

Egīls Dzelzītis

ALTERNATĪVAS ENERĢIJAS TRIGENERĀCIJAS PIELIETOJUMS SLODŽU BALANSĒŠANAI UN ILGTSPĒJĪGAS KVALITĀTES NODROŠINĀŠANAI VIEDOS ENERĢIJAS TĪKLOS

Promocijas darbs



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

EGĪLS DZELZĪTIS

Profesionālais maģistrs elektrotehnikā, elektroinženieris
Doktora studiju programmas “Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

ALTERNATĪVAS ENERĢIJAS TRIGENERĀCIJAS PIELIETOJUMS SLODŽU BALANSĒŠANAI UN ILGTSPĒJĪGAS KVALITĀTES NODROŠINĀŠANAI VIEDOS ENERĢIJAS TĪKLOS

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. habil. sc. ing.*
LEONĪDS RIBICKIS

Rīga 2021

ANOTĀCIJA

Promocijas darba pētījuma objekts ir mikrotikli centralizētas siltumapgādes sistēmā (CSS) Rīgā un Ogrē, šo sistēmu siltumenerģijas gala patērētāji (pasīvā ēka: Ogres Centrālā bibliotēka).

Promocijas darba aktualitāte: Latvijas Nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2030.

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt enerģijas vadības modeli mikrotikliem ar pasīvām ēkām un ekotriģenerāciju.

Promocijas darbā ir ievads un septiņas nodaļas, kurās sniegti pētījuma rezultāti par gala patērētāja slodžu balansēšanu ar siltuma enerģijas jaudu, ievērojot ekotriģenerācijas lietojumu mikrotiklos, kā arī eksperimentālā daļa, kas balstīta uz Ogres Centrālās bibliotēkas atjaunīgās enerģijas mikrotiklu, rezultātu izvērtējums, secinājumi, informācijas avoti (literatūras saraksts).

Latvijas Republikas Patentu valdē iesniegti 3 patentu pieteikumi, kas aizsargā promocijas darba tehniskos risinājumus un skaidrojumus.

Otrajā nodaļā sniegta matemātiskā modeļa izveide ēkas telpu dzesēšanai un izstrādātā modeļa novērtējums.

Trešajā nodaļā apkopoti pētījumu rezultāti par atsevišķu energoapgādes posmu dinamisko īpašību uzlabošanas iespējām (pastāvīga gaisa sadalījuma saglabāšanas robežās telpā, balstoties un Koanda efekta uzturēto un iespējamo siltumapmaiņas procesa intensifikāciju, veidojot siltumnesēju pulsācijas)

Ceturtajā nodaļā pētīta dažādu enerģijas veidu sadales tīklu mijiedarbības pilnveide, pamatojoties uz viedo enerģijas patēriņa mērītāju lietojumu.

Piektajā nodaļā piedāvāta grafoanalītiska metode gaisa apstrādes tehnoloģijas izvēlei, balstoties uz apstrādes vektora izvēli ar vismazāko iespējamo enerģijas patēriņu.

Sestajā nodaļā izklāstīts CSS vadības metodoloģijas pielietojums, pamatojoties uz izstrādāto CSS digitālo dvīni, aprakstīta CSS posma digitālā dvīņa izveide, kā arī skaidrots patenta pieteikums par digitālā dvīņa lietojumu CSS siltuma enerģijas avotu vadībai.

Septītajā nodaļā ir aplūkota atjaunīgo resursu energokopienas veidošanas un vadības stratēģija.

ANOTATION

“The object of the research is micro-grids in district heating systems (DHS) in Riga and Ogre, the end consumers of the thermal energy from these systems (the passive building: Ogre Central Library).

Topicality of the Thesis: The National Energy and Climate Plan of Latvia for 2030.

The aim of the doctoral thesis is to design the energy management model for micro-grids with passive buildings and eco-trigeneration by using renewable energy resources.

The doctoral thesis comprises the introduction and seven chapters in which the research results regarding balancing of the end consumer loads by thermal network power, considering the use of ecological trigeneration in the renewable energy micro-grids, as well as the experimental part based on the renewable energy micro-grid of Ogre Central Library, the evaluation of the results, the conclusions, the information resources (literature review) are presented.

The applications of the patents protecting the technical solutions of the doctoral thesis have been submitted to Patent Office of the Republic of Latvia.

In the second chapter creation of mathematical model for cooling the rooms of the building and the evaluation of the model designed are presented.

In the third chapter the research results regarding the options to improve the dynamic properties of individual energy supply phases (permanent air distribution within the maintaining limits in the room, based on the identification of the heat exchange process possible and maintained by the Coanda effect, by creating pulsations of the heat carriers).

In the fourth chapter improvement of interaction of the distribution networks of different energy types is described based on the use of the smart energy consumption meters.

In the fifth chapter a graph-analytical method for selection of air processing technology is presented, based on selection of the processing vector with the least possible energy consumption.

In the sixth chapter the creation of the digital twin of the DHS phase is described and the application of the patent regarding the usage of the digital twin for management of the DHS thermal energy resources is explained.

In the seventh chapter strategy of creating renewable resource energy communities (microgrids) have been described.

SATURS

ANOTĀCIJA	2
ANOTATION	3
IEVADS.....	6
1. PROMOCIJAS DARBA TĒMAS VISPĀRĒJS APRAKSTS	8
2. NODAĻA. DATU SAVĀKŠANAS ANALĪZES UN DATU AGREGĀCIJAS MODELIS DZESĒŠANAS VADĪBAI ENERGO SISTĒMAS GALA PATĒRĒTĀJOS	13
2.1. <i>ISO -13970-2018</i> modeļa būvju un to inženiersistēmu modeļa papildināšana	13
2.2. Pielāgoto <i>ISO-13970-2018</i> modeļu eksperimentāla verifikācija.....	17
Eksperimentiem izvēlētās ēkas zonas.....	17
Izmantotā mērīšanas iekārta un inženiersistēmu infrastruktūra	18
<i>PN4</i> zonas reālā enerģijas patēriņa aprēķina metode	19
<i>6R2C</i> Matemātiskā modeļa izveide	20
Veikto eksperimentu apraksts	20
Ievades dati dzesēšanas enerģijas modelī.....	21
Modelī <i>6R2C</i> balstītie iegūtie dati un to analīze	22
<i>6R2C</i> modeļa novērtējums dzesēšanai	24
3. NODAĻA. ENERĢIJAS SADALES TĪKLU VADĪBAS SISTĒMU ATSEVIŠĶU POSMU ENERGOEFEKTIVĀ SNIEGUMA UZLABOŠANAS IESPĒJAS	28
3.1. Noturīga gaisa sadalījuma vadība telpās	28
3.2. Cilvēka komforta līmenis biroju ēkas enerģijas taupīšanas simulācijas modelī	32
Biroja telpas fiziskais modelis.....	33
Pētāmās telpas matemātiskais modelis	35
Eksperimentālo datu apstrāde.....	37
Biroju ēkas darbinieka komforta līmeņa saglabāšana enerģijas taupīšanas simulācijas modelī ...	39
Biroja telpas komforta novērtējums ar telpas komforta kompleksa modeli	41
4. NODAĻA. ENERĢIJAS APGĀDES SISTĒMU MIJIEDARBĪBAS BŪTISKU PARAMETRU MONITORINGS	42
4.1. Enerģijas patēriņa viedās uzskaites nepieciešamība dažādu enerģijas veidu sadales tīklos	42
4.2. Hibrīdas energosistēmas	44
4.3. Reģionāli vienota starpvalstu dabasgāzes tirgus iespējas	45
4.4. Gāzes un elektroenerģijas tirgu mijiedarbība	46
4.5. Siltumenerģijas ražošana mainīga kurināmā tirgus situācijā.....	47
4.6. Viedās uzskaites raksturīgās iezīmes.....	49
4.7. Viedās uzskaites priekšrocības	52
4.8. Viedo skaitītāju piederība	52

4.9. Dažādu enerģijas veidu koptirgus raksturojums (secinājumi).....	54
5. NODAĻA. ENERĢIJAS SADALES SISTĒMU (EES) GALA PATĒRĒTĀJU SLODŽU BALANSĒŠANA	55
5.1. Gaisa apstrādes virziena optimāla trajektorijas izvēles algoritms	56
5.2. ESS gala patērētāju slodžu balansēšanas algoritmu sintēze	57
5.3. Grafoanalītiska metodoloģija ESS balansēšanas vadībai, ievērojot gala patērētāju dinamiskās slodzes	59
5.4. ESS automātisko vadības sistēmu struktūra, to pamata un papildu funkcijas.....	60
5.5. Maināmas ražības ESS vadības sistēmas struktūras analīze	64
6. NODAĻA. DIGITĀLĀ DVĪŅA IZSTRĀDE CENTRĀLĀS SILTUMAPGĀDES SISTĒMAS VADĪBAI.....	69
6.1. CSS vadība, balstoties uz digitālo dvīni, ko pamato CSS pārvaldības un kontroles metodoloģija	69
7. NODAĻA. ATJAUNĪGO RESURSU ENERĢOKOPIENAS (ARE) (MIKROTĪKLA) VEIDOŠANAS STRATĒGIJA AR ATJAUNĪGĀS ENERĢIJAS TRIGENERĀCIJU (EKO TRIGENERĀCIJU).....	76
7.1. Pasīvās ēkas iekļaušanas iespējas atjaunīgo resursu energokopienā (mikrotīklā).....	77
7.2. Ekotriģenerācijas lietojums atjaunīgo enerģijas resursu (AER) mikrotīklā pasīvās ēkas iekštelpu gaisa kvalitātes veidošanai.....	78
Ekotriģenerācijas ietaisais siltuma un dzesēšanas enerģijas ražošanai	80
7.3. Vadības stratēģijas atjaunīgas enerģijas kopienā (mikrotīklā) ar ekotriģenerāciju	83
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	87

IEVADS

Darba mērķis

Darba mērķis ir izstrādāt enerģijas vadības metodi mikrotikliem ar pasīvām ēkām, pielietojot ekotriģenerāciju, atjaunīgu resursu mikrotiklos.

RTU promocijas padomē P-14 ir aizstāvēta virkne promocijas darbu, kuros ir veikta elektro-tehnoloģisko procesu izpēte šo procesu vadības pilnveidei. Šo darbu autori ir pētnieki Apse-Apsītis, *Aleksandrs Suzdaļenko*, *Anatolijs Zabašta*, Genādijs Zaleskis, Rodions Saltanovs un Gints Poišs. Šie darbi aizstāvēti laika posmā no 2013.gada līdz 2021.gadam.

Darba uzdevumi

- 1) Pielāgot R & C modeli dzesēšanas režīmu izpētei;
- 2) Veikt tehnoloģiju analīzi atjaunīgu energoresursu regulēšanas loku elementu snieguma uzlabošanai;
- 3) Noformulēt pamatprasības viedai uzskaitēi gāzes sadales tīklos, ievērojot mijiedarbību ar citiem enerģijas sadales tīkliem;
- 4) Izstrādāt grafoanalītisku metodoloģiju vadības algoritmu sintēzei, balstoties uz galīgo automātu teoriju lietošanai iegulto mikroprocesoru programmēšanai atjaunīgu resursu mikrotiklu vadībai;
- 5) Izstrādāt digitālo dvīni centralizētas siltumapgādes sistēmu atgaitas temperatūras vadībai;
- 6) Izveidot atjaunīgas enerģijas mikrotikla vadības stratēģiju, balstoties uz ekotriģenerācijas tehnoloģiju ar saules PV baterijām un siltuma enerģijas rekuperācijas sistēmu no pilsētas notekūdeņiem.

Novitāte

Energoapgādes sistēmu, kurās iekļauti atjaunīgas enerģijas mikrotikli ar ekotriģenerāciju snieguma uzlabošana, pielāgojoties pasīvu ēku dinamiskai slodzei.

Patentu pieteikumi:

- 1) LR patenta Nr. LVP2020000012 “Automātiska temperatūras regulēšanas sistēma un paņēmieni telpām noturīga gaisa sadalījuma veidošanai.” pieteikums. Izgudrotāji: E.Dzelzītis, A.Krūmiņš, A.Prozuments. Pieteikuma datums: 28.02.2020.
- 2) LR patenta Nr. LVP2020000045 “Iekārta un paņēmieni kanalizācijas ūdeņu rekuperācijas sistēmas efektivitātes paaugstināšanai.” pieteikums. Izgudrotāji: E.Dzelzītis, K.Grīnbergs. Pieteikuma datums: 16.06.2020.
- 3) LR patenta Nr. LVP2020000070 “Automātiska vadības sistēma un paņēmieni siltumapgādes tīkla atgaitas temperatūras regulēšanai.” pieteikums. Izgudrotāji: E.Dzelzītis, N.Talcis. Pieteikuma datums: 13.10.2020.

Praktiskā nozīme

Izstrādāts pamatojums enerģijas kopienas (mikrotikla) darbam ar ekotriģenerāciju un pasīvām ēkām, atbilstoši Enerģētikas likuma sadaļai Energokopienas.

Promocijas darbs izstrādāts valsts pētījumu programmas “Latvijas gāzes infrastruktūras attīstības tendences, izaicinājumi un risinājumi (LAGAS)” ietvarā.

PVS Nr. 4006 34-11200-YD8112.

Finansēšanas institūcija: Latvijas Republikas Ekonomikas ministrija

Finansējuma numurs: VPP-EM-INFRA-2018/1-0003

Akronīms: VPP-2018-ENERGY

Šo pētījumu finansē Latvijas Republikas Ekonomikas ministrija.

1. PROMOCIJAS DARBA TĒMAS VISPĀRĒJS APRAKSTS

Parīzes klimata nolīgums noslēgts 2016. gadā Apvienoto Nāciju Organizācijas Vispārējās konvencijas par klimata pārmaiņām ietvarā (*UNFCCC*). Tas paredz siltumnīcefekta gāzes emisiju stabilizēt tādā līmenī, lai nepieļautu globālo sasilšanu vairāk par 2 °C [1].

Lai sasniegtu šādu mērķi, pasaulē notiek enerģētikas pārkārtošana no sistēmas, kas balstīta uz fosilo kurināmo ar augstām oglekļa emisijām, uz sistēmu ar zemām oglekļa emisijām un atjaunojamo energoresursu izmantošanu, ko nosaka nepieciešamība vienlaikus gan mazināt klimata pārmaiņas, gan nodrošināt ekonomisko labklājību. Dažādās valstīs un reģionos atšķiras ātrums un efektivitāte, ar kādu katra valdība izstrādā un ievieš politikas, lai panāktu enerģētikas ilgtspēju.

Valstu sniegumu vērtēšanai Pasaules Enerģijas padome ir ieteikusi termina “enerģijas ilgtspēja” definīciju, kas balstīta uz trim galvenajām dimensijām: enerģijas drošība (*Energy Security*); energoapgādes pieejamība (*Energy Equity*); energosistēmu vides ilgtspēja (*Environmental Sustainability*). Līdzsvars starp šīm trim dimensijām veido trilemmu, un līdzsvarotas sistēmas sekmē katras valsts labklājību un konkurētspēju [2].

Latvija 2019. gadā ir ceturtajā vietā enerģijas drošības ziņā saskaņā ar trilemmas indeksu, kas ir cieši saistīts ar pareizu energoresursu diversifikāciju. Kopvērtējumā 2020. gadā no vērtētām 108 valstīm Latvija daļa 22 vietu ar Islandi.

Enerģijas jomā ES saskaras ar virkni izaicinājumu: pieaugoša atkarība no importa, ierobežota enerģijas piegādes dažādība, augstas un nestabilas enerģijas cenas, pieaugošs globālais pieprasījums pēc enerģijas, drošības riski, kas ietekmē ražotājvalstis un tranzīta valstis, arvien lielāki klimata pārmaiņu izraisītie apdraudējumi, lēns progress energoefektivitātes jomā, kā arī nepieciešamība nodrošināt lielāku pārredzamību enerģijas tirgos un plašāk integrēt un savstarpēji savienot enerģijas tirgus. ES enerģētikas politikas centrā ir dažādi pasākumi, kuru mērķis ir izveidot integrētu enerģijas tirgu un nodrošināt energoapgādes drošību un enerģētikas nozares ilgtspēju.

2018. gada decembrī ES apstiprināja paketi “Tīra enerģija visiem eiropiešiem” [3].

ES ir pabeigusi pārskatīt enerģētikas politikas satvaru, ar ko nodrošina pāreju uz tīru enerģiju un kas ļauj ES virzīties uz Parīzes nolīguma saistību izpildi.

Nolīgumā ir paredzēts mērķrādītājs, proti, līdz 2030. gadam ES līmenī panākt, lai 32 % enerģijas iegūtu no atjaunīgiem energoresursiem.

ES ir vienojusies sarunām par četriem tiesību aktu priekšlikumiem tīras enerģijas paketē:

- pārvaldība;
- atjaunīgo energoresursu enerģija;
- iekšējais elektroenerģijas tirgus.

Šī pakete ir būtisks elements Enerģētikas savienības stratēģijā, kuras mērķis ir nodrošināt Eiropas iedzīvotājiem un uzņēmumiem drošu un ilgtspējīgu enerģiju par pieņemamām cenām.

Šai iniciatīvai ir trīs galvenie mērķi:

- priekšplānā izvirzīt energoefektivitāti;
- atjaunīgu energoresursu enerģijas jomā iegūt vadošo pozīciju pasaulē;
- nodrošināt taisnīgus nosacījumus patērētājiem.

Tīras enerģijas paketē ietilpst priekšlikumi tādās svarīgās jomās kā elektroenerģijas tirgus modelis, energoefektivitāte, piegādes drošība, atjaunīgie energoresursi un pārvaldības noteikumi.

Stratēģijas vispārējais mērķis ir līdz 2030. gadam pārveidot ES par mazoglekļa ekonomikas zonu.

Eiropadome uzsvēra savu mērķi izveidot Enerģētikas savienību, kas piedāvātu drošu un ilgtspējīgu enerģiju par pieņemamām cenām.

Vienlaikus tā ierosināja papildu pasākumus, ar ko mazināt ES energoatkarību un palielināt elektroenerģijas un gāzes piegādes drošību.

ES valstu vadītāji ir vienojušies par klimata un enerģētikas politikas satvaru laikposmam līdz 2030. gadam. Viņi apstiprināja četrus mērķus:

- līdz 2030. gadam samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas par 40 %, salīdzinot ar 1990. gada līmeni;
- panākt, lai 2030. gadā patērētās atjaunīgo energoresursu enerģijas īpatsvars būtu vismaz 32 %;
- par 27 % palielināt energoefektivitāti;
- pabeigt ES reģionālo enerģijas tirgus izveidi [4].

Saskaņā ar pārvaldības regulu, kas stājas spēkā 2018. gada decembrī, ES dalībvalstu pienākums ir ziņot par to ieguldījumu Enerģētikas savienībā atbilstoši Nacionāliem enerģētikas un klimata plāniem (NEKP), kas aptver 10 gadu laikposmu un kas regulāri tiek atjaunināti. Pirmie NEKP aptver laikposmu no 2021. līdz 2030. gadam.

NEKP ilgtermiņa mērķis ir, uzlabojot enerģētisko drošību un sabiedrības labklājību, ilgtspējīgā, konkurētspējīgā, izmaksu efektīvā, drošā un uz tirgus principiem balstītā veidā veicināt klimatneitrālas tautsaimniecības attīstību.

Lai šādu ilgtermiņa mērķi sasniegtu, nepieciešams:

- 1) veicināt resursu efektīvu izmantošanu, kā arī to pašpietiekamību un dažādību;
- 2) nodrošināt resursu, it īpaši – fosilo un neilgtspējīgo resursu, patēriņa būtisku samazināšanu un vienlaicīgu pāreju uz ilgtspējīgu, atjaunīgu un inovatīvu resursu izmantošanu, nodrošinot vienlīdzīgu pieeju energoresursiem visām sabiedrības grupām;
- 3) stimulēt tādas pētniecības un inovāciju attīstību, kas veicina ilgtspējīgas enerģētikas sektora attīstību un klimata pārmaiņu mazināšanu.

Katrā dalībvalstī NEKP izstrādāti, lai sasniegtu ES noteiktos mērķus vai starptautiskās apņemšanās, balstoties uz:

- ANO Vispārējo konvenciju par klimata pārmaiņām Parīzes nolīguma ietvaros izteiktās apņemšanās 2030. gadam attiecībā uz klimata pārmaiņu mazināšanu: izmaksu ziņā efektīvā veidā līdz 2030. gadam samazināt kopējās visu ES dalībvalstu SEG emisijas par vismaz 40 %, salīdzinot ar 1990. gadu [5];
- ES “Ceļvedis virzībai uz konkurētspējīgu ekonomiku ar zemu oglekļa dioksīda emisiju līmeni 2050. g.” – ES 2050. gadā ir gatava savā iekšienē samazināt kopējās ES dalībvalstu emisijas par 80–95 %, salīdzinot ar 1990. gada līmeni, lai pārietu uz konkurētspējīgu ekonomiku ar zemu oglekļa dioksīda emisiju līmeni [6];
- ES stratēģisks plāns “Tīru planētu visiem – Eiropas stratēģisks ilgtermiņa redzējums uz pārtikušu, modernu, konkurētspējīgu un klimatam neitrālu ekonomiku” – ES 2050. gadā ir gatava panākt “klimata neitralitāti” [7].

Vēlamā situācija Latvijā 2030. gadā (Latvijas Republikas NEKP):

- ēku fondā vidējais siltumenerģijas patēriņš apkurei ir par 30 % mazāks nekā 2020. gadā;
- atjaunotas vismaz 2000 daudzdzīvokļu dzīvojamās ēkas un vismaz 5000 savrupmāju, tajās ir uzstādītas ne-emisiju AER tehnoloģijas vai tās ir pieslēgtas centralizētai siltuma apgādei (CSA);
- ir nodrošināta valsts un pašvaldību ēku energoefektivitātes paaugstināšana.

Pašlaik Latvija ieņem trešo vietu Eiropā aiz Islandes un Lietuvas pēc iedzīvotāju skaita, kuriem siltumenerģija tiek nodrošināta ar centralizētu siltumapgādi CSA. Straujāku energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumu īstenošanu CSA kavē nepietiekošs investīciju apjoms, pašvaldību ierobežotās spējas ņemt kredītu, kā arī lēnais kapitāla apgrozījuma ātrums CSA modernizācijas procesos. Veicot kompleksu sistēmas (ražošana – pārvade – patēriņš) atjaunošanu, iespējams optimizēt enerģijas ražošanas procesu un samazināt siltumenerģijas zudumus pārvades sistēmās.

Papildu darbības vēlamās situācijas sasniegšanai 2030. gadā:

- enerģijas pašražošanas un pašpatēriņa veicināšana, lai efektīvizētu individuālo siltumenerģijas ražošanu un veicinātu tajā izmantoto ne-emisiju tehnoloģiju daļu;
- nodokļu sistēmas “zaļināšana” un pievilcīguma energoefektivitātei un AER tehnoloģijām uzlabošana, kur tiek noteikts akcīzes nodokļa kurināmajam un dabas resursu nodokļa DRN pārskats, nodokļu atvieglojumu izvērtējums un enerģijas subsīdiju pakāpeniska atcelšana;
- iedzīvotāju iesaiste enerģijas ražošanā, lielākā apjomā uzstādot enerģijas ražošanas iekārtas pašu patēriņam;
- ekonomiski pamatotu enerģijas pašražošanas, pašpatēriņa un atjaunojamās enerģijas kopienveicināšana;
- personu loka, kas iesaistās elektroenerģijas ražošanā vienotos lokālos tīklos (mikrotīklos, energokopienās), paplašināšana.

Parīzes nolīgums klimata pārmaiņu jomā stiprina ES centienus dekarbonizēt ēku sektoru un atvieglot pāreju no fosilām degvielām uz atjaunīgu un vietēji pieejamu enerģiju. Direktīvas 2018/844/ES par ēku energoefektivitāti pēdējā versija nosaka iekštelpu vides kvalitātes novērtējuma integrāciju vienlaikus ar energoefektivitātes un taupības prasībām, tajā pašā laikā nesamazinot komfortu, labklājību un veselīgus iekštelpu klimata apstākļus [8].

Parīzes nolīgumu ir parakstījušas 175 valstis, dažas no tām ir sniegušas īpašu paziņojumu. Pāvests Francisks apliecina Vatikāna mērķi kļūt par klimata neitrālu 2050. gadā, norādot, ka šodienas pandēmija un klimata pārmaiņas, kas iespaido ne tikai vidi, bet rada arī ētiskas, sociālas, ekonomiskas un politiskas sekas, ietekmējot trūcīgos un tāpēc vieglāk ievainojamos mūsu planētas iedzīvotājus. Vatikānā īsteno vides pārraudzību, racionāli izmanto dabas resursus, pirmkārt, ūdeni, vienlaikus apņemoties apzaļumot Vatikāna teritoriju. 2015. gadā pāvests Francisks publicēja encikliku “*Laudato Si*”: ar apbrīnu būt Tevī mans Kungs, caur mūsu māsu zemi, sargājot to rūpēs par mūsu kopējām mājām [9].

Savā runā 75. ANO Ģenerālajā Asamblejā 2020. gada 22. septembrī Ķīnas Tautas Republikas (ĶTR) prezidents Sji Dzjiņpins vēstīja par ĶTR nacionāli noteikto ieguldījumu. Parīzes klimata nolīguma mērķu sasniegšanā ĶTR būs klimata neitrālai 2060. gadā. Prezidents apliecināja, ka viņa valsts ir pārliecināta, ka pēc *Covid-19* ekonomikas atveseļošanās ĶTR ir jābūt zema oglekļa ekonomikai [10].

Atklājot līderu virtuālās tikšanās par klimatu 2021. gada 22. aprīlī, ASV 46. prezidents Džozefs Robinets Baidens noteica 2030. gada siltumnīcefekta gāzu samazinājuma mērķus, kuru sasniegšana radīs labi apmaksātu valsts darbu un stiprinās ASV līderību zaļajās tehnoloģijās.

2030. gadā ASV ir jāsasniedz siltumnīcefekta gāzes izmešu apjoma samazinājumu par 52 % salīdzinot ar 2005. gadu. Eiropa izstrādā Klimata aktu, kam jāklūst par vienu no galvenajiem Eiropas zaļā kursa elementiem, un tajā jānostiprina ES apņemšanās līdz 2050. gadam panākt klimatneitralitāti, vienlaikus atbalstot amerikāņu ražojumus tīrās enerģijas tehnoloģiju jomā, piedāvājot izstrādes pasaulei, piemēram, saules baterijas [11,12].

2021. gadā Pasaules Ekonomikas forumā Šveicē, Davosā, ir iezīmētas arī šādas diskusiju platformas:

- mākslīgais intelekts un mašīnmācīšanās;
- lietu internets un pilsētu pārveide;
- enerģija, materiāli un infrastruktūra [13].

ASV un Kanādas Apkures, gaisa kondicionēšanas un saldēšanas inženieru biedrība (*ASHRAE*), kas dibināta 1894. gadā, ir globāla biedrība, kas uzlabo cilvēka labklājību ar ilgtspējīgas tehnoloģijas lietojuma pilnveidošanu pilsētu inženiersistēmās [14]. Tās prezidents 2020.–2021. gadā *Charles E. Gullledge III* iestiprināšanas vēstījumā “*ASHRAE* digitālā bāka un 4,0 industrija” 2020. gada augustā ir atsaucies uz 2018. gada Pasaules Ekonomikas foruma ziņojumu “Digitālās tehnoloģijas var paaugstināt produktivitāti, veidojot būvniecības nākotni”.



1.1. att. Būvniecības informācijas modeļa (MIB) iedarbes (1–10).

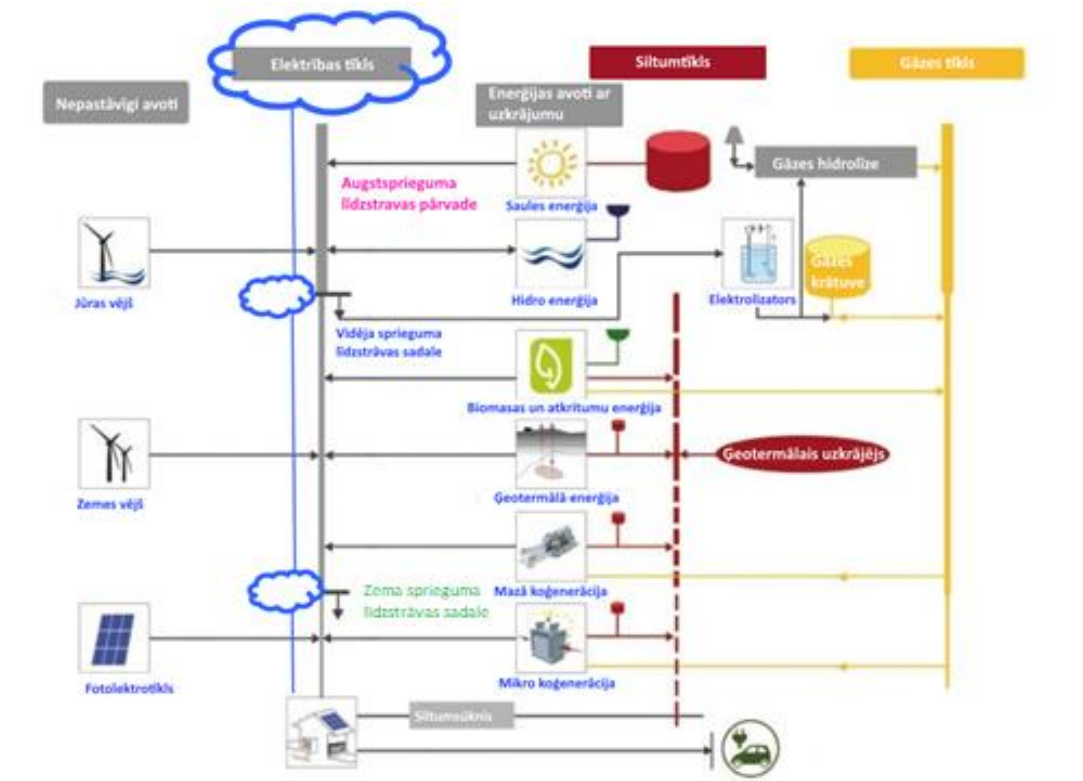
Šis ziņojums pamato rīcības plānu paātrināt BIM lietojumu, ieskicējot 10 BIM iedarbes digitālās attīstības pilnveides virzienus:

- 1) modernā būvniecība;
- 2) pirmrindas celtniecības materiāli;
- 3) 3D veidošana un saistītā ražošana;
- 4) autonoma būvniecība;
- 5) paplašinātā realitāte;
- 6) lielie dati un apsteidzoša analīze;
- 7) bezvadu pārraudzība un tīklotās iekārtas;
- 8) mākoņa un reālā laika sadarbība;
- 9) 3D skanēšana un fotogrammetrija;
- 10) būvju informācijas modelēšana (BIM) [15].

No šiem virzieniem ar promocijas darbu ir saistīti 5.–8. virziens, kas dziļāk pētīti Elektrotehnikas un elektronikas inženieru institūtā (*Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE*).

IEEE ir elektronikas un elektroinženieru profesionāla asociācija, tās mērķi ir izglītojoši un tehniski pilnveidot elektronikas inženieriju, telekomunikācijas, datorinženieriju un šīm jomām saskarīgas disciplīnas [16].

Nākotnes virzības ieskicējumi *IEEE* skatījumā ir sniegti profesora Rika V. de Donkera (*Rik W. De Doncker*) vieslekcijā RTU Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūtā “*Further Advantages in Electrical Grids with DC Technology*” (2. att.) [17].



1.2.att. Viedu līdzstrāvas tīklu mijiedarbe ar dažādotiem vietējiem elektriskās enerģijas ražotājiem.

Tehniskās iespējas un aktuālie uzdevumi enerģijas sadales tīklu viedizācijai ir:

- 1) izkliedēta elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošana, mikrotīklu veidošana;
- 2) enerģijas uzkrāšana;
- 3) elektroenerģijas un siltuma enerģijas avotu diversifikācija (saules enerģija, koksne, ūdeņradis, arī ekotriģenerācijas izmantošana);
- 4) industriālās elektronikas iespējas CO₂ neitralitātes sasniegšanā.

2. NODAĻA. DATU SAVĀKŠANAS ANALĪZES UN DATU AGREGĀCIJAS MODELIS DZESĒŠANAS VADĪBAI ENERGOSISTĒMAS GALA PATĒRĒTĀJOS

Analogā tehnoloģijā balstīto pētījumu posmā katram atsevišķam automātiskās regulēšanas sistēmas posmam tika piemēklēts vistuvākais pēc pārejas procesa dinamikas automātiskā regulēšanas sistēmas tipveida posms [18]. Šādu metodoloģiju ierobežo regulēšanas sistēmu modelēšanas iespējas, apgrūtinot apsteidzošas regulēšanas stratēģijas lietojuma iespējas [19]. Iespēju analogās metodoloģijas nomainīgai pavēra digitālās regulēšanas tehnoloģijas pieejamība [20] un automātiskā regulēšanas sistēmu universālais modelis, kas definēts starptautiskajā standartā [21]. Analogās regulēšanas sistēmu modelēšanas nomainīa uz digitālo ir atspoguļota arī patentos, kas reģistrēti starptautiskos patentu reģistros ar šādiem klasifikācijas indeksiem, piemēram, *F24f 11/54* “Centrāla programmēšanas regulatora pielietojums pakļautu regulatoru secīgai vadībai”, *G05B* “Regulēšanas sistēmas, šo sistēmu funkcionālie elementi; šādu sistēmu un to elementu pārraudzība vai pārbaude”, *G05B 13/00* “Pielāgojošas regulēšanas sistēmas, tās automātiski sevi noskaņojošas, lai to sniegums būtu optimāls kādam iepriekš uzdotam kritērijam”. Regulēšanas digitalizācijas iespēju lietojumu iepriekš norādītajos patentu klasifikācijas indikatoru tvērumos raksturo, piemēram, šādi patenti:

1. “Energijas patēriņa aplēses metode ēkām ar temperatūras regulēšanu” [22], kas aizsargā piecu pakāpju enerģijas patēriņa aplēses metodi, kas ietver piecus modulus:
 - 1) aprēķina iekštelpu temperatūras dabiskas izmaiņas;
 - 2) aprēķina iekštelpu temperatūras piespiedu izmaiņas (automātiskas regulēšanas iespaidā);
 - 3) šis modulis ņem vērā siltuma enerģijas guvumus un zudumus;
 - 4) aprēķina noteiktā laikā patērēto enerģiju un šīs enerģijas izmaksas;
 - 5) veic enerģijas patēriņa un to izmaksu prognozes.
2. “Ēku un ēku klastera enerģijas vadība un optimizācijas sistēma un šīs sistēmas darbināšanas metode” [23]. Šī patenta aizsargātā skaitļošanas iekārta veidota, lai prognozētu vismaz viena klastera ēkas noslodzi. Prognozi veic ar vidēju aproksimāciju stohastiskā programmēšanā. Enerģijas pieprasījumu prognozē uz termiskas pretestības un kapacitatīva tīkla modeļa.
3. “Ēkas energoefektivitāte projektēšanas stadijā” [24]. Dažādu metožu un sistēmu lietojums ir iespējami lietderīgs būves energoefektivitātes noteikšanai projektēšanas stadijā: būves digitāla dvīņa (moduļa) izveide, pieejas saišu izveide ēkas automatizācijas funkcijām, dažādu telpu modeļu apvienošana pēc noteiktām raksturīgām pazīmēm, tehnoloģisku un automātiskās regulēšanas moduļu izveide [25].
4. “Būves struktūras termodinamiska modeļa izveide un lietojums” [26]. Ir izveidots iekštelpu temperatūru profils reālā laikā. Ir saskaņotas regulēšanas sistēmas regulējošās iedarbes ar iespējamām iekštelpu temperatūru izmaiņām. Iepriekš izklāstītais var būt pamats ēkas rezistīvi kapacitatīvā termodinamiskā modeļa lietojumam patērētāju gala slodžu dinamikas pētījumos.

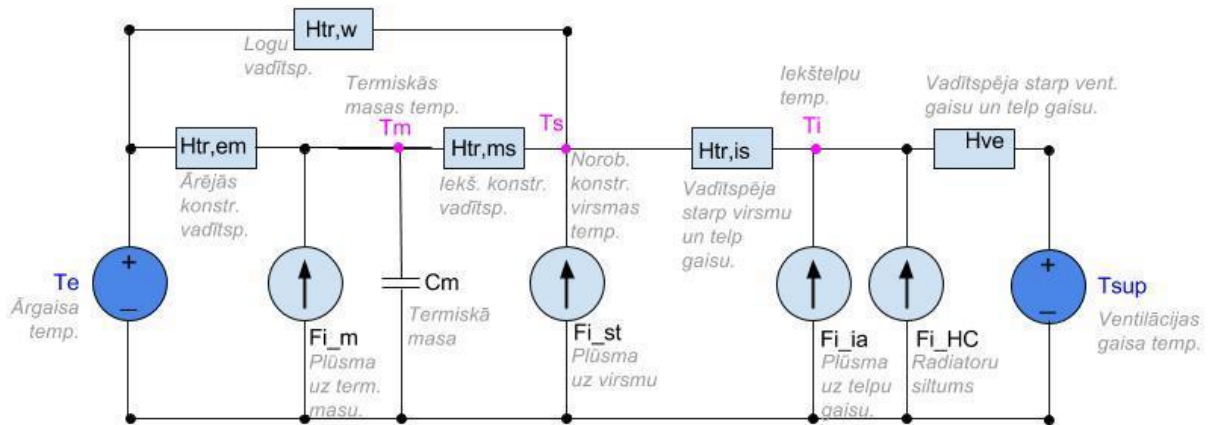
2.1. ISO -13970-2018 modeļa būvju un to inženiersistēmu modeļa papildināšana

Pamatojoties uz *ISO 13970/2018* modeli, ir veiktas šādas darbības:

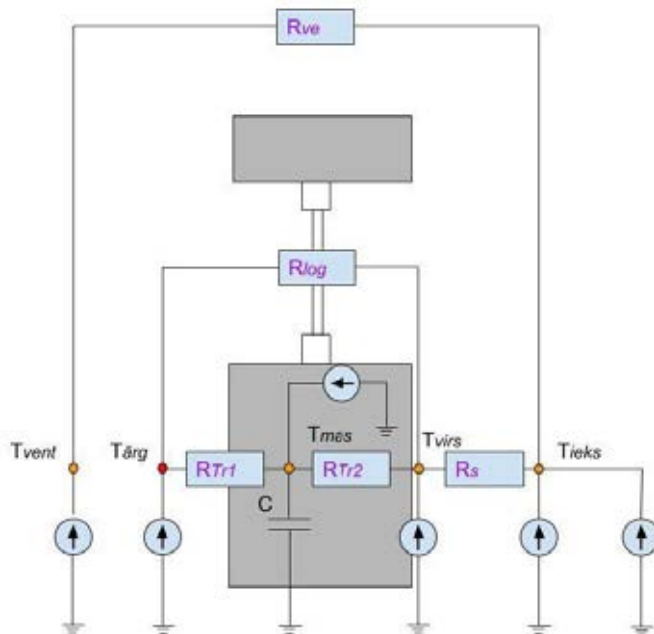
- Tas ir papildināts un kļūst par *6R2C* modeli;
- Gaisa apstrādes iekārta (*air handling unit – AHU*) modelēta simulējot tās darbību, pēc reāliem iestatījumiem;
- *6R2C* modelis iestrādāts *MATLAB*;
- *MATLAB SIMULINK* programmā izveidots *6R2C*;

- Pārbaudīta dienvidu fasāde, kuru apkalpo viena AHU (PN4) iekārta. Salīdzināts izmērītais AHU iekārtas enerģijas patēriņš ar modelim aprēķināto patēriņu vienam vasaras mēnesim;
- Papildus modelis pārbaudīts ēkas līmenī dzesēšanas režīmā. Salīdzināts izmērītais ēkas kopējā dzesētāja enerģijas patēriņš uz modeļa aprēķināto vienam mēnesim;
- Pārbaudīts ēkas līmenī arī apkures režīmā. Salīdzināts izmērītais enerģijas patēriņš apkurei (radiatori + ventiekārtas) četriem ziemas mēnešiem.

Termodinamiskas sistēmas modelēšanai tiek izmantots modelis *5RIC*, balstoties uz *ISO 13970-2018*, kas ļauj sistēmu modelēt, izmantojot elektrotehnisku sistēmu objektus. Atbilstoši šai pieejai katrs no sildīšanas vai dzesēšanas elementiem tiek modelēts ar atbilstoša raksturojuma sprieguma avotiem, apsildāmā telpa (vai objekts) – ar kapacitātvu elementu, siltuma plūsmas – ar strāvas avotiem, siltuma vadītspējas – ar atbilstošiem aktīvas pretestības elementiem. Atbilstoši izmantotajam modelēšanas paņēmienam vispārējā gadījumā ēka tiek modelēta pēc 2.1. attēlā redzamās elektrotehniskās sistēmas principiālās shēmas.



2.1. att. Ēkas termodinamiskas sistēmas *5RIC* modelis.



2.2. att. Shematisks 5RIC ēkas aprēķina modeļa attēlojums.

(apzīmējumus skatīt pie att. 2.3)

Efektīvai modeļa izmantošanai skaitļošanas vidē ir izveidota stāvokļu pārejas vienādojumu sistēma.

$$\frac{dx}{d\tau} = A(\tau)x(\tau) + B(\tau)u(\tau) - \text{stāvokļa vienādojums,} \quad (2.1.)$$

$$y = C(\tau)x(\tau) + D(\tau)u(\tau) - \text{izejas vienādojums,} \quad (2.2.)$$

kur vektori $x \in R_n$; $u = R_k$; $y = R_m$; x – ieeja; u – stāvoklis; y – izeja; A , B , C un D – sistēmas matricas.

5RIC modelim ir viens stāvokļa mainīgais T_m , un divi ieejas mainīgie T_e un T_{sup} . Tādējādi izejas vektors y ietver divas temperatūras – T_s un T_i . No tā izriet:

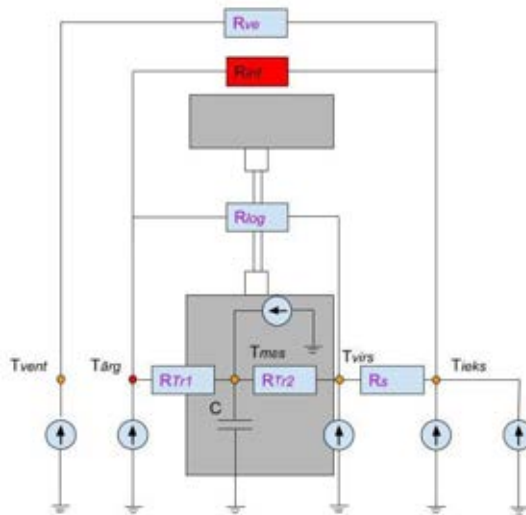
$$\begin{aligned} x &= [T_m]; \\ x' &= [T \dot{b}]; \\ u^T &= [T_e, T_{sup}, Fi_m, Fi_{st}, Fi_{ia}, Fi_{HC}]; \\ y^T &= [T_i, T_s]. \end{aligned} \quad (2.3.)$$

Lai modulis atbilstu noteiktam objektam, siltuma vadītspējas konstanšu vērtības ir jānoskaidro eksperimentāli. To var veikt arī, izmantojot būvniecības dokumentāciju. Lai arī siltumtehnikas jomā un enerģētikā ir uzkrāta būtiska pieredze, tomēr katru konkrēto objektu precīzi raksturojošās konstantes ir grūti nosakāmas. Tādēļ jāizmanto automātiskas modeli raksturojošo konstanšu noteikšanas metodes, kas ļautu neizmantojot precīzu vērtību iegūšanas modeli eksperimenta sākuma fāzē, iegūstot tās vēlāk, pēc kāda noteikta laika un salīdzinot ar reālajiem mērījumiem.

