

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Aurimas Butavičius**

**GYVENAMOJO NAMO ŠILDYMO SISTEMOS MODELIO  
SUKŪRIMAS IR TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Leonas Balaševičius

**KAUNAS, 2016**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**  
**AUTOMATIKOS KATEDRA**

**GYVENAMOJO NAMO ŠILDYMO SISTEMOS MODELIO  
SUKŪRIMAS IR TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
**Valdymo technologijos (621H66001)**

**Vadovas**

Doc. dr. Leonas Balaševičius

**Recenzentas**

Lekt. dr. Gytis Petrauskas

**Projektą atliko**

Aurimas Butavičius

**KAUNAS, 2016**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Aurimas Butavičius

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos 621H66001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Gyvenamojo namo šildymo sistemos modelio sukūrimas ir tyrimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 m. \_\_\_\_\_ d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Aurimo Butavičiaus** baigiamasis projektas tema „Gyvenamojo namo šildymo sistemos modelio sukūrimas ir tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Butavičius, A. Gyvenamojo namo šildymo sistemos modelio sukūrimas ir tyrimas. Valdymo sistemų magistro baigiamasis projektas / vadovas Doc. dr. Leonas Balaševičius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Kaunas, 2016. 80 psl.

## SANTRAUKA

Baigiamajame magistro darbe išanalizuota gyvenamųjų pastatų renovacijos daroma įtaka šilumos punkto valdymo sistemai. Tyrimo objektu pasirinkti du skirtingų plotų gyvenamieji namai, esantys Palangos mieste. Apžvelgti gyvenamojo pastato šildymo sistemoje vykstantys procesai bei sudarytas gyvenamojo pastato ir šildymo sistemos modelis, kuris leido atlikti tyrimą. Atlikto tyrimo rezultatai parodė, kad norint stabiliai valdyti temperatūrą, kuo aukštesnė yra tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra, tuo žemesnė turi būti P (proporcinės juostos) reikšmė. Taip pat, norint išvengti švytavimų, reikia mažinti I (integravimo) laiko konstantą. Tokiu atveju regulatoriaus reakcija bus lėtesnė, tačiau be švytavimų, didinant integravimo laiko konstantą, regulatoriaus reakcija į temperatūrų pasikeitimus bus tikslesnė, tačiau gali atsirasti švytavimai. Atlikus tyrimą su renovuoto pastato ir nerenovuoto pastato sistema matyti, kad renovavus pastatą būtina sumažinti valdymo sistemos regulatoriaus parametrų koeficientus, nes esant nerenovuoto pastato valdymo sistemos regulatoriaus koeficientams, pereinamojo proceso laikas didėja ir kai kuriais darbo režimais valdymo sistema tampa nestabili. Tyrimo metu keičiant PI regulatoriaus parametrų koeficientus buvo registruojami duomenys apie šilumos energijos suvartojimą. Remiantis tyrimo rezultatais, daroma išvada, jog valdymo sistemos regulatoriaus parametrai įtakoja šilumos suvartojimo rodiklius, nes esant neoptimaliems valdymo sistemos parametrams šilumos energijos suvartojama daugiau.

*Reikšminiai žodžiai: šilumos punktas, centralizuotas šilumos tiekimas, šildymo sistema.*

Butavičius, Aurimas. Design and analysis of living house heating system. Control systems master final work / supervisor Assoc. Prof. Dr. Leonas Balaševičius; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Automation.

Kaunas, 2016. 80 pages

## SUMMARY

Master degree report analyses the influence of the renovated residential building to the heating management system. Two different size residential houses in Palanga city has been chosen as a study object. Report examines residential building heating system processes, also, template of the residential building and heating system has been created for a research. The results of the research show that in order to control the temperature, the higher supply of the hot water heating system, the lower should be the P (proportional constant) value. Moreover, in order to avoid oscillations, there is a need to reduce I (integration constant), in this case the management reaction would be slower and without oscillations, on the other hand, if the integration time-constant would be higher, the management reaction to the temperature would be more specific, however the oscillations could appear. The investigation with renovated and not renovated residential building it can be seen that for renovated building there is a need to reduce the management system parameter coefficients, otherwise the management heating system would be not stable. The study changing the PI controller parameters weights were recorded data on the thermal energy consumption. Based on the results of the study concluded that the management of the system controller settings affect heat consumption indicators, as in inefficient management of the system parameters of the heat energy is used more.

*Keywords: heat stations, district heating, heating system.*

# TURINYS

ĮVADAS.....	8
1. LITERATŪROS APŽVALGA IR ANALIZĖ.....	9
1.1 Šildymo sistemos apžvalga.....	9
1.1.1. Atlikti tyrimai panašia tematika .....	9
1.1.2. Baigiamojo darbo temos aktualumas.....	10
1.1.3. Šildymo sistemos teorinis modelis .....	11
1.1.4. PID reguliatorius .....	12
1.1.5. Šildymo sistema.....	13
1.1.6. Šilumos punkto sistemos apžvalga.....	17
1.2. Šildymo sistemų termodinaminiai procesai.....	18
1.2.1. Šilumos mainus aprašantys dėsniai .....	19
1.2.2. Šilumos laidumo koeficientas.....	23
2. GYVENAMOJO NAMO ŠILDYMO SISTEMOS MATEMATINIO MODELIO SUDARYMAS.....	25
2.1. Pastato termodinamikos matematinio modelio sudarymas.....	25
2.1.1. Pastato sistemos energijos srautai.....	25
2.1.2. Pastato išorės termodinamika .....	27
2.1.3. Pastato vidaus mikroklimatas .....	32
2.2. Šildymo sistemos matematinio modelio sudarymas.....	36
2.2.1. Šildymo sistema.....	36
2.2.2. Šildymo radiatorius .....	37
2.2.3. Šilumokaitis.....	39
2.2.4. Termostatinis radiatoriaus vožtuvas .....	43
2.2.5. Srauto valdymo vožtuvas ir PI reguliatorius .....	44

2.2.6.	Šilumos skaitiklio sudarymas .....	45
2.2.7.	Pilnas šildymo sistemos modelis .....	47
3.	SUKURTO MODELIO TYRIMAS IR TYRIMO REZULTATAI.....	50
3.1.	Tyrimui atlikti naudojami duomenys.....	50
3.2.	Valdymo sistemos reguliatoriaus parametrų tyrimas.....	52
3.3.	Valdymo sistemos tyrimas keičiant namo termodinamines savybes.....	62
3.4.	PI parametrų parinkimas, kai pastatai renovuoti .....	70
3.5.	Modelio šilumos energijos sunaudojimo tyrimas ir duomenų palyginimas .....	75
	IŠVADOS.....	77
	LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	78

## ĮVADAS

Pasauliniu mastu sparčiai didėjantis aplinkos teršimas, klimato kaita skatina ieškoti efektyvesnių vystymosi kelių, kurie leistų sukurti galimybes sumažinti neigiamą poveikį aplinkai. Todėl susiformavo žaliosios ekonomikos koncepcija. Šios ekonomikos nuostatos diegiamos ir Lietuvoje. Viena iš šių koncepcijų yra gyvenamųjų būstų renovacija. Lietuvoje yra apie 35 tūkstančiai daugiabučių pastatų, kurie yra arba bus renovuojami [13]. Didžioji dalis šių pastatų šilumą gauna iš centralizuotų šilumos tinklų, o tai reiškia, kad visi šie pastatai turi automatizuotus šilumos punktus.

Renovacijos metu pastato išorinės konstrukcijos yra apšiltinamos, o šildymo sistemos galingumas sumažinamas proporcingai pastato šiluminei varžai. Renovuoto pastato šilumos poreikiai sumažėja maždaug 50 proc., lyginant su nerenovuotu [13]. Tai reiškia, kad šilumos punkto darbo režimas taip pat kardinaliai keičiasi, todėl reikia iš naujo sureguliuoti šilumos punkto automatiką bei jos įrenginius. Būtent dėl šios priežasties pasirinkta išanalizuoti, kokią įtaką turi šilumos punkto darbui pasikeitęs pastato šiluminis režimas.

**Darbo objektas:** gyvenamojo namo šildymo sistemos modelio sudarymas ir tyrimas

**Darbo tikslas:** sudaryti šildymo sistemos matematinį modelį ir išsiaiškinti, kokią įtaką valdymo kokybei turi regulatoriaus parametrai, pakeitus pastato termodinamines savybes.

**Darbo uždaviniai:**

1. Išanalizuoti šildymo sistemą sudarančius elementus ir joje vykstančius procesus;
2. Sudaryti namo šildymo sistemos matematinį modelį;
3. Ištirti PI regulatoriaus koeficientų įtaką valdymo kokybei, pakeitus namo termodinamines savybes;
4. Įvertinti, kokią įtaką turi valdymo sistemos parametrai šiluminės energijos suvartojimui.



# 1. LITERATŪROS APŽVALGA IR ANALIZĖ

## 1.1 Šildymo sistemos apžvalga

### 1.1.1. Atlikti tyrimai panašia tematika

Žemiau pateikiami literatūros analizės metu surasti tyrimai panašia tematika:

- 2005 metais atlikto tyrimo tikslas buvo surasti metodą, kaip identifikuoti gedimus, naudojant šilumos skaitiklį. Gedimų aptikimas leistų optimizuoti ir išlaikyti žemas grąžinamo į miesto šilumos tinklus termofikacinio vandens temperatūras. Todėl būtų galima sumažinti tiekiamo į šilumos punktus vandens temperatūrą. Autorius teigia, kad, sumažinus tiekiamo į šilumos punktus termofikacinio vandens temperatūrą Švedijoje vienu laipsniu, metinė nauda būtų apie 50 mln. kronų [15]. Pirmoje darbo dalyje autorius pristato gedimų aptikimo būdą, kai jutikliais matuojama temperatūra ir analizuojamas triukšmo amplitudės lygis. Antroje darbo dalyje aprašoma, kaip atskirti energijos naudojimą šildymui ir karšto vandens gamybai, naudojant tik vieną šilumos skaitiklį. Trečioje darbo dalyje aprašoma, kaip apskaičiuoti karšto vandens suvartojimą, matuojant šalto ir karšto vandens temperatūras [11].
- 2008 metais buvo sukurtas matematinis modelis, siekiant įvertinti pastate patirtus šilumos nuostolius bei nustatyti, kokią įtaką daro tam tikri pastatų šilumos izoliavimo metodai. Šis modelis taip pat turi galimybę išbandyti įvairius kontrolės bei šilumos energijos optimizavimo metodus, kurie taip pat buvo pagrindinis tikslas, kuriant šį modelį. Autorių sukurto modelio rezultatai pateikiami 2.38 paveiksle [12].
- 2009 metais buvo sukurtas modelis, kuris leidžia įvertinti konstrukcinius namo ypatumus (sienų storį, langų konstrukciją, oro infiltraciją patalpoje), šildymo sistemos parametrus ir klimato sąlygas (pavyzdžiui, vėjo kryptį bei greitį). Buvo siekiama rasti sąlygas, kuriomis šilumos nuostoliai minimalūs. Nustatyta, kad mažiau energijos šildymui sunaudojama, kai vandens srautai per radiatorius subalansuoti. Taip pat tyrimo rezultatai parodė, kad parinkę radiatorių galingumą proporcingai kambarių plotui, negauname subalansuotų vandens srautų per radiatorius. Sukurtas modelis leidžia apskaičiuoti optimalų radiatorių galingumo paskirstymą. Idealiu atveju, naudojant šį modelį galima nustatyti tokį radiatorių galingumą kambariuose, kad sunaudojamos energijos kiekis būtų minimalus. Tam reikia žinoti vėjo kryptis ir stiprumą per visą šildymo sezoną. Iš tikrųjų to žinoti neįmanoma, todėl siūloma išbalansuoti radiatorių

galingumus, nesant vėjo, ir truputį padidinti radiatorių galingumus kambariuose prie namo sienos, į kurią pučia vyraujančios krypties vėjai [23].

- 2011 metais buvo sukurtas modelis, kuris imituoja pastato termodinamines savybes, šildymo sistemos ir centralizuoto šilumos tiekimo sistemų elgesį. Naudojant sukurtą modelį, pastato centrinio šildymo sistemoje galima imituoti skirtingo galingumo šildymo prietaisus, skirtingas tiekiamas temperatūras, esant skirtingoms klimato sąlygoms. Modeliavimo rezultatai parodė, kad, padidinus šildymo prietaisų galią, pastatų patalpos buvo perkaitinamos ir galingesni šildymo prietaisai sukėlė didesnę grįžtamojo vandens temperatūros kritimą, todėl galingesni šildymo prietaisai padidina energijos nuostolius. Taip pat tyrimo rezultatai parodė, kad, sistemą bandant su mažesnio galingumo šildymo prietaisais, patalpos buvo neprišildomos iki reikiamos temperatūros. Tai įtakojo netinkama šildymo kreivė. Suregulius šildymo kreivę ir padidinus termofikacinio vandens srautą šildymo sistemoje bei sumažinus temperatūrų skirtumą tarp tiekiamo ir grąžinamo į šilumos tinklus termofikacinio vandens temperatūros, buvo gauti teigiami rezultatai. Remiantis modeliavimo duomenimis, siūloma nauja valdymo strategija - sumažinti tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūrą ir padidinti srautą šildymo sistemoje [10].

### **1.1.2. Baigiamojo darbo temos aktualumas**

Lietuvoje, remiantis Statistikos Departamento duomenimis, yra apie 35 tūkstančiai daugiabučių pastatų, iš kurių apie 80 proc. šiluma yra tiekama iš centralizuotų šilumos tinklų [4]. Tai reiškia, kad visi šie pastatai turi šilumos punktus. Nuo 2005 iki 2013 metų Lietuvoje modernizuota 500 daugiabučių. Tuo tarpu vien 2015 metais baigti modernizuoti 574 pastatai, tai daugiau nei per aštuonerius metus. 2016 metais, remiantis būsto energijos taupymo agentūros „Atnaujink būstą“ duomenimis, planuojama modernizuoti dar 800 daugiabučių, todėl tikėtina renovuojamų pastatų skaičius vis didės [5].

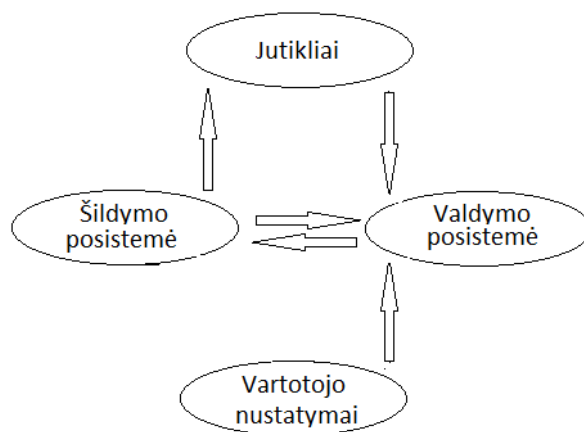
Renovavus pastatą, sutaupoma mažiausiai 50 proc [13]. šilumos energijos, tai reiškia, kad šilumos punkto darbo režimas taip pat kardinaliai keičiasi, todėl būtina iš naujo sureguliuoti šilumos punkto automatiką bei jos įrenginius. Būtent dėl šios priežasties šilumos punkto darbo režimas gali tapti neoptimalus, sunaudoti daugiau šilumos energijos negu reikalinga. Neoptimalus šilumos punkto darbo režimas taip pat turi įtakos šilumokaičio tarnavimo laikui.

### 1.1.3. Šildymo sistemos teorinis modelis

Šildymo sistemos teorinį modelį sudaro šie funkciniai elementai [17]:

- valdymo posistemė;
- šildymo posistemė;
- jutikliai;
- vartotojo daroma įtaka.

Funkcinių elementų tarpusavio ryšiai pavaizduoti 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Šildymo sistemos funkcinių elementų tarpusavio ryšiai

**Vartotojo nustatymai** - Šildymo sistemos valdymo modelis valdo sistemą automatiškai pagal vartotojo įvestus parametrus. Tai gali būti norimos šildymo kreivės pasirinkimas, kambario temperatūros bei kokia turi būti tiekiamo ir grąžinamo termofikacinio vandens temperatūra arba nustatyti papildomas temperatūrines reikšmes pagal laiko grafiką.

**Jutikliai** - Jutikliai nuolatos renka ir perduoda į šildymo sistemos valdymo posistemę informaciją, kokia yra termofikacinio vandens, lauko oro ir patalpos temperatūra. Remiantis šiais duomenimis, šildymo sistemos reguliatorius atlieka skaičiavimus.

**Šildymo posistemė** - Šildymo sistemos posistemė reguliuoja tiekiamo ir grąžinamo srauto temperatūrą pagal valdymo posistemės pateiktus parametrus.

**Valdymo posistemė** - Šildymo sistemos valdymo posistemė nuolatos gauna informaciją iš jutiklių. Šie duomenys yra lyginami su vartotojo nustatytais parametrais ir pagal valdymo logikos taisyklės apskaičiuojami šildymo posistemės valdymo signalai. Šildymo sistema yra realaus laiko sistema, nes valdymas vyksta realiu laiku, todėl labai svarbu, kad iš valdymo bloko gaunama

informacija atitiktų realią aplinkos būseną. Jeigu sistema gaus klaidingus duomenis, ji dirbs nekokybiškai ir neekonomiškai, todėl tokiai sistemai reikalingas pastovus aplinkos stebėjimas ir jos vertinimas [17].

#### 1.1.4. PID reguliatorius

Šilumos punktuose temperatūros reguliavimui yra naudojami įvairūs reguliatoriai. Reguliatorius yra automatinio valdymo sistemos dalis, kuri generuoja valdymo signalus.

PID (proporcingasis integralinis diferencialinis) - tai labiausiai paplitęs ir plačiausiai taikomas valdymo sistemose reguliatorius. Reguliatorius pagal paklaidą tarp išmatuoto proceso išėjimo signalo ir nustatyto norimo išėjimo apskaičiuoja kitam ciklui reikalingą valdymo signalą, kad esamas išėjimo signalas artėtų prie nustatytos norimos reikšmės. Pagrindinis reguliatoriaus uždavinys yra valdymo sistemos stabilumo užtikrinimas, bet ne mažiau svarbūs yra ir pereinamojo proceso laikas bei nustatytų parametrų palaikymas norimu tikslumu. PID reguliatorių sudaro trys grandys: proporcinė (P), integruojanti (I) ir diferencijuojanti (D) [1, 3].

PID reguliatoriaus algoritmas yra užrašomas taip:

$$u(t) = K \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d(\tau) + T_D \frac{De(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

Čia:

$u(t)$  - valdymo signalas,

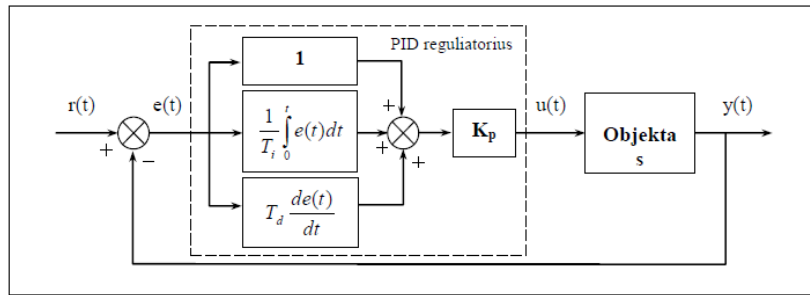
$e(t) = r(t) - y(t)$  - valdymo paklaida,

$K = P$  - proporcinės grandies koeficientas,

$1/T_I = I$  – integruojančios grandies laiko pastovioji,

$T_D = D$  – diferencijuojančios grandies laiko pastovioji.

Valdymo sistema su PID reguliatoriumi pavaizduota (1.2 pav.)



1.2 pav. Valdymo sistema su PID reguliatoriumi [27]

### *Valdymo sistemos optimizavimas, naudojant P, PI, PID reguliatorius*

Valdymo sistemos optimizavimo uždavinys - tai optimalių proporcinio (P), integruojančio (I) ir diferencijuojančio (D) reguliatoriaus kanalų koeficientų parinkimas, kad valdoma sistema veiktų stabiliai. Jeigu reguliatoriaus koeficientai parinkti neteisingai, procesas, kuris yra kontroliuojamas, bus nestabilus [2].

Optimizavimo metodai [20]:

- Rankinis optimizavimas;
- Ziegler'io–Nichols'o metodas;
- Programiniai paketai;
- Cohen - Coon metodas.

Rankinio optimizavimo eiga – kai valdymo sistema yra darbo režime, reguliatoriuje nustatomi lygūs 0 integruojančios ir diferencijuojančios grandies perdavimo kanalų koeficientai. Tada didinamas proporcinio kanalo perdavimo koeficientas  $P$  tol, kol išėjimo signalas pradeda švytuoti. Atsiradus švytavimams,  $P$  koeficientą nustatome perpus mažesnę. Tada didinamas koeficientas  $I$  tol, kol pereinamojo proceso laikas tenkina užduotas sąlygas. Per didelis  $I$  koeficientas gali valdymo sistemą padaryti nestabilią. Didinamas  $D$  koeficientas iki ribos, kada valdymo sistemos atsakas į pasikeitusias apkrovas yra pakankamai greitas, tačiau per didelė koeficiento reikšmė gali sukelti per didelį sistemos jautrumą [18].

#### **1.1.5. Šildymo sistema**

Šildymas – procesas, kurio metu yra šildomos patalpos. Šaltuoju metų laiku, kai lauko temperatūra žemesnė už kambario temperatūrą, kambarys vėsta dėl vykstančių šilumos mainų, nes

šiluma iš šiltesnės zonos teka į vėsesnę. Šilumos nuostoliai atsiranda, nes šiluma sklinda per sienas, stogą, grindis, duris ir langus. Šilumos nuostolių dydį įtakoja ne tik lauko temperatūra, klimato sąlygos, bet ir nuo pastatą sudarančių sienų, langų ar kitų su išore besiribojančių atitvarų kokybės bei jų šiluminės varžos. Kuo pastato šiluminė varža yra mažesnė, tuo reikia daugiau šilumos patalpoms šildyti. Pastato šiluminei varžai didinti pastato išorinės atitvaros yra apšiltinamos izoliacinėmis medžiagomis [13].

Patalpų šildymo būdai gali būti įvairūs. Šildymo būdo pasirinkimą lemia pastato statybinės konstrukcijos, patalpų išplanavimas ir pastatą supanti aplinka - klimato savybės. Šaltuoju metų laiku, kai žemėja lauko temperatūra ir stiprėja vėjas - didėja šildymui reikalingas šilumos kiekis, kuris į patalpą yra perduodamas šildymo prietaisais. Šiltėjant orui, šildymui sunaudojamas šilumos kiekis yra mažesnis, todėl reikalinga lanksti šildymo sistema, kuri reaguotų į lauko oro ir patalpos temperatūrą [16].

Šildymo sistema pagal jos įrengimo būdą skirstoma į vietinę bei centrinę. Vietinė šildymo sistema – kai šilumos šaltinis yra šildomoje patalpoje ir šiluma nuo šio įrenginio tiesiogiai sklinda į patalpą. Geriausias tokios sistemos pavyzdys gali būti krosnis arba židynys. Centrinė šildymo sistema - šildymo sistema, kada šilumą gaminantis įrenginys yra įrengtas atskirai nuo šilumą išspinduliuojančio įrenginio (2.3 pav.) [15].

Šildymo sistemoje šilumos nešėjas gali būti termofikacinis vanduo, garas arba oras. Atvejis, kai šilumos nešėjas yra vanduo, naudojamas dažniau, nes šildymo prietaisų temperatūra yra neaukšta, šildymo prietaisų skleidžiamą temperatūrą lengva reguliuoti, paprasta eksploatuoti, veikia tyliai ir nekelia triukšmo [13].

Vandens šildymo sistemas galima išskirti į atskiras grupes:

- pagal šilumos nešėjo cirkuliacijos būdą – natūrali ir priverstinė cirkuliacija;
- pagal vamzdynų paklojimo būdą pastate – viršutinio bei apatinio paskirstymo;
- pagal šilumos nešėjo tekėjimą – dvivamzdės ir vienvamzdės;
- pagal šilumos tiekimo būdą – kai yra naudojamas vietinis šilumos gamybos šaltinis arba kai šiluma yra tiekama centralizuotai iš miesto šilumos tiekimo tinklų;
- pagal ryšį su šilumos tiekimo tinklu – priklausomos ir nepriklausomos sistemos.

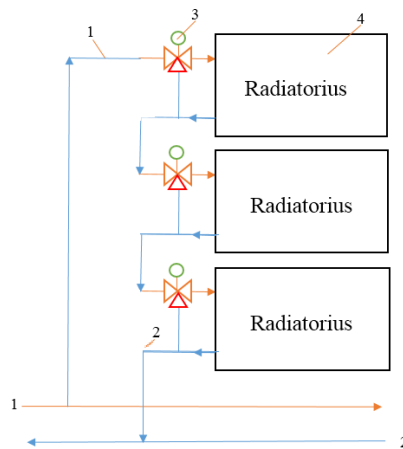
Šildymo prietaisai – įrenginys, skirtas perduoti pagamintą šilumą patalpoms, t. y. jas šildyti. Šildymo prietaisai, dažniausiai naudojami, yra radiatoriai, sieninės plokštės, į grindis įleidžiami konvektoriai. Patalpose reikia įrengti tiek šildymo prietaisų, kad jų išspinduliuojamos šilumos kiekio užtektų apšildyti patalpas iki nustatytos temperatūros. Šildymo prietaisai į patalpą turi išspinduliuoti

šilumos kiekį, lygų šilumos nuostoliams. Kuo pastato šiluminė varža yra mažesnė, tuo daugiau reikia šilumos. Įrengus šildymo prietaisus, kurių paviršiaus plotas yra mažas arba jie patalpoje išdėstyti neteisingai, prietaisas išspinduliuos per mažai šilumos, kurios patalpose neužteks. Šildymo prietaisų į aplinką išspinduliuojama galia yra reguliuojama, keičiant į pastato šildymo sistemą tiekiamo vandens temperatūrą arba per šildymo prietaisus pratekančio termofikacinio vandens kiekį. Reguluoti radiatorių arba kitų šildymo prietaisų išspinduliuojamą šilumos kiekį, t. y. patalpos temperatūrą, padeda termostatiniai ventiliai (1.3 pav.). Vartotojas nustato kambario temperatūrą pagal savo poreikius. Termostatas, priklausomai nuo aplinkos temperatūros, keičia į šildymo prietaisą pratekančio termofikacinio vandens (šilumnešio) kiekį [13].



1.3 pav. Termostatinis ventilis [13]

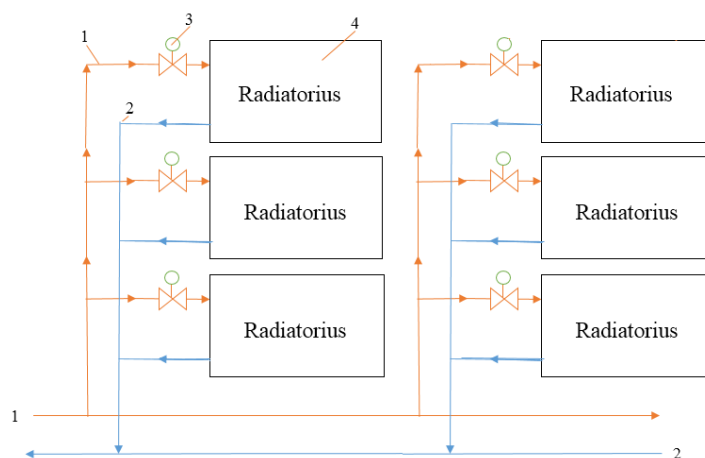
Vienvamzdė šildymo sistema – sistema, kurioje šilumos nešėjas tiekiamas į radiatorius ir grįžta iš jų tuo pačiu vamzdžių stovu. Ši sistema pavaizduota 1.4 paveiksle. Esminis šios šildymo sistemos trūkumas tai, kad negalima reguliuoti per šildymo prietaisus pratekančio termofikacinio vandens srauto.



1.4 pav. Vienvamzdė šildymo sistema

*Pastaba: 1 - paduodamas termofikacinis vanduo; 2 - grąžinamas termofikacinis vanduo;  
3 – trieigis vožtuvas; 4 – radiatorius.*

Dvivismzdė sistema – tokioje sistemoje termofikacinis vanduo yra į radiatorius tiekiamas paduodamo vandens vamzdžio stovu, o iš radiatoriaus grąžinamas termofikacinis vanduo tiekiamas į grąžinimo vandens vamzdžio stovą (1.5 pav.). Dvivismzdės šildymo sistemos, kaip ir vienvamzdės, gali būti viršutinio paskirstymo, apatinio paskirstymo ir horizontaliosios. Dvivismzdė šildymo sistema už vienvamzdę yra pranašesnė, nes į kiekvieną šildymo prietaisą (radiatorių) patenka vienodos temperatūros termofikacinis vanduo bei tokią sistemą lengva valdyti, nes bet kurio šildymo prietaiso (radiatoriaus) reguliavimas neturi įtakos kitų šildymo prietaisų veiklai [13].



1.5 pav. Dvivismzdė šildymo sistema.

