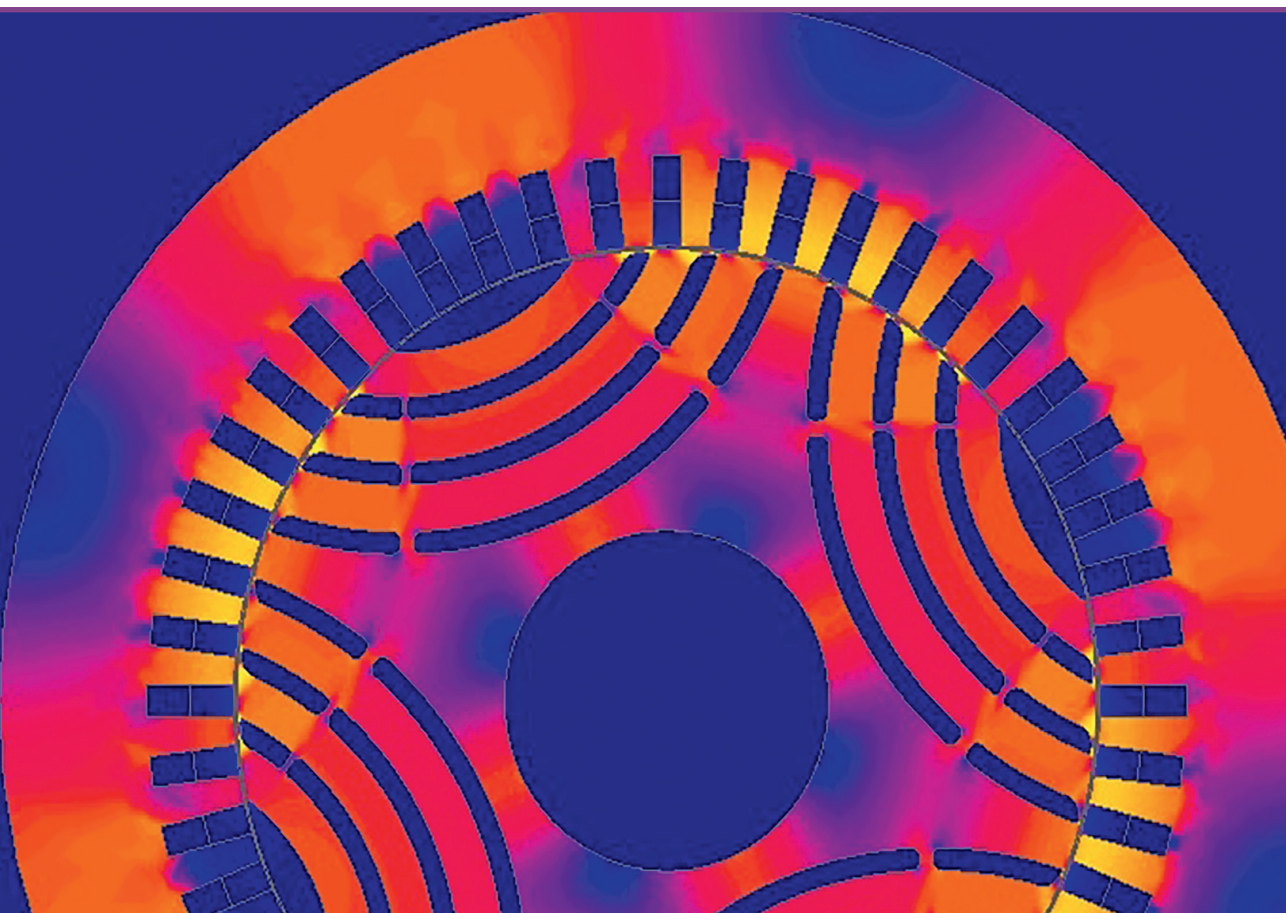


Kārlis Gulbis

SINHROŅĀ REAKTĪVĀ DZINĒJA IZSTRĀDE IZMANTOŠANAI SABIEDRISKAJĀ TRANSPORTĀ

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultāte
Industriālās elektronikas, elektrotehnikas un enerģētikas institūts

Kārlis Gulbis

Doktora studiju programmas “Viedā elektroenerģētika” doktorants

SINHROŅĀ REAKTĪVĀ DZINĒJA IZSTRĀDE IZMANTOŠANAI SABIEDRISKAJĀ TRANSPORTĀ

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
ANDREJS PODGORNOVS

RTU Izdevniecība
Rīga 2025

Gulbis K. Sinhronā reaktīvā dzinēja izstrāde izmantošanai sabiedriskajā transportā. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2025. – 53 lpp.

Publicēts saskaņā ar Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātes Promocijas padomes “P-14” 2025. gada 19.februāra lēmumu Nr.04030-9.12.2/2.

Vāka attēla autors – Kārlis Gulbis.

<https://doi.org/10.7250/9789934371905>
ISBN 978-9934-37-190-5 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2025. gada 18. jūnijā Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātē, Rīgā, Āzenes ielā 12/1, 508. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Leonīds Ribickis,
Rīgas Tehniskā universitāte

Vadošā pētniece *Dr. sc. ing.* Svetlana Orlova,
Fizikālās enerģētikas institūts, Latvija

Profesors *Ph. D. Toomas Vaimann*,
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Kārlis Gulbis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 61 attēls, deviņas tabulas, viens pielikums, kopā 104 lappuses. Literatūras sarakstā ir 61 nosaukums.

Saturs

1. Promocijas darba vispārējs raksturojums	5
2. Sinhronās reaktīvās mašīnas un to projektēšana	9
2.1. Vēsture un attīstība	9
2.2. Sinhrono reaktīvo dzinēju tipoloģija	9
2.3. <i>SynRM</i> darbības princips un elektromagnētiskais moments	10
2.4. <i>SynRM</i> parametri	11
2.5. <i>SynRM</i> projektēšana	12
2.6. Modernas <i>SynRM</i> rotora projektēšana	14
2.7. <i>SynRM</i> parametru aprēķins	22
2.8. Galīgo elementu metodes lietojums projektēšanā	24
3. Sinhronās reaktīvās mašīnas slēgtas konstrukcijas dzesēšanas sistēma	25
3.1. <i>SynRM</i> dzesēšanas sistēmas	25
3.2. <i>SynRM</i> termiskā ekvivalentā shēma	25
3.3. Siltumcīlpas dzesēšanas sistēma	26
3.4. Galīgo elementu metodes lietojums <i>SynRM</i> dzesēšanas sistēmu modelēšanā	27
4. Sinhronās reaktīvās mašīnas izstrāde	29
4.1. 180 kW <i>SynRM</i>	29
4.2. <i>SynRM</i> īpatnējās jaudas palielināšana ar siltumcīlpas dzesēšanas sistēmu	34
4.3. <i>SynRM</i> ar <i>HL</i> 1/12 statora segmenta eksperimentālā izpēte	34
4.4. <i>SynRM</i> ar <i>HL</i> statora rievās 1/12 statora segmentam eksperimentālā izpēte	37
4.5. Pilnas komplektācijas <i>SynRM</i> ar <i>HL</i> eksperimentālā izpēte	38
Galvenie darba rezultāti un secinājumi	47
Literatūras avotu saraksts	50

1. PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Darba aktualitāte

Augošās prasības elektrisko mašīnu efektivitātei, kā arī pusvadītāju elektronikas vadības sistēmu pieejamība radīja situāciju, kurā tādi sen zināmi risinājumi kā īsslēgts asinhronais dzinējs ražotnēs darba galdos, asinhronais dzinējs ar fāžu rotoru celtnu mehānismos vai līdzstrāvas dzinējs vilces transportā lielā daļā gadījumu vairs nebija labākie risinājumi. Pusvadītāju elektronikas vadības sistēmu pieejamība dod iespēju mainīga ātruma aplikācijās, kāda ir transporta piedziņa, lietot maiņstrāvas elektriskās mašīnas. Modernās prasības elektrisko mašīnu efektivitātei ir ļoti grūti izpildīt, izmantojot asinhrono dzinēju. Maiņstrāvas mašīnas, kas atbilst modernām elektrisko mašīnu efektivitātes prasībām, ir pastāvīgo magnētu mašīnās un sinhronās reaktīvās mašīnas (*SynRM*). Pastāvīgo magnētu mašīnas galvenās priekšrocības, salīdzinot ar *SynRM*, ir augstāks lietderības koeficients un lielāka īpatnējā jauda, bet galvenie trūkumi – salīdzinoši augstākas materiālu un ražošanas izmaksas, magnētu jutība pret augstām temperatūrām un magnētu atmagnetizēšanās risks. Būtiska ir arī pastāvīgo magnētu pieejamība, kas ir jāskata ģeopolitiskā kontekstā, ņemot vērā to, ka Ķīna apmierina 98 % no kopējā Eiropas Savienības retzemju materiāla pieprasījuma.

Elektrisko mašīnu izstrāde un projektēšana ļoti lielā mērā balstās gadiem pilnveidotos empīriskos koeficientos, bet *SynRM* rotora lielā atšķirība no asinhronajām mašīnām un ierosinātām sinhronajām mašīnām nozīmē, ka iepriekš zināmie mašīnu izstrādei nepieciešamie risinājumi uz *SynRM* attiecināmi tikai daļēji – uz satoru, savukārt rotora ģeometrijas risinājumi jāmeklē no jauna. Būtiski, ka *SynRM* aktualitāte sakrīt ar galīgo elementu modelēšanas (GEM) pieejamību un veiktspējas attīstību. GEM metodi plaši lieto *SynRM* pētniecībā, izstrādē un projektēšanā.

Eiropas zaļais kurss un virzība uz klimatneitralitāti 2019. gadā tika prezentēti kā nepieciešamība un kā iespēja ekonomiskai izaugsmei, tam atvēlot 25 % no Eiropas Savienības ilgtermiņa budžeta [1]. Patlaban transporta sektora radītās siltumnīcefekta gāzu emisijas veido apmēram 25 % no Eiropas Savienības kopējām emisijām. Lai Eiropa kļūtu par pirmo klimatneitrālo reģionu pasaulē līdz 2050. gadam, ir nepieciešamas nozīmīgas izmaiņas transporta nozarē, kur būtiska ietekme būs klimatneitrālam sabiedriskajam transportam. Sauszemes sabiedriskajam transportam Eiropas zaļā kursa prasības ir stingrākas nekā privātajam transportam – jau 2030. gadā visam jaunam pilsētas transportam, t. s. jauniem pilsētas autobusiem, jābūt nulles emisiju transportlīdzekļiem, kas iespējams tikai ar pilsētas sabiedriskā transporta elektrifikāciju.

Promocijas darbā kā pētījumu objekts izvēlēta *SynRM*, jo autora ieskatā tieši *SynRM* ir vislabākā izvēle Eiropā ražota sabiedriskā transporta, kas tiek barots no kontakttīkla, piedziņai. *SynRM* rotors sastāv tikai no elektrotehniskā tērauda, tajā nav aktīvo materiālu, rotoru ir vienkārši izgatavot, remontēt vai nomainīt. *SynRM* rotors ir piemērots smagiem ekspluatācijas apstākļiem, kuri zīmīgi transporta piedziņas sistēmām. No kontakttīkla barotam transportam pieļaujami lielāki kompromisi attiecībā pret efektivitāti un jaudas blīvumu, salīdzinot ar transportu, kas tiek barots no akumulatoru baterijām. *SynRM* nav pastāvīgo magnētu, pastāvīgo magnētu materiālu, piemēram, neodīms (Nd), prazeodīms (Pr), disprozijs (Dy) un terbijs (Tb),

kuru ieguve tiek saistīta ar būtiskiem jautājumiem par vides degradāciju proporcionāli nelielam retzemju materiāla daudzumam, ko iegūst raktuvēs, ētikas jautājumiem un piegādes ķēžu drošumu. Eiropas Savienība ir spējusi būtiskus soļus retzemju materiālu problēmu risināšanas virzienā, tomēr pat optimistiskos scenārijos 2030. gadā Eiropas Savienība pati spētu nodrošināt tikai 20 % no retzemju materiālu vajadzībām [2], kas autora ieskatā ir būtisks arguments lietot pastāvīgo magnētu alternatīvas, īpaši – no kontakttīkla barota sabiedriskā transporta piedziņā.

SynRM ir būtiskas priekšrocības, kas uzskaitītas iepriekš, tomēr pie trūkumiem jāmin zemāka īpatnējā jauda, salīdzinot ar citiem mašīnu tipiem, ko iespējams risināt, lietojot atvērtu mašīnas konstrukciju, vai noslēgtai mašīnas konstrukcijai lietot augstas veiktspējas dzesēšanas sistēmu. Darbā piedāvāts *SynRM* īpatnējo jaudu palielināt, izmantojot inovatīvu dzesēšanas metodi – siltumcilpas ar dabisko siltumnesēja cirkulāciju noslēgtā kontūrā *heat pipe termosyphon* (turpmāk *HL*), kuras pamatā ir siltumnesēja agregārstāvokļa maiņa iztvaikotājā no šķidruma uz gāzi un tvaika kondensatorā no gāzes uz šķidrumu. *SynRM* ir īpaši piemērota piespiedu dzesēšanas metodēm, jo mašīnas galvenie zudumi jeb siltums, kas jānovada, izdalās tieši statorā, kas paaugstina dzesēšanas metodes efektivitāti. **Siltumcilpas** ir noslēgta kontūra, pasīva, siltuma pārvades sistēma, bez papildu enerģijas patēriņa siltuma cirkulācijas nodrošināšanai, ar kuru iespējams izgatavot noslēgtas konstrukcijas elektrisko mašīnu un nav jāparedz elektrodzinēja papildu aizsargāšana no apkārtējās vides iedarbības. Apkures sezonā no *SynRM* novadīto siltumu iespējams izmantot sabiedriskā transporta apsildē, samazinot kopējo transportlīdzekļa elektroenerģijas patēriņu.

Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt augstas veiktspējas slēgtas konstrukcijas sinhrono reaktīvo dzinēju, ko panāk, izmantojot inovatīvas dzesēšanas metodi – siltumcilpas.

Būtiska promocijas darba daļa tiek atvēlēta *SynRM* projektēšanai ar mērķi, ka promocijas darbs kļūst par avotu latviešu valodā, ko izmantojot, lasītājs, students vai elektrisko mašīnu projektēšanas inženieris spētu projektēt augstas veiktspējas *SynRM*.

Darba uzdevumi

- Izstrādāt sinhrono reaktīvo dzinēju projektēšanas aprakstu.
- Izstrādāt *SynRM* parametru aprēķina metodi, ar ko iespējams jau projektēšanas stadijā precīzi aprēķināt projektējamās *SynRM* parametrus.
- Projektēt, izgatavot un pārbaudīt 180 kW *SynRM* prototipu.
- Pārbaudīt 180 kW *SynRM* veiktspēju, lietojot inovatīvu dzesēšanas metodi – siltumcilpas.

Pētījuma objekts un tvērums

Pētījuma objekts ir sinhronā reaktīva mašīna, kas paredzēta sabiedriskā transporta piedziņas darbināšanai. Darbs aprobežojas ar pašu *SynRM*, neapskatot to barojošo frekvenču pārveidotāju, pieņemot, ka *SynRM* darbībai nepieciešamie frekvenču pārveidotāji, to algoritmi ir labi izpētīti citos darbos [3] un komerciāli pieejami. Darbā apskatīta *SynRM*, kuras stators ir līdzīgs tipiskas trīsfasu maiņstrāvas mašīnas statoram, un *SynRM* rotorā nav aktīvo elementu.

Pētījuma ietvarā tika uzprojektēts, izgatavots un eksperimentāli pārbaudīts 180 kW *SynRM*, kas paredzēts asinhronā dzinēja aizvietošanai sabiedriskā transporta piedziņā.

Pētījuma ietvarā tika izgatavots un eksperimentāli pārbaudīts 180 kW *SynRM* modelis ar inovatīvu dzesēšanas metodi – siltumcilpām.

Darba novitāte

Izstrādāta *SynRM* mašīnas parametru aprēķina metode, kas ņem vērā garenass un šķērsass magnetizējošo spēku savstarpējo mijiedarbību. Salīdzinot ar standarta aprēķinu metodēm, izstrādātā metode ļauj precīzāk aprēķināt dzinēja parametrus projektēšanas stadijā. Izstrādātā metode uzlabo projektēšanas rezultātu – balstoties šajā metodē, projektētājs ar augstāku noteiktību var izvērtēt, vai projektēšanas rezultāts apmierina projektēšanas uzdevumu, vai veicami papildu optimizācijas soļi.

Izstrādāta slēgtas konstrukcijas *SynRM*, lietojot inovatīvu dzesēšanas metodi – siltumcilpas, aizstājot atvērta konstrukcijas *SynRM* ar ventilatoru *IC01*, kas montēts uz vārpstas.

Darba praktiskā nozīme

Pētījuma ietvarā Latvijā lielākais elektrisko mašīnu būves uzņēmums AS “Rīgas elektromašīnbūves rūpnīca” izgatavoja 180 kW *SynRM* mašīnu, kas uzņēmumam deva praktisku pieredzi šāda tipa mašīnu izgatavošanā. Pirms projekta uzņēmums galvenokārt specializējās asinhrono un līdzstrāvas vilces dzinēju ražošanā.

Pētījuma ietvarā SIA “*Allatherm*” bija iespēja savas tehnoloģiskās prasmes dzesēšanas sistēmu izstrādē izmantot lieljaudas vilces elektriskās mašīnas dzesēšanā. Uzņēmuma piedāvātās tehnoloģijas galvenokārt tiek lietotas elektronikas dzesēšanā.

Pētījuma ietvarā izstrādāto *SynRM* projektēšanas aprakstu var izmantot kā vadlīnijas šāda tipa elektrisko mašīnu izstrādē.

Pētījumā izvirzītās hipotēzes

SynRM parametru aprēķinu projektēšanas stadijā iespējams tuvināt faktiskajam, ņemot vērā garenlauka un šķērslauka savstarpējo mijiedarbību atbilstoši pētījumā prezentētajam aprēķinu algoritmam. Hipotēzes pārbaude aprakstīta 2. un 4. nodaļā, 2. nodaļā izklāstīta aprēķinu metode, 4. nodaļā – aprēķinu metodes rezultātu salīdzinājums ar eksperimenta rezultātiem.

SynRM tehniskos parametrus iespējams uzlabot, izmantojot inovatīvu dzesēšanas metodi – siltumcilpas. Hipotēzi pārbaude aprakstīta 3. un 4. nodaļā, 3. nodaļā izklāstīts metodes lietojums, 4. nodaļā aprakstīts eksperiments.

Pētījuma rīki un metodes

Promocijas darbā tiek izmantota skaitliskā pētījuma metode. Pētījumā magnētisko lauku matemātiskā modelēšana veikta, izmantojot galīgo elementu modelēšanas datorprogrammu *Altair Flux*. Galīgo elementu matemātiskā modelēšana ir plaši lietots rīks magnētisko lauku modelēšanai un aprēķiniem. Galīgo elementu matemātiskās modelēšanas rezultāti apstrādāti, izmantojot elektromagnētisko procesu bāzes vienādojumus un plaši pazīstamas skaitļošanas metodes.

Promocijas darbā tiek izmantota laboratorijas pētījuma metode. Pētījuma ietvaros veikti laboratorijas eksperimenti ar fiziskiem modeļiem, kuru mērķis ir validēt skaitliskās metodes rezultātus.

Aprobācija

Astoņu gadu laikā promocijas darba ietvarā ir publicētas septiņas zinātniskās publikācijas. Par promocijas darba tēmu autors ir piedalījies divu ERAF projektu realizācijā. Pētījumu ietvarā ir izgatavota 180 kW *SynRM*, divi *SynRM* modeļi (1/12 segmenti) ar siltumcīlpas dzesēšanas sistēmu un pilna 180 kW *SynRM* ar siltumcīlpas dzesēšanas sistēmu.

Publikācijas par promocijas darba tēmu

1. Gulbis, K., Podgornovs, A., Bižāns, A., Lavrinoviča, L. **Increasing the Power Density of 180 kW Synchronous Reluctance Motor by Implementing Loop Heat Pipe Cooling.** In: 2023 3rd International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME 2023), Spain, Santa Cruz de Tenerife, 19–21 July, 2023.
2. Lavrinoviča, L., Gulbis, K., Podgornovs, A., Bižāns, A. **Analysis of the Heat Dissipation of Synchronous Motor with Reluctance Rotor with Goal of Power Density Increasing 2023 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE 2023): Proceedings, Slovakia, The High Tatras, 25.–27. Sept., 2023.**
3. Gulbis, K., Brakanskis, U., Kamoliņš, E., Gorobecs, M., Potapovs, A., Sējējs, K., Zarembo, J., Burenin, V. **Analysis of Test Results of the Developed Synchronous Reluctance Motor for Public Transport Application.** Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2022, Vol. 59, No. 4, pp. 25–41.
4. Lavrinoviča, L., Podgornovs, A., Bižāns, A., Gulbis, K. **Overview of Thermal Loads Distribution in Traction Electric Machines and Conditions for Forced Cooling of Their Parts.** No: 2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET 2022), Czechia, Prague, 20.–22. Jul, 2022.
5. Kamoliņš, E., Gorobecs, M., Burenin, V., Gulbis, K., Potapovs, A., Brakanskis, U., Zarembo, J., Sējējs, K. **180 kW Synchronous Reluctance Motor for Mass Transit Electrical Traction Application.** In: 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), Belgium, Ghent, 6–10 Sept., 2021.
6. Gulbis, K., Brakanskis, U., Kamoliņš, E., Zarembo, J. **Parameter Calculation Method of Synchronous Reluctance Motor Including Cross Magnetic Saturation.** 2020 IEEE 61th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2020.
7. Gulbis, K., Kamoliņš, E., Brakanskis, U. **Synchronous Reluctance Machine with Improved Design of Rotor Mechanical Strength Connections.** In: 2016 IEEE 4th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE 2016): Proceedings, Lithuania, Vilnius, 10–12 Nov., 2016.

Projekti par promocijas darba tēmu

1. ERAF līdzfinansēts projekts Nr.1.1.1.1/20/A/116 “Elektrisko transportlīdzekļu vilces integrēto piedziņu ar iebūvētiem dzinējiem, spēka elektronikas pārveidotājiem, enerģijas avotiem un siltuma kontūriem vieda termiskā pārvaldība”.
2. ERAF līdzfinansēts projekts Nr.1.1.1.1/18/A/055 “Jaunas paaudzes sinhronā relaktances elektrodzinēja izstrāde”.