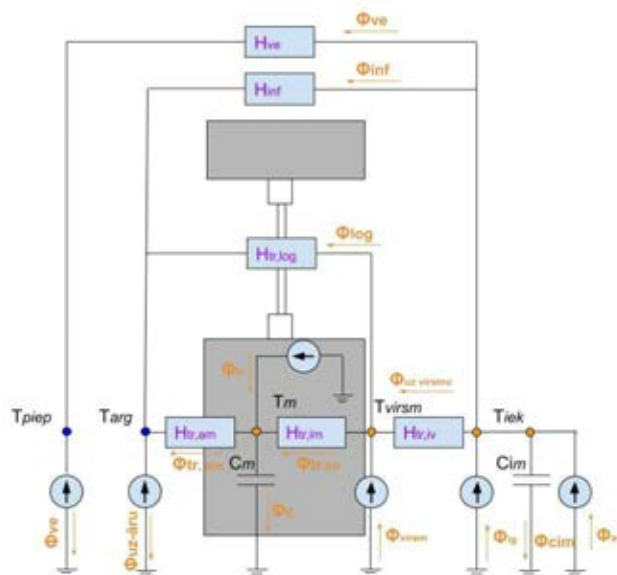
Lai noteiktu konkrētas parametru vērtības, jāveic optimizācijas uzdevums vairāku parametru telpā. Balstoties uz jomas labo praksi, piemērotākās metodes šī uzdevuma risināšanai ir daļiņu spieta un evolūcijā sakņotās metodes, kā arī pārmeklēšanas metodes.

Izmantotais modelis ir tuvināts, t. i., tas neatspoguļo precīzi visas fiziskā objekta īpašības, kā arī paši mērījumi *5RIC* ir trokšņaini sensoru nepilnību dēļ.

Lai šo trūkumu novērstu, nepieciešami shēmu papildinājumi.



2.3. att. Shematiskais *6RIC* modeļa attēlojums ar izceltām ventilācijas komponentēm.



2.4. att. Shematiskais *6R2C* modelis ar gaisa dzesēšanu.

(Mērāmais parametrs T , temperatūra $^{\circ}\text{C}$; modeļa raksturkonstantes: H – siltumvadītspēja, w/K ; C – siltumietilpība, J ; ϕ – siltuma guvumi no iekārtām, J)

Gaisa dzesēšanas iespēja ir iekļauta *6R2C* modelī. Tas ļauj uzlabot *ISO 13790:2008* standarta modeli *5RIC*, lai paaugstinātu pētījuma gaitā izstrādātā modeļa precizitāti. Modeļa validācijas gaitā tiks novērots, vai modeļa precizitāte ir apmierinoša, vai arī modelis iespēju robežās būs jāpapildina ar papildu pretestībām, piemēram, siltuma pārvadi starp blakus esošajām telpām vai zonām.

Energoefektivitāte, siltumnīcefekta gāzes (SEG) emisijas samazināšana, kā arī nepieciešamība samazināt ēkas ekspluatācijas izmaksas, ir šīs tehnoloģijas inovācijas virzītājspēks visā pasaulē. Ir pieejamas dažādas uz *IoT* balstītas sensoru sistēmas (ko darbina maiņstrāvas tīkli vai baterijas) mērījumu datu apkopošanai.

Arī viedā vadība, ēku enerģijas vadības sistēmu (ĒEVS) optimizācija ir sarežģīta sociotehniska sistēma [27], kas ietver inženiersistēmu inženieru, elektroinženieru un informāciju tehnoloģiju inženieru zināšanas, lai risinātu enerģijas, komforta un saimnieciskās darbības vajadzības.

Ir pieejamas arī jaunākas metodes, no kurām dažās elektrības patēriņam izmanto vadu risinājumus [28] vai bezvadu risinājumus [29], un šādu pieeju ir viegli savienot ar jebkuru citu sensoru veidu, lai arī iegūtu temperatūras, CO₂, mitruma, siltuma enerģijas rādījumus, gaisa spiediena datus tiešsaistes datubāzes sistēmā, tāpat kā [30], kas var palīdzēt analizēt ēkas enerģijas patēriņu un noteikt, vai tas ir pieņemams vai slikts režīms. Arī uz *IoT* balstītu sensoru un izpildmehānismu vadības koncepcija var tikt izmantota kā instruments apkures, ventilācijas un gaisa kondicionēšanas sistēmu modernizēšanai, iegūstot enerģijas ietaupījumu līdz pat 59 % [31, 32].

Pētījumi, kas aprakstīti [33–35], vairāk koncentrējas uz apkures enerģijas patēriņu modelēšanu (ziemā) ar mērķi radīt vienkāršotu modelēšanas rīku, kuru var iebūvēt modelējošā industriālā kontrolerī, kas tiek izmantots esošajās ĒEVS. Iestrādājot šo modeli ĒEVS, izmantojot *IoT* sensorus (tiešsaistes atgriezeniskās saites dati), var iegūt iespēju automātiski pielāgot matemātisko modeļu ievades datus, lai tie sakristu ar reālajiem iestatījumiem un ietekmējošiem faktoriem (piemēram, iemītnieku skaits ēkā vai zonā). ĒEVS *IoT* balstītie dati ir nozīmīgi, lai monitorētu ietekmējošo faktoru precīzās vērtības, ko izmanto kā ievades datus modelī, un pieņemtu pareizo lēmumu efektīvai un enerģiju taupošai ĒEVS darbībai. Turklāt dati, kas iegūti no sensoriem, ir nepieciešami, lai analizētu un simulētu esošo gaisa apstrādes vienību darbu, kam ir liela ietekme uz iekšējo klimatu un enerģijas patēriņu.

Lai noskaidrotu ievades sensoru datu apjomu, enerģijas patēriņu un prognožu datu aprēķina precizitāti, *MatLab* modelis tiek izveidots un pārbaudīts ar reāllaika siltuma un elektriskās enerģijas patēriņu, ko iegūst sensoru tīkls, kas sastāv no *LoRa* temperatūras un mitruma sensoriem, CO₂ sensoriem, ultraskaņas siltuma emisijas plūsmas mērītājiem, trīsfāžu elektriskās enerģijas rādītājiem, gaisa plūsmas sensoriem un reāllaika siltuma enerģijas patēriņa datiem no siltuma enerģijas mērītāja

Veikti eksperimenti matemātiskā modeļa izstrādei vasaras periodam, kad ir nepieciešama dzesēšanas enerģija. Liels skaits pētījumu datu RC modelēšanai un iegūto datu salīdzinājums ar reālo ēku mērījumu datiem nav pieejams, jo ēku ietekmē vairākas dinamiskas parametru izmaiņas dienas laikā (saules radiācija, cilvēku skaits ēkā, iekārtu lietošana un slodze). Tāpēc ir svarīgi analizēt matemātisko modeļi, ņemot vērā arī tādus datus, ko var sniegt reāllaika dati no *IoT* sensoriem.

2.2. Pielāgoto *ISO-13970-2018* modeļu eksperimentāla verifikācija

Eksperimentiem izvēlētās ēkas zonas

Eksperimentiem izvēlēta RTU Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātes ēka. Ēkā izmanto 13 ventilācijas sistēmās, ko apkalpo atsevišķas *PN4* zonas (*PN4* sistēma), zonas atrodas dienvidu pusē (vislielākā saules gaismas ietekme), un tai ir automātiskās žalūzijas, kas izvietotas ārpus logiem un

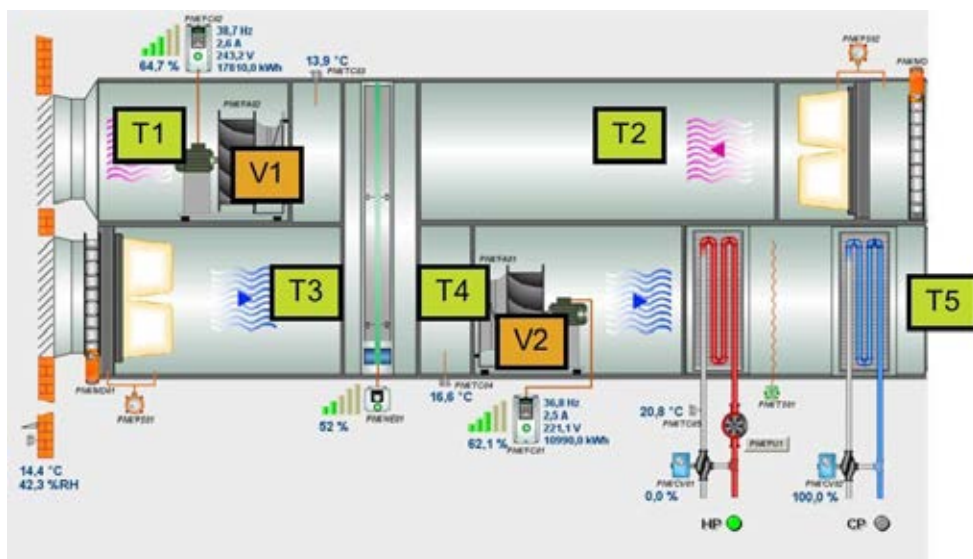
ko vada ĒEVS sistēma. *PN4* zona aptver zonu ar gaitenīem un birojiem no ēkas otrā līdz sestajam stāvam, un tā patērē visvairāk elektriskās enerģijas.



2.5. att. Fakultātes ēkas dienvidu fasāde (*PN4* zona).

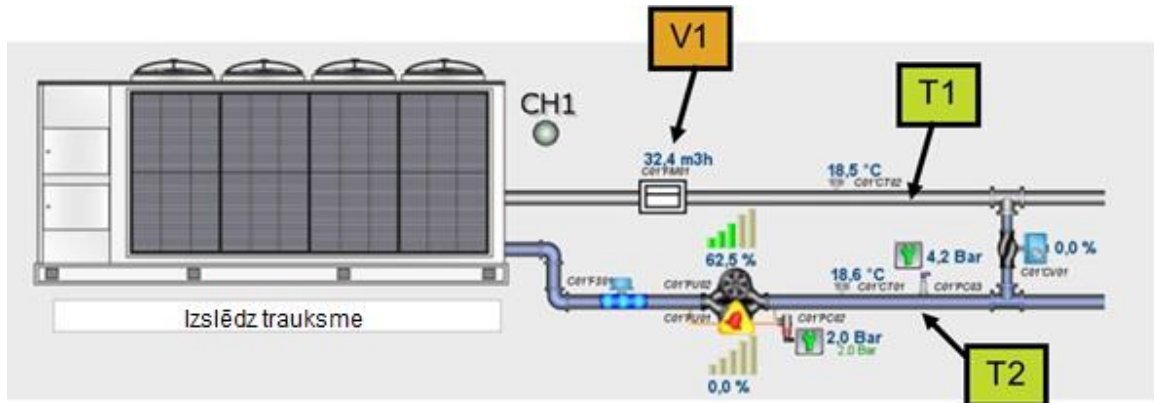
Izmantotā mērīšanas iekārta un inženiersistēmu infrastruktūra

Lai mērītu elektroenerģijas patēriņu no elektriskajām iekārtām, datoriem, apgaismojuma sistēmām, automātiskajām žalūzijām, kas atrodas *PN4* zonas birojos (visos stāvos), kopā tika uzstādīti astoņi tīkla analizatori, vienu izmantojot ēkas dzesēšanas sistēmas (dzesētāja) enerģijas patēriņa mērīšanai.



2.6. att. Sensoru novietojums *PN4* zonas ventilācijas sistēmā.

Lai iegūtu enerģijas plūsmu cauri *PN4* zonai, ir nepieciešams mērīt ārējā gaisa pieplūdi (pieplūde V2) un telpas gaisu (nosūce V1), ar pieciem temperatūras sensoriem (T1–T5), kuru novietojums redzams 2.6. attēlā. Arī temperatūras sensori (T1, T2) novietoti visas ēkas dzesēšanas sistēmā (2.7. att.), un izmantotas esošo dzesētāju plūsmas mērītāju (V1) digitālās izejas, lai iegūtu plūsmas datus ar 10 sekunžu intervālu.



2.7. att. Sensoru novietojums dzesēšanas sistēmā (visa ēka).

Tika monitorētas astoņas telpas, izmantojot *LoRa* temperatūras sensorus, kas tika instalēti iepriekš, aptverot visus stāvus *PN4* zonā. Katra *PN4* zonas stāva birojs aprīkots ar 2 x 28 W, 4 x 14 W vai 2 x 49 W T5 fluorescējošiem gaismekļiem ar kopējo uzstādīto jaudu 9,408 kW (neņemot vērā balasta zudumus).

***PN4* zonas reālā enerģijas patēriņa aprēķina metode**

PN4 zona izmanto vienu ventilācijas iekārtu. Lai aprēķinātu enerģijas patēriņu šai zonai, patērētā dzesēšanas enerģija tiek mērīta netieši, tādējādi enerģijas patēriņš tiek aprēķināts, izmantojot šādus mērītos datus:

- 1) temperatūra aiz rekuperatora, jo vasaras laikā tā dzesē ārā gaisu, ja telpas temperatūra ir zemāka;
- 2) ārā gaisa temperatūra pie dzesēšanas siltummaiņa. Ja šī temperatūra ir zemāka par temperatūru aiz rekuperatora, tad ir notikusi dzesēšana un ir nepieciešams aprēķināt patērēto enerģiju;
- 3) pieplūdes gaisa plūsmas apjoms. To mēra ar diferenciālu spiediena mērītāju pie ventilatora ieejas;
- 4) ārā temperatūra, iegūta no vietējās meteostacijas datiem;
- 5) ārā relatīvais mitrums, iegūts no meteostacijas. Ventilācijas sistēma tiek mērīta ar 10 sekunžu intervālu, savukārt meteostacija mēra ar 1 minūtes intervālu, tādējādi mērījumiem jābūt sinhronizētiem, izmantojot linearizētu *Matlab* sinhronizācijas funkciju.

Enerģijas patēriņa aprēķins ir veikts ar 60 sekunžu intervālu, izmantojot šādu vidējo vērtību aprēķina secību: ārā temperatūra (4); temperatūra aiz rekuperatora (1); pieplūdes gaisa temperatūra (2); gaisa plūsma (3); ārā mitrums (5). Datu aprēķina algoritms katrā laika intervālā veic dažādu parametru pārrēķinu. Patērēto enerģiju dzesēšanai aprēķina:

$$Q = m \cdot (h_2 - h_1) \quad (2.4.)$$

kur:

Q – patērētā enerģija gaisa dzesēšanai [kJ];

m – gaisa masa [kg];

h_2 – gaisa ievades entalpija [kJ/kg];

h_1 – gaisa entalpija aiz rekuperatora [kJ/kg].

Aprēķins tiek veikts ik pēc 60 sekundēm, tādējādi iegūstot enerģijas patēriņu katru minūti. Enerģijas patēriņš tiek aprēķināts, sareizinot gaisa entalpijas maiņu ar gaisa plūsmas masu 60 sekundēs.

6R2C Matemātiskā modeļa izveide

Modelis ir veidots *MatLab* vidē, tas sastāv no diviem apakšmodeļiem: 6R2C modelis un gaisa apstrādes iekārtas (AHU) modelis.

AHU modelis ir ļoti svarīgs, lai varētu simulēt reālu AHU aprīkojumu, kura parametri dinamiski mainās āra un iekštelpu parametru izmaiņu dēļ. Šis modelis ir izstrādāts atbilstoši reālajai PN4 zonas AHU iekārtai, kas tiek izmantota ēkā. AHU darbība:

- 1) atkarībā no āra temperatūras nosaka vajadzīgo telpas temperatūras iestatījuma punktu;
- 2) salīdzina telpas temperatūras iestatījuma punktu ar izmērīto telpas temperatūras vērtību AHU izejā un ar PID regulatoru pielāgo krītošā gaisa plūsmas temperatūru, lai sasniegtu telpas temperatūras iestatījuma punktu. Minimālās un maksimālās vērtības ir limitētas, šajā gadījumā no -14 °C līdz 26 °C ;
- 3) AHU modeli pārbauda, vai ir iespējams palielināt vai samazināt pieplūdes gaisa temperatūras vērtību, izmantojot rekuperatoru. Rekuperatora efektivitāte šajā ventilācijas sistēmā ir 61 %. Rekuperatora efektivitāti aprēķina, izmantojot formulu:

$$\mu_t = [t_2 - t_1] / [t_3 - t_1], \quad (2.5.)$$

kur: μ_t – siltuma pārneses efektivitāte;

t_1 – āra gaisa temperatūra pirms siltummaiņas; °C;

t_2 – pieplūdes gaisa temperatūra pirms siltummaiņas; °C;

t_3 – nosūces gaisa temperatūra, °C

Temperatūras vērtība iegūta no *IoT* sensoriem, kas sniedz atgriezenisko saiti reāllaikā. Pieņemts, ka vasaras režīmā pieplūdes temperatūra ir ne mazāka par 14 °C , ko sasniedz dzesējot, bet ne augstāka par āra temperatūru vai iespējamo temperatūru aiz rekuperatora atkarībā no tā, kura temperatūra ir augstāka.

Modelējot aprēķina nepieciešamo siltuma enerģijas daudzumu, lai sildītu gaisu, izmantojot rekuperatoru, līdz vēlamajai pieplūdes gaisa temperatūrai, ko regulē PID regulators.

Veikto eksperimentu apraksts

Lai pārbaudītu dzesēšanas režīma matemātisko modeli, tika veikti divi eksperimenti. Pirmā eksperimenta mērķis – noteikt PN4 zonas automātisko žalūziju ietekmi uz saules starojuma siltumenerģiju ēkā. Sākot eksperimentu 10.08.2018., visas žalūzijas tika paceltas plkst.12, un elektroenerģija tika atslēgta, tādējādi ēkas telpās uzkrājās 100 % saules enerģija, un ĒEVS sistēma tās neietekmēja. Eksperiments tika pabeigts 14.08.2018. plkst. 12.15, ļaujot ĒEVS kontrolēt žalūziju

sistēmu. Saskaņā ar metadatiem ir iespējams atrast līdzīgas eksperimentālās un normālās darbības dienas, tādējādi salīdzinot to enerģijas datus un iegūstot žalūziju sistēmas ietekmes vērtības. Tas varētu ļaut aprēķināt šādas sistēmas atdeves laiku, salīdzinot ar ietaupīto enerģiju, jebkurā jaunā ēkā. Reālie dati ļaus analizēt un salīdzināt modeļa simulācijas datu precizitāti. Otrā eksperimenta mērķis – noteikt sistēmas enerģijas patēriņu, kad žalūzijas ir nolaistas (sloksnes pagrieztas 75° leņķī), tādējādi saules gaisma telpās nenonāk, un maksimālais apgaismojums ir katrā telpā. Eksperiments tika veikts 23.08.2018, sākot plkst. 8.30, nolaižot žalūzijas, un tika pabeigts plkst. 17.30, paceļot žalūzijas. Visi mērījumi tika veikti paralēli, ļaujot precīzi aprēķināt enerģijas patēriņa datus un salīdzināt tos ar modelētajiem rezultātiem.

Ievades dati dzesēšanas enerģijas modelī

Automātisko logu žalūziju darbības režīms rada tiešu ietekmi uz enerģijas patēriņu, tāpēc modelis ņem vērā šo iedarbību, veicot automātisku korekciju optimālajiem apgaismojuma līmeņiem un temperatūras režīmiem telpās. Ēkas termisko režīmu ietekmējošo parametru dati tika iegūti no EVIF būvniecības projekta dokumentācijas, un būtiskie parametri ir sagrupēti 1.tabulā.

2.1. tabula

Pētāmās ēkas būtiskie raksturlielumi

Parametrs			
	Apraksts	Vērtība	Dimensija
<i>Agrid</i>	Kondicionētas telpas platība	1358	m ²
<i>Akop</i>	Kopējā platība, kas aptver ēku	1102	m ²
<i>Htr,op</i>	Siltuma pārneses zudumi caur gaismu necaurļaidīgām norobežojošām konstrukcijām	153,1	W/K
<i>Htr,log</i>	Siltuma pārneses zudumi cauri gaismu caurlaidīgām norobežojošām konstrukcijām (logi, stiklojums, durvis)	204,9	W/K
<i>Htr,iv</i>	Savienojošā konduktivitāte starp telpas temperatūras punktu T_{tiek} un robežas struktūras virsmas punktu T_{virsm}	21083	W/K
<i>Htr,im</i>	Savienojošā konduktivitāte starp robežas struktūras virsmas punktu T_{virsm} un termiskās masas punktu T_m .	43252,3	W/K
<i>Htr,am</i>	Savienojošā konduktivitāte starp termiskās masas punktu T_m un āra temperatūru T_{arg} .	153,5	W/K
<i>Cm1</i>	Zonas ārējo sienu termiskā masa	29,2	MJ/K
<i>Cm2</i>	Zonas iekštelpu termiskā masa	407,9	MJ/K
<i>Am</i>	Efektīvā termiskās masas virsma	4753,0	m ²

Matlab modelī simulācijai izmantoti šādi dati:

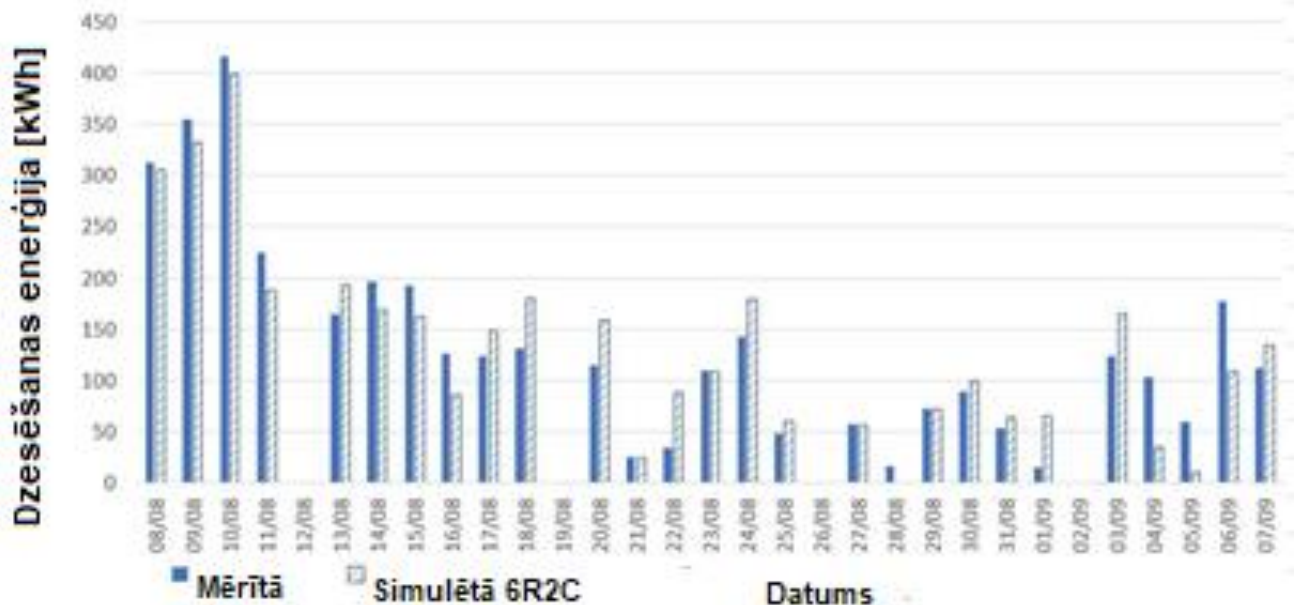
- ēkas konstruktīvie parametri;
- meteostacijas temperatūras un solārās radiācijas dati ēkas jumtam;
- cilvēku klātbūtnes grafiki un rezultējošais iekšējais siltuma guvums;
- eksperimentu ietekme uz aizkariem un apgaismojuma sistēmu.

Modelī 6R2C balstītie iegūtie dati un to analīze

6R2C modeļa simulācijas rezultāti periodam 08.08.2018.–08.09.2018. rāda, ka ir nepieciešama 3595 kWh dzesēšanas enerģija. Reālie mērījumi uzrāda, ka šajā periodā tika patērēti 3590 kWh. Iespējams secināt, ka mēneša perioda rezultātu novirzei ir maza ietekme. Taču, ja aplūko dienas periodu, novirzes vērtība ir daudz lielāka. Rezultāti apkopoti 2.8. attēlā, kur iekrāsotie stabiņi rāda mērītās vērtības, savukārt stabiņi, kas iezīmēti ar svītriņām, rāda simulētās vērtības.

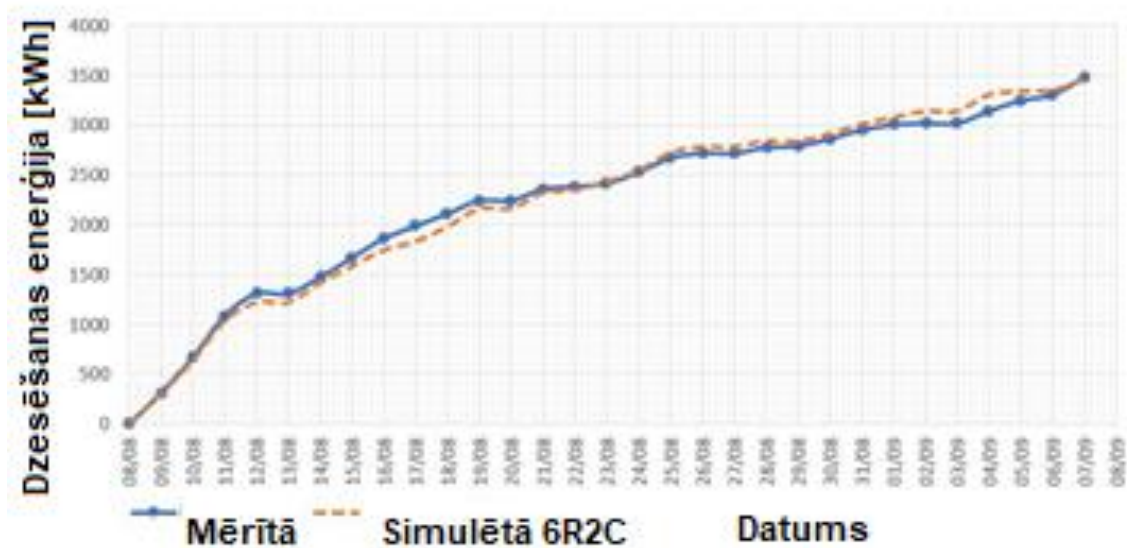
Ikmēneša kumulatīvais enerģijas patēriņš redzams 2.9. attēlā, kur nepārtrauktā līnija rāda mērītās vērtības, raustītā līnija – simulētās vērtības. Var ievērot, ka dažās dienās ir neliela novirze, taču var redzēt arī to, ka dažās dienās ir ļoti liela enerģijas patēriņa atšķirība. Dienās, kurās ir maza enerģijas patēriņa vērtība, var arī būt vislielākā kļūda, jo pat nelielas izmaiņas dažos faktoros var nozīmīgi ietekmēt modelēšanas rezultātu, piemēram, cilvēku klātbūtne (eksperimentā mērīts netika) ēkā varētu būt lielāka nekā paredzēts modelējot.

Tas ir skaidrojams ar to, ka septembrī, kad sākas studijas, cilvēku skaita svārstības dienas laikā bija lielākas.

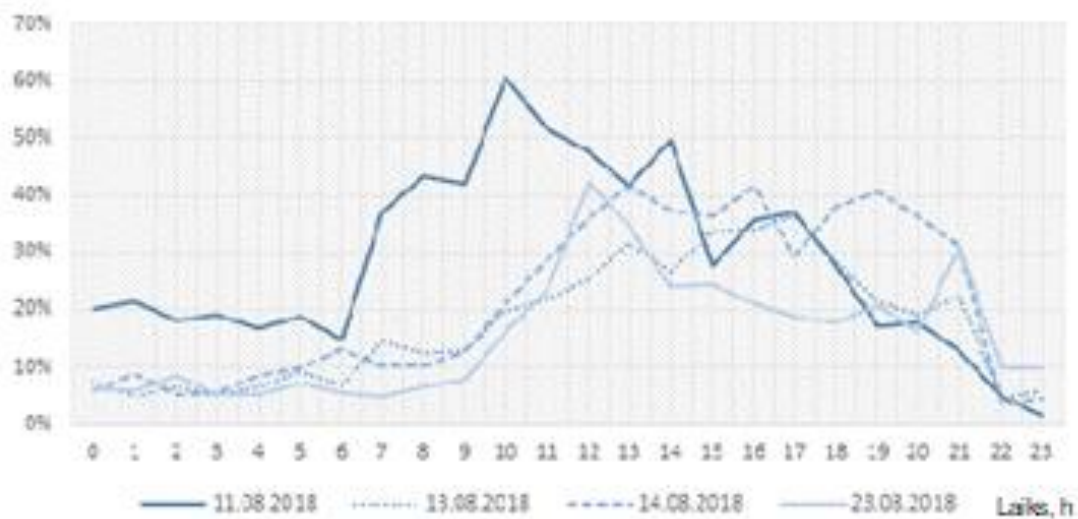


2.8. att. Dienas dzesēšanas enerģija patēriņš *PN4* zonai eksperimentālās ēkas dienvidu pusē.

Analizējot *PN4* zonas simulācijas rezultātus, jāņem vērā, ka šī zona ir savienota ar pārējo ēkas daļu un ventilācijas sistēmām, jo vienu gaitēņa daļu dzesē *PN4* ventilācijas sistēma, otru – cita sistēma. Tas ietekmē *PN4* zonas patērēto enerģiju, un, lai iegūtu precīzākus datus, nepieciešams aprēķināt savstarpējo mijiedarbību ar citām zonām. 2.8. attēlā redzams, ka mērītai un modelētai kumulatīvai enerģijas vērtībai katras dienas beigās ir 3,26 % novirze no vidējās vērtības, maksimālā novirze ir 7,62 % (17.08.2018.). Zonas savstarpēji skaidri korelē.



2.9. att. Kumulatīvais mēneša dzesēšanas enerģijas patēriņš PN4 zonai.



2.10. att. Dzesēšanas iekārtas (dzesētāja) enerģijas patēriņš attiecībā uz kopējo dienas ēkas patēriņu.

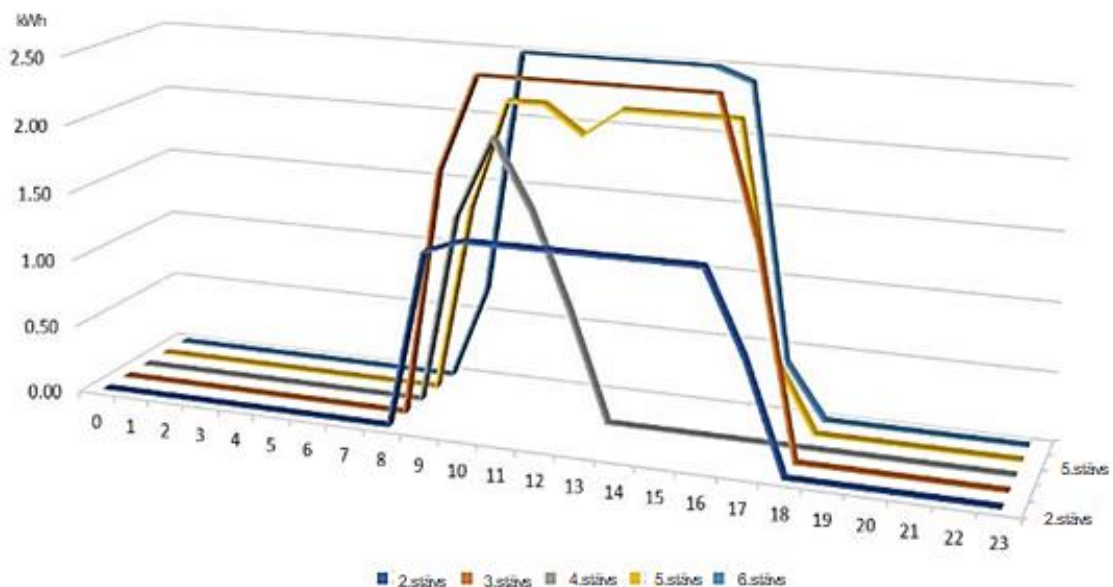
2.10. attēlā redzams, ka dzesētājs dienas laikā patērē 20–40 % no kopējā ēkas elektroenerģijas patēriņa, brīvdienās sasniedzot pat 50 %. Izmantojot tikai vidējo dienas patēriņa vērtību, var iegūt nepietiekošu informāciju, savukārt, ja izmanto vērtības pa stundām, var noteikt elektroenerģijas patēriņa maksimuma stundās, kad cenas enerģijas tirgos, piemēram, *NordPool*, ir visaugstākās, padarot iespējamu jaunas vadības stratēģijas izstrādi dzesēšanai.

Aplūkojot apgaismojuma sistēmas elektroenerģijas patēriņu (2.11. att.), var noteikt cilvēku klātbūtni telpās (reāli lejupielādēti komercdati), ko var izmantot uzlabotai (vai individuālai) AHU iekārtas vadībai, lai samazinātu patēriņu, kad dzesēšanas iekārta patērē papildus (piemēram, 98 kWh 19.08.2018.; 82 kWh 21.08.2018.; 87 kWh 22.08.2018.).

Ir lietderīgi aizvērt žalūzijas un izmantot mākslīgo apgaismojumu, tad enerģijas līdzsvars būs pozitīvs, jo dzesētājs patērēs mazāk enerģijas, lai dzesētu siltuma enerģijas guvumus no saules. Lai pierādītu šo apgalvojumu, nepieciešams analizēt pilnu gadu, veicot eksperimentus reizi mēnesī.

6R2C modeļa novērtējums dzesēšanai

Lai novērtētu izveidotā modeļa rezultātus, tika izmantota *ASHRAE CVRMSE* (vidējās kvadrāta kļūdas variācijas koeficients) metode [36]. *CV RMSE* vērtējuma rezultātā par dienas patēriņu periodā no 8. augusta līdz 8. septembrim tika iegūta vērtība 28,62 %. Šāda novirze ir uzskatāma par labu rezultātu, jo saskaņā ar *ASHRAE* vadlīnijām šai vērtībai ir jābūt < 30 %, lai to varētu izmantot enerģijas bāzes līnijas noteikšanai. Tomēr tas uzrāda arī potenciālu precizitātes uzlabošanai, kas būtu iespējams, ja būtu pieejami precīzāki dati par siltumenerģiju no cilvēkiem, elektriskajām iekārtām un no pašas zonas.



2.11. att. Apgaismojuma sistēmu elektroenerģijas patēriņš EVIF ēkā no otrā līdz sestajam stāvam

CV (RMSE) - kļūdas vērtība;

E_m – izmērītā enerģijas vērtība;

E_{mod} – modelētā enerģijas vērtība;

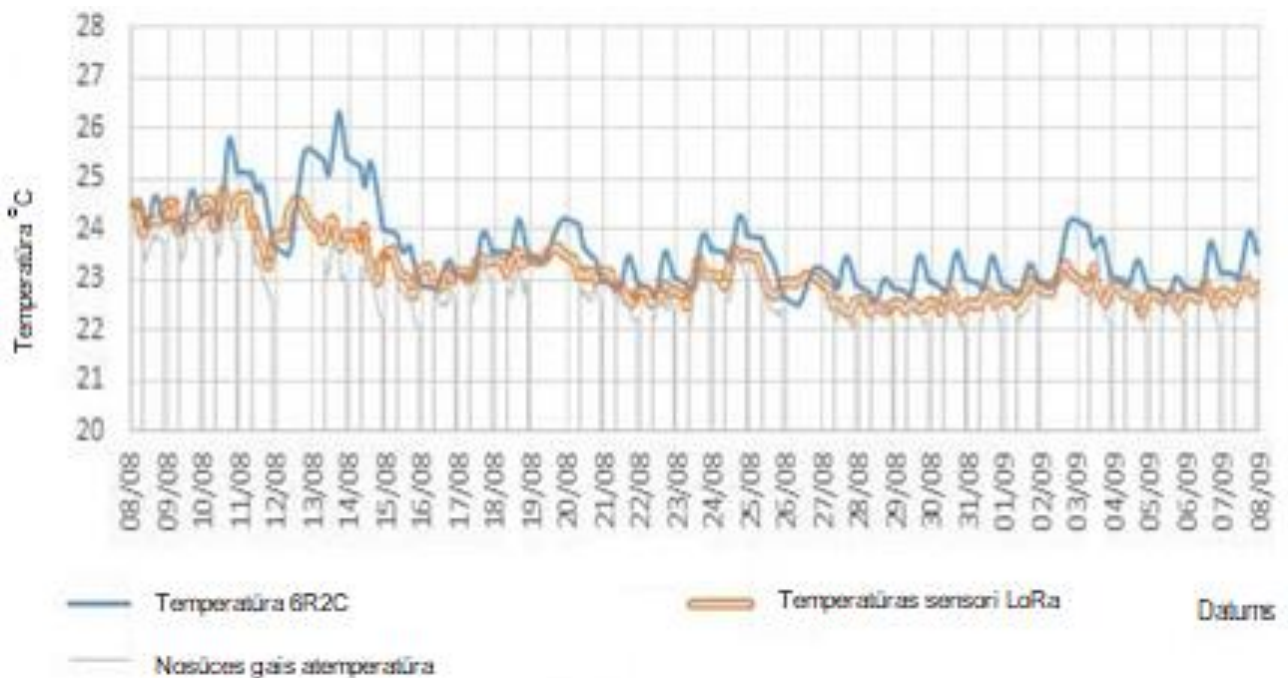
n – mērījumu skaits;

$E_{m,i}$ – vidējā mērītā enerģijas vērtība eksperimenta periodā.

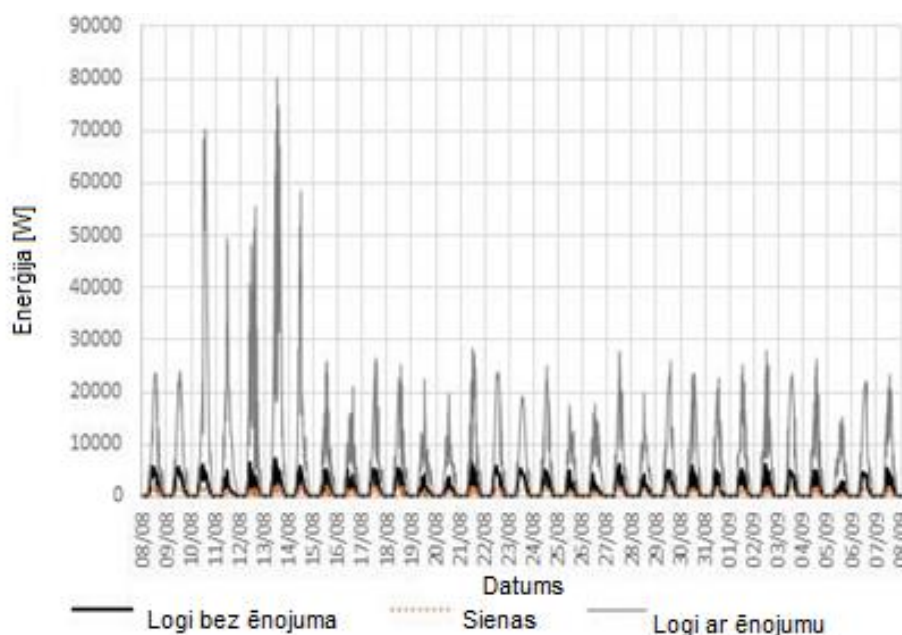
Eksperimenta dienas laikā žalūzijas bija aizvērtas, un telpās visu dienu tika izmantots mākslīgais apgaismojums. *PN4* zona ir ēkas dienvidu pusē, tāpēc, aizverot žalūzijas (arī uzlabojot cilvēku komfortu, kuri strādā telpā), samazinās saules radiācijas ietekme un dzesēšanas elektroenerģijas patēriņš. Rīta

perioda laikā, kad solārai radiācijai ir vislielākā ietekme uz ēkas logiem (no plkst. 8 līdz 12), apgaismojuma sistēma patērēja 38,2 kWh (telpas bija apdzīvotas 100 %). Dzesēšanas iekārtas kopējais patēriņš (24 h) šī eksperimenta dienas laikā (23.08.2018.) bija 323,1 kWh. Salīdzinot iegūtos dzesēšanas iekārtas patēriņa rezultātus ar citām metodoloģiski “līdzīgām” dienām (solārā radiācija, gaisa temperatūra un vēja ātrums), redzams, ka citās dienās tā papildus patērē: 12 kWh – 14.08.2018.; 50 kWh – 15.08.2018.; 34 kWh – 16.08.2018.; 46 kWh – 17.08.2018.; 36 kWh – 18.08.2018.

Tāda pati tendence var tikt novērota arī “nelīdzīgās” dienās. Ar matemātiskā modeļa palīdzību ir iespējams iegūt arī vidējās *PN4* zonas telpas temperatūras (2.12. att.), tādējādi iespējams tās salīdzināt ar mērītajām vērtībām no *LoRa* sensoriem abās telpās un ventilācijas bloka izvadi. Jāņem vērā tas, ka ventilācijas bloks nakts laikā ir izslēgts. Atšķirības starp vērtībām var izskaidrot ar faktu, ka ventilācijas izvades kombinētais *6R2C* simulācijas modelis neņem to vērā, taču enerģijas pārvešana starp sienām un telpām joprojām notiek, galvenām kļūdām rodoties svētdienā vai pirmdienā.



2.12. att. Vidējās *PN4* zonas mērīto un modelēto temperatūru vērtību salīdzinājums.



2.13. att. Siltumenerģijas guvums no saules starojuma.

6R2C balstītais modelis dod iespēju aprēķināt ēkas siltuma enerģijas guvumu no saules gaismas, kas nāk no sienām, logiem ar žalūzijām un logiem bez žalūzijām. 2.12. attēlā redzams, ka galvenie enerģijas guvumi nāk no ēkas dienvidu pusē logiem, neskatoties uz to, ka tiek izmantotas automātiskās logu žalūzijas.

Nepieciešamais enerģijas patēriņš tiek aprēķināts tieši no temperatūras starpības starp temperatūru aiz rekuperatora un nepieciešamo temperatūru pieplūdē, tāpēc ventilācijas modeļa vadības algoritmam ir liela ietekme uz precizitāti. AHU modeļa optimizācijas procesa laikā tika novērots, ka PI veida vadības algoritma proporcionālajām (P) un integrējošajām (I) vērtībām ir būtiska ietekme uz rezultātiem. PI vadība var tikt pielāgota, līdz tiek sasniegta nepieciešamā precizitāte.

SECINĀJUMI

1. Simulējot ar 6R2C modeli no 8. augusta līdz 8. septembrim, tika konstatēts, ka nepieciešamā dzesēšanas enerģija PN4 zonai ir 3595 kWh un mērījumi uzrāda vērtību 3590 kWh, tādējādi var secināt, ka enerģijas patēriņa kļūda šajā mēnesī ir mazāka par 0,14 %. Aprēķinot kumulatīvās vērtības novirzi katras dienas beigās attiecībā uz mērīto vērtību, tiek iegūta vidējā novirze – 3,26 % no reālās ēkas, savukārt maksimālā novirze šim periodam bija 7,62 %, kas tika iegūta 17. augustā.
2. Modelētās enerģijas patēriņa līknes ir līdzīgas mērītajām līknēm, tādējādi ir praktiski izmantot šo pieeju reālās vadības sistēmās. CV(RMSE) modeļa novērtējuma rezultātā dienas patēriņam periodā no 8. augusta līdz 8. septembrim tika iegūta vērtība 28,62 %, kas atbilst ASHRAE standartam (< 30 %). Ir grūti noteikt siltuma enerģijas guvumus no cilvēkiem, kas atrodas ēkā, jo viņu skaits dienas laikā ir mainīgs, tādējādi, lai uzlabotu modeļa precizitāti, ir nepieciešami klātbūtnes sensori klātesošo cilvēku uzskaitēi.

