



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Šilumos siurblių ūkio valdymo algoritmo sudarymas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Benas Krasnickas

Projekto autorius

Lekt. prakt. Kęstutis Brazauskas

Vadovas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Šilumos siurblių ūkio valdymo algoritmo sudarymas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Benas Krasnickas

Projekto autorius

Lekt. prakt. Kęstutis Brazauskas

Vadovas

Prof. Dr. Renaldas Urniežius

Recenzentas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Benas Krasnickas

Šilumos siurblių ūkio valdymo algoritmo sudarymas 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.

Benas Krasnickas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Krasnickas, Benas. Šilumos siurblių ūkio valdymo algoritmo sudarymas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. prakt. Kęstutis Brazauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: Šilumos siurbliai, ENTSO-E, Nord Pool, valdymas, tyrimas.

Kaunas, 2025. 86 p.

Santrauka

Šiame darbe nagrinėjama šilumos siurblių valdymo sistemos optimizavimo galimybė, atsižvelgiant į kintančias elektros biržos kainas. Siekiant sumažinti šildymo išlaidas ir padidinti pastato energetinį lankstumą, buvo sukurtas ir išanalizuotas matematinis šilumos punkto modelis *MATLAB/Simulink* aplinkoje, kuriame atkartojama realaus objekto valdymo logika. Modelis papildytas algoritmu, valdančiu grįžtamosios temperatūros nustatymus, priklausomai nuo elektros kainų pokyčių – įvedant stiprinimo, išankstinio stiprinimo bei kainų piko režimus.

Tyrimo metu atlikti trys eksperimentai, kiekviename jų lyginant neoptimizuoto ir optimizuoto modelio veikimą. Simuliacijos buvo vykdomos naudojant realius lauko oro temperatūros ir elektros kainų duomenis, o vertinimas atliktas pagal elektros sąnaudas (kWh) ir jų kaštus (EUR). Rezultatai parodė, kad optimizuotas valdymas leidžia reikšmingai sumažinti elektros sąnaudas pinigine išraiška (iki 23,3 %), net jei suvartojamos energijos kiekis šiek tiek išauga. Taip pat buvo atlikta analizė su fiksuoto tarifo scenarijais (0.16 €/kWh ir 0.18 €/kWh), leidžianti įvertinti optimizavimo naudą įvairiomis rinkos sąlygomis.

Be to, darbe buvo sukonstruotas realaus laiko elektros kainų perdavimo prototipas. *Raspberry Pi* įrenginyje sukonfigūruota sistema automatiškai nuskaito *ENTSO-E* duomenis per *REST API* ir perduoda juos į *Modbus TCP/IP* protokolo registrus. Ši infrastruktūra sukuria sąlygas realiam algoritmų diegimui automatizuotose pastato valdymo sistemose. Atliktas tyrimas pagrindžia, kad siūlomas sprendimas gali tapti ekonomiškai naudingas šilumos punktų valdymo srityje, ypač, kai elektros kainos tampa vis labiau nepastovios.

Krasnickas, Benas. Development and research of a heat pumps system control algorithm. Master's Final Degree Project / supervisor lect. asst. Kęstutis Brazauskas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: Heat pumps, ENTSO-E, Nord Pool, control, research.

Kaunas, 2025. 86 p.

Summary

This thesis explores the potential for optimizing the control of heat pump systems in response to fluctuating electricity market prices. To reduce heating costs and enhance the building's energy flexibility, a mathematical model of a heat distribution substation was developed and analyzed in the *MATLAB/Simulink* environment. The model replicates the control logic of a real-world system and is supplemented with an algorithm that dynamically adjusts the return water temperature setpoint based on electricity price variations—introducing boost, pre-boost, and peak pricing modes.

Three experiments were conducted, each comparing the performance of the non-optimized and optimized models. The simulations used real outdoor air temperature and electricity price data, while the evaluation was based on electricity consumption (kWh) and associated costs (EUR). The results demonstrated that the optimized control significantly reduced electricity expenses (by up to 23.3%), despite a slight increase in energy usage. Additionally, a fixed-tariff analysis (0.16 €/kWh and 0.18 €/kWh) was performed to assess the benefits of optimization under different market scenarios.

Furthermore, a real-time electricity price transmission prototype was constructed. A *Raspberry Pi*-based system was configured to automatically retrieve *ENTSO-E* electricity price data via *REST API* and transmit it to *Modbus TCP/IP* protocol registers. This infrastructure enables the practical deployment of control algorithms in automated building management systems. The findings of this study indicate that the proposed solution offers promising economic benefits for heat substation control, particularly in the context of increasingly volatile electricity pricing.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Teorinė dalis.....	14
1.1. Įvadas į šilumos siurblius	14
1.1.1. Veikimo principai	14
1.1.2. Tipai.....	15
1.1.3. Taikymo sritys	16
1.2. Šilumos siurblių valdymo sistemos	17
1.2.1. Tradiciniai valdymo metodai.....	17
1.2.2. Pažangūs valdymo metodai	18
1.2.3. Pastato energijos valdymo sistemos (PVS)	19
1.3. Elektros biržos kainų dinamika	20
1.3.1. Elektros kainų formavimosi principai	20
1.3.2. <i>Nord Pool</i> ir <i>ENTSO-E</i>	21
1.3.3. Elektros kainų poveikis šildymo sistemoms.....	21
1.4. Šilumos siurblių valdymas pagal kintamas elektros kainas	23
1.4.1. <i>Nord Pool</i> integracija į šilumos siurblių valdymą.....	23
1.4.2. Optimizavimo strategijos.....	24
1.4.3. Praktiniai taikymo pavyzdžiai	25
1.4.4. Ateities tyrimų kryptys	26
1.5. Apibendrinimas	27
2. Tyrinėjamos sistemos analizė ir matematinio modelio kūrimas.....	28
2.1. Pastato charakteristikos	28
2.2. Automatikos sistema ir valdymas.....	29
2.2.1. Geoterminės jėgainės valdymo logika.....	31
2.2.2. Radiatorinio/grindinio šildymo kontūro valdymas.....	33
2.2.3. Ventiliacijos įrenginių kontūro valdymas	34
2.3. Duomenų surinkimo procesas	34
2.3.1. Duomenų šaltinis ir prieiga	35
2.3.2. Duomenų paruošimas	36
2.4. Šilumos punkto dinamikos atkartojimas matematiniam modelyje.....	36
2.4.1. Temperatūrų pokyčių analizė	36
2.4.2. Perdavimo funkcijų identifikacija	37
2.5. Dinaminio šilumos punkto modelio kūrimas „Simulink“ aplinkoje	45
2.5.1. Sistemos modeliavimo tikslas	46
2.5.2. Modelio kūrimo eiga	46
2.6. Šilumos siurblių elektros suvartojimas.....	53
2.6.1. Elektros suvartojimo duomenų analizė ir supaprastinimas	53
2.6.2. Dinaminis elektros kainos integravimas į modelį	54
2.6.3. Bendra elektros sąnaudų ir kainos skaičiavimo logika.....	54
2.7. Modelio loginė validacija	55
2.7.1. Sistemos elgsenos logika ir reakcijos seka.....	55

2.7.2. Reikšmių dinamika savaitės bėgyje.....	56
3. Elektros kainų nuskaitymo prototipo paruošimas integracijai į pastato valdymo sistemą	58
3.1.1. Įrenginio pasirinkimo pagrindimas.....	58
3.1.2. Operacinės sistemos diegimas ir nuotolinė prieiga	58
3.1.3. <i>Home Assistant</i> platforma konteineryje.....	59
3.1.4. <i>ENTSO-E</i> kintančių elektros kainų integracija.....	59
3.1.5. Duomenų apdorojimas ir įrašymas į tekstinį dokumentą	60
3.1.6. Elektros kainų palyginimas tarp „Home assistant“ ir „ENTSO-E“ šaltinių.....	61
3.1.7. Elektros kainų publikavimas per <i>Modbus TCP/IP</i> serverį	63
4. Tiriamoji dalis.....	65
4.1. Tyrimo eiga	65
4.2. Matematinio modelio optimizavimas pasitelkiant elektros kainą	65
4.3. Modelio įėjimo duomenys ir jų parinkimo pagrindimas	69
4.4. Eksperimentinių tyrimų eiga ir vertinimo metodika	69
4.4.1. Eksperimentas laikotarpiui 2025-03-27 – 2025-04-03.....	70
4.4.2. Eksperimentas laikotarpiui 2025-04-04 – 2025-04-11.....	73
4.4.3. Eksperimentas laikotarpiui 2025-04-12 – 2025-04-19.....	76
4.5. Optimizuoto valdymo veiksmingumo įvertinimas	79
4.6. Rekomendacijos praktiniam taikymui	81
Rezultatai ir išvados	82
Literatūros sąrašas	83
Priedai.....	87
1 Priedas. Šilumo siurblių ūkio principinė schema.	87
2 Priedas. <i>Matlab</i> programos kodas, skirtas integruoti duomenis į <i>Simulink</i> aplinką.....	88
3 Priedas. Perdavimo funkcijų TE18 <i>Matlab</i> programos kodas.....	90
4 Priedas. Perdavimo funkcijų TE20 <i>Matlab</i> programos kodas.....	91
5 Priedas. Perdavimo funkcijų TE21 <i>Matlab</i> programos kodas.....	92
6 Priedas. Perdavimo funkcijų TE22 <i>Matlab</i> programos kodas.....	93
7 Priedas. Perdavimo funkcijų TE19 <i>Matlab</i> programos kodas.....	94
8 Priedas. <i>Simulink</i> aplinkos “Elektros kainų perskaičiavimas“ bloko kodas.....	95

Lentelių sąrašas

1 lentelė.	Automatizacijos schemoje pavaizduotų informacijos rinkimo įrenginių aprašymas	30
2 lentelė.	Valdomų sistemos įrenginių charakteristika	30
3 lentelė.	Valdymo sistemoje naudojami matavimo įrenginiai	31
4 lentelė.	Grižtamosios temperatūros užduoties priklausomybė nuo lauko temperatūros	32
5 lentelė.	Geoterminių šilumos siurblių histerezės taškai	32
6 lentelė.	. Šilumos punkto dinamikos modeliavimo įėjimų–išėjimų poros ir jų paskirtys	37
7 lentelė.	Perdavimo funkcijų modelių tikslumo įvertinimas	45
8 lentelė.	Pirmojo eksperimento bendri rezultatai.....	73
9 lentelė.	Antrojo eksperimento bendri rezultatai	76
10 lentelė.	Trečiojo eksperimento bendri rezultatai.....	79
11 lentelė.	Visų atliktų eksperimentų bendri rezultatai.....	80

Paveikslų sąrašas

1 pav. Šildymo sistemos automatizavimo schema.....	29
2 pav. Grįžtamosios temperatūros nustatymo priklausomybė nuo lauko oro temperatūros	32
3 pav. Geoterminių šilumos siurblių valdymo schema	33
4 pav. <i>Desigo CC</i> platformos „Trend“ funkcija.....	35
5 pav. Perdavimo funkcijos ŠS → TE18 modeliavimo ir realių duomenų palyginimas	39
6 pav. Perdavimo funkcijos TE18, TE22 → TE20 modeliavimo ir realių duomenų palyginimas ...	40
7 pav. Perdavimo funkcijos TE20 → TE21 modeliavimo ir realių duomenų palyginimas.....	41
8 pav. Perdavimo funkcijos TE25, TE26, TE21 → TE22 modeliavimo ir realių duomenų palyginimas	43
9 pav. Perdavimo funkcijų TE18, TE20, TE22 → TE19 modeliavimo ir realių duomenų palyginimas	45
10 pav. Bendras šilumos punkto modelio vaizdas Simulink aplinkoje.....	47
11 pav. Šilumos siurblių įsijungimo logikos schema.....	48
12 pav. „Šilumos gamyba“ posistemės struktūra Simulink aplinkoje	49
13 pav. Grįžtamosios temperatūros nustatymo blokas.....	49
14 pav. „Šilto vandens talpa“ posistemės struktūra Simulink aplinkoje.....	50
15 pav. „Tiekiamos temperatūros su triukšmu“ posistemės struktūra Simulink aplinkoje.....	51
16 pav. „Radiatorinis/grindinis kontūras“ posistemės struktūra Simulink aplinkoje	52
17 pav. „Ventiliacijos įrenginių kontūras“ posistemės struktūra Simulink aplinkoje	53
18 pav. „Grįžtamosios temperatūros dinamika“ posistemės struktūra Simulink aplinkoje	53
19 pav. „Siurblių elektros sąnaudų skaičiavimas“ posistemės struktūra Simulink aplinkoje.....	55
20 pav. Modelio temperatūrų ir siurblių veikimo dinamika	56
21 pav. Realios objekto temperatūrų dinamikos grafikas	57
22 pav. Nuskaityti neapdoroti duomenys iš <i>ENTSO-E</i> duomenų bazės	60
23 pav. Duomenų struktūrizavimo kodas CSV integracijai	61
24 pav. <i>ENTSO-E</i> elektros kaupiamų duomenų lentelė CSV formato faile	61
25 pav. „Home assistant“ integruoto <i>ENTSO-E API</i> kainų nuskaitymo grafikas 2025-05-08	62
26 pav. „ENTSO-E transparency platform“ elektros kainų grafikas 2025-05-08	62
27 pav. Elektros biržos būsimos dienos kainų „Modbus“ <i>registru</i> nuskaitymas naudojant „Modbus Poll“ programinę įrangą.....	63
28 pav. Veikimo pagal elektros biržos kainas valdymo schema.....	67
29 pav. MATLAB Function blokas, nustatantis elektros kainos režimus	68
30 pav. Temperatūros nustatymo korekcijos posistemė	68
31 pav. Visa pertvarkyta siurblių valdymo struktūra su optimizavimo integracija	68
32 pav. 2025-03-27 – 2025-04-03 lauko oro temperatūros duomenys	71
33 pav. 2025-03-27 – 2025-04-03 ENTSO-E elektros biržos kainos	71
34 pav. 2025-03-27 – 2025-04-03 grįžtamosios temperatūros ir nustatymo reikšmės baziniame matematiniame modelyje.....	72
35 pav. 2025-03-27 – 2025-04-03 grįžtamosios temperatūros ir nustatymo reikšmės optimizuotame matematiniame modelyje.....	72
36 pav. 2025-04-04 – 2025-04-11 lauko oro temperatūros duomenys	74
37 pav. 2025-04-04 – 2025-04-11 ENTSO-E elektros biržos kainos	74
38 pav. 2025-04-04 – 2025-04-11 grįžtamosios temperatūros ir nustatymo reikšmės baziniame matematiniame modelyje.....	75

39 pav. 2025-04-04 – 2025-04-11 grįžtamosios temperatūros ir nustatymo reikšmės optimizuotame matematiniam modelyje.....	75
40 pav. 2025-04-12 – 2025-04-19 lauko oro temperatūros duomenys	77
41 pav. 2025-04-12 – 2025-04-19 ENTSO-E elektros biržos kainos	77
42 pav. 2025-04-12 – 2025-04-19 grįžtamosios temperatūros ir nustatymo reikšmės baziniame matematiniam modelyje.....	78
43 pav. 2025-04-12 – 2025-04-19 grįžtamosios temperatūros ir nustatymo reikšmės optimizuotame matematiniam modelyje.....	78

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ŠVOK – šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas;

COP – efektyvumo koeficientas;

MPV – prognozuojančiu modeliu grįstas valdymas;

FUZZY – neraiškiųjų aibių logika.

Įvadas

Lietuvoje ir kitose šalto klimato šalyse, šildymo sektoriaus dekarbonizacija tapo itin aktuali didėjant energijos kainoms ir siekiant klimato kaitos švelninimo tikslų. Elektra varomi šilumos siurbliai (ŠS) šiame kontekste laikomi viena kertinių technologijų, galinčių pakeisti iškastinį kurą ir reikšmingai sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas šildyme [1]. Tačiau žema lauko temperatūra kelia problemų: šalto klimato sąlygomis ŠS efektyvumas ženkliai krinta (pvz., prie $\sim -20^{\circ}\text{C}$ aplinkos COP tesiekia maždaug vieneta [30], todėl didžiausi elektros apkrovų pikai gali sutapti su šalčiausiais periodais, kai apkrova tinklui ir sąnaudos vartotojui būna didžiausios. Nepaisant to, modernūs šilumos siurbliai net ir žiemą gali išlaikyti priimtina našumą, o tam tikri inžineriniai sprendimai, pavyzdžiui, garintuvo pašildymas, leidžia reikšmingai padidinti šildymo galią ir efektyvumą net esant neigiamai lauko temperatūrai [36]. Be to, įvairių šaltinių analizės patvirtina didelę ŠS diegimo naudą: pavyzdžiui, Kanadoje atliktas modeliavimas parodė $\sim 36\%$ mažesnę energijos naudojimą ir $\sim 23\%$ mažesnes šiltnamio efektą sudarančių dujų emisijas namų ūkiuose perėjus prie oro-vandens ŠS [34], o šiaurės Kinijoje ŠS sistema pareikalavo iki 68% mažiau pirminės energijos nei ekvivalentinis tiesioginis elektrinis šildymas [35].

Tuo pat metu elektros energetikos sektoriuje didėjanti atsinaujinančių išteklių integracija lemia ženklesnius elektros kainų svyravimus rinkoje. Įvairiu paros metu elektros biržos kaina gali svyruoti nuo labai žemos iki itin aukštos [3]. Tokios kintamos kainos vartotojams kelia naujų iššūkių – netinkamai valdant ŠS, šildymo sąskaitos gali smarkiai išaugti, jei siurblys daugiausia veikia brangiausiu metu. Vis dėlto kainų svyravimai atveria ir galimybes: pritaikius lankstų valdymą, ŠS gali perkelti elektros vartojimą į pigesnes valandas ir taip sumažinti išlaidas vartotojui bei padėti subalansuoti tinklo apkrovą [5]. Pavyzdžiui, šilumos talpos integravimas gali dar labiau padidinti sistemos lankstumą – tyrime nustatyta, kad $8,5\text{ kW}$ galios ŠS su 300 L akumuliacine talpa, eksploatuojamas dviejų zonų tarifu, $\sim 37\%$ sumažino energijos sąnaudas ir emisijas palyginti su analogišku dujiniu šildymu [4, 32]. Atlikti tyrimai taip pat patvirtina, kad realaus laiko kainodara skatina vartotojus koreguoti energijos vartojimo įpročius: pigios elektros periodu iš anksto įšildžius pastatą, dalis šilumos poreikio patenkinama iš sukauptos energijos, todėl vėlesnėmis brangiomis valandomis elektros paklausa sumažinama [16, 18]. Tačiau norint pilnai išnaudoti tokį energetinį lankstumą, reikalingi pažangūs automatinio valdymo sprendimai.

Mokslinėje literatūroje nagrinėjamos įvairios ŠS valdymo strategijos: nuo paprastų, taisyklių logika grįstų metodų iki pažangaus, modelių pagrįsto predikcinio valdymo (angl. *model predictive control*, *MPC*). Pavyzdžiui, taikant paprastą taisyklėmis paremtą strategiją, kaip akumuliacinės talpos įkrovimą nakties metu pagal pigesnę tarifą, galima pasiekti tam tikrą ekonominę naudą [14]. Vis dėlto rankiniu būdu sudarytos valdymo taisyklės ne visada išnaudoja visą sistemos lankstumo potencialą. Šiuo atveju modelinis predikcinis valdymas leidžia optimaliai suplanuoti ŠS darbą iš anksto, į sprendimų priėmimą įtraukiant būsimos lauko temperatūros bei elektros kainų prognozes, todėl galima minimizuoti išlaidas išlaikant patalpų komfortą [12, 15]. Tyrimai pabrėžia, kad MPC metodai efektyviai suderina ekonominę naudą su komfortu, nors ir jų realizavimas reikalauja tikslių modelių ir didesnių skaičiavimo išteklių.

Šiame darbe keliamą hipotezę, kad šilumos siurblių darbo optimizavimas pagal valandines elektros kainas gali sumažinti šildymo sistemos eksploatacijos kaštus, išlaikant patikimą šilumos tiekimą. Tam planuojama sukurti matematiniu modeliavimu pagrįstą valdymo strategiją, kurioje grįžtamosios temperatūros užduotis bus koreguojama atsižvelgiant į realiuoju laiku kintančias elektros energijos

biržos kainas. Modelis bus paremtas *MATLAB/Simulink* platforma ir papildytas duomenų srautu iš *ENTSO-E* kainų šaltinio, siekiant įvertinti šio metodo efektyvumą tiek energetiniu, tiek ekonominiu aspektu. Toks tyrimas leis įvertinti valdymo sistemos lankstumą kintančioje rinkos aplinkoje ir galimą jos pritaikymą moderniose pastatų valdymo sistemose.

Darbo tikslas – sukurti ir ištirti šilumos siurblių valdymo algoritmą, optimizuojantį šilumos siurblių ūkio veikimą pagal kintančias elektros biržos kainas, siekiant sumažinti energijos sąnaudas ir išlaikant pastato šiluminį komfortą.

Darbo uždaviniai:

1. išanalizuoti šilumos siurblių valdymo principus ir pažangias optimizavimo strategijas;
2. ištirti realaus objekto šilumos punktą ir sudaryti jo matematinį modelį *Simulink* aplinkoje;
3. sukurti elektros kainų nuskaitymo ir perdavimo prototipą, paremtą elektros biržos duomenų integracija bei *Modbus TCP/IP* protokolu;
4. integruoti optimizuotą valdymo logiką į matematinį modelį bei atlikti simuliacijas, siekiant įvertinti ekonominį efektyvumą esant kintančioms elektros kainoms.

Šis darbas susideda iš keturių skyrių: teorinės, sistemos analizės ir modelio kūrimo, elektros kainų nuskaitymo prototipo rengimo bei tiriamosios dalies. Teorinėje dalyje analizuojami šilumos siurblių veikimo principai, jų valdymo metodai bei elektros kainų dinamikos įtaka šildymo sistemų eksploatacijai. Antroje dalyje aprašoma nagrinėjamos pastato sistemos analizė bei jos matematinio modelio sudarymo eiga „*Simulink*“ aplinkoje. Trečioje dalyje pateikiamas *ENTSO-E* elektros kainų nuskaitymo sistemos prototipo kūrimas ir jo integracijos galimybės į pastato valdymo infrastruktūrą. Tiriamojoje dalyje vykdomos simuliacijos, kuriomis įvertinamas sukurto optimizavimo algoritmo efektyvumas skirtingomis elektros kainų sąlygomis, o darbo pabaigoje pateikiamos išvados, pagrindžiančios tyrimo naudą ir aktualumą.

1. Teorinė dalis

1.1. Įvadas į šilumos siurblius

Šilumos siurblys (ŠS) – tai efektyvi ir aplinkai draugiška šildymo technologija, kuri naudoja atsinaujinančią šilumos energiją iš aplinkos (grunto, oro ar vandens) ir grąžina ją vartotojui aukštesnės temperatūros pavidalu, tokiu būdu „apversdama“ natūralų šilumos srautą (nuo žemesnės temperatūros šaltinio link aukštesnės) [1]. Šis procesas pasiekiamas naudojant išorinę energiją (dažniausiai elektros energiją) kompresoriui – būtent dėl to elektriniai šilumos siurbLIAI gali perkelti 3–4 kartus daugiau šilumos nei sunaudoja elektros energijos, t. y. jų darbinius naudingumo koeficientus (COP) paprastai sudaro 3–4 ir net daugiau [1]. Šilumos siurblio efektyvumas sezono metu apibūdinamas sezoniniu naudingumo koeficientu SCOP, apskaičiuojamu kaip vidutinis COP per visą šildymo sezoną [1]. Taip pat naudojamas sezoninio veiksmingumo koeficientas (SPF), nusakantis metinį tiekiamos šilumos ir per tą patį laikotarpį suvartotos energijos santykį realiomis eksploataavimo sąlygomis [1]. Dėl savo gebėjimo išgauti aplinkos šilumą ir aukšto efektyvumo ŠS priskiriami atsinaujinančios energijos technologijoms, padedančioms mažinti išmetamą CO₂ kiekį šildymo sektoriuje [1][2].

Šilumos siurbLIAI nėra visiškai nauja technologija – pirmieji principai buvo suprasti dar XIX a. antroje pusėje, o pramoniniai taikymai prasidėjo XX a. pirmoje pusėje, kai atsirado reikiami kompresoriai [1]. Tačiau tik po antrojo pasaulinio karo, ir ypač po 1970-ųjų naftos krizių, ŠS technologijų plėtra suintensyvėjo – daugelyje šalių pradėtos tyrimų programos, įsteigtos ŠS asociacijos ir sukurti produktų kokybės standartai [1]. Per pastaruosius kelis dešimtmečius ŠS tapo brandžia rinkos technologija. Europos šilumos siurblių asociacijos duomenimis, 2017 m. Europoje buvo parduota apie 1,1 mln. vienetų, o bendras eksploatuojamų ŠS skaičius pasiekė ~10,6 mln., kas sudarė apie 5 % pastatų šildymo rinkos pajėgumų [1]. Šių įrenginių naudojimas tais metais padėjo sumažinti CO₂ emisijas ~29,8 Mt bei generavo ~116 TWh šilumos energijos, sutaupant ~148 TWh pirminės energijos, palyginti su iškastiniu kuru, ir sukuriant dešimtis tūkstančių darbo vietų [1]. Nors Prancūzija, Italija ir Ispanija pagal pardavimų apimtį pirmauja (kartu ~50 % Europos rinkos), pagal ŠS paplitimą vienam gyventojui lyderiauja Skandinavijos ir Baltijos šalys (Norvegija, Estija, Suomija) [1]. Tai rodo, kad ŠS ypač patrauklūs regionuose, kuriuose tradiciškai brangios iškastinio kuro alternatyvos arba skatinama švarios energijos politika.

1.1.1. Veikimo principai

Elektrinio šilumos siurblio veikimas pagrįstas garų kompresijos termodinaminiu ciklu – ratu vykstančiu šaltnešio garavimo ir kondensacijos procesu uždaramame kontūre. Pagrindinės keturios ciklo dalys yra: kompresorius, garintuvas, kondensatorius ir išsiplėtimo vožtuvas. Šildymo režimu veikiantis ŠS vykdo šiuos žingsnius [1]:

1. garintuve skystas šaltnešis garuoja, absorbuodamas šilumą iš aplinkos šaltinio (oro, grunto ar kt.) ir virsta žemo slėgio garu;
2. kompresorius suslegia šaltnešio garus, smarkiai padidindamas jų slėgį ir temperatūrą;
3. kondensatoriuje karštas suslėgtas šaltnešio garas atiduoda šilumą šildymo sistemai (pvz., pastato vandens šildymo tinklui) – šaltnešis atvėsta ir kondensuojasi į skystį aukštu slėgiu;
4. per išsiplėtimo vožtuvą šaltnešio slėgis sumažinamas, jis dalinai išgaruoja ir atvėsta iki pradinės žemos temperatūros, po ko ciklas kartojasi.

Šio ciklo metu „pumpuojama“ šiluma iš žemesnės temperatūros aplinkos į aukštesnės temperatūros šildymo sistemą – tam suvartojama dalis elektros energijos kompresoriaus darbui, tačiau pernešamos šilumos kiekis yra daug kartų didesnis už sunaudotą elektrą, kaip minėta ($COP \sim 3-4$ ar daugiau) [1]. Dauguma ŠS be bazinių komponentų turi ir pagalbinių – ventiliatorius (oras-oras ar oras-vanduo tipams), cirkuliacinius siurblius, valdiklius ir kt. Kai kurie modeliai turi papildomų šilumokaičių, pvz., perkaitinto garo atvėsintuvus (desuperheater), kurie leidžia atgauti dalį kompresoriaus išėjimo šilumos karšto vandens ruošimui iki $\sim 65-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, didinant sistemos bendrą efektyvumą ruošti buitinį karštą vandenį [1].

Pažymėtina, kad šilumos siurblio ciklas yra grįžtamas – pakeitus šaltnešio srauto kryptį (pvz., keturkrypčiu vožtuvu), tas pats įrenginys gali veikti ir kaip šaldymo mašina (oro kondicionierius), t. y. vėsinti patalpas vasarą, šilumą iš patalpų išskirdamas į aplinką [1]. Taigi, daugelis ŠS yra dvipusio veikimo (reversiniai) – užtikrinantys tiek šildymą, tiek vėsinimą.

1.1.2. Tipai

Šilumos siurbLIAI klasifikuojami pagal kelis požymius: šilumos šaltinį, paskirtį (funkciją), darbinę energiją ir taikymo sritį [1]. Pagal šilumos šaltinį, išskiriami trys pagrindiniai ŠS tipai: oras-vanduo arba oras-oras (naudojantys lauko orą), gruntas-vanduo (naudojantys grunto šilumą, dar vadinami geoterminiais šilumos siurbLIAIS) ir vanduo-vanduo (naudojantys paviršinio ar požeminio vandens šilumą) [1]. Šie variantai dažniausiai žymimi santrumpomis anglų kalba: *ASHP* – *Air Source Heat Pump*, *GSHP* – *Ground Source Heat Pump*, *WSHP* – *Water Source Heat Pump*. Oras-oras siurblys tiesiogiai pučia šiltą orą į patalpą, o oras-vanduo ar kiti tipai perduoda šilumą per vandens kontūrą (pvz., grindiniam ar radiatoriniam šildymui). Kiti galimi šilumos šaltiniai – nuotekų vanduo, pramoninės atliekų šilumos srautai, geoterminis vanduo, saulės kolektoriai ar net dūmų dujos – literatūroje aprašyti kaip perspektyvūs, tačiau praktikoje kol kas paplitę nedaug [1].

Pagal funkciją šilumos siurbLIAI gali būti tik šildymui, tik vėsinimui (šaldymui) arba daugiaveikiai (teikiantys abu režimus, taip pat ruošti karštą vandenį). Dauguma modernių buitinės paskirties ŠS yra daugiaveikiai (šildymo-reversiniai) – žiemą šildo patalpas ir vandenį, vasarą gali veikti kaip kondicionieriai. Pagal naudojamą energiją, didžioji dalis rinkoje yra elektriniai kompresoriniai šilumos siurbLIAI. Taip pat egzistuoja absorbciniai šilumos siurbLIAI, kuriuos varo ne elektros energija, o šiluminė energija (pvz., gamtinės dujos arba biokuras) – juose kompresorių pakeičia terminis ciklas su absorbentu, dažniausiai amoniako-vandens arba LiBr tirpalo, ir jie tinkami didesnėms galimoms atgauti šilumos srautams [3]. Dar kita kategorija – mechaniniai (dujiniai) šilumos siurbLIAI, varomi tiesiogiai vidaus degimo varikliu ar dujiniu varikliu kompresoriui sukurti, bei hibridiniai sprendimai (pvz., sujungiant ŠS ir tradicinį katilą). Pagal taikymo sritį skiriami buitiniai (individualiems namams, nedideliams objektams), komerciniai (didesniems pastatams, biurams) bei pramoniniai ir centralizuoto šilumos tiekimo šilumos siurbLIAI (didelės galios įrenginiai, tiekiantys šilumą į šilumos tinklus) [1][4]. Pastarieji dažnai integruojami į miestų centralizuoto šildymo sistemas kaip *Power-to-Heat* sprendimai, panaudojant elektros energiją šilumos gamybai, ypač kai elektros rinkoje yra perteklius iš atsinaujinančių šaltinių [5].

Oras kaip šaltinis yra patogiausias (nereikia gręžinių ar vandens telkinio), todėl oras-vanduo šilumos siurbLIAI paplitę plačiausiai gyvenamuosiuose namuose. Jų trūkumas – efektyvumas krenta lauko temperatūrai žemėjant: esant $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ar žemesnei temperatūrai COP smarkiai mažėja, todėl ekstremaliai šaltomis dienomis oras-vanduo ŠS gali tiekti mažiau šilumos arba reikalauti elektros

tenų pagalbos [1][6]. Vis dėlto modernūs modeliai ženkliai patobulėjo – šiandieniniai oras-vanduo siurbliai kai kurių gamintojų deklaruojami veikiantys net prie $-20\ldots-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ lauko temperatūros, nors ir mažesniu našumu [1]. Oras-oras siurbliai Lietuvos ir Skandinavijos klimatuose taip pat populiarūs dėl mažesnės kainos ir paprasto montavimo, nors jų efektyvumas žemesnėje temperatūroje ribotas, o skleidžiamas triukšmas (lauko bloko ventiliatoriaus ir kompresoriaus garsas $\sim 55\text{--}65\text{ dB}$) kartais įvardijamas kaip trūkumas [1][6].

Gruntas kaip šilumos šaltinis turi pranašumą – žemės gelmių temperatūra žiemą būna aukštesnė nei oro, todėl gruntas-vanduo šilumos siurbliai pasižymi stabiliu ir aukštu efektyvumu net šalčiausiu sezonu [1][7]. Šiems siurbliams būtinas geoterminis šilumos jėgainės elementas – horizontalūs kolektoriai grunte arba vertikalūs giluminiai zondai (gręžiniai) – todėl jų įrengimas sudėtingesnis ir brangesnis. Tačiau eksploatuojant *COP* dažnai viršija 4 ar net 5, o vienas įrenginys gali patikimai tiekti šilumą ištisus metus bei vėsinti vasarą (naudojant pasyviąją vėsą iš grunto) [7]. Dėl didesnių pradinių investicijų geoterminiai ŠS dažniau diegiami ten, kur yra finansinė parama ar kur reikalingas maksimalus efektyvumas (pvz., pasiekti pasyvaus ar beveik nulinio energijos pastato standartą) [3][7].

Vanduo (paviršinis arba gruntinis) taip pat puikus šaltinis – žiemą neužšalusio ežero ar upės vandens temperatūra ($\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$) būna aukštesnė už oro, todėl vanduo-vanduo siurbliai gali pasiekti aukštą *COP*. Jų naudojimui reikia turėti prieigą prie vandens telkinio ar gręžinio vandens. Kai kur miestuose naudojami net kanalizacijos vandenys kaip šilumos šaltinis per šilumokaičius (nuotekų ŠS sistemos) [1]. Specifiniai pramoniniai sprendimai gali išnaudoti technologinius procesus – pavyzdžiui, šilumos siurblys gali „siurbti“ atlikusią šilumą iš gamyklos aušinimo vandens ir pakelti ją iki naudingos temperatūros kitur ceche. Taigi, ŠS tipų įvairovė leidžia pritaikyti įrenginį pagal poreikį: nuo mažo oro kondicionieriaus iki didelio ūkio geoterminės sistemos.

1.1.3. Taikymo sritys

Pastatų šildymas ir vėsinimas yra pagrindinė šilumos siurblių taikymo sritis. Gyvenamuosiuose namuose ŠS dažnai pakeičia arba papildo katilus – pavyzdžiui, oras-vanduo ŠS integruojamas į namo radiatorinę arba grindinio šildymo sistemą, o oras-oras ŠS naudojamas kaip autonominis šildytuvai/vėsintuvai vienai ar kelioms patalpoms [6]. Daugiabučiuose ir komerciniuose pastatuose taip pat diegiamos šilumos siurblių sistemos, dažnai vadinamos *VRV/VRF* (kintamo šaldymo agento srauto) sistemomis su daugybe vidinių blokų, aptarnaujančių biurus, viešbučius ir kt. [8]. Didesniems objektams populiarėja hibridinės sistemos – pavyzdžiui, šilumos siurblys kartu su dujiniu katilu (kai labai šalta, katilas padeda) arba su saulės kolektoriais bei fotovoltiniais moduliais (naudojama saulės energija ŠS maitinimui) [4][9].

Buitinio karšto vandens (BKV) ruošimas – svarbi sritis, kur ŠS diegiami kaip efektyvesnė alternatyva elektros vandens šildytuvams. Tam gaminami specialūs šilumos siurbliai-vandens šildytuvai (angl. *heat pump water heaters*), dažnai integruoti su vandens talpa. Tokie įrenginiai gali naudoti patalpos orą ar orą iš lauko ir pasirūpinti namo BKV poreikiu ~ 3 kartus efektyviau nei elektrinis tenas [10]. Tyrimai rodo, kad pritaikant pažangų valdymą (pvz., modelinį predikcinį valdymą) BKV šilumos siurbliai gali pasinaudoti mažesnės elektros kainos valandomis [10][11].

Pramonėje ir infrastruktūroje šilumos siurbliai naudojami atgauti ir panaudoti žemesnės temperatūros šilumą. Pavyzdžiui, maisto pramonėje atliekinė $30\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ šiluma gali būti pakelta iki $70\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir grąžinta procesui arba patalpų šildymui [3]. Džiovyklos, sandėliai, šiltnamiai – visur, kur reikia

šildymo žemesnėje temperatūroje, ŠS gali sumažinti energijos sąnaudas. Taip pat jie naudojami gyvulininkystės sektoriuje – modernūs tvartai naudoja ŠS, palaikančius mikroklimatą su mažesnėmis sąnaudomis [4].

Centralizuoto šilumos tiekimo sistemos (CŠT) vis labiau integruoja didelio galingumo šilumos siurblius. Tai ypač aktualu Skandinavijoje ir kitur, kur siekiama 4-os kartos šilumos tinklų – lanksčių, žemos temperatūros, integruotų su elektros tinklu („Power-to-Heat“ koncepcija) [5]. Šilumos siurbLIAI CŠT tinkluose gali naudoti, pavyzdžiui, jūros ar ežerų vandenį kaip šaltinį ir tiekti ~70 °C šilumą į tinklą. Danijoje jau veikia nemažai didelių ŠS, naudojančių vėjo jėgainių perteklinę elektrą šilumos gamybai talpyklose – tai padeda subalansuoti tinklą ir sumažinti šildymo kainą esant žemoms elektros kainoms [5]. Baltijos šalyse taip pat atlikti tyrimai apie didelių ŠS potencialą – pavyzdžiui, analizuojant *Nord Pool* kainas ir gamtinių dujų kainas, įvertinta, kad dideli ŠS gali būti ekonomiškai naudingi integruojant atsinaujinančius šaltinius į miesto šilumos ūkius [5][12].

Apibendrinant, šilumos siurbLIAI jau pritaikomi plačiai: individualiuose būstuose, komerciniuose pastatuose, gamyboje ir net centralizuoto tiekimo sistemose. Tolimesniuose skyriuose bus aptarta, kaip šie įrenginiai valdomi tradiciniais ir pažangiais metodais, ir kaip jų darbą galima optimizuoti atsižvelgiant į kintančias elektros kainas bei kitus iššūkius.

1.2. Šilumos siurblių valdymo sistemos

Šilumos siurblio našumas ir eksploatacijos kaštai labai priklauso nuo tinkamo valdymo algoritmo. Valdymo sistema sprendžia, kada ir koku režimu siurblys turi veikti, kad palaikytų komfortišką temperatūrą ir efektyviai naudotų energiją. Istoriskai plačiausiai paplitę paprasti, tradiciniai valdymo metodai, tačiau pastaruoju metu vis daugiau dėmesio skiriama pažangiems, intelektualiesiems metodams bei integracijai į pastato energijos valdymo sistemas (PEVS). Šiame skyriuje aptariamos skirtingos valdymo strategijos.

1.2.1. Tradiciniai valdymo metodai

Daugumoje buitinės paskirties šilumos siurblių tradiciškai naudojamas paprastas termostatinis valdymas: šilumos siurblys įjungiamas, kai patalpos (arba sistemos vandens) temperatūra nukrenta žemiau nustatyto taško, ir išjungiamas, kai viršijamas aukštesnis nustatymas (histerezė) [13]. Toks ON/OFF valdymas su termostatu yra techniškai paprastas ir užtikrina bazinį komfortą, tačiau nebūtinai optimalus energijos vartojimo požiūriu. Dažnai nustatoma ir lauko oro temperatūros kompensacija – vadinamoji kreivė, pagal kurią šildymo kontūro vandens temperatūra automatiškai keliama esant šaltesniam orui lauke. Šis orų kompensacijos metodas plačiai taikomas katilams ir ŠS: valdiklis pagal lauko daviklį palaiko aukštesnę tiekiamo vandens temperatūrą stipriai pašalus, ir žemesnę – esant šiltesniam orui. Tai padeda išvengti pernelyg dažno kompresoriaus įjungimo ir pagerina stabilumą [14].

