



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Igors Ušakovs

ELEKTROIEKĀRTU VIEDĀ TERMISKĀ PĀRVALDĪŠANA

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

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

Igors Ušakovs

Doktora studiju programmas “Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

ELEKTROIEKĀRTU VIEDĀ TERMISKĀ PĀRVALDĪŠANA

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
ILJA GALKINS

RTU Izdevniecība
Rīga 2026

Ušakovs, I. Elektroiekārtu viedā termiskā pārvaldīšana, Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. – 28 lpp.

Publicēts saskaņā ar Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātes promocijas padomes “RTU P-14” 2026. gada 30. marts lēmumu Nr. 04030-9.12/1.

Autors pateicas saviem kolēģiem uzņēmumā “*Allatherm*” par ilgstošu un auglīgu sadarbību divfāžu siltuma pārnese sistēmu izstrādes jomā!

Īpaša pateicība *Dr. Donatas Mishkinis* un *Mr. Luka Ivanovskis* par profesionālo atbalstu, kopīgiem pētījumiem un ieguldījumu eksperimentālo un inženiertehnisko risinājumu attīstībā!

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Savienības Atvērēšanas un noturības mehānisma atbalstu projektā Nr. 5.2.1.1.i.0/2/24/I/CFLA/003 “Konsolidācijas un pārvaldības izmaiņu ieviešana Rīgas Tehniskajā universitātē, Liepājas Universitātē, Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmijā un Latvijas Jūras akadēmijā un Liepājas Jūrniecības koledža virzībai uz izcilību augstākajā izglītībā, zinātnē un inovācijās” akadēmiskās karjeras doktorantūras granta ietvaros (granta ID: 1145).

Vāka attēla autore Kristīne Kutepova.

<https://doi.org/10.7250/9789934372940>

ISBN 978-9934-37-294-0 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 29. maijā plkst. 14 RTU elektrotehnikas, elektronikas, informācijas un komunikāciju tehnoloģiju zinātnes nozares promocijas padomes “RTU P-14” atklātā sēdē Engures novadā, Klapkalnciemā, konferenču un sporta centrā “Ronīši”, konferenču zālē.

OFICIĀLIE RECENZENTI

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

Profesors *Dr. sc. techn. Dmitri Vinnikov,*
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

Asociētais profesors *Dr. Gytis Svinkūnas,*
Kauņas Tehnoloģiju universitāte, Lietuva

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.

Igors Ušakovs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 84 attēli, astoņas tabulas, kopā 176 lappuses. Literatūras sarakstā ir 82 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Promocijas darbs veltīts zinātniski pamatotas pieejas izstrādei pasīvo divfāžu siltuma cilpu izmantošanai kā universālai platformai elektroiekārtu viedajai termiskajai pārvaldīšanai.

Pētījuma aktualitāti nosaka nepārtraukts siltuma plūsmas blīvuma un mūsdienu elektroiekārtu konstrukciju kompakta pieaugums, kas arvien biežāk pārsniedz tradicionālo dzesēšanas sistēmu iespējas. Aktīvie dzesēšanas risinājumi prasa ārēju enerģijas padevi un vadības sistēmas, savukārt pasīvās divfāžu ierīces balstās iekšējos fizikālos mehānismos – fāžu pārejās, kapilārajos spēkos un gravitācijā, nodrošinot enerģētiski neatkarīgu siltuma pārdali ar augstu uzticamību.

Pētījuma mērķis ir formulēt fizikālos principus, izstrādāt matemātiskos modeļus un inženiertehniskās metodoloģijas, kas nodrošina pāreju no specializētiem siltuma cilpu lietojumiem uz universālām modulārām divfāžu dzesēšanas platformām, kas pielāgojamas dažādu klašu elektroiekārtām.

Pētījuma hipotēze paredz, ka tradicionālo dzesēšanas sistēmu aizstāšana ar atbilstoši projektētām pasīvām divfāžu siltuma cilpām maina elektroiekārtu termisko režīmu tādā veidā, kas uzlabo to darbības raksturlielumus, tostarp palielina siltuma plūsmas blīvumu, paaugstina efektivitāti, samazina masu un pagarina ekspluatācijas ilgumu.

Darba zinātniskā novitāte ietver viedās termiskās pārvaldīšanas koncepcijas ieviešanu kā pašregulējošu divfāžu termisko sistēmu klasi; modulāras daudziztvaikotāju arhitektūras piedāvājumu, balstītu “*Altom*” tehnoloģijā; cilpas tipa siltuma cauruļu (*LHP*) stacionāro un pārejas režīmu matemātisko modeļu izstrādi; termodinamiski konsekventas siltuma noplūdes un pārdzesēšanas interpretācijas formulēšanu; darba šķidruma kvalitātes parametru ieviešanu cilpas termosifoniem (*LTS*); kā arī oriģinālas programmatūras “*Altom-LHP*” izstrādi siltuma cilpu projektēšanai un analīzei.

Piedāvātās pieejas ir eksperimentāli validētas četrās dažādu klašu elektroiekārtās: rumbā integrētā elektromotorā, LED gaismeklī, degvielas šūnu blokā un vilces elektromotorā. Rumbā integrētajam elektromotoram izstrādāta un pārbaudīta *LHP* balstīta dzesēšanas sistēma, kā arī piedāvāta jauna statora konstrukcija ar integrētu iztvaikotāja arhitektūru. LED gaismeklim realizēta un eksperimentāli pārbaudīta jauna siltuma cilpas caurules (*HLP*) koncepcija, kas apvieno klasiskās siltuma caurules un *LHP* īpašības. Degvielas šūnu lietojumam izstrādāta konceptuāla, cilpas termosifonā balstīta dzesēšanas arhitektūra, kā arī izgatavoti un testēti prototipa iztvaikotāji. Vilces elektromotoram izstrādāta, izgatavota un eksperimentāli pārbaudīta dzesēšanas sistēma, kas balstīta sešos cilpas termosifonos.

Iegūtie rezultāti apstiprina, ka pasīvās divfāžu siltuma cilpas var kalpot kā universāla fizikāla un inženiertehniska platforma mērogojamai un enerģētiski neatkarīgai elektroiekārtu termiskajai pārvaldīšanai.

SATURS

1. IEVADS	6
1.1. Pētījuma aktualitāte.....	6
1.2. Darba mērķis.....	6
1.3. Pētījuma hipotēze.....	7
1.4. Pētījuma zinātniskā novitāte	7
Konceptuālie ieguldījumi.....	7
Teorētiskie ieguldījumi	7
Metodoloģiskie ieguldījumi	8
Inženiertehniskā realizācija un eksperimentālā validācija.....	8
1.5. Publikācijas un patenti, kas saistīti ar promocijas darbu	8
1.5.1. Publicēti raksti.....	8
1.5.2. Konferenču raksti	9
Patents	9
2. VIEDĀS TERMISKĀS PĀRVALDĪŠANAS KONCEPCIJA.....	10
2.1. Pasīvās divfāžu siltuma cilpas un Heat Loop Pipe arhitektūra	10
2.2. “Altom” modulārā tehnoloģija – universāla platforma divfāžu siltuma kontūrām.....	12
2.3. Vienfāzes un pasīvās divfāžu dzesēšanas salīdzinājums	13
3. PASĪVO DIVFĀŽU SILTUMA CILPU MODELĒŠANA	15
3.1. Pasīvo divfāžu siltuma cilpu modelēšanas vispārīgie principi.....	15
3.2. <i>LHP</i> stacionārais matemātiskais modelis.....	15
3.3. <i>LHP</i> pārejas procesa modelis, balstīts kompensācijas kameru termiskajā dinamikā	16
3.4. Programmatūra “ <i>Altom-LHP</i> ” <i>LHP</i> projektēšanai un analīzei.....	17
4. PASĪVO DIVFĀŽU SILTUMA CILPU EKSPERIMENTĀLĀ VALIDĀCIJA ELEKTROIEKĀRTĀS.....	19
4.1. Rumbā integrēts elektromotors	19
4.2. LED gaismeklis.....	21
4.3. Degvielas šūnu bloks	23
5. SECINĀJUMI	26
6. IZMANTOTĀ LITERATŪRA	28

1. IEVADS

1.1. Pētījuma aktualitāte

Termiskā pārvaldīšana ir noteicošais faktors, kas ietekmē mūsdienu elektrisko un elektronisko sistēmu uzticamību, efektivitāti un kalpošanas ilgumu. Plašākā nozīmē tā ietver metodes noteikta temperatūras režīma uzturēšanai; tomēr augstas jaudas elektroiekārtās dominējošais izaicinājums ir siltuma novadīšana. Pieaugošais jaudas blīvums, konstrukciju kompakts un funkcionālā integrācija pastiprina termiskos ierobežojumus un padara dzesēšanu par primāru projektēšanas ierobežojumu, nevis par palīgfunkciju. Saskaņā ar [1], ar temperatūru saistītie faktori izraisa vairāk nekā pusi no elektronisko iekārtu atteicēm, kas uzsver efektīvas siltuma novadīšanas kritisko nozīmi.

Dažādu klašu elektroiekārtas darbojas atbilstoši atšķirīgiem enerģijas pārveides principiem. Elektromotoros elektriskā enerģija tiek pārveidota mehāniskajā darbā; LED gaismekļos — starojumā; degvielas šūnu blokos ķīmiskā enerģija tiek pārveidota elektroenerģijā. Neskatoties uz šīm atšķirībām, visos gadījumos būtiska daļa no pārveidotās enerģijas neizbēgami pārvēršas siltumā. Šis siltums ir efektīvi jāsavāc, jāpārnes un jāizkliedē, nepieļaujot pārmērīgu masas, tilpuma vai parazītiskā enerģijas patēriņa pieaugumu. Tādējādi, neraugoties uz atšķirīgajiem enerģijas pārveides mehānismiem, šīm sistēmām ir kopīgs ierobežojošs faktors – tradicionālo dzesēšanas tehnoloģiju ierobežotās iespējas augsta siltuma plūsmas blīvuma [2], [3].

