



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Varis Žentiņš

**CENTRALIZĒTĀS SILTUMAPGĀDES DARBĪBAS
EFEKTIVĪTĀTES PAAUGSTINĀŠANA UN FOSILO
KURINĀMO AIZSTĀŠANA AR ALTERNATĪVIEM
ENERĢIJAS AVOTIEM (SILTUMA AVOTA
PARAMETRISKĀS OPTIMIZĀCIJAS ALGORITMI)**

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte
Mehānikas un mašīnbūves institūts

Varis Žentiņš

Doktora studiju programmas “Siltumenerģētika un siltumtehnika” doktorants

**CENTRALIZĒTĀS SILTUMAPGĀDES DARBĪBAS
EFEKTIVITĀTES PAAUGSTINĀŠANA UN FOSILO
KURINĀMO AIZSTĀŠANA AR ALTERNATĪVIEM
ENERĢIJAS AVOTIEM**
(Siltuma avota parametriskās optimizācijas algoritmi)

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
asociētais profesors
Dr. sc. ing. SIGURDS JAUNDĀLDERS

RTU Izdevniecība
Rīga 2022

Žentiņš, V. Centralizētās siltumapgādes darbības efektivitātes paaugstināšana un fosilo kurināmo aizstāšana ar alternatīviem enerģijas avotiem (Siltuma avota parametriskās optimizācijas algoritmi). Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. 49 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes "P-04" 2022. gada 13. oktobra lēmumu Nr. 54.

Šis pētījums tapis sadarbībā ar SAM 8.2.2. "Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās" projektu Rīgas Tehniskajā universitātē Nr.8.2.2.0/18/A/017.

Vāka attēls no SIA "Industry Service Partner" arhīva.

ISBN 978-9934-22-842-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 15. decembrī Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 521. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Pētnieks *Ph.D.* Oļegs Jakovļevs
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Dr. habil. sc. ing. Namejs Zeltiņš,
Fizikālās enerģētikas institūts, Latvija

Profesors *Dr.* Giedrius Janušas,
Kauņas Tehnoloģiju universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis(usi) 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.

Vārds Uzvārds (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu/angļu valodā, tajā ir ievads, 6 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 57 attēli, 7 tabulas, 13 pielikumi, kopā 110 lappuses, ieskaitot/neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 105 nosaukumi.

PATEICĪBAS

Liels paldies mana promocijas darba zinātniskajam vadītājam profesoram Sigurdam Jaundālderim par pacietību un ieguldīto darbu! Paldies par Jūsu ticību man, kā arī par vērtīgu padomu sniegšanu visā darba izstrādes laikā. Liels paldies par Jūsu morālo atbalstu un motivāciju darba izstrādes laikā. Bez Jūsu atbalsta promocijas darbs nebūtu tapis!

Paldies kolēģiem par uzaicinājumu un uzticību kļūt par siltuma akumulācijas sistēmas izbūves atbildīgo būvdarbu vadītāju. Paldies AS "RĪGAS SILTUMS", SIA "*Fortum Latvia*" (šobrīd SIA "*Gren Latvija*"), SIA "Juglas Jauda" darbiniekiem un vadībai par pretimnākšanu, zinātniskajām diskusijām, praktiskajiem padomiem un palīdzību eksperimentu un publikāciju tapšanā!

Vissirsnīgākais paldies manai ģimenei: sievai, vecākiem, sievas vecākiem, kas bija klāt promocijas izstrādes procesā, atbalstīja, uzmuntrināja un ļāva veltīt vakarus un brīvdienas pētniecībai un promocijas darba izstrādei!

Varis Žentiņš

SATURS

IZMANTOTO TERMINU UN SAĪSINĀJUMU SKAIDROJUMS.....	6
IEVADS	7
Promocijas darba aktualitāte	7
Promocijas darba hipotēze	7
Promocijas darba mērķis	7
Promocijas darba uzdevumi	7
Pētījumu metodika	8
Promocijas darba zinātniskā novitāte.....	8
Darba praktiskā nozīme	8
Promocijas darba aprobācija	10
1. LITERATŪRAS APSKATS.....	12
1.1. Klimata īpatnības un efektivitātes paaugstināšanas iespējas koģenerācijas stacijām	12
1.2. Koģenerāciju staciju apskats Latvijā un ražošanas lēmuma pieņemšana	12
1.3. Nodaļas secinājumi	14
2. SILTUMA AVOTA DARBĪBAS EFEKTIVITĀTES PAAUGSTINĀŠANA UN IZMEŠU SAMAZINĀŠANA.....	16
2.1. Absorbcijas tipa siltumsūkņa pielietošana	16
2.2. Siltuma akumulatora izmantošana	19
2.3. Nodaļas secinājumi	21
3. SILTUMU ZUDUMU APRĒĶINĀŠANAS METODIKA AKUMULATORA DARBĪBAS REŽĪMIEM	22
3.1. Nodaļas secinājumi	30
4. EKSPERIMENTĀLĀS METODES IZMANTOŠANA FAKTISKO SILTUMA ZUDUMU NOTEIKŠANAI.....	32
4.1. Siltuma akumulatora siltuma zudumu verifikācija	34
4.2. Nodaļas secinājumi	35
5. SILTUMSLODZES PROGNOZĒŠANA	36
5.1. Siltumenerģijas slodzes prognozes	36
5.2. Siltumslodzes vienkārši lineāri regresijas modeļi	36
5.3. Nodaļas secinājumi	37
6. KOĢENERĀCIJAS STACIJAS LĒMUMU PIEŅEMŠANAS ALGORITMA OPTIMIZĒŠANA, IZMANTOJOT SILTUMA AKUMULATORA DZIĻO ANALĪZI UN IEKĻAUJOT ZUDUMU MODELI	38
6.1. Siltuma akumulatora darbības režīma izmaksu modelis.....	39
6.2. Lēmuma pieņemšanas algoritms.....	40
6.3. Nodaļas secinājumi	43
7. SECINĀJUMI	44
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	46

IZMANTOTO TERMINU UN SAĪSINĀJUMU SKAIDROJUMS

ASV – Amerikas Savienotās Valstis	$P_{char(forecasted)}$ – SA uzlādes prognozētā jauda, MW
ATS – absorbcijas tipa siltumsūknis	$P_{disch(forecasted)}$ – SA izlādes prognozētā jauda, MW
ĀT – ārgaisa temperatūra	$\overline{Pel}_{max. ar HS}$ – maksimālā vidējā jauda KS darbībā ar SA, MW
C_{CO_2} – biržas cena izmešu CO_2 , Eur/t	P_{el1h} – elektriskā stundu kopējā jauda, MW _{el}
$C_{el.losses}$ – elektriskie zudumi SA darbības nodrošināšanai, Eur	P_{hmax} – KS maksimālā jauda siltumslodzes nodrošināšanai, MW
C_f – kurināmā izmaksas, Eur/MWh	P_h1h – siltuma stundu jauda elektrības ražošanas procesā, MW _{th}
$C_{heat losses}$ – siltuma zudumi SA darbības laikā, Eur	P_{hs_charge} – SA uzlādes jauda, MW
C_{losses} – kopējās SA zudumi, Eur	$P_{hs_discharge}$ – SA izlādes jauda, MW
C_{maint} – apkopes un remontu izmaksas SA zudumi, Eur	$P_{min gen}$ – minimālā elektrības ģenerēšanas jauda, MW
$C_{mp el}$ – biržas stundu cena elektrībai, Eur/MWh _{el}	P_{sc} – elektriskā stundu jauda pašpatēriņa nodrošināšanai, MW _{el}
$C_{mp th}$ – biržas stundu cena siltumam, Eur/MWh _{el}	Re^{el} – ieņēmumi no elektrības pārdošanas, kas saražots KS, Eur
$\overline{(Cmp)}$ – vidējā elektrības cena biržā	Q_{hs_actual} – pašreizējā siltumietilpība SA, MWh
$\overline{(Cmp)}_{best max. period}$ – vislabākā perioda vidējā elektrības biržas cena, Eur/MWh _{el}	$Q_{forec.HS}$ – prognozētā SA siltumietilpība, MWh
$C_{network el}$ – elektrības cena no tīkla, Eur/MWh _{el}	Q_{p1-24h} – vidējā prognozētā siltumslodze; MWh
CO_2 – oglekļa dioksīds	Q_{p1h} – siltuma prognoze stundai, MWh
$C_{pp el}$ – ražošanas pašizmaksa elektrībai	Re^{HS} – ieņēmumi no elektrības pārdošanas, kas saražots KS ar SA, Eur
C_{pph} – ražošanas pašizmaksa siltumam Eur/MWh _{th}	RTU – Rīgas Tehniskā universitāte
CSA – centralizētā siltumapgāde	SA – siltuma akumulators
CSS – centralizētās siltumapgādes sistēmas	SC – siltuma centrāle
CSP – Centrālās statistikas pārvalde	SEG – siltumniecisku emisiju gāzes
CST – centralizētie siltumtīkli	SO_2 – sēra dioksīds
DK – dūmgāzu kondensators	SS – siltumslodze
DR – darbības režīmi	TEC – termoelektrocentrāle
EEC – elektroenerģijas cena	$T_{o1h}(wind, precip.)$ – ārgaisa temperatūras, kā arī vēja stipruma un nokrišņu prognozes stundu dati; °C, m/s, jā/nē
ELSPOT – nākamās dienas elektroenerģijas tirgus	T_{1_1h} – tīklu turpgaitas temperatūra stundai, °C
ES – Eiropas Savienība	T_{2_1h} – tīklu atgaitas temperatūra stundai, °C
f – faktoru skaits	V_r – radiālais paātrinājums (velocity), m/s
FMM – fāžu maiņas materiāls	θ – bezdimensijas temperatūra
h – stunda	ξ – bezdimensijas tvertnes augstums
ISP – SIA “Industry Service Partner”	λ – siltumvadītspēja
J – džouls	δ – bezdimensijas termokļūda biežums
k – koeficients	v – kinētiskā viskozitāte
KM – katlumāja	τ – bezdimensijas laiks
KS – koģenerācijas stacija	ρ – ūdens blīvums, kg/m ³
kWh – kilovatstunda	ε – korekcijas koeficients
MWh – megavatstunda	δ_0 – sākotnējā termokļūda bezdimensijas augstums
NO_x – slāpekļa oksīds	μ – dinamiskā viskozitāte, Pa·s
OI – obligātais iepirkums	ω – ātruma lauka virpuļfunkcija tvertnē
OIK – obligātā iepirkuma komponente	ψ – ātruma lauka plūsmas funkcija tvertnē

IEVADS

Promocijas darba aktualitāte

Centralizētās siltumapgādes sistēmas darbības efektivitātes paaugstināšana un fosilo kurināmo aizstāšana ar atjaunojamiem energoresursiem ir viens no galvenajiem enerģētikas nozares uzdevumiem, kas jāveic, lai sasniegtu Eiropas Savienības ilgtermiņa klimata neitralitāti līdz 2050. gadam [1, 3, 5]. Šis politiskais mērķis ir nepieciešams ne tikai globālo klimata pārmaiņu samazināšanai un novēršanai, tas pozitīvi ietekmē energoapgādes drošību, valsts ekonomiku, konkurētspēju. Latvijā ir labi attīstīta CSS, un 69,5 % iedzīvotājiem tiek nodrošināta apkure un karstais ūdens [2].

Promocijas darba aktualitāti pamato arī pieņemtie likumdošanas akti – ES direktīvās noteiktie jaunie klimata un enerģētikas mērķi. Klimata neitralitātes sasniegšanai līdz 2050. gadam noteikts starpterniņš 2030. gads. Lai veicinātu tuvošanos klimata neitralitātei, atjaunojamo enerģijas avotu un energoefektivitātes mērķi tika pārskatīti un paaugstināti 2018. gadā, un tie ir jāsasniedz laika posmā no 2021. līdz 2030. gadam:

- siltumnīcefekta emisiju gāzu samazinājums vismaz par 40 % (salīdzinot ar 1990. gada līmeni);
- vismaz 32 % atjaunojamās enerģijas;
- energoefektivitātes uzlabojums vismaz par 32,5 % [4].

Priekšlikumi nemitīgi tiek papildināti, un 2020. gada decembrī ES līderi izvirzīja jaunu mērķi *fit 55*, kas paredz SEG samazinājumu jau par 55 % (salīdzinot ar 1990. gada līmeni) [6]. Lai izpildītu saistības un virzītos uz jaunajiem mērķiem, ir nepieciešams pārbūvēt visu enerģētikas sektoru un attīstīt jaunu centralizētās siltumapgādes konceptu. Notiek aktīvi pētījumi un diskusijas ne tikai par ceturtais paaudzes, bet jau par piektās paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmas konceptiem, kuros parādās tas, ka katrs sistēmas elements var būt patērētājs un ražotājs. Šādām sistēmām ļoti liela nozīme ir gan zema potenciāla siltuma izmantošana ar siltumsūkņu tehnoloģiju, gan arī sistēmas balansēšanai ar siltuma akumulatoriem. Promocijas darbā piedāvāta daudzperspektīvu analīze un izstrādāts algoritms, kas ļauj novērtēt vienu no galvenajiem virzītājspēka elementiem – siltumenerģijas akumulāciju, kas nākotnē būtiski paātrinātu pāreju uz nākamo paaudžu centralizētas siltumapgādes sistēmām un ļautu izpildīt saistības.

Promocijas darba hipotēze

Ir iespējams atrast optimālus koģenerācijas stacijas darbības režīmus, izmantojot siltuma akumulāciju tehnoloģiju brīvās elektroenerģijas tirgus apstākļos, lai palielinātu efektivitāti un samazinātu fosilo kurināmo.

Promocijas darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izpētīt dažādus Latvijas koģenerāciju staciju darbības režīmus un piedāvāt risinājumus to efektivitātes palielināšanai un fosilo kurināmo samazināšanai mainīgos darba apstākļos. Izstrādāt aprēķinu metodiku siltuma akumulācijas zudumiem darba režīmiem un iekļaut šo bloku koģenerācijas stacijas lēmumu pieņemšanas algoritmā.

Promocijas darba uzdevumi

Promocijas darba mērķa sasniegšanai definēti vairāki uzdevumi.

- 1) Veikt pētījumu par klimata īpatnībām un efektivitātes paaugstināšanas iespējām koģenerācijas stacijās. Koģenerācijas staciju analīze Latvijā un ražošanas lēmuma pieņemšana brīvās elektroenerģijas tirgū.
- 2) Siltuma avota darbības efektivitātes paaugstināšana un izmešu samazināšana, absorbcijas tipa siltumsūkņa un siltuma akumulatora izmantošana.

- 3) Veikt pētījumu un izstrādāt siltuma zudumu aprēķināšanas metodiku siltuma zudumiem dažādiem darbības režīmiem. Pēc izstrādātās metodikas salīdzināt efektīvāko siltumizolācijas risinājumu trīs lielākajiem siltuma akumulatoriem Latvijā.
- 4) Eksperimentālās metodes izmantošana faktisko siltuma zudumu noteikšanai, veicot siltuma akumulatora verifikāciju.
- 5) Veikt pētījumu par siltuma slodzes prognozēšanu.
- 6) Koģenerācijas stacijas lēmumu pieņemšanas algoritma optimizēšana, izmantojot siltuma akumulatora dziļo analīzi un iekļaujot akumulatora zudumu modeli.

Pētījumu metodika

Lai precīzi tiktu sasniegti darba mērķi, ievada daļā lietota vispārējās izziņas metode, ar kuras palīdzību veikta jaunāko publikāciju pētīšana, analīze un apkopošana. Izziņāti siltumenerģijas akumulācijas un siltumsūkņu tehnoloģiju veidi, jaunākās tendences un tēmas aktualitāte. Akumulācijas tvertnes darbības un efektivitātes kompleksa sistēmas uzvedības ietekmējošo faktoru noteikšanai tika izmantota sistēdinamikas pētījuma metode.

Pielietojot empīriskās izziņas metodi, eksperimentu laikā veikta faktu, informācijas uzkrāšana par pētāmajiem objektiem. Pētījumi veikti, izmantojot reāli darbojošās akumulācijas iekārtas. Tika lietota tiešā mērīšana, kuras rezultātā noteikti faktiskie siltuma zudumi. Lai iegūtu visticamākos rezultātus, tad empīriskā novērošana notika objekta dabiskajos apstākļos. Noteikti faktiskie siltuma zudumi, izmantojot eksperimentu laikā iegūto datu analīzi, un veikti aprēķini. Veikta savstarpēja eksperimenta un teorētisko aprēķinu salīdzināšana.

Veikta tehnoloģiskās efektivitātes novērtēšana siltumizolācijai. Darbā izveidotā aprēķinu metodika ļauj aprēķināt siltuma zudumus dažādos darba režīmos un salīdzināt risinājumus savā starpā. Izprotot siltuma akumulācijas sistēmas uzvedību un veicot dažādu uzņēmumu pieredzes apkopošanu, tika izveidots lēmumu pieņemšanas algoritms, kas ļauj paaugstināt kopējo stacijas lietderību, samazināt CO₂ izmešus un aizstāt fosilo kurināmo.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

Darbā veiktie pētījumi parāda koģenerācijas staciju režīmu optimizācijas iespējas, lietojot siltumsūkņa un akumulācijas iekārtas. Veiktajos pētījumos izmantoti reāli siltumapgādes uzņēmumu dati Latvijas klimatiskajos apstākļos.

Pētījuma rezultātā optimizēts koģenerācijas lēmumu pieņemšanas algoritms darbībā ar siltumenerģijas akumulācijas iekārtu, kas apraksta piecu savstarpēji saistītu bloku uzvedību (elektroenerģijas pašizmaksas un tirgus cenas analīze, laikapstākļu prognoze, koģenerācijas režīmi un siltuma akumulatora darbības parametri), kas ļauj pētīt sistēmai piemītošās atgriezeniskās saites. Katrs no blokiem ir aprakstīts ar apakšsistēmām un vienādojumiem, kas raksturo sistēmas darbības kritērijus un mijiedarbību. Piedāvātā metodoloģija ļauj ne tikai diferencēti analizēt siltuma akumulatora darbību, bet arī dod iespēju apskatīt šīs iekārtas lietderību un izmantošanas iespējas integrējot siltumapgādes sistēmā. Nozīmīgs pētījums veikts par siltuma akumulatora zudumiem, tika izveidota aprēķina metodika un tā tika integrēta lēmumu pieņemšanas algoritmā dažādiem darbības režīmiem

Darba praktiskā nozīme

Promocijas darbs ir ieguvis Latvijas lielāko koģenerācijas staciju – SIA “*Gren Latvia*” un SIA “*Juglas Jauda*” – atzinumus. Balstoties šī darba izpētes rezultātos, būs iespējams pārdomāti izvēlēties investīciju politiku ne tikai siltumapgādes uzņēmumos, bet arī valsts enerģētikas politikas kursam, lai sasniegtu definētos mērķus.

Centralizētās siltumapgādes sistēmu siltamovotu pāreja uz brīvā elektroenerģijas un siltumapgādes tirgu saistīta ar tehnoloģiskā procesa efektivitātes celšanu un ražošanas algoritma maiņu.

Promocijas darba forma, struktūra un saturs

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā. Tajā ir ievads, sešas nodaļas, secinājumi un rekomendācijas, pielikumi un literatūras saraksts. Darbā ir 59 attēli, astoņas tabulas, kopā 110 lappušu. Literatūras sarakstā norādīti 105 izmantotās literatūras avoti.

Pirmā nodaļa veltīta Latvijas klimata īpatnībām un efektivitātes paaugstināšanas iespējām koģenerācijas stacijās. Veikta koģenerāciju staciju analīze Latvijā, pētīta valsts atbalsta politika un ražošanas lēmuma pieņemšana brīvās elektroenerģijas tirgū.

Otrā nodaļa veltīta siltuma avota darbības efektivitātes paaugstināšanai un izmešu samazināšanai, izmantojot absorbcijas tipa siltumsūkni un siltuma akumulatoru; aprakstīts veiktais pētījums par siltuma atgūšanu no dūmgāzēm, kā arī pētīta siltuma akumulatora izmantošanas pamatotība koģenerācijas stacijas ražošanas procesā.

Trešajā nodaļā aprakstīts veiktais pētījums un izstrādātā siltuma zudumu aprēķināšanas metodika. Pēc izstrādātās metodikas salīdzināti efektīvākie siltumizolācijas risinājumi trīs lielākajiem siltuma akumulatoriem Latvijā.

