



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

Žilvinas Bičiūnas

**TEMPERATŪROS REGULIAVIMO VALDYMO SISTEMOS
TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Lekt. dr. Marius Mikolajūnas

PANEVĖŽYS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

**PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS
TECHNOLOGIJŲ KATEDRA**

TVIRTINU

Katedros vedėjas doc. Arūnas Tautkus

(parašas)

(data)

DARBO PAVADINIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

Vadovas Lekt. dr. Marius

Mikolajūnas

(parašas)

(data)

Recenzentas

(parašas)

(data)

Projektą atliko Žilvinas Bičiūnas

(parašas)

(data)

PANEVĖŽYS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

(Fakultetas)

Žilvinas Bičiūnas

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos 621H66001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Temperatūros reguliavimo valdymo sistemos tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. birželio 1 d.

Panevėžys

Patvirtinu, kad mano **Žilvinas Bičiūnas** baigiamasis projektas tema „**Temperatūros reguliavimo valdymo sistemos 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)

BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Išduota studentui: Žilvinui Bičiūnui Grupė PME-3

1. Darbo tema:

Lietuvių kalba: Temperatūros reguliavimo valdymo sistemos tyrimas

Anglų kalba: Research of reactor temperature regulation control

Patvirtinta 2015 m. vasario mėn. 13 d. dekanu potvarkiu Nr. ST17-F-13-11

2. Darbo tikslas:

Parinkti optimalių kaitinimo elementų išdėstymą kaitinamosios plokštelės reaktoriaus kaitinimui, palaikyti užduotą temperatūrą valdant elementus, naudoti papildomą aušinimą.

3. Reikalavimai ir sąlygos:

Visos kaitinimo reaktoriaus sienelės per 3 minutes turi įkaisti iki $200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros. Reikalingas temperatūros palaikymas, bei priverstinis aušinimas.

4. Projekto struktūra. Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į BP pobūdį.

4.1. Literatūros apžvalga ir analizė

Atlikti literatūros apžvalgą apie valdymo sistemų sudarymo metodus, peržvelgti pagrindines termodinamikos sąvokas, pasirinkti baigtinių elementų analizės programą modelio projektavimui.

4.2. Terminiai ir analizės tyrimai

Sukurti kaitinimo reaktoriui plokštelės modelį, kuriame panaudojant kaitinimo elementus reaktoriaus sienelės pasiektą reikiamą temperatūrą. Paskaičiuoti matematinį kaitinimo plokštelės modelį reikiamai temperatūrai pasiekti, ir ją palaikyti.

4.3. Eksperimentiniai tyrimai

Modeliuojant baigtinių elementų analizės programa parinkti tinkamą kaitinimo elementų išdėstymą kaitinimo reaktoriaus plokštelės kaitinimui, praktiškai išbandyti reaktoriaus kaitinimą ir aušinimą.

5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis.

6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas

_____ (data)

Užduotį gavau: _____

(studento vardas, pavardė, parašas)

_____ (data)

Vadovas: _____

(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

_____ (data)

Bičiūnas, Ž. Temperatūros reguliavimo valdymo sistemos tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Marius Mikolajūnas; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas, Technologijų katedra.

Panevėžys, 2015. 66 psl.

SANTRAUKA

Magistriniame darbe apžvelgtas valdymo sistemų sudarymo metodas, šilumos mainų procesas. Išbandytas ir panaudotas baigtinių elementų analizės programos modeliavimas magistrinio darbo tema. Palyginti trys kaitinimo plokštelės modelių variantai. Ištirtas temperatūros valdymas, aprašytas eksperimento algoritmas, schema. Atliktas kaitinimo plokštelės kaitinimas iki 200 °C ir trys aušinimo variantai.

Raktiniai žodžiai: valdymas, kaitinimo plokštelė, kaitinimas, aušinimas, temperatūra.

Bičiūnas, Ž. Research of reactor temperature regulation control. Masters final project / supervisor lekt. dr. Marius Mikolajūnas; Kaunas University of Technology, Panevėžys Faculty of Technology and Business, Department of Technologies.

Panevėžys, 2015. 66 psl.

SUMMARY

In work is reviewed the management of systems and the heat exchange processes. Tested and used in finite element analysis programs for simulation of the work theme. Compared three of heating plate models variants. Investigated control of temperature, described experimental of algorithm and scheme. Carried heating plate heating to 200 °C and three cooling options.

Keywords: management, heating plate, heating, cooling, temperature.

TURINYS

Įvadas.....	9
1. LITERATŪROS APŽVALGA IR ANALIZĖ	10
1.1. Valdymo sistemos.....	10
1.1.1 Automatinis ir rankinis valdymas.....	10
1.1.2 Valdymo sistemų sudarymo metodai, tipinė funkcinė schema	10
1.1.3 Valdymo sistemų kokybė, struktūra, funkciniai elementai	12
1.1.4 Regulatoriai	12
1.1.5 PID reguliatorius.....	13
1.2 Pagrindinės termodinamikos sąvokos.....	18
1.2.1 Šilumos mainai	18
1.2.2 Stacionarusis šilumos laidumas	19
1.3 COMSOL Multiphysics programa	20
1.3.1 Šilumos perdavimas Comsol Multiphysics programoje.....	23
1.3.2 Baigtinių elementų tinkeliai Comsol Multiphysics programoje.....	25
1.4 Skyriaus išvados	26
2. EKSPERIMENTINĖ DALIS	27
2.1 Fizinės sistemos aprašymas	27
2.2 Eksperimento valdymo algoritmo sudarymas	28
2.3 Baigtinių elementų analizės ir modeliavimo programa „COMSOL MULTIPHYSICS“ ..	30
2.3.1 Modelio projektavimas	30
2.3.2 Kaitinimo plokštelės modelių palyginimas Comsol programoje.....	41
2.3.3 Kaitinimo plokštelės baigtinių elementų tinkelių palyginimas	43
2.4 Matematinis kaitinimo plokštelės skaičiavimas Matlab terpėje	48
2.5 Kaitinamosios plokštelės temperatūros valdymas ir parametrų tyrimas	51
2.6 Kaitinimo plokštelės aušinimas	56
2.7 Eksperimentinis automatizuoto kaitinimo plokštelės proceso palyginimas su teorine kreive	58

2.8 Skyriaus išvados	59
Išvados	60
Literatūros sąrašas	61
PRIEDAI	63

IVADAS

Kalbant apie temperatūros kontrolę, pramonines kaitinimo bei aušinimo sistemas, pastarosios priskiriamos horizontaliajam klausimui. Kitais žodžiais tariant, geriausios turimos technologijos vertinamos nuodugniai, neatsižvelgiant į pramoninį procesą, kuris turi būti vykdomas. Vis dėlto svarstant geriausią turimą technologiją, kurią galima taikyti valdymo sistemose, atsižvelgiama į pramoninio proceso reikalavimus. Pripažįstama, kad pasirinkti, kokia geriausia turima technologija, kurią galima taikyti tam tikram procesui yra sudėtingas klausimas. Norint įgyvendinti ekonomiškai ir techniškai priimtinas sąlygas, reikia derinti valdomo proceso kintamuosius, kurie gali būti susiję ne tik su pačiu procesu, bet ir su išorine aplinka.

Pramoninės temperatūros valdymo sistemos - tai sistemos šilumos pertekliui šalinti ar šilumai didinti, naudojant šilumos mainus tarp vandens ir (arba) oro, kad tos terpės temperatūra būtų pasiekta iki reikiamos temperatūros.

Tiriamajame darbe pateiktas integruotas metodas geriausiai turimai technologijai, kurią galima taikyti aušinimo sistemose, nustatyti, tačiau kartu pripažįstama, kad galutinį sprendimą privalu priimti atsižvelgiant į konkrečias sąlygas. Taikant šį metodą, jei reikėtų rinktis aušinimo sistemą, nebūtų galima svarstyti, kurie aušinimo sistemos veikimo aspektai yra susiję.

Kaitinimo plokštelės aušinimui panaudotas suspaustas oras, kuris yra gaunamas kompresoriaus pagalba, nedaro jokio poveikio aplinkos užterštumui. O tai ypač aktualu šiandien, sprendžiant ekologines taršos mažinimo problemas.

Tyrimo objektas – Kaitinimo plokštelė.

Tyrimo tikslas: parinkti optimalių kaitinimo elementų išdėstymą kaitinamosios plokštelės reaktoriaus kaitinimui, palaikyti užduotą temperatūrą valdant elementus, naudoti papildomą aušinimą.

Tyrimo uždaviniai:

1. Susipažinti su valdymo sistemų sudarymo metodais;
2. Peržvelgti pagrindines termodinamikos sąvokas;
3. Panaudoti baigtinių elementų analizės programą modelio projektavimui;
4. Atlikti kaitinimo plokštelės temperatūros kontrolę, kaitinimą, aušinimą ir temperatūros palaikymą.

Tyrimo metodai – mokslinės literatūros analizė, eksperimentai.

1. LITERATŪROS APŽVALGA IR ANALIZĖ

1.1 Valdymo sistemos

1.1.1 Automatinis ir rankinis valdymas

Aplinkoje nuolat vyksta įvairūs valdymo procesai. Jie vyksta ne tik žmogaus sukurtoje erdvėje (roboto valdymas, lėktuvo autopilotas, šviesoforas, vėdinimo sistema ir t.t.), bet ir gyvojoje gamtoje (palaikoma pastovi gyvojo organizmo kūno temperatūra, širdies ritmas, kraujospūdis ir t.t.). Įvairių tipų valdymo sistemos naudojamos ne tik visose pramonės srityse (pavyzdžiui, gaminių kokybės valdymo sistemos, automatinės surinkimo linijos, robotika ir kt.), bet ir sprendžiant ekonomines, socialines, transporto sistemų valdymo, krašto apsaugos, aplinkos apsaugos ir kt. problemas [15].

Automatinio reguliavimo sistema (ARS) vadinama tokia valdymo sistema, kurioje yra grįžtamasis ryšys. Taigi ARS yra uždaroji valdymo sistema [13].

Valdymo inžinerija nagrinėja įvairių sistemų matematinius modelius, tiria jų dinamiką ir pagal valdymo teorijos žinias sudaro sistemą valdantį reguliatorių [16].

Automatinių valdymo sistemų privalumai:

- didelis saugumas ir efektyvumas;
- nereikalauja didelių žmogiškųjų ir materialinių resursų;
- paprastumas, pigumas ir patogumas;
- didelis našumas ar greitis;
- ...

Lyginant su rankiniu, kiekvienas paminėtas privalumas yra gana sąlyginis ir priklauso nuo konkrečios situacijos. Automatinis valdymas dažnai yra nepakeičiamas, bet yra sričių, kur rankinis valdymas yra žymiai efektyvesnis (pvz., kvalifikuotas policijos pareigūnas sankryžoje rytinių kamščių metu).

1.1.2 Valdymo sistemų sudarymo metodai, tipinė funkcinė schema

Kiekvieną valdymo sistemą, nepriklausomai nuo jos tipo ar fizinės kilmės, apibūdina [14]:

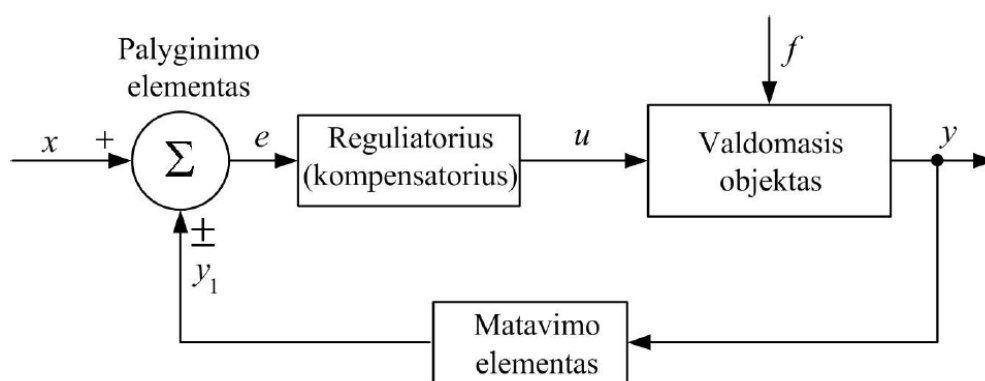
- valdymo tikslai;
- sistemos komponentai;

- valdymo rezultatai.

Sistemų modelius galima sudaryti naudojant du skirtingus metodus: analitinį modeliavimą ir eksperimentinį modeliavimą (sistemų identifikavimą). Analitinis modeliavimas yra grindžiamas sisteminiu fizikos dėsnų taikymu sistemos komponentams, norint gauti jų matematinį aprašymą (modelį). Modelius taip pat galima sudaryti vykdant identifikavimo eksperimentą, kurio metu užregistruoti sistemos įėjimo ir išėjimo duomenys panaudojami prognozuojamos modelio struktūros nežinomiems parametrams įvertinti.

Automatinės sistemos skirstomos pagal naudojamą energijos rūšį ar fizinę kilmę (elektrines, mechanines, hidraulines, pneumatines, šilumines, biologines ir kt.), pagal paskirtį (pozicionavimo, sekimo, stabilizavimo, programinio valdymo ir kt.), pagal valdomąjį parametą (padėties, greičio, lygio, temperatūros, slėgio ir kt.), pagal įėjimų/išėjimų skaičių ir kt.