2. SINHRONĀS REAKTĪVĀS MAŠĪNAS UN TO PROJEKTĒŠANA

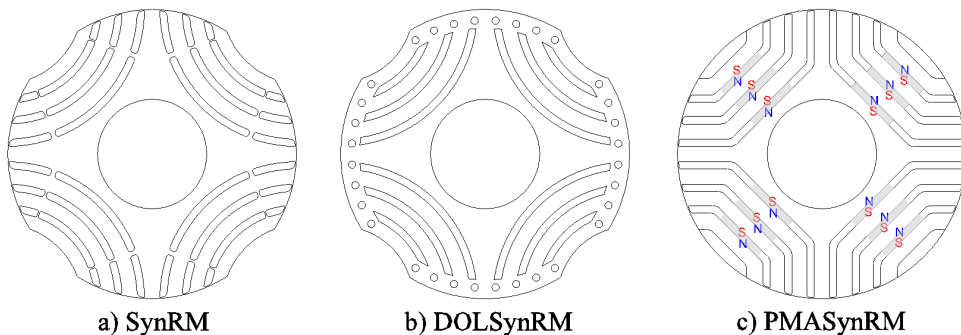
2.1. Vēsture un attīstība

Elektrodzinējs ar izvirzītiem rotora poliemi, bez rotora tinuma un bez pastāvīgajiem magnētiem, kas attīsta momentu, balstoties rotora magnētiskajā asimetrijā, ir viena no vecākajām elektriskajām mašīnām. 20. gs. reaktīvie dzinēji tika lietoti nišas aplikācijās, piemēram, pozicionēšanas iekārtās, tekstilrūpniecībā un citās, kurām īpaši svarīgi bija saglabāt precīzu soli vai ātrumu, bet attīstītais moments, lietderības koeficients un jaudas koeficients bija otršķirīgi. 20. gs. beigās attīstījās reaktīvie soļu dzinēji, ar kuriem saistās reaktīvo mašīnu nosaukums līdz 21. gs. otrajai desmitgadei, kad pārdošanā nonāk pirmās plaša lietojuma sinhronās reaktīvās mašīnas [4]. Sinhronā reaktīvā mašīna ar gaisa barjerām, kas aiztur šķērsass plūsmu, ir 100 gadu sens risinājums, ko 1923. gadā prezentēja Kostko [5]. 20. gs. beigās tika plaši pētīti *SynRM* būtiskie jautājumi. Tiek patentēts zemu pulsāciju *SynRM* rotora modelis [6], kas ir par pamatu pirmajiem sērijveida *SynRM*, kas pie patērētājiem nonāk 2011. gadā.

SynRM attīstības vēsturē ilgstoši pastāvēja pieņēmums, ka plašai dzinēja adaptācijai obligāta prasība ir iespēja palaist dzinēju, pieslēdzot tīklam, kam pārsvarā tiek piedāvāts risinājums ar dzinēja asinhrono palaišanu. Ņemot vērā vadības sistēmu pieejamību un patērētāju pieaugušo pieprasījumu pēc vadības sistēmām, var prognozēt, ka palaišana no tīkla nākotnē būs nišas lietojuma prasība, nevis *SynRM* lietojuma eksistenciāla prasība.

2.2. Sinhrono reaktīvo dzinēju tipoloģija

Aktuālie sinhrono reaktīvo dzinēju rotoru tipi apkopoti 2.1. attēlā.



2.1. att. Sinhronās reaktīvās mašīnas rotoru konstrukcijas:

- sinhronā reaktīvā mašīna ar nemagnētisku jeb gaisa barjeru rotoru (*SynRM*) darbojas ar frekvenču pārveidotāju;
- pie tīkla slēdzamas sinhronās reaktīvās mašīnas rotora konstrukcija ar gaisa barjerām un īsslēgtiem “vāveres” rata palaišanas tinumiem (*DOLSynRM*);
- sinhronās reaktīvās mašīnas rotora konstrukcija ar gaisa barjerās ievietotiem magnētiem (*PMASynRM*).

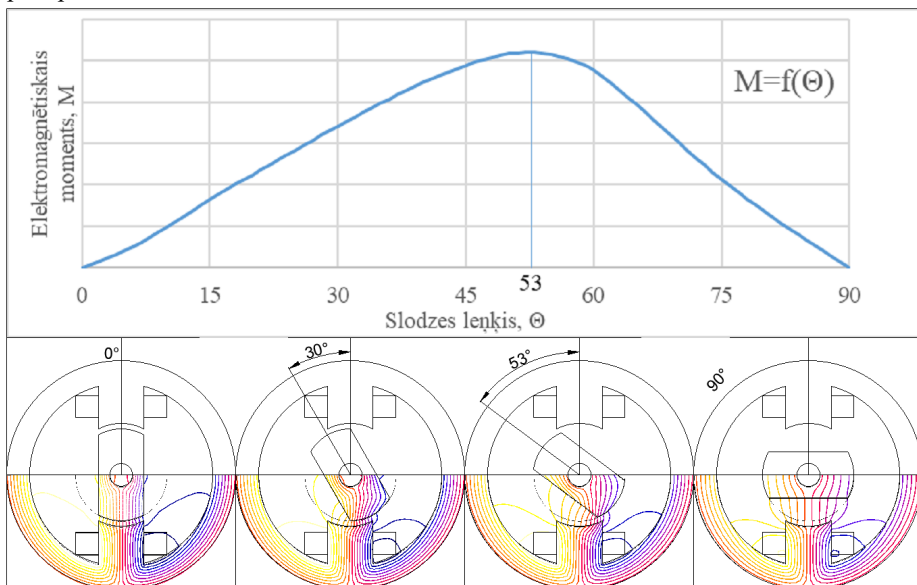
2.3. SynRM darbības princips un elektromagnētiskais moments

SynRM elektromagnētiskais moments ir izsakāms no 2.1. vienādojuma, kur tas atkarīgs no pievadītā sprieguma un tā frekvences, magnētiskās ķēdes garenass X_d un šķērsass X_q induktīvajam pretestībām un slodzes leņķa Θ . Jo lielāka attiecība starp induktīvajām pretestībām X_d/X_q jeb magnētiskā nesimetrija – $K_{d/q} = X_d/X_q$, jo lielāks būs elektromagnētiskais moments. Maksimālais elektromagnētiskais moments tiks sasniegts pie slodzes leņķa 45° .

$$M = \frac{3U^2}{2\omega} \times \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \times \sin 2\Theta. \quad (2.1.)$$

Garenass un šķērsass induktīvās pretestības satur tinuma izkļedes pretestības X_s , kas tiek pieņemtas abām komponentēm vienādas. Garenreakcijas un šķērsreakcijas induktīvās pretestības ir aprēķināmas no enkura tinuma elektrodzinējspēka un strāvas. Tinuma pašindukcijas elektrodzinējspēku izraisa magnētiskā plūsma.

SynRM elektromagnētiskā momenta līknes forma ir būtiski atkarīga no tādiem mašīnas ģeometrijas parametriem kā gaisa spraugas platums, gaisa spraugas vienmērīgums, pola pārsedze, statora rievu un rotora gaisa barjeru izmēri un to savstarpējā attiecība. Bez ģeometrijas parametriem elektromagnētiskā momenta līknes formu ietekmēs tinuma solis un elektriskie parametri. Tā rezultātā elektromagnētiskā momenta līkne atkarībā no slodzes leņķa, kas redzama 2.2. attēlā, būs atšķirīga, salīdzinot ar to, kas aprēķināta, izmantojot 2.1. vienādojumu, ja momentu aprēķina, pieņemot nemainīgas garenlauka un šķērslauka pretestības. 2.2. attēlā redzamā modeļa maksimālais moments atbilst kritiskajam slodzes leņķim 53° . Kritiskais slodzes leņķis ir atkarīgs no mašīnas magnētiskās sistēmas konstrukcijas, īpaši – no pola pārsedzes.



2.2. att. Elektromagnētiskā momenta atkarība no slodzes leņķa.

Faktisko elektromagnētiskā momenta likni nepieciešams noskaidrot gan projektēšanas, gan *SynRM* salāgošanas ar frekvenču vadību stadijā. Projektējot *SynRM*, faktisko elektromagnētiskā momenta likni iegūst, veicot modelēšanu ar galīgo elementu metodi.

2.4. *SynRM* parametri

2.4.1. Elektromagnētiskā momenta svārstību cēloņi, sekas un ierobežošanas veidi

Momenta svārstībām elektriskajā mašīnā var būt mehānisks vai elektromagnētisks cēlonis – mehāniskās slodzes radītas svārstības, rotora centrējuma nobīdes radītas svārstības, vadības iekārtas radītas svārstības un magnētiskās ķēdes nesimetrijas radītas svārstības. Neatkarīgi no svārstību cēloņa tās izraisīs mehānisku vibrāciju, troksni un sinhronās mašīnas stabilitātes problēmas.

Mehānisku vibrāciju rezultātā var tikt bojāti gultņi, piedziņas mehānisms vai pasliktināties stiprinājuma mehānismi. Pieļaujamais skaņas piesārņojums tiek regulēts, piemēram, reaktīvo soļu dzinēju plašāku lietojumu ierobežo momentu svārstību radītais troksnis. Trokšņa samazināšanai var būt arī ekonomiska rakstura pamatojums, mašīnai, kas rada mazāku troksni, nav vajadzīgi skaņu slāpējoši papildu pasākumi. Mašīnas stabilitātes problēmas var rasties, vadības iekārtai nespējot salāgot sagaidāmo momenta vērtību ar faktisko, starp kurām svārstību ietekmē veidojas nobīde. Darbā apskatītas magnētiskās sistēmas radītas elektromagnētiskā momenta svārstības. Mehāniska cēloņa svārstības sinhronajam reaktīvajam dzinējam ir tādas pašas kā citiem elektrodzinējiem.

Magnētiskās nesimetrijas izraisītas svārstības galvenokārt rodas statora rievu un rotora barjeru mijiedarbības rezultātā. Elektriskās mašīnas magnētiskās sistēmas projektēšanas gaitā iespējams mazināt momenta svārstības, ko izraisa statora rievu un rotora gaisa barjeru mijiedarbība. *SynRM* rotoru konstrukcijām piemīt lielas elektromagnētiskā momenta svārstības, ko nav iespējams novērst tikai ar statora rievu vai rotora nobīdi un statora tinumu soļa saīsināšanu. Lai izstrādātu mazu elektromagnētiskā momenta svārstību *SynRM* konstrukciju, svarīgākais ir pareizas rotora ģeometrijas izveide, kas ietver statora rievu un rotora gaisa barjeru skaita attiecību, rotora mehāniskās izturības tiltiņu un rotora gaisa barjeru formu. Elektromagnētiskā momenta svārstību samazināšana, ievērojot statora rievu un rotora gaisa barjeru skaita attiecību, skatīta literatūrā [6], [7].

2.4.2. Lietderības koeficientu ietekmējošie faktori

SynRM nav elektrisko zudumu rotorā, kas ir galvenā priekšrocība, salīdzinot ar asinhrono mašīnu [8]. Magnētiskie zudumi būs līdzīgi kā citām elektriskajām mašīnām. *SynRM* saistībā ar zemo $\cos\phi$ būs lielāka strāva, kas, salīdzinot ar pastāvīgo magnētu mašīnu, radīs lielākus elektriskos zudumus.

SynRM galvenā priekšrocība, salīdzinot ar asinhrono dzinēju, ir augstāks lietderības koeficients. Ir sarežģīti izveidot asinhronā dzinēja konstrukciju, kas nodrošina atbilstību IE4 efektivitātes klasei, energoefektivitātes klasi piešķirot atbilstoši *standartam LVS EN 60034-30-1:2015* “Rotējošas elektromašīnas. 30-1.daļa: No tīkla darbināmu maiņstrāvas motoru

efektivitātes klases (IE kods)”. To iespējams panākt, palielinot asinhronā dzinēja izmērus un vara, tērauda daudzumu. Apskatot “ABB”, kas ir viens no lielākajiem elektrisko mašīnu ražotājiem, veikumu, no 2011. gada tiek piedāvāti *SynRM* ar atbilstību IE4 klasei, nepalielinot izmērus; 2019. gadā “ABB” piedāvā *SynRM* ar atbilstību potenciālajai IE5 klasei; 2024. gadā “ABB” prezentēja preses materiālu saistībā ar *SynRM* atbilstību potenciālajai IE6 klasei, tā sauktai “hiperefektivitātes” klasei, piemēram, IE6 22 kW $2p=4$ dzinēja efektivitāte ir 95,8 % [9].

Moderna *SynRM* paredzēta darbam ar frekvenču pārveidotāju, tāpēc lietderīgi apskatīt gan dzinēja efektivitāti, gan piedziņas sistēmas kopējo efektivitāti, kas izdalīta atsevišķā IEC standartā *LVS CLC IEC/TS 60034-30-2:2022* “Rotējošas elektromašīnas. 30-2.daļa: Energoefektivitātes klases regulējamas rotācijas frekvences maiņstrāvas dzinējiem (IE kods)”.

2.4.3. Jaudas koeficientu ietekmējošie faktori

Vēsturiski *SynRM* būtisks trūkums ir zems jaudas koeficients. Modernai *SynRM*, ko darbina ar frekvenču pārveidotāju, zems jaudas koeficients nozīmē to, ka jāizvēlas lielāks frekvenču pārveidotājs, kas atbilst strāvai, nevis aktīvai jaudai, un samazināta efektivitāte elektrisko zudumu iespaidā vai lielāki dzinēja gabarīti.

SynRM jaudas koeficientu ietekmē gaisa spraugas platums un magnētiskā nesimetrija (garenass un šķērsass induktīvo pretestību attiecības), lielāks jaudas koeficients būs raksturīgs augstākas magnētiskās nesimetrijas konstrukcijām [10], [11].

2.5. *SynRM* projektēšana

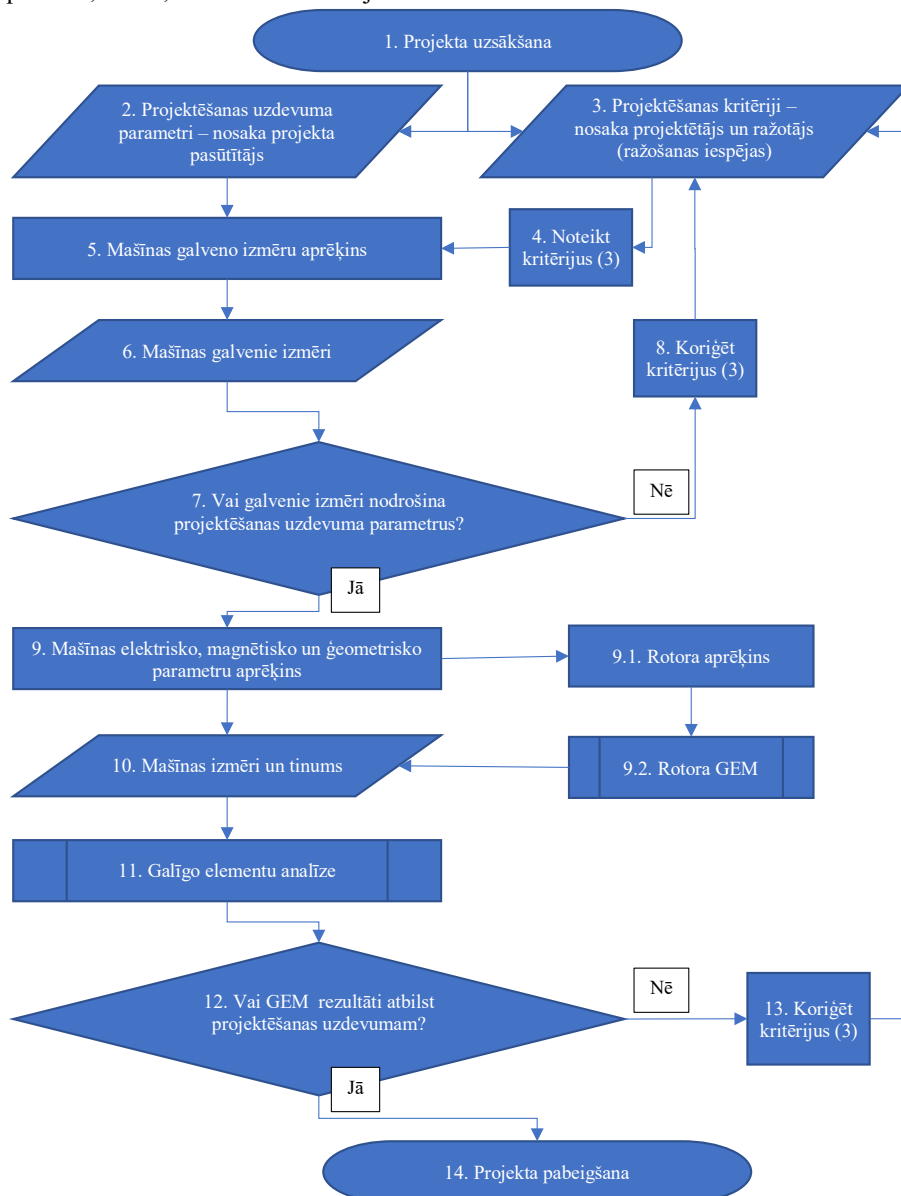
SynRM stators sastāv no rievām, kurās ievietots daudzu vijumu trīsfāžu tinums, zobiem, pa kuriem magnētiskā plūsma tiek virzīta rotora virzienā, un jūga, turklāt šo statora elementu un tinuma izmēri ir līdzīgi pastāvīgo magnētu sinhronām un asinhronām mašīnām. *SynRM* statora projektēšanā var izlīdzēties ar labi atstrādātām metodoloģijām, bet ražošanā – ar esošajām tehnoloģijām sinhrono un asinhrono mašīnu izstrādei. Maiņstrāvas mašīnu projektēšanas metodoloģijai ir savas nianses katrā reģionā, bet vienoti tās ir balstītas koeficientos un attiecībās, kas empīriski precizētas gadu desmitiem. Turpretim *SynRM* rotora projektēšana ir relatīvi jauna nepieciešamība, tā radās tajā pašā laikā, kad kļuva pieejamas un ērti lietojamas galīgo elementu matemātiskās modelēšanas (GEM) metodes, kas ļoti veiksmīgi var aizstāt iepriekš projektēšanā ļoti iecienītos empīriskos koeficientus.

2.5.1. Maiņstrāvas mašīnu projektēšana

Elektrisko mašīnu projektēšana ir iteratīva procedūra, kuras rezultātā elektrodzinējs ir atkarīgs no mērķa funkcijām un no apstiprinošajiem ierobežojumiem, kas saistīti ar temperatūras paaugstināšanos, palaišanas strāvu, palaišanas griezes momentu, maksimālo griezes momentu utt. Mērķa funkcija var būt aktīvo materiālu svars, izmaksas vai efektivitāte, vai vispārējās izmaksas, vai visu šo faktoru svērtā kombinācija. Maiņstrāvas mašīnu, īpaši – asinhrono dzinēju, projektēšana izvērsti skaidrota [11] un [12] literatūras avotos, kas plaši izmantoti atskaites punktu definēšanai šī darba ietvarā.

2.5.2. *SynRM* projektēšanas algoritms

Darbā piedāvāts *SynRM* projektēšanas algoritms (2.3. att.). Izstrādātais projektēšanas gaitas apraksts pilnā apjomā pieejams promocijas darbā. Algoritma tapšanā liela ietekme ir [11], [12], [13], [14]. Ieteicama GEM ieviešana projektēšanas procesā, piemēram, *SynRM* optimālo ģeometrisko parametru, īpaši *SynRM* rotora konstrukcijas izstrādē – rotora gaisa barjeru platuma, skaita, formas un novietojuma izvēlē.



2.3. att. *SynRM* projektēšanas algoritms.

2.5.3. *SynRM* galvenie izmēri

Mašīnas galveno izmēru aprēķina secība būs tāda pati kā citu maiņstrāvas mašīnu aprēķina secība. Aprēķinu secība balstās pieņemtā mašīnas izmantošanas – *Essona* – koeficientā C_0 [kW/m³] [12]. Līdzīgs aprēķina algoritms būs, *Essona* koeficienta vietā no rekomendācijām izvēloties lineāro noslodzi A un magnētisko indukciju gaisa spraugā B_δ [11]. Atšķirības starp *SynRM* un *AD* vai *PMSM* jāievērtē, izvēloties C_0 , A , B_δ .

2.5.4. *SynRM* tinumi un statora rievas

SynRM tinuma aprēķins

SynRM tinuma parametrus var aprēķināt pēc tādām pašām metodēm kā citām maiņstrāvas mašīnām. Tipiskās tinumu aprēķina metodes balstās virknē empīrisku koeficientu, kas jauna tipa mašīnām, kāda ir *SynRM*, var būt projektētajam nepieejami, tāpēc piedāvāts *SynRM* tinumu aprēķinā ietvert GEM balstītus optimizācijas soļus.

Vienslāņa vai divslāņu tinums

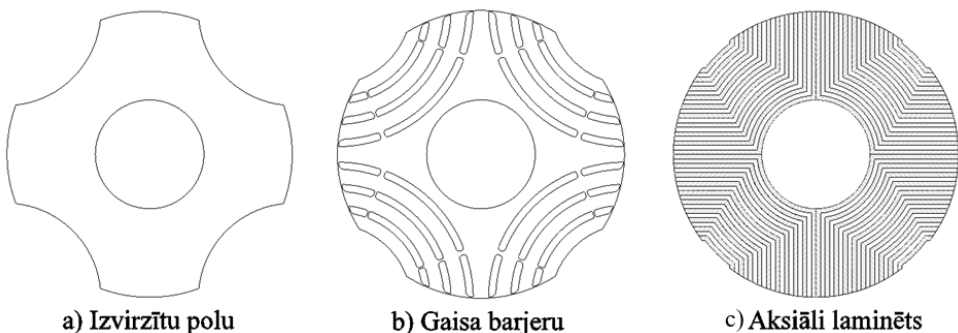
SynRM, tāpat kā citām maiņstrāvas mašīnām, var izmantot vienslāņa vai divslāņu tinumus. Vienkāršoti apskatot izvēli, vienslāņa tinumam raksturīgs lielāks maksimālais elektromagnētiskais moments un vienkāršāka konstrukcija, savukārt divslāņu tinumam – mazākas momenta svārstības. Četru polu mašīnai ieteicamās tinuma soļa īsināšanas attiecības ir 5/6, 7/9, 10/12 vai 12/15. Lielākai soļa īsināšanai būs raksturīgs būtisks maksimālā momenta samazinājums. Mazāka soļa īsināšana nepietiekami samazina momenta svārstības, ņemot vērā to, ka statora tinuma konstrukcija ir kļuvusi sarežģītāka, kā arī ir palielinātas ražošanas izmaksas. Piedāvātās soļa īsināšanas attiecības nodrošina pietiekami un septītās *MDS* harmonikas samazināšanu [15], [16].

