



RIGA TECHNICAL
UNIVERSITY

Kārlis Gulbis

SINHRONĀ REAKTĪVĀ DZINĒJA IZSTRĀDE IZMANTOŠANAI SABIEDRISKAJĀ TRANSPORTĀ

Promocijas darbs



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 darbs

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

RTU Izdevniecība
Rīga 2025

Gulbis K. Sinhronā reaktīvā dzinēja izstrāde izmantošanai sabiedriskajā transportā. Promocijas darbs. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2025. – 104 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.

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. Ievads.....	5
1.1. Darba aktualitāte.....	5
1.2. Darba mērķis uzdevumi, novitāte un praktiskā nozīme	6
1.3. Elektrificēts sabiedriskais transports.....	8
2. Sinhronās reaktīvās mašīnas un to projektēšana	10
2.1. Vēsture un attīstība	10
2.2. Reaktīvo dzinēju tipoloģija.....	12
2.3. <i>SynRM</i> darbības princips un elektromagnētiskais moments	14
2.4. <i>SynRM</i> parametri.....	17
2.5. <i>SynRM</i> projektēšana.....	21
2.6. Modernas <i>SynRM</i> rotora projektēšana	32
2.7. <i>SynRM</i> parametru aprēķins.....	43
2.8. Galīgo elementu metodes lietojums projektēšanā	47
3. Sinhronās reaktīvās mašīnas slēgtas konstrukcijas dzesēšanas sistēma	51
3.1. <i>SynRM</i> dzesēšanas sistēmas	51
3.2. <i>SynRM</i> termiskā ekvivalentā shēma.....	54
3.3. Siltumcīlpas dzesēšanas sistēma	54
3.4. Galīgo elementu metodes lietojums <i>SynRM</i> dzesēšanas sistēmu modelēšanā.....	57
4. Sinhronās reaktīvās mašīnas izstrāde	62
4.1. 180 kW <i>SynRM</i>	62
4.2. <i>SynRM</i> īpatnējās jaudas palielināšana ar siltumcīlpas dzesēšanas sistēmu	71
4.3. <i>SynRM</i> ar <i>HL</i> 1/12 statora segmenta eksperimentāla izpēte.....	73
4.4. <i>SynRM</i> ar <i>HL</i> statora rievās 1/12 statora segmentam eksperimentāla izpēte.....	79
4.5. Pilnas komplektācijas <i>SynRM</i> ar <i>HL</i> eksperimentāla izpēte	81
Galvenie darba rezultāti un secinājumi	94
Literatūras avotu saraksts.....	97
Pielikums	103

1. IEVADS

1.1. 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 statoru, 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 – siltumcīlpas ar dabisko siltumnesēja cirkulāciju noslēgtā kontūrā *heat pipe termosyphon* (turpmāk *HL*), kuras pamatā ir siltumnesēja agregātvokļa 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. **Siltumcīlpas** 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.

1.2. Darba mērķis uzdevumi, novitāte un praktiskā nozīme

Darba mērķis

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

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 – siltumcīlpas.

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 – siltumcīlpām.

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 – siltumcīlpas, aizstājot atvērtas konstrukcijas *SynRM* ar ventilatoru *ICOI*, 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 – siltumcīlpas. 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.

1.3. Elektrificēts sabiedriskais transports

Pilsētas elektrificētā sabiedriskā transporta lomu var izpildīt elektriskie autobusi, trolejbusi, tramvaji un metro. Pasaulē lietoti arī tādi specifiski sabiedriskā transporta līdzekļi, kā funikulieri vai elektriskais ūdenstransports. Vilcieni lielākoties nodrošina pārvietošanās iespējas starp pilsētām, bet lielās pilsētās tie ir integrēti pilsētas transporta tīklā, piemēram, 2024.g. Rīgas transporta tīklā ir integrētas 23 vilcienu pieturvietas. Latvijā pilsētu sabiedriskais transports ar elektrificētiem transporta līdzekļiem tiek nodrošināts:

- elektriskie autobusi 8 pilsētās – Daugavpilī, Jelgavā, Jēkabpilī, Jūrmalā, Rēzeknē, Rīgā, Valmierā un Ventspilī;
- tramvaji – Daugavpilī, Liepājā un Rīgā;
- trolejbusi – Rīgā.

Sabiedriskais elektriskais transports ir visaptveroša tēma, tāpēc vēlams to grupēt pēc pazīmēm, kuras potenciāli ir būtiskas sabiedriskā transporta piedziņas elektrodzinējam. Daži veidi, kā iespējams dalīt elektrificēto sabiedrisko transportu:

- pēc elektroenerģijas piegādes veida: no kontakttīkla, no akumulatoru baterijām vai no ūdeņraža degvielas šūnām. Elektroenerģijas piegādes veidam var būt neliela ietekme uz piedziņas sistēmu, jo piedziņas sistēmas efektivitāte būs svarīgāks kritērijs no akumulatoru baterijām barotam transportam salīdzinot ar no kontakttīkla barotu transportu;
- pēc kontakttīkla veida un parametriem, daži no izmantotiem kontakttīklu veidiem – viena vada un slīdes, tikai slīdes, divu vadu, maiņstrāvas, līdzstrāvas, 600 V DC, 3kV DC, 25kV AC un daudzi citi. Kontakttīkla veidam būs neliela ietekme uz modernu piedziņas sistēmu, kontakttīkla spriegumu pārveidojot piedziņas sistēmai nepieciešamajā. Piemēram, *Eurostar* e320 vilciens lielākoties tiek barots no 25 kV 50 Hz AC tīkla, bet daļā Beļģijas un Francijas to pārslēdz uz 3 kV DC tīklu un vilcienu iespējams barot arī no 15 kV 16,7 Hz Vācijas tīkla;
- pēc transporta līdzekļa vilces raksturliķnes, masas, nominālā ātruma, paātrinājuma un citiem ar transportlīdzekļu pārvietošanās dinamiku saistītiem parametriem. Vilces raksturliķnei būs būtiska ietekme uz piedziņas sistēmu;
- pēc piedziņas un elektrodzinēja novietojuma: lokomotīves piedziņa, zemvagona piedziņa, vienas ass piedziņa, visu asu piedziņa, riteņu piedziņa un citi. Elektrodzinēja novietojumam būs būtiska ietekme uz piedziņas sistēmu.

Transporta piedziņas elektrodzinēji un transporta piedziņas sistēmām izvirzītās prasības

Elektriskās piedziņas sistēmas ir viena no elektriskā transporta galvenajām sastāvdaļām. Elektriskās piedziņas sistēma sastāv no elektrodzinēja, enerģijas avota – barošanas sistēmas – vadības iekārtas. Transporta piedziņā elektrodzinējs pārveido elektroenerģiju mehāniskajā, nodrošinot transportlīdzekļa kustību, bet netipiski citām dzinēju aplikācijām, transportā plaši izmanto reģeneratīvās bremzēšanas režīmu, kura laikā elektriskā mašīna darbojas ģeneratora režīmā, vai retāk bez enerģijas rekuperācijas elektriskās mašīnas bremzes režīmā. Elektriskā transporta piedziņas sistēmas izvēle balstās uz daudziem faktoriem, piemēram, transportlīdzekļa paātrinājuma un ātruma kritērijiem, piedziņas sistēmas izmēriem, montāžas vietas un vides ierobežojumiem, enerģijas avota. [4] Transporta piedziņas sistēmām izvirza prasības:

- augsts lietderības koeficients;
- bezatteiču darbība un izturība;
- specifiska vilces raksturlīkne atkarībā no ātruma;
- plašs ātruma regulēšanas diapazons (0-6000 apgr/min);
- liela īpatnējā jauda un moments;
- regulēšanas un vadības sistēmas ātrdarbība.

Elektriskā transporta piedziņā izmanto ļoti plaša diapazona elektrodzinējus. Vēsturiski izplatītākie dzinēja veidi bija suku, virknes ierosmes līdzstrāvas dzinēji, pateicoties vienkāršai rotācijas frekvences regulēšanai un relatīvi lielam momentam. Tomēr modernās transporta piedziņas sistēmās līdzstrāvas dzinējus ar sukām neizmanto būtisku trūkumu dēļ: suku kontakta nolietošanās un drošums, kā arī relatīvi zems lietderības koeficients. Modernās transporta piedziņas sistēmās galvenokārt izmanto asinhronos vilces dzinējus un pastāvīgo magnētu dzinējus, retāk – reaktīvos dzinējus. Transporta piedziņā pastāvīgo magnētu dzinējus izmanto gan sinhronos (*PMSM*), gan ventiļdzinējus jeb *BLDC*. Retāk pielieto reaktīvos dzinējus, bet arī tiem atrodami lietošanas piemēri transporta piedziņā, gan reaktīviem soļu dzinējiem (*SRM*), kā arī atrodami piemēri, kur izmanto sinhronos reaktīvos dzinējus (*SynRM*).

2. SINHRONĀS REAKTĪVĀS MAŠĪNAS UN TO PROJEKTĒŠANA

Nodaļā tiek risināts darba mērķis – aprakstīt sinhrono reaktīvo mašīnu projektēšanu, lai promocijas darbs kļūst par avotu latviešu valodā, kuru izmantojot, lasītājs, students vai elektrisko mašīnu projektēšanas inženieris spētu projektēt augstas veiktspējas *SynRM*.

Nodaļā risinātie darba uzdevumi:

- izstrādāt sinhrono reaktīvo dzinēju projektēšanas aprakstu;
- izstrādāt *SynRM* parametru aprēķina metodi, ar kuru iespējams jau projektēšanas stadijā precīzi aprēķināt projektējamās *SynRM* parametrus.

2.1. Vēsture un attīstība

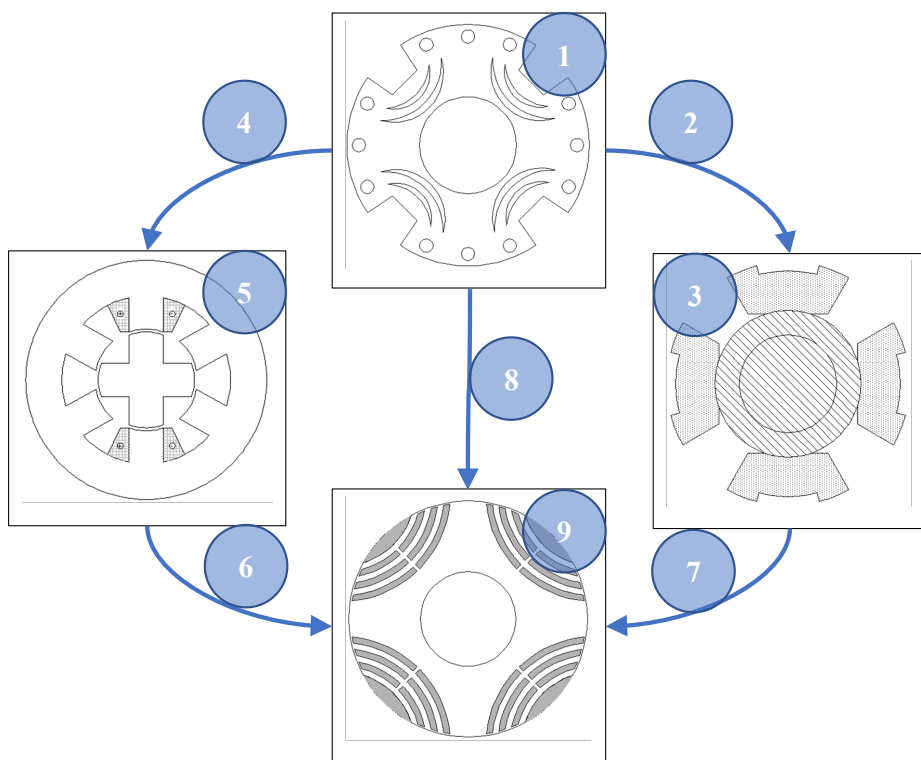
Elektrodzinējs ar izvīrātiem rotora poliēm, bez rotora tinuma un bez pastāvīgajiem magnētiem, kas attīsta momentu balstoties uz rotora magnētisko asimetriju, ir viena no vecākajām elektriskajām mašīnām. 20. gs. reaktīvie dzinēji tika pielietoti nišas aplikācijās, kā pozicionēšanas iekārtās, tekstilrūpniecībā un citas aplikācijas, kurām svarīgi bija saglabāt precīzu soli vai ātrumu, bet attīstītais moments, lietderības koeficients un jaudas koeficients bija otršķirīgi. 20. gs. beigās attīstās reaktīvie soļu dzinēji, ar kuriem saistās reaktīvo mašīnu nosaukums līdz 21. gs. otrajai desmitgadei, kad pārdošanā nonāk pirmās plaša pielietojuma sinhronās reaktīvās mašīnas.

Attēlā 2.1. piedāvāta sinhronā reaktīvā dzinēja attīstības vēsture, kas dalīta būtiskos attīstības posmos [5]:

- 1) sinhronā reaktīvā mašīna ar gaisa barjerām, kas aiztur šķērsass plūsmu ir 100 gadus sens risinājums, kuru 1923.g. prezentēja Kostko [6];
- 2) nākamo pusgadsimtu sekoja minimāla šāda tipa mašīnas attīstība ar nišas lietojumu aplikācijās kurām būtisks no slodzes neatkarīgs ātrums. Tika lietots asinhronais tinums palaišanai, bet mašīnas īpatnējais moments, lietderības koeficients un jaudas koeficienti bija salīdzinoši zemi;
- 3) ar mērķi palielināt īpatnējo momentu tika meklētas konstrukcijas ar augstu magnētisko nesimetriju, induktīvo pretestību attiecība – 5, piemēram, uz vārpstas stiprināti viengabala izvīrāti poli;
- 4) 20.gs. beigās attīstās reaktīvo mašīnu veidi ar statora strāvas vadību;
- 5) būtisku pielietojumu rod reaktīvie soļu dzinēji, kuri izmanto pusvadītāju elektroniku vadības sistēmās. Vadības sistēmu pareizai darbībai ir būtiska nepieciešamība pēc precīzas rotora stāvokļa noteikšanas;
- 6) soļu dzinēju un ventiļdzinēju vadības sistēmu un dzinēju rotora stāvokļa noteikšanas metožu attīstība sekmē modernu *SynRM* attīstību;
- 7) pētnieki meklē pēc iespējas lielāku magnētisko nesimetriju, izskata aksiāli laminētu jeb slāņainu rotoru, induktīvo pretestību attiecība – 10. Magnētisko lauku matemātiskai modelēšanai ir būtiska loma modernu *SynRM* ar augstu magnētisko nesimetriju un relatīvi zemām momenta pulsācijām izstrādē. Rūpnieciski ražot

aksiāli laminētu rotoru ir tehniski sarežģīts uzdevums, jo loksnes ir jāliec ar izliekumu. Tehniski vienkāršāks izpildījums ir saliekt loksni ar laužuma punktiem, tomēr arī šis risinājums ir sarežģīti standartizējams ražošanai;

- 8) vadības iekārtu attīstība un pieejamība, ko lielā mērā ir virzījuši reaktīvo soļu dzinēju pētījumi, atrisina *SynRM* palaišanas un sinhronisma nodrošināšanas problēmas. Rotorā stāvoklis tiek noteikts bez sensoriem pēc elektromagnētiskiem procesiem;
- 9) 20.g.s. beigās tiek plaši pētīti *SynRM* būtiskie jautājumi. Tiek patentēts zemu pulsāciju *SynRM* rotora modelis [7], kas ir par pamatu pirmajiem sērijveida *SynRM*, kuri nonāk pie patērētājiem 2011.gadā.



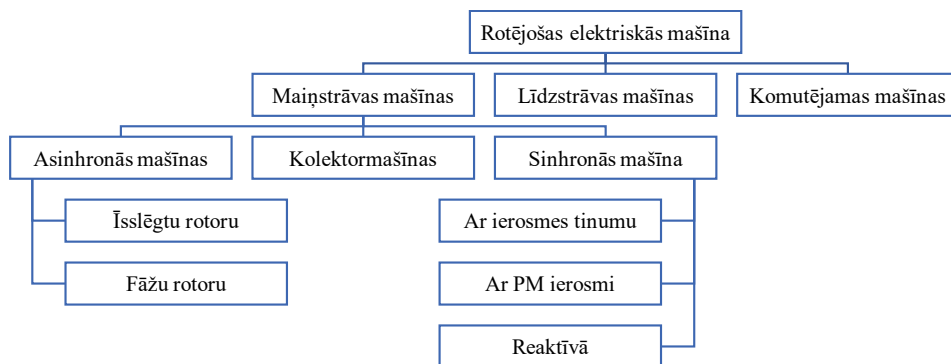
2.1. att. *SynRM* attīstības ceļš

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. Vēl 2011. gadā “ABB”, viens no lielākajiem elektrisko mašīnu ražotājiem, prezentējot jauno *SynRM* dzinēja-frekvenču pārveidotāja (piedziņas) sēriju, “ABB” paralēli prezentēja pie tīkla slēdzama *SynRM* tehniskos datus, tomēr līdz 2024. gadam pie tīkla slēdzamu dzinēju sēriju “ABB” nav padarījis plaši pieejamu. Ņemot vērā vadības sistēmu pieejamības palielināšanos 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. Reaktīvo dzinēju tipoloģija

Elektrisko mašīnu tipoloģijā pielietojami daudzi kritēriji atšķirīgiem mašīnu grupēšanas mērķiem. Nodaļas mērķis ir parādīt transportā pielietota sinhronā reaktīvā dzinēja galvenos kritērijus, pēc kuriem tā atšķiras no citiem mašīnu veidiem; nodaļas mērķis nav nosaukt visus iespējamus reaktīvo dzinēju grupēšanas kritērijus. Rotējošu elektrisko mašīnu saime ar galvenajiem industrijā pielietotajiem mašīnu veidiem parādīta 2.2. attēlā.



2.2. att. Rotējošu elektrisko mašīnu dalījums

Klasificējot bezkontakta elektriskās mašīnas pēc sekundārā tinuma vai aktīvā elementa, reaktīvo mašīnu kopīga īpašība ir sekundāro aktīvo elementu neesamība [8]. Bezkontakta elektriskās mašīnas pēc sekundārā tinuma vai aktīvā elementa:

- ar sekundāro tinumu (asinhronās mašīnas);
- ar sekundārā tinuma barošanu no papildus ģenerators (sinhronās mašīnas, kuru ierosmi nodrošina no bezkontakta ģenerators);
- ar sekundāro aktīvo elementu – pastāvīgie magnēti (pastāvīgo magnētu sinhronās mašīnas);
- ar primāro un sekundāro tinumu statorā (induktormašīnas);
- bez sekundārā aktīvā elementa (reaktīvās mašīnas).

Elektriskās mašīnas bez sekundārā aktīvā elementa jeb reaktīvās mašīnas var iedalīt pēc elektroenerģijas barošanas avota veida:

- sinusoidāla maiņsprieguma tīkla;
- invertora;
- līdzstrāvas programmējama loģiskā kontroliera.

Kaut arī literatūrā nav viennozīmīgi lietota apzīmējuma, šī darba ietvarā no invertora barota reaktīvā mašīna ar trīsfāžu sinusoidālu tinumu statoru tiek saukta par Sinhrono Reaktīvo Mašīnu, literatūrā angļu valodā – *Synchronous Reluctance Machine*, saīsināts uz *SynRM*. No sinusoidāla maiņsprieguma tīkla barotas reaktīvās mašīnas sauc par Tieši pie Tīkla Slēdzamas

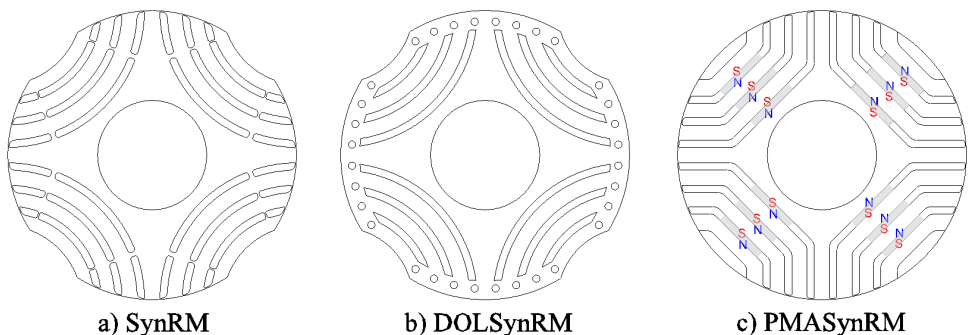
Sinhronās Reaktīvās Mašīnas, literatūrā angļu valodā – *Direct On Line Synchronous Reluctance Machine*, saīsināts uz *DOLSynRM*, vai *Line Start Synchronous Reluctance Machine*, saīsināts uz *LSSynRM*. No līdzstrāvas programmējama loģiskā kontroliera barotas reaktīvās mašīnas sauc par Reaktīvās Ventilmašīnas, literatūrā angļu valodā – *Switched Reluctance Machine*, saīsināts uz *SRM*.

Sinhronās reaktīvās mašīnas var iedalīt pēc rotora konstrukcijas:

- izvirzītu polu (2.17. att. a);
- nemagnētisku barjeru (2.3 att. a);
- nemagnētisku barjeru ar vāveres ratu (2.3 att. b);
- aksiāli laminēts (2.17 att. c).

Dzinējam nemainīga ātruma piedziņas sistēmā barošanai un vadīšanai nav nepieciešams invertors, šādās piedziņas sistēmās galvenokārt izmanto asinhronos dzinējus. Daudzos gadījumos ar asinhrono dzinēju nav iespējams nodrošināt jaunākās energoefektivitātes prasības vai būtiski jāpalielina dzinēja ārējie izmēri, lai tās nodrošinātu. Piemēram, Eiropas Savienība nosaka, ka jaunu pie tīkla slēdzamu dzinēju efektivitātei jābūt ar vismaz IE3 klasi, kas noteikta atbilstoši IEC60034-30-1. Pie tīkla slēdzamu asinhrono dzinēju alternatīva ir *DOLSynRM*. Tipiska *DOLSynRM* rotora konstrukcija sastāv no gaisa barjerām un īsslēgtiem “vāveres” rata palaišanas tinumiem (2.3 att. b). *DOLSynRM* palaišanas process sastāv no divām daļām: pirmā – ieskriešanās līdz ātrumam, kas tuvs sinhronajam, otrā – ieiešana sinhronismā. *DOLSynRM* ieskriešanās līdz ātrumam, kas tuvs sinhronajam, ir identiska kā asinhronā dzinēja palaišana, ar palaišanas strāvu lielāku nekā asinhronai mašīnai, jo rotora “vāveres” rats ir pielāgots gaisa barjeru novietojumam un nebūs tik optimāls kā asinhronajā mašīnā. *DOLSynRM* ieiešanas sinhronismā procesā asinhronais moments samazinās, bet sinhronizējošais moments pieaug mazāk nekā asinhronā momenta samazinājums, kas raksturojas ar elektromagnētiskā momenta samazinājumu tieši pirms sinhronizācijas. Moments tieši pirms sinhronizācijas parasti nokrīt zemāk kā nominālais moments, tāpēc lielākajai daļai *DOLSynRM* palaišana ar nominālo slodzi nav iespējama [9], [10].

Elektrificēta transporta piedziņā izmanto sinhrono mašīnu, kuras elektromagnētiskais moments galvenokārt veidojas no magnētiskās nesimetrijas, jeb reaktīvo mašīnu, bet rotora gaisa barjerās ir ievietoti pastāvīgie magnēti; šādas mašīnas parasti sauc par Sinhronās Reaktīvās Mašīnas ar Pastāvīgo Magnētu Palīdzību, literatūrā angļu valodā – *Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine*, saīsināts uz *PMASynRM*. *PMASynRM* parasti veidots ar ferīta magnētiem nevis retzemju pastāvīgajiem magnētiem. *PMASynRM* piemīt galvenās *SynRM* priekšrocības: konstrukcijas vienkāršums, sinhrona darbība, mazi zudumi, bet galvenais trūkums ir pastāvīgo magnētu atmagnetizēšanās risks un ierobežota maksimālā darba temperatūra, kā visām pastāvīgo magnētu mašīnām [11], [12]. Darba ietvarā *PMASynRM* netiek atsevišķi, izvērsti apskatīti.



2.3. att. Sinhronās reaktīvās mašīnas rotoru konstrukcijas:

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

Reaktīvie soļu dzinēji ir izplatītas reaktīvās mašīnas specifiskos pielietojumos. Salīdzinot ar sinhrono reaktīvo mašīnu, soļa dzinējiem ir citādāks izvērztu polu stators. Reaktīvā soļa dzinēja rotors ir izvērztu polu konstrukcijas ar noteiktām efektīvākajām statora un rotora izvērztu polu attiecībām. Reaktīvie soļu dzinēji ir populāri mehānismos, kur nepieciešams noiet noteiktu soļu skaitu vai veikt noteiktu leņķisko pārvietojumu. 20.gs nogalē un 21.gs sākumā reaktīvie soļu dzinēji tika pētīti plaša spektra pielietojumam, tajā skaitā transportā, tomēr reaktīvie soļu dzinēji nav kļuvuši par plaša pielietojuma mašīnām, saistībā ar tiem raksturīgiem būtiskiem trūkumiem. Reaktīvo soļu dzinēju būtiskākie trūkumi ir: lielas momenta svārstības un darbības rezultātā radītais troksnis. Reaktīvo soļu dzinēju dažas no grupēšanas iespējām [13]:

- pēc pārvietojuma veida – rotējoši, lineārie;
- pēc iedarbes virziena – aksiālie, radiālie;
- pēc rotora novietojuma – iekšējs rotors, ārējs rotors;
- pēc statora vai rotora pakešu skaita – vienpaketes, vairāku pakešu (dubultrotora).

2.3. *SynRM* darbības princips un elektromagnētiskais moments

Jebkura elektriskā dzinēja darbības pamatā ir elektroenerģijas pārveidošana mehāniskajā enerģijā ar magnētiskā lauka palīdzību, līdz ar to elektromagnētiskajam momentam ir svarīga nozīme elektriskā dzinēja mehāniskā griezes momenta radīšanā. Elektriskās mašīnas elektromagnētisko griezes momentu nosaka aktīvo elementu radītais magnetizējošais spēks, tinums ar tam pievadīto elektrisko jaudu vai pastāvīgie magnēti un magnētiskās ķēdes pretestība.

Sinhronās reaktīvās mašīnas elektromagnētisko griezes momentu būtiski ietekmē rotora magnētiskās ķēdes nesimetrija. Atšķirībā no citām mašīnām elektromagnētiskā griezes

momenta radīšanā nav iesaistīti aktīvie elementi rotorā. *SynRM* stators un tā tinumi būtiski neatšķirsies no asinhronā dzinēja vai pastāvīgo magnētu sinhronā dzinēja statoriem. *SynRM* rotora anizotropiju jeb magnētiskās ķēdes nesimetriju var izveidot vairākos variantos, piemēram, ļoti augstu nesimetriju iespējams sasniegt ar aksiāli laminētu rotoru, tomēr industrijā kā efektīvākais risinājums, kas ņem vērā dzinēja izstrādes sarežģītību un cenu, ir izvēlēts rotors, kura poli sastāv no plūsmas vadītāju kanāliem un gaisa barjerām, kas plašāk aprakstīts rotora projektēšanas daļā.

SynRM elektromagnētiskais moments ir izsakāms no 2.1. vienādojuma (2.1.), kur tas atkarīgs no pievadītā sprieguma U , rotējošā magnētiskā lauka leņķiskās frekvences Ω , magnētiskās ķēdes garenass X_d un šķērsass X_q induktīvajām pretestībām un slodzes leņķa θ . Rotējošā magnētiskā lauka leņķiskā frekvence $\Omega = \frac{2\pi f}{p}$, kur f – sprieguma frekvence un p – polu pāru skaits. 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 izkļiedes pretestības X_s , kas tiek pieņemtas abām komponentēm vienādas. Garenreakcijas un šķērsreakcijas induktīvās pretestības ir aprēķināmas no strāvas I un enkura tinuma elektrodzinējspēka, indekss – a apzīmē enkura tinuma. Tinuma pašindukcijas elektrodzinējspēku E_a izraisa magnētiskā plūsma Φ_a , attiecīgi, garenlauka, indekss – d , un šķērslauka, indekss – q , induktīvās pretestības aprēķināmas pēc (2.2.) un (2.3.) formulām. Plūsmas pamata harmonikas amplitūda Φ_{lm} ir atkarīga no indukcijas gaisa spraugā $B_{\delta lm}$ pamata harmonikas amplitūdas, abus magnētisko lielumus projektēšanas stadijā iespējams noteikt no magnētiskā lauka matemātiskās modelēšanas aprēķina rezultātiem, veicot modelēšanu laukam vērstam pa garenasi un šķērsasi.

$$X_{ad} = \frac{E_{ad}}{I_d} = \frac{\sqrt{2}\pi f w_1 k_{w1} \Phi_{ad}}{I_d}, \quad (2.2.)$$

$$X_{aq} = \frac{E_{aq}}{I_q} = \frac{\sqrt{2}\pi f w_1 k_{w1} \Phi_{aq}}{I_q}, \quad (2.3.)$$

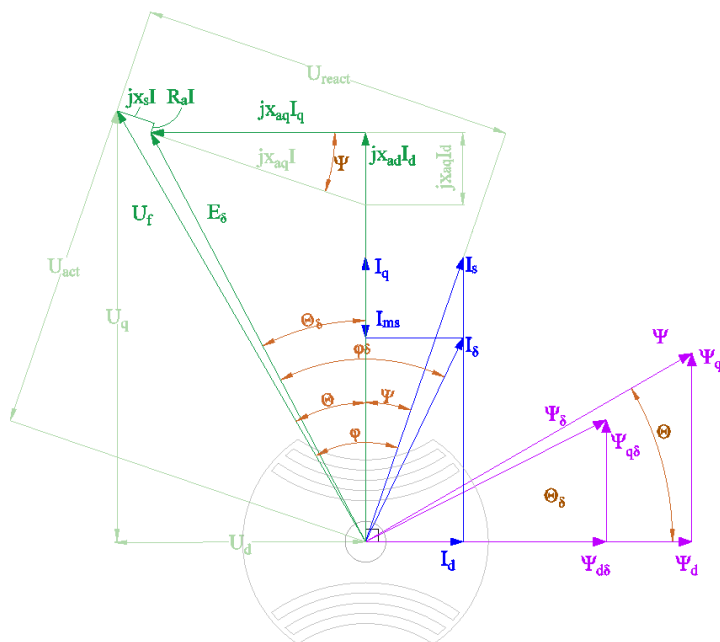
kur k_w – tinumu koeficients;

w – vijumu skaits.

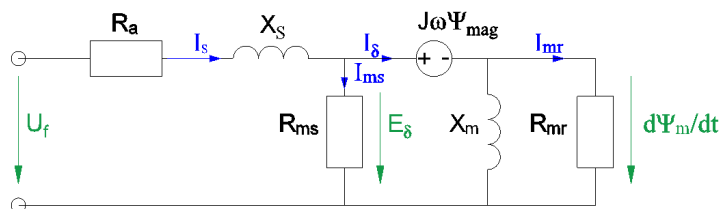
SynRM vektora diagramma parādīta 2.4. attēlā, bet ekvivalentā shēma, ievērojot elektriskos un magnētiskos zudumus, parādīta 2.5. attēlā, kuros R_a – enkura tinuma aktīvā pretestība, X_m – magnētiskās ķēdes induktīvā pretestība, R_{ms} – statora magnētiskās ķēdes aktīvā pretestība un R_{mr} – rotora magnētiskās ķēdes aktīvā pretestība

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, kura parādīta 2.6. attēlā, būs atšķirīga, salīdzinot ar pēc vienādojuma (2.1.) aprēķināmo. 2.6.

attēla modeļa maksimālais moments atbilst kritiskajam slodzes leņķim 53° . Kritiskais slodzes leņķis ir atkarīgs no mašīnas magnētiskās sistēmas konstrukcijas, īpaši no pola pārsedes.

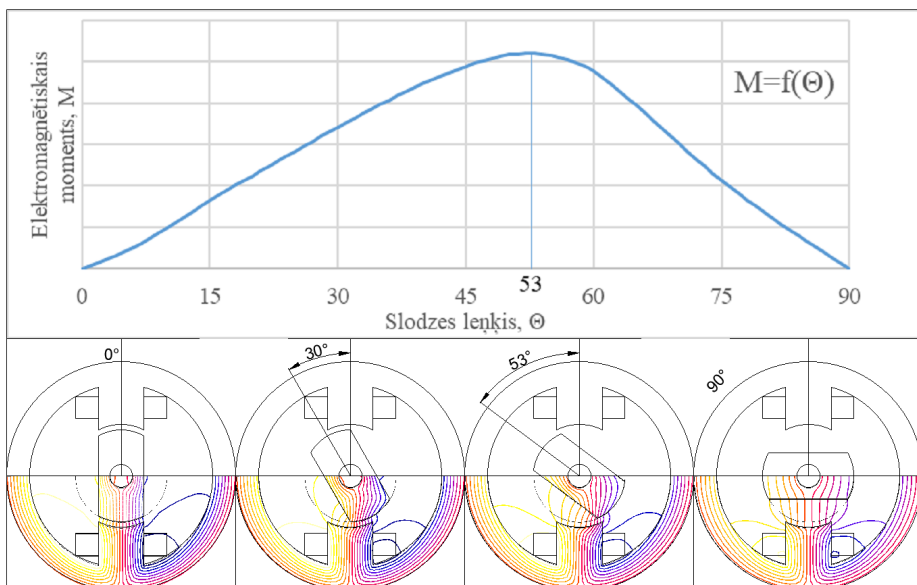


2.4. att. 180 kW *SynRM* vektoru diagramma, $I_N = 372$ A, $U_N = 420$ V, nominālās slodzes režīmā



2.5. att. *SynRM* ekvivalentā shēma ar magnētiskiem zudumiem

Faktisko elektromagnētiskā momenta līkni nepieciešams noskaidrot gan projektēšanas, gan *SynRM* salāgošanas ar frekvenču vadību stadijā. Projektējot *SynRM*, faktisko elektromagnētiskā momenta līkni iegūst, veicot modelēšanu ar galīgo elementu metodi. Eksploatācijā, salāgojot *SynRM* ar tās frekvenču vadību, būtiski uzņem pilnu momenta līkni pie visiem slodzes lēņkiem, ne tikai pie rotora novietojuma pa garenasi un šķērsasi.



2.6. att. Elektromagnētiskā momenta atkarība no slodzes leņķa.

2.4. *SynRM* parametri

Nodaļā apskatīti būtiski elektrisko mašīnu parametri: lietderības koeficients, jaudas koeficients un elektromagnētiskais moments, precīzāk, elektromagnētiskā momenta svārstības. Sinhronās reaktīvās mašīnās aktīvais elements ir tikai statora tinums, pateicoties kam sakarības starp parametru vērtībām un cēloņiem ir precīzāk aprakstāmas, salīdzinot ar citām sinhronajām mašīnām, kurām jāņem vērā ierosmes vai pastāvīgo magnētu ietekme, vai asinhronajām mašīnām, kur jāņem vērā rotora tinuma ietekme.

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.

Pieļaujama skaņas piesārņojums tiek regulēts: piemēram, reaktīvo soļu dzinēju plašāka pielietojuma būtisks šķērslis bija momentu svārstību radītais troksnis. Trokšņa samazināšanai var būt arī ekonomiska rakstura pamatojums – mašīnai, kura rada mazāku troksni, nav vajadzīgi skaņu slāpējoši papildus pasākumi.

Mašīnas stabilitātes problēmas var rasties, vadības iekārtai nespējot salāgot sagaidāmo momenta vērtību ar faktisko, starp kurām veidojas nobīde svārstību ietekmē.

Darbā apskatītas magnētiskās sistēmas radītas elektromagnētiskā momenta svārstības. Mehāniska cēloņa svārstības sinhronajam reaktīvajam dzinējam ir tādas pašas kā citiem elektrodzinējiem.

Elektrisko mašīnu elektromagnētiskā momenta svārstības samazina, izveidojot slīpas statora rievu un pielietojot statora tinumu soļa saīsināšanu. Statora slīpo rievu un statora tinumu nobīdīšanas ietekme teorētiski maz atšķiras no šo mēru pielietošanas citām elektriskajām mašīnām. Sinhronā reaktīvā dzinēja rotors ir bez aktīvajiem elementiem, pateicoties kam *SynRM* krietni pievilcīgāka ir slīpa (nobīdot loksnes) rotora konstrukcija, salīdzinot ar asinhronajām un pastāvīgo magnētu mašīnām. Izteikti, ja dzinējs nav paredzēts augsta ātruma aplikācijās, jo slīpam rotoram ir grūtāk nodrošināt mehānisko izturību.

Magnētiskās nesimetrijas izraisītas svārstības galvenokārt rodas statora rievu un rotora barjeru mijiedarbības rezultātā. Elektriskās mašīnas magnētiskās sistēmas projektēšanas gaitā iespējams mazināt momenta svārstības, kas izraisa statora rievu un rotora gaisa barjeru mijiedarbību. *SynRM* rotoru konstrukcijām piemīt lielas elektromagnētiskā momenta svārstības, kuras 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 pareiza rotora ģeometrijas izveide, kas ietver: statora rievu un rotora gaisa barjeru skaita attiecību, rotora mehāniskās izturības tiltiņus un rotora gaisa barjeru formu. Elektromagnētiskā momenta svārstību samazināšana, ievērojot statora rievu un rotora gaisa barjeru skaita attiecību, skatīta literatūrā [7], [14]. Darbā projektēšanas daļā aprakstītas citas elektromagnētiskā momenta svārstību samazināšanas metodes.

