

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Aivars ŽANDECKIS

Doktora studiju programmas „Vides zinātne” doktorants

**MODUĻVEIDA SAULES UN GRANULU KOMBINĒTĀ
SISTĒMA DAUDZDZĪVOKĻU ĒKAI.
EKSPERIMENTĀLĀ IZPĒTE UN OPTIMIZĀCIJA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

Dr.habil.sc.ing., profesore
D. BLUMBERGA

Dr.sc.ing., asociētais profesors
C. ROCHAS

Rīga 2012

UDK 697.329+697.7] (043.2)

Ža 550 m

Žandeckis A. Modulveida saules un granulu kombinētā sistēma daudzdzīvokļu ēkai. Eksperimentālā izpēte un optimizācija. Promocijas darba kopsavilkums.-Rīga: RTU, 2012.-32 lpp.

Iespiests saskaņā ar VASSI institūta 2012. gada 8. maija lēmumu, protokols Nr. 21.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».



EUROPEAN UNION
EUROPEAN REGIONAL DEVELOPMENT FUND
INVESTING IN YOUR FUTURE

Eksperimentālā sistēma tika uzbūvēta izmantojot Eiropas Ekonomikas zonas finanšu instrumenta programmas „Vides politika un integrācija Latvijā” finansiālo atbalstu apakšprojekta „Kompakts saules un granulu modulis” ietvaros.



**CENTRAL BALTIC
INTERREG IV A
PROGRAMME
2007-2013**

Eksperimentālās sistēmas monitorings tika īstenots ar Eiropas Komisijas Eiropas Reģionālās attīstības fonda programmas „Centrālās Baltijas INTERREG IV A programma 2007-2013” finansiālo atbalstu projekta „Ecohousing” ietvaros.

ISBN 978-9934-8196-5-0

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2012.g. 6. septembrī Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, 21. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr.habil.sc.ing., profesors Vytautas Martinaitis,
Viļņas Gediminas Tehniskā universitāte, Siltumapgādes un ventilācijas
departaments, Viļņa, Lietuva

Dr.sc.ing., profesors Rīvars Sudārs,
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Lauku inženieru fakultāte, Jelgava,
Latvija

Dr.sc.ing., profesors Mārtiņš Gedrovičs,
Rīgas Tehniskā universitāte, Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts,
Rīga, Latvija.

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Aivars Žandeckis

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 6 pielikumus, 52 attēlu, kopā 123 lappuses. Literatūras sarakstā ir 72 nosaukumi.

SATURS

Darba aktualitāte.....	5
Darba mērķis	5
Pētījumu metodika.....	6
Darba zinātniskā novitāte	6
Darba praktiskais izmantojums	7
Darba aprobācija.....	8
Patenti.....	10
Monogrāfijas	10
Dalība projektos	11
Autora publikācijas.....	11
Darba struktūra un apjoms.....	13
1. EKSPERIMENTĀLAIS KOMBINĒTĀS SISTĒMAS PROTOTIPS DAUDZDZĪVOKĻU ĒKAI.....	13
1.1. Projekta realizācijas robežnosacījumi.....	14
1.2. Kombinētās sistēmas darbības izpētes algoritms.....	15
1.3. Kombinētās sistēmas hidrauliskā slēguma koncepcija	17
2. SAULES UN GRANULU KOMBINĒTĀS SISTĒMAS MODELĒŠANA ...	18
2.1. Saules un granulu kombinētās sistēmas modelis TRNSYS vidē.....	18
2.2. Kombinētās sistēmas datormodeļa validācija	19
2.3. Akumulācijas tvertnes tilpuma un kolektoru laukuma izvēle.....	20
2.4. Saules kolektoru izvietojuma pamatojums	22
3. SAULES UN GRANULU KOMBINĒTĀS SISTĒMAS MONITORINGS...	23
4. SAULES UN GRANULU KOMBINĒTĀS SISTĒMAS OPTIMIZĀCIJA ...	24
SECINĀJUMI	31

Darba aktualitāte

Enerģētikas sektors spēlē vitālu lomu jebkuras valsts attīstībā. Enerģētikas politika, kas ir balstīta uz ilgtspējības principiem, nodrošina pamatu stabilai ekonomiskai izaugsmei, pasargā no straujām energoresursu cenu svārstībām un ļauj efektīvi risināt vides aizsardzības jautājumus.

Energoefektivitāte dzīvojamajā sektorā ir viena no vissvarīgākajām Eiropas Savienības prioritātēm. Galvenie uzdevumi izvirzīto politikas mērķu sasniegšanai ir enerģijas patēriņa samazināšana esošajās ēkās un stingrāku prasību definēšana jauno ēku būvniecībai. Atjaunojamo energoresursu izmantošanas veicināšanai un fosilo kurināmo izmantošanas efektivitātes paaugstināšanai ir piešķirta prioritāra nozīme uzdevumu izpildē.

Eiropas Komisijas direktīvā 2009/28/EC tiek izvirzīts ambiciozs, bet sasniedzams mērķis – līdz 2020. gadam Eiropas Savienībā paaugstināt atjaunojamo energoresursu īpatsvaru enerģijas bruto galapatēriņā līdz 20 %. Latvijas mērķis direktīvas ietvaros ir sasniegt 40 % atjaunojamo energoresursu īpatsvaru enerģijas bruto galapatēriņā.

Latvijā tiek īstenoti vairāki finansiāla atbalsta mehānismi, kuru mērķis ir veicināt enerģijas patēriņa samazinājumu un atjaunojamo energoresursu izmantošanu dzīvojamajā sektorā. Īstenotie pasākumi bija tikai pirmais solis sektora attīstībā un direktīvas mērķu sasniegšanā.

Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt atjaunojamo energoresursu izmantošanas risinājumu vidēja izmēra daudzdzīvokļu ēku siltumapgādei Latvijas klimatiskajos apstākļos. Risinājumam ir jābūt pilnībā balstītam uz saules enerģijas un biomasas izmantošanu.

Mērķa sasniegšanai tika veikti šādi izpētes uzdevumi:

- robežnosacījumu definēšana uz atjaunojamo energoresursu izmantošanu balstīta siltumapgādes risinājuma izstrādei un realizēšanai;
- moduļveida kombinētās saules un granulu sistēmas izveides koncepcijas izstrāde, kas paredz kompakto sistēmas kompakto moduļveida dizainu, iespēju sasniegt augstu sistēmas nokomplektēšanas pakāpi jau rūpnīcā un hidraulisko slēgumu ar iespēju apvienot vienā sistēmā saules kolektorus, granulu katlu, akumulācijas tvertni, apkures un karstā ūdens slodžu segšanas funkcijas;
- kombinētās sistēmas determinētā matemātiska modeļa izveide datorsimulācijas programmā;
- kombinētās sistēmas tehnisko risinājumu alternatīvu izvēle, balstoties uz ekonomisko optimizāciju, un līmeņatzīmes definēšana turpmākai reālās sistēmas optimizācijai;

- rūpnieciski eksperimentālās kombinētās sistēmas izveide un simulācijas modeļa validācija, izmantojot monitoringa rezultātus;
- kombinētās sistēmas darbības parametru optimizācija, balstoties uz laboratorijas eksperimentiem, monitoringa un dinamiskās simulācijas rezultātu apstrādi un analīzi, izmantojot līmeņatzīmes, īpatnējā saules enerģijas patēriņa (FSC), regresijas analīzes un stāvā kāpuma metodes.

Pētījumu metodika

Sis pētījums ir izstrādāts Eiropas Ekonomikas zonas finanšu instrumenta programmas „Vides politika un integrācija Latvijā” apakšprojekta „Kompakts saules un granulu modulis”, Eiropas Komisijas Eiropas Reģionālās attīstības fonda programmas „Centrālās Baltijas INTERREG IV A programma 2007-2013” apakšprojekta „Ecohousing” ietvaros un sadarbībā ar diviem Latvijas rūpnieciskajiem uzņēmumiem un vienu inženiertehnisko uzņēmumu.

Promocijas darba pētījumu metodika pamatā ir sadalīta divās savstarpēji saistītās daļās. Modulveida saules un granulu kombinētās sistēmas koncepcijas izstrāde daudzdzīvokļu ēkas siltumapgādei, dinamiskā simulācijas modeļa izveide TRNSYS vidē un šī modeļa izmantošana dažādu tehnoloģisko alternatīvu ekonomiskai optimizācijai.

Eksperimentālās sistēmas izveide daudzdzīvokļu ēkas siltumapgādei, sistēmas monitoringa un optimizācija. Sistēmas darbības monitoringa rezultāti tika izmantoti izstrādātā simulācijas modeļa validācijai. Kombinētās sistēmas optimizācija tika balstīta uz monitoringa, simulācijas un laboratorijas eksperimentu rezultātiem, izmantojot līmeņatzīmes, īpatnējā saules enerģijas patēriņa (FSC), vairāku parametru nelineārās regresijas analīzes un stāvā kāpuma (GRG2) metodes.

Darba zinātniskā novitāte

Promocijas darba rezultātā TRNSYS vidē tika izstrādāts saules un granulu kombinētās sistēmas deterministisks simulācijas modelis, kas tika validēts, balstoties uz eksperimentālās sistēmas monitoringa rezultātiem. Eksperimentālās saules un granulu kombinētās sistēmas izveidei tika definēti robežnosacījumi, bet sistēmas optimizācija tika balstīta uz šādām metodikām:

- līmeņatzīmju un mērķfunkciju definēšana;
- dažādu sistēmas tehnisko risinājumu ekonomiskā optimizācija, izmantojot simulācijas rezultātus;
- izmantojot mazākas jaudas granulu katlu laboratorijas apstākļos, tika veiktas vairākas degšanas eksperimentu sērijas, kuru rezultāti tika izmantoti kombinētajā sistēmā uzstādīta granulu katla darbības režīmu vērtēšanas un degšanas procesa optimizācijai;

- izstrādāts sistēmas darbības parametru optimizācijas algoritms, kurš iekļauj dinamisko simulāciju, vairāku parametru nelineāro regresijas analīzi, Markarta un stāvā kāpuma (GRG2) statistiskās metodes.

Optimizācijas rezultātā tika iegūts nelineārs regresijas vienādojums, kurš apraksta ekonomiskos ieguvumus no saules kolektoru izmantošanas atkarībā no darbības parametru izmaiņām. Eksperimentālās sistēmas veiktspējas un optimizācijas pasākumu kvantitatīvajai izvērtēšanai tika izmantota saules enerģijas patēriņa īpatsvara metode (FSC).

Darba izstrādes laikā ir tapušas idejas par saules enerģijas izmantošanas iespējām vasaras mājās un daudzdzīvokļu ēkās. Šīs idejas tika patentētas.

Darba praktiskais izmantojums

Promocijas darbam ir liela praktiskā nozīme, kuras pamatā ir vairāku rūpniecisko partneru un uzņēmumu līdzdalība eksperimentālās sistēmas izveidē. Sistēmas izveide un optimizācija tika veikta divu zinātnisko projektu ietvaros, un projekta rezultāti tika plaši prezentēti sabiedrībā un zinātniskajā vidē.

