

## Environmental engineering Aplinkos inžinerija

### EKSPERIMENTINIO ŠILUMOS SIURBLIO CIKLO VALDYMO ALGORITMO PAIEŠKA

Anton FRIK\*, Dovydas RIMDŽIUS, Tomas KROPAS

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

Gauta 2019 m. birželio 28 d.; priimta 2019 m. liepos 4 d.

**Santrauka.** Straipsnyje analizuojamas eksperimentinis šilumos siurblys „oras-oras“, kuris naudojamas šilumai atgauti mechaninėje patalpos vėdinimo sistemoje. Darbo tikslas – ištirti eksperimentinio šilumos siurblio „oras-oras“ veikimą ir pasiūlyti jo veikimo ciklo valdymo algoritmą didesniai sezoniniam efektyvumui gauti. Tikslui pasiekti buvo vykdomi šio įrenginio eksperimentiniai bandymai. Jie atlikti trimis etapais. Po kiekvieno etapo, atsižvelgiant į gautus rezultatus, buvo tobulinamas šilumos siurblio stendas, tikslinami jo valdymo režimai. Eksperimento metu analizuojamos šilumos siurblio freono ir šilumos mainuose su juo dalyvaujancio oro parametrų kitimo tendencijos, esant skirtingiems droselinio vožtuvo atidarymo pozicijos padėties ir kompresoriaus galios deriniams. Žinant tokias eksperimentines charakteristikas, įvertinama, kiek šių dviejų valdymo priemonių derinys gali būti naudojamas efektyviam šilumos siurblio valdymui pagal išorės oro temperatūrą. Remiantis atliktų tyrimų rezultatais pasiūlyti šilumos siurblio valdymo, priklausancio nuo kintancio lauko oro temperatūros, algoritmai.

**Reikšminiai žodžiai:** ciklas, freonas, šilumos siurblys „oras-oras“, šilumogrąža, valdymo algoritmas, vėdinimo sistema.

#### Įvadas

Pastaruoju metu energiniai reikalavimai pastatams griežtėja, pastatai tampa sandaresni, labiau izoliuoti nuo aplinkos poveikio. Tokiuose pastatuose mechaninis vėdinimas yra būtinas dalykas, be jo neįmanoma užtikrinti mikroklimato parametrų bei palaikyti žmogaus komforto sąlygų. Tokioje situacijoje vėdinimo sistema yra jautresnė aplinkos temperatūros pokyčiams nei šildymo sistema ir tampa vienu pagrindinių šiluminės energijos vartotojų pastate. Todėl verta ieškoti ir tobulinti būdus, kaip užtikrinti jos energiją taupantį veikimą.

Tradicinis šalinamame ore esancio šilumos atgavimas, naudojant šilumogrąžius, didina vėdinimo sistemos energinį efektyvumą, o papildomas šilumos atgavimas naudojant šilumos siurblius leidžia ne tik grąžinti šilumą, bet ir papildomai gana efektyviai pašildyti tiekiamą orą (Bagarella, Lazzarin ir Noro, 2016).

Lietuvoje vėdinimo įrenginiai su integruotais šilumos siurbliais pradėti naudoti neseniai. Tokio tipo šilumos siurblių valdymo galimybių, jų įtakos veikimo efektyvumui įvertinimas reikalauja naujų žinių ir technologijų, tad pasirinkta toliau tirti ir spręsti šią problemą.

Darbo tikslas – ištirti eksperimentinio šilumos siurblio „oras-oras“ veikimą ir pasiūlyti jo ciklo valdymo algoritmą aukštesniai sezoniniam efektyvumui pasiekti.

#### 1. Tyrimo metodika ir eiga

**Teorinis modelis.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VGTU) mokslininkai savo analitiniame tyrime (Martinaitis, Streckiene, Bagdanavicius ir Bielskus, 2018) palygino vėdinimo įrenginių, turinčių skirtingą komplektaciją ir veikimo režimus, efektyvumą. Jų rezultatai rodo, kad aukščiausius efektyvumo rodiklius turi tradicinis vėdinimo įrenginys su integruotu šilumos siurbliu.