SynRM rievas izmēru aprēķins

SynRM rievas izmērus, tāpat kā citās maiņstrāvas mašīnās, galvenokārt noteiks aprēķinātie tinuma izmēri un ražotāja tehnoloģiskās iespējas.

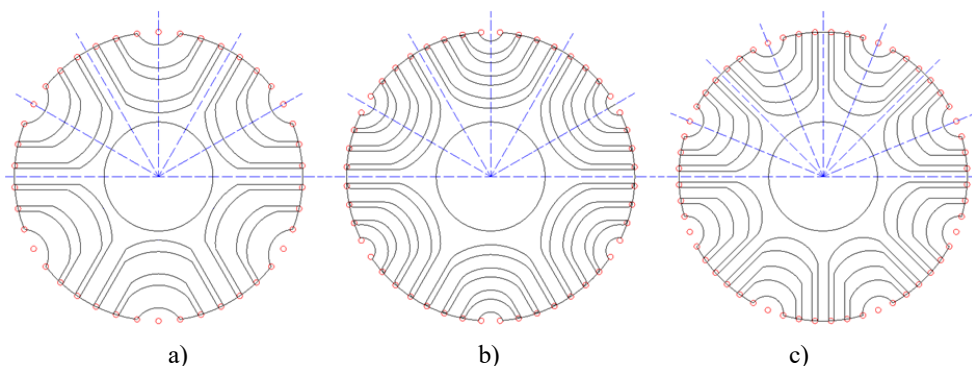
2.6. Modernas *SynRM* rotora projektēšana

Modernas *SynRM* rotors veidots no radiāli laminētām elektromagnētiskā tērauda loksnēm, kurās ir izveidotas gaisa barjeras šķērsass plūsmas ierobežošanai (2.4. b att.). *SynRM* rotora gaisa barjeras paredzētas, lai iegūtu augstu magnētisko pretestību šķērsass virzienā. *SynRM* rotoram ar gaisa barjerām raksturīga plaša pola pārsedze $\sim 2/3\tau$ un augsta magnētiskā nesimetrija $K_{d/q} > 4$, salīdzinot ar izvērzīto polu sinhronās mašīnas rotoru bez gaisa barjerām $K_{d/q} \sim 2$ (2.4. a att.). *SynRM* rotora ar gaisa barjerām ražošana būs vienkāršāka, salīdzinot ar aksiāli laminētu rotoru (2.4. c att.). Rotoru konstrukciju galvenokārt noteiks magnētiskās ķēdes aprēķins un magnētiskā nesimetrija, bet neliela ietekme uz konstrukciju būs mehāniskās izturības prasībām. Sasilums un dzesēšana neietekmēs rotora konstrukciju.



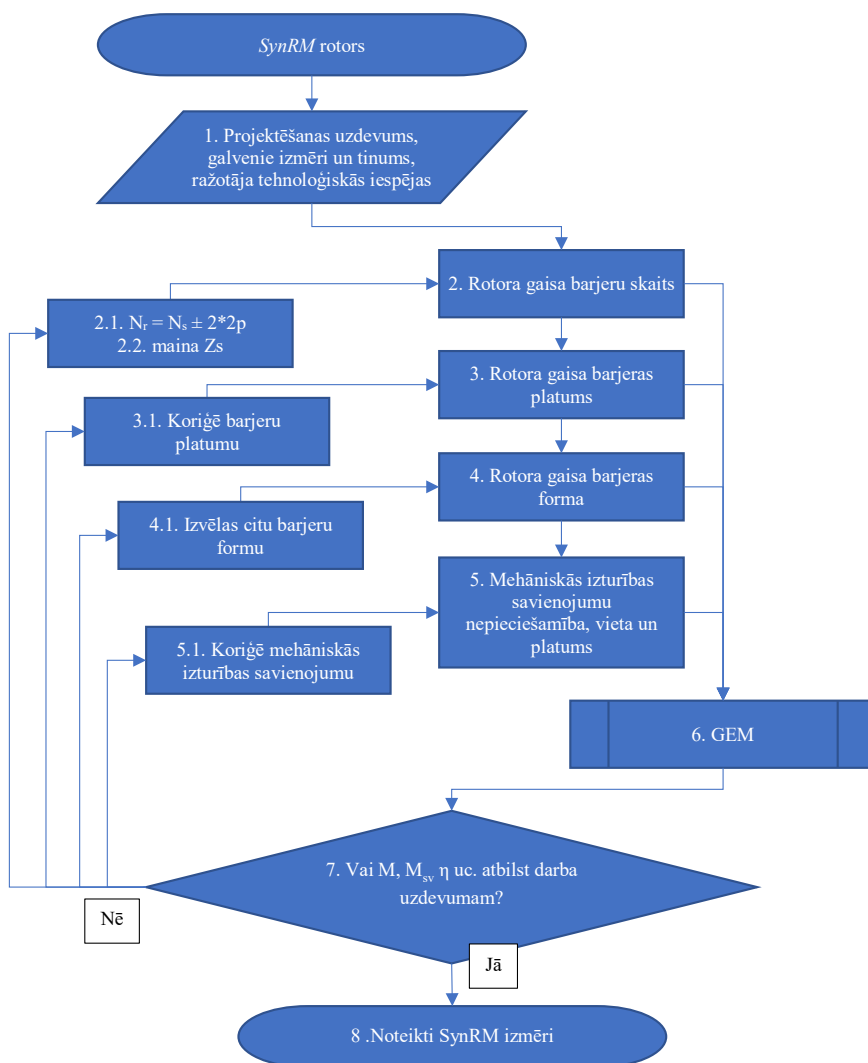
2.4. att. *SynRM* rotoru konstrukcijas: a) izvirzītu polu; b) nemagnētisku gaisa barjeru; c) aksiāli laminētas elektrotehniskā tērauda loksnes.

Pārliecinoši lielākā daļa no ražošanā ieviestām *SynRM* ir ar četriem poliem. Rotoru konstrukciju ar gaisa barjerām, kam raksturīga augsta magnētiskā nesimetrija un zemas elektromagnētiskā momenta pulsācijas, ir praktiski neiespējams izveidot divu polu mašīnai. Sešu (2.5. a, b att.) un astoņu (2.5. c att.) polu mašīnām ir iespējams izveidot rotoru konstrukciju ar gaisa barjerām, tomēr konstrukcijai būs raksturīgs mazāks īpatnējais elektromagnētiskais moments [17]. Sešu un astoņu polu mašīnās rotoru konstrukciju ar lielu barjeru skaitu ir sarežģīti izgatavot, jo barjeras veidojas šauras, ar mainīgu platumu.



2.5. att. *SynRM* konstrukcija ar dažādu polu skaitu un rotora gaisa barjeru skaitu:
 a) $2p = 6$, $N_r = 42$; b) $2p = 6$, $N_r = 48$; c) $2p = 8$, $N_r = 56$.

SynRM galveno izmēru, tinuma un statora aprēķins būtiski neatšķiras no asinhronā dzinēja, atšķirības veidojas pieņemto empīrisku koeficientu vērtībās. *SynRM* rotorā nav aktīvo elementu, tāpēc tā aprēķins būs pilnīgi citādāks nekā asinhronās vai pastāvīgo magnētu sinhronās mašīnas (2.6. att.).



2.6. att. *SynRM* rotora izmēru noteikšanas algoritms.

2.6.1. Rotorā nemagnētisko gaisa barjeru skaits

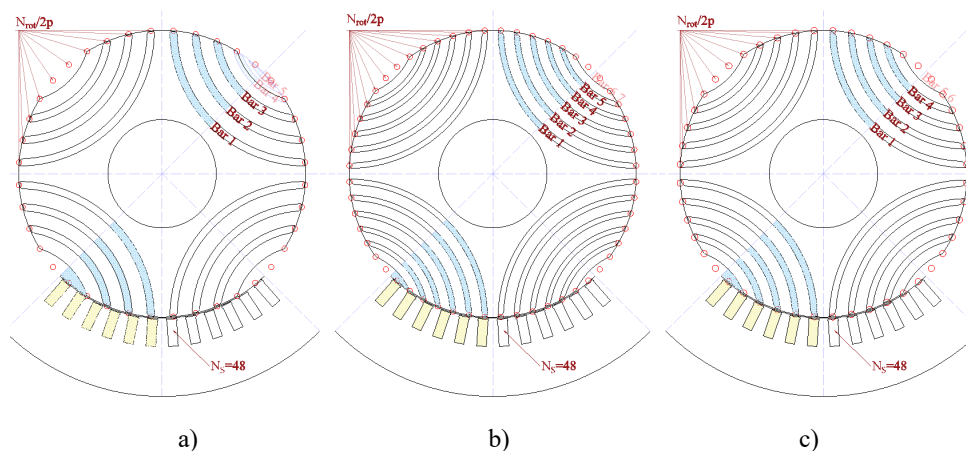
Rotorā nemagnētisko gaisa barjeru skaits būs atkarīgs no polu skaita, statora rievu skaita, mašīnas izmēra un ražotāja iespējām izveidot mazas rotorā gaisa barjeras. Lielākam rotorā gaisa barjeru skaitam būs raksturīga lielāka magnētiskā nesimetrija un mazākas elektromagnētiskā momenta svārstības; kā robežas konstrukciju ar ļoti lielu plūsmas vadošu kanālu un nemagnētisko barjeru skaitu var apskatīt aksiāli laminētu rotoru (2.4. c att.).

Laminējot tērauda loksnes aksiāli, nevis radiāli, starp tām veidojas magnētiskas izolācijas slānis, ko izmanto plūsmas ierobežošanai šķērsass virzienā. Aksiāli laminēta rotorā konstrukcijām raksturīgā magnētiskās nesimetrijas vērtība $K_{dlq} \sim 10$ [18], [19] ir būtiski lielāka, salīdzinot ar radiāli laminēta gaisa barjeru rotorā konstrukcijām. Tomēr aksiāli laminēta rotorā

konstrukcijai piemīt būtiski trūkumi. Aksiāli laminētu rotoru ir sarežģīti rūpnieciski izgatavot, katra loksne būs unikāla izmēra, 2.4. c attēlā redzams, ka katra nākamā loksne tuvāk gaisa spraugai ir īsāka par iepriekšējo. Jānodrošina lokšņu liekšana, kas ir īpaši sarežģīti daļā pie vārpstas. Jānodrošina lokšņu savstarpēja stiprināšana, kam jāparedz aksiālas skrūves vai citi elementi. Aksiāli laminētam rotoram nav ierobežotas virpuļstrāvas, attiecīgi magnētiskie zudumi būs 2–3 reizes lielāki, salīdzinot ar radiāli laminēta rotora ar gaisa barjerām konstrukciju [19].

Radiāli laminētu rotoru ar lielu gaisa barjeru skaitu būs sarežģīti izgatavot, plūsmas vadošiem kanāliem kļūstot dažus milimetrus šauriem, to mehāniskā noturība ir apšaubāma, kā arī jābūt augstai ražošanas precizitātei. Optimālo rotora gaisa barjeru skaitu, kas nodrošina augstu elektromagnētisko momentu un zemas elektromagnētiskā momenta svārstības, var noteikt, ņemot vērā statora rievu skaitu N_s un polu skaitu, ievērojot 2.2. sakarību [6]. Ievērojot šo sakarību, būtiski tiek samazināta statora rievas un rotora gaisa barjeras savstarpējās mijiedarbības izraisītās indukcijas gaisa spraugā augstākās harmonikas un no tām izrietošās elektromagnētiskā momenta svārstības. Izvēli starp rotora gaisa barjeru skaitu, kas ir lielāks vai mazāks par statora rievu skaitu (2.2. sakarība), jāskata katrai projektējamai mašīnai individuāli. 2.7. c attēlā redzams, ka, izvēloties $N_{rot} = N_s$, visas rotora gaisa barjeras ir novietotas tieši pret statora rievām, kā rezultātā veidojas lielas momenta svārstības, tāpēc šāda konstrukcija nav perspektīva.

$$N_r = N_s \pm 2 \times 2p \text{ vai } \frac{N_{rot}}{p} = \frac{N_s}{p} \pm 4. \quad (2.2.)$$



2.7. att. Gaisa barjeru skaits, *SynRM* ar $2p = 4$, $N_s = 48$:

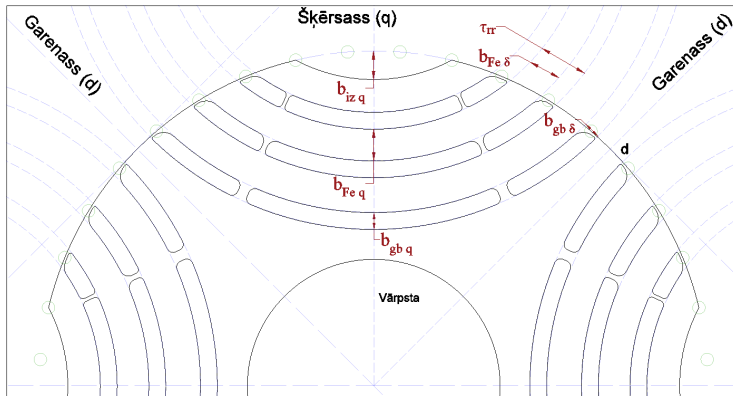
a) $N_r < N_s$, $N_r = N_s - 2 \times 2p = 40$; b) $N_r > N_s$, $N_r = N_s + 2 \times 2p = 56$; c) $N_r = N_s$, $N_r = N_s = 48$.

2.6.2. Rotorā nemagnētisko gaisa barjeru un plūsmu vadošo kanālu platums

Rotorā nemagnētisko gaisa barjeru un plūsmu vadošo kanālu platuma attiecība (2.3. formula) ietekmēs mašīnas magnētisko nesimetriju un mašīnas attīstāmo elektromagnētisko momentu. Magnētiskā nesimetrija nosaka ne tikai elektromagnētisko

momentu, bet arī jaudas koeficientu, strāvu un zudumus. Rotorā aprēķina pirmajā iterācijā nemagnētisko gaisa barjeru un plūsmu vadošo kanālu platuma attiecību var pieņemt, balstoties rekomendācijās $K_{gb/Fe} \in (0,3-0,5)$ [10], līdzīgas vērtības rekomendētas [18]. Rotorā barjeru un plūsmu vadošo kanālu platuma izvēlei ieteicams risināt optimizācijas uzdevumu ar vairākiem optimizējamiem parametriem, piemēram, palielināt maksimālo momentu un jaudas koeficientu.

SynRM rotorā nemagnētisko gaisa barjeru un plūsmas vadošo izmēru apzīmējumi redzami 2.8. attēlā, kur izmēri: b_{gb} – gaisa barjeras platums; b_{Fe} – plūsmas vadošā kanāla platums – sadalīti pa šķērsasi – q un pie gaisa spraugas – δ , papildus apzīmēti: $b_{iz\ q}$ – izgriezums pa q asi pie gaisa spraugas un τ_{rr} – rotora zoba iedaļa.



2.8. att. Rotorā gaisa barjeru un plūsmas vadošo kanālu izmēri.

Rotorā plūsmas vadošos kanālus jācenšas veidot ar nemainīgu platumu visa kanāla garumā $b_{Fe\ q} = b_{Fe\ \delta}$. Gandrīz visi $b_{Fe\ \delta}$ ir ar vienādu platumu, lai nodrošinātu vēlamo pola pārsedzi, ar neredzami palielinātu $b_{Fe\ \delta}$ var veidot izgriezumam tuvāko kanālu. Gandrīz visi $b_{Fe\ q}$ ir ar vienādu platumu, ar neredzami samazinātu platumu uz q asi var veidot vārpstai tuvāko $b_{Fe\ q}$, platumu nosaka ar GEM, par kritēriju izvēloties vienādu indukcijas sadalījumu visos $b_{Fe\ q}$. Nemainīgs b_{Fe} platums visa kanāla garumā nodrošina vienmērīgu kanāla magnētiskās indukcijas sadalījumu, neradot papildu augstākās harmonikas.

Rotorā nemagnētisko gaisa barjeru forma var būt ar vienmērīgu platumu $b_{gb\ q} = b_{gb\ \delta}$ visā garumā vai ar pieaugošu platumu q ass virzienā $b_{gb\ q} > b_{gb\ \delta}$. Par nevēlamu uzskatāma konstrukcija, kurai gaisa barjera pie gaisa spraugas ir platāka nekā uz q ass, tādā gadījumā jāizskata, vai nav izvēlēta pārāk maza pola pārsedze un pārāk liels izgriezums pret q asi – $b_{iz\ q}$. *SynRM* ar polu skaitu, kas ir lielāks par 4, praktiski visām konstrukcijām $b_{gb\ q} > b_{gb\ \delta}$. Izgrieuma pa q asi pie gaisa spraugas $b_{iz\ q}$ nepieciešamību nosaka projektētājs, izvērtējot:

- vai ražošanas tehnoloģija pieprasa rotoru veidot kā ideālu cilindru;
- neveidojot izgriezumus, vai tērauda daļa ir pietiekami mehāniski nostiprināta;
- neveidojot izgriezumus, vai tērauda daļa būtiski nesamazina magnētisko nesimetriju.

Neveidojot izgriezumus (2.9. b att.), gaisa barjeras un plūsmas vadošie kanāli pie gaisa spraugas pa q asi var veidot sarežģītu ģeometriju ar maziem izmēriem un ļoti asiem leņķiem, ko būs sarežģīti izgatavot, īpaši ražojot mašīnu rūpnieciskos apjomos, piemēram, 4. un 5. barjeru (2.7. a att.).

SynRM veidojot pēc [6] rekomendācijām, rotora gaisa barjeras un plūsmas vadošā kanāla iedaļas platums τ_{rr} ir nemainīgs.

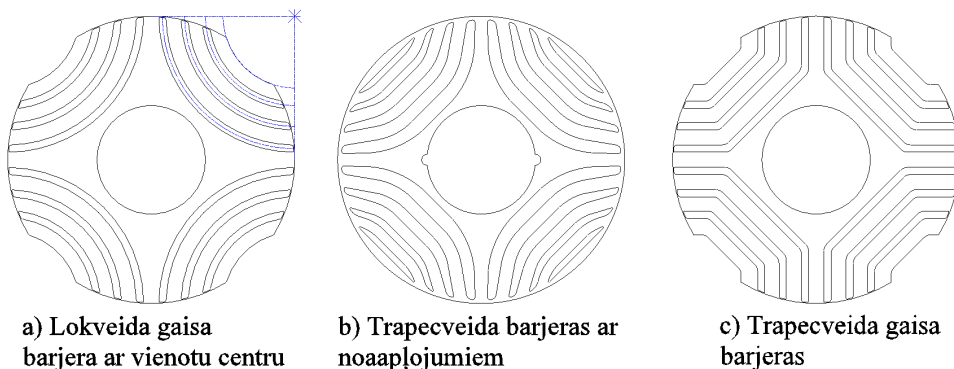
Plūsmas vadošo kanālu un gaisa barjeru platuma attiecību (2.3. formula) izsaka kā sakarību no visu nemagnētisko gaisa barjeru un izgriezuma platuma pret kopējo barjeras, izgriezuma un tērauda platumu.

$$K_{gb/Fe} = \frac{\sum b_{gb} + b_{iz}}{\sum b_{gb} + b_{iz} + \sum b_{Fe}}. \quad (2.3.)$$

2.6.3. Nemagnētisko gaisa barjeru forma

Rotora gaisa barjeru forma parasti tiek veidota trapecveida (2.9. c att.) vai lokveida (2.9. a att.). Gaisa barjeras forma var būt atsevišķs optimizācijas uzdevums. Gaisa barjeras formas izvēli ietekmēs ražotāja iespējas, kas būs atkarīgas no ražotājam pieejamā aprīkojuma un izvēlētajā rotora izgatavošanas tehnoloģijas. Būtiski barjeras formu ietekmēs nepieciešamais vārpstas diametrs. Trapecveida vai lokveida barjeras var būt ar nemainīgu barjeras platumu vai $b_{gb\ q} > b_{gb\ \delta}$. Trapecveida barjeras bieži tiek veidotas ar noapaļojumiem (2.9. b att.), lai ierobežotu magnētiskās indukcijas nevienmērīgu sadalījumu. Lokveida barjerām būtisks būs loka centrs.

Gaisa barjeras veidojot kā loku ar visām gaisa barjerām vienotu centru, momenta svārstības ir mazākas, salīdzinot ar trapecveida gaisa barjerām, piemēram 180 kW, $p = 2$, $f = 50$ Hz *SynRM* pie nominālās slodzes elektromagnētiskā momenta svārstības ir par 4 % mazākas [20]. Veidojot *PMASynRM*, ieteicams izvēlēties trapecveida barjeras.



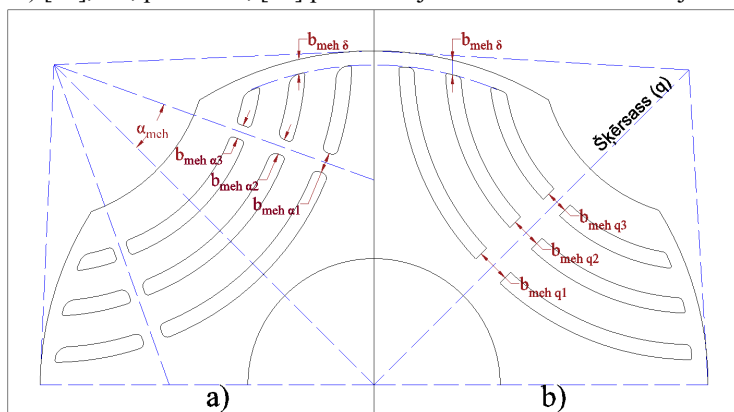
2.9. att. Gaisa barjeru forma.

