



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Laboratorinio aušintuvo akumuliacinės talpos šalčio užkrovimo algoritmo sukūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Rytis Petrauskas**

Projekto autorius

**Prof. Dr. Renaldas Urniežius**

Vadovas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Laboratorinio aušintuvo akumuliacinės talpos šalčio užkrovimo algoritmo sukūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

---

**Rytis Petrauskas**

Projekto autorius

**Prof. Dr. Renaldas Urniežius**

Vadovas

**Doc. Dr. Gytis Petrauskas**

Recenzentas / Recenzentė

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Rytis Petrauskas

## **Laboratorinio aušintuvo akumuliacinės talpos šalčio užkrovimo algoritmo sukūrimas ir tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Rytis Petrauskas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Petrauskas, Rytis. „Laboratorinio aušintuvo akumuliacinės talpos šalčio užkrovimo algoritmo sukūrimas ir tyrimas“. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Renaldas Urniežius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Elektronikos inžinerija (inžinerijos mokslai)

Reikšminiai žodžiai: kompresorius, valdymas, COP.

Kaunas, 2024. 65 p.

### **Santrauka**

Šaldymo sistemų kompresorių greičio valdymas yra svarbi ŠVOK sistemų technologijos dalis, leidžianti optimizuoti energijos sąnaudas ir pagerinti sistemos darbo našumą. Dinaminis kompresoriaus variklio greičio valdymas leidžia pritaikyti kompresoriaus darbą prie esamo šaldymo poreikio apkrovos. Tai leidžia sutaupyti šaldymui suvartojamos energijos. Valdant kompresoriaus greitį gaunamas geresnis sistemos našumas, kuris pasireiškia stabilesniu temperatūros palaikymu ar sumažėjusiu kompresoriaus skleidžiamu garsu. Kompresoriaus greičio valdymas taip pat prailgina įrangos gyvavimo laikotarpį ir sumažina sistemos aptarnavimo kaštus.

Šiame darbe aptariamos rinkoje esančių kompresorių rūšys, bei populiarūs valdymo algoritmai. Tyrimo metu siekiama sukurti laboratorinės aušinimo sistemos kompresoriaus valdymo algoritmą, kuriuo siekiama pagerinti sistemos efektyvumą. Algoritmui sudaryti atliekami kompresoriaus darbo tyrimai prie skirtingų nustatytų pastovių greičių. Šių tyrimų rezultatai atspindi dėsnį tarp nustatomo greičio, aušinamos talpos temperatūros, bei kompresoriaus efektyvumo koeficiento. Pasinaudojant gaunamu dėsniu sukuriamas kompresoriaus valdymo algoritmas, pagal aušinamos talpos temperatūrą. Pritaikius sukurtą valdymo algoritmą ir ištyrus kompresoriaus veikimą gautos 15-40 % mažesnės energijos sąnaudos, 8-20 % didesnis efektyvumo koeficientas, palyginus su tyrimais atliktais nustatytais stabiliais greičiais. Taip pat tyrimui naudojamų temperatūrų režyje pasiektas 11–79 % greitesnis atšaldymas, lyginant su stabilaus greičio atvejais.

Petrauskas, Rytis. Development and research of the cold charging algorithm for the laboratory chiller's cold storage tank / supervisor PhD, Renaldas Urniežius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics engineering (engineering sciences).

Keywords: compressor, control, COP.

Kaunas, 2024. 65 p.

### **Summary**

The control of compressor speed in refrigeration systems is a crucial component of HVAC system technology, enabling the optimization of energy consumption and the enhancement of overall system performance. Dynamic adjustment of compressor motor speed allows for the compressor's operation to be tailored to the current cooling demand, thereby conserving energy used for refrigeration. Effective speed control of the compressor leads to improved system efficiency, which manifests as more stable temperature regulation and reduced noise production from the compressor. Additionally, managing compressor speed not only prolongs the equipment's operational lifespan, but also decreases the costs associated with system maintenance.

This research discusses the various types of compressors available in the market, as well as commonly used control algorithms. The objective of this study is to develop a control algorithm for a laboratory cooling system's compressor to enhance system efficiency. To formulate this algorithm, tests are conducted to examine the performance of compressor at different, predefined constant speeds. The findings from the tests reveal a correlation between the designed speed, the temperature of refrigerated volume and the compressor's efficiency. Utilizing this established relation, a compressor speed control algorithm is formulated. Subsequent application of this control algorithm and further analysis of compressor function have shown reductions in energy consumption ranging from 15–40 %, and increase in the efficiency by 8–20 % compared to the operations carried out at fixed speeds. Moreover, within the utilized temperature ranges of the study, cooling times were improved by 11–79 % compared to the cases of stable speed operations.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>11</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>12</b>
<b>1. Teorinė dalis.....</b>	<b>14</b>
1.1. Šaldymo sistemos veikimas.....	14
1.2. Dažniausiai naudojamų kompresorių tipai .....	16
1.2.1. Stūmokliniai kompresoriai .....	16
1.2.2. Spiraliniai kompresoriai .....	17
1.2.3. Sraigtiniai kompresoriai .....	18
1.2.4. Išcentriniai kompresoriai .....	19
1.2.5. Apibendrinimas .....	19
1.3. Kompresorių greičio valdymo rūšys .....	20
1.3.1. Relinis valdymas .....	20
1.3.2. Kaskadinė fiksuoto greičio, kompresorių sistema.....	21
1.3.3. Kintančio dažnio pavaros .....	21
1.4. Pažangūs kompresoriaus valdymo algoritmai .....	22
1.4.1. PID reguliatorius .....	23
1.4.2. Prognozuojančiu modeliu grįstas valdymas .....	25
1.4.3. Neraiškių aibių algoritmas.....	27
1.4.4. Dirbtiniai neuroniniai tinklai .....	28
1.5. Kompresoriaus greičio valdymo privalumai .....	30
1.5.1. Apibendrinimas .....	30
<b>2. Metodologinė dalis.....</b>	<b>31</b>
2.1. Tiriamasis objektas .....	31
2.1.1. Aušinimo kompresoriaus valdymas .....	33
2.2. Efektyvumo koeficiento skaičiavimas.....	33
2.2.1. COP apskaičiavimas remiantis kompresoriaus parametrais.....	34
2.2.2. COP apskaičiavimas remiantis aušinamos talpos parametrais.....	38
2.2.3. Apibendrinimas .....	38
2.3. Temperatūros nuskaitymas ir registravimas .....	38
2.4. Valdančiosios varžos keitimas pagal sukurtą dėsnį.....	44
<b>3. Tiriamoji dalis.....</b>	<b>47</b>
3.1. Tyrimas su pastoviu kompresoriaus greičiu .....	47
3.2. Prognozuojančiu modeliu grįsto valdymo algoritmo sudarymas .....	50
3.3. Tyrimas su sukurtuoju valdymo algoritmu.....	54
3.3.1. Algoritmo realizavimas naudojant STM32 mikrovaldikliu .....	54
3.3.2. Rezultatai gauti pritaikius sukurtą valdymo algoritmą.....	56
<b>Rezultatai ir išvados .....</b>	<b>60</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>61</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>66</b>
1 Priedas. Tyrimui naudotos periferijos sujungimas su mikrovaldikliu.....	66
2 Priedas. Gaunamų duomenų UART kanalu nuskaitymo ir registravimo .csv faile programos kodo fragmentas .....	67

3 Priedas. Visų įmanomų varžų kombinacijų, varžų matricoje, paieškos programos kodo fragmentas .....	69
--	----

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Stūmoklinio kompresoriaus privalumai ir trūkumai [18].....	17
<b>2 lentelė.</b> Spiralinio kompresoriaus privalumai ir trūkumai [21].....	18
<b>3 lentelė.</b> Sraigtinio kompresoriaus privalumai ir trūkumai [22].....	19
<b>4 lentelė.</b> Išcentrinio kompresoriaus privalumai ir trūkumai [23].....	19
<b>5 lentelė.</b> Automatizacijos schemoje pavaizduotų informacijos rinkimo įrenginių aprašymas .....	32
<b>6 lentelė.</b> Varžyno parametrai ir jo išėjimo vertės .....	33
<b>7 lentelė.</b> Gamintojo pateikiama tiriamo kompresoriaus techninė specifikacija [48].....	35
<b>8 lentelė.</b> Gamintojo pateikiama varžos ir greičio priklausomybė [48].....	35
<b>9 lentelė.</b> Naudojamo R134a freono specifikacijos [50].....	37
<b>10 lentelė.</b> Vandens talpoje parametrai .....	38
<b>11 lentelė.</b> Varžų vertės naudotos sukurtoje varžų matricoje .....	45
<b>12 lentelė.</b> COP polinomų koeficientai prie skirtingų greičių .....	48
<b>13 lentelė.</b> (14), (15), (16) lygčių koeficientai .....	53
<b>14 lentelė.</b> Gautų rezultatų palyginimas su pritaikytu valdymo algoritmu .....	59



## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Garų suslėgimo ciklas su temperatūromis ir entalpinėmis vertėmis, R134a šaldymo agentas [14] .....	15
<b>2 pav.</b> Slėgio (P) – entalpijos (h) diagrama, kurioje parodomas garų suslėgimo ciklas [14] .....	16
<b>3 pav.</b> Stūmoklinis kompresorius [18] .....	17
<b>4 pav.</b> Stūmoklinio kompresoriaus veikimo ciklas [14] .....	17
<b>5 pav.</b> Spiralinio kompresoriaus veikimas [20] .....	18
<b>6 pav.</b> Sraigtinio kompresoriaus veikimas [19] .....	18
<b>7 pav.</b> Išcentrinio kompresoriaus veikimas [23] .....	19
<b>8 pav.</b> Relinis metodas [29].....	21
<b>9 pav.</b> Lygiagretusis PID valdiklis .....	24
<b>10 pav.</b> Nuoseklusis PID valdiklis .....	25
<b>11 pav.</b> MPC valdymo schema ŠVOK sistemose [30] .....	26
<b>12 pav.</b> Neraiškiųjų aibių (FUZZY) valdymo schema [32] .....	27
<b>13 pav.</b> Dirbtinio neuroninio tinklo diagrama [45] .....	29
<b>14 pav.</b> Dirbtinio neuroninio tinklo apmokymo procedūra [45] .....	29
<b>15 pav.</b> Tiriamos šaldymo sistemos dalies struktūrinė schema .....	31
<b>16 pav.</b> Šaldymo sistemos automatizavimo schema .....	32
<b>17 pav.</b> Kompresoriaus valdiklio sujungimų diagrama [48].....	33
<b>18 pav.</b> Greičio priklausomybė nuo parinktos, greitį valdančios, varžos .....	36
<b>19 pav.</b> Kompresoriaus greičio priklausomybė nuo kompresoriumi tekančios srovės.....	36
<b>20 pav.</b> Temperatūros daviklių (DS18B20) prijungimas prie „STM32F407 DISCOVERY“ plokštės .....	39
<b>21 pav.</b> 1-Wire įrenginių nuskaitymo programos kodo fragmentas.....	39
<b>22 pav.</b> 1-Wire įrenginių nuskaitymo programos algoritmas .....	40
<b>23 pav.</b> Temperatūros jutiklių bibliotekos suformavimo programos kodo fragmentas .....	40
<b>24 pav.</b> Temperatūros daviklių adresų bibliotekos sudarymo algoritmas.....	41
<b>25 pav.</b> Temperatūros nuskaitymo iš 1-Wire įrenginių programos kodo fragmentas.....	41
<b>26 pav.</b> Temperatūros nuskaitymo iš 1-Wire įrenginių algoritmas.....	42
<b>27 pav.</b> Duomenų, perduodamų UART, buferio suformavimo programos kodo fragmentas.....	42
<b>28 pav.</b> Duomenų, perduodamų UART, buferio suformavimo algoritmas .....	43
<b>29 pav.</b> Gaunamų duomenų UART kanalu nuskaitymo ir registravimo kompiuteryje algoritmas ..	43
<b>30 pav.</b> Relių modulių prijungimas prie „STM32F407 DISCOVERY“ programavimo plokštės ....	44
<b>31 pav.</b> Visų įmanomų varžų kombinacijų, galimų varžų matricioje, suradimo algoritmas.....	45
<b>32 pav.</b> Relių aktyvavimo programos kodo fragmentas, pagal gaunamą šešioliktainį kodą .....	46
<b>33 pav.</b> Matavimų rezultatai, kai kompresoriaus greitis nustatytas R0 varža.....	47
<b>34 pav.</b> Temperatūros kitimas vandens talpoje prie skirtingų greičių .....	48
<b>35 pav.</b> Kompresoriaus naudojama srovė prie skirtingų greičių.....	49
<b>36 pav.</b> COP kitimas laike prie skirtingų kompresoriaus greičių .....	49
<b>37 pav.</b> COP pokytis pagal vandens temperatūrą talpoje.....	50
<b>38 pav.</b> Kompresoriaus efektyvumo priklausomybė nuo temperatūros talpoje ir pasirinktos varžos (greičio) .....	51
<b>39 pav.</b> Šilumos kiekio priklausomybė nuo pasirinkto kompresoriaus greičio ir aušinamos talpos temperatūros .....	51
<b>40 pav.</b> Suformuotas paviršiaus ploto grafikas, kuris atspindi Q priklausomybę nuo T ir R .....	52

<b>41 pav.</b> Gautų varžos nuo temperatūros priklausomybių patikrinimas reikiamame temperatūrų diapazone .....	54
<b>42 pav.</b> Sukurtos programos kodo fragmentas, parinkti tinkamam kompresoriaus greičiui pagal valdymo algoritimą .....	55
<b>43 pav.</b> Sukurtasis kompresoriaus greičio valdymo algoritmas.....	55
<b>44 pav.</b> Gauti rezultatai su valdančiuoju algoritmu .....	56
<b>45 pav.</b> Varžų matricioje nustatyta varža palyginta su teorine algoritmo parinkta varža .....	57
<b>46 pav.</b> Temperatūros pokytis talpoje pritaikius valdymo algoritimą, lyginant su pastoviu greičiu .	57
<b>47 pav.</b> Kompresorių varanti srovė, lyginant su pastovaus greičio atvejais .....	58
<b>48 pav.</b> COP kitimas laike pritaikius valdymo algoritimą, lyginant su pastovaus greičio atvejais ...	58
<b>49 pav.</b> COP kitimas pagal aušinamos talpos temperatūra lyginant su pastovaus greičio atvejais ..	59

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

ŠVOK – šildymas, vėdinimas, oro kondicionavimas;

COP – efektyvumo koeficientas;

DC – nuolatinė srovė;

VFDs – kintančio dažnio pavara;

PID – proporcinis, integruojantis ir diferencijuojantis reguliatorius;

RBC – taisyklėmis grįstas valdymas;

MPC – prognozuojančiu modeliu grįstas valdymas;

ANN – dirbtiniai neuroniniai tinklai;

FUZZY – neraiškiųjų aibių logika;

DI – dirbtinis intelektas.

## Įvadas

Šiais laikais išaugus energijos kainoms ir padidėjus susirūpinimui dėl aplinkos apsaugos atsirado poreikis mažinti perteklinę energijos suvartojimą. ŠVOK (šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo) (angl. *Heating, Ventilation, Air Conditioning, HVAC*) sistemos yra vienos daugiausiai energijos pastatuose suvartojančių sistemų – ~30-40% [1, 2, 3]. Šaldymo kompresorių greičio valdymas atlieką svarbų vaidmenį optimizuojant ŠVOK sistemų energijos sąnaudas ir jų našumą.

Kompresorius – vienas svarbiausių šaldymo sistemos komponentų [4, 5], kuris yra atsakingas už šaldymo agento varinėjimą sistemoje, taip palaikant užsibrėžtą temperatūros lygį. Tradiciškai kompresoriai dirba tam tikru nustatytu greičiu [6]. Dėl šios priežasties kompresoriai nepritaikyti kintančioms apkrovoms ir tai lemia sistemų neefektyvumą. Greičio valdymas yra aktualus dėl galimybės pritaikyti kompresorių prie pasikeitusios apkrovos poreikio [7]. Keičiant kompresoriaus greitį ŠVOK sistemose, galima gauti padidėjusį temperatūros valdymo tikslumą bei komforto lygį ir energetiškai efektyvesni šaldymą arba šildymą [8]. Pastebima, kad pritaikius variklio greičio valdymo algoritmus gaunamas ~30% energijos sutaupymas [1, 4, 9, 10].

Įvairūs reiškiniai iššaukia nepageidaujamus svyravimus, kaip: lauko temperatūros pokyčiai, pasikeitęs vartotojų kiekis ir pan. Nereguliuojamo greičio sistemoje kompresorius pastoviai dirbtų maksimaliai, perteklinai naudojant energiją, kai apkrovimas yra mažas. Iš kitos pusės, pastovaus greičio kompresoriai, pakilus šaldymo poreikiui, gali nepatenkinti atsiradusio šiluminio poreikio, taip neišpildant užduoties ar greičiau sudėvint sistemos komponentus [7]. Pritaikant kompresoriaus greičio valdymą, ŠVOK sistema geba prisiderinti prie atitinkamo poreikio palaikymo reikiamu metu. Gerai suderintas įrangos valdymas praplečia sistemos aušinimo talpumą (angl. *Cooling Capacity*) taip padidinant energetinį efektyvumą [7]. Taip pat, dėl valdomo kompresoriaus greičio įranga gali reaguoti į aplinkos pokyčius žymiai greičiau, taip užtikrinant stabilią ir komfortabilią temperatūrą viduje. Valdant kompresoriaus greitį sistemoje gaunama ne tik ekonominė nauda, bet ir užtikrinamas sistemos patikimumas ir ilgaamžiškumas [11]. Perteklinio apkrovimo sumažinimas kompresoriuje, valdant jo greitį, leidžia lygiagrečiai sumažinti standartiškai kylančių problemų kiekį, pavyzdžiui: susidėvėjimą, triukšmą, temperatūros svyravimus [6]. Valdant kompresoriaus greitį, taip pat galima naudoti švelnų paleidimą (angl. *Soft Start*) arba švelnų stabdymą (angl. *Soft Stop*), taip palengvinant elektros tinklo darbą, nes sumažėja srovės šuoliai ir svyravimai.

Apibendrinant, šaldymo kompresorių greičio valdymas vaidina svarbų vaidmenį ŠVOK sistemose. Galimybė tiksliai valdyti temperatūrą, sutaupyti energijos ir pagerinti sistemos našumą padaro šią technologiją labai reikšmingą ŠVOK sistemų vystyme.

Kauno Technologijos universiteto laboratorijoje tyrimo metu buvo sukurta bioreaktoriaus temperatūros valdymo sistema, naudojant aušinamą vandeniu [12]. Šią sistemą sudaro vandens talpykla, kurioje vanduo aušinamas suslegiamu freonu. Freono slėgimui naudojamas 12-24V DC kompresorius. Sukurtos reguliavimo sistemos efektyvumo koeficientas yra mažas, bei talpos ataušinimas iki norimos vertės užtrunka ilgai. Viena iš esamų hipotezių, kad pritaikius kompresoriaus greičio valdymo metodus, aušintuvo sistema efektyviau pasieks reikiamą vandens temperatūrą talpoje, taip sumažinant elektrines sąnaudas ir paspartinant aušinimo laiką.

**Darbo tikslas** – padidinti laboratorinio aušintuvo efektyvumą tiriant kuriamą valdymo algoritmą.

***Darbo uždaviniai:***

1. ištirti esamos talpos aušinimo sistemos reakciją į kompresoriaus greičio pokyčius;
2. sukurti šaldymo kompresoriaus valdymo algoritmą;
3. realizuoti valdymo modelį laboratorinio aušintuvo sistemoje;
4. eksperimentiškai ištirti laboratorinio aušintuvo elgseną su sukurtuoju valdymo modeliu.

Tyrimas atliekamas Kauno Technologijos universiteto laboratorijoje su esamu laboratoriniu aušintuvu. Sistemos efektyvumui ištirti bus matuojama suvartojamas elektros energijos kiekis ir iš sistemos pašalintas šilumos kiekis – apskaičiuojamas kompresoriaus efektyvumo koeficientas.

Šis darbas sudarytas iš 3 skyrių: teorinės, metodologinės ir tiriamosios dalių, bei išvadų. Teorinėje dalyje aptariama kaip veikia aušinimo sistema, aušinimo kompresorių modeliai, bei galimi kompresorių ir aušinimo sistemų valdymo metodai. Metodologinėje dalyje aprašomi veiksmai ir procedūros, kuriais remiantis atliekami tyrimai ir apskaičiuojami rezultatai. Taip pat aprašoma kaip fiziškai realizuojamas valdymas, bei surenkami duomenys. Tiriamojoje dalyje apžvelgiami gauti rezultatai, aprašomas valdymo algoritmo sukūrimas ir aptariami gauti rezultatai, pritaikius sukurtą algoritmą. Išvadose aptariami pasiekti rezultatai išsikeltiems uždaviniams.

## 1. Teorinė dalis

### 1.1. Šaldymo sistemos veikimas

Šaldymo sistemos yra skaidomos į oro kondicionavimą ir šaldymą. Oro kondicionavimo įranga yra skirta palaikyti temperatūriniam komfortui, įrangos ir patalpų aušinimą (paprastai 20–30 °C). Šaldymo technologijos yra skirtos palaikyti, produktų ar kitos paskirties medžiagas, temperatūrai artimai 0 °C [13].

Energijos tvermės dėsnis teigia – keičiant vieną energijos rūšį kita, energijos kiekis sistemoje išlieka toks pats. Tačiau yra ribota galimybė pakeisti šiluminę energiją į mechaninę energiją. Šilumai judant iš šiltos zonos į šaltą tik tam tikras kiekis šiluminės energijos gali būti paverstas mechanine energija. Prancūzų fizikas Sadis Karnotas (angl. *Sadi Carnot*, 1796-1832) pirmasis atradęs, kad šilumos perdavimo sistemoje ryšys tarp pernešamos šilumos kiekio ir įdėto darbo yra priklausomas nuo temperatūros. Idealus šaldymo procesas yra vadinamas karnoto ciklu [14].

Minimalus darbo kiekis, skirtas šaldymo ciklui palaikyti, gali būti aprašomas absoliutinės temperatūros skalėje. Idealus santykis tarp sistemoje gauto darbo ir įdėtos šilumos ( $W/Q_1$ ) atgaliniame variklyje E lygus šilumos skirtumui ( $T_1 - T_0$ ) padalintam iš karštos talpos temperatūros ( $T_1$ ). Pasak Kelvino (1824-1907) išvestos formulės mažiausias darbo kiekis, kuris turi būti įdėtas norint pernešti šilumos kiekį  $Q$  iš  $T_0$  į  $T_1$  temperatūrą yra lygus (1) [13, 14].

$$W = \frac{Q(T_1 - T_0)}{T_0}; \quad (1)$$

čia  $W$  – įneštas darbo kiekis  $W$ ;

$Q$  – norimas pernešti šilumos kiekis  $W$ ;

$T_1, T_0$  – atitinkamai galutinė ir pradinė temperatūros  $K$ .

Šaldymo efektyvumas apibrėžiamas kaip išgautas šilumos kiekis  $Q$  padalintas iš darbo, įnešto šilumai paimti  $W$ . Tai vadinama efektyvumo koeficientu ( $COP$ , angl. *Coefficient of Performance*). Idealus, arba karnoto efektyvumo koeficientas randamas (2) [13, 14].

$$COP_{Carnot} = \frac{Q}{W} = \frac{T_0}{(T_1 - T_0)}; \quad (2)$$

čia  $Q$  – pernešamas šilumos kiekis,  $W$ ;

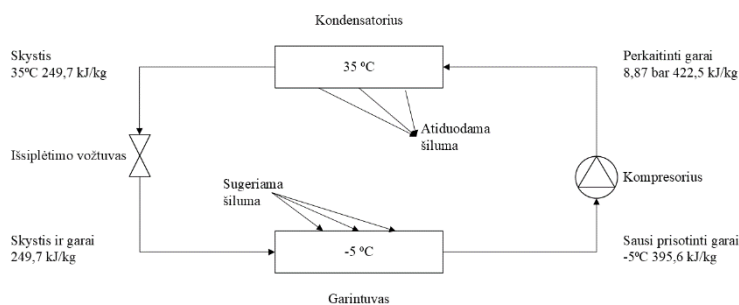
$W$  – įneštas darbo kiekis,  $W$ ;

$T_1, T_0$  – atitinkamai galutinė ir pradinė temperatūros, °K.

Dažniausia šaldymo, ar vėdinimo sistemose yra naudojamas garų slėgimo ciklas [13, 15]. Šaldymo technologijose panaudojama tiek jutiminė, tiek latentinė šiluma. Jutiminės šilumos perdavimas apibrėžiamas kaip savitosios šilumos kiekis. Pastarasis parodo energijos kiekį, reikalingą pridėti ar atimti iš medžiagos, norint pakeisti jos temperatūrą nepakeičiant jos termodinaminės fazės. Latentinis šilumos perdavimas apibrėžiamas garavimo arba sujungimo (kondensacijos) šiluma, kuri nurodo energijos kiekį reikalingą medžiagai pakeisti agregatinę būseną – iš kietos į skystą, arba iš skystos į dujinę. Pavyzdžiui tirpstant ledo kubeliui reikalingas kitas kūnas, kuris atiduotų šilumą ledui, taip

pats šaldamas [13]. Išnaudojant latentinę šilumą galima panaikinti didesnę šilumos kiekį, priklausomai nuo tekančios masės kiekio. Dėl to įrangą pasidaro sąlyginai kompaktiška [14].