*Pastaba: 1 - paduodamas termofikacinis vanduo; 2 - grąžinamas termofikacinis vanduo; 3 – termostatais ventilis; 4 – radiatorius.*



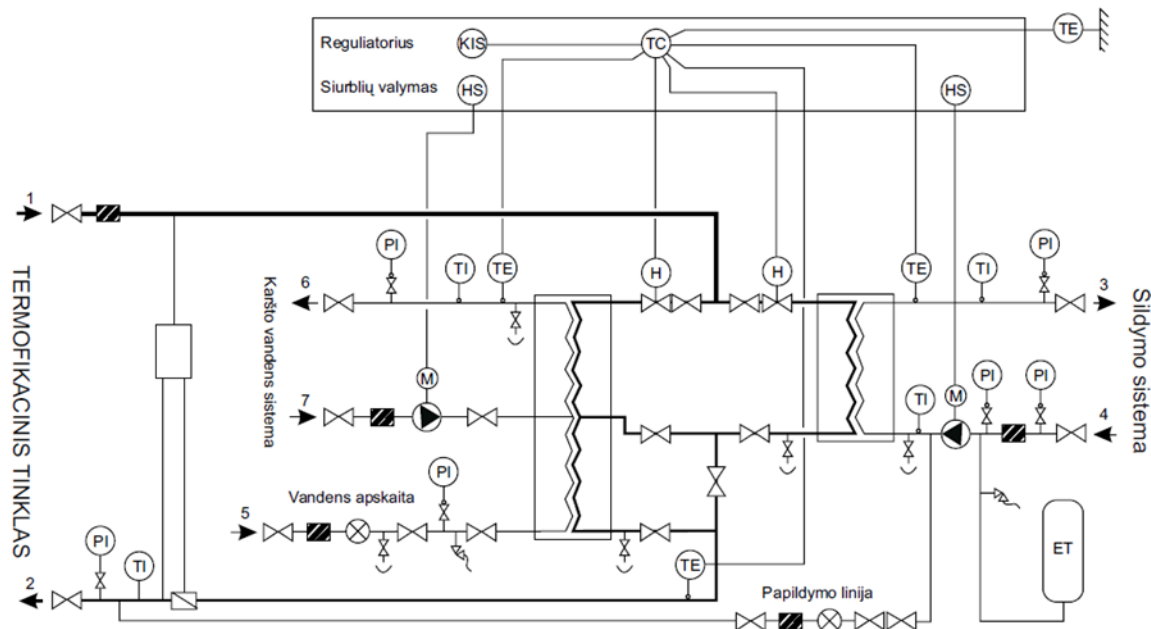
### 1.1.6. Šilumos punkto sistemos apžvalga

Šilumos punktas - tai centralizuotos šilumos tiekimo sistemos mazgas, kuriame iš termofikacinio vandens gauta šiluma yra transformuojama ir skirstoma į pastatų šildymo, karšto vandens ar kitas šilumą vartojančias sistemas. Šilumos punkto valdymo sistemos pagrindinis uždavinys yra reguliuoti šilumos tiekimą pastato inžinerinėms sistemoms pagal vartotojo nustatytus valdymo parametrus. Šilumos punkto pagrindinę įrangą sudaro [13]:

- Regulatorius (Rubisafe, Danfoss, Siemens);
- Įvairūs jutikliai;
- Siurblys (šildymo, karšto vandens);
- Reguliavimo vožtuvas su el. pavara (šildymo, karšto vandens);
- Šilumokaitis (šildymo, karšto vandens);
- Slėgio skirtumo regulatorius;
- Išsiplėtimo indas.

Kad šilumos punktas tinkamai atliktų savo darbą jame, turi būti tinkamai parinkti ir sumontuoti bei suderinti įrengimai; nuo to priklauso sistemos darbo kokybė ir suvartotos šilumos kiekis. Taip pat labai svarbu, kad valdymo automatika būtų sureguliuota teisingai, kitokiu atveju sistema veiks nepatikimai, be to gali būti sugadinti kai kurie šilumos punkto įrengimai.

Priklausomai nuo pastate sumontuotų inžinerinių sistemų, šilumos punkto schema, įrengimų tipas bei jų kiekis taip pat keičiasi. Projektuojant šilumos punktą ar jį remontuojant taip pat būtina atsižvelgti ir į termofikacinio vandens parametrus, būsimą ar esamą šilumos vartojimo režimą bei kitus veiksnius. Tipinė šilumos punkto schema pateikiama 1.6 paveiksle [14, 13].



1.6 pav. Tipinė šilumos punkto schema [13].

*Pastaba: 1 – paduodamas termofikacinis vanduo; 2- grąžinamas termofikacinis vanduo; 3 – tiekiamas į šildymo sistema; 4 – grąžinamas iš šildymo sistemos; 5 – šaltas vanduo; 6 – karštas vanduo; 7 – karšto vandens cirkuliacija.*

Automatizuotas šilumos punktas leidžia užprogramuoti šilumos punkto darbą taip, kad būtų galima taupyti ir neprarasti komforto, atsižvelgiant į vartotojų poreikius. Daugiausia sutaupoma, kai lauke yra teigiama oro temperatūra, nes įranga reaguoja į lauko oro temperatūros pokyčius - kai lauke atšąla, šilumos punkte pakeliama į šildymo sistemą tiekiamo vandens temperatūrą ir priešingai – lauke atšilus, termofikacinio vandens temperatūra mažinama.

Lietuvoje didžioji dalis pastatų šilumą gauna iš miesto šilumos tinklų, kuriuose yra įrengti automatizuoti šilumos punktai, todėl būtinas optimalus tokių valdymo sistemų parametru suderinimas.

## 1.2. Šildymo sistemų termodinaminiai procesai

Termodinaminė sistema - tai iš tam tikrų medžiagų sudaryta ir esanti tam tikroje erdvėje bei turinti aiškiai apibrėžtą paviršių. Šis paviršius yra sistemos riba, kuri gali judėti arba būti fiksuota. Aplinka vadinama viskas, kas yra už šios sistemos ribų. Termodinaminėje sistemoje vykstantys

procesai visada turi sąveiką su aplinka. Energijos perdavimas - tai bet koks pokytis šioje sistemoje. Energija tarp dviejų kūnų gali būti perduodama šilumos spinduliavimu arba darbu [16].

Šiluma ir darbas - tai energijos formos, kurios gali būti transformuojamos iš vieno kūno arba aplinkos į kitą. Energijos perdavimas įvyksta, kai yra perduodama energija arba ji transformuojama iš vienos šilumos formos į kitą. Sistemos būklė tam atitinkamu laiko momentu vadinama termodinamine būsena, kuri apibūdinama sistemos parametrais. Parametrai yra skirstomi į pagrindinius ir kalorinius. Pagrindiniai parametrai yra specifinis tūris ( $v$ ), slėgis ( $p$ ) ir temperatūra ( $T$ ), o kaloriniai – vidinė energija ( $u$ ), entalpija ( $h$ ) ir entropija ( $s$ ) [16].

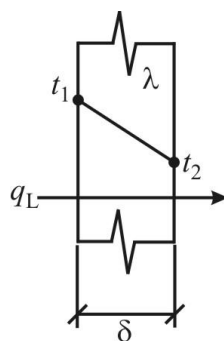
### 1.2.1. Šilumos mainus aprašantys dėsniai

Šilumos mainai arba šilumos pernešimas – tai savaiminis šilumos plitimas erdvėje, esant nevienodai temperatūrai įvairiuose jos taškuose. Šilumos sklidimo kryptis – nuo aukštesnės temperatūros zonos link žemesnės temperatūros zonos. Šiame skyriuje pateikiamos pagrindinės šilumos balanso lygtys, atspindinčios šilumokaičio, radiatoriaus ir termodinamines pastato savybes. Šilumos balanso lygtys sudarytos, remiantis informacija, pateikiama literatūroje [25].

Šilumos mainai yra sudėtingas procesas, kurį galima išskaidyti į 3 šilumos sklidimo būdus:

- 1) laidumas;
- 2) konvekcija;
- 3) spinduliavimas.

**Šiluma sklinda laidumu**, kai kūno dalelės liečiasi viena su kita. Karštesnės medžiagos molekulės perduoda dalį savo kinetinės energijos šaltesnėms molekulėms ir šiluma plinta kūne. Todėl laidumu šiluma plinta kietuosiuose kūnuose (arba nejudančiuose skysčiuose ir dujose, kai dalelės liečiasi). Pagrindinis dėsnis, aprašantis šiluminį laidumą – Furje dėsnis (2 lygtis). Atliekant inžinerinius skaičiavimus paprastai naudojama tokia paprasčiausia schema, kuri pateikta 1.7 paveiksle [25, 28, 10].



1.7 pav. Šilumos laidumo schema per vieno sluoksnio sienelę [25]

Pagal Furjė dėsnį:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (2)$$

Medžiagos šiluminis laidumas yra tiesiogiai proporcingas medžiagos storiui. 2 lygtis supaprastinama ir pateikiama kaip 5 lygtis [25]

Irašome  $\frac{dt}{dx}$  reikšmę:

$$q = -\lambda \frac{t_2 - t_1}{\delta} \quad \text{arba} \quad q = -kA \frac{t_2 - t_1}{\delta} \quad (3)$$

$$\lambda = k * A \quad (4)$$

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_2 - t_1), Wm^2 \quad (5)$$

čia:

$q$  - šilumos srautas ( $W/m^2$ );

$t_1$  ir  $t_2$  - paviršių temperatūros ( $^{\circ}C$ );

$\lambda$  - medžiagos šilumos laidumo koeficientas ( $W/m^2K$ );

$k$  - medžiagos šiluminis laidumas ( $W/m^2K$ );

$A$  - yra skerspjūvio plotas ( $m^2$ );

$\delta$  - sienelės storis, ( $m$ ).

Iš 5 lygties matoma, kad šilumos srauto tankis per nagrinėjamą sienelę yra tiesiogiai proporcingas jos šilumos laidumo koeficientui, paviršių temperatūrų skirtumui ir atvirkščiai proporcingas sienelės storiui [25].

**Konvenciniai šilumos mainai** – tai šilumos pernešimas judančiomis dalelėmis, kai šiluma sklinda skysčiuose ir dujose, jiems judant ir maišantis. Pagrindinis konvencinių šilumos mainų dėsnis – Niutono dėsnis (6 lygtis). Atliekant inžinerinius skaičiavimus, remiamasi paprasčiausia schema (1.8 pav.), kai paviršius, kurio temperatūra  $t_1$ , šildo oro srautus, kurių temperatūra  $t_2$ . Dėl temperatūrų skirtumo atsiranda konvencinis šilumos srautas  $q_k$  [25]:

$$q_k = -\alpha_k(t_1 - t_2) \quad (6)$$

$$\alpha_k = -h_c * A \quad (7)$$

čia:

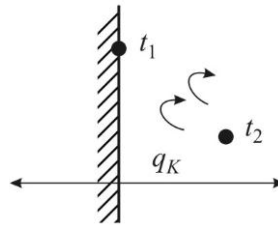
$\alpha_k$  – konvencinių šilumos mainų koeficientas vadinamas šilumos atidavimo koeficientu, ( $W/m^2K$ );

$h_c$  – konvencinio šilumos perdavimo koeficientas ( $W/m^2K$ );

$A$  - skerspjūvio plotas ( $m^2$ );

$t_1$  – sienelės paviršiaus temperatūra ( $^{\circ}C$ );

$t_2$  – oro temperatūra ( $^{\circ}C$ ).



1.8 pav. Konvenciniai šilumos mainai tarp sienelės ir oro [25]

**Spinduliniai šilumos mainai** – kai šiluma sklinda tarp dviejų kūnų elektromagnetinėmis bangomis. Kūno vidinė energija, kuri virsta elektromagnetinėmis bangomis, praeina pro skaidrią aplinką ir, pasiekusi kitą kūną, vėl paverčiama kūno vidine energija. Pagrindinis spindulinis šilumos mainų dėsnis aprašomas Stefano Bolcmano dėsniumi (8). Inžineriniams skaičiavimams naudojama schema pavaizduojama 1.9 pav. Ši schema apibūdina šilumos mainus, kurie vyksta spinduliuojant šilumai tarp dviejų paviršių [25].

Spindulinės šilumos srautas  $q_r$  :

$$q_r = -\alpha_s(t_1 - t_2), \quad \alpha_s = \sigma * A \quad (8)$$

$$q_r = h_r A (t_1 - t_2) \quad (9)$$

čia:

$q_r$  - Spindulinės šilumos srautas ( $W/m^2$ );

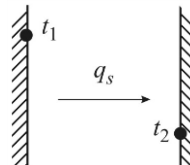
$h_r$  – šilumos spinduliavimo konstanta ( $W/m^2K$ );

$\alpha_r$  – spindulinių šilumos mainų koeficientas, ( $W/m^2K$ );

$A$  - skerspjūvio plotas ( $m^2$ );

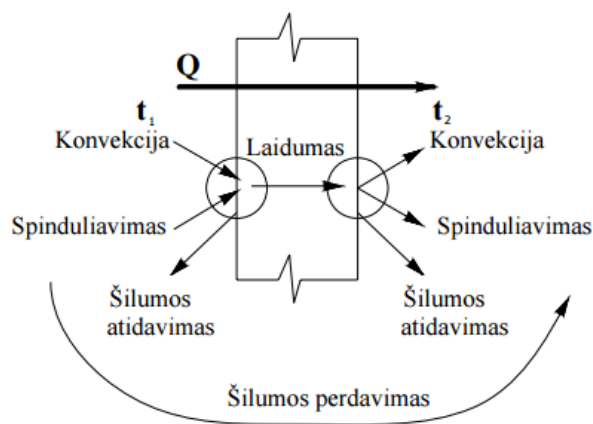
$t_1$  – sienelės paviršiaus temperatūra ( $^{\circ}C$ );

$t_2$  – oro temperatūra ( $^{\circ}C$ ).



1.9 pav. Šilumos spinduliavimas tarp dviejų paviršių [25]

Šilumos perdavimas – tai sudėtingas šilumos mainų procesas tarp dviejų skirtingos temperatūros aplinkų arba per šias aplinkas skiriančią sienelę. Atskirai vienas šilumos sklidimo būdas būna retai. Dažniausiai visi procesai vyksta kartu, sudarydami sudėtingus šilumos mainus. Jeigu šilumos mainai vyksta tarp skysčio (dujų) ir kietojo kūno paviršiaus, tokį procesą vadiname šilumos atidavimu. Čia gali pasireikšti visi trys šilumos sklidimo būdai, tačiau pagrindinis šilumos sklidimas yra konveciniai šilumos mainai. Jei šilumos mainai vyksta tarp skysčio ar dujų per juos skiriančią sienelę, toks procesas vadinamas šilumos perdavimu. Čia taip pat pasireiškia visi trys šilumos sklidimo būdai, kuriuos jungiantis procesas yra šilumos perdavimas (1.10 pav.). Jeigu kartu su šiluma pernešama ir kūno masė, vyksta ir masės mainai [6, 5, 7].



1.10 pav. Sudėtingi šilumos mainai – šilumos perdavimas [25]

Šilumos mainų galios balansas:

$$q=(h_r+h_c)*A*(t_1-t_2) \quad (10)$$

čia:

$q$  - Šilumos perdavimas ( $W/m^2$ );

$h_r$  – šilumos spinduliavimo konstanta ( $W/m^2K$ );

$h_c$  - konvecinio šilumos perdavimo koeficientas ( $W/m^2K$ );

$A$  - skerspjūvio plotas ( $m^2$ );

$t_1$  – sienelės paviršiaus temperatūra ( $^{\circ}C$ );

$t_2$  – oro temperatūra ( $^{\circ}C$ ).

### 1.2.2. Šilumos laidumo koeficientas

Šilumos laidumo koeficientas yra medžiagos fizinis parametras ir rodo, kokį šilumos kiekį sugeba praleisti tam tikra medžiaga per sekundę 1 m<sup>2</sup> plote, kai temperatūros gradientas yra lygus vienetai, t.y. temperatūros skirtumas tarp kraštinių medžiagos taškų šilumos tekėjimo kryptimi yra lygus 1 °C. Šilumos laidumo koeficiento matavimo vienetas yra W/mK. Šilumos laidumo koeficiento dydis priklauso nuo medžiagos fizinių ir cheminių savybių ir yra nustatomas laboratoriniais bandymais, dažniausiai matuojant šilumos srautą ir temperatūros gradientą.

Didžiausios šilumos laidumo koeficiento reikšmės yra grynų metalų atveju ( $\lambda=10\div 400$  W/mK). Šilumos izoliavimo ir statybinės medžiagos pasižymi sąlyginai mažu šilumos laidumo ( $\lambda=0,023\div 2,9$  W/mK), o skysčių koeficiento reikšmė svyruoja nuo 0,2 iki 0,5 W/mK [16].

Bet kurios medžiagos šilumos laidumas priklauso nuo jos vidinės struktūros, tankio, drėgnumo (įdrėkimo lygio), temperatūros, o taip pat nuo slėgio, jei kalbama apie dujas ar skysčius. Daugumos šilumos izoliavimo medžiagų šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo temperatūros yra beveik tiesinė [16]:

$$\lambda_t = \lambda_0 + bt \quad (11)$$

čia ir  $\lambda_t - \lambda_0$  šilumos laidumo koeficientai esant atitinkamai  $t$ , °C ir 0 °C temperatūrai;  $bt$  – temperatūros koeficientas, nustatomas eksperimentiniu būdu.

Įvairių medžiagų šilumos laidumo koeficiento reikšmės galima rasti norminėje ir techninėje literatūroje.



## 2. GYVENAMOJO NAMO ŠILDYMO SISTEMOS MATEMATINIO MODELIO SUDARYMAS

Sistemos modeliavimui ir analizei naudojamas MATLAB paketo Simulink programinis įrankis.

### 2.1. Pastato termodinamikos matematinio modelio sudarymas

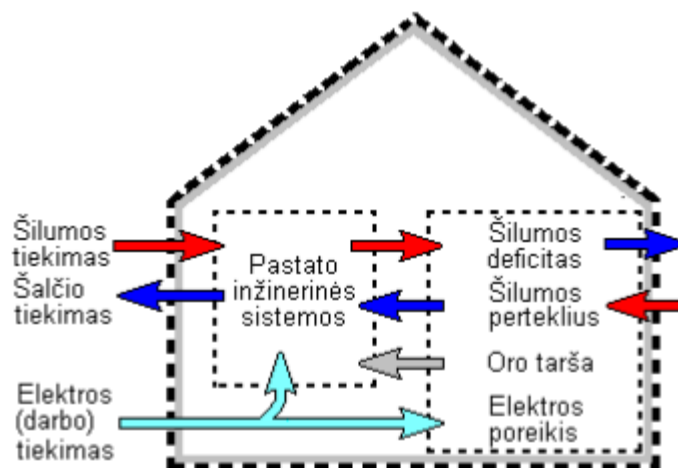
#### 2.1.1. Pastato sistemos energijos srautai

Pastatas - tai sudėtinga inžinerinė sistema, kurios funkcionavimą tiesiogiai lemia ją sudarantys elementai ir juose vykstantys procesai. Šie procesai savyje apjungia visus pastatą veikiančius išorinius ir vidinius veiksnius. Prie išorinių procesų priskiriama lauko oro drėgmė ir temperatūra, saulės skleidžiama spinduliuotė, krituliai bei vėjas. Vidiniai veiksniai yra šildymo sistema, pastato vėdinimo ir kondicionavimo sistema, žmonių veikla patalpoje ir joje veikiančios elektriniai prietaisai, kurie skleidžia šilumą. Šių procesų įtaką sunku tiksliai nustatyti, tam turi būti atliekama sudėtinga pastato analizė, todėl darbe detali pastato sistemos procesų analizė nėra atliekama [9].

Pastato sistema padalinama į tris atskirus, bet tarpusavyje glaudžiai susijusius elementus [9]:

- pastato atitvarų konstrukcijos;
- šildoma patalpa;
- pastato inžinerinės sistemos.

Pastatą sudarančių sistemų schema pateikta 2.11 paveiksle.



2.11 pav. Pastatą sudarančių sistemų schema [9]

Pastato konstrukcijų inžineriniai sprendimai daro didelę įtaką pastato energijos poreikiams. Pastato sudarančių konstrukcijų šiluminių varžų optimizavimas yra pagrindinė energijos suvartojimo efektyvumo pastate didinimo būdų [29].

Pastato neužtenka vien apšiltinti, reikia nustatyti optimalų balansą. Neapskaičiuotai didelis pastato sienų izoliavimas sumažins energijos poreikį šildymui, tačiau padidins energijos poreikį vėsinimui ir vėdinimui. Teisingai suprojektavus ir subalansavus pastato šiluminį režimą atsiranda galimybė išnaudoti išorinių ir vidinių veiksnių lemiamą energijos balansą. Nuo 2016 m. lapkričio 1 d. visi naujai projektuojami gyvenamieji pastatai turės atitikti A energinio naudingumo klasės reikalavimus. Palyginus A ir B energinio naudingumo klasės pastatus, matomas didelis šuolis tiek  $U$  vertėje (atitinkamos atitvaros projektinis šilumos perdavimo koeficientas ( $W/m^2K$ ), tiek ir šilumos izoliacijos storį. Šiandieninio gyvenamo namo sienos šiluminės izoliacijos storis priklausomai nuo panaudotų sienoms blokelių ar plytų, yra nuo 150 iki 200 mm. Atitinkamai nuo 2016 m. išorės sienos šilumos perdavimo koeficientas  $U$  turės būti 0,12 ( $W/m^2K$ ). Norint pasiekti tokį šilumos perdavimo koeficientą, sienos šilumos izoliacijos sluoksnis turės būti 300-350 mm. [7].

Antras pastato sistemą sudarantis elementas yra patalpa, kurioje turi būti užtikrinamos komforto sąlygos, šiame darbe apibrėžiamos kaip pageidaujama patalpos temperatūra ir tiekiamas šviežio oro kiekis į patalpą. Patalpoje vykstantys procesai yra laikomi pagrindiniais ir svarbiausiais, nes nuo šių procesų priklauso ir kitų pastato inžinerinių sistemų darbas.

Išskiriamos trys patalpoje vykstančių procesų būsenos [9]:

1. Kai patalpoje yra susidaręs šilumos deficitas, t. y. kai šilumos srautas, patenkantis į patalpą, yra mažesnis už šilumos srautą, atiduodamą patalpos aplinkai dėl šilumos mainų. Todėl susidaręs šilumos deficitas turi būti papildomai kompensuojamas šilumos srautu, tiekiamu į patalpą ir trunka tol, kol patalpa grįžta į šiluminę pusiausvyrą. Tokie procesai vyksta šildymo sezono metu, kai lauko oro temperatūra yra žema ir patalpos yra nuolatos šildomos.
2. Kai patalpoje yra susidaręs perteklinis šilumos kiekis. Tokia situacija susidaro, kai patalpai tiekiamas arba natūraliai pritekantis šilumos srauto kiekis viršija iš patalpos dirbtinai vėsinamą ar iš patalpos natūraliai atiduodamą šilumos srautą aplinkai. Tai dažniausiai pasitaiko dėl išorinių pastatą veikiančių veiksnių (saulės radiacijos ar lauko oro temperatūros) arba dėl vidinių veiksnių (žmonių veikla, elektros prietaisai).
3. Patalpų vėdinimas – nesvarbu, ar patalpa dažnai ar retai naudojama, jeigu ji bus nevėdinama, joje nebus galima užtikrinti komforto sąlygų dėl patalpoje esančio oro kokybės. Dėl šios priežasties patalpa turi būti nuolat vėdinama. Todėl, siekiant išlaikyti patalpoje reikalingą

mikroklimatą, turime sunaudoti papildomą energijos kiekį, šildydami patalpas. Šis reiškinys vadinamas šilumos nuostoliais dėl vėdinimo.

Pastato inžinerinių sistemų pagrindinis uždavinys yra užtikrinti komfortines sąlygas patalpoje, todėl šių sistemų analizė ir bendro subalansuoto darbo organizavimas yra sudėtingas, bet labai svarbus uždavinys, kurio turi būti siekiama. Magistro baigiamajame darbe, dėl tyrimo sudėtingumo, apsiribojama tik tų veiksnių analize, kurie daro didžiausią įtaką pastato mikroklimato energiniam balansui daugiabučiame gyvenamajame name. Tokie veiksniai yra šildymo ir vėdinimo sistemos, išorės daroma įtaka ir pastato konstrukcijų šiluminė varža.

### 2.1.2. Pastato išorės termodinamika

Pastato konstrukcinė dalis yra sudaryta iš  $N$  skaičiaus sluoksnių statybinių medžiagų, kurių storis ir savybės skiriasi. Kad nustatytume visus šiluminius nuostolius, pirmiausia reikia įvertinti kiekvieno tarpinio sienos sluoksnio paviršių temperatūrą. Iš apskaičiuotų sluoksnių temperatūros atimami šilumos srauto tankio ir šiluminės varžos tarp žinomos ir nežinomos temperatūros sandauga. Jeigu skaičiavimai atliekami prieš šilumos srauto sklidimo kryptį, tuomet reikia keisti ženklą (iš  $+$  į  $-$ ). Kiekvienoje pastato sienos konstrukcijos sluoksnyje temperatūra keičiasi tiesiškai. Temperatūros kitimo tiesės kampą su horizontalia linija lemia šilumos laidumo koeficientas, t. y., kuo didesnis šilumos laidumo koeficientas, tuo horizontalesnė tiesė [9].

Pirmosios pastato sienos konstrukcijos sluoksnio šiluminio balanso sudarymas:

Pirmojo sluoksnio sienelės paviršiaus temperatūra (2.12 paveikslas) aprašoma šilumos balanso 12 lygtimi [10]. Supaprastinę lygtį gauname temperatūros, kuri sklinda iš patalpos į antrąjį pastato konstrukcijos sluoksnį. Šiluminio balanso lygtis - 13. Pastato pirmojo sluoksnio matematinis modelis su dviem temperatūros mazgais, sudaromas su Matlab Simulink programiniu paketu ir yra pavaizduotas 2.13 paveiksle.

$$C_{p1}\rho_1 A_1 \frac{L_1}{2} \frac{dT_1}{dt} = hA_1(T_{in} - T_1) + hA_1(T_{in} - T_1) - \frac{k_1 A_1}{L_1}(T_1 - T_2) \quad (12)$$

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{h(T_{in}-T_1) - \frac{2k_1}{L_1}(T_1-T_2)}{C_{p1}\rho_1 A_1 \frac{L_1}{2}} \quad (13)$$

čia:

$C_p$  – medžiagos šiluminė talpa (J/kgK);

$\rho$  – medžiagos tankis (kg/m<sup>3</sup>);

$A$  – sienelės plotas (m<sup>2</sup>);

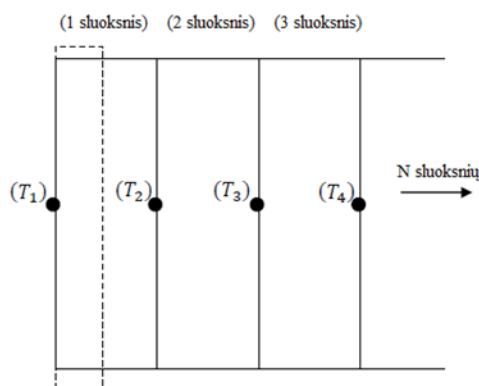
$L$  – sienelės storis (m);

$h$  – šilumos perdavimo koeficientas (W/m<sup>2</sup>K);

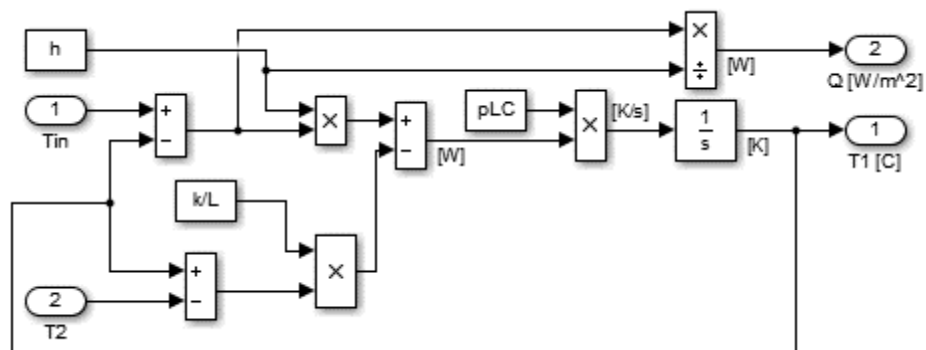
$T_{in}$  – patalpos temperatūra (K);

$T_1$  – medžiagos paviršiaus temperatūra (K);

$k$  – medžiagos šiluminis laidumas (W/mK).



