

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Aleksandrs MESŅAJEVS

**MATEMĀTISKĀS MODELĒŠANAS IZMANTOŠANA SPECIĀLAS
NOZĪMES SINHRONO MAŠĪNU MAGNĒTISKO SISTĒMU IZPĒTĒ UN
OPTIMIZĀCIJĀ**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2012

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Aleksandrs MESŅAJEVS

Doktora studiju programmas „Elektriskās mašīnas un aparāti” doktorants

**MATEMĀTISKĀS MODELĒŠANAS IZMANTOŠANA SPECIĀLAS
NOZĪMES SINHRONO MAŠĪNU MAGNĒTISKO SISTĒMU IZPĒTĒ UN
OPTIMIZĀCIJĀ**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. sc. ing., asoc. profesors
A.ZVIEDRIS

Rīga 2012

UDK 621.313.32(043.2)
Me 707 m

Mesņajevs. A. Matemātiskās modelēšanas izmantošana speciālas nozīmes sinhrono mašīnu magnētisko sistēmu izpētē un optimizācijā
Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2012.- 23 lpp.

Iespiests saskaņā ar Enerģētikas institūta 2012. gada 29. maija lēmumu, protokols Nr. 1/12.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai» .

This work has been supported by the European Social Fund within the project «Support for the implementation of doctoral studies at Riga Technical University».

Эта работа выполнена при содействии Европейского социального фонда в рамках проекта «Поддержка развития докторантуры РТУ».

ISBN

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU
DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ
UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2012.g. Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr. habil. sc. ing. Vladislavs Pugačevs,
Latvijas ZA Fizikālās enerģētikas institūta vadošais
pētnieks, Latvija

Profesors, Dr. sc. ing. Aleksandrs Gasparjans,
Latvijas Jūras akadēmija, Latvija

Dr. sc. ing. Olegs Šapovalovs,
AS „RER” vadošais pētnieks, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu (vai cita) doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Aleksandrs Mesņajevs(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 7 nodaļas, secinājumus un galvenos rezultātus, literatūras sarakstu, 2 pielikumus, 71 attēlu, kopā 169 lappuses. Literatūras sarakstā ir 76 nosaukumi.

Saturs

1. VISPĀRĪGS DARBA RAKSTUROJUMS	5
1.1. Darba aktualitāte.....	5
1.2. Darba mērķis, pētījuma objekts un pētījuma uzdevumi.....	5
1.3. Pētījumu metodes.....	5
1.4. Zinātniskā novitāte.....	6
1.5. Praktiskā nozīme.....	6
1.6. Darba aprobācija.....	6
1.7. Autora publikācijas.....	6
1.8. Promocijas darba struktūra.....	7
1.9. Darba apjoms.....	7
2. DARBA NODAĻU ANOTĀCIJA	8
2.1. Ievads.....	8
2.2. Elektromagnētiskā lauka teorijas pamatelementi elektrisko mašīnu magnētisko lauku pētīšanā.....	9
2.3. Sinhrono mašīnu galveno parametru noteikšana, izmantojot vektoru diagrammas.....	10
2.4. Eksperimentālā modeļa apraksts un pētījuma eksperimenta programma.....	11
2.5. Magnētiskā lauka skaitliskās modelēšanas ar GEM rezultātu izmantošana sinhronās mašīnas raksturlielumu noteikšanai.....	13
2.6. SRFP konstruktīvo elementu un parametru izvēle.....	14
2.6.1. Statora sekundārais tinums.....	14
2.6.2. Rotorā konstruktīvā izveidojuma iespējamie varianti dažādām f_2 / f_1 attiecībām (2:1, 3:1, 4:1).....	15
2.6.3. SRFP aprēķina piemērs.....	16
2.7. SRFP rotora ģeometrisko izmēru optimizācija.....	20
2.8. SRFP raksturlīkņu noteikšana.....	21
3. SECINĀJUMI UN GALVENIE DARBA REZULTĀTI	23

1. VISPĀRĪGS DARBA RAKSTUROJUMS

1.1. Darba aktualitāte

Izmantojot mūsdienu centralizēto maiņstrāvas trīsfāžu tīklu ar frekvenci 50 Hz nav lietderīgi izmantot autonomus barošanas avotus ar paaugstinātu frekvenci. Ekonomiski izdevīgāk ir pārveidot 50 Hz frekvences maiņstrāvu maiņstrāvā ar paaugstinātu frekvenci. Šīm nolūkam var izmantot sinhroni reaktīvo frekvences pārveidotājus (SRFP).

SRFP priekšrocības:

- bezkontakta;
- reaktīvais;
- vienmašīnu;
- izejā sinusoidāls spriegums;
- viegli izgatavojams no sērijveidā ražotas asinhronās mašīnas.

Paaugstinātas frekvences strāvas izmantošana elektriskiem rokas instrumentiem var dot ievērojamu ekonomisko efektu. Tā, piemēram, augstfrekvences elektriskie instrumenti ir vieglāki par pneimatiskiem par 25-35%, turklāt tiem ir augstāki tehniski ekonomiskie rādītāji.

Lai vispilnīgāk izmantotu priekšrocības, ko dod augstfrekvences tīkla izmantošana ir nepieciešama pamatota un praktiski lietojama SRFP projektēšanas (to konstrukcijas un galveno izmēru izvēles) un optimizācijas metodika. Šīs iekārtas konstrukcijas pilnveidošanai ir nepieciešams izstrādāt uz elektromagnētiskā lauka teoriju balstītus matemātiskos modeļus un modelēšanas pamatprincipus.

1.2. Darba mērķis, pētījuma objekts un pētījuma uzdevumi

Šis promocijas darbs veltīts galvenokārt speciālas konstrukcijas sinhrono mašīnu – sinhroni reaktīvo frekvences pārveidotāju magnētisko sistēmu optimizācijas jautājumiem, balstoties uz mūsdienu metodēm un tehniskajiem līdzekļiem.

Promocijas darba mērķis ir speciālas nozīmes sinhrono mašīnu optimizācija, pamatojoties uz magnētiskā lauka modelēšanas rezultātiem un šo rezultātu izmantošana SRFP izveidošanā.

Pētījumu objekts ir SRFP, ar kuru palīdzību barošanas frekvenci f_1 var paaugstināt 2, 3, 4 un teorētiski arī vairāk reižu, kas gan praktiski attaisnojas tikai atsevišķos gadījumos.

Lai sasniegtu norādītos mērķus, promocijas darbā risināti šādi uzdevumi:

- izvēlēties un pamatot elektromagnētiskā lauka matemātisko modelēšanu ar galīgo elementu metodi (GEM) pielietojumu;
- veikt analīzi un izstrādāt rekomendācijas statora tinuma racionālam izveidojumam;
- izstrādāt metodiku matemātiskās modelēšanas rezultātu apstrādei, adaptējot šo metodiku „klasiskajai sinhrono mašīnu teorijai”;
- veikt eksperimentālus pētījumus par atsevišķu sinhrono mašīnu raksturlielņiem.

1.3. Pētījumu metodes

Izvirzīto uzdevumu risināšana veikta, izmantojot magnētiskā lauka pētīšanai galīgo elementu metodi, izstrādājot un pilnveidojot programmatūru SRFP raksturlielumu noteikšanai.

Aprēķina rezultāti salīdzināti ar eksperimentāliem datiem, kuri iegūti Rīgas elektromašīnbūves rūpnīcā (RER) un RTU Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātes laboratorijā, izmantojot šim nolūkam speciāli izveidotus un aprīkotus standus.

1.4. Zinātniskā novitāte

- Elektromagnētiskā lauka teorijas adaptācija speciālas nozīmes sinhrono mašīnu pētīšanā.
- GEM izmantošana, kas adekvāti ļauj ievērot magnētiskās sistēmas konstruktīvos parametrus un piesātinājumu.
- Speciālas nozīmes sinhrono mašīnu mainīgu magnētisko lauku matemātiskās modelēšanas metodika, izmantojot stacionāru lauka vienādojumus.
- SRFP statora tinumu parametru izvēle un pamatojums.
- SRFP noteiktas formas magnētiskā lauka sintēze.
- SRFP optimizācijas metodika un magnētiskās sistēmas optimālo izmēru noteikšana.

1.5. Praktiskā nozīme

- Izstrādāti SRFP projektēšanas pamati.
- Modernizēts un pilnveidots nelielas jaudas sinhrono mašīnu pārbaudes stands.
- Izstrādātas lietišķas datorprogrammas magnētiskā lauka modelēšanas rezultātu automatizētai apstrādei, kā arī SRFP optimizācijai.

