



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

Anton Frik

**EKSPERIMENTINIS ŠILUMOS SIURBLIO CIKLO TYRIMAS, JO
VALDymo ALGORITMO PARENGIMAS**

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE HEAT PUMP CYCLE, ELABORATION
OF THE ALGORITHM FOR ITS CONTROL**

Baigiamasis magistro darbas

Pastatų energijos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX059

Energijos inžinerijos specializacija

Energijos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2019

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Artur Rogoža

(Vardas, pavardė)

(Data)

Anton Frik

**EKSPERIMENTINIS ŠILUMOS SIURBLIO CIKLO TYRIMAS, JO VALDYMO
ALGORITMO PARENGIMAS**

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE HEAT PUMP CYCLE, ELABORATION OF
THE ALGORITHM FOR ITS CONTROL**

Baigiamasis magistro darbas

Pastatų energijos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX059

Energijos inžinerijos specializacija

Energijos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

lekt. dr. prof. Vytautas Martineckis
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas lekt. Regina Žukienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2019

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

Energijos inžinerija

studijų kryptis

Pastatų energijos inžinerijos

studijų programa, valstybinis kodas 6211EX059

Energijos inžinerijos

specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(parašas)

Artur Rogoža

(vardas, pavardė)

2019 _____ mėn. _____ d.

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

.....Nr.
Vilnius

Studentui (ei) **Anton Frik**.....
(vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema ***Eksperimentinis šilumos siurblio ciklo tyrimas, jo valdymo algoritmo parengimas***

Patvirtinta 2019-03-06 Dekano įsakymu Nr. 70 ap

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2019 m. gegužės mėn. 23 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Šilumos siurblių vėdinimo sistemose efektyvumo, veikimo režimų, valdymo būdų, jų analitinių ir eksperimentinių tyrimų literatūros apžvalga. Eksperimentinio stendo galimybių įvertinimas: pirminiai bandymai, patobulinimų siūlymai. Tyrimų krypties patikslinimas, tikslo ir uždavinių formulavimas. Eksperimentinio tyrimo planas: stendo bei šilumos siurblio veikimo režimų jame valdymo būdų, eksperimentų vykdymo ir duomenų apdorojimo pristatymas. Eksperimentinių tyrimų atlikimas etapais, siekiant geriau atskleisti režimų valdymo galimybes. Tyrimų interpretavimas, šilumos siurblio veikimo režimų, ciklo valdymo pagal lauko oro temperatūrą galimybės įvertinimas, tam skirtas algoritmo formulavimas. Pranešimo konferencijai ir publikacijos parengimas. Išvadų, rekomendacijų tolimiesiems tyrimams formulavimas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: ***Regina Žukienė***
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas
(parašas)

..... ***habil. dr. Vytautas Martinaitis***.....
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau
(parašas)

Anton Frik
(vardas, pavardė)

2019-03-08
(data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Aplinkos inžinerijos fakultetas
Pastatų energetikos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Pastatų energijos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Eksperimentinis šilumos siurblio ciklo tyrimas, jo valdymo algoritmo parengimas**

Autorius **Anton Frik**

Vadovas **Vytautas Martinaitis**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe analizuojamas eksperimentinis šilumos siurblys, naudojamas šilumos atgavimui mechaninėje patalpos vėdinimo sistemoje. Darbo tikslas - ištirti šilumos siurblio veikimą, valdymo logiką ir įvertinti jo veikimo režimų, ciklo valdymo pagal lauko oro temperatūrą galimybes. Tikslui pasiekti buvo atlikta mokslinės literatūros apžvalga bei vykdomi šilumos siurblio eksperimentiniai bandymai. Jie atlikti 3 etapais, po kiekvieno etapo, atsižvelgiant į gautus rezultatus, buvo tobulinamas šilumos siurblio stendas, tikslinami eksperimento režimai. Eksperimento metu analizuojamos šilumos siurblio freono ir šilumos mainuose su juo dalyvaujančio oro parametrų kitimo tendencijos, esant skirtingiems droselio 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 parengiami šilumos siurblio valdymo, priklausančio nuo kintančios lauko oro temperatūros algoritmai. Pateikiamos baigiamojo darbo išvados ir rekomendacijos. Darbo apimtis: 56 psl. teksto be priedų, 31 paveikslų, 8 lentelės, 16 bibliografinių šaltinių.

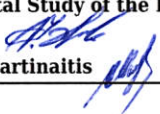
Prasminiai žodžiai: Oras-oras šilumos siurblys, vėdinimo sistema, šilumogrąža, šilumos siurblio valdymas, ciklas, freonas, valdymo algoritmas

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Environmental Engineering
Department of Building Energetics

ISBN _____ ISSN _____
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Building Energy Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Experimental Study of the Heat Pump Cycle, Elaboration of the Algorithm for Its Control**

Author **Anton Frik** 

Academic supervisor **Vytautas Martinaitis** 

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The master thesis 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 3 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 depending on the variable outdoor air temperature heat pump control algorithms are prepared. Conclusions and recommendations are presented. Thesis consist of 56 p. text without appendixes, 31 pictures, 8 tables, 16 bibliographical entries.

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

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Anton Frik, 20132650

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Aplinkos inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Pastatų energijos inžinerija, ENmf-17

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

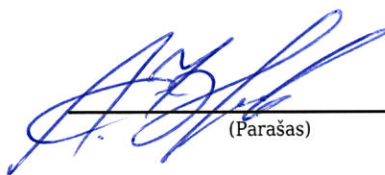
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2019 m. gegužės 20 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Eksperimentinis šilumos siurblio ciklo tyrimas, jo valdymo algoritmo parengimas“ patvirtintas 2019 m. kovo 06 d. dekanų potvarkiu Nr. 70ap, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas profesorius habilituotas daktaras Vytautas Martinaitis.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).



(Parašas)

Anton Frik

(Vardas ir pavardė)

Turinys

IVADAS.....	11
1. PROBLEMOS FORMULAVIMAS	12
2. DARBO TIKSLAS IR KELIAMİ UŖDAVINIAI	13
3. MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO RENGIMO SCHEMA	14
4. LITERATŪROS APŖVALGA	15
4.1. ŖilumogrąŖa vėdinimo sistemose	15
4.2. Ŗilumos siurblių efektyvumo nustatymas	16
4.3. Ŗilumos siurblių veikimo režimai.....	19
4.4. Ŗilumos siurblių valdymo būdai.....	21
5. STENDO TECHNINĖS GALIMYBĖS, EKSPERIMENTO PLANAS	24
6. EKSPERIMENTINIO ŖILUMOS SIURBLIO CIKLO VALDymo BANDYMAI.....	26
6.1. Stendo rekonstrukcija	26
6.2. Matavimo įranga.....	27
6.3. Ŗilumos siurblio valdymas	29
6.4. I-asis eksperimentinio bandymo etapas	29
6.5. II-asis eksperimentinio bandymo etapas.....	36
6.6. III-iasis eksperimentinio bandymo etapas	42
7. ŖILUMOS SIURBLIO VALDymo ALGORITMAS	50
8. IŖVADOS.....	53
9. REKOMENDACIJOS.....	54
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	55
PRIEDAI	57

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Baigiamojo magistro darbo ruošimo schema (sudaryta autoriaus).....	14
2 pav. Vėdinimo įrenginių principinės schemos:.....	16
3 pav. Šilumos siurblio COP prie skirtingų išorės oro temperatūrų bei skirtingų šildymo galių (Bagarella et al., 2016: 183–193)	20
4 pav. Šilumos siurblio COP eksperimento metu (Buikis et al., 2018).....	20
5 pav. Šilumos siurblio COP (a) ir elektros poreikis (b), dirbant prie skirtingų kompresoriaus sukimosi greičio, lauko oro temperatūros ($m_{air}=0,942\text{kg/s}$) bei šilumnešio temperatūros ($m_{water}=0,8\text{kg/s}$) (Fischer, 2017)	21
6 pav. Vėdinimo įrenginio COP priklausomybė nuo lauko oro temperatūros (Martinaitis et al., 2018: 385–395).....	22
7 pav. Šilumos siurblio ciklas $p-h$ diagramoje (Martinaitis et al., 2018: 385–395).....	22
8 pav. Pradinė eksperimentinio stendo principinė schema: 1 – šilumogrąžis, 2 – tiekiamo oro ventiliatorius, 3 – kondensatorius, 4 – ištraukiamo oro ventiliatorius, 5 – kompresorius, 6 – garintuvas, 7 – droselis (sudaryta autoriaus)	24
9 pav. Eksperimentinio stendo šilumogrąžis (sudaryta autoriaus).....	25
10 pav. Eksperimentinis stendas po rekonstrukcijos (sudaryta autoriaus)	26
11 pav. Eksperimentinio stendo principinė schema (sudaryta autoriaus)	26
12 pav. Matavimo taškų išsidėstymo schema (sudaryta autoriaus)	28
13 pav. I-ojo eksperimento suvestinis freono parametrų grafikas (sudaryta autoriaus).....	31
14 pav. Šilumos siurblio veikimo ciklas $p-h$ diagramoje: A – kompresoriaus valdymo signalo įtampa 3000–6000 mV, droselio padėtis 40 %; B – kompresoriaus valdymo signalo įtampa 3000–6000 mV, droselio padėtis 80 % (sudaryta autoriaus)	33
15 pav. Šilumos siurblio veikimo ciklas $p-h$ diagramoje: A – kompresoriaus valdymo signalo įtampa 3000 mV, droselio padėtis 40–80 %; B – kompresoriaus valdymo signalo įtampa 6000 mV, droselio padėtis 40–80 % (sudaryta autoriaus).....	34
16 pav. Šilumos siurblio veikimo hipotetinis ciklas $p-h$ diagramoje (sudaryta autoriaus).....	35
17 pav. II-ojo etapo eksperimento suvestinis freono parametrų grafikas (sudaryta autoriaus)	37
18 pav. Šilumos siurblio veikimo ciklas $p-h$ diagramoje: A – kompresoriaus valdymo signalo įtampa 1 V, droselio padėtis 40 %; B – kompresoriaus valdymo signalo įtampa 1 V, droselio padėtis 80 % (sudaryta autoriaus).....	40
19 pav. Šilumos siurblio veikimo ciklas $p-h$ diagramoje: A – kompresoriaus valdymo signalo įtampa 8 V, droselio padėtis 40 %; B – kompresoriaus valdymo signalo įtampa 8 V, droselio padėtis 80 % (sudaryta autoriaus).....	41

20 pav. Tiekiamas ir išraukiamas oro srautas esant skirtingiems droselio padėties ir kompresoriaus valdymo signalo įtampos deriniams, II-asis etapas (sudaryta autoriaus).....	42
21 pav. Eksperimentinio stendo principinė schema III-ame eksperimentinio bandymo etape (sudaryta autoriaus).....	43
22 pav. III-ojo etapo eksperimento suvestinis freono parametrų grafikas (sudaryta autoriaus).....	44
23 pav. Tiekiamas ir išraukiamas oro srautas esant skirtingiems droselio padėties ir kompresoriaus valdymo signalo įtampos deriniams, III-asis etapas (sudaryta autoriaus)	45
24 pav. Ribiniai šilumos siurblio veikimo ciklai $p-h$ diagramoje, III-iasis etapas (sudaryta autoriaus)	46
25 pav. Kondensatoriaus šiluminė galia ir šilumos siurblio COP esant skirtingiems droselio padėties ir kompresoriaus valdymo signalo įtampos deriniams (sudaryta autoriaus).....	47
26 pav. Temperatūrų kitimas kondensatoriuje (Martinaitis et al., 2018: 385–395).....	47
27 pav. Oro ir freono temperatūros po kondensatoriaus (sudaryta autoriaus).....	48
28 pav. Šildymo galios priklausomybė nuo droselio atidarymo pozicijos ir šaltnešio įkrovos (Zhang et al., 2017).....	48
29 pav. Laiptuotas šilumos siurblio valdymo algoritmas (sudaryta autoriaus)	50
30 pav. Nuoseklus šilumos siurblio valdymo algoritmas (sudaryta autoriaus)	51
31 pav. Šilumos siurblio valdymo algoritmo tekstinė forma (sudaryta autoriaus).....	52

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Šiluminių siurblių skaičiuojamųjų sezoninių naudingumo koeficientų η_{SPF} vertės (sudaryta autoriaus).....	18
2 lentelė. Sezoninis šildymo sistemos efektyvumas su skirtingais kompresoriaus valdymo režimais (Dongellini et al., 2017)	19
3 lentelė. Matavimo įrangos parametrai (sudaryta autoriaus).....	27
4 lentelė. Šilumos siurblio valdymo parametrai eksperimento metu, I-asis etapas (sudaryta autoriaus).....	30
5 lentelė. I-ojo etapo eksperimentinio tyrimo matavimo duomenų suvestinė (sudaryta autoriaus)..	32
6 lentelė. Šilumos siurblio valdymo parametrai eksperimento metu, II-asis etapas (sudaryta autoriaus).....	36
7 lentelė. II-ojo etapo eksperimentinio tyrimo matavimo duomenų suvestinė (sudaryta autoriaus)	38
7 lentelės tęsinys. II-ojo etapo eksperimentinio tyrimo matavimo duomenų suvestinė (sudaryta autoriaus).....	39
8 lentelė. Šilumos siurblio valdymo parametrai eksperimento metu, III-asis etapas (sudaryta autoriaus).....	43

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

COP – Šilumos siurblio naudingumo koeficientas (angl. *Coefficient of performance*);

SPF – Šilumos siurblio sezoninis naudingumo koeficientas (angl. *Seasonal performance factor*);

VĮ – Vėdinimo įrenginys.

IVADAS

Dabartiniame pasaulyje, kai energijos vartojimo tempai auga, iškastinio kuro ištekliai mažėja, o aplinkos užterštumo lygis didėja, susirūpinta pirminės energijos taupymu. Vienas iš energijos taupymo būdų – tai energiją vartojančių sistemų efektyvumo didinimas, todėl energetinio naudingumo reikalavimai tokioms sistemoms nuolat griežtėja.

Pastatų sektorius vienas iš pagrindinių energijos vartotojų Europoje. Pastatuose energija naudojama įvairiems tikslams, vienas iš pagrindinių ir daug energijos vartojančių – komforto žmonėms užtikrinimas, jo veiklai reikalingų sąlygų palaikymas. Už šios užduoties vykdymą atsakingos šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemos, todėl verta ieškoti ir tobulinti būdus kaip užtikrinti šių sistemų energiją taupantį veikimą.

Didėjant pastatų sandarumui, didėja ir mechaninės vėdinimo sistemos poreikis pastate. Kadangi šviežias oras yra būtinas normaliai žmogaus veiklai, tai iškyla uždavinys padidinti vėdinimo sistemos efektyvumą, sumažinti joje energijos vartojimą. Šilumograža iš šalinamo oro didina vėdinimo sistemos efektyvumą. Šilumos siurblio panaudojamas šilumos atgavimui leidžia ne tik grąžinti dalį šilumos, bet ir papildomai gana efektyviai pašildyti tiekiamą orą. Šilumos siurblio energetiškai efektyvus veikimas priklauso nuo tinkamo jo valdymo būdo.

Lietuvoje vėdinimo įrenginiai su integruotais šilumos siurbliais neseniai pradėjo plisti. Tokio šilumos siurblių naudojimo valdymo galimybėms, jų įtakai veikimo efektyvumui įvertinti reikia naujų žinių ir technologijų, tai pasirinkta toliau tirti ir spręsti šią problemą.

Darbe nagrinėjamas eksperimentinis šilumos siurblio stendas pritaikytas patalpos vėdinimui. Atsižvelgiant į ankstesnius tyrimus buvo atlikta stendo rekonstrukcija.

Tyrimo metu buvo siekiama iširti šilumos siurblio, integruoto į vėdinimo įrenginį, veikimą, jo valdymo logiką bei pasiūlyti valdymo algoritmą, kad šilumos siurblio sezoninis efektyvumas būtų kiek įmanoma aukštesnis. Tikslui pasiekti atlikta mokslinės literatūros apžvalga bei šilumos siurblio eksperimentiniai bandymai. Jie buvo atliekami 3 etapais, po kiekvieno etapo buvo tobulinamas šilumos siurblio stendas tam, kad gauti rezultatai būtų kiek įmanoma patikimesni. Eksperimento metu buvo analizuojamos šilumos siurblio freono ir oro parametrų kitimo tendencijos esant skirtingiems droselio padėties ir kompresoriaus galios 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.

Remiantis atliktų tyrimų rezultatais parengiami šilumos siurblio valdymo, priklausančio nuo kintančios lauko oro temperatūros algoritmai.

Anton Frik

1. PROBLEMOS FORMULAVIMAS

Mechaninė vėdinimo sistema – viena iš pagrindinių pastato inžinierinių sistemų, kuri palaiko reikalaujamus mikroklimato parametrus bei užtikrina komforto sąlygas patalpose. Reikalavimai pastatams bei jų energijos vartojančioms sistemoms griežtėja ir siekia kuo mažiau bei efektyviau vartoti energiją (EC 2010: 1–6). Kadangi vėdinimo sistema yra vienas iš pagrindinių energijos vartotojų pastate, verta ieškoti ir tobulinti būdus, kaip užtikrinti jos energiją taupantį veikimą.

Šalinamame ore esančios šilumos panaudojimas didina vėdinimo sistemos energetinį efektyvumą. Šilumos atgavimas iš ištraukiamojo oro srauto naudojant šilumos siurblių leidžia ne tik grąžinti šilumą, bet ir papildomai gana efektyviai pašildyti tiekiamą orą (Bagarella et al., 2016: 183–193). Tačiau, šilumos siurblio veikimas priklauso nuo daugelio faktorių, tokių kaip: sistemoje esančios oro temperatūros, jų nuolatinis kitimas, freono tipas, šilumos siurblio valdymo logika ir kt. Šie faktoriai gali turėti kaip teigiamą, taip ir neigiamą įtaką šilumos siurblio energetiniam efektyvumui.

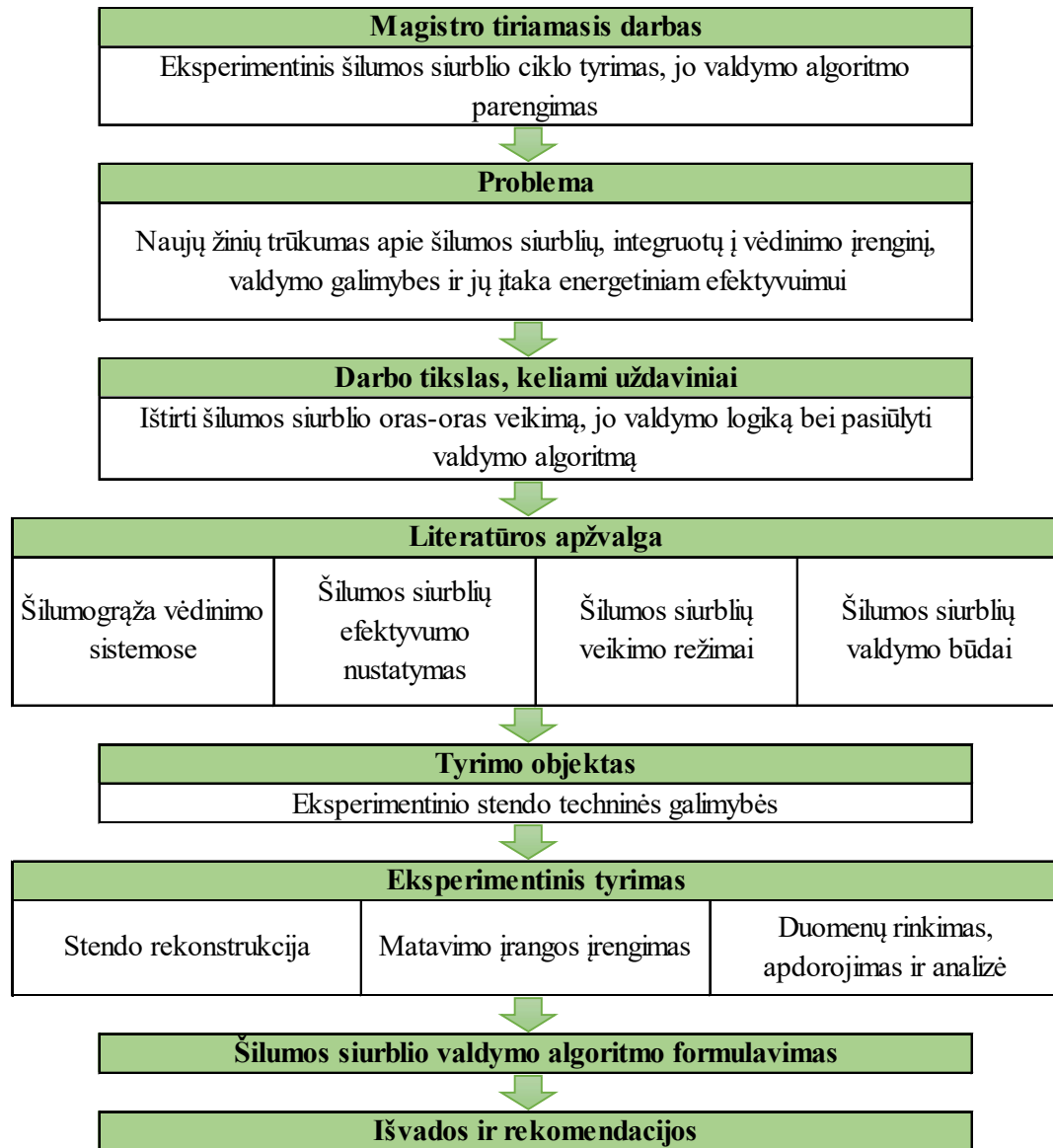
Kadangi apie šilumos siurblio, integruoto į vėdinimo įrenginį, valdymo galimybes ir jų įtaką energetiniam efektyvumui reikalingos naujos žinios ir technologijos, todėl svarbu toliau tirti, analizuoti bei spręsti šią problemą.

2. DARBO TIKSLAS IR KELIAMİ UŽDAVINIAI

Darbo tikslas – ištirti realaus šilumos siurblio oras-oras veikimą, jo valdymo logiką bei pasiūlyti valdymo algoritmą, kad šilumos siurblio sezoninis efektyvumas būtų kiek įmanoma aukštesnis. Tikslui pasiekti iškelti šie uždaviniai:

1. Literatūros apžvalga:
 - a. Šilumos siurblių naudojimas vėdinimo sistemose,
 - b. Vėdinimo ir šildymo sistemų šilumos siurblių efektyvumas, jo valdymo ypatybės,
 - c. Šilumos siurblių veikimo režimai, jų ypatybės ir valdymo galimybės;
2. Šilumos siurblio eksperimentinių tyrimų atlikimas:
 - a. Įvertinti stendo technines galimybes, parengti eksperimento planą,
 - b. Nustatyti eksperimentinio šilumos siurblio valdymo įtaką šilumos siurblio veikimo ciklui,
 - c. Nustatyti šaldymo agento (freono) ir oro parametrų priklausomybes nuo skirtingų šilumos siurblio veikimo režimų,
 - d. Įvertinti šilumos siurblio veikimo efektyvumus įvairiems režimo atvejams;
3. Remiantis atliktų tyrimų rezultatais suformuluoti šilumos siurblio valdymo, priklausančio nuo kintančios lauko oro temperatūros algoritmą;
4. Išvadų ir rekomendacijų parengimas.

3. MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO RENGIMO SCHEMA



1 pav. Baigiamojo magistro darbo ruošimo schema (sudaryta autoriaus)

4. LITERATŪROS APŽVALGA

4.1. Šilumograža vėdinimo sistemose

Mechaninė vėdinimo sistema – viena iš pagrindinių pastato inžinerinių sistemų, kuri palaiko mikroklimato parametrus bei užtikrina komforto sąlygas patalpose. Taip pat tai vienas iš pagrindinių šiluminės energijos vartotojų pastate. Reikalavimai pastatams bei jų energijos vartojančioms sistemoms griežtėja ir lemia kuo mažiau bei efektyviau vartoti energiją. (EC 2010: 1–6). Kadangi vėdinimo sistema yra vienas iš pagrindinių energijos vartotojų pastate, verta apsvarstyti kaip užtikrinti jos energiją taupanti veikimą.

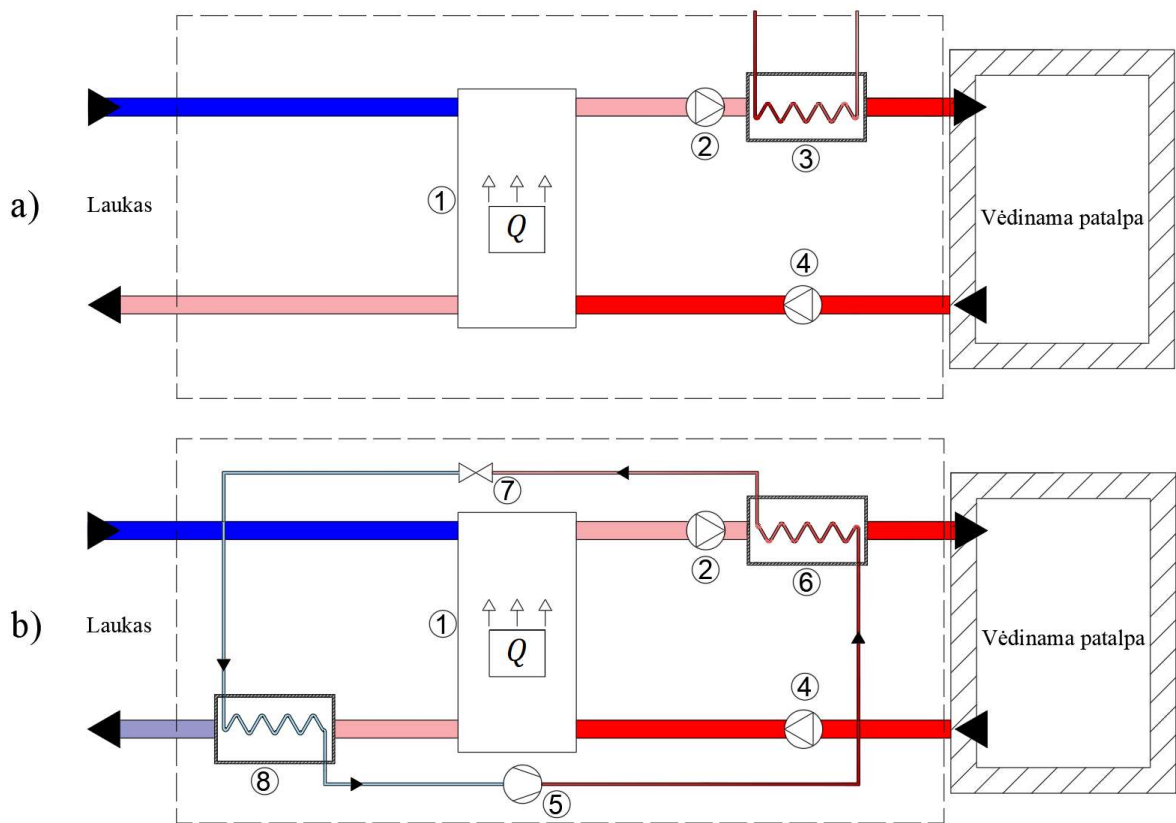
Vienas iš efektyvių būdų sumažinti vėdinimo sistemos šiluminės energijos suvartojimą yra šilumos atgavimas iš šalinamojo oro srauto – šilumograža. Jos dėka gali būti atgauta iki 90 % šilumos.

Šilumai atgauti naudojami įvairūs šilumogražos įrenginiai: rotaciniai, plokšteliniai šilumokaičiai, taip pat ir šilumokaičiai su tarpiniu šilumnešiu. Tokių įrenginių naudojimas skatinamas ne tik Lietuvos (STR 2.01.02:2016), bet ir Europos Sąjungos teisės aktuose (LST EN 13779:2007) (Martinaitis et al., 2012: 493–498).

Lietuvoje dauguma parduodamų vėdinimo įrenginių yra komplektuojami rotaciniu arba plokšteliniu šilumokaičiu, kuris skirtas šilumai atgauti iš šalinamojo oro srauto. Taip pat orui pašildyti iki nustatytos temperatūros į įrenginį įdiegiamas vandeninis arba elektrinis šildytuvas. Tokio tradicinio vėdinimo įrenginio principinė schema pateikta 2 paveiksle, a).

Pastaruoju metu tarp vėdinimo įrenginių gamintojų populiarėja dar vienas iš šilumos atgavimo būdų – šilumograža naudojant integruotus į vėdinimo įrenginius šilumos siurblius (gamintojai „Systemair“; „Komfovent“). Šia technologija skirta dar didesniai šilumos kiekiui atgauti, lyginant su įrenginiais, kur naudojami tik tradiciniai šilumogražiai. Taip pat šilumos siurblys vėdinimo įrenginyje vasaros metu gali būti panaudotas kaip vėsinimo įrenginys. Tokio tipo vėdinimo įrenginio principinė schema pateikta 2 paveiksle, b).

Šilumogražis – svarbus elementas šilumos atgavimo procese, tačiau jis beveik neturi valdymo galimybių, o jo efektyvumas nežymiai svyruoja priklausomai nuo temperatūros. Užtat šilumos siurblio efektyvumas ženkliai priklauso nuo valdymo režimo bei sistemoje esančių temperatūrų. Todėl verta detaliau analizuoti būtent šilumos siurblio veikimą.



2 pav. Vėdinimo įrenginių principinės schemos: a) šilumogražis ir šildymo šildytuvas, b) šilumogražis ir šilumos siurblys. 1 – šilumogražis, 2 – tiekiamo oro ventiliatorius, 3 – šildymo šildytuvas, 4 – ištraukiamo oro ventiliatorius, 5 – kompresorius, 6 – kondensatorius, 7 – droselis, 8 – garintuvas (sudaryta autoriaus)

Šilumos siurblio veikimas labai priklauso nuo darbo sąlygų. Kadangi šilumos šaltinio (šalinamojo oro) ir šildomo oro srauto temperatūros kinta per šildymo laikotarpį, todėl ir šilumos siurblio našumas turėtų būti derinamas prie skirtingų temperatūrų, charakteringų eksploatacijos vietai (EN 15316-4-2 2008: 149). Tačiau oro šilumos siurblių energetiniam efektyvumui daro įtaką ne tik lauko oro temperatūra, bet ir oro drėgmė. Kai drėgmės kiekis ore yra aukštas ir temperatūra yra žemesnė nei 6 °C, atsiranda užšalimo pavojus. Ant šilumokaičio (garintuvo) paviršiaus pradeda formotis šerkšno sluoksnis, dėl kurio mažėja šilumos siurblio naudingumas arba net gali būti sustabdytas šilumos siurblio veikimas (Vocale et al., 2014: 653–662).

4.2. Šilumos siurblių efektyvumo nustatymas

Dažniausiai kompresorinio tipo šilumos siurblių, naudojančių elektrą, efektyvumas yra įvertinamas naudingumo koeficientu COP (angl. *coefficient of performance*), kuris rodo įrenginio pateiktos ir sunaudotos energijos santykį. Šis koeficientas parodo momentinį šilumos siurblio efektyvumą esant tam tikroms standartinėms sąlygoms. Norint įvertinti šilumos siurblio sezoninį efektyvumą yra naudojamas koeficientas SPF (angl. *seasonal performance factor*). Tai per visą

sezoną šilumos siurblio pateiktos šilumos ir suvartotos elektros energijos santykis. Šis koeficientas įvertina kintamą šilumos poreikį, šilumos šaltinio ir pateiktos šilumos temperatūrų svyravimus, todėl geriau atspindi įrenginio veikimo efektyvumą (Pakalka et al., 2017: 51–56).

Šiuo metu galiojantys pagrindiniai Europos standartai, susiję su šilumos siurblių projektavimu ir efektyvumo skaičiavimais, kurių naudojimas yra patvirtintas ir Lietuvoje – LST EN 15450:2008 ir LST EN 15316-4-2:2008.

Standartuose pateikta metodika reikalauja faktinių duomenų apie šildymo sistemą su šilumos siurbliu. Dauguma metodų remiasi tuo, kad naudojami standartiniai šilumos siurblių parametrai, kuriuos nustato ir pateikia gamintojai. Svarbus faktorius, naudojamas efektyvumo tyrimuose, – duomenys apie lauko oro temperatūrą. Dauguma standartų turi būti naudojami jau projektavimo stadijoje, kai galima apskaičiuoti tikėtiną šilumos siurblio efektyvumą ir taip atlikti kitas analizės stadijas, pavyzdžiui, palyginti skirtingų parametru sistemų su skirtingais šilumos šaltiniais ir įvertinti tikėtiną sezoninį efektyvumą bei atlikti ekonominę sistemų vertinimą (Pakalka et al., 2017: 51–56).

Standarte (LST EN 15450:2008) nurodytos šilumos siurblio momentinio (COP) ir sezoninio (SPF) efektyvumo skaičiavimo formulės:

$$COP = \frac{\theta_{HP,hw}}{P_{HP} + P_{HP,aux}}, \quad (1)$$

Čia: $\theta_{HP,hw}$ – šildymo galia, W;

P_{HP} – kompresoriaus galia, W;

$P_{HP,aux}$ – papildomų įrenginių galia, W.

$$SPF_{g,t} = \frac{Q_{out,g,h} + Q_{out,g,DHW}}{E_{in,g} + W_g}, \quad (2)$$

Čia: $SPF_{g,t}$ – bendras sezoninis efektyvumo koeficientas;

$Q_{out,g,h}$ – šildymo sistemai suteiktas šilumos kiekis, kWh;

$Q_{out,g,DHW}$ – karšto vandens ruošimui suteiktas šilumos kiekis, kWh;

$E_{in,g}$ – šilumos siurblio elektros energijos sąnaudos, kWh;

W_g – papildomų įrenginių elektros energijos sąnaudos, kWh.

Šilumos siurblio naudinga šiluminė galia – tai jo kondensatoriaus šiluminė galia, kuri yra apskaičiuojama pagal (3) formulę:

$$Q_K = m_{oro} \cdot c_{oro} \cdot (t_1 - t_2) \quad (3)$$

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.

Kompresoriaus suvartojama galia apskaičiuojama pagal (4) formulę:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (4)$$

Čia: P – elektrinė galia, W;
 U – įtampa, V;
 I – srovės stipris, A;
 $\cos \varphi$ – fazių skirtumas tarp srovės ir įtampos.

Svarbu paminėti, kad statybos techniniame reglamente STR 2.01.02:2016 yra pateiktos SPF projektinės reikšmės (1 lentelė), priklausomai nuo energijos šaltinio.

1 lentelė. Šiluminių siurblių skaičiuojamųjų sezoninių naudingumo koeficientų η_{SPF} vertės (STR 2.01.02:2016)

Šiluminio siurblio apibūdinimas	η_{SPF}
Šiluminis siurblys, kai energija imama iš oro	3,0
Šiluminis siurblys, kai energija imama iš grunto	4
Šiluminis siurblys, kai energija imama iš vandens	4,5

Kaip matome iš lentelės, žemiausia naudingumo koeficiento vertė nustatoma tada, kai šiluma išgaunama iš oro.

Vėdinimo įrenginio termodinaminis efektyvumas išreiškiamas kaip suteikto patalpai vėdinti skirtam šviežiam orui šilumos srauto ir iš už vėdinimo įrenginio kaip termodinaminės sistemos ribų suteikiamos eksergijos srauto tiek darbo, tiek šilumos forma santykis (Streckienė et al., 2019). Šis rodiklis apskaičiuojamas pagal (5) formulę:

$$COP_{Vl} = \frac{\dot{Q}_{Vl}}{\dot{E}_{Vl}^+}, \quad (5)$$

Čia: $\dot{Q}_{Vl}$ – orui suteiktas šilumos srautas, W;
 $\dot{E}_{Vl}^+$ – vėdinimo įrenginiu sunaudotas energijos srautas, W.

Vėdinimo įrenginyje energija gali naudoti ventiliatoriai, kompresoriai bei schemeje neparodyti papildomi šildytuvai ar vėsintuvai, naudojančys išorinius šilumnešius ar elektrą (Streckienė et al., 2019).

4.3. Šilumos siurblių veikimo režimai

Kompresorius – vienas iš šilumos siurblio elementų, nuo kurio priklauso įrenginiu generuojama šiluminė galia. Kompresoriaus valdymas gali būti atliekamas keliais būdais. Vienas paprasčiausių ir dažniausiai naudojamų – vadinamas „veikimo“–„neveikimo“ (angl. ON/OFF) režimas (EN 15316-4-2 2008: 149). Veikdamas tokiu režimu kompresorius turi fiksuotą apsisukimų greitį, todėl esant šilumos poreikiui šilumos siurblys dirba nominalia galia, o kai pasiekiamą nustatyta temperatūra jis išsijungia. Taigi, tokio valdymo tipo kompresorių sunku pritaikyti vėdinimo sistemai. Kadangi vėdinimo sistemos šildymo šilumokaičio (kondensatoriaus) inercija yra maža, kompresorius bus priverstas pernelyg dažnai įsijunginėti ir išsijunginėti, o toks veikimo režimas ne tik sumažins jo eksploataavimo laiką, bet ir neužtikrins tolygaus reikiamų oro parametrų palaikymo.

Efektyvesnis šilumos siurblio valdymo būdas yra pakopinis arba tolygus šilumos siurblio galios reguliavimas su kintamojo greičio kompresoriumi. Šis valdymo būdas leidžia reguliuoti šilumos siurblio šildymo galią atitinkamai pagal pastato šilumos nuostolius. Taigi, tokiu atveju šilumos siurblio sezoninis efektyvumo faktorius gali būti aukštesnis (Pakalka et al., 2017: 51–56).

Kaip jau minėta, fiksuoto greičio šilumos siurblio galios reguliavimas („veikimo“–„neveikimo“ režimas) sukelia išjungimo ciklų seką, mažinančią įrenginio efektyvumą. Kita vertus, kintamo greičio įrenginys galėtų veikti nuolat, dėl to sumažėja įjungimo/išjungimo dažnis ir ciklo nuostolių efektas. (Bagarella et al., 2016: 183–193).

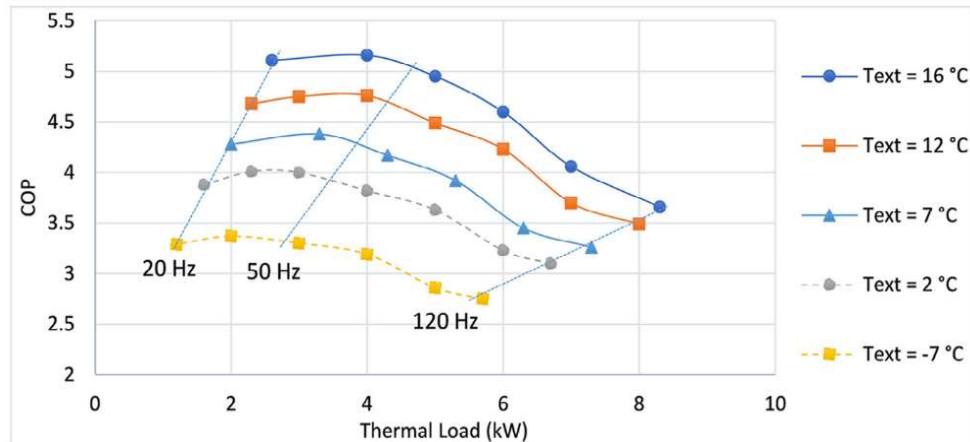
Mokslininkai M. Dongellinia, M. Abbenantea, G. Luca Morini savo darbe [3] analizuoja kompresoriaus skirtingų valdymo režimų įtaką šilumos siurblio sezoniniam efektyvumui. Darbe nagrinėjamas orinis šilumos siurblys veikiantis „veikimo“–„neveikimo“, pakopiniu ir tolygaus reguliavimo režimais. Tyrimo rezultatai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Sezoninis šildymo sistemos efektyvumas su skirtingais kompresoriaus valdymo režimais (Dongellini et al., 2017)

Heat pump typology	$E_{th,PdC}$ [kWh]	$E_{el,PdC}$ [kWh]	$E_{el,purr}$ [kWh]	$SCOP_{net}$	$SCOP_{on}$	η_s	Cycles
On-off HP	26159	9189	286	2.85	2.76	1.10	11393
MSHP	26420	8733	286	3.00	2.93	1.17	10335
MSHP _{opt}	26530	8595	268	3.09	2.99	1.19	4272
IDHP	26503	7864	286	3.37	3.25	1.30	2697

Rezultatai rodo, kad šilumos siurblio, dirbančio tolygaus reguliavimo režimu, sezoninis efektyvumas, lyginant su pakopiniu bei „veikimo“–„neveikimo“ režimais dirbančiais siurbliais yra aukštesnis 8,3 % bei 15,4 % atitinkamai.

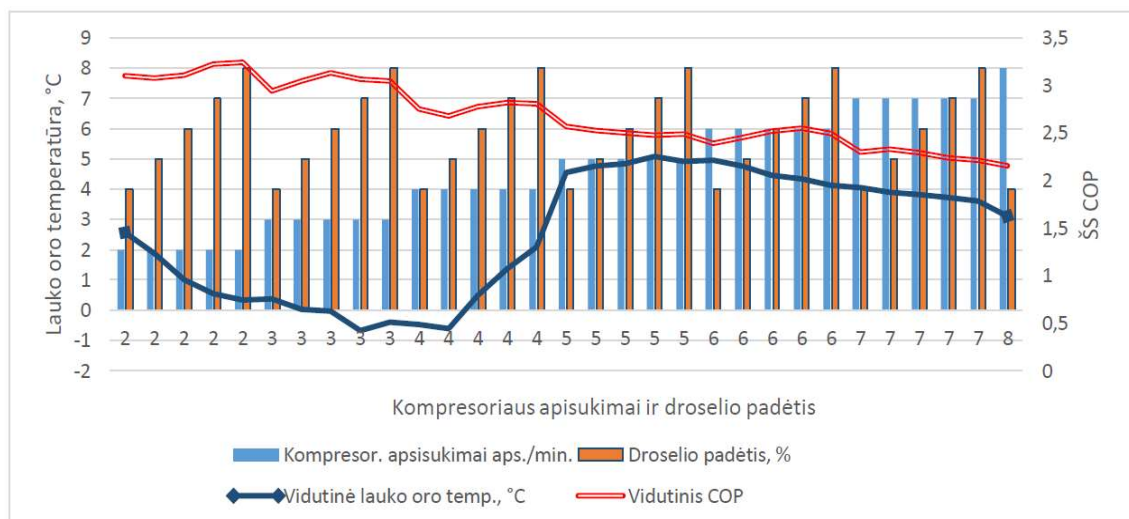
Analizuojant orinio šilumos siurblio su kintamojo greičio kompresoriumi veikimą, Italijos mokslininkai G. Bagarella, R. Lazzarin ir M. Noro [1] nustatė priklausomybę tiriamojo šilumos siurblio momentinio efektyvumo koeficiento (COP) nuo lauko oro temperatūros (pratekančio pro garintuvą oro temperatūros) bei šildymo galios. Tyrimo rezultatų grafinis vaizdas pateiktas 3 paveiksle.



3 pav. Šilumos siurblio COP prie skirtingų išorės oro temperatūrų bei skirtingų šildymo galių (Bagarella et al., 2016: 183–193)

Šilumos siurblio šildymo galia nusako kompresoriaus apsisukimų skaičius, kuo jis didesnis, tuo didesnė šildymo galia. Tačiau kartu su šiluminio galingumo padidėjimu krenta šilumos siurblio efektyvumas (3 pav.).

J. Buikio magistriniame darbe [2] atlikti veikiančio šilumogražio su integruotų šilumos siurbliu įrenginio eksperimentiniai tymai. Rezultatai rodo (4 pav.), kaip keičiasi orinio šilumos siurblio COP priklausomai nuo lauko oro temperatūros, kompresoriaus apsisukimų greičio bei droselio padėties.



4 pav. Šilumos siurblio COP eksperimento metu (Buikis et al., 2018)

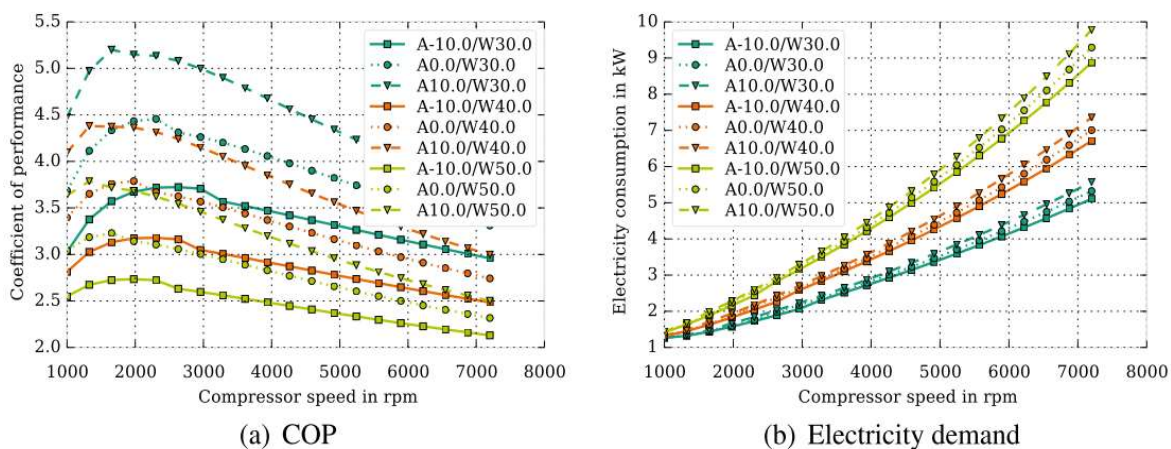
Mažiausias šilumos siurblio COP nustatytas, kai kompresorius veikia 7000 aps./min. greičiu (vidutinė lauko oro temperatūra 3,6 °C), droselio padėtis – 80 %. Didžiausias COP pasiektas, kai šilumos siurblys veikia 2000 aps./min. greičiu (vidutinė lauko oro temperatūra yra –0,3 °C), droselio padėtis – 80 % (Buikis et al., 2018).