2.12 pav. Šilumos balansas pirmajame sluoksnyje [12]



2.13 pav. Pirmojo pastato sienos sluoksnio šiluminio balanso sudarymas

Antrosios pastato konstrukcijos sluoksnio šiluminio balanso sudarymas [10]:

Siekiant sužinoti antrojo pastato sienos sluoksnio (2.14 pav.) patiriamus nuostolius, reikia rasti tarpinių paviršių temperatūras  $T_2$  ir  $T_3$ . Paviršiaus temperatūra tarp 1 ir 3 sluoksnių aprašomos

lygtimi 14, supaprastinus gauname lygtį 15. Pastato sieną, kuri yra sudaryta iš  $n$  skaičiaus sluoksnių tarpinių paviršių temperatūros, aprašoma 16 lygtimi. Sudarytas antrosios pastato konstrukcijos sluoksnio modelis pateikiamas 2.15 paveiksle.

$$(C_{p1}\rho_1 A_1 \frac{L_1}{2} + C_{p2}\rho_2 A_2 \frac{L_2}{2}) \frac{dT_1}{dt} = \frac{k_1 A_1}{L_1} (T_1 - T_2) - \frac{k_2 A_2}{L_2} (T_2 - T_3) \quad (14)$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{\frac{k_1}{L_1}(T_1 - T_2) - \frac{k_2}{L_2}(T_2 - T_3)}{C_{p1}\rho_1 \frac{L_1}{2} + C_{p2}\rho_2 \frac{L_2}{2}} \quad (15)$$

$$\frac{dT_n}{dt} = \frac{\frac{k_{n-1}}{L_{n-1}}(T_{n-1} - T_n) - \frac{k_n}{L_n}(T_n - T_{n+1})}{C_{pn-1}\rho_{n-1} \frac{L_{n-1}}{2} + C_{pn}\rho_n \frac{L_n}{2}} \quad (16)$$

čia:

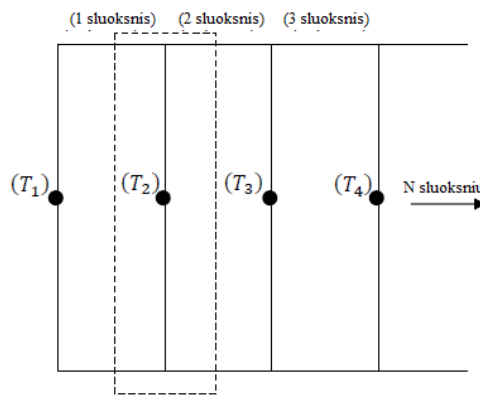
$n$  - tarpinių sienelių skaičius ( $N$ );

$A$  - sienelės plotas ( $m^2$ );

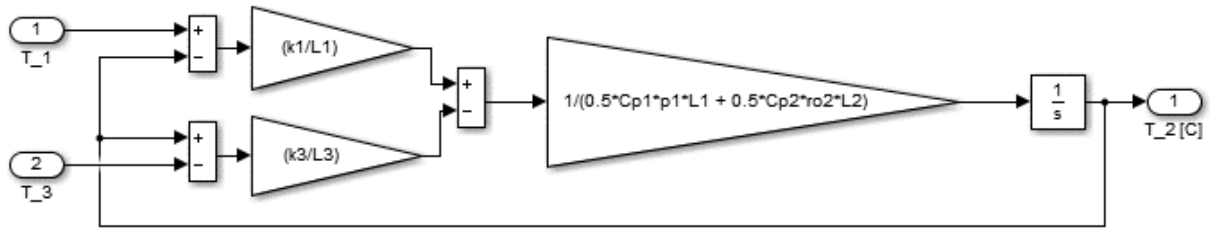
$L$  - sienelės storis ( $m$ );

$T$  - medžiagos paviršiaus temperatūra ( $K$ );

$k$  - medžiagos šiluminis laidumas ( $W/mK$ ).



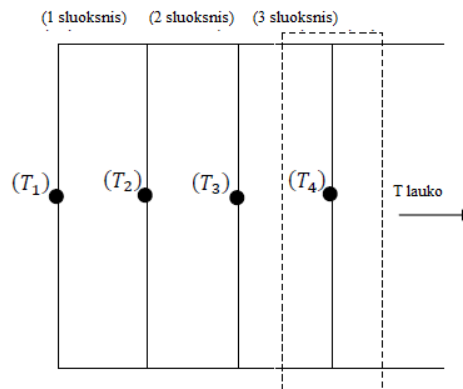
2.14 pav. Šilumos balansas antrajame sluoksnyje [10]



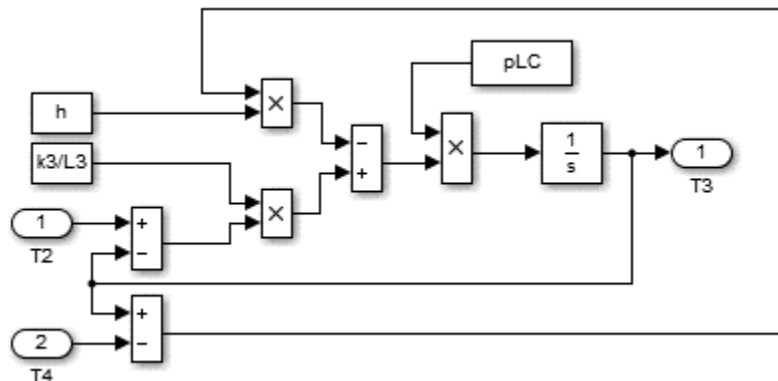
2.15 pav. Antrojo pastato sienos sluoksnio šiluminio balanso sudarymas

Paskutiniojo pastato konstrukcijos sluoksnio šiluminio balanso sudarymas (2.16 pav.):

Siekiant rasti tarpinių paviršių temperatūras  $T_3$  - priešpaskutinio sienos sluoksnio ir  $T_4$  - sluoksnio, kuris turi tiesioginį ryšį su lauko oru, apskaičiuojamos temperatūros iš abiejų sluoksnio pusių. Paviršių temperatūros aprašomos 17 lygtimi [10]: Pastato paskutiniojo sienos sluoksnio matematinis modelis su dviem temperatūros mazgais yra sudaromas su Matlab Simulink programiniu paketu ir yra pavaizduotas 2.17 paveiksle.



2.16 pav. Šilumos balansas paskutiniajame sienos sluoksnyje. [10]



2.17 pav. Paskutiniojo pastato sienos sluoksnio šiluminio balanso sudarymas

$$\frac{dT_3}{dt} = \frac{\frac{2k_3}{L_3}(T_3 - T_4) - h(T_4 - T_{lauko})}{C_{p3}\rho_3 A_3 \frac{L_3}{2}} \quad (17)$$

čia:

$C_p$  – medžiagos šiluminė talpa (J/kgK);

$\rho$  – medžiagos tankis (kg/m<sup>3</sup>);

$A$  – sienelės plotas (m<sup>2</sup>);

$L$  – sienelės storis (m);

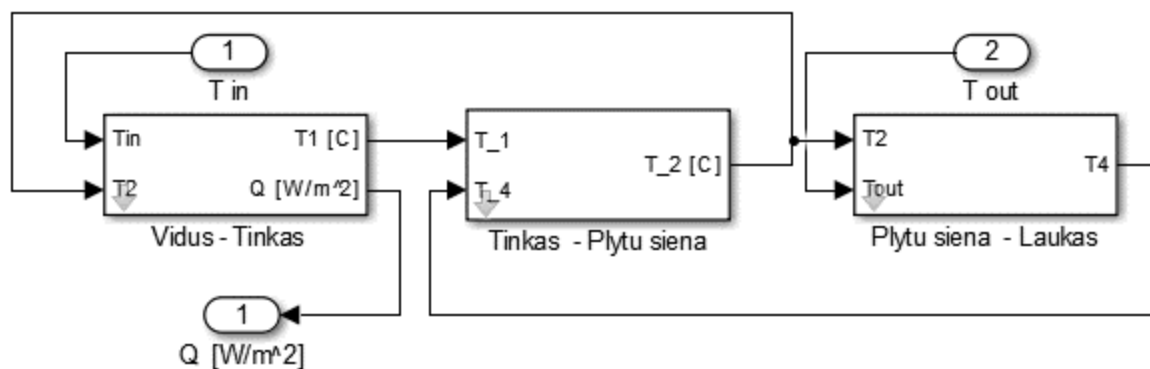
$T_{in}$  – patalpos temperatūra (K);

$T_1$  – medžiagos paviršiaus temperatūra (K);

$h$  – šilumos perdavimo koeficientas (W/m<sup>2</sup>K);

$k$  – medžiagos šiluminis laidumas (W/mK).

Pastato sienos modelis su keturiais temperatūros mazgais yra įgyvendinamas su Matlab Simulink programiniu paketu, modelis vaizduojamas 2.18 paveiksle. Remiantis aukščiau pavaizduotomis šiluminio balanso lygtimis, taip pat sudarytas matematinis modelis, imituojantis per pastato grindis, stogą bei langus prarandamą šilumos energiją. Panaudoti modeliavimo parametrai pateikiami 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 lentelėse. Sudarytas pastato sienos modelis imituoja patiriamus nuostolius per pastato konstrukcijas. Visa patalpų temperatūra apskaičiuojama, sudarius pilną kambario matematinį modelį.



2.18 pav. Pastato sienos modelis, sukurtas Matlab Simulink programiniu paketu

### 2.1.3. Pastato vidaus mikroklimatas

Patalpos energijos poreikius apsprendžia trys pagrindiniai veiksniai [29]:

- patalpai keliami komforto reikalavimai;
- pastato konstrukcijų šiluminės savybės;
- pastato (patalpos) inžinerinės sistemos.

Šildymo sezono laikotarpiu pastatas, kuriame yra palaikomos komforto sąlygos ir pastatą supanti aplinka nėra termodinaminėje pusiausvyroje, t. y., patalpos oro temperatūra yra aukštesnė už lauko oro temperatūrą. Dėl atsiradusio temperatūrų potencialų skirtumo vyksta šilumos mainai, atitinkamai per pastato išorines konstrukcijas patiriami šilumos nuostoliai, kuriuos turi kompensuoti šildymo sistema. Patalpos mikroklimatą palaikančias sistemas išskiriame į dvi dalis [28, 9]:

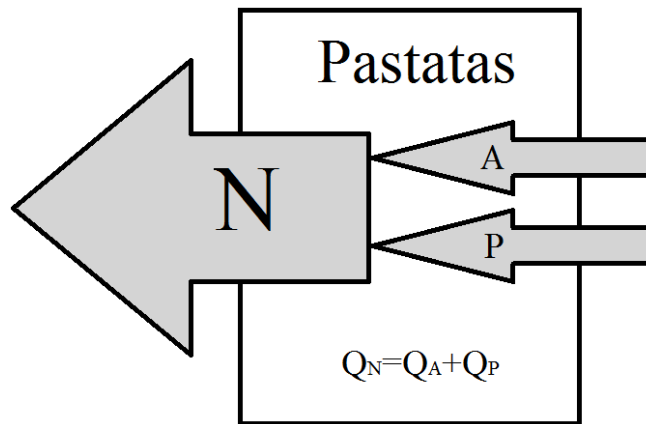
- pasyviašias mikroklimato kondicionavimo sistemas;
- aktyviašias mikroklimato kondicionavimo sistemas.

Pasyvioji mikroklimato kondicionavimo sistema yra sudaryta iš pastato atitvarų ir pastatą supančios aplinkos. Tai pastato konstrukcijose akumuliuojama šiluminė energija, šilumos pritekėjimas nuo saulės spinduliuotės, žmonių veiklos patalpoje bei elektros prietaisų. Šie šilumos srautai nėra nuolatiniai ir sąlyginai menkai prognozuojami. Kai pasyviosios mikroklimato kondicionavimo sistemos sukuriama šilumos kiekio neužtenka, komforto sąlygoms užtikrinti pasitelkiama aktyvioji mikroklimato kondicionavimo sistema [29, 28].

Aktyviają mikroklimato kondicionavimo sistemą sudaro inžinerinės sistemos, kurių perduodama šiluminė energija yra gaunama transformuojant energiją (deginant dujas, medieną ar panaudojus elektros energiją). Principinė į pastatui tiekiamų energijos srautų schema pateikta 2.19 paveiksle.

Lygiagretus šių dviejų srautų valdymas yra sudėtingas uždavinys, nes sunku prognozuoti pasyviosios mikroklimato kondicionavimo sistemos išskiriamos šilumos kiekį [29, 9].



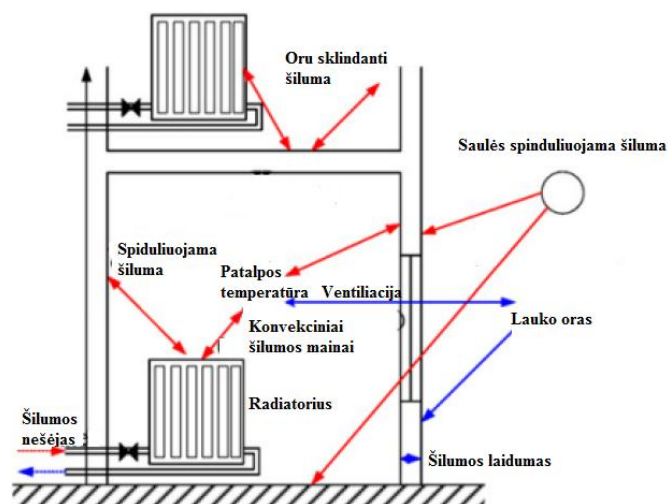


2.19 pav. Energijos srautų principinė schema [9]

*Pastaba: N - patalpos šilumos nuostoliai, P - pasyvioji mikroklimato kondicionavimo sistema, A - aktyvioji mikroklimato kondicionavimo sistema.*

Šilumos perdavimo procesas (2.20 pav.) patalpoje apima [9]:

- šilumos perdavimas iš karšto vandens radiatoriaus;
- saulės spinduliuojama šiluma;
- šilumos mainų per pastato išorines sienas;
- šilumos perdavimas per stiklus be šiluminės inercijos;
- šilumos nuostoliai dėl ventiliacijos;
- šilumos perdavimo tarp pastato patalpų.



2.20 pav. Patalpoje vykstantys šilumos perdavimo procesas [12]

Patalpai reikalingas tiekti energijos srautas apskaičiuojamas sudarant patalpos galių balansą [9]:

$$Q_{\text{int}} = \Sigma Q_{\text{išorės}} + \Sigma Q_{\text{int}} + Q_{\text{vėdinimo}} \quad (18)$$

čia:

$Q_{\text{išorės}}$  – šilumos nuostoliai per pastato išorę (W);

$Q_{\text{int}}$  – vidinė patalpos termodinamika (W);

$Q_{\text{vėdinimo}}$  – šilumos nuostoliai dėl patalpos vėdinimo (W).

Šilumos nuostoliai dėl pastato išorinių konstrukcijų [9]:

$$Q_{\text{išorės}} = Q_{\text{atitvoros}} + Q_{\text{grindys}} + Q_{\text{stogas}} + Q_{\text{langai}} \quad (19)$$

Vidinė patalpos termodinamika apskaičiuojama pagal formulę [9]:

$$Q_{\text{int}} = \frac{h_{\text{int}} A (T_{\text{in}} - T_{\text{int}})}{C_{p,\text{int}} m_{\text{int}}} \quad (20)$$

čia:

$h_{\text{int}}$  – vidinių atitvarų šilumos perdavimo koeficientas,  $W/(m^2K)$ ;

$A$  – vidinių atitvarų plotas,  $m^2$ ;

$T_{\text{int}}$  – apskaičiuota vidaus temperatūra,  $^{\circ}C$ ;

$T_{\text{in}}$  – vidaus temperatūra,  $^{\circ}C$ ;

$C_p$  – medžiagos šiluminė talpa  $J/kgK$ ;

$m_{\text{int}}$  – Patalpos oro keitimosi koeficientas.

Šilumos nuostoliai dėl patalpos vėdinimo apskaičiuojami pagal formulę [9]:

$$Q_{\text{vėdinimo}} = m_{\text{int}} (T_{\text{in}} - T_{\text{lauko}}) \quad (21)$$

čia:

$m_{\text{oro}}$  – oro masės judėjimo greitis  $kg/s$ ;

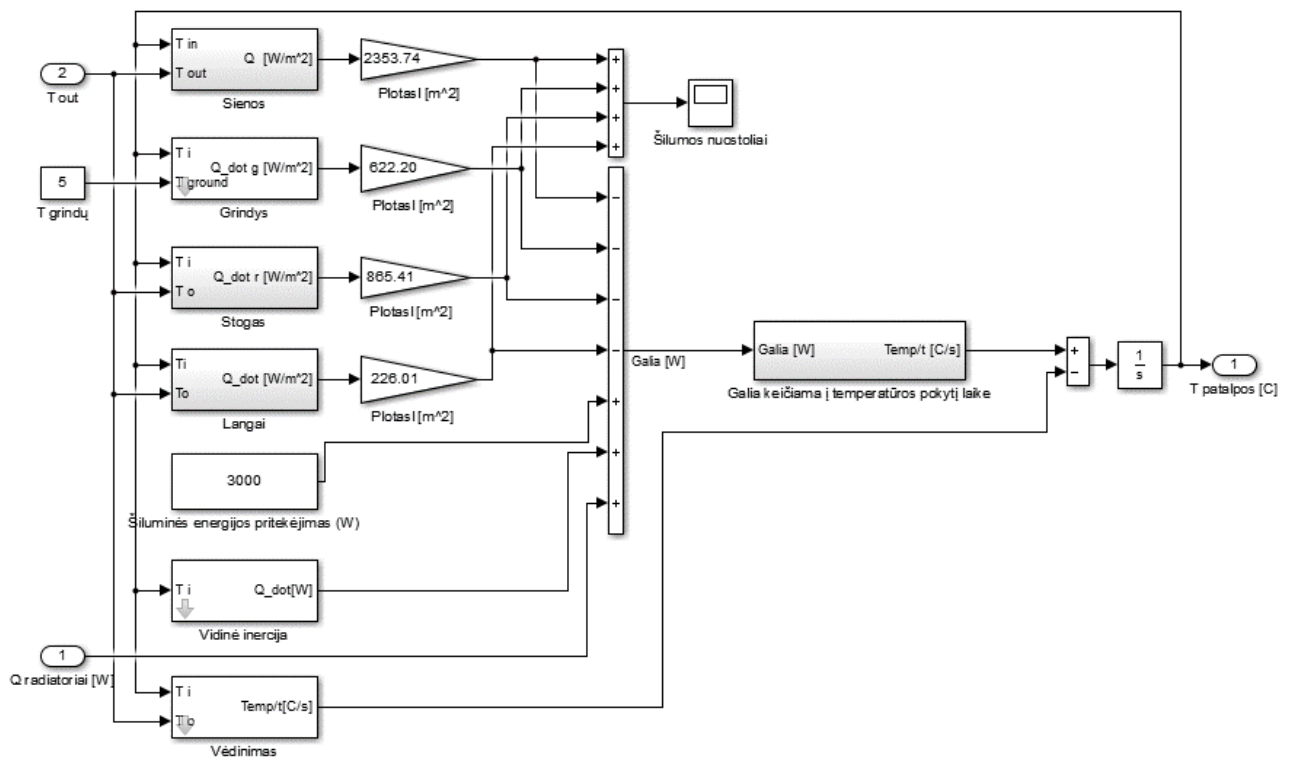
$T_{\text{lauko}}$  – lauko temperatūra,  $^{\circ}C$ ;

$T_{in}$  – vidaus temperatūra, °C.

Iš aukščiau pateiktų formulių sudaroma patalpos mikroklimato šiluminio balanso lygtis [9]:

$$Q_{\text{kambario}} + Q_{\text{radiatoriai}} + Q_{\text{int}} = Q_{\text{atitvoros}} + Q_{\text{grindys}} + Q_{\text{stogas}} + Q_{\text{langai}} + Q_{\text{vėdinimo}} + Q_{\text{radiatoriai}} \quad (22)$$

Remiantis pastato ir jo patalpos mikroklimato balanso lygtimis, aukščiau išanalizuotomis MATLAB Simulink programiniu paketu, sudarytas pastato termodinamines savybes imituojantis sistemos matematinis modelis, kuris pavaizduotas 2.21 paveiksle.

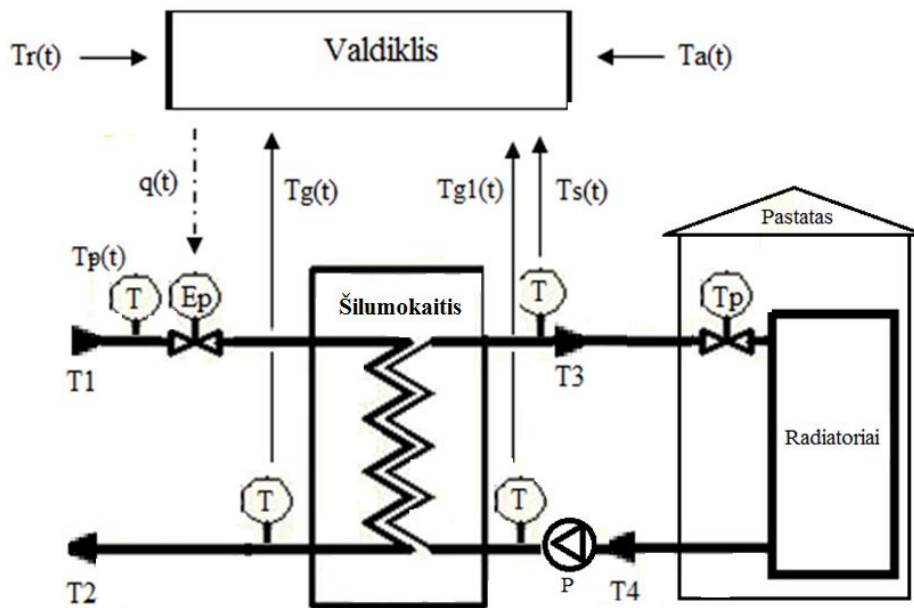


2.21 pav. Pastato termodinamines savybes imituojantis modelis

## 2.2. Šildymo sistemos matematinio modelio sudarymas

### 2.2.1. Šildymo sistema

Magistro baigiamajame darbe nagrinėjama dvivamzdė radiatorinė šildymo sistema. Šiluma į patalpas tiekama iš pastato šilumos punkto, kuriame šiluma tiekama iš miesto centralizuotų šilumos tinklų. Šilumos srautas miesto centralizuotose šilumos tinkluose reguliuojamas kiekybiškai [14]. Sudarant šildymo sistemos modelį skaičiuojama, kad tiekiamo termofikacinio vandens temperatūra siekia  $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ , grįžtamo  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Šilumos srauto tiekimas į patalpą atliekamas reaguojant į besikeičiančias klimatinės sąlygas, pagal vartotojo sudarytą šildymo kreivę. Nagrinėjama šildymo sistema pavaizduota 2.22 paveiksle.



2.22 pav. Šildymo sistema ir ją sudarantys elementai

*Pastaba:  $T_r$  – vartotojo nustatyta pageidaujama temperatūra;  $T_a(t)$  – lauko oro temperatūra;  $T_g(t)$  – grąžinamo į tinklus termofikacinio vandens srauto temperatūra;  $T_s(t)$  – tiekiamo termofikacinio vandens pastato šildymo sistemai srauto temperatūra;  $q(t)$  – Elektrinės pavaros valdymo signalai;  $T_1$  – Tiekiamas iš tinklų termofikacinis vanduo;  $T_2$  – grąžinamas į tinklus termofikacinis vanduo;  $T_3$  – tiekiamas termofikacinis vanduo į pastato šildymo sistema;  $T_4$  – grąžinamas termofikacinis vanduo iš pastato šildymo sistemos;  $E_p$  – elektrinė pvara;  $T$  – temperatūros jutiklis.*

Pagal šiuo metu plačiai taikomas nepriklausomas šilumos vartotojų prijungimo prie centrinio šildymo sistemų schemas, šilumos srautas pastatų vidaus uždaramame kontūre reguliuojamas kokybiniu principu - energijos srautas reikalingas tiekti į pastato šildymo sistemą, kurioje cirkuliuoja pastovus termofikacinio vandens debitas, valdomas reguliuojant pastato šildymo sistemos kontūro šilumnešio srautą. Modelyje priimta, kad šildymo sistemose, grįžtamo vandens temperatūra lygi +40 °C, kintantis šilumos srautas yra perduodamas, keičiant tiekiamo šilumnešio temperatūrą (debitas pastovus) [9; 19].

### 2.2.2. Šildymo radiatorius

Šildymo prietaisų paskirtis yra perduoti šildymo sistemoje cirkuliuojančio vandens į patalpas atnešama šiluminė energija ir taip jas šildyti. Idealiu atveju, jeigu karšto vandens pasiskirstymas visame radiatoriuje būtų vienodas, atiduodamos šilumos kiekį radiatoriuje būtų galima aprašyti 13 lygtimi. Radiatoriaus išspinduliuojamą šilumos kiekį skaičiuosime, taikant logaritminį temperatūrų skirtumo metodą, pavaizduotą 23 lygtyje [8, 22].

$$\Delta t = \frac{T_{rad,out} - T_{rad,in}}{\ln\left(\frac{T_{rad,in} - T_{patalpos}}{T_{rad,out} - T_{patalpos}}\right)} \quad (23)$$

Radiatoriaus šilumos perdavimo koeficientas išreiškiamas 24 lygtyje.

$$q_{perd} = UA\Delta t \quad (24)$$

Radiatoriaus patalpai atiduodamos šilumos kiekis  $q_{pat}$  išreiškiamas, sudarant energijos balansą pavaizduotą 25 lygtyje.

$$q_{vand} = Cp_w \cdot m_s (T_{rad,out} - T_{rad,in}) \quad (25)$$

Įtekančio į radiatorių vandens šiluminė energija yra išreiškiamą 24 lygtyje, o ištekančio vandens temperatūra apskaičiuojama 26 lygtimi [8].

$$q_{rad} = q_{vand} - q_{perd} = Cp_w \cdot m \frac{dT_{rad,out}}{dt} \quad (26)$$

$$\frac{dT_{rad,out}}{dt} = \frac{Cp_w \cdot m(T_{rad,in} - T_{rad,out}) - UA\Delta t}{Cp_w \cdot m} \quad (27)$$

čia:

$T_{rad,in}$  – tiekiamo į radiatorių vandens temperatūra ( $^{\circ}C$ );

$T_{rad,out}$  – iš radiatoriaus grįžtančio vandens temperatūra ( $^{\circ}C$ );

$T_{patalpos}$  – patalpos oro temperatūra ( $^{\circ}C$ );

$m_s$  – termofikacinio vandens srautas antrinėje šilumokaičio pusėje (kg/s);

$m$  - termofikacinio vandens srautas pratekantis per radiatorių (kg/s);

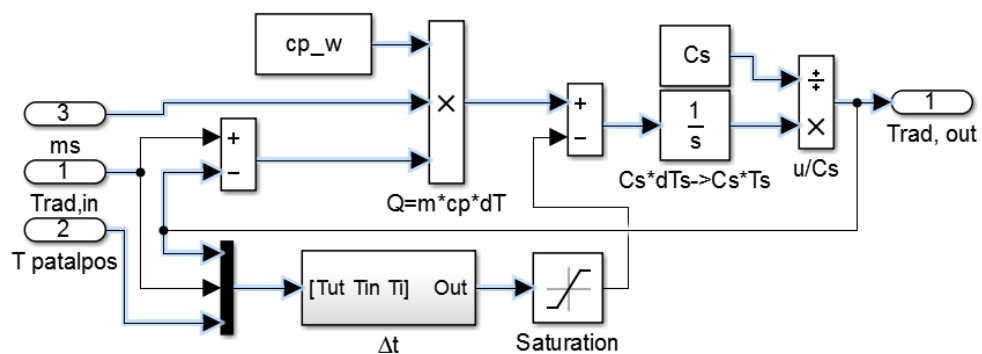
$U$  – radiatoriaus šilumos perdavimo koeficientas ( $W/m^2 \cdot K$ );

$A$  – radiatoriaus plotas ( $m^2$ );

$q_{rad}$  - radiatoriaus atiduodamas šilumos kiekis (W);

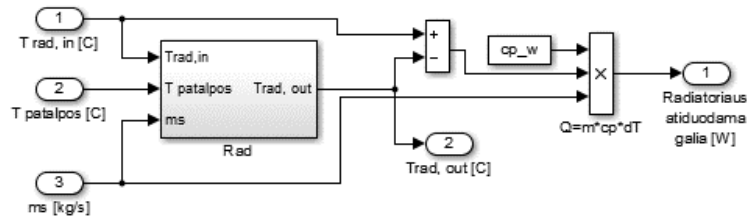
$Cp_w$  – vandens šiluminė talpa (J/kg  $^{\circ}C$ ).

25 lygtyje matyti, kad atiduodamos šilumos kiekį galima reguliuoti keičiant vandens srautą ( $m$ ) per radiatorių arba tiekiamo į radiatorių vandens temperatūrą ( $T_{rad,in}$ ). 2.23 paveiksle pavaizduotas radiatoriaus modelis realizuotas Matlab Simulink programiniu paketu, naudojant 23, 24, 25, 26, 27 lygtis radiatorių šilumos mainams aprašyti. Modelis pagal tiekiamo į radiatorius termofikacinio vandens temperatūrą bei srautą pratekanti per radiatorių, apskaičiuoja išspinduliuojamą į aplinką ir iš radiatoriaus grįžtančio vandens temperatūrą.



2.23 pav. Radiatoriaus matematinis modelis realizuotas Matlab Simulink programiniu paketu

Remiantis energijos balansą aprašančia 26 lygtimi su Matlab Simulink programiniu paketu, sudaromas matematinis modelis, pavaizduotas 2.24 paveiksle, kuriuo išreiškiama radiatoriaus galia.