1.6. Darba aprobācija

Promocijas darba rezultāti tika ziņoti starptautiskajās konferencēs:

- A. Mesņajevs, A. Zviedris Determination and Analysis of Synchronous Motor's Parameters. RTU 49. starptautiskā zinātniska konference. 14.09.2009-16.09.2009, Rīga, Latvija.
- A. Mesņajevs, A. Zviedris, A. Podgornovs Determination of Synchronous Machine's Parameters Steady State from Results of Magnetic Field's Mathematical Simulation. Problems of Present-Day Electrotechnics-2010, 31.05.2010 - 04.06.2010, Kijeva, Ukraina.
- A. Mesņajevs, A. Zviedris, Mathematical Simulation of the Magnetic Field Occurred by the Armature Reaction of the Synchronous Machine. 24th European Conference on Modelling and Simulation, 01.06.2010 - 04.06.2010, Kuala Lumpur, Malaizija.
- A. Mesņajevs, A. Zviedris, Mathematical Simulation, Determination and Analysis of the Magnetic Field Occurred by the Armature Reaction of the Synchronous Machine. 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 08.05.2011 - 11.05.2011, Roma, Itālija.
- A. Mesņajevs, A. Zviedris, A. Podgornovs Determination of Synchronous Machine's Characteristics Based on the Results of the Mathematical Modelling of the Magnetic Field. 25th European Conference on Modelling and Simulation, 07.06.2011 - 10.06.2011, Krakova, Polija.
- A. Mesņajevs, A. Zviedris Salient Pole Synchronous Machine's Mathematical Simulation Data's Processing Methods. The Sixth International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, 21.09.2011 - 23.09.2011, Stara Lesna, Slovākija.

1.7. Publikācijas

Autora pētījuma rezultāti ir publicēti 6 starptautiskajos zinātnisko rakstu krājumos un žurnālos (Autora raksti indeksējas tādas datu bāzēs kā IEEE-EXPLORE)

- A. Mesņajevs, A. Zviedris Determination and Analysis of Synchronous Motor's Parameters. RTU zinātniskie raksti, Enerģētika un elektrotehnika, sērija 4., sējums 25., 51.-56. lpp.
- A. Mesņajevs, A. Zviedris, A. Podgornovs Determination of Synchronous Machine's Parameters Steady State from Results of Magnetic Field's Mathematical Simulation. Problems of Present-Day Electrotechnics-2010: XI International Scientific Conference, 1. – 6. lpp.
- A. Mesņajevs, A. Zviedris, Mathematical Simulation of the Magnetic Field Occurred by the Armature Reaction of the Synchronous Machine. Simulation Meets Global Challenges, 93. - 97. lpp.
- A. Mesņajevs, A. Zviedris, Mathematical Simulation, Determination and Analysis of the Magnetic Field Occurred by the Armature Reaction of the Synchronous Machine. 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 414. - 417. lpp.
- A. Mesņajevs, A. Zviedris, A. Podgornovs Determination of Synchronous Machine's Characteristics Based on the Results of the Mathematical Modelling of the Magnetic Field. 25th European Conference on Modelling and Simulation, 175. - 180. lpp.
- A. Mesņajevs, A. Zviedris Salient Pole Synchronous Machine's Mathematical Simulation Data's Processing Methods. Elektroenergetika 2011, 142. – 145. lpp.

1.8. Promocijas darba struktūra

Ievads

1. Elektromagnētiskā lauka teorijas pamatelementi elektrisko mašīnu magnētisko lauku pētīšanā
2. Sinhrono mašīnu galveno parametru noteikšana, izmantojot vektoru diagrammas
3. Eksperimentālā modeļa apraksts un eksperimenta pētījuma programma
4. Magnētiskā lauka skaitliskās modelēšanas ar GEM rezultātu izmantošana sinhronās mašīnas raksturlielumu noteikšanai
5. SRFP konstruktīvo elementu un parametru izvēle
6. SRFP rotora ģeometrisko izmēru optimizācija
7. SRFP raksturlīkņu noteikšana

Secinājumi

Pielikumi

Literatūras saraksts

1.9. Darba apjoms

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 7 nodaļas, secinājumus un galvenos rezultātus, literatūras sarakstu, 2 pielikumus, 71 attēlu, kopā 169 lappuses. Literatūras sarakstā iekļauti 76 bibliogrāfiskie avoti.

2. DARBA NODAĻU ANOTĀCIJA

2.1. Ievads

Paaugstinātas frekvences strāvas izmantošana elektriskiem rokas instrumentiem var dot ievērojamu ekonomisko efektu. Tā, piemēram, augstfrekvences elektriskie instrumenti ir vieglāki par pneimatiskiem par 25-35%, turklāt tiem ir augstāki tehniski ekonomiskie rādītāji (ekspluatācijas lietderības koeficients pneimatiskiem instrumentiem vidēji ir 0.09, bet augstfrekvences – 0.55), pašizmaksa augstfrekvences instrumentiem ir 8-10 reizes mazāka nekā pneimatiskiem instrumentiem, bet ekspluatācijas izmaksas – 7-8 reizes mazākas. Elektriskiem urbjiem ar universālo kolektordzinēju īpatnējā jauda ir 30–65 W/kg, ar trīsfāžu asinhrono dzinēju un frekvenci 50 Hz – no 20 līdz 40 W/kg, bet augstfrekvences elektriskajiem urbjiem 50 – 110 W/kg.

Izmantojot mūsdienu centralizēto maiņstrāvas trīsfāžu tīklu ar frekvenci 50 Hz nav lietderīgi izmantot autonomus barošanas avotus ar paaugstinātu frekvenci. Ekonomiski izdevīgāk ir pārveidot 50 Hz frekvences maiņstrāvu maiņstrāvā ar paaugstinātu frekvenci ar frekvences pārveidotāja palīdzību.

Frekvences pārveidotājs ir elektriskās strāvas frekvences pārveidošanas iekārta. Šo iekārtu lieto regulējamās elektriskās piedziņas un magnētisko pastiprinātāju barošanas sistēmās, lai saskaņotu dažādas frekvences maiņstrāvas sistēmas darbu.

Frekvences pārveidotājus iedala:

- statiskos (SP);
- elektromehāniskajos;
- kombinētos.

Lielu izplatību ieguvuši bezkontakta sinhroni reaktīvie frekvences pārveidotāji, kuru darbība balstās uz magnētiskā lauka deformāciju sinhronās reaktīvās mašīnas gaisa spraugā. Tādos pārveidotājos dzinēja un ģeneratora daļas ir apvienotas vienā magnētiskā sistēmā. Rotorā ir tikai īsslēgtais palaišanas tinums bez slīdkontaktiem.

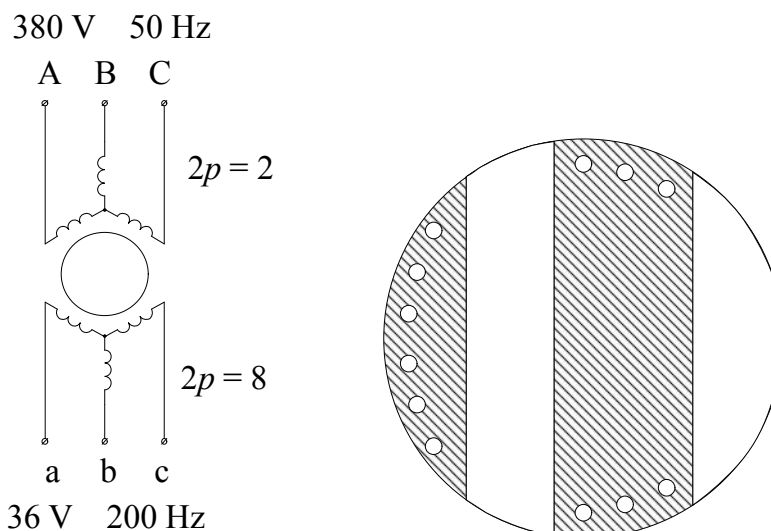
Par reaktīvo sinhrono mašīnu sauc sinhrono mašīnu ar izvirzīto polu rotoru bez ierosmes tinuma. Tādā mašīnā, tai darbojoties dzinēja režīmā, griezes momentu rada magnētiskās vadītspējas atšķirība pa garenasi un šķērsasi. Pieslēdzot reaktīvās mašīnas statora tinumu trīsfāžu maiņstrāvas tīklam, veidojas rotējošs magnētiskais lauks, kuru rada no tīkla patērētās reaktīvās atpaliekošās strāvas.

Sinhronais reaktīvais frekvences pārveidotājs (SRFP) ir sinhronā reaktīvā mašīna, kurā izmanto magnētiskā lauka augstākās harmonikas. Sinhronā reaktīvā frekvences pārveidotāja rievās ir izveidoti divi tinumi: primārais, kas pieslēgts rūpnieciskas frekvences maiņstrāvas tīklam un sekundārais, kas kalpo augstākas frekvences iegūšanai. Var atzīmēt, ka sinhronais reaktīvais frekvences pārveidotājs ir vienmašīnas agregāts, kurā apvienoti sinhronais reaktīvais dzinējs (statora primārais tinums – izvirzīto polu rotors) un induktorgenerators (izvirzīto polu rotors – statora sekundārais tinums).