Valdymo sistemos sandarai aprašyti ir jos elementų paskirčiai paaiškinti, naudojamos funkcinės schemas (2 pav.).



1 pav. Automatinio valdymo sistemos funkcinė schema (čia x – užduoties signalas; e – nuokrypis; u – valdymo signalas; f – trikdys; y – išėjimo signalas; y_1 – grįžtamojo ryšio signalas)

Šiuolaikinėje valdymo praktikoje, priklausomai nuo informacijos apie valdomąjį objektą ir jį veikiančius išorinius poveikius, taikomi šie pagrindiniai valdymo principai [15]:

- *atvirojo valdymo principas*, kai objekto valdymo algoritmas (dėsnis) yra suformuojamas remiantis vien tik jo funkcionavimo algoritmu, t.y. valdymo algoritmas nepriklauso nei nuo objekto veikiančių išorinių poveikių (trikdžių), nei nuo jo valdymo rezultatų;
- *išorinių poveikių (trikdžių) kompensavimo principas*, kai daromi objekto valdymo algoritmo pakeitimai, įvertinantys kontroliuojamų išorinių poveikių (trikdžių) matavimo rezultatus;
- *nuokrypio kompensavimo (grįžtamojo ryšio) principas*, kai daromi objekto valdymo

algoritmo pakeitimai, įvertinantys faktinius jo valdymo rezultatus.

1.1.3 Valdymo sistemų kokybė, struktūra, funkciniai elementai

Projektuojant automatinio valdymo sistemas, naudojami analizės ir sintezės metodai. Taikant analizės metodus, galima nustatyti kiekybines sistemų valdymo charakteristikas, t.y. suprasti kaip sistema veikia. Taikant sintezės metodus, galima pasiekti tokį sistemos veikimą, kad būtų tenkinami jos kokybės reikalavimai:

- sistemos greitaveika (reakcijos greitis);
- stabilumas;
- valdymo tikslumas;
- patikimumas;
- statinis ir dinaminis nuokrypis;
- ...

Pagrindinis 2 pav. pateiktos sistemos projektavimo tikslas – gauti tokį sistemos išėjimo y vektorių, kuris atitiktų nustatytus kokybės reikalavimus. Šis tikslas iš esmės pasiekiamas formuojant tinkamą objekto valdymo (reguliavimo) dėsnį – jo įėjimo vektoriaus u matematinį modelį [15].

Sudarant automatinio valdymo sistemas būtina:

- sudaryti optimalią sistemos struktūrą;
- tinkamai parinkti sistemos funkciniai elementus.

Sistemos struktūra ir funkciniai elementai parenkami priklausomai nuo sistemos paskirties, valdymo kokybės reikalavimų, turimų materialinių resursų ir kt., t.y., projektuojant valdymo sistemas, tenka spręsti techninį–ekonominį uždavinį.

Sistemos funkciniai elementai – vykdikliai, keitikliai, jutikliai, matuokliai, stiprintuvai, kompiuteriai.

Valdymo praktikoje automatinės sistemos struktūros optimizavimo uždavinys gali būti sprendžiamas naudojant fiksuotos struktūros ir pusiau laisvos struktūros schemas. Išsamiau apie struktūros optimizavimo uždavinio sprendimą pateikiama [15].

1.1.4 Regulatoriai

Sudarius sistemos struktūrą, projektuojamas pagrindinis funkcinis elementas – reguliatorius. Fiksuoto matematinio modelio reguliatoriui parenkamas tipas (matematinis modelis) ir nustatomos jo parametrų optimaliosios vertės.

Regulatoriaus tipas ir parametrai priklauso nuo reikalavimų, siekiant:

- sumažinti valdymo paklaidą;
- gauti maksimalią greitaveiką;
- užtikrinti stabilumą;
-

Reguliatorių tipai priklauso nuo valdymo algoritmo ir gali būti:

- įvairūs proporcingosios = integralinės = diferencialinės (PID) struktūros deriniai;
- būsenos grįžtamojo ryšio;
- faziniai kompensatoriai;
- fuzzy logikos;
- neuronų tinklo;
- optimalieji;
- prognozuojantieji;
- kintamos struktūros
-

1.1.5 PID reguliatorius

PID reguliatorius – tai plačiausiai šiuolaikinėse valdymo sistemose naudojamas reguliatorius. Šis reguliatorius bando mažinti (koreguoti) paklaidą tarp išmatuoto proceso kintamojo (esamo lygio) ir siekiamo (norimo) lygio, apskaičiuodamas kitai iteracijai reikalingą valdymo signalą, kad esamo lygio reikšmės artėtų prie norimo lygio reikšmių. Klasikinis PID reguliatorius sudarytas iš 3 grandžių: proporcinės (P), integruojančios (I) ir diferencijuojančios (D).

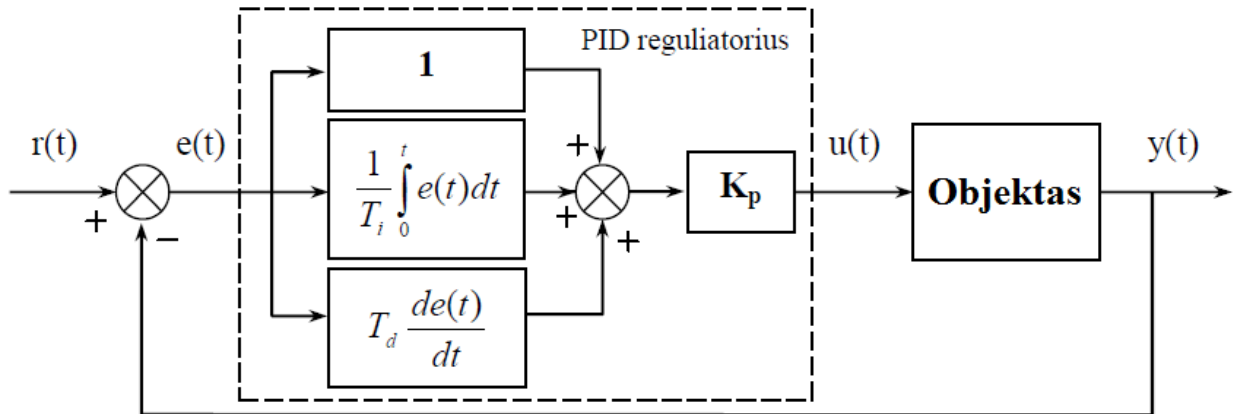
Tarkime, kad:

- $u(t)$ - valdymo signalas;
- $r(t)$ - užduoties (norimas) signalas;
- $y(t)$ - išėjimo (esamas) signalas;
- $e(t) = r(t) - y(t)$ - valdymo paklaida;
- $K = P$ - proporcinės grandies koeficientas koeficientas;
- T_I – integruojančios grandies laiko pastovioji;
- T_D – diferencijuojančios grandies laiko pastovioji;
- T_o - diskretizavimo žingsnis, tuomet tolydinio PID reguliatoriaus išraiška yra užrašoma

taip:

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d(\tau) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2)$$

Objekto su PID reguliatoriumi valdymo sistema pavaizduota (3 pav.).

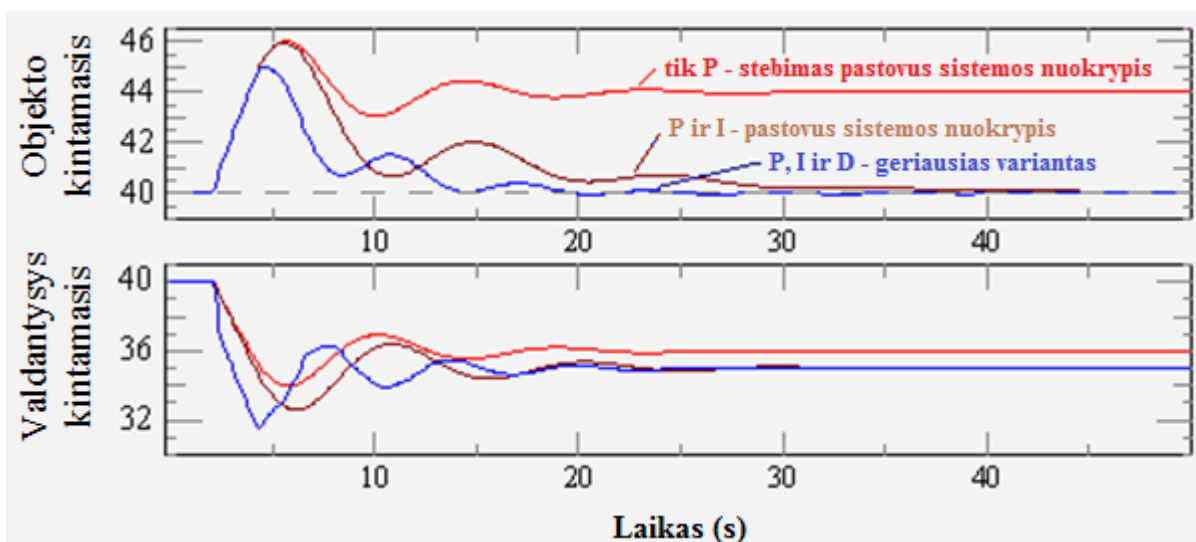


2 pav. Valdymo sistemos su PID reguliatoriumi schema

Geresniam PID reguliatoriaus veiklos supratimui nagrinėjamos atskiros PID reguliatoriaus komponentės: P, I ir D reguliatoriai. Proporciniame reguliatoriuje (3 pav. 1) valdančiojo kintamojo išėjimas yra proporcingas sistemos nuokrypiui. Jei sistemos nuokrypis yra didelis, tai valdančiojo kintamojo vertė taip pat yra didelė. Jei sistemos nuokrypis yra mažas, tai ir valdančiojo kintamojo vertė yra nedidelė. Kadangi, valdantysis kintamasis yra proporcingas sistemos nuokrypiui, tai valdantysis kintamasis bus tik tada, jei bus sistemos nuokrypis. Dėl šios priežasties vien proporciniu valdikliu negalima pasiekti, kad sistemos nuokrypis būtų lygus 0. Tokiu atveju, nebus valdančiojo kintamojo, o tuo pačiu ir valdymo. Integruojančio veikimo reguliatorius (3 pav. 2) atlieka sistemos nuokrypio sudėties veiksmą laikui bėgant, t. y. integruoja jį. Jei sistemos nuokrypis yra pastovus, tai valdančiojo kintamojo reikšmė pastoviai didės, kadangi ji priklauso nuo sumos, kuri bėgant laikui didėja. Tačiau didėjant valdančiojo kintamojo vertei, sistemos nuokrypio vertė mažėja. Toks procesas tęsiasi iki tol, kol sistemos nuokrypis pasidaro lygus 0. Integruojančio veikimo reguliatoriai yra taikomi, kai norima išvengti pastovių sistemos nuokrypių. Diferencijuojanti grandis (3 pav. 3) įvertina, koku greičiu kinta sistemos nuokrypis. Jei sistemos nuokrypis kinta greitai, tai valdančiojo kintamojo vertė yra didelė. Jei sistemos nuokrypis kinta lėtai, tai valdančiojo kintamojo vertė yra maža. Reguliatorius, kuris turi tik diferencijuojančią grandį, neturi prasmės, kadangi valdantysis kintamasis turės vertę tik tada, kai pasikeis sistemos nuokrypis [14].

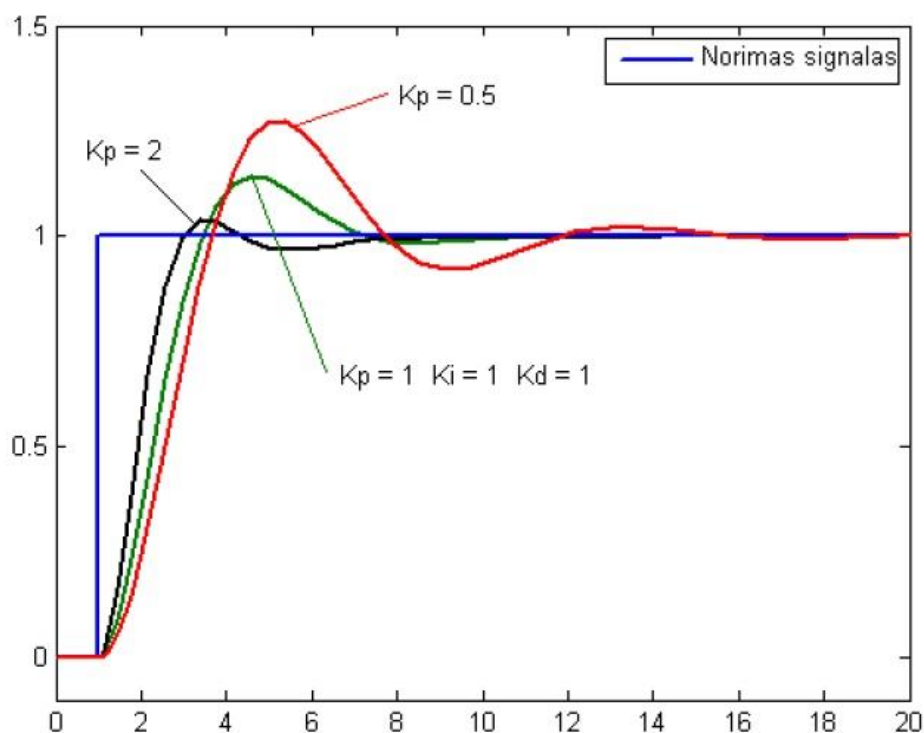
Apibendrinus gauname, kad proporcinė grandis nusako valdymo signalo $u(t)$ proporcinę priklausomybę nuo valdymo paklaidos $e(t)$, integruojanti grandis – priklausomybę nuo paklaidos $e(t)$ kaupimosi, diferencijuojanti grandis – priklausomybę nuo paklaidos $e(t)$ kitimo greičio. Užtenka parinkti šių priklausomybių koeficientus konkrečiam objektui taip, kad būtų pasiektas valdymo tikslas su galimai mažesne valdymo paklaida $e(t)$.