Mūsdienu termiskās pārvaldīšanas attīstības tendence ir arvien plašāka fāžu pāreju izmantošana siltuma pārnēsē, īpaši divfāžu sistēmās ar slēgtu termodinamisko ciklu, kur darba šķidrums iztvaiko siltuma pievades zonā un kondensējas siltuma atdeves zonā. Pasīvās divfāžu siltuma cilpas (*HL*), tostarp cilpas tipa siltuma caurules (*LHP*), kapilāri darbināmas cilpas (*CPL*) un cilpas termosifoni (*LTS*), kuru darbību nodrošina kapilārie spēki vai gravitācija, nodrošina augstu uzticamību, enerģētiski neatkarīgu darbību un spēju pārnest siltumu lielos attālumos ar nelielu temperatūras starpību. Tomēr to lietojums joprojām lielā mērā ir ierobežots ar specializētām jomām konstrukcijas sarežģītības un integrācijas izaicinājumu dēļ.

Tas rada zinātniski tehnisku problēmu – universālu projektēšanas un integrācijas principu izstrādi pasīvām divfāžu siltuma cilpām, kas ļautu pārvarēt termiskos ierobežojumus, vienlaikus nodrošinot tehnoloģisko realizējamību un mērogojamu ieviešanu.

1.2. Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt zinātniski pamatotu ietvaru pasīvo divfāžu siltuma cilpu lietošanai kā universālai platformai elektroiekārtu viedajai termiskajai pārvaldīšanai. Darbs ietver: 1) siltuma cilpu fizikālo un matemātisko modeļu izstrādi; 2) projektēšanas un integrācijas principu formulēšanu; 3) eksperimentālu validāciju reprezentatīvām elektroiekārtu klasēm.

Pētījuma mērķis ir paplašināt siltuma cilpu lietojumu ārpus specializētām jomām, vienlaikus risinot ar to integrāciju saistītos konstrukcijas un tehnoloģiskos izaicinājumus.

1.3. Pētījuma hipotēze

Pētījuma hipotēze paredz, ka tradicionālo dzesēšanas sistēmu aizstāšana ar atbilstoši projektētām pasīvām divfāžu siltuma cilpām maina elektroiekārtu termisko režīmu tādā veidā, kas paplašina to ekspluatācijas robežas un uzlabo galvenos darbības raksturlielumus, tostarp lietderīgo jaudu, efektivitāti, masas un tilpuma parametrus, ekspluatācijas uzticamību un kalpošanas ilgumu.

Tiek pieņemts, ka šim efektam ir vispārējs raksturs un to nosaka fundamentāli divfāžu siltuma pārnese mehānismi; līdz ar to tas var tikt realizēts dažādu klašu elektroiekārtās, ja siltuma cilpas arhitektūra ir atbilstoši pielāgota to ģeometrijai un termiskajiem darbības apstākļiem.

1.4. Pētījuma zinātniskā novitāte

Promocijas darba zinātniskā novitāte izpaužas vairākos konceptuālos, teorētiskos, metodoloģiskos un inženiertehniskos ieguldījumos.

Konceptuālie ieguldījumi

- Ieviesta viedās termiskās pārvaldīšanas koncepcija kā sistēmu klase, kas balstīta pasīvās divfāžu siltuma cilpās un izmanto iekšējos fizikālos mehānismus pašregulētai siltuma pārdalei bez ārējas enerģijas padeves vai aktīvas vadības.
- Formulēts princips pārejai no specializētām siltuma cilpām uz universālām moduļārām aukstās plāksnes platformām, kas nodrošina mērogojamu integrāciju elektroiekārtās ar dažādu ģeometriju un jaudas līmeni.

Teorētiskie ieguldījumi

- Izstrādāts cilpas tipa siltuma cauruļu stacionāro un pārejas darbības režīmu matemātiskais modelis, pielāgots sarežģītām daudziztvaikotāju konfigurācijām.
- Formulēta termodinamiski konsekventa siltuma noplūdes un pārdzesēšanas interpretācija *LHP* sistēmās, parādot siltuma noplūdes fundamentālo lomu cikla stacionārā enerģijas bilances noslēgšanā.
- Ieviesti darba šķidrums kvalitātes parametri cilpas termosifoniem, analogi *LHP* efektivitātes rādītājiem (*figures of merit*), bet ņemot vērā gravitācijas ierosinātu cirkulāciju.
- Piedāvāta hipotēze un fizikāls skaidrojums zemas efektivitātes siltuma pārnese režīmam *LHP* sistēmās.

Metodoloģiskie ieguldījumi

- Izstrādāta metode *LHP* parametru noteikšanai, kas nav tieši izmērāmi eksperimentāli.
- Izstrādāts algoritms matemātiskā modeļa pielāgošanai, balstoties eksperimentālajos rezultātos.
- Izveidota oriģināla programmatūra “*Altom-LHP*” modulāru *LHP* sistēmu projektēšanai un analīzei.

Inženiertehniskā realizācija un eksperimentālā validācija

- Piedāvāta jauna siltuma pārnese ierīces konstrukcija – *HLP (Heat Loop Pipe)*, kas apvieno klasisko siltuma cauruļu un *LHP* strukturālās īpašības.
- Izstrādātas un eksperimentāli validētas divfāžu dzesēšanas sistēmas:
 - rumbā integrētam elektromotoram;
 - augstas jaudas LED gaismeklim;
 - degvielas šūnu blokam;
 - vilces motoram (nav iekļauts promocijas darbā).
- Piedāvāta rumbā integrēta elektromotora arhitektūra ar konstruktīvi integrētiem iztvaikotājiem, kas nodrošina tiešu siltuma novadīšanu no statora zobiem un samazina termisko pretestību.
- Izstrādāts konceptuāls divfāžu dzesēšanas sistēmas risinājums degvielas šūnu blokam, balstīts cilpas termosifonā.

1.5. Publikācijas un patenti, kas saistīti ar promocijas darbu

Promocijas darba galvenie rezultāti ir atspoguļoti vairākās recenzētās zinātniskajās publikācijās un konferenču rakstu krājumos.

1.5.1. Publicēti raksti

1. **I. Ušakovs**, D. Mishkinis, I. A. Galkin “Concept and experimental study of two-phase cooling loops for PEM fuel cells with a flat aluminum evaporator”, Results in Engineering, 2026 (recenzēšanas stadijā).
2. Ghahfarokhi, P. S., Rasilo, P., Cardoso, A. J. M., **Ušakovs, I.**, Mishkinis, D., Podgornovs, A., “Proof of Concept of a Two-Phase Thermal Management System for Railway Traction Motors,” IEEE Trans. Energy Convers, 1–10, 2025. <https://doi.org/10.1109/TEC.2025.3583076>.
3. **I. Ušakovs**, L. Ivanovskis, “Advanced Loop Heat Pipe Application for Cooling High Power LED Lights”, Case Studies in Thermal Engineering, vol. 57, p. 104320, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104320>.
4. **I. Ušakovs**, D. Mishkinis, I. A. Galkin, A. Bubovich, and A. Podgornovs, “Experimental thermal characterization of the in-wheel electric motor with loop heat pipe thermal

management system”, Case Stud. Therm. Eng., vol. 47, p. 103069, Jul. 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103069>

1.5.2. Konferenču raksti

1. Donatas Mishkinis, **Igors Ušakovs**, Luka Ivanovskis, Marco Gottero, Albino Quaranta, Federica Negri, Antonio Rotondi, Stéphane Lapensée, Paula Prado “MECOP -A Novel Two Phase Capillary Technology for the Thermal Control of Space Systems”, 54th International Conference on Environmental Systems, ICES-2025-300, 13–17 July 2025, Prague, Czech Republic.
2. Luka Ivanovskis, **Igors Ušakovs**, Donatas Mishkinis, Marco Gottero, Albino Quaranta, Stéphane Lapensée “Multielevator Cold Plate (MECOP) Heat Loop characterization with butane and R134a” Joint 22st IHPC and 16th IHPS, Thailand, November, 2024.
3. Donatas Mishkinis, **Igors Ušakovs**, Luka Ivanovskis and Ilya A. Galkin “Heat Loop Pipe for Thermal Management of Powerful LED-based Applications”, Joint 21st IHPC and 15th IHPS, Melbourne, Australia, February 5–8, 2023.
4. P. Gakal, D. Mishkinis, A. Leilands, **I. Usakovs**, R. Orlov and Y. Rogoviy, Analysis of working fluids applicable for high-temperature loop heat pipe applications, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1226 (2022) 012036 doi:10.1088/1757-899X/1226/1/012036. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1226/1/012036>.
5. Mishkinis D., **Ušakovs I.**, Nasibulin D., “Novel Modular Evaporator Architecture for Electronics Cooling Applications”, Joint 19th International Heat Pipe Conference and 13th International Heat Pipe Seminar Pisa, Italy, 2018.