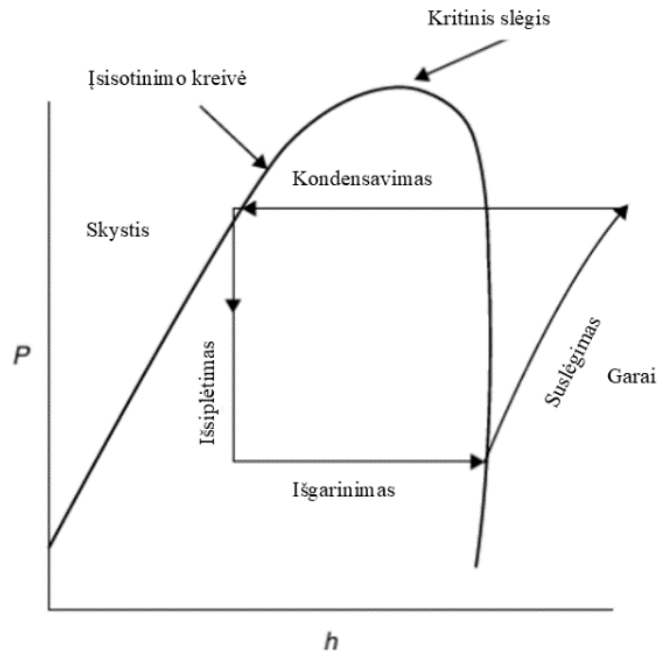
Šildant skystį žemesnėje temperatūroje ir slėgyje, suteikiama latentine šiluma priverčia jį garuoti. Įsisotinimo temperatūroje, mechanškai slegiami, garai gali prarasti prieš tai įgytą latentinę šilumą, ir pavirsi atgal į skystą būseną. Šaldymo procesas įvyksta pernešant šilumą į darbinį skystį garinimo proceso metu. Arba kitaip tariant, pasikeitus entalpijai tarp garintuve esančio skysčio ir garų (1 pav.) [14].



**1 pav.** Garų suslėgimo ciklas su temperatūromis ir entalpinėmis vertėmis, R134a šaldymo agentas [14]

Norint geriau suprasti procesą reikia atkreipti dėmesį į slėgio ir entalpijos, arba P-h, grafiką (2 pav.). Šiame grafike matomi skirtumai tarp skystos ir dujinės medžiagos būsenos. Vertikalioje ašyje pateikiamas slėgis P, o horizontalioje ašyje entalpija h. Įsisotinimo kreivė nurodo ribą tarp skystos būsenos, dujinės būsenos arba garų. Regione pažymėtame „Garai“ yra perkaitinti (angl. *Superheated*) garai. Regione pažymėtame „Skystis“ yra peršaldytas (angl. *Subcooled*) skystis. Kylant slėgiui virš nubrėžtos linijos nėra skirtumo tarp skystos ar dujinės būsenos. Viršijus šį slėgį dujų nebegalima paversti skysčiu. Žemiau šios kreivės medžiaga yra maišyta skysčio ir dujų visuma [13, 14].

2 pav. pademonstruotame šaldymo cikle galima išžvelgti 4 procesus. Išgarinimas vyksta pastoviam slėgyje, todėl grafike jis atvaizduotas tiesia linija. Suslėgimo procese panaudojama kompresoriaus mechaninė galia suslėgti dujoms. Dujas slegiant kyla jų temperatūra, kartu ir entalpija, todėl slėgimo pabaigoje dujos yra perkaitinimo zonoje, už įsisotinimo linijos ribų. Šis procesas, kuomet dujų suslėgimas pakelia jų entalpiją vadinamas adiabatiniu suslėgimu. Prieš kondensavimą dujos turi būti ataušinamos. Dujoms pasiekus tinkamą temperatūrą jos kondensuojasi ir medžiaga pereina į skystą būseną. Išsiplėtimas yra pastovios entalpijos procesas, todėl jis atvaizduojamas vertikalia linija. Šioje stadijoje šiluma nėra nei atiduodama, nei surenkama. Krentant slėgiui sistemoje krenta medžiagos temperatūra ir dalis skysčio pereina į dujinę būseną [14].



2 pav. Slėgio (P) – entalpijos (h) diagrama, kurioje parodomas garų suslėgimo ciklas [14]

## 1.2. Dažniausiai naudojamų kompresorių tipai

Rinkoje yra didelis kiekis skirtingų kompresorių tipų, kurie įprastai suskirstomi į 4 grupes: stūmokliniai (angl. *Reciprocating*), spiraliniai (angl. *Scroll*), sraigtiniai (angl. *Rotary*) ir išcentriniai (angl. *Centrifugal*) kompresoriai. Kompresoriaus pasirinkimas smarkiai priklauso nuo panaudojimo paskirties, reikalingo efektyvumo, šiluminės talpos. Pavyzdžiui sraigtiniai ir spiraliniai kompresoriai dažniausiai naudojami mažoms paskirtims: buityje ir autotransporte. Likę kompresoriai dažniau sutinkami, kur reikalinga didelė šiluminė talpa – industrinis oro kondicionavimas, ir šaldymas [13, 16].

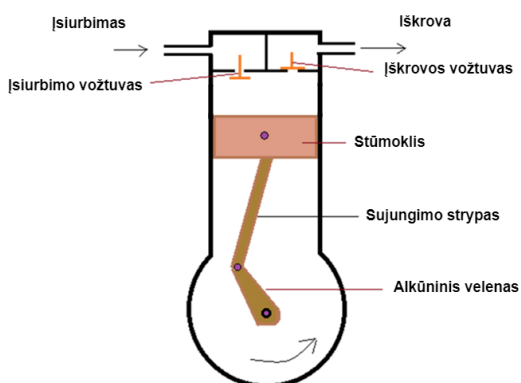
Dažnai gamintojai pateikia kompresorių šiluminės talpos vertes, leidžiant pritaikyti šaldymo sistemą pagal poreikį. Tačiau, kai kurios kategorijos persidengia tarpusavyje. Sraigtiniai kompresoriai naudojami šaldyme būna tarp 1-5 kW, stūmokliniai kompresoriai 1-500 kW, spiraliniai kompresoriai 5-50 kW, kita kategorija sraigčių kompresorių (angl. *Screw*) 50-500 kW, išcentriniai kompresoriai 200-10 000 kW [13].

### 1.2.1. Stūmokliniai kompresoriai

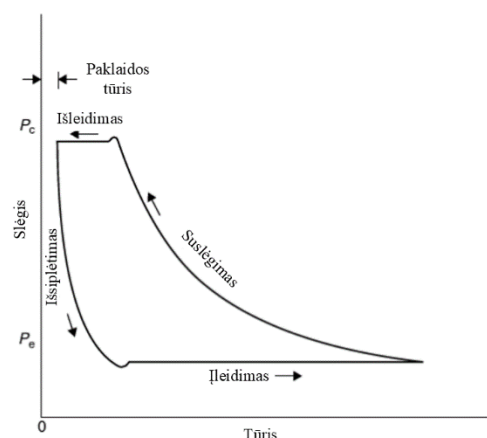
Naudojamas stūmoklis suslėgti šaldymo agentui. Jie paplitę dėl patvarumo ir gebėjimo veikti aukštesnio slėgio srityse. Stūmoklinio kompresoriaus veikimo principas yra panašus į vidaus degimo variklio veikimo principą. Tarkime, kad stūmoklis yra viršutinėje padėtyje. Stūmokliui besileidžiant žemyn per tiekimo vamzdelį ir sklendę yra įtraukiami šaldymo agento garai. Tuomet stūmokliui kylant į viršų garai yra slegiami iki tokios ribos, kuri yra nustatoma iškvovos sklende. Pasiekus tinkamą slėgį iškvovos sklendė atsidaro ir suslėgtas, aukštos temperatūros ir slėgio, šaldymo agentas yra perduodamas toliau į sistemą. Dujoms, likusioms kompresoriuje po išstūmimo, reikia išsiplėsti. Įsiurbimo vožtuvas neatsidarys tol, kol slėgis cilindre nenukris žemiau slėgio, esančio įsiurbimo



vamzdelyje. Kuo stūmoklis nueina ilgesnį kelią su uždarytu vožtuvu, tuo sistemoje matomi nuostoliai yra didesni. Stūmoklį judina elektros variklis [13, 14, 17].



3 pav. Stūmoklinis kompresorius [18]



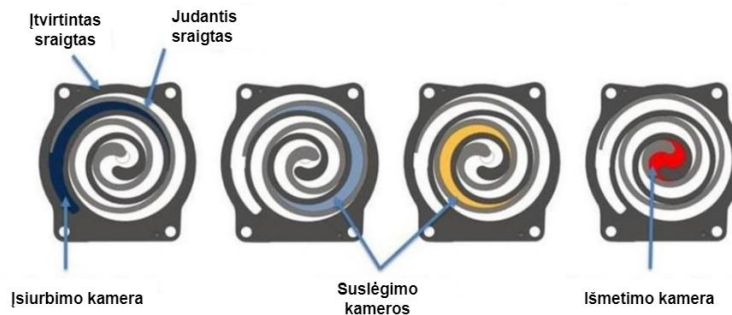
4 pav. Stūmoklinio kompresoriaus veikimo ciklas [14]

1 lentelė. Stūmoklinio kompresoriaus privalumai ir trūkumai [18]

Privalumai	Trūkumai
Išgaunamas didelis suslėgimas	Negalima keisti cilindro tūrio, pagal norimą gauti slėgį (neturi savireguliacijos)
Galima naudoti skirtingas medžiagas suspaudimui	Kompresorius yra didelis lyginant su slėgiamu tūriu
Didelis efektyvumas ir lankstumas	Dalis varomosios (variklio) energijos iššvaistoma dėl trinties
Pigus ir patikimas dizainas	Didelė vibracija ir triukšmas
-	Stūmoklio žiedai yra jautrūs purvui, kaip dėl nusidėvėjimo atsiradusioms šiukšlėms

### 1.2.2. Spiraliniai kompresoriai

Šie kompresoriai naudojami daugelyje namų apyvokos šilumos siurblių ir oro aušinimo sistemų. Spiraliniam kompresoriuje naudojamos dvi, persikeičiančios, sraigtinės plokštelės medžiagos suspaudimui. Dažniausiai kompresoriuje viena plokštelė yra įtvirtinta, o kita ekscentriškai sukasi aplink ją (žr. 5 pav.) taip slėgiant patekusią medžiagą. Suspaudimo procesas užtrunka 2-2,5 apsisukimo ciklo, lyginant su vienu rotoriniuose ir 1,5 stūmokliniuose kompresoriuose. Tačiau medžiagos įtraukimo ir išmetimo procesas trunka pilną apsisukimo ciklą lyginant su <0,5 stūmoklinio ir <0,25 rotorinio kompresorių ciklais [14, 19].



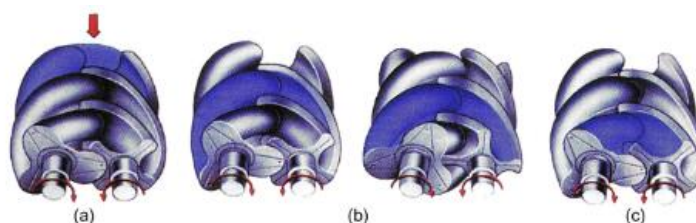
5 pav. Spiralinio kompresoriaus veikimas [20]

2 lentelė. Spiralinio kompresoriaus privalumai ir trūkumai [21]

Privalumai	Trūkumai
Didelis efektyvumas	Mažesnis pajėgumas lyginant su sraigtiniais ir išcentriniais kompresoriais
Mažas triukšmas ir vibracija	Kaina
Kompaktiškumas	Jautrus skystam šaldymo agentui
Patikimumas	Sudėtingesnis aptarnavimas lyginant su stūmokliniais kompresoriais
Patikimesnis tepimo principas	-

### 1.2.3. Sraigtiniai kompresoriai

Sraigtinis kompresorius, kaip ir sako pavadinimas, yra sudarytas iš poros sraigtų. Kompresoriaus dujų įtraukimo ir išmetimo angos yra sraigtų galuose. Du sraigtai, varantysis ir varomasis, besisukdami sudaro tarpą prie įėjimo angos, čia dujos patenka į kamerą (6 pav., a). Toliau besisukant kompresoriaus sraigtams, įėjimo kamera sraigtu uždaroma, o dujos stumiamos kapsulėje tolyn. Dujoms ašimi judant tolyn erdvės tūris mažėja ir dujos yra slegiamos (6 pav., b). Galiausiai sraigtams suformavus angą šachtos pabaigoje suslėgtos dujos yra išmetamos į sistemą (6 pav., c). Dėl šios priežasties kompresoriui nėra reikalingi įsiurbimo ir išmetimo vožtuvai [14, 19].



6 pav. Sraigtinio kompresoriaus veikimas [19]

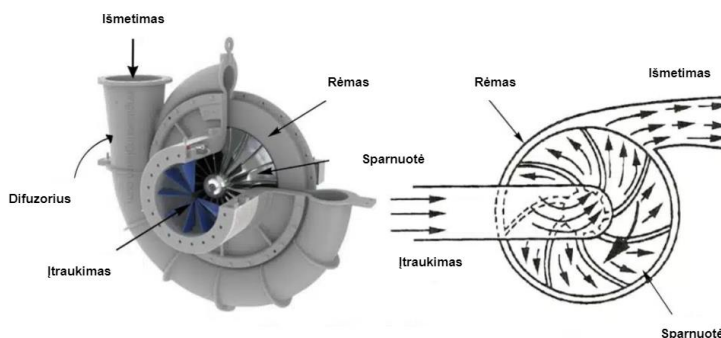
### 3 lentelė. Sraigtinio kompresoriaus privalumai ir trūkumai [22]

Privalumai	Trūkumai
Patikimas ir ilgaamžis	Didelė kaina
Tylus veikimas	Sudėtingas aptarnavimas
Gali atlaikyti dideles darbo apkrovas	-
Energetinis efektyvumas	-

#### 1.2.4. Išcentriniai kompresoriai

Šių kompresorių veikimui naudojamas turbinos principas, greitai besisukantis kompresorius suslegia dujas. Šiame kompresoriuje medžiagos suslėgimas pasiekiamas jai suteikiant kinetinės energijos (greičio), tekant per sparnuotę, kitaip rotorių. Tuomet kinetinė energija yra paverčiama potencine energija (statinis slėgis), medžiagą leidžiant per difuzorių [19]. Kadangi masės srautas kompresoriumi yra pastovus, juo pasiekama didesnė šiluminė talpa. Tačiau ši talpa yra smarkiai priklausoma nuo garintuvo ir kondensatoriaus temperatūrų šaldymo sistemoje. Išcentriniai kompresoriai sukurti patenkinti 200-10 000 kW šaldymo poreikiui. Didesnės išcentrinųjų kompresorių sistemos yra pagaminamos apjungiant kondensatorių, garintuvą, ir kompresorių viename pakete [13].

ŠVOK sistemose įprastai naudojamas pakopinis principas, nes sparnuotė gali būti per didelė norint ją palaikyti tinkamame greityje. Priklausomai nuo reikalingo slėgio, šių pakopų gali būti iki 8. Įprastai dirbančio kompresoriaus sparnuočių greitis yra 3500–7600 RPM [13].



7 pav. Išcentrinio kompresoriaus veikimas [23]

### 4 lentelė. Išcentrinio kompresoriaus privalumai ir trūkumai [23]

Privalumai	Trūkumai
Sąlyginai paprasta gamyba, lyginant su kitais kompresoriais	Apribotas slėgis – negali būti naudojamas didelio slėgio poreikiams
Didelis energetinis efektyvumas ir patikimumas	Reikalingas labai geras įtvirtinimas
Nereikalingas tepimas	Užsikerta arba stringa

#### 1.2.5. Apibendrinimas

Geras kompresorių veikimo principų supratimas yra labai svarbus norint valdyti jų greitį. Kompresoriai yra kertiniai ŠVOK sistemų komponentai, kurie atsakingi už šaldymo agento transportavimą sistemoje, bei jo garų suslėgimą. Kompresoriaus greičio valdymas leidžia pritaikyti,

optimizuoti sistemą pagal esamus poreikius, taip pat praplėsti įrangos panaudojimo sritis. Valdant kompresorius yra gaunama ir ekonominė nauda, nes sumažinamos energijos sąnaudos, prailginamas sistemos ilgaamžiškumas, sumažinami aptarnavimo kaštai [15].

### **1.3. Kompresorių greičio valdymo rūšys**

Kaičiama greičio kompresoriai yra pagrindinė ŠVOK sistemose taikoma technologija, kuri užtikrina tikslų ir efektyvų kompresoriaus valdymą priklausomai nuo poreikio [7, 24]. Lyginant su fiksuoto greičio kompresoriai, šie geba dinamiškai keisti greitį, apibrėžtame diapazone, taip pasiekdami reikiamą aušinimo tikslą.

- Kintamo greičio kompresoriai turi platų pritaikymo diapazoną, kuriame gali dirbti priklausomai nuo šaldymo poreikio. Juose galima keisti greitį nuo mažiausio (dažniausia 20–30 % maksimalaus greičio) iki maksimalaus greičio. Ši savybė leidžia kompresoriaus darbą pritaikyti prie kintančių aplinkos sąlygų [25, 26].
- Reguluojant kompresoriaus greitį pagal apkrovos poreikį yra sumažinamas nereikalingam šaldymui iššvaistomos energijos kiekis. Lyginant su fiksuoto greičio kompresoriais, šie sugeba sutaupyti 20–40 % energijos [25, 26].
- Kompresoriui dirbant mažesniais greičiais yra sumažinamas, komponentų nusidėvėjimas ilgesnėje perspektyvoje. Palaipsniui didinant ir mažinant greitį, prisitaikant prie reikiamo šaldymo poreikio, padeda sumažinti mechaninius sistemos įtempius. Taip valdomai sistemai reikia mažiau aptarnavimo išlaidų ir prailginamas įrangos gyvavimo laikas [25].
- Dirbant mažesnėmis apsvokomis kompresoriai skleidžia mažesnę garsą. Tai yra svarbus faktorius, jei šaldymo sistema yra naudojama vidaus patalpose, kur garso lygis, kuri gali pasiekti įranga, yra ribotas.
- Keičiamo greičio kompresoriai yra suderinami su įvairiomis šaldymo ir oro kondicionavimo sistemomis. Sistemos su šiais kompresoriais yra naudojamos gyvenamuose pastatuose, komercinėms ar industrinėms paskirtims.

Šiuo metu rinkoje egzistuoja ne vienas metodas valdyti kompresoriaus greičiui. Visi esantys metodai skiriasi tiek savo kompleksiskumu, valdymo tikslumu ir suderinamumu su skirtingais kompresorių tipais. Toliau šiame skyriuje analizuojamas ir pateikiamas išsamesnis valdymo sistemų aprašas.

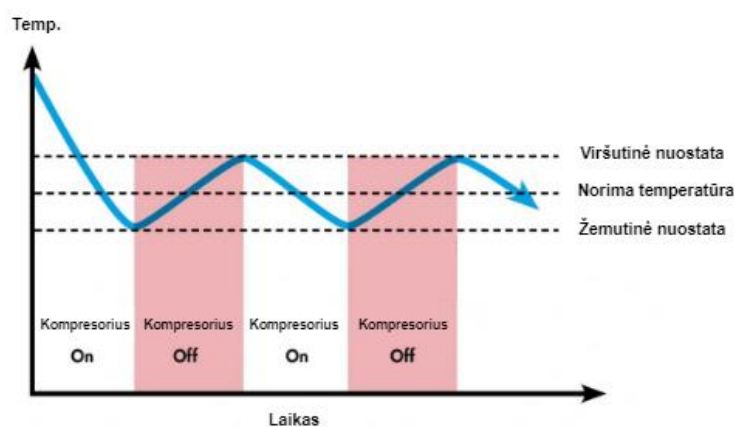
#### **1.3.1. Relinis valdymas**

Relinis kompresorių valdymo metodas veikia paprastu principu – kai temperatūra valdomoje terpėje peržengia nuostatos dydį, kompresorius yra paleidžiamas ir išjungiamas tada, kai terpės temperatūra nukrenta iki tam tikro nustatyto dydžio [15, 27].

Nors šis metodas yra paprastas ir palyginus efektyvus būdas valdyti kompresorių, tačiau turi kelis trūkumus. Vienas iš pagrindinių trūkumų – kompresoriaus (į)(iš)jungimo ciklai yra gana tankūs, tai priveda prie greitesnio įrenginyje esančių komponentų, ar to paties kompresoriaus, susidėvėjimo [6]. Dažnai besikartojantys ciklai taip pat sukelia didesnę mechaninę sistemos apkrovimą ir priveda prie trumpesnio tarnavimo laiko. Papildomai, paleidimo ir stabdymo momentu kompresorius gali pareikalauti daugiau energijos ir sukelti elektros srovės svyravimus tinkle.

Siekiant sumažinti dažnų ciklų poveikį į valdymo sistemą yra įnešamas vėlinimas arba histerezė. Delsa padeda prailginti darbinis ciklus, kuriuos iššaukia mažas temperatūros svyravimas sistemoje.

Relinė sistema labiausia tinka mažiems ŠVOK įrenginiams, kuriuose numatomas stabilus ir nuspėjamas temperatūros poreikis, tai gali būti: maži kondicionieriai, mažos šaldymo sistemos (naminiai šaldytuvai), ar mažoje dalyje industrinių įrenginių [28]. Tačiau didesnėse sistemose arba kitokio pobūdžio paskirtims yra naudojamas kiti kompresoriaus valdymo metodai.



8 pav. Relinis metodas [29]

### 1.3.2. Kaskadinė fiksuoto greičio, kompresorių sistema

Kaskadinėse fiksuoto greičio kompresorių sistemose, geriau žinomose kaip pakopinės kompresorių sistemos, naudojami du, ar daugiau, kompresoriai, kurie veikia nustatytu fiksuotu greičiu. Vietoj vieno kompresoriaus, šiuo atveju keli kompresoriai suderinami sistemoje, kad atitiktų panaudos reikalavimus ir pasiektų optimalų efektyvumą [1].

- Pakopinės kompresorių sistemos suteikia galimybę aušinimo sistemą suderinti su reikiamu aušinimo poreikiu. Kai aušinimo poreikis yra mažas, tik vienas iš sistemoje esančių kompresorių gali būti aktyvus, o kiti neveikiantys. Kylant aušinimo poreikiui, kiti kompresoriai yra paleidžiami atsiradusiam poreikiui patenkinti. Šis pakopinis metodas leidžia tiksliau valdyti temperatūrą taip sutaupant papildomai švaistomą energiją, kai šaldymo poreikis yra mažas.
- Daugiapakopėje kompresorių sistemoje yra pasiekiamas didelis patikimumas, nes sugedus vienam iš kompresorių įranga gali toliau dirbti. Ši savybė yra ypatingai svarbi panaudojimo srityse, kur aušinimo nepertraukiamumas yra svarbus faktorius, kaip duomenų centrai, ligoninės ar industriniai procesai.
- Panaudojant daugiapakopių kompresorių valdymo metodiką galima išgauti ekonomiškai efektyvesnę sistemą, lyginant su kintančio dažnio pavaromis. Fiksuoto greičio kompresoriai paprastai yra pigesni ir paprastesnės sandaros, lyginant su kintamo greičio atitikmenimis. Taip pat, jungiant kaskada fiksuoto greičio kompresorius nereikalinga sudėtinga valdymo sistema.
- Nors šis valdymo metodas turi privalumų, tačiau taip pat yra ir trūkumų. Kaskadinė kompresorių sistema neužtikrina tokio paties tikslumo temperatūros palaikymo, kaip reguliuojamo kompresorių greičio sistemose, nes aušinimo tikslumas priklausys nuo apibrėžtų kompresorių veikimo ribų. Taip pat sistemos sudėtingumas auga didinant kompresorių kiekį.

### 1.3.3. Kintančio dažnio pavaros

Kintančio dažnio pavaros (VFDs – angl. *Variable Frequency Drives*), geriau žinoma kaip dažnio keitikliai, yra elektroniniai įrenginiai, kuriais valdomas variklio greitis keičiant maitinimo įtampos

dažnį. VFDs tapo populiariu sprendimu ŠVOK sistemose dėl panaudojimo universalumo, energijos taupymo galimybių, ir suderinamumo su daugeliu kompresorių tipų [26, 27].

Naudojant dažnio keitiklius galima parinkti kompresoriaus greitį pagal gamintojo pateikiamas rekomendacijas. Parenkamas greitis yra tikslus. Naudojant keičiamo greičio pavaras galima naudoti ir tokias funkcijas kaip lengvas paleidimas ir stabdymas. Ši savybė leidžia sumažinti mechanines apkrovas sistemoje, taip prailginant komponentų tarnavimo laiką. VFDs yra gaminami su įrengtais harmonikų slopintuvais. Jie skirti numalšinti tinkle atsirandančioms perteklinėms harmonikoms, kurios sukeltos įrenginius valdant kintančio dažnio pavaromis.

Nemaža dalis dažnio keitiklių turi gebėjimą stebėti sistemą ar nustatyti esamus gedimus. Naudojant dažnio keitiklius galima realiu laiku sekti tokius duomenis kaip: kompresoriaus būseną, energijos suvartojimą, klaidų aptikimą ir kitus parametrus. Turint visus duomenis galima greičiau rasti gedimus, esančius sistemoje, parinkti reikiamus optimizavimus, jei sistema nesielgia taip, kaip planuota.

Dažnio keitikliai, be kompresorių, taip pat gali valdyti kitus sistemoje esančius įrenginius, tokius kaip: jutikliai, reguliatoriai, ar suteikti sąryšį su pastatų valdymo automatikos įranga.

#### **1.4. Pažangūs kompresoriaus valdymo algoritmai**

ŠVOK sistemų darbas yra užtikrinti komfortą patalpose ir gerą oro kokybę valdant kelias sistemas vienu metu. Paprasčiausia ŠVOK sistema yra valdoma naudojant relinį metodą – termostatus, kurie grįžtamuju signalu gaudami informaciją palaiko sistemą švytuojančią aplink nuostatos signalą. Tokio valdymo pavyzdys galėtų būti paprasta šaldymo sistema, kur uždavus tam tikrą temperatūrą šaldymas paleidžiamas ar stabdomas su 2 °C švytavimu. Kitaip tariant sistemos temperatūra pastoviai švytuoja aplink vidurkį. Nors šis metodas yra pigus, tačiau labai neefektyvus – stabilios temperatūros užtikrinti praktiškai nėra įmanoma dėl pastovaus temperatūrų svyravimo ir reguliavimo perviršio (angl. *Overshoot*) [30, 31].

ŠVOK sistemos sunaudoja didelę energijos dalį pastatuose. Numanoma, kad poreikiams patenkinti, energijos sąnaudos gali pakilti 50 % per sekančius du dešimtmečius. Šias sąnaudas apriboti, arba jas išnaudoti efektyviau, galima pasitelkiant išmaniuosius valymo algoritmus. Tačiau šiuo metu rinkoje didžiausia dalis valdymo algoritmų yra reliniai arba PID [31].