Šī darba rezultātiem ir dažādas mērķa grupas:

- daudzdzīvokļu ēku iedzīvotāji – promocijas darba ietvaros izveidotā eksperimentālā sistēma kalpo par piemēru pilnībā uz atjaunojamo energoresursu izmantošanu balstītas ēku siltumapgādes sistēmai. Darba rezultāti ir izmantojami par līmeņatzīmi līdzīgu projektu veiktspējas izvērtēšanai, optimizācijas metodes ir izmantojamas dažādu saules un granulu sistēmu optimizācijai;
- iekārtu uzstādītāji un izplatītāji – darbā ir piedāvāta metode dažādu tehnoloģisko risinājumu ekonomiskai izvērtēšanai, kā arī vairākas metodes sistēmas komponentu un darbības parametru izvēlei un optimizācijai;
- iekārtu ražotāji – šajā mērķa grupā ir iekļaujami vietējie granulu katlu un moduļveida katlumāju ražotāji. Darba ietvaros tika izmantotas dažādas metodes tehnisko risinājumu izvērtēšanai, granulu katla vadības algoritmu optimizēšanai, veiktspējas paaugstināšanai un emisiju samazināšanai;
- pašvaldības – izveidotā kombinētā sistēma var kalpot par piemēru vai paraugu dažādu daudzdzīvokļu ēku siltumapgādes problēmu risināšanai;
- likumdošanas institūciju pārstāvji un investori – promocijas darba rezultāti ir noderīgi, lai novērtētu atjaunojamo resursu izmantošanas atbalsta mehānismus un potenciālu, sevišķi attiecībā uz daudzdzīvokļu ēku sektoru. Darbā ir uzsvērtā daudzdzīvokļu ēku renovācijas nepieciešamība.

Darba aprobācija

Par pētījuma rezultātiem tika ziņots un tie tika apspriesti šādās zinātniskajās konferencēs un semināros:

1. 47. RTU Studentu zinātniskajā un tehniskajā konferencē ar referātu „Mazo koģenerācijas staciju darbības analīze” – 2006. gada 18.-28. aprīlī Rīgā;
2. 48. RTU Studentu zinātniskajā un tehniskajā konferencē ar referātu „Katla bilances un energoefektivitātes noteikšana Ādažu katlu mājā” – 2007. gada 27.-28. aprīlī Rīgā;
3. 49. RTU Studentu zinātniskajā un tehniskajā konferencē ar referātu „Granulu degšanas efektivitātes izpēte” 2008. gada 18. aprīlī Rīgā;
4. 49. RTU zinātniskajā konferencē, sekcijā „Tehnogēnās vides aizsardzības zinātniskās problēmas”, ar referātu „Granulu katla darbības energoefektivitātes izpēte” – 2008. gada 9.-10. oktobrī Rīgā;
5. seminārā projekta COFITEK ietvaros ar prezentāciju „Biomasa kā kurināmais” – 2008. gada 31. oktobrī Rīgā;
6. 49. RTU zinātniskajā konferencē, sekcijā „Vides un klimata tehnoloģijas”, ar referātu „Slāpekļa oksīdu un energoefektivitātes saistības izpēte granulu katlos” – 2008. gada 15. oktobrī Rīgā;
7. starptautiskajā seminārā Baltic Economic Forum ar referātu „Analysis of Wood Fuel Flow in Latvia” – 2008. gada 3.-4. novembrī Rīgā;
8. starptautiskajā seminārā BioNorm2 International Conference on Wood Fuel Standards. Combustion ar referātu „Results of wood pellets combustion testing in Latvia” – 2009. gada 6. augustā Rīgā;
9. starptautiskajā seminārā „Current and future woody biomass for energy – Monitoring use and understanding technology” ar stenda referātu „Bionorm II – Pre-normative research on solid biofuels for improved European standards” – 2009. gada 16. septembrī Rīgā;
10. RTU ikgadējā Inovāciju un jauno tehnoloģiju konferencē ar stenda referātu „Slāpekļa oksīdu samazināšanas metodes granulu katlos” – 2009. gada 23. septembrī Rīgā;
11. RTU ikgadējā Inovāciju un jauno tehnoloģiju konferencē ar stenda referātu „Periodiskās darbības Saules enerģijas modulis” – 2010. gada 23. februārī Rīgā;
12. seminārā „Cīņa ar enerģijas vampīriem: kā ietaupīt uz iekārtu izslēgšanas rēķina” ar prezentāciju „Mērījumu veikšana: pasaules prakse un Latvijas pieredze” – 2010. gada 8. septembrī Rīgā;
13. 51. RTU zinātniskajā konferencē, sesijā „Vides inženierzinātnes”, ar referātu „Methods of nitrogen oxide reduction in pellet boilers” – 2010. gada 12. oktobrī Rīgā;
14. seminārā „Saule un biokurināmais. No A līdz Z” ar prezentāciju „Biomassas apkures katli” – 2010. gada 7. decembrī Rīgā;

15. Eiropas Ekonomikas zonas finanšu instrumenta līdzfinansētās programmas „Vides politikas integrācijas programma Latvijā” noslēguma konferencē ar prezentāciju „Kompakts saules un granulu modulis” – 2011. gada 14. aprīlī Rīgā;
16. seminārā „Zema enerģijas patēriņa ēka Latvijā” ar prezentāciju „Kompakts saules un granulu modulis, daudzdzīvokļu ēkā Siguldā, Krišjāņa Barona ielā 2. Pasākumu plānošana, darbu norise un sasniegtie rezultāti” – 2011. gada 20. jūlijā Rīgā;
17. 6. Dubrovņiku starptautiskajā konferencē „Sustainable development of energy, water and environment systems”, sesijā “The interaction between heating technologies and renewable energy systems” ar referātu „Solar, pellet combisystem for apartment buildings” – 2011. gada 25.-29. septembrī Dubrovņikos;
18. 52. RTU zinātniskajā konferencē, sekcijā „Vides un klimata tehnoloģijas”, ar referātu „Saules siltuma izmantošanas iespējas daudzdzīvokļu ēkās Latvijā” – 2011. gada 12. oktobrī Rīgā;
19. 52. RTU zinātniskajā konferencē, sekcijā „Vides un klimata tehnoloģijas”, ar referātu „Gaisa padeves un kurināmā sastāva kontrole ar mērķi samazināt NO_x emisijas mazas jaudas biomasas apkures katlos” – 2011. gada 12. oktobrī Rīgā;
20. 52. RTU zinātniskajā konferencē, sekcijā „Vides un klimata tehnoloģijas”, ar referātu „Zemas temperatūras plazma GOS attīrīšanai dūmgāzēs” – 2011. gada 12. oktobrī Rīgā;
21. starptautiskajā seminārā projekta „Ecohousing” ietvaros ar prezentāciju „WP2: Progress in the project activities - Presentation in the project „Ecohousing” – 2011. gada 11.-13. oktobrī Rīgā;
22. semināru ciklā „Zinātnieku un uzņēmēju kontaktbirža” ar prezentācijām „Kompakts saules un granulu modulis” – 2011. gada 20. oktobrī Rīgā;
23. Apvienotajā pasaules latviešu zinātnieku III kongresā un Letonikas IV kongresā «Zinātne, sabiedrība un nacionālā identitāte», sekcijā „Enerģētika un elektrotehnika”, ar referātu „Centralizētu siltumapgādes sistēmu attīstības modelēšana” – 2011. gada 25. oktobrī Rīgā;
24. Apvienotajā pasaules latviešu zinātnieku III kongresā un Letonikas IV kongresā «Zinātne, sabiedrība un nacionālā identitāte», sekcijā „Enerģētika un elektrotehnika”, ar referātu „Slāpekļa oksīdu samazināšana mazas jaudas biomasas apkures katlos” – 2011. gada 25. oktobrī Rīgā;
25. Apvienotajā pasaules latviešu zinātnieku III kongresā un Letonikas IV kongresā «Zinātne, sabiedrība un nacionālā identitāte», sekcijā „Enerģētika un elektrotehnika”, ar referātu „Saules siltuma izmantošanas iespējas daudzdzīvokļu ēkās Latvijā” – 2011. gada 25. oktobrī Rīgā;

26. starptautiskajā seminārā projekta „Ecohousing” ietvaros ar prezentāciju „WP2: Progress in the project activities - Presentation in the project „Ecohousing” – 2011. gada 9.-11. novembrī Tartu;
27. starptautiskajā seminārā projekta „Ecohousing” ietvaros ar prezentāciju „WP2: Proposal for study material on performance of wood fuel appliances” – 2011. gada 9.-11. novembrī Tartu;
28. starptautiskajā seminārā projekta „Ecohousing” ietvaros ar prezentāciju „Monitoring and optimization of the solar combisystem” – 2012. gada 9.-10. februārī Rīgā;
29. starptautiskajā seminārā projekta „Ecohousing” ietvaros ar prezentāciju „Fuel combustion tests analysis” – 2012. gada 9.-10. februārī Rīgā;
30. seminārā „Ēku energoefektivitāte un ekoloģiskie aspekti” ar prezentāciju „Praktiski risinājumi biomasas un saules enerģijas izmantošana daudzdzīvokļu ēku siltumapgādē kompleksā ar ēkas renovāciju” – 2012. gada 28. martā Rīgā;

Patenti

1. Rochas C., Rošā M., Žandeckis A. Latvijas Republikas patents Nr.13768 „Temperatūras zonde”. 20.11.2008.
2. Blumberga D., Rochas C., Rošā M., Blumberga A., Žandeckis A., Žogla G. Latvijas Republikas patents Nr.14124 „Saules enerģijas modulis vasaras mājām” 14.03.2010.
3. Rochas C., Blumberga D., Rošā M., Žandeckis A. Latvijas Republikas patents Nr.14484 „Atjaunojamo energoresursu kombinētā sistēma daudzdzīvokļu ēkai”. 20.03.2012.

Monogrāfijas

1. Rošā M., Blumberga D., Bērziņa A., Rochas C., Žandeckis A. Compact Sun and Pellet Module. Heating System for Apartment Building.– Rīga: Rīgas Tehniskās universitātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts. – 2010. – 20 lpp.
2. Blumberga D., Veidenbergs I., Romagnoli F., Rochas C., Žandeckis A. Bioenerģijas tehnoloģijas. – Rīga: Rīgas Tehniskās universitātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts. – 2011. – 272 lpp.
3. Blumberga D., Veidenbergs I., Rošā M., Blumberga A., Bažbauers G., Rochas C., Dzene I., Žogla G., Kamenders A., Barisa A., Pubule J., Romagnoli F., Žandeckis A. Latvijas zaļās enerģijas stratēģija 2050 – Rīga: Rīgas Tehniskās universitātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts. – 2011. – septembris. – 28 lpp.

Dalība projektos

Šeit ir uzskaitīta dalība vietējas un starptautiskas nozīmes zinātniskos projektos, kuri ir saistīti ar promocijas darba tēmu.

