

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte

Enerģētikas institūts

Jeļena Daškova-Golovkina

Doktora studiju programmas „Elektriskās mašīnas un aparāti” doktorante

**Efektivitātes paaugstināšana
daudzpolu vējģeneratoriem
ar pastāvīgo magnētu ierosmi**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

Dr. habil. sc. ing.

V. Pugačevs

Zinātniskais konsultants

Dr. habil. sc. ing., profesors

N. Levins

Rīga 2010

UDK 621.548+621.311.245] (043.2)
Da 807 e

Daškova-Golovkina J. Efektivitātes paaugstināšana daudzpolu
vējģeneratoriem ar pastāvīgo magnētu ierosmi.
Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2010.-28 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Enerģētikas institūta
2010. gada 29. jūnija lēmumu,
protokols Nr. 37(72)

Šis darbs ir izstrādāts ar daļēju Eiropas Sociālā fonda atbalstu Nacionālās programmas „Atbalsts doktorantūras programmu īstenošanai un pēcdoktorantūras pētījumiem” projekta „Atbalsts RTU doktorantūras attīstībai” ietvaros.

ISBN

PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽINIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2010. gada 27.oktobrī plkst. 16:00 RTU Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē Kronvalda bulvārī 1 – 117 telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr.sc.ing., asoc. profesore Anastasija Žiravecka
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

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

Dr.sc.ing. Valērijs Bezrukovs
Galvenais inženieris, vadošais pētnieks
Ventspils Augstskolas Inženierzinātņu institūts
„Ventspils Starptautiskais Radioastronomiskais Centrs”, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

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

Jeļena Daškova-Golovkina.....

(Paraksts)

Datums:.....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 67 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 116 lappuses. Literatūras sarakstā ir 114 nosaukumu.

SATURS

Darba aktualitāte.....	5
Darba mērķis, objekts un pētījumu uzdevumi.....	5
Pētījumu metodes un līdzekļi.....	5
Zinātniskā novitāte.....	6
Teorētiskā un praktiskā nozīme.....	6
Darba aprobācija.....	7
Izgudrojumi.....	7
Darba struktūra.....	8

Darba saturs

Anotācija.....	9
I. Ievads.....	9
1. Autonomo VEI vējģeneratoru efektivitātes paaugstināšana, balstoties uz elektriskās mašīnas racionālās ierosmes shēmas izvēli un tās magnētiskā lauka izpēti	9
2. Daudzpolu sinhrona vējģeneratora ar pastāvīgo magnētu ierosmi magnētiskās sistēmas optimālie ģeometriskie parametri	1
3. Vējģeneratora ar pastāvīgiem magnētiem efektivitātes paaugstināšana, balstoties uz gredzenveida izpildījumu un polu skaitu un enkura tinuma shēmu optimizēšanu	1
4. Sinhrono ģeneratoru ar pastāvīgo magnētu ierosmi eksperimentālie pētījumi un to pilnveidošanas perspektīvas	8
Secinājumi	2
	7
Autora publikācijas.....	2
	8

VISPĀRĒJAIS DARBA RAKSTUROJUMS

Darba aktualitāte

Vēja enerģijas izmantošanas problēma mūsdienās ir kļuvusi ļoti aktuāla. Lētas enerģijas laikmets ir beidzies, un netradicionālo enerģijas avotu izmantošana kļūs arvien ekonomiski lietderīgāka. Vispirms tas attiecas uz patērētājiem attālākos lauku rajonos, kuru Latvijā ir ļoti daudz.

Tradicionālo enerģijas avotu izmantošana, tādu kā naftas, gāzes, ogles un citu, pirmkārt, veicina ārējās vides piesārņošanu un siltumnīcas efekta pastiprināšanos, otrkārt, šo derīgo izrakteņu daudzums strauji samazinās, kas veicina to pakāpenisku sadārdzinājumu un deficītu.

Tāpēc šodien enerģētikā ir aktuāla atjaunojamo enerģijas avotu izmantošana, t.i. saules, upju, vēja, geotermālās, biomasas, jūras straumes, viļņu un paisumu enerģijas izmantošana. Starp tām pietiekami efektīva ir vēja enerģijas izmantošana.

Latvijā jau ir uzstādītas ārzemju ražotāju tīklu vēja stacijas ar kopējo jaudu ap $30 \cdot 10^3$ kW. Tās ir nevainojamas, bet pagaidām dārgas iekārtas, kas ir paredzētas centralizētas energoapgādes sistēmas enerģijas ietilpīguma paaugstināšanai. Tomēr, fermu un attālināto vasarnīcas saimniecību vēja enerģijas izmantošanai ir nepieciešams būvēt autonomas vēja iekārtas ar paaugstinātu efektivitāti, kas ir vienkāršas ekspluatācijā, drošas, vieglas, ekonomiskas, beztrokšņa, kas strādā pie maza vēja ātruma ar paaugstināto enerģijas atdevi un, turklāt, ne visai dārgas. Tādu autonomo vēja iekārtu var izveidot no tiešas piedziņas gredzenveida ģeneratora (bez multiplikatora) ar ierosmi no pastāvīgiem magnētiem.

Dotais promocijas darbs veltīts vējģeneratora ar ierosmi no pastāvīgiem magnētiem efektivitātes paaugstināšanas jautājumu risināšanai.

Darba mērķis, objekts un pētījumu uzdevumi

Šī promocijas darba mērķis ir autonomo vējģekārtu ģeneratoru ar pastāvīgo magnētu ierosmi efektivitātes paaugstināšana.

Šī mērķa sasniegšanai tika izvirzīti šādi uzdevumi:

- 1) izstrādāt un pamatot autonomo vēja energoiekārtu (VEI) ģeneratoru pilnveidošanas kritērijus, vēja enerģijas izmantošanas efektivitātes paaugstināšanai;
- 2) pamatot ģeneratora ar pastāvīgiem magnētiem konstruktīvas pilnveidošanas koncepciju, kura nodrošina īpatnējās masas samazināšanu lēngaitas sinhronā mašīnā;
- 3) noteikt elektriskās mašīnas aktīvās zonas optimālo ģeometriju, kā arī sinhronas mašīnas statora zobu un polu skaitu, magnētu izmērus, tinumu shēmu, kas nodrošinātu lielāku ģeneratora efektivitāti;
- 4) atrast racionālu konstruktīvu risinājumu pastāvīgo magnētu drošam stiprinājumam uz rotora un to efektīvas izmantošanas saglabāšanu;
- 5) eksperimentāli pārbaudīt piedāvāto matemātisko modeļu un konstruktīvo risinājumu ticamību autonomo vējģeneratoru efektivitātes paaugstināšanai;
- 6) formulēt ierosinājumus tālākajai vējģeneratoru ar pastāvīgo magnētu ierosmi pilnveidošanai;
- 7) veikt pētījuma rezultātu aprobāciju.

Pētījumu metodes un līdzekļi

Izvirzīto uzdevumu risināšanai tika lietota viena no modernām un strauji progresējošām skaitliskām metodēm lauku aprēķināšanā – galīgo elementu metode (GEM). Aprēķini tika salīdzināti ar eksperimentāli iegūtiem rezultātiem, kuri tika veikti Fizikālās-enerģētikas institūta laboratorijā. Eksperiments apstiprināja piedāvāto matemātisko modeļu izmantošanas pamatotību plašas klases ģeneratoru ar pastāvīgo magnētu ierosmi pilnveidošanai.

Zinātniskā novitāte

Darba zinātniskā novitāte ir tāda:

- Pamatojoties uz magnētiskā lauka aprēķinu, tika iegūta un apstiprināta optimālā polu pārklājuma koeficienta noteikšanas analītiskā izteiksme

$$\alpha_{\delta} = 1 - \frac{\sqrt{h_m \delta}}{\tau},$$

kura dod iespēju, zinot pastāvīga magnēta augstumu h_m , gaisa spraugas lielumu δ un polu iedaļu τ , noteikt ģenerators ar ierosmi no radiāli magnetizētiem prizmatiskiem pastāvīgiem magnētiem maksimālo īpatnējo jaudu;

Kā izriet no magnētiskā lauka aprēķiniem, polu pārklājuma koeficienta vērtībai jābūt starp 0,8 un 0,95 salīdzinājumā ar tradicionāli pieņemto: 0,65 - 0,7.

- atrasta sinhrona ģenerators ar zobu spolēm optimālā attiecība starp polu skaitu p un statora zobu skaitu z_s : $p = \frac{z_s}{2} + k$, kur k – minimālais vesels skaitlis, kas nodrošina trīsfāžu simetriska enkura tinuma izveidošanu sinhronā mašīnā;

- polu pāru skaitu optimizācijas realizēšana sinhronā ģeneratorā ar pastāvīgo magnētu ierosmi gredzenveida izpildījumā;

- ir piedāvāts izgatavot induktorgeneratoru ar paaugstinātu polu pāru skaitu, bet ar samazinātu vienas polaritātes magnētu skaitu, kas novietoti starp rotora zobiem, kuri tādējādi iegūst pretējo magnetizēšanas polaritāti attiecībā pret magnētiem. Tas atvieglo magnētu stiprināšanu un ievērojami samazina ģenerators izgatavošanas izmaksas;

- ir piedāvāts paņēmieni ģenerators efektivitātes paaugstināšanai, ko var realizēt ar vējģenerators enkura tinuma pārslēgšanu no „zvaigznes” uz „trīsstūri”, ja vēja ātrums lielāks par aprēķina vēja ātrumu.

- ir iegūti divi patenti, kuri apstiprina izstrādāto risinājumu novitāti.

Teorētiskā un praktiskā nozīme

Teorētiskā nozīme:

- Tika iegūta optimālā polu pārklājuma koeficienta noteikšanas analītiskā izteiksme

$$\alpha_{\delta} = 1 - \frac{\sqrt{h_m \delta}}{\tau},$$

kura dod iespēju, zinot pastāvīga magnēta augstumu h_m , gaisa spraugas lielumu δ un polu iedaļu τ , noteikt ģenerators ar ierosmi no radiāli magnetizētiem prizmatiskiem pastāvīgiem magnētiem maksimālo īpatnējo jaudu;

Kā izriet no magnētiskā lauka aprēķiniem, polu pārklājuma koeficienta vērtībai jābūt starp 0,8 un 0,95 salīdzinājumā ar tradicionāli pieņemto: 0,65 - 0,7.

- atrasta optimāla attiecība starp polu skaitu un statora zobu skaitu: $p = \frac{z_s}{2} + k$, kur k – minimālais

vesels skaitlis, kas nodrošina trīsfāžu simetriska enkura tinuma izveidošanu sinhronā mašīnā;

- ir izveidots sinhronas mašīnas ar pastāvīgiem magnētiem matemātiskais modelis, orientēts uz daudzpolu vējģenerators gredzenveida izpildījumā parametru optimizāciju.

Praktiskā nozīme:

- ir piedāvāts izgatavot induktorgeneratoru ar samazinātu vienas polaritātes magnētu skaitu, kas novietoti starp rotora zobiem, kuri tādējādi iegūst pretējo magnetizēšanas polaritāti attiecībā pret magnētiem. Tas atvieglo magnētu stiprināšanu un ievērojami samazina ģenerators izgatavošanas izmaksas;

- ir piedāvāts vēja iekārtas uzstādītās jaudas izmantošanas koeficienta paaugstināšanai izveidot vējģeneratora enkura tinumu ar pārslēgšanas iespēju no „zvaigznes” uz „trīsstūri”, tad līdz aprēķinu vēja ātrumam enkura tinums ieslēgts „zvaigznē” un, kad aprēķinu vēja ātrums ir pārsniegts, realizējas automātiska tinuma pārslēgšana uz „trīsstūri”.

Darba aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti tika ziņoti starptautiskajās konferencēs:

- J. Daškova-Golovkina, N. Levins, V. Pugačevs Electrical generators of modern WPP. RTU zinātniskie raksti Enerģētika un elektrotehnika, sērija 4, sējums 15, 27.–32. lpp. 2005. g. (RTU 46. starptautiskā zinātniskā konference);

- J. Daškova-Golovkina, N. Levins, V. Pugačevs Обзор конструктивных схем электрических генераторов в современных ВЭУ. Научно прикладный журнал Технична электродинамика, 3 часть, 73 стр. IX International Conference “Problems of Present-day electrotechnics-2006”, 5.-9. jūnijā 2006.g., Kijeva, Ukraina;

- J. Dashkova-Golovkina, J. Dirba, N. Levin, V.Pugachov Synchronous generators in without gear installations. RTU zinātniskie raksti, Enerģētika un Elektrotehnika, sērija 4, sējums 18, 19.-25. lpp. (RTU 47. starptautiskā zinātniskā konference);

- J. Dashkova-Golovkina, N. Levin, V. Pugachov Multipole Synchronous Generators with Permanent Magnets and tooth windings for low-power WPP in CD format , topic 3(CT3), tekst 3.04. 2007 5th International Conference CPE 2007 „Compatibility in Power Electronics”, May 29-June 1, Gdansk, Poland;

- J. Daškova-Golovkina, J. Dirba, N. Levins, V. Pugačevs Tooth Zone Analysis in Multipole Synchronous Generators with Permanent Magnets. RTU zinātniskie raksti, Enerģētika un Elektrotehnika, sērija 4, sējums 20, 96.-102. lpp. (RTU 48. starptautiskā zinātniskā konference).