3. *6RIC* modelis, kas tika lietots dzesēšanas enerģijas simulācijai, tika papildināts ar ēkas papildu iekšējo termisko masu (*C*), tādā veidā iegūstot jaunu *6R2C* modeli, kas sniedz precīzāku iekštelpu temperatūru variāciju simulāciju. Tika ieviests arī jauns *AHU* modelis, kas sniedza precizitātes uzlabojumus gan vasaras (dzesēšanas enerģija), gan ziemas (siltuma enerģija) periodu enerģijas vērtību aprēķiniem.
4. Eksperimenta rezultāti rāda, ka, ja ventilācijas sistēma tiek atslēgta svētdienās (ēkā nav cilvēku), var ietaupīt 7 % ventilācijas sistēmas patēriņu, ja netiek izmantota ventilācijas sistēma enerģijas maksimuma brīžos, potenciāli var ietaupīt 27 % enerģijas izmaksu (EUR vērtībās) no “fiksētās likmes” vai 25 % no *Nordpool* cenām. Ja šis patēriņu tiek novirzīts tikai par vienu stundu agrāk, var viegli ietaupīt 3 % no šīm izmaksām. Arī otrs eksperiments rāda, ka ir lietderīgi nolaist žalūzijas un izmantot mākslīgo apgaismojumu, jo pārsvarā gadījumu enerģijas līdzsvars var būt pozitīvs, jo dzesētājs izmantos vairāk enerģijas, lai dzesētu siltuma enerģijas guvumus no saules gaismas.

Konstatēts, ka modelis darbojas un ievades dati no *IoT* sensoriem uzlabo modeļa precizitāti un iegūtos rezultātus, tādējādi tas pierāda arī *IoT* sensoru nepieciešamību un to lietojumu jaunām viedām vadības tehnikām, kas izmantojamas ĒEVS.

3. NODAĻA. ENERĢIJAS SADALES TĪKLU VADĪBAS SISTĒMU ATSEVIŠĶU POSMU ENERGOEFEKTIVĀ SNIEGUMA UZLABOŠANAS IESPĒJAS

Enerģijas gala patērētājiem piegādātā enerģijas (šīs nodaļas pētījuma tvērumā – siltuma enerģija) daudzuma iespējami precīza sakrītība ar patēriņa dinamiku ir būtiska, lai panāktu minimālu enerģijas lietojumu siltuma enerģijas sadales sistēmā kopumā. Šī mērķa sasniegšanai turpmāk tiks aplūkotas divas iespējas.

1. Saglabājot nemainīgu gaisa sadalījumu un līdz ar to komforta apstākļus zonās ventilējamā telpā, Koanda efektu pieplūdes gaisa strūkļas pielipšanas vietā pie šīs telpas sienas, iestatot pieļaujama spiediena krituma robežas gaisa apstrādes tehnoloģiskā iekārtā.
2. 1. punktā aplūkoto risinājumu papildinot ar modulēta siltumnesēja cirkulāciju gaisa apstrādes tehnoloģiskajās iekārtās.

Pirmās iespējas risinājuma oriģinalitāte ir aprakstīta patenta pieteikumā “Automatizēta temperatūras regulēšanas sistēma telpās ar noturīgu gaisa sadalījumu”. Patenta pieteikums attiecas uz elektrotehnoloģiju automatizācijas nozari, konkrēti – uz biroja vai noliktavas telpu apkures, ventilācijas un gaisa kondicionēšanas (AVGK) sistēmas automātiskās vadības sistēmu, tās iestatītos parametrus koriģējot tā, lai telpas temperatūra sensora novietojuma punktā saglabātos gaisa padeves strūkļas pielipšanas efekts (Koanda efekts) [37].

Literatūrā aprakstīta automātiskā ventilācijas individuālā gaisa sadales metode slēgtā telpā un atbilstoša sistēma, lai saglabātu gaisa padevi individuālai darba zonai [38]. Katrā individuālā darba zonā telpā ir atsevišķa gaisa pieplūde ar zemu gaisa ātrumu. Gaisa apstrādi veic kopējā iekārtā un pēc references darba vietas, iestatījumi regulē temperatūru visās individuālajās darba vietās telpā. Šādi var ietaupīt enerģiju gaisa apstrādei un precīzāk noteikt parametrus darba zonās, taču šāds gaisa sadalījums nerada iespēju vadīt ventilācijas sistēmu tā, lai telpā veidotos un saglabātos Koanda efekts.

Ir zināmas gaisa padeves sistēmas, kas regulēšanas diapazonā pielāgo gaisa padeves regulēšanas vārstu lāpstiņu profilus [39]. Taču zināmās sistēmas [38, 39] neļauj saglabāt iestatīto gaisa sadalījumu telpā visā ventilācijas sistēmas regulēšanas diapazonā.

Ventilācijas sistēma, ka Koanda efektu ventilējamā telpā nodrošina daļēji, jaucot pieplūdes un nosūces gaisa strūkļas, ir šī izgudrojuma prototips. Prototipa sistēma (3.1. att.) ir ierīce (101) telpas (3) gaisa attīrīšanai, pieplūde (19) un nosūce (21), gaisa sajaukumu prototipa sistēmā ierobežo Koanda efekts. Vertikāli novietotā gaisa apstrādes iekārta (103) saistīta ar nosūces lejasdaļu (104) un pieplūdes augšdaļu (105). Regulēšanas vārsts (106) iedarbojas tā, lai virzītu iesūces gaisu (A) gan iekšā, gan ārā. Iesūces sprausla (118) rada vertikālu sūkšanas virsmu (Sa), lai ievirzītu iesūces gaisu (A) paralēli nosūces gaisa vadam (55), to piesaistot grīdai (6) ar Koanda efektu (C).

Pieplūdes sprausla (129), radot griestu virsmas efektu (20), veido priekšējo poraino plūsmas virsmu (Ss). Šī sprausla rada gaisa strūkļu (19), kas pateicoties Koanda efektam piekļaujas griestiem (20). Gaisa A apstrāde notiek iekārtā (127). Iesūces virsmas (Sa) aktīvā daļa (Sae) ir zem pieplūdes virsmas (Ss) aktīvās daļas (Ssc) (3.1. att.). Prototipa trūkums ir tas, ka nav iespējams saglabāt noturīgu gaisa sadalījumu, kas ir balstīts uz gaisa sadalījuma aprēķina, ievērojot Koanda efektu.

3.1. Noturīga gaisa sadalījuma vadība telpās

Izgudrojuma mērķis ir saglabāt iestatīto padeves gaisa sadalījumu telpā, ievērojot spiediena starpības ierobežojumus starp tehnisko un kondicionējamo telpu un temperatūras novirzi padeves gaisa

strūklas pielipšanas punktā. Temperatūras sensora novietojums strūklas pielipšanas punktā dod iespēju gaisa padevi telpā regulēt tā, lai šī padeve notiktu determinētā kondicionējamās un tehniskās blakus telpas gaisa spiediena starpības robežās.

Ja pieplūdes temperatūra ir vienāda ar telpas gaisa temperatūru, tas ir labvēlīgs apstākļi Koanda efekta uzturēšanai. Veicot pētījumu, maksimālā pieplūdes (T pieplūdes) un telpas (T telpas) gaisa temperatūru starpība, pie kurām novērojams Koanda efekts, bija 8 °C, piemēram, T pieplūdes ir +16 °C, T telpas – +24 °C. Pieplūdes gaisa kustības ātrums jāuztur minimāls ($v < 0,2$ m/s), lai nerastos turbulence, kas izraisa haotisku gaisa cirkulāciju telpā [40]. Savukārt 10 Pa (10 N/m²) pārspiediens ir neliela vērtība, un pat pie nenozīmīga gaisa strūklas kropļojuma (telpas gaisa spiediena svārstības un turbulence) šī vērtība var kristies vai pieaugt 5–10 Pa robežās. Pieļaujamā spiediena starpība uz padeves gaisa difuzora starp kondicionējamo telpu un blakus telpu (pārspiediens) nedrīkst pārsniegt 20 Pa, lai saglabātu Koanda efektu telpas temperatūras sensora novietojuma vietā pieplūdes gaisa strūklas pielipšanas punktā.

Koanda efekta saglabāšana, uzstādot temperatūras sensoru padeves gaisa strūklas pielipšanas vietā, nepieļauj iestatītā gaisa sadalījuma kropļojumu kondicionējamā telpā un samazina elektroenerģijas patēriņu gaisa apstrādes ventilatora elektrodzinējam, saglabājot tā griešanās ātrumu minimālās nepieciešamības robežās, ko nosaka pieļaujamā spiediena starpība starp telpām.

No prototipa izgudrojuma sistēma atšķiras ar to, ka, lai nodrošinātu ieregulēto gaisa sadalījumu telpā, saglabājot pieplūdes gaisa strūklas pielipšanu pie vertikālās sienas (saglabājot Koanda efektu) (3.2. att.):

- 1) sistēmā uzstādīts vismaz viens spiediena diferences mērītājs (132) starp tehnisko (B) un ventilējamo (kondicionējamo) telpu (3);
- 2) spiediena diferences mērītājs (132) nepieļauj spiediena starpību starp ventilējamo (kondicionējamo) (3) telpu un tehnisko telpu (B), kas ir lielāka par 20 Pa;
- 3) telpā vismaz viens temperatūras sensors (131) ir uzstādīts pieplūdes gaisa strūklas pielipšanas zonā (Z).

Patenta pieteikums ir paskaidrots ar vairākiem zīmējumiem.

3.1. att. Prototipa principiālā shēma ar galvenajām komponentēm [3]: automātiskā temperatūras regulēšanas sistēma (ST) sastāv no ierīces (101) ventilējamās telpas (3) gaisa attīrīšanai, pieplūdi (19) un nosūci (21), kuru gaisa sajaukumu ierobežo Koanda efekts. Vertikāli novietotā gaisa apstrādes iekārta (103) saistīta ar nosūces lejas daļu (104) un pieplūdes augšdaļu (105). Plūsmas regulēšanas vārsts (106) iedarbojas tā, lai virzītu iesūces gaisu (A) gan iekšā, gan ārā. Iesūces sprausla (118) rada vertikālu sūkšanas virsmu (Sa), lai ievirzītu iesūces gaisu (A) paralēli nosūces gaisa vadam (55), to piesaistot grīdai (6) ar Koanda efektu (C). Pieplūdes sprausla (129), radot griestu virsmas efektu (20), veido priekšējo poraino plūsmas virsmu (Ss). Šī sprausla rada primāro gaisa strūklu (19), kas Koanda efekta dēļ piekļaujas griestiem (20). Gaisa A apstrāde notiek iekārtā (127). Iesūces virsmas (Sa) aktīvā daļa (Sae) ir zem pieplūdes virsmas (Ss) aktīvās daļas (Ssc).

3.3. att. Automātiskā temperatūras regulēšanas sistēma (ST) telpā noturīgam gaisa sadalījumam: ventilējamā (kondicionējamā) telpā (3) caur pieplūdi (19) pieplūdes gaiss; pieplūde (19) notiek secīgi caur pieplūdes ventilatoru (136), plūsmas regulējošo vārstu (130), gar temperatūras sensoru (133) un caur difuzoru (138); difuzors (138) ir robeželements pieplūdei (19) un ventilējamai (kondicionējamai) telpai (3); ventilējamai (kondicionējamai) telpai (3) ir nosūce (21), kas notiek secīgi gar temperatūras sensoru (134), caur plūsmas regulējošo vārstu (106), nosūces ventilatoru (137). Sistēma (ST) var ietvert vienu vai vairākus regulēšanas vārstus (106, 130), kas novietoti pieplūdē (19) vai nosūcē (21), vai abos. Pieplūdes ventilators (136) un nosūces ventilators (137) ir savienoti ar vadības bloku (135).

Ventilējamā (kondicionējamā) telpā (3) ir ievietots vismaz viens temperatūras sensors (131) un vismaz viena spiediena diferences mērītāja (132) viena no mērījumu veikšanas daļām (132A). Savukārt otra spiediena diferences mērītāja (132) mērījumu veikšanas daļa (132B) atrodas blakus tehniskajā telpā (B). Spiediena diferences mērītājs (132) veic spiediena starpības mērījumu ventilējamā (kondicionējamā)

telpā (3) un blakus tehniskajā telpā (B), iegūtos mērījumu datus nosūta uz vadības bloku (135). Temperatūras sensors (131) uzstādīts pieplūdes gaisa strūklas pielipšanas punktā (Z). Temperatūras sensori (131, 133, 134) nosūta temperatūras mērījumus uz vadības bloku (135). Vadības bloks (135) ir savienots ar plūsmas regulēšanas vārstiem (130) un (106), un atkarībā no iegūto automatizētas temperatūras regulēšanas sistēmas (ST) sensoru datiem un vadības algoritma veic regulēšanas vārstu (130), (106) vadību, ja spiediena starpība starp ventilējamo (kondicionējamo) telpu (3) un blakus tehnisko telpu (B) pārsniedz 20 Pa, plūsmas regulējošais vārsts (130) tiek piegriezts, tādā veidā ventilējamā (kondicionējamā) telpā (3) veidojas un saglabājas Koanda efekts (C).

3.3. a att. Gaisa plūsmas datordinamiskā simulācija pieplūdes gaisa plūsmai, kas rada stabilu Koanda efektu pieplūdes gaisa plūsmai $\Delta p < 20$ Pa ($v < 0,2$ m/s), kur v – pieplūdes gaisa ātrums, m/s; ΔP – spiediena starpība starp tehnisko un kondicionējamo telpu.

3. b att. Gaisa plūsmas datordinamiskā simulācija pieplūdes gaisa plūsmai, kas rada kroplotu Koanda efektu gaisa plūsmai $\Delta p \geq 20$ Pa ($v > 0,2$ m/s).

Lai sasniegtu augstu iekštelpu gaisa kvalitāti, telpā nepieciešams ievadīt pietiekamu gaisa apjomu, kā arī nodrošināt vēlamo gaisa sadali. Gaisa difuzors regulē gaisa pieplūdes plūsmu atkarībā no apkalpojamās telpas siltuma guvumiem un zudumiem. Kad gaiss tiek padots paralēli telpas sienai, starp šo sienu un pieplūdes gaisa strūklu parādās zemspiediena starpslānis, kas izsauc gaisa strūklas piekļaušanos sienas virsmai (Koanda efekts).

Lai pētītu Koanda efekta ietekmi uz gaisa izplatīšanos telpā, aerodinamikas laboratorijā tika veikti mērījumi dažādiem pieplūdes gaisa ātrumiem un dažādām spiediena starpībām starp testa telpu un tehnisko telpu. Testi tika veikti speciāli projektētā testa kamerā, kas imitēja biroja telpu. Tajā tika uzstādītas 24 mērījumu zondes trīs līmeņos: stāvoša cilvēka pēdu, gurnu un galvas zonā, kas ir saskaņā ar [40] standartu. Katrā no šiem punktiem tika veikti gaisa temperatūras un ātruma mērījumi. Testa kamera no apkārtējās telpas tika izolēta tā, lai tā būtu izotermiska un uzturētu 4 K un 8 K starpību starp pieplūdes un telpas gaisa temperatūrām. Vienlaikus tika mērīta spiediena starpība starp kondicionējamo telpu un tehnisko telpu.

Mērījumi tika reģistrēti ik 20 sekundes 2 minūšu garumā, kas ļāva iegūt pietiekami precīzus rezultātus:

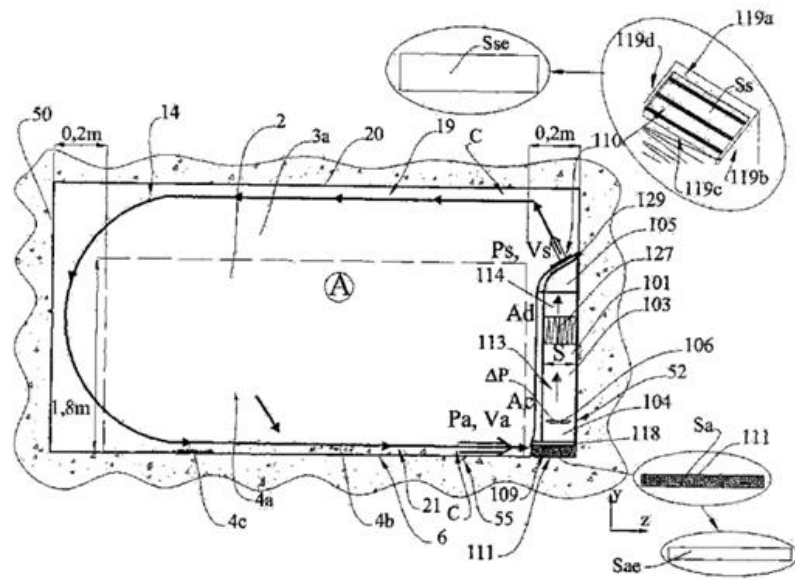
- $v < 0,2$ m/s – pieplūdes gaisa kustības ātrums jāuztur minimāls, lai nerastos turbulences, kas izraisa haotisku gaisa cirkulāciju telpā [40];
- jebkuras siltumslodzes, spiediena svārstības, cilvēku kustība, fiziski šķēršļi veicina turbulenci un tādējādi var izjaukt Koanda efektu.

3.2. att. ar iekārtu izgudrojuma paņēmiena realizācijai ir sniegti spiediena raksturojošie parametri eksperimentā laikā.

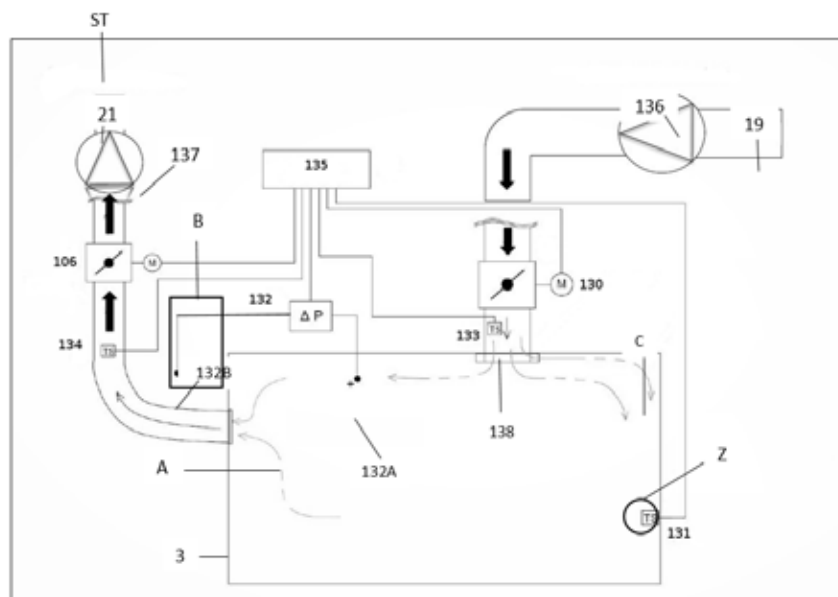
Gaisa plūsmas datordinamiskā simulācija divām dažādām pieplūdes gaisa plūsmām, kas rada dažāda spiediena starpības starp tehnisko un kondicionējamo telpu, kas rada noturīgu un kroplotu Koanda efektu, redzama 2.3. a un 2.3. b zīmējumos:

2.3. a zīm.: stabils Koanda efekts pieplūdes gaisa plūsmai $\Delta p < 20$ Pa ($v < 0,2$ m/s);

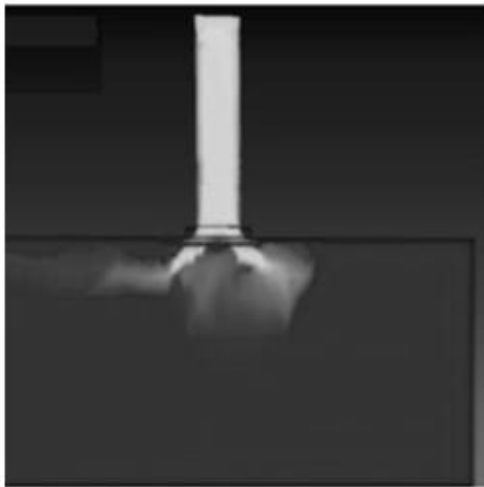
2.3. b zīm.: kroplots Koanda efekts gaisa plūsmai $\Delta p \geq 20$ Pa ($v > 0,2$ m/s), kur v – pieplūdes gaisa ātrums, m/s; ΔP – spiediena starpība starp tehnisko un kondicionējamo telpu.



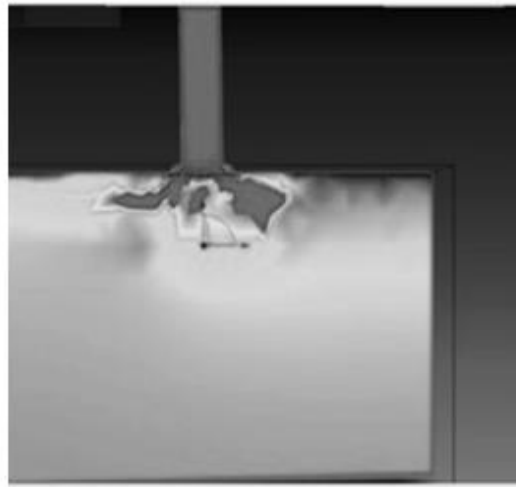
3.1. att. Automatizēta ventilācijas sistēma gaisa sadalei slēgtā telpā ar gaisa padevi katrā individuālā telpas zonā.



3.2. att. Ventilācijas sistēmas gaisa sadalījuma pieplūdes gaisa strūklu pielipšanu pie vertikālas sienas (saglabājot Koanda efektu)



3.3. a att. Stabils Koanda efekts.



3.3. b att. Kropļots Koanda efekts.

3.2. Cilvēka komforta līmenis biroju ēkas enerģijas taupīšanas simulācijas modelī

Kopējais ēku un būvju enerģijas patēriņš būvniecības nozarē patlaban veido 41 % no kopējā enerģijas patēriņa Eiropas Savienībā (ES). Apkurei un gaisa kondicionēšanai tiek izmantoti 85 % no kopējā enerģijas patēriņa [41].

Tāpēc energoefektīvu ēku projektēšanas un būvniecības laikā galvenais mērķis ir efektīvāk izmantot enerģijas resursus ēku energoapgādē. To var panākt, izmantojot novatoriskus risinājumus, kas ir tehniski iespējami, ekonomiski pamatoti un pieņemami arī no vides un sociālā viedokļa. Tajā pašā laikā šādiem risinājumiem nevajadzētu mainīt cilvēku ierasto dzīves veidu [42–50].

Tomēr tas neizslēdz iespēju palielināt ēku energoefektivitāti siltumapgādes sistēmu optimizācijas ceļā:

- paaugstinot enerģijas apgādi atsevišķu elementu energoefektivitātei;
- paaugstinot sistēmas atsevišķu elementu efektivitāti;
- optimizējot regulēšanas loku posmu enerģētisko sniegumu;
- optimizējot siltuma ķēdes parametrus;
- salāgojot gala patērētāju slodzes profilu ar enerģijas avotu sniegumu;
- optimizējot ēku siltuma slodzes profilu utt.

Viens no galvenajiem veidiem siltumenerģijas ierīču efektivitātes paaugstināšanai nākotnē ir siltumapmaiņas iekārtu uzlabošana, ko var realizēt, ieviešot efektīvas siltuma pārnese intensifikācijas metodes.

Veicot siltuma pārnese intensifikāciju, tiek palielināts siltuma daudzums, kas tiek pārnesti caur siltummaiņa virsmu, ļaujot panākt labvēlīgāku attiecību starp siltumpārnesi un pārsūknētā siltumnesēja apjomu [45–56]. Šādas nestablas plūsmas var radīt mākslīgi vai arī tās var parādīties siltumenerģijas iekārtas darbības laikā.

Veiktie eksperimentālie pētījumi par mainīgām plūsmām ventilācijas kanālos un sildķermeņos [57–62] pierāda, ka plūsmas pulsācijas var ievērojami ietekmēt hidrodinamiku un siltuma pārnese.

Nav izpētīts, kā nestacionāri procesi ventilācijas kanālos un sildķermeņos, kas uzstādīti dzīvojamā zonā, kur atrodas cilvēki, ietekmēs komforta līmeni.

Tāpēc jāveic skaitliski pētījumi par pulsējoša siltumnesēja plūsmas, kas pienāk paneļa sildķermenim, ietekmi uz tā siltuma jaudu, un jānosaka siltuma jaudas pulsāciju ietekme arī uz komforta līmeni cilvēkiem, kuri atrodas noslēgtā kondicionētā telpā.

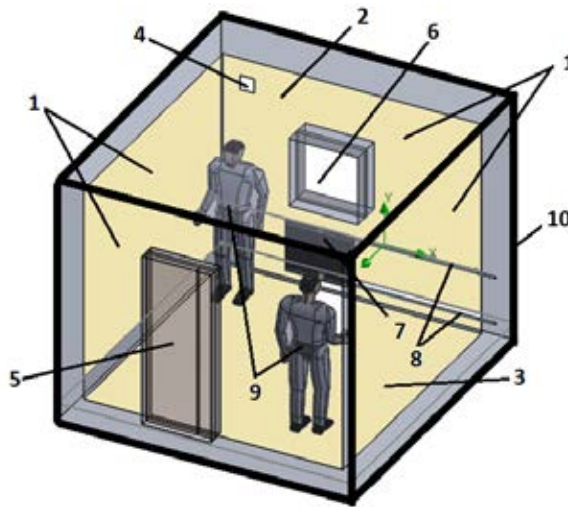
Skaitliskā modelēšana tika veikta ar programmatūras *SolidWorks / FlowSimulation CAD / CFD / HVAC* kompleksu [63]. Tajā tika atrisināta pilnīga Navjē–Stoka vienādojumu sistēma un enerģijas vienādojums, izmantojot $k-\varepsilon$ turbulences modeli nestacionārā formulējumā.

Uzdevuma skaitliskā risinājuma sarežģītības dēļ un aprēķina laika samazināšanas nolūkā tika nolemts izmantot vienkāršotu biroja telpas trīsdimensiju modeli, izslēdzot mēbeļu ietekmi.

Risinājuma precizitāte tika novērtēta, pamatojoties uz telpas modeli uzstādītā *PII* tipa paneļa radiatora siltuma jaudas konverģences rezultātiem, salīdzinot ar ražotāja deklarēto siltuma jaudu.

Biroja telpas fiziskais modelis

Biroja telpas ģeometriskās imitācijas 3D modelis tika uzbūvēts, izmantojot *SolidWorks CAD* programmatūru. Problēmas skaitliskā risinājuma sarežģītības dēļ telpas kopējie izmēri tika izvēlēti salīdzinoši nelieli. Telpas platības kopa $S = 3000 \times 3000$ mm, griestu augstums 2500 mm. Plānotā siltuma režīma aprēķins, ņemot vērā ēkas konstrukciju siltuma vadītspēju. Biroja telpas 3D modelis redzams 3.4. attēlā.



3.4. att. Biroja telpas 3D modelis: 1 – sienas; 2 – griesti; 3 – grīda; 4 – ventilācijas iepļūde; 5 – durvis; 6 – logs; 7 – radiators; 8 – caurules; 9 – cilvēki; 10 – aprēķinātais vērtību apgabals.

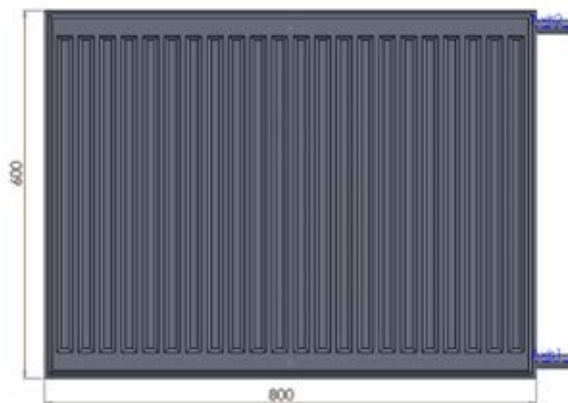
Visi nepieciešamie sākotnējie un robežnosacījumi tika noteikti programmatūras pakotnes *SolidWorks* plūsmas simulācijas daļā.

Tika pieņemts, ka sienas 1. pozīcijā ir ķieģeļu mūris ar blīvumu – 1700 kg / m^3 , siltuma vadītspēju – $0,62 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$, īpatnējo siltumu – $800 \text{ J / (kg} \cdot \text{K)}$. Logi (6. poz.) un durvis (5. poz.) tika uzskatīti par stikla pakešu logiem, kuru blīvums – 2500 kg / m^3 , siltumvadītspēja – $0,699 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$, īpatnējais siltums – $837 \text{ J / (kg} \cdot \text{K)}$.

Svaiga gaisa ieplūde telpā notiek caur ventilācijas pieplūdes atveri (4. poz.), kas atrodas sienā un ir savienota ar āra gaisu. Ventilācijas atveres izmēri ir 170 x 170 mm, pieplūdes gaisa ātrums 0,006 m³/s, gaisa temperatūra – 15 °C.

Telpu apsilda *P11* tipa tērauda paneļa radiators (7. poz.), tā gabarīti – 600 x 800 mm, siltuma jauda – 861 W, darba spiediens – līdz 10 bāriem. Sildķermenis ir paredzēts apsildāmai platībai līdz 10 m². Turpgaitas un atgaitas cauruļu (8. poz.) iekšējais diametrs – 20 mm. Radiators ir izgatavots no nerūsējošā tērauda: blīvums – 7900 kg/m³, siltumvadītspēja – 16,3 W/(mK), īpatnējais siltums – 500 J / (kg · K). Radiatora 3D modelis redzams 3.5. attēlā.

Apkures sistēmā un radiatorā izmantotais siltumnesējs ir ūdens. Stacionāras plūsmas gadījumā siltumnesēja ātrums turpgaitā ir $V = 0,4$ m/s (maksimāli pieļaujamais ātrums) ar spiedienu $P = 5$ bāri. Turpgaitas – 80 °C, atgaitas – 60 °C.



3.5. att. Radiatora 3D modelis.

Pētot pulsāciju ietekmi uz siltuma pārnesei, tika izmantots periodiski pulsējošs siltumnesēja modelis radiatorā ar sinusoidāla ātruma impulsu, kas aprakstīts 3.1. vienādojumā:

$$V(t) = 0,4 (1 + A \sin (2\pi ft)), \quad (3.1)$$

kur:

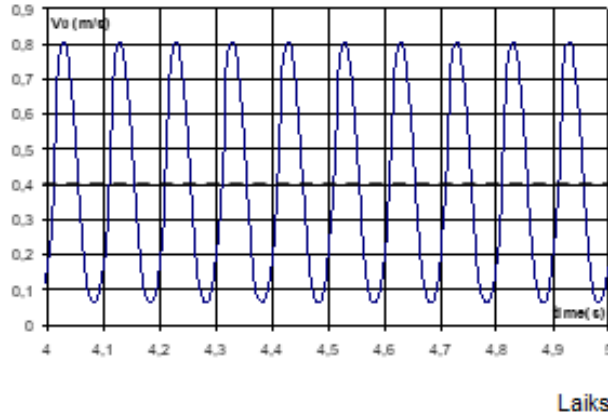
t – laiks;

$V(t)$ – ātrums;

$A = I$ – pulsāciju amplitūda;

pulsējošā frekvence $f = 5$ Hz, siltumnesēja vidējais ātrums, kas vienāds ar $V_0 = 0,4$ m/s.

Siltumnesēja ātruma V atkarība no laika t pulsācijas frekvencei 5 Hz redzama 3. attēla grafikā. Pārtrauktā līnija atbilst vidējam plūsmas ātrumam $V_0 = 0,4$ m/s, līnija $V(t)$ – no vienādojuma 3.1.



3.6. att. Siltumnesēja plūsmas vidējā ātruma V atkarības grafiks, ja $f = 5$ Hz.

Telpā ir divi cilvēki, kuru siltuma jauda (siltuma enerģijas izdalījums) ir 140W. Pieņemts, ka gaisa temperatūra telpās ir 15 °C un ir normāls atmosfēras spiediens. Ģeometriskais aprēķina modelis (vērtību apgabals (10. poz.) ir tāds pats kā sākotnējais telpas modelis.

Pētāmās telpas matemātiskais modelis

Nestacionārais Navjē–Stoksa vienādojums – enerģijas vienādojums (pirmais termodinamikas likums) un stāvokļa vienādojums [61, 62] izmantoti gaisa un siltuma apmaiņas kustības matemātiskai modelēšanai. Turbulentām plūsmām sākotnējie vienādojumi tiek aprēķināti ar Reynoldsa metodi, un ņemti vērā papildu spriegumi turbulentu parametru pulsāciju dēļ [61, 62]. Iegūtā neslēgtā vienādojumu sistēma tiek noslēgta ar papildu vienādojumu turbulences kinētiskās enerģijas k un turbulences enerģijas izkliedēšanas ε saskaņā ar zināmo $k - \varepsilon$ turbulences modeli [62]. Impulsa (4), masas (5) un enerģijas (6) saglabāšanas vienādojumu sistēmu attēlo:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j - \tau_{ij}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = F_i \quad (3.2.)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (3.3.)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} ((\rho E + P)u_i + q_i - \tau_{ij}u_j) = F_i u_i + Q_H \quad (3.4.)$$

Lai aprakstītu turbulentās kinētiskās enerģijas k izkliedi ε , izmanto divus papildu vienādojumus:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k \quad (3.5.)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + S_\varepsilon \quad (3.6.)$$

kur enerģijas avots ir S_k (7) un S_ε (8) definē:

$$S_k = \tau^{R}_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B, \quad (3.7.)$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (f_1 \tau^{R}_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}. \quad (3.8.)$$

Pēc Businesska pieņēmuma Reynoldsa stresa tenzoram (9. vienādojums) ir šāda forma:

$$\tau^{R}_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}. \quad (3.9.)$$

Difuzīvo siltumu plūsma

$$q_i = - \left(\frac{\mu_l}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) C_P \frac{\partial T}{\partial x_i}. \quad (3.10.)$$

Analizējot konjugētās siltuma apmaiņu starp plūsmu un cieto vielu, siltuma pārnese cietajā vielā imitē ar siltuma pārnese vienādojumu [62]:

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + Q_H \quad (3.11.)$$

kur:

u_{ij} – šķidruma ātrums ir četru neatkarīgu mainīgo x, y, z, t funkcija;

P – šķidruma spiediens ir četru neatkarīgu mainīgo x, y, z, t funkcija;

ρ – šķidruma blīvums;

F_i – kopējais spēks, kas iedarbojas uz masas vienību;

E – šķidruma masas vienības kopējā enerģija;

Q_H – siltuma avots uz tilpuma vienību;

τ_{ij} – viskozs bīdes sprieguma tenzors;

$i = x, y, z; j = x, y, z$ – summēšanu veic apakšraksti;

μ_l, μ_t – dinamiskās viskozitātes koeficients, turbulentās viskozitātes koeficients;

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – empīriskās konstantes;

τ^{R}_{ij} – spriedzes tenzors Reynoldsa modelī;

g_i – gravitācijas paātrinājuma komponentes virzienā x_i ;

Pr – Prandtla skaitlis;

C_P – īpatnējā siltuma jauda pie pastāvīga spiediena;

δ_{ij} – Kronekera simbols;

e – īpatnējais siltums;

T – temperatūra;

λ_s – cietā siltuma vadītspēja.

3.–3.11. vienādojums tiek atrisināts skaitliski, izmantojot *CFD* programmatūras *Flow Simulation* [63]. Sākotnējie un robežnosacījumi konkrētiem uzdevumiem ir noteikti plūsmas simulācijas programmatūrā trīsdimensiju dizaina modeļa apjomā un uz attiecīgajām virsmām, kas izveidotas *CAD* (datorizētās projektēšanas) vidē *SolidWorks* programmatūrā.

Lai skaitliski atrisinātu 2.–11. vienādojuma sistēmu, *Flow Simulation* programmatūra izmanto ierobežota tilpuma metodi ar adaptīvu taisnstūra režģi. Aprēķina procesā galīgo

tilpumu sākotnējais režģis skaitļošanas apgabalā tiek sasmalcināts automātiski vai atbilstoši pieņemtajiem katra atkarīgā mainīgā lieluma gradientiem vai cieto virsmu izliekuma būtisku izmaiņu apgabalos. Visi mainīgie balstas uz kontroles tilpumu masas centriem. Šīs vērtības, kas centrētas uz šūnām, tiek izmantotas tuvinājumiem. Integrālās saglabāšanas likumus var attēlot šūnu tilpuma un virsmas integrāls 3.12.–3.13. vienādojuma veidā:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int U dv + \oint F ds = \int Q dv \quad (3.12.)$$

aizvietojot ar diskreto formu:

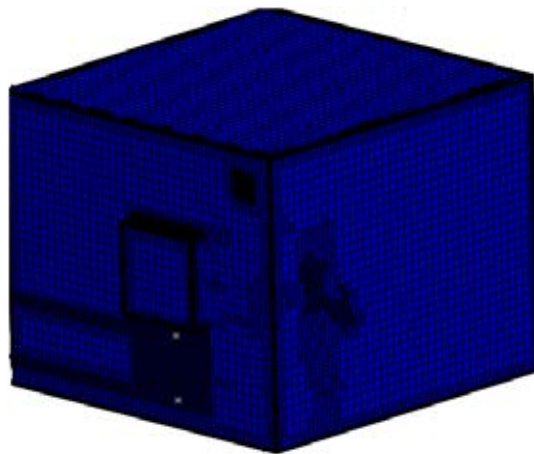
$$\frac{\partial}{\partial t} (U \cdot V) + \sum_{cell} F \cdot S = Q \cdot V \quad , \quad (3.13.)$$

kur:

- F – siltumplūsmas;
- U – fizisko parametru vektors;
- V – šūnu tilpums;
- S – šūnas virsmas laukums;
- Q – masu spēki.

Lai samazinātu skaitliskā risinājuma laiku vietās, kur pieņemti augsti gradienti, tilpuma režģis tika sasmalcināts lokāli. Tas attiecas uz sildķermeņu, ventilācijas pieplūdes lūku un cilvēku atrašanās vietām.

Lai panāktu vēlamo risinājuma precizitāti, šajā promocijas darbā bija nepieciešami 1 000 000–1 200 000 šķidru un cietu elementu. Biroja telpas aprēķina režģis redzams 2.7. attēlā.



3.7. att. Biroja telpas aprēķina režģis.

Eksperimentālo datu apstrāde

SolidWorks programmatūras paketes *HVAC* plūsmas simulācijas modulim ir funkcionalitāte, kas ļauj prognozēt apkārtējā vidē esošo cilvēku siltuma sajūtu un diskomforta līmeni [63].

Paredzamā neapmierināto daļu procentpunktos (*PPD*) apraksta to cilvēku īpatsvaru, kuriem aplūkojamā vide rada diskomfortu. Šis raksturlielums ir varbūtīgs (vērtības no 5 līdz 99, (9) %) un aprēķināts saskaņā ar 3.14. vienādojumu:

$$PPD = 100 - 95e^{(-0.03353PMV^4 - 0.2179PMV^2)} \quad (3.14.)$$

Funkcijas paredzamais vidējais balsojums (PMV), kas aprēķināts saskaņā ar 3.15. vienādojumu:

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \times \quad (3.15.)$$

$$\times \left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99(M - V) - p_a] \\ -0.42[(M - V) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M(5867 - p_a) - 0.0014M(34 - T_a) \\ - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - T_r + 273^4] - f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \end{array} \right\}$$

$$T_{cl} = 35.7 - 0.028(M - V) -$$

$$- I_{cl} \left\{ 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [T_{cl} + 273]^4 - (T_r + 273)^4 \right\} + f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \left. \right\}$$

where

$$h_c = \max \left[2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25}; 12.1\sqrt{v} \right]$$

$$f_{cl} \left\{ \begin{array}{l} 1.00 + 1.29I_{cl}, \text{ if } I_{cl} \leq 0.078 \frac{m^2}{K \times W} \\ 1.05 + 0.645I_{cl}, \text{ if } I_{cl} > 0.078 \frac{m^2}{K \times W} \end{array} \right\}$$

kur:

I_{cl} ($m^2 \cdot K/W$) – apģērba termiskā pretestība (izturība pret siltuma pārneši apģērba dēļ); šī konstante ir neatņemama īpašība, kas raksturo gan pārklātās ķermeņa daļas, gan tās, kas tieši mijiedarbojas ar vidi, it īpaši rokas un seju;

f_{cl} – ar apģērbu nosegtu un nenosegtu zonu attiecība;

fa (Pa) – daļējs ūdens tvaiku spiediens, kas aprēķināts pēc piesātinājuma līknes, gaisa temperatūras un relatīvā mitruma;

h_c ($W / m^2 \cdot K$) – ķermeņa virsmas konvekcijas siltuma pārnese koeficients.

Vidējā starojuma temperatūra:

$$T_r^4 = \frac{1}{4\sigma} \int I_{diffuse}(\Omega) d\Omega + \frac{1}{4\sigma} \sum I_{sun} \quad (3.16.)$$

kur:

$I_{diffuse}$ – izkliedētā (difūzā) siltuma starojuma intensitāte ($W (m^2 \times rad)$);

I_{sun} – saules starojuma intensitāte (Wm^2);

σ – Stefana–Boltmana konstante.

Aprēķinot vidējo starojuma temperatūru, pieņemts, ka visu seju melnuma līmenis aprēķina apgabalā ir 1.

Operatīvā temperatūra ir vizuāli melnās vides viendabīga temperatūra, kurā cilvēks kopā ar konvekciju starojuma ietekmē saņem tādu pašu siltuma daudzumu, kā saņem no starojuma, it kā viņš atrastos vidē ar nevienmērīgu temperatūru.

$$T_c = \frac{T_r + T_a \sqrt{10v}}{1 + \sqrt{10v}}, \quad (3.17.)$$

kur:

T_r – vidējā starojuma temperatūra, °C;

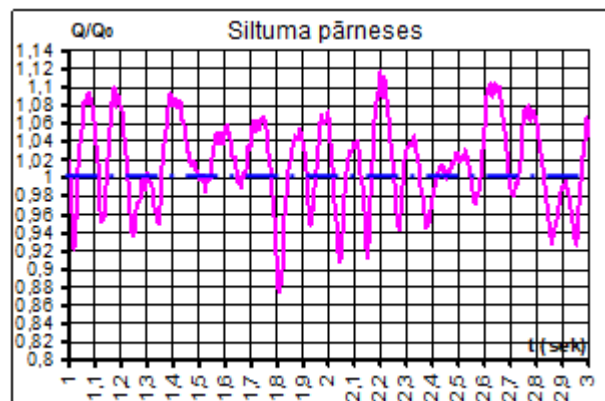
T_a – gaisa temperatūra, °C;

v – gaisa ātrums, m/s.

Biroju ēkas darbinieka komforta līmeņa saglabāšana enerģijas taupīšanas simulācijas modelī

Skaitlisko aprēķinu rezultāti parādīja, ka biroja telpas apkures stacionārajam režīmam radiatora siltuma jauda Q_0 ir 820 vati. Šī vērtība ir par 5 % mazāka nekā zināmie pilna mēroga *PII* tipa radiatoru tehniskie raksturlielumi, savukārt vērtība ir aprēķinātās kļūdas robežās.

Periodiski pulsējoša šķidrums gadījumā radiatorā, kas aprakstīts 3.1. vienādojumā, tā siltuma jauda $Q(t)$ laika gaitā mainās. Q/Q_0 izmaiņas laikā t redzamas 3.8. attēlā. Pārtrauktā līnija atbilst stacionārajam procesam ar $V_0 = 0,4$ m/s, nepārtrauktā līnija – nestacionāram siltuma pārneses procesam saskaņā ar 3.1. vienādojumu.