Pritaikant pažangius valdymo metodus, dažnai reikia ir pažangios stebėjimo ir valdymo sistemos, taip pat gebėjimų analizuoti gaunamus duomenis realiu laiku. Šių valdymo modelių pritaikymas valdant kompresorių greitį yra padidėjęs dėl pagerėjusio prieinamumo prie jutiklių, duomenų analizės įrankių, daiktų interneto (IoT- angl. *Internet of Things*) panaudojimo. Šie valdymo metodai leidžia pagerinti energijos sąnaudas, sistemų našumą ir prisitaikantį prie sąlygų valdymą.

Temperatūros sekimo ir palaikymo problemą galima išspręsti naudojant proporcinį-integralinį-diferencijuojantį (PID, angl. *Proportional, Integral, Derivative*) valdymo algoritmą. Šį algoritmą yra sąlyginai pigu realizuoti, tačiau sudėtinga suderinti jo dedamąsias ir nėra išsprendžiamas energetinio efektyvumo uždavinys – netinkamai suderintas valdiklis gali priversti sistemą naudoti neprideramai daug energijos, taip pat gali ją pervesti į nestabilią būseną [30, 31].

ŠVOK sistemose naudojamas taisyklėmis grįstas valdymo algoritmas (RBC, angl. *Rule-Based Control*), kurio pagalba kompensuojamas PID reguliatoriaus negalėjimas prisitaikyti prie didelių

sistemų apribojimų realiu laiku. Kiekvieno ŠVOK sistemai priklausančio PID valdiklio koeficientai yra aprašomi taisyklių rinkiniuose. Sistemų projektuotojai dažnai numato taisyklių rinkinius kiekvienam ŠVOK sistemos elementui. Šie taisyklių rinkiniai dažnai yra pagrįsti projektuotojų patirtimi [30].

Lyginant su PID, prognozuojančiu modeliu grįsto valdymo (MPC, angl. *Model Predictive Control*) atveju gaunami geresni rezultatai, taip valdymo grandinė gali būti ženkliai sudėtingesnė prijungiant daugiau skirtingų daviklių. Tačiau dėl šio algoritmo sudėtingumo, reikalaujamų resursų ir sugriežtintų reikalavimų jų pritaikymas realiame pasaulyje yra sulėtėjęs [31].

Valdymo technologijos paremtos dirbtiniu intelektu, kaip: neuroniniai tinklai (ANN, angl. *Artificial Neural Networks*), mišrių aibių logika (angl. *Fuzzy Logic*), ir generaciniai algoritmai – pasirodė kaip geri valdymo algoritmai dėl pritaikomumo. Neuroniniai tinklai orientuoti į MPC modelių parametru nustatymą ir sistemos efektyvumą. Sistemoms, kurioms reikalingas didesnis stabilumas ir efektyvumas pritaikomas mišriųjų aibių valdymo algoritmas. Šis algoritmas lyginant su kitais algoritmais taip pat padeda apspręsti uždavinius nelinejiniams sistemoms arba sistemoms su daug kintamųjų, sudėtingais matematiniais modeliais, geba išspręsti šiuos uždavinius [32].

#### 1.4.1. PID reguliatorius

PID valdymo algoritmas yra plačiai pritaikomas valdymo technologijose. Jo pavadinimas sudarytas paėmus tris reguliatoriaus dedamųjų pirmąsias raides:

- P – proporcinė dedamoji. Naudojama, siekiant gauti reguliatoriaus reakciją proporcingą įėjimo paklaidai [33]. Kitaip tariant P dedamoji naudojama norint nustatyti reguliatoriaus reakcijos laiką į atsiradusį poveikį.
- I – integralinė dedamoji. Naudojama tuomet, kai reguliatorių reikia panaikinti tam tikro didžio statinę paklaidą išėjime [33].
- D – diferencinė dedamoji. Ši dedamoji naudojama paklaidos pokyčio spartos signalą norint nuspėti galimą reakciją. Diferencinė dedamoji sulėtina integralinio poveikio signalą [33, 34].

Vartotojas keisdamas visas tris dedamąsias derina PID valdiklį geriausiam darbo rezultatui. PID derinimui dažnai pasitelkiamas klaidų ir bandymų metodas, Ziglerio–Nikolso (angl. *Ziegler–Nichols*) derinimo metodai [34].

PID valdiklis turi paprastą struktūrą, bei yra lengvai pritaikomas praktikoje. Dėl šios priežasties šis algoritmas yra vienas labiausiai paplitusių ir naudojamų. PID galima sutikti tokiose srityse kaip: judėjimo valdyme, procesų valdyme, galios elektronikoje, hidraulikoje, pneumatikoje ir kt. 90–95 % valdymo grandinių yra sudarytos su PID valdikliais [34, 35].

PID valdiklio realizavimui paprastai naudojamos dvi formos: lygiagreti (ideali) ir nuosekli [33, 34]. Lygiagrečioje formoje (3) valdiklio dedamosios yra išskaidytos ir išėjimo signalas yra apjungta visų poveikio suma [33, 34]. Šią formą galima sutikti pavadintą idealia arba vadovėline, nes joje neatspindi modifikacijos priimtose realizuojant PID reguliatorius. Kaip pavyzdys galėtų būti diferencinė dedamoji – ji dažniausia nepanaudojama, dėl įnešamų triukšmų stiprinimo reguliavime [33].

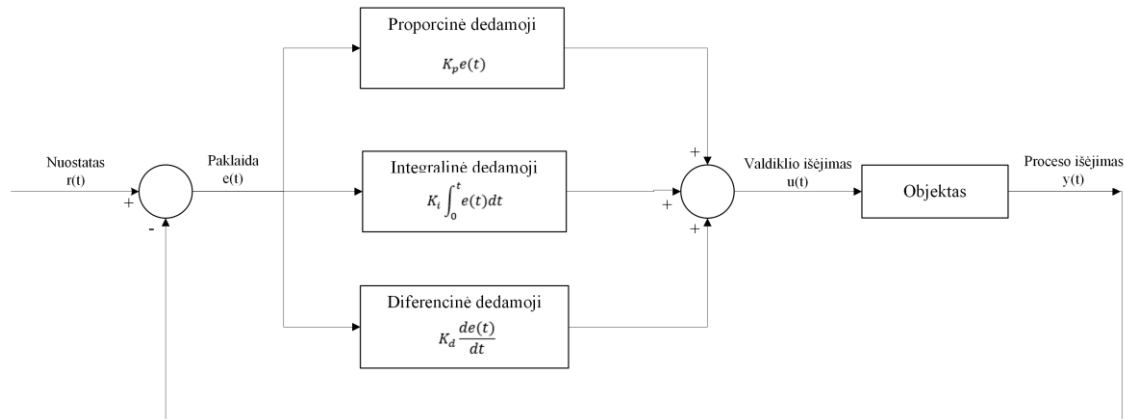
$$u(t) = k_p \left( e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(\tau) d\tau + \tau_d \frac{de}{dt} \right); \quad (3)$$

čia  $k_p$  – proporcinė dedamoji;

$e(t)$  – paklaidos signalas;

$\tau_i = \frac{k_p}{k_I}$  – integralinis laikas;

$\tau_d = \frac{k_D}{k_P}$  – diferencinis laikas.



9 pav. Lygiagretusis PID valdiklis

Senais laikais daugelis valdymo buvo realizuojama panaudojant pneumatinius įrankius, kurie atstojo atitinkamus matematinius veiksmus. Norint išlaikyti analoginę valdymo formą, kai kurie gamintojai pritaikė nuoseklų PID reguliatorių. Šiais laikais dauguma valdiklių yra skaitmeniniai, todėl ši forma yra rečiau sutinkama [33]. Šioje formoje proporcinė dedamoji paveikia visas kitas dedamąsias kaip ir idealaus valdymo atveju. Nuoseklaus valdymo metodo išskirtinumas, kad tiek integrali, tiek diferencinė dedamoji taip pat paveikia proporcinę dedamąją. Vadinasi, keičiant diferencinę dedamąją paveikiamas P ir D veikimas, keičiant integralinę dedamąją paveikiamas P ir I veikimas [34].

$$u(t) = k_s \left( 1 + \frac{T_d}{T_i} \right) e(t) + \frac{k_s}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + k_s T_d \frac{de}{dt}; \quad (4)$$

čia  $k_s$  – daugiklis;

$T_i$  – integralinis laikas;

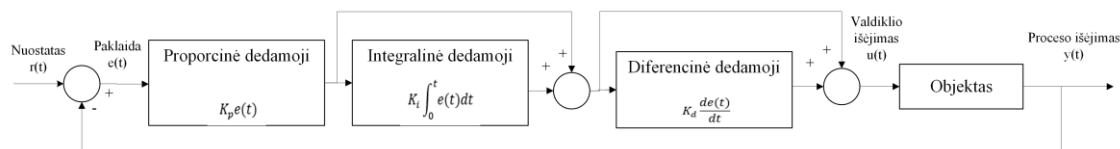
$T_d$  – diferencinis laikas;

$k_p = k_s \left( 1 + \frac{T_d}{T_i} \right)$  – proporcinė dedamoji;

$k_I = \frac{k_s}{T_i}$  – integralinė dedamoji;

$k_D = k_s T_d$  – diferencinė dedamoji.





10 pav. Nuoseklusis PID valdiklis

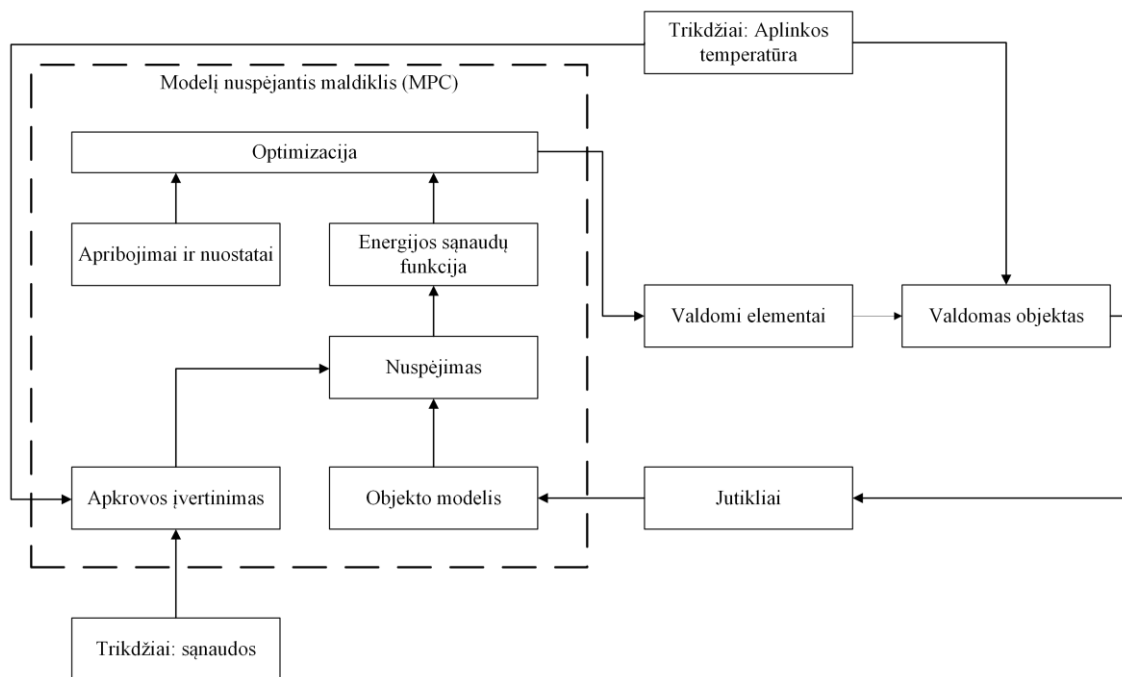
PID valdymo algoritmas yra senai vartojamas ir gerai pažystamas valdymo metodas, pritaikomas daugelyje skirtingų scenarijų [36]. Jis puikiai tinka valdyti paprastus procesus, bei yra pranašesnis už relinį valdymo metodą. Taip pat gerai žinomas dėl valdymo tikslumo ir stabilumo. Taikant šį valdymo metodą yra galimybė prisitaikyti prie atsiradusio paklaidos signalo ir suvaldyti sistemą taip, kad ji tenkintų reikiamą nuostatą. Naudojant PID valdiklį galima gauti didesnę energetinį efektyvumą. [37] aptartame tyrime pastebėta, kad naudojant PID buvo pasiektas 25 % energijos sutaupymas. Tačiau prisitaikymas prie atsiradusių trikdžių gali būti ir silpnybė, nes reguliatorius sistemą gali derinti remiantis triukšmu grandinėje. Taip pat sudėtingesnio valdymo algoritmai, kaip prognozuojančių modelių grįstas valdymo algoritmas (MPC), ar neraiškiųjų aibių algoritmas (FLC), gali būti panaudoti valdyti sudėtingesniems procesams – kur yra daugiau valdomų sistemos komponentų. Dar vienas PID metodo trūkumų yra sudėtingas reguliatoriaus derinimas. Blogai suderintas reguliatorius gali išvesti valdomą objektą į nestabilią būseną.

#### 1.4.2. Prognozuojančių modelių grįstas valdymas

Sistemų energetiniam efektyvumui pagerinti imtasi nagrinėti kitokius valdymo metodus. Vienas tokių – prognozuojančių modelių grįstas valdymas (MPC, angl. *Model Predictive Control*). Pritaikius šį valdymo metodą gaunami geresni rezultatai [30, 38, 39], nei valdant naudojant RBC [40]. MPC metodu galima rasti atitinkamą valdymo signalą kiekvienam valdymo momentui, priklausomai nuo besikeičiančių įėjimų ir išėjimų verčių. Negana to, sprendžiant valdymo užduotį, galima nustatyti valdymo signalą reikalingą ateityje [41]. Kadangi šis metodas yra grįstas matematiniais aprašais, čia naudojamas objekto aprašymas būsenų erdvėje. Objekto būsenų erdvės išmatuoti nėra galima, tai turi būti apskaičiuota [30]. Norint, kad sudarytas objekto modelis veiktų tinkamai, reikia įvertinti trikdžius, galinčius atsirasti valdomoje sistemoje.

MPC valdoma sistema leidžia sistemiškai įvertinti sistemos apribojimus ir kokybiškai apjungti kelis valdymo objektus, signalus, užtikrinant energijos sąnaudų sumažinimą, bei užtikrinant valdomame objekte nustatytus tikslus. Šis valdymo metodas rodo geresnius rezultatus taupant energiją, nei konkurenciniai sprendimai [30, 39].

Prognozuojančių modelių grįstas valdymo metodas reikalauja didelių skaičiavimo pajėgumų [38, 41], todėl jo realizacija yra valdymo priežiūros lygmenyje. Didelis metodo trūkumas – priklausomybė nuo objekto matematinio modelio tikslumo. Valdomo objekto paprastinimas ir išoriniai trikdžiai kaip saulės skleidžiama šiluma, padaro šį metodą sunkiai pritaikomu realiai [30, 38]. Šiai problemai spręsti yra panaudojami keli metodai: prisitaikantis MPC (angl. *Adaptive MPC*), griežtas MPC (angl. *Robust MPC*) ir stochastinis MPC (angl. *Stochastic MPC*). Pirmasis panaudoja atnaujintus nuo laiko priklausančius modelius kiekvienu laiko intervalu. Tai padeda pasiekti geresnį valdymą tačiau prarandamas valdymo agresyvumas. Antruoju valdymo atveju priimamas blogiausias galimas valdymo scenarijus. Trečiuoju atveju į skaičiavimus įtraukiami neapibrėžtumai, tačiau gaunama problema tampa sunkiai išsprendžiama [30].



11 pav. MPC valdymo schema ŠVOK sistemose [30]

MPC pritaikymas ŠVOK sistemose yra retas – jis pradėtas taikyti sąlyginai neseniai. Dėl šios priežasties literatūros šaltinių, tiriančių MPC veikimą, šia tema nėra daug [30]. Tačiau [30] šaltinyje aptarti panaudojimai bendrosios paskirties, viešuose pastatuose, parodo, kad naudojant MPC valdymo algoritmą pastebimas 5–70 %, priklausomai nuo panaudotos situacijos, energetinis efektyvumas. Taip pat galima tiksliau aprašyti ir nuspėti šilumos poreikį pastatuose [38], tai leidžia pagerinti vėdinimo efektyvumą ir oro kokybę, sutaupant kaštus. Kaip teigiama [38] šaltinyje, naudojamas tikslus (angl. *Explicit MPC*) valdymo metodas, dažnai veikia geriau, nei kiti lyginami valdymo metodai.

Prognozuojančiu modeliu grįstas valdymas nėra idealus algoritmas, todėl galima rasti trūkumų. Labiausiai išryškėjantis trūkumas yra sistemos sudėtingumas. Objekto aprašymas būsenų erdvėje yra sudėtingas procesas, reikalaujantis specifinių žinių. Atliekant valdymo signalų apskaičiavimą ir nuspėjimą reikia sąlyginai galingų skaičiavimo įrenginių, kompiuterių. Dėl šios priežasties yra ganėtinai sunku pritaikyti MPC algoritmą realiame pasaulyje. Kadangi realūs objektai nėra tiesiški, o modelio sudarymui ir paprastinimui naudojamas modelio tiesinimas, ateityje gali iškilti problemų dėl gaunamų kontrolinių signalų nuspėjimų [42].

Apibendrinant šis valdymo metodas turi savų privalumų ir trūkumų lyginant su konkurenciniais sprendimais. Naudojant MPC pastebimi privalumai kaip: lankstumas, objekto dinamikos išnaudojimas, išsprendžiamas optimizavimo uždavinys, bei nuspėjamas valdymas ateities laiko intervale [42]. Kaip minėta anksčiau, pastebimas nemažas energetinio efektyvumo padidėjimas, pritaikius valdymo algoritmą, pagerėjusi komforto kokybė patalpose. MPC naudojimas taip pat yra naudingas didelėse arba kompleksinėse sistemose, kur reikalinga daugiau nei vienas įėjimas ar išėjimas.

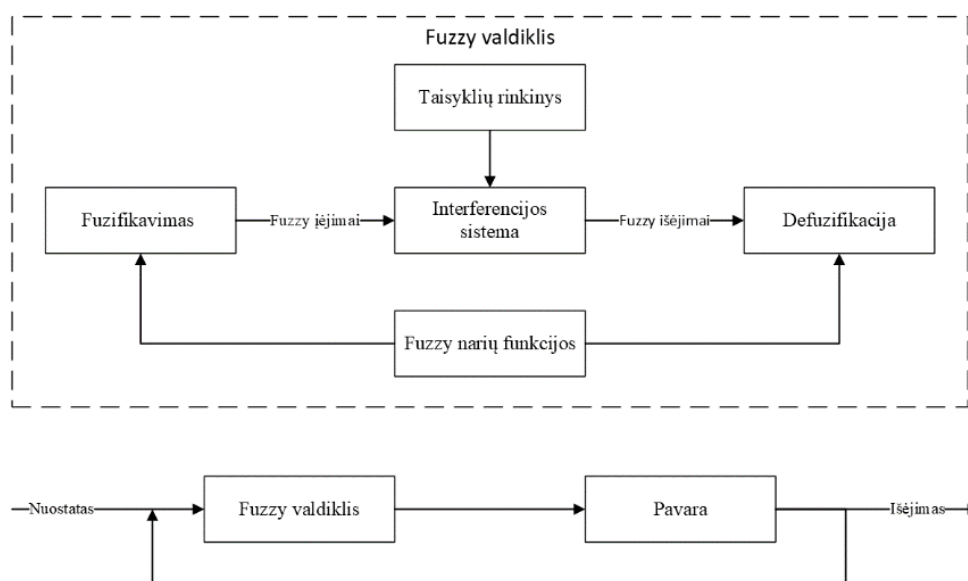
### 1.4.3. Neraiškių aibių algoritmas

Neraiškiųjų aibių valdiklis (angl. *Fuzzy Controller*) veikia panašiai kaip ir operatorius valdydamas sistemą. Šis valdymo algoritmas geriausiai panaudojamas valdymo objektuose, kurių valdymo matematinį modelį gauti labai sunku arba neįmanoma [35]. FUZZY valdiklis yra aprašomas duomenimis bei taisyklėmis, kurios apjungiamos su tam tikromis nustatytomis tikimybėmis taip imituojant žmogaus mąstyseną [32].

Yra keli metodai, kuriais gali būti aprašomos taisyklės. Šaldymo sistemose dažniausia susiduriama su Mamdani (Daugiausia-Mažiausia) metodu. Kiti metodai randami šaldymo sistemų valdyme: Sugeno, Takagi–Sugeno–Kang [32].

FUZZY valdymas susideda iš keturių dalių: fuzifikavimas (angl. *Fuzzification*), taisyklių rinkinys (angl. *Rule Base*), sąveikos sistema (angl. *Interference Engine*), defuzifikacija (angl. *Defuzzification*). Fuzifikavimo stadijoje įėjimų vertės, remiantis narių funkcijomis, paverčiamos FUZZY vertėmis ( $0 \leq (\mu(x) \leq 1)$ ). Tuomet interferencijos sistema įvertina gautas FUZZY vertes su taisyklių rinkiniais taip gaunant išėjimų vertes. Galiausia išėjimų vertės yra defuzifikuojamos, kur išvado signalas perduodamas valdomam objektui [32].

Naudojant neraiškiųjų aibių valdiklį šaldyme, valdomas objektas gali būti šaldymo kompresorius, šaltnešio išsiplėtimo solenoidinis vožtuvas ir pan. Nustačius norimą temperatūrą patalpoje ir ją sekant, pagal aprašytas taisykles galima valdyti šaldymo kompresoriaus greitį, veikimo laiką FUZZY išėjime.



12 pav. Neraiškiųjų aibių (FUZZY) valdymo schema [32]

Vienas iš pagrindinių neraiškiųjų aibių valdiklio privalumų yra jo suderinimas su kitomis valdymo algoritmų rūšimis. Dažniausia sutinkama FUZZY ir PID valdiklių kombinacija [32]. FUZZY valdiklio pagalba yra apskaičiuojamos PID valdiklio įėjimo dedamosios ( $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ ), taip pritaikant PID valdiklį prie pasikeitusių valdymo ar aplinkos sąlygų.

[32] aptariamuose panaudojimo pavyzdžiuose galima matyti, kad neraiškiųjų aibių valdymo metodas pagerina sistemos efektyvumą ir šaldymo kokybę. Pirmu atveju, pritaikius FUZZY logiką, parinkti

PID valdiklio įėjimo signalams, nuostato nuokrypis sumažėjo 43 %. Kitu atveju, pakeitus relinį valdymo metodą FUZZY valdymo metodu, kompresoriaus greičio valdyme ir tuo pačiu valdant išsiplėtimo vožtuvą, pastebėtas 17 % sumažėjęs energijos suvartojimas.

Neraiškių aibių valdymo metodas yra naudingas, nes jam nėra būtinas tikslus matematinis objekto aprašymas [43]. Tai yra ypač naudinga norint valdyti sudėtingas ar netiesiškas sistemas. Taip pat naudojant FUZZY logiką nesudėtinga apmokyti įrangą naudojančius operatorius, nes taisyklių rinkiniai aprašomi „JEI–TADA“ metodika. Vadinasi objektą gerai išmanantis personalas gali prisidėti prie valdiklio kūrimo ar derinimo [44].

Neraiškių aibių valdiklis turi ir savų trūkumų. Vienas jų – tai padidėjęs duomenų apdirbimo kiekis lyginant su dvejetainine logika. Kitas trūkumas yra FUZZY valdiklio suderinimas. Šis procesas yra dažnai sudėtingas, nes nėra apibendrinto metodo, kaip išspręsti valdymo uždavinį [44]. Blogai suderintas FUZZY valdiklis gali klaidingai sudirbti valdant objektą.

#### 1.4.4. Dirbtiniai neuroniniai tinklai

Pirmąjį kartą terminą dirbtinis intelektas (DI, angl. *Artificial Intelligence, AI*) paminėjo kompiuterių sistemų mokslininkas Makartis (angl. *McCarthy*) 1954 metais. Pasak jo DI geba imituoti žmogaus kognityvines funkcijas, kaip mąstymas ar problemų sprendimas. Šiuo metu šis mokslas sparčiai plinta. Yra atliekama daug tyrimų ir bandymų DI pritaikyti daugumoje sričių, kaip finansuose, agrokultūroje, sveikatos moksluose, robotikoje, balso atpažinime ir t.t. Taip pat labai svarbi sfera, kurioje galima pritaikyti DI ir mašininį apmokymą yra pastatų energetinio suvartojimo valdymas [24].

