 6.1. Prikaz raspodjele magnetske indukcije na polnom koraku zajedno s konstrukcijskim izmjerama pola prikazan je na slici 7.5.



Slika 7.5. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerena sa zuba statorskog paketa za prazni hod pri uzbudnoj struji od 4 A.

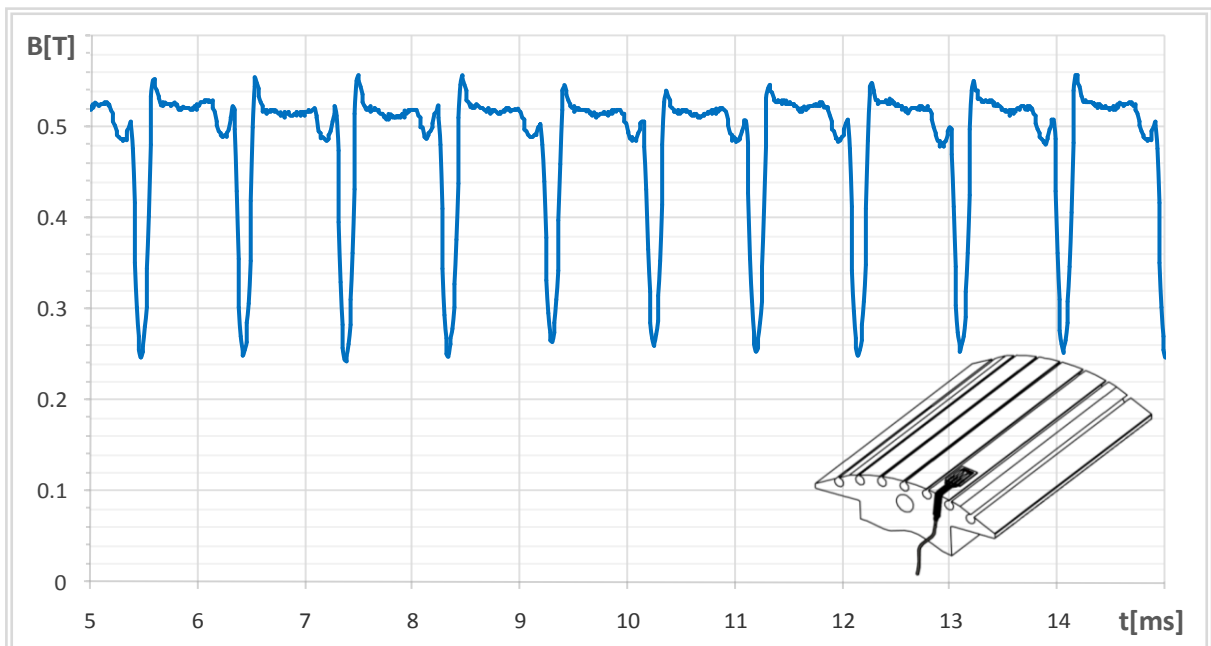
Na valnom obliku prikazanom na slici 7.5 moguće je uočiti da su lokalizirana smanjenja magnetske indukcije, označena brojevima 1-7, uzrokovana utjecajem prigušnog namota i poluotvorenih utora za smještaj prigušnog namota što je i pojašnjeno u poglavlju 6.1 na rezultatima izračuna.

Na ispitivanom generatoru mjerena je raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu Hallovim senzorom H_4 , smještenim na polnoj papučici kako je prikazano na slici 5.12-1. Slika 7.6 prikazuje raspodjelu magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerenu s polne papučice, u praznom hodu pri struji uzbude 4 A, za jedan puni okret rotora.



Slika 7.6. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerena s polne papučice rotora, za prazni hod pri uzбудnoj struji od 4 A.

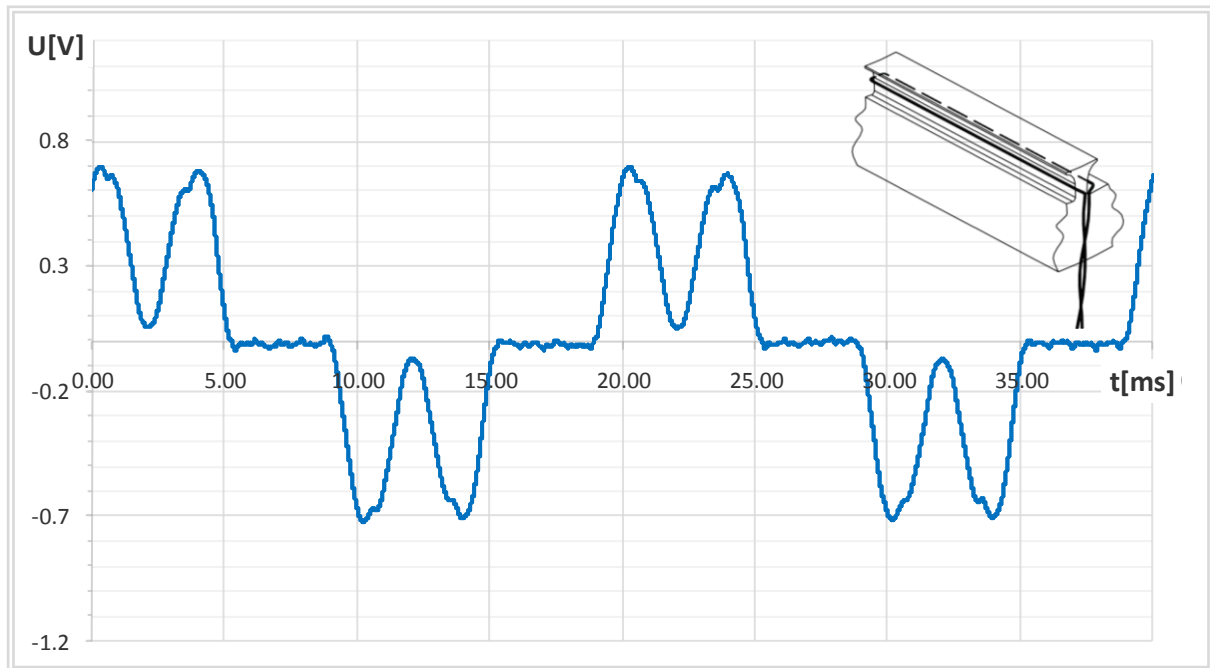
Detaljnija analiza raspodjele magnetske indukcije prikazane na slici 7.6, te povezivanje njenog oblika s konstrukcijskim izmjerama statorskog paketa, prikazana je na slici 7.7.



Slika 7.7. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerena s polne papučice rotora, za prazni hod pri uzбудnoj struji od 4 A.

Na slici 7.7 može se uočiti da se lokalizirana smanjenja magnetske indukcije događaju u trenucima kada povrh Hallovog senzora, kojim se mjeri raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu, naiđe utorski otvor statora.

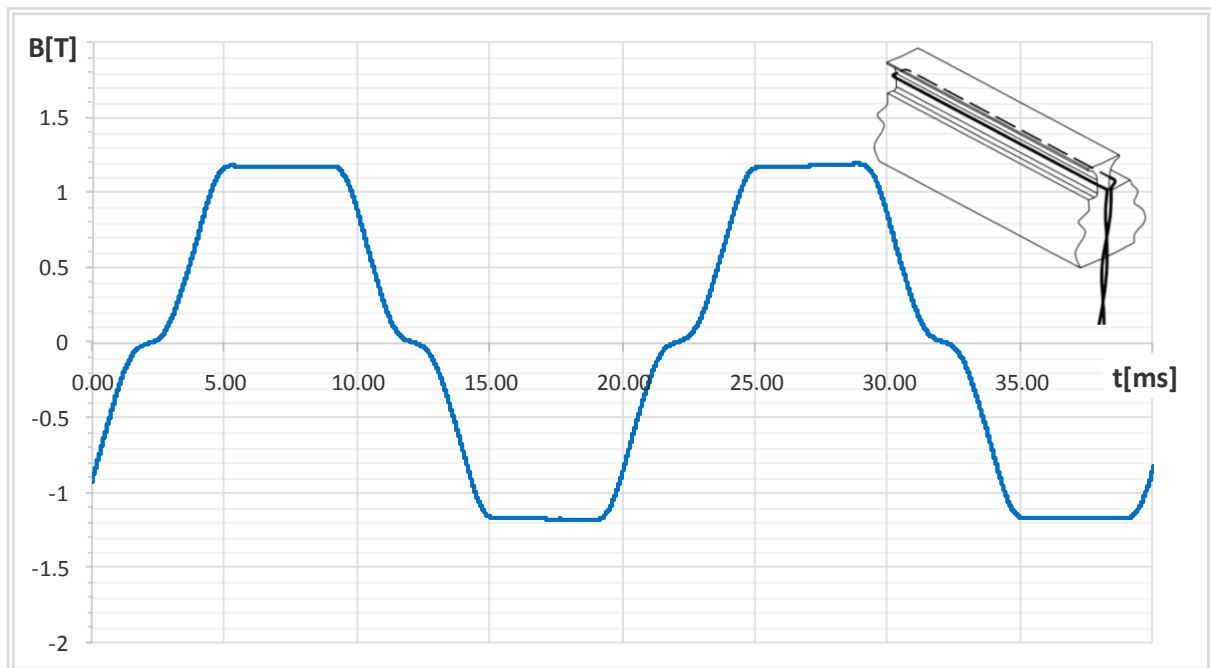
Prikazat će se i rezultati mjerenja napona koji se induciraju u mjernim svitcima ugrađenim na stator ispitivanog generatora. Napon koji se inducira u mjernom svitku Ms_1 , ugrađenom kao na slici 5.10-1, prikazan je na slici 7.8. Prikazani valni oblik izmjeren je u praznom hodu pri uzbudnoj struji od 4 A.



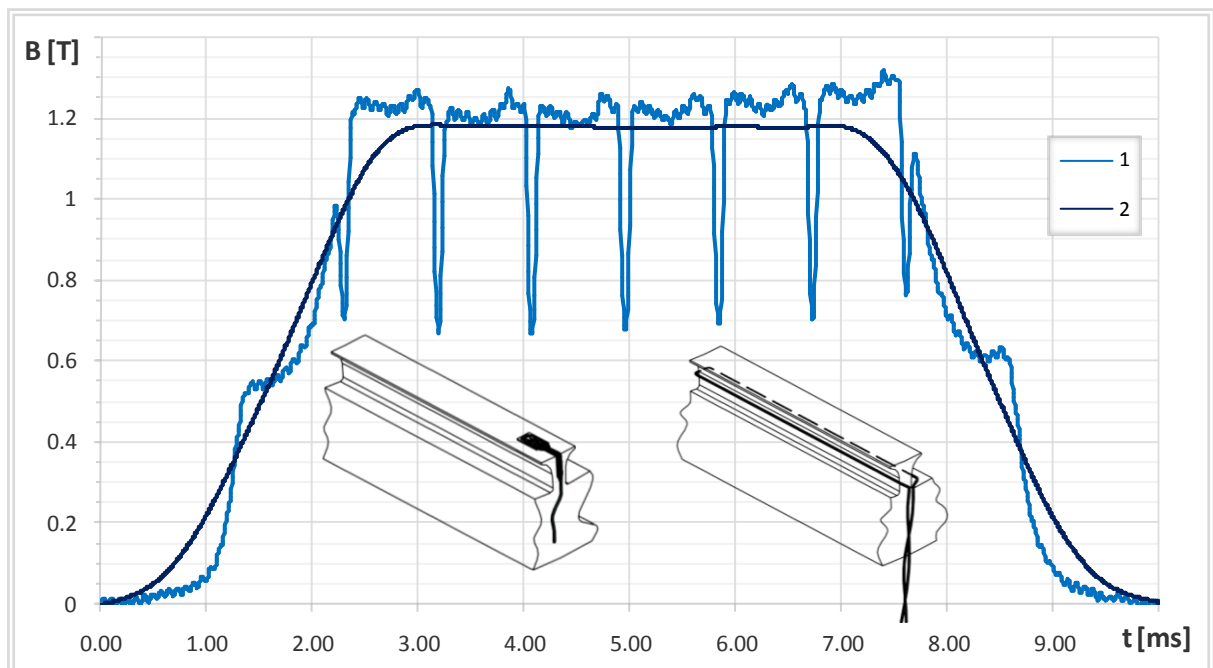
Slika 7.8. Napon induciran u mjernom svitku Ms_1 , ugrađenom kao na slici 5.10-1, za prazni hod pri uzbudnoj struji od 4 A.

Integracijom napona induciranih u mjernom svitku prikazanom na slici 7.8, dobiva se vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetskog toka kojeg obuhvaća mjerni svitak Ms_1 . Primjenom relacije (5.13), uz poznatu površinu svitka, može se izračunati vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka, koja je prikazana na slici 7.9.

Dobivenu raspodjelu prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka Ms_1 , moguće je usporediti s raspodjelom magnetske indukcije mjerene sa zuba statorskog paketa Hallovim senzorom H_1 . Usporedbu je potrebno izvršiti na način da se rezultati dobiveni Hallovim senzorom H_1 množe faktorom koji je jednak omjeru širina zuba na mjestu ugradnje senzora H_1 i Ms_1 . Slika 6.13 prikazuje presjek zuba statorskog paketa s naznačenim mjestima ugradnje senzora H_1 i Ms_1 . Rezultati usporedbe prikazani su na slici 7.10.



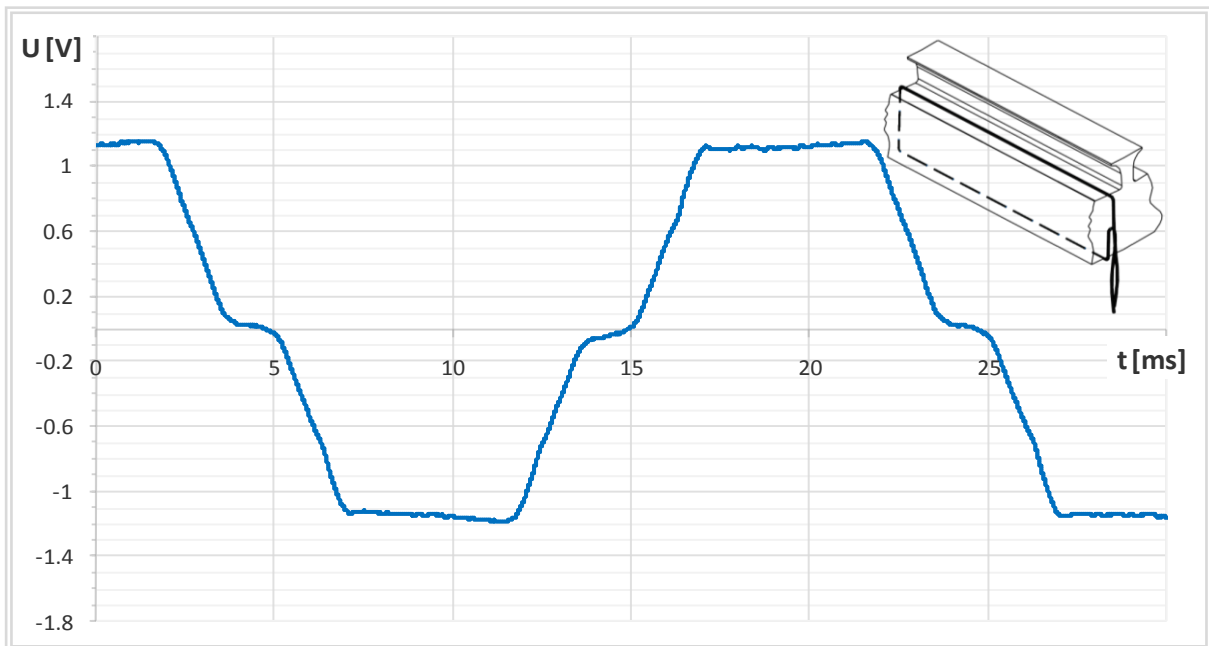
Slika 7.9. Raspodjela prosječne vrijednosti magnetske indukcije dobivena integracijom napona inducirano u mjernom svitku Ms_1 , te primjenu relacije 5.13.



Slika 7.10. Raspodjela magnetske indukcije;
 Krivulja 1 – dobivena integracijom izmjerenog inducirano napona u mjernom svitku, uz primjenu relacije (5.13),
 Krivulja 2 – preračunata raspodjela magnetske indukcije promatrane sa zuba statorskog paketa, na mjesto ugradnje mjernog svitka.

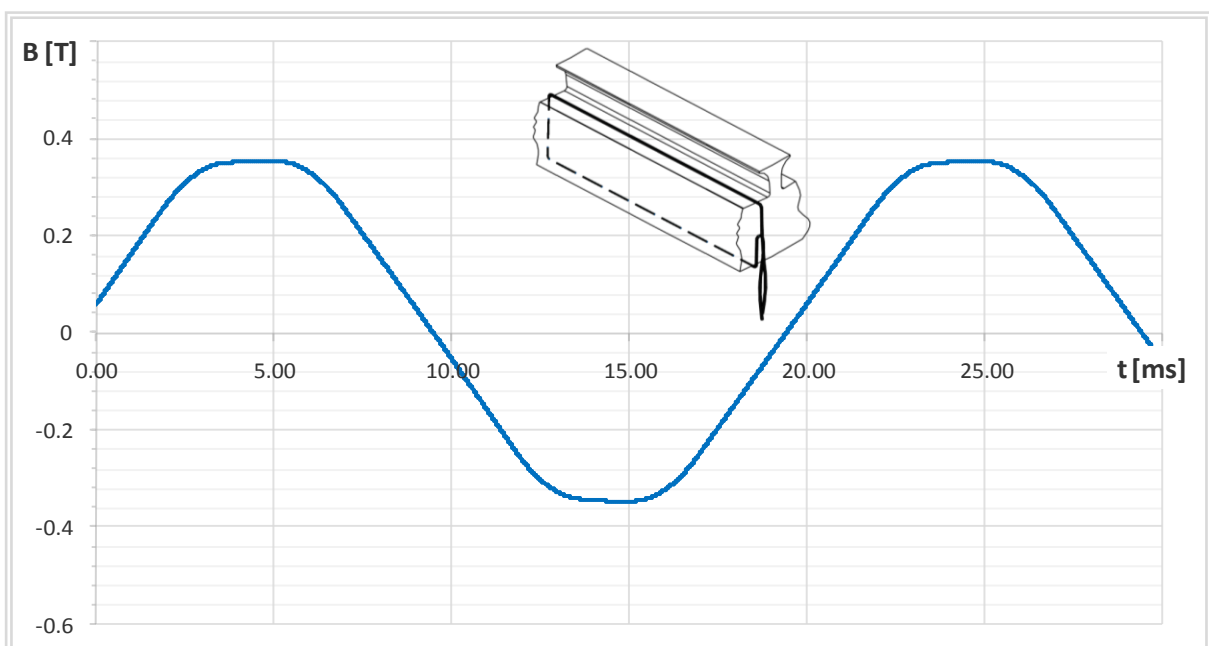
Prema slici 7.10-1, može se zaključiti da su rezultati raspodjele magnetske indukcije, dobiveni mjernim svitkom ugrađenim oko zuba statorskog paketa, manje osjetljivi na konstrukcijske utjecaje stroja. Razlog tome je što mjerni svitak obuhvaća ukupni magnetski tok koji prolazi kroz zub i ovisi o njegovoj srednjoj vrijednosti, dok su podaci prikazani na slici 7.10-2, mjereni na točno određeno mjesto u stroju.

Napon koji se inducira u mjernom svitku Ms_3 , ugrađenom kao na slici 5.10-2, prikazan je na slici 7.11. Prikazani valni oblik izmjeren je u praznom hodu pri uzbudnoj struji od 4 A.



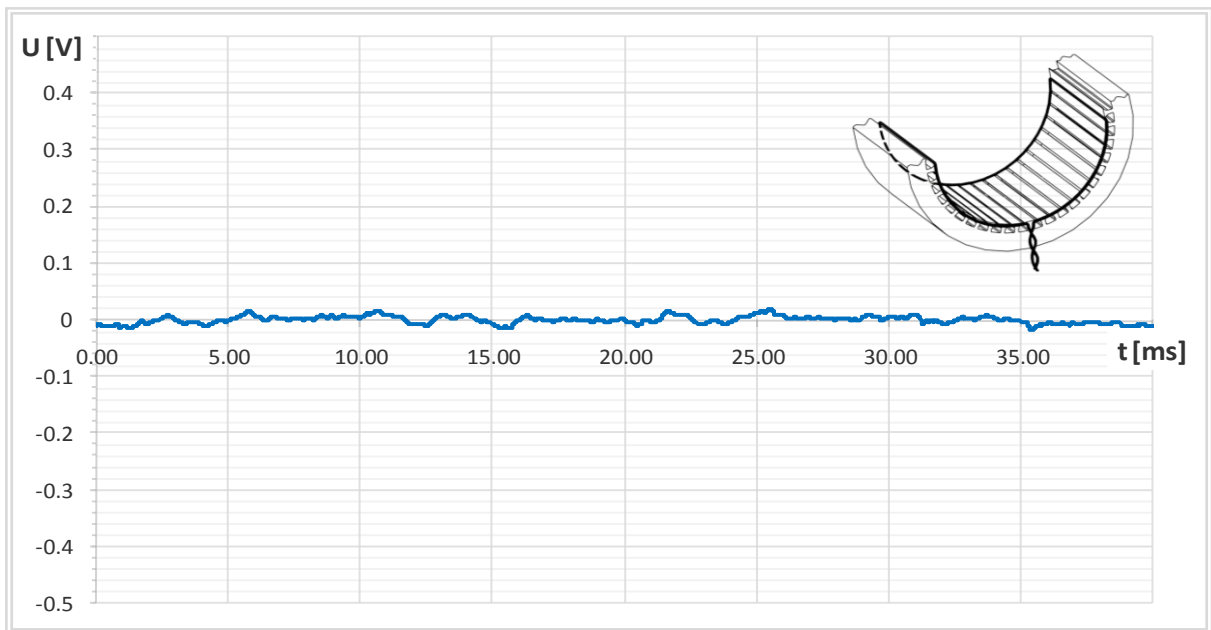
Slika 7.11. Napon induciran u mjernom svitku Ms_3 , ugrađenom kao na slici 5.10-2, za prazni hod pri uzbudnoj struji od 4 A.

Integracijom napona induciranog u mjernom svitku prikazanom na slici 7.11, dobiva se vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetskog toka kojeg obuhvaća mjerni svitak Ms_3 . Primjenom relacije (5.13), uz poznatu površinu svitka, može se izračunati vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka, koja je prikazana na slici 7.12.



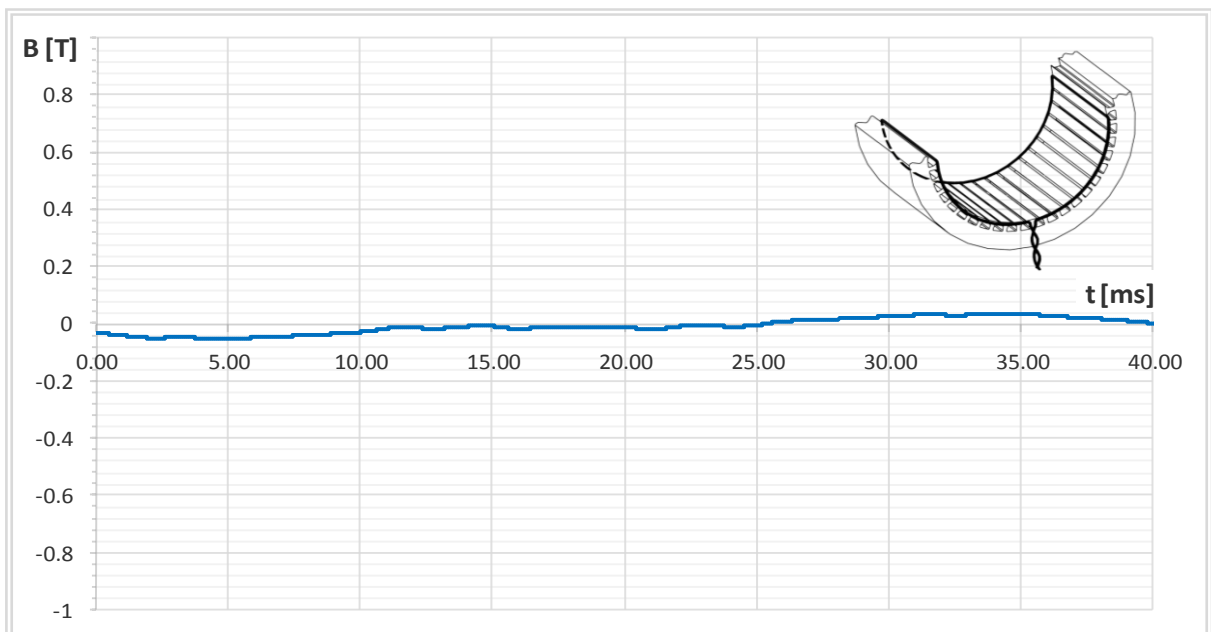
Slika 7.12. Raspodjela magnetske indukcije dobivena integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_3 te primjenu relacije 5.13.

Mjeren je i napon koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 , koji je ugrađen kako je prikazano na slici 5.11-2, odnosno na dvostrukom polnom koraku. Valni oblik napona koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 , u praznom hodu pri struji uzbude 4 A, prikazan je na slici 7.13.



Slika 7.13. Izmjereni napon koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 , koji je ugrađen kao na slici 5.10-3, za prazni hod pri uzbudnoj struji od 4 A.

Integracijom napona induciranog u mjernom svitku prikazanom na slici 7.13, te primjenom relacije (5.13), uz poznatu površinu mjernog svitka Ms_7 , može se izračunati vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka, koja je prikazana na slici 7.14.



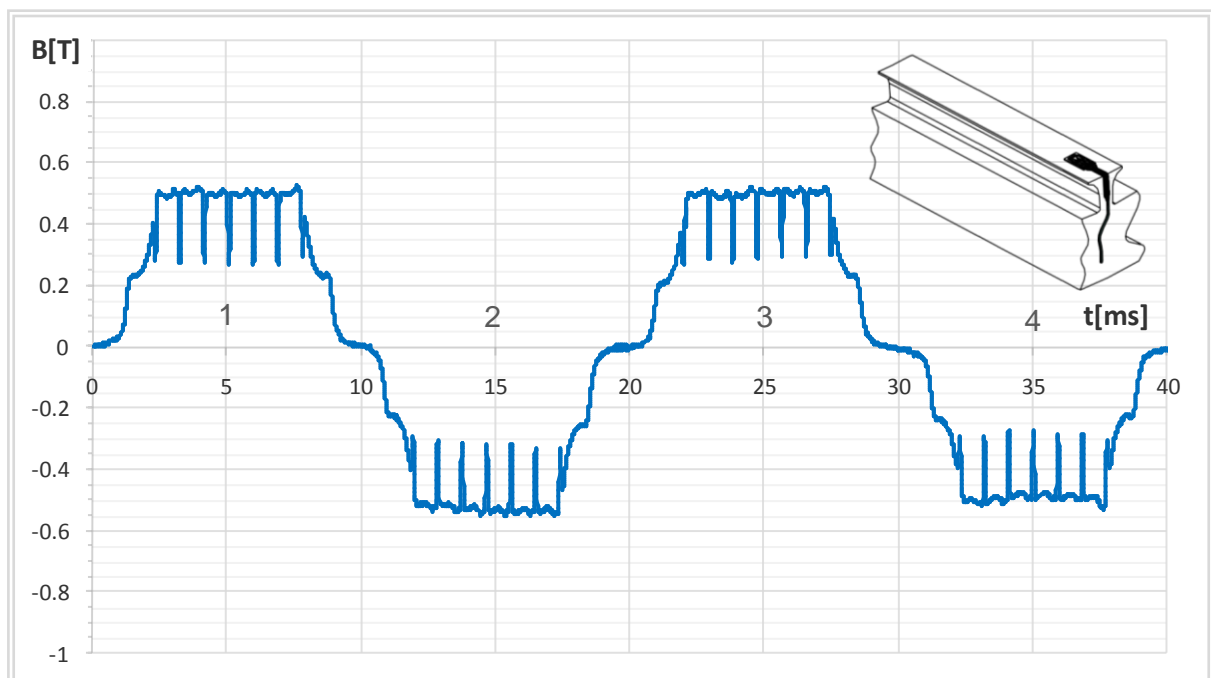
Slika 7.14. Raspodjela prosječne vrijednosti magnetske indukcije dobivene integracijom napona induciranog u mjernom svitku ugrađenom na dvostrukom polnom koraku, za prazni hod pri uzbudnoj struji od 4 A.

7.3. Prazni hod generatora uz prisutne međuzavojne kratke spojeve svitka uzbuđnog namota

Ova faza ispitivanja provodi se na način da se pogonskim strojem zarotira rotor ispitivanog generatora na željenu brzinu vrtnje, te se postepeno podiže uzbuđna struja uzbuđnika putem regulacijskog transformatora. S tim, da je prije početka rotacije ispitivanog stroja potrebno kratko spojiti n zavoja svitka uzbuđnog namota.

