

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Ludmila LAVRINOVIČA

Doktora studiju programmas „Elektriskās mašīnas un aparāti” doktorante

**BEZKONTAKTU SINHRONO DZINĒJU IZSTRĀDE
UN OPTIMIZĀCIJA IZMANTOŠANAI MAZJAUDAS
ELEKTROIEKĀRTĀS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

Dr. habil. sc. ing.

J. DIRBA

Zinātniskais konsultants

U. BRAKANSKIS

Rīga 2014

Lavrinoviča L. Bezkontakta sinhrono dzinēju izstrāde un optimizācija izmantošanai mazjaudas elektroiekārtās. Promocijas darba kopsavilkums.– R.: RTU, 2014.– 34 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Enerģētikas institūta 2014. gada. _____ lēmumu, protokola Nr. ____.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu “Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

ISBN 978-9934-10-632-3

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014 . g. Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1 – 212 telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

LZA akadēmiķis, profesors, *Dr. habil. sc. ing.* Imants Matīss,
LZA Sertifikācijas centrs, Latvija

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

Profesors, *Dr. sc. ing.* Žilvinas Bazaras,
Kauņas tehnoloģiju universitāte, Lietuva

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.

Ludmila Lavrinoviča (Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas un secinājumus un darba galvenos rezultātus. Promocijas darba kopējais apjoms ir 119 lappuses. Darbs satur 64 attēlus, 19 tabulas un tajā ir atsauces uz 97 informācijas avotiem.

SATURS

IEVADS	5
Darba aktualitāte	5
Pētījuma objekts, mērķis un uzdevumi	6
Pētījumā izmantotie līdzekļi un metodes	7
Promocijas darba zinātniskā novitāte	7
Promocijas darba praktiskā nozīme	7
Darba aprobācija	8
Autora publikācijas	8
Izgudrojumi	10
1. MAZJAUDAS BEZKONTAKTU SINHRONIS DZINĒJS – ALTERNATĪVA PLAŠI IZMANTOTIEM KOLEKTORDZINĒJIEM	11
2. ELEKTRISKO DZINĒJU MAGNĒTISKĀ LAUKA SKAITLISKIE APRĒĶINI – PAMATS METAMODEĻU SINTĒZEI UN IZMANTOŠANAI DZINĒJU MAGNĒTISKO SISTĒMU OPTIMIZĀCIJAI	17
3. BEZKONTAKTU SINHRONO DZINĒJU JAUNO KONSTRUKCIJU IZSTRĀDE	19
4. BEZKONTAKTU SINHRONO DZINĒJU JAUNO KONSTRUKCIJU ANALĪZE UN OPTIMIZĀCIJA	22
5. BEZKONTAKTU SINHRONO DZINĒJU EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI	27
GALVENIE DARBA REZULTĀTI UN SECINĀJUMI	32
KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	32

IEVADS

Darba aktualitāte

Elektriskais dzinējs ir viens no galvenajiem mehāniskās sistēmas elementiem, kuru izmanto daudzās tehnikas nozarēs. Aptuveni 90 % no visiem elektriskajiem dzinējiem ir mazjaudas dzinēji [1].

Visplašāk pielietotie mazjaudas elektriskie dzinēji sadzīves elektroiekārtās, ražošanas un komerciālos uzņēmumos ir kolektordzinēji, pateicoties to vienkāršai un precīzai rotācijas frekvences regulēšanai [2, 3]. Lai samazinātu kolektordzinēju gabarītus un masu, tos parasti izgatavo ātrgaitas un ar nelielu griezes momentu. Līdz ar to mehāniskajās sistēmās izmanto dažāda veida pārvades elementus, bieži siksna pārvadus. Mehāniskajām sistēmām ar kolektordzinējiem ir zema drošuma pakāpe, ar laiku tiem paradās papildus izmaksas, kuras saistītas ar kolektoru un suku mezglu, kā arī pārvades elementu apkalpošanu. Līdz ar to, mehāniskās sistēmas pilnveidošana un modernizācija šādās jomās ir aktuāls un svarīgs uzdevums.

Viens no efektīvākiem un radikālākiem paņēmieniem mehāniskās sistēmas drošuma paaugstināšanai, kā arī funkcionālo iespēju paplašināšanai ir atteikšanās no dzinējiem ar slīdošiem kontaktiem, t. i. kolektordzinēju aizvietošana ar bezkontakta dzinējiem. Šīs apgalvojums ir pamatots, piemēram darbos [4, 5, 2, 6, 7].

Mazjaudas bezkontakta elektriskie dzinēji atšķiras no pārējiem dzinējiem galvenokārt, ar konstruktīvā izpildījuma un funkcionālās nozīmes daudzveidību. Atkarībā no pielietošanas prasībām bezkontakta elektriskos dzinējus var izveidot gan ar iekšējo, gan ar ārējo rotoru [8, 9, 10]. Dzinēju ar ārējo rotoru var tieši apvienot ar mehāniskās sistēmas izpildmehānismu, kas ļauj atteikties daudzos gadījumos no pārvades elementiem, vienlaikus uzlabojot to drošumu un gabarītu izmērus.

Vislielāko interesi mehāniskās sistēmas pilnveidošanā un modernizācijā izraisa bezkontakta sinhronie dzinēji ar elektronisku komutāciju, zināmi arī, kā ventiļdzinēji [11, 12].

Šodienas bezkontakta sinhrono dzinēju straujas attīstības laikā pastāv būtisks jautājums par šādu dzinēju enerģētisko rādītāju uzlabošanu, kas ir saistīts ar plašu augstenerģētisko pastāvīgo magnētu izmantošanu. Sakarā ar to, ka augstenerģētisko pastāvīgo magnētu izmantošana būtiski sadārdzina dzinēja izgatavošanu ir nepieciešams modernizēt esošo dzinēju ar pastāvīgajiem magnētiem konstrukcijas vai izstrādāt jaunas, kā arī izstrādāt jaunas sinhrono reaktīvo dzinēju konstrukcijas, kuras spētu konkurēt ar esošajiem.

Ievērojot arī to, ka pēdējā laikā aktīvo materiālu augstā izmantošanas intensitāte elektriskajos dzinējos izraisa magnētiskās ķēdes piesātinājuma pakāpes pieaugumu, jaunu un esošo elektrisko dzinēju izpēte nav iespējama bez magnētiskā lauka detalizētas analīzes, ievērojot magnētiskās ķēdes reālo piesātinājumu. Šādam nolūkam plaši izmanto datorprogrammas, kur magnētiskā lauka aprēķins realizēts ar galīgo elementu metodi (GEM).

Jaunu dzinēju konstrukciju izstrāde, pamatojoties uz magnētiskā lauka aprēķiniem, ir saistīta ar daudziem magnētisko lauku skaitliskiem aprēķiniem. Katrā atsevišķā gadījumā magnētiskā lauka aprēķins atbilst konkrētajam elektriskās mašīnas modelim ar konkrētu magnētiskās ķēdes konfigurāciju, strāvu vērtībām tinumos un aktīvo materiālu īpašībām. Šī iemesla dēļ jebkura elementa ģeometrisku izmēru vai raksturojošo parametru izmaiņa prasa jaunu skaitlisko eksperimentu, kas savukārt apgrūtina elektrisko dzinēju magnētiskās ķēdes elementu formas optimālu variantu noteikšanu. Lai vienkāršotu šo procesu, darbā piedāvāts izmantot metamodeļus, kuri ir sintezēti, izmantojot magnētiskā lauka skaitlisko aprēķinu rezultātus. Metamodeļi nosaka sakarības starp iegūtajiem rezultātiem daudzos magnētiskā lauka aprēķinos.

Pētījuma objekts, mērķis un uzdevumi

Promocijas darbā par pētāmiem objektiem izvēlēti mazjaudas bezkontakta sinhronie dzinēji (sinhronais dzinējs ar pastāvīgajiem magnētiem un sinhronais reaktīvais dzinējs) ar iespēju tos darbināt arī kā ventiļdzinējus.

Promocijas darba mērķis ir mazjaudas bezkontakta sinhrono dzinēju elektromagnētisko parametru uzlabošana, izstrādājot jaunas konstrukcijas un metamodeļu sintēze.

Lai sasniegtu uzstādīto darba mērķi, ir izvirzīti sekojoši galvenie uzdevumi:

1. izstrādāt un piedāvāt sinhrono dzinēju ar pastāvīgajiem magnētiem un sinhrono reaktīvo dzinēju jaunas konstrukcijas ar uzlabotam elektromagnētiskiem parametriem;
2. izstrādāt apakšprogrammu, kas ļautu būtiski samazināt datu sagatavošanas un ievadīšanas darbietilpību, risinot elektrisko dzinēju magnētiskā lauka aprēķinu uzdevumus;
3. balstoties uz magnētiskā lauka skaitliskiem aprēķiniem sintezēt metamodeļus, kurus iespējams izmantot jaunas konstrukcijas dzinēju analīzē un optimizācijā;
4. uz sintezēto metamodeļu bāzes, optimizēt sinhrono dzinēju ar pastāvīgajiem magnētiem un reaktīvo dzinēju ar ārējo rotoru aktīvās zonas ģeometriju;
5. eksperimentālos pētījumos pārbaudīt darbā izvirzīto teorētisko nostādņu pareizību.

Pētījumā izmantotie līdzekļi un metodes

Pētāmo bezkontakta sinhrono dzinēju magnētiskā lauka skaitliskie aprēķini ir veikti saskaņā ar Maksvela vienādojumiem, izmantojot galīgo elementu metodi ar datorprogrammas *QuickField* palīdzību [13].

Lai vienkāršotu un paātrinātu magnētiskā lauka daudzkārtēju aprēķināšanu, izmantojot *Visual Basic* programmēšanas valodu un *Active Field* tehnoloģiju [14], izstrādāta apakšprogramma *Microsoft Excel* vidē [15]. Minētā *Active Field* tehnoloģija ļauj izstrādāto apakšprogrammu apvienot ar datorprogrammu *QuickField*, kur pēc *Microsoft Excel* ievadītiem datiem automātiski notiek pētāmā objekta topoloģiskā modeļa konstruēšana un elektromagnētisko parametru aprakstīšana.

Pētāmo dzinēju magnētiskā lauka analīzei un optimizācijai pielietoto metamodeļu sintēzei ir izmantota metode, kuru izstrādājis Latvijas zinātnieks V. Eglājs un aprakstījis to darbā [16].

Promocijas darba zinātniskā novitāte

1. Sintezēti metamodeļi sinhroniem dzinējiem ar pastāvīgajiem magnētiem un reaktīvajiem dzinējiem ar ārējo rotoru.
2. Izstrādāta sinhrono dzinēju ar pastāvīgajiem magnētiem sinhrono reaktīvo dzinēju ar ārējo rotoru konstrukcijas optimizācijas metodika, kas balstās uz magnētiskā lauka skaitliskiem aprēķiniem un metamodeļu izmantošanas.
3. Izstrādātas jaunas sinhrono bezkontakta dzinēju konstrukcijas.
4. Pierādīts, ka sinhronā reaktīvā dzinēja efektivitātes paaugstināšanai var izmantot bezjūga konstrukcijas.

Izstrādāto dzinēju novitāte ir apstiprināta ar saņemtiem četriem Latvijas patentiem un iesniegtu vienu starptautisko patentu.

Promocijas darba praktiskā nozīme

1. Izstrādāta programma *Microsoft Excel* vidē pētāmo dzinēju automātiskai topoloģiskā modeļa konstruēšanai un elektromagnētisko parametru aprakstīšanai datorprogrammu kompleksa *QuickField* vidē.
2. Balstoties uz pētījuma rezultātiem, izstrādāti un izgatavoti divi sinhrono dzinēju prototipi ar pastāvīgajiem magnētiem un izstrādāts viens sinhronais reaktīvais dzinējs ar uzlabotiem elektromagnētiskiem parametriem salīdzinājumā ar esošajiem dzinējiem.
3. Izstrādātos bezkontakta sinhronos dzinējus varēs izmantot mazjaudas elektroiekārtās kolektordzinēju vietā, piemēram, rokas elektroinstrumentos.