Ceturtajā nodaļā veltīta eksperimentālās metodes izmantošanai faktisko siltuma zudumu noteikšanai, veicot siltuma akumulatora verifikāciju. Izmantojot eksperimentālo metodi, izmērīti siltuma zudumi. Nodaļā publicēts eksperimenta apraksts, informācija par izmantotajiem mērīšanas instrumentiem un to precizitāti, kā arī eksperimenta plānošanas gaita. Iegūtie eksperimenta rezultāti salīdzināti ar teorētisko aprēķinu. Termiskie tilti konstatēti ar termogrāfijas metodi un aprēķināti siltuma zudumi. Veikta verifikācija siltuma akumulatoram, ieviešot labojuma koeficientu.

Piektajā nodaļā apskatīta siltumenerģētikas situācija Latvijā, un siltumslodzes prognozēšanai ar siltumslodzes profilu.

Sestajā nodaļā aprakstīta koģenerācijas stacijas lēmumu pieņemšanas algoritma optimizēšanas gaita, izmantojot siltuma akumulatora dziļo analīzi un iekļaujot akumulatora zudumu modeli, kā arī siltuma akumulatora izmaksas modeļa analīze, kurā novērtēti zudumi procesa nodrošināšanai. Apskatīta apkalpošanas un remontu izmaksas ietekme un efektivitātes paaugstināšana, izmantojot aktīvu pārvaldības sistēmu.

Autora personīgais ieguldījums

Promocijas darbs izstrādāts ciešā sadarbībā ar zinātnisko vadītāju asociēto profesoru S. Jaundālderu un citiem līdzautoriem. Autors piedalījās visos darba posmos – datu iegūšanā, aprēķinos vajadzīgo ieejas datu apkopošanā un simulāciju rezultātu analīzē. Autors izveidoja aprēķinu metodi *Microsoft Excel*, *Therm* un *Matlab* programmatūrā un veica nepieciešamos eksperimentus ar reālu siltuma akumulatoru un centrālām siltumapgādes sistēmām.

Darbā veikta siltumenerģijas akumulācijas izpēte un apkopota dažādu siltumapgādes uzņēmumu pieredze. Darba gaitā autors izstrādājis savu lēmumu pieņemšanas algoritmu brīvās elektroenerģijas tirgus apstākļiem, ko atzinīgi novērtējuši nozares uzņēmumi.

Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba galvenie zinātniskie sasniegumi un rezultāti prezentēti piecās starptautiskās zinātniskās un trīs vietējās konferencēs.

Par promocijas darba tematu ir publicēti pieci pilna teksta zinātniskie raksti, piecas pilna teksta publikācijas konferenču rakstu krājumā un piecas zinātniskās konferenču tēzes.

Promocijas darba aprobācija

Par darba rezultātiem ziņots un tie tika apspriesti četrās starptautiskās konferencēs.

1. Rīgas Tehniskās universitātes 59. starptautiskā zinātniskā conference 2018. gada 12. oktobrī, Rīgā, Latvijā.
2. 19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 2020. gada 20.–22. maijā, Jelgava, Latvija.
3. 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2019) 2019. 7–9 oktobrī, Rīga, Latvija.
4. 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2020) 2020. gada 5.–6. novembrī, Rīga, Latvija.
5. Rīgas Tehniskās universitātes 61. starptautiskā zinātniskā konferences. 2020. gada 14. oktobrī, Rīga, Latvija.
6. Riga Technical University 62nd International Scientific Conference. 2021. gada 15. oktobrī. Rīga, Latvija.
7. RTU 62. studentu zinātniski tehniskā konference. Sekcija “Ražošanas tehnoloģija” 2021. gada 29. aprīlī, Rīga, Latvija.
8. Zinātniski metodiskā konference «Izaicinājumi inženierzinātņu augstākajā izglītībā». 2021. gada 15. oktobrī. Rīga, Latvija.

Promocijas darba publikācijas

1. Soročins, A., Rusovs, D., Nagla, J., **Žentiņš V.** The Influence of the Thermal Storage on the Electricity Production in a Co-Generation in Peak and Off-Peak Time Range. *2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2020)*: 5–6 2020. November, Riga, Piscataway: IEEE, 2020, pp. 136–139. ISBN 978-1-7281-9511-7.
2. Soročins, A., Nagla, J., **Žentiņš V.** District Heating Simulation Model Development to Solve Optimization Problems in the Market Conditions. *No: 2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2020)*, Latvija, Riga, 5.–6. novembris, 2020. Piscataway: IEEE, 2020, Article number 9316575. ISBN 978-1-7281-9511-7.
3. Rusovs D., **Žentiņš V.** Steam driven absorption heat pump and flue gas condenser applied for heat recovery in district heating network. *19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*. 2020, Jelgava:, pp. 1627–1632. ISSN 1691-5976.
4. **Žentiņš V.**, Rusovs D., Soročins A., Cars A. Increasing the efficiency of the heat storage by using a absorption heat pump. *Riga Technical University 62nd International Scientific Conference*. 2021. gada 15. oktobrī, p. 9, ISBN 978-9934-22-756-1.
5. **Žentiņš V.**, Rusovs D., Soročins A., Cars A., Analysis of different thermal insulation solutions of a heat storage. *Riga Technical University 62nd International Scientific Conference*. 2021. gada 15. oktobrī, p.5, ISBN 978-9934-22-756-1.
6. Vostrikovs S., **Žentiņš V.**, Rusovs D., Klimatneitralitāte, tehnogēno risku mazināšana un atjaunojamo energoresursu izmantošana siltumapgādē un enerģētikā. *Zinātniski metodiskā konference “Izaicinājumi inženierzinātņu augstākajā izglītībā”*. 2021. gada 15. oktobrī, Rīga, p. 82–84, ISBN 978-9934-22-672-4.
7. **Žentiņš V.**, Soročins A., Koģenerācijas staciju ražošanas lēmumu pieņemšanas algoritms darbībā ar siltuma akumulatoru. *RTU 62. studentu zinātniski tehniskā konference. Sekcija “Ražošanas tehnoloģija”*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. ISBN 978-9934-22-649-6.

8. **Zentins V.**, Soročins A., Nagla J., Rusovs D., Insulation cost impact on heat accumulation unit heat loss. *Rīgas Tehniskās universitātes 61. starptautiskā zinātniskā konference*. 2020. gada 14. oktobrī. ISBN 978-9934-22-503-1.
9. **Žentiņš V.**, Valpētris M., Ķibilds A., Mitruma un temperatūras sensoru izstrāde. *Rīgas Tehniskās universitātes 59. starptautiskā zinātniskā konference*. Rīga, 2018. gada 12. oktobrī.
10. **Žentiņš V.** Nagla J. Ūdenssildāmā katla KVG100 efektivitātes paaugstināšana, izmantojot siltumsūkni *Rīgas Tehniskās universitātes 59. starptautiskā zinātniskā konference*. Rīga, 2018. gada 12. Oktobrī.
11. Nagla J., **Žentiņš V.**, Jaundālders S., Soročins A., Metodika tirgus apstākļiem piemērota centralizētās siltumapgādes sistēmas optimizācijas modeļa izstrādei, Latvija. *Rīgas Tehniskās universitātes 59. starptautiskā zinātniskā konference*. Rīga, 2018. gada 12. oktobrī.

Raksti zinātniskajos žurnālos

1. Rusovs, D., Jakovļeva, L., **Žentiņš, V.**, Baltputnis, K. Heat Load Numerical Prediction for District Heating System Operational Control. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2021, Vol. 58, No. 3, 121.–136. lpp. ISSN 0868-8257.
2. **Žentiņš V.**, Rusovs D., Soročins A., Decision Making Control Algorithm for Cogeneration Plants in Operating with the Heat Accumulator Deep Analysis Model. *Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly Journal* 2022, Riga No. 30, ISSN: 2255-9922.

1. LITERATŪRAS APSKATS

1.1. Klimata īpatnības un efektivitātes paaugstināšanas iespējas koģenerācijas stacijām

Latvija atrodas mērenajā klimata joslā, kur vasaras un ziemas gaisa temperatūra ir ne tikai ļoti mainīga sezonāli, bet arī diennaktī bieži mainās pat 15–20 °C diapazonā [7].

Lai nodrošinātu stabilu siltuma slodzi mainīgos klimatiskos apstākļos, centralizētā siltumapgādes sistēmā nepārtraukti nepieciešams regulēt siltumavotu jaudu. Ražojot koģenerācijas režīmā, mainīga ir ne tikai siltuma slodze, bet arī elektrības tirgus cenas, piemēram, *Nord Pool* sistēmā.

Siltuma akumulācija dod iespēju nodalīt siltuma un elektrības ražošanu. Brīvās siltuma enerģijas tirgus apstākļos akumulācija nodrošina iespēju elastīgi sekot enerģijas pieprasījumam un ražot enerģiju ar tādiem iekārtas režīmiem, kādi ir maksimāli efektīvi. Tādējādi ir iespējams efektīvi izmantot esošās staciju jaudas, tajā skaitā elektroenerģijas ražošanu maksimālās slodzes režīmos, ja tirgus cenas ir augsta. Termiskā uzglabāšana ir 100 reizu lētāka, salīdzinot ar ieguldījumiem uz vienu uzglabāšanas jaudas vienību elektrībai [9].

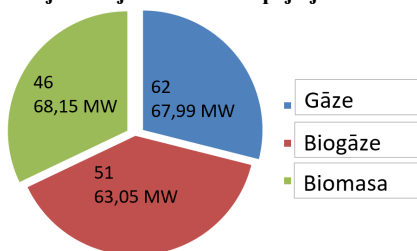
Siltumenerģētikā visbiežāk izmanto siltumietilpības akumulāciju ar stratifikāciju, kur gan karstais, gan aukstais ūdens noslāņojas un vienlaikus atrodas rezervuārā. Šī ūdens noslāņošanās notiek Arhimēda spēka ietekmē [13]. Šāda tipa siltumenerģijas uzglabāšana ir visvienkāršākā un lētākā [12].

Tehnoloģijām attīstoties, koģenerācijas stacijas kopējās efektivitātes celšanai pakāpeniski tiek ieviesti efektivitātes pasākumi. Viena no aktuālajām šā brīža tehnoloģijām ir zema potenciāla siltuma atgūšana gan no dūmgāzēm, gan kondensāta.

1.2. Koģenerāciju staciju apskats Latvijā un ražošanas lēmuma pieņemšana

Enerģētikas tirgus liberalizācija un ES mērķi par energoefektivitātes uzlabojumu katrai dalībvalstij [4] veicina siltuma akumulācijas iekārtu strauju attīstību. Precīza ražošanas plānošana ir ļoti svarīga koģenerācijas stacijās, kas darbojas elektroenerģijas brīvās tirgus apstākļos [40, 53], bet, izmantojot siltuma akumulatoru, tās nozīme būtiski palielinās gan sarežģītības, gan papildu aprēķina funkciju dēļ. Turklāt ražošanas procesu ietekmē mainīgās siltuma, CO₂ un kurināmā izmaksas [41]. Latvijā 175 stacijas koģenerācijas režīmā saražo 75 % siltumu. 2019. gadā no visām KS (koģenerācijas stacijas) 159 saņēma OI atbalstu elektroenerģijas ražošanai, piecas lielākās stacijas virs 10 MW_{el} – uzstādītās jaudas maksu, kas patērētājiem veido OIK, kas tiek pieskaitīts elektrības rēķinam. KS zem 10 MW_{el}, kas saņēma OIK atbalstu, kopējā uzstādītā elektriskā jauda ir 199,2 MW_{el}.

Koģenerāciju staciju skaits un kopējā jauda



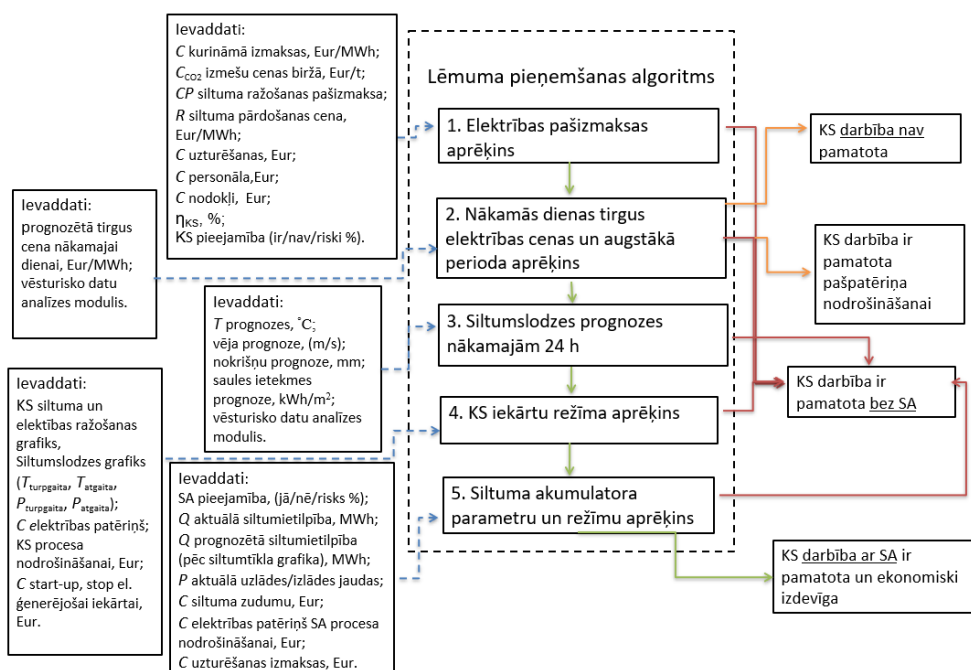
1.2.1. att. Koģenerāciju staciju iedalījums pēc kurināmā [42].

Kopējā uzstādītā jauda 62 gāzes, 51 biogāzes un 48 biomasas KS ir robežās no 63,05 MW_{el} biogāzei līdz 68,15 MW_{el} biomasai. Savukārt piecām lielākajām koģenerācijas stacijām uzstādītā jauda ir

1061,90 MW_{el}, un tās saņem uzstādītās jaudas atbalstu, kas arī ietilpst OIK [42]. Kopā no 2020.–2022. gadam atbalstu zaudēs 61 stacija [43] no pavisam 164 stacijām jeb 37 % no kopējā skaita. Arī pēc 2022. gada staciju skaits, kam beidzas valsts atbalsts, samazināsies, jo garantētais OI elektroenerģijai paredzēja no 10–15 gadu atbalsta periodu [44]. Lielai daļai KS, tuvojoties vai jau beidzoties OIK atbalstam, ir jāpārorientējas brīvās tirgus apstākļiem, tas nozīmē, ka elektroenerģija netiek iepirkta garantētās maksas ietvaros.

Lai maksimāli īsākā periodā varētu pieņemt maksimāli precīzu rezultātu dalībai brīvā elektroenerģijas tirgū, piemēram, *Nord Pool* nākamās dienas tirgus, kur piedāvājuma un pieprasījuma piedāvājumi nākamajai dienai jāizvieto ne vēlāk kā līdz pulksten 12 dienā [22], ir jāspēj apstrādāt liels datu apjoms. Šajā datu apjomā ietilpst nākamās dienas siltumslodzes prognozes, KS darbība, elektrības cenas izmaiņas, turklāt SA gadījumā jāņem vērā arī tā darbības parametri. Ja netiek ņemti vērā visi apstākļi, var rasties situācija, kad KS darbība ar SA var neradīt maksimālo labāko rezultātu, vai arī radīt pat zaudējumus.

Mainoties ārējiem faktoriem, piemēram, siltuma slodzei, kā arī elektroenerģijas tirgus cenai [22], ir gandrīz neiespējami panākt perfektu koģenerācijas režīmu plānošanu nākamai dienai, taču šo mērķi var tuvināt, izmantojot dažādas metodikas. Ir vairāki veidi, kā panākt elastīgāku koģenerācijas staciju ekspluatāciju tirgus apstākļos [58]. Viens no tiem ir SA izmantošana [59]. Turklāt, plānojot saskaņotu koģenerācijas stacijas darbību ar SA, var paaugstināt efektivitāti, taču tas plānošanas uzdevumu padara vēl sarežģītāku [60]. Koģenerācijas stacijas daudzlīmeņu algoritma kontroles mērķis ir iegūt maksimālu pozitīvu rezultātu, ātri izslēdzot tos darbības scenārijus, kuros KS ar SA darbība nav tehniski vai ekonomiski lietderīga.



1.2.2. att. Funkcionāla shēma piecu mainīgo bloku definēšanai [62].

Šis algoritms ietver vairāku līmeņu sistēmas ar galvenajiem pieciem bloku aprēķinu moduļiem, katram modulim ir savi ievaddati, katrs no tiem var savstarpēji mijiedarboties ar savu funkcijas izeju jeb rezultātu. Izejot cauri visām funkciju ķēdēm, tiek izfiltrēti gadījumi, vai KS darbība ar SA ir efektīva, vai nav. Turklāt ir iespējams, ka ievaddatu parametru aprēķinu funkciju rezultāti kādā no šiem atsevišķiem blokiem parāda, ka SA izmantošana nav lietderīga.

Lai sasniegtu visefektīvāko rezultātu, ir nepieciešams optimizēt lēmumu pieņemšanas algoritmu, kas apvieno šos atsevišķos procesus vienotā. Algoritms ietver piecus lielus pamatblokus, kas definē galvenos procesus, piešķirot lielu nozīmi siltuma akumulatora darbības režīmu parametriem un zudumiem.

1. Elektrības pašizmaksas aprēķina modulis – viens galvenajiem rādītājiem, lai varētu startēt brīvajā tirgū, ir precīza kalkulācija aktuālajai saražotās elektrības pašizmaksai [61], ko ietekmē tādi mainīgi faktori, kā kurināmā izmaksas, siltuma ražošanas pašizmaksa pret pārdošanas cenu, kā arī CO₂ izmešu cenas biržas faktora, ja stacija neizmanto atjaunojamo kurināmo. Turklāt šajā blokā nosaka iekārtu pieejamību un darbības riskus.

2. Elektrības tirgus cenas aprēķina modulis nosaka nākamās dienas elektrības cenas prognozes. Tirgus cenas kalkulācijā tiek analizēti un meklēti elektrības maksimālie un minimālie vidējie cenu periodi, salīdzinot ar vidējo elektroenerģijas pašizmaksas cenu. Turklāt daudzos pētījumos tiek izmantota vēsturisko datu analīze, kas palīdz veikt plānošanu ilgākam periodam [45].

3. Siltumslodzes aprēķina modulis paredz precīzu siltuma slodzes prognozes veikšanu katrai stundai [36] nākamajās 24 h, kas būtiski ietekmē visu ražošanas plānošanas procesu. Neprecīzas prognozes rezultātā siltuma akumulators var tikt priekšlaicīgi uzlādēts un, turpinot ražot lieko siltumu, vairs nebūtu iespējams uzkrāt, kas ietekmētu to, ka jāsamazina ražošanas jaudas. Var būt arī situācija, kad, sākot jauno biržas ciklu, SA vēl nav izlādēts. Arī šajā gadījumā ražošana ar noteikto jaudu notikt nevar.

4. Koģenerācijas darbības režīma modulis kurā atkarībā no siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanas attiecības un ģenerācijas bloku elastības ir jāveic aprēķins, lai pieņemtu lēmumu par ražošanas sākšanu. Turklāt ir jāņem vērā arī koģenerācijas stacijas palaišanas un izslēgšanas apstākļi un ražošanas jaudas amplitūda diennakts laikā, kas var kaitēt iekārtu tehniskajām sastāvdaļām [39]. Jāņem vērā arī KS iekārtas palaišanas un apstāšanās apstākļi un izmaksas [46].

5. Siltuma akumulatora aprēķina modulis ietver siltuma uzkrāšanas tehniskos parametrus un aprēķinu funkcijas: siltuma jauda, uzlādes un izlādes jauda, zudumi, elektriskie u. c. tehniskie parametri. Ļoti svarīga ir iekārtu pieejamība akumulācijas sistēmai.