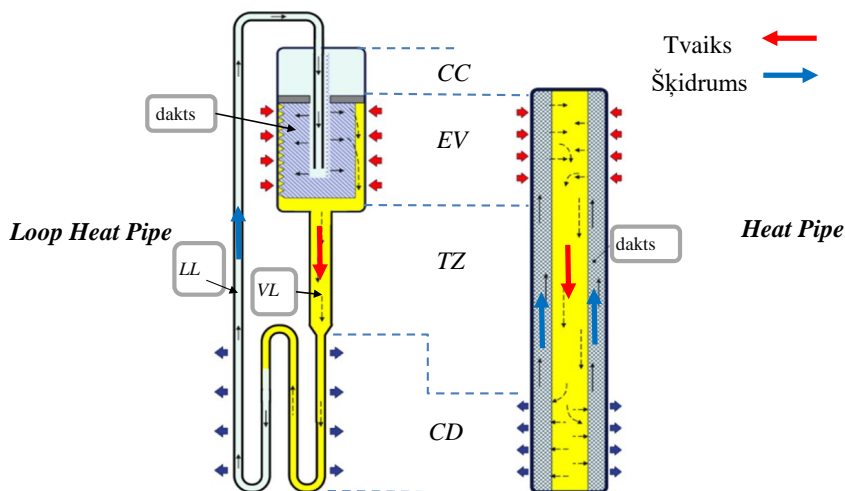
Patents

1. Mishkinis, D., **Ušakovs, I.** SILTUMA CILPAS CAURULE (HEAT LOOP PIPE). LV 15883 A – patent application publication. Application No. LVP2023000021; filing date 2023-03-07; publication date 2024-09-20. Applicant: ALLATHERM, SIA, LV.

2. VIEDĀS TERMISKĀS PĀRVALDĪŠANAS KONCEPCIJA

2.1. Pasīvās divfāžu siltuma cilpas un Heat Loop Pipe arhitektūra

Pasīvās divfāžu siltuma cilpas, kas darba šķidruma cirkulācijai izmanto kapilāros spēkus (*LHP*, *CPL*), ir klasiskās siltuma caurules (*HP*) tehnoloģiska attīstība. To izstrādes pamatā bija nepieciešamība pārvarēt tradicionālajai *HP* tehnoloģijai raksturīgos hidrauliskos un veiktspējas ierobežojumus.



2.1. att. *HP* un *LHP* salīdzinājums.

2.1. attēlā shematiski salīdzinātas *HP* un *LHP* konfigurācijas. Abas ierīces ietver tās pašas pamata funkcionālās zonas – iztvaikotāju (*EV*), kondensatoru (*CD*) un transporta zonu (*TZ*). *LHP* sistēmās papildus iztvaikotājam atrodas kompensācijas kamera (*CC*), kas pārejas procesos kalpo kā darba šķidruma rezervuārs un kompensē tā termisko izplešanos.

Galvenā arhitektoniskā atšķirība starp *HP* un *LHP* ir darba šķidruma cirkulācijas organizācijā. Tradicionālajās *HP* porainā struktūra stiepjas visā transporta zonā, palielinot hidraulisko pretestību un ierobežojot siltuma pārneses attālumu. *LHP* sistēmās dakts ir lokalizēta tikai iztvaikotāja reģionā, savukārt tvaiks un šķidrums plūst pa atsevišķām transporta līnijām. Tā rezultātā šķidrums caur poraino struktūru plūst tikai īsā posmā, kas ļauj izmantot mikroporainu dakts ar poru izmēriem mikrometru kārtā. Tas būtiski palielina kapilāro spiedienu un nodrošina siltuma pārnesi vairāku metru vai pat desmitiem metru attālumā, savukārt tipiskas *HP* efektīvi darbojas ievērojami īsākos attālumos (apmēram līdz 0,5 m) un būtiski zaudē efektivitāti darbībā pret gravitāciju.

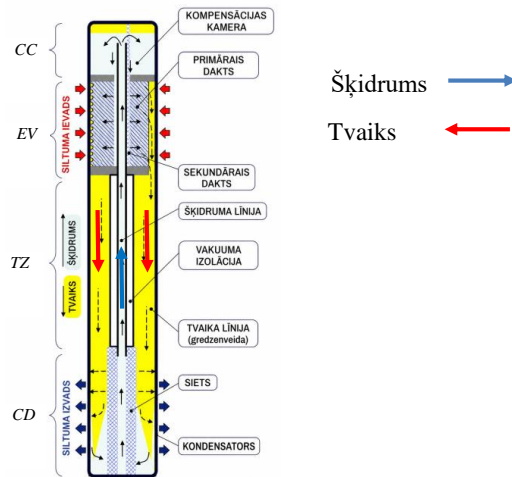
Vienkāršots hidraulisko pretestību salīdzinājums ģeometriski salīdzināmām ierīcēm parāda, ka:

$$\frac{\Delta P_{HP}}{\Delta P_{LHP}} \sim 10^5 - 10^7, \quad (2.1.)$$

kur ΔP_{HP} un ΔP_{LHP} apzīmē spiediena zudumus attiecīgi *HP* un *LHP* šķidruma kanālā. Šī vairāku lieluma kārtu atšķirība izskaidro *LHP* augstāko siltuma pārnese spēju gadījumos, ja ir lielas siltuma slodzes un ievērojami transporta attālumi.

Vienlaikus tradicionālās *HP* ģeometriskā vienkāršība, parasti – cilindriska caurule, joprojām ir priekšrocība integrācijai daudzās tehniskās sistēmās. Savukārt *LHP* sistēmām nepieciešamas atdalītas transporta līnijas un papildu komponentes, kas palielina konstrukcijas sarežģītību un apgrūtina integrāciju.

Lai apvienotu *HP* ģeometrisko vienkāršību ar *LHP* hidrauliskajām priekšrocībām, tika piedāvāta jauna termiskā arhitektūra – *Heat Loop Pipe (HLP)* [4]. Tās izkārtojums redzams 2.2. attēlā.



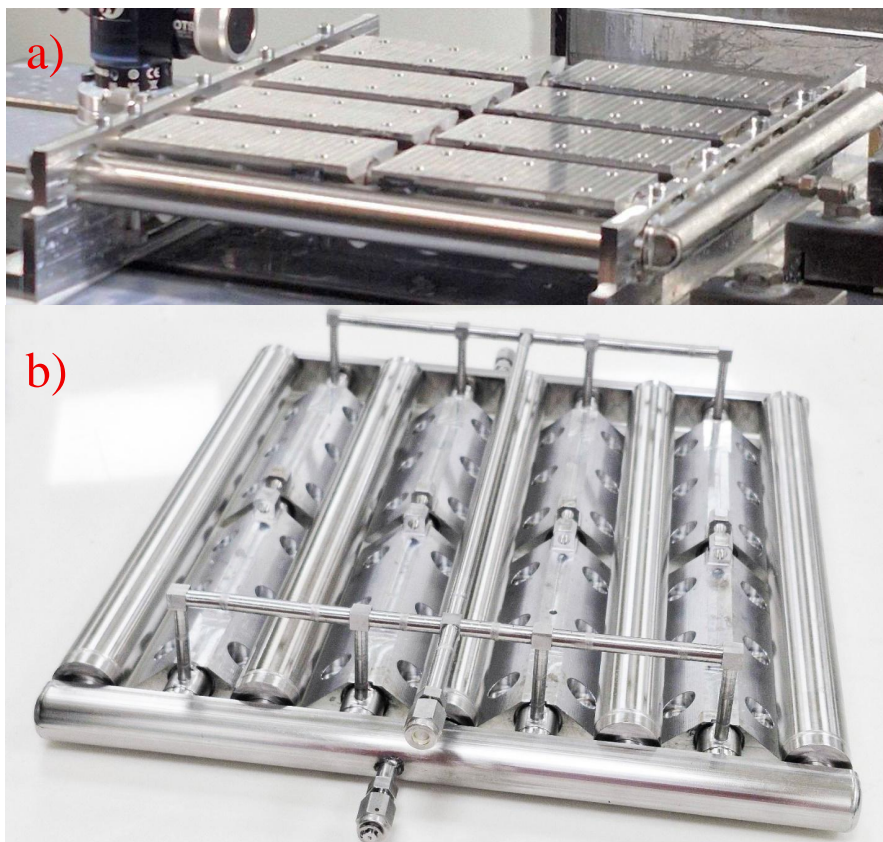
2.2. att. *HLP* izkārtojums. *EV* – iztvaikotājs; *CD* – kondensators; *CC* – kompensācijas kamera; *TZ* – transporta zona.

Šajā konfigurācijā iztvaikotājs, kompensācijas kamera un transporta līnijas ir izvietotas vienotā cilindriskā korpusā. Tvaika un šķidruma kanāli ir atdalīti, bet ārējā ģeometrija saglabājas līdzīga tradicionālajai *HP*. Tas ļauj būtiski samazināt hidraulisko pretestību, nezaudējot integrācijas elastību. Transporta zona vairs nav ierobežota ar porainās struktūras pretestību un var tikt pagarināta vai izpildīta elastīgā formā, ļaujot izmantot sistēmu sarežģītās telpiskās konfigurācijās.

Ir izgatavoti un eksperimentāli validēti vairāki *HLP* prototipi, tostarp LED gaismekļu dzesēšanas lietojumos.

2.2. “Altom” modulārā tehnoloģija – universāla platforma divfāžu siltuma kontūrām

Lai gan *HLP* arhitektūra risina ģeometriskās integrācijas ierobežojumus, plašāka mērogojamības un tehnoloģiskās reproducējamības problēma prasa modulāru projektēšanas pieeju.



2.3. att. *MECOP* iztvaikotājs: a) aizmugures skats; b) skats no augšas.