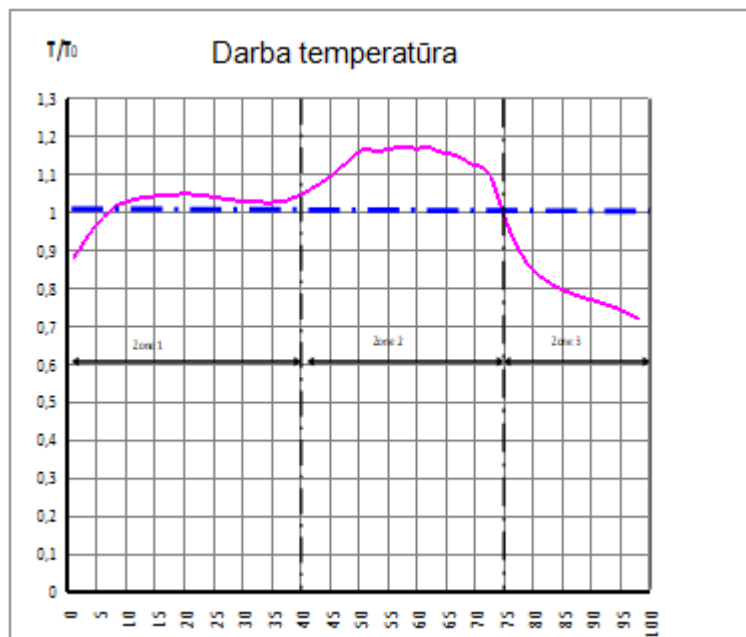
3.8. att. Siltuma jaudas Q/Q_0 grafiks pret laiku t .

Grafikā redzams, ka, mainoties siltumnesēja ātrumam radiatorā, siltuma jauda, salīdzinot ar stacionāro režīmu, var mainīties vidēji par 10 % gan uz augšu, gan uz leju.

Ir pētīta mainīga operatīvā temperatūra telpā saskaņā ar 3.16 vienādojumu. Temperatūras pieņemtas punktos ar atbilstošajām koordinātēm telpā x, y, z . Aplūkojamā telpa tika nosacīti iedalīta trīs zonās: 1. zona – zona, kur atrodas caurules apkures turpgaitai un atgaitai; 2. zona – radiatora zona; 3. zona – zona, kurā atrodas personas, nav sildierīces, sienas augšpusē ir ventilācijas lūka.

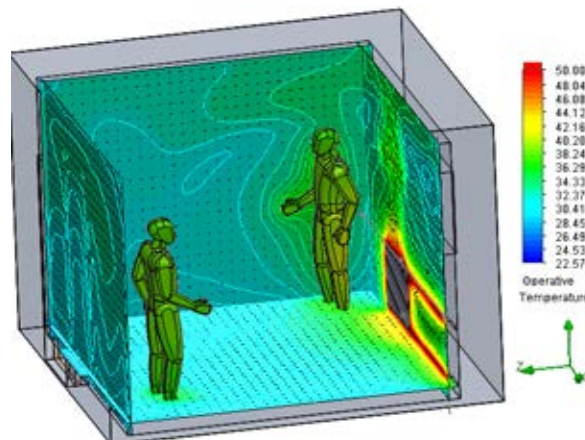
Aplēses parādīja, ka 1. zonā attiecībā pret stacionāro režīmu šķidrums plūsmas pulsācijas būtiski neietekmē darba temperatūru T °C. 2. zonai raksturīga darba temperatūras paaugstināšanās par aptuveni 20 %, jo notiek pulsējošas radiatora radītas siltuma jaudas izmaiņas. Salīdzinot ar 2. un 3. zonu novērota darba temperatūras pazemināšanās vidēji par 20–25 %.

Temperatūras salīdzinājuma T/T_0 grafiks redzams 3.9. attēlā. Darba temperatūra T_0 °C attiecas uz stacionāro režīmu, un T °C attiecas uz pulsējošās plūsmas režīmu radiatorā. X ass apzīmē punktu numerāciju, kas atbilst koordinātām telpā x, y, z.



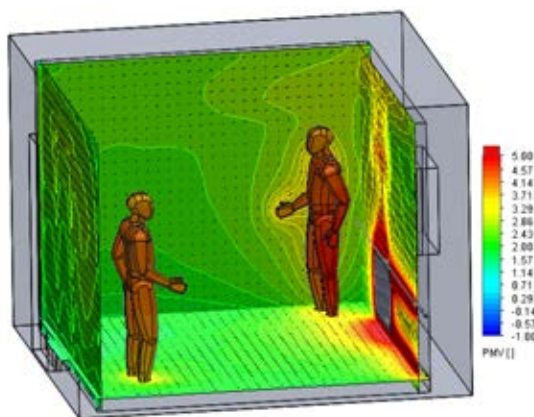
3.9. att. Temperatūru salīdzinājuma grafiks T/T_0 .

Temperatūru salīdzinājuma vizualizācija stacionārā režīmā atspoguļota 3.10. attēlā.



3.10. att. Temperatūras salīdzinājuma vizualizācija telpā.

Cilvēka pašsajūtu nosaka siltuma līdzsvars ķermenī. Skaitliskā aprēķina procesā tika noteikti vides parametri, piemēram, vidējā starojuma temperatūra T_r , kā arī temperatūra T_a , relatīvais ātrums v un gaisa mitrums. Tas ļauj paredzēt telpā esošo cilvēku siltuma izjūtu – telpā esošo cilvēku prognozētus vidējos vērtējumus balsojot (PMV – vidējais paredzamais vērtējums) saskaņā ar 3.15 vienādojumu. Vizualizēts prognozētais vidējais vērtējuma attēlojums telpā redzams 3.11. attēlā.

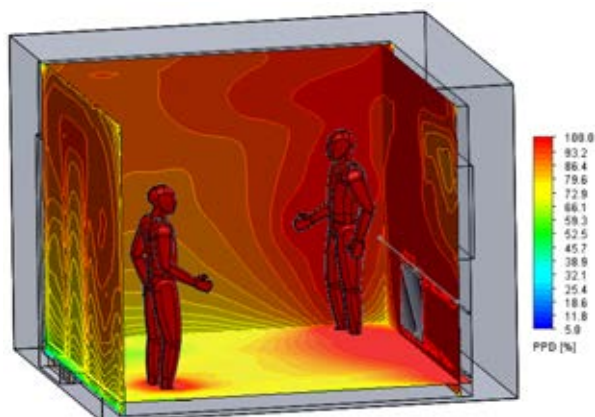


3.11. att. Prognozētā vidējā vērtējuma siltuma izjūtas.

3.11 attēlā redzams, ka maksimālā *PMV* vērtība ir +5 un tā atrodas ārpus kalibrētās skalas no -3 līdz +3, tas ir, cilvēka stāvokli pie radiatora var novērtēt kā “ļoti karsti”. Otrai personai, tas ir, zonā starp “siltu” un “karstu”, tas ir no +2 līdz +3.

Nestabila siltumnesēja plūsmas režīmā radiatora tuvumā esošās personas *PMV* vērtība sasniedz līdz +6. Tas notiek radiatora siltumatdeves pieauguma dēļ.

Paredzamais neapmierināto (*PPD*) cilvēku procentuālais daudzums telpās ir to cilvēku īpatsvars, kuriem noteiktā vidē rodas diskomforts. Šis raksturlielums ir varbūtīgs (vērtības no 5 līdz 99,(9) %) un aprēķināts saskaņā ar 3.14. vienādojumu. Prognozētā neapmierināto procentuālā daudzuma (*PPD*) vizualizācija redzama 3.12. attēlā.



3.12. att. Prognozētais neapmierināto personu daudzums procentpunktos.

Biroja telpas komforta novērtējums ar telpas komforta kompleksa modeli

- 1) modelētā biroja telpa nav komfortabla, galvenā diskomforta zona ir zona pie radiatora;
- 2) pulsējošā radiatora darbības režīmā diskomforta zona palielinās par aptuveni 10 %;
- 3) ir jāpilnveido gaisa sadalījums brīvajā telpā;
- 4) veiktie eksperimenti novērtē programmatūras *SOLIDWORKS / Flow Simulation CAD / CFD / HVAC* paketes iespējas, salīdzinot stacionārus siltumnesēja režīmus ar pulsējošo.

4. NODAĻA. ENERĢIJAS APGĀDES SISTĒMU MIJIEDARBĪBAS BŪTISKU PARAMETRU MONITORINGS

4.1. Enerģijas patēriņa viedās uzskaites nepieciešamība dažādu enerģijas veidu sadales tīklos

Gāzes viedo patēriņa uzskaites mērāparātu izmantošanas nepieciešamība Latvijas dabasgāzes tirgū ir aktuāla vairāku iemeslu dēļ [64, 65].

- Direktīvā 2009/73/EK noteiktas prasības par viedo mērāparātu sistēmu ieviešanu.
- Energoefektivitātes prasības.
- Dabasgāzes nesankcionētas patērēšanas samazināšana.
- Sadales sistēmas tarifa projektā ietvertais aprēķins pēc atļautās slodzes.
- Latvijas dabasgāzes tirgus atvēršana.

Līdz ar dabasgāzes tirgus atvēršanu Latvijā ir nepieciešamība nodrošināt operatīvu un precīzu informāciju sadales sistēmu par patērēto dabasgāzes apjomu, kā arī veikt prognozēšanu dabasgāzes gāzapgādes sistēmas balansa uzturēšanai. Vairākos pētījumos tiek atzīts, ka viedā sistēma ar viedo skaitītāju izmantošanu uzlabo gan precīzu datu uzskaiti, gan sistēmas darbības efektivitāti.

Sākot no 2017. gada 3. aprīļa, saskaņā ar Ministru kabineta 2017. gada 7. februāra noteikumiem Nr. 78 “Dabasgāzes tirdzniecības un lietošanas noteikumi” un 2009. gada 13. jūlija Eiropas Parlamenta un Padomes Regulas (EK) Nr. 715/2009 “Par nosacījumiem attiecībā uz piekļuvi dabasgāzes pārvades tīkliem” noteikts, ka:

- dabasgāzes tehnisko uzskaiti pārvades sistēmā un uzglabāšanas sistēmā nodrošina standarta apstākļos 0 °C temperatūra un 1,01325 bāri; attiecībā uz augstāko siltumspēju, enerģiju un Vobes skaitli degšanas standarta temperatūra pēc noklusējuma ir 25 °C;
- dabasgāzes uzskaiti lietotāju norēķiniem pārvades sistēmā un uzglabāšanas sistēmā nodrošina enerģijas vienībās – kilovatstundās (kWh), kas tiek izteikta, kubikmetrus standarta apstākļos reizinot ar augstāko siltumspēju, izteiktu kWh/m³.

Gāzes kvalitātes noteikšana notiek atbilstoši šādiem standartiem:

- *ISO 6326* Dabasgāze – sēra savienojumu noteikšana;
- *ISO 6327* Gāzes analīze – dabasgāzes rasas punkta noteikšana;
- *ISO 6974* Dabasgāze – sastāva un saistītās nenoteiktības noteikšana ar gāzes hromatogrāfijas metodi;
- *ISO 6976* Dabasgāze – augstākās un zemākās siltumspējas, blīvuma, relatīvā blīvuma un Vobes skaitļa aprēķināšana gāzes sastāvam;
- *ISO 12148* Dabasgāze – instrumentu ar spoguļi kalibrēšana ogļūdeņražu rasas punkta noteikšanai;
- *LVS 459* Degas – gāzu īpašības, parametri, kvalitātes novērtēšana;
- *LVS EN ISO 11541* Dabasgāze – ūdens satura noteikšana augstā spiedienā.

Ministru kabineta 2017. gada 7. februāra noteikumi Nr. 78 “Dabasgāzes tirdzniecības un lietošanas noteikumi” nosaka dabasgāzes piegādes kārtību, kā arī kārtību, kādā veicami norēķini par saņemtajiem pakalpojumiem. Tirdzniecības noteikumu 139. punkts paredz, ka dabasgāzes sadales sistēmas operatoram ir tiesības lietotājam piegādātās dabasgāzes uzskaiti gazificētajā objektā uzstādīt savu komercuzskaites mērāparātu [64] vai nomainīt lietotājam piegādātās dabasgāzes uzskaiti gazificētajā objektā uzstādīto komercuzskaites mērāparātu, kā

arī aprīkot lietotāja komercuzskaites mēraparātu ar telemetrijas vai telemehānikas sistēmu datu automatizētai attālinātai nolasīšanai, lai rādījumus izmantotu norēķinos par dabasgāzi. Līdz ar to normatīvie akti Latvijā jau paredz dabasgāzes sistēmas operatora tiesības aprīkot dabasgāzes sistēmu ar komercuzskaites mēraparātu ar attālinātu un automatizētu datu nolasīšanu.

Eiropas Savienībā ir aktualizēts jautājums par viedo skaitītāju izmantošanu dabasgāzes gāzapgādes sistēmā dabasgāzes patēriņa uzskaitē norēķinu vajadzībām. Dabasgāzes tirgu un dabasgāzes gāzapgādes sistēmas izmantošanu Latvijā regulē Enerģētikas likums un uz tā 107. panta trešās, piektās un septītās daļas un 109. panta ceturtais daļas pamata izdotie Ministru kabineta 2017. gada 7. februāra noteikumi Nr. 78 “Dabasgāzes tirdzniecības un lietošanas noteikumi”, kas nosaka, ka komercuzskaites mēraparāti patērēto daudzumu uzskaita kubikmetros, savukārt norēķiniem ar tirgotāju sadales sistēmas operators pārrēķina kWh, ņemot vērā vidējo svērto augstāko siltumspēju standartapstākļos. Tomēr gadījumus, kad komercuzskaites mēraparāts ir aprīkots ar temperatūras un spiediena korektoru, uzskaites datus koriģē saskaņā ar standarta apstākļiem (apstākļi, kad dabasgāzes spiediens ir 101,325 kPa un temperatūra 20 °C). Latvijas valsts standartā *LVS 459* “Deggāzes. Gāzu īpašības, parametri, kvalitātes novērtēšana” noteikts, ka normālstāvoklis, ko izmanto, lai salīdzinātu gāzes, kas tiek izmantotas atšķirīgos darba stāvokļos atbilstoši *LVS EN ISO 13443:2007*, ir:

- gāzes spiedienu normālstāvoklī: $p_n = 101,325 \text{ kPa} = 1,01325 \text{ bar}$;
- gāzes temperatūru normālstāvoklī: $T_n = 273,15 \text{ K}$ pie 0 °C.

Jāņem vērā, ka līdz ar dabasgāzes tirgus atvēršanu ir nepieciešams noteikt dabasgāzes sadales sistēmā sadalīto dabasgāzes daudzumu prognozēšanas vajadzībām katru diennakti un to nosaka saskaņā ar Tirdzniecības noteikumiem, summējot šādus datus:

- no ikdienas uzskaites vietām saņemto vai lietotāju iesniegto patēriņu;
- sadales sistēmas operatora aprēķināto vai lietotāja, kas nav mājсаimniecības lietotājs, iesniegto patēriņu par gāzes dienā patērēto dabasgāzes daudzumu neikdienas uzskaites vietās;
- sadales sistēmas operatora aprēķināto mājсаimniecības lietotājiem diennaktī sadalīto dabasgāzes daudzumu neikdienas uzskaites vietās.

Saskaņā ar Tirdzniecības noteikumiem sadales sistēmas operators veic sadales sistēmas neikdienas uzskaites vietu nākamās diennakts patēriņa prognozi un nosūta to dabasgāzes tirgotājam iekļaušanai nākamās dienas jaudas nominēšanai. Dabasgāzes prognozēšanas vajadzībām, ko veic katru diennakti, ir nepieciešamība pēc precīzākiem patēriņa datiem, it īpaši gadījumos, kad dabasgāzes lietotājs var patērēt lielākus dabasgāzes daudzumus un patēriņa apjomi ir mainīgi un neregulāri. Tāpat arī precīzāka patēriņa informācija ir nepieciešama neikdienas uzskaites vietā, bez iespējas nolasīt datus ne retāk kā reizi dienā, ir nepieciešams veikt aprēķinus, vadoties no vēsturiskajiem patēriņa datiem, turklāt izmantojot tos par ilgāku laiku posmu, kas var būt nepilnīgi un vēsturiski uzskaitīti mēneša laikā, nevis katru dienu, kas attiecīgi sarežģī iespēju veikt precīzu patēriņa prognozi katrai dienai. Precīza patēriņa datu nolasīšana uzlabo arī reaģēšanas spēju krīzes situācijās, ja ir neplānoti pieaudzis gāzes patēriņš, piemēram, straujš patēriņa palielinājums zemākas āra temperatūras dēļ.

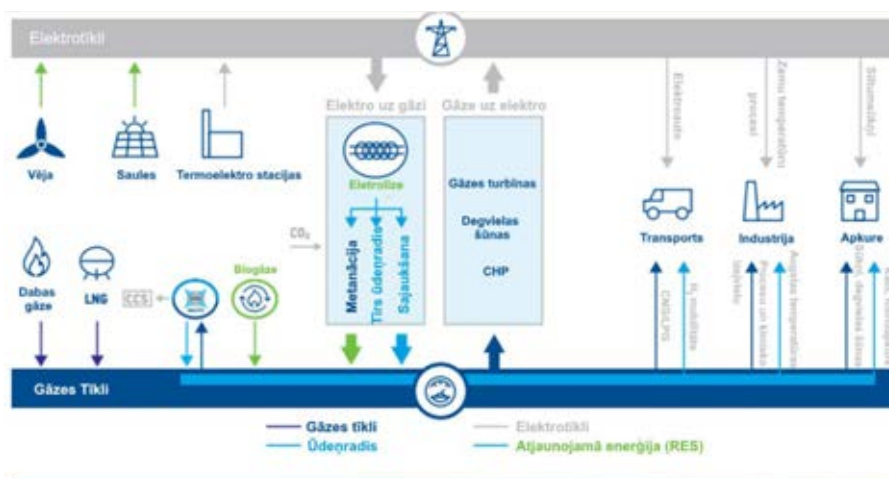
Sobrīd Latvijas dabasgāzes sadales sistēmā ar telemetriju ir aprīkoti apmēram 600 lielākie dabasgāzes lietotāji, kas nodrošina, ka 75 % patērētās dabasgāzes apjoma tiek uzskaitīta ar komercuzskaites mēraparātu, kas ir aprīkots ar korektoru (temperatūras un spiediena) ar telemetrijas sistēmu attālinātai datu nolasīšanai. Latvijā mājсаimniecībās uzskaitē nav aprīkota ar telemetriju. Pētot viedo mērierīču izmantošanas lietderību, var secināt, viedās mērierīces tehnisko rādītāju un īpašību dēļ – izmaksu ziņā ir dārgāki, taču nodrošina precīzāku uzskaiti, līdz ar to šāda mērierīce mājсаimniecībā ar apkures izmantošanu var atmaksāties 2–3 gados, savukārt tirgū piedāvā bateriju izturību līdz pat 20 gadiem. Tikai gadījumos, ja patēriņš ir mazs, piemēram, tikai plīts izmantošana, esošā membrānas mērierīces nomaiņa pret viedo uzskaites

mēraparātu vai membrānas mērierīces aprīkošana ar papildu komunikācijas moduli datu nosūtīšanai nebūtu lietderīga.

Gāzes viedo komercuzskaites mēraparātu izmantošanai ir vairākas priekšrocības, it īpaši: precīza uzskaitē palielinātu uzskaitīto gāzes patēriņu vismaz par 2 %, atsevišķos gadījumos temperatūras un spiediena korekcija uzskaitīto apjomu palielinātu vēl vairāk; atvērtā dabasgāzes tirgus apstākļos tiek nodrošināta ātra un precīza informācija par gāzes patēriņu, kas svarīga, mainot tirgotāju un prognozējot ikdienas patēriņu; automatizētā precīzo datu iegūšana un apstrāde atvieglo riska klientu atrašanu, kas var nesankcionēti patērēt dabasgāzi, kā arī ļauj kontrolēt lietotājus, vai netiek pārsniegta atļautā slodze. Gāzes viedo skaitītāju sistēmas pakāpeniska attīstība Latvijā ir risinājums vairākiem izaicinājumiem, kas ir aktualizējušies pēdējos gados, tāpēc būtu nepieciešams sakārtot tiesisko regulējumu par viedajiem skaitītājiem (terminu vienveidības nodrošināšana, atsaucis uz piemērojamiem standartiem, mērīšanas līdzekļu metroloģisko prasību papildināšana ar minimālajām prasībām viedajiem skaitītājiem, piemēram, nosakot baterijas darbības ilgumu un minimālo datu apmaiņas biežumu un to saglabāšanas ilgumu).

4.2. Hibrīdas enerģosistēmas

Sadarbība starp enerģētikas nozarēm, jo īpaši – elektroenerģiju un gāzi, samazinās enerģētikas pārejas izmaksas un veicinās gāzes nozares dekarbonizāciju. Hibrīda enerģosistēmai (4.1. att.), kas balstās uz esošās enerģētikas infrastruktūras reģionālajām priekšrocībām, būs nepieciešami arī ES mēroga principi attiecībā uz sektoru savienošanu.



4.1. attēls. Hibrīda enerģosistēma.

Svarīgi ir novērtēt spēju integrēt atjaunojamās enerģijas avotus ar elektrības starpniecību un gāzes sistēmas. Būtu jāņem vērā nozaru sasaistīšanas tiesiskais regulējums, ņemot vērā nozaru sasaistīšanas perspektīvas attiecībā uz aspektiem, kas līdz šim nav bijuši integrēti tiesību aktos [67].

Lai novērtētu kopējo dabasgāzes patēriņu ES nākotnē, ir pieņemti trīs iespējamie Eiropas klimata mērķu un enerģētikas politikas mijiedarbības scenāriji: klimata rīcības veicinošais scenārijs, ilgtspējīgs pārejas scenārijs un sadalīto enerģijas ražošanu atbalstošais scenārijs. Pasauls klimata rīcības veicinošais scenārijs paredz visaktīvāko klimata pārmaiņu novēršanas pasākumu īstenošanu, veicinot projektus un investīcijas, kas palielina atjaunīgo

energoresursu izmantošanu, tādējādi sasniedzot vides mērķus un vienlaikus samazinot fosilo energoresursu (tostarp dabasgāzes) izmantošanu. Šajā scenārijā nozīmīga loma ir gāzei, kas tiek ražota no atjaunnīgiem resursiem un ievadīta kopējos tīklos. Ilgtspējīgas pārejas scenārijs paredz pakāpenisku dekarbonizāciju, pirmkārt, pārejot no oglēm uz dabasgāzi. Šajā scenārijā sagaidāms, ka dabasgāzes patēriņš ES palielināsies. Sadalītās ražošanas scenārijs paredz būtisku vietējās enerģijas ražošanas pieaugumu, līdz ar to – būtisku patērētāju iesaistīšanu procesā. Atbilstoši pašreizējiem scenārijiem, dabasgāzes patēriņš Eiropas Savienībā samazināsies ļoti vai mēreni lēni. Iespējamie samazinājuma iemesli ir vispārējā energoefektivitātes paaugstināšana, līdz ar to – efektīvāka enerģijas izmantošana, kā arī dabasgāzes kā CO₂ avota izmantošanas samazināšana un aizstāšana ar atjaunnīgiem enerģijas avotiem. Tikai viens no scenārijiem paredz ES dabasgāzes patēriņa pieaugumu vidējā termiņā, pamatojoties uz ogļu enerģijas ātru aizstāšanu ar dabasgāzi. Vēl viens faktors, kas veicina dabasgāzes pieprasījumu nākotnē, ir nepieciešamība samazināt emisijas transporta nozarē. Pētījumi par ES dabasgāzes tirgus perspektīvām atzīmē atjaunīgās dabasgāzes ražošanu, kas ietver saspiestās un sašķidrinātās dabasgāzes izmantošanu transportēšanā, biometāna gāzes ražošanu vai elektroenerģijas pārvēršanu dabasgāzē un tās uzglabāšanu un transportēšanu. Saspiestās dabasgāzes tehnoloģija kļuvusi populāra tikai dažās no ES valstīm, un nevienā valstī tā nav kļuvusi par dabasgāzes galveno avotu. Sašķidrinātai dabasgāzei joprojām ir liels potenciāls tālsatiksmes un jūras transporta jomā. Biometāna izmantošana nav izplatīta augsto ražošanas izmaksu dēļ, salīdzinot ar biogāzi: lai sasniegtu dabasgāzes tīklā ievadīšanai nepieciešamus parametrus, biometāns ir jāattīra un jāpārstrādā. Regulāri tiek izstrādāti pilotprojekti elektroenerģijas pārvēršanai dabasgāzē, tomēr pašreizējās tehnoloģijas vēl nespēj piedāvāt uzņēmumiem rentablus risinājumus. Lai gan notiek darbs pie jaunām, atjaunojamām dabasgāzes tehnoloģijām, nav paredzams, ka šīs inovācijas būtiski ietekmēs dabasgāzes patēriņa prognozes līdz 2025. gadam.

4.3. Reģionāli vienota starpvalstu dabasgāzes tirgus iespējas

Vēsturiski Baltijas valstis vienmēr bijušas atkarīgas no viena dominējošā dabasgāzes piegādātāja un arī infrastruktūras ziņā ir bijušas izolētas no Eiropas dabasgāzes tīkliem. Jau 2008. gadā Eiropas Komisija saskatīja energoatkarību un izolētību kā bīstamu enerģētikas sektora parādību, un, lai to novērstu, nolēma tirgu pakāpeniski liberalizēt. Gāzes nozarē pirmā enerģētikas pakete (pirmās gāzes tirgus liberalizācijas direktīvas) tika pieņemta pirms vairāk nekā 20 gadiem – 1998. gadā, otrā pakete – 2003. gadā. Lai vēl vairāk liberalizētu Eiropas Savienības valstu gāzes tirgu, 2009. gada aprīlī tika pieņemta trešā enerģētikas pakete, kas nodrošināja pamatu iekšējo enerģijas tirgu veidošanai un monopola izbeigšanai. Trešo enerģētikas paketi veidoja divas direktīvas, no kurām viena attiecas uz gāzes nozari – Eiropas Parlamenta un Padomes 2009. gada 13. jūlija Direktīva Nr. 2009/73/EK par kopīgiem noteikumiem attiecībā uz dabasgāzes iekšējo tirgu un par Direktīvas Nr. 2003/55/EK atcelšanu (turpmāk – Direktīva Nr. 2009/73/EK), savukārt otrā attiecas uz elektroenerģijas iekšējo tirgu, kā arī no trīs regulām, no kurām viena ir par piekļuves nosacījumiem dabasgāzes pārvades tīkliem – Eiropas Parlamenta un Padomes 2009. gada 13. jūlija Regula (EK) Nr. 715/2009 par nosacījumiem attiecībā uz piekļuvi dabasgāzes pārvades tīkliem un par Regulas (EK) Nr. 1775/2005 atcelšanu (turpmāk – Regula Nr. 715/2009).

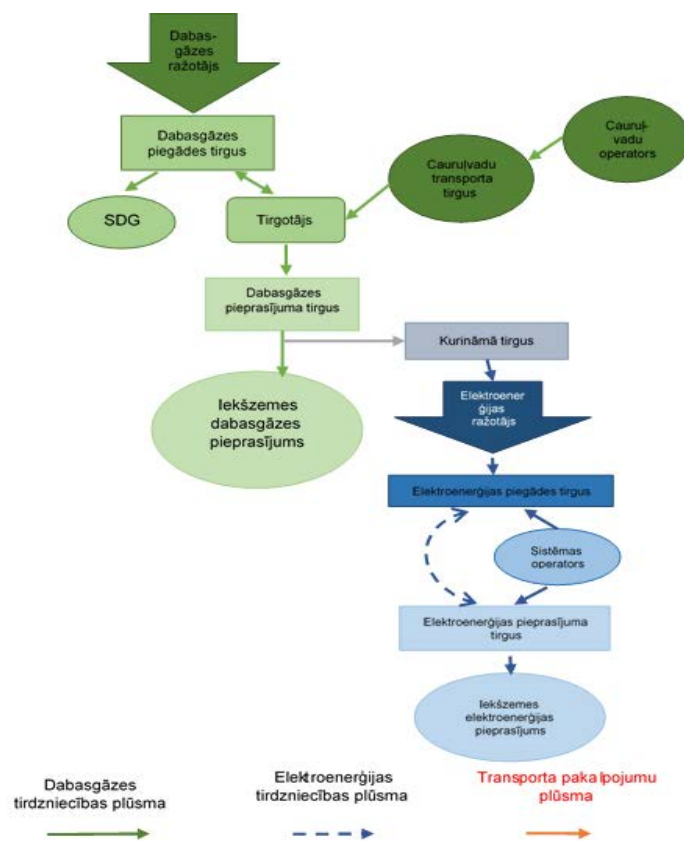
Tajā pašā laikā, ņemot vērā Eiropas Komisijas atbalstu un pēc Baltijas jūras reģiona valstu vienošanos 2008. gada oktobrī, Eiropas Komisija izveidoja augsta līmeņa grupu, kurā piedalījās Dānija, Vācija, Igaunija, Latvija, Lietuva, Polija, Somija un Zviedrija [68, 69]. Norvēģija augstā līmeņa darba grupā piedalījās novērotāja statusā. Iepriekšminētā augstā līmeņa darba grupa ar ambicioziem mērķiem 2009. gada jūnijā nāca klajā ar Baltijas enerģētikas tirgus starpsavienojumu plānu (turpmāk – *BEMIP*), kas nosaka visaptverošus enerģijas

starp savienojumus un tirgus uzlabojumus visam Baltijas jūras reģionam. *BEMIP* ietver konkrētus uzdevumus, lai sasniegtu valstu kopīgos mērķus – atvērtu reģionālo elektroenerģijas un dabasgāzes tirgu starp Eiropas Savienības valstīm un Baltijas jūras reģionu, tādējādi beidzot izolētību enerģētikas sektorā.

Trīs Eiropas Savienības izvirzītie enerģētikas politikas mērķi ir konkurētspēja, piegādes drošība un ilgtspēja, ko iespējams sasniegt, izveidojot funkcionējošu un ar atbilstoši attīstītu infrastruktūru nodrošinātu iekšējo enerģijas tirgu un koordinētu dalībvalsts rīcību, stiprinot valstu solidaritāti. Jau 2014. gada noslēgumā Baltijas valstu premjerministri Tallinā (Igaunijā) kopīgi vienojās par to, ka ir būtiski nodrošināt Eiropas Savienības Trešās enerģētikas paketes ieviešanu, vienlaikus ar saprotamiem, pārskatāmiem un konkurenci īstenojošiem noteikumiem attiecībā uz trešo pušu piekļuves nosacījumiem gāzes sistēmai. Lai arī tie bija daži no juridiski būtiskākajiem instrumentiem, lai veicinātu un attīstītu iekšējo enerģijas tirgu, tas nenoliedzami radīja dažāda veida izaicinājumus, īpaši – izolētajām Baltijas valstīm.

Ņemot vērā Eiropas Savienības centienus izveidot iekšējo enerģijas tirgu, tostarp atbalstu vērienīgu gāzes infrastruktūras projektu īstenošanai, kā arī nepieciešamību sasniegt *BEMIP* definētos mērķus, Ziemeļaustrumu valstīm – Somijai, Igaunijai, Latvijai un Lietuvai – bija svarīgi izstrādāt skaidrus un harmonizētus noteikumus, lai izveidotu funkcionējošu gāzes tirgu. Sākotnēji 2015. gada 14. janvārī *BEMIP* īstenošanas ietvaros Baltijas valstu par enerģētikas nozari atbildīgo ministru starpā tika parakstīta deklarācija par enerģijas piegādes drošumu [68], kurā valstis apņēmas attīstīt brīvu, pārskatāmu, konkurētspējīgu un pilnībā funkcionējošu reģionālo gāzes un elektroenerģijas tirgu, realizējot trešo enerģijas paketi, īstenojot tirgus integrāciju un atbilstošas infrastruktūras izbūvi. Tostarp, tika iniciēta Reģionālā gāzes tirgus koordinācijas grupas izveide (turpmāk – RGTKG).

4.4. Gāzes un elektroenerģijas tirgu mijiedarbība



4.2. att. Gāzes un elektroenerģijas tirgu mijiedarbība.

Lai pamatotu nepieciešamību izpētīt abu sistēmu mijiedarbību, šis pētījums balstās uz 2012. gada 9. februāra notikumu. Šajā laikā aukstuma vilnis ietekmēja Franciju, palielinot elektroenerģijas pieprasījumu līdz vairāk nekā 100 GW. Parasti imports no Vācijas nodrošina šajos gadījumos vajadzīgo papildu enerģiju. Ņemot vērā Vācijas moratoriju attiecībā uz kodolenerģiju pēc Fukušimas avārijas, kodolelektrostacijas, kas parasti eksportē elektroenerģiju uz Franciju, tika slēgtas, un gāzes spēkstacijas tika aicinātas ražot to teritorijā. Taču sakarā ar to, ka Vācijā nebija piekļuves gāzes cauruļvadu jaudai, elektroenerģijas eksports uz Franciju bija ierobežots.

Par darbības modeli uzskata abas sistēmas, kas pieslēgtas ar gāzi darbināmās spēkstacijās. Kā redzams 4.2. attēlā, gāzes tirgus dalībnieki ir ražotāji, tirgotāji, sašķidrinātās dabas-gāzes operatori un cauruļvadu operatori (parasti – PSO), kas pārdod gāzi.

4.5. Siltumenerģijas ražošanas mainīga kurināmā tirgus situācija

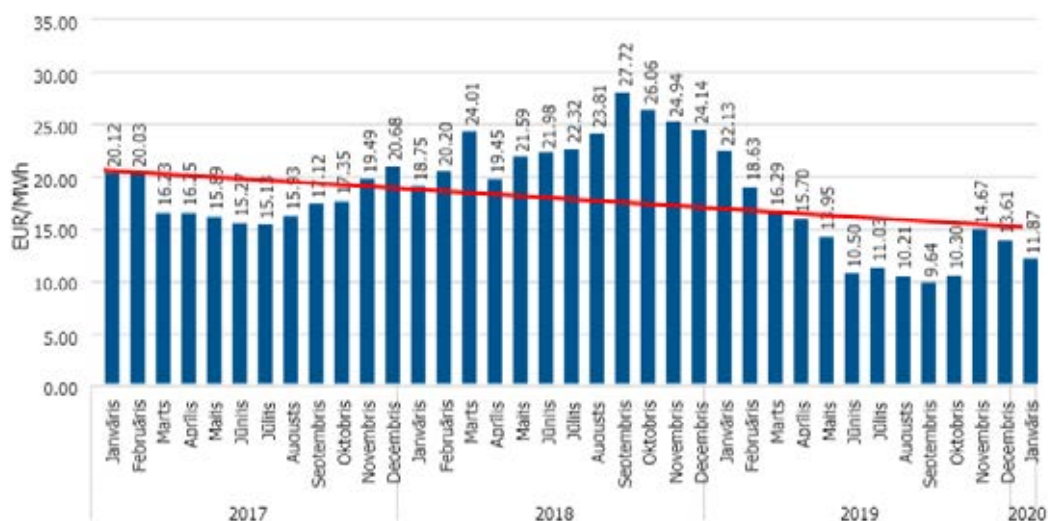
Kurināmā izmaksas būtiski ietekmē siltumenerģijas tarifu lielumu. Kā jau minēts iepriekš, centralizētajā siltuma ražošanā Latvijā visbiežāk izmantotais ir dabasgāze un šķelda. No 2017. gada 1. aprīļa Latvijā ir atvērta dabasgāzes tirgus. Mājsaimniecībām joprojām iespējams iegādāties dabasgāzi arī par regulētu cenu, savukārt juridiskie lietotāji dabasgāzi iegādājas par cenu, kas noteikta savstarpējā līgumā ar dabasgāzes piegādātāju. Šķeldas tirgus netiek regulēts, tomēr līdz ar šķeldas eksporta, kā arī tās patēriņa strauju pieaugumu, arī šķeldas tirgus kļuvis dinamiskāks.

Kurināmā iegādes pakalpojuma izmaksas veido kurināmā cena, izmaksas par papildu pakalpojumiem un uzcenojums. Uzcenojumu ietekmē konkurences spiediens un ar līguma izpildi saistīto risku sadalījums. Jo vairāk risku gulstas uz kurināmā tirgotāju, jo lielāku uzcenojumu tirgotājs var paredzēt. Šie riski galvenokārt saistīti ar nenoteiktību. Saistībā ar kurināmā piegādi izšķir divus būtiskākos riskus:

- kurināmā galapatēriņa svārstības; brīdī, kad tiek noslēgts līgums, nav zināms, cik daudz konkrētā produkta pircējam faktiski būs nepieciešams; lai pircējam nodrošinātu produkta pieejamību, kurināmā piegādātājam tas jāpagādā prognozētā apjomā, kas var atšķirties no faktiski nepieciešamā; ja apjoms prognozēts nepareizi, tas rada papildu izmaksas piegādātājam, kas tiek iekļautas kurināmā cenā;
- kurināmā sagādes izmaksu (šķeldas ražošana, dabasgāzes iepirkuma cenas) svārstības; līguma slēgšanas brīdī nav iespējams paredzēt patiesās kurināmā sagādes izmaksas; ja prognozētā cena ir mazāka nekā faktiskā, cenu starpība atkarībā no līguma veida būs jāsedz vai nu kurināmā tirgotājam, vai arī pircējam (un otrādi).
- abām pusēm pastāv iespējas mazināt riskus – iegādāties risku ierobežošanas (*hedging*) instrumentus, līgumā iekļaut risku mazinošus nosacījumus, diversificēt līgumu portfeli. Eksistē šādi kurināmā tirdzniecības līgumu veidi:
- fiksētās cenas līgums (dabasgāze, šķelda) – pārsvarā tiek slēgts uz periodu līdz diviem gadiem; kurināmā cena tiek noteikta līguma slēgšanas brīdī un ir attiecināma uz visu līguma darbības laiku; fiksētās cenas līgumi nereti iekļauj maksu par līguma pirmstermiņa izbeigšanu no pircēja puses;
- fiksētās cenas un apjoma līgums – pārsvarā tiek slēgts uz periodu līdz diviem gadiem; kurināmā cena tiek noteikta līguma slēgšanas brīdī un ir attiecināma uz visu līguma darbības laiku; papildu līgums paredz fiksētu kurināmā apjomu, par ko lietotājs norēķinās neatkarīgi no tā, vai apjoms tiek, vai netiek patērēts (*take-or-pay* nosacījums); šādi līgumi paredz maksu par līguma pirmstermiņa izbeigšanu no pircēja puses;
- sezonālas cenas līgums (dabasgāze, šķelda) – pārsvarā tiek slēgts uz vienu gadu; līguma slēgšanas brīdī kurināmā cena vasaras un ziemas sezonām tiek noteikta atšķirīga; cenas ir attiecināmas uz visu līguma darbības laiku;

- nosacījumu cenas līgums (dabasgāze) – pārsvarā tiek slēgts uz vienu gadu; dabasgāzes cena tiek daļēji piesaistīta biržas cenai (visbiežāk – *Gaspool*), nosakot, ka cena ir fiksēta atbilstoši līguma nosacījumiem, kamēr biržas cena iekļaujas līgumā noteiktā diapazonā;
- tirgus cenas līgums (dabasgāze) – pārsvarā tiek slēgts uz vienu gadu; dabasgāzes cena tiek piesaistīta biržas cenai (visbiežāk – *Gaspool*), kam tiek noteikts papildu uzcenojums; piesaiste noteikta kā mēneša vidējā cena vai cena konkrētā mēneša stundā;
- tirgus cenas līgums ar fiksētu apjomu (dabasgāze) – pārsvarā to slēdz patērētāji ar lielu dabasgāzes patēriņu uz vienu gadu; dabasgāzes cena tiek piesaistīta biržas cenai (visbiežāk – *Gaspool*), kam tiek noteikts papildu uzcenojums; piesaiste noteikta kā mēneša vidējā cena vai cena konkrētā mēneša stundā; papildus tiek noteikts apjoms, kas līguma ietvarā jāiegādājas.

Dabasgāzes cenu Latvijā būtiski ietekmē tendences pasaules dabasgāzes un naftas tirgos, kur pēdējos trīs gados vērojama liela cenu dinamika. Pieaugot dabasgāzes patēriņam Āzijā, 2018. gadā dabasgāzes cena gan pasaulē, gan Latvijā strauji pieauga. 2019. gads sekoja ar salīdzinoši siltu ziemu, kā arī būtisku dabasgāzes ražošanas kapacitātes pieaugumu ASV un Austrālijā un arī ekonomisko saspīlējumu starp ASV un Ķīnu. Tā rezultātā dabasgāzes tirgū bija vērojama strauja cenas lejupslīde. Savukārt 2020. gads, ņemot vērā cenu samazinājumu iepriekšējā gadā, sākās ar salīdzinoši lieliem dabasgāzes krājumiem un pieprasījuma samazinājumu Āzijā, palēninoties ražošanas procesiem pēc 2019. gada sākuma koronavīrusa uzliesmojuma (4.3. att.).



4.3. attēls. *Gaspool* mēneša vidējā cena.

Latvijas šķeldas tirgu primāri ietekmē saražotais šķeldas apjoms, resursa imports no Lietuvas un Baltkrievijas, kā arī eksports uz Ziemeļvalstīm un Centrāleiropu. Vienlaikus ar dabasgāzes cenas pieaugumu 2018. gadā Latvijā bija novērojams arī straujš šķeldas cenas pieaugums. Tas saistāms ar šķeldas izstrādei nelabvēlīgiem laikapstākļiem Latvijā un kaimiņvalstīs, kā arī negaidītu šķeldas pieprasījuma pieaugumu. 2019. gadā laika laikapstākļi normalizējās, un tā rezultātā šķeldas cenas 2019./2020. gada apkures sezonā samazinājās. Šķeldas cenās vērojamas būtiskas reģionālas atšķirības – vietās, kur pieprasījums un piedāvājums ir samērīgs, šķeldas cenas ir zemākas. Savukārt reģionos, no kuriem iespējams eksports, izmantojot jūras transportu, un reģionos, kur ražošanas un/vai siltumapgādes nozarēs būtiski pieaudzis biomasas kurināmā īpatsvars, patēriņš audzis straujāk nekā ražošana. Līdz ar to atsevišķos Latvijas novados cena saglabājusies salīdzinoši augsta (4.4. att.).

Kurināmā tirgus tendenču dēļ šobrīd siltumapgādes komersanti nereti atrodas situācijā, kur noslēgtais fiksētās cenas līgums (gan dabasgāzes, gan šķeldas) būtiski pārsniedz aktuālo tirgus cenu, pat ņemot vērā saistības, ko rada pirmstermiņa līguma izbeigšana.

Tarifu izvērtēšanas procesā tiek rūpīgi pārbaudītas šādas pozīcijas:

- komersants seko līdzi kurināmā tirgus tendencēm un ņem tās vērā, organizējot kurināmā iegādi;
- komersants pirms līguma slēgšanas organizējis efektīvu iepirkuma procedūru (veikta cenu aptauja, vairāki pretendenti);
- komersants izvēlēties saimnieciski izdevīgāko piedāvājumu, ievērojot uz lietotājiem attiecināmās izmaksas kopumā.



4.4. att. Šķeldas cenas atšķirība dažādos Latvijas novados.

Ja komersants uzskatāmi pierādījis, ka godprātīgi izpildījis visus iepriekš minētos punktus, Regulatoram nav pamata noraidīt tarifā iekļautās kurināmā izmaksas. Būtiski uzsvērt, ka Regulatora pārraudzībā ir tarifā iekļauto izmaksu izvērtēšana nevis līguma formas vai piegādātāja izvēles ietekmēšana.

4.6. Viedās uzskaites raksturīgās iezīmes

ES valstīs viedās dabasgāzes uzskaites sistēmas ieviešana sākās dažādos laika posmos, turklāt tā norit daudz lēnāk, salīdzinot ar viedo elektroenerģijas uzskaiti, kaut arī viedās sistēmas priekšrocības ir acīmredzamas: viedā uzskaitē dabasgāzes nozarē ne tikai veicina efektīvāku enerģijas resursu izmantošanu, bet arī būtiski optimizē gāzes apgādes sistēmas pārvaldību, kā arī datu apkopošanu, analīzi un arhivēšanu.

Viedā datu apmaiņas un pārraides sistēma sastāv no šādiem elementiem [69]:

- viedie skaitītāji, kas veic datu uzskaiti un pārraidi;
- datu savācējs, kas koordinē informācijas apmaiņu ar visiem sistēmai pieslēgtajiem skaitītājiem, kas atrodas konkrētajā teritorijā;
- sakaru sistēmas;
- informācijas vadības sistēma.