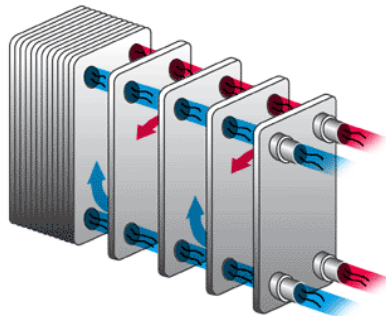


2.24 pav. Radiatoriaus galia

### 2.2.3. Šilumokaitis

Šilumokaičiu vadinamas įrenginys, kuriame vienas šilumnešis perduoda šilumą kitam. Pagal veikimo principą šilumokaičiai yra trijų tipų: rekuperaciniai, degeneraciniai ir maišymosi. Šilumnešiais gali būti dujos, skysčiai ir kietosios medžiagos. Jeigu šilumokaitis šildo šilumnešį, toks šilumokaitis vadinamas šildytuvu, jei garina šilumnešį – garintuvu, o jei aušina – aušintuvu. Maišymosi šilumokaičiuose šiluma nuo šildančiojo skysčio perduodama šildomajam jiems maišantis [30]. Pagal skysčio judėjimo kryptį visi šilumokaičiai skirstomi į pasrovinius, priešsrovinius ir skersasrovinius. Pasroviniuose šilumokaičiuose abu šilumos nešėjai teka viena kryptimi, priešsroviniuose – priešinga, o skersasroviniuose – skersai vienas kito atžvilgiu. Tyrimais nustatyta, kad efektyviausi yra priešsroviniai šildytuvai, o prasčiausiomis – pasroviniai [24].

Šildymo sistemos modelio sudarymui nagrinėjamas plokštelinis, priešpriešinio srauto šilumokaitis (2.25 paveikslas), kuris turi atlikti šilumos mainus tarp dviejų atskirų sistemų, t.y., tarp miesto šilumos perdavimo tinklą ir pastato šildymo sistemos. Šilumos mainų paviršius susideda iš profiliuotų pagamintų iš nerūdijančio plieno plokštelių, sulituotų į paketą. Termofikacinis vanduo, dalyvaujantys šilumos perdavimo procese, teka kanalais, suformuotais tarp kaitinimo plokštelių kas antrąjį kanalą pakaitomis.



2.25 pav. Plokštelinis šilumokaitis [6]

Šilumokaičio termodinaminis balansas sudaromas panašiai kaip radiatoriaus bei skaičiuojamas naudojant logaritminį temperatūrų skirtumo metodą [8].

$$\Delta t = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\ln\left(\frac{T_{h,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{c,in}}\right)} \quad (28)$$

Šilumokaitis aprašomas šiluminio balanso 29 ir 30 lygtimis. Šilumos perdavimas tarp abiejų šilumokaičio pusių apibūdina konvekciniai šilumos mainai tarp skysčio ir šilumokaičio sienelių [12].

$$Cp_w \cdot m_h \frac{dT_{h,out}}{dt} = Cp_w \cdot m_h (T_{h,in} - T_{h,out}) - \Delta t \quad (29)$$

$$Cp_w \cdot m_c \frac{dT_{c,out}}{dt} = Cp_w \cdot m_c (T_{c,in} - T_{c,out}) - \Delta t \quad (30)$$

Šilumokaičio temperatūros skirtumas tarp pirminės ir antrinės pusės aprašomas tiesinėmis 31, 32, 33 lygtimis [12].

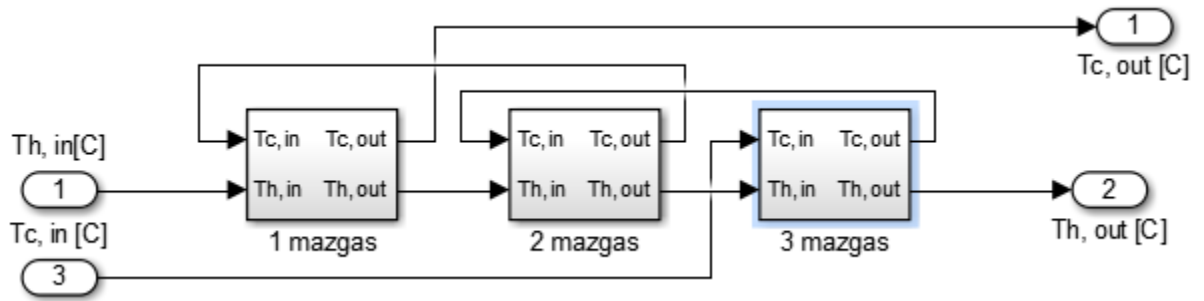
$$Cp_w \cdot m_h \frac{dT_{h,out}}{dt} = Cp_w \cdot m_h (T_{h,in} - T_{h,out}) - h_h A_h \left( \frac{T_{h,in} + T_{h,out}}{2} - T_w \right) \quad (31)$$

$$Cp_w \cdot m_c \frac{dT_{c,out}}{dt} = Cp_w \cdot m_c (T_{c,in} - T_{c,out}) + h_c A_c \left( T_w - \frac{T_{c,in} + T_{c,out}}{2} \right) \quad (32)$$

$$Cp_{wall} \cdot m_{wall} \frac{dT_{wall}}{dt} = h_h A_h \left( \frac{T_{h,in} + T_{h,out}}{2} - T_w \right) - h_c A_c \left( T_w - \frac{T_{c,in} + T_{c,out}}{2} \right) \quad (33)$$

Šilumos perdavimo koeficientas yra nevienodai pasiskirstęs visame šilumokaičio šilumos perdavimo paviršiuje [8]. Siekiant tiksliau modeliuoti temperatūros pasiskirstymą visame šilumokaičio šilumos perdavimo paviršiuje. Sudarant šilumokaičio matematinį modelį Matlab Simulink programiniu paketu, šilumokaitis yra dalinamas į tris atskirus mazgus 2.26 paveikslas. Trijų mazgų šilumokaičio šilumos balansas aprašomas lygtimis nuo 34 iki 42 [12].





2.26 pav. Pirminės šilumokaičio pusės šilumos balanso 34, 35, 36 lygtys [12]:

$$\frac{dT_{h,2}}{dt} = \frac{Cp_w \cdot m_h (T_{h,1} - T_{h,2}) - h_h A_h \left( \frac{T_{h,1} + T_{h,2}}{2} - T_{w,1} \right)}{Cp_w \cdot m_h} \quad (34)$$

$$\frac{dT_{h,3}}{dt} = \frac{Cp_w \cdot m_h (T_{h,2} - T_{h,3}) - h_h A_h \left( \frac{T_{h,2} + T_{h,3}}{2} - T_{w,2} \right)}{Cp_w \cdot m_h} \quad (35)$$

$$\frac{dT_{h,4}}{dt} = \frac{Cp_w \cdot m_h (T_{h,3} - T_{h,4}) - h_h A_h \left( \frac{T_{h,3} + T_{h,4}}{2} - T_{w,3} \right)}{Cp_w \cdot m_h} \quad (36)$$

Antrinės šilumokaičio pusės šilumos balanso 37, 38, 39 lygtys [12]:

$$\frac{dT_{c,1}}{dt} = \frac{Cp_w \cdot m_h (T_2 - T_1) - h_c A_c \left( T_{w,2} - \frac{T_{c,2} + T_{c,1}}{2} \right)}{Cp_w \cdot m_c} \quad (37)$$

$$\frac{dT_{c,2}}{dt} = \frac{Cp_w \cdot m_h (T_3 - T_2) - h_c A_c \left( T_{w,2} - \frac{T_{c,3} + T_{c,2}}{2} \right)}{Cp_w \cdot m_c} \quad (38)$$

$$\frac{dT_{c,3}}{dt} = \frac{Cp_w \cdot m_h (T_4 - T_3) - h_c A_c \left( T_{w,3} - \frac{T_{c,4} + T_{c,3}}{2} \right)}{Cp_w \cdot m_c} \quad (39)$$

Remiantis aukščiau pateiktomis pirminės ir antrinės šilumokaičio pusės šilumos balanso lygtimis sudaromos lygtys 40, 41, 42, kurios aprašo kiekvieno šilumokaičio mazgo temperatūrą [12].

$$Cp_{wall} \cdot m_{wall,1} \frac{dT_{wall,1}}{dt} = \left( \frac{T_{h,1} + T_{h,2}}{2} \right) - h_c A_c \left( T_{w,1} - \frac{T_{c,1} + T_{c,2}}{2} \right) \quad (40)$$

$$Cp_{wall} \cdot m_{wall,2} \frac{dT_{wall,2}}{dt} = \left( \frac{T_{h,2} + T_{h,3}}{2} \right) - h_c A_c \left( T_{w,1} - \frac{T_{c,2} + T_{c,3}}{2} \right) \quad (41)$$

$$Cp_{wall} \cdot m_{wall,3} \frac{dT_{wall,3}}{dt} = \left( \frac{T_{h,3} + T_{h,4}}{2} \right) - h_c A_c \left( T_{w,1} - \frac{T_{c,3} + T_{c,4}}{2} \right) \quad (42)$$

čia:

$T_{h,in}$  - tiekiamo į šilumokaičio pirminę pusę termofikacinio vandens temperatūra ( $^{\circ}C$ );

$T_{h,out}$  - iš šilumokaičio pirminės pusės grįžtančio termofikacinio vandens temperatūra ( $^{\circ}C$ );

$M_h$  - yra šilumokaičio pirminės pusės termofikacinio vandens srautas (kg/s);

$\theta_{LMTD}$  - logaritminis temperatūrų skirtumas ( $^{\circ}C$ );

$T_{c,in}$  - grąžinamo iš šildymo sistemos į šilumokaičio antrinę pusę termofikacinio vandens temperatūra ( $^{\circ}C$ );

$T_{c,out}$  - tiekiamo į pastato šildymo sistemą iš šilumokaičio antrinės pusės termofikacinio vandens temperatūra ( $^{\circ}C$ );

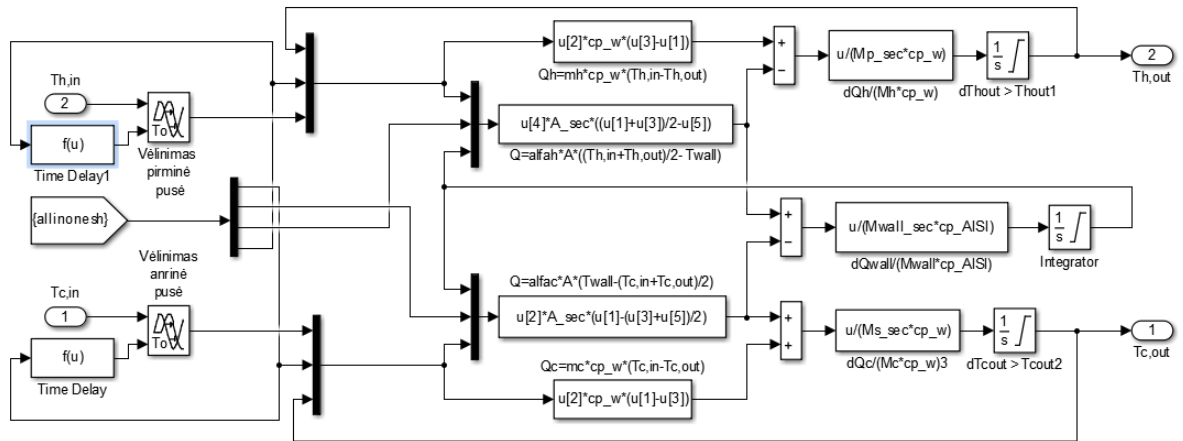
$M_c$  - yra šilumokaičio pirminės pusės termofikacinio vandens srautas (kg/s);

$T_w$  - šilumokaičio sienelės paviršiaus temperatūra ( $^{\circ}C$ );

$H_h$  - pirminės šilumokaičio pusės šilumos perdavimo koeficientas ( $W/m^2K$ );

$H_c$  - antrinės šilumokaičio pusės šilumos perdavimo koeficientas ( $W/m^2K$ ).

Šilumokaičio vieno mazgo matematinis modelis sudarytas Matlab Simulink programiniu paketu pavaizduotas 2.27 paveiksle.



2.27 pav. Šilumokačio vieno mazgo matematinis modelis

### 2.2.4. Termostatinis radiatoriaus vožtuvas

Termostatinis radiatoriaus vožtuvas (TRV) kontroliuoja karšto vandens debitą per radiatorių, pagal patalpų temperatūrą. Jutiklis yra pavara, kuri pasyviai koreguoja vožtuvo atidarymą, priklausomai nuo kambario temperatūros. Jei patalpos temperatūra yra žemesnė negu termostate nustatyta reikšmė, termostatas atidaro ventilių ir šiltas vanduo patenka į radiatorių. Kai patalpos oras sušyla iki nustatytos reikšmės, termofikacinio vandens tiekimas į radiatorių yra nutraukiamas. Termostatinio ventilio elgsena aprašoma 43 lygtyje pateikiama formule [12]. Termostatinio radiatoriaus vožtuvo matematinis modelis realizuotas MATLAB Simulink programos aplinkoje pavaizduotas 2.28 paveiksle.

$$m = f(\Delta T_{nust-kamb}) \frac{K_{vs} \sqrt{\Delta P \rho}}{3600} \quad (43)$$

Čia:

$\Delta T_{nust-kamb}$  – temperatūros skirtumas tarp nustatytos ir esamos kambario temperatūros ( $^{\circ}\text{C}$ );

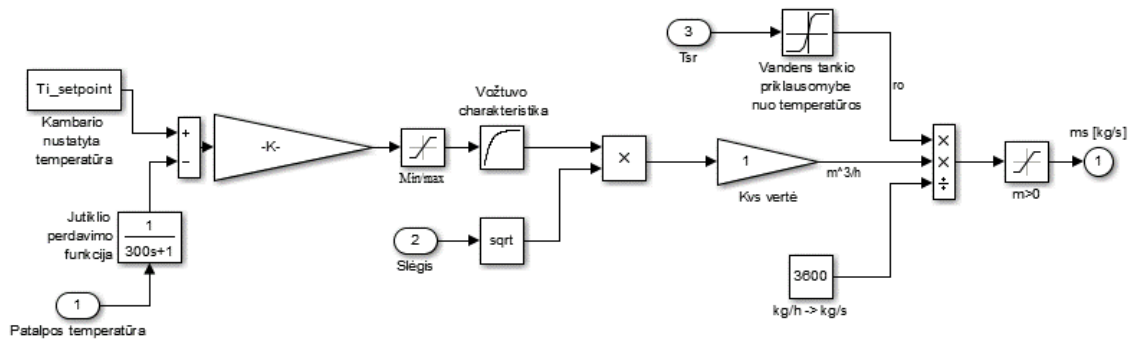
$\Delta P$  – slėgis sistemoje (Pa);

$m$  - termofikacinio vandens srautas, pratekantis per radiatorių (kg/s);

$K_{vs}$  – pro vožtuvą pratekančio skysčio debitas, kai jis yra pilnai atidarytas ( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$\rho$  – vandens tankis, priklausomai nuo temperatūros ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$f$  – vožtuvo atsidarymo priklausomybė nuo temperatūros ( $T_{kamb} \text{kg/s}$ ).



2.28. pav. Radiatoriaus termostatinis ventilis

### 2.2.5. Srauto valdymo vožtuvas ir PI reguliatorius

Į šildymo sistemą tiekiamo termofikacinio vandens temperatūrą kontroliuoja vožtuvas su elektrine pavara, keisdamas termofikacinio vandens srautą pirminėje šilumokaičio pusėje. Vožtuvas yra valdomas valdiklio, naudojant PI valdymo dėsnį. Tiekiamo į šildymo sistemą termofikacinio vandens temperatūra priklauso nuo vartotojo nustatytos šildymo kreivės (3.36 pav.). Šildymo kreivė nusako, kokia turi būti termofikacinio vandens temperatūra, priklausomai nuo lauko oro temperatūros. Šilumos punkto valdymo vožtuvas aprašomas 44 lygtyje pateikiama formule [10, 12, 19].

$$m_v = V_s \frac{K_{vs} \sqrt{\Delta P} \rho}{3600} \quad (44)$$

čia:

$m_v$  – valdymo signalas iš valdiklio;

$\Delta P$  – slėgis (Pa);

$K_{VS}$  – pro vožtuvą pratekančio skysčio debitas, kai jis yra pilnai atidarytas ( $m^3/h$ );

$\rho$  – vandens tankis priklausomai nuo temperatūros ( $kg/m^3$ );

$f$  – vožtuvo atsidarymo priklausomybė nuo temperatūros. ( $T_{kamb}$  kg/s);

Šildymo sistemai valdyti projektuojamas PI reguliatorius, nes nereikalinga greita reakcija į temperatūros pasikeitimą, todėl reguliatoriuje atsisakoma Diferencijuojančios grandies. PI reguliatorius aprašomas 45 lygtimi [12].

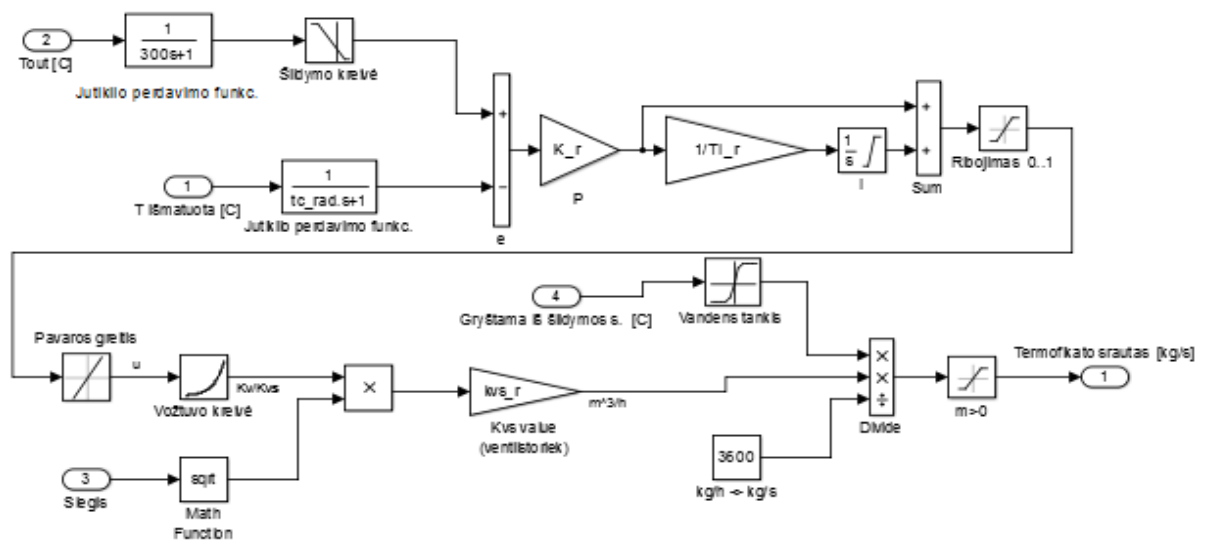
$$u(t) = K_i \cdot (e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt) \quad (45)$$

čia:

$K_i = P$ ;

$1/T_i = I$ .

Šilumos punkto valdymo vožtuvo ir PI reguliatoriaus matematinis modelis, realizuotas Matlab programiniu paketu, pavaizduotas 2.29 paveiksle.

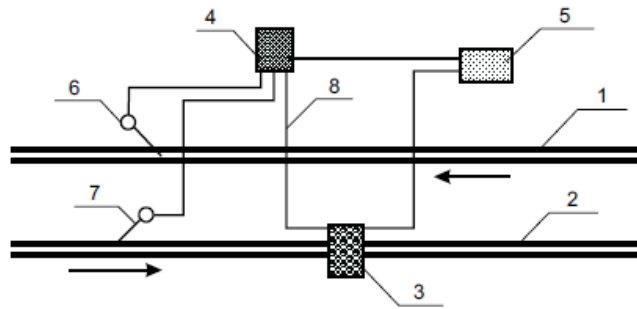


2.29. pav. PI reguliatoriaus ir srauto valdymo vožtuvo modelis

## 2.2.6. Šilumos skaitiklio sudarymas

Šildymo sistemų suvartota šiluma yra matuojama termofikacinio vandens įvade. Visa šildymui į pastatą patekusi šiluma yra išmatuojama ir paskirstoma gyventojams. Šilumos skaitiklį sudaro (2.30 pav.) [13]:

- šilumnešio debito matuoklis;
- elektroninio skaičiavimo blokas;
- maitinimo šaltinis;
- temperatūros jutikliai.



2.30 pav. Šilumos skaitiklis [26]

*Pastaba: 1 – šilumnešio tiekimo vamzdis; 2 – šilumnešio grąžinimo vamzdis; 3 – debito matuoklis; 4 – elektroninis skaičiavimo blokas; 5 – maitinimo šaltinis; 6 ir 7 – temperatūros jutikliai tiekimo ir grąžinimo vamzdyne; 8 – kabeliai.*

Šilumos skaitikliai skirti matuoti sunaudotos šilumos kiekiui gyvenamuosiuose namuose ar kituose ne pramoninės paskirties pastatuose. Pagal debito jutiklio veikimo principą yra skirstomi į tokias pagrindines grupes:

- mechaniniai;
- elektromagnetiniai;
- ultragarsiniai.

Nagrinėjamame objekte sumontuotas ultragarsinis šilumos skaitiklis, kurio debito matavimas yra pagrįstas ultragarsinių bangų sklidimo greičio vandenyje matavimu. Šie jutikliai pakaitomis siunčia ir priima signalą. Išsiųsto signalo grįžimo laikas prieš ir pagal šilumnešio tekėjimo kryptį yra skirtingas. Skirtumas priklauso nuo šilumnešio tekėjimo greičio. Pratekėjusio šilumnešio tūris skaičiuojamas integruojant momentines debito reikšmes. Tuo pat metu tiekiamo ir grąžinamo šilumnešio temperatūros matuojamos temperatūros jutikliais (47 lygtis), iš kurių informacija patenka į elektroninį bloką. Šiame bloke pagal debitą ir temperatūrų skirtumą apskaičiuojamas sunaudotos šilumos kiekis [13]. Šilumos skaitiklio algoritmas pateikiamas 46 lygtyje [11]. Šilumos skaitiklio modelis, sudarytas Matlab Simulink programiniu paketu, pavaizduojamas 2.31 paveiksle.

$$q = \int_0^t F1(T_{pad} - T_{gr})k_{T_{pad},gr}dt \quad (46)$$

$$\Delta T = T_S - T_R \quad (47)$$

$$k(T_{pad,gr}) = \rho(T_{gr}) \cdot C_p(T_{pad,gr}) \quad (49)$$

čia:

$q$  – sunaudota galia (kJ/s = kW);

$F1$  – Srautas (m<sup>3</sup>/s);

$T_{pad}$  – tiekiamo termofikacinio vandens temperatūra (°C);

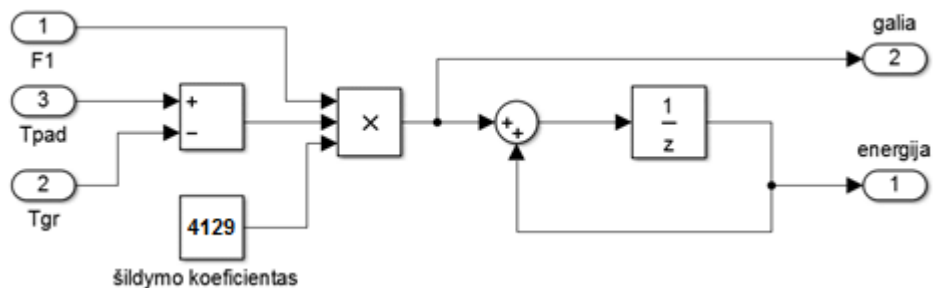
$T_{gr}$  – tiekiamo termofikacinio vandens temperatūra (°C);

$k(T_{S,R})$  – šildymo koeficientas (kJ/°Cm<sup>3</sup>);

$\Delta T$  – temperatūrų skirtumas (°C);

$\rho(T_R)$  – termofikacinio vandens tankis kg/cm<sup>3</sup> 0,9832;

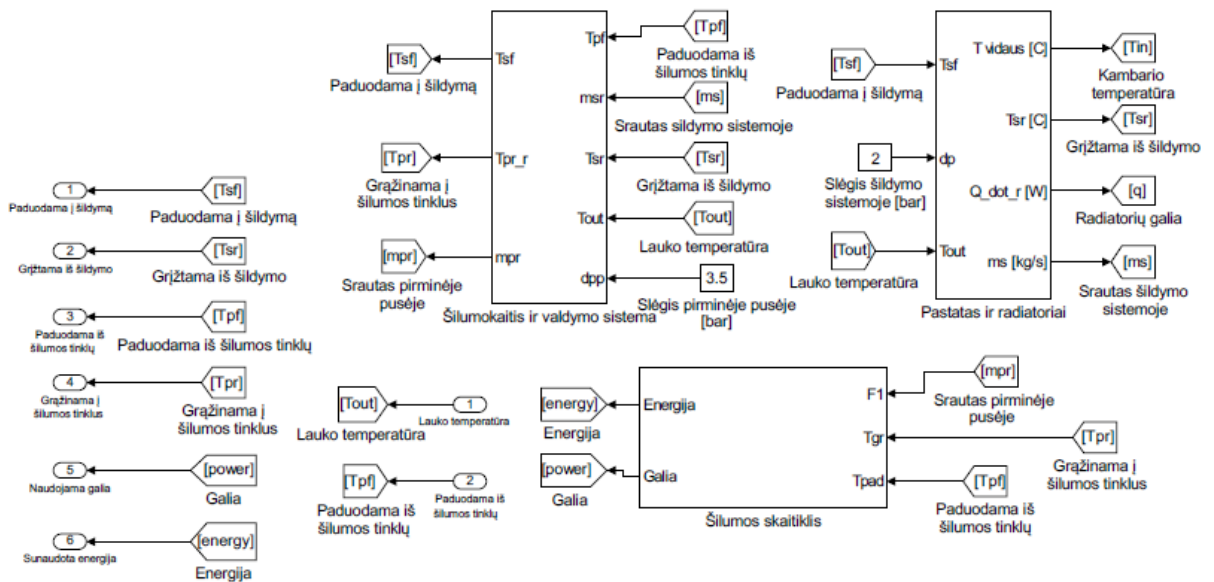
$C_p(T_{S,R})$  – savitoji šiluma J/°Ckg 4200J/kg\*°C.



2.31 pav. Šilumos skaitiklio modelis sudarytas Matlab Simulink programinių paketu

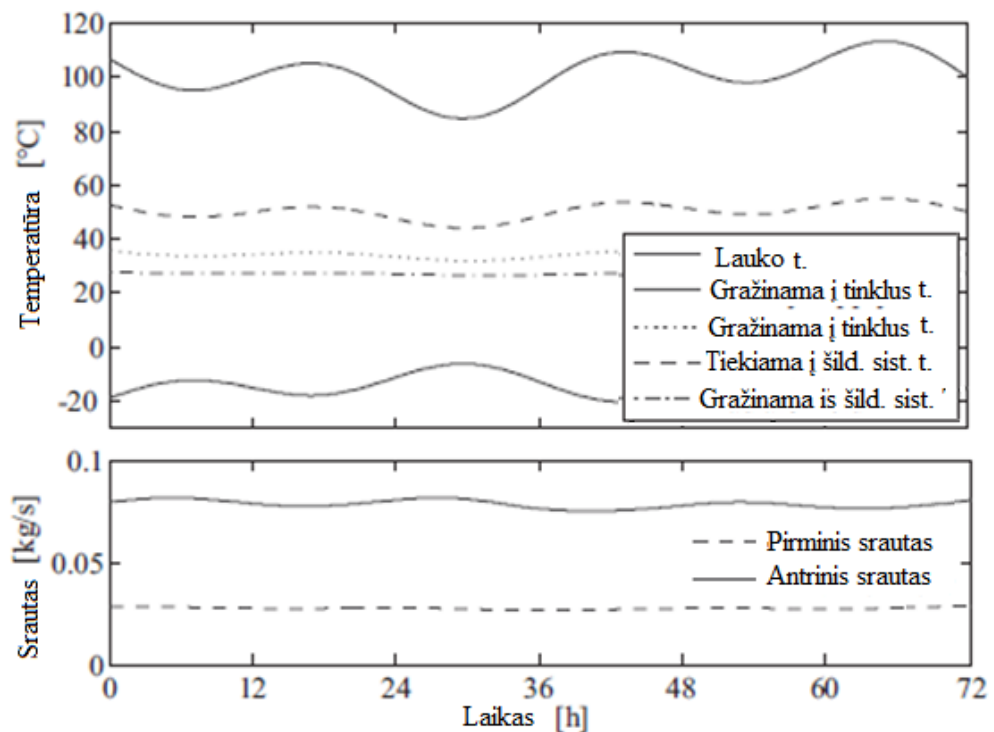
### 2.2.7. Pilnas šildymo sistemos modelis

Pilnai sudarytas ir veikiantis daugiabučio gyvenamojo pastato modelis, sudarytas Matlab Simulink programiniu paketu, yra pateikiamas 2.32 paveiksle. Modelyje paliekama galimybė laisvai keisti modeliavimo duomenis, t. y., modeliuojamo pastato šilumines varžas, patalpos šiluminius pritekėjimus bei oro infiltracijos laiką, šilumos punkto ir šildymo sistemos įrengimų parametrus taip pat pastatą veikiančias klimatinės sąlygas.