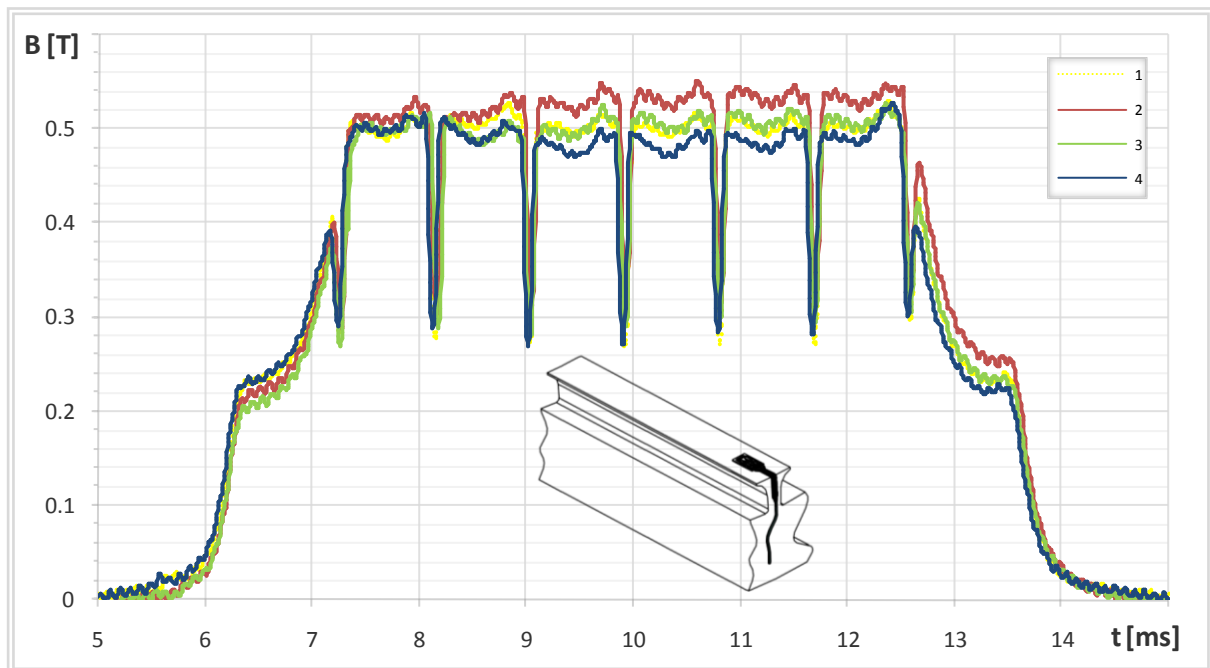
Na slici 4.10 prikazan je način ugradnje izvoda za kratko spajanje, koji omogućuju kratko spajanje 6, 8 i 10 zavoja svitka uzbuđnog namota. U nastavku ove točke prikazat će se rezultati mjerenja magnetske indukcije i napona induciranih u mjernim svitcima uz prisutnost 10 kratko spojenih zavoja svitka uzbuđnog namota.

Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu, mjerena Hallovim senzorom H_1 , ugrađenim na zub statorskog paketa, uz prisutni međuzavojni kratki spoj 10 zavoja, za prazni hod pri struji uzbuđe od 4 A, prikazana je na slici 7.15.



Slika 7.15. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerena Hallovim senzorom ugrađenim na zub statorskog paketa za prazni hod, uz međuzavojni kratki spoj 10 zavoja jednog svitka uzbuđnog namota, pri uzbuđnoj struji od 4 A.

Valni oblik raspodjele magnetske indukcije pod polom na kojem je prisutan međuzavojni kratki spoj, ne razlikuje se od raspodjele magnetske indukcije pod preostalim polovima. Međutim, među njima dolazi do određenih odstupanja u iznosima magnetske indukcije. Slika 7.16 prikazuje raspodjelu magnetske indukcije na polnom koraku svih polova.

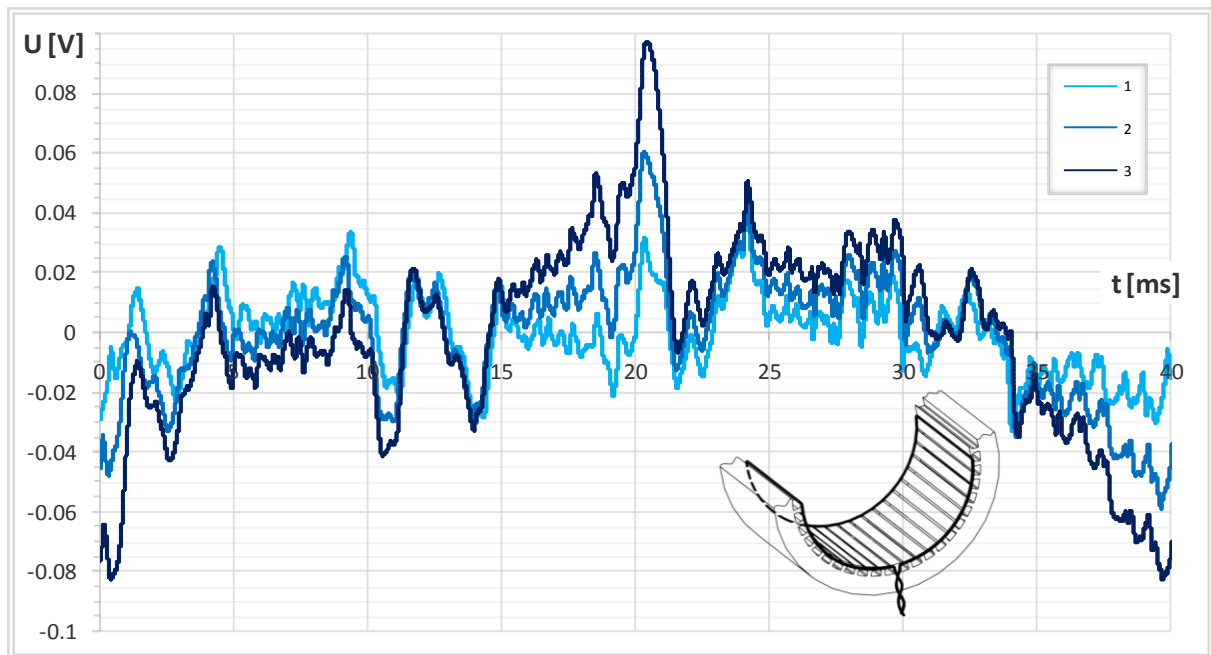


Slika 7.16. Raspodjela magnetske indukcije na polnom koraku, mjerena Hallovim senzorom H_1 , za prazni hod, pri uzbudnoj struji od 4 A:
 Krivulja 1 – pol broj 1, Krivulja 2, pol broj 2, Krivulja 3 – pol broj 3,
 Krivulja 4 – pol broj 4 (pol s međuzavojnim kratkim spojem).

Iz podataka prikazanih na slici 7.16 može se uočiti da srednja vrijednost magnetske indukcije pod polom s međuzavojnim kratkim spojem (pol br. 4) ima i najmanji iznos, srednja vrijednost magnetske indukcije pod polovima br. 3 i 1 (susjedni polovi) imaju nešto veći iznos, dok pol br. 2 koji je dijametralno suprotan polu s manjim iznosom broja zavoja ima najvišu srednju vrijednost magnetske indukcije pod polom.

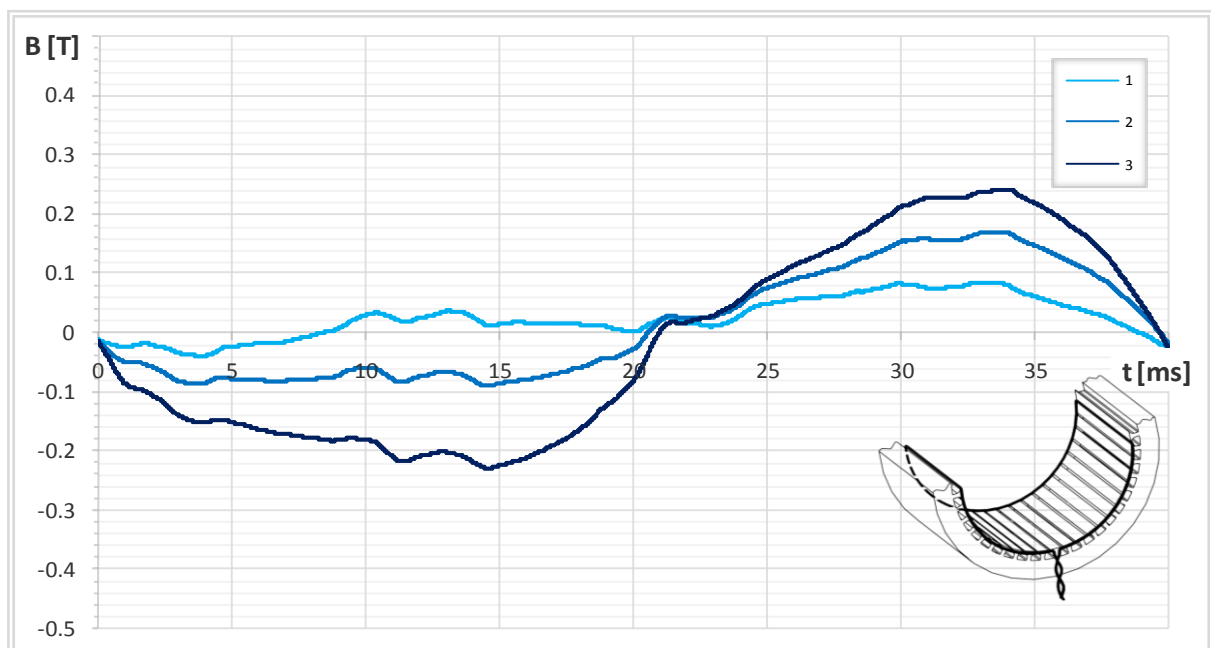
Izmjeren je i valni oblik napona koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 , koji je ugrađen kako je prikazano na slici 5.11-2, odnosno na dvostrukom polnom koraku. Valni oblik napona koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 , u praznom hodu uz prisutne međuzavojne kratke spojeve svitka uzbudnog namota, pri struji uzbude 4 A, prikazan je na slici 7.17.

Integracijom napona induciranog u mjernom svitku prikazanom na slici 7.17, te primjenom relacije (5.13), uz poznatu površinu mjernog svitka Ms_7 , može se izračunati vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka, koja je prikazana na slici 7.18.



Slika 7.17. Izmjereni napon koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 , koji je ugrađen kao na slici 5.10-3, za prazni hod pri uzbuđnoj struji od 4 A: Krivulja 1 – bez međuzavojnih kratkih spojeva, Krivulja 2- uz prisutni kratki spoj 5% zavoja svitka uzbuđenog namota, Krivulja 3 - uz prisutni kratki spoj 10% zavoja svitka uzbuđenog namota.

Kako se može vidjeti na slici 7.17 pojavom međuzavojnih kratkih spojeva u svitku uzbuđenog namota u mjernom svitku inducira se veći iznos napona. Iznos napona induciran u mjernom svitku Ms_7 , bez prisutnih međuzavojnih kratkih spojeva, ovisi o preciznosti ugradnje vodiča mjernog svitka na dijametralnom koraku.

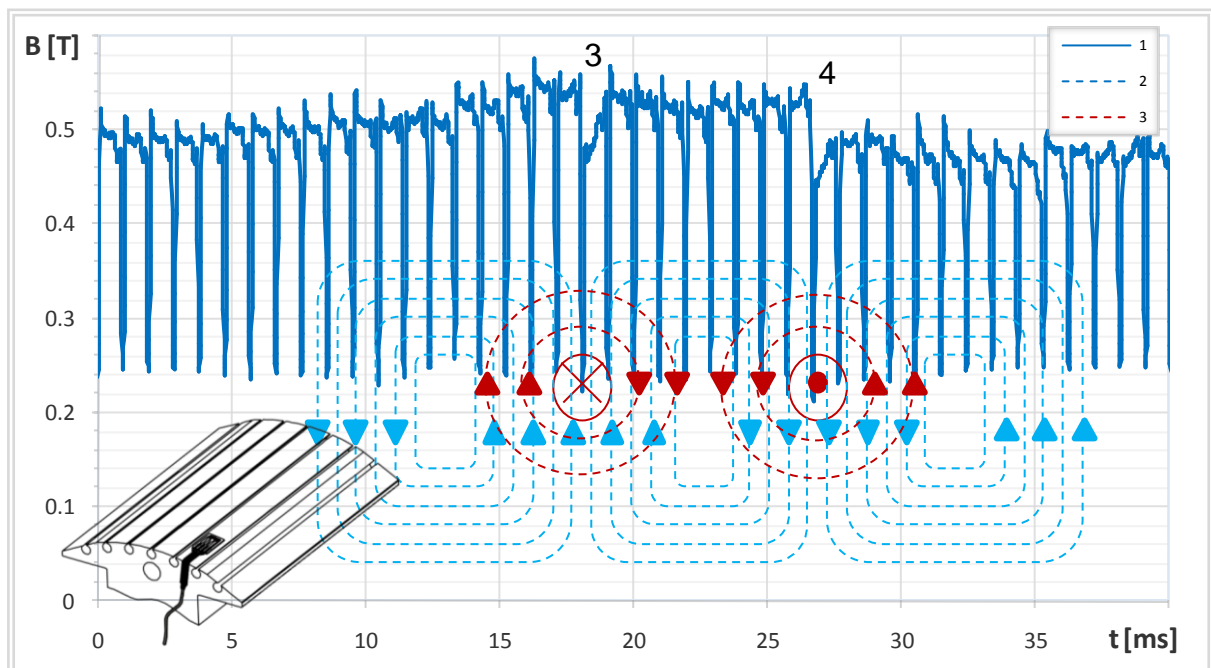


Slika 7.18. Raspodjela prosječne vrijednosti magnetske indukcije dobivene integracijom napona induciranog u mjernom svitku ugrađenom na dvostrukom polnom koraku, za prazni hod pri uzbuđnoj struji od 4 A: Krivulja 1 – bez međuzavojnih kratkih spojeva, Krivulja 2- uz prisutni kratki spoj 5% zavoja svitka uzbuđenog namota, Krivulja 3 - uz prisutni kratki spoj 10% zavoja svitka uzbuđenog namota.

7.4. Prazni hod generatora uz prisutne međuzavojne kratke spojeve svitka armaturnog namota

Ova faza ispitivanja provodi se na jednak način kao i ispitivanje u točki 7.3, s tim da se umjesto na svitku uzbudnog namota međuzavojni kratki spojevi provode na svitku armaturnog namota. Na slici 4.9 prikazan je svitak armaturnog namota kojim je omogućeno kratko spajanje 1, 2, 3, 4, 5 i 14 zavoja svitka. U nastavku ove točke prikazat će se rezultati mjerenja magnetske indukcije s rotorske polne papuče, te napona koji se inducira u mjernom svitku M_{s7} , uz prisutnost 5 kratko spojenih zavoja svitka armaturnog namota.

Slika 7.19 prikazuje raspodjelu magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerenu s rotorske polne papuče Hallovim senzorom H_4 , u praznom hodu pri uzbudnoj struji od 4 A, za jedan puni okret rotora. Valni oblik raspodjele magnetske indukcije na slici 7.19 prikazan je zajedno s magnetskim poljem kratko spojenih zavoja svitka namota armature i magnetskog polja namota uzbude.



Slika 7.19. 1- Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerena s polne papuče rotora, 2- raspodjela silnica magnetskog polja uzbude, 3 – raspodjela silnica magnetskog polja kratko spojenog svitka.

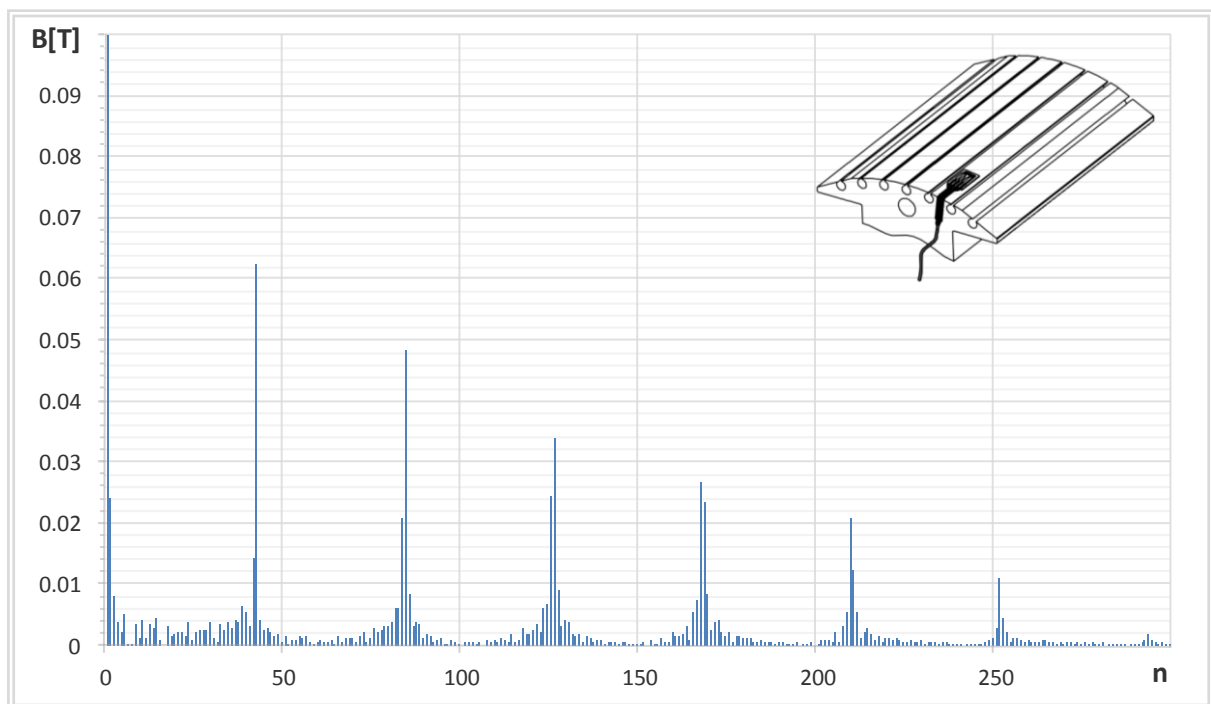
Usporedi li se valni oblik raspodjele magnetske indukcije prikazane na slici 7.19 s valnim oblikom raspodjele magnetske indukcije prikazane na slici 7.6, mjerene bez međuzavojnih kratkih spojeva svitka namota armature, a u istim radnim uvjetima, mogu se uočiti značajna odstupanja.

Bez prisutnih međuzavojnih kratkih spojeva, valni oblik raspodjele magnetske indukcije je periodična funkcija za svaki zub odnosno utor statora. Pri tom magnetska indukcija pod svim zubima statora jednakog je iznosa. Pojavom međuzavojnih kratkih spojeva, u svitku namota armature, iznos magnetske indukcije prestaje biti jednak pod svim zubima statora, a u valnom obliku prisutni su harmonički članovi nižeg reda.

Također je moguće uočiti dva karakteristična propada magnetske indukcije uzrokovana kratko spojenim zavojima svitka u namotu armature.

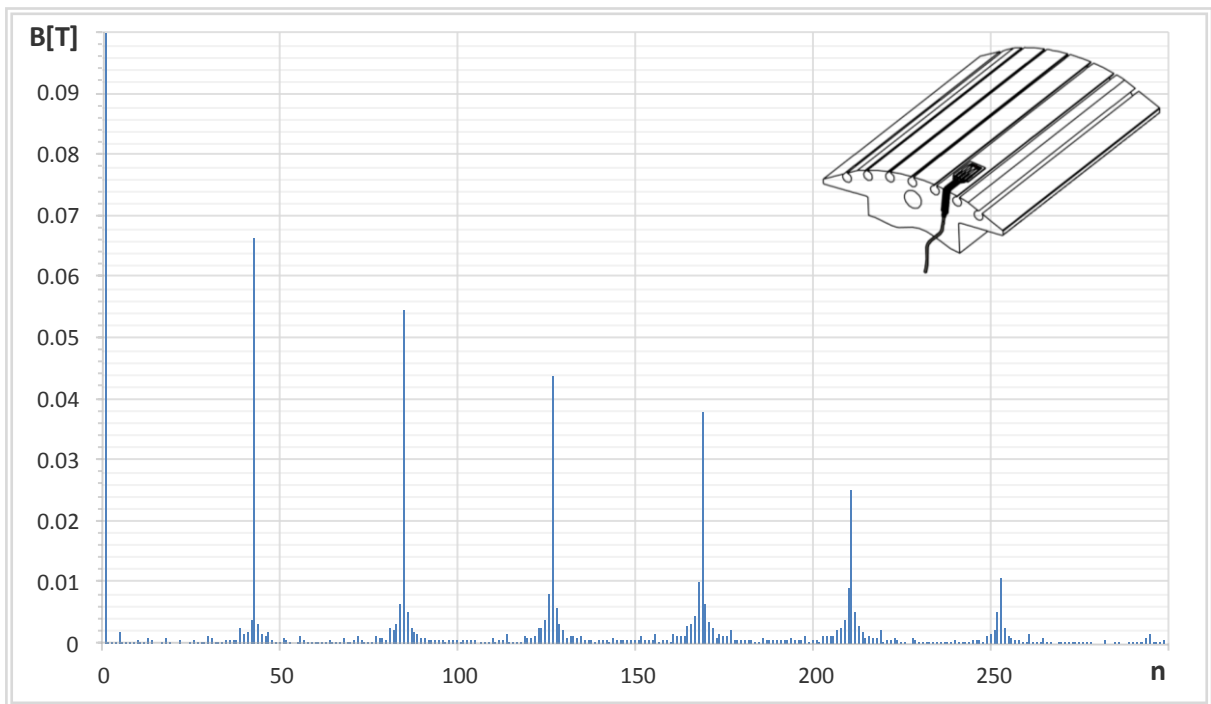
Na slici 7.19 može se uočiti je udaljenost karakterističnih propada označenih brojevima 3 i 4 jednaka 10 utorskih koraka, što je jednako koraku namota, a time i koraku svitka s kratko spojenim zavojima. Prema tome, može se potvrditi teza dana u poglavlju 6.3 i zaključiti da magnetsko polje struje kroz kratko spojeni zavoj uzrokuje poremećaj magnetskog polja u zračnom rasporu stroja. Također je moguće uočiti da se uz istu uzбудnu struju postiže niža vrijednost magnetske indukcije u zračnom rasporu uz prisutne kratke spojeve.

Frekvencijski sastav valnog oblika raspodjele magnetske indukcije mjerene u zračnom rasporu s rotorske polne papuče uz prisutne međuzavojne kratke spojeve i bez istih prikazuju slike 7.20 i 7.21.



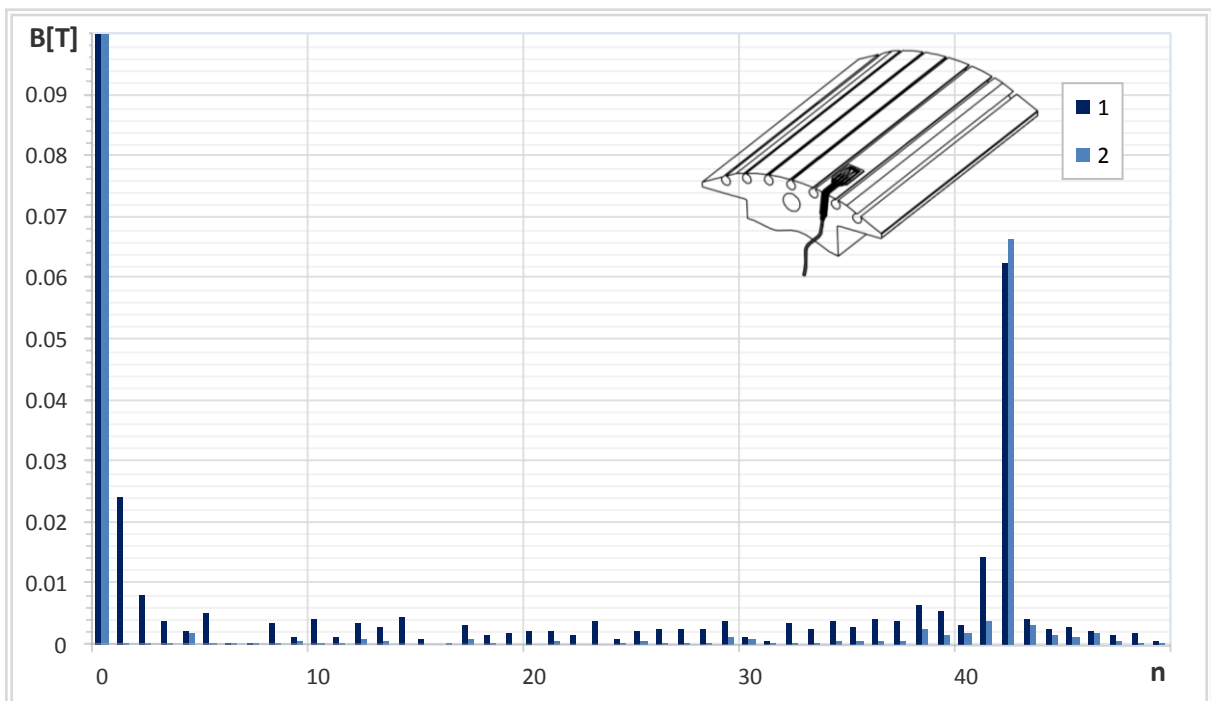
Slika 7.20. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije mjerene u zračnom rasporu s rotorske polne papuče uz prisutne međuzavojne kratke spojeve 5 zavoja svitka namota armature, za generator u praznom hodu.

U frekvencijskom sastavu valnog oblika raspodjele magnetske indukcije, prikazane na slici 7.20, dominantan je nulti harmonički član, 42 harmonički član te njegovi viši harmoničkih članovi koji su određeni brojem statorskih utora.



Slika 7.21. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije mjerene u zračnom rasporu s rotorske polne papuče bez međuzavojnih kratkih spojeva svitka namota armature, za generator u praznom hodu.

Iz rezultata frekvencijske analize prikazane na slikama 7.20 i 7.21 moguće je uočiti da se najveće razlike manifestiraju na harmoničkim članovima nižeg reda. Slika 7.22 prikazuje prvih 50 harmoničkih članova sa slike 7.20 i 7.21.



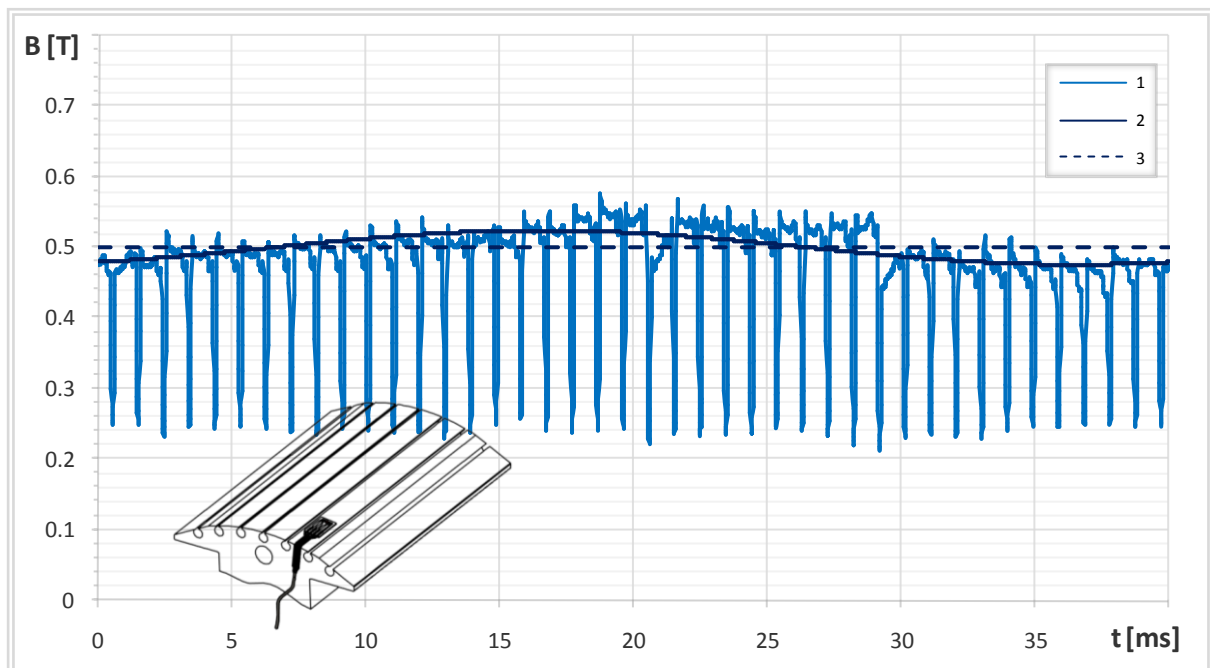
Slika 7.22. Frekvencijska analiza prvih 50 harmonijskih članova raspodjele magnetske indukcije mjerene u zračnom rasporu s rotorske polne papuče:
1 – uz prisutne međuzavojne kratke spojeve 5 zavoja svitka namota armature,
2 – bez međuzavojnih kratkih spojeva svitka namota armature.

Promjena amplituda harmoničkih članova, uzrokovana kratkim spojevima 5 zavoja svitka namota armature, prikazana je u tablici 7.5.

Tablica 7.5. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed kratkog spoja 5 zavoja svitka namota armature.