2.6.4. Mehāniskās izturības savienojumi

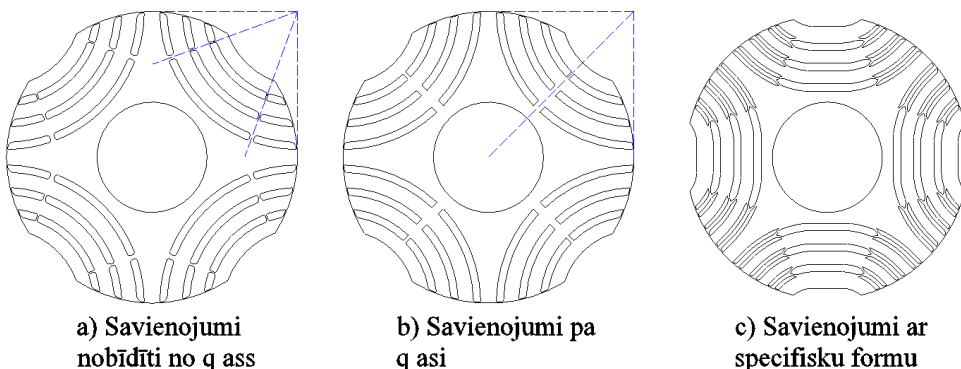
Mehāniskās izturības savienojumi ir paredzēti rotora mehāniskās izturības nodrošināšanai. Pieaugot mašīnas izmēriem, jāparedz lielāki savienojumi, jo pieaug mehāniskie spēki uz rotora tērauda daļām. Mehāniskās izturības savienojumu samazina magnētisko nesimetriju, samazina maksimālo elektromagnētisko momentu, savukārt mehāniskās izturības savienojumiem pie gaisa spraugas ir pozitīva ietekme uz elektromagnētiskā momenta svārstībām, kas tiek nedaudz samazinātas, piemēram, [21], [22] novērtēts, ka mehāniskās izturības savienojumi samazina

maksimālo momentu par 7 %, bet momenta svārstības par 2 %. Līdzīgi novērojumi, sadalot mehāniskās izturības savienojumu pie gaisa spraugas un pa q asi ietekmi, prezentēti [18]. Mehāniskās izturības savienojumiem ieteicams atsevišķs mehānikas un elektromagnētiskajos aprēķinos balstīts optimizācijas uzdevums.

Modernas *SynRM* konstrukcijas tipiski mehānisko savienojumu veidi: pie gaisa spraugas 2.10. attēlā apzīmēts ar platumu $b_{meh\ \delta}$ un gaisa barjeru sadalošs 2.10. b attēlā apzīmēts ar platumu $b_{meh\ q}$, ja stiprinājums atrodas tieši uz šķērsass, vai 2.11. a attēlā apzīmēts ar $b_{meh\ \alpha}$, ja stiprinājums ir nobīdīts no šķērsas par leņķi α_{meh} . Mehānisko savienojumu nepieciešamību, atrašanās vietu, platumu un skaitu nosaka rotora mehāniskās izturības aprēķins. Piemēram, 1,5 kW, $p = 2$ *SynRM* (2.9. b att.), ko ražo elektrisko mašīnu un sūkņu viens no lielākajiem ražotājiem “KSB”, ir tikai mehāniskās izturības savienojumi pie gaisa spraugas $b_{meh\ \delta}$. Pētīti arī dažādas formas mehāniskās izturības savienojumi, kas rotora izgatavošanu padara sarežģītāku, bet raksturojami ar augstāku magnētisko nesimetriju, piemēram, specifiskas formas mehāniskās izturības savienojumi (2.11. c att.) nodrošina par 5 % lielāku magnētisko nesimetriju, salīdzinot ar (2.11. a att.) [21], vai, piemēram, [23] pētītie “dūjas aste” formas savienojumi.



2.10. att. Ilustratīva skice mehāniskās izturības savienojumiem un to galvenajiem izmēriem: a) savienojumiem ar nobīdi no q ass; b) savienojums pa q asi.



2.11. att. Mehāniskās izturības savienojumu novietojums un forma.

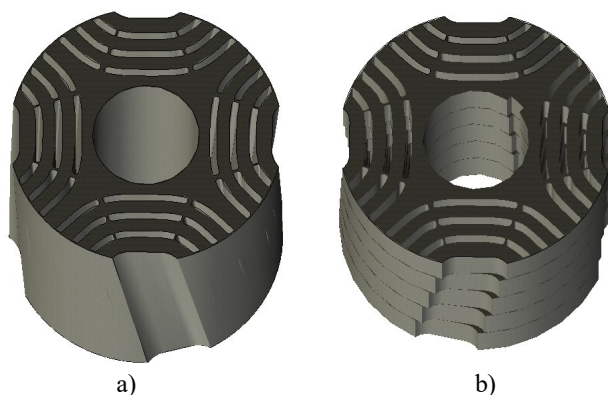
2.6.5. Pola pārsedze

Rotora pola pārsedze ietekmēs maksimālo attīstāmo elektromagnētisko momentu, elektromagnētiskā momenta pulsācijas un slodzes leņķi, pie kura tiks attīstīts maksimālais elektromagnētiskais moments. Lielākai rotora pola pārsedzei būs raksturīgs mazāks elektromagnētiskais moments un mazākas momenta pulsācijas [18]. Atbilstoši [13] rotora pola pārsedzi ieteikts izvēlēties $\tau_p/\tau \sim 2/3$. Praksē vairāki ražotāji izvēlas rotorus ar $\tau_p/\tau = 1$, piemēram, “KSB” 1,5 kW, $p = 2$ *SynRM* (2.9. b att.), tādā veidā rotors ir ideāls cilindrs, kas var būt ražošanas procesa nepieciešamība vai optimizācija.

2.6.6. Rotora nobīde

Līdzīgi kā asinhronajam dzinējam, statora un rotora rievu ģeometrijas iespaidā gaisa spraugā tiek radītas augstākās harmonikas, kas negatīvi ietekmē dzinēja darbību, tai skaitā izraisa elektromagnētiskā momenta svārstības. Rievu izraisīto augstāko harmoniku ierobežošanas nolūkos *SynRM* statora vai rotora konstrukciju iespējams izveidot ar nobīdi aksiālā virzienā. Lielākoties tiek lietota rotora nobīde. Statora nobīde ir tehnoloģiski sarežģīts process, kas ietver tērauda paketes salikšanu, rievu izolēšanu, tinuma ievietošanu, pēc kā statora pakete tiek pagriezta jeb nobīdīta, tad nostiprināta un kopā ar tinumu impregnēta [11]. *SynRM* rotorā nav aktīvo elementu, kas ir būtiska priekšrocība, nobīdi veidojot rotorā. Rotora nobīdi iespējams veidot šādi: nobīdot katru elektrotehniskā tērauda loksni par nelielu leņķi (2.12. a att.), kam raksturīgs lielāks efekts uz augstāko harmoniku ierobežošanu, bet ražošana ir sarežģītāka un dārgāka; rotoru sadalot segmentos un nobīdi veidojot starp segmentiem (2.12. b att.).

Nobīdes maksimālais efekts uz elektromagnētiskā momenta svārstību ierobežošanu parasti ir aptuveni vienas statora rievas iedaļas lielumā. Nobīde samazinās *SynRM* attīstāmo elektromagnētisko momentu, jo lielāka nobīde, jo mazāks attīstāmais moments. Rotora nobīdītās gaisa barjeras veido ventilatora spārniem līdzīgu konstrukciju, un gaisa barjeras radīs piespiedu gaisa cirkulāciju ar dzesējošu efektu [24].



2.12. att. *SynRM* rotors ar nobīdi aksiālā virzienā: a) nobīdot katru elektrotehniskā tērauda loksni par nelielu leņķi; b) rotoru sadalot segmentos un nobīdi veidojot starp segmentiem.

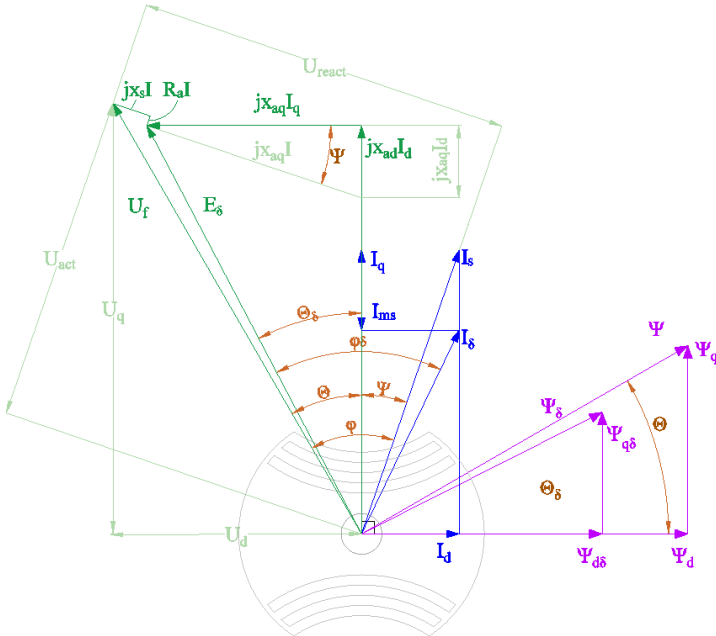
2.7. *SynRM* parametru aprēķins

Aprēķina algoritms

Induktīvo pretestību x_{ad} , x_{aq} un slodzes leņķa Θ aprēķinam tiek piedāvāts algoritms, ar kuru reaktīvās pretestības tiek aprēķinātas, ņemot vērā GEM rezultātus, ievērojot savstarpējo magnētisko iedarbību un magnētiskos zudumus. Lietojot aprēķinu algoritmu, induktīvās pretestības nav jāizsaka kā noteiktas ass strāvas funkcija. Leņķis Θ tiek aprēķināts, ņemot vērā savstarpējo magnētisko ietekmi. Tiek piedāvāts jauns aprēķinu algoritms, kas prezentēts [25], metodi papildinot ar magnētisko zudumu ievērošanu. Magnētiskos zudumus var aprēķināt no: ar GEM iegūtas indukcijas statora zobos B_z un jūgā B_j ; zoba, jūga elektrotehniskā tērauda masas; vai GEM apakšprogrammā, rēķinot *Bertotti* zudumus.

Tiek piedāvāts algoritms, balstoties kurā pretestības x_{ad} , x_{aq} un slodzes leņķis Θ ir aprēķina lielumi. Induktīvās pretestības tiek aprēķinātas, tās nav jāizsaka kā funkcija no strāvām. Leņķis Θ tiek aprēķināts, ņemot vērā I_d ietekmi uz x_{aq} un I_q ietekmi uz x_{ad} .

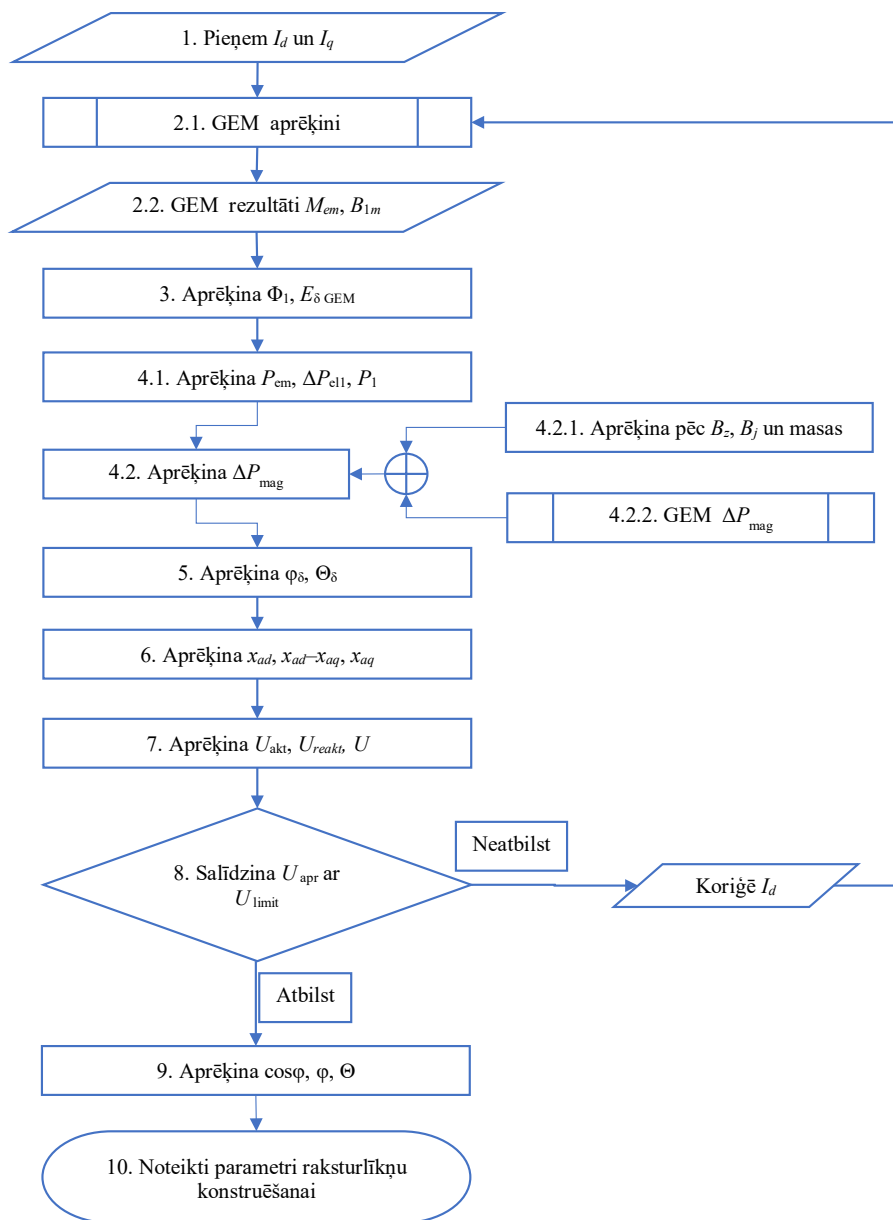
Algoritms balstās sinusoidālā maiņspriegumā. Mašīnas projektēšanas aprēķini parasti tiek veikti, pieņemot, ka darbību nodrošina sinusoidāls maiņspriegums [13]. Izstrādātais algoritms atšķiras no *Kampera* metodes [26] ar to, ka induktīvās pretestības tiek noteiktas, aprēķinot elektromagnētisko momentu ar GEM, un saskaņā ar vektora diagrammu (2.13. att.) tiek noteiktas enkura garenlauka x_{ad} un šķērslauka x_{aq} induktīvās pretestības.



2.13. att. 180 kW *SynRM* vektora diagramma ($I_N = 372$ A, $U_N = 420$ V) nominālās slodzes režīmā.

Algoritma aprēķinu secība

Sinhronās reaktīvās mašīnas vektoru diagramma algoritma vajadzībām redzama 2.13. attēlā. Aprēķinu algoritma darbību secība grafiski attēlota 2.14. attēla blokshēmā. Algoritms ietver skaitlisko aprēķinu daļu un GEM aprēķinu daļu.



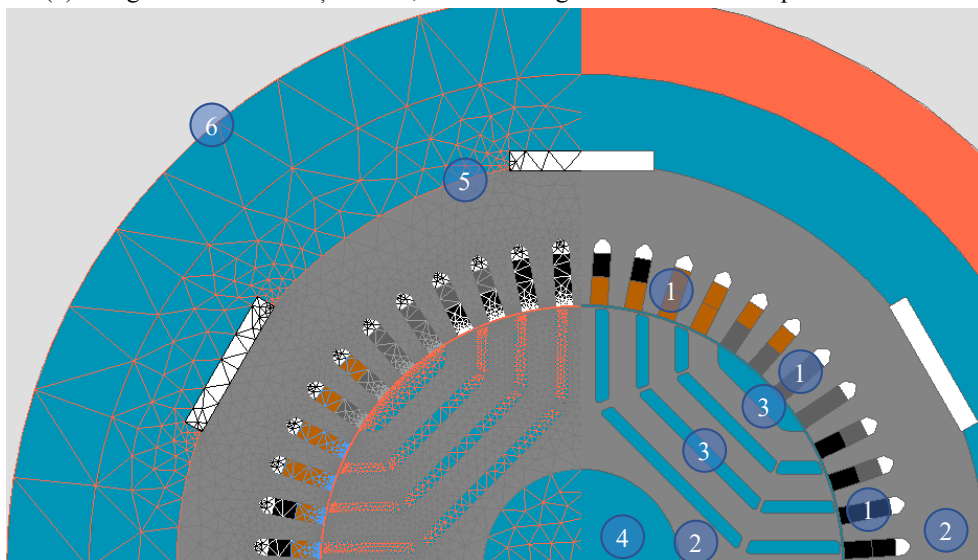
2.14. att. Raksturliķņu aprēķina algoritma darbību secība.

2.8. Galīgo elementu metodes lietojums projektēšanā

SynRM projektēšanā šī darba ietvarā un vispārīgi modernu elektrisko mašīnu projektēšanā plaši lietota ir elektromagnētisko lauku aprēķina skaitliskā metode – galīgo elementu metode (GEM). Latviešu valodā apraksts par modernu GEM datorprogrammas lietošanu elektrotehnikā lasāms [27] avotā. Darba ietvarā izmantota GEM datorprogramma *Flux*, kuras funkcionalitāte un darbības princips būtiski neatšķiras no citām industrijā un akadēmiskajā vidē populārām GEM datorprogrammām, piemēram, *ANSYS*, *COMSOL* vai *SolidWorks*. GEM datorprogrammas *Flux* lietojums elektriskās mašīnas magnētiskā lauka modelēšanai aprakstīts [28] avotā.

SynRM GEM modelis redzams 2.15. attēlā.

- (1) Trīsfāžu divslāņu tinums uzdots ar rievas strāvu [A]. Uzdodot fāžu strāvas, tiek noteikts magnētiskā lauka novietojums attiecībā pret rotora stāvokli un attiecīgi slodzes leņķis Θ .
- (2) Rotora un statora tērauds, kuru magnētiskās īpašības uzdotas ar $B(H)$ līkni. Magnētisko zudumu aprēķinam definē īpatnējo zudumu atkarību no indukcijas un plāksnītes biezumu.
- (3) *SynRM* rotora nemagnētiskas gaisa barjeras un gaisa sprauga starp statoru un rotoru uzdots ar relatīvo magnētisko caurlaidību $\mu_r = 1$.
- (4) Vārpsta un citi magnētiski un elektriski neaktīvi elementi uzdoti ar materiālam raksturīgu relatīvo magnētisko caurlaidību.
- (5) Galīgo elementu tīkls no trīsstūra elementiem. Tīkls tiek veidots smalkāks pie ģeometriskiem mezglu punktiem, piemēram, gaisa spraugā.
- (6) Galīgo elementu modeļa robeža, aiz kuras magnētiskais lauks neturpinās.



2.15. att. *SynRM* GEM modelis ar galīgo elementu tīklu.

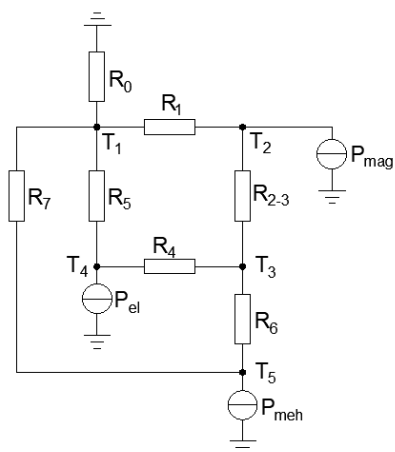
3. SINHRONĀS REAKTĪVĀS MAŠĪNAS SLĒGTAS KONSTRUKCIJAS DZESĒŠANAS SISTĒMA

3.1. *SynRM* dzesēšanas sistēmas

Elektriskajās mašinās dzesēšanas sistēmas konstrukcijai ir tikpat liela nozīme kā iekārtas elektromagnētiskajai konstrukcijai, nosakot elektriskās mašīnas maksimālo pārvadāmo jaudu, drošumu, stabilitāti un ilgmūžību. Optimālas dzesēšanas sistēmas izvēle ir īpaši būtiska transporta aplikācijā, kurā elektriskās mašīnas ārējie izmēri un svars ir ierobežoti. Lielākai daļai elektrisko mašīnu pietiekamu dzesēšanu nodrošina gaisa konvekcija jeb siltuma starojums no mašīnas korpusa uz apkārtējo vidi un siltuma novadīšana caur mašīnas stiprinājumiem un vārpstu. Dzesēšanas sistēma ir pasīva, ja siltums tiek novadīts bez papildu enerģijas patēriņa, tikai ar gaisa konvekciju un pārnesei uz stiprinājumiem. Elektriskajām mašīnām ar lielu jaudas blīvumu lieto aktīvas dzesēšanas metodes. Galvenokārt lieto ventilatorus gaisa plūsmas radīšanai vai siltumapmaiņu veicina ar dzesēšanas šķidruma cirkulāciju. Dzesēšanas šķidrums pārvada siltumu no mašīnas siltākajām daļām, parasti tuvu tinumam uz radiatoru.

3.2. *SynRM* termiskā ekvivalentā shēma

SynRM siltumapmaiņas procesu aprakstošā ekvivalentā shēma redzama 3.1. attēlā, tās galvenais vienkāršojums – siltuma plūsmas apskatīta tikai radiālā virzienā. Vairākos literatūras avotos aprakstīta tieši *SynRM* termiskā ekvivalentā shēma, kur, autora ieskatā, ieteicams apskatīt [29], [30], [31] literatūras avotus.

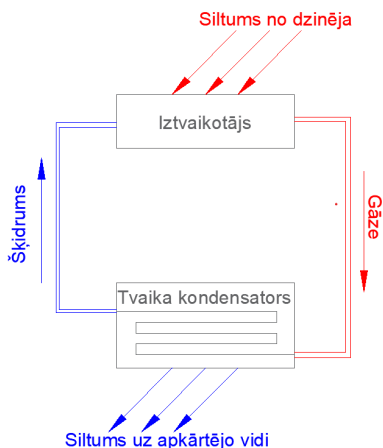


- R_0 – apkārtējās vides siltumvadošs slānis;
- R_1 – statora jūga augšējās daļas siltuma vadīšanas pretestība;
- R_{2-3} – statora jūga iekšējās daļas un statora zoba siltuma vadīšanas pretestība;
- R_4 – siltuma vadīšanas pretestība starp statora rievu un statoru;
- R_5 – siltuma vadīšanas pretestība rievas slāņos;
- R_6 – konvekcijas pretestība gaisa spraugai;
- R_7 – siltuma vadīšanas pretestība rotoram.

3.1. att. *SynRM* termiskā ekvivalentā shēma.