Atsižvelgiant į kitų autorių atliktus tyrimus bei mokslinę literatūrą, galima teigti, kad teisingai užduoti šilumos siurblio veikimo valdymo algoritmai leidžia užtikrinti komforto sąlygos pastate bei pasiekti galimai didesnę sezoninę efektyvumą.

4.4. Šilumos siurblių valdymo būdai

Šilumos siurbliu generuojama šildymo galia priklauso nuo daugelio faktorių: šilumos siurblio konstrukcija, kompresoriaus greitis, droselio padėtis, freono bei oro temperatūros, freono tipas. Kiekvieno iš įvardintų elementų įtaka turi būti įvertinta optimizuojant šilumos siurblio veikimą.

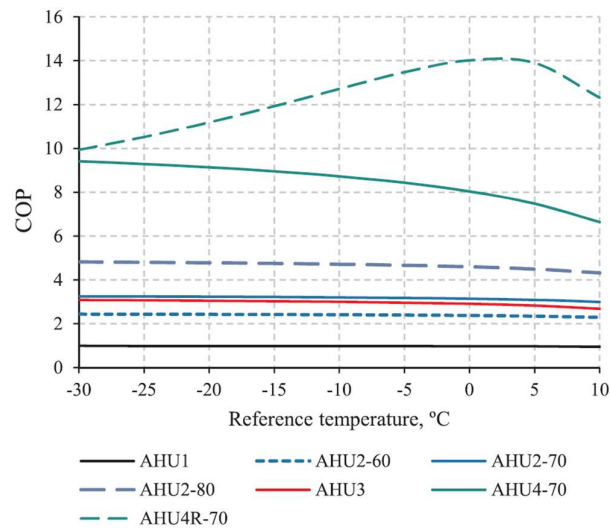
Mokslininkas David Fischer iš Vokietijos savo darbe pateikia šilumos siurblio oras-vanduo COP bei elektros poreikio priklausomybės nuo kompresoriaus sukimosi greičio (5 pav.).



5 pav. Šilumos siurblio COP (a) ir elektros poreikis (b), dirbant prie skirtingų kompresoriaus sukimosi greičio, lauko oro temperatūros ($m_{air}=0,942\text{kg/s}$) bei šilumnešio temperatūros ($m_{water}=0,8\text{kg/s}$) (Fischer, 2017)

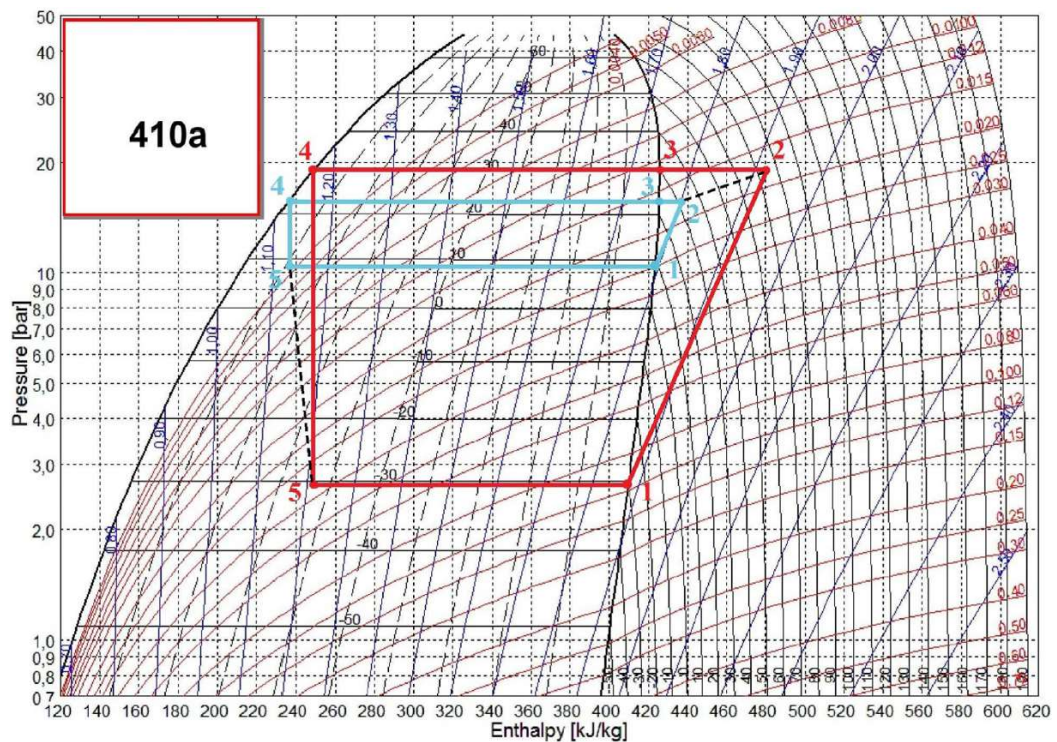
Padidėjęs kompresoriaus sukimosi greitis padidina COP iki tam tikro taško, taip įvyko dėl to, kad sumažėja suspaudimo proceso nuostoliai (Fischer, 2017). Toliau šilumos siurblio efektyvumas tik mažėja, padidinus kompresoriaus greitį. Elektros poreikio priklausomybė nuo kompresoriaus greičio beveik tiesinė, didinant apsukimų skaičių, auga ir elektros sąnaudos.

VGTU mokslininkai savo analitiniame tyrime [9] atlikę šilumos siurblio, veikiančio vėdinimo įrenginyje, termodinaminio efektyvumo vertinimą esant jo skirtingiems veikimo režimams. Gautą vėdinimo įrenginio COP priklausomybę nuo išorės oro temperatūros pateikta 6 paveiksle.



6 pav. Vėdinimo įrenginio COP priklausomybė nuo lauko oro temperatūros (Martinaitis et al., 2018: 385–395)

Tyrimo rezultatai rodo, kad aukščiausias efektyvumas yra pasiekiamas, kai vėdinimo įrenginys veikia „AHU4R-70“ režime. Šitame atvejyje vėdinimo įrenginio COP atspindi ir yra proporcingas šilumos siurblio efektyvumo koeficientui, nes šilumos siurblys šioje sistemoje yra vienintelis oro šildymo komponentas vartojantis energiją. Analitinio tyrimo analizė rodo, kad toks aukštas veikimo naudingumas būtų pasiektas, jeigu šilumos siurblio valdymas būtų atliekamas pagal, 7 paveiksle parodytą, izotermų judėjimo tendenciją.

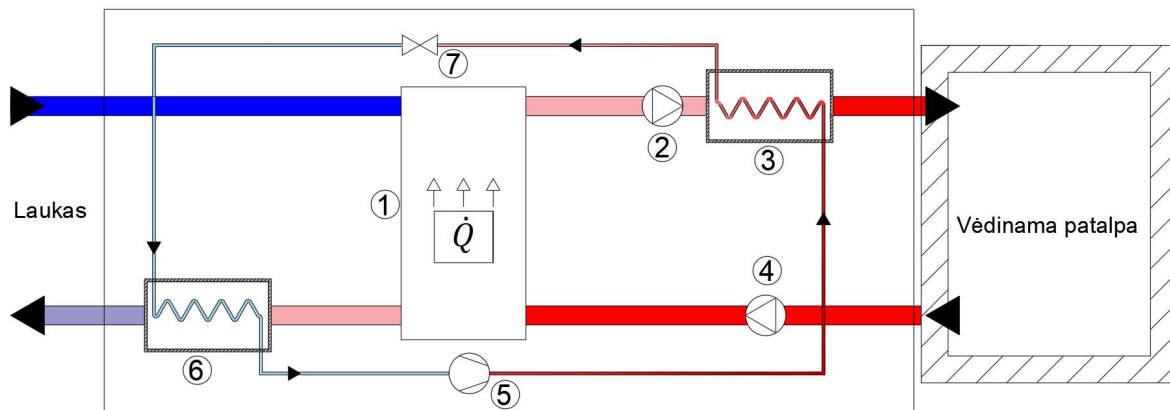


7 pav. Šilumos siurblio ciklas p - h diagramoje (Martinaitis et al., 2018: 385–395)

7 paveiksle parodyta koku būdu turi keistis šilumos siurblio veikimo ciklas priklausomai nuo lauko oro temperatūros, nuo šilčiausios atskaitos $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros (mėlyna linija) iki šalčiausios $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros (raudona linija). Šis valdymas nurodo tiesioginį ryšį tarp garintuvo ir kondensatoriaus izotermų ir lauko oro temperatūros. Deja, tai teorinis modelis, kurio galimybės eksperimentiškai nėra patikrintos.

5. STENDO TECHNINĖS GALIMYBĖS, EKSPERIMENTO PLANAS

Darbe nagrinėjamas eksperimentinis šilumos siurblio stendas, esantis Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos inžinerijos fakulteto Pastato energetinių ir mikroklimato sistemų (PEMS) laboratorijoje. Šio stendo principinė schema pateikta 8 paveiksle.



8 pav. Pradinė eksperimentinio stendo principinė schema: 1 – šilumogražis, 2 – tiekiamo oro ventiliatorius, 3 – kondensatorius, 4 – ištraukiamo oro ventiliatorius, 5 – kompresorius, 6 – garintuvas, 7 – droselis (sudaryta autoriaus)

Stendo sistema (8 pav.) susideda iš:

- Šilumogražio (1);
- oro tiekimo/ištraukimo ventiliatorių (2, 4);
- ortakių;
- šilumos siurblio (3, 5, 6, 7).

O pats šilumos siurblys susideda iš tokiu atskirų komponentų kaip kompresorius (5), kondensatorius (3), išsiplėtimo vožtuvas (7), garintuvas (6), valdymo automatika, uždaromoji ir reguliavimo armatūra. Stende sumontuotas kintamo greičio (inverterinis) kompresorius, kurio maksimali elektrinė galia yra 695 W. Šilumos siurblio sistema užpildyta R410 tipo freonu. Šilumos siurblio veikimą galima reguliuoti keičiant droselio pralaidumą bei kompresoriaus apsukų skaičių.

J. Buikio magistriniame darbe [2] atlikti matavimų rezultatai rado, kad šilumogražis (9 paveikslas) daro neigiamą įtaką eksperimentinio šilumos siurblio bandymams. Jis didina sistemos aerodinaminį pasipriešinimą, todėl pro šilumos siurblio šilumokaičius (kondensatorių ar garintuvą) prateka sąlyginai mažas oro kiekis (142 m³/h). Taip pat šilumogražis kelia tiekiamo lauko oro temperatūrą, dėl šitos priežasties sudėtinga analizuoti šilumos siurblio veikimą prie šaltojo laikotarpio lauko oro parametrų. Be to, J. Buikio darbe [2] atlikto eksperimento metu tiekiamo į patalpą oro temperatūra siekdavo net +84 °C, o tai rodo, kad oras buvo perkaitinamas.



9 pav. Eksperimentinio stendo šilumogražis (sudaryta autoriaus)

Siekiant atlikti nustatytą magistrinio darbo tikslą bei gilintis ir nagrinėti šilumos siurblio veikimą, taip pat atsižvelgiant į ankstesnių eksperimentų su bandomuoju stendu rezultatus ir rekomendacijas šiame darbe buvo priimtas sprendimas pakeisti stendo konstrukciją – pašalinti iš sistemos šilumogražį. Tikėtasi, kad tokie stendo pakeitimai leis detaliau išanalizuoti šilumos siurblio veikimą.

Sudaromas eksperimento planas:

1. Perkonstruoti eksperimentinį stendą;
2. Sumontuoti matavimo įrangą prie charakteringų taškų;
3. Suprogramuoti šilumos siurblio valdymo logiką;
4. Atlikti šilumos siurblio eksperimentinį bandymą.

6. EKSPERIMENTINIO ŠILUMOS SIURBLIO CIKLO VALDYMO BANDYMAI

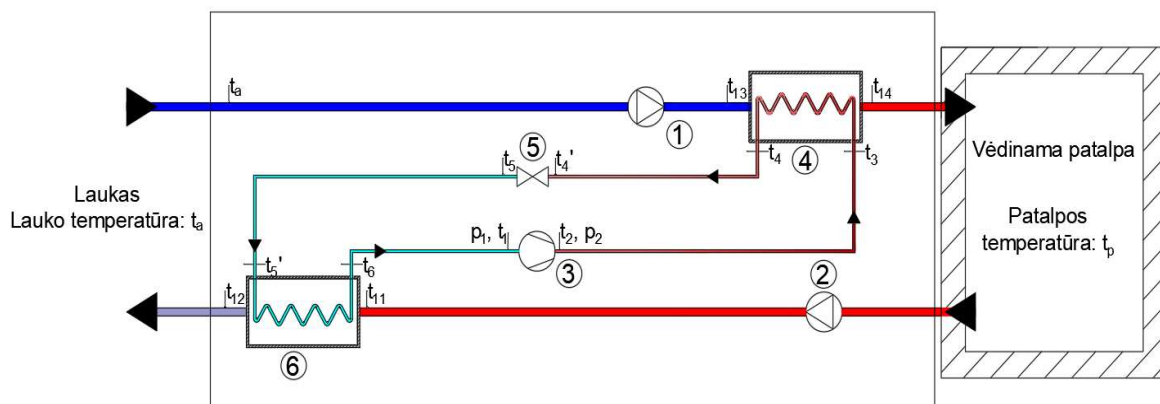
6.1. Stendo rekonstrukcija

Atlikta bandomojo stendo rekonstrukcija, kurios metu iš oro tiekimo/ištraukimo sistemos buvo pašalintas šilumogražis. Taip pat atlikti dalies oro paėmimo ir išmetimo ortakių izoliavimo darbai, siekiant sumažinti šilumos nuostolius sistemoje bei kondensacijos pavojų.



10 pav. Eksperimentinis stendas po rekonstrukcijos (sudaryta autoriaus)

Atnaujinto eksperimentinio stendo schema pateikta 11 paveiksle.



11 pav. Eksperimentinio stendo principinė schema (sudaryta autoriaus)

Šiame stendo variante šilumos siurblys yra pagrindinis įrenginys skirtas šilumai iš šalinamo oro atgauti ir į patalpą tiekiamam orui pašildyti iki projektinės temperatūros. Šiame procese dalyvauja 4 pagrindiniai šilumos siurblio įrenginiai (11 pav.). Kompresorius (3) suspaudžia freoną iki reikiamo slėgio, taip jį pašildo ir priverčia garuoti. Tuomet freonas teka į kondensatorių (4), kuriame,

atiduodamas šilumą tekančiam orui, kondensuojasi. Atidavęs šilumą, bet neatvėsęs freonas teka pro droselinį vožtuvą (5), kuriame droseliavimo metu staigiai krenta freono slėgis ir temperatūra. Atšalęs freonas teka į garintuvą (6), kuriame šiltesnis tekantis oras jį pašildo ir išgarina. Po to, freonas vėl patenka į kompresorių ir ciklas kartojasi (Martinaitis et al., 2012: 493–498).

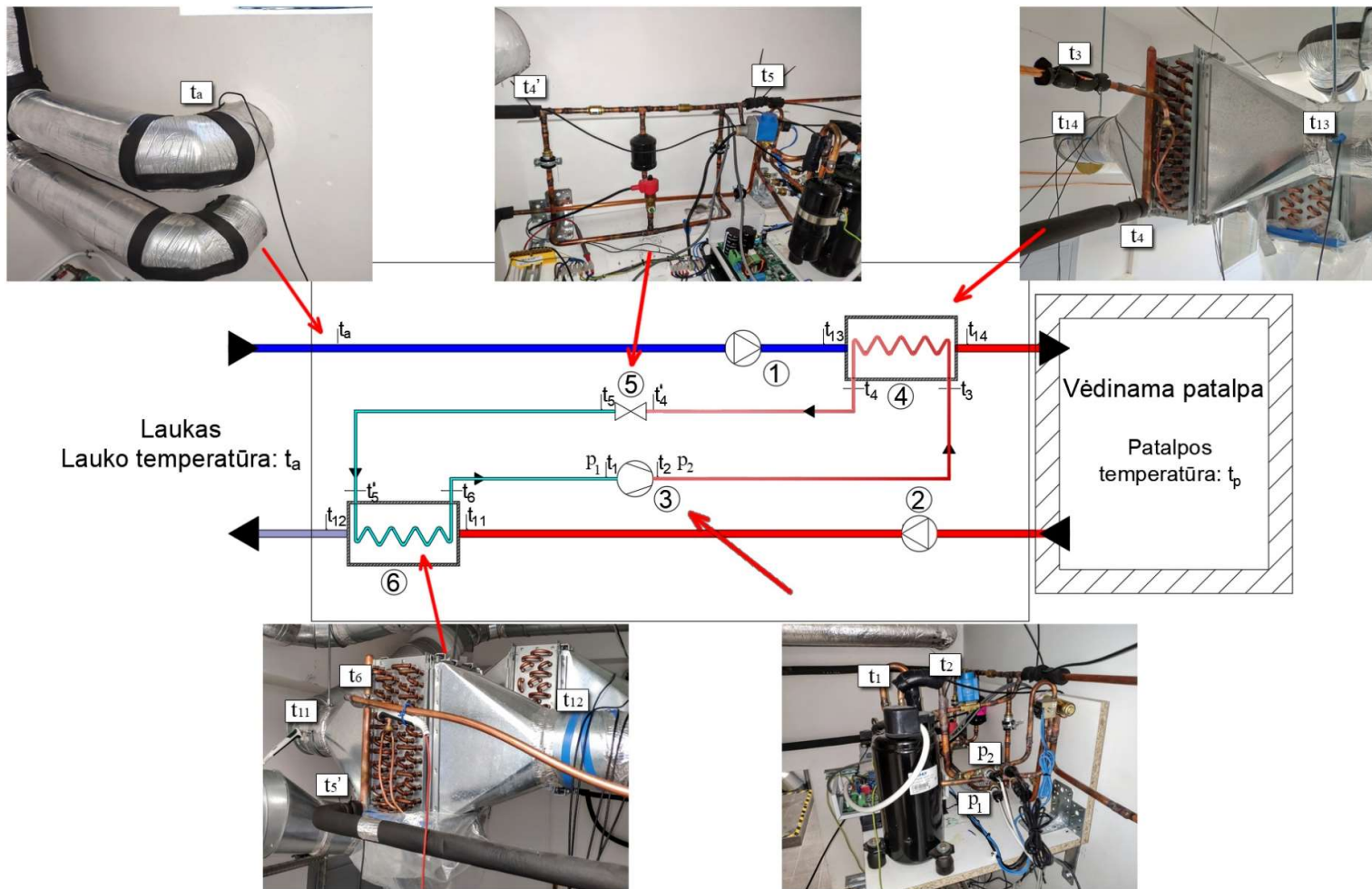
6.2. Matavimo įranga

Prie charakteringų sistemos taškų įrengiama temperatūros bei slėgio matavimo įranga. Matavimams atlikti naudojamos įrangos duomenys pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Matavimo įrangos parametrai (sudaryta autoriaus)

Pavadinimas	Atliekama funkcija	Matavimo ribos	Matavimo paklaida prie 25 °C (matavimų tikslumas)
Almemo 5690-2 AHLBORN	Duomenų kaupimas	60 įvesties duomenų kaupiklių	±0,1 %
Hobo ENERGY LOGGER PRO	Duomenų kaupimas	6 įvesties duomenų kaupiklių	±5 sek. per savaitę
Extech EX542	Srovės bei įtampos matavimas	0,01 μA...20 A; 0,01 mV...1000 V	±0,06 %
Almemo ZA 9030-FS1; Pt 100	Freono ir oro temperatūros matavimas	−40...+300 °C	±0,3 °C
Hobo S-TMB-M017	Oro temperatūros matavimas	−40...+100 °C	±0,2 °C
Carel SPKT00B6R0	Aukšto freono slėgio matavimas	0...45,0 bar	±1,2%
Carel SPKT0043R0	Žemo freono slėgio matavimas	0...17,3 bar	±1,2%
Kurenta DN150	Flanšinio tipo diafragma	4...400 Pa	±0,06 %
FD A602-S1K	Oro slėgio skirtumo matavimas	0,5...40,0 m/s	± 0.1 m/s

Detalus daviklių išsidėstymas parodytas schemeje, esančioje 12 paveiksle. Eksperimento metu matuojamos 8 freono temperatūros ($t_1, t_2, t_3, t_4, t_4', t_5, t_5', t_6$) bei 5 oro temperatūros ($t_a, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}$) charakteringuose taškuose. Kaupiami duomenys apie elektros srovės tiekiamos kompresoriui stiprio dydį. Taip pat matuojamas oro srauto matavimo diafragmų sukeltas slėgio skirtumas ant oro tiekimo bei ištraukimo linijų, siekiant nustatyti sistemos oro debitus. Visi matavimai atliekami 60 sekundžių intervalu.



12 pav. Matavimo taškų išsidėstymo schema (sudaryta autoriaus)

Iš nuotraukų, esančių 12 paveiksle galima matyti tikslų matavimo įrangos daviklių išsidėstymą realiame stende.

6.3. Šilumos siurblio valdymas

Eksperimento metu siekiama ištirti šilumos siurblio freono parametrų keitimo tendencijas prie skirtingų droselio padėties bei kompresoriaus apsukų skaičiaus derinių. Žinant tokias eksperimentines charakteristikas galima būtų įvertinti kiek šių dviejų valdymo priemonių derinys gali būti naudojamas efektyviam šilumos siurblio valdymui pagal išorės oro temperatūrą.