- J. Dashkova-Golovkina, N. Levin, V. Pugachov Geometrical parameters of tooth zone in multipole synchronous generators with permanent magnets NdFeB, Научно прикладный журнал Технична электродинамика, 5 часть, 23-26 стр. X International Conference “Problems of Present-day electrotechnics-2008”, 3-5 jūnijā 2008.g., Kijeva, Ukraina.

Izgdrojumi:

1. Dirba. J., Daškova J., Ketners K., Levins N., Pugačevs V., Serebrjakovs A. Iduktorgenerators ar pastāvīgā magnēta ierosmi. LV Patents Nr. 13822B. 20.01.2009.

2. Dirba. J., Daškova-Golovkina J., Ketners K., Levins N., Pugačevs V. Sinhronās mašīnas rotors ar pastāvīgajiem magnētiem. LV Patents Nr. 13924B. 20.08.2009.

Darba struktūra

Ievads

1. NODAĻA. Autonomo VEI vējģeneratoru efektivitātes paaugstināšana, balstoties uz elektriskās mašīnas racionālās ierosmes shēmas izvēli un tās magnētiskā lauka izpēti

- 1.1. Efektivitātes pamatkritēriji pie vēja enerģijas iekārtas ģeneratoru izvēles
- 1.2. Vēja ģeneratoru ar pastāvīgo magnētu ierosmi priekšrocības un trūkumi
- 1.3. Magnētiskā lauka pētīšana ģeneratoros ar pastāvīgo magnētu ierosmi – ceļš to efektivitātes paaugstināšanai
- 1.4. Secinājumi

2. NODAĻA. Daudzpolu sinhrona vējģeneratora ar pastāvīgo magnētu ierosmi magnētiskās sistēmas optimālie ģeometriskie parametri

- 2.1. Daudzpolu sinhronu ģeneratoru ar pastāvīgiem magnētiem konstrukciju salīdzinošā analīze
- 2.2. Par daudzpolu ģeneratoru ar pastāvīgo magnētu ierosmi gredzenveida konstrukcijas izmantošanas lietderīgumu
- 2.3. Magnētiskais lauks un statora zobu un polu skaita optimālā attiecība
- 2.4. Rotoru un statora jūga parametru optimizācija pie dotas zobu zonas ģeometrijas
- 2.5. Polu pārklājuma koeficienta analītiska izteiksme
- 2.6. Secinājumi

3. NODAĻA. Vējģeneratora ar pastāvīgiem magnētiem efektivitātes paaugstināšana, balstoties uz gredzenveida izpildījumu un polu skaitu un enkura tinuma shēmu optimizēšanu

- 3.1. Vējģeneratora pamatparametri un elektriskās mašīnas masas un gabarītu atkarība no tiem
- 3.2. Mērķfunkcija magnētelektriska ģeneratora optimālo ģeometrisko parametru noteikšanai
- 3.3. Enkura tinuma likšanas un rievu konfigurācijas optimālās shēmas izvēle un pamatojums
- 3.4. Zobu spoles savienojuma shēmas izvēle trīsfāžu enkura tinumā
- 3.5. Secinājumi

4. NODAĻA. Sinhrono ģeneratoru ar pastāvīgo magnētu ierosmi eksperimentālie pētījumi un to pilnveidošanas perspektīvas

- 4.1. Eksperimentālo pētījumu programma
- 4.2. Universāls stands elektrisko mašīnu pētīšanai
- 4.3. Vējģeneratora ar pastāvīgo magnētu ierosmi eksperimentālais modelis
- 4.4. Ģeneratora parametru mērīšana un iegūto rezultātu salīdzināšana ar aprēķinātiem
- 4.5. Daudzpolu vējģeneratora ar pastāvīgo magnētu ierosmi eksperimentālā modeļa raksturliķnes
- 4.6. Ieteikumi daudzpolu ģeneratoru efektivitātes paaugstināšanai
- 4.7. Ģeneratoru ar pastāvīgiem magnētiem pilnveidošanas perspektīvas autonomām VEI
- 4.8. Magnētu stiprinājuma rotorā drošuma paaugstināšanas ierosinājumi
- 4.9. Secinājumi

DARBA SATURS

Anotācija

Darbā dota kopējā virzība un tā aktualitāte. Ir izklāstīti pētījuma galvenie rezultāti. Ir raksturots darba apjoms.

Ievads

Vietējo energoresursu trūkums Latvijā rada priekšnoteikumus atkarībai no elektroenerģijas importētājiem. Tāpēc, lai mazinātu šo atkarību, nepieciešams pastāvīgi kāpināt elektroenerģijas ražošanas jaudas, kas, savukārt, veicina kaitīgo izmešu pieaugumu un siltumnīcas efekta pastiprināšanos.

Viens no elektroenerģijas importa samazināšanas ceļiem varētu būt ekoloģiski tīru enerģijas avotu izmantošana, tai skaitā arī vēja.

Vēja enerģijas izmantošanas problēma mūsdienās ir kļuvusi ļoti aktuāla. Lētas enerģijas laikmets ir beidzies un netradicionālo enerģētikas avotu izmantošana kļūs arvien ekonomiski izdevīgāka. Sevišķi tas attiecas uz patērētājiem attālākos lauku rajonos, no kuriem Latvija daudzējādā ziņā sastāv.

Sekmīgs uzdevuma risinājums būs iespējams tikai, ja tiks izveidotas augstākas efektivitātes VEI, it sevišķi autonomās VEI. Ir nepieciešams tās konstruktīvi pilnveidot, palielinot elektroenerģijas izstrādi pie maziem vēja ātrumiem.

Vispilnīgāk tādiem ekspluatācijas noteikumiem atbilst vējiekārtas ar tiešas piedziņas ģeneratoriem ar pastāvīgo magnētu ierosmi. Pasaules praksē jau plaši izmanto tiešas piedziņas ģeneratorus ar pastāvīgo magnētu ierosmi, bet netiek doti to konstrukcijas optimālie parametri.

Latvijas zinātnieki veikuši būtisku ieguldījumu vēja enerģētikas attīstībā un VEI elementu konstrukciju pilnveidošanā. Tomēr vēl ir daudz problēmu un uzdevumu, kas gaida savus risinājumus, lai Latvijā ātrāk attīstītos vēja enerģētika.

Pēdējos gados Latvijā tika iesniegti un sekmīgi aizstāvēti daži promocijas darbi, kas ir veltīti autonomo VEI efektivitātes paaugstināšanai, kā drošuma paaugstināšanas jomā, tā arī masas pazemināšanai un vēja iekārtas uzstādītās jaudas koeficienta paaugstināšanai. Tas tika veikts, pilnveidojot vējģeneratorus un uzlabojot VEI orientāciju uz vēju.

Līdztekus tam, izrādījās, ka ir nepietiekoši izpētīts jautājums par pastāvīgo magnētu efektīvu izmantošanu ģeneratoru ierosmei. Pastāvīgo magnētu pielietošana palielina īpatnējo jaudu, bet tajā pašā laikā nav dotas rekomendācijas par to racionālo lietošanu. Minētais ir īpaši svarīgs sakarā ar tādu magnētu paaugstinātām izmaksām un to ietekmi uz apkārtējo automātikas elementu darbu.

Ņemot vērā minēto, dotais darbs ir veltīts ģeneratoru ar pastāvīgiem magnētiem efektivitātes paaugstināšanai, izmantojot tos autonomās vēja iekārtās.

Šajā sakarā tika uzstādīts mērķis un formulēti pētīšanas uzdevumi, kas ir piedāvāti nodaļā „Darba vispārējais raksturojums”.

1. Autonomo VEI vējģeneratoru efektivitātes paaugstināšana, balstoties uz elektriskās mašīnas racionālās ierosmes shēmas izvēli un tās magnētiskā lauka izpēti

Lai iegūtu lielāku vējģeneratora efektivitāti, nepieciešams ņemt vērā noteiktus kritērijus, pēc kuriem spriežot, varētu novērtēt ne tikai efektivitāti, bet arī ietekmēt tās palielināšanu jebkurā agrāk minētā posmā. Analizēsim šos kritērijus.

Pirmkārt, ģeneratora konstrukcijai un ražošanas tehnoloģijai ir jābūt vienkāršai, lai pēc iespējas ar mazākiem izdevumiem varētu izveidot ģeneratorus un tos apkalpot ekspluatācijā.

Otrkārt, ģeneratoram jābūt drošam ekspluatācijā, jāatbilst apkārtējās vides aizsardzības noteikumiem.

Treškārt, ģeneratoram jābūt aprēķinātam mazai rotācijas frekvencei, lai to varētu savienot tieši ar vējturbīnu bez multiplikatora izmantošanas.

Ceturtkārt, ģeneratoram jābūt minimālam tinumu skaitam, kuru pieru daļas nekrustotos. Tas paaugstina drošumu un remontējamību.

Piektkārt, ģeneratoram jābūt ar minimālu skaņas līmeni un elektromagnētisko starojumu, kas iedarbojas uz apkārtējo vidi. Tas nodrošina minimāli negatīvo ietekmi uz ekoloģiju.

Sestkārt, ģeneratoram jābūt remontējamam, turklāt remonta tēriņiem nevajadzētu būt augstiem un pats remonts vai tehniskā apkalpošana neaizņemtu daudz laika to izpildei.

Septīnkārt, ģeneratora izgatavošanas izmaksas mazas, kas nosaka ātru VEI atmaksāšanos.

Astoņkārt, ģeneratora īpašību saglabāšana, t.i. ģeneratoram jā saglabā savi enerģētiskie rādītāji un drošums visā paredzētajā darbības laikā.

Sinhronie ģeneratori ar pastāvīgo magnētu ierosmi, radot ierosmes magnētiskās plūsmas, neizlieto enerģiju, tāpēc tie var būt ne tikai bez sukām un gredzeniem, t.i., bezkontakta (tie ir droši), bet papildus arī daudzpolu, tieši savienoti ar vēja turbīnu. Tātad var secināt, ka sinhronie ģeneratori ar pastāvīgo magnētu ierosmi pēc visiem kritērijiem ir visvairāk piemēroti izmantošanai autonomajās vēja stacijās.

Šo ģeneratoru priekšrocības ir sekojošas. Samazinās elektriskās mašīnas gabarīti un masa, tā kā ierosmes tinumu aizstājošajiem pastāvīgajiem magnētiem piemīt mazāka masa un tilpums. Parādās iespēja izgatavot daudzpolu elektrisko mašīnu, samazinot tās gabarītus un masu. Paaugstinās lietderības koeficients, tā kā atkrīt nepieciešamība tērēt enerģiju magnētiskas plūsmas ierosmes radīšanai, kura sastāda līdz 10% no nominālās jaudas. Tiek paaugstināts drošums, jo tiek izslēgts ierosmes tinums, kuram, salīdzinot ar magnētu, ar laiku bojātās un novecotās izolācijas dēļ, samazinās drošums. Netiek arī izmantota suku-kontaktu pāreja, kurai VEI smagos ekspluatācijas apstākļos piemīt zems drošums. Samazinās ekspluatācijas izdevumi, saistīti ar suku-kontaktu pārejas apkalpošanu un periodisku suku vai kontaktgredzenu nomaiņu pēc to izdilšanas. Ātrāka nominālā darba režīma sasniegšana, kas parasti ievēlka pārejas procesu dēļ ar paaugstinātu enkura tinuma laika konstanti. Ir atmagnetizējošas enkura reakcijas darbības būtiski mazāka izpausme, tas nozīmē, ka tiek nodrošināta augstāka stabilitāte ģeneratora darbībā.

Trūkumi, saistīti ar pastāvīgo magnētu lietošanu:

- lielākas izmaksas salīdzinājumā ar poliem un ierosmes tinumu;
- kritiskums pret temperatūras un mehāniskām pārslodzēm (sitieniem, vibrācijām, pārkāršanām);
- stiprināšanas sarežģītība bez enerģētisko rādītāju ierobežošanas;
- magnētiskās plūsmas regulēšanas sarežģītība;
- paaugstināta magnētiskā lauka negatīvā iedarbība uz apkārtējiem elementiem un nepieciešamība tos aizsargāt no šīs iedarbības;
- rotora un statora „pielipšanas” parādības rašanās kustības sākumā un rotācijas mazu ātrumu gadījumā.

