

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



Ģirts VĪGANTS

ZEMA OGLEKĻA SILTUMAPGĀDES SISTĒMAS

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2015

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

Ģirts VĪGANTS
Doktora studiju programmas „Vides zinātne” doktorants

ZEMA OGLEKĻA SILTUMAPGĀDES SISTĒMAS

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji
Dr. habil. sc. ing., profesore
D. BLUMBERGA
Dr. habil. sc. ing., profesors
I. VEIDENBERGS

Rīga 2015

UDK 697.34(043.2)
Vī 323 z

Vīgants Ģ. Zema oglekļa siltumapgādes sistēmas.
Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU, 2015. – 47 lpp.

Iespiests saskaņā ar Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta
2015. gada 22. janvāra lēmumu, protokols Nr. 50.

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda projekta „Atbalsts RTU doktora studiju
īstenošanai” atbalstu.



ISBN 978-9934-542-01-5

**PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU
DOKTORA GRĀDA VIDES INŽENIERZINĀTNĒ IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora zinātniskā grāda Vides zinātnes nozares apakšnozarē “Vides inženierzinātne” iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada 11. jūnijā plkst. 14:00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Rīgā, Āzenes ielā 12/1 115. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr.sc.ing. Gatis Bažbauers
Rīgas Tehniskā universitāte

Dr.sc.ing. Andres Siirde
Tallinn University of Technology, Igaunija

Dr.ing. Ingo Weidlich
Fernwärme-Forschungsinstitut/District Heating Research Institute, Vācija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora zinātniskā grāda Vides zinātnes nozares apakšnozarē “Vides inženierzinātne” iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Ģirts Vīgants (paraksts)

Datums: 11.06.2015.

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā un satur ievadu, 3 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 33 zīmējumus un ilustrācijas, 3 tabulas, tam pievienotas 5 autora publikācijas. Literatūras sarakstā ir 89 nosaukumi.

SATURS

Darba aktualitāte	7
Darba mērķis un uzdevumi	7
Pētījumu metodika	7
Darba zinātniskā novitāte.....	8
Darba praktiskā nozīme	8
Darba uzbūve un raksturojums	8
Promocijas darba autora veikto Ludzas pilsētas centralizētās siltumapgādes sistēmas pētījumu pārskats	9
Pētījumu pārskata ievads.....	9
Izmantoto risinājumu īss raksturojums	9
Darba aprobācija	12
Ziņojumi konferencēs.....	12
Autora publikācijas	13
1. IZPĒTES METODIKAS	15
1.1. Ludzas centralizētās siltumapgādes sistēmas apraksts	15
1.1.1. Siltumapgādes sistēmas avota raksturojums	15
1.1.2. Siltumapgādes sistēmas siltuma tīklu raksturojums.....	15
1.2. Siltumsūkņa integrācija siltumapgādes sistēmā.....	15
1.2.1. Siltumsūkņa pieslēgums	15
1.2.2. Siltumapgādes sistēmas ar siltumsūkni modelēšana	16
1.3. Kondensatora nomogrammas izveides metodika.....	18
1.4. Šķeldas katlu mājas ar gāzes kondensatoru energovadība.....	20
1.5. Dūmgāzu kondensatora lietojuma siltumapgādes sistēmas avotā ekonomiskā analīze.....	22
1.5.1. Kurināmā izmaksas katlam un katlam ar kondensatoru.....	22
1.5.2. Kondensatora darbības izmaksas	25
1.6. Dūmgāzu kondensatora lietojuma siltumapgādes sistēmā ekointensitātes izpētes metodika.....	26
1.6.1. Siltumapgādes sistēmas darbības ekointensitāte	26
1.6.2. Siltumapgādes sistēmas ekointensitātes vērtēšanas modelis.....	27
1.6.3. Katlu mājas ekointensitātes vērtēšanas modelis.....	30
2. IZPĒTES REZULTĀTI UN TO ANALĪZE	32

2.1. Siltumsūkņa integrācijas siltumapgādes sistēmā rezultāti	32
2.1.1. Siltumsūkņa lietojuma modeļa testēšana Ludzas siltumapgādes sistēmai	32
2.1.2. Modelēšanas rezultāti un to analīze	33
2.2. Kondensatora nomogrammas izveides rezultāti	35
2.2.1. Kondensatora parametru mijiedarbības sakarības	35
2.2.2. Katla un kondensatora slodzes sadalījums	37
2.3. Šķeldas katlu mājas ar gāzes kondensatoru energovadības izpētes rezultāti un to analīze	39
2.4. Dūmgāzu kondensatora lietojuma siltumapgādes sistēmas avotā ekonomiskās analīzes rezultāti	42
2.4.1. Katla ar kondensatoru kurināmā izmaksu analīze	42
2.4.2. Kondensatora darbības izmaksu analīze	42
2.5. Dūmgāzu kondensatora lietojuma siltumapgādes sistēmas avotā ekointensitātes analīzes rezultāti	44
2.5.1. Katlu mājas darbības eksperimenta rezultāti	44
2.5.2. Siltumapgādes sistēmas darbības ekointensitātes analīzes rezultāti	45
Secinājumi	46

Darba aktualitāte

Eiropas Savienība pēdējos gados ir izdevusi vairākas direktīvas un regulas, kas nosaka un reglamentē atjaunojamo energoresursu īpatsvara pieaugumu dalībvalstu primāro energoresursu bilancēs, kā arī enerģijas patēriņa samazinājumu uz energoefektivitātes paaugstināšanas rēķina. Vissvarīgākās ir trīs direktīvas: energoservisa, atjaunojamo energoresursu, energoefektivitātes, jo tās ietekmēs valstu energosektoru attīstību ilgtermiņā.

Ne mazāk svarīgu lomu spēlē īstermiņa uzstādījumi enerģijas un klimata paketē, kas sasniedzami līdz 2020. gadam. Tas arī apliecina, cik svarīgs ir siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājuma jautājums, kas nosaka energosektora ietekmi uz globālajām klimata pārmaiņām. Zema oglekļa energosistēmu ar minimālu fosilā energoresursa īpatsvaru un maksimāli augstu energoefektivitāti attīstība ir ne tikai inovatīvs risinājums valsts mērogā, bet arī cilvēces izdzīvošanas jautājums.

Ziemeļvalstīs un Baltijas valstīs būtisks energosektora spēlētājs ir centralizētā siltumapgāde, uz kuras darbību attiecas visas iepriekšminētās Eiropas Savienības direktīvas, kā arī klimata un enerģijas paketes mērķi. Centralizētās siltumapgādes sistēmas darbības efektivitāte ir atkarīga no visu trīs tās komponentu – energoavota, siltuma tīklu un enerģijas patērētāja – energoefektivitātes.

Nenoliedzami, svarīga ir katras atsevišķas komponentes darbības efektivitāte. Īpašu uzmanību prasa katlu mājas darbības energoefektivitāte mainīgos darbības režīmos, dzīvojamo māju atšķirīgā siltumenerģijas patēriņa izmaiņas, kā arī siltuma tīklu zudumu plašais diapazons. Tomēr visbūtiskākais ieguvums var tikt sasniegts, ja analīze ir vērsta uz centralizēto siltumapgādes sistēmu (CSS) kopumā – kā vienotu veselumu. Lai izvērtētu un analizētu CSS energoefektivitātes paaugstināšanas iespējas, nepieciešama ne tikai objektīvas darbības efektivitātes noteikšanas metodika, bet arī indikatori, kas visprecīzāk ļauj noteikt un izvērtēt tehnoloģiskos, ekonomiskos, vides un klimata aspektus, kuri balstās ne tikai uz līdzšinējās centralizētās siltumapgādes sistēmas darbināšanas pieredzes analīzi, bet arī ļauj prognozēt primāro energoresursu samazināšanas potenciālu.

Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir izveidot un aprobēt metodes siltumapgādes sistēmu esošo un jaunu tehnoloģisko risinājumu novērtēšanai energoefektivitātes, izmaksu un vides aizsardzības aspektā. Mērķa sasniegšanai risināmi šādi uzdevumi:

1. dūmgāzu kondensatora un siltumsūkņa integrācijas siltumapgādes sistēmā iespēju un rezultātu analīze;
2. katlu mājas ar kondensatoru darbības novērtējuma diagrammas izstrāde;
3. energopārvaldības izveide sistēmas energoavotā, nosakot energoefektivitāti raksturojošus indikatorus, līmeņatzīmes un rādītāju izmaiņas;
4. dūmgāzu kondensatora lietojuma sistēmas energoavotā ekonomiskais novērtējums, balstoties uz darbināšanas datu analīzi;
5. siltumapgādes sistēmas ietekmes uz vidi novērtējums.

Pētījumu metodika

Darba izstrādē ir izmantotas divas izpētes pieejas. Pirmā ir saistīta ar modeļu izveidi un pētāmo lielumu modelēšanu. Tas attiecas uz siltumsūkņa integrācijas siltumapgādes sistēmā un sistēmas ekointensitātes izpēti. Otrās pieejas pamatā ir rūpnieciskais eksperiments vai uzņēmuma darbības datu statistiskā apstrāde, izmantojot korelācijas un regresijas analīzes metodes, rezultātā iegūstot empīriskus vienādojumus, kurus izmanto parametru izmaiņu

modelēšanā. Visos gadījumos, kur tas ir iespējams, modelēšanas rezultāti salīdzināti ar eksperimenta datiem.

Darba zinātniskā novitāte

Ir veikta kompleksa siltumapgādes sistēmas energoefektivitātes paaugstināšanas iespēju izpēte dūmgāzu kondensatora un siltumsūkņa lietojuma gadījumā. Izvērtēta energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumu ietekme uz vidi, izmantojot ekointensitātes rādītājus.

Izstrādāta jauna siltumsūkņa integrācijas shēma siltumapgādes sistēmas atgaitas siltuma izmantošanai patērētāju siltuma slodzes daļējai segšanai. Izstrādāts modelis un veikta siltumsūkņa darbības modelēšana mainīgos klimatiskajos apstākļos. Izstrādāta un aprobēta nomogramma katlu mājas slodzes sadalījumam starp katlu un kondensatoru, kura izmantojama siltumapgādes sistēmas pašreizējās darbības novērtējumam, kā arī prognozēm.

Darba praktiskā nozīme

Siltumapgādes sistēmas energoefektivitātes paaugstināšanas pētījumi ir svarīgs solis energoefektīvai atjaunojamo energoresursu izmantošanai Latvijas energosektorā. Darba rezultātam ir praktiska nozīme gan valstiskā, gan reģionālā un pašvaldību līmenī. Jebkurā katlu mājā, kurā dedzina šķeldu, energoefektivitātes uzlabošanas nolūkā var uzstādīt gāzes kondensatoru un iegūt energoresursu patēriņa samazinājumu līdz 20 %.

Siltumsūkņa lietojuma novērtējumam izmantojams promocijas darbā piedāvātais datormodelis, kas ļauj novērtēt siltumapgādes sistēmas atgaitas ūdens temperatūras pazeminājumu un katlu mājā uzstādītā dūmgāzu kondensatora efektivitātes paaugstinājumu.

Sistēmas energoefektivitātes nodrošināšanai izmantojamas katlu mājas energopārvaldībai piedāvātās īpatnējā kurināmā patēriņa un īpatnējā kurināmā patēriņa pieauguma līmeņatzīmes.

Kopumā izpētes rezultāti izmantojami, lai plānotu energoefektivitātes pasākumus un noteiktu pasākumu ietekmi uz siltumapgādes sistēmas darbību, kā arī veiktu sistēmu attīstības projektu izpēti un novērtētu sistēmas ieviešanas un ekspluatācijas rādītājus, ietverot gan tehniskos ierobežojumus un iespējas, gan vides un ekonomisko aspektu analīzi.

Darba uzbūve un raksturojums

Promocijas darbs ir balstīts uz piecām [1; 2; 3; 4; 5] galvenajām publikācijām un citu autora veikto un publicēto pētījumu pārskata. Pārskata mērķis ir paplašināt siltumapgādes sistēmas pētāmo jautājumu loku ar citiem autora veiktajiem un publicētajiem pētījumiem [6-15] un akcentēt pētījumu kopsakaru. Darbs sastāv no ievada un trim nodaļām:

1. Literatūras apskata;
2. Pētījumu metodikām;
3. Pētījuma rezultātiem un to analīzes.

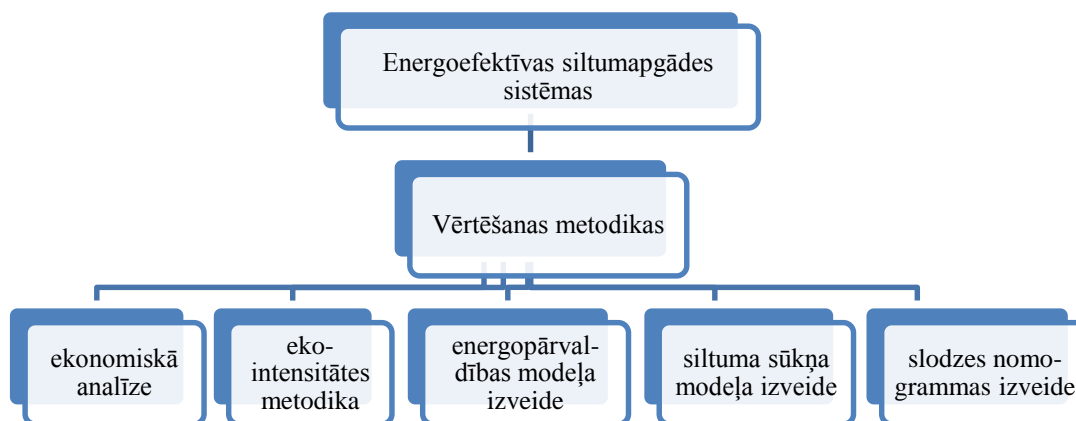
Ievadā definēti izpētes mērķi un uzdevumi, skaidrota darba uzbūve un dots autora publicēto pētījumu īss raksturojums, kas aptver gan galvenās publikācijas, gan citus ar siltumapgādes sistēmu analīzi saistītus autora pētījumus. Pirmajā nodaļā sniegts literatūras apskats un akcentēti nepieciešamie pētījumi par galvenajās publikācijās skartajiem siltumapgādes sistēmu darbības un tās uzlabošanas aspektiem. Otrajā nodaļā redzamas galvenajās publikācijās skarto jautājumu izpētes metodikas. Izpētē iegūtie rezultāti un to analīze redzama trešajā nodaļā. Darbs noslēdzas ar izpētes secinājumiem.

Promocijas darba autora veikto Ludzas pilsētas centralizētās siltumapgādes sistēmas pētījumu pārskats

Pētījumu pārskata ievads

Centralizētā siltumapgāde Skandināvijas un Baltijas valstīs spēlē galveno lomu siltumapgādē. Latvijā šobrīd tā sedz 80 % no kopējā enerģijas patēriņa siltumapgādei. Lai nodrošinātu centralizētās siltumapgādes ilgtspējīgu attīstību, nepieciešama sistēmu tehnoloģiska pilnveidošana un pakāpeniska pāreja uz trešās un ceturtās paaudzes siltumapgādes sistēmām. Lai to īstenotu, ir jāveic esošo sistēmu raksturojošo rādītāju un iespējamo uzlabojumu komplekss izvērtējums.

RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūtā ir veikti centralizētās siltumapgādes sistēmu energoefektivitātes paaugstināšanas pētījumi. To ietvaros izstrādātas vai adaptētas dažādas centralizētās siltumapgādes sistēmu vērtēšanas metodikas, kuras ietver tehnoloģisko risinājumu ietekmi uz sistēmas ekonomisku un videi draudzīgu darbību. Vērtēšanas metodikas testētas Ludzas pilsētas centralizētās siltumapgādes sistēmā, un tās redzamas 1. attēlā.



1. att. Vērtēšanas metodikas

Jebkura siltumapgāde ir kompleksa atsevišķu tās elementu tehnoloģisko risinājumu kopa, kas ir jāaplūko kā vienota sistēma. Tā ir sistēma, kuras efektīva darbība ir atkarīga no ekonomiski pamatotu un videi draudzīgu tehnoloģisko risinājumu izvēles. Šis sadaļas mērķis ir sniegt siltuma apgādes sistēmas kompleksa izvērtējuma vispārēju pārskatu, kas detalizēti aplūkots šī darba turpmākajās nodaļās.

Izmantoto risinājumu īss raksturojums

Siltumapgādes sistēmas temperatūras grafika pazeminājuma ietekme uz darbības rādītājiem

Rakstā [6] ir apskatīta universāla metodika, ar kuru var aprēķināt centralizētās siltumapgādes siltumtīklu optimālo plūsmu un temperatūru režīmus, pie kuriem ir viszemākās ekspluatācijas izmaksas, balstoties uz SIA "Ludzas Bio-Enerģija" uzkrātajiem apjomīgajiem datu materiāliem par Ludzas pilsētas CSS darbību dažādu siltuma slodžu gadījumā. Analizējot rezultātus, secināts, ka temperatūras pazemināšana uzskatāma par ekonomiski pamatotu pasākumu, jo naudas līdzekļi, kas ietaupīti līdz ar siltuma zuduma samazinājumu, pārsniedz izdevumus, kas radušies, nodrošinot intensīvāku siltumnesēja cirkulāciju.

Dūmgāzu kondensatora lietojums siltuma apgādes sistēmas avotā

Rezultāti rāda, ka centralizētu siltumapgādes sistēmu energoefektivitāti var paaugstināt, tās katlu mājā integrējot dūmgāzu kondensatoru, tādā veidā pilnīgāk izmantojot kurināmā

degšanā izdalīto siltumu [7]. Ar kondensatora palīdzību atgūto siltumu izmanto primārai siltuma tīklu atgaitas ūdens uzsildīšanai, un kondensatora efektivitāte ir atkarīga no tā, cik efektīvi noris siltumapmaiņa enerģijas patērētāja pusē. Tas un katlu mājas temperatūras grafiks nosaka temperatūru līmeni siltuma tīklos. Savukārt dūmgāzu kondensatora darbību būtiski ietekmē siltuma tīklu atgaitas temperatūra. Jo zemāka ir atgaitas temperatūra, jo efektīvāka ir ūdens tvaika kondensācija no dūmgāzēm un lielāks ir atgūtais fāžu pārejas siltums. Pieaugot tīkla ūdens atgaitas temperatūrai, kondensatora siltuma jauda samazinās, jo pasliktinās siltuma apmaiņa starp siltumtīklu un kondensatora ūdens kontūriem tīkla ūdens siltummainī. Kondensatorā uzsildīto ūdeni tīkla siltummainī sliktāk atdzesē un ar augstāku temperatūru iesmidzina caur sprauslām kondensatorā. Paaugstinātas iesmidzināmā ūdens temperatūras gadījumā pasliktinās gan sausā siltuma apmaiņa starp pilieniem un dūmgāzēm, gan masas apmaiņa.

Kondensatora integrācija siltumapgādes sistēmas siltuma avotā paaugstina sistēmas energoefektivitāti, un patērētāja slodzi var segt ar mazāku katla jaudu. Ir svarīgi noteikt slodzes sadalījumu starp katlu un kondensatoru mainīgos sistēmas darbības apstākļos. Pētījumā [2], balstoties uz Latvijas pilsētas Ludzas siltumapgādes sistēmas apkures sezonas datu analīzi, sīkāk aplūkota kondensatora un siltumapgādes sistēmas mijiedarbības parametru – tīklu atgaitas temperatūras un katlu jaudas – ietekme uz kondensatora efektivitāti. Rakstā ir piedāvāta nomogramma kondensatora efektivitātes novērtēšanai un katlu mājas siltuma slodzes sadalījumam starp katlu un kondensatoru apkures sezonas laikā. Pateicoties kondensatora uzstādīšanai pēc šķeldas katla apkures sezonas laikā ir samazināts primāro resursu patēriņš par 11,8 %.

Siltuma zudumu un dūmgāzu kondensatora efektivitātes ietekme uz sistēmas energoefektivitāti padziļināti ir analizēta darbā [9]. Parādīts, ka sistēmas lietderības koeficientu nosaka kondensatora jaudas un siltumu zudumu relatīvo attiecību izmaiņas, kuru raksturs pie dažādām ārējais temperatūrām ir atšķirīgs. Kondensatora relatīvā jauda pieaug, ārējais temperatūrai kvadrātiski paaugstinoties. Relatīvo zudumu pieaugums ir neliels zemu ārējais temperatūru gadījumā, un tālāka ārējais temperatūras paaugstināšanās ir saistīta ar izteiktu relatīvo siltuma zudumu pieaugumu. Lielumu izmaiņas kvantitatīvi raksturotas ar līkņu gradientu palīdzību.

Siltumsūkņa integrācija siltumapgādes sistēmā

Siltumapgādes sistēmas energoefektivitāti var paaugstināt dažādos veidos: optimizējot sistēmas darbības parametrus vai integrējot sistēmā jaunus inovatīvus elementus. Pie pēdējiem pieder dūmgāzu kondensatori un siltumsūkņi. Pētījumā [1] aplūkots augstas temperatūras siltumsūkņa lietojums daļējai patērētāja slodzes segšanai, to uzstādot siltuma tīklu atgaitas cauruļvadā. Ir piedāvāta un aprēķināta siltumsūkņa pieslēguma shēma un modelētas sistēmas darbības parametru izmaiņas apkures sezonas laikā. Aprēķinu modeli veido siltumapgādes sistēmas elementu un siltumsūkņa enerģijas un masas bilances vienādojumi un siltumapgādes sistēmas darbības eksperimentālo datu apstrādē iegūtie empīriskie vienādojumi, kas raksturo tīkla ūdens plūsmu, turpgaitas un atgaitas ūdens temperatūru izmaiņas apkures sezonas laikā. Aprēķini liecina, ka siltumsūkņa lietojums spēj segt slodzi daļai patērētāju un, kas ir būtiski, pazemina atgaitas temperatūru, salīdzinot ar scenāriju bez siltumsūkņa. Tas nozīmē, ka ir zemāka temperatūra katlu mājas dūmgāzu kondensatora siltummainī un paaugstinās kondensatora energoefektivitāte.