3.3. Siltumcilpas dzesēšanas sistēma

Šķidruma dzesēšanas sistēmu, kuras darbības pamatā ir siltumnesēja agregātstāvokļa maiņa ar dabisko siltumnesēja cirkulāciju noslēgtā kontūrā, sauc par siltumcilpas. Angļu valodā tiek izmantots termins *heat pipe termosyphon* (turpmāk *HL*). Siltumcilpas pamatā ir siltumnesēja agregātstāvokļa maiņa iztvaikotājā no šķidruma uz gāzi un tvaika kondensatorā no gāzes uz šķidrumu. Siltumcilpas darbības principa grafiska interpretācija redzama 3.2. attēlā. Siltumcilpas ir noslēgta kontūra pasīva, ar nelieliem siltuma zudumiem, siltuma pārvades sistēma, bez papildu enerģijas patēriņa siltuma cirkulācijas nodrošināšanai.



3.2. att. Siltumcilpas jeb *HL* darbības princips.

Grafisks siltumcilpas dzesēšanas sistēmas skaidrojums redzams 3.3. attēlā, kur:

- 1) siltuma kolektors – iztvaikotāju bloks ar termiskām saskarēm ar mašīnu, 3.3. b attēlā redzama mašīnas konstrukcija ar 12 iztvaikotājiem;
- 2) siltumnesēja pārvades kanāli (šķidruma un tvaika līnija);
- 3) dzesēšanas radiators – kondensators ar gaisa siltummaini.

Projektēšanas un izgatavošanas ziņā tehniski sarežģītākais siltumcilpas elements ir siltuma kolektors.



3.3. att. Siltumcilpas dzesēšanas sistēma: a) galvenie siltumcilpas elementi; b) mašīnas konstrukcija ar 12 siltumcilpas iztvaikotājiem.

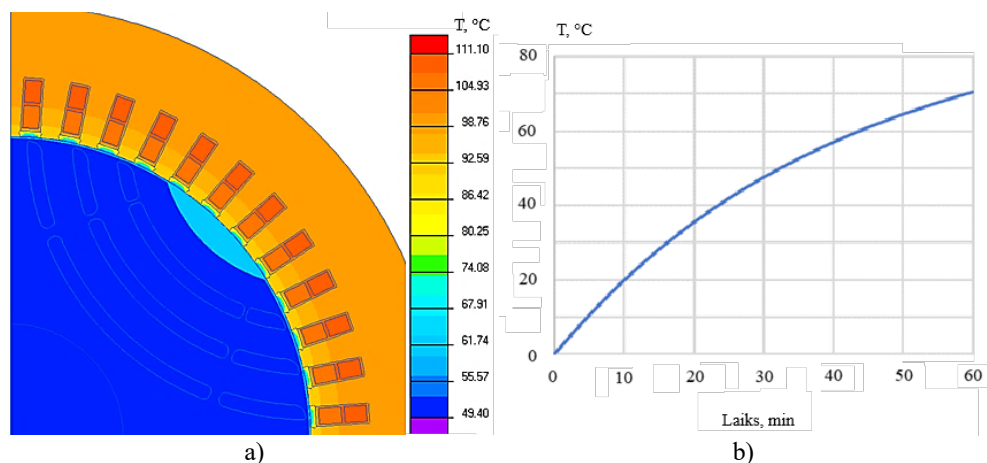
3.4. Galīgo elementu metodes lietojums *SynRM* dzesēšanas sistēmu modelēšanā

Galīgo elementu metode tiek izmantota dažādās zinātnes nozarēs, lai risinātu dažādas sarežģītas fizikālas problēmas. Ar GEM var veikt cietvielu mehānikas, šķidrumu un gāzu mehānikas, elektrotehnikas un praktiski visu citu tehnisko nozaru aprēķinus. Latvijā GEM lietošanā ir vairāku desmitgadu iestrādnes ne tikai autoram tuvajā elektrotehnikas nozarē, bet arī būvniecības un mehānikas nozarēs [32]. Galvenās metodes priekšrocības, kāpēc galīgo elementu metode tiek izmantota tik plaši, ir iespēja matemātiski modelēt un skaitliski atrisināt sarežģītas problēmas [33]. Autora pieredze GEM lietošanā galvenokārt saistīta ar elektromagnētisko procesu modelēšanu, bet jāatzīmē divi darbi [34], [35], kuros pētīta, salīdzināta un aprakstīta GEM lietošana *SynRM* termiskajā modelēšanā, kuru tapšanā autoram ir bijusi konsultanta loma.

GEM lietojuma *SynRM* piemērs temperatūras modelēšanā

Apskatīts GEM lietojums temperatūras modelēšanā 180 kW *SynRM* dzinējam ar IC01 dzesēšanas sistēmu, kas prezentēta [36] publikācijā.

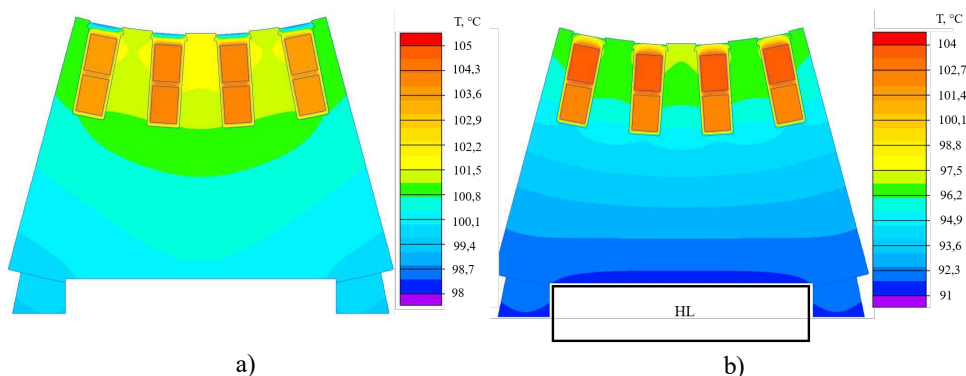
GEM modelēšanas rezultāti labi sakrīt ar eksperimentāli noteiktiem rezultātiem, kas aprakstīti šī darba nākamajā nodaļā, nominālās slodzes režīmā 60 min laikā temperatūra tinumā pieaug no 17,7 °C līdz 88,6 °C jeb par **70,9 °C**. GEM rezultāti redzami 3.4. attēlā, kur: a) parādīts temperatūru sadalījums stabilā režīmā, ko iegūst, modelējot termodinamikas problēmu nostabilizējušam darba režīmam; b) parādītas temperatūras izmaiņas statora zobā 60 minūšu laikā, ko iegūst, modelējot pārejas procesu režīma termodinamikas problēmu, nominālās slodzes režīmā 60 minūšu laikā temperatūra tinumā pieaug no 0 °C līdz 72 °C jeb par **72 °C**.



3.4. att. GEM modelēšanas rezultāti 180 kW *SynRM*: a) temperatūras sadalījums mašīnā, nostabilizēties režīms; b) temperatūras izmaiņas statora rievā jeb tinumā atkarībā no darbības laika, GEM rezultātu apkopojums.

Piemērs ar GEM lietojumu *SynRM* ar *HL* temperatūru modelēšanā

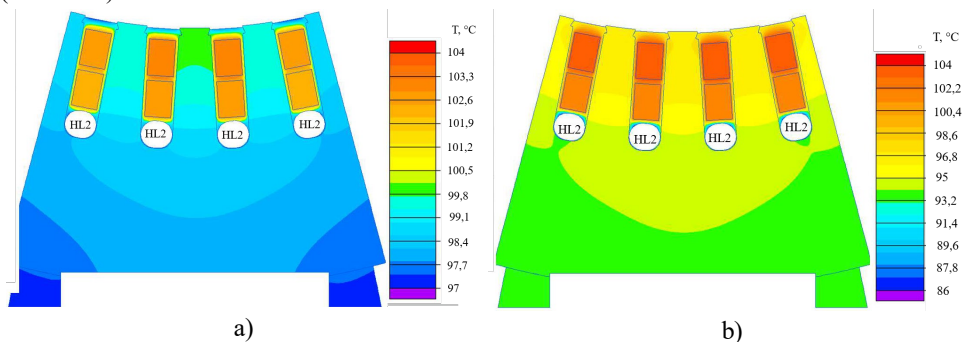
Apskatīts GEM lietojums temperatūras modelēšanā *SynRM* ar *HL* dzesēšanas sistēmu, kas prezentēta [37] publikācijā. GEM modelēšana bez *HL* tiek veikta, uzdodot siltumapmaiņas koeficientu uz statora segmenta visām ārējām virsmām $h = 4 \text{ W/m}^2/\text{K}$ (3.5. a att.). GEM modelēšana ar *HL* tiek veikta, uzdodot siltumapmaiņas koeficientu uz statora segmenta ārējām virsmām, kas vērstas pret blakus segmentiem un pret rotoru $h_1 = 44 \text{ W/m}^2/\text{K}$, bet virsmām, kas sakaras ar *HL*, $h_2 = 44 \text{ W/m}^2/\text{K}$ (3.5. b att.).



3.5. att. GEM modelēšanas rezultāti *SynRM* segmentam: a) bez *HL* ($h = 4 \text{ W/m}^2/\text{K}$); b) ar *HL* (pie *HL* $h = 44 \text{ W/m}^2/\text{K}$).

Piemērs ar GEM lietojumu *SynRM* ar dzesēšanas kanāliem rievās temperatūras modelēšanā

Ar GEM tiek modelētas temperatūras 1/12 segmentam, kuram statora rievās tiek izveidoti papildu dzesēšanas kanāli, turpmāk *HL2*. Līdzīgi kā iepriekš, uz segmenta visām ārējām virsmām uzdod siltumapmaiņas koeficientu $h_1 = 4 \text{ W/m}^2/\text{K}$. Vispirms apskatīts variants, kurā rievās ir izveidoti kanāli, bet nav ievietoti *HL2* iztvaikotāji, uzdodot kanālos gaisu, attiecīgi uz *HL2* virsmas tiek uzdots $h_2 = 4 \text{ W/m}^2/\text{K}$ (3.6. a att.). Otrs apskatītais variants ir ar kanālos ievietotiem *HL2* iztvaikotājiem, attiecīgi uz *HL2* virsmas tiek uzdots $h_2 = 28 \text{ W/m}^2/\text{K}$ (3.6. b att.).



3.6. att. GEM modelēšanas rezultāti *SynRM* segmentam ar *HL2* statora rievās: a) *HL2* aizstāj ar gaisu ($h_2 = 4 \text{ W/m}^2/\text{K}$); b) *HL2* (pie *HL* $h_2 = 28 \text{ W/m}^2/\text{K}$).

4. SINHRONĀS REAKTĪVĀS MAŠĪNAS IZSTRĀDE

4.1. 180 kW *SynRM*

4.1.1. Projektēšana

Galvenie izmēri

Izstrādāts 180 kW *SynRM* ar galveno projekta mērķi aizstāt masu tranzīta elektriskā transportlīdzekļa – trolejbusa – piedziņas asinhrono dzinēju ar efektivitāti 92,6 % ar augstākas efektivitātes 95 % elektrodzinēju. Risinājumam jābūt ar nemainīgiem ārējiem izmēriem un barošanas avota prasībām kā aizstājamajam asinhronajam dzinējam, jo risinājums tiek lietots jau izgatavotam transporta līdzeklim ar elektrodzinējam atvēlētās vietas ierobežojumiem. Projektēšanas stadijā veicot optimizāciju, prioritāte ir lietderības koeficienta palielināšana. Jāatzīmē, ka *SynRM* un tā vadības sistēma izstrādāta atsevišķi, projektējot dzinēju atbilstoši galvenajiem uzdotajiem parametriem (4.1. tab.), pēc kā tam pielāgo vadības sistēmu. *SynRM* pielāgotās vadības metodes un sistēmas apraksts dots [3], [38], [39] avotos.

4.1. tabula

SynRM izstrādei izvirzītās pamatprasības

D_{as}	493	mm	Statora ārējais diametrs
L	290	mm	Statora aktīvais garums
D_v	60	mm	Vārpstas diametrs
δ	1,2	mm	Gaisa spraugas platums
U_{Nl}	420	V	Nominālais tīkla līnijas spriegums
f_l	50	Hz	Nominālā tīkla frekvence
m	3		Fāžu skaits
P_N	180	kW	Nominālā mehāniskā jauda
M_N	1146	N * m	Nominālais mehāniskais moments
n_1	1500	min ⁻¹	Nominālais rotācijas ātrums
η	95 %		Projektā sasniedzamais dzinēja lietderības koeficients
	S2 60 min		Darba režīms atbilstoši <i>LVS EN 60034-1:2011</i>

SynRM stators

Statora izmēru aprēķins veikts līdzīgi kā citām maiņstrāvas mašīnām, papildus ietverot optimizāciju ar galīgo elementu metodi (GEM).

SynRM rotors

Rotora gaisa barjeru skaitam jābūt $N_r = N_s \pm 2 \times 2p$, kas nodrošina vismazākās momenta svārstības. Tiek projektēts rotors ar $N_r = N_s - 2 \times 2p = 40$, jo šāds rotors ir vienkāršāks, ar mazāku gaisa barjeru skaitu. Rotoru ar $N_r = 56$ ir sarežģītāk izgatavot.

Plūsmu vadošie kanāli izveidoti aptuveni divas reizes platāki nekā gaisa barjeras. Attiecība robežās no 2 līdz 3 nodrošina optimālu magnētisko nesimetriju x_d/x_q .

Rotora gaisa barjeru formas izvēle balstās uz [38]. Gaisa barjeras tiek izveidotas kā loks, visām gaisa barjerām ir nemainīgs loka centrs.

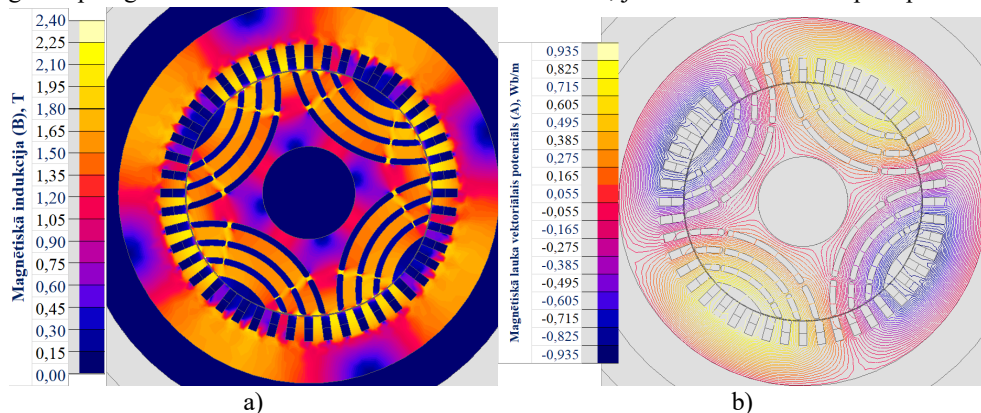
Rotora gaisa barjeras forma ietver mehāniskās izturības savienojumus, kas veido ceļu šķērass plūsmai. Tie ir nepieciešami, lai nodrošinātu rotora mehānisko izturību.

Rotora gaisa barjeru noapaļojumi pie gaisa spraugas izveidoti ar rādiusu 7 mm. Šāds rādiuss ir optimāls un, salīdzinot ar noapaļojumu 4 mm, momenta pulsācijas $M_{sv\ amp}$ ir par 2 % mazākas.

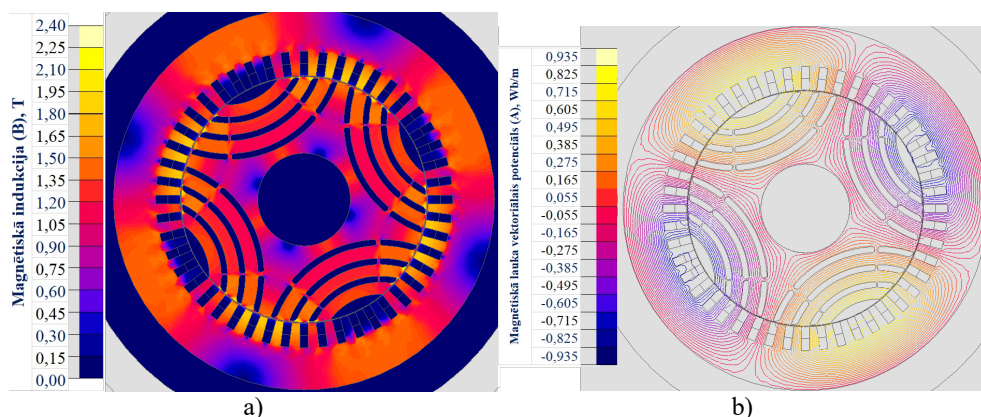
Projektēšanas rezultāti un magnētiskais lauks

Aprēķinu rezultāti salīdzināti ar eksperimenta rezultātiem 4.6.–4.8. attēla grafikos. Ar GEM modelētā magnētiskā lauka ainas nominālās slodzes režīmam redzamas 4.1. attēlā, tukšgaitas režīmam – 4.2. attēlā.

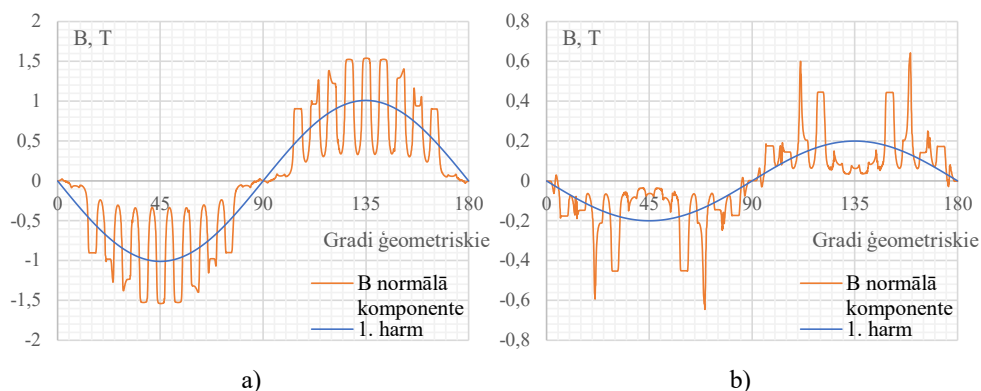
Pēc indukcijas sadalījuma gaisa spraugā var izvērtēt projektējamai mašīnai raksturīgās elektromagnētiskā momenta svārstības (4.3. att.). Indukcijas sadalījuma līknē nolasāma statora rievu un rotora gaisa barjeru ietekme uz elektromagnētiskā momenta svārstībām, izceļot to, ka izstrādātā mašīna ir ar 48 statora rievām un diviem polu pāriem, bet indukcijas sadalījumam gaisa spraugā izteiktākā ir 23 harmonika un 25 harmonika, jo $48/2 = 24$ rievās uz polu pāri.



4.1. att. Magnētiskā lauks nominālajā režīmā: $I = 392\text{ A}$, $I_d = 125\text{ A}$, $I_q = 372\text{ A}$; $\Theta = 29,9^\circ$:
a) indukcija (T); b) vektorpotenciāls (Wb/m).



4.2. att. Magnētiskā lauks tukšgaitas režīmā: $I = 126\text{ A}$, $I_d = 126\text{ A}$, $I_q = 0$; $\Theta = 0$:
a) indukcija (T); b) vektorpotenciāls (Wb/m).

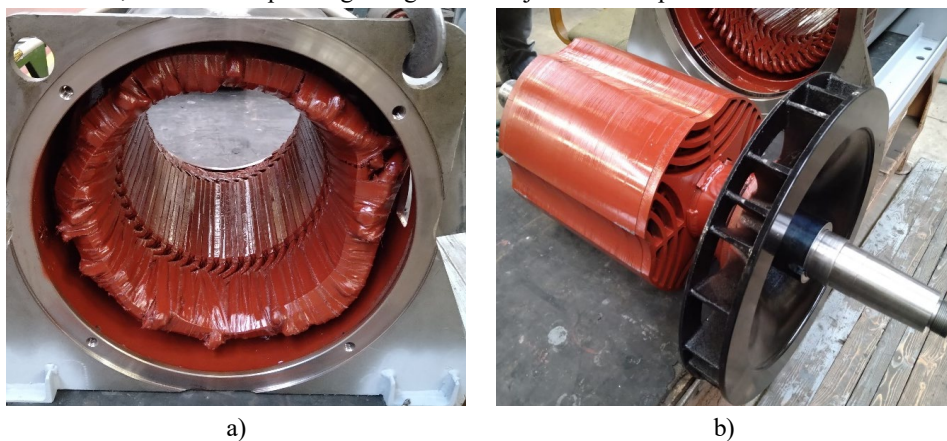


4.3. att. Magnētiskās indukcijas sadalījums gaisa spraugā tukšgaitas režīmā, normālā komponente: a) garenass (d); b) šķērsass (q).

4.1.2. 180 kW *SynRM* eksperimentālā izpēte

Izgatavošana

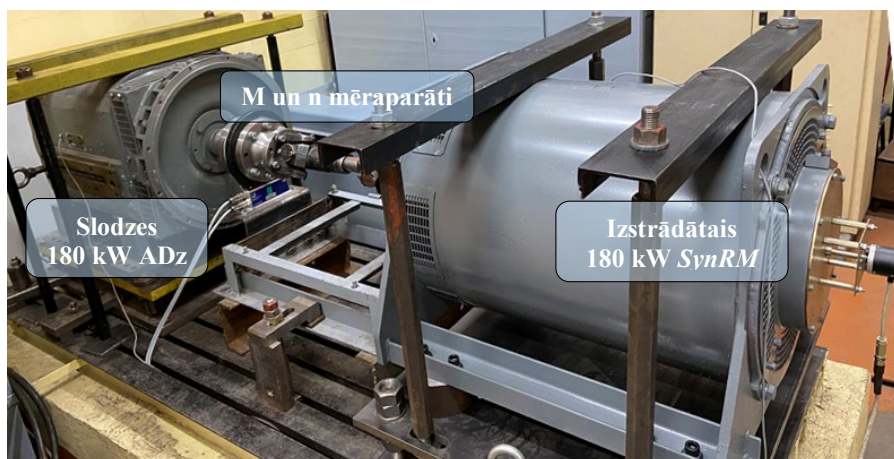
AS “RER” izgatavoja projektēto 180 kW *SynRM* prototipu, ražošanas procesā lielākoties izmantojot uzņēmumā labi atstrādātās asinhrono mašīnu ražošanas tehnoloģijas. *SynRM* ražošanas procesa līdzība ar asinhronā dzinēja ražošanas procesu uzskatāma par lielu priekšrocību, salīdzinot ar pastāvīgo magnētu dzinēju ražošanas procesu.



4.4. att. AS “RER” izgatavotā 180 kW *SynRM*: a) stators; b) rotors.