1.3. Nodaļas secinājumi

Literatūras analīze parāda: lai nodrošinātu stabilu siltuma slodzi centralizētās siltumapgādes sistēmā mainīgos klimatiskos apstākļos, ir nepieciešams nepārtraukti regulēt jaudu siltuma avotos. Mainīgā diennakts siltumslodze ietekmē darba režīmus, un ražošanas plānošana ir salīdzinoši vienkārša, ja koģenerācijas stacija saņem valsts atbalstītu elektroenerģijas iepirkumu. Līdz 2022. gadam 37 % koģenerācijas staciju notiek pārorientācija uz brīvā tirgus apstākļiem un valsts atbalsta zaudēšana, šo staciju darbības režīmus ietekmē arī svārstīgais elektroenerģijas tirgus. Enerģētikas politika arī turpmāk virzīsies uz brīvā tirgus apstākļiem. Tādējādi šo staciju ražošanas darba režīmu lēmumus sarežģīt ne tikai mainīgā elektroenerģijas tirgus cena, bet arī tas, ka lēmums par nākamās dienas elektroenerģijas ražošanas apjomu jānosauca kārtējā dienā no plkst. 10 līdz 12. Attiecīgi biržā tiek veidoti pieprasījumi un piedāvājumi.

Siltuma akumulācijas vai siltuma sūkņu tehnoloģiju izmantošanas gadījumā vēl vairāk palielinās mainīgie faktori un nenoteiktība gala ražošanas lēmumu pieņemšanā. Nepieciešams plānot un ņemt vērā iekārtu tehniskos un ekonomiskos parametrus mainīgajos tirgus un vides apstākļos. Piemēram, siltuma akumulatora tehnoloģija var paaugstināt kopējo siltuma avota efektivitāti, taču bez plānošanas un tehnoloģiskiem aprēķiniem var to arī samazināt vai pat radīt zaudējumus atsevišķos darbības režīmos.

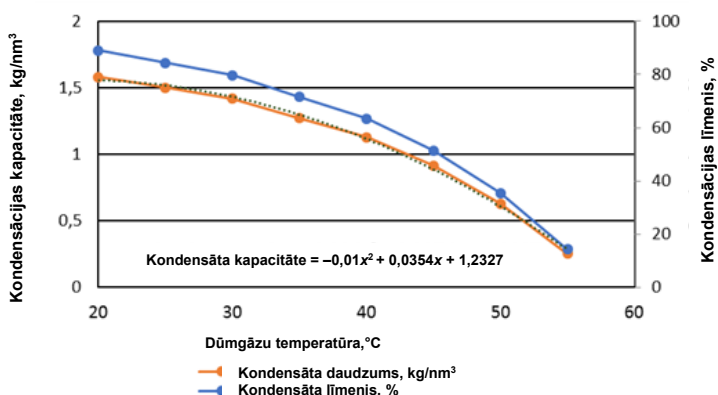
Tika definēti pieci lieli algoritmu pamatbloki: elektrības pašizmaksas, elektrības tirgus cenas, siltumslodzes, koģenerācijas darba režīmu un siltuma akumulatora aprēķina modulis, kas visvairāk ietekmē koģenerācijas stacijas ražošanas lēmumu pieņemšanu. Katrs modulis veido aprēķinu funkcijas, kur atkarībā no ievaddatiem izejas funkcijas veido piecus stāvokļus, kuri pamato ražošanas lēmumu.

2. SILTUMA AVOTA DARBĪBAS EFEKTIVITĀTES PAAUGSTINĀŠANA UN IZMEŠU SAMAZINĀŠANA

2.1. Absorbcijas tipa siltumsūkņa lietošana

Dūmgāzu kondensatora izmantošana kļūst par izplatītu risinājumu stacijas efektivitātes paaugstināšanai. Rezultātā kopējā sistēmas efektivitāte pārsniedz 100 %, salīdzinot to tikai ar katla lietderību. Katla dūmgāzu rasas punkts ir aptuveni 50–60 °C, kas atbilst dūmgāzu efektīvam rekuperācijas sliekšnim un ir atkarīgs no CST atgaitas ūdens temperatūras. Dūmgāzu dziļā dzesēšana (zem 40–45 °C) un zema potenciāla atgūšana nav iespējama ar tiešu siltuma apmaiņu starp dūmvadiem un tīkla atgaitas ūdeni. Šajā nodaļā apskatīta esošā dūmgāzu kondensatora sistēmas modernizācija – tika pieslēgts esošais absorbcijas tipa siltumsūknis (ATS) ar nominālo jaudu 2,1 MW, lai atgūtu papildu siltumu no dūmgāzēm. Dūmgāzu dziļās dzesēšanas rezultātā samazinās kurināmā patēriņš, tādējādi nodrošinot oglekļa emisiju samazināšanos. Kurināmā mitrums un ūdeņradis kā sastāvdaļa rada ievērojamu mitruma koncentrāciju dūmvados, kas kondensējas ūdens veidā. Izplūdes gāzu mitruma kondensācija paaugstina sadegšanas efektivitāti un samazina emisijas līmeni uz enerģijas vienību. Piemēram, sadegot metānam, veidojas reakcijas produkts – vismaz 2,25 kilogrami ūdens tvaika uz kilogramu metāna. Kondensācijas rezultātā tvaika daudzums atgriežas enerģijas bilancē no 4 MJ līdz 5 MJ uz kilogramu kurināmā.

Apkures siltumslozdes režīmā atgaitas temperatūras vērtības nosaka kondensācijas ātrumu un siltuma atgūšanu. 2.1.1. attēlā redzama kondensācijas ātruma un siltuma atgūšanas sakarība no dūmgāzu temperatūras [14] – 45 °C temperatūrā tiek kondensēta tikai puse no visa iespējamā mitruma.



2.1.1. att. Latentā siltuma atgūšana no dūmgāzēm pēc dabasgāzes sadedzināšanas [14].

Dūmgāzu temperatūras pazemināšana līdz 25–35 °C dod iespēju gāzes katla kurināmā siltuma efektivitāti uzlabot līdz pat 16 % [15] un cieto daļiņu samazinājumu biomasas katliem par 33–44 % [16]. Eksperimentālie rezultāti kurināmajam ar mitruma saturu 50,9 % liecina, ka, izmantojot ATS, no dūmgāzēm atgūst līdz 44 % enerģijas, ar DK – 23 %.

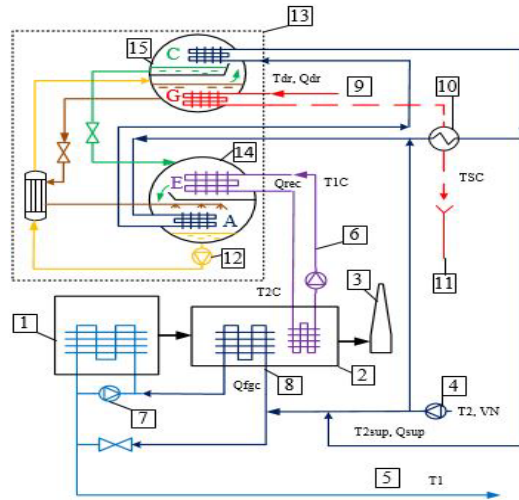
Ja centralizētajai siltumapgādes sistēmai tiek izmantota ATS sistēma, tad ļoti būtisks ir COP pievadītā siltuma daudzuma Q_{sup} un latentā siltuma daudzuma Q_{rec} , kas atgūts no dūmgāzēm, attiecības [17]

$$COP = \frac{Q_{sup}}{Q_{sup} - Q_{rec}}. \quad (2.1.1)$$

Literatūrā minēts, ka šādas sistēmas COP ar līdzīgu parametru vērtībām var sasniegt 1,762 [18].

Absorbcijas sistēmai ir trīs galvenās daļas: absorbers, kurā tiek atdzesētas dūmgāzes, ģenerators un dzesētājs, kur iztvaicēšanas rezultātā tiek iegūts tvaiks, un tas kondensējas pie lielāka spiediena. Nominālā dzesēšanas jauda ir 2,1 MW, dzesēšanas ūdens plūsma – 70 m³/h, dūmgāzu atdzesēšana no 55 °C līdz 29 °C temperatūrā. Piegādātā ATS siltumenerģija sastāv no enerģijas Q_{dr} (no karstām dūmgāzēm, tvaika vai ūdens), kas nonāk ģeneratorā ar nominālo jaudu 2,7 MW. Nominālā dzesēšanas darbība bija ar $COP = 0,78$ pie ūdens cirkulācijas 110 m³/h slēgtā kontūrā starp no DK un ATS. Savukārt temperatūra DK bija no $T_{1C} = 17$ °C līdz $T_{2C} = 25$ °C. Dūmgāzu daudzums jeb latentā enerģija Q_{rec} , kas iegūta DK, tiek izmantota ATS iztvaicēšanas procesam. Pēc tam iztvaicēto ūdeni ar enerģiju absorbē Li-Br šķīdums. Atgaitas ūdens plūsma ATS ir ierobežota, un tā novērojuma laikā bija apmēram 350 m³/h. Šī plūsma pēc sasildīšanas absorbētājā nonāk ATS kondensatorā, kur tvaika ģenerators enerģijai Q_{dr} jābūt līdzsvarotai ar atpakaļgaitas CST plūsmu. Atgaitas ūdens plūsma iegūst enerģiju absorbētājā Q_{rec} un kondensatorā Q_{dr} . Kopējā enerģija $Q_{sup} = Q_{dr} + Q_{rec}$ ar temperatūru T_{2sup} tiek pievadīta CST atgaitas ūdens plūsmai.

Pētījuma mērķis ir izstrādāt empīrisku sakarību starp siltuma atgūšanas ātrumu dažādiem katla ar ATS un DK darbības režīmiem. Reālā apkures režīmā jaudas pieprasījuma ātrums prasa rūpīgi apsvērt tīklu termiskās inerces ietekmi [19] un enerģijas uzkrāšanu uzlādes plānošanu atbilstoši [20] uzrādītajam tirgus pieprasījumam. Dati, kas redzami 2.1.3., 2.1.4. un 2.1.5. attēlā, pētījuma gaitā tika iegūti katru stundu ar rūpnieciskās precizitātes līmeni, ņemot vērā temperatūras un plūsmas ātruma mērījumus konkrētos punktos.

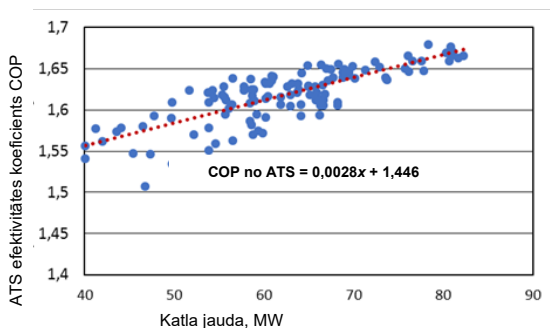


2.1.2. att. Absorbcijas siltumsūkņa un dūmgāzu kondensatora darbība enerģijas atgūšanai: 1 – katls; 2 – dūmgāzu kondensators (DK); 3 – skurstenis; 4 – tīkla cirkulācijas sūknis, atgaitas ūdens no centralizētās siltumapgādes tīkla (CSS); 5 – turpgaitas ūdens uz CSS; 6 – dūmgāzu enerģijas kondensācijas cilpa ATS iztvaicētājam (E); 7 – katla recirkulācijas sūknis; 8 – dūmgāzu enerģijas cilpa; 9 – ūdens tvaika piegāde ATS; 10 – ūdens tvaika kondensatora dzesētājs; 11 – ūdens tvaika kondensāta noteka; 12 – litija bromīda šķīduma cirkulācijas sūknis; 13 – absorbcijas tipa siltumsūknis (ATS); 14 – iztvaicētājs (E) un absorbētājs (A); 15 – kondensators (C) un ģenerators (G) [21].

Jaudas un COP daudzuma izkliede aplūkotās diagrammās rodas plašā darbības parametru diapazonā. Piemēram, katla jauda un atgaitas temperatūra T_2 . ATS jaudas Q_{sup} lielumus nominālajai katla jaudai var noteikt, novērtējot ATS darbību. Siltuma atgūšana no tvaika kondensāta tiek nodrošināta kondensatora dzesētājā punktā Nr. 10.

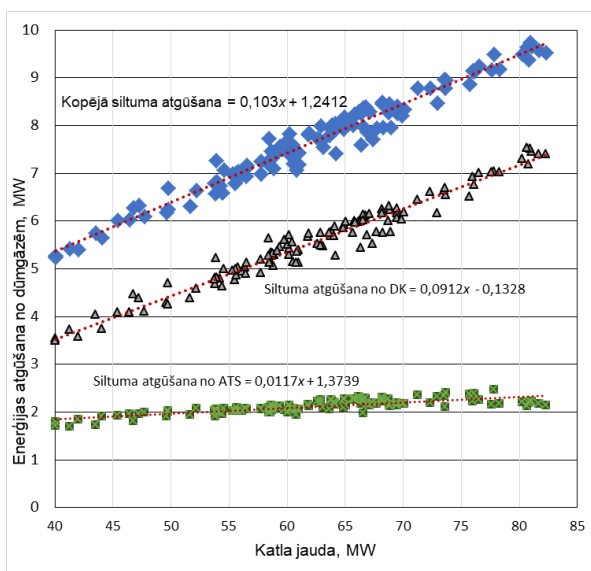
Būtiskās ATS COP svārstības katla jaudas izmaiņai var izskaidrot ar dažādām atgaitas temperatūras T_2 vērtībām un ūdens plūsmas izmaiņu daudzumu Q_{DR} . 2.1.3. attēlā redzamās tendences rāda, ka COP

palielinās tad, kad dūmgāzu daudzums pieaug kopā ar ūdens tvaika daudzumu. ATS tvaika jauda Q_{DR} nodrošina zema potenciāla siltuma atgūšanu no dūmgāzu atdzišanas.



2.1.3. att. Absorbcijas tipa siltumsūkņa COP dažādi katla jaudai [21].

2.1.4. attēlā redzama sakarība enerģijas atgūšanai DK kopumā. Var redzēt, ka kopējā enerģijas atgūšana seko katla jaudas pieauguma novirzei, kur pie 40 MW jaudas atgūst 5,2 MW siltuma. Pie 80 MW katla jaudas vajadzētu būt 10,4 MW, taču reālā ekspluatācijā reģenerācijas vērtība ir tikai 9,5 MW.

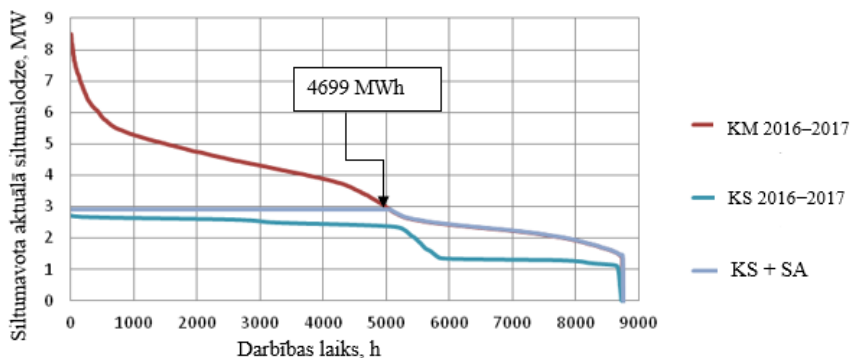


2.1.4. att. Enerģijas atgūšana no dūmgāzēm: ATS (Q_{rec}) ■, DK (Q_{fgc}) ▲ un kopējā ($Q_{rec} + Q_{fgc}$) ◆ [21].

Šo 10 % deficītu var izskaidrot ar ierobežoto Q_{rec} . Kad katla jauda dubultojas no 40 MW līdz 80 MW, ATS sistēmā Q_{rec} vērtība palielinās par 35–40 %. Empīriskie vienādojumi, kas redzami 2.1.3.–2.1.4. attēla diagrammās, atspoguļo katla ietekmi uz jaudu, atgaitas temperatūru T_2 un reģenerācijas efektivitātes COP vērtību. Šis attiecības sakarības pavērs ceļu ražošanas plānošanai, siltumtīklu darbības simulācijai, kā arī sistēmas darbības tālākai uzlabošanai.

2.2. Siltuma akumulatora izmantošana

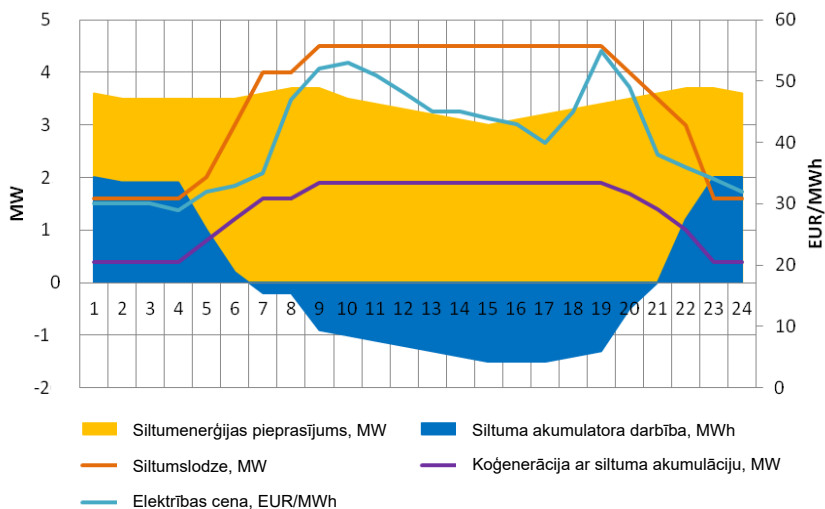
Pamatojoties uz siltuma skaitītāju datiem par apkures periodu trīs gados (2015–2016., 2016.–2017. g. un 2017.–2018. g.), tika analizēti KM siltuma slodzes dinamikas stundas dati. Veicot datu apstrādi un konstruējot siltumslodzes grafiku, 2.2.1. attēlā redzama kopējā siltumavota slodze KM un KS režīmos. Modulācijas rezultātā tika sastādīts siltumslodzes grafiks KS darbībā ar SA.



2.2.1. att. KM siltuma slodzes grafiks (2016.–2017. gada periodam) [22].

Katram apkures periodam tika sastādīts faktiskais siltuma slodzes ilguma grafiks jeb tā sauktais Rosandera grafiks, atsevišķi atdalot koģenerācijas un katla siltuma slodzi (2.2.1. att.). Koģenerācijas iekārta neatrodas maksimālās slodzes sadaļā no ~ 4000 līdz 8760 stundām.

KS vienmērīgas darbības nodrošināšanai mainīgas siltumslodzes un elektroenerģijas tirgū ir risinājums ar SA lietošanu [23], kā redzams 2.2.2. attēlā. Tajā redzams, ka galvenie SA lietošanas ieguvumi ir: panākta iekārtu vienmērīga darbība; elektrības cenas pīķu stundās tiek maksimāli izmantotas koģenerācijas iekārtas. Modulējot situāciju, lai novērtētu KS darbību ar SA un iespējamo papildu saražoto elektroenerģiju, salīdzinot KS bez SA, tika izmantoti *Nordpool spot* dati, jo tajos bija iespējams atrast stundas vēsturiskos datus par elektroenerģijas cenām Latvijā [8]. Aprēķinos tika analizēta atšķirība elektroenerģijas cenās starp vidējo cenu “pīķa” periodā un periodu, kad elektroenerģijas cena ir kritusies (vidējais svētais laiks ārpus pīķa).



2.2.2. att. Siltumavota darbība ar siltuma akumulatoru 24 stundu ciklam [22].

Izmantojot SA, tiek panākta koģenerācijas iekārtas nepārtraukta darbība diapazonā no 50 % līdz 100 % no uzstādītās jaudas. Salīdzinot ar trīs gadu vidējo apkures periodu, koģenerācijas režīmā ir iespējams papildus ražot 4272 MWh elektroenerģiju, lai kombinētā ciklā iegūtu 4699 MWh siltumenerģiju.

