



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Egīls Dzelzītis

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

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Egīls Dzelzītis

Doktora studiju programmas “Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

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

Promocijas darba kopsavilkums

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

LEONĪDS RIBICKIS

RTU Izdevniecība

Rīga 2021

E. Dzelzītis. Alternatīvas enerģijas triģenerācijas pielietojums slodžu balansēšanai un ilgtspējīgas kvalitātes nodrošināšanai viedos enerģijas tīklos. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU izdevniecība, 2021, 35 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes 2020. gada 16. septembra RTU promocijas padomes "P-14" sēdes lēmumu Nr. 27100-4/2.

Vāka attēla autors Rūdis Rubenis.

<https://doi.org/10.7250/9789934227141>

ISBN 978-9934-22-714-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 28. decembrī plkst. 10 *Microsoft Teams* sapulcē.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Jurijs Tabunščikovs (*Юрий Табуничиков*),
Maskavas Arhitektūras valsts akadēmija, Krievija

Profesors *Dr. sc. ing.* Ilja Galkins,
Rīgas Tehniskā universitāte

Dr. sc. ing. Antons Briņs (*Антон Бринь*),
Baltkrievijas Nacionālās zinātņu akadēmijas Enerģētikas institūts, Baltkrievija

APSTIPRINĀJUMS

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

Egīls Dzelzītis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, septiņas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 50 attēli, trīs tabulas, kopā 94 lappuses. Literatūras sarakstā ir 135 nosaukumi.

SATURS

ANOTĀCIJA	5
1. IEVADS	6
2. NODAĻA. DATU IEГУVES ANALĪZES UN DATU AGREGĀCIJAS MODELIS DZESĒŠANAS VADĪBAI ENERĢOSISTĒMAS GALAPATĒRĒTĀJOS	12
2.1. 6R2C Matemātiskā modeļa izveide dzesēšanas režīmiem	12
2.2. 6R2C modeļa novērtējums dzesēšanai	12
3. NODAĻA. ENERĢIJAS SADALES TĪKLU VADĪBAS SISTĒMU ATSEVIŠĶU POSMU ENERGOEFEKTIVITĀTES SNIEGUMA UZLABOŠANAS IESPĒJAS.....	15
3.1. Cilvēka komforta līmenis biroju ēkas enerģijas taupīšanas simulācijas modelī	15
3.2. Biroja ēkas darbinieka komforta līmeņa saglabāšana enerģijas taupīšanas simulācijas modelī.....	15
4. ENERĢIJAS APĢĀDES SISTĒMU MIJIEDARBĪBAS BŪTISKU PARAMETRU MONITORINGS	18
4.1. Enerģijas patēriņa viedās uzskaites nepieciešamība dažādu enerģijas veidu sadales tīklos	18
4.2. Gāzes un elektroenerģijas tirgus mijiedarbība	18
4.3. Viedās uzskaites priekšrocības.....	19
5. NODAĻA. ENERĢIJAS SADALES SISTĒMU (EES) GALAPATĒRĒTĀJU SLODŽU BALANSĒŠANA.....	21
5.1. Grafoanalītiska metodoloģija ESS balansēšanas vadībai, ievērojot galapatērētāju dinamiskās slodzes	22
6. NODAĻA. CENTRALIZĒTĀS SILTUMAPGADES SISTEMAS VADĪBAS DIGITALĀ DVĪŅA IZSTRADE	24
7. NODAĻA. ATJAUNĪGO RESURSU ENERĢOKOPIENAS (ARE) (MIKROTĪKLA) VEIDOŠANAS STRATĒGIJA AR ATJAUNĪGĀS ENERĢIJAS EKOĻOĢISKO TRIGENERĀCIJU (EKOTRIGENERĀCIJU)	26
7.1. Pasīvas ēkas iekļaušanas iespējas atjaunīgo resursu energokopienā (mikrotīklā)	26
7.2. Nosacījumi atjaunīgās enerģijas mikrotīkla vadības stratēģijai	26
7.3. Vadības stratēģijas atjaunīgas enerģijas kopienā (mikrotīklā) ar ekotriģenerāciju.....	29
SECINĀJUMI.....	32
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	33

ANOTĀCIJA

Pētījuma objekts ir centralizētas siltumapgādes sistēmu (CSS) mikrotīkli Rīgā un Ogrē, šo sistēmu siltumenerģijas galapatērētāji (pasīvā ēka – Ogres centrālā bibliotēka).

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

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt enerģijas vadības modeli mikrotīkliem ar pasīvām ēkām un ekotriģenerāciju, izmantojot atjaunīgas enerģijas avotus.

Promocijas darbā ir ievads un septiņas nodaļas, kurās sniegti pētījuma rezultāti par galapatērētāja slodžu balansēšanu ar siltuma tīkla jaudu, ievērojot ekotriģenerācijas lietojumu atjaunīgās enerģijas mikrotīklos, kā arī eksperimentālā daļa, kas balstīta uz Ogres centrālās bibliotēkas atjaunīgās enerģijas mikrotīklu, rezultātu izvērtējums, secinājumi, literatūras saraksts.

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

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 saglabāšana robežās telpā, balstoties uz Koanda efekta uzturēto un iespējamo siltumapmaiņas procesa intensifikāciju, veidojot siltumnesēju pulsācijas).

Ceturtajā nodaļā raksturota 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 aprakstīta CSS posma digitālā dvīņa izveide un paskaidrots patenta pieteikums par digitālā dvīņa lietojumu CSS siltuma enerģijas avotu vadībai.

Septītajā nodaļā aplūkota atjaunīgo resursu energokopienas veidošanas un vadības stratēģija.

1. IEVADS

Vispārējā daļa

Nacionālie enerģētikas un klimata plāni.

Saskaņā ar pārvaldības regulu, kas stājās 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 tirgus principos balstītā veidā veicināt klimatneitrālas tautsaimniecības attīstību.

Lai šādu ilgtermiņa mērķi sasniegtu:

- 1) jāveicina resursu efektīva izmantošana, kā arī to pašpieejamība un dažādība;
- 2) jānodrošina resursu, it īpaši fosilu un neilgtspējīgu resursu, patēriņa būtiska samazināšana un vienlaicīga pāreja uz ilgtspējīgu, atjaunojamu un inovatīvu resursu izmantošanu, nodrošinot vienlīdzīgu pieeju energoresursiem visām sabiedrības grupām;
- 3) jāstimulē tādas pētniecības un inovāciju attīstība, kas veicina ilgtspējīgas enerģētikas sektora attīstību un klimata pārmaiņu mazināšanu.

Lai sasniegtu ES noteiktos mērķus vai starptautiskās apņemšanās, katrā dalībvalstī izstrādāti NEKP, 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 siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisijas par vismaz 40 %, salīdzinot ar 1990. gadu [5];

- ES “Ceļvedi virzībai uz konkurētspējīgu ekonomiku ar zemu oglekļa dioksīda emisiju līmeni 2050. g.” – ES 2050. gadā ir gatava 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 stratēģisko plānu “Tīru planētu visiem – Eiropas stratēģisks ilgtermiņa redzējums uz pārtikušu, modernu, konkurētspējīgu un klimatam neitrālu ekonomiku” – ES 2050. gadā ir gatava panākt klimatneitralitāti [7].

1. 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 privātmājas, tajās ir uzstādītas bezemisiju atjaunīgu energoresursu (AER) tehnoloģijas vai tās ir pieslēgtas centralizētai siltuma apgādei (CSA);
- ir nodrošināta valsts un pašvaldību ēku energoefektivitātes paaugstināšana.

Patlaban Latvija ieņem trešo vietu Eiropā aiz Īslandes un Lietuvas pēc iedzīvotāju skaita (%), kuriem siltumenerģija tiek nodrošināta ar CSA. Straujāku energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumu īstenošanu CSA kavē trūkstošais 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 izmantoto bezemisiju tehnoloģiju lietojumu;

- 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;
- sabiedrības iesaiste enerģijas ražošanā;
- iedzīvotāju iesaiste enerģijas ražošanā, lielākā apjomā uzstādot enerģijas ražošanas iekārtas pašu patēriņam;
- ekonomiski pamatotas enerģijas pašražošanas, pašpatēriņa un atjaunojamās enerģijas kopienu veicināšana;
- personu, kas iesaistās elektroenerģijas ražošanā vienotos lokālos tīklos (mikrotīklos, enerģijas salās), loka paplašināšana.