Darba aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti tika prezentēti starptautiskajās konferencēs:

1. „Analysis of a Permanent – Magnet Brushless DC Motor with Fixed Dimensions”, 51st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, 14 October, 2010.
2. “VBA-Program for the Automatic Analysis of Brushless DC Motor Magnetic Field”, 6th International Conference on Electrical and Control Technologies (ECT-2011), Lithuania, Kaunas, 5–6 May, 2011.
3. “Metamodel for Permanent Magnet Synchronous Motor with Outer Rotor”, The 8th International Conference "Electric Power Quality and Supply Reliability" (PQ-2012), Estonia, Tartu, 11–13 June, 2012.
4. “The Influence of Permanent Magnet Parameters on the Effectiveness of Brushless DC Motor with Outer Rotor”, 21st Edition of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2012), Italy, Sorrento, 20–22 June, 2012.
5. „Magnetostatic Analysis of Surface-Mounted Permanent Magnet Motor with External Rotor for Use in Electric Hand Planer”, 14th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2013 (EPE-2013), Czech Republic, Kouty nad Desnou, 28–30 May, 2013.
6. “Synchronous Reluctance Motor without Rotor Ferromagnetic Yoke”, IEEE Region 8 EUROCON 2013, Croatia, Zagreb, 1–4 July, 2013.
7. “Metamodeling of the Outer-Rotor Synchronous Reluctance Motor”, 54th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, 14–16 October, 2013.
8. “Comparison of Permanent Magnet Synchronous Motor and Synchronous Reluctance Motor Based on Their Torque per Unit Volume”, Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ2014), Estonia, Rakvere, 11–13 June, 2014.

Autora publikācijas

Promocijas darba galvenie rezultāti atspoguļoti 14 publikācijās, 9 no tām iekļautas datu bāzē SCOPUS un 5 datu bāzē IEEE Xplore Digital Library:

1. Brakanskis U., Dirba J., Kukjane (Lavrinovicha) L., Drava V. Analysis of a Permanent – Magnet Brushless DC Motor with Fixed Dimensions. In: *Scientific Journal of RTU. Power and Electrical Engineering*. vol. 27. Riga: RTU, 2010, pp. 77– 80.

2. Kukjane (Lavrinovicha) L., Brakanskis U., Dirba J. VBA-Program for the Automatic Analysis of Brushless DC Motor Magnetic Field. In: *Electrical and Control Technologies 2011: Proceedings of the 6th International Conference on Electrical and Control Technologies (ECT-2011)*, Lithuania, Kaunas: Technologija, 2011, pp. 231–234. ISSN 1822-5934.
3. Dirba, J., Lavrinovicha, L., Levins, N., Pugachev, V. Application of Synchronous Brushless Motors in Electric Hand Tools. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2012, vol. 49, no. 1, pp. 29–34. ISSN 0868-8257. Available from: doi:10.2478/v10047-012-0003-7. (SCOPUS)
4. Dirba, J., Lavrinovicha, L., Jekabsons, G., Vitolina, S. Metamodel for Permanent Magnet Synchronous Motor with Outer Rotor. In: *The 8th International Conference "Electric Power Quality and Supply Reliability": Conference Proceedings*, Estonia, Tallinn: Tallinn University of Technology, 2012, pp. 9–12. ISBN 9781467319775. (SCOPUS un IEEE Xplore Digital Library)
5. Dirba, J., Lavrinovicha, L., Onzhevs, O., Vitolina, S. The Influence of Permanent Magnet Parameters on the Effectiveness of Brushless DC Motor with Outer Rotor. In: *21st Edition of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2012)*, Italy, Sorrento: IEEE, 2012, pp. 718–723. ISBN 9781467313001. (SCOPUS un IEEE Xplore Digital Library)
6. Lavrinovicha, L., Dirba, J., Brakanskis, U., Lavrinovich, N. Experimental Study of Synchronous Electronically Commutated Outer – Rotor Brushless Motor at Stalled Rotor. In: *Power and Electrical Engineering*. vol. 31. Latvia, Riga: RTU, 2013, pp. 112–116.
7. Lavrinovicha, L., Dirba, J., Lavrinovichs, N. Magnetostatic Analysis of Surface-Mounted Permanent Magnet Motor with External Rotor for Use in Electric Hand Planer. In: *EPE: Electric Power Engineering 2013 (EPE 2013)*, Czech Republic, Ostrava: Technical University of Ostrava, 2013, pp. 1–4. (SCOPUS un IEEE Xplore Digital Library)
8. Lavrinovicha, L., Brakanskis, U., Dirba, J. Synchronous Reluctance Motor without Rotor Ferromagnetic Yoke. In: *IEEE Eurocon 2013: IEEE Region 8 EuroCon 2013 Conference*, Croatia, Zagreb: 2013, pp. 1020–1024. ISBN 9781467322317. Available from: doi:10.1109/EUROCON.2013.6625106. (SCOPUS un IEEE Xplore Digital Library)
9. Levins, N., Pugachev, V., Dirba, J., Lavrinovicha, L. Electric Machines with Non-Radially Mounted Rectangular Permanent Magnets. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2013, vol. 50, iss. 2, pp. 15–22. ISSN 0868-8257. Available from: doi:10.2478/lpts-2013-0008. (SCOPUS)

10. Levins, N., Pugachev, V., Dirba, J., Lavrinovicha, L. High-Reliability Brushless Synchronous Motors for Hand Tools and Household Appliances. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2013, vol. 50, iss. 3, pp. 3–11. ISSN 0868-8257. Available from: doi:10.2478/lpts-2013-0015. (SCOPUS)
11. Lavrinoviča, L., Dobrijans, R., Onževs, O. Metamodeling of the Outer-Rotor Synchronous Reluctance Motor. In: *Electronic Proceedings of 54th International Scientific Conference of Riga Technical University: 54th International Scientific Conference of Riga Technical University*, Latvia, Riga: RTU, 2013, pp. P8.1–P8.6.
12. Dirba J., Lavrinovicha L., Metamodels for new designs of outer-rotor brushless synchronous electric motors. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2014, vol. 51, iss. 2, pp. 22–30. ISSN 0868-8257. (SCOPUS)
13. Lavrinovicha L., Dirba J. Comparison of Permanent Magnet Synchronous Motor and Synchronous Reluctance Motor Based on Their Torque per Unit Volume. In: *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ2014)*, Estonia, 2014. Tallinn: Tallinn University of Technology, 2014, pp. 233–236. (SCOPUS un IEEE Xplore Digital Library)
14. Lavrinovicha L, Dobriyan R, Onzevs O., Metamodels for Optimum Design of Outer – Rotor Synchronous Reluctance Motor. *The Scientific Journal of Riga Technical Univerity – Electrical, Control and Communication Engineering*. Nr. 5, 2014, 34.–39.lpp. Available from: doi:10.2478/ecce-2014-0005.

Izgudrojumi

1. Pugačevs V., Dirba J., Kukjane (Lavrinoviča) L., Levins N., Orlova S. *Sinhronais reaktīvais dzinējs*. Int. Cl.: H02K19/02. Iesniegšanas datējums 2011-08-17. Patenti un Preču Zīmes. LV Patents 14418 B. 2012-01-20.
2. Levins N., Dirba J., Lavrinoviča L., Pugačevs V. *Ātrgaitas magnetoelektriskais sinhronais dzinējs*. Int. Cl.: H02K1/27. Iesniegšanas datējums 2012-03-13. Patenti un Preču Zīmes. LV Patents 14509 B. 2012-07-20.
3. Levins N., Dirba J., Lavrinoviča L., Orlova S., Pugačevs V. *Sinhronais dzinējs ar pastāvīgajiem magnētiem*. Int. Cl.: H02K1/27. Iesniegšanas datējums 2011-11-07. Patenti un Preču Zīmes. LV Patents 14458 B. 2012-03-20.
4. Levins N., Dirba J., Lavrinovicha L., Pugachevs V. *High speed magnetoelectric synchronous motor*. Int. WO2013/135312 A. International filing date 2012-08-16. World Intellectual Property Organization. 2013-09-19.
5. Levins N., Pugačevs V., Dirba J., Lavrinoviča L., Brakanskis U. *Sinhronais reaktīvais dzinējs*. Int.Cl. H02K19/02 Iesniegšanas datējums 2012-11-16. Patenti un Preču Zīmes. LV Patents 14627 B. 2013-04-20.

1. MAZJAUDAS BEZKONTAKTU SINHRONĀIS DZINĒJS – ALTERNATĪVA PLAŠI IZMANTOTIEM KOLEKTORDZINĒJIEM

Pirmajā nodaļā veikta mazjaudas elektrisko dzinēju īpašību, priekšrocību un trūkumu analīze, kā rezultātā par pētāmajiem objektiem izvēlēti bezkontakta sinhronie dzinēji. Dots vispārīgs apraksts par bezkontakta sinhroniem dzinējiem un, ievērojot iespēju darbināt tos ventilācijai, aplūkoti pamatjautājumi par ventilācijai. Aprakstīti bezkontakta sinhrono ventilāciju pamatvienādojumi, ar kuru palīdzību veikta pētāmo dzinēju mehānisko raksturlīkņu analīze un salīdzinājums ar kolektordzinēju raksturlīknēm.

Mazjaudas elektriskie dzinēji atšķiras no pārējiem dzinējiem, ne tikai ar masveida ražošanu un pielietošanu, bet galvenokārt ar konstruktīvā izpildījuma un funkcionālās nozīmes daudzveidību. Mazjaudas elektriskos dzinējus var iedalīt asinhronos, sinhronos un kolektordzinējos.

Asinhronos dzinējus atkarībā no rotora uzbūves iedala divās galvenajās grupās – dzinēji ar īsslēgtu rotoru un dzinēji ar fāžu rotoru. Asinhrono dzinēju ar īsslēgtu rotoru galvenā priekšrocība ir slīdošo kontaktu neesamība. Šādus dzinējus var ātri palaist, tiem ir stabila darbība mainīgas slodzes režīmos, kā arī tie ir vienkārši izgatavošanā un apkalpošanā. Tomēr tiem ir arī trūkumi – liela palaišanas strāva, zems jaudas koeficients, relatīvi nelieli palaišanas momenti, sarežģīta rotācijas frekvences regulēšana, kā arī tie ir jutīgi pret tīkla parametru izmaiņām. Asinhronajiem dzinējiem ar fāžu rotoru salīdzinājumā ar asinhronajiem dzinējiem ar īsslēgtu rotoru ir iespēja nodrošināt mazāku palaišanas strāvu, lielākus palaišanas momentus un regulēt rotācijas frekvenci nelielā diapazonā. Tomēr tiem ir sarežģīta konstrukcija un slīdošie kontakti. Turklāt asinhronajiem dzinējiem ir ievērojams reaktīvās jaudas patēriņš, it īpaši darba režīmos ar mazu slodzi. [17]

Mazjaudas sinhronos dzinējus iedala dzinējos ar elektromagnētisko ierosmi, ar pastāvīgajiem magnētiem, reaktīvos un histerēzes dzinējos [18]. Sinhronie dzinēji ar elektromagnētisko ierosmi nav raduši plašu pielietojumu mazjaudas elektroiekārtās to dārguma un sarežģītās konstrukcijas dēļ. Mūsdienās pastāvīgo magnētu izmantošana sinhronajos dzinējos ļauj nodrošināt tādas dzinēja priekšrocības, kā mazāki enerģijas zudumi un līdz ar to lielāks lietderības koeficients, mazāki gabarīti un masa, magnētiskās plūsmas nemainīgums – tā nav atkarīga no sprieguma un frekvences svārstībām tīklā un labāki dzesēšanas nosacījumi. Tomēr dzinējiem ar pastāvīgajiem magnētiem ir arī trūkumi, kas saistīti ar pastāvīgo magnētu dārgumu un to jutību pret triecieniem, vibrācijām un augstām temperatūrām. Turpretī sinhronajiem reaktīvajiem dzinējiem nav ierosmes tinumu un pastāvīgo magnētu, tāpēc tie ir drošāki un lētāki, salīdzinājumā ar citiem dzinējiem. Tomēr

visplašāk pielietotiem sinhronajiem reaktīvajiem dzinējiem ir relatīvi mazs īpatnējais elektromagnētiskais moments salīdzinājumā ar pārējiem bezkontakta dzinējiem.

