

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte

Enerģētikas institūts

Svetlana ORLOVA

Doktora studiju programmas „Elektriskās mašīnas un aparāti” doktorante

**AUTONOMU BAROŠANAS AVOTU INDUKTORĢENERATORU
OPTIMIZĀCIJA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

Dr. habil. sc. ing.

V. PUGAČEVŠ

Zinātniskais konsultants

Dr. habil. sc. ing., profesors

N. LEVINS

RTU Izdevniecība

Rīga 2011

UDK 621.313.32 (043.2)
Or 525 a

Orlova S. Autonomu barošanas avotu
induktorģeneratoru optimizācija.
Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU,
2011. – 25 p.

Iespiests saskaņā ar RTU Enerģētikas institūta
2011. gada 17. marta lēmumu,
protokols Nr. 41 (76).

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

Šis darbs izstrādāts Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā “Eiropas energotehnoloģiju stratēģiskā plāna Latvijas aktivitāšu atbalsta zinātniskā grupa”, identifikācijas numurs IDP/1.1.1.2.0./09/APIA/VIAA/027.

PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011. gada 18. maijā plkst. 15.00 RTU Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1 - 117 telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asoc. profesore, Dr.sc.ing. Anastasija Žiravecka
Rīgas Tehniskā universitāte

AS RER Vilces elektroiekārtu izmēģinājumu centra priekšnieks,
Dr. sc. ing. Aleksandrs Mesņajevs
Rīgas Elektromašīnbūves rūpnīca

Profesors, Dr. habil. sc.ing, Zigurds Sīka
Valsts emeritētais zinātnieks

APSTIPRINĀJUMS

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

Svetlana Orlova(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, slēdzienus, literatūras sarakstu, 8 pielikumus, 89 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 127 lappuses. Literatūras sarakstā ir 98 nosaukumi.

SATURS

DARBA VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS	5
Darba aktualitāte	5
Darba mērķis, pētījumu objekts un uzdevumi	5
Pētījumu metodes.....	5
Darba zinātniskā novitāte	6
Darba teorētiskā un praktiskā nozīme	6
Darba aprobācija	6
Izgudrojumi	7
Darba struktūra	8
DARBA SATURS.....	9
Ievads	9
1. Aksiālā induktormašīna kā ekonomisks paaugstināta drošuma autonomas elektroapgādes avots	10
2. Aksiālās induktormašīnas magnētiskā lauka aprēķins – pamats elektriskās mašīnas raksturlielumu noteikšanai un tās parametru optimizācijai.....	11
3. Rekomendāciju izstrāde aksiālās induktormašīnas efektivitātes paaugstināšanai	13
4. Aksiālās induktormašīnas eksperimentālie pētījumi un tās tālākās pilnveidošanas iespējas	19
Slēdzieni	23
AUTORA PUBLIKĀCIJAS	25

DARBA VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS

Darba aktualitāte

Ar katru gadu pieaugošais enerģijas patēriņš prasa paaugstināt energoefektivitāti, t.i. energosistēmu un to elementu optimizāciju. Tā kā elektriskās mašīnas ir galvenie enerģijas pārveidotāji, tad nepieciešama to savlaicīga modernizācija. Enerģijas tirgus izaugsmes jaunu tehnoloģiju attīstības apstākļos, palielinoties ekoloģiskajām prasībām, rada nepieciešamību pēc jauniem risinājumiem elektrisko mašīnu masas, gabarītu rādītāju un drošuma uzlabošanā. Sakarā ar iepriekš minēto šis darbs veltīts aksiālo induktormašīnu optimizācijas jautājumiem.

Darba mērķis, pētījumu objekts un uzdevumi

Šī darba mērķis ir rekomendāciju izstrāde aksiālās induktormašīnas efektivitātes uzlabošanā, balstoties uz magnētiskā lauka analīzi, kam piemīt radiāli tangenciāls – aksiāls sadalījums.

Pētījuma objekts ir divpakešu zemvagonu ģenerators 2ГВ.13.2У1, kuru Latvijā ražo akciju sabiedrība “Latvo” (Rīgas Elektromašīnbūves rūpnīca).

Uzstādītā mērķa sasniegšanai tiek risināti šādi uzdevumi:

- pamatota optimāla enkura tinuma shēma;
- veikta magnētiskā lauka aprēķina metodikas izvēle un pamatojums, ņemot vērā tā sadalījuma īpatnības aksiālajā induktormašīnā;
- pamatota mērķfunkcija magnētiskā lauka modelēšanas rezultātu analīzei un racionālas zobzonas ģeometrijas noteikšanai;
- veikta eksperimentāla jaunu tehnisko risinājumu pārbaude;
- parādītas aksiālās induktormašīnas attīstības perspektīvas;
- tiek īstenota pētījuma rezultātu aprobācija.

Pētījumu metodes

Induktormašīnas magnētiskā lauka modelēšanā izmantota galīgo elementu metode. Aprēķinu rezultāti tika salīdzināti ar datiem, kuri tika iegūti eksperimentos, kas veikti uz Rīgas elektromašīnbūves rūpnīcas (RER) pārbaudes kompleksa.

Darba zinātniskā novitāte

Darba zinātniskā novitāte ir:

- paņēmiens lauka trīsdimensiju uzdevumu transformēšanai uz divdimensiju uzdevumiem ar matemātisko modeli, kas izveidots uz galīgo elementu metodes pamata;
- mērķfunkcija, kura ļāva ņemt vērā ģeneratora darba īpatnības tukšgaitas un slodzes režīmā, kā arī atrast tā zobzonas optimālo ģeometriju;
- izstrādātas un pamatotas rekomendācijas racionālai induktormašīnas zobzonas ģeometrijai;
- ģeneratora konstrukcija zemvagona induktoģeneratorotam 2ГВ.13.2У1 ar samazinātu statora zobu skaitu līdz 18, saglabājot rotora zobu skaitu vienādu ar 10;
- darba novitāte tiek apstiprināta ar divu patentu uz izgudrojumu saņemšanu.

Darba teorētiskā un praktiskā nozīme

Darba teorētiskā nozīme ir:

- aksiālās induktormašīnas magnētiskā lauka aprēķina metodikas papildināšana ar jaunu paņēmienu, kas ļauj ņemt vērā magnētiskās plūsmas sadalījumu aksiālā magnētīvadā;
- piedāvāta mērķfunkcija, kas ļauj noteikt aksiālā induktorģeneratora zobzonas optimālo ģeometriju.

Darba praktiskā nozīme ir:

- dotas rekomendācijas par ģeneratora zobzonas racionālo ģeometriju;
- pamatojoties uz darba rezultātiem rūpnīca RER izgatavotais jaunais rotors ģeneratoram 2ГВ.13.У1, ļauj būtiski palielināt tā jaudu un lietderības koeficientu.

Darba aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti tika ziņoti starptautiskās konferencēs:

- 1.“Magnetic field in the tooth zone of an axial inductor machine (AIM) “, 5th annual Conference of Young Scientists on Energy Issues, Kaunas, Lithuania, May 2008;
- 2.“Магнитное поле в зубцовой зоне аксиальной индукторной машины”, Problems of present-day electrotechnics, Киев, Украина, июнь 2008;
- 3.“Research of magnetic field of an axial inductor machine“, Riga Technical University 49th international scientific conference, Riga, Latvia, October 2008;

4. "Rational geometry of a magnetic circuit of an axial inductor generator", The 4TH International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2009, Kaunas, Lithuania, May 2009;
5. "Optimization of the circuit of an axial inductor machine based on the calculation and analysis of magnetic field", 13th European Conference on Power Electronics and Applications EPE-2009, Barcelona, Spain, September 2009;
6. "Optimization of the magnetic circuit of an axial inductor machine", Riga Technical University 50th international scientific conference, Riga, Latvia, October 2009;
7. "Non-overlapping concentrated windings in homopolar inductor machines", 20th International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Pisa, Italy, June 2010;
8. "Optimization of the magnetic circuit of the homopolar inductor machine with non-overlapping concentrated windings", 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC, Ohrid, Republic of Macedonia, September 2010.