Elektromagnētiskā momenta svārstību skaitliskai aprakstīšanai var izmantot svārstību vidējo kvadrātisko vērtību (2.4. formula) vai svārstību amplitūdu (2.5. formula). Magnētiskās sistēmas elementu ietekmi uz elektromagnētiskā momenta svārstībām var pētīt ar vidējo kvadrātisko vērtību, bet konstrukcijas novērtējumam un salīdzinājumam pietiek ar svārstību amplitūdu.

$$M_{sv_{vid\ kv}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{25} M_{im}^2}}{M_{vid}} \times 100\%, \quad (2.4.)$$

$$M_{sv_{amp}} = \frac{M_{max} - M_{min}}{M_{vid}} \times 100\%, \quad (2.5.)$$

kur M_{im} – i-tās elektromagnētiskā momenta harmonikas amplitūda, Nm;

M_{vid} – vidējais elektromagnētiskais moments, Nm;

M_{max} – maksimālā elektromagnētiskā momenta vērtība, Nm;

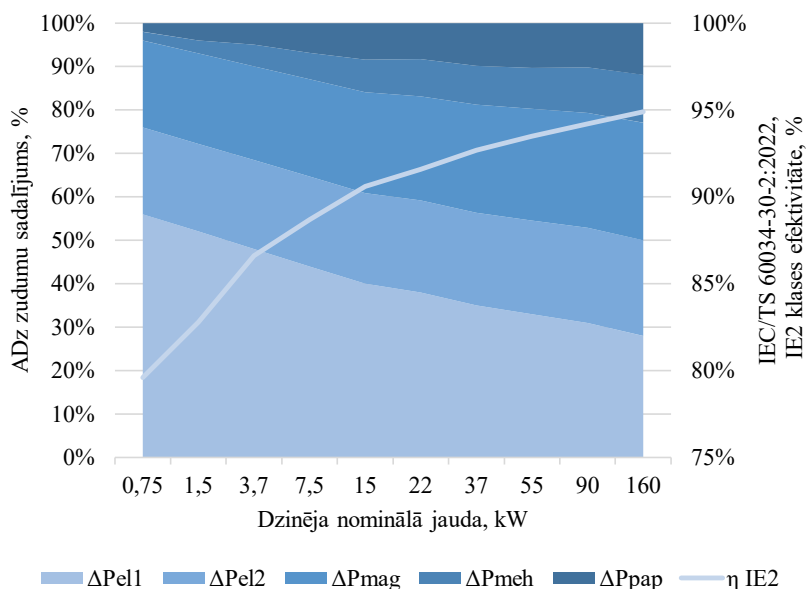
M_{min} – minimālā elektromagnētiskā momenta vērtība, Nm.

2.4.2. Lietderības koeficientu ietekmējošie faktori

SynRM galvenā priekšrocība, salīdzinot ar asinhrono dzinēju, ir augstāks lietderības koeficients. 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)”, ar asinhrono dzinēju ir sarežģīti izveidot konstrukciju, kas nodrošinātu atbilstību *IE4* efektivitātes klasei; to iespējams panākt, palielinot asinhronā dzinēja izmērus un vara, tērauda daudzumu. Turpretim *SynRM* konstrukcijai, apskatot industrijas līdera “*ABB*” sasniegumus, 2011. gadā tiek piedāvāti *SynRM* ar atbilstību *IE4* klasei, nepalielinot izmērus

salīdzinoši ar zemāku efektivitāšu klasēm, 2019. gadā tiek piedāvāti *SynRM* ar atbilstību potenciālajai *IE5* klasei, un 2024. gadā “*ABB*” prezentē preses materiālu saistībā ar *SynRM* atbilstību potenciālajai *IE6* klasei, tā sauktai “*hiper-efektivitātes*” klasei, piemēram, *IE6* 22 kW 2p = 4 dzinēja efektivitāte ir 95,8% [15].

Mainstrāvas trīsfāžu dzinēja efektivitāte un dažādu zudumu veidu proporcija būs atkarīga no dzinēja jaudas un izmēra, rotācijas ātruma un frekvences, dzesēšana sistēmas veida un daudziem citiem faktoriem. Transporta pielietojumam tipiska 4 polu asinhronā elektrodzinēja ar nominālo jaudu 160 kW darbam ar 50 Hz frekvenci aptuvenš zudumu sadalījums būs: 1/2 elektriskie zudumi, 1/4 magnētiskie zudumi un 1/4 mehāniskie un papildus zudumi (2.7. att. [16]). Palielinot ātrumu un attiecīgi frekvenci, proporcija būtiski mainīsies, pieaugot magnētisko un mehānisko zudumu proporcijai, bet samazinoties elektrisko zudumu proporcijai. *SynRM* dzinēja efektivitāti būtiski ietekmēs magnētiskā nesimetrija, no kuras ir atkarīga strāva un attiecīgi elektriskie zudumi. *SynRM* dzinēja magnētiskie zudumi statorā un mehāniskie zudumi būs līdzīgi citu mainstrāvas mašīnu zudumiem.



2.7. att. Asinhronā dzinēja aptuvenš zudumu sadalījums dažādās jaudas dzinējiem [16] un ar frekvenci vadāmu *IE2* klases 4 polu elektrodzinēju efektivitāte, atbilstoši standartam *LVS CLC IEC/TS 60034-30-2:2022*

SynRM nav elektriskie zudumi rotorā, kas ir galvenā priekšrocība, salīdzinot ar asinhrono mašīnu [17]. Saistībā ar *SynRM* zemo $\cos\phi$, tai būs salīdzinoši lielāka strāva, kas radīs salīdzinot ar pastāvīgo magnētu mašīnu lielākus elektriskos zudumus.

SynRM rotorā magnētiskie zudumi ir niecīgi, jo rotors rotē sinhroni ar magnētisko lauku, kas ir neliela priekšrocība salīdzinoši ar asinhronajām mašīnām, minimāli magnētiskie zudumi

rotorā pastāvēs pulsāciju ietekmē. *SynRM* rotorā nav aktīvo elementu, kuri izraisīs papildus magnētiskos zudumus statorā.

SynRM mehāniskie zudumi būs līdzīgi citām maiņstrāvas mašīnām. *SynRM* papildu zudumi būs mazāki salīdzinot ar asinhronajām mašīnām. *SynRM* mehānisko zudumu potenciālās atšķirības:

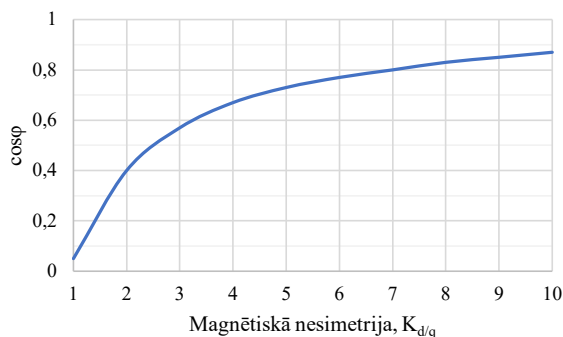
- *SynRM* rotora gaisa barjera pie gaisa spraugas pa q asi veido rotora izgriezumus, tādā gadījumā rotors nav ideāls cilindrs un radīsies papildus mehāniskie zudumi;
- *SynRM* rotora gaisa barjeras nav aizsegta ar tērauda lokšņu savienojumā nospēlāksnēm, tādā gadījumā caur rotora gaisa barjerām plūdis gaiss un radīsies papildus mehāniskie zudumi; pozitīvi ir tas, ka gaisa cirkulācija radīs nelielu dzesējošo efektu;
- *SynRM* rotors parasti būs vieglāks, salīdzinot ar tādas pašas jaudas asinhronās mašīnas rotoru vai pastāvīgo magnētu mašīnas rotoru. Piemēram, 160 kW, $p = 2$, IE5, “ABB”, *SynRM* rotors ir 30 % vieglāks, salīdzinot ar 160 kW, $p = 2$, IE3, “ABB”, ADz rotoru. *SynRM* rotors būs aptuveni 10 % vieglāks kā ekvivalentas PMSM mašīnas rotors. *SynRM* rotors ir vieglāks, jo tam nav aktīvo elementu, un *SynRM* būs mazāki mehāniskie zudumi, labāka pāātrināšanās un reaģēšana uz ātruma izmaiņu, bet sliktāka momenta inerce, kā rezultātā elektromagnētiskā momenta pulsācijām būs lielāka ietekme.

Moderna *SynRM* ir 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 ar frekvenču pārveidotāju darbinātai *SynRM* 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 inductīvo pretestību attiecības); jaudas koeficients būs uzlabots augstākas magnētiskās nesimetrijas konstrukcijām (2.8. att.) [18], [19]. *SynRM*, tāpat kā lielāko daļu elektrodzinēju, cenšas izveidot ar pēc iespējas mazāku gaisa spraugas platumu, lai samazinātu magnetizēšanas strāvu. Jāņem vērā, ka *SynRM* ar mazu gaisa spraugu statora zobu un rotora gaisa barjeru mijiedarbības rezultātā radītās momenta svārstības būs izteiktākas. Praksē pieņemts, ka ar asinhronajiem dzinējiem konkurētspējīgas *SynRM* jaudas koeficientam jābūt lielākam par $\cos\phi > 0,65$, kas sasniedzams ar magnētisko nesimetriju, kas lielāka par četri $K_{d/q} > 4$.



2.8. att. Jaudas koeficienta atkarība no magnētiskās nesimetrijas $K_{d/q}$ [18]

2.5. *SynRM* projektēšana

SynRM stators sastāv no rievām kurās ievietots daudz viju trīsfāžu tinums, zobiem pa kuriem magnētiskā plūsma tiek virzīta rotora virzienā un jūga, pietam 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 metodoloģijas ir ar savām niansēm katrā reģionā, bet vienoti balstītas uz koeficientiem un attiecībām, kuri empīriski precizēti gadu desmitiem.

SynRM rotora projektēšana ir relatīvi jauna nepieciešamība, tai rodoties tajā pašā laikā, kad kļuva pieejamas un ērti pielietojamas galīgo elementu matemātiskās modelēšanas metodes (GEM), kas ļoti veiksmīgi var aizstāt iepriekš projektēšanā ļoti iecienītos empīriskos koeficientus. Tā kā *SynRM* rotorā nav aktīvu elementu, GEM datorprogrammās mašīnas apraksts, aprēķini un aprēķinu rezultātu apstrāde ir būtiski vienkāršāka, salīdzinot ar tām pašām darbībām pastāvīgo magnētu sinhrono vai asinhrono mašīnu projektēšanā.

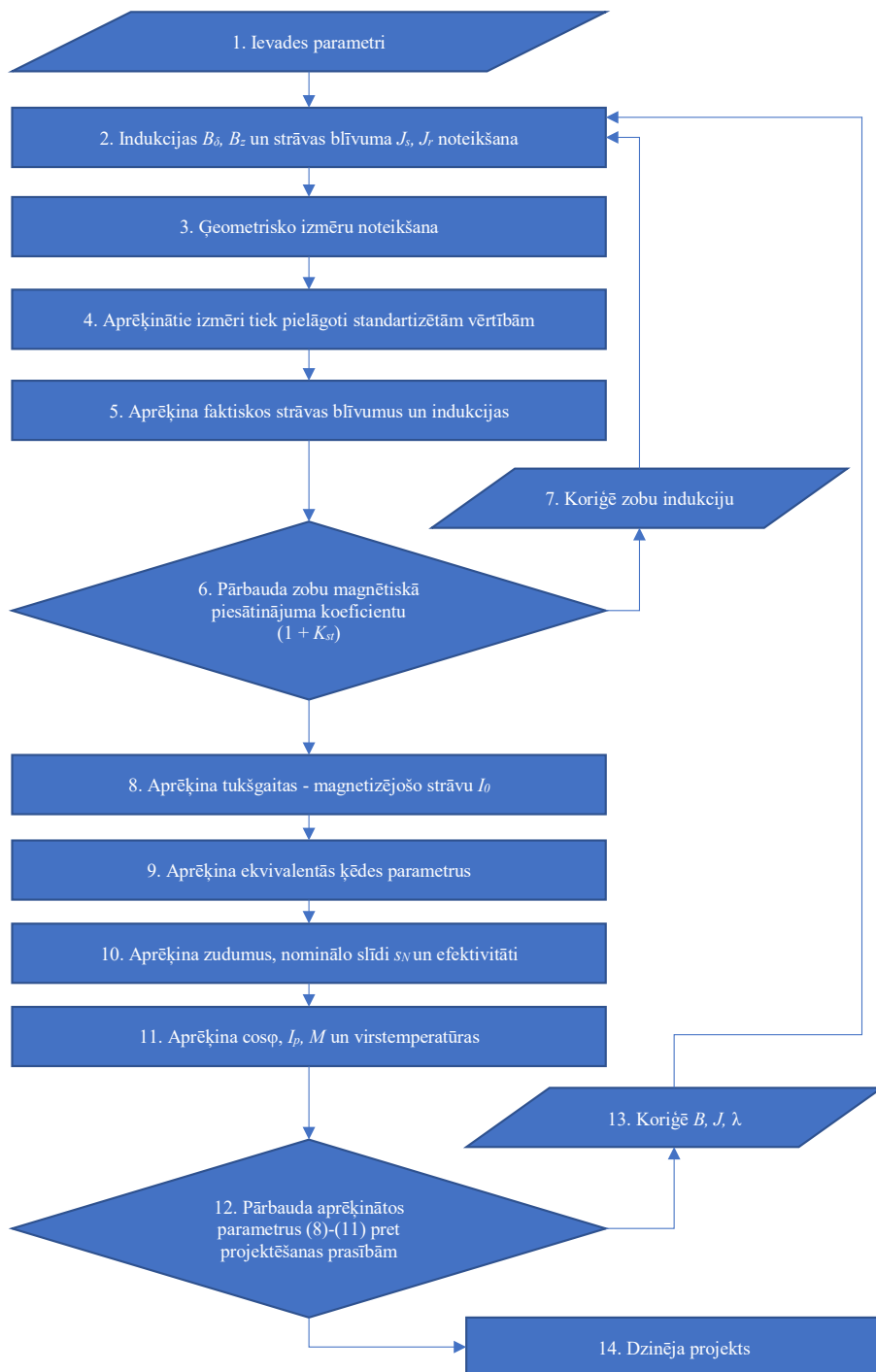
2.5.1. Maiņstrāvas mašīnu projektēšana

Elektrisko mašīnu projektēšana ir iteratīva procedūra, kā rezultāts Elektrodzinējs ir atkarīgs no mērķa funkcijām, kas jāsamazina līdz minimumam, 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, asinhrono dzinēju projektēšana izvērsti skaidrota [19] un [20] literatūras avotos, kuri plaši izmantoti atskaites punktu definēšanai šī darba ietvarā.

SynRM ir maiņstrāvas, sinusoidāla trīsfāžu tinuma elektriskā mašīna, kā stators praktiski neatšķiras no asinhronā dzinēja, tāpēc lietderīgi apskatīt asinhronā dzinēja projektēšanas galvenos soļus, kuri uzskaitīti zemāk un projektēšanas soļu diagramma parādīta 2.9. attēlā.

1. Projektēšanas uzdevums un nemainīgie parametri.

2. Projektēšana sākas ar elektrisko un magnētisko noslodžu – indukcijas un strāvas blīvumu noteikšanu.
3. Ģeometrisko izmēru noteikšana – statora iekšējais diametrs D_{is} , mašīnas aktīvais garums L , statora rievu un zobu izmēri, statora ārējais diametrs D_{as} , tālāk seko rotora rievas un zobu izmēru, jūga augstuma un korpusa izmēru noteikšana.
4. Aprēķinātie izmēri tiek pielāgoti standartizētām vērtībām (statora ārējais diametrs, statora tinuma vijuma izmēri utt.).
5. Aprēķina faktiskās (pēc izmēru standartizācijas) elektriskās un magnētiskās noslodzes (strāvas blīvums un indukcija).
6. Pārbauda statora un rotora zobu magnētiskā piesātinājuma koeficientu $(1 + K_{st})$ atbilstību piešķirtajām vērtībām.
7. Projektēšana atgriežas pie (1) ar koriģētām zobu indukcijas vērtībām, ja statora un rotora zoba magnētiskā piesātinājuma koeficienta $(1 + K_{st})$ rezultāti nav vienādi ar piešķirtajām vērtībām.
8. Aprēķina tukšgaitas – magnetizējošo strāvu I_0 .
9. Aprēķina ekvivalentās ķēdes parametrus.
10. Aprēķina zudumus, nominālo slīdi S_N un efektivitāti.
11. Aprēķina jaudas koeficientu $\cos\phi$, palaišanas strāvu I_p , griezes momentu M un virstemperatūras.
12. Pārbauda aprēķinātos parametrus (8)-(11) pret projektēšanas prasībām, ja parametri ir neapmierinoši, tad process tiek atsākts no (1) ar jaunām indukcijas vērtībām, un/vai strāvas blīvuma vērtībām, un/vai aktīvā garuma pret pola iedaļu attiecību $\lambda = L/\tau$ (τ – pola iedaļa).
13. Lēmumu (12) var pieņemt, pamatojoties uz optimizācijas metodi, pēc kā var atgriezties pie (2) soļa vai uz (4) soli, ja izvēlēta konstrukcija un ģeometriskie dati tiek mainīti saskaņā ar optimizācijas metodi.



2.9. att. Asinhronā dzinēja projektēšanas algoritms

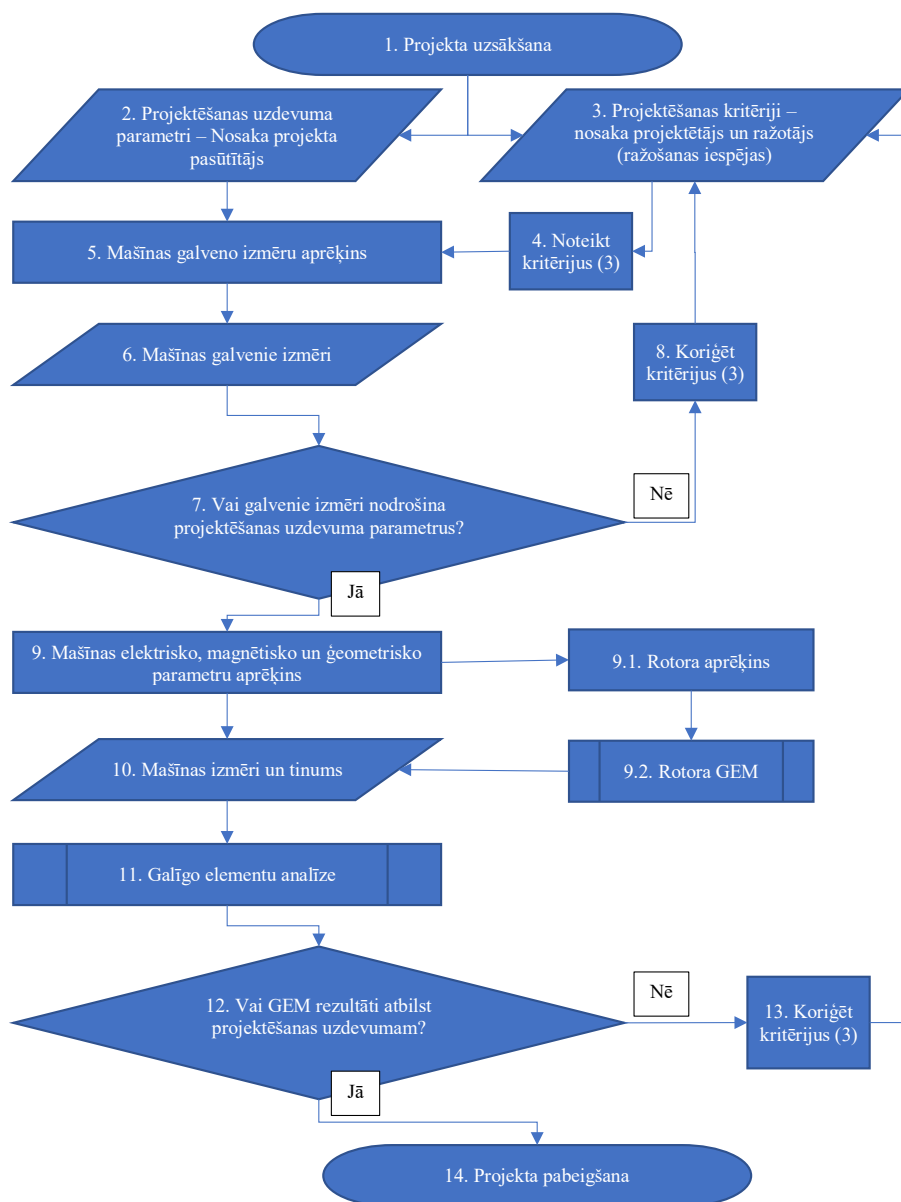
2.5.2. *SynRM* projektēšanas algoritms

Darba ietvarā izstrādāts *SynRM* projektēšanas algoritms ar projektēšanas soļu aprakstu kuri parādīti 2.10. attēlā. Izstrādātais projektēšanas gaitas apraksts ir veidots, balstoties uz asinhrono mašīnu projektēšanu [19], [20] un *SynRM* projektēšanas gaitas aprakstiem, no kuriem lielāko iesaistīto atstājuši [21], [22] literatūras avoti.

Projektēšanas procesā, izmantojot GEM tikai uzprojektētās mašīnas rezultātu pārbaudei, *SynRM* projektēšanas gaita jeb algoritms būtiski neatšķirsies no tipiskas maiņstrāvas mašīnas, piemēram, asinhronā dzinēja projektēšanas (2.9. att.). Autora ieskatā, ko apliecina (2.10. att.) piedāvātais algoritms, ieteicama GEM ieviešana tieši projektēšanas procesā, piemēram, *SynRM* optimālo ģeometriskā parametru, *SynRM* rotora konstrukcijas izstrādē. GEM izmanto *SynRM* rotora gaisa barjeru platumu, skaitu, formas un novietojuma izvēlē.

1. Projektēšanas uzdevuma sagatavošanas stadijā definē projekta mērķus. Projekta mērķis ietelmēs projektēšanas uzdevuma parametrus un projektēšanas gaitu. Piemēram, dzinēja projektēšana transportlīdzekļa modeļa dzīvescikla vidū, kad tiek veikta produkta atjaunināšana, tā saucamais *facelift*, ar uzdevumu aizstāt esošo dzinēju ar efektīvāku, nemainot mašīnas izmērus, vai dzinēja projektēšana, ja tiek izstrādāts jauns transporta līdzeklis, kuram jābūt ar klasē labāko paātrinājumu.
2. **Projektēšanas uzdevuma parametri**, kurus parasti **nosaka projekta pasūtītājs**, ar dažiem piemēriem: dzinēja ārējie izmēri – D_{sa} , L ; dzinēja montāžas metode, iekšējā aizsargātība, slodzes režīms; nominālā un maksimālā jauda – P_N , P_{max} ; nominālais rotācijas ātrums – n_N ; lietderības koeficients – η ; frekvenču pārveidotāju barojošo akumulatoru bateriju spriegums – U_{DC} ; dzinēja vilces raksturlīkne – $M = f(n)$ līkne.
3. **Projektēšanas kritērijus**, kurus parasti **nosaka projektētājs un mašīnas ražotāja iespējas**, ar dažiem piemēriem: pieļaujamais vada strāvas blīvums – J ; pieļaujamā tinumu virstemperatūra – Θ_w ; magnētiskā indukcija gaisa spraugā – B_{lgm} ; pola iedaļas un gaisa spraugas platuma attiecība – τ/g ; mašīnas aktīvā garuma un pola iedaļas attiecība – L/τ ; Kārtera koeficients – K_c ; piesātinājuma koeficients – K_s ; Rievas aizpildījuma koeficients – K_{fill} ; invertora ietekmes faktors – K_{Vo} ; magnētiskā nesimetrija – $K_{d/q}$.
4. Projektētājs pieņem pirmās kritēriju vērtības, ko ievada galveno izmēru aprēķina algoritmā, balstoties uz empīriskām rekomendācijām un ārējo izmēru ierobežojumiem, kuri noteikti darba uzdevumā. Piemēram, *Essona* koeficientu C_0 vai lineāro noslodzi A izvēlas tādu rekomendācijām atbilstošu lielāko vērtību, kura nodrošina vēlamo statora ārējo diametru un mašīnas garumu.
5. Mašīnas galveno izmēru aprēķins neatšķirsies no citu maiņstrāvas mašīnu aprēķina. Projektētājam atšķirības starp *SynRM* un AD vai PMSM jāievērtē projektēšanas kritēriju izvēlē.
6. Iegūti mašīnas galvenie izmēri, noslēdzot pirmo aprēķinu iterāciju. Līdz šim posmam projektētāja ieguldītais darba laiks būs ļoti īss, dažas minūtes pilnībā automatizētam algoritmam vai pāris stundas bez automatizēta algoritma.
7. Projektētājs izvērtē, vai aprēķinātie mašīnas galvenie izmēri nodrošina projektēšanas kritērijus.

8. Ja galvenie izmēri nenodrošina projektēšanas kritērijus, tos koriģē. Pēc vairākām iterācijām nesasniedzot atbilstību, projektētājs griežas pie pasūtītāja ar lūgumu mainīt projektēšanas uzdevuma parametrus. Palielinoties galveno izmēru aprēķina iterāciju skaitam, palielinās projektētāja iesaiste.
9. Aprēķina mašīnas elektriskos, magnētiskos un ģeometrijas parametrus izmantojot analītiskas aprēķinu metodes, piemēriem: tinuma strāva, spriegums; statora rievas garums un platums; statora rievu skaitu; tinuma parametri, tinuma slēguma shēma, vijumu skaits.
 - 9.1. *SynRM* projektēšanas būtiska atšķirība no AD un PMSM projektēšanas būs rotora izmēru aprēķinam. Rotora izmēri, kuri jāizvēlas, piemēriem: gaisa barjeru kopējā platuma attiecība pret tēraudu; gaisa barjeru skaits; gaisa barjeru platums; gaisa barjeru novietojums; rotora mehāniskās izturības nodrošināšana.
 - 9.2. Rotora izmēru optimizācijai var pielietot GEM, kas dod iespēju izstādāt projektēšanas uzdevumam pielāgotu *SynRM*. Rotora izmēru optimizācijas GEM izdala no kopējās mašīnas GEM ar vienkāršotu optimizācijas uzdevumu, piemēram, maksimālais moments vai momenta svārstības noteiktam ātrumam un slodzei.
10. Iegūti mašīnas elektriskie, magnētiskie un ģeometriskie parametri.
11. Veic matemātisko modelēšanu ar GEM palīdzību, lai aprēķinātu izstrādātās mašīnas veikspēju, piemēriem: maksimālais elektromagnētiskais moments; elektromagnētiskais moments atkarībā no slodzes; elektromagnētiskā momenta svārstības; magnētiskās indukcijas sadalījums. GEM ļauj ievērtēt magnētisko sistēmu nelinearitāti un specifiskas mašīnas konstrukcijas īpatnības, ko analītiskā aprēķinā praktiski nav iespējams ievērtēt.
12. Pārbauda, vai GEM rezultāti apmierina projektēšanas kritērijus un nodrošina projektēšanas uzdevuma izpildi.
13. Ja rezultāti neatbilst projektēšanas uzdevumam, tad koriģē kritērijus, ar dažiem piemēriem: strāvas blīvums; magnētiskā indukcija gaisa spraugā; pola iedaļas un gaisa spraugas platuma attiecība; mašīnas aktīvā garuma un pola iedaļas attiecība.
14. Elektrisko mašīnu projektēšana ir iteratīvs process, kas parasti noslēdzas pēc 10–15 iterācijām.

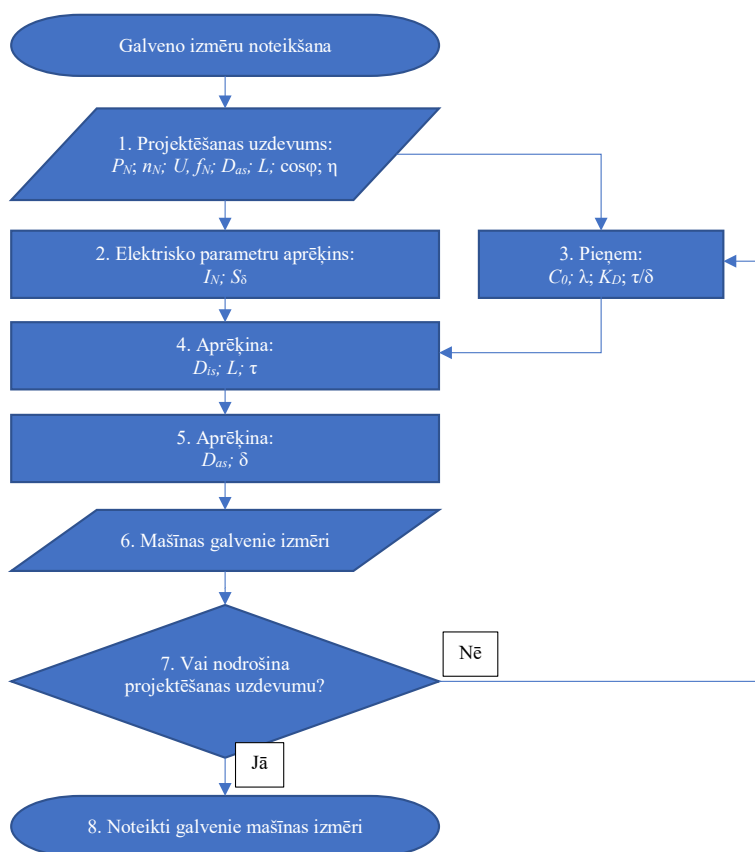


2.10. att. *SynRM* projektēšanas algoritms

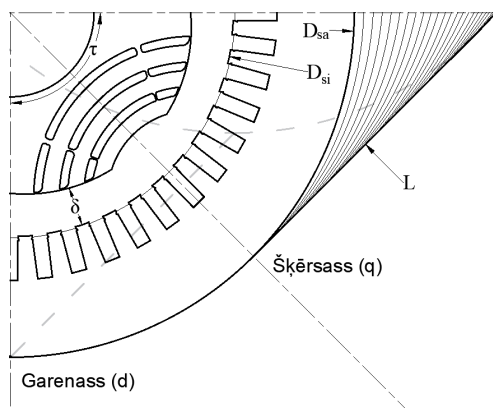
2.5.3. *SynRM* galvenie izmēri

Mašīnas galveno izmēru aprēķina secība būs tāda pati kā citu maiņstrāvas mašīnu aprēķina secība. 2.11. attēlā parādīta aprēķinu secība, kura balstās uz pieņemtu mašīnas izmantošanas – *Essona* koeficientu C_0 (kW/m³) [20]. Līdzīgs aprēķina algoritms būs, *Essona* koeficienta vietā no rekomendācijām izvēloties lineāro noslodzi A un magnētisko indukciju gaisa spraugā B_δ [19]. Atšķirības starp *SynRM* un AD vai PMSM jāievērtē, izvēloties C_0 , A , B_δ .

1. Projektēšanas uzdevumā parasti kādā kombinācijā būs definēti parametri: dzinēja nominālā jauda P_N ; nominālais rotācijas ātrums n_N ; lietderības koeficients η ; barošanas spriegums U , nominālā sprieguma frekvence f_N ; jaudas koeficients $\cos\varphi$; ārējais statora izmērs D_{as} ; aktīvais garums L ; slodzes režīms; dzesēšanas metode.
2. Parametru aprēķins: nominālā strāva I_N , pilnā jauda pārvadīta caur gaisa spraugu S_δ
3. Pieņem garuma attiecību pret pola iedaļu λ , un *Essona* koeficientu, vērtības izvēlas no rekomendācijām pēc mašīnas veida, plānotās dzesēšanas metodes, slodzes režīma, polu skaita un jaudas.
4. Aprēķina statora iekšējo diametru D_{is} , mašīnas aktīvo garumu L un pola iedaļu τ .
5. Aprēķina statora ārējo diametru D_{as} un gaisa spraugas platumu δ . Gaisa spraugas platumu ierobežos ražotāja iespējas noteiktas jaudas mašīnai.
6. Aprēķinu rezultātā iegūti mašīnas galvenie izmēri: D_{as} ; D_{is} ; L ; δ ; τ .
7. Projektētājs izvērtē, vai mašīnas izmantošanas koeficients un garuma attiecība pret pola iedaļu nodrošina projektēšanas uzdevuma parametrus.



2.11. att. Elektrisko mašīnu galveno izmēru noteikšanas algoritms



2.12. attēls. Mašīnas galvenie izmēri

2.5.4. *SynRM* tinumi un statora rievas

SynRM tinuma aprēķins

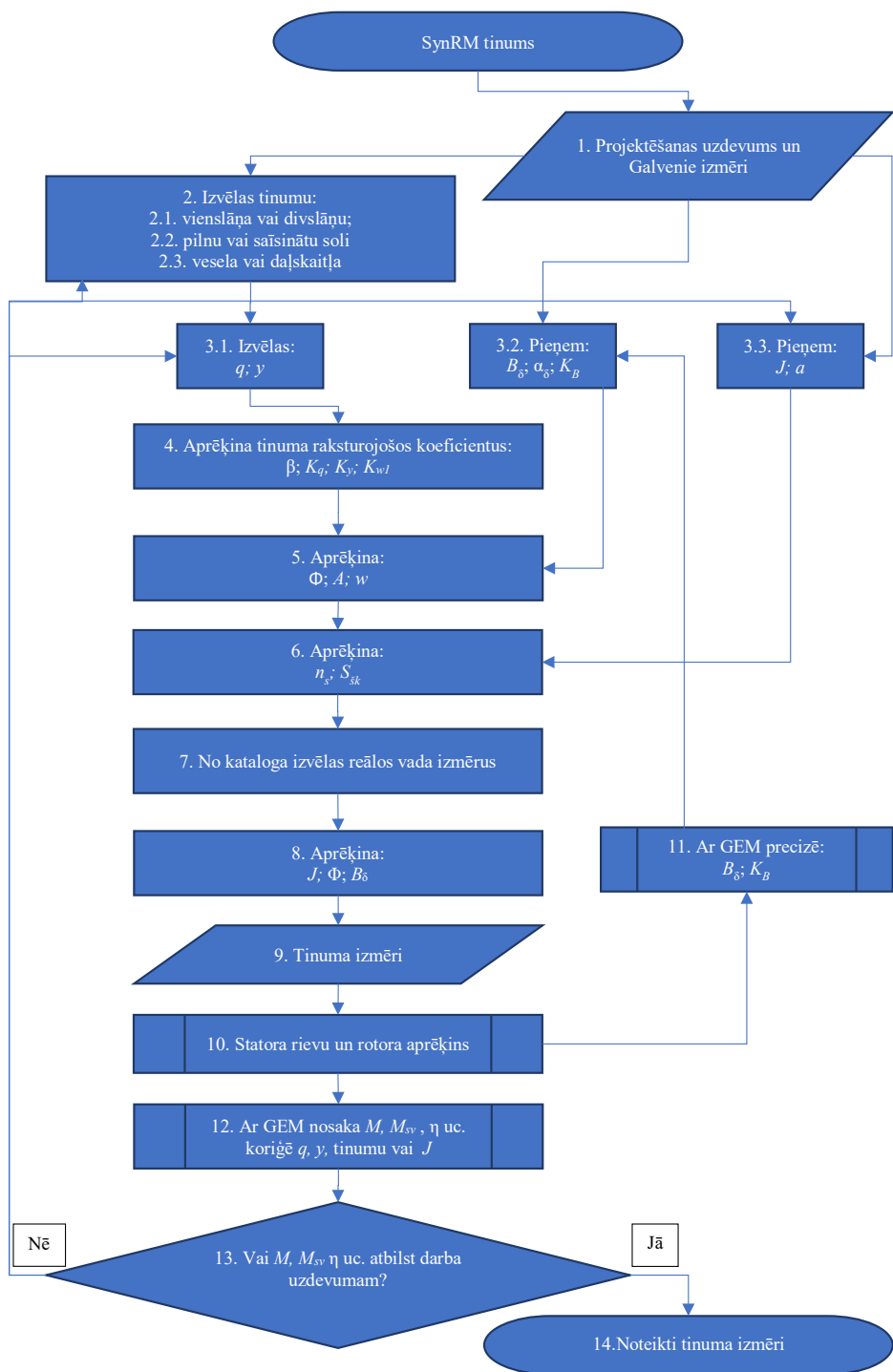
SynRM tinuma parametrus var aprēķināt pēc tādām pašām metodēm kā citām maiņstrāvas mašīnām. Tipiskās tinumu aprēķina metodes balstās virknē empīrisku koeficientu, kas jauna tipa mašīnām, kāda ir *SynRM*, var būt projektētājam nepieejami. Tāpēc 2.13. attēlā piedāvāts *SynRM* tinumu aprēķina algoritms, kurā ietverti GEM parametru optimizācijas soļi. Taisnstūrveida veida divslāņu tinums parādīts 2.14. attēlā.