[45] šaltinyje aptariami skirtingi dirbtinių neuroninių tinklų modeliai. Dažniausiai naudojamasis yra tiesioginis tinklas (angl. *Feed-Forward*), jis tinkamas išspręsti daugumai problemų. Egzistuoja ir daugiau neuroninių tinklų modelių, tačiau jie daugiau naudojami specifinėms problemoms spręsti. 13 pav. pavaizduota tipinė neuroninio tinklo sandara – įėjimo, išėjimo ir paslėpti neuronai. Įėjimo neuronai atstoja atitinkamus įėjimo parametrus, atitinkamai tas pats yra ir su išėjimo neuronais. Šiame pavyzdyje yra parodyti tik du paslėpti neuronų sluoksniai, tačiau jų gali būti ženkliai daugiau, kiekis pasirenkamas pagal užduotį ir jos sudėtingumą. Atliktuose bandymuose buvo nustatyta, kad mažiausios paklaidos gaunamos naudojant 3 paslėptus sluoksnius, o optimaliausias neuronų kiekis sluoksnyje turėtų būti apie 10. Neuronai yra sujungti su visais kito lygio neuronais, kintančiu sinapsiniu svoriu. Modelio apmokymo procese yra derinami sinapsiniai neuroninių ryšių svoriai, kol gaunamas norimas išėjimas. (5) lygtyje aprašoma išėjimo signalo apskaičiavimo formulė [45].

$$y = T(\sum W_i a_i + b); \quad (5)$$

čia  $i$  – atstoja įėjimo numerį;

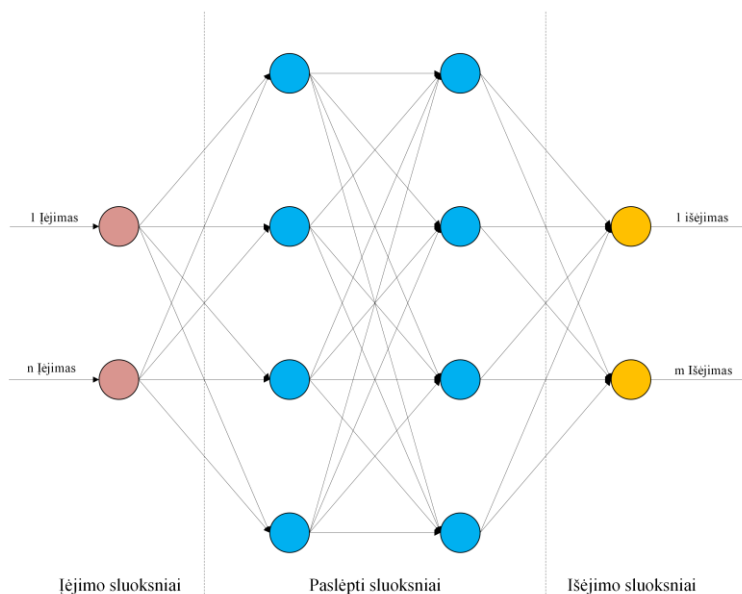
$W$  – sąsajos svertinis koeficientas;

$T$  – perdavimo funkcija;

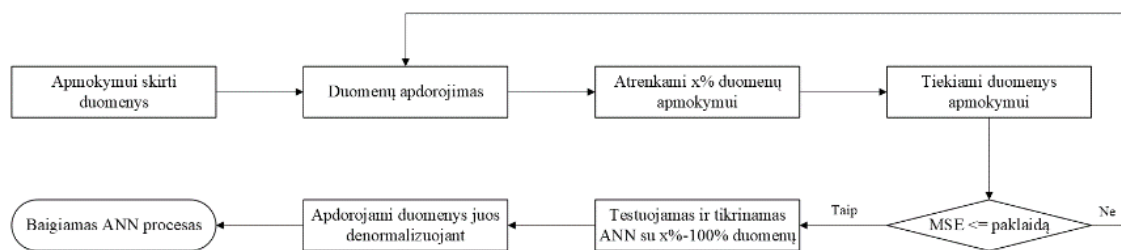
$b$  – sąryšio vertė (angl. *Bias Value*);

$a$  – įėjimo duomu;

$y$  – išėjimo signalas.



13 pav. Dirbtinio neuroninio tinklo diagrama [45]



14 pav. Dirbtinio neuroninio tinklo apmokymo procedūra [45]

Neuroninio tinklo formavimas pradedamas nuo reikalingų duomenų surinkimo ir apdorojimo. Apdorojami duomenys gali būti kaip: aplinkos temperatūra, vidaus temperatūra, oro srautas, oro drėgmė ir kt. Tuomet remiantis gautais rezultatais yra apmokomas neuroninis modelis. Pagal šiuos duomenis modelis stengsis nuspėti reikiamus išėjimo rezultatus, atsižvelgiant į įėjimo duomenis. Paruošus modelį, šis gali būti panaudotas esamos ŠVOK sistemos optimizavimui. Nepaisant to šis modelis geba valdyti sistemą realiu laiku, pakeisti valdymo signalus remiantis besikeičiančia duomenų baze. Laikui bėgant ir didėjant duomenų bazei, modelis gali gebėti geriau ir kokybiškiau nuspėti galimus pokyčius ateityje, parinkti geresnius valdymo signalus [31, 46].

Nors PID reguliatorius yra dažniausiai sutinkamas valdant ŠVOK sistemas, jo vienas iš pagrindinių trūkumų yra darbas su atsirandančiais sistemos netiesiškumais. Šiai problemai spręsti buvo pasiūlytas dirbtinių neuroninių tinklų modelis. Atliktame bandyme pastebėta, kad valdomo objekto netiesiškumai iššaukia nepageidaujamus svyravimus sistemoje, taip pat, kad PID reguliatorius yra smarkiai priklausomas nuo proporcinės dedamosios. Tačiau dirbtinis neuroninis tinklas reagavo greitai į atsirandančius pokyčius ir sistemą suvaldė, su minimaliu perviršiu (angl. *Overshoot*) [45].

[31] aptariamuose tyrimų rezultatuose nustatyta, kad pritaikius neuroninių tinklų valdymo modelius ŠVOK sistemose buvo pasiektas ir užtikrintas užbrėžtas komforto lygis patalpose. Taip pat buvo pasiektas ir optimizuotas energijos suvartojimas ~11–25 % [31, 45, 46]. Naudojant neuroninius tinklus, šildymo sistemos šiluminė galia buvo pritaikyta pagal atsiradusį poreikį [45, 47].

## **1.5. Kompresoriaus greičio valdymo privalumai**

Naudojant kintamo greičio valdymo algoritmus kompresoriuje, pastebimas efektyvesnis energijos suvartojimas – sumažėję sąnaudų kaštai. Taip atsitinka todėl, nes esant mažesnei apkrovai sistemoje, kompresorius dirba mažesnėmis apsukomis arba visai nedirba, o tai tiesiogiai veikia elektros energijos suvartojimą. Pavyzdžiui gamykloje, kurioje apkrova svyruoja visą dieną, kompresoriui prisitaikant prie apkrovos sumažinami kaštai [32]. Tyrimai parodė, kad kompresoriai valdomais greičiais, padeda sutaupyti nuo 10 % iki 30 % energijos [7, 37]. Kadangi šiuo metu yra kreipiamas itin didelis dėmesys į atsinaujinančius energijos šaltinius, kuriant ekonomiškesnius ir mažiau energijos reikalaujančius kompresorius, palengvinamas tinklo apkrovimas [37].

Greičio kontrolė ŠVOK sistemose leidžia palaikyti užsibrėžtą nuostatą kintant aplinkos sąlygoms [4]. Dėl šios priežasties yra pastebimas padidėjęs temperatūrinis komforto lygis patalpose. Negana to, sumažėję svyravimai yra labai naudingi maisto, gėrimų ar farmacijos pramonėje, kur yra ypač svarbu užtikrinti stabilias aplinkos sąlygas [32].

Sistemai veikiant mažesnėmis apsukomis, kai poreikis yra mažas, yra sumažinamas apkrovimas šaldymo sistemą sudarantiems komponentams. Tai reiškia gaunamą mažesnę mechaninį susidėvėjimą, kuris yra tiesiogiai susijęs su produkto gyvavimo trukme. Papildoma galimybė naudoti lengvą paleidimą ir stabdymą leidžia pašalinti perteklines apkrovas elektros tinkle ir didelius momentinius mechaninius apkrovimus, apsaugant kompresorių ir likusią sistemos įrangą. Tai leidžia įmonėms sutaupyti aptarnavimo ir remonto kaštus [32].

Valdomoje sistemoje galima pasiekti mažesnę triukšmo lygį, kurį sukelia dirbdamas kompresorius. Tradiciškai fiksuoto greičio kompresoriai sukelia didesnę triukšmą pastoviai veikdami pilnu pajėgumu. Valdant kompresoriaus greitį, šis yra sumažinamas esant mažam šaldymo poreikiui, kaip tiesioginis šalutinis efektas gaunamas sumažėjęs sklaidžiamas garsas. Ši savybė yra išnaudojama tokiose srityse, kaip buitinė technika, ar patalpose kaip ofisai ir ligoninės [32].

ŠVOK sistemose, kuriose valdomi kompresorių greičiai, yra pagerinamas bendras sistemos lankstumas ir pritaikomumas prie skirtingų apkrovų. Tai yra ypač naudinga sistemose, kuriose šaldymo poreikis kinta laike, pavyzdžiui pastate diena reikalingas didesnis šaldymas, nei naktį. Keičiant kompresoriaus greitį realiu laiku (momentu), sistema turi galimybę greitai reaguoti į gautą apkrovą, taip suteikiant optimalų rezultatą be perteklinio peršaldymo arba per mažo aušimo.

### **1.5.1. Apibendrinimas**

Šaldymo kompresoriaus greičio valdymas turi nemažai privalumų: žymūs energijos sutaupymas, kurių išvengiama lyginant su fiksuoto greičio kompresoriais. Taip pat šis valdymo metodas leidžia užtikrinti optimalų aušinimo našumą, palaikant aplinkos temperatūrą stabilia net ir besikeičiant aplinkos sąlygoms. Kadangi kompresoriai ne visuomet dirba pilnu greičiu ir galima panaudoti švelnius paleidimo ir stabdymo algoritmus, yra smarkiai sumažinamas mechaninis aparatūros apkrovimas, ko pasėkoje prailgėja įrangos gyvavimo trukmė ir sumažėja aptarnavimo kaštai.

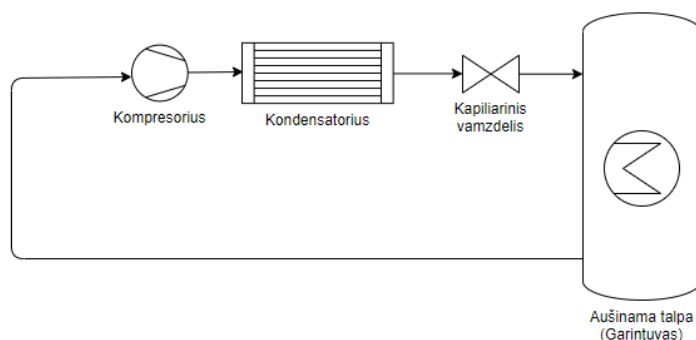
Ateityje numatomas aušinimo kompresorių greičio valdymo pažanga dėl plintančių modernaus valdymo technologijų, kaip mašinų apmokymas.

## 2. Metodologinė dalis

### 2.1. Tiriamasis objektas

Magistrinio projekto metu tiriama esama bioreaktoriaus aušinimo sistema [12]. Ji sudaryta iš dviejų aušinimo ratų: mažojo, skirto palaikyti skysčio judėjimą sistemoje, ir didžiojo, skirto aušinti bioreaktoriui. Mažajame šaldymo rate kompresoriaus varinėjamas šaldymo agentas aušina talpoje laikomą vandenį. Tuomet, esant poreikiui, šis vanduo keliauja didžiuoju aušinimo ratu, kur yra panaudojamas aušinti bioreaktoriui ir gražinamas atgal į talpą. Taigi, mažojo šaldymo ciklo tikslas yra palaikyti tinkamą aušinimo vandens temperatūrą. Tyrimo metu bus bandoma nustatyti ar keičiant kompresoriaus greitį mažojo aušinimo ciklo sistemoje galima pagerinti kompresoriaus efektyvumo koeficientą, talpos atvėsinimui. Tyrimui atlikti esama šaldymo sistema yra supaprastinama iki šaldymo kontūro, kurį sudaro (15 pav.): stūmoklinis šaldymo kompresorius, kondensatorius, kapiliarinis vamzdelis ir aušinamos talpos viduje esantis garintuvas.

Kaip analizuota teorinėje dalyje, šaldymo procesas yra cikliškas ir prasideda kompresoriui suslegiant freoną. Suslėgtos, karštos, aukšto slėgio dujos keliauja vamzdeliu į kondensatorių, kur pravėsusios tampa aukšto slėgio karštu skysčiu. Šios sistemos atveju kondensatorius yra aušinamas patalpos oru. Iš kondensatoriaus ištekėjęs šaldymo agentas kapiliariniu vamzdeliu keliauja iki išsiplėtimo taško. Pasiekus jį, freono slėgis smarkiai krenta žemyn taip suformuojant žemo slėgio šaltą skysčio ir garų mišinį. Skystis tekėdamas talpoje išvedžiotu vamzdeliu surenka šilumą, taip freonas dar kartą pakeičia būseną - iš skystos į dujinę. Šiuo atveju sistemoje esanti vandens talpa veikia kaip kondensatorius. Iš talpos išėję žemo slėgio, vėsūs freono garai vėl yra slegiami kompresoriumi.



15 pav. Tiriamos šaldymo sistemos dalies struktūrinė schema

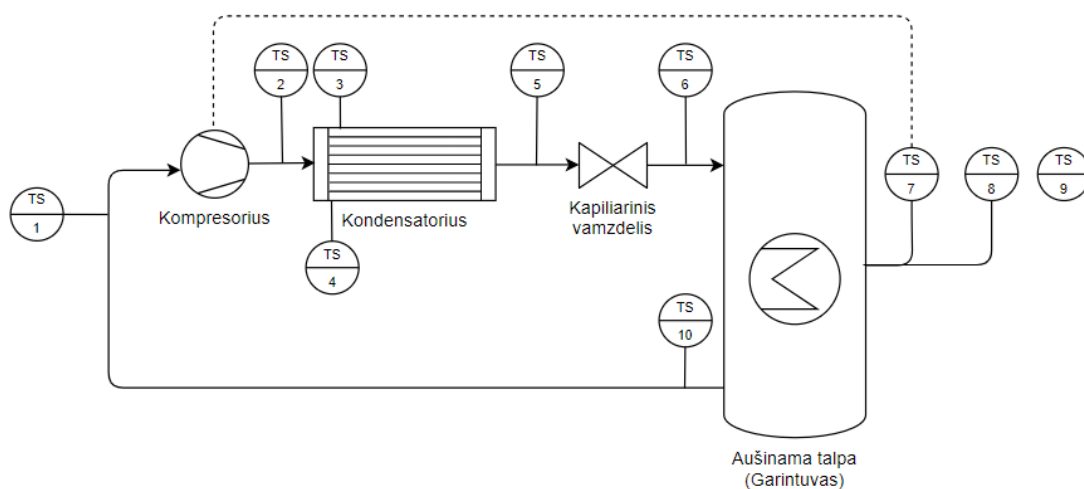
Tyrimai atliekami turint pastovią šaldymo apkrovą – ~30 kg vandens, esančio talpoje. Vandens aušinimui naudojamas R314a freonas. Šis yra varinėjamas sistemoje naudojant 12-24 VDC stūmoklinį kompresorių [48] su galimybe valdyti jo apsisukimų greitį.

Tyrimai atliekami dviem etapais, kuriais nustatomas sistemos efektyvumas:

1. Nustatoma kaip šaldymo sistema reaguoja į skirtingus greičio nustatymus,
2. Patikrinama kaip sistema veikia pritaikius suformuotą valdymo algoritmą.

Visiems tyrimams atlikti bus sekamos temperatūros skirtinguose aušinimo etapuose. Duomenims surinkti naudojami temperatūros davikliai, kuriais matuojama kiekvieno šaldymo ciklo etapo temperatūra (16 pav.). Vandens talpos temperatūrai nustatyti turėtų būti naudojami 2 termometrai, dėl skirtingo temperatūrų pasiskirstymo tūryje. Kadangi sistemoje numatyta temperatūros matavimo

vieta yra viduryje, priimama, kad matuojama temperatūra yra vidutinė. Kiti matavimams sistemoje skirti termometrai apibūdinami 5 lentelėje.



**16 pav.** Šaldymo sistemos automatizavimo schema

**5 lentelė.** Automatizacijos schemoje pavaizduotų informacijos rinkimo įrenginių aprašymas

Eil. Nr.	Funkcinis žymėjimas	Matuojami dydžiai	Funkcija
1	TS1	°C	Įsiurbiamo freono temperatūra
2	TS2	°C	Suslėgto freono temperatūra Temperatūra prieš kondensatorių
3	TS3	°C	Kondensatoriaus aušinimui tiekiamo oro temperatūra
4	TS4	°C	Kondensatoriaus išmetamo oro temperatūra
5	TS5	°C	Freono temperatūra po kondensatoriaus Freono temperatūra prieš kapiliarinį vamzdelį
6	TS6	°C	Temperatūra po freono išsiplėtimo Į talpą patenkančio freono temperatūra
7	TS7	°C	Temperatūra talpos centriniame taške Kompresoriaus valdiklio temperatūros daviklis
8	TS8	°C	Aušinamos talpos temperatūra centriniame taške
9	TS9	°C	Aplinkos temperatūra
10	TS10	°C	Iš talpos išeinančio freono temperatūra



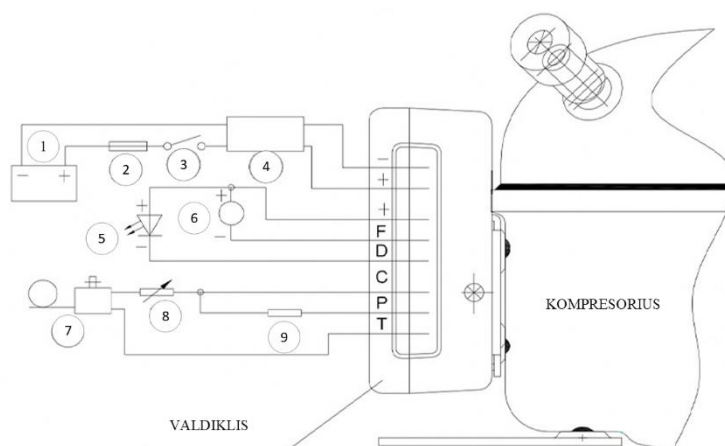
### 2.1.1. Aušinimo kompresoriaus valdymas

Tiriamąjį objekto šaldymo kompresorius yra valdomas gamykliniu valdikliu. Gamintojai yra numatę galimybę keisti, ar pasirinkti kitą kompresoriaus greitį keičiant nustatančios varžos, prijungtos tarp C ir T kontaktų, dydį (17 pav. 8 poz.). Šios varžos dydis gali būti nuo 0  $\Omega$  iki 1500  $\Omega$ , atitinkamai nuo mažiausio iki didžiausio greičio (žr. 8 lentelė.).

Kompresoriaus darbui ir reakcijai į varžos keitimą patikrinti buvo naudotos 6 skirtingų dydžių, greitį nustatančios, varžos.

6 lentelė. Varžyno parametrai ir jo išėjimo vertės

Pažymėjimas	Varžos nominalas, $\Omega$	Tikra varža, $\Omega$
R0	0	1,5
R1	200	201,5
R2	400	398,6
R3	900	977
R4	1200	1175
R5	1500	1467



17 pav. Kompresoriaus valdiklio sujungimų diagrama [48]

### 2.2. Efektyvumo koeficiento skaičiavimas

COP, kitaip efektyvumo koeficientas (angl. *Coefficient of Performance*), yra santykis tarp reikiamo šildymo, ar šaldymo, ir suvartotos energijos kiekio tam tikslui pasiekti. Aukštesnis koeficientas parodo, kad suvartojama mažiau energijos nei gaunamas šildymo arba šaldymo energijos kiekis. Šis koeficientas šilumos siurbliuose įprastai yra didesnis už 1. Taip yra todėl, nes šiluma perkeliama ne tik tiesioginių energijos sąnaudų kaina, bet ir aplinkos pagalba (kitu atveju COP būtų 1) [49].

$$COP = \frac{|Q|}{E}; \quad (6)$$

čia  $Q$  – naudingas šilumos kiekis, tiekiamas ar pašalinamas iš sistemos, W;

$E$  – suvartotos energijos kiekis panaudotas sistemai, W.

Matuojant sistemos efektyvumą bandoma atsižvelgti į efektyvumo koeficiento kitimą laike, taip pat prie skirtingų vandens talpoje temperatūrų. Efektyvumo koeficientą tiriamajam objektui apskaičiuoti galima remiantis dviem metodais: kompresoriaus parametrais arba talpos parametrais. Šie metodai aptariami sekančiuose skyreliuose.

### 2.2.1. COP apskaičiavimas remiantis kompresoriaus parametrais

Efektyvumo koeficientui apskaičiuoti reikia nustatyti šilumos kiekį perneštą iš sistemos. Tai galima padaryti remiantis freono masės srautu, pratekančiu vamzdeliu talpoje, bei temperatūrų skirtumu tarp įtekėjimo ir ištekėjimo taškų (7).

$$Q = c \cdot \dot{m} \cdot \Delta T = c \cdot \dot{m} \cdot (T_2 - T_1); \quad (7)$$

čia  $c$  – freono (R314a) savitoji šiluminė talpa,  $\frac{J}{kg \cdot K}$ ;

$\dot{m}$  – freono (R314a) masės srautas,  $\frac{kg}{s}$ ;

$T_1$  – freono (R314a) temperatūra talpos įėjime, °K;

$T_2$  – freono (R314a) temperatūra talpos išėjime, °K.

Masės srautas nėra žinomas, nes esamoje aušinimo sistemoje nėra srauto matavimo įrenginių. Tačiau šį dydį galima išskaičiuoti turint kompresoriaus fizinius parametrus (7 lentelė.) ir apsisukimų greitį (8 lentelė.). Žinant pastaruosius parametrus masės srautas apskaičiuojamas naudojant (8) lygtį.

$$\dot{m} = \frac{V_s \cdot \rho \cdot N}{\eta}; \quad (8)$$

čia  $\dot{m}$  – freono masės srautas,  $\frac{kg}{s}$ ;

$V_s$  – kompresoriaus prastumiamas tūris,  $m^3$ ;

$\rho$  – freono tankis,  $\frac{kg}{m^3}$ ;

$N$  – kompresoriaus apsisukimų greitis, RPS;

$\eta$  – kompresoriaus efektyvumo koeficientas, dažniausiai pasitaikantis stūmokliniams kompresoriams 80%.

Kompresoriaus vieno apsisukimo metu prastumiamas tūris yra sužinomas iš gamintojo pateikiamos įrenginio techninės specifikacijos (žr. 7 lentelė.). Iš jos gaunama, kad kompresoriaus prastumiamas tūris yra  $2 \text{ cm}^3$ , arba  $2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .

**7 lentelė.** Gamintojo pateikiama tiriamo kompresoriaus techninė specifikacija [48]

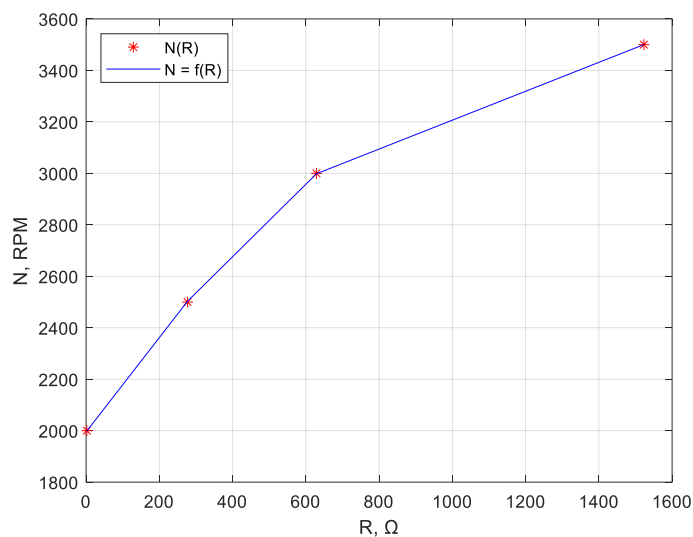
<b>Kompresoriaus modelis</b>	ACV20DC			
<b>Tūris (cm<sup>3</sup>)</b>	2			
<b>Paskirtis</b>	LBP			
<b>Apsisukimų dažnis (RPM)</b>	2000	2500	3000	3500
<b>Šiluminė talpa (W)</b>	33	39	45	50
<b>Maitinimo galia (W)</b>	33	39	45	50
<b>Darbinė srovė (A)</b>	1,25/2,5 <sup>1</sup>	1,48/3,0 <sup>1</sup>	1,70/3,4 <sup>1</sup>	1,92/3,8 <sup>1</sup>
<b>C.O.P (W/W)</b>	1,1			
<b>Triukšmo lygis (dB(A))</b>	38			40
<b>Įsibėgėjimo pagreitis(m/s<sup>2</sup>)</b>	≤0,65			
<b>Darbinė įtampa(V DC)</b>	10,9V~17V (12V) 22,7V~31,5V (24V)			
<b>Aušinimas</b>	Statinis arba aušinimo fenas			
<b>Tepimas</b>	Poliesteris			
<b>Tepalo tūris (ml)</b>	150±5			
<b>Svoris (kg)</b>	4,3			
<b>Valdiklio svoris (kg)</b>	0,4			
<b>Variklio tipas</b>	BLDCM			
<b>Šaldymo agentas</b>	R134a			
<b>Išsiplėtimo tipas</b>	Kapiliarinis			

Kompresoriaus greitis yra sužinomas pagal dėsnį, išvestą remiantis gamintojo pateikiamą greičio ir valdymo varžos priklausomybę (9), arba pagal reikalingos srovės ir greičio priklausomybę (10).

**8 lentelė.** Gamintojo pateikiama varžos ir greičio priklausomybė [48]

<b>Varža, Ω</b>	<b>Greitis, RPM</b>
0	2000
277	2500
629	3000
1523	3500

<sup>1</sup> Jei maitinimo įtampa yra 12 V.

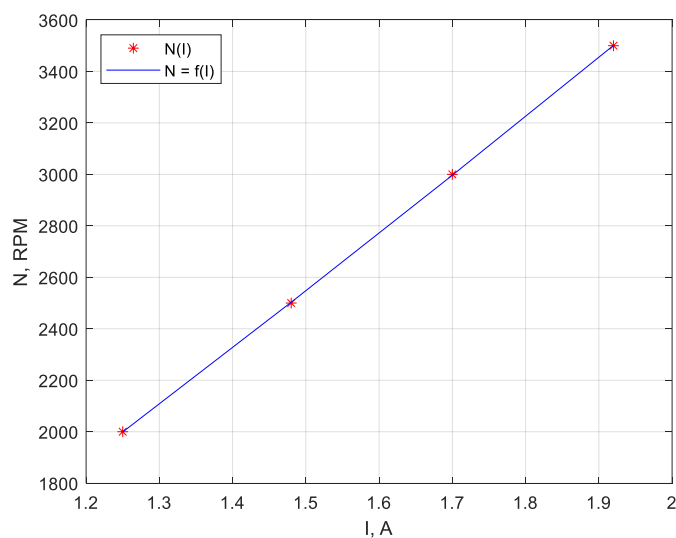


**18 pav.** Greičio priklausomybė nuo parinktos, greitį valdančios, varžos

$$N = f(R) = -0.001 R^2 + 2.023 R + 1994.654 ; \quad (9)$$

čia  $N$  – kompresoriaus apsisukimų greitis, RPM;

$R$  – kompresoriaus greitį nustatanti varža,  $\Omega$ .