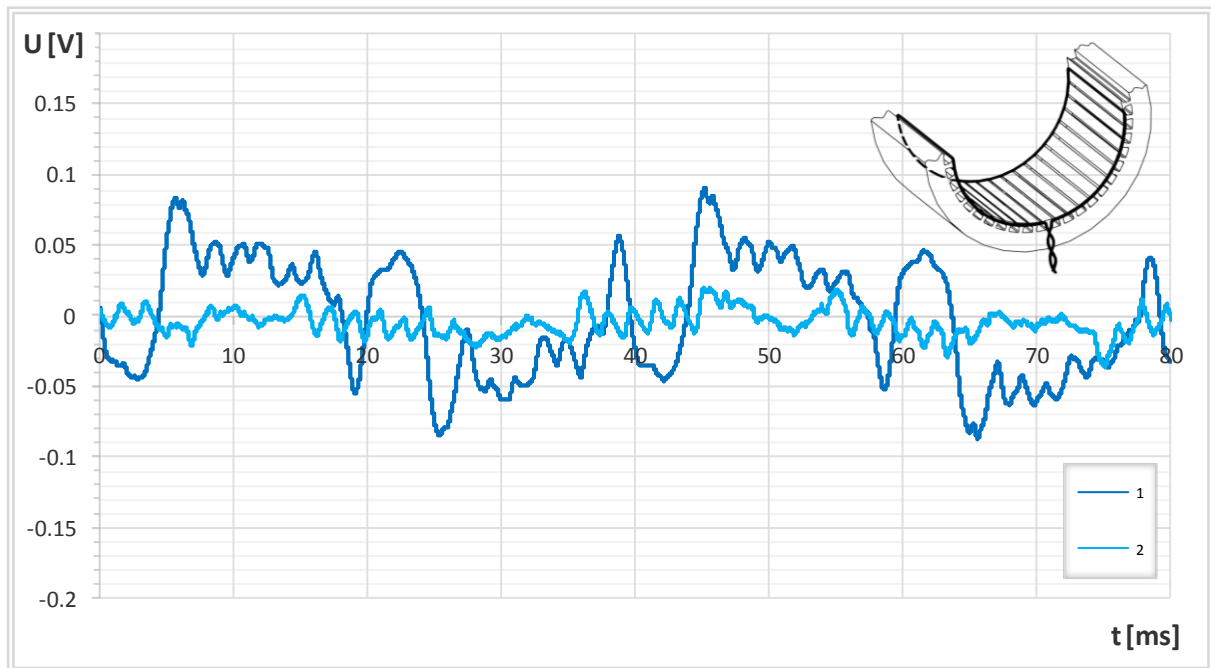
Harmonik broj	B [T]		Promjena amplitude ΔA (%)
	Bez kratkog spoja	Uz kratki spoj	
1	0,000275	0,024208	8707,39
2	0,000305	0,008118	2562,85
5	0,000424	0,005107	1105,53
10	0,000382	0,004358	1041,94
14	0,000059	0,004512	7519,74
15	0,000082	0,001019	1146,53
23	0,000146	0,003901	2579,84

Promjena amplituda harmoničkih članova navedenih u tablici 7.5, može se upotrijebiti za detekciju kvara na stroju. Najvjerniji pokazatelj prisutnosti međuzavojnih kratkih spojeva u svitku namota armature, prema podacima mjerenja, je značajnija promjena prvog harmoničkog člana u frekvencijskom sastavu raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerene s polne papuče rotora, što je prikazano na slici 7.23.



Slika 7.23. 1- Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerena s polne papuče rotora uz prisutne međuzavojne kratke spojeve 5 zavoja svitka namota armature, 2- prvi harmonički član uz prisutne međuzavojne kratke spojeve 5 zavoja svitka namota armature, 3 – prvi harmonički član bez međuzavojnih kratkih spojeva svitka namota armature.

Prikazat će se i rezultati mjerenja napona koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 , ugrađenom kao na slici 5.11-2. Prikazani valni oblik izmjeren je u praznom hodu generatora.



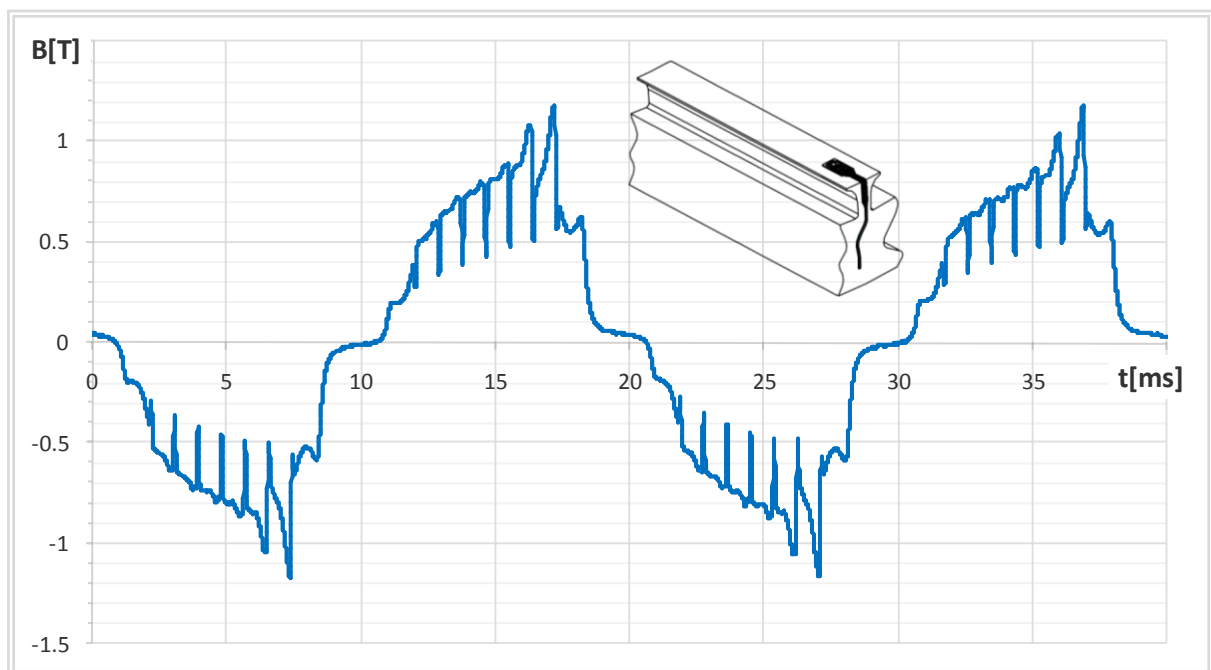
Slika 7.24. Napon induciran u mjernom svitku Ms_7 , ugrađenom kao na slici 5.11-2, za prazni hod generatora: Krivulja 1 – uz prisutnost međuzavojnih kratkih spojeva 5 zavoja svitka namota armature, Krivulja 2 – bez međuzavojnih kratkih spojeva namota armature.

Kako se može uočiti na slici 7.24, pri pojavi međuzavojnih kratkih spojeva u namotu armature, razlika napona induciranih u vodičima mjernog svitka Ms_7 , postavljenih na dijametralnom koraku, postaje izraženija. Taj efekt može se upotrijebiti kao indikator u detekciji međuzavojnih kratkih spojeva svitka armaturnog namota.

7.5. Opterećeno stanje generatora

Opterećeno stanje generatora provodi se na način da se pogonskim strojem zarotira rotor ispitivanog generatora na željenu brzinu vrtnje, te se postepeno podiže uzbudna struja uzбудnika putem regulacijskog transformatora, dok se ne postigne nazivni napon na otvorenim stezaljkama armaturnog namota. Zatim se u armaturni krug uključi trofazni regulacijski otpor (slika 7.1 – 17), čiji iznos određuje struju armature. Kako se povećava iznos armaturne struje potrebno je povećavati i struju uzbuđe uzbudnika, odnosno uzbuđu ispitivanog generatora, kako bi se zadržao nazivni napon generatora. Za opterećenje generatora, pored regulacijskog otpora korištena je mreža 380 VAC na koju je sinkroniziran ispitivani stroj. Ovim je omogućeno mjerenje parametara stroja pri induktivnom djelatnom i kapacitivnom opterećenju ispitivanog generatora.

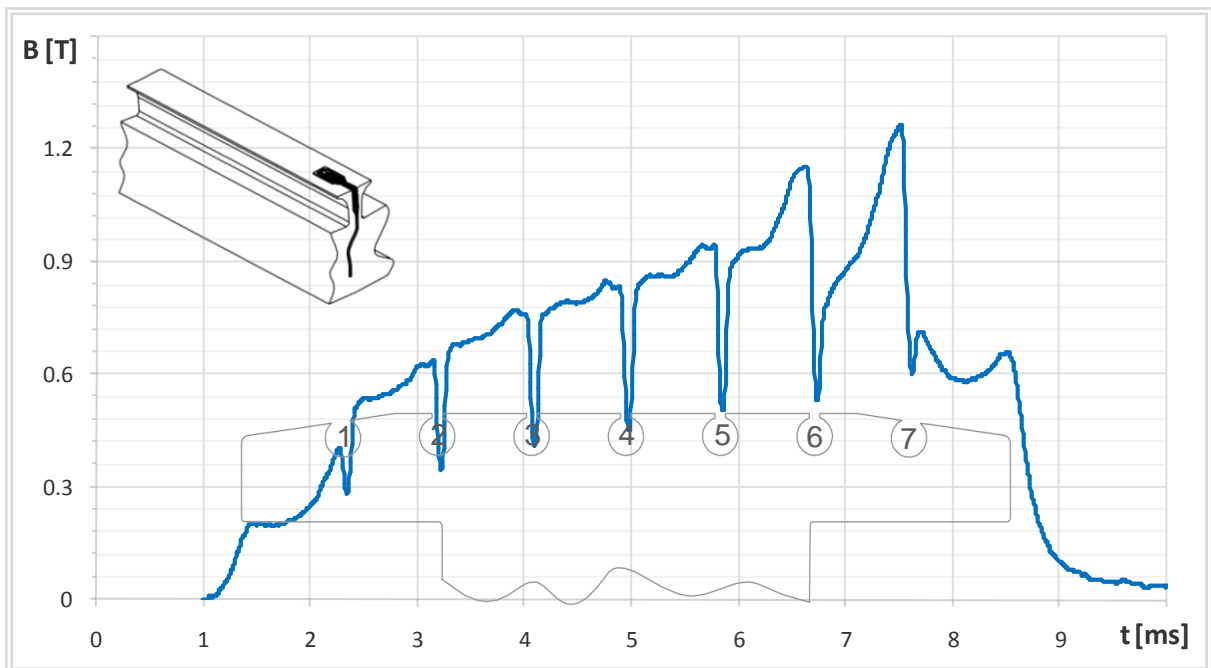
Rezultati mjerenja dobiveni u ovoj fazi ispitivanja prikazat će se u nastavku ove točke. Započet će se s prikazom raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu koja je mjerena Hallovim senzorom H_1 smještenim na zub statorskog paketa, za opterećeni generator, za jedan puni okret rotora (slika 7.25). Hallov senzor H_1 ugrađen je kako je prikazano na slici 5.11-1.



Slika 7.25. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerena sa zuba statorskog paketa, za opterećeni generator.

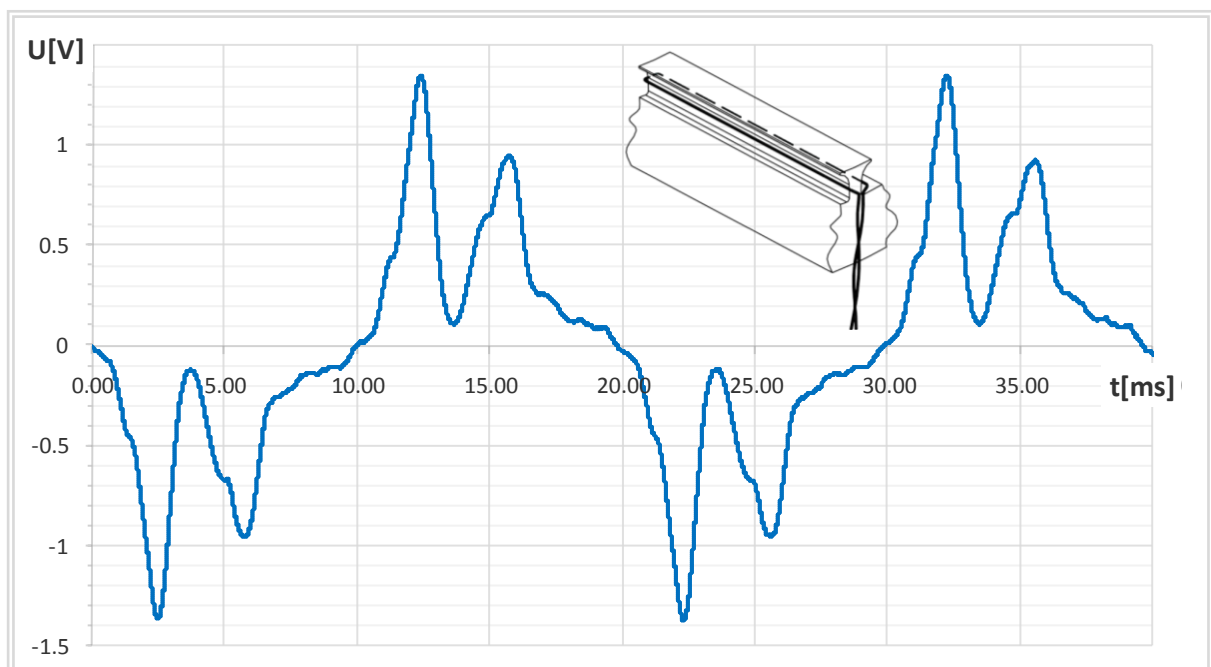
Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu, na polnom koraku, zajedno s konstrukcijskim izmjerama pola prikazana je na slici 7.26.

Na prikazanom valnom obliku moguće je uočiti da valni oblik raspodjele magnetske indukcije, promatran na polnom koraku, nema jednak oblik s lijeve i desne strane polne papuče iako su one identične. Razlog tome je armaturno protjecanje koje značajno utječe na valni oblik što je i objašnjeno u poglavlju 6.6, a prikazano na slici 6.93.



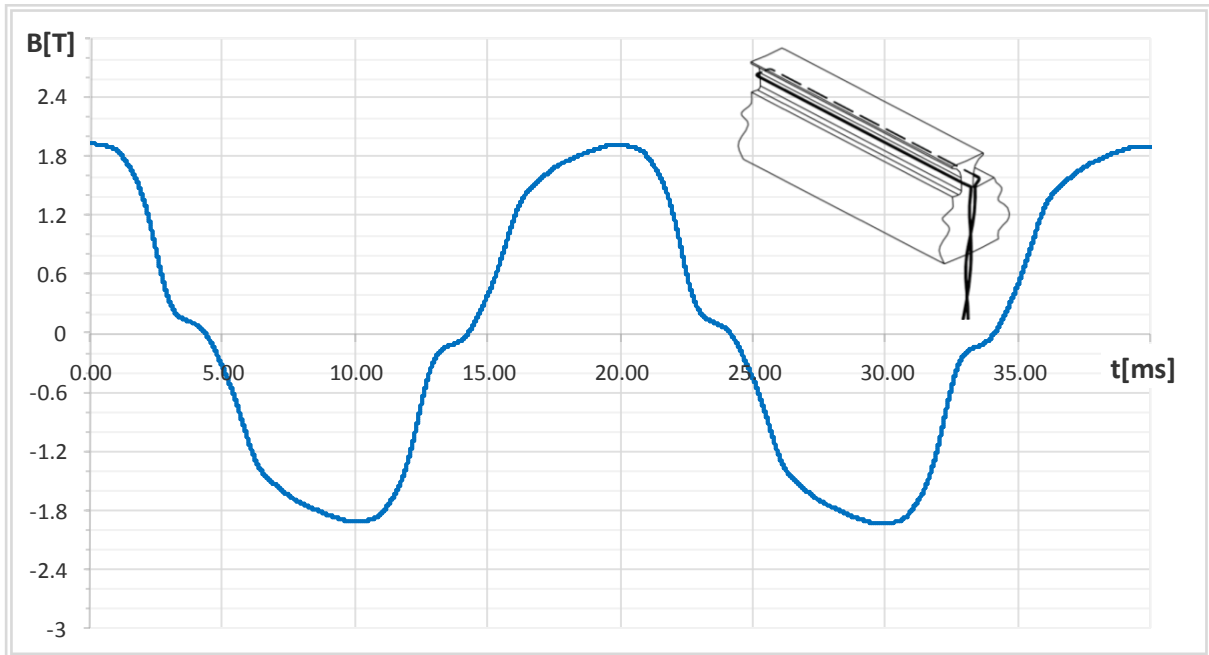
Slika 7.26. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerena sa zuba statorskog paketa, za opterećeni generator, prikazana zajedno s konstrukcijskim izmjerama polne papuče.

Prikazat će se i rezultati mjerenja napona koji se induciraju u mjernim svitcima ugrađenim na stator ispitivanog generatora. Napon koji se inducira u mjernom svitku Ms_1 , ugrađenom kao na slici 5.10-1, prikazan je na slici 7.27. Prikazani valni oblik izmjeren je uz opterećeni generator.



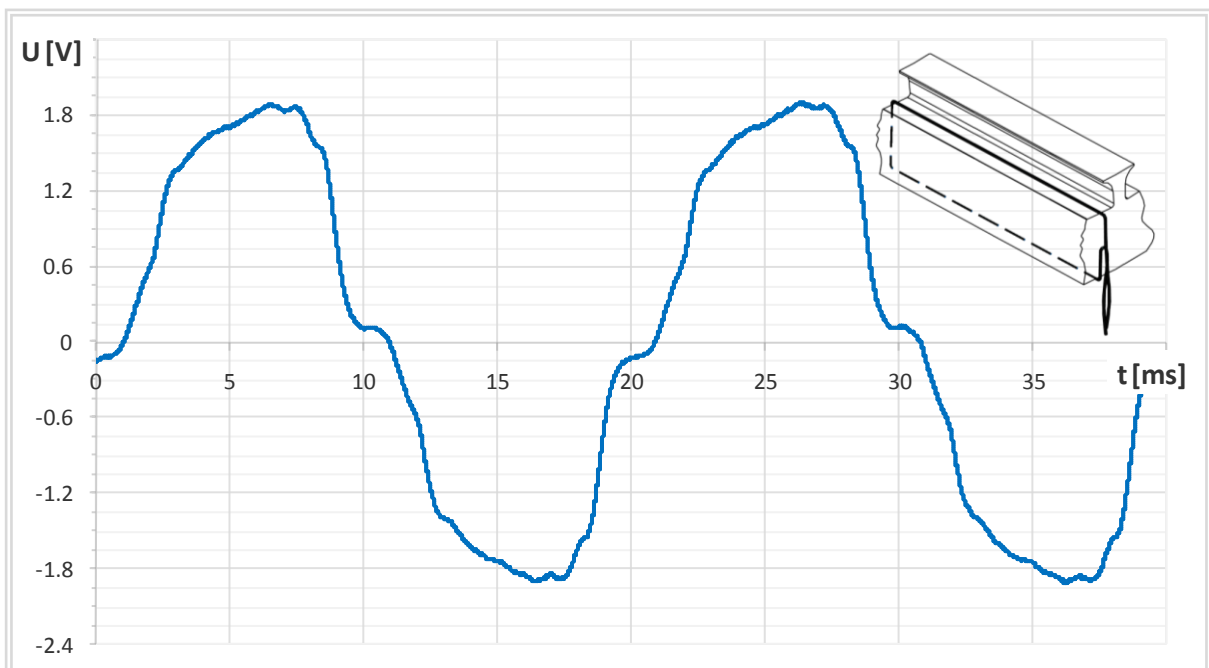
Slika 7.27. Napon induciran u mjernom svitku Ms_1 , ugrađenom kao na slici 5.10-1, za opterećeni generator.

Integracijom napona induciranog u mjernom svitku prikazanom na slici 7.26, dobiva se vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetskog toka kojeg obuhvaća mjerni svitak Ms_1 . Primjenom relacije (5.13), uz poznatu površinu svitka, može se izračunati vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka, koja je prikazana na slici 7.28.



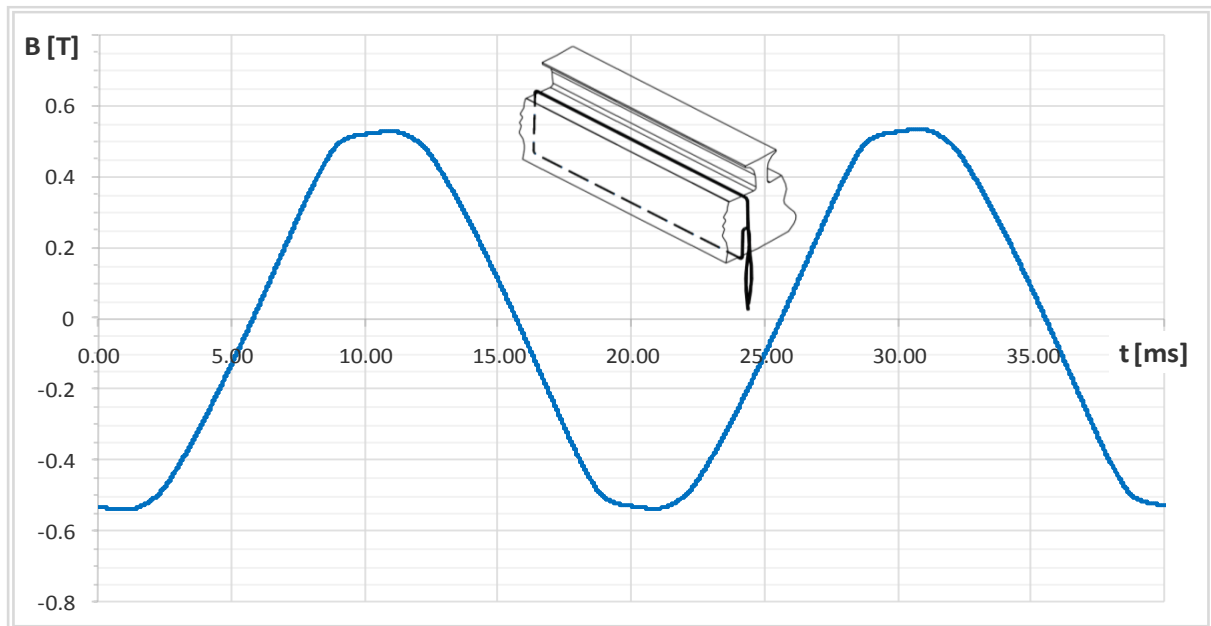
Slika 7.28. Raspodjela prosječne vrijednosti magnetske indukcije dobivena integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 , te primjenu relacije 5.13.

Napon koji se inducira u mjernom svitku Ms_3 , ugrađenom kao na slici 5.10-2, prikazan je na slici 7.29. Prikazani valni oblik izmjeren je uz opterećeni generator.



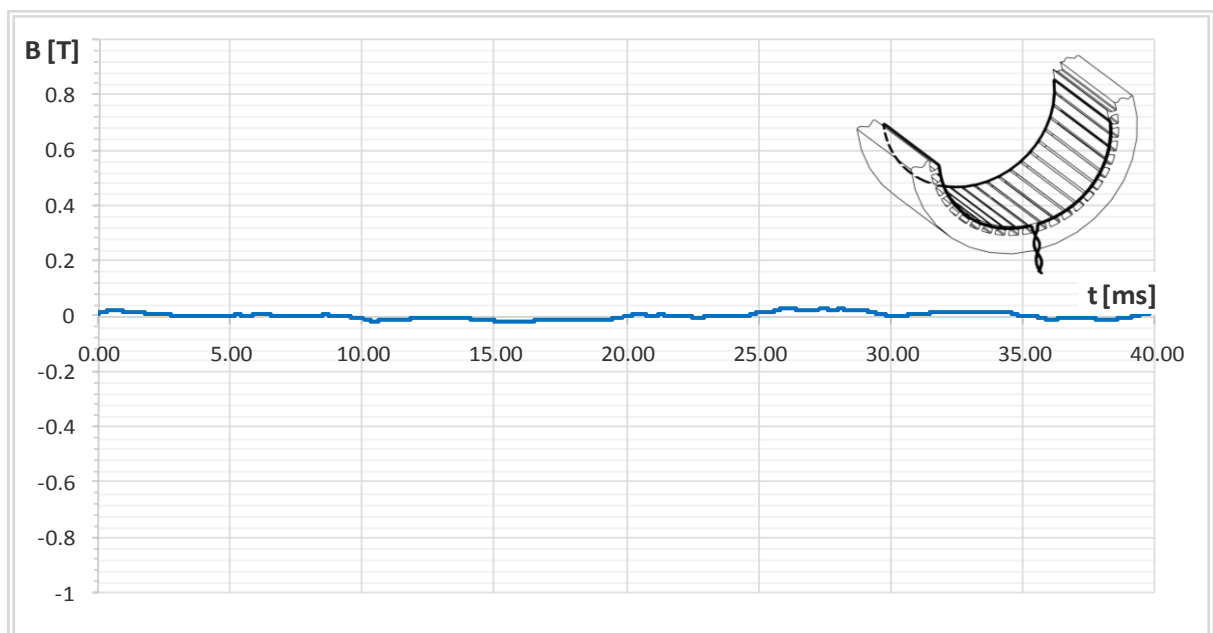
Slika 7.29. Napon induciran u mjernom svitku Ms_3 , ugrađenom kao na slici 5.10-2, za opterećeni generator.

Integracijom napona induciranog u mjernom svitku prikazanom na slici 7.29, dobiva se vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetskog toka kojeg obuhvaća mjerni svitak Ms_3 . Primjenom relacije (5.13), uz poznatu površinu svitka, može se izračunati vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka, koja je prikazana na slici 7.30.



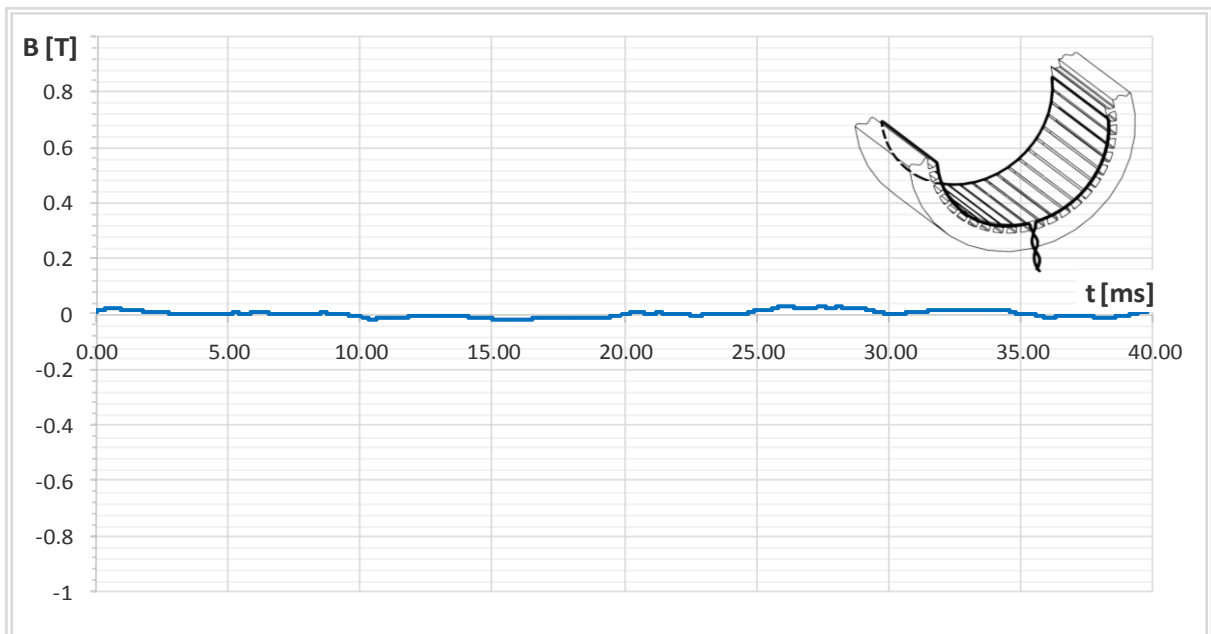
Slika 7.30. Raspodjela magnetske indukcije dobivena integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_3 te primjenu relacije 5.13.

Mjeren je i napon koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 , koji je ugrađen kako je prikazano na slici 5.11-2, odnosno na dvostrukom polnom koraku. Valni oblik napona koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 , za opterećeni generator, prikazan je na slici 7.31.