1. Pirms tinuma aprēķina nepieciešams aprēķināt galvenos izmērus.
2. Izvēlas tinumu veidu. *SynRM* tāpat kā citām maiņstrāvas mašīnām izmanto: vienslāņa vai divslāņu tinumus, tinumu ar pilnu vai saīsinātu soli, vesela vai daļskaitļa tinumus.
3. Izvēlas koeficientus un parametrus, ja nav pieejamas *SynRM* parametru rekomendācijas, sākotnēji parametrus izvēlas pēc asinhronā dzinēja projektēšanas rekomendācijām; kad veikts rotora aprēķins, parametrus precizē, optimizē un pielāgo *SynRM*, izmantojot GEM.
 - 3.1. Rievu skaits uz polu un fāzi q . Lielākam q būs raksturīgas mazākas elektromagnētiskā momenta svārstības, bet lielākam q būs raksturīgs tehnoloģiski sarežģītāks stators, izstrādājot rotoru, q ietekmēs rotora barjeru skaitu.
Tinuma soļa īsināšanai y būs raksturīgas mazākas elektromagnētiskā momenta svārstības. Diemžēl soļa īsināšana samazinās arī maksimālo momentu.
 - 3.2. *SynRM* indukcija gaisa spraugā B_δ lielākoties būs lielāka $B_\delta \approx 1$ T, salīdzinoši ar asinhrono dzinēju $B_\delta \approx 0,75$ T. Tā kā *SynRM* būs ar augstu piesātinājumu, magnētiskās plūsmas formas koeficients K_B lielākajā daļā risinājumu būs salīdzinoši augsts $K_B \approx 1,1$. Ieteicams ar GEM palīdzību B_δ un K_B pielāgot projektējamai mašīnai.
Pola pārklājums α_δ būs atkarīgs no rotora konstrukcijas.
 - 3.3. Strāvas blīvuma J pareiza izvēle ir viens no galvenajiem projektētāja uzdevumiem, jo no tā būs atkarīga mašīnas ilgmūžība, efektivitāte un drošums. Pareizai J izvēlei ļoti būtiski projektēšanas uzdevumā noteikt:
 - sasniedzamo efektivitāti;
 - mašīnas ārējā korpusa – dzesēšanas sistēmas risinājumu vai maksimālos pieļaujamos ārējos izmērus, ja dzesēšanas sistēmu var izvēlēties projektētājs;
 - mašīnas darba režīmu (S – režīmi);

- ārējā korpusa aizsargātību (IP klases);
- paredzamo vai projektējamo mašīnas darbmūžu;
- ražotāja iespējas tinuma materiālam, dzesēšanas sistēmām, izolācijas materiāliem.

Mašīnām bez piespiedu dzesēšanas iespējams $J < 4 \text{ A/mm}^2$, bet no akumulatoru baterijām barotām transporta elektriskajām mašīnām, kurām ļoti būtiska liela īpatnējā jauda kW/kg un pielietota šķidrums dzesēšana ar piespiedu cirkulāciju, $J > 10 \text{ A/mm}^2$.

4. Aprēķina tinuma raksturojošos koeficientus: tinuma relatīvā soļa koeficientu β , tinuma sadalījuma koeficientu K_q , tinuma soļa saīsinājuma koeficientu K_y un statora tinuma koeficientu K_{wl} , kas ir K_q un K_y reizinājums.
5. Aprēķina pola magnētisko plūsmu Φ , pola magnetizējošo spēku A un fāzes vijumu skaitu w .
6. Aprēķina vadītāju skaitu rievā n_s un vada šķērsgrizumu S_{sk} .
7. No kataloga izvēlas reālos vada izmērus, kuri pēc iespējas tuvāki aprēķinātajam vada šķērsgrizumam.
8. Aprēķina reāliem izmēriem atbilstošos parametrus: J , Φ , B_δ .
9. Iegūti tinuma izmēri, pēc kuriem var aprēķināt statora rievas izmērus.
10. Ja ir noteikti mašīnas galvenie izmēri un statora tinuma izmēri, veic statora rievu un rotora aprēķinu.
11. No GEM tiek precizēti B_δ ; K_B . Atkārto, līdz tinuma izmēriem nav jāmaina izmēri un šķērsgrizums.
12. Ar GEM nosaka M , M_{sv} , η un citus parametrus.
13. Pārbauda, vai ar GEM noteiktie parametri atbilst darba uzdevumam. Ja tie neatbilst projektēšanas uzdevumam, koriģē q , y , tinuma veidu, J , a .

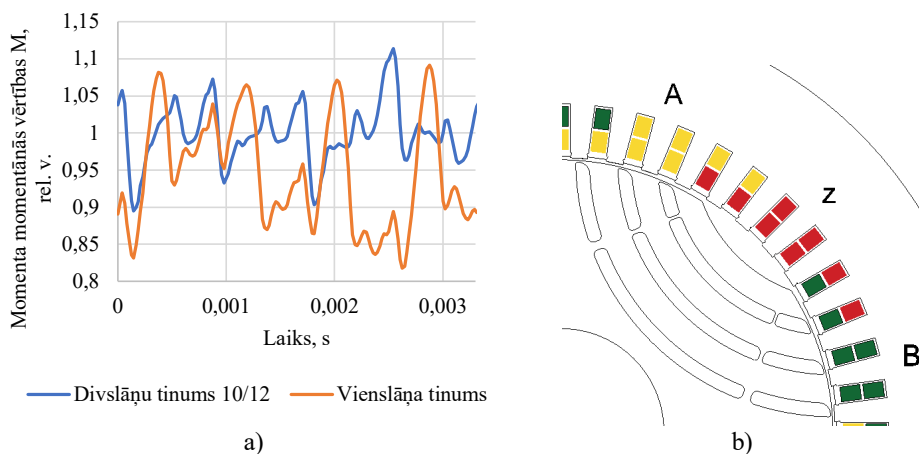


2.13. att. *SynRM* tinuma noteikšanas algoritms

Vienslāņa vai divslāņu tinums

SynRM tāpat kā citām maiņstrāvas mašīnām var izmantot vienslāņa vai divslāņu tinumus. Vienkāršoti apskatot izvēles būtību, salīdzinoši vienslāņa tinumam raksturīgs lielāks maksimālais elektromagnētiskais moments, 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 par ieteikto soļa īsināšanai būs raksturīgs būtisks maksimālā momenta samazinājums. Mazākai par ieteikto soļa īsināšanai būs raksturīgs neproporcionāli mazs momenta svārstību samazinājums, ņemot vērā būtiski pieaugušo statora tinuma konstrukcijas sarežģītību, kas palielinās ražošanas izmaksas. Piedāvātās soļa īsināšanas attiecības nodrošina piektās un septītās MDS harmonikas samazināšanu. [23]

Soļa saīsināšanas pielietojanas lietderība katrā projektā jāizvērtē individuāli, piemēram, avotā [23] ziņots, ka soļa saīsināšana būtiski samazina maksimālo elektromagnētisko momentu, bet elektromagnētiskā momenta pulsāciju samazinājums ir neliels, turpretim [24] ar soļa saīsināšanu 10/12 (2.14. att. a) panākts elektromagnētiskā momenta pulsāciju samazinājums par 5%, bet maksimālā elektromagnētiskā momenta samazinājums nav novērots 2.14. att. b).



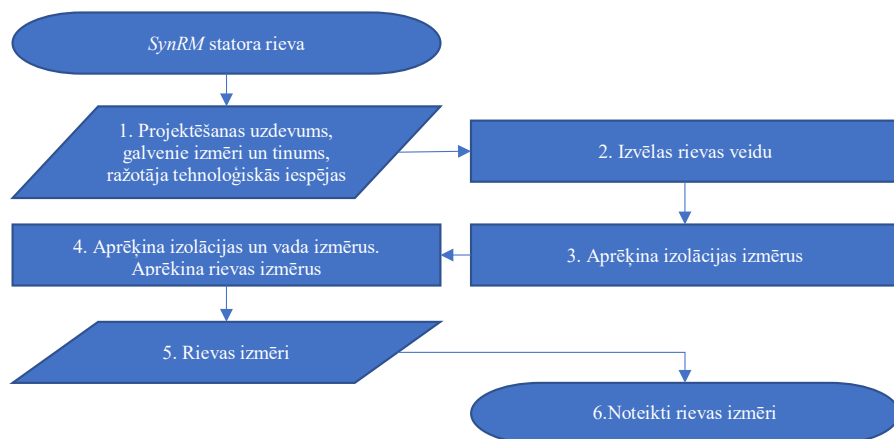
2.14. attēls. 180 kW, $2p = 4$, $q = 4$ *SynRM* ar 10/12 saīsinātu soli [25]: a) elektromagnētiskais moments nominālās slodzes režīmā; b) trīsfāžu tinuma izvietojums (A-x, B-y, C-z)

SynRM rievas izmēru aprēķins

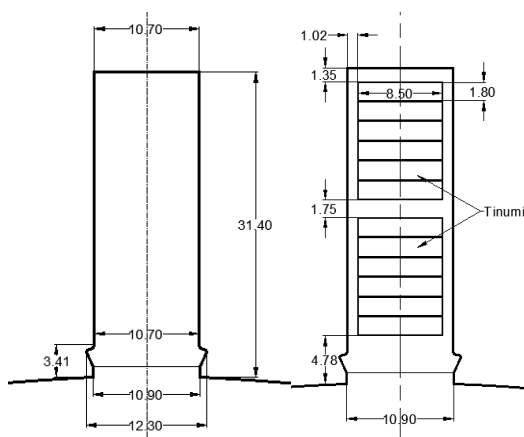
SynRM rievas izmērus (2.15. attēls), tāpat kā citās maiņstrāvas mašīnās galvenokārt noteiks aprēķinātie tinuma izmēri un ražotāja tehnoloģiskās iespējas. Taisnstūrveida pilnībā atvērta rievā parādīta 2.16. attēlā.

1. Pirms rievas izmēru aprēķina, nepieciešams aprēķināt galvenos izmērus un tinuma parametrus, kā arī noskaidrot ražotāja tehnoloģiskās iespējas.
2. Rievas veida izvēle būs atkarīga no ražotāja tehnoloģiskajām iespējām un tinuma aprēķina, kur daži no svarīgajiem aspektiem ir:
 - spoļu tīšanas metode. Spoles tiek iepriekš sagatavotas un ievietotas rievās vai vijumi tiek ievīti;
 - vadu forma, taisnstūra vai apaļi vadi;

- vienslāņa vai divslāņu tinums;
 - tinuma un rievas izolācija, tās biezums, materiāli, ieklāšanas metode, izolācijas klase;
 - nodrošināmais rievas aizpildes koeficients.
3. Aprēķina rievas, vadu un starp spoļu izolācijas kopējo platumu un augstumu.
 4. Aprēķina kopējo nepieciešamo vadu un izolācijas platumu un augstumu. Aprēķina rievas izmērus. Rievas platums b_r , rievas augstums h_r un rievas laukums S_r .
 5. Iegūti rievas izmēri. Tipiskie atvērtas taisnstūra formas rievas izmēri, taisnstūra formas rievas izmanto vidējas un lielas jaudas maiņstrāvas mašīnām, parādīti 2.16. att.



2.15. att. *SynRM* rievas izmēru noteikšanas algoritms



2.16. att. 180 kW mašīnas: a) rieva; b) tinums.

2.6. Modernas *SynRM* rotora projektēšana

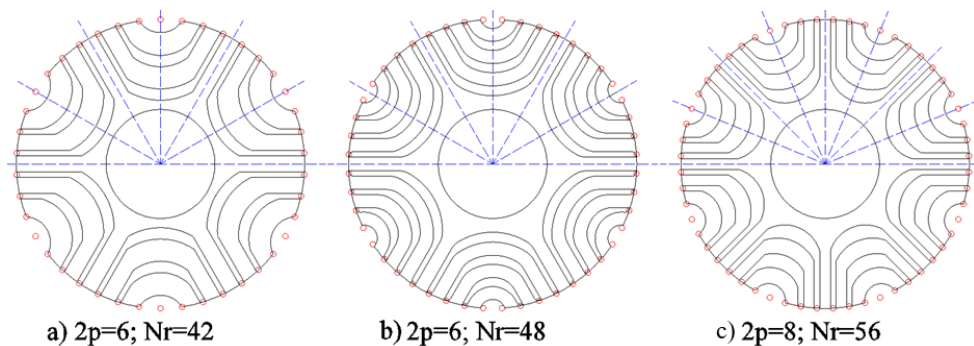
Modernas *SynRM* rotors veidots no radiāli laminētām elektromagnētiskā tērauda loksēm, kurās ir izveidotas gaisa barjeras šķērsass plūsmas ierobežošanai (2.17. att. b). *SynRM* rotora

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 izvirzīto polu sinhronās mašīnas rotoru bez gaisa barjerām $K_{d/q} \sim 2$ (2.17. att. a). *SynRM* rotora ar gaisa barjerām ražošana ir būtiski vienkāršāka, salīdzinot ar aksiāli laminētu *SynRM* rotoru 2.17. att. c). Rotoru konstrukciju galvenokārt noteiks magnētiskās ķēdes aprēķins un magnētiskā nesimetrija, bet neliela ietekme uz konstrukciju būs mehāniskās izturības prasībām. Sasilums un dzesēšana neietekmēs rotoru konstrukciju.

Pārliecinoši lielākā daļa no ražošanā ieviestām *SynRM* ir ar četriem poliem. Augstas magnētiskās nesimetrijas un zemu momenta pulsāciju rotora konstrukciju ar gaisa barjerām ir praktiski neiespējams izveidot divu polu mašīnai. Sešu (2.18. att. a, b) un astoņu (2.18. att. c) polu mašīnai ir iespējams izveidot konstrukciju ar gaisa barjerām, tomēr konstrukcijai būs raksturīgs mazāks īpatnējais elektromagnētiskais moments [26]. Sešu un astoņu polu mašīnās rotora konstrukciju ar lielāku barjeru skaitu būs sarežģītāk izgatavot, jo barjeras būs salīdzinoši šaurākas un barjeras būs ar mainīgu platumu.



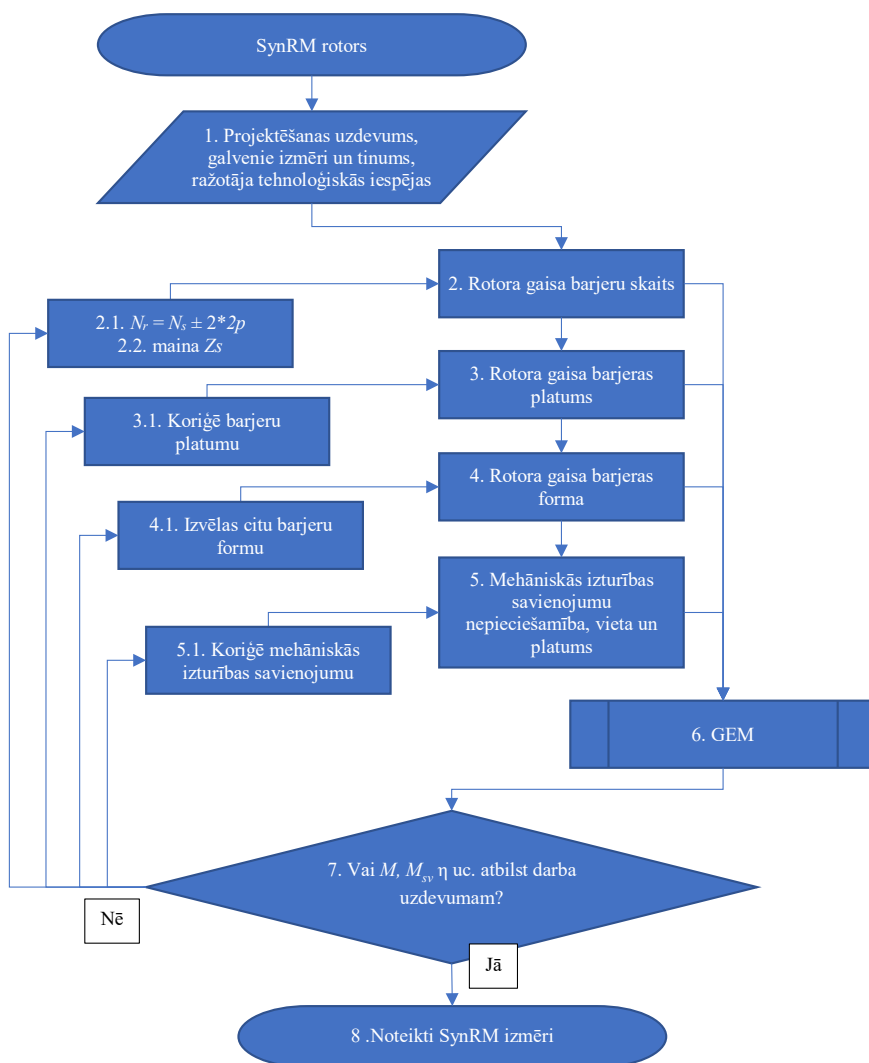
2.17. att. *SynRM* rotoru konstrukcijas: a) izvirzītu polu; b) nemagnētisku gaisa barjeru; c) aksiāli laminētas elektrotehniskā tērauda loksnes



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

SynRM galveno izmēru, tinuma un statora aprēķina gaita būtiski neatšķiras no asinhronā dzinēja. Atšķirības veidojas pieņemto empīrisku koeficientu vērtībās. *SynRM* rotorā nav aktīvo elementu, tāpēc rotora aprēķins būs pilnīgi citādāks nekā asinhronās vai pastāvīgo magnētu sinhronās mašīnas (2.19. att.):

1. Pirms rotora aprēķina nepieciešams aprēķināt mašīnas galvenos izmērus un tinuma parametrus.
 - 1.1. Rotora aprēķinam būtiski mašīnas galvenie izmēri: D_{si} , δ , L , τ .
 - 1.2. Rotora aprēķinam būtisks tinuma aprēķina parametrs ir q .
 - 1.3. Ražotāja iespējām būtiski noteikt:
 - rotora elektrotehniskā tērauda plāksņu formēšanas metodi: izgriešana ar lāzeri vai plazmu, štancēšana u.c;
 - gaisa barjeru noapaļojumu un gala apstrādes pielaiides;
 - pieejamie materiāli gaisa barjeru aizpildei ar nemagnētisku materiālu;
 - rotora gala apstrādes tehnika: vai pieļaujami izgriezumi pie gaisa spraugas, vai rotoram jābūt cilindriskam.
2. Nosaka rotora gaisa barjeru skaitu, atbilstoši sakarībai: $N_r = N_s \pm 2 \cdot 2p$ [7]. Optimizācijas uzdevums jāveido, iekļaujot statora rievu skaita izvēli. Optimizācijas uzdevums neizbēgami būs daudz mērķu. Optimizācijai izmanto GEM modelēšanu.
 - 2.1. Izvēlas, vai rotora gaisa barjeru – N_r – skaits būs lielāks ($+ 2 \times 2p$) vai mazāks ($- 2 \times 2p$) par statora rievu skaitu.
 - 2.2. Maina statora rievu skaitu – N_s .
3. Nosaka rotora barjeru un plūsmu vadošo kanālu platumu. Rotora barjeru un plūsmu vadošo kanālu platumu izvēlas attiecībā, kas nodrošina optimālas momenta un magnētiskās nesimetrijas vērtības. Rotora aprēķina pirmajā iterācijā nemagnētisko gaisa barjeru un plūsmu vadošo kanālu platuma attiecību var pieņemt, balstoties uz rekomendācijām $K_{gb/Fe} \in (0,3-0,5)$ [18]. Rotora barjeru un plūsmu vadošo kanālu platuma izvēlei ieteicams atsevišķs optimizācijas uzdevums. Optimizācijai izmanto GEM modelēšanu.
4. Izvēlas rotora gaisa barjeru formu. Rotora gaisa barjeru forma parasti tiek veidota trapecveida vai loka veida. Gaisa barjeras forma var būt atsevišķs optimizācijas uzdevums. Optimizācijai izmanto GEM modelēšanas rezultātus.
5. Izvērtē mehāniskās izturības savienojumu nepieciešamību un izvēlas vietu un platumu. Mehāniskās izturības savienojumi nodrošina rotora mehānisko izturību, bet tie pasliktina elektromagnētiskos lielumus, samazinot magnētisko nesimetriju. Mehāniskās izturības savienojumi var būt atsevišķs mehānikas un elektromagnētiskajos aprēķinos balstīts optimizācijas uzdevums, optimizējot vietu un platumu. Optimizācijai izmanto elektromagnētisko un mehānisko modeļu GEM modelēšanas rezultātus.
6. Veic *SynRM* GEM modelēšanu.
7. Izvērtē GEM rezultātu atbilstību projektēšanas uzdevumam. Ja rezultāti neatbilst, maina rotora parametrus jeb risina optimizācijas uzdevumu.



2.19. att. *SynRM* rotora izmēru noteikšanas algoritms

2.6.1. Rotora nemagnētisko gaisa barjeru skaits

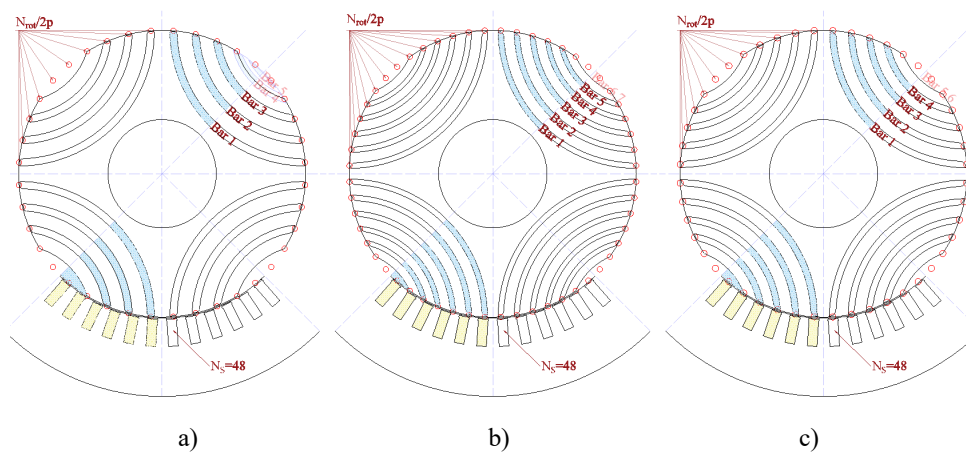
Rotora nemagnētisko gaisa barjeru skaits būs atkarīgs no polu skaita, statora rievu skaita, mašīnas izmēra un ražotāja iespējām izveidot mazas rotora gaisa barjeras. Lielākam rotora gaisa barjeru skaitam būs raksturīga lielāka magnētiskā nesimetrija un mazākas elektromagnētiskā momenta svārstības; kā robežas konstrukciju ar ļoti lielu plūsmas vadošu kanālu un nemagnētisko barjeru skaitu var apskatīt aksiāli laminētu rotoru (2.17. att. c).

Laminējot tērauda loksnes aksiāli, nevis radiāli, starp tām veidojas magnētiskas izolācijas slānis, ko izmanto plūsmas ierobežošanai šķērsass virzienā. Aksiāli laminēta rotora konstrukcijām raksturīga magnētiskās nesimetrijas vērtība $K_{d/q} \sim 10$ [27], [28] ir būtiski lielāka, salīdzinot ar radiāli laminēta gaisa barjeru rotora konstrukciju. Tomēr aksiāli laminēta rotora

konstrukcijai piemīt būtiski trūkumi. Aksiāli laminētu rotoru ir sarežģīti rūpnieciski izgatavot, katra loksne būs unikāla izmēra. Attēlā 2.17. c) novērojams, ka katra nākamā loksne tuvāk gaisa spraugai ir īsāka par iepriekšējo. Jānodrošina lokšņu liekšana, kas 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 [28].

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 sakarību (2.6.) [7]. Ievērojot šo sakarību, būtiski tiek samazināta statora rievu 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 lielāku vai mazāku par statora rievu skaitu (2.6.) jāskata katrai projektējamai mašīnai individuāli. 2.20. attēls c) parāda, 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.

$$N_r = N_s \pm 2 \times 2p \text{ vai } \frac{N_{rot}}{p} = \frac{N_s}{p} \pm 4. \quad (2.6.)$$



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

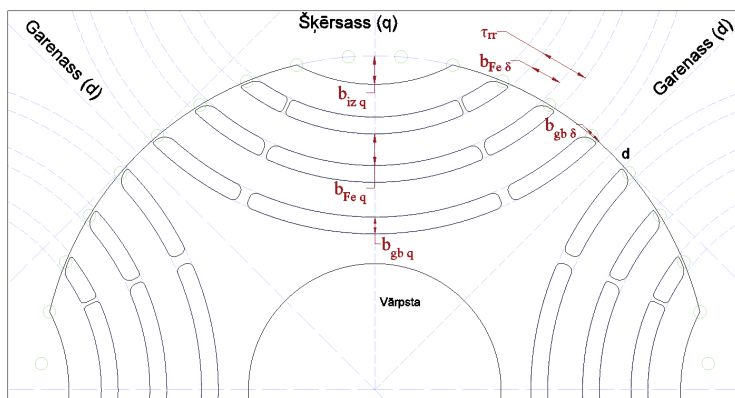
a) $N_r < N_s$, $N_r = N_s - 2 \times 2p = 40$; b) $N_r > N_s$, $N_r = N_s + 2 \times 2p = 56$; c) $N_r = N_s$, $N_r = N_s = 48$.

2.6.2. Rotorā nemagnētisko gaisa barjeru un plūsmu vadošo kanālu platums

Rotorā nemagnētisko gaisa barjeru un plūsmu vadošo kanālu platuma attiecība (2.7.) ietekmēs mašīnas magnētisko nesimetriju un mašīnas attīstāmo elektromagnētisko momentu. Magnētiskā nesimetrija nosaka ne tikai elektromagnētisko momentu, bet arī jaudas koeficientu, strāvu un attiecīgi zudumus. Rotorā aprēķina pirmajā iterācijā nemagnētisko gaisa barjeru un

plūsmu vadošo kanālu platuma attiecību var pieņemt, balstoties uz rekomendācijām $K_{gb/Fe} \in (0,3-0,5)$ (2.22. att.) [18], līdzīgas vērtības rekomendētas [27]. 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 doti 2.21. attēlā, kur izmēri b_{gb} – gaisa barjeras platums, b_{Fe} – plūsmas vadošā kanāla platums izdalīti, pa šķērsasi – q un pie gaisa spraugas – δ , papildus apzīmēts izgriezums pa q asi pie gaisa spraugas – $b_{iz\ q}$ un rotora zoba iedaļa – τ_{rr} .



2.21. 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 $b_{gb\ q} > b_{gb\ \delta}$. Izgrieztuma pa q asi pie gaisa spraugas $b_{iz\ q}$ nepieciešamību nosaka projektētājs, izvērtējot:

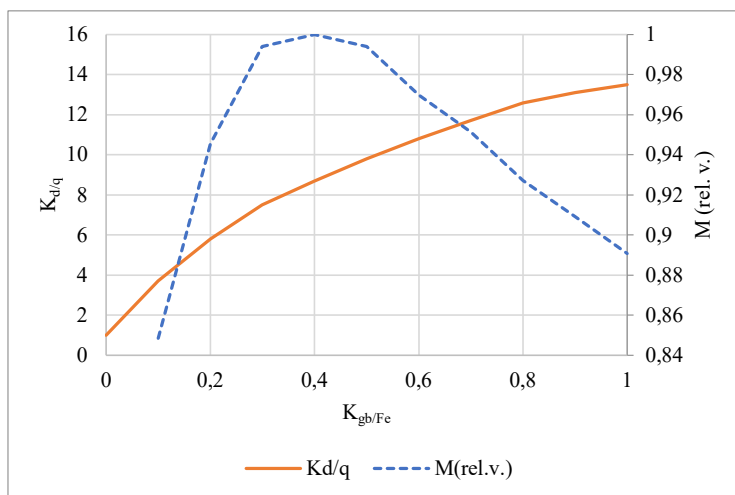
- vai ražošanas tehnoloģija pieprasa rotoru veidot kā ideālu cilindru;
- neveidojot izgriezumus, vai tērauda daļa ir pietiekami mehāniski nostiprināta;
- neveidojot izgriezumus, vai tērauda daļa būtiski nesamazina magnētisko nesimetriju.

Neveidojot izgriezumus, gaisa barjeras un plūsmas vadošie kanāli pie gaisa spraugas pa q asi var veidot sarežģītu geometriju ar maziem izmēriem un ar ļoti asiem leņķiem, kuru būs sarežģīti izgatavot, īpaši, ražojot mašīnu rūpnieciskos apjomos, piemēram (2.20. att. a) barjeras 4 un 5.

SynRM veidojot pēc [7] rekomendācijām rotorā gaisa barjeras un plūsmas vadošā kanāla iedaļas platumus – τ_{rr} ir nemainīgs.

Plūsmas vadošo kanālu un gaisa barjeru platuma attiecību (2.7.) izsaka kā sakarību no visu nemagnētisko gaisa barjeru un izgriezuma platuma pret kopējo barjeras, izgriezuma un tērauda platumu.

$$K_{gb/Fe} = \frac{\sum b_{gb} + b_{iz}}{\sum b_{gb} + b_{iz} + \sum b_{Fe}}. \quad (2.7.)$$

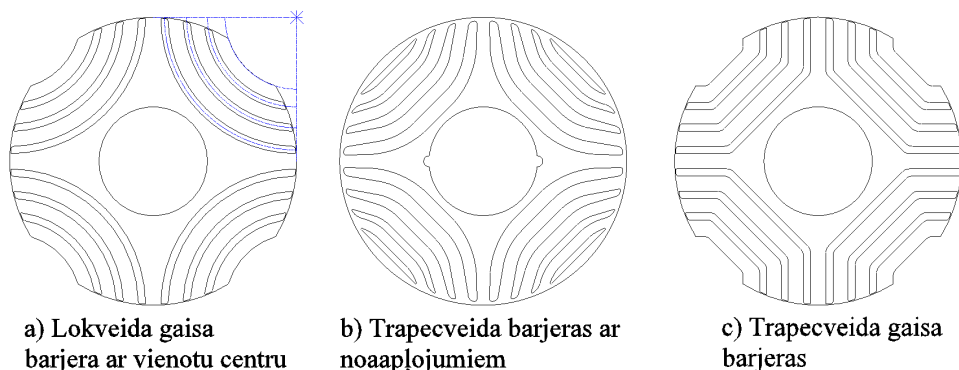


2.22. att. Elektromagnētiskais moments un magnētiskā nesimetrija atkarībā no plūsmas vadošo kanālu un gaisa barjeru platuma attiecības

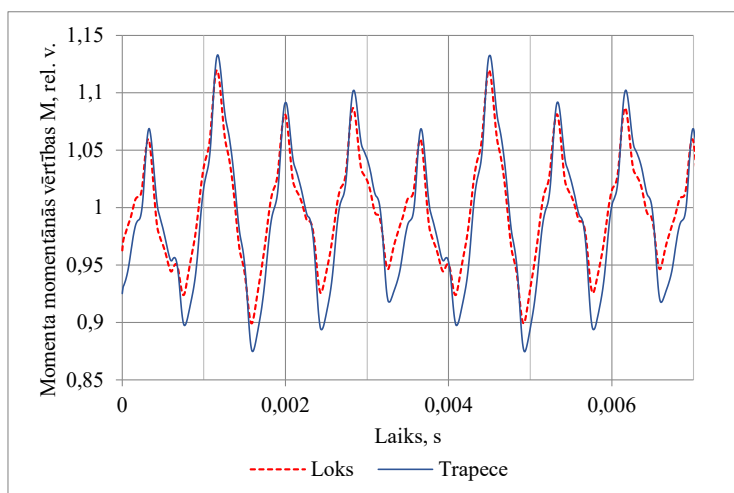
2.6.3. Nemagnētisko gaisa barjeru forma

Izvēlas rotora gaisa barjeru formu. Rotora gaisa barjeru forma parasti tiek veidota trapecveida (2.23. att. c) vai loka veida (2.23. att. a). Gaisa barjeras forma var būt atsevišķs optimizācijas uzdevums. Gaisa barjeras formas izvēli ietekmēs ražotāja iespējas, kuras būs atkarīgas no ražotājam pieejamā aprīkojuma un izvēlētās rotora izgatavošanas tehnoloģijas. Būtiski barjeras formu ietekmēs nepieciešamais vārpstas diametrs. Trapecveida vai lokveida barjeras var būt ar nemainīgu barjeras platumu vai $b_{gbq} > b_{gb\delta}$. Trapecveida barjeras bieži tiek veidotas ar noapaļojumiem (2.23. att. b), 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 (2.24. att.), piemēram 180 kW, $p = 2$, $f = 50$ Hz *SynRM* pie nominālās slodzes elektromagnētiskā momenta svārstības ir par 4% mazākas [29]. Veidojot *PMASynRM*, ieteicams izvēlēties trapecveida barjeras.



2.23. att. Gaisa barjeru forma

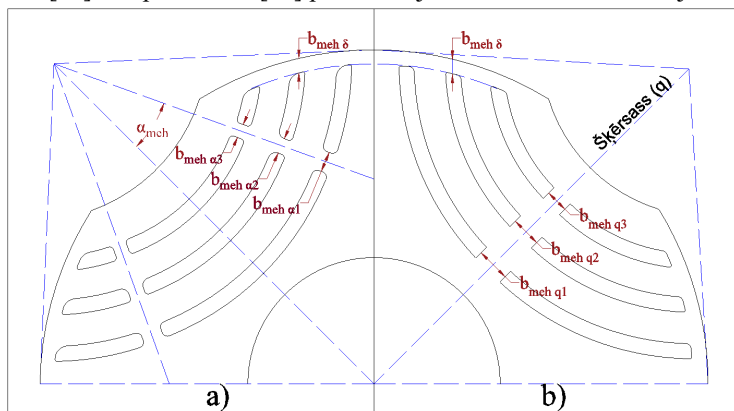


2.24. att. 180 kW, $p = 2$, $f = 50$ Hz Elektromagnētiskā momenta svārstības dažādām gaisa barjeras formām

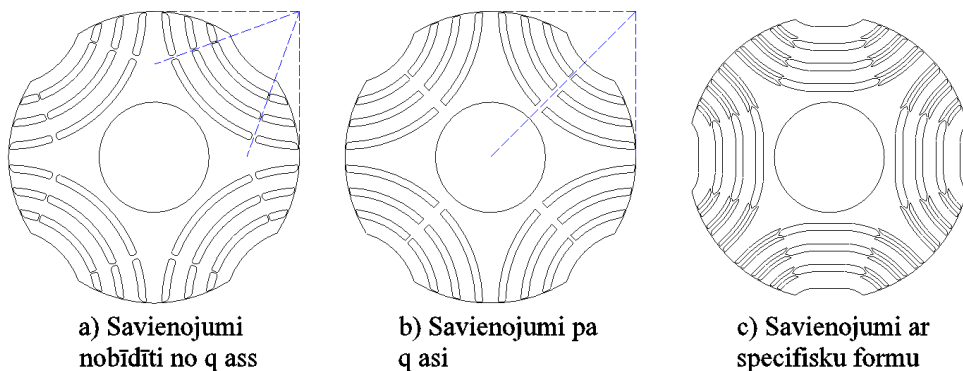
2.6.4. Mehāniskās izturības savienojumi

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, kuras tiek nedaudz samazinātas. Piemēram, [25], [30] 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 [27], parādīts 2.27. attēlā. Mehāniskās izturības savienojumi var būt atsevišķs mehānikas un elektromagnētiskajos aprēķinos balstīts optimizācijas uzdevums, optimizējot vietu un platumu. Optimizācijai izmanto elektromagnētisko un mehānisko modeļu GEM.

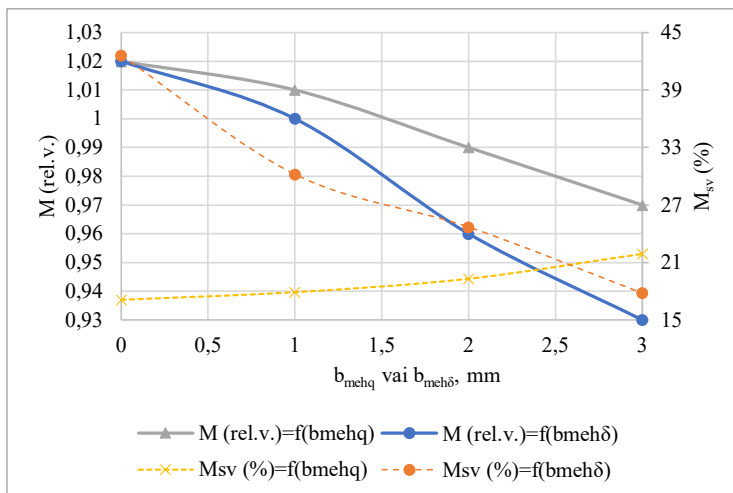
Modernas *SynRM* konstrukcijas tipiski mehānisko savienojumu veidi: pie gaisa spraugas 2.25. attēlā apzīmēts ar platumu $b_{meh\ \delta}$ un gaisa barjeru sadalošs 2.26. attēlā b) apzīmēts ar platumu $b_{meh\ q}$, ja stiprinājums atrodas tieši uz šķērsass, vai 2.26. attēlā a) apzīmēts ar $b_{meh\ \alpha}$, 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* (2.26. att. b), ko ražo “KSB” sūkņa pielietojumam, ir tikai mehāniskās izturības savienojumi pie gaisa spraugas $b_{meh\ \delta}$. Pētīti arī dažādas formas mehāniskās izturības savienojumi, kas rotora izgatavošanu padara sarežģītāku, bet būs raksturojami ar augstāku magnētisko nesimetriju, piemēram specifiskas formas mehāniskās izturības savienojumi (2.26. att. c) nodrošinās par 5% lielāku magnētisko nesimetriju, salīdzinot ar (2.26. att. a) savienojumiem [25] vai, piemēram, [31] pētītie “dūjas astes” formas savienojumi.