Šilumos siurblio veikimo programoje buvo nustatytas eksperimentinis įrenginio veikimo režimas, kuris leidžia matyti kaip keičiasi freono ir oro parametrai prie skirtingų šilumos siurblio veikimo režimų (skirtingų kompresoriaus galios ir droselio padėties kombinacijų). Valdymo algoritmas veikia tokiu būdu:

1. Šilumos siurblys pradeda veikimą su nustatytais pradiniais droselio bei kompresoriaus parametrais;
2. Nustatytu laiko dažnumu keičia droselio atidarymo poziciją (40–80 %);
3. Kai pasiekta maksimali droselio atidarymo pozicija (80%), keičiama (didinama) kompresoriaus galia. Droselio padėtis gražinama į pradinę poziciją (40 %);
4. Veikimo ciklas kartojasi nuo antro punkto, vėl nustatytu laiko dažnumu keičia droselio atidarymo poziciją;
5. Kai pasiekta maksimali kompresoriaus galia (prie 8 V kompresoriaus valdymo signalo įtampos), šilumos siurblys pradeda veikimą nuo pirmo punkto.

Kadangi šilumos siurblys veikia realiomis sąlygomis (naudojamas drėgnas lauko oras), likus nustatytam laiko intervalui prieš droselio pozicijos keitimą, jungiamas atitirpinimo ciklas, kompresoriaus galia mažinama iki minimalios, kai kompresoriaus valdymo signalo įtampa yra mažinama iki 1 V.

Pagal tokia valdymo programą suprogramuojamas šilumos siurblio mikrovaldiklis (*Arduino Mega 2560*). Šis elementas yra pagrindinis šilumos siurblio valdymo komponentas, kuris analizuoja temperatūrų ir slėgio jutiklių reikšmes bei kontroliuoja kompresoriaus ir išsiplėtimo vožtuvo darbą (Buikis et al., 2018). Mikrovaldiklis yra programuojamas, naudojant Arduino programavimo kalbą (*Microcontroller Arduino*).

6.4. I-asis eksperimentinio bandymo etapas

Atsižvelgiant į J. Buikio darbe [2] pateiktus stendo tyrimų rezultatus bei PEMS laboratorijos darbuotojų rekomendacijas, pasirenkami eksperimentiniai šilumos siurblio valdymo parametrai, kurie leistų pamatyti pagrindines šilumos siurblio veikimo tendencijas, reikalingas detalesniam stendo

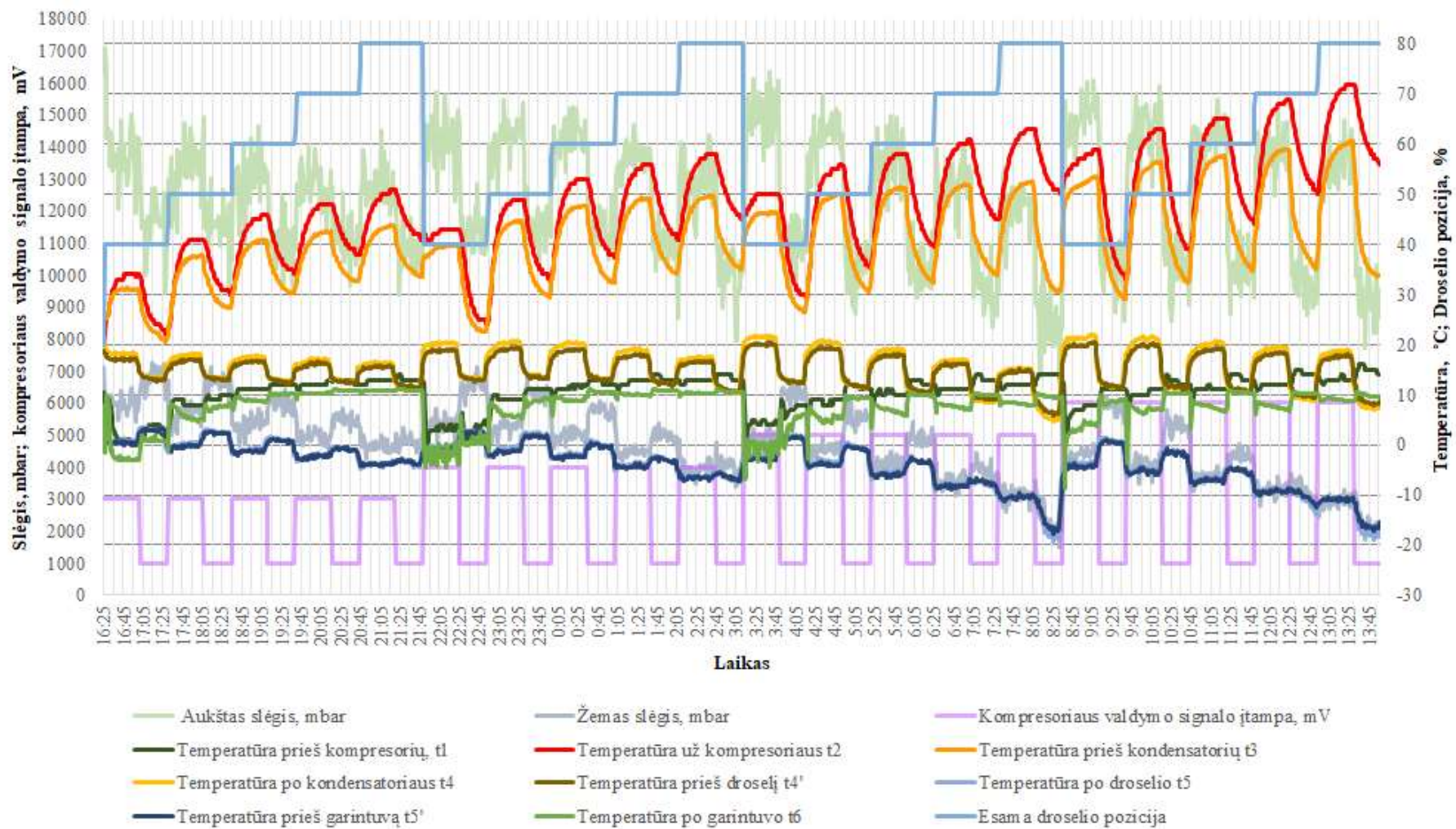
kalibravimui tolimesniuose eksperimentuose. 4 lentelėje pateikti šilumos siurblio valdymo parametrai I-ojo eksperimento metu.

4 lentelė. Šilumos siurblio valdymo parametrai eksperimento metu, I-asis etapas (sudaryta autoriaus)

Parametras	Vertė
Droselio atidarymo pozicijos keitimo ribos	40–80 %, žingsnis 10 %
Kompresoriaus valdymo signalo įtampos keitimo ribos	3–6 V, žingsnis 1 V
Šilumos siurblio veikimo laikas prie vienos droselio pozicijos	64 minutės
Atitirpinimo ciklo laikas	27 minutės

Eksperimentas buvo atliktas 2019 m. sausio 15–16 d. Suvestiniai pirmo bandymo metu gauti rezultatai, kurie susiję su šilumos siurblio veikimu, pateikti 13 paveiksle.

Pastaba: patogesniai vaizdavimui grafikuose kompresoriaus valdymo signalo įtampa perskaičiuojama į milivoltus ($1\text{ V} = 1000\text{ mV}$).



13 pav. I-ojo eksperimento suvestinis freono parametrų grafikas (sudaryta autoriaus)

Iš 13 paveiksle pateikto grafiko matyti ciklinį šilumos siurblio veikimą. Eksperimento pradžioje kompresoriaus valdymo signalo įtampa 3 V, droselio padėtis 40 %. Po 37 minučių įtampa mažinama iki 1 V, prasideda atitirpinimo ciklas, kuris trunka 27 minutės. Po šio laiko kompresorius vėl grįžta į pradinę padėtį, o droselio pozicija keičiama iki 50 %. Tokiais veikimo ciklais šilumos siurblys veikia viso eksperimento metu.

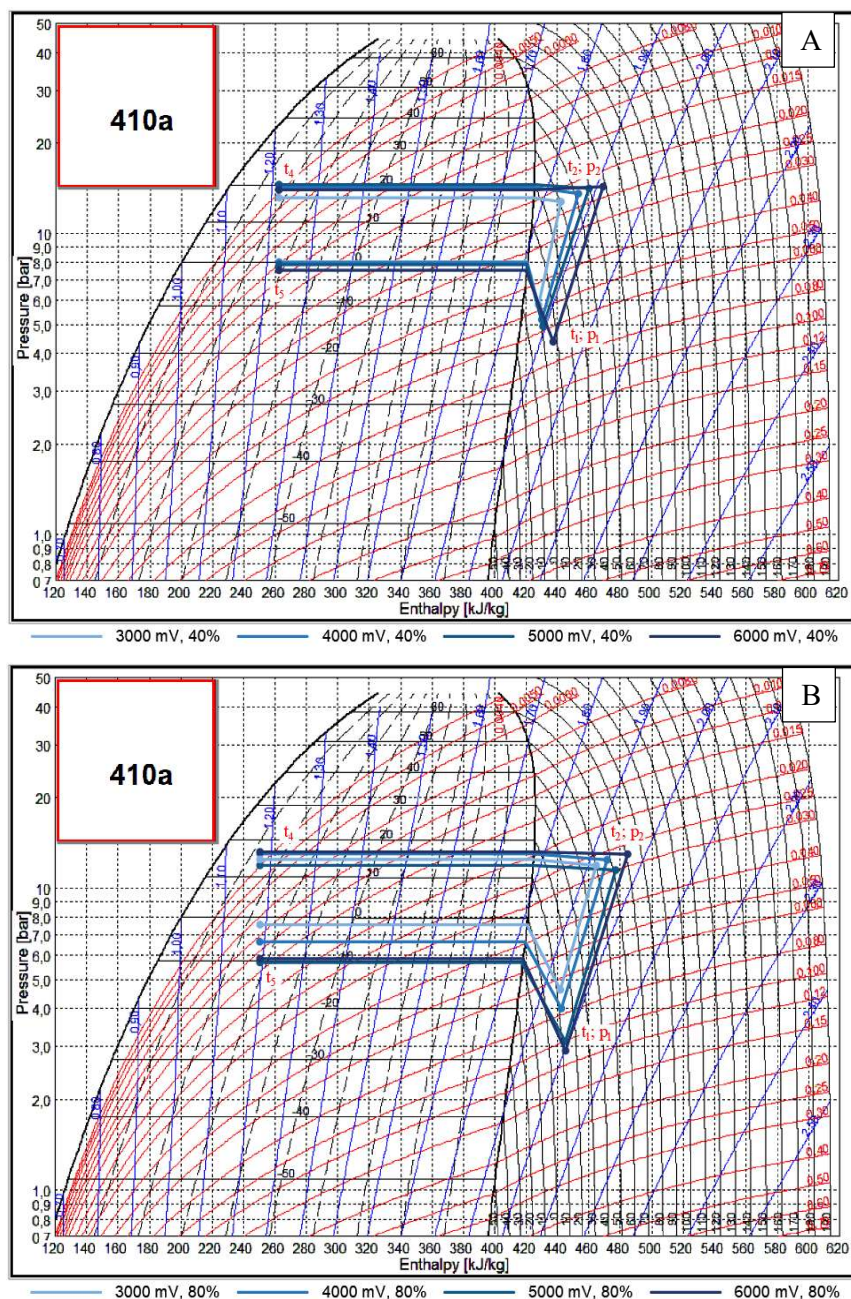
Detalesnei freono parametrų ir būsenos keitimo eksperimento metu analizei, šilumos siurblio veikimo ciklai vaizduojami $p-h$ diagramoje prie skirtingų darbo režimų. Atitirpinimo bei pereinamųjų režimų freono parametrai nėra vertinami. Kadangi pagrindinis šio eksperimento tikslas nustatyti skirtingų kompresoriaus galios ir droselio padėties kombinacijų įtaką šilumos siurblio veikimo ciklui, $p-h$ diagramoje nagrinėjami tik tie atvejai, kai šilumos siurblio veikimas yra nusistovėjęs (kai temperatūra po kondensatoriaus nebekyla).

Ciklų $p-h$ diagramoje vaizdavimui, eksperimentų metu gauti rezultatai papildomai apdorojami. Iš nusistovėjusių procesų temperatūros bei slėgio rodiklių išvedami vidurkiai, gauti rezultatai pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. I-ojo etapo eksperimentinio tyrimo matavimo duomenų suvestinė (sudaryta autoriaus)

Kompresoriaus valdymo signalo įtampa, mV	Esama droselio pozicija, %	Temperatūra prieš kompresorių t_1 , °C	Temperatūra už kompresoriaus t_2 , °C	Temperatūra prieš kondensatorių t_3 , °C	Temperatūra po kondensatoriaus t_4 , °C	Temperatūra po droselio t_5 , °C	Temperatūra po garintuvo t_6 , °C	Aukštas slėgis p_2 , mbar	Žemas slėgis p_1 , mbar
3000	40	0,58	33,96	30,64	17,72	1,18	-0,71	13679	5965
3000	50	8,00	41,00	37,38	17,67	0,54	6,17	13552	5761
3000	60	11,00	46,00	39,93	16,49	-0,11	10,13	13130	5355
3000	70	12,35	48,00	41,86	16,41	-1,90	10,75	12462	4875
3000	80	13,00	51,00	42,75	15,22	-3,69	11,08	12575	4599
4000	40	3,57	43,00	39,50	19,71	0,04	-0,80	14316	5399
4000	50	9,00	49,00	43,86	19,63	-0,01	7,67	14577	5333
4000	60	11,87	53,00	47,17	19,45	-1,52	10,42	14400	5007
4000	70	13,00	56,00	48,11	17,77	-3,57	10,90	13749	4497
4000	80	13,00	58,00	48,58	16,40	-6,17	10,78	13256	4001
5000	40	4,28	50,00	45,69	20,76	-1,50	0,23	15067	4915
5000	50	9,00	56,00	47,36	16,76	-1,91	9,20	14304	4483
5000	60	10,00	58,00	50,55	18,16	-5,13	8,58	13756	4105
5000	70	11,00	61,00	48,54	13,51	-6,80	10,13	13281	3662
5000	80	12,00	63,00	50,84	13,89	-10,22	9,78	12084	3107
6000	40	8,00	59,00	51,02	18,82	-2,11	8,43	15235	4462
6000	50	11,00	63,00	54,78	19,31	-4,42	10,34	14957	4156
6000	60	11,00	65,02	56,16	19,22	-6,39	9,20	14436	3736
6000	70	12,00	68,95	56,43	17,02	-9,04	10,42	13838	3255
6000	80	13,00	71,98	58,58	17,33	-11,05	10,09	13780	2989

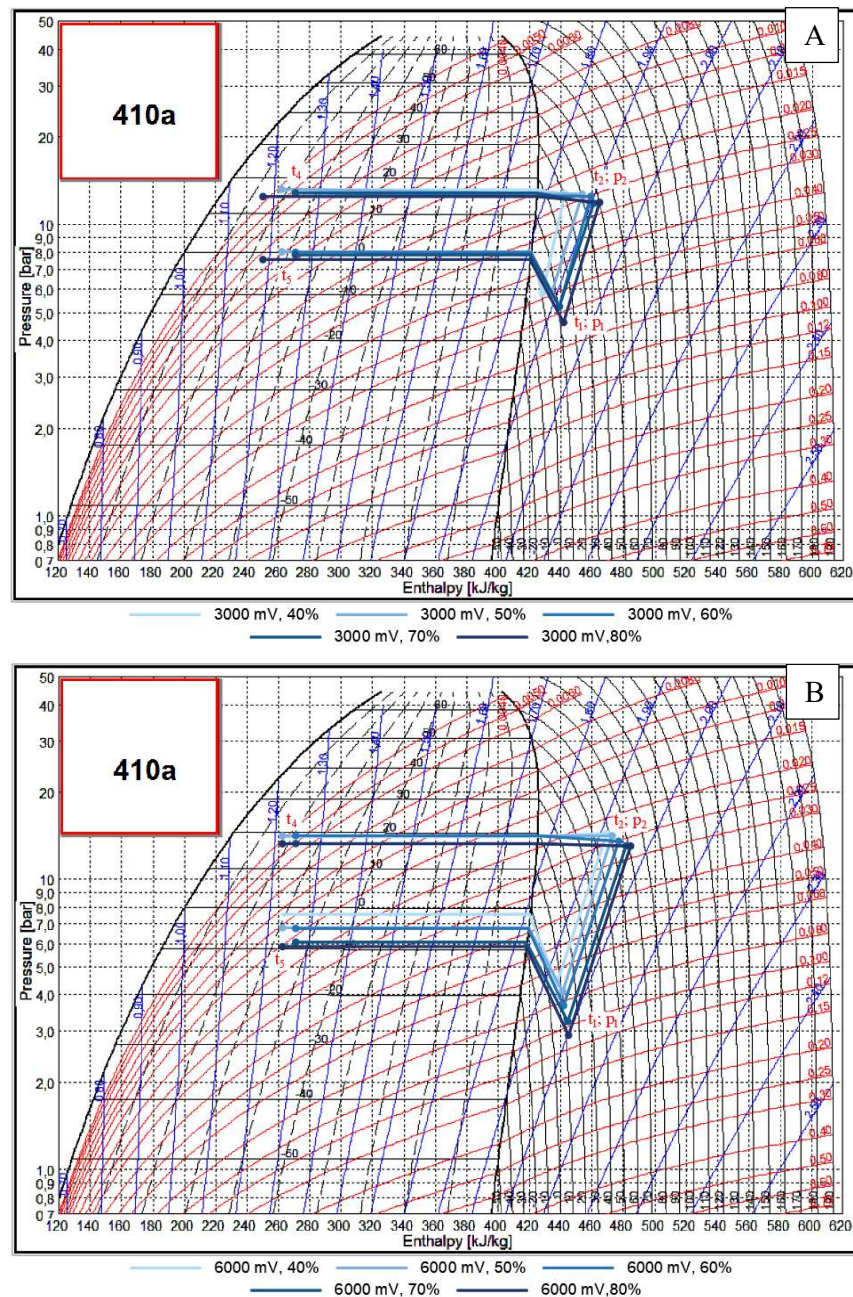
5 lentelėje pateikti duomenys naudojami šilumos siurblio veikimo ciklą braižymui p - h diagramoje. Šilumos siurblio veikimo ciklą braižymui (14 pav. ir 15 pav.) naudojami išmatuoti (12 pav.) temperatūros bei slėgio parametrai: freono temperatūra prieš kompresorių t_1 , °C; freono slėgis prieš kompresorių p_1 , mbar; freono temperatūra už kompresoriaus t_2 , °C; freono slėgis už kompresoriaus p_2 , mbar; temperatūra po kondensatoriaus t_4 , °C; temperatūra po droselio t_5 , °C.



14 pav. Šilumos siurblio veikimo ciklas p - h diagramoje: A – kompresoriaus valdymo signalo įtampa 3000–6000 mV, droselio padėtis 40 %; B – kompresoriaus valdymo signalo įtampa 3000–6000 mV, droselio padėtis 80 % (sudaryta autoriaus)

14 paveiksle parodyta kaip keičiasi šilumos siurblio veikimo ciklas priklausomai nuo kompresoriaus valdymo signalo įtampos (3000–6000 mV) esant pastoviai droselio padėčiai. „A“

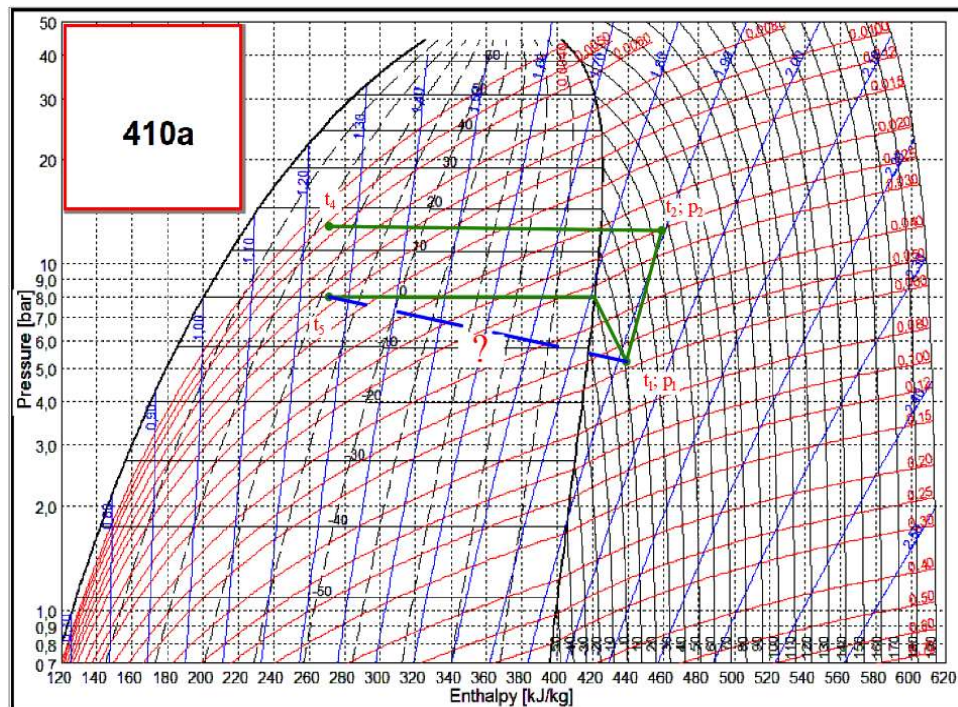
atveju prie minimalios pozicijos (40 %), kai droselis labiausiai atidarytas; „B“ diagramoje parodytas variantas, kai droselis yra labiausiai pridarytas (80 %).



15 pav. Šilumos siurblio veikimo ciklas p - h diagramoje: A – kompresoriaus valdymo signalo įtampa 3000 mV, droselio padėtis 40–80 %; B – kompresoriaus valdymo signalo įtampa 6000 mV, droselio padėtis 40–80 % (sudaryta autoriaus)

15 paveiksle parodyta kaip keičiasi šilumos siurblio veikimo ciklas priklausomai nuo droselio padėties (40–80 %) esant pastoviai kompresoriaus valdymo signalo įtampai. „A“ atveju prie minimalios įtampos (3000 mV); „B“ diagramoje parodyti ciklai, kai kompresoriui buvo tiekama maksimali įtampa (6000 mV).

Darbo eigoje pastebėta, kad bendra šilumos siurblio veikimo ciklo formavimo tendencija nėra būdinga teoriniam šilumos siurblio darbo ciklui ir kelia abejones. Aukšto slėgio dalis pakankamai patikima, tačiau žemo slėgio linija neatitinka teorinio ciklo. Visuose nagrinėjamuose atvejuose pastebėtas staigus freono slėgio kritimas (2–3,5 bar) garintuvo zonoje. Dėl šitos priežasties norint likviduoti neaiškumus, reikėtų nustatyti sistemos energijos balansus, tai padėtų tiksliau nustatyti šilumos siurblio veikimo ciklo taškus p - h diagramoje. Tuo tikslu reikalingi eksperimentinio stendo patobulinimai. Papildomai turėtų būti instaliuota slėgio skirtumo matavimo įranga, kuri leistų nustatyti sistemos oro debitus, reikalingus energijos balanso skaičiavimuose.