Tradiciiniame valdyme paprastai nenumatoma optimizacija pagal elektros kainą ar kitus išorinius veiksnius – tik reaktyvus valdymas pagal temperatūrą. Šiuolaikiniai įrenginiai dažnai turi invertorius (kintamo greičio kompresorius) – tai leidžia moduluoti galingumą. Tradicinis moduluojamo ŠS valdymas – palaikyti pastovią užduotinę temperatūrą: pavyzdžiui, grindų šildymo kontūre palaikoma 30 °C, kompresoriaus dažnis automatiškai reguliuojamas, kad išlaikytų šią temperatūrą esant kintamai apkrovai. Nors tai užtikrina efektyvesnį veikimą nei nuolatinis junginėjimas, tačiau valdiklis

vis dar orientuotas tik į tiesioginį rezultatą (temperatūros palaikymą) ir nenaudoja išankstinės informacijos ar optimizavimo [15].

Tradiciniai metodai laikomi patikimais dėl savo paprastumo – tiek projektavime, tiek įgyvendinime. Daugelyje pastatų energijos valdymo sistemų iki šiol vyrauja tokie klasikiniai metodai, nes jie pakankamai gerai atlieka darbą ir reikalauja mažiau derinimo [16]. Klasikiniai valdymo metodai, tokie kaip termostatinis ar proporcinis-integralinis valdiklis, dažnai dominuoja pastatų energijos valdymo sistemose dėl jų paprastumo, patikimumo ir ilgo naudojimo istorijos, ypač laikotarpiu, kai energijos kainos buityje buvo gana stabilios, o tai sumažino motyvą diegti sudėtingesnius sprendimus. Vis dėlto šylant pastatų sektoriui ir didėjant atsinaujinančių šaltinių daliai elektros energetikoje, net paprastuose gyvenamuosiuose namuose atsiranda poreikis lanksčiau valdyti šilumos siurblius. Tai paskatino pažangesnį metodų kūrimą.

1.2.2. Pažangūs valdymo metodai

Pažangiu valdymu laikomi metodai, kurie pasitelkia moderniąsias technologijas – daviklių tinklus, prognozes, optimizavimo algoritmus, dirbtinį intelektą – siekiant efektyviau valdyti ŠS darbą. Vienas iš populiariausių pažangaus valdymo būdų yra modelinis predikcinis valdymas (MPV) (*Model Predictive Control, MPC*). MPV algoritmas naudoja matematinį pastato ir šildymo sistemos modelį, kad prognozuotų būsimas patalpų temperatūras ir energijos sąnaudas, ir optimizuoja ŠS veikimą tam tikram horizontui [18]. Šis metodas leidžia atsižvelgti į daugybę veiksnių vienu metu: būsimą lauko oro temperatūrą, patalpų šilumos apkrovą, net numatomas elektros kainas ar kitus apribojimus. Tyrimai rodo, kad MPV geba ženkliai sumažinti energijos sąnaudas išlaikant komfortą, palyginti su tradiciniu valdymu: pavyzdžiui, vieno namo eksperimentas Vokietijoje parodė ~13–20 % elektros sutaupymą per sezoną naudojant MPV vietoje paprasto termostatinio valdymo [11]. Kitame tyrime, MPV algoritmas, optimizuojantis ŠS darbą atsižvelgiant į kintamas elektros kainas, pasiekė net iki 35 % kaštų sutaupymą lyginant su nekoreguotu tradiciniu režimu [16]. Taigi, vienas akivaizdus pažangaus valdymo privalumas – galimybė įtraukti kainų ir kitų išorinių signalų prognozes į valdymo sprendimus.

Kitas svarbus pažangaus valdymo tipas – dirbtinio intelekto metodai. Tai gali būti *fuzzy* logika (neraiški logika), genetiniai algoritmai optimizavimui, arba vis labiau populiarėjantys mašininio mokymosi metodai, ypač stiprinamasis mokymasis (angl. *reinforcement learning, RL*) [3][19]. Pastaraisiais metais mokslinėje literatūroje pasirodė nemažai pavyzdžių, kaip RL pritaikomas ŠS valdyti autonomiškai: agentas po daugybės simuliacijų išmoka, kada geriau išjungti ar sumažinti ŠS, kada jį įjungti anksčiau ir pan. [19][20]. Viena iš tyrimų buvo taikomas Q-mokymosi algoritmas 32 realių namų karšto vandens šilumos siurbliams; per bandomąjį laikotarpį šis metodas sumažino elektros suvartojimą karšto vandens ruošimui ~20 %, išlaikant vartotojų komfortą [20]. Kitoje studijoje panaudotas gilesnis stiprinamasis mokymasis su neuroniniu tinklu leido ~15 % sumažinti ŠS sistemos pikinę apkrovą ir ~10 % energijos sąnaudų, palyginti su tradiciniu valdymu, mokantis iš elektros kainų dinamikos ir orų prognozių [19]. Nors DI metodai reikalauja daugiau skaičiuojamosios galios bei duomenų mokymui, jų lankstumas leidžia prisitaikyti prie sudėtingų sistemų net kai tikslaus fizinio modelio sudaryti sunku.

Pažangūs valdikliai taip pat suteikia galimybę vienu metu siekti kelių tikslų – ne tik minimizuoti energijos sąnaudas, bet ir optimizuoti komfortą, riboti galingumą ar išnaudoti savo paties pagamintą saulės energiją. Tradiciniai valdikliai paprastai fokusavosi tik į komfortą, o MPC ar DI gali įvesti

svorio koeficientus, pvz., elektros kainos ir komforto kompromisui: tai leidžia sistemos operatoriui pasirinkti, ar labiau taupyti išlaidas, ar griežčiau palaikyti idealią temperatūrą [16][18]. Kitas pažangaus valdymo privalumas – gebėjimas atsižvelgti į nepastovų ŠS efektyvumą. Pavyzdžiui, oras-vanduo siurblio *COP* priklauso nuo lauko temperatūros: pažangus valdiklis gali nuspręsti daugiau šildyti namą tada, kai *COP* aukštas (šiltesnėmis valandomis), ir mažinti darbą, kai *COP* krenta (labai šaltomis valandomis) – taip išnaudojant ŠS efektyvumo svyravimus savo naudai [16]. Tradicinis valdymas tokio lankstumo neturi.

Svarbu pažymėti, kad nors pažangūs metodai demonstruoja puikius rezultatus tyrimuose ir bandomuosiuose projektuose, jų diegimas realiame gyvenime vis dar kelia iššūkių. Ne visi vartotojai ir montuotojai pasiruošę sudėtingoms sistemoms – dažnai reikalaujama patikimumo ir „plug-and-play“ principo. Be to, pažangūs valdikliai gali reikalaus patikimų prognozių, pavyzdžiui, netiksliai orų prognozė gali pabloginti MPV efektyvumą [19]. Tendencija aiški – pastatų energetikos automatizacija progresuoja link didesnio intelektualumo, o šilumos siurbliai dėl savo lankstumo tampa centriniu tokių sistemų elementu [16][22].

1.2.3. Pastato energijos valdymo sistemos (PVS)

Pastato valdymo sistema (angl. *Building Management System, BMS*) – tai kompiuterizuota sistema, kuri stebi ir kontroliuoja įvairias pastato inžinerines sistemas: šildymą, vėdinimą, oro kondicionavimą (ŠVOK), apšvietimą, apsaugą ir kt., siekdama optimizuoti energijos naudojimą ir palaikyti gyventojų komfortą [23]. Šilumos siurbliai, ypač moderniuose energiška efektyviuose pastatuose, dažnai būna integruoti į PVS kaip vienas iš valdomų įrenginių. Tai leidžia koordinuoti ŠS darbą su kitomis sistemomis ir išnaudoti sinergiją.

Tradicinėse PVS (paprastai diegiamose didesniuose komerciniuose pastatuose) ŠS valdymas būdavo gana paprastas – centrinis valdiklis nustatydavo šildymo kontūro užduotį pagal grafiką (pvz., darbo valandomis +21 °C, naktį +17 °C) ir pagal lauko temperatūrą. Naujos kartos PVS, atsiradus daugiau jutiklių ir duomenų, gali daryti daugiau: pavyzdžiui, sekti, kiek žmonių realiu laiku yra patalpose, koks CO₂ lygis ir atitinkamai koreguoti tiek ŠS, tiek vėdinimo sistemos darbą [24]. Taip išvengiama energijos švaistymo šildant tuščias patalpas arba palaikant per aukštą temperatūrą. Tyrimai rodo, kad integruotas pastato valdymo sistemų (PVS) požiūris gali sumažinti pastato energijos sąnaudas 10–20 %, palyginti su nekoordinuotomis, atskiromis sistemomis [25]. Pavyzdžiui, viename tyrime PVS, naudojanti modelio prognozinį valdymą, sumažino biurų pastato šildymo energijos suvartojimą apie 12 %, efektyviai derindama šilumos siurblio, saulės kolektorių ir termoaktyvių konstrukcijų veikimą, lyginant su tradiciniais rankiniais valdymo grafikais [25].

Šilumos siurblio integracija į PVS leidžia taip pat realizuoti paklausos valdymą pastatų lygiu. PVS gali gauti signalus iš tinklo ar elektros tiekėjo apie poreikį sumažinti apkrovą tam tikromis valandomis ir tuomet centralizuotai šiek tiek atvėsinti pastatą arba persijungti į kitą šaltinį, jei yra. Toks koordinuotas valdymas neįmanomas su pavieniais termostatais, tačiau per PVS – tai tiesiog programinės logikos klausimas.

Taigi, pastato energijos valdymo sistema apjungia atskirus išmanius valdiklius į vieningą protingą visumą. Šilumos siurblių valdymas PVS aplinkoje tampa nebe lokalia užduotimi („pasiekti X temperatūrą“), o dalimi globalesnės optimizacijos („minimalios sąnaudos visam pastatui, esant X komforto lygiui“). Tai yra svarbu ne tik vieno pastato mastu, bet ir energetikos sistemos mastu, kai tūkstančiai pastatų sudaro didelį lanksčios paklausos potencialą. Tradicinės pastato valdymo sistemos

vis dar dominuoja daugelyje pastatų, tačiau IoT pagrįstos intelektinės PVS vis plačiau diegiamos, nes jos optimizuoja energijos sąnaudas ir sudaro galimybes aktyviai dalyvauti elektros rinkoje per paklausos atsako mechanizmus [26].

1.3. Elektros biržos kainų dinamika

Siekiant suprasti, kaip šilumos siurblių darbą galima derinti prie elektros kainų, pirmiausia reikia aptarti pačių elektros kainų formavimosi principus ir rinkos dinamiką. Lietuva ir kaimyninės šalys dalyvauja bendroje Šiaurės Europos elektros biržoje *Nord Pool*, kurioje kaina nustatoma kiekvienai valandai atskirai, remiantis pasiūlos ir paklausos pusiausvyra laisvojoje rinkoje [29]. Taip pat veikia *ENTSO-E* (Europos elektros perdavimo sistemų operatorių tinklas) koordinuojamas bendros dienos išankstinės prekybos mechanizmas (angl. *Single Day-Ahead Coupling, SDAC*), apjungiantis Europos šalių biržas.

1.3.1. Elektros kainų formavimosi principai

Laisvojoje elektros rinkoje kaina nustatoma aukciono būdu – elektrinės (tiektėjai) ir vartotojai (pirkėjai) pateikia siūlymus, kiek energijos norėtų parduoti ar pirkti už tam tikrą kainą, o biržoje sudaromos pusiausvyros taško sandoriai kiekvienam valandos intervalui [29]. Dienos į priekį rinkoje (angl. *day-ahead*) visas artėjančios paros 24 valandų kainos nustatomos iškart, remiantis paraiškomis, pateiktomis iki nustatyto termino (*Nord Pool* biržoje – iki ~13:00 Lietuvos laiku kiekvieną dieną). Biržos algoritmas suformuoja paklausos kreivę ir pasiūlos kreivę kiekvienai valandai; šių kreivių susikirtimo taškas lemia tą valandą galiojančią rinkos kainą (dar vadinamą lygiaverte kaina, angl. *clearing price*) ir sudaromą kiekį [29]. Visi gamintojai, kurie pasiūlė elektrą pigiau nei ši kaina, gauna galimybę parduoti energiją ir gauna būtent rinkos kainą (ne savo siūlytą, jei siūlė pigiau – skirtumas tampa jų pelnu); analogiškai, visi pirkėjai (tarp jų – tiektėjai, kurie perka elektrą vartotojų poreikiui) moka rinkos kainą [29]. Šis vieningos kainos aukciono principas skatina gamintojus konkuruoti mažinant kainą, nes pigiausios elektrinės pirmiausia užtikrina pardavimą.

Elektros perdavimo tinklai turi ribotą pralaidumą tarp regionų, todėl *Nord Pool* rinka padalinta į keliolika kainų zonų. *Nord Pool* taip pat apskaičiuoja sisteminę kainą – teorinę kainą, jei nebūtų jokių perdavimo suvaržymų, kuri naudojama finansiniuose sandoriuose kaip etalonas [29]. Lietuvos elektros kainą biržoje lemia vietinės elektrinės, kurių nėra daug, ir daugiausia – importas iš Švedijos, Latvijos, Lenkijos, todėl kainos labai priklauso nuo situacijos kaimyninėse rinkose ir tarptautinių jungčių pralaidumų.

Trumpalaikiai kainos svyravimai atspindi elektros paklausos ir pasiūlos balansą: dieną, kai vartojimas didelis (pvz., rytinis ir vakarinis pikas), o generacija (pvz., saulės, vėjo) gali būti nepakankama, kaina kyla; naktį ar esant dideliui atsinaujinančių išteklių generavimui – kainos krenta. 2020–2022 m. Europoje buvo užfiksuoti neigiamų elektros kainų epizodai, kai vėjuotomis naktimis vėjo energijos perteklius viršijo paklausą, sudarydamas galimybę lanksčiai elektrą vartojantiems vartotojams gauti kompensaciją [30]. Toks reiškinys kol kas retas Baltijos šalyse, tačiau vis augant vėjo jėgainių parkams ateityje neigiamos ar nulinės kainos valandos gali pasitaikyti ir pas mus.

Svarbu ir tai, kad galutiniai vartotojai elektros rinkoje gali turėti skirtingų tipų tarifus: fiksuotą kainą arba dinaminį tarifą, susietą su biržos kainomis (pvz., *Nord Pool* dienos į priekį kainos, pridėdant tiekėjo maržą) [9]. Pastaruoju metu vis daugiau namų ūkių renka dinaminį planą, pavyzdžiui, Švedijoje 2019 m. jau daugiau nei 50 % namų ūkių buvo pasirinkę kintamos kainos sutartį [9]. Tai

reiškia, kad jiems tiesiogiai rūpi biržos kainos valandos – sąskaita priklauso nuo to, kada sunaudota elektra. Lietuvoje taip pat nuo 2023 m. pradėti siūlyti planai, kur kaina susieta su birža. Būtent tokiems vartotojams aktualu keisti įpročius: paklausos valdymas (angl. *load shifting*) – vartoti daugiau elektros pigiais periodais ir mažiau brangiais. Šilumos siurbliai tam labai tinkami, nes šildymą galima tam tikru laipsniu akumuliuoti (patalpose ar boilerio vandens talpoje).

1.3.2. *Nord Pool* ir *ENTSO-E*

Nord Pool – viena seniausių ir didžiausių elektros biržų Europoje, apimanti Šiaurės ir Baltijos šalių regioną. Ji funkcionuoja pagal minėtus principus: kasdien skelbia dienos išankstines kainas kiekvienai valandai kitai parai, taip pat veikia vidudieninė rinka (angl. *intraday*), kur prekyba vyksta operatyviai iki pat pristatymo valandos [29]. *Nord Pool* padalinta į zonas, atitinkančias šalių teritorijas ar jų dalis, siekiant valdyti perdavimo tinklo apkrovas. Pavyzdžiui, Lietuva – tai atskira LT zona. *ENTSO-E* lygmeniu *Nord Pool* dalyvauja bendrame Europos rinkos susiejime: „Single Day-Ahead Coupling“ reiškia, kad visos šalys vykdo vieną bendrą aukcioną sujungtomis pajėgumų ribomis – tai užtikrina, jog iš principo elektra teka iš žemesnės kainos zonų į aukštesnės kainos zonas iki tol, kol užpildomi perdavimo linijų pajėgumai, taip maksimaliai suvienodinant kainas ir padidinant bendrą socialinę gerovę [29][31]. Paprastai tariant, jei Lietuvoje kyla poreikis pigesnės elektros, mes importuojame iš Švedijos, Latvijos ar kitur tol, kol linijos netampa pilnai apkrautos; tuomet, jei vis dar trūksta pigesnės generacijos, Lietuvos zonoje kaina kyla aukščiau nei kaimynų.

ENTSO-E vaidmuo – koordinuoti tarpvalstybinį perdavimą ir užtikrinti skaidrumą. *ENTSO-E* valdo Europos elektros rinkos duomenų skaidrumo platformą, kur realiu laiku skelbiami duomenys apie generaciją, vartojimą, kainas, perdavimus ir kt. Per *ENTSO-E* sistemą *Nord Pool* ir kitos biržos keičiasi informacija, kad galėtų atlikti sėkmingą bendrą kainų skaičiavimą. *Nord Pool* kainos (tiek dienos išankstinės, tiek vidinės rinkos) skelbiamos viešai kiekvienos paros popietę visoms kitai dienai – šiuos duomenis gali automatiškai pasiekti ir intelektualios valdymo sistemos (yra viešos *API* sąsajos) [32]. Be to, *Nord Pool* pateikia istorinius kainų archyvus, kuriuos tyrėjai naudoja analizuoti, pavyzdžiui, kiek valandų per metus elektros kaina būna mažesnė nei tam tikra riba, kiek – didesnė, kokios būna maksimalios piko kainos ir pan. Pavyzdžiui, 2020 m. *Nord Pool* kainos svyravo nuo ~10 EUR/MWh naktimis iki 60–80 EUR/MWh piko metu, su metiniu vidurkiu apie 30 EUR/MWh, tačiau 2022 m. energijos krizė lėmė kainų šuolius virš 500 EUR/MWh, o vidurkiausiai reikšmingai išaugo [30]. Toks nepastovumas – naujas reiškinys vartotojams, anksčiau turėjusiems stabilius tarifus, ir tai skatina ieškoti būdų prisitaikyti.

1.3.3. Elektros kainų poveikis šildymo sistemoms

Kintamos elektros kainos sukuria tiek iššūkius, tiek galimybes šildymo sektoriuje. Šilumos siurbliai, kaip elektros energija varomi įrenginiai, jautriai reaguoja į elektros kainą: kai kaina labai aukšta, jų veikimas tą valandą tampa brangesnis nei alternatyvūs šilumos šaltiniai (pvz., dujos ar biokuras), tačiau kai kaina žema – šildyti yra itin pigu. Todėl dinamiškos kainos skatina paklausos valdymą šilumos ūkyje: t. y. lankstų šilumos poreikio tenkinimą laike.

Namų ūkyje tai reiškia, kad turint *Nord Pool* tarifą, gyventojas gali sąmoningai keisti termostato nustatymus: pavyzdžiui, leisti namui šiek tiek labiau atvėsti brangios elektros valandomis (ryte ir vakare), o intensyviau pašildyti namus per nakties pigias valandas. Tokiu būdu vidutinė paros temperatūra išlieka komforto ribose, bet didesnė dalis energijos sunaudojama pigiau kainuojančiu metu – vadinama šilumos kaupimu pastato masėje arba šiluminės inercijos išnaudojimu [33]. Tyrimai

rodo, kad gerai izoliuotas pastatas gali 2–3 valandas išbūti išjungus šildymą su tik nedideliu ($\sim 1^\circ\text{C}$) vidaus temperatūros nukritimu, priklausomai nuo namo šiluminės talpos [34]. Pavyzdžiui, vieno tyrimo metu trijų britų namų šilumos siurbliai buvo išjungiami kasdien nuo 16 iki 19 val. vakaro ir per tą laiką temperatūra vidutiniškai nukrito vos $\sim 0,6\text{--}1,1^\circ\text{C}$ naujesnės statybos name, o senesnės statybos namuose – $\sim 1,1\text{--}1,5^\circ\text{C}$ [34]. Dalies gyventojų toks trumpalaikis komforto sumažėjimas net nepastebimas arba priimtinas mainais į sutaupymą, nors kai kurie jautresni žmonės jau po $\sim 1^\circ\text{C}$ pokyčio pradeda jausti vėsumą [34]. Taigi, žmogaus veiksnys tampa svarbus – kiek esame pasirengę toleruoti temperatūros svyravimus dėl pigesnės energijos.

Kainų dinamika itin veikia ir didesnes sistemas. Centralizuoto šildymo įmonės su elektrinėmis katilinėmis ar šilumos siurbliais turi spręsti, kada naudoti elektros įrangą, kada – kitus šaltinius. Pavyzdžiui, jeigu turime hibridinę katilinę: biokuro katilą ir šilumos siurblį, optimalu naudoti ŠS tada, kai elektros kainos (kWh) santykis su kuro kaina (kWh) yra pakankamai mažas, kad su COP laimėtume. Jei elektra pabrangsta, perjungiamo į biokurą. Toks optimizavimo uždavinys sprendžiamas realiu laiku ar prieš parą, remiantis kainų prognoze [12]. Tyrimai Austrijoje parodė, kad namų ūkių lygmeniu integravus išmanų valdiklį ŠS ir elektrinio boilerio sistamai, per metus įmanoma sumažinti išlaidas $\sim 15\%$, perkeliant suvartojimą į mažesnius kainos periodus, tačiau bendra suvartota elektros energija gali šiek tiek padidėti ($2\text{--}5\%$), nes įvedami kompromisai su efektyvumu dėl laikino peršildymo ar energijos kaupimo nuostolių [18][33]. Tai įdomus aspektas: taupant pinigus, ne visuomet taupoma energija. Pavyzdžiui, pastatą aktyviai prišildant prieš brangaus tarifo valandas, suvartojama daugiau šilumos nei idealiu atveju reikėtų, dėl perteklinės temperatūros ir papildomų nuostolių. Modeliavimas Austrijos sąlygomis (36 tipiniai namai su ŠS) parodė, kad padidinus elektros kainų svyravimus (scenarijai su 4 kartus didesne kainų amplitudė ateityje), namų ūkiai galėtų perkelti $\sim 59\%$ daugiau apkrovos laiko požiūriu, tačiau vieno namo lygmeniu metinės išlaidos sumažėtų tik keliais procentais, o vien investicijos į išmanų valdymą, deja, gali neatsipirkti, jei kainų skirtumai nėra pakankamai dideli [12]. Mascherbauer ir kt. (2022) atliko išsamų modeliavimą Austrijos mastu: jie parodė, kad padidinus elektros kainų nepastovumą, pastatai su ŠS galėtų per metus perstumti iki $\sim 17,7$ GWh poreikio iš brangaus laiko į pigų (visos Austrijos mastu), tačiau vieno namo sutaupytos lėšos būtų per mažos, kad paskatintų papildomų investicijų į valdymo sistemas – taip tvirtina jų išvada [12]. Tai rodo, kad kol kas ekonominiai motyvai vartotojams nėra pakankamai stiprūs be papildomų paskatų arba didesnių kainų svyravimų.

Vis dėlto, kainų dinamika atveria naujas galimybes: „uždirbti“ iš lankstumo. Kai kurios elektros tiekimo įmonės kuria produktus, kur vartotojai su ŠS gali automatiškai dalyvauti biržoje: pavyzdžiui, parduoti tinklui paslaugą – sumažinti apkrovą tam tikru metu už atlygį [28]. ŠS, sujungti į virtualią agregavimo platformą, gali reaguoti per minutes – tai tinkama rezervinės galios rinkai. *Nord Pool* sistemoje dalis rinkos ($\sim 2\%$) skirta balansavimui ir reguliavimui, kur mokama už greitus paklausos pokyčius [8]. Šilumos siurbliai galėtų čia dalyvauti per agregatorius, gaudami naudos iš to, kad kelioms minutėms išsijungia, kai tinklui trūksta galios, arba persijungia iš nominalaus režimo [28].

Apibendrinant, kintamos elektros kainos skatina šilumos siurbių naudotojus ir sistemas elgtis lanksčiai: naudoti šiluminę akumuliaciją (pastato mase ar vandens talpose) tam, kad perkelti elektros vartojimą į pigesnius langus ir vengti brangių pikų. Tai sumažina išlaidas vartotojui ir padeda energetikos sistemai išlyginti apkrovas. Visgi yra praktinis kompromisas tarp taupymo ir komforto bei net tarp taupymo pinigais ir energijos efektyvumo: kai kuriais atvejais sąskaita mažesnė, bet visos suvartotos kWh – didesnės (dėl papildomo šildymo). Šiame kontekste valdymo algoritmų vaidmuo labai svarbus – kaip protingai suvaldyti ŠS, kad nauda būtų didžiausia. Būtent tai nagrinėjama

sekančiame skyriuje – šilumos siurblių valdyme pagal *Nord Pool* kainas, aptariant optimizavimo strategijas ir praktinius pavyzdžius.

1.4. Šilumos siurblių valdymas pagal kintamas elektros kainas

Kai elektros kaina biržoje keičiasi kas valandą, idealiu atveju ir elektros vartojimas turėtų būti priderintas prie šių pokyčių – vartoti daugiau, kai pigu, ir mažiau, kai brangu. Šilumos siurbliai yra viena iš nedaugelio buitinės technikos rūšių, galinti lanksčiai reaguoti į kainų signalus, nes šilumos poreikis gali būti tam tikrą laiką patenkintas iš anksčiau sukauptos šilumos. Šiame poskyryje aptariama, kaip praktikoje integruoti *Nord Pool* kainų signalą į ŠS valdymą, kokios naudojamos optimizavimo strategijos ir kokie realūs pavyzdžiai jau įgyvendinti.

1.4.1. *Nord Pool* integracija į šilumos siurblių valdymą

Norint, kad šilumos siurblys „žinotų“, kada elektra pigi ar brangi, reikia, kad jo valdiklis gautų atitinkamą informaciją. Moderniuose įrenginiuose tai realizuojama prijungiant valdymo sistemą prie interneto ir nuskaitant biržos kainų duomenis. *Nord Pool* dienos į priekį kainos viešai prieinamos kasdien ~14 val. (Lietuvos laiku) kitai parai – jas galima automatiškai nuskaityti per *API* ar net paprastą .csv failą [32]. Daugelyje išmanių namų platformų (pvz., Home Assistant, OpenHAB) entuziastai jau sukūrė integracijas, kurios parsisiunčia *Nord Pool* kainas ir leidžia naudotojui nusistatyti veikimo logiką [32]. Verta paminėti, kad *Nord Pool* integracija per Home Assistant platformą be *API* nėra visiškai legali, nes ji naudoja *Nord Pool* duomenis be oficialaus leidimo ar licencijos, o tai gali pažeisti paslaugos teikimo sąlygas. Šilumos siurblio atveju integracija veikia taip: valdiklis kasdien gauna valandinių kainų lentelę ir tuomet priima sprendimus, kada siurbliui leisti veikti pilnu galingumu, kada apriboti ar išjungti.

Valdymo strategijos gali būti įvairios. Paprasčiausia – fiksuotos ribos metodas: vartotojas nustato, kad ŠS veiktų tik tuomet, kai kaina žemesnė už X EUR/MWh, o viršijus – laikinai išjungtų ar persijungtų į minimalią galią. Tačiau toks „ribinis“ požiūris ne visada optimalus, nes gali nutikti taip, kad labai šaltą dieną kaina visą laiką aukšta, ir pagal taisyklę ŠS neįsijungtų pakankamai dažnai. Todėl dažniau taikoma pigių valandų pasirinkimo strategija: iš artimiausių 24 valandų išrenkamas tam tikras valandų skaičius, kai kaina mažiausia, ir planuojama pagrindinį šildymą vykdyti būtent per jas [33]. Pavyzdžiui, jeigu laukiama šaltos nakties, sistema gali nuspręsti 2 valandom ilgesnį prieššildymą per pigias popietės valandas, kad vakare siurblys galėtų mažiau dirbti. Tokio algoritmo įgyvendinimui naudojamas MPV arba taisyklių rinkinys. Be to, jungiama prie pastato modelio: jei žinoma, kad patalpos per valandą atvėsta 0,5 °C be šildymo, valdiklis neplanuos ilgesnės nei, tarkime, 3 val. pertraukos net jei kainos labai aukštos, kad patalpa neatvėstų per daug. Moderniuose valdikliuose taip pat atsižvelgiama į šilumos siurblio techninius apribojimus: kompresoriui nepatartina per dažnai junginėti, tam nustatomas minimalus išjungimo ir įjungimo trukmės limitas [16]. Visa tai reikalauja gana sumanaus algoritmo.

Nord Pool integracija jau veikia kai kuriose komercinėse sistemose. Pavyzdžiui, Skandinavijoje keletas šilumos siurblių gamintojų siūlo funkciją „Smart Grid ready“ – siurblys gali gauti signalą iš tinklo operatoriaus ar kainų serverio ir atitinkamai sumažinti arba padidinti galingumą [28]. 2020 m. Vokietijoje atliktas lauko eksperimentas, kur 10 namų su oras-vanduo ŠS buvo valdomi centralizuotai pagal biržos kainas: kiekvienas įrenginys gavo dienos grafiką: kada veikti pilnai, kada dalinai, kada ilsėtis – rezultatas buvo ~15 % sumažintos išlaidos, palyginti su kontrolinėmis namų grupėmis, per ~2 žiemos mėnesius [33]. Svarbu paminėti, kad tinkama integracija apima ne tik programinį valdymą,

bet ir vartotojo sąsają, nes žmonės turi suprasti, kas vyksta. Tyrimuose pastebėta, kad vartotojų pasitikėjimas didesnis, jei jie gali mobiliajame įrenginyje matyti, kurios valandos bus šildomos, kokia dabar namo temperatūra ir pan., o prireikus – rankiniu būdu panaikinti išjungimą (jei tarkime, pasidarė per šalta) [34]. Tai reikalauja komunikacijos tarp valdiklio ir vartotojo, t. y. atitinkamos programėlės ar valdiklio ekrano.

Lietuvoje pirmieji pavyzdžiai taip pat atsiranda – kai kurie nepriklausomi tiekėjai reklamuoja išmanius sprendimus, kur šilumos siurblys derinamas prie „Nord Pool“ kainodaros planų. Kol kas tai daugiau pilotiniai projektai ar entuziastų diegimai – pavyzdžiui, išmaniųjų namų mėgėjų forumuose dalinamasi *Nord Pool* pigiausių valandų paieškos sprendimais su „Node-RED“ ar kitomis automatizavimo priemonėmis.

Sėkmingai integravus kainų duomenis, šilumos siurblys tampa aktyviu elektros rinkos dalyviu: jis iš anksto žino, kada elektra bus pigi ar brangi, ir savo darbą suplanuoja optimaliai. Žinoma, tam būtinas ir šilumos kaupimas: dažniausiai paties pastato termomasė atlieka akumuliatoriaus vaidmenį. Taip pat gali būti panaudojama ir papildoma akumuliacinė talpa vandeniui – kai kurie įdiegimai padidina boilerio temperatūrą per pigias valandas (pvz., iki 55 °C vietoje įprastų 50 °C), kad brangiomis valandomis vandens šildyti nebereikėtų [18].

1.4.2. Optimizavimo strategijos

Valdant ŠS pagal kainas, optimizavimo tikslas paprastai yra minimizuoti išlaidas, išlaikant komforto ir sistemos apribojimus. Formuojant optimizavimo uždavinį, reikia apsibrėžti keletą dalykų: - Objektyvo funkcija: dažniausiai tai paros ar kito laikotarpio elektros sąnaudų kaina, kurią norima minimizuoti [16]. Gali būti pridedamos baudos už komforto nukrypimus:

- Patalpų temperatūra turi išlikti virš tam tikros minimalios ribos, pavyzdžiui, dieną ne žemesnė nei 20 °C, o naktį 18 °C;
- Boilerio temperatūra ne žemesnė nei reikalaujama higienai BKV;
- Šilumos siurblio galia negali viršyti tam tikros maksimalios vertės;
- Kompresoriaus junginėjimų skaičius ribotas ir pan. [16][19].

Valdymo kintamieji: tai valandų (arba trumpesnio intervalo) sprendimai, pavyzdžiui, ŠS būseną (įjungtas/išjungtas) arba galia kiekvienu laiko žingsniu [18].

Modelinis predikcinis valdymas (MPV) suformuluoja minėtą optimizavimo uždavinį ir naudoja pastato modelį prognozuoti ateities būseną. Tada matematiškai (dažnai su tiesine ar mišria sveikųjų skaičių programavimo metodika) surandamas sprendinys – grafikas, kiek energijos tiekti kiekvieną valandą [18][22]. Šis grafikas paduodamas į vykdymą, o po valandos procesas kartojamas su naujausia informacija. Pavyzdžiui, MPV galėtų suoptimizuoti:

- nuo 2 iki 5 val. nakties padidinti patalpos temperatūrą iki 22 °C, nes elektra pigi;
- nuo 6 iki 8 val. ryto visiškai išjungti ŠS (temperatūra nukris iki 20 °C, bet tai dar komfortiška);
- 9 val. vėl įjungti ŠS, bet sumažinta galia, nes kaina vidutinė – visa tai atsižvelgiant į prognozuojamą lauko atšalimą dieną, kad spėtų prišildyti, ir pan.

Toks sprendimas gali ženkliai sumažinti dienos išlaidas, ypač jei kainų skirtumai ryškūs. Tyrimai rodo, kad MPV, palyginti su paprastesnėmis taisyklių strategijomis, paprastai pasiekia geresnį kompromisą tarp komforto ir kaštų – nes jis „žino“ visos paros kontekstą ir gali subtiliau planuoti

[16][22]. Vis dėlto paprastumas dažnai nugalėti praktikoje, todėl aptinkamos ir euristinės strategijos – paprastų taisyklių rinkiniai:

Jei dabartinė kaina didesnė, nei šiandienos vidurkis, o patalpos temperatūra didesnė, nei minimalios – išjungti ŠS vienai valandai [33];

Jei po dviejų valandų kaina bus dvigubai didesnė – padidinti dabartinę temperatūrą per 1 °C ir pan. [33].

Šių taisyklių rinkiniai gali būti sudėlioti rankiniu būdu arba automatiškai su paieškos algoritmais (genetiniais, kt.) [19]. Nors tokie metodai nėra globaliai optimalūs, jie paprastesni skaičiuoti, reikalauja mažiau tikslaus modelio, todėl inžinerinėje praktikoje neretai pasirenkami.

Heuristinio valdymo pavyzdys galėtų būti:

- Suplanuoti, kad šilumos siurblys neveiks brangiausių 3 valandų laikotarpiu per parą (nebent grėstų temperatūros kritimas žemiau X).
- Jei iš eilės eina daugiau nei 2 brangios valandos, trumpam (15 min) išjungti per vidurį tam, kad visai nenukristų temperatūra.
- Visada įjungti ŠS bent minimaliai, jei patalpos temperatūra nukrito iki apatinės komforto ribos, nepaisant kainos.

Praktiniai optimizavimo strategijų rezultatai: Naujausių tyrimų apžvalga [22] parodė, kad tipiniame gerai izoliuotame name Lietuvoje/Skandinavijoje, turinčiame grindų šildymo sistemą su didele termomase, galima net ~6–8 valandas išsiversti be šildymo esant vidutiniam šalčiui (lauke ~0 °C), patalpai atvėstant tik ~2 °C. Tai reiškia, kad per parą galima sukcentruoti šildymą į, tarkim, 16 valandų (pigiausių), o 8 valandas praleisti. Kombinuojant su vandens talpa (karšto vandens boileriu) – pastarąjį galima pašildyti pigiausiu metu pakeliant temperatūrą iki 55–60 °C, kas leis visą brangų periodą net neįjungti kompresoriaus karštam vandeniui. Tokia strategija ypač pasiteisina, jei kainų skirtumai dideli. 2022 m. duomenimis, *Nord Pool* kainos Lietuvoje svyravo nuo neigiamų iki virš 400 €/MWh, tad teoriškai laimėjimai didžiuliai, praktiškai – valdymo patogumas riboja. Visgi net ir esant nuosaikesniems svyravimams, tyrimas Austrijoje parodė ~5 % metinių kaštų sumažėjimą be juntamo komforto praradimo [12]. Tai atrodytų nedaug, tačiau kaupiantis energijos brangimui ir plečiantis atsinaujinančių šaltinių daliai, šie procentai gali tik didėti.

1.4.3. Praktiniai taikymo pavyzdžiai

Jungtinė Karalystė (JK) atliko vieną iš pirmųjų realių bandymų su gyvenamaisiais namais. 2020–2021 m. projekte dalyvavo trys namų ūkiai su šilumos siurbliais, kurie savanoriškai sutiko pereiti prie lankstaus šildymo programos. Jų šilumos siurbliai buvo nuotoliniu būdu valdomi taip, kad sumažintų ar išjungtų šildymą kasdien 16–19 val. (tada, kai JK elektros sistema patiria vakaro piką) [34]. Buvo stebėta patalpų temperatūra ir gyventojų reakcija. Rezultatai: vidutiniškai per 3 val. be šildymo senesnės statybos name temperatūra nukrito ~1,1 °C, naujesniame – ~0,6 °C [34]. Tik senesnių namų gyventojai tai aiškiau pajuto: jie pranešė juntantys, kad oras ir paviršiai atvėso, keli ėmė vilkėti šiltesnius rūbus ar perėjo į šiltesnį kambarį vakaro metu [34]. Po 19 val., kai siurbliai vėl įsijungė, buvo pastebėtas elektros galios šuolis – kai kuriais atvejais ŠS bandė kompensuoti prarastą šilumą greitai pakeldami temperatūrą, kas netgi viršijo įprastą galios lygį ir gali kenkti įrenginiui bei tinklui [34]. Sprendimas ateičiai – programiškai to išvengti laipsniškai didinant galią. Gyventojų atsiliepimai parodė, kad priimtinumas labai priklauso nuo motyvacijos: tie, kurie labiau buvo suinteresuoti sumažinti sąskaitas ir CO₂ emisijas, toleravo 1–2 °C kritimą ir liko programoje; tie, kuriems

prioritetas komfortas, buvo linkę atsisakyti tokio režimo [34]. Šis JK pavyzdys parodė, kad technologiškai įmanoma perlaužti vartotojų šildymo įpročius, bet reikia juos įtikinti nauda bei suderinti lūkesčius (gal sprendimas – leisti vartotojui pačiam pasirinkti, iki kiek laipsnių gali nukristi temperatūra).

Skandinavijoje daugelis namų ūkių turėjo dviejų laiko zonų tarifus (dieninis/naktinis) dar iki visai neseniai, tai skatino bent jau į naktį perkelti kai kurias apkrovas. Suomijoje atliktas tyrimas su 50 namų parodė, kad esant paprastam dviejų laiko zonų tarifui (naktį pigiau ~30%), tipinis oras-vanduo šilumos siurblys su 300 L talpa vandeniui sugebėjo per naktį sukaupti tiek šilumos, kad dieną ~4 val. galėjo būti išjungtas be komforto praradimo, o metinės išlaidos sumažėjo ~8 % [33]. Tai ne milžiniška suma, bet pastebima vartotojams. Pereinant prie valandinės Nord Pool kainodaros, tikimasi didesnio efekto. Švedijoje 2022 m. daugiau kaip pusė namų ūkių turėjo kintamos kainos sutartis, ir pastebėta, kad tie vartotojai vidutiniškai ~5–15% mažiau suvartojo elektros piko valandomis nei analogiškai su fiksuotu tarifu – vadinasi, jau vyko tam tikras „savireguliacijavimas“ (nors dalį lanksčių apkrovų galėjo lemti ne vien ŠS, bet ir EV įkrovimas, kt.) [9]. Švedijos energijos rinkos inspekcijos duomenimis, ~11% vartotojų net netyčia atsidūrė su priskirtomis sutartimis (laikinose sutartyse su ~30% brangesne nei vidutinė kaina), bet didžioji dauguma perėjo į kintamą kainą – tai rodo, kad neturint fiksuoto tarifo, žmonės suinteresuoti rinktis išmanius sprendimus [9].