Aukštas veikimo naudingumas būtų pasiektas, jeigu šilumos siurblys būtų valdomas pagal darbe nustatytą garintuvo ir kondensatoriaus izotermų judėjimo tendenciją. Deja, šių teorinių rezultatų eksperimentinio patikrinimo nėra. Šis aukšto naudingumo šilumos siurblio teorinis modelis buvo pasirinktas kaip eksperimentinio tyrimo teorinis pagrindas, su kuriuo bus lyginami eksperimentiniai rezultatai bei vertinama galimybė valdyti šilumos siurblio veikimo ciklą pagal nustatytas izotermų judėjimo tendencijas.

\*Autorius susirašinėti. El. paštas [anton.frik@stud.vgtu.lt](mailto:anton.frik@stud.vgtu.lt)

**Tyrimo objektas.** Eksperimentiniai tyrimai atliekami šilumos siurblio stende, esančiame VGTU laboratorijoje. Atsižvelgiant į ankstesnių bandymų rezultatus stendas, imituojantis tradicinį vėdinimo įrenginį, buvo rekonstruotas – pašalintas šilumogrąžis. Stendo sistemą (1 pav.) sudaro šie įrenginiai: oro tiekimo ir ištraukimo ventilatoriai (1, 2); šilumos siurblys – kintamojo greičio kompresorius (3), kurio didžiausioji elektrinė galia yra 695 W; kondensatorius (4); droselis (5); garintuvas (6).

Šiame stendo (1 pav.) variante šilumos siurblys yra pagrindinis įrenginys, skirtas šilumai iš šalinamojo oro atgauti ir į patalpą tiekiamajam orui pašildyti. Eksperimento metu buvo matuojamos 8 freono ir 5 oro temperatūros charakteringuose taškuose, taip pat freono aukštas ir mažas slėgis (1 pav.). Visi matavimai atliekami 60 sekundžių intervalu.

**Tyrimo eiga.** Eksperimento metu buvo siekiama ištirti šilumos siurblio freono parametrų kitimo tendencijas, esant skirtingiems droselinio vožtuvo padėties bei kompresoriaus apskukų skaičiaus deriniams. Žinant tokias eksperimentines charakteristikas, galima būtų įvertinti, kiek šių dviejų valdymo priemonių derinys gali būti naudojamas efektyviam šilumos siurblio valdymui pagal išorės oro temperatūrą.

Atsižvelgiant į ankstesnių stendo tyrimų rezultatus ir laboratorijos darbuotojų rekomendacijas šilumos siurblio veikimo programoje buvo nustatytas eksperimentinis šilumos siurblio veikimo režimas, kuris leidžia matyti, kaip keičiasi freono ir oro parametrai esant skirtingiems šilumos siurblio veikimo režimams.

Šilumos siurblio valdymas vykdomas taip: šilumos siurbliui nustatomi pradiniai droselinio vožtuvo (DV) bei

kompresoriaus (KM) parametrai: DV uždarymo pozicija 40 % (didesnis DV pralaidumas), KM valdymo signalo įtampa 1 V; nustatytu laiko dažnumu keičiama DV uždarymo pozicija (40–80 %); kai pasiekta maksimali DV uždarymo pozicija (80 %), didinama KM valdymo signalo įtampa 1 V. DV padėtis grąžinama į pradinę poziciją (40%); veikimo ciklas kartojasi, keičiama DV uždarymo pozicija; kai pasiekta didžiausioji KM galia (esant 8 V), šilumos siurblys pradeda veikti iš naujo ar bandymas baigiamas.