Primārais tinums no tīkla patērē magnetizētājstrāvu, kas rada rotējošo magnētisko lauku mašīnas gaisa spraugā. Pateicoties attiecīgas formas rotora magnētiskai sistēmai un atbilstoši izvēlētam gaisa spraugas platumam, no indukcijas sadalījuma līknes tiek izmantota nepieciešamā augstākā harmonika.

Šī harmonika sekundārā tinumā inducē EDS ar paaugstinātu frekvenci. Lai to panāktu, sekundārā tinuma solim ir jābūt vienādam ar attiecīgo lauka augstākās harmonikas pola iedaļu (vai tuvu tai).

Sinhronais reaktīvais frekvences pārveidotājs, kura statora tinumu shēma parādīta 2.1.1. attēlā, paredzēta, piem., trīsfāžu maiņstrāvas ar spriegumu 380/220 V un frekvenci 50 Hz pārveidošanai trīsfāžu maiņstrāvā ar spriegumu 36 V un frekvenci 200 Hz.



2.1.1. att. Statora tinumu shēma.

2.1.2. att. Rotorā šķērs griezumā.

2.1.2. attēlā shematiski parādīts šāda pārveidotāja rotora šķērs griezumā. Iesvītrotās rotora daļas izgatavotas no feromagnētiska materiāla, pārējās - no nemagnētiska (alumīnija, plastmasas). Rotorā iegriešanai tā magnētiskajā daļā izveidots palaides tinums „vāveres rata” veidā no alumīnija stieņiem un īsslēdzošiem gredzeniem. Rotoram iegriežoties ar sinhrono ātrumu, tas reaktīvā momenta darbības rezultātā ievelkas sinhronismā. Slodzes režīmā rotors griežas sinhroni ar magnētisko griezes lauku (tāpat kā reaktīvā sinhronajā dzinējā), tādēļ maiņstrāvas paaugstinātā frekvence ir nemainīga.

2.2. Elektromagnētiskā lauka teorijas pamatelementi elektrisko mašīnu magnētisko lauku pētīšanā

Promocijas darba 1. nodaļā aprakstīts, kā elektromagnētiskā lauka vienādojumu sistēmu lietderīgi aizstāt ar vienu vienādojumu attiecībā pret vektoriālo magnētisko potenciālu A un reducēt šo vienādojumu uz vairākiem vienkāršākiem uzdevumiem, kuros elektromagnētisko lauku apraksta ar stacionāra lauka vienādojumu

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu j_a, \quad (2.2.1)$$

kur μ – magnētiskā caurlaidība, j_a – ārējā lauka avotu strāvas blīvums.

Zinot vektoriālā magnētiskā potenciāla sadalījumu uz statora virsmas, var veikt iegūtās raksturlīknes harmoniku analīzi un iegūt pirmās un augstāko harmoniku vektoriālā magnētiskā potenciāla amplitūdas vērtības un fāzes.

Šajā gadījumā, pirmās harmonikas EDS var noteikt kā

$$E_1 = 4,44 f_1 k_{w1} \frac{2 p_1 q w_{sp}}{a} 2 A_{1m} l, \quad (2.2.2)$$

kur f_1 – pamatharmonikas frekvence; k_{w1} – tinuma sadalījuma koeficients; q –rievu skaits uz polu un fāzi; w_{sp} – spoles vijumu skaits; a – paralēlo zaru skaits; A_{1m} – vektoriāla magnētiskā potenciāla amplitūdas vērtība.

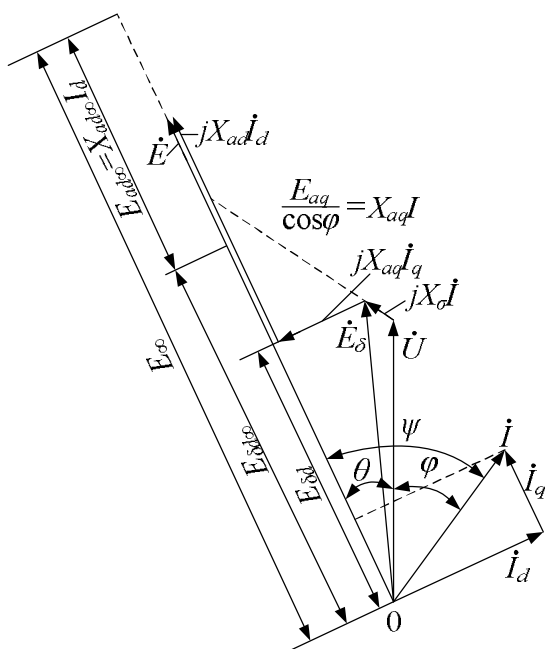
Līdzīgi var noteikt augstāko harmoniku EDS, attiecīgi ievietojot tinuma datus un attiecīgās harmonikas vektoriālā magnētiskā potenciāla amplitūdas vērtības.

Galvenie rezultāti

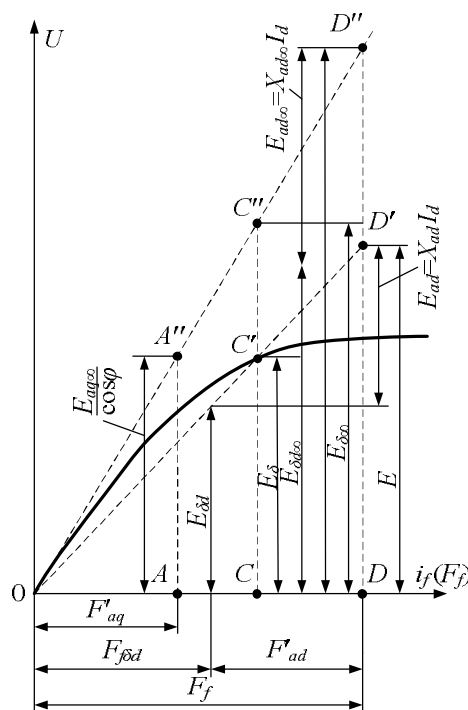
- Pāreja no elektromagnētiskā lauka vienādojumu sistēmas uz stacionāra lauka vienādojuma izmantošanu telpā un laikā mainīga magnētiskā lauka aprakstīšanai.
- Galīgo elementu metodes un vektoriāla magnētiskā potenciāla izmantošana EDS noteikšanai.

2.3. Sinhrono mašīnu galveno parametru noteikšana, izmantojot vektoru diagrammas

Promocijas darba 2. nodaļā ir apskatīta induktīvo pretestību noteikšanas metode un ar to saistītās grūtības, piem., piesātinājuma ietekme. Piesātinājuma tuvinātai ievērošanai izmanto 2.3.1. un 2.3.2. attēlā parādītās vektoru diagrammas.

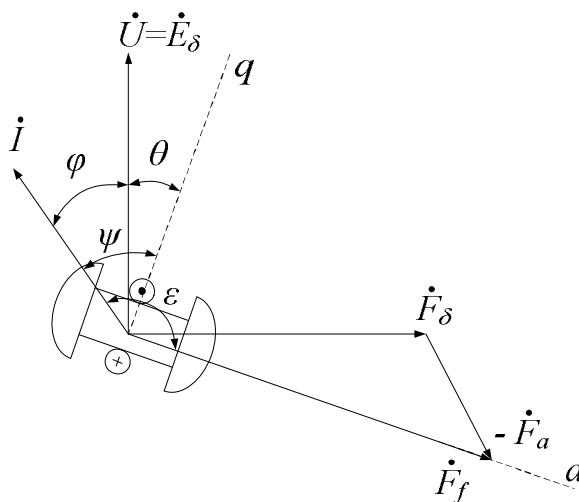


2.3.1. att. Piesātinātas sinhronās mašīnas spriegumu vektoru diagramma



2.3.2. att. Izvirzīto polu sinhronā ģeneratora EDS noteikšana (ievērojot piesātinājumu)

Analizējot un pētīt sinhrono mašīnu raksturlīknes, lietderīgi izmantot tieši spriegumu U , enkura strāvu I , fāzes leņķi starp šiem lielumiem φ un ierosmes strāvu I_f , turklāt tiešā veidā nesaistot tos ar divu reakciju teorijas induktīvām pretestībām X_{ad} un X_{aq} . Bez tam minētie lielumi ir vienkārši izmērāmi un eksperimentāli pārbaudāmi. Ievērojot šos apsvērumus var izmantot, piem., 2.3.3. attēla vektoru diagrammu, kurā vienlaikus ar laikkarīgajiem lielumiem \dot{U} , \dot{I} , \dot{E}_δ , parādīti arī ierosmes tinuma, enkura tinuma un rezultējošā MS pamatharmoniku telpiskie vektori \dot{F}_a , \dot{F}_f un \dot{F}_δ



2.3.3.att. Sinhronās mašīnas vektoru diagramma (dzinēja režīmam)

Galvenie rezultāti

- Vektoru diagrammas izmantošana piesātinājuma ievērošanā.
- Pāreja uz vektoru diagrammu, kurā nefigurē induktīvās pretestības X_{ad} un X_{aq} .