2.2.1. tabula

KS darbība ar un bez akumulatora [22]

Nosaukums	Vienība	Pirms SA	Pēc SA uzstādīšanas	Starpība
		Vidējais 3 gadu	Prognozētais	Pirms un pēc SA
Pārdotā elektrība	MWh	14651	18453	3802
Pārdotais siltums	MWh	22061	22061	0
Elektrība saražotais apjoms koģenerācijas režīmā	MWh	16462	20734	4272
Siltuma saražotais apjoms	MWh	31516	31516	0
KS	MWh	18108	22807	4699
Katls	MWh	13408	8709	-4699
Kurināmā patēriņš	MWh	54836	60721	5885
KS	MWh	41155	51834	10679
Katls	MWh	13682	8887	-4795

Iegūstot vairāk elektroenerģijas pie esošās siltumslodzes un veicinot koģenerācijas iekārtas ilgāku darbību, kas ir efektīvāka, tiek panākta kurināmā ekonomija un CO₂ izmešu samazinājums aptuveni par 959 tonnām [24], ja to salīdzina ar gāzes katlu balansēšanai paredzēto saražoto siltuma daudzumu. 2.2.1. tabulā apkopotie pētījuma rezultāti liecina, ka šajā stacijā kurināmā patēriņa ekonomija pielīdzināma 4795 MWh.

2.3. Nodaļas secinājumi

Efektivitātes paaugstināšanu, izmešu samazināšanu un siltumslodzes balansēšanu var panākt, ekspluatācijas stadijā modernizējot stacijas ar siltuma akumulācijas un siltumsūkņa tehnoloģiju.

- Dziļai dūmgāzu dzesēšanai ar absorbcijas tipa siltumsūkni ir plašs potenciāls lietojums, gan koģenerācijas stacijās, gan katlumājās uzstādītiem ūdenssildāmiem katliem, lai uzlabotu kopējo efektivitāti. Efektīvai enerģijas atgūšanai no dūmgāzēm ir daudz komponentu (dūmgāzu kondensatori, absorbcijas dzesētāji, siltummaiņi utt.). Joprojām nav pietiekami daudz pētījumu siltumsūkņa nominālās jaudas noteikšanai dažādiem darbības apstākļiem. Eksperimentālie un teorētiskie aprēķinu dati pierāda, ka katla siltumefektivitāti var uzlabot līdz 16 %, ja dūmgāzu temperatūru samazina līdz 25 °C.
- Reālu datu analīze parāda, ka elektrības cenas nakts stundās bieži ir zemākas, taču siltumslodze šajā brīdī pieaug, savukārt dienas stundās pie zemākas siltumslodzes elektroenerģijas cenas sasniedz pīķus. Īslaicīgā siltuma akumulācija ļauj balansēt siltuma slodzi un dienas laikā uzkrāt papildus saražoto siltumu. Pētījums liecina, ka siltuma akumulācijas iekārtas izmantošana koģenerācijas stacijā, kurā ir uzstādītas koģenerācijas iekārtas ar kopējo elektrisko jaudu 2,64 MW_{el}, izmantošana dod iespēju gada laikā saražot un pārdot papildu elektroenerģiju līdz 4272 MWh pie esošās siltumslodzes. Fosilā kurināmā gadījumā tiek novērsta 959 t CO₂ izmešu nokļūšana atmosfērā.

3. SILTUMU ZUDUMU APRĒKINĀŠANAS METODIKA AKUMULATORA DARBĪBAS REŽĪMIEM

Eiropā siltuma akumulācijas iekārtas ir vairāk izplatītas Ziemeļvalstīs, līderes to izmantošanā ir Dānija un Zviedrija. Kopējā akumulācijas tvertnu siltumietilpība ir liela, piemēram, Zviedrijā tā ir 42 GWh, Dānijā pat 50 GWh. Eiropā vislielākās siltumakumulācijas tvertnes atrodas Dānijā. Pašreiz pati lielākā tvertne ir Odensē, tās ietilpība ir 75 000 m³, siltumietilpība var sasniegt 3,6 GWh [12].

Latvijā pirmās lielizmēra siltuma akumulācijas tvertnes ar tilpumu virs 1000 m³ tika izbūvētas 2019. gadā, no tām pirmā atklāta SIA “Salaspils Siltums” ar tilpumu 8000 m³. Tajā pašā gadā uzņēmumā SIA “Fortum Latvia”, Jelgavā, tapa SA ar 5000 m³ un 180 MWh siltumietilpību [26]. AS “Latvenergo” TEC-2 2021. gada 26. martā tika pieņemts ekspluatācijā Baltijā lielākais SA ar tilpumu 18 000 m³, kas jau ir salīdzināms ar Ziemeļvalstu SA.

Siltumizolācijas biežums un siltumvadītspēja SA ietekmē ne tikai zudumus, bet arī efektivitāti. Sliktā siltumizolācija, radot lielus siltuma zudumus, var izjaukt stratifikāciju SA iekšienē un karstā un aukstā ūdens slāņus [55,56]. Efektivitāti ietekmē arī SA forma, kur lielākas augstuma un diametra attiecības gadījumā stratifikācija kļūst izteiktāka [57]. Galvenais šīs nozares mērķis ir noteikt trīs reālu lielāko Latvijas siltuma akumulatoru siltumizolācijas risinājuma efektivitāti un veikt to analīzi. Siltuma pārejas aprēķini tika veikti stacionāram režīmam, modelēšana veikta SA uzlādes-izlādes ciklā.

Koeficients U ir galvenais parametrs, ar kura palīdzību tiek noteikta termiskā izolācija. Tas ir atkarīgs no termiskās pretestības:

$$U = \frac{1}{R \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_n}{\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_n}}, \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}, \quad (3.1)$$

kur: R – termiskā pretestība; δ – materiāla slāņa biezums, m; λ – materiālu siltumvadītspējas koeficients, W/(m·K) [29].

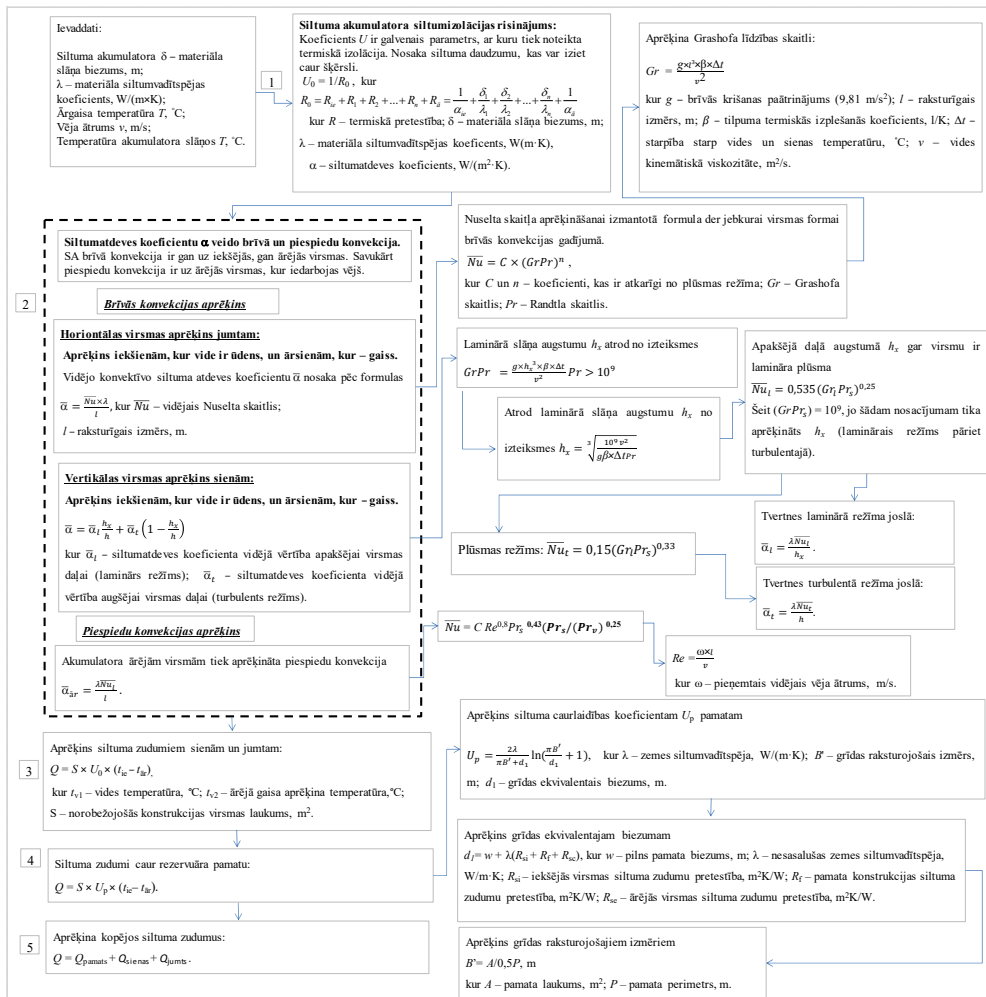
Aprēķins tika veikts SA ar tilpumu $V = 5000 \text{ m}^3$ un vienādiem ģeometriskiem izmēriem – $S_{\text{pam}} = 200,96 \text{ m}^2$, $S_{\text{jumts}} = 220 \text{ m}^2$, $S_{\text{sienas}} = 1246 \text{ m}^2$, taču mainās siltumizolācijas risinājumi, ko var redzēt pēc 3.1. tabulas datiem kā objektu x , y un z . Tika veikti aprēķini siltuma zudumiem 0 °C gaisa temperatūrā, 75 °C karstajam slānim, 47 °C aukstajam slānim, kas atbilst reālam CSS grafikam. Sajaukšanās zonas temperatūra tika pieņemta 60 °C. Raksturīgie izmēri ir siltuma akumulatora augstums – 25,86 m un diametrs 16 m. Lai iegūtu ticamāku simulācijas rezultātu, tika noteiktas α vērtības pie izvēlēta siltuma akumulatora darbības parametriem gan piespiedu, gan brīvajai konvekcijai.

Teorētiskā siltuma zudumu noteikšana vai modelēšana SA prasa ietilpīgus aprēķinus, ko autors veica *Microsoft Excel* datorprogrammā. Lai varētu veikt modelēšanu siltumizolācijas risinājumiem, tad tika izveidota aprēķina metodika blokshēmas veidā, kas redzama 3.1. attēlā.

3.1. tabula

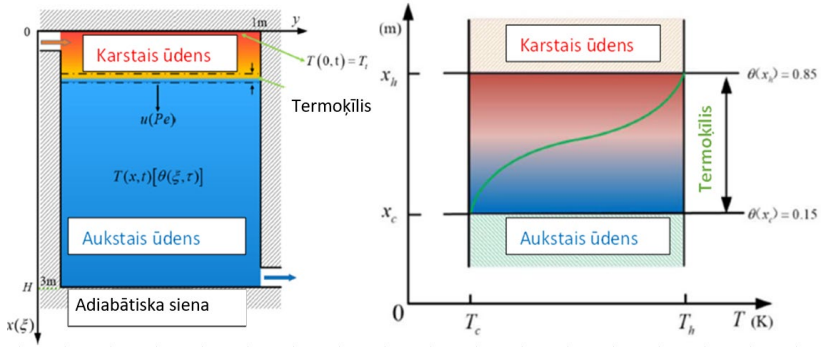
Lielāko Latvijas siltuma akumulatoru izolācijas risinājumi [30]

Konstrukcijas nosaukums	Slānis	Objekts, materiāls	Biezums, m	λ , W/(m·K)	Objekts, materiāls	Biezums, m	λ , W/(m·K)	Objekts, materiāls	Biezums, m	λ , W/(m·K)
		Objekts x			Objekts z			Objekts y		
Rezervuāra jumts	1	tērauds	0,006	50	Tērauds	0,006	50	Tērauds S355 J2H	0,006	50
	2	Krāsa (polurītāna bāze)	0,0002	0,2	Krāsa (polurītāna bāze)	0,0002	0,2	Krāsa (polurītāna bāze)	0,0002	0,2
	3	Rokwools1960	0,5	0,045	PAROC ROS 30	0,26	0,036	PAROC ROS 30	0,3	0,036
	4	Apšuvuma skārds	0,0006	14,4	PAROC ROS 50	0,04	0,038	PAROC ROB 80	0,02	0,038
	5				Apšuvuma skārds	0,0006	14,4	Apšuvuma skārds	0,006	14,4
			U , W/(m ² ·K)	0,0899			0,1208			0,11285
Rezervuāra sienas	1	Tērauds	0,18	50	tērauds	0,012	50	Tērauds S355 J2H	0,08	50
	2	Krāsa (polurītāna bāze)	0,002	0,2	Krāsa (polurītāna bāze)	0,002	0,2	Krāsa (polurītāna bāze)	0,002	0,2
	3	Rokwools1930	0,4	0,049	PAROC WAS 50	0,3	0,034	PAROC ROS 30	0,3	0,036
	4	Apšuvuma skārds	0,0006	14,4	Apšuvuma skārds	0,0006	14,4	PAROC WAB 10t	0,02	0,036
	5							Apšuvuma skārds	0,0006	14,4
			U , W/(m ² ·K)	0,12233			0,1132			0,11235



3.1. att. Siltuma zudumu aprēķināšanas metodika [29, 31, 32, 33].

Nozīmīgs siltuma akumulatora efektivitātes rādītājs ir ne tikai siltuma zudumu aprēķins, bet arī termokļīļa augstums. Termokļīļa augstums dažādos darba režīmos var samazināt vai palielināt akumulatora siltumietilpību. 3.2. attēlā redzamo termokļīļa augstumu ietekmē tādi faktori kā siltuma akumulatora augstuma un diametra attiecība [57], siltumizolācijas efektivitāte [56].



3.2. att. Siltuma akumulatora termoķīļa piemērs [63].

Termoķīļa augstums tiek aprēķināts, izmantojot diferenciālvienādojumus.

Nepārtrauktības vienādojums izsaka ar uzlādētā akumulatora ūdens masas aprēķina vienādojumu uzlādes cikla laikā. Tas ir izteikts saskaņā ar koordinātu sistēmu [63]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left[\frac{1}{r} \frac{\partial (rV_r)}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0. \quad (3.2.)$$

Impulsa vienādojums nodrošina šķidrums plūsmas ātrumu siltuma akumulatorā (V_r , V_θ un V_z) un spiediena lauka attīstību. To izsaka uz r ass, kā redzams 3.2. vienādojumā:

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial V_r}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r\rho V_r V_r)}{\partial r} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial (V_\theta V_r)}{\partial \theta} + \rho \frac{\partial (V_z V_r)}{\partial z} = \\ & = -\rho \frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (rV_r)}{\partial r} \right) \right] + \mu \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right] + \mu \left[-\frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right] + \frac{\rho V_\theta^2}{r} + \rho g_r \beta \Delta T. \end{aligned} \quad (3.3.)$$

Uz θ ass izteikts impulsa vienādojums:

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial V_\theta}{\partial t} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial (r\rho V_r V_\theta)}{\partial r} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial (V_\theta V_\theta)}{\partial \theta} + \rho \frac{\partial (V_z V_\theta)}{\partial z} = \\ & = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (rV_\theta)}{\partial r} \right) \right] + \mu \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} \right) + \mu \left(\frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} \right) - \frac{\rho V_r V_\theta}{r} + \rho g_\theta \beta \Delta T. \end{aligned} \quad (3.4.)$$

Uz z ass izteikts impulsa vienādojums:

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial V_z}{\partial t} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial (r\rho V_r V_z)}{\partial r} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial (V_\theta V_z)}{\partial \theta} + \rho \frac{\partial (V_z V_z)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (rV_z)}{\partial r} \right) \right] + \\ & + \mu \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \beta \Delta T. \end{aligned} \quad (3.5.)$$

Enerģijas vienādojums tiek izteikts šādi:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C \bar{u} \nabla T = \nabla (\lambda \nabla T). \quad (3.6.)$$

Nepārtrauktības vienādojums tiek izteikts polārajās koordinātēs:

$$\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{U}{r} = 0. \quad (3.7.)$$

Impulsa vienādojums tiek projicēts uz r ass, kā vienādojumā:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial r} + V \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{\rho} f_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \vartheta \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{U}{r} - \frac{U}{r^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right). \quad (3.8.)$$

Impulsa vienādojums tiek projicēts uz z ass, kā vienādojumā:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial r} + V \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{1}{\rho} f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \vartheta \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{V}{r} - \frac{V}{r^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right). \quad (3.9.)$$

Siltuma pārneses enerģijas vienādojums, kas ļauj aprēķināt temperatūras lauku, ir šāds:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial r} + V \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (3.10.)$$

Virpuļvienādojums ir atvasināts no 3.7. un 3.8. vienādojuma. Pirmais vienādojums tiek diferencēts attiecībā pret z , otrais – attiecībā pret r , otrais vienādojums tiek atņemts no pirmā [63]:

$$\omega = \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial V}{\partial r}. \quad (3.11.)$$

Tādējādi virpuļvienādojumu var izteikt šādi:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} - \frac{U}{r} \omega + U \frac{\partial \omega}{\partial r} + V \frac{\partial \omega}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} [\text{rot}]_{\vartheta} + \nu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} - \frac{\omega}{r^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right), \quad (3.12.)$$

kur $F = [f_r f_z]$ ir nepieciešams papildu vienādojums, jo ir nepieciešams aprēķināt U un V . Plūsmas funkcijas ψ vienādojums ir iegūts:

$$U = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}; \quad V = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}. \quad (3.13.)$$

Ieliekot U un V 3.11. vienādojumā, iegūst šādu vienādojumu:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -r\omega. \quad (3.14.)$$

Pacelšanas spēki blīvuma starpība dēļ izsaka ar *Boussinesq* tuvinājumu:

$$\rho(T) = \beta \rho_0 (T - T_0), \quad (3.15.)$$

kur: β – termiskās izplešanās koeficients; g – brīvās krišanas paātrinājums; T_0 – temperatūra.

Šo vienādojumu izmanto, lai izteiktu *Boussinesq* aproksimāciju virpuļtransportā [63]:

$$\frac{1}{\rho_0} [\text{rot}f]_{\vartheta} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho(T)}{\partial x} = g\beta \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (3.16.)$$

Nepārtrauktības vienādojums (trīs dimensijās):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0. \quad (3.17.)$$

Trīsdimensiju enerģijas pārneses vienādojums:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + T \beta \frac{dP}{dt} - \frac{2}{3} \mu (\text{div} \vec{u})^2, \quad (3.18.)$$

kur: β – tilpuma termiskas izplešanas koeficients; μ – dinamiska viskozitāte.

Vienas dimensijas enerģijas pārneses vienādojums:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c v \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (3.19.)$$

Bezdimensijas temperatūra tilpumā x ass virzienā:

$$\theta(x) = \frac{T(x) - T_c}{T_h - T_c}. \quad (3.20.)$$

Termoķīlis rodas, kad notiek siltuma akumulatora uzlādes process un karstais ūdens ieplūst no augšas T_h , Termoķīlis veidojas dažādu ūdens blīvumu dēļ, ko ietekmējusi tā temperatūra [63].

Termoķīlis pastāv, kad $0,15 < \theta(x) < 0,85$. Termoķīļa augša $\theta(x_h) = 0,85$ un apakša $\theta(x_c) = 0,15$.

Mērķis ir noteikt termoķīļa biezumu $\Delta h = x_h - x_c$.

Bezdimensijas koordināte ξ un laiks τ vai Furjē skaitlis

$$\xi = \frac{x}{H} \quad \text{un} \quad \tau = Fo = \frac{t a}{H^2}, \quad (3.21.)$$

kur: $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ ir temperatūras vadītspēja; H – tvertnes augstums un t uzpildes laiks.

3.2. tabula

Robežas nosacījumi (dziļums x , laiks t)

	Temperatūra	Bezdimensijas temperatūra
Tvertnes sākuma temperatūra (auksts stāvoklis)	$T(x,0) = T_c$	$\theta(\xi, 0) = 0$
Siltā ūdens uzlāde (no augšas)	$T(0,t) = T_h$	$\theta(0, \tau) = 1$
Apkārtējās vides temperatūra no akumulatora ārpuses	$T_c = T(\infty, 0)$	$\theta(\infty, 0) = 0$

Bezdimensijas ātrums vai Peklē skaitlis:

$$u = Pe = \frac{vH}{a}, \quad (3.22.)$$

kur: $v = \frac{Q}{A}$ – konvektīvais ātrums termoķīļa kustībai lejup; A – šķērsriezuma laukums tvertnei; Q – tilpuma plūsma uzlādes laikā, m^3/s .

Lai atrastu analītisko risinājumu, ir pieņemti šādi nosacījumi:

- termoķīļa temperatūras sadalījums ir asimetrisks un neatkarīgs no radiālā sadalījuma bez sajaukšanās vai traucējumiem;
- siltuma zudumi, ko izraisa vadīšana caur tvertnes sienu, ir niecīgi;
- ieplūdes temperatūra un masas plūsma tiek uzturēta nemainīga;
- augšējā un apakšējā seguma un sānu virsmu termiskie robežnosacījumi ir adiabatiski.