16 pav. Šilumos siurblio veikimo hipotetinis ciklas p - h diagramoje (sudaryta autoriaus)

Diagramoje pavaizduotas hipotetinis šilumos siurblio veikimo ciklas, tačiau šitame etape trūksta duomenų tam, kad paaiškinti jo egzistavimą.

6.5. II-asis eksperimentinio bandymo etapas

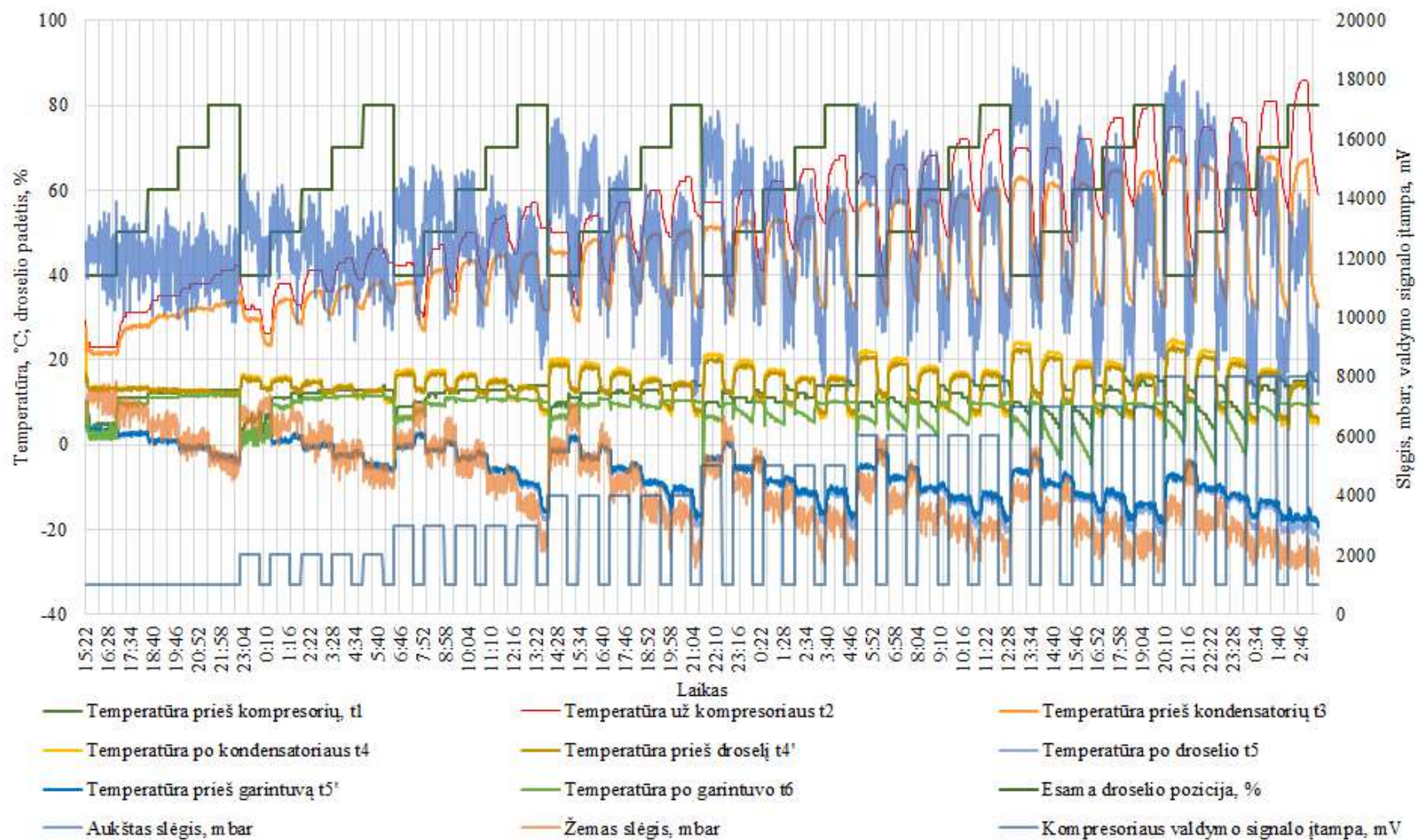
Siekiant atskleisti priežastis, likviduoti neaiškumus šilumos siurblio veikimo cikle, gautus pirmo eksperimento metu, atliekami bandomojo stendo patobulinimai bei valdymo parametrų pakeitimai. Papildomai prie oro srauto matavimo diafragmų įrengiami oro slėgio skirtumo davikliai tam, kad nustatytų sistemos tiekiamą bei ištraukiamą oro debitą. Ampermetru matuojamas elektros srovės tiekiamos kompresoriui stiprio dydis. Siekiant gauti platesnį rezultatų diapazoną kompresoriaus valdymo signalo įtampos keitimo ribų intervalas didinamas iki 1–8 V. Taip pat didinamas šilumos siurblio veikimo laikas prie vienos droselio padėties. Šio veiksmo tikslas – gauti ilgesnį stacionarų procesą. 5 lentelėje pateikti šilumos siurblio valdymo parametrai II-ojo eksperimento metu.

6 lentelė. Šilumos siurblio valdymo parametrai eksperimento metu, II-asis etapas (sudaryta autoriaus)

Parametras	Vertė
Droselio atidarymo pozicijos keitimo ribos	40–80 %, žingsnis 10 %
Kompresoriaus valdymo signalo įtampos keitimo ribos	1–8 V, žingsnis 1 V
Šilumos siurblio veikimo laikas prie vienos droselio pozicijos	89 minutės
Atitirpinimo ciklo laikas	32 minutės

Eksperimentas buvo atliktas 2019 m. sausio 18–21 d. Suvestiniai antro bandymo metu gauti rezultatai, kurie susiję su šilumos siurblio veikimu, pateikti 17 paveiksle.

Pastaba: patogesniai vaizdavimui grafikuose kompresoriaus valdymo signalo įtampa perskaičiuojama į milivoltus ($1 \text{ V} = 1000 \text{ mV}$).



17 pav. II-ojo etapo eksperimento suvestinis freono parametrų grafikas (sudaryta autoriaus)

17 paveiksle vėl matome ciklinį šilumos siurblio veikimą. Eksperimento pradžioje kompresoriaus valdymo signalo įtampa 1 V, droselio padėtis 40 %. Po 57 minučių įtampa mažinama iki minimalios, prasideda atitirpinimo ciklas, kuris trunka 32 minutes. Po šio laiko kompresorius vėl grįžta į nustatytą padėtį, o droselio pralaidumas mažinamas 10 %. Tokiais veikimo ciklais šilumos siurblys veikia viso eksperimento metu, kol nebus pasiekta maksimalią kompresoriaus galią prie 8 V valdymo signalo.

Šilumos siurblio veikimo ciklai vaizduojami $p-h$ diagramoje tam, kad būtų galima patvirtinti pirmo badoymo metu gautos veikimo ciklo formavimosi tendencijos egzistavimą.

Ribinių šilumos siurblio veikimo ciklų $p-h$ diagramoje vaizdavimui bei tolimesnei analizei eksperimentų metu gauti rezultatai papildomai apdorojami. Iš nusistovėjusių procesų temperatūros bei slėgio rodiklių išvedami vidurkiai, gauti rezultatai pateikti 7 lentelėje. Atitirpinimo bei pereinamųjų režimų freono parametrai nėra vertinami.

7 lentelė. II-ojo etapo eksperimentinio tyrimo matavimo duomenų suvestinė (sudaryta autoriaus)

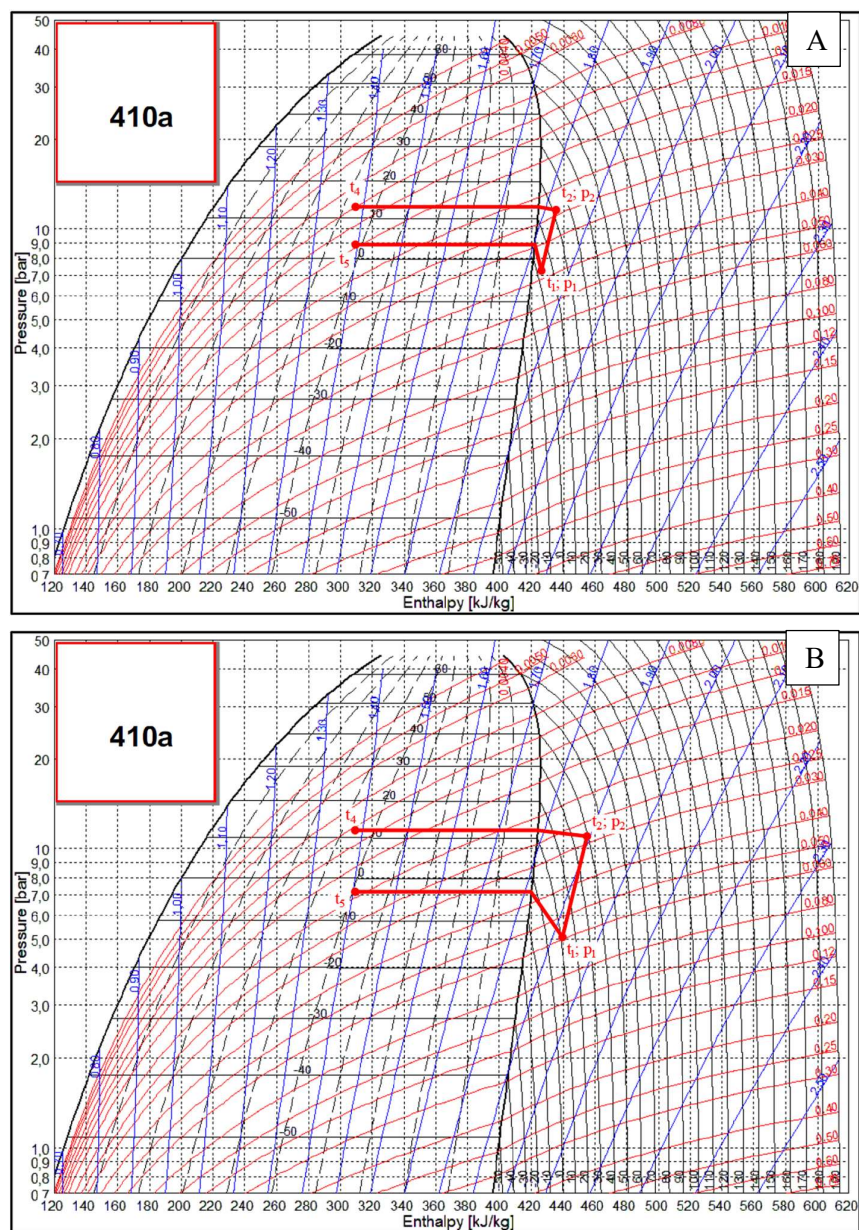
Kompresoriaus valdymo signalų įtampa, V	Esama droselio pozicija, %	Aukštas slėgis, mbar	Žemas slėgis, mbar	Temperatūra prieš kompresorių t1, °C	Temperatūra už kompresoriaus t2, °C	Temperatūra prieš kondensatorių t3, °C	Temperatūra po kondensatoriaus t4, °C	Temperatūra po droselio t5, °C	Temperatūra po garintuvo t6, °C
1	40	12278	7307	4,68	23,00	21,64	13,41	3,45	2,19
1	50	11988	6906	11,00	31,00	27,91	13,44	2,64	9,66
1	60	11927	6387	12,05	34,93	30,30	13,04	0,87	11,13
1	70	11838	5861	13,00	38,00	32,00	12,70	-0,99	11,53
1	80	11456	5092	13,00	41,00	33,39	12,01	-3,69	11,50
2	40	13204	6625	5,89	32,13	29,58	15,99	1,86	2,28
2	50	13055	6336	10,99	38,00	33,99	15,77	1,15	9,01
2	60	12830	5916	12,11	41,00	35,97	14,95	-0,32	10,86
2	70	12074	5239	13,00	44,00	37,34	13,84	-2,49	11,31
2	80	12089	4687	13,00	47,00	38,33	12,74	-5,19	11,30
3	40	13749	5935	9,00	42,81	38,27	17,42	0,02	6,39
3	50	13770	5629	12,00	46,97	41,29	17,37	-1,05	9,39
3	60	13673	5156	13,00	49,99	43,24	16,70	-2,92	10,36
3	70	12908	4336	13,00	54,00	44,80	15,31	-6,13	10,52
3	80	11840	3543	14,00	57,00	45,14	13,35	-9,78	10,43
4	40	15040	5545	9,58	50,00	45,22	19,92	-1,09	6,56
4	50	14809	5081	12,00	54,02	48,01	19,08	-2,95	9,45
4	60	13988	4422	12,37	57,00	49,06	17,57	-5,75	9,20
4	70	12804	3648	12,81	60,00	49,54	15,50	-9,15	8,79
4	80	12738	3342	14,00	63,00	50,35	14,37	-11,30	10,26
5	40	15568	4972	9,65	57,00	51,08	21,03	-3,10	6,30
5	50	14768	4353	10,45	59,91	52,57	19,59	-5,67	6,56
5	60	13798	3671	10,30	62,00	52,80	17,45	-8,98	5,70
5	70	13218	3217	11,25	65,00	53,54	15,75	-11,68	6,20

7 lentelės tęsinys. II-ojo etapo eksperimentinio tyrimo matavimo duomenų suvestinė (sudaryta autoriaus)

5	80	12961	3102	14,00	67,72	55,21	15,75	-11,91	9,98
6	40	15837	4377	9,73	63,36	56,69	21,87	-5,15	5,94
6	50	15120	3835	9,49	65,71	57,27	20,12	-7,96	4,83
6	60	14157	3271	9,25	68,00	57,47	18,27	-10,69	3,78
6	70	13500	2851	11,36	71,78	58,76	16,88	-13,22	5,81
6	80	13814	2914	14,00	73,63	60,28	17,16	-12,99	9,31
7	40	17205	4109	8,92	69,82	62,53	23,77	-6,36	4,31
7	50	15882	3436	5,88	69,85	61,18	21,66	-9,59	-0,29
7	60	14811	2924	5,83	71,93	61,01	19,36	-12,64	-1,41
7	70	14550	2958	12,81	76,74	64,46	19,04	-12,34	7,99
7	80	13346	2421	14,00	79,76	64,26	16,47	-15,55	8,91
8	40	17191	3642	8,50	74,84	67,01	24,21	-7,89	3,32
8	50	15887	3094	6,12	74,81	65,53	22,10	-10,55	-0,25
8	60	14984	2791	7,48	76,75	65,86	19,92	-12,75	0,84
8	70	13907	2522	13,06	81,00	67,60	17,58	-14,61	7,51
8	80	12869	1977	15,00	86,00	66,90	14,22	-19,30	9,35

7 lentelėje pateikti duomenys naudojami ribinių šilumos siurblio veikimo ciklų braižymui p - h diagramoje (18 ir 19 paveikslai). Ribiniai ciklai – tai ciklai, kai šilumos siurblys veikia esant minimaliai bei maksimaliai kompresoriaus galiai; šituose atvejuose droselinio vožtuvo pralaidumas irgi vertinamas ribinėse pozicijose. Iš viso nagrinėjami 4 ribiniai atvejai:

1. Minimali kompresoriaus galia (kompresoriaus valdymo signalas 1 V) ir maksimalus droselio pralaidumas (40 %);
2. Minimali kompresoriaus galia (kompresoriaus valdymo signalas 1 V) ir minimalus droselio pralaidumas (80 %);
3. Maksimali kompresoriaus galia (kompresoriaus valdymo signalas 8 V) ir maksimalus droselio pralaidumas (40 %);
4. Maksimali kompresoriaus galia (kompresoriaus valdymo signalas 8 V) ir minimalus droselio pralaidumas (80 %).



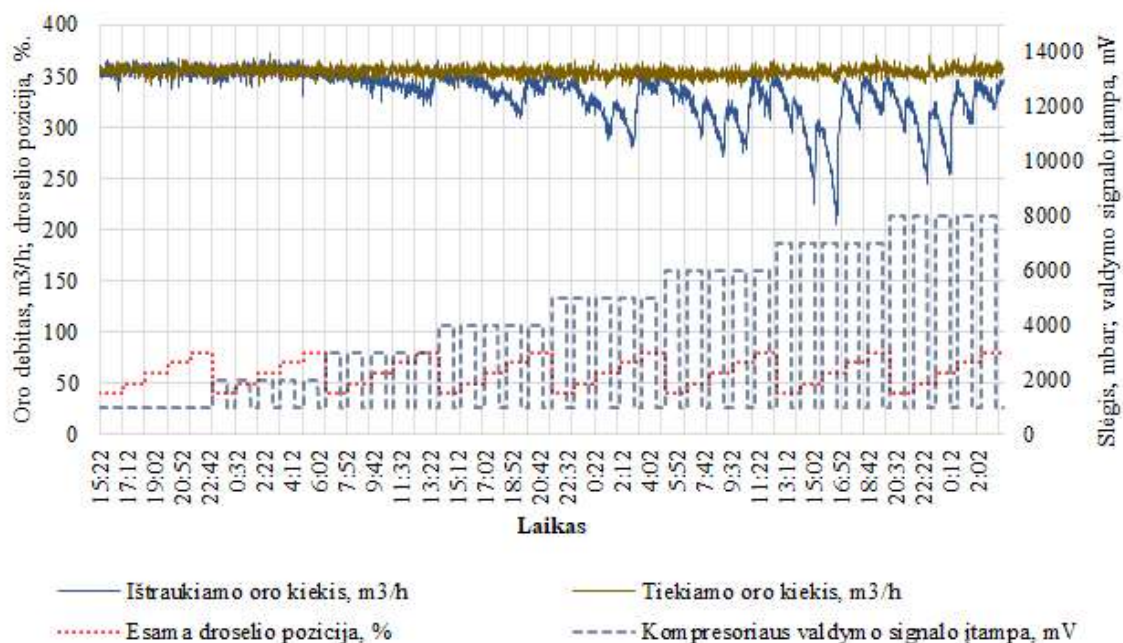
18 pav. Šilumos siurblio veikimo ciklas p - h diagramoje: A – kompresoriaus valdymo signalo įtampa 1 V, droselio padėtis 40 %; B – kompresoriaus valdymo signalo įtampa 1 V, droselio padėtis 80 % (sudaryta autoriaus)

18 paveiksle matome šilumos siurblio veikimo ciklus, kai kompresoriaus galia yra minimali.

19 paveiksle pavaizduotas kitas ribinis atvejis, kai kompresoriaus galia yra maksimali.

Δp – slėgio skirtumas prie oro srauto matavimo diafragmos, Pa.

Oro kiekių skaičiavimo rezultatų suvestinis grafikas pateikiamas 20 paveiksle.



20 pav. Tiekiamas ir ištraukiamas oro srautas esant skirtingiems droselio padėties ir kompresoriaus valdymo signalo įtampos deriniams, II-asis etapas (sudaryta autoriaus)

Kaip matome 20 paveiksle, esant didesnei kompresoriaus galiai ištraukiamo oro kiekis pradeda mažėti (kritimas iki 40 %). Akivaizdu, kad dėl žemos (-19,3–3,5 °C) freono temperatūros garintuve ant jo paviršiaus kondensuodavosi drėgmė, esanti ištraukiamame ore. Susikondensavusi drėgmė virsta šerkšno arba ledo sluoksniu ant garintuvo plokštelių paviršiaus. Dėl to išauga ištraukimo linijos aerodinaminis pasipriešinimas – mažėja ištraukiamas oro kiekis.

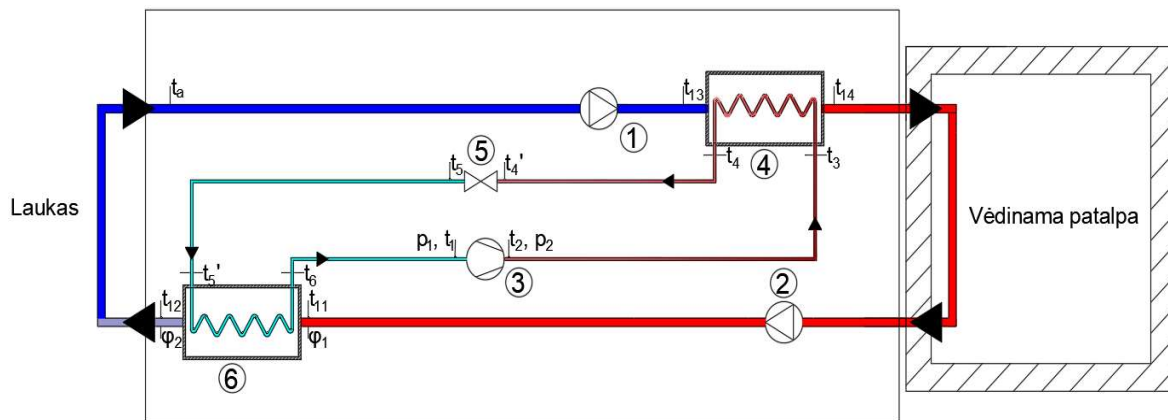
Dėl šitos priežasties patikimas, stacionaraus proceso reikalaujantis energijos balanso nustatymas naudojant sukauptus duomenis yra neįmanomas. Dėl susidarančio šerkšno ar ledo sluoksnio keičiasi esminiai šilumos mainų procesai garintuve bei svyruoja sistemos oro debitas.

Siekiant tiksliau nustatyti garintuvo linijos freono parametrus reikia pakartoti eksperimentą, naudojant sausą orą. Tai leistų išlaikyti pastovų oro debitą sistemoje, turėti ilgiau trunkančius stacionarius režimus, patikimiau taikyti energijos balansą rezultatų analizėje.

6.6. III-iasis eksperimentinio bandymo etapas

Atsižvelgiant į pirmo ir antro etapo rezultatus, priimtas sprendimas rekonstruoti eksperimentinį stendą. Rekonstrukcijos metu stendo lauko ir vėdinimo patalpos pusėse oro tiekimo

bei ištraukimo linijos yra sujungiamos, kaip parodyta schemeje 21 paveiksle. Taip pat ortakyje prieš ir už garintuvo įrengiami santykinės drėgmės davikliai.



21 pav. Eksperimentinio stendo principinė schema III-ame eksperimentinio bandymo etape (sudaryta autoriaus)

Tikėtina, kad tokioje „užžiedintoje“ sistemoje esamą cirkuliuojantį orą pavyks išsausinti eksperimento pradžioje. Ore esanti drėgmė, susikondensavus ant garintuvo paviršiaus bus pašalinta kartu su kondensatu, o ortakiuose cirkuliuos sausas oras, tinkamas eksperimento atlikimui.