Direktīvas 2012/27/ES 9. panta 2. daļa paredz, ka, ES dalībvalstij ieviešot dabasgāzes un/vai elektroenerģijas patēriņa viedo mēraparātu sistēmu saskaņā ar Direktīvu 2009/72/ES un Direktīvu 2009/73/ES, tā:

- nodrošina iespēju galalietotājiem no viedās uzskaites sistēmām saņemt informāciju par faktisko izmantošanas laiku un to, ka, nosakot minimālās skaitītāju funkcijas un tirgus dalībniekiem noteiktos pienākumus, tiek pilnībā ņemti vērā energoefektivitātes mērķi un galalietotāju ieguvumi;
- atbilstoši attiecīgajiem ES tiesību aktiem datu aizsardzības un konfidencialitātes jomā galalietotājiem tiek garantēts viedo skaitītāju un datu pārraides drošums, kā arī galalietotāju konfidencialitāte;
- nosaka, lai viedo skaitītāju uzstādīšanas laikā klientiem tiktu sniegti atbilstoši padomi un informācija, it īpaši par visām skaitītāja rādījumu pārvaldīšanas un enerģijas patēriņa pārraudzības iespējām.

Tomēr Eiropas Savienībā nav noteiktas stingras prasības attiecībā uz kolektoru modeļu un tiem atbilstošās programmatūras izvēli, tāpēc ir izveidojusies situācija, kurā pastāv četras datu nolasīšanas sistēmas ar atšķirīgu ierīču funkcionalitāti, un tas apgrūtina efektīvas telemetrijas sistēmas izstrādi. Nav noteiktas arī īpašas prasības nodrošināt telemetrijas sistēmas ārējo barošanu objektos ar lielu patēriņa apjomu, kur datus ir nepieciešams nolasīt vairākas reizes dienā.

Latvijā par dabasgāzes viedās uzskaites sākumu var uzskatīt 2004. gadu, kad tika definēts mērķis nodrošināt maksimāli iespējamā patērētās dabasgāzes apjoma uzskaiti, izmantojot telemetrijas sistēmu. Šobrīd Latvijas gāzes sadales sistēmā, izmantojot telemetriju, apstrādā aptuveni 75 % no visas informācijas par dabasgāzes patēriņu. Datu pārraide notiek ar datu pārraides iekārtā ievietotu *SIM* karti, izmantojot *GSM* sakaru sistēmu. Latvijas gāzes apgādes sistēmā ir uzstādīti aptuveni 3100 spiediena un temperatūras datu kolektori; 510 no tiem ir aprīkoti ar telemetrijas sistēmu. Tomēr tehnisko un funkcionālo parametru vienotas prasības viedajiem gāzes skaitītājiem Latvijā vēl nav izstrādātas.

Latvijas Energoefektivitātes likuma 16. panta sadaļa nosaka, ka sistēmas operators, ņemot vērā enerģijas lietotāju vajadzības un potenciālos ieguvumus, var noteikt minimālās viedā komercuzskaites mēraparāta funkcijas, tai skaitā iespēju iegūt informāciju par faktisko enerģijas patēriņu konkrētā laika posmā. Turklāt likums nosaka arī to, ka sistēmas operatoram, uzstādot viedo skaitītāju, jāsniedz enerģijas patērētājam informācija par mēraparāta rādījumu pārvaldību un enerģijas patēriņa pārraudzību [70].

Kopš 2018. gada 25. maija ES dalībvalstīs tiek piemērotas fiziskas personas datu aizsardzības prasības, ko nosaka Eiropas Parlamenta un Eiropas Padomes Regula 2016/679 par fizisko personu aizsardzību attiecībā uz personas datu apstrādi un šādu datu brīvu apriti. Latvijā šīs prasības ir nostiprinātas Fizisko personu datu apstrādes likumā, kas nosaka, ka gan dabasgāzes sadales sistēmas operatoram (turpmāk tekstā – SSO), gan datu apstrādātājam ir jānodrošina komercuzskaites viedo mēraparātu sistēmas datu drošība, kā arī enerģijas patērētāju datu aizsardzība [71].

Daudzās ES dalībvalstīs patlaban norisinās diskusijas par to, kādi kritēriji ir iekļaujami viedās uzskaites sistēmas un viedo skaitītāju tehniskās ekspluatācijas prasību kopumā. Piemēram, Īrijas tehniskajā ziņojumā “Viedā uzskaites sistēma” [72] ir minētas deviņas galvenās prasības, kas izvirzāmas viedajiem skaitītājiem:

- drošas datu pārraides nodrošināšana;
- divpusējas komunikācijas nodrošināšana starp viedajām uzskaites sistēmām un ārējiem sakaru tīkliem;
- iespēja nolasīt rādījumus gan patērētājam, gan jebkurai trešajai personai, kuru ir pilnvarojis patērētājs;
- iespēja operatoram attālināti nolasīt rādījumus;

- iespēja nolasīt rādījumus pietiekami bieži, lai tos varētu izmantot enerģijas patēriņa analīzei tās lielākas ekonomijas nolūkā;
- iespēja nolasīt rādījumus pietiekami bieži, lai operators datus varētu izmantot tīklu optimizēšanai;
- mūsdienīga tarifkācijas sistēma – dabasgāzes gadījumā skaitītāji, kas darbojas pēc avansu sistēmas modeļa (turpmāk – priekšapmaksas skaitītāji);
- iespēja attālināti kontrolēt dabasgāzes piegādes pārtraukšanu/pieslēgšanu un/vai plūsmas ierobežošanu noteiktām patērētāju grupām;
- nesankcionētas iejaukšanās identificēšanas un seku novēršanas nodrošināšana.

Arī valstīs, kas neietilpst ES sastāvā, ir identificēti daži ar telemetrijas sistēmas izmantošanu saistīti izaicinājumi, ko būtu jāatrisina, lai ieviestu pilnvērtīgu un drošu informācijas attālinātu nolasīšanu. Piemēram, Japāna norāda vairākas problēmas: atkarību no klienta komunikāciju infrastruktūras (tās sākotnējā tehniskā stāvokļa); klientu pieprasījumu pēc daudzveidīgiem pakalpojumiem (kas aktualizē datu apmaiņas drošības līmeņa jautājumu), kā arī skaitītāju pieejamību mājokļos (kas prasa aizsardzības pasākumus klientu mājokļos) [73].

Japānā viedā skaitītāja datu apmaiņas sistēmai tiek izvirzītas noteiktas prasības:

- datu pārraides nodrošināšana, izmantojot klienta tālruņa līniju;
- divpusējas komunikācijas sistēmas nepieciešamība;
- dažādu pakalpojumu nodrošināšana pēc klienta pieprasījuma, ieskaitot datu monitoringu saistībā ar traucējumiem, netipisku datu plūsmu un tāl vadības atslēgšanos;
- raidītāja akumulatoram jākalpo vismaz 10 gadu.

Pakistānā automātiska datu nolasīšanas sistēma uzstādīta gan individuālajiem, gan industriālajiem dabasgāzes patērētājiem. Agrāk informācijas apstrādei bija nepieciešama skaitītāja rādījumu vizuāla nolasīšana ar to turpmāku manuālu pārsūtīšanu un ievadīšanu sistēmā, un uz tā pamata tika izrakstīts rēķins. Tagad informācijas apkopošana, apstrāde un izmantošana rēķinu izrakstīšanai notiek bez vizuālās datu nolasīšanas un manuālās pārsūtīšanas posma. Individuālajiem patērētājiem ir izvēlēta viedā priekšapmaksas sistēma, savukārt industriālajiem patērētājiem, kas izmanto ievērojamus dabasgāzes apjomus, ir izraudzīts telemetrijas risinājums. Tas paredz GSM sistēmas izmantošanu, kas ļauj nodrošināt attālinātu monitoringu un kontrolēt dabasgāzes plūsmu ar iespēju ieslēgt un izslēgt skaitītāju. Šādas sistēmas ļauj līdz minimumam samazināt cilvēciskā faktora izraisītu kļūdu iespējamību un vienlaikus samazināt izmaksas, kas saistītas ar datu nolasīšanu, aprēķinu veikšanu un rēķinu nosūtīšanu. Šādus dabasgāzes piegādes viedizācības principus būtu ieteicams izmantot arī citās valstīs [74].

Kopumā viedo priekšapmaksas skaitītāju izmantošana nodrošina klientu rūpīgāku attieksmi pret energoresursiem, kā arī precīzu un savlaicīgu patērētās dabasgāzes apmaksu [75]. Viedā sistēma ļauj gāzes piegādātājam un SSO ātrāk atgūt ieguldītos finanšu līdzekļus. Viedie priekšapmaksas skaitītāji ir jāaprīko ar autonomiem strāvas elementiem (baterijām) un iebūvētu vārstu, kas noslēdz gāzes plūsmu, kad baterija ir izlādējusies vai kad tā nav ievietota. Izmantojot priekšapmaksas skaitītājus, ir jāatrod efektīvākie risinājumi, kas nodrošinātu maksimālu baterijas darbības laiku.

Akumulatora kalpošanas ilgumam un uzlādes līmenim ir liela nozīme, jo ir nepieciešams nepārtraukti uzraudzīt apmaksātā dabasgāzes apjoma atlikumu, lai nepieļautu nejaušu dabasgāzes piegādes pārtraukšanu, kā arī savlaicīgi atslēgtu dabasgāzes padevi, tiklīdz ir iztērēts apmaksātais apjoms.

4.7. Viedās uzskaites priekšrocības

Viedo skaitītāju izmantošana nodrošina virkni priekšrocību, kuras var iedalīt vairākās grupās:

- 1) pēc ierīces tehniskajiem parametriem:
 - precīzāka, dinamiskāka un drošāka patērētā apjoma uzskaitē;
 - efektīva visas skaitītāju grupas pārvaldība, saņemot trauksmes signālu (temperatūra, manipulācijas, akumulators, gaiss sistēmā);
 - attālināta rādījumu nolasīšana;
 - iespēja izvēlēties dažādus komunikācijas risinājumus datu pārraidei (informācijas nosūtīšana, izmantojot mobilos vai radiosakarus, izmantojot optiskos kabeļus vai bezvadu signālu);
- 2) pēc izmantošanas efektivitātes dabasgāzes sadales sistēmā:
 - attālināta automātiska datu nolasīšana ietaupa sistēmas operatora līdzekļus, līdz minimumam samazinot skaitītāju fizisko apkalpošanu (rādījumu nolasīšana, dabasgāzes padeves pārtraukšana/atjaunošana, ierīces fiziskā stāvokļa verifikācija u. c.);
 - efektīva un ātra dabasgāzes noplūdes vai citu tehnisku problēmu identifikācija gāzes vadu sistēmā;
 - dabasgāzes nesankcionēta slietošanas novēršana, identificējot netipisku slodzi, kas neatbilst dabasgāzes patēriņa profilam;
 - dabasgāzes patēriņa prognozēšanas atvieglošana sistēmas optimizācijai, iegūstot precīzus datus par izmantoto apjomu, kā to nosaka MK noteikumi Nr. 78 [77];
 - klientu apkalpošanas uzlabošanās (patēriņa rādījumu pievienošana un analīze, datu operatīva kontrole un nolasīšana);
 - klientu diferencēšanas (segmentēšanas un profilēšanas) iespēja, balstoties uz iegūtajiem datiem par gāzes patēriņu;
 - iespēja norēķināties par izlietoto dabasgāzi avansa maksājuma veidā;
 - iespēja attālināti un ātri atslēgt dabasgāzi bez iekļūšanas objektā, kā to nosaka MK noteikumi Nr. 78, tai skaitā – iespēja apturēt dabasgāzes piegādi (nemaksāšanas gadījumā) un/vai lauzt līgumu;
 - iespēja optimizēt sistēmas apkalpošanu avārijas gadījumos, atslēdzot dabasgāzes piegādi, kā arī izpildīt sistēmas operatora pienākumus ierobežot gāzes piegādi, kā to nosaka Ministru kabineta 2011. gada 19. aprīļa noteikumi Nr. 312 “Energijas lietotāju apgādes un kurināmā pārdošanas kārtība izsludinātas enerģētiskās krīzes laikā un valsts apdraudējuma gadījumā”;
 - iespēja iegūt precīzu informāciju par gāzes vadu sistēmu, kas ļauj detalizēti aprēķināt zaudējumu;
 - iespēja uzstādīt viedo uzskaites sistēmu kontrolmērījumu vietās.
- 3) pēc energoefektivitātes un izmantošanas ērtībām galalietotājiem:
 - precīzas informācijas iegūšana elektroniskā formā par patērēto dabasgāzi;
 - informācijas iegūšana par patērēto apjomu reālajā laikā, ļaujot klientam mainīt enerģijas lietošanas scenāriju un taupīt energoresursus.

4.8. Viedo skaitītāju piederība

No juridiskā viedokļa viedais gāzes skaitītājs var piederēt SSO vai apkalpojošam uzņēmumam, vai enerģijas patērētājam.

Ja viedā skaitītāja īpašnieks ir SSO, kas nodrošina arī datu infrastruktūras un uzskaites pakalpojuma vadību, daudzu funkciju veikšana kļūst vienkāršāka. Tomēr tas attiecas galvenokārt uz tām valstīm, kurās ir viens vai ne vairāk par diviem SSO, jo jāņem vērā, ka datu pārsūtīšana un apmaiņa, izmantojot dažādu operatoru atšķirīgas sistēmas, ir saistīta ar zināmu risku. Izmaksas var samazināt, organizējot vienotu datu pārraides tīklu starp dabasgāzes, siltuma un ūdens apgādes sistēmu operatoriem.

Ja datus fiksē un apstrādā uzņēmums, kas sniedz uzskaites pakalpojumus, paveras iespēja ievērojami atvieglot no viedajām sistēmām saņemtās datu plūsmas pārvaldību. Šāds uzņēmums var piedāvāt uzskaites un datu pārraides pakalpojumus plašam klientu lokam, tādējādi samazinot pakalpojumu izmaksas. Tādā gadījumā atbildību par skaitītājiem uzņemas vai nu SSO, vai arī uzskaites pakalpojumu sniedzējs.

Savukārt, ja skaitītāji pieder enerģijas patērētājiem, SSO vajadzētu pievērst uzmanību ne tikai dabasgāzes apjoma uzskaitēi, bet arī citiem faktoriem, piemēram, nesankcionētu manipulāciju veikšanas riska pieaugumam [77]. Ir konstatēti daudzi gadījumi, kad, neskatoties uz jaunā gāzes skaitītāja verifikāciju un ražotāja plombas esamību, ar mēraparātu ir veiktas nelikumīgas manipulācijas. Tāpēc būtu jāparedz stingrākas drošības prasības viedo skaitītāju uzstādīšanai. Varētu pieņemt lēmumu par SSO ekskluzīvajām īpašumtiesībām uz komercuzskaites mēraparātiem. Gadījumos, kad skaitītāju ir atļauts iegādāties un izmantot patērētājam, SSO būtu jāorganizē verificēta skaitītāja uzstādīšana un jāpārlicinās par mērījumu precizitāti.

Latvijā saskaņā ar MK noteikumiem Nr. 78 individuālo patērētāju gāzes apgādes sistēmā uzstādītie uzskaites mēraparāti ir SSO īpašums. Mēraparāti, kas nav uzstādīti individuāliem patērētājiem, pieder pašiem patērētājiem, izņemot gadījumus, kad tos iegādājas un uzstāda SSO [78]. Tādējādi industriālais vai komerciālais patērētājs var iegādāties savu gāzes skaitītāju un lūgt SSO to uzstādīt.

No SSO darba organizācijas viedokļa būtu ērtāk, ja skaitītāji būtu tā īpašumā. Tas piešķirtu operatoram tiesības netraucēti veikt ekspertīzes un, ja nepieciešams, saglabāt to rezultātus kā pierādījumu turpmākām darbībām zaudējumu atgūšanai. Tādas darbības nav iespējams veikt ar skaitītāju, kas pieder patērētājam, jo tiesības piekļūt ierīcei pret patērētāja gribu var iegūt tikai tiesībsargājošās iestādes kriminālprocesa vajadzībām.

Tādējādi, lai mazinātu birokrātiskos un juridiskos šķēršļus pilnīgai viedo skaitītāju ieviešanai un ekspluatācijai, ir nepieciešams izvērtēt dabasgāzes viedizācijas saistību ar gāzes skaitītāju dažādo juridisko piederību.

Neskatoties uz to, ka viedās dabasgāzes uzskaites sistēmas pirmsākumi Latvijā ir rodami jau 2004. gadā, tās aktualitāte ir būtiski pieaugusi tikai līdz ar dabasgāzes tirgus atvēršanu 2017. gadā, kas sniedz iespēju arī efektīvāk izpildīt prasības, ko definē KM noteikumi Nr. 78. Viedo skaitītāju ieviešana nodrošina iespēju ātri un precīzi apkopot, analizēt un arhivēt datus par dabasgāzes patēriņu, kā arī ļauj SSO efektīvāk novērtēt un plānot gāzes apgādes sistēmas attīstību dažādos valsts reģionos. Viedās resursu uzskaites un galalietotāju izglītošanas sistēmai ir zināms potenciāls sasniegt energoefektivitātes mērķus, kas savukārt veicina ilgtspējīgu tautsaimniecības attīstību, kā arī ierobežo negatīvo ietekmi uz klimatu.

Jāpievērš uzmanība tam, ka būtu lietderīgi izpētīt dabasgāzes uzskaites viedizācijas attīstības iespējas Latvijā. Tajā pašā laikā no dažādiem viedokļiem (tehniskā, ekonomiskā, ekspluatācijas, administratīvā u. c.) būtu jāizvērtē viedo gāzes skaitītāju izmantošana valsts gāzes apgādes sistēmas optimizācijas kontekstā. Šobrīd ne ES kopumā, ne Latvijā nav izstrādātas un juridiski nostiprinātas vienotas prasības viedo gāzes skaitītāju tehniskajai atbilstībai un to ekspluatācijai, un tas zināmā mērā palēnina enerģijas patēriņa vispārējās viedizācijas tempu.

4.9. Dažādu enerģijas veidu koptirgus raksturojums (secinājumi)

1) Reģionālā gāzes tirgus izveide ir prasījusi atbilstošu normatīvo aktu pielāgošanu visās valstīs, un Latvijai šis darbs vēl ir priekšā, to nepieciešams īstenot steidzami.

2) Reģionālā gāzes tirgus izveide veicinās tirgotāju interesi par reģionu, stiprinās piegādes drošību un uzlabos tirgus likviditāti. Tirgotāju konkurence, ilgtermiņā prognozējami tarifi, atcelti tarifi uz iekšējām robežām, tostarp, ārējo ieejas-izejas tarifu caurspīdīgums, kā arī digitāla komunikācija un uz klientu vērsta darbība, ir daļa no ieguvumiem, ko nesīs Reģionālais dabasgāzes tirgus.

3) Izstrādājot viedo dabasgāzes uzskaites sistēmu, galvenās izmaksas ir iedalāmas vienreizējās (rodas sistēmas projektēšanas, izstrādes un testēšanas procesā) un ekspluatācijas izmaksās (rodas sistēmas darbības laikā, ieskaitot datu pārraides nodrošināšanu, piemēram, izmantojot *SIM* karti un *GSM* komunikācijas sistēmu).

4) Patērētājiem visas minētās izmaksas veidojas no šādām izdevumu pozīcijām šādās pozīcijās [70]:

- maksa par viedo skaitītāju;
- maksa par skaitītāja uzstādīšanu klientam;
- sakaru sistēmas izmaksas;
- IT sistēmas izmaksas;
- maksa par sistēmas noregulēšanu;
- apkalpošanas un ekspluatācijas izdevumi;
- datu pārraides izmaksas;
- administratīvie izdevumi.

5) Lai optimizētu uzskaitītās izmaksas, ES būtu ieteicams izmantot vienotu telekomunikāciju risinājumu visiem viedajiem enerģijas uzskaites veidiem. Atsevišķu valstu pieredze rāda, ka viedā uzskaites sistēma tiek attīstīta, balstoties uz elektroenerģijas nozares viedizāciju, jo datu pārraidei ir nepieciešams enerģijas avots (elektrotīkls, akumulators, autonomi elements).

5. NODAĻA. ENERĢIJAS SADALES SISTĒMU (EES) GALA PATĒRĒTĀJU SLODŽU BALANSĒŠANA

Dinamiskā programmēšana ļauj vadīt tehnoloģiskos procesus, ja tie notiek vienmērīgi izkliedētas enerģijas laukā. Taču, izvēloties enerģijas patēriņa lauku, jāņem vērā, ka enerģijas patēriņu nosaka pieejamās gaisa apstrādes tehnoloģijas. Tāpēc izvēlētajām tehnoloģijām universālu vadības algoritmu izstrādei ir iespējams lietot noskaņojamu gala automāta sintēzes teoriju [81, 82]. Sintezētus algoritmus izstrādes stadijā iespējams programmēt balstoties ārgaisa stāvokļu diagrammā uz mikroprocesora bāzes [83].

Pārlūkojot iespējas realizēt tehnoloģisko iekārtu vadību, jāveic vairāki informācijas apkopojuma izvērtēšanas posmi.

1. Vadības sistēmas struktūras izstrāde, kuras gaitā ir jāveido atsevišķi funkcionāli bloki un to savstarpējie savienojumi. Izstrādes gaitā jābalstās uz vispārējiem ieguldīto mikroprocesoru programmas arhitektūras principiem [84], ņemot vērā arī ieteikumus to verifikācijai [85].
2. Mikroprocesoru izvēle, lai to būtu iespējams ieguldīt izstrādātajā vadības sistēmas arhitektūrā [86, 87].
3. Izvēlēta mikroprocesora programmēšanas iespēja darba algoritmu pārprogrammēšanai, pielāgojot atbilstošu aprīkojumu [88, 89, 90] un izveidojot gaisa apstrādes tehnoloģijai atbilstošas saskarnes [91, 92].

Lai iegūtu ārgaisa stāvokli raksturojoša punkta pārvietojumus līdz nepieciešamajam pieplūdes gaisa stāvokļa punktam pa trajektoriju, kas izdevīga no enerģijas patēriņa viedokļa, ir iespējams lietot dinamisko programmēšanu [79, 80]. Tad gaisa apstrādi uzskata par determinētu procesu resursu sadalīšanai.

Rekurences funkcija, kas apraksta pieplūdes gaisa sasniegto stāvokli aplūkojamā solī, ir šāda:

$$F_i(I) = \min[g(\Delta I_i) + f_{i-1}(I_i - \Delta I_i)], \quad 0 < \Delta I_i < I_i, \quad (5.1.)$$

kur: I_i – i -tā soļa entalpija;

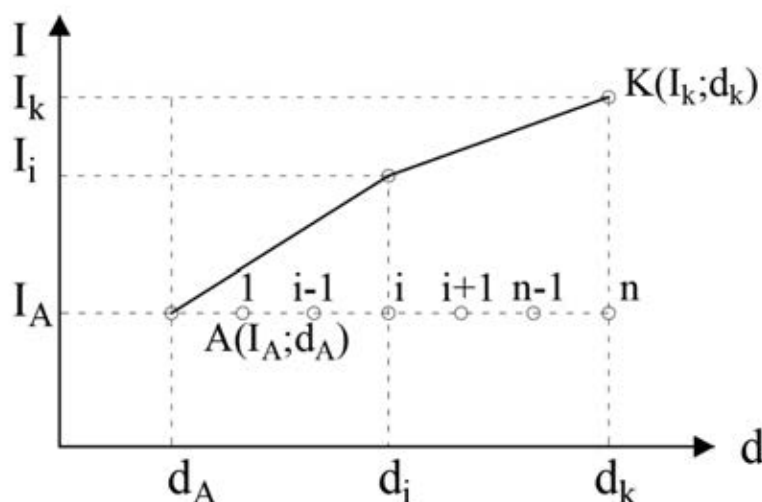
ΔI_i – entalpijas izmaiņa, veicot soli no $i-1$ līdz i ;

$f_i(I)$ – entalpijas izmaiņas funkcija (minimālais enerģijas patēriņš, pārejot stāvoklī I_i ar i soļiem ΔI_i);

$f_{i-1}(I_i - \Delta I_i)$ – minimālais enerģijas patēriņš, pārejot stāvoklī $I_i - \Delta I_i$ ar $i-1$ soļiem;

$g(\Delta I_i)$ – enerģijas patēriņa funkcija (enerģijas patēriņš – entalpijas palielināšana par ΔI_i).

Gaisa apstrādes daudzsoļu process redzams 5.1. attēlā.



5.1. att. Gaisa apstrādes procesa, ko veic pa soļiem, attēlojums I-d diagrammā.

5.1. Gaisa apstrādes virziena optimāla trajektorijas izvēles algoritms

Ārgaisa (apstrādājamā gaisa) sākuma stāvokli raksturo punkts $A(I_A; d_A)$, beigu stāvokli – punkts K ar koordinātēm $(I_k; d_k)$. Uz līnijas A-n ir atzīmētas mitruma satura izmaiņas pa soļiem (1 – pirmajā solī, i – i -tajā solī, n – pēdējā solī). Ja ir zināmas gaisa apstrādes izmaksas, tad, salīdzinot izmaksas enerģijas patēriņam pārvietojumiem ΔI_i un Δd_i atšķirīgiem lietotajiem procesiem, var atrast punkta minimālo pārvietojumu, kas atbilst minimālai izmaksai.

Definējot sākuma nosacījumus, projektēšanas gaitā ir lietderīgi noteikt optimālos gaisa apstrādes režīmus pēc minimālā reducētās enerģijas patēriņa.

Siltumapgādes sistēmu gala patērētāju uzdevums galvenokārt ir uzturēt definēto komforta temperatūru iekštelpās, taču atsevišķos gadījumos ir iespējama arī gaisa kondicionēšana, noteiktās robežās noturot ne tikai telpu gaisa temperatūru, bet arī relatīvo mitrumu. Šādos gadījumos atsevišķi jāaplūko gaisa apstrādes trajektorijas ar minimālu enerģiju atrašana daudzzonu gaisa kondicionēšanas sistēmās. Ja ir liels skaits kondicionējamo telpu ar dažādām siltuma un mitruma slodzēm, tad šajās telpās nav iespējams precīzi uzturēt temperatūru un relatīvo mitrumu, lietojot tradicionālās gaisa kondicionieru shēmas. Minēto trūkumu var novērst, izmantojot divkanālu gaisa kondicionēšanas sistēmas, kas, katrā kanālā sagatavojot pieplūdes gaisu ar divu atsevišķu kondicionieru palīdzību, nodrošina šajos kanālos gaisu ar minimālu dp_{min} un maksimālu dp_{max} mitruma saturu, precīzāk – sajaucot gaisa plūsmas līdz nepieciešamajam mitruma saturam zonālos gaisa jaucējos un sasildot pieplūdes gaisu zonālos pielāgotājos. Taču šajā gadījumā ir jāatrisina papildu enerģijas patēriņa optimizācijas problēmas.

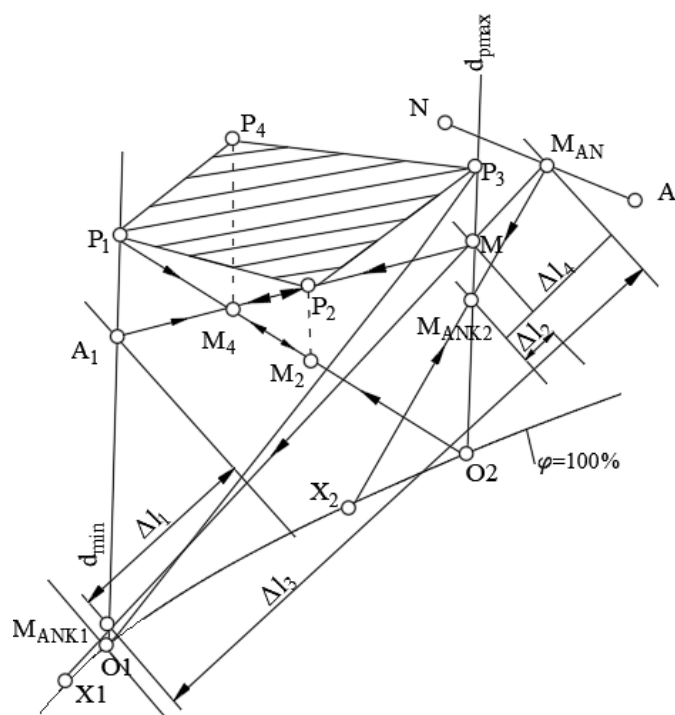
Vispārējā gadījumā pieplūdes gaisa koordināšu izvēle uz pastāvīgu minimālā un maksimālā pieplūdes gaisa mitruma satura līnijām I-d diagrammā ir summārās jaudas minimizācija zonālajos pielāgotājos, t. i., summas minimuma atrašana,

$$\sum Q_i = \min, \quad (5.2.)$$

kur Q_i – i -tās zonas pielāgotāja jauda, kW.

5.2. nosacījuma izpilde ir atkarīga no pieplūdes gaisa daļu sajaukšanas taisnes stāvokļa (5.2. att.). Kopējā enerģijas patēriņa minimizācijas uzdevumu var atrisināt, aprēķinot gaisa daļu

sajaukšanas taisnes virzieniem ar krituma saturu dp_{min} un dp_{max} , ko ierobežo pieplūdes gaisa stāvokļu punkts un O_1 un O_2 .



5.2. att. Optimāla (ar minimālu enerģijas patēriņu) jaukšanas virziena gaisa daļām divkanālu daudzzonu MKS meklēšanas grafisks skaidrojums [100].

P_1, P_2, P_3, P_4 . Iesvītrotā vieta attēlā ir gaisa stāvokļa daļa, kas definēta ar taisnēm un savieno pieplūdes gaisa parametru punktus P_1, P_2, P_3, P_4 .

M_i – pieplūdes gaisa daļu maisījuma parametri i -tai zonai;

M_{ANK} – ārgaisa un noplūdes gaisa maisījuma sajaukšanas punkts ar gaisa daļu, kas apstrādāts mitrināšanas kamerā;

M_{AN} – ārgaisa un noplūdes gaisa maisījums.

$$\Delta I_i = I_{in} - I_{iM},$$

kur:

I_{in} – i -tās zonas pieplūdes gaisa entalpija;

I_{iM} – i -tās zonas gaisa maisījuma (ar nepieciešamo mitruma saturu).

$$\Delta I_i = I_{in} - I_{iM},$$

kur:

I_{in} – i -tās zonas pieplūdes gaisa entalpija;

I_{iM} – i -tās zonas gaisa maisījuma (ar nepieciešamo mitruma saturu).

Pēc tam tiek salīdzināta i -tā soļa Q_g vērtība ar Q_g vērtību solī $i-1$. Taisnei A_1M šķēļot piesātinājuma līkni (virziens P_3O_1), aprēķins beidzas ar kopējo enerģijas patēriņa un taisnes A_1M koordināšu dp_{min} un dp_{max} fiksēšanu uz izolīnijām, izpildot 4.2. nosacījumu.

5.2. ESS gala patērētāju slodžu balansēšanas algoritmu sintēze

Tālāk aplūkojams pielāgojamas kombināciju shēmas, kuras realizē noteiktu Būla funkciju kopu, veicot MKS vadības sistēmas struktūras sintēzes uzdevums. Nepieciešamība pēc

šāda risinājuma parādījās ESS gala slodžu balansēšanas mikroklimata kondicionēšanas sistēmu (MKS) vadības ierīču projektēšanā.

Ir zināmi ārgaisa stāvokļa apgabali, kuros izmaiņas rada ar atbilstošu gaisa apstrādes tehnoloģiju. Ja ir zināmas tehnoloģiskās iespējas gaisa apstrādei, tad šiem apgabaliem definē iespējamus procesus ar minimālām izmaksām. Gaisa apstrādes apgabalus identificē:

- 1) tieši – novērojot ārgaisa parametrus;
- 2) netieši – fiksējot tehnoloģisko iekārtu robežstāvokļus.

MKS funkcionēšanas nosacījumu analīze parādīja, ka vadības ierīces loģisko daļu var aplūkot kā galīgu automātu bez atmiņas (kombināciju shēmu), kura ieejas signāli vispārīgā gadījumā ir kādas kopas $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ signāli, savukārt izejas signāli – kopas $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_m\}$ signāli. Diskrēto informāciju par mērāmajiem signāliem aplūkojamās shēmās iegūst, izmantojot pozīcijas regulatorus (ar releja raksturliķni), kuru nostrādes nosacījumus kodē binārajā skaitīšanas sistēmā. Vadības ierīcei jānodrošina nekļūdīga ieejas-izejas saite gaisa apstrādei ar minimālu enerģijas patēriņu.

Sintezējamajai ierīcei ir v režīmi, kur katru režīmu apraksta kāda m Būla funkciju no n_i mainīgajiem:

$$F_i(n_i, m) = \begin{cases} Z_1 = f_{1i}(A_{i1}, \dots, A_{in_i}); \\ Z_m = f_{mi}(A_{i1}, \dots, A_{in_i}), \end{cases} \quad (i = 1, \dots, v; n_i \leq n). \quad (5.3.)$$

Jāatzīmē, ka vispārējā gadījumā visas kādu ieejas mainīgo Z_k ($k=1, \dots, m$) vērtības sistēmās var būt patvaļīgas (faktiskais sistēmu F_i veidojošo funkciju skaits var būt mazāks par m). Sistēmas tabulāras definēšanas gadījumā šādam mainīgajam Z_k atbilstošā kolonna sastāvēs tikai no svītrām.

Ir jāatrod pēc sarežģītības optimālu funkciju sistēma:

$$S^*(q, m) = \begin{cases} Z_1 = \psi_1(B_1, \dots, B_q); \\ Z_m = \psi_m(B_1, \dots, B_q), \end{cases} \quad (5.4.)$$

kas apraksta kombināciju shēmas struktūru un kurai ir q ieejas ($q \geq n_m = \max\{n_1, \dots, n_v\}$), m ieejas un ko realizē, no ārpuses regulējot jebkuru no sistēmām $F_i(n_i, m)$ ($i=1, \dots, v$).

Sistēmas optimalitātes kritērijs var būt sistēmas *DNF* dažādo konjunkciju minimālais skaits, *DNF* ietilpstošo burtu skaits, sistēmas izmantošanā izmantoto noteiktas bāzes elementu skaits utt.

Ar shēmas pielāgošanu saprot kāda kopas $\{0, 1, A_1, \bar{A}_1, \dots, A_n, \bar{A}_n\}$ signāla attiecināšanu katrai shēmas ieejai B_1, \dots, B_q .

Par sistēmas $S(q, m)$ pielāgošanu sistēmai $F_i(n_i, m)$ tiek saukta katra sistēmas $S(q, m)$ argumenta B_k ($k=1, \dots, q$) aizstāšanu ar kopas $\{0, 1, A_i, \bar{A}_i, \dots, A_{in_i}, \bar{A}_{in_i}\}$ elementu, kur A_{i1}, \dots, A_{in_i} – sistēmas $F_i(n_i, m)$ argumenti, turklāt katrs $\bar{A}_{in} \in \{A_{in}, \bar{A}_{in}\}$ ($n = 1, \dots, n_1$) elements regulēšanā tiek izmantots vismaz vienu reizi.

Šādi iestatījumi tiks apzīmēti ar $Q_j(q, n_i)$ ($j=1, \dots, N(q, n_i)$), kur $N(q, n_i)$ – aplūkojamo iestatījumu skaits.

Visu mainīgo A_{i1}, \dots, A_{in_i} kombināciju kopa tiks apzīmēta ar $A^{(i)}$ visu mainīgo B_1, \dots, B_q kopu – ar B . Katrai kombinācijai $a \in A^{(i)}$ nozīmē to, ka iestatījums $Q_j(q, n_i)$ ($j=1, \dots, N(q, n_i)$) kombinācijai viennozīmīgi izveido atbilstoši kombināciju $B \in B_1$, ko apzīmē ar $B_{Q_j}^a$.

Sistēma $S^*(q, m)$ ir iestatāma, ja ar sistēmu $F_i(n_i, m)$, ja pastāv tāds iestatījums $Q_j(q, n_i)$, pie kura katrai funkcijai $f_{ki} \in F_j$ ($k = 1, \dots, m$) izpildās nosacījums $f_{ki}(a) = \psi_k(B_{Q_j}^a)$ visiem

a , kuriem ir noteikta f_{ki} .

Tiks uzskatīts, ka ierīces shēma realizē sistēmu F_i , ja sistēma $S'(q, m)$, kas apraksta šīs shēmas darbību, būs iestatāma par sistēmu F_i .

Pie fiksēta q shēmas ieeju skaita vispārējā pieeja risinājumam sastāv no tālāk tekstā aprakstītajiem elementiem. Funkciju sistēmai $S_j^i(q, m) = \{\psi_j^{kl}, \dots, \psi_j^{ml}\}$, ko iestata par $F_i(n_i, m)$ pie iestatījuma $Q_j(q, n_i)$, un katrai funkcijai $\psi_j^{ki} (k = 1, \dots, m)$ pastāv minimāls argumentu skaits B_1, \dots, B_q , kuriem ψ_j^{ki} ir noteikta. Katrā sistēmā $F_i (i = 1, \dots, v)$ savieno sistēmu kopu $M_j = \{S_1^i, \dots, S_{N(q, n_i)}^i\}$

Apvienojot daļēji noteiktas Būla funkciju sistēmas $S'(q, m)$ un $S''(q, m)$, iegūtā sistēma ir $S'''(q, m)$, kas būs katras sistēmas S' un S'' sākotnējā definīcija, turklāt tai katrai funkcijai, kas pieder sistēmai S''' , būs minimāls argumentu komplektu skaits, kuriem šī funkcija ir definēta.

Divas sistēmas $S_{j_1}^{i_1}$ un $S_{j_2}^{i_2}$

$(i_1 = i_2; i_1, i_2 = 1, \dots, v; j_1 = 1, \dots, N(q, n_{i_1}); j_2 = 1, \dots, N(q, n_{i_2}))$

sauksim par savietojamām, ja pastāv to apvienojums.

Skaidri redzams, ka sistēma $S(q, m) + S_1, \dots$, kas ir kādas kopas W pa pāriem savietotu sistēmu $S_{j_1}^i, S_{j_2}^i, \dots, S_{j_v}^i$ apvienojums, ir noskaņojama uz katru no $S_{j_1}^i, S_{j_2}^i, \dots, S_{j_v}^i$ definētajām sistēmām.

Aplūkojamā uzdevuma risinājuma shēma pie definētā skaita q ir šāda.

1. Secīgi atrod dažādas kopas W un tām atbilstošos apvienojumus $S(q, m)$.

2. Veic katras atrastās sistēmas $S(q, m)$ minimizāciju.

3. Iegūto sistēmu $S(q, m)$ minimizācijas rezultātus savstarpēji salīdzina un iegaumē vislabāko rezultātu.

Jāatzīmē, ka pie ieeju skaita $q > n_m + \lceil \log_2 v \rceil$ [risinājums pastāv vienmēr.

Lai atrastu kopas W , var izmantot to pašu sistēmu $S_{j_i}^i (i = 1, \dots, v; j_i = 1, \dots, N(q, n_i))$ pārļaušanas organizācijas principu, ko izmanto pa pāriem savietojamu funkciju meklēšanā (4–6).

Lai noteiktu divu sistēmu $S_{j_1}^{i_1}$ un $S_{j_2}^{i_2}$ saderību, ir pietiekami pārlicināties, ka pie viena $k = 1, \dots, m$ funkcijas $\psi_{j_1}^{kl_1} \in S_{j_1}^{i_1}$ un $\psi_{j_2}^{kl_2} \in S_{j_2}^{i_2}$.

Ja kā sākuma sistēmas $S(q, m)$ optimalitātes kritēriju lieto minimālu argumentu q skaitu, tad kā sākuma datus jāņem vērā funkcijas, kas ir atkarīgas no vienāda argumentu skaita. Šajā darbā tiek aplūkots daudz vispārīgāks gadījums, kurā sākuma dati ir daļēji definētu Būla funkciju, kas ir atkarīgas no dažāda argumentu skaita, sistēmu kopa.

5.3. Grafoanalītiska metodoloģija ESS balansēšanas vadībai, ievērojot gala patērētāju dinamiskās slodzes

Grafoanalītisko funkcionālo bloku regulēšanas analīzes metode, sakārtojot tehnoloģisko parametru izraisošās iedarbes gala automātam ieejas lielumu virknē, pieļauj iegūtās binārās starpkombinācijas aprakstīt atsevišķos programmatūras blokus, ko var realizēt arī uz mikroshēmu bāzes.

Iepriekš aprakstītais sniedz iespēju funkcionālo bloku darba kanālus veidot atsevišķu lietotāja saskarnes veidā, vajadzības gadījumā vadības gaitu vizualizējot atsevišķā informācijas panelī (*dashboard*), demonstrējot būtiskās enerģijas sadales sistēmas atsevišķas tehnoloģiskas zonas un regulēšanas loku parametrus.

Definējot iestatījumu vērtību izmaiņu grafiku vēlākā laikā, var saņemt analītisku

funkcijas vērtības aplēses infografiku, modelējot dažādu enerģijas patēriņu, balstoties uz dažāda termiņa laika prognozēm.

Izstrādātā metodoloģija nodrošina šādu apakšuzdevumu sasniegšanu:

- 1) gaisa apstrādes tehnoloģiju izvēli gala patērētāju mikroklimata kondicionēšanas sistēmās, vadoties no ārgaisa stāvokļa un papildinformācijas par iekārtu stāvokli, kurā veic gaisa apstrādi un izvēlēto tehnoloģiju; uz binārā formā iegūtās informācijas pamata ESS gala patērētāju iekārtu vadības algoritmus izpilda galīgais automāts bez atmiņas [81, 93];
- 2) regulēšanas kvalitātes uzlabošanu tehnoloģisko procesu regulēšanas lokos [95];
- 3) ESS snieguma paaugstināšanu, samazinot enerģijas patēriņu tehnoloģiskajos procesos, ar papildu vadības programmu blokiem [95];
- 4) ESS ātrdarbības paaugstināšanu, novietojot atsevišķu parametru sensorus tieši tehnoloģiskajā procesā; informācija no šiem sensoriem, apstrādājot pielāgotos vadības programmas blokus [96];
- 5) ārgaisa termodinamiskā stāvokļa novērtējums apstrādātā gaisa samazināšanai [97].

5.4. ESS automātisko vadības sistēmu struktūra, to pamata un papildu funkcijas

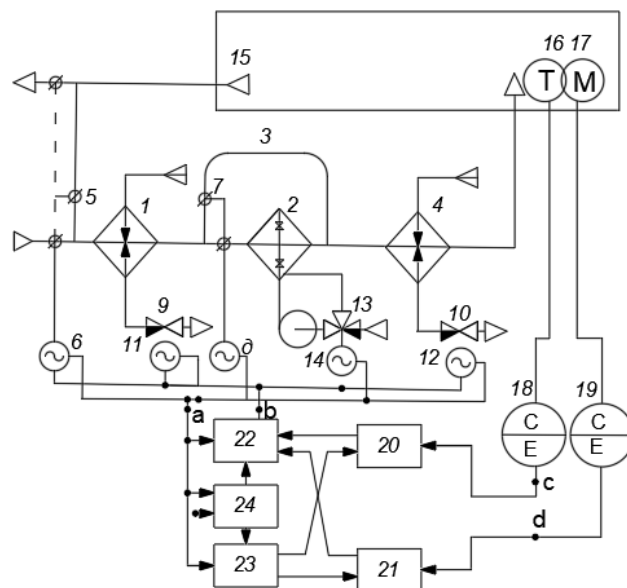
Sintezējot ESS vadības algoritmus, tiem pirmkārt definē pamatfunkcijas:

- 1) veicamā gaisa apstrādes režīma identifikācija;
- 2) gaisa parametru regulatoru izeju komutācija ar gaisa apstrādes iekārtām, nodrošinot ESS darbu algoritmā paredzētajā režīmā.

Papildu funkcijas:

- 1) koordinējošu saišu radīšana starp regulatoru izejām, tiem regulējot savstarpēji saistītus gaisa parametrus;
- 2) gaisa apstrādes režīmu vadība regulatora nejutības zonā (vienam vai abiem parametriem);
- 3) gaisa apstrādes režīmu vadība parametru pieļaujamās regulēšanas zonas robežās;
- 4) optimāla gaisa apstrādes režīmu vadība, ievērojot gaisa apmaiņas nepilnības kondicionējamā telpā.