Lietuvoje konkrečių viešai skelbtų bandymų su šilumos siurbliais ir kintamais tarifais dar mažai. Tačiau 2022–2023 m., kai biržos kainos mušė rekordus, socialiniuose tinkluose lietuvių vartotojų bendruomenė aktyviai dalijosi patirtimi: vieni rankiniu būdu nustatinėjo ŠS termostatus, atsižvelgdami į rytdienos Nord Pool kainas (pvz., per programėlę per naktį pakeldavo nustatymą +2 °C, o dienos pikui nuleisdavo), kiti diegė „Home Assistant“ integracijas su Nord Pool ir sudarė automatizavimo scenarijus. Nors tai pavienių entuziastų pavyzdžiai, jie rodo, kad technologinės kliūtys nėra didelės – dauguma šiuolaikinių šilumos siurbių turi nuotolinę valdymo galimybę (per Wi-Fi ir gamintojo serverį). Būna sukurti platesniam vartotojų ratui prieinama išmanų valdiklį arba paslaugą. Tikėtina, kad artimiausiu metu tiekėjai pasiūlys planus, kur tiesiog įjungus „smart“ režimą, ŠS pats žinos Nord Pool kainas ir optimizuos – tam netgi teisės aktai sudaro sąlygas (ES Elektros vidaus rinkos direktyva skatina pažangius skaitiklius ir dinaminis tarifus).

Galima teigti, kad ŠS valdymas pagal kintamą kainą realybėje duoda naudos, tačiau ją geriausiai išnaudoja gerai izoliuoti, inertiški pastatai su galimybe bent kelias valandas akumuliuoti šilumą. Naudos dydis priklauso ir nuo vartotojo lankstumo – jei jis toleruos 1–2 °C temperatūros svyravimus, sutaupymas bus didesnis, nei stengiantis palaikyti absoliučiai vienodą komfortą. Bet kuriuo atveju, tokie sprendimai prisideda prie energetikos sistemos lankstumo didinimo, kas ypač vertinga integruojant daugiau atsinaujinančios generacijos.

1.4.4. Ateities tyrimų kryptys

Ateityje tikėtina, kad tyrimai ir plėtra suksis šiomis kryptimis:

- **Dirbtinis intelektas ir mašininis mokymasis:** dar gilesnis pritaikymas. Pvz., nuspėjamas aptarnavimas – DI stebi šilumos siurblio veikimo parametrus ir prognozuoja gedimus, optimalius nustatymus. RL tobulinimas: pvz., „safe RL“, kuris garantuoja neperžengsias komforto ribų. Taip pat, kolektyvinis mokymasis: vienas pastatas išmoko gerą valdymą, tą modelį pritaikom kitiems panašiams, kad nereikėtų kiekvienam mokytis nuo nulio [19].

- **Didelio masto šilumos siurbliai:** tyrimai fokusuojasi į centralizuotus sprendimus: kaip dideliais ŠS (~MW galios) pakeisti dujinius katilus miestų šilumos tinkluose, integruojant su šilumos saugyklomis ir su atsinaujinančios elektros tinklu. Pavyzdžiui, „šilumos akumulatoriai“ – milžiniškos vandens talpyklos (pramonėje jau statoma dešimčių tūkstančių kubų) [5]. Kartu su ŠS tai leistų ištisus miestus šildyti pasinaudojant vėjo jėgainių nakties pertekliumi. Jau vykdomi pilotiniai projektai Danijoje – 20 MW šilumos siurbliai, integruoti su 10 000 m³ vandens talpa. Tyrinėjama, kaip valdyti tokią sistemą, kad miestas gautų pigiausią šilumą, o tinklas – lankstumą [5].
- **Vartotojų elgsena ir priėmimas:** ne vien technika, bet ir socialiniai tyrimai svarbūs. Kaip įtikinti žmones dalyvauti paklausos valdyme? Kokie motyvai labiausiai veikia (sutaupyti pinigų, prisidėti prie ekologijos, gauti atlygį)? Tyrimai JK [34] parodė, kad informavimas ir aiškus atlygis padeda – ateityje, galbūt programėlės rodys: „Šiandien taupėte 2€ išjungę šildymą valandai – ačiū, jūsų CO₂ pėdsakas sumažėjo X kg“. Tokie elgsenos aspektai integruojami – to sieks ateities tyrimai su žmogaus ir automatizacijos sąveika.
- **Duomenų standartizacija:** Ateities tyrimuose ir iniciatyvose bus svarbu plėtoti atviras duomenų platformas, kurios leistų realiu laiku pasiekti meteorologijos duomenis, elektros tinklo kainas ir paklausos valdymo signalus, užtikrinant jų naudojimą įvairiems įrenginiams su minimaliais integravimo kaštais [26]. Galbūt bus sukurti europos lygio „energetikos interneto“ protokolai analogiški TCP/IP, kad kiekvienas prietaisas gali komunikuoti energetikos kalba su kitais. Tyrimų programos, tokia kaip *Horizon Europe* jau skiria lėšų „Smart Energy interoperability“ temoms.

Šilumos siurblių technologija atveria kelius dekarbonizuoti šildymą, bet norint pilnai išnaudoti jų potencialą – būtina įveikti aptartus iššūkius. Technologinės inovacijos, protingi reguliaciniai sprendimai ir nauji verslo modeliai turės eiti koja kojon. Jei tai pavyks, ateities energetikos sistemoje šilumos siurbliai taps ne pasyviais elektros vartotojais, o aktyviais energijos valdymo elementais, užtikrinančiais lanksčią, efektyvią ir švarią energijos pusiausvyrą.

1.5. Apibendrinimas

Šilumos siurbliai yra efektyvi ir tvari šildymo technologija, kurios veikimas grindžiamas termodinaminiais ciklais ir šilumos mainų principais. Skirtingi siurblių tipai leidžia juos taikyti įvairiose srityse – nuo gyvenamųjų iki pramoninių pastatų. Jų veikimo efektyvumą nusako tokie rodikliai kaip *COP* ir *SCOP*, kurie padeda vertinti sistemų energetinį naudingumą.

Atsižvelgiant į didėjančius energijos kainų svyravimus ir skaitmeninių sprendimų plėtrą, šilumos siurblių valdymo sistemos pereina nuo paprastų *on/off* metodų prie pažangių algoritmų, įskaitant modelio prediktyvinį valdymą ir dirbtinį intelektą. Elektros biržos kainų integravimas leidžia optimizuoti šilumos gamybą realiuoju laiku, o atsinaujinančių šaltinių ir energijos kaupimo sprendimų integracija didina energetinę nepriklausomybę ir mažina sąnaudas.

2. Tyrinėjamos sistemos analizė ir matematinio modelio kūrimas

2.1. Pastato charakteristikos

Tyrimo objektas – mišrios paskirties pastatas, apjungiantis gyvenamąją funkciją ir sporto paskirties zonas. Bendras pastato plotas siekia 8388,56 m², o jo energinė klasė – A++, kas indikuoja itin gerą šiluminę varžą, mažus energijos nuostolius bei modernų inžinerinių sistemų sprendimą.

Pastate įrengtos sporto salės, kurios aktyviai naudojamos dienos metu – ypač rytais ir vakarais. Kartu pastate veikia ir gyvenamosios paskirties zonos, kurioms reikalingas nuolatinis mikroklimato palaikymas visą parą. Dėl šios priežasties šildymo sistema dirba pastoviai.

Pastate įdiegta moderni geoterminė šildymo sistema (1 priedas). Šioje sistemoje šilumą gamina trys, lygiagrečiai sujungti, vienodi gruntas–vanduo tipo šilumos siurbliai SW 302H3 (gamintojas Alpha Innotec). Kiekvieno siurblio šiluminė galia esant B0/W35 sąlygoms siekia 29,5 kW, o COP (naudingumo koeficientas) – 4,88. Naudojamas šaltnešis – R410A. Bendra trijų siurblių galia viršija 88kW, todėl sistema yra pajėgi patenkinti pastato šildymo poreikius.

Vasaros metu, visi trys siurbliai yra naudojami vėsinimo režimui. Tiriamojo objekto surinkti duomenys yra tik žiemos sezono, todėl šio darbo tyrimas yra atliekamas tik su šildymo sezono duomenimis.

Šilumos siurbliai sujungti su 1200 litrų akumuliacine talpa (Š-2), kuri veikia kaip šilumos kaupiklis ir paskirstymo centras. Temperatūra šioje talpoje palaikoma pagal grįžtamojo vandens į ŠS šilumos kreivę, sudaryta pagal lauko temperatūros jutiklio rodmenis. Taip pat temperatūros užduotis gali būti nustatoma tiesiogiai per pastato valdymo sistemą (PVS).

Siurbliai yra tiesiogiai valdomi iš jų atitinkamo kaskadinio valdiklio, kuris apskaičiuoja: kuriam siurbliui teikti veikimo prioritetą pagal išdirbtas valandas; kiek siurblių turi veikti pagal grįžtamos temperatūros iš talpos nustatymą ir taip toliau. Aktyvuoti siurbliai tuo pačiu įjungia savo atitinkamus:

- grunto kontūro cirkuliacinius siurblius,
- cirkuliacinius siurblius tarp siurblio ir akumuliacinės talpos.

Kaupiama šiluma akumuliacinėje talpoje yra tiekiamą į:

- grindinio ir radiatorinio šildymo sistemą,
- vėdinimo įrenginius su šilumnešio pašildymu, kurie užtikrina komfortišką vidaus mikroklimatą.

Tiriamojo objekto techniniame ir darbo projekte buvo numatyta, kad į radiatorių ir grindinio šildymo kontūrą tiekiamo šilto vandens temperatūra turi būti reguliuojama pagal temperatūrinį grafiką 40/35 °C. Tačiau pradėjus naudotis pastatu, PVS eksploatuojantys naudotojai pakeitė šį nustatymą ir nustatė pastovią 25 °C tiekiamo vandens temperatūrą. Tai rodo, kad tokios temperatūros visiškai pakanka užtikrinti komfortą pastate. Šis faktas leidžia manyti, jog tyrimo metu gauti rezultatai atspindės realias sąlygas, todėl jų tikslumas bus didesnis. Tiekiamą temperatūrą į radiatorių ir grindinio kontūrą yra reguliuojama triegiu pamaišymo vožtuvu, kurį valdiklis valdo PID regulatoriumi.

Darbo projekte pateikti geoterminės jėgainės techniniai rodikliai:

1. įrengtas šiluminis galingumas žiemą, šilumnešis 40/33°C:

$$\text{Šilumos siurbliai gruntas/vanduo prie B0/W35} - 3 \times 28,1\text{kW} = 84,3 \text{ kW};$$

2. didžiausias šilumos poreikis radiatoriniam / grindiniam šildymui - 102 kW (40 / 35°C);
3. didžiausias šilumos poreikis į vėdinimo įrenginius - 237 kW (40 / 30°C);
4. didžiausias valandinis elektros poreikis - 136,9 kW.

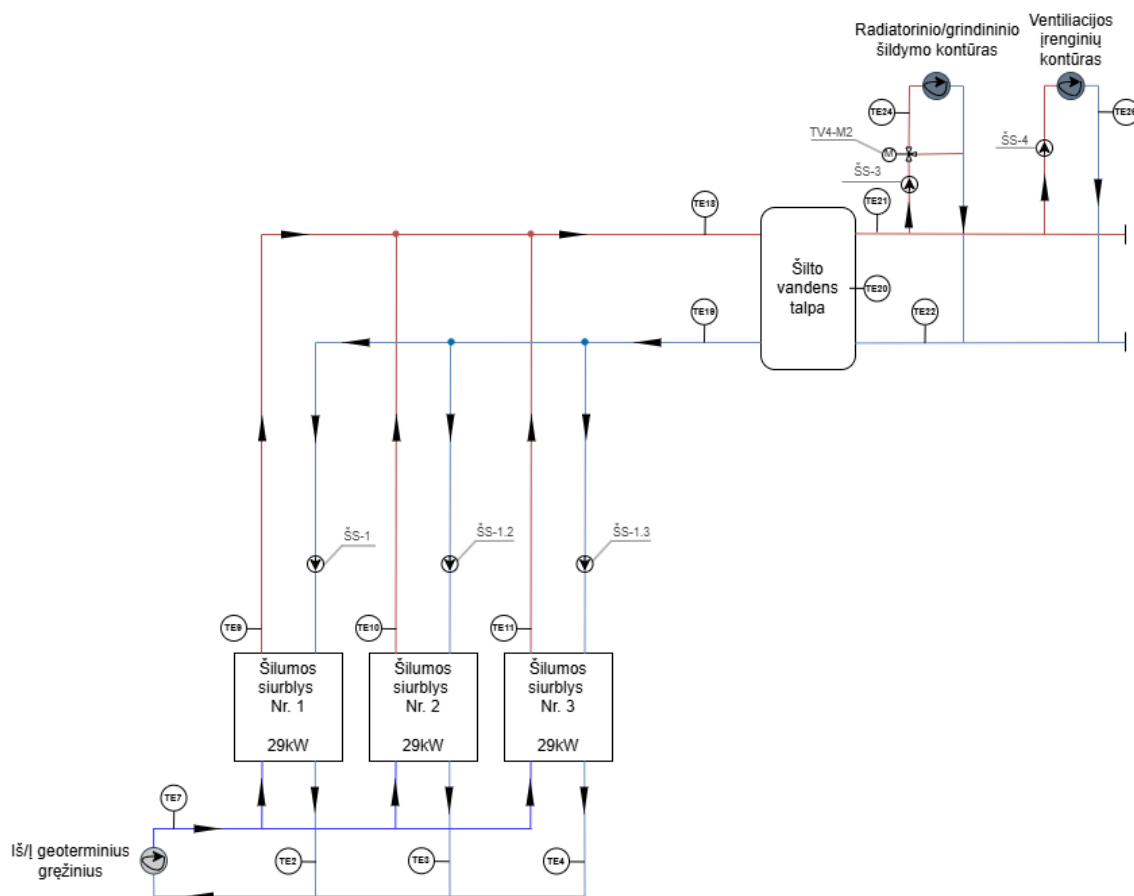
2.2. Automatikos sistema ir valdymas

Visa šildymo ir buitinio karšto vandens ruošimo sistema valdoma Siemens automatikos sprendimu, kurio pagrindinis valdiklis – Siemens PXC7.E400M. Valdiklis koordinuoja geoterminių šilumos siurblių, recirkuliacinių siurblių ir vožtuvų pavarų darbą, pasitelkiant temperatūrinių jutiklių duomenimis. Sistemos automatizavimo schema yra pateikta 9 pav.

Pagrindiniai sistemos komponentai:

1. Šilumos siurbliai (Š-1, Š-2, Š-3).
2. Recirkuliaciniai siurbliai (ŠS-1, ŠS-1.2, ŠS-1.3, ŠS-2.1, ŠS-2.2, ŠS-3, ŠS-4): Skirti srautų valdymui per įvairias šildymo grandis.
3. Temperatūros jutikliai (TE): Nuolat seka temperatūrą strateginiuose taškuose – tiekimo, grįžimo, siurblių, šilumos talpų ir kontūrų vietose.
4. Šilto vandens talpa (akumuliacinė): Veikia kaip buferis šildymo kontūrams, užtikrinant stabilų temperatūros palaikymą.

Visų geoterminių šilumos siurblių veikimo duomenys yra nuolat nuskaitomi šilumos punkto valdikliu. Duomenų mainai vykdomi naudojant Modbus TCP/IP protokolą, kuris užtikrina greitą ir patikimą ryšį tarp šilumos siurblių valdymo automatikos ir pagrindinės sistemos.



1 pav. Šildymo sistemos automatizavimo schema

Sistema remiasi šiais informacijos rinkimo įrenginiais:

1 lentelė. Automatizacijos schemoje pavaizduotų informacijos rinkimo įrenginių aprašymas

Eil. Nr.	Funkcinis žymėjimas	Matuojami dydžiai	Funkcija
1	TE2	°C	Š-1 grąžinamo į geoterminius gręžinius etanolio tirpalo temperatūra
2	TE3	°C	Š-2 grąžinamo į geoterminius gręžinius etanolio tirpalo temperatūra
3	TE4	°C	Š-3 grąžinamo į geoterminius gręžinius etanolio tirpalo temperatūra
4	TE7	°C	Bendro grįžtamo į geoterminius gręžinius etanolio tirpalo temperatūra
5	TE9	°C	Š-1 tiekiamo šilumnešio į šildymo talpą temperatūra
6	TE10	°C	Š-2 tiekiamo šilumnešio į šildymo talpą temperatūra
7	TE11	°C	Š-3 tiekiamo šilumnešio į šildymo talpą temperatūra
8	TE18	°C	Bendro tiekiamo šilumnešio iš šilumos siurblių į šildymo talpą temperatūra
9	TE19	°C	Bendro grįžtamojo šilumnešio iš šildymo talpos šilumos siurblius temperatūra
10	TE20	°C	Šilto vandens talpos temperatūra
11	TE21	°C	Bendro tiekiamo šilumnešio iš šilto vandens talpos į kontūrus temperatūra
12	TE22	°C	Bendro grįžtamo šilumnešio iš kontūrų į šilto vandens talpą temperatūra
13	TE24	°C	Tiekiamo šilumnešio į radiatorinį/grindinį kontūrą temperatūra
14	TE26	°C	Grįžtamo šilumnešio iš vėdinimo įrenginių kontūro temperatūra

Aktualiausios įrangos techninės specifikacijos yra pateiktos 2-oje ir 3-oje lentelėse:

2 lentelė. Valdomų sistemos įrenginių charakteristika

Įrenginys	Gamintojas	Modelis	Galia	Įtampa	Žymuo schemoje
Cirkuliacinis siurblys (šilumos siurbLIAI)	Wilo	Stratos MAXO 25/0.5-6	0,16 kW	230 V	ŠS-1, ŠS-1.2, ŠS-1.3
Cirkuliacinis siurblys (radiatorių kontūras, vėdinimas)	Wilo	Stratos MAXO 30/0.5-12	1,48 kW	230 V	ŠS-3, ŠS-4
Geoterminis šilumos siurblys	Alpha Innotec	SW 302H3	29,5 kW	400 V	Š-1, Š-2, Š-3
Trieigės vožtuvo pavara	Danfoss	AME 435	5 W	24 V	TV-3

3 lentelė. Valdymo sistemoje naudojami matavimo įrenginiai

Gamintojas	Modelis	Matavimo vienetas	Terpė	Signalų tipas	Matavimo ribos	Žymuo schemoje
Belimo	01UT-1B	°C	Lauko oras	PT1000	–40...60 °C	TE1
Belimo	01DT-1BH	°C	Vanduo	PT1000	0...100 °C	TE2, TE3, TE4, TE7, TE9, TE10, TE11, TE18, TE19, TE20, TE21, TE22, TE24, TE26

2.2.1. Geoterminės jėgainės valdymo logika

Šilumos siurbliai šilumos energiją gauna iš geoterminių gręžinių, kuriuose cirkuliuoja žemos temperatūros šilumnešis. Kiekvienas šilumos siurblys turi savo atskirą cirkuliacinį siurblį, integruotą į įrenginį, kuris užtikrina šilumnešio tekėjimą tarp gręžinių ir šilumos siurblio šilumokaičio.

Kai valdymo sistema (gamyklinis kaskadinis valdiklis) suteikia komandą konkrečiam šilumos siurbliui įsijungti, tuo pačiu metu aktyvuojamas ir atitinkamas jo vidinis gręžinio cirkuliacinis siurblys. Šis veiksmas inicijuoja šilumnešio tekėjimą iš gręžinio per šilumokaitį, leisdamas siurbliui absorbuoti žemės gelmių energiją. Lygiai taip pat, kai valdiklis nustato, kad šilumos poreikio nebeliko arba yra pasiekta reikiama grįžtama temperatūra iš talpos, siunčiamas signalas šilumos siurbliui išsijungti. Reaguodamas į tai, šilumos siurblys stabdo savo veikimą ir tuo pačiu išjungia vidinį gręžinio siurblį, taip sustabdydamas šilumnešio cirkuliaciją iš geoterminio šaltinio. Visa ši grandinė dirba glaudžiai susieta su temperatūriniais jutikliais (TE2, TE3, TE4, TE7), kurie pateikia realaus laiko duomenis apie šilumnešio temperatūrą tiek įeinant į šilumos siurblį, tiek išeinant iš jo. Šie duomenys naudojami ne tik valdymui, bet ir diagnostikai bei sistemos optimizavimui.

Šilumos siurblių valdiklis taiko kaskadinį šilumos siurblių valdymo principą. Tai reiškia, kad siurbliai įsijungia nuosekliai – tik tiek įrenginių, kiek tuo metu reikia, kad būtų palaikoma reikalinga grįžtamoji temperatūra iš šilto vandens talpos. Siurblių įjungimas/išjungimas valdosi pagal grįžtamosios temperatūros iš šilto vandens talpos užduotį. Ji gali būti nustatoma per PVS (Siemens valdiklį) arba ją nustato kaskadinis valdiklis pagal diegusio asmens sukonfiguruotą šilumos kreivę. Galimybės susisiekti su kreivę konfigūravusiu inžinieriumi nebuvo, bet PVS nuskaito nuo kaskadinio valdiklio esamą grįžtamosios temperatūros nustatymą bei lauko temperatūrą, todėl buvo galima išsiskaičiuoti kreivės formulę:

$$T_N = -0.0333 * T_L^2 - 0.0183 * T_L + 37.84, \quad (1)$$

čia

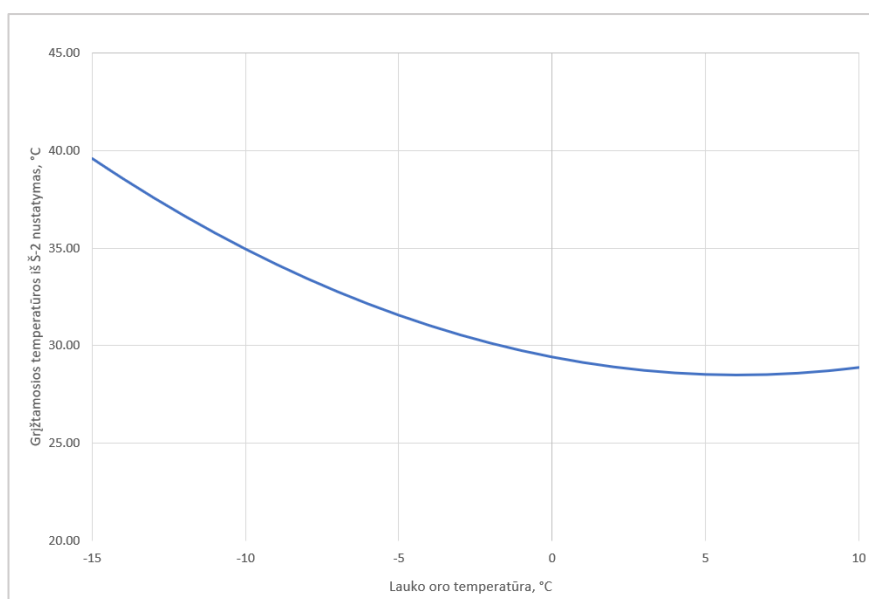
T_N – grįžtamojo šilumnešio iš šilto vandens talpos temperatūros nustatymas, °C;

T_L – lauko oro temperatūra, °C.

Pasinaudojus šia formule, galima išsiskaičiuoti grįžtamosios temperatūros užduotį pagal lauko oro temperatūrą:

4 lentelė. Grįžtamosios temperatūros užduoties priklausomybė nuo lauko temperatūros

Lauko temperatūra, °C	Grįžtamosios temperatūros užduotis, °C
-15	39,61
-10	34,96
-5	31,57
0	29,43
5	28,54



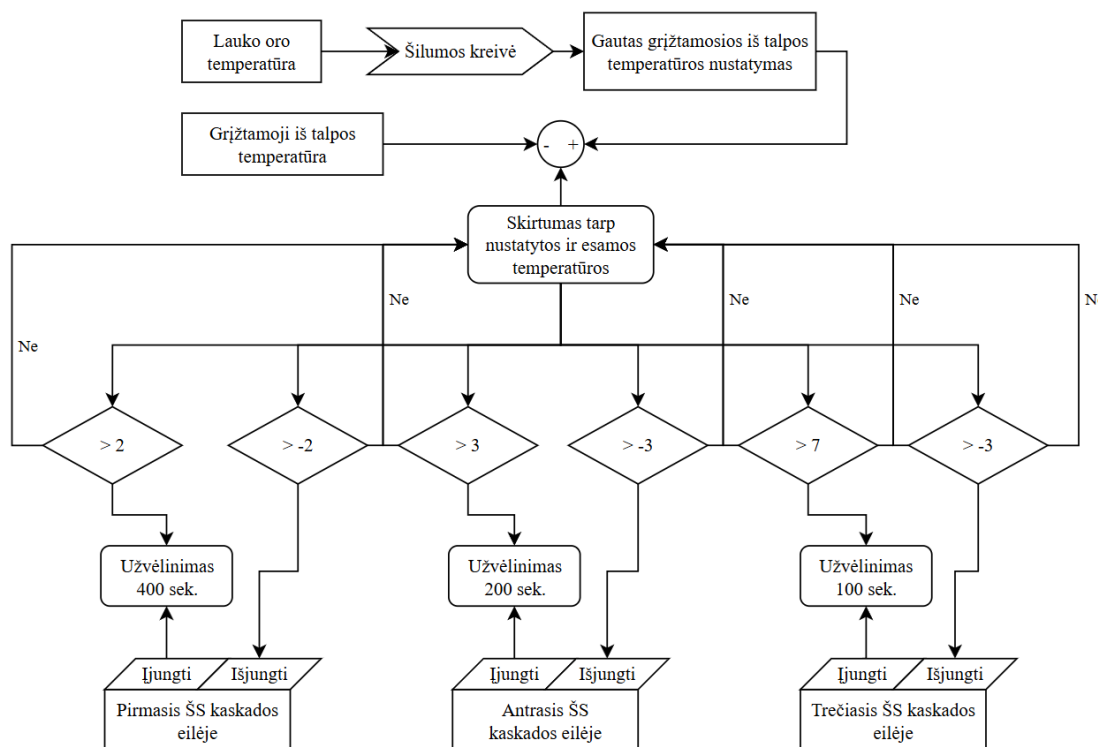
2 pav. Grįžtamosios temperatūros nustatymo priklausomybė nuo lauko oro temperatūros

Geoterminių šilumos siurblių įjungimo logika pagrįsta kaskadine seka su priskirtomis histerezės pozicijoms, o ne konkrečioms įrenginiams. Kiekviena eilės pozicija turi nustatytą savo histerezės temperatūros atžvilgiu. Šios histerezės nurodo, prie kokio temperatūros nukritimo lygio turi būti aktyvuojamas atitinkamas siurblys. Tačiau pačių siurblių priskyrimas prie eiliškumo pozicijų yra dinaminis: siurblių eilė nuolat kinta priklausomai nuo jų išdirbtų darbo valandų. Sistema pirmiausia parenka tą siurblių, kuris turi mažiausiai išdirbtų valandų, ir priskiria jį pirmajai eilės pozicijai. Toliau, antrasis pagal darbo valandų mažumą siurblys priskiriamas antrajai pozicijai, o trečiasis siurblys – trečiajai. Žemiau yra pateikta lentelė, kurioje atvaizduotos histerezės.

5 lentelė. Geoterminių šilumos siurblių histerezės taškai

Eil. nr.	Siurblys pagal nuoseklumą	Įjungimo taškas	Išjungimo taškas	Histerezės plotas	Įjungimo užlaikymas
1	Siurblys nr. 1	2 °C	-2 °C	4 °C	400 s
2	Siurblys nr. 2	3 °C	-3 °C	6 °C	200 s
3	Siurblys nr. 3	7 °C	-2 °C	9 °C	100 s

Jeigu nustatytos užduoties temperatūra yra 30 °C, o pirmojo siurblio kaskadinėje eilėje įjungimo taškas nustatytas ties +2, o išjungimo taškas ties -2, tuomet siurblys įsijungs, kai faktinė temperatūra nukris iki 28 °C, ir išsijungs, kai temperatūra pakils iki 32 °C. Tokia valdymo logika leidžia išvengti dažno siurblio įjungimo ir išjungimo dėl nedidelių temperatūros svyravimų.



3 pav. Geoterminių šilumos siurblių valdymo schema

2.2.2. Radiatorinio/grindinio šildymo kontūro valdymas

Pastato šilumos punkte radiatorinio/grindinio šildymo kontūras ir ventiliacijos įrenginių kontūras yra valdomi naudojant Siemens valdiklį. Abiejų kontūrų valdymas organizuotas taip, kad būtų užtikrintas optimalus šilumos paskirstymas pagal faktinius pastato poreikius ir išorines sąlygas, užtikrinant energijos vartojimo efektyvumą bei komfortą vartotojams.

Radiatorinio ir grindinio šildymo kontūras yra valdomas pagal tiekimo temperatūrą, kurią matuoja TE24 jutiklis. Pagrindiniai valdymo komponentai:

1. Trijų eigių vožtuvas (TV3), reguliuojantis šilto vandens maišymą, kad būtų pasiektas nustatytas tiekimo temperatūros nustatymas;
2. Cirkuliacinis siurblys (ŠS-3), kuris užtikrina vandens cirkuliaciją radiatoriniame ir grindiniame šildymo kontūre;
3. Tiekiamo šilumnešio temperatūros jutiklis (TE24), skirtas stebėti tiekiamą temperatūrą.

Valdiklis reguliuoja trijų eigių vožtuvo padėtį pagal proporcinį-integracinį (PI) valdymo reguliatorių, siekdamas palaikyti reikiamą tiekimo temperatūrą. Trieigės pavaros PI regulatoriaus dedamosios:

- Proporcinio veiksmo stiprinimo koeficientas – 2,5;
- Integralinio veiksmo stiprinimo koeficientas – 0,0208;

Pilna *PI* reguliatoriaus formulė:

$$u_{(t)} = 2,5 * e_{(t)} + 0,0208 \int_0^t e(t)dt, \quad (2)$$

čia:

$u_{(t)}$ – valdiklio išėjimo signalas tam tikru laiko momentu t ;

$e_{(t)}$ – paklaida tam tikru laiko momentu t , apskaičiuojama kaip skirtumas tarp užduotinės vertės ir faktinės sistemos vertės.

Cirkuliacinio siurblio ŠS-3 įjungimas/išjungimas yra nustatomas pagal histerezę, kuri remiasi į trieigio vožtuvo pavarą. Jeigu pavara atsidaro bent 5 % šilumnešio cirkuliacijai į kontūrą, tada siurblys yra įjungiamas, o jeigu pavaros atsidarymo užduotis nukrenta žemiau 3 %, tada cirkuliacinis siurblys išsijungia.

Iš šilumos punkto radiatorinio/grindinio šildymo kontūro išeinantis šilumnešis toliau paskirstomas po pastatą per atskiras zonas. Šilumnešio paskirstymui pastato viduje naudojamos terminės pavaros, sumontuotos kolektoriuose ant kiekvieno radiatoriaus ar grindinio šildymo kontūro. Kiekviena terminė pavara valdo atskirą šildymo zoną ir reguliuoja šilumnešio pratekėjimą į konkrečią patalpos dalį pagal individualius poreikius. Pagrindinis šilumos punkto valdiklis užtikrina tinkamą bendrą šilumnešio temperatūrą ir srautą, o vietinis šilumos paskirstymas ir atskirų patalpų šildymo valdymas vykdomas autonomiškai pagal atskirus patalpų termostatus. Todėl radiatorių ir grindinio šildymo kontūras yra atskirtas nuo šilumos punkto valdymo ir valdosi nepriklausomai nuo vidaus temperatūros poreikių.

2.2.3. Ventiliacijos įrenginių kontūro valdymas

Šilumos punkte esantis ventiliacijos įrenginių kontūras yra valdomas paprastu tiekimo principu. Kontūras susideda iš cirkuliacinio siurblio ŠS-4 ir grįžtamosios temperatūros jutiklio TE26. Tačiau siurblio veikimas nėra tiesiogiai priklausomas nuo temperatūros ar kito valdymo kriterijaus.

Cirkuliacinis siurblys ŠS-4 veikia neperstojamai, užtikrinant pastovų šilumnešio tiekimą iš šilto vandens talpos į pastato ventiliacijos įrenginius. Tiekiamo šilumnešio temperatūra nėra reguliuoja šilumos punkte – ji atspindi šilto vandens talpos temperatūrą. Temperatūros reguliavimas pagal faktinius ventiliacijos poreikius vyksta jau ventiliacijos įrenginių viduje. Dėl šios priežasties, šilumos punkto ventiliacijos kontūro valdymo funkcija apsiriboja pastoviu šilumnešio tiekimu, o visos aktyvios temperatūrinės kontrolės yra vykdomos decentralizuotai ventiliacijos įrenginių automatikoje.

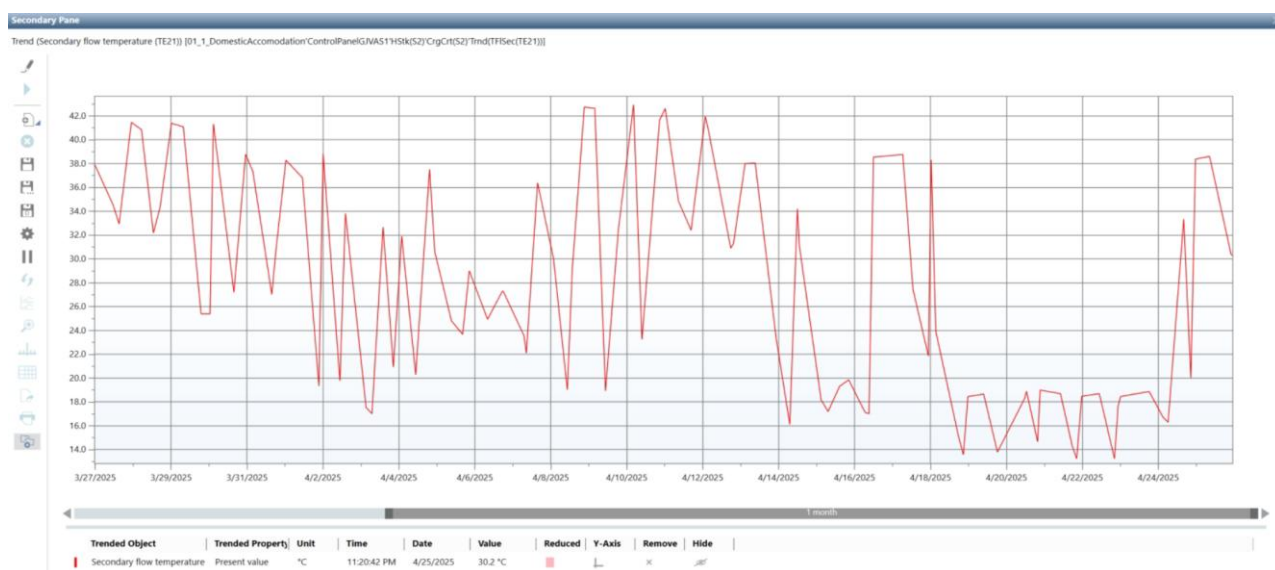
2.3. Duomenų surinkimo procesas

Siekiant sukurti tikslią šilumos punkto matematinio modelio struktūrą, būtina remtis realiais įrenginių darbo duomenimis. Šiame poskyryje pateikiamas duomenų surinkimo procesas, apimantis naudojamų šaltinių aprašymą, duomenų kaupimo principus bei parengimą tolimesnei analizei ir modeliavimo darbams.

2.3.1. Duomenų šaltinis ir prieiga

Šilumos punkto darbo parametrų duomenys buvo surinkti iš pastato automatizuotos valdymo sistemos, pagrįstos „Siemens Desigo CC“ valdymo platforma. Sistemos priežiūrą ir duomenų registravimą vykdė „Siemens PXC7.E400M“ valdiklis, leidžiantis nuolat stebėti įrenginių būsenas ir temperatūrinius parametrus.

Duomenų kaupimui buvo naudojama tendencijų sekimo funkcija (angl. *trend*), kuri registruoja pasirinktų objektų reikšmes, vadovaujantis reikšmės pokyčio principu (angl. *Change of Value, COV*). Tai reiškia, kad reikšmės įrašomos tik tada, kai jos pasikeičia daugiau nei nustatyta slenksčio vertė. Toks metodas sumažina duomenų kiekį ir užtikrina jų aktualumą, išsaugant tik reikšmingus sistemos būklės pasikeitimus (žr. 4 pav.).



4 pav. Desigo CC platformos „Trend“ funkcija

Rinkti pagrindiniai duomenys:

- šilumos siurblių darbo būseną (įjungta/išjungta),
- tiekimo ir grįžimo temperatūros įvairiuose kontūruose (pvz., TE18, TE20, TE21, TE26, TE28),
- šilto vandens talpos temperatūra (TE20),
- cirkuliacinių siurblių būsenos (įjungta/išjungta),
- šilumos siurblių elektros energijos sąnaudos.

Duomenys buvo eksportuojami CSV formato failais, kuriuose kiekviena eilutė atitiko konkretų laiko momentą ir tuo metu fiksuotas reikšmes. Eksportavimo procesas buvo atliekamas periodiškai, nes sistema leidžia vienu metu gauti ne ilgesnio nei trijų mėnesių laikotarpio duomenis dėl archyvavimų apribojimų.

Eksportavimo ypatybės:

- duomenys pateikiami su nevienodais laiko tarpais (dėl COV veikimo logikos),
- eksportavimui būtina rankiniu būdu pasirinkti norimus objektus, laikotarpį ir įsitikinti duomenų pilnumu,
- neįmanoma tiesiogiai valdyti duomenų įrašymo dažnio,

- gali atsirasti duomenų praradimų dėl ryšio ar serverio apkrovos.

Nepaisant šių apribojimų, surinkti duomenys buvo pakankamai detalūs ir tinkami tolimesniam apdorojimui.

2.3.2. Duomenų paruošimas

Surinkus šilumos punkto duomenis CSV formato failais, buvo atliktas sistemingas duomenų paruošimo procesas. Duomenys buvo registruojami pagal reikšmės pokyčio principą, tai lėmė netolygų įrašų dažnį – duomenys įrašomi tik tada, kai stebimas reikšmingas parametrų pokytis. Norint parengti duomenis matematiniam modeliui, buvo pasirinktas linijinės interpoliacijos metodas, kuris yra pakankamai tikslus taikant jį šilumos sistemoms, kuriose pokyčiai dažniausiai vyksta palaipsniui.

Interpoliacijos ir duomenų apdorojimo žingsniai:

1. išanalizuotas pradinio duomenų rinkinio laiko žingsnis;
2. sudarytas vientisas laiko vektorius, pasirenkant diskretizavimo intervalą, priklausomai nuo surinktų duomenų laiko pokyčių. Kai kur buvo taikomas vienos minutės diskretizavimo intervalas, kitur siekė net iki 15 minučių;
3. kiekvienam matavimo taškui atlikta linijinė interpoliacija, atkuriant reikšmes tarp faktinių įrašų;
4. siekiant sumažinti duomenų iškraipymus, tam tikrose sekose buvo taikytas medianinis filtravimas, leidžiantis pašalinti galimus netikslumus, atsiradusius dėl sistemos sutrikimų ar duomenų šuolių.

Atlikus linijines interpoliacijas buvo gauti duomenų rinkiniai su vienodais laiko žingsniais. Toks paruošimas buvo esminis žingsnis siekiant atkurti realaus objekto temperatūrų dinamikas matematiniam modeliui.

2.4. Šilumos punkto dinamikos atkartojimas matematiniam modeliui

Šilumos punkto dinamikos modeliavimas buvo grindžiamas realiais eksploataciniais duomenimis, siekiant sudaryti tikslias perdavimo funkcijas tarp pagrindinių sistemos parametrų. Sukurtas matematinis modelis leidžia analizuoti temperatūrinių pokyčių dėsningumus ir prognozuoti šilumos paskirstymo procesų elgseną įvairiomis eksploatacijos sąlygomis.

2.4.1. Temperatūrų pokyčių analizė

Matematinio modeliavimo procesas buvo pradėtas nuo šilumos punkto temperatūrinių pokyčių analizės. Buvo siekiama išnagrinėti, kaip keičiasi skirtingų dinaminių taškų temperatūros priklausomai nuo laiko ir kitų sistemos elementų būsenos. Šis etapas buvo būtinas, norint nustatyti, kokio tipo dinamika būdinga sistemai ir kokie metodai tinkamiausi jos modeliavimui.

Išanalizavus surinktus duomenis pastebėta, kad temperatūros pokyčiai sistemoje vyksta lėtai ir inertiškai, be staigių šuolių ar netikėtų svyravimų. Tai rodo, kad šilumos punktui būdinga inercinė sistema su aiškiai išreikšta laiko konstanta ir galimais transportavimo vėlinimais (dėl šilumnešio judėjimo vamzdynais ir šilumos mainų).