Elektriskās mašīnās ar pastāvīgajiem magnētiem enerģijas pārveidošanās notiek, pateicoties magnētiskajam laukam, kura enerģija koncentrēta galvenokārt gaisa spraugā un pastāvīgajos magnētos. Pārējais magnētiskais lauks kalpo tikai magnētiskā lauka sasaistīšanai ar enkura tinuma vadītājiem.

Darbā ir parādīts, ka ģeneratoros ar pastāvīgajiem magnētiem magnētiskā lauka pētīšanai var izmatot skaitlisko galīgo elementu metodi (GEM).

Pašreiz ir efektīvas magnētisko lauku aprēķina programmas ar galīgo elementu metodi. Par vienu no šādām programmām tiek uzskatīta programma „QuickField”.

Lietojot GEM magnētiskā lauka aprēķinam elektriskās mašīnas šķērsriezumā, tika paredzēti sekojoši darba etapi.

Pirmais etaps. Elektriskās mašīnas konstruktīvās komponēšanas izvēle (aptuvenš statora zobu skaits, magnētu skaits un to izvietošana, palīgelementu un materiālu izmantošanas nepieciešamība).

Otrs etaps. Konkrēta materiāla, formas un izmēru magnēta izvēle. Šis etaps ir ļoti atbildīgs, jo dzenoties pēc materiāla ar lielu īpatnējo enerģiju bieži nav ņemtas vērā to citas īpašības, tādas kā siltum- un vibroizturība, tādu vai citādu tehnoloģisko paņēmieni lietojumu iespēja. Šeit temperatūras faktors ir ļoti būtisks un, neapšaubāmi, tika ņemts vērā, izvēloties attiecīga materiāla un polu tilpuma izmaiņas, kas bija izveidotas no izvēlētā magnētiski cietā materiāla.

Nodrošinot magnētiskas sistēmas ar materiāliem, kuriem piemīt vislabākie raksturlielumi, nozīmē izveidot magnētisko sistēmu tā, lai būtu pēc iespējas mazākas izkliedes plūsmas un magnētiskās plūsmas visīsākais ceļā garums, augstāka temperatūra un objekta vibroizturība kopumā.

Termiskās ietekmes saistītas ne tikai ar magnētiem, bet arī ar enkura tinumu, kā arī ar dzesēšanas virsmas laukumu, kas nodrošina pietiekošu siltuma atdevi apkārtējai videi. No šī viedokļa atsevišķos gadījumos tinumu lietderīgi izveidot no vairākām spolēm, kas savukārt ietekmē konstrukciju, kā arī magnētvara formu un ģeometriskos izmērus.

Ļoti būtisks faktors, kas ietekmē magnētiskās sistēmas izvēli, ir izgatavošanas tehnoloģija. Lietderīgi izmantot tādas progresīvās tehnoloģijas, kuras ļautu maksimāli mehanizēt un automatizēt izgatavošanas procesu, piemēram, štancēšanu (magnētisko serdi saliek no elektrotehniskā tērauda loksniem), kura ļauj bez īpašām grūtībām izveidot jebkuras formas magnētvaru. Savukārt magnētvara un to elementu izgatavošana no metālkeramikas ir progresīvāka tehnoloģija, jo nodrošina ražošanu bez atkritumiem.

Izvēloties magnētisko sistēmu jācenšas, lai tās izmēri un masa būtu pēc iespējas mazāka, jo tad arī samazināsies materiālu daudzumi un to izmaksas.

Trešajā etapā, kad tika izvēlēti magnētiski mīkstie un magnētiski cietie materiāli, to forma un kopējā orientācija, tika izveidota magnētiskās ķēdes precīza skice ar norādītiem izmēriem un ievērojot to iespējamās izmaiņas (kas ir nepieciešams, lai ātri izšķirotu magnētiskā lauka raksturlielumu dažādus izmaiņu variantus un izvēlētos optimālo risinājumu). Turklāt īpaša uzmanība bija veltīta pastāvīgo magnētu parametru uzdošanai.

Ceturtajā etapā tika ievadīti robežnosacījumi. Robežnosacījumi bija uzdoti pēc dotā modeļa iekšējām un ārējām robežām. Robeža pa ārējo perimetru ir robeža starp ferimagnētisko vidi un gaisu, kad gaisam aptuveni var pieņemt, ka $\mu=0$. Tāds tuvinājums ļauj noteikt robežas aprēķinu apgabalu, kas sakrīt ar elektriskās mašīnas statora ārējo virsmu. Fiziski šis tuvinājums nozīmē, ka magnētiskais lauks koncentrējas pašā mašīnā un neiziet ārpus tās robežas. T.i., uz statora ārējās virsmas magnētiskās indukcijas normāles komponents $B_n=0$ (magnētiskā spēka līnijas iet gar robežām). Uz šīs robežas $\frac{\partial A}{\partial \tau} = 0$ vai vektoru magnētisks potenciāls $A=const$.

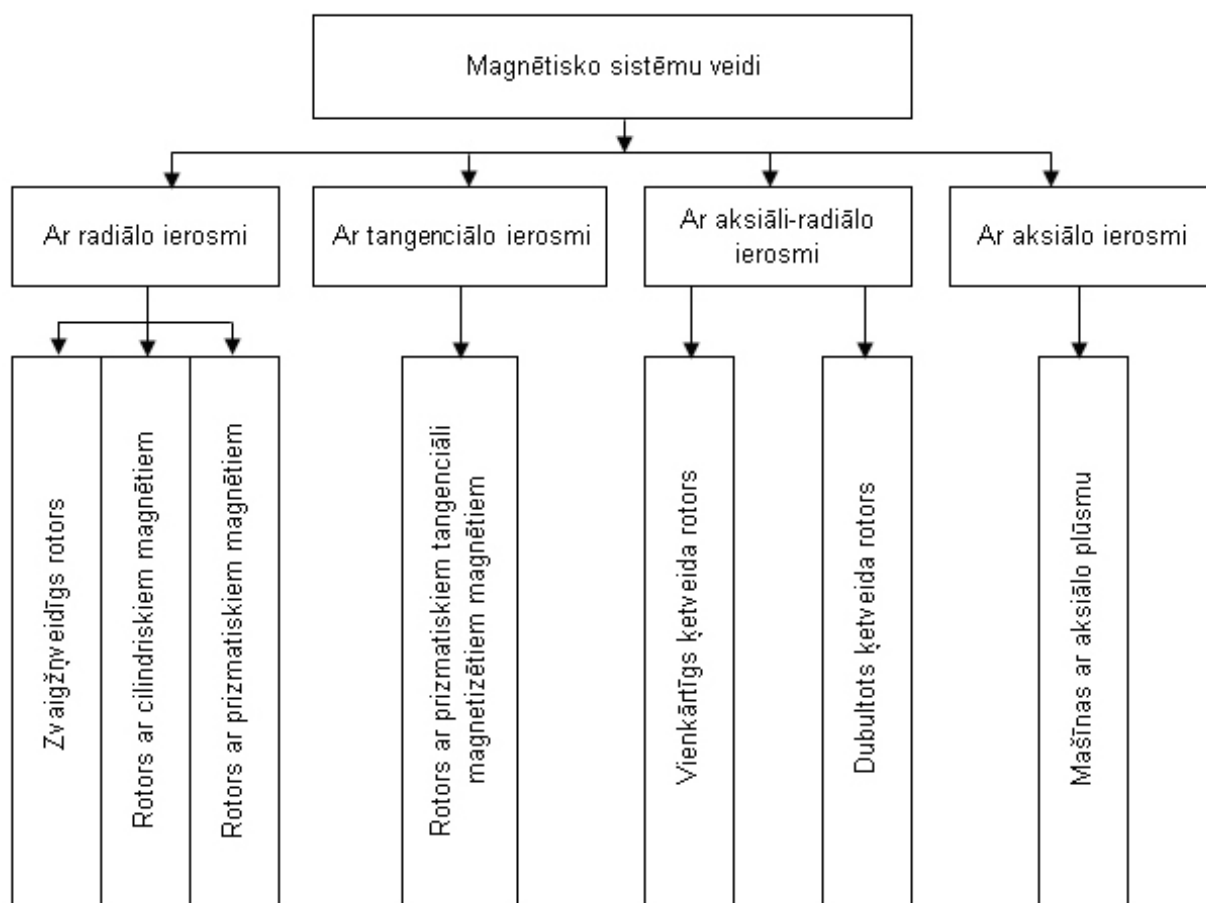
Piektajā etapā, pēc pamatizmēru un materiālu īpašību datu uzdošanas tiek noteikti magnētiskā lauka parametri un īstenota iegūto rezultātu analīze ar mērķi, lai pamatotu iespējamās magnētiskās ķēdes izmaiņas tālākajos aprēķinos.

Sestajā etapā tika veikta visu iegūto rezultātu galīgā analīze, tika konstruēti grafiki, diagrammas un tika izdarīts gala secinājums par pētāmā objekta optimālo parametru vērtībām.

2. Daudzpolu sinhrona vājģenerators ar pastāvīgo magnētu ierosmi magnētiskās sistēmas optimālie ģeometriskie parametri

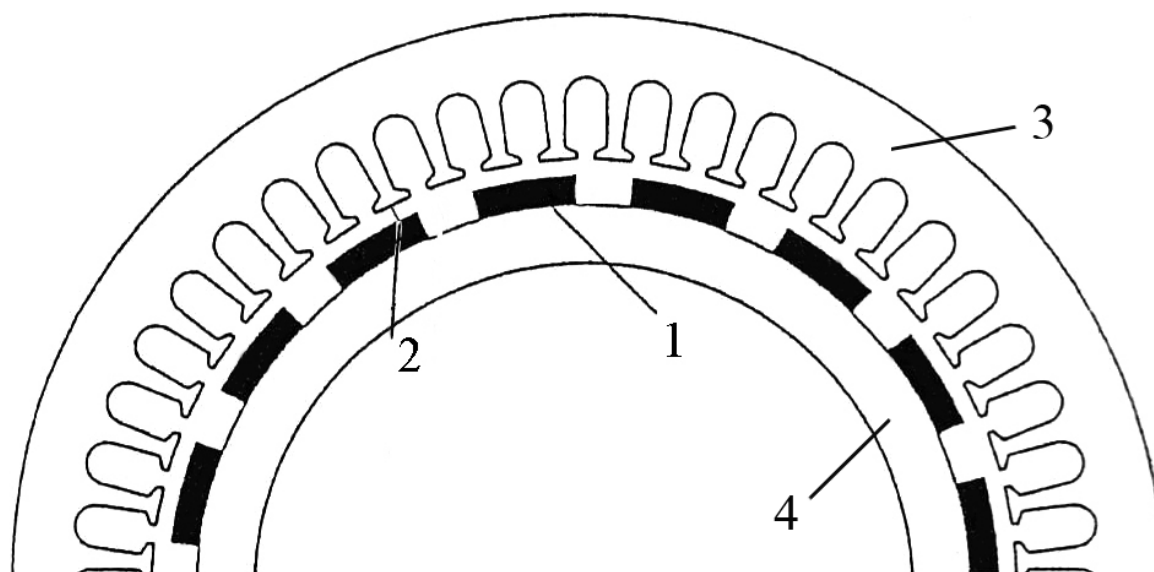
Darbā tika analizēti ģenerators konstrukcijas ar dažādām magnētiskām sistēmām, un proti: ar radiālo ierosmi, ar tangenciāli-radiālo ierosmi, ar aksiāli-radiālo ierosmi un ar aksiālo ierosmi.

1. att. ir parādīta magnētisko sistēmu un rotoru ar pastāvīgiem magnētiem šajās sistēmās konstruktīvo veidu klasifikācija.



1. att. Magnētisko sistēmu un rotoru ar pastāvīgiem magnētiem klasifikācija

No parādītām 1. att. dažādām ģeneratoru konstrukcijām, pēc to labo īpašību un trūkumu analīzes, priekšrocība bija dota ģeneratoram ar prizmatiskiem radiāli magnetizētiem magnētiem. Šim ģeneratoram (2. att.) piemīt augsta magnētu izmantošanas pakāpe, tas ir daudzpolu un, kā tas ir parādīts tabulā 1., vislabāk der izmantošanai autonomās VEI.