**19 pav.** Kompresoriaus greičio priklausomybė nuo kompresoriumi tekančios srovės

$$N = f(I) = 112.703 I^2 + 1884.731 I - 533.046 ; \quad (10)$$

čia  $N$  – kompresoriaus apsisukimų greitis, RPM;

$I$  – kompresoriaus maitinimo srovė, A.

Kompresoriaus greičio apskaičiavimas pagal maitinimo srovę yra kokybiškesnis, nes yra žinoma aiški priklausomybė tarp suvartojamos elektros srovės ir greičio. Algoritmas skirtas nustatyti kompresoriaus greitį pagal valdančią varžą yra apytikslis nes tai yra tik apytiksliai duomenys.

Taigi, suradus visas trūkstančias dedamąsias galima įvertinti kompresoriaus efektyvumą, remiantis kompresoriaus parametrais. Kadangi skaičiavimai atliekami pagal naudojamo šaldymo agento duomenis, atitinkami parametrai parenkami iš R134a freono specifikacijos (9 lentelė.).

$$COP = \frac{c \cdot \dot{m} \cdot \Delta T}{E} = \frac{c \cdot V_s \cdot \rho \cdot N \cdot (T_2 - T_1)}{E \cdot \eta}; \quad (11)$$

čia E – momentinė suvartota elektros energija, Ws;

c – freono savitoji šiluminė talpa,  $\frac{J}{kg \cdot K}$ ;

$\dot{m}$  – freono masės srautas,  $\frac{kg}{s}$ ;

T<sub>1</sub> – freono temperatūra talpos įėjime, °K;

T<sub>2</sub> – freono temperatūra talpos išėjime, °K;

$\dot{m}$  – freono masės srautas,  $\frac{kg}{s}$ ;

V<sub>s</sub> – kompresoriaus prastumiamas tūris, m<sup>3</sup>;

ρ – freono tankis,  $\frac{kg}{m^3}$ ;

N – kompresoriaus apsisukimų greitis, RPS;

η – kompresoriaus efektyvumo koeficientas.

**9 lentelė.** Naudojamo R134a freono specifikacijos [50]

Pavadinimas	Matavimo vienetai	R-134a
Molekulinė masė	g/mol	102,03
Virimo taškas (1,013 bar slėgyje)	°C	-26,06
Užšalimo taškas	°C	-103
Kritinė temperatūra	°C	101,08
Kritinis Slėgis	bar abs	40,60
Kritinis tankis	kg/m <sup>3</sup>	515,3
Skysčio tankis (25°C)	kg/m <sup>3</sup>	1205,9
Skysčio tankis (0°C)	kg/m <sup>3</sup>	1,293
Prisotintų garų tankis virimo taške	kg/m <sup>3</sup>	5,28
Garų slėgis (25°C)	bar abs	6,657
Garų slėgis (0°C)	Bar abs	2,92
Garavimo šiluma virimo temperatūroje	kJ/Kg	217,2

Savitoji skysčio šiluma 25 ° C (1,013 bar)	kJ/Kg <sup>o</sup> K	1,44
Savitoji garų šiluma 25°C (1,013 bar)	kJ/Kg <sup>o</sup> K	0,85

### 2.2.2. COP apskaičiavimas remiantis aušinamos talpos parametrais

Norint apskaičiuoti aušinimo efektyvumo koeficientą, galima panaudoti panašias formules, tačiau atsižvelgiant į talpos parametrų kitimą laike. Norint patikslinti skaičiavimus ir sumažinti svyravus, skaičiavimai atliekami naudojant 10 minučių intervalų duomenis, kas 1s – 600s duomenų masyvas. Šiame laiko intervale randamas vandens talpos temperatūrų pokytis nuo pirmo matavimo taško iki paskutinio, taip pat kompresoriaus suvartota energija šaldymui atlikti. COP skaičiavimui taip pat reikalinga rasti šilumos kiekį, pašalintą iš sistemos, kuris apibendrinamas vandens savitosios šilumos, masės ir temperatūrų skirtumo sandauga. Tuomet gautas rezultatas padalinamas iš suvartotos elektros energijos (12). Vandens parametrai naudojami skaičiavimams yra pateikiami 10 lentelėje.

$$COP = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T}{E} = \frac{c \cdot m \cdot (T_n - T_1)}{\sum_{t_1}^{t_n} P \cdot dt}, \quad (12)$$

čia  $c$  – vandens savitoji šiluminė talpa,  $\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$ ;

$m$  – vandens masė, kg;

$T_1, T_n$  – vandens temperatūra, atitinkamai pirmu ir paskutiniu matavimo metu,  $^\circ K$ ;

$E$  – elektros energija, Ws;

$P$  – elektrinė galia, W;

10 lentelė. Vandens talpoje parametrai

Vandens talpoje tūris	m <sup>3</sup>	0,03
Vandens talpoje masė	kg	29,94
Tankis	kg/m <sup>3</sup>	998
Savitoji šiluma	J/kg <sup>o</sup> K	4184

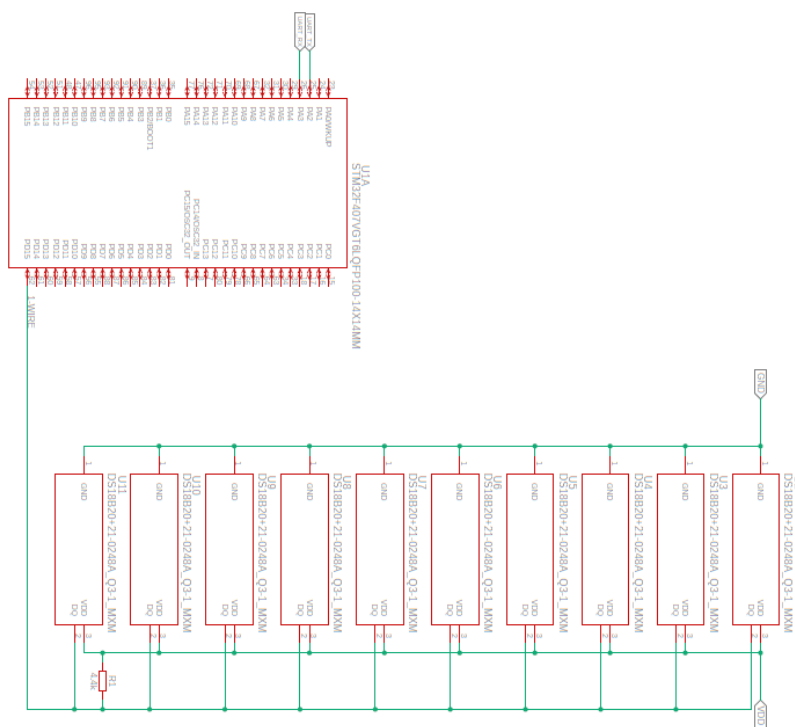
### 2.2.3. Apibendrinimas

Metodui skaičiuoti COP pasitelkiant kompresoriaus duomenis išvelgiama nemažai trūkumų. Šiuo metodu būtų galima apskaičiuoti efektyvumą, sumažinus neapibrėžtų kintamųjų kiekį. Kadangi šiuo metu nėra tiksliai žinomas kompresoriaus greitis, pratekantis freono srautas, šio metodo nesirenkama naudoti. Tyrimo metu COP apskaičiavimui bus naudojamas talpos parametrų metodas, kuris yra patikimesnis, taip pat visi kintamieji yra pamatuojami ir žinomi.

## 2.3. Temperatūros nuskaitymas ir registravimas

Duomenų surinkimui sukuriama programos kodas STM32F407 mikrovaldikliui, naudojant „STM32CubeIDE“ [51] programinį paketą. Programa surenkama temperatūros daviklių (žr. 16 pav.) informacija. Tiriamajame objekte naudojami DS18B20 temperatūros davikliai [52]. Duomenų nuskaitymas iš šių daviklių vyksta 1-Wire sąsaja (angl. *One-Wire*). DS18B20 davikliai yra prijungiami prie „STM32F407 DISCOVERY“ [53] programavimo stendo 5V, GND ir PD15 išvadų (žr. 20 pav. ). PD15 prievadas yra sukonfigūruotas skaityti duomenis 1-Wire protokolu. Pateiktame

20 pav. galima pastebėti, kad yra naudojama 4,4 kΩ varža, prijungta tarp 1-Wire ir VDD kanalų. Ji skirta palaikyti grandinę aukštame lygyje, kol nevyksta duomenų apsikeitimas. Atitinkamai diagramoje VDD atstoja 5VDC maitinimo įtampa.

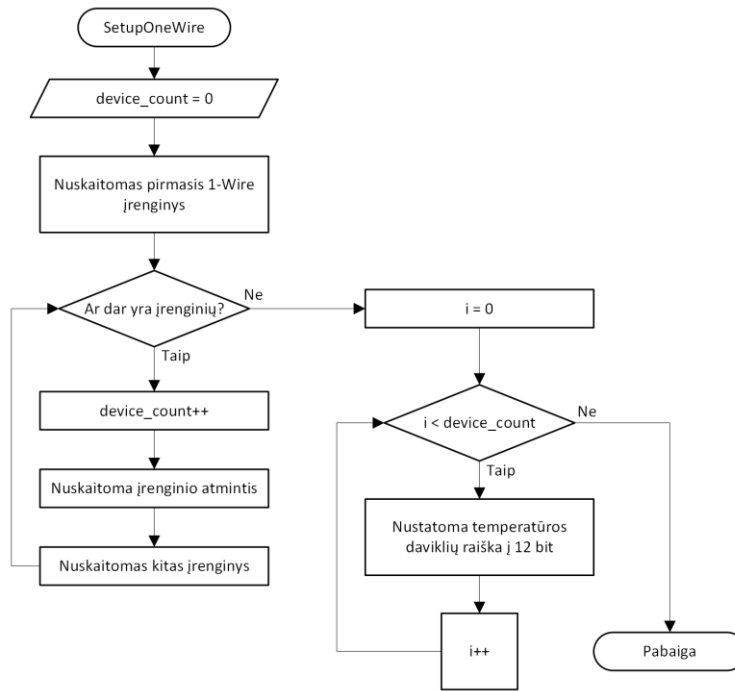


**20 pav.** Temperatūros daviklių (DS18B20) prijungimas prie „STM32F407 DISCOVERY“ plokštės

Sujungtų daviklių nuskaitymui suformuojamas algoritmas ir parašoma programa. Programos kode nuskaityti visi 1-Wire komunikacijos įrenginiai, prijungti prie PD15 gnybtų, naudojant 21 paveikslėlyje pateiktą programos kodo fragmentą. Pirmu programos paleidimu prijungiama po vieną temperatūros jutiklį vienu metu. Tai daroma todėl, kad nuskaityti prijungiamus įrenginius gaunamas jo adresas, tuo pačiu tai leidžia įsitikinti, kuris temperatūros daviklis yra prijungtas. Nuskaitytus įrenginius sudaroma adresų biblioteka (žr. 23 pav.)

```
void SetupOneWire() {
    device_count = 0;
    devices = TM_OneWire_First(&OneWire);
    while (devices) {
        device_count++;
        TM_OneWire_GetFullROM(&OneWire, device[device_count - 1]);
        devices = TM_OneWire_Next(&OneWire);
    }
    for (int i = 0; i < device_count; i++) {
        TM_DS18B20_SetResolution(&OneWire, device[i],
            TM_DS18B20_Resolution_12bits);
    }
}
```

**21 pav.** 1-Wire įrenginių nuskaitymo programos kodo fragmentas



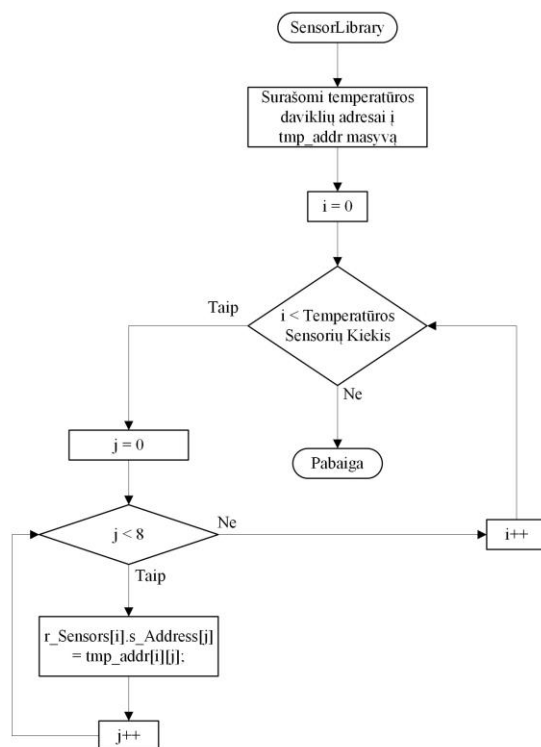
**22 pav.** 1-Wire įrenginių nuskaitymo programos algoritmas

```

void SensorLibrary(TempSensors *r_Sensors) {
    uint8_t tmp_addr[NUMBER_OF_TEMPERATURE_SENSORS][18] = {
        { 0x28, 0x0d, 0x25, 0x96, 0xf0, 0x01, 0x3c, 0xc2 }, // Kondensatoriaus oro tiekimo temperatūra
        { 0x28, 0x45, 0xD9, 0x96, 0xF0, 0x01, 0x3C, 0x91 }, // Kondensatoriaus išmetamo oro temperatūra
        { 0x28, 0xD3, 0x20, 0x96, 0xF0, 0x01, 0x3C, 0xC7 }, // Kompresoriaus įsiurbimo temperatūra
        { 0x28, 0xB3, 0x56, 0x96, 0xF0, 0x01, 0x3C, 0xF5 }, // Freono temperatūra kompresoriaus išėjime
        { 0x28, 0xc9, 0x1e, 0x96, 0xf0, 0x01, 0x3c, 0x75 }, // Talpos-Garintuvo temperatūra įėjime
        { 0x28, 0x7f, 0x0d, 0x96, 0xf0, 0x01, 0x3c, 0xf2 }, // Talpos-Garintuvo temperatūra išėjime
        { 0x28, 0xb1, 0x52, 0x96, 0xf0, 0x01, 0x3c, 0x84 }, // Kapiliarinio vamzdelio temperatūra
        { 0x28, 0xf6, 0x67, 0x94, 0x97, 0x10, 0x03, 0x2D }, // Vandens talpos temperatūra centrinėje pozicijoje
        { 0x28, 0x14, 0x55, 0x96, 0xf0, 0x01, 0x3c, 0x62 } // Patalpos temperatūra
    };
    for (uint8_t i = 0; i < NUMBER_OF_TEMPERATURE_SENSORS; i++) {
        for (uint8_t j = 0; j < 8; j++) {
            r_Sensors[i].s_Address[j] = tmp_addr[i][j];
        }
    }
}
  
```

**23 pav.** Temperatūros jutiklių bibliotekos suformavimo programos kodo fragmentas





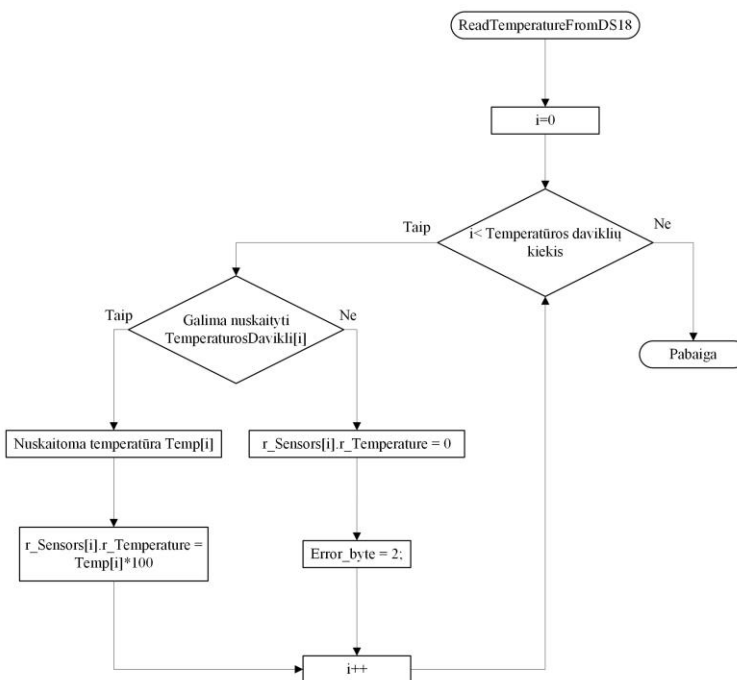
**24 pav.** Temperatūros daviklių adresų bibliotekos sudarymo algoritmas

Sudarius temperatūros adresų biblioteką (23 pav.), visi temperatūros jutikliai yra sujungiami į bendrą grandinę ir atitinkamai nuskaitoma temperatūra kiekviename temperatūros daviklyje (25 pav.). Ši temperatūra yra registruojama atmintyje tokia tvarka, kaip aprašyta bibliotekoje. Gauta temperatūra yra padauginama iš 100 siekiant suformuoti sveiką skaičių ir išsaugoti po kablelio esančią vertę. Tai atliekama norint sumažinti perduodamų duomenų kiekį per pus.

```

void ReadTemperatureFromDS18(TempSensors *r_Sensors) {
    for (int i = 0; i < NUMBER_OF_TEMPERATURE_SENSORS; i++) {
        if (TM_DS18B20_Read(&OneWire, (uint8_t*) &r_Sensors[i].s_Address, &Temps[i])) {
            r_Sensors[i].r_Temperature = Temps[i] * 100;
        } else {
            r_Sensors[i].r_Temperature = 0;
            Error_byte = 2;
        }
    }
}
  
```

**25 pav.** Temperatūros nuskaitymo iš 1-Wire įrenginių programos kodo fragmentas



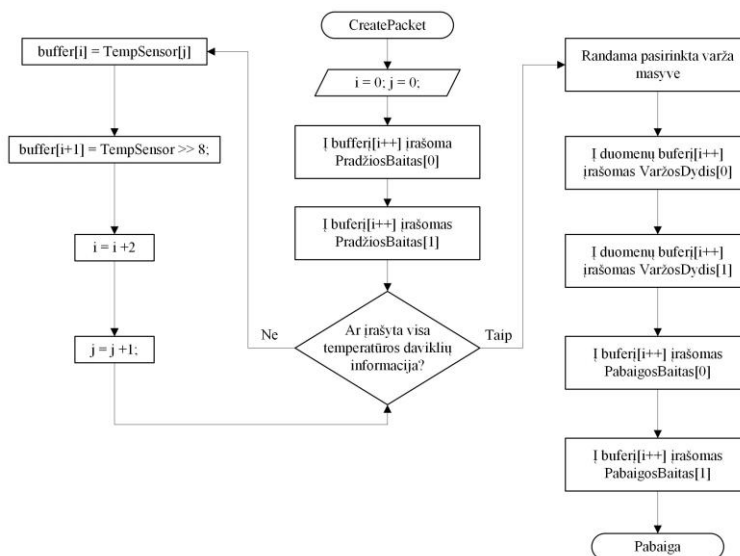
**26 pav.** Temperatūros nuskaitymo iš 1-Wire įrenginių algoritmas

Nuskaityta temperatūra yra patalpinama duomenų buferyje, 1 baido ilgio masyvais (27 pav.). Šie duomenys UART protokolu yra perduodami į duomenis registruojantį kompiuterį. UART sąsaja realizuojama mikrovaldiklyje nustatant PA2 ir PA3 prievadus kaip UART\_TX ir UART\_RX atitinkamai (žr. 20 pav.) Duomenų siuntimas vykdomas kas 500 ms.

```

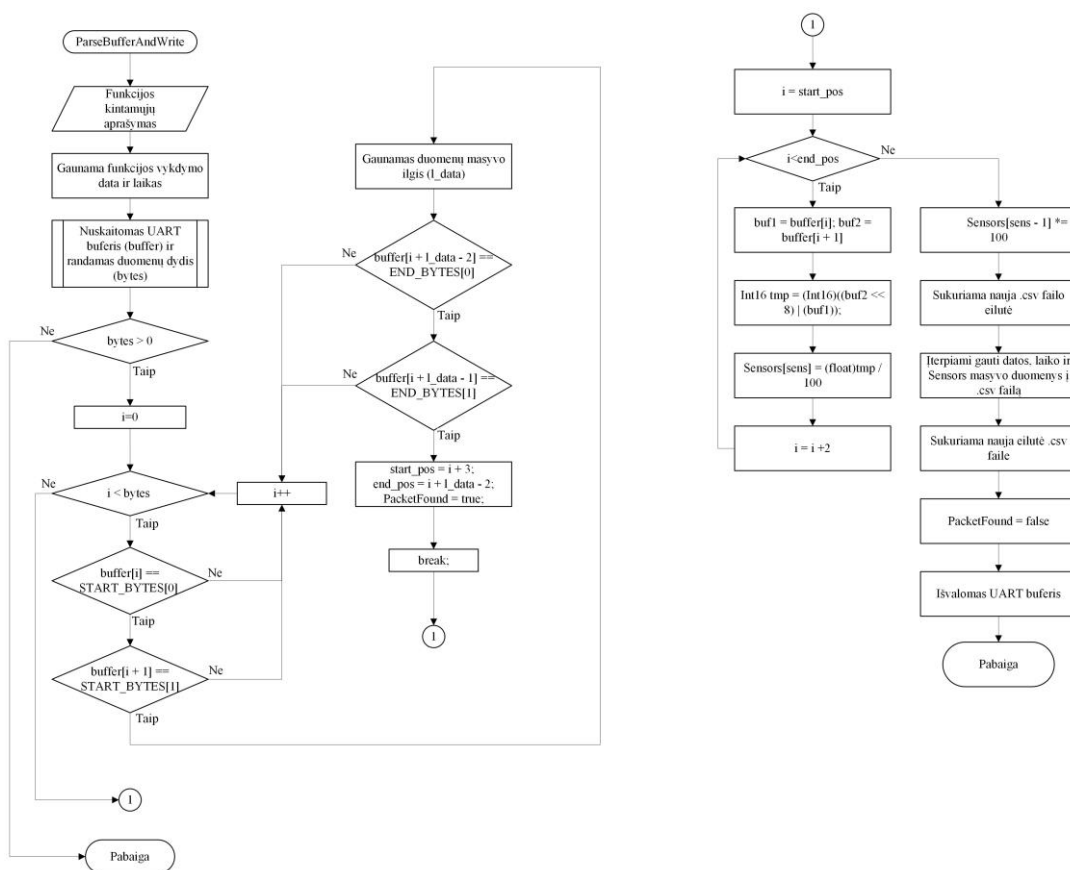
void CreatePacket(unsigned char *buffer, int lenght, TempSensors *r_Sensors) {
    int i = 0, j = 0;
    buffer[i++] = START_BYTES[0];
    buffer[i++] = START_BYTES[1];
    buffer[i++] = lenght;
    for ( /*.*; i < (2 + NUMBER_OF_TEMPERATURE_SENSORS * 2); i += 2, j++) {
        buffer[i] = (uint8_t) (r_Sensors[j].r_Temperature) & 0xFF;
        buffer[i + 1] = (uint8_t) (r_Sensors[j].r_Temperature >> 8) & 0xFF;
    }
    uint16_t id1 = (ResID >> 6) & 0x3f;
    uint16_t id2 = ResID & 0x3f;
    buffer[i++] = (uint8_t) (((uint16_t)Rp_var[id1][id2])) & 0xFF;
    buffer[i++] = (uint8_t) (((uint16_t)Rp_var[id1][id2]) >> 8) & 0xFF;
    buffer[i++] = END_BYTES[0];
    buffer[i++] = END_BYTES[1];
}
  
```

**27 pav.** Duomenų, perduodamų UART, buferio suformavimo programos kodo fragmentas



28 pav. Duomenų, perduodamų UART, buferio suformavimo algoritmas

Duomenų registravimui kompiuteryje sukuriama programos kodas C# programavimo kalba naudojant „Microsoft Visual Studio 2022“ [54] programinę įrangą. Gaunami duomenys iš STM mikrovaldiklio yra iššifruojami – duomenys išskaidyti vieno baido masyvais sudedami į sveiką skaičių 2 baitų dydžio. Tuomet apdoroti duomenys padalinami iš 100 ir paverčiami dešimtainiais skaičiais, kurie sudedami lentelės formatu ir saugomi .csv faile (2 Priedas). Duomenys į dokumentą įrašomi kas 1 s.

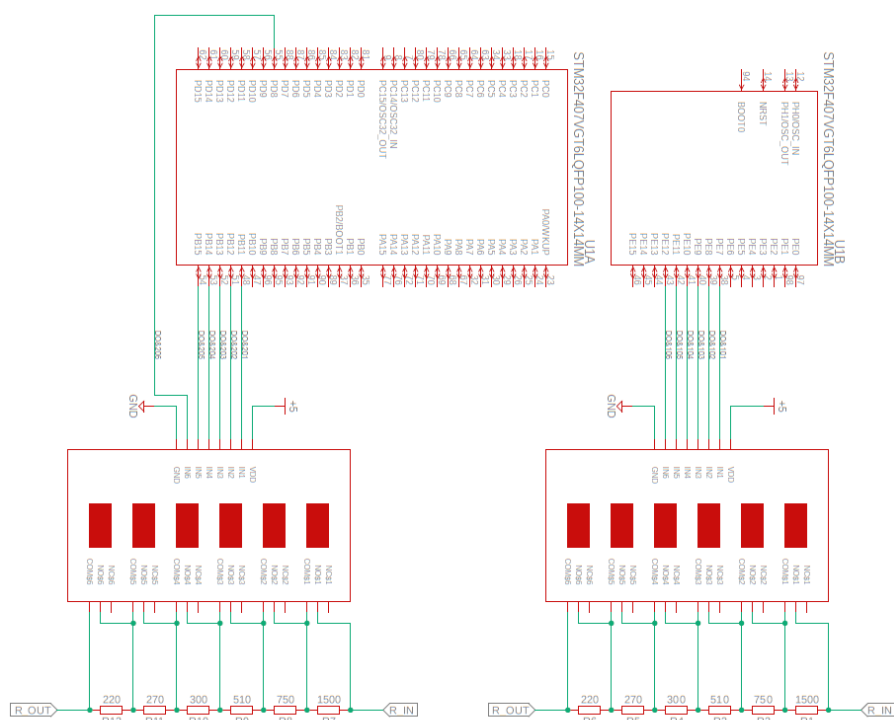


29 pav. Gaunamų duomenų UART kanalu nuskaitymo ir registravimo kompiuteryje algoritmas

## 2.4. Valdančiosios varžos keitimas pagal sukurtą dėsnį

Iš gautų tyrimų rezultatų kuriamas algoritmas, aprašytas sekančiame skyriuje, kuris keičia kompresoriaus greitį atitinkamai keičiant jį valdančią varžą. Šiam tikslui pasiekti suformuota varžų matrica, kuri valdoma 12 bitų seka. Matricai sukurti naudojami du nuosekliai sujungti varžynai po šešias varžas. Kiekviena varža yra prijungta prie relės, kuri pagal poreikį varžą prijungia arba atjungia nuo grandinės. Abu varžynai sujungti lygiagrečiai duoda reikiama varžą išėjime – galimi 4096 kombinacijų variantai.