Energovadības modeļa izveide

Katlu mājas darbības eksperimentālas izpētes rezultātā ir iespēja veidot datu bāzi, kurā apkopotas indikatoru vērtības un to izmaiņas raksturojošas empīriskas sakarības un līknes. Pateicoties izveidotajai datu bāzei, rodas iespēja ieviest energovadības pasākumus, lai paaugstinātu katlu mājas energoefektivitāti un kritiski izvērtētu pašreizējo darbināšanas praksi. Raksts [3] veltīts šķeldas katlu mājas energovadības aspektu analīzei, balstoties uz gadu gaitā

iegūtiem darbības parametriem. Katlu mājas darbības raksturojumam izmantoti īpatnējā kurināmā siltuma patēriņa un īpatnējā kurināmā siltuma patēriņa pieauguma rādītāji, kas noteikti, izmantojot katlu mājā mērītus darbināšanas datus. Īpatnējās kurināmā siltuma patēriņa līmeņatzīmes ir līknes ar izteiktu minimumu. Līkņu raksturu nosaka brīvsgaitas kurināmā patēriņš un katla lietderības koeficienta izmaiņas. Pētījumā aplūkotas problēmas, kas saistītas ar datu bāzes izveidi un nepārtrauktu energovadības pasākumu īstenošanu ražošanas procesu līmenī.

Siltumapgādes sistēmas darbības ekointensitāte

Siltumapgādes sistēmas darbības ekointensitāte raksturo iespēju palielināt katlu mājā saražotās, siltuma tīklos nodotās un enerģijas lietotāja pusē saņemtās siltumenerģijas daudzumu, nepalielinot kurināmā patēriņu. Tādējādi samazinās dabas resursu patēriņš, videi kaitīgās emisijas gaisā un siltumnīcefekta gāzu emisijas, kas izceļ vides problēmu risinājumu sasaisti ar energoefektivitāti. Siltumapgādes sistēmas ekointensitātes izpēte ir veikta darbā [5]. Siltumapgādes sistēmas darbības ekointensitāti raksturo parametru savstarpējā mijiedarbība. Ekointensitātes matemātisko aprakstu veido vienādojumu sistēma. Vienādojumi sniedz atbildi par neatkarīgo mainīgo kopu, kas ir ietverti ekointensitātes vērtēšanas modelī un ļauj spriest par siltumapgādes sistēmas darbības optimizācijas virzieniem. Darbā ekointensitāti raksturo kurināmā patēriņa samazinājums.

Kurināmā diversifikācijas siltuma avotā analīze. SEG samazinājuma potenciāls

Darbā [11] ir aprakstīts autoru izstrādāts matemātisks modelis un algoritms, ar kura palīdzību var salīdzināt un izvērtēt dažādas kurināmā diversifikācijas alternatīvas, lai varētu ātri un pamatoti izvēlēties visizdevīgāko risinājumu. Izstrādātā metodika ir aprobēta uz Ādažu ciema katlu mājas piemēra. Diversificējot kurināmo centralizētās siltumapgādes katlu mājās, ir svarīgi atrast ne tikai optimālos ekonomiskos risinājumus, bet arī strikti izvērtēt ietekmi uz vidi un klimatu. Tāpēc šī metodika tika veidota tā, lai ar tās palīdzību varētu izvērtēt un salīdzināt dažādus kurināmo diversifikācijas variantus gan ekonomiskajā, gan ekoloģiskajā aspektā.

Dūmgāzu kondensatora lietojuma siltumapgādes sistēmas avotā ekonomiskā analīze

Raksta [4] mērķis bija veikt nelielas jaudas, ar šķeldu darbināmas katlu mājas kondensatora darbināšanas un kurināmā izmaksu analīzi nolūkā novērtēt izmaksu samazinājumu dūmgāzu kondensatora uzstādīšanas gadījumā. Aplūkota kurināmā izmaksu ķēde – paša kurināmā cena, stundu izmaksas atkarībā no jaudas un īpatnējās izmaksas uz saražotās enerģijas vienību. Izpētes objekts ir Ludzas pilsētas centralizētās siltumapgādes sistēmas siltuma avots – katlu māja, kurā uzstādīts ar tieša kontakta kondensatoru aprīkots šķeldas katls. Dūmgāzu kondensatora īpatnējo izmaksu analīze rāda, ka kondensatoram ir jaudas robežvērtība, kuru pārsniedzot, ir vērojama naudas līdzekļu ekonomija. Pazeminoties jaudai zem robežvērtības, kondensators strādā ar zaudējumiem un tā darbināšanas izmaksas ir lielākas par ieņēmumiem, kurus nosaka šķeldas ekonomija. Analīze rāda, ka 2012./2013. apkures sezonas deviņos mēnešos kondensators ir darbināts gan ar ekonomisko ieguvumu, gan bez tās. Kopējo novērtējumu sniedz īpatnējo izsvērto ieguvumu un zaudējumu bilance, kas nosaka laika periodā gūtos īpatnējos izsvērtos tīros ienākumus. Aplūkota kondensatora atslēgšanas mazas jaudas gadījumā ekonomiskā ietekme.

Siltumapgādes sistēmas ekserģētiskā analīze

Līdz šim autora aplūkotās siltuma sistēmu analīzes metodes balstītas uz plūsmu un zudumu kvantitatīva novērtējuma. Netiek ievērots tas, ka dažādiem enerģijas veidiem ir dažāda kvalitāte jeb ekserģija, ko vērtē pēc lietojuma iespējām. Lai segtu patērētāja siltuma slodzi, ir nepieciešama siltumenerģija un elektroenerģija, lai ar sūkņu palīdzību siltumenerģiju nogādātu patērētājam. Enerģijas analīzes metodes aplūko summāro enerģiju atbilstoši enerģijas bilancei.

Ekserģētiskās metodes analīzei izmanto pilnīgāku un vienotu enerģijas raksturojumu – ekserģiju, kura elektroenerģijai ir augstāka nekā siltuma enerģijai.

Darbā [12] ir piedāvāts siltumapgādes sistēmas ekserģijas aprēķina modelis. Siltumapgādes sistēmas ekserģētiskā modeļa matemātisko pusi veido ekserģijas bilance. Modeļa aprobācija ir veikta uz Ludzas pilsētas centralizētās siltumapgādes sistēmas pamata. Lai izvērtētu siltumapgādes sistēmas modeli, tiek noteikti ekserģijas faktori 2010./2011. gada apkures sezonai dažādu siltumapgādes sistēmas parametru gadījumā. Pēc tam šie faktori tiek analizēti un salīdzināti ar citu valstu siltumapgādes sistēmām. Novērtēti arī ekserģijas zudumi dažādos siltumapgādes sistēmas elementos. Rezultāti liecina, ka ekserģijas analīze ir daudz pilnīgāka metode, laiparādītu analizējamās sistēmas veikspēju, salīdzinot ar vienkāršu enerģijas analīzi.

Darba aprobācija

Ziņojumi konferencēs

1. Vīgants Ģ., Blumberga D. Modelling of the District Heating System's Operation. The 52nd International Scientific Conference of Riga Technical University, Rīga, Latvija, 12.–13. oktobris, 2011.
2. Vīgants Ģ., Ivanova P., Vīgants E., Veidenbergs I. Analysis of Diversification of Fuel in DH Sources. Potential of Reduction of GHG. The 13th International Symposium on District Heating and Cooling (DHC13), Dānija, Kopenhāgena, 3.–4. septembris, 2012.
3. Vīgants Ģ. Environmental Aspects of District Heating Systems. Environmental Science and Education in Latvia and Europe: Resources and Biodiversity, Ministry of Environmental Protection and Regional Development, Latvija, Rīga, 19. oktobris, 2012.
4. Vīgants Ģ., Galindoms G., Veidenbergs I., Blumberga D. Energy efficiency of DH system with wood chips boiler houses and flue gas condensing unit. International Conference on Energy, Environment, Ecosystems, and Development (EEED 2013), Rodas sala, Grieķija, 16.–19. jūlijs, 2013.
5. Ziemele J., Blumberga D., Vīgants Ģ. District heating systems performance analyses. Heat energy tariff. The 8th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES2013), Dubrovņiki, Horvātija, 21.–27. septembris, 2013.
6. Vīgants Ģ., Terehovičs E., Blumberga D., Veidenbergs I. Exergy Model for District Heating System Analysis. International Conference on Industrial Engineering and Management Science (ICIEMS 2013), Šanhaja, Ķīna, 28.–30. septembris, 2013.
7. Vīgants Ģ., Veidenbergs I., Galindoms G., Vīgants E., Blumberga D. Analysis of Operation Mode for Complex DHS. International Scientific Conference Environmental and Climate Technologies 2013, Latvija, Rīga, 14.–16. oktobris, 2013.
8. Vīgants G., Galindoms G., Veidenbergs I., Vīgants E., Blumberga D. Energy management of a wood chip boiler house with a gas condenser. The 27th International Conference On Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2014), Turku, Somija, 15.–19. jūnijs, 2014.
9. Vīgants G., Galindoms G., Veidenbergs I., Vīgants E., Blumberga D. Efficiency diagram for district heating system with gas condensing unit, The International Scientific Conference on Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2014), Latvija, Rīga, 14.–16. oktobris, 2014.
10. Vīgants G., Veidenbergs I., Vīgants E., Blumberga D. Cost analysis of a wood chip boiler house with a gas condenser. The 7th International Conference on Applied Energy (ICAE2015), Abū Dabī, Apvienotie Arābu Emirāti, 28.–31. marts, 2015.

Autora publikācijas

1. Vīgants, Ģ., Galindoms, G., Vīgants, E., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Heat Pump Application for Efficient DH Systems. Conference Proceedings: 6th International Conference on Applied Energy, Taipei, Taiwan, May 30–June 2, 2014, Vol. 61, pp. 2168–2171.
2. Vīgants, Ģ., Galindoms, G., Veidenbergs, I., Vīgants, E., Blumberga, D. Efficiency Diagram for District Heating System with Gas Condensing Unit. Abstracts of 55th International Scientific Conference: Subsection: Environmental and Climate Technologies, Riga, Latvia, October 14–15, 2014, pp. 65–66.
3. Vīgants G., Galindoms G., Veidenbergs I., Vīgants E., Blumberga D. Energy management of a wood chip boiler house with a gas condenser. Proceedings of the 27th International Conference On Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Turku, Finland, June 15–19, 2014, Vol. 1, pp. 1464–1474.
4. Vīgants G., Veidenbergs I., Vīgants E., Blumberga D. Cost analysis of a wood chip boiler house with a gas condenser. The 7th International Conference on Applied Energy, Abu Dhabi, United Emirates, March 28–31, 2015.
5. Blumberga D., Vīgants E., Veidenbergs I., Vīgants Ģ., Vītoliņš V. Eco-Intensity Analysis for a Chip-Fuelled Boiler House. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 2012, Vol. 20, No. 4, pp. 249–255.
6. Vīgants Ģ., Blumberga D. Modelling of the District Heating System's Operation. Environmental and Climate Technologies, 2011, Vol. 6, pp. 132–137.
7. Vīgants E., Blumberga D., Veidenbergs I., Vīgants Ģ., Rochas C. Experimental Research of Flue Gas Condensing Unit. Advances in Environment, Biotechnology and Biomedicine: Proceedings of the 1st WSEAS International Conference on Energy and Environment Technologies and Equipment, Zlin, Czech Republic, September 20–22, 2012, pp. 179–189.
8. Rošā M., Romagnoli F., Blumberga D., Vīgants Ģ. Small Scale District Heating Systems. Demand Side Management Effect. Proceedings of the 13th International Symposium on District Heating and Cooling, Copenhagen, Denmark, September 3–4, 2012, pp. 38–46.
9. Vīgants Ģ., Galindoms G., Veidenbergs I., Blumberga D. Energy efficiency of DH system with wood chips boiler houses and flue gas condensing unit. Proceedings of the 2013 International Conference on Energy, Environment, Ecosystems, and Development, Energy, Environmental and Structural Engineering Series, Rhodes Island, Greece, July 16–19, 2013, Vol. 12, pp. 168–171.
10. Vīgants Ģ., Veidenbergs I., Galindoms G., Vīgants E., Blumberga D. Analysis of Operation Mode for Complex DHS. Conference Proceedings: Environmental and Climate Technologies 2013, Riga, Latvia, October 14–16, 2013, pp. 35–38.
11. Vīgants Ģ., Ivanova P., Vīgants E., Veidenbergs I. Analysis of Diversification of Fuel in DH Sources. Potential of Reduction of GHG. Proceedings of the 13th International Symposium on District Heating and Cooling (DHC13), Copenhagen, Denmark, September 3–4, 2012, pp. 179–285.
12. Vīgants Ģ., Terehovičs E., Blumberga D., Veidenbergs I. Exergy Model for District Heating System Analysis. Proceedings of International Conference on Industrial Engineering and Management Science, Shanghai, China, September 28–30, 2013, pp. 351–361.
13. Ziemele J., Vīgants Ģ., Vītoliņš V., Blumberga D., Veidenbergs I. District Heating Systems Performance Analyses. Heat Energy Tariff. Proceedings of the 8th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Dubrovnik, Croatia, September 21–27, 2013.

14. Ziemele, J., Pakere, I., Talcis, N., Cimdiņa, G., Vīgants, Ģ., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Analysis of Wood Fuel Use Development in Riga. *Agronomy Research*, 2014, Vol.12, No.2, pp. 645–654.
15. Cimdina G., Slisane Dz., Ziemele J., Vitolins V., Vigants G., Blumberga D, Sustainable Development of Renewable Energy Resources Biomass Cogeneration Plant. Proceedings of the 9th International Conference Environmental Engineering, Vilnius, Lithuania, May 22–23, 2014.

1. IZPĒTES METODIKAS

1.1. Ludzas centralizētās siltumapgādes sistēmas apraksts

1.1.1. Siltumapgādes sistēmas avota raksturojums

Ludzas katlu māja darbojas kopš 2000. gada, kā kurināmo izmantojot šķeldu, kas tiek iepirkta no vietējiem piegādātājiem. Katlu māja ir aprīkota ar biomasas sadedzināšanas katlu, pēc kura 2010. gada uzstādīts Latvijā izgatavots un patentēts dūmgāzu kondensators papildu enerģijas atgūšanai no dūmgāzēm.

Sistēmas analīzei darbā izmantoti mērījumu dati par katlu mājas iekārtu darbību vairāku apkures sezonu laikā no 2010. līdz 2013. gadam. Katlu mājā mērījumu ceļā tiek noteikti tālāk uzskaitītie parametri, uz kuriem balstoties tika izvērtēta siltumapgādes sistēmas darbība:

1. katla jauda;
2. kondensatora jauda;
3. kopējā katlu mājas jauda;
4. ūdens temperatūra kondensatora cirkulācijas lokā pirms un pēc siltummaiņa;
5. tīkla ūdens atgaitas un turpgaitas temperatūra;
6. elektroenerģijas patēriņš katlu mājā;
7. kondensatora elektroenerģijas patēriņš;
8. šķeldas patēriņš mēnesī.

Datus personāls nolasa reizi trijās stundās no automātikas un vadības bloka un arī siltuma katla un dūmgāzu kondensatora skaitītājiem un atzīmē žurnālā. Kondensators atdesē dūmgāzes līdz aptuveni 60 °C un uzsilda ūdeni, kas tiek izmantots apkures sistēmas atgaitas ūdens priekšsildīšanai. Kondensāta plēvīte, kas rodas uz siltumapmaiņas virsmas, veicina cieto daļiņu izgulsnēšanu no plūsmas un gāzveida komponentu absorbciju. Konstatēts, ka cieto daļiņu emisijas samazinājums var būt 33–44 %. Lai atdalītu uztvertās cietās daļiņas, izmanto nostādināšanas tvertni. Tā kā veidojas kondensāts, ūdens līmenis tvertnē ceļas un daļa ūdens kopā ar cietām daļiņām pulpas veidā tiek aizvadīta. Kondensāts veido skābu vidi, un tās neitralizēšanai izmanto NaOH. Skābo vidi veido kondensāta šķīstošie oksīdi, kurus satur dūmgāzes.

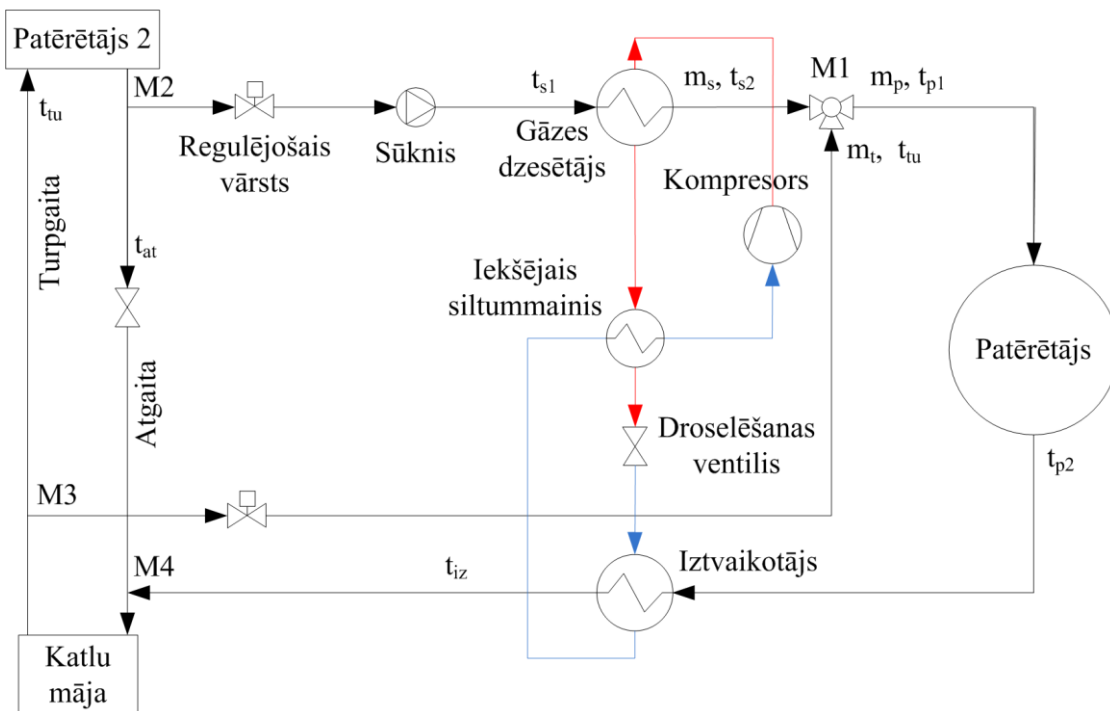
1.1.2. Siltumapgādes sistēmas siltuma tīklu raksturojums

Ludzas centralizētās siltumapgādes sistēmas siltuma tīkli ir projektēti gāzveida siltuma nesējam – tvaikam. Tas ir tāpēc, ka Ludzas pilsētā pirms 2000. gada apkure tika nodrošināta ar mazuta apkures katliem. Siltuma tīklu diametri, salīdzinot ar citām CSS, ir mazi. No katlu mājas ir viens maģistrālais siltuma tīklu izvads ar iekšējo diametru 0,263 metri, un maģistrālā siltuma tīkla garums ir 2029,5 metri, kura noslēgumā iekšējais diametrs ir 0,07030 metri. Maģistrālā siltuma tīkla atzari kopā savieno 108 apkurināmos objektus: dzīvojamās mājas, bērnudārzus, skolas, slimnīcas un Ludzas domi. Ludzas pilsētas kopējais siltuma tīklu garums ir 9770 metri.

1.2. Siltumsūkņa integrācija siltumapgādes sistēmā

1.2.1. Siltumsūkņa pieslēgums

Izpētes problēma ir saistīta ar nepietiekamu siltuma padevi vienai pilsētas siltumapgādes sistēmas patērētāja grupai. Ir jāpaaugstina siltumnesēja temperatūra pirms patērētāja grupas. To var veikt, paaugstinot temperatūru visai sistēmai katlu mājas izejā. Otra iespēja ir paaugstināt temperatūru patērētāju grupai, uzstādot papildus jaudu. Darbā aplūkots variants siltumsūkņa lietojumam papildu jaudas segšanai. Izpēte saistīta ar siltumsūkņa pieslēgšanas shēmas izveidi un aprēķiniem par siltumsūkņa nodrošinātām temperatūru izmaiņām siltumapgādes sistēmā. Izstrādātā siltumsūkņa pieslēgšanas siltumapgādes sistēmai shēma ir aplūkojama 1.1. attēlā.



1.1. att. Siltumsūkņa integrācija siltumapgādes sistēmā

Siltumsūknis ir pieslēgts siltuma tīklu atgaitai, un tas ir paredzēts lai, piejaucot daļu no tīklu turpgaitas ūdens, kopā nodrošinātu nepieciešamo siltuma slodzi patērētāju grupai. Turpgaitas ūdens piejaukšana ir nepieciešama, ja siltuma sūkņa jauda ir nepietiekama patērētāju grupas slodzes segšanai vai ir apstākļi, kuros siltumsūknis nevar darboties.

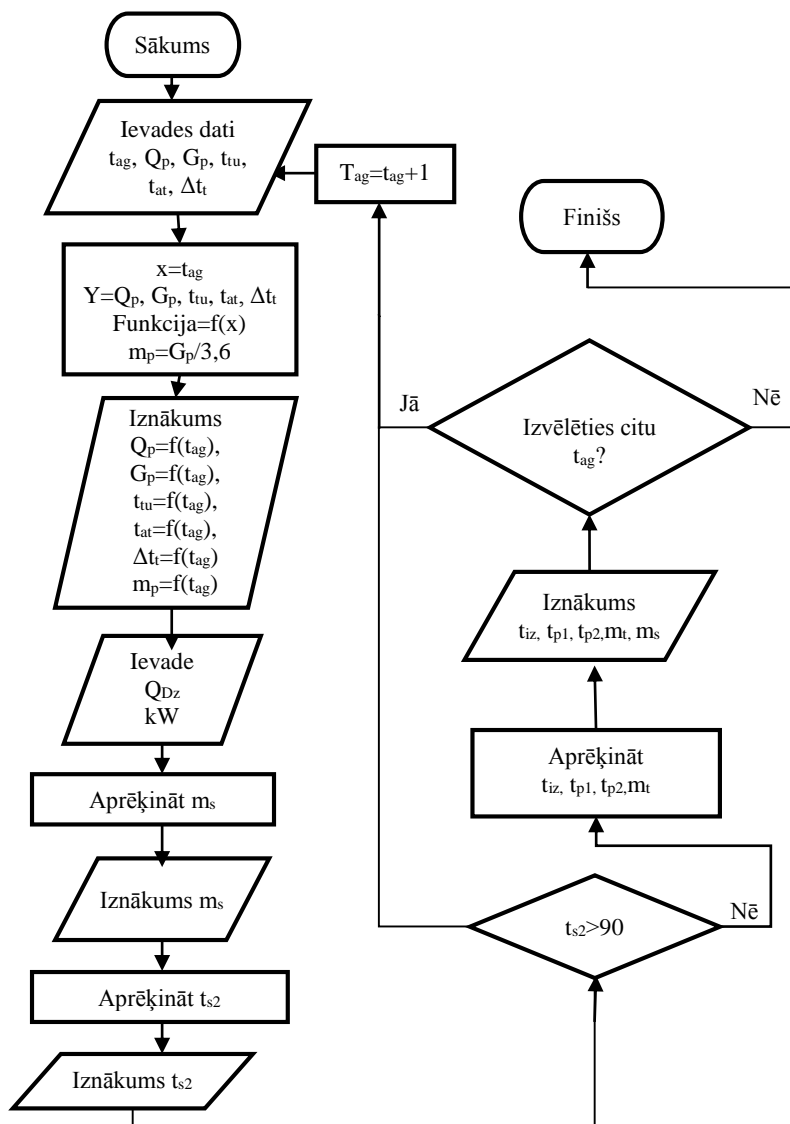
Atgaitas tīkla ūdens pēc patērētā 2. mezglā M2 tiek nozarots un virzīts uz siltumsūkņa gāzes dzesētāju. Nozarotā atgaitas ūdens plūsma ir m_s . Nozaro arī turpgaitas ūdens daļu m_t mezglā M3. Abas plūsmas sajaucas mezglā M1 un veido patērētāja plūsmu m_p . Siltuma nesēja plūsma m_p pēc patērētāja plūst cauri siltumsūkņa iztvaikotājam, pēc kura plūsma tiek ievadīta siltuma tīklu atgaitā mezglā M4.