Vertinant temperatūrinių parametrų grafikų tendencijas, buvo priimtas sprendimas modeliuoti šilumos punktą naudojant perdavimo funkcijas. Perdavimo funkcijos leidžia efektyviai aprašyti ryšį tarp įėjimo ir išėjimo signalų be būtinybės kurti sudėtingus fizikos pagrįstus šilumos perdavimo modelius.

Tokios sistemos, kaip šilumos punktai, dėl savo fizinės prigimties (šilumos inercija, srauto dinamika) dažniausiai yra tinkamai aprašomos pirmos, antros ar trečios eilės perdavimo funkcijomis su galimu vėlinimo elementu. Remiantis šia prielaida, buvo pasirinkta tolimesnė sistemų identifikacija eksperimentiniu būdu, naudojant *MATLAB* aplinkos metodus.

2.4.2. Perdavimo funkcijų identifikacija

Remiantis atlikta šilumos punkto temperatūrinių pokyčių analize, buvo priimtas sprendimas sistemos dinamiką modeliuoti naudojant perdavimo funkcijas. Identifikacijos darbams buvo pasinaudota *MATLAB* programine aplinka ir joje buvo naudota pagrindinė funkcija „*tfest*“, kuri identifikuoja perdavimo funkcijas tiesiogiai iš laiko eilučių duomenų.

Perdavimo funkcijų sudarymo procesas prasidėjo nuo įėjimų ir išėjimų porų nustatymo. Buvo identifikuotos pagrindinės sistemos grandys, kurias reikėjo modeliuoti atskirai (žr. 6 lentelę).

6 lentelė. . Šilumos punkto dinamikos modeliavimo įėjimų–išėjimų poros ir jų paskirtys

Eil. nr.	Įėjimai	Išėjimai	Paskirtis
1	Š-1, Š-2, Š-3	TE18	Šilumos siurblių darbo įtaka tiekiamo šilumnešio temperatūrai į šilumnešio talpą.
2	TE18, TE22	TE20	Tiekiamo į talpą bei grįžtamojo iš kontūrų šilumnešio daroma įtaka talpos temperatūrai.
3	TE20	TE21	Talpos šilumnešio poveikis tiekiamai temperatūrai į kontūrus.
4	TE24	TE25	Tiekiamo šilumnešio į radiatorių kontūrą poveikis grįžtamai temperatūrai iš kontūro.
5	TE21	TE26	Tiekiamo šilumnešio iš talpos daroma įtaka grįžtamajai temperatūrai iš ventiliacijos įrenginių
6	TE25, TE26	TE22	Grįžtamo iš radiatorių ir iš ventiliacijos įrenginių kontūrų šilumnešio poveikis bendrai grįžtamai temperatūrai iš kontūrų.
7	TE18, TE20, TE22	TE19	Tiekiamo į talpą, tiekiamo į kontūrus ir grįžtamojo iš kontūrų šilumnešio temperatūrų įtaka grįžtamajai šilumnešio temperatūrai į šilumos siurblius.

Buvo atlikta pirminė modelių identifikacija, naudojant *MATLAB tfest* funkciją. Kiekvienai įėjimo–išėjimo porai buvo generuojamos įvairios perdavimo funkcijų variacijos su skirtingų polių ir nulių skaičiumi. Tais atvejais, kai sistemos dinamikoje buvo pastebėta ryškesnė inercija, papildomai buvo taikomas transportavimo vėlinimo (angl. *transport delay*) funkcija, siekiant tiksliau atkartoti realų sistemos vėlavimą.

Kiekvienas sukurtas modelis buvo vertinamas pagal atitikties (angl. *fit*) koeficientą, išreiškiantį modeliavimo ir realių duomenų kreivių atitikimą procentais. Modeliai, kurių atitikties koeficientas buvo mažesnis nei 90 %, buvo toliau optimizuojami, koreguojant polių ir nulių skaičių, taikant kitus identifikacijos metodus ir parenkant kitus duomenų rinkinius, iki kol buvo pasiektas aukščiausias įmanomas rezultatas.

Galutinės perdavimo funkcijos buvo atrinktos atsižvelgiant į pasiektą sistemos dinaminį pagrįstumą. Taip pat, buvo siekiama išlaikyti modelius kuo paprastesnius, vengiant aukštos eilės perdavimo funkcijų, kad būtų užtikrintas modeliavimo aiškumas ir efektyvus tolimesnis taikymas.

Perdavimo funkcija iš Š-1, Š-2, Š-3 į TE18. Šilumos siurbLIAI Š-1, Š-2 ir Š-3 yra pagrindiniai šilumos generavimo įrenginiai, tiekiantys šilumnešį į šilumos kaupimo talpą. Šių siurblių įjungimo ir išjungimo būsenos tiesiogiai veikia šilumnešio temperatūrą (TE18). Nagrinėjama sąsaja leidžia įvertinti, kaip bendras siurblių darbas veikia šilumnešio pašildymą ir koku greičiu temperatūra pakinta nuo siurblių įsijungimo momento.

Kiekvieno siurblio įjungimo būseną yra įjungta/išjungta, todėl visų trijų siurblių veikimas buvo sujungtas į vieną apibendrintą loginį signalą. Šis signalas apibūdina bendrą sistemos aktyvumą: kuo daugiau veikiančių siurblių, tuo stipresnis šiluminis poveikis. Naudoti interpoliuoti savaitės eksploataciniai duomenys, kuriuose temperatūros pokyčiai TE18 buvo fiksuojami priklausomai nuo siurblių darbo.

Identifikacijai naudota *tfest* funkcija *MATLAB* aplinkoje (3 priedas). Modeliuojant gautos trys perdavimo funkcijos, kurios nurodo, kaip kiekvienas siurblys daro įtaką temperatūrai. Š-1 gauta perdavimo funkcija yra pirmos eilės, Š-2 gauta perdavimo funkcija yra antros eilės ir Š-3 gauta perdavimo funkcija yra taip pat antrosios eilės. Modelio struktūra atitiko lėtą, bet tolygų temperatūros kilimą po siurblių įsijungimo.

Gauta Š-1 siurblio perdavimo funkcija:

$$G(s) = e^{-1.98s} * \frac{1.755s + 0.001149}{s + 3.211 \cdot 10^{-5}}. \quad (3)$$

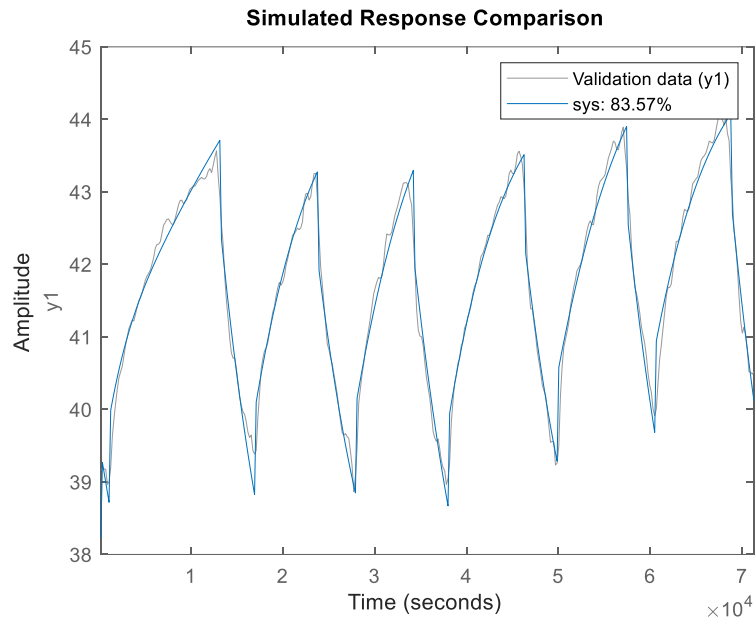
Gauta Š-2 siurblio perdavimo funkcija:

$$G(s) = e^{-1.98s} * \frac{1.437s^2 + 0.001395s + 5.22 \cdot 10^{-8}}{s^2 + 9.335s \cdot 10^{-5} + 4.294 \cdot 10^{-9}}. \quad (4)$$

Gauta Š-3 siurblio perdavimo funkcija:

$$G(s) = e^{-1.08s} * \frac{-0.0003122s + 5.237 \cdot 10^{-7}}{s^2 + 0.0004203s + 3.441 \cdot 10^{-7}}. \quad (5)$$

Modelio atitikimo rodiklis (angl. *fit*) siekė 83,57 %. Su šia šilumos perdavimo dinamika nepavyko gauti daugiau nei 90 % atitikties. Ši perdavimo funkcija buvo pasirinkta dėl vizualinio pagrįstumo. Tai rodo pakankamai tikslų dinaminį atkartojimą, įvertinant, kad pačios įėjimo reikšmės yra žingsninės ir nepertraukiamos. Vizualinė (žr. 5 pav.) analizė rodo gerą modelio atitikimą realiai TE18 temperatūros eigai.



5 pav. Perdavimo funkcijos ŠS → TE18 modeliavimo ir realių duomenų palyginimas

Perdavimo funkcija iš TE18, TE22 į TE20. Temperatūra TE20 apibūdina šilumnešio temperatūrą šilumos talpoje. Ši temperatūra susiformuoja veikiant dviem pagrindiniams priešingiems procesams. TE18 – šilto šilumnešio temperatūra, tiekama iš šilumos siurblių į talpą, kuri didina talpos temperatūrą. TE22 žymi grįžtamojo šilumnešio temperatūrą, grįžtančią iš šildymo kontūrų ir šis srautas paprastai yra atvėsęs, todėl turi vėsinantį poveikį. Talpos temperatūra yra šių dviejų dinamikų sumos rezultatas – šilumos įnešimo ir nuėmimo balansas.

Modeliavimui buvo pasirinktas perdavimo funkcijos modelis su dviem įėjimais – TE18, TE22 ir vienu išėjimu TE20. Naudota *tfest* funkcija *MATLAB* aplinkoje (4 priedas), leidžianti identifikuoti kiekvieno įėjimo dinaminę įtaką iš atskirų duomenų eilučių. Identifikacijos metu nustatyta, kad TE18 turi tiesioginį, teigiamą poveikį TE20, o TE22 – neigiamą, nes reprezentuoja šilumos nuėmimą per kontūrus.

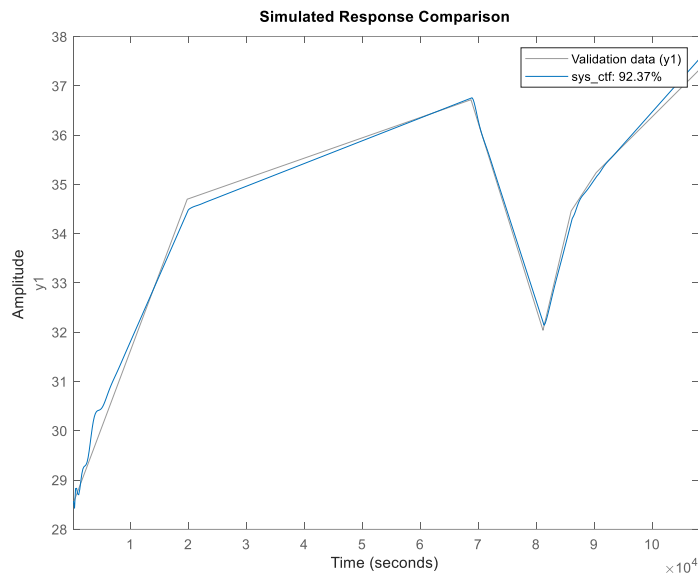
Gauta TE18 perdavimo funkcija:

$$G(s) = \frac{7.3887 \cdot 10^{-4} s^2 + 4.2019 \cdot 10^{-5} s + 3.6257 \cdot 10^{-8}}{s^3 + 0.0073 s^2 + 1.7985 \cdot 10^{-5} s + 3.0380 \cdot 10^{-8}}. \quad (6)$$

Gauta TE22 perdavimo funkcija:

$$G(s) = \frac{0.0072 s^2 - 4.6777 \cdot 10^{-5} s - 1.3030 \cdot 10^{-8}}{s^3 + 0.0080 s^2 + 2.0324 \cdot 10^{-5} s + 3.5923 \cdot 10^{-8}}. \quad (7)$$

Pritaikius *MATLAB* „compare()“ funkciją, gautas 92,37 % atitikimo koeficientas. Taip pat, gautas grafikas (žr. 13 pav.), papildomai pagrindžia gerą modeliavimo ir realių duomenų sutapimą. Dėl šių priežasčių, buvo pasirinktos šios perdavimo funkcijos. Apskaičiuojant TE20 reikšmę, abu modeliai turi būti taikomi vienu metu, o jų išėjimų reikšmės – susumuojamos.



6 pav. Perdavimo funkcijos TE18, TE22 → TE20 modeliavimo ir realių duomenų palyginimas

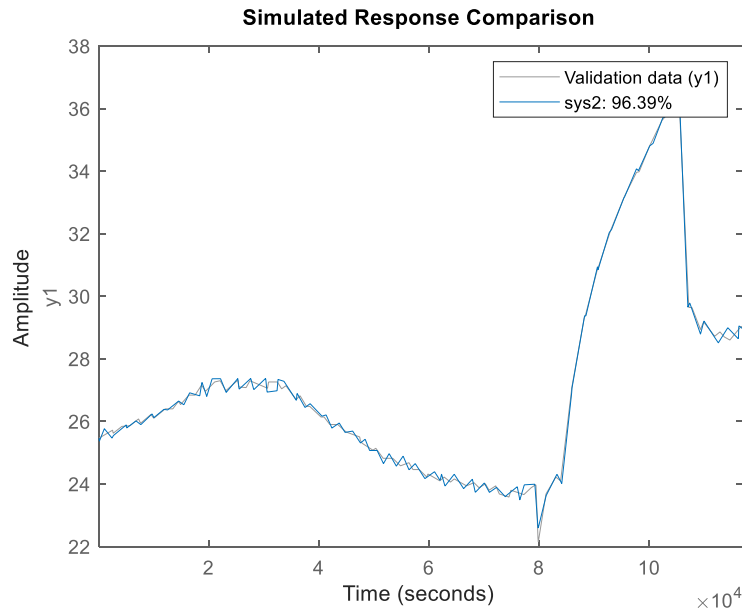
Perdavimo funkcija iš TE20 į TE21. Temperatūros taškas TE20 atspindi šilumnešio temperatūrą šilumos kaupimo talpoje, o TE21 – temperatūrą, kuri iš tikrųjų pasiekia šildymo kontūrus. Nors šios dvi vietos hidrauliškai yra labai arti, tarp jų vis tiek egzistuoja šiluminė inercija, kurią lemia vamzdynų šiluminės savybės, siurblio dinamika bei trumpalaikiai srautų pokyčiai. Perdavimo funkcijai išskaičiuoti pagal realius duomenis buvo naudotas kodas, kuris yra pateiktas 5 priede. Ši perdavimo funkcija aprašo, kaip TE20 temperatūra veikia tiekiamo šilumnešio temperatūrą.

Identifikuota sistema atitiko antros eilės perdavimo funkcijos struktūrą. Modelis buvo be transportavimo vėlinimo, o tai rodo nedidelį, bet matomą šiluminį atsaką tarp šių dviejų taškų.

Gauta perdavimo funkcija:

$$G(s) = \frac{4.17s + 5.195 \cdot 10^{-5}}{s^2 + 4.16s + 5.039 \cdot 10^{-5}} \quad (8)$$

Modeliavimo tikslumas siekė 96,39 %, o tai rodo labai aukštą dinaminio atitikimo lygį tarp matematinio modelio ir realių temperatūros TE21 duomenų. Grafikas (žr. 7 pav.), sugeneruotas su „compare()“ funkcija, parodė, kad modeliavimo rezultatai puikiai seka tiek lėtus, tiek greitus temperatūros pokyčius. Pereinamieji procesai yra atvaizduojami be virpesių ar iškraipymų.



7 pav. Perdavimo funkcijos TE20 → TE21 modeliavimo ir realių duomenų palyginimas

Radiatorių kontūro apkrovos modeliavimo metodika. Radiatorių ir grindinio šildymo kontūro analizėje buvo atsisakyta klasikinio požiūrio, kai sistema modeliuojama kaip tiesioginė perdavimo funkcija tarp tiekiamo (TE24) ir grįžtamo (TE25) šilumnešio temperatūrų. Nors TE24 temperatūra yra reguliuojama per trieigį vožtuvą ir išlieka beveik pastovi (~25 °C), pagrindinis veiksnys, nulėmęs šio metodo netinkamumą, yra ne žemas temperatūros kitimas, o tai, kad kontūro apkrova priklauso nuo veiksnių, esančių už stebimos sistemos ribų – t. y., patalpose.

Grįžtamoji temperatūra (TE25) priklauso nuo to, kiek šilumos išsklaidoma patalpose, o tai lemia vartotojo elgsena, pastato charakteristikos bei klimato sąlygos. Pavyzdžiui:

- jeigu viename kabinete langas paliekamas pravertas, patalpa greičiau praranda šilumą, o grįžtanti temperatūra TE25 bus žemesnė – tai padidina kontūro apkrovą;
- priešingai, jei patalpa tuščia, joje mažesnė šilumos apykaita – radiatoriai mažiau šilumos išskiria į aplinką, todėl grįžtamoji temperatūra bus aukštesnė, vadinasi, kontūras tuo metu beveik neapkraunamas.

Dėl šios priežasties perdavimo funkcijos tarp TE24 ir TE25 negali tiksliai atspindėti realių sisteminių ryšių, nes nėra galimybės išmatuoti ar įvertinti galinių kontūro vartotojų sąlygų.

Vietoje to buvo pasirinkta fizikinė apkrovos analizė pagal šilumos srauto lygtį:

$$Q = \frac{\rho * c_p * V * (T_{tiekiamas} - T_{grįžtama})}{1000}, \quad (9)$$

čia

Q – šilumos srautas (apkrova) [kW],

ρ – vandens tankis (998 kg/m³),

c_p – vandens specifinė šiluma (4180 J/kg·K),

V – tūrinis debitas (m^3/s),

T_{teikiama} – tiekiamo vandens temperatūra (TE24),

$T_{\text{grįžtama}}$ – grįžtamo vandens temperatūra (TE25).

Radiatorių kontūro siurblio srautas, remiantis technine specifikacija, siekia $17,71 \text{ m}^3/\text{h}$, todėl šis parametras taip pat įtrauktas į skaičiavimus. Visa sistema užpildyta vandeniu, taigi šilumnešio tankis ir specifinė šiluma yra žinomi. Duomenys buvo gauti iš realios sistemos ir apdoroti taikant duomenų valymą bei laiko sinchronizavimą (interpoliuoti duomenys su 180 s žingsniu), tam kad būtų galima tiksliai įvertinti apkrovų dinamiką per savaitės laikotarpį.

Apkrova tokiu atveju yra ne tik fizikinis skaičiavimas – ji tampa grįžtamąja informacija apie realų patalpų poreikį, kurio neįmanoma tiesiogiai sudaryti per perdavimo funkcijas. Toks modelis leidžia kurti kontūrų simuliaciją, pagrįstą faktine šilumos paklausa pastate.

Ventiliacijos kontūro apkrovos modeliavimo metodika. Ventiliacijos įrenginių kontūro analizėje taip pat buvo nuspręsta atsisakyti klasikinių perdavimo funkcijų tarp tiekiamos (TE21) ir grįžtamos (TE26) temperatūros, nes šios vertės nėra tiesiogiai susijusios.

TE21 žymi bendrą tiekiamą temperatūrą tiek radiatoriams, tiek ventiliacijos kontūrai, todėl pastarojo vožtuvas buvo nustatytas palaikyti pastovią temperatūrą šildymo kontūre. Tačiau čia iškyla svarbi problema – ventiliacijos kontūro grįžtamoji temperatūra TE26 stipriai priklauso nuo oro srautų, rekuperacijos intensyvumo bei patalpų, kurioms tiekiamas ir ištraukiamas oras, mikroklimato sąlygų.

Pavyzdžiui:

- jeigu pastate veikia intensyvi ventiliacija, tiekiamas šilumnešis greitai atiduoda šilumą šaltam orui ir šilumnešis grįžta žemesnės temperatūros;
- priešingai, kai rekuperatoriai dirba efektyviai, arba oro srautas yra mažas (pvz., nakties režimu), TE26 gali beveik sutapti su TE21, nes šiluma beveik neišsisklaido.

Dėl šių nenuspėjamų sąlygų nėra galimybės patikimai identifikuoti perdavimo funkcijos tarp TE21 ir TE26. Todėl vietoje to, taikytas fizikinis apkrovos įvertinimas, remiantis šilumos srauto formule (9).

Bendros grįžtamos temperatūros iš kontūrų modeliavimo perdavimo funkcija. Temperatūros taškas TE22 apibrėžia bendrą šilumnešio grįžtamąją temperatūrą iš pastato kontūrų, patenkančią atgal į šilumos kaupimo talpą. Šią temperatūrą lemia keli veiksniai – svarbiausi iš jų yra dviejų atskirų šilumos kontūrų grįžtamosios temperatūros:

- TE25 – temperatūra, grįžtanti iš radiatorių bei grindinio šildymo kontūro,
- TE26 – temperatūra, grįžtanti iš ventiliacijos įrenginių kontūro.

Fiziniam šilumos punkto vamzdyne šios dvi grįžtamosios šakos susijungia prieš patekdamos į talpą. Vis dėlto, svarbu pažymėti, kad temperatūros šiuo atveju nėra tiesiogiai sumuojamos, nes jų įtaka TE22 priklauso nuo konkrečių šilumnešio srautų proporcijų kiekviename kontūre, o ne vien nuo temperatūros reikšmių.

Modeliavimo tikslais, buvo suformuotas daugiąjėjiminis dinaminis modelis (MISO), kuriame TE25 ir TE26 vertinami kaip nepriklausomi įėjimai, o TE22 – kaip sistemos išėjimas. Perdavimo funkcijos identifikacijai buvo naudota *tfest* funkcija *MATLAB* aplinkoje (6 priedas). Abiems įėjimams buvo gautos antros eilės perdavimo funkcijos be akivaizdžių transportavimo vėlinimų.

Siekiant dar tikslesnio modeliavimo, į sistemą buvo įtrauktas papildomas įėjimas – TE21, žymintis bendrą tiekiamo vandens temperatūrą į pastato kontūrus. Šis įėjimas yra svarbus dėl šilumos punkte veikiančios triegės pavaros, kuri valdo vandens tiekimą į radiatorių kontūrą. Tuo atveju, kai pavara yra nepilnai atidaryta, dalis šilumnešio nepatenka į kontūrą, o tiesiog recirkuliuoja grįžtamuju keliu atgal į talpą, taip reikšmingai paveikdamas TE22 reikšmę.

Gauta TE26 perdavimo funkcija:

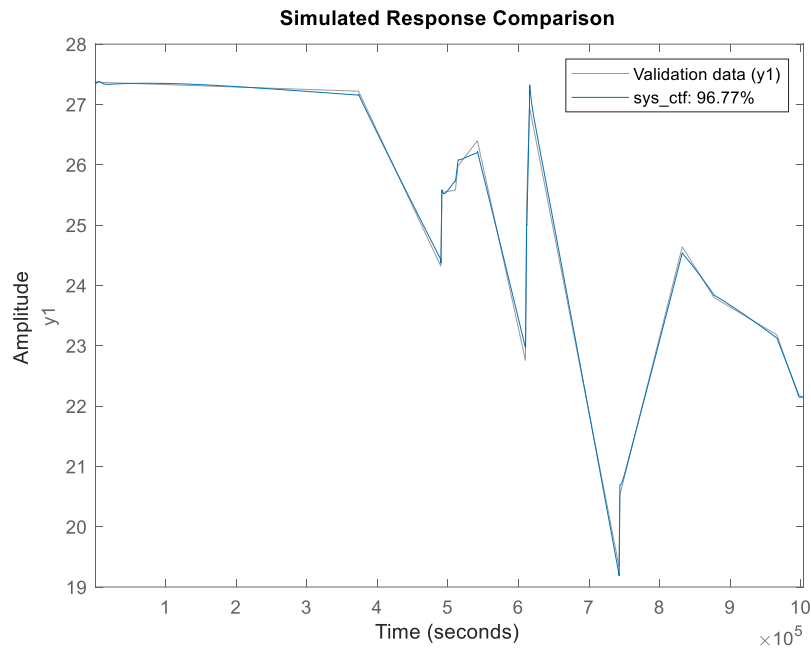
$$G(s) = \frac{1.12s^3 + 0.004808s^2 + 1.69 \cdot 10^{-6}s + 2.56 \cdot 10^{-11}}{s^3 + 0.008554s^2 + 4.05 \cdot 10^{-6}s + 2.689 \cdot 10^{-11}}. \quad (10)$$

Gauta TE25 perdavimo funkcija:

$$G(s) = \frac{1.469s^3 + 0.002429s^2 + 1.604 \cdot 10^{-6}s + 1.121 \cdot 10^{-12}}{s^3 + 0.009079s^2 + 4.168 \cdot 10^{-6}s + 3.005 \cdot 10^{-11}}. \quad (11)$$

Gauta TE21 perdavimo funkcija:

$$G(s) = \frac{-0.9438s^3 + 0.001173s^2 + 8.516 \cdot 10^{-7}s + 1.241 \cdot 10^{-14}}{s^3 + 0.009496s^2 + 5.107 \cdot 10^{-6}s + 3.548 \cdot 10^{-11}}. \quad (12)$$



8 pav. Perdavimo funkcijos TE25, TE26, TE21 → TE22 modeliavimo ir realių duomenų palyginimas

Galutinis identifikuotas modelis sudarė sąlygas įvertinti pagrindinių fizinių veiksnių įtaką TE22 temperatūros kaitai. Modelio atitikimo rodiklis siekė 96,77 %, o tai rodo aukštą identifikacijos tikslumą ir tinkamą visų įėjimų poveikio įvertinimą. Vizualinė analizė (žr. 8 pav.) patvirtino, kad modelis tiksliai atkartoja tiek ilgalaikius temperatūros pokyčius, tiek staigius kritimus viso nagrinėto duomenų intervalo metu. Šie rezultatai rodo, kad modelyje tinkamai atspindėta tiek radiatorių, tiek ventiliacijos kontūrų grįžtamoji dinamika, taip pat reikšminga recirkuliacijos įtaka per TE21 parametą.

Perdavimo funkcija iš TE18, TE20, TE22 į TE19. Temperatūros taškas TE19 žymi grįžtamojo šilumnešio temperatūrą iš šilumos punkto atgal į šilumos siurblius. Tai reikšmingas sistemos parametras, nes jis atspindi, kokios temperatūros šilumnešis grįžta į geoterminius siurblius. Šią temperatūrą veikia keli veiksniai:

- TE18 – tiekiamą šilumą į talpą iš šilumos siurblių.
- TE20 – talpos temperatūra, esanti tarp tiekimo ir grįžtamosios šakos.
- TE22 – grįžtamoji temperatūra iš visų pastato kontūrų.

Šiai sistemai modeliuoti pasirinkta trijų įėjimų struktūra, kad būtų galima atskirai įvertinti kiekvieno įėjimo įtaką galutinei temperatūrai TE19. Kiekvienas įėjimas modeliuotas atskira perdavimo funkcija, atspindinčia dinaminį ryšį tarp konkretaus temperatūros taško ir grįžtamojo šilumnešio į siurblius. Duomenų analizė ir modelių identifikacija atlikta *MATLAB* aplinkoje, naudojant *tfest* funkciją (7 priedas).

Gauta TE18 perdavimo funkcija:

$$G(s) = \frac{1.139s + 0.004858}{s + 0.003724}. \quad (12)$$

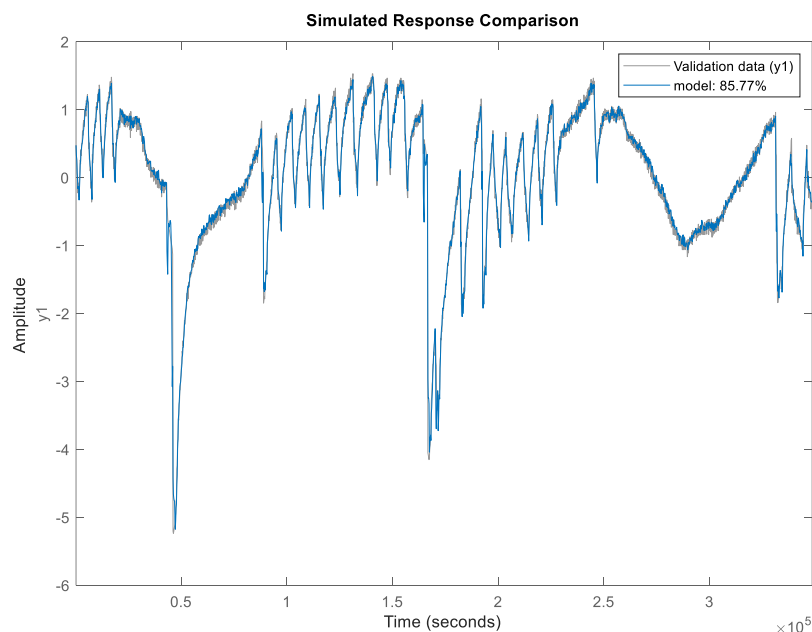
Gauta TE20 perdavimo funkcija:

$$G(s) = \frac{-0.5222s^2 - 0.004497s - 9.766 \cdot 10^{-6}}{s^2 + 0.009212s + 2.917 \cdot 10^{-5}}. \quad (13)$$

Gauta TE22 perdavimo funkcija:

$$G(s) = \frac{0.01118s^3 - 3.933 \cdot 10^{-5}s^2 - 9.066 \cdot 10^{-7}s + 1.806 \cdot 10^{-10}}{s^3 + 0.005919s^2 + 6.689 \cdot 10^{-6}s + 1.805 \cdot 10^{-8}}. \quad (14)$$

Modeliavimo atitikties koeficientas siekė 85,77 %, o tai yra pakankamai aukštas tikslumas, įvertinant trijų įėjimų dinamiškai besikeičiantį pobūdį. Vizualus „compare()“ grafiko (žr. 9 pav.) palyginimas rodo, kad modelis patikimai atkartoja tiek dažnus svyravimus, tiek ilgesnio laikotarpio nuosmukius. Pereinamieji procesai, ypač šuoliai dėl šilumos siurblių įjungimo ir kontūrų apkrovos pokyčių, yra tiksliai atkuriami.



9 pav. Perdavimo funkcijų TE18, TE20, TE22 → TE19 modeliavimo ir realių duomenų palyginimas

Šilumos punkto dinamikos atkūrimo matematiniui modeliui apibendrinimas. Siekiant įvertinti bendrą šilumos punkto dinaminio modelio kokybę, buvo atlikta kiekvienos perdavimo funkcijos tikslumo analizė. Tam naudotas *MATLAB* „compare()“ metodas, kuris leidžia palyginti modeliuoto atsako kreivę su realiais ir eksperimentiniais duomenimis. Pagrindiniai vertinimo kriterijai – atitikties koeficientas ir vizualinė analizė. Gauti rezultatai pateikiami 7 lentelėje.

7 lentelė. Perdavimo funkcijų modelių tikslumo įvertinimas

Eil. Nr.	Įėjimai	Išėjimas	Atitiktis su realiu objektu
1	Š-1, Š-2, Š-3	TE18	83.57 %
2	TE18, TE22	TE20	92.37 %
3	TE20	TE21	96.39 %
4	TE25, TE26	TE22	96.77 %
5	TE18, TE20, TE22	TE19	85.77 %

Kaip matyti iš 7 lentelės duomenų, perdavimo funkcijų modeliai pasižymėjo aukštu tikslumo lygiu. Didžiausias atitikimo su realiu objektu rodiklis siekė 96,77 %, o mažiausias – 83,57 %. Apskaičiavus visų pateiktų modelių vidutinį atitikimo rodiklį, gauta reikšmė sudaro 90,57 %, tai atskleidžia gerą bendrą modelių identifikacijos kokybę. Atsižvelgiant į sistemos inertiškumą, skirtingus šilumos kontūrus ir ribotą jutiklių skaičių, toks rezultatas leidžia teigti, kad sudaryti perdavimo funkcijų modeliai yra pakankamai tikslūs ir tinkami tolesniam modelio kūrimui.

2.5. Dinaminio šilumos punkto modelio kūrimas „Simulink“ aplinkoje

„Simulink“ – tai *MATLAB* platformos dalis, skirta grafiniam dinamiškų sistemų modeliavimui, simulavimui ir analizavimui. Skirtingai nei programinis kodas, „Simulink“ naudoja blokines schemas, kuriose vartotojas sistemas konstruoja jungdamas funkcinis blokus, atspindinčius realius

procesus, matematines lygtis ar loginius ryšius. Ši aplinka yra tinkama šilumos punkto modeliui kurti, nes leidžia vizualiai atkartoti fizinius procesus, tiesiogiai integruoti anksčiau identifikuotas perdavimo funkcijas ir išlaikyti aiškų, struktūruotą blokų išdėstymą pagal technologinę schemą.

Didžiausi šios aplinkos privalumai yra šie:

- galimybė kurti sudėtingas sistemas naudojant intuityvų grafinį formatą;
- tiesioginis perdavimo funkcijų integravimas;
- realaus laiko signalų stebėseną ir analizę;
- paprastas testinių scenarijų kūrimas bei įėjimų/valdymo logikos modeliavimas.

Simulink ne tik leidžia sukurti matematinį šilumos punkto atvaizdą, bet ir suteikia galimybę vėliau išplėsti modelį į automatizuotą valdymo sistemą, prijungti duomenų šaltinius arba atlikti eksperimentinę analizę.

2.5.1. Sistemos modeliavimo tikslas

Šilumos punkto modeliavimas *Simulink* aplinkoje buvo atliekamas siekiant sukurti matematinį šilumos tiekimo sistemos dinamikos atvaizdą, leidžiantį analizuoti tarpusavio ryšius tarp skirtingų šilumos grandžių, simuliuoti realias veikimo situacijas ir įvertinti modeliu pagrįstus valdymo scenarijus.

Šis modelis remiasi anksčiau atlikta perdavimo funkcijų identifikacija, kurios metu eksperimentiniais duomenimis buvo nustatyti šilumos srautų sąryšiai tarp jutiklių taškų. Visos šios funkcijos buvo integruotos į atitinkamus *Transfer Fcn* blokus *Simulink* aplinkoje, sujungiant jas pagal realų fizinės sistemos principą.

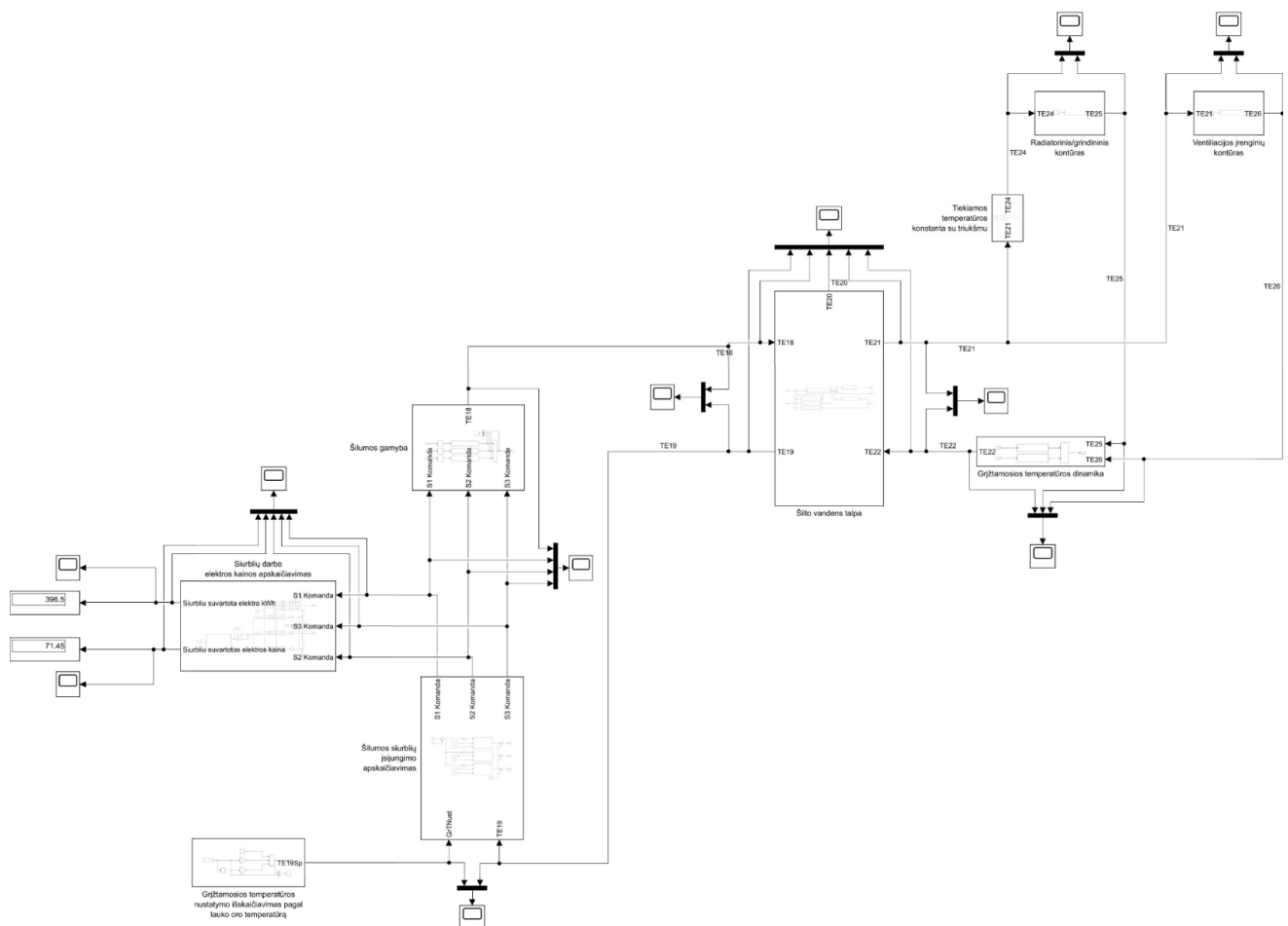
Pagrindiniai modeliavimo tikslai buvo šie:

- Atkurti šilumos punkto temperatūrų dinamiką įvairiose šakoje – tiek tiekimo, tiek grįžtamojo šilumnešio;
- Atvaizduoti šilumos siurblių ir šilto vandens talpos sąveiką su kontūrų apkrova;
- Sudaryti prielaidas tolimesniam valdymo algoritmų projektavimui;
- Išskaičiuoti šilumos siurblių elektros suvartojimą bei suvartojimo kainas;

Modelis buvo kuriamas ne kaip supaprastinta schema, o kaip detali dinaminė sistema, atspindinti realius šilumos punkto veikimo principus. Jo tikslumas pagrįstas identifikuotų perdavimo funkcijų atitikties rodikliais, o struktūra – faktiniu šilumos paskirstymo kontūrų išdėstymu.

2.5.2. Modelio kūrimo eiga

Šilumos punkto matematinio modelio kūrimas *Simulink* aplinkoje buvo vykdomas atsižvelgiant į realią technologinę struktūrą bei identifikuotų perdavimo funkcijų rezultatus. Modelio tikslas – atkurti pagrindines šilumos srautų grandis ir jų dinaminę sąveiką, laikantis tokio išdėstymo, kuris būtų tiek funkcionalus, tiek vizualiai aiškus.