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



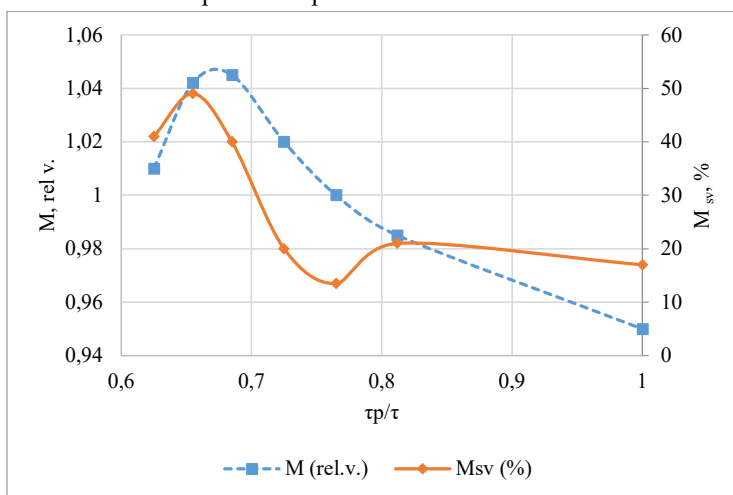
2.26. att. Mehāniskās izturības savienojumu novietojums un forma



2.27. att. Mehāniskās izturības savienojumu ietekme uz elektromagnētisko momentu un momenta svārstībām, dalot to: savienojumu pie gaisa spraugas platumu $b_{meh\delta}$ un savienojumu pa q asi platumu b_{mehq}

2.6.5. Pola pārsedze

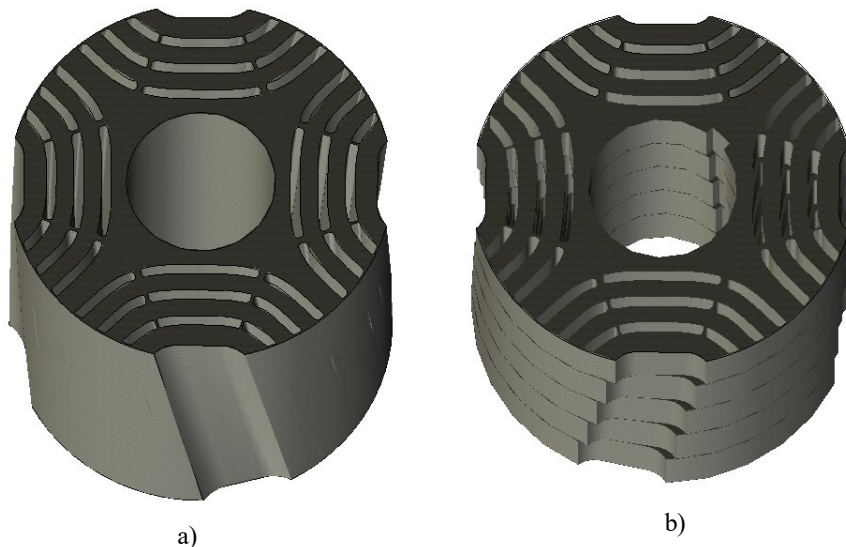
Rotora pola pārsedze ietekmēs maksimālo attīstāmo elektromagnētisko momentu, elektromagnētiskā momenta pulsācijas un slodzes leņķi, pie kura tiks attīstīts maksimālais elektromagnētiskais moments. Lielākai rotora pola pārsedzei būs raksturīgas mazāks elektromagnētiskais moments un mazākas momenta pulsācijas. Attēlā 2.28. att. parādītas aptuvenas sakarības rotora ģeometrijai ar vairākiem vienkāršojumiem [27]. Atbilstoši [21] 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 (2.23. att. b), tādā veidā rotors ir ideāls cilindrs, kas var būt ražošanas procesa nepieciešamība.



2.28. att. Pola pārsedzes ietekme uz SynRM elektromagnētisko momentu un tā pulsācijām

2.6.6. Rotora nobīde

Līdzīgi kā asinhronajam dzinējam, statora un rotora rievu ģeometrijas iespaidā gaisa spraugā tiek radītās 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. *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 (2.29. att. a), kam raksturīgs lielāks efekts uz augstāko harmoniku ierobežošanu, bet ražošana ir sarežģītāka un dārgāka salīdzinoši ar risinājumu (2.29. att. b), rotoru sadalot segmentos un nobīdi veidojot starp segmentiem. [19]

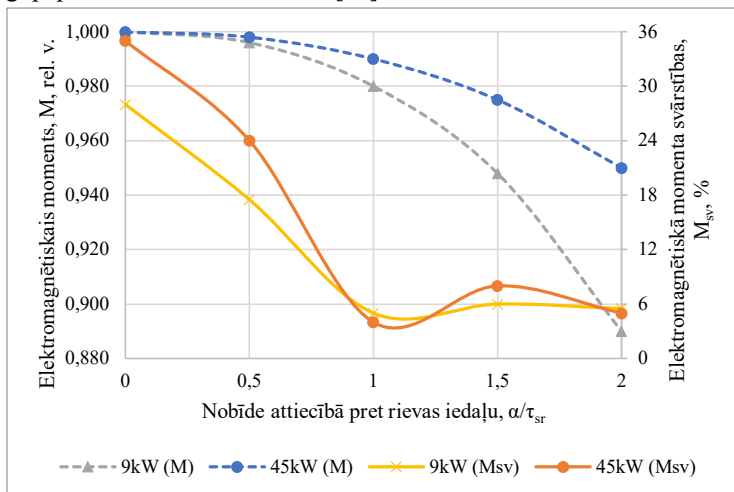


2.29. att. *SynRM* rotors ar nobīdi aksiālā virzienā: a) nobīdot katru elektrotehniskā tērauda loksni par nelielu leņķi; b) rotoru sadalot segmentos un nobīdi veidojot starp segmentiem

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. [27], [23] ziņots, ka konstrukcijām, kurām raksturīgas lielas elektromagnētiskā momenta svārstības, pielietojot nobīdi par vienu rievas iedaļu, svārstības iespējams samazināt par 25%, bet attīstāmais elektromagnētiskais moments samazinās par 1-2% (2.30. att.). Būtiski atzīmēt, ka [27], [23] nenobīdīta rotora elektromagnētiskā momenta svārstības (20-30%) ir ļoti lielas, potenciāli elektromagnētiskā momenta svārstības var būtiski samazināt ar mazāku iespaidu uz attīstāmo elektromagnētisko momentu, rotora konstrukcijā pielietojot pareizu statora rievu un rotora gaisa spraugu attiecību [7]. Rotora nobīde samazina maksimālo elektromagnētisko

momentu, primāri nosaka, vai izvēlētajam dizainam ir palielinātas momenta svārstības un vai tās nav iespējams samazināt ar citu paņēmieni.

Rotora nobīdītās gaisa barjeras veido ventilatora spārniem līdzīgu formu. Ja rotora gaisa spraugas nav aizsegtas ar paketi savienkošajiem elementiem vai piepildītas ar materiālu, piemēram, epoksīdu, gaisa barjeras radīs piespiedu gaisa cirkulāciju ar dzesējošu efektu, kam būs raksturīgi papildus mehāniskie zudumi [32].



2.30. att. Nobīdes ietekme uz *SynRM* elektromagnētisko momentu un tā pulsācijām, nobīde attiecināta pret statora rievas iedaļu

2.7. *SynRM* parametru aprēķins

SynRM projektēšanas būtiska sastāvdaļa ir projektētās mašīnas raksturlielumu aprēķins, kā enkura pretestības x_{ad} , x_{aq} , griezes momenta atkarība no slodzes lēnķa $M = f(\Theta)$, lietderības koeficients η , jaudas koeficients un daudzi citi parametri. Nepareizi aprēķināti parametri var izraisīt projekta apturēšanu projektēšanas stadijā, pārāk optimistiskus secinājumu izdarīšanu, nepareiza mašīnas vadības algoritma izvēli utt. *SynRM* reaktīvo pretestību aprēķināšana ir svarīga, jo tās nosaka dzinēja radīto griezes momentu un reaktīvās pretestības ir svarīgas dzinēja vadības sistēmas izstrādē.

Aprēķinot *SynRM* darba raksturlielnes $M_2 = f(\Theta)$; η , I , $\cos\phi = f(P_2)$, jāņem vērā enkura garenass pretestība x_{ad} un enkura šķērsass pretestība x_{aq} . Izteikt x_{ad} un x_{aq} no strāvas I , ņemot vērā savstarpējo magnētisko piesātinājumu dzinēja projektēšanas stadijā, ir sarežģīti, jo ir sarežģīti izveidot GEM modeli, ar kuru x_{ad} un x_{aq} var pareizi izteikt kā funkcijas no strāvas I . Modelējot garenass un šķērsass magnetizēšanās līkni $\Phi = f(F_{mag})$, x_{ad} un x_{aq} var izteikt no attiecīgās ass strāvas komponentēm I_d un I_q , bet šajā gadījumā netiek ņemta vērā savstarpējā magnētiskā iedarbība I_q strāvas ietekmei uz x_{ad} un I_d strāvas ietekmei uz x_{aq} .

Sinhronās reaktīvās mašīnas parametru aprēķināšanai mašīnas projektēšanas stadijā ir piedāvāti vairāki modeļi. Vēsturiski projektēšanā plaši izplatīti bija modeļi, kuri balstās uz

empīriskiem koeficientiem. Pateicoties datortehnoloģiju attīstībai, bija iespējams izveidot arvien sarežģītākus matemātiskos modeļus. Mašīnas parametrus būtiski iespaido magnētiskais piesātinājums, vairāki autori ir pētījuši magnētiskā piesātinājuma ietekmi uz garenlauka un šķērslauka induktīvajām pretestībām, kā arī izkliedes induktīvo pretestību [21], [33], [34]. Pastāv modeļi, kuros induktīvās pretestības ir izteiktas kā funkcijas tikai no attiecīgās ass indukcijas. Tomēr vairāku autoru darbos norādīts, ka I_q strāvas ietekme uz x_{ad} un I_d strāvas ietekme uz x_{aq} ir būtiska [33], [34], [35], [36]. Asu plūsmu savstarpējā ietekme apskatīta no dzinēja vadības viedokļa [37], [38]. Daudzos zinātniskos rakstos tiek pētītas *SynRM* projektēšanas problēmas, nerēķinot *SynRM* reaktīvās pretestības [39].

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 rezultātiem, 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 [40] metodi papildina ar magnētisko zudumu ievērošanu. Magnētiskos zudumus var aprēķināt no GEM indukcijas statora zobos un jūgā B_z un B_j un zoba, jūga tērauda masas, vai GEM apakšprogrammā, rēķinot *Bertotti* zudumus.

Tiek piedāvāts algoritms, balstoties uz kuru pretestības x_{ad} , x_{aq} un slodzes leņķis Θ ir aprēķina lielumi. Induktīvās pretestības tiek aprēķinātas un 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} . Aprēķina algoritms paredzēts rotoram bez aktīviem elementiem.

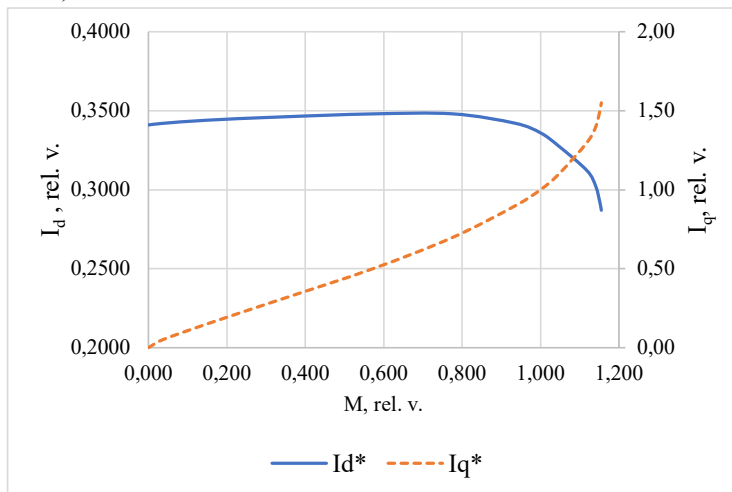
Algoritms balstās uz sinusoidālu maiņspriegumu, kaut arī praksē sinhronās reaktīvās mašīnas darbība gandrīz vienmēr tiek nodrošināta no frekvenču pārveidotāja. Mašīnas projektēšanas aprēķini parasti tiek veikti, pieņemot, ka darbību nodrošina sinusoidāls maiņspriegums [21]. Izstrādātais algoritms atšķiras no *Kampera* metodes [33] ar to, ka induktīvās pretestības tiek noteiktas, aprēķinot elektromagnētisko momentu ar galīgo elementu metodi un saskaņā ar vektora diagrammu (2.4. att.) tiek noteiktas enkura garenlauka x_{ad} un šķērslauka x_{aq} induktīvās pretestības.

Algoritma aprēķinu secība

Sinhronās reaktīvās mašīnas vektoru diagramma algoritma vajadzībām parādīta (2.4. att.). Aprēķinu algoritma darbību secība grafiski attēlota blokshēmā (2.32. att.). Algoritms ietver skaitlisko aprēķinu daļu un GEM aprēķinu daļu. GEM aprēķini tiek veikti, magnetostatiskam modelim uzdodot trīsfāžu tinuma magnetizējošos spēkus. Pāreju no strāvas garenass un šķērsass komponentēm uz trīsfāžu fāzes magnetizējošiem spēkiem izsaka ar Parka inversajām transformācijām (*inverse Park transformation*).

1. Pieņem I_d un I_q vērtības. I_d un I_q strāvas atkarībā no elektromagnētiskā momenta, 2.31. attēlā parādīta sakarība 180 kW *SynRM*, būs atkarīga no dažādiem projektam specifiskiem parametriem un vērtības sākotnējai pieņemšanai būs liels iespaids uz aprēķinu iterāciju skaitu. Sākotnējās vērtības var pieņemt:

- 1.1. garenass strāvu I_d uzdod, balstoties uz magnetizēšanas līkni $E_d = f(I_d)$, pie EDS vērtības, kura ir vienāda ar sprieguma maksimālo vērtību, vai nominālo spriegumu $E_d = U_{lim}$;
- 1.2. šķērsass strāvu I_q uzdod brīvi, robežās no 0 līdz strāvas maksimālajai vērtībai, vai nominālai strāvai $I_q = (0 - I_{lim})$. Vērtības izvēli būtiski ietekmēs, kādam slodzes režīmam tiek veikts aprēķins, attiecīgi, jo lielāka slodze M_2 , jo lielāks slodzes leņķis Θ , jo lielāka jāizvēlas I_q vērtība (3.31. att.).



2.31. att. *SynRM* I_d un I_q atkarība no slodzes

2. Ar pieņemtajiem I_d un I_q veic GEM aprēķinu, no kā iegūst elektromagnētisko momentu M_{em} un indukcijas gaisa spraugā pirmo harmoniku B_{lm} .
3. Aprēķina plūsmu Φ_1 (2.8.) un EDS no gaisa spraugas plūsmas pamat harmoniskās E_δ (2.9.).

$$\Phi_1 = \frac{D_{is}}{2} B_{lm} L, [\text{Wb}], \quad (2.8.)$$

$$E_\delta = \sqrt{2} \pi \omega f k_w \Phi_1, [\text{V}], \quad (2.9.)$$

kur L – statora aktīvais garums, m;

D_{is} – statora iekšējais diametrs, m.

4. Aprēķina jaudu:

4.1. elektromagnētisko jaudu P_{em} (2.10.), elektriskos zudumus ΔP_{el} (2.11.) un patērēto jaudu P_I (2.13.). Elektromagnētisko jaudu aprēķina no GEM noteiktā elektromagnētiskā momenta M_{em} ;

4.2. aprēķina magnētiskos zudumus. Magnētiskos zudumus var aprēķināt no GEM indukcijas statora zobos un jūgā B_z un B_j un zoba, jūga tērauda masas, (2.12.) vai GEM apakšprogrammas, rēķinot *Bertotti* zudumus;

$$P_{em} = \frac{f 2\pi}{p} M_{em}, [\text{W}], \quad (2.10.)$$

$$\Delta P_{el} = 3 I^2 R_{\sigma}, [\text{W}], \quad (2.11.)$$

$$\Delta P_{mag} = k p_{10} (B_j^{1.7} m_j + B_z^{1.7} m_z) + \Delta P_{FePAP}, [\text{W}], \quad (2.12.)$$

$$P_1 = P_{em} + \Delta P_{el} + \Delta P_{mag} = \frac{2\pi f}{p} M_{em} + 3 I^2 R_a + \Delta P_{mag} \text{ [W]}, \quad (2.13.)$$

kur p – polu pāri;

R_a – stator tinumu pretestība, Ω .

5. Aprēķina leņķus: fāžu nobīdes leņķi starp strāvu un EDS no gaisa spraugas plūsmas pamat harmoniskās φ_δ (2.14.), un elektrisko leņķi starp plūsmas pirmo harmoniku un garenasi Θ_δ (2.15.). Lai aprēķinātu leņķi Θ_δ , jānosaka leņķis starp pilno strāvu un strāvas šķērskomponenti Ψ (2.16.).

$$\varphi_\delta = \arccos\left(\frac{P_{em}}{3 E_\delta I}\right), \text{ [grādi]}, \quad (2.14.)$$

$$\Theta_\delta = \varphi_\delta - \Psi, \text{ [grādi]}, \quad (2.15.)$$

$$\Psi = \arctan\left(\frac{I_d}{I_q}\right), \text{ [grādi]}, \quad (2.16.)$$

6. Aprēķina enkura garenlauka induktīvo pretestību x_{ad} (2.17.) un enkura šķērslauka induktīvo pretestību x_{aq} (2.18.). Šķērslauka induktīvo pretestību izsaka no elektromagnētiskās jaudas vienādojuma (2.19.).

$$x_{ad} = \frac{E_\delta}{I_d} \cos(\Theta_\delta), \text{ } [\Omega], \quad (2.17.)$$

$$x_{ad} - x_{aq} = \frac{P_{em}}{3 I_q I_d}, \text{ } [\Omega], \quad (2.18.)$$

$$x_{aq} = x_{ad} - \frac{P_{em}}{3 I_q I_d}, \text{ } [\Omega], \quad (2.19.)$$

7. Aprēķina sprieguma aktīvo komponenti U_{akt} (2.20.), sprieguma reaktīvo komponenti U_{reakt} (2.21.) un pieslēgspriegumu U (2.22.).

$$U_{akt} = E_\delta \cos(\varphi_\delta) + R_a I, \text{ [V]}, \quad (2.20.)$$

$$U_{reakt} = E_\delta \sin(\varphi_\delta) + x_s I, \text{ [V]}, \quad (2.21.)$$

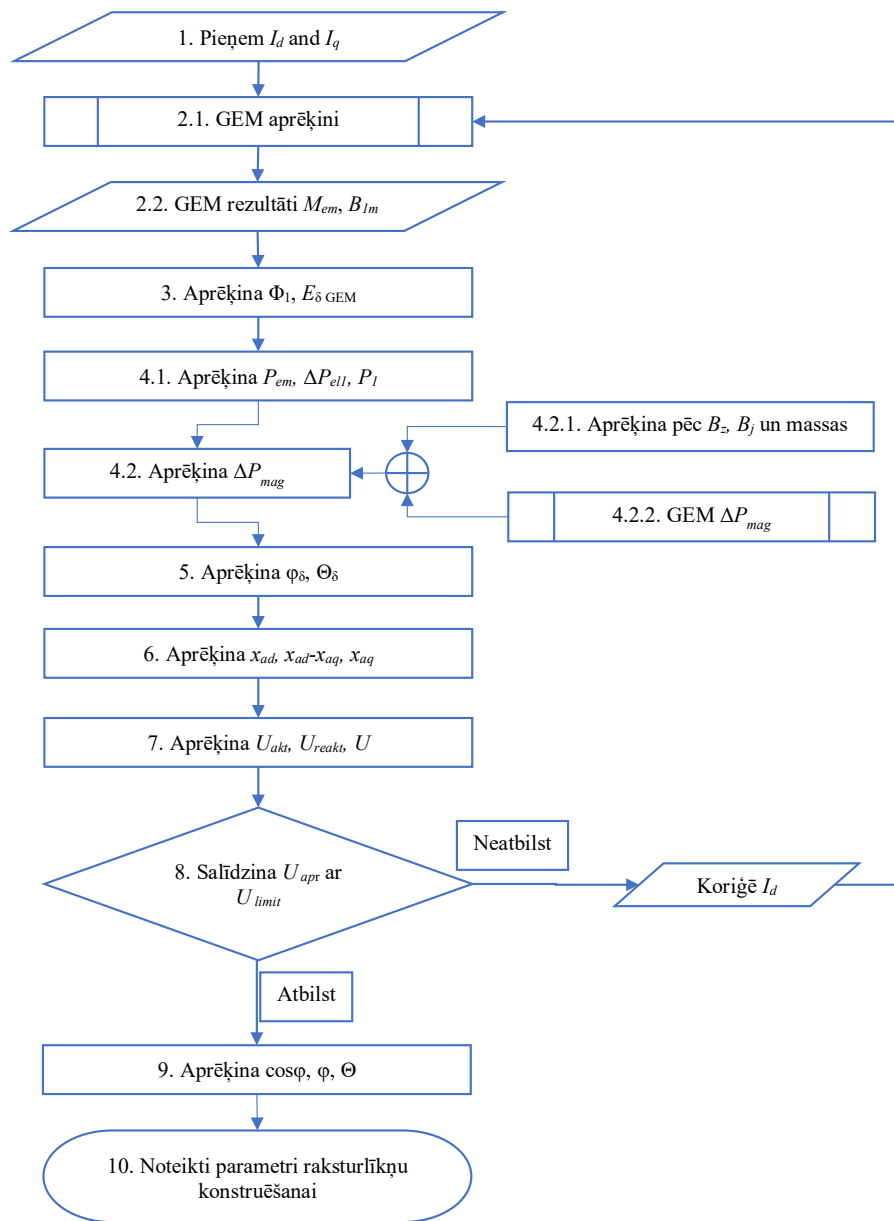
$$U = \sqrt{U_{akt}^2 + U_{reakt}^2}, \text{ [V]}, \quad (2.22.)$$

8. Pārbauda, vai sprieguma aprēķinātā vērtība ir vienāda ar sprieguma uzdoto vērtību vai nominālo spriegumu. Ja vērtības nesakrīt ar noteiktu precizitāti maina strāvu I_d un atkārtoti GEM aprēķinus un soļus 2 – 7, līdz tiek sasniegta noteiktā precizitāte.

9. Aprēķina jaudas koeficientu $\cos\varphi$ (2.23.) un slodzes leņķi Θ (2.24.).

$$\varphi = \arccos\left(\frac{U_{akt}}{U}\right), \text{ [grādi]}, \quad (2.23.)$$

$$\Theta = \varphi - \Psi, \text{ [grādi]}, \quad (2.24.)$$



2.32. att. Raksturlīkņu aprēķina algoritma darbību secība

2.8. Galīgo elementu metodes lietojums projektēšanā

SynRM projektēšanā šī darba ietvarā un vispārīgi modernu elektrisko mašīnu projektēšanā plaši pielietota ir elektromagnētisko lauku aprēķina skaitliskā metode – galīgo elementu metode

(GEM). GEM elektrisko mašīnu modelēšanā sāka plaši lietot iepriekšējā gadsimta sešdesmitos gados, saistībā ar skaitļošanas mašīnu veiktspējas attīstību. Kaut metode ir ilgi un plaši lietota, autora ieskatā ir lietderīgi paskaidrot tās pielietošanu tieši *SynRM* elektromagnētiskā lauka modelēšanā. Modernas GEM datorprogrammas ir intuitīvas, salīdzinoši viegli pielietojamas. To izmantošanai lietotājam nav nepieciešamas speciālas datorprasmes vai zināšanas skaitliskajās metodēs, kas ir viens no galvenajiem iemesliem to plašai pielietošanai elektrisko mašīnu projektēšanā. Latviešu valodā apraksts par modernu GEM datorprogrammas pielietošanu elektrotehnikā lasāms [41] avotā. GEM dod iespēju noteikt magnētiskā lauka sadalījumu ierobežotā apgabalā (turpmāk robežnosacījumi), dažādu konstrukciju elektriskajās mašīnās (turpmāk ģeometrija), ģeometriju pārklājot ar galīga skaita ģeometriskiem elementiem, parasti trijstūra elementiem (turpmāk režģis, vai tīkls) un risinot vienādojumus, kas elektromagnētiskā lauka gadījumā ir Maksvela vienādojumi. Datorprogrammas modeļa apraksta soļi un to secība parādīti 2.33. attēlā.

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*.



2.33. att. Darbību secība, aprakstot modeli programmā FLUX

Datorprogrammā modelē divu dimensiju lauku, balstoties uz pieņēmumu, ka *SynRM* mašīnas elektromagnētiskais lauks ir plakanparalēls un frontālo daļu ietekme uz rezultātiem ir labi izpētīta. *SynRM* stators un tā tinums būtiski neatšķiras no citu sinusoidāla tinuma maiņstrāvas mašīnu statoriem un tinuma frontālo daļu ietekme uz *SynRM* būs tāda pati. Datorprogramma *Flux*, tāpat kā citas GEM datorprogrammas, piedāvā iespēju modelēt trīs dimensiju magnētisko lauku. Tomēr trīs dimensiju modelēšana ir būtiski sarežģītāka no modeļa aprakstīšanas viedokļa un vairākkārt prasīgāka pret skaitļošanas tehniku, kā rezultātā neiztikt bez modeļa vienkāršojošiem un papildus simetrijas, un periodiskuma robežnosacījumiem. Autors ieskatā trīs dimensiju lauku lietderīgi modelēt, pētot specifiskas trīs dimensiju problēmas, bet ne vispārīgā *SynRM* projektēšanā.

GEM datorprogrammas *Flux* pielietojums elektriskās mašīnas magnētiskā lauka modelēšanai aprakstīts [42] avotā. Ģeometrijas aprakstā tiek ievadīta pētījuma objekta konstrukcija, kura definēta ar taisnām vai liektām līnijām un punktiem līnijas galos, pēc kā datorprogramma pati izveido laukuma vienības un tilpuma vienības 3D uzdevumiem. Izveidotajai ģeometrijai piešķir koordinātu sistēmu, sadalot rotoru un statoru ģeometriju, katru savā koordinātu sistēmā iespējams modelēt elektriskās mašīnas rotāciju.

Pēc aprakstītās modeļa ģeometrijas var veidot modeļa galīgo elementu režģi jeb tīklu. Autors ieskatā GEM veiksmīgas pielietošanas būtiskākais solis ir izvēlēties uzdevumam atbilstošu galīgo elementu tīklu, no kā būs atkarīga aprēķina precizitāte un aprēķinu laiks. Uzdevumam atbilstoša tīkla izveidei nepieciešama pieredze un intuīcija. Lielākajā daļā

datorprogrammu t.s. *Flux* galīgo elementu tīklu iespējams izveidot pastāvīgi, nosakot katras līnijas trīsstūra virsotņu skaitu, kas nosaka galīgo elementu izmēru, vai automātiski, tad datorprogramma atkarībā no ģeometrijas sarežģītības automātiski izvēlas galīgo elementu virsotņu skaitu un elementu izmēru. Tīkla izveidi var kombinēt, tas ir, dažām zonām piešķirt tīkla informāciju pastāvīgi, bet citām izmantot tīkla izveides palīgfunkciju.

Ģeometrijas un tīkla apraksts būtiski neatšķirsies neatkarīgi no tā, vai tiek modelēta elektromagnētiskās, termodinamikas vai mehānikas problēma. Fizikas aprakstā definē aplikāciju, robežnosacījumus, materiālu īpašības un avotu veidu un parametrus. *SynRM* projektēšanā lielākoties var iztikt ar magnetostatiska magnētiskā lauka modelēšanu. Laikā mainīgam magnētiskām laukam raksturīgu parādību modelēšanai lielākoties var attiecināt magnetostatiska magnētiskā lauka modelēšanas rezultātus, tomēr pārejas procesa magnētiskā lauka modelēšanu ieteicams pielietot *SynRM* elektromagnētiskā momenta svārstību, virpuļstrāvu un histerēzes zudumu modelēšanai. Datorprogrammā magnetostatiska lauka modelēšanai lietotājs definē lauka avota strāvas momentānās vērtības vai pastāvīgo magnētu spēku un veic lauka modelēšanu šim noteiktajam laikam, bet modelēto lauka rezultātu attiecināšana uz rotējošu mašīnu ar laikā mainīgu magnētisko lauku paliek lietotāja pārziņā. Pārejas procesu magnētiskā lauka modelēšanai datorprogrammas lietotājs definē laikā mainīgās strāvas izmaiņas sakarību, magnētu spēku un rotora rotācijas kustību.

Ar robežnosacījumiem nosaka GEM modelēšanas apgabalu. Galvenais robežnosacījums, bez kura modelēšana nav iespējama, ir robeža, aiz kuras magnētiskais lauks neturpinās, ar ko apraksta reālu magnētisko lauku, kas relatīvi netālu no magnētiski mīksta materiāla ārējās robežas ir niecīgs, bet teorētiski magnētiskais lauks ir bezgalīgs galīgā attālumā. Papildus modeļa vienkāršošanas nolūkos var izmantot periodiskuma un simetrijas robežas.

Modeļa fizikas apraksta būtiska daļa ir elektrisko, magnētisko un materiālu īpašību piešķiršana ģeometriskiem elementiem – punkts, līnija, laukums un tilpums. Pēc piešķiramajām īpašībām elementus var dalīt: gaiss vai vakuums; magnētisks reģions, kas ir strāvu nevadošs; strāvu vadošs reģions. Strāvu vadošu reģionu apraksta ar magnetizējošo spēku, strāvas blīvumu vai vijuma strāvu un vijumu skaitu. Magnētiskiem reģioniem piešķir materiāla magnētiskās īpašības, *SynRM* elektrotehniskam tēraudam $B(H)$ magnetizēšanās līkni. Ja pētāmās problēmas ietvars to pieļauj, modeli būtiski var vienkāršot, neaprakstot rievās, spoles un vadu izolācijas, kuru relatīvā magnētiskā caurlaidība tuva $\mu_r \sim 1$.

Modelim ar aprakstītu ģeometriju, fiziku un galīgo elementu tīklu iespējams risināt Maksvela vienādojumus, pēc kuru atrisināšanas datorprogrammā *Flux* iegūst vektorpotenciālu elementu virsotnēs. No GEM aprēķina iespējams iegūt indukcijas sadalījumu gaisa spraugā, indukciju zobā vai jūgā, rotora elektromagnētisko momentu, plūsmu vai plūsmas saķēdējumu. Modelējot rotācijas kustību, iespējams novērtēt elektromagnētiskā momenta svārstības vai spoles EDS. Magnetostatiska magnētiskā lauka modelēšanai datorprogrammā *Flux* tiek aprēķināts vektorpotenciāls pēc (2.25.) vienādojuma un pārejas procesu maiņstrāvas lauka modelēšanai tiek aprēķināts vektorpotenciāls pēc (2.26.) vienādojuma.

$$\text{rot}(v_0[v_r]\text{rot}(\vec{A}) - \vec{H}_c) = \vec{J}_s, \quad (2.25.)$$

$$\text{rot}(v_0[v_r]\text{rot}(\vec{A}) - \vec{H}_c) + [\sigma] \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \text{grad } V \right) = 0, \quad (2.26.)$$

kur ν_0 – vakuuma magnētiskā pretestība, kas apgriezti proporcionāla vakuuma magnētiskajai caurlaidībai, $\nu_0 = \frac{1}{\mu_0}$, m/H;

$[\nu_r]$ – vides relatīvās pretestības tenzors;

$\vec{A}$ – vektorpotenciāls, Wb/m;

$\vec{H}_c$ – uzspiests magnētiskais lauks (pastāvīgie magnēti), A/m;

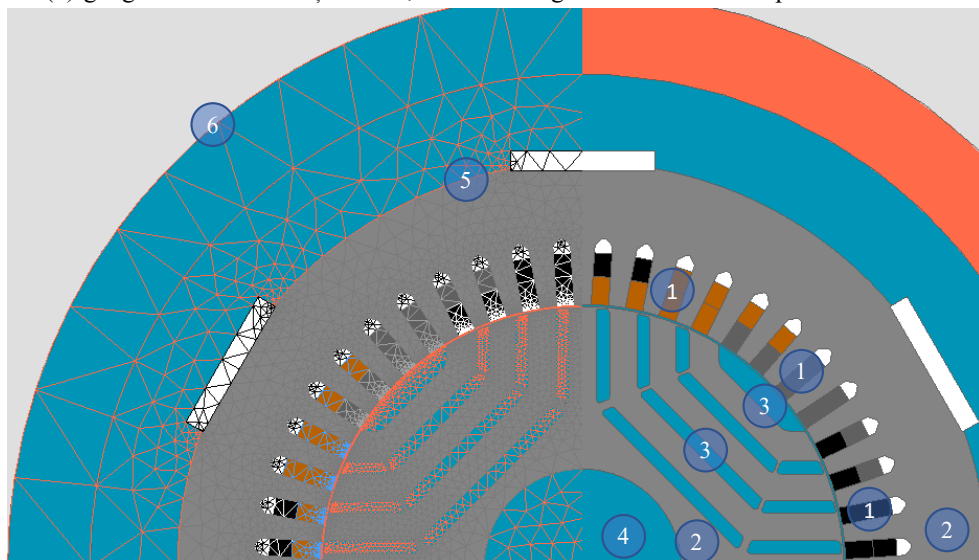
$\vec{J}_s$ – stāvas avota intensitāte, A/m²;

$[\sigma]$ – vides vadītspējas tenzors, S;

V – elektriskais skalārais potenciāls.

SynRM GEM modelis parādīts 2.34. attēlā:

- (1) trīsfāžu divslāņu tinums uzdots ar rievas strāvu [A]. Uzdotot 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.



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

3. SINHRONĀS REAKTĪVĀS MAŠĪNAS SLĒGTAS KONSTRUKCIJAS DZESĒŠANAS SISTĒMA

Nodaļa veltīta īsam elektrisko mašīnu dzesēšanas sistēmas aprakstam, lai piešķirtu kontekstu darbā pētītajai problēmai – izgatavot augstas efektivitātes sabiedriskā transporta piedziņas elektrodzinēju ar slēgtu konstrukciju. Kā risinājums tiek piedāvāts – trolejbusa pielietojuma 180kW *SynRM* ar atvērtu konstrukciju un piespieda gaisa cirkulācijas aizstāt ar inovatīvu dzesēšanas sistēmu – siltumcilpu, kuras darbības princips balstīts uz siltumnesēja agregārstāvokļa maiņu.

3.1. *SynRM* dzesēšanas sistēmas

Elektriskajās mašīnās 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 svārs 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.

Zemāk tiks apskatīti ar darbu saistītie galvenie elektriskās mašīnas dzesēšanas veidi. Nodaļas mērķis nav aprakstīt visus iespējamās elektriskās mašīnas dzesēšanas veidus. Atbilstoši starptautiskās elektrotehniskās komisijas (*IEC*) standartam *LVS EN 60034-6:2002* piešķirot dzesēšanas sistēmas *IC* kodu (*International Cooling*), klasificējami 10x9x7 dažādi elektriskās mašīnas dzesēšanas sistēmas veidi. *IC* kodu pirmais cipars apraksta dzesēšanas sistēmas veidu un siltumapmaiņas procesu no mašīnas iekšējās daļas uz dzesēšanas sistēmu, kopā piešķirami 10 cipari no 0 līdz 9. *IC* koda otrais burts apraksta siltumnesēju, kopā piešķirami 9 burti. *IC* koda trešais cipars apraksta siltumnesēja cirkulācijas metodi, kopā piešķirami 7 cipari no 0 līdz 9, cipari 2, 3, 4 šobrīd nav aktīvi un rezervēti nākotnei.

Dabīgā pasīvā dzesēšana IC00

Materiālu siltumvadītspēja nosaka siltuma pārnesei dzinēja aktīvās daļās. Dzinējam ar dabīgo pasīvo dzesēšanu siltuma pārnesei nodrošina tikai dzinēja elektromagnētiskai sistēmai, mehāniskai sistēmai un korpusam izmantotie materiāli. Elektriskajā mašīnā izmantoto materiālu vadītspējas būs ļoti atšķirīgas, piemēram, pie 27 °C gaisa ~ 0,024 W/m/K, elektrotehniskā tērauda ~ 29 W/m/K, vara ~ 400 W/m/K. Lielākai daļai materiālu vadītspēja ir atkarīga no materiāla temperatūras, piemēram, pie 127 °C gaisa ~ 0,03 W/m/K, elektrotehniskā tērauda ~ 25 W/m/K, vara ~ 390 W/m/K. Dabīgās pasīvās dzesēšanas sistēmas efektivitāti galvenokārt ierobežo dzinēja korpusa siltumapmaiņa ar sliktu siltumvadītāju – gaisu.

Izmantojot dabīgo dzesēšanu, elektrodzinēja elementu izvietojums un apkārtējās vides enerģija izkļied siltumu. Šajā gadījumā elektrodzinēja korpuss ir galvenā daļa, caur kuru siltums no iekšējiem elektrodzinēja elementiem tiek pārnests uz apkārtējo vidi. Siltuma pārnese konvekcijas ceļā tiek uzlabota, optimizējot korpusa dizainu. Dabiskā siltuma pārnese no elektrodzinēja virsmas uz apkārtējo vidi tiek uzlabota, ja dzinēja korpusu izveido ar dzesēšanas ribām.