Siltumsūkņa uzdevums ir paaugstināt ūdens temperatūru pirms patērētāja t_{p1} tā, lai patērētājs zemu ārējais temperatūru gadījumā savā mājoklī varētu iegūt nepieciešamo iekšstelpu temperatūru. To panāk, sajaucot siltumsūkņa gāzes dzesētājā uzsildīto atgaitas ūdens daļu m_s ar turpgaitas ūdens daļu m_t . Plūsmu summa m_p ir lielums, kas atbilst patērētāja ūdens caurplūdei un mainās atkarībā no ārējais temperatūras. Svarīgi atcerēties, ka plūsmas m_s un m_t ir saistīti lielumi – pieaugot m_t , samazinās m_s , un otrādi. Lai gāzes dzesētājā uzsildītu nozaroto atgaitas tīkla ūdeni m_s , siltumsūknis saņem siltumu no iztvaikotāja, kas ir ieslēgts patērētāja atgaitā. Pēc siltumsūkņa iztvaikotāja atgaitas ūdens temperatūra t_{iz} ir pazemināta. Tas samazina siltuma zudumus atgaitā un paaugstina katlu mājā uzstādītā dūmgāzu kondensatora efektivitāti.

1.2.2. Siltumapgādes sistēmas ar siltumsūkni modelēšana

Siltumsūkņa integrācijas siltumapgādes sistēmā shēmas aprēķins veido modeli, kas ietver aprēķiniem nepieciešamās empīriskās un analītiskās sakarības un algoritmu. Aprēķina mērķis ir noteikt nozarotā tīklu atgaitas ūdens temperatūru pēc siltumsūkņa gāzes dzesētāja t_{s2} , nozarotā ūdens plūsmu caur siltumsūkņa gāzes dzesētāju m_s , atgaitas ūdens temperatūru pēc siltumsūkņa iztvaikotāja t_{iz} , atgaitas ūdens temperatūru pēc patērētāja un piejaucamā turpgaitas ūdens plūsmu m_t . Aprēķinā pieņemts, ka siltumsūkņa darbības rezultātā ūdens temperatūra pirms patērētāja t_{p1} ir par Δt °C augstāka nekā tīklu turpgaitas ūdens temperatūra t_{tu} . Piedāvātās aprēķinu metodes īpatnība ir tā, ka tajā apvienoti siltumapgādes sistēmu raksturojoši empīriski vienādojumi, kas iegūti, apstrādājot sistēmas darbību raksturojošus eksperimentālus datus un

analītiskas izteiksmes. Analītiskās sakarības iegūtas, izmantojot shēmas elementu un mezglu masas un enerģijas bilances vienādojumus. Shēmas aprēķina algoritms, kas sastāv no 16 blokiem, parādīts 1.2. attēlā.



1.2. att. Siltumsūkņa aprēķina algoritms

No masas un enerģijas siltuma bilancēm mezglā M1 un siltumsūkņa gāzes dzesētāja siltuma bilances iegūst izteiksmi no kopējā siltuma tīkla atgaitas nozarotās ūdens plūsmas noteikšanai:

$$m_s = \frac{\frac{Q_{Dz}}{4,19} - \Delta t_t \cdot m_p}{t_{tu} - t_{at}}, \quad (1.1.)$$

kur

m_s – atgaitas ūdens caurplūde caur gāzes dzesētāju, kg/s;

Q_{Dz} – siltumsūkņa gāzes dzesētāja jauda, kW;

Δt_t – temperatūras paaugstinājums pirms patērētāja, °C;

m_p – patērētāja ūdens caurplūde, kg/s;

t_{tu} – tīklu turpgaitas ūdens temperatūra, °C.

Nozarotā ūdens temperatūru pēc siltumsūkņa gāzes dzesētāja nosaka, izmantojot siltuma bilances vienādojumu shēmas mezglā M1:

$$t_{s2} = t_{tu} + \Delta t_t \cdot \left(\frac{m_p}{m_s} \right) \quad (1.2.)$$

Maksimālā iespējamā ūdens temperatūra pēc augstas temperatūras siltumsūkņa ir ap 90 °C, tāpēc aprēķinos iegūto t_{s2} temperatūru salīdzina ar pieļaujamo un, ja tā nav augstāka par 90 °C, aprēķinu turpina. Pretējā gadījumā aprēķinu sāk no sākuma, ārējais temperatūrai esot augstākai. Ārējais temperatūras izmaiņas solis ir 1 °C.

Izmantojot patērētāja siltuma bilances vienādojumu, ūdens temperatūru pēc patērētāja aprēķina ar izteiksmi:

$$t_{p2} = t_{tu} + \Delta t_t - \frac{Q_p}{4,19 \cdot m_p}, \quad (1.3.)$$

kur

Q_p – patērētāja siltuma slodze, kW.

Ūdens pēc patērētāja plūst caur siltumsūkņa iztvaikotāju, kur ūdens temperatūra pazeminās līdz t_{iz} . Ūdens temperatūras pēc siltumsūkņa iztvaikotāja aprēķiniem izmanto vienādojumu:

$$t_{iz} = t_{tu} + \Delta t_t - \frac{Q_p + Q_{iz}}{4,19 \cdot m_p}, \quad (1.4.)$$

kur

Q_{iz} – izvēlētā siltumsūkņa iztvaikotāja jauda, kW.

Kā redzams 1.1. attēlā, mezglā M4 ūdens ar temperatūru t_{iz} sajaucas atgaitas tīkla ūdeni pēc 2. patērētāja un tālāk tiek virzīts uz katla māju. Ja t_{iz} būs zemāka par atgaitas ūdens temperatūru t_{at} , tad pazemināsies atgaitas ūdens temperatūra katlu mājā.

No mezgla M1 materiālās bilances nosaka nepieciešamo tīkla turpgaitas ūdens piejaukumu:

$$m_t = m_p - m_s \quad (1.5.)$$

Patērētājam padodamā ūdens temperatūra ir paaugstināta zemu ārējais temperatūru gadījumā, un to nosaka kā:

$$t_{p1} = t_{tu} + \Delta t_t \quad (1.6.)$$

Aprēķinu veic visam ārējais temperatūru izmaiņu diapazonam.

1.3. Kondensatora nomogrammas izveides metodika

Nomogramma, kas dod iespēju noteikt kādu katlu mājas slodzi var segt ar katla un kādu ar kondensatora palīdzību, izstrādāta Ludzas pilsētas siltumapgādes sistēmas siltuma avotam, kurā uzstādīts ar tieša kontakta kondensatoru aprīkots 8 MW šķeldas katls. Katlu mājas darbināšanas pieredze rāda, ka zemu ārējais temperatūru gadījumā ar kvalitatīvu kurināmo šķeldas katla jaudu var paaugstināt līdz 10 MW. Izpēte veikta, analizējot Ludzas siltumapgādes sistēmas 2012./2013. gadu apkures sezonas darbības datus, izmantojot korelācijas un regresijas statistiskās analīzes metodes. Datu statistiskajā apstrādē izmantota programma Statgraphics Plus. Analizējamo datu kopa ietver 474 režīmus un 17 parametrus. Rūpnieciskajā eksperimentā

iegūto datu analīzes mērķis ir noteikt to statistiski nozīmīgo darbības parametru kopu, kura būtiski ietekmē kondensatora siltuma atguves efektivitāti, kā arī noteikt parametrus saistošu multiregresijas vienādojumu un novērtēt tā adekvātumu.

Kondensatora darbības novērtēšanai ir izvēlēts kondensatora efektivitātes indikators, ko definē kā:

$$E_{ko} = N_{ko} \cdot \frac{100}{N_k}, \% \quad (1.7.)$$

kur

N_{ko} – kondensatora jauda, MW;

N_k – katla jauda, MW.

Kondensatora efektivitātes indikators rāda, kādu daļu no katla jaudas var atgūt dūmgāzu dziļās dzesēšanas ceļā.

Datu statistiskās analīzes rezultātā iegūts vienādojums, kas saista kondensatora efektivitātes indikatoru ar 7 statistiski nozīmīgiem neatkarīgiem mainīgajiem parametriem.

$$E_{ko} = 7,84433 + 0,0793491 \cdot G_t - 1,82416 \cdot K_{sh} + 0,394416 \cdot K_{sv} - 1,96617 \cdot N_k - 0,0255361 \cdot t_{dg2} + 0,966587 \cdot t_{\bar{u}2} - 1,07522 \cdot t_{at} \quad (1.8.)$$

Dispersijas analīze liecina, ka neatkarīgie mainīgie ir statistiski nozīmīgi 95 % ticamības intervālā. Vienādojums (1.8.) skaidro 94,86 % no E_{ko} izmaiņām.

Vienādojuma neatkarīgie mainīgie:

N_k – katla jauda, MW;

G_t – ūdens plūsma tīkla siltummaiņa siltumtīklu kontūrā, m³/h;

t_{dg2} – dūmgāzu temperatūra pēc dūmgāzu kondensatora, °C;

$t_{\bar{u}2}$ – ūdens temperatūra pēc kondensatora un pirms tīkla siltummaiņa, °C;

t_{at} – siltuma tīkla ūdens atgaitas temperatūra pirms tīkla siltummaiņa, °C;

K_{sh} – ūdens iesmidzināšanas koeficients kondensatora horizontālajā daļā, kg/kg_{s.g.};

K_{sv} – ūdens iesmidzināšanas koeficients kondensatora vertikālajā daļā, kg/kg_{s.g.}

Mainīgo parametru izmaiņu diapazons eksperimenta laikā redzams 1.1. tabulā.

1.1. tabula

Parametru izmaiņu diapazoni

Parametrs	G_t	K_{sh}	K_{sv}	N_k	t_{dg2}	$t_{\bar{u}2}$	t_{at}
Mērvienība	m ³ /h	kg/kg _{s.g.}	kg/kg _{s.g.}	MW	°C	°C	°C
Diapazons	107– 216	0,034– 1,005	3,19– 22,04	2,8– 9,4	50– 70	51– 64	43,3– 58,3

Ūdens iesmidzināšanas koeficienta noteikšanai izmanto sakarību:

$$K_s = \frac{G_{ko} \cdot \rho_{\bar{u}} \cdot 1000}{L_{dg}}, \quad (1.9.)$$

kur

G_{ko} – izsmidzināšanas ūdens daudzums caur kondensatora horizontālās vai vertikālās daļas sprauslām, m³/h;

L_{dg} – sauso dūmgāzu daudzums, kg_{s.g.}/h;

$\rho_{\bar{u}}$ – ūdens blīvums, kg/m³.

Atkarībā no tā, vai ūdeni iesmidzina kondensatora horizontālajā iztvaikošanas daļā vai vertikālajā kondensācijas daļā, izšķir izsmidzināšanas koeficientus K_{sh} un K_{sv} .

1.4. Šķeldas katlu mājas ar gāzes kondensatoru energovadība

Izpēte ir saistīta ar energovadības sistēmas izveides metodikas izstrādi mazas jaudas centralizētai siltumapgādes sistēmai un tās aprobāciju šķeldas katlu mājā Ludzā. Energovadības metodika ietver katlu mājas energoefektivitātes novērtējumu, pamatojoties uz katlu mājas darbības datu iegūvi un apstrādi. Datu matemātiskās apstrādes rezultātā iegūts empīrisks modelis, kas apraksta īpatnējā šķeldas patēriņa izmaiņas atkarībā no saražotā siltuma. Tā ir pirmā līmeņatzīme. Līmeņatzīmes raksturojoši vienādojumi ir iegūti gadījumiem, kad katls strādā ar kondensatoru un bez tā. Tā kā energovadība ir nepārtraukts energoresursu racionālas izmantošanas process, tad, sasniedzot pirmo līmeņatzīmi, jāskatās, kādi pasākumi veicami turpmākam kurināmā patēriņa samazinājumam. To sasniedzot, jānosaka jauna līmeņatzīme. Tās noteikšanai arī izmantojama promocijas darbā piedāvātā metode.

Izpēte veikta, ar korelācijas analīzes metodi analizējot Ludzas siltumapgādes sistēmas katlu mājas 2011./2012. un 2012./2013. gada apkures sezonas ik mēnesi mērītus darbības datus. Mērījumi veikti ar katlu mājā uzstādītām mērierīcēm. Šķeldas patēriņu nosaka beramos m^3 , izmantojot tilpuma bilances metodi, pamatojoties uz iepirkta kurināmā daudzumu un krājuma starpību, ar šādu formulu:

$$V = P + (S - E) \quad (1.10.)$$

kur:

V – kurināmais, ko sadedzina pārskata perioda laikā, m^3 ;

P – kurināmais, ko iegādājas pārskata perioda laikā, m^3 ;

S – kurināmā krājumi pārskata perioda sākumā (tiek mērīts ar mērlenti), m^3 ;

E – kurināmā krājumi pārskata perioda beigās (tiek mērīts ar mērlenti), m^3 .

Kurināmā zemāko sadegšanas siltumu un blīvumu nosaka laboratorijā. Katru mēnesī tiek savākti kurināmā paraugi no katra atsevišķa piegādātāja. Pēc analīžu veikšanas laboratorijā tiek aprēķinātas mēneša vidējās zemākā sadegšanas siltuma un blīvuma vērtības.

Pamatojoties uzkurināmā raksturojumu, nosaka katlā mēnesī ievadāmo kurināmā enerģiju kā:

$$B_k = V \cdot Q_z^d \cdot \rho, \text{ MWh}_{ku} / \text{mēnesī}, \quad (1.11.)$$

kur

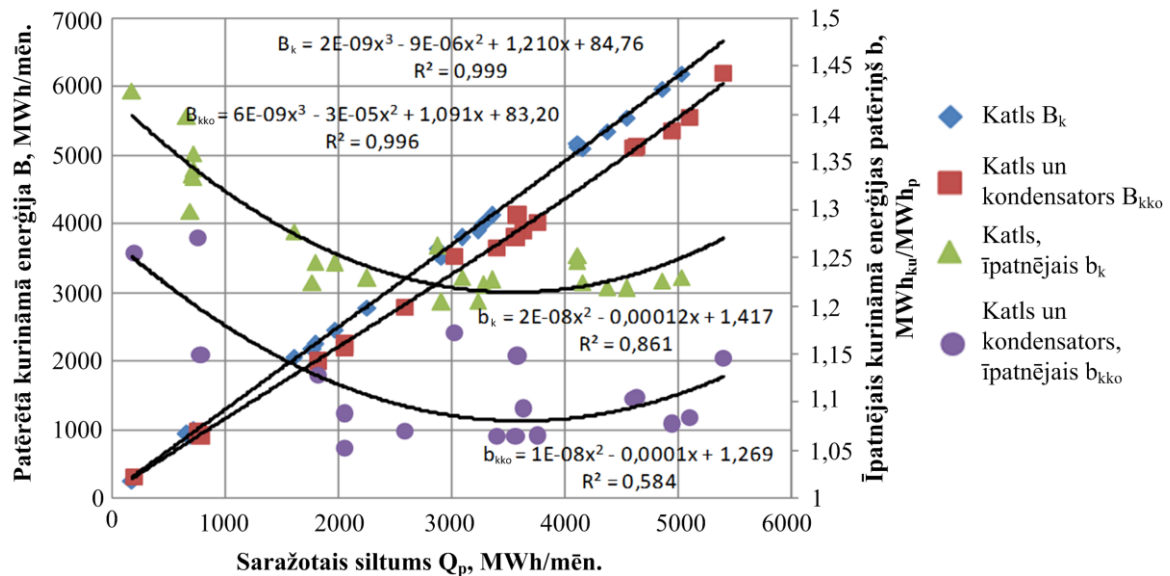
V – šķeldas patēriņš mēnesī, m^3 ;

Q_z^d – šķeldas zemākais sadegšanas siltums, MWh/t;

ρ – šķeldas blīvums, t/m^3 .

Katlā mēnesī ievadāmo enerģiju B dalot ar stundu skaitu mēnesī, nosaka mēneša vidējo kurināmā ievadīto jaudu P_{ku} . Līdzīgi, ar skaitītājiem mērīto enerģiju dalot ar stundu skaitu mēnesī, nosaka MW mēneša vidējo katla jaudu P_k un mēneša vidējo elektrisko jaudu P_{el} .

Kurināmā siltuma īpatnējos rādītājus b_k un b_{kko} nosaka, patērēto kurināmā enerģiju B dalot ar katla saražoto siltumenerģiju Q_k vai katla un kondensatora saražoto siltumenerģiju Q_{kko} . Īpatnējie elektroenerģijas e_{el} patēriņi noteikti, mērīto mēneša elektroenerģijas patēriņu E_m dalot ar katla saražoto siltumu Q_k . Tādā veidā īpatnējo rādītāju vērtības ir attiecinātas pret katla vai katla un kondensatora saražoto siltumenerģiju. Datu apstrādes rezultāti grafiski parādīti 1.3. attēlā.



1.3. att. Šķeldas katlu mājā patērētā kurināmā siltuma un ģpatnējā kurināmā siltuma izmaiņas atkarģbā no mēnesģ izstrādātās siltumenerģijas, darģinot katlu ar kondensatoru un bez tģ

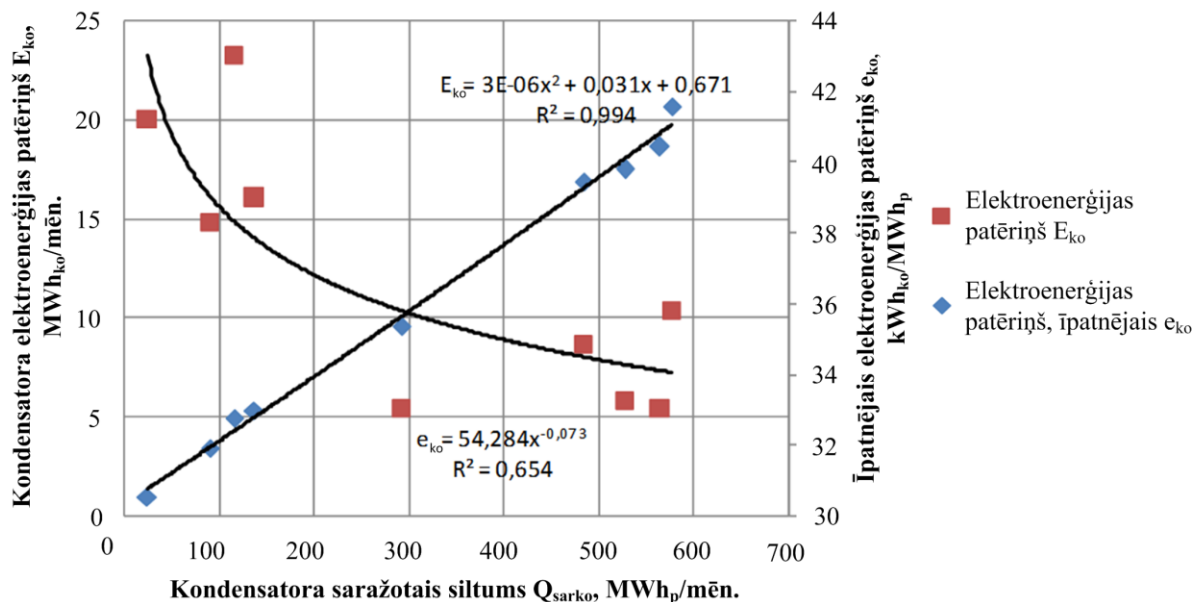
Attģlģ redzamģs lģknes raksturo atģilstoģo parametru vģrtģbas un to izmaiņas, mainģties katlu mģjas enerģijas izstrģdei. Ir iegģti attģlģ redzami parametru izmaiņas aprakģtoģi empģriskie vienģdoģumi, kas pģrsvarģ lģbi korelģ ar iegģtajiem datiem. Korelģcijas koefģcienu kvadrģtu vģrtģbas R^2 ir no 0,86 lģdz 0,99. Sliktģka korelģcija vģrojama ģpatnģjģ kurinģmģ siltuma patģriņa izmaiņas datiem katlam ar kondensatoru ($R^2=0,58$). Vienģdoģumi ir izmantojami turpmģkai datu analģzei. Iegģtie grafģskie attģli raksturo parametru lģmeņatzģmes paģreizģjģ situģcijģ, un tģs ir nepiecieģamas efektģvai katlu mģjas energovģdģbai. Veģcot energoefektģvģtģtes paaugģstinģģšanas pasģkumus siltumapgģdes sistģmas patģrģtģju pusģ vai katlu mģjģ, parametru lģmeņatzģmes mainģties, un ir jģveģdo jauni grafģki. To iespģjams veģkt, izmantoģot promocijas darbģ piedģvģto pieeģu.