2. att. Ģeneratora konstrukcija ar prizmatiskiem radiāli magnetizētiem magnētiem:
1 – magnēts, 2 – gaisa sprauga; 3 – stators ar rievām; 4 – rotora jūgs

Dažādu rotoru konstrukcijas pozitīvas īpašības ar pastāvīgo magnētu ierosmi

№ p. k.	Pozitīvas īpašības	Rotoru konstrukcijas						
		Zvaigžņ- veidīgs	Prizma- tisks (radiāls)	Prizma- tisks (tangen- ciāls)	Cilin- drisks	Vienkār- tīgs ķetnveida	Dubul- tots ķet- veida	Aksi- āls
1.	Konstrukcijas vienkāršība un tās tehnoloģiskums	•	•	•	•			
2.	Efektīvas magnētu magnetizēšanas iespējamība		•	•		•	•	•
3.	Trūkums (mazi) zudumi rotorā pārmagnetizēšanas laikā		•	•				
4.	Magnēti aizsargāti no atmagnetizēšanas		•	•		•	•	•
5.	Augstkoercitīvo magnētu (Nd-Fe-B) pielietošanas iespējamība		•	•				•
6.	Daudzpolainība		•	•				•
7.	Drošs stiprinājums rotorā		•	•	•	•	•	
8.	Ir iespējami lieli lineārie ātrumi		•	•	•			
9.	Maza magnētiskā izkliedes plūsma		•		•			
10.	Liela magnētu mehāniskā izturība		•	•	•	•	•	•
11.	Lielas magnētiskas indukcijas gaisa spraugā		•	•				
12.	Liels tilpuma izmantošanas koeficients		•	•	•			

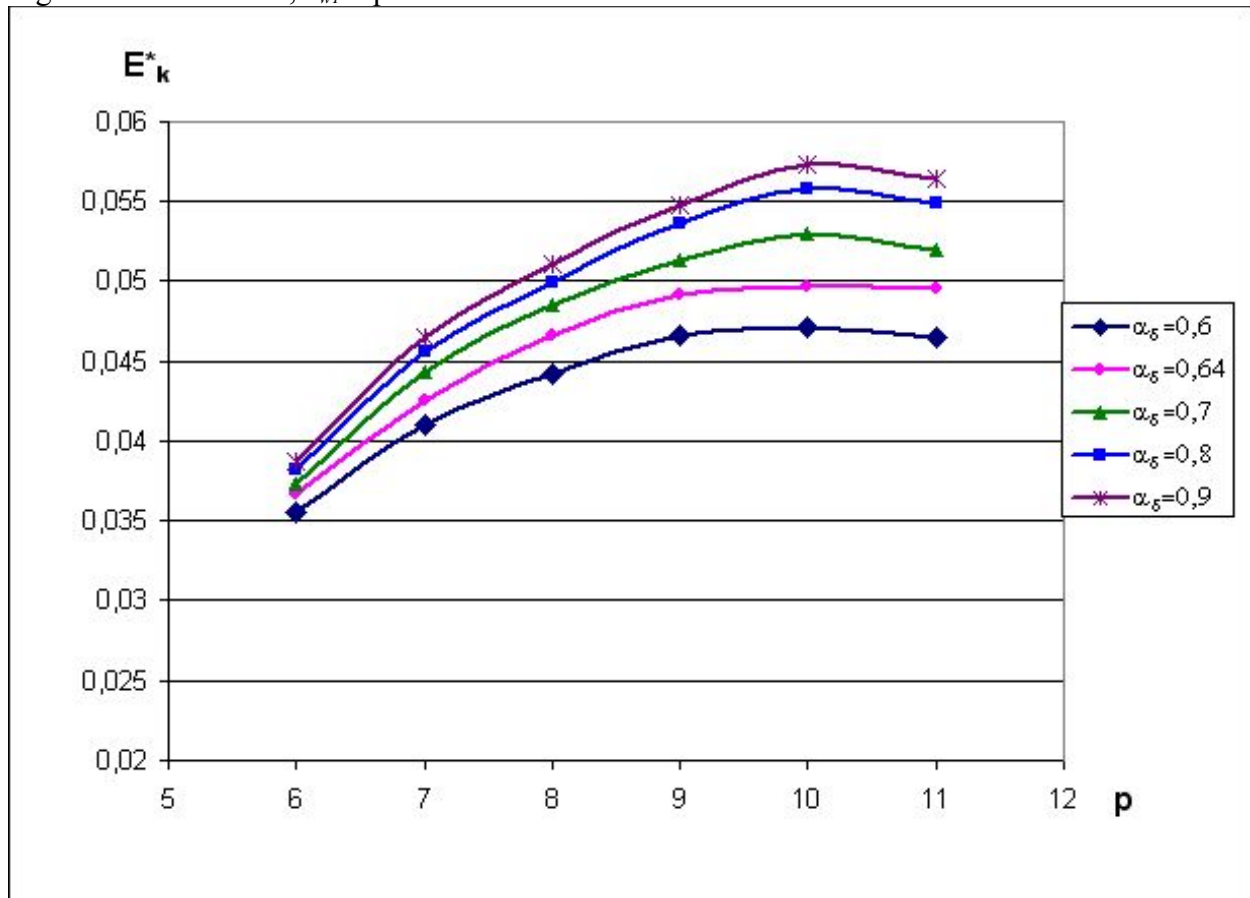
Tālāk tika veikta daudzpolu sinhrona vējģenerators ar prizmatiskiem magnētiem, kuriem ir radiāla magnetizēšana, konstrukcijas analīze un meklēti optimālie risinājumi. Šai konstrukcijai ir mazas izkliedes plūsmas (salīdzinājumā ar tangenciāli magnetizētiem magnētiem). Tā ir ļoti svarīga īpašība ģenerators augstas efektivitātes nodrošināšanai.

Tika parādīts, ka tiešas piedziņas vējģenerators efektivitātes paaugstināšanai, elektriskās mašīnas polu skaita palielināšanu ir lietderīgi veikt, vienlaicīgi palielinot tās statora izvirpošanas diametru un samazinot tās rotora paketes garumu (gredzenveida konstruktīvs komponējums).

3. att. ir piedāvāti relatīvie EDS enkura tinuma spolē, to atkarība no polu pāru skaita p un polu pārklājuma a_δ , pie $z_s=18$. No šo atkarību analīzes ir redzams, ka ģeneratoros ar $z_s=18$ un $p=6$ ir minimālais EDS. Ar pastāvīgo magnētu skaitu pieaugumu EDS būtiski palielinās un sasniedz

maksimumu pie $p=10$. Pastāvīgo magnētu skaitu turpmākais pieaugums uz rotora noved pie EDS samazināšanās enkura tinuma spolēs. Polu pārklājuma palielinājums arī noved pie EDS pieauguma

$E_k^* = \frac{E_k}{c}$, kur $c = 4,44w_k \frac{n}{60} k_w$ – konstante, kurā w_k – vijumu skaits enkura tinuma spolē, n – griešanās frekvence, k_{wl} – pirmās harmonikas tinuma koeficients.



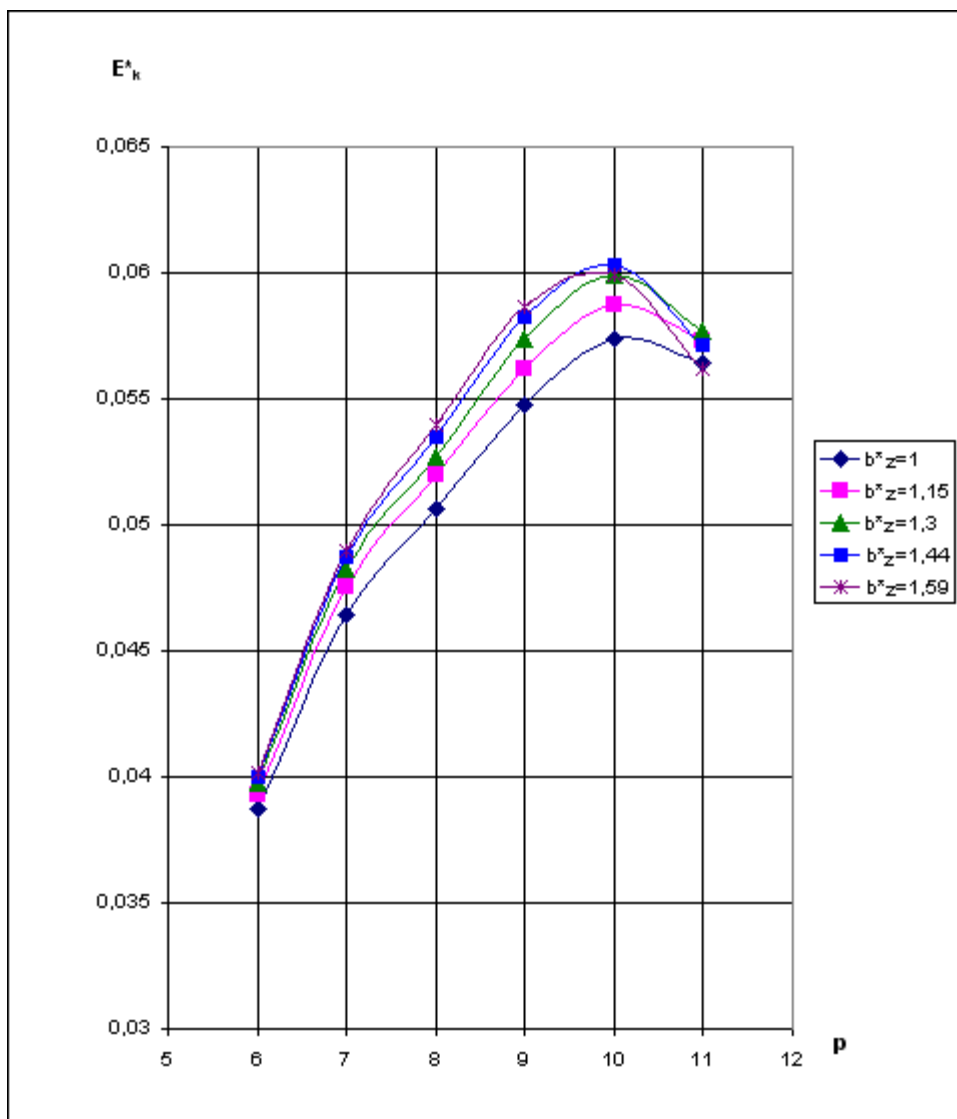
2. att. Spoles relatīvā EDS atkarība no polu pāru skaita p un polu pārklājuma $\alpha_\delta = 0,6; 0,64; 0,7; 0,8; 0,9$ pie $z_s=18$

Tādējādi, pamatojoties uz magnētiska lauka mašīnas šķērsgriezumā analīzi, noteiktas optimālās sakarības starp pastāvīgo magnētu skaitu un zobu ar spolēm statorā skaitu

$$p = \frac{18}{2} + 1 = 10, \text{ t.i. } p = \frac{z_s}{2} + k, \quad (1)$$

kur k – minimālais vesels skaitlis, kurš nodrošina simetrisko (z_s ir $2m$ kārtis) trīsfāžu enkura tinuma formējumu, kad EDS ir maksimāls. Tika noteikts, ka iegūtā attiecība nav atkarīga no elektriskās mašīnas statora zobu skaita.

Dotajā gadījumā un turpmākajos pētījumos par pētāmo ģeneratoru tika ņemts VEI elektriskais ģenerators, kurš bija izstrādāts „Rīgas elektromašīnbūves rūpnīcā” (AS „RER”). Statora (enkura) zoba platums bāzes modelī ir vienāds ar 27 mm. Tika nolemts palielināt statora zoba uzgali par 5 iedaļām ar soli 4 mm. T.i., ja $b_{z1}=27$ mm, tad $b_{z2}=31$ mm; $b_{z3}=35$ mm; $b_{z4}=39$ mm; $b_{z5}=43$ mm un $b_{z6}=47$ mm.