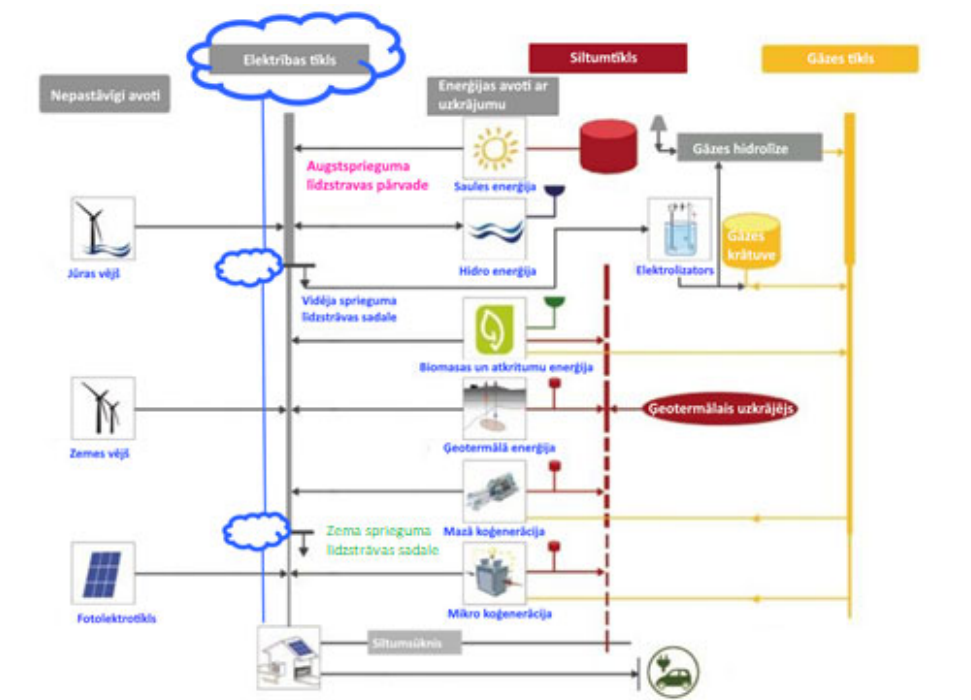
Būvniecības informācijas modeļa (BIS) mijiedarbības ir šādas:

- 1) mūsdienu būvniecības struktūra;
- 2) inovatīvi materiāli būvniecībai;
- 3) 3D veidņošana un saistītā ražošana;
- 4) autonoma būvniecība;
- 5) paplašinātā realitāte;
- 6) lielle 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 saistīts 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*” (1. att.) [17].



1.1. att. Viedu līdzstrāvas tīklu mijiedarbe ar dažādotiem vietējiem elektriskās enerģijas ģeneratoriem.

Tehniskās iespējas un aktuālie uzdevumi enerģijas sadales tīklu viedizācijai ir:

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

Darba aktualitāte

RTU promocijas padomē “P-14” ir aizstāvēta virkne promocijas darbu, kuros ir veikta elektrotehnoloģisko procesu izpēte šo procesu vadības pilnveidei. Šo darbu autori ir pētnieki Pēteris Apse-Apsītis, Aleksandrs Suzdaļenko, Anatolijs Zabašta, Genādijs Zaļeskijs, Rodions Saltanovs un Gints Poišs. Darbi aizstāvēti no 2013. līdz 2021. gadam.

Taču energoapgādes pilnveidošanai un uzlabošanai ir:

- 1) jāizpēta dzesēšana galapatērētājos, kas iesaistīti energoapgādes tīklā;
- 2) jāizstrādā dvīņi siltumapgādes sistēmu digitālie;
- 3) jāformulē ekotriģenerācijas vadības pamatprincipi;
- 4) jāizstrādā ekotriģenerācijas vadības stratēģija;
- 5) jāizstrādā rekomendācijas energoapgādes automatisko regulēšanas sistēmu atsevišķu posmu dinamisko īpašību uzlabošanai.

Novitāte

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

Patentu pieteikumi

1. LR patenta Nr. LVP2020000012 “Automātiska temperatūras regulēšanas sistēma un paņēmiens telpām noturīga gaisa sadalījuma veidošanai” pieteikums. Izgudrotāji: E. Dzelzītis, A. Krūmiņš, A. Prozuments. Pieteikuma datums: 28.02.2020.
2. LR patenta Nr. LVP2020000045 “Īekārta un paņēmiens 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 paņēmiens siltumapgādes tīkla atgaitas temperatūras regulēšanai” pieteikums. Izgudrotāji: E. Dzelzītis, N. Talcis. Pieteikuma datums: 13.10.2020.

Patentspējīgai inženiertehniskai novitātei “Notekūdens siltuma potenciāla pielietojums ēkas mikroklimata nodrošināšanā” 8. starptautiskajā izgudrojumu un inovāciju izstādē “MINOX 2020”, Rīgā, 2020. gada 30. un 31. oktobrī ir piešķirta Zelta balva (izgudrotāji Egīls Dzelzītis un Kaspars Grīnbergs).

Darba mērķis

1. Izstrādāt enerģijas vadības metodi mikrotīkliem ar pasīvām ēkām un ekotriģenerāciju, ekotriģenerācijai izmantojot atjaunīgas enerģijas avotus.

2. Viedas enerģijas uzskaites sistēmas izveide, ievērojot dažādu enerģijas sadales tīklu mijiedarbību.

Praktiskā nozīme

Izstrādāts pamatojums enerģijas kopienas (mikrotīkla) darbam ar ekotriģenerāciju un pasīvām ēkām atbilstoši Enerģētikas likuma projekta sadaļai “Energokopienas”.

Promocijas darbs izstrādāts valsts pētījumu programmā Nr. VPP-EM-INFRA-2018/1-0003.

Finansēšanas institūcija: Latvijas Republikas Ekonomikas ministrija.

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

Akronīms: VPP-2018-ENERGY.

Latvijas Republikas Ekonomikas ministrija, projekts “Latvijas gāzes infrastruktūras attīstības tendences, izaicinājumi un risinājumi (LAGAS)”.

Publikācijas

SCOPUS

1. Dzelzitis, E., Sidenko, S. Analysis of influence of nonstationary power of heating radiator on human comfort level (2020). *Engineering for Rural Development*, Vol. 19, pp. 952–961. <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2020/Papers/TF228.pdf>.
2. Dzelzitis, E., Talcis, N., Kolyshkin, A. Empirical Study of the Relationship between Temperature Difference and Outdoor Temperature for District Heating Systems in Riga (2020). *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 21, No.1, pp. 23–33.
3. Sidenko, N., Dzelzitis, E. Flow features in channels with pulsating fluid movement regime (2020). *Engineering for Rural Development*, Vol. 19, pp. 962–969. <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2020/Papers/TF229.pdf>.

4. Zerroug, A., Dzelzitis, E. Analysis of different building exterior walls insulations using eQUEST (2019). *E3S Web of Conferences*, Vol. 111, Article No. 06032. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/37/e3sconf_clima2019_06032.pdf.
5. Dzelzitis, E., Pilscikovs, D. Efficiency evaluation of proportional pressure control for centrifugal pumps with variable-speed motors (2014). *ASHRAE Transactions*, Vol. 120, Part 1, pp. 382–385. https://www.thefreelibrary.com/_/print/PrintArticle.aspx?id=371282967.

SCOPUS, Web of Science

6. Dzelzitis, E., Sidenko, S. The Human Comfort Level in an Energy-Saving Simulation Model of Office Building (2020). *E3S Web of Conferences*, Vol. 172, Article No. 06009. <https://ur.booksc.eu/book/83697240/9d0cb5>.
7. Savickis, J., Zemite, L., Jansons, L., Bode, I., Dzelzitis, E., Broks, A., Vempere, L. The Development of the Smart Gas Distribution: General Trends and the Latvian Context (2020). *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, Vol. 57, No. 6, pp. 23–29. <https://sciendo.com/article/10.2478/lpts-2020-0031>.
8. Savickis, J., Zemite, L., Zeltins, N., Bode, I., Jansons, L., Dzelzitis, E., Kopusovs, A., Selickis, A., Ansonē, A. The biomethane injection into the natural gas networks: the EU's gas synergy path (2020). *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, Vol. 57, No. 4, pp. 34–50. <https://sciendo.com/article/10.2478/lpts-2020-0020>.
9. Zerroug, A., Dzelzitis, E. A Study of Modeling Techniques of Building Energy Consumption (2020). *Engineering Technology & Applied Science Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 5191–5194. <http://www.etasr.com/index.php/ETASR/article/view/3257>.
10. Kopusovs, A., Bode, I., Zemite, L., Dzelzitis, E., Odineca, T., Ansonē, A., Selickis, A., Jasevics, A. Optimization of the Selection Method for Reconstruction of Outworn Gas Distribution Pipeline (2019). *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, Vol. 56, No. 5, pp. 33–44. [Optimization of the Selection Method for Reconstruction of Outworn Gas Distribution Pipeline \(sciendo.com\)](https://sciendo.com/article/10.2478/lpts-2020-0031).
11. Nevercika, E., Dzelzitis, E., Jasevics, A., Laube, I., Bode, I. Procedures for the Supply of Energy Users during Energy Crisis (2019). *IEEE 7th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE 2019): Liepaja, Latvia, 15–16 November 2019*. Piscataway, NJ: IEEE, 2019, pp. 92–97, Article No. 8976958. [Procedures for the Supply of Energy Users during Energy Crisis | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8976958).
12. Krizmane, M., Borodinecs, A., Dzelzitis, E. Enabling the Landscape for Deep Green Renovations (2016). *Energy Procedia*, Vol. 96, pp. 404–412. <https://cyberleninka.org/article/n/715317>.
13. Šlihte, S., Krizmane, M., Dzelzitis, E. Cost Analysis of In-House Heat Substations in Next Generation Heat Networks (2016). *Energy Procedia*, Vol. 96, pp. 511–516. <https://cyberleninka.org/article/n/1467191>.

Dalība konferencēs

SCOPUS

14. Analysis of influence of nonstationary power of heating radiator on human comfort level (2020). *Engineering for Rural Development*, Vol. 19, pp. 952–961. <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2020/Papers/TF228.pdf>.
15. Flow features in channels with pulsating fluid movement regime (2020). *Engineering for Rural Development*, Vol. 19, pp. 962–969. <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2020/Papers/TF229.pdf>.
16. Analysis of different building exterior walls insulations using eQUEST (2019). *E3S Web of Conferences*, Vol. 111, Article No. 06032. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/37/e3sconf_clima2019_06032.pdf.