Relių moduliai yra valdomi STM32F407 mikrovaldikliu. Kiekviena relė valdoma atskiru mikrovaldiklio kontaktu (žr. 30 pav. ) pakeičiant jo būseną aukšta, arba atvirkščiai. Schemoje pavaizduoti kanalų pavadinimai reprezentuoja varžyno numerį, 1 arba 2, ir varžos numerį, 01-06. DO pavadinime reiškia diskretinį mikrovaldiklio išėjimą.

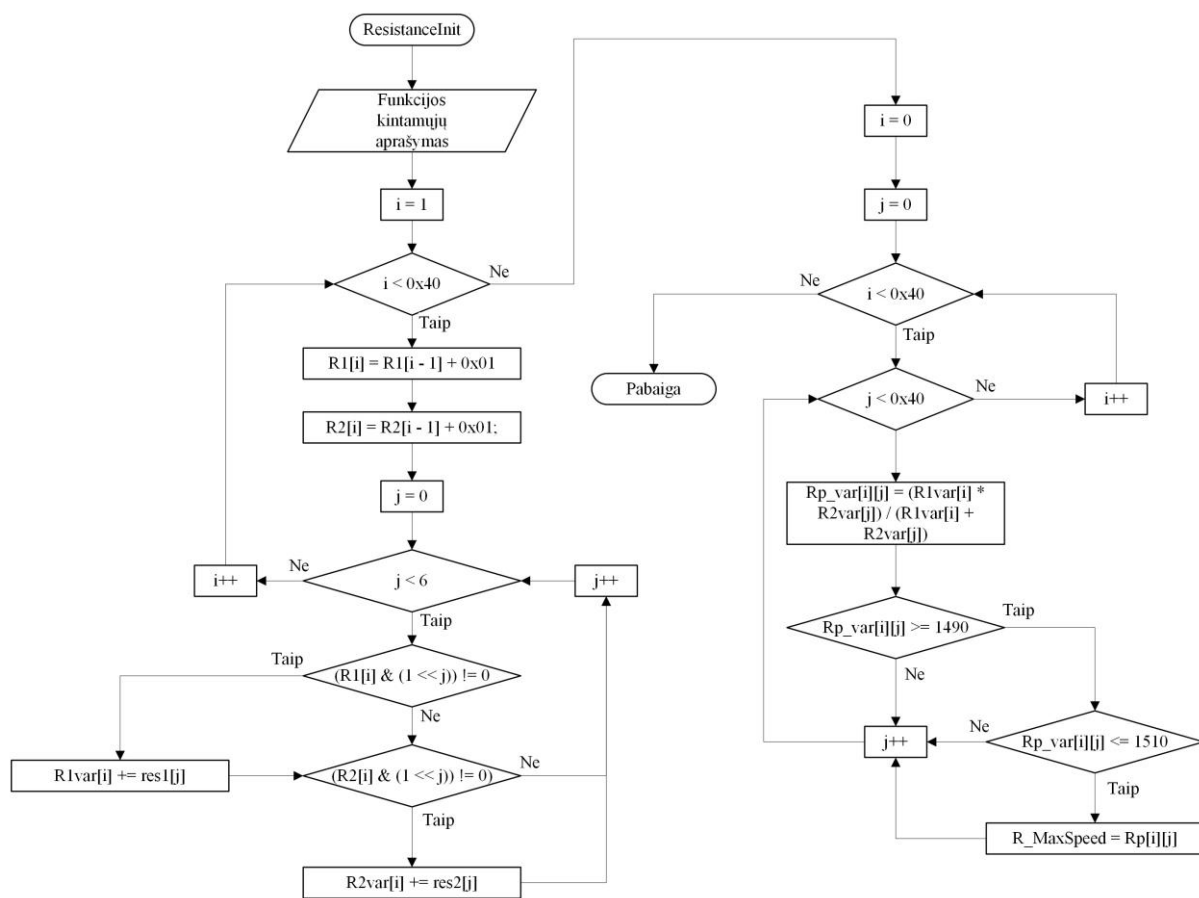


30 pav. Relių modulių prijungimas prie „STM32F407 DISCOVERY“ programavimo plokštės

Programos kode relės priskiriamos bitų vertėms – 0 bitas atitinka 1 varžyno relę ir t.t. Sukurtame programos kode, startavimo metu, yra randamos visos įmanomos varžų kombinacijos. Visu pirma, randamos visos įmanomos nuosekliai sujungtų varžų vertės, kurių gali būti  $2^6 = 64$ . Radus visas galimas nuosekliai sujungtų varžų vertes, ieškoma visų galimų lygiagrečių jungimų variacijų. Šis procesas pateiktas (3 Priedas). 11 lentelėje pateikti nominalių ir realių varžų dydžiai. Programa derinama pagal realaus dydžio varžų vertes.

11 lentelė. Varžų vertės naudotos sukurtoje varžų matricioje

Varžos pavadinimas schemoje	Nominalus varžos dydis, $\Omega$	Realus varžos dydis, $\Omega$
DO101	1500	1465
DO102	750	730
DO103	510	490
DO104	300	290
DO105	270	260
DO106	220	215
DO201	1500	1465
DO202	750	725
DO203	510	492
DO204	300	293
DO205	270	265
DO206	220	215



31 pav. Visų įmanomų varžų kombinacijų, galimų varžų matricioje, suradimo algoritmas

Radus norimą nustatyti varžą yra suformuojamas šešioliktainis kodas, kuris perduodamas 32 paveikslėlyje pavaizduotai programos funkcijai. Čia šešioliktainis kodas yra išskaidomas į dvi dalis – 1 varžynas ir 2 varžynas. Tai atliekama bitų perstūmimo operacijos pagalba. Tuomet patikrinama kurie bitai yra nenuliniai ir pakeičiama atitinkamų relių būseną. Kadangi kiekviena relė atitinka bitą, tikrinama ar atitinkantis relės numerį sekoje bitas šešioliktainiame numeryje, yra lygus 1.

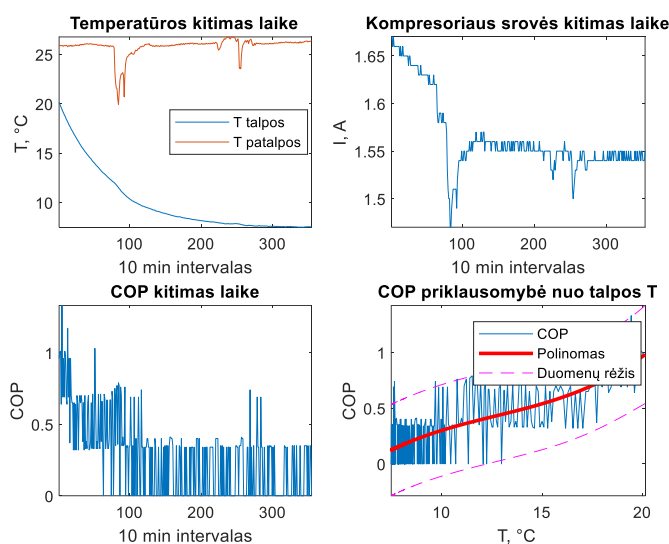
```
void SwitchRelay(uint16_t kodas){
    uint8_t rmod1 = (kodas >> 6) & 0x3F;
    uint8_t rmod2 = kodas & 0x3F;
    /* RELAY MODULE 1 */
    HAL_GPIO_WritePin(DO101_GPIO_Port, DO101_Pin, (rmod1 & 0x01));
    HAL_GPIO_WritePin(DO102_GPIO_Port, DO102_Pin, (rmod1 & 0x02));
    HAL_GPIO_WritePin(DO103_GPIO_Port, DO103_Pin, (rmod1 & 0x04));
    HAL_GPIO_WritePin(DO104_GPIO_Port, DO104_Pin, (rmod1 & 0x08));
    HAL_GPIO_WritePin(DO105_GPIO_Port, DO105_Pin, (rmod1 & 0x10));
    HAL_GPIO_WritePin(DO106_GPIO_Port, DO106_Pin, (rmod1 & 0x20));
    /* RELAY MODULE 2 */
    HAL_GPIO_WritePin(DO201_GPIO_Port, DO201_Pin, (rmod2 & 0x01));
    HAL_GPIO_WritePin(DO202_GPIO_Port, DO202_Pin, (rmod2 & 0x02));
    HAL_GPIO_WritePin(DO203_GPIO_Port, DO203_Pin, (rmod2 & 0x04));
    HAL_GPIO_WritePin(DO204_GPIO_Port, DO204_Pin, (rmod2 & 0x08));
    HAL_GPIO_WritePin(DO205_GPIO_Port, DO205_Pin, (rmod2 & 0x10));
    HAL_GPIO_WritePin(DO206_GPIO_Port, DO206_Pin, (rmod2 & 0x20));
}
```

**32 pav.** Relių aktyvavimo programos kodo fragmentas, pagal gaunamą šešioliktainį kodą

### 3. Tiriamoji dalis

#### 3.1. Tyrimas su pastoviu kompresoriaus greičiu

Siekiant nustatyti šaldymo kompresoriaus darbo efektyvumą prie skirtingų greičių, ataušinant talpą, atliekami šeši bandymai. Kiekvieno bandymo metu talpykla ataušinama kompresoriui parinkus stabilų greitį. Parinkti greičiai eksperimentams nurodyti 6 lentelėje. Šių tyrimų metu buvo matuojama kompresoriaus elektrinės sąnaudos, bei sistemos komponentų temperatūros, kaip aušinamos talpos temperatūra. Gauti duomenys apdoroti „Microsoft Excel“ [55] programa. Gauti sekundiniai duomenys sujungiami atitinkamais matavimo laikais, kurie taip pat buvo registruojami. Sujungti duomenys suskirstomi 10 minučių intervalais, kur randama suvartota galia matavimo periode, taip pat temperatūrų skirtumas. Turint šiuos duomenis apskaičiuojamas kompresoriaus efektyvumas pagal (12) lygtį. Be kompresoriaus efektyvumo iš gautų duomenų galima nustatyti ir talpos aušinimo spartą. Apskaičiuoti duomenys lengvesniam jų įvertinimui atvaizduojami grafiškai. Duomenų vizualizacijai grafiškai pasitelkta „MATLAB R2022a“ [56] programa.



**33 pav.** Matavimų rezultatai, kai kompresoriaus greitis nustatytas R0 varža

Kaip pastebima iš šio bandymų rezultatų COP kinta laike gana staigiais šuoliais. Taip atsitinka dėl temperatūrų skirtumo matavimo laikotarpiuose. Pavyzdžiui viename dešimties minučių intervale temperatūrų skirtumas  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o kitame pokytis buvo  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Taip pat gali skirtis ir suvartota galia tame pačiame periode, dėl svyruojančios srovės kompresoriaus variklio ritėje. Siekiant kokybiškiau įvertinti talpos efektyvumą, visų bandymų metu gautos efektyvumo reikšmės yra apibendrinamos trečiojo laipsnio polinomais (13), kurie grafike atvaizduoti raudona linija. Rožinė punktyrinė linija vaizduoja apibendrinamų duomenų rėžio plotį. Gautos polinomų reikšmės apskaičiuojamos pagal COP priklausomybę nuo talpos temperatūros.

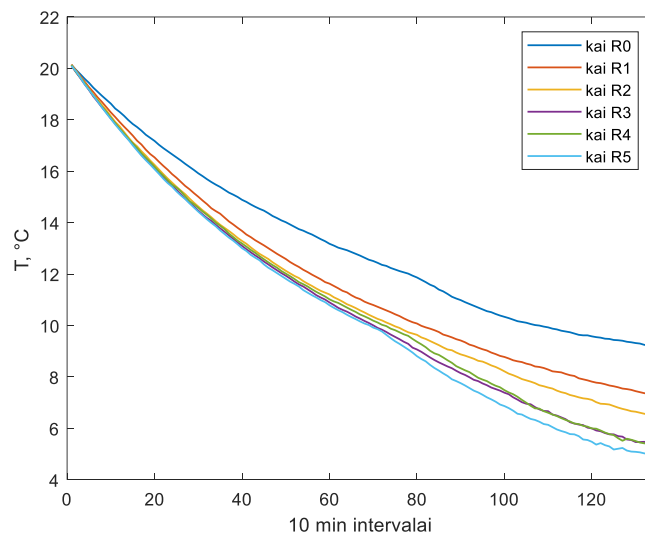
$$COP(T) = T^3a + T^2b + Tc + d; \quad (13)$$

čia T – aušinamos talpos temperatūra, °C;

a, b, c, d – koeficientai, pateikiami 12 lentelėje.

**12 lentelė.** COP polinomų koeficientai prie skirtingų greičių

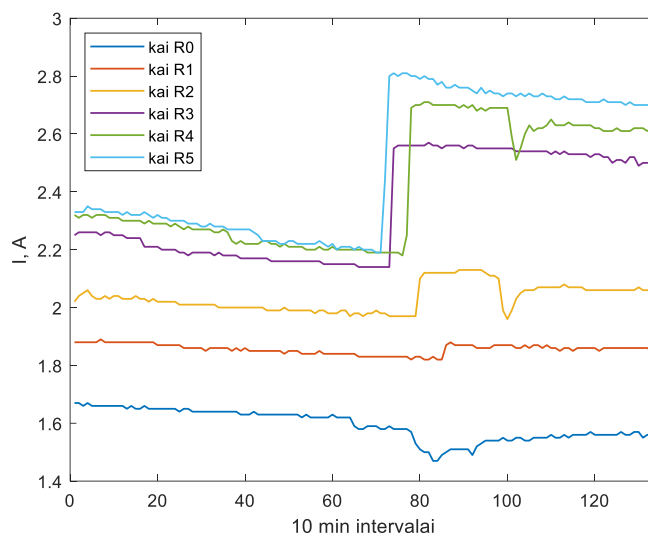
Parinkta varža	a	b	c	d
R0	534,7464e-006	-20,3517e-003	302,6447e-003	-1,2261e+000
R1	-1,0241e-003	38,6465e-003	-390,7920e-003	1,3841e+000
R2	-460,7012e-006	18,3040e-003	-170,3979e-003	688,0656e-003
R3	-35,1482e-006	3,1823e-003	-12,8008e-003	217,1876e-003
R4	-251,3831e-006	10,1426e-003	-81,0104e-003	409,9196e-003
R5	70,5994e-006	-802,4078e-006	27,9260e-003	106,1982e-003



**34 pav.** Temperatūros kitimas vandens talpoje prie skirtingų greičių

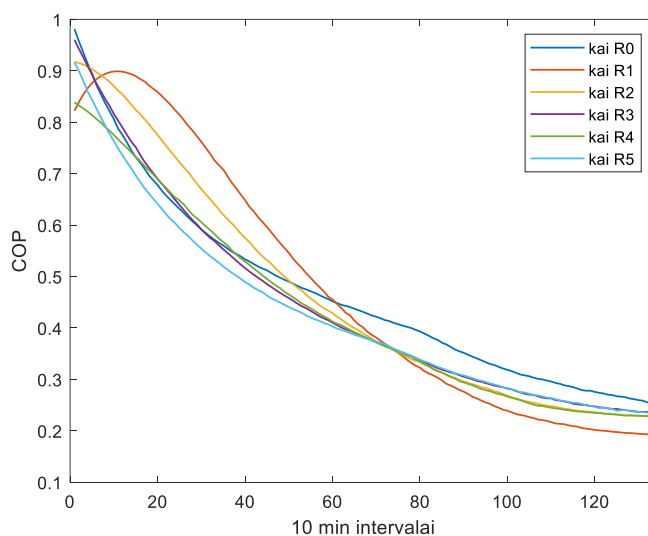
Gautuose talpos temperatūros kitimo rezultatuose matoma, kad didinant kompresoriaus greitį talpa ataušinama greičiau. Didesniuose greičiuose šis skirtumas pradeda išryškėti tik talpai pasiekus žemesnės temperatūros. Lėčiausiu atveju talpa ataušinama lėčiausiai. Tai parodo, kad vanduo talpoje gali perduoti tik tam tikrą šilumos kiekį šaldymo agentui, tekančiam vamzdeliu. Tačiau kadangi kompresoriui dirbant didesnėmis apsukomis temperatūrų skirtumas, tarp vandens talpoje ir šaldymo agento, pasiekiamas didesnis, dėl to talpa yra aušinama didesniu greičiu.





**35 pav.** Kompresoriaus naudojama srovė prie skirtingų greičių

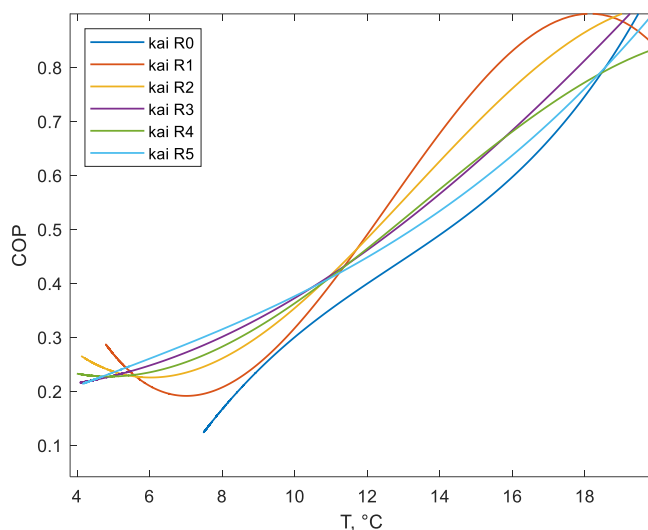
Kaip pastebima (35 pav. ), kompresoriui veikiant skirtingu greičiu apvijomis prateka skirtingas srovės kiekis, o tai tiesiogiai susiję su suvartojama galia. Tačiau taip pat pastebimas kompresoriaus sąnaudų šuolis, kurį sunku paaiškinti. Viena iš priežasčių galėtų būti prastas freono garavimas. Kadangi vanduo nespėja perduoti tiek šilumos, kad freonas galėtų pakeisti būseną į dujinę, dalis garų, dujų ir skysčio mišinio, patenka į suspaudimo veleną ir reikia didesnės galios tinkamam slėgiui pasiekti. Galima teigti, kad kompresorius didesniu greičiu, pasiekus tam tikrą temperatūrą, pradeda švaistyti elektros energiją dėl atsiradusių fizinių aušinimo sistemos apribojimų.



**36 pav.** COP kitimas laike prie skirtingų kompresoriaus greičių

Gaunamas kompresoriaus efektyvumo rezultatas parodo, kad kompresorius didžiąją dalį efektyviausiai dirbo su R1 varža nustatytų greičiu. Žemesnėse temperatūrose šaldymas efektyviausias kai greitis mažiausias. Tai galima paaiškinti tuo, kad didesniu greičiu pasiekiamas didesnis šaldymas,

tačiau vanduo talpoje geba perimti tik tam tikrą šilumos kiekį per tą laiką, kol prateka šaldymo agentas. Kadangi mažesnėmis apsukomis šaldymo agentas sistema keliauja lėčiau, jis geba perimti daugiau šilumos iš vandens talpos, nei didesnio greičio atveju. Taip pat efektyvumas priklauso ir nuo suvartotos galios. Kompresoriaus efektyvumo skaičiavimas parodo, kad kompresorius dirbdamas didesnėmis apsukomis sunaudoja daugiau elektros energijos nei reikia, tačiau tai suvartojama nenaudingai, nes aušinama talpa nesugeba perimti sugeneruoto šalčio.

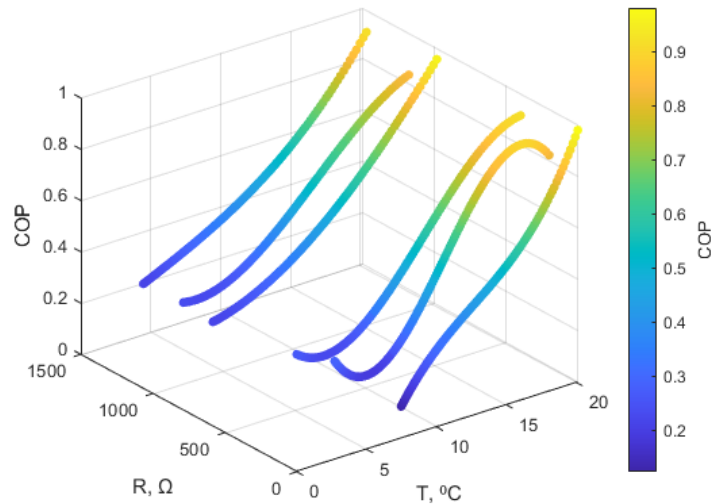


**37 pav.** COP pokytis pagal vandens temperatūrą talpoje

Kompresoriaus efektyvumo koeficientas smarkiai priklauso nuo temperatūrų skirtumo tarp šaldymo agento tekančio vamzdeliu, bei vandens, aušinamoje talpoje. Dėl šios priežasties yra tikrinama kompresoriaus efektyvumo priklausomybė nuo talpos temperatūros. Lyginant COP pagal temperatūrą talpoje pastebima, kad efektyvumas mažėja auštant vandens talpai, kaip ir praėjusių rezultatų atveju.

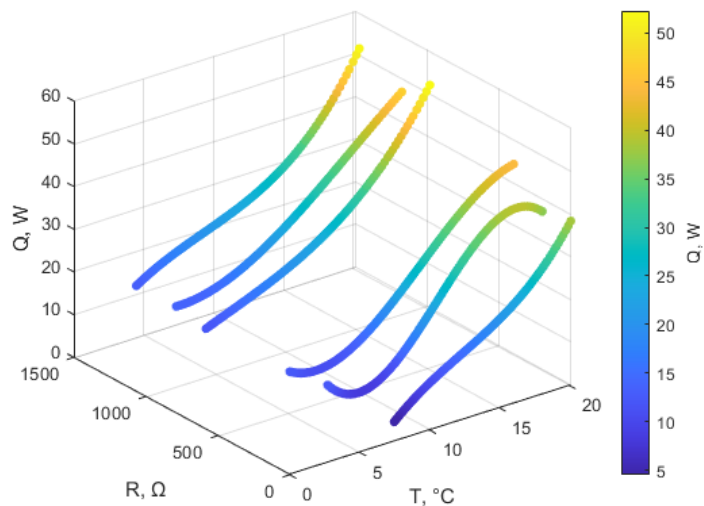
### 3.2. Prognozuojančiu modeliu grįsto valdymo algoritmo sudarymas

Iš gautų rezultatų matyti, kad efektyvumo koeficientas priklauso nuo temperatūros talpoje ir nuo kompresoriaus greičio. Norint patikrinti, jų sąveiką tarpusavyje suformuojamas trimatis grafikas, kurio x ašyje atidedama temperatūra talpoje, y ašyje atidedamas kompresoriaus greitis ir z ašyje atidedamas efektyvumo koeficientas.



**38 pav.** Kompresoriaus efektyvumo priklausomybė nuo temperatūros talpoje ir pasirinktos varžos (greičio)

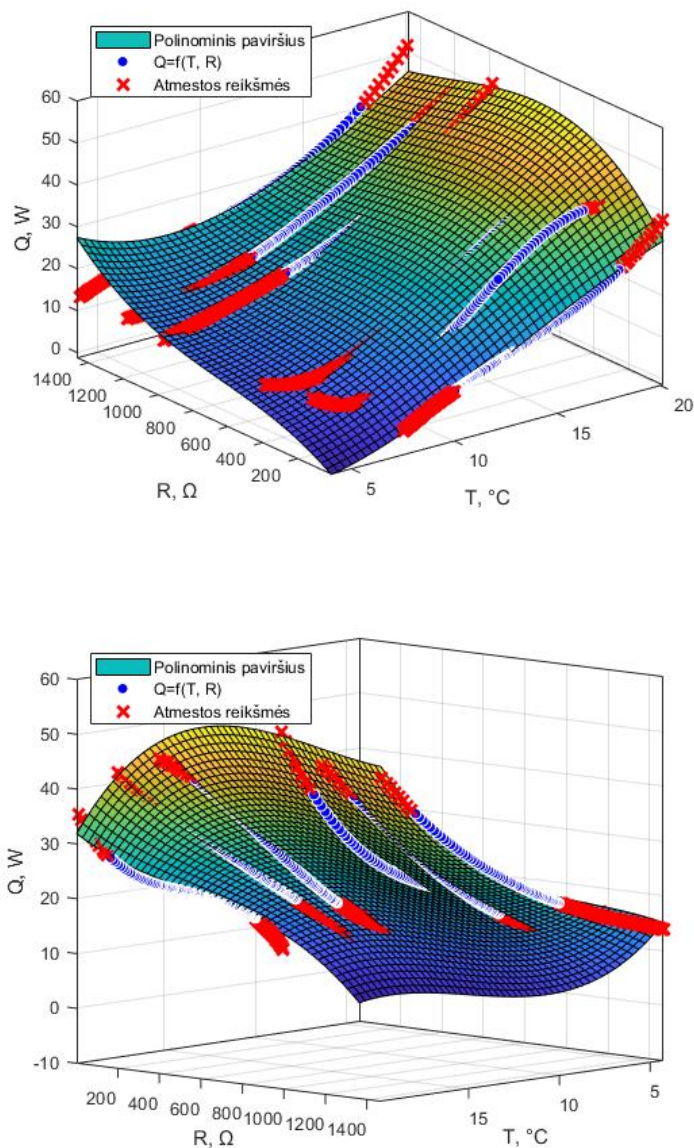
Didele dalimi efektyvumas priklauso nuo šilumos kiekio, kuris spėjamas pašalinti iš sistemos. Kaip pastebėta anksčiau pateiktuose grafikuose, kai kuriais atvejais kompresoriaus efektyvumas yra pakankamai artimas tarp skirtingų greičių. Tai gali lemti fiziniai sistemos parametrai, kaip šilumos perdavimo sparta. Taigi norint pasiekti didesnę COP reikia palaikyti didesnę  $Q$  (šilumos kiekį) pašalintą iš sistemos. Dėl šios priežasties suformuojamas kitas trimatis grafikas, patikrinti kaip  $Q$  kinta, pagal pasirinktą kompresoriaus greitį, ir pagal talpoje aušinamo vandens temperatūrą. 39 pav. pateiktame grafike x ašyje yra atidėtos temperatūros talpoje reikšmės, y ašyje pasirinktos varžos reikšmės, z ašyje panaikinto šilumos kiekio vertės.