Kolektordzinēji var būt ar elektromagnētisko ierosmi vai ierosmi no pastāvīgajiem magnētiem. Dzinējos ar elektromagnētisko ierosmi lieto virknes vai paralēlo ierosmi. Jauktu ierosmi mazgabarītu dzinējos parasti nelieto. Plaši, it īpaši mazjaudas elektroiekārtās izmanto kolektordzinējus ar ierosmi no pastāvīgajiem magnētiem. Kolektordzinējus plaši izmanto sadzīves elektroiekārtās, pateicoties to maziem izmēriem, lieliem palaišanas momentiem un iespējai viegli un precīzi regulēt rotācijas frekvenci plašā diapazonā [19]. Tomēr šādiem dzinējiem piemīt zema efektivitāte, zems drošuma līmenis un nepietiekams kalpošanas ilgums, kas galvenokārt ir saistīts ar kolektora un suku mezglas trūkumiem.

Izpētot dažādu dzinēju priekšrocības un trūkumus, var izcelt divus dzinēja veidus, kuriem ir būtiska loma raksturojošo parametru uzlabošanas jautājumos. Tie ir sinhronie dzinēji ar pastāvīgajiem magnētiem un sinhronie reaktīvie dzinēji, kurus iespējams darbināt kā ventiļdzinējus.

Ventiļdzinējs darbojas tāpat kā klasiskais sinhronais dzinējs, tā kā dzinēja rotora un statora magnētiskā lauka rotācijas frekvences sakrīt. Ventiļdzinēja atšķirība no klasiskā sinhronā dzinēja ir tāda, ka šajā gadījumā enkura griežlauka rotācijas frekvenci caur atgriezenisko saiti nosaka rotora rotācijas frekvence [20].

Balstoties uz sinhrono mašīnu teorijas pamatprincipiem, ventiļdzinējus aplūko kā sinhrono mašīnu, kas darbojas speciālos režīmos, kad paliek nemainīgi, piemēram, tādi lielumi kā slodzes leņķis θ starp spriegumu U_1 un tukšgaitas EDS pirmajām harmonikām, vai leņķis ϵ starp enkura tinuma un ierosmes tinuma MDS asīm.

Zemāk doti pamatvienādojumi sinhronā dzinēja ar pastāvīgajiem magnētiem elektromagnētisko parametru noteikšanai: enkura strāvai I_1 , elektromagnētiskam griezes momentam M_{em} , patērētai aktīvai jaudai P_1 , fāžu nobīdes leņķim ϕ starp fāžu strāvu I_1 un fāžu spriegumu U_1 . Šādi vienādojumi ir iegūti no neizvirzītu polu mašīnas vektoru diagrammas [21].

Ventiļdzinēju vienādojumi darbībai ar uzdotu leņķi θ

$$I_1 = \sqrt{\frac{U_1^2 - 2U_1 I_2 \omega L \cos \theta + \omega^2 I_2^2 L^2}{r_1^2 + \sigma^2 \omega^2 L^2}}; \quad (1.1)$$

$$P_{em} = \frac{m\omega L I_2 [U_1 (\sigma\omega L \sin \theta + r_1 \cos \theta) - I_2 \omega L r_1]}{r_1^2 + \sigma^2 \omega^2 L^2}; \quad (1.2)$$

$$P_1 = mU_1 \left[\frac{U_1 r_1 + I_2 \omega L (\omega L \sigma \sin \theta - r_1 \cos \theta)}{r_1^2 + \sigma^2 \omega^2 L^2} \right]; \quad (1.3)$$

$$M_{em} = \frac{mpLI_2 [U_1 (\sigma \omega L \sin \theta + r_1 \cos \theta) - I_2 \omega L r_1]}{r_1^2 + \sigma^2 \omega^2 L^2}; \quad (1.4)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L [\sigma U_1 - I_2 (\sigma \omega L \cos \theta + r_1 \sin \theta)]}{U_1 r_1 + I_2 \omega L (\sigma \omega L \sin \theta - r_1 \cos \theta)}, \quad (1.5)$$

un darbībai ar uzdotu leņķi ε

$$I_1 = \frac{\sqrt{I_2^2 \omega^2 L^2 (r_1 \sin \varepsilon + \omega L \sigma \cos \varepsilon)^2 + (r_1^2 + \sigma^2 \omega^2 L^2) (U_1^2 - I_2^2 \omega^2 L^2)}}{r_1^2 + \sigma^2 \omega^2 L^2} - \frac{I_2 \omega L (\omega L \sigma \cos \varepsilon + r_1 \sin \varepsilon)}{r_1^2 + \sigma^2 \omega^2 L^2}, \quad (1.6)$$

$$P_{em} = m \omega L I_1 I_2 \sin \varepsilon; \quad (1.7)$$

$$P_1 = m I_1 (\omega L I_2 \sin \varepsilon + I_1 r_1); \quad (1.8)$$

$$M_{em} = mp L I_1 I_2 \sin \varepsilon; \quad (1.9)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L (\sigma I_1 + I_2 \cos \varepsilon)}{I_2 \omega L \sin \varepsilon + I_1 r_1}, \quad (1.10)$$

kur m – fāžu skaits;

ω – enkura strāvas leņķiskā frekvence, rad/s;

p – polu pāru skaits;

σ – enkura tinuma izkliedes koeficients;

I_2 – ierosmes tinuma strāva, kuras vērtība reducēta uz enkura tinumu, A;

r_1 – enkura tinuma aktīvā pretestība, Ω ;

L – induktivitāte, kas atbilst enkura reakcijas magnētiskai plūsmai, H.

Vienādojumi (1.1)–(1.10) ļauj konstruēt visas nepieciešamās ventiļdzinēja raksturlīknes, mainoties rotācijas frekvencei.

Jāatzīmē, ka izmantojot vienādojumus (1.1)–(1.10), pastāvīgos magnētus sinhronos dzinējos aizvieto ar nosacītu ierosmes tinumu ar ekvivalento strāvu I_2 , kura ir reducēta uz statora tinumu un veido tādu pašu indukcijas pirmo harmoniku gaisa spraugā, kā pastāvīgie magnēti [22].

Sinhronajos reaktīvajos dzinējos nav ierosmes tinuma ($I_2 = 0$) un nav arī pastāvīgo magnētu, tāpēc pamatvienādojami šādu dzinēju elektromagnētisko parametru noteikšanai darbībai ar uzdotu leņķi θ ir šādi

$$I_1 = \frac{U_1 \sqrt{(\omega L_{ad} \sigma \sin \theta + r_1 \cos \theta)^2 + \left[\omega L_{ad} \left(\frac{k_q}{k_d} + \sigma - 1 \right) \cos \theta - r_1 \sin \theta \right]^2}}{r_1^2 + \sigma \omega^2 L_{ad}^2 \left(\frac{k_q}{k_d} + \sigma - 1 \right)}; \quad (1.11)$$

$$P_{em} = \frac{\left[\omega L_{ad} \left(\frac{k_q}{k_d} + \sigma - 1 \right) \cos \theta - r_1 \sin \theta \right] (\sigma \omega L_{ad} \sin \theta + r_1 \cos \theta) \left(\frac{k_q}{k_d} + \sigma - 1 \right)}{\left[r_1^2 + \sigma \omega^2 L_{ad}^2 \left(\frac{k_q}{k_d} + \sigma - 1 \right) \right]^2} \times$$

$$\times m \omega L_{ad} U_1^2; \quad (1.12)$$

$$P_1 = m U_1^2 \left[\frac{r_1 + 0.5 \omega L_{ad} (1 - \frac{k_q}{k_d}) \sin 2\theta}{r_1^2 + \sigma \omega^2 L_{ad}^2 \left(\frac{k_q}{k_d} + \sigma - 1 \right)} \right]; \quad (1.13)$$

$$M_{em} = \frac{m p L_{ad} U_1^2 \left[\omega L_{ad} \left(\frac{k_q}{k_d} + \sigma - 1 \right) \cos \theta - r_1 \sin \theta \right]}{\left[r_1^2 + \sigma \omega^2 L_{ad}^2 \left(\frac{k_q}{k_d} + \sigma - 1 \right) \right]^2} \times$$

$$\times \frac{(\sigma \omega L_{ad} \sin \theta + r_1 \cos \theta) \left(1 - \frac{k_q}{k_d} \right)}{\left[r_1^2 + \sigma \omega^2 L_{ad}^2 \left(\frac{k_q}{k_d} + \sigma - 1 \right) \right]^2}; \quad (1.14)$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{\omega L_{ad} \left[\sigma \sin^2 \theta + \left(\frac{k_q}{k_d} + \sigma - 1 \right) \cos^2 \theta \right]}{r_1 + 0.5 \omega L_{ad} \left(1 - \frac{k_q}{k_d} \right) \sin 2\theta}, \quad (1.15)$$

un darbībai ar uzdotu leņķi ε ir šādi

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{(\omega L_{ad} \sigma \cos \varepsilon + r_1 \sin \varepsilon)^2 + \left[\omega L_{ad} \left(\sigma - 1 + \frac{k_q}{k_d} \right) \sin \varepsilon - r_1 \cos \varepsilon \right]^2}}; \quad (1.16)$$

$$P_{em} = 0.5 m \omega L_{ad} I_1^2 \left(1 - \frac{k_q}{k_d} \right) \sin 2\varepsilon; \quad (1.17)$$

$$P_1 = m I_1^2 \left[r_1 + 0.5 \omega L_{ad} \left(1 - \frac{k_q}{k_d} \right) \sin 2\varepsilon \right]; \quad (1.18)$$

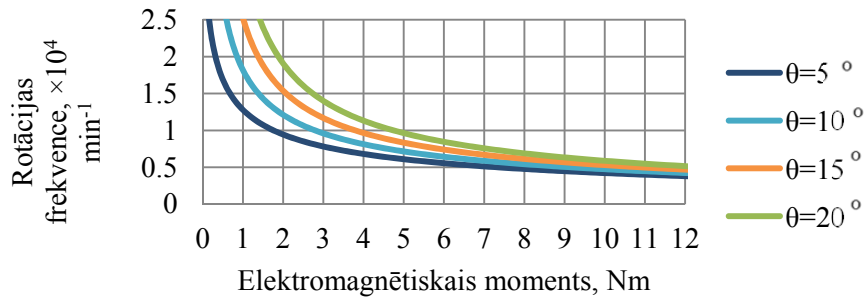
$$M_{em} = 0.5mpL_{ad}I_1^2 \left(1 - \frac{k_q}{k_d}\right) \sin 2\varepsilon; \quad (1.19)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L_{ad} \left(\cos^2 \varepsilon + \frac{k_q}{k_d} \sin^2 \varepsilon + \sigma - 1 \right)}{r_1 + 0.5\omega L_{ad} \left(1 - \frac{k_q}{k_d}\right) \sin 2\varepsilon}, \quad (1.20)$$

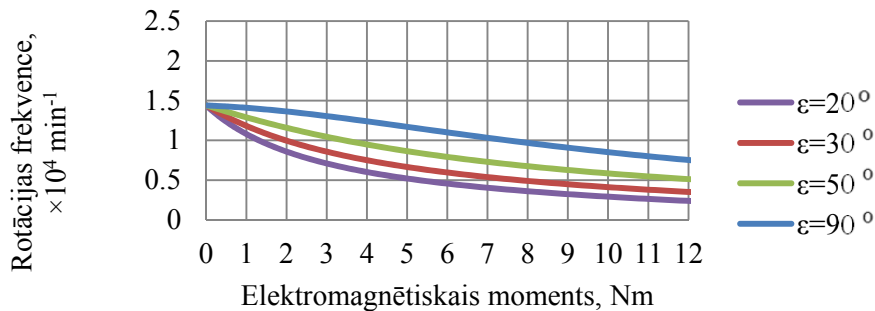
kur L_{ad} – induktivitāte, kas atbilst enkura garenreakcijas plūsmas, H;

k_q un k_d – enkura reakcijas šķērslauka un garenlauka formas koeficienti.