2.4. Eksperimentālā modeļa apraksts un pētījuma eksperimenta programma

Lai apstiprinātu matemātiskajā modelēšanā iegūtos rezultātus, izmantota trīsfāžu divpolu sinhronā mašīna, kas izveidota uz rūpnieciski izgatavota vienfāzes sinhronā ģenerators bāzes ГАБ-2-0/230.

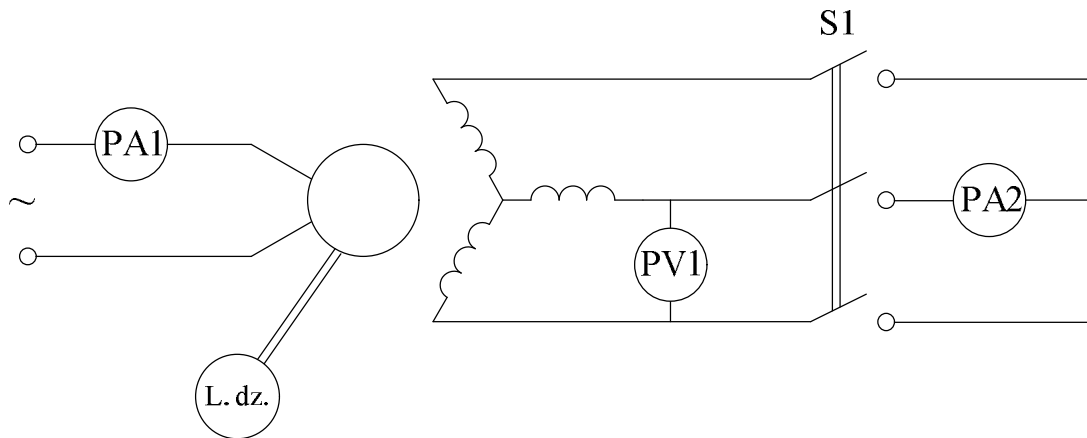
Eksperimentālā objekta pārbaudes mērķis ir izpētīt sinhronās mašīnas garenlauka sinhrono induktīvo pretestību X_d , lai salīdzinātu iegūtos rezultātus ar magnētiskā lauka matemātiskās modelēšanas rezultātiem.

Pētījuma programma

- Uzņemt un konstruēt:
 - tukšgaitas raksturlīkni;
 - īsslēguma raksturlīkni.
- No mēģinājumu rezultātiem noteikt garenlauka sinhrono induktīvo pretestību X_d .

Pētāmās mašīnas eksperimentālā pārbaude veikta Rīgas elektromašīnbūves rūpnīcas (RER) izmēģinājumu centrā ar tajā esošas mēraparatūras palīdzību.

Sinhronā ģenerators raksturlīkņu uzņemšanai izmantota 2.4.1. attēlā, parādītā slēguma shēma.



2.4.1.att. Trīs fāžu sinhronā ģenerators principiālā shēma pētījumiem

2.4.1.tabula

Tukšgaitas mērījumu rezultāti

I_f, A	U_1, V
12	162
10	154
8	147
6	134
4	114
2	76
1	42
0	0

2.4.2.tabula

Īsslēguma eksperimenta mērījumu rezultāti

I_f, A	I_1, A
6	9,2
5	8
4	6,8
2,5	4,5
1	2
0	0

2.4.3. tabula.

Sinhronās induktīvās garenpretestības, kas noteiktas izmantojot RER izmēģinājuma centrā iegūtos datus.

$I, r.v.$	X_d, Ω
1.0	14.56
0.8	15.62
0.6	16.76

Galvenie rezultāti

- Ir iegūtas reālas mašīnas tukšgaitas un īsslēguma raksturlīknes.
- Izmantojot tukšgaitas un īsslēguma eksperimenta rezultātus noteiktas induktīvās pretestības X_d dažādām ierosmes strāvas I_f vērtībām.

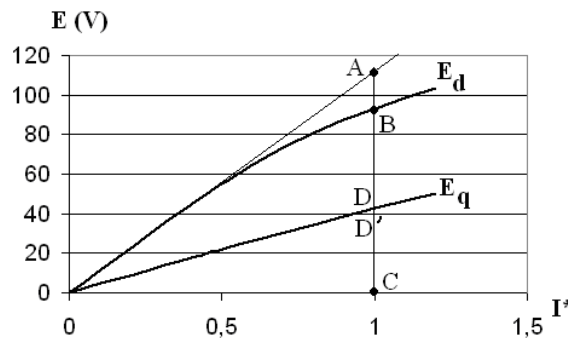
2.5. Magnētiskā lauka skaitliskās modelēšanas ar GEM rezultātu izmantošana sinhronās mašīnas raksturlielumu noteikšanai

Uzdevuma nostādne ir sinhrono mašīnu garenass X_d un šķērsass X_q induktīvo pretestību noteikšana ievērojot piesātinājumu.

Izvirzītā uzdevuma risināšanas procesu lietderīgi sadalīt šādos posmos:

- izvirzīto polu sinhronās mašīnas matemātiskā modeļa izveidošana *QuickField* vidē;
- matemātiskās modelēšanas rezultātu (vektoriāla magnētiskā potenciāla sadalījuma) iegūšana;
- izmantojot matemātiskās modelēšanas rezultātus, viena pola magnētiskās plūsmas (garenass Φ_d un šķērsass Φ_q) noteikšana;
- plūsmas saķēdējuma ar enkura tinuma fāzi (Ψ_d un Ψ_q) noteikšana viena pola plūsmai;
- EDS E_d un E_q efektīvās vērtības noteikšana;
- sinhronās induktīvās pretestības X_d un X_q noteikšana;
- salīdzināt iegūtās garenlauka sinhrono induktīvo pretestību X_d vērtības no RER eksperimentiem iegūto garenlauka sinhrono induktīvo pretestību X_d .

Magnētiskās sistēmas piesātinājuma ietekmi var novērtēt no 2.5.1. attēlā parādītajām līknēm $E_d = f(I^*)$ un $E_q = f(I^*)$.



2.5.1.att. Enkura tinuma EDS atkarība no enkura strāvas relatīvajās vienībās

Kā redzams 2.5.1. attēlā, līkne $E_q = f(I^*)$ ir gandrīz lineāra, tas nozīmē, ka piesātinājuma ietekme ir minimāla un $k_{\mu q} \approx 1$.

2.5.1. tabula

Induktīvo pretestību atkarība no enkura strāvas izraisītā piesātinājuma pakāpes

I^*	X_d (Ω)	X_q (Ω)	X_d/X_q	$k_{\mu d}$	$k_{\mu q}$
0.4	16.93	6.65	2.55		
0.6	16.53	6.64	2.49		
0.8	15.42	6.59	2.34		
1.0	14.22	6.49	2.19	1.22	1.02
1.2	13.14	6.34	2.07		

Iegūtās induktīvās garenpretestības ir salīdzinātas ar pretestībām, kas noteiktas izmantojot RER izmēģinājumu centrā iegūtos datus. Salīdzinājuma rezultāti apkopoti 2.5.2. tabulā.

2.5.2. tabula

Sinhrono induktīvo pretestību salīdzinājums.

$I, \text{r.v.}$	$X_d, \Omega \text{ (RER)}$	$X_d, \Omega \text{ (GEM)}$	klūda (%)
1.0	14,56	14,22	2,42
0.8	15,62	15,42	1,32
0.6	16,76	16,53	1,41

Piezīme: (RER) – pretestības noteiktas izmantojot RER izmēģinājumu centrā iegūtos datus, (GEM) – pretestības aprēķinātas izmantot galīgo elementu metodi.

Galvenie rezultāti:

- Izmantojot promocijas darba pirmā nodaļā aprakstīto materiālu kopā ar matemātiskās modelēšanas ar GEM rezultātiem noteikta EDS E_d un E_q atkarība no enkura strāvas.
- Promocijas darba otrajā nodaļā piedāvātā vektoru diagramma ir pielietota izvirzīto polu sinhronās mašīnas magnētiskā lauka pētīšanā.
- Izmantojot promocijas darba otrā nodaļā aprakstīto materiālu, izrēķināti piesātinājuma koeficienti $k_{\mu d}$ un $k_{\mu q}$.
- Piesātinājuma ietekmi uz parametriem X_d un X_q var novērtēt ar piesātinājuma koeficientiem $k_{\mu d}$ un $k_{\mu q}$. Projektēšanas grāmatās rekomendētās $k_{\mu d}$ un $k_{\mu q}$ vērtību robežas ($k_{\mu d} = 1.2 \div 1.5$ un $k_{\mu q} = 1.0 \div 1.2$) sakrīt ar iegūtām $k_{\mu d} = 1.22$ un $k_{\mu q} = 1.02$.
- Promocijas darba trešā nodaļā iegūtās (reālai sinhronai mašīnai) X_d vērtības salīdzinātas ar modelēšanas rezultātā (ievērojot pētāmās mašīnas ģeometriju un piesātinājuma ietekmi) iegūtām X_d vērtībām. Rezultātā kļūda nepārsniedz 3%. Līdz ar to ir pierādīta matemātiskā aparāta pareiza darbība.