Bendroju atveju kaip keičiasi valdymo paklaida bei valdymo signalas naudojant atskiras PID reguliatoriaus grandis ir visas kartu pavaizduota (4 pav.).

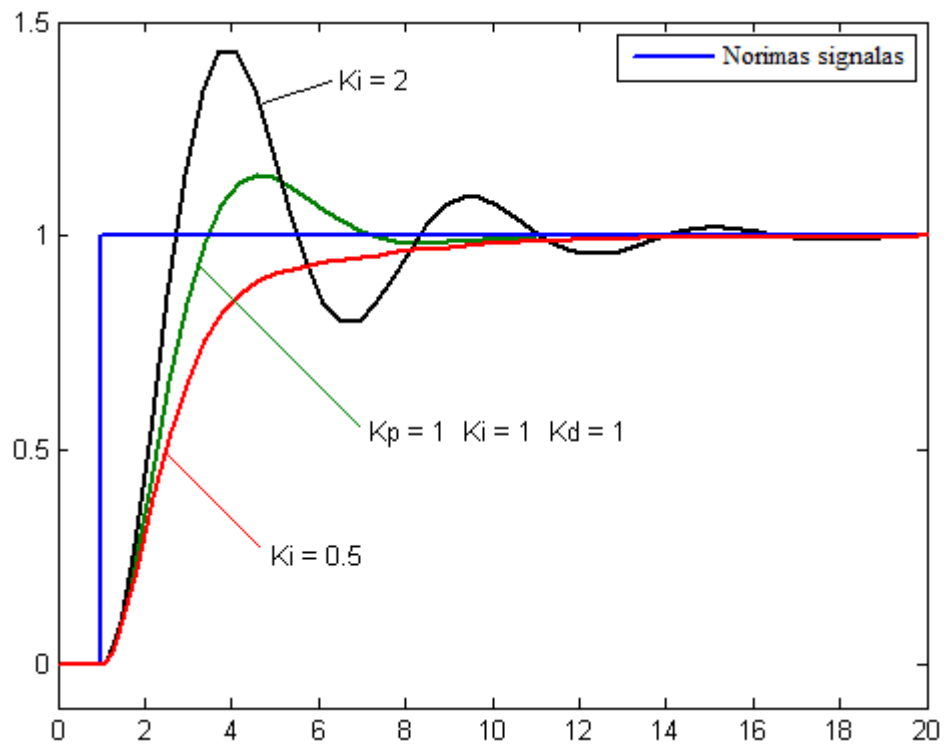


3 pav. Sistemos išėjimo signalai su skirtingomis PID reguliatoriaus grandimis

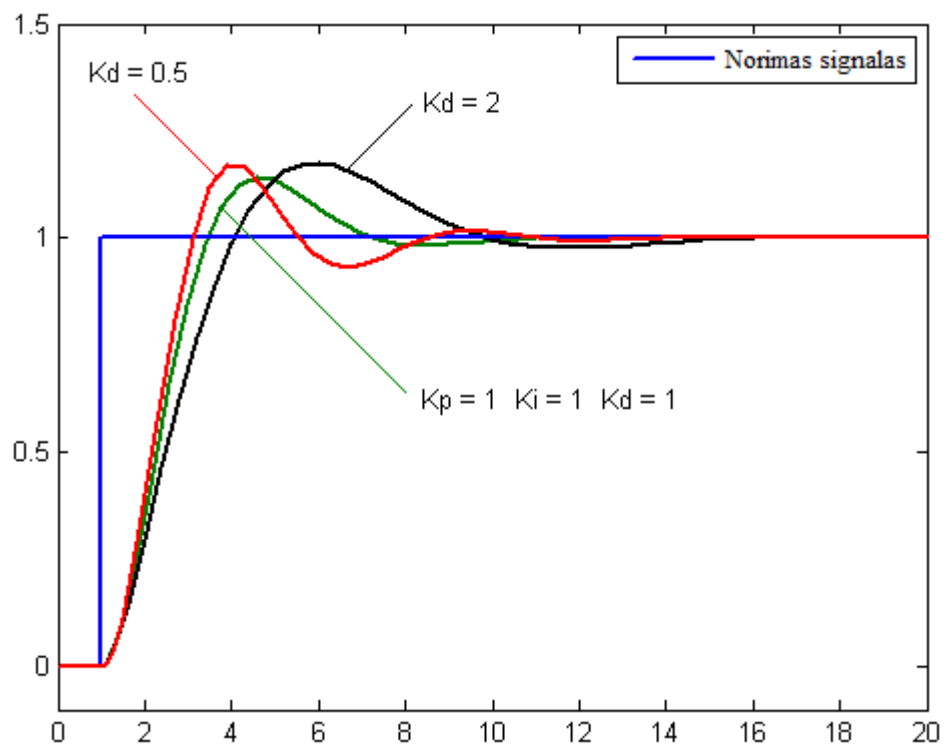
Atskirų PID reguliatoriaus grandžių koeficientų įtaką sistemų valdyme galima pavaizduoti:



4 pav. Pateikiama proporcinės grandies parametro įtaka



5 pav. Integruojančios grandies parametro įtaka



6 pav. Diferencijuojančios grandies parametro įtaka

Kalbant apie PID reguliatorius, verta paminėti tokias pagrindines detales apie atskiras grandines: jei proporcinės grandies (P) parametras yra parenkamas didelis, tai gali privesti prie

sistemos nestabilumo, tuo pačiu jei šis parametras yra per mažas, tuomet gaunami per dideli nuokrypiai ir toks reguliatorius esti nepakankamai jautrus: labai keičiantis valdymo nuokrypiams – per mažai įtakojamas valdymo kintamasis, tuo būdu gaunamas prastas sistemos valdymas. Tiek integruojanti grandis (I), tiek proporcinė (P) gali sąlygoti vadinamojo peršokimo atsiradimą. Integruojančios grandies nebuvimas gali sąlygoti ir tai, kad valdymo sistema niekada nepasieks savo norimo lygio reikšmės. Diferencijuojanti grandis (D) sulėtina reguliatoriaus išėjimo (valdymo kintamojo) pokytį, tai ypatingai jaučiama, kai objekto kintamojo reikšmės yra pakankamai arti norimo lygio reikšmių, tai naudojama integruojančios grandies (I) sugeneruojam peršokimui sumažinti bei padidinti sistemos stabilumui. Diferencijuojanti grandis stiprina triukšmus ir jei valdomas objektas yra jautrus triukšmams, tuomet tai taip pat gali išprovokuoti sistemos nestabilumą.

PID reguliatoriais valdomų sistemų kokybė priklauso nuo aukščiau minėtų trijų grandžių parinktų parametru. Parametru derinimo būdai yra rankinis derinimas, Ziegler'io-Nichols'o metodas. Nemaža dalis parametru derinimo algoritmu remiasi pereinamojo proceso analize.

Rankinio derinimo algoritmas: pradžioje užnulinami I ir D grandžių koeficientai, o P grandies koeficientas yra didinamas tol, kol objekto išėjimo signalas pradeda švytuoti. Tuomet P grandies koeficiento reikšmė priskiriama pusei gautos koeficiento reikšmės. Vėliau didinamas D grandies koeficientas, kol sistemos nuokrypis yra pakoreguojamas per priimtina laiko tarpą. Suderinus P ir D grandžių koeficientus, jei reikia, derinamas I grandies koeficientas, kol per priimtina laiką objektas pasiekia savo norimas reikšmes. Per didelės I reikšmės sąlygoja staigų atsaką bei peršokimus. Šio metodo trūkumas, kad reikalingas kvalifikuotas specialistas, išmanantis sistemų parametru derinimo principus.

1 lentelė

Ziegler'io-Nichols'o PID koeficientu derinimo lentelė

Regulatorius	K_P	K_I	K_D
<i>P</i>	$0.5 \cdot K_c$	-	-
<i>PI</i>	$0.45 \cdot K_c$	$1.2 \cdot K_p / P_c$	-
<i>PID</i>	$0.6 \cdot K_c$	$2 \cdot K_p / P_c$	$K_p \cdot P_c / 8$

Ziegler'io-Nichols'o parametru derinimo metodas veikia panašiai kaip ir rankinio derinimo atveju: I ir D grandžių koeficientai užnulinami, o P grandies koeficientas didinamas tol, kol pasiekiamas „kritinė reikšmė“ K_c , kurioje išėjimo signalas pradeda švytuoti. Tuomet K_c ir švytavimo periodas P_c yra naudojami pagal 1 lentelę PID reguliatoriaus parametrams gauti. Pagrindinis metodo privalumas, kad tai įrodytas ir patikrintas parametru derinimo metodas, o trūkumas – tai pakankamai „agresyvus“ derinimo būdas [17].

1.2 Pagrindinės termodinamikos sąvokos

Šiuolaikinę termodinamiką būtų galima apibrėžti kaip mokslą apie energiją, jos savybes ir transformacijas įvairiuose fiziniuose ir cheminiuose procesuose, kuriems vykstant išsiskiria arba yra sunaudojama šiluma. Techninė termodinamika nagrinėja šilumos pavertimo darbu ir darbo pavertimo šiluma procesus. Dažniausiai termodinaminė sistema yra tam tikras medžiagos kiekis arba/ir tam tikra erdvė, kuri gali būti atskirta nuo ją supančios aplinkos aiškiai apibrėžtu paviršiumi. Šis paviršius yra vadinamas sistemos riba, arba ribojančiuoju paviršiumi. Sistemos riba gali judėti arba gali būti fiksuota. Viskas, kas yra už termodinaminės sistemos ribų, yra traktuojama kaip aplinka. Sistema visada sąveikauja su aplinka. Jeigu šioje sąveikoje įvyksta pokyčių arba jei atsiranda pokyčių pačioje sistemoje, vadinasi, įvyko energijos perdavimas. Vienas kūnas kitam energiją gali perduoti dviem būdais: šiluma arba darbu. Dalis išorinių jėgų lauke bei sistemos judėjimu aplinkos atžvilgiu, yra vadinama termodinaminės sistemos vidine energija [19].

Šiluma ir darbas yra dvi skirtingos energijos formos, kurios gali pereiti iš vieno materialaus kūno į kitą. Energijos perėjimas gali vykti dvejopai: perduodant energiją arba ją transformuojant. Perėjimo (perdavimo arba transformacijos) energija yra vadinama šiluma, jeigu šis perėjimas vyksta šiluminio judėjimo forma (dėl nekryptingo, chaotiško molekulių judėjimo), pvz., šilumos perdavimas laidumo būdu arba mechaninio darbo virtimas šiluma dėl trinties poveikio.

Sistemos būklė tam tikru laiko momentu yra vadinama termodinamine būseną arba tiesiog būseną. Būseną tam tikru laiko momentu yra 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 .

1.2.1 Šilumos mainai

Šilumos mainus galima apibūdinti kaip šilumos plitimo ir perdavimo procesą erdvėje, pasižyminčioje nestacionariu temperatūrų lauku. Egzistuoja trys pagrindiniai šilumos plitimo būdai: laidumas, konvekcija ir spinduliavimas.

Šilumos laidumas – tai šilumos plitimas tarp tiesiogiai besiliečiančių kūno dalių, kurių temperatūra yra skirtinga. Šio proceso metu vyksta apsikeitimas medžiagos sudedamųjų dalelių (molekulių, atomų, laisvųjų elektronų) judėjimo energijas. Labiau įkaitusios medžiagos dalies dalelės netvarkingai judėdamos atsitrenkia į gretimas daleles ir perduoda joms dalį savo kinetinės energijos, todėl viena iš besiliečiančių kūno dalių įkaista, o kita ataušta.

Konvekcija – tai šilumos pernešimo terpėje (skysčiuose ar dujose) procesas, kuris vyksta dėl nevienodai įkaitusių terpės dalių judėjimo erdvėje. Tuo pačiu šilumos perdavimo procesas yra tiesiogiai susijęs su pačios terpės pernešimu.

Spinduliavimu šilumą perneša elektromagnetinės bangos, sklindančios nuo energiją spinduliuojančio kūno. Šiuo atveju spinduliuojančio kūno vidinė energija virsta spinduliavimo energija, kuri, sugerta kito kūno, gali virsti šiluma [19].

Labai dažnai šiluma plinta visais trim būdais vienu metu. Vien laidumu šiluma dažniausiai plinta tik kietuosiuose kūnuose. Vien spinduliavimu šiluma gali plisti tik vakuume. Vien tik konvekcija šiluma plisti negali. Konvekcinis šilumos pernešimas visada yra susijęs su šilumos pernešimu laidumo būdu.