Indeksēti SCOPUS, Web of Science

17. S. The Human Comfort Level in an Energy-Saving Simulation Model of Office Building (2020). *E3S Web of Conferences*, Vol. 172, Article No. 06009. <https://ur.booksc.eu/book/83697240/9d0cb5>.
18. IoT Solution Approach for Energy Consumption Reduction in Buildings: Part 4. Mathematical Model and Experiments for Cooling Energy Consumption (2019). *IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2019): Riga, Latvia, 7–9 October 2019: Conference Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE, 2019, pp. 388–394, Article No. 8982307. <https://ortus.rtu.lv/science/lv/publications/30442>.
19. Numerical simulation of heat exchange in discrete-rough channels at flow superimposed oscillations (2019). *Engineering for Rural Development*, Vol. 18, pp. 1155–1161. <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2019/Papers/N203.pdf>.
20. Lebedeva, K., Krumins, A., Tamane, A., Dzelzitis, E. Analysis of Latvian Households' Potential Participation in the Energy Market as Prosumers (2021). *Clean Technologies*, Vol. 3, No. 2, pp. 437–449. <https://www.mdpi.com/2571-8797/3/2/25>.

2. NODAĻA. DATU IEGUVES ANALĪZES UN DATU AGREGĀCIJAS MODELIS DZESĒŠANAS VADĪBAI ENERĢOSISTĒMAS GALAPATĒRĒTĀJOS

2.1. 6R2C Matemātiskā modeļa izveide dzesēšanas režīmiem

Pamatojoties uz *ISO 13790:2008*, ir izstrādāts modelis *6R2C* ēkas dzesēšanas režīmiem. 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 2.1 formulu:

$$\mu_t = [t_2 - t_1] / [t_3 - t_1], \quad (2.1.)$$

kur μ_t – siltuma pārnese efektivitāte;

t_1 – āra gaisa temperatūra pirms siltummaiņas;

t_2 – pieplūdes gaisa temperatūra pirms siltummaiņas;

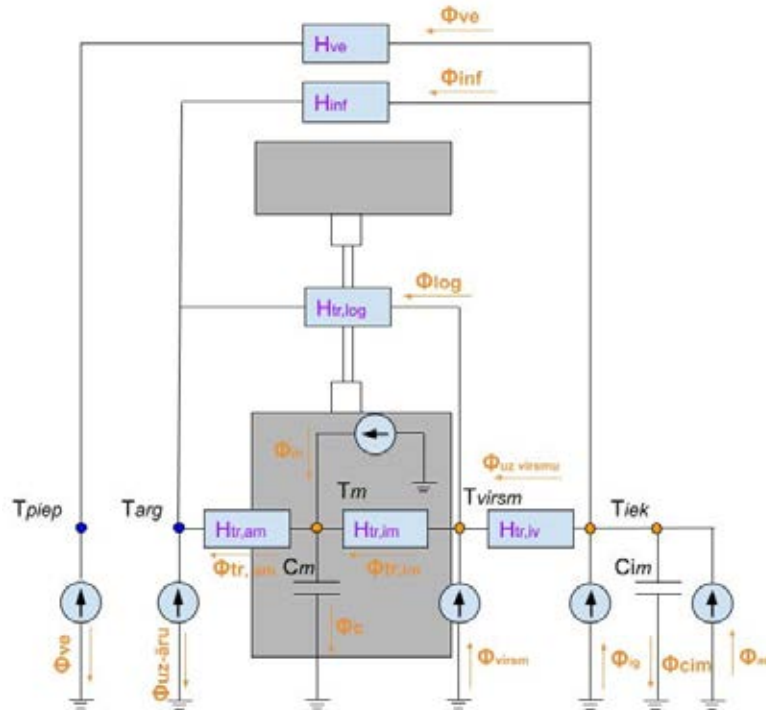
t_3 – nosūces gaisa temperatūra.

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

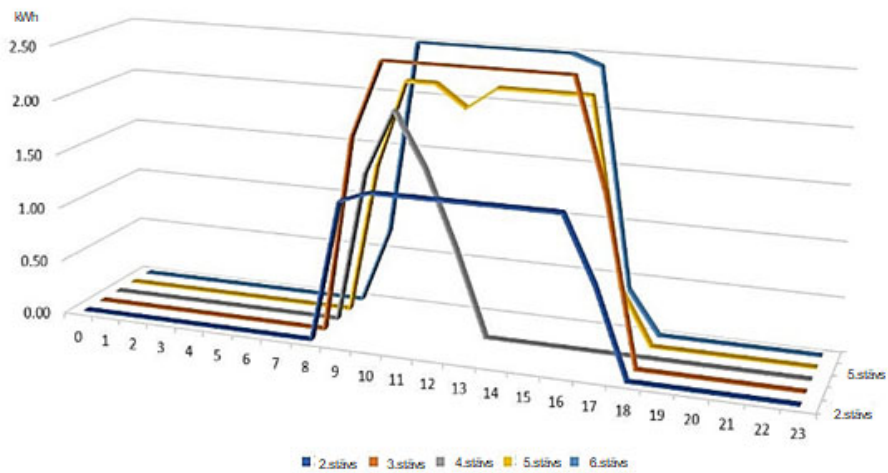
2.2. 6R2C modeļa novērtējums dzesēšanai

Lai novērtētu izveidotā modeļa rezultātus, tika izmantota *ASHRAE CVRMSE* (vidējās kvadrāta kļūdas variācijas koeficients) metode [1]. *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.



2.1. att. 6R2C – sešu pretestību un divu kapacitāšu modelis.

(Mērāmais parametrs – T, temperatūra °C; modeļa raksturkonstantes: H – siltumvadītspēja, w/K; C – siltumietilpība, J; ϕ – siltuma guvumi no iekārtām, J).



2.2. att. Apgaismojuma sistēmu elektroenerģijas patēriņš pētāmajā ēkā no otrā līdz sestajam stāvam.

Ekspérimenta dienā žalūzijas bija aizvērtas, un telpās visu dienu tika izmantots mākslīgais apgaismojums. PN4 zona ir ēkas dienvidu pusē, tāpēc, aizverot žalūzijas (arī uzlabojot cilvēku, kuri strādā telpā, komfortu), samazinās saules radiācijas ietekme un dzesēšanas elektroenerģijas patēriņš. Rīta periodā, kad solārai radiācijai ir vislielākā ietekme uz ēkas logiem (no plkst. 8

līdz 12), apgaismojuma sistēma patērēja 38,2 kWh (telpas bija 100 % apdzīvotas) Dzesēšanas iekārtas kopējais patēriņš (24 h) šī eksperimenta dienā (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.

Tādu pašu tendenci var novērot arī “nelīdzīgās” dienās. Ar matemātiskā modeļa palīdzību ir iespējams iegūt arī vidējās *PN4* zonas telpas temperatūras, 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 izplūdes kombinētais *BR2C* simulācijas modelis neņem to vērā, taču enerģijas pārnese starp sienām un telpām notiek.

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

3.1. Cilvēka komforta līmenis biroju ēkas enerģijas taupīšanas simulācijas modelī

Gandrīz nulles ēku projektēšanas un būvniecības laikā galvenais mērķis ir efektīvāk izmantot pieejamos enerģijas resursus. To var panākt, izmantojot pieejamos tehniskos risinājumus, kas ir tehniski iespējami, ekonomiski pamatoti un pieņemami arī no vides un sociālā viedokļa. Tajā pašā laikā šādiem risinājumiem nevajadzētu mainīt cilvēku ierastos komforta apstākļus [2–10].

Iespējamie uzlabojumi ēku energoapgādē:

- paaugstinot enerģijas apgādes atsevišķu elementu energoefektivitātei;
- paaugstinot sistēmas atsevišķu elementu energoefektivitāti;
- salāgojot galapatērētāju slodzes profilu ar enerģijas avotu sniegumu.

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

Veicot siltuma pārneses intensifikāciju, tiek palielināts siltuma daudzums, kas tiek pārnesti caur siltummaiņa virsmu, ļaujot panākt labvēlīgāku attiecību starp siltumpārnesi un pārsūknētā siltumnesēja apjomu [5–6].

Veiktie eksperimentālie pētījumi par mainīgām plūsmām ventilācijas kanālos un sildķermeņos [11–16] pierāda, ka plūsmas pulsācijas var ievērojami ietekmēt hidrodinamiku un siltuma pārnesi.

Tāpēc veikti skaitliski pētījumi par pulsējoša siltumnesēja plūsmas, kas pienāk paneļa sildķermenim, ietekmi uz tā siltuma jaudu, un noteikta siltuma jaudas pulsāciju ietekme arī uz cilvēku komforta līmeni.

Skaitliskā modelēšana tika veikta ar programmatūras *SolidWorks / FlowSimulation CAD / CFD / HVAC* kompleksu [17].

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

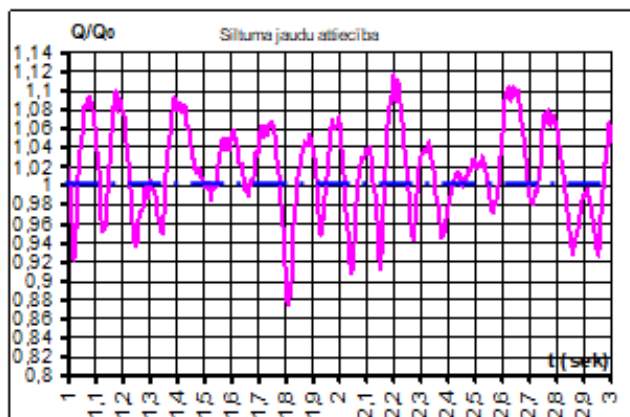
Risinājuma precizitāte tika novērtēta, pamatojoties uz telpas modelī uzstādītā *P11* tipa paneļa radiatora siltuma jaudas konverģences rezultātiem, salīdzinot ar ražotāja deklarēto siltuma jaudu.