2.6. SRFP konstruktīvo elementu un parametru izvēle

2.6.1. Statora sekundārais tinums

Izvirzīto polu sinhronās mašīnās magnētiskās indukcijas sadalījums gaisa spraugā nav sinusoidāls. Tas nozīmē, ka magnētiskās indukcijas līknē ir ne tikai pamatharmonika, bet arī augstākas kārtas harmonikas. Augstāko k -to harmoniku magnētiskais lauks sinhronās mašīnās rotē ar sinhrono rotācijas frekvenci, un to polu skaits $2p_k$ ir k reizes lielāks par pamatharmonikas polu skaitu $2p$. Tātad, k -tās harmonikas enerģijas izmantošanai sinhronās mašīnas enkura rievās ir jāievieto sekundārais tinums, kura polu skaits

$$2p_k = 2kp \quad (2.6.1)$$

un tinuma solis

$$y_k \approx \frac{\tau_z}{k} = \frac{Z_k}{2kp}, \quad (2.6.2)$$

kur τ_z – pamatharmonikas pola iedaļa, kas izteikta ar rievu skaitu; Z_k – sekundārajam tinumam izmantoto rievu skaits.

Šajā gadījumā sekundārā tinumā inducējas EDS ar k -tās harmonikas frekvenci un, ja sakarība (2.6.2) ir precīzi ievērota, sekundārajā tinumā neinducējas pamatharmonikas EDS, jo pamatharmonikas tinuma koeficients sekundārajā tinumā šajā gadījumā ir vienāds ar nulli.

Lai efektīvi izmantotu k -tās harmonikas enerģiju, ir svarīgi pareizi izvēlēties sekundārā tinuma shēmu un tinuma parametrus. Konstruktīvi ir lietderīgi sekundāro tinumu ievietot tajās pašās rievās, kurās ievietots enkura primārais tinums. Izveidojot sekundāro tinumu kā divslāņu cilpas tinumu, tas aizņems visas Z enkura rievās, t.i. $Z_k = Z$. Vispārīgā gadījumā sekundāro tinumu var izveidot ar citu fāžu skaitu m_k . Tikai ir jāatzīmē, ka sekundārā tinuma fāžu skaitu m_k nedrīkst izvēlēties patvaļīgi. Fāžu skaits ir atkarīgs no statora primārā tinuma rievu skaita Z , polu skaita $2p$ un rievu skaita uz polu un fāzi

$$q_k = \frac{Z}{2p_k m_k}. \quad (2.6.3)$$

Sinhronos reaktīvos frekvences pārveidotājus lietderīgi projektēt un izgatavot ar šādiem enkura tinuma parametriem: $Z = 6 \dots 36$, $2p = 2 \dots 8$ un $q = 0,5 \dots 6$, pie tam q var būt gan vesels skaitlis, gan daļskaitlis. Tā vērtībai ir jāatbilst simetriska trīsfāžu tinuma izveidošanas nosacījumiem. Daļskaitļa tinuma gadījumā rievu skaitu uz polu un fāzi var aprēķināt, kā

$$q_k = b_k + \frac{c_k}{d_k}, \quad (2.6.4)$$

kur b_k , c_k un d_k – veseli skaitļi; $c_k < d_k$ un c_k/d_k ir īsts nesaīsināms daļskaitlis.

Simetriska trīsfāžu tinuma izveidošanas nosacījumi ir:

$$\frac{2p_k}{d} = \text{vesels skaitlis}; \quad (2.6.5)$$

$$\frac{d}{m_k} \neq \text{vesels skaitlis}. \quad (2.6.6)$$

Ievērojot iepriekš minēto, ir iespējams noteikt tinumu parametrus, ar kādiem iespējams izveidot sinhroni reaktīvo frekvences pārveidotāju.

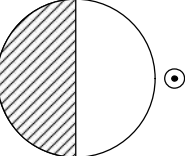
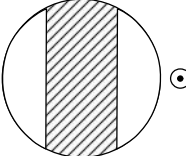
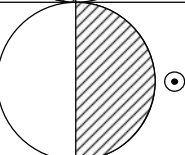
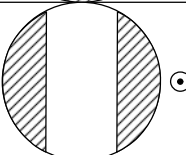
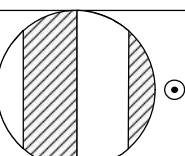
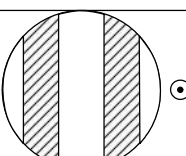
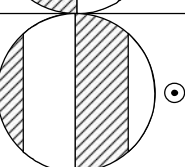
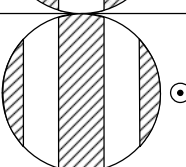
2.6.2. Rotorā konstruktīvā izveidojuma iespējamie varianti dažādām f_2/f_1 attiecībām (2:1, 3:1, 4:1)

Sinhroni reaktīvos frekvences pārveidotājos ir īpaši svarīgi izdalīt noteiktu magnētiskā lauka augstāko harmoniku tā, lai tai būtu vislielākā vērtība. Šim nolūkam rotora magnētiskās sistēmas forma un gaisa sprauga jāizvēlas tā, lai magnētiskajā laukā izdalās tieši tā noteiktā lauka harmonika, bet visas pārējās augstākās harmonikas būtu pēc iespējas, tuvākas nullei.

Rotora konstrukcijas varianti dažādu harmoniku izdalīšanai aplūkoti 2.6.1. tabulā.

2.6.1. tabula

Rotora varianti harmoniku izdalīšanai

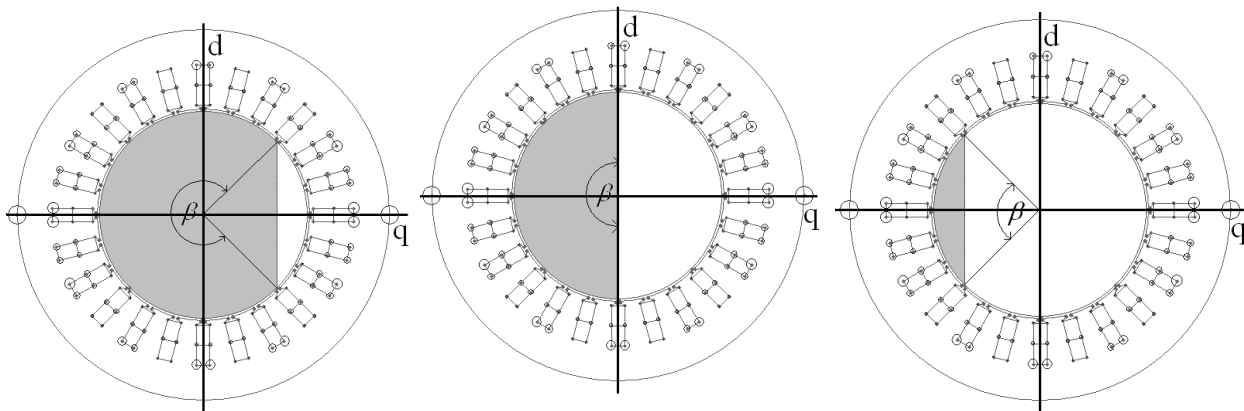
Izdalāmā harmonika $k = f/p$ Harmonikas izdalīšana	$k = 2$ (pāra)	$k = 3$ (nepāra)
Izmantojot garenvadībspēju	1) 	3) 
Izmantojot šķērsvadībspēju	2) 	4) 
Izdalāmā harmonika $k = f/p$ Harmonikas izdalīšana	$k = 4$ (pāra)	$k = 5$ (nepāra)
Izmantojot garenvadībspēju	5) 	7) 
Izmantojot šķērsvadībspēju	6) 	8) 

Izdalot nepāra harmoniku, rotoram ar garenvadībspēju augstāko harmoniku fāzes iznāk pretējas salīdzinājumā ar harmoniku fāzēm, kas iegūtas izmantojot rotoru ar šķērsvadībspēju. Bet ar šādu paņēmieni izdalītās augstāko harmoniku amplitūdas ir ievērojami mazākas nekā harmoniku amplitūdas, kas izdalītas, izmantojot rotoru ar šķērsvadībspēju. Tātad izvēloties rotora konstrukciju nepāra harmoniku izdalīšanai priekšroku dod rotoram ar šķērsvadībspēju. Atšķirībā no nepāra harmonikas izdalīšanas pāra harmoniku izdalīšana ir iespējama izmantojot tikai vienu rotora formu, piem., ar šķērsvadībspēju (sk. 2.6.1. tab.), jo pagriežot šo rotoru pa 180° , tas kļūst līdzīgs rotoram ar garenvadībspēju.