Tiek transformēts Laplasa analītiskais risinājums:

$$\theta(\xi, \tau) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\xi - u\tau}{2\sqrt{\tau}} \right) + e^{u\xi} \operatorname{erfc} \left(\frac{\xi + u\tau}{2\sqrt{\tau}} \right) \right], \quad (3.23.)$$

kur $\operatorname{erfc}()$ ir kļūdas funkcija.

Var vienkāršot 2.23. izteiksmi, jo x un t vērtības ir lielākas par 0, bet vienādojums tuvojas 0:

$$\theta(\xi, \tau) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\xi - u\tau}{2\sqrt{\tau}} \right) \right]. \quad (3.24.)$$

Vienas dimensijas aprēķins nevar pilnībā analītiski atrisināt uzdevumu ar temperatūras sadalījumu, līdz ar to nepieciešams ieviest korekciju, izmantojot koeficientu ε un normalizētu laiku $\bar{t} = Pe Fo$.

$$\theta(\xi, \tau) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\xi - \bar{t}}{2\sqrt{\bar{t}}} \sqrt{Pe} \right) \right] \quad (3.25.)$$

Peklē skaitli izsaka ar formulu:

$$Pe = \frac{vH}{\varepsilon a}. \quad (3.26.)$$

Eksperimentu gaitā ir atrasts, ka [64]

$$E = 1,22 \cdot 10^{-6} e^{2,29 \ln(Re_s)}, \quad (3.27.)$$

kur tvertnes Reynolds skaitlis ir šāds:

$$Re_s = \frac{vD}{\nu} < 1708. \quad (3.28.)$$

Difuzora izplūde (karstais ūdens):

$$Re_i = \frac{q}{\nu}, \quad (3.29.)$$

kur: q – caurplūde uz difūzera perimetra garuma vienību $q = Q/(\pi d)$

(q – tūpuma plūsma uz difuzora garuma vienību, kas ir difuzora plāksnes perimetrs).

Fruda skaitlis ir šāds:

$$Fr_i = \frac{q}{\sqrt{(h^3 g \frac{\Delta \rho}{\rho})}}, \quad (3.30.)$$

kur: ρ – ūdens blīvums tvertnē; $\Delta \rho$ – blīvuma starpība starp tvertnē esošo ūdeni un no difuzora ieplūstošo ūdeni.

Tad termoķīļa sākotnējais biežums ir šāds:

$$\delta_0 = 5,74 Fr_i^{1,34} Re_i^{-0,48}. \quad (3.31.)$$

Ričardsona skaitlis parāda sajaukšanās attiecību, un tas tiek plaši izmantots, lai novērtētu termisko stratifikāciju siltuma akumulatoram [65]:

$$Ri = \frac{g\beta h(T_{top} - T_{bott})}{v_s^2} > 1, \quad (3.32.)$$

kur v_s – ieplūdes ātrums caur difuzoru.

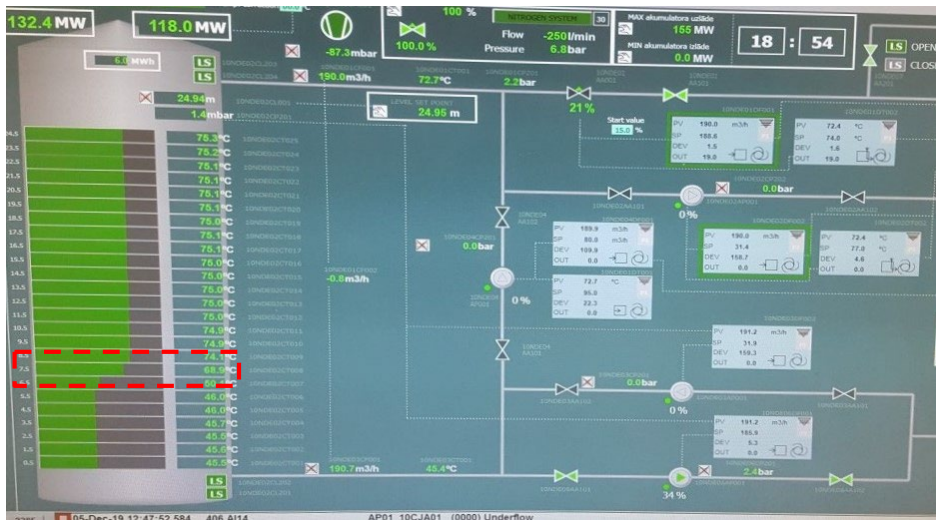
$$V_s = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (3.33.)$$

3.3. tabula

Ričardsona skaitļa ietekme uz termisko stratifikāciju [64]

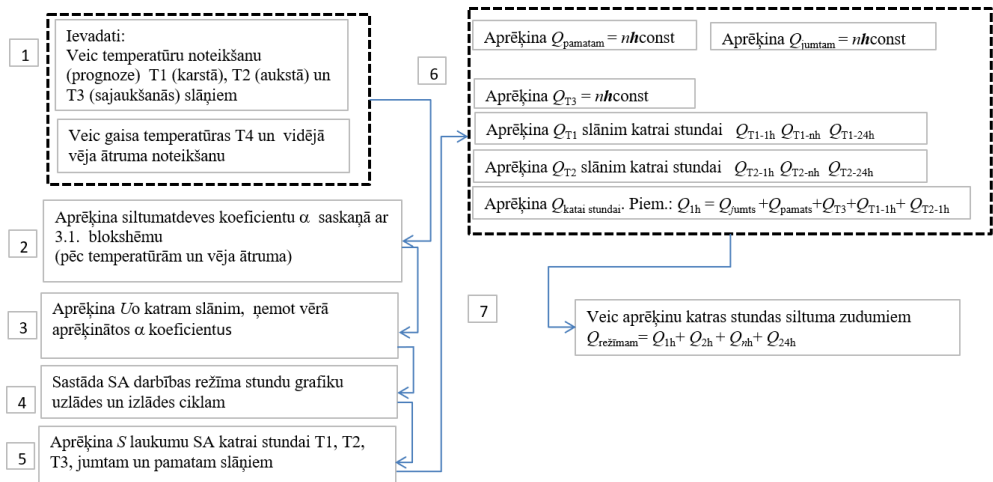
$Ri < 3,6$	Ieplūdes ģeometrijai ir būtiska ietekme uz stratifikāciju
$Ri > 10$	Ieplūdes efektu var neņemt vērā
$Ri > 10-20$	Tiek novērota skaidra sajaukšanās
$Ri = 0,615$	Parādās stratifikācija

3.3. attēlā redzams operatora kontroles rīks siltuma akumulatora darbības parametru kontrolei. Var konstatēt, ka termoķīļa augstums ir 1 m (zonā ar sarkano raustīto līniju). Termoķīlis, kas izveidojies šajā darbības režīma punktā, atrodas zonā 6,5 m un 7,5 m.

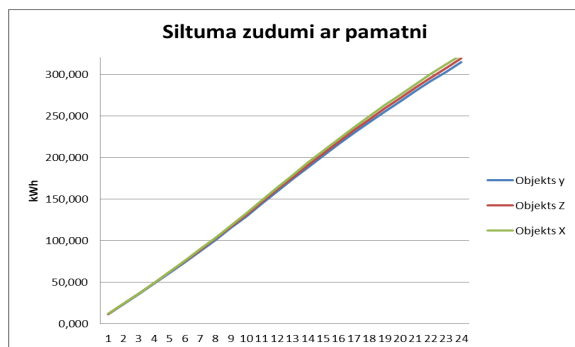


3.3. att. Siltuma akumulators uzlādes cikla beigās.

3.4. attēlā redzama izstrādātā siltuma zudumu aprēķinu metodika siltuma akumulatoram, kas apvienots gan ar 3.1. attēlā redzamo aprēķinu metodiku, gan termoķīļa aprēķinu. Blokskhēmā definētas galvenās aprēķinu funkcijas, lai varētu atrast siltuma zudumus katrai stundai, un, tās apvienojot, iegūst vienu darbības ciklu no uzlādes līdz izlādei.



3.4. att. Blokshēma, kas parāda siltuma akumulatora darba režīma siltuma zudumu aprēķinu [62].



3.5. att. Siltuma zudumi SA 24 stundu periodam [29].

Vismazākie siltuma zudumi bija objekta Y siltumizolācijas risinājumam ar 314,29 kWh 24h periodā, kas ir par 2,8 % labāki par objekta X siltumizolācijas risinājumu un 1,4 % labāki par objekta Z siltumizolācijas risinājumu. Pētījuma rezultāti liecina, ka teorētiskie aprēķini un darba režīmi ir ļoti līdzīgi visiem trīs siltumizolācijas risinājumiem, lai arī tika izmantots atšķirīgs materiāls un biežums.

3.1. Nodaļas secinājumi

Teorētisko siltuma zudumu noteikšana siltuma akumulācijai darba režīmos prasa ietilpīgus daudzpakāpju aprēķinus, jo jāņem vērā daudzi faktori: siltumizolācijas pretestība; iekšējās temperatūras izmaiņas; brīvā un piespiedu konvekcija; gaisa temperatūra; vējš un citi faktori. Pētījums liecina, ka nozīmīgs siltuma akumulatora efektivitātes rādītājs ir ne tikai siltuma zudumu aprēķins, bet arī termoķīļa augstums. Turklāt termoķīļa augstums dažādos darba režīmos ne tikai ietekmē siltuma zudumus, bet var arī samazināt vai palielināt akumulatora siltumietilpību. Termoķīļa augstumu ietekmē tādi faktori kā siltuma akumulatora augstuma un diametra attiecība, siltumizolācijas efektivitāte. Tika izstrādāta daudzpakāpju

siltuma zudumu un termokīļa aprēķina metodika, lai varētu šos vienādojumus integrēt kā moduļa daļu siltuma akumulatora dziļās analīzes kopējā koģenerācijas stacijas lēmuma pieņemšanas algoritmā.

Veicot aprēķinus trīs Latvijas lielākajiem siltuma akumulatoriem un to siltumizolācijas risinājumiem, tika konstatēts, ka ir izmantoti atšķirīgi risinājumi, tajā skaitā izolācijas biezums. Piemēram, objekta X jumta (biezums – 0,5 m) siltumizolāciju caurlaidības koeficients U ir vislabākais $0,089 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, savukārt sienām tas bija vissliktākais – $0,122 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$. Atšķirīgie siltumizolācijas risinājumi aprēķinos parādīja, ka koeficienta U vērtības ir ļoti tuvas un 24 stundu darba režīma modulēšanā pie vienādiem parametriem tika iegūti 2,8 % siltuma zudumu atšķirība starp objektiem. Viszemākie siltuma zudumi – 314,29 kWh – bija objekta Y siltumizolācijas risinājumam.

4. EKSPERIMENTĀLĀS METODES IZMANTOŠANA FAKTISKO SILTUMA ZUDUMU NOTEIKŠANAI

Patlaban viena no Latvijas lielākajām siltumenerģijas akumulācijas tvertnēm atrodas biomasas koģenerācijas stacijā Jelgavā, Rūpniecības ielā 73, kas nodota ekspluatācijā 2019. gadā 1. novembrī. Atbildīgais būvdarbu vadītājs šajā objektā bija promocijas darba autors.



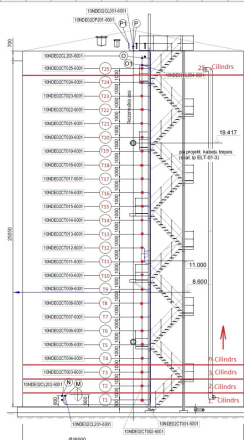
4. 1. att. Siltuma akumulatora pamata armēšanas darbi un metāla konstrukciju montāža (autora fotoattēli).

Akumulatoram siltumizolācija izveidota no *PAROC ROS30* 300 mm biezumā trīs kārtās pa 100 mm. Jumtam un sienām papildus uzlikta 20 mm biezuma izolācija *PAROC ROB80* un *WAB10t* termisko tiltu un pretvēju iedarbībai.

Galvenie eksperimenta mērķi bija noteikt SA reālos siltuma zudumus vides apstākļos.

Eksperiments bija organizēts kā tests, kas ietver mērījumus SA tvertnes atdzišanas procesam no 31.08.2020. līdz 07.09.2020. Šajā periodā SA sistēma bija pilnībā apturēta, tajā nenotika nekāda tehnoloģiska darbība – ne uzlādes vai izlādes process, ne drenēšana vai uzpildīšana. Vidējā aproksimētā temperatūra eksperimenta laika periodā bija +17,09 °C, vidējais vēja ātrums – 3,14 m/s. Nekontrolējamie faktori, kas netika ņemti vērā, bija gaisa mitrums un saules starojuma ietekme. Tika izvēlēts novērojuma periods, kurā netika novēroti nokrišņi, kas radītu papildu kļūdu iespējamību. Šajā periodā tika novēroti SA ūdens temperatūras kritumi 25 punktos visā tā augstumā.

Temperatūras kritumi



4.2. att. Siltuma akumulatora temperatūras devēju izvietojums un temperatūras kritumi [62].

Temperatūras devēju no T1 līdz T25 izvietojums uz rezervuāra redzams 4.2. attēlā. Lai noteiktu faktiskos siltuma zudumus reālas vides apstākļos, SA tika sadalīts 25 atsevišķos slāņos jeb cilindros ar savu tilpumu jeb zonās, kurās ir izvietoti temperatūras devēji ar noteiktu tilpumu.

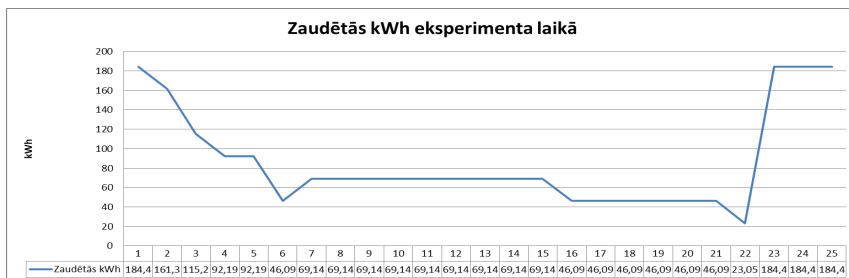
Siltuma zudumi katram atsevišķam slānim ar tilpumu tika noteikti, izmantojot šādu formulu:

$$Q_{sl} = V_{sl} \rho c_p dT, \quad (4.1.)$$

kur: T_1 – sākuma temperatūra, °C; T_2 – beigu temperatūra °C; V – ūdens tilpums mērijumu zonā, m³ [29].

Kopējos siltuma zudumus iegūst, summējot katra slāņa siltuma zudumus:

$$Q = Q_{sl.1} + Q_{sl.2} + Q_{sl.n} + Q_{sl.25}. \quad (4.2.)$$

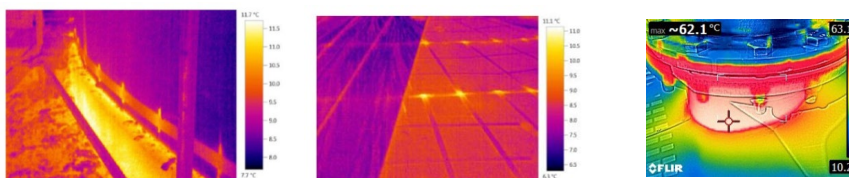


4.3. att. Siltuma zudumu profils akumulatoram [62].

4.3. attēlā redzami rezultāti rāda SA septiņu diennakšu jeb 168 h temperatūras kritumus. Lielākos kritumus uzrādīja rezervuāra temperatūras devējs Nr. 1. un augšējie Nr. 23., 24., 25. ar maksimālo temperatūras kritumu 0,8 °C. Savukārt rezervuāra vidusdaļā devēji Nr. 16.–22. uzrādīja temperatūras kritumu no 0,1 °C līdz 0,2 °C. Vislielākie siltuma zudumi veidojas 1., 23., 24., 25. cilindrā, kuros katrā tie veido 184,4 kWh. Šie četri mērījumu siltuma zudumi veidoja 34 % no visiem siltuma zudumiem. Kopējie siltuma zudumi šajā novērojuma periodā veidoja 2160,46 kWh jeb 12,71 kW tika zaudēti katru stundu.

4.1. Siltuma akumulatora siltuma zudumu verifikācija

Iegūtie dati ļāva novērtēt aprēķina precizitāti pret reālām eksperimenta vērtībām un ieviest **labojuma koeficientu**. Šāda metode ļāva noteikt kopējo termisko tiltu ietekmi uz konstrukciju, 4.1.1. attēlā redzams, ka termiskie tilti nokļāv visu rezervuāru – gan jumtu, gan sienas un arī pamatu.



4.1.1. att. Konstatētie konstruktīvie termiskie tilti akumulatora izbūves laikā (autora fotogrāfijas).

Termiskais tilts ir jebkurš paaugstinātas siltumvadītspējas ieslēguma elements rezervuārā, tas var rasties arī nehomogēnas siltumizolācijas montāžas rezultātā.

Termiskais tilts tiek aprēķināts kā H_T ($W \cdot K^{-1}$), kas norāda enerģijas zudumus (W):

$$H_T = \sum_i U_i S_i + \sum_i \psi_i l_i + \sum_k X_k, \quad (4.2.1)$$

kur: ψ_i – lineārā termiskā tilta i aprēķina siltuma caurlaidība ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$); l_i – lineārā termiskā tilta i projektējamais garums (m); X_k – punktteida termiskā tilta k aprēķinātā siltuma caurlaidība ($W \cdot K^{-1}$) [31].

Konstrukcijas divdimensiju termiskie tilti var tikt modulēti un aprēķināti, piemēram, izmantojot *THERM* programmas atbilstoši noteiktajiem kritērijiem. Izmantojot *THERM* simulācijas aprēķina programmu, kas tiek klasificēta kā augstas precizitātes aprēķina metode ar $\pm 5\%$ precizitāti [34], liels trūkums ir kļūdas iespējamība, nosakot termotiltus.

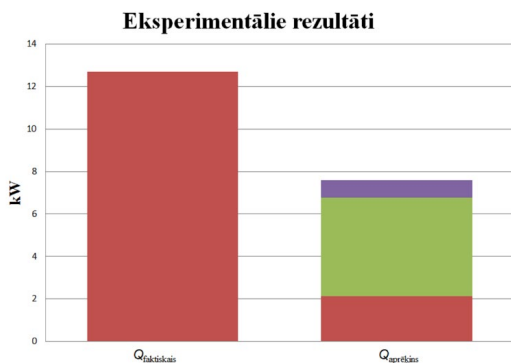
Šādā veidā verificējot SA rezervuāru, tālākos tā darbības režīmos ir iespējams precīzi prognozēt siltuma zudumus un izmaksas.

Teorētiskie siltuma zudumi tika aprēķināti pēc 3. nodaļas metodikas eksperimenta vides apstākļos (vidējā aproksimētā temperatūra eksperimenta laika periodā bija +17,09 °C, vidējais vēja ātrums – 3,14 m/s, 4.1. att. temperatūru grafika SA).

Lai varētu noteikt siltuma zudumu labojuma koeficientu n , tika aprēķināti teorētiskie siltuma zudumi šim periodam.

$$n = Q_{\text{teor}}/Q_{\text{eksp}} \times 100. \quad (4.2.2.)$$

Pēc šādas formulas rezultāti tika savstarpēji salīdzināti Q_{teor} , $Q_{\text{teor}} + Q_{\text{ter,til}}$, Q_{eksp} .



4.2.2. att. Siltuma zudumu salīdzinājums (eksperimenta un aprēķinu rezultāti) [62].

4.2.2. attēlā redzams SA salīdzinājums, pirmais stabiņš ir eksperimentā iegūtā vērtība 12,71 kW/h. Otrais stabiņš – teorētiskā aprēķinā iegūtā vērtība 7,59 kW/h, neņemot vērā termiskos tiltus. Teorētisko aprēķinu gaitā iegūtais rezultāts bija par 40,25 % mazāks, ja pieņem, ka siltumizolācija bija homogēna un tajā nebija termisko tiltu.