Izgudrojumi

1. Bezsmertnij A., Dirba J., Ketners K., Levins N., Orlova S., Pugačevs V. Induktormašīna. LV patents Nr. 13947 no 20.08.09.
2. Dirba J., Ketners K., Levins N., Orlova S., Pugačevs V. Aksiālas ierosmes induktormašīna. LV patents Nr. 13971 no 08.04.09.

Darba struktūra

Ievads

1. Aksiālā induktormašīna kā ekonomisks paaugstināta drošuma autonomas elektroapgādes avots

- 1.1. Homopolāru un heteropolāru induktormašīnu salīdzinoša analīze
- 1.2. Induktormašīna kā autonomas elektroapgādes avots aviācijā, vēja enerģētikā un dzelzceļa transportā
- 1.3. Aksiālās induktormašīnas enkura tinumu tipa izvēle un pamatojums
- 1.4. Enkura tinuma shēmas pamatojums un tinuma koeficienta noteikšana
- 1.5. Secinājumi

2. Aksiālās induktormašīnas magnētiskā lauka aprēķins – pamats elektriskās mašīnas raksturlielumu noteikšanai un tās parametru optimizācijai

- 2.1. Elektromagnētiskā lauka vienādojumi
- 2.2. Magnētiskā lauka aprēķināšanas ar galīgo elementu skaitlisko metodi galvenās priekšrocības
- 2.3. Aksiālās induktormašīnas magnētiskā lauka aprēķināšanas metodes, izvēle un pamatojums
- 2.4. Aksiālā induktorģeneratora tukšgaitas un īsslēguma raksturlieknes un to uzbūve uz magnētiskā lauka aprēķina bāzes
- 2.5. Secinājumi

3. Rekomendāciju izstrāde aksiālās induktormašīnas efektivitātes paaugstināšanai

- 3.1. Pētījuma objekta – zemvagona induktorģeneratora 2ГВ.13.2У1 apraksts
- 3.2. Aksiālā induktorģeneratora magnētiskās ķēdes parametri, kas nosaka mašīnas izmantošanas efektivitāti
- 3.3. Aksiālās induktormašīnas zobu zonas ģeometrijas optimizācija, pamatojoties uz magnētiskā lauka izpēti
- 3.4. Aksiālā induktorģeneratora magnētiskā lauka skaitliskās modelēšanas rezultāti
- 3.5. Rekomendācijas racionālai induktormašīnas zobzonas ģeometrijas izvēlei
- 3.6. Secinājumi

4. Aksiālās induktormašīnas eksperimentālie pētījumi un tās tālākās pilnveidošanas iespējas

- 4.1. Eksperimentālo pētījumu mērķis un uzdevumi
- 4.2. Eksperimentālās pārbaudes veikšanas ģeneratora eksperimentālā modeļa apraksts
- 4.3. Sērijveida ģeneratora un eksperimentālā parauga eksperimentālo pētījumu rezultāti
- 4.4. Eksperimenta rezultātu un teorētisko datu salīdzināšana
- 4.5. Priekšlikumi induktorģeneratora konstrukcijas pilnveidošanai
- 4.6. Secinājumi

Slēdzieni

Izmantotie informācijas avoti

Pielikumi

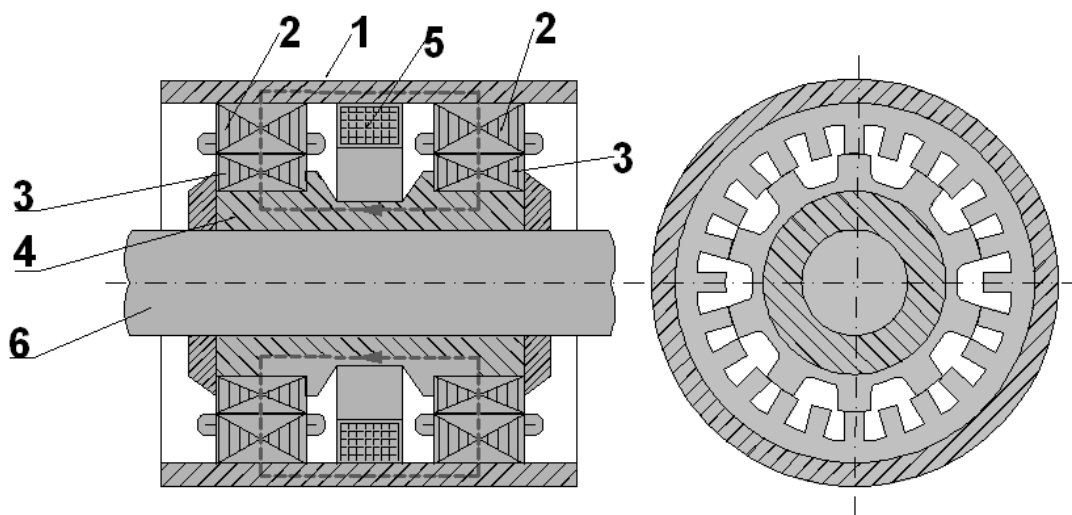
DARBA SATURS

Ievads

Plašu pielietojumu ieguvuši tādi elektromehāniskie pārveidotāji kā aksiālie induktorgeneratori. Par induktormašīnu sauc sinhrono elektrisko mašīnu, kurā magnētiskā plūsma statora zobos, pulsējoša rakstura magnētiskās vadītspējas izmaiņu dēļ. Šīs mašīnas atšķirīgā konstruktīvā īpatnība ir tā, ka tajā nav rotējošu tinumu (visi tinumi izvietoti statorā un ir nekustīgi), bet rotors izgatavots zobrata veidā, kuram griežoties, notiek pulsācijas.

Aksiālajam induktorgeneratoram var būt viena, divas vai pat vairāk par divām statora un rotora paketēm. Tālāk tiek aplūkoti tikai divpakešu induktorgeneratori.

Aksiālais induktorgenerators (II.att.) sastāv no korpusa, kurā izvietotas, piemēram, divas statora paketes ar enkura tinumiem un divām rotora zobu paketēm (bez tinumiem). Gredzenveida ierosmes tinums izvietots starp statora paketēm.



II.att. Aksiālais divpakešu induktorgenerators:

1 - korpusa, 2 –statora paketes ar tinumiem, 3 - rotora paketes,
4 - rotora ieliktnis, 5 - ierosmes tinums, 6 - vārpsta

Induktormašīnas darbības princips ir zināms kopš XIX gadsimta. V. Apsīša un L. Dombura darbos sīki izklāstīta šī tipa mašīnu attīstība un praktiskā izmantošana. Taču elektromašīnbūvē plašāk induktormašīnas sāka izmantot tikai kopš pagājušā gadsimta vidus, tādu labu īpašību dēļ, kā ekspluatācijas drošums, izgatavošanas vienkāršums, iespēja izgatavot lielām rotācijas frekvencēm. Savas attīstības sākumā induktormašīnas tika izmantotas galvenokārt kā paaugstinātas frekvences vienfāzes maiņstrāvas barošanas avoti. Tomēr veiktie pētījumi ļāva atklāt plašākas daudzfāžu induktormašīnu izmantošanas iespējas. Pateicoties A.

Aļeksejeva, V. Vologdina, J. Petruņkina un M. Spicina darbiem, mūsdienās induktormašīnas sekmīgi tiek izmantotas transportlīdzekļu elektroapgādes sistēmās – aviācijā, dzelzceļa, jūras un automobiļu transportā, kā arī kā rūpnieciskajās un paaugstinātas frekvences autonomajās elektroierīces.

Pie vēlāka perioda interesantākajiem darbiem, kas veltīti induktormašīnu galveno īpatnību pētīšanai, jāattiecinā M. Aļeksejevas, N. Alpera, V. Apsīša, L. Dombura, R. Žežerina, M. Krasnošapkas, N. Levina, V. Pugačeva, A. Serebrjakova, E. Skruzīša, A. Terzjana, V. Šarova, G. Šturmana darbi. Pateicoties šo zinātnieku pētījumiem, šodien mums ir pietiekami pilnīgs priekšstats par svarīgākajiem fizikāliem procesiem induktormašīnās, kas ļāva krasi paaugstināt šo mašīnu tehnisko līmeni un izgatavošanas kvalitāti. Turklāt liela nozīme induktormašīnu pilnveidošanā ir to magnētiskā lauka kvalitatīvai analīzei.