Katlu mģja ir aprģkota ar elektroenerģijas skaitģtģjiem, un tie atģveģģģki uzskaita elektroenerģijas patģriņu katlu mģjai bez kondensatora E_{km} un kondensatoram E_{ko} . Elektroenerģijas patģriņa un ģpatnģjģ patģriņa izmaiņas grafģki redzami 1.4, un 1.5, attģlģ.



1.4. att. Siltumapgģdes sistģmas elektroenerģijas un ģpatnģjģ elektroenerģijas izmaiņas atkarģbģ no mēnesģ izstrādģtģs siltumenerģijas

Attēlā vērojama laba datu korelācija, un R^2 ir 0,85–0,87 robežās. Elektroenerģijas patērētāji ir pati katlu māja, un datos nav iekļauts elektroenerģijas patēriņš, kas saistīts ar siltuma tīkla ūdens sūkņu darbību. Elektroenerģijas patēriņu aprakstoši vienādojumi redzami 1.4. attēlā.



1.5. att. Kondensatora elektroenerģijas patēriņa izmaiņas atkarībā no izstrādātā siltuma

Katlu mājas parametru līmeņatzīmes var noteikt katlu mājai kopā vai tās sadalot pa galvenajām siltumenerģijas izstrādes tehnoloģijām, un tās ir šķeldas katls un kondensators. 1.3. attēlā redzamās patēriņa B_{kko} un īpatnējā kurināmā siltuma patēriņa b_{kko} līmeņatzīmes raksturo katla un kondensatora siltuma ražošanu kopā. Savukārt 1.3. attēla līknes B_k un b_k nosaka tikai katla siltuma ražošanas līmeņatzīmes. Ar siltuma izstrādi katlā un kondensatorā saistīto elektroenerģijas patēriņu nosaka 1.4. un 1.5. attēlā redzamās dalītās līmeņatzīmes līknes. No energovadības viedokļa priekšroka dodama dalītām līmeņatzīmēm, jo tas ļauj novērtēt, kurā no iekārtām ir vērojama novirze no noteiktās līmeņatzīmes. Taču praksē ir jāņem vērā, kāda veida darbības dati katlu mājā tiek mērīti un ir pieejami analīzei.

1.5. Dūmgāzu kondensatora lietojuma siltumapgādes sistēmas avotā ekonomiskā analīze

Analīzes mērķis ir veikt nelielas jaudas ar šķeldu darbināmas katlu mājas kurināmā un kondensatora darbināšanas izmaksu analīzi, lai novērtētu izmaksu samazinājumu dūmgāzu kondensatora uzstādīšanas gadījumā. Promocijas darbā aplūkota kurināmā izmaksu ķēde – paša kurināmā cena, stundu izmaksas atkarībā no jaudas un īpatnējās izmaksas uz saražotās enerģijas vienību.

1.5.1. Kurināmā izmaksas katlam un katlam ar kondensatoru

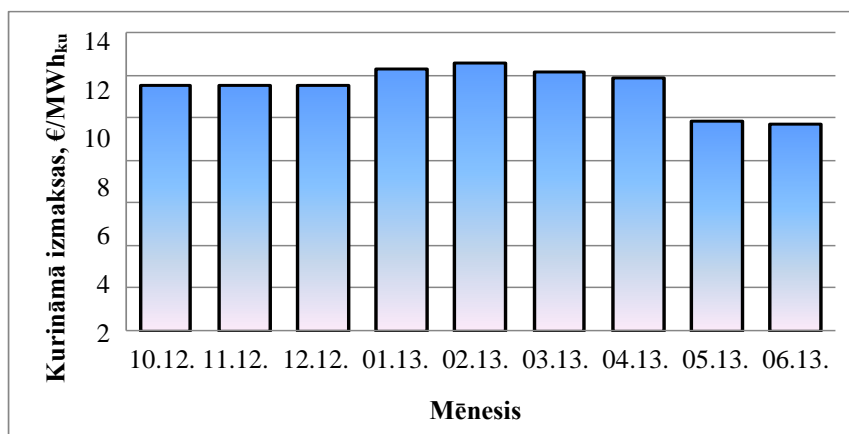
Enerģijas ražošanas kurināmā izmaksu analīzei iegūtas un izmantotas:

1. kurināmā patēriņa līkne;
2. kurināmā izmaksu līkne;
3. īpatnējā kurināmā patēriņa līkne;
4. īpatnējā kurināmā patēriņa izmaksu līkne.

Izpēte veikta, analizējot Ludzas siltumapgādes sistēmas katlu mājas 2012./2013. gada apkures sezonas ik mēnesi mērītus darbības datus. Mērījumi veikti ar katlu mājā uzstādītām

mērierīcēm. Kurināmā patēriņu nosaka beramos m^3 mēnesī no iepirktā un kurināmā noliktavā palikušā kurināmā bilances. Reizi mēnesī laboratorijā nosaka katra piegādātāja kurināmā zemāko sadegšanas siltumu. Pamatojoties uz kurināmā raksturojumu un patērēto apjomu, nosaka katlā ievadāmo jaudu P_{ku} MW_{ku} .

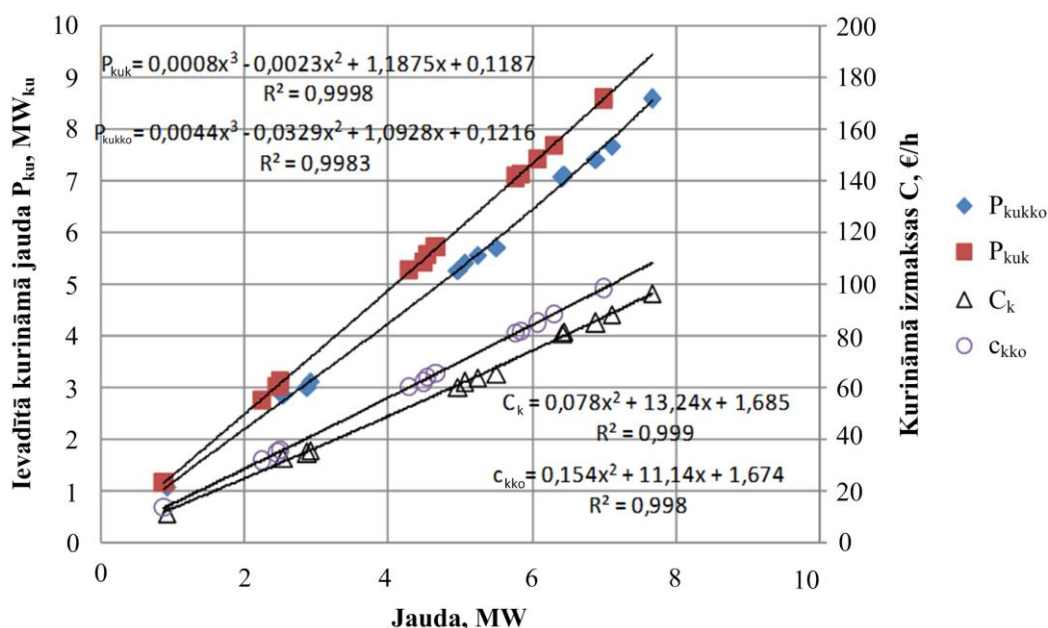
Izmaksu analīzei izmantoti uzņēmuma ik mēneša finanšu atskaites dati par katla kurināmā un kondensatora darbināšanas izmaksām. Iekārtas darbināšanas enerģētiskie aspekti ir sīkāk aplūkoti promocijas darba energovadības sadaļā. Kurināmā izmaksas nosaka šķeldas cena, kuras izmaiņas pa mēnešiem redzamas 1.6. attēlā.



1.6. att. Šķeldas cenu izmaiņas Ludzas katlu mājā

Redzams, ka cenas svārstās un ir augstākas ziemas mēnešos. Tālākiem aprēķiniem izmantota cenas vidējā vērtība $c_{ku} = 11,46$ €/MWh_{ku}. Šķeldas cena ir noteikta uz kurināmā enerģijas vienību.

Iekārtas enerģijas ievada un izvada līkne ir pamats kurināmā izmaksu līknes noteikšanai un tālākiem īpatnējā kurināmā enerģijas un izmaksu aprēķiniem. Mēneša vidējo katla P_k un katla un kondensatora P_{kko} jaudu nosaka, ar skaitītājiem mērīto mēnesī saražoto enerģiju Q_k un Q_{kko} dalot ar stundu skaitu mēnesī. Sakarību $P_{ku} = f_1(P_k)$ un $P_{ku} = f_2(P_{kko})$ grafiskie attēli veido katla un katla ar kondensatoru ievada un izvada līknes. Kurināmā izmaksu līkni iegūst, ievadīto kurināmā jaudu P_{ku} reizinot ar kurināmā cenu c_{ku} . Līkņu grafiki redzami 1.7. attēlā.



1.7. att. Ievadītā jauda un kurināmā izmaksas stundā atkarībā no iekārtas siltuma jaudas

Redzams, ka, pieaugot iekārtas jaudai, pieaug kurināmā izmaksas stundā. Tendence ir saprotama, jo, pieaugot ģenerēšanas jaudai, pieaug kurināmā patēriņš. Datu korelācijas analīze rāda, ka katla darbības bez kondensatora kurināmā izmaksas aprakstāmas ar vienādojumu:

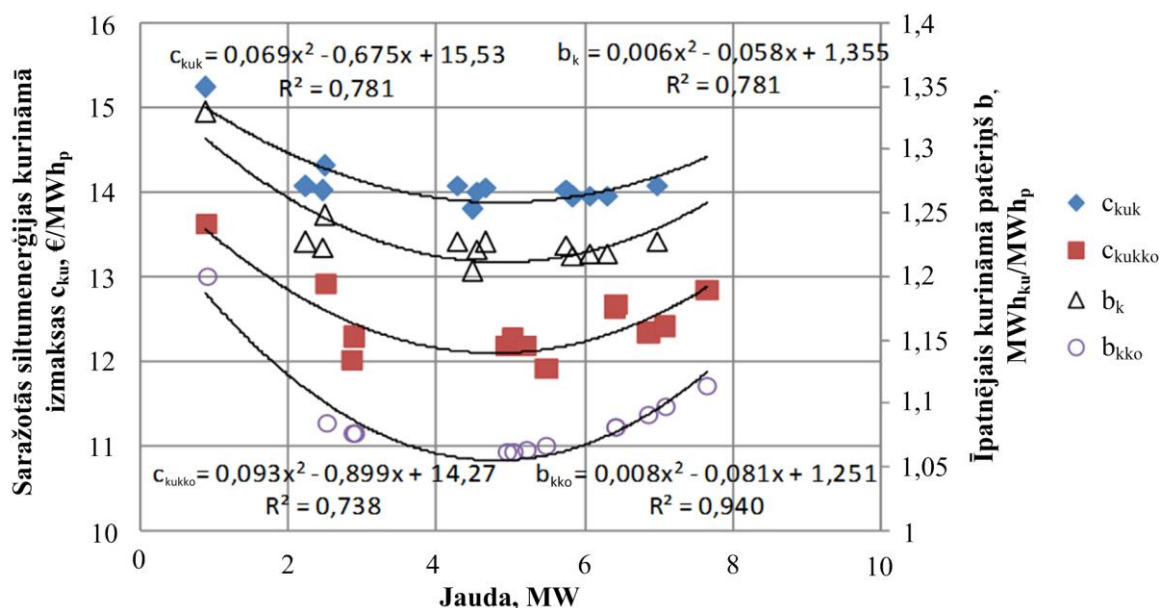
$$C_k = 0,078 \cdot P_k^2 + 13,24 \cdot P_k + 1,685, \text{ €/h} \quad (1.12.)$$

Darbinot katlu ar kondensatoru, kurināmā izmaksas stundā ir zemākas, un tās var noteikt kā:

$$C_{kko} = 0,154 \cdot P_{kko}^2 + 11,14 \cdot P_{kko} + 1,674, \text{ €/h} \quad (1.13.)$$

Iekārtas kurināmā patēriņu atkarībā no ģenerēšanas jaudas nosaka kurināmā patēriņa līkne. Kurināmā izmaksu līkne atšķiras no tās tikai ar mērogu. Mēroga koeficients ir kurināmā cena c_{ku} . Vienādojumi (1.12.) un (1.13.) liecina par nelineārām kurināmā izmaksu izmaiņām, kas liek domāt, ka ir iespējami ekonomiski izdevīgāki un mazāk izdevīgi darbināšanas režīmi.

Pilnīgāku izmaksu analīzi nodrošina īpatnējie rādītāji. Īpatnējos kurināmā siltuma rādītājus b_k un b_{kko} nosaka, patērēto kurināmā enerģiju B dalot ar mērītu katla saražoto siltumenerģiju Q_k un katla un kondensatora saražoto siltumenerģiju Q_{kko} . Īpatnējo rādītāju vērtības nosaka, cik kurināmā enerģijas ir jāpatērē uz vienu saražoto siltumenerģijas vienību. Skaitliski to pašu vērtību iegūst, dalot kurināmā ievadīto jaudu P_{ku} ar katla P_k vai katla un kondensatora jaudu P_{kko} . Īpatnējo rādītāju noteikšanai var izmantot iekārtas kurināmā patēriņa līknes. Zinot kurināmā enerģijas vienības cenu c_{ku} , €/MWh_{ku}, var noteikt katla vai katla ar kondensatoru kurināmā komponentes cenu c_{kuk} vai c_{kukko} , €/MWh_p uz saražotās enerģijas vienību. Lielumu aprēķinu rezultāti redzami 1.8. attēlā.



1.8. att. Īpatnējo kurināmā patēriņa un kurināmā izmaksu izmaiņas atkarībā no ģenerētās jaudas

Līkņu izmaiņu raksturs 1.8. attēlā liecina, ka noteiktu siltumu ģenerējošu jaudu gadījumā vērojami kā īpatnējo kurināmā siltuma rādītāju, tā arī saražotās enerģijas vienības cenu minimumi. Kurināmā izmaksu minimumu noteikšanai izmantojami datu korelācijas analīzē iegūtie izmaiņas aprakstošie vienādojumi.

1.5.2. Kondensatora darbības izmaksas

Veicot katlu mājā energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumus, ir svarīgi zināt, vai tie nodrošinās ekonomiski pozitīvu efektu un cik lielu. Kondensatora analīzei izmantoti dati par detalizētām darbināšanas izmaksām. Lai veiktu analīzi, ir savākti un apkopoti kondensatora darbināšanas dati 2012./2013. gada apkures sezonas 9 mēnešos. Analizējamo datu kopu veido tiešo mērījumu rezultāti – saražotais siltums, elektroenerģijas patēriņš, ūdens patēriņš, kondensatorā uztverto pelnu daudzums–un dati par kurināmā, elektroenerģijas, kanalizācijas, pelnu transportēšanas un darba izmaksām. Datu analīzei veidoti īpatnējie rādītāji, kuros ienākumi, izmaksas un ietaupījumi attiecināti uz kondensatorā saražotās siltumenerģijas vienību MWh_{ko} . Tiek aplūkotas īpatnējās izmaksas elektroenerģijai c_{el} , ūdenim un kanalizācijai $c_{ūka}$, darba spēkam un materiāliem c_{dama} un pelnu noglabāšanai c_{pel} . Kondensatora darbināšanas kopējās īpatnējās izmaksas veido atsevišķu pozīciju īpatnējo izmaksu summā:

$$c_{izm} = c_{el} + c_{ūka} + c_{dama} + c_{pel} + c_{am}, \text{ €/MWh}_{ko} \quad (1.14.)$$

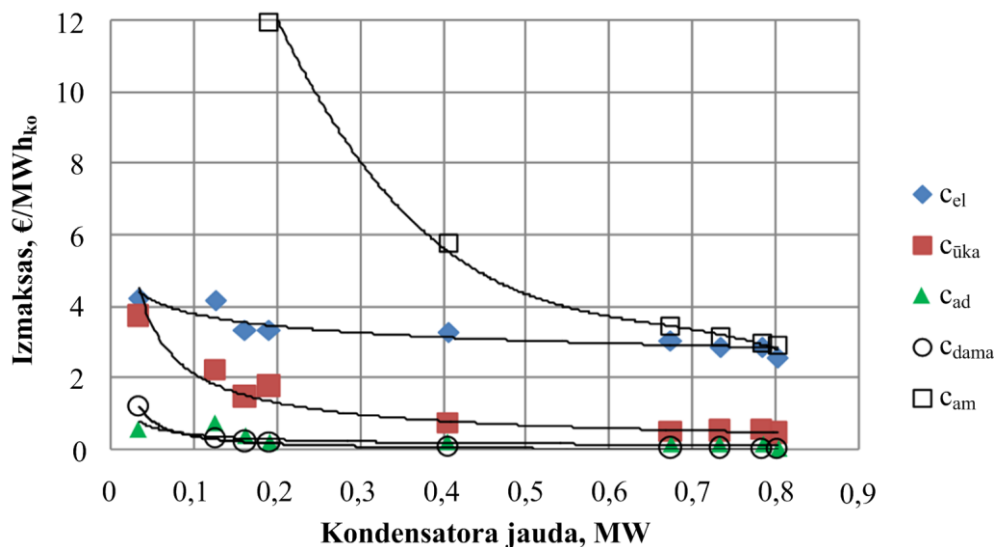
Kondensatora darbības rezultātā iegūtie līdzekļu ietaupījumi ir ieņēmumi c_{iet} , kas saistīti ar šķeldas ekonomiju c_{ie} , un kopējo izmaksu c_{izm} starpību. Kondensatora darbības tiešo mērījumu un aprēķinu ceļā iegūtie dati apkopoti 1.2. tabulā.

1.2. tabula

Kondensatora darbināšanas dati

Parametrs	Mēr- vienība	2012			2013					
		Okt.	Nov.	Dec.	Jan.	Febr.	Mar.	Apr.	Mai.	Jūn.
Saražotā siltum- enerģija Q_{ko}	MWh_{ko}	137	116	577	563,8	484,2	529,9	291,5	90,6	23,9
Jauda P_{ko}	MW	0,19	0,16	0,8	0,78	0,67	0,73	0,4	0,12	0,03
Ieņēmumi c_{ie}	€/MWh _{ko}	14,2	14,1	15,8	15,2	15,4	15,4	14,3	12,1	11,8
Izmaksas c_{izm}	€/MWh _{ko}	17,93	20	6,14	6,62	7,28	6,82	10,13	26	79,8
Elektroenerģija c_{el}	€/MWh _{ko}	3,46	3,36	2,6	2,88	3,06	2,9	3,29	4,19	4,26
Ūdens un kanalizācija $c_{ūka}$	€/MWh _{ko}	1,79	1,49	0,49	0,56	0,52	0,54	0,74	2,24	3,75
Darbspēks un materiāli c_{dama}	€/MWh _{ko}	0,21	0,25	0,051	0,052	0,06	0,055	0,1	0,32	1,23
Pelnu noglabāšana c_{pel}	€/MWh _{ko}	0,21	0,41	0,08	0,144	0,168	0,154	0,24	0,75	0,57
Amortizācija c_{am}	€/MWh _{ko}	12,26	14,51	2,92	2,98	3,47	3,17	5,76	18,5	70
Ietaupījumi c_{iet}	€/MWh _{ko}	-3,73	-5,92	9,66	8,78	8,12	8,58	4,17	-13,9	-68

Kondensatora darbināšanas izmaksu sastāvdaļu izmaiņas atkarībā no kondensatora jaudas redzamas 1.9. attēlā.



1.9. att. Kondensatora darbināšanas izmaksas atkarībā no jaudas

Redzams, ka izmaksu izmaiņu raksturs ir vienmērīgs, bez izteikta minimuma. Pieaugot kondensatora jaudai, visas īpatnējās izmaksas samazinās. Mazu kondensatora jaudu gadījumā dominējošās ir amortizācijas un elektroenerģijas izmaksas un pieaug ūdens un kanalizācijas izmaksas. Lielāku jaudu gadījumā īpatnējās elektroenerģijas un amortizācijas izmaksas izlīdzinās.

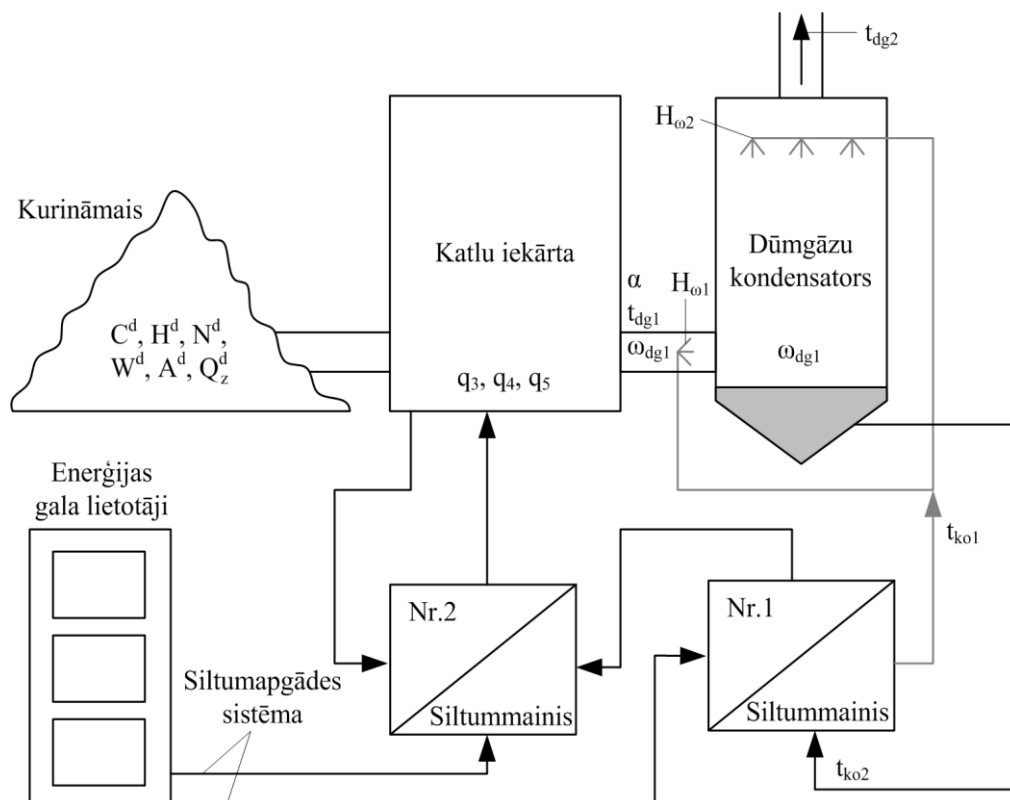
1.6. Dūmgāzu kondensatora lietojuma siltumapgādes sistēmā ekointensitātes izpētes metodika

1.6.1. Siltumapgādes sistēmas darbības ekointensitāte

Siltumapgādes sistēmas darbības ekointensitāte raksturo iespēju palielināt katlu mājā saražotās, siltuma tīklos nodotās un enerģijas lietotāja pusē saņemtās siltumenerģijas daudzumu, nepalielinot kurināmā patēriņu. Tādējādi samazinās dabas resursu patēriņš, videi kaitīgās emisijas gaisā un siltumnīcefekta gāzu emisijas, kas izceļ vides problēmu risinājumu sasaisti ar energoefektivitāti un ekointensitāti. Darbināšanas ekointensitāte ir atkarīga no siltumapgādes sistēmas elementu (energoavota, siltuma tīklu un enerģijas lietotāja) energoefektīvas darbības sistēmā kopumā. Tā ir atkarīga no šādiem siltumapgādes sistēmas darbības tehnoloģiskajiem, ekonomiskajiem, vides un pārvaldības aspektiem:

1. degšanas procesa organizācijas katlu kurtuvē,
2. izmantotā energoresursa kvalitātes,
3. katlu iekārtas energoefektivitātes,
4. siltuma tīklu darbības parametriem,
5. katlu mājas pārvaldības profesionalitātes,
6. ekonomiski izdevīgas iekārtu uzstādīšanas un darbināšanas parametriem,
7. dabas resursu lietderīgas izmantošanas,
8. kaitīgo vielu emisiju daudzumu monitoringa,
9. siltumnīcefekta gāzu emisiju apjomu kontroles.