Vienalaikis šilumos pernešimas konvekcijos ir laidumo būdais yra vadinamas konvekciniais šilumos mainais. Vienas iš konvekcinių šilumos mainų atvejų yra šilumos atidavimas, t.y. konvekciniai šilumos mainai tarp kietosios sienelės ir judančios terpės. Šilumos mainų tarp dviejų terpių (skysčio, dujų, kietųjų dalelių ar daugiafazis srauto) procesas per jas skiriančią sienelę yra vadinamas šilumos perdavimu per sienelę.

1.2.2 Stacionarusis šilumos laidumas

Šilumos laidumo koeficientas yra medžiagos fizinis parametras ir rodo, kokį šilumos kiekį sugeba praleisti tam tikra medžiaga per sekundę per 1 m² plotą, kai temperatūros gradientas yra lygus vienetui, t.y. temperatūros skirtumas tarp kraštinių medžiagos taškų šilumos tekėjimo kryptimi yra lygus 1 °C. Šilumos laidumo koeficiento matavimo vienetas yra W/m·K.

Šilumos laidumo koeficiento dydi 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 atvejų ($\lambda=10\div 400$ W/m·K). Šilumos izoliavimo ir statybinės medžiagos pasižymi sąlyginai mažu šilumos laidumo ($\lambda=0,023\div 2,9$ W/m·K), o skysčių koeficiento reikšmė svyruoja nuo 0,2 iki 0,5 W/m·K.

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:

$$\lambda_t = \lambda_0 + bt \tag{9}$$

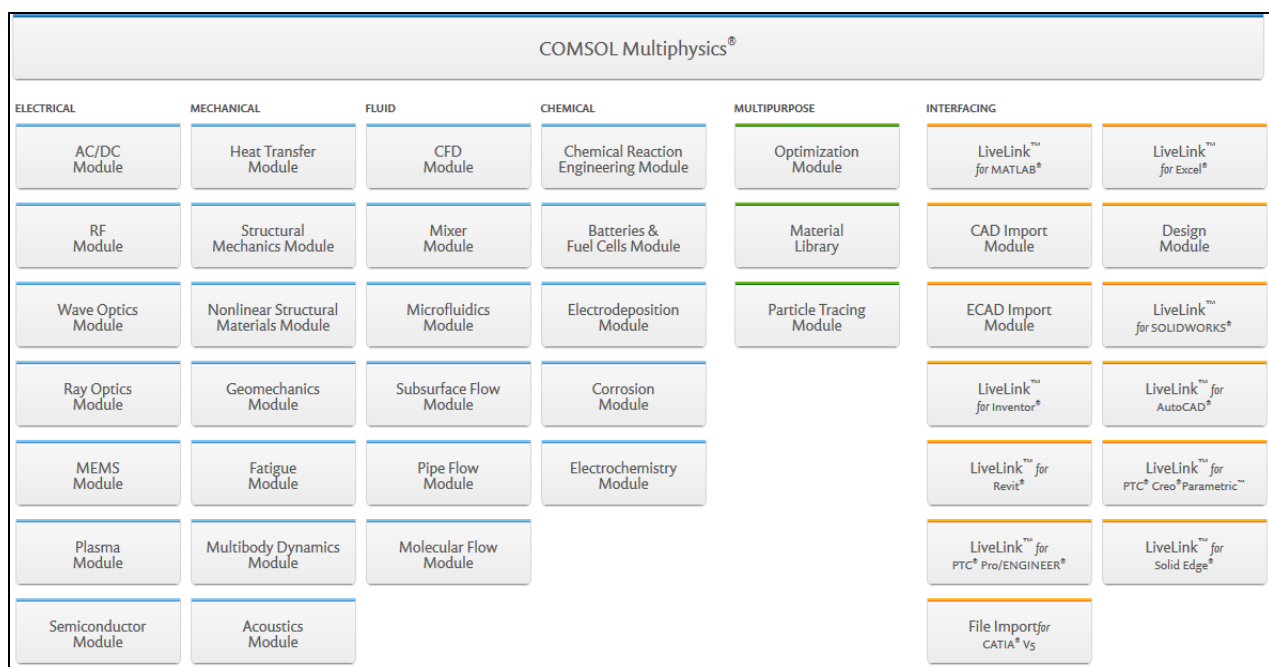
čia λ_t ir λ_0 – šilumos laidumo koeficientai esant atitinkamai t , °C ir 0 °C temperatūrai;

b – temperatūros koeficientas, nustatomas eksperimentiniu būdu.

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

1.3 COMSOL Multiphysics programa

COMSOL Multiphysics yra baigtinių elementų analizės ir modeliavimo programinė įranga, skirta įvairių fizikos ir inžinerijos reiškinių modeliavimui ir imitacijai, visų pirma, susietųjų ir pereinamųjų procesų ir sistemų analizei pasitelkiant modeliavimui reikiamus modulius, kurie pateikti 8 pav.



7 pav. COMSOL Multiphysics programos moduliai

Nors Comsol Multiphysics turi tiesioginių sąsajų su populiariausiomis projektavimo programomis, tačiau yra galimybė kurti modelius ir šioje programoje. Galimas projektavimas 0D, 1D, 1D simetrinėje, 2D, 2D simetrinėje, 3D dimensijose.

Dvimatėje ir trimatėje dimensijose galimas parametrinis projektavimas, nes kuriant modelį, jį charakterizuojančius matmenis ir kitus parametrus įmanoma saugoti kaip projekto parametrus. Tai leidžia projektuotojams žaibiškai atlikti pakeitimus, tiesiog pakeičiant kažkurio parametro vertę. Modelis automatiškai atnaujinamas pagal naujai įvestą vertę, o kitos modelio charakteristikos ir matmenys, kuriems įtakos turi ši kaita, taip pat automatiškai koreguojasi.

COMSOL turi specialų modulį skirtą spręsti šiluminiais uždaviniais. Šis modulis sugeba įvertinti laidumą, konvekciją, radiaciją ir kai kurias kitas fizikinius reiškinius. Šilumos perdavimo modulis buvo specialiai parašytas vartotojams, kurie domisi laisvos ir priverstinės konvekcijos proceso projektavimu, fazių kaitos modeliavimu, spindulinės šilumos tiek per skaidrias tiek per pusiau skaidrias laikmenas, taip pat ir visų šių reiškinių kombinacijai. Taip pat pridedamos specialios formuluotes jei reiktų spręsti šilumos perdavimo uždavinius gyvuose audiniuose. Taip pat šilumos perdavimo modulį galima derinti su kitais COMSOL fizikinių moduliais [5].

Pradinis projektas. COMSOL modelio objekto darbo plokštuma leidžia vartotojui kurti dvimačius objektus trimatėje erdvėje. Geometrijoje saugomi visi trimačiai, dvimačiai ir vienmačiai primityvai. Nurodžius baigtinių elementų tinklelio tipą jį galima priskirti modelio geometrijai arba jos daliai ir taip ta sritį padalinti baigtinių elementų metodu.

COMSOL modelis saugo visa su uždaviniu susijusia informacija. Mano programoje naudoti šie modelio objektai.

- geom - objektas saugo informacija apie modelio geometrija.
- material - saugoma informacija apie modelyje esančių medžiagų savybes
- param - saugomi modelio globalūs kintamieji
- mesh - saugoma informacija apie baigtinių elementų tinklelio tipą ir jo savybes.

COMSOL modelio geometrijos kūrimas. COMSOL modelyje galima kurti šiuos trimačius primityvus:

- | | |
|-----------------------------|---------------------------|
| • Bezjė daugiakampis; | • Kūgis; |
| • Ekscentriškas kūgis; | • Sraigtas; |
| • Interpoliacinė kreivė; | • Parametrinis paviršius; |
| • Daugiakampis; | • Sfera; |
| • Toras; | • Cilindras; |
| • Stačiakampis gretasienis; | • Heksaedras; |
| • Elipsoidas; | • Taškas; |
| • Parametrinė kreivė; | • Tetraedras. |
| • Piramidė; | |

COMSOL darbo plokštumoje galima kurti šiuos dvimačius primityvus:

- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| • Bezjė daugiakampis; | • Apskritimas; |
| • Interpoliacinė kreivė; | • Parametrinė kreivė; |
| • Daugiakampis; | • Stačiakampis; |

- Elipsė;

- Kvadratas;

- Taškas.

Galima su primityvais atlikti šias operacijas:

Su darbo plokštuma susiję veiksmai:

- Darbo plokštumos kūrimas
- Geometrijos ištempimas iš darbo plokštumos į trimatę erdvę
- Pasukimas iš darbo plokštumos į trimatę erdvę
- Poslinkio

Tiesinės transformacijos:

- Rikiavimo
- Kopijavimo
- Atspindžio
- Sukimo
- Mastelio keitimo

Binarinės operacijos:

- Sukurimo
- Skirtumo
- Persidengimo
- Atspindžio

Objekto tipo konvertavimo:

- Konvertavimas į pilnavidurį
- konvertavimas į paviršių
- Konvertavimas į kreivę
- konvertavimas į tašką

Kitos operacijos:

- Objekto šalinimas
- Objekto koregavimo
- Simetrinis kampų suapvalinimas
- pažymėto kampo suapvalinimas
- Objekto pažymėjimas
- Skėlimas
- Liestinė

Su operacijomis galima dirbti taip pat, kaip ir su geometrijos primityvais. Juos kurti ir keisti jų parametrus galima tais pačiais būdais, bet kol nesuforuojamos operacijos negalima atvaizduoti modelio. Dėl šio atvejo nebuvo galima atlikti modelio vaizdavimo atnaujinimo kiekviena kartą kai vartotoja atlieka veiksmą su primityvais ar operacijomis.

1.3.1 Šilumos perdavimas Comsol Multiphysics programoje

Šiame poskyriuje aprašomos skirtingų tipų šilumos perdavimo sąsajos (šilumos perdavimo kietuosiuose kūnuose ir šilumos perdavimo skysčiuose) ir Džaulio šildymo sąsaja [6].

Apie šilumos perdavimo interfeisus. Šilumos perdavimo modelis susideda iš šilumos perdavimo laidumu ir konvekcijos. Spinduliuotės poveikis gali būti įtraukas aplink modelio paviršiaus briaunų ribas. Šis interfeisas tinka modeliuoti šilumos perdavimą kietuosiuose medžiagose ir skysčiuose. Sąsajos gali apimti 1D, 2D ir 3D ir ašies simetrinius modelius su cilindrais, koordinuojant 1D ir 2D koordinacijomis. Numatytasis priklausomas kintamasis yra temperatūra, T.

Pavyzdžiui, jei yra pasirinktas šilumos perdavimas į kietųjų dalelių kiekį, šilumos perdavimo mazgas iškarto bus numatytas, kaip šilumos mainų kietuosiuose medžiagose modelis. Jei pasirinktas šilumos perdavimo modelis skysčiuose, iškarto pridedami pagrindiniai šilumos perdavimo skysčiuose mazgai.

Šilumos perdavimas kietuosiuose kūnuose ir šilumos perdavimas skysčiuose.

Naudojant šilumos perdavimo kietuosiuose kūnuose modelį, kad ir daugiausia modelių sudaro šilumos perdavimo kietuosiuose medžiagose mazgų, bet visą funkcionalumą, įskaitant skysčio domenų pasirinkimą taip pat galima naudoti.

Naudojant šilumos perdavimą skysčiuose, taip pat galimi ir šilumos perdavimo kietuosiuose kūnuose domenų pasirinkimai. Tai leidžia lanksčiau modeliuoti įvairias šilumos perdavimo šakas.

Džaulio šildymas. Išsirinkus Džaulio šildymą, surastą po elektromagnetine šildančia šaka, galima sukombinuoti visas ypatybes nuo elektros srovės interfeiso sujungto su šilumos perdavimo interfeisu tam, kad modeliuotumėme Džaulio šildymą.

Šilumos lygtis. Esmė, reguliuojanti visą šilumos perdavimą yra pirmasis termodinamikos dėsnis, kuris paprastai vadinamas išsaugojimo energijos principu. Tačiau energijos vidus, U, yra gana nepatogus kiekis išmatuoti ir naudoti modeliavimą. Todėl pagrindinis įstatymas yra perrašomas išreiškiant temperatūrą T. Skysčiui, šilumos lygtis yra:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \Delta u \cdot T \right) = -\Delta q + \tau : S - \left. \frac{T \partial \rho}{\rho \partial T} \right|_p \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \Delta u \cdot p \right) + Q \quad (12)$$

čia:

ρ - tankis (kg/m^3); C_p - specifinė šiluminė talpa esant pastoviam slėgiui ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$);

T – absoliutinė temperatūra (K); u – greičio vektorius (m/s) q – šilumos laidumas (W/m^2);

p – slėgis (Pa); τ - klampumas (Pa); Q – šilumos šaltinis (W/m^3); S – deformacija (1/s).

$$S = \frac{1}{2}(\Delta u + \Delta u^T) \quad (13)$$

Šilumos srautas. Šilumos srauto koncepcija yra ne taip paprasta, kaip gali pasirodyti iš pirmo žvilgsnio. Taip yra todėl, kad šiluma yra ne užkonservuotas turtas. Užkonservuotas turtas yra ne visa energija. Taigi šilumos srauto ir energijos srautas yra panašus, bet ne identiškas. Paskaičiuoti apytiksliai skaičiai nepaveikia skaičiavimo rezultatų, tiksliai kintamieji, pasiekiami rezultatų analizei ir vizualizacijai. Bendro šilumos srauto formulė:

$$\rho u(H_0 + \Psi) - k\Delta T + \tau \cdot u + q_r \quad (14)$$

H_0 formulė:

$$H_0 = H + \frac{1}{2}(u \cdot u) \quad (15)$$

Šilumos perdavimo sąsaja. Šilumos perdavimo sąsaja yra prieinama daugelyje formų ir kiekviena iš jų turi lygtis, ribines sąlygas ir šaltinius, modeliavimo laidus, konvekcinį šilumos perdavimą sprendžiant temperatūros modelius.