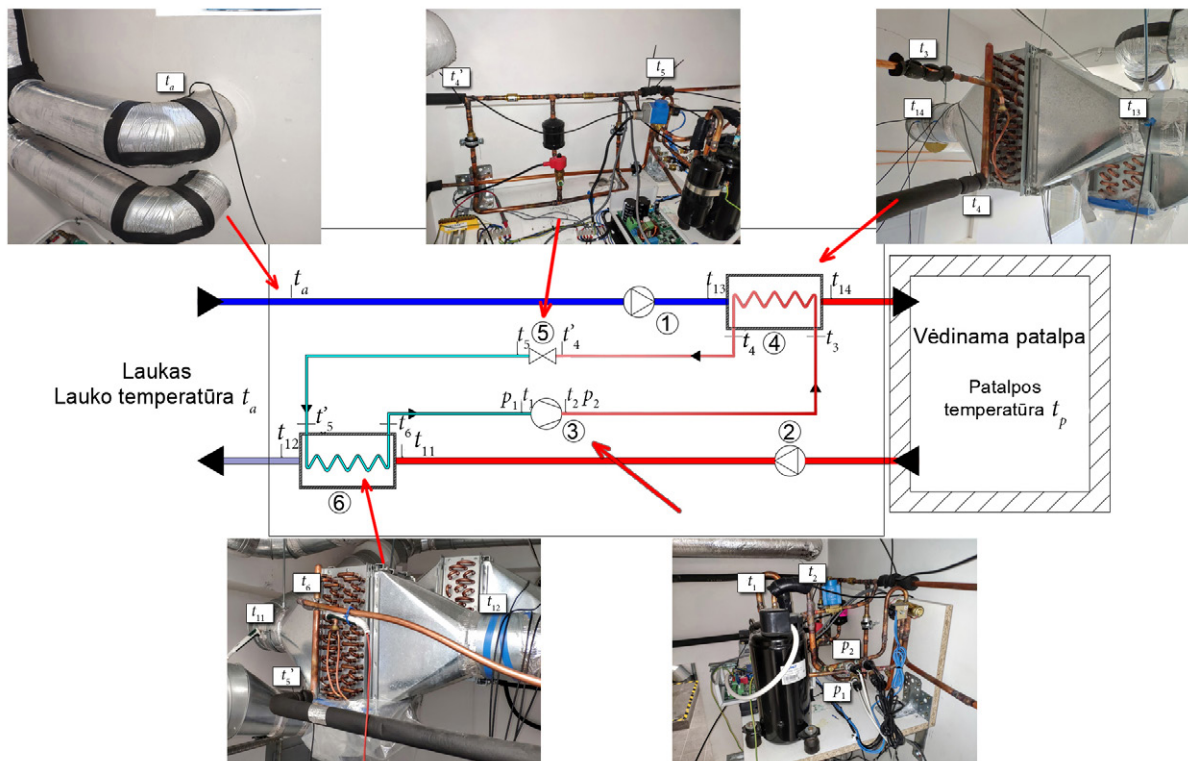
Kadangi šilumos siurblys veikia realiomis sąlygomis (naudojamas drėgnas lauko oras), tai, likus nustatytam laiko intervalui prieš DV pozicijos keitimą, jungiamas garintuvo apšalo atitirpinimo ciklas, KM valdymo signalo įtampa mažinama iki mažiausiosios reikšmės 1 V.

**Tyrimo metodika.** Tyrimo metu gauti matavimo duomenys papildomai apdorojami, pagal pateiktas (1–2) formules skaičiuojami eksperimentinio stendo veikimo rodikliai.

Oro debitas, pratekantis per šilumos siurblio kondensatorių bei garintuvą, matuojamas oro srauto matavimo diafragmomis. Šilumos siurblio naudingoji šiluminė galia – tai jo kondensatoriaus šiluminė galia, apskaičiuojama pagal (1) formulę:

$$Q_K = m_{oro} \cdot c_{oro} \cdot (t_1 - t_2), \quad (1)$$

čia  $m_{oro}$  – oro masinis debitas, kg/s;  $c_{oro}$  – sauso oro savitoji šiluma, kJ/kg·K;  $t_1$  – oro temperatūra prieš kondensatorių, K;  $t_2$  – oro temperatūra už kondensatoriaus, K.



1 paveikslas. Eksperimentinio stendo principinė schema  
Figure 1. Principal scheme of experimental stand

Kompresoriaus suvartojama galia nustatoma pagal įtampas ir srovės matavimo duomenis, o šilumos siurblio momentinis efektyvumas (angl. *coefficient of performance*, COP) skaičiuojamas pagal nurodytą standarte (LST EN 15450, Lietuvos standartizacijos departamentas, 2008) skaičiavimo formulę (2):

$$COP = \frac{\theta_{HP,hw}}{P_{HP} + P_{HP,aux}}, \quad (2)$$

čia  $\theta_{HP,hw}$  – šildymo galia, W;  $P_{HP}$  – kompresoriaus galia, W;  $P_{HP,aux}$  – papildomų įrenginių galia, W.