Vēlākos Latvijas Republikas zinātnieku J. Novika, A. Zviedra, U. Brakanska, A. Zaiceva, A. Gasparjana, E. Kamoliņa un A. Podgornova darbos izskatīti magnētiskā lauka kvantitatīvās modelēšanas ar galīgo elementu metodi jautājumi. Šīs metodes priekšrocība ir tāda, ka tā ļauj risināt uzdevumus ar jebkuras sarežģītības pakāpes magnētiskas sistēmas ģeometriju, ņemot vērā, ka vides ir nelineāras.

Tostarp magnētiskā lauka analīze aksiālajā induktormašīnā līdz šim brīdim tika veikta, neņemot vērā tā sadalījuma īpatnības aksiālā virzienā, kas noveda pie būtiskām kļūdām. Tāpēc aksiālo induktormašīnu tehniski ekonomisko rādītāju uzlabošana, optimizējot to parametrus, pamatojoties uz vēl precīzāku magnētiskā lauka analīzi, ņemot vērā tā aksiālo komponenti, ir viens no galvenajiem šī darba mērķiem.

1. Aksiālā induktormašīna kā ekonomisks paaugstināta drošuma autonomas elektroapgādes avots

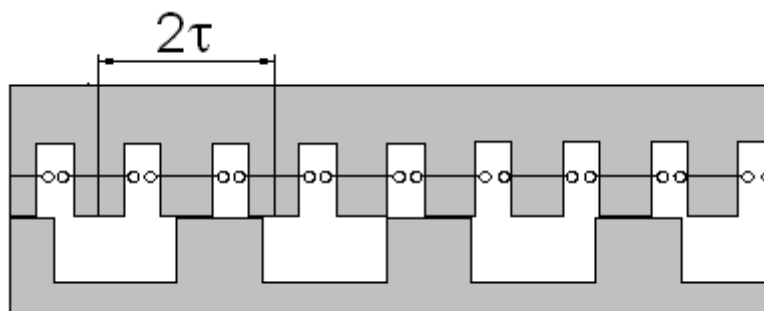
Promocijas darba pirmajā nodaļā tiek veikta salīdzinoša homopolāru un heteropolāru induktormašīnu analīze, kas parāda, ka homopolārām induktormašīnām ir augstāks lietderības koeficients, tās patērē mazāk vara un tās ir remontējamas.

Šai nodaļā tiek arī pamatots koncentrēto tinumu lietošanas lietderīgums aksiālajā induktormašīnā, kas pasaules praksē zināmi ar nosaukumu „non-overlapping concentrated winding”. Tā statora rievu skaita samazināšanas nolūkā, vienlaicīgi samazinot garenass plūsmas pulsāciju, var izgatavot tuvu dubultotam rotora zobu skaitam

$$Z_1 = 2Z_2 \pm k, \quad (1.1)$$

kur $k=1,2,3,\dots$, - nelieli veseli skaitļi.

Koncentrēto tinumu pielietošana aksiālajos induktorgeneratoros, vienlaicīgi palielinot zobu skaitu rotorā, ļauj būtiski vienkāršot enkura tinuma un ģeneratora kopumā izgatavošanas tehnoloģiju, paaugstināt ģeneratoru atdoto jaudu un uzlabot mašīnas īpatnējās masas un gabarītu rādītājus, nepalielinot aktīvo materiālu pātēriņu.



1.1. att. Koncentrēts trīsfāžu tinums pie $Z_1 = 2Z_2 \pm k$

2. Aksiālās induktormašīnas magnētiskā lauka aprēķins – pamats elektriskās mašīnas raksturlielumu noteikšanai un tās parametru optimizācijai

Promocijas darba otrā nodaļa veltīta magnētiskā lauka aprēķinam. Kā zināms, elektrisko mašīnu un citu elektrotehnisko ierīču aprēķināšanas metodes balstās uz to elektromagnētisko lauku pētījumu rezultātiem. Tāpēc magnētiskā lauka analīze aksiālajā induktormašīnā ir pamats elektriskās mašīnas raksturlielumu noteikšanai un sekojošai tās konstrukcijas optimizācijai.

Šajā darbā magnētiskā lauka aprēķināšanai aksiālajā induktormašīnā izvēlēta galīgo elementu metode.

Aksiālajām induktormašīnām ir raksturīga vienkārša konstrukcija, tām ir principiāli atšķirīga magnētiskā sistēma salīdzinājumā ar parastās konstrukcijas sinhronajām mašīnām un magnētiskais lauks tajās ir ar izteiktu trīsdimensiju raksturu.

Aksiālās induktormašīnas aktīvās zonas magnētiskā lauka modelēšanas sarežģītība ir tā, ka nepieciešams modelēt ierosmes lauka avotu, jo koaksiālā ierosmes spole atrodas telpā starp statora paketēm (I.1.att).

Magnētiskā lauka aprēķināšanas uzdevumu var risināt trīs veidos:

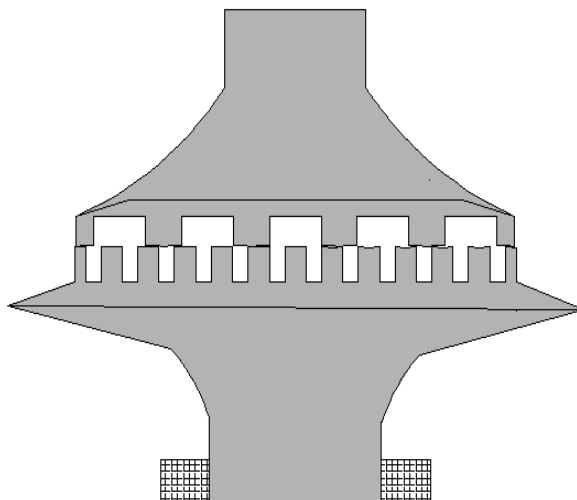
- risinot magnētiskā lauka trīsdimensiju uzdevumu;

- reducējot aprēķinu divos divdimensiju uzdevumos;
- transformējot trīsdimensiju uzdevumu divdimensiju uzdevumā.

Šajā darbā grūti pieejamo trīsdimensiju aprēķinu programmu dēļ magnētiskais lauks, risinot trīsdimensiju uzdevumu, netiek aplūkots.

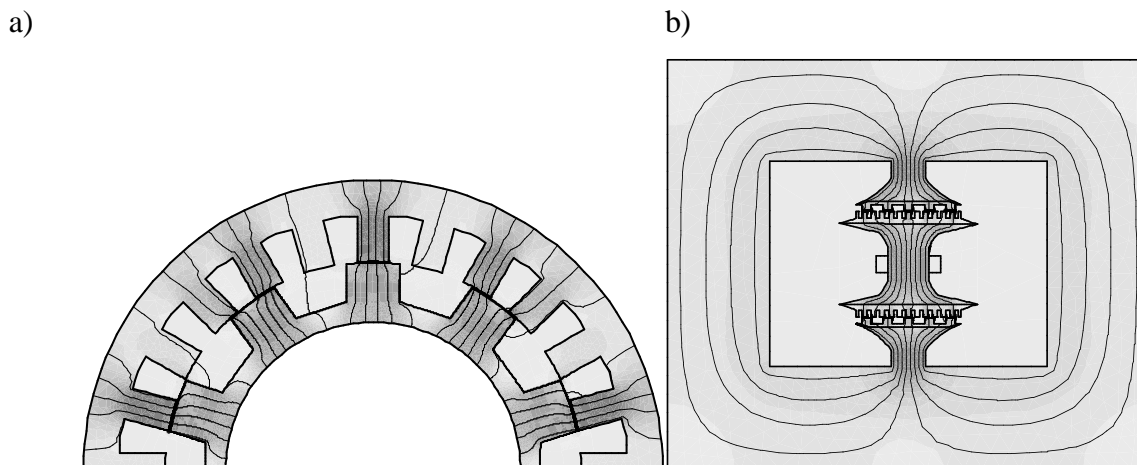
Aprēķina reducēšana divos divdimensiju uzdevumos tiek aplūkots lauks radiālajā aktīvajā zonā (statora un rotora serdenis un galvenā gaisa sprauga), kur lauks ir plakanparalēls, un lauks aksiālajā magnētavadā, kur tas ir aksiālsimetrisks. Darbā šis risināšanas veids papildināts ar algoritmu, kas ļauj ņemt vērā magnētdzinējspēka kritumu aksiālajā magnētavadā, ar dažādu zobzonas ģeometriju, t.i., risinot optimizācijas uzdevumu.