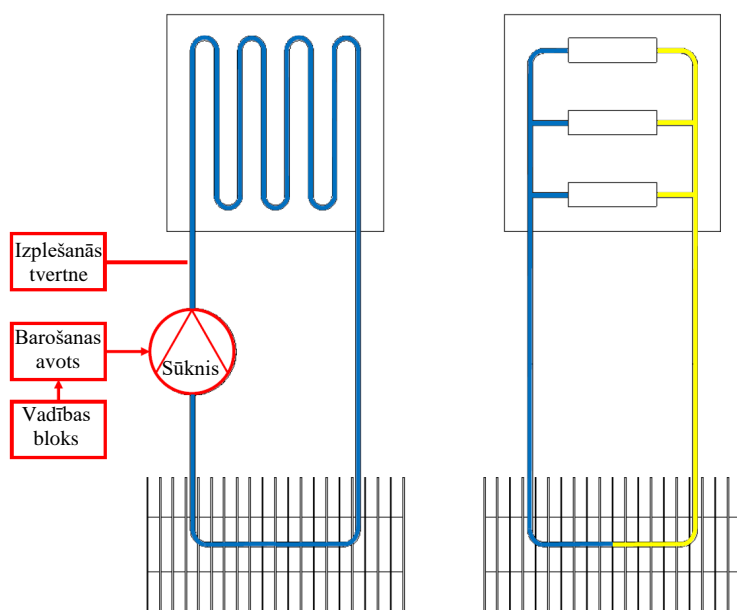
Ņemot vērā to, ka iztvaikotājs ir tehnoloģiski sarežģītākā un visprasīgākā *LHP* sastāvdaļa, tika izstrādāta modulāra iztvaikotāja koncepcija, kas pazīstama kā “*Altom*” tehnoloģija. Šajā pieejā iztvaikotāji tiek komplektēti no standartizētiem kapilāro sūkņu (*CP*) moduļiem ar labi raksturotiem

un reproducējamiem parametriem. Savienojot šos moduļus virknē un/vai paralēli, iespējams nodrošināt nepieciešamo siltuma pārses jaudu, vienlaikus saglabājot prognozējamu darbības raksturu.

Šāda modulāra arhitektūra ļauj realizēt daudziztvaikotāju aukstās plāksnes sistēmas, kurās uz vienas divfāžu dzesēšanas platformas var izvietot vairākus elektroniskos komponentus ar atšķirīgām siltuma slodzēm. Kā piemērs minama *MECOP (Multi-Evaporator Cold Plate)* konfigurācija (2.3. att.), kas demonstrējusi spēju pārnest līdz 3200 W siltuma jaudu 6 m attālumā, kā darba šķidrumu izmantojot amonjaku. Šādi rādītāji tuvojas sūkņētu divfāžu sistēmu veikspējai, vienlaikus saglabājot pasīvu darbības principu [5].

2.3. Vienfāzes un pasīvās divfāžu dzesēšanas salīdzinājums

2.4. attēlā shematiski salīdzināta vienfāzes dzesēšanas cilpa un pasīvā divfāžu cilpa, kas paredzētas identisku termisko uzdevumu veikšanai.



2.4. att. Vienfāzes un divfāžu dzesēšanas cilpu salīdzinājums.

Vienfāzes cilpa darbojas tikai aktīvā režīmā un prasa piespiedu darba šķidruma cirkulāciju ar sūkņa palīdzību. Tas nozīmē papildu apakšsistēmas elektroapgādei un vadībai, palielinot gan enerģijas patēriņu, gan atteices varbūtību. Savukārt pasīvā divfāžu cilpa balstās iekšējos termodinamiskos mehānismos un iesāk cirkulāciju automātiski, tiklīdz starp siltuma avotu un

siltuma uztvērēju rodas temperatūras starpība. Pašīnīcētā cirkulācija un iekšējā termodinamiskā atgriezeniskā saite novērš nepieciešamību pēc ārējas vadības loģikas, kas veido šajā darbā ieviestās viedās termiskās pārvaldīšanas koncepcijas fizikālo pamatu.

Papildus enerģētiskajām un uzticamības priekšrocībām būtiskas atšķirības pastāv arī nepieciešamajā masas plūsmā. Pie salīdzināmas siltuma pārnese jaudas vienfāzes sistēmā nepieciešamais masas plūsmas ātrums parasti ir par vienu lieluma kārtu lielāks nekā divfāžu cilpā, kur dominē latentā siltuma pārnese. Šī atšķirība tieši ietekmē konstrukcijas parametrus – vienfāzes sistēmām nepieciešami lielāki transporta līniju diametri, lielāks dzesēšanas šķidrums tilpums un papildu izplešanās tvertnes termiskās izplešanās kompensācijai. Līdz ar to vienfāzes sistēmas parasti ir apjomīgākas un mazāk kompakts nekā ekvivalentas pasīvās divfāžu cilpas.

Tomēr, neraugoties uz šīm priekšrocībām, pasīvās divfāžu cilpas saskaras ar būtiskiem izaicinājumiem. To izgatavošanas sarežģītība nosaka augstākas izmaksas, un parasti tās ir neapkalpojamas ierīces. Turklāt fāžu pārejas procesi ievieš papildu modelēšanas sarežģītību, salīdzinot ar vienfāzes sistēmām. Tādēļ divfāžu termisko tehnoloģiju turpmākā attīstība ir vērsta ne tikai uz siltumtehniko rādītāju uzlabošanu, bet arī uz tehnoloģiskās sarežģītības samazināšanu un integrācijas iespēju paplašināšanu.

3. PASĪVO DIVFĀŽU SILTUMA CILPU MODELĒŠANA

3.1. Pasīvo divfāžu siltuma cilpu modelēšanas vispārīgie principi

Pasīvā divfāžu siltuma cilpa pilda trīs funkcijas – siltuma savākšanu iztvaikotājā, siltuma transportēšanu cilpas ietvaros un siltuma atdevi kondensatorā. Modelēšana paredz katra funkcionālā elementa aprakstu ar matemātisku modeli un šo elementu savstarpēju sasaisti, izmantojot masas un enerģijas saglabāšanās likumus, ko papildina spiediena un temperatūras nepārtrauktības nosacījumi to savienojuma robežās.

Lielākajā daļā inženiertehnisko lietojumu galvenais uzdevums ir noteikt dzesējamās ierīces stacionāro temperatūru atkarībā no pieliktās siltuma slodzes. Tādēļ bieži vien pietiek ar stacionāru modelēšanu. Tomēr sistēmās ar lieliem, telpiski izkļiedētiem iztvaikotājiem, piemēram, *MECOP* konfigurācijā, pāreja no viena līdzsvara stāvokļa uz citu var ilgt vairākas stundas, jo iztvaikotājam un darba šķidrums kontūrā ir augsta termiskā inerce. Šādos gadījumos nepieciešama pārejas procesa modelēšana.

3.2. *LHP* stacionārais matemātiskais modelis

Izstrādātais matemātiskais modelis pieder kvaziviendimensionālu stacionāru modeļu klasei. Tas nosaka *LHP* stacionāros darbības punktus, balstoties:

enerģijas bilances vienādojumā

$$\sum \dot{Q}_i = 0, \quad (3.1.)$$

spiediena bilances vienādojumā

$$P_{cc}(T_{cc}) = P_{ev}(T_{ev}) - \sum \Delta P_i, \quad (3.2.)$$

masas saglabāšanās likumā

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{ev}}{h_{ev}(T_{ev})} = const \quad (3.3.)$$

un iteratīvā skaitliskā procedūrā, kuras koncepcija aprakstīta [6]. Modelis ņem vērā siltuma apmaiņu ar apkārtējo vidi un gravitācijas ietekmi. Viendimensionālais pieņēmums tiek atvieglojots, aprēķinot siltuma apmaiņu starp iztvaikotāju, kondensatoru un apkārtējo vidi.

3.1. vienādojums tiek pierakstīts secīgi katram *LHP* elementam (*EV*, *VL*, *CD*, *LL*, *CC*) atbilstoši darba šķidruma cirkulācijas virzienam, summējot siltuma plūsmas \dot{Q}_i .

3.2. vienādojums saista piesātinātā tvaika spiedienu P_{cc} kompensācijas kamerā ar piesātinātā tvaika spiedienu P_{ev} iztvaikotājā un ļauj noteikt kompensācijas kameras stacionāro temperatūru T_{cc} . Summas loceklis 3.2. vienādojuma labajā pusē apzīmē kopējo hidraulisko spiediena zudumu kontūrā no iztvaikotāja līdz kompensācijas kamerai. Šis spiediena zudums tiek aprēķināts secīgi katram *LHP* elementam pa plūsmas ceļu.

3.3. vienādojumā \dot{m} apzīmē iztvaikotājā ģenerēto masas plūsmas ātrumu, kas ir vienāds visā kontūrā. Loceklis \dot{Q}_{ev} raksturo to siltuma slodzes daļu, kas tiek pievadīta no dzesējamās ierīces un izmantota darba šķidrums iztvaikošanai, savukārt h_{ev} ir īpatnējā iztvaikošanas entalpija. Ārējie ieejas parametri ir siltuma slodze \dot{Q}_{in} un apkārtējās vides temperatūra T_{amb} . Galvenais izejas parametrs ir siltuma avota temperatūra T_{src} .

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{hl} + \dot{Q}_{ev}. \quad (3.4.)$$

Kopējā pievadītā siltuma plūsma \dot{Q}_{in} sadalās iztvaikošanas siltumā \dot{Q}_{ev} un siltuma noplūdē \dot{Q}_{hl} . Lai gan siltuma noplūde bieži tiek interpretēta kā parazitiska, tai ir fundamentāla termodinamiski nozīme. Tā kā kondensācija notiek zemākā temperatūrā nekā iztvaikošana, kondensācijas laikā izdalītā entalpija pārsniedz to, kas nepieciešama tādas pašas masas plūsmas iztvaikošanai. Tādēļ stacionārā režīmā nepieciešams papildu siltuma pārneses ceļš, kas kompensē šo starpību. Šo kompensāciju nodrošina siltuma noplūde, kas līdzsvaro pārdzesēšanas siltumu \dot{Q}_{sc} :

$$\dot{Q}_{hl} = \dot{Q}_{sc}, \quad (3.5.)$$

kur

$$\dot{Q}_{sc} = c_{p,l} \times \dot{m} \times (T_{ev} - T_{ll,out}). \quad (3.6.)$$

Šeit $c_{p,l}$ – šķidrā darba šķidrums īpatnējā siltumietilpība, bet šķidrums temperatūra $T_{ll,out}$, kas parādās 3.6. vienādojumā, tiek noteikta no secīgas enerģijas bilances 3.1. vienādojumu sistēmas atrisinājuma. Šī vienādība noslēdz cilpas enerģijas bilanci un nosaka stacionāro darbības punktu.