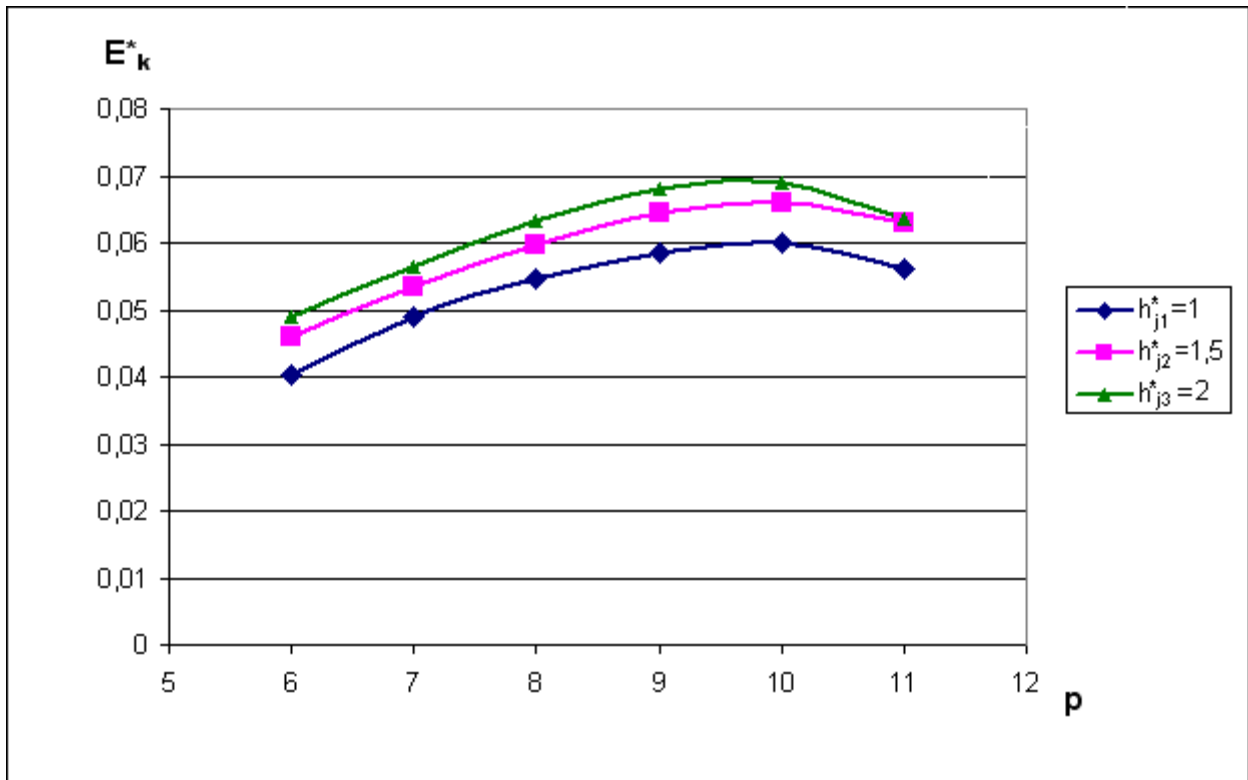
4. att. Atkarības $E_k^* = f(p; b_z^*)$; $\alpha_\delta = 0,9$; $h_{j1}^* = 1$, kur b_z^* un h_j^* ņemti relatīvās vienībās

No 4. att. izriet, ka ar statora zobu platuma palielinājumu E_k^* pieaugums ir minimāls pie $p=6$ un $p=11$ un maksimāls pie $p=10$. Optimālā vērtība ir $p=10$, $b_{z^*}^* = 1,44$. Magnēta platuma attiecība pret statora zobu platumu $b_m/b_z = 41/39 = 1,05$.

Salīdzinošas atkarības trijām statora jūga vērtībām ir parādītas 5. att.

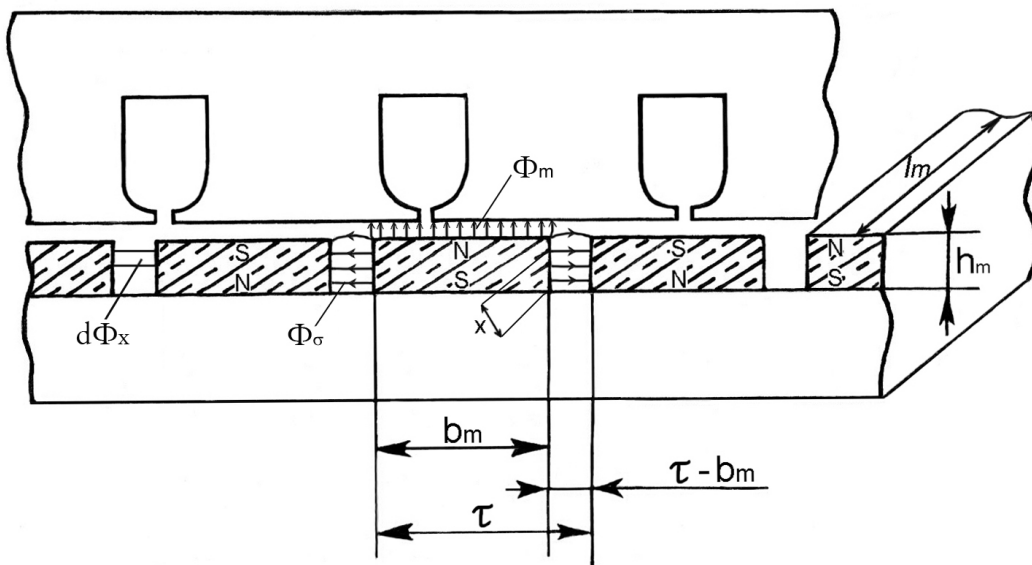
Ar polu pāru pieaugumu EDS sasniedz maksimālo vērtību pie $p=10$. Ar statora jūga relatīvā augstuma palielināšanu no $h_{j1}^* = 1$ līdz $h_{j2}^* = 1,5$ S EDS pieaugums sastāda 11%, bet ar $h_{j3}^* = 2$ – papildus vēl 6%. Jūga augstuma un zoba platuma optimālās vērtības pie $p=10$ ir $h_{j3}^* = 2$, $b_{z^*}^* = 1,44$.

Šeit ir redzams, ka jūga augstuma palielināšana 1,5 reizes, t.i. līdz vērtībai ne vairāk par $\frac{\tau}{4} \alpha_\delta$, pilnīgi pietiekoši, lai iegūtu attaisnotu EDS pieaugumu un tātad arī īpatnējo jaudu.



5.att. Atkarības $E_k^* = f(p; h_j^*)$; $\alpha_\delta = 0,9$; $b_z^* = 1,44$, kur b_z^* un h_j^* ņemti relatīvās vienības

Tradicionāli tika pieņemts, ka, lai nodrošinātu inducēto EDS sinusoidālas līknes veidā un pieļaujamā līmeņa izkliedi, polu pārklājums ir $\alpha_\delta = \frac{b_m}{\tau} = 0,65 \div 0,7$. Taču ar pusvadītāju tehnikas pilnveidošanos, kad ik uz soļa izstrādātā maiņstrāvas enerģija tika iztaisnota un invertēta, kā arī samazinājās magnētu augstums un pazeminājās izkliede, kļuva neizdevīgi iegūt pazeminātu pola loka lielumu, t.i. neizmantotu magnētu zonas tilpumu. Tiešām, ja palielina pola loku b_m , tad jā sagaida derīgās magnētiskā plūsmas palielināšanos, kas saķēdēta ar statora tinumu. Taču, ja pārmērīgi palielina polu pārklājumu α_δ , tas attālumu starp magnētiem samazina, kas palielina izklijes plūsmu, kas tiek atskaitīta no aprēķinātās derīgās pola (magnēta) plūsmas (6. att.).



6. att. Optimālas vērtības $\alpha_\delta = \frac{b_m}{\tau}$ noteikšanas ilustrācija

Pamatojoties uz vienādojuma (2) risinājumu

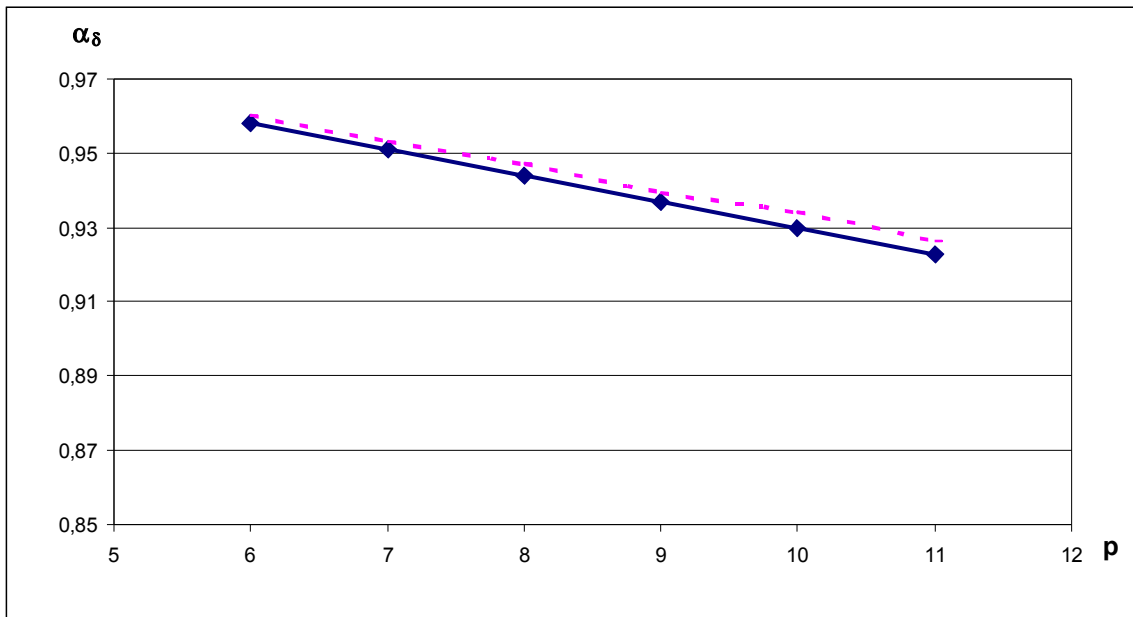
$$\Phi = \Phi_m - \Phi_\sigma = B_\delta b_m l_m - \int_0^{h_m} \frac{2F_m l_m \mu_0 x}{h_m (\tau - b_m)} dx = \frac{F_m l_m h_m}{(\tau - b_m)} \mu_0, \quad (2)$$

kur F_m – patvaļīgi izvēlēta magnēta MDS aprēķins;

x – apskatāmās elementārās magnētiskās izkliedes plūsmas $d\Phi_x$ caurules koordināte, tika iegūta polu pārklājuma koeficienta analītiskā izteiksme

$$\alpha_\delta = 1 - \frac{\sqrt{h_m \delta}}{\tau} = 1 - \frac{2p\sqrt{h_m \delta}}{\pi D}, \quad (3)$$

kuras izvešanas laikā nav ņemtas vērā gala izkliedes plūsmas tāpēc, ka tās ir mazas salīdzinājumā ar izkliedes plūsmām starp dažādas polaritātes poliem.



7. att. Polu pārklājuma koeficienta atkarība no polu pāru skaita:

— — — — — iegūta aprēķinot magnētiska lauku ar GEM, - - - - - iegūta, pamatojoties uz analītisko formulu
Izteiksme (3) tika apstiprināta, pamatojoties uz magnētiskā lauka aprēķinu ar galīgo elementu metodi (GEM) (7. att.). Tās nozīme ir tā, ka tā ļauj noteikt elektriskās mašīnas optimizējamās konstrukcijas ģeometrisko parametru savstarpējās sakarības, līdz ar to samazinot analizējamo variantu daudzumu.

Pieļausim, ka ir izvēlēti 10 noteicoši parametri, kuri var būt:

p – polu pāru skaits;

z_s – statora zobu skaits;

b_m – magnēta platums;

b_z – statora zoba platums;

D – statora izvirpošanas diametrs;

l – statora paketes garums;

δ – gaisa sprauga;

h_z – zoba augstums;

h_j – statora (rotora) jūga augstums;

h_m – magnēta augstums.

Tad analizējamo variantu skaits (ja katrs no tiem pieņem vismaz trīs vērtības) pieaug līdz $N=3^{10}$. Tas ir ļoti liels skaitlis.

Tāpēc apskatīsim, kādi parametri un kā ir atkarīgi viens no otra. Parasti dotie lielumi ir: jauda, rotācijas frekvence un elektromagnētiskās slodzes. Tāpēc, pagaidām ar zināmo no gredzenveida

ģeneratoru izveidošanas pieredzes, ar uzdoto attiecību $\frac{l}{D}$, var noteikt D un l . Tādējādi, ir izslēgti divi parametri l un D . Gaisa sprauga δ cieši saistīta ar mašīnas statora izvirpošanas diametru, tad tas arī tiek izslēgts, kā neatkarīgs. Magnēta augstums h_m tiek noteikts ar maksimālo iespējamo uzdoto indukciju gaisa spraugā B_δ un sprauga lielumu δ , t.i. tie arī tiek izslēgti kā neatkarīgie parametri. Optimālas konstrukcijas statora zobu skaits z_s arī cieši saistīts ar polu pāru skaitu (1), t.i. arī šis parametrs tiek izslēgts, kā neatkarīgs. Kā arī tiek izslēgts rievas un statora zoba platumš, tā kā tie optimālajā konstrukcijā aptuveni ir vienādi viens otram un cieši saistīti ar lineāru slodzi A , kura ir iepriekš uzdota, kā maksimāli iespējama pēc siltuma ierobežojumiem. Tādējādi, optimizācijai var būt pakļauti tikai polu pāru skaits p un polu pārklājuma koeficients α_δ . Turklāt statora (rotora) jūga augstums h_j „cieši” saistīts ar polu iedaļu τ . Izmantojot augstāk iegūto analītisko attiecību (3) pārveidotā veidā, ar vienkāršu polu pāru skaita izvēli, izmantojot veiksmīgi izvēlēto mērķfunkciju, var noteikt optimālo, t.i. vējģeneratora ar pastāvīgo magnētu ierosmi efektīvo konstrukciju.