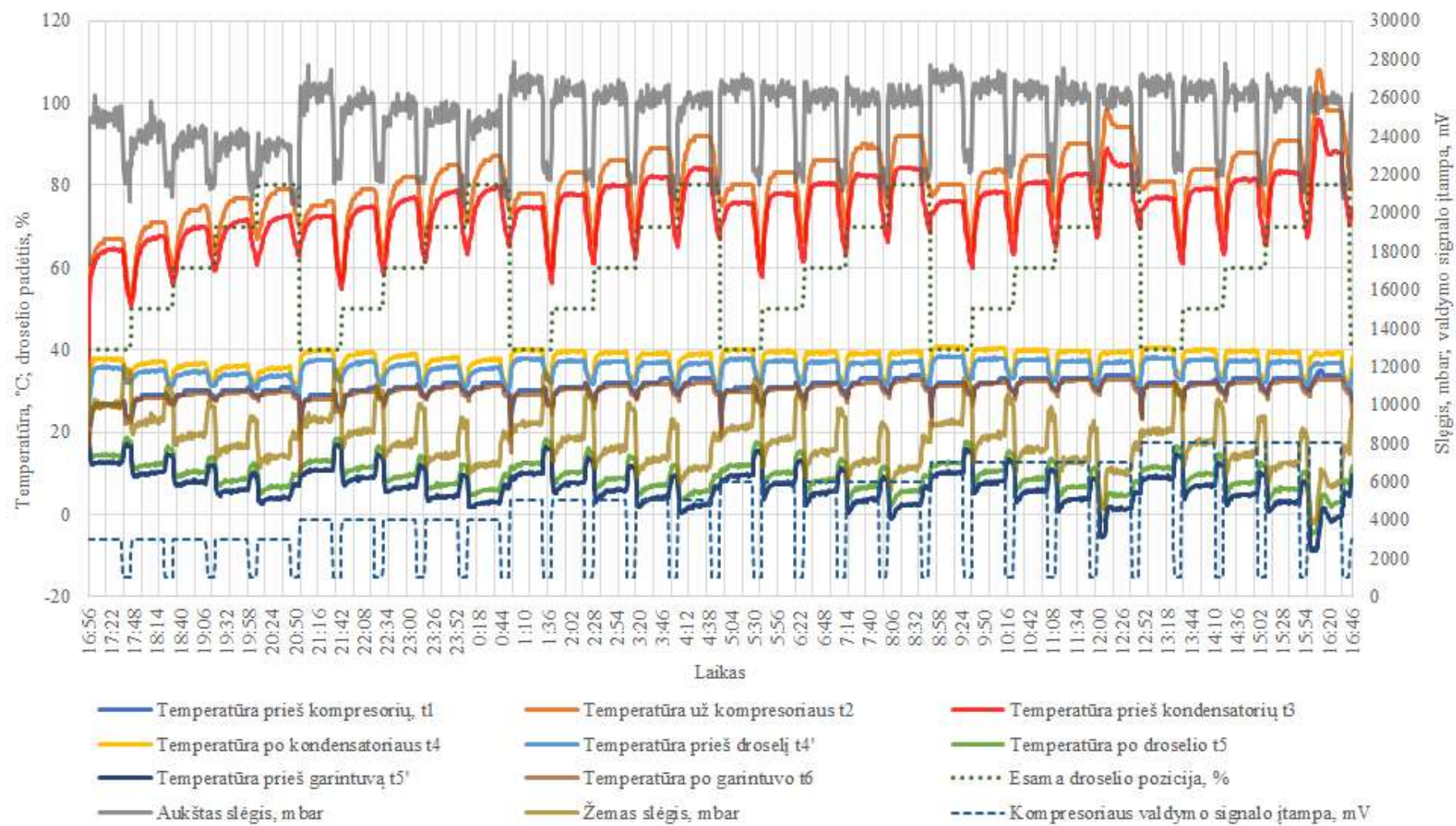
Atsižvelgiant į II-ojo etapo rezultatus, yra koreguojami šilumos siurblio valdymo parametrai. Kompresoriaus valdymo signalo įtampos keitimo ribos orientuojami į garintuvo užšalimo periodą (nuo 3 V). Tikėtina, kad sistemoje cirkuliuos sausas oras, todėl atitirpinimo ciklo laikas yra mažinamas iki 9 minučių. 7 lentelėje pateikti šilumos siurblio valdymo parametrai III-ojo eksperimento metu.

8 lentelė. Šilumos siurblio valdymo parametrai eksperimento metu, III-asis etapas (sudaryta autoriaus)

Parametras	Vertė
Droselio atidarymo pozicijos keitimo ribos	40–80 %, žingsnis 10 %
Kompresoriaus valdymo signalo įtampos keitimo ribos	3–8 V, žingsnis 1 V
Šilumos siurblio veikimo laikas prie vienos droselio pozicijos	38 minutės
Atitirpinimo ciklo laikas	9 minutės

Eksperimentas buvo atliktas 2019 m. balandžio 6–7 d. Suvestiniai trečio bandymo rezultatų grafikas, kurie susiję su šilumos siurblio veikimu, pateikti 22 paveiksle.

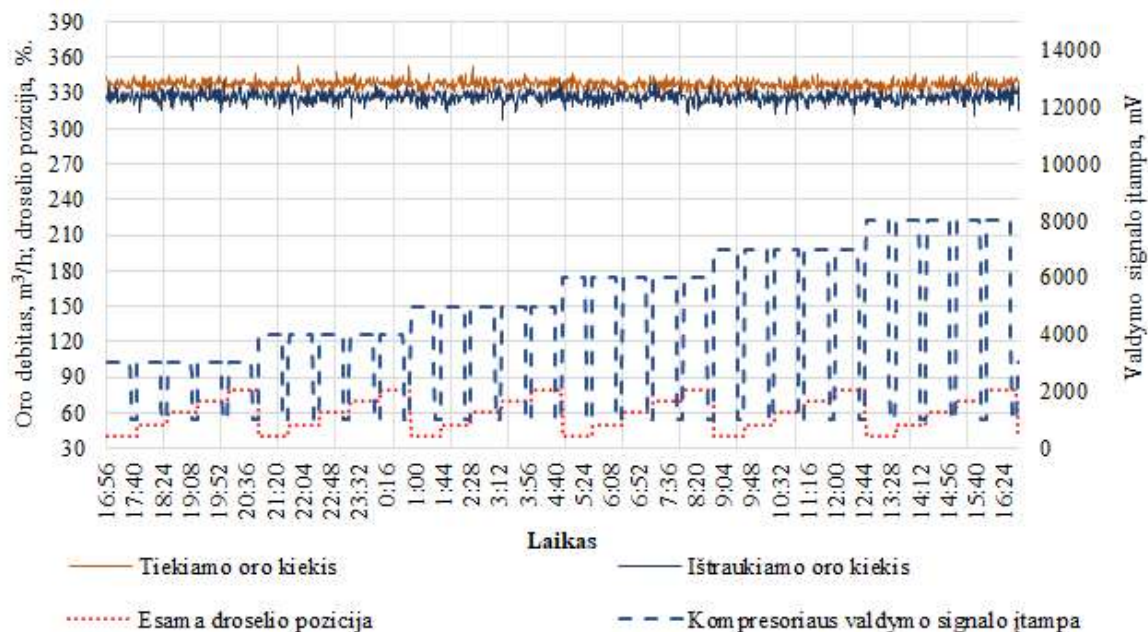
Pastaba: patogesniai vaizdavimui grafikuose kompresoriaus valdymo signalo įtampa perskaičiuojama į milivoltus (mV).



22 pav. III-ojo etapo eksperimento suvestinis freono parametrų grafikas (sudaryta autoriaus)

22 paveiksle matome, kad šilumos siurblio veikimas yra tolygesnis, ciklo metu temperatūros bei slėgiai sistemoje svyruoja neženkiai.

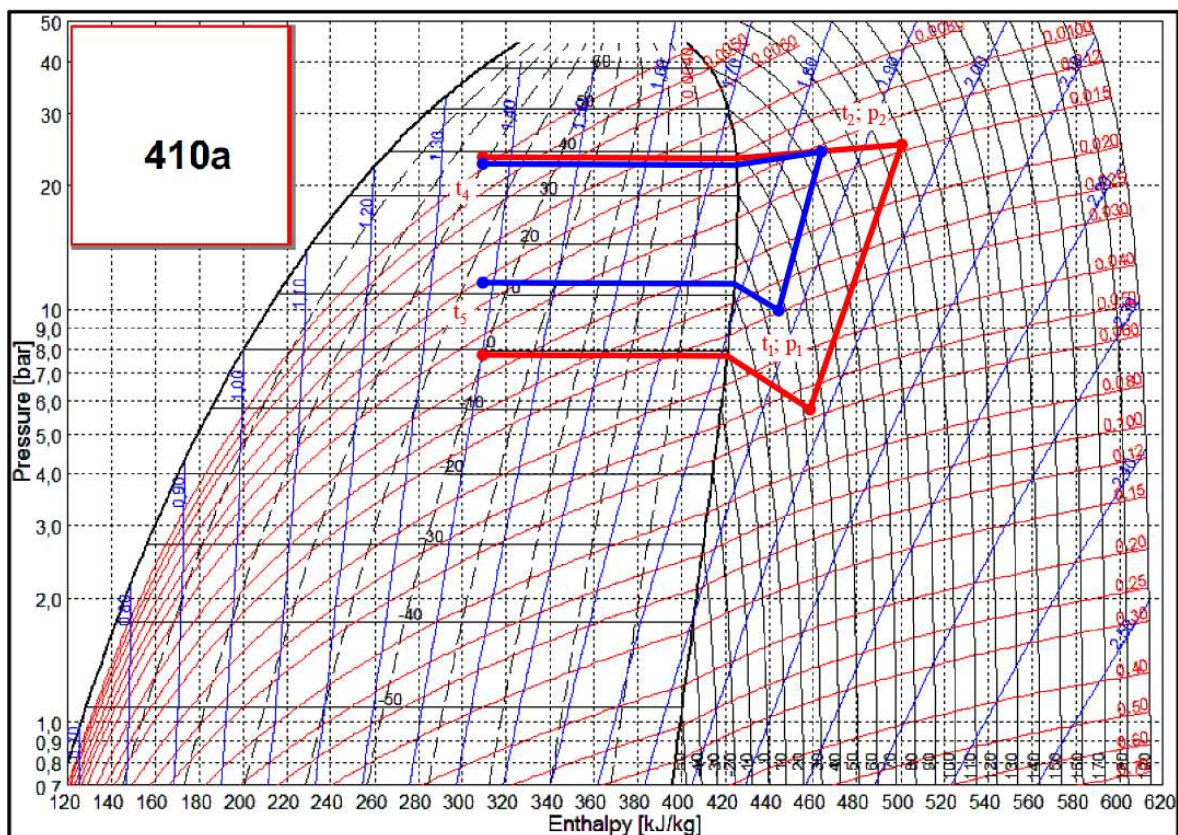
Pagal (6) formulę apskaičiuojami oro tiekimo ir ištraukimo linijų oro kiekiai, rezultatai pateikiami 23 paveiksle.



23 pav. Tiekiamas ir ištraukiamas oro srautas esant skirtingiems droselio padėties ir kompresoriaus valdymo signalo įtampos deriniams, III-asis etapas (sudaryta autoriaus)

Iš 16 paveikslo matyti, kad oro srautai sistemoje viso eksperimento metu yra pastovūs, o tai reiškia, kad pavyko eliminuoti garintuvo užšalimo įtaką tyrimo rezultatams.

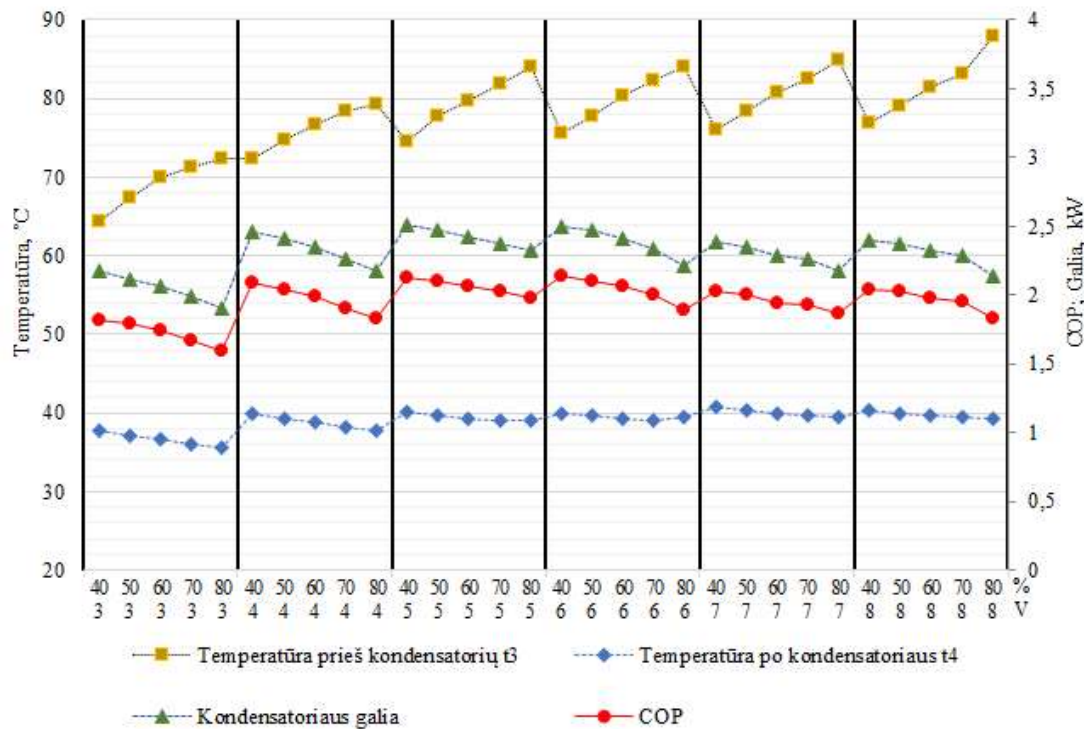
Toliau ribiniai (eksperimento pradžios ir pabaigos) šilumos siurblio veikimo ciklai vaizduojami p - h diagramoje, rezultatai pateikti 24 paveiksle.



24 pav. Ribiniai šilumos siurblio veikimo ciklai p - h diagramoje, III-iasis etapas (sudaryta autoriaus)

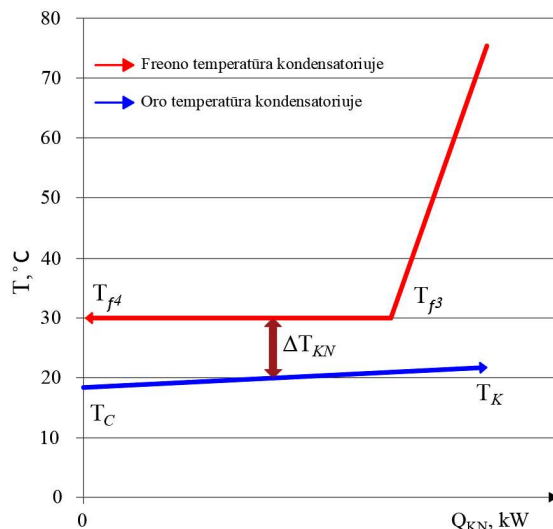
Pateiktoje diagramoje (24 pav.) matome šilumos siurblio veikimo ciklus. Mėlyna linija paroda šilumos siurblio veikimą, kai kompresoriaus valdymo signalo įtampa 3 V, droselio padėtis 40 %; raudona linija – kompresoriaus valdymo signalo įtampa 8 V, droselio padėtis 80 %. Galima teigti, kad augantys šilumos siurblio darbo parametrai daro didesnę įtaką garintuvo temperatūrinei linijai, nei kondensatoriaus. Viršutinės (kondensatoriaus linijos) poslinkis yra nežymus – iki 1,5 °C. Taip pat diagramoje galima pastebėti, kad eksperimento bėgyje freonas vis daugiau ir daugiau perkaitinimas, nuo 68,0 °C iki 98,0 °C. O žinant faktą, kad tyrimo metu oro debitas yra sąlyginai pastovus, oro temperatūros skirtumas prieš ir už kondensatoriaus nežymiai svyruoja – tarp 16,8 °C ir 23,3 °C, reiškia išgaunamas šilumos kiekis kondensatoriuje eksperimento metu turi nuolatinę tendenciją mažėti, galima teigti, kad eksperimento eigoje freono debitas pratekantis per kondensatorių nuolat mažėja.

Atlikus kompresoriaus suvartojamos energijos bei kondensatoriaus šiluminės galios skaičiavus, pagal trečio tyrimo etapo duomenis, nustatytas šilumos siurblio efektyvumo koeficientas (COP) skirtingiems droselio padėties ir kompresoriaus valdymo signalo įtampos deriniams. Apačioje esančiame paveiksle (25 pav.) pateikti skaičiavimo rezultatai.



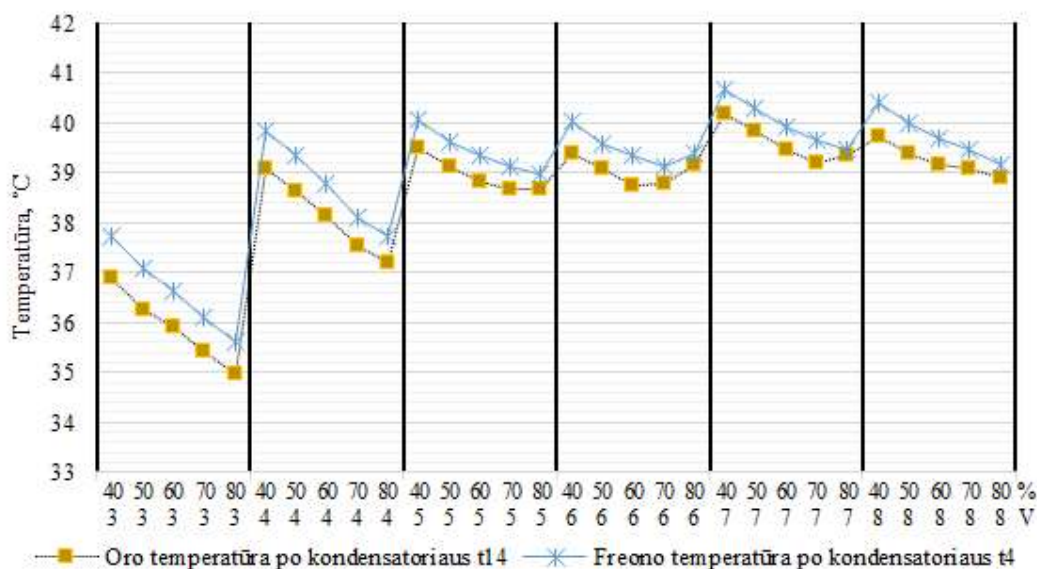
25 pav. Kondensatoriaus šiluminė galia ir šilumos siurblio COP esant skirtingiems droselio padėties ir kompresoriaus valdymo signalo įtampos deriniams (sudaryta autoriaus)

25 paveiksle pateiktame grafike matome, kad mažinant droselinio vožtuvo pralaidumą, šilumos siurblio COP mažėja; nors tuo metu freono temperatūra auga, kondensatoriumi atiduodamas šilumos kiekis mažėja. Kompresorius atlieka nereikalingą darbą perkaitinant freoną. Šią tendenciją galima paaiškinti atsižvelgiant į V. Martinaičio ir kitų mokslininkų darbe [7] pateiktą kondensatoriaus galios priklausomybę nuo freono bei oro temperatūros (26 pav.).



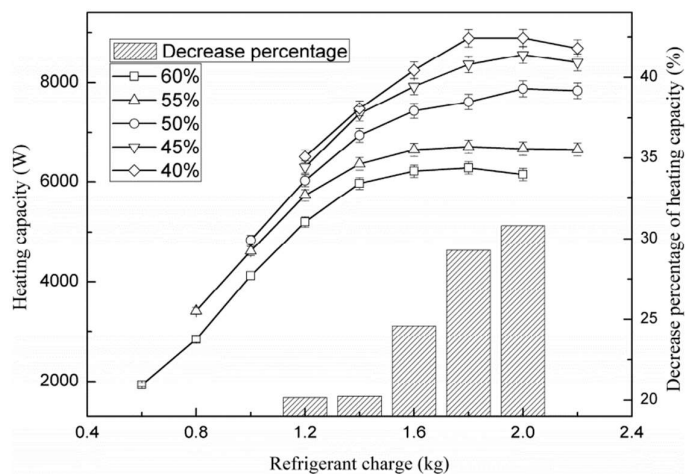
26 pav. Temperatūrų kitimas kondensatoriuje (Martinaitis et al., 2018: 385–395)

Užžiedintame kontūre, kylant oro temperatūrai, mažėja temperatūros skirtumas tarp freono ir oro temperatūrų (27 pav.), dėl to sulėtėja šilumos mainų procesai tarp šitų fluidų ir bandymuose fiksuojamas faktinės kondensatoriaus galios mažėjimas.



27 pav. Oro ir freono temperatūros po kondensatoriaus (sudaryta autoriaus)

Rezultatai rodo (25 pav.), kad reguliuojant (mažinant) droselio pralaidumą galima pasiekti freono temperatūros augimo gana plačiame diapazone be kompresoriaus apsukų skaičiaus didinimo. Panašią tendenciją savo eksperimentiniame darbe [15] gavo mokslininkai iš Kinijos. Jų gautą priklausomybę pateiktą 28 paveiksle.



28 pav. Šildymo galios priklausomybė nuo droselio atidarymo pozicijos ir šaltnešio įkrovos (Zhang et al., 2017)

Iš pateikto 28 paveiksle grafiko matome, kad nepriklausomai nuo šaltnešio kiekio sistemoje šilumos siurblio šildymo galia auga mažinant droselio pralaidumą nuo 60 % iki 40 %. Šitame atvejuje

galima teigti, kad kartu su galia kyla ir šilumnešio temperatūra. Tokia pat priklausomybė pastebima ir eksperimento metu PEMS laboratorijoje. Mažinant droselio pralaidumo poziciją (nuo 40 % iki 80 %) freono temperatūra kondensatoriuje didėdavo 8–14 % priklausomai nuo skirtingų nustatytos kompresoriaus galios kombinacijų.