Kai ši sąsaja yra pridėta, numatytieji mazgai yra pridedami prie modelio remiantis kokį modelį pasirinkome - šilumos mainų kietose medžiagose ar šilumos perdavimo skysčiuose, taipogi pridedama šiluminė izoliacija (numatytoji riba), pradinės vertės. Norint, galima pridėti daugiau šilumos perdavimo mazgų, bei kitų funkcijų, kurių reikia modelio įgyvendinimui. Galimos šilumos perdavimo interfeiso funkcijų pasirinktis [5]:

- krašto šilumos šaltinis;
- šilumos srautas;
- šilumos šaltinis;
- šilumos perdavimas skysčiais;
- šilumos perdavimas kietomis medžiagomis;
- pradinės vertės;
- linijinis šilumos šaltinis;
- ištekėjimas;
- įtekėjimas;
- periodinė šilumos būklė;
- taškinis šilumos šaltinis;
- šilumos srauto veikimas;
- paviršiaus iki aplinkos spinduliuotė;
- simetrija;
- temperatūra;
- šiluminė izoliacija (numatytoji riba);
- plonas termiškai varžinis sluoksnis;

- pritaikymo pasiūlymas.

Šilumos perdavimas kietuosiuose kūnuose. Šilumos perdavimui kietuosiuose kūnuose naudoja šilumos lygtis, kaip matematinis šilumos perdavimo kietųjų medžiagų modelis:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - (\Delta k \cdot \Delta T) = Q \quad (16)$$

Ši formulė susideda iš: tankumo ρ , pilnos karščio kontrolės C_p , šiluminio laidumo k ir šilumos šaltinio Q , šilumos šaltinių gali būti ir nevienas.

1.3.2 Baigtinių elementų tinkleliai Comsol Multiphysics programoje

Baigtinių elementų metodas leidžia rasti apytikslius diferencialinių lygčių dalinėmis išvestinėmis ar integralinėmis lygtimis sprendinius. Metodo esmė – sritis, kurioje ieškomas sprendimas, suskaidoma į dalis (baigtinius elementus). Tada daroma prielaida, kad kiekviename elemente nagrinėjamas nežinomas kinta nesudėtingu dėsnio ir diferencialinė lygtis jame pakeičiama į algebrinių lygčių sistemą. Sujungus visų elementų sistemas gaunama sistema, kurią išsprendus gaunamas atsakymas.

Turint jau paruoštą modelį COMSOL Multiphysics programoje, prieš atliekant skaičiavimus, reikia jį suskaidyti į baigtinius elementus. Baigtinių elementų dydį galime pasirinkti iš modeliujamos fizikos moduly siūlomų 9 elementų dydžių: *Extremely coarse*, *Extra coarse*, *Coarser*, *Coarse*, *Normal*, *Fine*, *Finer*, *Extra Fine*, *Extremely Fine*. 1 lentelėje pateikti programos siūlomi elementų dydžiai.

2 lentelė

Naudojamos fizikos moduly siūlomi elementų dydžiai

Vartotojo tinklelio nustatymai bendrai dinamikai	Extremely coarse	Extra coarse	Coarser	Coarse	Normal	Fine	Finer	Extra Fine	Extremely Fine
Didžiausias elemento dydis	37,5	22,5	14,3	11,3	7,5	6	4,13	2,63	1,5
Mažiausias elemento dydis	5,25	4,05	3	2,1	1,35	0,75	0,3	0,11	0,02
Didžiausio elemento augimo tempas	2	1,85	1,7	1,6	1,5	1,45	1,4	1,35	1,3
Išlinkimo rezoliucija	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
Smulkių vietų rezoliucija	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,85	1

Yra galimybė vartotojui koreguoti bet kurį programos siūlomo baigtinio elemento dydžio nustatymus, tačiau imantis saviveiklos reikia stebėti baigtinių elementų tinklelio statistiką, nes nuo suskaidytų baigtinių elementų priklausys skaičiavimų tikslumas, kompiuterio resursų išnaudojimas bei skaičiavimo laikas.

1.4 Skyriaus išvados

Atlikus literatūros apžvalgą identifikuoti termodinamikos susiję su temperatūra metodai, valdymų sistemų principai. Nustatyta, kad kaitinimo plokštelės valdymui reikalingas PID reguliatorius. Įsigilinus į baigtinių elementų analizės ir modeliavimo programą Comsol Multiphysics, nuspręsta su ja analizuoti ir kurti kaitinimo plokštelės modelį.

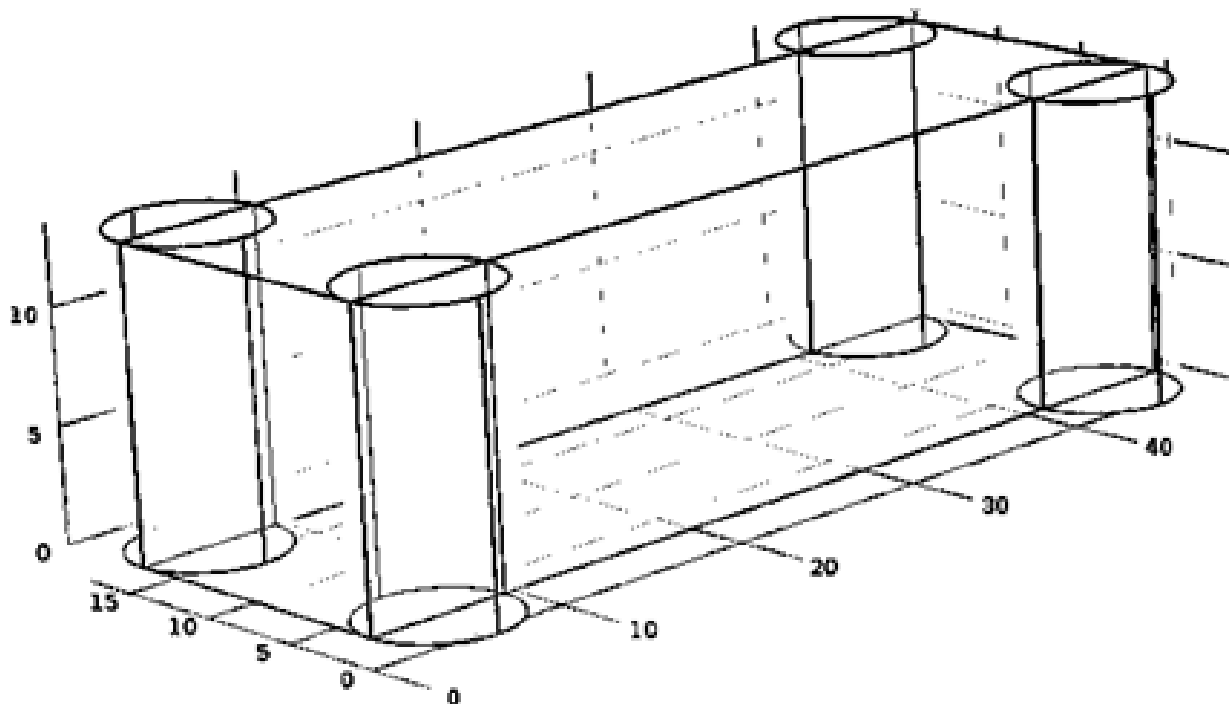
2. EKSPERIMENTINĖ DALIS

2.1 Fizinės sistemos aprašymas

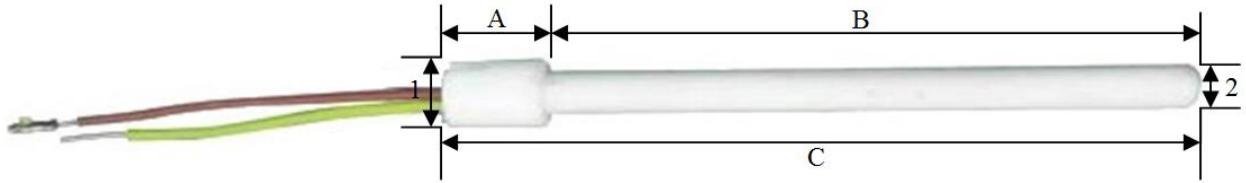
Projektuojama plokštelė kaitinimui, kuri turi išpjovą – reaktorių cheminėms medžiagoms. Vartotojui reikalinga kuo kompaktiškesnė plokštelė. Plokštelė bus naudojama kaitinti miltelių mišinius. Kaitinamasis plokštelės reaktorius turi pasiekti 200 °C temperatūrą per 3 minutes ir ją išlaikyti. Reikalingas ir priverstinis aušinimas, nes nuo 200 °C temperatūros savaiminis atvėsimas užims daug laiko. Plokštelės kaitinimui naudojami keramikiniai kaitinimo elementai, pateikti iš vartotojo.

Pagal kaitinimo elemento išmatavimus ir plokštelės kaitinimo reaktoriaus išpjovą sudaromas modelis.

Plokštelės išpjovos milteliniam reagentams kaitinti matmenys: ilgis – 45 mm, plotis – 14 mm, gylis – 13,5 mm, apskritimų skersmenys – 3,5 mm, gylis – 13,5 mm. Reaktoriaus sienelių temperatūra turi būti 200 °C ± 3 °C. Technologinis tokio reaktoriaus brėžinys pateiktas 8 pav.



8 pav. Plokštelės išpjovos (reaktoriaus) technologinis brėžinys



9 pav. Kaitinimo elementas

9 pav. pavaizduotas kaitinimo elementas, su kuriuo bus kaitinamas plokštelės reaktorius. Kaitinimo elementą sudaro aukštos klasės geležies ir keramikos lydinys, kaitintuvo galia 80 vatų. Žemiau patikti kaitini elemento matmenys (2 lentelė).

3 lentelė

Kaitinimo elemento matmenys

Vieta	Matmuo (mm)
įtvirtinimo ilgis (A)	9,2
kaitintuvo ilgis (B)	57,8
bendras ilgis (C)	67
įtvirtinimo skersmuo (1)	6,48
kaitintuvo skersmuo (2)	3,8

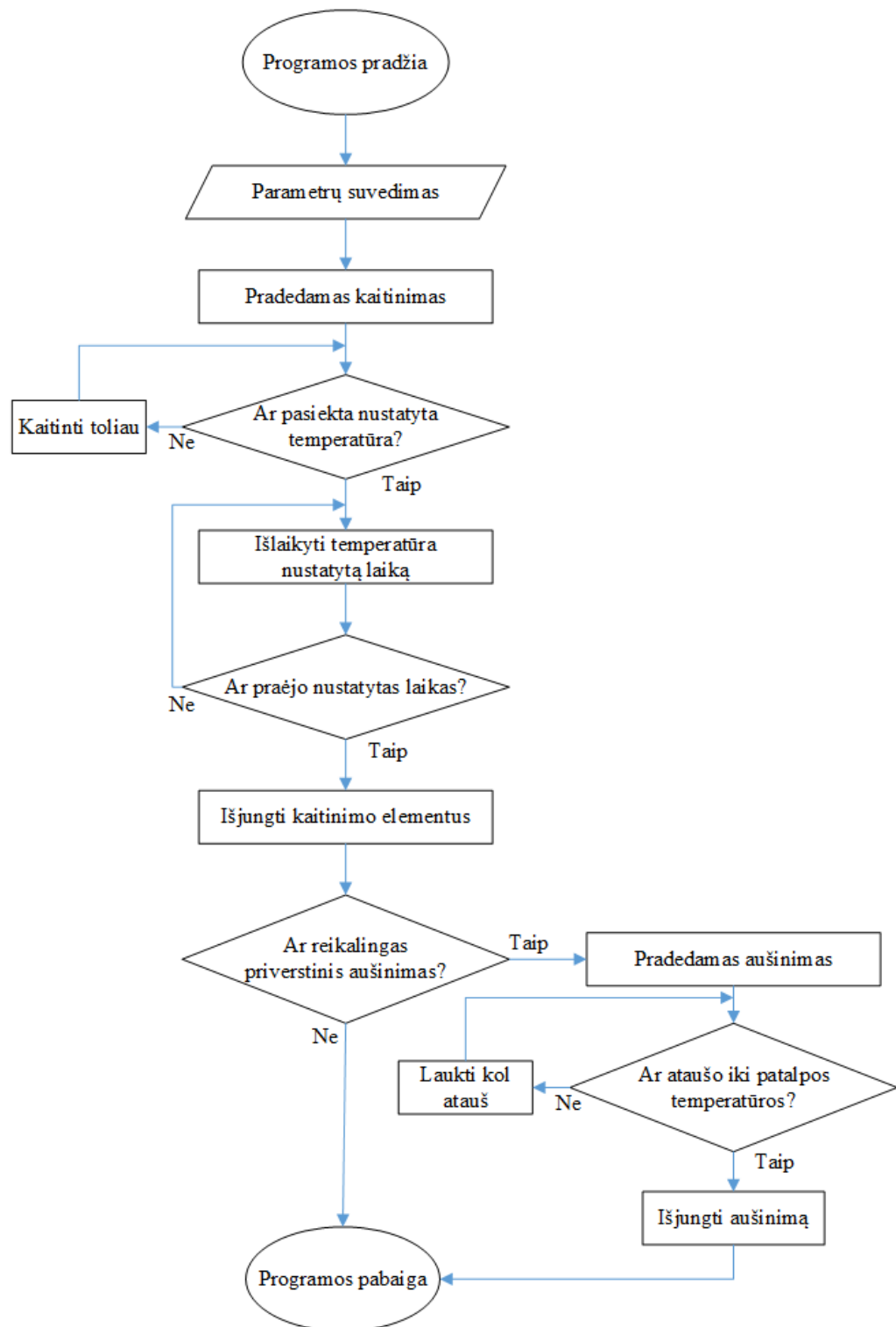
Plokštelė gaminama iš duraliuminio 2024 (UNS A92024), firminis pavadinimas *diuralis*. Duraliuminis – aliuminio lydinys, grūdinamas terminiu apdorojimu ir po to sendinimu. Sudėtis – aliuminis (93,2 %), varis (4,5 % masės), magnis (1,6 %) ir manganas (0,7 %).