2.6.3. SRFP aprēķina piemērs

Par magnētiskā lauka pētāmo metodi izvēlēta galīgo elementu metode (GEM). Pētījumiem tiek izvēlēta sērijveida asinhronā dzinēja magnētiskā sistēma, kura statora rievās ir jāievieto primārais un sekundārais tinums. Lai noskaidrotu SRFP magnētiskā lauka matemātiskās modelēšanas jautājumus un novērtētu iegūtos raksturlielumus, aplūkots frekvences divkāršotājs.

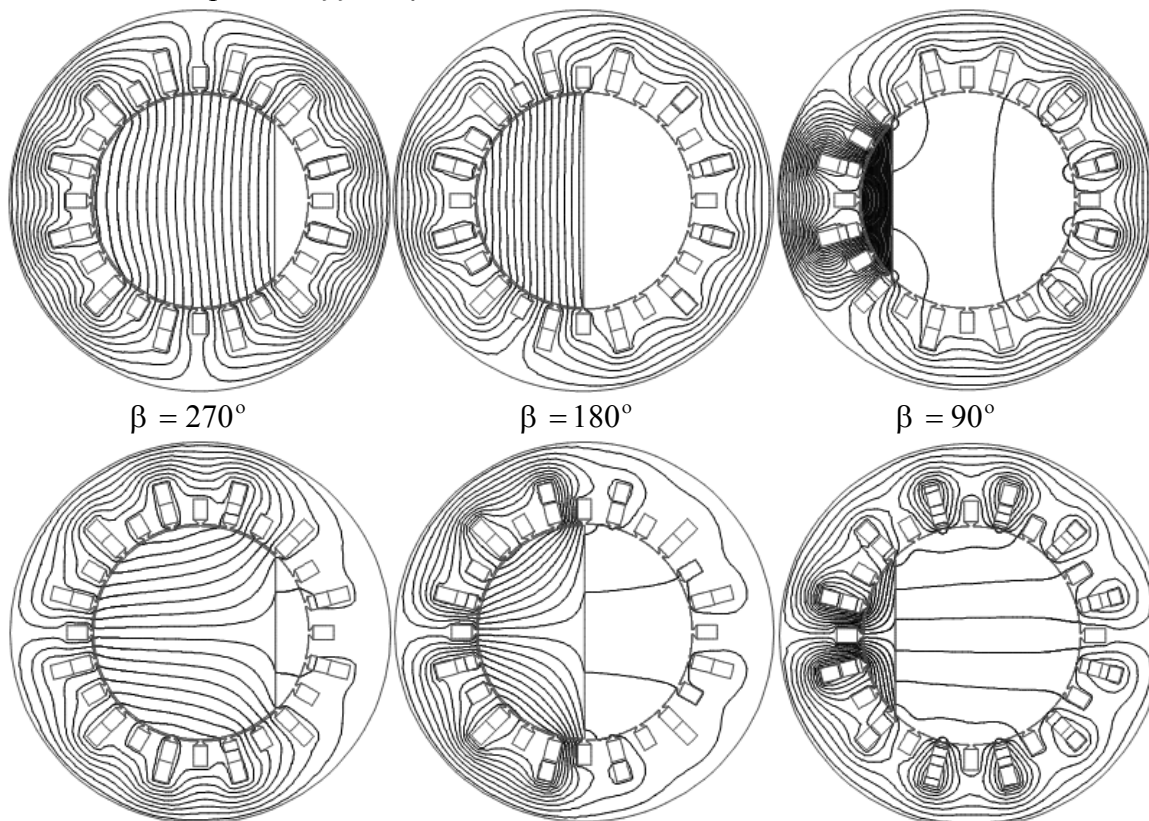
Pētījuma mērķis ir noteikt statora primārā un sekundārā tinumā inducētā EDS pamatharmonikas efektīvās vērtības atkarību no SRFP rotora ģeometriskajiem parametriem, rotora feromagnētiskās daļas aizpildes leņķa β (sk. 2.6.1.att.) un enkura strāvas.



2.6.1.att. Sinhroni reaktīvā frekvences pārveidotāja rotora konstrukcijas, (ar pelēko krāsu ir parādīta rotora feromagnētiskā daļa)

Aprēķini veikti tukšgaitas režīmam, kad sekundārā tinuma strāva $I_2 = 0$.

Veicot magnētiskā lauka matemātisko modelēšanu, iegūtas šādas magnētiskā lauka ainas dažādiem rotora aizpildes leņķiem β .



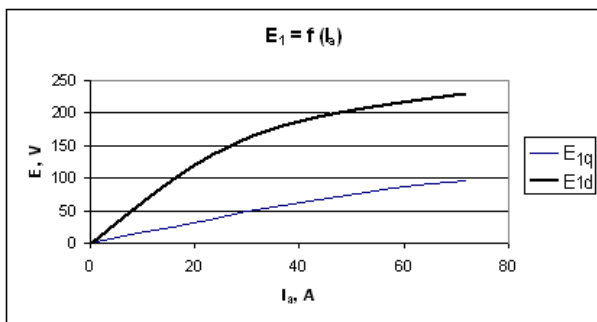
2.6.2. att. SRFP magnētiskā lauka ainas gadījumā, kad $I_a = 44$ A

Pirmā rindā – garenass ($I_a = I_d$ un $I_q = 0$), otrā rindā – šķērsass ($I_a = I_q$ un $I_d = 0$)

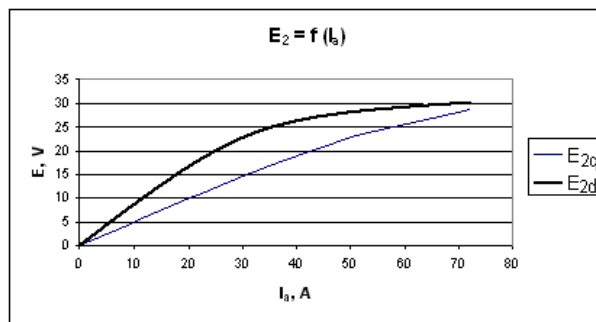
Iegūtās primārā un sekundārā tinumā inducētā EDS pamatharmonikas vērtības (sekundārajam tinumam pamatharmonika ir magnētiskā lauka sadalījuma augstākā harmonika, šajā gadījumā 100 Hz) aplūkotajiem variantiem:

1. $\beta = 180^\circ$ un $I_a = 16, 30, 44, 58, 72$ A;
2. $\beta = 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ un $I_a = 16, 44, 58, 72$ A.

Iegūtie rezultāti, izmantojot 1. varianta datus, apkopoti 2.6.3. un 2.6.4. attēlā.

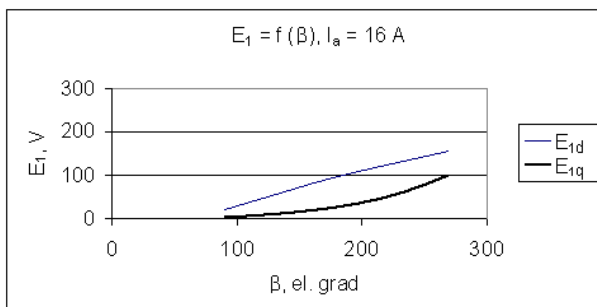


2.6.3. att. Primārā tinumā inducētā (pa garenasi ar indeksu d , pa šķērsasi ar indeksu q) EDS efektīvās vērtības atkarība no enkura strāvas, ja $\beta = 180^\circ$

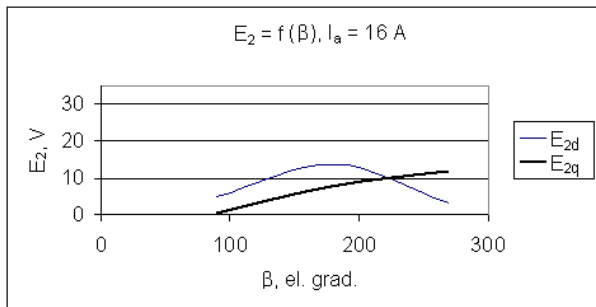


2.6.4. att. Sekundārā tinumā inducētā (pa garenasi ar indeksu d , pa šķērsasi ar indeksu q) EDS efektīvās vērtības atkarība no enkura strāvas, ja $\beta = 180^\circ$

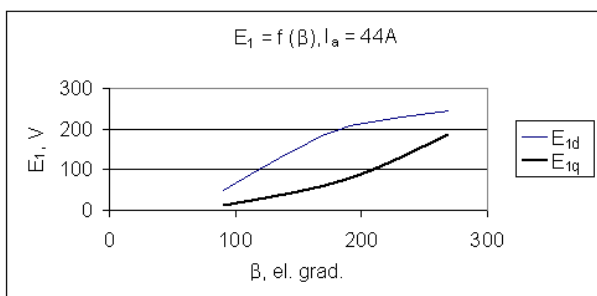
Iegūtie rezultāti, izmantojot 2. varianta datus, apkopoti 2.6.5. - 2.6.12. attēlā.