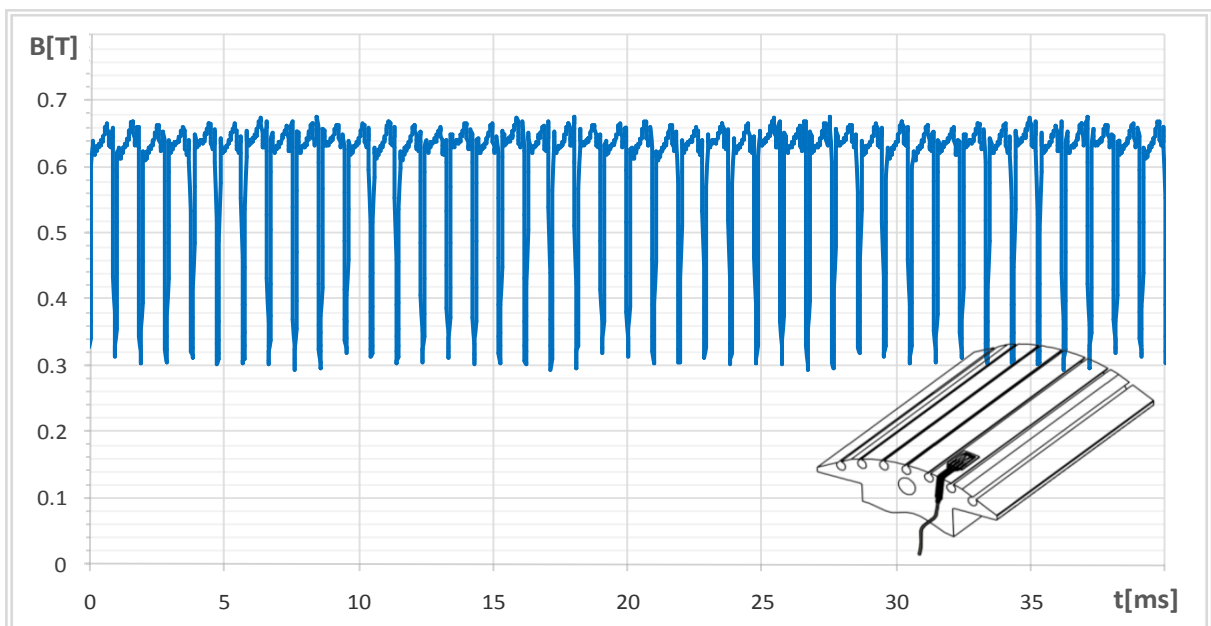
Slika 7.31. Izmjereni napon koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 , koji je ugrađen kao na slici 5.10-3, za opterećeni generator.

Integracijom napona induciranog u mjernom svitku prikazanom na slici 7.31, te primjenom relacije (5.13), uz poznatu površinu mjernog svitka M_{s7} , može se izračunati vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka, koja je prikazana na slici 7.32.



Slika 7.32. Raspodjela prosječne vrijednosti magnetske indukcije dobivene integracijom napona induciranog u mjernom svitku ugrađenom na dvostrukom polnom koraku, za opterećeni generator.

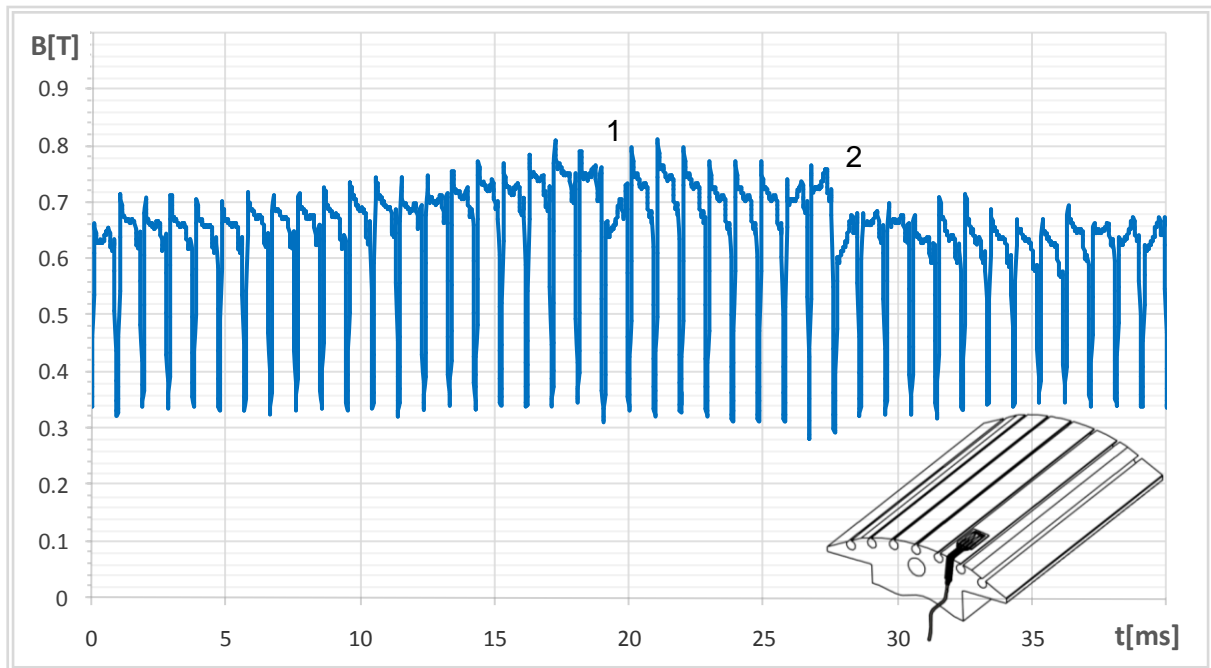
Na ispitivanom generatoru mjerena je raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu Hallovim senzorom H_4 , smještenim na polnoj papučici kako je prikazano na slici 5.12-1. Slika 7.33 prikazuje raspodjelu magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerenu s polne papučice, za opterećeni generator.



Slika 7.33. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerena s polne papučice rotora, za opterećeni generator.

7.6. Opterećeno stanje generatora uz prisutne međuzavojne kratke spojeve svitka armaturnog namota

Ova faza ispitivanja provodi se na jednak način kao i ispitivanje u točki 7.5, s tim da se na svitku armaturnog namota uključe međuzavojni kratki spojevi n zavoja. Na slici 4.9 prikazan je svitak armaturnog namota kojim je omogućeno kratko spajanje 1, 2, 3, 4, 5 i 14 zavoja svitka. U nastavku ove točke prikazat će se rezultati mjerenja magnetske indukcije s rotorske polne papuče uz prisutnost 5 kratko spojenih zavoja svitka armaturnog namota za opterećeni generator.



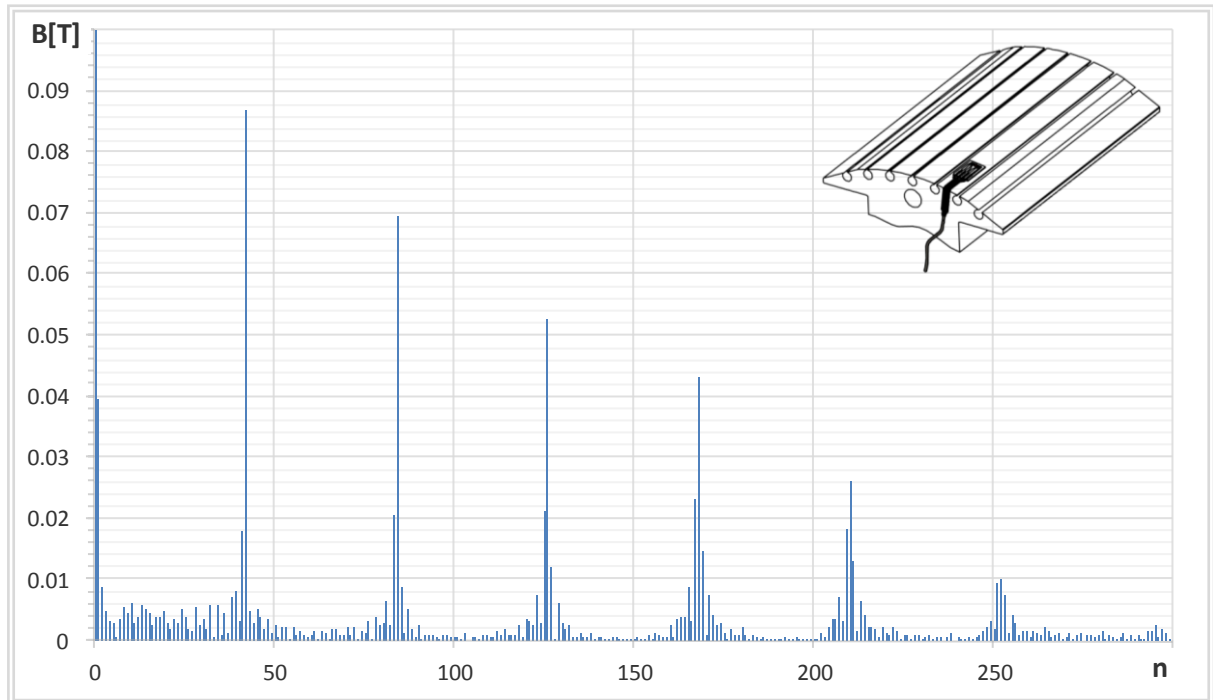
Slika 7.34. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu, mjerena s polne papuče rotora, za opterećeni generator, uz prisutni kratki spoj 5 zavoja svitka namota armature.

Usporedi li se valni oblik raspodjele magnetske indukcije prikazane na slici 7.34 s valnim oblikom raspodjele magnetske indukcije prikazane na slici 7.33, mjerene bez međuzavojnih kratkih spojeva svitka namota armature, a u istim radnim uvjetima, mogu se uočiti značajna odstupanja.

Bez prisutnih međuzavojnih kratkih spojeva, valni oblik raspodjele magnetske indukcije je periodična funkcija za svaki zub odnosno utor statora. Pri tom magnetska indukcija pod svim zubima statora jednakovnog je iznosa. Pojavom međuzavojnih kratkih spojeva, u svitku namota armature, iznos magnetske indukcije prestaje biti jednak pod svim zubima statora, a u valnom obliku prisutni su harmonički članovi nižeg reda. Također je moguće uočiti dva karakteristična propada magnetske indukcije uzrokovana kratko spojenim zavojima svitka u namotu armature.

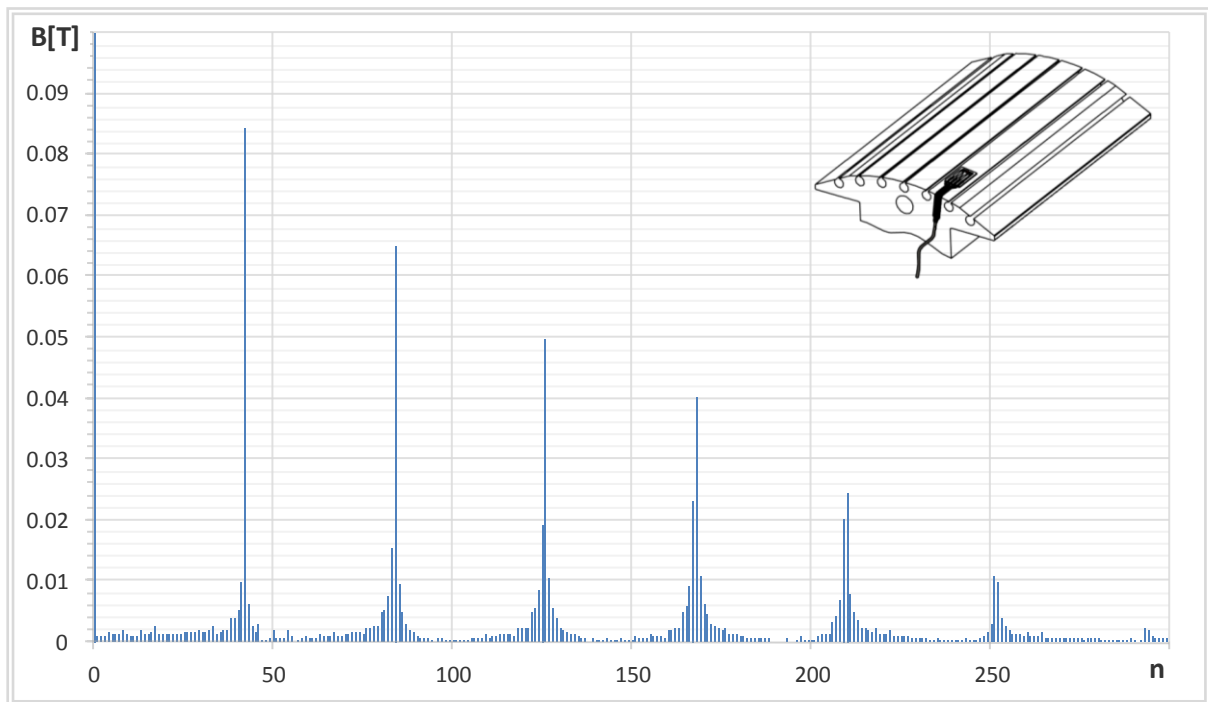
Na slici 7.34 može se uočiti je udaljenost karakterističnih propada označenih brojevima 1 i 2 jednaka 10 utorskih koraka, što je jednako koraku namota, a time i koraku svitka s kratko spojenim zavojima. Prema tome, može se potvrditi teza da magnetsko polje struje kroz kratko spojeni zavoj uzrokuje poremećaj magnetskog polja u zračnom rasporu stroja.

Frekvencijski sastav valnog oblika raspodjele magnetske indukcije mjerene u zračnom rasporu s rotorske polne papuče uz prisutne međuzavojne kratke spojeve i bez istih prikazuju slike 7.35 i 7.36.



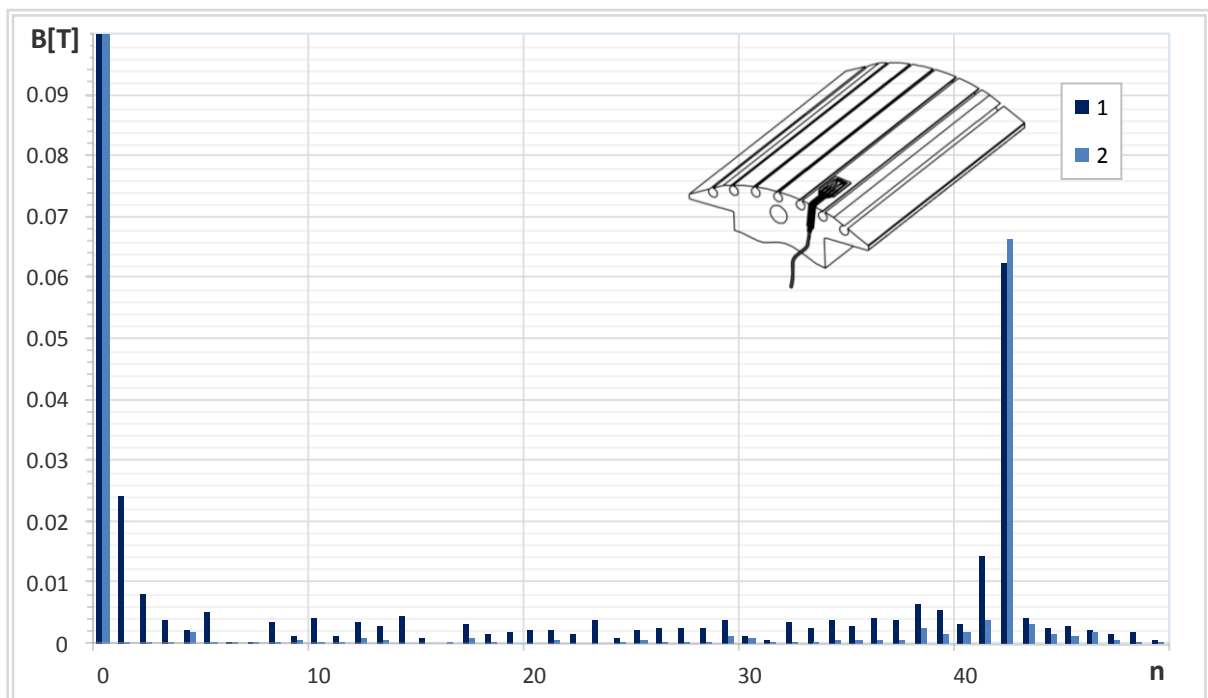
Slika 7.35. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije mjerene u zračnom rasporu s rotorske polne papuče uz prisutne međuzavojne kratke spojeve 5 zavoja svitka namota armature, za opterećeni generator.

U frekvencijskom sastavu valnog oblika raspodjele magnetske indukcije, prikazane na slici 7.35, dominantan je nulti harmonički član, 42 harmonički član te njegovi viši harmoničkih članovi koji su određeni brojem statorskih utora.



Slika 7.36. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije mjerene u zračnom rasporu s rotorske polne papuče bez međuzavojnih kratkih spojeva svitka namota armature, za opterećeni generator.

Iz rezultata frekvencijske analize prikazane na slikama 7.35 i 7.36 moguće je uočiti da se najveće razlike manifestiraju na harmoničkim članovima nižeg reda. Slika 7.37 prikazuje prvih 50 harmoničkih članova sa slike 7.35 i 7.36.



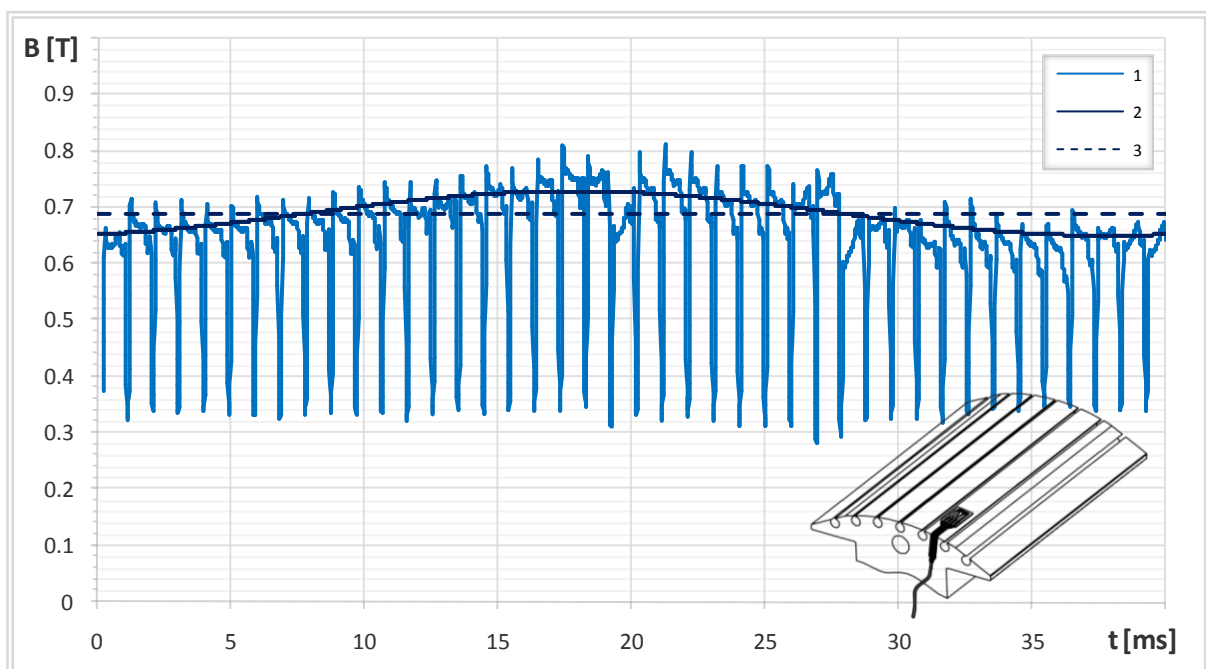
Slika 7.37. Frekvencijska analiza prvih 50 harmonijskih članova raspodjele magnetske indukcije mjerene u zračnom rasporu s rotorske polne papuče: 1 – uz prisutne međuzavojne kratke spojeve 5 zavoja svitka namota armature, 2 – bez međuzavojnih kratkih spojeva svitka namota armature.

Promjena amplituda harmoničkih članova, uzrokovana kratkim spojevima 5 zavoja svitka namota armature, za opterećeni generator, prikazana je u tablici 7.6.

Tablica 7.6. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed kratkog spoja 5 zavoja svitka namota armature.

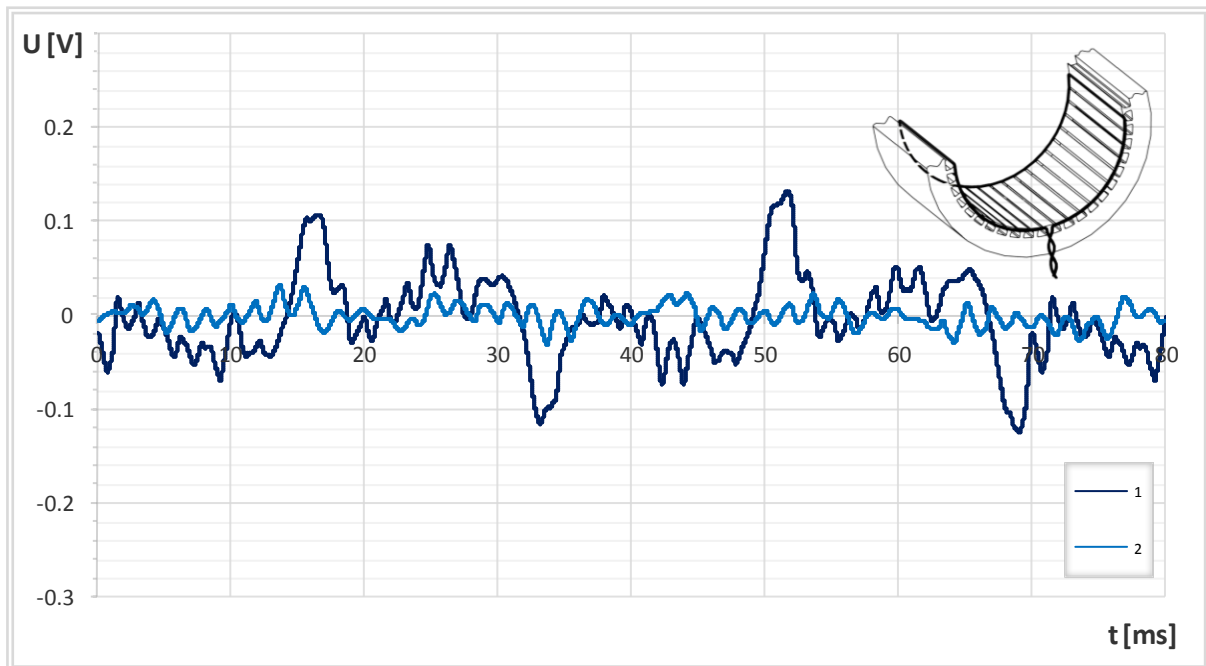
Harmonik broj	B [T]		Promjena amplitude ΔA (%)
	Bez kratkog spoja	Uz kratki spoj	
1	0,001082	0,039417	3542,30
2	0,001069	0,008718	715,94
10	0,001130	0,006357	462,81
12	0,001057	0,004042	282,54
14	0,001436	0,005278	267,44
15	0,001415	0,004723	233,81
34	0,001227	0,005939	384,19

Promjena amplituda harmoničkih članova navedenih u tablici 7.6, može se upotrijebiti u detekciji kvara na stroju. Najvjerniji pokazatelj prisutnosti međuzavojnih kratkih spojeva u svitku namota armature, za opterećeni generator, a prema podacima mjerenja, je značajnija promjena prvog harmoničkog člana u frekvencijskom sastavu raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerene s polne papuče rotora, što je prikazano na slici 7.38.



Slika 7.38. 1- Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerena s polne papuče rotora uz prisutne međuzavojne kratke spojeve 5 zavoja svitka armaturnog namota, 2- prvi harmonički član uz prisutne međuzavojne kratke spojeve 5 zavoja svitka namota armature, 3 – prvi harmonički član bez međuzavojnih kratkih spojeva svitka namota armature.

Prikazat će se i rezultati mjerenja napona koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 , ugrađenom kao na slici 5.11-2. Prikazani valni oblik izmjeren je u praznom hodu generatora.



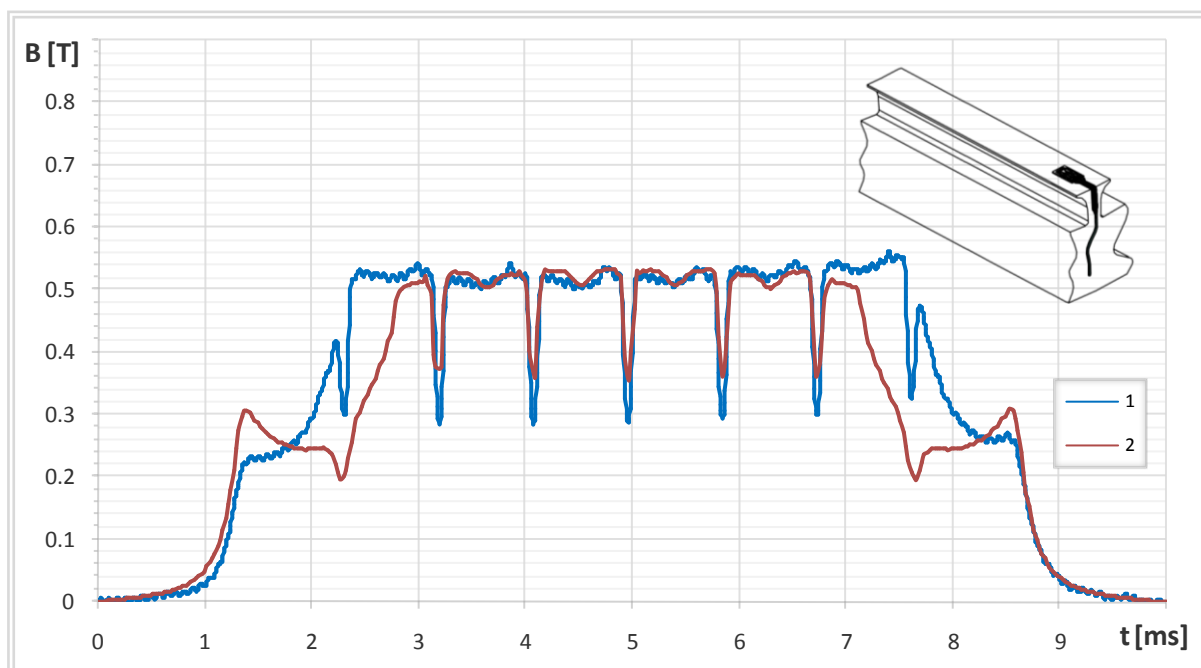
Slika 7.39. Napon induciran u mjernom svitku Ms_7 , ugrađenom kao na slici 5.11-2, za prazni hod generatora: Krivulja 1 – uz prisutnost međuzavoynih kratkih spojeva 5 zavoja svitka namota armature, Krivulja 2 – bez međuzavoynih kratkih spojeva namota armature.

Kako se može uočiti na slici 7.39, pri pojavi međuzavoynih kratkih spojeva u namotu armature, razlika napona induciranih u vodičima mjernog svitka Ms_7 , postavljenih na dijametralnom koraku, postaje izraženija. Taj efekt može se upotrijebiti kao indikator u detekciji međuzavoynih kratkih spojeva svitka armaturnog namota.

8. USPOREDBA PODATAKA MJERENJA I PRORAČUNA

Nakon što su prikupljeni rezultati mjerenja, načinjena je usporedba istih s rezultatima dobivenim proračunom. Proračuni, primjenom metode konačnih elemenata, obavljani su na modelu koji je izrađen prema tehničkoj dokumentaciji generatora SGBP 160 M-4M, a parametri stroja računati su pri jednakim uvjetima u kojim su provedena i mjerenja na ispitivanom stroju.

Započet će se s usporedbom rezultata mjerenja i proračuna raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane sa zuba statora, u praznom hodu.



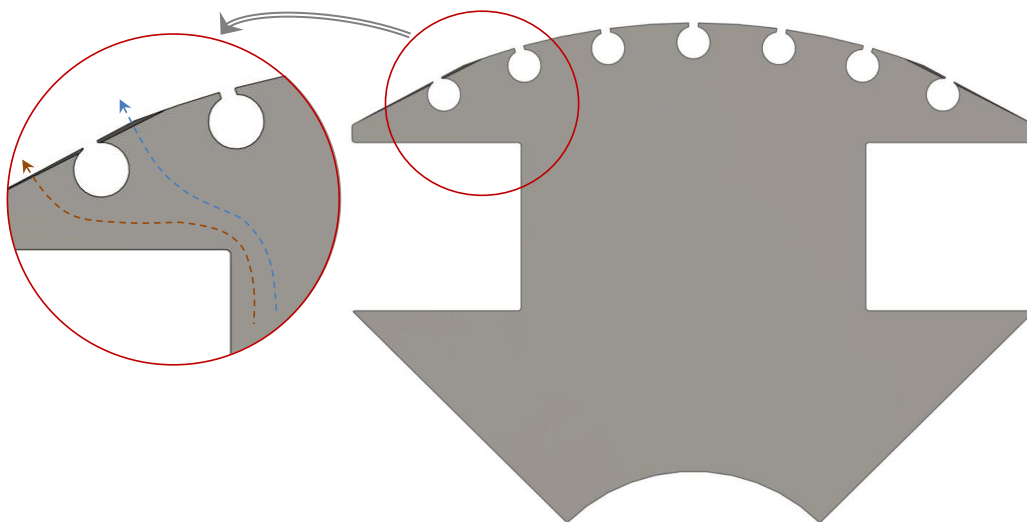
*Slika 8.1. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana sa zuba statorskog paketa za generator u praznom hodu:
Krivulja 1 - mjerenje, Krivulja 2 – izračun.*

Iz podataka prikazanih na slici 8.1 može se uočiti da se rezultati dobiveni mjerenjem i izračunom u dobroj mjeri poklapaju, ali da su prisutna i određena odstupanja. Najveća odstupanja prisutna su na rubnim dijelovima polne papuče, i moguće ih je objasniti ukoliko se pogleda oblik polne papuče. Iz tehničkih podataka ispitivanog stroja proizlazi da je zračni raspor stroja konstantnog iznosa na središnjem dijelu polne papuče, odnosno na 62 % polne papuče, te se postepeno povećava na preostalom dijelu polne papuče.