Visumoje, bandymo metu gautos šilumos siurblio veikimo ciklo kitimo tendencijos (24 pav.) yra palankios ir artimos teorinio ciklo kitimo tendencijoms (7 pav), parodytoms V. Martinaičio bei kitų mokslininkų darbe [9]. Tokios tendencijos yra charakteringos, analitiškai nustatytam, efektingam šilumos siurblio valdymo režimui, kuriuo pagalba gali būti pasiekti aukšti naudingumo rodikliai. Deja, patikimas eksperimentinio modelio galios bei naudingumo rodiklių patikrinimas ir jų palyginimas su teoriniu nėra įmanomas, nes sistemoje cirkuliuoja aukštų temperatūros parametrų oras, dėl kurio sudėtingėja šilumos mainų procesai kondensatoriuje.

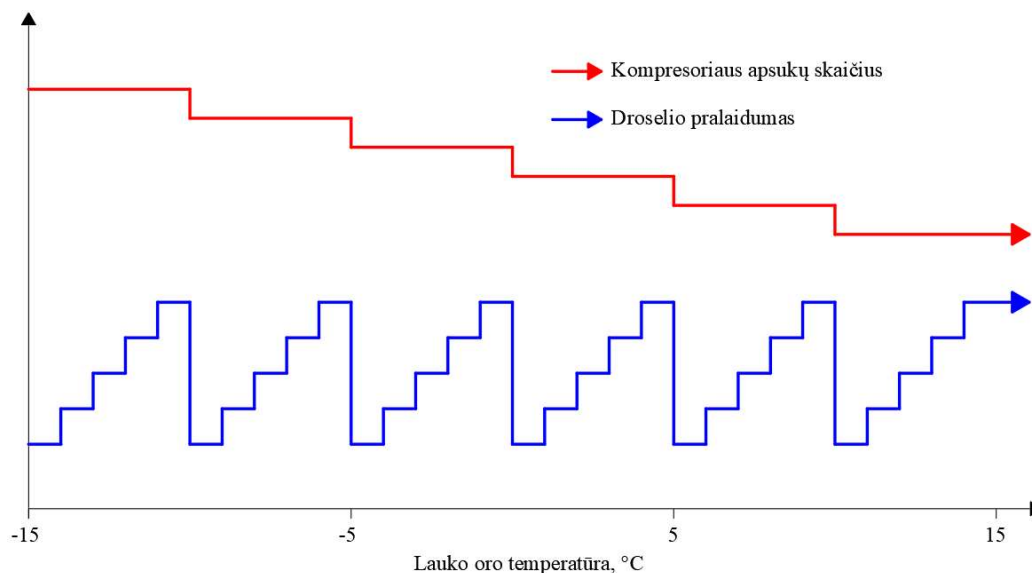
7. ŠILUMOS SIURBLIO VALDYMO ALGORITMAS

Eksperimento metu gautos šilumos siurblio veikimo ciklo tendencijos, jų panašumas į aukšto energetinio naudingumo teorinio šilumos siurblio modelio tendencijos (7 pav.) bei nustatytos priklausomybės leidžia formuoti šilumos siurblio valdymo algoritmą.

Šilumos siurblio valdymo kreivių formavimas gali būti laiptuotas arba nuoseklus.

Laiptuotam reguliavimui charakteringas atskiras (nepriklausomas) valdymo priemonių reguliavimas bei reguliuojamo parametro (pvz. kompresoriaus apsukų skaičius) pastovumas užduotam diapazone. Nuosekliame reguliavime reguliuojamo parametro dydis nuolat keičiasi priklauso nuo atskaitos parametro (pvz. lauko oro temperatūros), be to dažnai priklauso ir nuo kitų reguliuojamų parametrų dydžių.

29 paveiksle pateikiamas suformuotas laiptuotas šilumos siurblio valdymo algoritmas priklausomas nuo lauko oro temperatūros. Šio valdymo algoritmo esmė galima suformuluoti taip: droselio pralaidumo reguliavimas – prioritetinga šilumos siurblio šiluminės galios valdymo priemonė; kompresoriaus apsukų skaičius keičiamas tada, kai jau nepakanka droselio reguliavimo diapazono šiluminės galios didinimui esant pastoviam kompresoriaus apsukų skaičiui.



29 pav. Laiptuotas šilumos siurblio valdymo algoritmas (sudaryta autoriaus)

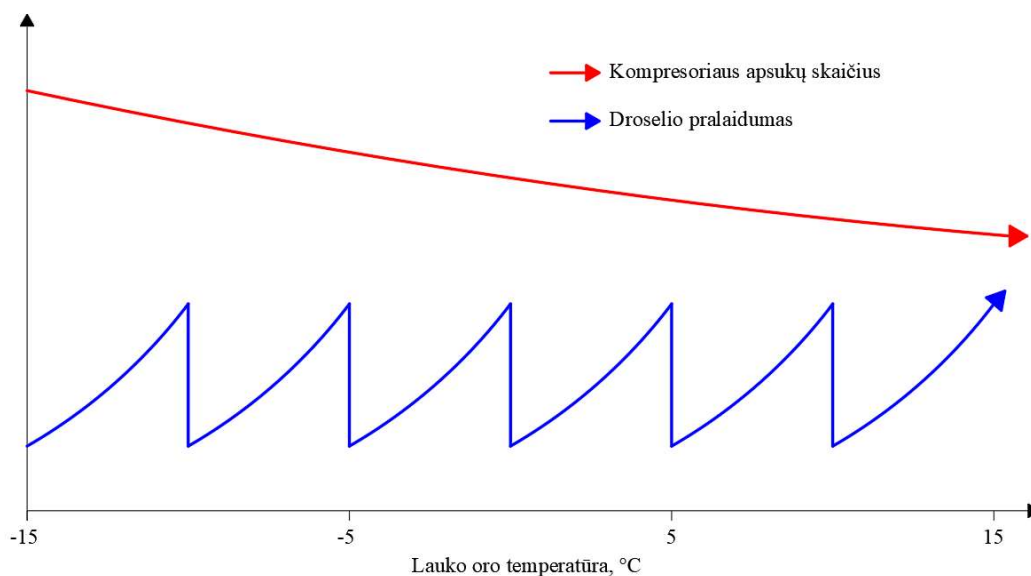
Viršuje pateiktame grafike (29 pav.) matome kompresoriaus apsukų skaičiaus bei droselio pralaidumo valdymo kreives. Reikalaujama šilumos siurblio šiluminė galia tiesiogiai priklauso nuo lauko oro temperatūros, kuo aukštesnė temperatūra lauke tuo mažesnė šiluminė galia. Aukščiausia šilumos siurblio šiluminė galia pasiekama esant šalčiausiai temperatūrai, šilumos siurblio kompresoriaus apsukų skaičius yra didžiausias, o droselio pralaidumas mažiausias. Didėjant lauko

oro temperatūrai droselio pralaidumas pakopomis didėja, tokiu būdu yra mažinama šilumos siurblio šiluminė galia. Kai droselio pralaidumo parametras pasiekia maksimalų dydį, kompresoriaus apsukų skaičius yra mažinamas, o droselio atidarymo padėtis grąžinama į pradinę, labiausiai pridarytą, poziciją. Tokiais ciklais šilumos siurblys veikia kol nebus pasiekta jo didžiausia šiluminė galia.

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

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

30 paveiksle pavaizduotas nuoseklus šilumos siurblio valdymo algoritmas. Jo pagrindinis skirtumas nuo laiptuoto algoritmo, kad reguliuojamų valdymo parametrų dydžiai tolygiai keičiasi priklausomai nuo lauko oro temperatūros.

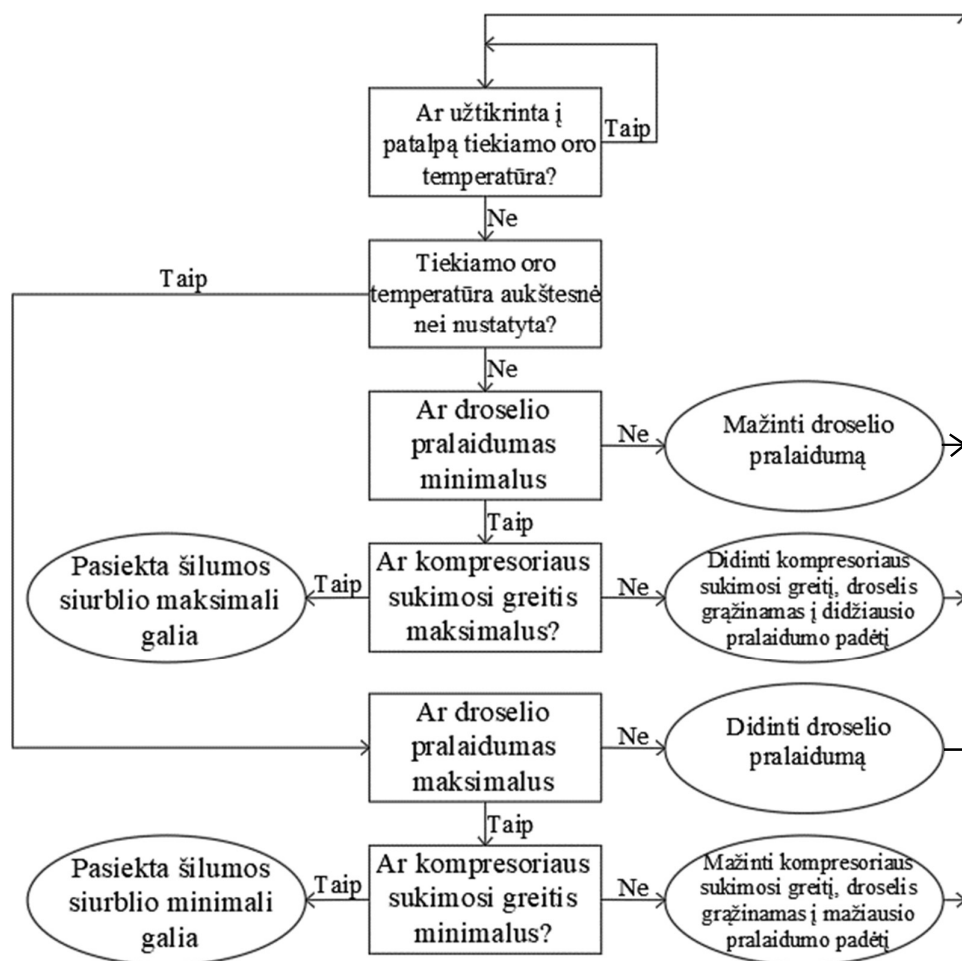


30 pav. Nuoseklus šilumos siurblio valdymo algoritmas (sudaryta autoriaus)

Kaip matome pateiktame grafike kiekvienai lauko oro temperatūrai atitinka unikalūs droselio pozicijos bei kompresoriaus apsukų skaičiaus derinys. Toks valdymo būdas reikalauja sudėtingesnės valdymo elektronikos ir automatikos, tačiau leidžia pasiekti tolygaus bei tikslaus reikiamų oro parametrų palaikymo ir aukštesnio šilumos siurblio energetinio efektyvumo.

Taip pat svarbu paminėti, kad valdymo kreivių poslinkio kampas ir jų svyravimo amplitudės priklauso nuo konkretaus šilumos siurblio modelio bei reikalaujamos šiluminės galios.

Šilumos siurblio valdymo algoritmo tekstinė forma pateikta 31 paveiksle.



31 pav. Šilumos siurblio valdymo algoritmo tekstinė forma (sudaryta autoriaus)

Pateiktas 31 paveiksle algoritmas atspindi ankščiau pateiktą grafiškai pavaizduotą (29 pav. ir 30 pav.) šilumos siurblio valdymo algoritmų logiką.

8. IŠVADOS

Šiame darbe atliktas šilumos siurblio oras-oras, veikiančio realiomis sąlygomis, valdymo galimybių eksperimentinis tyrimas. Jo metu šilumos siurblys buvo valdomas keičiant droselio atidarymo padėtį bei kompresoriaus signalo įtampą. Apibendrinus rezultatus galima išskirti šias išvadas:

1. Atlikus mokslinės literatūros apžvalgą nustatyta šilumos siurbių panaudojimo galimybės šilumos atgavimui bei tiekiamo oro šildymui vėdinimo sistemose. Nustatyti šilumos siurblio veikimo režimai bei jų tradicinės valdymo priemonės – kompresoriaus apsukų skaičiaus ir droselio pralaidumo reguliavimas. Apžvelgti teoriniai šilumos siurblio modeliai.

2. Pirmame eksperimento etape nustatyta, kad šilumos siurblio veikimo ciklo formavimosi tendencija nėra būdinga teoriniam šilumos siurblio darbo ciklui. Aukšto slėgio dalis pakankamai patikima, tačiau žemo slėgio linija neatitinka teorinio ciklo. Visuose nagrinėjamuose atvejuose pastebėtas staigus freono slėgio kritimas 2–3,5 bar garintuvo zonoje.

3. Antrame eksperimento etape užfiksuota, kad esant didesnei kompresoriaus galiai ištraukiamo oro debitas pradeda mažėti (kritimas iki 40 %). Susikondensavusi ant garintuvo plokštelių paviršiaus drėgmė virsta šerkšno arba ledo sluoksniu. Dėl to išauga ištraukimo linijos aerodinaminis pasipriešinimas – mažėja ištraukiamo oro kiekis.

4. Trečiame eksperimento etape atliktas eksperimentinio stendo oro tiekimo ir ištraukimo ortakių „užžiedinimas“. Tokia sistemos rekonstrukcija leido eliminuoti garintuvo užšalimo įtaką tyrimo rezultatams. Oro debitai sistemoje tapo pastovūs, o šilumos siurblio veikimas tolygesnis. Vis tik šiuo atveju susiaurėjo galimų lauko oro parametrų intervalas.

5. Eksperimento metu nustatyta, kad kylant lauko oro temperatūrai mažėja temperatūros skirtumas tarp freono ir oro temperatūrų, dėl to sulėtėja šilumos mainų procesai tarp šių fluidų ir bandymuose fiksuojamas faktinės kondensatoriaus galios mažėjimas.

6. Tyrimo rezultatai rodo, kad mažinant droselio pralaidumą galima pasiekti freono temperatūros augimą gana plačiame diapazone be kompresoriaus apsukų skaičiaus didinimo.

7. Bandymo metu gautos šilumos siurblio veikimo ciklo kitimo tendencijos yra palankios ir artimos aukšto energetinio efektyvumo teorinio ciklo kitimo tendencijoms.

8. Remiantis atliktų tyrimų rezultatais parengiami laiptuotas ir nuoseklus šilumos siurblio valdymo, priklausančio nuo kintančios lauko oro temperatūros algoritmai.

9. REKOMENDACIJOS

1. Rekomenduojama atlikti pakartotinius stendo eksperimentinius bandymus esant platesniam sistemos oro parametrų (temperatūros, drėgmės) diapazonui, tai leistų detaliau kalibruoti šilumos siurblio valdymo algoritmą.

2. Siūloma modernizuoti eksperimentinį stendą norint analizuoti įvairesnį oro parametrų diapazoną. Reikėtų įrengti didesnio paviršiaus ploto ortakio atkarpą lauko pusėje, tai leistų atvėsinti sistemoje cirkuliuojantį orą. Taip pat užžiedintame oro kontūre patartina įrengti šviežio oro pamašymo mazgą, toks patobulinimas duotų galimybę plačiau reguliuoti oro parametrus sistemoje.

3. Siekiant išsamiau nagrinėti šilumos siurblyje vykstančius procesus, detaliau analizuoti sistemos energijos balansus bei efektyvumo rodiklius siūloma į šilumos siurblio kontūrą instaliuoti freono debito matuoklį.

4. Rekomenduojama įrengti greičio reguliatorius ant eksperimentinio stendo oro ventiliatorių, tai leistų sumodeliuoti įvairesnes šilumos siurblio veikimo režimų variacijas.

5. Patartina atlikti visos sistemos kokybiškus izoliavimo darbus tam, kad eliminuoti sistemos šilumos nuostolių įtaką tyrimo rezultatams.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.02.015>

Buikis, J. (2018). *Veikiančio vėdinimo šilumogrąžio su šilumos siurbliu efektyvumo tyrimas: baigiamasis magistro darbas*. Vilnius: Vilniaus Gedimino technikos universitetas.

Dongellini, M., Abbenante, M., Morini, G.L. (2017). A strategy for the optimal control logic of heat pump systems: impact on the energy consumptions of a residential building. In *12th IEA Heat Pump Conference 2017*. Rotterdam: Heat pump center.

Europos parlamento ir tarybos komisija. (2010). Europos parlamento ir tarybos direktyva 2010/31/EU, 1–6. Briuselis, 2010.

EN 15316-4-2 2008: *European Standard EN 15316-4-2 Heating systems in buildings – Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 4-2: Space heating generation systems, heat pump systems*. Briuselis, 2008..

EN 13779:2007. *Ventilation for non-residential buildings - Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems*. Brussels, 2007.

Fischer, D. (2017). *Integrating Heat Pumps into Smart Grids: A study on system design, controls and operation*. Stockholm: Universitetservice US AB.

LST EN 15450:2008. *Pastatų šildymo sistemos. Šildymo sistemų su šilumos siurbliais projektavimas*. Vilnius, 2008.

Martinaitis, V., Streckiene, G., Bagdanavicius, A., Bielskus, J. (2018). A comparative thermodynamic analysis of air handling units at variable reference temperature. *Applied Thermal Engineering*, 143(11), 385–395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.122>

Martinaitis, V., Bareika, P., Misevičiūtė, V. (2012). Vėdinimo įrenginio su šilumos siurbliu termodinaminio efektyvumo tyrimas. *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 4(5), 493–498. DOI: <https://doi.org/10.3846/mla.2012.79>

STR 2.01.02:2016. *Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas*. Vilnius, 2016.

EN 13779:2007. *Ventilation for non-residential buildings - Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems*. Brussels, 2007

Streckienė, G., Martinaitis, V., Bielskus, J. (2019). From Entropy Generation to Exergy Efficiency at Varying Reference Environment Temperature: Case Study of an Air Handling Unit. *Entropy* 2019, 21(4), 361. DOI: <https://doi.org/10.3390/e21040361>

Pakalka, S. (2017). Šilumos siurblio darbo režimų analizė. *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 8(1), 51–56. DOI: <https://doi.org/10.3846/pinzs.2017.09>

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 CO₂ Heat Pump Water Heater. *Energies* 2017, 10, 1521. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10101521>

Vocale, P., Morini, G.L., Spiga, M. (2014). Influence of outdoor air conditions on the air source heat pumps performance. *Energy Procedia*, 45, 653–662. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.070>



22-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminė konferencija
Proceedings of the 22 th Conference for Junior Researchers „Science – Future of Lithuania“

PASTATŲ ENERGETIKA / BUILDING ENERGETICS

2019 m. balandžio 25 d. Vilnius
25 April, Vilnius, Lithuania
<http://jmk.pinzs.vgtu.lt>

ISSN 2029-7157
eISSN 2029-7149
ISBN 978-609-457-936-3
eISBN 978-609-457-935-6

<http://dx.doi.org/10.3846/pinzs.2019.00>

EKSPERIMENTINIO ŠILUMOS SIURBLIO CIKLO VALDymo BANDYMAI

Anton Frik¹, Vytautas Martinaitis²

¹ Magistrantas, ² profesorius

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

el. p. ¹anton.frik@stud.vgtu.lt; ²vytautas.martinaitis@vgtu.lt

Anotacija. Straipsnyje nagrinėjamas eksperimentinis oras-oras šilumos siurblys, pritaikytas vėdinimo sistemos šilumogrąžai. Siekiant įvertinti šilumos siurblio valdymo galimybes naudojant tradicinius šilumos siurblių valdymo būdus, buvo atliktas eksperimentas, kurio metu šilumos siurblys buvo valdomas keičiant droselio atidarymo padėtį bei kompresoriui tiekiamą įtampą. Nustatytos šilumos siurblio freono (R410A) parametrų kitimo priklausomybės nuo skirtingų droselio padėties ir kompresoriui tiekiamos įtampos derinių rodo, kad mažinant droselio pralaidumą freono slėgis visoje sistemoje mažėja, izotermos p - h diagramoje juda žemyn, mažėja temperatūros; didėjant kompresoriui tiekiamai įtampai, freono slėgio skirtumas tarp žemo ir aukšto slėgio pusių didėja, kompresoriaus atliekamas darbas auga. Gautos kitimo tendencijos apibūdina galimybes efektyvaus šilumos siurblio ciklo valdymo algoritmo paieškai, kai tam naudojami droselio ir kompresoriaus veikimo deriniai.

Reikšminiai žodžiai: oras-oras šilumos siurblys, freonas, vėdinimo sistema, šilumogrąža, šilumos siurblio valdymas, ciklas.

Įvadas

Mechaninė vėdinimo sistema – viena iš pagrindinių pastato inžinerinių sistemų, kuri palaiko reikalaujamus mikroklimato parametrus bei užtikrina komforto sąlygas patalpose. Reikalavimai pastatams bei jų energijos vartojančioms sistemoms griežtėja ir siekia kuo mažiau bei efektyviau vartoti energiją. (EC 2010: 1–6). Kadangi, vėdinimo sistema yra vienas iš pagrindinių energijos vartotojų pastate, verta ieškoti, tobulinti būdus kaip užtikrinti jos energiją taupantį veikimą.

Šalinamame ore esančios šilumos panaudojimas didina vėdinimo sistemos energetinį efektyvumą. Šilumos atgavimas iš ištraukiamojo oro srauto naudojant šilumos siurblių leidžia ne tik grąžinti šilumą, bet ir papildomai gana efektyviai pašildyti tiekiamą orą (EC 2010: 1–6)(Bagarella et al. 2016: 183–193). Tačiau, šilumos siurblio veikimas priklauso nuo daugelio faktorių, tokių kaip: sistemoje esančios oro temperatūros, jų nuolatinis kitimas, freono tipas, šilumos siurblio valdymo logika ir kt.

Šie faktoriai gali turėti kaip teigiamą, taip ir neigiamą įtaką šilumos siurblio energetiniam efektyvumui.

Kadangi apie šilumos siurblio, integruoto į vėdinimo įrenginį, valdymo galimybes ir jų įtaką energetiniam efektyvumui reikalingos naujos žinios ir technologijos, todėl svarbu toliau tirti, analizuoti, spręsti šią problemą.

Tyrimo tikslas

Įvertinti šilumos siurblio, veikiančio realiomis sąlygomis, valdymo galimybes, naudojant tradicinius valdymo būdus – keičiant droselio padėtį bei kompresoriaus apsukų skaičių.