1. Z08.2138. Granulu degšanas procesa efektivitātes noteikšana. Granulu kvalitātes ietekmes izpēte. 02.01.2008. – 30.06.2008.
2. Z04.1188. Zaļās enerģijas tehnoloģiju adaptācija Latvijā. Izpēte. Perspektīvas. 02.01.2008. – 30.06.2008.
3. FI-08/775. Atjaunojamo energoresursu izmantošanas iespēju izvērtējums Latvijā līdz 2020. gadam. 01.07.2008. – 30.09.2008.
4. L7462. Faktiskās enerģētiskās koksnes plūsmas apzināšana. 19.09.2008. – 15.10.2008.
5. Z09.1241. Ilgtspējīga ēku enerģijas patēriņa samazināšanas iespēju izpēte. Stratēģija. Nulles emisijas ēka. 01.01.2009. - 10.06.2009.
6. FLPP-2009/19. Esošās situācijas analīze ēkās ar periodisku apkuri. 01.03.2009. - 15.06.2009.
7. ZP-2008/8. Slāpekļa oksīdu samazināšanas metodes granulu katlos. 16.04.2009. – 31.08.2009.
8. R7506. „Periodiskās darbības saules enerģijas modulis” 16.06.2009. – 15.12.2009.
9. Projekts „Kompakts saules un granulu modulis” 19.04.2010. – 31.01.2011.
10. Starptautisks projekts „Ecohousing” 03.01.2011. līdz šim brīdim.

Autora publikācijas

1. Žandeckis A., Veidenbergs I. Mazo koģenerācijas staciju datu analīze // 47. RTU Studentu zinātniskā un tehniskā konference – 2006. - aprīlis. – 116. lpp.
2. Žandeckis A., Žogla G., Veidenbergs I. Katla bilances un energoefektivitātes noteikšana Ādažu katlu mājā// 48. RTU Studentu zinātniskā un tehniskā konference – 2007. - aprīlis. – 110. lpp.
3. Rochas C., Žandeckis A. Economical and system analysis for solar combisystem using two different solar store units integrated in 60x60 cabinets // The 11th International Conference on Solar Energy at High Latitudes. North Sun – 2007. – May.
4. Rochas C., Žandeckis A. Performance analysis of technical unit and for solar combisystem // Scientific Proceeding of RTU power and electrical engineering – 2007. – Vol.21. – 152-162 p.
5. Žandeckis A., Blumberga D., Boloņina A., Rochas C. Granulu katla darbības energoefektivitātes izpēte // Tehnogēnās vides aizsardzības zinātniskās problēmas: studentu zinātniskās un praktiskās konferences zinātniskie raksti – 2008. – 74.-79. lpp.

6. Žandeckis A., Blumberga D., Boloņina A., Rochas C., Siliņš K. Research of link between nitrogen oxides and efficiency of pellet boilers // Scientific Journal of RTU. 13. series., Environmental and climate Technologies – 2008. – Vol.1. – 158-166 p.
7. Blumberga D., Romagnoli F., Žandeckis A. Analysis of wood fuel flow in Latvia // 9th Baltic Economic Forum: Energy Efficiency and Renewable's Conference: Forum Documentation – 2008. – November – 189-196 p.
8. Žandeckis A., Rochas C. Granulu degšanas efektivitātes izpēte // 49. RTU Studentu zinātniskā un tehniskā konference – 2008. - aprīlis. – 1. lpp.
9. Žandeckis A., Rochas C., Blumberga D. Research of formation of nitrogen monooxides during pellet combustion // RTU scientific proceedings 13. ser., Environmental and climate technologies – 2009. – Vol.2. – 91-98 p.
10. Romagnoli F., Rochas C., Žandeckis A. Research of combustion efficiency of pellets // RTU scientific proceedings 13. ser., Environmental and climate technologies – 2009. – Vol.2. – 65-76 p.
11. Siliņš K., Žandeckis A., Valtere S. Determination of solid particle concentration at coal transshipment site // RTU scientific proceedings 13. ser., Environmental and climate technologies– 2009. – Vol.3. – 97-101 p.
12. Žandeckis A., Blumberga D., Rochas C., Veidenbergs I., Siliņš K. Methods of nitrogen oxide reduction in pellet boilers // RTU scientific proceedings 13. ser., Environmental and climate technologies – 2010. – Vol.4. – 123 - 130 p.
13. Siliņš K., Žandeckis A. Cieto daļiņu koncentrācijas noteikšana ogļu pārkraušanas punktā - daļiņu sadalījums pēc raksturīgā izmēra // Cilvēks. Vide. Tehnoloģijas: 14. starptautiskās studentu zinātniski praktiskās konferences rakstu krājums – 2010. – aprīlis – 339.-343.lpp.
14. Jaunzems D., Veidenbergs I., Žandeckis A., Rochas C. Use of reflectors for improving the energy performance of solar thermal collectors in Latvian climate conditions // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences – 2011. – Vol.5. – 1-6 p.
15. Žandeckis A., Rochas C., Blumberga D., Rošā M., Siliņš K., Timma L. Solar, pellet combisystem for apartment buildings // 6thDubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water & Environment Systems Online Proceedings – 2011. – Sept. – 1-9 p.
16. Žandeckis A., Rochas C., Blumberga D., Rošā M., Siliņš K., Timma L. Solar, pellet combisystem for apartment buildings // 6thDubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water & Environment Systems: Book of Abstracts – 2011. – Sept. – 103-104 p.
17. Žandeckis A., Timma L., Blumberga D., Rochas C. Possibilities for utilization of solar thermal energy in multi-family buildings in Latvia // Scientific Journal of RTU. 13. ser., Environmental and climate technologies – 2011. – Vol.6. – 138-146 p.

18. Ikaunieks J., Mežmale L., Žandeckis A., Veidenbergs I. Non-thermal plasma for voc treatment in flue gases // RTU scientific proceedings 13. ser., Environmental and climate technologies – 2011. – Vol.6. – 31 - 37 p.
19. Siliņš K., Žandeckis A., Veidenbergs I. Slāpekļa oksīdu samazināšana mazas jaudas biomasas apkures katlos // Apvienotā Pasaules latviešu zinātnieku 3. kongresa un Letonikas 4. kongresa sekcijas „Vides kvalitāte Latvijā: esošais stāvoklis, izaicinājumi, risinājumi” referātu kopsavilkumu krājums – 2011. – oktobris. – 84. lpp.
20. Žandeckis A., Timma L., Blumberga D., Rochas C. Saules siltuma izmantošanas iespējas daudzdzīvokļu ēkās // Apvienotā Pasaules latviešu zinātnieku 3. kongresa un Letonikas 4. kongresa sekcijas „Vides kvalitāte Latvijā: esošais stāvoklis, izaicinājumi, risinājumi” referātu kopsavilkumu krājums – 2011. – oktobris. – 103.lpp.
21. Beloborodko A., Timma L., Žandeckis A., Romagnoli F. The regression model for the evaluation of the quality parameters for pellets // Agronomy Research – 2012. – Vol.10. – 17-24 p.
22. C. Rochas, A. Žandeckis, M. Rošā, F. Romagnoli, L. Timma. Applications of informatics and cybernetics in compact solar combisystem for multifamily residential buildings // 8th International Symposium on Management, Engineering and Informatics, Focus Symposium in the 16th World Multiconference on Systems, Cybernetics and Informatics – 2012. – July.
23. Žandeckis A., Timma L., Blumberga D., Rochas C., Rošā M. Solar and pellet combisystem for apartment buildings: heat losses and efficiency improvements of the pellet boiler // Applied Energy – 2012. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.049> – Article in Press.
24. Žandeckis A., Timma L., Rochas C., Roša M., Blumberga D. Thermal performance analysis of solar collectors installed for combisystem in apartment building // Latvian Journal of Physics and Technical sciences – 2012. – Vol.49. – 32-46 p.
25. Kirsanovs V., Timma L., Žandeckis A., Romagnoli F. The quality of pellets available on the market in Latvia: classification according EN 14961 requirements // submitted abstract for 53th RTU scientific conference – 2012. – February.
26. Ikaunieks J., Pubule J., Beloborodko A., Žandeckis A., Blumberga A., Veidenbergs I., Blumberga D. NO_x and SO_x reduction from biomass boilers in condensing unit with different solvents // submitted abstract for Conference of Young Scientists on Energy Issues CYSENI – 2012. – March.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 6 pielikumus, 52 attēlu, kopā 123 lappuses. Literatūras sarakstā ir 72 nosaukumi.

1. EKSPERIMENTĀLAIS KOMBINĒTĀS SISTĒMAS PROTOTIPS DAUDZDZĪVOKĻU ĒKAI

Šajā nodaļā ir aprakstīti saules un granulu kombinētās sistēmas eksperimentālā prototipa izveidošanai izvirzītie robežnosacījumi un izstrādātā hidrauliskā slēguma koncepcija.

1.1. Projekta realizācijas robežnosacījumi

Eksperimentālā sistēmas prototipa izveidošanai tika izvirzīti šādi robežnosacījumi:

- sistēmai ir jābūt kompaktai un modulārai. Tās uzstādīšana ir iespējama ēkās, kurās nav brīvu vietu pagrabā vai bēniņos. Nav nepieciešama laukietilpīga un dārga piebūvju izbūve;
- par papildu enerģijas avotu ir jāizmanto koksnes granulu apkures katls;
- sistēmai ir jābūt spējīgai segt daudzdzīvokļu ēkas karstā ūdens (KŪ) sagatavošanas un apkures slodzes. Pareizi organizēta karstā ūdens sagatavošana ir galvenais nosacījums efektīvai saules enerģijas izmantošanai;
- kombinētajā sistēmā ir jāiekļauj visas siltumenerģijas (SE) iegūšanai, uzkrāšanai un sadalei nepieciešamās komponentes. Ēkā nav nepieciešamas papildu platības jebkādu sistēmas komponentu izvietojumam, izņemot saules kolektorus un cauruļvadus;
- sistēmas tehnisko risinājumu alternatīvu izvēle ir jābalsta uz ekonomiskās optimizācijas rezultātiem;
- saules un granulu kombinētajai sistēmai ir jābūt spējīgai konkurēt ar tradicionālajām fosilā kurināmā siltuma tehnoloģijām;
- saules kombinētās sistēmas uzstādīšanai pievilcīgākas ir renovētas vai jaunbūvētas daudzdzīvokļu ēkas. Citos gadījumos ir izdevīgāk ieguldīt naudu energoefektivitātes pasākumos.