Pirms lauka analīzes ar trešo metodi (2.1.att) magnētvasda ass posmi tiek transformēti radiālos, vienlaikus saglabājot magnētiskās ķēdes transformējamo elementu šķērsriezuma laukumus.



2.1.att. Magnētiskās ķēdes šķērsriezums pēc magnētvasda transformēto aksiālo posmu ieviešanas tajā

Divos veidos iegūto magnētiskā lauka aprēķina rezultātu analīze apstiprina, ka katrs no tiem ir loģisks. Tomēr aprēķina metodika, transformējot trīsdimensiju uzdevumu divdimensiju uzdevumā, ļauj vienkāršot risināšanas procesu, kas ekonomē laiku, jo nav nepieciešamības daudzkārt risināt vienu un to pašu uzdevumu ar dažādām patvaļīgi uzdodamām vektoriālā magnētiskā potenciāla vērtībām un izvēlēties no risinājumu kopas piemērotu variantu. 2.2.att. parādīti magnētiskā lauka attēli mašīnas šķērsriezumā un pēc magnētvasda aksiālo posmu transformācijas.



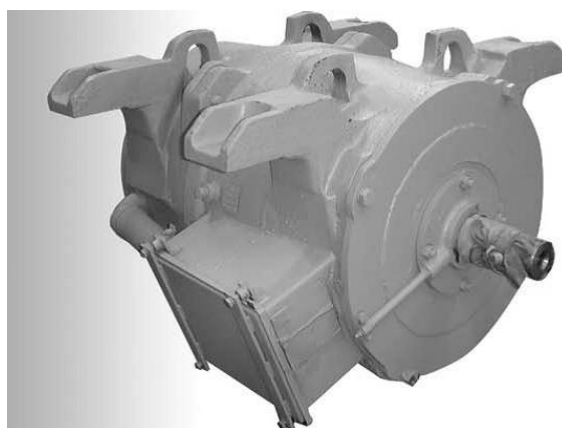
2.2.att. Magnētiskā lauka aina:

a) mašīnas šķērs griezumā; b) pēc magnētva da aksiālo posmu transformācijas

3. Rekomendāciju izstrāde aksiālās induktormašīnas efektivitātes paaugstināšanai

Promocijas darba trešā nodaļa veltīta rekomendāciju izstrādei aksiālo induktormašīnu efektivitātes paaugstināšanā.

Kā pētījuma objekts izvēlēts akciju sabiedrības „Latvo” sērijveidā izgatavotais induktorgenerators ar jaudu 32 kW (3.1.att). Šis ģenerators tiek izmantots vagonu ar gaisa kondicionēšanas sistēmu elektroapgādei.



3.1.att. Zemvagona ģenerators 2ГВ.13.2У1

Projektējot aksiālo induktorgeneratoru, jāizvēlas induktora racionālu zobzonas ģeometriju, kas nodrošina efektīvu magnētiskās plūsmas izmantošanu mašīnā. Neveiksmīgi izvēloties zobzonas ģeometriskos parametrus, mašīna var nenodrošināt nepieciešamo jaudu. Tāpēc induktorgeneratora racionāla ģeometrija tiek noteikta, meklējot optimālu rotora un

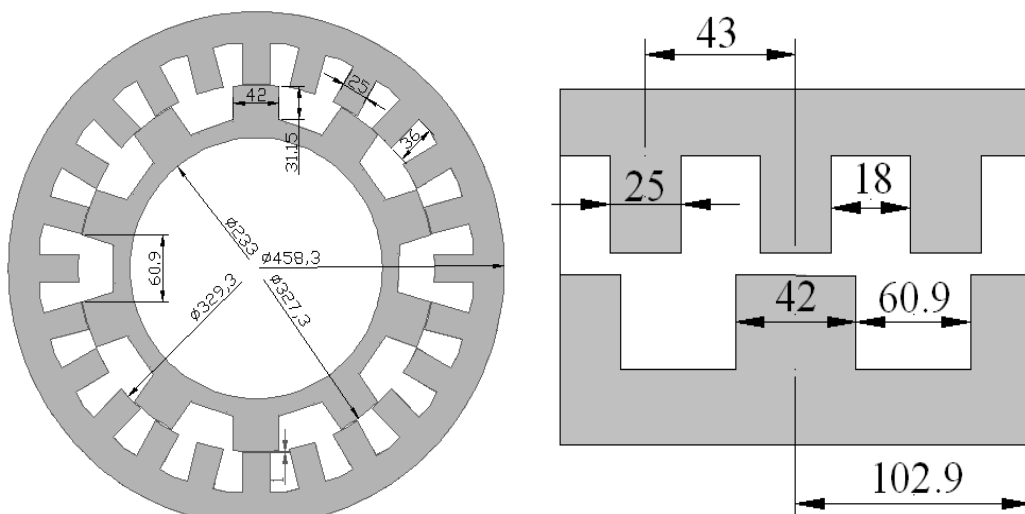
statora zobu skaita attiecību, kā arī rotora rievas relatīvo platumu (t.i. rotora rievas platumu attiecība pret rotora zoba platumu).

Pētāmajam induktorgeneratoram ir 24 zobi rotorā un 10 zobi statorā ar relatīvu rievu platumu (t.i. rotora rievu platumu attiecību pret rotora zoba platumu) $\gamma=1.45$. Tādas attiecības gadījumā uz rotora zobi ir daudz platāki par zobiem uz statora, kas noved pie nelabvēlīgas plūsmas palielināšanās caur rotora rievu un zudumu palielināšanos. 3.1. tabulā parādīti ģenerators zobu zonas galvenie parametri. 3.2.att. attēlota ģenerators zobzona, kur norādīti ģenerators galvenie izmēri.

3.1.tabula

Ģenerators 2ГВ.13.2У1 zobzonas galvenie parametri

Nosaukumi	Apzīmējumi	Vērtības	Mērvienības
Statora zobu skaits	Z_1	24	-
Rotora zobu skaits	Z_2	10	-
Statora zoba iedaļa	b_1	0.043	m
Rotora zoba iedaļa	b_2	0.1029	m
Statora zoba platums	b_{z1}	0.025	m
Rotora zoba platums	b_{z2}	0.042	m
Statora rievu platums	b_{r1}	0.018	m
Rotora rievu relatīvais platums	γ	1.45	-
Rotora rievu platums	b_{r2}	0.0609	m
Gaisa sprauga	δ	0.001	m
Statora paketes garums	l	0.115	m
Tērauda marka	elektrotehniskais tērauds 2211, loksnes biezums $\Delta=0.5$ mm		
Tērauda paketes aizpildes koef.	k_{Fe}	0.96	-
Statora zoba šķērsgriezums	$S_{z1} = b_{z1} \cdot l \cdot k_{Fe}$	0.002662	m ²
Rotora zoba šķērsgriezums	$S_{z2} = b_{z2} \cdot l \cdot k_{Fe}$	0.004472	m ²
Statora zoba augstums	h_{z1}	0.036	m
Rotora zoba augstums	h_{z2}	0.03115	m
Statora izvirkuma diametrs	D_s	0.3293	m
Rotora ieliktņa diametrs	D_{ie}	0.233	m
Rotora jūga šķērsgriezums	S_r	0.042617	m ²
Statora ārējais diametrs	D_a	0.4583	m
Statora jūga šķērsgriezums	S_j	0.022446	m ²