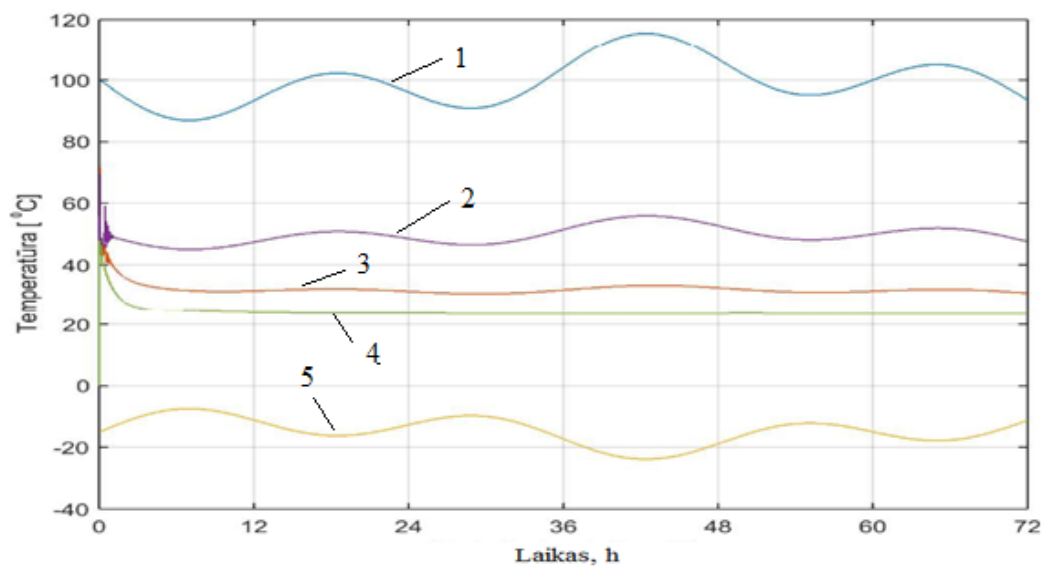
2.32 pav. Sudarytas pastato šildymo sistemos modelis

Siekiant įsitikinti, kad sudarytas modelis veikia teisingai, modeliavimo rezultatai palyginami su literatūros analizėje nagrinėtu tyrimu, duomenys pavaizduojami 2.33 paveiksle [12], sudaryto modelio modeliavimo rezultatai pateikiami 2.34 ir 2.35 paveiksle. Palyginus modeliavimo rezultatus galime teigti, kad modelis sudarytas teisingai.



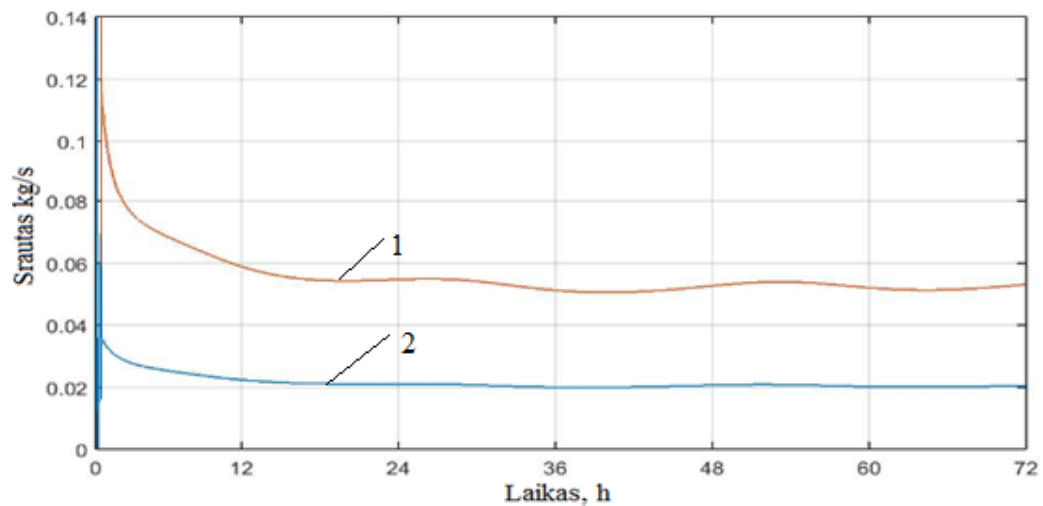
2.33 pav. Literatūros analizėje nagrinėto tyrimo rezultatai





2.34 Sudaryto modelio modeliavimo rezultatai

*Pastaba: 1 - tiekama iš šilumos tinklų temperatūra, 2 - tiekama į šildymo sistemą temperatūra, 3 - grąžinama į šilumos tinklus temperatūra, 4 - grąžinama iš šildymo sistemos temperatūra, 5 – lauko temperatūra.*



2.35 pav. Sudaryto modelio modeliavimo rezultatai

*Pastaba: 1 – antrinis srautas (šildymo sistema), 2 – Pirminis srautas (šilumos tinklai)*

### 3. SUKURTO MODELIO TYRIMAS IR TYRIMO REZULTATAI

#### 3.1. Tyrimui atlikti naudojami duomenys

Tyrimui pasirinkti du daugiabučiai tipinės statybos gyvenamieji daugiabučiai pastatai, esantys Palangos mieste. Pagal savo požymius pastatai atitinka daugumą gyvenamųjų namų, kurie yra šiame mieste. Pastatų šildomas plotas ir šildymo sistemos galia yra skirtinga. Pastatai toliau tekste bus vadinami *pastatas A* ir *pastatas B*. Tyrimas atliekamas modeliuojant pastatų termodinamines savybes prieš renovaciją ir po renovacijos, t. y., kai sienų šiluminė varža didelė ir maža. Šiuo tyrimu siekiama nustatyti, kokią įtaką turi valdymo sistemos regulatoriaus parametrai, keičiant pastato A ir B šiluminę varžą. Duomenys apie pastato šilumines varžas bei šildymo sistemos galią yra surinkti iš pastatų renovacijos projektų, kurie yra laisvai publikuojami internete [26]. Pastatų A ir B charakteristikos pateikiamos 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 lentelėje.

Pasirinktuose pasatuose yra sumontuoti automatizuoti šilumos punktai su nepriklausoma šildymo sistemos jungimo schema. Tiek pastato A, tiek pastato B šildymo sistema yra dvivamzdė apatinio paskirstymo ir kambario temperatūra yra nereguliuojama. Renovacijos metu pakeičiami radiatoriai, sumažinama šildymo sistemos galia ir įrengiamas kambario temperatūros reguliavimas. Šilumos punkto įrengimai ir galia nesikeičia. Pastatų A ir B šildymo sistemos charakteristikos pateikiamos 3.1 lentelėje

3.1 lentelė. Pastatų A ir B šildymo sistemos charakteristika

<b>Charakteristika</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
Šilumokaičio plotas m <sup>2</sup>	3,25	1,57
Šildymo plokštelių skaičius vnt.	60	30
Srautas kg/s	0.7	0.7
Tiekiamo pirminė temperatūra °C	95	95
Grąžinama pirminė temperatūra °C	50	50
Tiekiamo antrinė temperatūra °C	85	85
Grąžinama antrinė temperatūra °C	60	60
Bendra radiatorių galia kW	125	82
Bendra radiatoriumi galia po renovacijos kW	100	57

Pastatų A ir B esamos sienos, stogas, langai ir grindys pastatytos iš tokių pačių medžiagų, todėl jų storiai ir šilumos perdavimo koeficientas yra toks pat. Skirtumai yra konstrukcijų plotas ir langų skaičius. Renovacijos metu išorinės konstrukcijos bus šiltinamos 20 cm pilkuoju polistireniniu

putplasčiu, esami langai keičiami į langus, kurių šilumos perdavimo koeficientas yra didesnis. Pastatų A ir B sienų plotas ir šilumos perdavimo koeficientas pateikiamas 3.2 bei 3.3 lentelėse. Statybinių medžiagų storiai ir jų šilumos perdavimo koeficientas pateikiami 3.4 lentelėje.

3.2 lentelė. Pastato A sienų plotas ir šilumos perdavimo koeficientas

<b>Pastato konstrukcijos pavadinimas</b>	<b>Konstrukcijos plotas m<sup>2</sup></b>	<b>Šilumos perdavimo koeficientas prieš renovaciją W/m<sup>2</sup>K</b>	<b>Šilumos perdavimo koeficientas po renovacijos W/m<sup>2</sup>K</b>
Sienos	2353,74	1,27	0,20
Stogas	865,41	0,85	0,16
Langai	226,01	2,2	1,4
Grindys	622,20	0,71	0,25

3.3 lentelė. Pastato B sienų plotas ir šilumos perdavimo koeficientas

<b>Pastato konstrukcijos pavadinimas</b>	<b>Konstrukcijos plotas m<sup>2</sup></b>	<b>Šilumos perdavimo koeficientas prieš renovaciją W/m<sup>2</sup>K</b>	<b>Šilumos perdavimo koeficientas po renovacijos W/m<sup>2</sup>K</b>
Sienos	1643,66	1,27	0,20
Stogas	436,20	0,85	0,20
Langai	191,98	2,2	0,25
Grindys	337,54	0,71	1,4

3.4 lentelė. Statybinių medžiagų specifikacija

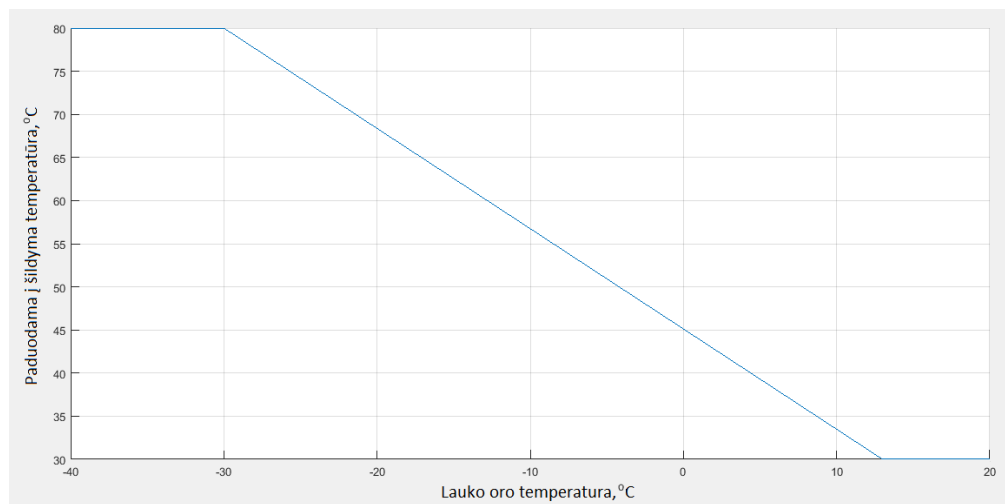
<b>Medžiaga</b>	<b>Medžiagos tankis kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Storis m</b>	<b>Savitoji šiluminė talpa J/kgK</b>	<b>Šilumos laidumo koeficientas W/mK</b>
Plytų mūras	1800	0,51	880	1,03
Gelžbetoniniai blokai	2500	0,15	1000	2,04
Tinkas patalpos viduje	1700	0,02	1000	0,87
Polistireninis putplastis	40	0,2	1450	0,031
Oro tarpas	1.23	0,025	1008	0,022

Valdymo sistema tiriama, modeliuojant tris darbo režimus, kurie priklauso nuo lauko oro temperatūros bei tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūros. Tai reikalinga, nes reikia išanalizuoti, kaip valdymo sistema veiks per visą šildymo sezoną, keičiantis lauko oro temperatūrai bei tuo pačiu kintant iš šilumos tinklų tiekiamo termofikacinio vandens temperatūrai. Režimai sudaryti, atsižvelgiant į Lietuvos klimatinės sąlygas ir šilumos tiekėjų skelbiamais temperatūriniais grafikais [21].

3.4 lentelė. Modeliuojami režimai.

<b>Veiksniai</b> <b>Rėžimas</b>	<b>Kai lauko temperatūra kinta °C</b>	<b>Termofikacinio vandens temperatūra kinta °C</b>
<b>1</b>	nuo 12 iki 0	nuo 60 iki 73
<b>2</b>	nuo 0 iki -12	nuo 73 iki 95
<b>3</b>	nuo -12 iki -28	nuo 95 iki 105

Valdymo kokybę apsprendžiantis faktorius yra tiekama į pastato šildymo sistemą termofikacinio vandens temperatūra. Ji turi kiek įmanoma tiksliau atkartoti nustatytą šildymo kreivę. Visi eksperimentai atliekami esant tai pačiai šildymo kreivei, pavaizduotai 3.36 paveiksle.



3.36 pav. Šildymo kreivė

### 3.2. Valdymo sistemos regulatoriaus parametrų tyrimas

Siekiant surasti valdymo sistemos parametrus, pirmiausia nustatoma, kaip aplinkos veiksniai (t.y., lauko oro temperatūra ir iš šilumos tinklų tiekama termofikacinio vandens temperatūra) įtakoja valdymo kokybę, esant maksimaliai aukšties ir maksimaliai žemiems valdymo sistemos PI regulatoriaus parametrms. Modeliuojant surandami A ir B pastato valdymo sistemos PI regulatoriaus parametru maksimali ir minimali vertė, kada reguliuojami parametrai išlieka stabilūs ir tikslūs, kai lauko temperatūra kinta nuo 12 iki 0 °C laipsnių temperatūros ir kai iš šilumos tinklų tiekama termofikacinio vandens temperatūra kinta 65-73 °C. Žemiau esančiuose paveiksluose pavaizduojama A ir B renovuotų ir nerenovuotų pastatų paduodamo į pastato šildymo sistemą termofikacinio vandens temperatūra, kai regulatoriaus parametrų koeficientas yra maksimalus ir

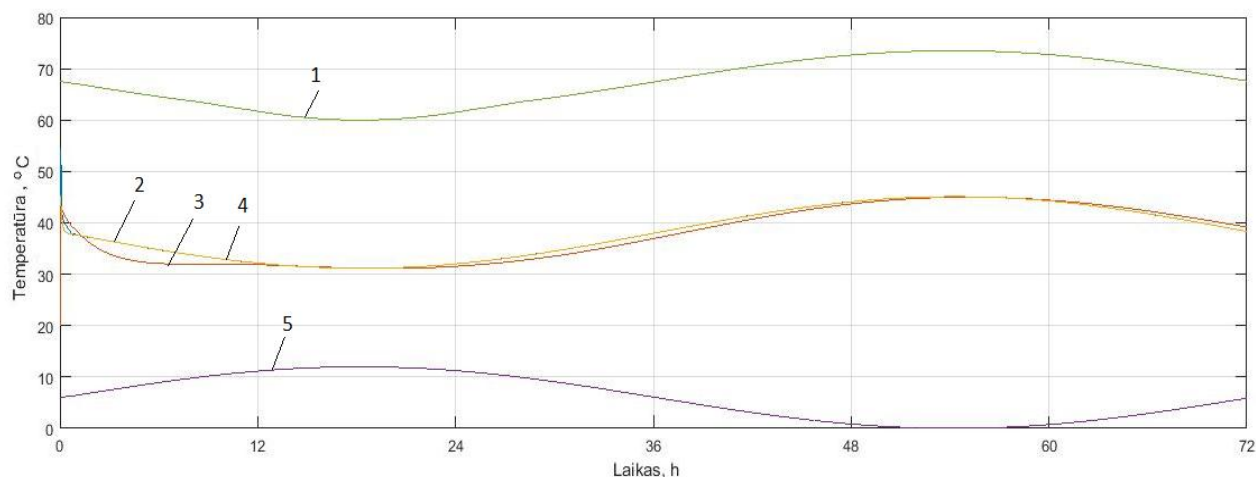
minimalus. Modeliavimo laikas yra 72 valandos. Parametrai tiriamame reguliatoriuje aprašomi remiantis 45 lygtimi.

Regulatoriaus parametrai (maksimali vertė):

- P – 0,66;
- I – 1/40.

Regulatoriaus parametrai (minimali vertė):

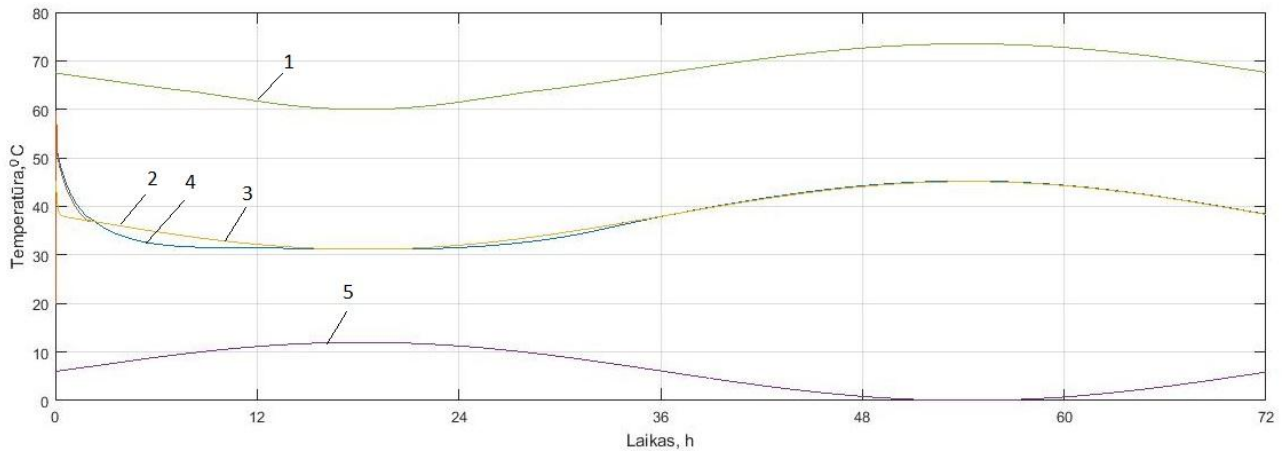
- P – 0,001;
- I – 1/250.



3.37 pav. A nerenovuoto pastato valdymo sistemos reakcija, kai lauko oro temperatūra kinta nuo 12 iki 0 °C laipsnių

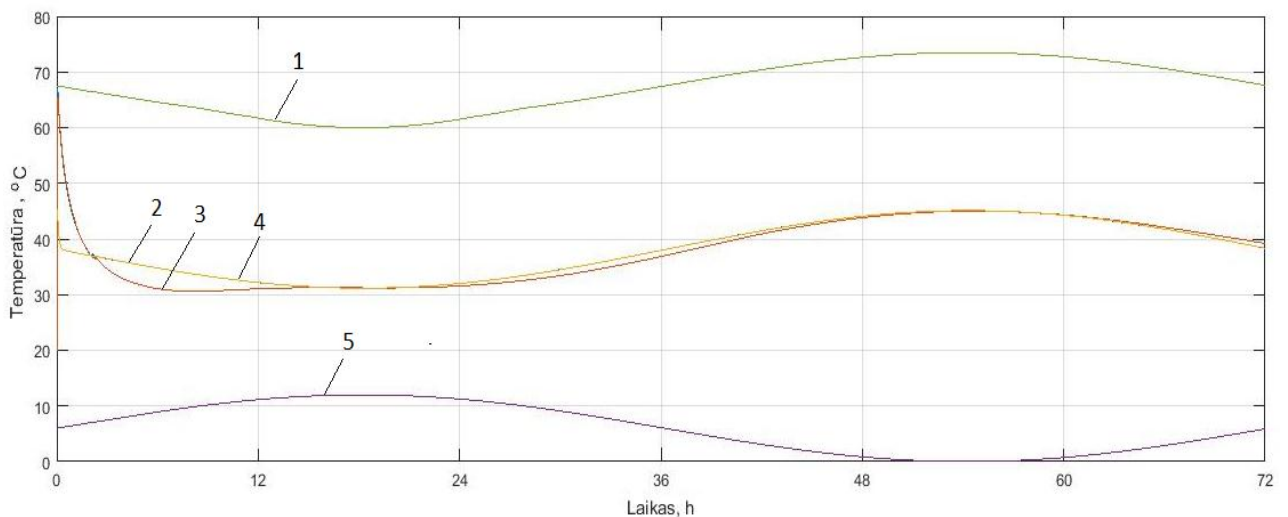
*1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – šildymo kreivė; 3 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai P-0,66 I-1/40; 4 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai P-0,001 I-1/250; 5 – lauko oro temperatūra*

3.37 paveiksle matyti pastato A valdymo sistemos reakcija, kai pastatas nėra apšiltintas. Esant aukštiesiems PI regulatoriaus parametrams, sistema stabiliai ir tiksliai atkartoja nustatytą šildymo kreivę, pereinamasis procesas trunka 3258 sekundes. Esant žemoms PI regulatoriaus koeficiento vertėms, sistema išlieka stabili, tačiau su paklaida nuo šildymo kreivės 0,8 °C, o pereinamasis procesas trunka 45651 sekundes.



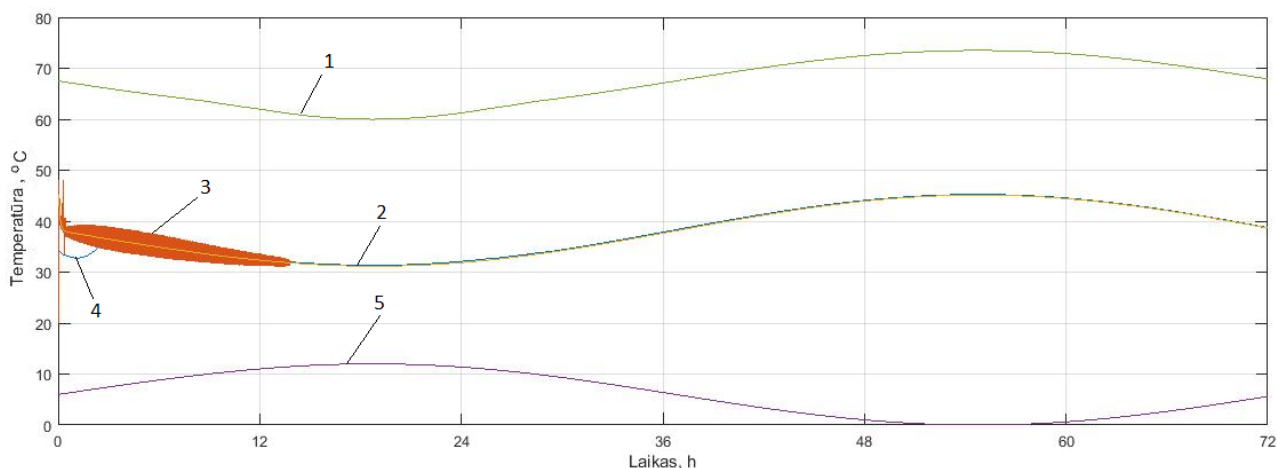
3.38 pav. A renovuoto pastato valdymo sistemos reakcija, kai lauko oro temperatūra kinta nuo 12 iki 0 °C laipsnių  
*1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – šildymo kreivė; 3 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai P-0,66 I-1/40; 4 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai P-0,001 I-1/250; 5 – lauko oro temperatūra*

3.38 paveiksle matyti, kad apšiltintus pastatą sistema su aukštais PI reguliatoriaus parametrais išlieka stabilūs ir tiksliai atkartoja nustatytą šildymo kreivę, tačiau pereinamasis procesas užtrunka 7121 sekundes. Valdymo sistema su žemomis valdymo sistemos PI reguliatoriaus vertėmis, kaip ir neapšiltinto pastato atveju, valdo sistemą su paklaida nuo šildymo kreivės 0,8 °C, pereinamasis procesas tęsiasi 52155 sekundes.



3.39 pav. B nerenovuoto pastato valdymo sistemos reakcija, kai lauko oro temperatūra kinta nuo 12 iki 0 °C laipsnių  
*1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – šildymo kreivė; 3 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai P-0,66 I-1/40; 4 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai P-0,001 I-1/250; 5 – lauko oro temperatūra*

3.39 paveiksle matyti nerenovuoto pastato B valdymo sistemos reakcija esant aukštiems PI reguliatoriaus parametrams. Sistema valdo tiksliai - paklaida nuo šildymo kreivės išlieka  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o pereinamasis procesas trunka 7702 sekundes. Valdymo sistema, esant žemomis valdymo sistemos PI reguliatoriaus vertėms, valdo sistemą su paklaida nuo šildymo kreivės  $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pereinamasis procesas trunka 49680 sekundes. Toliau modeliuojamas B pastatas, kai jis yra apšiltintas. Modeliavimo rezultatai pavaizduoti žemiau esančiame 3.40 paveiksle.

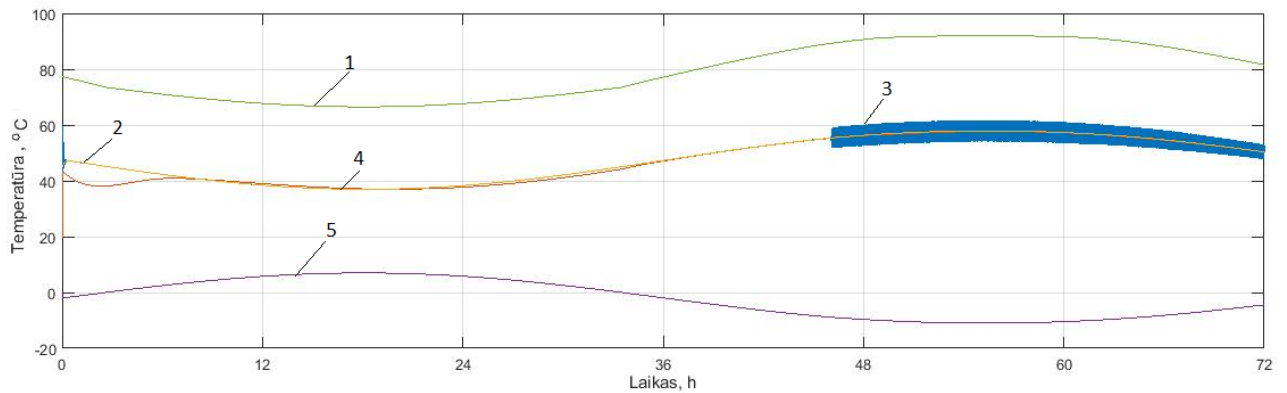


3.40 pav. B renovuoto pastato valdymo sistemos reakcija, kai lauko oro temperatūra kinta nuo 12 iki  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  laipsnių

*1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – šildymo kreivė; 3 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai  $P=0,66\text{ I-1/40}$ ; 4 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai  $P=0,001\text{ I-1/250}$ ; 5 – lauko oro temperatūra*

3.40 paveiksle matyti renovuoto pastato B valdymo sistemos reakcija esant aukštiems PI reguliatoriaus parametrams, sistema valdo tiksliai, paklaida nuo šildymo kreivės -  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tačiau pereinamajame procese matomi stiprūs švytavimai, kurių amplitudė siekia  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o pereinamasis procesas užtrunka 47244 sekundes. Valdymo sistema, esant žemomis valdymo sistemos PI reguliatoriaus vertėms, valdo sistemą su paklaida nuo šildymo kreivės  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o pereinamasis procesas užtrunka 12546 sekundes.

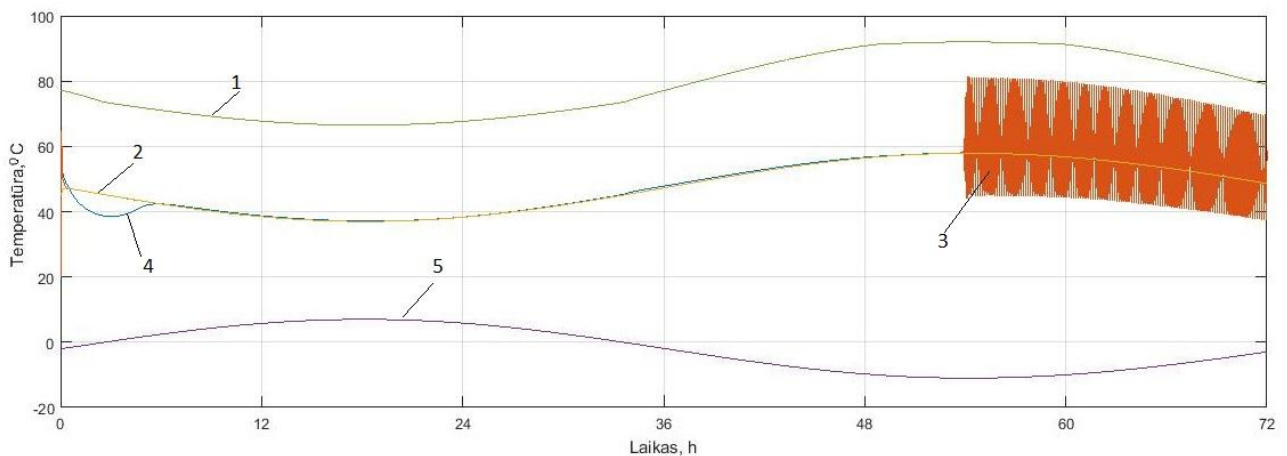
Toliau atliekamas modeliavimas su A ir B pastatais, kai lauko temperatūra kinta nuo  $0$  iki  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o termofikacinio vandens temperatūra  $73 - 95\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Žemiau esančiame 3.41 paveiksle pavaizduoti modeliavimo rezultatai, kai pastatas A yra neapšiltintas.