Tyrimo objektas

Darbe nagrinėjamas eksperimentinis šilumos siurblio stendas, esantis Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VGTU) laboratorijoje. Stendo sistema (1 pav.) susideda iš:

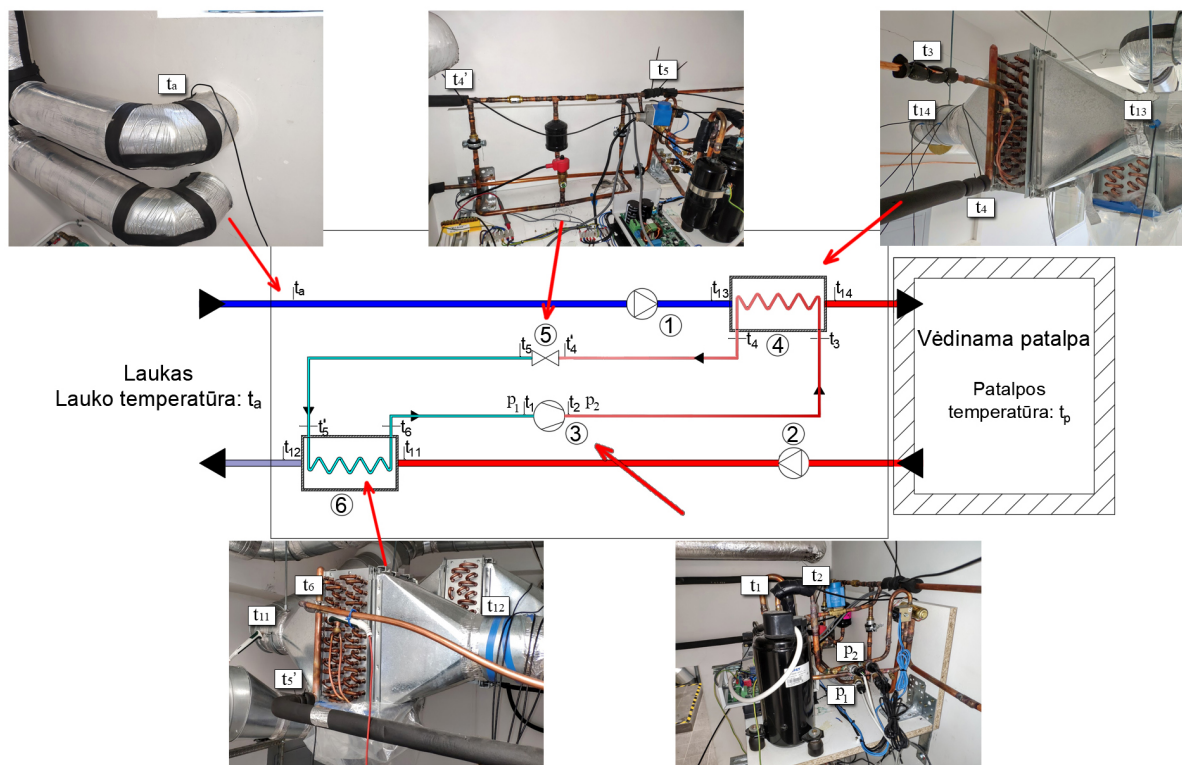
- oro tiekimo ir ištraukimo ventiliatorių (1, 2);
- šilumos siurblio (3, 4, 5, 6).

Šilumos siurblys yra pagrindinis įrenginys, skirtas šilumai iš šalinamo oro atgauti ir į patalpą tiekiamam orui pašildyti iki reikiamos temperatūros. Šiame procese dalyvauja 4 pagrindiniai šilumos siurblio įrenginiai (5 pav.). Kompresorius (3) suslegia freoną (R410A) iki reikiamo slėgio, taip jo būseną transformuoja į aukštos temperatūros perkaitintus garus. Tuomet freonas teka į kondensatorių (4), kuriame, atiduodamas šilumą tekančiam orui, kondensuojasi. Atidavęs šilumą, bet neatvėsęs freonas teka pro droselinį vožtuvą (5), kuriame droseliavimo metu staigiai krenta freono slėgis ir temperatūra. Atšalęs freonas teka į garintuvą (6), kuriame šiltesnis tekantis oras jį pašildo ir išgarina. Po to, freonas vėl patenka į kompresorių ir ciklas kartojasi (Martinaitis et al. 2012: 493–498).

Tyrimo eiga ir metodika

Eksperimento metu buvo siekiama ištirti šilumos siurblio freono parametrų kitimo tendencijas prie skirtingų droselio padėties bei kompresoriaus apskukų skaičiaus derinių. Žinant tokias eksperimentines charakteristikas galima būtų įvertinti kiek šių dviejų valdymo priemonių derinys gali būti naudojamas efektyviam šilumos siurblio valdymui pagal išorės oro temperatūrą.

Šilumos siurblio veikimo programoje buvo nustatytas eksperimentinis įrenginio veikimo režimas, kuris leidžia matyti kaip keičiasi freono ir oro parametrai prie skirtingų šilumos siurblio veikimo režimų (skirtingų į kompresorių paduodamos įtampos ir droselio padėties kombinacijų).



1 pav. Eksperimentinio stendo principinė schema. (1 – tiekiamo oro ventiliatorius, 2 – ištraukiamo oro ventiliatorius, 3 – kompresorius, 4 – kondensatorius, 5 – droselis, 6 – garintuvas)

Valdymo algoritmas:

1. Šilumos siurblys pradeda veikimą su nustatytais pradiniais droselio bei kompresoriaus parametrais (40%, 1 V);
2. Nustatytu laiko dažnumu keičia droselio atidarymo poziciją (40–80 %);

3. Kai pasiekta maksimali droselio atidarymo pozicija (80 %), keičiama (didinama) kompresoriaus galia. Droselio padėtis gražinama į pradinę poziciją;
4. Veikimo ciklas kartojasi nuo antro punkto, vėl nustatytu laiko dažnumu keičia droselio atidarymo poziciją;

5. Kai pasiekta maksimali kompresoriaus galia (prie 8 V kompresoriaus valdymo signalo įtampos), šilumos siurblys pradeda veikimą nuo pirmo punkto.

Kadangi šilumos siurblys veikia realiomis sąlygomis (naudojamas drėgnas lauko oras), tai likus nustatytam laiko intervalui prieš droselio pozicijos keitimą, jungiamas atitirpinimo ciklas, kompresoriaus valdymo signalo įtampa yra mažinama iki 1 V.

Viso eksperimento metu buvo matuojamos freono ($t_1, t_2, t_3, t_4, t_4', t_5, t_5', t_6$) ir oro ($t_a, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}$) temperatūros charakteringuose taškuose (1 pav.). Kaupiami duomenys apie elektros srovės tiekiamos kompresoriui stiprio dydį. Taip pat, matuojamas oro srauto matavimo diafragmų sukeltas slėgio skirtumas ant oro tiekimo bei ištraukimo linijų, siekiant nustatyti sistemos oro debitus. Visi matavimai atliekami 60 sekundžių intervalu. Eksperimentas buvo atliktas 2019 m. sausio 18-21 d. 1

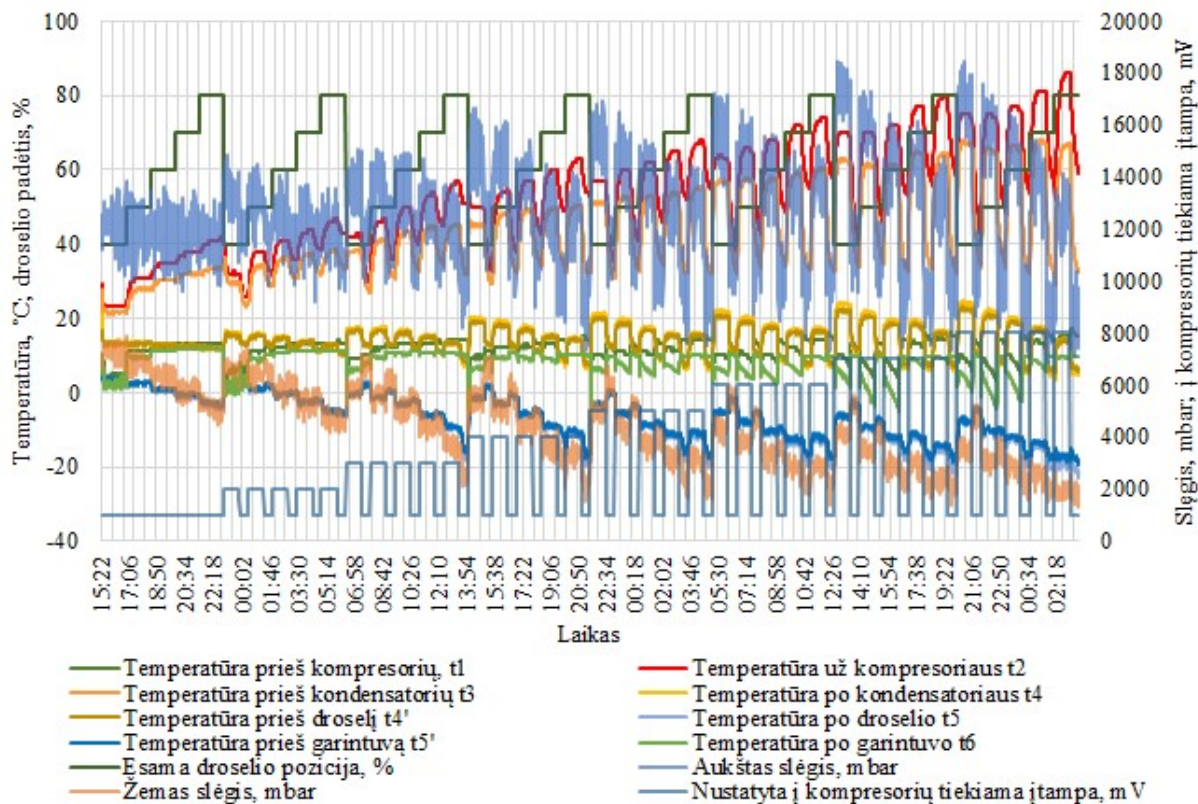
lentelėje pateikti šilumos siurblio valdymo parametrai eksperimento metu.

Lentelė 1. Šilumos siurblio valdymo parametrai eksperimento metu

Parametras	Vertė
Droselio atidarymo pozicijos keitimo ribos	40-80 %, žingsnis 10 %
Į kompresorių paduodamos įtampos keitimo ribos	1-8 V, žingsnis 1 V
Šilumos siurblio veikimo laikas prie vienos droselio pozicijos	89 minutės
Atitirpinimo ciklo laikas	32 minutės

Rezultatų analizė

Gautas nuoseklus parametų atvaizdavimas laiku bėgyje parodytas 2 paveiksle.



2 pav. Suvestinis eksperimento metu gautų rezultatų grafikas

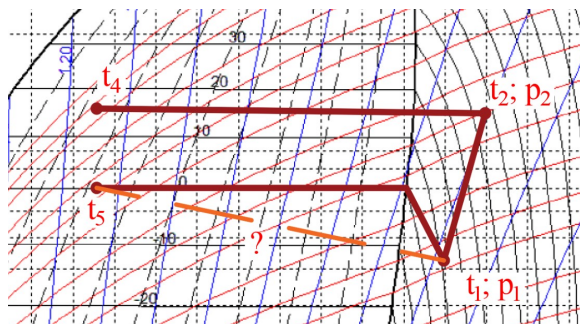
Detalesnei freono parametų ir būsenos keitimo eksperimento metu analizei, šilumos siurblio veikimo ciklai vaizduojami $p-h$ diagramoje prie skirtingų darbo režimų. Atitirpinimo bei pereinamųjų režimų freono parametrai nėra vertinami. Kadangi pagrindinis šio eksperimento

tikslas nustatyti skirtingų į kompresorių paduodamos įtampos ir droselio padėties kombinacijų įtaką šilumos siurblio veikimo ciklui, tai $p-h$ diagramoje nagrinėjami tik tie atvejai, kai šilumos siurblio veikimas yra nusisto-

vėjęs (kai freono temperatūra po kondensatoriaus nebekyla).

Ciklų p - h diagramoje vaizdavimui, eksperimentų metu gauti rezultatai papildomai apdorojami. Iš nusistovėjusių procesų temperatūros bei slėgio rodiklių išvedami vidurkiai.

Darbo eigoje pastebėta, kad bendra šilumos siurblio veikimo ciklo formavimo tendencija nėra būdinga teoriniam šilumos siurblio darbo ciklui ir kelia abejones (3 pav.). Aukšto slėgio dalis pakankamai patikima, tačiau žemo slėgio linija neatitinka teorinio ciklo. Visuose nagrinėjamuose atvejuose pastebėtas staigus slėgio kritimas (2-3,5 bar) garintuvo zonoje.

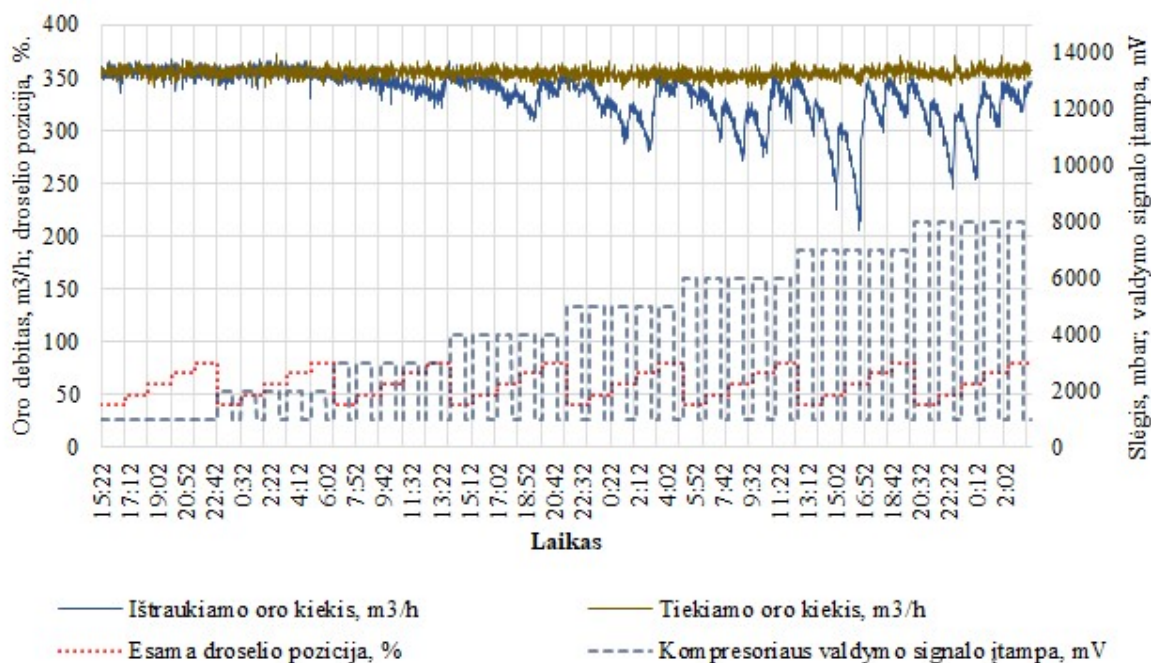


3 pav. Šilumos siurblio veikimo ciklas p - h diagramoje (į kompresorių tiekama įtampa 3 V, droselio padėtis 60 %)

Siekiant atskleisti priežastis, likviduoti neaiškumus šilumos siurblio veikimo ciklo, buvo tikrinamas sistemos energijos balansas. Šitam tikslui atlikti yra skaičiuojami oro srautai pratekantys per šilumos siurblio kondensatorių bei garintuvą pagal (1) formulę.

$$L = k \cdot \sqrt{\Delta p}, \quad (1)$$

čia: L – oro debitas, m^3/h ; k – matavimo diafragmos koeficientas; Δp – slėgio skirtumas prie oro srauto matavimo diafragmos, Pa.



4 pav. Tiekiamas ir išraukiamas oro srautas esant skirtingiems droselio padėties ir kompresoriaus valdymo signalo įtampoms deriniams

Kaip matome 4 paveiksle, prie didesnės kompresoriui tiekiamos įtampos ištraukiamo oro kiekis pradeda mažėti (kritimas iki 40%). Dėl šerkšno sluoksnio forma-

vimosi ant garintuvo plokštelių paviršiaus, išauga ištraukimo linijos aerodinaminis pasipriešinimas.

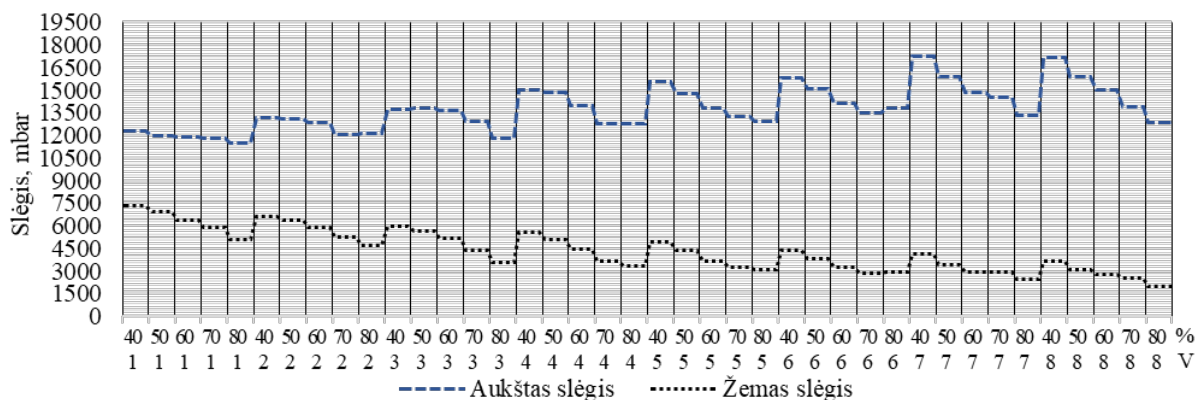
Dėl šitos priežasties, patikimas, stacionaraus proceso reikalaujantis energijos balanso nustatymas naudo-

jant sukaupus duomenis yra neįmanomas. Dėl susidarančio šerkšno ar ledo sluoksnio keičiasi esminiai šilumos mainų procesai garintuve bei svyruoja sistemos oro debitas.

5 paveiksle matome bendras freono slėgio kitimo tendencijas viso tyrimo metu. Pastebėta, kad keičiant droselio pralaidumo padėtį, labiau pridarinėjant ją, slėgis visoje sistemoje mažėja (5 pav.). Izotermos p - h diagramoje juda žemyn, mažėja temperatūros.

Be to, skirtumas tarp žemo ir aukšto slėgio pusių didėja, mažinant droselio pralaidumą (6 pav.). O tai reiškia,

kad kompresorius atlieka didesnę darbą, suspaudžiant freoną. Tokia priklausomybė egzistuoja, kol kompresoriui tiekiamas įtampa neviršija 5 V. Padidėjus įtampai, pastebima atvirkštinė priklausomybė. Skirtumas tarp slėgių mažėja, mažinant droselio pralaidumą. Matome, kad ši priklausomybė yra ne tik netiesialinijinė, bet nuo tam tikro droselio ir kompresoriaus režimų derinio keičia savo kitimo kryptį.



5 pav. Freono slėgis esant skirtingiems droselio padėties ir tiekiamos įtamos deriniams.



6 pav. Skirtumas tarp aukšto ir žemo freono slėgių esant skirtingiems droselio padėties ir tiekiamos įtamos deriniams.

Visumoje, freono slėgio skirtumas tarp žemo ir aukšto slėgio pusių didėja, didėjant kompresoriui tiekiamai įtampai. Kompresoriaus atliekamas darbas auga, o tai įtakoja šilumos siurblio suvartojamą energijos kiekį.

Gautos kitimo tendencijos apibrėžia galimybes efektyvaus šilumos siurblio ciklo valdymo algoritmo paieškai, kai tam naudojami droselio ir kompresoriaus veikimo deriniai.

Išvados

Šiame darbe atliktas šilumos siurblio, veikiančio realiomis sąlygomis, eksperimentinis bandymas. Jo metu šilumos siurblys buvo valdomas keičiant droselio atidarymo padėtį bei kompresoriaus valdymo signalo įtampą. Apibendrinus rezultatus galima išskirti šias išvadas:

1. Šilumos siurblio veikimo ciklo formavimo tendencija neatitinka teorinio šilumos siurblio darbo ciklo. Visuose nagrinėjamuose atvejuose matomas staigus slėgio kritimas (2–3,5 bar) žemo slėgio zonoje.

2. Nustatytas ledo sluoksnio formavimasis ant garintuvo plokštelių paviršiaus, dėl kurio išauga oro ištraukimo linijos aerodinaminis pasipriešinimas, iškreipiami šilumos mainų procesai garintuvo pusėje.

3. Pastebėta, kad mažinant droselio pralaidumą freono slėgis visoje sistemoje mažėja.

4. Kai kompresoriui tiekiamas įtampa neviršija 5 V, mažinant droselio pralaidumą, didėja kompresoriaus atliekamas darbas.

5. Kai kompresoriui tiekiamas įtampa viršija 5 V, mažinant droselio pralaidumą, mažėja kompresoriaus atliekamas darbas.

6. Freono slėgio skirtumas tarp žemo ir aukšto slėgio pusių didėja, didėjant kompresoriui tiekiamai įtampai. Kompresoriaus atliekamas darbas auga.

Rekomendacijos

1. Siekiant tiksliau nustatyti garintuvo linijos freono parametrus reikia pakartoti eksperimentą, naudojant sausą orą. Tai leistų išlaikyti pastovų oro debitą sistemoje, turėti ilgiau truncančius stacionarius režimus, patikimiau taikyti energijos balansą rezultatų analizėje.

Padėkos

Dėkojame VGTU Akademiko Algirdo Žukausko šilumos mainų laboratorijos darbuotojams Dovydui Rimdžiui ir Tomui Kropui už pagalbą eksperimentinio stendo rekonstrukcijoje bei paleidimo darbuose.

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. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2016.02.015.
- EC 2010. The Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, *Official Journal of the European Union* 53: 1–6. DOI: doi:10.3000/17252555.L_2010.153.eng.
- Martinaitis V., Bareika P., Misevičiūtė V. 2012. Vėdinimo įrenginio su šilumos siurbliu termodinaminio efektyvumo tyrimas, *Mokslas - Lietuvos ateitis* 4(5): 493–498. DOI: 10.3846/mla.2012.79.

ANALYSIS OF THE CONTROL OF AN EXPERIMENTAL HEAT PUMP'S CYCLE

A. Friks, V. Martinaitis

Summary

This paper evaluates the experimental air-to-air heat pump used for a heat recovery in ventilation system. An experimental analysis has been performed to evaluate control possibilities of a heat pump cycle.

Heat pump freon (R410A) parameters dependence on expansion valve position and compressor voltage have been determined. The results have shown that reducing expansion valve permeability reduces the freon pressure across the system, the isotherms on $p-h$ diagram move down, temperature decreases; increasing the voltage supplied to the compressor, freon pressure difference between the low- and high-pressure sides increases, the work performed by the compressor is growing. The resulting variation trends define the possibilities for the search for an efficient heat pump cycle control algorithm using combinations of expansion valve and compressor operation.