Balstoties uz vairāku pētījumu rezultātiem, piesaistīto rūpniecisko partneru pieredzi un ieteikumiem, tika izvirzīti vairāki specifiski robežnosacījumi:

- sistēmas uzstādīšanai ir jāizmanto konteiner-tipa katlumāja ar standarta transportēšanas izmēriem (6000×2900×3100 mm);
- ierobežotie katlumājas izmēri ļauj izmantot granulu katlus ar jaudu līdz 150-200 kW, kas savukārt ierobežo potenciālo patērētāju loku. Kopējo siltumenerģijas patēriņu 450-600 MWh gadā var izvirzīt kā robežlielumu;
- konteiner-tipa katlumājas izmantošana ļaus lielāko sistēmas komponentu daļu uzstādīt jau rūpnīcā. Tas būtiski samazinās uzstādīšanai uz vietas nepieciešamo laiku un izmaksas;
- saules kolektorus un granulu katlā iegūtās enerģijas akumulācija ir jānodrošina kopējā tilpumā;

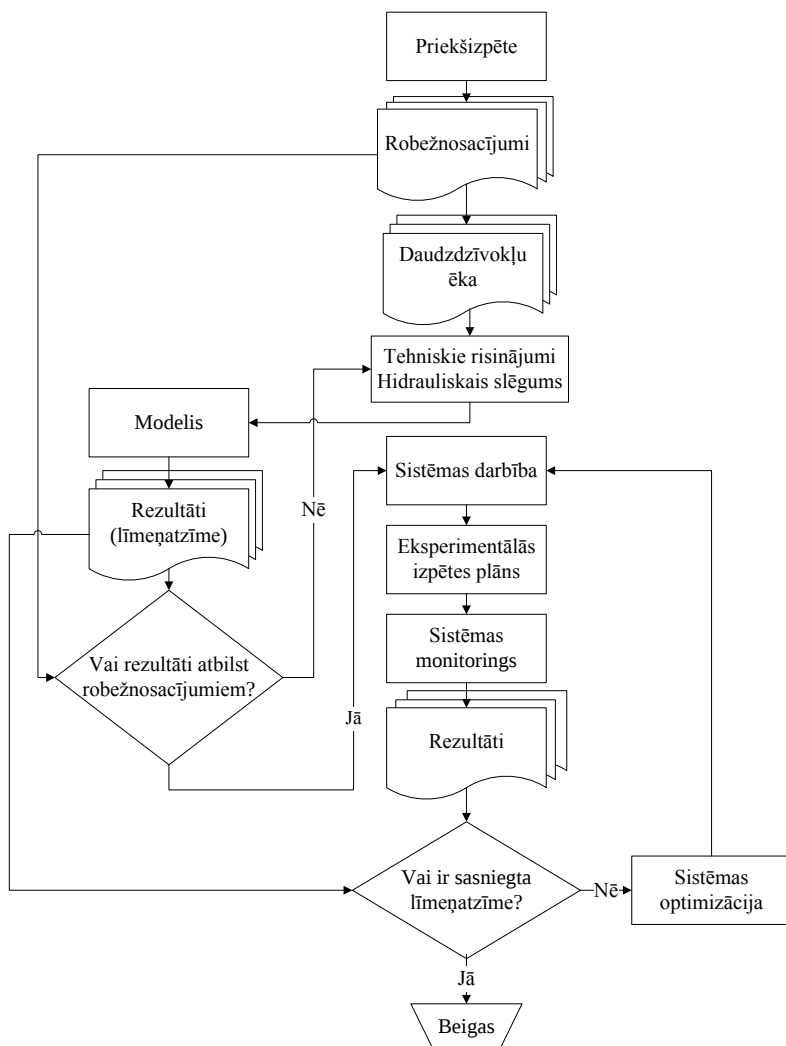
- apkures vajadzībām ir jāizmanto ārējais siltummainis, kas ļaus efektīvi strādāt gan ar augstas, gan vidējas, gan zemas temperatūras apkures sistēmām;
- patērētāja karstā ūdens slodze var mainīties no 0 kW līdz 100 kW un vairāk, tāpēc karstā ūdens sagatavošanai ir jāizmanto ārējais siltummainis un jāņem vērā karstā ūdens recirkulācijas slodze;
- sistēmas izveidošanai ir jāizmanto plakanie saules kolektori. Šī tehnoloģija ir izvēlēta, jo tai ir zemākas kapitālizmaksas un to ir vieglāk apkalpot;
- saules kombinētā sistēma jāprojektē tā, lai tā atbilstu Ziemeļeiropas klimatiskajiem apstākļiem.

Darba ietvaros uz izvirzītajiem robežnosacījumiem ir balstīta sistēmas hidrauliskā koncepta izstrāde.

1.2. Kombinētās sistēmas darbības izpētes algoritms

Eksperimentālās sistēmas izveidošana, izpēte un optimizācija norisinājās atbilstoši 1. attēlā redzamajam algoritmam. Algoritms sastāv no 2 posmiem: darbībām pirms un pēc kombinētās sistēmas izbūves.

Pirmais algoritma posms ietver priekšizpēti, kam sekoja robežnosacījumu izvirzīšana. Algoritma turpmākajās fāzēs tika meklēta robežnosacījumiem atbilstoša daudzdzīvokļu ēka, kuras raksturošanai tika izmantotas apkures, karstā ūdens sagatavošanas un recirkulācijas slodzes. Balstoties uz iegūtajiem datiem, tika izvēlētas tehnoloģiskās iekārtas un risinājumi. Ņemot vērā siltumapgādes sistēmu specifiku esošajās ēkās, tika izstrādāta kombinētās sistēmas hidrauliskā koncepcija. Visi iepriekš noteiktie parametri tika izmantoti kombinētās sistēmas datorsimulācijas modeļa izveidei. Simulācijas rezultāti tika izmantoti sistēmas veikspējas līmeņatzīmes definēšanai, kā arī projekta atbilstības robežnosacījumu noteikšanai.

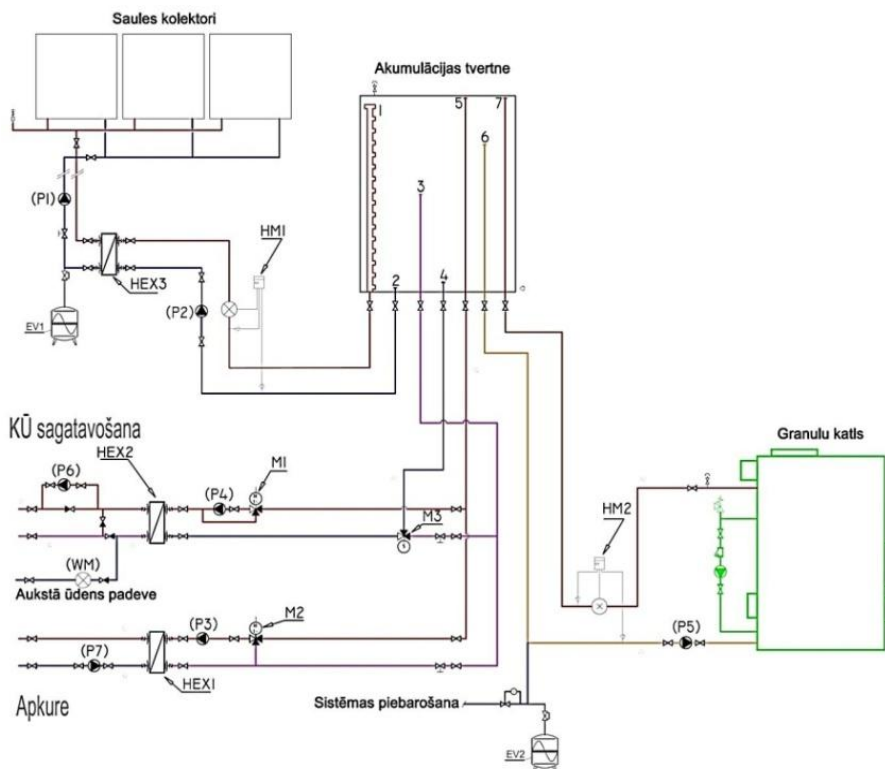


1. attēls. Kombinētās sistēmas darbības izpētes algoritms

Otrais algoritma realizācijas posms sākas ar sistēmas palaišanas brīdi. Šajā posmā tika vērtēti sistēmas darbības rezultāti un veikta sistēmas darbības optimizācija. Nepārtraukti tika veikts sistēmas darbības monitorings, kura rezultāti izmantoti sistēmas veiktspējas izvērtēšanai un salīdzināšanai ar iepriekš definēto līmeņatzīmi. Optimizācijas pasākumu izstrāde un izvērtēšana tika balstīta uz skaitlisko, laboratorijas un rūpniecisko eksperimentu rezultātiem.

1.3. Kombinētās sistēmas hidrauliskā slēguma koncepcija

Slēguma koncepcijas pamatā ir 5 sistēmas komponentes: saules kolektori ar hidrauliskajiem lokiem, granulu katls, siltuma akumulācijas tvertne, KŪ sagatavošanas loks un apkures loks, skatīt 2. attēlu.



2. attēls. Kombinētās sistēmas hidrauliskā slēguma koncepcija (HEX1 – apkures siltummainis, HEX2 – KŪ sagatavošanas siltummainis, HEX3 – saules loka siltummainis, M1 – KŪ jaucejvārsts, M2 – apkures jaucejvārsts, M3 – KŪ atgaitas trīsceļu vārsts, HM –SE skaitītāji, WM – ūdens skaitītājs, P – cirkulācijas sūkņi, EV – izplešanās tvertnes)

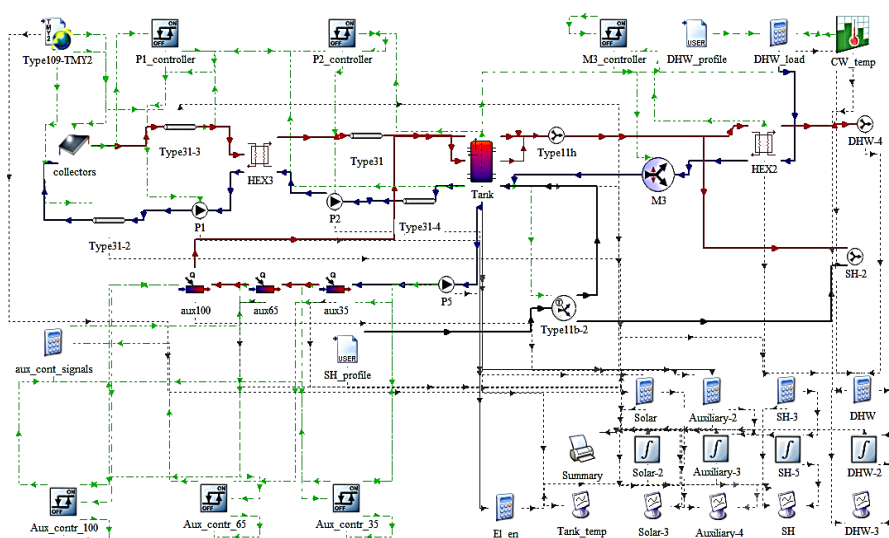
Hidrauliskā slēguma koncepcija paredz piecu funkciju izpildīšanu sistēmā: karstā ūdens sagatavošana un recirkulācija, apkures nodrošināšana, saules siltuma izmantošana un akumulācija, granulu katla izmantošana un siltuma akumulācija.

2. SAULES UN GRANULU KOMBINĒTĀS SISTĒMAS MODELĒŠANA

Matemātiski determinēts saules un granulu kombinētās sistēmas simulācijas modelis tika izveidots dinamisku pārejas procesu simulācijas programmā TRNSYS 16.1. (*Transient Simulation Tool*). Datorprogrammas darbības pamatā ir sistēmas atsevišķo komponentu matemātiskais apraksts un aprēķins.