10 pav. Bendras šilumos punkto modelio vaizdas Simulink aplinkoje

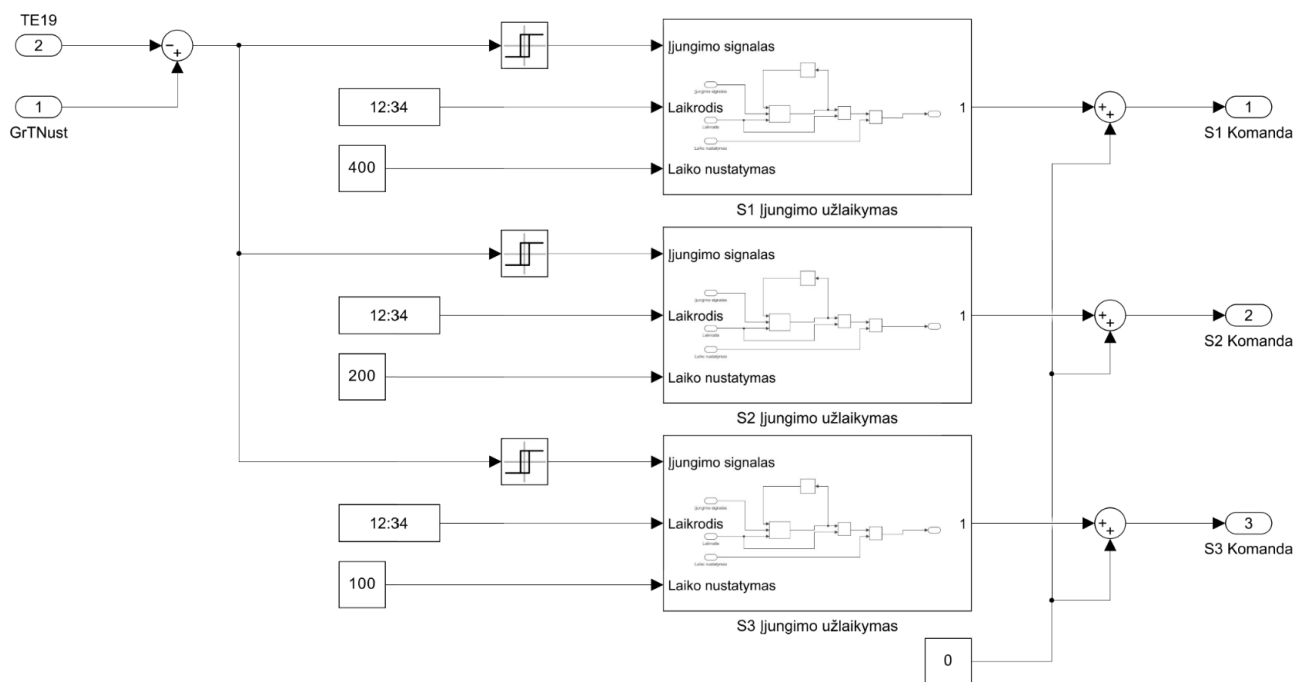
Šilumos siurblių įsijungimo logika. Šis posistemės blokas realizuoja siurblių valdymą pagal kaskadinį principą. Jame yra sudarytas trijų siurblių (S1, S2, S3) veikimas, kuris yra organizuojamas eiliškumo tvarka, atsižvelgiant į temperatūrinį poreikį, nustatytą pagal grįžtamąją temperatūrą iš šilto vandens talpos (TE19) ir skaičiuojamą grįžtamąsios temperatūros nustatymą (GrTNust).

Pagrindinis logikos veikimo principas:

1. Iš TE19 atimama GrTNust reikšmė – taip gaunamas temperatūros nuokrypis nuo užduoties.
2. Šis nuokrypis yra lyginamas su kiekvienos kaskadinės pakopos individualia įsijungimo histereze.
3. Jeigu nuokrypis viršija nustatytą ribą, siurblys aktyvuojamas, tačiau ne iškart – aktyvinimas vyksta tik po to, kai įvyksta papildomas įjungimo vėlinimas, įgyvendintas atskiruose subsystem blokuose:

- „S1 įjungimo užlaikymas“,
- „S2 įjungimo užlaikymas“,
- „S3 įjungimo užlaikymas“.

Ši posistemė įvertina laiką, per kurį signalas viršija histerezės slenkstį, ir tik tuomet išduoda įjungimo komandą (1). Jei sąlygos nebeatitinka – siurblys lieka išjungtas (0). Modelio išėjimai „S1 Komanda“, „S2 Komanda“ ir „S3 Komanda“ vėliau perduodami į šilumos gamybos bloką, kuriame kiekvienas siurblys turi atskirą perdavimo funkciją.



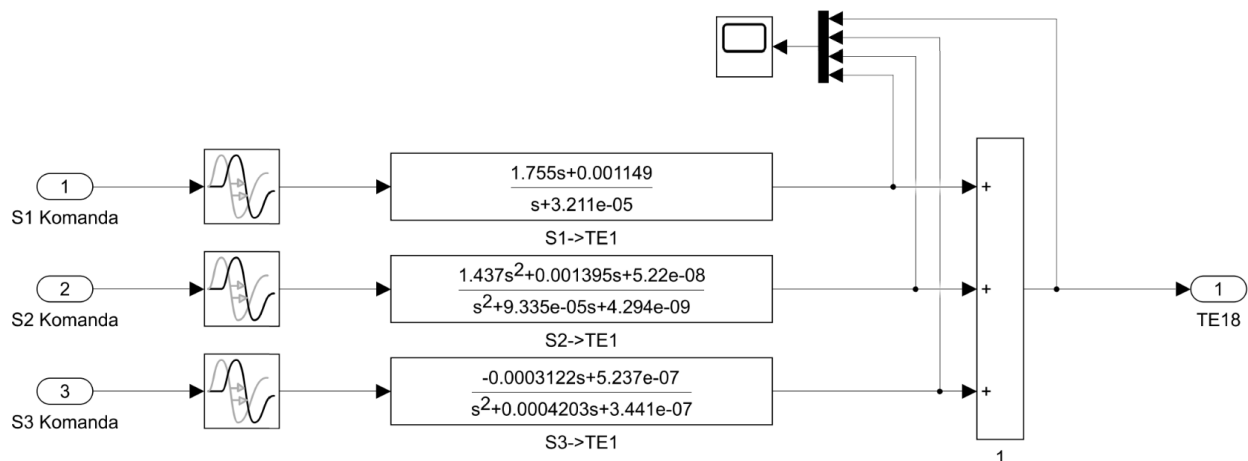
11 pav. Šilumos siurblių įsijungimo logikos schema

Šilumos gamyba. Posistemė modeliuoja siurblių generuojamos šilumos patekimą į šilto vandens talpą, aprašydama dinaminę ryšį tarp šilumos siurblių darbo komandų ir tiekiamos temperatūros TE18. Kiekvienas šilumos siurblys turi atskirą įėjimą į šį bloką, atitinkantį loginį įjungimo signalą, kurį generuoja „Šilumos siurblių įsijungimo logika“.

Kiekvienam siurbliui priskirta unikali perdavimo funkcija, kuri atspindi jo atsaką į įjungimą. Be to, prieš perduodant signalą į perdavimo funkcijos bloką, įvestas papildomas laiko vėlinimo elementas („Transport Delay“), siekiant tiksliau atkartoti realią sisteminę inerciją. Užlaikymo reikšmės yra tokios:

- Šilumos siurblys Nr. 1 – 1.98 s
- Šilumos siurblys Nr. 2 – 1.98 s
- Šilumos siurblys Nr. 3 – 1.08 s

Visų trijų siurblių atsakai yra sumuojami naudojant *Sum* bloką, o rezultatas išvedamas kaip TE18 – bendra tiekiamą temperatūrą iš šilumos šaltinio į šilto vandens talpą. Taip užtikrinama, kad TE18 atspindėtų bendrą sistemos šiluminę indėlį, kai veikia vienas, keli ar visi siurbliai.

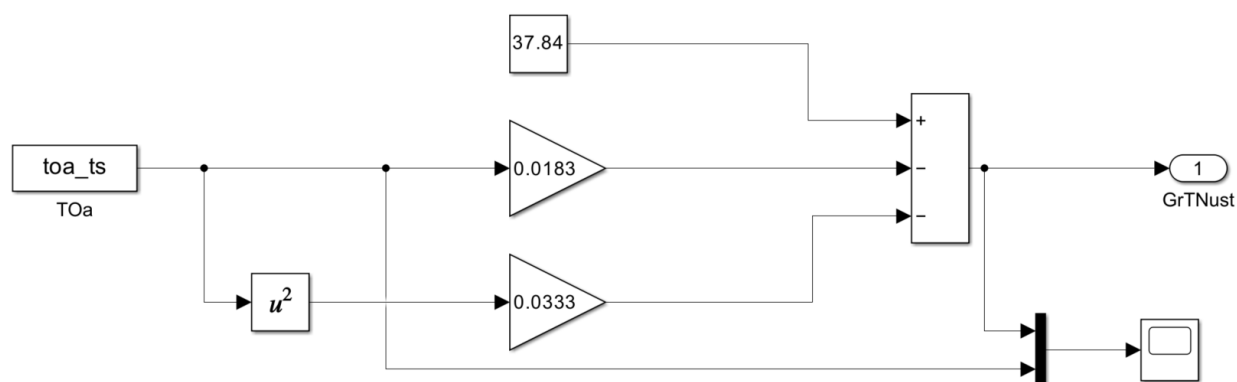


12 pav. „Šilumos gamyba“ posistemės struktūra Simulink aplinkoje

Grįžtamosios temperatūros nustatymo išskaičiavimas pagal lauko temperatūrą. Ši posistemė apskaičiuoja grįžtamosios temperatūros užduotį (GrTNust) pagal lauko oro temperatūrą. Jis atspindi tą pačią šilumos kreivės formulę (1), kuri buvo pateikta ankstesniame skyriuje, ir naudojamas kaip pagrindinis atskaitos taškas siurblių valdymo logikai.

Į bloką įeina kintamasis *toa_ts*, kuris yra lauko oro temperatūros duomenų rinkinys, iš anksto paruoštas ir įkeltas į *MATLAB* aplinką. Toliau ši reikšmė taikoma kvadratinei šilumos kreivės formulei.

Bloko išvestis naudojama „Šilumos siurblių įsijungimo logikos“ posistemėje, kur ji lyginama su faktine grįžtąja temperatūra TE19, siekiant nustatyti, ar yra poreikis įjungti papildomą šilumos siurblį.



13 pav. Grįžtamosios temperatūros nustatymo blokas

Šilto vandens talpa. Ši posistemė imituoja šilto vandens talpos temperatūrinius srautus ir jų tarpusavio sąveiką. Tai vienas iš svarbiausių sistemos dinaminių mazgų, nes čia susikerta pagrindiniai

šilumos šaltiniai (iš siurblių) ir šilumos vartotojai (pastato kontūrai). Talpa veikia kaip šiluminė inercinė grandis, kurią veikia tiek šilumos tiekimas, tiek atgal grįžtantis šilumnešis.

Šio bloko įėjimai:

- TE18 – tiekiamą temperatūrą į talpą iš šilumos siurblių;
- TE22 – bendra grįžtamoji temperatūra iš visų pastato kontūrų

Bloko išėjimai:

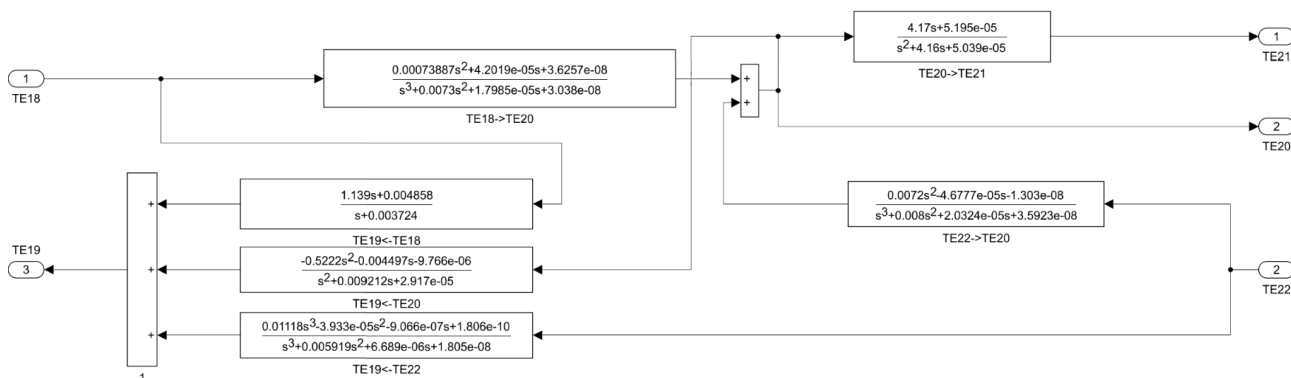
- TE19 – grįžtamoji temperatūra į šilumos siurblius;
- TE20 – talpos temperatūra;
- TE21 – temperatūra, tiekiamą iš talpos į kontūrus.

Dinaminiai ryšiai ir jų modeliavimas:

- TE18 → TE20: tai pagrindinis šilumos šaltinio perdavimas į talpą. Modeliuojamas aukštesnės eilės perdavimo funkcija, įvertinant tiek inerciją, tiek šilumos padidėjimo greitį.
- TE22 → TE20: modeliuojamas kaip šilumos nuėmimas – tai reiškia, kad grįžtamoji temperatūra iš kontūrų atvėsina talpą. Šis efektas pateiktas su neigiamos įtakos perdavimo funkcija, atspindinčia sistemos balansą.

Abi funkcijos yra sumuojamos per Sum bloką, o jų išėjimas pateikiamas kaip TE20.

- TE20 → TE21: ši perdavimo funkcija aprašo šilto vandens temperatūros perdavimą į kontūrų tiekimo liniją.
- TE18, TE20, TE22 → TE19: TE19 gaunama sumuojant trijų nepriklausomų perdavimo funkcijų atsakus. Tai modeliuoja sudėtinį šilumos judėjimą grįžtamajame vamzdyne link siurblių. Visi trys komponentai daro dinaminę įtaką, todėl jie yra sumuojami ir jų suma sudaro TE19 temperatūrą.



14 pav. „Šilto vandens talpa“ posistemės struktūra Simulink aplinkoje

Radiatorinis/grindinis kontūro ir tiekiamos temperatūros su triukšmu modeliavimas. Šis punktas apjungia du atskirus, bet tarpusavyje susijusius posistemės blokus:

1. „Tiekiamą temperatūrą su triukšmu“ – tai blokas (žr. 15 pav.), kuriame TE24 reikšmė atvaizduojama kaip pastovi temperatūra (25 °C) su nedideliu ± 0.2 °C triukšmu.
2. „Radiatorinis/grindinis kontūras“ – čia modeliuojamas temperatūros kritimas kontūre nuo tiekiamos temperatūros TE24 iki grįžtamosios TE25 (žr. 16 pav.).

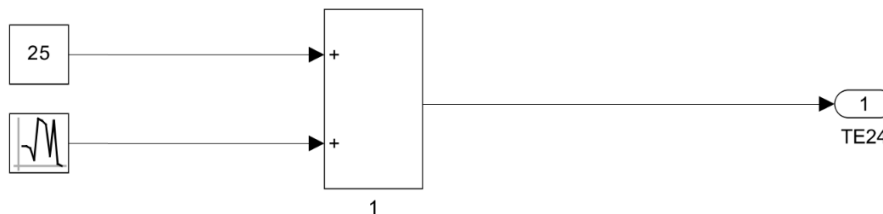
Realiam šilumos punkte triegės pavaros *PI* reguliatorius palaiko TE24 praktiškai nekintančią (tik ± 0.2 °C svyravimai), todėl TE24 dinamika modeliui buvo perteikta kaip konstanta su triukšmo generatoriumi. Tai leidžia:

- išlaikyti modeliavimo tikslumą;
- išvengti netikslumų, kylančių dėl per stabilios reikšmės.

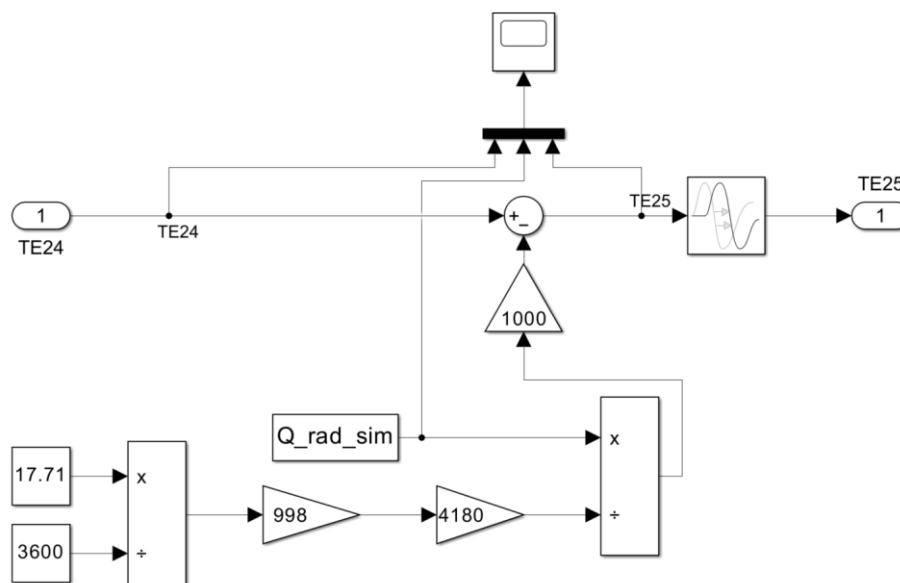
Šis sprendimas buvo pagrįstas perdavimo funkcijų identifikacijos metu, kai nepavyko išgauti tikslaus modelio esant labai ribotai TE24 dinamikai. Sukurta „Radiatorinis/grindinis kontūras“ Simulink posistemė leidžia įvertinti šilumos apkrovą radiatorių kontūre, remiantis fizikiniais skaičiavimais, aprašytais 9-ojoje lygtyje. Ši apkrova išreiškia perduodamos šilumos kiekį tarp tiekiamo ir grįžtamo šilumnešio srautų, atsižvelgiant į pastovų siurblio srautą bei vandens fizines savybes. Šioje posistemėje naudojami šie įėjimai:

- TE24 – tiekiamo šilumnešio temperatūra į kontūrą,
- TE25 – grįžtamo šilumnešio temperatūra iš kontūro,
- Q_rad_sim – iš anksto apskaičiuotas šilumos srautas (apskaičiuotos apkrovos modeliavimo metodikoje),
- fiksuoti konstantiniai blokai – apibrėžiantys šilumos srauto skaičiavimui reikalingas reikšmes: tūrinį srautą, vandens tankį ir specifinę šilumą.

Skirtumas tarp tiekiamos ir grįžtamos temperatūros padauginamas iš šilumos perdavimo konstantų, o rezultatas padalinamas iš 1000, kad būtų gauta apkrova kilovatais (kW). Gautas rezultatas toliau palyginamas su Q_rad_sim reikšme. Galiausiai, posistemės išėjimas yra temperatūra TE25, kuri naudojama tolimesniame modeliavimo procese kaip grįžtamos šilumnešio temperatūros į talpą atitikmuo.



15 pav. „Tiekiamos temperatūros su triukšmu“ posistemės struktūra Simulink aplinkoje



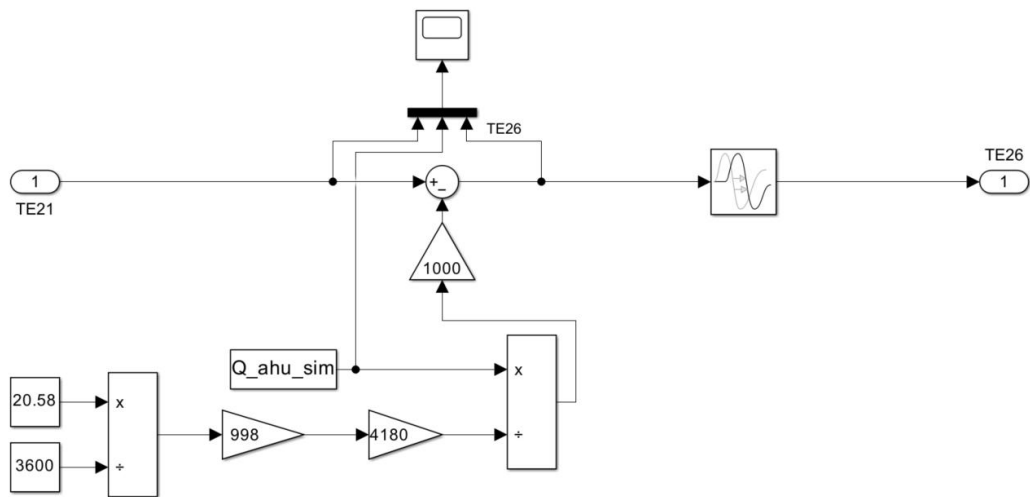
16 pav. „Radiatorinis/grindinis kontūras“ posistemės struktūra Simulink aplinkoje

Ventiliacijos įrenginių kontūras. Šilumos srauto dinamika *Simulink* aplinkoje realizuota remiantis energijos balanso skaičiavimu, leidžiančiu įvertinti kontūro apkrovą pagal šilumnešio parametrus. Skaičiavimas grindžiamas žinoma šilumos srauto formule (žr. 9 lygtį), kuriai taikomos pastovios srauto ir fizikinės vandens savybės.

Naudojami įėjimai:

- TE21 – tiekiamo šilumnešio temperatūra iš talpos į kontūrus,
- TE26 – grįžtamo šilumnešio temperatūra iš ventiliacijos kontūro,
- Q_{ahu_sim} – žinomos apkrovos reikšmės (apskaičiuotos apkrovos modeliavimo metodikoje).

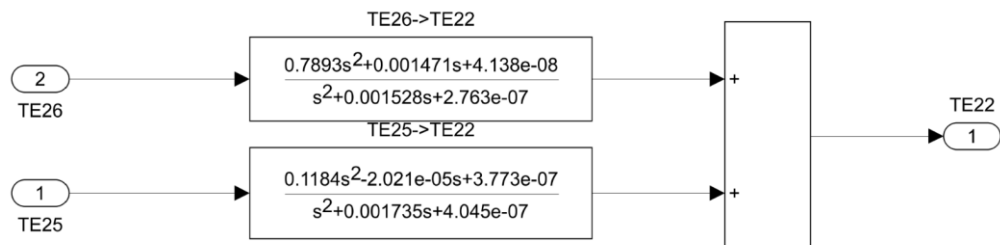
Naudojant TE21 ir TE26 temperatūrų skirtumą, skaičiuojama šiluminė energija, perduodama ventiliacijos įrenginių šilumokaičiams. Dėl pastovaus siurblio srauto ir stabilios vandens terpės, formulėje taikomos pastovios reikšmės, leidžiančios efektyviai prognozuoti grįžtamosios temperatūros TE26 reikšmę esant žinomam šilumos srautui. Išėjimo reikšmė (TE26) pateikiama kaip grįžtamo šilumnešio temperatūros prognozė, koreliuojanti su apkrovos dydžiu. Modelis leidžia įvertinti, kaip šilumos suvartojimo pokyčiai daro įtaką grįžtamajai temperatūrai.



17 pav. „Ventiliacijos įrenginių kontūras“ posistemės struktūra Simulink aplinkoje

Grižtamosios temperatūros dinamika. Ši posistemė modeliuoja bendros grįžtamosios temperatūros iš pastato kontūrų (TE22) formavimąsi pagal dviejų skirtingų kontūrų temperatūrinius atsakus: iš radiatorinio/grindinio šildymo kontūro (TE25) ir ventiliacijos įrenginių kontūro (TE26). TE22 – tai bendra temperatūra, grįžtanti atgal į šilto šilumnešio talpą.

Modelyje temperatūros TE25 ir TE26 yra paduodamos per dvi atskiras antros eilės perdavimo funkcijas, kurios atspindi kontūro inerciją ir temperatūros sklaidą vamzdynuose. Abu signalai po dinaminį grandžių yra sumuojami, kad būtų gautas bendras temperatūrinis atsakas TE22.



18 pav. „Grižtamosios temperatūros dinamika“ posistemės struktūra Simulink aplinkoje

2.6. Šilumos siurblių elektros suvartojimas

Šilumos siurblių elektros energijos sąnaudų skaičiavimo modeliavimas prasidėjo nuo faktinių duomenų analizės. Buvo surinktas vienos savaitės laikotarpio duomenų paketas, kuriame registruotos tiek siurblių sukauptos elektros sąnaudos (kWh), tiek jų įjungimo/išjungimo komandos. Tokia struktūra leido tiksliai identifikuoti veikimo laikotarpius ir analizuoti energijos suvartojimo dinamiką.

2.6.1. Elektros suvartojimo duomenų analizė ir supaprastinimas

Analizuojant duomenis buvo pastebėta, kad kiekvienas siurblys įsijungęs veikia pagal aiškų algoritmą: pradiniam etape per maždaug 10 minučių išibėgėja, o vėliau pereina į pastovaus veikimo

režimą. Tokia eksploatacinė elgsena atitinka įprastą šilumos siurblių darbo principą, kai naudojamas įsibegėjimas prieš pasiekiant nominalų darbo tašką.

Remiantis šiuo režimu ir stebėta energijos kreive, nustatyta, kad vienas šilumos siurblys per 15 minučių veikimo laikotarpį vidutiniškai sunaudoja apie 1,4 kWh elektros energijos. Ši reikšmė buvo pritaikyta modeliui, konvertuojant ją į sekundinį energijos suvartojimą.

Modelyje kiekvienas siurblys valdomas per loginį įėjimą, o energijos skaičiavimas vykdomas naudojant pastovią suvartojimo normą. Toks metodas leidžia paprastai ir tiksliai įvertinti realius siurblių energijos poreikius skirtingomis darbo sąlygomis bei integruoti šiuos duomenis į elektros kainų analizę.

2.6.2. Dinaminis elektros kainos integravimas į modelį

Siekiant realistiškai įvertinti šilumos siurblių eksploatacines sąnaudas, į matematinį modelį buvo integruotos dinamiškai kintančios elektros energijos kainos, pagrįstos „ENTSO-E“ duomenimis. Kainų informacija buvo nurašyta į CSV formato dokumentą, su tikslu integruoti į matematinį modelį, ir įkeliami į Simulink aplinką.

Kainų faile pateikiamos reikšmės EUR/MWh formatu, valandiniais intervalais, tai yra, kiekvienai valandai skirta viena reikšmė. Šie duomenys integruojami į modelį kaip „electricity_prices_timeseries.mat“ failas, kuriame laikomos dvi eilutės: laiko žymos (s) ir atitinkamos kainos (EUR/MWh). Duomenų nuskaitymas atliekamas naudojant *MATLAB Function* bloką (8 priedas), kuriame įgyvendinta interpoliacijos logika. Tam, kad kiekvieną simuliacijos akimirką būtų galima žinoti tikslią elektros kainą, taikoma laiko atžvilgiu diskreti interpoliuota paieška („previous“ metodas), užtikrinanti, kad visa viena valanda turės pastovią vertę.

Be bazinės kainos, papildomai buvo integruotas tiekėjo taikomas tarifas – 0,06 EUR/kWh, kuris pridedamas prie kiekvienos valandinės reikšmės. Šis papildomas mokestis pritaikytas atsižvelgiant į modelio veikimo žingsnį (1 sek.), todėl jis proporcingai įskaičiuojamas prie energijos sąnaudų sekundės tikslumu. Galutinė kaina kiekvieną akimirką gaunama sudauginus tuo metu veikiančio siurblio energijos sunaudojimą (kWh/s) su tuo momentu galiojančia elektros kaina (EUR/kWh). Tokiu būdu *Simulink* modelis fiksuoja momentines sąnaudas, kurias vėliau galima integruoti bendrai analizės išvadais arba naudoti optimizavimo algoritmams.

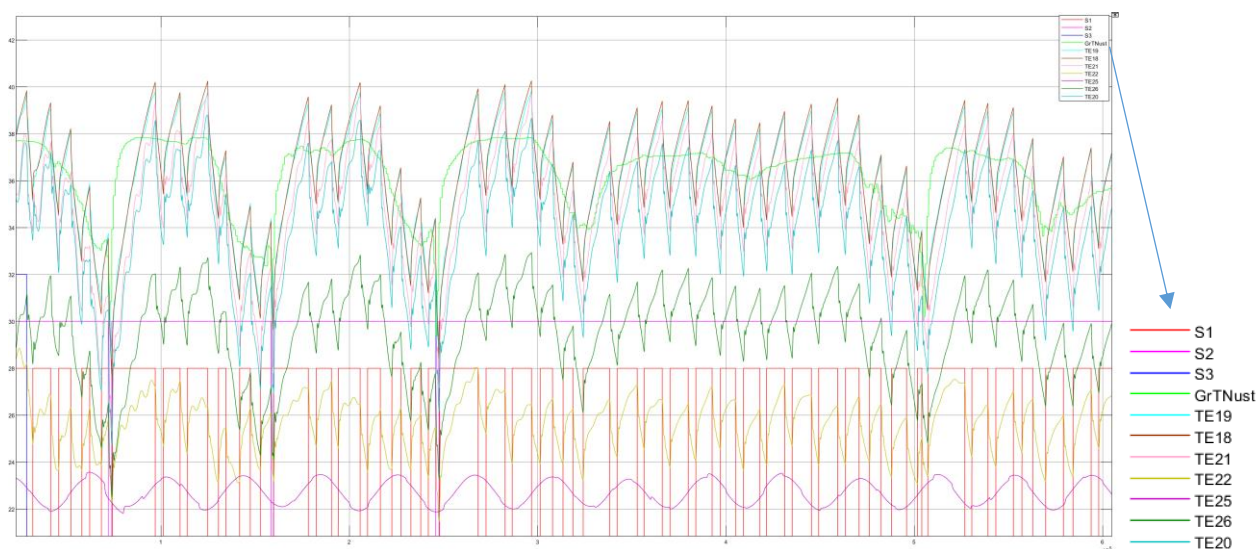
2.6.3. Bendra elektros sąnaudų ir kainos skaičiavimo logika

Apjungus šilumos siurblių darbo logiką bei elektros kainų dinamiką, *Simulink* aplinkoje suformuota atskira posistemė, skirta elektros sąnaudų skaičiavimui. Kiekvienas šilumos siurblys modelyje turi atskirą loginį įjungimo signalą, kuris dauginamas iš pastovios suvartojimo normos (kWh/s). Šios normos buvo nustatytos remiantis eksploataciniais duomenimis ir atitinka ~1,404 kWh per 15 minučių darbo laikotarpį.

Kiekvieno siurblio momentinė elektros suvartojimo reikšmė modelyje apskaičiuojama paprastai – žinant, kad vienas siurblys per 15 minučių sunaudoja 1,404 kWh, ši reikšmė buvo padalinta iš 900 sekundžių (15 min) ir gauta konstanta įtraukta į *Simulink* modelį. Ši konstanta (kWh/s) dauginta iš loginio įjungimo signalo, tokiu būdu gaunant momentinį elektros suvartojimą kiekvieną sekundę. Tolesnis integravimas laike leidžia nustatyti kiekvieno siurblio sukauptą elektros kiekį (kWh) per visą simuliacijos trukmę. Šie duomenys išvedami atskirais signalais ir naudojami sąnaudų analizei.

Kiekvieno siurblio įsijungimas tiesiogiai lemia TE18 padidėjimą – tai yra temperatūra, tiekiamą į šilto vandens talpą. Vėliau kyla TE20 (talpos temperatūra), o jai pakilus, TE21 (tiekiamo šilumnešio į kontūrus temperatūra) taip pat pradeda augti. Sistema reaguoja logiškai: šiluma paskirstoma, grįžtamoji temperatūra TE22 stabilizuojasi, o TE19 grįžta į normos ribas. Kai ji peržengia viršutinį histerezės tašką – atitinkami siurbliai išsijungia.

2.7.2. Reikšmių dinamika savaitės bėgyje



20 pav. Modelio temperatūrų ir siurblių veikimo dinamika

Šiame grafike (28 pav.) pavaizduota savaitės trukmės modelio veikimo simuliacija. Matomi šie parametrai:

- S1, S2, S3 – diskretiniai šilumos veikimo signalai, kurie yra padauginti iš 28 (S1), 30 (S2), 32 (S3), su tikslu, kad aiškiai matyti įsijungimo momentus grafike;
- GrTnust – Išskaičiuotas grįžtamosios temperatūros nustatymas;
- TE19 – grįžtamoji temperatūra iš talpos (pagrindinis kontrolės taškas);
- TE18 – siurblių tiekiamą temperatūrą į talpą;
- TE21 – temperatūra tiekiamą į kontūrus;
- TE22 – grįžtamoji temperatūra iš pastato kontūrų.
- TE25 – grįžtama temperatūra iš radiatorių kontūro;
- TE26 – grįžtama temperatūra iš ventiliacijos įrenginių kontūro;
- TE20 – šilto šilumnešio talpos temperatūrą.

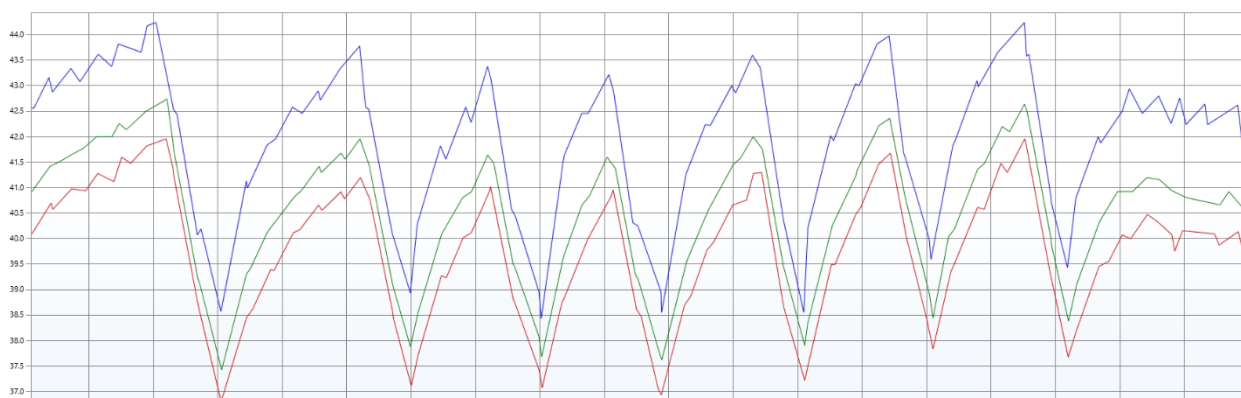
Modelio simuliacija buvo vykdoma su trimis įėjimais – lauko oro temperatūra, ventiliacijos kontūro apkrovos ir radiatorinio/grindinio konūtro apkrovos. Likę duomenys buvo generuojami sistemos dinamikos, paremtos ankstesniuose skyriuose identifikuotomis perdavimo funkcijomis ir loginėmis priklausomybėmis. Tai leidžia imituoti visą šilumos punkto veikimą be realių duomenų srautų, remiantis vien matematiniu modeliu.

Vienas svarbiausių įsitikinimų simuliacijos teisingumu – sistemos elgesio dėsningumas, kuris pastebimas pateiktame savaitės grafike. Dinamikoje aiškiai matoma, kad šilumos siurbliai įsijungia tik tada, kai grįžtamoji temperatūra iš talpos (TE19) nukrenta žemiau paskaičiuoto nustatymo (GrTnust). Įsijungimas vyksta kaskadine logika, o taip pat su vėlinimais bei histerezėmis.

Įsijungus siurbliams, pradeda kilti tiekiamą temperatūrą į talpą (TE18), o netrukus po to kyla ir talpos temperatūra (TE20) bei temperatūra tiekiamą į pastato kontūrus (TE21). Šis kylantis šilumnešio srautas palaipsniui šildo visą sistemą, kol TE19 pasiekia viršutinę histerezės ribą – tuomet siurbliai išsijungia ir ciklas kartojasi.

Svarbu pastebėti ir realistinę fizikinę prielaidą, kuri aiškiai atsispindi grafikuose – TE21 reikšmė kyla greičiau nei TE20. Tai atsiranda dėl to, nes vamzdis, per kurį šiluma tiekiamą iš siurblių į talpą, įeina į viršutinę talpos dalį, kaip ir vamzdis, kuriuo šiluma nukreipiama į kontūrus. Todėl, TE21 reaguoja greičiau į siurblių įjungimą nei TE20, nes šiluma iš siurblių greitai pasiekia viršutinę zoną, bet kol ji išsisklaido per visą talpą, praeina šiek tiek laiko. Tokiu būdu šilumos judėjimas per viršutinę talpos dalį atsispindi greičiau kontūrų tiekimo temperatūroje nei visos talpos vidutinėje temperatūroje. Tai galima pamatyti ne tik matematinio modelio, bet ir realioje objekto dinamikoje, kurio grafikas yra pateiktas 21 paveiksle. Grafiko kreivės yra pavaizduotos trimis spalvomis: žalia – TE21, mėlyna – TE18, raudona – TE20.

Šie dėsningumai rodo, kad matematinis modelis logiškai atkuria šilumos punkto veikimą. Grafike aiškiai išryškėja cikliškumas, priklausomybė nuo grįžtamosios temperatūros ir tarpusavyje nuosekliai veikiantys komponentai, leidžiantys teigti, jog modelis yra funkciškai pagrįstas ir tiksliai atspindi realios sistemos veikimo principus.



21 pav. Realaus objekto temperatūrų dinamikos grafikas

3. Elektros kainų nuskaitymo prototipo paruošimas integracijai į pastato valdymo sistemą

ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) – Europos elektros perdavimo sistemos operatorių tinklas, kurio pagrindinis tikslas – užtikrinti saugų, patikimą ir efektyvų elektros energijos perdavimą bei skatinti bendros Europos elektros rinkos plėtrą ir integraciją.

Šiame poskyryje buvo siekiama sukurti autonominę elektros kainų nuskaitymo sistemą, pagrįstą „Raspberry Pi“ mikrokompiuteriu, „Home Assistant“ automatizavimo platforma bei tiesioginiu ryšiu su elektros biržos *API*. Sistema gavus aktualius kainų duomenis, juos automatiškai surašys į *CSV* formato dokumentą ir perduos visą informaciją *Modbus TCP/IP* protokolu į valdiklius.

3.1.1. Įrenginio pasirinkimo pagrindimas

Projekte, kuriame svarbu užtikrinti stabilų duomenų nuskaitymą, autonominį veikimą ir sąsają su debesijos paslaugomis, pasirinktas *Raspberry Pi 4* mikrokompiuteris. Šis įrenginys pasižymi itin geru kainos ir funkcionalumo santykiu bei plačiu pritaikomumu tiek moksliniuose, tiek inžineriniuose sprendimuose. Pagrindiniai šio pasirinkimo argumentai – kompaktiškumas, nedidelis energijos suvartojimas, platus priedų ir plėtinių pasirinkimas bei galimybė naudoti atvirojo kodo įrankius.

Raspberry Pi 4 modelis turi keturių branduolių procesorių ir pakankamai darbinės atminties (4 Gb), todėl be problemų palaiko operacines sistemas su grafinėmis vartotojo sąsajomis, konteinerizacijos įrankius, bei nuotolinės prieigos sprendimus. Tai leidžia viename įrenginyje sujungti kelias tarpusavyje susijusias funkcijas: *API* užklausų siuntimą ir atsakymų apdorojimą, automatizacijos valdymą bei duomenų perkėlimą į išorinius šaltinius.

Be to, *Raspberry Pi* suderinamumas su *Home Assistant* platforma leidžia šį įrenginį panaudoti kaip centralizuotą automatizacijos serverį, kuriame gali būti apdorojami tiek elektros kainų duomenys, tiek kiti energetinio valdymo signalai. Įrenginys puikiai veikia su *Linux* pagrindu veikiančiomis operacinėmis sistemomis, palaiko įvairius programinius paketus ir turi patogią dokumentaciją bei aktyvią naudotojų bendruomenę, kas itin svarbu vystant tyrimų projektą.

3.1.2. Operacinės sistemos diegimas ir nuotolinė prieiga

RPi įrenginyje buvo pasirinkta įdiegti *Ubuntu 22.04.5 LTS* operacinę sistemą, kuri remiasi *Debian* pagrindu ir pasižymi ilgo laikotarpio palaikymu, stabilumu bei suderinamumu su plačiu programinės įrangos spektru. Ši sistema leidžia naudoti pažangius konteinerizacijos ir automatizacijos sprendimus (pvz., *Docker*, *Python* aplinkas) bei suteikia galimybę centralizuotai valdyti įrenginį per terminalą arba grafinę aplinką.

Sistemos diegimui naudota oficiali priemonė *Raspberry Pi Imager*, kuri leidžia tiesiogiai įrašyti pasirinktą operacinę sistemą į *microSD* atminties kortelę. Buvo įdiegta *Ubuntu 22.04.5 LTS* versija. Nors tai nėra naujausia versija, bet ji buvo parinkta, nes naujausios versijos diegimo metu kilo problemų prisijungiant per *SSH*, todėl pasirinktas stabilesnis sprendimas.