Izmantojot iepriekš dotos vienādojumus (1.1)–(1.10), iegūtas sinhronā ventiļdzinēja¹ ar pastāvīgajiem magnētiem mehāniskās raksturlīknes $n = f(M_{em})$ darba režīmos ar dažādām uzdotā leņķa θ (1.1. att.) un uzdotā leņķa ε vērtībām (1.2. att.).



1.1. att. Sinhronā ventiļdzinēja ar pastāvīgajiem magnētiem mehāniskās raksturlīknes ar dažādām uzdotā leņķa θ vērtībām

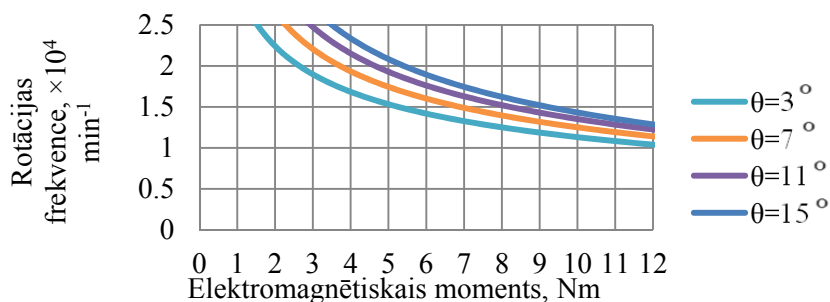


1.2. att. Sinhronā ventiļdzinēja ar pastāvīgajiem magnētiem mehāniskās raksturlīknes ar dažādām uzdotā leņķa ε vērtībām

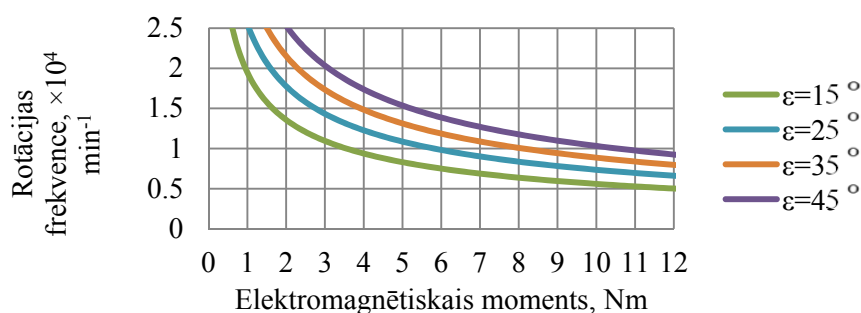
Sinhronajam reaktīvajam ventiļdzinējam² aprēķinātās mehāniskās raksturlīknes attiecīgos darba režīmos, izmantojot vienādojumus (1.11)–(1.20), parādītas 1.3. un 1.4. attēlos.

¹ Sinhronā ventiļdzinēja ar pastāvīgajiem magnētiem parametri: $p = 2$; $m = 3$; $U_1 = 92$ V; $L = 0.00061$ H; $r_1 = 0.25$ Ω ; $\sigma = 1.04$; pastāvīgo magnētu paliekošā indukcija 1.2 T un augstums 2 mm; pola pārklājuma koeficients 0.8; $I_2 = 50$ A.

² Sinhronā reaktīvā ventiļdzinēja parametri: $p = 2$, $m = 3$, $U_1 = 92$ V, $L_{ad} = 0.00061$ H, $r_1 = 0.25$ Ω , $\sigma = 1.04$, $k_q/k_d = 0.15$.



1.3. att. Sinhronā reaktīvā ventiļdzinēja mehāniskās raksturlīknes ar dažādām uzdotā leņķa θ vērtībām



1.4. att. Sinhronā reaktīvā ventiļdzinēja mehāniskās raksturlīknes ar dažādām uzdotā leņķa ϵ vērtībām

Analizējot sinhronā ventiļdzinēja vienādojumus un iegūtās raksturlīknes, var secināt, ka tas spēj nodrošināt plašu mehānisko raksturlīkņu spektru. Salīdzinot sinhronā ventiļdzinēja ar pastāvīgajiem magnētiem un sinhronā reaktīvā ventiļdzinēja raksturlīknes, redzams, ka dzinējiem ar pastāvīgajiem magnētiem ir plašākas iespējas mehānisko raksturlīkņu formas izvēlē, kas var būt līdzīgas paralēlas, virknes vai jauktas ierosmes kolektordzinēja raksturlīknēm. Savukārt sinhronie reaktīvie ventiļdzinēji, kas darbojas speciālos režīmos, var nodrošināt mehāniskās raksturlīknes, kas ir līdzīgas virknes ierosmes kolektordzinēja raksturlīknēm.

Izvēloties attiecīgus darba režīmus un īstenojamās raksturlīknes, var panākt arī pozitīvus blakus efektus, piemēram, ierobežot rotācijas frekvenci tukšgaitā, kas daudzos esošajos elektroinstrumentos rada zināmas problēmas un prasa speciālus risinājumus.

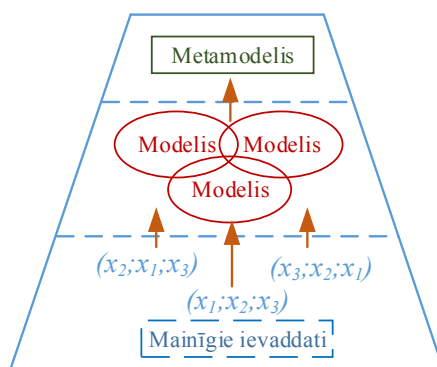
Vispārīgā gadījumā, ja, mainoties, ventiļdzinēja slodzei, regulē atsevišķus lielumus (I_2 , U_1 , θ vai ϵ), var nodrošināt jebkuras formas mehānisko raksturlīkni un augstus enerģētiskos rādītājus.

2. ELEKTRISKO DZINĒJU MAGNĒTISKĀ LAUKA SKAITLISKIE APRĒĶINI – PAMATS METAMODEĻU SINTĒZEI UN IZMANTOŠANAI DZINĒJU MAGNĒTISKO SISTĒMU OPTIMIZĀCIJAI

Otrajā nodaļā sniegts pārskats par elektrisko dzinēju magnētiskās sistēmas optimizāciju, pielietojot metamodeļus un balstoties uz magnētiskā lauka skaitliskiem aprēķinu rezultātiem. Pamatota metamodeļu sintēzes metodikas izvēle. Dots metamodeļu sintēzes metodikas apraksts.

Lai atvieglotu optimizācijas uzdevumu risināšanu, kas satur darbietilpīgus aprēķinus, mūsdienās nereti izmanto metamodeļus, kas ir matemātiskā modeļa vienkāršots modelis, jeb sarežģīta modeļa aproksimācija ar vienkāršu modeli [23, 24].

Vispārēja metamodelēšanas ideja ir parādīta 2.1. attēlā, kur pirmajā līmenī ir mainīgie faktori, kas būtiski ietekmē optimizācijas kritēriju, otrajā līmenī ir objekta skaitliskie modeļi, un trešajā līmenī ir metamodelis, kas apraksta iepriekšējā līmeņa modeļu kopumu. Metamodelēšanas galvenais uzdevums ir matemātiskā modeļa izveide, kas raksturo ieejas un izejas parametru savstarpējo saistību.



2.1. att. Vispārēja metamodelēšanas ideja

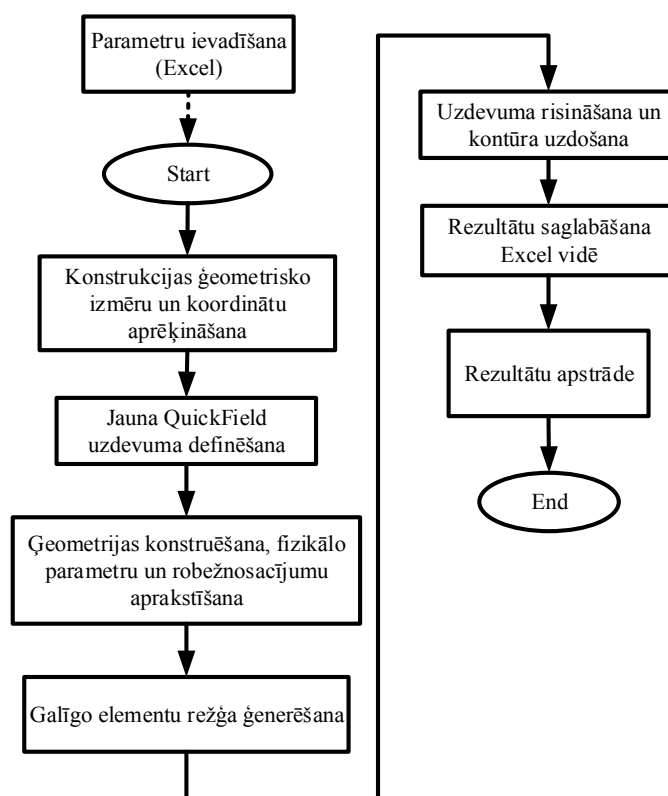
Elektrisko dzinēju magnētiskās sistēmas optimizācija, pielietojot metamodeļus var iedalīt piecos galvenos etapos:

1. *Optimizējamās sistēmas robežu noteikšana.*
2. *Optimizācijas kritērija, mainīgo faktoru, mainīgo parametru izmaiņas diapazonu un optimizācijas ierobežojumu izvēle.*
3. *Eksperimentu racionāla plānošana.*
4. *Eksperimentu realizēšana.*
5. *Metamodeļa sintēze un pētāmās sistēmas optimizācija.*

Jebkuras elektriskās mašīnas projektēšanā un optimizācijā nepieciešamo informāciju par mašīnas magnētisko lauku, ievērojot reālo magnētiskās sistēmas piesātinājumu, var iegūt, veicot tā skaitliskos aprēķinus saskaņā ar Maksvela vienādojumiem [25], izmantojot galīgo elementu metodi ar datorprogrammas *QuickField* [13] palīdzību.

Datorprogramma *QuickField* nodrošina ātru, vieglu un precīzu skaitlisko uzdevumu atrisināšanu. Tomēr, gadījumā ja skaitlisko eksperimentu skaits ir liels, rodas nepieciešamība to realizēšanu automatizēt. Šādam nolūkam ir izstrādāta programma *Microsoft Excel* vidē [15], izmantojot tajā iebūvēto apakšprogrammu *Visual Basic for Application (VBA)* [26]. Turklāt, izmantojot specialās *Active Field* tehnoloģijas kodus [14], iespējams apvienot izstrādāto programmu *Microsoft Excel* vidē ar datorprogrammu *QuickField*.

Izstrādātās programmas algoritms parādīts 2.2. attēlā.



2.2. att. Izstrādātās programmas algoritms

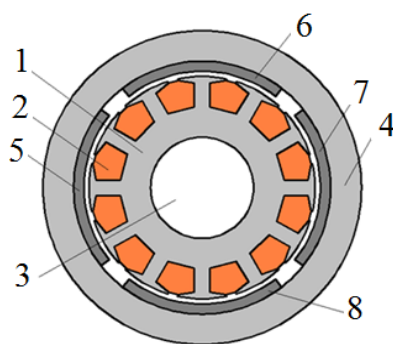
Izstrādātā programma nodrošina precīzu modeļa aprakstīšanu pēc ievadītiem datiem un būtiski vienkāršo skaitlisko eksperimentu realizēšanu.

Šajā darbā pētāmo bezkontakta sinhrono dzinēju optimizācijai nepieciešamo metamodeļu sintēzei tiek izmantota Latvijas zinātnieka V. Eglāja izstrādātā metodika [16], kura balstās uz tabulveida datu polinomiālu aproksimāciju, to vienkāršības, pietiekamas precizitātes un efektivitātes dēļ.

3. BEZKONTAKTU SINHRONO DZINĒJU JAUNO KONSTRUKCIJU IZSTRĀDE

Trešajā nodaļā ir aplūkotas plaši pielietoto bezkontakta sinhrono dzinēju konstrukcijas uzlabošanas iespējas un aprakstītas pētījumu laikā izstrādātās bezkontakta sinhrono dzinēju jaunās konstrukcijas, kuras spētu konkurēt ar esošajām.