Iz rezultata prikazanih na slici 8.1 može se uočiti da iznos magnetske indukcije započinje opadati na dijelu polne papuče gdje započinje postepeno povećanje zračnog raspora. Kod rezultata mjerenja iznos magnetske indukcije počinje opadati nešto kasnije nego je to slučaj kod podataka izračuna. Iz tog proizlazi da je kod stvarnog stroja širina polne papuče sa konstantnim zračnim rasporom nešto veća nego kod modela za izračun. Model za izračun izrađen je prema tehničkoj

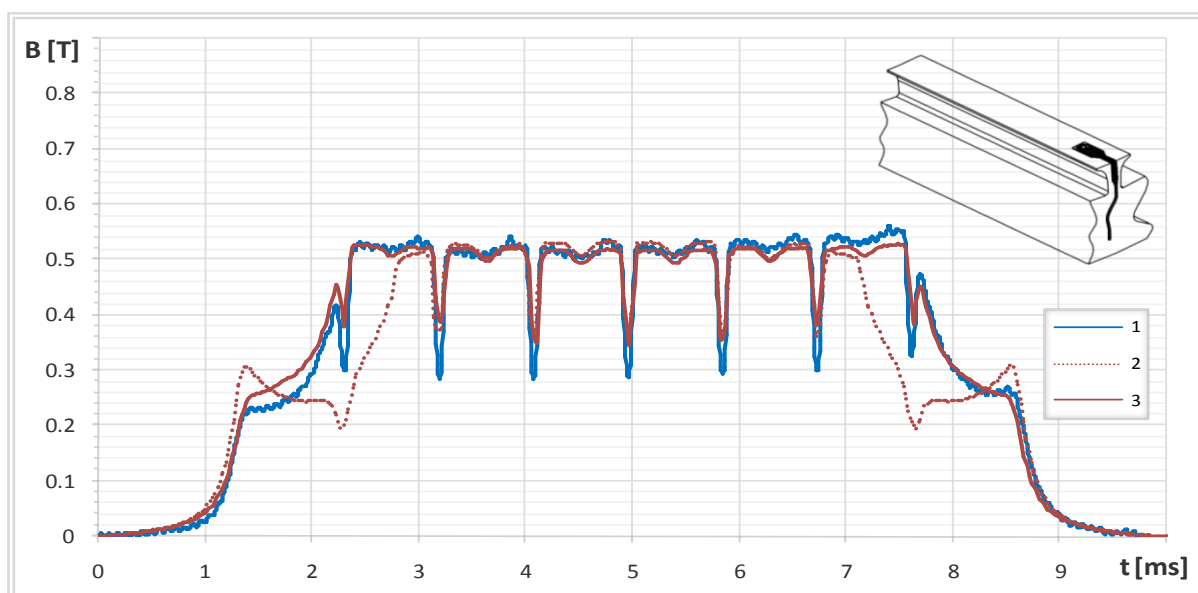
dokumentaciji analiziranog stroja, pa je moguće zaključiti da postoje odstupanja između tehničke dokumentacije i izvedenog stanja.

Analizom je utvrđeno da se radi o odstupanju koje uzrokuje povećanje zračnog raspora, kod modela za izračun, za 0,025 – 0,05 mm. Slika 8.2 prikazuje oblik polne papuče s naznačenim odstupanjem između modela, koji je korišten za izračun, i stvarnog stroja. Stoga, gustoća magnetskih silnica, kod stvarnog stroja je povećana na dijelu polne papuče gdje se nalazi magnetska silnica plave boje. Suprotno, kod modela za izračun, gustoća magnetskih silnica je povećana na dijelu polne papuče gdje se nalazi magnetska silnica crvene boje.



Slika 8.2. Oblik polne papuče rotora s naznačenim odstupanjem između modela koji je korišten za izračun i stvarnog stroja.

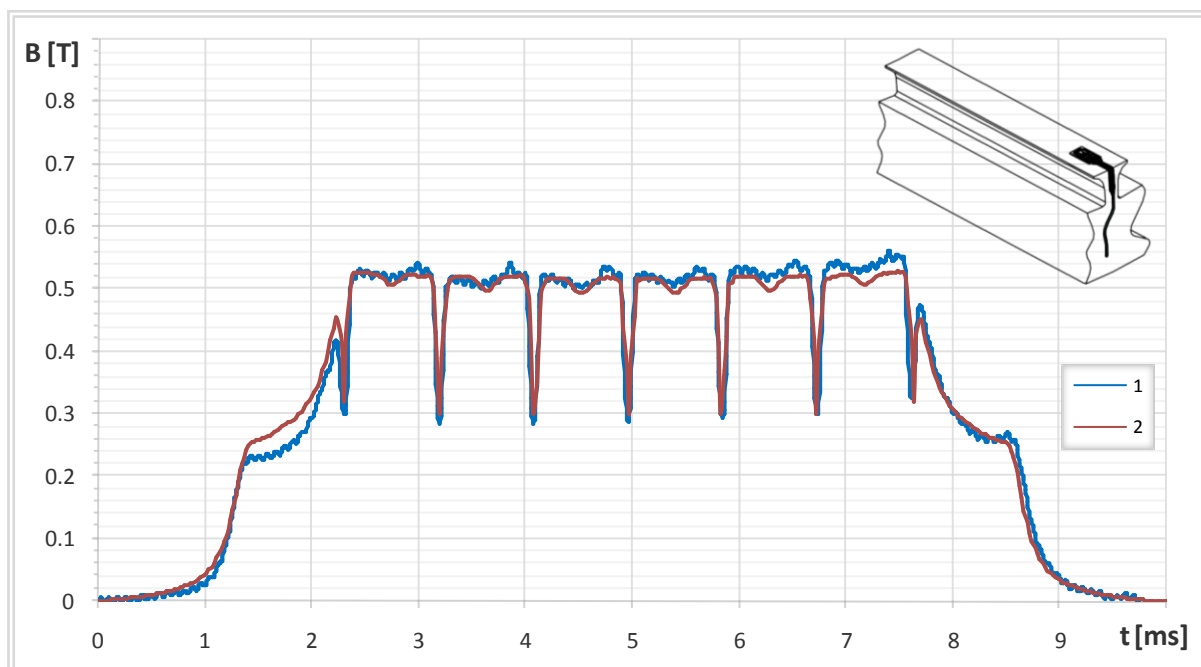
Slika 8.3 prikazuje rezultate mjerenja, izračuna modelom izrađenim prema tehničkoj dokumentaciji i modelom s izmijenjenom polnom papučom, u jednakim radnim uvjetima.



Slika 8.3. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana sa zuba statorskog paketa: Krivulja 1 – mjerjenje, Krivulja 2 – izračun modelom izrađenim prema tehničkoj dokumentaciji, Krivulja 3 – izračun modelom s izmijenjenom polnom papučom.

Iz podataka prikazanih na slici 8.3 može se uočiti da se rezultati izračuna s izmijenjenom polnom papučom bolje poklapaju s rezultatima mjerenja. Prema tome može se zaključiti da izvedeno stanje polne papuče odstupa od navedenog u tehničkoj dokumentaciji.

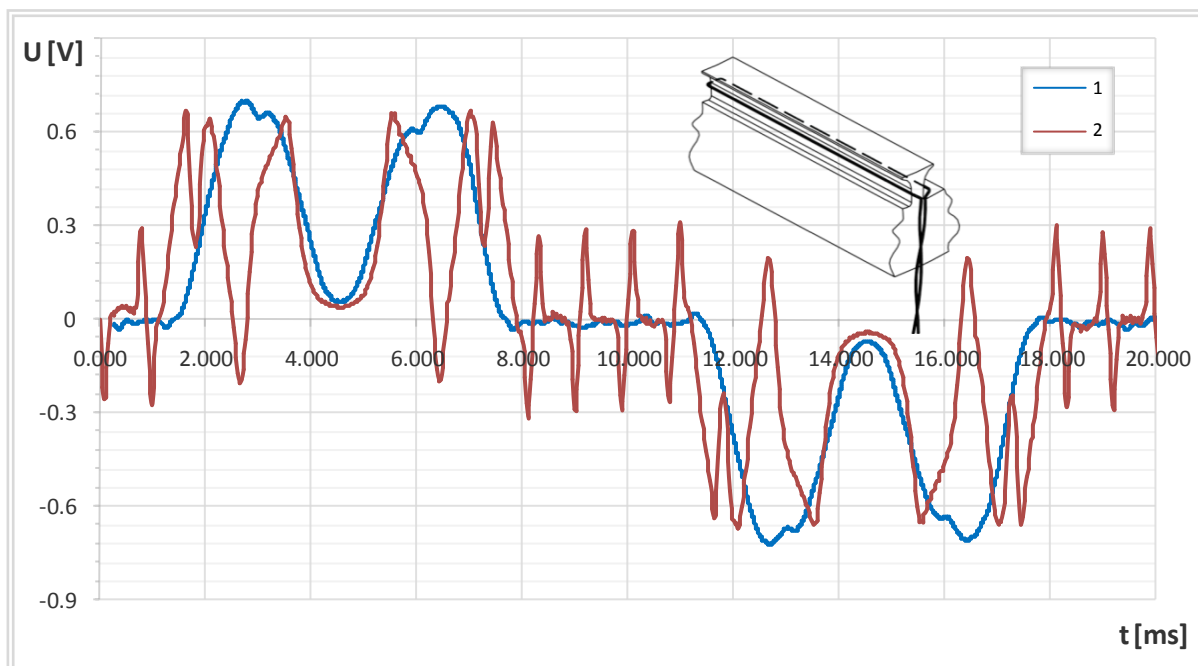
Drugo odstupanje koje je moguće uočiti na slici 8.1 između podataka dobivenih izračunom i mjerenjem je u iznosima propada magnetske indukcije izazvanim prigušnim namotom i poluotvorenim utorima za smještaj prigušnog namota. Naime kod rezultata mjerenja navedeni propadi iznosa magnetske indukcije imaju nešto veći iznos. Razlog toga je vrijeme uzorkovanja prikazanog valnog oblika. Kod rezultata izračuna ukupno četiri točke opisuju propad magnetske indukcije, dok kod rezultata mjerenja istu pojavu opisuje deset točaka. Stoga bi trebalo povećati rezoluciju podataka izračuna u programu MagNet, pri čemu će izračun trajati duže ali će se izračunati magnetska indukcija u više točaka. U svrhu potvrde iznesene tvrdnje izrađen je novi izračun u kojem je vremenska baza smanjena, a rezultati izračuna prikazani su na slici 8.4.



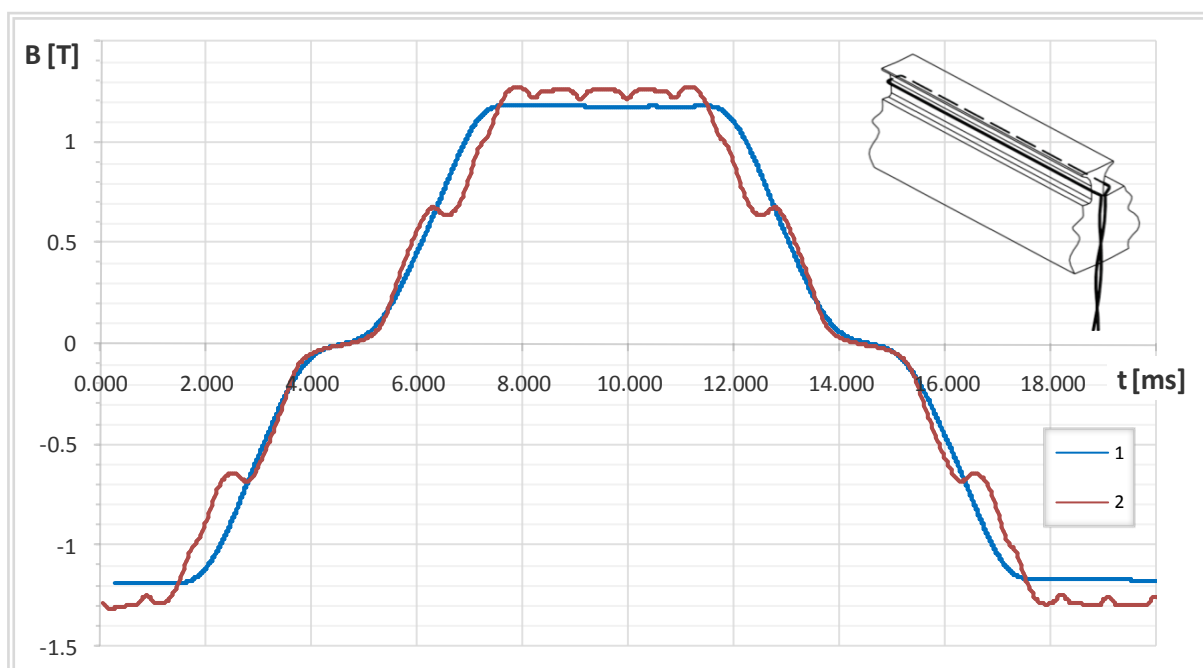
Slika 8.4. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana sa zuba statorskog paketa: Krivulja 1 – mjerjenje, Krivulja 2 – izračun modelom s većom rezolucijom i izmijenjenom polnom papučom.

Iz rezultata prikazanih na slici 8.4 može se zaključiti da se izmjenom oblika polne papuče i povećanjem rezolucije izračuna odstupanja valnog oblika dobivenog mjerenjem i izračunom postaju minimalna.

Pored raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu uspoređeni su i podaci dobiveni izračunom i mjerenjem mjernim svitkom M_{s1} , ugrađenim oko zuba statora. Slika 8.5 prikazuje valni oblik napona koji se inducira u mjernom svitku M_{s1} , dobiven mjerenjem i izračunom. Vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka M_{s1} , dobivena integracijom valnih oblika prikazanih na slici 8.5 te uz primjenu relacije (5.13), prikazana je na slici 8.6.



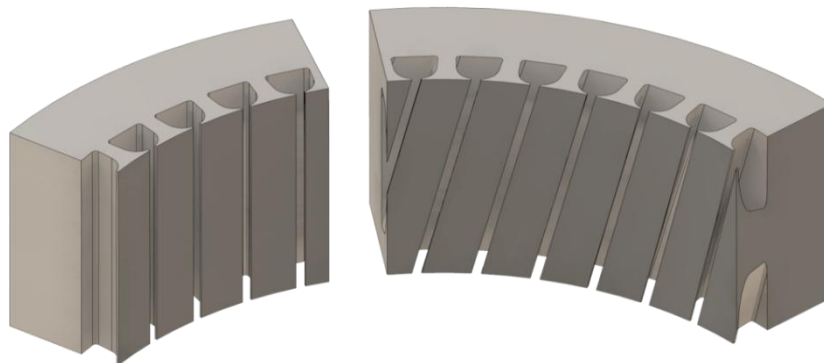
Slika 8.5. Napon induciran u mjernom svitku Ms_1 , za prazni hod:
Krivulja 1 – mjerjenje, Krivulja 2 – izračun.



Slika 8.6. Raspodjela magnetske indukcije dobivena integracijom napona
induciranog u mjernom svitku Ms_1 , za prazni hod:
Krivulja 1 – mjerjenje, Krivulja 2 – izračun.

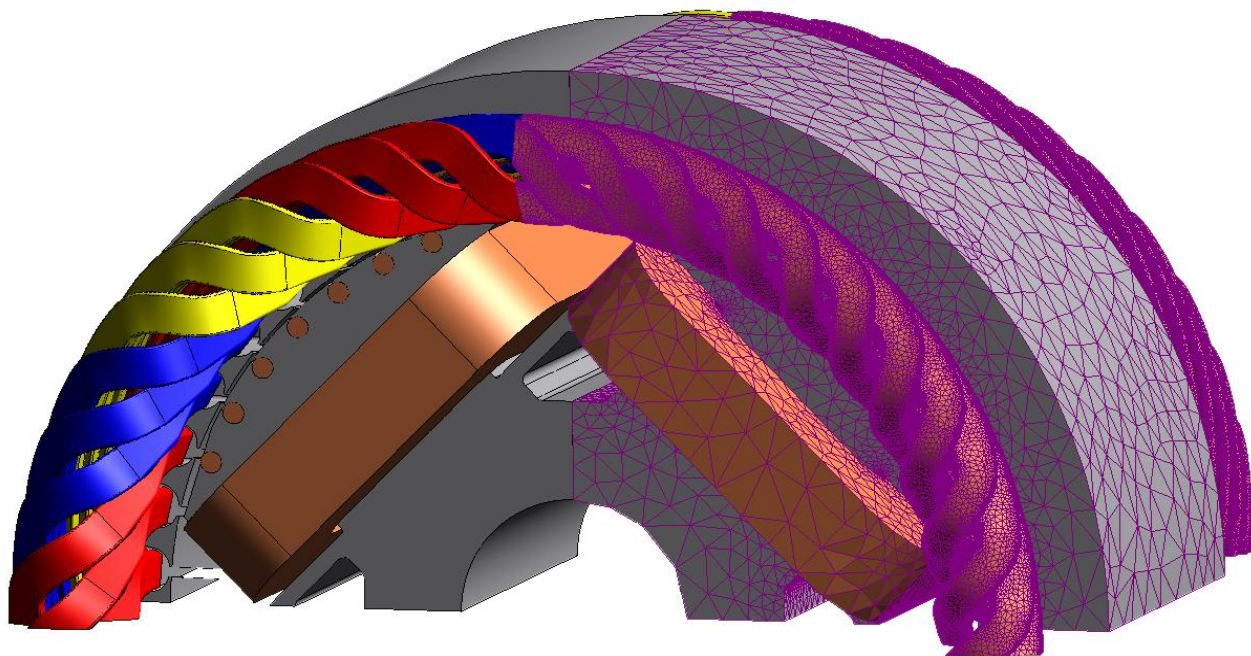
Iz podataka prikazanih na slici 8.6, a posebice na slici 8.5 mogu se uočiti odstupanja valnih oblika dobivenih mjerenjem i izračunom. Na podacima izračuna moguće je uočiti prisutnost viših harmoničkih članova. Uzrok prisutnosti viših harmoničkih članova u podacima izračuna, je zanemarenje skošenja statorskih utora pri izradi modela za izračun. Naime podaci izračuna prikazani u 6. poglavlju računati su s 2D modelom, a samim tim nije bilo moguće uzeti u obzir skošenje statorskih utora što je jedna od mjera koja se često primjenjuje za smanjenje

intenziteta utorskih harmonika. Za potvrdu ove tvrdnje izrađen je 3D model stroja te je primjenom MKE u programu MagNet izračunat napon koji se inducira u mjernom svitku postavljenom oko zuba statora koji ima skošenje za jedan utorski korak. Slika 8.7 prikazuje stator sa i bez skošenja utora.



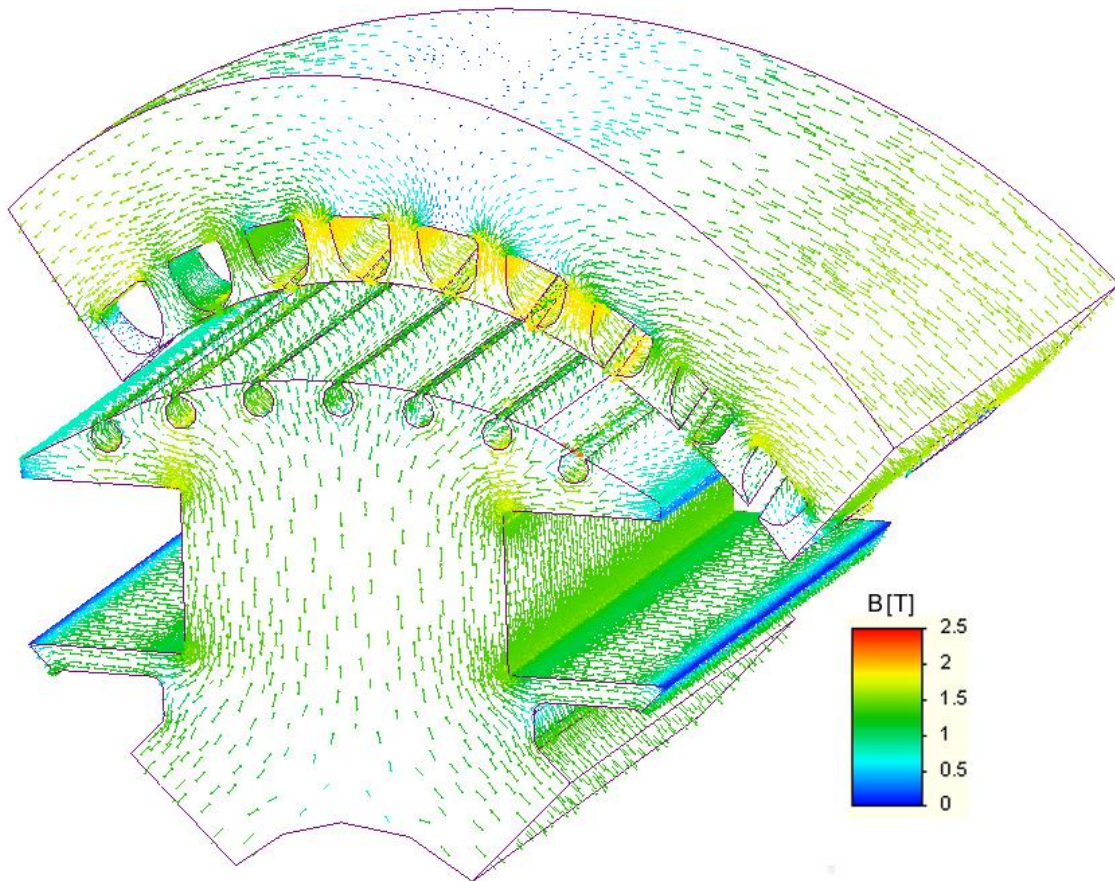
Slika 8.7. Stator: Lijevo - bez skošenja utora, Desno - sa skošenjem utora.

Model, istovjetan generatoru SGBP 160 M-4M, izrađen je u programu za 3D crtanje SolidWorks i importiran u jednom od tipskih formata u program MagNet. Na ovaj način izbjeglo se crtanje 3D modela u programu MagNet što je znatno olakšalo izradu samih modela za izračun. Kako se radi o iznimno zahtjevnom modelu odabrana je točnost izračuna koju je maksimalno moguće postići s obzirom na dostupne resurse računala. Pri tom vrijeme trajanja izračuna jedne periode napona koji se inducira u mjernom svitku Ms_1 , iznosi 15 dana. Iz tog razloga rezultati proračuna prikazani u poglavlju 6 računati su s 2D modelom, a u svrhu približavanja rezultata izračuna i mjerenja izrađen je jedan 3D model, sa skošenim statorskim utorima, koji je prikazan na slici 8.8.



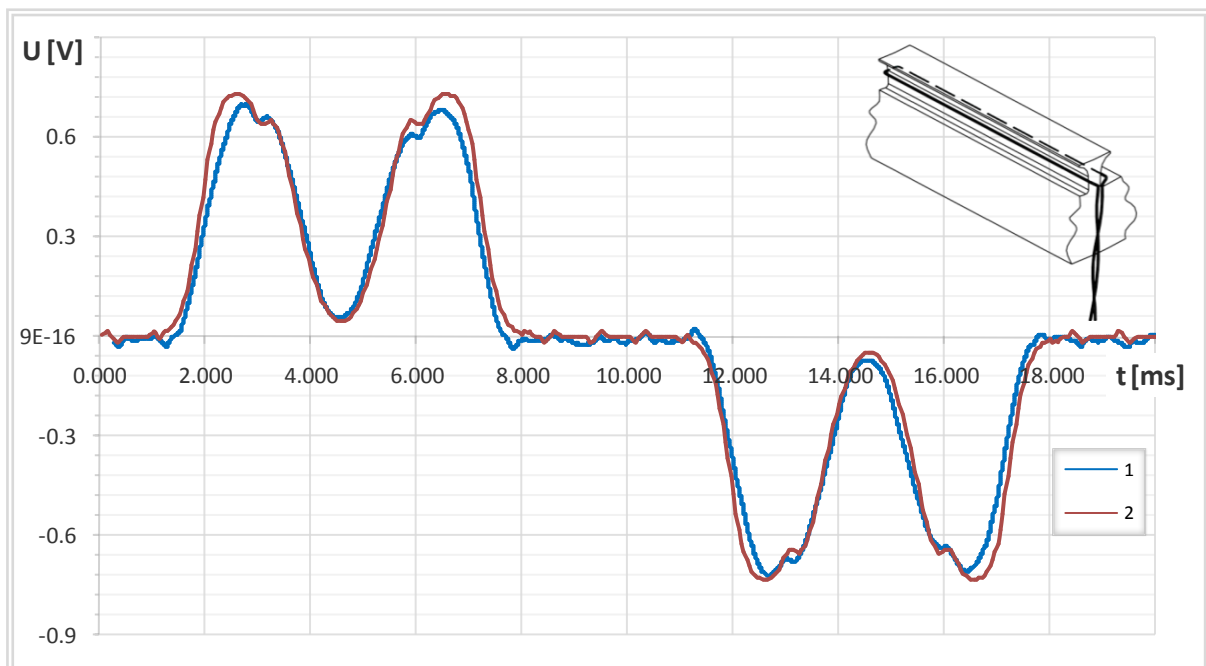
Slika 8.8. 3D model sinkronog generatora SGBP 160 M-4M korišten za izračun u programu MagNet.

Raspored silnica magnetskog polja u generatoru SGBP 160 M-4M, izračunat 3D modelom sa slike 8.8, prikazan je na slici 8.9.



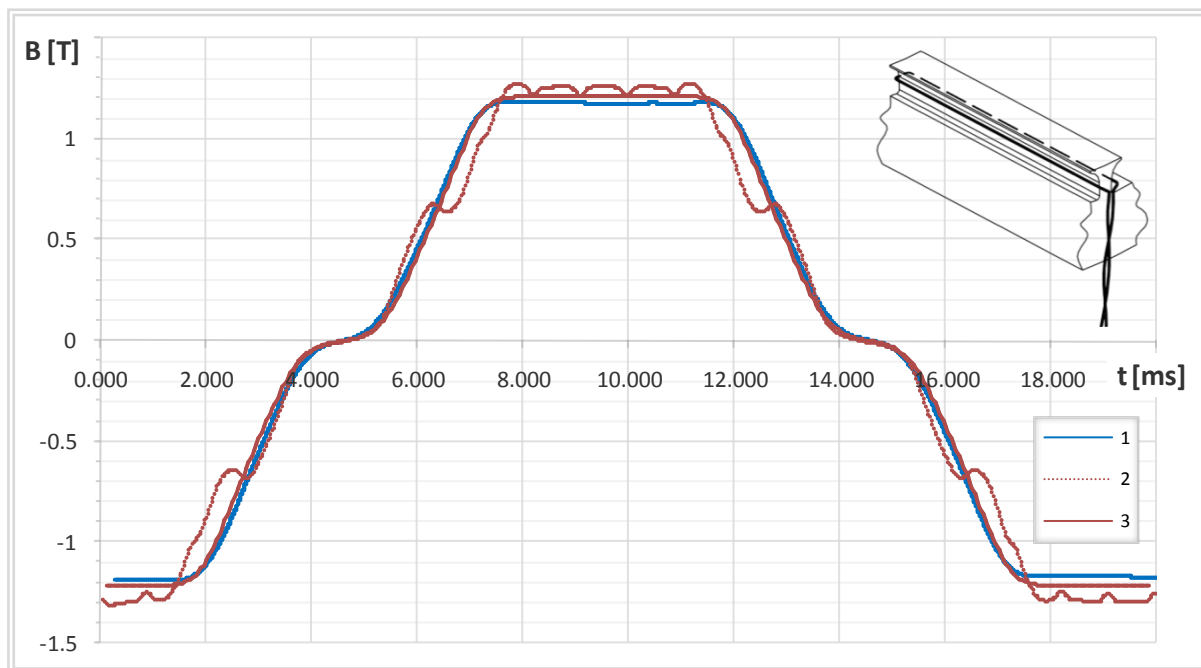
Slika 8.9. Raspored silnica magnetskog polja u sinkronom generatoru SGBP 160 M-4M izračunat pomoću 3D modela.

Rezultati izračuna napona koji se inducira u mjernom svitku Ms_1 , dobiven mjerenjem i izračunat pomoću 3D modela, prikazani su na slici 8.9.



Slika 8.9. Napon induciran u mjernom svitku Ms_1 , za prazni hod: Krivulja 1 –mjerenje, Krivulja 2 – izračun pomoću 3D modela.

Vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka Ms_1 , dobivena integracijom valnog oblika prikazanog na slici 8.9 i 8.5, uz primjenu relacije (5.13), prikazuje slika 8.10.