Siltuma noplūde var ietvert radiālo siltuma vadīšanu caur dakti, kā arī papildu vadītspējas ceļus, ko lineārā pieejā iespējams aprakstīt ar efektīvu termiskās pretestības parametru R_{HL} . Šis parametrs tiek noteikts vai nu ar skaitlisku modelēšanu, vai eksperimentālas kalibrācijas ceļā.

3.3. *LHP* pārejas procesa modelis, balstīts kompensācijas kameru termiskajā dinamikā

Lielās daudziztvaikotāju sistēmās pārejas režīmu nosaka kompensācijas kameru (*CC*) termiskā inerce. Modelis pieņem, ka hidrauliskie un fāžu līdzsvara procesi notiek laika skalās, kas ir ievērojami īsākas nekā termiskā līdzsvara iestāšanās kompensācijas kamerās. Tādēļ kompensācijas

kameras temperatūra T_{cc} tiek uzskatīta par noteicošo stāvokļa mainīgo, kura evolūcija nosaka visas cilpas dinamiku. Saskaņā ar šo pieņēmumu:

- masas plūsma pielāgojas slodzes izmaiņām praktiski momentāni;
- spiediens kontūrā izlīdzinās praktiski momentāni;
- iztvaikošanas un kondensācijas temperatūras seko T_{cc} praktiski momentāni;
- darba šķidrums pārdale kontūrā notiek ātrāk nekā kompensācijas kameru termiskās inerces noteiktajos laika intervālos.

Tādējādi pārejas procesa modelis reducējas uz kompensācijas kameru termiskās dinamikas aprakstu, kas ir sasaistīts ar stacionārā modeļa sakarībām.

Modelī tiek ieviesti trīs pielāgošanas parametri:

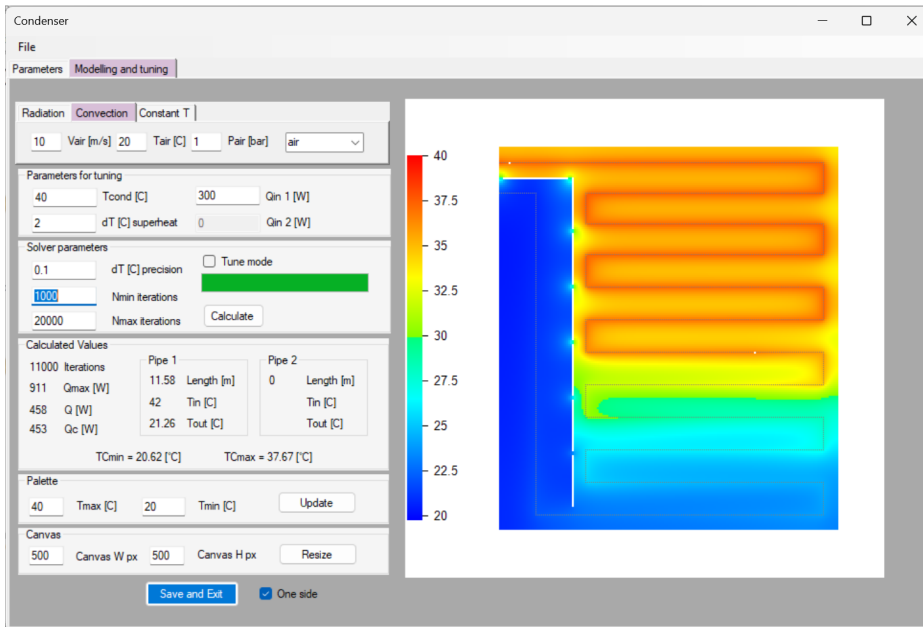
- bajoneta siltumvadītspēja uz garuma vienību g_b ;
- efektīvā siltuma noplūdes termiskā pretestība R_{HL} ;
- efektīvā iztvaikotāja siltumietilpība $C_s M_s$.

Šie parametri tiek noteikti, balstoties eksperimentālajos datos un iztvaikotāja (EV) konstrukcijas raksturlielumos.

3.4. Programmatūra “Altom-LHP” LHP projektēšanai un analīzei

Aprakstītie stacionārie un pārejas procesa modeļi tika realizēti skaitliskā aprēķinu rīkā, kas izstrādāts C# programmēšanas valodā. Programmatūra ļauj konfigurēt un analizēt sarežģītas LHP sistēmas, tostarp daudziztvaikotāju arhitektūras, kompozītas transporta līnijas, siltuma apmaiņu ar apkārtējo vidi, gravitācijas ietekmi un dažādus kondensatora robežnosacījumus. Kondensatora modelēšanas saskarnes piemērs redzams 3.1. attēlā.

Programmatūra nodrošina parametru analīzi, modeļa pielāgošanu eksperimentālajiem datiem, kā arī stacionāro un pārejas režīmu novērtēšanu praktisku LHP konstrukciju gadījumā.



3.1. att. Kondensatora modelēšanas saskarne.

4. PASĪVO DIVFĀŽU SILTUMA CILPU EKSPERIMENTĀLĀ VALIDĀCIJA ELEKTROIEKĀRTĀS

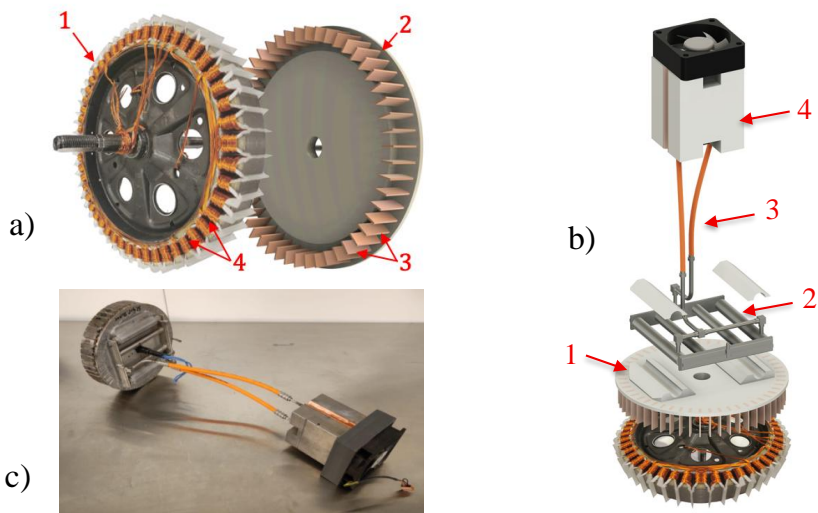
Hipotēze tiek pārbaudīta, izmantojot četrus ierīču tipus, kas atšķiras pēc siltuma slodzes līmeņa, ģeometrijas, siltuma ģenerācijas telpiskā sadalījuma, darbības režīmiem un prasībām attiecībā uz temperatūras stabilitāti:

- rumbā integrēts elektromotors;
- LED gaismeklis;
- degvielas šūna;
- vilces elektromotors.

Pirmo trīs ierīču gadījumā iegūtie rezultāti ir izklāstīti šajā darbā un publicēti zinātniskajos rakstos [7], [8], [9].

Vilces elektromotora lietojumam tika izstrādāta un eksperimentāli pārbaudīta dzesēšanas sistēma, kas balstīta sešos cilpas termosifonos. Pilnīgie šī pētījuma rezultāti šajā promocijas darbā nav iekļauti; tomēr atsevišķi secinājumi ir daļēji publicēti [10].

4.1. Rumbā integrēts elektromotors



4.1. att. a) *LHP* – statora saskarne: 1 – stators; 2 – saskarne; 3 – vara ribas; 4 – spraugas tinumā.

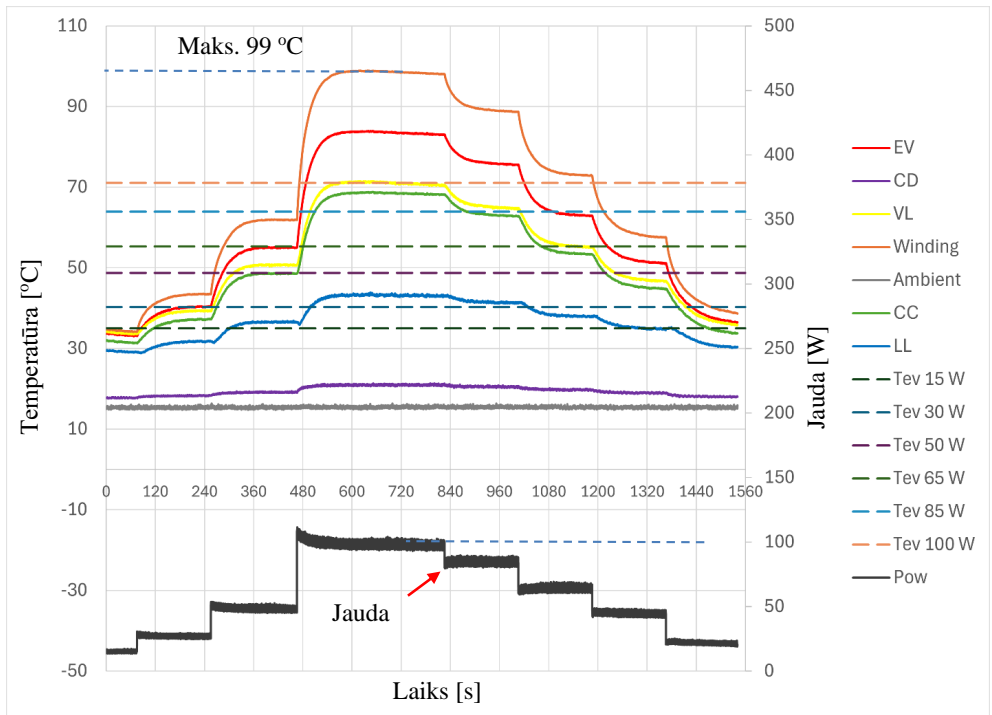
b) *LHP* struktūra: 1 – saskarne; 2 – kapilārie sūkņi; 3 – transporta līnijas; 4 – kondensators. c)

Fotogrāfija ar motoru un integrētu *LHP*.