Nuotolinei prieigai į *Raspberry Pi* įdiegtas sprendimas *Tailscale*, pagrįstas *WireGuard* VPN protokolu. Ši sistema leidžia saugiai pasiekti įrenginį iš bet kurios vietos be sudėtingo maršrutizatoriaus konfigūravimo ar statinių *IP* adresų. *Tailscale* leidžia sukurti virtualų tinklą tarp

kompiuterio ir *Raspberry Pi*, taip išvengiant poreikio atidaryti prievadus ar naudoti nesaugų prievadų peradresavimą (angl. *port forwarding*).

Norint užtikrinti galimybę naudotis grafine vartotojo sąsaja, įdiegta *Xfce* aplinka. Ji leidžia naudotis *Raspberry Pi* įrenginiu per *xRDP* protokolą, kuris buvo pasirinktas vietoje alternatyvių sprendimų (pvz., *VNC*), nes pasižymi didesniu našumu ir geresniu suderinamumu su *Windows* operacine sistema. Tokiu būdu suformuota saugi, stabili ir patogiai darbo aplinka, leidžianti pilnai valdyti ir stebėti *Raspberry Pi* įrenginį tiek per komandų eilutę, tiek grafinę vartotojo sąsają, nepriklausomai nuo fizinės buvimo vietos.

3.1.3. *Home Assistant* platforma konteineryje

Home Assistant – viena plačiausiai naudojamų atvirojo kodo automatizavimo platformų, pasižyminti dideliu funkcionalumu, plačia integracijų įvairove bei aktyvia kūrėjų bendruomene. Dėl savo lankstumo ir suderinamumo su įvairiais įrenginiais, ši platforma buvo pasirinkta kaip pagrindinis sprendimas elektros kainų nuskaitymui, apdorojimui ir perdavimui šio projekto prototipe.

Home Assistant buvo įdiegtas kaip atskiras *Docker* konteineris, veikiantis tiesiogiai *Raspberry Pi* įrenginyje. Toks diegimo būdas užtikrina kelis esminius privalumus: greitą paleidimą, atskirtą sisteminių komponentų veikimą, mažą resursų naudojimą ir paprastą priežiūrą. Konteinerio technologija leidžia patogiai atnaujinti ar modifikuoti komponentus nekeičiant bazinės operacinės sistemos, o tai svarbu prototipo vystymo metu. Diegimas buvo atliktas naudojant oficialius *Docker* paleidimo įsakymus, apibrėžiant reikiamus tinklo prievadus ir katalogų susiejimus. Vartotojo sąsaja pasiekama per bet kurią interneto naršyklę, prisijungus prie *Home Assistant* sąsajos per vietinį tinklą arba per saugų *Tailscale VPN* tunelį, leidžiantį pasiekti įrenginį nuotoliniu būdu.

3.1.4. *ENTSO-E* kintančių elektros kainų integracija

Norint automatizuotai gauti valandines elektros energijos kainas, į „*Home Assistant*“ platformą buvo integruota *ENTSO-E* elektros rinkos duomenų prieiga per *RESTFUL API*. Šis *API* leidžia tiesiogiai užklausti oficialios Europos elektros perdavimo sistemos operatorių tinklo (*ENTSO-E*) duomenų bazės ir gauti elektros kainas pasirinktame regione. Integracija leidžia naudoti šiuos duomenis tiek vizualizacijai, tiek automatizuotiems sprendimams. Prieiga prie *ENTSO-E RESTFUL API* buvo suteikta nemokamai, gavus individualų *API* raktą. Toks sprendimas ne tik supaprastino techninį įgyvendinimą, bet ir sumažino projekto įgyvendinimo kaštus, nes nereikėjo naudotis komercinėmis ar mokamomis *API* alternatyvomis.

Duomenų integracija į „*Home Assistant*“ buvo atlikta pasitelkus *Home Assistant Community Store* (*HACS*) – bendruomenės kuriamą papildinių valdymo sistemą. Po *HACS* diegimo, per grafinę sąsają buvo įdiegta *ENTSO-E* integracija, nurodant atitinkamus parametrus: Lietuvos regiono zonos kodą (*LT*), PVM taikymą (21 %) bei duomenų atnaujinimo intervalą. Sėkmingai įdiegus integraciją, „*Home Assistant*“ automatiškai suformavo kelis jutiklius (angl. *sensors*), pateikiančius šią informaciją:

- einamosios dienos elektros kainos (€/kWh),
- ateinančios paros kainų prognozė (€/kWh),
- dabartinė valandinė kaina,
- būsimos valandos kaina,
- dienos mažiausia, didžiausia ir vidutinė kaina,

- dabartinės kainos santykis su dienos maksimumu ar intervalu (%).

Visoms reikšmėms buvo pritaikytas 21 % PVM, todėl jutikliai pateikia apytikres galutinio vartotojo kainas, todėl gauti duomenys gali būti tiesiogiai naudojami tiek vartotojo analizėms, tiek automatizuotam valdymui.

Integracija veikia patikimai – jutikliai atsinaujina automatiškai pagal *ENTSO-E* duomenų publikavimo grafiką, užtikrindami nuolatinę informacijos atnaujinimą.

sensor.entso_e_average_electricity_price	0.13174	state_class: measurement
① Average electricity price (ENTSO-e)		prices_today:
		- time: '2025-05-08 00:00:00+03:00'
		price: 0.11818
		- time: '2025-05-08 01:00:00+03:00'
		price: 0.11755
		- time: '2025-05-08 02:00:00+03:00'
		price: 0.11241
		- time: '2025-05-08 03:00:00+03:00'
		price: 0.11225
		- time: '2025-05-08 04:00:00+03:00'
		price: 0.11455
		- time: '2025-05-08 05:00:00+03:00'
		price: 0.11641
		- time: '2025-05-08 06:00:00+03:00'
		price: 0.14067
		- time: '2025-05-08 07:00:00+03:00'
		price: 0.16437
		- time: '2025-05-08 08:00:00+03:00'
		price: 0.18482
		- time: '2025-05-08 09:00:00+03:00'
		price: 0.15084
		- time: '2025-05-08 10:00:00+03:00'
		price: 0.12347
		- time: '2025-05-08 11:00:00+03:00'
		price: 0.10915
		- time: '2025-05-08 12:00:00+03:00'
		price: 0.0943
		- time: '2025-05-08 13:00:00+03:00'
		price: 0.08039
		- time: '2025-05-08 14:00:00+03:00'
		price: 0.07933
		- time: '2025-05-08 15:00:00+03:00'
		price: 0.08806
		- time: '2025-05-08 16:00:00+03:00'
		price: 0.10919
		- time: '2025-05-08 17:00:00+03:00'
		price: 0.11171
		- time: '2025-05-08 18:00:00+03:00'
		price: 0.12453
		- time: '2025-05-08 19:00:00+03:00'
		price: 0.14359

22 pav. Nuskaitomi neapdoroti duomenys iš *ENTSO-E* duomenų bazės

3.1.5. Duomenų apdorojimas ir įrašymas į tekstinį dokumentą

Elektros kainų duomenys šiame projekte yra esminė sudedamoji dalis tolimesniam sistemos optimizavimui, todėl analizei ir integracijai su išoriniais valdikliais, buvo pasirinktas praktiškas ir patikimas sprendimas – automatinis duomenų kaupimas CSV (Comma-Separated Values) formato faile. Toks formatas leidžia užtikrinti nepriklausomą, vietinį duomenų saugojimą, išvengti priklausomybės nuo trečiųjų šalių paslaugų ir suteikia galimybę lengvai prie istorinių įrašų.

Pagrindinis duomenų šaltinis – „Home Assistant“ platformoje veikiantis *ENTSO-E* jutiklis, kuris kasdien atnaušina kitos paros elektros kainas, pateikdamas jas kaip atributų masyvą. Šie duomenys buvo nukreipti į CSV failą, kad juos galėtų tiesiogiai naudoti kitos sistemos – be papildomo konvertavimo ar formavimo. „Home Assistant“ šiame projekte buvo diegiamas kaip *Docker* konteineris, o ne kaip atskira operacinė sistema, todėl nebuvo prieinamos įprastos papildinių (angl. *Add-on*) sistemos, leidžiančios patogiai plėsti funkcionalumą. Be to, naudojamos *YAML* automatikos neturėjo tiesioginio failų įrašymo palaikymo, o alternatyvos, tokios kaip „python_script“, buvo ribotos – jose neleidžiama naudoti failų operacijų, pvz., *open()*.

Atsižvelgiant į šiuos apribojimus, buvo pasirinktas išorinis *Shell (Bash)* skriptas, veikiantis nepriklausomai nuo *Home Assistant* branduolio, bet sąveikaujantis su juo per *REST API*. Sukurtas skriptas (žr. 23 pav.) kiekvieną dieną 17:00 val. yra inicijuojamas per *Home Assistant* automatizaciją. Jo veikimo principas toks: *curl* komanda užklausia jutiklio būseną per *REST API*, o gautas *JSON* objektas apdorojamas naudojant *jq* įrankį. Ištrauktos valandinės kainos susiejamos su datos žyma, ir visa informacija įrašoma kaip viena *CSV* eilutė, reprezentuojanti konkrečios dienos kainas.

Toks sprendimas pasižymi keliais esminiais privalumais:

- nereikalauja papildomų programavimo bibliotekų ar debesijos paslaugų;
- yra suderinamas su *Docker* aplinkos ribojimais;
- veikia patikimai net minimalių resursų įrenginiuose, tokiuose kaip *Raspberry Pi*;
- duomenys pateikiami universaliu formatu, kuris gali būti analizuojamas *Excel*, *Python*, *MATLAB* aplinkose ar net tekstiniuose redaktoriuose.

```
GNU nano 6.2 entsoe_to_csv.sh
#!/bin/bash

# Failo vieta
OUT="/config/elektra_kainos.csv"

# Dabartinė data
DATE=$(date +%Y-%m-%d %H:%M:%S)

# Gauti JSON atributus iš sensor (naudojant HA REST API)
PRICES=$(curl -s -X GET \
  -H "Authorization: Bearer " \
  -H "Content-Type: application/json" \
  http://localhost:8123/api/states/sensor.entso_e_average_electricity_price | jq -r '.attributes.prices_tomorrow[].price')

# Sudėlioti CSV eilutę
LINE="$DATE"

for PRICE in $PRICES; do
  LINE="$LINE,$PRICE"
done

# Įrašyti eilutę į failą
echo "$LINE" >> "$OUT"
```

23 pav. Duomenų struktūrizavimo kodas CSV integracijai

Spausdinami duomenys į *CSV* lentelę yra pateikti 23 pav.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
4/22/2025 17:00	0.113	0.132	0.122	0.120	0.120	0.125	0.192	0.302	0.187	0.148	0.121	0.105	0.097	0.093	0.095	0.101	0.109	0.118	0.133	0.163	0.207	0.260	0.154	0.131
4/23/2025 17:00	0.091	0.115	0.108	0.105	0.104	0.103	0.227	0.267	0.303	0.143	0.224	0.114	0.108	0.104	0.094	0.094	0.104	0.104	0.246	0.213	0.303	0.230	0.201	0.129
4/24/2025 17:00	0.088	0.105	0.101	0.100	0.102	0.103	0.140	0.164	0.137	0.132	0.116	0.090	0.084	0.078	0.038	0.033	0.069	0.071	0.103	0.121	0.141	0.166	0.133	0.121
4/25/2025 17:00	0.070	0.082	0.080	0.080	0.074	0.075	0.080	0.078	0.062	0.050	0.024	0.003	0.000	-0.002	-0.002	-0.003	-0.001	0.002	0.035	0.062	0.121	0.134	0.156	0.103
4/26/2025 17:01	0.021	0.085	0.137	0.121	0.121	0.103	0.083	0.083	0.076	0.042	0.001	-0.002	-0.005	-0.012	-0.019	-0.021	0.000	0.002	0.040	0.148	0.199	0.156	0.132	0.120
4/27/2025 16:59	0.145	0.112	0.105	0.079	0.064	0.097	0.067	0.156	0.159	0.115	0.082	0.012	0.004	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.002	0.080	0.111	0.144	0.097	0.097	0.042
4/28/2025 17:00	0.111	0.006	0.005	0.005	0.005	0.037	0.102	0.089	0.137	0.108	0.080	0.006	0.004	0.002	0.000	0.000	0.001	0.017	0.093	0.123	0.174	0.226	0.161	0.141
4/29/2025 17:00	0.174	0.115	0.109	0.107	0.107	0.154	0.154	0.221	0.146	0.115	0.085	0.009	0.001	0.000	0.000	0.004	0.000	0.024	0.076	0.081	0.155	0.209	0.159	0.131
4/30/2025 17:00	0.072	0.118	0.112	0.098	0.092	0.110	0.080	0.077	0.071	0.061	0.009	-0.003	0.002	-0.003	-0.004	-0.007	-0.002	0.003	0.049	0.174	0.303	0.411	0.230	0.174
5/1/2025 17:00	0.078	0.108	0.069	0.065	0.064	0.063	0.064	0.071	0.079	0.082	0.010	0.001	0.001	0.000	-0.004	-0.003	0.000	0.001	0.010	0.068	0.073	0.081	0.080	0.074
5/2/2025 17:02	0.085	0.069	0.074	0.074	0.074	0.075	0.075	0.075	0.074	0.009	0.002	0.000	0.000	-0.001	-0.003	-0.003	0.000	0.001	0.028	0.087	0.093	0.122	0.110	0.082
5/3/2025 17:00	0.045	0.073	0.055	0.039	0.094	0.200	0.200	0.044	0.040	0.007	0.001	0.009	0.007	0.005	0.010	0.011	0.024	0.010	0.012	0.074	0.117	0.133	0.135	0.094
5/4/2025 17:00	0.135	0.079	0.046	0.042	0.088	0.076	0.108	0.133	0.145	0.103	0.029	0.019	0.016	0.024	0.028	0.040	0.036	0.024	0.067	0.073	0.164	0.303	0.085	0.050
5/5/2025 17:02	0.045	0.050	0.052	0.051	0.051	0.042	0.071	0.099	0.147	0.102	0.080	0.060	0.046	0.046	0.038	0.053	0.053	0.093	0.113	0.126	0.170	0.189	0.161	0.141
5/6/2025 17:00	0.121	0.107	0.101	0.099	0.102	0.110	0.128	0.156	0.174	0.149	0.113	0.089	0.085	0.075	0.073	0.077	0.081	0.095	0.114	0.134	0.183	0.192	0.168	0.132
5/7/2025 17:00	0.118	0.118	0.112	0.112	0.115	0.116	0.141	0.164	0.185	0.151	0.123	0.109	0.094	0.080	0.079	0.088	0.109	0.112	0.125	0.144	0.200	0.236	0.179	0.148

24 pav. *ENTSO-E* elektros kaupiamų duomenų lentelė *CSV* formato faile

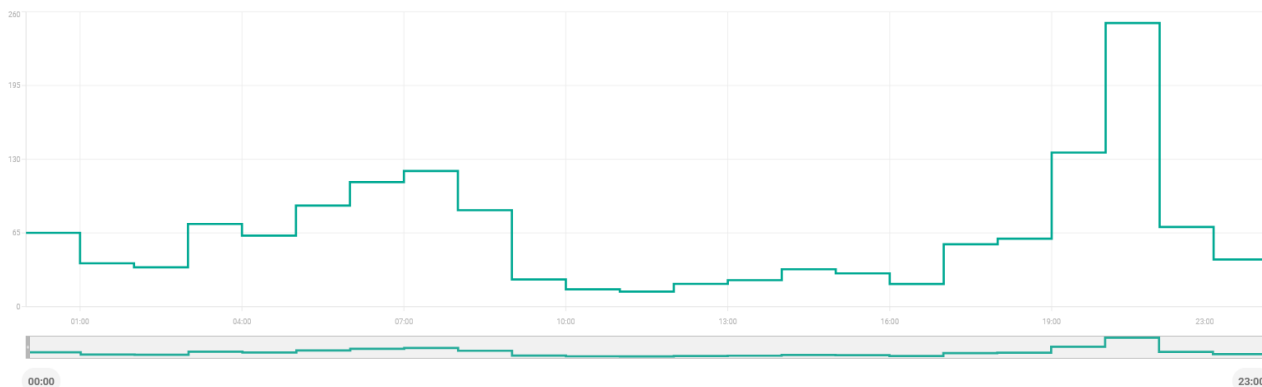
3.1.6. Elektros kainų palyginimas tarp „Home assistant“ ir „ENTSO-E“ šaltinių

Siekiant įsitikinti, kad į „Home Assistant“ platformą integruotas *ENTSO-E* elektros kainų šaltinis veikia patikimai ir tiksliai, buvo atliktas gautų reikšmių palyginimas su oficialiai *ENTSO-E* skelbiamais duomenimis. Analizei pasirinkta 2025 m. gegužės 5 d. – tai diena, kurios duomenys buvo

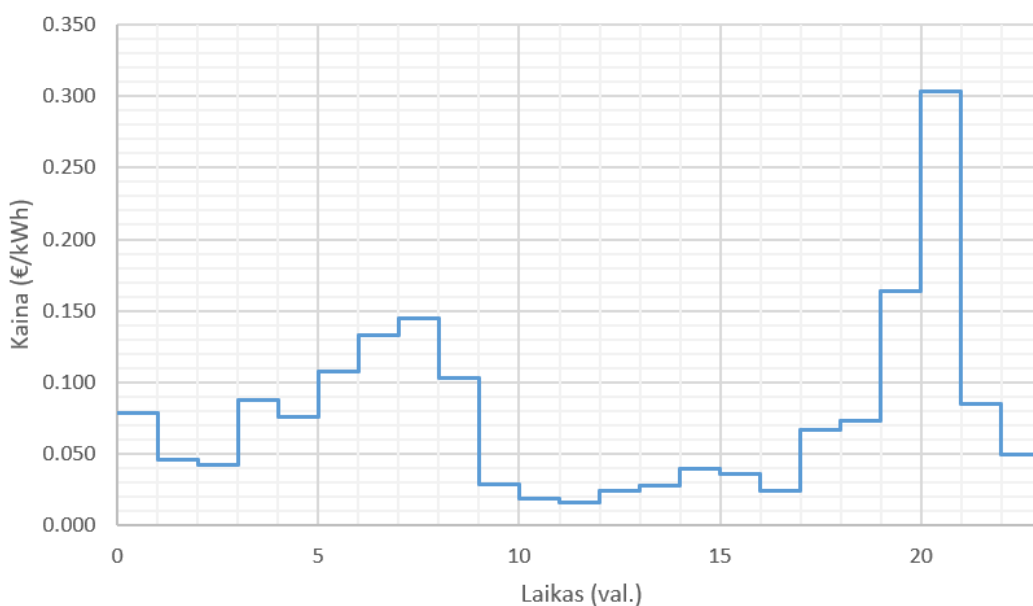
prieinami tiek automatizuotoje „Home Assistant“ integracijoje, tiek *ENTSO-E* svetainėje, leidžiančioje peržiūrėti rinkos kainas atskirai pagal valandas.

Vertinant abu grafikus vizualiai (žr. 25 pav. ir 26 pav.), matyti, kad kainų kreivių forma ir dinamika yra identiška: tiek kainų augimo ir kritimo tendencijos, tiek pikiniai intervalai yra visiškai sutampantys. Tačiau absoliučios reikšmės žymiai skiriasi. Šis skirtumas paaiškinamas skirtinga vienetų ir duomenų interpretacija. *ENTSO-E* svetainėje kainos pateikiamos EUR/MWh formatu, o „Home Assistant“ integracija jas automatiškai konvertuoja į EUR/kWh. Be to, API integracija taiko 21 % pridėtinės vertės mokestį (PVM).

Lyginant grafikus valandos tikslumu, buvo užtikrinta, kad integruoti duomenys į sistemą atkartoja viešai skelbiamus duomenis. Nepaisant minėtų sisteminių niuansų, galima pagrįstai teigti, kad „Home Assistant“ integracija teisingai atspindi realias kainų tendencijas ir yra pakankamai tiksli tolimesniam naudojimui: tiek vizualizacijose, tiek automatizuotuose sprendimuose, paremtuose elektros kainų pokyčiais.



25 pav. „Home assistant“ integruoto *ENTSO-E* API kainų nuskaitymo grafikas 2025-05-08



26 pav. „ENTSO-E transparency platform“ elektros kainų grafikas 2025-05-08

3.1.7. Elektros kainų publikavimas per *Modbus TCP/IP* serverį

Norint sudaryti sąlygas išoriniams valdikliams nuskaityti valandines elektros kainas, šio projekto prototipe buvo realizuotas *Modbus TCP/IP* serverio sprendimas. Tokia architektūra leidžia patikimai perduoti apdorotus duomenis standartizuotu būdu, paremtu plačiai pastatų automatikoje naudojamu protokolu.

Pirmojo etapo metu buvo išbandyta *Python* kalba grįsta *pymodbus* biblioteka, siūlanti asinchroninio serverio funkcionalumą „StartTcpServer()“. Tačiau praktikoje nepavyko paleisti *modbus* serverio ir siekiant negaišti laiko, alternatyviai buvo pasirinkta paprastesnė *pyModbusTCP* biblioteka. Ji pasižymi sinchroniniu veikimu ir stabilium elgesiu. *Modbus* serveris buvo paleistas 502 prievade, naudojant „DataBank.set_holding_registers(...)“ metodą reikšmių atvaizdavimui. Kiekvieną dieną, 18:00 valandą, atskira fono funkcija inicijuoja duomenų nuskaitymą iš naujausios CSV failo eilutės, kurioje pateiktos 24 valandų elektros kainos. Šios reikšmės konvertuojamos iš *float32* formato į dvi *int16* reikšmes (dėl *Modbus* standarto ribojimo), ir įrašomos į 48-ius „holding register“ registrus (žr. 27 pav.), kuriuos gali pasiekti išoriniai klientai.

Siekiant padidinti patikimumą ir funkcionalumą, įdiegti papildomi sprendimai:

- realizuotas automatinis reikšmių įrašymas serverio paleidimo metu, siekiant užtikrinti, kad duomenys būtų prieinami iškart po sistemos starto;
- sukurtas „systemd“ servisas (*modbuscsv.service*), užtikrinantis nuolatinį serverio veikimą fone bei automatinį paleidimą po sistemos perkrovimo;

Galutinis sprendimas leido pasiekti visus keliamus reikalavimus – sistema užtikrina vienkartinį dienos kainų perdavimą iš „Home Assistant“ per CSV failą, šie duomenys pateikiami per *Modbus TCP/IP* protokolą, kuris palaiko kelių klientų viena laikį prisijungimą. Visa sistema veikia *Raspberry Pi* platformoje ir yra pritaikyta naudoti minimalių resursų aplinkose.

Siekiant įvertinti serverio patikimumą ir *Modbus* ryšio stabilumą esant apkrovai, buvo atliktas stresinis testavimas – kompiuteryje paleistos penkios atskiros *Modbus* registrų nuskaitymo sesijos, kurios vykdė nuolatinį visų prieinamų registrų nuskaitymą kas 500 ms. Šis testas buvo tęsiamas keletą valandų, po kurio buvo atlikta registrų duomenų analizė ir patikrinta, ar nuskaitymo procesai bei pats serveris veikė be klaidų ar ryšio nutrūkimų. Rezultatas parodė, kad klaidų neatsirado. Taigi buvo priimtas faktas, kad sistema veikia tinkamai.

Tx = 446: Err = 0: ID = 1: F = 03: SR = 1000ms

	Name	00000	Name	00010	Name	00020	Name	00030	Name	00040
0		135.01		121.61		100.74		133.1		365.32
1		--		--		--		--		--
2		123.7		365.37		76.27		56.94		365.37
3		--		--		--		--		--
4		117.95		365.32		68.98		111.55		229.89
5		--		--		--		--		--
6		114.51		186.45		59.82		332.74		365.32
7		--		--		--		--		--
8		116.14		118.53		53.65		229.89		0
9		--		--		--		--		--

27 pav. Elektros biržos būsimos dienos kainų „Modbus“ registrų nuskaitymas naudojant „Modbus Poll“ programinę įrangą

Apibendrinant, priimtas sprendimas pasižymi funkciniu stabilumu, techniniu paprastumu ir yra lengvai prižiūrimas. Nors iš pradžių buvo svarstomos sudėtingesnės technologijos, pasirinkta sinchroninė biblioteka leido pasiekti geresnį rezultatą esant mažesniai sudėtingumui. Be to, derinant „shell“ skriptus su *REST API* buvo įgyvendintas efektyvus būdas perduoti informaciją tarp *Docker* konteineryje veikiančios sistemos ir *Modbus* serverio.

4. Tiriamoji dalis

4.1. Tyrimo eiga

Tyrimas pradėtas siekiant sukurti šilumos siurblių valdymo sistemą, kuri reaguotų į elektros energijos kainų pokyčius biržoje ir leistų sumažinti eksploatacines sąnaudas, išlaikant šildymo sistemos stabilumą ir komforto parametrus. Tyrimo pagrindas – *MATLAB Simulink* aplinkoje sukurtas ir ankstesniuose skyriuose aprašytas matematinis šilumos punkto modelis, kuris buvo papildytas nauja optimizavimo logika. Tikslas – patikrinti, ar pasitelkus iš anksto žinomus kainų duomenis galima reikšmingai pakeisti šilumos siurblių veikimo laikus ir taip sumažinti energijos vartojimą brangiausiomis valandomis.

Visa tyrimo eiga buvo suskirstyta į kelis nuoseklius etapus:

- optimizuoto valdymo logikos sukūrimas ir jos įterpimas į šilumos siurblių darbo algoritmą;
- lauko temperatūros, kontūrų apkrovų ir elektros kainų duomenų parinkimas bei įkėlimas į modelį;
- simuliacijų paleidimas su identiškais įėjimais baziniam ir optimizuotam modeliams;
- modelio rezultatų apdorojimas: suvartotos energijos, temperatūrų, elektros kainų ir darbo režimų fiksavimas bei kaupimas;
- gautų duomenų palyginimas su pradiniu modeliu ir efektyvumo įvertinimas.

Tyrimui naudoti realūs duomenys iš šilumos punkto eksploatacijos: lauko oro temperatūros profilis, pagal kurį valdosi grįžtamoji šilumnešio temperatūra; valandinis elektros kainų grafikas, gautas iš *ENTSO-E* platformos; radiatorinio/grindinio ir ventiliacijos kontūrų apkrovos. Tyrimo laikotarpis apėmė tris pavasario savaites, per kurias buvo stebimas lauko oro temperatūros svyravimas nuo -3°C iki $+24^{\circ}\text{C}$ bei elektros kainų kaita nuo $\sim 0,01\text{EUR/kWh}$ iki $0,78\text{EUR/kWh}$.

Visa analizė buvo atliekama uždaroje *Simulink* aplinkoje. Modelis sudarytas iš tarpusavyje sujungtų sisteminių blokų, atspindinčių šilumos siurblių darbą ir šilto vandens talpos bei šildymo kontūrų dinamikas. Sistemos dinamikai atkurti naudotos perdavimo funkcijos, kurios buvo identifikuotos pagal realius temperatūros pokyčius. Valdymo logika realizuota pasitelkiant standartinius *Simulink* loginius ir aritmetinius blokus, modeliuojančius siurblių įsijungimo logiką, histerezių veikimą bei reakciją į grįžtamosios temperatūros nustatymus. Tokia metodika leido išvengti duomenų eksporto ar išorinės analizės poreikio ir užtikrino visišką duomenų kontrolę bei rezultatų tikslumą. Rezultatai vertinti pagal kelis kriterijus: bendra elektros energijos sąnaudų suma (kWh), elektros sąnaudų kaštai (€/kWh) ir grįžtamosios temperatūros laikymosi tikslumas. Tyrimo metu taip pat fiksuoti kritiniai momentai – kada siurbLIAI neveikė dėl aukštos elektros kainos ir kokį poveikį tai turėjo bendrai sistemos temperatūrinei dinamikai.

4.2. Matematinio modelio optimizavimas pasitelkiant elektros kainą

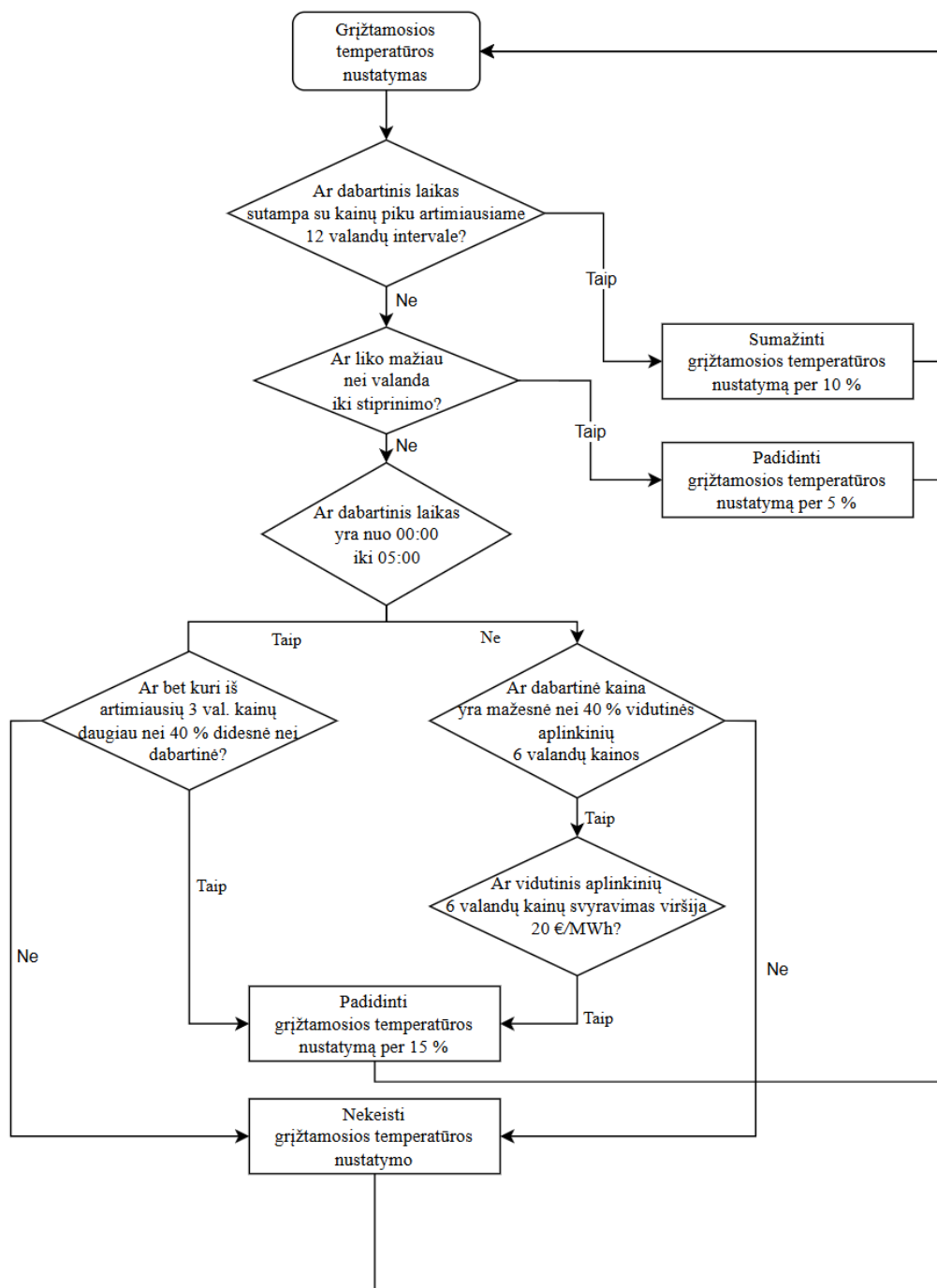
Šiame tyrimo etape buvo siekiama perkelti šilumos punkto matematinį modelį iš statinio, klasikiniu principu veikiančio valdymo režimo į išmaniąją, elektros kainomis grįstą valdymo logiką. Pritaikius šią optimizavimo strategiją, modelis turi gebėti ne tik reaguoti į grįžtamosios temperatūros pokyčius, bet ir į dinamiškai besikeičiančias elektros energijos kainas, kurios šildymo sezono metu gali reikšmingai įtakoti eksploatacinius kaštus. Esminis pokytis – perėjimas nuo reaktyvaus į prevencinį valdymą, kai šilumos gamyba ne tik reaguoja į poreikį, bet ir numato, kada artėja ekonomiškai nenaudingas elektros vartojimo laikotarpis, taip iš anksto pasirūpindama šilumos rezervu.

Siekiant tai įgyvendinti, pradžioje buvo plėtojama elektros kainų analizės sistema. Buvo sukurtas atskiras „MATLAB Function“ blokas, kuriame sukurtas logikos algoritmas, realiuoju laiku atliekantis elektros kainų analizę (8 priedas). Šiame bloke duomenys įkeliami kaip iš anksto suformuotas failas su laikų ir kainų stulpeliais. Blokas, veikdamas modeliavimo metu, kiekvieną sekundę nustato dabartinę kainą bei vertina jos kontekstą pagal platesnį laiko langą. Apskaičiuojamas penkių valandų intervalo aplink dabartinį laiką vidurkis, o taip pat prognozuojamos artimiausios kainos. Jei dabartinė elektros kaina yra bent 40 % mažesnė už to vidurkio reikšmę, laikoma, kad tai – žemiausios kainos taškas. Tokiu atveju aktyvuojamas režimas, vadinamas „stiprinimu“ (angl. *boost*), kurio tikslas – padidinti šilumos gamybą ir taip pasinaudoti palankiomis elektros kainos sąlygomis.

Papildomai sukurtas ir „išankstinio stiprinimo“ (angl. *preboost*) režimas. Šis režimas aktyvuojamas prieš prasidedant „stiprinimui“. Tokiu atveju modelis leidžia siurbliams palaipsniui kilti iki didesnio šilumos kiekio nei to reikalauja standartinis valdymas, tačiau dar nepasiekia „stiprinimo“ režimo intensyvumo. Tokia išankstinė reakcija leidžia sumažinti riziką, jog prasidėjus pigių kainų intervalui talpos temperatūra bus per žema ir siurbliai dirbs ties tiesioginiu vartojimo poreikiu, o ne šilumos kaupimui. *Preboost* režimas leidžia jau anksčiau pakelti temperatūrą iki tarpinės reikšmės – tarp esamos užduoties ir *boost* pakeltos ribos.

Trečiasis algoritmas – „piko“ režimas – buvo įdiegtas identifikuoti didžiausios kainos momentus. Analizuojamas dvylikos valandų laikotarpis ir identifikuojamas maksimalios kainos momentas. Jei dabartinis laikas sutampa su *piko* momentu, tuomet įsijungia *piko* režimas, kurio metu šilumos gamybos tikslinė reikšmė yra mažinama.

Visi trys režimai – stiprinimo, išankstinio stiprinimo ir piko – nevaldo siurblių tiesiogiai, o veikia per modifikuotą temperatūros užduotį. Buvo sukurta atskira *Simulink* posistemė, kuri koreguoja grįžtamosios temperatūros nustatymą pagal režimus. Esant aktyviam išankstinio stiprinimo režimui, temperatūros nustatymas yra padidinamas 5 %. Jei įsijungia stiprinimo režimas, temperatūros užduotis pakeliama 15 %. Tuo tarpu *piko* režimo metu, kai siekiama apriboti šilumos gamybą dėl aukštų kainų, temperatūros nustatymas sumažinamas 10 %. Tokiu būdu buvo realizuotas netiesioginis valdymas. Ši koreguota temperatūros užduoties reikšmė toliau keliauja į siurblių įsijungimo logiką. Čia veikia tas pats kaskadinis siurblių valdymas - kiekvienas siurblys turi savo histerezės ribas ir atskirus užlaikymo parametrus. Todėl net ir modifikuota temperatūros užduotis veikia per esamą struktūrą – sistema prisitaiko prie naujų užduočių, bet nepraranda savo stabilumo ir valdymo hierarchijos.



28 pav. Veikimo pagal elektros biržos kainas valdymo schema

Naujas valdymas buvo integruotas į esamą struktūrą kaip papildoma funkcija, o ne kaip esminė konfigūracija. Dėl šios priežasties buvo išlaikytas tiek logikos aiškumas, tiek realaus objekto atkartojimas. Visa valdymo strategija buvo realizuota *Simulink* aplinkoje. Režimų nustatymo algoritmas, temperatūros korekcijos logika ir signalų maršrutizavimas vykdomi vidinėje modeliavimo struktūroje ir tai leidžia sistemą testuoti įvairiais scenarijais realiuoju laiku.

Elektros kainų analizės blokas buvo patalpintas į atskirą „MATLAB Function“ bloką (žr. 29 pav.), o temperatūros korekcijos logika realizuota atskiroje posistemėje (žr. 30 pav.). Visa valdymo grandinė susieta su siurblių įsijungimo logika, kuri priklauso nuo modifikuotos temperatūros užduoties (žr. 31 pav.).

4.3. Modelio įėjimo duomenys ir jų parinkimo pagrindimas

Optimizuotam šilumos punkto modeliui reikalingi įėjimo duomenys buvo atrinkti iš realios šildymo sistemos. Buvo pasirinktas pavasario sezono laikotarpis, nes tyrimo metu, didžiausi temperatūrų šuoliai buvo būtent šio laikotarpio metu. Pagrindinis modeliui reikalingas trikdžio signalas buvo lauko oro temperatūra, kuri tiriamuoju laikotarpiu buvo nuskaityta iš realios sistemos ir eksportuota kaip laiko serija. Šios temperatūros kintamasis – *Toa_ts*, o modeliavimo metu integruotas per „From Workspace“ bloką. Temperatūra turi esminę įtaką grįžtamosios temperatūros nustatymui (šilumos kreivės formulėje), todėl jos tikslus atkūrimas yra būtinas teisingam modelio veikimui.

Kitas svarbus modelio įėjimas – tai elektros energijos kaina. Ji buvo paimta iš „Raspberry Pi“ įrenginyje veikiančios „Home Assistant“ sistemos, kuri kiekvieną dieną automatizuotai generavo CSV formato failą su ateinančios paros valandinėmis kainomis. Duomenys buvo paimti būtent iš to paties laikotarpio kaip ir lauko oro temperatūra, siekiant sinchroniško sistemos atkūrimo. Surinktas CSV failas buvo įkeltas į *MATLAB* aplinką, kur panaudojant standartines duomenų analizės funkcijas buvo konvertuotas į masyvą. Šis masyvas buvo naudojamas kaip „From Workspace“ blokas *Simulink* modelyje, leidžiantis kiekvieno modeliavimo žingsnio metu nuskaityti atitinkamos sekundės elektros kainą. Šios kainos buvo pateikiamos EUR/MWh formatu ir jau turėjo pritaikytą PVM mokestį bei tiekimo maržą (atitinkamai 21 % ir papildomą 0,06 €/kWh), todėl atspindėjo galutinio vartotojo patiriamus elektros kaštus. Toks tikslumas buvo būtinas, nes optimizavimo algoritmas priima sprendimus ne tik pagal nominalias rinkos kainas, bet ir atsižvelgdamas į realias eksploatacijos sąnaudas.

Siekiant apskaičiuoti realų elektros suvartojimą, buvo remiamasi ankstesniuose skyriuose pateiktomis išvadomis, kad siurbliai veikia pastoviu galingumu po įsibėgėjimo. Remiantis savaitės trukmės realiais duomenimis, buvo nustatyta, jog vienas siurblys per 15 minučių sunaudoja 1,404 kWh. Atsižvelgiant į tai, modelyje kiekvienam aktyviam siurbliui buvo priskirtas pastovus suvartojimo koeficientas per sekundę, kuris buvo naudojamas kaupti bendrai sunaudotai energijai.

Bendrai, modelio įėjimai buvo:

- lauko oro temperatūros laiko serija (iš realios sistemos),
- valandinės elektros kainos (iš „Home Assistant“),
- siurblių loginiai veikimo signalai (modeliuojami dinamiškai),
- koreguojamas grįžtamosios temperatūros nustatymas,
- šilumos punkto kontūrų apkrovos.

Tokiu būdu užtikrinta, kad modelio dinamika atitiktų tikrojo objekto sąlygas ne tik termodinamiškai, bet ir ekonomiškai. Modelis gebėjo priimti sprendimus realiu laiku, pagrįstus tiek šiluminiu poreikiu, tiek elektros rinkos signalais.