3.2. Biroja 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 w. Šī vērtība ir par 5 % mazāka nekā zināmie pilna mēroga *P11* tipa radiatoru tehniskie raksturlielumi, savukārt vērtība ir aprēķinātās kļūdas robežās.

Periodiski pulsējoša šķidrums gadījumā radiatorā, kas aprakstīts 1. vienādojumā, tā siltuma jauda $Q(t)$ laika gaitā mainās. Q/Q_0 izmaiņas laikā t redzamas 3.1. attēlā. Pārtrauktā līnija atbilst stacionārajam procesam ar $V_0 = 0,4$ m/s, nepārtrauktā līnija – nestacionāram siltuma pārneses procesam. Grafikā redzams, ka, mainoties siltumnesēja ātrumam radiatorā,

siltuma jauda, salīdzinot ar stacionāro režīmu, var mainīties vidēji par 10 %, siltuma jaudai gan pieaugot, gan samazinoties.

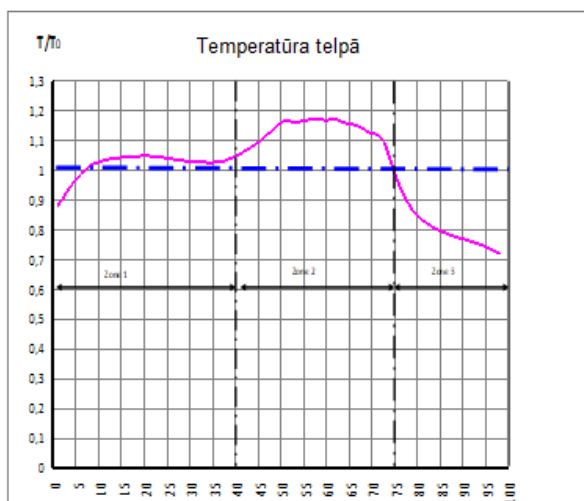


3.1. att. Siltuma jaudu attiecības Q/Q_0 izmaiņas.

Ir pētīta mainīgā temperatūra telpā. Temperatūras pieņemtas punktos ar atbilstošajām koordinātām 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 sildierīču, sienas augšpusē ir ventilācijas lūka.

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

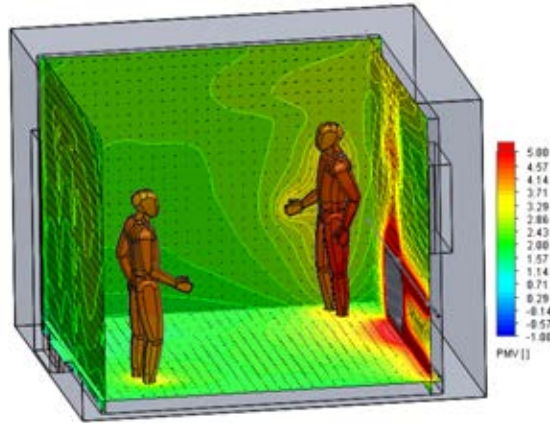
Temperatūras salīdzinājuma T/T_0 grafiks redzams 3.2. attēlā. Darba temperatūra T_0 °C attiecas uz stacionāro režīmu, T °C attiecas uz pulsējošas plūsmas režīmu radiatorā. X ass apzīmē punktu numerāciju, kas atbilst koordinātām telpā x, y, z .



3.2. att. Temperatūru salīdzinājuma grafiks T/T_0 .

Komforta apstākļu novērtējumam izmantots profesora Oles Fangerā modelis, kas ir standarta *ISO 7730* pamatā. Cilvēka pašsajūtu nosaka siltuma līdzsvars ķermenī. Skaitliskā aprēķina procesā tika noteikti vides parametri, piemēram, vidējā starojuma temperatūra T_r , kā arī temperatūra T_a , gaisa ātrums un mitrums. Tas ļauj paredzēt telpā esošo cilvēku siltuma izjūtu –

telpā esošo cilvēku prognozētus vidējos vērtējumus (PVV). Vizualizēts prognozētais vidējais vērtējuma attēlojums telpā redzams 3.3. attēlā.



3.3. att. Prognozētā vidējā vērtējuma siltuma izjūtas.

3.3. attēlā maksimālā PVV 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 režīma gadījumā radiatora tuvumā esošās personas PVV vērtība sasniedz +6. Tas notiek radiatora siltumatdeves pieauguma dēļ.

4. ENERĢIJAS APGĀDES SISTĒMU MIJIEDARBĪBAS BŪTISKU PARAMETRU MONITORINGS

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

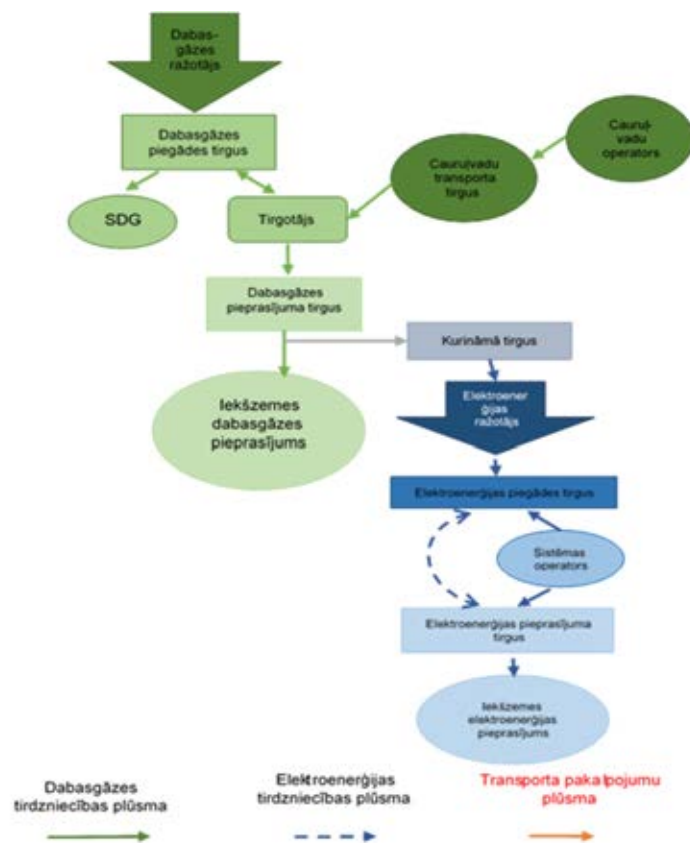
Gāzes viedo patēriņa uzskaites mēraparātu izmantošanas nepieciešamība Latvijas dabasgāzes tirgū ir aktuāla.

- Direktīvā 2009/73/EK noteiktas prasības par viedo mēraparātu sistēmu ieviešanu.
- Energoefektivitātes prasības.
- Dabasgāzes nesankcionēta patēriņa samazināšana.
- Sadales sistēmas tarifa projektā ietvertais aprēķins pēc atļautās slodzes.
- Latvijas dabasgāzes tirgus atvēršana [18, 19].

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 [18, 19] tiek atzīts, ka viedā sistēma ar viedajiem skaitītājiem uzlabo gan datu uzskaiti, gan sistēmas darbības efektivitāti.

4.2. Gāzes un elektroenerģijas tirgus mijiedarbība

Eiropas dekarbonizācijas scenārijos 2030 un 2050 sniegta gāzes un elektroenerģijas apgādes sistēmu mijiedarbības analīze [20, 21].



4.1. att. Gāzes un elektroenerģijas tirgus mijiedarbība.

Sistēmas mijiedarbības padziļinātu pētījumu nepieciešamību saasināja 2012. gada 9. februāra notikumi. Šajā laikā aukstuma vilnis ietekmēja Franciju, palielinot elektroenerģijas pieprasījumu par 100 GW. Parasti vajadzīgo papildu enerģiju šādos gadījumos nodrošina imports no Vācijas. Ņemot vērā Vācijas moratoriju attiecībā uz kodolenerģiju pēc Fukušimas avārijas, kodolelektrostacijas, kas parasti eksportē elektroenerģiju uz Franciju, tika slēgtas, un slodzi pārlīka uz dabas gāzi. Taču sakarā ar to, ka Vācijā pietrūka dabasgāzes, elektroenerģijas eksports uz Franciju bija ierobežots.

Par mijiedarbības modeli uzskata abas sistēmas, kas pieslēgtas ar gāzi darbināmās spēkstacijās. 4.1. attēlā redzama gāzes tirgus dalībnieku ražotāju, tirgotāju, sašķidrinātās dabas gāzes operatoru un cauruļvadu operatoru sasaiste.

Visi šie dalībnieki reaģē uz dabasgāzes pieprasījuma tirgū. Atjaunīgās enerģijas ražošanas pieaugums samazinās dabasgāzes ražošanu nepieciešamību, tomēr gāzes stacijas būs priekšrocība, lai atbalstītu atjaunīgās enerģijas ražošanu un sadali.