Siltumapgādes sistēmas elementi ilustrēti 1.10. attēlā, un tajā ir parādītas sistēmas darbības parametru noteikšanas vietas.



1.10. att. Siltumapgādes sistēmas elementu integrācijas principiālā shēma

Sistēma sastāv no šādiem elementiem:

1. katlu iekārtas ar kurināmā un ūdens sagatavošanas un attīrīšanas saimniecību, kā arī dūmgāzu attīrīšanas tehnoloģiju;
2. papildus esošajai iekārtai ir uzstādīta inovatīva šķeldas katlu mājas tehnoloģija – gāzes kondensators dūmgāzu dziļai dzesēšanai, kas sastāv no divām virknē saslēgtām daļām;
3. siltummaiņa siltuma tīklu ūdens sildīšanai ar gāzes kondensatorā iegūto siltumenerģiju;
4. siltummaiņa siltuma tīklu ūdens sildīšanai ar katlu iekārtā saražoto siltumenerģiju;
5. siltuma tīklu cauruļvadu sistēmas, kas savieno energoavotu ar enerģijas galalietotājiem;
6. siltumenerģijas patērētājiem, kas siltumenerģiju izmanto ēku apkurei un karstā ūdens apgādei.

Siltumapgādes sistēmas darbības parametri tiek noteikti un vērtēti no kurināma patēriņa samazinājuma viedokļa, un pēc tam noteikta to ietekmes uz vidi un klimata pārmaiņām.

Gāzes kondensators izveidots tā, lai tajā notiekošie procesi papildinātu viens otru un siltuma un masas apmaiņas apstākļi būtu optimāli. Optimālie kondensatora darbības apstākļi ir atkarīgi gan no paša kondensatora konstrukcijas un darbināšanas apstākļiem, gan no katlu iekārtas darbināšanas nosacījumiem un efektivitātes, gan arī no siltumapgādes sistēmas darbības parametriem.

1.6.2. Siltumapgādes sistēmas ekointensitātes vērtēšanas modelis

Siltumapgādes sistēmas darbības ekointensitāti raksturo parametru savstarpējā mijiedarbība un tās matemātisko aprakstu veido vienādojumu sistēma. Vienādojumi sniedz atbildi par neatkarīgo mainīgo kopu, kuri ir ietverti ekointensitātes vērtēšanas modelī un ļauj spriest par siltumapgādes sistēmas darbības optimizācijas virzieniem.

Vispārīgā gadījumā ir jārisina kompleksa četru vienādojumu sistēma, kuru funkcionālā atkarība ir ilustrēta zemāk. Šajā gadījumā ekointensitāti raksturo kurināmā patēriņa samazinājums:

$$\begin{cases} dB_1 = f(C^d, H^d, N^d, W^d, A^d, Q_z^d) \\ dB_2 = f(\alpha, t_{dg1}, q_3, q_4, q_5) \\ dB_3 = f(t_{dg1}, t_{dg2}, t_{irr1}, t_{irr2}, \omega_{dg}, H_{\omega1}, H_{\omega2}) \\ dB_3 = f(t_{at}, t_{tu}, G_{st}) \end{cases} \quad (1.15.)$$

kur

dB – kurināmā patēriņa samazinājums;

C^d, H^d, N^d, W^d, A^d – darba kurināmā sastāvs: attiecīgi ogleklis, ūdeņradis, slāpeklis, mitruma un pelnu saturs;

Q_z^d – darba kurināmā zemākais sadegšanas siltums;

α – gaisa patēriņa koeficients;

q_3 – ķīmiski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi;

q_4 – mehāniski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi;

q_5 – siltuma zudumi apkārtējā vidē;

t_{dg1} – dūmgāzu temperatūra pirms gāzes kondensatora;

t_{dg2} – dūmgāzu temperatūra pēc gāzes kondensatora;

t_{irr1} – šķidrums temperatūra pirms sprauslām;

t_{irr2} – šķidrums temperatūra pēc gāzes kondensatora;

ω_{dg} – dūmgāzu ātrums gāzes kondensatorā, kas var atšķirties iekārtas 1. un 2. daļā;

$H_{\omega1}$ – izsmidzināšanas blīvums pirmajā gāzes kondensatora daļā;

$H_{\omega2}$ – izsmidzināšanas blīvums otrajā gāzes kondensatora daļā;

t_{at} – siltuma tīklu atgaitas temperatūra;

t_{tu} – siltuma tīklu turpgaitas temperatūra;

G_{st} – siltuma tīklu ūdens caurplūde.

Kurināmā patēriņa samazinājumu nosaka:

$$dB = B_1 - B_2, \quad (1.16.)$$

kur

B_1 – kurināmā patēriņš katlu mājā ar gāzes kondensatoru;

B_2 – kurināmā patēriņš katlu mājā bez gāzes kondensatora.

Pirmais sistēmas (1.15.) vienādojums apkopo kurināmā kvalitātes parametrus vienādojumu sistēmā, otrs – katla darbināšanas efektivitātes rādītājus, trešais – gāzes kondensatora darbības neatkarīgos mainīgos, bet ceturtais – siltuma tīklu regulēšanas iespēju parametrus. Siltuma zudumi ar dūmgāzēm tiek noteikti, mainoties dūmgāzu parametriem (dūmgāzu temperatūrai aiz katlu iekārtas un gaisa patēriņa koeficientam). Tāpēc otrajā vienādojumā izdalīti abi šie parametri, kas ir jāuzskata par ievaddatiem gāzes kondensatora darbības raksturošanai: dūmgāzu temperatūrām, ātrumiem, dūmgāzu caurplūdei un citiem iekārtas energoefektivitāti raksturojošiem faktoriem.

Kurināmā patēriņa samazinājumu, ja nemainīgs ir saražotais siltums un katla lietderības koeficients, saistot ar kurināmā kvalitātes uzlabojumu, var novērtēt kā:

$$\Delta B_1 = \frac{Q_{sar}}{\eta \cdot \left(\frac{1}{Q_{z_1}^d} - \frac{1}{Q_{z_2}^d} \right)}, \quad (1.17.)$$

kur

η – katla lietderības koeficients;

Q_{sar} – saražotais siltums;

$Q_{z_1}^d, Q_{z_2}^d$ – sākuma un uzlabotas kvalitātes kurināmā zemākais sadeģšanas siltums.

Attiecībā uz šķeldu tiek pieņemts, ka sākuma kurināmais ir mitrs un zemas kvalitātes, bet uzlabotais atbilst ES standarta prasībām, un tā mitruma saturs nav augstāks par 25 %. Vienādojumu (1.17.) var matemātiski pārveidot un iegūt izteiksmi:

$$\Delta B_1 = \frac{k_1}{Q_{z_2}^d \cdot \left(\frac{Q_{z_2}^d}{Q_{z_1}^d} - 1 \right)}, \quad (1.18.)$$

kur

$k_1 = Q_{sar}/\eta$ – primārās enerģijas patēriņš.

Kurināmā zemākais sadeģšanas siltums ir atkarīgs no kurināmā sastāva, un tā noteikšanai var izmantot Mendeļejeva formulu:

$$Q_{zem}^d = k_C \cdot C_i^d + k_H \cdot H_i^d - k_{OS} \cdot (O_i^d + S_i^d) - k_W \cdot W_i^d, \quad (1.19.)$$

kur

$k_C = 339$ – oglekļa koeficients;

$k_H = 1031$ – ūdeņraža koeficients;

$k_{OS} = 109$ – skābekļa un sēra koeficients;

$k_W = 25$ – mitruma koeficients.

Kurināmā sastāvdaļu $C_i^d, H_i^d, O_i^d, S_i^d, W_i^d$ vērtības ir dotas procentos. Jo augstāks kurināmā sākuma mitruma saturs, jo lielāka ir kurināmā ekonomija, pazeminot mitruma saturu līdz standarta vērtībai.

Kurināmā patēriņa samazinājumu, kas saistīts ar katla darbināšanas efektivitātes rādītāju izmaiņām (uzlabojumu), var noteikt ar vienādojumu:

$$\Delta B_2 = \frac{Q_{sar}}{Q_z^d \cdot \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right)} = \frac{k_2}{\eta_1 \cdot \left(1 - \frac{\eta_1}{\eta_2} \right)}, \quad (1.20.)$$

kur

η_1, η_2 – katla lietderības koeficienti attiecīgi tehnoloģiskā procesa sākumā un beigās;

$k_2 = Q_{sar}/Q_z^d$ – primāro resursu lietojuma rādītājs.

Katla lietderības koeficienta noteikšanai var izmantot apgrieztās bilances vienādojumu:

$$\eta_i = 100 - (q_{2i} + q_{3i} + q_{4i} + q_{5i}), \quad (1.21.)$$

kur

$q_{2i}, q_{3i}, q_{4i}, q_{5i}$ – siltuma zudumi attiecīgi ar dūmgāzēm, ķīmiski nepilnīgu degšanu, mehāniski nepilnīgu degšanu un siltuma atdevi apkārtējā vidē.

Būtiski ir siltuma zudumi ar izvadāmajām dūmgāzēm, un tos nosaka ar vienādojumu:

$$q_{2i} = \frac{1}{Q_z^d} \cdot \left[\left(c'_{CO_2} \cdot V_{CO_{2i}} + c'_{N_2} \cdot V_{N_{2i}} + c'_{H_2O} \cdot V_{H_2O_i}^0 + (\alpha - 1) \cdot c'_{gaisss} \cdot V_i^0 \right) \cdot t_{dgl_i} - c'_{gaisss} \cdot V_i^0 \cdot t_{gaisss} \right] \cdot (100 - q_{4i}), \quad (1.22.)$$

kur

c'_{CO_2} , c'_{N_2} , c'_{H_2O} , c'_{gaisss} – gāzu un gaisa īpatnējā siltumietilpība;

$V_{N_{2i}}^0$, $V_{H_2O_i}^0$, V_i^0 – slāpekļa, tvaika un gaisa tilpumi stehiometriskos degšanas apstākļos;

$V_{CO_{2i}}$ – trīs atomu gāzes tilpums;

t_{dgl_i} – dūmgāzu temperatūra pēc katla;

t_{gaisss} – degšanai padodamā gaisa temperatūra.

Izsakot gāzu tilpumus, izmantojot kurināmā sastāvu, (1.22.) vienādojumu var pārveidot kā:

$$q_2 = \frac{1}{Q_z^d} \cdot \left\{ \left[K_{1C} \cdot c'_{CO_2} + K_{2C} \cdot c'_{N_2} + K_{3C} \cdot c'_{H_2O} + K_{4C} \cdot (\alpha - 1) \cdot c'_{gaisss} \right] \cdot C_i^d + \left[K_{1H} \cdot c'_{N_2} + K_{2H} \cdot c'_{H_2O} + K_{3H} \cdot (\alpha - 1) \cdot c'_{gaisss} \right] \cdot H_i^d + \left[K_{1S} \cdot c'_{CO_2} + K_{2S} \cdot c'_{N_2} + K_{3S} \cdot c'_{H_2O} + K_{4S} \cdot (\alpha - 1) \cdot c'_{gaisss} \right] \cdot S_i^d + K_{1N_2} \cdot c'_{N_2} \cdot N_i^d + K_{1W} \cdot c'_{H_2O} \cdot W^d - \left[K_{2S} \cdot c'_{N_2} + K_{3H} \cdot c'_{H_2O} + K_{4S} \cdot (\alpha - 1) \cdot c'_{gaisss} \right] \cdot O_i^d \cdot t_{dgl_i} - \left(K_{4C} \cdot \alpha \cdot c'_{gaisss} \cdot C_i^d + K_{3H} \cdot \alpha \cdot c'_{gaisss} \cdot H_i^d + K_{4S} \cdot \alpha \cdot c'_{gaisss} \cdot S_i^d - K_{3O} \cdot \alpha \cdot c'_{gaisss} \cdot O_i^d \right) \cdot t_{gaisss} \right\} \cdot (100 - q_{4i}), \quad (2.23.)$$

kur

$K_{1C} = 0,0187$; $K_{2C} = 0,07$; $K_{3C} = 0,00143$; $K_{4C} = 0,089$ – oglekļa koeficienti;

$K_{1H} = 0,21$; $K_{2H} = 0,11528$; $K_{3H} = 0,266$ – ūdeņraža koeficienti;

$K_{1S} = 0,007$; $K_{2S} = 0,026$; $K_{3S} = 0,00053$; $K_{4S} = 0,033$ – sēra koeficienti;

$K_{1N} = 0,008$ – slāpekļa koeficients;

$K_{1W} = 0,0124$ – mitruma koeficients.

Vienādojumu sistēmas (1.15.) trešais vienādojums apraksta primāro resursu samazinājumu ΔB_3 , izmantojot katlu mājā dūmgāzu kondensatoru. Dūmgāzu dzesēšanas, tvaiku kondensācijas un šķidrums iztvaikošanas procesu, kuri notiek vienlaikus kondensatorā, matemātiskais apraksts ir komplicēts un šeit netiek aprakstīts. Kondensatora sakarības iegūtas eksperimentāli, un tās apraksta empīriski vienādojumi.

Nosakot kurināmā patēriņa samazinājumu, iepriekš aplūkotajās izteiksmēs saražotais siltums bija nemainīgs. Tā izmaiņas nosaka izteiksme:

$$Q_{sar} = c_{\bar{u}d} \cdot G_{st} \cdot (t_{tu} - t_{at}), \quad (1.24.)$$

kur

$c_{\bar{u}d}$ – ūdens īpatnējā siltumietilpība;

G_{st} – tīkla ūdens plūsma.

Būtiska ietekme uz kurināmā patēriņu ir atgaitas ūdens temperatūrai – jo zemāka temperatūra, jo lielāka kurināmā ekonomija ΔB_4 .

1.6.3. Katlu mājas ekointensitātes vērtēšanas modelis

Ekonomiski izdevīgas iekārtu uzstādīšana un darbināšana ir saistīta ar nepieciešamību samazināt darbināšanas izmaksas, lai paaugstinātu katlu mājas darbības efektivitāti. Piemēram, dūmgāzu dziļas dzesēšanas iekārtu uzstādīšana katlu mājā ir saistīta ar kapitālieguldījumiem, kurus ir iespējams atpelnīt 3–10 gados atkarībā no uzstādītās jaudas un izvēlētās iekārtas tipa.

Ludzas pilsētas katlu mājā ir uzstādīts gāzes kondensators, kas kalpo kā eksperimentu poligons zinātniekiem ne tikai siltuma un masas apmaiņas procesu izpētei, bet arī šādu iekārtu darbības efektivitātes noteikšanai. Iekārta izveidota tā, ka to ir iespējams darbināt gan ar pildījumu, gan bez tā, gan vienā vai otrā vietā ieslēdzot un izslēdzot smidzināšanas sprauslas, gan mainot smidzināšanas blīvuma parametru.

Katlu mājas darbības ekointensitātes izmaiņas ir noteiktas, kopējo noteiktā laika vienībā katlu mājā saražoto siltumu dalot ar katla iekārtu saražoto siltumu tajā pašā laika vienībā:

$$\Delta q = \frac{(Q_{ko} + Q_k)}{Q_k}, \quad (1.25.)$$

kur

Δq – katlu mājas darbības ekointensitāte

Q_{ko} – ar gāzes kondensatoru saražotā siltumenerģija;

Q_k – ar katlu saražotā siltumenerģija.

Katlu mājas darbības ekointensitātes izmaiņas ilustrē iespēju palielināt katlu mājā saražotās siltumenerģijas daudzumu, nepalielinot kurināmā patēriņu.

Katla īpatnējā noslodze noteikta, attiecinot katla noslodzi pret katla uzstādīto jaudu:

$$q = \frac{Q_{fa}}{Q_{uzs}}, \quad (1.26.)$$

kur

q – katla īpatnējā noslodze;

Q_{fa} – faktiskā katla slodze;

Q_{uzs} – katla uzstādītā jauda.

Aplūkotās sakarības izmantotas ekointensitātes novērtējumam, kas veikts promocijas darba rezultātu analīzes nodaļā.

2. IZPĒTES REZULTĀTI UN TO ANALĪZE

2.1. Siltumsūkņa integrācijas siltumapgādes sistēmā rezultāti

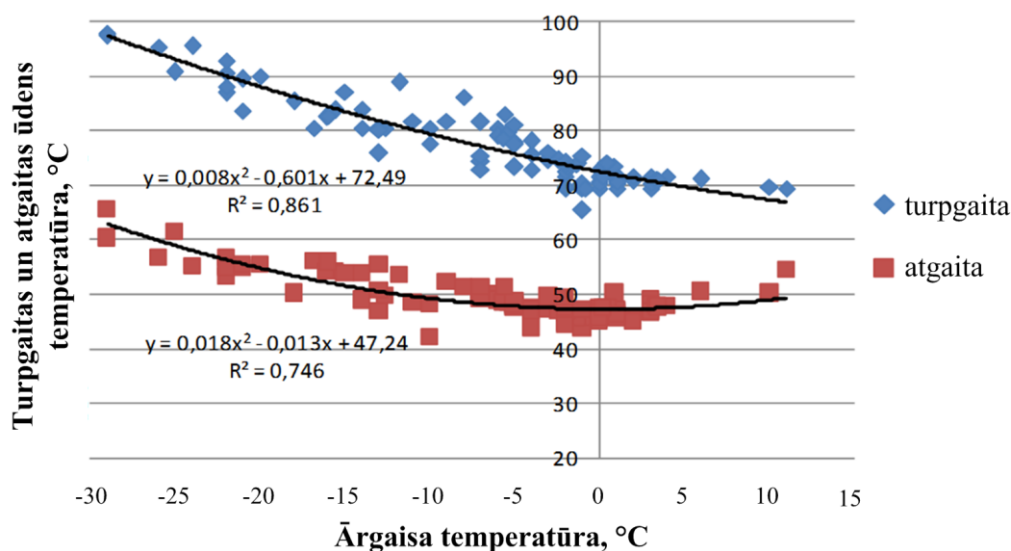
2.1.1. Siltumsūkņa lietojuma modeļa testēšana Ludzas siltumapgādes sistēmai

Siltuma sūkņa lietojuma modelis aprobēts Ludzas pilsētas siltumapgādes sistēmā. Šīs sistēmas avots ir katlu māja, kurā ir uzstādīti divi katli: 8 MW šķeldas katls pamatslodzes segšanai un pīķa slodzes katls, kas izmanto dīzeļdegvielu. Pēc šķeldas katla ir uzstādīts dūmgāzu kondensators, kas nodrošina siltuma atgūšanu, kā arī paaugstina katla energoefektivitāti.

Maģistrālie tīkli pēc katlu mājas sadalīti divos zaros. Vienā no tiem paredzēts uzstādīt siltumsūkni un paaugstināt temperatūru pirms patērētāja par Δt , lai nodrošinātu patērētājiem nepieciešamo siltuma slodzi zemu ārējais temperatūru gadījumā. Lielākais temperatūras paaugstinājums ir $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ pie ārējais temperatūras $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$, un tas pakāpeniski samazinās, pieaugot ārējais temperatūrai. Sākot ar ārējais temperatūru $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, turpgaitas ūdens temperatūra nav paaugstināta un tās vērtība un izmaiņas atbilst esošajam turpgaitas temperatūras izmaiņu grafikam. Pašreizējais risinājums paredz paaugstināt turpgaitas ūdens temperatūru visai sistēmai katlu mājas izejā. Šāds risinājums saistīts ar lielākiem siltuma zudumiem tīklos. Modelī pieņemts, ka augstas temperatūras siltuma sūkņa gāzes dzesētāja jauda ir 260 kW un iztvaikotāja jauda – 190 kW.

Lai modelētu sistēmu, bez aplūkotajiem enerģijas un masas bilances vienādojumiem ir nepieciešami sistēmas darbību raksturojošu parametru izmaiņu empīriski vienādojumi. Tie iegūti, veicot Ludzas siltumapgādes sistēmas 2011./2012. gada apkures sezonas darbības datu statistisku analīzi.

Siltumapgādes sistēmas tīkla ūdens turpgaitas un atgaitas temperatūru izmaiņas atkarībā no ārējais temperatūras redzamas 2.1. attēlā.



2.1. att. Siltumapgādes sistēmas turpgaitas un atgaitas temperatūras izmaiņas apkures sezonas laikā

Veicot datu korelācijas analīzi, ir iegūti empīriski vienādojumi temperatūru izmaiņu noteikšanai. Iegūtās sakarības un korelācijas koeficientu kvadrātu vērtības ir redzamas 2.1. attēlā.