3.41 pav. A nerenovuoto pastato valdymo sistemos reakcija, kai lauko oro temperatūra kinta nuo 0 iki  $-12^{\circ}\text{C}$  laipsnių

1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – šildymo kreivė; 3 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai  $P=0,66$  I-1/40; 4 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai  $P=0,001$  I-1/250; 5 – lauko oro temperatūra

3.41 paveiksle matyti, kad sistemos valdymas su aukštais PI reguliatoriaus parametrais išliko stabilus iki tol, kol tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra pasiekė  $91^{\circ}\text{C}$  ribą. Švytavimų amplitudė  $7^{\circ}\text{C}$ , o pereinamasis procesas trukmė 1750 sekundžių. Esant žemos PI reguliatoriaus vertėms sistema išlieka stabili, tačiau netiksliai atkartoja, šildymo kreivė su paklaida  $1,1^{\circ}\text{C}$ , pereinamojo laiko trukmė 27560 sekundžių. Toliau modeliuojamas pastatas A, kuris yra renovuotas. Modeliavimo rezultatai pavaizduoti žemiau esančiame 3.42 paveiksle.

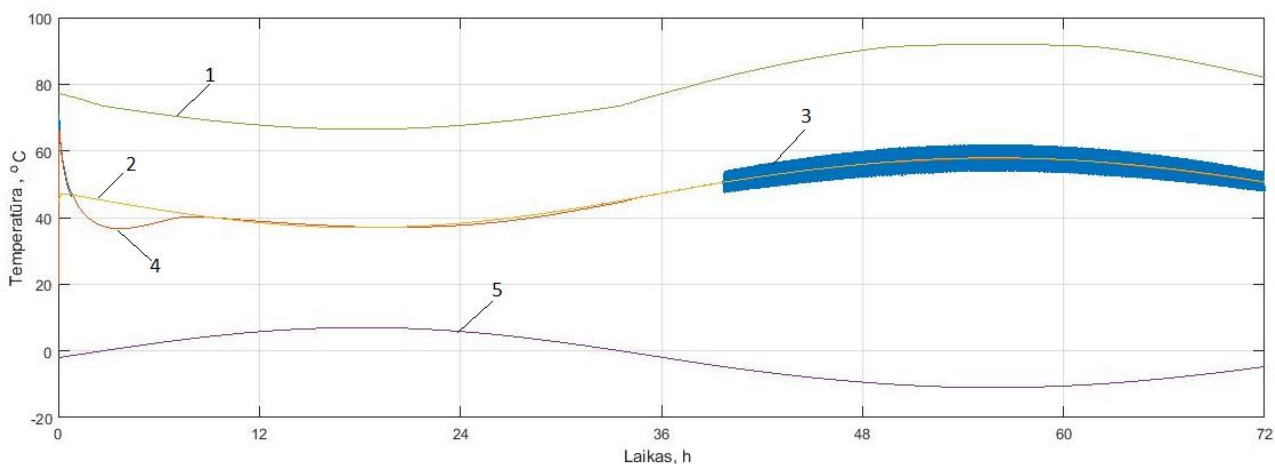


3.42 pav. A renovuoto pastato valdymo sistemos reakcija, kai lauko oro temperatūra kinta nuo 0 iki  $-12^{\circ}\text{C}$  laipsnių

1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – šildymo kreivė; 3 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai  $P=0,66$  I-1/40; 4 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai  $P=0,001$  I-1/250; 5 – lauko oro temperatūra



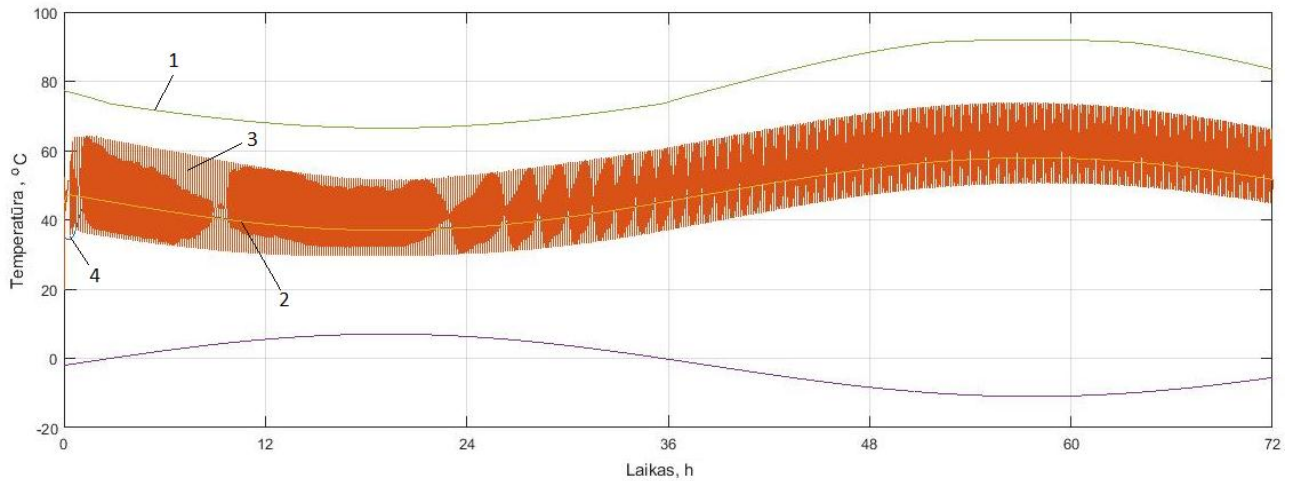
3.42 paveiksle matyti, kad sistemos valdymas su aukštais PI reguliatoriaus parametrais išlieka stabilūs iki tol, kol tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra pasiekia 95 °C ribą, tuomet atsiranda švytavimai, kurių amplitudė 18<sup>0</sup>C, o pereinamasis procesas užtrunka 1271 sekundžių. Atveju, kai PI reguliatoriaus vertės yra žemos, sistemos valdymo tikslumas didėja iki 0,11 °C šildymo kreivės atžvilgiu, pereinamasis procesas trunka 22594 sekundes.



3.43 pav. B nerenovuoto pastato valdymo sistemos reakcija, kai lauko oro temperatūra kinta nuo 0 iki -12 °C laipsnių

1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – šildymo kreivė; 3 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai  $P=0,66$  I-1/40; 4 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai  $P=0,001$  I-1/250; 5 – lauko oro temperatūra

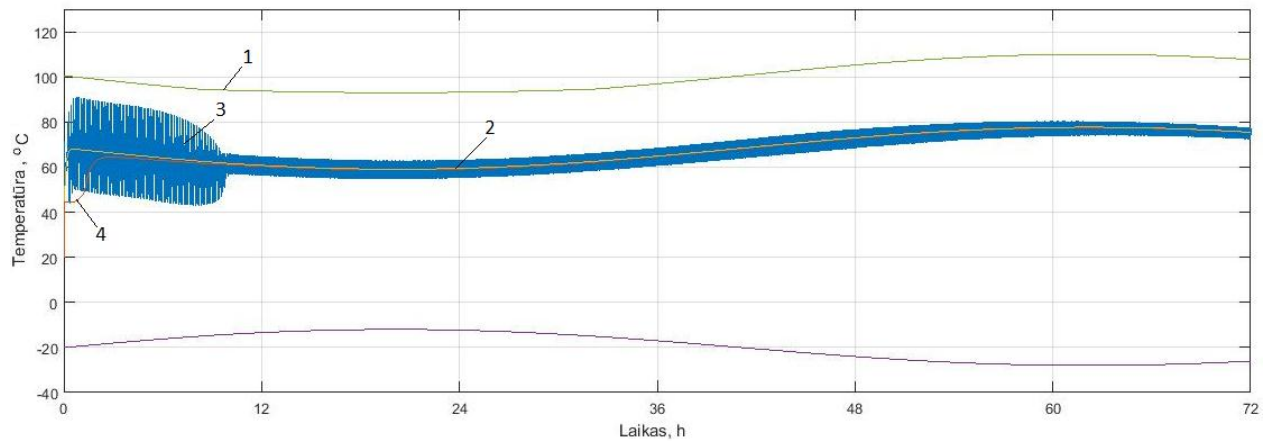
3.43 paveiksle matyti, kad esant aukštiems PI reguliatoriaus parametrams, sistema išlieka stabili iki tol, kol tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra pasiekia 82 °C ribą, tuomet atsiranda švytavimai, kurių amplitudė 5,4 °C, pereinamasis procesas užtrunka 2675 sekundes. Atveju, kai PI reguliatoriaus parametrų vertės yra žemos, sistemos paklaida nuo šildymo kreivės yra 0,8 °C, pereinamasis procesas užtrunka 32884 sekundes.



3.44 pav. B renovuoto pastato valdymo sistemos reakcija, kai lauko oro temperatūra kinta nuo 0 iki  $-12^{\circ}\text{C}$  laipsnių  
*1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – šildymo kreivė; 3 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai  $P=0,66$  I-1/40; 4 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai  $P=0,001$  I-1/250; 5 – lauko oro temperatūra*

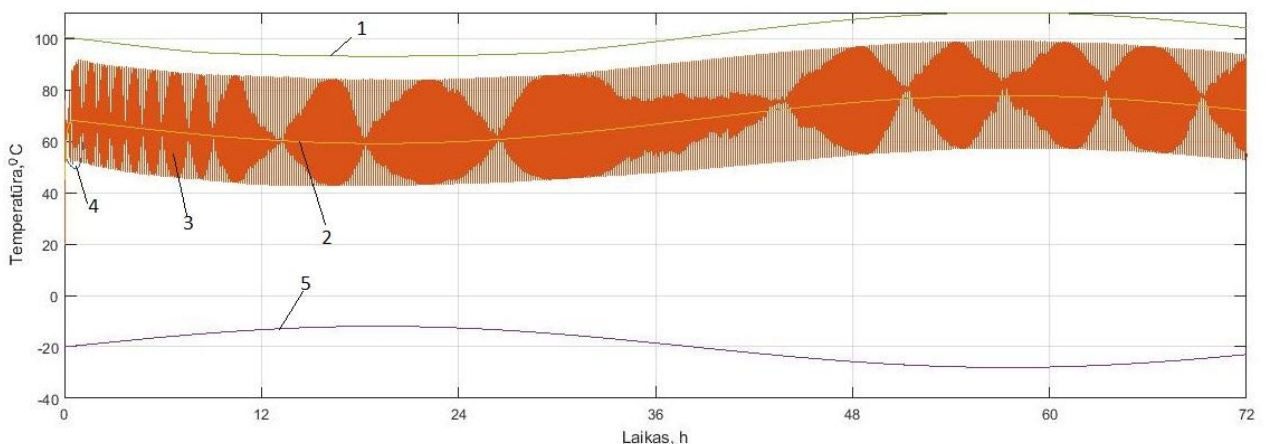
3.44 paveiksle matyti, kad esant aukštiems PI reguliatoriaus parametrams, kai tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra kinta  $73\text{--}95^{\circ}\text{C}$ , sistemoje atsiranda švytavimai, kurių amplitudė  $12,2^{\circ}\text{C}$  ir tęsiasi visą modeliavimo laiką. Atveju, kai PI reguliatoriaus parametru vertės yra žemos, sistemos paklaida nuo šildymo kreivės yra  $0,2^{\circ}\text{C}$ , pereinamasis procesas užtrunka 7035 sekundės.

Toliau atliekamas modeliavimas su A ir B pastatais, kai lauko temperatūra kinta nuo  $-12$  iki  $-28^{\circ}\text{C}$ , o termofikacinio vandens temperatūra nuo  $95$  iki  $105^{\circ}\text{C}$ . Žemiau esančiame 3.45 paveiksle pavaizduoti modeliavimo rezultatai, kai pastatas A yra nerenovuotas.



3.45 pav. A nerenovuoto pastato valdymo sistemos reakcija, kai lauko oro temperatūra kinta nuo  $-12$  iki  $-28$   $^{\circ}\text{C}$  laipsnių  
 1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – šildymo kreivė; 3 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai  $P=0,66$   $I-1/40$ ; 4 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai  $P=0,001$   $I-1/250$ ; 5 – lauko oro temperatūra

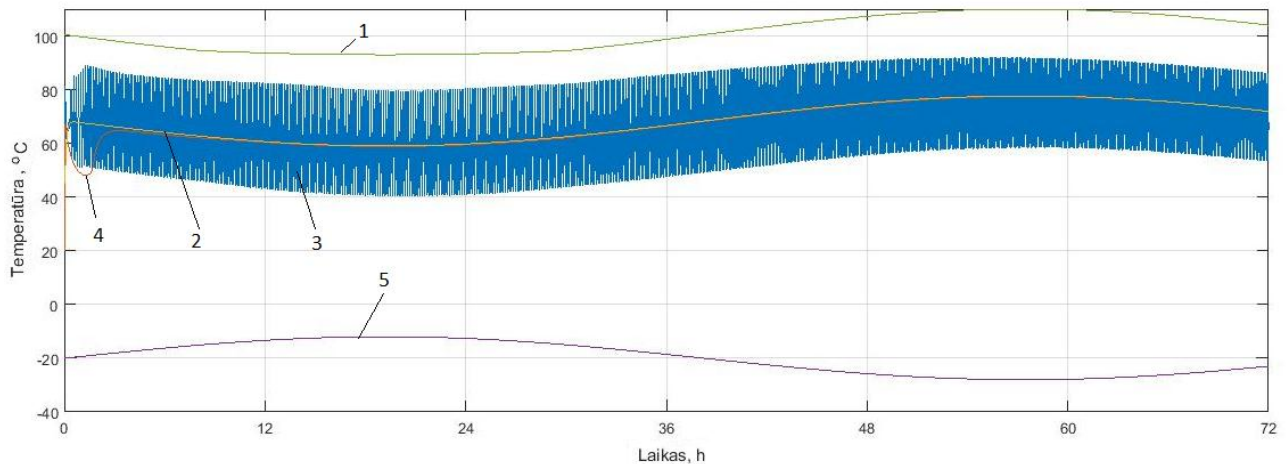
3.45 paveiksle matyti, kad esant aukštiesiems PI reguliatoriaus parametrams, kai tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra kinta nuo  $95$  iki  $105$   $^{\circ}\text{C}$ , sistemoje atsiranda švytavimai, kurių amplitudė  $14$   $^{\circ}\text{C}$ , švytavimai tęsiasi visą modeliavimo laiką. Atveju, kai PI reguliatoriaus parametru vertės yra žemos, sistemos paklaida nuo šildymo kreivės yra  $0,1$   $^{\circ}\text{C}$ , pereinamasis procesas užtrunka  $10035$  sekundės. Toliau modeliuojamas pastatas A, kuris yra renovuotas. Modeliavimo rezultatai pavaizduoti žemiau esančiame 3.46 paveiksle.



3.46 pav. A renovuoto pastato valdymo sistemos reakcija, kai lauko oro temperatūra kinta nuo  $-12$  iki  $-28$   $^{\circ}\text{C}$  laipsnių  
 1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – šildymo kreivė; 3 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai  $P=0,66$   $I-1/40$ ; 4 –

*paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai P-0,001 I-1/250; 5 – lauko oro temperatūra*

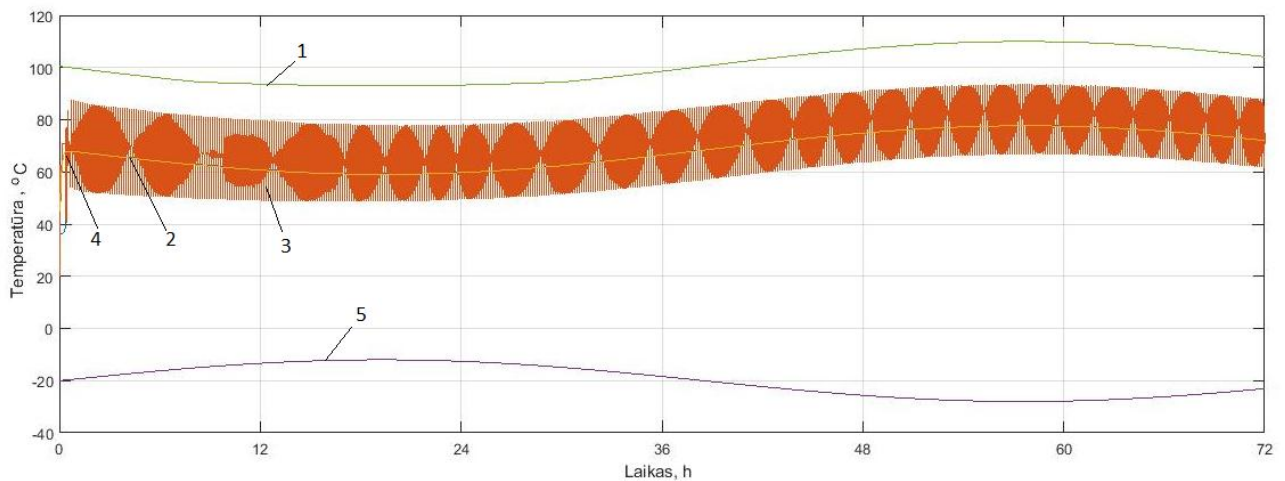
3.46 paveiksle matyti, kad esant aukštiems PI regulatoriaus parametrams, kai tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra kinta nuo 95 iki 105 °C, sistemoje atsiranda švytavimai, kurių amplitudė 19 °C, švytavimai tęsiasi visą modeliavimo laiką. Atveju, kai PI regulatoriaus parametru vertės yra žemos, sistemos paklaida nuo šildymo kreivės yra 0,1 °C, pereinamasis procesas užtrunka 6053 sekundės. Toliau modeliuojamas pastatas B, kuris yra nerenovuotas. Modeliavimo rezultatai pavaizduoti žemiau esančiame 3.47 paveiksle.



3.47 pav. B nerenovuoto pastato valdymo sistemos reakcija, kai lauko oro temperatūra kinta nuo -12 iki -28 °C laipsnių

*1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – šildymo kreivė; 3 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai P-0,66 I-1/40; 4 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai P-0,001 I-1/250; 5 – lauko oro temperatūra*

3.47 paveiksle matyti, kad esant aukštiems PI regulatoriaus parametrams, kai tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra kinta nuo 95 iki 105 °C, sistemoje atsiranda švytavimai, kurių amplitudė 20,5 °C, švytavimai tęsiasi visą modeliavimo laiką. Atveju, kai PI regulatoriaus parametru vertės yra žemos, sistemos paklaida nuo šildymo kreivės yra 0,1 °C, pereinamasis procesas užtrunka 28532 sekundės. Toliau modeliuojamas pastatas B, kuris yra renovuotas. Modeliavimo rezultatai pavaizduoti žemiau esančiame 3.48 paveiksle.



3.48 pav. B renovuoto pastato valdymo sistemos reakcija, kai lauko oro temperatūra kinta nuo  $-12$  iki  $-28$   $^{\circ}\text{C}$  laipsnių  
*1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – šildymo kreivė; 3 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai  $P-0,66$   $I-1/40$ ; 4 – paduodamo į šildymo sistema termofikacinio vandens temperatūra, kai  $P-0,001$   $I-1/250$ ; 5 – lauko oro temperatūra*

3.48 paveiksle matyti, kad esant aukštiems PI regulatoriaus parametrams, kai tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra kinta  $95-105$   $^{\circ}\text{C}$ , sistemoje atsiranda švytavimai, kurių amplitudė  $17,5$   $^{\circ}\text{C}$ , švytavimai tęsiasi visą modeliavimo laiką. Atveju, kai PI regulatoriaus parametru vertės yra žemos, sistemos paklaida nuo šildymo kreivės yra  $0,3$   $^{\circ}\text{C}$ , pereinamasis procesas užtrunka 2000 sekundės.

Atliktas modeliavimas, kai kinta lauko ir iš šilumos tinklų tiekiamo termofikacinio vandens temperatūra, o valdymo sistemos PI regulatoriaus parametrai  $P - 0,001$   $I - 1/250$  ir  $P - 0,66$   $I - 1/40$ . Iš 3.6 lentelėje pateiktų tyrimo rezultatų suvestinės matome, kad esant žemoms PI regulatoriaus reikšmėms, kai pastatai A ir B renovuoti ar nerenovuoti, krentant lauko oro temperatūrai ir kylant tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūrai mažėja paklaida tarp šildymo kreivės ir į šildymo sistemą tiekiamo šilumnešio, taip pat mažėja ir pereinamojo proceso laikas. Kai valdymo sistemos PI regulatoriaus parametrai yra aukšti, krentant lauko oro temperatūrai matome, kad sistema tampa nestabili, t. y., atsiranda švytavimai.

3.6 lentelė. Tyrimo rezultatų suvestinė

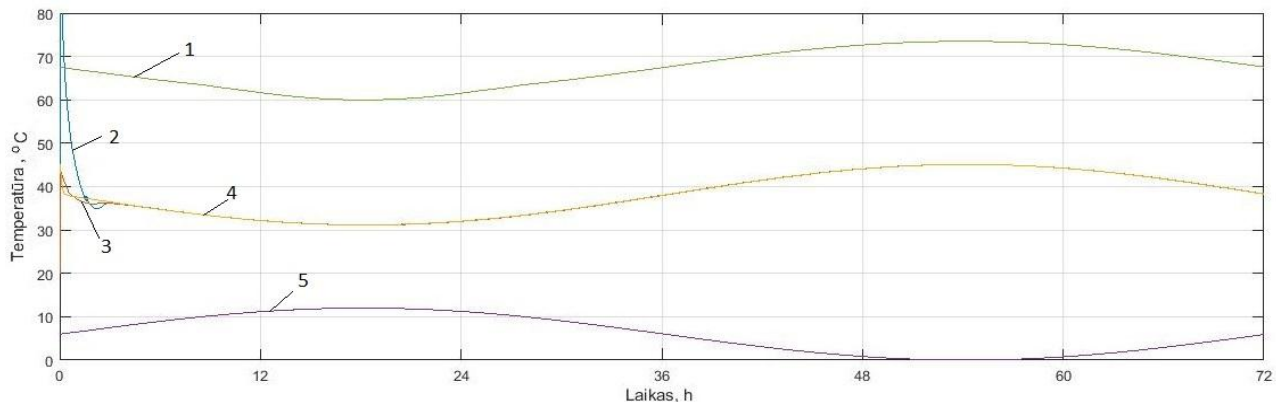
		Regulatoriaus parametrai P - 0,001 I - 1/250			Regulatoriaus parametrai P - 0,66 I - 1/40		
		nuo 12 iki 0 °C	nuo 0 iki -12 °C	nuo -12 iki -28 °C	nuo 12 iki 0 °C	nuo 0 iki -12 °C	nuo -12 iki -28 °C
<b>Pastatas A nerenuotas</b>	<b>Paklaida nuo šildymo kreivės °C</b>	1,1	0,8	0,1	0	0	-
	<b>Pereinamasis procesas s.</b>	45651	27560	10035	3258	1750	∞
	<b>Švytavimų amplitudė °C</b>	0	0	0	0	7	14
<b>Pastatas A renuotas</b>	<b>Paklaida nuo šildymo kreivės °C</b>	0,8	0,11	0,1	0	-	-
	<b>Pereinamasis procesas s.</b>	52155	22594	6053	7121	1271	∞
	<b>Švytavimų amplitudė °C</b>	0	0	0	0	18	19
<b>Pastatas B nerenuotas</b>	<b>Paklaida nuo šildymo kreivės °C</b>	1	0,8	0,1	0	-	-
	<b>Pereinamasis procesas s.</b>	49680	32884	28532	7702	2675	∞
	<b>Švytavimų amplitudė °C</b>	0	0	0	0	5,4	20,5
<b>Pastatas B renuotas</b>	<b>Paklaida nuo šildymo kreivės °C</b>	0,2	0,2	0,3	0	-	-
	<b>Pereinamasis procesas s.</b>	12546	7035	2000	47244	∞	∞
	<b>Švytavimų amplitudė °C</b>	0	0	0	7	12,2	17,5

Apibendrinat tyrimą, galime teigti, kad, norint stabiliai valdyti temperatūrą, kuo aukštesnė yra tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra, tuo žemesnė turi būti P (proporcinės juostos) reikšmė. Taip pat, norint išvengti švytavimų, reikia mažinti I (integravimo) laiko konstantą, tokiu atveju regulatoriaus reakcija bus lėtesnė, bet be švytavimų, o didinant integravimo laiko konstantą, regulatoriaus reakcija į temperatūrų pasikeitimus bus tikslesnė, tačiau gali atsirasti švytavimai.

### 3.3. Valdymo sistemos tyrimas, keičiant namo termodinamines savybes

Šio tyrimo tikslas yra išsiaiškinti, ar reikia pakeisti valdymo sistemos PI regulatoriaus parametrus, kai pastatas yra renuojuojamas. Tyrimas bus atliekamas, modeliuojant 6 lentelėje pateiktais trimis darbo režimais, kurie priklauso nuo lauko oro temperatūros. Modeliavimo metu buvo surastos dvi valdymo sistemos PI regulatoriaus parametrų vertės, prie kurių visais darbo režimais nerenuotų pastatų šildymo sistema dirbo tinkamai. Šios valdymo sistemos regulatoriaus PI parametrų vertės įvedamos į pastato, kuris yra renuotas, valdymo sistemos regulatorių.

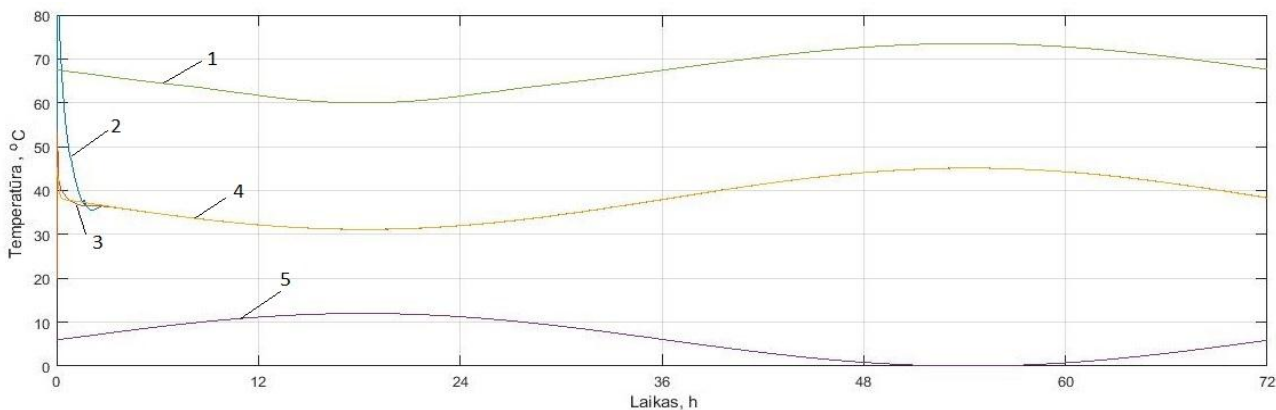
Kai lauko oro temperatūra kinta nuo 12 iki 0 °C



3.49 pav. A pastatas, kai valdymo sistemos parametrai P-0,008 I-1/100

1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – renovuotas pastatas; 3 – nerenovuotas pastatas; 4 – šildymo kreivė; 5 – lauko oro temperatūra.

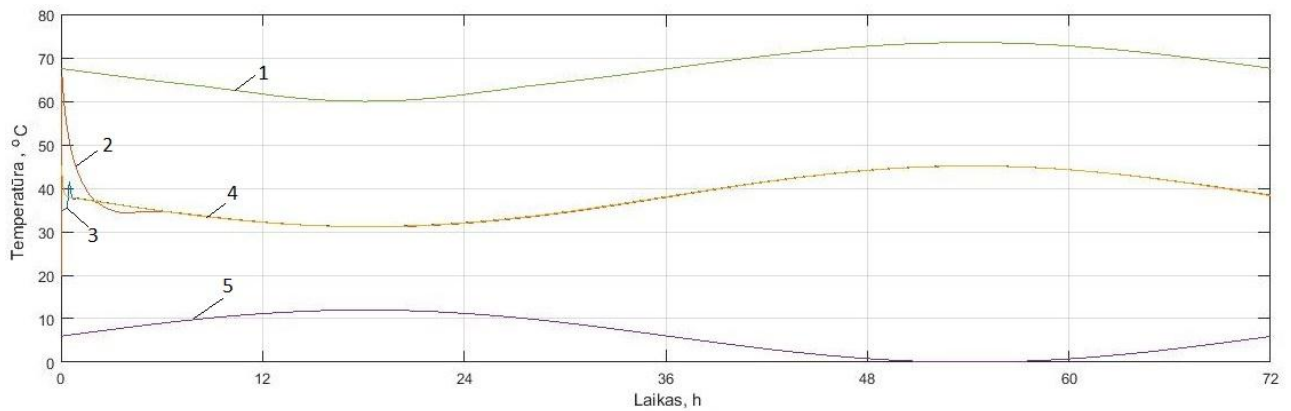
Kaip matyti 3.49 paveiksle, atveju, kai pastatas yra nerenovuotas, pereinamasis procesas užtrunka 14000 sekundžių. Renovuoto pastato atveju pereinamasis procesas užtrunka 14557 sekundžių. Valdymo sistema išlieka stabili visą modeliavimo laikotarpį ir tiksliai atkartoja šildymo kreivę.