4.3. Viedās uzskaites priekšrocības

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

- 1) pēc ierīces tehniskajiem parametriem:
 - precīzāka, dinamiskāka un drošāka patērētāja apjoma uzskaitē;
 - efektīva visas skaitītāju grupas pārvaldība, saņemot trauksmes signālu (temperatūra, manipulācijas, akumulators, gaiss caurulē);
 - 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;
 - iespējamu dabasgāzes zādzību 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 [22];
 - 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, tajā 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 MK 2011. gada 19. aprīļa noteikumi Nr. 312 “Enerģijas lietotāju apgādes un kurināmā pārdošanas kārtība izsludinātās 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 galapatērētājiem:
- precīzas informācijas iegūšana elektroniskā formā par patērēto dabasgāzi;
 - informācijas iegūšana par patērēto apjomu reālā laikā, ļaujot klientam mainīt enerģijas lietošanas scenāriju un taupīt energoresursus.

5. NODAĻA. ENERĢIJAS SADALES SISTĒMU (ESS) GALPATĒRĒTĀJU SLODŽU BALANSĒŠANA

Dinamiskā programmēšana ļauj vadīt tehnoloģiskos procesus, ja tie notiek vienmērīgi izkliedētas enerģijas laukā. Taču, izvēloties enerģijas patēriņa lauku gaisa apstrādei, 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 [23, 24]. Sintezētus algoritmus izstrādes stadijā iespējams programmēt, balstoties ārgaisa stāvokļu diagrammā uz mikroprocesora bāzes [25].

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 iegulto mikroprocesoru programmas arhitektūras principiem [26], ņemot vērā arī ieteikumus to verifikācijai [27].
2. Mikroprocesoru izvēle, lai būtu iespējams tos iegult izstrādātajā vadības sistēmas arhitektūrā [28, 29].
3. Izvēlētajā mikroprocesora programmēšanas iespēja darba algoritmu pārprogrammēšanai, pielāgojot atbilstošu aprīkojumu [30, 31, 32] un izveidojot gaisa apstrādes tehnoloģijai atbilstošas saskarnes [33, 34].

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 [20, 33]. 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;

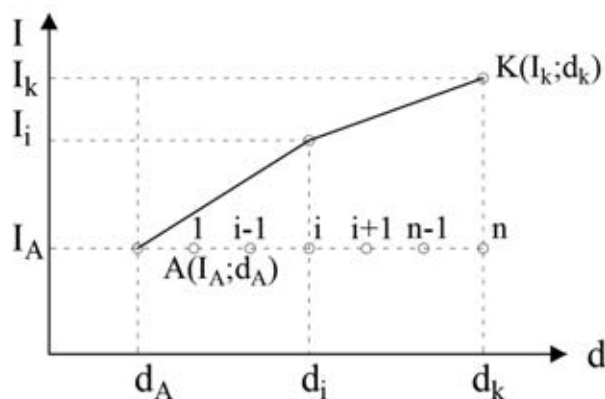
ΔI_i – entalpijas izmaiņa, veicot soli no $i=1$ līdz i ;

$f_i(I)$ – 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.



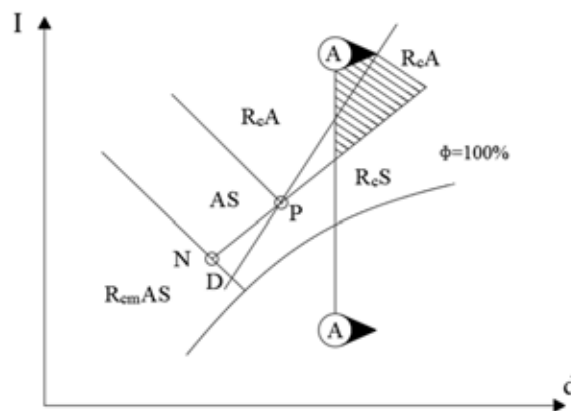
5.1. att. Gaisa apstrādes procesa, ko veic pa soļiem, attēlojums I - d diagrammā.

5.1. Grafoanalītiska metodoloģija ESS balansēšanas vadībai, ievērojot galapatērētāju dinamiskās slodzes

Grafoanalītisko funkcionālo bloku regulēšanas analīzes metode, sakārtojot tehnoloģisko parametru izraisošās iedarbes gala automātā ieejas lielumu virknē, pieļauj iegūtās binārās starpkombinācijas aprakstīt atsevišķos programmatūras blokus, ko var realizēt arī uz mikroprocesoru bāzes. Iepriekš aprakstītais sniedz iespēju funkcionālo bloku darba kanālus veidot atsevišķa lietotāja saskarnes veidā, vajadzības gadījumā vadības gaitu vizualizējot atsevišķā informācijas panelī, demonstrējot būtiskās enerģijas sadales sistēmas tehnoloģiskās zonas un regulēšanas loku parametrus.

Definējot iestatījumu vērtību izmaiņu grafiku laikā, var saņemt analītisku funkcijas vērtības aplēses infografiku, modelējot dažādu enerģijas patēriņu, balstoties uz dažāda termiņa laika prognozēm.

Funkcionālos blokus programmē galīgu automātu bez atmiņas formātā, katras ieejas lielumu kombinācijai paredzot noteiktu izejas lielumu kombināciju. Gaisa apstrādes tehnoloģijas izvēles vadības sistēmas algoritma grafiskais attēlojums sastāv no saistītiem funkcionāliem blokiem. Funkcionālais bloks var veikt arī funkcionālu sakarību skaitļojumu, piemēram, definējot ārgaisa stāvokļa robežu, kurā ir izdevīgi palielināt apstrādājamā ārgaisa daudzumu. Ārgaisa stāvokļa zona, kurā ir izdevīgi palielināt apstrādājamā gaisa daudzumu, 5.2 attēlā ir iesvītota, [36]. 5.2. attēlā redzami gaisa apstrādes tehnoloģiskie procesi – recirkulācija, sildīšana, jauda, adiabatiska mitrināšana – un telpas slodzes raksturojumi. Nogriežņa A-A novietojumu nosaka mitruma saturs, aiz kura jāpalielina apstrādājamā gaisa daudzums.



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

Izstrādātā metodoloģija nodrošina šādu apakšuzdevumu izpildi:

- 1) gaisa apstrādes tehnoloģiju izvēli galapatērētāju 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 galapatērētāju iekārtu vadības algoritmus izpilda galīgais automāts bez atmiņas [22, 36];
- 2) regulēšanas kvalitātes uzlabošanu tehnoloģisko procesu regulēšanas lokos [36];
- 3) ESS snieguma paaugstināšanu, samazinot enerģijas patēriņu tehnoloģiskajos procesos, ar papildu vadības programmu blokiem [36];
- 4) ESS ātrdarbības paaugstināšanu, novietojot atsevišķu parametru sensorus tieši tehnoloģiskajā procesā; informācija no šiem sensoriem, apstrādājot pielāgotos vadības

- programmas blokos [37];
- 5) ārgaisa termodinamiskā stāvokļa novērtējums apstrādātā gaisa samazināšanai [38].

6. NODAĻA. CENTRALIZĒTĀS SILTUMAPGADES SISTEMAS VADĪBAS DIGITĀLĀ DVĪŅA IZSTRADE

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 rāda, ka, paaugstinoties T_{out} vērtībām, samazinās ΔT ja $T_{out} < 10^\circ\text{C}$. 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 $T_{out} > 10^\circ\text{C}$. Centralizēto siltumapgādes sistēmu darbība Dānijā un Latvijā atšķiras, tāpēc tika nolemts 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: $f(x, a_1, a_2, \dots, a_n)$ – lietotāja izvēlēta funkcija; gaisa temperatūra T_{out} – neatkarīgais mainīgais; temperatūru starpība starp turpgaitas un atgaitas ūdens temperatūru ΔT – 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:

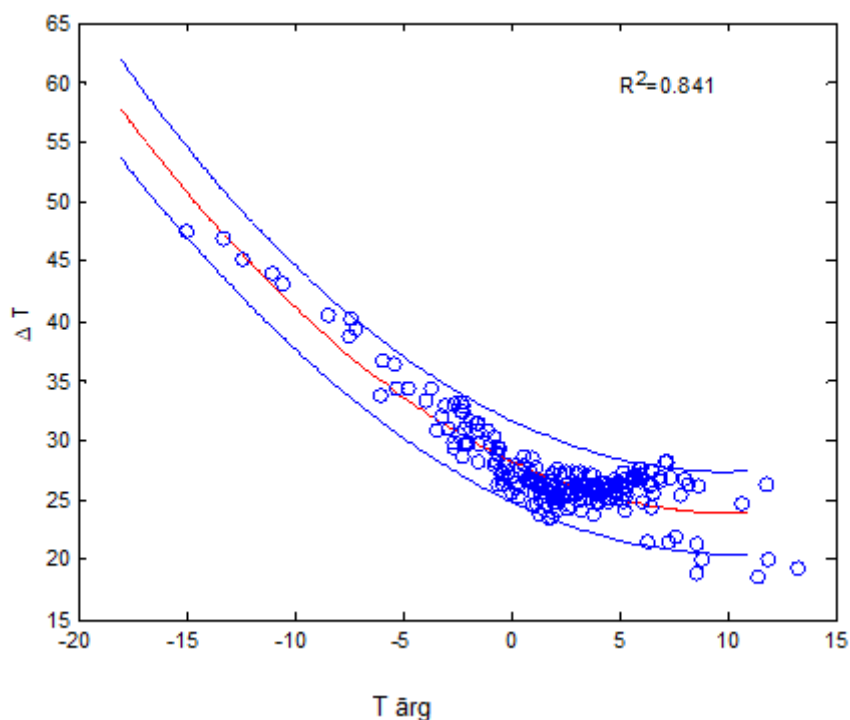
$$Q = \sum_{i=1}^N [y_i - f(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)]^2, \quad (6.2.)$$

kur: $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N$ – 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 6.1. 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 attēlā 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 ($T_{\text{ārg}}$).