## 2. Rezultatų analizė

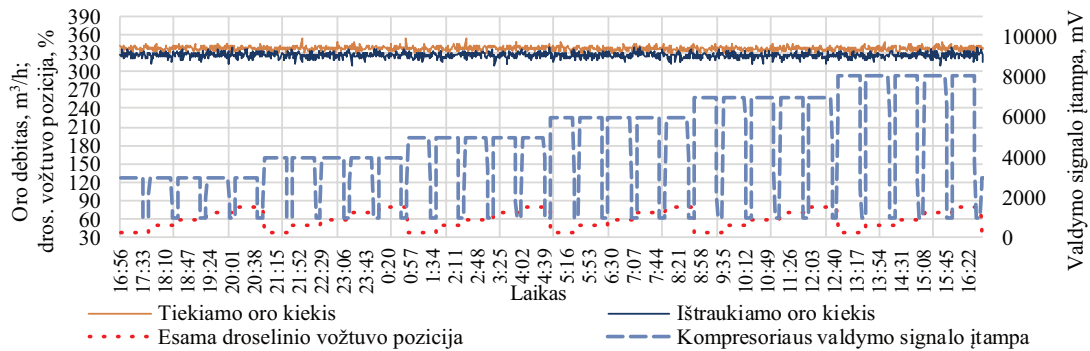
Pirmajame eksperimentiniame bandyme buvo pastebėta, kad bendra šilumos siurblio veikimo ciklo formavimo tendencija nėra būdinga teoriniam, slėgio kritimo nuostolių nevertinančiam šilumos siurblio veikimo ciklui. Didelio slėgio dalis gana patikima, tačiau mažo slėgio linija neatitinka teorinio ciklo. Visais nagrinėjamais atvejais pastebėtas staigus freono slėgio kritimas (2–3,5 bar) garintuvo zonoje. Patikimai įvertinti, ar tai tik vamzdžių slėgio nuostolių įtaka, galimybių nebuvo. Prieš antrąjį eksperimentinį bandymą buvo atlikti stendo patobulinimai, valdymo parametrų pakeitimai, prie oro srauto matavimo diafragmų įrengiami oro

slėgio skirtumo davikliai oro debitui nustatyti. Ilgesniam stacionariam procesui gauti didinamas šilumos siurblio veikimo laikas esant vienai DV padėčiai. Bendra šilumos siurblio veikimo ciklo formavimosi tendencija nepasikeitė, yra staigus slėgio kritimas (2–3,5 bar) garintuvo zonoje.

Buvo tikrinami oro kiekiai, pratekantis per šilumos siurblio kondensatorių ir garintuvą. Rezultatai parodė, kad, esant didesnei kompresoriaus galiai, ištraukiamo oro kiekis pradeda mažėti (krinta iki 40 %). Akivaizdu, kad dėl žemos (–19,3–3,5 °C) freono temperatūros garintuve ant jo paviršiaus kondensuodavosi drėgmė, esanti ištraukiamajame ore. Susidaręs šerkšnas arba ledo sluoksnis padidina ištraukimo linijos pasipriešinimą – mažėja ištraukiamas oro kiekis. Trečiajam bandymui lauko ir vėdinamos patalpos pusėse oro tiekimo bei ištraukimo linijos sujungiamos. Tikėtina, kad žiedinėje sistemoje esamą cirkuliuojantį orą pavyks išsaisinti eksperimento pradžioje. Gauti tiekimo ir ištraukimo linijų oro kiekiai pateikiami 2 paveiksle.

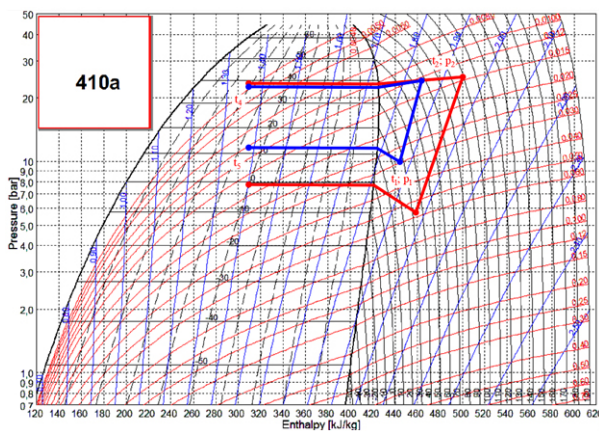
Iš 2 paveiksle pateiktos diagramos matome, kad oro srautai sistemoje viso eksperimento metu yra pastovūs, o tai reiškia, kad, eliminuojant garintuvo užšalimo įtaką, pavyko turėti ilgiau trunkantį nuostoviojo veikimo procesą ir gauti patikimesnius tyrimo rezultatus.