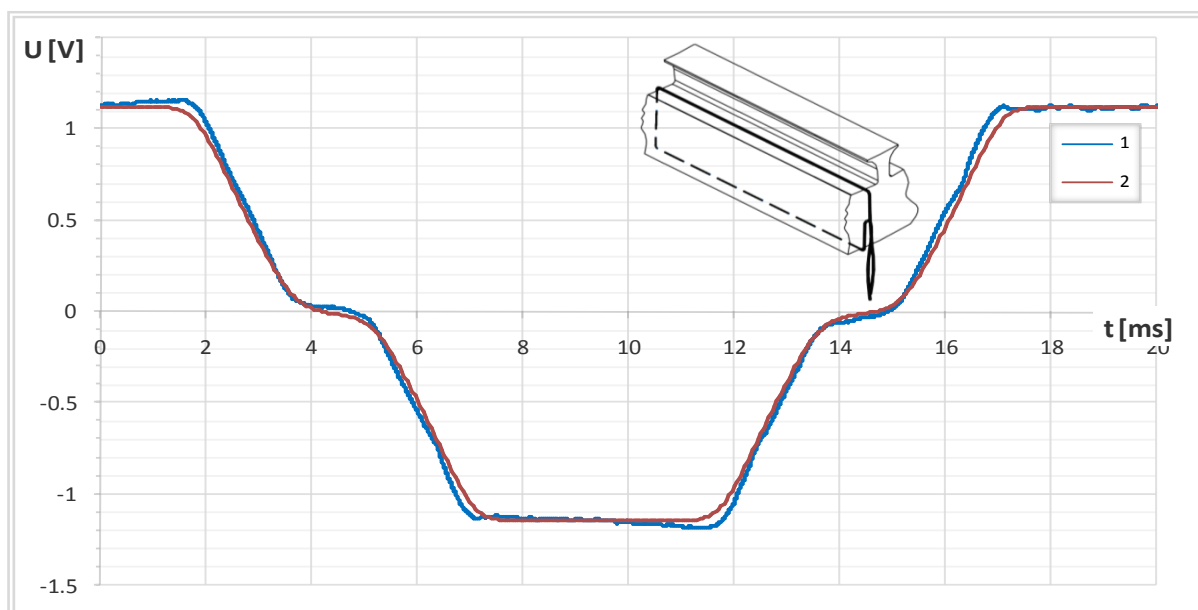


Slika 8.10. Raspodjela magnetske indukcije dobivena integracijom napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 , za prazni hod: Krivulja 1 – mjerjenje, Krivulja 2 – izračun 2D modelom, Krivulja 3 – izračun 3D modelom.

Iz rezultata prikazanih na slici 8.9 i 8.10 može se zaključiti da su, primjenom 3D modela za izračun, odstupanja između valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku Ms_1 dobivenog mjerenjem i izračunom zanemariva.

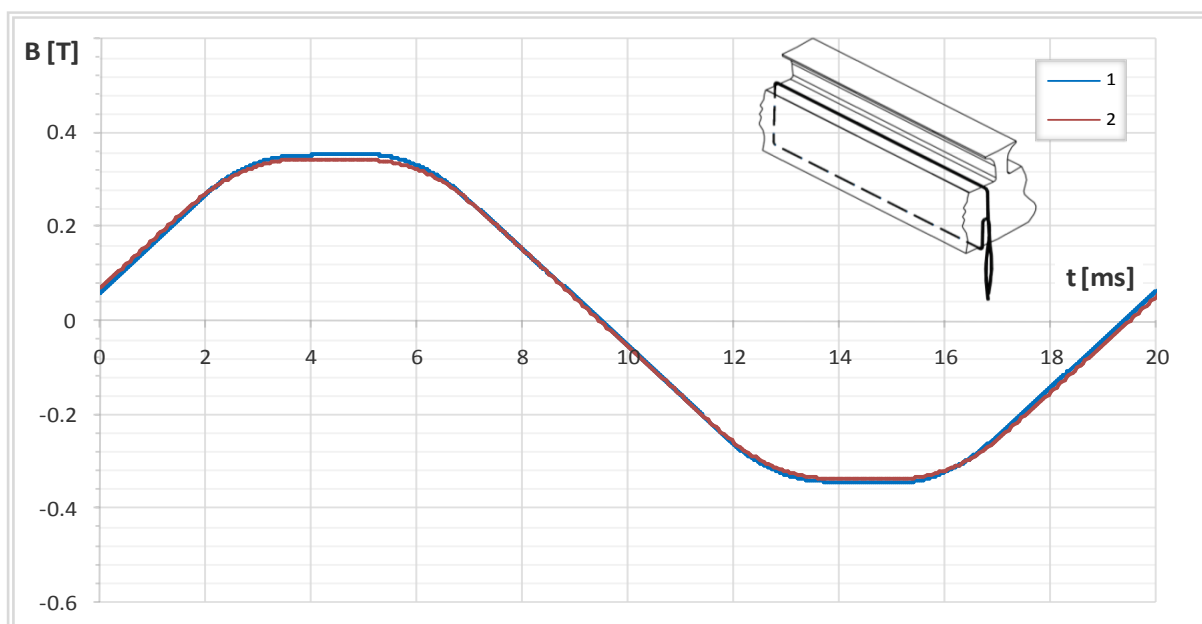
Prema tome može se zaključiti da je 3D modelom u programu MagNet moguće računati elektromagnetske parametre rotacijskog stroja bez obzira na složenost njegove konstrukcije, te pri tom nije potrebno optimizirati model za izračun. Međutim, u svim situacijama nije opravdano primjenjivati 3D model već je moguće dobiti zadovoljavajuće rezultate izračuna pomoću 2D modela. To vrijedi npr. za slučaj izračuna raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu, koja ne ovisi o skošenju utora iz razloga što se radi o parametru stroja promatranom na relativno maloj površini. Za razliku od raspodjele magnetske indukcije, napon koji se inducira u svitku ovisi o promjeni toka kroz površinu koju obuhvaća svitak. To znači da će skošenje utora utjecati na rezultat izračuna, posebice se to odnosi na rezultate izračuna napona koji se inducira u mjernom svitku ugrađenim oko zuba statora. Prema tome kod strojeva koji zahtijevaju 3D model moguće je za potvrdu određene teze primijeniti 2D model ali za postizanje točnijih rezultata izračuna nužno je primijeniti 3D model.

Načinjena je usporedba valnog oblika napona koji se inducira u mjernom svitku Ms_3 , dobivenog mjerenjem i izračunom 3D modelom, a rezultati usporedbe prikazani su na slici 8.11.



Slika 8.11. Napon inducirani u mjernom svitku Ms_3 , za prazni hod:
Krivulja 1 – mjerenje, Krivulja 2 – izračun 3D modelom.

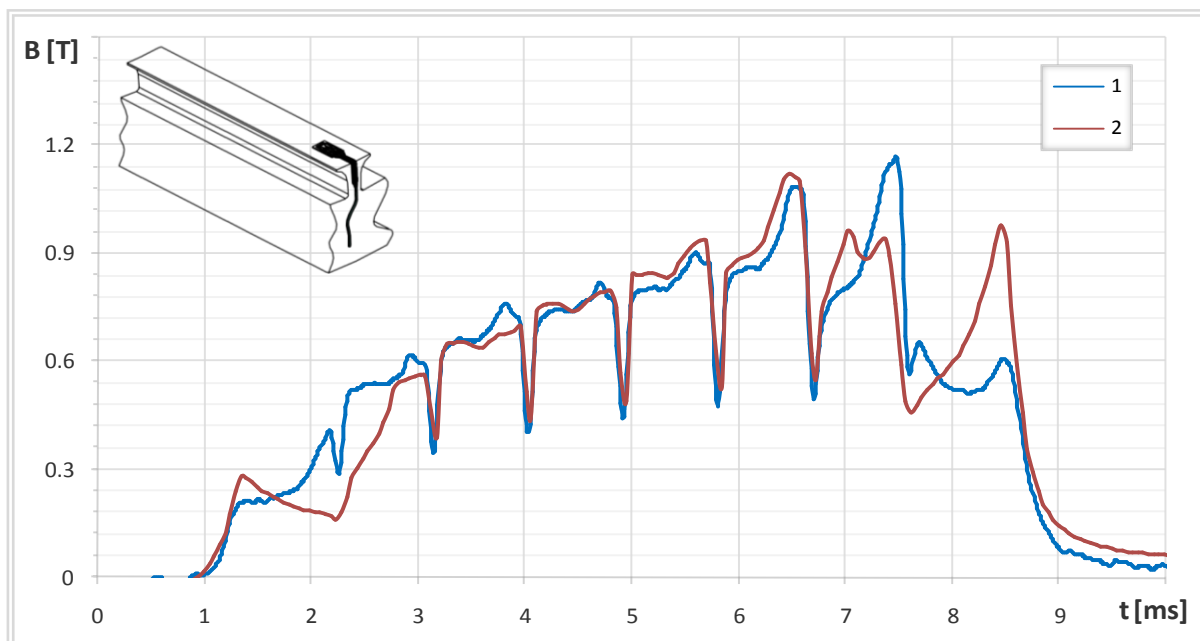
Vremenska ovisnost prosječne vrijednosti magnetske indukcije na mjestu ugradnje mjernog svitka Ms_3 , dobivena integracijom valnog oblika prikazanog na slici 8.11, uz primjenu relacije (5.13), prikazuje slika 8.12.



Slika 8.12. Raspodjela magnetske indukcije dobivena integracijom napona induciranih u mjernom svitku Ms_3 , za prazni hod:
Krivulja 1 – mjerenje, Krivulja 2 – izračun 3D modelom.

Iz rezultata prikazanih na slici 8.11 i 8.12 može se zaključiti da su odstupanja rezultata mjerenja i izračuna 3D modelom zanemariva.

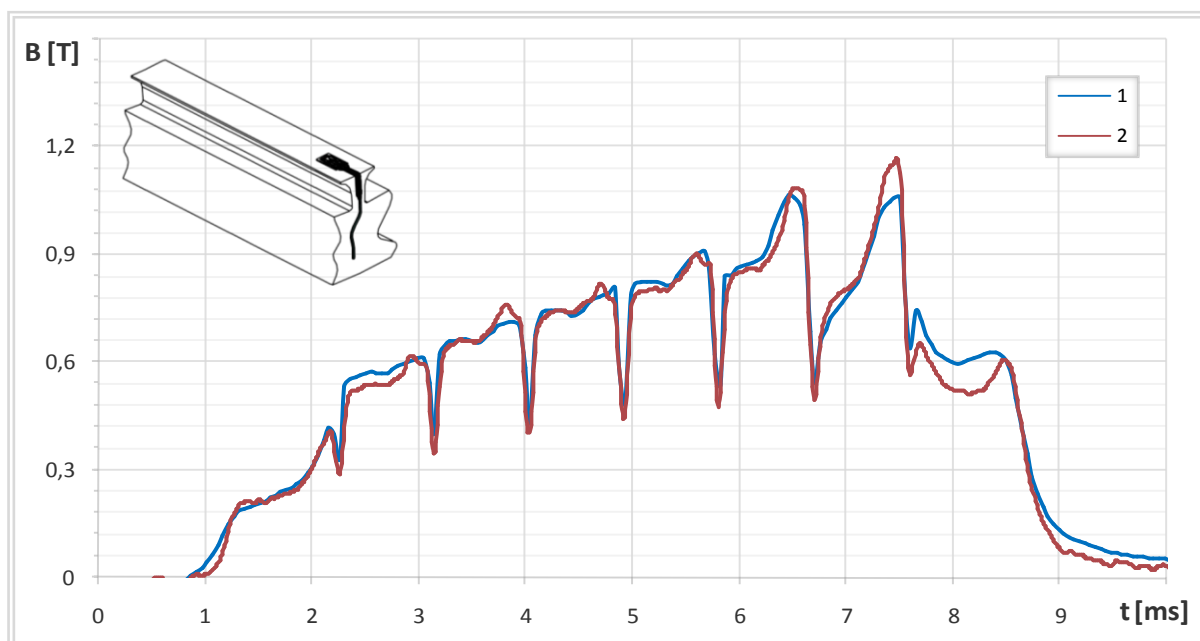
Uspoređeni su i rezultati izračuna i mjerenja raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane sa zuba statora, za opterećeni generator uz $\cos\varphi = 1$. Rezultati usporedbe prikazani su na slici 8.13.



Slika 8.13. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana sa zuba statorskog paketa za opterećeni generator: Krivulja 1 - mjerjenje, Krivulja 2 – izračun.

Valni oblici prikazani na slici 8.13, dobiveni mjerenjem i izračunom, u dobroj se mjeri poklapaju, ali su prisutna i određena odstupanja na rubnim djelovima polne papuče. Razlog odstupanja valnih oblika obrazložen je na slici 8.2, a vezan je za odstupanje izvedenog stanja polne papuče rotora od tehničke dokumentacije po kojoj je izrađen model za izračun.

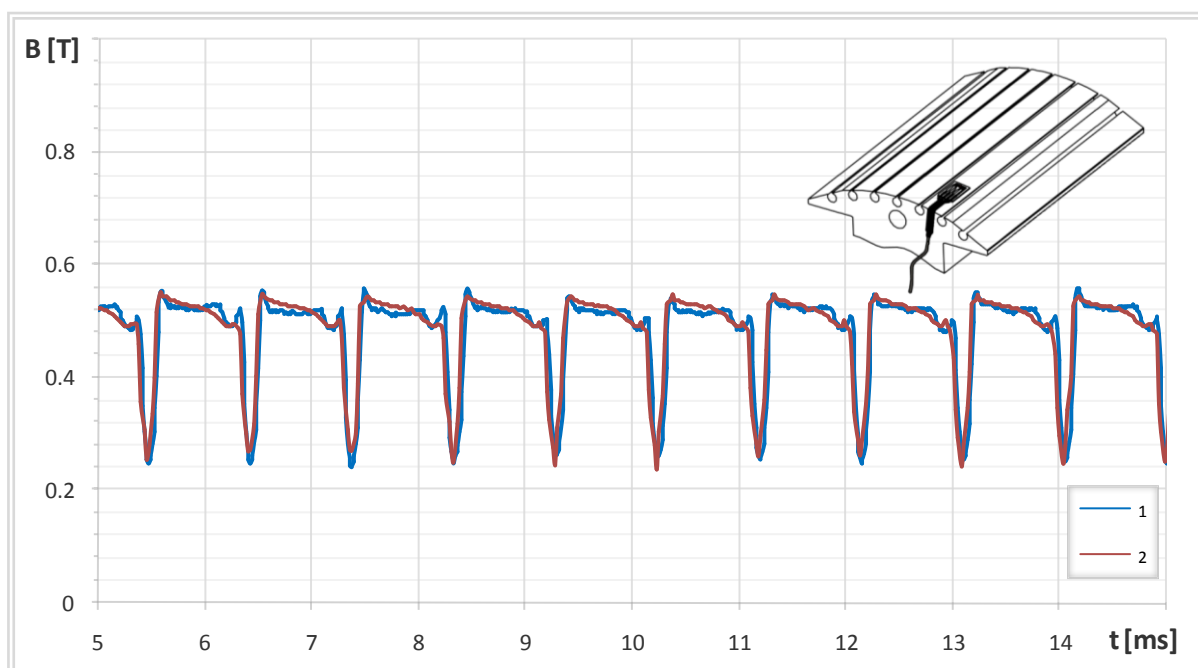
Izmjenom polne papuče rotora, prema slici 8.2, izračunat je valni oblik raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu kojeg prikazuje slika 8.14.



Slika 8.14. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana sa zuba statorskog paketa za opterećeni generator: Krivulja 1 – mjerjenje, Krivulja 2 – izračun modelom s izmijenjenom polnom papučom.

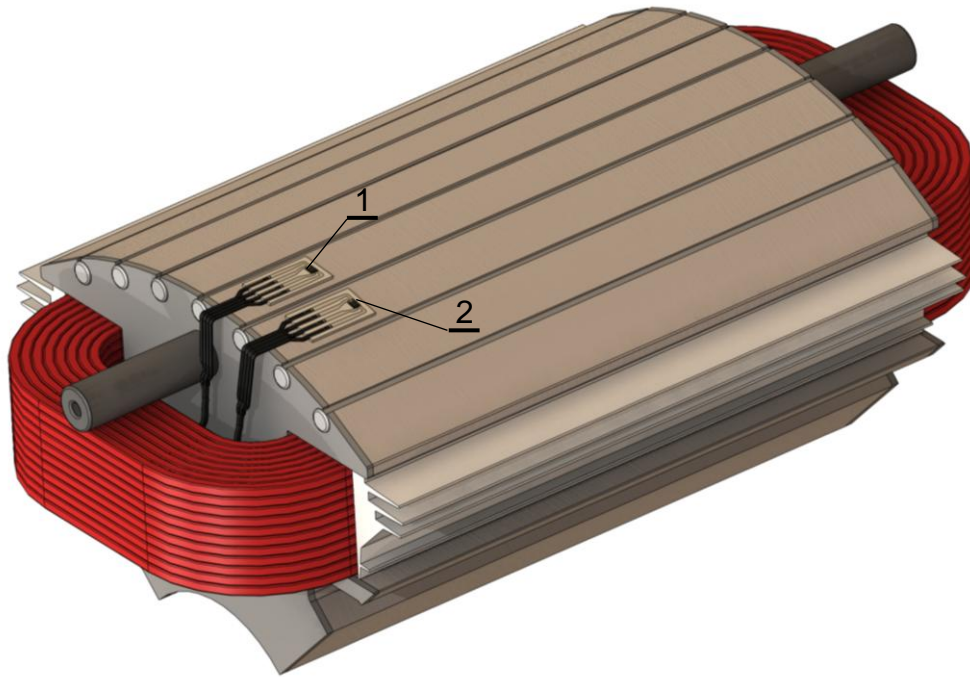
Iz podataka prikazanih na slici 8.14 može se uočiti da su međusobna odstupanja valnih oblika mjerenja i izračuna s modificiranom polnom papučom, za opterećeni generator, zanemariva.

Uspoređeni su rezultati izračuna i mjerenja raspodjele raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane s polne papuče rotora, za generator u praznom hodu, opterećeni generator te generator s prisutnim međuzavojn timer kratkim spojevima u svitku namota armature. Započet će se s usporedbom podataka izračuna i mjerenja raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu s polne papuče rotora za generator u praznom hodu. Rezultati usporedbe prikazani su na slici 8.15.



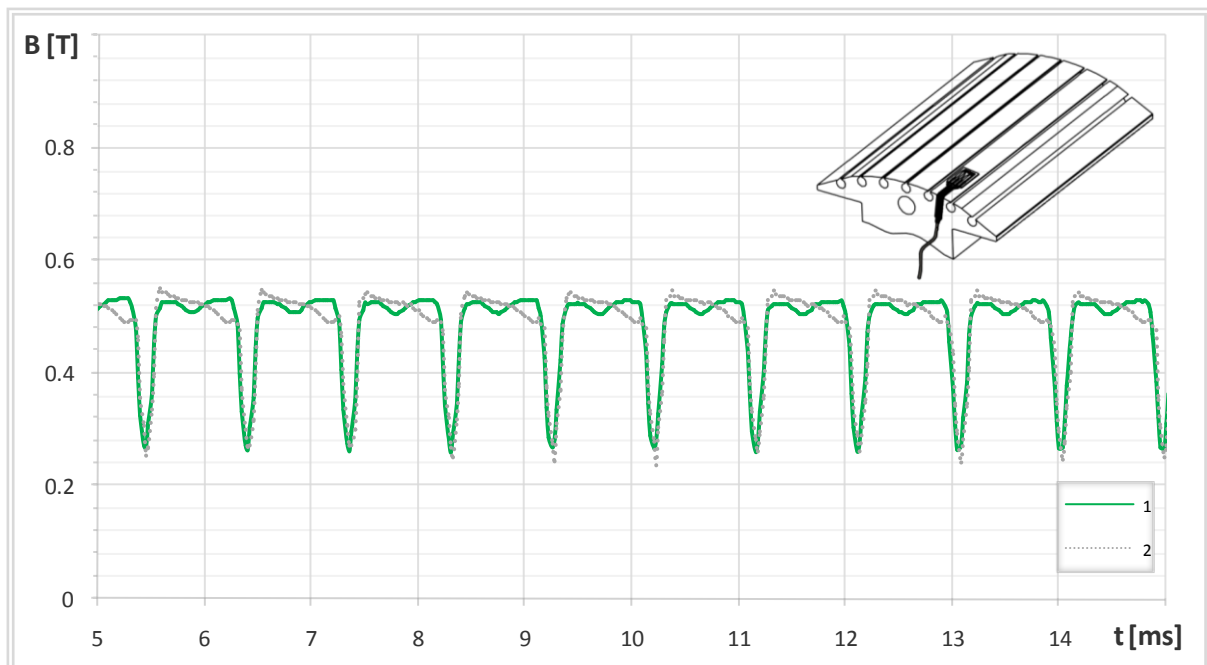
*Slika 8.15. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče rotora za generator u praznom hodu:
Krivulja 1 – mjerenje Hallovim senzorom H_4 , Krivulja 2 – izračun.*

Valni oblici prikazani na slici 8.15, dobiveni mjerenjem i izračunom, u dobroj se mjeri poklapaju. Važno je napomenuti da valni oblik raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu, mjereno s polne papuče, varira ovisno o mjestu ugradnje mjernog senzora na polnu papuču. Tako je moguće da se na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporom, izmjere različiti valni oblici raspodjele magnetske indukcije. Slika 8.16 prikazuje mjerna mjesta na polnoj papučici rotora s konstantnim zračnim rasporom.



Slika 8.16. Mjesta mjerenja magnetske indukcije u zračnom rasporu s rotorske polne papuče: 1 – Hall senzor 3, 2 – Hall senzor 4.

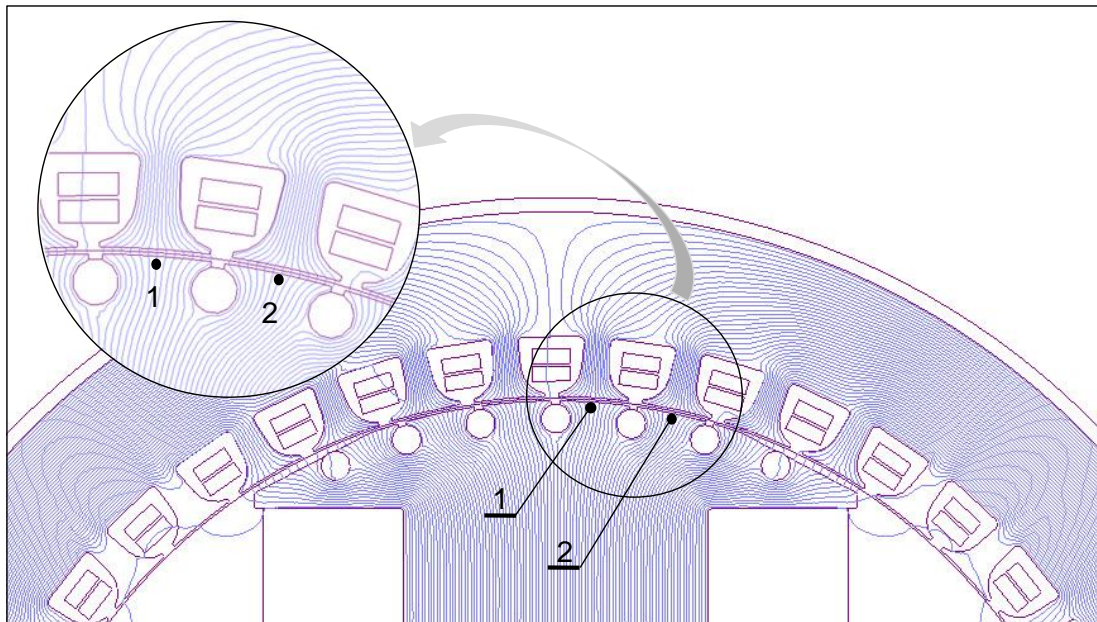
Iako se mjerna mjesta, označena brojevima 1 i 2 a prikazana na slici 8.16, nalaze na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporom dobiveni valni oblici raspodjele magnetske indukcije na navedenim mjestima nisu jednaki, što je prikazano na slici 8.17.



Slika 8.17. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče rotora na pozicijama označenim na slici 8.16: Krivulja 1 – na mjestu 1, Krivulja 2 –na mjestu 2.

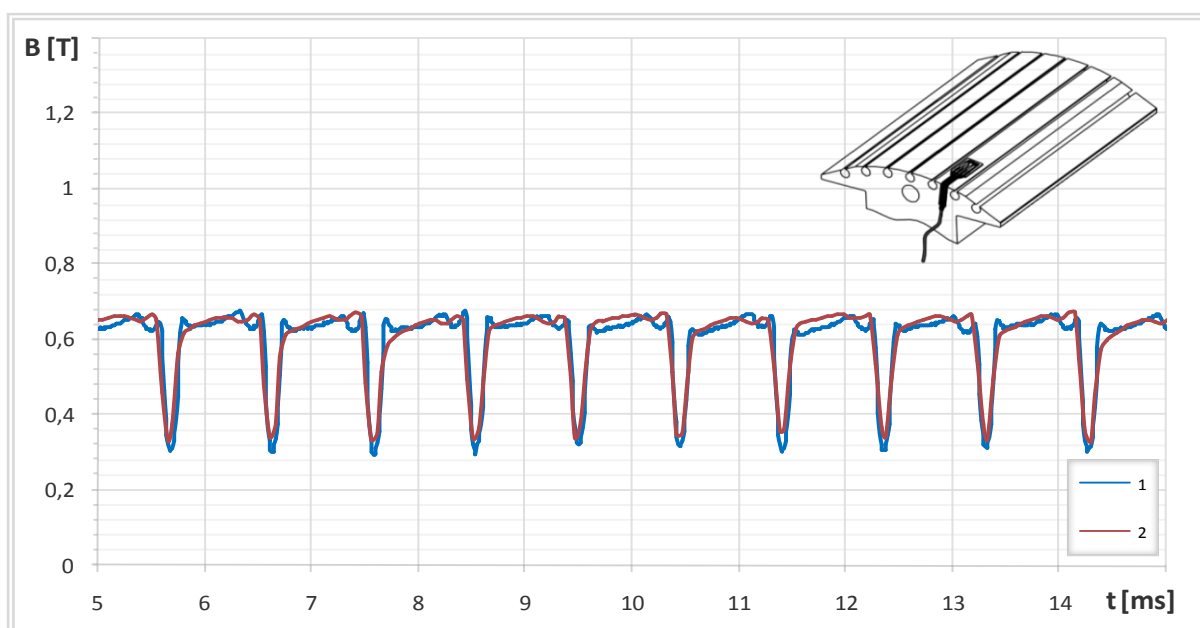
Razlog odstupanja valnih oblika prikazanih na slici 8.17 vezan je za raspodjelu silnica magnetskog polja u polnoj papučici na promatranim mjestima.

Raspored silnica magnetskog polja u okolini mjernog mjesta broj 1 i broj 2 prikazan je na slici 8.18, i proizlazi da silnice magnetskog polja za mjerno mjesto broj 1 imaju jednak raspored s njegove lijeve i desne strane, dok za mjerno mjesto broj 2 raspored silnica magnetskog polja nije jednak s lijeve i desne strane.



Slika 8.18. Raspodjela silnica magnetskog polja u generatoru za prazni hod.

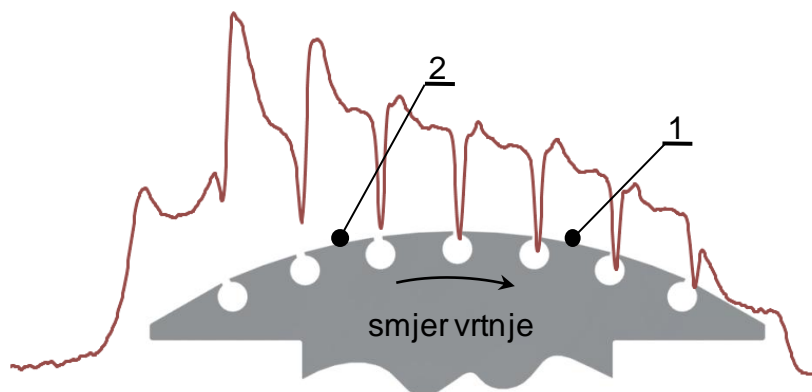
Rezultati usporedbe podataka izračuna i mjerenja raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu s polne papučice rotora za opterećeni generator prikazani su na slici 8.19.



Slika 8.19. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papučice rotora za opterećeni generator:

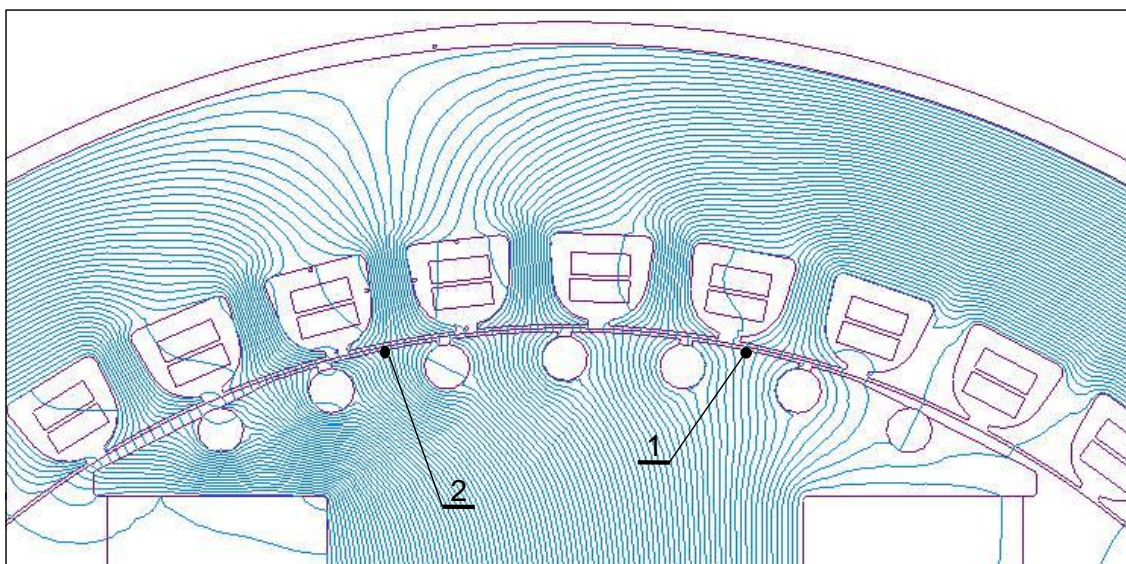
Krivulja 1 – mjerenje Hallovim senzorom H_4 , Krivulja 2 – izračun.