3.50 pav. A pastatas kai valdymo sistemos parametrai P-0,002 I-1/150

1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – renovuotas pastatas; 3 – nerenovuotas pastatas; 4 – šildymo kreivė; 5 – lauko oro temperatūra.

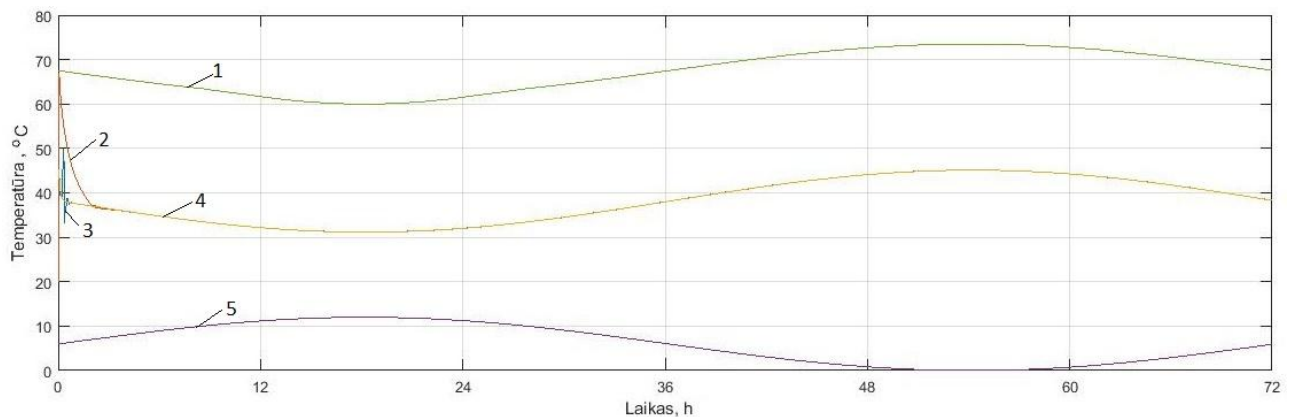
3.50 paveiksle matyti, kai pastatas yra nerenovuotas, pereinamojo proceso trukmė yra 9000 sekundžių, o valdymo sistema tiksliai atkartoja šildymo kreivę. Renovuoto pastato valdymo sistema išlieka stabili, tačiau pereinamasis procesas užtrunka 7965 sekundes.



3.51 pav. B pastatas, kai valdymo sistemos parametrai P-0,006 I-1/180

1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – nerenovuotas pastatas; 3 –renovuotas pastatas; 4 – šildymo kreivė; 5 – lauko oro temperatūra.

Kaip matyti 3.51 paveiksle, atveju, kai pastatas yra nerenovuotas, pereinamasis procesas užtrunka 23000 sekundžių. Renovuoto pastato atveju, pereinamasis procesas užtrunka 3146 sekundes. Valdymo sistema išlieka stabili visą modeliavimo laikotarpį ir tiksliai atkartoja šildymo kreivę.



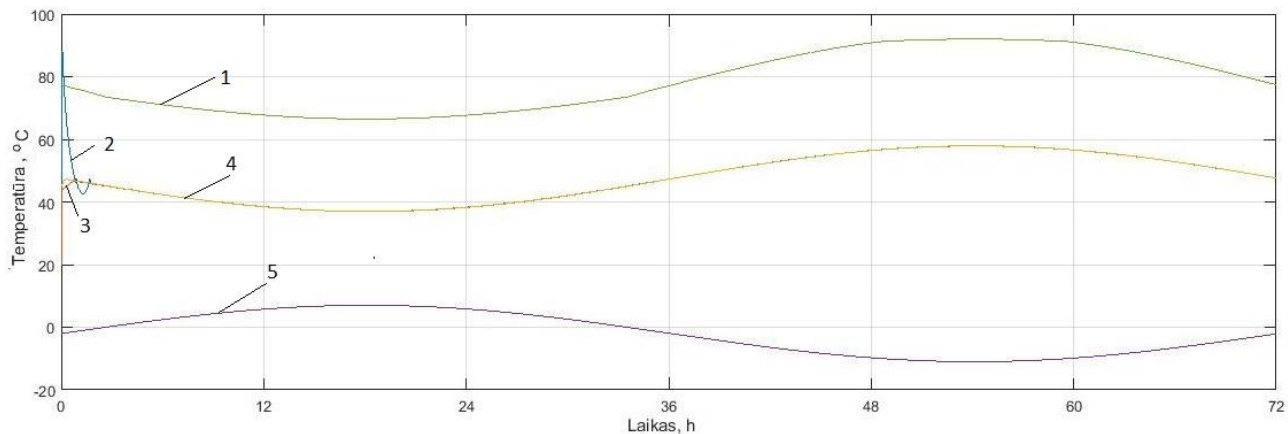
3.52 pav. B pastatas, kai valdymo sistemos parametrai P-0,05 I-1/120

1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – nerenovuotas pastatas; 3 –renovuotas pastatas; 4 – šildymo kreivė; 5 – lauko oro temperatūra.

3.52 paveiksle matyti, kai pastatas yra nerenovuotas, pereinamojo proceso trukmė yra 7528 sekundžių, valdymo sistema tiksliai atkartoja šildymo kreivę. Renovuoto pastato valdymo sistema išlieka stabili, tačiau pereinamasis procesas užtrunka 3341 sekundę.



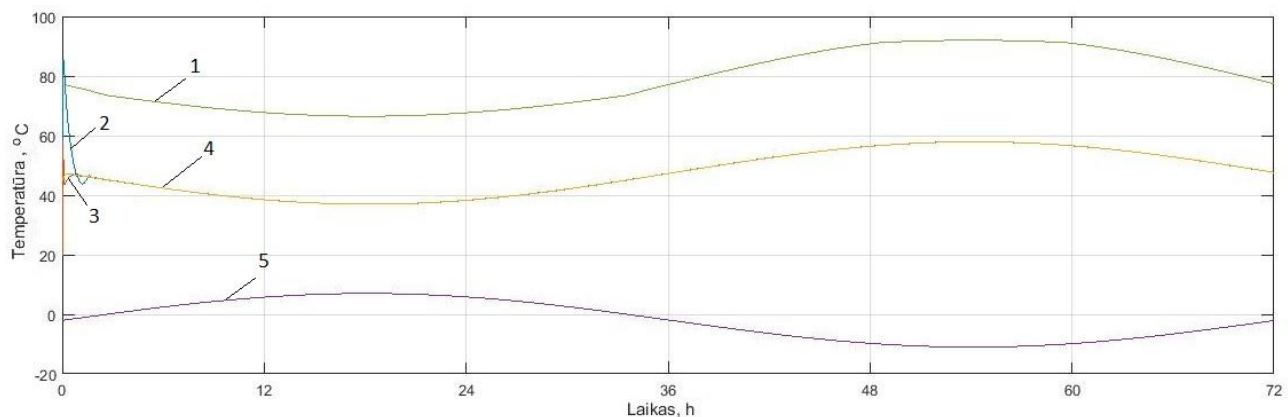
*Kai lauko oro temperatūra kinta nuo 0 iki -12 °C*



3.53 pav. A pastatas, kai valdymo sistemos parametrai P-0,008 I-1/100

*1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – renovuotas pastatas; 3 – nerenovuotas pastatas; 4 – šildymo kreivė; 5 – lauko oro temperatūra.*

Kaip matyti 3.53 paveiksle, kai pastatas yra nerenovuotas, pereinamasis procesas užtrunka 2500 sekundžių. Renovuoto pastato atveju, pereinamasis procesas užtrunka 7000 sekundžių. Valdymo sistema išlieka stabili visą modeliavimo laikotarpį ir tiksliai atkartoja šildymo kreivę.

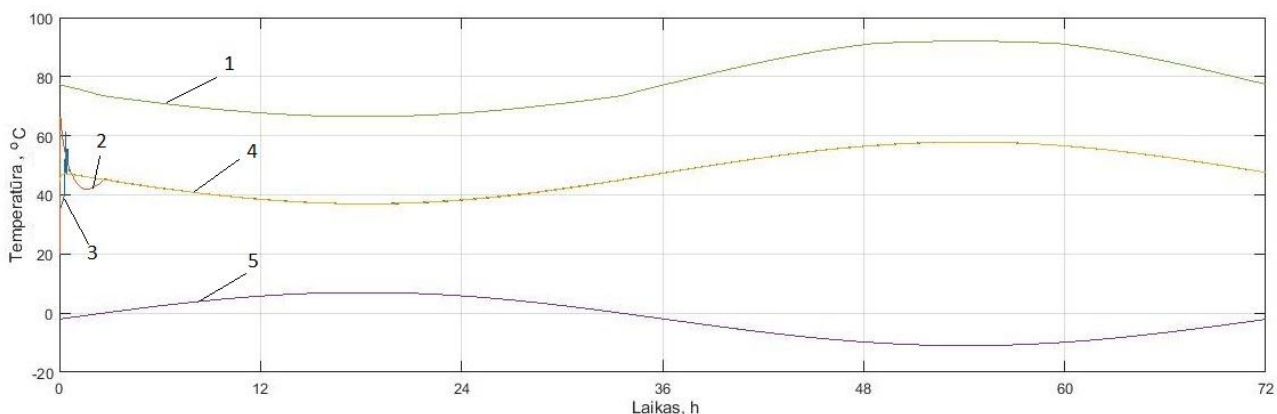


3.54 pav. A pastatas, kai valdymo sistemos parametrai P-0,002 I-1/150

*1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – renovuotas pastatas; 3 – nerenovuotas pastatas; 4 – šildymo kreivė; 5 – lauko oro temperatūra.*

3.54 paveiksle matyti, kai pastatas yra nerenovuotas, pereinamojo proceso trukmė yra 2231 sekundė. Renovuoto pastato valdymo sistema išlieka stabili, tačiau pereinamasis procesas užtrunka

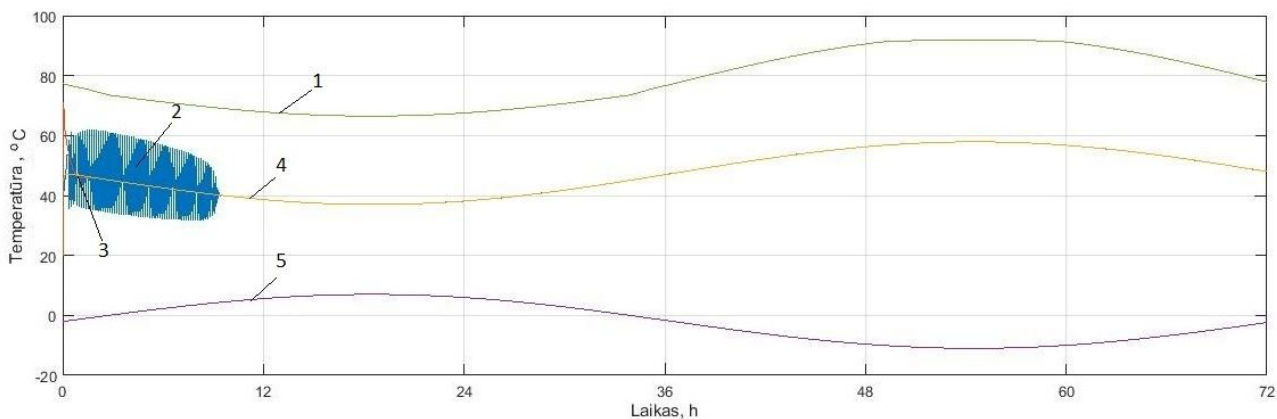
6050 sekundę. Renovuoto ir nerenovuoto pastato atveju valdymo sistemos išlieka stabilios ir tiksliai atkartoja šildymo kreivę.



3.55 pav. B pastatas, kai valdymo sistemos parametrai P-0,006 I-1/180

1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – nerenovuotas pastatas; 3 –renovuotas pastatas; 4 – šildymo kreivė; 5 – lauko oro temperatūra.

Kaip matyti 3.55 paveiksle, kai pastatas yra nerenovuotas, pereinamasis procesas užtrunka 9400 sekundes. Renovuoto pastato atveju, pereinamasis procesas užtrunka 2500 sekundes. Valdymo sistema abejais atvejais išlieka stabiliai visą modeliavimo laikotarpį ir tiksliai atkartoja šildymo kreivę.

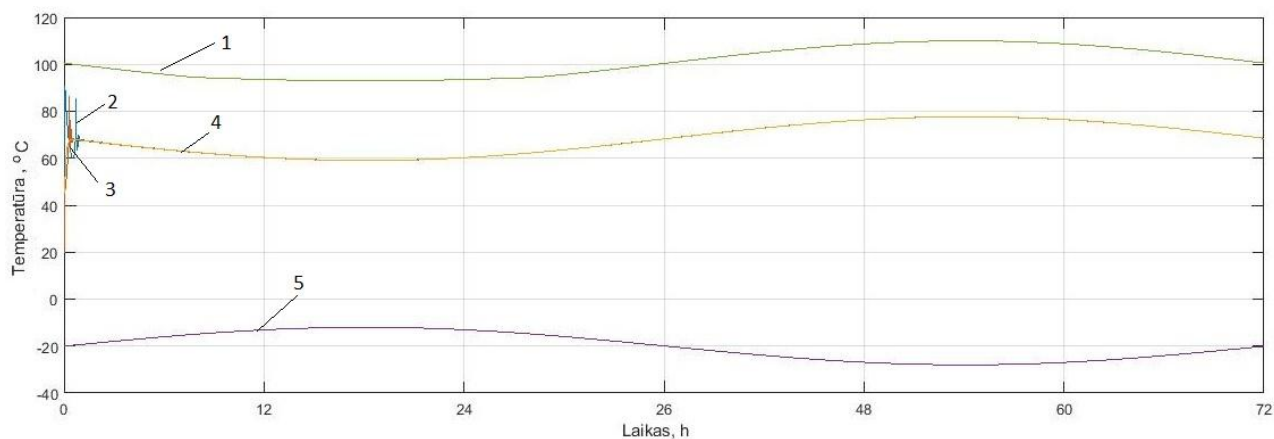


3.56 pav. B pastatas, kai valdymo sistemos parametrai P-0,05 I-1/120

1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – renovuotas pastatas; 3 –nerenuotas pastatas; 4 – šildymo kreivė; 5 – lauko oro temperatūra.

3.56 paveiksle matyti, kad nerenovuoto pastato atveju, pereinamojo proceso trukmė yra 4212 sekundžių, o valdymo sistema išlieka stabili ir tiksliai atkartoja šildymo kreivę. Renovuoto pastato valdymo sistemoje pereinamojo proceso metu, kuris trunka 32000 sekundžių, atsiranda švytavimai, kurių amplitudė siekia 24 °C, pasibaigus pereinamajam procesui tiekiamo į šildymo sistemą termofikacinio vandens temperatūra tiksliai atitinka šildymo kreivę. Toliau atliekamas pastato A modeliavimas, kai valdymo sistemos regulatoriaus parametrai yra P-0,008 I-1/100, o lauko temperatūra kinta nuo -12 iki -28 °C. Modeliavimo rezultatai vaizduojami 3.57 paveiksle.

*Kai lauko oro temperatūra kinta nuo -12 iki -28 °C*

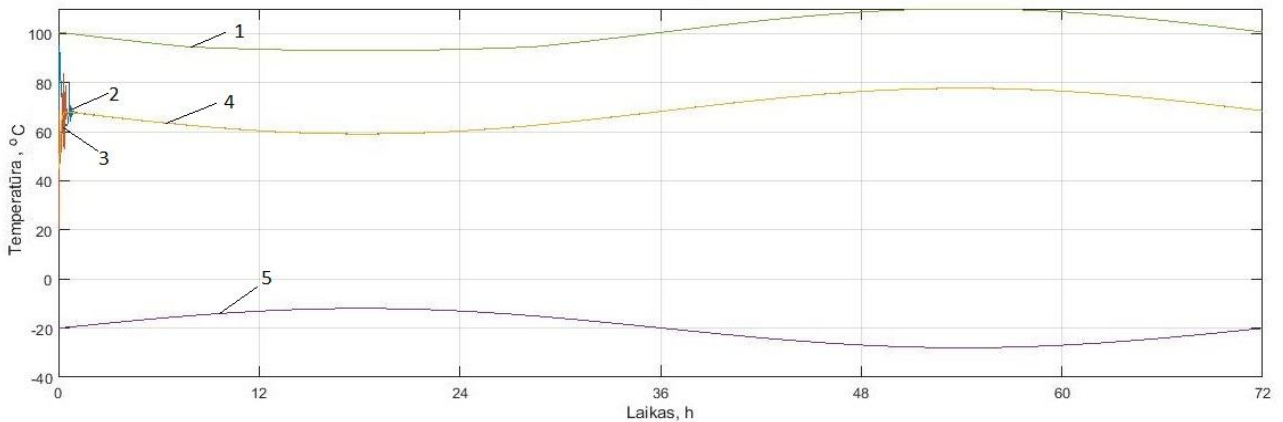


3.57 pav. A pastatas, kai valdymo sistemos parametrai P-0,008 I-1/100

*1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – renovuotas pastatas;*

*3 – nerenovuotas pastatas; 4 – šildymo kreivė; 5 – lauko oro temperatūra.*

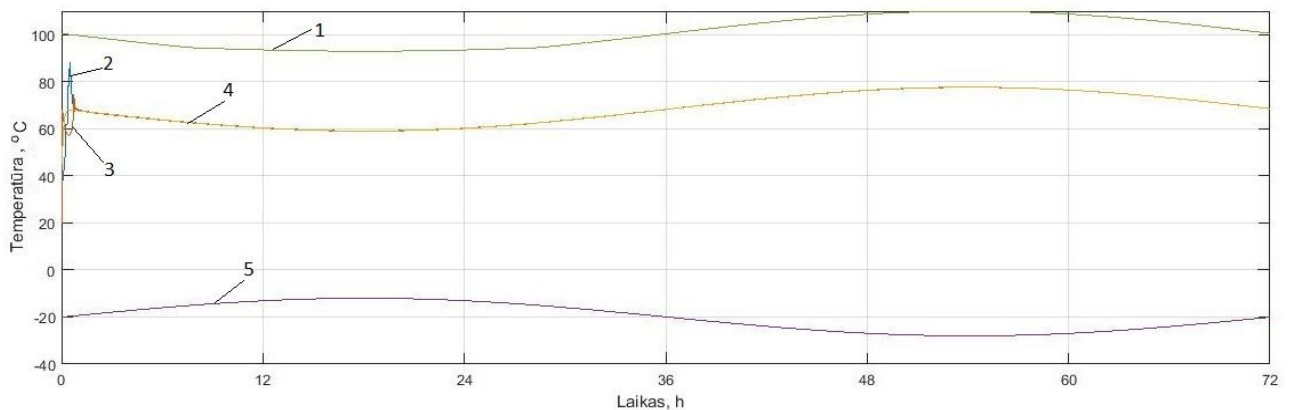
Kaip matyti 3.57 paveiksle, kai pastatas yra nerenovuotas, pereinamasis procesas užtrunka 2122 sekundes. Renovuoto pastato atveju, pereinamasis procesas užtrunka ilgiau - 3500 sekundes. Valdymo sistema abejais atvejais išlieka stabili visą modeliavimo laikotarpį ir tiksliai atkartoja šildymo kreivę. Žemiau 3.58 paveiksle vaizduojamas modeliavimas, kai valdymo sistemos regulatoriaus parametrai yra P-0,002 I-1/150.



3.58 pav. A pastatas, kai valdymo sistemos parametrai P-0,002 I-1/150

1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – renovuotas pastatas; 3 –nerenuotas pastatas; 4 – šildymo kreivė; 5 – lauko oro temperatūra.

3.58 paveiksle matyti, kai pastatas yra nerenovuotas, pereinamojo proceso trukmė yra 2101 sekundė. Renovuoto pastato valdymo sistema išlieka stabili, tačiau pereinamasis procesas užtrunka 3500 sekundžių. Renovuoto ir nerenovuoto pastato atveju, valdymo sistemos išlieka stabilios ir tiksliai atkartoja šildymo kreivę. Toliau atliekamas pastato B modeliavimas, kai valdymo sistemos regulatoriaus parametrai yra P-0,006 I-1/180. Modeliavimo rezultatai vaizduojami 3.59 paveiksle.

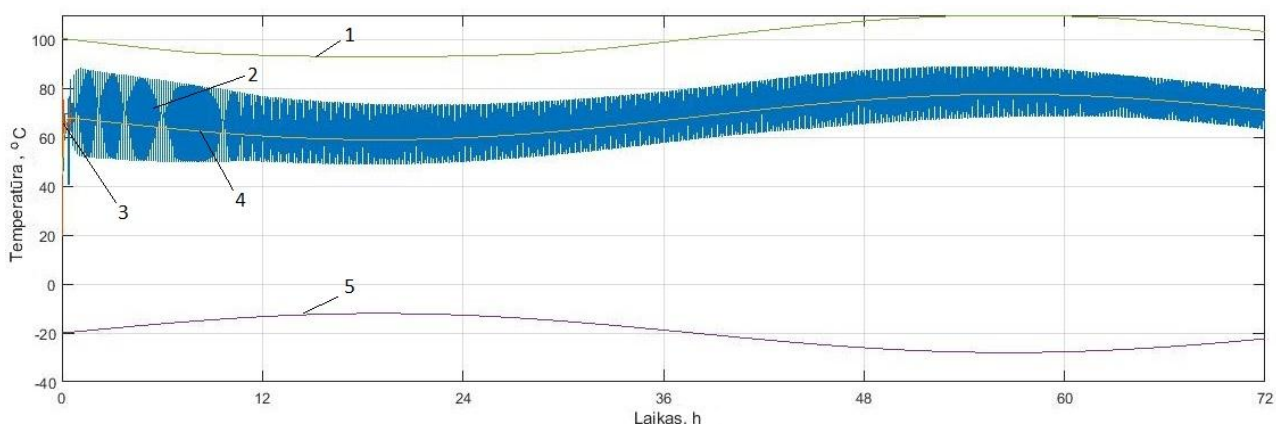


3.59 pav. B pastatas, kai valdymo sistemos parametrai P-0,006 I-1/180

1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – renovuotas pastatas; 3 –nerenuotas pastatas; 4 – šildymo kreivė; 5 – lauko oro temperatūra.

Kaip matyti 3.59 paveiksle, atveju, kai pastatas yra nerenovuotas, pereinamasis procesas užtrunka 4400 sekundes. Renovuoto pastato atveju, pereinamasis procesas užtrunka – 3011

sekundes. Valdymo sistema abiem atvejais išlieka stabili visą modeliavimo laikotarpį ir tiksliai atkartoja šildymo kreivę.



2.60 pav. B pastatas, kai valdymo sistemos parametrai P-0,05 I-1/120

1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – renovuotas pastatas; 3 – nerenuotas pastatas; 4 – šildymo kreivė; 5 – lauko oro temperatūra.

3.60 paveiksle matyti, kad nerenuoto pastato atveju, pereinamojo proceso trukmė yra 2500 sekundžių, valdymo sistema visą modeliavimo laikotarpį išlieka stabili ir tiksliai atkartoja šildymo kreivę. Renovuoto pastato valdymo sistemoje atsiranda švytavimai, kurių amplitudė siekia 22 °C ir trunka visą modeliavimo laikotarpį.

3.7 lentelė. A pastato modeliavimo rezultatai

Kai lauko temperatūra kinta	Požymis	P-0.008 I-1/100		P-0.002 I-1/150	
		Nerenuotas	Renovuotas	Nerenuotas	Renovuotas
nuo 12 iki 0 °C	Pereinamasis procesas s.	14000	14557	9000	9765
	Švytavimų amplitudė °C	0	0	0	0
nuo 0 iki -12 °C	Pereinamasis procesas s.	2500	7000	2231	6050
	Švytavimų amplitudė °C	0	0	0	0
nuo -12 iki -28°C	Pereinamasis procesas s.	2122	3500	2101	3500
	Švytavimų amplitudė °C	0	0	0	0

3.7 lentelėje matyti, kad geriausi modeliavimo rezultatai gauti, kai valdymo sistemos regulatoriaus parametrai yra P-0,002 I-1/150, tačiau pereinamojo proceso laikas renovuoto pastato atveju didėja.

3.8 lentelė. B pastato modeliavimo rezultatai

Kai lauko temperatūra kinta	Požymis	P-0.006 I-1/180		P-0,05 I-1/120	
		Nerenovuotas	Renovuotas	Nerenovuotas	Renovuotas
nuo 12 iki 0 °C	Pereinamasis procesas s.	23000	3000	7528	3341
	Švytavių amplitudė °C	0	0	0	0
nuo 0 iki -12 °C	Pereinamasis procesas s.	9400	2500	4212	32000
	Švytavių amplitudė °C	0	0	0	26
nuo -12 iki -28 °C	Pereinamasis procesas s.	4400	3011	2500	-
	Švytavių amplitudė °C	0	0	0	28

3.8 lentelėje pateikiami B pastato, kurio šildomas plotas yra mažesnis, modeliavimo rezultatai. Iš modeliavimo duomenų matyti, kad trumpiausias pereinamojo proceso laikas yra, kai valdymo sistemos regulatoriaus parametrai yra P-0,006 I-1/180. Atveju, kai valdymo sistemos regulatoriaus parametrai yra P-0,05 I-1/120, pereinamojo proceso laikas stipriai padidėjo ir, esant režimui, kai lauko oro temperatūra kinta -12- -28 °C, sistema tapo marginaliai stabili.

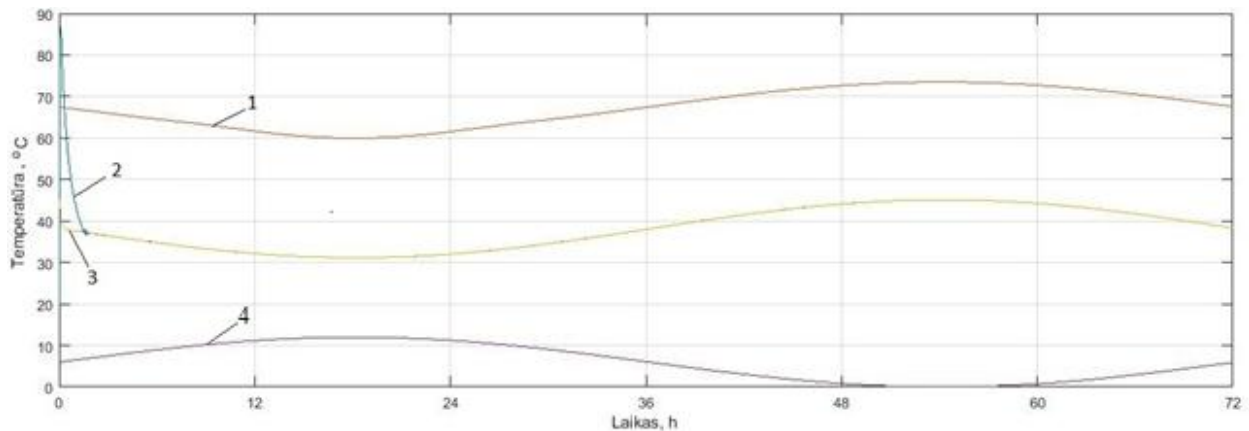
Remiantis 3.7 ir 3.8 lentelėje pateikiamais duomenimis, galime daryti išvadą, kad, renovavus pastatą, būtina sumažinti valdymo sistemos regulatoriaus parametrų koeficientus, nes, esant nerenovuoto pastato valdymo sistemos regulatoriaus koeficientams, pereinamojo proceso laikas didėja ir kai kuriais darbo režimais valdymo sistema tampa nestabili.

### 3.4. PI parametrų parinkimas, kai pastatai renovuoti

Valdymo sistemos PI regulatoriaus koeficientai parenkami rankiniu būdu, kuris yra pagrįstas taisyklėmis. Naudojant šias taisykles, atsižvelgiant į turimą tikslą, kad valdymo sistemos darbas išliktų stabilus, keičiantis aplinkos veiksniams, kurie yra pateikti 3.6 lentelėje, parinkti valdymo sistemos PI regulatoriaus parametrai:

- A pastatas  $P=0,15$ ;  $I=1/60$ ;
- B pastatas  $P=0,015$ ;  $I=1/100$ .