Toliau ribiniai šilumos siurblio veikimo ciklai vaizduojami *p-h* diagramoje, rezultatai pateikti 3 paveiksle.



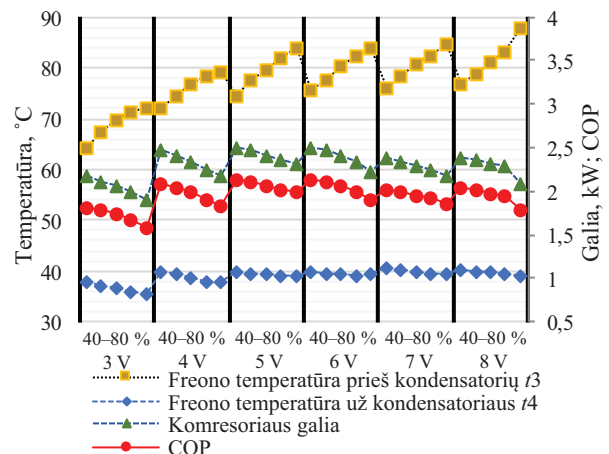
2 paveikslas. Tiekiamasis ir ištraukiamasis oro srautas, esant skirtingiems droselinio vožtuvo padėties ir kompresoriaus valdymo signalo įtampos deriniams

Figure 2. Supply and exhaust air flow at different combinations of expansion valve position and compressor control voltage



3 paveikslas. Ribiniai šilumos siurblio veikimo ciklai *p-h* diagramoje

Figure 3. Bounded heat pump operating cycles *p-h* diagram



4 paveikslas. Kondensatoriaus šiluminė galia ir šilumos siurblio COP

Figure 4. Condenser heat capacity and COP of the heat pump

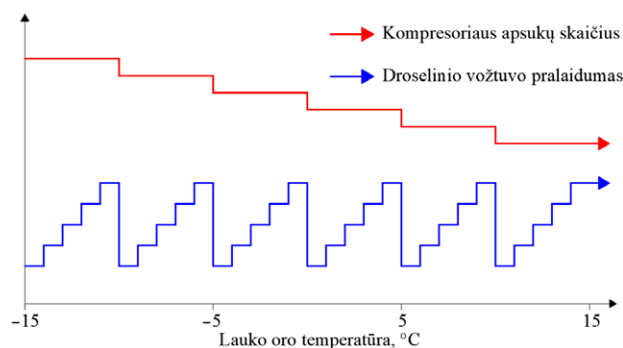
3 paveiksle matome ribinius šilumos siurblio veikimo ciklus. Mėlyna linija parodo šilumos siurblio veikimą, kai KM galia yra mažiausioji (esant 3V), o DV pralaidumas didžiausias; raudona linija – KM galia didžiausioji (esant 8 V), DV pralaidumas mažiausias. Galima pastebėti, kad didėjantys šilumos siurblio darbo parametrai daro didesnę įtaką garintuvo temperatūrinei linijai nei kondensatoriaus.

Apskaičiavus kompresoriaus suvartojamą energiją ir kondensatoriaus šiluminę galią, pagal trečio tyrimo etapo duomenis nustatytas šilumos siurblio efektyvumo koeficientas (COP), esant skirtingiems DV padėties ir kompresoriaus valdymo signalo įtampos deriniams. Skaičiavimo rezultatai pateikti 4 paveiksle. Mažinant DV pralaidumą, šilumos siurblio COP mažėja. Nors tuo metu freono temperatūra didėja, kondensatorius atiduodamas šilumos kiekis mažėja. Tai įvyko dėl to, kad, uždarius kontūrą, didėjant oro temperatūrai, mažėja temperatūros skirtumas tarp freono ir oro temperatūrų, dėl to tarp šių fluidų sulėtėja šilumos mainų procesai ir fiksuojama, kad faktinė kondensatoriaus galia ir naudingumo rodiklis mažėja.