Kod opterećenog generatora odabir mjesta mjerenja s rotorske polne papuče znatno utječe na rezultate mjerenja raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu. To proizlazi iz raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu na polnom koraku. Na slici 8.20 prikazana je rotorska polna papuča, raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu na polnom koraku i dvije pozicije ugradnje mjernih senzora.



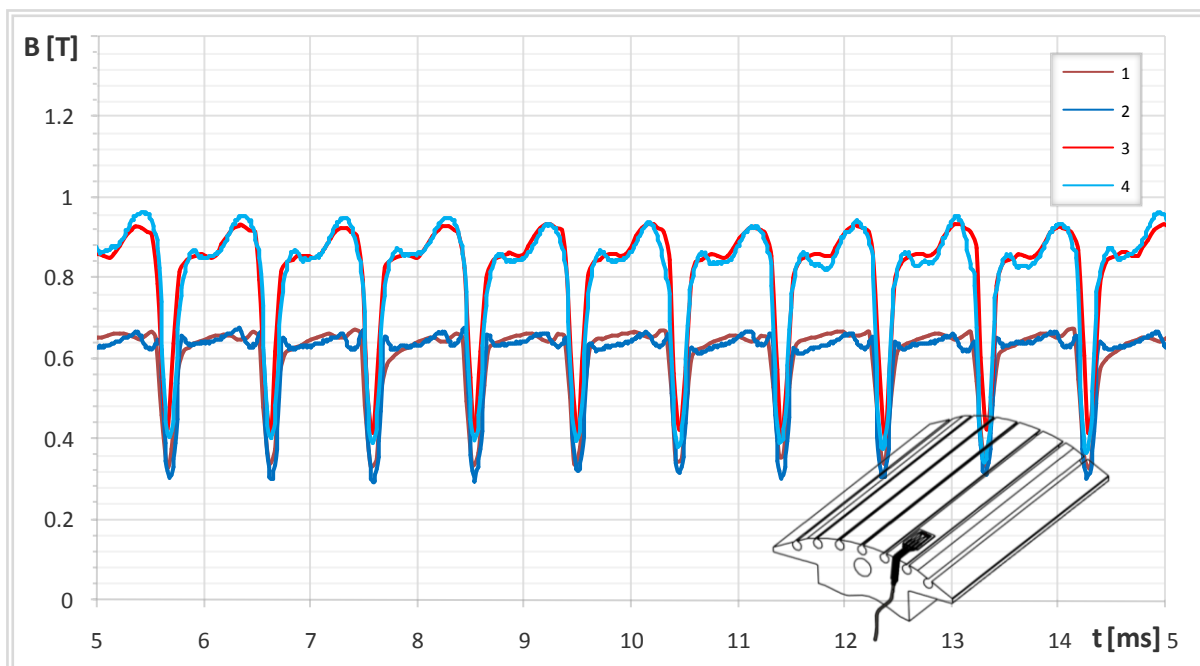
Slika 8.20. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu na polnom koraku za opterećeni generator i pol rotora s naznačenim pozicijama ugradnje mjernih senzora.

Za prikazani smjer vrtnje rotora, senzor broj 2 mjerit će najviše iznose magnetske indukcije, dok će senzor broj 1 mjeriti najniže iznose magnetske indukcije. To je moguće uočiti iz raspodjele silnica magnetskog polja za opterećeni generator prikazane na slici 8.21.



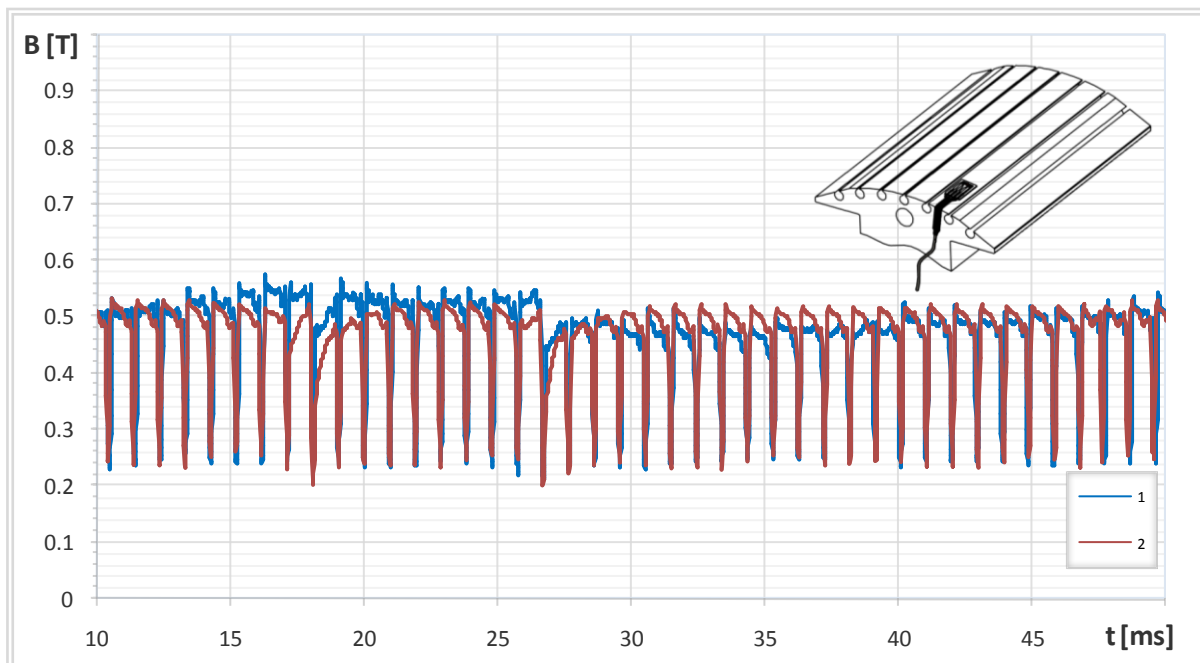
Slika 8.21. Raspodjela silnica magnetskog polja u opterećenom generatoru.

Slika 8.22 prikazuje raspodjelu magnetske indukcije u zračnom rasporu s rotorske polne papuče za dvije pozicije ugradnje mjernih senzora na polnoj papuču rotora. Valni oblici prikazane na slici 8.22 dobiveni su jednim senzorom ugrađenim na polnoj papuču za jednake radne uvjete ali uz različiti smjer okretanja generatora. Odnosno valni oblik prikazan na slici 8.22-2 mjereno je za desni smjer vrtnje, a valni oblik prikazan na slici 8.22-4 mjereno je istim senzorom za lijevi smjer vrtnje.

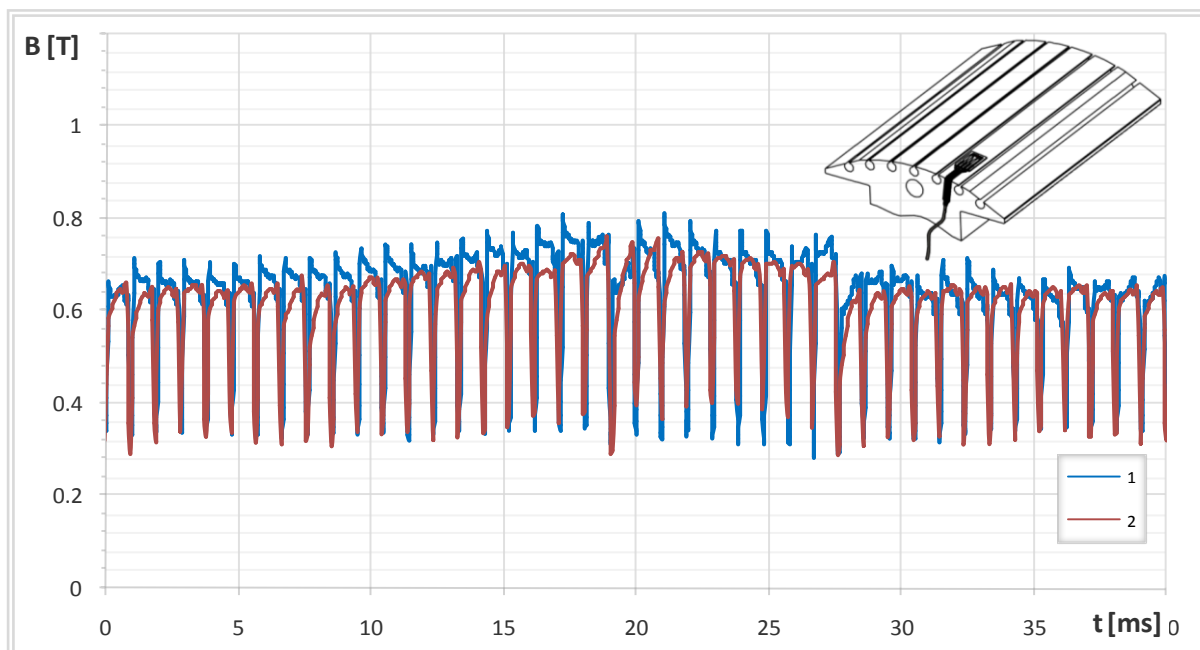


Slika 8.22. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče rotora za opterećeni generator i mjerno mjesto 1: Krivulja 1 –izračun, desni smjer vrtnje, Krivulja 2 –mjerenje, desni smjer vrtnje, Krivulja 3 - izračun, lijevi smjer vrtnje, Krivulja 4 –mjerenje, lijevi smjer vrtnje.

Uspoređeni su rezultati izračuna i mjerenja raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu s polne papuče rotora, uz prisutne međuzavojne kratke spojeve svitka namota armature. Rezultati usporedbe prikazani su na slici 8.23.



Slika 8.23. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče rotora za generator u praznom hodu uz prisutne međuzavojne kratke spojeve svitka namota armature: Krivulja 1 – mjerenje Hallovim senzorom H_4 , Krivulja 2 – izračun.



Slika 8.24. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče rotora za opterećeni generator uz prisutne međuzavojne kratke spojeve svitka namota armature:

Krivulja 1 – mjerenje Hallovim senzorom H_4 , Krivulja 2 – izračun.

Valni oblici prikazani na slici 8.23 i 8.24, dobiveni mjerenjem i izračunom, u dobroj se mjeri poklapaju, a prisutna odstupanja valnih oblika ne dovode u pitanje ispravnost metode detekcije kvara.

9. PRIMJENA BAYESOVIH MREŽA U DETEKCIJI KVAROVA NA ROTACIJSKOM STROJU

Podaci dobiveni mjerenjem na generatoru SGBP 160M-4M i izračunom na modelima primjenom MKE pokazali su da analizirani kvarovi uzrokuju poremećaje magnetskog polja u stroju, te da ih je moguće detektirati. Metode detekcije zasnivaju se na analizi magnetskog polja u stroju, što je prikazano u poglavljima 6., 7. i 8. U ovom poglavlju je na osnovu podataka izračuna i mjerenja izrađen sustav za detekciju analiziranih kvarova.

9.1. Izrada sustava za detekciju analiziranih kvarova

Izrada sustava za detekciju analiziranih kvarova uključuje slijedeće faze:

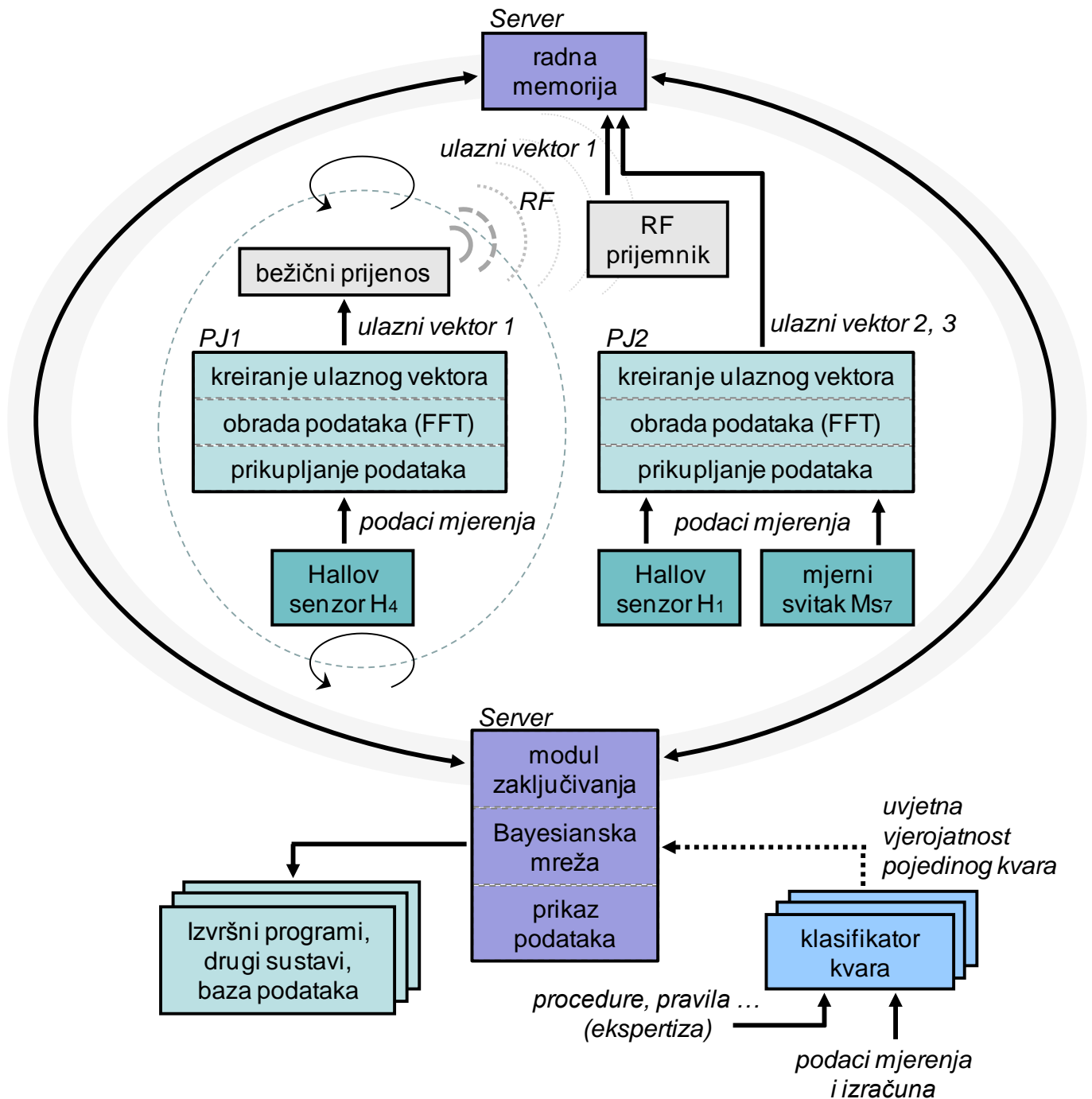
- odabir mjerne metode, potrebnih senzora i mjerne opreme,
- odabir načina obrade sirovih signala mjerenja,
- izrada klasifikatora za svaki od analiziranih kvarova,
- izrada programa za automatsko prikupljanje i obradu podataka,
- izrada modula za odlučivanje, te prosljeđivanje informacija korisniku.

Odabrane mjerne metode, senzori i mjerna oprema prikazani su u poglavlju 5., dok su u poglavlju 6. i 7. prikazane metode detekcije analiziranih kvarova u podacima izračuna, odnosno mjerenja.

Podaci mjerenja odnosno izračuna moraju biti organizirani u formatu koji će omogućiti modulu za odlučivanje učinkovit rad. To podrazumijeva da se za svaki od analiziranih kvarova putem određenog postupka izradi klasifikator. Pri tom klasifikator ne sadržava sirovi signal mjerenja, već značajke kvara u vremenskoj ili frekvencijskom području koje proizlaze iz sirovog signala. Ukoliko su značajke analiziranog kvara ovisne o radnom stanju stroja tada je za svako radno stanje potrebno izraditi klasifikator, pri čemu jedan analizirani kvar može imati više klasifikatora. Nakon izrade klasifikatora svih analiziranih kvarova baza znanja je formirana i može se započeti s izradom modula za odlučivanje. Program HuginExpert, razvijen od strane istoimene tvrtke, korišten je kao modul za odlučivanje, a baziran je na Bayesovim mrežama. Na osnovu klasifikatora kvarova izrađene su uvjetne vjerojatnosti prema kojima modul za odlučivanje donosi odluku o prisutnosti kvara u podacima mjerenja odnosno u ulaznom vektoru.

Sljedeći korak je izrada programa za prikupljanje i obradu podataka. Program treba biti koncipiran da kontinuirano prema predviđenom postupku prikuplja, obrađuje podatke, te formira ulazni vektor koji prosljeđuje modulu za odlučivanje.

Integracija dijelova sustava, korištenog u ovom radu, za detekciju analiziranih kvarova na rotacijskom stroju prikazana je na slici 9.1.



Slika 9.1. Integracija dijelova sustava za detekciju analiziranih kvarova.

9.2. Izrada klasifikatora kvara

Iz podataka dobivenih izračunom na modelima i mjerenjem na stroju, u ispravnim i kvarnim stanjima, potrebno je izvući značajke kvarova u vremenskoj ili frekvencijskom području koje nedvojbeno upućuju na kvar. Na taj način se M dimenzionalna veličina transformira u N dimenzionalnu, pri čemu je $N \ll M$.

U nastavku ove točke prikazat će se izrada klasifikatora za KVAR-1 (prisutnost međuzavoynih kratkih spojeva u svitku namota armature). Klasifikator za KVAR-1 odrediti će se na osnovu valnih oblika raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerene s polne papuče rotora, te napona koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 postavljenom na dvostrukom polnom koraku kako je prikazano na slici 5.11-2.

Promotri li se valni oblik raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane s polne papuče rotora u ispravnom stanju stroja i za KVAR-1, moguće je uočiti međusobna odstupanja valnih oblika. Odstupanja se manifestiraju kroz promjenu amplituda harmoničkih članova nižeg reda u frekvencijskom sastavu analiziranih valnih oblika. Pri tome se harmonici u rasponu 1 do 41 smatraju harmoničkim članovima nižeg reda. Amplitude tih harmoničkih članova u ispravnom stanju i za KVAR-1, razlikuju se od nekoliko desetaka do nekoliko stotina puta. Prema tome, promatranjem promjene amplitude jednog ili više harmoničkih članova nižeg reda, u frekvencijskom sastavu podataka mjerenja, može se s određenom sigurnošću utvrditi prisutnost KVARA-1 u stroju. Potrebno je naglasiti da osnovni harmonik napona induciranog u mjernom svitku iznosi nekoliko postotaka iznosa osnovnog harmonika raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu.

Valni oblik napona koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 , također je moguće primijeniti u detekciji KVARA-1 u stroju, koji se manifestira kao promjena amplitude osnovnog harmoničkog člana u frekvencijskom sastavu valnog oblika. Pri tom se amplituda osnovnog harmoničkog člana promjeni dva do pet puta, što s određenom sigurnošću upućuje na prisutnost KVARA-1 u stroju.

Slika 9.2 prikazuje klasifikator za KVAR-1 koji se definira kao omjer trenutnih izmjerenih podataka te podataka, početnog stanja bez prisutnosti kvara. U nedostatku podataka mjerenja početnog stanja, mogu se primijeniti podaci izračuna.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta B_{1r} \\ \Delta B_{2r} \\ \Delta U_1 \end{array} \right\}$$

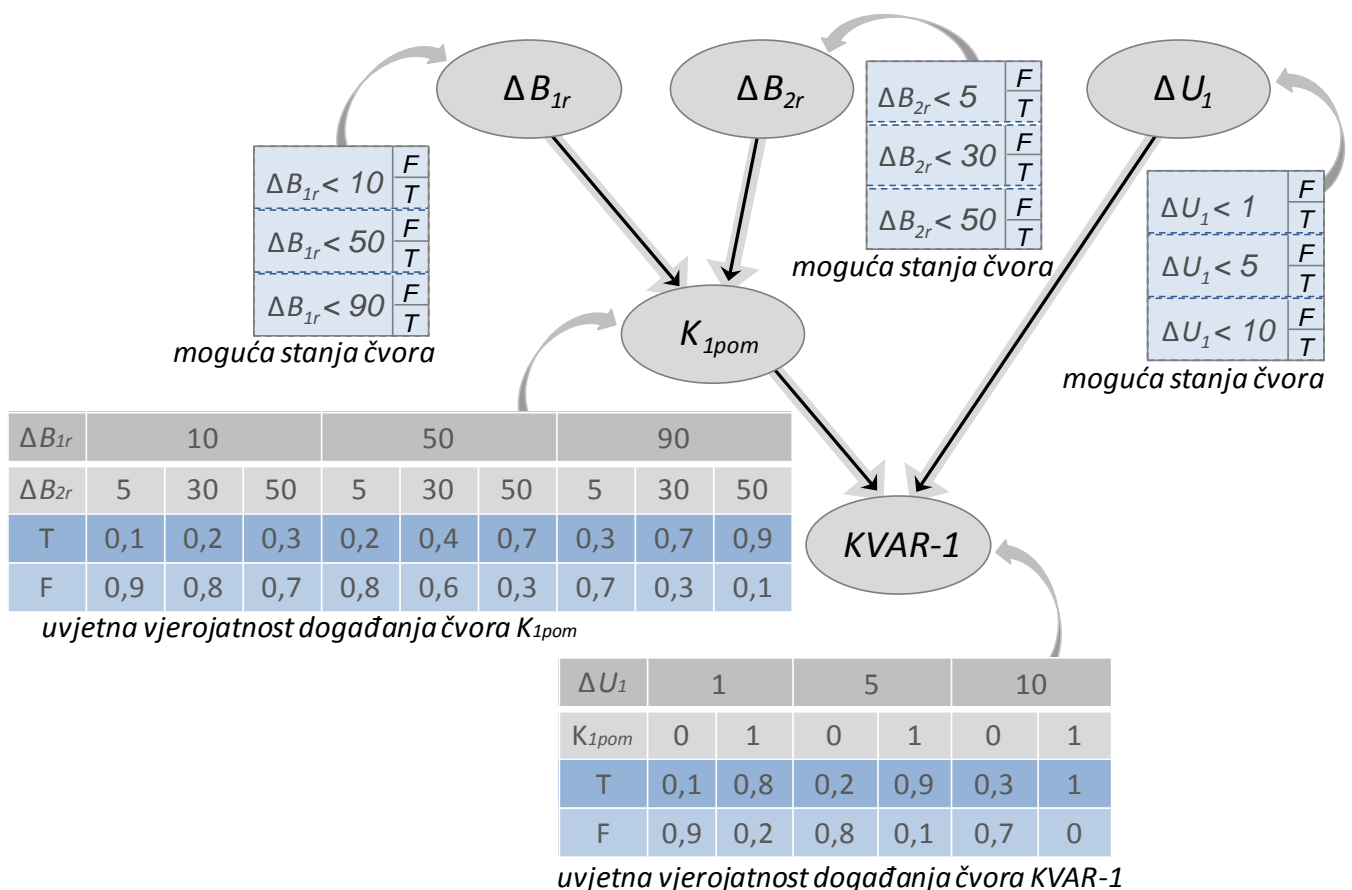
Slika 9.2 Klasifikator za KVAR-1 gdje je: ΔB_{1r} promjena amplitude prvog harmonika u frekvencijskom sastavu raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane s polne papuče rotora, ΔB_{2r} promjena amplitude drugog harmonika u frekvencijskom sastavu raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane s polne papuče rotora i ΔU_1 promjena amplitude prvog harmonika u frekvencijskom sastavu napona induciranog u mjernom svitku ugrađenom na dvostrukom polnom koraku.

9.3. Izrada modula za odlučivanje

Modul za odlučivanje realiziran je u programu HuginExpert koji je baziran na Bayesovim mrežama. U navedenom programu se zadaju elementi (čvorovi) koji su određeni svojim stanjima i vjerojatnostima tih stanja. Poveznice (strelice) između čvorova određuju njihov vremenski redosljed, a čvorovi mogu i ne moraju imati svoje prethodnike. Na taj način formira se usmjereni aciklički graf.

Bayesova mreža primijenjena u detekciji KVARA-1 i KVARA-2, realizirana u programu HuginExpert, prikazana je na slici 9.3 i 9.4. Mreže za detekciju navedenih kvarova nisu međusobno vezane jer nije pronađena međusobna veza istih. Stoga je moguće izraditi dvije neovisne mreže za odlučivanje.

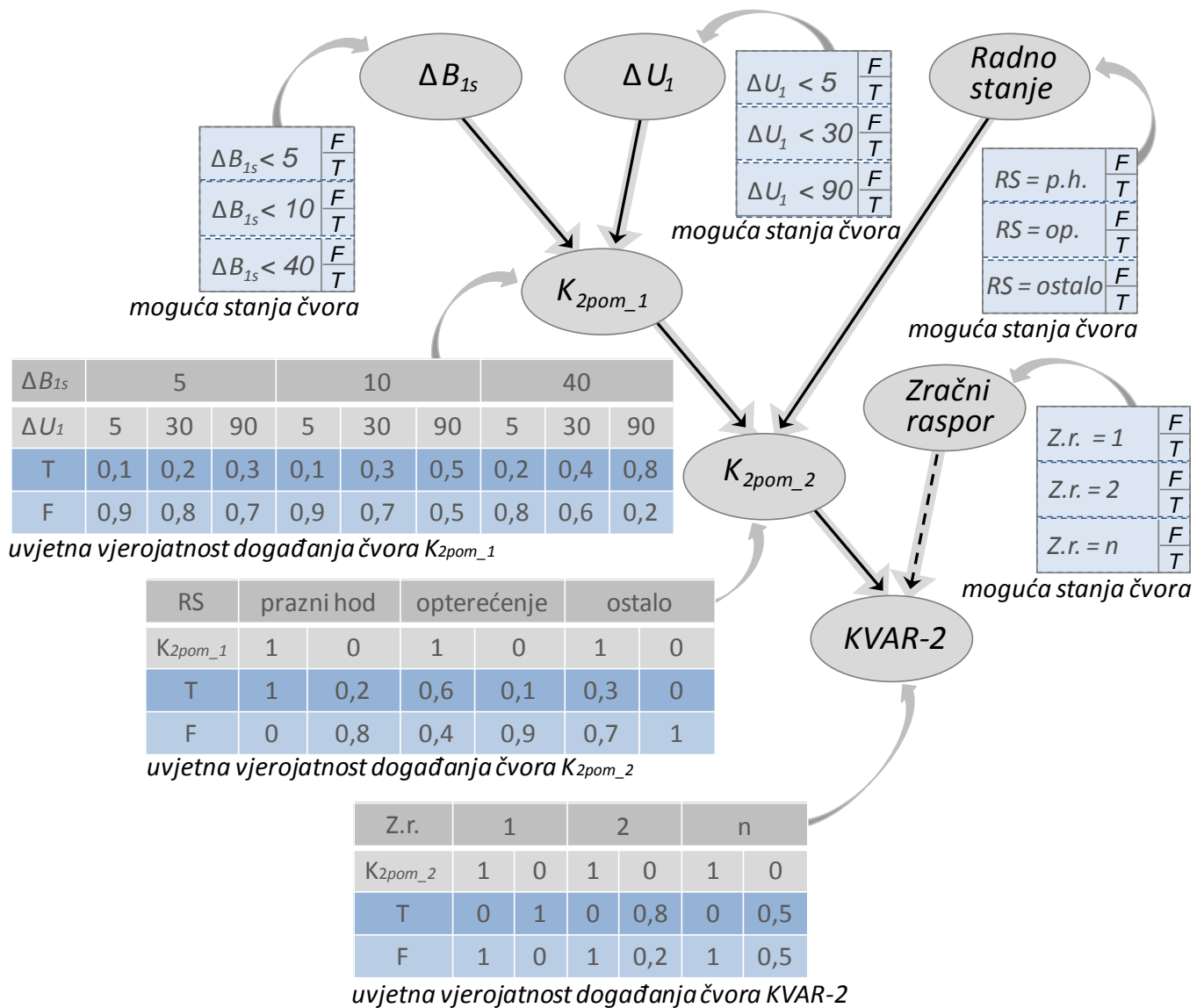
Za čvorove bez prethodnika zadaju se samo apriorne vjerojatnosti stanja, tj. vjerojatnosti koje ne ovise o stanjima drugih čvorova u mreži. Takav je npr. čvor ΔB_1 . S druge strane stanje čvorova koji imaju prethodnike, kao što je čvor K_{1pom} , ovisi o stanju čvorova prethodnika. Za ovakve čvorove zadaju se vezane (uvjetne) vjerojatnosti stanja putem tablice, u kojoj se zadaju vjerojatnosti svih mogućih kombinacija stanja čvorova prethodnika.