**39 pav.** Šilumos kiekio priklausomybė nuo pasirinkto kompresoriaus greičio ir aušinamos talpos temperatūros

Kadangi siekiama panaikinti didesnę šilumos kiekį iš sistemos, remiantis šilumos kiekio priklausomybės nuo temperatūros talpoje ir parinkto greičio sudaromas paviršiaus ploto grafikas, kur reikšmės tarp pateiktų rezultatų yra suformuojamas trečios eilės polinominis paviršius mažiausių

kvadratų metodu naudojant „Curve Fitter“ funkciją „Matlab“ programoje. Kadangi tiriama sistema yra bioreaktoriaus aušinimo dalis, kurį reikia šaldyti  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  šaldymo agentu (šiuo atveju vandeniui), todėl siekiama efektyviau atšinti talpą iki šios temperatūros. Pradedant aušinti bioreaktorių temperatūra gali staigiai pradėti kilti aukštyn, dėl šios priežasties pasirenkama talpos aušinimo efektyvumą valdyti  $18\text{-}10\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrų diapazone. Šie duomenys yra pažymimi mėlynais taškais sugeneruotame (40 pav.) grafike. Duomenys nepatenkantys į šį diapazoną pažymėti raudonais kryžiuokais.



**40 pav.** Suformuotas paviršiaus ploto grafikas, kuris atspindi  $Q$  priklausomybę nuo  $T$  ir  $R$

Sukurtame paviršiaus plote labai gerai matoma, kad didžiausias efektyvumas yra talpai esant aukštesnėje temperatūroje, ir šiai krentant efektyvumas mažėja. Kompresoriaus greičio valdymo tikslas yra sekti gaunamo paviršiaus aukščiausių vertę aušinant talpą. Tai pasiekiant ne tik, kad talpa bus aušinama didžiausiu efektyvumu, tačiau ir bus pasiekama didžiausia proceso sparta. Norint sukurti algoritmą, reikia sudaryti esančio paviršiaus ploto lygtį, kurią išsprendus būtų randamas valdymo dėsnis.

Paviršiaus plotas yra formuojamas trečiojo laipsnio polinomine lygtimi, kuri aprašoma (14).

$$Q(T, R) = p_{00} + p_{10}T + p_{01}R + p_{20}T^2 + p_{11}TR + p_{02}R^2 + p_{30}T^3 + p_{21}T^2R + p_{12}TR^2 + p_{03}R^3 ; \quad (14)$$

čia p – lygties koeficientai pateikti (13 lentelė. );

Q – šilumos kiekis pašalintas iš sistemos, W;

T – aušinamos talpos temperatūra, °C;

R – šaldymo kompresoriaus greitį reguliuojanti varža, Ω.

Šioje lygtyje Q ir R prilyginus 0 ir išsprendus lygtį, pagal R, gaunami du sprendiniai (15) ir (16). Šie sprendiniai nusako varžos priklausomybę, nuo talpos temperatūros ir šilumos kiekio talpoje. Šie du sprendiniai padeda suformuoti modelį nuspėjančio valdymo algoritmą.

$$r_1(T) = -\frac{p_{02}+p_{12}\cdot T+\sqrt{(p_{02}+p_{12}\cdot T)^2-3\cdot p_{03}\cdot(p_{01}+T\cdot(p_{11}+p_{21}\cdot T))}}{3\cdot p_{03}}; \quad (15)$$

čia p – lygties koeficientai pateikti (13 lentelė. );

T – aušinamos talpos temperatūra, °C;

r – šaldymo kompresoriaus greitį reguliuojanti varža, Ω.

$$r_2(T) = -\frac{p_{02}+p_{12}\cdot T-\sqrt{(p_{02}+p_{12}\cdot T)^2-3\cdot p_{03}\cdot(p_{01}+T\cdot(p_{11}+p_{21}\cdot T))}}{3\cdot p_{03}}; \quad (16)$$

čia p – lygties koeficientai pateikti (13 lentelė. );

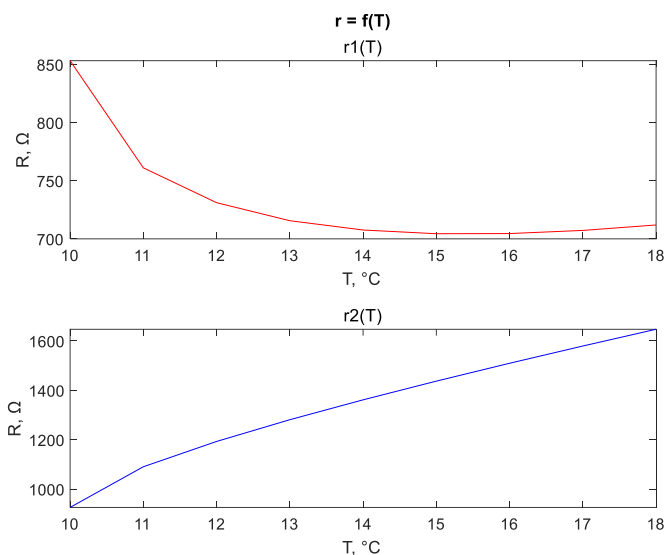
T – aušinamos talpos temperatūra, °C;

r – šaldymo kompresoriaus greitį reguliuojanti varža, Ω.

**13 lentelė.** (14), (15), (16) lygčių koeficientai

Koeficientas	Vertė
p00	14,95
p10	-4,832
p01	0,02366
p20	0,5336
p11	0,0007618
p02	-2,431e-05
p30	-0,01218
p21	5,165e-05
p12	-1,673e-06
p03	1,538e-08

Kadangi išsprendus lygtį gaunamos dvi šaknys, šiuos sprendinius reikia patikrinti norimame valdyti temperatūrų diapazone. Tai padarius, rezultatai atvaizduojami grafiškai (41 pav.). Čia matoma kaip kompresoriaus greitis turėtų kisti, pagal esamą temperatūrą talpoje, norint užtikrinti didžiausią pašalinamą šilumos kiekį. Kadangi  $r_2(T)$  apibrėžimų sritis netenkina, t.y. sprendiniai viršija galimą kompresoriaus greitį, šis variantas yra atmetamas. Todėl valdymo algoritmui pasirenkamas pirmasis sprendinys (15). Pirmoji šaknis pasirenkama valdyti kompresoriaus greitį norimame temperatūrų diapazone bei pritaikoma kompresoriaus greičio valdymo algoritme.



**41 pav.** Gautų varžos nuo temperatūros priklausomybių patikrinimas reikiamame temperatūrų diapazone

### 3.3. Tyrimas su sukurtuoju valdymo algoritmu

#### 3.3.1. Algoritmo realizavimas naudojant STM32 mikrovaldikliu

Kompresoriaus valdymui pagal rastą priklausomybę (15), sukuriamas greičio valdymo algoritmas (43 pav.) ir parašoma programa (42 pav.), skirta parinkti reikiamą varžą sukurtoje varžų matricioje. Šiame programos kode yra tikrinama temperatūra vandens talpoje. Pagal (15) lygtį žinoma kokia varža turėtų būti pritaikoma prie šios temperatūros. Tuomet visų įmanomų varžų dydžių matricioje randama artimiausia varžų kombinacija pasiekti norimam rezultatui. Gautas šešioliktainis kodas yra perduodamas į relių valdymo algoritmą (32 pav.). Temperatūroms didesnėms, nei 18 °C nustatomas maksimalus kompresoriaus greitis, o temperatūroms žemesnėms nei 10 °C parenkamas mažiausias kompresoriaus greitis. Taip daroma todėl, nes modelis skirtas valdyti kompresoriaus greitį 18-10 °C temperatūrų diapazone.

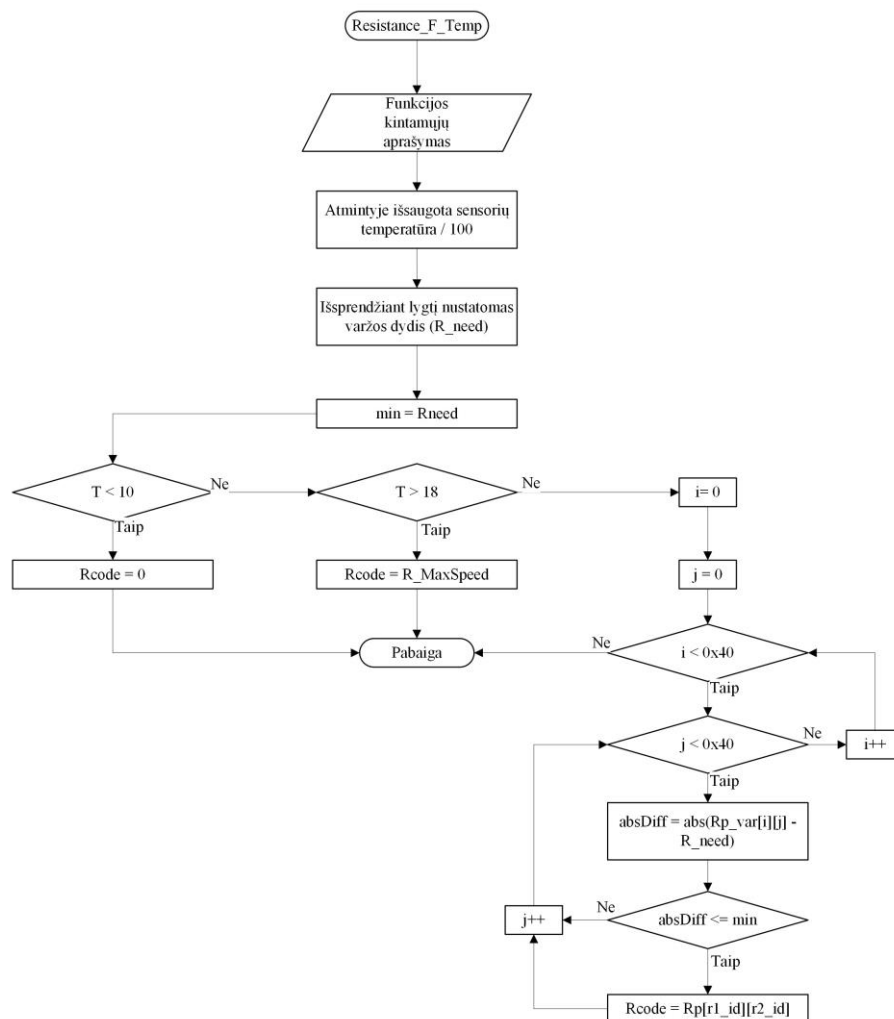
```
uint16_t Resistance_F_Temp(TempSensors *r_Sensors){
    #include "math.h"
    uint16_t Rcode;
    float absDiff;
    uint16_t r1_id = 0, r2_id = 0;
    float T = (float)r_Sensors[7].r_Temperature / 100;
    if (T >= 10 && T <= 18) {
        float p01 = 0.02366, p11 = 0.0007618, p02 = -2.431e-05, p21 = 5.165e-05,
```

```

    p12 = -1.673e-06, p03 = 1.538e-08;
    float R_need = -1 * ((p02 + p12 * T + sqrt(pow((p02 + p12 * T), 2) - 3 * p03 * (p01 + T * (p11 + p21 * T)))) / (3 * p03));
    float min = R_need;
    for (uint8_t i = 0; i < 0x40; i++) {
        for (uint8_t j = 0; j < 0x40; j++) {
            absDiff = abs(Rp_var[i][j] - R_need);
            if (absDiff <= min) {
                min = absDiff;
                r1_id = i;
                r2_id = j;
            }
        }
        Rcode = Rp[r1_id][r2_id];
    } else if (T > 18) { Rcode = R_MaxSpeed; }
    else if (T < 10) { Rcode = Rp[0][0]; }
    return Rcode;
}

```

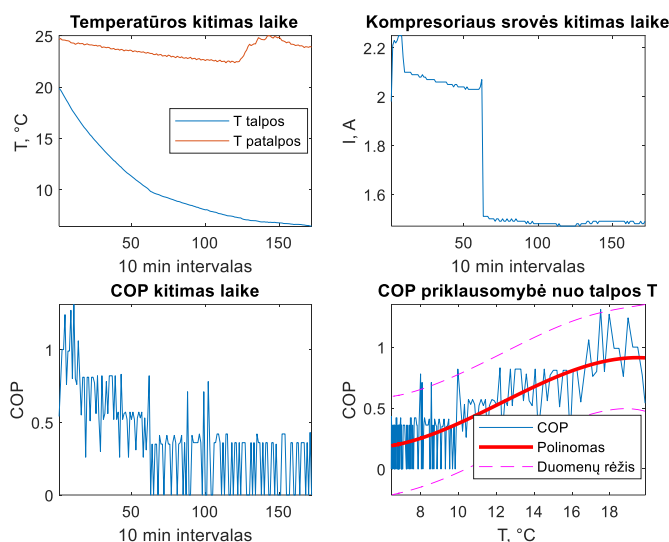
**42 pav.** Sukurtos programos kodo fragmentas, parinkti tinkamam kompresoriaus greičiui pagal valdymo algoritmą



**43 pav.** Sukurtasis kompresoriaus greičio valdymo algoritmas

### 3.3.2. Rezultatai gauti pritaikius sukurtą valdymo algoritmą

Atlikus eksperimentą pritaikius valdantįjį algoritmą, gauti rezultatai buvo apibendrinti ir atvaizduoti grafiškai. Kaip pastebima 44 pav. COP priklausomybė nuo temperatūros taip pat svyruoja kaip ir matavimais su stabilia varža. Dėl to COP rezultatas yra apibendrinamas trečiojo lygio polinoline lygtimi (17) kaip ir stabiliaus greičio atvejais.



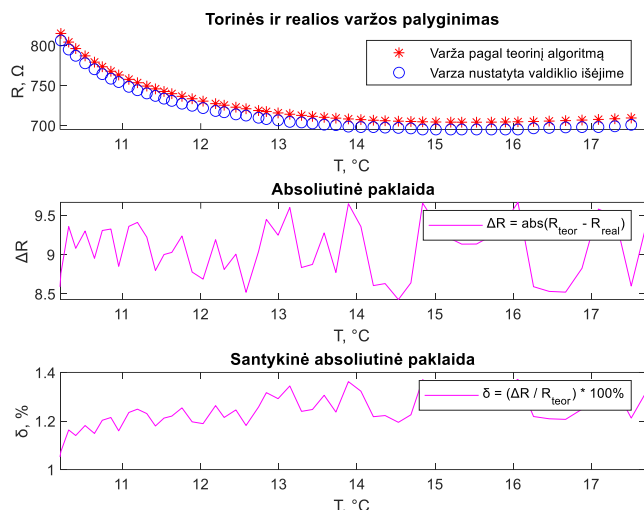
44 pav. Gauti rezultatai su valdančiuoju algoritmu

$$COP(T) = -493,9973 \cdot 10^{-6}T^3 + 18,1499 \cdot 10^{-3}T^2 - 145,085 \cdot 10^{-3}T + 504,2009 \cdot 10^{-3}; \quad (17)$$

čia  $T$  – vandens talpoje temperatūra, °C.

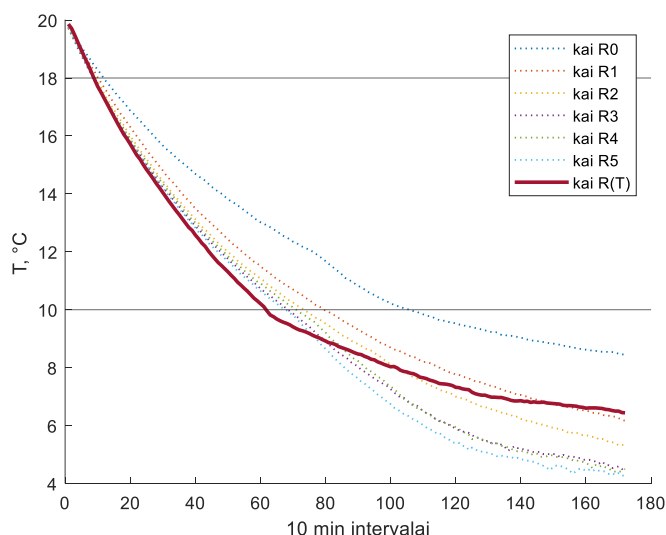
Matavimo metu buvo registruojama nustatyta kompresoriaus greitį valdanti varža, siekiant įsitikinti, kad greičio valdymas veikia pagal sukurtą algoritmą. Gautose rezultatuose matoma, kad greitis valdomame intervale parenkamas  $10 \Omega$ , arba 1,5 % absoliutinės santykinės paklaidos ribose. Toks valdymo tikslumas pasiekiamas, dėl skirtumo tarp teorinės varžos, bei gaunamos realiai. Tai yra dėl varžų realios vertės skirtumo nuo jų nominalių verčių, taip pat susumuojant ir sujungiant jas šis skirtumas kinta.





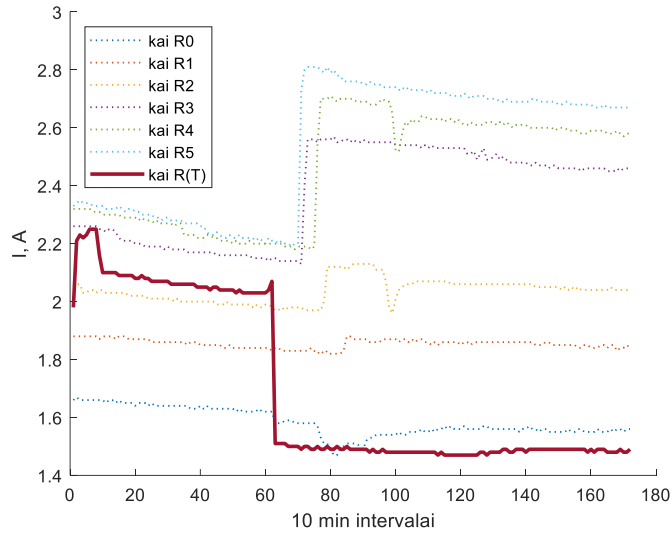
**45 pav.** Varžų matricijoje nustatyta varža palyginta su teorine algoritmo parinkta varža

Gautame temperatūros pokyčio grafike pastebima, kad valdomame režyje talpa aušinama sparčiausiai, lyginant su pastovaus greičio atvejais. Kompresoriui ataušinus talpą iki 10 °C ir perėjus į lėčiausią režimą, pastebimas stipriai sulėtėjęs šalimas, kaip ir lėčiausio greičio atveju. Iki pasiekiant valdomąją temperatūrų zoną ir veikiant didžiausiu parinktu greičiu matomas panašumas, su didžiausio greičio atveju.



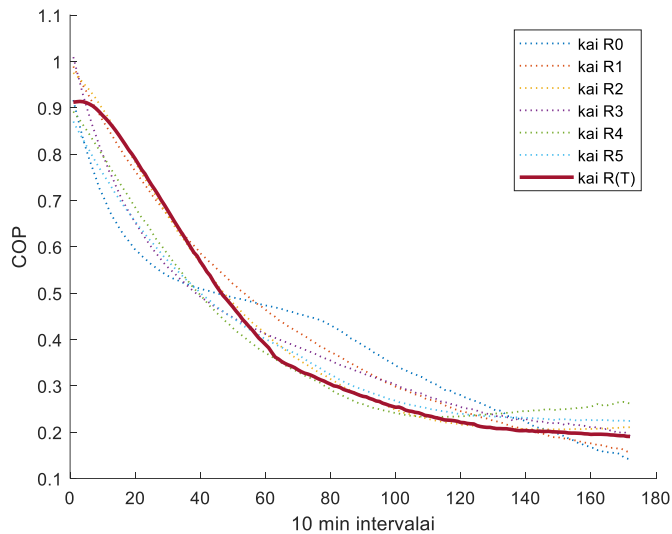
**46 pav.** Temperatūros pokytis talpoje pritaikius valdymo algoritimą, lyginant su pastoviu greičiu

Žvelgiant į kompresoriaus suvartojamą srovę matomi 3 laiptai. Pirmajame režyje matomas kompresoriaus veikimas prieš pereinant į valdomąjį režį. Antrame etape matoma, kad valdomame režyje matomas vidutinis energijos suvartojimas, lyginant su pastovaus greičio atvejais. Taip pat grafike pastebimas panašus srovės kritimo dėsningumas aušinamai talpai vėstant. Nukritus talpos temperatūrai 10 °C ribą matoma, kad kompresorius perėjo į mažiausio greičio režimą.



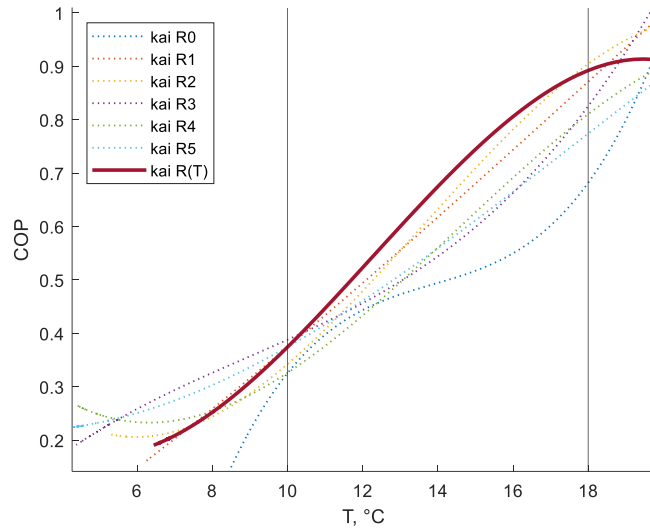
**47 pav.** Kompresorių varanti srovė, lyginant su pastovaus greičio atvejais

Kompresoriaus efektyvumo koeficiento kitimo laike grafike pastebima, kad kompresoriaus efektyvumas pranoksta R1 atvejo efektyvumą, tačiau vėstant talpai pradeda kristi žemyn, kaip ir pastovaus greičio atvejais.



**48 pav.** COP kitimas laike pritaikius valdymo algoritmą, lyginant su pastovaus greičio atvejais

Kaip matoma kompresoriaus efektyvumo pagal temperatūrą grafike, kompresorius išlaiko aukščiausią efektyvumą valdomame temperatūrų intervale.



**49 pav.** COP kitimas pagal aušinamos talpos temperatūra lyginant su pastovaus greičio atvejais

**14 lentelė.** Gautų rezultatų palyginimas su pritaikytu valdymo algoritmu

	<b>R0</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>R(T)</b>
<b>Talpos atvėsinimo laikas 18–10 °C intervale, min</b>	950	690	640	600	630	590	530
<b>Suvargota elektros energija 18 - 10 °C intervale, kWh</b>	0.594	0.489	0.501	0.510	0.549	0.521	0.428
<b>Vidutinis COP 18–10 °C intervale</b>	0.489	0.582	0.583	0.541	0.513	0.531	0.640

Apibendrinant gauti rezultatai aprašomi 14 lentelėje. Čia apskaičiuojamas laikas, kiek talpa buvo aušinama nuo 18 iki 10 °C. Pastebima, kad talpa buvo ataušinta 11,32–79,24 % greičiau, nei pritaikius didžiausią kompresoriaus greitį. Lyginant suvargotą elektros kiekį aušinimo periode matoma, kad pritaikius sukurta valdymo algoritmą pasiektas 14,25–38,78 % energijos suvartojimo sumažinimas. Taip pat apskaičiavus vidutinę COP reikšmę valdymo periode, pastebima, kad efektyvumas padidintas 8,9–23,59 %.

## Rezultatai ir išvados

1. Ištirtas aušinimo sistemos modelis ir nustatytas kompresoriaus greičio, aušinamos talpos temperatūros ir suvartojamos elektros energijos dėsningumas, t.y. kompresoriui dirbant didesniu greičiu yra suvartojama daugiau elektros energijos – mažėja efektyvumo koeficientas.
2. Remiantis gautais rezultatais sudarytas trečios eilės paviršiaus ploto grafikas, kuris parodo priklausomybę tarp pašalinamo šilumos kiekio iš sistemos  $Q$ , greitį nustatančios varžos  $R$  ir temperatūros talpoje  $T$ . Šis paviršius aprašomas kubine lygtimi  $Q = f(T, R)$ . Pagal priimtina šaknies vertę buvo sukurtas kompresoriaus valdymo algoritmas (43 pav.).
3. Valdymo algoritmo realizavimui buvo sukurta varžų matrica (žr. 30 pav.). Varžos nustatymui ir valdymui sukurtas programos kodas (42 pav.). Programa nustato varžą remiantis aušinimo sistemos modeliu ir įvertinta sistemos būseną pagal aprašytą dėsningumą.
4. Sukurtas aušintuvo kompresoriaus greičio valdymo algoritmas patikrintas eksperimentiškai. Gauti rezultatai (14 lentelė) parodė, kad pasiektas 11,32–79,24 % spartesnis talpos ataušinimas (žr. 46 pav.), palaikant 8,9–23,59 % didesnę efektyvumo koeficientą ir sutaupyta 14,25–38,78 % elektros energijos, tiriamoje temperatūrų zonoje 18–10 °C (žr. 49 pav.). Sukurtos varžyno matricos metodas leido valdyti greitį su 1,5 % santykinė absoliutine paklaida (žr. 45 pav.).