3. Vējģeneratora ar pastāvīgiem magnētiem efektivitātes paaugstināšana, balstoties uz gredzenveida izpildījumu un polu skaitu un enkura tinuma shēmu optimizēšanu

Pieņemsim, ka tiešas piedziņas gredzenveida ģeneratora ar mazu rotācijas frekvenci konstrukcija ir ar mazu statora garuma l attiecību pret izvirpojuma diametru D , t.i. $l/D=0,1$, kā tas jau pieņemts pasaules praksē, ir lielums, kas sevi pilnībā attaisnojis.

Kā tas noteikts elektrisko mašīnu projektēšanas praksē gaisa spraugas lielums

$$\delta = \frac{D}{350 \div 450}. \quad (4)$$

Kas attiecas uz magnēta augstumu, tad to var noteikt ar vienādojumu

$$F_\delta = \frac{B_\delta \delta}{\mu_0} \approx 0,1 H_c h_m, \quad (5)$$

kur H_c – pastāvīgā magnēta izvēlētajā materiāla koercitīvais spēks.

Šeit pēc elektrisko mašīnu projektēšanas pieredzes lielumam F_δ , t.i. MDS, kas nonāk gaisa spraugā, jābūt aptuveni 10 reizes mazākam par magnēta koercitīvo MDS, t.i. $F_c = H_c h_m$.

Ņemot vērā (4), pamatojoties uz (5), var iegūt

$$h_m = \frac{B_\delta \delta}{0,1 H_c \mu_0}. \quad (6)$$

Tad galīgā veidā formula (3) ir

$$\alpha_\delta = 1 - \frac{p \sqrt{\frac{h_m}{\delta}}}{\pi(175 \div 225)}, \quad (7)$$

kur, piemēram, magnētiski cietam materiālam Nd-Fe-B pie $B_r \approx 1,35$ T, $H_c \approx 850 \cdot 10^3$ A/m, $B_\delta \approx 1,1$ T

$$\frac{h_m}{\delta} = \frac{B_\delta}{0,1 H_c \mu_0} = \frac{1,1}{0,1 \cdot 850 \cdot 10^3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 10,3. \quad (8)$$

Formulēsim mērķfunkciju kā ģenerators ar aktīviem materiāliem tilpuma attiecību pret aprēķinu jaudu un lietderības koeficientu, t.i.

$$C_g = \frac{\pi(D_1^2 - D_0^2)l}{4S\eta}.$$

(9)

Šeit D_1 – statora paketes ārējais diametrs, m;

D_0 – rotora paketes iekšējais diametrs, m;

l – statora paketes garums, m;

$S = mEI$ – m -fāzes ģenerators aprēķina jauda, VA;

η – lietderības koeficients.

Ārējo diametru pa statoru var noteikt kā

$$D_1 = D + 2h_z + 2h_j, \quad (10)$$

bet iekšējo (rotora), kā

$$D_0 \approx D - 2h_m - 2h_j, \quad (11)$$

kur h_z – zoba augstums,

h_m – magnēta augstums,

h_j – statora (rotora) jūga augstums.

Tad iegūst izteiksmi

$$h_z = \frac{2A}{j_a k_{Cu}}; \quad h_j = \frac{\tau}{2} \alpha_\delta = \frac{\pi D \alpha_\delta}{4p}, \quad (12)$$

tad augstāk norādītās diametru vērtības var noteikt

$$D_1 = D \left(1 + \frac{4A}{j_a k_{Cu} D} + \frac{\pi \alpha_\delta}{2p} \right)$$

(13)

$$D_0 = D \left(1 - \frac{2h_m}{D} - \frac{\pi \alpha_\delta}{2p} \right) \quad (14)$$

kur k_{Cu} – rievās aizpildīšanas koeficients ar varu;

j_a – strāvas blīvums enkura tinumā, $\frac{A}{m^2}$;

A – lineārā slodze, $\frac{A}{m}$.

Tad ņemot vērā (13, 14), mērķfunkcija iegūst tādu veidu

$$C_g = \frac{\pi D^2 \left[\left(1 + \frac{4A}{j_a k_{cu} D} + \frac{\pi \alpha_\delta}{2p} \right)^2 - \left(1 - \frac{2h_m}{D} - \frac{\pi \alpha_\delta}{2p} \right)^2 \right] l}{4S\eta}, \quad (15)$$

kur statora izvirpošanas diametrs tiek noteikts no zināmās izteiksmes

$$D^2 l = \frac{S}{0,18 B_\delta A n \alpha_\delta}.$$

(16)

Polu pāru skaita p un polu pārklājuma koeficienta α_δ optimizēšana tika veikta uz vējģeneratora piemēra ar aprēķina jaudu $S=10$ kVA; rotācijas frekvenci $n=150$ min⁻¹; attiecību $\lambda = \frac{l}{D} = 0,5$; ar

lineāru slodzi $A = 2 \cdot 10^4 \frac{A}{m}$; strāvas blīvumu tinumos $j_a = 5 \cdot 10^6 \frac{A}{m^2}$; magnētisko indukciju gaisa

spraugā $B_\delta=1,1$ T; rievas aizpildīšanas ar varu koeficients ar varu $k_{Cu}=0,6$.

2. tabulā sakopoti mērķfunkcijas aprēķina rezultāti četrām vērtībām ar $\lambda = 0,5$; $\lambda = 0,1$; $\lambda = 0,05$ un $\lambda = 0,15$, kā arī dažādām p vērtībām $p=10, 20, 30, 40, 50, 60$.

2. tabula

Vējģeneratora parametri atkarībā no polu pāru skaita

№ p. k.	Parametri	p=10	p=20	p=30	p=40	p=50	p=60	p=40	p=40
		$z_s=18$ $\lambda=0,53$	$z_s=36$ $\lambda=0,1$	$z_s=54$ $\lambda=0,1$	$z_s=72$ $\lambda=0,1$	$z_s=100$ $\lambda=0,1$	$z_s=120$ $\lambda=0,1$	$z_s=72$ $\lambda=0,15$	$z_s=72$ $\lambda=0,05$
1.	D^2l, m^3	0,0143	0,0146	0,0158	0,0168	0,0180	0,0192	0,0168	0,0168
2.	D, m	0,300	0,526	0,540	0,552	0,565	0,577	0,482	0,695
3.	D_1, m	0,38	0,597	0,597	0,601	0,612	0,622	0,531	0,750
4.	D_0, m	0,236	0,463	0,490	0,506	0,518	0,503	0,447	0,639
5.	δ, m	0,001	0,0013	0,0013	0,0014	0,0014	0,0015	0,001	0,0017
6.	h_m, m	0,01	0,013	0,013	0,014	0,014	0,015	0,01	0,017
7.	l, m	0,160	0,053	0,057	0,055	0,057	0,058	0,072	0,034
8.	τ	0,047	0,041	0,028	0,022	0,018	0,015	0,019	0,027
9.	α_δ	0,94	0,90	0,85	0,80	0,75	0,7	0,83	0,8
10.	$V = \frac{\pi(D_1^2 - D_0^2)l}{4}, m^3$	0,0113	0,0059	0,0049	0,0045	0,0048	0,0050	0,0046	0,0041
11.	η	0,88	0,92	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91
12.	$C_g = \frac{V}{S\eta}, \frac{m^2}{kVA}$	0,00185	0,00064	0,00053	0,00048	0,00052	0,00055	0,0005	0,00045 + δ_k
13.	G_a – aktīvo materiālu masa, kg	83	44	37	34	36	38	36	31
14.	G_k – konstruktīvo materiālu masa, kg	16	23	23	23	24	25	23	29
15.	ΣG_g – kopēja ģenerators masa, kg	99	67	60	57	60	63	59	60

No 2. tabulas izriet, ka optimālais variants, ar kuru ir nodrošināts mērķfunkcijas minimums, ir polu pāru skaits $p=40$, pie pola pārklājuma koeficienta $\alpha_\delta=0,8$. No tabulas arī seko, ka gredzenveida izpildījums praktiski divreiz samazina ģenerators masu, salīdzinājumā ar parasto konstrukciju. Tad vēl no 2. tabulas izriet, ka $\lambda=0,1$ izvēle ir optimāla, tā kā λ samazināšana un tā pieaugums ($\lambda=0,05$ un $0,15$) nesamazina ģenerators masu.

Enkura tinums sinhronā mašīnā ar pastāvīgo magnētu ierosmi ir viens no elementiem, kas visbiežāk pakļauts darbības atteicei. Šo traucējumu iemesls ir izolācijas bojājums pie tinumu tīšanas rūpnīcā, jeb ekspluatācijas procesā temperatūras iedarbības dēļ, vai mitruma un agresīvas vides iedarbības dēļ.

Šādos apstākļos dažādiem pēc izveidošanas shēmas tinumiem piemīt atšķirīgs drošums vai bojājumu biežums. Ja tinums ir daudzslāņu ar lielu soli, t.i. tā spoles aptver uzreiz vairākus statora zobus, tad tādi tinumi likšanas procesā tiek pakļauti lielām mehāniskām iedarbībām un spoļu malu ielocīšanai, kuru pieres daļas krustojas un saskaras viena ar otru pa lielu laukumu. Dabīgi, ka tādi tinumi ar lielu varbūtību var būt bojāti vai var nonākt stāvoklī ar zemu drošību.

Tāpēc autonomu VEI vējģeneratoriem lietderīgi lietot vienzobu spoles tinumu, kā drošākas un vienkāršākas ražošanā un remontā.

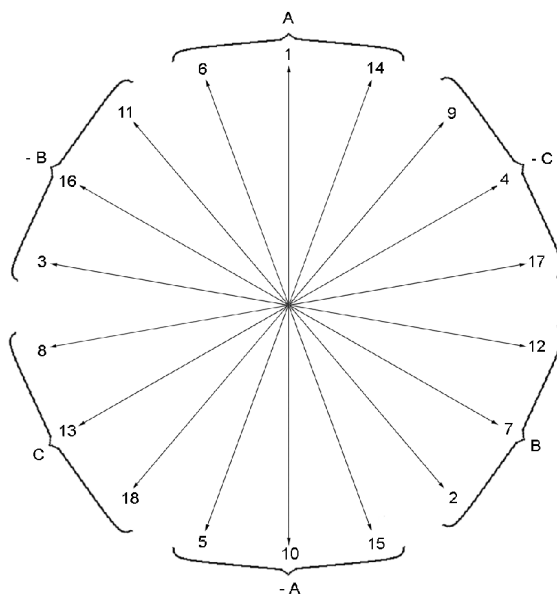
Statora zobu skaita un polu optimālās attiecības gadījumā, spoļu EDS izveido daudzstaru zvaigzni, kur EDS vektoriem ir minimālā sakritība, kas rada noteikumus fāžu EDS augstāko harmoniku skaita samazināšanai.

Turklāt tinums it kā sadalīts un raksturots ar sadalījuma koeficientu

$$k_s = \frac{\sin a \frac{\alpha}{2}}{a \sin \frac{\alpha}{2}} < 1, \quad (17)$$

kur a – spoļu skaits fāžu zonā; $\alpha = 20^\circ$ – leņķis starp rievu EDS vektoriem.

Kā piemērs 8. att. ir dots rievu EDS zvaigzne gadījumam $\frac{z_s}{p} = \frac{18}{7}$, kur $a=3$; $\alpha=20^\circ$.



8. att. Rievu EDS zvaigzne attiecībai $z_s/p = 18/7$

Šajā gadījumā spoles sadalījuma koeficients k_s tinuma fāzē tiek noteikts ar izteiksmi

$$k_s = \frac{\sin a \cdot \frac{\alpha}{2}}{a \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 3 \cdot \frac{20}{2}}{3 \cdot \sin \frac{20}{2}} = 0,96. \quad (18)$$

Tādējādi, enkura tinuma formēšanas laikā no viena zoba spoles ar polu skaitu un statora zobu skaitu optimālo attiecību tiek nodrošināts augsts drošums, īpatnējā jauda, tehnoloģiskums un remontējāmība, kā arī tiek samazināts fāžu EDS sastāvā augstāko harmoniku skaits.