Slika 9.3 Bayesova mreža primijenjena u detekciji KVARA-1

Klasifikator za KVAR-2 (prisutnost međuzavoynih kratkih spojeva u svitku namota uzbuđene) određen je na osnovu valnog oblika raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu mjerene sa zuba statora, te napona koji se inducira u mjernom svitku Ms_7 postavljenom na dvostrukom polnom koraku kako je prikazano

na slici 5.11-2. Iz podataka izračuna i mjerenja je pokazano da se pri pojavi KVARA-2 značajno promjeni prvi ΔB_{1s} i treći ΔB_{3s} harmonički član u frekvencijskom sastavu valnog oblika raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu. Također je značajna promjena prvog harmonika ΔU_1 u frekvencijskom sastavu valnog oblika napona koji se inducira u mjernom svitku Ms₇.



Slika 9.4 Bayesova mreža primjenjena u detekciji KVARA-2

Kako se može uočiti na slici 9.4 pored čvorova ΔB_{1s} i ΔU_1 korišten je čvor *Radno stanje*, koji daje informaciju u kojem se radnom stanju stroj trenutno nalazi. Ova informacija je korisna u slučaju detekcije KVARA-2, iz razloga što je podacima mjerenja i izračuna pokazano da uočljivost kvara ovisi o zasićenju magnetskog kruga stroja. Što je magnetski krug stroja više zasićen, to je KVAR-2 teže detektirati. Stoga se vjerojatnost događanja KVARA-2 povećava ukoliko je stroj u praznom hodu ili kapacitivnom radu i magnetski krug mu nije zasićen.

Također je moguće koristiti informaciju iz drugih senzora koji nisu korišteni u ovom radu, a mogu pridonijeti povećanju vjerojatnosti pri detekciji kvarova u stroju. Tako npr. isti efekt koji uzrokuje međuzavojni kratki spoj svitka namota uzbude

može uzrokovati i pomak jednog od polova. Senzorom za mjerenje zračnog rasporeda moguće je utvrditi pomak jednog pola, što je u mreži označeno stanjem 1. Ukoliko je neistinita tvrdnja da je stanje mjerenja zračnog rasporeda 1, onda je vjerojatnost da je međuzavojni kratki spoj uzrok KVARA-2 a ne pomak pola.

Zajednička osobina svim modelima zasnovanim na Bayesovim mrežama jest mogućnost procjene vjerojatnosti čak i onda kada neke informacije nedostaju. Što je više informacija, to je procjena pouzdanija, no u slučaju nepostojanja određene informacije, model je ipak sposoban predviđati vjerojatnosti. Bayesove mreže pokazale su se primjenjive za rješavanje problema o kojem se posjeduje određena razina strukturiranog znanja kao što je detekcija KVARA-1 i KVARA-2.

10. ZAKLJUČAK

Područje detekcije kvarova na rotacijskim strojevima zauzima značajno mjesto u energetici i na tom području intenzivno se istražuje. Razne ideje i tehnike korištene pri detekciji kvarova ugrađuju se u sustave nadziranja stanja stroja, čime se mogućnosti takvih sustava kontinuirano unaprjeđuju i proširuju. U radu se obrađuju metode detekcije kvarova na rotacijskim strojevima koje se zasnivaju na analizi magnetskog polja u stroju. Opsežnim istraživanjem i izračunima uz primjenu metode konačnih elemenata (MKE), te potvrdu istih eksperimentalnim mjerenjem, pronađeni su indikatori na osnovu kojih je moguće detektirati kratke spojeve u svicima namota sinkronih strojeva.

U radu su opisane dvije nove metode. Prvom metodom detektiraju se međuzavojni kratki spojevi svitka namota armature. Drugom metodom detektiraju se međuzavojni kratki spojevi svitka uzbudnog namota.

Prva metoda bazira se na analizi valnog oblika raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu stroja promatrane s rotorske polne papuče. Novina u ovoj metodi je da se valni oblik raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatra na vremenskom periodu koji odgovara jednom punom okretu rotora. Tada poremećaj magnetskog polja u zračnom rasporu uzrokovan međuzavojnim kratkim spojem svitka namota armature, vidljiv kao lokalizirani poremećaj, uzrokuje promjenu znatnog broja harmoničkih članova u frekvencijskom sastavu analiziranog valnog oblika. Relativna promjena iznosa magnetske indukcije ΔA , koja je prisutna na vremenskom periodu $1/(Z-N)$, gdje je Z broj zubi statora, a N broj zubi statora obuhvaćen poremećajem, sadrži $(Z-N)$ harmoničkih članova amplituda reda veličine ΔA , i njihove više harmonike nešto nižih amplituda. Usporedbom tih harmoničkih članova s istim, ali bez međuzavojnog kratkog spoja svitka namota armature, uočavaju se izrazite promjene koje se mogu koristiti kao pouzdani indikatori međuzavojnog kratkog spoja u svitku namota armature. To predstavlja novi pristup otkrivanja kvara u namotu armature, a metodu je moguće primijeniti na širokom spektru sinkronih strojeva.

Detekcija međuzavojnih kratkih spojeva svitka armaturnog namota na realnom stroju, zahtjeva mjerenje magnetske indukcije u zračnom rasporu stroja. To se dobije putem Hallovog senzora ugrađenog na zub statora ili polnu papuču rotora. Rezultati izračuna pokazuju da je pojavu međuzavojnih kratkih spojeva svitka namota armature moguće detektirati sa zuba statora i s polne papuče rotora, međutim postoje značajne razlike u primjeni ove metode ovisno o odabranom mjestu promatranja, odnosno mjerenja magnetske indukcije.

Pri detekciji međuzavojnih kratkih spojeva u svitku namota armature, promatranjem magnetske indukcije u zračnom rasporu, sa zuba statora, udaljenost mjesta nastanka kvara i mjesta mjerenja magnetske indukcije uvelike utječe na uspješnost detekcije kvara. Što je mjesto mjerenja magnetske indukcije bliže utoru u kojem je smješten vodič s kratko spojenim zavojem, to je poremećaj magnetskog polja u stroju uzrokovan međuzavojnim kratkim spojem u podacima mjerenja više izražen. Graničnu udaljenost predstavlja polni korak iznad kojeg u podacima mjerenja magnetske indukcije nije moguće detektirati međuzavojni kratki spoj namota armature. Stoga, kako bi se osigurala uspješna i pouzdana detekcija ovog kvara, potrebno je ugraditi dovoljan broj senzora na međusobnoj udaljenosti koja

osigurava detekciju kvara. Nasuprot tome, pri mjerenju magnetske indukcije u zračnom rasporu s polne papuče rotora, dovoljan je samo jedan senzor za uspješnu i pouzdanu detekciju analiziranog kvara. Na bilo koju polnu papuču rotora ugradi se senzor za mjerenje magnetske indukcije. Kako se rotor okreće, a tim i senzor za mjerenje, pri nailasku na kvar koji je lokalizirana pojava, iz podataka mjerenja može se detektirati kvar. Otežavajući faktor kod ovog načina detekcije je nužnost osiguranja prijenosa podataka iz rotirajućeg dijela stroja, što poskupljuje tehničko rješenje nadzornog sustava.

Važnost detekcije međuzavoynih kratkih spojeva svitka namota armature očituje se u činjenici da u kratkom vremenskom periodu mogu prerasti u međuslojne, međufazne kratke spojeve ili proboj na masu stroja, što u većini slučajeva podrazumijeva velike materijalne štete. Suvremene zaštite generatora ne mogu detektirati međuzavoynne kratke spojeve, iako kroz kratko spojene zavoje teku značajne struje. Razlog nemogućnosti detekcije je što se struje međuzavoynih kratkih spojeva zatvaraju u lokalnim petljama između zavoja koji su u kratkom spoju. U tom slučaju nema razlike u struji na početku i kraju namota, a zaštitni diferencijalni relej upravo na osnovu te razlike detektira kvar u namotu. Eksperimentalnim mjerenjem utvrđeno je da se pri pojavi 5 međuzavoynih kratkih spojeva u svitku namota armature ne javlja nesimetrija u strujama faza. Za očekivati je pojavu nesimetrije napona faza u omjeru ukupnog broja zavoja armature i broja zavoja u kratkom spoju, međutim za analizirani stroj iznos nesimetrije napona je unutar klase točnosti mjernog instrumenta.

Iz navedenog slijedi zaključak da je detekcija međuzavoynih kratkih spojeva u ranoj fazi nastajanja od izuzetne važnosti. Njihovim ranim otkrivanjem mogu se izbjeći veliki materijalni troškovi nastali izbivanjem stroja iz pogona i samim popravcima.

Druga metoda koristi se za detekciju međuzavoynih kratkih spojeva svitka uzbudnog namota sinkronih strojeva s istaknutim polovima. Iz rezultata izračuna i mjerenja je utvrđeno da prisutnost međuzavoynih kratkih spojeva u svitku uzbudnog namota na nekom od polova, uzrokuje smanjenje magnetske indukcije pod tim polom. Pri tom je odnos broja kratko spojenih zavoja pola i promjene iznosa magnetske indukcije pod polom uzrokovane kratkim spojem ovisi o iznosu uzbudne struje. Naime, njihovu ovisnost određuje nagib krivulje praznog hoda u točki promatranja. Ta ovisnost biti će linearna sve dok je magnetski krug stroja nezasićen. Kako magnetski krug stroja postaje zasićen promjena iznosa magnetske indukcije izazvana međuzavoynim kratkim spojevima svitka na polu postaje sve manje izražena.

Također je utvrđeno da međuzavoyni kratki spojevi prisutni na jednom polu utječu na iznos magnetske indukcije pod preostalim polovima u stroju. Pri tom je utjecaj kratko spojenih zavoja pola na iznos magnetske indukcije pod preostalim polovima stroja, to manji što stroj ima više polova. To znači da će poremećaj magnetskog polja u stroju izazvan kratkim spojevima zavoja pola biti više lokalizirani poremećaj što stroj ima više polova. Nasuprot tome, kod strojeva s manjim brojem polova, poremećaj magnetskog polja u stroju biti će više raspodijeljen na preostale polove što otežava detekciju međuzavoynih kratkih spojeva. U poglavlju broj 6 prikazane su relacije koje za bilo koji analizirani stroj s

$2p$ polova, daju ovisnost promjene iznosa magnetske indukcije pod svim polovima stroja uzrokovane kratkim spojem N zavoja jednog pola.

Utvrđivanje prisutnosti međuzavoynih kratkih spojeva na nekom od polova donosi se na osnovu promjena u harmonijskom sastavu valnog oblika raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane sa zuba statora. Novina u ovoj metodi je da se na valnom obliku raspodjele magnetske indukcije vrši frekvencijska analiza za vremenski period $2p\tau_p$, odnosno cijelom okretu rotora. Uslijed pojave međuzavoynih kratkih spojeva dolazi do promjene valnog oblika magnetske indukcije, koji se za analizirani stroj manifestira kao značajna promjena amplitude prvog i trećeg harmoničkog člana. Broj harmoničkih članova kojima se značajno promjeni amplituda uslijed pojave međuzavoynih kratkih spojeva ovisi o broju polova stroja. Što stroj ima više polova na raspolaganju je u svrhu detekcije kvara i veći broj harmoničkih članova, što dodatno olakšava detekciju kvara.

Prisutnost međuzavoynih kratkih spojeva u svitku uzbudnog namota ne može imati posljedice razmjera onih izazvanih međuzavoynim kratkim spojevima armaturnog namota. Međutim, dugoročno kratki spojevi u uzbudnom namotu nisu poželjni i potrebno ih je ukloniti.

Podaci mjerenja na stvarnom objektu prikupljeni su adekvatnim nadzornim sustavom, te na odgovarajući način obrađeni. U poglavlju 9. dan je primjer sustava za detekciju analiziranih kvarova na osnovu zaključaka iz ovog rada. Sustav je baziran na Bayesovim mrežama koje su se pokazale primjenjive za rješavanje problema o kojem se posjeduje određena razina strukturiranog znanja.

Daljnje aktivnosti za unaprjeđenje sustava za detekciju kvarova sinkronih strojeva prikazanog u ovom radu treba usmjeriti ka povezivanju s novim sensorima i novim metodama detekcije kako bi se, jednom povećala sigurnost pri detekciji kvarova, te kako bi se obuhvatio veći broj kvarova koje je moguće detektirati u rotacijskim strojevima.

LITERATURA

- [1] ENEL Failure Study – Hydropower Proceedings, Barcelona 1995.
- [2] V. Čerić, , M. Varga, Informacijska tehnologija u poslovanju. Element, Zagreb, 2004.
- [3] B. Kliček, M. Zekić-Sušac, S. Lovrenčić, Edukacijski repozitorij za inteligentne sustave, Neuronske mreže – Predavanja, Internet: <http://eris.foi.hr/11/neuronske/nn-predavanje1.html>, 21.03.2003.
- [4] M. Jelavić; - Optimalno upravljanje vjetroelektranom primjenom bayesijskih mreža, seminarski rad, Zagreb 2008.
- [5] R. Wolf; - Osnove električnih strojeva, Školska knjiga Zagreb, 1985.
- [6] Z. Maljković, Z. Sirotić; - Sinkroni strojevi, Element Zagreb, 1996.
- [7] B. Heller, V. Hamata; - Harmonic field effects in induction machines, Institute of Electrical Engineering off the Czechoslovak Academy of Sciences, Prague 1977.
- [8] V. Kuterovac; - Ograničavanje vibracija statora sinkronog stroja metodama izbora rasporeda razlomljenog namota, Doktorska disertacija, ETF Zagreb, 1971.
- [9] A. Elez; Magistarski rad - Elektromagnetska stanja sporohodnog sinkronog generatora vjetroagregata, Zagreb. 2008.
- [10] S. Berberović, - Teorijska elektrotehnika (odabrani primjeri), FER Zagreb. 1998.
- [11] B. Takač; - Sustav motrenja rotacijskih strojeva zasnovan na generičkim tehnologijama, Magistarski rad, FER Zagreb. 2009.
- [12] National Instruments; NI PXI-4204 User manual, 373529C-01, June 2007.
- [13] Beckhoff; CX 9010 Ethernet controller, Hardware documentation, version 2,4, June 2008.
- [14] Beckhoff; EL 3702 Analog input terminal, Hardware documentation, January 2009.
- [15] Moxa; W315 Embedded computers, Hardware documentation, January 2009.
- [16] Sergio M. A. Cruz, A. J. Marques Cardoso; - Stator Winding Fault Diagnosis in Three-Phase Synchronous and Asynchronous Motors, by the Extended Park's Vector Approach, IEEE Transactions on industry applications, Vol. 37. No. 5. September 2001, str. 1-7.
- [17] R. Ong, J. H. Dymond, R. D. Findlay, B. Szabados; - Shaft Current in AC Induction Machine- An Online Monitoring System and Prediction Rules, IEEE Transactions on industry applications. Vol. 37. No. 4. July 2001, str. 1-8.
- [18] H. C. Karmaker; - Broken Damper Bar Detection Studies Using Flux Probe Measurements and Time-Stepping Finite Element Analysis For Sailer – Pole Synchronous Machines, Sdemped 2003, Symposium for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Atlanta USA August 2003, str. 1-5.
- [19] F. Zidani, M. Benbouzid, D. Diallo, M. Said; - Induction Motor Stator Faults Diagnosis by a Current Concordia Pattern- Based Fuzzy Decision System, IEEE Transactions on energy conversion. Vol. 18. No. 4. December 2003, str. 1-7.

-
- [20] S. Nandi, H. Toliyat; - Novel Frequency-Domain-Based Technique to Detect Stator Interturn Faults in Induction Machines Using Stator-Induced Voltages After Switch-Off, IEEE Transactions on industry applications. Vol. 38. No. 4. January 2002, str. 1-9.
- [21] S. Štefanko, I. Kurtović, M. Bogut, M. Kovačević, M. Momić; - Broken Bar Detection in Induction Machines Using Measurements of Shaft Currents, IEEE Sdemped 2001 Symposium for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Grado Italy 2001, str. 1-4.
- [22] J. Mendes K. Gulez, B. Karlik, S. Vakkas Ustun; - Designing Artificial Neural Networks for Fault Detection in Induction Motors with the TMS320C30 DSP, ESIEE Paris, September 1996, str. 1-19.
- [23] R. Rajeswari and N. Kam; - Diagnosis of Inter Turn Fault in the Stator of Synchronous Generator Using Wavelet Based ANFIS, International Journal of Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 2 No. 2 October 2007, str. 1-7.
- [24] D. R. Albright, D. J. Albright, J. D. Albright; - Generator field winding shorted turn detection technology, Power Engineering September 1999, Volume 103, Issue 9, p. 28-32.
- [25] E. Garbe, R. Helmer, B. Ponick; - Modelling and Fast Calculating The Characteristics of Synchronous Machines With The Finite Element Method, Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, str. 1-6.
- [26] S.-A. Tahan, I. Kamwa; - A two-factor saturation model for synchronous machines with multiple rotor circuits, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 4, December 1995, str. 1-4.
- [27] D. Žarko; – Analiza zasićenih reaktancija turbogeneratorskog metodom konačnih elemenata, Magistarski rad, FER Zagreb. 1999.
- [28] M. Petrinić, D. Radonić, I. Mandić; Primjena metode konačnih elemenata u elektromagnetskom proračunu velikih sinkronih generatora, Jugoslavenski komitet međunarodne Konferencije za velike električne mreže – CIGRE, XIX Svjetovanje elektrotehničara Jugoslavije, Bled. 1989, str. 35-44.
- [29] A. Elez, B. Tomičić, B. Takač, "Contemporary Approach to Determination of Magnetic Induction in Wind Generator Air Gap", International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPQ'08), Spain – Santander 2008, str 1-6.
- [30] A. Elez, B. Tomičić, A. Čolak, "The Comparison of Magnetic Values Obtained from Hall Probes and Measuring Coils in Synchronous Generators", International Conference on Electrical Machines ICEM'08- XVIII, Portugal – Vilamoura 2008, str 1-6.
- [31] A. Elez, B. Tomičić, M. Petrinić, "Detection of inter-coil short circuits in coils of salient poles synchronous generator excitement winding on the basis of analysis of magnetic field in the machine", International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPQ'10), Spain – Granada 2010, str 1-6,

POPIS OZNAKA

OZNAKA	ZNAČENJE
H	jakosti magnetskog polja
\mathbf{H}	vektor jakosti magnetskog polja
B	magnetska indukcija
\mathbf{B}	vektor položaja raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu
\mathbf{n}	jedinični vektor normalan na površinu S
\mathbf{J}	vektor gustoće struje
δ_x	duljina zračnog raspora
θ_r	uzbudno protjecanje
θ_s	armaturno protjecanje
θ	ukupno protjecanje
θ_z	protjecanje zavoja
θ_c	protjecanje svih zavoja svitka
θ_m	protjecanje grupe svitaka
α_y	prostorni kut vodiča zavoja
μ_0	permeabilnost zraka
U, V, W	oznake namota armature
τ_p	polni korak
p	broj pari polova
f_t	tetivni faktor namota
f_z	zonski faktor namota
ν	harmonik
q	grupa
ω_ν	kutna brzina
Λ_x	vodljivost zračnog raspora
$C - D$	uzbudni namot
$E - F$	namot za kompaundaciju
u_1	regulator napona
u_2	sklop za kompaundaciju
Tr	transformator
R	otpor
S	svitak
k	broj svitaka
Z	zavoj

OZNAKA	ZNAČENJE
V	vodič
i	broj žice u zavoju
j	početak ili kraj zavoja
$S_2Z_5V_{21}$	oznaka izvoda za kratko spajanje
$-X01$	redna stezaljka
$-U1$	priključna kutija
Φ	magnetski tok
S	površina
\mathbf{n}	vektor površine
Q	naboj
N	količina naboja
v_x	brzina gibanja naboja
t	vrijeme
\mathbf{F}	vektor sile
E_y	električno polje
U_H	Hallov napon
R_H	Hallov koeficijent
I_c	kontrolna struja
B_z	dio magnetske indukcije okomit na površinu ugradnje
u_{ind}	napon induciran u petlji površine S obrubljene konturom c
c	kontura
MS_1	mjerni svitak
MS_3	mjerni svitak
MS_7	mjerni svitak
H_1	Hallov senzor
H_3	Hallov senzor
H_4	Hallov senzor
θ_{d1}	protjecanje dodatnog svitka
θ_{u1}	protjecanje uzbudnog svitka
ΔB_{SRn}	promjena iznosa mag. indukcije pod n polom
$\Delta B_{SR(n \pm i)}$	promjena iznosa mag. indukcije pod $(n \pm i)$ polom
$\Delta B_{SR(n \pm j)}$	promjena iznosa mag. indukcije pod $(n \pm j)$ polom
B_{MAX}	maksimalni iznos mag. indukcije
ΔB_{MAX}	maksimalna promjena iznosa mag. indukcije
ΔN	promjena broja zavoja

OZNAKA	ZNAČENJE
k_{ph}	nagib krivulje praznog hoda
1U1	oznaka početka paralelne grane armaturnog namota
i_z	struja kratko spojenog zavoja
u_z	napon zavoja
Z_z	impedancija kratko spojenog zavoja
R_p	prijelazni otpor mjesta kratkog spoja
ΔA	promjena amplitude
φ	fazni pomak
i_u	struja faze U
i_v	struja faze V
i_w	struja faze W
I_m	maksimalni iznos struje
ψ	kut
a	broj paralelnih grana
r	radni otpor
x_{gl}	rasipna reaktancija glava statorskog namota
U_{i0}	vrijednost induciranog napona
I_f	uzbudna struja
Δu_i	odstupanje induciranog napona
$\Delta \varphi_i$	odstupanje faznog pomaka
PM_1	priključno mjesto 1
PM_2	priključno mjesto 2
PXI-1044	statorska procesna jedinica
PXI-8186	kontroler procesne jedinice
PXI-4204	mjerni modul
CS-1010	strujni izvor
R_2	regulacioni otpornik
AI_0	analogni ulaz
CX9000	rotorska procesna jedinica
EL3702	mjerni modul
W315	bežični prijemnik/predajnik
n	brzina vrtnja stroja

OZNAKA ZNAČENJE
Neuronske mreže

x_1, \dots, x_n	ulazni signal
w_1, \dots, w_n	sinaptičke težine
S	izlaz iz sumatora
w_0	prag
f	funkcija
y	izlaz iz neurona
$S_j^{[s]}$	ulaz u neuron j u sloju s
$w_{ji}^{[s]}$	težina veze od neurona j prema ulazu i u sloju ($s-1$)
$y_i^{[s]}$	izlaz neurona j u sloju s
$y_i^{[s-1]}$	ulaz i sloja ($s-1$)
i	broj ulaza j -tog neurona
j	broj neurona
w_{ij}	težina
w_{ij}^*	korekcija težine određena u postupku učenja
LR	iznos učenja
e_j	iznos greške
X_j	vrijednost i -tog ulaza
Y_j	stvarni izlaz
d_j	željeni izlaz
RMS_E	srednja kvadratna greška
r_i	računati izlaz dobiven iz mreže za slučaj i
s_i	stvarni izlaz za slučaj i
n	broj slučajeva u uzorku

Bayesove mreže

$P(A)$	vjerojatnost događanja događaja A
$P(B)$	vjerojatnost događanja događaja B
$P(A \cap B)$	vjerojatnost događanja događaja A i događaja B
$P(A B)$	uvjetna vjerojatnost događanja događaja A i događaja B
K_{1pom_1}	pomoćna varijabla
T	istina
F	neistina

SAŽETAK

U radu se obrađuje problematika detekcije kvarova u rotacijskim strojevima temeljem analize magnetskog polja u stroju, s ciljem doprinosa fundusu znanja o prepoznavanju kvarova rotacijskih strojeva, odnosno unapređenju nadzornih sustava zaduženih za praćenje stanja rotacijskih strojeva. Razrađuje se detekcija međuzavoynih kratkih spojeva u armaturnim i uzbudnim namotima sinkronih strojeva. Primjenom MKE (metode konačnih elemenata), na 2D i 3D modelima generatora, na mjestima od interesa, izračunati su valni oblici magnetskog polja u stroju u ispravnom i kvarnom stanju. Mjesta od interesa odabrana su s namjerom usporedbe izračunatih valnih oblika na modelima s mjerenjima Hallovim senzorima i mjernim svitcima na stvarnom stroju. Usporedbom rezultata izračuna u ispravnim i kvarnim stanjima, uočene su promjene magnetskih polja u stroju. Na osnovu tih promjena izrađene su dvije nove metode detekcije kvarova bazirane na analizi viših harmoničkih članova u frekvencijskom sastavu valnih oblika magnetske indukcije i napona induciranih u mjernim svitcima.

Kako bi se potvrdile teze proizašle iz rezultata izračuna, izrađena su opsežna mjerenja na stvarnom stroju s ciljem potvrde rezultata dobivenih izračunima. Eksperimentalni dio ovog rada izrađen je na sinkronom generatoru snage 16 kVA, adaptiranom na način da se analizirani kvarovi mogu simulirati. Za mjerenje su korištene tehnike i tehnička rješenja prisutna u monitoringu rotacijskih strojeva. U radu su prikazani rezultati mjerenja te su isti uspoređeni s rezultatima izračuna. Usporedba rezultata mjerenja i izračuna pokazala je zanemariva odstupanja u ispravnim radnim stanjima stroja, dok su za kvarna stanja prisutna određena odstupanja rezultata, ali koja ne dovode u pitanje ispravnost dvije nove metode detekcije kvarova.

Na osnovu rezultata izračuna i mjerenja izrađeni su klasifikatori analiziranih kvarova. U sklopu rada izrađen je i sustav, baziran na Bayesovim mrežama, koji na osnovu klasifikatora detektira kvarove u stroju.

Ključne riječi: sinkroni stroj, magnetsko polje, magnetska indukcija, MKE, Hallov senzor, detekcija i dijagnostika kvarova.

ABSTRACT

In this thesis a systematic approach to fault detection problem in electrical rotating machines based on magnetic field analysis in machine is presented. The aim of this thesis is a contribution in the field of faults and failures identification in rotating machines, that is, improvement of monitoring systems aimed for rotating machine condition monitoring. This thesis deals with detection of inter-coil short circuits in coils of the synchronous machines armature and field winding.

Applying FEM (finite element method) to the generator 2D and 3D models, magnetic field wave forms in the machine were calculated, on the points of interests, under both, faultless and faulty conditions. Using the models, flux density and magnetic flux were calculated on the points accessible for measuring with Hall's sensors and measuring coils in the actual machine. When results of calculations were compared, under faultless and faulty conditions, changes in wave forms caused by the analyzed faults were identified and two new methods of fault detections have been made. New methods are based on analysis of higher harmonics in frequency spectrum of flux density and measuring coils induced voltages wave forms.

To confirm calculation results extensive measurements have been made on real synchronous machine, specially adapted in a way that simulated failures can be analyzed. Techniques and technical solutions usually present in monitoring systems for rotating machines were applied to perform measurements. Measuring data are presented. Also comparison between calculated and measuring data is made, in order to confirm theses of this work. Comparison of the data acquired by measurements and calculation for faultless conditions are insignificant, while for faulty conditions deviation is present but in amounts that do not challenge credibility of two new fault detection methods.

On the bases of calculation and measurement results fault classifiers are made. Within this work system, based on Bayesian networks, for fault detections in rotating machines is made.

Key words: synchronous machine, magnetic flux, flux density, FEM, Hall sensor, fault detection and diagnostics.

ŽIVOTOPIS

Elez Ante rođen je 1979. godine u Splitu. Elektrotehničku školu u Splitu završio je 1998. godine, a Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, smjer Elektrostrojarstvo i automatizacija, 2003. godine. Nakon završetka studija zaposlio se u tvrtci KONČAR-Institutu za elektrotehniku d.d, gdje i danas radi kao razvojni inženjer u Zavodu za rotacijske strojeve.

Pohađao je poslijediplomski studij na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, smjer Elektrostrojarstvo i automatizacija, na kojem je magistrirao 2008. godine. Na istoimenom fakultetu, upisan je nastavak daljnjeg znanstvenog usavršavanja.

U znanstvenoistraživačkom radu bavi se mjerenjem i analizom parametara električnih strojeva. Koautor je više radova publiciranih u zbornicima znanstvenih i stručnih konferencija u zemlji i inozemstvu.

CIRRICULUM VITAE

Elez Ante was born in 1979 in Split. He completed the Secondary Electrical Engineering School in Split in 1998. At the same year he enrolled at the Faculty of Electrical Engineering and Computing in Zagreb. In 2003 he graduated at the Department for Mechanical engineering for electrical machines and automation. After graduation he joined the company KONČAR – Institute for Electrical Engineering on the permanent employment basis where he works today as an R&D engineer in the department for Rotating Machines.

He attended a master degree study at the Faculty for Electrical Engineering and Computing, at the Department for Mechanical engineering for electrical machines and automation, and took a master degree in 2008. He continued his education at the same faculty in order to resume scientific excellence.

His scientific research and development activities are aimed at measuring and analyses of electric machine parameters. He is a co-author of several studies and papers published in proceedings of scientific and expert conferences and gatherings in the country and abroad. He lives and works in Zagreb, Croatia.