2.1. Saules un granulu kombinētās sistēmas modelis TRNSYS vidē

Izveidotā datormodeļa uzbūve ir atspoguļota 3. attēlā, un tā atbilst sistēmas hidrauliskā slēguma koncepcijai (skatīt 2. attēlu). Izstrādātais modelis ir elastīgs un ir izmantojams dažādu sistēmas tehnisko risinājumu un patērētāju siltumenerģijas slodžu simulēšanai.



3. attēls. Saules un granulu kombinētās sistēmas datormodelēšanas modeļa uzbūves shēma TRNSYS Studio vidē

Balstoties uz skaitlisko eksperimentu rezultātiem, tika definēta atsaucis sistēma un līmeņatzīme, tika veikta tehnisko risinājumu ekonomiskā optimizācija un eksperimentālās sistēmas termiskās veiktspējas paaugstināšana.

2.2. Kombinētās sistēmas datormodeļa validācija

Validācija tika veikta, izmantojot monitoringa rezultātus, faktiskos vadības un darbības parametrus validācijas periodā. Par izejas datiem tika izmantota āra gaisa temperatūra, globālās saules radiācijas daudzums uz horizontālas virsmas, patērētā KŪ masas plūsma, aprēķinātās KŪ recirkulācijas un apkures slodzes. Absolūtās vērtības un starpība starp monitoringa un simulācijas rezultātiem ir dotas 1. tabulā.

1. tabula

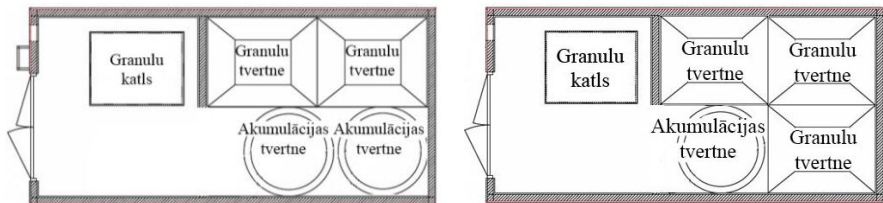
Monitoringa un simulācijas rezultātu salīdzinājums

Parametrs	Monitorings, °C vai MWh	Starpība, %
Akumulācijas tvertne		
Temperatūra tvertnes augšējā daļā	71,4	+ 0,6
Temp. tvertnes vidus augšējā daļā	39,4	- 0,5
Temp. tvertnes vidus apakšējā daļā	37,0	- 5,1
Temperatūra tvertnes apakšējā daļā	33,6	- 4,5
Granulu katls		
Temperatūra katla turpgaitā	75,7	- 3,4
Temperatūra katla atgaitā	67,5	- 1,9
Saules kolektori		
Temp. kolektoru sekundārā loka turpgaitā	50,2	- 8,0
Temp. kolektoru sekundārā loka atgaitā	38,0	- 7,9
Slodzes puse		
Karstā ūdens turpgaitas temperatūra	56,3	+ 1,4
Apkures turpgaitas temperatūra	38,3	+ 0,3
Siltumenerģijas patēriņš		
Siltumenerģija karstā ūdens sagatavošanai	0,807	+ 4,2
Siltumenerģija karstā ūdens recirkulācijai	0,623	+ 4,0
Siltumenerģija apkurei	2,790	+ 3,3
Kopā patērēts (bez zudumiem)	4,220	+ 3,6
Saražotā siltumenerģija		
Katlā iegūtā siltumenerģija	4,132	+ 3,4
Kolektoros iegūtā siltumenerģija	0,125	+ 3,2
Kopā iegūts (ar zudumiem)	4,257	+ 3,4

Datormodeļa iekšējās enerģijas balance uzrādīja 0,3 % starpību starp modelī iegūto un patērēto siltumenerģiju. Siltuma zudumi no akumulācijas tvertnes tika pieskaitīti patērētās enerģijas daudzumam.

2.3. Akumulācijas tvertnes tilpuma un kolektoru laukuma izvēle

Tehnoloģisko risinājumu izvēles stadijā tika izskatīti 2 varianti ar dažādu akumulācijas tvertņu skaitu un kopējo tilpumu, skatīt 4. attēlu.



A.

B.

4 attēls. Akumulācijas tvertņu izvietojuma varianti katlumājā
 (A. 2,35 m³ akumulācijas tilpums un 12 m³ granulu uzglabāšanai,
 B. 4,7 m³ akumulācijas tilpums un 8 m³ granulu uzglabāšanai)

Katra no alternatīvām ir tehnoloģiski realizējama, tādēļ tika veikta to ekonomiskā optimizācija. Risinājumu ekonomisko rādītāju izvērtēšanai tika izmantoti sistēmas darbības simulācijas rezultāti gada griezumā. Ekonomiskās optimizācijas mērķis ir izvēlēties alternatīvu (gan pēc akumulācijas tvertnes tilpuma, gan pēc saules kolektoru skaita) ar viszemākajām siltumenerģijas izmaksām. Kā optimizācijas mērķfunkcijas tika izvirzītas siltumenerģijas tarifa kapitālizmaksu ($E_{th, cap}$) un ekspluatācijas izmaksu ($E_{th, expl}$) komponentes, skatīt 1. un 2. formulu.

$$\min \{E_{th, cap} = f(I_{c, eq}, n_c, I_c, n_t, I_t, n_{pel, t}, I_{pel, t}, n_{year}, Q_{th})\} \quad (1)$$

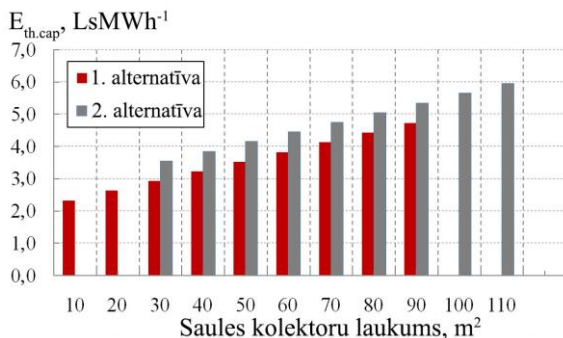
$$\min \{E_{th, expl} = g(Q_c, Q_{th}, I_{pel}, \eta_b, q_{net}, I_{transp}, m_{pel, t}, Q_{c, el}, Q_{b, el}, E_{el})\} \quad (2)$$

Kur,

- $I_{c, eg}$ – saules kolektoru apsaistes izmaksas, Ls;
- n_c – saules kolektoru skaits, gab.;
- I_c – saules kolektora izmaksas, Ls;
- n_t – akumulācijas tvertņu skaits, gab.;
- I_t – akumulācijas tvertnes izmaksas, Ls;
- $n_{pel, t}$ – granulu uzglabāšanas tvertņu skaits, gab.;
- $I_{pel, t}$ – granulu uzglabāšanas tvertnes izmaksas, Ls;
- n_{year} – ekspluatācijas periods, gadi;
- Q_{th} – patērētās siltumenerģijas daudzums, MWh gadā;
- Q_c – kolektoros iegūtās siltumenerģijas daudzums, MWh gadā;
- I_{pel} – granulu izmaksas, Lst⁻¹;
- η_b – granulu katla efektivitāte, - ;

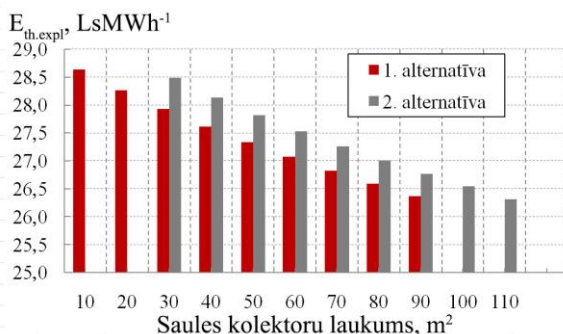
q_{net} – granulu zemākais sadegšanas siltums, MWh^{-1} ;
 I_{transp} – granulu piegādes izmaksas, Ls ;
 $m_{\text{pel.t}}$ – granulu uzglabāšanas tvertnes ietilpība, t ;
 $Q_{\text{c.el}}$ – kolektoru loku elektroenerģijas patēriņš, $\text{MWh}_{\text{el}}\text{MWh}_{\text{th}}^{-1}$;
 $Q_{\text{b.el}}$ – granulu katla elektroenerģijas patēriņš, $\text{MWh}_{\text{el}}\text{MWh}_{\text{th}}^{-1}$;
 E_{el} – elektroenerģijas tarifs, $\text{LsMWh}_{\text{el}}^{-1}$.

Kapitālizmaksu izmaiņas katrai alternatīvai atkarībā no uzstādītā kolektoru laukuma ir atspoguļotas 5. attēlā.



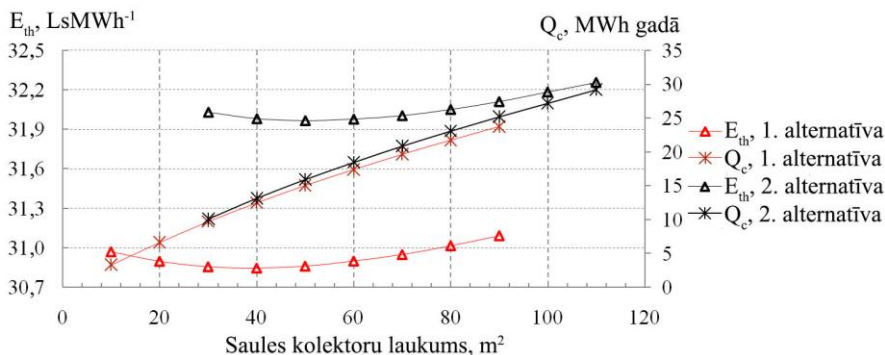
5. attēls. Siltumenerģijas kapitālizmaksu komponentes atkarība no uzstādīto kolektoru laukuma

Ekspluatācijas izmaksu izmaiņas katrai alternatīvai atkarībā no uzstādītā kolektoru laukuma ir atspoguļotas 6. attēlā.



6. attēls. Siltumenerģijas ekspluatācijas izmaksu komponentes atkarība no uzstādīto kolektoru laukuma

Kopējo siltumenerģijas izmaksu (E_{th}) un kolektoros iegūtās siltumenerģijas daudzuma (Q_{c}) izmaiņas atkarībā no uzstādīto kolektoru laukuma ir atspoguļotas 7. attēlā.

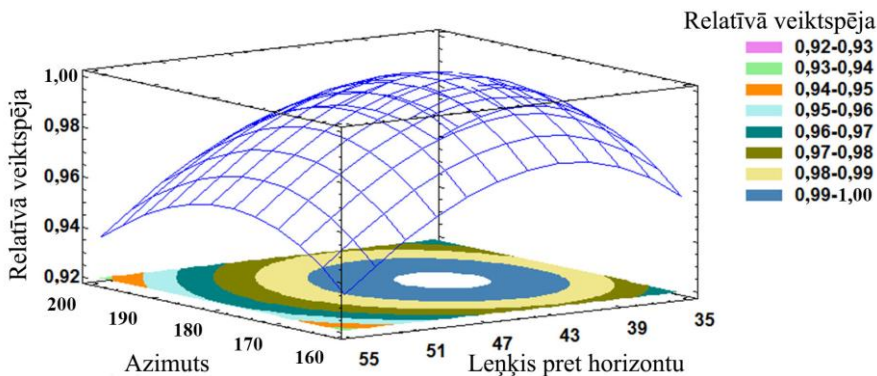


7. attēls. Siltumenerģijas izmaksu un kolektoros iegūtās siltumenerģijas izmaiņas katrai alternatīvai atkarībā no kolektoru laukuma

Analīzes rezultāti uzrāda, ka alternatīva ar vienu akumulācijas tvertni, trim granulu uzglabāšanas tvertnēm un 40 m² saules kolektoru ir ekonomiski visizdevīgākā eksperimentālās sistēmas izveidošanai.