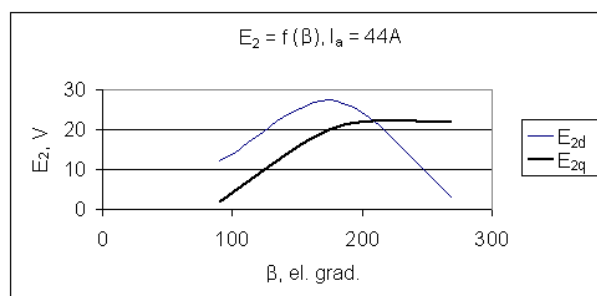
2.6.5. att. Primārā tinumā pamatharmonikas inducētā EDS efektīvās vērtības atkarība no leņķa β , ja $I_a = 16$ A, pa garenasi un pa šķērsasi



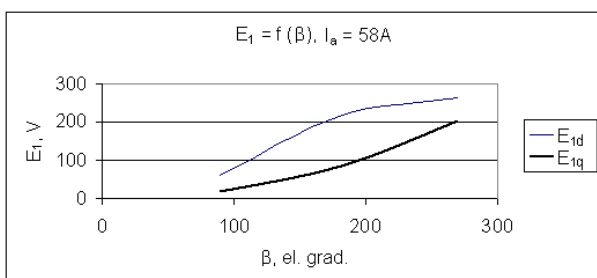
2.6.6. att. Sekundārā tinumā pamatharmonikas inducētā EDS efektīvās vērtības atkarība no leņķa β , ja $I_a = 16$ A, pa garenasi un pa šķērsasi



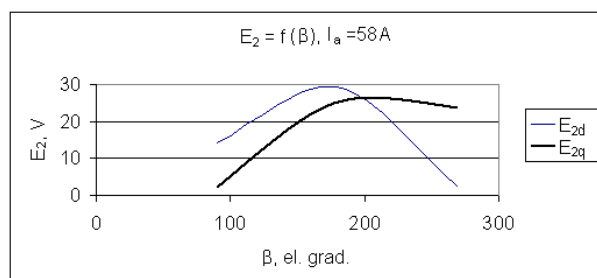
2.6.7. att. Primārā tinumā pamatharmonikas inducētā EDS efektīvās vērtības atkarība no leņķa β , ja $I_a = 44$ A, pa garenasi un pa šķērsasi



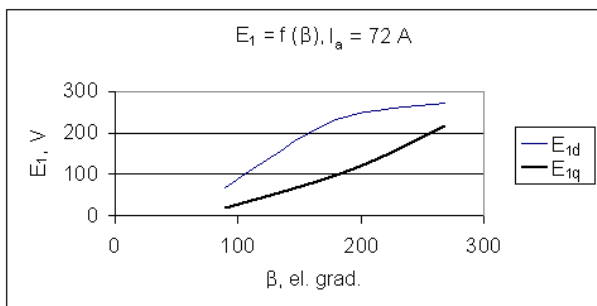
2.6.8. att. Sekundārā tinumā pamatharmonikas inducētā EDS efektīvās vērtības atkarība no leņķa β , ja $I_a = 44$ A, pa garenasi un pa šķērsasi



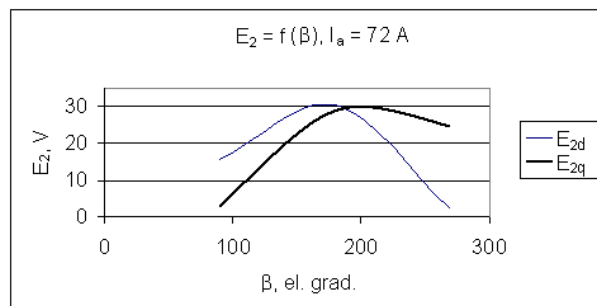
2.6.9. att. Primārā tinumā pamatharmonikas inducētā EDS efektīvās vērtības atkarība no leņķa β , ja $I_a = 58$ A, pa garenasi un pa šķērsasi



2.6.10. att. Sekundārā tinumā pamatharmonikas inducētā EDS efektīvās vērtības atkarība no leņķa β , ja $I_a = 58$ A, pa garenasi un pa šķērsasi



2.6.11. att. Primārā tinumā pamatharmonikas inducētā EDS efektīvās vērtības atkarība no leņķa β , ja $I_a = 72$ A, pa garenasi un pa šķērsasi



2.6.12. att. Sekundārā tinumā pamatharmonikas inducētā EDS efektīvās vērtības atkarība no leņķa β , ja $I_a = 72$ A, pa garenasi un pa šķērsasi

Galvenie rezultāti

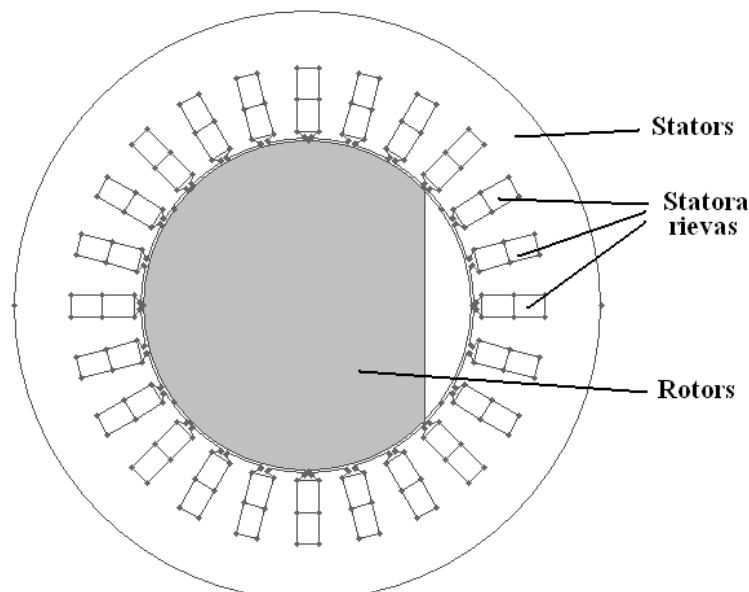
- Izmantojot sērijveida rūpnieciski izgatavoto asinhrono dzinēju ir iespējams pārveidot to sinhroni reaktīvajā frekvences pārveidotājā.
- Ir aprakstīti SRFP tinumu izvēles pamati.
- Ir parādīts, kādas formas rotoram jābūt, lai frekvences pārveidotājā varētu izdalīt noteiktu (2, 3, 4, 5) augstāko harmoniku.
- Izmantojot promocijas darba pirmā un ceturtnā nodaļā izklāstīto materiālu, iegūtas primārā un sekundārā tinumā inducētās EDS līknes, kā arī induktīvās pretestības X_d un X_q atkarībā no rotora aizpildes leņķa β .

2.7. SRFP rotora ģeometrisko izmēru optimizācija

Uzdevuma nostādne, kas ņemta par pamatu optimizācijas uzdevumam ir:

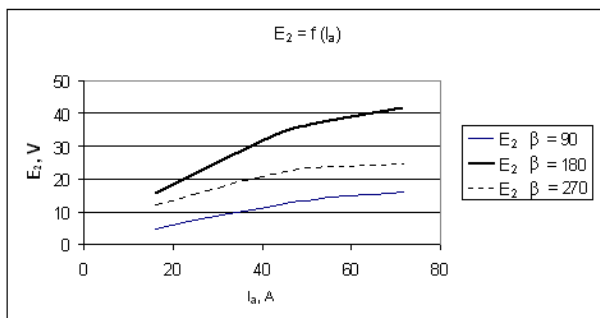
- optimizējamās sistēmas robežas noteiktas izvēlētai konstrukcijai (SRFP ar nesimetrisku rotoru un diviem tinumiem statora rievās). Lai samazinātu variējamo parametru skaitu, pieņemts, ka ģeometriskie izmēri un tinumu parametri ir zināmi;
- par optimizācijas kvantitatīvo kritēriju (raksturkritēriju) pieņemts otrās harmonikas sekundārā tinumā inducētais EDS E_2 (tukšgaitās režīmā);
- par sistēmas neatkarīgiem mainīgiem pieņemti šādi lielumi: SRFP rotora feromagnētiskās daļas aizpildes leņķis β un enkura primārā tinuma strāva I_a ;
- sistēmas matemātiskā modeļa izveidē par pamatu ņemti uz magnētiskā lauka teoriju balstīti vienādojumi, izmantojot galīgo elementu metodi;
- pētījuma mērķis ir noteikt statora sekundārā tinumā inducēto EDS E_2 atkarībā no leņķa β un enkura strāvas I_a .

Izmantojot *QuickField* programmatūru, izveidots SRFP modelis, kas ir parādīts 2.7.1. attēlā.