Dabīgās pasīvās dzesēšanas sistēmas priekšrocības ir lētums, vienkāršums un sistēma nepatērē papildus enerģiju vai nerada papildus mehāniskos zudumus.

Piespiedu dzesēšana

Piespiedu vai aktīvā dzesēšana sistēma būtiski uzlabo dzesēšanas apstākļus un attiecīgi pielietojams lielāks stāvas blīvums, salīdzinot ar pasīvo dzinēja dzesēšanu. Salīdzinot ar pasīvo dzesēšanas sistēmu, piespiedu dzesēšanas sistēmai ir nepieciešamas papildu ārējās ierīces un papildu enerģijas avots, kas padara dzinēja konstrukciju sarežģītāku un pieaug izmaksas. Tomēr piespiedu dzesēšana ļauj konstruēt elektrodzinējus ar lielāku jaudas blīvumu.

Piespiedu dzesēšana ar gaisu IC01

Piespiedu gaisa dzesēšanas sistēma sastāv no uz vārpstas uzstādīta ventilatora, kas radītu gaisa plūsmu caur elektrodzinēju. Galvenās gaisa dzesēšanas priekšrocības ir sistēmas vienkāršums, lētums un dzesēšanas vienmērīgums.

Uz vārpstas uzstādītā ventilatora efektivitāti ierobežo rotora ātrums. Tādējādi gaisa dzesēšanas veiktspēja ir zemāka nekā citām piespiedu dzesēšanas metodēm. Pielietojot frekvenču pārveidotāju, jāņem vērā dzesēšanas sistēmas veiktspējas atkarība no rotācijas ātruma.

Ventilators var būt uzstādīts korpusa iekšienē vai ārpus tā. Mašīna var būt atvērtas vai slēgtas konstrukcijas. No dzesēšanas viedokļa efektīvākā ir atvērtai mašīnas konstrukcija, tomēr atvērtas konstrukcijas mašīnām ir ierobežots pielietojums.

Piespiedu dzesēšana ar šķidrumu

Augstas veiktspējas slēgtam elektrodzinējam piespiedu dzesēšana ar šķidrumu var būt labāka izvēle galvenokārt labākas siltuma pārnese veiktspējas un mazāku dzesēšanas sistēmas izmēra dēļ. Šķidrumiem ir lielāka siltumietilpība nekā tādas pašas masas gaisam, ūdens $\sim 0,6 \text{ W/m/K}$, etilēnglikols $\sim 0,25 \text{ W/m/K}$. Šķidruma dzesēšana, kas pazīstama arī kā dzesēšanas apvalks, izmanto konvekciju, lai maksimāli palielinātu siltuma pārnesei, šķidrumam pārvietojoties pa mērķa apgabalu [43]. Izmanto arī šķidruma dzesēšanas ar kanāliem, kas uzstādītas tinumu spraugās vai statora jūgā, vai lielas jaudas mašīnās tinuma vidū plūst dzesēšanas šķidrums. Jo tuvāk dzesēšanas šķidrums ir novietots siltuma avotam, jo zemāka būs termiskā pretestība. Ievietojot dzesēšanas kanālus pie rievām, samazinās magnētiskās serdes aktīvā daļa, kā rezultātā tiks iespaidota dzinēja veiktspēja, vai ir jāmaina elektrodzinēja geometrija. Projektējot augstas veiktspējas vilces elektrodzinēju, ieteicams elektromagnētisko un termisko sistēmu skatīt vienlaikus.

Parasti dzesēšanas sistēma ar šķidrumu sastāv no radiatora, sūkņa un kanāliem, caur kuriem cirkulē siltumnesējs. Šādas sistēmas izmanto šķidrumu kā dzesēšanas šķidrumu (parasti eļļu vai ūdeni), lai noņemtu siltumu konvekcijas ceļā [44]. Ūdens ir visizplatītākais dzesēšanas šķidrums, ko izmanto šķidruma dzesēšanas sistēmās, ar labu dzesēšanas vienmērīgumu. Eļļas dzesēšanai ir augsta dzesēšanas veikspēja un to ļoti plaši pielieto transformatoru dzesēšanā.

Lai gan šķidruma dzesēšana nodrošina augstu konvekcijas siltuma pārnese spēju, tai ir vairāki trūkumi. Galvenais trūkums ir: elektrodzinējs tiek papildināts ar sarežģītu konstrukciju, kas sastāv no vairākiem elementiem, kas palielina visas sistēmas gabarītus un svaru, kā arī samazina elektrodzinēja drošumu un efektivitāti [45]. Papildu šķidruma dzesēšanas sistēmas trūkumi ir īssavienojuma risks, korozija un piesārņojuma risks.

Šķidruma dzesēšana kas balstās uz siltumnesēja agregātstāvokļa maiņu

Šķidruma dzesēšanas princips ar siltumnesēja agregātstāvokļa maiņu ir sekojošs, ka dzesēšanas šķidrums (šķidrā stāvoklī) tiek iesūkņēts dzesēšanas sistēmā. Dzesēšanas šķidrums absorbē siltumenerģiju, ar kuru dzesēšanas šķidrums maina savu stāvokli no šķidra uz gāzveida. Gāze caur kanāliem tiek virzīta uz kondensatoru, kur tā atbrīvo siltumenerģiju un kondensējas atpakaļ šķidrumā. Dzesēšanas sistēmas, kuras pamatā ir siltumnesēja agregātstāvokļa maiņa, nodrošina lielāku siltuma izkliedes ātrumu paaugstinātā darba temperatūrā [46]. Šādu dzesēšanas sistēmu siltuma pārnese spēja ir atkarīga no saskares virsmas laukuma, izmēra un temperatūras starpības starp iztvaikotāju un kondensatoru [47]. Uz fāzes maiņu balstītai šķidruma dzesēšanai ir augsta siltuma pārnese jauda ar kompaktiem izmēriem un svara ziņā vieglu konstrukciju [48]. Šādas dzesēšanas metodes galvenā priekšrocība ir tā, ka tai nav ārēja barošanas avota.

Tabulā 3.1. uzskaitītas dažādas dzesēšanas metodes un tām raksturīgie parametri: strāvas blīvums j , lineārais strāvas blīvums A_l , tangenciālais spriegums σ un siltuma pārnese koeficients h . Dzesēšanas sistēma ar agregātstāvokļa maiņu ir relatīvi jauna tehnoloģijā un tās siltumvadītspēja parādīta ļoti plašā diapazonā no 1,5 līdz 50 W/m²K.

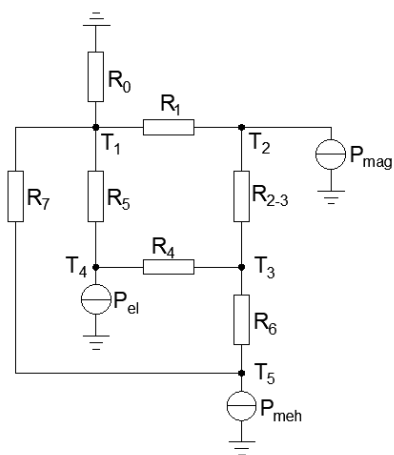
3.1. tabula

Dažādu dzesēšanas sistēmu veikspējas salīdzinājums [19], [48]

Dzesēšanas metode		Aptuvenās vērtība			
		σ , kPa	A_l , kA/m	j , A/mm ²	h , W/m ² K
Dabīgā konvekcija		-	-	1.5-5	5-30
Piespiedu gāzes cirkulācija	Gaiss	<15	<80	5-10	20-300
	Ūdenradis	<25	90-110	7-12	(0.1-1) × 10 ³
Piespiedu šķidruma cirkulācija	Netieša	<60	90-110	7-20	(0.1-10) × 10 ³
	Tieša	60-100	100-200	10-30	(0.2-25) × 10 ³
	Agregātstāvokļa maiņa	-	-	-	(1.5-50) × 10 ³

3.2. *SynRM* termiskā ekvivalentā shēma

Sinhronā reaktīvā dzinēja siltumapmaiņas procesu modelēšanai var izmantot termisko ekvivalento shēmu. Ekvivalentā shēma sastāv no siltuma avotiem, termiskajām pretestībām elementiem un mezglu punktiem kuros nosakāmas temperatūras. Siltuma avoti ir elektriskie, magnētiskie un mehāniskie zudumi elektriskajā mašīnā. *SynRM* siltumapmaiņas procesu aprakstošā ekvivalentā shēma parādīta 3.1. attēlā, ar galveno vienkāršojumu – apskatot siltuma plūsmu tikai radiālā virzienā. Vienkāršojums pieņemts ņemot vērā siltumcīlpas dzesēšanas sistēmas novietojumu pie mašīnas korpusa uz statora paketes aktīvās daļas. Temperatūru aprēķinam shēmas mezglu punktos [T] aprēķina termiskās pretestības R_0 - R_7 , kurus izsaka termisko vadītspēju matricā [G], un to reizina ar zudumu matricu [P], jeb $[T] = [G] \cdot [P]$. Termisko pretestības R_0 - R_6 aprēķins neatšķirsies no citu trīsfāžu maiņstrāvas mašīnu pretestības aprēķina, tas ir aprakstīts plaša spektra literatūras avotos no zinātniskām publikācijām līdz elektrisko mašīnu projektēšanas rokasgrāmatām, kur autora ieskātā ieteicams apskatīt [19], [49] literatūras avotus. Rotorā termiskā pretestība R_7 būs atkarīga no rotora konstrukcijas. Vairākos literatūras avotos aprakstīta tieši *SynRM* termiskā ekvivalentā shēma, kur, autora ieskātā, ieteicams apskatīt [50], [51], [52] literatūras avotus.



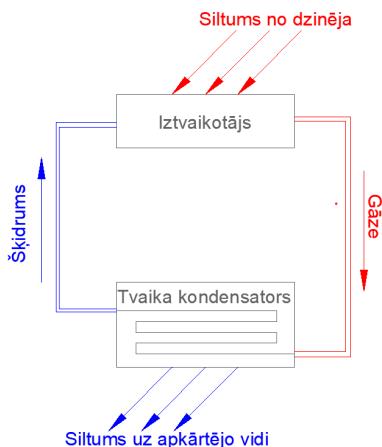
- R_0 – apkārtējās vides siltumvadošs slānis;
- R_1 – statora jūga augšējās daļas siltuma vadīšanas pretestība;
- R_{2-3} – statora jūga iekšējās daļas un statora zoba siltuma vadīšanas pretestība;
- R_4 – siltuma vadīšanas pretestība starp statora rievu un statoru;
- R_5 – siltuma vadīšanas pretestība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

3.1. att. *SynRM* termiskā ekvivalentā shēma

3.3. Siltumcīlpas dzesēšanas sistēma

Šķidruma dzesēšanas sistēmu, kuras darbības pamatā ir siltumnesēja agregātstāvokļa maiņa ar dabisko siltumnesēja cirkulāciju noslēgtā kontūrā, sauc par siltumcīlpas. Angļu valodā tiek izmantots termins *heat pipe thermosyphon* (turpmāk *HL*). Siltumcīlpas pamatā ir siltumnesēja agregātstāvokļa maiņa iztvaikotājā no šķidruma uz gāzi un tvaika kondensatorā no gāzes uz šķidrumu. Siltumcīlpas 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

Ar siltumcilpas dzesēšanas sistēmu iespējams izgatavot noslēgtas konstrukcijas elektrisko mašīnu kurai nav jāparedz elektrodzinēja papildus aizsargāšana no apkārtējās vides iedarbības. Siltumcilpas dzesēšanas sistēmā no mašīnas novadītais siltums pa siltumnesēja kanāliem tiek pārvadīts un atdots apkārtējai videi kondensatorā/radiatorā, kas var būt attālināts no mašīnas. Kondensatoru iespējams uzstādīt attālināti no mašīnas mazāk svarīgās vietās, vai transporta aplikācijā, apkures sezonā siltumu izmanto sabiedriskā transporta apsildē, uzlabojot kopējo transportlīdzekļa elektroenerģijas patēriņa bilanci.

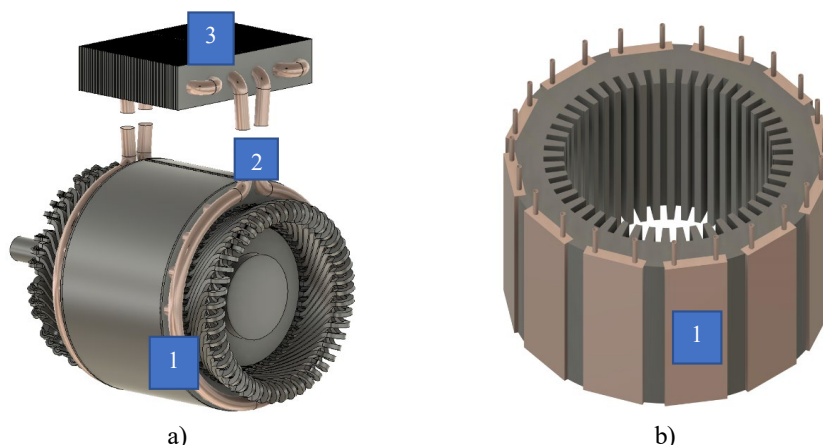
Siltumcilpa sastāv no siltuma kolektora, kas ir izlvaikotāju komplekss ar termiskām saskarēm ar elektrisko mašīnu, siltumnesēja pārvades kanāliem (tvaika un šķidrums līnijas) un kondensatora, elementu, kurā siltumu atdod apkārtējai videi. Sistēmas izvietoums ļauj noslēgt elektrodzinēju putekļu necaurlaidīgā apvalkā. Siltumcilpas dzesēšanas sistēmas projektēšana ir saistīta ar trīs galvenajiem uzdevumiem: siltuma savākšanu, siltuma pārnešanu un siltuma izkliedi. Grafisks siltumcilpas dzesēšanas sistēmas skaidrojums parādīts 3.3. attēlā, kur:

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

Projektēšanas un izgatavošanas ziņā tehniski sarežģītākais siltumcilpas elements ir siltuma kolektors. Projektējot kolektoru jātiecas uz augstu dzesēšanas sistēmas veiktspēju būtiski nepasliktinot elektrotehniskos parametrus, kas ir būtisks izaicinājums. No praktiskās puses izstrādājot siltumcilpas dzesēšanas sistēmu, kas plašāk aprakstīta nākamajā nodaļā, iezīmējās vairāki būtiski izaicinājumi:

1. Elektrodzinējs ir labi sabalansēta elektromehāniskā sistēma, tāpēc jebkura nopietna iejaukšanās tā konstrukcijā var izraisīt tā veiktspējas samazinājumu.

2. Sistēma nedrīkst būt pārāk sarežģīta. Sistēmas sarežģītība samazina turpmākās masveida ražošanas iespējas.
3. Lai saglabātu sistēmas kompaktnumu, jāizmanto siltumnesējs ar augstu iztvaikošanas siltumu.
4. Siltumnesējam jābūt netoksiskam un videi draudzīgam.



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

Darba izmantotās siltumcilpas dzesēšanas sistēmas apraksts

Darba ietvarā izvēlēts siltumnesējs, kas atbilst iepriekš minētajām prasībām ir šķidrumam ar lieliskiem termiskajiem parametriem – ūdens. Ūdens izmantošana savukārt uzliek ierobežojumus siltumcilpas elementu materiāliem. Saderīgākais pāris ir varš-ūdens, kas nodrošina ilgu siltumcilpas elementu darba mūžu, jo sistēmā neizdalās nekondensējamās gāzes un nav korozijas. Tāpēc visām detaļām, kas saskaras ar ūdeni, jābūt izgatavotām no vara.

Elektrodzinēja lielākās temperatūras ir pie statora tinumiem, tāpēc siltuma kolektora iztvaikotājus vēlams novietot pēc iespējas tuvāk tinumiem. Tinumi atrodas vistālākajā punktā no elektrodzinēja korpusa. Šī iemesla dēļ tika izskatīts risinājums kurā iztvaikotāja kanāli tiek izvietoti statora rievās 3.3. attēlā (a). Risinājums plašāk aprakstīts ar GEM modelēšanas rezultātiem šīs nodaļas nākamajā apakšnodaļā. Pilnas konstrukcijas mašīnai, kas aprakstīts darba nākamajā nodaļā, risinājums, ar kanāliem statora rievās, netika izmantots tā izgatavošanas sarežģītības un ievērojamās ietekmes uz elektrodzinēja elektromagnētiskajām īpašībām dēļ. Gala konstrukcijai izvēlēts risinājums uzstādot iztvaikotājus uz statora virsmas. Iztvaikotājus izgatavo taisnstūrveida formas. Shematisks izkārtojums ar 12 siltumcilpas iztvaikotājiem parādīts 3.3. attēlā (b). Siltuma pārnese sistēmas darbībā bez siltumnesēja agregātstāvokļa maiņas siltumnesēja cirkulāciju papildus veicina termosifona princips, ko panāk tvaika kondensatorus novietojot virs elektriskās mašīnas, virs iztvaikotājiem. Katram siltumcilpas komplektam ir jānovada, jeb jānodzesē 1/12 no mašīnas pilnas jaudas. Piedāvātais modulārais risinājums atvieglo siltumcilpas projektēšanas, izgatavošanas un pārbaudes

procesu. Eksperimentālu pārbaudi var veikt 1/12 pilnas mašīnas konstrukcijas, kas būtiski samazina izmaksas un eksperimentālās fāzes laiku.

Darbam izvēlētai mašīnai 180 kW, $D_a = 493$ mm, $L = 290$ mm piemērota izmēra iztvaikotāja (290 mm x 80 mm x 12 mm) izgatavošana ir izaicinājums pats par sevi. Pirmkārt, iztvaikotājam jāspēj izturēt vairāku atmosfēru lielu spiedienu, vienlaikus saglabājot savu formu. Tika izstrādāts kameras mehāniskais modelis un veikti stiprības aprēķini. Otrkārt, ūdenim jābūt vienmērīgi sadalītam pa iztvaikotāja siltuma apmaiņas virsmu (kameras apakšā). To var panākt, siltummaiņas virsmu izgatavojot ar porainu struktūru – poras raksturojamas ar dakts formu. Dakts palielina siltuma apmaiņas virsmu, palielinot iztvaikotāja efektivitāti. Iztvaikotāja dakts tika izgatavots, vakuumā stiprinot vara pilienus pie iztvaikotāja virsmas.

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 [53]. Galvenās metodes priekšrocības, kāpēc galīgo elementu metode tiek izmantota tik plaši, ir iespēja matemātiski modelēt un skaitliski atrisināt sarežģītas problēmas [54]. Pielietojot GEM iespējams modelēt sarežģītākus termiskos procesus elektriskajā mašīnā salīdzinot ar iepriekšējā apakšnodaļā apskatīto *SynRM* temperatūru aprēķinu ar ekvivalentās shēmas parametriem, kurā pieņemta virkne vienkāršošanu. Modernas GEM datorprogrammas dod iespēju risināt dažādu fizikas nozaru problēmas vienlaicīgi, piemēram elektriskās mašīnas modelim vienlaicīgi risinot elektromagnētisko un termisko aprēķinu [55]. Autora pieredze GEM pielietošanā galvenokārt saistīta ar elektromagnētisko procesu modelēšanu, bet jāatzīmē divi darbi [56], [57] kuros pētīta, salīdzināta un aprakstīta GEM lietošana *SynRM* termiskajā modelēšanā, kuru tapšanā autoram ir bijusi konsultanta loma.

Termodinamikas problēmas GEM datorprogrammas modeļa apraksta secība neatšķiras no magnetoelektriskā modeļa apraksta soļiem, atšķiras fizikas apraksta daļā ievadāmie parametri un datorprogrammas risinātie vienādojumi (3.4 att.). Fizikas aprakstā tiek definēti materiāli kurus galvenokārt uzdod ar siltumvadītspējas koeficientiem. Robežnosacījumu definēšana termodinamikas modelim būs atšķirīga no magnetoelektriskā modeļa, kur magnetoelektriskam modelim parasti var iztikt ar vienu robežnosacījumu – robeža aiz kuras magnētiskais lauks neeksistē. Rotējošās elektriskās mašīnas termodinamikas modelim būs jāuzdod robežnosacījumi uz mašīnas ārējās virsmas, kuru siltumvadītspējas koeficienti būs būtiski atšķirīgi ne tikai no korpusa materiāla, bet arī no dzesēšanas sistēmas veida. Arī jāņem vērā, ka siltumvadītspējas koeficienti daļai materiālu un dzesēšanas sistēmu veidu būs mainīgi, atkarībā no temperatūras, no rotācijas ātruma un citiem parametriem. Būs nepieciešams uzdod robežnosacījumus uz vārpstas, ar ko apraksta siltumu, kas no mašīnas caur vārpstu tiek nodots piedzenamajam mehānismam. Papildus sarežģījums būs divu dimensiju modelī ievērtēt

siltumu, kas nodots apkārtējai videi caur gultņu vairogu. Fizikas aprakstā nepieciešams definēt siltuma modeļa avotus kuri ir elektriskās mašīnas zudumi. Fizikas apraksta daļā ieteicami vienkāršojumi samazinot galīgo elementu skaitu. Galīgo elementu skaitu iespējams samazināt vienkāršojot rievās un vadu izolācijas aprakstu, to aizstājot ar vienu elementu, jeb ekvivalento siltumvadītspēju vai ieviešot papildus robežnosacījumus un apskatot tikai daļu no elektriskās mašīnas. Būtiski vienkāršot izolācijas materiālu aprakstu, jo to ģeometriskie izmēri ir relatīvi mazi, kā rezultātā izolācijas daļās un to tuvumā galīgie elementi būs mazi, kā rezultātā būtiski tiks palielināts aprēķina laiks, bez būtiskas aprēķinu precizitātes pieauguma.



3.4. att. Darbību secība termodinamikas GEM modeļa aprakstam

Termodinamikas problēmas risināšanai nostabilizējušam darba režīmam GEM datorprogrammā Flux temperatūras tiek rēķinātas pēc (3.1.) vienādojuma un pārejas procesu režīmam pēc (3.2.) vienādojuma.

$$\operatorname{div}\left(-[k] \operatorname{grad}(\vec{T})\right)=q, \quad (3.1)$$

$$\operatorname{div}\left(-[k] \operatorname{grad}(\vec{T})\right)+\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}=q, \quad (3.2)$$

kur $[k]$ – siltumvadītspējas tenzors, W/m/K;

$\vec{T}$ – temperatūra, K;

q – siltuma avota jauda tilpuma vienībā, W/m³;

ρC_p – siltumietilpība tilpuma vienībā, J/m³/K.

GEM lietojuma *SynRM* piemērs temperatūras modelēšanā

Apskata GEM pielietojumu temperatūru modelēšanā 180 kW *SynRM* dzinējam ar IC01 dzesēšanas sistēmu, kas prezentēta [58] publikācijā. Modeli definē ar ģeometriskajiem izmēriem (180 kW *SynRM*), materiālu parametriem (3.2. Tab.), elektriskās mašīnas elektriskajiem un magnētiskajiem zudumiem (180 kW *SynRM*) un robežnosacījumiem.

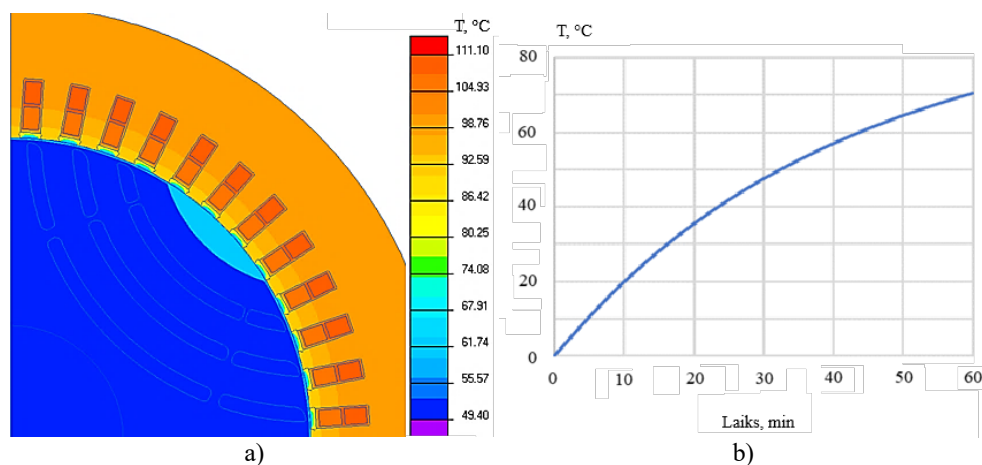
180kW *SynRM* ģeometriskie izmēri aprakstīti šī darba nākamajā nodaļā, galvenie izmēri ir $D_{sa}=493$ mm; $D_{si}=320$ mm; $\delta=1,2$ mm; $Z_s=48$. Siltuma avots tiek definēts ar 180 kW *SynRM* elektriskajiem zudumiem aktīvajā daļā $P_{elL}=2306$ W un magnētiskajiem zudumiem statorā $P_{mag}=2673$ W. Rotorā magnētiskie zudumi rodas no elektromagnētiskā momenta svārstībām, praktiski tie ir niecīgi, kā arī mehāniskie zudumu ietekme uz siltumapmaiņas procesu statora rievās pie tinuma būs niecīga, tāpēc rotora zudumus pieņem vienādus ar 0.

GEM modelim definē robežnosacījumus uz statora un rotora virsmām. Lai aprakstītu siltumapmaiņu konvekcijas ceļā uz statora iekšējā diametra un rotora ārējā diametra uzdod siltumapmaiņas koeficientu $h=90$ W/m²/K, koeficients atbilst piespiedu gaisa cirkulācijai. Lai aprakstītu siltumapmaiņu konvekcijas ceļā uz statora ārējās virsmas uzdod siltumapmaiņas koeficientu $h=30$ W/m²/K, koeficients atbilst dabīgai siltumapmaiņai konvekcijas ceļā.

180 kW *SynRM* materiālu parametri

Pielietojums	Materiāls	Siltum- ietilpība, J/kg/K	Blīvums, kg/m ³	Siltum- vadītspēja, W/m/K
Tinums	Varš	385	8900	395
Vārpsta	Tērauds 40X13	470	7650	28,9
Statora un rotora serde	Elektrotehniskais tērauds SURA M470-50HP	615	7700	42
Rievas izolācija	Polimērs II-PIIM/180	400	1000	0,2
Gaisa sprauga, rotora barjeras, apkārtējā vide	Gaiss	1010	1,23	0,0243

GEM modelēšanas rezultāti labi sakrīt ar eksperimentāli noteiktiem rezultātiem, kuri 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 parādīti 3.5. attēlā, kur a) attēlā parādīts temperatūru sadalījums stabilā režīmā, ko iegūst modelējot termodinamikas problēmu nostabilizējušam darba režīmam, bet b) attēlā parādīta temperatūras izmaiņa statora zobā 60 minūšu laikā, ko iegūst modelējot pārejas procesu režīma termodinamikas problēmu, nominālās slodzes režīmā 60 min laikā temperatūra tinumā pieaug no 0 °C līdz 72 °C, jeb par **72 °C**.



3.5. att. GEM modelēšanas rezultāti 180 kW *SynRM*: a) temperatūru sadalījums mašīnā, nostabilizējies režīms; b) temperatūras izmaiņa statora rievē, jeb tinumā atkarībā no darbības laika, GEM rezultātu apkopojums

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

Apskata GEM pielietojumu temperatūru modelēšanā *SynRM* ar *HL* dzesēšanas sistēmu, kas prezentēta [59] publikācijā. Materiālu parametri (3.2. tab.) ir tādi paši, kā iepriekš apskatītajam modelim, ar atšķirību, ka GEM modelēšana tiek veikta 1/12 segmentam, kas aprakstīts šī darba nākamajā nodaļā, tur arī doti segmenta izmēri. Lai novērtētu dzesēšanas sistēmas efektivitāti GEM modelēšana un eksperimenti tiek veikti modelim ar *HL* un modelim bez *HL* abiem

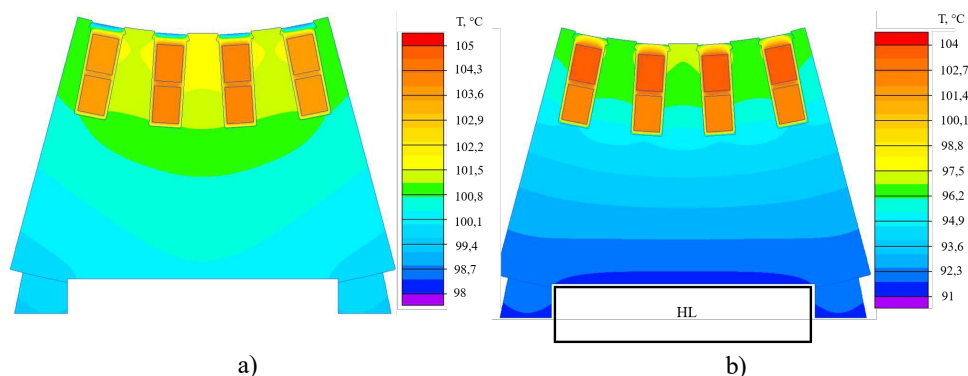
dzesēšanas veidiem nodrošinot līdzīgu tinuma temperatūru $\sim 103\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eksperimentu un GEM rezultāti apkopoti 3.3. tabulā. Temperatūru noteikšanas vietu grafisku skaidrojumu un aprakstu iespējams skatīt šī darba nākamajā nodaļā, īss apzīmējumu skaidrojums: Nr.1 – tinuma, rievas temperatūra; Nr.4 – statora jūgā; Nr.13 – uz statora virsmas, vietā kurā montē *HL* iztvaikotāju.

3.3. tabula

SynRM ar vai bez *HL* eksperimenta un GEM rezultāti

Eksperiments/GEM Ar/bez <i>HL</i>	Jauda, W	Temperatūra, $^{\circ}\text{C}$		
		Nr.1	Nr.4	Nr.13
Eksperiments bez <i>HL</i>	138	102	97	96
Eksperiments ar <i>HL</i>	350	103	75	49
GEM bez <i>HL</i>	138	103	100	100
GEM ar <i>HL</i>	350	103	93	91

GEM modelēšana bez *HL* tiek veikta uzdodot siltumapmaiņas koeficientu uz statora segmenta visām ārējām virsmām $h = 4\text{ W/m}^2/\text{K}$ (3.6. att. a). GEM modelēšana ar *HL* tiek veikta uzdodot siltumapmaiņas koeficientu uz statora segmenta ārējās virsmām, kuras vērstas pret blakus segmentiem un pret rotoru $h_1 = 44\text{ W/m}^2/\text{K}$, bet virsmām kuras sakaras ar *HL* $h_2 = 44\text{ W/m}^2/\text{K}$ (3.6. att. b).



3.6. 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 papildus dzesēšanas kanāli, turpmāk *HL2*. Segmenta izmēri doti šī darba nākamajā nodaļā. GEM modelēšanā apskata atsevišķi rievās ievietoto *HL2* iztvaikotāju efektivitāti, rezultāti apkopoti 3.4. tabulā. Līdzīgi kā iepriekš uz segmenta visām ārējām virsmām uzdod siltumapmaiņas koeficientu $h_1 = 4\text{ W/m}^2/\text{K}$. Vispirms apskata variantu, kurā rievās ir izveidoti kanāli, bet nav ievietoti *HL2* iztvaikotāji, uzdodot kanālos gaisu, attiecīgi, uz *HL2* virsmas

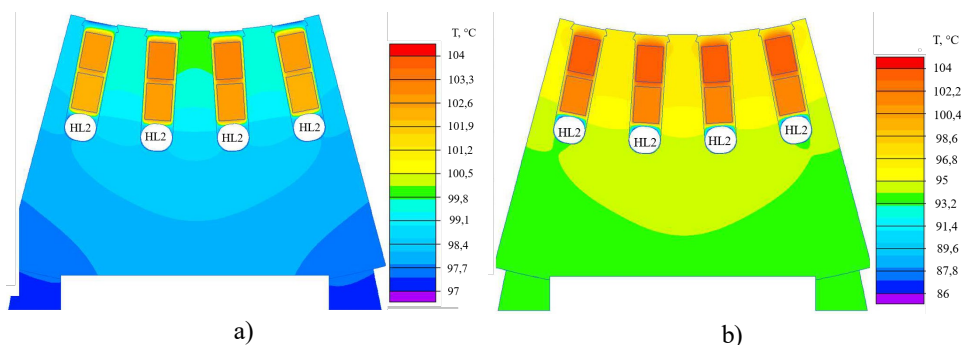
uzdod $h_2 = 4 \text{ W/m}^2/\text{K}$ (3.7. att. a). Otrs apskatītais variants ir ar kanālos ievietotiem *HL2* iztvaikotājiem, attiecīgi, uz *HL2* virsmas uzdod $h_2 = 28 \text{ W/m}^2/\text{K}$ (3.7. att. b).

Ar *HL2* tinumā izlādējama 2,5 reizes lielāka jauda (350 W) salīdzinot ar segmentu bez *HL* (138 W) pie vienādām tinumu temperatūrām. Novērojams, ka gaisa kanāli rievā (170 W) uzlabo dzesēšanas apstākļus bez kanāliem (138 W) un iespējams palielināt jaudu 1,2 reizes. *HL2* (350 W) salīdzinot ar gaisa kanāliem rievā (170 W), *HL* ir efektīvāka dzesēšanas sistēma, pateicoties kam pieļaujami tinumos 2 reizes lielāki zudumi. *HL* un īpaši *HL2* ieviešana neizbēgami palielina indukciju statora jūga, kā rezultātā pieaug magnētiskie zudumi un samazinās jaudas koeficients, kas plašāk apskatīts darba nākamajā nodaļā.

3.4. tabula.

SynRM ar *HL* rievā GEM rezultāti

Ar/bez <i>HL2</i>	Jauda, W	Temperatūra, °C		
		Nr.1	Nr.4	Nr.13
GEM bez <i>HL</i>	170	103	98	98
GEM ar <i>HL2</i>	350	103	93	93



3.7. 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

Laika posmā no 2019.g. – 2021.g. ar autora dalību tika īstenots projekts ERAF Nr.1.1.1.1/18/A/055 “Jaunas paaudzes sinhronā relaktances elektrodzinēja izstrāde” ar galveno projekta mērķi izstrādāt *SynRM* ar vismaz 95% efektivitāti, kas aizstātu asinhrono dzinēju ar efektivitāti 92,6% masu tranzīta elektrisko transportlīdzekļu pielietojumam – trolejbusa piedziņā. Projekta ietvarā izstrādātajam *SynRM* bija jābūt ar nemainīgiem ārējiem izmēriem un barošanas avota prasībām kā aizstājamajam asinhronajam dzinējam. Projekta ietvarā šī darba autora uzraudzībā tika projektēta 180 kW *SynRM*. Mašīna tika izgatavota pie projekta partnera AS “Rīgas elektromašīnbūves rūpnīcā” (turpmāk – AS “RER”), kur tā tika eksperimentāli pārbaudīta. Nodaļas ietvarā izdalīts 180 kW *SynRM* projektēšanas gaitas īss apraksts, projektēšanā pielietotās galīgo elementu metodes apraksts un 180 kW *SynRM* izgatavošanas un eksperimentālas pārbaudes apraksts.

Laika posmā no 2021.g. – 2023.g. ar autora dalību tika īstenots projekts ERAF 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”. Projektā tika pētīts kā ar inovatīvu dzesēšanas sistēmu – siltumcīlpas palielināt *SynRM* īpatnējo jaudu. Projekta ietvarā šī darba autora uzraudzībā tika projektēta 180 kW *SynRM* ar siltumcīlpas dzesēšanas sistēmu. Elektriskās mašīnas komponentes tika izgatavotas projekta partnera AS “RER” rūpnīcā un dzesēšanas sistēmas komponentes tika izgatavotas projekta partnera SIA “Allatherm” uzraudzībā. Izstrādātā 180 kW *SynRM* ar siltumcīlpas dzesēšanas sistēmu tika eksperimentāli pārbaudīta pie sadarbības partneriem. Nodaļā prezentēti mašīnas projektēšanas gaitas un izgatavošanas, eksperimentālas pārbaudes apraksti.

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 pielietots 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 izstrādāti atsevišķi, projektējot dzinēju atbilstoši galvenajiem uzdotajiem parametriem, 4.1. tabulā, pēc kā tam pielāgo vadības sistēmu. *SynRM* pielāgotās vadības metodes un sistēmas apraksts dots [3], [29], [60] avotos.

Dzinēja izstrādei izvīzītie ierobežojumi un pamatprasības, apkopotas 4.1. tabulā: *SynRM* lietderības koeficients, ārējie izmēri, jeb korpusa izmērs, kas uzdoti ar dzinēja aktīvo daļu ārējiem izmēriem (statora ārējais diametrs D_{as} , statora aktīvais garums L un vārpstas diametrs

D_v), elektroapgādes parametri (U_{NI} , f_I , m), mehāniskie parametri (P_N , M_N , n_N) un ražotāja konstrukcijas iespējas, pielāides rotora gaisa barjeru konstrukcijai un gaisa spraugas platums δ .