## Literatūros sąrašas

1. Ma Liangdong; Zhang Jili and Zhang Shuyan. *Thermodynamic Cycle Performances Analysis of High Temperature Refrigerants in a Multi-Stage Heat Pump System*. Interaktyvus.2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering: IEEE, 26-28 June 2010, 2010<https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5536071> [žiūrėta 2023-05-06].
2. A. Yatim; E. P. Wijaya; R. Irwansyah; A. S. Auzani and Y. Liu. *Risk Assessment of Flammable Natural Refrigerant Application in Air Conditioning Systems*. Interaktyvus.Piscataway: IEEE, 07-10 December 2022, 2022<https://doi.org/10.1109/IEEM55944.2022.9989964> [žiūrėta 2023-05-06].
3. CIARLO, Davide and ALDA, D. *Refrigeration Systems, Design Technologies and Developments*. Interaktyvus. New York: Nova Science Publishers, Inc, 2013. ISBN 9781624172298. [http://ebookcentral.proquest.com/lib/SITE\\_ID/reader.action?docID=3021256](http://ebookcentral.proquest.com/lib/SITE_ID/reader.action?docID=3021256) . [žiūrėta 2023-05-06].
4. S. Kasera; R. Nayak and S. C. Bhaduri. *Energy Efficiency Analysis of Variable Speed DC Compressor using R290*. Interaktyvus.2020 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE): IEEE, 26 February 2021, 2020<https://doi.org/10.1109/ICRAIE51050.2020.9358297> [žiūrėta 2023-05-06].
5. Y. Sun and Y. Tan. *Intelligent Model Selection for Refrigerating Compressors*. Interaktyvus.2011 3rd International Workshop on Intelligent Systems and Applications: IEEE, 28-29 May 2011, 2011<https://doi.org/10.1109/ISA.2011.5873441> [žiūrėta 2023-05-06].
6. APREA, C.; MASTRULLO, R. and RENNO, C. *Fuzzy Control of the Compressor Speed in a Refrigeration Plant*. Int.J.Refrig., t. 27 (2004), pp.639-648. Interaktyvus. ISSN 0140-7007. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.02.004> . [žiūrėta 2023-05-06].
7. KIZILKAN, Önder; KABUL, A. and YAKUT, A.K. *Exergetic Performance Assessment of a Variable-Speed R404a Refrigeration System*. Int.J.Energy Res., t. 34 (2010), pp.463-475. Interaktyvus. ISSN 0363-907X. <https://doi.org/10.1002/er.1553> . [žiūrėta 2023-05-06].
8. GONZÁLEZ-RAMÍREZ, J. E.; LEDUCQ, D.; ARELLANO, M. and ALVAREZ, G. *Energy Consumption Optimization of a Continuous Ice Cream Process*. Energy Conversion and Management, t. 70 (2013), pp.230-238. Interaktyvus. ISSN 0196-8904. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.015> . [žiūrėta 2023-05-06].
9. SU, Peng; JI, J.; CAI, J.; GAO, Y. and HAN, K. *Dynamic Simulation and Experimental Study of a Variable Speed Photovoltaic DC Refrigerator*. Renewable Energy, t. 152 (2020), pp.155-164. Interaktyvus. ISSN 0960-1481. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.047> . [žiūrėta 2023-05-06].
10. LI, Hua; JEONG, S. and YOU, S. *Feedforward Control of Capacity and Superheat for a Variable Speed Refrigeration System*. Appl.Therm.Eng., t. 29 (2009), pp.1067-1074. Interaktyvus. ISSN 1359-4311. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.05.022> . [žiūrėta 2023-05-06].
11. LI, Hua; JEONG, S.; YOON, J. and YOU, S. *An Empirical Model for Independent Control of Variable Speed Refrigeration System*. Appl.Therm.Eng., t. 28 (2008), pp.1918-1924. Interaktyvus. ISSN 1359-4311. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.008> . [žiūrėta 2023-05-06].

12. BURBA, Martynas. *Adaptyvios Šaltnešio Temperatūros Reguliavimo Sistemos Sukūrimas Ir Tyrimas*. Masters Degree. PDF. Kaunas: Kauno technologijos universitetas, 2022. [žiūrėta 2023-02-01].
13. KIRKPATRICK, Allan. *Introduction to Refrigeration and Air Conditioning Systems : Theory and Applications*. Interaktyvus. 1 laida. Cham: Springer International Publishing AG, 2017. ISBN 9783031795794. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-79579-4> . [žiūrėta 2024-03-12].
14. HUNDY, G. F.; TROTT, A.R.; WELCH, T.C.; HUNDY, G.F.; TROTT, A.R. and WELCH, T.C. *Refrigeration and Air-Conditioning*. Interaktyvus. San Diego: Elsevier Science & Technology, 2008. ISBN 9780080559209. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/ktu-ebooks/detail.action?docID=405191> . [žiūrėta 2023-05-06].
15. ASHRAE, (Firm). *ASHRAE Guide for Sustainable Refrigerated Facilities and Refrigeration Systems*. Interaktyvus. Atlanta, GA: ASHRAE, 2018. ISBN 9781947192003. [https://vb.ktu.edu/permalink/f/1746fh5/TN\\_cdi\\_knovel\\_primary\\_book\\_kpASHRAETA](https://vb.ktu.edu/permalink/f/1746fh5/TN_cdi_knovel_primary_book_kpASHRAETA) . [žiūrėta 2023-05-06].
16. DECHESNE, Bertrand J.; TELLO-OQUENDO, F.M.; GENDEBIEN, S. and LEMORT, V. *Residential Air-Source Heat Pump with Refrigerant Injection and Variable Speed Compressor: Experimental Investigation and Compressor Modeling*. Int.J.Refrig., t. 108 (2019), pp.79-90. Interaktyvus. ISSN 0140-7007. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.08.034> . [žiūrėta 2023-05-06].
17. Noria Corporation. *Reciprocating Compressor Basics*. Machinery Lubrication, (2005), Interaktyvus. <https://www.machinerylubrication.com/Read/775/reciprocating-compressor> . [žiūrėta 2023-05-06].
18. Mecholic. *Reciprocating Compressors Working, Applications, Advantages and Disadvantages*. 2019 m. Interaktyvus. Prieiga per: <https://www.mecholic.com/2019/03/reciprocating-compressors-working.html>. [žiūrėta 2023-05-06].
19. SARBU, Ioan and SEBARCHIEVICI, C. *Chapter 4 - Types of Compressors and Heat Pumps*. In: Ground-Source Heat Pumps. Interaktyvus. Academic Press, 2016. ISBN 9780128042205. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804220-5.00004-7> . [žiūrėta 2023-05-06].
20. Sunrise. *How do Scroll Air Compressors Work? Paveikslėlis*. Prieiga per: <https://www.sunrise-metal.com/how-do-scroll-air-compressors-work/>. [žiūrėta 2023-05-06].
21. BOOTH, Blake. *Scroll Compressors Advantages and Disadvantages*. Rasmussen Mechanical, January 26, 2022. Interaktyvus. <https://www.rasmech.com/blog/scroll-compressors-advantages-and-disadvantages/> . [žiūrėta 2023-05-06].
22. RENARDSON, Amy. *Advantages & Disadvantages of a Rotary Screw Air Compressor*. Air Supply UK, June 05, 2022. <https://www.airsupply.co.uk/blogs/advantages-and-disadvantages-of-a-rotary-screw-air-compressor/> . [žiūrėta 2023-05-06].
23. Engineering Learn. *Centrifugal Compressor: Definition, Types, Working Principle, Components, Applications, Advantages & Disadvantages*. 2021 m. Interaktyvus. Prieiga per: <https://engineeringlearn.com/centrifugal-compressor-definition-types-working-principle-components-applications-advantages-disadvantages/>. [žiūrėta 2023-05-06].

24. ENTEZARI, Ashkan; ASLANI, A.; ZAHEDI, R. and NOOROLLAHI, Y. *Artificial Intelligence and Machine Learning in Energy Systems: A Bibliographic Perspective*. Energy Strategy Reviews, t. 45 (2023), pp.101017. *Interaktyvus*. ISSN 2211-467X. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101017> . [žiūrēta 2024-03-10].
25. HUAYI COMPRESSOR BARCELONA. *Variable Speed*. *Interaktyvus*. Prieiga per: <https://www.huayicompressor.es/index.php/variable-speed>. [žiūrēta 2023-05-06].
26. GRILLIOT, Eric. *Optimize Supermarket Energy Efficiency and Performance with VFD Retrofits*. , May 31, 2022. *Interaktyvus*. <https://e360blog.copeland.com/optimize-supermarket-energy-efficiency-and-performance-with-vfd-retrofits/> . [žiūrēta 2023-05-06].
27. HAMED, Ahmed. *Study the Thermal Performance of A Refrigeration System Equipped with Variable Speed Compressor and Different Controllers*. *Interaktyvus*. Wasit University, 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25160.24321> . [žiūrēta 2023-05-06].
28. B. -G. Gu; J. -H. Choi and I. -S. Jung. *Online Load Torque Compensator for Single Rolling Piston Compressor*. *Interaktyvus*. 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia: IEEE, 30 May 2011 - 03 June 2011, 2011 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia. <https://doi.org/10.1109/ICPE.2011.5944763> [žiūrēta 2023-05-06].
29. Air Change. *Thermostat Control Methodologies for Variable Capacity Air Conditioners*. 2019 m. *Paveikslėlis*. Prieiga per: [https://www.airchange.com.au/cms/assets/2020/08/Air-Change-Technical-Paper\\_Thermostat-Control-Methodologies-for-Variable-Capac.pdf](https://www.airchange.com.au/cms/assets/2020/08/Air-Change-Technical-Paper_Thermostat-Control-Methodologies-for-Variable-Capac.pdf). [žiūrēta 2023-05-06].
30. R. Kwadzogah; M. Zhou and S. Li. *Model Predictive Control for HVAC Systems — A Review*. *Interaktyvus*. 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE): IEEE, 07 November 2013, 2013 <https://doi.org/10.1109/CoASE.2013.6654072> [žiūrēta 2024-02-25].
31. D. Yu; H. Peng; Y. He; Z. Meng and M. Zhao. *Research on Intelligent Air Conditioning Optimization Control Algorithms Based on Neural Networks and Heuristic Algorithms*. *Interaktyvus*. 2023 IEEE International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering (ICSECE): IEEE, 8-20 August 2023, 2023 <https://doi.org/10.1109/ICSECE58870.2023.10263552> [žiūrēta 2024-03-10].
32. BELMAN-FLORES, Juan; RODRÍGUEZ-VALDERRAMA, D.A.; LEDESMA, S.; GARCÍA-PABÓN, J.J.; HERNÁNDEZ, D. and PARDO-CELY, D. *A Review on Applications of Fuzzy Logic Control for Refrigeration Systems*. Applied Sciences, t. 12 (2022), pp.1302. *Interaktyvus*. ISSN 2076-3417. <https://doi.org/10.3390/app12031302> . [žiūrēta 2024-03-02].
33. CHEN, Guanrong; MORADI, M.H.; TANG, W.K.S.; MORADI, M.H.; MAN, K.F., ir kiti. *PID Control: New Identification and Design Methods*. *Interaktyvus*. London: Springer, 2005. ISBN 9781846281488. <https://doi.org/10.1007/1-84628-148-2> . [žiūrēta 2024-03-10].
34. BORASE, Rakesh P.; MAGHADE, D.K.; SONDKAR, S.Y. and PAWAR, S.N. *A Review of PID Control, Tuning Methods and Applications*. Int. J. Dynam. Control, t. 9 (2021), pp.818-827. *Interaktyvus*. ISSN 2195-2698. <https://doi.org/10.1007/s40435-020-00665-4> . [žiūrēta 2024-03-03].
35. KIM, Jun G.; HAN, C.H. and JEONG, S.K. *Disturbance Observer-Based Robust Control Against Model Uncertainty and Disturbance for a Variable Speed Refrigeration System*.

- Int.J.Refriger., t. 116 (2020), pp.49-58. *Interaktyvus*. ISSN 0140-7007. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.03.019> . [žiūrėta 2023-05-06].
36. MORTENSON, Ted. *PID Vs. Other Control Methods: What's the Best Choice?* RealPars, March 18, 2024. *Interaktyvus*. Prieiga per: RealPars, <https://www.realpars.com/blog/pid-vs-advanced-control-methods> . [žiūrėta 2024-03-03].
37. EKREN, Orhan; CELIK, S.; NOBLE, B. and KRAUSS, R. *Performance Evaluation of a Variable Speed DC Compressor*. Int.J.Refriger., t. 36 (2013), pp.745-757. *Interaktyvus*. ISSN 0140-7007. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.09.018> . [žiūrėta 2023-05-06].
38. OLFATI-SABER, R.; SHAMMA, J.S.; M. Molinari; D. Varagnolo and K. H. Johansson. *Control of HVAC Systems Via Scenario-Based Explicit MPC*. *Interaktyvus*. 53rd IEEE Conference on Decision and Control: IEEE, 12 February 2015, 2014 <https://doi.org/10.1109/CDC.2014.7040202> [žiūrėta 2024-02-25].
39. CHEN, Liangliang and ZHANG, Y. *Accelerated Distributed Model Predictive Control for HVAC Systems*. *Control Eng.Pract.*, t. 110 (2021), pp.104782. *Interaktyvus*. ISSN 0967-0661. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104782> . [žiūrėta 2024-02-25].
40. F. Oldewurtel; A. Parisio; C. N. Jones; M. Morari; D. Gyalistras; ir kiti. *Energy Efficient Building Climate Control using Stochastic Model Predictive Control and Weather Predictions*. *Interaktyvus*. Proceedings of the 2010 American Control Conference: IEEE, 30 June 2010 - 02 July 2010, 2010 <https://doi.org/10.1109/ACC.2010.5530680> [žiūrėta 2024-03-02].
41. T. Zeng and P. Barooah. *An Autonomous MPC Scheme for Energy-Efficient Control of Building HVAC Systems*. *Interaktyvus*. 2020 American Control Conference (ACC): IEEE, 01-03 July 2020, 2020 <https://doi.org/10.23919/ACC45564.2020.9147753> [žiūrėta 2024-02-25].
42. SCHWENZER, Max; AY, M.; BERGS, T. and ABEL, D. *Review on Model Predictive Control: An Engineering Perspective*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, t. 117 (2021), pp.1327-1349. *Interaktyvus*. ISSN 1433-3015. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07682-3> . [žiūrėta 2024-03-02].
43. Wikipedia. *Fuzzy Control System*. 2024 m. *Interaktyvus*. Prieiga per: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fuzzy\\_control\\_system&oldid=1215205504](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fuzzy_control_system&oldid=1215205504). [žiūrėta 2024-03-03].
44. Geeks for Geeks. *Fuzzy Logic | Introduction*. 2018 m. *Interaktyvus*. Prieiga per: <https://www.geeksforgeeks.org/fuzzy-logic-introduction/>. [žiūrėta 2024-03-03].
45. AHMAD, Muhammad W.; MOURSHED, M.; YUCE, B. and REZGUI, Y. *Computational Intelligence Techniques for HVAC Systems: A Review*. *Build. Simul*, t. 9 (2016), pp.359-398. *Interaktyvus*. ISSN 1996-8744. <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0285-4> . [žiūrėta 2024-03-10].
46. NASSIF, Nabil. *Modeling and Optimization of HVAC Systems using Artificial Neural Network and Genetic Algorithm*. *Build. Simul*, t. 7 (2014), pp.237-245. *Interaktyvus*. ISSN 1996-8744. <https://doi.org/10.1007/s12273-013-0138-3> . [žiūrėta 2024-03-10].
47. MAWSON, Victoria J. and HUGHES, B.R. *Coupling Simulation with Artificial Neural Networks for the Optimisation of HVAC Controls in Manufacturing Environments*. *Optim Eng*, t. 22



(2021), pp.103-119. *Interaktyvus*. ISSN 1573-2924. <https://doi.org/10.1007/s11081-020-09567-y> . [žiūrėta 2024-03-11].

48. Akawell. *Refrigeration Compressor*. *Interaktyvus*. Prieiga per: <https://www.akawell.com/product/refrigeration-compressor/>. [žiūrėta 2023-05-06].

49. Wikipedia. *Coefficient of Performance*. 2023 m. *Interaktyvus*. Prieiga per: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Coefficient\\_of\\_performance&oldid=1192895758](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Coefficient_of_performance&oldid=1192895758). [žiūrėta 2024-01-05].

50. Chemours. *Refrigerant (R-134a)*. *Interaktyvus*. Prieiga per: <https://www.freon.com/en/-/media/files/freon/freon-134a-si-thermodynamic-properties.pdf?rev=7519d264dfd74fe68c04c9e119f7361f>. [žiūrėta 2023-09-01].

51. STMicroelectronics. *Integrated Development Environment for STM32*. 2021 m. *Interaktyvus*. Prieiga per: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html#overview>. [žiūrėta 2024-05-04].

52. Maxim Integrated. *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. Maxim Integrated Products, Inc. 2019 m. *Interaktyvus*. Prieiga per: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>. [žiūrėta 2024-05-03].

53. STMicroelectronics. *UM1472 Rev 7*. 2020 m. *Interaktyvus*. Prieiga per: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/um1472-discovery-kit-with-stm32f407vg-mcu-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1472-discovery-kit-with-stm32f407vg-mcu-stmicroelectronics.pdf). [žiūrėta 2024-05-02].

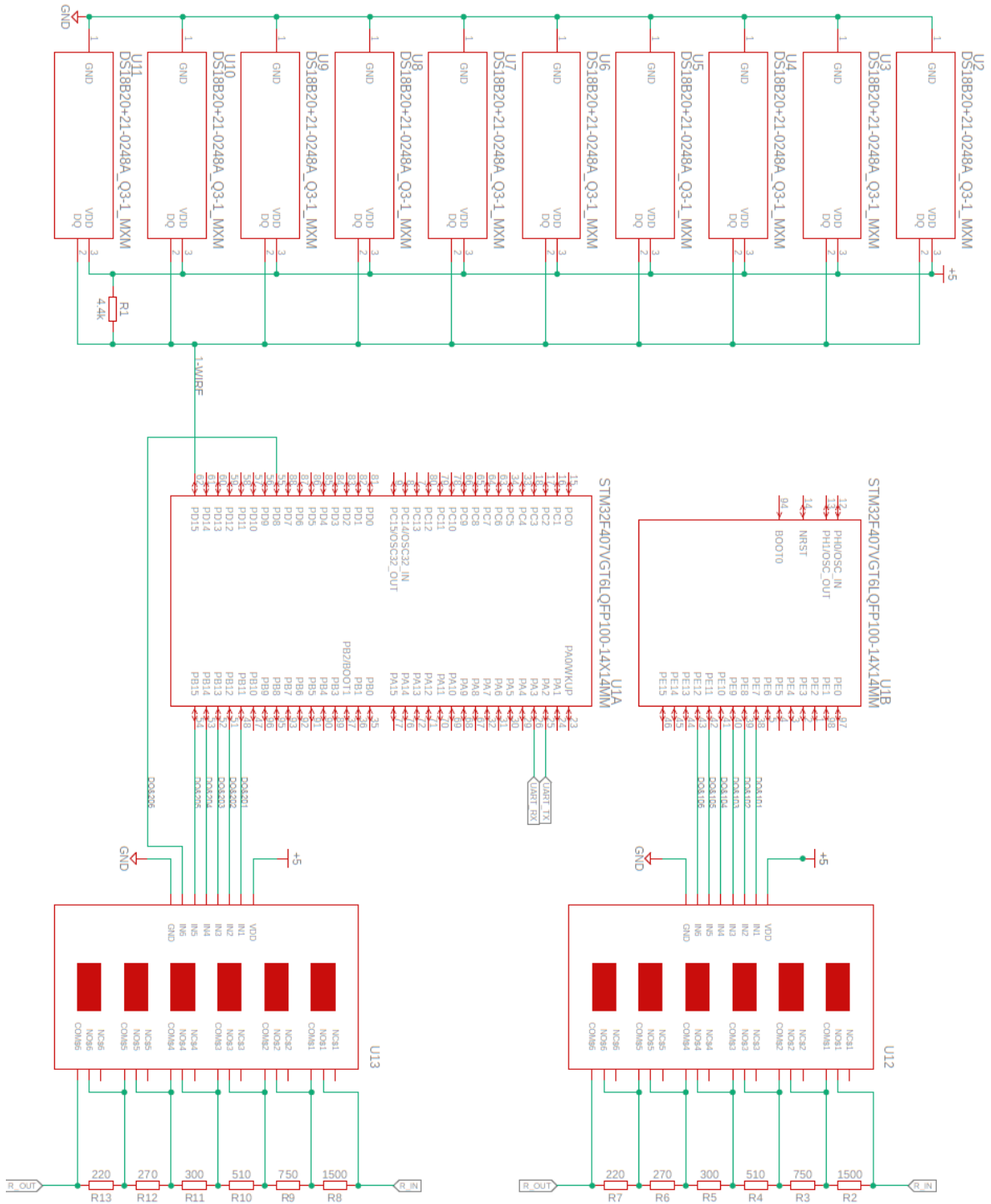
54. Microsoft. *Visual Studio 2022*. *Interaktyvus*. Prieiga per: <https://visualstudio.microsoft.com/vs/>. [žiūrėta 2024-05-04].

55. Microsoft. *Excel | Microsoft 365*. *Interaktyvus*. Prieiga per: <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/excel>. [žiūrėta 2024-05-05].

56. THE MATHWORKS, Inc. *R2022a - Updates to the MATLAB and Simulink Product Families*. *Interaktyvus*. Prieiga per: [https://uk.mathworks.com/products/new\\_products/release2022a.html](https://uk.mathworks.com/products/new_products/release2022a.html). [žiūrėta 2024-05-05].

# Priedai

## 1 Priedas. Tyrimui naudotos periferijos sujungimas su mikrovaldikliu



## 2 Priedas. Gaunamų duomenų UART kanalu nuskaitymo ir registravimo .csv faile programos kodo fragmentas

```
public void ParseBufferAndWrite(object sender)
{
    /* Funkcijos kintamieji */
    int l_data = 0, start_pos = 0, end_pos = 0;
    bool PacketFound = false;
    float[] Sensors;
    int sens = 0;
    /* Gaunamas funkcijos iskvietimo laikas */
    DateTime time;
    time = DateTime.Now;
    /* Sukuriamas StringBuilder */
    var csv = new StringBuilder();
    try
    {
        if (bytes > 0) /* Patikrinimas, ar gautas buferis nera tuscias */
        {
            /* Buferyje randamas siunciamas paketas */
            for (int i = 0; i < bytes; i++)
            {
                if (buffer[i] == START_BYTES[0] && buffer[i + 1] == START_BYTES[1])
                {
                    {
                        l_data = buffer[i + 2];
                        if (buffer[i + l_data - 2] == END_BYTES[0] && buffer[i + l_data - 1] == END_BYTES[1])
                        {
                            start_pos = i + 3;
                            end_pos = i + l_data - 2;
                            PacketFound = true;
                            break;
                        }
                    }
                }
            }
            /* Rastas paketas yra apdorojamas */
            if (PacketFound)
            {
                /* Gaunama temperatūra sudedama į float masyvą */
                Sensors = new float[(l_data - 5) / 2];
                /* Pradedama kurti failo eilutę */
                for (int i = start_pos; i < end_pos; i += 2, sens++)
                {
                    uint buf1, buf2;
                    buf1 = buffer[i]; buf2 = buffer[i + 1];
                    //uint tmp = ((buf1 & 0xFF) | ((buf2 & 0xFF) << 8));
                    Int16 tmp = (Int16)((buf2 << 8) | (buf1));
                    Sensors[sens] = (float)tmp / 100;
                }
                Sensors[sens - 1] *= 100; // varžos reikšmė
                /*Gauti duomenys irasomi į csv failą*/
                var newLine = time.ToShortDateString() + "\t" + time.ToLongTimeString() + "\t" + string.Join("\t",
Sensors);
```

```

        csv.AppendLine(newLine);
        File.AppendAllText(filepath, csv.ToString());
        csv.Clear();
        /*Baigus duomeni apdorojima isvalomas bufferis ir jo busenos veliava*/
        PacketFound = false;
        SerialPort.DiscardInBuffer();
        /* */
        if (RefreshFlag)
        {
            TextBox.Text = $"Temperatura vandens talpoje: {Sensors[Sensors.Length - 2]} °C \n Temperatura
patalpoje: {Sensors[Sensors.Length - 1]} °C";
            RefreshFlag = false;
        }
    }
    catch (Exception ex) { }
}

```

### 3 Priedas. Visų įmanomų varžų kombinacijų, varžų matricoje, paieškos programos kodo fragmentas

```
void ResistanceInit(void) {
    uint16_t res1[6] = { 1465, 730, 490, 290, 260, 215 };
    uint16_t res2[6] = { 1465, 725, 492, 293, 265, 215 };
    uint16_t R1var[0x40] = { 0 };
    uint16_t R2var[0x40] = { 0 };
    uint16_t R1[0x40] = { 0 };
    uint16_t R2[0x40] = { 0 };
    for (unsigned int i = 1; i < 0x40; i++) {
        R1[i] = R1[i - 1] + 0x01;
        R2[i] = R2[i - 1] + 0x01;
        for (unsigned int j = 0; j < 6; j++) {
            if ((R1[i] & (1 << j)) != 0) {
                R1var[i] += res1[j];
            }
            if ((R2[i] & (1 << j)) != 0) {
                R2var[i] += res2[j];
            }
        }
    }
    for (unsigned int i = 0; i < 0x40; i++) {
        for (unsigned int j = 0; j < 0x40; j++) {
            /* Randami visi imanomi bitu variantai */
            Rp[i][j] = ((R1[i] << 6) & 0xFFFF) | (R2[j] & 0xFFFF);
            if ((R1var[i] + R2var[j]) != 0) {
                /* Randamos visos imanomos varzu reikšmes */
                Rp_var[i][j] = (R1var[i] * R2var[j]) / (R1var[i] + R2var[j]);
            }
            if (Rp_var[i][j] >= 1490 && Rp_var[i][j] <= 1510){
                R_MaxSpeed = Rp[i][j];
            }
        }
    }
}
```