Savybės: Lydinio tankis 2500–2800 kg/m³, lydymosi temperatūra apie 650 °C. Po atkaitinimo (kaitinimo iki +500 °C ir ataušinimo) duraliuminis tampa minkštas ir lankstus (kaip aliuminis). Po sendinimo (+20 °C – kelias paras, aukštesnėje temperatūroje – kelias valandas) pasidaro kietas ir stangrus. Duraliuminiui būdingas didelis statinis stipris (iki 450–500 MPa) kambario ir aukštesnėje (iki 150–175 °C) temperatūroje, atsparumas nuovargiui ir irimo klampa. Duraliuminio trūkumas – mažas atsparumas korozijai, todėl duraliuminio gaminius reikia saugoti nuo korozijos. Duraliuminio lakštai paprastai dengiami grynu aliuminiu. Tankis (density): 2,77g/cm³. Šilumos laidumas (thermal conductivity): 190 (W/(m·K)). Šiluminė talpa (heat capacity): 870 (J/(kg·K)).

2.2 Eksperimento valdymo algoritmo sudarymas

Eksperimento programos algoritmo aprašymas. Pateikiamas algoritmas (11 pav.). Kaitinimo reaktoriaus paviršiaus taisyklingas veikimas susideda iš valdomų kaitinimo elementų

ir aušinimo. Paleistas programos algoritmas, vartotojas nustato temperatūros vertę, pasiektos temperatūros palaikymo trukmę ir ar reikalingas priverstinis aušinimas, pradedamas kaitinimo plokštelės kaitinimas iki nustatytos vertės. Pasiekus reikiamą temperatūrą, ji palaikoma. Praėjus užduotam laikui, atjungiamas kaitinimo elementų reikiamos temperatūros palaikymo etapas, pradedamas kaitinimo plokštelės aušinimas, jeigu tai buvo nustatyta.



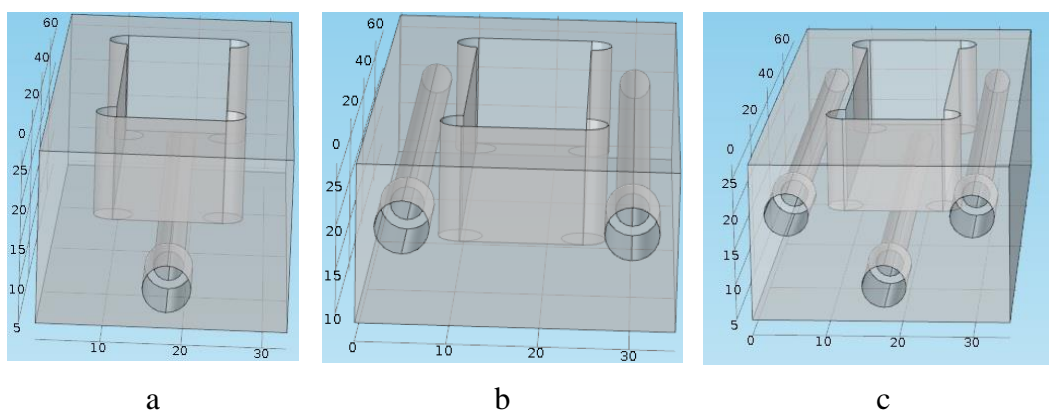
10 pav. Eksperimento algoritmas

2.3 Baigtinių elementų analizės ir modeliavimo programa „COMSOL MULTIPHYSICS“

2.3.1 Modelio projektavimas

Sprendžiamas šilumos mainų uždavinys COMSOL Multiphysics programinėje įrangoje. Ši modeliavimo programa grindžiama baigtinių elementų metodu. Modelyje įvertintos pradinės sąlygos – išorės ir vidaus temperatūra, metalo specifinės savybės tokios kaip tankis, šilumos laidumas, varža apie tai rašė Stepan Ozana, Martin Pies, Lukas Skovajsa, Radovan Hajovsky staipsnyje: Šilumokaičio modeliavimas Comsol Multiphysics programoje [3].

Modeliuojami trys kaitinimo elementų išdėstymo variantai, atsižvelgiant į plokštelės išpjovą, kuri pateikta (11 pav.) ir kaitinimo elementų išdėstymą (15 pav.), keičiami kaitinimo plokštelės gabaritai.



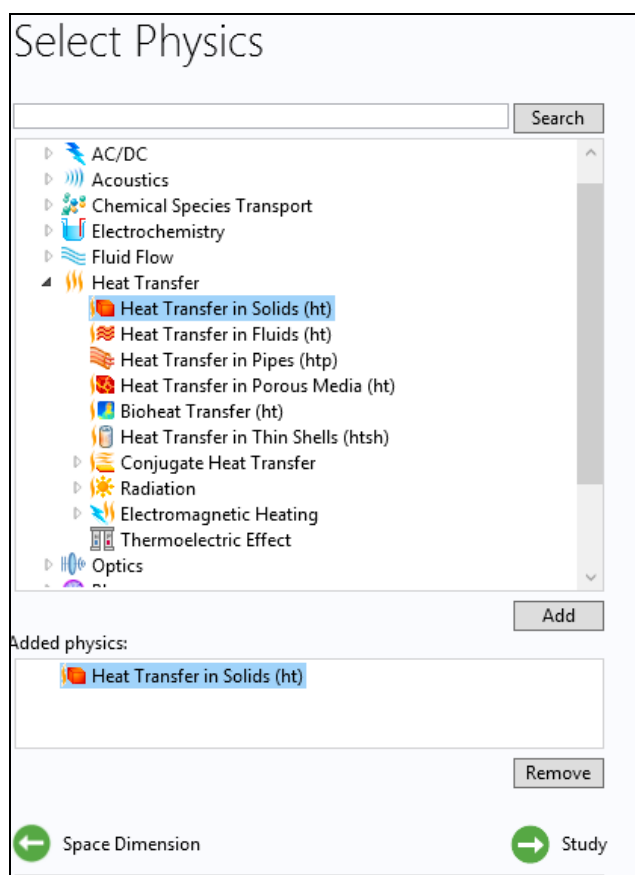
11 pav. Plokštelės kaitinimo elementų galimi išdėstymai: a – su vienu kaitinimo elementu; b – su dviem kaitinimo elementais; c – su trimis kaitinimo elementais

Plokštelės modelis su vienu kaitinimo elementu. – tai mažiausiai elektros sąnaudų reikalaujantis modelis. Surašomi pradiniai matmenys į programą (13 pav.).

Parameters			
Parameters			
Name	Expression	Value	Description
L	45[mm]	0.045000 m	išpjovos ilgis
B	14[mm]	0.014000 m	išpjovos plotis
H	13.5[mm]	0.013500 m	išpjovos aukštis
R	3.5[mm]	0.0035000 m	išpjovos cilindro radiusas
A	10[mm]	0.010000 m	kaitinimo elemento įtvirtin...
B1	60[mm]	0.060000 m	kaitintuvo ilgis
C	70[mm]	0.070000 m	kaitinimo elemento ilgis
R1	6.5[mm]	0.0065000 m	kaitinimo elemento įtvirti...
R2	4[mm]	0.0040000 m	kaitinintuvo skersmuo

12 pav. Parametruose nustatyti plokštelės išpjovos ir kaitinimo elemento matmenys

Pasirenkama kaitinimo sritis - šilumos perdavimas kietuosiuose kūnuose (14 pav.).



13 pav. Sričių pasirinkimas (galima rinktis ir kelias iškart sritis)

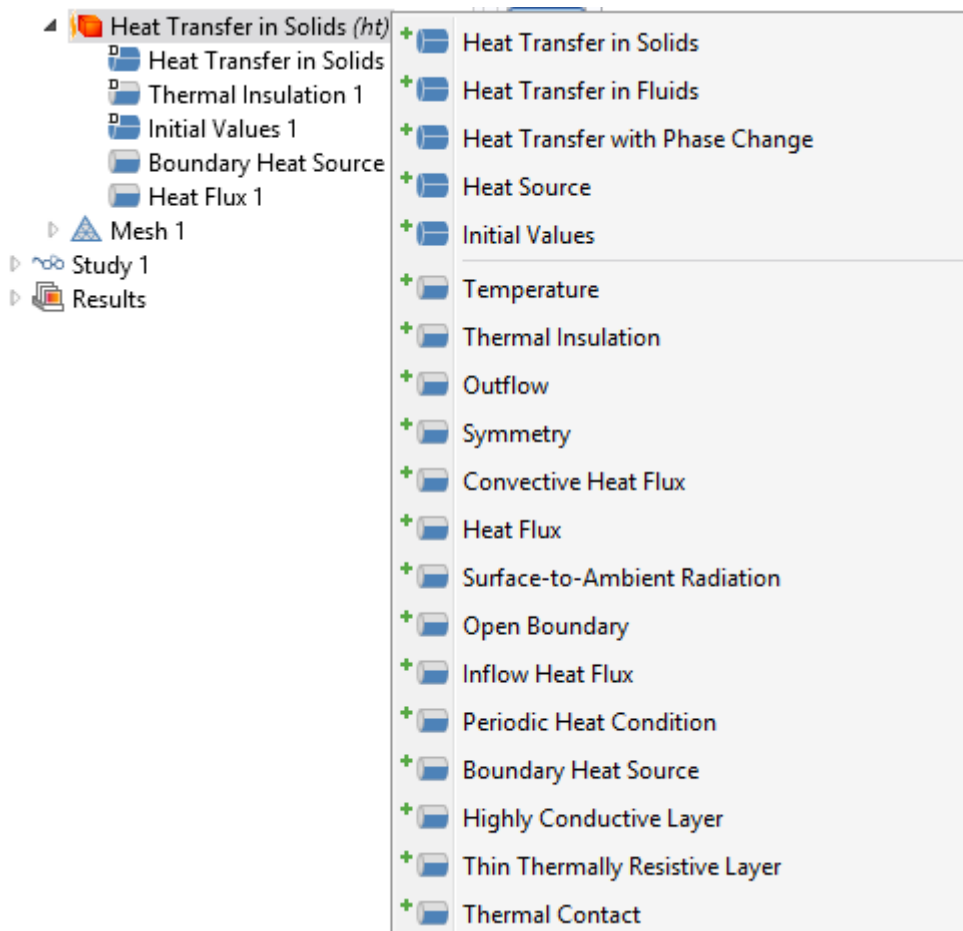
Pasirinktas šilumos perdavimas į kietųjų medžiagų sąsaja, šilumos perdavimui, laidumui, konvekcijai, ir spinduliavimui tirti. Šis modelis, t.y. šilumos perdavimas kietuosiuose kūnuose yra aktyvus pagal nutylėjimą visose srityse. Visą funkcionalumą, įskaitant kitus domenų tipus, tokius kaip skysčio domeną, taip pat galima naudoti.

Temperatūros lygtis apibrėžta kietų domenų atitinkama diferencine forma, Furjė dėsnio, kuriame gali būti papildomų įnašų, pavyzdžiui, šilumos šaltinis. Matematiškai šį procesą aprašo **Furjė dėsnis**: šilumos srauto tankis proporcingas temperatūros gradientui.:

$$q = -\lambda \cdot \nabla T \quad (17)$$

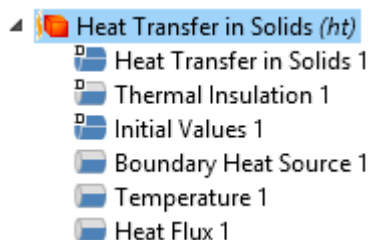
q - yra šilumos srauto tankis (šilumos kiekis perneštas per laiko vienetą vieno kvadratinio metro plotu, $\frac{J}{m^2 \cdot s}$); λ - yra šiluminio laidumo koeficientas ($\frac{W}{m \cdot K}$); T – absoliutinė temperatūra.