3.2.att. Ģenerators zobzona, kurā norādīti galvenie izmēri (mm)

Ģenerators elektrodzinējspēks (EDS) tukšgaitā tiek noteikts ar formulu

$$E_0 = 2 \cdot 4.44 \cdot f_1 \cdot \frac{N_S}{a} \cdot w_k \cdot k_{w1} \cdot \frac{\Phi_{max} - \Phi_{min}}{2}, \quad (3.1)$$

kur $f_1 = \frac{Z_2 \cdot n_N}{60}$ - strāvas frekvence;

n_N - nominālā rotācijas frekvence;

N_S - spoļu skaits ģenerators fāzē;

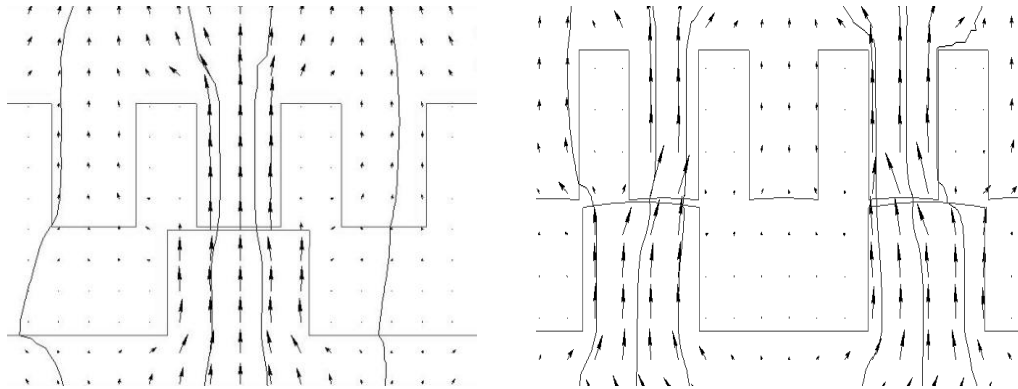
a - enkura tinuma fāzes paralēlo zaru skaits;

Φ_{max}, Φ_{min} - magnētiskās plūsmas maksimālā un minimālā vērtība statora zobā, kad statora zobs atrodas pret rotora zobu, vai kad pret rotora rievu;

w_k - vijumu skaits vienā enkūrā spolē;

k_{w1} - tinuma koeficients pēc pirmās harmonikas.

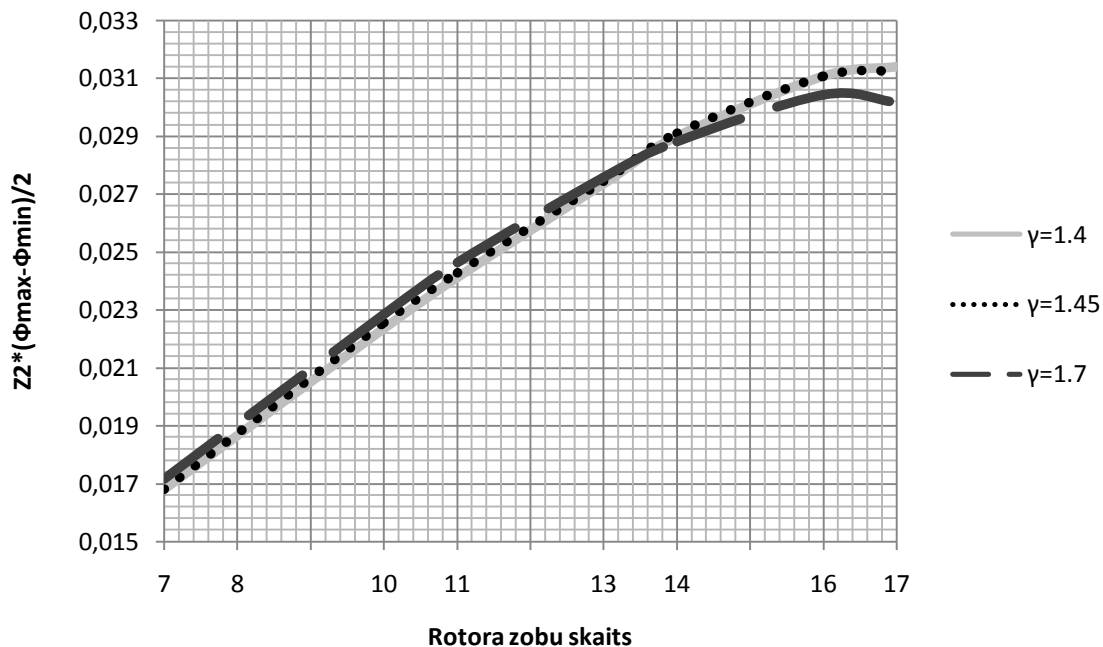
EDS vērtības noteicošie galvenie parametri ir maksimālā magnētiskā plūsma (plūsma statora zobā, kad tas atrodas pret rotora zobu) un minimālā plūsma (plūsma statora zobā, kad tas atrodas pret rotora rievu) (3.3.att.), kā arī strāvas frekvence. Jāatzīmē, ka šie parametri pilnā mērā ir atkarīgi no zobzonas ģeometrijas.



3.3. att. Magnētiskā lauka sadalījums statora zoba, kas atrodas pret rotora zoba (maksimālā plūsma Φ_{max}), un statora zoba, kas atrodas pret rotora rievu (minimālā magnētiskā plūsma Φ_{min})

3.4.att. parādīti magnētiskā lauka izpētes rezultāti kā $\frac{\Phi_{max} - \Phi_{min}}{2} \cdot Z_2$ atkarībā no zobu skaita pie dažādiem rotora rievas relatīviem platumiem.

Kā izriet no iegūtajiem datiem, spoles maksimālo EDS var iegūt ar 16 zobu rotoru un pie relatīva rievu platuma vienādu ar 1.4. Jāatzīmē, ka iegūtie aksiālās induktormašīnas tukšgaitas režīma analīzes rezultāti nav pietiekami, jo, meklējot optimālu zobzonas ģeometriju, ir jāņem vērā arī dati, kas iegūti, mašīnai darbojoties slodzes režīmā.



3.4.att. $\frac{\Phi_{max} - \Phi_{min}}{2} \cdot Z_2$ vērtības atkarībā no rotora zobu skaita un relatīvo rievas platumu

$\gamma=1.4; 1.45; 1.7$

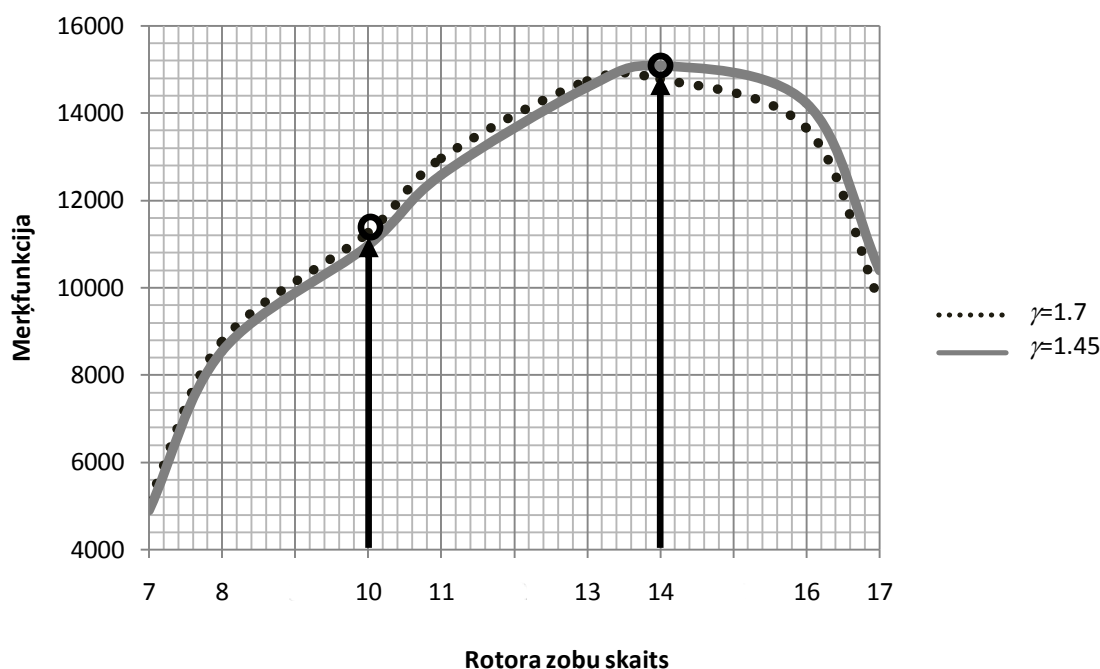
Lai noskaidrotu divpakešu induktorgeneratora optimālu zobzonas ģeometriju, lietderīgi izmantot mērķfunkciju:

$$C_g = \frac{\pi}{120} k_w^2 n_N Z_1 Z_2 \frac{(\Phi_{max} - \Phi_{min})^2}{(\Phi_{max(k)} + \Phi_{min(k)}) F_k} \quad (3.2)$$

kur $\Phi_{max(k)}, \Phi_{min(k)}$ – attiecīgi magnētiskās plūsmas maksimālā un minimālā vērtība, kuru nosaka rezultējošais magnētdzinējspēks (MDS);

$F_k = \sqrt{2} w_k I_k$ – īsslēguma MDS.

3.5.att. dotas mērķfunkcijas atkarības no rotora zobu skaita ar relatīvo rievas platumu $\gamma=1.45; 1.7$.



3.5. att. Mērķfunkcijas atkarība no rotora zobu skaita ar relatīvo rievas platumu $\gamma=1.45; 1.7$

Kā redzams attēlotajās līknēs, palielinoties rotora zobu skaitam, mērķfunkcijas vērtības aug līdz noteiktai robežai, taču tālāka rotora zobu skaita palielināšana noved pie mērķfunkcijas vērtības samazinājuma. Jāatzīmē, ka katrai rotora zobu skaita vērtībai jāizvēlas optimāla rievas platuma attiecība pret rotora zoba platumu, piemēram, ar 10 zobiem rotorā mērķfunkcijas maksimums ir pie $\gamma=1.7$, bet ar 14 zobiem pie $\gamma=1.45$.

No mērķfunkcijas aprēķinu rezultātiem, iegūstam, ka 10 zobu rotoram ar rievu relatīvo platumu $\gamma=1.45$ salīdzinājumā ar 14 zobu rotoru ģenerators īpatnējā jauda (jauda uz mašīnas masas vienību) palielinās par 37 %.

Balstoties uz magnētiskā lauka aprēķina rezultātiem un mērķfunkcijas analīzi, sniegtas rekomendācijas aksiālās induktormašīnas racionālas zobzonas ģeometrijas pamatošanā, kas reducējas šādi:

- statora zobu skaits dalās bez atlikuma ar dubultotu fāžu skaitu

$$Z_1 = 2k_1m, \quad (3.3)$$

kur k_1 - vesels skaitlis;

- rotora zobu skaits tiek noteikts ar šādu izteiksmi;

$$Z_2 = \frac{Z_1}{2} + k, \quad (3.4)$$

- rotora zobu skaits nedalās bez atlikuma ar fāžu skaitu

$$Z_2 \neq k_2m, \quad (3.5)$$

kur k_2 - vesels skaitlis;

- rotora zobu platumu attiecībai pret statora zobu platumu jābūt

$$\gamma_{1-2} = \frac{b_{z2}}{b_{z1}} = 1.02 \div 1.1; \quad (3.6)$$

- statora un rotora zobu platumu attiecībai pret gaisa spraugu δ jābūt

$$\frac{b_{z1}}{\delta} \geq 20; \frac{b_{z2}}{\delta} \geq 20; \quad (3.7)$$

- rotora rievu platumu attiecība pret rotora zoba platumu

$$\gamma = \frac{b_{r2}}{b_{z2}} = 1.4 \div 1.7; \quad (3.8)$$

- rotora zobu augstumam jābūt lielākam par zoba platumu

$$h_{z2} \geq b_{r2}. \quad (3.9)$$

4. Aksiālās induktormašīnas eksperimentālie pētījumi un tās tālākās pilnveidošanas iespēja

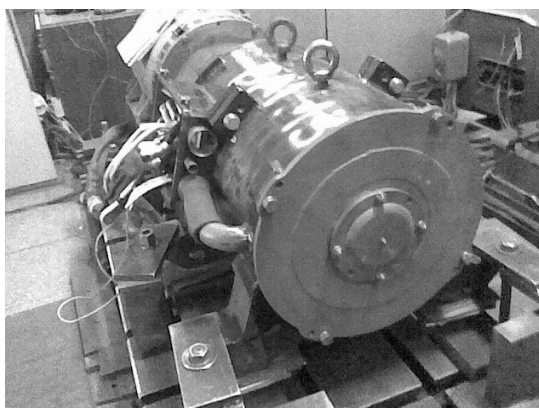
Promocijas darba ceturtā nodaļa veltīta eksperimentālam pētījumam ar mērķi apstiprināt piedāvātā matemātiskā modeļa pilnīgu pamatotību aksiālās induktormašīnas konstrukcijas optimizācijai un pārbaudīt konkrētu priekšlikumu efektivitāti tās tehnisko un ekonomisko rādītāju uzlabošanā. Šajos pētījumos par modeļi tika izmantots zemvagona induktorgenerators. Ģeneratora nominālie dati doti 4.1.tabulā.

4.1.tabula

Ģeneratora 2ГВ.13.2Y1 nominālie dati

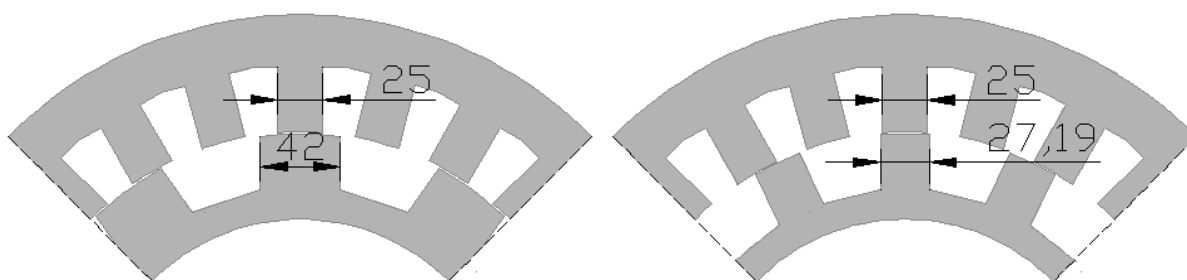
Parametrs	Vērtība	Mērvienība
Nominālā jauda	32	kW
Nominālais spriegums (līnijas)	116	V
Nominālā strāva līdz taisngriezim	170	A
Nominālā rotācijas frekvence	1000	min ⁻¹
Statora tinuma fāžu skaits	3	-
Fāžu savienojums	Y	-
Nominālā strāvas frekvence	167	Hz
Tērauda marka	2211	-
Enkura tinuma spoles vijumu skaits	13	-
Ierosmes tinuma strāva	3	A
Ierosmes tinuma vijumu skaits	1520	-
Statora (rotora) pakešu skaits	2	-

Kā izriet no iepriekš iegūtajiem datiem, ģeneratoram ar statora zobu skaitu $Z_1=24$ un rotora zobu skaitu $Z_2=14$ ir optimāla konstrukcija; tāds rotors ar zobu skaitu $Z_2=14$ deva iespēju pārbaudēm izmantot sērijveida ģenerators 2ГВ13.2Y1 statoru, nemainot enkura tinuma shēmu un neveicot citas būtiskas izmaiņas. Ģeneratoru ar dažādiem rotoriem eksperimentālie pētījumi tika veikti rūpnīcas RER pārbaudes kompleksā (4.1.att.).