2.4. Saules kolektoru izvietojuma pamatojums

Lai noteiktu optimālo saules kolektoru uzstādīšanas leņķi, tika izmantota sistēmas darbības simulācija gada griezumā. Par optimizācijas mērķfunkciju tika izvirzīta kolektoru relatīvā termiskā veikspēja atkarībā no kolektoru uzstādīšanas leņķa un azimuta, skatīt 8. attēlu.



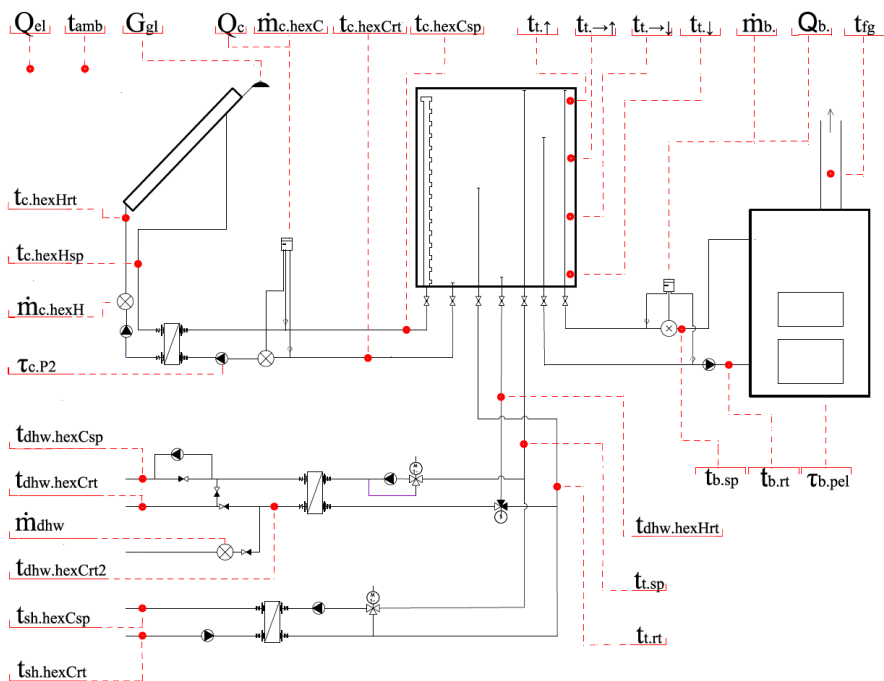
8. attēls. Kolektoru relatīvā termiskā veikspēja atkarībā no uzstādīšanas leņķa un orientācijas pret dienvidiem

Balstoties uz analīzes rezultātiem, tika secināts, ka optimāls saules kolektoru uzstādīšanas risinājums ir 45° leņķis pret horizontu un 0° grādu azimuta leņķis.

3. SAULES UN GRANULU KOMBINĒTĀS SISTĒMAS MONITORINGS

Saules un granulu kombinētās sistēmas eksperimentālais prototips tika uzstādīts pie daudzdzīvokļu ēkas Kr. Barona ielā 2, Siguldā (N 57° 09.410 E 024° 52.194). Paralēli sistēmas uzstādīšanai tika veikta ēkas kompleksā renovācija. Sistēma tika projektēta renovētās ēkas siltuma slodžu segšanai. Tika izmantots tehniskais risinājums ar vienu 2,35 m³ akumulācijas tvertni (skatīt 4. attēlu), 100 kW granulu katls un saules kolektori ar kopējo laukumu 42 m².

Pēc eksperimentālās sistēmas palaišanas tika uzsākts sistēmas monitorings. Monitoringa shēma ir atspoguļota 9. attēlā.



9. attēls. Eksperimentālās sistēmas monitoringa shēma

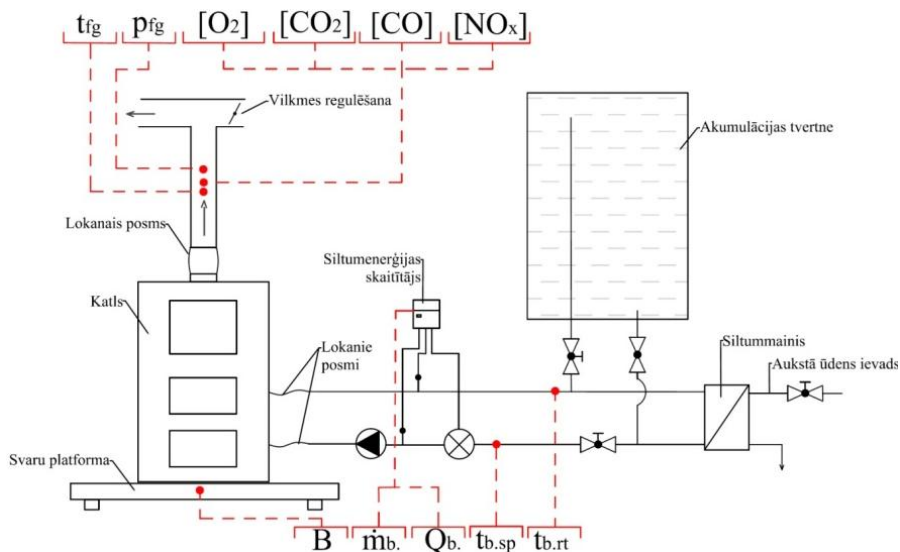
Darbā tika veikts sistēmas darbības monitoringa rezultātu apkopojums, kas galvenokārt tika izmantots potenciālo optimizācijas pasākumu un uzdevumu definēšanai. Balstoties uz monitoringa rezultātiem tika veikta pirmā gada sistēmas darbības rezultātu analīze un salīdzināšana ar definēto līmeņzīmi.

4. SAULES UN GRANULU KOMBINĒTĀS SISTĒMAS OPTIMIZĀCIJA

Darba ietvaros tika veikta kompleksā sistēmas optimizācija, kas iekļāva katla vadības algoritmu, degšanas procesa, kolektoru loku darbības parametru optimizāciju. Tika veikta caurplūdes KŪ recirkulācijas lokā ietekmes uz sistēmas veiktspēju analīze un optimizācija.

Tika izstrādāts sezonāls katla vadības algoritms, kas ļāva samazināt temperatūras režīmu sistēmā un novērst akumulācijas tvertnes pārkarsēšanu. Rezultātā, salīdzinot ar atsaucis sistēmu, vidējā temperatūra akumulācijas tvertnes augšā gada griezumā samazinājās par 5,2 K un ārpus apkures sezonas – par 7,3 K, kolektoros saražotās enerģijas daudzums (Q_c) pieauga par 10,6 %, enerģijas patēriņa samazinājuma īpatsvars ($f_{sav.th}$) un paplašinātā primārās enerģijas patēriņa samazinājuma īpatsvara ($f_{sav.ext}$) attiecīgi pieauga par 0,4 un 0,3 absolūtajiem procentiem.

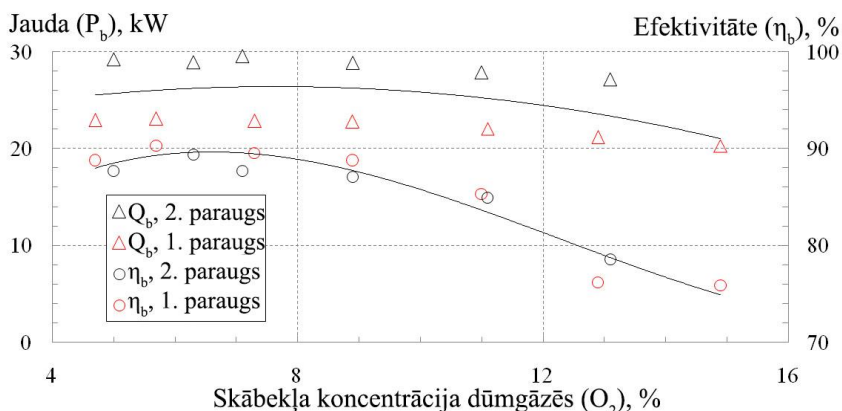
Lai noteiktu degšanas gaisa daudzuma ietekmi uz katla veiktspēju, laboratorijā konstantas slodzes apstākļos tika veikti eksperimenti ar 25 kW granulu katlu. Eksperimentiem tika izmantots RTU Vides monitoringa laboratorijas katlu testēšanas stends, skatīt 10. attēlu.



10 . attēls. Laboratorijas katlu testēšanas stenda shēma un mēramie parametri

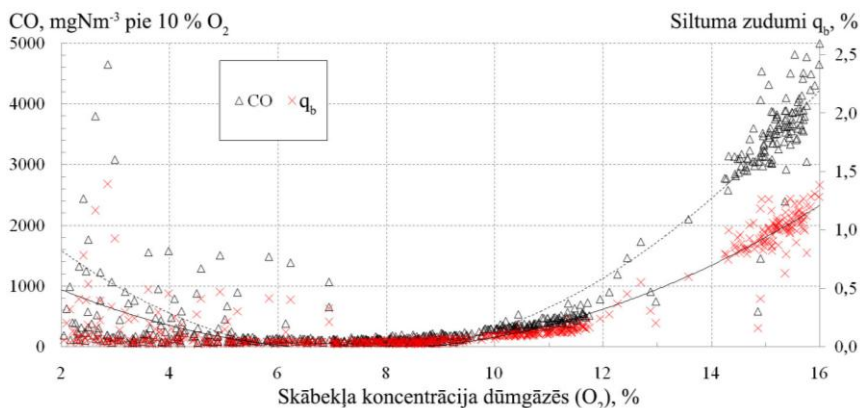
Izmantojot divus granulu paraugus, tika veikti 13 eksperimenti. Rezultāti uzrāda optimumu starp O_2 koncentrāciju dūmgāzēs un katla jaudu, efektivitāti, CO emisijām un zudumiem ar aizejošajām dūmgāzēm, skatīt 11. attēlu.

Visas minētās sakarības ir aprakstāmas ar polinoma funkcijām. Visaugstākā katla efektivitāte tika sasniegta pie 5,6 % O_2 dūmgāzēs, bet viszemākās CO emisijas pie 7,8 %.