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_{NI}	420	V	Nominālais tīkla līnijas spriegums
f_I	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_I	1500	min ⁻¹	Nominālais rotācijas ātrums
η	95%		Projektā sasniedzamais dzinēja lietderības koeficients
	S2 60 min		Darba režīms atbilstoši LVS EN 60034-1:2011

***SynRM* stators**

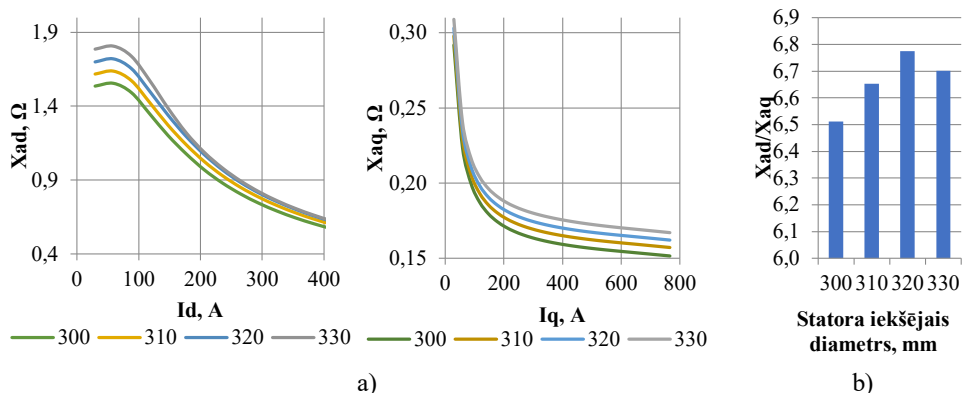
Statora iekšējais diametrs tiek iegūts, veicot magnētiskā lauka matemātisko modeļu aprēķinus ar galīgo elementu metodi (GEM). Statora iekšējā diametra optimālā vērtība tiek noteikta saglabājot nemainīgus: 1) statora rievas izmērus, 2) gaisa spraugu un 3) rotora izstrādes principus, rotora izstrādes principi paskaidroti daļā par rotoru. Statora mainīgie lielumi ir: 1) jūga augstums un 2) zoba platums. Statora iekšējā diametra optimālās vērtības kritērijs ir pieņemts – lielākā magnētiskā nesimetrija, enkura garenreakcijas induktīvās pretestības vērtības (X_{ad}) attiecība pret enkura šķērsreakcijas induktīvo pretestību (X_{aq}). X_{ad} un X_{aq} vērtības noteiktas režīmam tuvu nominālajam, ar atbilstošām strāvas vērtībām: $I_d = 163$ A; $I_q = 278$ A, $I = 323$ A. Lielākā magnētisko pretestību attiecība nodrošinās lielāko elektromagnētisko momentu, attiecīgi, jāpalielina garenass induktīvā pretestība, bet jāsamazina šķērsas induktīvā pretestība.

Enkura garenreakcijas induktīvā pretestība ir atkarīga no statora iekšējā diametra izmēriem un magnetizējošās strāvas (4.1. att.). Palielinot statora iekšējo diametru, var palielināt garenass induktīvo pretestību, tomēr ievērojams palielinājums ir novērojams pie mazām strāvas vērtībām 0,1-0,3 I/I_N , kad mašīna nav piesātināta. Enkura šķērsreakcijas induktīvā pretestība ir atkarīga no statora iekšējā diametra izmēriem pie magnetizējošās strāvas vērtībām sākot no 0,5 I/I_N (4.1. att.).

Izvēlas divslāņu tinums, lai pēc iespējas vairāk samazinātu momenta pulsācijas, neietekmējot magnētiskās sistēmas ģeometriju.

Tiek izveidots tinums ar relatīvi lielu strāvas blīvumu, balstoties uz tehnoloģiskajām iespējām un pieredzi elektrisko mašīnu ar līdzīgu strāvas blīvumu izgatavošanā. Transporta piedziņas elektrodzinēji bieži ir ar relatīvi lielu strāvas blīvumu ārējo izmēru un masas samazināšanas nolūkos, kā arī to slodze lielāko daļu no darba laika ir būtiski zemāka par nominālo.

Projektētajai mašīnai paredzēta IC01 dzesēšanas klase atbilstoši LVS EN 60034-6:2002 – atvērta mašīna ar brīvu gaisa cirkulāciju un mašīnas iekšpusē uz rotora vārpstas montētu ventilatoru. Darba režīms (S2 60 min) uzdots darba uzdevumā.

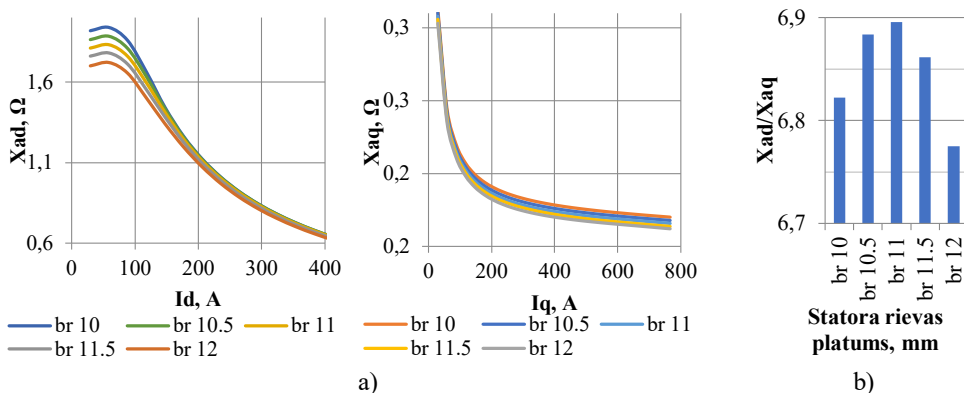


4.1. att. a) Enkura garenreakcijas un šķērsreakcijas induktīvā pretestība pie dažādiem statora iekšējā diametra izmēriem (mm) un dažādām enkura strāvas komponentēm; b) X_{ad}/X_{aq} pie dažādiem statora iekšējā diametra izmēriem

Statora rievas un zoba platums tiek iegūts, veicot magnētiskā lauka matemātisko modeļu aprēķinus ar galīgo elementu metodi (GEM). Statora rievas un zoba platuma optimālā vērtība tiek noteikta saglabājot nemainīgu: 1) statora rievas un zoba sekcijas platumu; 2) statora rievas summāro laukumu; 3) gaisa spraugu un 4) rotoru. Mainīgie lielumi ir: 1) zoba un rievas platums; 2) mainās rievas augstums.

Galīgo elementu metodes (GEM) aprēķinos uzdots elektrotehniskā tērauda SURA M470-50HP B(H) līkne. Balstoties uz GEM rievas un zobu formas ir vienkāršotas, neņemot vērā ķīļa formas un noapaļojumus, kuri galvenokārt palielina magnētiskos zudumus, bet ietekme uz induktīvo pretestību vērtībām ir niecīga, attiecīgi šajā projektēšanas posmā šie elementi nav saistoši. Statora rievas un zoba platuma optimālās vērtības kritērijs ir pieņemts – lielākā enkura garenreakcijas induktīvās pretestības vērtības (X_{ad}) attiecība pret enkura šķērsreakcijas induktīvo pretestību (X_{aq}) (4.2. att). X_{ad} un X_{aq} vērtības, pēc kuru attiecības izvēlēts optimālais rievas un zoba platums, noteiktas režīmam tuvu nominālajam, ar strāvas vērtībām: $I_d = 163$ A; $I_q = 278$ A, $I = 323$ A. Rievas izolācijai nodrošina H termisko klasi atbilstoši LVS EN 60085:2008, ar maksimālo ilgstoši pieļaujamo tinumu temperatūru $\Theta_{tinumi} = 180$ °C un ar projektējamo tinumu virstemperatūru 125 °C.

Enkura garenreakcijas induktīvā pretestība ir atkarīga no zoba platuma un magnetizējošās strāvas (4.2 att.). Palielinot zoba platumu (samazinot rievas platumu), var palielināt garenass induktīvo pretestību, tomēr ievērojams palielinājums ir novērojams pie mazām strāvas vērtībām 0,1-0,4 I/I_N , kad mašīna nav piesātināta. Enkura šķērsreakcijas induktīvā pretestība ir relatīvi maz atkarīga no zoba platuma (4.2. att.).



4.2. att. a) Enkura garenreakcijas un šķērsreakcijas induktīvā pretestība pie dažādiem statora rievas izmēriem (mm) un dažādām enkura strāvas komponentēm; b) X_{ad}/X_{aq} pie dažādiem statora rievas izmēriem

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 [25]. Gaisa barjeras tiek izveidotas kā loks, visām gaisa barjerām ir nemainīgs loka centrs. Izveidojot rotora gaisa barjeras kā lokus ar vienu centru, momenta pulsācijas tiek samazinātas, salīdzinot ar trapecveida gaisa barjerām:

- 1) Loks – $M_{max} = 1362 \text{ Nm}$; $M_{min} = 1094 \text{ Nm}$; $M_{sv \text{ amp}} = 22\%$;
- 2) Trapece – $M_{max} = 1378 \text{ Nm}$; $M_{min} = 1064 \text{ Nm}$; $M_{sv \text{ amp}} = 26\%$.

Rotora gaisa barjeras forma ietver mehāniskās izturības savienojumus, kuri veido ceļu šķērsass plūsmai. Tie ir nepieciešami, lai nodrošinātu rotora mehānisko izturību. Rotora mehāniskās izturības savienojumi samazina mašīnas maksimālo momentu par 7%, salīdzinot ar teorētisku rotoru bez mehāniskās izturības savienojumiem. Mašīnas sākotnējā projektēšanas daļā, veicot GEM aprēķinu modeļa vienkāršošanas nolūkos, mehāniskās izturības tiltiņi nav ņemti vērā.

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

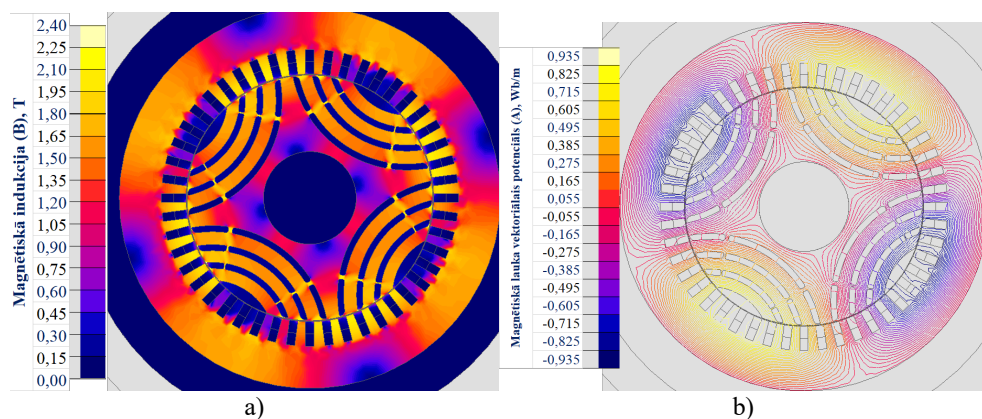
Projektēšanas rezultāti un magnētiskais lauks

Aprēķinu rezultāti salīdzināti ar eksperimenta rezultātiem 4.8. – 4.10. attēla grafikos. Ar GEM modelētā magnētiskā lauka ainas nominālās slodzes režīmam parādītas 4.3. attēlā, tukšgaitas režīmam 4.4. attēlā. Tipiski augsta jaudas blīvuma, transporta pielietojumu elektrodzinēji, t.s. SynRM ir ar augstu piesātinājumu, mašīna nominālajā darba režīmā ir piesātināta, indukcija zobos līdz 2 T un statora jūgā līdz 1.6 T. Rotora indukcija ir sadalīta

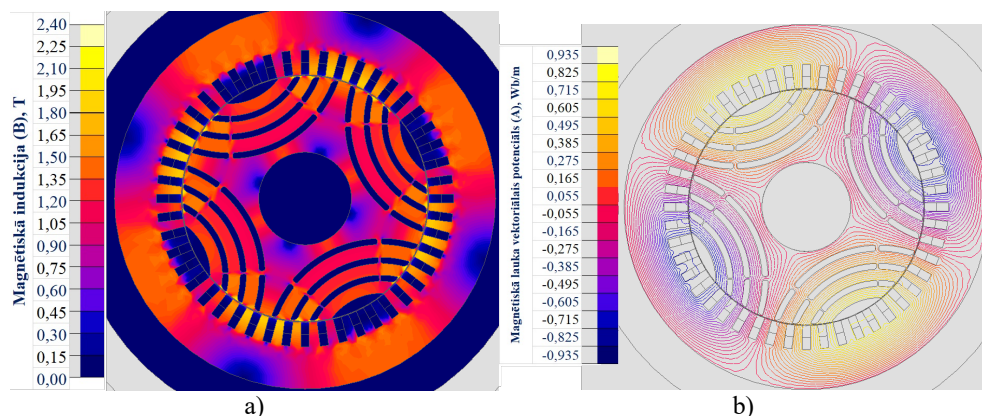
vienmērīgi visā rotorā ar izņēmumiem pie vārpstas un mehāniskās stiprības savienojumi - tilti piesātinās. Mehānisko savienojumu tiltu piesātināšana ir vēlama, jo tiltu piesātinājuma rezultātā pieaug šķērsass pretestība.

Atšķirīgās magnētiskā lauka ainas tukšgaitas (4.4. att.) un slodzes (4.3. att.) režīmos grafiski akcentē pareiza GEM modeļa pielietojuma svarīgumu. Projektēšanai nepieciešamās no GEM iegūtas indukcijas novedīs pie ļoti atšķirīgiem secinājumiem. Gandrīz ideālas magnētiskā lauka vektorpotenciāla līnijas tukšgaitas režīmā salīdzinot ar slodzes režīma līnijām novedīs pie krasi atšķirīgiem elektromagnētiskā momenta svārstību aprēķinu rezultātiem un secinājumiem.

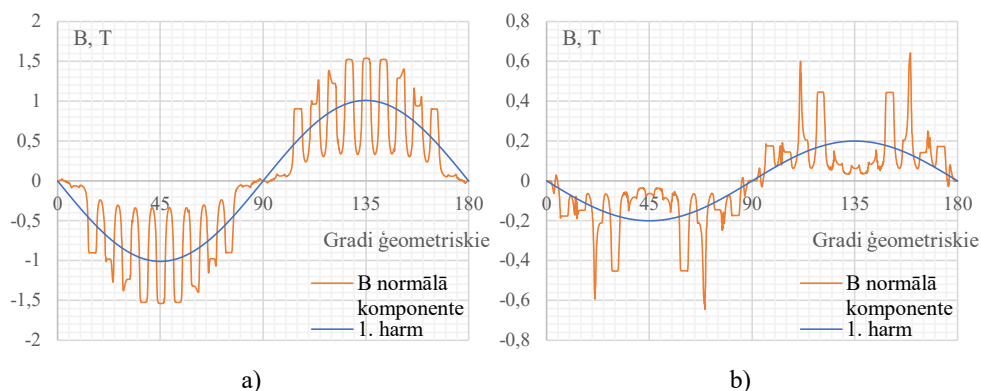
Pēc indukcijas sadalījuma gaisa spraugā var izvērtēt projektējamai mašīnai raksturīgās elektromagnētiskā momenta svārstības 4.5. attēlos. Indukcijas sadalījuma līknē nolasāma statora rievu un rotora gaisa barjeru ietekme uz elektromagnētiskā momenta svārstībām, izceļot, ka izstrādātā mašīna ir ar 48 statora rievām un 2 polu pāriem, bet indukcijas sadalījumam gaisa spraugā izteiktākās ir 23 un 25 harmonikas, jo $48/2 = 24$ rievas uz polu pāri.



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



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



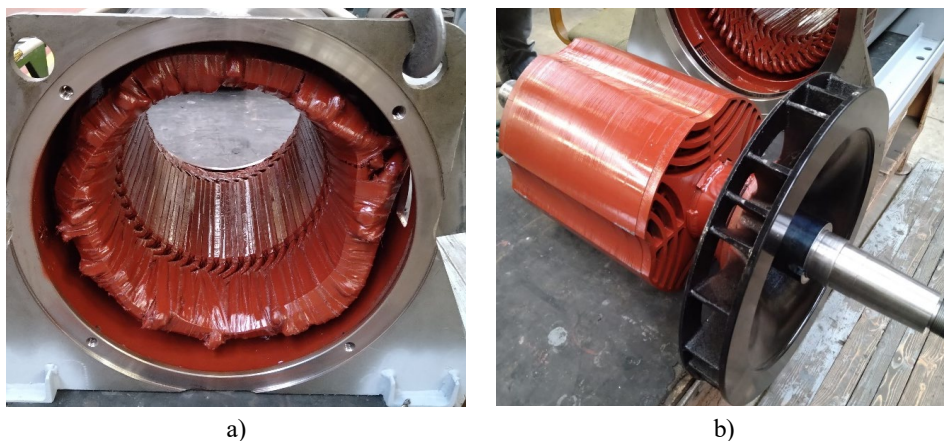
4.5. att. Magnētiskās indukcijas sadalījums gaisa spraugā tukšgaitas režīmā, normālā komponente: a) garenass (d); b) šķērsass (q)

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. Pastāvīgo magnētu mašīnu ražošanai nepieciešams papildus aprīkojums, zināšanas un kvalifikācija darbā ar jaunu materiāla veidu – pastāvīgo magnētu.

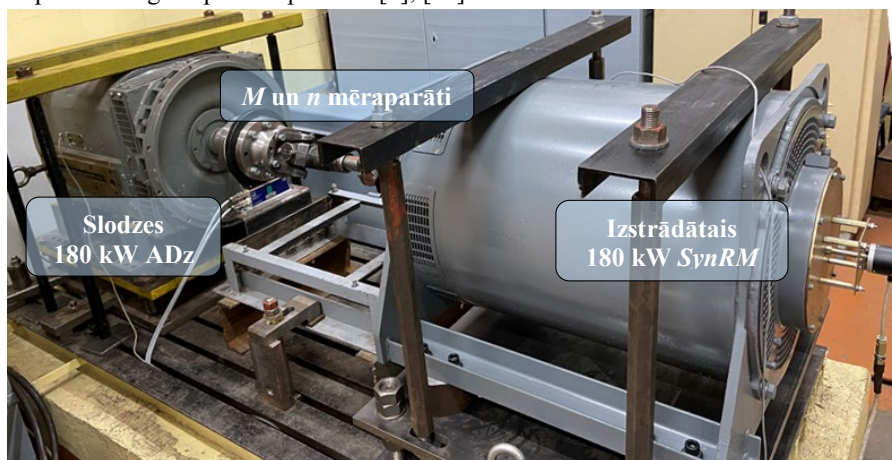
Statora un rotora elektrotehniskā tērauda lokšņu formēšana tika realizēta formu izgriežot ar lāzeri, nevis masveida ražošanā pielietoto štancēšanu, kas saistīts ar ražoto eksemplāru skaitu – viens. Nav pamata pieņemt, ka štancējot loksnes varētu rasties neparedzamas problēmas. Izgatavotā statora rievās ir tādas pašas, kā līdzīgiem asinhronajiem dzinējiem. Izgatavotā *SynRM* rotora loksnes nemagnētisko gaisa barjeru pielaides, izmēri un liekumi ir līdzīgi asinhronās mašīnas rotora rievām. *SynRM* korpuss ir tāds pats, ka aizstājamajam asinhronajam dzinējam. *SynRM* tinuma izgatavošana un ievietošanas statora rievās neatšķiras no asinhronās mašīnas. *SynRM* divslāņu tinums ar taisnstūrveida vadiem ir tāds pats, kā asinhrono dzinēju. Statora rievās atvērums ir tāds pats kā asinhronajam dzinējam. *SynRM* dzesēšanai tiek izmantota atvērta dzinēja konstrukcija ar piespiedu gaisa cirkulāciju ventilatoru montējot uz dzinēja vārpstas IC 01, atbilstoši IEC 60034-6:1991. Dzinēja izgatavošanas process pa soļiem ir aprakstīts [3] darbā, stators un rotors parādīti 4.6. attēlā.



4.6. 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 (4.7. att.). *SynRM* piedziņai tika izmantots speciāls frekvenču pārveidotājs ar konstantu šķērsass strāvas vadības algoritmu (*CDAC*). *SynRM* slodšanu nodrošināja uz vārpstas montēts asinhronais dzinējs. Starp pārbaudāmo *SynRM* un slodzes asinhrono dzinēju uz vārpstas bija montēts *HBK T40B* rotācijas ātruma un mehāniskā momenta mērinstruments. *SynRM* elektriskie parametri tika mērīti ar *Yokogawa Power Analyser WT-1800*. Eksperimentos izmantotais laboratorijas stends un eksperimentu gaita plašāk aprakstīti [3], [61] darbos.



4.7. att. 180 kW *SynRM* pārbaudes stends

Eksperimentu rezultāti

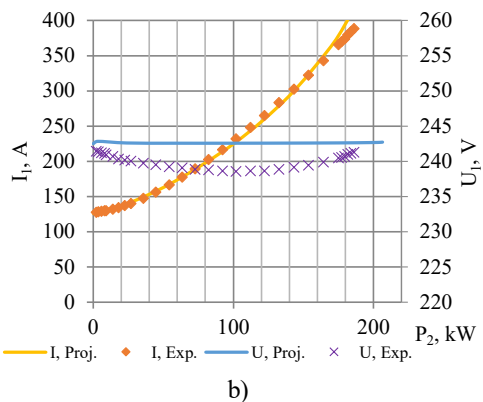
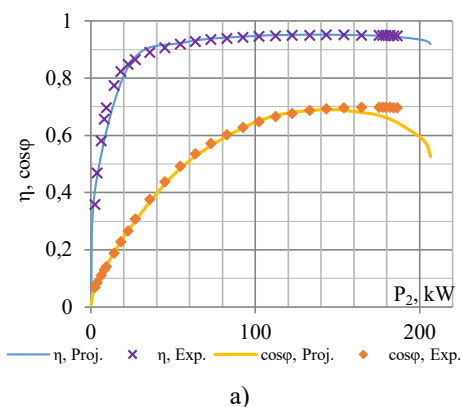
Izstrādātā dzinēja eksperimentu rezultāti apkopoti 4.2. tabulā (Eksp.) un elektriskie parametri 4.8. attēlā, moments – 4.9. att., temperatūra un svārstības – 4.10. attēlā. Eksperimentu

rezultāti prezentēti publikācijās [29], [60]. Eksperimentu rezultāti attēloti kopā ar projektēšanas stadijā aprēķinātajiem parametriem (Proj.), kas iegūti izmantojot aprēķinu metodi, kas prezentēta šī darba iepriekšējā nodaļā un publikācijā [40]. Tabulā salīdzināšanai attēlo 180 kW vilces asinhronā dzinēja (AD) parametrus. Asinhrono dzinēju izmanto sabiedriskā transporta – trolejbusa piedziņā. Attēlā 4.10. d) parādīta *SynRM* vilces raksturlikne, kurai var izcelt 3 zīmīgus piedziņas režīmus – kustības uzsākšana, paātrināšanās un maksimālo apgriezību režīms.

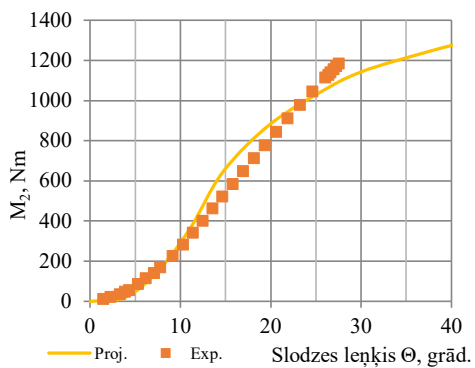
4.2. tabula

180 kW *SynRM* projekta un eksperimenta galvenie rezultāti

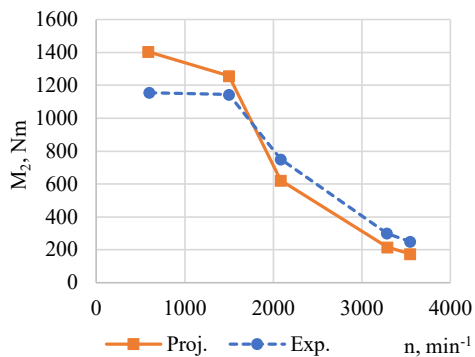
Parametri			Proj.	Eksp.	ADz
Statora strāva	I_1	A	392	374	310
Statora spriegums	U_1	V	420	417	420
Jaudas koeficients	$\cos\varphi$	-	0,7	0,7	0,89
Elektriskā jauda	P_1	kW	189	189	201
Mehāniskā jauda	P_2	kW	179	179	186
Mehāniskais moments	M_2	Nm	1141	1144	1193
Statora tinuma pretestība	R_1	Ω	0,0122	0,0103	-
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%



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

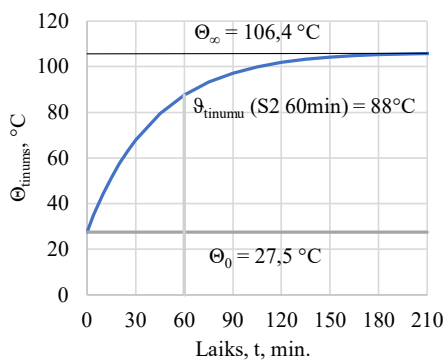


c)

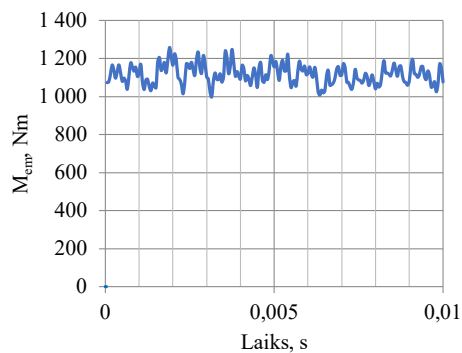


d)

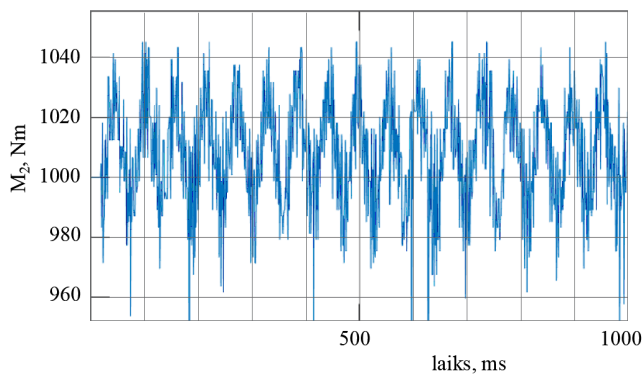
4.9. att. 180 kW *SynRM* eksperimentos noteiktās un aprēķinātās darba līknes: c) leņķa raksturlikne; d) vilces raksturlikne



e)



f)



g)

4.10. 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 siltumcilpas 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.

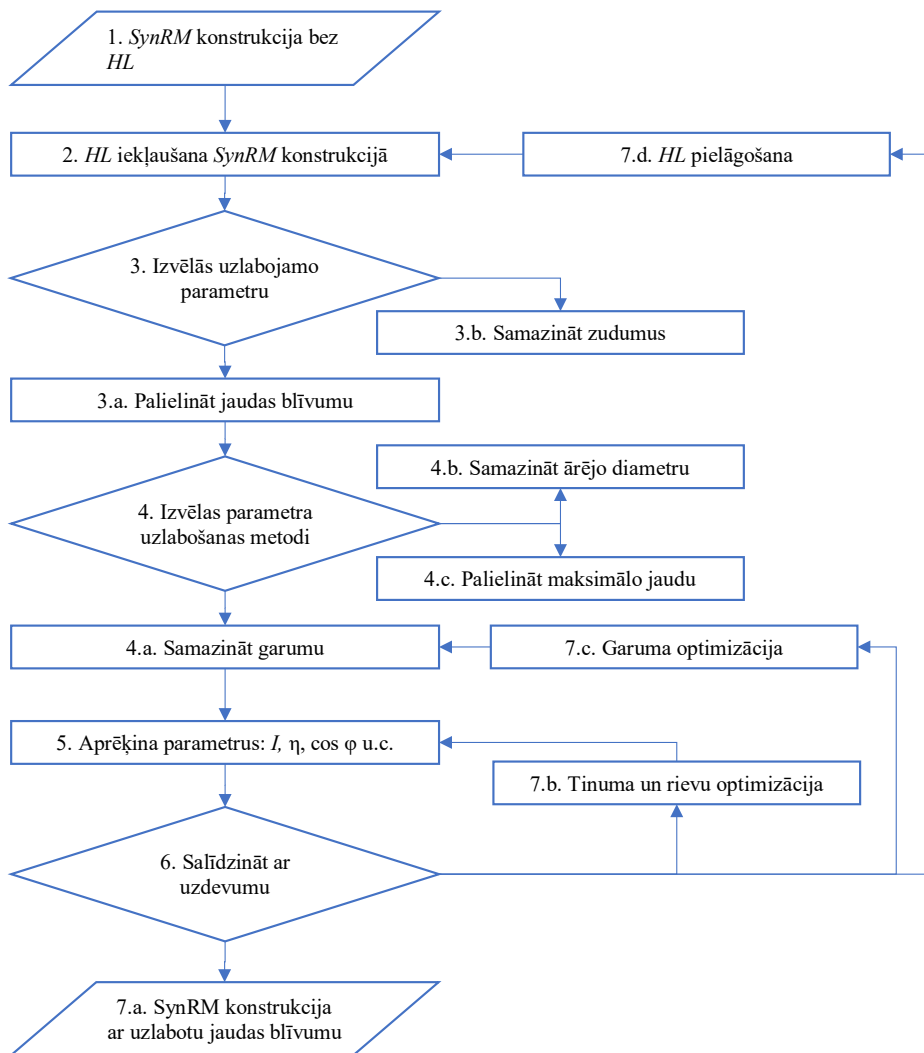
Darba ietvarā tiek izskatīts risinājums ar kuru izstrādātai *SynRM* elektromagnētiskai konstrukcijai uzlabo dzesēšanas sistēmas veiktspēju, tādā veidā iegūstot mašīnu ar lielāku īpatnējo jaudu [62]. Darbā pielietotā aprēķinu gaita ļauj noteikt maksimālo vērtību, par kādu iespējams palielināt *SynRM* konstrukcijas īpatnējo jaudu, pielietojot siltumcilpas (*HL*) dzesēšanas sistēmu. Lai paskaidrotu kā darba ietvarā tiek iegūta *SynRM* ar lielāku īpatnējo jaudu izveidota diagramma (4.11. att.) un aprakstīta darbu secība:

1. Izstrādāta pamata *SynRM* konstrukcija ar *IC01* dzesēšanas sistēmu – *SynRM* dzesēšanai tiek izmantota atvērta dzinēja konstrukcija ar piespiedu gaisa cirkulāciju ventilatoru montējot uz dzinēja vārpstas. Pētījuma praktiskai daļai par pamatu tiek izmantots no tīkla barota transporta piedziņai (metro vilcieniem un trolejbusiem) paredzēts 180 kW *SynRM*, kura projektēšana, izgatavošana un testēšana aprakstīta iepriekšējā darba nodaļā.
2. Papildinot izstrādāto 180 kW *SynRM* ar augstas veiktspējas dzesēšanas sistēmu, iespējams uzlabot dzinēja tehniskos parametrus. Būtisks parametrs kuru iespējams uzlabot ir mašīnas īpatnējā jauda. Lai iegūtu mašīnu ar labākiem parametriem salīdzinoši ar tirgū pieejamiem, jāpielieto efektīva, bet tajā pašā laikā masveida elektrisko mašīnu ražošanā neizmantota dzesēšanas sistēma, par kādu autors uzskata siltumcilpas (*HL*) dzesēšanas sistēmu.
3. Izvēlas galveno uzlabojamo parametru. Izvēlas īpatnējo jaudu, kā uzlabojamo parametru ar potenciālu alternatīvu – zudumu samazināšana.
4. Daži no veidiem kā palielināt īpatnējo jaudu ir:
 - a. saglabājot nemainīgu jaudu, samazināt mašīnas aktīvo garumu,
 - b. saglabājot nemainīgu jaudu, samazināt statora diametru
 - c. saglabājot nemainīgus izmērus, palielināt maksimālo jaudu.

Darba ietvarā izvēlas garuma samazināšanu. Mašīnas garumu ir vieglāk pielāgot salīdzinoši ar diametru gan no elektromagnētiskās sistēmas projektēšanas, gan ražošanas viedokļa.

5. Papildinot mašīnu ar dzesēšanas sistēmu tiek mainīta magnētiskās sistēmas konstrukcija, tinums un tinumam pievadītais spriegums Izveidotajai *SynRM* ar *HL* aprēķina strāvu, spriegumu, magnētiskos un elektriskos zudumus u.c. parametrus aprēķins aprakstīts iepriekšējā nodaļā un tas ietver skaitliskos aprēķinus un GEM modelēšanu.

6. Novērtē lietderības koeficienta, jaudas koeficienta, strāvas un citu parametru atbilstību projekta prasībām. Palielinot jaudas blīvumu pieaug strāvas blīvums tinumos un indukcija tēraudā, attiecīgi pieaug elektriskie un magnētiskie zudumi.
7. Projektu noslēdz vai pāriet uz mašīnas optimizācijas uzdevumu:
 - a. Izstrādāta *SynRM* ar *HL* dzesēšanu, kuras parametri atbilst prasībām.
 - b. Ja parametri neatbilst prasībām, veic mašīnas ģeometrijas – tinumi, rievas, rotora gaisa barjeras – optimizāciju līdz tiek sasniegti parametri kuri atbilst prasībām.
 - c. Ja joprojām parametri neatbilst prasībām, veic mašīnas ģeometrijas – garuma – optimizāciju, līdz sasniedz parametrus, kuri atbilst prasībām.
 - d. Ja ar mašīnas ģeometrijas optimizāciju nav iespējams sasniegt atbilstošus parametrus, pielāgo *HL* dzesēšanas sistēmu.



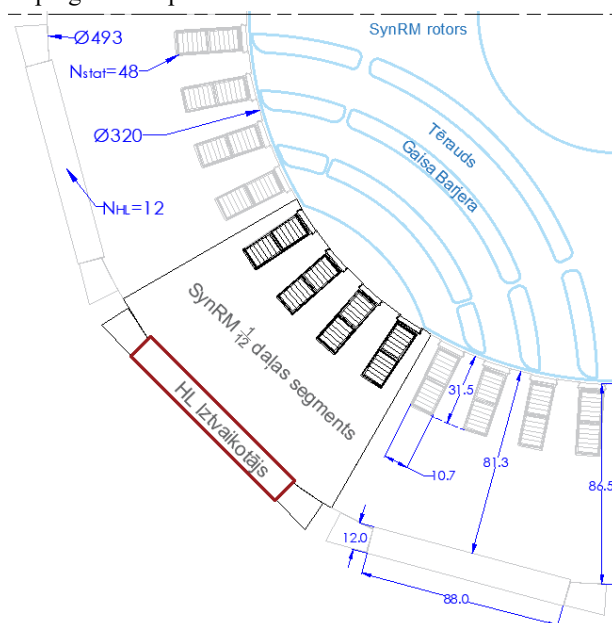
4.11. att. *SynRM* īpatnējās jaudas palielināšana ar siltumcīlpas papildus dzesēšanu

4.3. SynRM ar HL 1/12 statora segmenta eksperimentāla izpēte

Ar mērķi 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. Statora segmenta daļas apjoms no pilnas SynRM parādīts 4.12. attēlā. Pie statora segmenta piestiprina HL dzesēšanas sistēmu kuru izgatavoja SIA “Allatherm”.

Statora segmenta apraksts

Statora segments ir 1/12 daļa no pilnas SynRM statora. Rievas, zoba un jūga izmēri 1:1 mērogā atbilst pilnai SynRM. Aktīvajā daļā tinums, tinuma izolācija un rievas izolācija 1:1 mērogā atbilst pilnai SynRM. Tinuma frontālās daļas savienojumi izveidoti vienkāršoti, bez izolācijas. Statora segments izgatavots no 0,5 mm biezām elektrotehniskā tērauda M470-50HP loksņēm, kuras tika izgrieztas ar lāzeri. Statora ārējam diametram tiek piemērināti stiprinājumi ar kuriem fiksē HL dzesēšanas sistēmu. Statora ārēja virsma daļā pie kuras tiks stiprināta HL dzesēšanas sistēma tiek noslīpēta taisna, HL dzesēšanas sistēmai pēc iespējas precīzāk jāpiekļaujas statora virsmai, lai nerastos papildus termiski izolējošas gaisa kārtas. Spoles vijumi tiek grupēti pa 6 tinumiem un tinumu grupas savienotas virknē. Izveidota izolācija starp divslāņu tinumiem. Tinuma un rievas izolācija ir ar (H) – termiskās izturības klasi, kurai maksimālā ilgstoši pieļaujamā temperatūra ir 180 °C, atbilstoši LVS EN 60085:2008 “Elektroizolācija. Termiskās ilgzitūības izvērtēšana un apzīmēšana”. Pēc tinumu ievietošanas rievas, segments tiek impregnēts ar epoksīda kārtu.