Pamatfunkciju veikšanai – jādefinē bāzes vadības algoritms un vadības algoritms.



5.3. att. ESS vadības iekārtas funkcionālās shēmas grafisks attēlojums (24. pozīcija – programmējams vadības bloks, galīgais automāts bez atmiņas, papildu bulta apzīmē programmas ievadu) [93].

Paplašinātais vadības algoritms – vadības algoritms, kurā atšķirībā no bāzes vadības algoritma ir paredzētas papildu funkcijas.

ESS funkcionālais bloks – ESS vadības algoritma daļa, kas realizē atsevišķas vadības algoritma funkcijas (attēlojot funkcionālo bloku grafiski, tiek norādīti blokā apstrādājamās informācijas ievades kanāli un iedarbes uz citiem ESS elementiem, tās ir bloka funkcionālās saites).

Bāzes ESS enerģiju taupošu gaisa apstrādes tehnoloģijas veikšanai ietver (5.3. att): pirmās un otrās pakāpes gaisa sildītājus (1 un 4); mitrināšanas kameru (2) ar apvada gaisa vadu (3); gaisa daudzuma regulēšanas vārstus recirkulācijai (5) un apvadam (7), arī citas gaisa apstrādes tehnoloģijas, regulējošos vārstus siltumnesēja atgaitas vados (9 un 10); trīs virzienu vārstus aukstumnesēja cauruļvadā (13); elektriskos izpildmehānismus (6, 8, 11, 12, 14); regulatorus temperatūrai (18) un relatīvajam mitrumam (19) telpā (15) ar atbilstošiem sensoriem (16 un 17). Lai veiktu secīgas iedarbes uz dažādiem regulējošiem vārstiem, sistēma ir papildināta ar komutatoru (22), elektrisko mehānismu ātruma izmaiņai – kontūru pieskaņošanas blokiem atbilstoši temperatūras regulēšanas kontūrā (20), relatīvā mitruma regulēšanas kontūrā (21). Lai mainītu slēgumu ieregulējumu, kas veido iedarbes impulsus uz izpildmehānismiem atbilstoši regulēšanas kontūra raksturlielumiem un identificētajam gaisa apstrādes režīmam, sistēmā ir paredzēts dešifrators (23). Informācija, uz ko pamatojas sistēmas darbība, ir vai nu enerģijas patēriņš kondicioniera sekcijās, ko raksturo regulējošo vārstu stāvoklis, vai arī informācija par ārgaisa parametru salīdzināšanu ar gaisa apstrādes režīmu robežparametriem. Abos gadījumos informācija binārā skaitļu koda veidā nonāk komutatora un dešifratora ieejās. Pamatojoties uz šo informāciju, komutators caur atbilstošiem kontūru pieskaņošanas blokiem pieslēdz regulatoru izejas pie programmā paredzētajiem izpildmehānismiem, savukārt dešifrators vienā no izejām izstrādā (izeju skaits atbilst gaisa apstrādes režīmu skaitam ar atšķirīgām dinamiskām raksturlielībām) katram pieskaņošanas blokam loģisko signālu.

Citu funkciju izpildei sistēma ir jāpapildina ar funkcionāliem blokiem. Piemēram, lai mainītu gaisa apstrādes secību, ir jāizvēlas darba programma (jāpārskatīto vadības iekārtas loģiskā shēma), ko panāk, starp izpildmehānismu izejām un komutatora un dešifratora ieejām ieslēdzot programmvadības bloku ar noskaņošanas ieeju (24. bloks, 4.3. att.), kas dod iespēju bloka manuālai un arī automātiskai pārskatīšanai (programmvadības bloka funkcijas nosaka ESS vadības algoritms reizē ar komutatora un dešifratora funkcijām).

Praksē nepieciešamība pārskatīt programmvadības bloku var rasties:

- 1) mainoties pieejamām gaisa apstrādes tehnoloģijām (tā sastāva izmaiņa ir līdzvērtīga jebkura energoņesēja iztrūkumam, to parametru neatbilstība prasībām);
- 2) nomainot vienu parametru sensorus ar citu parametru sensoriem;
- 3) mainoties telpu siltuma un mitruma slodzēm;
- 4) mainoties energoņesēju cenām;
- 5) ESS pārejot no pamata un papildu funkciju izpildes pie citu papildu funkciju izpildes (pārejot no bāzes vadības algoritma uz paplašināto vadības algoritmu).

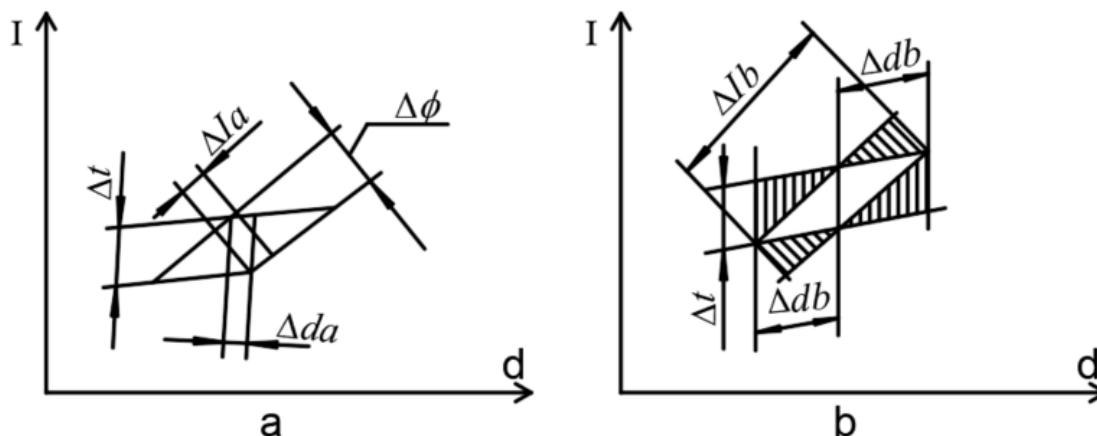
Izvēloties I-d diagrammā režīmus ESS pēc minimālā enerģijas patēriņa kritērija, kas ietver MKS pieejamās gaisa apstrādes tehnoloģijas, nodrošinot temperatūru un relatīvo mitrumu robežās, ko nosaka šo parametru sensoru tehniskie raksturlielumi un ko nosacīti I-d diagrammā attēlo kā punktus, iespējamie gaisa apstrādes režīmi ir iezīmēti 5.4. attēlā, ir izvēlēti šādi simboli gaisa apstrādes režīmu apzīmēšanai:

Rem – maksimāli iespējamā recirkulācija;

S – sildīšana;

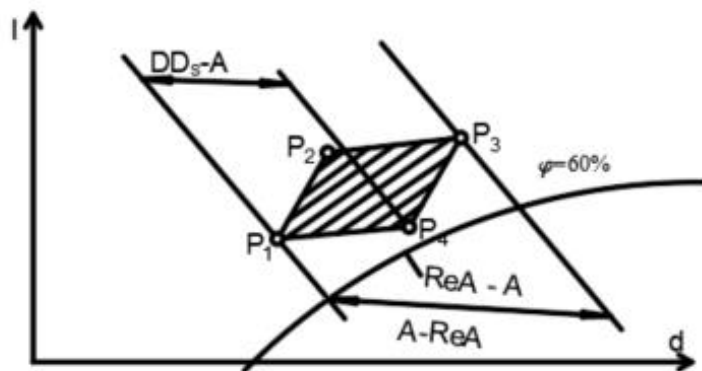
Am – gaisa adiabatiska mitrināšana kamerā, ja apvads ir pilnīgi slēgts;

Kā redzams 5.7. a attēlā, novirzes ΔI_a un Δd_a ir jādefinē tā, lai tiktu saglabātas noteiktās pieļaujamās temperatūras Δt un relatīvā mitruma $\Delta \ell$ novirzes. Veicot pārrēķinu pēc maksimāli pieļaujamām Δt un $\Delta \varphi$ novirzēm, iegūtās ΔI un Δd novirzes atradīsies ārpus pieļaujamajām Δt un $\Delta \varphi$ (5.7. b att., ΔI_b , un Δd_b).



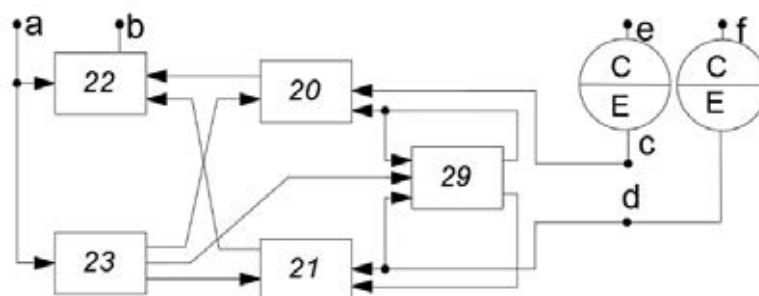
5.6. att. Pieļaujamo noviržu grafiskais atainojums dažādiem gaisa regulējamo parametru savietojumam: a) pārrēķinot pēc diviem parametriem; b) tieši pārrēķinot pēc viena parametra.

Salīdzinot enerģijas patēriņu ārgaisa parametru punkta pārvietošanai pieļaujamo gaisa stāvokļu daudzstūrī, ir redzams, ka, lai sasniegtu jebkuru punktu daudzstūra iekšienē vienā pārvietoējuma virzienā, ir jāpatērē mazāk enerģijas nekā gadījumā, lai sasniegtu jebkuru punktu uz daudzstūra tuvākās malas. Uzturot gaisa parametrus pieļaujamajā daudzstūrī un veicot netiešo gaisa apstrādes režīmu identifikāciju, lietojot vienu trīspozīciju regulatoru pāri (piemēram, t un ℓ regulatorus), pāreja uz nākamajiem gaisa apstrādes režīmiem notiek, sasniedzot ESS elementos ekstremālus enerģijas patēriņus, ko nosaka regulatoru signāli atbilstoši vadības algoritmam. Piemēram, ja pāreja no režīma R_eA uz režīmu A vadības algoritmā ir definēta pēc recirkulācijas vārsta aizvēršanās pēc mitruma regulatora komandas, tad, kā redzams 4.6. attēlā, komanda var parādīties, pieplūdes gaisa punktam P pārejot nogriezni P_3P_4 . Tas ļauj secināt, ka robeža starp režīmiem R_eA un A var atrasties uz jebkuras izoentalpas starp entalpijas vērtībām P_1 un P_3 . Pāreja no režīma DD_s uz režīmu A pēc aukstumnesēja vārsta aizvēršanās var notikt, pieplūdes gaisa punktam izejot no pieļaujamā gaisa stāvokļa daudzstūra pār nogriezni $P_1 P_4$ pēc temperatūra regulatora komandas. Daļēji izvairīties no stāvokļa, kad konkrētajos apstākļos ekonomiskākā gaisa apstrādes režīma vietā tiek realizēts iepriekšējais, mazāk ekonomiskais, var pārejas realizācijai ievērot abu regulatoru signālus, piemēram, pāreju $A \rightarrow DD_s$ pēc signāliem t_M , φv , kas ļauj izpildīt šo nosacījumu tikai tad, ja pieplūdes gaisa stāvokļa punkts pāriet punktu P_3 , pāreju $DD_s \rightarrow A$ — pēc signāliem t_M , φv , nodrošinot pāreju caur P_4 . Ekonomiski izdevīga ir arī režīmu Re_mS , Re un režīma bez apstrādes — 0 veikšana. Taču, tāpat kā veicot režīmus ar robežām, kas sakrīt ar izoentalpām, tomēr nevar radīt ekonomiskāko režīmu pārklāšanos ar mazāk ekonomiskiem (piemēram, Re_mS režīms R_e režīma vietā). Tas ļauj secināt, ka ar vienu pozicionālo regulatoru pāri var tikai daļēji realizēt iespējami ekonomiskākos režīmus. Ņemot vērā vadības algoritmu sastādīšanas īpatnības, pozicionālo regulatoru efektīva izmantošana tomēr ir iespējama.



5.7. att. Režīma A robežu veidošana, definējot parametru novirzes ar regulatoru nejutības zonu noskaņojumu.

Lai realizētu aplūkotos režīmus, sistēmas bāzes funkcionālā shēma ir jāpapildina ar kodēšanas bloku (25), kas nodrošina regulatoru pāra izeju kodēšanu un šīs informācijas ievadīšanu komutatora un dešifratora ieejās.



5.8. att. Bāzes funkcionālās shēmas daļa ar kodēšanas bloku (25) [120].

Funkcionālās shēmas daļa ar kodēšanas bloku redzama 5.8. attēlā.

Pilnīgi realizēt režīmus, ko nosaka pieļaujamās novirzes, var, lietojot regulatoru papildu pāri, turklāt viena parametra regulatorus noskaņo tuvu pieļaujamo noviržu robežām tā, lai parametri atrastos pieļaujamo noviržu zonā. Lai apstrādātu informāciju no regulatoru izejām, sistēmā papildus jālieto enerģijas patēriņa minimizācijas bloks, kas ieslēgts regulatoru izeju saitē ar komutatoru. Šo režīmu realizācija ir iespējama, izmantojot regulatorus ar maināmu iestatījumu, ko vada dešifratora komandas.

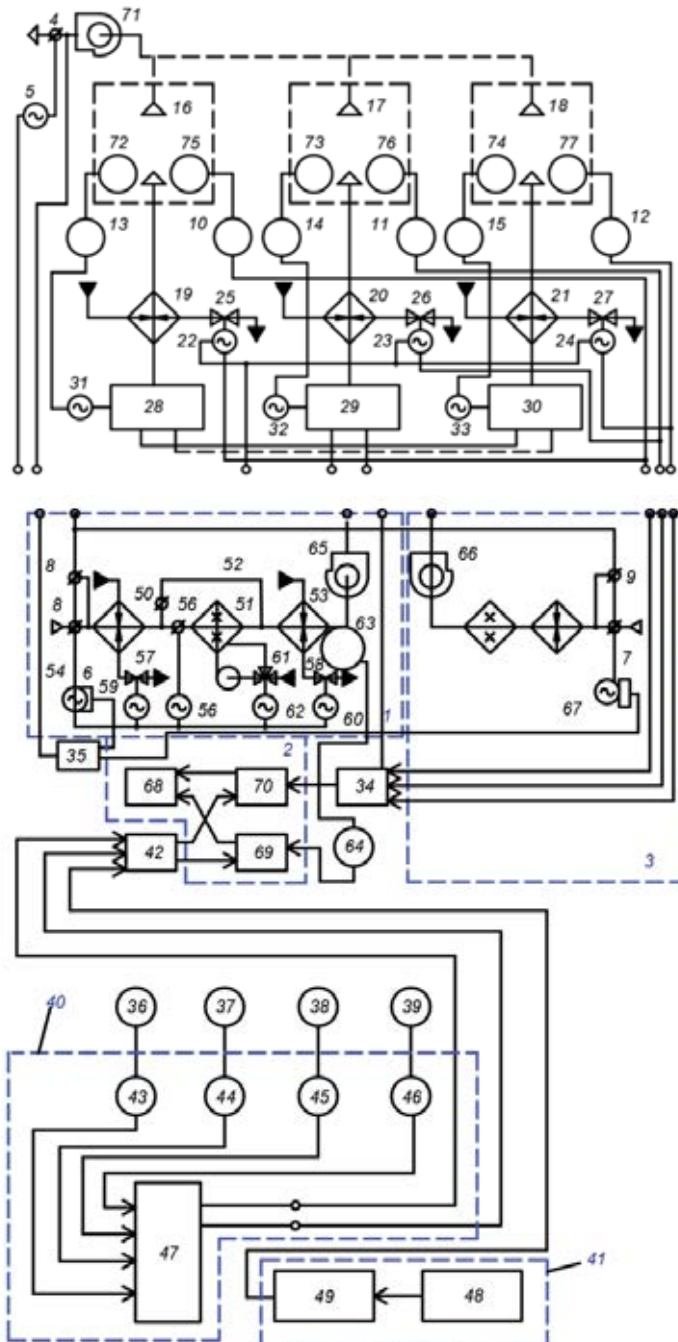
5.5. Maināmas ražības ESS vadības sistēmas struktūras analīze

Ir iespējami ārgaisa stāvokļi, kuros, lai papildus samazinātu enerģijas patēriņu gaisa apstrādei, ir lietderīgi palielināt apstrādājamā gaisa daudzumu [97]. ESS, lai mainītu apstrādājamā gaisa daudzumu, ir jābūt (5.4. att.) pieplūdes gaisa vadam (1), pirmās un otrās pakāpes gaisa sildītājiem (2 un 3), starp tiem ievietotai mitrināšanas kamerai (4) ar apvada gaisa vadu (5), ventilatoram (6) ar piedziņu (7), svaigā gaisa, recirkulācijas gaisa un nosūces gaisa vadiem (8–10) ar vārstiem gaisa daudzuma regulēšanai (11–13), regulēšanas vārstiem (14–16), kas uzstādīti uz gaisa sildītāju (2 un 3) un mitrināšanas kameras (4) pieslēgcauruļvadiem (17–19), temperatūras un relatīvā mitruma sensoriem (20 un 21), kas uzstādīti kondicionējamā telpā (22) un saistīti caur optimizācijas un iedarbju veidošanas iekārtu (23) ar regulējošo vārstu (11–16) izpildmehānismiem (24–27), arī ar mitrināšanas kameras (4) sajūgtā vārstu gaisa

regulēšanai (29) izpildmehānismu (28). Sistēmā papildus izmantoti ārgaisa un recirkulācijas gaisa maisījuma entalpijas un mitruma saturs sensori (30 un 31) un ventilatora (6) griešanās ātruma regulators (32), kas pieslēgts optimizācijas un iedarbību veidošanas iekārtai (23), kas ietver komutatoru (33), mērspriegumu bloku (34), salīdzināšanas bloku (3), pirmdevēja bloku (36), dešifratoru (37), vadības signālu formēšanas bloku (38), funkciju pārveidotāju (39) un integratoru (40).

Funkciju pārveidotājs (39) sastāv no līdzstrāvas operāciju pastiprinātāja ar nelineāru pārveidotāju ar kvadrātisku raksturlīkni atgriezeniskajā saitē, regulators (32) – no sprieguma-frekvences pārveidotāja, trīsfāžu sprieguma ģenerators un invertora.

Sensori (20 un 21) ir pieslēgti temperatūras (41) un relatīvā mitruma (42) regulatoriem, savukārt sensori (30 un 31) – pie entalpijas un mitruma saturs mēriekārtām (5.9. att.).



5.9. att. ESS funkcionālā shēma ar maināmu apstrādājamā gaisa daudzumu.

Aplūkotā ESS darbojas šādā veidā [97]. Sistēmas ieslēgšanas brīdī vārsts sildītāju (2 un 3) siltumnesēja regulēšanas vārsti (14 un 15) un trīsvirzienu regulēšanas vārsts (16) uz aukstumnesēja cauruļvada (19) ir aizvērti, temperatūras regulatora (41) izeja ir caur komutatoru (33) pieslēgta gaisa regulēšanas vārsta (12) izpildmehānismam (24), mitruma regulatora (42) izeja caur komutatoru (33) ir pieslēgta mitrināšanas kameras apvada (5) gaisa regulēšanas vārsta (29) izpildmehānisma (28) ieejai. Pazeminoties gaisa temperatūrai kondicionējamā telpā (22), izpildmehānisma (24) ieejā caur komutatoru (33) no temperatūras regulatora (41) izejas tiek ievadīta komanda recirkulācijas gaisa regulēšanas vārsta (12) pievēršanai, savukārt, temperatūrai paaugstinoties, – pretēja komanda. Ja kondicionējamā telpā (22) pazeminās gaisa relatīvais mitrums, no mitruma regulatora (42) izejas caur komutatoru (33) uz mitrināšanas kameras apvada (5) gaisa regulēšanas vārsta (29) izpildmehānisma (28) ieejās tiek ievadīta komanda gaisa vārsta (29) pievēršanai. Gaisa relatīvajam mitrumam kondicionējamā telpā (22) palielinoties, izpildmehānisma (28) ieejā nonāk pretēja komanda. Dešifratora izejā parādās loģiskais signāls, ko ievada sprieguma summatora (40) pirmajā ieejā un vadības signālu formēšanas bloka (38) pirmajā ieejā. Bloka (38) izejā vadības signāla nav. Sprieguma summatora (40) izejā veidojas vadības signāls ar maksimālu vērtību, kas griešanās ātruma regulatorā (32) pārveidojas maiņstrāvā ar minimāli iestādīto frekvenci. Vadības impulsi atbilstoši sprieguma frekvencei nosaka tiristoru atvēršanās momentus griešanās ātruma regulatora (32) izejā atbilstoši sprieguma summatora (40) izejā formējamai vadības signāla maksimālai vērtībai, nodrošinot piedziņas (7) asinhronā dzinēja minimālo griešanās ātrumu un ventilatora (6) minimālu ražību. Šādā ceļā kondicionējamā telpā (22) ievada minimālu gaisa daudzumu, ko nosaka sanitārās normas. Aplūkotais stāvoklis atbilst režīmam ReA (recirkulācija ar vēlāku adiabatisku mitrināšanu) negatīvai siltuma un mitruma bilancei kondicionējamā telpā (22) (5.10. att.).

Pirmdevēja blokā (36) ar potenciometrisku pirmdevēju palīdzību iestata mērspriegumus, kas papildus sadala gaisa apstrādes režīmus zonās, kurās, lai palielinātu funkcionēšanas efektivitāti, jāpalielina apstrādājamā gaisa daudzums.

Ja ārgaisa stāvoklis mainīsies tā, ka ārgaisa un recirkulācijas, gaisa maisījuma punkts pārvietosies režīma ReA (5.10. att.) svītrotajā daļā, tad salīdzināšanas bloka (35) izejā pēc ārgaisa un recirkulācijas gaisa maisījuma entalpijas un mitruma satura salīdzināšanas ar mērspriegumu, kas nonāk mērspriegumu blokā (34) no pirmdevēja bloka (36), parādās signāls, ko ievada dešifratora (37) otrajā ieejā. Dešifrators (37), pamatojoties uz informāciju, kas pienāk no izpildmehānismu (24–28) izejām un no salīdzināšanas bloka (35), pārtrauc loģiskā signāla ievadīšanu sprieguma summatora (40) un vadības signālu formēšanas bloka (38) pirmajās ieejās. Šādos apstākļos vadības signālu formēšanas blokā (38) tiek veidots spriegums, kas vienāds pieplūdes gaisa (pieņemts, ka pieplūdes gaisu ievada tieši darba zonā) un ārgaisa un recirkulācijas gaisa mitruma satura starpības reizinājumam ar ūdens cenas adiabatiskajai mitrināšanai, naudas vien./kg un elektroenerģijas cenas, naudas vien./kWs attiecību. Spriegums no vadības signālu formēšanas bloka (38) nonāk funkciju pārveidotāja (39) ieejā, kas sastāv no līdzstrāvas pastiprinātāja ar kvadrātisku atgriezenisko saiti, kurā veido spriegumu, proporcionālu optimālam apstrādājamā ārgaisa daudzumam L_o , saskaņā ar formulu:

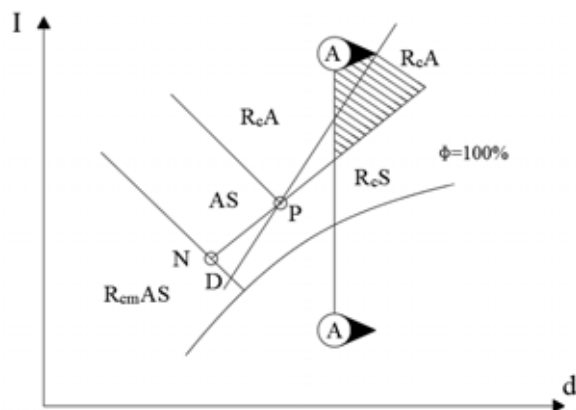
$$L_o = L_A \sqrt{\frac{-q_e L_A}{3q_e}}, \quad (5.5.)$$

kur:

L_A – ārgaisa minimums, ko nosaka sanitārās normas, kg/s;

q_e – ESS ventilātoru dzinēju jauda, kas nepieciešama gaisa daudzuma L_a pārvietošanai, kW;

q''_e – koeficients, proporcionāls spriegumam vadības signālu formēšanas bloka (38) izejā, kJ/kg.



5.10. att. Ārgaisa zona, kurā ir izdevīgi palielināt apstrādājamā gaisa daudzumu.

Spriegums no funkciju pārveidotāja (39) izejas nonāk sprieguma summatora (40) otrajā ieejā, kura izejā parādās starpība starp sprieguma summatorā (40) pastāvīgi normēto spriegumu un spriegumu, kas pienāk no funkciju pārveidotāja (39) izejas. Tāpēc sprieguma summatora (40) izejā parādās spriegums, kas ir mazāks par pastāvīgo spriegumu, kas veidojas sprieguma summatorā (40). Šādā gadījumā griešanās ātruma regulatora (32) sprieguma frekvences pārveidotājs (3) izejā maina maiņsprieguma frekvenci atbilstoši līdzsprieguma vērtībai, kas pienāk no sprieguma summatora izejas, palielinot sprieguma frekvenci, samazinoties līdzstrāvas vadības signāla spriegumam. Maiņspriegums no griešanās ātruma regulatora (32) sprieguma-frekvences pārveidotāja izejas nonāk trīsfāžu sprieguma ģeneratora ieejā, kas veido invertora tiristoru vadības impulsus, palielinot piedziņas (7) elektrodzinēja griešanās ātrumu un gaisa daudzumu, ko ventilators (6) pievada kondicionējamā telpā (22). Sprieguma frekvence mainās atkarībā no ārgaisa un recirkulācijas gaisa maisījuma momentānajiem parametriem.

Spriegumu, kas nosaka režīmu robežas atbalstsprriegumu blokā (34), iestata ar pirmdevēja bloka (36) potenciometru palīdzību.

SECINĀJUMI

1. Enerģijas sadales sistēma (ESS) vadības algoritmos paredzamo funkciju interpretācija funkcionālo bloku veidā dod iespēju analizēt vadības izmantojamo informāciju ar ESS funkcionālo shēmu palīdzību.
2. Vadības algoritmu realizācija, ievērojot gaisa sadales optimizāciju, ir iespējama gan tiešai, gan arī netiešai ESS režīmu identifikācijai.
3. Gaisa apstrādes režīmu identificēšana, pamatojoties uz grafoanalītisko metodoloģiju dod iespēju definēt vadības algoritmus ar kombinācijas shēmu palīdzību.
4. Noskaņojamus vadības algoritmus, ko realizē uz iespējamo gaisa apstākļu tehnoloģiju virknējumiem analītiskā veidā, ir jāapraksta ar Būla funkciju sistēmām, kas paredz iespēju tās noskaņot atsevišķu vadības algoritmu izpildei.
5. Izstrādātā grafoanalītiskā metode lietojama analīzei *OSI* starptautiskās standartu organizācijas atvērto sistēmu starp savienojumu modeļa (*ISO-OSI*) sestajā līmenī.

Apzīmējumi:

L – ESS ražība (apstrādājamā gaisa daudzums), m^3/s (kg/s);

m – gaisa sadales novērtējuma koeficients;

Q_t, G_t – kondicionējamās telpas siltuma un mitruma slodze, kW, kg/s;
KPN – kondicionējamās telpas procesa virziena koeficients;
nas – adiabatiskas mitrināšanas ūdens un siltuma cenu attiecība, kJ/kg;
t – process telpā.

6. NODAĻA. DIGITĀLĀ DVĪŅA IZSTRĀDE CENTRĀLĀS SILTUMAPGĀDES SISTĒMAS VADĪBAI

6.1. CSS vadība, balstoties uz digitālo dvīni, ko pamato CSS pārvaldības un kontroles metodoloģija

Ceturrtā industriālā revolūcija attīstības gaitā tehnikas jomā ir aprobētas līmeņatzīmes [13] lietojums, kas plašākā tehnisko pētījumu tvērumā ir formulēts kā digitālā dvīņa modelis [17]. Centrālās siltumapgādes sistēmās uzdevums ir izveidot digitālā dvīņa modeli, balstoties uz turpgaitas un atgaitas temperatūru matemātisko modelēšana ar regresijas polinomiem. Ar šāda modeļa palīdzību ir jānosaka pārraudzības un kontroles kritēriji ekonomiski pamatotai siltumapgādes tīklu vadībai [99].

Centralizētās siltumapgādes sistēma ir kompleksa sistēma, kas sastāv no siltumenerģijas stacijas, siltumenerģijas pārvades un sadales sistēmas un vairākiem patērētājiem. Zinātnieki ir modelējuši un optimizējuši centralizētās siltumapgādes sistēmu. Viens no svarīgākajiem mērķiem ir siltuma zudumu samazināšana. Plašs pārskats par dažādiem modelēšanas klasifikācijas paņēmieniem sniegts promocijas darbos, kas aizstāvēti RTU promocijas padomēs “P-12” un “P-19”.

Āris Žīgurs promocijas darbā salīdzinā atsevišķu siltuma apgādes sistēmu posmu uzlabojumu ietekmi uz kopējo sistēmas efektivitāti un tīkla parametru vadības kvalitātes uzlabojuma iespējas [100]. Kaspars Grīnbergs ir pētījis centralizētas dzesēšanas sistēmas izveidi, izmantojot absorbcijas dzesētāju siltumenerģijas pārveidei telpu dzesēšanai vasarā [101]. Ilze Dzene pētījusi politikas instrumentu ietekmi uz atjaunīgu energoresursu īpatsvara palielināšanu valsts un reģionu līmenī, izveidots sistēmdinamisks modelis primāro enerģoresursu izmantošanas prognožu analīzei. Sistēmdinamisks modelis aprobēts Ogres rajona siltumapgādes sistēmās [102]. Aivars Cers promocijas darbā ir pētījis kombinētā cikla gāzes triģenerācijas iespēju mērena klimata apstākļos [103]. Modeļi koģenerācijas potenciāla izpētei, koģenerācijai strādājot centralizētā siltumapgādes sistēmā, ir piedāvāti Antras Kundziņas promocijas darbā [104]. Teorētiski un metodoloģiski pētījumi par atjaunīgu resursu lietojumu enerģijas ražošanas un patēriņa balansēšanai enrgoapagādes tīklos ir veikti Kristīnas Ļebedjevas promocijas darbā [105].

Viens no veidiem, kā panākt ievērojamus enerģijas ietaupījumus, ir centralizētās siltumapgādes sistēmas turpgaitas un atgaitas ūdens temperatūras samazināšana. Pašreizējā situācija aprakstīta [106]. Viena no [94] minētajām rekomendācijām balstīta uz turpgaitas ūdens temperatūras pakāpenisku samazināšanu ēkām, kas projektētas ar augstākām temperatūras prasībām. Šobrīd daudzas centralizētās siltumapgādes sistēmas klasificējamās kā trešās paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmas, kurās parasti turpgaitas un atgaitas ūdens temperatūras ir attiecīgi diapazonā no 80 °C līdz 110 °C un no 40 °C līdz 50 °C [94]. Jaunākajos pētījumos [107, 108] noskaidrots, ka pat ar relatīvi zemām turpgaitas ūdens temperatūrām (mazliet virs 50 °C) ir iespējams nodrošināt patērētāju prasības Centrāleiropas un Ziemeļeiropas valstīs.

Starpība starp turpgaitas un atgaitas ūdens temperatūru (ΔT) gada laikā parasti mainās. Pētījumā [94] noskaidrots, ka Dānijā apkures sezonā pastāv korelācija starp ΔT un gaisa temperatūru (T_{out}). Pētījumā identificētās [94] tendences parāda, ka, paaugstinoties T_{out} vērtībām, samazinās ΔT ja $T_{out} < 10^{\circ}C$. Attiecībā uz augstākām T_{out} vērtībām dati nav sistematizēti, tie aptver plašu vērtību diapazonu (no 0 °C līdz 50 °C), un nepastāv korelācija pie temperatūrām $T_{out} > 10^{\circ}C$. Centralizēto siltumapgādes sistēmu darbība Dānijā un Latvijā

atšķiras, tāpēc tika nolēmts veikt pētījumu ar mērķi noskaidrot sakarību starp ΔT un T_{out} Latvijas siltumenerģijas stacijās.

Aproksimācijas ar otrās pakāpes regresijas polinomu izvērtējums

Patlaban daudzas centralizētās siltumapgādes sistēmas klasificējamās kā trešās paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmas, kurās parasti turpgaitas un atgaitas ūdens temperatūras ir attiecīgi diapazonā no 80 °C līdz 110 °C un no 40 °C līdz 50 °C [39]. Jaunākajos pētījumos [40, 41] noskaidrots, ka pat ar relatīvi zemām turpgaitas ūdens temperatūrām (mazliet virs 50 °C) ir iespējams nodrošināt patērētāju prasības Centrāleiropas un Ziemeļeiropas valstīs.

Starpība starp turpgaitas un atgaitas ūdens temperatūru (ΔT) gada laikā parasti mainās. Pētījumā [94] noskaidrots, ka Dānijā apkures sezonā pastāv korelācija starp ΔT un gaisa temperatūru (T_{out}). Pētījumā identificētās [37] tendences parāda, ka, paaugstinoties T_{out} vērtībām, samazinās ΔT ja $T_{out} < 10^{\circ}C$. Attiecībā uz augstākām T_{out} vērtībām dati nav sistematizēti, tie aptver plašu vērtību diapazonu (no 0 °C līdz 50 °C), un nepastāv korelācija pie temperatūrām $T_{out} > 10^{\circ}C$. Centralizēto siltumapgādes sistēmu darbība Dānijā un Latvijā atšķiras, tāpēc tika nolēmts veikt pētījumu ar mērķi noskaidrot sakarību starp ΔT un T_{out} Latvijas siltumenerģijas stacijās.

Ņemot vērā problēmas praktiskos aspektus, būtu vēlams noteikt statistiski būtisko sakarību starp ΔT un T_{out} visā apkures sezonas laikā. Šo sakarību iespējams noskaidrot, izmantojot regresijas (korelācijas) vienādojumu:

$$y = f(x, a_1, a_2, \dots, a_n), \quad (6.1)$$

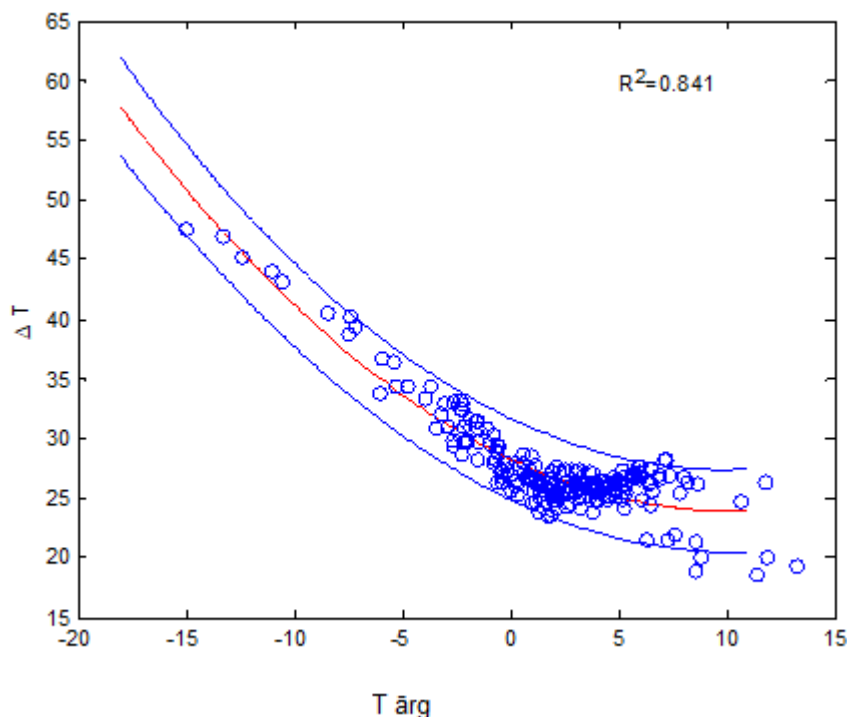
kur: $f(x, a_1, a_2, \dots, a_n)$ ir lietotāja izvēlēta funkcija, gaisa temperatūra T_{out} ir neatkarīgais mainīgais un temperatūru starpība starp turpgaitas un atgaitas ūdens temperatūru ΔT ir atkarīgais mainīgais. Koeficientus a_1, a_2, \dots, a_n aprēķina, izmantojot attiecīgu optimizācijas modeli. Vispopulārākā metode ir vismazāko kvadrātu metode, ar kuru minimizē funkciju:

$$Q = \sum_{i=1}^N [y_i - f(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)]^2, \quad (6.2)$$

kur: $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N$ ir eksperimentālie punkti. 6.2 vienādojumā redzamo problēmu atrisina *Matlab*. Izvēlas dažādas funkcijas $f(x, a_1, a_2, \dots, a_n)$. Noskaidrots, ka 6.2. attēlā doto datu (kā arī citu pētījuma datu) aproksimācijai vislabāk izmantot otrās pakāpes polinomu

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2. \quad (6.3)$$

Katlumāja "Gobas" ar jaudu 20 MW uzbūvēta 1999. gadā. Tā ir automātiskā katlumāja, kuras darba temperatūras režīms ir no 70 °C līdz 115 °C. Siltumenerģijas ražošanai galvenokārt tiek izmantota dabasgāze, taču ārkārtas situācijās kā kurināmo var izmantot arī dīzeļdegvielu. Vidējais tīklā nodotās siltumenerģijas apjoms piecu gadu periodā ir 20 422,49 MW. Regresijas analīze katlumājai "Gobas" sniegta attēlā.



6.1 att. Otrās pakāpes polinomālā aproksimācija siltumapgādes tīklā apkures sezonā (sistēmas digitālais dvīnis): pieļaujamā parametru noviržu posmā.

Siltumapgādes tīklā temperatūras starpību vietējās sistēmas ieejā uztur ar tīkla sūkni un spiediena starpības regulatoru, kura regulējošās iedarbes veido programmējamā regulatorā, balsoties uz polinomiālo aproksimāciju. 6.1 att. redzama otrās pakāpes polinomiālā aproksimācija tīklā apkures sezonā, kur regresijas analīzes rezultāti rāda, ka otrās pakāpes polinomi labāk aproksimē sakarību starp temperatūras starpību (ΔT) turpgaita/atgaita un āra gaisa temperatūru ($T_{\text{ārg}}$).

Lai novērtētu siltumenerģijas zudumus, izmantoti šādi stacijas “Gobas” sākotnējie dati:

- vidējais dienu skaits apkures sezonā piecu gadu periodā (207,4 dienas);
- vidējā gaisa temperatūra apkures sezonā piecu gadu periodā (+2,58 °C).

Stacija “Gobas” darbojas saskaņā ar šādiem nosacījumiem: turpgaitas ūdens temperatūra T_1 un atgaitas ūdens temperatūra T_2 pie vidējās gaisa temperatūras 2,58 °C ir $T_1 = 65$ °C un $T_2 =$ °C. Saskaņā ar teorētisko aprēķinu siltuma zudumi stacijā “Gobas” ir 3821,36 MWh/gadā. Samazinot temperatūru T_2 par 1 °C, siltuma zudumi samazināsies par 44,36 MWh/gadā jeb par 1,16 %. Tika analizēta arī atgaitas ūdens temperatūras samazināšanas par 1 °C ietekme uz gāzu kondensācijas ekonomaizera ražību. Tika noskaidrots, ka ražība palielinās par 24 kW (efektivitātes kāpums ir 3,4 % attiecībā pret maksimālo ražību).

Regresijas vienādojumu pielietojumus stacijā “Goba” veikto mērījumu datu apstrādes radīja pamatu automātiskā siltumapgādes tīkla vadības sistēmas izstrādei.

Digitālā dvīņa modifikācija siltuma enerģijas sadales tīklos ir patentētas vairākos autoram zināmos patentos.

Patents [109] aizsargā vietējai administratīvai komūnai būtiskus datus (tai skaitā dažāda veida enerģijas bilances), salīdzinot ar izveidoto digitālo dvīni, kas saglabāts mākoņplatformā bezvadu vidē [109].

Uz mērījumu pamata izveido sūkņa digitālo dvīni, raksturliķni izmanto regulēšanas stratēģijas korekcijai [110].

Siltumtīklu hidrauliskās balansēšanas metode, kas salāgo datus par gala lietotāju patēriņu, ārējais temperatūru un siltumapgādes sistēmas turpgaitas temperatūru [111].

Sistēma veido sistēmas hidraulisku modeli, balstoties uz aplētsto siltumnesēja plūsmu un spiediena starpību tīkla atgaitā. Siltumapgādes vadību veido uz šī digitālā dvīņa pamata, veidojot regulējošās iedarbes izvēlētiem balansēšanas vārstiem [112].

Sistēma veidota ar regulējošu un balansējošu vārstu katram gala patērētājam. Regulēšanas sistēma paredz iespējas salāgot spiediena starpības katram gala patērētājam ieejā un kopīgo spiediena starpību siltumapgādes tīklā [113].

Patents aizsargā lietu internetā balstītu inteligēnto siltumapgādes vadības sistēmu, kas ievēro arī siltuma enerģijas uzkrāšanas iespējas. Šādā veidā tiek salāgotas siltumapgādes sistēmā ievadītā un gala patēriņa slodzes, nodrošinot iespējami mazāko siltuma enerģijas patēriņu sistēmā [114].

Nemot vērā eksperimenta rezultātus Rīgas Centralizētās siltumapgādes sistēmā un zināmos patentus siltumapgādes vadības sistēmās, ir iesniegts patenta pieteikums.

Izvērtējot patentētos tehniskos risinājumus, patenta pieteikumos siltumapgādē ir zināmas sistēmas, kurās tiek izmantota enerģija, kas pieejama gan turpgaitas, gan atgaitas cauruļvadā, neskatoties uz to, ka siltumenerģiju, kas papildus pieejama siltumapgādes tīkla atgaitas cauruļvadā, parasti uzskata par siltuma zudumiem [115]. Pasākumi, kas balstīti uz enerģijas taupīšanu un efektīvu izmantošanu, ir noteicoši jebkuras optimālas sistēmas izbūvē. Zināmām sistēmām [114, 115] ir nestabils hidrauliskais līdzsvars mainīgām plūsmām, kas rada lielus siltuma zudumus un augstu/zemu atgaitas temperatūru.

Lai maksimāli palielinātu siltumapgādes sistēmas efektivitāti jeb lai palielinātu līdz patērētājam aizvadītā siltuma enerģijas izmantošanas lietderību siltumapgādes sistēmās, ir svarīgi, lai siltumapgādes tīklā būtu iespējami liels temperatūras kritums. Uzturot lielu temperatūras kritumu, patērētājs saņem vairāk siltuma enerģijas no siltumnesēja tilpuma vienības. Attiecīgi, jo lielāks temperatūras kritums, jo mazāka sūkņa jauda nepieciešama siltumapgādes tīklam. Tas samazina sadales zudumus un dod iespēju lielākam skaitam klientu pieslēgties tīklam un saņemt kvalitatīvu pakalpojumu.

Zināms, ka, palielinoties siltumapgādes sistēmas temperatūras kritumam par 10 °C, nepieciešamā sūkņa jauda samazināsies par 55 %. Atkarībā no siltumenerģijas ražošanas metodes kopējais primārā kurināmā ietaupījums siltuma avotā svārstās no 0,1 līdz 14,0 %. Tas apliecina, ka ir būtiski panākt lielu temperatūras kritumu siltumapgādes tīklos [116].