Rezultatai rodo, kad, mažinant DV pralaidumą, galima pasiekti freono temperatūros didėjimą gana plačiu diapazonu nedidinant kompresoriaus apskukų skaičių. Mažinant DV pralaidumą freono temperatūra kondensatoriuje didėdavo 8–14 % priklausomai nuo skirtingų nustatytos kompresoriaus galios derinių. Panašią tendenciją savo eksperimentiniame darbe (Zhang, Dong, Ren, Lai ir Hou, 2017) gavo mokslininkai iš Kinijos. Tai įrodo atlikto eksperimento rezultatų patikimumą.

**Valdymo algoritmas.** Bandyto metu gautos šilumos siurblio veikimo ciklo kitimo tendencijos yra palankios ir artimos teorinio ciklo kitimo tendencijoms, parodytoms VGTU mokslininkų darbe (Martinaitis et al., 2018). Tokios tendencijos yra būdingos didelio efektyvumo teoriniam šilumos siurblio modeliui. Deja, patikimas eksperimentinio modelio galios bei naudingumo rodiklių patikrinimas ir jų palyginimas su teoriniais nėra įmanomas, nes sistemoje cirkuliuoja aukštų temperatūros parametrų oras, dėl kurio sumažėja šilumos atidavimas kondensatoriuje, siaurėja šilumos srauto valdymo diapazonas.

Eksperimento metu gautos šilumos siurblio veikimo ciklo tendencijos, jų panašumas į aukšto energinio naudingumo teorinio šilumos siurblio modelio tendencijas



5 paveikslas. Laiptuotasis šilumos siurblio valdymo algoritmas  
Figure 5. Stepped heat pump control algorithm

bei nustatytos priklausomybės leidžia formuoti šilumos siurblio valdymo algoritmą. 5 paveiksle pavaizduotos šilumos siurblio veikimo kreivės. Jos atspindi suformuotą šilumos siurblio valdymo algoritmą priklausomai nuo lauko oro temperatūros.

Laiptuotojo valdymo algoritmo esmę galima apibūdinti taip: DV pralaidumo reguliavimas – prioritetingė šilumos siurblio šiluminės galios valdymo priemonė; kompresoriaus apskukų skaičius keičiamas tada, kai jau nepakanka DV reguliavimo diapazono šiluminei galiai didinti.

Veikdamas pagal tokį valdymo algoritmą šilumos siurblys ne tik turėtų pasiekti aukštus energinio naudingumo rodiklius, bet ir jo kompresoriaus veikimo režimas būtų tolygesnis. Tai prailgintų kompresoriaus naudojimo laiką.

Nuosekiojo šilumos siurblio valdymo algoritmo pagrindinis skirtumas nuo laiptuotojo algoritmo tas, kad reguliuojamų valdymo parametrų dydžiai tolygiai keičiasi priklausomai nuo lauko oro temperatūros. Toks valdymo būdas reikalauja sudėtingesnės valdymo elektronikos ir automatikos, tačiau leidžia pasiekti tolygų ir tikslų reikiamų oro parametrų palaikymą bei aukštesnį šilumos siurblio energinio efektyvumą.

Svarbu paminėti, kad valdymo kreivių pakopų skaičius, poslinkio kampas ir jų svyravimo amplitudės priklauso nuo konkretaus šilumos siurblio modelio bei reikalaujamos šiluminės galios.