4.1.att. Pārbaudes stends ģenerators eksperimentālai izpētei

4.2. att. parādīti statora un rotora lokšņu sektori.



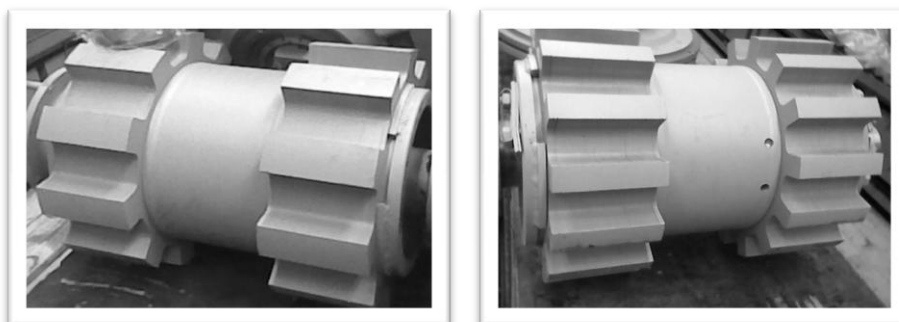
4.2.att. Rotora un statora lokšņu sektori:

a – sērijveida ģenerators ar rotora zobu skaitu $Z_2=10$; b – eksperimentālā ģenerators ar rotora zobu skaitu $Z_2=14$

Pārbaudes programmas ietvēra:

- enkura tinumu pretestību mērīšana ar līdzstrāvu;
- tukšgaitas raksturlielumu noteikšana;
- īsslēguma raksturlielumu noteikšana;
- ģeneratoru regulēšanas iespēju noteikšana;
- sasilšanas un pārkaršanas novērtējums;
- sprieguma līkņu formu noteikšana tukšgaitas un slodzes režīmā.

4.3.a att. parādīts sērijveida ģenerators ar zobu skaitu $Z_2=10$ kopskats, bet 4.3.b att. – ģenerators ar $Z_2=14$.

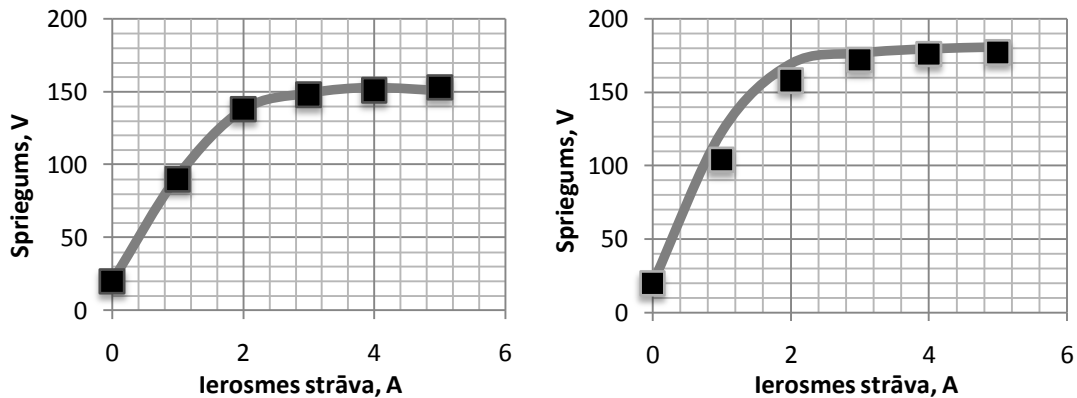


4.3.att. Ģeneratoru rotori:

a – sērijveida ar rotora zobu skaitu $Z_2=10$; b – eksperimentālā ar $Z_2=14$

4.4.att. parādīti ģeneratoru ar dažādiem rotoriem tukšgaitas teorētiskās un eksperimentālās raksturlielnes. Sērijveida ģenerators $Z_2=10$ (4.9.a att.) tukšgaitas raksturlielnes praktiski pilnībā sakrīt ar teorētiskajām. Tas liecina par to, ka pareizi izvēlēts matemātiskais modelis, pamatojoties uz magnētiskā lauka aprēķinu un analīzi. Tajā pašā laikā eksperimenta ģenerators ar $Z_2=14$ uz rotora tukšgaitas raksturlielne ir nedaudz augstāk par eksperimentālo. Rezultātu starpību var izskaidrot ar to, ka pārbaudēs tika izmantoti ģeneratori ar dažādu rotora

izgatavošanas tehnoloģiju. 10 zobu uz rotora gadījumā tā bija lietā statne un rotora lokšņu štancējums, bet 14 zobu gadījumā – no divām daļām saliktā statne, bet rotora zobi izgatavoti ar frēzēšanu.

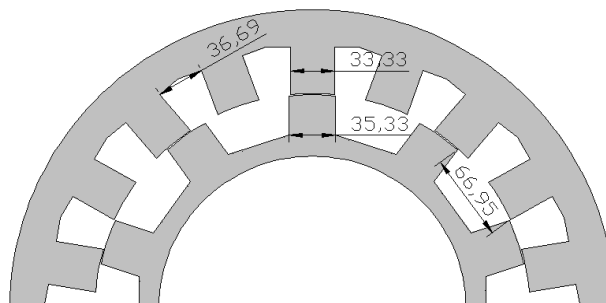


4.4.att. Tukšgaitas raksturlīknes:

a – sērijveida ģenerators ar $Z_2=10$; b – eksperimentālā ģenerators ar $Z_2=14$;
 — teorētiskā, ■ eksperimentālā

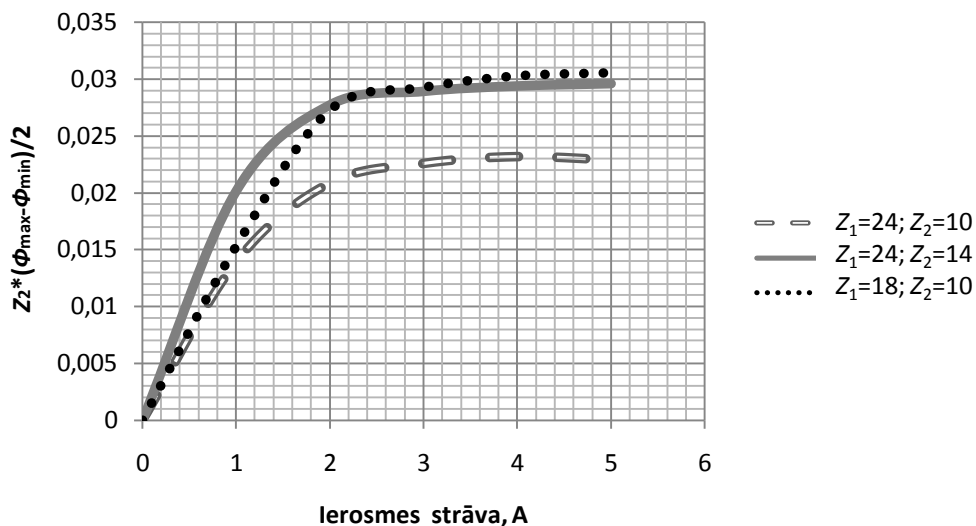
Meklējot racionālu zemvagona induktorģenerators zobzonas ģeometriju, tika noteikta optimāla statora un rotora zobu skaita attiecība, kā arī rotora rievas un zoba relatīvais platums. Tomēr iegūtais optimālais rotora zobu skaits, kas vienāds ar $Z_2=14$, izraisa strāvas frekvences palielinājumu, un tātad noved pie zudumu palielinājumu tēraudā un ģenerators lietderības koeficienta samazinājuma. Tāpēc strāvu frekvences pamazināšanas un zudumu ģenerators tēraudā samazināšanas nolūkā tiek piedāvāts izmantot ģenerators konstrukciju ar samazinātu statora zobu skaitu līdz $Z_1=18$, saglabājot rotora zobu skaitu $Z_2=10$. Ar tādu rotora un statora zobu skaitu strāvas frekvence paliek tāda pati kā sērijveida ģenerators.

4.5.att. parādīta statora un rotora lokšņu skice ģenerators ar $Z_1=18$ un $Z_2=10$.