Ir zināms arī risinājums, ar kura palīdzību ir panākta gan atgaitas temperatūras samazināšana, gan paaugstināšana siltumapgādes/aukstumapgādes sistēmās, tādējādi izvairoties no nelietderīgām temperatūras starpībām [117]. Kā risinājums šajā izgudrojumā tiek piedāvāta vadības sistēma uz siltumapgādes tīkla gala lietotāja pieprasījuma balstītai vadībai vietējās sildīšanas plūsmu sadalītai kontrolei no sildīšanas avotiem caur vietējām apkures sistēmām, izmantojot termostatiskus vārstus. Šie vārsti ir iestatīti tā, lai regulētu vietējās sildīšanas plūsmas, regulējot temperatūru, vārstu pozīciju, plūsmas ātrumu, vietējo dzesēšanas vides spiedienu un nosūtot nepieciešamo informāciju uz centrālo monitoru. Minētai sildīšanas sistēmai ar attiecīgiem regulēšanas blokiem ir nepietiekama, atsevišķos mezglos – pat zema, vadības efektivitāte, un tā rezultātā sistēmā ir lieks enerģijas patēriņš.

Tāpēc ir aplūkota proporcionālā spiediena metode, ko sauc par siltumapgādes tīkla sūkņa vadības metodi un kas nodrošina minimālu elektroenerģijas patēriņu, tā ir pamatota un aprakstīta [118].

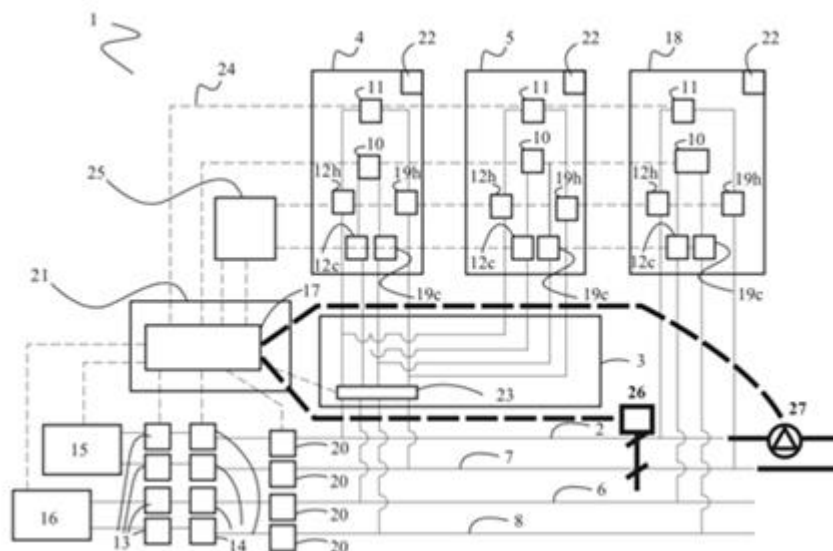
Uzlabojuma mērķis ir izveidot automātisku siltumapgādes tīkla vadības sistēmu, kas uzlabotu un paaugstinātu siltumapgādes sistēmu efektivitāti, sasniedzot optimālu atgaitas temperatūru (zemākā atgaitas temperatūra, ko sasniedz, piegādātā siltuma enerģijas daudzumam sakrīt ar patērētāja dinamisko slodzi), kas ietver siltumapgādes tīklu (1) un sastāv no spiediena starpības regulatora (26), tīkla sūkņa (9), termostatiskiem vārstiem (12) un (19),

enerģijas komutatora (3), universāliem sensoriem (20), centrālās vadības vienības (21), programmējamā regulatora (17), iekštelpu temperatūras sensoriem (22) un hidrauliskā kolektora (23), pie tam spiediena starpības regulators (26) un tīkla sūknis (9) ir savienoti ar programmējamu regulatoru (17), programmējams regulators (17) ir centrālās vadības vienības (21) atsevišķa sastāvdaļa, gala lietotāju apkures termostatiskie vārsti (12) un (19) ir tieši saistīti ar hidraulisko kolektoru (23), kas savienots ar siltumapgādes tīkla (1) siltumnesēja turpgaitas (2) un atgaitas (6) cauruļvadiem, gala lietotāju iekštelpu temperatūras sensoriem (22) ir bezvadu datu pārraides tīklā savienoti ar centrālo vadības vienību (21), universālo sensoru kopums (20) ir saistīts ar programmējamo regulatoru (17) un siltumnesēja turpgaitas (2) un atgaitas (6) cauruļvadiem, uzlabo un paaugstina siltumapgādes sistēmu efektivitāti, sasniedzot optimālu atgaitas temperatūru (zemākā atgaitas temperatūra, ko sasniedz, piegādātā siltuma enerģijas daudzumam sakrīt ar patērētāju dinamisko slodzi).

Tehniskais risinājums ir automātiska vadības sistēma siltumapgādes tīkla (1) atgaitas temperatūras regulēšanai, kurā iestrādāts spiediena starpības regulators (26), kas saistīts ar turpgaitas (2) un atgaitas (6) cauruļvadiem un savienots ar programmējamu regulatoru (17), tādējādi dalīti regulējot spiedienu turpgaitas (2) un atgaitas (6) cauruļvados.

Šī tehniskā risinājuma būtība ir gala lietotāja slodzē balstīta siltumnesēja turpgaitas temperatūras regulēšana. Šajā pieprasījumā balstītajā siltumapgādes tīkla (1) darbībā pieplūdes temperatūru notur pēc iespējas zemākā līmenī saskaņā ar gala lietotāju sildīšanas sistēmas plūsmas robežām ar mērķi uzturēt atgaitas temperatūru tik zemu, cik iespējams, lai izvairītos no liekas siltumnesēja caurplūdes (sasniedzot atbilstību gala lietotāja dinamiskajai slodzei).

Gadījumos, kad siltumnesēja plūsmas ātrums vai atgaitas temperatūra sasniedz augšējo robežu, uz lokālo (patērētāja) sildīšanas (10) iekārtu vai ierīci, kas tās regulē, tiek nosūtīts signāls, lai palielinātu vai samazinātu turpgaitas temperatūru. Tādējādi sildīšanas jaudu tīklā regulē atbilstoši plūsmas vai atgaitas temperatūrai siltumapgādes tīkla (1) patērētāja sildīšanas iekārtā (10).



6.2. att. Automātiskā vadības sistēma siltumapgādes tīkla atgaitas temperatūras regulēšanai.

6.2. attēlā redzama automātiskā vadības sistēma siltumapgādes tīkla (1) atgaitas temperatūras regulēšanai. Turpgaitas cauruļvads (2) piegādā siltumnesēju uz enerģijas komutatoru (3) turpmākai siltumnesēja nogādāšanai gala lietotājiem (4), (5) un (18), šo vienību siltumapgādei un ar tām savienoto māju, ēku un industriālo telpu gala lietotāju sildīšanai, kas aprīkotas ar siltummaiņas aparātiem, piemēram, radiatoriem. Automātiskā vadības sistēma

siltumapgādes tīkla (1) atgaitas temperatūras regulēšanai paredzēta tikai sildīšanai. Atgaitas cauruļvads (6) ir paredzēts siltumnesēja turpgaitas cauruļvadam (2). Katram no gala lietotājiem (4), (5) un (18) ir sildīšanas iekārtas (10). Siltumapgādes turpgaitu pievada sildīšanas iekārtai (10). Atdzesētais siltumnesējs nonāk atgaitas cauruļvadā (6). Atgaitas plūsmas virzās caur enerģijas komutatoru (3), ko vada ar proporcionālā spiediena metodi (5) tā, lai programmējamam regulatoram (17), analizējot regresijas vienādojumus, kas definēti ārējais un temperatūras svārstības tīklā korelācijai, tādējādi palielinoties temperatūras starpībai. Siltumapgādes tīklā korekciju sūkņu darbā veic, taču, tai samazinoties, samazina sūkņa ražību, lai pazeminātu atgaitas temperatūru siltumapgādes tīklā, tā realizācijai nosūtot komandu no programmējamā regulatora (17) uz tīkla sūkni (9), nodrošinot vadības datu nosūtīšanu uz centrālo vadības vienību (21), lai būtu saskaņota ar gala lietotāja siltuma enerģijas slodzi.

Gala lietotāji (4), (5) un (18) un sildīšanas iekārtas (10) ir savienotas hidrauliski. Katra no sildīšanas iekārtām (10) ir savienota ar turpgaitas cauruļvadu (2) caur enerģijas komutatoru (3) un attiecīgiem siltumnesēja atgaitas cauruļvadiem (6). Siltumnesēja plūsmu uz sildīšanas iekārtu (10) regulē ar termostatiskiem vārstiem (12).

Vienu vai vairākus regulējamus vārstus (14) un vienu vai vairākus siltumenerģijas avotus (15) var regulēt ar programmējamu regulatoru (17), piemēram, regulējot avotu izejas temperatūras. Tīklā (1) var iekļaut termiskos akumulatorus, lai izlīdzinātu maksimumslodzes.

Realizācijas varianti attiecas uz programmējamu regulatoru (17), kas regulē plūsmu un siltumnesēja temperatūru no siltuma enerģijas avota (15), pamatojoties uz dalītu vadību, izmantojot termostatiskos vārstus (12 h) vietējās vienībās (4), (5), tādās kā mājās, ēkās, savukārt industriālajās telpās – tieši uz vietējo vienību (18), vai arī izmantojot enerģijas komutatoru (3) gala lietotājiem (4) un (5). Šie termostatiskie vārsti (12 h) iestata vietējās plūsmas, pamatojoties uz gala lietotāja iestatījumiem. Datus vadībai, piemēram, izvēlas no dažām vai visām temperatūrām, plūsmas ātrumiem, spiedieniem un vārstu pozīcijām gala lietotājos (4), (5) un (18) mājās, ēkās un industriālajās telpās, mērot ar sensoriem (19 h), kas uzstādīti sildīšanas lokos. Datus tīkla vadībai, dažām vai visām temperatūrām, plūsmas ātrumiem, spiedienam var mērīt ar universālu sensoru kopumu (20). Iegūtie dati var tikt nogādāti uz centrālo vadības vienību (21), kas iekļauj programmējamu regulatoru (17), kas identificē novirzes hidrauliski dalītā vadības sistēmā.

Termostatiskie vārsti (12 h) paredzēti, lai vadītu siltumapgādes procesu gala lietotājos (4), (5), (18), sildīšanai vai dzesēšanai izmantojot gaisa kondicionēšanas iekārtas vai radiatorus. Šo termostatisko vārstu (12 h) vadība un plūsmas ātruma regulēšana notiek automātiski, balstoties uz temperatūras mērījumiem un gala lietotāju temperatūras iestatījumiem iekštelpās. Iekštelpu temperatūru mēra ar sensoriem (22).

Enerģijas komutatoru (3), veidojot vadības arhitektūru, iespējams konfigurēt ar hidraulisku kolektoru (23), kas satur vārstus, apvadcaurules un, ja nepieciešams – sūkņus, lai jauktu siltumnesēju no siltumapgādes.

Plūsmas ātrumiem gala lietotājos (4), (5) un (18) sasniedzot nevēlamu līmeni, piemēram, siltumnesējs tīkla daļā sasniedz augstu vai paaugstinātu atgaitas temperatūru virs noteiktās vērtības, sistēma pazemina pieplūdes temperatūras siltumenerģijas avotos (15) vai dzesēšanas enerģijas avotos (16), izmantojot programmējamo regulatoru (17).

No termostatiskiem vārstiem (12 h) iegūto informāciju var pielāgot nosūtīšanai programmējamam regulatoram (17), kā arī var saistīt ar temperatūras sensora rādījumu, lai nosūtītu rādījumu informāciju par ieejas temperatūru programmējamam regulatoram (17). Sensori (19 h) un vārsti (12 h) ir pielāgojami, lai mērītu plūsmas ātrumu un iegūtos datus nosūtītu programmējamam regulatoram (17). Attiecīgi, vadības datus (temperatūru, plūsmas ātrumu, vārstu pozīcijas, spiedienu) no tīkla (1) var iegūt ar universālu sensoru (20) kopumu. Šie dati savukārt tiek nosūtīti uz centrālo vadības vienību (21), kas ietver programmējamu regulatoru (17).

Termostatiskie vārsti (12 h) nodrošina sildīšanas vadību, kas veic sildīšanu, piemēram, radiatoros un gaisa kondicionēšanas iekārtās. Termostatisko vārstu (12 h) kātu pārvietojums ir saistīts ar gala lietotāja dinamisko slodzi, ko nosaka telpas norobežojošo konstrukciju siltumtehnikas īpašības un iekštelpu gaisa temperatūra, līdz ar to ir svarīgi, lai šie vārsti būtu ar pašpiedziņu un automātiski regulētu plūsmas ātrumu gala lietotājos (4), (5) un (18), tādējādi sasniedzot iestatīto temperatūru. Iekštelpu temperatūra tiek mērīta ar sensoru (22).

Siltumapgādes tīklā (1) iestrādāts spiediena starpības regulators (26), saistīts ar turpgaitas (2) un atgaitas (6) cauruļvadiem. Spiediena starpības regulators (26) savienots ar programmējamu regulatoru (17). Siltumapgādes tīklā (1) siltumnesēja turpgaitas cauruļvadā (2) papildus ir uzstādīts tīkla sūkni (9), ko regulē programmējams regulators (17). Tīkla sūkni (9) regulē, mainot barošanas sprieguma frekvenci. Spiediena starpības regulators mijiedarbībā ar tīkla sūkni (9) uztur optimālu atgaitas temperatūru siltumapgādes tīklā (1).

Paņēmiens siltumapgādes tīkla (1) dalītai vadībai sildīšanai un/vai dzesēšanai ietver: vietējo termostatisku vārstu (12 c, 12 h) iestatīšanu vietējai sildīšanai un/vai dzesēšanai; informācijas nodošanu programmējamam regulatoram (17) no spiediena starpības regulatora (26); komandu nosūtīšanu no programmējama regulatora (17) uz tīkla sūkni (9); vadības datu nosūtīšanu uz centrālo vadības vienību (21); centrālā vadības vienība (21) uztur siltumnesēja plūsmu, spiedienu un temperatūru tā, lai padeves temperatūra siltuma enerģijas avotā (15) būtu saskaņota ar gala lietotāju sildīšanas un/vai dzesēšanas sistēmu pieprasījumu (dinamiskai patēriņa jaudai).

6.1. att. Automātiska vadības sistēma efektīvākai siltuma apmaiņai starp centralizētās siltumapgādes tīkliem atgaitas temperatūras regulēšanai: siltumapgādes tīkls (1); siltumnesēja turpgaitas cauruļvads (2); enerģijas komutators (3); enerģijas gala lietotāji: dzīvojamās (4), sabiedriskās (5) un rūpnieciskās ēkas (18); siltumnesēja atgaitas cauruļvads (6); aukstumnesēja turpgaitas cauruļvads (7); aukstumnesēja atgaitas cauruļvads (8); tīkla sūkņa (9); sildīšanas iekārtas (10); dzesēšanas iekārtas (11); termostatiskie vārsti: sildīšanai (12h), dzesēšanai (12 c); tīkla parametru sensori (13) un universālo sensoru kopums (20); regulējamie vārsti (14); siltuma enerģijas avoti (15); dzesēšanas enerģijas avoti (16); programmējams regulators (17); temperatūras sensori: siltumnesēja sensors (19 h), aukstumnesēja sensors (19 c); centrālā vienības vienība (21); enerģijas gala lietotāju (4), (5) un (18) iekštelpu temperatūras sensors (22); hidrauliskais kolektors (23); vadības datu tīkls (24); datu tīkla mezgls (25); spiediena starpības regulators (26).

SECINĀJUMI

1. Labāku atbilstību centralizētās siltumapgādes sistēmu tehnoloģiskajiem režīmiem sniedz procesu aproksimācija ar otrās pakāpes regresijas polinomiem.
2. Siltumtīklu atgaitas temperatūra samazinājumu lineāri korelē ar uzturēto starpību starp tīkla turpgaitas un atgaitas temperatūrām.
3. Atgaitas temperatūras samazinājums rada lielāku iespaidu uz dūmgāzu kondensācijas ekonomizera darbu, salīdzinot siltumenerģija ģenerācijas procesu.
4. Siltumapgādes sistēmas atgaitas temperatūras pārraudzību un vadību vislabāk balstīt uz otrās pakāpes polinoma regresijas modeļa digitālo dvīni.
5. Digitālais dvīnis siltumapgādes tīklu pārraudzībai un vadībai ir jāveido ar aproksimāciju, balsoties uz otrās pakāpes regresijas polinomiem.

7. NODAĻA. ATJAUNĪGO RESURSU ENERGOKOPIENAS (ARE) (MIKROTĪKLA) VEIDOŠANAS STRATĒGIJA AR ATJAUNĪGĀS ENERĢIJAS TRIGENERĀCIJU (EKO TRIGENERĀCIJU)

Veidojot atjaunīgas enerģijas kopienas, ir svarīgi samazināt visu veidu enerģiju iespējamo patēriņu. Pirmkārt, ir jāaplūko pasīvo ēku iekļaušanas perspektīvas veidojamā atjaunīgas enerģijas kopienā.

Saskaņā ar Latvijas Republikas likumdošanu ēka klasificējama kā gandrīz nulles enerģijas ēka, ja tā atbilst šādām prasībām:

- ēkas energoefektivitātes rādītājs apkurei atbilst A klasei, vienlaikus nodrošinot telpu mikroklimata atbilstību normatīvo aktu prasībām būvniecības, higiēnas un darba aizsardzības jomā;
- kopējais primārās enerģijas patēriņš apkurei, karstā ūdens apgādei, mehāniskajai ventilācijai, dzesēšanai, apgaismojumam ir ne vairāk par 95 kWh uz kvadrātmetru gadā;
- ēkā izmanto augstas efektivitātes sistēmas, kas:
 - nodrošina ne mazāk par 75 % ventilācijas siltuma zudumu atgūšanu apkures periodā;
 - vismaz daļēji nodrošina atjaunojamās enerģijas izmantošanu;
 - ēkā nav uzstādītas zemas lietderības fosilo kurināmo apkures iekārtas;
- elektrības primārās enerģijas faktors ir 1-5, kas būtiski ierobežo iespēju sasniegt kopējas primārās enerģijas patēriņu zem 95 kWh/m². Līdz ar to atjaunojamo energoresursu izmantošana jaunbūvējamā ēkām kļūst obligāta. Papildus tam jāņem vērā, ka, pieaugot siltuma izolācijas līmenim, pieaug dzesēšanas slodzes;
- lai izpildītu *nZEB* ēku prasības un nodrošinātu cilvēku termisko komfortu, ir svarīgi optimizēt un sabalansēt apkures, dzesēšanas slodzes un elektroenerģijas patēriņu ventilācijas vajadzībām.

Pasīvo ēku (*PH*) standarts paredz taupīgu veidu, kā attiecīgi samazināt ēku pieprasījumu pēc enerģijas saskaņā ar ilgtspējības globālo principu [119]. Pasīvo ēku (*PH*) standarts ir brīvprātīga kvalitātes nodrošināšana, kas ir vērsta uz iedzīvotāju maksimālu veselības un labklājības veicināšanu, tajā pašā laikā samazinot telpu apkures jaudu līdz ļoti zēmam līmenim – līdz 15 kWh/m². Komplementāras sinerģistikas tehnoloģijas pieejas, kas pamatojas uz siltumenerģijas nodošanas un saglabāšanas fiziku, ir ieviestas “gandrīz nulles enerģijas ēkas” pieejā, un tas nozīmē, ka ēka gada laikā neizmanto lielāku enerģijas daudzumu kā to, ko ir ģenerējusi. Šīs vērtības var šķist pārāk optimistiskas, tomēr būvmateriālu siltuma veiktspējas faktisko mērījumu rezultāti kopā ar salīdzinājumu starp projekta mērķi un izmērīto telpu siltumenerģiju, kas izlietota vairāk nekā 2000 jaunās un modernizētās pasīvās ēkās, atklāj, ka apkures siltumenerģijas patēriņš ir 14,6 kWh/m² (katru gadu). Šī faktiskā veiktspēja ir tuvu sākotnējam projekta mērķim un ārkārtīgi zema, salīdzinot ar esošo ēku patēriņu [120].

Optimizācijas stratēģija zemas enerģijas patēriņa ēkām ietver vairākas metodes un pieejas. Atšķirīga modelēšana, optimizācija un simulācijas stratēģijas ir aprakstītas četros pētījumos, kuros autori uzsver rūpīgu aprēķinu procedūru svarīgumu pirms enerģijas taupību pasākumu ieviešanas [121, 122, 123, 124]. Taupības analīzes rezultāti rāda, ka izpētīto scenāriju vidū zemākās izmaksas tiek sasniegtas ēkā, ko apsilda ar elektrību, tai ir pasīvās ēkas ārējā apvalka raksturojums, mehāniska ventilācija un siltuma reģenerācija, siltumsūkņi un saules kolektors [125]. Austrijas pasīvo ēku dzīvojamā kvartāla pētījumā tika konstatēts, ka pasīvās ēkas maz ietekmē apkārtējo vidi [126]. Cits pētījums sniedz dažādu materiālu novērtējumu CO₂-eq ietaupījumu ziņā. Rūpīga materiālu atlase var samazināt CO₂-eq ietaupījumus līdz pat

68 %, it īpaši, ja tiek izmantoti kokmateriāli [127]. Ēkas ārējā apvalka siltuma caurlaidība nav piemērota siltuma enerģijas zudumu salīdzinājumam un harmonizācijai, jo valstis ir noteikušas atšķirīgas vērtības katrai klimata zonai, kas tiek noteiktas, pamatojoties uz dažādu dienas temperatūru izmaiņām, un tiek aprēķinātas, izmantojot atšķirīgas aprēķina temperatūras [128, 129, 130]. Nepieciešamā enerģija apkurei ziemas laikā tiek ievērojami samazināta, izmantojot pasīvo saules ēku un energoefektivitātes projektu stratēģiju (*PSEEDS*). Palielinot termisko masu (būvmateriālus ar lielākām R vērtībām), izmantojot atšķirīgu sienu un grīdu sistēmu, izstrādājot projektu, ievērojot *PSEEDS*, kopējais enerģijas pieprasījums var tikt samazināts līdz pat 58 %. Tādējādi, izmantojot *PSEEDS* un lielāku termisko masu dzīvojamo ēku būvniecībā, var panākt ievērojamu enerģijas izmaksu ietaupījumu 50 gadu paredzētajā kalpošanas laikā [129]. Pētījums pierāda izmērītu un modelētu iekšējās masas veiktspēju kā termālās enerģijas uzkrājēju pasīvām ēkām [130]. Iesaka apsvērt iespējamās turpmākās izpētes virzienus zemas enerģijas ēku kontekstā, iekļaujot mijiedarbību ar esošajiem enerģijas sadales tīkliem. Ziemeļu platumos enerģija, kas ražota uz vietas, izmantojot pieejamās solārās tehnoloģijas, nav pietiekama gandrīz nulles enerģijas mērķim, un pētījumam ir jākoncentrējas uz novatoriskiem risinājumiem, piemēram, sezonālai uzkrāšanai un modernizētiem “viedo enerģijas tīklu” risinājumiem, lai iegūtu pozitīvas enerģijas ēkas [133].

Eiropas valstīs zema enerģijas patēriņa ēku būvniecība tiek stimulēta valsts līmenī, ierobežojot ēku siltuma enerģijas patēriņu ziemas laikā līdz 40–60 kWh/m² [120, 121]. Tomēr enerģijas patēriņš ēku dzesēšanai nav stingri reglamentēts.

Ņemot vērā to, ka mūsdienas ēkām stiklotu logu virsmas laukums sasniedz līdz pat 90 % no sienas laukuma, enerģijas patēriņš ēku dzesēšanai varētu būt kopējās energobilances lielākā daļa. Dati [122] pierādīja, ka aukstā klimata pasīvās ēkas siltuma patēriņš apkurei ir 36 kWh/m². Savukārt dzesēšanai tas veido 5 kWh/m² jeb 14 % no apkures patēriņa. Tomēr, ja prasības termiskajam komfortam būtu stingrākas, dzesēšanas enerģijas patēriņš būtu lielāks. Pasīvo ēku projektos būtiska ir inovatīvu dzesēšanas tehnoloģiju izvēle.

7.1. Pasīvās ēkas iekļaušanas iespējas atjaunīgo resursu energokopienā (mikrotīklā)

Atbilstoši normatīvajām prasībām energopārvaldībai – Enerģētikas likumam vai MK noteikuma projektiem – ir jāveic energopārvaldības ieviešana atbilstoši *ISO50001:2018* “Enerģopārvaldības sistēmas. Prasības un lietošanas norādījumi”. Enerģopārvaldības ieviešanu var veikt atsevišķā uzņēmumā vai arī administratīvā teritorijā. Enerģopārvaldības sniegto datu analīzei jāvirza enerģijas bilance atsevišķa uzņēmuma vai administratīvas teritorijas energobilances uzlabošanas virzienā, sasniedzot pirmajā posmā nulles enerģijas bilanci iespējami minimālām enerģijas patēriņam, tālāk, organizējot atjaunīgās enerģijas ģenerēšanu, panākot to, ka pašu saražotā enerģija pārsniedz patērēto enerģiju. Tad ir iespējams aplūkot energokopienas [135] veidošanas lietderību, lai veidotu kopdarba modeli ar esošajiem enerģijas sadales tīkliem.

Tehniskie risinājumi energokopienas (mikrotīkla) vadībai ir sniegti vairākos autoram zināmos pantentos.

Ar vēlamo enerģijas patēriņa modeli, salīdzina dažādas regulēšanas stratēģijas un enerģijas ražošanas un pārvades tehnoloģijas [136].

Sniedz enerģijas vadības sistēmas konfigurēšanas un parametrizācijas iespējas uz pieejamo enerģijas gala patērētāja digitālo dvīņu kopas pamata [137].

Ir aprakstīta siltumapgādes sistēma ar hidrauliski atdalītām ēku iekšējām inženiersistēmām. Sistēmā ir iespējams atdalīt siltumnesēju slāņos siltuma enerģijas uzkrājējā. Atmiņas iekārta seko uzkrājēja slāņojumam un vada siltuma enerģijas piegādi patērētājiem no dažādiem slāņiem [138].

Ir lokāla enerģijas sadale saskaņotai koplietošanai, sasaistot un vadot “enerģijas trūkuma” ķēdes ar “enerģijas avotu” ķēdēm, izpildot CO₂ izmešu ierobežojuma prasības [139].

Siltuma enerģijas atkārtota izmantošana, enerģijas uzkrāšana un emisiju samazināšana vietās, kurās siltuma enerģiju iegūst no apdzīvotās vietas notekūdeņiem [136].

Enerģijas uzkrāšanas sistēma vairāku enerģijas formu piedāvājuma veidošanai patēriņam, ņemot vērā to, ka pieejamiem enerģijas veidiem citam citu ir jāpapildina [137].

7.2. Ekotriģenerācijas lietojums atjaunīgo enerģijas resursu (AER) mikrotīklā pasīvās ēkas iekštelpu gaisa kvalitātes veidošanai

Triģenerācija ir elektroenerģijas, siltuma enerģijas un dzesēšanas enerģijas ražošanas iespējas enerģijas kopienā (mikrotīklā), kurā ir atsevišķas izejas katram enerģijas veidam – elektroenerģijai, siltuma enerģijai un dzesēšanas enerģijai. Ja triģenerācijā izmanto tikai atjaunīgu enerģiju, tad šādu triģenerāciju dēvē par ekotriģenerāciju. Par atjaunīgas enerģijas kopienas (mikrotīkla) izveidei izvēlēts Ogres Centrālās bibliotēkas (OCB) projekts. OCB atjaunīgās enerģijas elektroenerģiju paredzēts iegūt saules PV baterijas. Siltuma un dzesēšanas enerģiju – pilsētas notekūdeņu rekuperācijas sistēmā, šīs enerģijas ģenerējošās iekārtas apvienojot viedās atjaunīgās enerģijas mikrotīklā (energokopienā).



7.1. att. Ogres Centrālās bibliotēkas ārskats (pasīvā ēka, platība 2336 m²).

7.1. tabula

Klimata pārmaiņu finanšu instrumenta prasības (kritēriji) OCB projektam.

Nr.	Kritērija noisaukums	Kritēriju skaidrojums
-----	----------------------	-----------------------

1.	Projektā plānotais energoefektivitātes rādītājs apkurei.	Enerģijas patēriņš apkurei uz ēkas aprēķina platību būs mazāks vai vienāds ar 15 kWh/m ² gadā.
2.	Ēkas siltumapgādes sistēmas.	Ēkā paredzēta autonoma atjaunojamo energoresursu tehnoloģiju uzstādīšana, kas 100 % apmērā nodrošinās ēkai nepieciešamo siltumenerģijas saražošanu, un vismaz 20 % no kopējā ēkas siltumenerģijas apjoma tiks iegūts, izmantojot ventilācijas sistēmas ar siltuma rekuperāciju.
3.	Ēku dzesēšanas (un gaisa sausināšanas) risinājums.	Ēkā paredzēts izmantot pasīvās un mehāniskās dzesēšanas (un gaisa sausināšanas) sistēmas.
4.	Ūdens resursus taupošas tehnoloģijas.	Ēkā un tās teritorijā paredzēts īstenot pasākumus virsūdens savākšanai un izmantošanai ēkā un tai pieguļošajā teritorijā.
5.	Ēkas viedās vadības un kontroles sistēma.	Ēkā paredzēts īstenot viedās vadības un kontroles risinājumus gan elektroenerģijas, gan siltumenerģijas patēriņa vadībai un kontrolei, ievērojot iekštelpu gaisa kvalitātes prasības.
6.	Videi draudzīgas transporta infrastruktūra.	Ēkai paredzētajās autostāvvietās būs pieejamas elektromobiļu uzlādes stacijas vai uzlādes punkti, lai vienlaikus nodrošinātu elektromobiļu uzlādi vairāk nekā 10 % no kopējā stāvvietu skaita.
7.	Dabiskā apgaismojuma izmantošana.	Vairāk nekā 80 % no ēkas izmantojamās platības paredzēts nodrošināt vidējo dienasgaismas koeficientu 1,5 % uz ārpagalmu vērstajām fasādēm un 0,7 % uz iekšpagalmu vērstajām fasādēm.
8.	Būves izmaksas dzīves cikla laikā	Jaunbūves projektā ir veikta dzīves cikla analīze par ēkas būvkonstrukciju, ārsienu, izolācijas materiālu, grīdu un pārsegumu, iekšējo sienu, logu un jumta materiālu ražošanas, piegādes un ekspluatācijas izmaksām 20 gadu periodam.
9.	Reciklētu materiālu izmantošana.	Ēkas būvniecībā paredzēts izmantot reciklētus (pārstrādātus) materiālus vismaz 2 (diviem) būves vai teritorijas labiekārtošanas materiālu veidiem.
10.	Inovācijas līmenis.	Projekta ietvaros uzstādāmā tehnoloģija (ēkas konstrukcijas elementi vai energoražošanas un efektivitātes, vai apkures, vai energoefektīvā apgaismojuma, vai citas ēkas resursu vadības sistēmas) saskaņā ar publiski pieejamo informāciju līdz šim Latvijā nav uzstādītas (ražotāju apliecinājums).
11.	Jaunbūves enerģijas aprēķini.	Jaunbūvei jāveic atjaunojamo saražoto un kopējās patērētās enerģijas aprēķins,

		jānodrošina ēkas energoefektivitātes pagaidu sertifikāts.
12.	Jaunbūves CO ₂ aprēķini.	Jaunbūves siltumnīcefekta gāzu emisijas aprēķini un samazināšanas risinājumi.
13.	Ilgtspējīgas būvniecības kvalitātes vērtēšanas sistēmas novērtējums.	Projektu plānots īstenot, izmantojot kādu no starptautiskās ilgtspējīgas būvniecības kvalitātes vērtēšanas sistēmām (piemēram, <i>BREEAM</i> , <i>LEED</i> , <i>DGNB</i> vai līdzvērtīgas).

7.2. tabula

Ēkas energoefektivitātes novērtējums aprēķinātai energoefektivitātei. Enerģijas patēriņš

Enerģijas patēriņa sadalījums	Aprēķinātie dati gadā		
	kWh/m ²	kWh	MWh
Apkures transmisijas siltuma zudumi	8,54	19 867,35	19,87
Ventilācijas piesildīšana	6,26	14 564,82	14,56
Karstā ūdens sagatavošana	6,3	14 532,60	14,53
Dzesēšana (un gaisa sausināšana)	4	9306	9,31
Apgaismojums	15	34 897,5	34,90
Mehāniskā ventilācija (elektromotoru darbība)	7,5	17 642,12	17,64
Papildu enerģija (apkure, ventilācija, gaisa kondicionēšana, laistīšanas sistēmas ūdens sūkņu darbība)	1,8	4188,57	4,2
Citi patērētāji	0	0	0

Ēka atbilst ēku energoefektivitātes minimālajam pieļaujamam līmenim saskaņā ar MK noteikumiem Nr. 383 "Noteikumi par ēku energosertifikāciju".

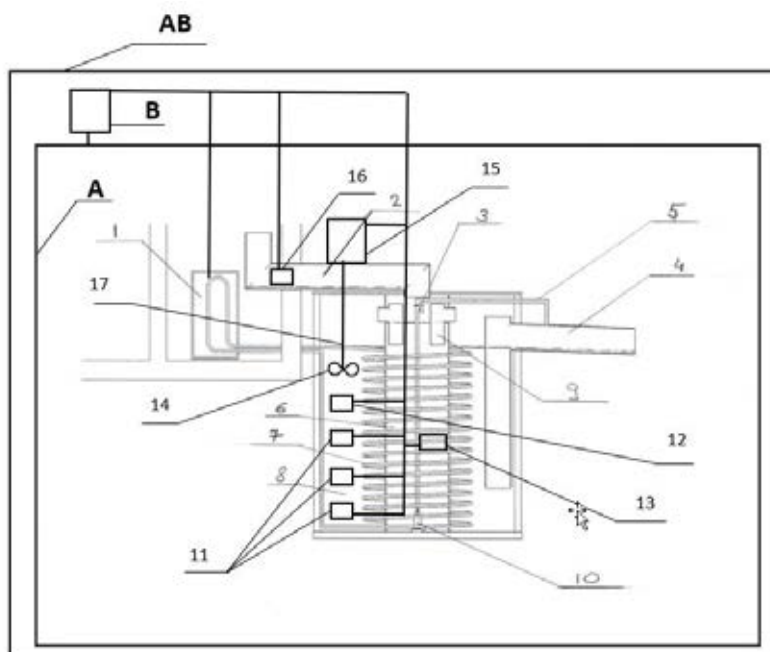
Kopējā uzstādītā jauda nepieciešamā siltuma enerģijas daudzuma saražošanai ir 126 kW.

Ekotriģenerācijas ietaises siltuma un dzesēšanas enerģijas ražošanai

OCB tehniskajā projektā ir iestrādāta tehnoloģiskā iekārta, kas kalpo par pamatu patenta pieteikuma sagatavošanai, jo šī tehnoloģiskā iekārta izlīdzinās veiktspējas kalkulatora (VK) aplēšu atšķirības gadā un sniegs iespējami mazākas siltumenerģijas izmaksas. Iekārtai ir divi galvenie bloki:

- 1) kanalizācijas rekuperācijas bloks;
- 2) vadības bloks ar mērierīcēm un VK.

VK uzdevums ir prognozēt siltumapmaiņas procesa potenciālu, aprēķināt siltuma inerci, prognozēt iekārtas darbības režīmu. Ar nosacījumu, ka krīt notekūdens temperatūra, samazinās tās patēriņš, ir nepieciešamas precīzi aprēķināt pieejamā notekūdens siltuma potenciālu, tādējādi mainot iekārtas darbības parametrus.



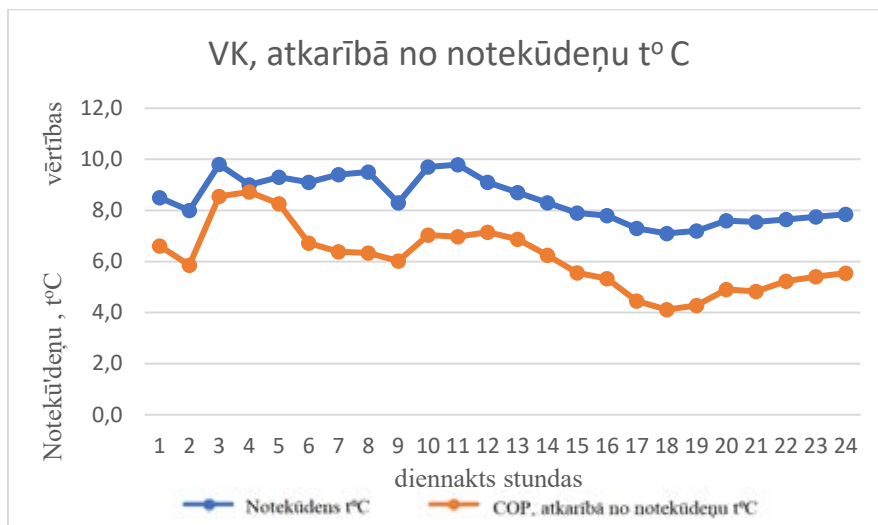
7.2. attēls

Notekūdēns tvertnē trīs līmeņos ir izvietoti termometri 7.2. att., lai varētu sekot siltumapmaiņas procesa virzienam. Tas mainās atkarībā no darbības režīma – apkure vai brīvdzesēšana. Tvertnē pieejamā siltuma potenciāls vienmēr ir atkarīgs no tā temperatūras, ieplūstot tvertnē, kurā pēc aprēķina ir paredzēts, ka aizplūstošā notekūdens temperatūrā nedrīkst būt zemāka par MK noteikumos Nr. 34 “Noteikumi par piesārņojošo vielu emisiju ūdenī” noteikto. VK kalkulatoram jābrīdina par siltuma potenciāla samazināšanos, pielāgojot iekārtas darbību samazinātas jaudas režīmam. Jaudas samazināšana nepieciešama tikai tādos gadījumos, kad pēc parametru analīzes nav prognozējams siltuma potenciāla pieaugums, ar nosacījumu, ka siltuma potenciāla samazinājums ir pārejošs, kad tiek izmantotas nepieciešamās siltuma rezerves akumulācijas tvertnē. Atkarībā no siltumsūkņa pieprasītā siltuma daudzuma nepieciešams aprēķināt pieplūstošā notekūdens apjomu. Pieplūstošā notekūdens izmaiņām VK kalkulators veic aplēsi, lai prognozētu iespējamās stundas patēriņa izmaiņas. Lai noteiktu notekūdens apjomu, kas ieplūst tvertnē, uz padeves sūkņa tiks uzstādīts elektrības skaitītājs. Stundas patēriņu dalot ar jaudu, varēs noteikt sūkņa ražību, līdz ar to tvertnē iesūkņēto notekūdens apjomu m^3 .

Ja izpildās nosacījums, ka momentānā jauda ir mazāka par siltuma potenciālu tvertnē, rēķinot to uz notekūdens apjomu un ieplūdes temperatūru līdz atdzišanas robežai $+7\text{ }^\circ\text{C}$, tad siltumnesēja cirkulācijas sūkņa ražība paliek nemainīga ēkas pieprasītā siltuma apjomā. Ja siltuma potenciāls tvertnē ir pietiekams, savukārt aug ēkas siltuma patēriņš, tad atveras plūsmas vārsts uz papildu siltummaiņa loku, tādā veidā palielinot sildvirsmas laukumu, kas ļauj novadīt lielāku enerģijas apjomu. Ja ēkas momentānā siltuma jauda pārsniedz tvertnes aprēķināto siltuma rezervi, ņemot vērā pievadītā notekūdens mainīgo apjomu, kalkulators pēc siltuma potenciāla aprēķina samazina siltumnesēja caurplūdi caur notekūdens siltummaiņa kontūru notekūdens tvertnē.

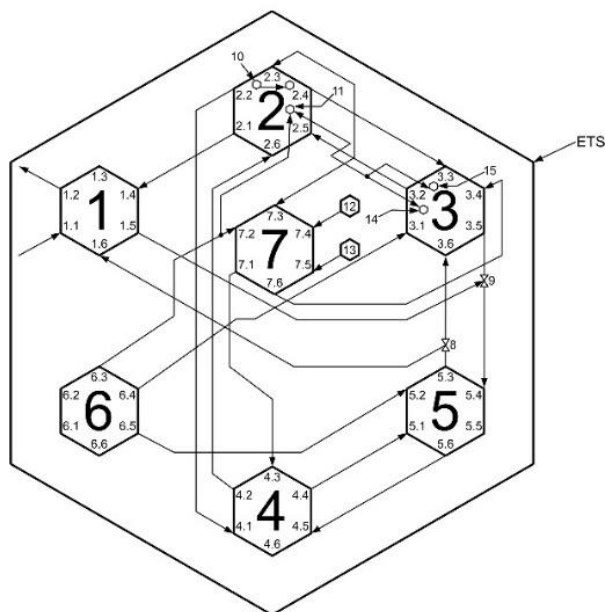
VK vērtības ir atkarīgas no siltumnesēja turpgaitas temperatūras. Jo augstāka notekūdens temperatūra, jo augstāks siltuma potenciāls un notekūdens atdzišanas rezerve līdz norādītajiem $+7\text{ }^\circ\text{C}$. Jāparedz siltumnesēja zemākā temperatūra, lai neatdzēsētu tvertni zem uzstādītajām vērtībām. Tas nozīmē, ka, samazinoties temperatūrai tvertnes ievadā, cirkulācijas sūkņa caurplūdes līkne mazinās, līdz tiek pielāgota atbilstoša caurplūde, kas var nodrošināt

uzstādīto temperatūras grafiku ar temperatūras starpību starp turpgaitu un atgaitu 4 °C ar nosacījumu, ka izejā no siltumsūkņa siltumnesēja temperatūra nav zemāka par +4 °C.



7.3. att. Notekūdens temperatūras ietekme uz VK vērtībām.

7.3. attēlā redzams, kā tvertnē pievadītā notekūdens apjoma un temperatūras ietekmē mainās VK vērtību līkne.



Attēls 7.4 Ekoloģiskās triģenerācijas slēguma shēma.

Ekoloģiskas triģenerācijas sistēmā ETS ir iekļauti:

1. Kanalizācijas notekūdeņu sistēmas enerģijas transformācijas iekārta enerģijas kopienā (mikrotīklā) iekļauto pasīvo ēku apsildei un dzesēšanai;
2. Siltumenerģijas gala patērētājs enerģijas kopienā (mikrotīklā) – pasīva ēka;
3. pasīvās ēkas telpu dzesēšanas sistēma;
4. Siltuma enerģijas uzkrājējs (akumulators);

5. Siltumsūkņis;

6. PV paneļu elektriskā enerģijas ģenerācijas sistēma ar DC/AC invertoru.

ETS pirmā ieeja ir savienota ar pilsētas kanalizācijas tīklu, otrā ieeja - ar enerģijas kopienas (mikrotīkla) gala patērētāja (pasīvās ēkas) 2 kanalizācijas sistēmas izvadu un šīs iekārtas, kurā ieeja ir pieslēgta jaucēja vārstam pie siltumsūkņa 5 siltā loka. Kanalizācijas notekūdeņu sistēma enerģijas transformācijas iekārtas pirmā izeja ir pievienota pilsētas kanalizācijas tīklam, bet otrā izeja savienot ar gala patērētāja (pasīvās ēkas) 2 dzesēšanas sistēmas 3 pirmo ieeju. Gala patērētāja (pasīvās ēkas) 2 pirmā izeja 4 pievienota kanalizācijas notekūdeņu sistēmas enerģijas transformācijas iekārtas 1 otro ieeju, otrā izeja pievienota dzesēšanas sistēmas 3 otrajai ieejai, bet 3 izeja ir saistīta ar siltuma enerģijas uzkrājēja 4 pirmo ieeju. Gala patērētāja (pasīvās ēkas) 2 pirmā ieeja ir pieslēgta telpu dzesēšanas sistēmas 3 pirmajai ieejai, bet otrā izeja ir savienota ar sistēmas 4 pirmo ieeju.