Programos lange, prie šilumos perdavimo kietuose kūnuose modulio galima pridėti papildomų funkcijų (15 pav.) minėtų 1.3.1 skyriuje.



14 pav. Papildomos funkcijos šilumos perdavimo srityje

Plokštelės reaktoriaus kaitinimui pridėdamos funkcijos, šilumos šaltinis, šilumos srautas ir temperatūra (16 pav.).



15 pav. Šilumos perdavimo kietuose kūnuose paprogramė

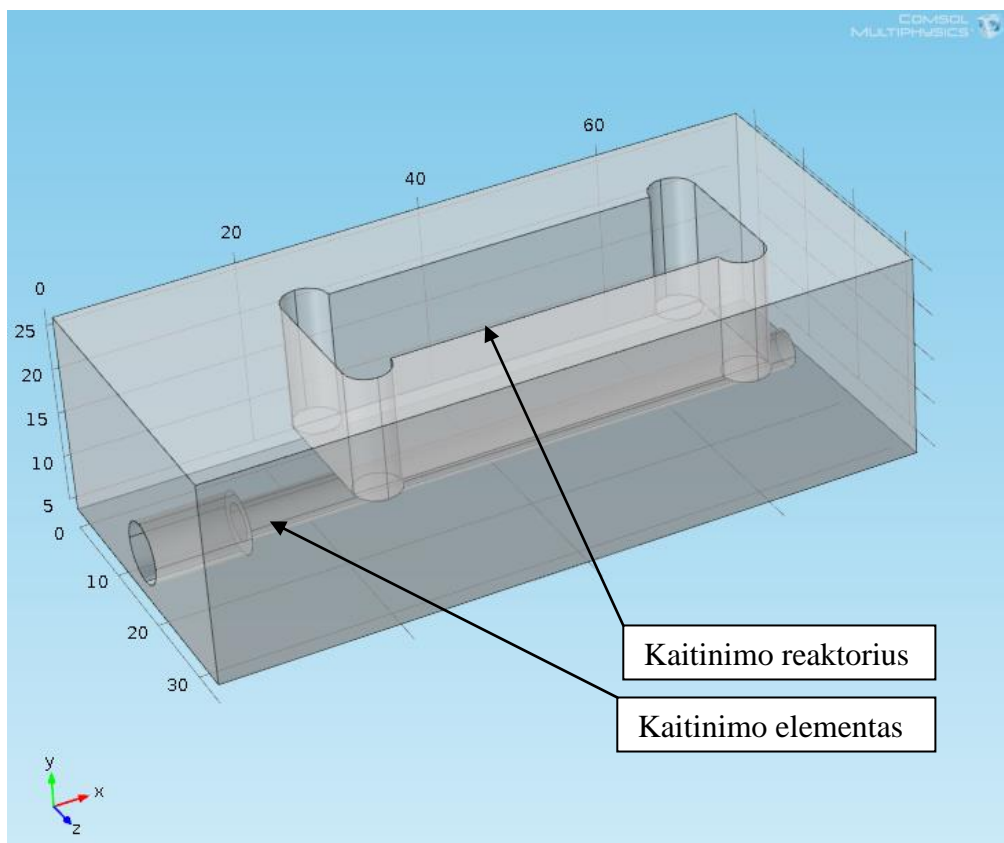
Kaitinimo plokštelės ilgis parenkamas pagal kaitinimo elemento ilgį, kad neišlįstų už plokštelės gabaritų. Plokštelės aukštis parenkamas atsižvelgiant į išpjovos aukštį ir elemento

kaitintuvo diametrą. Taip pat, plokštelės plotis į reaktoriaus išpjovos plotį. Bendri matmenys pateikti .. lentelėje, kaitinimo plokštelės išvaizda 17 pav.

4 lentelė

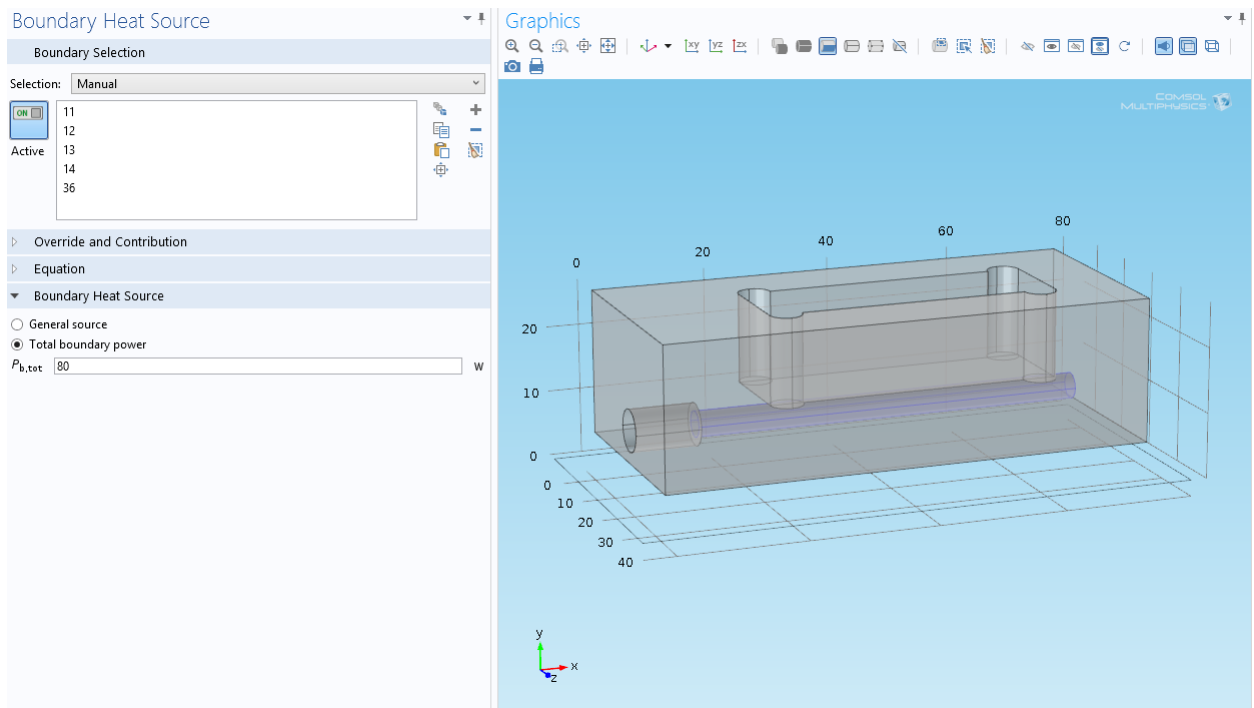
Kaitinimo plokštelės su vienu kaitinimo elementu modelio bendri matmenys

Vieta	Matmuo, mm
Ilgis	75
Aukštis	22
Plotis	31



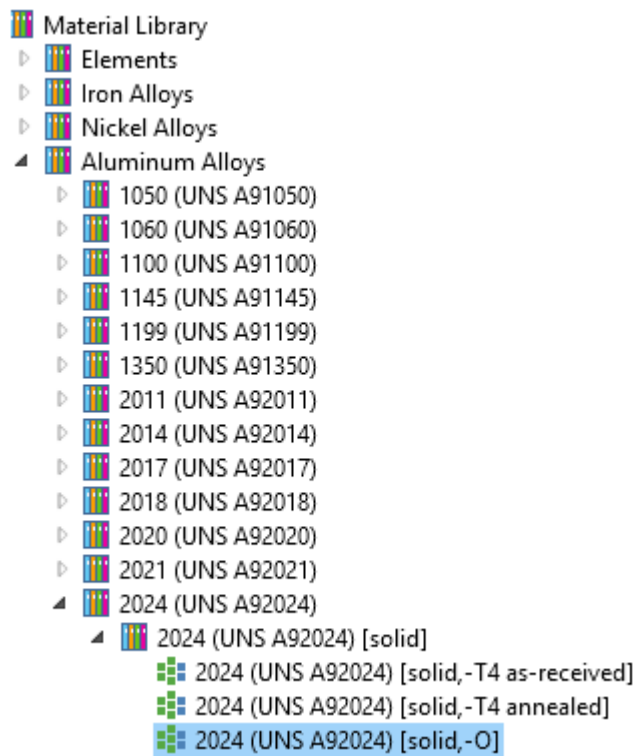
16 pav. Plokštelės modelis su vienu kaitinimo elementu

Nustatoma kaitinimo elemento sienelių išpjova, kaip šilumos šaltinis, kadangi šilumos srautas tekės iš kaitinimo elemento išpjovos į visas puses. Nustatoma kaitinimo elemento galia – 80 vatų (18 pav.).



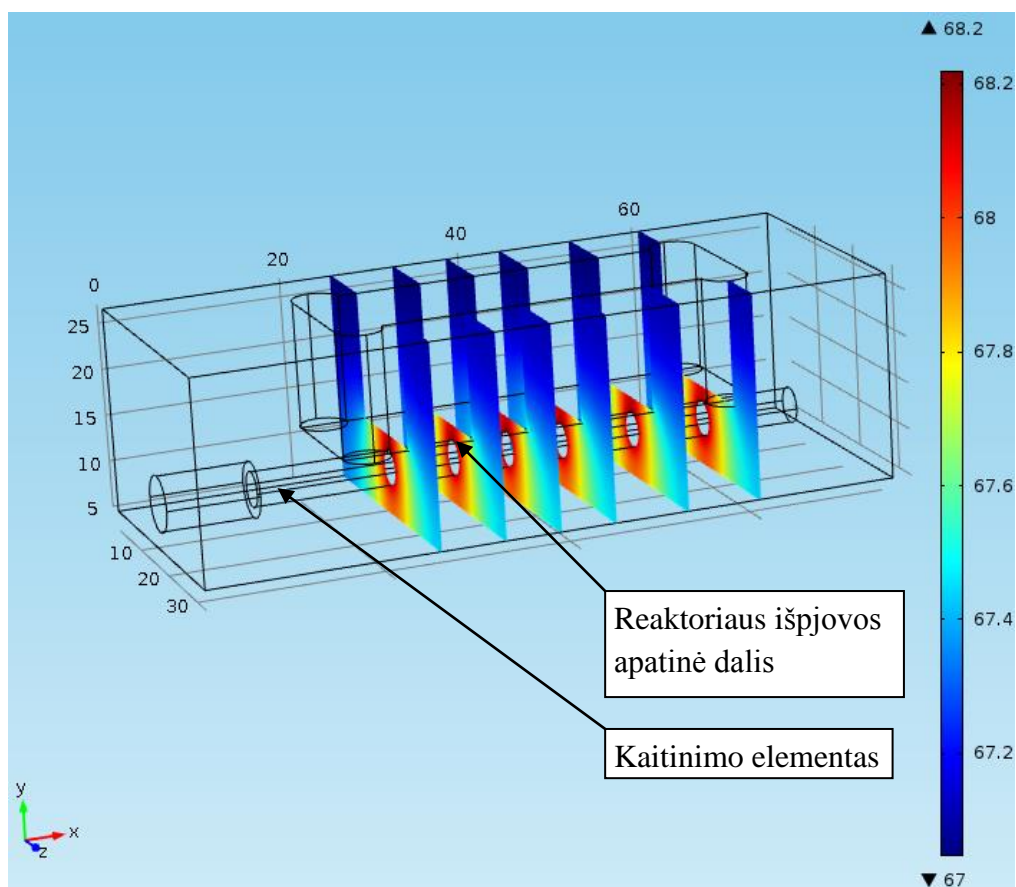
17 pav. Kaitinimo elemento, kaip šilumos šaltinio nustatymas (programos langas)

Visą kaitinimo plokštelę sudaro medžiagos lydinys, kuris pasirenkamas iš bibliotekos aliuminio lydinų grupės (19 pav.) - duraliuminis 2024 (UNS A92024).



18 pav. Bibliotekos langas

Analizuojant temperatūros pokyčius, geriausia juos stebėti bėgant laikui, taip matomas pereinamasis procesas, kaip šiluma sklinda laike. 20 pav. pateikti šilumos mainai tarp kaitinimo elemento ir kaitinimo plokštelės.