Eksperimenti

Izgatavotā 180 kW *SynRM* eksperimentālā pārbaude tika veikta AS “RER” laboratorijā uz īpaša lieljaudas transporta piedziņas elektrodzinēju izmēģinājuma stenda (4.5. att.). Eksperimentos izmantotais laboratorijas stends un eksperimentu gaita plašāk aprakstīti [3], [39] darbos.



4.5. att. 180 kW *SynRM* pārbaudes stends.

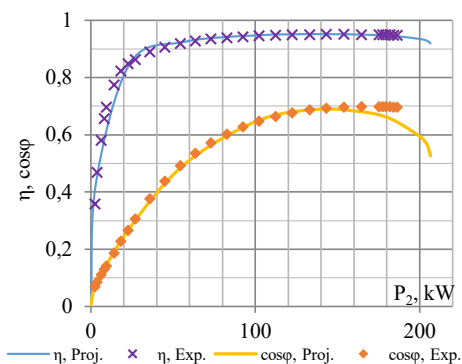
Eksperimentu rezultāti

Izstrādātā dzinēja eksperimentu rezultāti apkopoti 4.2. tabulā (Eksp.); elektriskie parametri redzami 4.6. attēlā, moments – 4.7. attēlā, temperatūra un svārstības – 4.8. attēlā. Eksperimentu rezultāti prezentēti publikācijās [20], [38]. Eksperimentu rezultāti attēloti kopā ar projektēšanas stadijā aprēķinātajiem parametriem (Proj.), kas iegūti, izmantojot aprēķinu metodi, kas prezentēta šī darba iepriekšējā nodaļā un publikācijā [25].

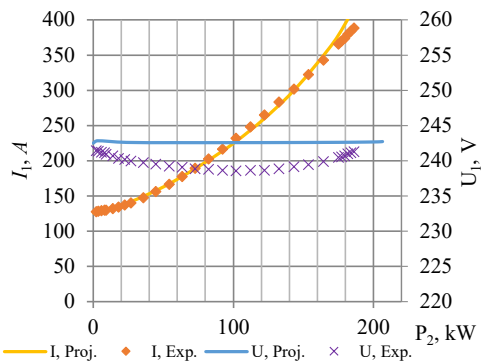
4.2. tabula

180 kW *SynRM* projekta un eksperimenta galvenie rezultāti

Parametri			Proj.	Eksp.	ADz
Statora strāva	I_1	A	392	374	310
Statora spriegums	U_1	V	420	417	420
Jaudas koeficients	$\cos\phi$	–	0,7	0,7	0,89
Elektriskā jauda	P_1	kW	189	189	201
Mehāniskā jauda	P_2	kW	179	179	186
Mehāniskais moments	M_2	Nm	1141	1144	1193
Statora tinuma pretestība	R_1	Ω	0,0122	0,0103	–
Statora elektriskie zudumi	$\Delta P_{el1\ N}$	kW	5,64	4,90	6,74
Rotora elektriskie zudumi	$\Delta P_{el2\ N}$	kW	–	–	2,17
Magnētiskie zudumi	ΔP_{mag}	kW	2,87	2,85	3,68
Mehāniskie zudumi	ΔP_{mech}	kW	0,54	0,82	0,47
Papildzudumi	ΔP_{add}	kW	1,00	0,86	1,03
Kopā zudumi	ΔP_{Σ}	kW	10,1	9,43	14,1
Lietderības koeficients	η	%	94,7 %	95,0 %	92,5 %

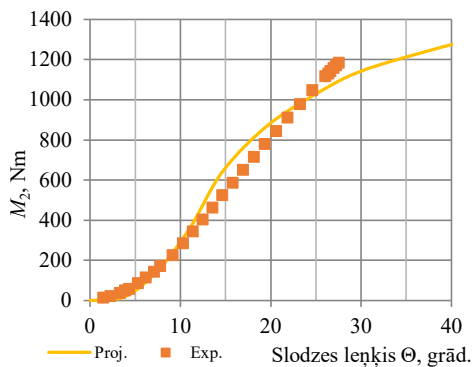


a)

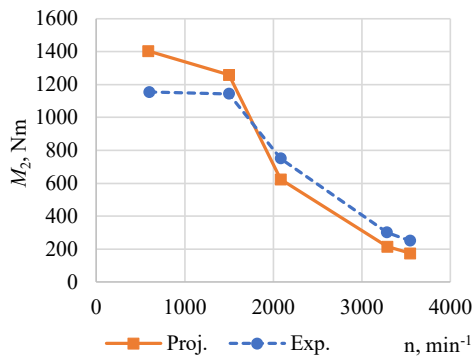


b)

4.6. att. 180 kW *SynRM* eksperimentos noteiktās un aprēķinātās darba līknes: a) lietderības un jaudas koeficienti; b) spriegums un strāva.

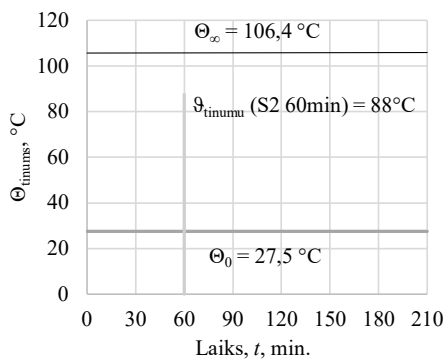


c)

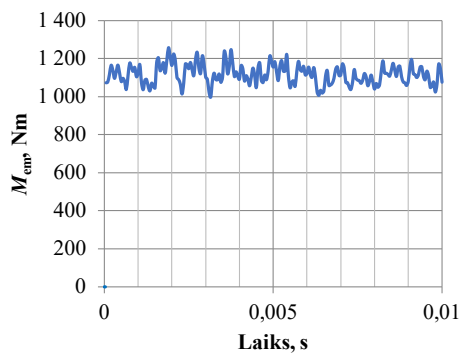


d)

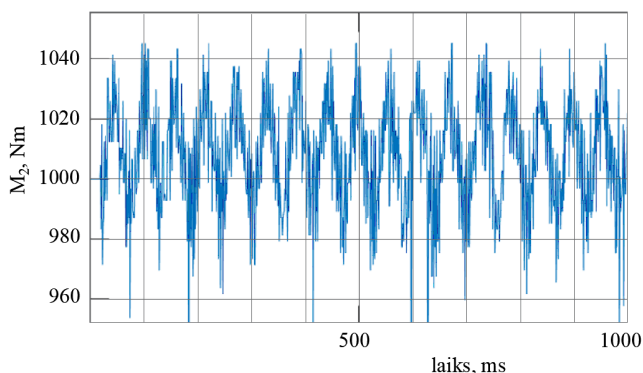
4.7. att. 180 kW *SynRM* eksperimentos noteiktās un aprēķinātās darba līknes: c) leņķa raksturlīkne; d) vilces raksturlīkne.



e)



f)



g)

4.8. att. 180 kW *SynRM* eksperimentos noteiktās un aprēķinātās darba līknes: e) statora tinuma temperatūra; f) elektromagnētiskā momenta svārstības, momentānā vērtība – no GEM aprēķiniem; g) mehāniskā momenta svārstības – no eksperimenta rezultātiem.

4.2. *SynRM* īpatnējās jaudas palielināšana ar siltumcīlpas dzesēšanas sistēmu

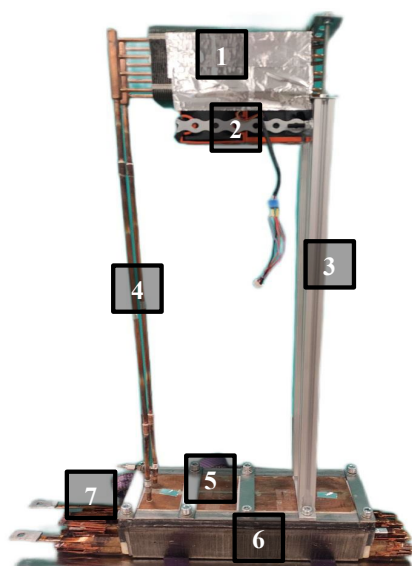
Maksimālo elektrodzinēja pārveidojamo jaudu ietekmēs gan elektromagnētiskās sistēmas konstrukcija, gan dzesēšanas sistēmas spēja aizvadīt siltumu no tinumiem. Uzlabojot elektriskās mašīnas dzesēšanas sistēmas veiktspēju, iespējams panākt vienu no rezultātiem:

- palielināt dzinēja maksimālo jaudu, nepalielinot tinumu temperatūru jeb nesamazinot iekārtas termisko stabilitāti un drošumu;
- samazināt dzinēja elektriskos zudumus un ilgmūžību, samazinot tinumu temperatūru.

Darba ietvarā tiek izskatīts risinājums, ar kuru izstrādātai *SynRM* elektromagnētiskai konstrukcijai tiek uzlabota dzesēšanas sistēmas veiktspēja, tādā veidā iegūstot mašīnu ar lielāku īpatnējo jaudu [40].

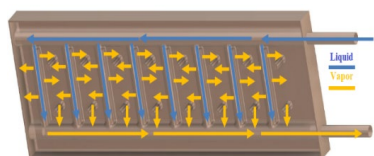
4.3. *SynRM* ar *HL* 1/12 statora segmenta eksperimentālā izpēte

Lai pārbaudītu iespēju uzlabot *SynRM* parametrus – īpatnējo jaudu – ar *HL* dzesēšanas sistēmas palīdzību, AS “RER” elektrisko mašīnu ražotnē tika izgatavots 180 kW *SynRM* 1/12 statora segments. Pie statora segmenta tika piestiprināta *HL* dzesēšanas sistēma, kas izgatavota SIA “*Allatherm*”. Statora segments, kas savienots ar *HL* dzesēšanas sistēmas segmentu, redzams 4.9. attēlā, kurā ir numurētas eksperimenta stenda sastāvdaļas. *HL* dzesēšanas sistēmas iztvaikotājs (4.10. att.); fragments ietver 1/12 no pilnas mašīnas iztvaikotājiem un tvaika kondensatoriem.

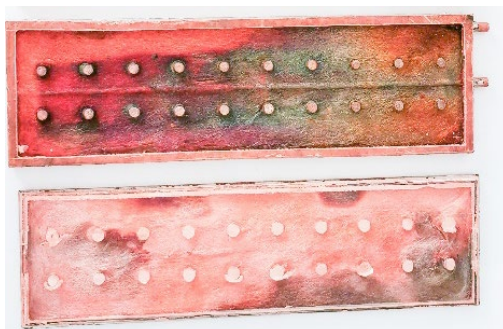


1. Tvaika kondensators;
2. ventilators;
3. stiprinājums;
4. siltumnesēja šķidruma un tvaika kanāli;
5. iztvaikotājs;
6. statora fragments;
7. statora tinums.

4.9. att. Statora fragments ar *HL* dzesēšanu.



a)



b)

4.10. att. *HL* iztvaikotājs: a) shematiskais attēlojums; b) izgatavotais kapilāra efekta ar dakts formas vara daļām iztvaikotājs.

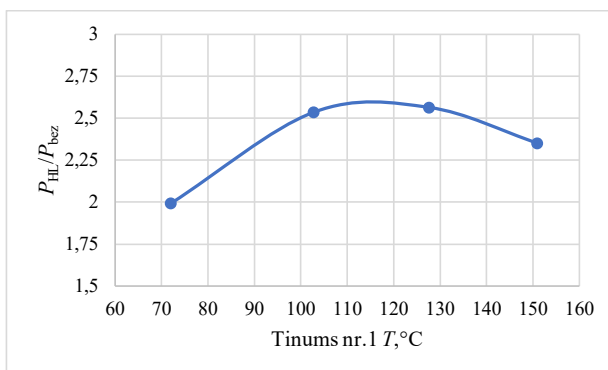
Segmenta eksperimenta rezultāti

Segmenta eksperimenta rezultāti pie tādas jaudas, kas statora tinumos rada nostabilizējušos temperatūru, kas vienāda ar 180 kW *SynRM* nostabilizējušos temperatūru $T^\circ = 105^\circ \text{C}$, apkopoti 4.3. tabulā. Rezultāti parādīti vienai termozondei no katras grupas, jo grupas ietvaros mērījumu rezultāti praktiski neatšķiras. No eksperimenta rezultātiem var novērot, ka, izmantojot *HL* dzesēšanu, mašīnas tinumos var ievadīt $\Delta P_{\text{Cu (HL)}}/\Delta P_{\text{Cu (bez HL)}} = 350/138 = 2,54$ reizes lielāku jaudu, lai saglabātu nemainīgu tinuma temperatūru $\sim T^\circ = 105^\circ \text{C}$. Jaudu attiecība būs atkarīga no temperatūras, kā redzams 4.11. attēlā.

4.3. tabula

Segmenta eksperimenta rezultāti

Termozonde Segmenta dzēsēšana	Tinums (Nr. 1)	Zobs (Nr. 4)	Statora tēr. virsmā (Nr. 13)	Jauda
	Temperatūra, $T^{\circ}\text{C}$			W
Bez HL	102	97	96	138
Ar HL	103	75	49	350



4.11. att. Segmenta tinumiem pievadīto jaudu attiecība ar un bez HL dzēsēšanas pie nostabilizējušās temperatūras

Segmenta eksperimenta rezultātu pielīdzināšana pilnai mašīnai

Segmenta eksperimenta rezultāti, pielīdzinot pilnai mašīnai, apkopoti 4.4. tabulā.

4.4. tabula

Salīdzinājums starp *SynRM* ar HL un *IC01* dzēsēšanu

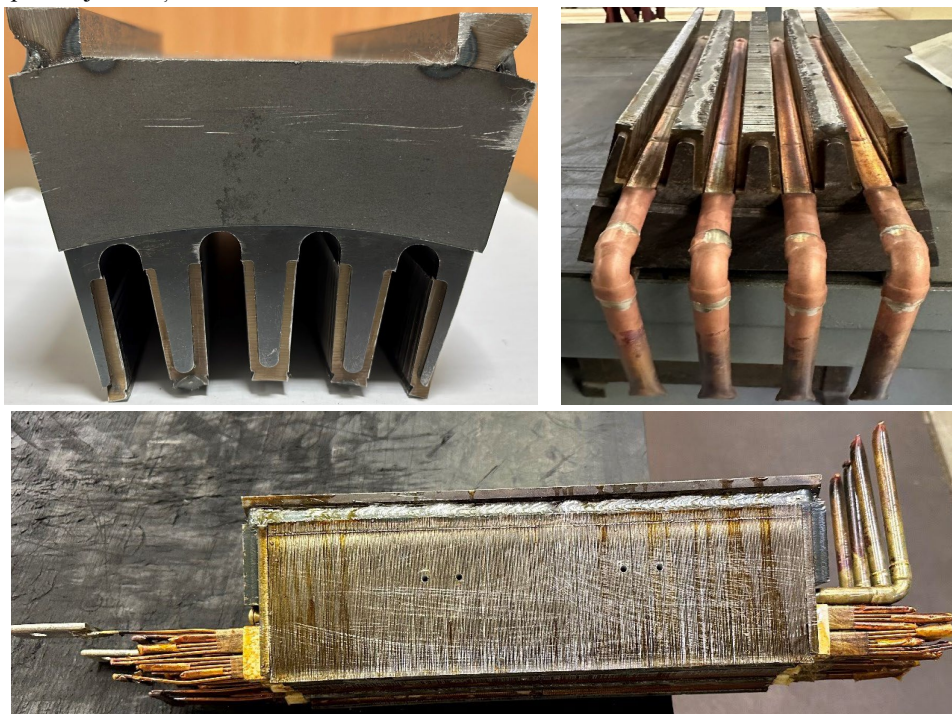
Parametri		Mērv.	<i>SynRM</i> ar <i>IC01</i> dzēsēšanu	<i>SynRM</i> ar HL dzēsēšanu ar samazinātu <i>L</i>	<i>SynRM</i> ar HL dzēsēšanu ar palielinātu P_2
Mehāniskā jauda	P_2	kW	179,6	182,6	290,4
Strāva	I	A	374	591	591
Elektromagnētiskais moments	M_{em}	Nm	1144	1173	1980
Aktīvais garums	L	mm	290	168	290
Statora ārējais diametrs	D_{sa}	mm	493	493	493
Cu + Fe svars	$m_{Cu} + m_{Fe}$	kg	479	277	479
Jaudas blīvums		kW/kg	0,37	0,66	0,61
Elektriskie zudumi	ΔP_{Cu}	kW	4,9	11,5	14,3
Indukcija zobā	B_z	T	2,05	2,16	2,16
Indukcija jūgā	B_j	T	1,72	1,93	1,93
Magnētiskie zudumi	ΔP_{Fe}	kW	2,9	2,4	4,2
Lietderības koeficients	η	%	94,9 %	92,2 %	93,4 %

4.4. *SynRM* ar *HL* statora rievās 1/12 statora segmentam eksperimentālā izpēte

Nemot vērā to, ka iepriekš apskatītajam modelim, dzesējot mašīnu ar *HL*, ir būtiska atšķirība starp tinuma temperatūru un statora tērauda virsmas temperatūru, tika izstrādāta konstrukcija – modelis, kurā *HL* dzesēšanas sistēmas elementi tiek izvietoti pie tinuma, turpmāk saukts par segmentu nr. 2. Segments nr. 2 izgatavots ar mērķi pētīt, vai iespējams uzlabot siltuma izkliedes efektivitāti, novietojot siltumu uzņemošos dzesēšanas sistēmas elementus pēc iespējas tuvāk galvenajam siltuma avotam – tinumam.

Segmenta nr. 2 izgatavotais modelis redzams 4.12. attēlā. Salīdzinot pirmā segmenta un segmenta nr. 2 ražošanas procesu, kā trūkumu var izcelt to, ka segmenta nr. 2 ražošanas posmā starp statora paketes izveidošanu un tinuma ievietošanu rievās tajās jāievieto dzesēšanas sistēmas elementi. Projektā, kura ietvarā ražots segments, atbildības bija sadalītas – par elektriskās mašīnas ražošanas daļu atbild AS “RER”, par dzesēšanas sistēmas ražošanu – SIA “*Allatherm*”, kas atspoguļo tipiskas elektriskās mašīnas ražošanas procesu, kurā šo daļu ražošanu veic atsevišķas nodaļas vai uzņēmumi. Ražošanas process no stators> tinums> dzesēšana> korpuss, tiek aizstāts ar stators> dzesēšana> tinums> dzesēšana> korpuss.

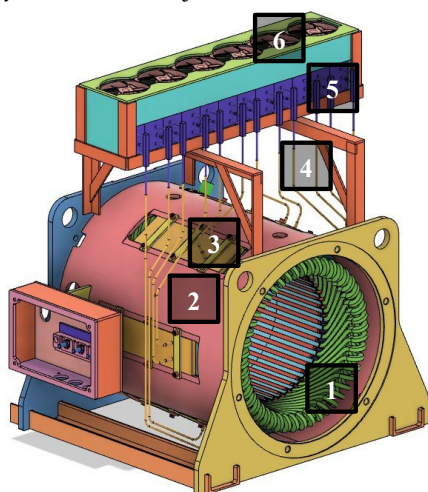
HL iztvaikotāja nr. 2 rievās ievietoto iztvaikotāju izgatavošanas problēmu dēļ segmentu nebija iespējams pārbaudīt, kas liecina par risinājuma būtisku trūkumu – izgatavošanas sarežģītību. Par segmenta veikspēju var spriest no GEM modelēšanas, kas aprakstīta iepriekšējā nodaļā.



4.12. att. izgatavotais 1/12 segmenta nr. 2 modelis.

4.5. Pilnas komplektācijas *SynRM* ar *HL* eksperimentālā izpēte

SynRM 1/12 segmenta testi uzrāda, ka ir potenciāls dzesēt *SynRM* ar *HL* dzesēšanas sistēmu. Segmenta testa rezultātus ar virkni vienkāršošanu attiecinot uz pilnu mašīnu, var secināt, ka, lietojot *HL* dzesēšanas sistēmu, iespējams ne tikai dzesēt mašīnu esošajā līmenī, bet pat palielināt jaudas blīvumu. Tomēr segments tikai daļēji apraksta pilnas mašīnas siltumapmaiņas procesu. Segmenta testa attiecināšana uz slēgtas konstrukcijas mašīnu novērtējama analītiski, bet tas ietver virkni pieņēmumu, no kuriem būtiskākie ir pilnīgi noslēgtas konstrukcijas un rotora rotācijas kustības ietekme uz siltumapmaiņas procesu. Tika izgatavota pilnas komplektācijas *SynRM* ar *HL* dzesēšanas sistēmu ar galveno mērķi eksperimentāli pārbaudīt iespēju realizēt pilnīgi slēgtas konstrukcijas *SynRM*, saglabājot jaudu 180 kW, nepalielinot mašīnas ārējos izmērus, pēc iespējas (–2 %) nepasliktinot lietderības koeficientu. *HL* iekļaušana *SynRM* konstrukcijā redzama 4.13. attēlā.



1. *SynRM* stators ar tinumiem;
2. *SynRM* korpus ar atverēm *HL* iztvaikotājam;
3. *HL* iztvaikotāji;
4. *HL* siltumnesēja šķidruma un tvaika kanāli;
5. *HL* tvaika kondensatori;
6. *HL* ventilatori.

4.13. att. *SynRM* ar *HL* dzesēšanu skice.

Izstrādātā 180 kW *SynRM* ar *HL* dzesēšanas sistēmu dzesēšanas sistēmas *IC* kods (*International Cooling*) atbilstoši *LVS EN 60034-6:2002* ir *IC9W7*.