Telpu dzesēšanas sistēmas 3 otrā ieeja ir pievienota PV paneļu elektriskā enerģijas ģenerācijas sistēmai ar DC/AC invertoru 6 pirmajai izejai. Siltuma enerģijas uzkrājēja (akumulatora) pirmā izeja ir pievienota gala patērētāja (pasīvās ēkas) trešajai ieejai, otrā izeja ir pievienota siltumsūkņa 5 otrajai ieejai. Siltumsūkņa 5 loks ir pievienots savā otrajā izejā siltuma enerģijas uzkrājēja (akumulatora) 4otrajai ieejai un siltumsūkņa 5, bet siltuma enerģijas uzkrājēja (akumulatora) otra izeja 4 pievienota siltumsūkņa 5 trešajai ieejai (t.i. siltumtīklam) (iztvaikošanas), loka ieejā. PV paneļu sistēmas elektriskā enerģijas ģenerācija sistēmas ar DC/AC invertoru otrā izeja ir pievienota siltumsūkņa 5 centrālajai ieejai (kompresora dzinējam).

Zināmā ekoloģiskas triģenerācijas sistēma enerģijas kopienā (mikrotīklā) ar pasīvu enerģijas patērētāju (Patenta pieteikums: LVP2020000045 16.06.2020. F24D 11/00; F25B 27/00 "Iekārta un paņēmieni kanalizācijas ūdeņu rekuperācijas sistēmas efektivitātes paaugstināšanai") ir papildināta ar PV paneļu elektriskā enerģijas ģenerācijas sistēmu, kurā ietverts DC/AC invertors, lai veiktu enerģijas kopienas (mikrotīkla) inženiersistēmas tīkla barošanu. Taču ģenerētā elektroenerģijas apjomu nosaka saules starojuma intensitāte, kas diennakts gaitā ir mainīga (att. 2). Šāds saules enerģijas diennakts sadalījums neļauj pilnībā lietderīgi izmantot pieejamo saules enerģijas potenciālu, vakara stundās, kad pasīvajā ēkā vēl ir OCB darba laiks, PV ģenerētais elektroenerģijas apjoms, ir nepietiekams OCB inženiersistēmu darbināšanai. Lai varētu pilnvērtīgāk izmantot saules enerģijas potenciālu, ekoloģiskas triģenerācijas sistēmai ir pievienots iekštelpu gaisa kvalitātes un ārējās temperatūras korelācijas bloks 7. Šis bloks veic iekštelpu gaisa kvalitātes, galvenokārt iekštelpu gaisa temperatūras iestatījumu korekciju, mainoties ārējās temperatūrai.

Iekštelpu gaisa kvalitātes IKG un ārējās temperatūras korelācijas bloka ieeja 4 savienota ar PV paneļu elektriskā enerģijas ģenerācijas sistēmu un izeja ar ventilācijas sistēmas pieplūdes ventilatoru. Korelācijas bloks 7 veic IKG un ārējās temperatūras korelāciju saskaņā ar ANSI/ASHRAE standarta 55 "Thermal environmental conditions for human occupancy" ieteikumiem.

7.3. Vadības stratēģijas atjaunīgas enerģijas kopienā (mikrotīklā) ar ekotriģenerāciju

Aplūkojot perspektīvas enerģijas vadības metodes un tehniku pielietojumam atjaunīgas enerģijas kopienā (mikrotīklā) ar ekotriģenerāciju, iespējams secināt, ka šai jomai un datu apjomam, vispiemērotākā ir vietēja vadības sistēma ar iegultu mikroprocesoru.

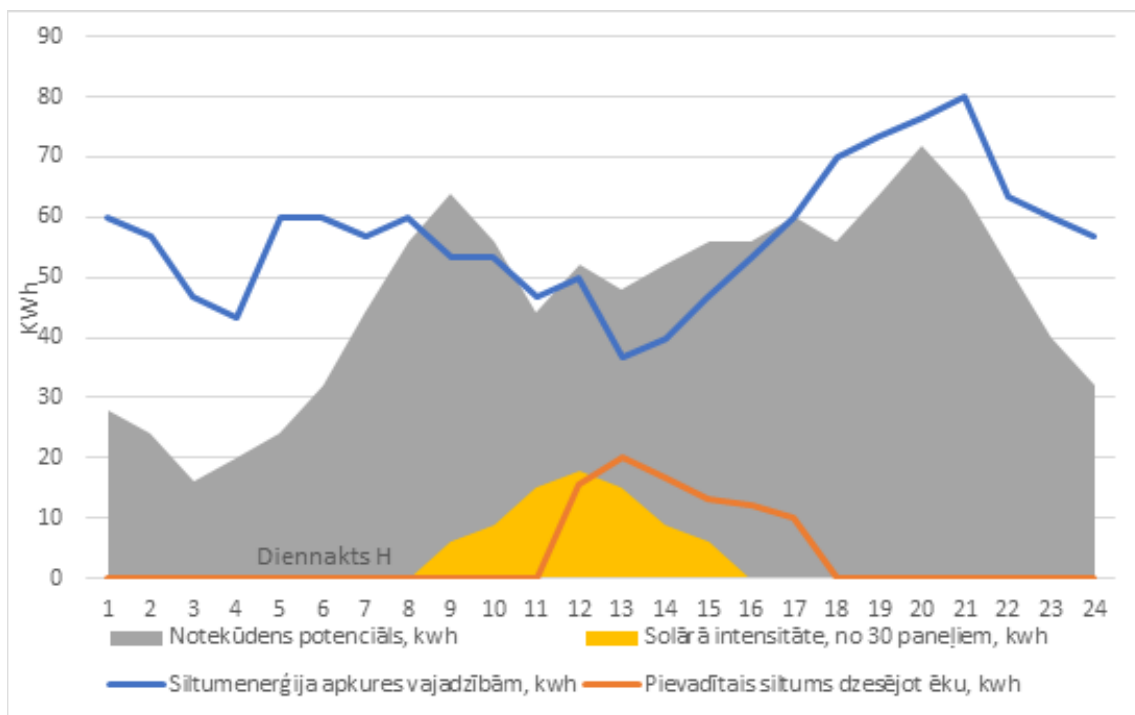
Analizējot mikroprocesoru pielietojuma jomas [40] ir secināts, ka "visredzamākais mikroprocesoru pielietojums ir maīnstrāva elektriskajā piedziņā ar minimālo reaktīvo elementu skaitu un izmēriem, kā arī augstu pārveidošanas kvalitāti." Šāds apgalvojums ir guvis arī apstiprinājumu tālākos praktiskos pētījumos [42], [43]. Šīs atziņas pamato arī apkures (tai skaitā

arī siltumapgādes), dzesēšanas, saldēšanas un gaisa kondicionēšanas jomā ieteiktās vadlīnijas [44], kuras palīdz inženieriem saprast sistēmā iekļautos atsevišķos sistēmas regulatorus, sistēmas iekārtas un to sasaisti projektētam sistēmas sniegunam. Regulatoriem strādājot tīklā, būtiska ir darba secība, lai nodrošinātu vienmērīgu tīkla darbu [45]. Kopaina par mūsdienu izaicinājumiem māju informācijas sistēmās ir sniegta ASHRAE Tehniskās komisijas 1.4 Vadības teorijas pielietojums priekšsēdētāja Chris Benson intervijā [46]. Pieminētos avotos secināts, ka mikroprocesoru pielietojuma iespējas atjaunīgu enerģijas resursu mikrotīklā, prasa papildus vērtējumu balstoties uz spēkā esošajiem normatīviem un mikrotīklā vadīto tehnoloģisko procesu.

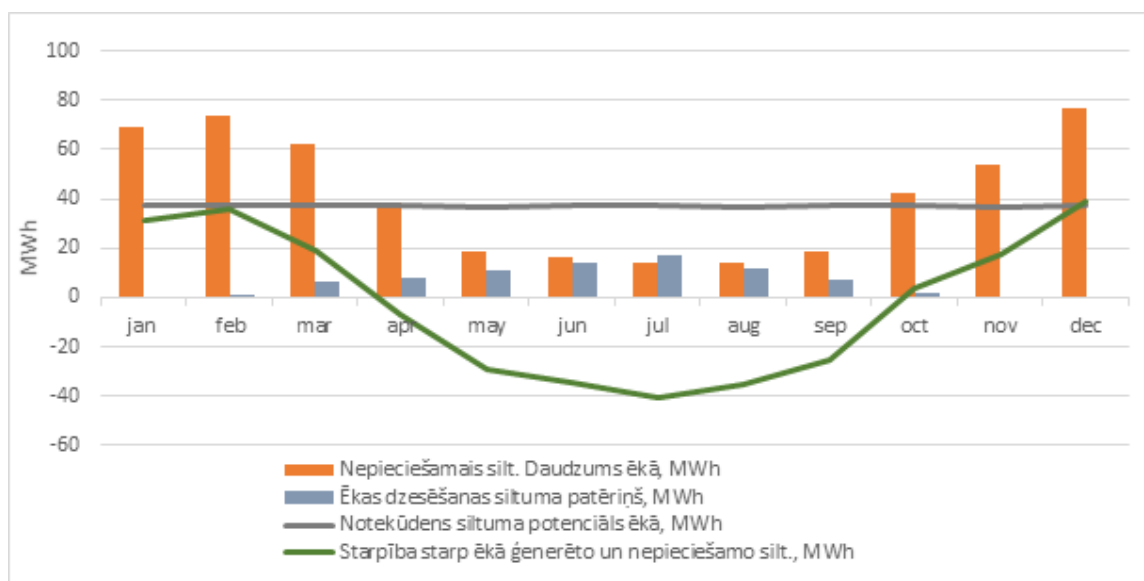
Atjaunīgā enerģijas mikrotīklā siltumu apkurei un karstā ūdens vajadzībām ēkā nodrošina ar notekūdeņu siltuma atgūšanas sistēmas palīdzību. Iekštelpu dzesēšanu nodrošina no notekūdens brīvdzesēšanas režīmā. Elektroenerģiju šo procesu tehnoloģijas nodrošināšanai iegūst no saules, šo konceptu promocijas darba autors ir nosaucis par ekoloģisko triģenerāciju jeb ekotriģenerāciju.

Attēlā 7.5. ilustrēts esošas ēkas notekūdeņu patēriņš (kurš pārvērst atgūstamā siltuma vienībā), paredzamais ēkas dzesēšanas pieprasījums, karstā ūdens pieprasījums un ieguvums no 30m² solāro paneļu radītās elektriskās jaudas. Attēls 7.6. parāda ēkas enerģijas pieprasījumu mijiedarbību jūlija mēnesī. Solārā radiācija vasarā, nosedz lielu daļu ēkas elektroenerģijas pieprasījuma. Tas nozīmē, ka pārgrupējot resursu izmantošanas ieradumus dienas gaitā, iespējams nodrošināt ēku ar zemu izmaksu atjaunojamo enerģiju.

Siltumenerģiju karstā ūdens sagatavošanai rīta pusē iespējams nodrošināt ar notekūdeņu siltuma atgūšanas ierīci, pie nosacījuma, ka notekūdens tvertnē ir pietiekošs siltuma apjoms, kurš nav patērēts iepriekšējā vakarā. Solārā radiācija ir pietiekoša no plkst. 4.00 – 9.00, lai nodrošinātu karstā ūdens siltuma pieprasījumu siltumsūkņa un cirkulācijas sūkņa darbībai. Ja notekūdens potenciāls notekūdens tvertnē no ēkā radītajiem notekūdeņiem ir nepietiekošs, iespējams pievadīt notekūdeni no pilsētas tīkla, lai kompensētu enerģijas trūkumu. No plkst. 9.00 – 12.00 mājas iedzīvotājiem dodoties uz darbu, notekūdens patēriņš samazinās (līdz ar to arī nepieciešamība pēc karstā ūdens), tomēr šajā brīdī pieaug pieprasījums pēc iekštelpu dzesēšanas. Iekštelpu dzesēšanu sākotnēji nodrošina ar siltumsūkņa B pusi, tik lielā apmērā, kas nosedz karstā ūdens pieprasījumu. Pieaugot solārajai aktivitātei, pieaug dzesēšanas jauda, attiecīgi pieaug siltumsūkņa saražotā siltumenerģija A pusē. Ēkā izvietot lielus siltuma akumulatorus nav ekonomiski pamatoti, tamdēļ periodā no plkst. 12.00 – 16.00 iekštelpu dzesēšana jānodrošina brīvdzesēšanas režīmā, tai skaitā no pilsētas notekūdens tīkla, jo pieprasījums pēc karstā ūdens ēkā ir neliels, līdz ar to nav nepieciešamības darbināt siltumsūkni, tādā veidā netiek nelietderīgi uzkrāta siltumenerģija, kurai nav ekonomiska pamatojumu. No plkst. 16.00 – 20.00 pieaug ēkas karstā ūdens pieprasījums, attiecīgi siltumsūknis strādā karstā ūdens sagatavošanai novadot A pusi ēka siltuma akumulatorā un B puse nodrošina ēkas iekštelpu dzesēšanu (siltuma un dzesēšanas jaudas trūkumā gadījumā, notekūdeni pievada no pilsētas tīkliem enerģijas kompensēšanai). Šādā darbības režīmā netiek atdzesēts notekūdens uzkrājvertnē, ļaujot notekūdens siltuma resursu izmantot dienas beigās no 20.00 – 24.00 pēc solārās radiācijas, kad tas kalpo karstā ūdens sagatavošanai. Šis ir veids, kā ražot ēkai nepieciešamo enerģiju vasaras periodā ekotriģenerācijas ciklā.



Att. 7.3. Paredzamais enerģijas patēriņš ēkā vasarā.



Att.7.4. Ēkas paredzamais enerģijas patēriņš gadā.

Attēlā nav ietverta solārās aktivitātes enerģijas līkne, tomēr tas atspoguļo ēkā saražotās un pieprasītās enerģijas apjomu. Ar ekotriģenerācijas iekārtu kompleksu, būtu iespējams samazināt enerģijas izmaksas un CO2 emisiju.

Iekārta paredzēta notekūdeņu siltuma atgūšanai, tālāk to novirzot sabiedrisko ēku, industriālo objektu apsildei un karstā ūdens apgādei.

SECINĀJUMI

1. EKO triģenerācijas pielietojums vislietderīgāk ir ARE (mikrotīklos) pasīvās ēkas iekštelpu gaisa kvalitātes veidošanai
2. Ilgtspējīgu siltumenerģijas atguvi nodrošina pieslēgums pilsētas kanalizācijas tīklam.
3. EKO triģenerācija pielietojama rekuperācijas laika pagarināšanai.
4. Rekuperācijas laika pagarināšanai nepieciešama iekštelpu gaisa kvalitātes kritēriju korekcija normatīvu pieļaujamās robežās.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. *The Paris Agreement* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
2. *Energy Trilemma Index* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://trilemma.worldenergy.org/>.
3. *Clean energy for all Europeans package* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en.
4. *Regulation (EU) No 1227/2011 of the European Parliament and of the Council of 25 October 2011 on wholesale energy market integrity and transparency Text with EEA relevance* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <http://data.europa.eu/eli/reg/2011/1227/oj>.
5. *EU climate target plan: Raising the level of ambition for 2030* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document.html?reference=EPRS_BRI\(2020\)659370](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document.html?reference=EPRS_BRI(2020)659370).
6. *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2011-112-a-roadmap>.
7. Runge-Metzger, A. *A Clean Planet for all: A European strategic long term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: https://eeas.europa.eu/sites/eeas/files/eu_long_term_vision_presentation_beijing_january_2018_final.pdf.
8. *Directive (EU) 2018/844 of the European parliament and of the council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844>.
9. *Encyclical Letter Laudato si' of the Holy Father Francis on care for our common home* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: http://www.vatican.va/content/francesco/en/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si.html.
10. Shankleman, J., Rathi, A. *China Vows Carbon Neutrality by 2060 in Major Climate Pledge* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-09-22/china-pledges-carbon-neutrality-by-2060-and-tighter-climate-goal>.
11. Biden, R., J. *Remarks by President Biden at the Virtual Leaders Summit on Climate Opening Session* <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/speeches-remarks/2021/04/22/remarks-by-president-biden-at-the-virtual-leaders-summit-on-climate-opening-session/>
12. *US: Joe Biden signs climate directives, announces April summit* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://www.dw.com/en/us-joe-biden-signs-climate-directives-announces-april-summit/a-56365062>.
13. *World Economic Forum Platforms* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://www.weforum.org/platforms>.
14. *About ASHRAE* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://www.ashrae.org/about>.
15. Gullledge, C.E., III. *The ASHRAE digital lighthouse & industry 4.0. ASHRAE Journal*, 2020, 62 (8), pp. 12-20. Pieejams: https://www.ashrae.org/file%20library/about/leadership/presidential%20members%20gallery/12-21_president-speech_gullledge.pdf.
16. *IEEE - The world's largest technical professional organization dedicated to advancing technology for the benefit of humanity* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://www.ieee.org/>.
17. De Doncker, R.W. *Distribution grids with DC power electronics - a key enabling technology* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: https://www.dut.ac.za/wp-content/uploads/2019/05/keynote3_doncker_2018-06-15_DC_Congress_Utrecht.pdf.

18. Dzelzitis, E. Ilmastointiprosessin säädettävyys: raportti B2 / Teknillinen korkeakoulu. LVI-laboratorio. Espoo, 1983. 45 s. ISBN 951-753-009-9. ISSN 0780-2811.
19. Underwood, C.P. *HVAC Control Systems: Modelling, Analysis and Design*. London: Taylor & Francis, 1999. 332 p. ISBN 978-1-135-81782-4.
20. Shadpour, F. *The Fundamentals of HVAC Direct Digital Control*. Escondido: Hacienda Blue Publishing, 2012. 337 p.
21. ISO 13970:2008. *Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling*. Geneva: ISO, 2008. 162 p.
22. EN 15232:2012. *Energy performance of buildings - Impact of building automation, controls and building management*. Brussels: CEN, 2012. 116 p.
23. ES 2696424 A1. Arcos Sánchez, J.A., Rodríguez Jusdado, E., Fernández Rodríguez, G. *Method for the calculation of the energy consumption for thermally conditioning a building*. Oficina Española de Patentes y Marcas, 2019 [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/ES2696424A1/en>.
24. US 2020/0059098 A1. Bing Dong, Zhaoxuan Li, Jeff Qiang Xu. *Building and building cluster energy management and optimization system and method*. United States Patent and Trademark Office, 2020 [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/US20200059098A1>.
25. US 2018/0348713 A1. Frey, C., Ullmann, R. *Energy efficiency of a building at the planning stage*. United States Patent and Trademark Office, 2018 [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/US20180348713A1>.
26. EP 2987112 B1. Matsuoka, Y., Malhotra, M., Minich, A.J., Ruff, J.A. *Generating and implementing thermodynamic models of a structure*. European Patent Office, 2020 [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/EP2987112B1>.
27. Mastelic, J., Emery, L., Previdoli, D., Papilloud, L., Cimmino, F., Genoud, S. Energy management in a public building: A case study co-designing the building energy management system (2017). *2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation: Engineering, Technology and Innovation Management Beyond 2020: New Challenges, New Approaches, ICE/ITMC 2017, Madeira, Portugal - Proceedings*, pp. 1517-1523. DOI: 10.1109/ICE.2017.8280062.
28. Apse-Apsitis, P., Avotins, A., Ribickis, L. A different approach to electrical energy consumption monitoring. *2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE-ECCE Europe 2014, Lappeenranta, Finland*, art. no. 6910970, pp. 2573-2577. DOI: 10.1109/EPE.2014.6910970.
29. Apse-Apsitis, P., Avotins, A., Porins, R. Industrial greenhouse electrical power monitoring using secure internet-of-things(IoT) Platform. *2018 IEEE 6th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, AIEEE 2018, Vilnius, Lithuania - Proceedings*, art. no. 8592307, DOI: 10.1109/AIEEE.2018.8592307.
30. Ramprasad, B., McArthur, J., Fokaefs, M., Barna, C., Damm, M., Litoiu, M. Leveraging existing sensor networks as IoT devices for smart buildings. *IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2018, Singapore - Proceedings*, pp. 452-457. DOI: 10.1109/WF-IoT.2018.8355121.
31. Papas, I., Estibals, B., Ecrepont, C., Alonso, C. Energy Consumption Optimization through Dynamic Simulations for an Intelligent Energy Management of a BIPV Building. *7th International IEEE Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2018, Paris, France*, art. no. 8566915, pp. 853-857. DOI: 10.1109/ICRERA.2018.8566915.
32. Medina, B.E., Manera, L.T. Retrofit of air conditioning systems through an Wireless Sensor and Actuator Network: An IoT-based application for smart buildings. *Proceedings of the 2017 IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC 2017, Calabria, Italy*, art. no. 8000066, pp. 49-53. DOI: 10.1109/ICNSC.2017.8000066.
33. Avotins, A., Senfeids, A., Apse-Apsitis, P., Podgornovs, A. IoT solution approach for energy consumption reduction in buildings: Part 1. Existing situation and problems regarding electrical consumption. *58th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2017, Riga, Latvia - Proceedings*, pp. 560-565. DOI: 10.1109/RTUCON.2017.8124847.

34. Avotins, A., Podgornovs, A., Senfelds, A., Vegeris, M. IoT solution approach for energy consumption reduction in buildings: Part 2. Measurement setup and practical data analysis. *17th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development", May 23-25, 2018, Jelgava, Latvia. Proceedings, Volume 17.* Jelgava, 2018, pp. 923-929. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N375.
35. Avotins, A., Senfelds, A., Nikitenko, A., Podgornovs, A., Zadeiks, K., Dzenis, M. IoT Solution approach for energy consumption reduction in buildings: Part 3. Mathematical model of building and experimental results. *2018 IEEE 59th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2018, Riga, Latvia - Proceedings*, art. no. 8659890, pp. 466-473. DOI: 10.1109/RTUCON.2018.8659890.
36. *Measurement of Energy, Demand, and Water Savings: ASHRAE Guideline 14-2014.* ASHRAE Inc., 2014.
37. Skistad, H., Mundt, E., Nielsen, P. V., Hagström, K., Railio, J. *Displacement Ventilation in Non-Industrial Premises: Rehva Guidebook No.1.* Second edition. Brussels: Rehva, 2004. 95 p. ISBN 82-594-2369-3.
38. DEOS AG [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://www.deos-ag.com/en>.
39. EP 1670565 A2. Billiotte, J.-M., Basset, F., Volodina, E.V., Nagolkin, A.V. *Method and device for airborne ventilation and decontamination by mixing an air delivery and suction flux bound by Coanda effect.* European Patent Office, 2004 [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/EP1670565A2/en>.
40. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy: ANSI/ASHRAE Standart 55-2004.* ASHRAE Inc., 2004.
41. *Communication from the Commission to the European parliament, the Council, the European economic and social committee and the Committee of the regions: A Blueprint to Safeguard Europe's Water Resources* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52012DC0673>.
42. *The impact of building automation and control functions on the energy efficiency of buildings: Document Nr. CMI10854en_02 2008.* Siemens Switzerland Ltd.
43. *The business case for green building: a review of the costs and benefits for developers, investors and occupants* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: https://www.worldgbc.org/sites/default/files/Business_Case_For_Green_Building_Report_WEB_2013-04-11-2.pdf.
44. Borodinecs, A., Prozuments, A., Zajacs, A., Zemitis, J. Retrofitting of fire stations in cold climate regions. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, 90 (6), pp. 85-92. DOI: 10.18720/MCE.90.8.
45. Sergeev, V.V., Petrichenko, M.R., Nemova, D.V., Kotov, E.V., Tarasova, D.S., Nefedova, A.V., Borodinecs, A.B. The building extension with energy efficiency light-weight building walls. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, 84 (8), pp. 67-74. DOI: 10.18720/MCE.84.7.
46. Baranova, D., Sovetnikov, D., Borodinecs, A. The extensive analysis of building energy performance across the Baltic Sea region. *Science and Technology for the Built Environment*, 2018, 24 (9), pp. 982-993. DOI: 10.1080/23744731.2018.1465753.
47. Zemite, L., Gerhards, J. Reliability evaluation of distribution systems. *Electrical and Control Technologies: Proceedings of the 9th international conference on electrical and control technologies (ECT-2014).* Kaunas: Technologija, 2014, pp. 94-100.
48. Zemite, L., Kutjuns, A., Bode, I., Kunickis, M., Zeltins, N. Risk treatment and system recovery analysis of gas system of gas and electricity network of Latvia. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2018, 55 (5), pp. 3-14. DOI: 10.2478/lpts-2018-0031.
49. Zemite, L., Kutjuns, A., Bode, I., Kunickis, M., Zeltins, N. Consistency analysis and data consultation of gas system of gas-electricity network of Latvia. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2018, 55 (1), pp. 22-34. DOI: 10.2478/lpts-2018-0003.
50. Kuposovs, A., Bode, I., Zemite, L., Dzelzitis, E., Odineca, T., Ansona, A., Selickis, A., Jasevics, A. Optimization of the selection method for reconstruction of outworn gas distribution pipeline. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2019, 56 (5), pp. 33-44. DOI: 10.2478/lpts-2019-0029.

51. Mahmood, G.I, Ligrani, P.M. Heat transfer in a dimpled channel: Combined influences of aspect ratio, temperature ratio, Reynolds number, and flow structure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45 (10), pp. 2011-2020. DOI: 10.1016/S0017-9310(01)00314-3.
52. Kiselev, N.A., Burtsev, S.A., Strongin, M.M. A procedure for determining the heat transfer coefficients of surfaces with regular relief. *Measurement Techniques*, 2015, 58 (9), pp. 1016-1022. DOI: 10.1007/s11018-015-0835-7.
53. Leontiev, A.I., Vinogradov, Yu.A., Bednov, S.M., Golikov, A.N., Yermolaev, I.K., Dilevskaya, E.V., Strongin, M.M. Effect of vortex flows at surface with hollow-type relief on heat transfer coefficients and equilibrium temperature in supersonic flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 26 (5), pp. 487-497. DOI: 10.1016/S0894-1777(02)00157-7.
54. Лаптев, А.Г., Николаев, Н.А., Башаров, М.М. *Методы интенсификации и моделирования теплообменных процессов: учебно-справочное пособие*. Москва: Теплотехник, 2011. 335 с. ISBN 978-5-98457-104-3.
55. Галицейский, Б.М., Рыжов, Ю.А., Якуш, Е.В. *Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках*. Москва: Машиностроение, 1977. 256 с.
56. Rony, R.U., Hasan, M.N., Laskar, M.A.R. Heat transfer of pulsating turbulent flow in pipes. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 2018, 5 (8), pp. 511-516. Pieejams: <http://www.ejaet.com/PDF/5-8/EJAET-5-8-511-516.pdf>.
57. Embaye, M., Al-Dadah, R.K., Mahmoud, S. The effect of flow pulsation on the heating performance of panel radiators in central heating systems: CFD analysis. *Heat Transfer XIII: Simulation and Experiments in Heat and Mass Transfer*. WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol. 83. Southampton: WIT Press, 2014, pp. 27-37. DOI: 10.2495/HT140031.
58. *Heat Transfer XIII: Simulation and Experiments in Heat and Mass Transfer: Thirteenth International Conference on Simulation and Experiments in Heat and Mass Transfer*. WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol. 83. Southampton: WIT Press, 2014. 528 p. Pieejams: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-engineering-sciences/83>.
59. Myhren, J.A., Holmberg, S. Flow patterns and thermal comfort in a room with panel, floor and wall heating. *Energy and Buildings*, 2008, 40 (4), pp. 524-536. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.04.011.
60. Erdoğan, A.B. *Simulation of the Heater Test Room Defined by EN442 Standard and Virtual Testing of Different Type of Heaters*. PhD Thesis. İzmir, 2011. 180 p. [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <http://library.iyte.edu.tr/tezler/doktora/makinamuh/T000858.pdf>.
61. Sidenko, N., Dzelzitis, E. The method of numerical modeling of hydrodynamics and heat exchange in a channel with discrete roughness. *Mathematical Modeling*, 2018, 2 (2), pp. 61-64. [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://stumejournals.com/journals/mm/2018/2/61>.
62. Dzelzitis, E., Sidenko, N. Numerical simulation of heat exchange in discrete-rough channels at flow superimposed oscillations. *18th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development": May 22-24, 2019, Jelgava, Latvia. Proceedings, Volume 18*. Jelgava, 2019, pp. 1155-1161. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N203.
63. *SOLIDWORKS Flow Simulation 2018*.
64. *Dabaszgāzes tirdzniecības un lietošanas noteikumi: LR Ministru kabineta noteikumi Nr. 78*, pieņemti 07.02.2017. 119., 120.punkts [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/289031>.
65. *Dabaszgāzes tirdzniecības un lietošanas noteikumi: LR Ministru kabineta noteikumi Nr. 78*, pieņemti 07.02.2017. 127.punkts [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/289031>.
66. *ENTSOG Ten-Year Network Development Plan (TYNDP 2017) and EU Reference Scenario 2016*.
67. *Baltic Energy Market Interconnection Plan* [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/infrastructure/high-level-groups/baltic-energy-market-interconnection-plan>.
68. *Energy Security of Supply Declaration*, January 14, 2015, Riga [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://enmin.lrv.lt/uploads/enmin/documents/files/Teisin%C4%97%20informacija/Teis%C4>

[%97s%20aktai/Bendrieji%20energetikos%20strateginiai%20dokumentai/Regioninis%20bendradarbiavimas/Energy_Security_of_Supply_declaration_20150114_EN.pdf](#)

69. Eurogas Distribution Committee Report on Smart Gas Metering. Eurogas, 2010.
70. Energoefektivitātes likums: LR likums, pieņemts 03.03.2016 [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/280932>.
71. Fizisko personu datu apstrādes likums: LR likums, pieņemts 21.06.2018 [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/300099>.
72. Decision on the National Rollout of Electricity and Gas Smart Metering. The Commission for Energy Regulation, 2012 [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://www.cru.ie/wp-content/uploads/2012/07/cer12092.pdf>.
73. Hayashi, H. Evolution of next-generation gas metering system in Japan. 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014), Tampa, FL, USA, art. no. 6848612. DOI: 10.1109/MWSYM.2014.6848612.
74. Khan, M.F., Zoha, A., Ali, R.L. Design and implementation of smart billing and automated meter reading system for utility gas. 2007 International Conference on Information and Emerging Technologies, ICIET, Karachi, Pakistan, art. no. 4381338, pp. 205-210. DOI: 10.1109/ICIET.2007.4381338.
75. Khan, T.H., Paul, T.K., Shahabuddin, G.M., Wahid, K., Chowdhury, A.H., Kabir, S.M.L. Towards design of a smart prepaid gas metering system. 2009 International Conference on Innovations in Information Technology, IIT '09, Al Ain, United Arab Emirates, art. no. 5413776, pp. 55-59. DOI: 10.1109/IIT.2009.5413776.
76. Daminov, I., Tarasova, E., Andreeva, T., Avazov, A. Comparative analysis of smart meters deployment business models on the example of the Russian federation markets. EPJ Web of Conferences, 2016, 110, art. no. 01015. DOI: 10.1051/epjconf/201611001015.
77. Dabasgāzes tirdzniecības un lietošanas noteikumi: LR Ministru kabineta noteikumi Nr. 78, pieņemti 07.02.2017 [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/289031>
78. Enerģētikas likums: LR likums, pieņemts 03.09.1998 [skatīts 2021.g. 14. aprīlī]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/49833-energetikas-likums>.
79. Bell, R., Calaba, R. *Classic Papers in Control Theory*. Mineola, New York: Dover Publications, Inc., 2017. 200 p. ISBN 978-0-486-81856-6.
80. Bertsekas, D. *Dynamic Programming and Optimal Control*. 4th edition. Belmont, Massachusetts: Athena Scientific, 2017. 2 volume set. ISBN 978-1-886529-08-3.
81. Дзелзитис, Э.Э., Калнберзинь, А.Я., Каулинъш, Д.Я. Синтез настраиваемых комбинационных схем для систем кондиционирования воздуха. *Теория конечных автоматов и ее приложения*. Рига: Зинатне, 1978, вып. 9, с. 169-177.
82. Дзелзитис, Э.Э., Гинтерс, Э.В., Гертнерс, А.Г. Оценка объема информации при управлении энергосберегающими системами кондиционирования воздуха. *Вентиляция и кондиционирование воздуха промышленных и сельскохозяйственных зданий*. Рига: Риж. политехн. ин-т, 1986, вып. 18, с. 50-57.
83. Tahir, M., Javed, K. *ARM Microprocessor Systems: Cortex-M Architecture, Programming, and Interfacing*. Boca Raton: CRC Press, 2020, 514 p.
84. Mehta, A.B. *System Verilog Assertions and Functional Coverage: Guide to Language, Methodology and Applications*. Cham: Springer, 2020. 507 p. ISBN 978-3-030-24737-9.
85. Berger, A.S. *Debugging Embedded and Real-Time Systems: The Art, Science, Technology and Tools of Real-Time Systems Debugging*. San Diego: Elsevier Science & Technology, 2020, 304 p. ISBN 978-0-12-817812-6.
86. Marwedel, P. *Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems, and the Internet of Things*. Cham: Springer, 2018. 423 p. ISBN 978-3-319-56043-4.
87. Ferrnandez, A., Dang, D. *Getting Started with the MSP430 Launchpad*. Amsterdam: Elsevier/Newnes, 2013. 187 p. ISBN 978-0-12-411588-0.
88. Iyer, G.G. *An Introduction to Texas Instruments C2000 Real-Time Control Microcontrollers*. [S.l.], 2016. 159 p. ISBN 978-1-5207-2424-9.
89. Welch, T.B., Wright, C.H.G., Morrow, M.G. *Real-Time Digital Signal Processing from MATLAB to C with the TMS320C6x DSPs*. Boca Raton: CRC Press, 2017. 444 p. ISBN 978-1-4987-8101-5.

90. Badescu, V. *Optimal Control in Thermal Engineering*. Cham: Springer, 2017. 588 p. ISBN 978-3-319-52967-7.
91. McDowall, R., Montgomery, R.D. *Fundamentals of HVAC Control Systems*. Atlanta: ASHRAE, 2011. 348 p. ISBN 978-1-933742-92-2.
92. Ryan, M. Understanding cascade control and its applications for HVAC. *ASHRAE Journal*, 2021, 63 (2), pp. 14-20.
93. А.с. SU 813090 А2. Дзелзитис, Э.Э., Анцифоров, Л.А., Дорофеев, О.Н., Креслинь, А.Я., Нефелов, С.В., Фрицнович, Г.Ф., Чапенко, В.П. *Система кондиционирования воздуха*. Заявл. 18.12.1978 (№ 2698517/29-06) ; Оpubл. 15.03.1981 [skatīts 2021.g. 15. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/SU813090A2>.
94. А.с. SU 939884 А2. Дзелзитис, Э.Э. *Система кондиционирования воздуха*. Заявл. 12.05.1980 (№ 2921345/29-06) ; Оpubл. 30.06.1982 [skatīts 2021.g. 15. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/SU939884A2>.
95. А.с. SU 881466 А2. Дзелзитис, Э.Э., Креслинь, А.Я. *Система кондиционирования воздуха*. Заявл. 13.02.1980 (№ 2882073/29-06) ; Оpubл. 15.11.1981 [skatīts 2021.g. 15. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/SU881466A2>.
96. А.с. SU 1268892 А1. Дзелзитис, Э.Э., Рубе, И.А., Буценс, А.А., Скумбиньш, Ю.Я. *Многозональная двухканальная система кондиционирования воздуха*. Заявл. 25.06.1985 (№ 3916703/29-06) ; Оpubл. 07.11.1986 [skatīts 2021.g. 15. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/SU1268892A1>.
97. Пат. SU 1341465 А1. Дзелзитис, Э.Э. *Система кондиционирования воздуха*. Заявл. 20.06.1984 (№ 3754950/29-06) ; Оpubл. 30.09.1987 [skatīts 2021.g. 15. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/SU1341465A1>.
98. А.с. SU 881465 А2. Дзелзитис, Э.Э., Креслинь, А.Я. *Система кондиционирования воздуха*. Заявл. 13.02.1980 (№ 2881719/29-06) ; Оpubл. 15.11.1981 [skatīts 2021.g. 15. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/SU881465A2>.
99. Talcis, N. *Centralizētās siltumapgādes sistēmas pārvaldības un kontroles metodoloģija*. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība, 2018. 122 lpp.
100. Žīgurs, Ā. *Centralizētās siltumapgādes sistēmu efektivitāte*. Promocijas darbs. Rīga, 2009. 122 lp.
101. Grīnbergs, K. *Absorbcijas aukstumapgādes sistēmu kondensatoru dzesēšana*. Promocijas darbs. Rīga, 2013. 101 lpp.
102. Dzene, I. *Latvijas reģionu energosistēmu ilgtspējīgas attīstības modelēšana un optimizācija*. Promocijas darbs. Rīga, 2011. 131 lpp.
103. Cers, A. *Kombinētā cikla gāzes triģenerācija mērena klimata apstākļos*. Promocijas darbs. Rīga, 2013. 112 lpp.
104. Kundziņa, A. *Centralizēto siltumapgādes sistēmu koģenerācijas potenciāla modeļi*. Promocijas darbs. Rīga, 2007. 110 lp.
105. Ļebedeva, K. *Atjaunojamo energoresursu izmantošanas izpēte Latvijā*. Promocijas darbs. Rīga, 2008. 132, [30] lp.
106. Castro Flores JF. *Low-Temperature Based Thermal Micro-Grids: Operation and Performance Assessments*. PhD dissertation. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2018. 278 p. [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-228607>.
107. Gadd, H., Werner, S. Achieving low return temperatures from district heating substations. *Applied Energy*, 2014, 136, pp. 59-67. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.09.022.
108. Oevelen, T.V., Vanhoudt, D., Salenbien, R. Evaluation of the return temperature reduction potential of optimized substation control. *Energy Procedia*, 2018, 149, pp. 206-215. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.08.185.
109. WO 2019/125746 А1. Fowler, E.A. *Digital twin of centrifugal pump in pumping systems*. World Intellectual Property Organization, 2019 [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/WO2019125746A1>.
110. CN 105674390 B. *Method and device for adjusting dynamic hydraulic balance of central heating system*. China National Intellectual Property Administration, 2021 [skatīts 2021.g. 15. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/CN105674390B/en>.

111. WO 2016/087057 A1. Kallesøe, C.S., Bergqvist, R.S., Mortensen, L.S. *A method and system for balancing a heating system*. World Intellectual Property Organization, 2016 [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/WO2016087057A1>.
112. EP 2376841 B1. Trnka, P., Havlena, V., Pekar, J., Hilborne-Clarke, A. *System and method for decentralized balancing of hydronic networks*. European Patent Office, 2019 [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/EP2376841B1>.
113. CN 208418891 U. Sun Haixia. *A kind of intelligent hydraulic equilibrium heating system based on Internet of Things*. China National Intellectual Property Administration, 2019 [skatīts 2021.g. 12. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/CN208418891U/en>.
114. EP 3067631 B1. Yong Hoon Im, Jae Yong Lee, Dae Hun Chung. *Control system for heat exchange between district heating networks, and method for same*. European Patent Office, 2018 [skatīts 2021.g. 14. aprīlī]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/EP3067631B1>.
115. Rosen, P Combined heating and cooling system, WO2018007234 A2, 2018
116. Delsing, J., van Deventer, J., Gustafsson, J. District heating substation control, WO2010087759 A1, 2010
117. Tol, H.I., Desmedt, J. Reduction of the return temperature in district heating and increasing of the return temperature in district cooling, WO2018015508 A1, 2018
118. Dzelzītis, E., Pilscikovs, D., *Efficiency evaluation of proportional pressure control for centrifugal pumps with variable-speed motors* (2014) ASHRAE transaction, Vol.120 part 1, pp.382-385. [SCOPU]
119. Tanasa, C., Dan, D., Becchio, C., Corgnati, S.P., Stoian, V. Cost-optimal and indoor environmental quality assessment for residential buildings towards EU long-term climate targets. *Energy for Sustainable Development*, 2020, 59, pp. 49-61. DOI: 10.1016/j.esd.2020.09.002.
120. Yuan, Y., Shim, J., Lee, S., Song, D., Kim, J. Prediction for overheating risk based on deep learning in a zero energy building. *Sustainability (Switzerland)*, 2020, 12 (21), art. no. 8974. DOI: 10.3390/su12218974.
121. Piccardo, C., Dodoo, A., Gustavsson, L. Retrofitting a building to passive house level: A life cycle carbon balance. *Energy and Buildings*, 2020, 223, art. no. 110135. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110135.
122. Wang, Y., Kuckelkorn, J., Zhao, F.-Y., Spliethoff, H., Lang, W. A state of art of review on interactions between energy performance and indoor environment quality in Passive House buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 72, pp. 1303-1319. DOI: 10.1016/j.rser.2016.10.039.
123. Mihai, M., Tanasiev, V., Dinca, C., Badea, A., Vidu, R. Passive house analysis in terms of energy performance. *Energy and Buildings*, 2017, 144, pp. 74-86. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.03.025.
124. Albayyaa, H., Hagare, D., Saha, S. Energy conservation in residential buildings by incorporating passive solar and energy efficiency design strategies and higher thermal mass. *Energy and Buildings*, 2019, 182, pp. 205-213. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.09.036.
125. Reda, F., Fatima, Z. Northern European nearly zero energy building concepts for apartment buildings using integrated solar technologies and dynamic occupancy profile: Focus on Finland and other Northern European countries. *Applied Energy*, 2019, 237, pp. 598-617. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.029.
126. Wang, R., Lu, S., Feng, W. A three-stage optimization methodology for envelope design of passive house considering energy demand, thermal comfort and cost. *Energy*, 2020, 192, art. no. 116723. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116723.
127. Oliveira Panão, M.J.N., Mateus, N.M., Carrilho da Graça, G. Measured and modeled performance of internal mass as a thermal energy battery for energy flexible residential buildings. *Applied Energy*, 2019, 239, pp. 252-267. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.200.
128. Forde, J., Hopfe, C.J., McLeod, R.S., Evins, R. Temporal optimization for affordable and resilient Passivhaus dwellings in the social housing sector. *Applied Energy*, 2020, 261, art. no. 114383. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114383.

129. Colclough, S., Kinnane, O., Hewitt, N., Griffiths, P. Investigation of nZEB social housing built to the Passive House standard. *Energy and Buildings*, 2018, 179, pp. 344-359. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.06.069.
130. Kovacic, I., Reisinger, J., Honic, M. Life Cycle Assessment of embodied and operational energy for a passive housing block in Austria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82, pp. 1774-1786. DOI: 10.1016/j.rser.2017.07.058.
131. Schnieders, J., Eian, T.D., Filippi, M., Florez, J., Kaufmann, B., Pallantzas, S., Paulsen, M., Reyes, E., Wassouf, M., Yeh, S.-C. Design and realisation of the Passive House concept in different climate zones. *Energy Efficiency*, 2020, 13 (8), pp. 1561-1604. DOI: 10.1007/s12053-019-09819-6.
132. Niskanen, J., Rohracher, H. Passive houses as affiliative objects: Investment calculations, energy modelling, and collaboration strategies of Swedish housing companies. *Energy Research and Social Science*, 2020, 70, art. no. 101643. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101643
133. Johnston, D., Siddall, M., Ottinger, O., Peper, S., Feist, W. Are the energy savings of the passive house standard reliable? A review of the as-built thermal and space heating performance of passive house dwellings from 1990 to 2018. *Energy Efficiency*, 2020, 13 (8), pp. 1605-1631. DOI: 10.1007/s12053-020-09855-7.
134. 130) Galkins I., Matricas veida frekvences pārveidotāja izpēte un izstrāde, Promocijas darba kopsavilkums, RTU, Rīga, 2001, 47 lpp.
135. 131) Galkin, I.A. Simulation of current sourced power supply providing adjustable currents for multiple loads (2019) Electric power Quality and Supply reliability Conference and 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics, PQ and SEEM 2019, art. No. 8818249 DOI: 10.1109/PQ.2019.8818249
136. 132) Bubovich, A., Galkin, I. Vorobyov, M. Eurther improvement of customized vibration generator for machine-human feedback with the help of resonant networks (2021) Electronics (Switzerland), 10 (8), art. No. 962, DOI: 10.3390/electronics10080962
137. 133) ASHRAE Guideline 13-2015, Specifying Building Automation Systems.
138. 134) ASHRAE Guideline 36-2018, High-performance Sequences of Operation for HVAC Systems.
139. 135) Mary Kate McGowan, Exploring Challenges in Existing Building Automation Systems. ASHRAE Journal, April 2001, pp. 18-23