Līdzīgi, apstrādājot novērojumu datus, iegūtas sakarības patērētāju grupas siltuma slodzes izmaiņām:

$$Q_p = 0,02 \cdot t_{ag}^3 - 0,273 \cdot t_{ag}^2 - 50,41 \cdot t_{ag} + 759,2, \text{ kW} \quad (2.1.)$$

ūdens caurplūdes izmaiņām siltuma tīklu atzarā:

$$G_p = -0,011 \cdot t_{ag}^2 - 0,997 \cdot t_{ag} + 25,7, \text{ m}^3/\text{h} \quad (3.2.)$$

nepieciešamā temperatūras paaugstinājuma pirms patērētāja izmaiņām:

$$\Delta t_t = -0,00017 \cdot t_{ag}^3 + 0,00211 \cdot t_{ag}^2 - 0,00061 \cdot t_{ag} - 0,0148, \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.3.)$$

Caurplūdi m_p ar G_p saista sakarība:

$$m_p = \frac{G_p \cdot \rho_{\bar{u}}}{3600}, \text{ kg/s} \quad (3.4.)$$

kur

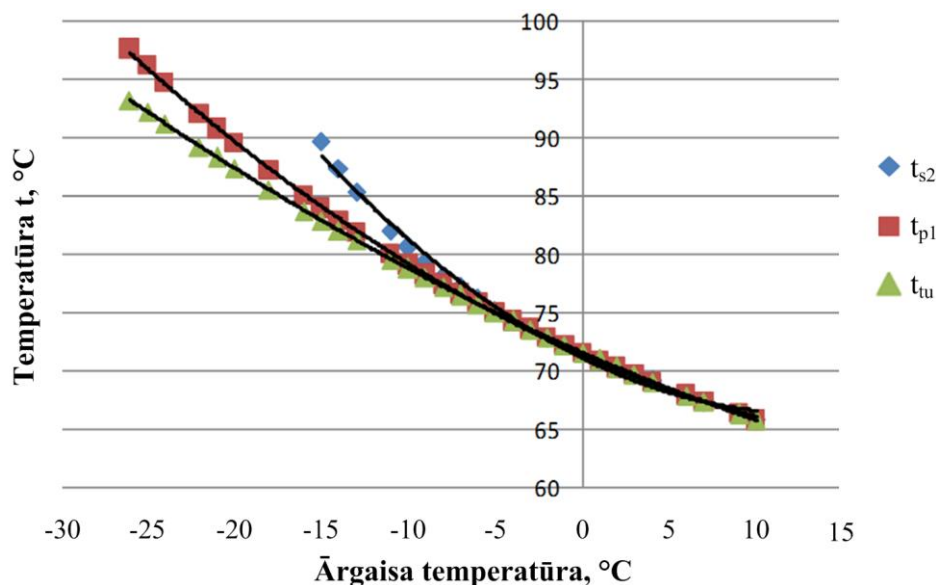
$\rho_{\bar{u}}$ – ūdens blīvums, kg/m^3 .

Patērētāju grupas siltuma slodzes Q_p izmaiņas ņem vērā temperatūras paaugstinājumu pirms patērētāja.

2.1.2. Modelēšanas rezultāti un to analīze

Modelēšana sākas ar siltuma tīkla trases, kurā tiks uzstādīts siltumsūkņis, parametru ievadi. Katram no šiem parametriem ir iegūta sakarība empīrisku vienādojumu veidā kā funkcija no ārējais temperatūras. Tiek ievadīta izvēlētā siltumsūkņa gāzes dzesētāja un iztvaikotāja jauda un aprēķināti siltuma tīklu parametri pēc siltumsūkņa uzstādīšanas. Modelēšana parāda nepieciešamo temperatūru pēc siltumsūkņa gāzes dzesētāja, lai, sajaucoties ar tīkla turpgaitas ūdeni t_{tu} , nodrošināto patērētājam nepieciešamo ūdens temperatūru t_{p1} . Tā kā pieļaujamā ūdens temperatūra pēc siltumsūkņa gāzes dzesētāja t_{s2} ir limitēta – ap 90°C , tad aprēķinātā nepieciešamā temperatūra tiek salīdzināta ar siltumsūkņa pieļaujamo temperatūru. Ja $t_{s2} > 90^\circ\text{C}$, tad siltumsūkņi nevar izmantot un patērētāja siltuma slodze ir pilnībā jāsedz no katlu mājas, paaugstinot tajā turpgaitas temperatūru par Δt_t .

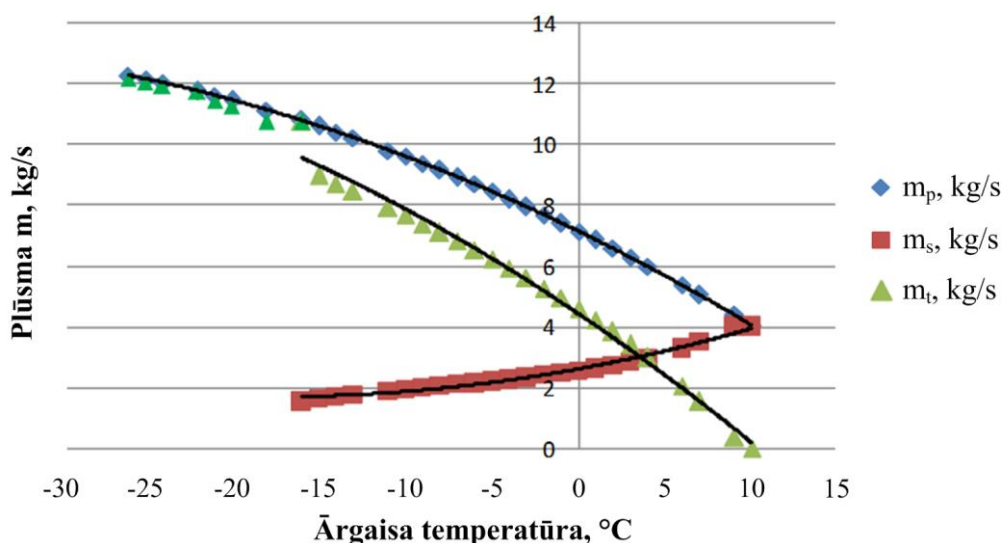
Modelēšanas rezultātā iegūtās temperatūras izmaiņas atkarībā no ārējais temperatūras redzamas 2.2 attēlā.



2.2. att. Siltumnesēju temperatūras izmaiņas pirms patērētāja

Attēlā redzamās līknes atbilst ūdens temperatūrai t_{s2} pēc siltumsūkņa pirms sajaukšanās ar turpgaitas ūdeni mezglā M1, patērētāja ūdens temperatūrai t_{p1} un mezglā M1 piejaucamā turpgaitas ūdens temperatūrai t_{tu} . Temperatūru izmaiņu analīze rāda, ka zemu ārējais temperatūru gadījumā patērētāja siltuma slodzes segšanai nevar izmantot siltumsūkni un ir jāpaaugstina turpgaitas ūdens temperatūra katlu mājas izvadā. Siltumsūkņa līdzdarbība patērētāju slodzes segšanā ir iespējama, ja ārējais temperatūra ir $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ vai augstāka. Ja ārējais temperatūra ir $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$, tad patērētājam nepieciešamo ūdens temperatūru $t_{p1} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ iegūst, mezglā M1, pēc siltumsūkņa, sajaucot ūdeni ar temperatūru $t_{s1} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ar siltuma tīklu turpgaitas ūdeni, kura temperatūra $t_{tu} = 82\text{ }^{\circ}\text{C}$. Redzams, ka, ja ārējais temperatūra ir aptuveni $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ un augstāka, tad aplūkojamās temperatūras līknes sakrīt un nav temperatūras paaugstinājuma pirms patērētāja.

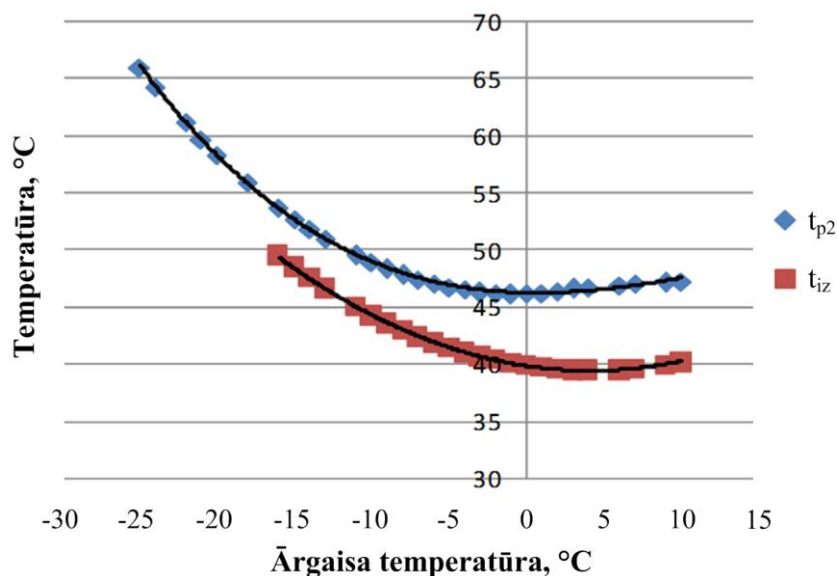
Lai nosegtu patērētāja siltuma slodzi, bez siltumnesēju temperatūrām jāzina to plūsmas. Modelēšanas rezultātā iegūtās plūsmu izmaiņas atkarībā no ārējais temperatūras redzamas 2.3. attēlā.



2.3. att. Plūsmu izmaiņas atkarībā no ārējais temperatūras

Attēlā redzamas patērētāja siltumnesēja plūsmas m_p , plūsmas caur siltumsūkņa gāzes dzesētāju m_s , un siltuma tīkla turpgaitas plūsmas m_t izmaiņas atkarībā no ārējais temperatūras. Plūsma m_s ir tīkla ūdens daudzumu, kuru nozaro no siltuma tīkla atgaitas un nosaka to atgaitas siltuma daudzumu, kuru izmanto patērētāja grupas siltumapgādes nodrošināšanā. Tas nozīmē, ka vēlams pēc iespējas lielāka plūsma caur siltumsūkni. Plūsmu ierobežo siltumsūkņa gāzes dzesētāja jauda un nepieciešamā temperatūra pēc siltumsūkņa. Paaugstinoties ārējais temperatūrai, samazinās kopējā plūsma m_p un plūsma no tīklu turpgaitas m_t , bet pieaug plūsma caur siltumsūkņa gāzes dzesētāju m_s . Tas nozīmē, ka arvien lielāks īpatsvars patērētāja siltuma nodrošināšanā ir siltumsūknim.

Zemu ārējais temperatūru gadījumā (zem $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$) siltumsūknis, kā tika minēts iepriekš, nedarbojas. Tas nozīmē, ka visu patērētāja siltuma slodzi sedz no katlu mājas un $m_p = m_t$. Siltumnesēja temperatūras izmaiņas pēc patērētāja redzamas 2.4. attēlā.



2.4. att. Siltumnesēja temperatūras izmaiņas pēc patērētāja atkarībā no ārējais temperatūras

Attēlā redzamas siltumnesēja temperatūras pēc patērētāja t_{p2} un temperatūras pēc siltumsūkņa iztvaikotāja t_{iz} izmaiņas atkarībā no ārējais temperatūras. Analīze rāda, ka ārējais temperatūru intervālā siltumsūkņa darbības temperatūra pēc iztvaikotāja ir zemāka par tīklu atgaitas temperatūru. Tas nozīmē, ka siltumsūkņa lietojums siltumapgādes sistēmā atbilstoši piedāvātajai shēmai pazemina tīklu atgaitas ūdens temperatūru. Zemu ārējais temperatūru gadījumos (zem -16 °C) tīkla ūdens temperatūra pēc patērētāju grupas atbilst temperatūrai t_{p2} .

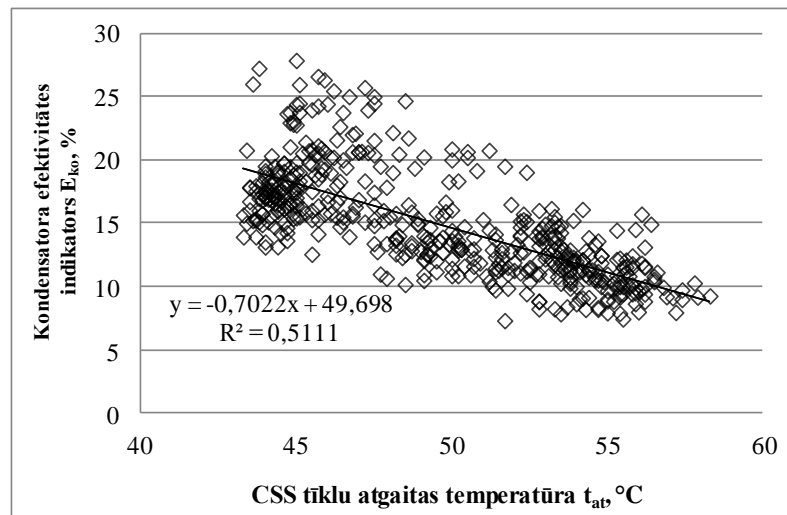
Veiktās analīzes rezultāti ir spēkā, ja ievēroti modelēšanas sākuma pieņēmumi. Būtiskākais no tiem ir nosacījums, ka siltumsūknis strādā ar nominālo gāzes dzesētāja Q_{Dz} un iztvaikotāja Q_{iz} jaudu. Teorētiskie un eksperimentālie pētījumi siltumsūkņa lietojumam siltumapgādes sistēmā liecina, ka aplūkojamā ūdens temperatūru diapazonā siltumsūkņa COP mainās 2,8–3,4 robežās.

2.2. Kondensatora nomogrammas izveides rezultāti

2.2.1. Kondensatora parametru mijiedarbības sakarības

Kondensatora darbību raksturojošie neatkarīgie mainīgie parametri iedalāmi divās grupās: pašu kondensatoru raksturojoši (iesmidzināšanas koeficients kondensatora horizontālajā K_{sh} un vertikālajā K_{sv} daļā, dūmgāzu temperatūra pēc kondensatora t_{dg2} , ūdens temperatūra pēc kondensatora un pirms tīklu siltummaiņa $t_{ū2}$), kondensatora un siltumapgādes sistēmas mijiedarbību raksturojoši (ūdens plūsma caur tīkla siltummaini siltuma tīklu pusē G_t , katla jauda N_k un siltuma tīklu atgaitas temperatūra t_{at}).

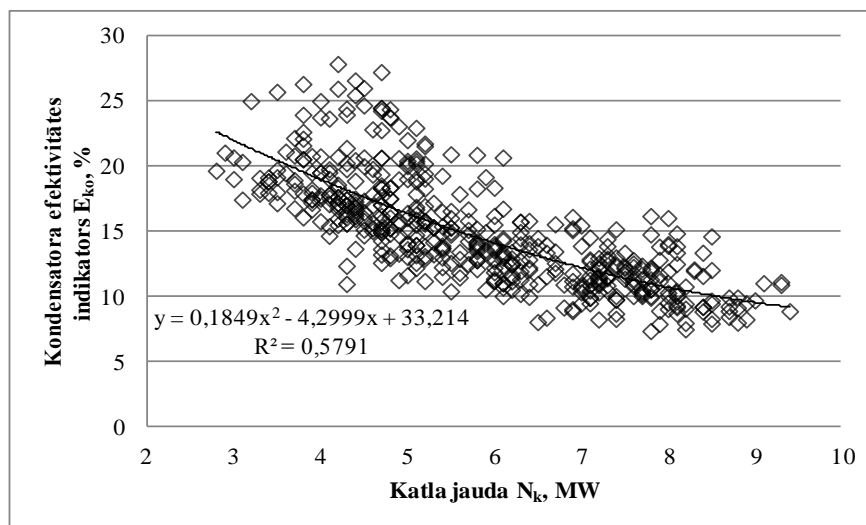
Viens no būtiskākajiem mijiedarbības parametriem ir siltuma tīklu atgaitas temperatūra. Lai sāktos ūdens tvaika kondensācija no dūmgāzēm, tās ir jāatdzesē līdz rāsas punkta temperatūrai. Turpmākais temperatūras pazeminājums noteiks to, cik pilnīga būs tvaika kondensācija un cik pilnīga būs latentā siltuma atguve, un tāad cik efektīvs būs kondensators. Dūmgāzu rāsas punkta temperatūra ir tuvu 65 °C . To ietekmē dūmgāzu mitruma saturs un skābekļa daudzums dūmgāzēs. Lai panāktu tvaika kondensāciju, kondensatora vertikālajā daļā iesmidzināmā ūdens temperatūrai ir jābūt zemākai. Iesmidzināmā ūdens dzesēšanu veic tīkla siltummainī ar atgaitas ūdens palīdzību. Tādā veidā tīkla ūdens pilda dzesētāja funkcijas, un dzesētāja efektivitāti nosaka atgaitas ūdens temperatūra. Kondensatora energoefektivitātes indikatora izmaiņas atkarībā no tīklu atgaitas temperatūras ir redzamas 2.5. attēlā.



2.5. att. Kondensatora efektivitātes indikatora izmaiņas atkarībā no siltuma tīklu atgaitas temperatūras

Redzams, ka, pazeminot atgaitas ūdens temperatūru par 1 °C, kondensatora efektivitātes indikatora vērtība pieaug par 0,7 %. Siltuma tīklu atgaitas temperatūra ir mainīgs lielums, un to ietekmē ārējais temperatūra, sistēmas siltuma slodze, tās regulēšanas veids, kā arī patērētāja siltuma mezglu darbība. Daudzo rādītāju ietekme izskaidro 2.5. attēlā redzamo datu izkliedi.

Lai segtu apkures sezonas mainīgo slodzi, ir jāmaina katlu jauda. Mērītās katlu jaudas un tām atbilstošās indikatora izmaiņas apkures sezonas laikā redzamas 2.6. attēlā.



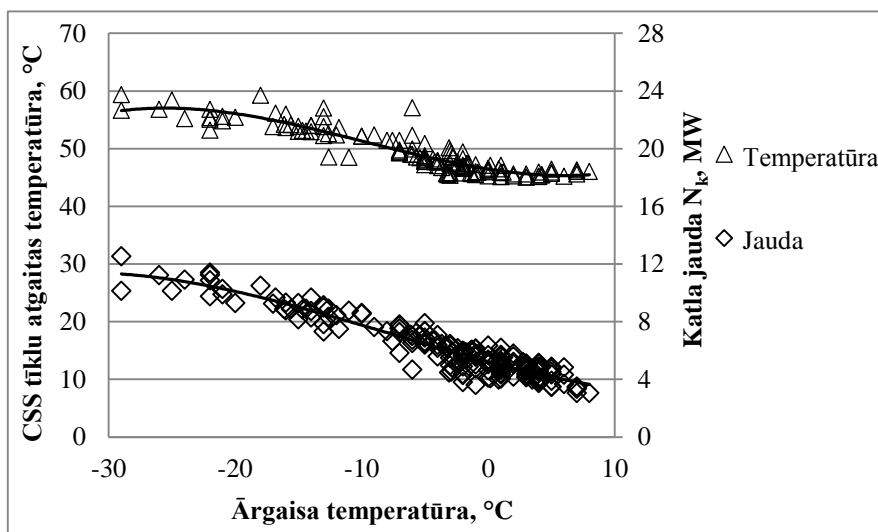
2.6. att. Kondensatora efektivitātes indikatora izmaiņas atkarībā no katla jaudas

Siltumapgādes sistēmas datu analīze liecina, ka, pieaugot katlu jaudai, pieaug arī kondensatora jauda. Taču lielāku katla jaudu gadījumā kondensatora jaudas attiecība pret katla jaudu ir procentuāli mazāka nekā mazām katlu jaudām. Pieaugot katlu jaudai, kondensatora efektivitātes indikatora vērtība samazinās nelineāri un ir vērojama datu izkliede. Indikatora vidējo vērtību izmaiņas apraksta otrās pakāpes vienādojums:

$$E_{ko} = 0,184 \cdot N_k^2 - 4,299 \cdot N_k + 33,21 \quad (2.5)$$

Siltumapgādes sistēmas darbības režīmus nosaka ārējais temperatūra, un no tās ir atkarīga patērētāja slodzes segšanai nepieciešamā katlu jauda un tīkla siltumnesēja parametri; ūdens plūsma, turpgaitas un atgaitas temperatūra. Ārējais temperatūra ir būtisks, bet nav

vienīgais katlu jaudu un tīklu atgaitas temperatūru noteicošais faktors. Apkures sezonas laikā novērotās katlu jaudas un atgaitas temperatūras izmaiņas atkarībā no ārējais temperatūras parādītas 2.7. attēlā.

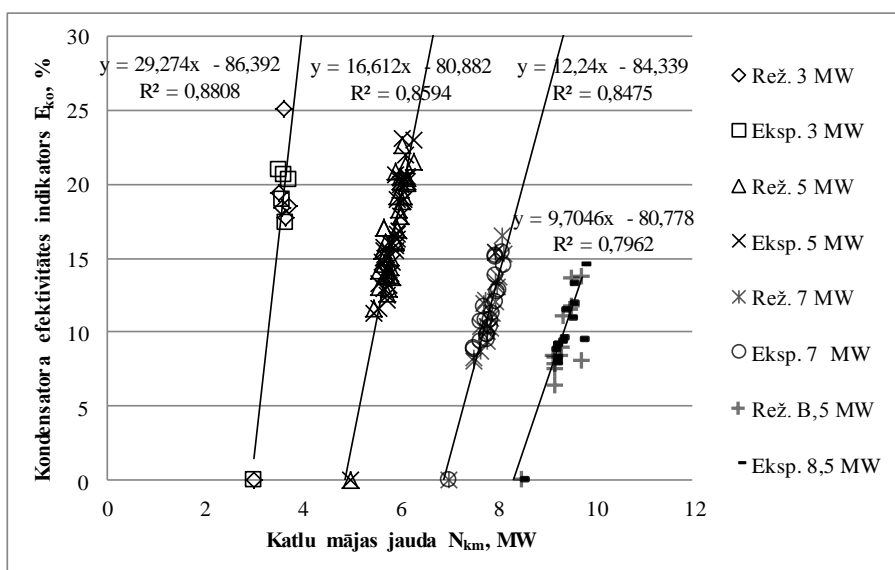


2.7. att. Katlu jaudas un tīkla ūdens atgaitas temperatūras izmaiņas atkarībā no ārējais temperatūras

Redzams, ka abu parametru izmaiņas ir vienādi vērstas – pieaugot katlu jaudai, pieaug arī tīkla ūdens temperatūra. Kondensatora efektivitātes indikatora samazinājums, pieaugot katla jaudai (sk. 2.6. att.), skaidrojams ar augstākām atgaitas temperatūrām siltumtīklā. Lai nodrošinātu lielāku kondensatora jaudu ļoti zemu ārējais temperatūru gadījumā, ir jāsamazina siltumtīklu atgaitas temperatūra. To var panākt, palielinot patērētāju ēku energoefektivitāti, samazinot zudumus siltuma tīklos vai, piemēram, izmantojot siltumsūkņus kondensatora vai siltuma tīklu kontūrā.