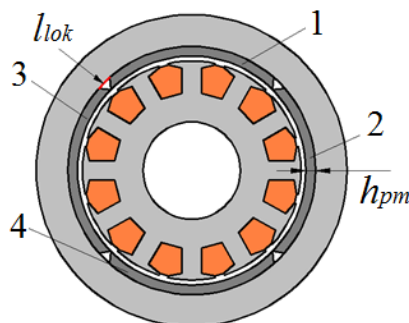
Attēlā 3.1. parādīta visbiežāk pielietotā četrpolu sinhronā dzinēja konstrukcija ar pastāvīgajiem magnētiem un ārējo rotoru [27, 28, 29]. Pola pārklājuma koeficientu šādos dzinējos parasti izvēlas robežās no 0.7 līdz 0.85. Šādam dzinējam ir relatīvi zems īpatnējais moments un stipras elektromagnētiskā momenta pulsācijas, kuras izraisa būtiskas vibrācijas, kas savukārt pasliktina dzinēja darbību.



3.1. att. Sinhronais dzinējs ar pastāvīgajiem magnētiem:

1 – stators; 2 – enkura tinums; 3 – vārpsta; 4 – rotora jūgs; 5–8 – pastāvīgie magnēti

Pēc veiktās sinhronā dzinēja ar pastāvīgajiem magnētiem magnētiskā lauka aprēķinu rezultātu un elektromagnētisko rādītāju analīzes, ir izstrādāta jauna konstrukcija, kura parādītā 3.2. attēlā. Šeit elektromagnētisko momentu pulsācijas samazināšanai pastāvīgie magnēti 1–4 izveidoti tā, lai to sānu malas pie dzinēja gaisa spraugas saskaras savā starpā un attālinās pa loku l_{lok} vietās, kur magnēti pieskaras pie rotora jūga iekšējas virsmas (Latvijas patent [30]).



3.2. att. Sinhronā dzinēja ar ārējo rotoru un pastāvīgajiem magnētiem piedāvātā konstrukcija:

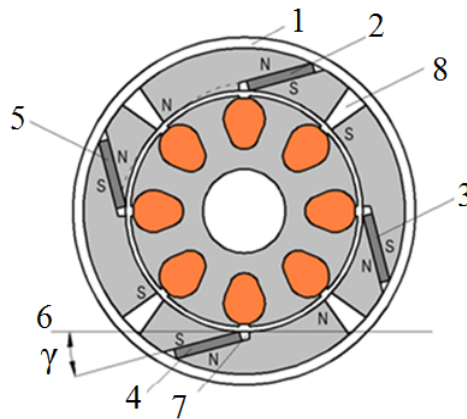
1–4 – pastāvīgie magnēti; h_{pm} – pastāvīgo magnētu augstums; l_{lok} – loka garums

Jaunās konstrukcijas sinhronā dzinēja ar pastāvīgajiem magnētiem (3.2 att.) loka l_{lok} garumu nosaka saskaņā ar izteiksmi

$$l_{lok} = \frac{\pi h_{pm}}{p}, \quad (3.1)$$

kur h_{pm} – pastāvīgo magnētu augstums.

Sinhrono dzinēju ar pastāvīgajiem magnētiem, kuri ir nostiprināti uz rotora virsmas, trūkums ir nepietiekami drošs pastāvīgo magnētu stiprinājums pie rotora jūga virsmas. Turklāt, šādā dzinējā nepieciešams izmantot pastāvīgos magnētus ar lielu pārklājuma koeficientu, kas savukārt palielina dzinēja kopējās izgatavošanas izmaksas. Tāpēc lai palielinātu sinhronā dzinēja drošumu un samazinātu dzinēja izgatavošanas izmaksas, ir izstrādāta vēl viena sinhronā dzinēja konstrukcija ar slīpi iebūvētiem pastāvīgajiem magnētiem rotora serdē (Latvijas patents [31]). Šī sinhronā dzinēja ar ārējo rotoru un pastāvīgajiem magnētiem konstrukcija ir parādīta 3.3. attēlā.



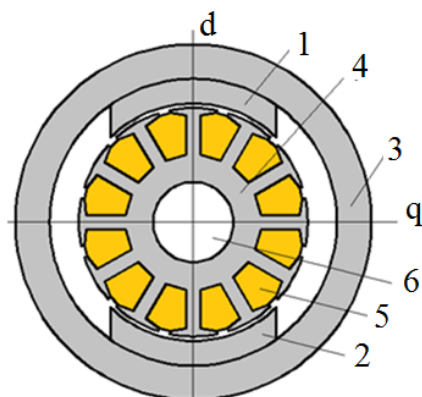
3.3. att. Sinhronā dzinēja jaunā konstrukcija ar slīpi iebūvētiem pastāvīgajiem magnētiem:

- 1 – nemagnētisks korpuss; 2–5 pastāvīgie magnēti; 6 – pieskares plakne; 7 – rotora izvirpojuma vieta;
8 – nemagnētiska sprauga

Saskaņā ar izgudrojumu [31] prizmatiskie pastāvīgie magnēti 2–5 ir novietoti rotora taisnstūrveida starppolu atstarpēs slīpi $\gamma = 10^\circ - 25^\circ$ leņķī attiecībā pret pieskares plaknēm 6 rotora izvirpojuma vietās 7, kur starppolu atstarpes iznāk gaisa spraugā. Šajā gadījumā magnētu magnetizēšanas virziens ir perpendikulārs starppolu atstarpju malām.

Pastāvīgo magnētu novietošana rotora serdē nodrošina drošu magnētu nostiprināšanu. Izstrādātajā dzinējā šķērslauka samazināšanai katra pola centrā ir izveidotas nemagnētiskas spraugas 8. Elektromagnētisko momentu pulsāciju samazināšanai šādā dzinējā piedāvāts gaisa spraugu izveidot nevienmērīgi, kas mainās no pola centra uz tā malām. Tas tuvina magnētiskās indukcijas sadalījumu gaisa spraugā sinusoīdālam. Iespējama nevienmērīgā gaisa sprauga 3.3. attēlā ir parādīta vienam polam ar raustītu līniju.

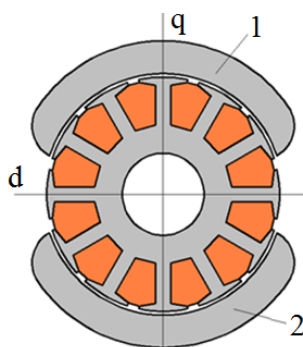
Bieži pielietotai sinhronā reaktīvā dzinēja konstrukcijai ar izvirzītiem poliēm (3.4. att.) ir neliels īpatnējais elektromagnētiskais moments un tā poli ir magnētiski saistīti ar masīvo feromagnētisko jūgu, kurš palielina kopējo dzinēja masu.



3.4. att. Sinhronais reaktīvais dzinējs ar izvirzīto polu rotoru:

1, 2 – rotora izvirzītie poli; 3 – feromagnētiskais jūgs; 4 – stators; 5 – enkura tinums; 6 – vārpsta

Ar mērķi uzlabot sinhronā reaktīvā dzinēja īpatnējos elektromagnētiskos rādītājus tika piedāvāts atteikties no smaga un liela feromagnētiskā jūga un izveidot dzinēja ārējo rotoru no feromagnētiskiem segmentiem 1, 2 (3.5. att.), kuri savā starpā ir atdalīti ar nemagnētisko vidi (Latvijas patents [32]). Šajā gadījumā pola pārklājuma koeficientu jāizvēlas robežās no 0.8 līdz 0.98. Atteikšanās no feromagnētiskā jūga ļauj samazināt dzinēja ārējo diametru, bet, palielinot pola pārklājuma koeficientu pieaug dzinēja elektromagnētiskais moments.



3.5. att. Sinhronā reaktīvā dzinēja jaunā konstrukcija:

1, 2 – feromagnētiskās segmentveida paketes

Jaunās konstrukcijas sinhronais reaktīvais dzinējs konstruktīvi ir pietiekoši vienkāršs un lēts izgatavošanā, bet nelielās nemagnētiskās atstarpes starp poliēm saglabā ievērojamu magnētisko plūsmu šķērsass virzienā, kā arī elektromagnētiskā momenta pulsācijas, kas izraisa ievērojamas dzinēja vibrācijas darbības laikā.

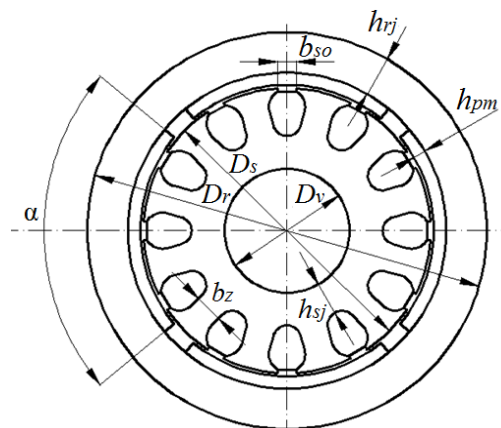
Lai samazinātu elektromagnētiskā momenta pulsācijas, piedāvāts izveidot segmentus slīpi attiecībā pret statora rievām par vienu statora zoba iedaļu (Latvijas patents [33]).

4. BEZKONTAKTU SINHRONO DZINĒJU JAUNO KONSTRUKCIJU ANALĪZE UN OPTIMIZĀCIJA

Šajā nodaļā ir veiktas ātrgaitas mazjaudas bezkontakta sinhrono dzinēju (sinhronā dzinēja ar pastāvīgajiem magnētiem un reaktīvā dzinēja) ar ārējo rotoru analīze un optimizācija, izmantojot magnētiskā lauka skaitliskos aprēķinus un sintezētos metamodeļus. Salīdzināti no īpatnējā elektromagnētiskā momenta viedokļa sinhronie dzinēji ar dažādu materiālu pastāvīgajiem magnētiem un sinhronie reaktīvie dzinēji.

Piedāvātā dzinēju optimizācijas metodika, izmantojot sintezētos metamodeļus, zemāk tiek ilustrēta ar reālu piemēru. Tiek aplūkota četrpolu sinhronā dzinēja ar pastāvīgajiem magnētiem un ārējo rotoru optimizācija. Šis dzinējs paredzēts izmantošanai tiešai piedziņai ātrgaitas rokas elektriskajos instrumentos, piemēram, ēvelē, kur pētāmā dzinēja gabarīti ir ierobežoti ar tā novietošanas vietu. Optimizācijas uzdevums ir maksimizēt pētāmā dzinēja galveno magnētisko plūsmu, kuru rada pastāvīgie magnēti ierobežotos dzinēja gabarītos, ievērojot magnētiskās ķēdes piesātinājuma ierobežojumus.

Pētāmā četrpolu sinhronā dzinēja ar ārējo rotoru un pastāvīgajiem magnētiem šķērsriezums ir parādīts 4.1. attēlā.



4.1. att. Sinhronā dzinēja ar pastāvīgajiem magnētiem šķērsriezums

Par mainīgiem parametriem optimizācijas uzdevuma atrisināšanai izvēlēti pieci mainīgie parametri, kuri galvenokārt ietekmē pētāmā dzinēja galveno magnētisko plūsmu, kas savukārt nosaka dzinēja jaudu un elektromagnētisko momentu:

- pola pārklājuma leņķis α ;
- pastāvīgo magnētu paliekošā indukcija B_r ;
- pastāvīgo magnētu relatīvā magnētiskā caurlaidība μ_r ;
- pastāvīgo magnētu augstums h_{pm} ;
- rotora jūga augstums h_{rj} .

Izvēloties mainīgo parametru izmaiņas diapazonu un sastādot eksperimentu plānu, veikti skaitliskie eksperimenti, kuru pamatā ir magnētiskā lauka skaitliskie aprēķini, izmantojot Maksvela vienādojumus. Magnētisko lauku aprēķini veikti, izmantojot GEM ar datorprogrammas *QuickField* un speciāli izstrādātās programmas *Microsoft Excel* vidē palīdzību.