4. Sinhrono ģeneratoru ar pastāvīgo magnētu ierosmi eksperimentālie pētījumi un to pilnveidošanas perspektīvas

Ģeneratora ar pastāvīgo magnētu ierosmi eksperimentālo pētījumu veikšanai tika izmantots universāls stends dinamometrs DS 546–4V, kas uzstādīts Elektrofizikālo procesu modelēšanas laboratorijā, Fizikālās-enerģētikas institūtā. Pētāmā stenda kopskats ir parādīts 9. att. Šajā stendā tika pētīts mazjaudas ģeneratora eksperimentālais modelis.



9. att. Pētāmā stenda kopskats

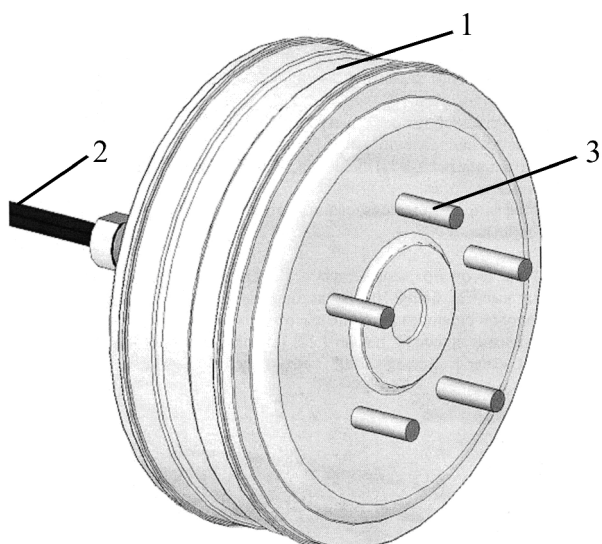
Eksperimentālajam tiešās piedziņas ģeneratoram bija sekojošie parametri:

- jauda $P_N=600\text{W}$;
- spriegums $U_N=25\text{ V}$;
- nominālā strāva $I_N=14\text{ A}$;
- rotācijas frekvence $n_N=500\text{ min}^{-1}$;
- gabarīti: $170 \times 80\text{ mm}^2$;
- ārējais diametrs $D_f=170\text{ mm}$;
- aksiāls garums $l=38\text{ mm}$;
- fāžu skaits $m=3$;
- ģeneratora masa $G=7,5\text{ kg}$.

Ģeneratoram ir nekustīgs iekšējais stators ar enkura tinumu un ārējais rotors ar 16 prizmatiskiem magnētiem, kas izveido 8 polu pārus ($p=8$). Magnētu materiāls – Nd-Fe-B, kuru raksturo sekojoši parametri:

paliekošā indukcija – $B_r=1,15\text{ T}$;
 koercentīvais spēks – $H_r=850\text{ kA/m}$.

Tieši pie rotora paredzēts piestiprināt trīs vējturbīnas lāpstiņas. Ģeneratora kopskats ir parādīts (10. att.).



10. att. Pēc savas konstrukcijas apvērsts tiešās piedziņas vējģeneratora kopskats:

1 – ārējais rotors; 2 – enkura tinuma izvads; 3 – elementi lāpstiņu nostiprināšanai

3. tabula

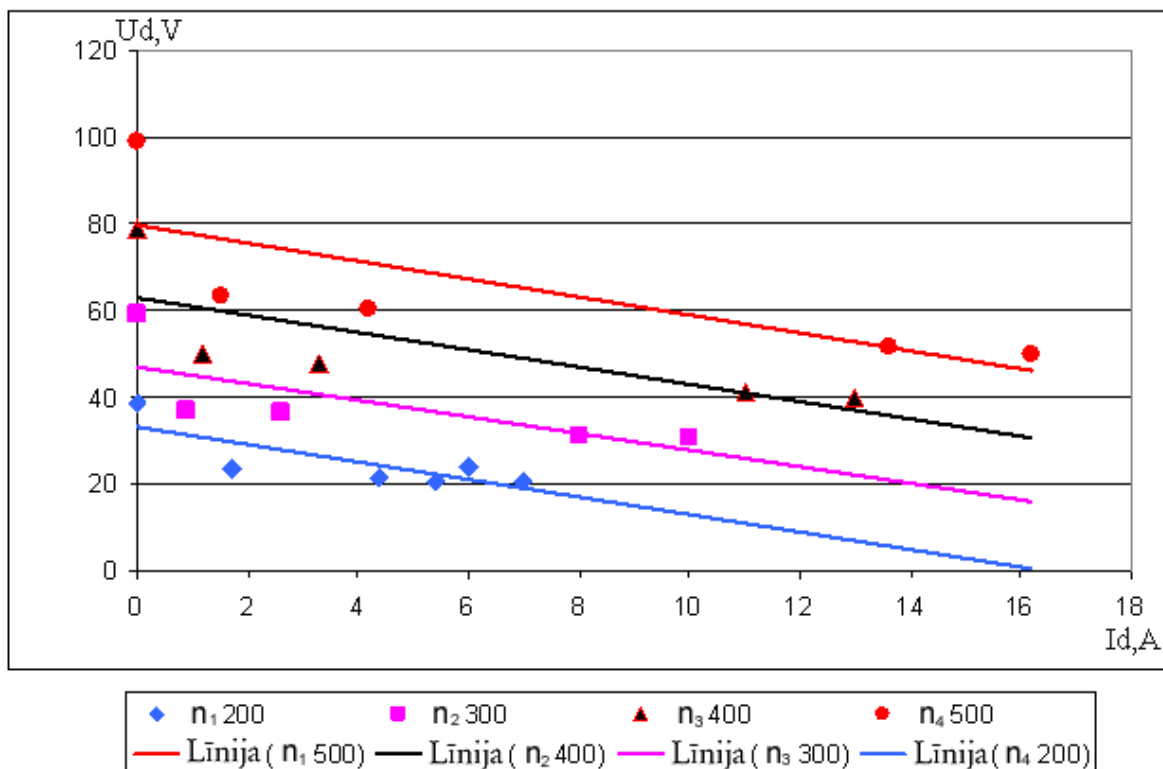
Vējģeneratora eksperimentālā modeļa parametri

Nº p. k.	Parametrs	Mērvienība	Skaitliskas vērtības
1.	Nominālā jauda, P	W	600
2.	Nominālais spriegums, U	V	25
3.	Nominālā rotācijas frekvence, n	min ⁻¹	500
4.	Nominālā fāzes strāva, I	A	14
5.	Statora izvirpošanas diametrs, D	mm	143,8
6.	Statora paketes aksiālais garums, l	mm	38
7.	Fāžu skaits, m		3
8.	Vijumu skaits fāzē, w		104
9.	Fāzes pretestība, R	Ohm	0,9
10.	Tinuma induktīvā pretestība, x_L	Ohm	0,4
11.	Ģeneratora masa, G	kg	7,5
12.	Polu pārklājums, α_s		0,9
13.	Magnētu izmēri, $h_m \times b_m \times l_m$	mm ³	12,7x25,4x38,1

Eksperimenta veikšanas procesā tika uzņemtas:

- ārējās raksturliķnes $U_d=f(I_d)$;
- tukšgaitas raksturliķnes $E_d=f(n)$;
- momenta raksturliķne $M=f(I_d)$;
- lietderības koeficienta raksturliķne $\eta=f(R_{st})$.

Piemērā dotas tikai ārējās raksturliķnes (11. att.) dažādām rotācijas frekvencēm n . Turklāt, raksturliķnes, kas iegūtas no aprēķina, dotas ar nepārtrauktām līnijām, bet pētījuma rezultāti parādīti ar punktiem.



11. att. Ģenerators ārējās raksturliķnes, t.i. iztaisnota sprieguma U_d atkarība no strāvas I_d pie dažādām griešanas frekvencēm $n_1 - n_4$

Zemāk, 4. tabulā, ir doti dati, kuri ir iegūti aprēķinu ceļā un no pētījuma (eksperimentālie).

4. tabula

Salīdzinājumā dati, kuri iegūti no aprēķina un eksperimentā

№ p. k.	Parametrs	Mērvienība	Skaitliskas vērtības	
			No eksperimenta	No aprēķina
1.	Fāzes aktīvā pretestība	Ohm	0,94	0,9
	$t=15^\circ \text{C}$, A-x			
	B-y			
2.	Fāzes induktivitāte	H	$0,95 \cdot 10^{-3}$	$0,97 \cdot 10^{-3}$
	A-x			
	B-y			
3.	Pola magnētiskā plūsma	Wb	$0,97 \cdot 10^{-3}$	$0,90 \cdot 10^{-3}$
	C-z			
4.	Momenta koeficients	$\frac{Nm}{A}$	1,3	1,25

Kā redzams no 4. tab., aprēķina un eksperimenta dati pietiekoši labi sakrīt, kas apstiprina izvēlēto matemātiskā modeļa pareizību un tā ticamību.

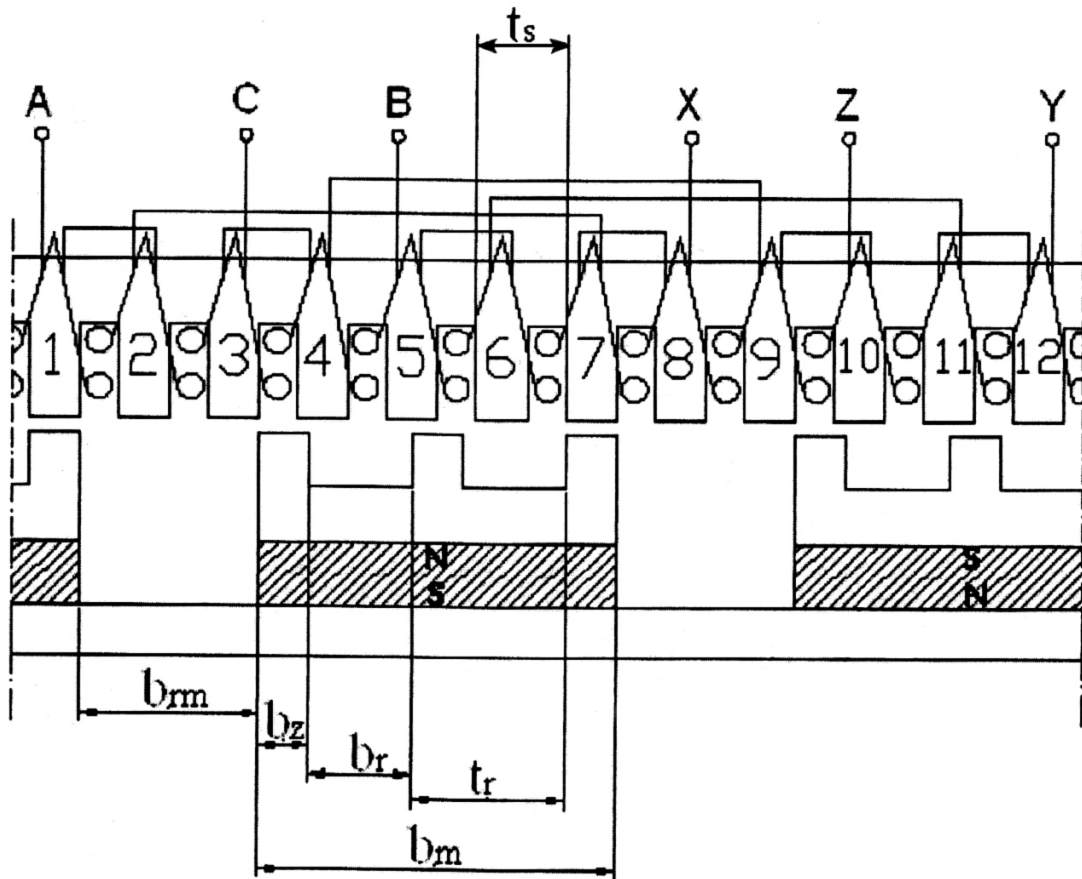
Darbā ir apskatītas vējģeneratoru ar pastāvīgo magnētu ierosmi pilnveidošanas perspektīvas. Viens no iespējamiem perspektīviem risinājumiem ir enkura tinuma izpildījums ar pārslēģšanu no „zvaigznes” uz „trīsstūri”.

Tā, piemēram, līdz aprēķina vēja ātrumam, slodzē ģenerators enkura tinumi savienojas „zvaigznē”. Ar aprēķinu vēja ātrumu sasnieģšanu enkura tinumi pārslēģdzas no „zvaigznes” uz „trīsstūri”. Ģenerators iegūst iespēju bez pārslodzes palielināt rotācijas frekvenci un izejas strāvu $\sqrt{3}$ reizes.