2.2.2. Katla un kondensatora slodzes sadalījums

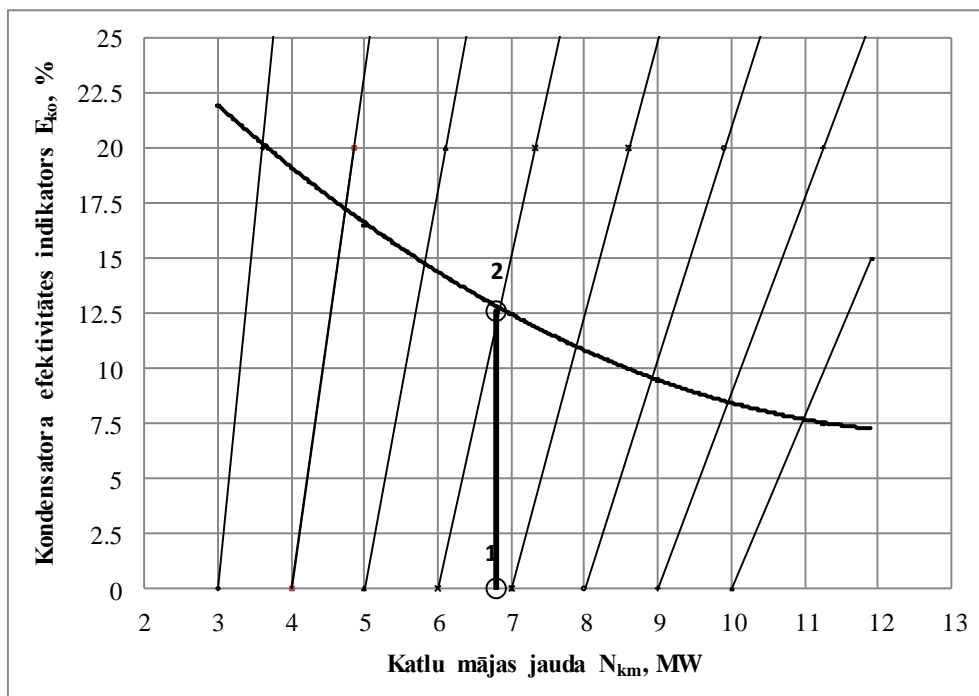
Katlu mājas ar katliem, kuri aprīkoti ar kondensatoriem nepieciešamo slodzi sedz ar katlu un kondensatoru kopā. Lai novērtētu abu iekārtu darbību kopējās katlu mājas slodzes nodrošināšanā, izveidots 2.8. attēlā redzamais grafīks.



2.8. att. Katla un kondensatora ietekme katlu mājas jaudas nodrošinājumā

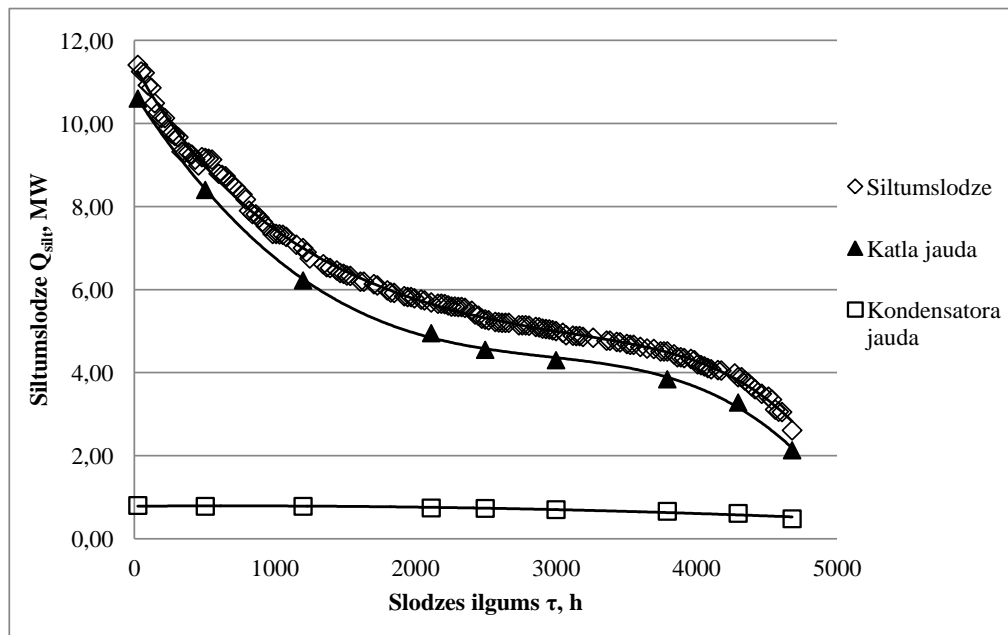
Ir aplūkotas katlu mājas jaudas izmaiņas četrām katlu jaudas vērtībām: 3 MW, 5 MW, 7 MW un 8,5 MW. Katrai jaudai atbilstošs grafiks iegūts no eksperimenta datiem izvēloties raksturīgās jaudas $\pm 0,1$ MW intervālā. Tā, piemēram, raksturīgo jaudu 3 MW apraksta dati, kuru katla jaudas vērtības ir intervālā no 2,9 MW līdz 3,1 MW. Katrai raksturīgai katla jaudai atbilstošās kondensatora jaudas un energoefektivitātes vērtības veido eksperimentālos punktus, caur kuriem novilkts grafiks. Ja kondensators ir izslēgts, tad tā energoefektivitāte ir 0 un katlu mājas jaudu nosaka katla jauda. Redzams, ka grafiki ir dažāda slīpuma taisnes un veido staru kūli. Katram eksperimentālajam punktam tika aprēķināta efektivitātes indikatora vērtība, izmantojot daudzfaktoru regresijas vienādojumu (1.8.). Kā redzams, punktu sakritība ir laba, un regresijas vienādojumu var izmantot grafika izveidei.

Lai attēlotu katla jaudas, katlu mājas jaudas un kondensatora energoefektivitātes indikatora izmaiņu savstarpējo atkarību ir izveidota 2.9. attēlā redzamā nomogramma. Nomogrammu veido staru kūlis, kurā katra taisne atbilst savai katlu jaudai robežās no 3 MW līdz 10 MW ar soli 1 MW. Katrai katla jaudai, izmantojot vienādojumu (2.5.), noteikta kondensatora vidējā energoefektivitātes indikatora vērtība. Indikatora izmaiņas atkarībā no katlu jaudas raksturo nomogrammā attēlotā līkne. Nomogrammā ir redzami punkti 1 un 2 ar kuru palīdzību skaidro tās lietojumu. Ja katlu mājas jauda stāvoklī 1 ir 6,8 MW, tad taisne 1–2 kondensatora vidējās efektivitātes līkni krusto stāvoklī 2, indikatora vērtībai esot 12,5 %. Caur stāvokli 2 iet taisne, kas atbilst katlu jaudai 6 MW. Tas nozīmē, ka katlu mājas jaudu nodrošina katls ar jaudu 6 MW un kondensators, kura jauda ir 0,8 MW.



2.9. att. Nomogramma katlu mājas jaudas sadalījumam starp katlu un kondensatoru

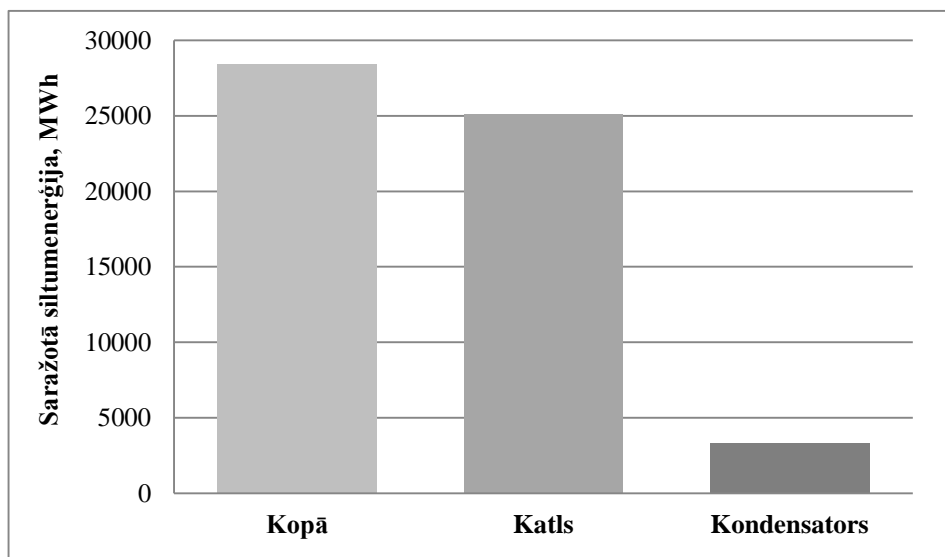
Katlu mājas jaudu nosaka patērētāja siltuma slodze, kas pārrēķināta uz katlu mājas izvadu. Slodzes izmaiņas apkures sezonas laikā raksturo slodzes ilguma grafiks, kas redzams 2.10. attēlā (augšējā līkne).



2.10. att. Katlu mājas slodzes sadalījums kondensatora uzstādīšanas gadījumā

Izmantojot 2.9. attēlā redzamo nomogrammu, ir noteikts, kādu slodzes daļu sedz katls un kādu kondensators. Katla un kondensatora slodžu izmaiņas apkures sezonas laikā parādītas 2.10. attēlā.

Zinot katlu mājas, katla un kondensatora jaudas un to ilgumu, var aprēķināt kopējo ar katlu un kondensatoru, ar katlu, kā arī tikai uz kondensatoru attiecināmo saražoto enerģiju apkures sezonas laikā. Aprēķinu rezultāti parādīti 2.11. attēlā.



2.11. att. Katlu mājas kopējā, katlā un kondensatorā saražotā enerģija apkures sezonas laikā

Rezultātu analīze liecina, ka kondensatora uzstādīšanas gadījumā enerģijas ekonomija apkures sezonas laikā ir 11,8 %.

2.3. Šķeldas katlu mājas ar gāzes kondensatoru energovadības izpētes rezultāti un to analīze

Aplūkojot 1.3. attēlā kurināmā siltuma patēriņa līmeņatzīmju līknes atkarībā no katlā un katlā kopā ar kondensatoru saražotās siltumenerģijas, redzams, ka tās nav lineāras un

aprakstāmas ar trešās pakāpes vienādojumiem. Tas ir būtiski datu tālākai apstrādei un analīzei. Katla bez kondensatora ievadītā siltuma patēriņa izmaiņas nosaka vienādojums:

$$B_k = 2E - 09 \cdot Q_k^3 - 9E - 06 \cdot Q_k^2 + 1,21 \cdot Q_k + 84,76, \text{ MWh}_{ku}/\text{mēnesī} \quad (2.6.)$$

Vienādojumā Q_k ir katlā saražotā siltumenerģija $\text{MWh}_k/\text{mēnesī}$. Katla un kondensatora vienlaikus darbības gadījumā ievadītā siltuma izmaiņas var aprakstīt kā:

$$B_{kko} = 6E - 09 \cdot Q_{kko}^3 - 3E - 05 \cdot Q_{kko}^2 + 1,091 \cdot Q_{kko} + 83,2, \text{ MWh}_{ku}/\text{mēnesī} \quad (2.7.)$$

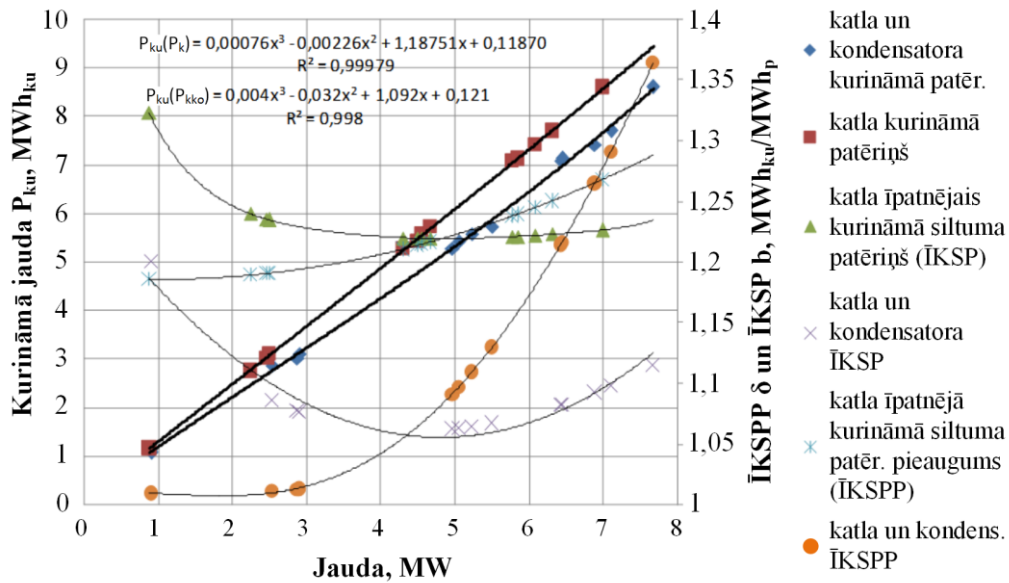
Argumentus Q_{kko} ir katlā un kondensatorā saražotā siltumenerģija $\text{MWh}_{kko}/\text{mēnesī}$. Tad, ja slodzes nav ($x = 0$), no vienādojumiem (2.6.) un (2.7.) iegūst nosacīto brīvsgaitas kurināmā siltuma patēriņu. Grafiski šo lielumu var attēlot kā punktu uz y ass. Lielums ir nosacīts, jo iekārta šādā režīmā strādāt nevar. No vienādojumiem redzams, ka brīvsgaitas kurināmā siltuma patēriņa vērtības ir tuvas un ir aptuveni $84 \text{ MWh}_{ku}/\text{mēnesī}$.

Īpatnējās kurināmā siltuma patēriņa līmeņatzīmes ir līknes ar izteiktu minimumu, kura vērtības katla un katla ar kondensatoru darbībai ir atbilstoši $b_k = 1,22 \text{ MWh}_{ku}/\text{MWh}_k$ un $1,07 \text{ MWh}_{ku}/\text{MWh}_{kko}$. Līkņu raksturu nosaka brīvsgaitas kurināmā siltuma patēriņš un katla lietderības koeficienta izmaiņas aplūkojamajā siltuma ražošanas diapazonā. Katla lietderības koeficients ir pazemināts mazu katla jaudu gadījumā, pieaug un sasniedz maksimumu, jaudām esot aptuveni $0,65-0,8$ no nominālās, un paliek nemainīgs vai nedaudz pazeminās (atkarībā no katla veida un tehniskā stāvokļa), paaugstinoties katla jaudai līdz nominālai vai to pārsniedzot. No minētā izriet, ka katla energoefektivitāte ir tieši saistīta ar kurināmā siltuma patēriņa līmeņatzīmēm. To apliecina arī zemākas kurināmā īpatnējā siltuma patēriņa vērtības katla ar kondensatoru darbības gadījumā. Kondensatora lietojums samazina katla siltuma zudumus ar aizejošajām dūmgāzēm, tā paaugstinot katla energoefektivitāti. No energovadības viedokļa ir redzams, ka, veicot katla energoefektivitātes pasākumu – uzstādot kondensatoru pēc šķeldas katla –, minimālais kurināmā īpatnējais siltuma patēriņš samazinās no $1,22 \text{ MWh}_{ku}/\text{MWh}_k$ līdz $1,07 \text{ MWh}_{ku}/\text{MWh}_k$.

Katlu mājas elektroenerģijas un īpatnējā elektroenerģijas patēriņa izmaiņas redzamas 1.4.attēlā. Dati atspoguļo katlu mājas bez kondensatora un siltuma tīklu elektroenerģijas patēriņu. Katlu mājas brīvsgaitas elektriskā jauda ir 60 kW un 170 kW maksimālās siltuma izstrādes gadījumā. Īpatnējais elektroenerģijas patēriņš samazinās, pieaugot siltumenerģijas ražošanas apjomam no $e_{km} = 80 \text{ kWh}_{km}/\text{MWh}_p$ minimālās izstrādes gadījumā un sasniedz zemāko līmeņatzīmi $e_{km} = 20 \text{ kWh}_{km}/\text{MWh}_p$ maksimālās izstrādes gadījumā.

Kondensatora elektroenerģijas un īpatnējā elektroenerģijas patēriņa izmaiņām, kuras redzamas 1.5. attēlā, ir sava specifika. Tas saistīts ar lielāku īpatnējo elektroenerģijas līmeņatzīmi $e_{ko} = 34 \text{ kWh}_{km}/\text{MWh}_p$, salīdzinot ar katlu mājas līmeņatzīmi $e_{km} = 20 \text{ kWh}_{km}/\text{MWh}_p$ maksimālās siltuma izstrādes gadījumā. Tas nozīmē, ka elektroenerģijas patēriņš uz kondensatorā saražoto siltumenerģijas vienību ir lielāks nekā katlā izstrādātajai siltumenerģijai.

Energoavotu energoefektivitātes analīzē bez īpatnējā kurināmā siltuma patēriņa b izmanto arī īpatnējā kurināmā siltuma patēriņa pieauguma rādītāju δ . Indikators izmantojams arī energoavota ietekmes uz vidi novērtējumam. Tā mērvienība, tāpat kā īpatnējam kurināmā siltuma patēriņam, ir $\text{MWh}_{ku}/\text{MWh}_p$. Īpatnējais kurināmā siltuma patēriņa pieaugums pēc definīcijas ir kurināmā siltuma pieaugums, kas nepieciešams 1 MW jaudas papildu izstrādei. Īpatnējo kurināmā siltuma patēriņu b un īpatnējo kurināmā siltuma patēriņa pieaugumu δ var noteikt, izmantojot siltuma patēriņa līkni. Siltuma patēriņa līkne apraksta kurināmā siltuma ievadītās jaudas P_{ku} izmaiņas atkarībā no katla P_k vai katla un kondensatora P_{kko} jaudas un ir parādīta 2.12. attēlā.



2.12. att. Katla un katla ar kondensatoru darbības raksturīgie rādītāji

Kurināmā siltuma patēriņa likni katlam apraksta vienādojums:

$$P_{ku}(P_k) = 0,00076 \cdot P_k^3 - 0,00226 \cdot P_k^2 + 1,1875 \cdot P_k + 0,1187, \text{ MW}_{ku} \quad (2.8.)$$

kur

P_k – katla jauda, MW.

Matemātisko izteiksmi kurināmā siltuma patēriņa liknei katlam ar kondensatoru nosaka kā:

$$P_{ku}(P_{kko}) = 0,004 \cdot P_{kko}^3 - 0,032 \cdot P_{kko}^2 + 1,092 \cdot P_{kko} + 0,121, \text{ MW}_{ku} \quad (2.9.)$$

kur

P_{kko} – katla un kondensatora jauda, MW.

Izmantojot kurināmā siltuma patēriņa līknes, īpatnējo kurināmā siltuma patēriņu b_k katlam vai b_{kko} katlam ar kondensatoru nosaka kā $P_{ku}(P_k)/x$ vai $P_{ku}(P_{kko})/x$. Atbilstošie aprēķinu vienādojumi ir:

$$b_k(P_k) = 0,00076 \cdot P_k^2 - 0,00226 \cdot P_k + 1,1875 + \frac{0,1187}{P_k}, \text{ MWh}_{ku}/\text{MWh}_k \quad (2.10.)$$

$$b_{kko}(P_{kko}) = 0,004 \cdot P_{kko}^2 - 0,032 \cdot P_{kko} + 1,092 + \frac{0,121}{P_{kko}}, \text{ MWh}_{ku}/\text{MWh}_{kko} \quad (2.11.)$$

Lai noteiktu kurināmā īpatnējā siltuma patēriņa pieauguma δ aprēķinu izteiksmes, jānosaka izteiksmju (2.8.) un (2.9.) pirmie atvasinājumi:

$$\delta_k = \frac{dP_{ku}(P_k)}{dP_k} = 0,00228 \cdot P_k^2 - 0,00452 \cdot P_k + 1,1875, \text{ MWh}_{ku}/\text{MWh}_k \quad (2.12.)$$

$$\delta_{kko} = \frac{dP_{ku}(P_{kko})}{dP_{kko}} = 0,0132 \cdot P_{kko}^2 - 0,0659 \cdot P_{kko} + 1,0927, \text{ MWh}_{ku}/\text{MWh}_{kko} \quad (2.13.)$$

Izmantojot izteiksmes no (2.10.) līdz (2.13.), ir veikti īpatnējā kurināmā siltuma patēriņa b un īpatnējā kurināmā siltuma patēriņa pieauguma δ aprēķini un rezultāti līkņu veidā parādīti

2.12. attēlā. Redzams, ka b un δ līknes krustojas vienā punktā un tajā lielumu vērtības ir vienādas. Minimāls īpatnējais kurināmā siltuma patēriņš ir līkņu krustojuma punktā. Salīdzinot katla un katla ar kondensatoru darbināšanas variantus, redzams, ka kondensatora lietojuma gadījumā ir jauns b un δ līkņu krustpunkts, kurā minimālais īpatnējais kurināmā siltuma patēriņš ir zemāks. Tas nozīmē, ka ir veikts energoefektivitātes pasākums – pēc katla uzstādīts kondensators, ir noteiktas jaunas līmeņatzīmes b un δ , un iekārtu var darbināt ar augstāku energoefektivitāti. Gadījumā, kad katlu mājā ir viens katls un pieaug siltuma ražošana, tad katla jauda būs lielāka par optimālo un noteicošais ir īpatnējais kurināmā siltuma patēriņš. Tad, kad katlu mājā darbojas vairāki katli un slodzes pieaugums ir jāsadala starp tiem, noteicošo lomu spēlē īpatnējā kurināmā siltuma pieaugums, un slodze jāpalielina tam katlam, kura δ ir mazāks. Jaunās iekārtas b un δ līmeņatzīmes noteikšanai izmantojama promocijas darbā piedāvātā metode.