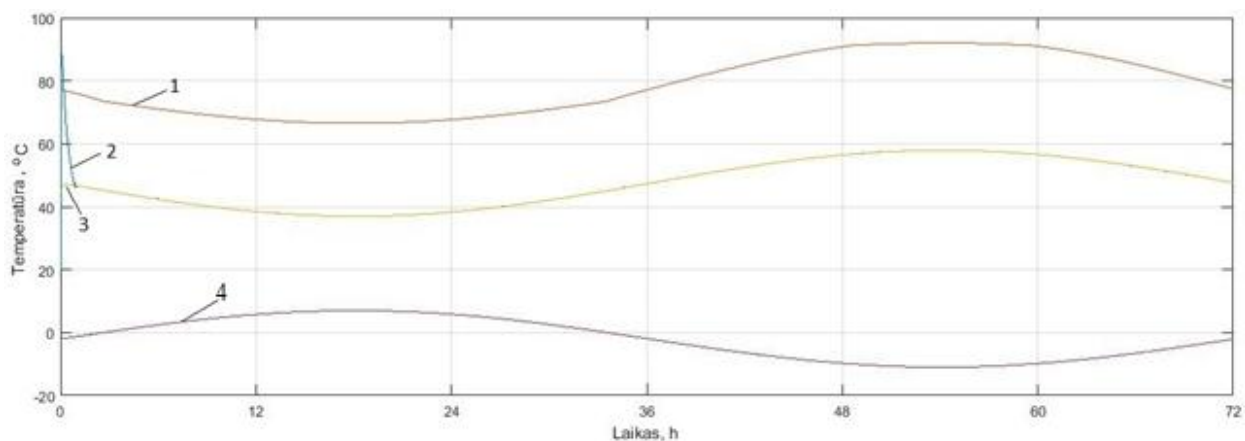
Atliktas tyrimas, kai pastato A valdymo sistemos PI reguliatorius parametrai yra  $P=0,15$ ;  $I=60$ , o lauko oro temperatūra kinta  $12-0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Iš 3.61 paveikslo matyti, kad pereinamasis procesas trunka 5545 sekundę, o paklaida nuo šildymo kreivės yra  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Toliau atliekamas modeliavimas, kai lauko temperatūra kinta nuo  $0$  iki  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



3.61 pav. A renovuotas pastatas, kai lauko oro temperatūra kinta nuo  $12$  iki  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  laipsnių

*Pastaba: 1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – tiekiamas termofikacinis vanduo į šildymo sistemą; 3 – šildymo kreivė; 4 – lauko oro temperatūra.*

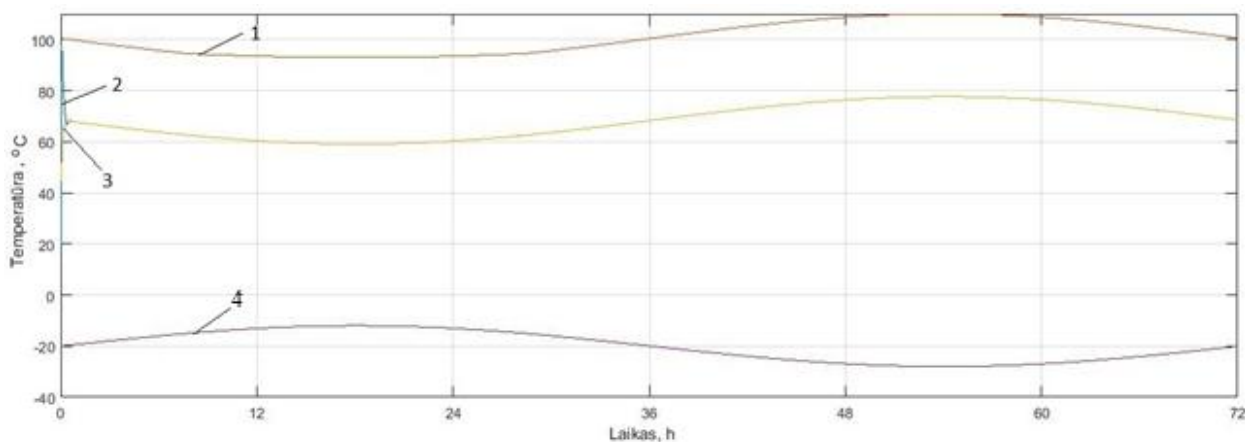
Kaip matyti 3.62 paveiksle, kai lauko oro temperatūra kinta nuo  $0$  iki  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pereinamasis procesas užtrunka 4575 sekundes. Valdymo sistema visą modeliavimo laikotarpį išlieka stabili ir tiksliai atkartoja šildymo kreivę. Toliau 3.63 paveiksle pavaizduoti modeliavimo rezultatai, kai lauko oro temperatūra kinta nuo  $-12$  iki  $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



3.62 pav. A renovuotas pastatas, kai lauko oro temperatūra kinta nuo 0 iki -12 °C laipsnių

*Pastaba: 1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – tiekiamas termofikacinis vanduo į šildymo sistemą; 3 – šildymo kreivė; 4 – lauko oro temperatūra.*

3.63 paveiksle matyti, kad pereinamojo proceso trukmė yra 2576 sekundžių, o valdymo sistema visą modeliavimo laikotarpį išlieka stabili ir tiksliai atkartoja šildymo kreivę, paklaida 0°C.



3.63 pav. A renovuotas pastatas, kai lauko oro temperatūra kinta nuo -12 iki -28 °C laipsnių

*Pastaba: 1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – tiekiamas termofikacinis vanduo į šildymo sistemą; 3 – šildymo kreivė; 4 – lauko oro temperatūra.*

Modeliavimo rezultatų suvestinė pateikiama 3.10 lentelėje, kai lauko temperatūra kinta nuo 12 °C iki -28 °C. Valdymo sistemos PI reguliatoriaus parametrai yra  $P=0,15$ ;  $I=1/60$ . Valdymo sistema visais darbo režimais išlieka stabili ir tiksliai atkartoja šildymo kreivę. Pereinamasis procesas užtrunka trumpiausiai – 2576 sekundes, kai lauko oro temperatūra kinta nuo -12 iki -28 °C. Lyginant

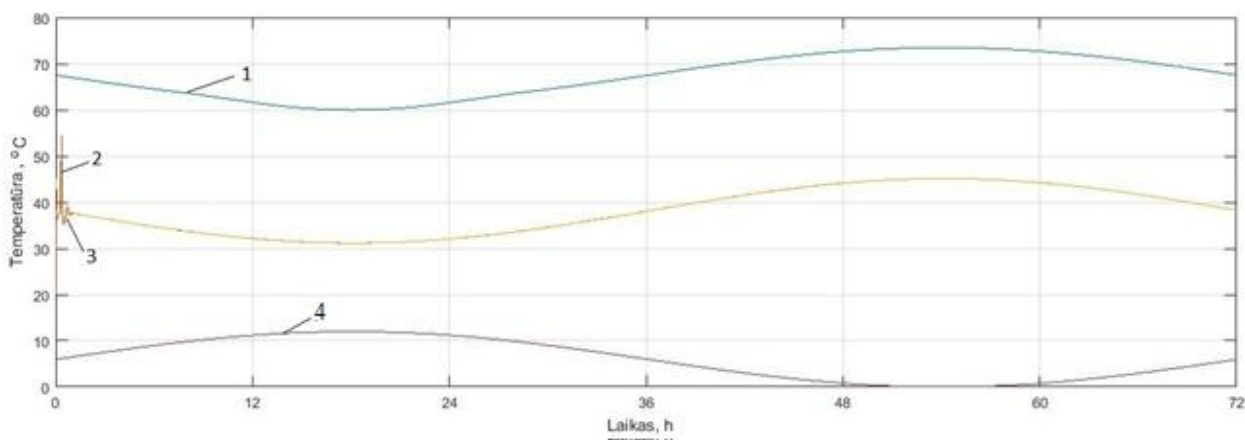


3.9 lentelėje pateiktus modeliavimo duomenis su pateikiamais 3.8 lentelėje, matyti, kai valdymo sistemos regulatoriaus parametrai yra  $P=0,15$ ;  $I=1/60$ , pereinamasis procesas užtrunka trumpiausiai visuose darbo režimuose.

3.9 lentelė. Pastato A modeliavimo rezultatų suvestinė

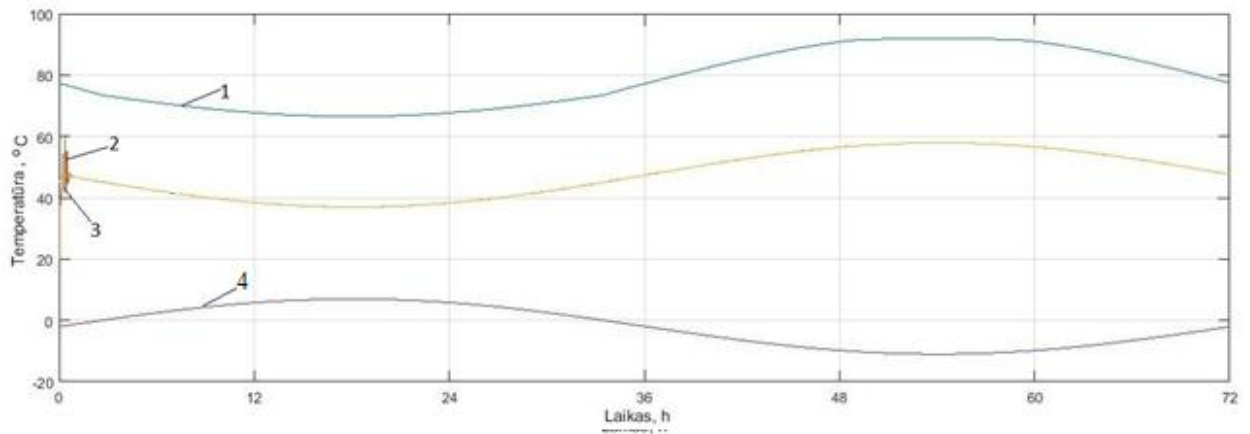
Požymis	Kai lauko temperatūra kinta		
	nuo 12 iki 0 °C	nuo 0 iki -12 °C	nuo 12 iki -28 °C
Pereinamasis procesas s.	5545	4575	2576

Ekspirimentiniu būdu surasti pastato B valdymo sistemos PI regulatorius parametrai yra  $P=0,015$ ;  $I=1/100$ . Atliekamas modeliavimas, kai lauko oro temperatūra kinta nuo 12 – 0 °C. Iš 3.64 paveikslo matyti, kad pereinamasis procesas trunka 3940 sekundes, o paklaida nuo šildymo kreivės yra 0 °C. Toliau atliekamas modeliavimas, kai lauko temperatūra kinta nuo 0 iki -12 °C. Modeliavimo rezultatai vaizduojami 3.64 paveiksle.



3.64 pav. B renovuotas pastatas, kai lauko oro temperatūra kinta nuo 12 iki 0 °C laipsnių  
*Pastaba: 1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – tiekiamas termofikacinis vanduo į šildymo sistemą; 3 – šildymo kreivė; 4 – lauko oro temperatūra.*

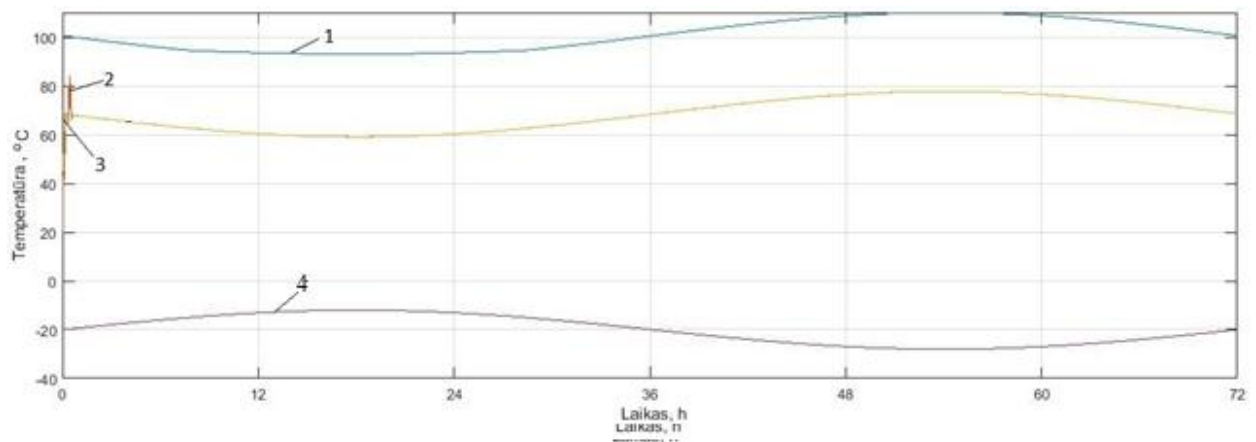
3.64 paveiksle matyti, kad pereinamasis procesas trunka 3046 sekundes, o valdymo sistema visą modeliavimo laikotarpį išlieka stabili ir tiksliai atkartoja šildymo kreivę, paklaida 0°C. Toliau atliekamas modeliavimas, kai lauko temperatūra kinta nuo 0 iki -12 °C. Modeliavimo rezultatai vaizduojami 3.65 paveiksle.



3.65 pav. B renovuotas pastatas, kai lauko oro temperatūra kinta nuo 0 iki -12 °C laipsnių

*Pastaba: 1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – tiekiamas termofikacinis vanduo į šildymo sistemą; 3 – šildymo kreivė; 4 – lauko oro temperatūra.*

Kaip matyti 3.66 paveiksle, kai lauko oro temperatūra kinta -12 iki -28 °C, pereinamasis procesas užtrunka 2355 sekundes. Valdymo sistema visą modeliavimo laikotarpį išlieka stabili ir tiksliai atkartoja šildymo kreivę.



3.66 pav. B renovuotas pastatas, kai lauko oro temperatūra kinta nuo -12 iki 28 °C laipsnių

*Pastaba: 1 – tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra; 2 – tiekiamas termofikacinis vanduo į šildymo sistemą; 3 – šildymo kreivė; 4 – lauko oro temperatūra.*

Modeliavimo rezultatų suvestinė, kai lauko temperatūra kinta nuo 12 °C iki -28 °C, o valdymo sistemos PI regulatoriaus parametrai yra  $P=0,15$ ;  $I=1/60$  pateikta 3.10 lentelėje. Valdymo sistema

visais darbo režimais išlaiko paklaidą nuo šildymo kreivės 0 °C. Pereinamasis procesas užtrunka trumpiausiai – 2355 sekundes, kai lauko oro temperatūra kinta -12- -28 °C.

3.10 lentelė. Pastato B modeliavimo rezultatų suvestinė

Požymis	Kai lauko temperatūra kinta		
	nuo 12 iki 0 °C	nuo 0 iki -12 °C	nuo 12 iki -28 °C
<b>Pereinamasis procesas s.</b>	3940	3046	2355

Lyginant 3.10 lentelėje pateiktus modeliavimo duomenis su gautais 3.8 lentelėje matyti, kad atveju, kai valdymo sistemos reguliatoriaus parametrai yra P=0,15; I=1/60, pereinamasis procesas užtrunka trumpiausiai visuose darbo režimuose.

### 3.5. Sudaryto modelio šilumos energijos sunaudojimo tyrimas ir duomenų palyginimas

Šiame skyriuje palyginami, kokią įtaką turi energijos suvartojimui valdymo sistemos PI reguliatoriaus parametrų koeficientai. Pastatų A ir B modeliavimo duomenys pateikiami 3.12 ir 3.13 lentelėse.

3.11 lentelėje pateikiami pastato A šilumos suvartojimas, kintant lauko oro temperatūrai nustatytais režimais, kurie pateikiami 3.4 lentelėje. Lentelėje valdymo sistemos PI reguliatoriaus parametrų koeficientai yra naudojami tie, kurie buvo naudojami viso tyrimo metu. Modeliavimo laikas yra 72 valandos. Nerenovuoto pastato atveju, šilumos suvartojimo rodikliai, skaičiuojant vidutinį energijos suvartojimo kiekį per vieną dieną, kinta 19 kW/h intervale. Renovuoto pastato atveju, šilumos suvartojimo rodikliai, skaičiuojant vidutinį energijos suvartojimo kiekį per vieną dieną, kinta 15 kW/h intervale.

3.11 lentelė. Pastato A energijos suvartojimas (kW), esant skirtingiems PI reguliatoriaus koeficientams

	Nerenovuotas				Renovuotas				
	<i>P=0.4</i> <i>I=1/80</i>	<i>P=0.02</i> <i>I= 1/150</i>	<i>P=0.008</i> <i>I =1/100</i>	<i>P=0.001</i> <i>I=1/250</i>	<i>P=0.4</i> <i>I=1/80</i>	<i>P=0.02</i> <i>I= 1/150</i>	<i>P=0.008</i> <i>I =1/100</i>	<i>P=0.001</i> <i>I=1/250</i>	<i>P=0.015</i> <i>I= 1/100</i>
<b>nuo 12 iki 0 °C</b>	3875	3829	3835	3834	1825	1823	1802	1769	1825
<b>nuo 0 iki -12 °C</b>	6234	6205	6207	6181	2006	2005	2004	1993	2006
<b>nuo -12 iki -28 °C</b>	10178	10141	10139	10154	2257	2251	2255	2246	2256
<b>Vidutiniškai per 1 dieną</b>	2256	2242	2241	2237	683	673	674	668	676

3.12 lentelėje pateikiami pastato B, kurio šildomas plotas yra mažesnis, šilumos suvartojimas, kintant lauko oro temperatūrai nustatytais režimais. Lentelėje 3.12 valdymo sistemos PI reguliatoriaus parametru koeficientai yra naudojami tie, kurie buvo naudojami viso tyrimo metu. Modeliavimo laikas yra 72 valandos. Nerenovuoto pastato atveju, šilumos suvartojimo rodikliai, skaičiuojant vidutinį energijos suvartojimo kiekį per vieną dieną, kinta 48 kW/h intervale. Renovuoto pastato atveju, šilumos suvartojimo rodikliai, skaičiuojant vidutinį energijos suvartojimo kiekį per vieną dieną, kinta 5 kW/h intervale.

3.12 lentelė. Pastato B energijos suvartojimas (kW), esant skirtingiems PI reguliatoriaus koeficientams

	Nerenovuotas				Renovuotas				
	<i>P=0.4</i> <i>I=1/80</i>	<i>P=0.05</i> <i>I= 1/120</i>	<i>P=0.006</i> <i>I =1/80</i>	<i>P=0.001</i> <i>I=1/250</i>	<i>P=0.4</i> <i>I=1/80</i>	<i>P=0.05</i> <i>I= 1/120</i>	<i>P=0.006</i> <i>I =1/100</i>	<i>P=0.001</i> <i>I=1/250</i>	<i>P=0.15</i> <i>I= 1/60</i>
<b>nuo 12 iki 0 °C</b>	2725	2274	2713	2630	994	994	992	988	993
<b>nuo 0 iki -12 °C</b>	4080	4079	4065	4007	1091	1080	1077	1075	1078
<b>nuo -12 iki -28 °C</b>	6338	6356	6351	6327	1252	1237	1252	1235	1238
<b>Vidutiniškai per 1 dieną</b>	1460	1412	1459	1440	371	368	369	366	368

## IŠVADOS

1. Literatūros analizės metu nebuvo aptikta darbų, kuriuose būtų nagrinėjama šildymo sistemos regulatoriaus koeficientų įtaka valdymui. Todėl buvo nuspręsta iširti, kaip PI regulatoriaus koeficientai įtakoja valdymo kokybę, pakeitus namo termodinamines savybes.
2. Išanalizavus šildymo sistemą sudarančius elementus ir joje vykstančius procesus, Matlab Simulink programiniu paketu buvo sudarytas daugiabučio gyvenamojo pastato modelis, leidžiantis modeliuoti parametrų kitimą: pastato šiluminę varžą, patalpos šiluminius pritekėjimus, oro infiltracijos laiką, šilumos punkto ir šildymo sistemos įrengimų parametrus bei pastatą veikiančias klimatinės sąlygas.
3. Ištyrus PI regulatoriaus koeficientų įtaką valdymo kokybei, pakeitus namo termodinamines savybes, galima teigti, kad norint stabiliai valdyti temperatūrą, kuo aukštesnė yra tiekiamo iš šilumos tinklų termofikacinio vandens temperatūra, tuo **žemesnė turi būti P (proporcinės juostos) reikšmė**. Taip pat, norint išvengti švytavimų, reikia **mažinti I (integravimo laiko) konstantą**. Tokiu atveju regulatoriaus reakcija bus lėtesnė, tačiau be švytavimų, didinant integravimo laiko konstantą, regulatoriaus reakcija į temperatūrų pasikeitimus bus tikslesnė, tačiau gali atsirasti švytavimai. Atlikus tyrimą su renovuotu ir nerenovuotu pastatu matyti, kad, renovavus pastatą, būtina sumažinti valdymo sistemos regulatoriaus parametrų koeficientus, nes esant nerenovuoto pastato valdymo sistemos regulatoriaus koeficientams, pereinamojo proceso laikas didėja ir kai kuriais darbo režimais valdymo sistema tampa marginaliai stabili.
4. Tyrimo metu, keičiant PI regulatoriaus parametrų koeficientus, buvo registruojami duomenys apie šilumos energijos suvartojimą. Išanalizavus modeliavimo rezultatus matyti, kad pastato A, kai jis yra nerenovuotas, šilumos suvartojimo rodikliai, skaičiuojant vidutinį energijos suvartojimo kiekį per vieną dieną, kinta 19 kW/h intervale, o, esant renovuoto pastato atveju, šilumos suvartojimo rodikliai, skaičiuojant vidutinį energijos suvartojimo kiekį per vieną dieną, kinta 15 kW/h intervale. Pastato B, kai jis yra nerenovuotas, šilumos suvartojimo rodikliai, skaičiuojant vidutinį energijos suvartojimo kiekį per vieną dieną, kinta 48 kW/h intervale, o, esant renovuoto pastato atveju, šilumos suvartojimo rodikliai kinta 5 kW/h intervale. Remiantis tyrimo rezultatais daroma išvada, jog valdymo sistemos regulatoriaus parametrai įtakoja šilumos suvartojimo rodiklius, nes esant neoptimaliems valdymo sistemos parametrams, šilumos energijos suvartojama daugiau.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Aleksa V., Technologiniu procesu automatizavimas. „Technologija“, Kaunas, 2004. ISBN 9955-09-445-1.
2. Aleksa V., Galvanauskas V., Technologinių procesų automatizavimas ir valdymas. „Technologija“, Kaunas, 2008.
3. Astrom K., Introduction to Control: Lecture 9 - PID Control [interaktyvus]. Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund University, 2002. [žiūrėta 2016 m. kovo 30 d.]. Prieiga per internet: [http://www.dei.unipd.it/~picci/Files/TEACHING/CONTROLLO\\_DEI\\_PROCESSI/AstromPID.pdf](http://www.dei.unipd.it/~picci/Files/TEACHING/CONTROLLO_DEI_PROCESSI/AstromPID.pdf)
4. Aplinkos ministerija [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. gegužės 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.am.lt/VI/index.php#a/13581>
5. Atnaujink būstą [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. gegužės 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://atnaujinkbusta.lt/apie/>
6. Apie lituotus plokštinius šilumokaičius [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. gegužės 01 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.statybajums.lt/temos/sildymas-sildymo-iranga/apie-lituotus-plokstinius-silumokaicius>
7. Architektura ir konstrukcijos [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. balandžio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://architektura-konstrukcijos.lt/nuo-2016-metu-projektavimo-ir-statybospaslaugossmarkiai-brangs/>
8. Bejan A., Allan D. Karus. Heat transfer handbook [interaktyvus]. Published by John Wiley & Sons. Inc. Hoboken. New Jersey Published simultaneously in Canada 2003. [žiūrėta 2016 m. gegužės 01 d.]. Prieiga per internetą: [https://books.google.lt/books?hl=lt&lr=&id=d4cgNGIUq8C&oi=fnd&pg=PR9&dq=Bejan+%26+Karus,+2003&ots=26BVha6vZA&sig=aqqmtL78BUntKG1u4Cb2Kxpqs5Q&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Bejan%20%26%20Karus%2C%202003&f=false](https://books.google.lt/books?hl=lt&lr=&id=d4cgNGIUq8C&oi=fnd&pg=PR9&dq=Bejan+%26+Karus,+2003&ots=26BVha6vZA&sig=aqqmtL78BUntKG1u4Cb2Kxpqs5Q&redir_esc=y#v=onepage&q=Bejan%20%26%20Karus%2C%202003&f=false)
9. Biekša D. Pastato inžinerinių sistemų procesų integravimo vertinimas taikant eksergijos kriterijų. Vilnius. 2008, Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
10. Edmund Wong. An Investigation Of The Performance Of District Heating Substations Using Computer Simulation [interaktyvus]. Ryerson University, 2011. [žiūrėta 2016 m. gegužės 01 d.]. Prieiga per internetą: [http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:0TOWmhMbF0J:scholar.google.com/&hl=lt&as\\_sdt=0,5](http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:0TOWmhMbF0J:scholar.google.com/&hl=lt&as_sdt=0,5)

11. Yliniemi K. Fault detection in district heating substations [interaktyvus]. Luleå University of Technology, 2005. [žiūrėta 2016 m. gegužės 01 d.]. Prieiga per internetą: <https://pure.ltu.se/portal/files/113922/LTU-LIC-0560-SE.pdf>.
12. Gustafsson, J., Delsing, J. van Deventer., Thermodynamic Simulation of a Detached House with District Heating Subcentral [interaktyvus]. Ryerson University, 2008. [žiūrėta 2016 m. gegužės 01 d.]. Prieiga per internetą: <http://pure.ltu.se/portal/files/1669465/pid588494.pdf>
13. Dr. Gudzinskas J., dr. V. Lukoševičius, dr. E. Tuomas, habil. dr. V. Martinaitis. Šilumos vartotojo vadovas. Vilnius, 2011.
14. Gedgaudas M., Šležas A., Tuomas E. Šilumos tiekimas. Kaunas: Aušra, 1993, 327 p.
15. Jomni Y., Improving heat measurement accuracy in district heating substations [interaktyvus]. PhD thesis, Lulea University of Technology, Lulea University of Technology, 971 87 Luleå, Sweden, 2006. [žiūrėta 2016 m. balandžio 25 d.]. Prieiga per internetą: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=DA00F4A8A2D26EB32F2CC1B6F8A0DA03?doi=10.1.1.467.3109&rep=rep1&type=pdf>
16. Jakubčionis M. Šiluminės technikos pagrindai : mokomoji knyga. – Kaunas: Technologija, 2011. p. 7-9, 13-14, 79-83. ISBN 978-9955-20-670-5.
17. Jasaitis V., Gyvenamojo namo šildymo ir vėdinimo sistemos kompiuterinio valdymo modelio sudarymas ir tyrimas naudojant miglotąją logiką [interaktyvus]. Kaunas, 2005. [žiūrėta 2016 m. gegužės 01 d.]. Prieiga per internetą: [http://vddb.library.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2005~D\\_20050522\\_222507-69302/DS.005.0.01.ETD](http://vddb.library.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2005~D_20050522_222507-69302/DS.005.0.01.ETD)
18. Levišauskas D. Automatinio reguliavimo sistemų derinimas. Vilnius, 2008
19. Ljungren P. and J. Wollerstrand. Optimal radiatorreglering for att na lag fjarrvarmeretur [interaktyvus]. Report at Svensk Fjarrvarmeforening 2005:142, Institutionen for Energivetenskap, LTH, 2005. Art nr: FOU 2005:142. [žiūrėta 2016 m. balandžio 21 d.]. Prieiga per internetą: [http://www.lth.se/fileadmin/ees/Publikationer/2006/Lic\\_PL.pdf](http://www.lth.se/fileadmin/ees/Publikationer/2006/Lic_PL.pdf)
20. Liutkevicius R., Parametriškai optimizuojami regulatoriai. PID regulatorius [interaktyvus]. Vilnius, 2008 [žiūrėta 2016 m. sausio 30 d.]. Prieiga per internetą: [http://fcim.vdu.lt/~raimundas\\_liutkevicius/kvs/Dien/lab/vslab1.doc](http://fcim.vdu.lt/~raimundas_liutkevicius/kvs/Dien/lab/vslab1.doc)
21. Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. gegužės 01 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.meteo.lt/apzvalgos.php>
22. Dr. Tuomas. E., Šilumos perdavimo tinklų ir pastatų vidaus šildymo, karšto vandens sistemų optimalių, saugių, efektyvių darbo režimų ir priemonių jiems įdiegti analizei bei rekomendacijų

- dėl šios srities teisinio reglamentavimo tobulinimo parengimas [interaktyvus]. LSTA 2006, 40psl. [žiūrėta 2016 m. kovo 10 d.]. Prieiga per internetą: [http://www.lsta.lt/files/studijos/1\\_STsistemu-darbo-rezimai.pdf](http://www.lsta.lt/files/studijos/1_STsistemu-darbo-rezimai.pdf)
23. Mikucas A., Mikucienė I. Kazanavičius, E., Čeponis, J. Kompiuterizuoto būsto šiluminio balanso modeliavimas naudojant MATLAB [interaktyvus]. Informacijos mokslai, 2009. [žiūrėta 2016 m. gegužės 01 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.zurnalai.vu.lt/informacijos-mokslai/article/view/3219/2336>
  24. Novošinskas H., Inžinerinių technologijų projektavimas – Vilnius: Akademija 2012.
  25. Paulauskaitė S., Valančius K. Statybinė šiluminė fizika. Vilnius technika 2012
  26. Palangos komunalinis ūkis [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. gegužės 01 d.]. Prieiga per internetą: <http://butas.palkom.eu/>
  27. PID reguliatorius [interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. balandžio 5 d.]. Prieiga per internetą: [https://lt.wikipedia.org/wiki/PID\\_reguliatorius](https://lt.wikipedia.org/wiki/PID_reguliatorius)
  28. Rogrs S. C. and others. Building as a Power Plant Proposed Control Architecture. Intelligent Control. IEEE International Symposium. 2003, p. 691–696.
  29. Siren K. Lanksti pastatų energetikos technologija – ateities iššūkis. VGTU 4-oji tarptautinė konferencija. Energija pastatams. 2000 rugsėjo 21–22 d. Vilnius, p. 337–343.
  30. Švenčianas P., Narbutas T. Šiluminė technika. – Kaunas: Technologija, 1997. – 212 p