4.2. Nodaļas secinājumi

Ekspimentālās metodes izmantošana faktisko siltuma zudumu noteikšanai reālos apstākļos ir precīzāka, nekā veicot termisko tiltu meklēšanu, modelēšanu un aprēķinu. Tika veikts eksperiments, kura laikā tika apturēta siltuma akumulācija un novēroti siltuma zudumi 168 h ilgā laikā. Šajā laika periodā tika fiksēti temperatūras kritumi, salīdzinot tos ar teorētisko aprēķinu. Novērojumu dati liecināja, ka eksperimenta apstākļos akumulators zaudēja siltumu ar 12,79 kW. Veicot teorētisko aprēķinu eksperimenta apstākļos un neņemot vērā termiskos tiltus, tika iegūta 7,59 kW siltuma zuduma jauda. Siltuma akumulatora verificācijas laikā tika ieviests labojuma koeficients 1,403. Šāda siltuma akumulatora siltuma zudumu verificēšana ir nepieciešama, lai varētu šo koeficientu ieviest vienādojumos un integrēt modulī siltuma akumulatora dziļās analīzes kopējā koģenerācijas stacijas lēmuma pieņemšanas algoritmā.

5. SILTUMSLODZES PROGNOZĒŠANA

5.1. Siltumenerģijas slodzes prognozes

Brīvās elektroenerģijas tirgū koģenerācijas stacijas viens no būtiskākajiem faktoriem ir precīzi prognozēt siltumslozdi pieteiktajam elektroenerģijas ražošanas periodam. Vēl svarīgāk tas ir tad, ja notiek koģenerācijas darbība ar siltuma akumulāciju, kur siltuma prognozēšana ietekmē šo abu iekārtu savstarpējo darbību [22].

Siltumavotiem un centralizētiem siltumapgādes tīkliem (CST) darbība tiek plānota, izmantojot prognozes, savukārt ēku siltummezgli un ēkas tiek individuāli regulētas pēc faktiskā siltuma pieprasījuma. Līdz ar to prognozes un faktiskās centralizētās siltumapgādes sistēmas (CSS) slodzes var ievērojami atšķirties [35].

Daudzos pētījumos CSS tīklu siltumslozdes prognozēšana tiek veikta ikdienas apjomiem, taču, lai plānotu koģenerācijas staciju elektroenerģijas ražošanas grafiku daļēnai elektroenerģijas brīvajā tirgū, nepieciešams pielāgot uz tirgu orientētu darbības un plānošanas modeli. Tāpēc tādās elektroenerģijas tirdzniecības platformās kā, piemēram, *Nord Pool* birža, siltumslozdesprognozes izšķirtspēja jāpārveido vismaz uz stundu mērogu [35].

Šajā nodaļā aprakstīts veiktais pētījums par apkures slodzes prognozēšanas algoritmu, kas ir izstrādāts, pārbaudot arī tā precizitāti. CSS slodzes prognozēšana veikta vairākās atšķirīgās sistēmās dažādos apkures sezonas periodos un ar dažādiem modeļa parametriem. Iegūtās prognozētās novirzes no faktiskajām patēriņa vērtībām tiek analizētas pēc vidējās procentuālās kļūdas (*MAPE*) un normalizētā vidējā novirzes kļūdas (*NBIAS*) [36].

5.2. Siltumslozdes vienkāršie lineārie regresijas modeļi

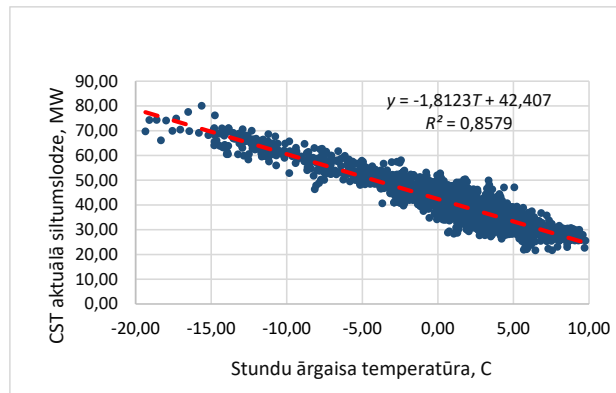
5.2.1. tabulā apkopoti dažādu pilsētas siltumtīklu apkures siltumslozdes diapazoni gada aukstajos mēnešos no decembra līdz martam. Tika izslēgti dati par oktobri–novembri un aprīli, jo tad apkures slodze nav stabila. 5.2.1. tabulā sniegta statistisko datu par stundu siltuma slodzi analīze, kas ļauj veikt lineāro regresiju siltuma slodzes līknēm. Trīs gadu periodā (2017.–2019.) tika iegūti dati par divām dažādām CSS ar nominālo jaudu (*RP*, t. i., vidējais patēriņš), kas svārstās no 20 MW līdz 460 MW.

5.2.1. tabula

CSS gadījumu izpētes dati par dažādiem *RP* un laika periodiem [36]

CSS RP/ numurs	Apkures sezona	Vidējā slodze Q_0 , MWh/h	Minimālā/ maksimālā slodze, MWh	Lineārās regresijas vienādojums ($Q = aT + Q_0$)	R^2	Normalizēts slīpums, a/Q_0
RP20	2017–2018	18,56	14-38	$Q = -0,7972T + 18,563$	0,8770	-0,043
RP40	2017	42,41	22-80	$Q = -1,8123T + 42,407$	0,8579	-0,043
RP40	2018	40,94	12-75	$Q = -1,8357T + 40,937$	0,8977	-0,045
RP40	2019	41,95	22-62	$Q = -1,6395T + 41,946$	0,8039	-0,039
RP460	2015	457,48	210...1100	$Q = -22,877T + 457,48$	0,9400	-0,050

Regresijas analīzes (5.2.1. att.) parāda, kā mainās siltumslozde atkarībā no ārējās temperatūras. Analīzes mērķis – iegūt pēc iespējas lielāku kvadrātu summu un uzzīmēt līniju saskaņā ar lineārās regresijas vienādojumu, kas vislabāk atbilst savāktajiem CSS datiem.



5.2.1. att. *DHS* ($RP = 40$ MW) atkarība no ārējās temperatūras 2017. gadā [36].

Katrai apkures sezonai bija savs parametru kopums (piemēram, gaisa temperatūras profils), tādēļ vienas un tās pašas sistēmas lineārās regresijas vienādojumi var būt atšķirīgi. Lai to ilustrētu, dati par CSS ar *RP* 40 MW tika salīdzināti trīs atšķirīgās apkures sezonās (2017., 2018., 2019.), un rezultāti apkopoti 5.2.1. tabulā un redzami 5.2.1. attēlā.

5.2.1. tabulā parādītie vienkāršie lineārās regresijas vienādojumi attēlo apkures pieprasījuma atkarību no ārējās temperatūras. 5.2.1. tabulā ir ietverti arī noteikšanas koeficienti (R^2) katram gadījuma pētījumam, kas tiek izmantots kā indikators noteiktā lineārā vienādojuma piemērotībai. Tas parāda izmērītās CSS slodzes novirzes no tās, ko aprēķina regresijas līnija. R^2 vērtība ir CSS slodzes kvadrātisko noviržu summa no vidējās vērtības. Parasti tiek uzskatīts, ka iegūtie regresijas modeļi ir spēcīgi, ja R^2 ir tuvu 1. Piemēram, *RP20* gadījumā (5.2.1. att.) R^2 vērtība ir 0,87, kas ir pietiekami tuvu 1. Tomēr citos gadījumos koeficients ir ievērojami mazāks. Apkures pieprasījuma lineārā regresija pret āra temperatūru parasti parāda labu korelāciju, tomēr, veicot analīzi dzīvojamā ēku līmenī, korelācija samazinās. Piemēram, ikdienas siltuma patēriņa R^2 pret gaisa temperatūru bija tikai 0,5459 [37]. Plašākā mērogā, ja apskata rajonu vai pilsētas, svārstību amplitūda mazinās un visas kopējās sistēmas regresijas rezultāti ir daudz labāki, sasniedzot koeficientu 0,9 no gaisa temperatūras funkcijas [38].

Tomēr ir jārīsinā uzdevums, kas saistīts ar to, ka lielākajā daļā šajā nodaļā izklāstīto gadījumu izpētes lineārās regresijas vienādojumu noteikšanas koeficients ir zemāks par 0,9, tāpēc tas parāda lielāku atšķirību starp iegūto vienādojumu un savāktajiem datiem. R^2 vērtība četriem pētītajiem CSS ir no 0,9 līdz 0,8 jeb 10 % līdz 20 % no aprēķinātajiem CSS slodzes datiem.

5.3. Nodaļas secinājumi

Lai precīzi pieteiktu saražoto elektroenerģijas apjomu nākamajai dienai un izvēlētos pareizu darbības režīmu, koģenerācijas stacijai strādājot brīvās elektroenerģijas tirgū, viens no būtiskākajiem faktoriem ir precīzi prognozēt siltumslozdi nākamās diennakts ciklam. Turklāt saistībā ar elektroenerģijas ikstundas cenas izmaiņām biržā arī siltumslozdes prognozes izšķirtspēja jāpārveido vismaz uz stundu mērogu. Analīzes mērķis bija iegūt pēc iespējas mazāku kvadrātu summu un uzzīmēt līniju saskaņā ar lineārās regresijas vienādojumu, kas vislabāk atbilst savāktajiem CSS datiem.

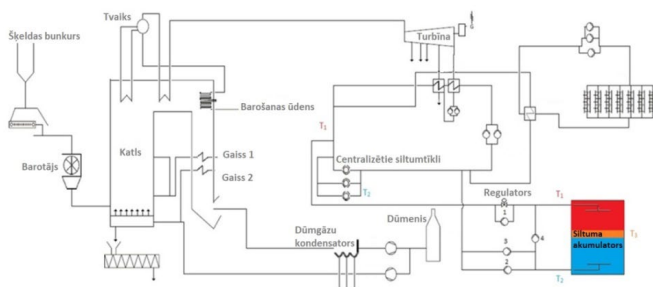
Pētītas iespējas ieviest aprakstošu CSS parametru – bezdimensiju apkures līknes – normalizētu slīpumu, ko aprēķina kā lineārās regresijas vienādojuma temperatūras koeficienta attiecību pret vidējo CSS siltuma slodzi jeb *RP*. Siltumslozdes sniegtā statistisko datu analīze parāda, ka vienkāršās lineārās regresijas koeficients ir robežās no 0,8 līdz 0,94 dažādu Latvijas CSS atkarībā no āra gaisa temperatūras.

6. KOĢENERĀCIJAS STACIJAS LĒMUMU PIENĒMŠANAS ALGORITMA OPTIMIZĒŠANA, IZMANTOJOT SILTUMA AKUMULATORA DZIĻO ANALĪZI UN IEKĻAUJOT ZUDUMU MODELI

Enerģētikas tirgus liberalizācija un ES mērķi par energoefektivitātes uzlabojumu katrai dalībvalstij [4] veicina siltuma akumulācijas iekārtu strauju attīstību. Precīza ražošanas plānošana ir ļoti svarīga koģenerācijas stacijās, kas darbojas elektroenerģijas brīvās tirgus apstākļos [40, 53], un, izmantojot siltuma akumulatoru, tās nozīmē būtiski palielinās gan no sarežģītības, gan no papildu aprēķina funkciju viedokļa. Turklāt ražošanas procesu ietekmē mainīgās siltuma, CO₂ un kurināmā izmaksas [41].

Pārorientācija tirgus apstākļiem prasa jaunus izaicinājumus KS darbības plānošanai [40], piemēram, nākamās dienas laikapstākļu un siltumprognozes [45], kā arī iekārtu darbības izmaksu plānošanu atkarībā no palaišanas (aukstā, siltā, karstā laikā) apstākļiem [46]. Prognožu precizitāte ietekmē KS siltuma un elektrības ražošanas režīmus [47] un attiecīgi stratēģijas brīvā tirgus apjomu noteikšanai [48]. Centralizētajā siltumapgādes tīklā siltumenerģijas pieprasījuma prognozēšanai tiek izmantots maksimālais neironu tīkla modelis. Savukārt elektroenerģijas cenai tiek izmantoti dažādi prognožu modeļi – ekstrēmas mācību mašīnas, daudzslāņu perceptrons, automātiskā *ARIMA* un trīskāršā eksponenciālā izlīdzināšanas metode [45]. Vēsturisko datu analīze veicina šo metožu un rīku attīstību un precizitāti. Tirgus apjomu noteikšana nākamās dienas tirgū notiek īsā laikā ar apjomīgu datu ievadi, tādēļ prognozēšanas rīki kombinācijā ar daudzpakāpju programmēšanas modelēšanas koncepcijas metodēm sniedz jau ticamu rezultātu un lēmumu [49, 50]. Panākot arvien efektīvāku KS darbību, tiek veicināta dekarbonizācija [51], turklāt, izmantojot SA, var uzlabot visas stacijas efektivitāti [52]. SA lietošana kā sistēmas elements ietekmē visas sistēmas darbību [45], palielina nenoteiktību iekārtas darbības efektīvai izmantošanai, ja netiek izvērtēti visi kritēriji, piemēram, zudumi [54]. Veikts elektrisko un siltuma zudumu izmaksu ietekmes aprēķins SA darbības režīmam, kas ietverts izmaksu modelī. Izveidots lēmumu pieņemšanas algoritms koģenerācijas stacijām elektrības brīvās tirgus apstākļos, kas balstīts uz elektrības pašizmaksas un detalizētu SA analīzi, iekļaujot tā darbības izmaksu modeli. Algoritms kalpo kā īstermiņa datorsistēmu plānošanas rīks, tā mērķis ir maksimāli palielināt kopējo bruto ieņēmumu robežu koģenerācijas darbības plānošanai un izslēgt tādas darbības režīmus, kas var radīt zaudējumus.

Uzstādītās siltumakumulācijas sistēmas efektīvu darbību ietekmē tādi faktori kā aktuālā siltumietilpība, uzlādes un izlādes ātrumi, turklāt ir jāspēj noteikt, vai iekārta izpildīs noteikto darbības režīmu. Darbības režīms atkarīgs no tīkla turpgaitas un atgaitas temperatūras T_1 , T_2 , SA termokōļa augstuma ar temperatūru T_3 . Savukārt operatoram darbības plānošanā jāņem vērā arī tādi faktori kā SA siltuma zudumi, kas atkarīgi siltumizolācijas pretestības no $T_{\text{ārgaisa}}$, vēja iedarbības, elektrības patēriņa papildu 1., 2., 3. un 4. sūkņa darbības procesa nodrošināšanai un iekārtu uzturēšanas izmaksām. Turklāt KS, strādājot nākamās dienas tirgū, SA darbības plānošanai nepieciešama ikstundas prognoze nākamām 24 stundām, kur brīvās tirgus apstākļos ir mainīgas elektroenerģijas, siltuma, CO₂ izmešu (ja fosilais kurināmais) un kurināmā cenas. Biomasas koģenerācijas stacijas ar siltuma akumulatoru shēma redzama 6.1. attēlā (autors veicis šī elementa dziļo analīzi).



6.1. att. Biomasas koģenerācijas stacijas ar siltuma akumulatoru shēma [25].

6.1. Siltuma akumulatora darbības režīma izmaksu modelis

Siltuma akumulatora lietošana nedrīkst pasliktināt KS kopējo efektivitāti [39], kur $Re^{KS} < Re^{KS} + Re^{HS} - C_{kopējās}$ (izmaksas procesa nodrošināšanai). Galvenās izmaksas šajā modelī veido elektrības, siltuma zudumu, apkalpošanas un remonta, ko izsaka ar šādu formulu:

$$C_{kopējās} = C_{siltuma} + C_{el} + C_{apkalpošanas\ izmaksas}, \quad (6.1.)$$

Autora izveidotā metodika siltuma zudumu aprēķināšanai aprakstīta 4. nodaļā, kur tika iegūti siltuma zudumi 438 kWh, siltuma zudumus nosaka šādi:

$$C_{sil} = Q_{sil} \cdot C_{pp\ h}. \quad (6.2.)$$

Biomases koģenerācijas stacijās ar siltuma akumulatoru procesa nodrošināšanai darbojas trīs sūkņi:

- siltumenerģijas uzlādei strādā 2. sūknis ar elektrisko jaudu 75 kW;
- siltumenerģijas izlādei strādā 1. sūknis ar elektrisko jaudu 200 kW un 3. sūknis ar elektrisko jaudu 30 kW

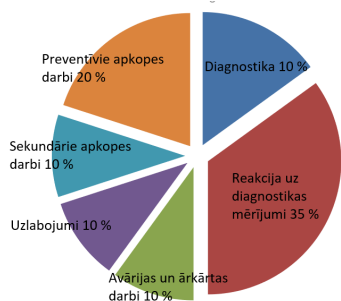
$$C_{el} = P \cdot h \cdot C_{pp\ el}, \quad (6.3.)$$

kur: P – jauda, kWh; h – darba stundu skaits.

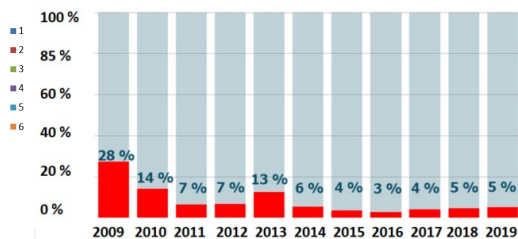
Analizējot SA darbību maksimālajā režīmā 12 stundas uzlādes un 12 izlādes režīmam, **maksimālais uzlādes process** ir $Q_{\text{sūknis nr. 2}} = 75 \times 12 = 825$ kWh, **maksimālais izlādes process** – $Q_{\text{sūknis nr. 1}} Q_{\text{sūknis nr. 3}} = 200 \times 12 + 30 \times 12 = 2200 + 330 = 2530$ kWh.

Lai novērtētu SA efektivitāti, nedrīkst neņemt vērā sistēmas apkalpošanas, remonta izmaksas un sistēmas pieejamību. SA sistēma ietver ļoti daudzas iekārtas – sūkņus, vārstus, skaitītājus, devējus u. c. – darbības nodrošināšanai. Šīs iekārtas prasa regulāru apkalpošanu, pretējā gadījumā var rasties atteikumi, kas ietekmēs ražošanas procesu.

Aktīvu pārvaldības sistēmas ļauj vadīt, plānot un izsekot darbus un nepieciešamos resursus to izpildei. Prasmīga fizisko aktīvu uzturēšana nodrošina to, ka avārijas darbu apjoms kopējo darbu apjomā nepārsniedz 10%. Pasauls līmenis rāda, ka uzņēmums spēj sasniegt tehnisko pieejamību līdz 98,6% [27].



Avārijas apstāšanās un preventīvie pasākumi kopš Infor sistēmas ieviešanas



6.1.1. att. SIA “Industry Service Partner” ieviestās aktīvu pārvaldības sistēmas laika sadalījums, sistēmas ražošanas procesu dinamikas izmaiņas [28].

6.1.1. attēlā redzama uzņēmuma SIA “Industry Service Partner” aktīvu pārvaldības sistēmas *Infor* atteikumu dinamika 10 gados. Sākotnēji 2009. gadā uzņēmuma iekārtu atteikumi veidoja pat 28 % gadījumu. Grafikā redzams, ka uzņēmuma atteikumi samazināti: pirmajā gadā – divas reizes, piecu gadu laikā skaits ir nostabilizējies un vidēji veido 5 % no kopējā iekārtu uzturēšanas laika. Pārējo laiku – 95 % – aizņem preventīvie pasākumi.

Apkalpošanas vidējās izmaksas dienai tiek aprēķinātas šādi:

$$C_{\text{apkalpošanas izmaksas}} = C_{\text{gada apkalp. izm}}/h, \quad (6.4.)$$

kur h – iekārtas noslodzes stundas gadā.