4.4. Eksperimentinių tyrimų eiga ir vertinimo metodika

Norint įvertinti sukurtos šilumos punkto matematinės sistemos efektyvumą bei optimizuoto siurblių valdymo naudingumą, buvo atlikta eksperimentinių simuliacijų serija *MATLAB Simulink* aplinkoje.

Eksperimentų metu modeliai buvo vertinami trimis režimais:

1. Bazinis (neoptimizuotas) modelis su kintančia elektros kaina, kuri atspindi realią situaciją rinkoje (naudotos ENTSO-E biržos kainos).

2. Optimizuotas modelis su kintančia elektros kaina, kuriame įdiegti išankstinio stiprinimo, stiprinimo ir elektros kainų piko režimai, atitinkamai valdantys grįžtamosios temperatūros nustatymą pagal kainų tendencijas.
3. Bazinis modelis su pastovia elektros kaina, kurio metu buvo taikytos dvi hipotetinės fiksuotos elektros kainos – 0,16 €/kWh ir 0,18 €/kWh. Kadangi nebuvo galimybės gauti tikslių duomenų apie pastato valdytojo pasirašytą tiekimo sutartį, todėl hipotetinės vertės buvo parinktos remiantis viešai prieinama informacija. Oficialioje tiekėjo „Ignitis“ svetainėje nurodyta mažiausia standartinė fiksuota kaina, siūloma vartotojams - 0,206 €/kWh. Atsižvelgiant į galimą nuolaidų politiką didelių objektų valdytojams, kurie pasižymi dideliu ir pastoviu elektros suvartojimu, buvo spekuliatyviai taikytos 22 % ir 13 % nuolaidos, kurios atitinkamai leido pagrįsti 0,16 €/kWh ir 0,18 €/kWh tarifus. Šie tarifai naudoti vertinant galimą pastovios kainodaros įtaką bendroms elektros sąnaudoms, lyginant su kintamos kainos modeliais.

Eksperimentams pasirinkti šie laikotarpiai:

- 2025 m. kovo 20–27 d.,
- 2025 m. kovo 28 d. – balandžio 3 d.,
- 2025 m. balandžio 4–11 d.

Šie laikotarpiai buvo pasirinkti dėl jų aktualumo ir duomenų prieinamumo – senesni laikotarpiai nebuvo pasiekiami, todėl tyrimas buvo apribotas tik tuo metu turimais realiais duomenimis. Visi eksperimentai atlikti naudojant faktinius duomenis: lauko oro temperatūra paimta iš stebėjimų pavasario sezono metu, o valandinės elektros kainos – iš *ENTSO-E* elektros energijos biržos. Šie duomenys buvo apdoroti *MATLAB* aplinkoje ir integruoti į modelį naudojant *From Workspace* blokus.

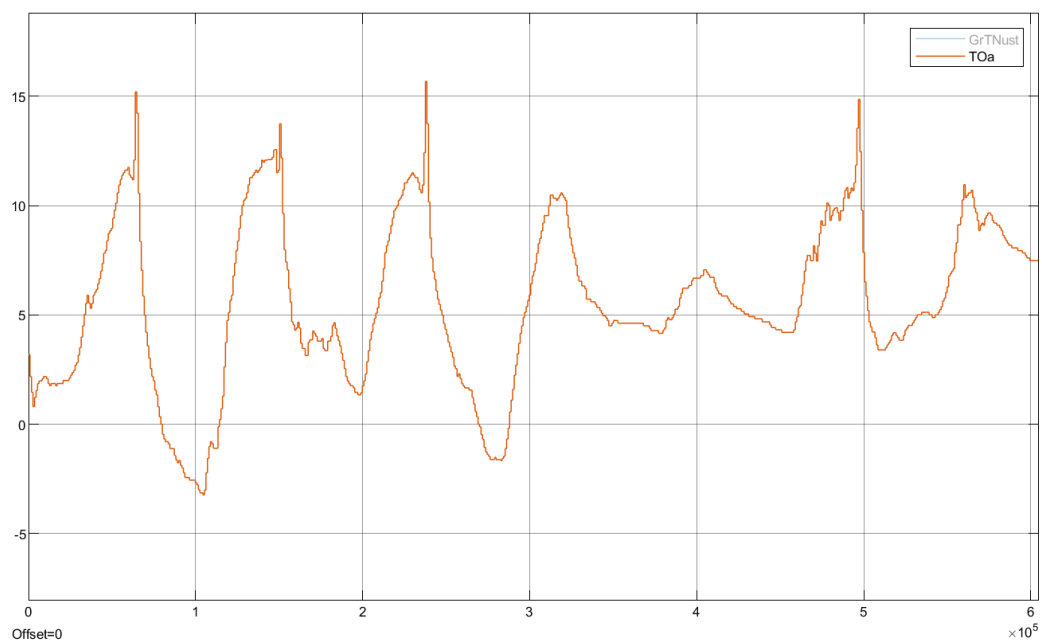
Kiekvienas eksperimentas susidėjo iš dviejų pagrindinių simuliacijų – viena su pradiniu, kita su optimizuotu modeliu. Papildomai, remiantis bazinio modelio elektros sąnaudomis (kWh), buvo atlikti skaičiavimai su fiksuotomis kainomis. Kiekvienos savaitės metu buvo stebimi šie rodikliai:

- bendras šilumos siurblių sunaudotos elektros kiekis (kWh);
- elektros sąnaudų kaštai (eurais);
- lauko temperatūros ir sistemos temperatūrų dinamika;
- elektros kainų svyravimų analizė.

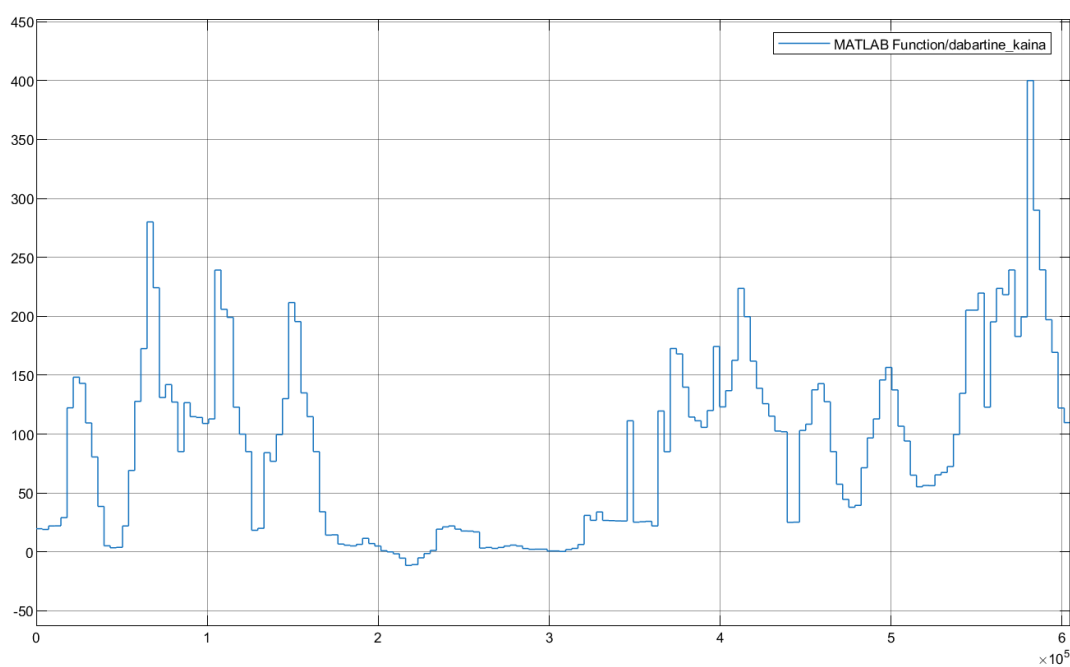
Vertinimui pasitelkti grafiniai metodai, leidžiantys pavaizduoti temperatūrinius pokyčius, kainų kitimą bei jų įtaką siurblių veikimui. Simuliacijų rezultatai buvo suvesti į palyginamąją lentelę, pagal kurią galima įvertinti kiekvieno eksperimento efektyvumą.

4.4.1. Eksperimentas laikotarpiui 2025-03-27 – 2025-04-03

Pirmasis eksperimentas buvo atliktas analizuojant modelių veikimą laikotarpiu nuo 2025 m. kovo 27 d. iki balandžio 3 d. Šiai savaitei būdingi intensyvūs paros temperatūrų svyravimai – lauko oro temperatūra kito nuo $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tokios sąlygos leido įvertinti, kaip šilumos siurblių valdymo logika reaguoja į dinamiškai besikeičiančius išorinius veiksnius, ypač esant perėjimo sezonui tarp žiemos ir pavasario. Eksperimentui buvo įkelti minėto laikotarpio duomenys – lauko oro temperatūra (žr. 32 pav.), elektros biržos kainos (žr. 33 pav.) ir kontūrų apkrovos.

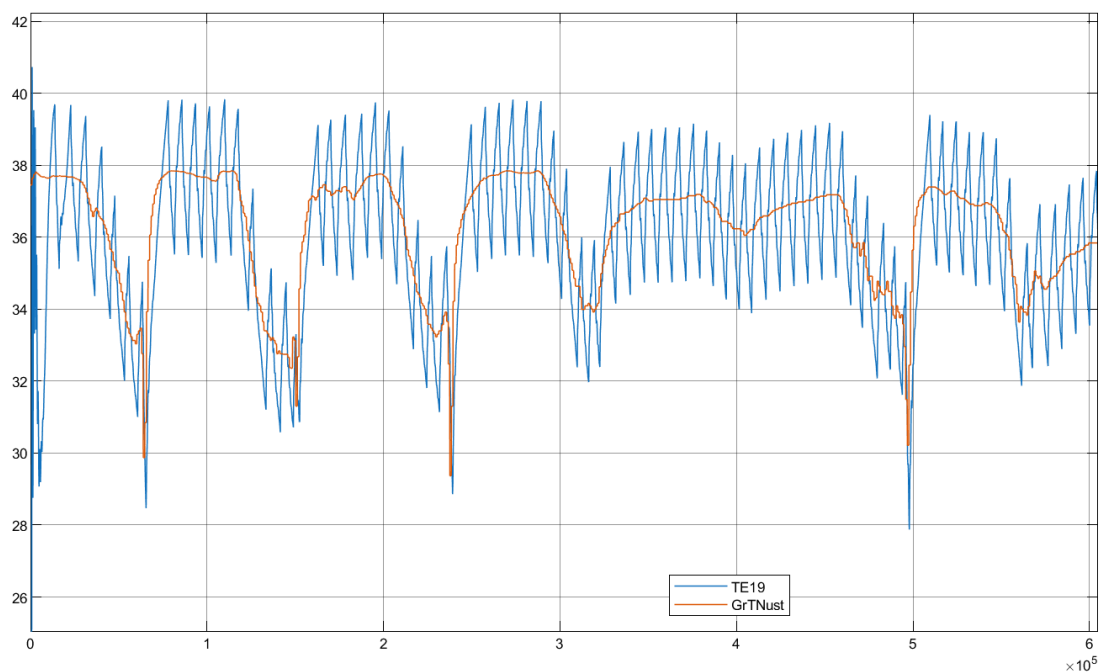


32 pav. 2025-03-27 – 2025-04-03 lauko oro temperatūros duomenys

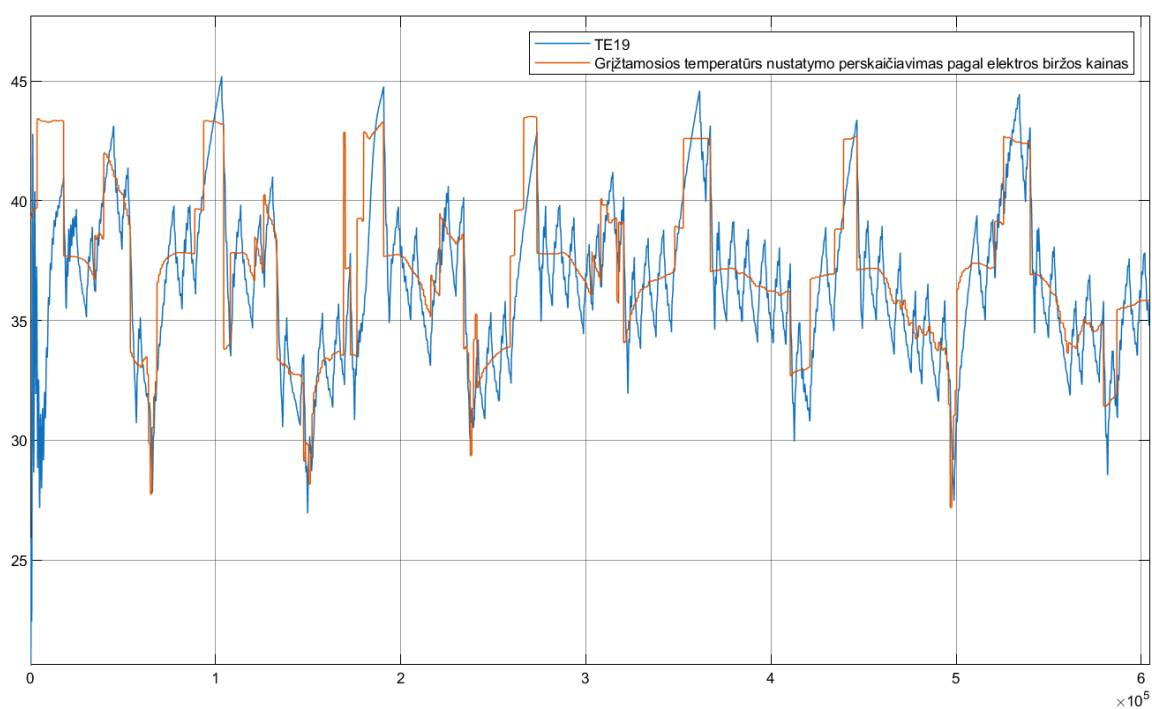


33 pav. 2025-03-27 – 2025-04-03 ENTSO-E elektros biržos kainos

Kiekviename eksperimento etape buvo lyginamas bazinis (neoptimizuotas) modelis su optimizuotu valdymo modeliu. Grįžtamosios temperatūros keitimas paveikė šilumos siurblių įsijungimo laikus bei jų darbo trukmę, tokiu būdu optimizuojant elektros sąnaudų pasiskirstymą.



34 pav. 2025-03-27 – 2025-04-03 grįžtamosios temperatūros ir nustatymo reikšmės baziniame matematiniame modelyje



35 pav. 2025-03-27 – 2025-04-03 grįžtamosios temperatūros ir nustatymo reikšmės optimizuotame matematiniame modelyje

Eksperimento metu nustatyta, kad bazinis modelis sunaudojo 1248 kWh, o optimizuotas – 1287 kWh, t. y. 3,1 % daugiau. Tačiau, vertinant elektros kaštus, rezultatai skyrėsi kardinaliai:

- Bazinis modelis su kintama (ENTSO-E) kaina: 145,20 €;
- Optimizuotas modelis su kintama kaina: 121,70 €.

Toks rezultatas rodo, kad optimizuota valdymo logika leido nukreipti elektros vartojimą į laikotarpius, kai elektros energija buvo pigesnė, taip ženkliai sumažinant bendras elektros sąnaudas, nepaisant šiek tiek didesnio energijos kiekio.

Papildomai buvo atlikta hipotetinė analizė su fiksuotomis elektros kainomis. Naudotos dvi vertės:

- 0,16 €/kWh,
- 0,18 €/kWh.

Remiantis šiais tarifais ir bazinio modelio energijos sąnaudomis, bendros savaitės elektros sąnaudos būtų siekusios atitinkamai 199,68 € ir 224,64 €. Galiausiai, kiekvienam simuliacijos atvejui buvo apskaičiuotas efektyvumo rodiklis, apibrėžiamas kaip suvartotos energijos kiekio (kWh) ir patirtų elektros kaštų (€) santykis. Gautos reikšmės:

- Bazinis modelis su fiksuota 0,18 €/kWh kaina: 5,56;
- Bazinis modelis su fiksuota 0,16 €/kWh kaina: 6,25;
- Bazinis modelis su kintama kaina: 8,60;
- Optimizuotas modelis su kintama kaina: 10,58.

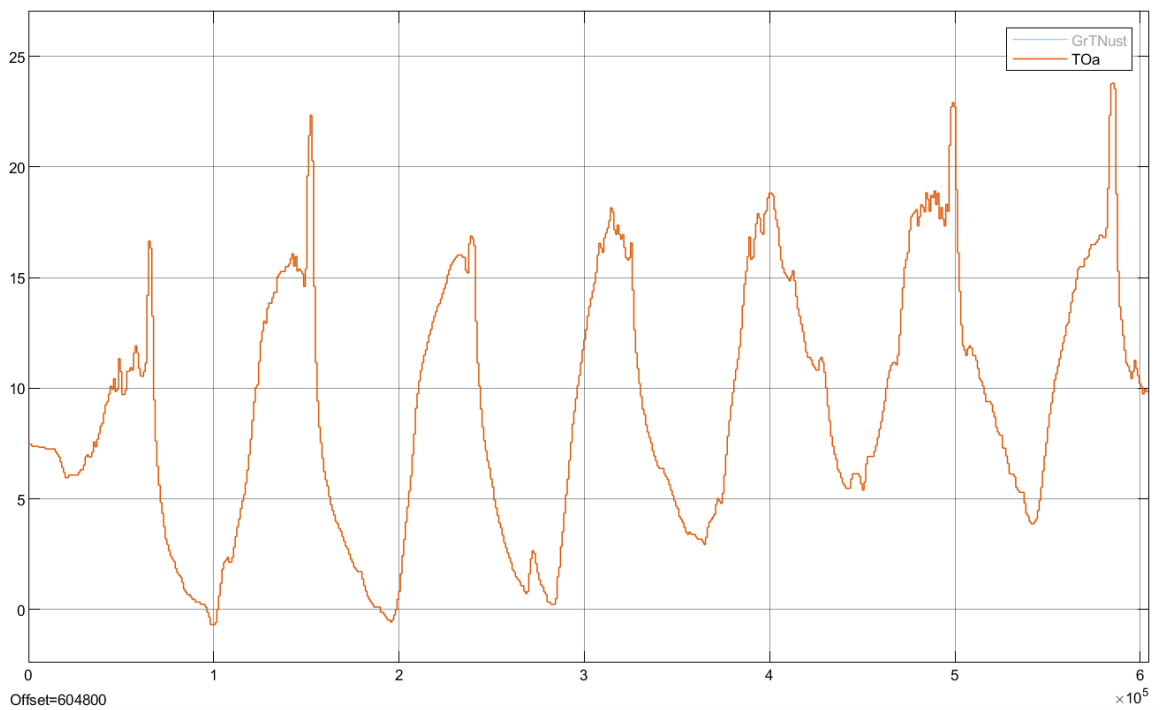
Šie rezultatai patvirtina, kad optimizuotas modelis efektyviau naudoja elektros energiją ekonominiu aspektu, o kaina/kWh santykis yra akivaizdžiai geresnis nei kituose scenarijuose.

8 lentelė. Pirmojo eksperimento bendri rezultatai

Eil. Nr.	Modelio tipas	Kainos tipas	Suvartota elektra, kWh	Suvartotos elektros kaina, €	Efektyvumo rodiklis
1	Bazinis	Fiksuota kaina (0.16 €)	1248	199.68	6.25
2	Bazinis	Fiksuota kaina (0.18 €)	1248	224.64	5.56
3	Bazinis	Kintanti kaina	1248	145.2	8.60
4	Optimizuotas	Kintanti kaina	1287	121.7	10.58

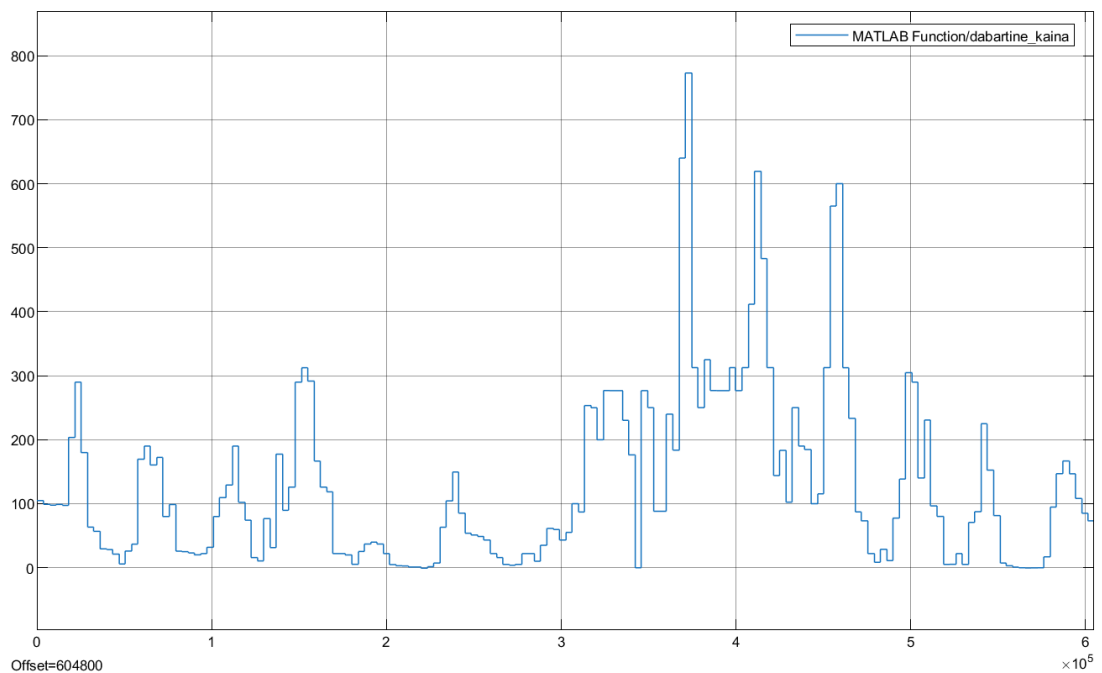
4.4.2. Eksperimentas laikotarpiui 2025-04-04 – 2025-04-11

Antrasis eksperimentas buvo atliktas analizuojant modelių veikimą laikotarpiu nuo 2025 m. balandžio 4 d. iki balandžio 11 d. Ši savaitė taip pat buvo būdinga pereinamojo sezono sąlygoms, kai oro temperatūros svyravimai išlieka pakankamai ryškūs. Lauko oro temperatūra šiuo laikotarpiu kito nuo maždaug $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$, leidžiant toliau vertinti siurblių darbo reakciją į dinamiškai besikeičiančią aplinką.

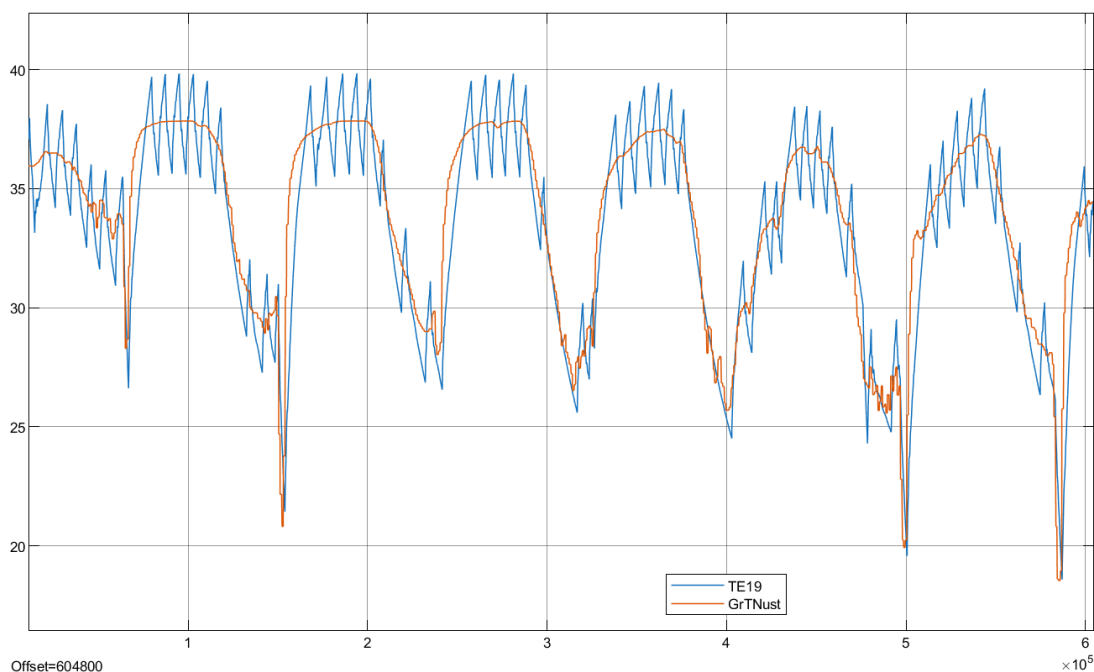


36 pav. 2025-04-04 – 2025-04-11 lauko oro temperatūros duomenys

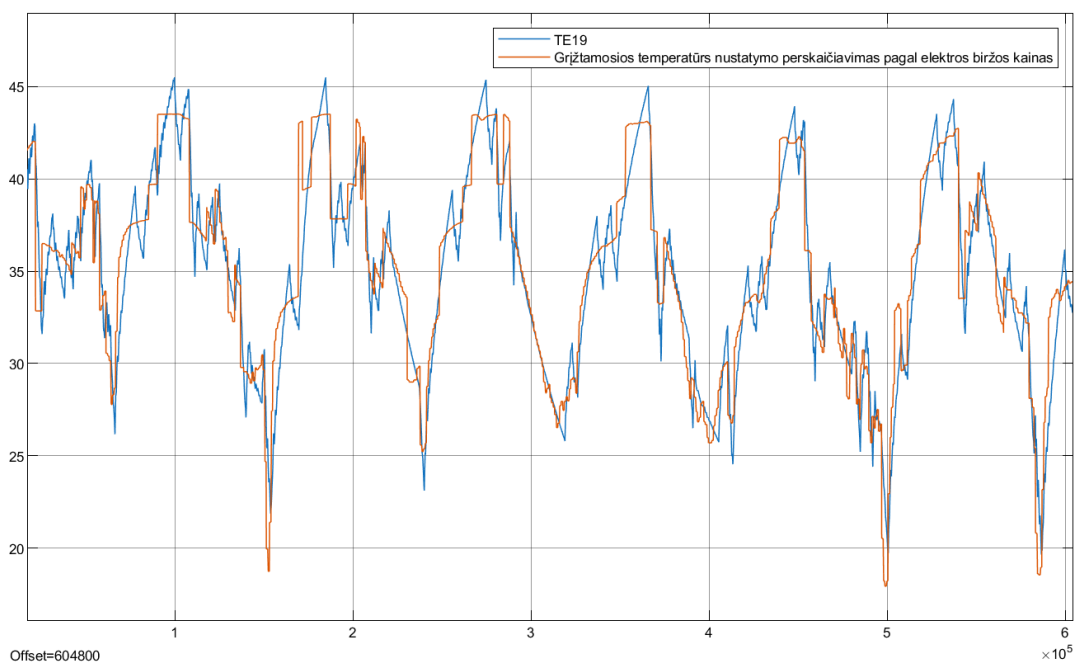
Kaip ir pirmojo eksperimento metu, valandinės elektros kainos buvo gautos iš *ENTSO-E* duomenų bazės. Šie duomenys (žr. 37 pav.) *MATLAB* aplinkoje buvo paruošti importavimui į *Simulink* naudojant „From Workspace“ bloką. Taip pat buvo įkelti savaitės trukmės lauko oro temperatūros duomenys (žr. 38 pav.), pateikiant realistinę šilumos poreikio dinamiką.



37 pav. 2025-04-04 – 2025-04-11 ENTSO-E elektros biržos kainos



38 pav. 2025-04-04 – 2025-04-11 grįžamosios temperatūros ir nustatymo reikšmės baziniame matematiniame modelyje



39 pav. 2025-04-04 – 2025-04-11 grįžamosios temperatūros ir nustatymo reikšmės optimizuotame matematiniame modelyje

Rezultatai rodo, kad bazinis modelis šią savaitę sunaudojo 1208 kWh, o optimizuotas – 1216 kWh, t. y. +0.66 % daugiau elektros energijos. Tačiau ekonominiu požiūriu pokytis buvo reikšmingesnis:

- bazinis modelis su kintama kaina: 202,60 €;
- optimizuotas modelis su kintama kaina: 155,30 €.

Skirtumas tarp modelių sudarė net 23,3 %, kas rodo didelį optimizuotos logikos pranašumą kainų valdymo srityje. Sugebėjimas paskirstyti elektros suvartojimą į pigesnius laikotarpius, vėl pasiteisino kaip itin efektyvi strategija.

Papildomai buvo atlikta hipotetinė analizė su fiksuotais tarifais:

- 0,16 €/kWh: sąnaudos būtų siekusios 193,28 €;
- 0,18 €/kWh: sąnaudos – 217,44 €.

Šie skaičiai rodo, kad optimizuoto modelio veikimas su dinamiškomis kainomis leido pasiekti net mažesnes išlaidas nei būtų taikant 0.16 €/kWh fiksuotą tarifą.

Efektyvumo rodikliai, skaičiuojami kaip santykis tarp suvartotos elektros energijos (kWh) ir elektros sąnaudų (€), pasiskirstė taip:

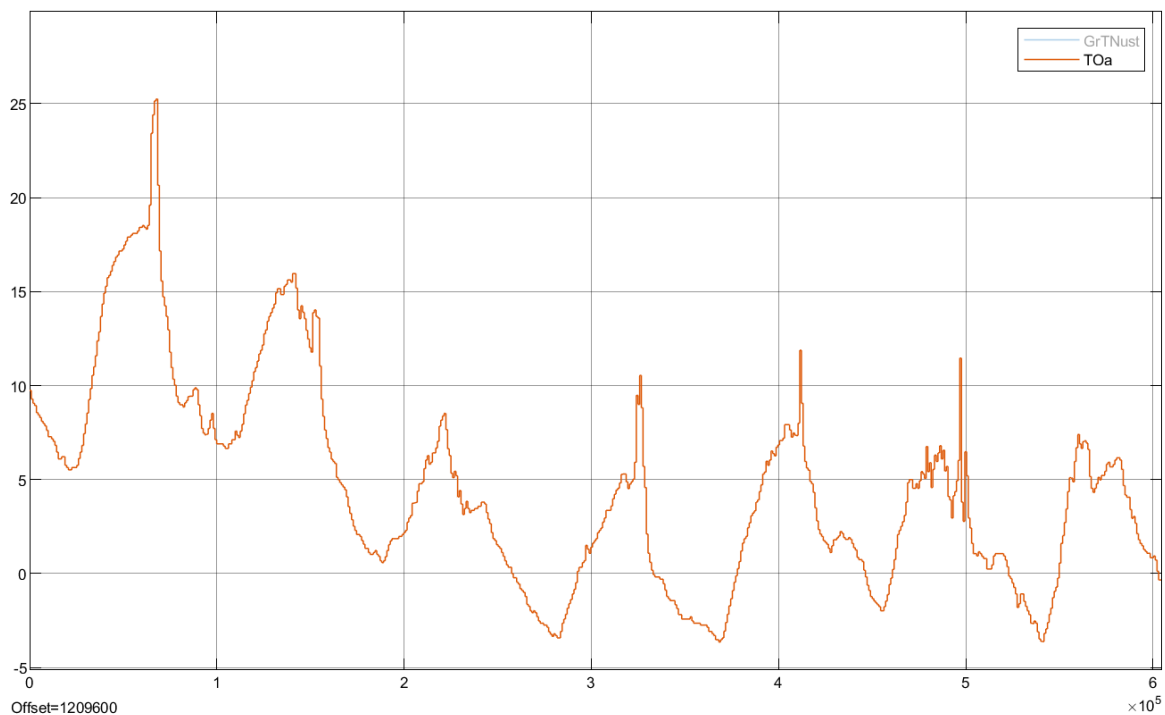
- Bazinis modelis su fiksuota 0.18 €/kWh kaina: 5.56;
- Bazinis modelis su fiksuota 0.16 €/kWh kaina: 6.25;
- Bazinis modelis su kintama kaina: 5.96;
- Optimizuotas modelis su kintama kaina: 7.83.

9 lentelė. Antrojo eksperimento bendri rezultatai

Eil. Nr.	Modelio tipas	Kainos tipas	Suvartota elektra, kWh	Suvartotos elektros kaina, €	Efektyvumo rodiklis
1	Bazinis	Fiksuota kaina (0.16 €)	1208	193.28	6.25
2	Bazinis	Fiksuota kaina (0.18 €)	1208	217.44	5.56
3	Bazinis	Kintanti kaina	1208	202.6	5.96
4	Optimizuotas	Kintanti kaina	1216	155.3	7.83

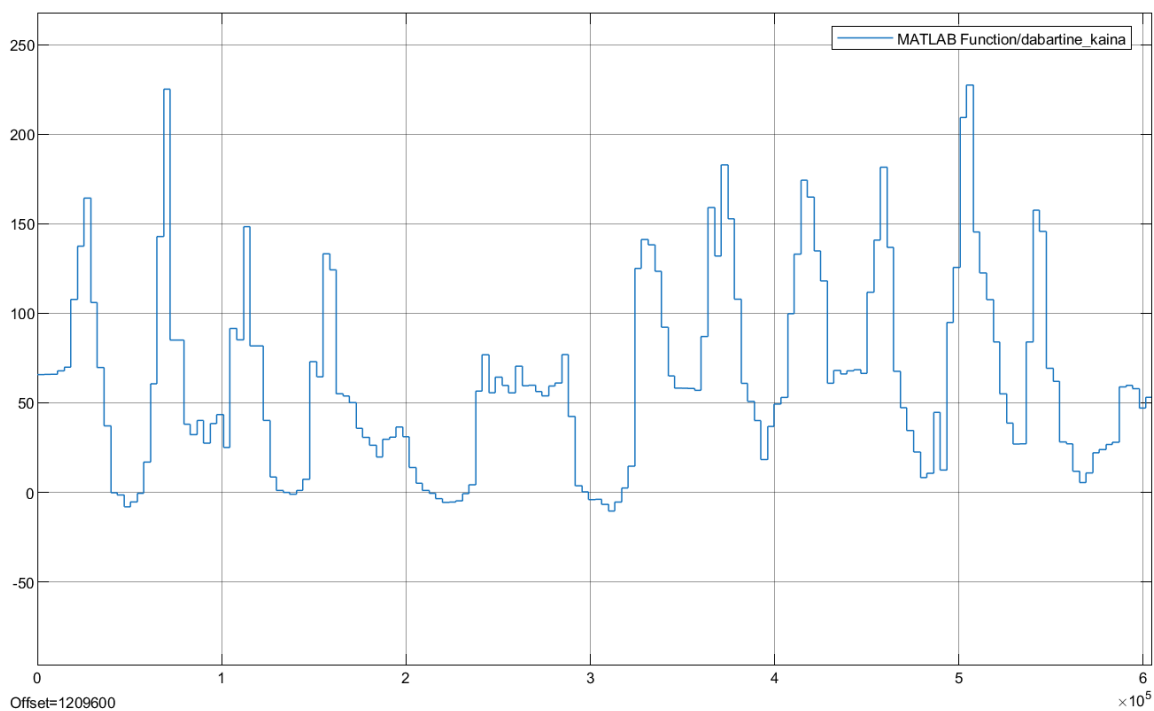
4.4.3. Eksperimentas laikotarpiui 2025-04-12 – 2025-04-19

Trečiasis eksperimentas buvo atliktas 2025 m. balandžio 12–19 d. laikotarpiu. Tuo metu lauko oro temperatūra svyravo nuo -3°C iki $+25^{\circ}\text{C}$. Nors užfiksuota minimali temperatūra siekė -3°C , reikšmingesnių atšalimų žemiau nulio nepasitaikė.



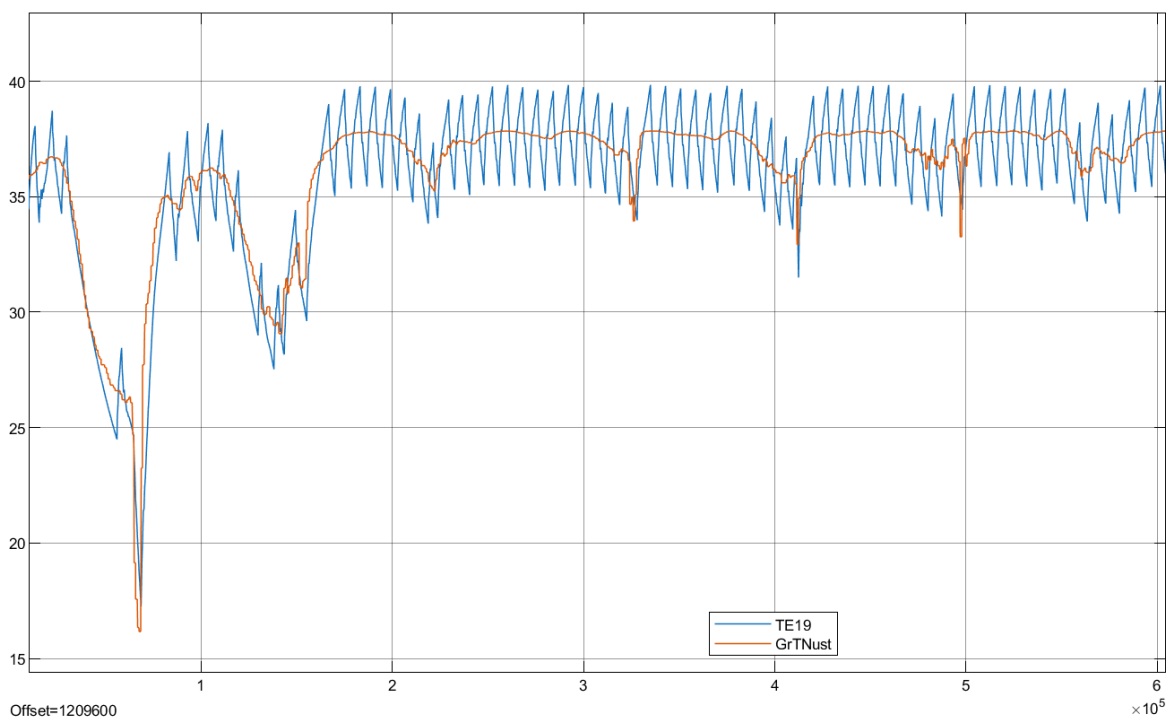
40 pav. 2025-04-12 – 2025-04-19 lauko oro temperatūros duomenys

Kaip ir ankstesnėse simuliacijose, valandinės elektros kainos (žr. 41 pav.) buvo gautos iš *ENTSO-E* platformos, importuotos į *MATLAB* aplinką ir integruotos į *Simulink* modelį naudojant „From Workspace“ bloką. Taip pat buvo įkelti atitinkamo laikotarpio oro temperatūros duomenys (žr. 40 pav.), užtikrinant atitikimą realioms šildymo sąlygoms.