7. NODAĻA. ATJAUNĪGO RESURSU ENERĢOKOPIENAS (ARE) (MIKROTĪKLA) VEIDOŠANAS STRATĒGIJA AR ATJAUNĪGĀS ENERĢIJAS EKOĻOĢISKO TRIGENERĀCIJU (EKOTRIGENERĀCIJU)

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

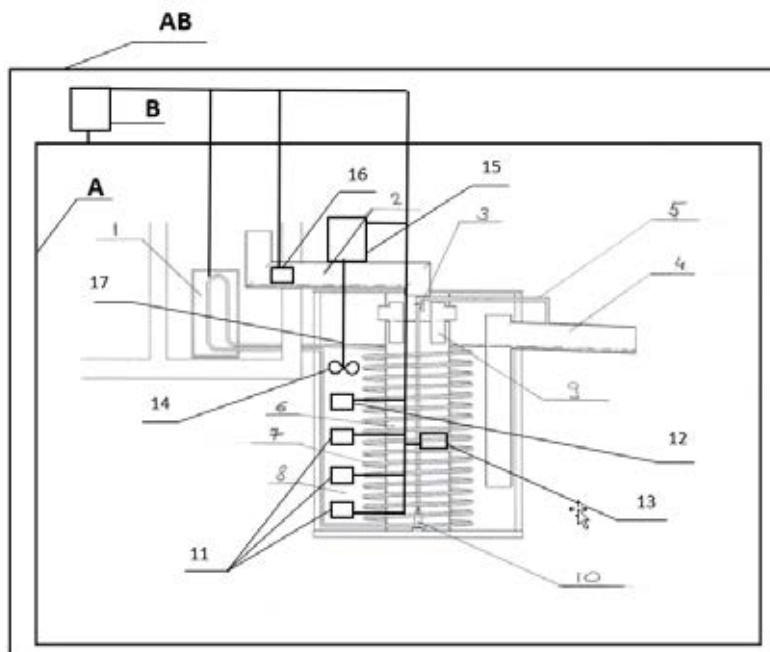
Atbilstoši normatīvās prasības energopārvaldībai – Enerģētikas likums vai MK noteikuma projekti – ir jāveic energopārvaldības ieviešana saskaņā ar *ISO50001:2018* “Enerģopārvaldības sistēmas. Prasības un lietošanas norādījumi”. Enerģopārvaldības ieviešanu var veikt atsevišķā uzņēmumā vai arī administratīvā 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 [40] veidošanas lietderību, lai veidotu kopdarba modeli ar esošajiem enerģijas sadales tīkliem.

Tehniskie risinājumi energokopienas (mikrotīkla) vadībai ir sniegti vairākos autoram zināmos patentos, kuros:

- ar vēlamo enerģijas patēriņa modeli salīdzina dažādas regulēšanas stratēģijas un enerģijas ražošanas un pārvades tehnoloģijas [42];
- sniedz enerģijas vadības sistēmas konfigurēšanas un parametrizācijas iespējas, pamatojoties uz pieejamo enerģijas galapatērētāja digitālo dvīņu kopu [43];
- ir aprakstīta siltumapgādes sistēma ar hidrauliski atdalītām ēku iekšējām inžiniersistēmām. Sistēmā ir iespējams atdalīt siltumnesēju slāņos siltuma enerģijas uzkrājējā. Atmiņas iekārta seko uzkrājēja slāņojumam un vada siltuma enerģijas piegādi patērētājiem no dažādiem slāņiem [44];
- ir lokāla enerģijas sadale saskaņotai koplietošanai, sasaistot un vadot “enerģijas pieprasījuma” ķēdi ar “enerģijas avotu” ķēdēm, lai iekļautos CO₂ izmešu ierobežojuma prasībās [45];
- siltuma enerģijas atkārtota izmantošana, enerģijas uzkrāšana un emisiju samazināšana vietās, kurās siltuma enerģiju iegūst no apdzīvotās vietas notekūdeņiem [42];
- enerģijas uzkrāšanas sistēma vairāku enerģijas formu piedāvājuma veidošanai patēriņam, ņemot vērā to, ka pieejamiem enerģijas veidiem citam citu ir jāpapildina [43].

7.2. Nosacījumi atjaunīgās enerģijas mikrotīkla vadības stratēģijai

Veikspējas kalkulatora (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.



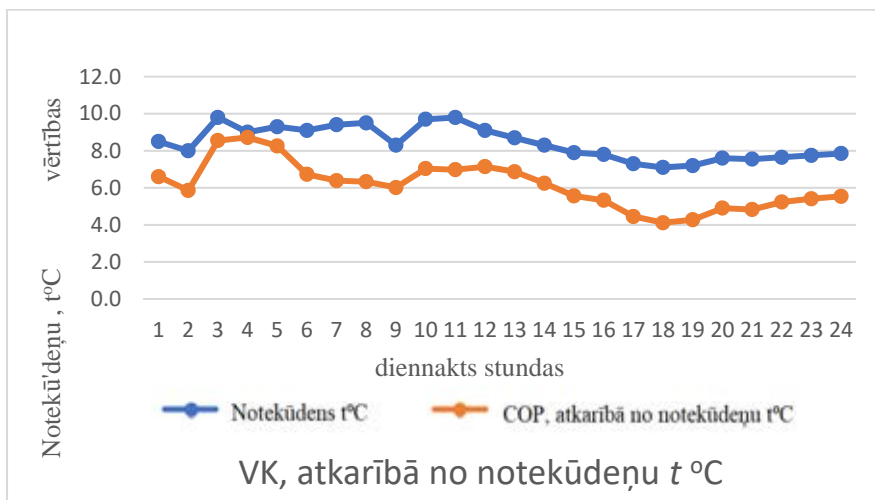
7.1. att. Notekūdens tvertne ar temperatūras mērīšanu vairākos līmeņos.

7.1. attēlā redzamajā notekūdens tvertnē trīs līmeņos ir izvietoti termometri, 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 2002. gada 22. janvāra 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 veic aplēsi, lai prognozētu iespējamās stundas patēriņa izmaiņas. Lai noteiktu notekūdens apjomu, kas ieplūst tvertnē, uz padeves sūkņa tiks uzstādīts elektrības skaitītājs. Stundas patēriņu dādot 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.

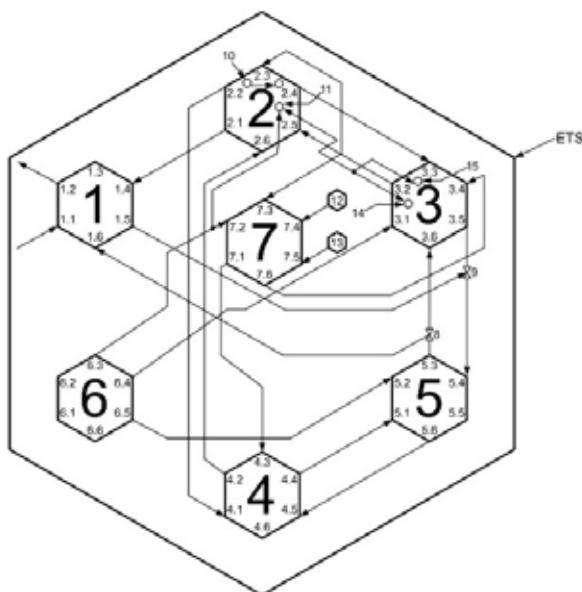
VK vērtības ir atkarīgas no siltumnesēja turpgaitas temperatūras. Jo augstāka notekūdens temperatūra, jo augstāks siltuma potenciāls un notekūdens atdzišanas rezerve līdz norādītajiem $+7\text{ }^\circ\text{C}$. Jāparedz siltumnesēja zemākā temperatūra, lai neatdzesētu tvertni zem iestatītajam vērtībām.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

temperatūras grafiku ar temperatūras starpību starp turpgaitu un atgaitu $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ar nosacījumu, ka izejā no siltumsūkņa siltumnesēja temperatūra nav zemāka par $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$.



7.2. att. Notekūdens temperatūras ietekme uz VK vērtībām.

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



7.3. att. Ekoloģiskās triģenerācijas slēguma shēma.