11. attēls. Laboratorijas eksperimenti ar 25 kW katlu. Katla jaudas (P_b) un efektivitātes (η_b) izmaiņas atkarībā no O_2 koncentrācijas dūmgāzēs

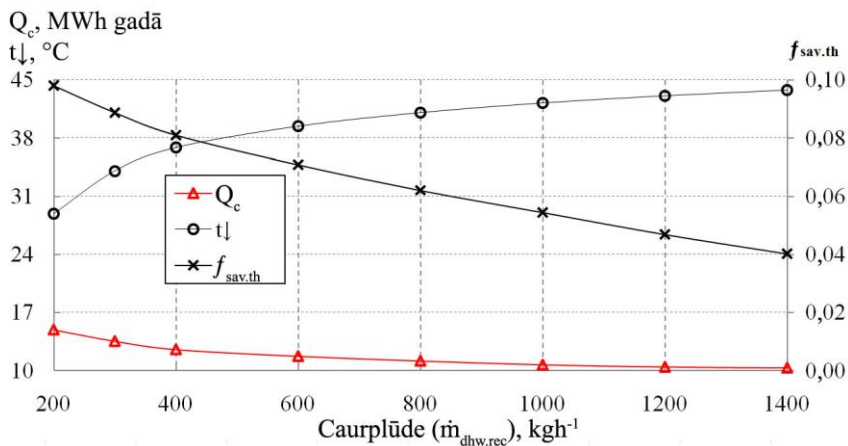
Kombinētās sistēmas monitoringa rezultāti liecina par O_2 koncentrācijas pieaugumu dūmgāzēs, katlam strādājot 65 kW un 35 kW jaudas režīmos. Veicot mērījumus, tika noteiktas CO koncentrācijas un ķīmiski nepilnīgas degšanas siltuma zudumu (q_b) izmaiņas atkarībā no O_2 koncentrācijas dūmgāzēs, skatīt 12. attēlu.



12. attēls. Rūpnieciskais eksperiments ar 100 kW katlu. CO koncentrācijas un siltuma zudumu (q_b) izmaiņas atkarībā no O_2 koncentrācijas dūmgāzēs

Veicot modifikācijas katla vadības algoritmā, tika samazināts kurtuvē padotā gaisa daudzums. Optimizācijas rezultātā siltuma zudumi ar dūmgāzēm (q_a) tika samazināti par 1,6 % un zudumi q_a par 0,17 %, kas ļauj paaugstināt $f_{sav.th}$ un $f_{sav.ext}$ attiecīgi par 2 %-punktiem un 1,8 %-punktiem.

Darba ietvaros tika pētīta caurplūdes KŪ recirkulācijas lokā ($\dot{m}_{dhw.rec}$) ietekme uz sistēmas darbības rādītājiem. Tika noteikts, ka caurplūde $\dot{m}_{dhw.rec}$ ir galvenais faktors, kas nosaka temperatūru tvertnes apakšā ($t_{\downarrow}$) un kolektoru veikspēju, skatīt 13. attēlu.



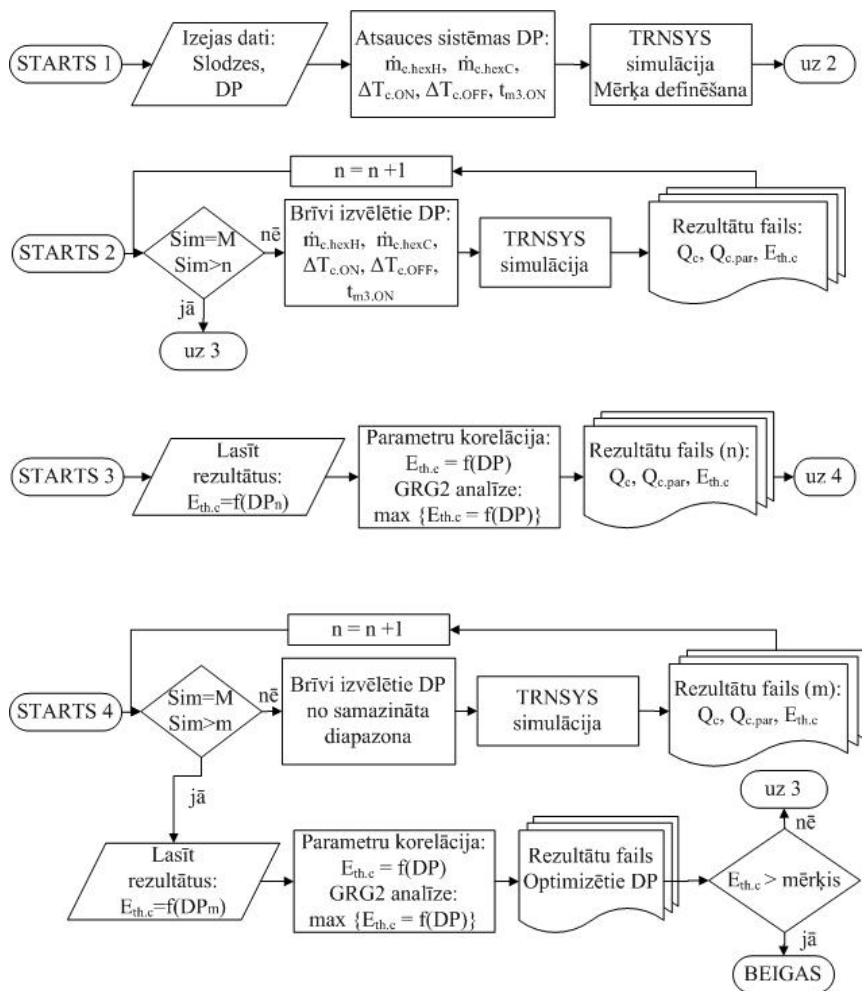
13. attēls. Kolektoros iegūtās siltumenerģijas (Q_c), enerģijas patēriņa samazinājuma īpatsvars ($f_{sav.th}$) un temperatūras tvertnes apakšā ($t_{\downarrow}$) izmaiņas atkarībā no caurplūdes KŪ recirkulācijas lokā ($\dot{m}_{dhw.rec}$)

Samazinot recirkulētā KŪ caurplūdi no 1400 kg/h līdz 295 $kg\cdot h^{-1}$, tika panākts kolektoros iegūtās enerģijas paaugstinājums par 31 % jeb 3,21 MWh gadā. Par 20 % jeb 5,12 MWh gadā samazinājās siltumenerģijas patēriņš karstā ūdens recirkulācijai. Ņemot vērā siltumenerģijas patēriņa samazinājumu, $f_{sav.th}$ un $f_{sav.ext}$ vērtības pieauga attiecīgi par 9,6 %-punktiem un 9,5 %-punktiem.

Darbā tika izstrādāta metodika kompleksai sistēmas darbības parametru (DP) optimizācijai. Izstrādātā metodika ir balstīta uz TRNSYS simulācijas modeļa izmantošanu un vairāku parametru nelineārās regresijas analīzi. Izstrādātais optimizācijas metodikas algoritms ir atspoguļots 14. attēlā, un tas sastāv no šādiem soļiem:

- mērķfunkcijas definēšana un matemātiskā izteikšana;
- ieguvumu aprēķins atsaucēs sistēmai, robežvērtību definēšana;
- dinamiskā simulācija, no iespējamā diapazona izmantojot brīvi izvēlētas darbības parametru vērtības;

- vairāku parametru regresijas analīze starp simulācijas rezultātiem un izvēlēto parametru kombinācijām;
- stāvā kāpuma metodes izmantošana nelineārā regresijas vienādojuma optimizācijai, lai atrastu parametru kombināciju ar maksimālo vai minimālo rezultātu;
- atkārtota simulācija ar parametru vērtībām no samazināta diapazona;
- regresijas vienādojuma optimizācija samazinātajā diapazonā un optimālās DP vērtību kombinācijas noteikšana.



14. attēls. Sistēmas darbības parametru optimizācijas algoritms

Metodika tika aprobēta, optimizējot šādus eksperimentālās sistēmas darbības parametrus:

- caurplūde primārajā kolektoru lokā ($\dot{m}_{c,hexH}$);
- caurplūde sekundārajā kolektoru lokā ($\dot{m}_{c,hexC}$);
- temperatūras starpība kolektoru loka ieslēgšanai ($\Delta T_{c,ON}$);
- temperatūras starpība kolektoru loka izslēgšanai ($\Delta T_{c,OFF}$);
- vārsta M3 aktivācijas temperatūra ($t_{M3,ON}$).

Par optimizācijas mērķfunkciju tika izvēlēti naudas vienībās izteikti ieguvumi no saules enerģijas ($E_{th,c}$), skatīt 3. vienādojumu.

$$\max \{E_{th,c}=f(t_{c,\Delta t,ON}, t_{c,\Delta t,OFF}, \dot{m}_{c,hexH}, \dot{m}_{c,hexC}, t_{M3,ON})\} \quad (3)$$

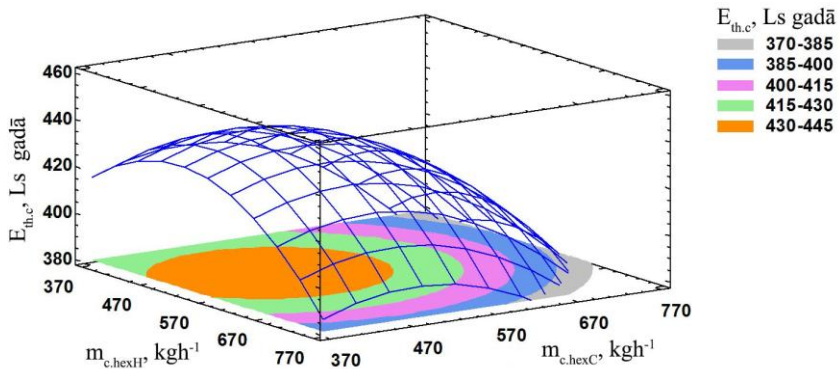
Ieguvumi tiek aprēķināti ar 4. vienādojumu:

$$E_{th,c} = \frac{Q_c \cdot I_{pel}}{\eta_b \cdot q_{net}} + \frac{Q_c \cdot I_{transp}}{\eta_b \cdot q_{net} \cdot m_{pel,t}} + Q_c \cdot Q_{b,el} \cdot E_{el} - Q_{c,el} \cdot E_{el} \quad (4)$$

Tika veiktas 100 simulācijas ar brīvi izvēlētām DP vērtībām definētajā diapazonā. Iegūtie rezultāti tika apstrādāti STATGRAPHICS Centurion 16.1.15 programmā otrās pakāpes polinoma regresijas vienādojuma iegūšanai (Markarta metode). Iegūtais regresijas vienādojums tiek optimizēts, izmantojot stāvā kāpuma (GRG2) metodi SOLVER vidē, un tiek noteikta optimālo DP kombinācija. Procedūra tika atkārtota, samazinot DP iespējamo vērtību intervālu un veicot papildu 50 simulācijas.