Kā eksperimentālais objekts tika izvēlēts rumbā integrēts elektromotors ar trīsfāžu asinhrono mašīnu (nominālā jauda 500 W). Pamatojoties uz ražotāja deklarēto lietderības koeficientu, sagaidāmie siltuma zudumi bija aptuveni 70 W, galvenokārt statora tinumos.

Bāzes konfigurācijā tinumos ģenerētais siltums izplatās caur statora serdi un pāri gaisa spraugai uz motora korpusu, kur tas tiek izkļiedēts dabiskās konvekcijas ceļā. Lai uzlabotu tiešu siltuma novadīšanu no tinumu zonas, tika izstrādāta īpaša termiskā saskarne ar diviem “Altom” kapilārajiem sūkņiem (4.1. a attēls). Salīdzinoši lielais statora diametrs (~200 mm) prasīja izkļiedētu siltuma savākšanu no plašas virsmas, kas noteica daudziztvaikotāju konfigurācijas izmantošanu.

Lai demonstrētu *LHP* arhitektūras integrācijas elastību, tika izmantotas elastīgas polimēru transporta līnijas. Siltuma atdeve tika nodrošināta ar kompakto rievotu kondensatoru piespiedu konvekcijas režīmā. Pilnais sistēmas izkārtojums un integrētā motora mezgls redzams 4.1. b un 4.1. c attēlā.



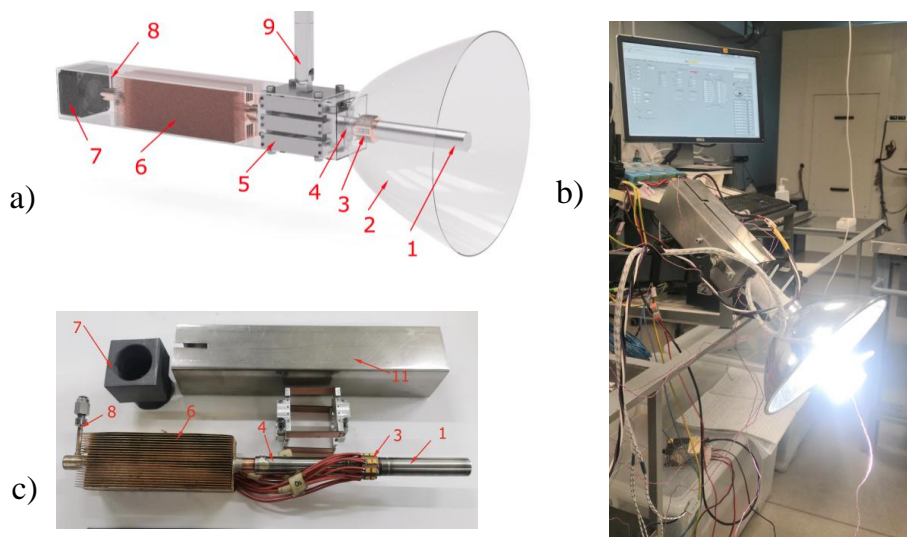
4.2. att. Temperatūras sadalījums *LHP* pie dažādām jaudas slodzēm. Stators ir termiski izolēts. *EV* – iztvaikotājs un sēdeklis; *VL* – tvaika līnija; *LL* – šķidruma līnija; *CC* – kompensācijas kameras; *CO* – kondensatora ribas. Pārtrauktās līnijas atbilst ar modeli aprēķinātajām tvaika temperatūrām.

Ekspierimentālie pētījumi parādīja, ka siltuma novadīšana caur *LHP* darbojās paralēli tradicionālajam siltuma pārnesei ceļam caur motora rumbu, un tā rezultātā ievērojami pieauga pieļaujamā siltuma slodze. Pieļaujamā siltuma izkliede palielinājās aptuveni 2,5 reizes, salīdzinot ar bāzes konfigurāciju. Ņemot vērā to, ka motors laboratorijas apstākļos tika modificēts, lai integrētu iztvaikotāja saskarni (kas samazināja efektīvo tinuma šķērsriezumu), neto veikspējas pieaugumu var konservatīvi novērtēt kā aptuveni 1,8 reizes lielāku.

Šie rezultāti parāda, ka maksimālais divfāzu dzesēšanas efekts tiek sasniegts gadījumā, kad iztvaikotāja arhitektūra tiek integrēta jau motora projektēšanas stadijā, nevis pievienota vēlāk kā papildinājums. Šajā darbā ir piedāvāta konceptuāla statora konstrukcija ar konstruktīvi integrētiem iztvaikotājiem. Ekspierimentālo datu salīdzinājums ar “*Altom-LHP*” modeļa aprēķiniem apstiprināja izstrādātā matemātiskā ietvara adekvātumu. Kā redzams 4.2. attēlā, aprēķinātā tvaika temperatūra cieši seko izmērītajām vērtībām (dzeltenā līkne), kas liecina par korektu masas plūsmas un spiediena bilances aprakstu kontūrā.

4.2. LED gaismeklis

HLP arhitektūra tika veiksmīgi realizēta augstas intensitātes LED gaismekļa termiskajai pārvaldīšanai. Ģeometriskās konfigurācijas un uzlabotās siltuma transportēšanas spējas kombinācija ļāva izstrādāt kompakto apgaismes ierīci ar lokalizētu augstas jaudas gaismas avotu.

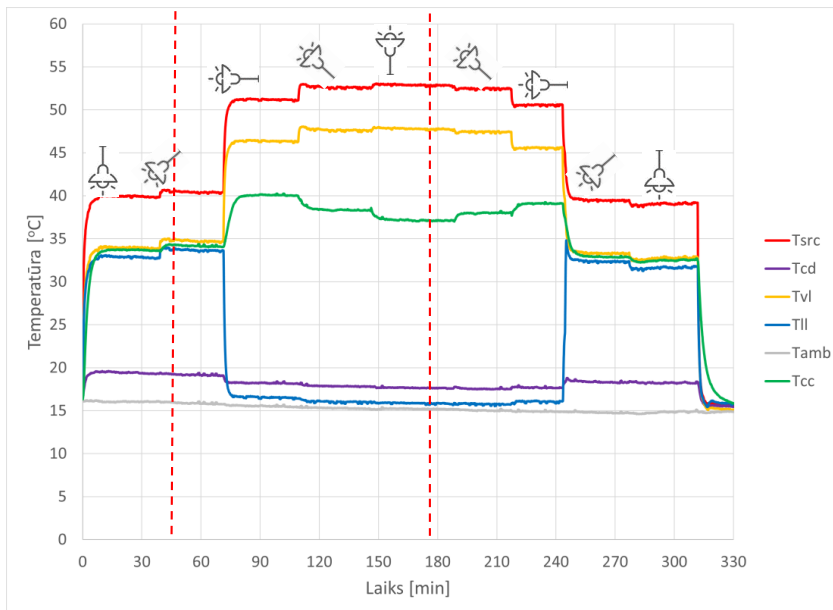


4.3. att. a) *HLP* balstīta gaismekļa arhitektūra: 1 – kompensācijas kamera; 2 – paraboliskais reflektors; 3 – iztvaikotājs ar 18 LED; 4 – transporta zona; 5 – LED draiveri; 6 – kondensators ar gaisa siltummaiņi; 7 – ventilators; 8 – uzlādes pieslēgvietā. b) gaismeklis testa iekārtā; c) dzesēšanas sistēmas komponentes.

Kā redzams 4.3. a attēlā, cilindriskā *HLP* pilda ne tikai siltuma pārnese elementa funkciju, bet arī kalpo kā gaismekļa konstrukcijas nesošais elements. Šī dubultā funkcionalitāte vienkāršo mehānisko integrāciju un samazina kopējo sistēmas masu. Astoņpadsmit LED tika uzstādīti tieši uz iztvaikotāja korpusa, veidojot kompakto gaismas avotu, kas novietots paraboliska reflektora fokusā. Šāda konfigurācija nodrošina kvaziparalēlu gaismas plūsmu, vienlaikus saglabājot netraucētu optisko ģeometriju.

Gaismekļa prototipa masa (ieskaitot LED un reflektoru, bet neiekļaujot draivera elektroniku) ir mazāka par 1,2 kg. *HLP* tika uzpildīta ar 20 g n-Butāna kā darba šķidrumu.

Eksperimentālie testi tika veikti dažādās telpiskās orientācijās attiecībā pret gravitācijas lauku un pie ieejas jaudas diapazona no 10 W līdz 80 W.



4.4. att. Temperatūras mērījumu vietas un temperatūras profili dažādās gaismekļa orientācijās (LED jauda 60 W).

Eksperimenti parādīja, ka *HLP* nodrošina LED temperatūras uzturēšanu pieļaujamajā diapazonā visā pētītajā jaudas intervālā. Tomēr orientācijas testi atklāja būtisku *HLP* termiskās pretestības pieaugumu gadījumos, kad kondensators atradās vienā līmenī ar iztvaikotāju vai zem tā.