Pārslēgšanās, protams, jāveic ar ātrdarbīgu elementu palīdzību (piemēram, tiristoriem), izmantojot stabilizējošos filtrus.

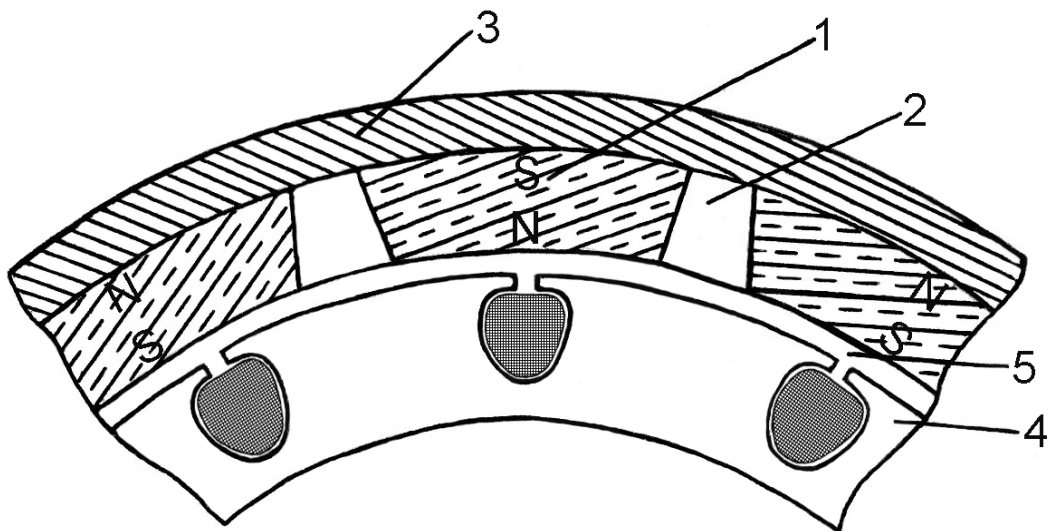
Tāda shēma būtiski paplašina vēju darba diapazonu un ļauj palielināt VEI atdoto jaudu $\sqrt{3}$ reizes salīdzinājumā ar nominālo.

Diezgan interesants ir sinhronas mašīnas polu pāru skaita palielināšanas piedāvājums bez pastāvīgo magnētu skaita palielinājuma. Šis piedāvājums var būt realizēts mašīnās ar zobainiem tinumiem un lietojot zobainu polu uzgaļus, kas nostiprināti uz pastāvīgiem magnētiem. 12. att. ir parādīts viens no tāda ģenerators konstrukciju variantiem.



12. att. Daudzpolu ģenerators ar zobainiem polu uzgaļiem

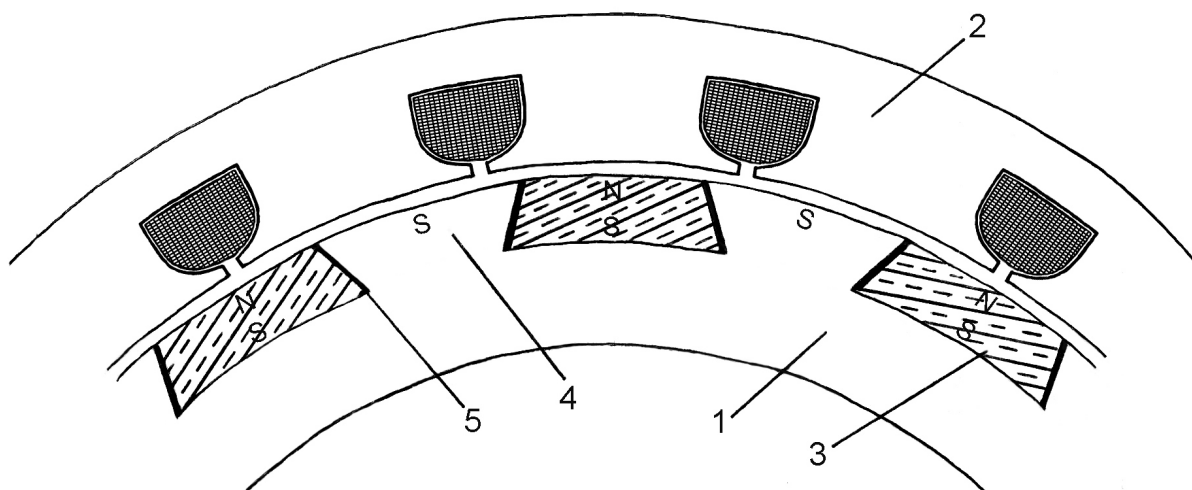
Perspektīva ir arī magnētu stiprināšanas pilnveidošanai. Viens no variantiem ir tāds: elektriskai mašīnai ir apvērsts izpildījums – rotors aptver statoru. Šajā gadījumā rotora griešanās laikā magnēti piespiežas centrālās spēku iedarbībā pie ārēja ferimagnētiska jūga, bet viens no otra distancējas ar speciālo nemagnētisko separatoru. Separatoram ir trapecveidīga ligzda, trapecveidīgo pēc formas magnētu izvietošanai tajās (13. att.).



13. att. Sinhrona ģenerators ar ārējo rotoru fragments:
 1 – pastāvīgs magnēts; 2 – nemagnētisks separators; 3 – rotora jūgs;
 4 – stators ar enkura tinumu; 5 – gaisa sprauga

14. att. ir piedāvāta rotora konstrukcija ar nepilnu magnētu skaitu. Šeit magnēti un rotora zobi mijas: magnēts-zobs-magnēts un t.t. Visi magnēti ieiet gaisa spraugā ar vienādas polaritātes polu. Tad zobiem, kuri mijas ar tiem, ir pretēja, bet visiem vienāda polaritāte.

Dotās konstrukcijas īpatnības ir sekojošas. Magnētiem un zobiem ir trapecveidīga forma. Turklāt magnēta, kurš ir vērsts uz gaisa spraugu, platums ir vienāds ar zoba platumu spraugā. Magnēta apakšējam pamatam, kas saskaras ar rotora jūgu, jābūt platākam par rievu, t.i. par attālumu starp zobiem spraugā. Magnēts ir ielikts rievā no gala virsmas. Nemagnētiskie ielaidumi izslēdz sānu malu magnētu un zobu saskaršanos.



14. att. Rotors ar nepilnu magnētu skaitu, kuri mijas ar zobiem:
 1 – rotors ar magnētiem; 2 – stators ar enkura tinumu; 3 – magnēts; 4 – rotora zobs;
 5 – nemagnētisks ielaidums starp zobu un magnētu

Nemagnētiskā ielaiduma biezumu Δ starp magnētiem un zobiem izvēlas atbilstoši attiecībai (3), t.i.

$$\Delta = (1 - \alpha_\delta)\tau,$$

(19)

kur $\alpha_\delta = 1 - \frac{\sqrt{h_m \delta}}{\tau}$.

Secinājumi

Darbā parādīti pētījuma rezultāti, uz kuru pamata parādīta iespēja paaugstināt VEI efektivitāti, kas apgādātas ar sinhroniem ģeneratoriem ar pastāvīgo magnētu ierosmi.

Rezultāti ir šādi:

1. Formulēti efektivitātes kritēriji, atbilstoši kuriem izvēlas un izveido vājģeneratoru, kas ļauj palielināt ģeneratora, kā arī VEI efektivitāti.
2. Balstoties uz dažādu tipu mašīnu analīzes, ir noteikts, ka vispilnīgāk formulētiem efektivitātes kritērijiem atbilst daudzpolu sinhronie ģeneratori ar radiāli magnetizētiem prizmatiskiem magnētiem, kuri ir izveidoti no augsti enerģētiska materiāla.
3. Tika iegūta analītiska izteiksme polu pārklājuma optimālā koeficienta noteikšanai, kas dod iespēju, zinot pastāvīga magnēta augstumu h_m , gaisa spraugas lielumu δ un polu iedaļu τ , noteikt ģeneratora ar ierosmi no radiāli magnetizētiem pastāvīgiem magnētiem maksimālo īpatnējo jaudu saskaņā ar (3).
Kā izriet no magnētiskā lauka aprēķiniem, polu pārklājuma vērtībai jābūt starp 0,8 un 0,95 salīdzinājumā ar tradicionāli pieņemto: $0,65 \div 0,7$.
4. Optimālam polu skaitam p jābūt vienādam ar pusi no statora zobu skaita z_s plus k , kur k – minimālais vesels skaitlis, kas nodrošina simetrisko trīsfāžu enkura tinuma izveidošanu, saskaņā ar (1).
Optimālam magnēta platumam jābūt lielākam par zobu platumu uz gaisa spraugas vērtību.
5. Ir parādīts, ka tikai ģeneratora gredzenveida izpildījuma gadījumā un ar optimālo polu skaitu var būtiski samazināt elektriskās mašīnas masu un gabarītus.
6. Ir piedāvāts izgatavot induktoģeneratora ar samazinātu vienas polaritātes magnētu skaitu, kas novietoti starp rotora zobiem, kas tādējādi iegūst polaritāti pretēju magnētiem. Tas atvieglo magnētu stiprināšanu un ievērojami samazina ģeneratora izgatavošanas izmaksas.
7. Ir piedāvāts vājģiekārtas uzstādītās jaudas izmantošanas koeficienta palielināšanai vājģeneratora enkura tinumu izveidot ar pārslēgšanas iespēju no „zvaigznes” uz „trīsstūri”. Turklāt, līdz aprēķinu vēja ātrumam enkura tinumam jābūt ieslēgtam „zvaigznē”, bet, kad vēja ātrums pārsniedz aprēķinu ātrumu – „trīsstūrī”.

Autora publikācijas

1. J. Daškova, E. Kamoliņš, N. Levins Tiešas piedziņas vēja elektrostaciju iekārtu daudzpolu elektriskie ģeneratori. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2004, Nr. 4, pp. 41.–47.
2. N. Levins, V. Pugačevs, J. Daškova, E. Kamoliņš, A. Mesnjaevs Daudzpolu momentdzinēja izmantošana vēja iekārtas azimutālās orientācijas bezreduktora sistēmā. *LFTZ žurnāls* 2005. g. № 3. 37.–42. lpp.
3. J. Daškova-Golovkina, N. Levins, V. Pugačevs Electrical generators of modern WPP. RTU zinātniskie raksti *Enerģētika un elektrotehnika*, sērija 4, sējums 15, 27.–32. lpp. 2005. g. Power and Electrical Engineering International Conference, Riga, RTU, 16 October 2005.
4. J. Daškova-Golovkina, N. Levins, V. Pugačevs Обзор конструктивных схем электрических генераторов в современных ВЭУ. *Научно прикладный журнал Технична электродинамика*, 3 часть, 73 стр. IX International Conference “Problems of Present-day electrotechnics-2006”, 5–9 June, 2006, Kiev, Ukraine.
5. J. Dashkova-Golovkina, J. Dirba, N. Levin, V. Pugachov Synchronous generators in without gear installations. RTU zinātniskie raksti, *Enerģētika un Elektrotehnika*, sērija 4, sējums 18, 19.–25. lpp. Power and Electrical Engineering International Conference, Riga, RTU, 12–14 October 2006.
6. J. Dashkova-Golovkina, N. Levin, V. Pugachov Multipole Synchronous Generators with Permanent Magnets and tooth windings for low-power WPP. In CD format, topic 3(CT3), text 3.04. 5th International Conference CPE 2007 „Compatibility in Power Electronics”, May 29- June 1, 2007, Gdansk, Poland.
7. J. Dashkova-Golovkina, V. Pugachov Plastic bonded BaFe Permanent Magnets, tēzes 98. lpp., pilns raksts – CD These and Reports 134.–136. lpp. 5 starptautiska konference MET 2007 „Metāli, metināšana un pulvermetalurģija”, 13.–14. septembrī 2007. g. Rīgā, Latvijā.
8. J. Daškova-Golovkina, J. Dirba, N. Levins, V. Pugačevs Tooth Zone Analysis in Multipole Synchronous Generators with Permanent Magnets. RTU zinātniskie raksti, *Enerģētika un Elektrotehnika*, sērija 4, sējums 20, 96.–102. lpp. RTU 48. starptautiskā zinātniskā konference, Rīgā 2007. gada 11.–13. oktobrī.
9. J. Dashkova-Golovkina, N. Levin, V. Pugachov Geometrical parameters of tooth zone in multipole synchronous generators with permanent magnets NdFeB, *Научно прикладный журнал Технична электродинамика*, 5 часть, 23–26 стр. X International Conference “Problems of Present-day electrotechnics-2008”, 3–5 June, 2008, Kiev, Ukraine.