6.2. Lēmuma pieņemšanas algoritms

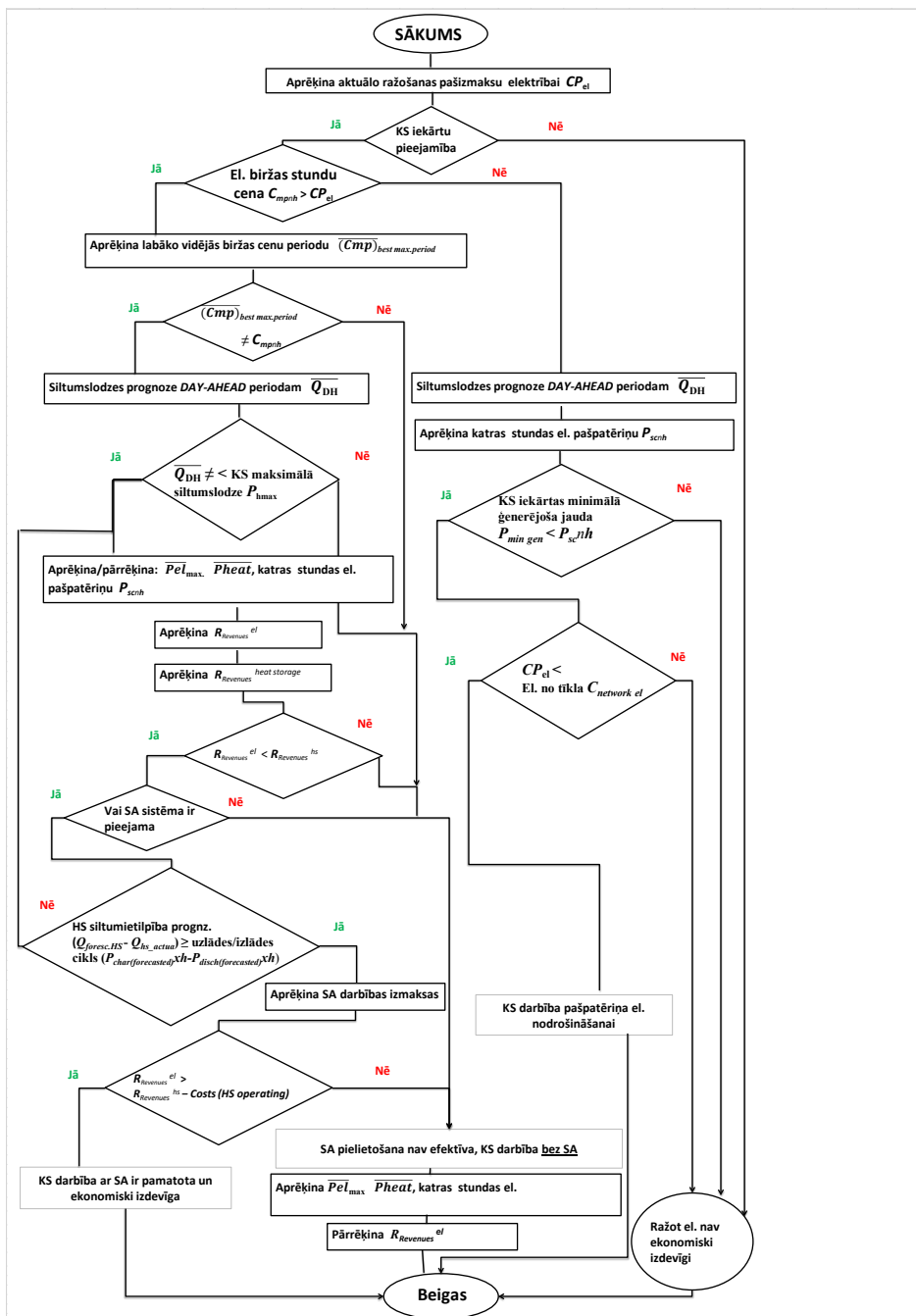
Par pamatu ņemot piecu līmeņu funkcionālo shēmu (1.2.2. att.), tika izveidots daudzlīmeņa Eiklīda blokshēmas lēmuma pieņemšanas algoritms KS darbībā ar SA, kas redzams 6.2.1. attēlā. 1.2.2. un 6.2.1. attēls viens otru papildina (1.2.2. attēlā redzami galvenie ievaddati un četras izejas funkcijas). Savukārt 6.2.1. attēlā redzama aprēķina secība un ietekmējošo faktoru “Jā/Nē” izejas funkcijas. 6.2.1. algoritma galvenais uzsvars likts uz SA dziļās analīzes datu iekļaušanu, kuras rezultātā tiek precizētas SA darbības izmaksas, lai izslēgtu tādus darbības režīmus, kas KS darbībā ar SA radītu zaudējumus.

Lai iegūtu pozitīvu rezultātu, kur SA izmantošana būs efektīva un nesīs peļņu, jāiziet cauri 12 pozīciju filtram. Algoritms var radīt arī šādus rezultātus: KS darbība bez SA, KS darbība tikai pašpatēriņa elektrības ražošanai un elektrības ražošana nav ekonomiski izdevīga. Sākuma izejas pozīcijā ir jāveic KS aprīkojuma pieejamības novērtēšana. Turklāt ir jāidentificē riski, vai tehniskajam stāvoklim nav apdraudējumu, kas varētu ietekmēt ražošanas procesu [27].

1. Starta pozīcija sākas ar elektroenerģijas ražošanas pašizmaksas ($C_{pp\ el}$) aprēķinu. Ražošanas izmaksas ietekmē daudzi faktori, piemēram, CO₂ biržas cenas, siltumenerģijas tarifs, koģenerācijas efektivitāte, kurināmā un personāla izmaksas u. c. faktori [61].
2. Šajā blokā ir jāveic KS aprīkojuma pieejamības novērtēšana. Turklāt ir jāidentificē riski, vai tehniskajam stāvoklim nav apdraudējumu, kas ietekmēs ražošanas procesu [27].
3. Sākotnēji ir jāprognozē elektroenerģijas tirgus cena visam diennakts periodam un jāsalīdzina ar ražošanas izmaksām. Šis solis nosaka, vai elektroenerģijas stundas cena tirgū ir augstāka par elektroenerģijas ražošanas pašizmaksu:

$$C_{mp\ el\ nh} > C_{pp}. \quad (6.1.)$$

Ja elektroenerģijas ražošanas pašizmaksa $C_{pp\ el}$ ir augstāka nekā ikdienas stundas prognozētā, tad SA nav efektīvi lietot ieņēmumu gūšanai. Var rasties situācija, kad KS darbība ir ekonomiski neefektīva vai iespējama tikai KS pašpatēriņa vajadzību segšanai. Turklāt jāņem vērā, vai ģenerators tehnoloģiskā minimālā jauda atbilst pašpatēriņam, turklāt, iespējams, iepirkta elektrība no tīkla ir lētāka par sarazotās pašizmaksas cenu.



6.2.1. att. Lēmuma pieņemšanas algoritma blokshēma.

4. Situācijā, kad cena nākamās dienas elektroenerģijas tirgū ir vienāda vai gandrīz vienāda ar vidējo tirgus cenu visā 24 stundu periodā, SA iekārtas darbība ir neefektīva, un tā uzlāde un izlāde būs neizdevīga siltuma un elektrības zudumu dēļ:

$$\overline{(Cmp)} \neq C_{mp}1h \approx C_{mp}nh \approx C_{mp}24h. \quad (6.2.)$$

Šajā gadījumā iegūst rezultātu, ka KS darbība jāorganizē bez SA.

5. Aprēķina labāko vidējo biržas cenas laika periodu virs elektrības ražošanas cenas $\overline{(Cmp)}_{best \ max \ period}$

$$\overline{(Cmp)}_{bestmax.period} = (C_{mp}1h + C_{mp}2h + C_{mp}nh)/nh. \quad (6.3.)$$

Šī funkcija nosaka labāko periodu, kurā KS darbība tirgus apstākļos var nest lielākos ienākumus gan KS, gan KS darbībā ar SA.

6. Papildus elektroenerģijas tirgus cenai ir svarīgi prognozēt arī nākamās dienas apkures pieprasījumu, pirms tiek pieņemts lēmums, vai siltuma uzglabāšanas darbība varētu būt izdevīga. Precīza siltuma slodzes prognozes veikšana būtiski ietekmē visu ražošanas plānošanas procesu. Ļoti būtiski siltumslodzi prognozēt ik stundai nākamajām 24 stundām, kā arī jānosaka tīkla turpgaitas un atgaitas temperatūra. Tas saistīts ar biržas pieteikto periodu nākamai dienai kārtējā dienā plkst. 12 [8]. Tas nozīmē, ka neprecīzas prognozes rezultātā siltuma akumulators var tikt priekšlaicīgi uzlādēts, tad nebūs iespējams utilizēt saražoto siltumu un nāksies samazināt koģenerācijas ražošanas jaudu. Var rasties situācija, ja visa enerģija no SA netiek izlādēta zemās elektroenerģijas tirgus stundās, nākamajā pieteiktā cikla gadījumā nebūs iespējams uzlādēt akumulatoru paredzētajā apjomā. Tas nozīmē, ka netiks saražota elektrība pieteiktā apjomā, kas radīs situāciju, ka pie labas elektroenerģijas biržas cenas būs ne tikai neiegūtā peļņa, bet būs arī jākompensē zaudējumi [8].
7. Gadījumā, ja prognozētā siltumslodze atbilst KS maksimālajai jaudai vai ir lielāka, koģenerācijas bloku var noslogot vēlamajā režīmā maksimālā tirgus cenu diapazonā un nav lietderīgi izmantot SA ienākumu gūšanai.
8. Atkarībā no siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanas attiecības un ražošanas bloku elastības ir jāveic aprēķins, lai pieņemtu lēmumu KS darbības režīmu ik stundai. Turklāt ideālā gadījumā ir jāņem vērā arī koģenerācijas stacijas palaišanas (aukstās, siltās un karstās laikā), jaudas paaugstināšanas vai samazināšanas apstākļi [39]. Šajā blokā tiek noteikts arī pašpatēriņa Psc elektriskās enerģijas nepieciešamība procesa nodrošināšanai.
9. Šajā aprēķinu blokā tiek noteikti ieņēmumi Pr^{el} jeb maksimālie ieņēmumi KS darbībā bez SA un Pr^{is} jeb KS darbībā ar SA.
10. Šajā blokā ir jāveic SA aprīkojuma pieejamības novērtēšana. Turklāt ir jāidentificē riski, vai tehniskajā stāvoklī nav apdraudējumu, kas ietekmēs ražošanas procesu [27].
11. Šajā blokā tiek veikts aprēķins atlikušajam siltumam akumulatorā, kā arī veikts prognozētais koģenerācijas darba režīms ar saražoto papildu siltumu, kas nodrošinās SA uzlādes un izlādes režīmus. Šie parametri var būt mainīgi atkarībā no prognozētā siltumtīklu temperatūras grafika. Var gadīties, ka SA siltumietilpība neļauj veikt elektrības ražošanas režīmā radušos visa siltuma uzkrāšanu vai arī, ja viss akumulatorā esošais siltums netiek izmantots nakts darba režīmā, nepieciešamas papildu kalkulācijas KS darbībai, lai varētu pielāgot režīmu aktuālajai un prognozētai SA situācijai.

12. Šajā blokā tiek lietota 3. nodaļā aprakstītā siltuma akumulatora darbības režīmu izmaksas modeļa novērtēšana. No ieņēmumiem tiek atņemti kopējie zudumi. Tiek salīdzināti ieņēmumi tikai no KS, un KS ar SA zudumi. Izejas funkcija – SA darbība ir efektīva, vai arī – zudumi veido lielāku daļu nekā ieņēmumi, tad ieteicama KS darbība bez SA.

6.3. Nodaļas secinājumi

Optimizēts koģenerācijas stacijas lēmumu pieņemšanas algoritms darbībā ar siltumenerģijas akumulatoriem, veicot akumulatora dziļo analīzi un ieviešot tā parametriskās funkcijas. Algoritma iznākumā rodas četri izejas stāvokļi jeb rezultāti: KS darbība ar SA; KS darbība bez SA; KS darbība pašpatēriņa nodrošināšanai; elektroenerģiju ražot nav izdevīgi, kas nodrošinās maksimālus ieņēmumus, ātri izslēgs tādus darbības režīmus, kas var nest zaudējumus brīvajā elektroenerģijas tirgū. Siltuma akumulācijas aprēķinu modulī tika ietverts ne tikai siltumietilpības, uzlādes-izlādes jaudas, siltuma zudumi, bet arī vairākas parametriskās funkcijas.

- Algoritmā ietverot SA darbības režīma izmaksu modeli, tas parādīja, ka lielākās izmaksas veido elektriskais patēriņš, kur darbības režīmā tika patērēts 3,355 MWh darbības nodrošināšanai. Savukārt siltuma zudumi aprēķinātajam darba režīmam veidoja 0,43 MWh.
- SA pieejamība un apkalpošanas izmaksas funkcija ļoti ietekmē ražošanas plānošanu, ja pastāv iekārtu atteikumu riski. Lielāka iekārtu pieejamība sniedz būtisku iespēju izmantot tās visefektīvākos un ekonomiski pamatotos darba režīmos, lai arī uz kopējām izmaksām ir vismazākās. Aktīvu pārvaldības sistēmas ieviešana uzņēmumā palīdz pat piecas reizes samazināt avārijas iekārtu remontiem patērēto laiku, ja tiek vairāk palielināti preventīvie pasākumi un diagnostika

7. SECINĀJUMI

1. Literatūras analīze liecina: lai nodrošinātu stabilu siltuma slodzi centralizētās siltumapgādes sistēmā mainīgos klimatiskos apstākļos, ir nepieciešams nepārtraukti regulēt jaudu siltuma avotos. Mainīgā diennakts siltumslodze ietekmē darba režīmus, savukārt ražošanas plānošana ir salīdzinoši vienkārša, ja koģenerācijas stacija saņem valsts atbalsfītu elektroenerģijas iepirkumu. Līdz 2022. gadam 37 % koģenerācijas staciju notiek pārorientācija uz brīvā tirgus apstākļiem un valsts atbalsta zaudēšana, šo staciju darbības režīmus ietekmē arī svārstīgais elektroenerģijas tirgus. Enerģētikas politika arī turpmāk virzīsies uz brīvā tirgus apstākļiem. Tādējādi šo staciju ražošanas darba režīmu lēmumus sarežģī ne tikai mainīgā elektroenerģijas tirgus cena, bet arī apstākļi, ka lēmums par nākamās dienas elektroenerģijas ražošanas apjomu jānosauca kārtējā dienā no plkst. 10 līdz 12. Attiecīgi biržā tiek veidoti pieprasījumi un piedāvājumi.

Siltuma akumulācijas vai siltuma sūkņu tehnoloģiju lietošanas gadījumā vēl vairāk palielinās mainīgie faktori un nenoteiktība gala ražošanas lēmumu pieņemšanā. Nepieciešams plānot un ņemt vērā iekārtu tehniskos un ekonomiskos parametrus mainīgos tirgus un vides apstākļos. Piemēram, siltuma akumulatora tehnoloģija var paaugstināt kopējo efektivitāti siltuma avotam, taču bez plānošanas un tehnoloģiskiem aprēķiniem var arī samazināt vai pat radīt zaudējumus atsevišķos darbības režīmos.

Tika noteikti pieci lieli pamatbloki algoritmam – elektrības pašizmaksas, elektrības tirgus cenas, siltumslodzes, koģenerācijas darba režīmu un siltuma akumulatora aprēķina moduļi, kas visvairāk ietekmē koģenerācijas stacijas ražošanas lēmumu pieņemšanu. Katrs no moduļiem veido aprēķinu procesus, kur ar ievaddatiem un vienādojumiem veidojas izejas funkcijas ar pieciem stāvokļiem, kas definē ekonomiski pamatotu ražošanas lēmumu.

2. Efektivitātes paaugstināšanu, izmešu samazināšanu un siltumslodzes balansēšanu var panākt, ekspluatācijas stadijā modernizējot stacijas ar siltuma akumulācijas un siltumsūkņa tehnoloģiju.

- Dziļai dūmgāzu dzesēšanai ar absorbcijas tipa siltumsūkni ir plašs lietojums gan koģenerācijas stacijās, gan katlumājās ūdenssildāmiem katliem, lai uzlabotu efektivitāti. Efektīvai enerģijas atgūšanai no dūmgāzēm ir daudz komponentu (dūmgāzu kondensatori, absorbcijas dzesētāji, siltummaiņi utt.). Joprojām nav pietiekami daudz pētījumu siltumsūkņa nominālās jaudas noteikšanai dažādos darbības apstākļos. Eksperimentālie un teorētiskie aprēķinu dati pierāda, ka katla siltumefektivitāti var uzlabot līdz 16 %, ja dūmgāzu temperatūru samazina līdz 25 °C.

- Reālo datu analīze liecina, ka elektrības cenas nakts stundās bieži ir zemākas, taču šajā brīdī siltumslodze pieaug, savukārt dienas stundās pie zemākas siltumslodzes elektroenerģijas cenas – sasniedz pīkus. Īslaicīgā siltuma akumulācija ļauj balansēt siltuma slodzi un dienas laikā uzkrāt papildus saražoto siltumu. Pētījums rāda, ka siltuma akumulācijas iekārtas izmantošana koģenerācijas stacijā, kurā ir uzstādītas koģenerācijas iekārtas ar kopējo elektrisko jaudu 2,64 MW_{el}, lietošana gada laikā dod iespēju saražot un pārdot papildu elektroenerģiju līdz 4272 MWh pie esošās siltumslodzes. Fosilā kurināmā gadījumā tiek ietaupītas 959 t CO₂ izmešu.

3. Teorētisko siltuma zudumu noteikšana siltuma akumulācijai darba režīmos prasa ietilpīgus daudzpakāpju aprēķinus, jo jāņem vērā daudzi faktori: siltumizolācijas pretestība; iekšējās temperatūras izmaiņas; brīvā un piespiedu konvekcija; gaisa temperatūra; vējš u.c. Pētījums parādīja, ka nozīmīgs siltuma akumulatora efektivitātes rādītājs ir ne tikai siltuma zudumu aprēķins, bet arī termokīļa augstums. Turklāt termokīļa augstums dažādos darba režīmos ietekmē siltuma zudumus, taču var samazināt vai palielināt siltumietilpību akumulatoram. Termokīļa augstumu ietekmē tādi faktori kā siltuma akumulatora augstuma un diametra attiecība, siltumizolācijas efektivitāte. Tika izstrādāta daudzpakāpju siltuma zudumu un termokīļa aprēķina metodika, lai šos vienādojumus varētu integrēt kā moduļa daļu siltuma akumulatora dziļās analīzes kopējā koģenerācijas stacijas lēmuma pieņemšanas algoritmā.