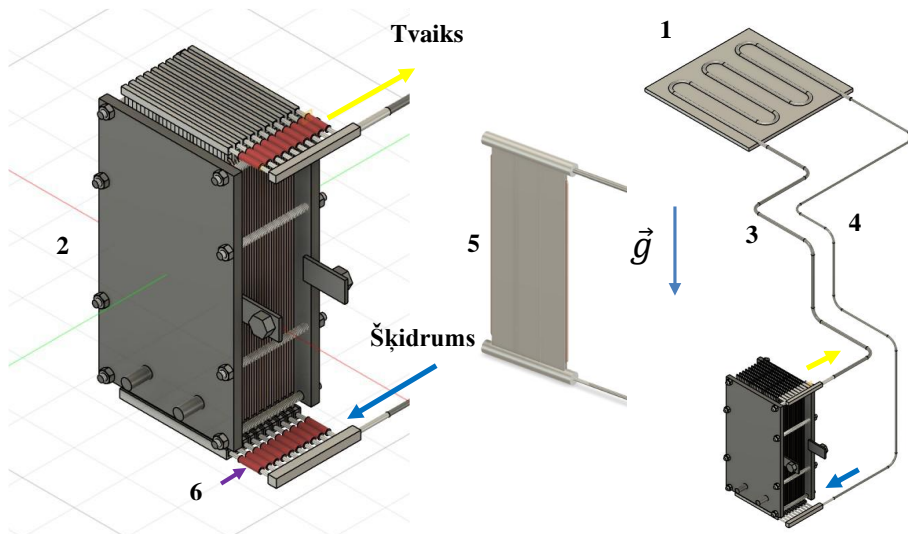
Novērotais efekts tika analizēts teorētiski. Tika pierādīts, ka gravitācijas radītais spiediena pieaugums viens pats nevar izskaidrot izmērīto pretestības pieaugumu. Fizikāli konsekvents skaidrojums iegūstams, pieņemot, ka gravitācijai nelabvēlīgās orientācijās iztvaikošanas fronte

atkāpjās dziļāk dakts struktūrā, un tā rezultātā pirms ieplūdes tvaika līnijā notiek daļēja tvaika pārkarsēšana.

Šis režīms nav fundamentāls *HLP* koncepcijas ierobežojums, bet gan konstrukcijas jutīgs darbības stāvoklis, ko iespējams mazināt, turpmāk optimizējot dakts ģeometriju, kapilāro struktūru un transporta kanālu hidraulisko konfigurāciju.

4.3. Degvielas šūnu bloks

Neraugoties uz labi zināmajām pasīvo divfāžu ierīču priekšrocībām, uzticama siltuma cilpu arhitektūru integrācija protonu apmaiņas membrānas degvielas šūnu (*PEMFC*) šūnas līmenī joprojām ir neatrisināts izaicinājums. Īpaši iztvaikotājs ir galvenais ierobežojošais elements, jo tam vienlaikus jāatbilst stingriem ģeometriskiem, elektriskiem un termodinamiskiem nosacījumiem.



4.5. att. *PEMFC* divfāžu siltuma cilpas izkārtojums: 1 – kondensators; 2 – *PEMFC* bloks; 3 – pacelājscaurule (tvaika līnija); 4 – nolaižamā caurule (šķidruma līnija); 5 – plakans iztvaikotājs; 6 – izolējošie ieliktni.

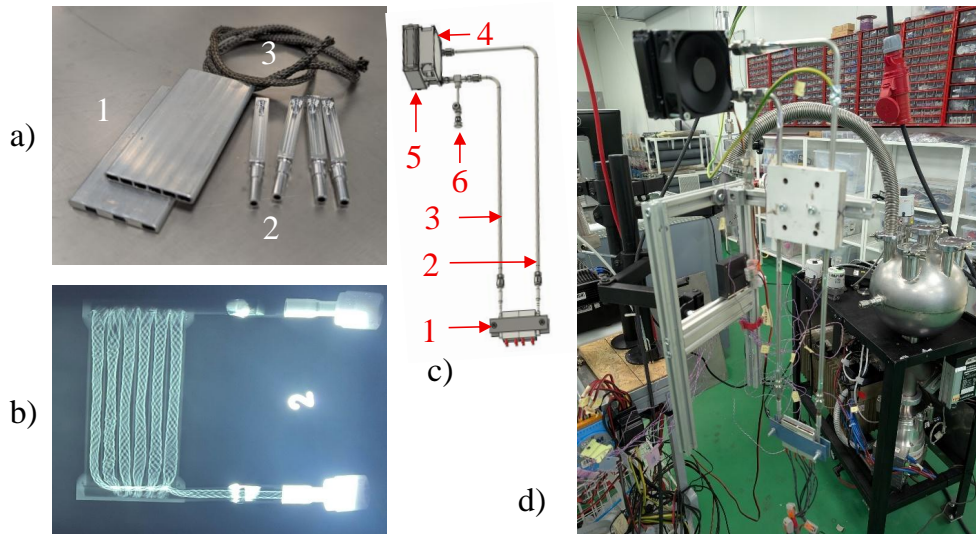
PEMFC bloka slāņainā arhitektūra faktiski ierobežo iztvaikotāja ģeometriju līdz plakanām konfigurācijām, kas savietojamas ar bipolārajām plāksnēm (BP). Vienlaikus bloks veido elektriski virknē savienotu sistēmu. Tādēļ iztvaikotājiem, kas integrēti kopējā siltuma cilpā, jābūt elektriski vadītspējīgiem, lai nodrošinātu saderību ar BP vidi, taču savstarpēji elektriski izolētiem, lai novērstu parazitisku strāvu ceļu veidošanos.

Lai risinātu šos ierobežojumus, tika piedāvāta konceptuāla daudziztvaikotāju cilpas termosifona (*LTS*) arhitektūra (4.5. att.).

Alumīnijs tika izvēlēts kā galvenais konstrukcijas materiāls, ņemot vērā tā zemo blīvumu un pieņemamu elektrisko saderību. Darba šķidrums izvēle balstījās tā dielektriskajās īpašībās, saderībā ar alumīniju, darbības temperatūras diapazonā (gan *LT-PEMFC*: 60–80 °C, gan *HT-PEMFC*: 120–200 °C), mērenā tvaika spiedienā un labvēlīgās termofizikālajās īpašībās. Par darba šķidrumu tika izvēlēts toluols, jo tas ir elektriski izolējošs, saderīgs ar alumīniju un termodinamiski piemērots gan zemas, gan augstas temperatūras *PEMFC* režīmiem. *LT-PEMFC* darbība atbilst pazeminātam spiedienam, savukārt *HT-PEMFC* darbība notiek pie mērena pārspiediena.

Eksperimentālais pētījums bija vērst uz optimālas iztvaikotāja konfigurācijas identificēšanu, kas piemērota kā pilna mēroga sistēmas pamatelements. Tika pētīti četri iztvaikotāju varianti (bez dakts un ar dakti) un termosifona konfigurācijās ar atšķirīgu kondensatora novietojumu.

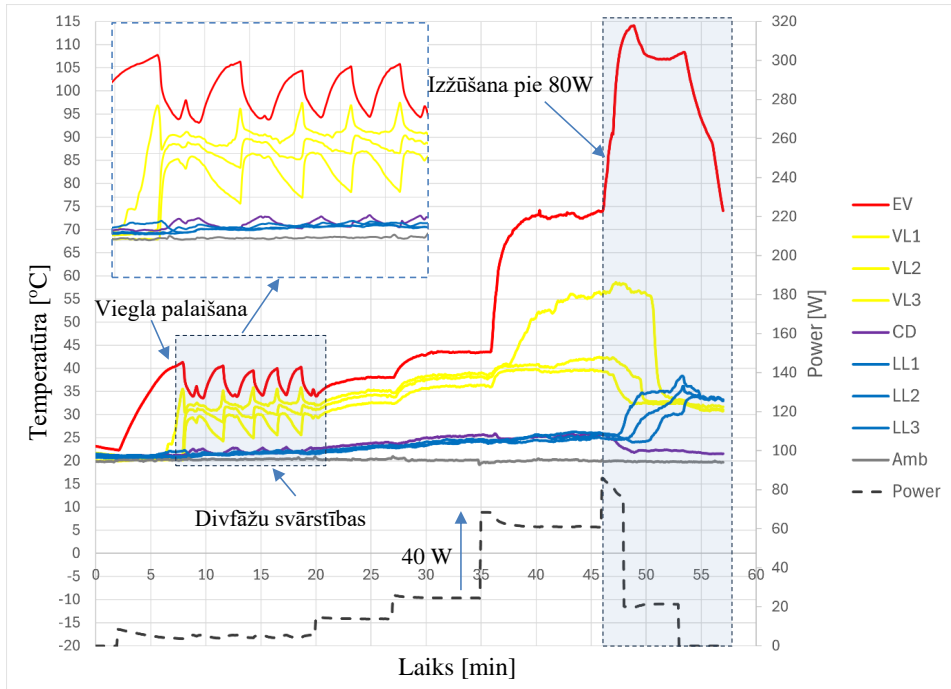
Iztvaikotāju izgatavošanai tika izmantotas mikrokanālu alumīnija plakanās caurules (*MAFT*), kuru biezums bija 2,15 mm un 3,72 mm. Praktiskai integrācijai bipolārajās plāksnēs noteiktais mērķa biezums bija aptuveni 2 mm.



4.6. att. a) Iztvaikotāja komponentes: 1 – iztvaikotāja korpuss; 2 – sānu kolektori; 3 – dakts.
 b) Iekšējā struktūra ar dakti; c) *LTS* konfigurācija: 1 – iztvaikotājs; 2 – pacēlājcaurule;
 3 – nolaižamā caurule; 4 – kondensators ar gaisa siltummaini; 5 – ventilators; 6 – uzlādes
 pieslēgvietā; d) testa iekārta.