4.5.att. Ģenerators zobzonas ģeometrija $Z_1=18$, $Z_2=10$

4.6.att. parādītās ģeneratoru tukšgaitas raksturlīknes ar dažādām statora un rotora zobu skaita attiecībām ($Z_1=24, Z_2=10$; $Z_1=24, Z_2=14$; $Z_1=18, Z_2=10$).



4.6. att. Tukšgaitas raksturlīknes ģeneratoriem ar dažādām statora un rotora zobu skaita attiecībām

No dotajām raksturlīknēm redzams (4.6.att.), ka pie nominālas ierosmes strāvas, kas vienāda ar 3 A, ģeneratoriem ar piedāvātam konstrukcijām ir vienādas EDS vērtības, kas par 29% lielākas nekā sērijveida ģeneratorā. Ģeneratora ar parametriem $Z_1=18, Z_2=10$ zobzonas ģeometrija ļauj saglabāt strāvas frekvenci tajā pašā līmenī, turklāt par 29% paaugstinās ģeneratora īpatnēja jauda un būtiski tiek vienkāršota elektriskās mašīnas izgatavošanas tehnoloģija.

Slēdzieni

1. Elektrisko kontaktu suku veidā un rotējošu tinumu trūkuma dēļ induktormašīnas ir plaši izplatītas, pateicoties augstai ekspluatācijas drošībai, izgatavošanas vienkāršībai un vienkāršai tehniskai apkopei. Radiālas un aksiālas ierosmes induktormašīnu salīdzinoša analīze, pamatojoties uz esošiem literatūras avotiem parāda, ka aksiālajām induktormašīnām ir augstāks lietderības koeficients, nepieciešams mazāks vara patēriņš, laba piemērotība remontam, tāpēc tām ir zināmas priekšrocības, tajā skaitā arī dzelzceļa transportā.

2. Divu magnētiskā lauka aprēķina veidu reducēšana divos divdimensiju uzdevumos un darbā piedāvātā trīsdimensiju uzdevuma reducēšana vienā divdimensiju, salīdzinoša analīze parāda, ka abi veidi ir pamatoti aksiālās induktormašīnas magnētiskā lauka parametru noteikšanai. Tomēr ātrāka un uzskatāmāka ir trīsdimensiju uzdevuma reducēšana uz divdimensiju.

3. Piedāvātā mērķfunkcija uz kuras analīzes bāzes ļauj ātri atrast pētāmās elektriskās mašīnas optimālo konstruktīvo risinājumu.

$$C_g = \frac{\pi}{120} k_{w1}^2 n_N Z_1 Z_2 \frac{(\Phi_{\max} - \Phi_{\min})^2}{F_k},$$

kur k_{w1} – pirmās harmonikas tinumu koeficients;

n_N – nominālā rotācijas frekvence;

Z_1 – statora zobu skaits;

Z_2 – rotora zobu skaits;

Φ_{\max} , Φ_{\min} – ierosmes maksimālā un minimālā magnētiskā zobu plūsma, kas atbilst statora zoba ievietojumam pret rotora zobu vai pret rotora rievu;

$\Phi_{\max(k)}$, $\Phi_{\min(k)}$ – maksimālās un minimālās vērtības magnētiskai plūsmai, kuru nosaka rezultējošais MDS;

F_k – īsslēguma MDS.

4. Balstoties uz magnētiskā lauka aprēķina rezultātiem un mērķfunkcijas analīzi, sniegtas rekomendācijas aksiālās induktormašīnas racionālas zobzonas ģeometrijas izvēlē, kas tiek apkopotas šādi:

- statora un rotora zobu skaita attiecība

$$Z_1 = 2k_1m; Z_2 = \frac{Z_1}{2} + k_2 \neq km,$$

kur k_1 un k_2 – veseli skaitļi; k – mazs vesels skaitlis; m – fāžu skaits;

- statora zoba b_{z1} (rotora b_{z2}) platuma attiecībai pret gaisa spraugu δ jābūt

$$\frac{b_{z1}}{\delta} \geq 20; \frac{b_{z2}}{\delta} \geq 20;$$

- rotora zoba platuma attiecība pret statora zoba platumu

$$\gamma_{1-2} = \frac{b_{z2}}{b_{z1}} = 1.02 \div 1.1.$$

5. Rotora magnētisko zudumu samazināšanai un lietderības koeficienta palielināšanai piedāvāts samazināt statora zobu skaitu no 24 līdz 18, vienlaikus saglabājot rotora zobu skaitu vienādu ar 10, tādējādi ļaujot samazināt magnētiskas zudumus un palielināt ģenerators īpatnējo jaudu par 29%.

6. Veiktie eksperimentālie pētījumi apstiprina aksiālā induktorģenerators piedāvātā matemātiskā modeļa un priekšlikumu energoefektivitātes paaugstināšanā pamatotību.

Aizstāvībai tiek izvirzīti sekojoši jaunie zinātniskie rezultāti:

- lauka trīsdimensiju uzdevuma transformēšanas divdimensiju uzdevumā veids, izmantojot galīgo elementu metodi;
- mērķfunkcija, kas ņem vērā ģenerators darbības īpatnības tukšgaitas un slodzes režīmā;
- rekomendācijas racionālai aksiālo induktormašīnu zobzonas ģeometrijai;
- zemvagonu ģenerators 2ГВ.13.У1 konstrukcija ar samazinātu statora zobu skaitu līdz 18, saglabājot rotora zobu skaitu vienādu ar 10.

AUTORA PUBLIKĀCIJAS

1. Orlova S., Pugachov V., Levin N. Magnetic field in the tooth zone of an axial inductor machine (AIM) // 5th annual Conference of Young Scientists on Energy Issues – 29 May, 2008, Kaunas, Lithuania, CD proceedings. II-20 – II-27.
2. Магнитное поле в зубцовой зоне аксиальной индукторной машины. Орлова С., Пугачёв В., Левин Н., Камолиньш Э. // Problems of present-day electrotechnics 2008 - Техн. Електродинаміка. Частина 5, Киев 2008, стр. 31-34.
3. Research of magnetic field of an axial inductor machine. Orlova S., Pugachov V., Levin N., Bezsmertnij A. //RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika. - 23.sēj. (2008), 117.-122.lpp
4. Optimization of the tooth zone of an axial inductor machine based on analysis of magnetic field. Levin N., Orlova. S., Pugachov V., E. Kamolins. // Latv. J. Phys. Tech. Sci. - Nr.2 (2009), pp. 21-28.
5. Rational geometry of a magnetic circuit of an axial inductor generator. Orlova S., Pugachov V., Levin N., Kamolins E.// The 4TH International Conference on Electrical and Control Technologies, 2009. May, Lithuania, Kaunas. – Kaunas: “Technologija”, 2009, pp. 219-222.
6. Optimization of the circuit of an axial inductor machine based on the calculation and analysis of magnetic field. Dirba J., Levin N., Orlova S., Pugachov., Ribickis L. // 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. September, Spain, Barcelona. – Barcelona:CD proceedings, 2009.
7. Optimization of the magnetic circuit of an axial inductor machine. Dirba J., Levin N., Orlova S., Pugachov V. //RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika. - 25.sēj. (2009), 57.-60.lpp
8. Non-overlapping concentrated windings in homopolar inductor machines. Orlova S., Pugachov V., Levin N., Konuhova M. //20th International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2010. June, Italy, Pisa.-Pisa: CD proceedings, 2010.
9. Optimization of the magnetic circuit of the homopolar inductor machine with non-overlapping concentrated windings. Levin N., Orlova S., Pugachov V., Ribickis L. // 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC, Ohrid, Republic of Macedonia, September 2010. – Ohrid: CD proceedings, 2010.
10. Induktormāšīna. Bezsmertnij A., Dirba J., Ketners K., Levins N., Orlova S., Pugačevs V. // LV patents Nr. 13947 no 20.08.09.
11. Aksiālas ierosmes induktormāšīna. Dirba J., Ketners K., Levins N., Orlova S., Pugačevs V. // LV patents Nr. 13971 no 08.04.09.