Ekoloģiskas triģenerācijas sistēmā (ETS) iekļauti:

- 1) kanalizācijas notekūdeņu sistēmas enerģijas transformācijas iekārta enerģijas kopienā (mikrotīklā) iekļauto pasīvo ēku apsildei un dzesēšanai (Patenta pieteikums: LVP2020000045 16.06.2020. F24D 11/00; F25B 27/00 “Iekārta un paņēmieni kanalizācijas ūdeņu rekuperācijas sistēmas efektivitātes paaugstināšanai”, izgudrotāji: E. Dzelzītis, K. Grīnbergs);
- 2) siltumenerģijas galapatērētājs enerģijas kopienā (mikrotīklā) – pasīva ēka;
- 3) pasīvās ēkas telpu dzesēšanas sistēma;
- 4) siltuma enerģijas uzkrājējs (akumulators);
- 5) siltumsūknis;

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

ETS (7.3. att.) pirmā ieeja ir savienota ar pilsētas kanalizācijas tīklu, otrā ieeja – ar enerģijas kopienas (mikrotīklā) galapatērētāja (pasīvās ēkas) (2) kanalizācijas sistēmas izvadu un iekārtas (1) piektā izeja, kas ir pieslēgta jaucēja vārstam pie siltumsūkņa (5) siltā loka. Kanalizācijas notekūdeņu sistēma enerģijas transformācijas iekārtas pirmā izeja ir pievienota pilsētas kanalizācijas tīklam, otrā izeja savienota ar galapatērētāja (pasīvās ēkas) (2) dzesēšanas sistēmas (3) pirmo ieeju. Galapatērētāja (pasīvās ēkas) (2) pirmā izeja (4) pievienota kanalizācijas notekūdeņu sistēmas enerģijas transformācijas iekārtas (1) otro ieeju, otrā izeja pievienota dzesēšanas sistēmas (3) otrajai ieejai, savukārt (3) izeja ir saistīta ar siltuma enerģijas uzkrājēja (4) pirmo ieeju. Galapatērētāja (pasīvās ēkas) (2) pirmā ieeja ir pieslēgta telpu dzesēšanas sistēmas (3) pirmajai ieejai, otrā izeja ir savienota ar sistēmas (4) pirmo ieeju.

Iekārta (1) ir papildināta ar PV paneļu elektriskās enerģijas ģenerācijas sistēmu, kurā ietverts DC/AC invertors, lai veiktu enerģijas kopienas (mikrotīkla) inženiersistēmas tīkla barošanu. 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 galapatērētāja (pasīvās ēkas) trešajai ieejai, otrā izeja ir pievienota siltumsūkņa (5) otrajai ieejai. Siltumsūkņa (5) sestā izeja ir savienota ar siltuma enerģijas uzkrājēja (4) piekto ieeju, siltuma enerģijas uzkrājēja (akumulatora) (4) otrā izeja (4) pievienota siltumsūkņa (5) piektajai ieejai (t. i., siltumtīklam) iztvaikošanas loka ieejā (5). PV paneļu sistēmas elektriskās enerģijas ģenerācijas sistēma ar DC/AC invertoru (6) otrā izeja ir pievienota siltumsūkņa (5) centrālajai ieejai (kompresora dzinējam).

Taču ģenerētā elektroenerģijas apjomu nosaka saules starojuma intensitāte, kas diennakts gaitā ir mainīga (7.2. att.). Šāds saules enerģijas diennakts sadalījums neļauj pilnībā lietderīgi izmantot pieejamo saules enerģijas potenciālu vakara stundās, kad pasīvajā sabiedriskajā ēkā vēl ir darba laiks, PV ģenerētais elektroenerģijas apjoms ir nepietiekams pasīvās ēkas inženiersistēmu darbināšanai. Lai varētu pilnvērtīgāk izmantot saules enerģijas potenciālu, ekoloģiskas triģenerācijas sistēmai ir pievienots iekštelpu gaisa kvalitātes un ārējais temperatūras korelācijas bloks (7). Šis bloks veic iekštelpu gaisa kvalitātes, galvenokārt iekštelpu gaisa temperatūras, iestatījumu korekciju, mainoties ārējai temperatūrai.

Iekštelpu gaisa kvalitātes (IGK) un ārējais temperatūras korelācijas bloka ieeja (4) savienota ar PV paneļu elektriskā enerģijas ģenerācijas sistēmu, izeja – ar ventilācijas sistēmas pieplūdes ventilatoru. Korelācijas bloks (7) veic IGK un ārējais temperatūras korelāciju saskaņā ar ANSI/ASHRAE 55. standarta “*Thermal environmental conditions for human occupancy*” ieteikumiem.

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

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

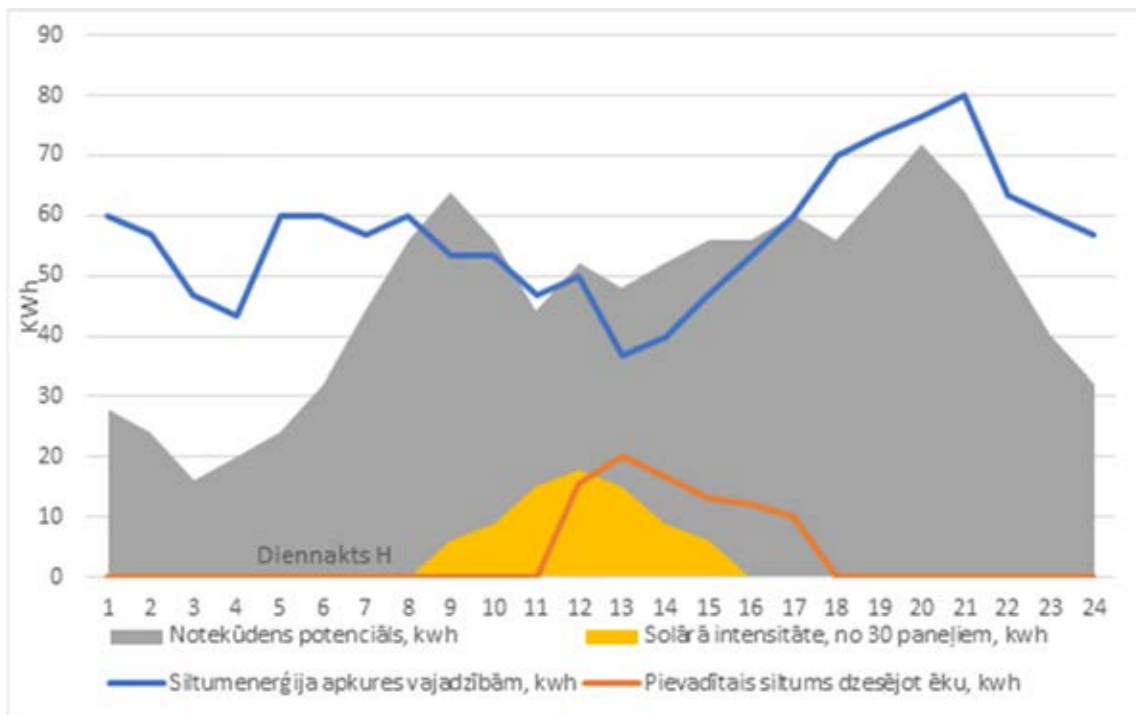
Analizējot mikroprocesoru lietojuma jomas [40], ir secināts, ka visredzamākais mikroprocesoru lietojums ir maiņstrāvas elektriskajā piedziņā ar minimālo reaktīvo elementu skaitu un izmēriem, kā arī augstu pārveidošanas kvalitāti. Šāds apgalvojums ir guvis apstiprinājumu arī tālākos praktiskos pētījumos [42], [43]. Šīs atziņas pamato arī apkures (tajā skaitā arī siltumapgādes), dzesēšanas, saldēšanas un gaisa kondicionēšanas jomā ieteiktās vadlīnijas [44], kas palīdz inženieriem saprast sistēmā iekļautos atsevišķos sistēmas regulatorus, sistēmas iekārtas un to sasaisti projektētajam sistēmas sniegumam. Regulatoriem strādājot tīklā, būtiska ir darba secība, lai nodrošinātu vienmērīgu tīkla darbu [45]. Kopaina par

mūsdienu izaicinājumiem māju informācijas sistēmās ir sniegta *ASHRAE* Tehniskas komisijas priekšsēdētāja *Chris Benson* intervijā [46]. Minētajos avotos secināts, ka mikroprocesoru lietojuma iespējas atjaunīgu enerģijas resursu mikrotīklā prasa papildu vērtējumu, balstoties uz spēkā esošajiem normatīviem un mikrotīklā vadīto tehnoloģisko procesu.

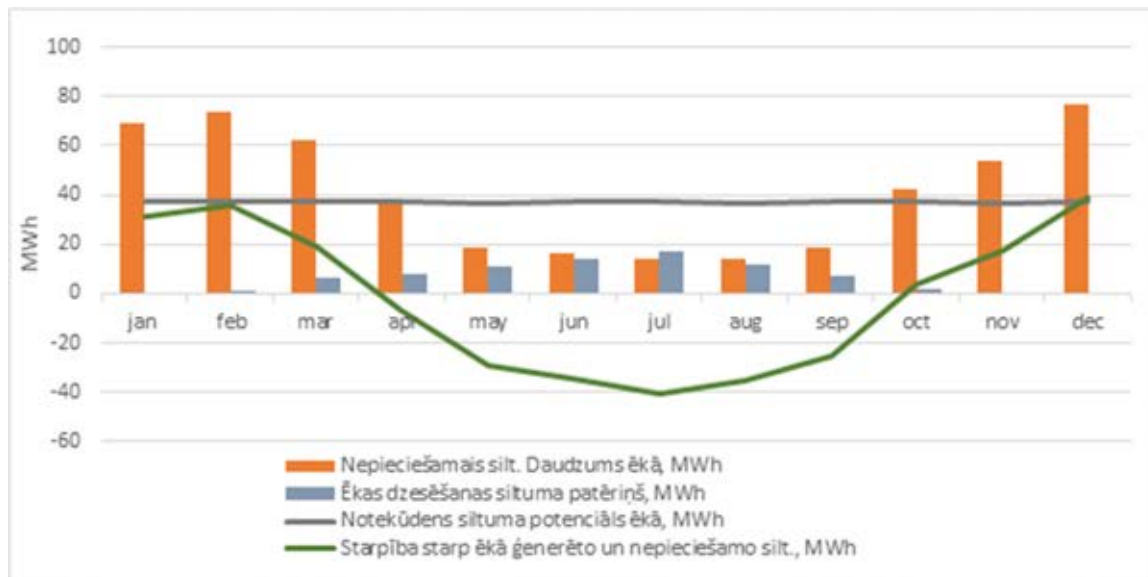
Atjaunīgās enerģijas mikrotīklā siltumu apkurei un karstā ūdens vajadzībām ēkā nodrošina ar notekūdeņu siltuma atgūšanas sistēmas palīdzību. Iekštelpu dzesēšanu nodrošina no notekūdens brīvdzesēšanas režīmā. Elektroenerģiju šo procesu tehnoloģijas nodrošināšanai iegūst no saules, šo konceptu promocijas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