Izmantojot metodiku, kuras pamatā ir tabulveida datu polinomiāla aproksimācija, balstoties uz magnētiskā lauka skaitlisko aprēķinu rezultātiem, sintezēti šādi metamodeļi

$$\Phi = (-0.3168 - 0.03175 \mu_r^* - 0.8246 B_r^{*2} + 0.677 B_r^* h_{pm}^* + 0.1363 \alpha^* h_{pm}^* - 1.583 B_r^* + 0.235 h_{rj}^* - 0.1394 h_{rj}^* B_r^* - 0.0274 h_{rj}^{*2}) \cdot 10^{-3}; \quad (4.1)$$

$$B_{rj} = 1.127 - 0.6525 h_{rj}^* - 0.265 B_r^{*2} + 0.8705 \alpha^* B_r^* + 0.2748 \alpha^* h_{rj}^* - 1.939 \alpha^* h_{pm}^* + 2.158 B_r^* + 2.425 h_{pm}^* - 0.1979 B_r^* h_{rj}^* - 1.124 B_r^* h_{pm}^* + 0.3878 h_{pm}^* h_{rj}^* - 0.228 \alpha^* \mu_r^*; \quad (4.2)$$

$$B_{sj} = -0.9987 - 0.2308 \mu_r^* - 1.311 B_r^{*2} - 0.0144 h_{rj}^{*2} + 0.8229 \alpha^* h_{pm}^* + 3.101 B_r^* + 0.2155 h_{rj}^* + 0.0583 B_r^* h_{rj}^* - 0.1283 h_{pm}^* h_{rj}^*; \quad (4.3)$$

$$B_{sz} = 0.2918 + 1.226 h_{pm}^* - 0.7185 \alpha^* + 0.0571 B_r^* h_{rj}^* - 0.0157 h_{rj}^{*2} + 2.867 B_r^* - 0.2891 \mu_r^{*2} - 0.9883 B_r^{*2} - 0.5952 B_r^* h_{pm}^* + 0.1017 \alpha^* h_{rj}^*, \quad (4.4)$$

kur $\alpha^* = 0.01\alpha$, $B_r^* = 1B_r$, $\mu_r^* = 1\mu_r$, $h_{pm}^* = 0.2h_{pm}$, $h_{rj}^* = 1h_{rj}$;

Φ – magnētiskā plūsma dzinēja gaisa spraugā, Wb;

B_{rj} – magnētiskā indukcija rotora jūgā, T;

B_{sj} – magnētiskā indukcija statora jūgā, T;

B_{sz} – magnētiskā indukcija statora zobā, T.

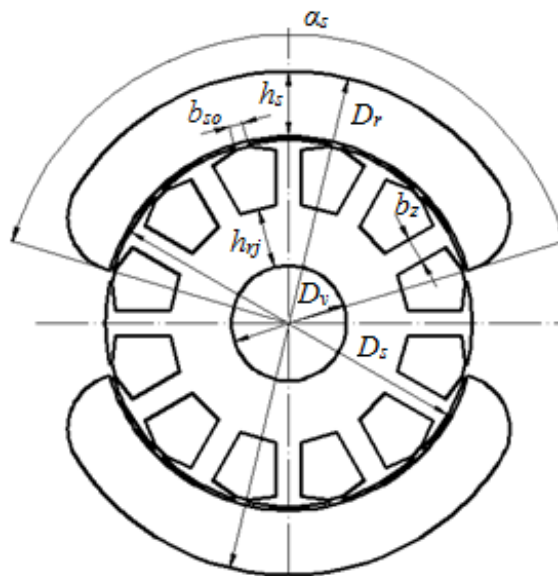
Sintezēto metamodeļu (4.1)–(4.4) pārbaude, izmantojot datorprogrammu *QuickField*, parādīja, ka relatīvo kļūdu vērtības nepārsniedz 8 % gan eksperimentu plānā iekļautos punktos, gan starppunktos.

Maksimizējot funkciju (4.1) un pieņemot magnētiskās sistēmas piesātinājuma ierobežojumus, tā lai saskaņā ar (4.2)–(4.4) aprēķinātās magnētiskās indukcijas nepārsniegtu 1.9 T statora zobos, 1.65 T statora un rotora jūgos, atrastas mainīgo parametru optimālās vērtības, kuras nodrošina maksimālo magnētisko plūsmu pētāmajam dzinējam ar ārējo diametru $D_r = 63$ mm. Šīs vērtības dotas 4.1. tabulā

Pētāmā sinhronā dzinēja ar pastāvīgajiem magnētiem optimālie parametri

Apzīmējumi	Vērtības	Mērvienības
α	133	el. grādi
h_{pm}	3	mm
h_{rj}	5	mm
B_r	0.831	T
μ_r	1.02	-
Φ	0.00163	Wb

Lai novērtētu sinhrono reaktīvo dzinēju izmantošanas efektivitāti mazjaudas elektroiekārtās, šajā apakšnodaļā aplūkota jaunās konstrukcijas divpola ($p = 1$) sinhronā reaktīvā dzinēja ar ārējo segmentveida rotoru optimizācija, izmantojot metamodeļus. Optimizācijas uzdevums ir atrast maksimālo īpatnējo elektromagnētisko momentu sinhronajam reaktīvajam dzinējam ar noteiktu nominālo jaudu un rotora rotācijas frekvenci. Pētāmā sinhronā reaktīvā dzinēja šķērsriezums parādīts 4.2. attēlā.



4.2. att. Sinhronā reaktīvā dzinēja šķērsriezums

Pētāmā sinhronā reaktīvā dzinēja sākotnējai optimizācijai un magnētiskā lauka analīzei pieņemti trīs mainīgie parametri:

- pola pārklājuma leņķis α ;
- rotora segmentu augstums h_s ;
- statora ārējais diametrs D_s .

Statora zobu platums b_z un jūga augstums h_{rj} ir atkarīgi no mainīga statora diametra, pieņemot, ka statora rievu laukums ir nemainīgs.

Izmantojot skaitlisko eksperimentu rezultātus, sintezēti šādi metamodeļi

$$m_{ip} = -16.670 - 1.601(\alpha_s^*)^{-1} + 5.749(h_s^*)^{-1} + 6.25\alpha_s^* + 5.068h_s^* + 1.073D_s^* - 0.1004D_s^* - 2.183(\alpha_s^*)^2 - 0.6578D_s^*(h_s^*)^{-1} - 0.01136(\alpha_s^*)^{-1} - 0.04832(h_s^*)^{-5}; \quad (4.5)$$

$$B_r = -5.53 + 0.5351(\alpha_s^*)^{-1} + 2.928(h_s^*)^{-1} + 1.961h_s^* + 0.3122D_s^*\alpha_s^* - 0.3738D_s^*(h_s^*)^{-1} + 1.002h_s^*D_s^* - 0.1416(\alpha_s^*)^{-2} - 0.00993(D_s^*)^{-2}(\alpha_s^*)^{-3}; \quad (4.6)$$

$$B_{sj} = -1.26 + 1.87D_s^* - 5.118(\alpha_s^*)^{-1} + 3.263(h_s^*)^{-1} + 8.497\alpha_s^* + 0.3937(\alpha_s^*)^{-3} + 0.8932\alpha_s^3 - 2.299\alpha_s^*D_s^*(h_s^*)^{-1} + 0.7807(\alpha_s^*)^2D_s^* - 5.541(\alpha_s^*h_s^*)^2 - 0.132(D_s^*)^3(h_s^*)^{-1} - 0.2957\alpha_s^*(D_s^*)^{-1}(h_s^*)^2 + 0.2881\alpha_s^*(D_s^*)^3; \quad (4.7)$$

$$B_{sz} = -1.71 - 0.3719D_s^* - 1.835(\alpha_s^*)^{-1} + 11.19(h_s^*)^{-1} + 9.988h_s^* - 1.404h_s^*(D_s^*)^{-1} + 0.4016(D_s^*h_s^*)^{-1} + 0.8739(\alpha_s^*h_s^*)^{-1} - 1.069(h_s^*)^{-3}, \quad (4.8)$$

kur $\alpha_s^* = -1.667 + 0.01852\alpha$, $D_s^* = -6.167 + 0.167D_s$, $h_s^* = 0.4196 + 0.01787h_s$;

m_{ip} – īpatnējais elektromagnētiskais moments, Nm/l;

B_r – magnētiskā indukcija rotora segmentos, T.

Sintezēto metamodeļu (4.5)–(4.8) pārbaude, izmantojot datorprogrammu *QuickField*, parādīja, ka relatīvo kļūdu vērtības nepārsniedz 5 % gan eksperimentu plānā iekļautajos punktos, gan starppunktos.

Sintezētie metamodeļi (4.5)–(4.8) izmantoti lai maksimizētu īpatnējo elektromagnētisko momentu jaunās konstrukcijas sinhronajam reaktīvajam dzinējam ar noteiktu pilnās strāvas vērtību statora rievās. Ievērojot indukcijas ierobežojumus ($B_{rs} \leq 1.65$ T, $B_{sj} \leq 1.65$ T, $B_{sz} \leq 2$ T), atrastas šī dzinēja mainīgo parametru optimālās vērtības, kuras nodrošina maksimālo īpatnējo elektromagnētisko momentu ja strāvas blīvums $j = 6$ A/mm². Šīs vērtības dotas 4.2 tabulā.

4.2. tabula

Sinhronā reaktīvā dzinēja optimālie parametri

Apzīmējumi	Vērtība	Mērvienības
α	143	el.grādi
h_s	6	mm
D_s	46	mm
m_{ip}	1.74	Nm/l

Šajā nodaļā veikta arī sinhrono dzinēju ar dažādiem pastāvīgo magnētu materiāliem un jaunās konstrukcijas sinhrono reaktīvo dzinēju ar vienādu polu pāru skaitu ($p = 1$) salīdzinošā

analīze pēc īpatnējā elektromagnētiskā momenta dzinēju jaudas diapazonā no 1 kW līdz 2.5 kW.

Pētāmo bezkontakta sinhrono dzinēju ar jaudu 1 kW salīdzinošā analīze rāda, ka īpatnējais elektromagnētiskais moments dzinējam ar retzemju pastāvīgajiem magnētiem ir 1.4 reizes lielāks, un īpatnējais elektromagnētiskais moments dzinējam ar ferītu pastāvīgajiem magnētiem 1.36 reizes lielāks nekā īpatnējais elektromagnētiskais moments reaktīvajam dzinējam ar segmenveida rotoru. Turklāt īpatnējais elektromagnētiskais moments pieaug, pieaugot dzinēju jaudai. Tomēr īpatnējais elektromagnētiskais moments dzinējam ar pastāvīgajiem magnētiem pieaug straujāk nekā reaktīvajam dzinējam. Aplūkojot dzinējus ar jaudu 2.5 kW, var secināt, ka īpatnējas elektromagnētiskais moments dzinējiem ar retzemju pastāvīgajiem magnētiem ir 1.55 reizes lielāks un īpatnējais elektromagnētiskais moments dzinējiem ar ferītu pastāvīgajiem magnētiem 1.52 reizes lielāks par īpatnējo elektromagnētisko momentu reaktīvajam dzinējam.

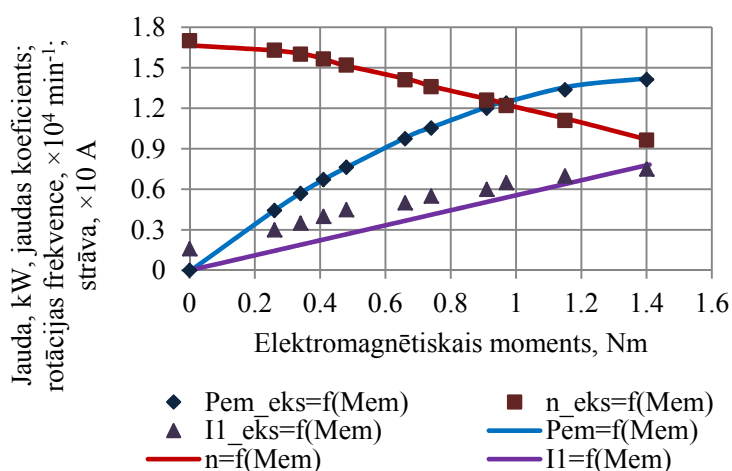
Novērtējot aplūkoto dzinēju salīdzināšanu kopumā, jāsecina, ka jaunās konstrukcijas sinhronie reaktīvie dzinēji daudzos gadījumos, kad masas gabarītu nosacījumi nav noteicošie, var sekmīgi konkurēt ar pastāvīgo magnētu dzinējiem, jo tie ir ievērojami lētāki un drošāki ekspluatācijā.