2.4. Dūmgāzu kondensatora lietojuma siltumapgādes sistēmas avotā ekonomiskās analīzes rezultāti

2.4.1. Katla ar kondensatoru kurināmā izmaksu analīze

Īpatnējo kurināmā siltuma rādītāju uz saražoto siltumenerģijas vienību un īpatnējo kurināmā izmaksu izmaiņas atkarībā no siltumu ģenerējošajām jaudām ir nelineāras ar izteiktu minimumu. Lai precizētu 1.12. attēlā redzamo līkņu minimumu jaudas vērtības, izmantoti saražotās enerģijas vienības cenu izmaiņas aprakstoši vienādojumi. Kurināmā cenas izmaiņas vienādojums šķeldas katlam ir:

$$c_{kuk} = 0,069 \cdot P_k^2 - 0,675 \cdot P_k + 15,53, \text{ €/MWh}_p \quad (2.14.)$$

un katlam ar kondensatoru:

$$c_{kukko} = 0,093 \cdot P_{kko}^2 - 0,899 \cdot P_{kko} + 14,77, \text{ €/MWh}_p \quad (2.15.)$$

Funkcijas minimumu nosaka, tās pirmo atvasināto pielīdzinot nullei:

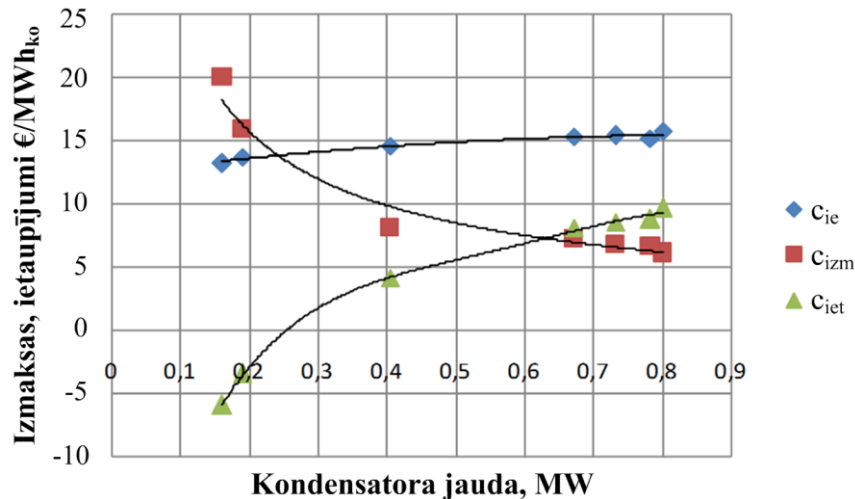
$$\frac{dc_{kuk}}{dP_k} = 0 \quad \text{un} \quad \frac{dc_{kukko}}{dP_{kko}} = 0 \quad (2.16.)$$

Ar sakarībām (2.16.) noteiktās ģenerējošo jaudu vērtības, pie kurām vērojami saražotās enerģijas vienības kurināmā izmaksu minimumi, ir $P_k^{\min} = 4,89 \text{ MW}$ un $P_{kko}^{\min} = 4,83 \text{ MW}$. Redzams, ka vērtības praktiski sakrīt un vērojamā atšķirība ir 1,2 % robežās. Iekārtai strādājot ar jaudu aptuveni 5 MW, būs viszemākās kurināmā izmaksas uz izstrādātās siltumenerģijas vienību.

Jaudu un tātad izmaksu minimumu nosaka divi faktori: nosacītā brīvģaitas režīma ietekme un katla lietderības koeficienta izmaiņas. Pieaugot katla jaudai, brīvģaitas režīma ietekme ir relatīvi mazāka nekā mazu jaudu gadījumā. Savukārt katla lietderības koeficients pieaug, palielinoties katla jaudai un asimptotiski sasniedz maksimālo vērtību, un tālāk paliek nemainīgs vai nedaudz pazeminās.

2.4.2. Kondensatora darbības izmaksu analīze

Analīzes mērķis ir novērtēt, vai kondensatora darbība nodrošina līdzekļu ekonomiju, cik liela tā ir un vai tā vērojama visā kondensatora jaudu diapazonā. Ar kondensatora darbību saistīto īpatnējo pilno izmaksu c_{eks} , ieņēmumu c_{ie} un līdzekļu ekonomijas c_{iet} izmaiņas atkarībā no kondensatora jaudas redzamas 2.13. attēlā.



2.13. att. Kondensatora darbināšanas izmaksas un ietaupījumi atkarībā no jaudas

Analīze rāda, ka, darbinot kondensatoru ar jaudu, kas lielāka par 0,25 MW, ir vērojama naudas līdzekļu ekonomija, kura, jaudai palielinoties līdz 0,8 MW, pieaug un sasniedz 10 €/MWh_{ko}. Jauda 0,25 MW ir robežvērtība, kas nerada ekonomisko efektu. Jaudai samazinoties zem 0,25 MW, kondensators strādā ar zaudējumiem un tā darbināšanas izmaksas ir lielākas par ieņēmumiem, kurus nosaka šķeldas ekonomija.

No datiem redzams, ka 2012./2013. apkures sezonas deviņos mēnešos kondensators ir darbināts ar ekonomisko efektu un bez tā. Kopējo novērtējumu sniedz ieguvumu un zaudējumu bilance, kas nosaka laika periodā gūtos tīros ienākumus:

$$c_t = \sum_{i=1}^{i=9} \frac{Q_{ko_i}}{Q_{sum}} \cdot (c_{ie_i} - (c_{el_i} + c_{ūka_i} + c_{dama_i} + c_{pel_i} + c_{am_i})), \text{ €/MWh}_{ko}, \quad (2.17.)$$

kur

i – mēnešu skaits aplūkojamā laika periodā;

Q_{sum} – kondensatora atgūtā siltumenerģija aplūkojamā laika periodā, MWh_{ko}.

Izmantojot tabulas datus, novērtētie īpatnējie izsvērtie ieguvumi uz kondensatora saražoto siltumenerģijas vienību ir 5,74 €/MWh_{ko}. Līdzekļu zaudējumi ir saistīti ar kondensatora darbināšanas un amortizācijas izmaksām. Rodas jautājums, vai zemu kondensatora jaudu gadījumā nav izdevīgāk to izslēgt un dūmgāzes izvadīt tieši skurstenī. Izslēdzot kondensatoru, nebūs darbināšanas izmaksu, taču paliks amortizācijas izmaksas. Šajā gadījumā īpatnējos izsvērtos tīros ienākumus aprēķina kā:

$$c_t^* = \sum_{j=1}^{j=5} \frac{Q_{ko_j}}{Q_{sum}} \cdot (c_{ie_j} - (c_{el_j} + c_{ūka_j} + c_{dama_j} + c_{pel_j} + c_{am_j})) - \sum_{k=1}^{k=4} \frac{Q_{ko_k}}{Q_{sum}} \cdot c_{am_k}, \text{ €/MWh}_{ko}, \quad (2.18.)$$

kur

j – mēneši, kuros kondensatoru darbina;

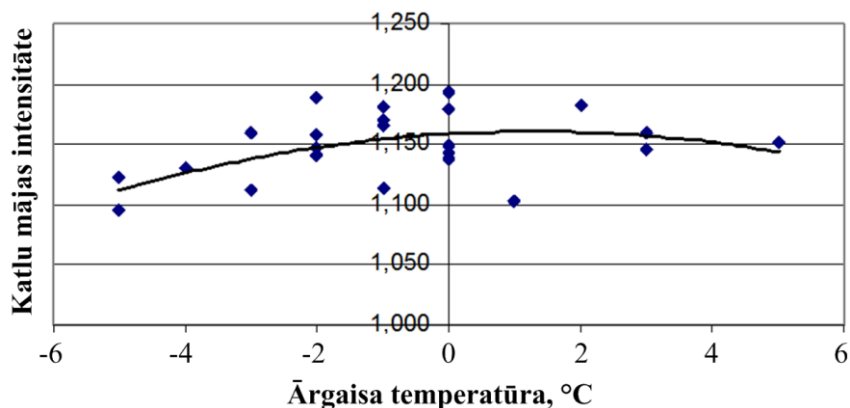
k – mēneši, kuros kondensators izslēgts.

Aprēķini liecina, ka, ja kondensatoru darbina tikai ar jaudu virs 0,25 MW un to izslēdz mazāku jaudu gadījumos, īpatnējie izsvērtie tīrie ienākumi ir 4,79 €/MWh_{ko}, kas ir par 16,5 % mazāki, salīdzinot ar nepārtrauktu darbību. Analīze rāda, ka kondensatoru ir izdevīgi darbināt arī ar mazām jaudām, kad atsevišķos mēnešos iegūtie ietaupījumi nesedz darbināšanas izmaksas.

2.5. Dūmgāzu kondensatora lietojuma siltumapgādes sistēmas avotā ekointensitātes analīzes rezultāti

2.5.1. Katlu mājas darbības eksperimenta rezultāti

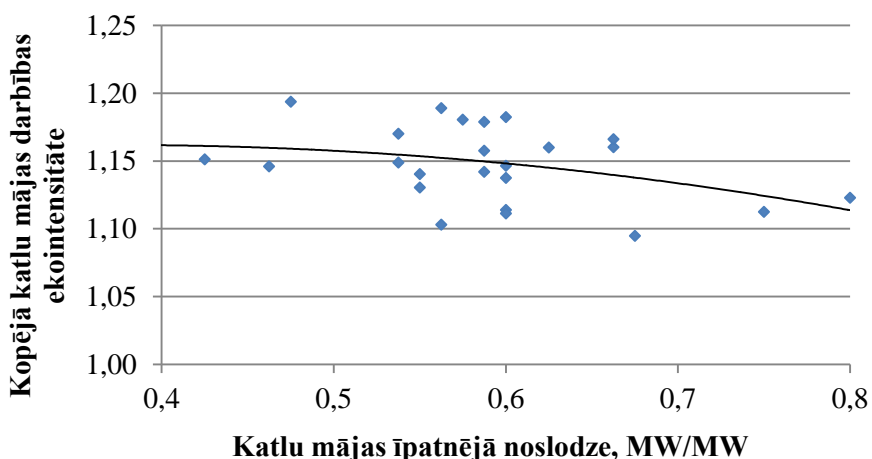
Rūpnieciskā eksperimenta laikā noteiktie dati ietvēra katlu mājas darbības parametrus, kas ir atkarīgi no patērētāja siltuma slodzes, kuru nosaka gan enerģijas lietotāju uzvedība, gan klimatiskie apstākļi un siltumapgādes sistēmas darbināšanas nosacījumi. Eksperimenta rezultāti, kas saistīti ar gāzes kondensatora bez pildījuma darbināšanas ekointensitātes noteikšanu, ir ilustrēti 2.14. un 2.15. attēlā.



2.14. att. Katlu mājas darbības ekointensitāte atkarībā no ārējais temperatūras

Kā redzams 2.14. attēlā, katlu mājas darbības ekointensitāte samazinās, ja ārējais temperatūra krītas. Tas notiek vairāku iemeslu dēļ, no kuriem vissvarīgākie ir tukša gāzes kondensatora bez pildījuma novirze no optimālās darbības parametriem: dūmgāzu ātruma un temperatūras palielināšanās.

Šo apsvērumu apstiprina cita parametrs, kas ietekmē katlu mājas darbības intensitāti, analīze. Šis parametrs ir katlu mājas īpatnējā noslodze. Tā ietekmes uz katlu mājas darbības ekointensitāti analīze liecina par to, ka, jo lielāka ir katlu mājas noslodze, jo zemāka ir katlu mājas darbības ekointensitāte, jo mazāk ir iespējams saņemt siltumenerģiju gāzes kondensatorā uz katla jaudas vienību, kā redzams 2.15. attēlā.

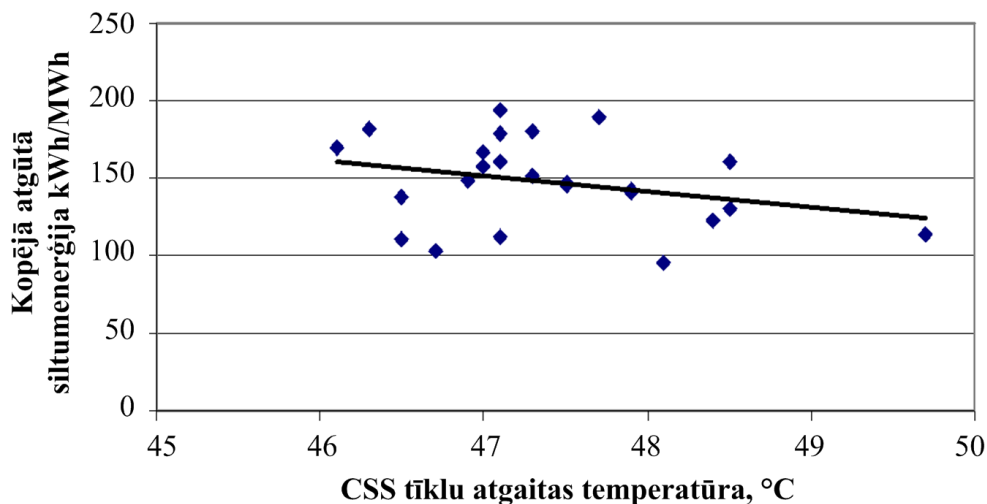


2.15. att. Katlu mājas darbības ekointensitāte atkarībā no katla īpatnējās noslodzes

Tas apstiprina iepriekš izteikto hipotēzi, ka brīdī, kad samazinās ārējais temperatūra, pieaug katlu mājas noslodze, palielinās kurināmā patēriņš un veidojas lielāki dūmgāzu apjomi.

2.5.2. Siltumapgādes sistēmas darbības ekointensitātes analīzes rezultāti

Jebkura siltumapgāde ir kompleksa atsevišķu tās elementu tehnoloģisko risinājumu kopa, kas ir jāaplūko kā vienota sistēma, kuras efektīva darbība ir atkarīga no ekonomiski pamatotu un videi draudzīgu tehnoloģisko risinājumu izvēles. Kondensatora kā sistēmas elementa darbības rādītāji redzami 2.16. attēlā.



2.16. att. Gāzes kondensatorā atgūtā siltumenerģija atkarībā no siltumapgādes sistēmas atgaitas temperatūras

Kā redzams 2.16. attēlā, korelācijas analīze liecina, ka eksperimentālie dati vāji korelē ar empīrisko modeli (taisni). Tomēr skaidri iezīmējas tendence, ka gāzes kondensatorā iegūtais īpatnējais siltums ir lielāks, ja siltuma tīklu atgaitas temperatūra ir zemāka, un otrādi – iegūtais siltuma daudzums krītas, temperatūrai pieaugot. Tas apliecina iepriekš izteikto viedokli, ka kurināmā ietaupījums ir atkarīgs no visas sistēmas darbības kopumā, kuras viens elements ir gāzes kondensators. Savukārt tā darbība ir atkarīga no siltumapgādes sistēmai pieslēgto enerģijas lietotāju energoefektivitātes un ūdens ātrumiem un caurplūdes parametriem siltuma tīklu visos elementos, ieskaitot siltummaiņus ēku siltuma mezglos. Lai palielinātu gāzes kondensatorā iegūto siltumenerģijas daudzumu, ir jāsamazina siltuma tīklu atgaitas temperatūra, kas ir iespējams, modelējot siltumapgādes sistēmu regulēšanas režīmus, kā arī veicot energoefektivitātes pasākumus patērētāja pusē.

Katlu mājas darbināšanas, izmantojot gāzes kondensatoru, ekointensitātes pieaugums ir vērtējams arī no slāpekļa oksīdu emisiju daudzuma samazināšanās viedokļa. Tas notiek divu iemeslu dēļ:

1. samazinās kurināmā patēriņš un samazinās kopējais slāpekļa oksīdu emisiju daudzums no katlu mājas skursteņa;
2. notiek dažu slāpekļa oksīdu komponentu daļēja absorbcija ar izsmidzināšanas šķidrums: 10 % no kopējā NO_x apjoma uztver izsmidzināšanas šķidrums.

Secinājumi

1. Darbā piedāvāta shēma augstas temperatūras siltumsūkņa integrācijai pilsētas siltumapgādes sistēmā tīkla atgaitas siltuma izmantošanai daļējai patērētāja slodzes segšanai.
2. Izveidots modelis un veikti aprēķini siltumapgādes sistēmas parametru izmaiņām siltumsūkņa izmantošanas gadījumā, mainoties ārējais temperatūrai apkures sezonas laikā. Modelis ietver shēmas mezglu un elementu masas un enerģija bilances vienādojumus, kā arī sistēmu raksturojošas empīriskas sakarības. Modelēšanas rezultātā noskaidrots, ka siltumsūkņa darbība iespējama, ja ārējais temperatūra nav zemāka par $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Siltumsūkņa darbības rezultātā pazeminās siltumapgādes sistēmas atgaitas ūdens temperatūra, kas paaugstina katlu mājā uzstādītā dūmgāzu kondensatora efektivitāti.
3. Siltumapgādes sistēmas datu statistiskās analīzes rezultātā iegūts daudzfaktoru regresijas vienādojums, kas saista kondensatora efektivitātes indikatoru ar statistiski būtiskiem neatkarīgajiem mainīgajiem parametriem. Vienādojuma neatkarīgie mainīgie parametri iedalāmi divās grupās: pašu kondensatoru raksturojoši un tie, kas raksturo kondensatora un siltumapgādes sistēmas mijiedarbību. Galvenie mijiedarbības parametri ir katla jauda un siltuma tīklu atgaitas temperatūra.
4. Dūmgāzu rāsas punkta temperatūra ir tuvu $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lai panāktu tvaika kondensāciju, kondensatorā iesmidzināmā ūdens temperatūrai ir jābūt zemākai. Iesmidzināmais ūdens tiek dzesēts tīkla siltummainī ar atgaitas ūdens palīdzību. Tādā veidā tīkla ūdens veic dzesētāja funkcijas un dzesētāja efektivitāti nosaka atgaitas ūdens temperatūra. Analīze rāda, ka, pazeminot atgaitas ūdens temperatūru par $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, kondensatora efektivitātes indikatora vērtība vidēji pieaug par $0,7\%$.
5. Pētījuma gaitā izstrādāta nomogramma, kas attēlo mainīgo katla jaudu, katla mājas jaudu un kondensatora efektivitātes indikatoru savstarpējo atkarību. Ar tās palīdzību var noteikt katlu mājas slodzes sadalījumu starp katlu un kondensatoru. Nomogramma aprobēta Ludzas pilsētas siltumapgādes sistēmas darbības analīzē. Noteikts, ka apkures sezonas laikā no kopējās saražotās siltumenerģijas ar katlu saražoti $88,2\%$ un ar kondensatora palīdzību – $11,8\%$. Tas nozīmē, ka primāro resursu ietaupījums kondensatora lietojuma gadījumā ir $11,8\%$.
6. Darbā katlu mājas darbības raksturojumam un vadībai kā energovadības līmeņatzīmes izmantoti īpatnējā kurināmā siltuma patēriņa un īpatnējā kurināmā siltuma patēriņa pieauguma rādītāji, kas noteikti, izmantojot katlu mājā mērītus darbināšanas datus. Parādīts, ka optimālā katla jauda ir vērojama līmeņatzīmju līkņu krustpunktā. Ja katlu mājā ir viens katls un pieaug siltuma ražošana, tad katla jauda būs lielāka par optimālo. Tādā gadījumā noteicošais lielums ir īpatnējais kurināmā siltuma patēriņš. Cita izvēle ir tad, ja katlu mājā darbojas vairāki katli un slodzes pieaugums ir jāsadala starp tiem. Tad noteicošo lomu spēlē īpatnējā kurināmā siltuma pieaugums un slodze jāpalielina tam katlam, kura īpatnējā kurināmā siltuma pieaugums ir mazāks.
7. Katla darbināšanas stundu izmaksas līkne rāda, ka izmaiņas nav lineāras un darbināšanas režīmi nav vienlīdz ekonomiski izdevīgi. Novērtējot īpatnējo kurināmā izmaksu izmaiņas, redzams, ka katla darbībā ir režīmi ar minimālām īpatnējām kurināmā izmaksām. Līkņu raksturu nosaka brīvģaitas kurināmā patēriņš un katla lietderības koeficienta izmaiņas. Ar izmaiņas aprakstošu vienādojumu palīdzību noteiktas ekonomiski visizdevīgākās katla jaudas strādājot ar kondensatora un bez tā.
8. Dūmgāzu kondensatora īpatnējo izmaksu detalizēta analīze liecina, ka, darbinot kondensatoru ar jaudu, kas lielāka par $0,25\text{ MW}$, ir vērojama naudas līdzekļu ekonomija, kura, jaudai palielinoties līdz $0,8\text{ MW}$, pieaug un sasniedz 10 €/MWh_c .

Jauda 0,25MW ir robežvērtība, kas nerada ekonomisko efektu. Jaudai pazeminoties zem 0,25 MW, kondensators strādā ar zaudējumiem un tā darbināšanas pilnas izmaksas ir lielākas par ieņēmumiem, kurus nosaka šķeldas ekonomija. 2012./2013. apkures sezonas deviņos mēnešos kondensators ir darbināts ar ekonomisko efektu un bez tā. Kopējo aplūkojamā perioda novērtējumu sniedz īpatnējo ieguvumu un zaudējumu bilance. Novērtētie īpatnējie tīrie ieguvumi uz kondensatora atgūto siltumenerģijas vienību ir 5,74€/MWh_c. Tas nozīmē, ka aplūkojamajā periodā kondensatora izmantošana kopumā ir radījusi ekonomisku efektu.

9. Šķeldas katlu mājas darbība, tajā uzstādot gāzes kondensatoru, ir atkarīga no visas siltumapgādes sistēmas darbības kopumā. Sistēmas darbības efektivitātes vērtēšana ar ekointensitātes (ietver tehnoloģiju darbības parametru ietekmi uz dabas resursu patēriņa samazinājumu) palīdzību ļauj pilnvērtīgi analizēt tās paaugstināšanas iespējas, nosakot faktorus, kas ietekmē ekointensitātes izmaiņas. Tie ir ārējais temperatūra, katlu mājas īpatnējā noslodze un siltuma tīklu atgaitas temperatūra. To ietekme uz ekointensitāti ir atšķirīga – samazinoties ārējais temperatūrai un palielinoties katlu mājas noslodzei, ekointensitāte krītas. Savukārt, samazinot siltuma tīklu atgaitas temperatūru, ekointensitāte pieaug. Atgaitas temperatūras samazinājums par 1 °C samazina šķeldas patēriņu par 0,02 ber. m³ uz saražotās siltuma enerģijas MWh.