Eksperimenti parādīja, ka iztvaikotāji ar dakti nodrošina augstāku darbības stabilitāti. Kā redzams 4.7. attēlā, palaišana tika panākta pie aptuveni 7 °C pārkarsējuma, sākotnējā nepieciešamā jauda – aptuveni 8 W (samazinoties līdz ~5 W, ņemot vērā siltuma zudumus apkārtējā vidē). Dakts

klātbūtne nodrošināja arī stabilu darbību strauju jaudas pieaugumu gadījumā par 40 W, kas nebija iespējams bezdaktis konfigurācijās.



4.7. att. LTS testēšana ar iztvaikotāju ar dakti.

Izzūšana iestājās pie aptuveni 80 W, kas atbilst siltuma plūsmas blīvumam, aptuveni divas reizes lielākam nekā tipisks *PEMFC* lietojumos. Tas liecina par pietiekamu ekspluatācijas rezervi praktiskai ieviešanai. Svarīgi, ka pārbaudītā iztvaikotāja biežums saglabājās savietojams ar integrācijas prasībām bipolārajās plāksnēs.

Augstas temperatūras eksperimenti apstiprināja sagaidāmo termosifona veiktspējas uzlabojumu, ko nosaka toluola termofizikālās īpašības. Šis rezultāts apliecina piedāvātās arhitektūras universālo piemērojamību gan *LT-PEMFC*, gan *HT-PEMFC* sistēmām.

5. SECINĀJUMI

Darba hipotēze paredzēja, ka tradicionālo dzesēšanas sistēmu aizstāšana ar pasīvām divfāžu siltuma cilpām, kas projektētas atbilstoši konkrētās ierīces konstrukcijas un termiskajām īpatnībām, rada tās termiskā režīma maiņas un tehnisko raksturlielumu uzlabošanu.

Veiktie teorētiskie un eksperimentālie pētījumi apstiprina šo hipotēzi.

Rumbā integrētā elektromotora gadījumā uz cilpas siltuma caurules (*LHP*) balstītas dzesēšanas sistēmas integrācija palielināja pieļaujamo siltuma slodzi un samazināja darba temperatūru. Piedāvātā statora arhitektūra ar konstruktīvi integrētiem iztvaikotājiem demonstrēja tiešas siltuma novadīšanas iespēju no statora zobiem un iekšējo temperatūras gradientu samazinājumu, liecinot par divfāžu dzesēšanas agrīnas integrācijas nozīmi motora projektēšanas stadijā.

LED gaismekļa gadījumā *HLP* arhitektūras ieviešana nodrošināja efektīvu siltuma novadīšanu no koncentrēta siltuma avota, vienlaikus saglabājot kompaktu cilindrisku ģeometriju un optisko funkcionalitāti. Orientācijas atkarīgās darbības analīze precizēja noteicošos fizikālos mehānismus un identificēja konstrukcijai jutīgus darbības režīmus.

Degvielas šūnu blokam veiktais plāno alumīnija cilpas termosifonu eksperimentālais pētījums demonstrēja stabilu darbību *PEMFC* raksturīgajos siltuma plūsmas blīvuma diapazonos. Tika apstiprināta integrācijas iespēja šūnas līmenī un identificēti galvenie parametri, kas nosaka palaišanas stabilitāti un ekspluatācijas rezervi. Rezultāti apstiprina pasīvo divfāžu cilpu lietojamību gan zemas, gan augstas temperatūras *PEMFC* sistēmās.

Promocijas darba zinātniskais ieguldījums ir vienotas konceptuālas, teorētiskas un eksperimentālas ietvarstruktūras izstrāde pasīvo divfāžu siltuma cilpu lietošanai kā viedām termiskās pārvaldības sistēmām.

Viedās termiskās pārvaldības koncepcija tika formulēta kā sistēmu klase, kas balstīta iekšējos termodinamiskās atgriezeniskās saites mehānismos, kas nodrošina autonomu siltuma plūsmas pārdali bez ārēja enerģijas pievada. Atšķirībā no aktīvām dzesēšanas sistēmām šādas cilpas savu darbības stāvokli pielāgo robežnosacījumiem bez ārējas vadības.

Tika izstrādāta termodinamiski konsekventa siltuma noplūdes un pārkarsējuma interpretācija cilpas siltuma caurulēs, nosakot to fundamentālo lomu stacionārā režīma enerģijas bilances noslēgšanā un novēršot izplatītus pārpratumus par tā sauktajām parazitiskajām siltuma plūsmām.

Tika formulēts cilpas siltuma cauruļu stacionārais un pārejas procesa matemātiskais modelis, iekļaujot siltuma apmaiņu ar apkārtējo vidi, gravitācijas ietekmi un iekšējo enerģijas pārdali. Tika izstrādāts modeļa parametru pielāgošanas algoritms, balstīts eksperimentālajos datos, kā arī metode tieši nemērāmu parametru noteikšanai.

Cilpas termosifoniem tika ieviesti darba šķidruma kvalitātes parametri, paplašinot klasisko “*figures-of-merit*” pieeju uz gravitācijas vadītām sistēmām.

Tika piedāvāta jauna siltuma pārnese arhitektūra *Heat Loop Pipe*, kas apvieno klasisko siltuma cauruļu kompakto cilindrisku ģeometriju ar cilpas siltuma cauruļu hidrauliskajām priekšrocībām.

Tika izstrādāta modulāra iztvaikotāju tehnoloģija (“*Altom*”), kas ļauj mērogojami konstruēt daudziztvaikotāju aukstās plāksnes un atvieglo pāreju no specializētām cilpas siltuma cauruļu sistēmām uz universālām divfāžu platformām.

Kopumā iegūtie rezultāti veido metodoloģisku pamatu pasīvo divfāžu siltuma cilpu tehnoloģijas paplašināšanai ārpus šaurām specializētām lietošanas jomām uz plašāku elektroiekārtu klāstu.

Turpmāka tehnoloģijas attīstība, īpaši – ražošanas vienkāršošanas, integrācijas ar elektroiekārtu arhitektūrām un ekspluatācijas noturības paaugstināšanas virzienā, var būtiski paplašināt tās industriālo lietojamību un veicināt energoefektīvu termiskās pārvaldības sistēmu attīstību.

6. IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] Zhihao Zhang, Xuehui Wang, Yuying Yan, “A review of the state-of-the-art in electronic cooling”, *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 1, 100009, 2021.
- [2] Xiaomin Shi, Yunhua Gan, “A comprehensive review of heat pipes for the thermal management in proton exchange membrane fuel cells”, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 220, 2026.
- [3] Rafal Wrobel, Ryan J. MGlen, “Heat pipes in thermal management of electrical machines – A review”, *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 26, 2021, 101053, ISSN 2451-9049, doi: 10.1016/j.tsep.2021.101053.
- [4] Mishkinis, D., Ušakovs, I. SILTUMA CILPAS CAURULE (HEAT LOOP PIPE). LV 15883 A – patent application publication. Application No. LVP2023000021; filing date 2023-03-07; publication date 2024-09-20. Applicant: ALLATHERM, SIA, LV.
- [5] Donatas Mishkinis, Igors Ušakovs, Luka Ivanovskis, Marco Gottero, Albino Quaranta, Federica Negri, Antonio Rotondi, Stéphane Lapensée, Paula Prado, “MECOP – A Novel Two-Phase Capillary Technology for the Thermal Control of Space Systems”, 54th International Conference on Environmental Systems, ICES-2025-300, 13–17 July 2025, Prague, Czech Republic.
- [6] T. Kaya, T. Hoang, “Mathematical modeling of loop heat pipes and experimental validation,” *J. Thermophys. Heat Transfer*, vol. 13, 314–320, 1999.
- [7] I. Ušakovs, D. Mishkinis, I. A. Galkin, A. Bubovich, and A. Podgornovs, “Experimental thermal characterization of the in-wheel electric motor with loop heat pipe thermal management system,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 47, p. 103069, Jul. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103069>
- [8] Igors Ušakovs, Luka Ivanovskis, “Advanced Loop Heat Pipe Application for Cooling High Power LED Lights”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 57, 104320, 2024 (indexed in Scopus, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Science Citation Index Expanded (SCIE), SCImago Journal Rank (SJR), SNIP) <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104320>
- [9] I. Ušakovs, D. Mishkinis, I. A. Galkin, “Concept and experimental study of two-phase cooling loops for PEM fuel cells with a flat aluminum evaporator”, *Results in Engineering*, 2026.
- [10] Ghahfarokhi, P. S., Rasilo, P., Cardoso, A. J. M., Ušakovs, I., Mishkinis, D., Podgornovs, A., “Proof of Concept of a Two-Phase Thermal Management System for Railway Traction Motors,” *IEEE Trans. Energy Convers.* 1–10, 2025. <https://doi.org/10.1109/TEC.2025.3583076>



Igors Ušakovs dzimis 1969. gadā Kačkanarā (Krievija). Latvijas Universitātē ieguvis maģistra grādu fizikā un fiziķa teorētiska kvalifikāciju (1993). Maģistra darbs veltīts divatomu molekulu kvantu mehāniskajam aprakstam un izstrādāts profesora *Dr. habil. phys.* Ruvina Ferbera vadībā.

2015. gadā kopā ar *Dr. Donatas Mishkinis* nodibinājis SIA "*Allatherm*", kur līdz šim ieņem vadītāja un vadošā inženiera amatu.

Piedalījies vairāku starptautisku, tostarp Eiropas Kosmosa aģentūras (*ESA*), projektu, kas saistīti ar divfāžu siltuma pārnese sistēmu izstrādi un eksperimentālo validāciju, īstenošanā. To ietvaros piedalījies divu nozīmīgu tehnoloģiju izstrādē Mēness stacijai – ksenona uzpildes kompresors un daudziztvaikotāju divfāžu aukstā plāksne.

Zinātniskās intereses saistītas ar divfāžu siltuma pārnese, cilpas siltuma caurulēm (*LHP*), termosifoniem un viedo termisko pārvaldību elektrotehniskās iekārtās.