5. BEZKONTAKTU SINHRONO DZINĒJU EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

Šajā nodaļā ir apkopoti bezkontakta sinhrono dzinēju eksperimentālo pētījumu rezultāti ar rotējošu un nobremzētu rotoru.

Promocijas darbā veikto pētījumu rezultātā ir izstrādāti un izgatavoti divi sinhronie dzinēji ar pastāvīgajiem magnētiem un ir izstrādāts jaunās konstrukcijas sinhronais reaktīvais dzinējs ar segmentveida ārējo rotoru. Sinhronie dzinēji ar pastāvīgajiem magnētiem ir izstrādāti darbībai ar elektronisku komutāciju kā ventiļdzinēji. Pirmā dzinēja ar pastāvīgajiem magnētiem nominālā jauda ir $P_N = 1.2$ kW, otrā dzinēja – $P_N = 0.8$ kW. Savukārt sinhronais reaktīvais dzinējs ir izstrādāts tiešai darbībai no tīkla ar frekvenci 50 Hz un nominālo jaudu $P_N = 1$ kW.

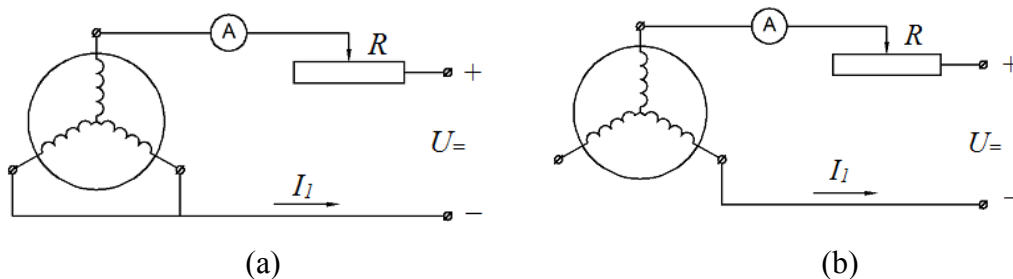
Noslogojot izgatavoto sinhrono dzinēju ar pastāvīgajiem magnētiem, kura nominālā jauda ir $P_N = 1.2$ kW, pētījumos ar rotējošo rotoru uzņemtās raksturlīknes ir salīdzinātas ar aprēķinu ceļā iegūtām, izmantojot 1. nodaļā dotos vienādojumus. Minētās raksturlīknes parādītas 5.1. attēlā.



5.1. att. Eksperimentālās un aprēķinātās raksturlīknes ventiļdzinējam ar pastāvīgajiem magnētiem un nominālo jaudu $P_N = 1.2$ kW

Eksperimentāli uzņemtās ventiļdzinēja raksturlīknes parāda labu sakritību ar aprēķinu ceļā iegūtajām.

Sinhronā dzinēja leņķa raksturlīknes eksperimentāli var noteikt arī statiskā režīmā ar uzdotu enkura strāvas vērtību un ar nobremzētu dzinēja rotoru [34]. Šajā gadījumā enkura tinums tiek barots no līdzstrāvas avota saskaņā ar shēmu 5.2. att. (a) vai 5.2. att. (b).



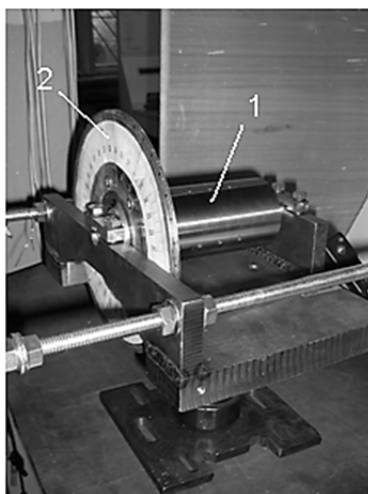
5.2. att. Sinhronā dzinēja trīs fāžu enkura tinuma savienošanas shēmas eksperimentā ar nobremzētu dzinēja rotoru:

(a) – līdzstrāva plūst visās fāzēs; (b) – līdzstrāva plūst divās fāzēs

Saskaņā ar statistiskā elektromagnētiskā momenta noteikšanas metodi, magnetizējošā spēka pamatharmonikai, kuru rada līdzstrāva $I_{1=}$ pie nobremzēta dzinēja rotora, jābūt vienāda ar magnetizējošā spēka pamathormuniku, kuru rada maiņstrāva I_1 , plūstot dzinēja enkura fāžu tinumos, kad rotors rotē. Enkura trīs fāžu tinuma savienošanas shēmai, kas parādīta 5.2. att. (a), līdzstrāvas vērtība ir vienāda ar $I_{1=} = \sqrt{2}I_1$, bet shēmai 5.12. att. (b) līdzstrāvas vērtība ir $I_{1=} = \sqrt{\frac{3}{2}}I_1$. Aplūkotajās shēmās enkura strāvas vērtības regulēšanai paredzēts reostats R .

Elektromagnētiskā momenta noteikšanai metodika dzinējam ar nobremzētu rotoru ļauj vienkārši bez speciālām slogošanas ierīcēm ātri iegūt eksperimentālos rezultātus.

Eksperimentālos pētījumos ar nobremzētu rotoru pārbaudīts otrais izgatavots dzinējs ar pastāvīgajiem magnētiem, kura nominālā jauda ir $P_N = 0.8$ kW. Pētāmā dzinēja statistiskā elektromagnētiskā momenta leņķa raksturlīknes eksperimentālai uzņemšanai izgatavotais stends parādīts 5.3. attēlā.



5.3. Sinhronais dzinējs ar ārējo rotoru (1) un eksperimentālais stends ar graduētu disku (2) statistiskās leņķa raksturlīknes uzņemšanai

Lai radītu statisko momentu pētāmā dzinēja rotoram ir piekārts svars W , kura lielumu var mainīt. Atkarībā no piekārtā svara lieluma, to iedarbības rezultātā dzinēja rotors pagriežas par noteiktu leņķi un gadījumā ja magnetizējošie spēki, kuri darbojas uz dzinēja rotoru ir lielāki par spēku, kuru rada rotoram piekārtais svars, dzinēja rotors noturas šajā stāvoklī. Statisko elektromagnētisko momentu, zinot pētāmajam dzinējam pieliktā svara lielumu nosaka kā

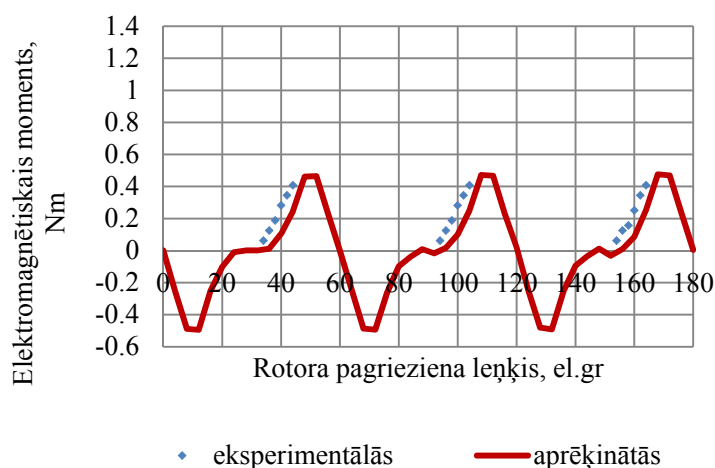
$$M_{em} = 9.81 \cdot W \cdot R_r, \quad (5.1)$$

kur W – pieliktā svara vērtība, kg;

R_r – virsmas rādiuss, kur pielikts svars, m.

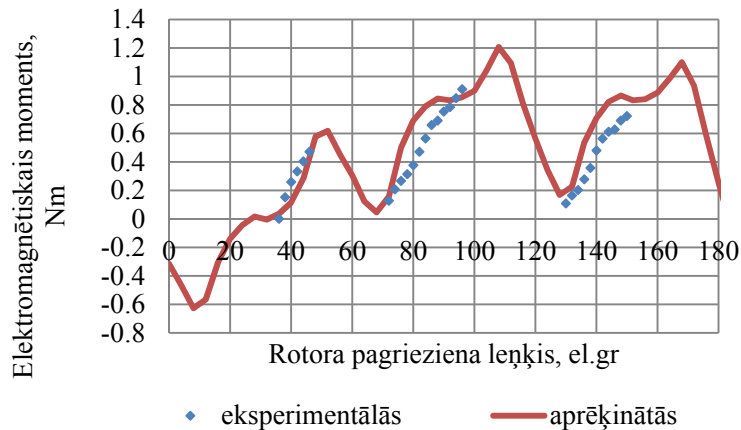
Rotora pagriešanās leņķa noteikšanai uz rotora frontālās daļas ir piestiprināts disks ar graduētu skalu.

Attēlā 5.4. parādītas eksperimentāli uzņemtās statiskā elektromagnētiskā momenta leņķa raksturlīknes salīdzinājumā ar magnētisko lauku skaitlisko aprēķinu ceļā iegūtajām gadījumā, kad magnētisko lauku dzinējā rada tikai tajā esošie pastāvīgie magnēti.

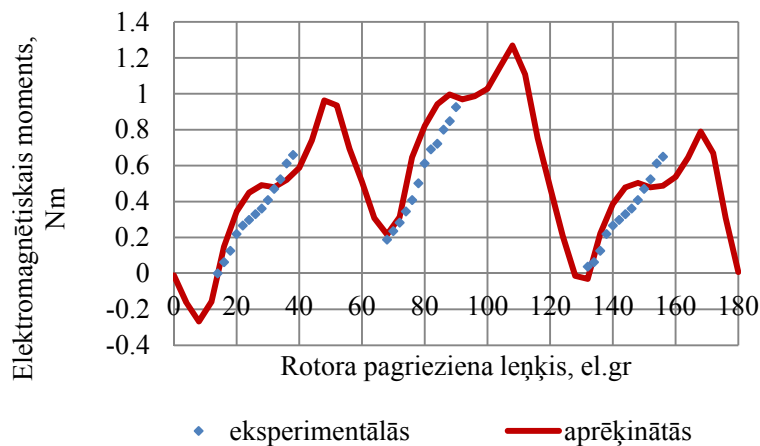


5.4. att. Elektromagnētiskā momenta leņķa raksturlīknes, kad $I_l = 0$ A

Lai ierobežotu dzinēja silšanu, elektromagnētiskā momenta leņķa raksturlīknes uzņemtas eksperimentāli un skaitliski aprēķinātas pētāmajam dzinējam ar pazeminātu enkura fāzes strāvu $I_l = 3.5$ A. Tad, pirmajā mēģinājumā ar nobremzētu rotoru, saslēdzot enkura tinumu saskaņā ar 5.2. attēlā parādīto shēmu (a), līdzstrāvas vērtība, kura plūst enkura tinumā, ir vienāda ar $I_{1=} = \sqrt{2}I_l = \sqrt{2} \cdot 3.5 = 5$ A, bet otrajā – saslēdzot enkura tinumu saskaņā ar shēmu (b), līdzstrāvas vērtība ir vienāda ar $I_{1=} = \sqrt{\frac{3}{2}}I_l = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot 3.5 = 4.3$ A. Pirmajā mēģinājumā iegūtie eksperimentālie dati ir salīdzināti ar skaitliski aprēķinātiem, un parādīti 5.5. attēlā, savukārt otrajā mēģinājumā iegūtie dati parādīti 5.6. attēlā.