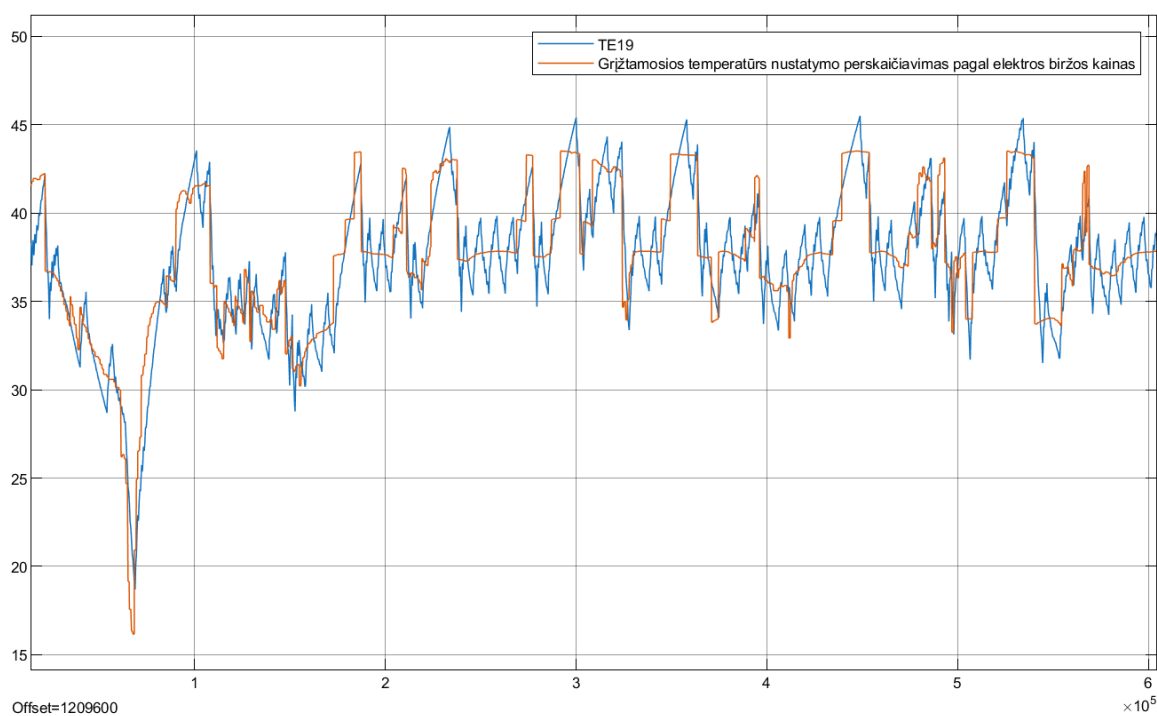


41 pav. 2025-04-12 – 2025-04-19 ENTSO-E elektros biržos kainos

Modelių palyginimas atliktas analogiškai kaip ankstesniuose eksperimentuose. Baziniame modelyje siurbliai veikė pagal pastovią temperatūros užduotį, o optimizuotame – veikimas buvo koreguojamas atsižvelgiant į elektros kainų svyravimus.



42 pav. 2025-04-12 – 2025-04-19 grįžamosios temperatūros ir nustatymo reikšmės baziniame matematiniame modelyje



43 pav. 2025-04-12 – 2025-04-19 grįžamosios temperatūros ir nustatymo reikšmės optimizuotame matematiniame modelyje

Trečiojo eksperimento metu bazinis modelis sunaudojo 1257 kWh elektros energijos. Optimizuotas modelis sunaudojo 1291 kWh, t. y. +2.7 % daugiau. Visgi, bendros elektros sąnaudos labai ženkliai skyrėsi:

- Bazinis modelis su kintama kaina: 113.00 €;
- Optimizuotas modelis su kintama kaina: 94.81 €.

Optimizuotas valdymas leido pasiekti net 16.1 % mažesnes elektros sąnaudas, lyginant su baziniu modeliu. Tai rodo, kad net ir esant švelnesniems elektros biržos kainų svyravimams, galima efektyviai pasinaudoti žemų kainų periodais, išlaikant šiluminį komfortą.

Papildomai, atlikta hipotetinė analizė su fiksuotais tarifais:

- 0.16 €/kWh: elektros kaštai – 201.12 €;
- 0.18 €/kWh: elektros kaštai – 226.26 €.

Efektyvumo rodikliai, apibrėžti kaip kWh/€ santykis, buvo tokie:

- Bazinis modelis su 0.18 €/kWh kaina: 5.56;
- Bazinis modelis su 0.16 €/kWh kaina: 6.25;
- Bazinis modelis su kintama kaina: 11.12;
- Optimizuotas modelis su kintama kaina: 13.62.

10 lentelė. Trečiojo eksperimento bendri rezultatai

Eil. Nr.	Modelio tipas	Kainos tipas	Suvaldoma elektra, kWh	Suvaldomos elektros kaina, €	Efektyvumo rodiklis
1	Bazinis	Fiksuota kaina (0.16 €)	1257	201.12	6.25
2	Bazinis	Fiksuota kaina (0.18 €)	1257	226.26	5.56
3	Bazinis	Kintanti kaina	1257	113	11.12
4	Optimizuotas	Kintanti kaina	1291	94.81	13.62

Šis bandymas parodė didžiausią efektyvumo šuolį, kai optimizuotas modelis ne tik sumažino elektros kaštus, bet ir pasiekė didžiausią efektyvumo rodiklį iš visų trijų eksperimentų. Tai leidžia teigti, jog net esant mažesnėms šildymo apkrovoms, taikant pažangią valdymo logiką galima pasiekti apčiuopiamą ekonominę naudą.

4.5. Optimizuoto valdymo veiksmingumo įvertinimas

Išanalizavus visų trijų laikotarpių eksperimentinių tyrimų rezultatus, galima pateikti išsamesnį vertinimą apie optimizuoto šilumos siurblių valdymo metodikos veiksmingumą bei jos priklausomybę nuo išorinių veiksnių – elektros kainų dinamikos, lauko oro temperatūros ir kontūrų apkrovų. Nors kiekvieno eksperimento metu šilumos poreikio ir elektros vartojimo apimtys skyrėsi, pastebėta tendencija, jog optimizuotas modelis nuosekliai generuoja mažesnes elektros sąnaudas eurai, net jei kartais suvartojama šiek tiek daugiau energijos kilovatvalandėmis.

Elektros kainų sutaupymas buvo didžiausias tais atvejais, kai vidutinės elektros kainos buvo aukštesnės, o rinkos kainų svyravimai – ryškesni. Pavyzdžiui, antrojo eksperimento metu, kai elektros kainos *ENTSO-E* rinkoje svyravo reikšmingiau, optimizuotas modelis leido sutaupyti beveik 47,3 €,

nepaisant 3,1 % didesnio energijos vartojimo. Tai rodo, kad tokia valdymo logika yra efektyviausia esant dideliui rinkos kainų kintamumui, kai atsiranda galimybė lanksčiai išnaudoti pigių valandų langus ir vengti brangių tarifų periodų. Atitinkamai, kai elektros kainos yra žemesnės ir stabilesnės, kaip pirmojo ar trečiojo laikotarpio metu, sutaupymas mažėja, tačiau išlieka ekonomiškai reikšmingas – atitinkamai apie 23.5 € ir 18.2 €.

Svarbu pabrėžti, kad optimizavimo nauda atsiskleidžia ne tik absoliučiais sutaupymo rodikliais, bet ir per pagerėjusią šildymo sistemos sąnaudų grąžą – skaičiuojant efektyvumo koeficientą (kWh/€), kuris visuose trijuose tyrimuose buvo didžiausias būtent optimizuoto modelio atveju. Tai reiškia, kad kiekvienas išleistas euras už elektros energiją sugeneravo daugiau šilumos, palyginti su kitais valdymo metodais.

Palyginus su baziniu modeliu, taikančiu fiksuotus elektros tarifus (0,16 €/kWh ir 0,18 €/kWh), optimizuotas modelis, veikęs pagal kintamą *ENTSO-E* kainą, buvo ekonomiškai efektyvesnis net ir esant hipotetiškai palankioms fiksuotoms kainoms. Tai patvirtina, jog pažangus valdymas sugeba adaptuotis prie rinkos svyravimų ir siūlyti geresnę grąžą net konkurencingoje kainų aplinkoje. Nors absoliutus kaštų skirtumas skirtinguose scenarijuose gali kisti, optimizuoto valdymo logika išlieka konkurencinga visomis sąlygomis.

Apibendrinant, optimizuotas šilumos siurblių valdymo modelis, pritaikytas prie realaus laiko elektros kainų svyravimų, pasirodė esąs veiksmingas ir ekonomiškai pagrįstas sprendimas. Sistemos lankstumas leidžia prisitaikyti prie skirtingų rinkos scenarijų, išlaikant aukštą efektyvumo lygį. Toks požiūris į energijos vartojimo planavimą galėtų tapti plačiau taikomu metodu tiek privačiuose, tiek komerciniuose objektuose, ypač didėjant elektros kainų nepastovumui ir augant poreikiui užtikrinti energetinį efektyvumą.

11 lentelė. Visų atliktų eksperimentų bendri rezultatai

Bandymo nr.	Modelio tipas	Kainos tipas	Suvaldoma elektra, kWh	Suvaldomos elektros kaina, €	Efektyvumo rodiklis
1	Bazinis	Fiksuota kaina (0.16 €)	1248	199.68	6.25
	Bazinis	Fiksuota kaina (0.18 €)	1248	224.64	5.56
	Bazinis	Kintanti kaina	1248	145.2	8.60
	Optimizuotas	Kintanti kaina	1287	121.7	10.58
2	Bazinis	Fiksuota kaina (0.16 €)	1208	193.28	6.25
	Bazinis	Fiksuota kaina (0.18 €)	1208	217.44	5.56
	Bazinis	Kintanti kaina	1208	202.6	5.96
	Optimizuotas	Kintanti kaina	1216	155.3	7.83
3	Bazinis	Fiksuota kaina (0.16 €)	1257	201.12	6.25
	Bazinis	Fiksuota kaina (0.18 €)	1257	226.26	5.56
	Bazinis	Kintanti kaina	1257	113	11.12
	Optimizuotas	Kintanti kaina	1291	94.81	13.62

4.6. Rekomendacijos praktiniam taikymui

Įvertinus sukurtos šilumos siurblių valdymo sistemos efektyvumą ir jos galimą praktinį pritaikymą realiuose pastatuose, pateikiamos rekomendacijos, kurios užtikrintų sėkmingą sprendimo integraciją ir eksploatavimą.

- **Valdiklio ir elektros kainos integracijos įrenginio komunikacijos užtikrinimas.** Tam, kad pastato automatikos valdiklis galėtų naudoti optimizavimo logikos duomenis realiaame laike, būtina, jog jis turėtų prieigą prie „Modbus TCP/IP“ protokolo. Jei naudojamas valdiklis šio protokolo tiesiogiai nepalaiko, rekomenduojama integruoti protokolų keitiklį, galintį konvertuoti „Modbus TCP/IP“ į valdikliui suprantamą protokolą (pvz., „Modbus RTU“, „BACnet“ ar kt.). Toks lankstus sprendimas leidžia išvengti techninės įrangos keitimo ir padidina sistemos suderinamumą su esama infrastruktūra.
- **Pakankamas šilumos kaupimo rezervuaras.** Optimizuotas siurblių valdymas reikalauja tam tikros šiluminės inercijos, kad būtų galima pasinaudoti elektros kainų svyravimais. Todėl rekomenduojama, kad pastate būtų įrengta ne mažesnė nei 1 m³ talpos šilumos kaupimo talpa. Ši talpa leidžia akumuliuoti perteklinę šilumą mažos kainos laikotarpiais ir ją naudoti kainų piko metu, taip užtikrinant tiek ekonominį, tiek termodinaminį sistemos efektyvumą.
- **Šilumos siurblių valdomumas.** Norint, kad valdiklis galėtų realiai įtakoti siurblių darbą, įranga turi būti valdoma išorinėmis užduotimis, t. y. siurbLIAI turi priimti grįžtamosios temperatūros nustatymus ar kitas kontrolės komandas iš pastato valdymo sistemos. Autonomiškai dirbantys siurbLIAI, kurie nėra pritaikyti išoriniam valdymui, yra nesuderinami su tokio tipo optimizavimo algoritmais ir riboja sistemos lankstumą.
- **Kintamųjų elektros kainų logikos plėtra į kitas inžinerines sistemas.** Siekiant dar labiau sumažinti elektros sąnaudas ir efektyviai išnaudoti kintamąją kainodarą, rekomenduojama taikyti analogišką logiką ir kitiems elektros energiją naudojantiems įrenginiams. Pavyzdžiui, pastato vėdinimo sistemos galėtų būti suprogramuotos taip, kad kainų piko metu sumažintų ventiliatorių našumą, o žemos kainos laikotarpiu padidintų vėdinimo intensyvumą. Tokie sprendimai būtų ypač veiksmingi pastatuose, kuriuose galima toleruoti vėdinimo intensyvumo svyravimus (pvz., administraciniuose ar viešuosiuose objektuose).
- **Valdymo režimų konfigūravimas ir perjungimo galimybė.** Siekiant užtikrinti sistemos ilgaamžiškumą ir prisitaikymą prie galimų rinkos pokyčių, būtina numatyti galimybę perjungti valdymo logiką. Rekomenduojama įdiegti funkcionalumą, leidžiantį automatikos specialistams arba pastato valdytojams perjungti sistemos veikimą tarp dviejų režimų: optimizavimo pagal kintamąsias elektros kainas ir tradicinio veikimo, ignoruojant kainų svyravimus. Tai suteikia lankstumo tais atvejais, kai vėliau pasirašomos tiekimo sutartys su pastoviais tarifais.

Rezultatai ir išvados

1. Buvo atlikta išsami literatūros analizė, apimanti tiek tradicinius šilumos siurblių valdymo metodus, tiek pažangias strategijas, tokias kaip modelio prognozavimo valdymas, stiprinamojo mokymosi, neraiškos logikos ir dirbtinio intelekto algoritmai. Literatūros analizė patvirtino, kad egzistuoja įvairūs ŠS valdymo algoritmai, tačiau dauguma jų reikalauja sudėtingų modelių ar išankstinio mokymo. Siūlomas temperatūros užduoties koregavimo metodas pagal biržos kainas išsiskiria savo paprastumu, tačiau kartu leidžia pasiekti reikšmingą ekonominį efektyvumą.
2. Buvo išanalizuota reali geoterminių šilumos siurblių sistema, kuri tiekia šilumą radiatoriniam, grindiniam ir vėdinimo šildymo kontūrams. Duomenys iš realaus objekto leido atkurti sistemos veikimą naudojant perdavimo funkcijas ir logines sąsajas „Simulink“ platformoje. Sukurtas matematinis modelis sėkmingai atkartojo šilumos punkto dinamiką ir leido atlikti tolesnius eksperimentus. Modelio struktūra buvo pakankamai lanksti, kad būtų galima taikyti optimizavimo logiką ir vertinti sistemų elgseną pagal skirtingus scenarijus.
3. Parengtas *Raspberry Pi* pagrindu veikiantis prototipas, kuris, naudodamas „Home Assistant“ platformą ir „REST API“, kasdien automatiškai užklausia *ENTSO-E* elektros kainas, jas apdoroja „Shell“ scenarijumi ir įrašo į CSV failą. Tada duomenys perskaitomi ir perduodami į *Modbus TCP/IP holding* registrus, kuriuos gali pasiekti PVS valdikliai. Prototipas įrodė savo praktiškumą ir galimybę integruotis į esamas pastatų valdymo sistemas. Jis užtikrina savarankišką elektros kainų duomenų perdavimą be debesijos sprendimų, o tai leidžia diegti algoritmą realioje infrastruktūroje.
4. Optimizavimo logika buvo įgyvendinta koreguojant grįžtamosios temperatūros nustatymą pagal prognozuojamus *ENTSO-E* elektros kainų pokyčius. Modelyje pritaikyti trys optimizavimo režimai skirti šilumos akumuliacijai arba apkrovos mažinimui kainų pikų metu. Trijų savaičių eksperimentinių simuliacijų metu nustatyta, kad optimizuotas modelis, nors ir suvartojo kiek daugiau elektros (iki ~3 %), bendrai sutaupė iki 47 € per savaitę, priklausomai nuo kainų svyravimų. Efektyvumo rodiklis (kWh/€) pagerėjo iki 24 %. Eksperimentai patvirtino, kad net paprasta optimizavimo logika, koreguojanti tik temperatūros užduotį, leidžia ženkliai sumažinti elektros sąnaudas. Šis sprendimas pasižymi aukštu diegimo paprastumu ir reikalauja mažai resursų, todėl yra tinkamas diegti praktikoje. Metodas pasiteisina labiausiai tais laikotarpiais, kai elektros kainos yra nepastovios ir turi ryškius pikus.

Literatūros sąrašas

1. VALANCIUS, Rokas, et al. A review of heat pump systems and applications in cold climates: Evidence from Lithuania. *Energies*, 2019, 12(22): 4331 [žiūrėta 2025-01-03]. Prieiga per: DOI:[10.3390/en12224331](https://doi.org/10.3390/en12224331).
2. ARTECONI, Alessia; POLONARA, Fabio. Assessing the demand side management potential and the energy flexibility of heat pumps in buildings. *Energies*, 2018, 11(7): 1846 . Prieiga per: DOI:[10.3390/en11071846](https://doi.org/10.3390/en11071846).
3. NOYE, Sarah, et al. A review of advanced ground source heat pump control: Artificial intelligence for autonomous and adaptive control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 153: 111685. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.rser.2021.111685](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111685).
4. RASTEGARPOUR, Soroush; FERRARINI, Luca. Energy Management in Buildings: Lessons Learnt for Modeling and Advanced Control Design. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 899866. Prieiga per: DOI:[10.3389/fenrg.2022.899866](https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.899866).
5. MASCHERBAUER, Philipp, et al. Impact of variable electricity price on heat pump operated buildings. *Open Research Europe*, 2022, 2: 135. Prieiga per: DOI:[10.12688/openreseurope.15268.1](https://doi.org/10.12688/openreseurope.15268.1).
6. CRAWLEY, Jenny, et al. Demand response with heat pumps: Practical implementation of three different control options. *Building Services Engineering Research and Technology*, 2023, 44(2): 211-228. Prieiga per: DOI:[10.1177/01436244221145871](https://doi.org/10.1177/01436244221145871).
7. BELTRAN, Francisco, et al. Solar Heat Pumps and Self-Consumption Can (and should) electricity suppliers encourage thermal storage?. In: *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2022. p. 06005. Prieiga per: DOI:[10.1051/e3sconf/202236206005](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236206005).
8. BACHSEITZ, Michael, et al. PV-Optimized Heat Pump Control in Multi-Family Buildings Using a Reinforcement Learning Approach. *Energies*, 2024, 17(8): 1908. Prieiga per: DOI:[10.3390/en17081908](https://doi.org/10.3390/en17081908).
9. KUBOTH, Sebastian, et al. Experimental Long-Term Investigation of Model Predictive Heat Pump Control in Residential Buildings with Photovoltaic Power Generation. *Energies*, 2020, 13(22): 6016. Prieiga per: DOI:[10.3390/en13226016](https://doi.org/10.3390/en13226016).
10. XUE, Tianchen; JOKISALO, Juha; KOSONEN, Risto. Demand Response Potential of an Educational Building Heated by a Hybrid Ground Source Heat Pump System. *Energies*, 2024, 17(21): 5428. Prieiga per: DOI:[10.3390/en17215428](https://doi.org/10.3390/en17215428).
11. DINO, Giuseppe Edoardo, et al. Promoting the flexibility of thermal prosumers equipped with heat pumps to support power grid management. *Sustainability*, 2023, 15(9): 7494. Prieiga per: DOI:[10.3390/su15097494](https://doi.org/10.3390/su15097494).
12. KANNARI, Lotta, et al. Energy cost driven heating control with reinforcement learning. *Buildings*, 2023, 13(2): 427. Prieiga per: DOI:[10.3390/buildings13020427](https://doi.org/10.3390/buildings13020427).
13. MADANI, Hatef; CLAESSEON, Joachim; LUNDQVIST, Per. A descriptive and comparative analysis of three common control techniques for an on/off controlled Ground Source Heat Pump (GSHP) system. *Energy and Buildings*, 2013, 65: 1-9. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.enbuild.2013.05.006](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.006).
14. ATAM, Ercan, et al. Optimal control approaches for analysis of energy use minimization of hybrid ground-coupled heat pump systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 24.2: 525-540. Prieiga per: DOI:[10.1109/TCST.2015.2445851](https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2445851).

15. KAZMI, Hussain, et al. Generalizable occupant-driven optimization model for domestic hot water production in NZEB. *Applied Energy*, 2016, 175: 1-15. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.apenergy.2016.04.108](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.108).
16. VERHELST, Clara, et al. Study of the optimal control problem formulation for modulating air-to-water heat pumps connected to a residential floor heating system. *Energy and buildings*, 2012, 45: 43-53. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.enbuild.2011.10.015](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.015).
17. LUND, Peter D., et al. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2015, 45: 785-807. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.rser.2015.01.057](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.057).
18. MÜLLER, Fabian L.; JANSEN, B. Large-scale demonstration of precise demand response provided by residential heat pumps. *Applied Energy*, 2019, 239: 836-845. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.apenergy.2019.01.202](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.202).
19. VÁZQUEZ-CANTELI, José R.; NAGY, Zoltán. Reinforcement learning for demand response: A review of algorithms and modeling techniques. *Applied energy*, 2019, 235: 1072-1089. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.apenergy.2018.11.002](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.002).
20. KAZMI, Hussain; D'OCA, Simona. Demonstrating model-based reinforcement learning for energy efficiency and demand response using hot water vessels in net-zero energy buildings. In: *2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*. IEEE, 2016. p. 1-6. Prieiga per: DOI:[10.1109/ISGTEurope.2016.7856208](https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2016.7856208).
21. KUMAR, GV Brahmendra, et al. Large scale renewable energy integration: Issues and solutions. *Energies*, 2019, 12.10: 1996. Prieiga per: DOI:[10.3390/en12101996](https://doi.org/10.3390/en12101996).
22. SINSEL, Simon R.; RIEMKE, Rhea L.; HOFFMANN, Volker H. Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review. *renewable energy*, 2020, 145: 2271-2285. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.renene.2019.06.147](https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.147).
23. DOMINGUES, Pedro, et al. Building automation systems: Concepts and technology review. *Computer Standards & Interfaces*, 2016, 45: 1-12. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.csi.2015.11.005](https://doi.org/10.1016/j.csi.2015.11.005).
24. AFRAM, Abdul; JANABI-SHARIFI, Farrokh. Theory and applications of HVAC control systems—A review of model predictive control (MPC). *Building and environment*, 2014, 72: 343-355. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.buildenv.2013.11.016](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.016).
25. SERALE, Gianluca, et al. Model predictive control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: Problem formulation, applications and opportunities. *Energies*, 2018, 11.3: 631. Prieiga per: DOI:[10.3390/en11030631](https://doi.org/10.3390/en11030631).
26. MINOLI, Daniel; SOHRABY, Kazem; OCCHIOGROSSO, Benedict. IoT considerations, requirements, and architectures for smart buildings—Energy optimization and next-generation building management systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4.1: 269-283. Prieiga per: DOI:[10.1109/JIOT.2017.2647881](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2647881).
27. SHAIKH, Pervez Hameed, et al. A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 34: 409-429. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.rser.2014.03.027](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.027).
28. SHAFIULLAH, Md; AHMED, Shakir D.; AL-SULAIMAN, Fahad A. Grid integration challenges and solution strategies for solar PV systems: A review. *IEEE Access*, 2022, 10: 52233-52257. Prieiga per: DOI:[10.1109/ACCESS.2022.3174555](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174555).
29. Nord Pool: The power market and price formation. 2023. Prieiga per: <https://nordpoolgroup.com>

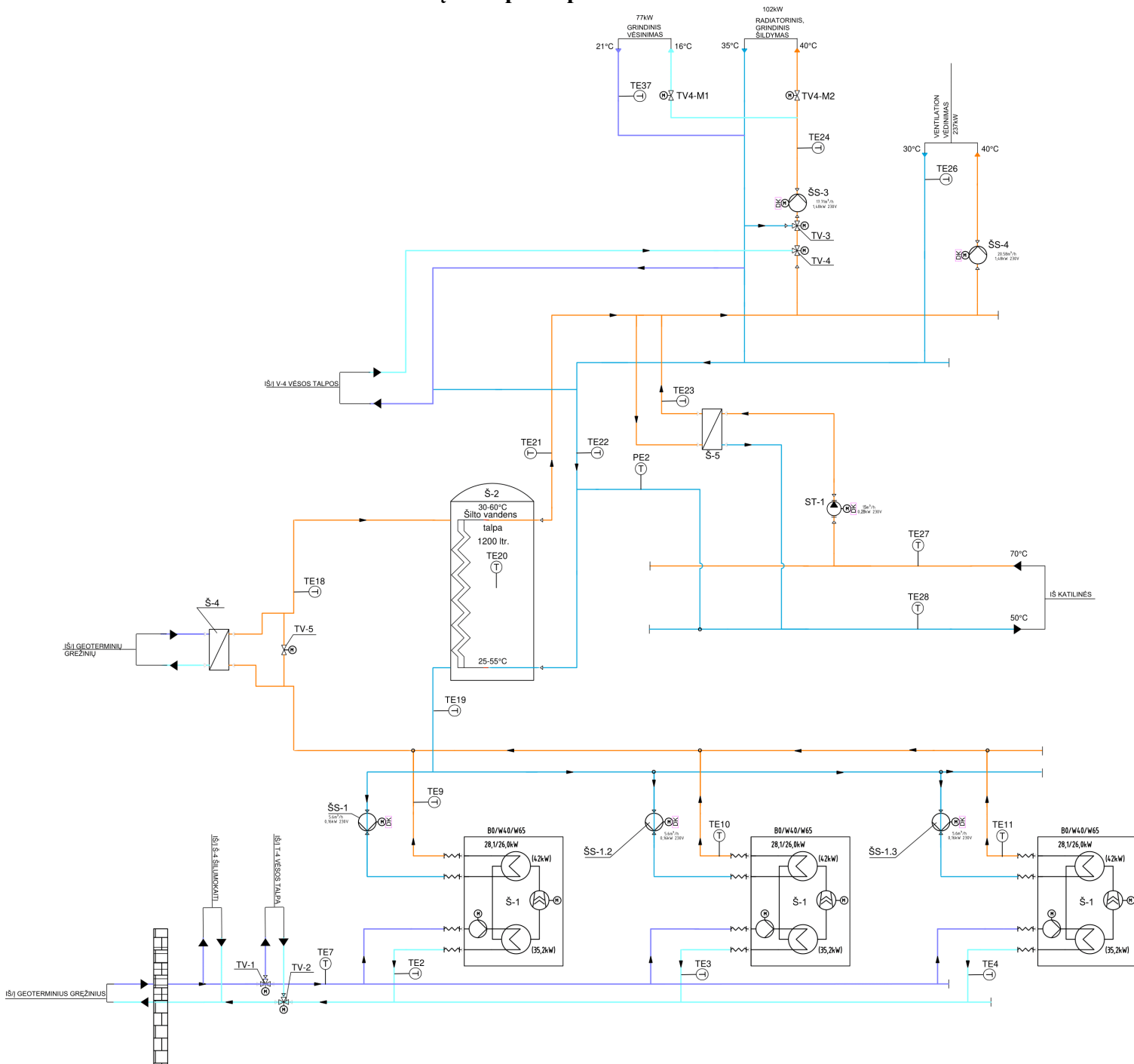
30. HUISMAN, Ronald; STET, Cristian. The dependence of quantile power prices on supply from renewables. *Energy Economics*, 2022, 105: 105685. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.eneco.2021.105685](https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105685).
31. ENTSO-E: Single Day-Ahead Coupling (SDAC) explanation and status. 2021. Prieiga internete: <https://entsoe.eu>
32. OpenHAB Community: Nord Pool binding usage for cheap hours optimization. 2020. Prieiga internete: <https://community.openhab.org>
33. SULTAN, Sara; GLUESENKAMP, Kyle R. The State of Art of Heat-Pump integrated Thermal Energy Storage for Demand Response. *Heat Pumping Technologies Magazine*, 2021, 40.2. Prieiga internete: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1820760>
34. Jenny, C. ir kt. (2023). Flexible heating: how does it work and how does it feel? *UCL Energy Institute Report*. Prieiga internete: <https://www.ucl.ac.uk/bartlett/news/2023/jan/flexible-heating-how-does-it-work-and-how-does-it-feel>
35. ANELI, Stefano, et al. Improvement of energy self-sufficiency in residential buildings by using solar-assisted heat pumps and thermal and electrical storage. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, 60: 103446. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.seta.2023.103446](https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103446).
36. LUTHANDER, Rasmus, et al. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied energy*, 2015, 142: 80-94. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.apenergy.2014.12.028](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028).
37. SALPAKARI, Jyri; LUND, Peter. Optimal and rule-based control strategies for energy flexibility in buildings with PV. *Applied Energy*, 2016, 161: 425-436. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.apenergy.2015.10.036](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.036).
38. BACH, Bjarne, et al. Integration of large-scale heat pumps in the district heating systems of Greater Copenhagen. *Energy*, 2016, 107: 321-334. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.energy.2016.04.029](https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.029).
39. HU, Yue, et al. Experimental and numerical study of PCM storage integrated with HVAC system for energy flexibility. *Energy and Buildings*, 2022, 255: 111651. Prieiga per: DOI:[10.1016/j.enbuild.2021.111651](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111651).
40. Wilson, E. ir kt. (2017). Grid-interactive efficient buildings: definitions and value streams. *PNNL Technical Report*. Prieiga per: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www1.eere.energy.gov/buildings/pdfs/75470.pdf&ved=2ahUKEwi67tKUxKGNAxV4U1UIHaQMOMkQFnoECA8QAQ&usg=AOvVaw10cUhMrO07ZJEPanafMDj>
41. Stromback, J. ir kt. (2011). The potential of smart meter enabled programs to increase energy and systems efficiency: a mass pilot comparison. VaasaETT Report. Prieiga per: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.esmig.eu/wp-content/uploads/2021/11/ESMIG-Empower-Demand-report-phase-I.pdf&ved=2ahUKEwjf1pDhxKGNAxXMJBAlHduQMr4QFnoECA8QAQ&usg=AOvVaw0WH2WcswzKTC-mV5frjrra>
42. European Heat Pump Association (2022). European Heat Pump Market and Statistics Report. 2022. Prieiga per: <https://ehpa.org>
43. Zühlsdorf, B. ir kt. Smart Grid integration of heat pumps. *IEA HPT TCP Annex 42 Final Report*. 2020. Prieiga per: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://heatpumpintgtechnologies.org/publications/heat-pumps-in-smart-grids-final->

report/&ved=2ahUKEwjS2duVxaGNAXU5CBAIHQPOJk8QFnoECBIQAAQ&usg=AOvVaw2l
TAt6ZRSIqC_PNvzSupfg

44. JIANG, Jiatong, et al. A review and perspective on industry high-temperature heat pumps. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2022, 161: 112106. Prieiga per:
DOI:[10.1016/j.rser.2022.112106](https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112106).

Priedai

1 Priedas. Šilumo siurblių ūkio principinė schema.



2 Priedas. *Matlab* programos kodas, skirtas integruoti duomenis į *Simulink* aplinką

```
%% Lauko oro temperatūros įkėlimas

data = readtable('TOa_4weeks.csv');

toa_ts = timeseries(data.Toa, data.Timestamp);

assignin('base', 'toa_ts', toa_ts);

%% Elektros biržos kainų įkėlimas

filename = 'Electricity_prices4.CSV';

opts = detectImportOptions(filename, ...

    'NumHeaderLines', 1, ...

    'VariableNamesLine', 1, ...

    'VariableNamingRule', 'preserve');

for i = 2:length(opts.VariableNames)

    opts = setvaropts(opts, opts.VariableNames{i}, 'Type', 'string');

end

raw = readtable(filename, opts);

hourly_cols = raw.Properties.VariableNames(2:end);

for i = 1:length(hourly_cols)

    cleaned = strrep(raw.(hourly_cols{i}), ',', '.');

    cleaned = strtrim(cleaned);

    raw.(hourly_cols{i}) = str2double(cleaned);

end

price_values = reshape(raw{:, hourly_cols}', [], 1);

time_seconds = (0:length(price_values)-1)' * 3600;

ElectricityPrices = [time_seconds, price_values];

save('electricity_prices_timeseries.mat', 'ElectricityPrices');

%% Radiatorių bei AHU kontūrų apkrovos skaičiavimas

rho = 998;    % vandens tankis

cp = 4180;    % vandens specifinė šiluma
```



```

% Srautai m^3/h → m^3/s

Vkonv_rad = 17.71 / 3600; % Radiatorių kontūras

Vkonv_ahu = 20.58 / 3600; % AHU kontūras

% Duomenų įkėlimas

data = readtable('interpolated_TE24_25_21_26_180s.csv');

% Skirtumai tarp tiekimo ir grįžtamo

deltaT_rad = data.TE24 - data.TE25;

deltaT_ahu = data.TE21 - data.TE26;

% Apkrovų skaičiavimas

Q_rad = rho * cp * Vkonv_rad * deltaT_rad / 1000; % kW

Q_ahu = rho * cp * Vkonv_ahu * deltaT_ahu / 1000; % kW

% Papildoma: laiko vektorius

time = (0:height(data)-1)' * 180; % 180s tarp duomenų taškų

% Išsaugoti kaip mat failą Simulink naudoti

Q_rad_sim = [time Q_rad];

Q_ahu_sim = [time Q_ahu];

save('Q_loads_simulink.mat', 'Q_rad_sim', 'Q_ahu_sim');

```

3 Priedas. Perdavimo funkcijų TE18 *Matlab* programos kodas

```
data = readtable('HGen_1week_interpolated_v2.csv');

Ts = 180;

u1 = data.SS1;
u2 = data.SS2;
u3 = data.SS3;

data.TE18 = movmean(data.TE18, 3);

y = data.TE18;

N = length(u1);

timeVec = (0:N-1)' * Ts;

u11 = [timeVec, u1];
u22 = [timeVec, u2];
u33 = [timeVec, u3];

validRows = all(~isnan([u1, u2, u3, y]), 2);

u1 = u1(validRows);
u2 = u2(validRows);
u3 = u3(validRows);
y = y(validRows);

u = [u1, u2, u3];

data_id = iddata(y, u, Ts);

orders = [1 1 2; 2 2 2; 1 2 1];

sys = tfest(data_id, orders(1,:), orders(2,:), orders(3,:));

disp(sys)

compare(sys, data_id);

present(sys);

[~, fit_info] = compare(sys, data_id)
```

4 Priedas. Perdavimo funkcijų TE20 *Matlab* programos kodas

```
data = readtable('final_interpolated_3min.csv');
time = datetime(data.Timestamp);
t_minutes = minutes(time - time(1));
u = [data.TE18, data.TE22];
y = data.TE20;
sys_data = iddata(y, u, 180);
np = [3, 3];
nz = [2, 2];
dl = [0, 0];
sys_ctf = tfest(sys_data, np, nz, dl);
disp(sys_ctf)
compare(sys_data, sys_ctf);
[~, fit_info] = compare(sys_data, sys_ctf)
```

5 Priedas. Perdavimo funkcijų TE21 *Matlab* programos kodas

```
data = readtable('Interpolated_Merged_Data.csv');  
timeStamps = datetime(data.Time);  
timeSec = seconds(timeStamps - timeStamps(1));  
TE20 = data.TE20;  
TE21 = data.TE21;  
Ts = 60;  
data = iddata(TE21, TE20, Ts);  
sys = tfest(data, 2)  
compare(data, sys);
```

6 Priedas. Perdavimo funkcijų TE22 *Matlab* programos kodas

```
data = readtable('interpolated_large_cleaned_180s.csv');
time = datetime(data.Timestamp);
t_minutes = minutes(time - time(1));
u = [data.TE25, data.TE26, data.TE21];
y = data.TE22;
N = length(u);
Ts = 180;
sys_data = iddata(y, u, Ts);
np = 3;
nz = [3, 3, 3];
dly = 0;
sys_ctf = tfest(sys_data, np, nz, dly)
compare(sys_data, sys_ctf);
[~, fit] = compare(sys_data, sys_ctf)
```

7 Priedas. Perdavimo funkcijų TE19 *Matlab* programos kodas

```
Ts = 180;
nz = [1 2 3];
np = [1 2 3];
io = [0 0 0];
data = readtable('Interpolated_TE19_Based.csv');
u = [data.TE18, data.TE20, data.TE22];
y = data.TE19;
valid_rows = all(~isnan([u, y]), 2);
u = u(valid_rows, :);
y = y(valid_rows);
u = normalize(u);
y = normalize(y);
sys_data = iddata(y, u, Ts);
model = tfest(sys_data, np, nz, io, opt)
compare(model, sys_data);
```

8 Priedas. *Simulink* aplinkos “Elektros kainų perskaičiavimas“ bloko kodas

```
function [stiprintas, dabartine_kaina, isankstinis_stipr, piko_laikas, dabar_pikas] =  
Elektros_kainu_perskaiciavimas(t)  
  
coder.varsize('laikoMatrica', [inf,1]);  
coder.varsize('kainuMatrica', [inf,1]);  
  
persistent laikoMatrica kainuMatrica  
  
stiprintas = 0;  
  
isankstinis_stipr = 0;  
  
dabartine_kaina = 0;  
  
piko_laikas = -1;  
  
dabar_pikas = 0;  
  
if isempty(laikoMatrica) || isempty(kainuMatrica)  
    duomenys = load('electricity_prices_timeseries.mat');  
    ElektrosKainos = duomenys.ElectricityPrices;  
    if size(ElektrosKainos, 2) < 2  
        return;  
    end  
    laikoMatrica = ElektrosKainos(:,1);  
    kainuMatrica = ElektrosKainos(:,2);  
end  
  
dabartine_kaina = interp1(laikoMatrica, kainuMatrica, t, 'previous', 'extrap');  
  
if isnan(dabartine_kaina)  
    dabartine_kaina = 0;  
    return;  
end  
  
valanda = floor(t / 3600);  
  
paros_valanda = mod(valanda, 24);  
  
stiprinimo_veiksmas = 0;
```

```

if ismember(paros_valanda, 0:5)

    ziureti_i_prieki = (t+3600 : 3600 : t+3*3600)';

    if max(ziureti_i_prieki) <= max(laikoMatrica)

        busimos_kainos = interp1(laikoMatrica, kainuMatrica, ziureti_i_prieki, 'previous', NaN);

        busimos_kainos = busimos_kainos(~isnan(busimos_kainos));

        if ~isempty(busimos_kainos) && any(busimos_kainos > 1.4 * dabartine_kaina)

            stiprinimo_veiksmas = 1;

        end

    end

else

    lango_pradzia = max(0, t - 3*3600);

    lango_pabaiga = min(max(laikoMatrica), t + 3*3600);

    lango_laikai = (lango_pradzia:3600:lango_pabaiga)';

    lango_kainos = interp1(laikoMatrica, kainuMatrica, lango_laikai, 'linear', NaN);

    lango_kainos = lango_kainos(~isnan(lango_kainos));

    if length(lango_kainos) >= 2

        vidurkis = mean(lango_kainos);

        diapazonas = max(lango_kainos) - min(lango_kainos);

        if dabartine_kaina < 0.4 * vidurkis && diapazonas > 20

            stiprinimo_veiksmas = 1;

        end

    end

end

stiprintas = double(stiprinimo_veiksmas);

busimi_laikai = t + (0:300:5000);

isankstinis_veiksmas = 0;

for i = 1:length(busimi_laikai)

    laikinas_t = busimi_laikai(i);

```



```

val = floor(laikinas_t / 3600);

paros_val = mod(val, 24);

t_kaina = interp1(laikoMatrica, kainuMatrica, laikinas_t, 'previous', 'extrap');

if isnan(t_kaina)

    continue;

end

veiksmas = 0;

if ismember(paros_val, 0:5)

    ziura = (laikinas_t+3600 : 3600 : laikinas_t+3*3600)';

    if max(ziura) <= max(laikoMatrica)

        f_kainos = interp1(laikoMatrica, kainuMatrica, ziura, 'previous', NaN);

        f_kainos = f_kainos(~isnan(f_kainos));

        if ~isempty(f_kainos) && any(f_kainos > 1.4 * t_kaina)

            veiksmas = 1;

        end

    end

else

    lango_pr = max(0, laikinas_t - 3*3600);

    lango_pb = min(max(laikoMatrica), laikinas_t + 3*3600);

    lango_lt = (lango_pr:3600:lango_pb)';

    lango_k = interp1(laikoMatrica, kainuMatrica, lango_lt, 'linear', NaN);

    lango_k = lango_k(~isnan(lango_k));

    if length(lango_k) >= 2

        vid = mean(lango_k);

        skirtumas = max(lango_k) - min(lango_k);

        if t_kaina < 0.4 * vid && skirtumas > 20

            veiksmas = 1;

        end

    end

end

```

```

        end

    end

    if veiksmas == 1

        isankstinis_veiksmas = 1;

        break;

    end

end

isankstinis_stipr = double(isankstinis_veiksmas || stiprintas);

laiko_langas = t : 900 : t + 43200;

if max(laiko_langas) <= max(laikoMatrica)

    kainos_priek = interp1(laikoMatrica, kainuMatrica, laiko_langas, 'previous', NaN);

    [~, max_indeksas] = max(kainos_priek);

    piko_laikas = laiko_langas(max_indeksas);

    if abs(t - piko_laikas) < 900

        dabar_pikas = 1;

    end

end

end

end

```