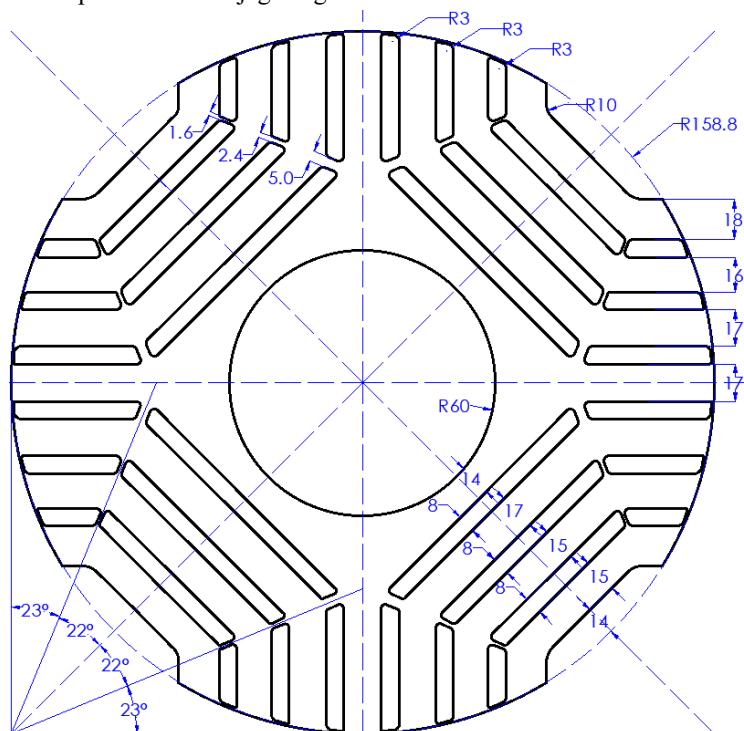
Projektēšana

Sinhronās reaktīvās mašīnas projektēšana tika veikta pēc iepriekšējās nodaļās aprakstītajām vadlīnijām. Lai neatkārtotu iepriekšējās nodaļās izklāstīto, šeit atspoguļotas tikai galvenās *SynRM* ar siltumcīpās dzesēšanas sistēmu (turpmāk – *SynRM* ar *HL*) atšķirības no 180 kW *SynRM* ar *IC01* dzesēšanas sistēmu (turpmāk – 180 kW *SynRM*). *SynRM* ar *HL* tika veidota līdzīgu 180 kW *SynRM* ar mērķi novērtēt *HL* dzesēšanas efektivitāti, salīdzinot gandrīz identiskas elektriskās mašīnas, kuru galvenā atšķirība ir dzesēšanas sistēma – attiecīgi *HL* vai *IC01*.

Izstrādātā *SynRM* izveidota ar trapeceveida rotora gaisa barjerām (4.14. att.). Trapecveida barjerām raksturīgs trūkums ir tas, ka sasniedzams mazāks elektromagnētiskais moments, salīdzinot ar loka formas barjerām, savukārt priekšrocība ir tāda, ka barjeras malas ir taisnas,

ko ir vienkāršāk uzgatavot, un tajās vieglāk ievietot pastāvīgo magnētus. Projekta ietvarā netiek izskatīta *SynRM* jaudas palielināšana ar pastāvīgajiem magnētiem, bet lēmums par trapecveida barjerām pieņemts, lai izgatavoto prototipu būtu iespējams izmantot potenciālos nākotnes *PMA_{SynRM}* pētījumos.

Izstrādātā *SynRM* izveidota ar sešiem *HL* dzesēšanas sistēmas iztvaikotājiem. Iztvaikotāji daļēji aizņem vietu, kas tipiski ir atvēlēta atstarpei starp korpusu un statora paketi, lai pēc iespējas mazāk iespaidotu statora jūga augstumu.



4.14. att. *SynRM* ar *HL* dzesēšanu, trapecveida gaisa barjeru rotors.

Izgatavošana

SynRM ar *HL* izgatavota AS “RER” (4.15. att.). *SynRM* ar *HL* ražota tāpat kā 180 kW *SynRM*. Mašīnas stators un rotors izgatavoti no 0,5 mm biezām elektrotehniskā tērauda M470-50HP loksņēm. Tinums ar vara vadiem 8,5 mm × 1,7 mm, vada izolācijas biezums – 0,23 mm. Rievas izolācija veidota 0,9 mm līdz 1,75 mm biezumā. Tinuma un rievas izolācija veidota ar (H) – termiskās izturības klasi ar maksimālo ilgstoši pieļaujamo temperatūru 180 °C atbilstoši *LVS EN 60085:2008*. Siltumcīlpas dzesēšanas sistēmas sastāvdaļas izgatavotas SIA “Allatherm”.

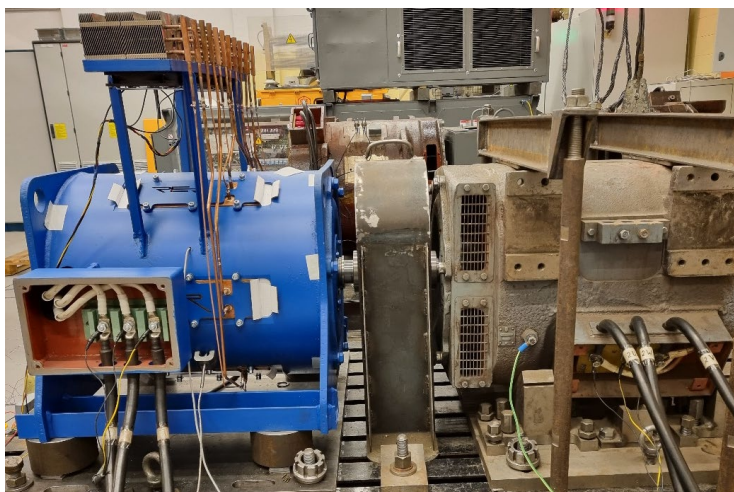
Eksperimenti

SynRM ar *HL* pārbaude veikta AS “RER” laboratorijā uz transporta piedziņas elektrodzinēju izmēģinājuma stenda (4.16. att.), eksperimentus veicot divos režīmos – tukšgaitas režīmā un nominālās slodzes jeb $P_2 = 180$ kW režīmā. Tukšgaitas eksperiments veikts aptuveni 2 h

25 min. Slodzes eksperiments veikts uzreiz pēc tukšgaitas eksperimenta, neatslēdzot mašīnu, aptuveni 1 h.



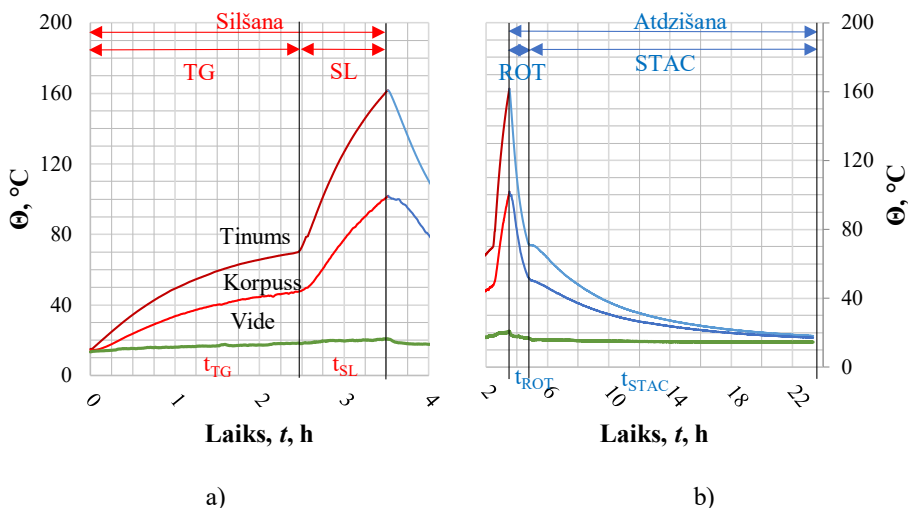
4.15. att. *SynRM* ar *HL* izgatavošanas process.



4.16. att. *SynRM* ar *HL* eksperimenta stends.

Eksperimentu rezultāti

Temperatūras mērījumi veikti silšanas (4.17. a att.) un atdzišanas procesam (4.17. b att.). Silšanas process iedalīts tukšgaitas (TG) un slodzes (SL) režīmos. Atdzišanas process iedalīts eksperimentam ar ieslēgtu, rotējošu *HL* tvaika kondensatora ventilatoru (ROT) un ar izslēgtu *HL* tvaika kondensatora ventilatoru (STAC). Temperatūras mērījumi kopā veikti gandrīz 24 h ilgi, temperatūras datu ierakstītājiem (*logeriem*) ierakstot mērījumu ik pēc ~ 10 sekundēm. Mērīta temperatūra rievā tieši pie tinuma, kas arī ir lielākā temperatūra uz mašīnas korpusa un gaisa temperatūra pie eksperimentu stenda.



4.17. att. *SynRM* ar *HL* eksperimenta rezultāti: a) silšana tukšgaitas (TG) un nominālās slodzes (SL) režīmos; b) atdzišana ar ieslēgtiem *HL* iztvaikotāja ventilatoriem (ROT) un ieslēgtiem *HL* iztvaikotāja ventilatoriem (STAC).

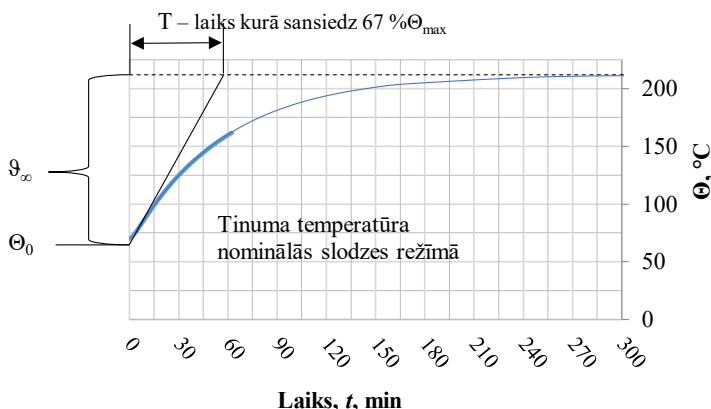
Ar dažiem vienkāršojumiem eksperimentos novēroto *SynRM* ar *HL* mašīnas silšanas procesu un mašīnas elementu temperatūru silšanas procesa laikā Θ_{sil} var aprakstīt ar 4.1. vienādojumu. Galvenais vienkāršojums ir tas, ka vienādojums neietver noteiktā režīma pirmās 5–10 minūtes, kurās norisinās elektriska režīma izmaiņas process jeb slodzes palielināšana, pārejot no tukšgaitas uz slodzes režīmu, vai ātruma uzņemšana tukšgaitas režīmā. Aproximācija neņem vērā eksperimenta laikā mainīgo vides temperatūru Θ_{vide} , tā vietā tiek izmantota aproksimētā eksperimenta sākuma temperatūru Θ_0 . Interesanti, ka no eksperimenta rezultātiem novērojama sakarība, kā mašīnas silšanas process ir ietekmējies apkārtējās vides temperatūru. Darba režīmam raksturīgās nostabilizējušās virstemperatūras ϑ_∞ un silšanas laika konstante T ir eksperimentu rezultātu aproksimācija. Grafiski eksperimentu rezultāti (exp.) un, izmantojot 4.1. vienādojumu, aproksimācija (aprox.) parādīta 4.19. attēlā. Silšanas procesu raksturojošās temperatūras Θ_0 , ϑ_∞ un silšanas laika konstante T dažādiem režīmiem apkopota 4.5. tabulā, un tie grafiski paskaidroti 4.18. attēlā.

$$\Theta_{sil} = \Theta_0 + \vartheta_\infty \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{T}\right)}\right). \quad (4.1.)$$

Izmantojot no eksperimentu rezultātiem iegūtās silšanas laika konstantes un stabilas virstemperatūras, iespējams aprēķināt *SynRM* ar *HL* dzesēšanu temperatūru nominālās slodzes $P_2 = 180$ kW režīmā pēc 60 min darba laika – *S2* 60 min pie apkārtējās vides temperatūras 40°C *SynRM* ar *HL* $\Theta_{tinumi} = 135^\circ\text{C}$ un $\Theta_{korpus} = 101^\circ\text{C}$.

Atdzišanas procesa elementu temperatūru Θ_{atdz} var aprakstīt ar 4.2. vienādojumu. Eksperimenta sākuma temperatūru Θ_0 un atdzišanas laika konstante T apkopota 4.5. tabulā.

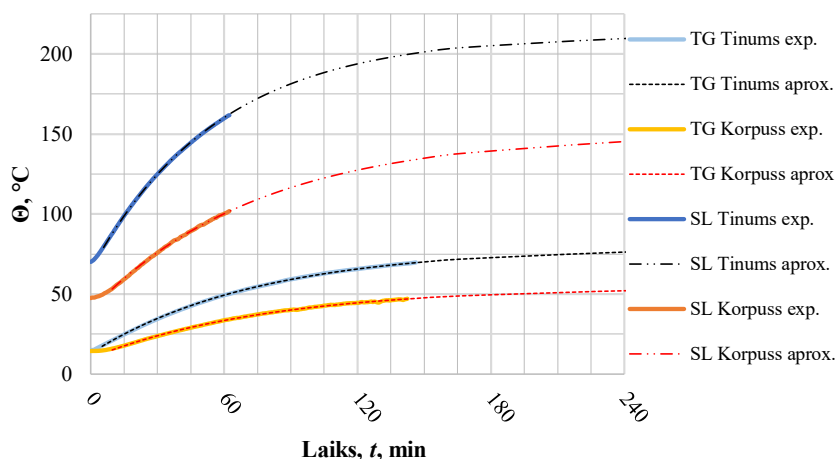
$$\Theta_{atdz} = \Theta_{vide} + (\Theta_0 - \Theta_{vide})e^{\left(-\frac{t}{T}\right)}. \quad (4.2)$$



4.18. att. *SynRM* ar *HL* tinuma temperatūras Θ_0 , ϑ_∞ un silšanas laika konstante T .

Temperatūras Θ_0 , Θ_∞ un silšanas laika konstante T

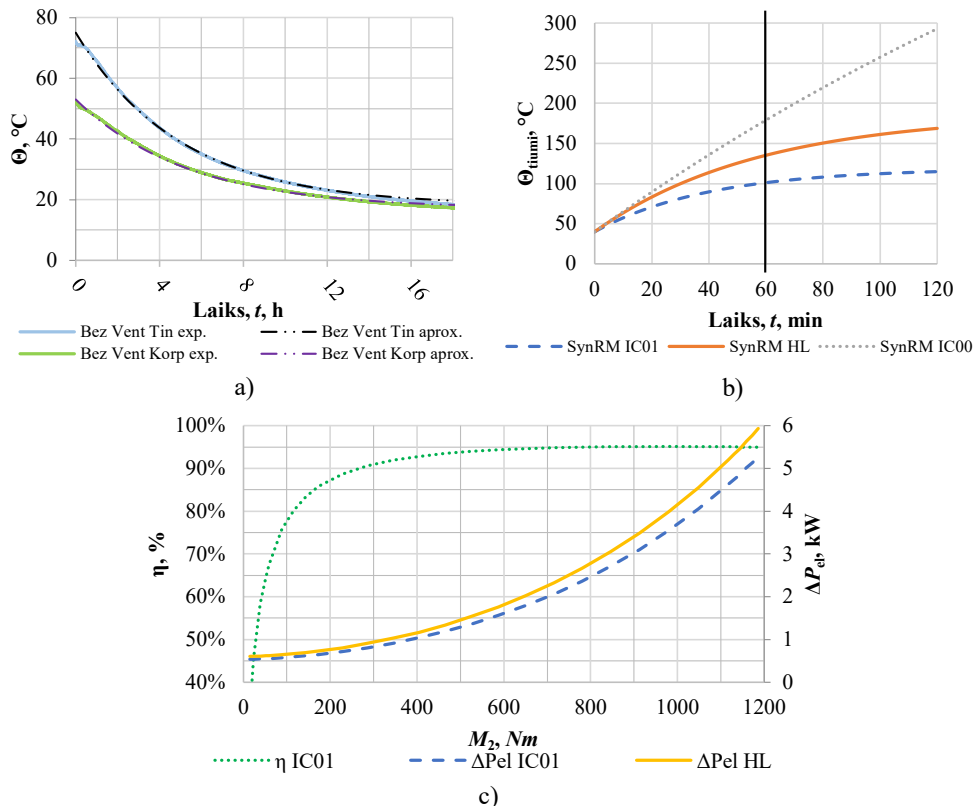
Parametrs	Režīms Mērījumu vieta	Silšana				Atdzišana			
		Tukšgaita		Slodze		Rotācija		Statisks	
		Tinums	Korpuss	Tinums	Korpuss	Tinums	Korpuss	Tinums	Korpuss
Temperatūra eksperimenta sākuma, Θ_0 , °C		13	10	65	40	162	110	75	53
Nostabilizējies virstemperatūra, Θ_∞ , °C		66	44,3	147	110	—	—	—	—
Silšanas laika konstante, T , minūtes		75	80	57,5	75	75	80	300	320

4.19. att. *SynRM* ar *HL* tinuma un korpusa sasilums tukšgaitas (TG) un slodzes (SL) režīmos.

Atdzišanas eksperimentam un tā rezultātu aproksimācijai (4.20. a att.) īpaši būtisks ir režīms, kad atslēgti *HL* dzesēšanas sistēmas tvaika kondensatoru ventilatori (STAT). Šāds dzesēšanas režīms vislabāk apraksta mašīnu bez dzesēšanas sistēmas, kas atbilstoši *LVS EN 60034-6:2002* standartam apzīmējama kā *IC00* dzesēšanas sistēma, siltumapmaiņa dabīgā ceļā no korpusa uz apkārtējo vidi bez ventilatora. Salīdzinot *SynRM* ar *HL*, *SynRM IC00*, *SynRM IC01* silšanas laika konstantes un stabilas virstemperatūras vislabāk var novērtēt ieguvumu, ko sniedz *HL* dzesēšanas sistēmas (4.20. b att.). Ar relatīvi lielu precizitāti var pieņemt, ka līdzīgos apstākļos mašīnas atdzišanas un silšanas laika konstantes būs vienādas, ko apstiprina 4.5. tabulā parādītie dati tukšgaitas silšanas eksperimentam un atdzišanas eksperimentam ar ieslēgtiem *HL* tvaika kondensatora ventilatoriem. Jāatzīmē, ka slēgta izpildījuma mašīnai ar *IC00* dzesēšanas sistēmu laika konstante un stabila virstemperatūra būs lielāka nekā analītiski noteiktā, jo atdzišanas eksperiments veikts *SynRM* ar *HL*, kura *HL* daļas izgatavotas no vara, kam ir labāka siltumvadītspēja, salīdzinot ar *IC00* mašīnas korpusa tēraudu.

Tinumu silšana ietekmē tinuma aktīvo pretestību, attiecīgi mašīnas elektriskos zudumus, tāpēc lietderīgi novērtēt *SynRM* ar *HL* elektriskos zudumus un tos salīdzināt ar *SynRM IC01* elektriskajiem zudumiem (4.20. c att.). No vispārzināmām pretestības un temperatūras

sakarībām analītiski aprēķināta pieaugušās tinuma temperatūras ietekme uz tinuma aktīvo pretestību un tai atbilstošie elektriskie zudumi. Nominālajā darba režīmā pie $P_{2N} = 180$ kW, $U = 420$ V, $f = 50$ Hz, $n = 1500$ min⁻¹ *SynRM* ar *HL* elektriskie zudumi, salīdzinot ar 180 kW *SynRM* ar *IC01* dzesēšanu, ir par ~0,5 kW lielāki, kā ietekmē lietderības koeficients samazinās par ~0,3 %.



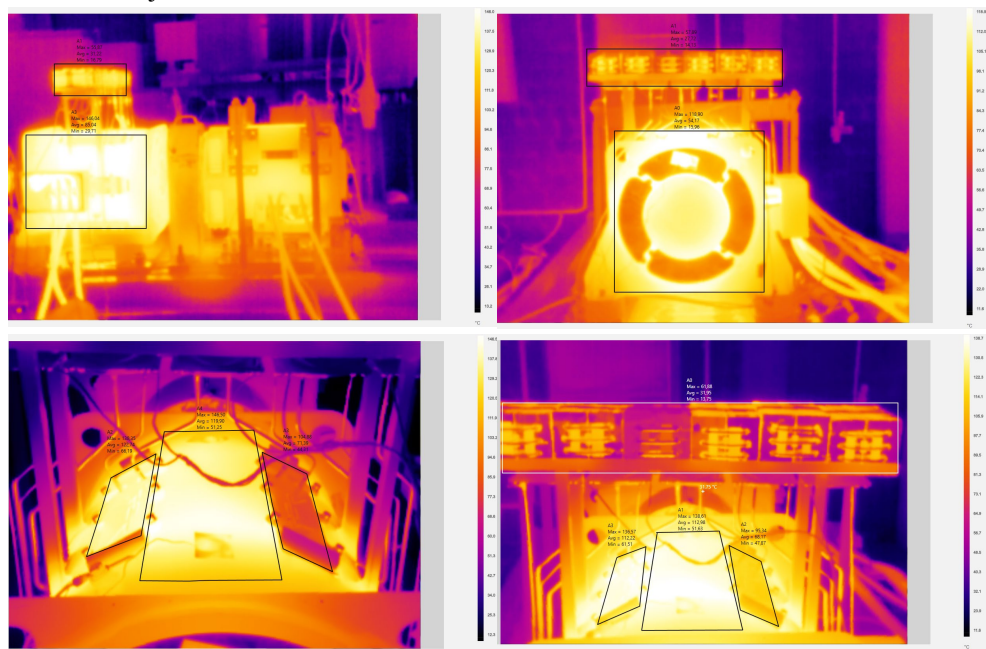
4.20. att. a) *SynRM* ar *HL*, tinuma un korpusa atdzišana, atslēgti *HL* tvaika kondensatora ventilatori; b) *SynRM* ar *HL*, *SynRM IC01* un *SynRM IC00* bez dzesēšanas sistēmas temperatūras salīdzinājums pie apkārtējās vides temperatūras $\Theta_{\text{vide}} = 40$ $^\circ\text{C}$; c) *SynRM* ar *HL* un *SynRM IC01* elektriskie zudumi atkarība no slodzes momenta pie $n = 1500$ min⁻¹, $U = 420$ V, $f = 50$ Hz.

SynRM ar *HL* galvenokārt veikti temperatūras mērījuma eksperimenti, elektriskie mērījumi veikti tukšgaitas un nominālajā darba režīmā, pēc kuriem var spriest par dzinēja kopējo efektivitāti, salīdzinot ar *IC01* dzinēju. Nominālajā režīmā veikti šādi mērījumi: $U = 467,5$ V; $I_1 = 370$ A; $P_1 = 194,2$ kW; $\cos\varphi = 0,648$; $f = 50$ Hz; $P_2 = 181,1$ kW, attiecīgi lietderības koeficients ir $\eta = 93,3$ %. Lai arī elektriskie zudumi ir pieauguši tikai par 0,5 kW, kopējie zudumi ir pieauguši uz $\Delta P_\Sigma = 13,1$ kW, pieaugums par 3,67 kW ($\Delta P_{\Sigma IC01} = 9,43$ kW).