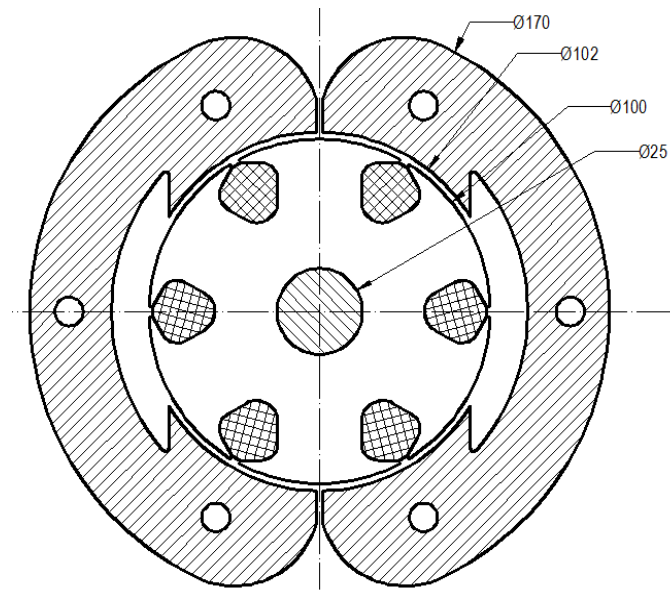
5.5. att. Elektromagnētiskā momenta leņķa raksturlīknes, kad $I_l = 3.5$ A un shēma (a)



5.6. att. Elektromagnētiskā momenta leņķa raksturlīknes, kad $I_l = 3.5$ A un shēma (b)

Kā redzams no 5.4.–5.6. attēlos parādītām elektromagnētiskā momenta leņķa raksturlīkņēm, skaitliski aprēķinātā elektromagnētiskā momenta leņķa raksturlīkne grafikos ir nedaudz augstāk salīdzinājumā ar eksperimentāli iegūtiem raksturlīkņēm, kas acīmredzot izskaidrojams ar to, ka izstrādātajā dzinējā ir izmantoti vājāki pastāvīgie magnēti nekā ir ielānots aprēķinos. Kopumā eksperimentālās pārbaudes rezultāti parādīja apmierinošu sakritību ar skaitliski aprēķinātiem. Tas ļauj secināt, ka eksperimentāliem pētījumiem, var izmantot arī režīmus ar nobremzētu rotoru.

Promocijas darbā izstrādāts uzlabotās konstrukcijas sinhronais reaktīvais dzinējs ar nominālo jaudu $P_N = 1$ kW un nominālo rotācijas frekvenci $n_N = 3000$ min⁻¹. Tā šķērsgriezums parādīts 5.7. attēlā.



5.7. att. Izstrādātā sinhronā reaktīvā dzinēja šķērsriezums ar izmēriem ($l_{\delta} = 100$ mm)

Izstrādātā uzlabotās konstrukcijas sinhronā reaktīvā dzinēja magnētiskās plūsmas samazināšanai pa šķērsasi segmentveida rotora paketēs izveidotas papildus nemagnētiskās atstarpes („logi”).

GALVENIE DARBA REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

1. Sintezēti metamodeļi sinhronajiem dzinējiem ar pastāvīgajiem magnētiem un reaktīvajiem dzinējiem ar ārējo rotoru, kurus ar pietiekamu precizitāti var izmantot dzinēju analīzē un optimizācijā.
2. Izstrādāta sinhrono dzinēju ar pastāvīgajiem magnētiem un sinhrono reaktīvo dzinēju ar ārējo rotoru konstrukcijas optimizācijas metodika, kas balstās uz magnētiskā lauka skaitliskiem aprēķiniem un metamodeļu izmantošanas.
3. Piedāvāti jaunas konstrukcijas sinhronie dzinēji ar pastāvīgajiem magnētiem un sinhronie reaktīvie dzinēji, kuriem pastāvīgo magnētu gadījumā īpatnējais moments ir par 10–15 %, bet reaktīvā dzinēja gadījumā par aptuveni 30–40% lielāks, salīdzinot ar zināmiem prototipiem.
4. Parādīts, ka pētāmiem bezkontakta sinhroniem dzinējiem jaudu diapazonā no 1 kW līdz 2.5 kW vidēji īpatnējais moments dzinējiem ar retzemju pastāvīgajiem magnētiem ir par 32 % lielāks un īpatnējais moments dzinējiem ar ferītu pastāvīgajiem magnētiem ir par 30 % lielāks nekā īpatnējais moments reaktīvajam dzinējam ar segmentveida rotoru.
5. Pierādīts, ka vairākos gadījumos, kad masas un gabarītu nosacījumi nav noteicošie, jaunās konstrukcijas sinhronie reaktīvie dzinēji var sekmīgi konkurēt ar sinhronajiem dzinējiem ar pastāvīgajiem magnētiem, jo tie ir ievērojami lētāki un drošāki ekspluatācijā.
6. Izstrādāta speciāla programma *Microsoft Excel* vidē, izmantojot *VisualBasic* programmēšanas valodu, kura ļauj būtiski ietaupīt darba un laika resursus programmā *QuickField* ievadīto datu sagatavošanā un magnētiskā lauka aprēķinu rezultātu apstrādē.
7. Izstrādāti un izgatavoti divi sinhronie ventiļdzinēji ar pastāvīgajiem magnētiem un nākamajai iespējamai ražošanai izstrādāts viens sinhronais reaktīvais dzinējs.
8. Izgatavoto dzinēju eksperimentālā pārbaude veikta gan režīmos ar rotējošu, gan ar nobremzētu rotoru. Eksperimentāli uzņemtās raksturīknes labi sakrīt ar teorētiski aprēķinātajām.

KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Waide P., Brunner C. U. *Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems*. International Energy Agency, Energy efficiency series, 2011. 128 p. Available from: www.iea.org.
2. Vila Mani M. *A quick overview on rotatory brush and brushless DC motors*. Ingenia-cat – Motion Control Department, Barcelona, Spain: 2006. Available from: <http://www.ingeniamc.com/Es/Soporte/Centro-Aprendizaje.aspx>.
3. Reston Condit. *Brushed DC Motor Fundamentals*. Microchip Technology Inc., AN905, 2004, 10 p. Available from: <http://ww1.microchip.com>
4. Бут Д. А. *Бесконтактные электрические машины*. Москва: Высшая школа, 1990. 416 стр.
5. Levins N., Kamoliņš E., Vītoliņa S. *Bezkontaktu elektriskās mašīnas*. Rīga: RTU, 2011. 275 lpp.
6. Yedamale P. *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. Microchip Technology Inc. 2003, 20 p. Available from: <http://electrathonoftampabay.org>.
7. Gieras, J.F., Gieras, I.A. Recent developments in electrical motors and drives. In: *International Conference on Electrotejnic and Electronics Eng*. Bursa, Turkey, 2001. 8 p. Available from: <http://www.researchgate.net>.
8. Duane C. Hanselman. *Brushless Permanent-Magnet Motor Design*. McGraw-Hill, Singapore, 1994. 190 p.
9. Miller T. J. E., Hendershot J.R. *Design of brushless permanent magnet motors*. Oxford: Clarendon Press, 1994. 584 p.
10. Chaieb M., Naurez Ben Hadj et al. A comparative Study of two Permanent Magnet Motors Structures with Interior and Exterior Rotor. *Journal of Asian Vehicles*. 2010. Volume 8, Number 1, pp. 1363–1370.
11. Schramm A., Gerling D. Researches on the Suitability of Switched Reluctance Machines and Permanent Magnet Machines for Specific Aerospace Applications Demanding Fault Tolerance. *Presented at the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2006)*, Taormine, Sicilian, 2006. pp. 56–60.
12. Vitek O., Prochazka O., Pazdera I, Hajek V. Design of Compact BLDC Drive. *Proceeding of the 1st International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. 2011. pp. 23–28.
13. Tera Analysis. *QuickField. Finite Element Analysis System. Version 5.7. User's Guide*. Denmark, 2010. 269 p. Available from: <http://www.quickfield.com/downloads.htm>
14. Tera Analysis, *ActiveField technology*. Available from: <http://active.quickfield.com>.
15. Kukjane L., Brakanskis U., Dirba J. VBA-Program for the Automatic Analysis of Brushless DC Motor Magnetic Field. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Electrical and Control Technologies (ECT-2011)*. Lithuania, Kaunas, 5–6 May, 2011. Kaunas, 2011, pp. 231–234.
16. Эглайс В. О. Синтез регрессионной модели объекта на основе табличных данных. *Изв. АН. Латв. ССР. Сер. физ. и тех. наук*. 1980, Nr. 4. стр. 109–112.
17. Bakshi U. A., Bakshi M. V. *Asynchronous machines. First Edition*. India: Technical Publications Pune, 2008. 278. p.
18. Вольдек, А. И. *Электрические машины*. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. 3-е изд., Ленинград: «Энергия», 1978. 831 стр.
19. Бекишев Р. Ф. Качин С. И. Боровиков Ю. С. Совершенствование коллекторных электрических машин систем электроприводов. *Изв. Томского политехнического университета*. 2003, No 3. стр. 107–113.
20. Dirba J, Ketners K. *Elektriskās mašīnas*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2009. 534 lpp.
21. Dirba J. *Sinhrono mašīnu speciālie režīmi*. Rīga: RTU Izdevniecība, 1997, 70 lpp.

22. Dirba J., Pugačevs V., Roldugina N. *Calculation and Optimisation Methodology of Contactless Electronically Commutated Motors with Permanent Magnets*. RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika, 2001.
23. Myers, R. H., Montgomery, D. C. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. New York: Wiley & Sons, 1995. p. 704
24. Auziņš J., Januševskis J., Kalniņš K., Kovaļska A. Optimization and Metamodeling of Metal Sandwich Panel Structures. *Mašīnzinātne un transports*. 2010. 33. sēj., 83.–88. lpp.
25. Maxwell J. C. A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1864, pp. 459–512.
26. Martin R. *Excel Programming with VBA Starter*. Birmingham: Pack Publishing, 2012, p. 60. ISBN 184-9688-443.
27. Lopez-Fernandez X. M., Gyselinck J. Finite element Analysis of Outer-Rotor Permanent Magnet Brushless DC Motor for Light Traction. *COMPEL*. 2006, vol. 25, pp. 705–712.
28. Wang Y., Chau K. T., Chan C. C., Jiang J. Z. Transient Analysis of a New Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless DC Drive Using Circuit-Field-Torque Coupled Time-Stepping Finite-Element Method. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2002, Vol. 38, No 2, pp. 1297–1300.
29. Hwang C. C., Chang J. J. Design and analysis of a high power density and high efficiency permanent magnet DC motor. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2000, pp. 234–236.
30. RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE, FIZIKĀLĀS ENERĢĒTIKAS INSTITŪTS. *Sinhronais dzinējs ar pastāvīgajiem magnētiem*. N. Levins, J. Dirba, L. Lavrinoviča, S. Orlova, V. Pugačevs (izgudrotāji). Int. Cl.: H02K1/27. Iesniegšanas datējums 2011-11-07. Patenti un preču zīmes. LV 14458B. 2011-03-20.
31. RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE, FIZIKĀLĀS ENERĢĒTIKAS INSTITŪTS. *Ātrgaitas magnetoelektriskais sinhronais dzinējs*. N. Levins, J. Dirba, L. Lavrinoviča, V. Pugačevs (izgudrotāji). Int. Cl.: H02K1/27. Iesniegšanas datējums 2012-03-13. Patenti un preču zīmes. LV 14509B. 2012-07-20.
32. RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE, FIZIKĀLĀS ENERĢĒTIKAS INSTITŪTS. *Sinhronais reaktīvais dzinējs*. V. Pugačevs, J. Dirba, L. Kukjane (Lavrinoviča), N. Levins, S. Orlova (izgudrotāji). Int. Cl.: H02K19/02. Iesniegšanas datējums 2011-08-17. Patenti un preču zīmes. LV 14418 B. 2012-01-20.
33. RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE, FIZIKĀLĀS ENERĢĒTIKAS INSTITŪTS. *Sinhronais reaktīvais dzinējs*. N. Levins, V. Pugačevs, J. Dirba, L. Lavrinoviča, U. Brakanskis (izgudrotāji). Int. Cl.: H02K19/02. Iesniegšanas datējums 2012-11-16. Patenti un preču zīmes. LV 14627 B. 2013-04-20.
34. Lavrinoviča, L., Dirba, J., Lavrinovičs, N. Magnetostatic Analysis of Surface-Mounted Permanent Magnet Motor with External Rotor for Use in Electric Hand Planer. In: *EPE: Electric Power Engineering 2013 (EPE 2013), Czech Republic, Kouty nad Desnou, Technical University of Ostrava, 28-30 May, 2013*. Ostrava, 2013, pp. 1–4.