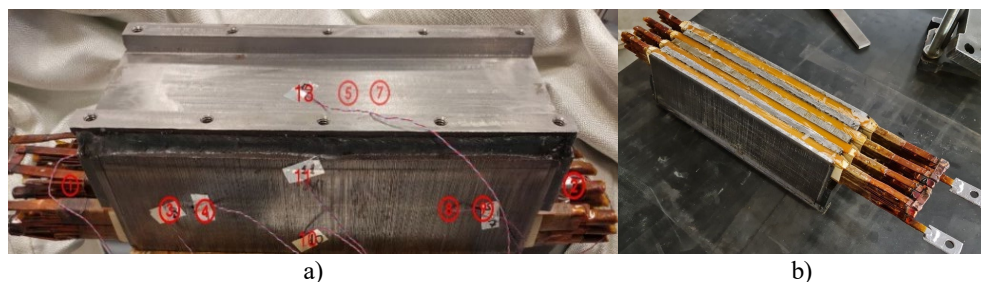
4.12. att. Skice SynRM ar HL dzesēšanu

Statora segments izveidots 1/12 daļai, jo tāda daļa apmierina vairākas magnētiskās un dzesēšanas sistēmas prasības:

- atbilst rievu skaitam, kas vienāds ar rievu skaitu uz polu un fāzi $q = 4$;
- ietekme uz jūga augstumu ir relatīvi neliela, samazinot *HL* skaitu, ietekme uz jūga augstumu pieaug;
- atbilst vienai *HL* segmenta daļai, *HL* segmenta iespējamo platumu ietekmē mehāniskā izturība un ražošanas iespējas.

Statora segmentam izveidota speciāla vieta kurai iespējams piestiprināt *HL* dzesēšanas sistēmu. Statora segments bez *HL* parādīts 4.13. attēlā, kurā numurētas termozondes. Ar termozondēm tiek veikti temperatūras mērījumi eksperimenta laikā. Termozondes iespējams iedalīt trīs grupās:

- pirmās grupas termozondes – 1), 2) termozondes ievietotas tinuma frontālajās daļās, 1) pie ieejas rievā, 2) frontālo daļu galā;
- otrās grupas zondes – 3), 4), 5), 7), 8), 9) termozondes izvietotas statora rievās, zobos un jūga;
- trešās grupas zondes – 11), 13) termozondes izvietotas uz virsmas daļās kurās statora tērauds saskarās ar *HL* dzesēšanas sistēmu vai blakus esošo segmentu.



4.13. att. Statora fragments bez *HL* dzesēšanas kontūra: a) ar numurētām termozondēm; b) no rievu atveres puses

Statora segments savienots ar *HL* dzesēšanas sistēmas segmentu parādīts 4.14. attēlā kurā ir numurētas eksperimenta stenda sastāvdaļas. *HL* dzesēšanas sistēmas iztvaikotājs (parādīts 4.15. att.), fragments ietver 1/12 no pilnas mašīnas iztvaikotājiem un tvaika kondensatoriem.

(1) Siltuma novadītājs, kas *HL* dzesēšanas sistēmā ir tvaika kondensators, paredzēts siltuma nodošanai no *HL* dzesēšanas sistēmas uz apkārtējo vidi, potenciāli izmantojams sabiedriskā transporta kabīnes sildīšanai.

(2) Ventilators paredzēts tvaika kondensatora efektivitātes palielināšanai. Ventilators ir *HL* dzesēšanas sistēmas vienīgais aktīvais elements, ar relatīvi mazu elektroenerģijas patēriņu. Potenciāli var izslēgt ventilatoru izveidojot lielāku tvaika kondensatoru.

(3) Mehāniskais eksperimenta stenda stiprinājums, kas nodrošina iztvaikotāja un tvaika kondensatora atdalīšanu. Elements nav saistīts ar *HL* darbības principu.

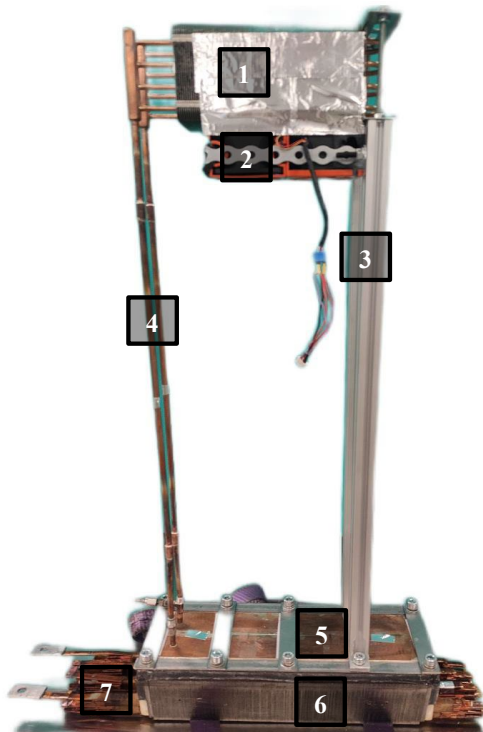
(4) Siltumnesēja šķidruma un tvaika kanāli, kuri nodrošina siltumnesēja cirkulāciju no iztvaikotāja uz tvaika kondensatoru.

(5) Siltuma savācējs, kas *HL* dzesēšanas sistēmā ir iztvaikotāju komplekss, kuru virsmas savienotas ar dzesējamo elementu, šajā gadījumā statora paketes ārējo virsmu.

(6) *SynRM* 1/12 segments, kas ietver 4 pilnas rievas, 3 pilnus zobus un divu zobu pusi.

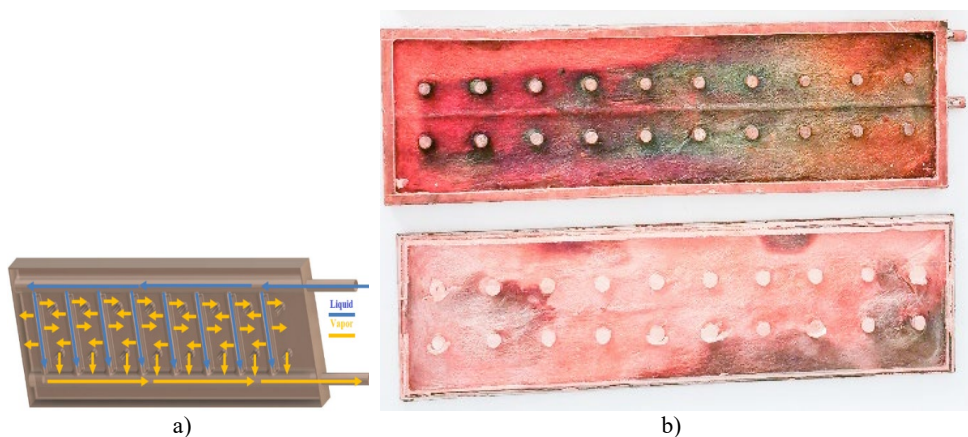
(7) Statora tinums. Attēlā redzamas statora tinuma frontālās daļas, kuras vienkāršotas salīdzinot ar reālu mašīnu.

Eksperimenta laikā segmenta malas kurās pilnai mašīnai būtu elektrotehniskais tērauds nosedz ar termiski izolējošu materiālu.



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

4.14. att. Statora fragments ar *HL* dzesēšanu



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

Segmenta eksperimenti

Pētījuma ietvaros veikti eksperimenti dažādām elektrodzinēja segmenta un siltumcilpas segmenta integrācijas pakāpēm:

- 1) eksperiments statora segmentam bez *HL* dzesēšanas;
- 2) eksperiments *HL* dzesēšanas sistēmai bez statora segmenta;
- 3) eksperiments integrētai sistēmai ar *HL* dzesēšanas sistēmu stiprinātu uz statora segmenta virsmas.

Eksperimentos ar statora segmentu, siltuma jaudu nodrošina statora tinumi, kurus pieslēdz līdzstrāvas avotam. Tinumu grupas saslēgtas virknē, bet tinumu slēgums eksperimenta ietvaros nav svarīgs, jo būtisks ir tikai visu tinumu kopējais izdalītais enerģijas daudzums, kas apraksta mašīnas zudumus.

Eksperimentu veic pie dažādām tinumā izdalītām jaudām. Izceļams ir eksperiments kas veikts pie tādas jaudas, kas statora tinumos rada nostabilizējušos temperatūru, kas vienāda ar 180 kW *SynRM* nostabilizējušos temperatūru $T^\circ = 105^\circ\text{C}$. Eksperimenta vienkāršošanas nolūkos netiek apskatīta siltuma daļa, kura no statora paketes nodod siltumu uz gaisu un tālāk uz gultņu vairogu, ņemot vērā, ka praktiski tas sastāda ļoti mazu daļu no siltumapmaiņas procesa un iedarbība ir vienāda eksperimentam ar un bez *HL*.

HL dzesēšanas sistēmas eksperimentos bez elektriskās mašīnas segmentam pārbaudīta siltumcilpas elementu veiktspēja dažādām temperatūrām un dažādiem sistēmas ģeometriskajiem novietojumiem. Ar galvenajiem eksperimentu secinājumiem:

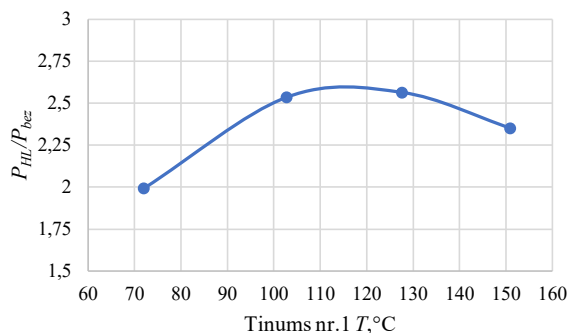
1. Siltumcilpas sistēma uzrāda izcilu veiktspēju parastajās pozīcijās ar kondensatoru virs iztvaikotāja un bez problēmām darbojās pārslodzes apstākļos līdz 560 W.
2. Pozīcijās, kurās siltumcilpas sistēma pagriezta pa 90 grādiem vai pacelta garenvirzienā ūdens uzkrājās tvaika līnijas priekšā un apturēja tvaika plūsmu. Iztvaikotāja vairākās zonās temperatūra ievērojami paaugstinājās.
3. Siltumcilpas sistēma pagriezta pa 90 grādiem ar šķidruma līniju virs iztvaikotāja, tas samazināja gravitācijas ietekmi uz sistēmu. Tāpēc ūdens uzkrājās pie kondensatora, samazinot ūdens plūsmu uz iztvaikotāju, un kopējā veiktspēja ievērojami samazinājās.
4. Citos virzienos sistēma darbojās stabili, bez izzūšanas, pārkaršanas vai pārdzesēšanas apstākļiem.
5. Lai siltumcilpas sistēma darbotos nevainojami, gan siltuma savākšanas (iztvaikotājs), gan siltuma izkliešanas sekcijām (kondensators) ir jādarbības labi.

Segmenta eksperimenta rezultāti

Segmenta eksperimenta rezultāti pie tādas jaudas kura statora tinumos rada nostabilizējušos temperatūru, kas vienāda ar 180 kW *SynRM* nostabilizējušos temperatūru $T^\circ = 105^\circ\text{C}$, parādīti 4.3. tabulā. Rezultāti parādīti vienai termozondei no katras grupas, tā kā grupas ietvaros mērījumu rezultāti praktiski neatšķiras. No eksperimenta rezultātiem varam novērot, ka izmantojot *HL* dzesēšanu mašīnas tinumos var ievadīt $\Delta P_{Cu (HL)}/\Delta P_{Cu (bez HL)} = 350/138 = 2,54$ reizes lielāku jaudu, lai saglabātu nemainīgu tinuma temperatūru $\sim T^\circ = 105^\circ\text{C}$. Jaudu attiecība būs atkarīga no temperatūras, kas parādīts 4.16. attēlā.

Segmenta eksperimenta rezultāti

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



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

Dzesējot mašīnu ar HL, statora tērauda temperatūra zoba daļā ir krietni zemāka par tinuma temperatūra un statora tērauda virsmas temperatūra ir zemāka par zoba daļas temperatūru. Uzlabojot siltumapmaiņas procesu starp tinumiem un HL, pozitīvo HL ietekmi uz mašīnas dzēsēšanu iespējams palielināt. Galvenā termiskā pretestība starp tinumu un HL iztvaikotāju ir rievas izolācija.

Segmenta eksperimenta rezultātu pielīdzināšana pilnai mašīnai

Balstoties uz 1/12 segmenta testiem, SynRM mašīnai ar HL dzēsēšanu, nemainot SynRM mašīnas rotora un būtiski nemainot statora konstrukciju, statora tinumos izlādēto jaudu iespējams palielināt 2,54 reizes, neizraisot tinuma temperatūra pieaugumu salīdzinot ar mašīnu bez HL dzēsēšanas. Tinumos plūstošo strāvu iespējams palielināt $I_{(LHP)}/I_{(bez\ LHP)} = \sqrt{2,54} = 1,59$ reizes. Palielinot strāvu iespējams iegūt mašīnu ar augstāku īpatnējo jaudu. Palielinātā strāva radīs lielākus elektriskos zudumus (4.1.). Palielinātā strāva izsauks magnētiskās indukcijas B pieaugumu statorā un rotorā un attiecīgi arī pieaugs magnētiskie zudumi (4.2.).

Ar mērķi pielīdzināt segmenta eksperimenta rezultātus pilnai mašīnai, veic GEM modelim ar ~1,6 reizes lielāku strāvu palielinot strāvas blīvumu vadā. Konstrukcijai veidojas neliels statora jūga samazinājums, kas nepieciešams HL montāžai uz statora paketes (4.12. att.). Citi parametri ir nemainīgi, salīdzinot ar 180 kW SynRM bez HL. GEM modeļa robežnosacījumi, materiālu definīcijas un mezglu skaits ir izvēlēti un veidoti pēc līdzības ar iepriekš aprakstītiem modeļiem. GEM veikta plakanparalēlam modelim rēķinot divu dimensiju magnētisko lauku, pēc aprēķina to attiecinot uz pilnu mašīnas garumu. Modelēšanas un aprēķinātie rezultāti ir

apkopoti 4.4. tabulā. Jaudas blīvums aprēķināts attiecinot pret mašīnas aktīvo daļu svaru – statora un rotora elektrotehniskais tērauds, un statora tinums (4.3.). Korpuss, vārpsta, gultņi un citas neaktīvās daļas netiek ņemtas vērā jaudas blīvuma aprēķinos. Tā kā GEM modelis ir divu dimensiju, relatīvi vienkārši veikt GEM un no rezultātiem aprēķināt divas no trīs piedāvātajām jaudas blīvuma palielināšanas metodēm, kuras realizē ieviešot *HL* dzesēšanu un salīdzina ar 180 kW *SynRM* ar IC01 dzesēšanu (4.4. tab.):

1) Samazināts mašīnas aktīvais garums $L_{HL}/L_{IC01} \sim 0,6$, palielināta strāva $I_{HL}/I_{IC01} \sim 1,6$, saglabāts nemainīgs moments $M_{HL}/M_{IC01} \sim 1$;

2) Palielināts moments $M_{HL}/M_{IC01} \sim 1,7$, palielināta strāva $I_{HL}/I_{IC01} \sim 1,6$, saglabāts nemainīgs aktīvais garums $L_{HL}/L_{IC01} = 1$.

$$\Delta P_{Cu} = 3 I^2 R_s, \quad (4.1)$$

$$\Delta P_{Fe} = k p_{10} (B_j^{1.7} m_j + B_z^{1.7} m_z) + \Delta P_{Fe\ PAP}, \quad (4.2)$$

$$Jaudas\ blīvums = \frac{P_2}{m_{Cu} + m_{Fe}}, \quad (4.3)$$

kur k – empīrisks koeficients = 1,6;

p_{10} – īpatnējie magnētiskie zudumi laminētām elektrotehniskam tēraudam pie zoba un jūga indukcijas T un frekvences 50 Hz, segments mašīnas pilns modelis izgatavoti no tērauda SURA M470-50HP, W/kg;

B – indukcija, T;

m – masa, kg;

t – parametri statora zobiem, j – parametri statora jūgam;

$\Delta P_{Fe\ ADD}$ – papildus magnētiskie zudumi, kas pieņemti 7,5 % apmērā no zobu un jūga magnētiskajiem zudumiem, zudumi saistīti ar mašīnas ražošanas tehnoloģiju un tie tiek noteikti kā citām līdzīgas jaudas, AS “RER” ražotām mašīnām.

4.4. tabula

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

Parametri		Mērv.	<i>SynRM</i> ar IC01 dzesēšanu	<i>SynRM</i> ar <i>HL</i> dzesēšanu ar samazinātu L	<i>SynRM</i> ar <i>HL</i> dzesēšanu 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 (4.3)		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%

Segmenta eksperimenta galvenie rezultāti un secinājumi

Segmenta eksperimentu rezultāti ļauj secināt, ka *SynRM* ar *ICOI* dzesēšanas sistēmu, to aizstājot ar *HL* dzesēšanas sistēmu pieļaujams palielināt dzinēju tinumos izdalīto jaudu 2,5 reizes, saglabājot nemainīgu tinumu temperatūru, kā rezultātā iespējams strāvu tinumos palielināt 1,6 reizes, kas parādīts 4.4. tabulā.

Attiecinot 1/12 segmenta eksperimenta rezultātus uz pilnu mašīnu, veic magnētiskā lauka GEM kuras rezultāti parāda, ka *SynRM* modelim palielinot dzinēja strāvu, iespējams palielināt dzinēja jaudas blīvumu. Palielinot jaudas blīvumu iespējams palielināt dzinēja maksimālo jaudu vai samazināt dzinēja garumu. Strāvas palielināšana neizbēgami samazina *SynRM* lietderības koeficientu, palielinot elektriskos zudumus, kā arī palielinātā indukcija izsauc magnētisko zudumu pieaugumu. No segmenta eksperimenta iegūtos parametrus attiecinot uz pilnu *SynRM* rezultāti parādīti 4.4. tabulā.

Pētījuma 180 kW *SynRM* paredzēta 180 kW asinhronā dzinēja aizstāšanai. Aizstājamā asinhronā dzinēja parametri doti iepriekšējā nodaļā, bet salīdzināšanas nolūkā būtiski izcelt aizstājamā 180 kW asinhronā dzinēja lietderības koeficients $\eta = 92.6\%$. Salīdzinot 180 kW asinhrono dzinēju un *SynRM* ar *HL* dzesēšanu, *SynRM* var izveidot ar $\sim 1,6$ reizes lielāku jaudas blīvumu un līdzīgu lietderības koeficientu.

Segmenta eksperimenti parāda, ka dzesējot mašīnu ar *HL* ir būtiska atšķirība starp tinuma temperatūra un statora tērauda virsmas temperatūra. Iespējams uzlabot dzesēšanas sistēma efektivitāti, uzlabojot siltumapmaiņas procesu starp tinumiem un *HL*. Siltumapmaiņas procesu iespējams uzlabot divos veidos: 1) samazināt termisko izolāciju, kas ietvertu ietekmi uz rievas un tinuma izolācijas dielektriskajām īpašībām un uzskatāms par nevēlamu risinājumu; 2) tuvināt *HL* dzesēšanas sistēmu tinumam, kas apskatīts nākamajā apakšnodaļā.

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

Nemot vērā, 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 *segments 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.

Statora segmenta apraksts

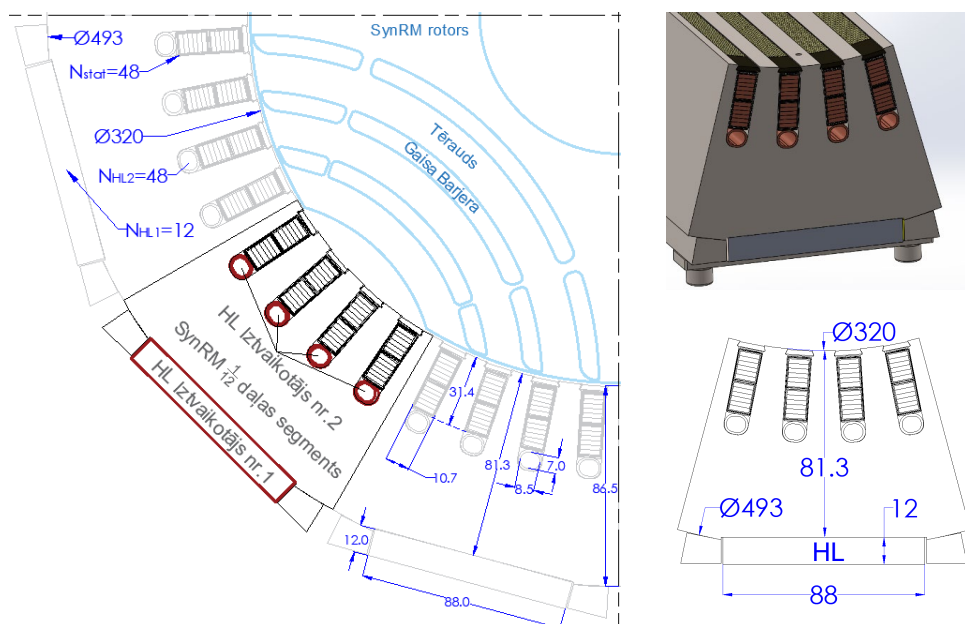
Līdzīgi kā iepriekš aprakstītais 1/12 statora segments, arī segments nr.2 tiek veidots no 0,5 mm biezām M470-50HP elektrotehniskā tērauda loksņēm kuras izgrieztas ar lāzeri un pie arējās statora virsmas piemetināti stiprinājumi. Tērauda daļas kuras saskaras ar dzesēšanas sistēmas elementiem, ir precīzi apstrādātas, lai nodrošinātu pēc iespējas labāku saskari un minimālu termisko pretestību saskares vietā. Atšķirībā no iepriekšējā segmenta, šī segmenta ražošanas procesā pēc statora elektrotehniskā tērauda paketes salikšanas un pirms tinuma ievietošanas, statora rievās jāievieto dzesēšanas sistēmas caurules. Tinumu un izolāciju veido tā pat kā iepriekšējam segmentam. Segmentā nr.2, kā iepriekšējam segmentam, iestrādātā

atveres temperatūras mērīšanai kurās ievieto termozondes. Segmenta nr.2 izmantota iepriekš aprakstītā HL dzesēšanas sistēma, kurai papildus pieslēgtas rievā izvietotās caurules. Segmenta nr.2 galvenie izmēri parādīti 4.17. attēlā, bet izgatavotais modelis 4.18. attēlā.

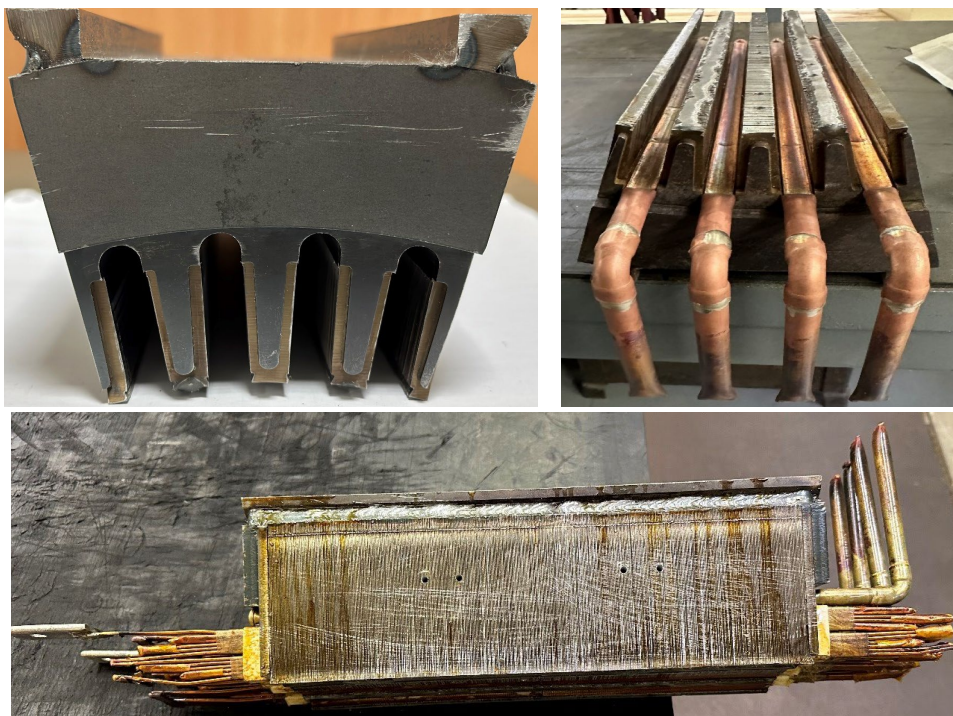
Segmenta nr.2 galvenie rezultāti un secinājumi

Salīdzinot pirmā segmenta un segments nr.2 ražošanas procesu, kā trūkumu var izcelt – segments nr.2 ražošanas posmā starp statora paketes izveidošanu un tinuma ievietošanu rievās, rievās jāievieto dzesēšanas sistēmas elementi. Projekta kura ietvarā ražots segments, atbildības bija sadalītas par elektriskās mašīnas ražošanas daļu atbild AS “RER”, bet par dzesēšanas sistēmas ražošanu atbildīgs ir SIA “Allatherm”, kas atspoguļo tipiskas elektriskās mašīnas ražošanas procesu kurā šo daļu ražošanu veiks atsevišķas nodaļas, vai uzņēmumi. Aprakstot ražošanas procesa soļu secību – stators > tinums > dzesēšana > korpuss – papildina ar papildus soli – stators > dzesēšana > tinums > dzesēšana > korpuss.

HL iztvaikotāja nr. 2 rievās ievietoto iztvaikotāju izgatavošanas problēmu dēļ segment nebija iespējams pārbaudīt, kas parāda risinājuma būtisku trūkumu – izgatavošanas sarežģītību. Par segmenta veiktspēju var spriest no GEM modelēšanas, kas aprakstīts iepriekšējā nodaļā.



4.17. att. Skice SynRM ar HL statora rievās dzesēšanu



4.18. att. izgatavotais 1/12 segments nr.2 modelis

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

SynRM 1/12 segmenta testi uzrāda, ka ir potenciāls dzesēt *SynRM* ar *HL* dzesēšanas sistēmu. Segmenta testa rezultātus ar virkni vienkāršojuumu 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.

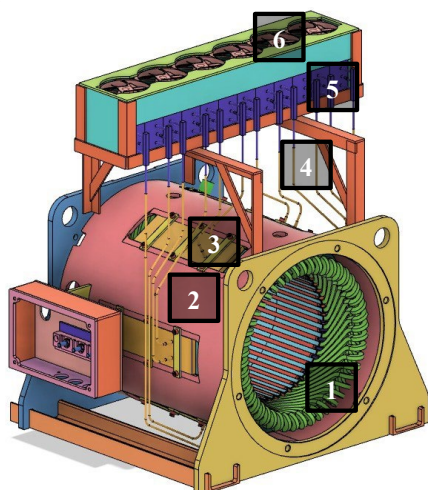
HL iekļaušana *SynRM* konstrukcijā (4.19. att.) ietver elektriskās mašīnas konstrukcijas mašīnas daļu (1), (2) un *HL* dzesēšanas sistēmas daļu (3) – (6). Mašīnas daļa praktiski neatšķiras no tipiskas *SynRM* konstrukcijas ar IC01 dzesēšanu. Mašīnas daļa attiecas arī uz rotoru, kas nav iekļauts skicē. *HL* dzesēšanas sistēmas daļas (4.19. att. (3)-(6)):

(3) *HL* iztvaikotājs ir mašīnas izdalītā siltuma savācējs, paredzēts siltuma uzņemšanai no mašīnas uz *HL* dzesēšanas sistēmu. Iztvaikotājā, mašīnas zudumu radītais siltums uzsilda siltumnesēju, kā rezultātā tas maina agregātvācokli no šķidruma uz tvaiku.

(4) *HL* siltumnesēja šķidruma un tvaika kanāli paredzēti siltumnesēja cirkulācijai no iztvaikotāja uz tvaika kondensatoru.

(5) *HL* tvaika kondensatori ir mašīnas izdalītā siltuma novadītājs, paredzēts siltuma nodošanai no *HL* dzesēšanas sistēmas uz apkārtējo vidi. Darbojas mainot siltumnesēja agregātstāvokli no tvaika uz šķidrumu. Potenciāli izmantojams sabiedriskā transporta kabīnes sildīšanai, lai uzlaboto kopējo transportlīdzekļa enerģijas patēriņa efektivitāti. Eksperimenta mašīnai tvaika kondensatori uzstādīti virs mašīnas ~ 0,5 m attālumā no korpusa.

(6) *HL* Ventilatori paredzēti tvaika kondensatoru efektivitātes uzlabošanai virzot gaisa plūsmu uz tvaika kondensatoru siltumu izstarojošo cauruļu, jeb radiatora virsmu.



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

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

Izstrādātās *SynRM* mašīnas ar *HL* dzesēšanas sistēmu apraksta būtiska daļa ir dzesēšanas sistēmas *IC* koda (*International Cooling*) piešķiršana atbilstoši *LVS EN 60034-6:2002* standartam. Kā jebkurai inovatīvai metodei, standarta pielietošana var tikt dažādi interpretēta, tāpēc zemāk dots autora ieskatā atbilstošākais kods, bet vēlama diskusija par koda pirmo un sevišķi pēdējo ciparu.

- *HL* dzesēšanas sistēmas būtiska priekšrocība ir iespēja realizēt mašīnu pilnīgi slēgtā izpildījumā. *IC* koda pirmais cipars apraksta dzesēšanas sistēmas veidu un siltumapmaiņas procesu no mašīnas iekšējās daļas uz dzesēšanas sistēmu. Slēgtas konstrukcijas *SynRM* ar *HL* iztvaikotājiem montētiem uz statora paketes, bet tvaika kondensatoriem, kuri pilda siltummaiņa funkciju, montēti atsevišķi, kā arī ūdens cirkulē slēgtā kontūrā, apzīmējams ar – 9.
- Izstrādātā dzinēja *HL* dzesēšanas sistēmā kā siltumnesēju izmanto ūdeni. *IC* koda otrais burts apzīmē siltumnesēju. Ūdens apzīmējams ar – W.
- Izstrādātā dzinēja *HL* dzesēšanas sistēmas siltumnesējs cirkulē dabiskā veidā, siltumnesēja agregātstāvokļa maiņas ietekmē, bez piespiedu cirkulācijas, bez pumpja vai kompresora. *IC* koda trešais cipars apraksta siltumnesēja cirkulācijas metodi. Autora ieskatā atbilstošākais apzīmējums *SynRM* ar *HL* ir – 7 – siltumnesēja

cirkulāciju nodrošina no mašīnas neatkarīgs elektrisks vai mehānisks elements, vai cirkulāciju nodrošina spiediens dzesēšanas sistēmā.

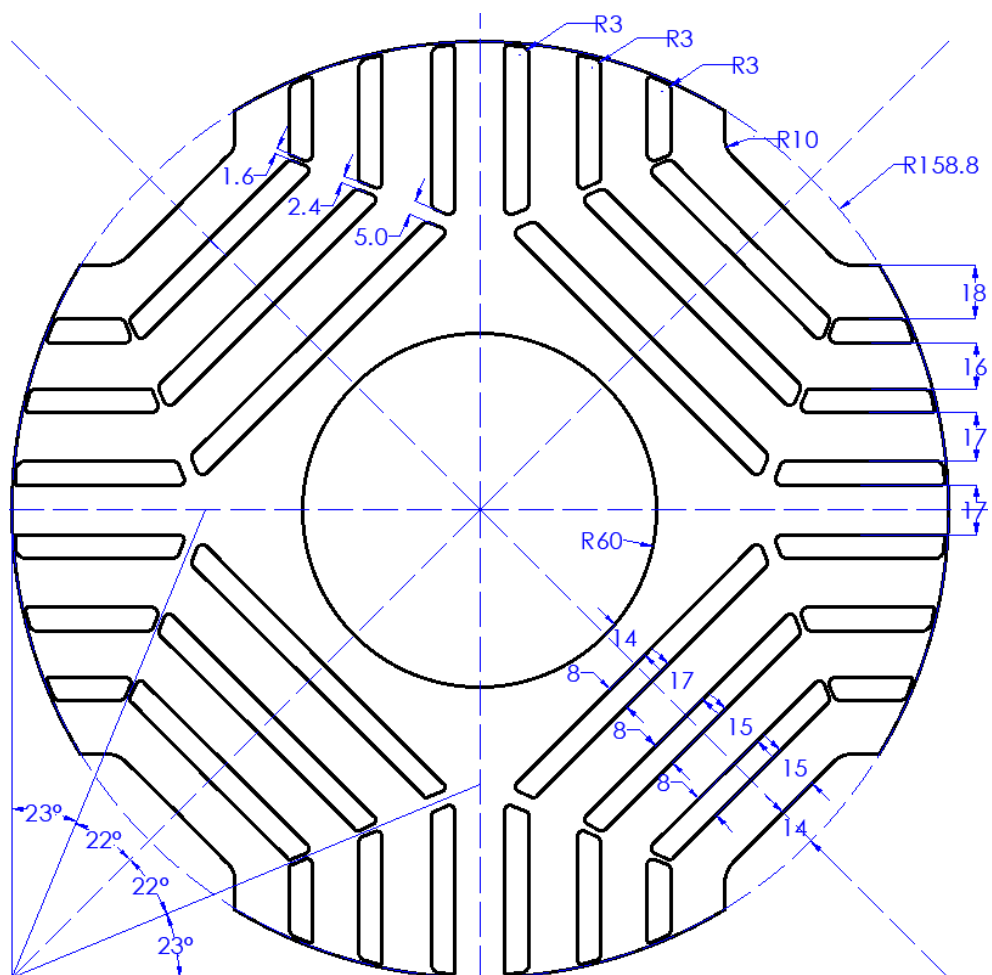
Attiecīgi, izstrādātā 180 kW *SynRM* ar *HL* dzesēšanas sistēmu dzesēšanas sistēmas *IC* kods (*International Cooling*) atbilstoši *LVS EN 60034-6:2002* ir *IC9W7*.

Projektēšana

Sinhronās reaktīvās mašīnas projektēšana tika veikta pēc iepriekšējās nodaļās aprakstītajām vadlīnijām. Lai neatkārtotu iepriekšējās nodaļās izklāstīto, šeit atspoguļotas tikai galvenās *SynRM* ar siltumcīlpas 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 (4.20. 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 trapeceveida barjerām pieņemts, lai izgatavoto prototipu būtu iespējams izmantot potenciālos nākotnes *PMASynRM* 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.



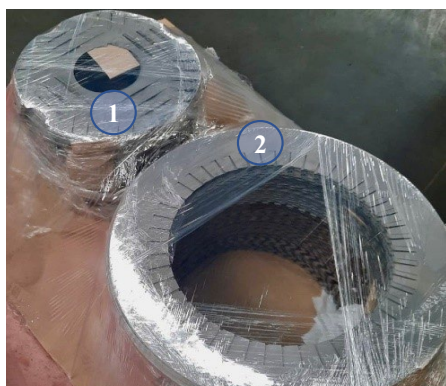
4.20. att. *SynRM* ar *HL* dzēsēšanu, trapecveida gaisa barjeru rotors

Izgatavošana

SynRM ar *HL* izgatavota AS “RER”. *SynRM* ar *HL* ražota tāpat kā 180 kW *SynRM*. Mašīnas stators un rotors izgatavoti no 0,5 mm biežām elektrotehniskā tērauda M470-50HP loksnēm. 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*”.