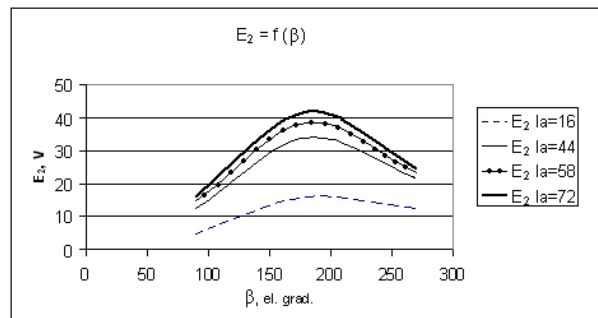


2.7.1. att. SRFP modelis

Pētījumu rezultātā ir iegūtas sekojošas līknes



2.7.2. att. Sekundārā tinumā inducētā EDS atkarība no enkura strāvas, ja $\beta = 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$



2.7.3. att. Sekundārā tinumā inducētā EDS atkarība no rotora aizpildījuma leņķa β

No 2.7.2 attēla ir redzams, ka visstraujāk EDS E_2 līkne aug gadījumā kad $\beta = 180^\circ$.

No 2.7.3. attēla ir redzams, ka vislielāko EDS E_2 vērtību nodrošina β robežās no 180° līdz 200° .

Galvenie rezultāti

- Izmantojot promocijas darba piektā nodaļā iegūtos rezultātus veikta SRFP rotora optimizācija. Rezultātā ir konstatēts, ka, lai iegūtu vislielāko sekundārā tinumā inducēto EDS vērtību, frekvences divkāršotāja rotoram jā sastāv vismaz no 50% feromagnētiska materiāla un rotora aizpildes leņķim jābūt robežās $180^\circ \div 200^\circ$ un enkura strāvai jābūt ar vislielāko vērtību (pieļaujamās robežās, ko ierobežo dzesēšanas apstākļi un izolācijas klase).

2.8. SRFP raksturlīkņu noteikšana

No inženieraprēķina ir zināmi lielumi, kas atspoguļoti 2.8.1. tabulā.

2.8.1. tabula

SRFP aprēķinātie raksturlielumi

Tukšgaitas strāvas uzmagnetizējošā komponente	$I_{\mu 1} = 1.854 \text{ A};$
Sekundārā tinuma tukšgaitas fāzes spriegums	$U_{20} = 24.185 \text{ V}$
Sekundārā tinuma pašindukcijas induktīvā pretestība pa garenasi	$X_{kd} = 4.398 \ \Omega;$
Primārā tinuma un sekundārā tinuma mijindukcijas induktīvā pretestība	$X_{1kd} = 13.045 \ \Omega;$
Primārā tinuma pašindukcijas induktīvā pretestība pa garenasi	$X_{1d} = 64.196 \ \Omega;$
Primārā tinuma fāzes aktīvā pretestība, kas reducēta uz $t = 75^\circ \text{C}$	$R_{175} = 4.903 \ \Omega;$
Sekundārā tinuma fāzes aktīvā pretestība, kas reducēta uz $t = 75^\circ \text{C}$	$R_{275} = 0.064 \ \Omega.$

2.8.1. tabulā parādītie lielumi ir izmantoti SRFP darba raksturlīkņu noteikšanā. Šī SRFP raksturlīknes atspoguļotas 2.8.2. un 2.8.3. tabulās, kurās lielumi ir izrēķināti atkarībā no slodzes strāvas vērtības un rakstura (tīri aktīvai un aktīvi-induktīvai slodzei).

2.8.2. tabula

SRFP darba raksturlīknes tīri aktīvas slodzes gadījumā

$\cos\varphi_2 = 1$						
I_2, A	$U_{2 lin}, V$	P_2, W	P_{al}, W	I_1, A	η	$\cos\varphi_1$
0	41.88965	0	86.62188	1.85864	0	0.070614
5	41.5849	360.1358	451.5577	1.976213	0.797541	0.346207
10	40.65696	704.1991	810.021	2.223419	0.869359	0.55199
15	39.06142	1014.846	1144.667	2.538753	0.886586	0.683148
20	36.71136	1271.719	1435.141	2.857547	0.886128	0.760952
25	33.44811	1448.346	1654.968	3.118494	0.875151	0.804083
30	28.96465	1505.047	1764.469	3.253396	0.852975	0.821738

2.8.3. tabula

SRFP darba raksturlīknes aktīvi inductīvas slodzes gadījumā

$\cos\varphi_2 = 0.7$						
I_2, A	$U_{2 lin}, V$	P_2, W	P_{al}, W	I_1, A	η	$\cos\varphi_1$
0	41.88965	0	86.62188	1.85864	0	0.070614
5	38.17117	330.5721	443.484	2.312972	0.745398	0.290512
10	34.14515	591.4114	744.0094	2.808593	0.794898	0.401371
15	29.80111	774.2556	979.9356	3.286193	0.790109	0.451815
20	25.12022	870.19	1142.348	3.718278	0.761756	0.465493
25	20.07278	869.1768	1221.209	4.092285	0.711735	0.452148
30	14.61359	759.3442	1204.647	4.405217	0.630346	0.414332

Izmantojot GEM ir pārbaudītas dažas SRFP inductīvās pretestības. Rezultāti atspoguļoti 2.8.4. tabulā.

7.4. tabula

Inductīvās pretestības iegūtas ar GEM un inženieraprēķinu

	X_{ld}, Ω	X_{lkd}, Ω	X_{kd}, Ω
GEM aprēķins	72.99	12.18	4.81
Inženieraprēķins	63.88	12.99	4.4
Kļūda, %	12.48	6.56	8.57

Galvenie rezultāti

- Veikta inženieraprēķinā iegūto inductīvo pretestību salīdzināšana ar matemātiskās modelēšanas (izmantotā aprēķinu secība ir aprakstīta promocijas darba ceturtā nodaļā, kura ticamība pārbaudīta tajā pat nodaļā) noteiktiem. Ir konstatēts, ka kļūda nepārsniedz 13%, kas ir pieļaujamās inženieraprēķinu kļūdu robežās.
- Ir iegūtas SRFP darba raksturlīknes dažādiem slodzes raksturiem.

3. SECINĀJUMI UN GALVENIE DARBA REZULTĀTI

1. „Klasiskā sinhrono mašīnu teorija”, kas balstīta uz superpozīcijas principu un kurā tiek ieviestas garenreakcijas un šķērsreakcijas induktīvās pretestības X_{ad} un X_{aq} , teorētiskā ziņā nav korekta piesātinātām mašīnām. Tādējādi atsevišķos gadījumos tā nedod tās priekšrocības, kuru dēļ šī teorija tika radīta, kaut vai sakarā ar to, ka superpozīcijas princips ir piemērojams tikai lineārām sistēmām.
2. Tomēr, izmantojot vektoru diagrammas (2.3.1. un 2.3.2. attēlā) šādu pretestību (X_{ad} un X_{aq}) lietošana praktiskiem aprēķiniem atsevišķos gadījumos ir attaisnojama, par ko liecina eksperimentu rezultāti.
3. Analizējot sinhrono mašīnu raksturlīknes, lietderīgi to parametrus nesaistīt ar divu reakciju metodi, bet konsekventi izmantot elektromagnētiskā lauka teoriju, kas balstīta uz Maksvela vienādojumiem.
4. Izpētīta izvīrziņo polu sinhronā mašīna ar mērķi pierādīt matemātiskā aparāta pareizu darbību.
5. Reālai sinhronai mašīnai iegūtās X_d vērtības salīdzinātas ar modelēšanas rezultātā iegūtām X_d vērtībām. Rezultātā kļūda nepārsniedz 3%. Līdz ar to ir pierādīta matemātiskā aparāta pareiza darbība.
6. Piedāvātā magnētiskā lauka skaitliskā modeļa ļauj:
 - projektēt SRFP ar vēlamo paaugstināto frekvenci;
 - iegūt rotoram optimālu ģeometrisko izmēru;
 - noteikt darba raksturlīknes.
7. Piesātinājuma ietekmi uz parametriem X_d un X_q var novērtēt ar piesātinājuma koeficientiem $k_{\mu d}$ un $k_{\mu q}$. Projektēšanas grāmatās rekomendētās $k_{\mu d}$ un $k_{\mu q}$ vērtību robežas ($k_{\mu d} = 1.2 \div 1.5$ un $k_{\mu q} = 1.0 \div 1.2$) sakrīt ar iegūtām $k_{\mu d} = 1.22$ un $k_{\mu q} = 1.02$.
8. Lai iegūtu vislielāko sekundārā tinumā inducēto EDS vērtību, frekvences divkārtotāja rotoram jāsastāv vismaz no 50% feromagnētiska materiāla un rotora aizpildes leņķim jābūt robežās $180^\circ \div 200^\circ$ un enkura strāvai jābūt ar vislielāko vērtību (pieļaujamās robežās, ko ierobežo dzesēšanas apstākļi un izolācijas klase).