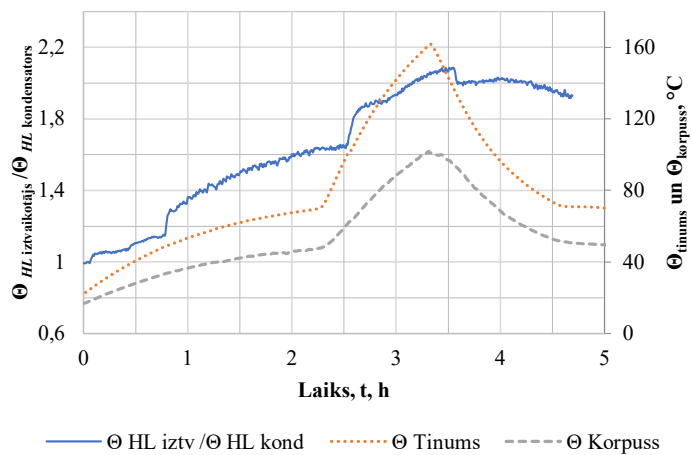
Eksperimenta laikā tika lietota infrasarkanā termogrāfija, lai noteiktu karstos punktus “hot spots”. Infrasarkanās termogrāfijas attēli uzskatāmi parāda bojāto *HL* iztvaikotāju. Infrasarkanā

termogrāfija uzņemta ar visam attēlam vienu atstarošanas koeficientu. 4.21. attēlā redzami termoattēli slodzes eksperimenta beigās, kad tika sasniegta lielākā dzinēja temperatūra.

Par *HL* dzesēšanas sistēmas efektivitāti var spriest pēc iztvaikotāja un tvaika kondensatora temperatūras attiecības (4.22. att.). Jo augstāka temperatūru attiecība, jo efektīvāka dzesēšanas sistēma. Iztvaikotāja un tvaika kondensatora temperatūras attiecību apskatot kopā ar sistēmas temperatūru, var secināt – jo augstāka atdzesējamā temperatūra, jo augstāka *HL* dzesēšanas sistēmas efektivitāte (4.22. att.). Interesanti, ka novērojami *HL* dzesēšanas sistēmas lēcienvēida efektivitātes pieaugumi, kas, iespējams, skaidrojams ar ūdens agregātstāvokļa maiņas procesu *HL* iztvaikotājā.



4.21. att. *SynRM* ar *HL* termoattēli pirms silšanas režīma pārtraukšanas, kad sasniegta dzinēja maksimālā temperatūra.



4.22. att. *HL* iztvaikotāja un *HL* tvaika kondensatora temperatūru attiecība vienā laika skalā ar tinuma un korpusa temperatūrām.

GALVENIE DARBA REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

180 kW *SynRM*, kas aizvieto asinhrono dzinēju trolejbusā

1. Uzprojektēts, izgatavots un pārbaudīts 180 kW *SynRM* sabiedriskā transporta lietojumam, kura lietderības koeficients nominālās slodzes režīmā ($n = 1500 \text{ min}^{-1}$; 180 kW) ir lielāks $\eta_{\text{SynRM}} = 95 \%$, salīdzinot ar asinhrono dzinēju, ko tas aizstāj $\eta_{\text{AD}} = 92,5 \%$. Izstrādātā *SynRM* ārējie izmēri un korpuss ir tādi paši kā asinhronam dzinējam, ko tas aizstāj. Asinhronais dzinējs tiek izmantots trolejbusu piedziņas sistēmā, ko šobrīd ražo AS “RER”.
2. Projekta stadijā aprēķināti *SynRM* parametri un raksturlīknes, izmantojot tam speciāli izstrādātu aprēķina metodiku, kas apstiprināta ar eksperimentu rezultātiem.
3. Izstrādājot *SynRM* rotoru, ievēroti vairāki priekšnosacījumi – gaisa barjeru skaits, novietojums un platums, lai ierobežotu elektromagnētiskā momenta svārstības un no tām izrietošās mehāniskā momenta svārstības. Eksperimentu rezultāti apliecina, ka dzinējam nav novērojamas būtiskas momenta svārstības.
4. Izstrādātais dzinējs ir ar augstu lietderības koeficientu, bet zemu pārslodzes spēju. Dzinējs izstrādāts ar mērķi iegūt maksimālo jaudu pie noteiktiem ārējiem izmēriem, sprieguma un lietderības koeficienta. Pie šādiem ārējiem izmēriem un izvēlētajā rotora konstrukcijas maksimālo momentu var palielināt, lietojot augstākas veiktspējas dzesēšanas sistēmu.
5. Izstrādātā 180 kW *SynRM* dzesēšanai tiek izmantota atvērta dzinēja konstrukcija ar piespiedu gaisa cirkulāciju, ventilatoru montējot uz dzinēja vārpstas *IC01*, kas atbilst aizstājamā asinhronā dzinēja dzesēšanas sistēmai. Dzinēja tinuma stabila temperatūra nominālās slodzes režīmā ir 107°C . *SynRM* ir mazāki zudumi, salīdzinot ar asinhrono dzinēju, ko tas aizvieto, attiecīgi arī tinumu sasilums ir mazāks.

SynRM ar siltumcilpas dzesēšanu un slēgtu konstrukciju

6. Izstrādāta un eksperimentāli pārbaudīta *SynRM* ar siltumcilpas (*HL*) dzesēšanas sistēmu, kas sasniedz galveno darba mērķi – izstrādāt pilnīgi slēgtas konstrukcijas *SynRM*, saglabājot nominālo jaudu 180 kW, nepalielinot mašīnas ārējos izmērus un būtiski ($\sim 1,7 \%$) nepasliktinot lietderības koeficientu, savukārt tinumu temperatūra nominālajā darba režīmā S2 60 min nepārsniedz izolācijas klasei H ilgstoši pieļaujamo maksimālo temperatūru 180°C .
7. Izstrādātās 180 kW *SynRM* ar *HL* dzesēšanas sistēmu dzesēšanas sistēmas *IC* kods (*International Cooling*) atbilstoši *LVS EN 60034-6:2002* ir *IC9W7*.
8. *SynRM* ar *HL* dzesēšanu, ar 6 *HL* iztvaikotāja un tvaika kondensatora kontūriem, ir ar sliktākiem dzesēšanas apstākļiem, salīdzinot ar 180 kW *SynRM* ar *IC01* dzesēšanu. *IC01* – atvērta mašīna ar mašīnas iekšienē uz vārpstas stiprinātu ventilatoru. Tā kā

SynRM paredzēta darba režīmam S2 60 min, lietderīgi salīdzināt mašīnu tinumu temperatūras nominālās slodzes režīmā $P_2 = 180 \text{ kW}$, $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ pēc 60 minūšu darba laika pie apkārtējās vides temperatūras $40 \text{ }^\circ\text{C}$, tad *SynRM IC01* $\Theta_{\text{tinumi}} = 101 \text{ }^\circ\text{C}$, bet *SynRM* ar *HL* $\Theta_{\text{tinumi}} = 135 \text{ }^\circ\text{C}$.

9. *SynRM* ar *HL* dzesēšanu, salīdzinot ar mašīnu bez dzesēšanas sistēmas *IC00*, siltumapmaiņa notiek konvekcijas ceļā starp mašīnas korpusu un apkārtējo gaisu, tad *SynRM* ar *HL* dzesēšanu ir ar būtiski labākiem dzesēšanas apstākļiem nominālās slodzes režīmā $P_2 = 180 \text{ kW}$, $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ pēc 60 minūšu darba laika, analītiski noteikts, ka pie apkārtējās vides temperatūras $40 \text{ }^\circ\text{C}$ *SynRM IC00* $\Theta_{\text{tinumi}} = 179 \text{ }^\circ\text{C}$.
10. Pilnas *SynRM* ar *HL* konstrukcija izstrādāta ar 6 *HL* iztvaikotāja un tvaika kondensatora kontūriem, bet tehniski iespējams uzstādīt divas reizes vairāk tāda paša izmēra iztvaikotājus, kopā uzstādot 12 *HL* iztvaikotāja un tvaika kondensatora kontūrus. Ar 12 *HL* kontūriem iegūtu lielāku dzesēšanas efektu, potenciāli sasniedzot zemāku temperatūru nekā *SynRM* ar *IC01* dzesēšanu.
11. Izstrādāta *HL* dzesēšanas sistēma, kurā netiek izmantoti sūkņi siltumnesēja piespiedu cirkulācijai. Siltumnesēja, kas izstrādātajai mašīnai ir ūdens, cirkulāciju nodrošina ūdens agregātstāvokļa maiņa no šķidruma uz tvaiku un atpakaļ šķidrumā, kā arī termosifona princips, novietojot tvaika kondensatorus virs mašīnas. Lai ūdens siltuma ietekmē mainītu agregātstāvokli, iztvaikotāja konstrukcijai jābūt specifiskai – porainai, kas ražošanas procesā bija būtisks izaicinājums.
12. Siltumcilpas dzesēšanas sistēmas masveida adaptācijai elektrisko mašīnu dzesēšanā jāuzlabo iztvaikotāju uzticamība un ražošanas kvalitāte, jo eksperimenta laikā no sešiem iztvaikotājiem viens pilnībā atteica, bet viena iztvaikotāja efektivitāte bija samazināta. Sagaidāms, ka eksperimentu rezultātā tinumu temperatūra būtu par $5 \text{ }^\circ\text{C}$ zemāka, ja visi seši *HL* iztvaikotāji būtu strādājuši.
13. Uzstādot *HL* iztvaikotājus uz *SynRM* statora paketes, ir būtiska temperatūru atšķirība starp tinumu un statora tērauda virsmu. Iespējams uzlabot dzesēšanas sistēmas efektivitāti, uzlabojot siltumapmaiņas procesu starp tinumiem un *HL*. Siltumapmaiņas procesu iespējams uzlabot: 1) samazinot termisko izolāciju, kas ietvertu ietekmi uz rievas un tinuma izolācijas dielektriskajām īpašībām; 2) tuvināt *HL* dzesēšanas sistēmu tinumam, kas ir potenciāls nākotnes pētījumu priekšmets.
14. Veidojot mašīnu ar siltumcilpas iztvaikotāju statora rievās, ražošanas posmā pēc statora paketes izveidošanas un pirms tinuma ievietošanas rievās jāievieto dzesēšanas sistēmas elementi, kas mašīnas ražošanas procesu padara sarežģītāku.
15. Infrasarkanās termogrāfijas rezultāti parāda, ka uz mašīnas korpusa starp diviem *HL* iztvaikotājiem nav novērojami karstie punkti “hot spots” (izņēmums ir pie nestrādājošā *HL* iztvaikotāja); attiecīgi var secināt, ka dzesēšanas sistēma ar sešiem *HL* iztvaikotāja un tvaika kondensatora kontūriem ir pietiekami termiski līdzsvarota.

16. Izstrādātai *SynRM* augstākā *HL* dzesēšanas sistēmas efektivitāte ir 2, efektivitāti izsakot ar *HL* iztvaikotāja un *HL* tvaika kondensatora temperatūru attiecību, kas novērots, kad tinumu temperatūra pārsniedz $\Theta_{\text{tinums}} > 140\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eksperimenta rezultāti parāda, ka siltumcīlpas efektivitāte ir lielāka augstākā temperatūrā, kas īpaši piemērots transporta aplikācijai, kurai raksturīgi lieli jaudas blīvumi un augsta temperatūra.
17. Izstrādātā *SynRM* ar *HL* var būt ar būtiski mazāku aksiālo garumu, salīdzinot ar *SynRM IC01*, jo tai nav uz vārpstas uzstādīts ventilators. 180 kW *SynRM IC01* lietots ventilators ar garumu (aksiālā virzienā) 125 mm, kas atbilst aptuveni 15 % no kopējā vārpstas garuma 817 mm.
18. *SynRM* ar *HL*, salīdzinot ar *SynRM IC01*, ir papildu tvaika kondensators. Bet *SynRM* ar *HL* priekšrocība ir tā, ka tvaika kondensatoru iespējams novietot attālināti no mašīnas, potenciāli mazāk nozīmīgā vietā, salīdzinot ar *IC01* ventilatora novietojumu. Potenciāli tvaika kondensatoru iespējams novietot uz transportlīdzekļa jumta, kur, transportlīdzeklim atrodoties kustībā, tvaika kondensatora dzesēšanas apstākļi tiek būtiski uzlaboti. Apkures sezonā siltumu no kondensatora potenciāli var nodot transportlīdzekļa kabīnes apsildes sistēmai.

Potenciālie nākotnes darbi

1. *SynRM* turpmākās pētījumu iespējas ietver rotora barjerās ievietot pastāvīgos magnētus, iegūstot *PMASynRM*. *PMASynRM* piemīt vairākas pastāvīgo magnētu mašīnas priekšrocības – augstāks lietderības koeficients, jaudas koeficients, jaudas blīvums. Taču *PMASynRM* ir arī tipiski trūkumi – magnētu atmagnetizēšanās iespējamība, magnētu cena, magnētu pieejamība un ražošanas sarežģījumi ar magnētu ievietošanu un nostiprināšanu.
2. *SynRM* ar slēgtu konstrukciju turpmākas pētījumu iespējas ietver kombinētas dzesēšanas sistēmas izpēti. Potenciāla kombinētā dzesēšanas sistēma ir šāda: dzinēja korpusu dzesē ar siltumcīlpas sistēmu, kas izveidota tā, kā aprakstīts darbā, bet statora rievās izveido kanālus, kuros nodrošina siltumnesēja piespiedu cirkulāciju. Ar šādu risinājumu iegūtu priekšrocības no siltumcīlpas pasīvās dzesēšanas, bet augstas slodzes režīmos, kad temperatūra sasniedz noteiktu vērtību, tuvu tinumam pieslēdzas papildu dzesēšanas sistēma.

LITERATŪRAS AVOTU SARAKSTS

1. Eiropas Komisija. Eiropas zaļais kurss [tiešsaiste]. Skatīts 09.2024. Pieejams: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/lv/ip_19_6691.
2. Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action. A report by the Rare Earth Magnets and Motors Cluster of the European Raw Materials Alliance. Berlin 2021. [tiešsaiste]. Skatīts 09.2024. Pieejams: https://eit.europa.eu/sites/default/files/2021_09-24_ree_cluster_report2.pdf.
3. Zarembo, Jaroslavs. Research and Development of the Synchronous Reluctance Motor Traction Drive. PhD Thesis. Rīga: [RTU], 2022. 80 p.
4. Lipo, T. A. Synchronous Reluctance Machines – A Viable Alternative for AC Drives?, In: Electrical Machines and Power Systems, 1991, 659–671 p.
5. Kostko, J. K. Polyphase Reaction Synchronous Motor, In: Journal of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 42, No. 11, 1923.
6. Vagati, A. Synchronous Reluctance Electrical Motor Having A Low Tourque-Ripple Design, Publication number 5818140 A, Publication date Oct 6, 1998.
7. Vagati, A., Pastorelli, M., Franceschini, G., Petrache, S. C. Design of Low-Tourque-Ripple Synchronous Reluctance Motors, IEEE Transactions on Industry Applications Vol: 34, No. 4, 1998.
8. Almeida, A. T., Ferreira, F. J. T. E. and Baoming, G. “Beyond Induction Motors – Technology Trends to Move Up Efficiency”, in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 50, No. 3, pp. 2103–2114, May–June 2014.
9. ABB is first to reach anticipated IE6 hyper-efficiency with magnet-free motors, ABB, Jun. 2024. (Skatīts 5.11.2024 – library.e.abb.com).
10. Lipo, T. A., Matsuo, T., Rotor design optimization of synchronous Reluctance machine, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 9, No. 2, 1994.
11. Pyrhonen, J., Jokinen, T., Hrabovcova, V. Design of Rotating Electrical Machines, John Wiley & Sons, Ltd., 2008.
12. Boldea, I. Nasar, S. A. The Induction Machines Desighn Handbook, second edition, CRC Press, 2009, 845 p.
13. Boldea, I., Reluctance Synchronous Machines and Drives, Oxford: Clarendon Press, 1996, 230 p.
14. Taghavi, S. and Pillay, P. “A Sizing Methodology of the Synchronous Reluctance Motor for Traction Applications”, in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 2, No. 2, pp. 329–340, June 2014.

15. Bomela, X. B., Kamper, M. J., Effect of Stator Chording and Rotor Skewing on Performance of Reluctance Synchronous Machine. IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 38, No. 1, 2002.
16. Gulbis, K. Sinhronās reaktīvās mašīnas konstrukcijas izstrāde, Maģistra darbs, Rīgas tehniskā universitāte, Rīga, 2016. 105 p.
17. Wang, K., Zhu, Z. Q., Ombach, G., Koch, M., u. c. Optimal Slot/Pole and Flux-Barrier Layer Number Combinations for Synchronous Reluctance Machines, No: IEEE Ecological Vehicles and Renewable Energies, Monte Carlo, 2013.
18. Haataja, Jorma. "A comparative performance study of four-pole induction motors and synchronous reluctance motors in variable speed drives", Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta teknillinen yliopisto, Digipaino 2003.
19. Hrabovcova, V., Rafajdus, P., Janousek, L., Hudak, P., Influence of axially laminated Rotor Arrangement on the Saliency Ratio of 4 Pole Reluctance Synchronous Motor, In: Workshop on Electrical Machines' Parameters, Technical University of Cluj-Napoca, 26th of May 2001.
20. Kamoliņš, E., Gorobecs, M., Burenin, V., Gulbis, K., Potapovs, A., Brakanskis, U., Zarembo, J., Sējējs, K. 180 kW Synchronous Reluctance Motor for Mass Transit Electrical Traction Application. In: 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), Belgium, Ghent, 6–10 Sept., 2021.
21. Gulbis, K., Kamoliņš, E., Brakanskis, U. Synchronous Reluctance Machine with Improved Design of Rotor Mechanical Strength Connections. In: 2016 IEEE 4th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE 2016): Proceedings, Lithuania, Vilnius, 10–12 Nov., 2016.
22. Gulbis, K. Sinhronās reaktīvās mašīnas konstrukcijas izstrāde, Maģistra darbs, Rīgas tehniskā universitāte, Rīga, 2016. 105 p.
23. Kolehmainen, J. Synchronous reluctance motor with form blocked rotor, IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 25, No. 2, pp. 450–456, Jun. 2010.
24. Lendenmann, H., Osterholm, V., Synchronous Reluctance Machine Using Rotor Flux Barriers as Cooling Channels, Publication number: US20130099607 A1, Issue date: apr 25, 2013.
25. Gulbis, K., Kamoliņš, E., Brakanskis, U., Zarembo, J. "Parameter Calculation Method of Synchronous Reluctance Motor Including Cross Magnetic Saturation," 2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 5–7 Nov. 2020.

26. Kamper, M. J. "Effect of rotor dimensions and cross magnetisation on L_d and L_q inductances of reluctance synchronous machine with cageless flux barrier rotor", IEEE Proceedings - Electric Power Applications, Vol. 141, No. 4, pp. 213–220, 1994.
27. Zviedris, A., Podgornovs, A. Divdimensionālu magnētisko lauku matemātiskā modelēšana ar galīgo elementu metodi, Programma Quick Field, instrukcija, Rīga, 2007. 59 p.
28. Gulbis, K., Ātrgaitas ventilāzīnējs ar ārēju, reaktīvu rotoru, Inženierprojekts, Rīgas tehniskā universitāte, Rīga, 2014. 112 p.
29. Ghahfarokhi, P. S., Kallaste, A., Vaiman T. un Belachen, A. "Thermal Analysis of Totally Enclosed Fan Cooled Synchronous Reluctance Motor-state of art", 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 4372–4377, October 2019.
30. Ghahfarokhi, P. S., Kallaste, A., Podgornovs, A., Belahcen A., Vaimann, T. Development of analytical thermal analysis tool for synchronous reluctance motors, IET Electric Power Applications, pp. 1828–1836, 5 August 2020.
31. Ghahfarokhi, P. S., Kallaste, A., Belahcen A., Vaimann, T. Hybrid Thermal model of synchronous reluctance machine, Case studies in Thermal Engineering, pp. 381–389, December 2018.
32. Rikards R., Čate, A. Galīgo elementu metode, Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte, 2001.
33. Bathe, K. The finite element method, Massachusetts Institute of Technology, 2008.
34. Kunkulbergs, R. Termisko procesu izpēte elektriskajās mašīnās ar matemātiskām skaitliskajām metodēm, Maģistra darbs, Rīgas tehniskā universitāte, Rīga, 2021. 90 p.
35. Lavrinoviča, L. Siltumslodzes sadalījums vilces reaktīvajam dzinējam ar jaudu 180 kW, Inženierprojekts, Rīgas tehniskā universitāte, Rīga, 2022. 74 p.
36. Lavrinoviča, L., Podgornovs, A., Bižāns, A., Gulbis, K. Overview of Thermal Loads Distribution in Traction Electric Machines and Conditions for Forced Cooling of Their Parts. No: 2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET 2022), Czechia, Prague, 20.–22. Jul, 2022.

37. Lavrinoviča, L., Gulbis, K., Podgornovs, A., Bižāns, A. Analysis of the Heat Dissipation of Synchronous Motor with Reluctance Rotor with Goal of Power Density Increasing 2023 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE 2023): Proceedings, Slovakia, The High Tatras, 25.–27. Sept., 2023.
38. Gulbis, K., Brakanskis, U., Kamoliņš, E., Gorobecs, M., Potapovs, A., Sējējs, K., Zarembo, J., Burenin, V. Analysis of Test Results of the Developed Synchronous Reluctance Motor for Public Transport Application. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2022, Vol. 59, No. 4, pp. 25–41.
39. Burenin V., Zarembo, J., Žiravecka, A., Ribickis, L., Model of Laboratory Test Bench Setup for Testing Electrical Machines, in 2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2020.
40. Gulbis, K., Podgornovs, A., Bižāns, A., Lavrinoviča, L. Increasing the Power Density of 180 kW Synchronous Reluctance Motor by Implementing Loop Heat Pipe Cooling. In: 2023 3rd International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME 2023), Spain, Santa Cruz de Tenerife, 19–21 July, 2023. Piscataway: IEEE, 2023, pp. 1–5.



Kārlis Gulbis dzimis 1989. gadā Aizputē. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis bakalaura grādu (2012), inženiera kvalifikāciju (2014) un maģistra grādu (2016) enerģētikā un elektrotehnikā. Kopš 2013. gada strādā RTU, patlaban ieņemot lektora un pētnieka amatu. Papildus pētniecībai un darbam ar studentiem kopš 2016. gada strādā elektroapgādes apsaimniekošanas jomā, šobrīd VAS "Valsts nekustamie īpašumi", ieņemot vadošā elektroinženiera amatu.

Zinātniskās intereses saistītas ar transporta elektriskajām mašīnām, atjaunīgo energoresursu jomu un elektrisko mašīnu matemātisko modelēšanu.