Izstrādātās *SynRM* ar *HL* ražošanas process iedalāmas šādos:

1. No elektrotehniskā tērauda loksnēm ar lāzeri tiek izgrieztas rotora (1) un statora (2) loksnes (4.21. att. a). Štancēšanas metodi aizstāj ar lāzeri, jo tiek izgatavots viens unikāls eksemplārs.
2. Rotora salikšanu sāk ar vārpstas izgatavošanu. Uz vārpstas (3) no rotora elektrotehniskā tērauda loksnēm (1) saliek rotora serdi, ko nostiprina ar gala stiprinājumu (4), tad serdi laminē. Veic rotora serdes un vārpstas apstrādi un slīpēšanu, tad veic rotora balansēšanu un visbeidzot rotoru nokrāso. (4.21. att. b)
3. Statora serdes salikšanu sāk ar korpusa cilindra daļas izgatavošanu (5) kurai piemetina gala plāksnes (6). Gala plāksnes paredzētas gultņu vairogam un mašīnas kāju stiprinājumam. Veic cilindra slīpēšanu un apstrādi. Korpusa cilindrā ievieto statora elektrotehniskā tērauda loksnes (2) (4.21. att. c) pēc kā saliktai statora serdei veic rievu slīpēšanu un apstrādi. Nākamajā solī rievās ievieto tinumu aktīvās daļas un rievas izolāciju (7) (4.21. att. d). Tinuma frontālās daļas (8) savieno atbilstoši tinumu shēmai un izolē. Salikts stators ar tinumiem tiek impregnēts ar epoksīda kārtu. Visbeidzot statoru un korpusu nokrāso.
4. Saliek *SynRM* konstrukciju bez *HL* dzesēšanas sistēmas. Korpusā izveido speciālas atveres *HL* iztvaikotāja stiprināšanai (9). Izveido konstrukciju *HL* tvaika kondensatora stiprināšanai (10). Tvaika kondensatora daļu iespējams pārnest pie transportlīdzekļa apsildes sistēmas un *SynRM* izdalīto siltumu izmantot transportlīdzekļa kabīnes apsildē. (4.21. att. e)
5. *SynRM* un *HL* dzesēšanas sistēmas ražošanas procesi tika atdalīti. Atdalīta ražošana uzskatāma par priekšrocību. Visbeidzot *SynRM* piestiprina izgatavoto *HL* dzesēšanas sistēmas iztvaikotāju (11), ūdens un tvaika pārvades līnijas (12) un tvaika kondensatoru (13). (4.21. att. f)



a)



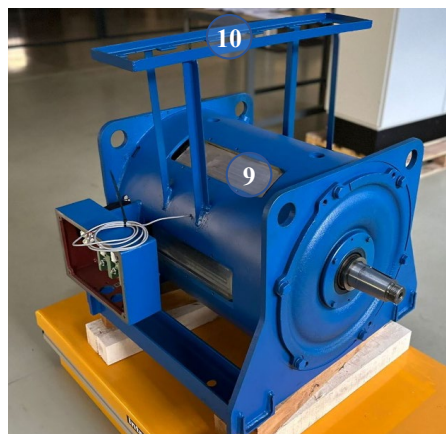
b)



c)



d)



e)



f)

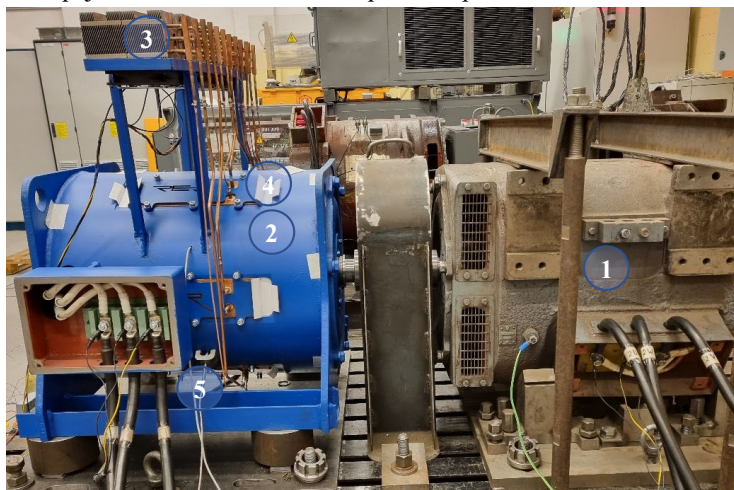
4.21. att. *SynRM* ar *HL* izgatavošanas process

Eksperimenti

SynRM ar *HL* pārbaude veikta AS “RER” laboratorijā uz transporta piedziņas elektrodzinēju izmēģinājuma stenda (4.22. att.). Pārbaudes stends, kas ietver frekvenču pārveidotāju, slodzi un mēraparātus ir tas pats, kas izmantots 180 kW *SynRM* pārbaudei. *SynRM* ar *HL* būtiskā atšķirība no 180 kW *SynRM* ir tieši dzesēšanas sistēmā, tāpēc eksperimentos pastiprināta uzmanība pievērsta temperatūras mērījumiem. Temperatūra tika mērīta ar trīs dažādām mēriekārtām:

- Pārnēsājams termometrs ar datu ierakstīšanas funkciju *PCE-T390*, 2 iekārtas katra ar 4 mērījumu kanāliem, kopā 8 mērījuma vietas. Mēraparātu un termozondes uzstāda pirms mērījumiem. Atbilstoši *LVS EN 60034-1:2011* termometra metode. Termozondes izvietotas uz *HL* iztvaikotāja un *HL* tvaika kondensatora uz tinumiem, korpusa u.c., eksperimenta mērījumus izmanto *HL* dzesēšanas sistēmas efektivitātes noteikšanai.
- Pārbaudes stenda termometrs ar trīs *PT-100* temperatūras sensoriem kuri mēra temperatūras: pie tinuma, uz korpusa un apkārtējās vides temperatūra pie stenda. Atbilstoši *LVS EN 60034-1:2011* iebūvētā temperatūras detektora metode *ETD*. Izmanto tinuma un korpusa temperatūras analizē.
- *Fluke TiS60+* infrasarkanā termokamera, ar infrasarkanās lēcas izšķirtspēju 320 x 240. Standarts *LVS EN 60034-1:2011* ražošanā un ekspluatācija iesaka noteikt karstos punktus “*hot spots*”, kam ieteicams izmantot infrasarkanu termogrāfiju.

SynRM eksperimenta stends parādīts 4.22. attēlā, kur: (1) slodzes asinhronas dzinējs; (2) *SynRM* ar *HL*; (3) *HL* dzesēšanas sistēmas tvaika kondensators; (4) mašīnas atveres, kuras uz eksperimenta laiku aizklātas; (5) *PT-100* termosensori. Pirms eksperimentu veikšanas, pēc visu termosensoru uzstādīšanas aizklāj visas atveres (4), tā lai siltumapmaiņas procesi ar apkārtējo vidi iespējami tikai caur mašīnas korpusu, vārpstu un *HL* dzesēšanas sistēmu.



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

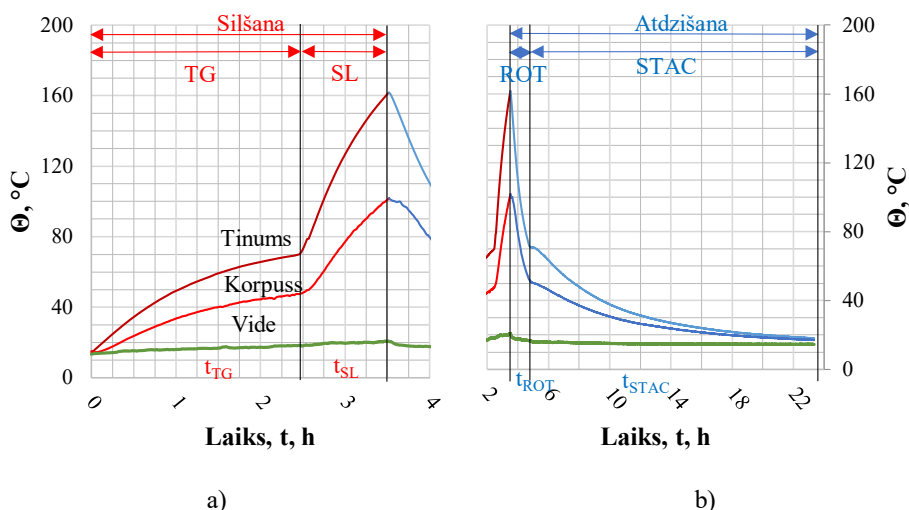
Veic eksperimentus diviem režīmiem, tukšgaitas režīmā un nominālās slodzes, jeb $P_2 = 180 \text{ kW}$ režīmā. Abus eksperimentus veic vienā piegājienā bez mašīnas atslēgšanas, sākot ar tukšgaitas eksperimentu, kad ir iegūti pietiekami daudz mērījumu, lai noteiktu tukšgaitas stabilu tinumu virstemperatūru, slodzi palielina līdz nominālai. Tukšgaitas eksperimentā mašīna tiek nedaudz papildus slogota ar sajūgtā asinhronā dzinēja rotora masu. Pāreja no tukšgaitas režīma uz nominālās slodzes režīmu ilgst 6 min 13s.

Tukšgaitas eksperiments tiek veikts aptuveni 2 h 25 min pēc kurām ir novērojams tinuma temperatūras pieaugums un analītiski novērtējams kāda būs stabila virstemperatūra. Tukšgaitas eksperiments tiek veikts pie tāda samazināta sprieguma ar kuru iespējams nodrošināt nominālo rotācijas ātrumu un sinchronu darba režīmu.

Slodzes eksperiments tiek veikts uzreiz pēc tukšgaitas eksperimenta, neatslēdzot mašīnu, aptuveni 1 h un pēc kā ir novērojams tinuma temperatūras pieaugums un analītiski novērtējams kāda būs stabila virstemperatūra. Stundas laikā tinums temperatūra ir ļoti tuva izolācijas klases H maksimāli pieļaujamai $180 \text{ }^\circ\text{C}$, jāatzīmē, ka slodzes tests tika sākts uzreiz pēc tukšgaitas testa pie $\theta_{tinums} \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eksperimentu rezultāti

Temperatūras mērījumu veikti silšanas (4.23. att. a) un atdzišanas procesam (4.23. att. b). 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.



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

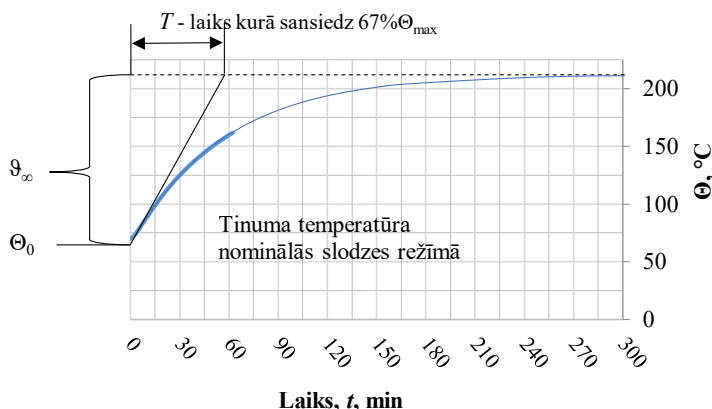
Ar dažiem vienkāršojumiem eksperimentos novēroto *SynRM* ar *HL* mašīnas silšanas procesu un mašīnas elementu temperatūru silšanas procesa laikā Θ_{sil} var aprakstīt ar 4.1. vienādojumu. Galvenais vienkāršojums ir tas, ka vienādojums neietver noteiktā režīma pirmās 5–10 minūtes, kurās norisinās elektriska 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 ietekmējis apkārtējās vides temperatūru. Darba režīmam raksturīgās nostabilizējušās virstemperatūras ϑ_∞ un silšanas laika konstante T ir eksperimentu rezultātu aproksimācija. Grafiski eksperimentu rezultāti (exp.) un, izmantojot 4.4. 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 4.24. attēlā.

$$\Theta_{sil} = \Theta_0 + \vartheta_\infty \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{T}\right)}\right), \quad (4.4.)$$

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 – S_2 60 min pie apkārtējās vides temperatūras 40°C *SynRM* ar *HL* $\Theta_{tinumi} = 135^\circ\text{C}$ un $\Theta_{korpuss} = 101^\circ\text{C}$.

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

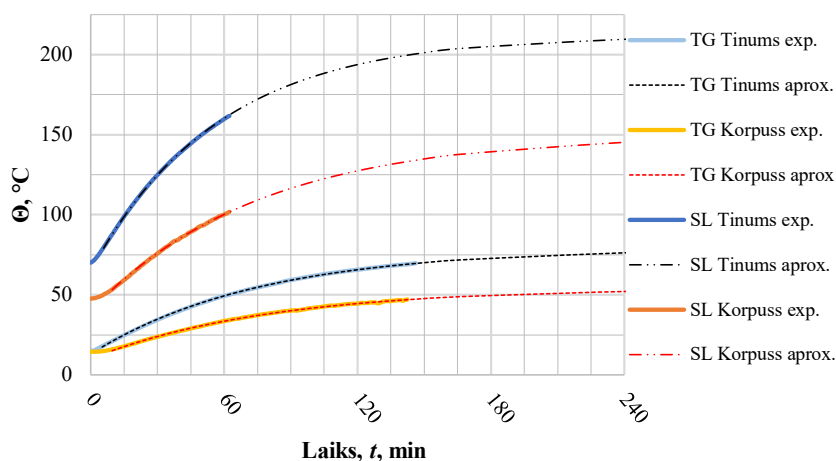
$$\Theta_{atdz} = \Theta_{vide} + (\Theta_0 - \Theta_{vide})e^{\left(-\frac{t}{T}\right)}. \quad (4.5)$$



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

Temperatūras θ_0 , ϑ_∞ un silšanas laika konstante T

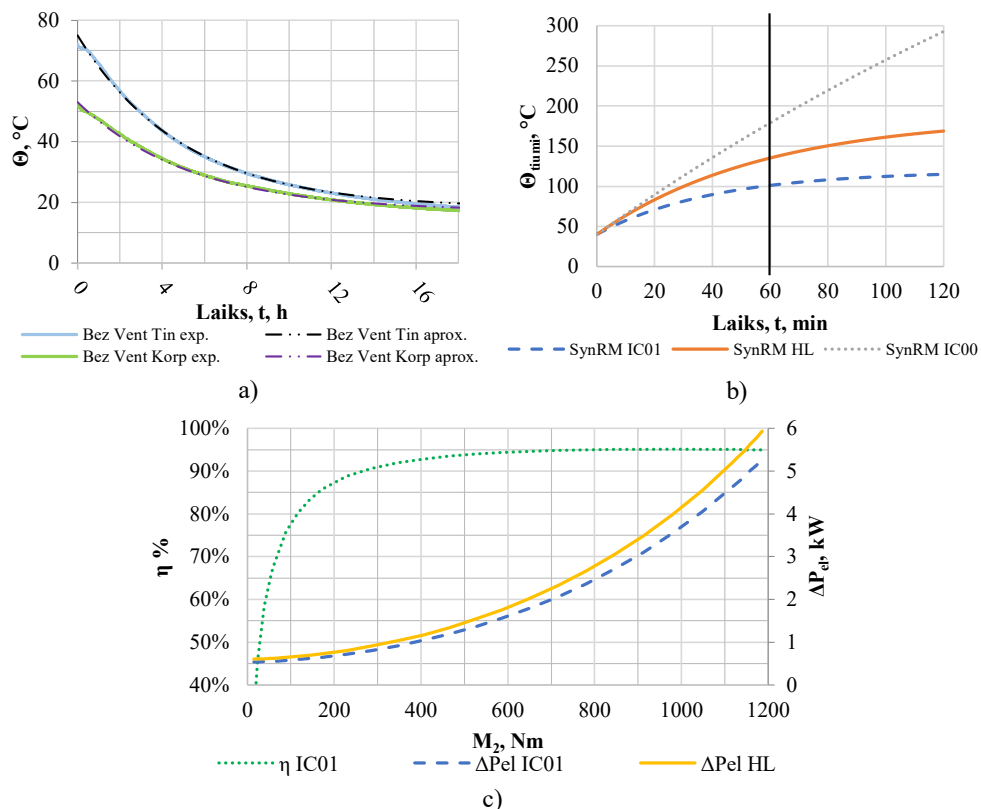
Parametrs	Režīms Mērījumu vieta	Silšana				Atdzišana			
		Tukšgaita		Slodze		Rotācija		Statisks	
		Tinums	Korpuss	Tinums	Korpuss	Tinums	Korpuss	Tinums	Korpuss
Temperatūra eksperimenta sākuma, θ_0 , °C		13	10	65	40	162	110	75	53
Nostabilizējies virstemperatūra, ϑ_∞ , °C		66	44,3	147	110	-	-	-	-
Silšanas laika konstante, T , minūtes		75	80	57,5	75	75	80	300	320

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

Atdzišanas eksperimentam un tā rezultātu aproksimācijai (4.26. 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 (4.26. 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 (4.26. 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 $P_{2N} = 180 \text{ kW}$, $U = 420 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ *SynRM* ar *HL* elektriskie zudumi, salīdzinot ar 180 kW *SynRM* ar *IC01* dzesēšanu, ir par $\sim 0,5 \text{ kW}$ lielāki, kā ietekmē lietderības koeficients samazinās par $\sim 0,3 \%$.



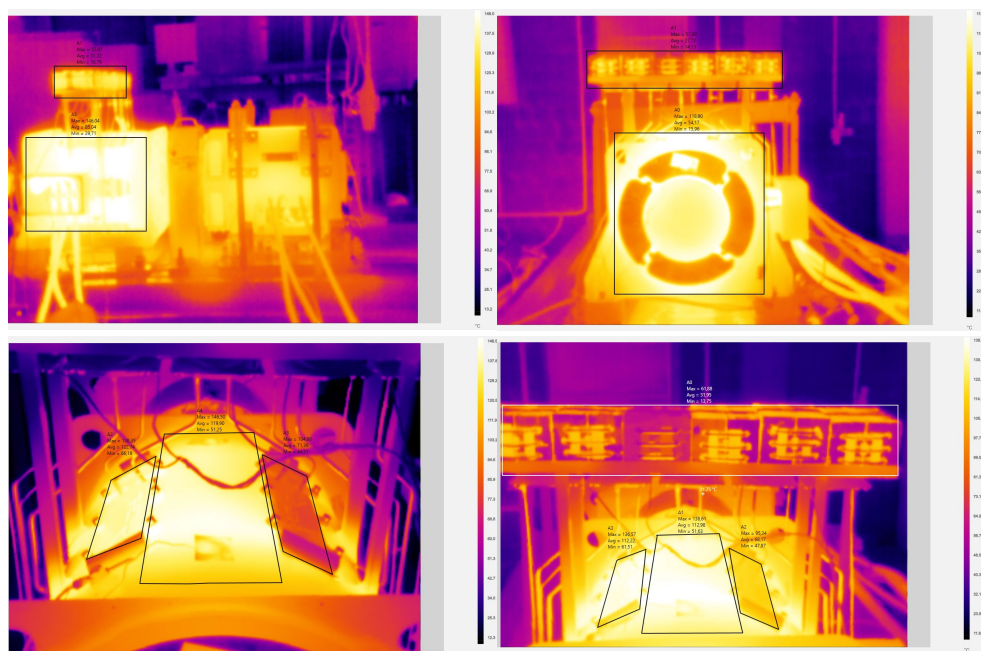
4.26. att. a) *SynRM* ar *HL*, tinuma un korpusa atdzišana, atslēgti *HL* tvaika kondensatora ventilatori; b) *SynRM* ar *HL*, *SynRM IC01* un *SynRM IC00* bez dzesēšanas sistēmas temperatūras salīdzinājums pie apkārtējās vides temperatūras $\Theta_{\text{vide}} = 40 ^\circ\text{C}$; c) *SynRM* ar *HL*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

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: $U = 467,5 \text{ V}$; $I_1 = 370 \text{ A}$; $P_1 = 194,2 \text{ kW}$; $\cos\phi = 0,648$; $f = 50 \text{ Hz}$; $P_2 = 181,1 \text{ kW}$, attiecīgi lietderības koeficients ir $\eta = 93,3 \%$. Lai arī elektriskie zudumi ir pieauguši tikai par $0,5 \text{ kW}$, kopējie zudumi ir pieauguši uz $\Delta P_{\Sigma} = 13,1 \text{ kW}$, pieaugums par $3,67 \text{ kW}$ ($\Delta P_{\Sigma \text{ IC01}} = 9,43 \text{ kW}$).

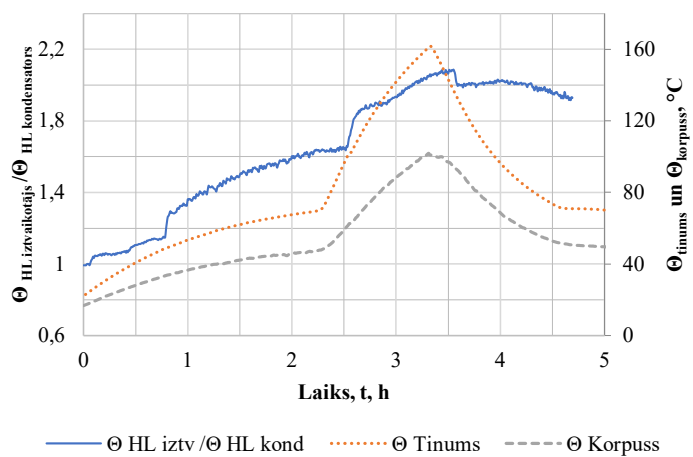
Eksperimenta laikā pielieto infrasarkanā termogrāfiju, lai noteiktu karstos punktus “hot spots”. Infrasarkanās termogrāfijas attēli ļoti uzskatāmi parāda bojāto *HL* iztvaikotāju.

Infrasarkanās termogrāfija uzņemta ar visam attēlam vienu atstarošanas koeficientu, tāpēc attēlā uzrādīto temperatūru skaitliskās vērtības nav tik būtiskas, cik būtiska ir temperatūras izmaiņa laikā un temperatūru atšķirība starp līdzīgos apstākļos esošiem elementiem. 4.27. attēlā parādīti termoattēli slodzes eksperimenta beigās, kad tika sasniegtas lielākās dzinēja temperatūras.

Par *HL* dzesēšanas sistēmas efektivitāti var spriest pēc iztvaikotāja un tvaika kondensatora temperatūras attiecības (4.28. 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 (4.28. att.). Interesanti ka novērojami *HL* dzesēšanas sistēmas lēcienveida efektivitātes pieaugumi, kas iespējams skaidrojams ar ūdens agregātstāvokļa maiņas procesu *HL* iztvaikotājā.



4.27. att. *SynRM* ar *HL* termoattēli pirms silšanas režīma pārtraukšanas, kad sasniegtas dzinēja maksimālās temperatūras



4.28. 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 agregārstāvokļa maiņa no šķidruma uz tvaiku un atpakaļ šķidrumā, kā arī termosifona princips, novietojot tvaika kondensatorus virs mašīnas. Lai ūdens siltuma ietekmē mainītu agregārstāvokli, 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 sarežģītumi ar magnētu ievietošanu un nostiprināšanu.
2. *SynRM* ar slēgtu konstrukciju turpmākās 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. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., Ebrahimi, K.. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. United States: CRC Press. 2018.
5. Lipo, T. A. *Synchronous Reluctance Machines – A Viable Alternative for AC Drives?*, In: Electrical Machines and Power Systems, 1991, 659-671 p.
6. Kostko, J. K. Polyphase Reaction Synchronous Motor, In: Journal of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 42, Iss. 11, 1923.
7. Vagati, A. Synchronous Reluctance Electrical Motor Having A Low Torque-Ripple Design, Publication number 5818140 A, Publication date Oct 6, 1998.
8. Levins, N., Kamoliņš, E., Vītolņa, S., *Bezkontakta Elektriskās Mašīnas*, RTU izdevniecība, Rīga, 2011, 275 lpp.
9. Gamba, M., Pellegrino, G., Vagati, A. and Villata, F. "Design of a line-start synchronous reluctance motor," 2013 International Electric Machines & Drives Conference, Chicago, IL, USA, 2013, pp. 648-655.
10. Magnet-free motor technology for fixed speed applications reaching "IE5" efficiency level, ABB, Sept. 2015. [tiešsaiste] (Skatīts 19.10.2024 - library.e.abb.com)
11. Boldea, I., Tutelea, L. N., Parsa, L. and Dorrell, D. "Automotive Electric Propulsion Systems With Reduced or No Permanent Magnets: An Overview," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 10, pp. 5696-5711, Oct. 2014.
12. Bianchi, S. Bolognani, E. Carraro, M. Castiello and E. Fornasiero, "Electric Vehicle Traction Based on Synchronous Reluctance Motors," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no. 6, pp. 4762-4769, Nov.-Dec. 2016.
13. Krishnan, R., *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*, CRC Press, 2001, 432 p.
14. Vagati, A., Pastorelli, M., Franceschini, G., Petrache, S.C. *Design of Low-Torque-Ripple Synchronous Reluctance Motors*, IEEE Transactions on Industry Applications Vol: 34, Iss: 4, 1998.

15. ABB is first to reach anticipated IE6 hyper-efficiency with magnet-free motors, ABB, Jun. 2024. (Skatīts 5.11.2024 - library.e.abb.com)
16. Almeida, A. T., Ferreira, F. J. T. E. and Fong, J. A. C. "Standards for Efficiency of Electric Motors," in IEEE Industry Applications Magazine, vol. 17, no. 1, pp. 12-19, Jan.-Feb. 2011,
17. 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
18. Lipo, T. A., Matsuo, T., *Rotor design optimization of synchronous Reluctance machine*, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 9, No. 2, 1994.
19. Pyrhonen, J., Jokinen, T., Hrabovcova, V. *Design of Rotating Electrical Machines*, John Wiley & Sons, Ltd., 2008.
20. Boldea, I. Nasar, S. A. *The Induction Machines Design Handbook, second edition*, CRC Press, 2009, 845 p.
21. Boldea, I., *Reluctance Synchronous Machines and Drives*, Oxford: Clarendon Press, 1996, 230 p.
22. 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,
23. 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.
24. Gulbis, K. Sinhronās reaktīvās mašīnas konstrukcijas izstrāde, Maģistra darbs, Rīgas tehniskā universitāte, Rīga, 2016. 105 p.
25. 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.
26. 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.
27. 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.

28. 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.
29. 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.
30. Gulbis, K. Sinhronās reaktīvās mašīnas konstrukcijas izstrāde, Maģistra darbs, Rīgas tehniskā universitāte, Rīga, 2016. 105 p.
31. Kolehmainen, J. "Synchronous reluctance motor with form blocked rotor," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 25, no. 2, pp. 450-456, Jun. 2010.
32. Lendenmann, H., Osterholm, V., *Synchronous Reluctance Machine Using Rotor Flux Barriers as Cooling Channels*, Publication number: US20130099607 A1, Issue date: apr 25, 2013.
33. 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, Iss.: 4 , pp. 213 – 220, 1994.
34. Kamper, M.J., Merwe, F.S., Williamson, S. "Direct finite element design optimisation of the cageless reluctance synchronous machine", IEEE Transactions on Energy Conversion Vol.: 11 , Iss.: 3 , pp.547 – 555, 1996 .
35. Vagatti, A., Canona, A., Chiampi, M., Pastorelli, M., Repetto, M. "Design Refinement of Synchronous Reluctance Motors Through Finite-Element Analysis", IEEE Transactions on industry applications, Vol. 36, No. 4, 2000.
36. Barcaro, M., Pradella, T., Furlan, I. "Low-torque ripple design of a ferrite-assisted synchronous reluctance motor," IET Electric Power Applications, Vol.: 10, Iss.: 5, 2016.
37. Lubin, T., Razik, H., Rezzoug, A. "Magnetic Saturation Effects on the Control of a Synchronous Machine", IEEE Transactions on Energy Conversion Vol.: 17, No. 3, 2002.
38. Im, J.-B., Kim, W., Kim, K., Jin, C.-S., Choi, J.-H., Lee, J. "Inductance Calculation Method of Synchronous Reluctance Motor Including Iron Loss and Cross Magnetic Saturation", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 6, 2009.
39. Moghaddam, R.R., Gyllensten, F. "Novel High-Performance SynRM Design Method: An Easy Approach for A Complicated Rotor Topology," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, Iss. 9, 2014.

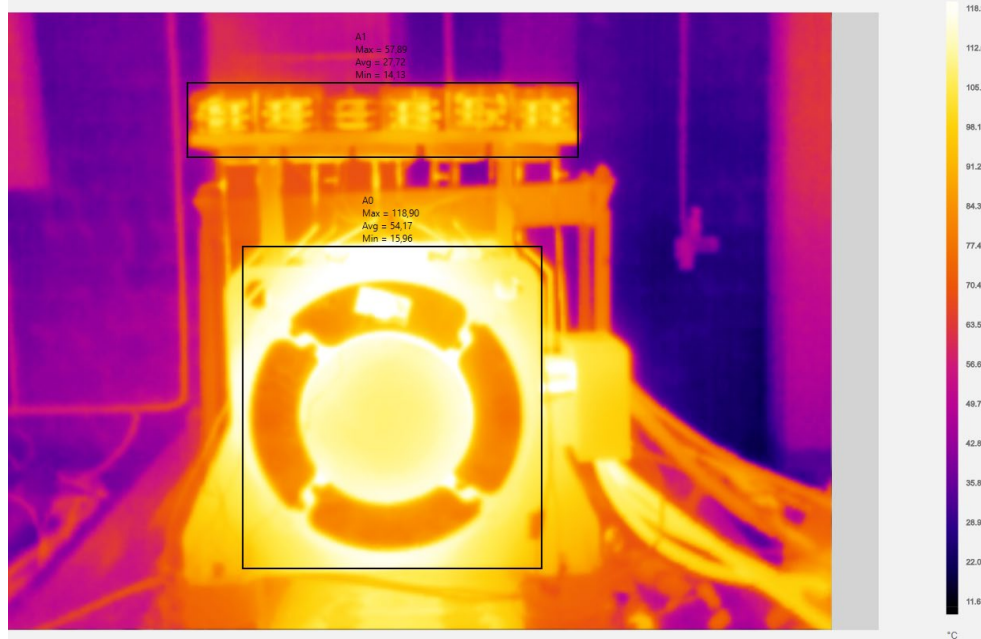
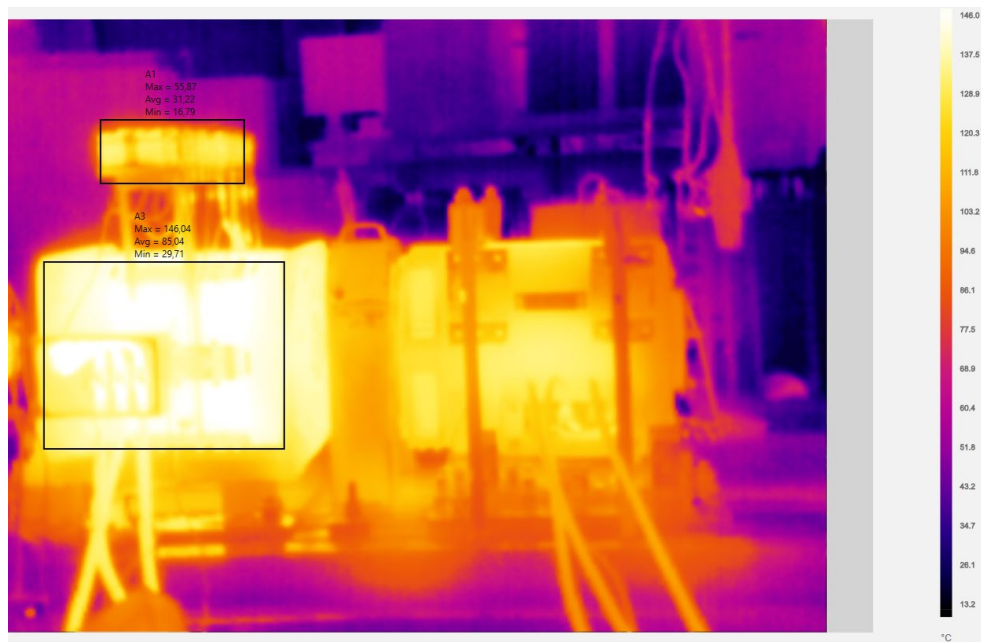
40. Gulbis, K., Kamoliņš, E., Brakanskis, U., Zarembo, J. "Parameter Calculation Method of Synchronous Reluctance Motor Including Cross Magnetic Saturation," 2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 5-7 Nov. 2020.
41. Zviedris, A., Podgornovs, A. Divdimensionālu magnētisko lauku matemātiskā modelēšana ar galīgo elementu metodi, Programma Quick Field, instrukcija, Rīga, 2007. 59 p.
42. Gulbis, K., *Ātrgaitas ventiļdzinējs ar ārēju, reaktīvu rotoru*, Inženierprojekts, Rīgas tehniskā universitāte, Rīga, 2014. 112 p.
43. Crowell, J. R., Doctor, M. M., Johnson, W. R., Marker, T. K., Sontag, D. R. and Basu, A. K. "Liquid Cooled Electric Motor Frame," Patent 5,859,482, 12 Jan., 1999.
44. Deriszadeh, A., Monte, F. "On Heat Transfer Performance of Cooling Systems Using Nanofluid for Electric Motor Applications" in XII International Conference on Computational Heat Mass and Momentum Transfer, Entropy 2020, 22(1), p. 99.
45. Wang, S., Li, Y., Li, Y.Z., Wang, J., Xiao, X., Guo, W. Transient cooling effect analysis for a permanent-magnet synchronous motor with phase-change material packing. Appl. Therm. Eng. 2016, 109, 251–260.
46. Chaudhry, H.N., Hughes, B. R., Ghani, S. A. "A review of heat pipe systems for heat recovery and renewable energy applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16, Issue 4, 2012, Pages 2249-2259, ISSN 1364-0321.
47. Polikarpova, Mariia. "Liquid cooling solutions for rotating permanent magnet synchronous machines," Ph.D. dissertation, Dep. Mech. Eng., Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 2014.
48. Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., Smyth, M. "A Review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14 Issue 2, 2010, pp.615-628.
49. Boglietti, A., Cavagnino, A. Lazzari un Pastorelli, M. "A Simplified Thermal Model for Variable-Speed Self-Cooled Industrial Induction Motor" IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 945-952, 4 July 2003.
50. Ghahfarokhi, P. S., Kallaste, A., Vaiman T. un Belachen, A. "Thermal Analysis of Totally Enclosed Fan Cooled Synhronous Reluctance Motor-state of art" 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 4372-4377, October 2019.

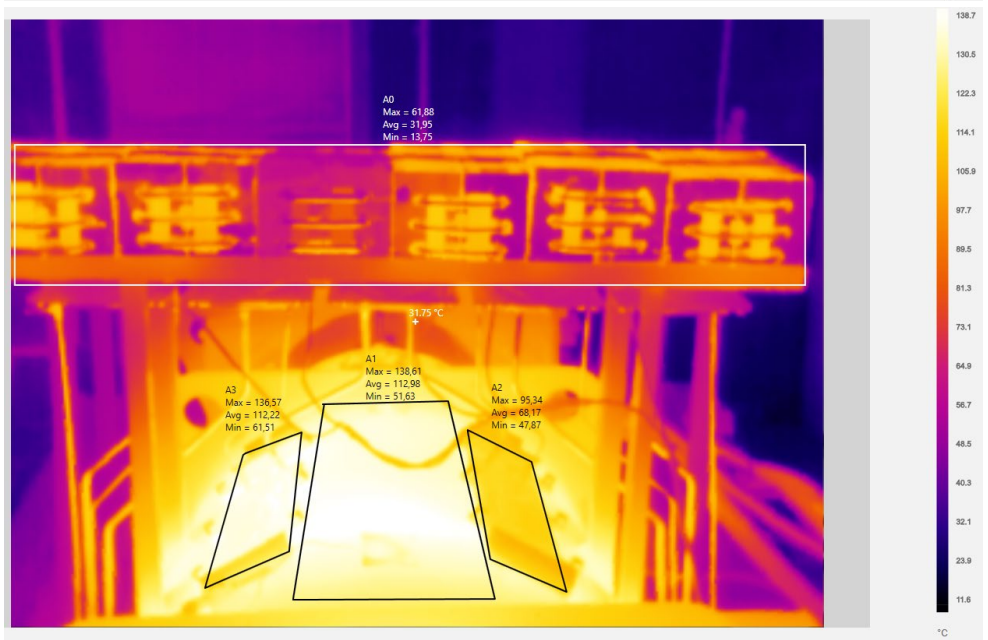
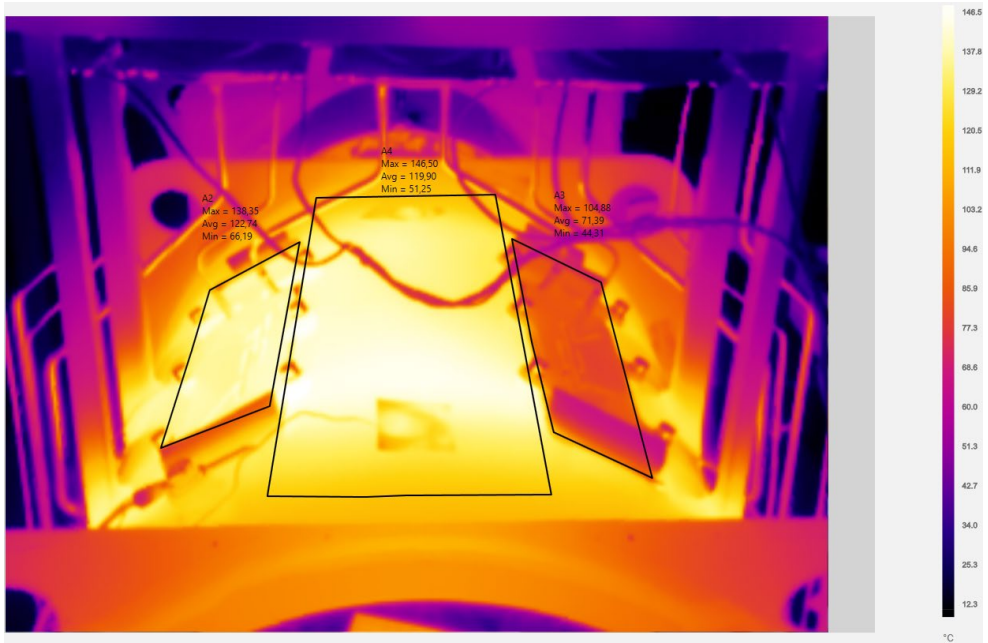
51. Ghahfarokhi, P. S., Kallaste, A., Podgornovs, A., Belahcen A., Vaimann, T. "Development of analytical thermal analysis tool for synchronous reluctance motors," *IET Electric Power Applications*, pp. 1828-1836, 5 August 2020.
52. Ghahfarokhi, P. S., Kallaste, A., Belahcen A., Vaimann, T. "Hybrid Thermal model of synchronous reluctance machine," *Case studies in Thermal Engineering*, pp. 381-389, December 2018.
53. Rikards R., Čate, A. Galīgo elementu metode, Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte, 2001.
54. Bathe, K. "The finite element method," *Massachusetts Institute of Technology*, 2008.
55. Rosu, M., Zhou, P., Lin, D., Ionel, D., Popescu, M., Blaabjerg, F., Rallabandi, V., Staton, D., Multiphysics Simulation by Design for Electrical Machines, Power Electronics, and Drives, New Jersey: John Wiley and Sons, 2018.
56. Kunkulbergs, R. Termisko procesu izpēte elektriskajās mašīnās ar matemātiskām skaitliskajām metodēm, Maģistra darbs, Rīgas tehniskā universitāte, Rīga, 2021. 90 p.
57. Lavrinoviča, L. Siltumslodzes sadalījums vilces reaktīvajam dzinējam ar jaudu 180 kW, Inženierprojekts, Rīgas tehniskā universitāte, Rīga, 2022. 74 p.
58. 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.
59. 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*.
60. 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.
61. 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.

62. 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.

PIELIKUMS

SynRM ar *HL* termoattēli pirms silšanas režīma pārtraukšanas, kad sasniegtas dzinēja maksimālās temperatūras (10 x 16 cm)







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.