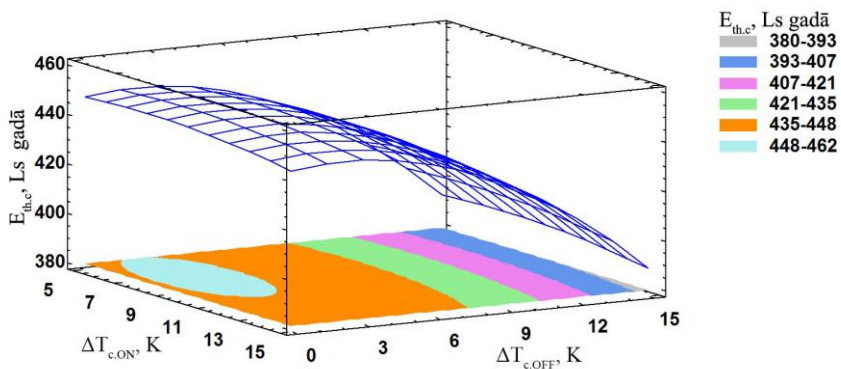
Rezultātā tika iegūta šāda optimizēto darbības parametru kombinācija: $\dot{m}_{c,hexH} = 514 \text{ kg h}^{-1}$, $\dot{m}_{c,hexC} = 447 \text{ kg h}^{-1}$, $\Delta T_{c,ON} = 7 \text{ K}$; $\Delta T_{c,OFF} = 2 \text{ K}$, $t_{M3,ON} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Iegūtās darbības parametru vērtības tika integrētas eksperimentālās sistēmas darbībā. Ieguvumu $E_{th,c}$ izmaiņas atkarībā no caurplūdes abos kolektoru lokos ir atspoguļotas 15. attēlā.



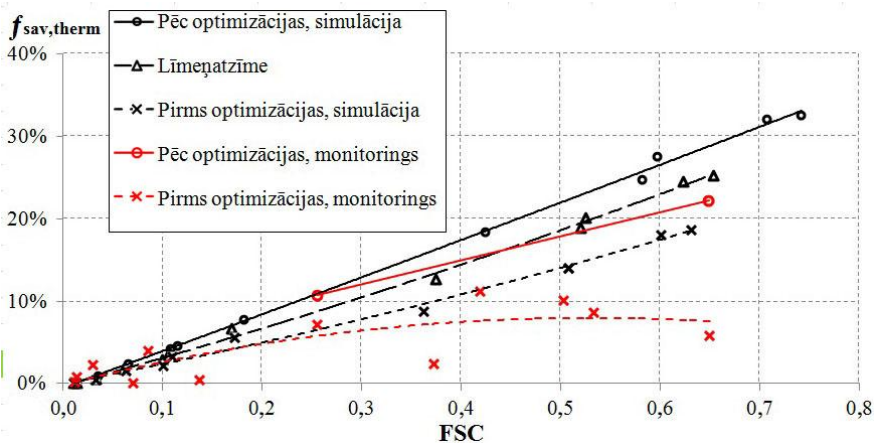
15. attēls. Ieguvumu $E_{th,c}$ izmaiņas atkarībā no caurplūdes $\dot{m}_{c,hexH}$ un $\dot{m}_{c,hexC}$.
Pie $\Delta T_{c,ON} = 8$ K, $\Delta T_{c,OFF} = 2$ K un $t_{M3,ON} = 28$ °C

Ieguvumu no saules kolektoriem ($E_{th,c}$) izmaiņas atkarībā no kolektoru loku vadības kontroliera uzstādījumiem ($\Delta T_{c,ON}$ un $\Delta T_{c,OFF}$) ir atspoguļotas 16. attēlā.



16. attēls. Ieguvumu $E_{th,c}$ izmaiņas atkarībā no temperatūras starpības cirkulācijas sūkņu ieslēgšanai ($\Delta T_{c,ON}$) un izslēgšanai ($\Delta T_{c,OFF}$). Pie $\dot{m}_{c,hexH} = 519$ kg h⁻¹,
 $\dot{m}_{c,hexC} = 481$ kg h⁻¹ un $t_{M3,ON} = 28$ °C

Visi izstrādātie optimizācijas pasākumi tika realizēti eksperimentālajā sistēmā. Eksperimentālās sistēmas un simulācijas modeļa optimizācijas rezultāti ir atspoguļoti 17. attēlā.



17. attēls. Eksperimentālās sistēmas un simulācijas modeļa optimizācijas rezultāti. Saules enerģijas patēriņa īpatsvara (FSC) un enerģijas patēriņa samazinājuma īpatsvars $f_{\text{sav.th}}$ izmaiņas

Salīdzinājumā ar atsaucē sistēmu optimizētajā simulācijas modelī tika panākts $f_{\text{sav.th}}$ pieaugums par 8,5 %-punktiem un $f_{\text{sav.ext}}$ par 8,2 %-punktiem gada griezumā.

SECINĀJUMI

1. Šajā darbā ir definēti robežnosacījumi pilnībā uz atjaunojamo energoresursu izmantošanas balstītās saules kombinētās sistēmas izveidošanai daudzdzīvokļu ēku siltumapgādei. Robežnosacījumi nosaka sistēmas moduļveida un hidrauliskās koncepcijas izveides principus, tehnisko risinājumu un atbilstošo daudzdzīvokļu ēku izvēli.
2. Moduļveida saules un granulu kombinētās sistēmas koncepcija ietver šādus neatkarīgus mainīgos: brīvā vieta granulu katla uzstādīšanai, siltuma akumulācijas tehnoloģiju un granulu uzglabāšanas tvertņu kopējais tilpums.
3. Kombinētās sistēmas matemātiski determinēts modelis ir aprakstīts ar tehniskiem un darbības parametriem, kuri, balstoties uz eksperimentālās sistēmas monitoringa rezultātiem, tika validēti TRNSYS programmas vidē. Par validācijas periodu tika izvēlēta viena nedēļa. Izstrādātais simulācijas modelis apraksta eksperimentālo sistēmu, un validācijas rezultāti iekļaujas iepriekš definētajos robeždiapazonos: $\pm 10 \%$ dinamisko parametru vidējām vērtībām, $\pm 5 \%$ iegūtās un patērētās enerģijas akumulētajiem daudzumiem un $\pm 1 \%$ modeļa iekšējai enerģijas bilancei. Izstrādātais simulācijas modelis ir izmantojams līdzīgu saules enerģijas sistēmu izpētei un optimizācijai.
4. Balstoties uz sistēmas simulācijas rezultātiem ir definētas šādas līmeņatzīmju vērtības: saules enerģijas patēriņa īpatsvars (FSC) - 0,15, enerģijas patēriņa samazinājuma īpatsvars ($f_{\text{sav.th}}$) - 0,051 un paplašinātā primārās enerģijas patēriņa samazinājuma īpatsvars ($f_{\text{sav.ext}}$) - 0,05. Definētās līmeņatzīmju vērtības ir izmantotas eksperimentālās sistēmas darbības analīzei un optimizācijai.
5. Dažādu tehnisko risinājumu izvēle ir balstīta uz ekonomisko optimizāciju. Optimizācijas kritēriji ir zemākās ekspluatācijas un kapitālizmaksu komponentu vērtības. Optimizācijas mērķfunkcijas ietver šādus neatkarīgus mainīgos: saules kolektoru skaits un izmaksas, kolektoru apsaistes izmaksas, granulu uzglabāšanas tvertņu skaits, ietilpība un izmaksas, akumulācijas tvertņu skaits un izmaksas, iekārtu ekspluatācijas laiks, kopējais siltumenerģijas patēriņš, kolektoros iegūtās enerģijas daudzums, granulu cena un zemākais sadegšanas siltums, katla efektivitāte, granulu piegādes izmaksas, katla un kolektoru elektroenerģijas patēriņš un elektroenerģijas izmaksas. Balstoties uz rezultātiem, par optimālo ir izvēlēts risinājums ar vienu akumulācijas tvertni un 40 m² saules kolektoru.
6. Darba ietvaros tika izstrādāta sistēmas darbības parametru optimizācijas metodika, kas ļauj ar minimālu resursu un laika patēriņu noteikt optimālu darbības parametru kombināciju. Metodika ņem vērā darbības parametru

savstarpējo ietekmi un ir īpaši piemērota kompleksu sistēmu analīzei un optimizācijai. Optimizācijas metodikas algoritms iekļauj sistēmas darbības simulāciju TRNSYS vidē, vairāku parametru nelineāro regresijas analīzi un stāvā kāpuma metodes izmantošanu regresijas vienādojumu optimizācijai. Izstrādātā metode tika aprobēta eksperimentālās sistēmas piecu darbības parametru optimizācijai.

7. Darba ietvaros ir analizēti triju veidu eksperimentālie dati, kuri ir iegūti skaitlisko, laboratorijas un rūpniecisko eksperimentu rezultātā. Analīzes rezultātā ir izveidoti statistiskie modeļi, kas noteiktajā diapazonā raksturo sakarības starp šādiem parametriem:
 - kolektoru veiktspējas izmaiņas atkarībā no orientācijas pret dienvidiem (160 – 200 azimuta grādos) un uzstādīšanas leņķi pret horizontu (35 – 55° diapazonā);
 - kolektoru loka efektivitātes izmaiņas atkarībā no temperatūras akumulācijas tvertnes apakšā (10 – 70 °C diapazonā);
 - temperatūras akumulācijas tvertnes apakšā, siltumenerģijas patēriņa karstā ūdens recirkulācijai, kolektoros saražotās enerģijas daudzuma un $f_{sav.th}$ izmaiņas atkarībā no caurplūdes karstā ūdens recirkulācijas lokā (200 – 1400 kg h⁻¹ diapazonā);
 - 25 kW granulu katla jaudas, efektivitātes, zudumu ar aizejošām dūmgāzēm un CO emisiju izmaiņas atkarībā no O₂ koncentrācijas dūmgāzēs (4,7 – 14,9 %);
 - eksperimentālajā sistēmā uzstādītā 100 kW granulu katla CO emisiju un zudumu ar aizejošām dūmgāzēm izmaiņas atkarībā no O₂ koncentrācijas (2,1 – 16,0 % diapazonā);
 - ieguvumu no saules kolektoru izmantošanas izmaiņas atkarībā no šādiem darbības parametriem: caurplūde kolektoru primārajā un sekundārajā lokos (371 – 700 kg h⁻¹), temperatūras starpība cirkulācijas sūkņu ieslēgšanai (2 – 15 °C) un izslēgšanai (1 – 14 °C), kā arī trīsceļa vārsta M3 aktivācijas temperatūra (20 – 40 °C).
8. Izstrādātie optimizācijas pasākumi ievērojami paaugstina kombinētās sistēmas modeļa veiktspēju. Salīdzinājumā ar atsauces sistēmu optimizētajā simulācijas modelī ir panākts $f_{sav.th}$ pieaugums par 8,5 %-punktiem un $f_{sav.ext}$ par 8,2 %-punktiem. Samazinot caurplūdi karstā ūdens recirkulācijas lokā, ir panākts saules enerģijas patēriņa īpatsvara (FSC) pieaugums par 3 %-punktiem. Darba ietvaros iegūtie rezultāti izmantoti eksperimentālās sistēmas darbināšanai optimālajā režīmā. Balstoties uz divu mēnešu monitoringa rezultātiem, ir secināts, ka eksperimentālajā sistēmā ir iespējams sasniegt definēto līmeņatzīmi un simulācijas modeļa veiktspēju.