7.4. attēlā redzams esošas ēkas notekūdeņu patēriņš (kas pārvērsts atgūstamā siltuma vienībā), paredzamais ēkas dzesēšanas pieprasījums, karstā ūdens pieprasījums un ieguvums no 30m² solāro paneļu radītās elektriskās jaudas. 7.4. attēlā redzama ēkas enerģijas pieprasījumu mijiedarbība jūlijā. Solārā radiācija vasarā nosedz lielu daļu ēkas elektroenerģijas pieprasījuma. Tas nozīmē, ka, pārgrupējot resursu izmantošanas ieradumus dienas gaitā, iespējams nodrošināt ēku ar zemu izmaksu atjaunīgu enerģiju.

Siltumenerģiju karstā ūdens sagatavošanai rīta pusē iespējams nodrošināt ar notekūdeņu siltuma atgūšanas ierīci ar nosacījumu, ka notekūdens tvertnē ir pietiekams siltuma apjoms, kas nav patērēts iepriekšējā vakarā. Solārā radiācija ir pietiekama no plkst. 4 līdz 9, lai nodrošinātu karstā ūdens siltuma pieprasījumu siltumsūkņa un cirkulācijas sūkņu darbībai. Ja notekūdens potenciāls notekūdens tvertnē no ēkā radītajiem notekūdeņiem ir nepietiekams, iespējams pievadīt notekūdeni no pilsētas tīkla, lai kompensētu enerģijas trūkumu. No plkst. 9 līdz 12, 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 līdz 16 iekštelpu dzesēšana jānodrošina brīvdzesēšanas režīmā, tajā 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 līdz 20 pieaug ēkas karstā ūdens pieprasījums, attiecīgi siltumsūknis strādā karstā ūdens sagatavošanai, novadot A puses siltuma enerģiju 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 līdz 24 pēc solārās radiācijas, kad tas kalpo karstā ūdens sagatavošanai. Šis ir veids, kā ražot ēkai nepieciešamo enerģiju vasaras periodā ekotriģenerācijas ciklā.



7.4. att. Paredzamais enerģijas patēriņš ēkā vasarā.



7.5. att. Ēkas paredzamais enerģijas patēriņš gadā.

7.5. 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.

SECINĀJUMI

1. Pilsētu, apdzīvotu vietu, ēku un ražošanas objektu droša, patērētājiem pieejama, videi droša, ilgtspējīga un noturīga energoapgāde ir iespējama tikai vienlaikus no dažādu veidu enerģijas sadales tīkliem.
2. Katra atsevišķa enerģijas sadales tīkla energoefektivitāti un vadības dinamikas sniegumu nosaka tās atsevišķu posmu sniegumu salikums.
3. Enerģija sadales tīklu un enerģijas kopienu (mikrotīklu) mijiedarbības augstas efektivitātes sasniegšanai ir svarīgas katras atsevišķas sistēmas un kopienas atvērtības pakāpe mijiedarbībai enerģijas galapatērētāju slodzes samazināšanai.
4. Uz *ISO 13790:2008* "Ēku enerģētiskais sniegums" (*Energy performance of buildings*) pamata veidotais modelis *6R2C* sniedz vistuvāko atbilstību reāliem mērījumiem galapatērētāju telpu dzesēšanai.
5. Mikroklimatei enerģijas sadales tīklu galapatērētāju telpā ir būtiska vienlaicīga noturīga gaisa sadalījuma veidošana un siltummaiņas procesu intensifikācija.
6. Jauktai enerģijas apgādei ir svarīga enerģijas patēriņa uzskaitē ar informācijas apmaiņu starp ražotāju un patērētāju nepārtraukta dubleksa režīmā, t. i., viedā uzskaitē.
7. Izstrādātā grafoanalītiskā metode gaisa apstrādes tehnoloģijas analīzei veic darbību izpēti atbilstoši *ISO-OSI* "Atvērtu sistēmu savstarpējas savietojamība" 6. līmenim.
8. Centralizētā siltumapgādes digitālā dvīņa verifikācijai būtiskākais kritērijs ir atgaitas temperatūras 1 °C pazeminājums, pārrēķināts enerģijas vienībās un izmaksās.
9. Enerģijas kopienās (mikrotīklos), lai paaugstinātu šo kopienu enerģētisko lietderību, ir jāieklauj pasīvās ēkas.
10. Ekotriģenerācijas lietojuma izvērtējams jāierobežo ar pasīvai ēkai pieļaujamo pārkaršanu.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- 1) *Measurement of Energy, Demand, and Water Savings: ASHRAE Guideline 14-2014*. ASHRAE Inc., 2014.
- 2) *The impact of building automation and control functions on the energy efficiency of buildings: Document Nr. CM110854en_02 2008*. Siemens Switzerland Ltd.
- 3) *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](https://www.worldgbc.org/sites/default/files/Business_Case_For_Green_Building_Report_WEB_2013-04-11-2.pdf).
- 4) 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.
- 5) 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 lightweight building walls. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, 84 (8), pp. 67–74. DOI: 10.18720/MCE.84.7.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) *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>.
- 13) 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.
- 14) Erdoğmuş, 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>.

- 15) 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>.
- 16) 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.
- 17) *SOLIDWORKS Flow Simulation 2018*.
- 18) *Dabasgāzes 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>.
- 19) *ENTSOG Ten-Year Network Development Plan (TYNDP 2017) and EU Reference Scenario 2016*.
- 20) *Enerģētikas likums: LR likums*, pieņemts 03.09.1998 [skatīts 2021. g. 14. aprīlī]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/49833-energetikas-likums>.
- 21) Дзелзитис, Э. Э., Калнберзинь, А. Я., Каулиньш, Д. Я. Синтез настраиваемых комбинационных схем для систем кондиционирования воздуха. *Теория конечных автоматов и ее приложения*. Рига: Зинатне, 1978, вып. 9, с. 169–177.
- 22) 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.
- 23) Tahir, M., Javed, K. *ARM Microprocessor Systems: Cortex-M Architecture, Programming, and Interfacing*. Boca Raton: CRC Press, 2020, 514 p.
- 24) 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.
- 25) 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.
- 26) 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.
- 27) Ferrmandez, A., Dang, D. *Getting Started with the MSP430 Launchpad*. Amsterdam: Elsevier/Newnes, 2013. 187 p. ISBN 978-0-12-411588-0.
- 28) Iyer, G. G. *An Introduction to Texas Instruments C2000 Real-Time Control Microcontrollers*. [S. l.], 2016. 159 p. ISBN 978-1-5207-2424-9.
- 29) 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.
- 30) Badescu, V. *Optimal Control in Thermal Engineering*. Cham: Springer, 2017. 588 p. ISBN 978-3-319-52967-7.
- 31) McDowall, R., Montgomery, R. D. *Fundamentals of HVAC Control Systems*. Atlanta: ASHRAE, 2011. 348 p. ISBN 978-1-933742-92-2.
- 32) Ryan, M. Understanding cascade control and its applications for HVAC. *ASHRAE Journal*, 2021, 63 (2), pp. 14–20.
- 33) Bertsekas, D. *Dynamic Programming and Optimal Control*. 4th edition. Belmont, Massachusetts: Athena Scientific, 2017. 2 volume set. ISBN 978-1-886529-08-3.
- 34) 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>.
- 35) 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>.
- 36) 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>.
- 37) 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>.
- 38) 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.
- 39) 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.
- 40) Mary Kate McGowan, Exploring Challenges in Existing Building Automation Systems. *ASHRAE Journal*, April 2001, pp. 18–23.



Egils Dzelzītis dzimis Rīgā 1945. gadā. Rīgas Politehniskajā institūtā ieguvis inženiera elektromehāniķa kvalifikāciju (1973). Maskavas Inženierceltniecības institūtā (Krievija) aizstāvējis disertāciju tehnisko zinātņu kandidāta grāda iegūšanai (1982). Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Rīgas Biznesa skolā ieguvis profesionālā maģistra grādu uzņēmuma un organizāciju vadībā (2008). RTU ieguvis profesionālo maģistra grādu elektrotehnikā un elektroinženiera kvalifikāciju (2016).

Patlaban E. Dzelzītis ir Latvijas Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģijas inženieru savienības valdes priekšsēdētājs, RTU Būvniecības inženierzinātņu fakultātes Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģijas institūta direktors un siltumtehnikas uzņēmuma, akciju sabiedrības "Lafipa" valdes priekšsēdētājs.

Atzinības krusta virsnieks (2012). Ogres Goda pilsonis (2020).

Zinātniskās intereses: elektriskās tehnoloģijas un automātika; siltuma, gāzes un ūdens inženiersistēmas.