- Veicot aprēķinus trīs Latvijas lielākajiem siltuma akumulatoriem un to siltumizolācijas risinājumiem, tika konstatēts, ka lietoti atšķirīgi risinājumi, tajā skaitā – izolācijas biežums. Piemēram, objekta X jumta (biežums – 0,5 m) siltumizolāciju caurlaidības koeficients U ir vislabākais $0,089 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, savukārt sienām tas bija vissliktākais – $0,122 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Atšķirīgie siltumizolācijas risinājumi aprēķinos parādīja, ka koeficienta U vērtības ir ļoti tuvas, un 24 stundu darba režīma modulēšanā pie vienādiem parametriem tika iegūta 2,8 % siltuma zudumu atšķirība starp objektiem. Viszemākie siltuma zudumi bija objekta Y siltumizolācijas risinājumam ar 314,29 kWh.
4. Eksperimentālās metodes izmantošana faktisko siltuma zudumu noteikšanai reālos apstākļos ir precīzāka, nekā veicot termisko tiltu meklēšanu, modelēšanu un aprēķinu. Tika veikts eksperiments, kura laikā tika apturēta siltuma akumulācija un novēroti siltuma zudumi 168 h ilgā periodā. Šajā laika periodā tika fiksēti temperatūras kritumi, un tie salīdzināti ar teorētisko aprēķinu. Novērojumu dati liecināja, ka eksperimenta apstākļos akumulators zaudēja siltumu ar 12,79 kW. Veicot teorētisko aprēķinu eksperimenta apstākļiem un neņemot vērā termiskos tiltus, tika iegūta 7,59 kW siltuma zuduma jauda. Siltuma akumulatora verifikācijas laikā tika ieviests labojuma koeficients 1,403. Šāda siltuma akumulatora siltuma zudumu verifikācija ir nepieciešama, lai varētu šo koeficientu ieviest vienādojumos un integrēt modulī siltuma akumulatora dziļās analīzes kopējā koģenerācijas stacijas lēmuma pieņemšanas algoritmā.
 5. Lai precīzi pieteiktu saražoto elektroenerģijas apjomu nākamajai dienai un izvēlētos pareizu darbības režīmu, koģenerācijas stacijai strādājot brīvās elektroenerģijas tirgū, viens no būtiskākajiem faktoriem ir precīzi prognozēt siltumslodzi nākamās diennakts ciklam. Turklāt saistībā ar elektroenerģijas ikestundas cenas izmaiņām biržā arī siltumslodzes prognozes izšķirtspēja jāpārveido vismaz uz stundu mērogu. Analīzes mērķis bija iegūt pēc iespējas mazāku kvadrātu summu un uzzīmēt līniju saskaņā ar lineārās regresijas vienādojumu, kas vislabāk atbilst savāktajiem CSS datiem. Pēfītas iespējas ieviest aprakstošu CSS parametru – bezdimensiju apkures līknes normalizētu slīpumu, ko aprēķina kā lineārās regresijas vienādojuma temperatūras koeficienta attiecību pret vidējo CSS siltuma slodzi jeb RP . Siltumslodzes sniegtā statistisko datu analīze parāda, ka vienkāršās lineārās regresijas koeficients ir robežās no 0,8 līdz 0,94 dažādu Latvijas CSS atkarībā no āra gaisa temperatūras.
 6. Optimizēts koģenerācijas stacijas lēmumu pieņemšanas algoritms darbībā ar siltumenerģijas akumulatoriem, veicot akumulatora dziļo analīzi un ieviešot tā parametriskās funkcijas. Algoritma iznākumā rodas četri izejas stāvokļi jeb rezultāti: KS darbība ar SA; KS darbība bez SA; KS darbība pašpatēriņa nodrošināšanai; elektroenerģiju ražot nav izdevīgi, kas nodrošinās maksimālus ieņēmumus, ātri izslēgs tādas darbības režīmus, kas var nest zaudējumus brīvajā elektroenerģijas tirgū. Siltuma akumulācijas aprēķinu modulī tika ietverts ne tikai siltumietilpības, uzlādes-izlādes jaudas, siltuma zudumi, bet arī vairākas parametriskās funkcijas.
 - Algoritmā ietverot SA darbības režīma izmaksu modeli, tas parādīja, ka lielākās izmaksas veido elektriskais patēriņš, kur darbības režīmā tika patērēts 3,355 MWh. Savukārt siltuma zudumi aprēķinātajam darba režīmam veidoja 0,43 MWh.
 - Algoritmā ietverta SA pieejamība un apkalpošanas izmaksas. Šī daļa ir nebūtiska pret kopējiem darbības izdevumiem, bet ļoti ietekmē ražošanas plānošanu, ja pastāv atteikumu riski. Aktīvu pārvaldības sistēmas ieviešana uzņēmumā palīdz pat piecas reizes samazināt avārijas iekārtu remontiem patērēto laiku. Vairāk palielinot preventīvos pasākumus un diagnostiku, iespējams krietni paaugstināt iekārtu un kopējo sistēmu pieejamību.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. *Enerģētikas likums* (1998) [tiešsaiste]. LR likums Rīga: pieņemts Rīgā 1998. gada 3. septembrī, Latvijas Vēstnesis, interneta vietne Likumi.lv [skatīts 2018. gada 1. martā]. Pieejams: <https://likumi.lv/doc.php?id=49833>.
2. *Likums par Latvijas Nacionālo enerģētikas un klimata plānu 2021.–2030. gadam*. (2020) [tiešsaiste]. LR likums Rīga: pieņemts Rīgā 2020. gada 4. februārī, Latvijas Vēstnesis, interneta vietne Likumi.lv [skatīts 2018. gada 1. martā]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/312423-par-latvijas-nacionalo-energetikas-un-klimata-planu-20212030-gadam>.
3. *Parīzes nolīgums – ANO Vispārējā konvencija par klimata pārmaiņām* [tiešsaiste]. Brisele, ratificēts ES 2016. gada 5. oktobrī, Oficiāla Eiropas Savienības tīmekļa vietne [skatīts 2018. gada 1. martā]. Pieejams: <https://eur-lex.europa.eu/content/paris-agreement/paris-agreement.html?locale=lv>.
4. *Klimata un enerģētikas satvars laikposmam līdz 2030. gadam* [tiešsaiste]. Brisele, pieņemts ES 2014. gada 23. oktobrī, oficiāla Eiropas Savienības tīmekļa vietne [skatīts 2020. gada 1. novembrī]. Pieejams: <https://www.consilium.europa.eu/lv/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework/>.
5. *Likums par Par Apvienoto Nāciju Organizācijas Vispārējo konvenciju par klimata pārmaiņām* [tiešsaiste]. LR likums Rīga: pieņemts Rīgā 1995. gada 3. septembrī, Latvijas Vēstnesis, interneta vietne Likumi.lv [skatīts 2018. gada 1. martā]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/34198-par-apvienoto-naciju-organizācijas-visparejo-konvenciju-par-klimata-parmainam>.
6. *Eiropas zaļais kurss un pakete "Gatavi mērķrādītājam 55 %" [tiešsaiste].* Brisele, pieņemts ES Vides padomē 2022. gada 17. martā, Oficiāla Eiropas Savienības tīmekļa vietne [skatīts 2022. gada 18. martā]. Pieejams: <https://www.consilium.europa.eu/lv/policies/green-deal/timeline-european-green-deal-and-fit-for-55/>.
7. *Metroloģisko novērojuma dati* [tiešsaiste]. Rīga, 2018. Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra tīmekļa vietne videscentrs.lv/gmc.lv [skatīts 2018. gada 1. martā]. Pieejams: <https://www.meteo.lv/meteorologija-datu-meklesana/?nid=461>.
8. *Elektroenerģijas cenas biržā* [Tiešsaiste]. Ziemeļu un Baltijas reģions Nord pool birža, 2021 [skatīts 2021. gada 1. decembrī]. Pieejams: <https://www.nordpoolgroup.com/historical-market-data/>.
9. Henrik L., Østergaard P. A., Connolly D., Ridjan I., Mathiesen B. V., Hvelplund F., Thellufsen J. Z., Sorknæs P. Energy Storage and Smart Energy Systems. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. 2016.11.211: 3–14. doi:10.5278/ijsepm.
10. H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. Thorsen, F. Hvelplund un M. B.V, 4th Generation District Heating (4GDH) Integrating Smart Thermal Grids Into Future Sustainable Energy Systems. *Energy*. 2014; 68: 1–11.
11. Buffaa S., Cozzinia M., D'Antonia M., Baratier M., Fedrizzia R., 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Elsevier*. 2019, vol.104(C), pp. 504–522.
12. Bertelsen N., Petersen U. R. Thermal Energy Storage in Greater Copenhagen. Master's Thesis MSc in Engineering Sustainable Cities Department of Planning. Denmark, University Copenhagen, 2017.
13. Pinel P., Cynthia A. Cruickshank, Ian Beausoleil-Morrison, Adam Wills. A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications.
14. Hou J., Che D., Liu Y., Jiang Q. A new system of Absorption Heat Pump Vs. Boiler for recovering Heat and water Vapor in Flue gas. *Energy Procedia*. 2018, vol. 152, pp. 1266–1271.
15. Che D, Liu Y, Gao C. Evaluation of retrofitting a conventional natural gas-fired boiler into a condensing boiler. *Energy Convers Manage*. 2004, vol. 45, pp. 3251–3263.
16. Westerlund L., Hermanson R., Fagerström J. Flue gas purification and heat recovery: A biomass fired boiler supplied with an open absorption system. *Applied Energy*. 2012, vol. 96, pp. 444–450.
17. Yang B., Jiang Y., Fu L., Zhang S. Conjugate heat and mass transfer study of a new open-cycle absorption heat pump applied to total heat recovery of flue gas. *Applied Thermal Engineering*. 2018, vol. 138, pp. 888–899.

18. Yang B., Yuan W., Fu L., Zhang S., Wei M., Guo D. Techno-economic study of full-open absorption heat pump applied to flue gas total heat recovery. *Energy*. 2020, vol. 190, 116429.
19. Sauhats, A., Dolgicers, A., Kozadajevs, J., Zālītis, I., Boreiko, D. The Impact of the District Heating System Thermal Inertia on the CHPP Operation Mode. In: *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON): Conference Materials*, Latvia, Riga, 7–9 October, 2019. Piscataway: IEEE, 2019, pp. 225–229. ISBN 978-1-7281-3943-2.
20. Sauhats A., Kozadajevs J., Dolgicers A., Zālītis I., Boreiko D. Thermal Energy Storage for CHP in Power Market Conditions. *16th European Energy Market Conference*. 2019. September, (EEM 2019), Slovenia, Ljubljana, pp.18–20.
21. Rusovs D., Zentins V. Steam driven absorption heat pump and flue gas condenser applied for heat recovery in district heating network. *19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 2020, Jelgava.*, pp. 1627–1632. ISSN 1691-5976.
22. Soročins, A., Rusovs, D., Nagla, J., Žentiņš, V. The Influence of the Thermal Storage on the Electricity Production in a Co-Generation in Peak and Off-Peak Time Range. *2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2020)*: 5–6 2020. November, Riga, Piscataway: IEEE, 2020, pp. 136–139. ISBN 978-1-7281-9511-7.
23. Kavvadias K. Jimenez Navarro J. P., Zucker A., Quoilin S. Case study on the impact of cogeneration and thermal storage on the flexibility of the power system.: *Joint Research Centre*. 2017. Tech. rep. Luxembourg doi: 10.2760/814708.
24. Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs, CO₂ emisiju no kurināmā stacionārās sadedzināšanas aprēķinu metodika, Rīga, 2020. gada janvāris.
25. Cimdira G., Blumberga D., Veidenbergs I. Analysis of wood fuel CHP operational experience, International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies – CONECT 2014, Energy Procedia 72 (2015) 263–269, Riga.
26. *Akumulatora izbūve* [tiešsaiste]. Jelgava, 28.02.2019. [skatīts 2020. gada 1. novembrī] Pieejams: <https://www.jelgava.lv/lv/jaunumi/zinu-arhivs/siltumapgades-uznemums-fortum-jelgava-buve-siltumenerģijas-akumulatoru/>.
27. Raikar V. A., Naik G., Naik P., A Simulation Model for Overall Equipment Effectiveness of a Generic Production Line. *OSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. 2015 Sep.–Oct., e-ISSN: 2278-1684,p-ISSN: 2320-334X, Volume 12, Issue 5 Ver. III pp. 52–63.
28. Neilands R., Šaršuns N., Automatic monitoring and control system, Wastewater treatment process supervision in Riga city. SIA “Industry Service Partner” prezentācija. Riga, 2020. October 1.
29. Nagla J., Saveljevs A., Ciemins R., Siltumtehnikas pamati, Rīga “Zvaigzne” 1981.
30. Žentiņš V., Rusovs D., Soročins A., Cars A., Analysis of different thermal insulation solutions of a heat storage. *Riga Technical University 62nd International Scientific Conference*. 2021. gada 15. oktobrī, p. 5, ISBN 978-9934-22-756-1.
31. Ekonomikas ministrija, Metodiskie norādījumi Latvijas būvnormatīva LBN 002-01 “Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika” izpildei, Rīga, 2005.
32. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th Edition. Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera. John Wiley & Sons, Incorporated, 2011. ISBN: 9781118137253.
33. U. S. Department of Energy, Thermodynamics, Heat Transfer and Fluid Flow. DOE Fundamentals Handbook, Volume 2 of 3. May 2016.
34. European Committee for Standardization, Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance – Simplified methods and default values, LVS EN ISO 14683:2008, 2007.
35. Baltputnis, K., Petričenko, R., Sobolevskis, D. Heating Demand Forecasting with Multiple Regression: Model Setup and Case Study. No: 2018 IEEE 6th Workshop on Advances in Information, *Electronic and Electrical Engineering (AIEEE 2018)*, Lietuva, Vilnius, 8.–10. novembris, 2018. Piscataway, NJ: IEEE, 2018, 91.–95. lpp. ISBN 978-1-7281-2000-3. Lithuania.
36. Rusovs, D., Jakovļeva, L., Žentiņš, V., Baltputnis, K. Heat Load Numerical Prediction for District Heating System Operational Control. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2021, Vol. 58, No. 3, 121.–136. lpp. ISSN 0868-8257. Pieejams: doi:10.2478/lpts-2021-0021.

37. Blumberga, D., Blumberga, A., Vitols, V. *Energy audits in dwelling buildings in Latvia. Data analysis*. [skatīts 2020. gada 20. decembrī]. Rīga, 2005. Pieejams: <https://docplayer.net/18489666-Energy-audits-in-dwelling-buildings-in-latvia-data-analysis.html>.
38. Talcis, N., Dzelzītis, E., Līkrastiņa, A.. Return Temperature in DH as Key Parameter for Energy. *International Journal of Modern Engineering Research*. (2018) 8 (7), 88–92.
39. Ivanova P. Termoelektrocēntrāļu elastīguma un efektivitātes palielināšana mainīgos darbības apstākļos. *Promocijas darba kopsavilkums*. Rīgas Tehniskā universitāte izdevniecība 2018.
40. Dvorák M, Havel P, Combined heat and power production planning under liberalized market conditions *Applied Thermal Engineering* Volume 43, October 2012, Pages 163–173.
41. Lam L. H., Valentin I., Bovo C., European day-ahead electricity market coupling: Discussion, modeling, and case study. *Electric Power Systems Research*. 2018. February.
42. 2019. gadā elektroenerģijas ražošanas līmenis koģenerācijas stacijās saglabājās nemainīgi augsts [tiešsaiste]. LR Centrālā statistikas pārvalde 19.05.2020 [skatīts 2020. 20. Decembrī]. Pieejams: <https://www.csb.gov.lv/lv/statistika/statistikas-temas/vide-energetika/energetika/meklet-tema/2685-kogeneracijas-staciju-darbiba-2019-gada>.
43. Šogad atbalstu zaudējušas 10 OIK elektrostacijas; valsts ietaupījusi 14,63 milj. EUR [Tiešsaiste]. LR Ekonomikas Ministrija, preses relīze 16.07.2020. [skatīts 2020. gada 20. decembrī] Pieejams: <https://www.em.gov.lv/lv/sogad-atbalstu-zaudejusas-10-oik-elektrostacijas-valsts-ietaujusi-1463-milj-eur>.
44. Valdība lemj par tālākajiem soļiem OIK samazināšanai [Tiešsaiste]. LR Ekonomikas ministrija preses relīze 22.09.2020. [skatīts 2020. gada 21. novembrī] Pieejams: <https://www.mk.gov.lv/lv/aktualitates/valdiba-lemj-par-talakajiem-soljiem-oik-samazinasanai>.
45. Zymelka P., Szega M., Short-term scheduling of gas-fired CHP plant with thermal storage using optimization algorithm and forecasting models. *Energy Conversion and Management*. 2021 March Volume 231, 1, 113860.
46. Mitra S., Sun L., E. Grossmann I., Optimal scheduling of industrial combined heat and power plants under time-sensitive electricity prices. *Energy*. 2013 June, Volume 54, 1 pp. 194–211.
47. Atānāsoae P., The Operating Strategies of Small-Scale Combined Heat and Power Plants in Liberalized Power Markets. *Energies*. 2018. 11, 3110; doi:10.3390/en11113110.
48. CUI H., SONG K., DOU W., NAN Z., WANG Z., ZHANG N., Bidding Strategy of a Flexible CHP Plant for Participating in the Day-Ahead Energy and Downregulation Service Market. *Journal IEEE ACCESS*. 2021. 1. Oktober. November, p. 49647–149656, ISSN: 2169-3536DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3116981.
49. Kumbartzky N., Schacht M., Schulz K., Werners B., Optimal operation of a CHP plant participating in the German electricity balancing and day-ahead spot market. *European Journal of Operational Research*. Volume 261, Issue 1, 16 August 2017, pp. 390–404.
50. Schledorn A., Guericke D., Andersen A. N., Madsen H., Optimising block bids of district heating operators to the day-ahead electricity market using stochastic programming, *Smart Energy*. 2021. February Volume 1
51. Koch K., Alt B., Gaderer M., Dynamic Modeling of a Decarbonized District Heating System with CHP Plants in Electricity-Based Mode of Operation. *Energies*. 2020, 13, 4134; doi:10.3390/en13164134.
52. Fang T., Lahdelma R., Optimization of combined heat and power production with heat storage based on sliding time window method, *Applied Energy*. 2016, 15 January, Volume 162, pp. 723–732.
53. Al-Mansoura F., Kožuh M., Risk analysis for CHP decision making within the conditions of an open electricity market. *Energy*. (2007) 32 1905–1916.
54. Zheng P., Liu P., Zhang Y., Economic Assessment and Control Strategy of Combined Heat and Power Employed in Centralized Domestic Hot Water Systems, *Appl. Sci*. 2021, 11 (10), 4326.
55. Fan J., Furbo S., Thermal stratification in a hot water tank established by heat loss from the tank. *Renewable Energy Shaping Our Future Proceedings of the ISES Solar world congress Johannesburg, South Africa*. 2009. pp. 341–350, ISBN 978-1-920017-42-2.

56. Haller M. Y., Yazdanshenas E., Andersen E., Wolfgang Streicher C. B., Furbo S., A method to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes independently from storage heat losses. *Solar Energy*. 2010. ISSN 0038-092X, E-ISSN 1471-1257, Vol. 84, no 6, pp. 997–1007.
57. Karim A., Burnett A., Fawzia S. Investigation of Stratified Thermal Storage Tank Performance for Heating and Cooling Applications. *Energies*. 2018, Vol. 11, p. 1049.
58. Ying L; Fengzhong S., Qiannan Z., Xuehong C., Wei Y. Numerical Simulation Study on Structure Optimization and Performance Improvement of Hot Water Storage Tank in CHP System. *Energies*. 2020, Vol. 13 (18), p. 4734.
59. Henrik L., P. A. Østergaard, D. Connolly, I Ridjan, Vad Mathiesen B., Hvelplund F., Zinck J. Sorknæs P. Energy Storage and Smart Energy Systems.” *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. 2016. 11: 3–14. doi:10.5278/ijsepm.2016.11.2.
60. Tjardo S., Persis D., Claudio ; Tesi, Pietro Modeling and Control of Heat Networks With Storage: The Single-Producer Multiple-Consumer Case IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, March Vol. 25 (2), pp. 414–428.
61. Likums "Par sabiedrisko pakalpojumu regulatoriem" Koģenerācijas tarifu aprēķināšanas metodika [tiešsaiste]. LR likums Rīga: pieņemts Rīgā 2011. gada 16. jūnijā, Latvijas Vēstnesis, interneta vietne Likumi.lv [skatīts 2020. gada 8. septembrī]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/211966-kogeneracijas-tarifu-aprekinasanas-metodika>.
62. Žentiņš V., Rusovs D., Soročins A., Decision Making Control Algorithm for Cogeneration Plants in Operating with the Heat Accumulator Deep Analysis Model. *Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly Journal* 2022, Riga No. 30, ISSN: 2255-9922.
63. Xu C., Liu M., Jiao S., Tang H., Yan J., Experimental study and analytical modeling on the thermocline hot water storage tank with radial plate-type diffuser. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022, May Volume 186, 1 122478.
64. Fertahi S., Jamil A., Benbassou A., Review on Solar Thermal Stratified Storage Tanks (STSST): Insight on stratification studies and efficiency indicators. *Solar Energy*. 2018. December, Volume 176, pp. 126–145.
65. Bouzahera M. T., Bouchahma N., Guerirab B., Bensacib C., Lebbi M. On the thermal stratification inside a spherical water storage tank during dynamic mode. *Applied Thermal Engineering*. 2019. august, Volume 159, 113821.



Varis Žentiņš dzimis 1987. gada 1. septembrī Jelgavā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis profesionālo bakalaura grādu un inženiera kvalifikāciju (2011) un maģistra grādu (2013) siltumenerģētikā un siltumtehnikas specialitātē. No 2011. līdz 2018. gadam strādājis SIA "Energoremonts Rīga" par projekta vadītāja asistentu un projektu vadītāju. Kopš 2019. gada strādā SIA "Industry Service Partner", ieņemot projekta vadītāja amatu lielo industriālo objektu būvniecībā. Ieguvis būvprakses sertifikātu sadales un lietotāju gāzes apgādes sistēmu būvdarbu vadīšanā (līdz 16 bar) un siltumapgādes, ventilācijas, rekuperācijas un aukstumapgādes sistēmu būvdarbu vadīšanā. Kopš 2020. gada ir RTU pētnieks. Zinātniskā pētniecība saistīta ar siltuma akumulācijas un siltumsūkņu tehnoloģijām.