## Išvados

Šiame darbe buvo analizuojamas eksperimentinis šilumos siurblio „oras–oras“ eksperimentinis stendas. Bandyto metu šilumos siurblys buvo valdomas keičiant DV uždarymo padėtį bei kompresoriaus valdymo signalo įtampą. Apibendrinus tyrimo rezultatus galima išskirti šias išvadas:

1. Pirmame eksperimento etape nustatyta, kad šilumos siurblio veikimo ciklo formavimosi tendencija nėra būdinga teoriniam šilumos siurblio darbo ciklui. Didelio slėgio dalis gana patikima, tačiau mažo slėgio linija rodo didelius slėgio nuostolius. Visais nagrinėjamais atvejais pastebėtas staigus 2–3,5 bar freono slėgio kritimas garintuvo zonoje.
2. Antrame eksperimento etape užfiksuota, kad, esant didesnei kompresoriaus galiai, ištraukiamojo oro debitas pradeda mažėti (krinta iki 40 %). Susikondensavusi ant garintuvo plokštelių paviršiaus drėgmė virsta šerkšno arba ledo sluoksniu. Dėl to išauga ištraukimo linijos aerodinaminis pasipriešinimas – mažėja ištraukiamo oro kiekis.
3. Trečiame eksperimento etape eksperimentinio stendo oro tiekimo ir ištraukimo ortakai tapo uždaryti. Tokia sistemos rekonstrukcija leido eliminuoti garintuvo užšalimo įtaką tyrimo rezultatams. Oro debitai sistemoje tapo pastovūs, o šilumos siurblio veikimas – tolygesnis. Vis dėlto šiuo atveju susiaurėjo galimų lauko oro parametrų intervalas.
4. Eksperimento metu nustatyta, kad, kylant lauko oro temperatūrai, mažėja temperatūros skirtumas tarp freono ir oro temperatūrų, dėl to sulėtėja šilumos

mainių procesai tarp šių fluidų, ir bandymuose fiksuojamas faktinės kondensatoriaus galios mažėjimas.

5. Tyrimo rezultatai rodo, kad, mažinant droselio pralaidumą, galima pasiekti freono temperatūros augimą gana plačiu diapazonu nedidinant kompresoriaus apsukų skaičiaus, o gautos šilumos siurblio veikimo ciklo kitimo tendencijos yra palankios ir artimos didelio energinio efektyvumo teorinio ciklo kitimo tendencijoms.
6. Remiantis atliktų tyrimų rezultatais, siūlomi laiptuotasis ir nuoseklusis šilumos siurblio valdymo, priklausančio nuo kintančios lauko oro temperatūros, algoritmai.

## Padėka

Dėkojame VGTU Pastato energetikos ir mikroklimato sistemų laboratorijai už pagalbą tobulinant eksperimentinį standą ir vykdant eksperimentus.

## Literatūra

- Bagarella, G., Lazzarin, R., & Noro, M. (2016). Sizing strategy of on-off and modulating heat pump systems based on annual energy analysis. *International Journal of Refrigeration*, 65, 183-193. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.02.015>
- Martinaitis, V., Streckiene, G., Bagdanavicius, A. ir Bielskus, J. (2018). A comparative thermodynamic analysis of air handling units at variable reference temperature. *Applied Thermal Engineering*, 143(11), 385-395. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.122>
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2008). *Pastatų šildymo sistemos. Šildymo sistemų su šilumos siurbliais projektavimas* (LST EN 15450). Vilnius.
- Zhang, Z., Dong, X., Ren, Z., Lai, T., & Hou, Y. (2017). Influence of refrigerant charge amount and EEV opening on the performance of a transcritical CO<sub>2</sub> heat pump water heater. *Energies*, 10(10), 1521. <https://doi.org/10.3390/en10101521>

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE HEAT PUMP CYCLE CONTROL ALGORITHM SEARCH

A. Frik, D. Rimdžius, T. Kropas

### Abstract

This paper analyzes an experimental heat pump used for heat recovery in a mechanical room ventilation system. The aim of the work is to examine the operation, control logic of the heat pump and evaluate the possibilities of its operation modes, cycle control by outdoor air temperature. A review of scientific literature and experimental tests of the heat pump were performed to achieve this goal. Tests were performed in three stages, after each stage, according to the results obtained the heat pump stand was improved and experimental modes were adjusted. During the experiment, the tendencies of the heat pump freon and air involved in the heat exchange parameters are analyzed with different combinations of expansion valve positions and compressor power. Knowing these experimental characteristics, the extent to which the combination of these two controls can be used to efficiently control of the heat pump according to the outside air temperature is assessed. Based on the results of the research the heat pump control algorithms (depending on the variable outdoor air temperature) are prepared.

**Keywords:** air-to-air heat pump, control algorithm, cycle, freon, heat recovery, ventilation system.