19 pav. Šilumos sklidimas plokštelėje, kaitinant vienu kaitinimo elementui

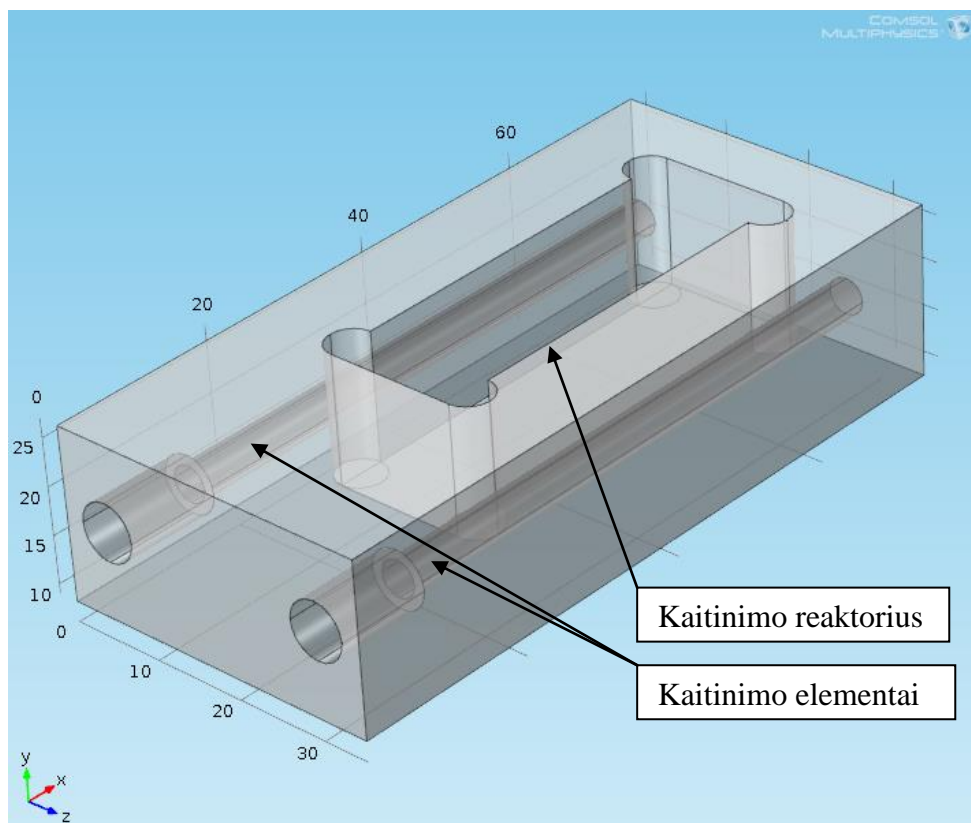
Pjūviai pateikti iš kairės į dešinę pradedant 30 s, 1 min, 1 min 30 s, 2 min, 2 min 30 s, 3 min. Iš 20 pav. matyti, jog kaitinimo elemento šilumos srautas plokštelėje labiausia kaitina reaktoriaus išpjovos apatinę dalį. Temperatūros skalė pateikta po 3 minučių, matome, jog plokštelė nepasiekia reikiamos temperatūros, iki reikiamos temperatūros labai toli. Tai netenkina projektinės užduoties.

Plokštelės modelis su dviem kaitinimo elementais. Visos funkcijos atliekamos taip pat, kaip ir su pirmuoju bandytu kaitinimo plokštelės modeliu. Pakeičiamas plokštelės aukštis iš 22 mm į 18 mm ir plotis iš 31 mm į 35 mm, nes bandoma kaitinimo elementus įtvirtinti šonuose, kad geriau šiluma pasiskirstytų ne tik po reaktoriaus apatinę dalį, bet ir šonines sienes. Kaitinimo elementai įtvirtinami plokštelės centre pagal jos aukštį. Plokštelės bendri matmenys pateikti 4 lentelėje, kaitinimo plokštelės išvaizda 21 pav.

5 lentelė

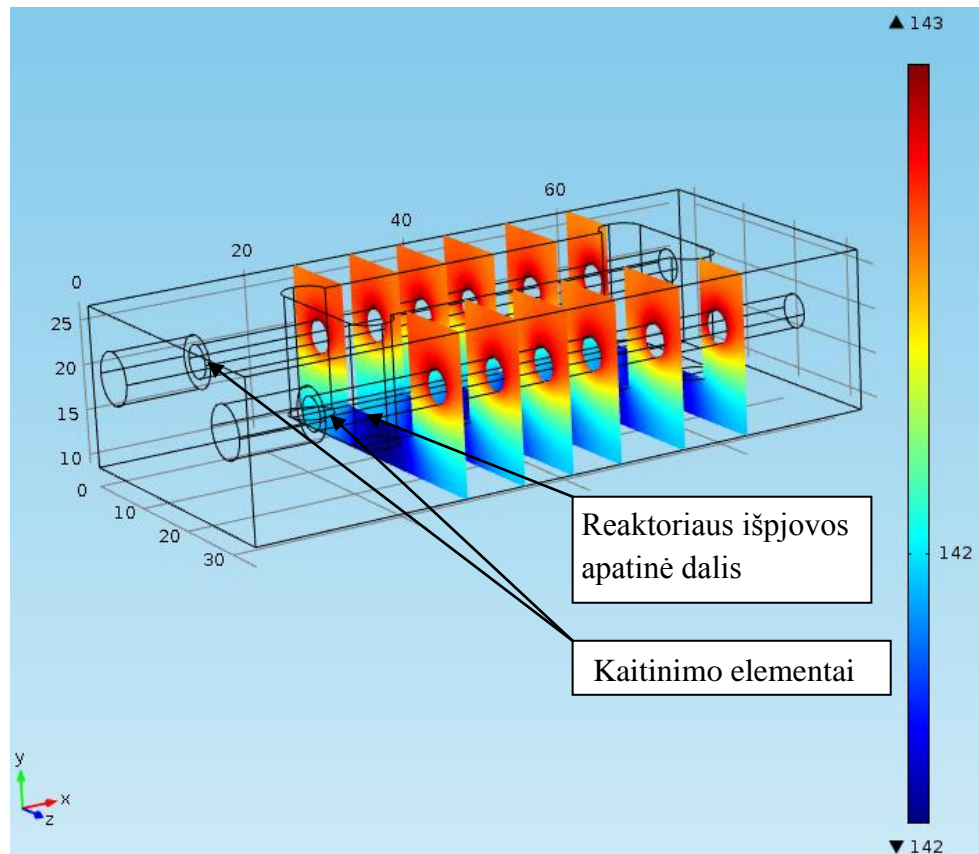
Kaitinimo plokštelės su dviem kaitinimo elementais modelio bendri matmenys

Vieta	Matmuo, mm
Ilgis	75
Aukštis	18
Plotis	35



20 pav. Plokštelės modelis su dviem kaitinimo elementais

Analogiškai, kaip ir plokštelės modelio su vienu kaitinimo elementu, nustatomos kaitinimo elementų sienelių išpjovos, kaip šilumos šaltiniai, tiktai nustatoma dviejų kaitinimo elementų galia. Šilumos sklidimą laike kaitinant dviejų kaitinimo elementų iš reaktoriaus šonų matome 22 pav.



21 pav. Šilumos sklidimas plokštelėje, kaitinant dviejų kaitinimo elementų

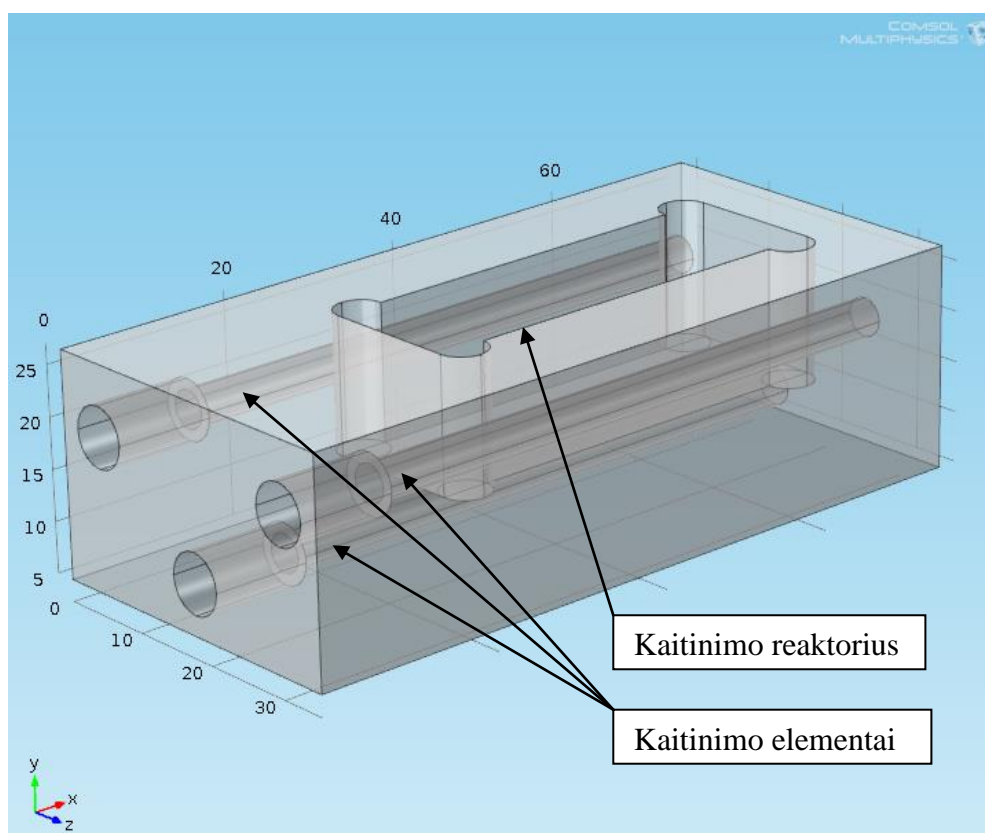
Pjūviai pateikti nuo kairės į dešinę pradedant 30 s, 1 min, 1 min 30 s, 2 min, 2 min 30 s. Iš plokštelės, kaitinamos dviejų kaitinimo elementų pjūvių matyti, jog šiluma daugiausiai pasiskirsto po reaktoriaus šonines sienes, apatinė reaktoriaus apatinė dalis pagal esančią temperatūros skalę atsilieka kaitimui. 22 pav. esanti temperatūros skalė paimta iš paskutinės kaitinimo reaktoriaus išpjovos, kai laikas yra 3 minutės, matome, kad pasiekama tik 142 °C temperatūra. Tai netenkina projektinės užduoties.

Plokštelės modelis su trimis kaitinimo elementais. Visos funkcijos atliekamos analogiškai, kaip ir su dviejų kaitinimo elementų modelių, tiktais pakeičiamas plokštelės aukštis iš 18 mm į 22 mm, nes kaitinimo elementus bandoma įtvirtinti šonuose ir vieną apačioje. Tvirtinami šonuose du kaitinimo elementai pakeliami aukščiau, negu plokštelės centras, nes atsižvelgiama į reaktorių. Kaitinimo plokštelės matmenys pateikti 5 lentelėje, modelis 23 pav.

6 lentelė

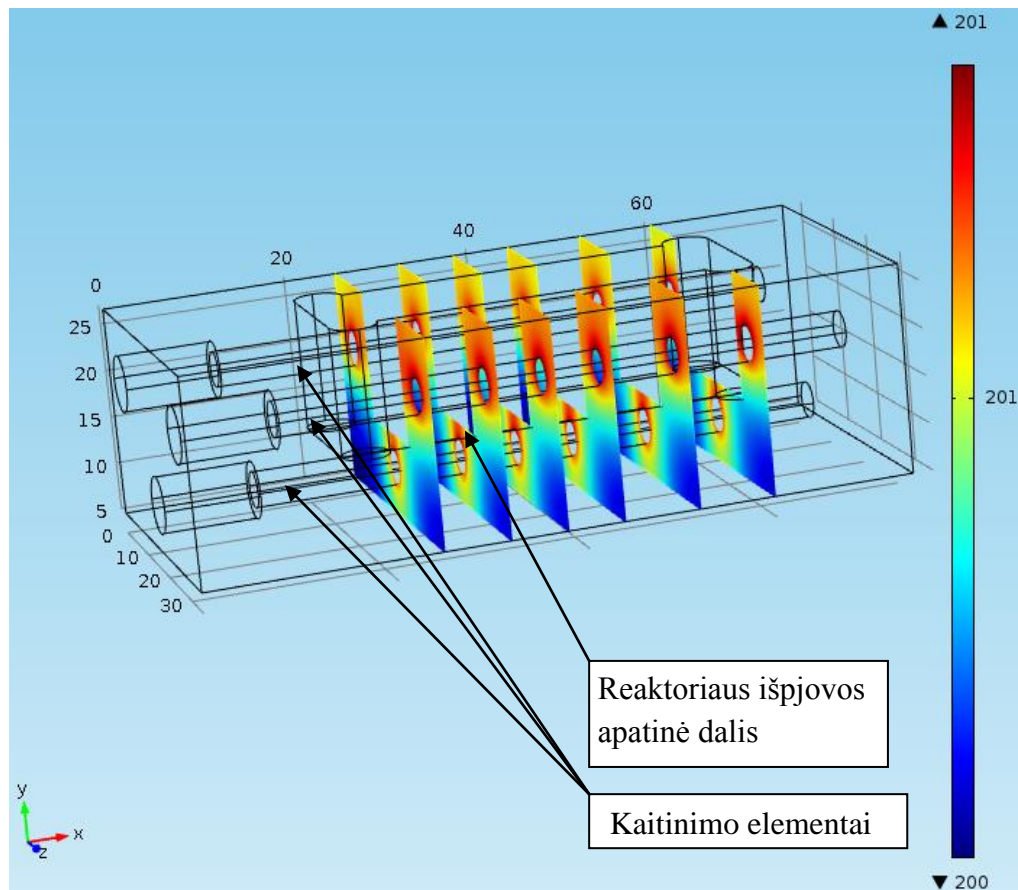
Kaitinimo plokštelės su trimis kaitinimo elementais modelio bendri matmenys

Vieta	Matmuo, mm
Ilgis	75
Aukštis	22
Plotis	35



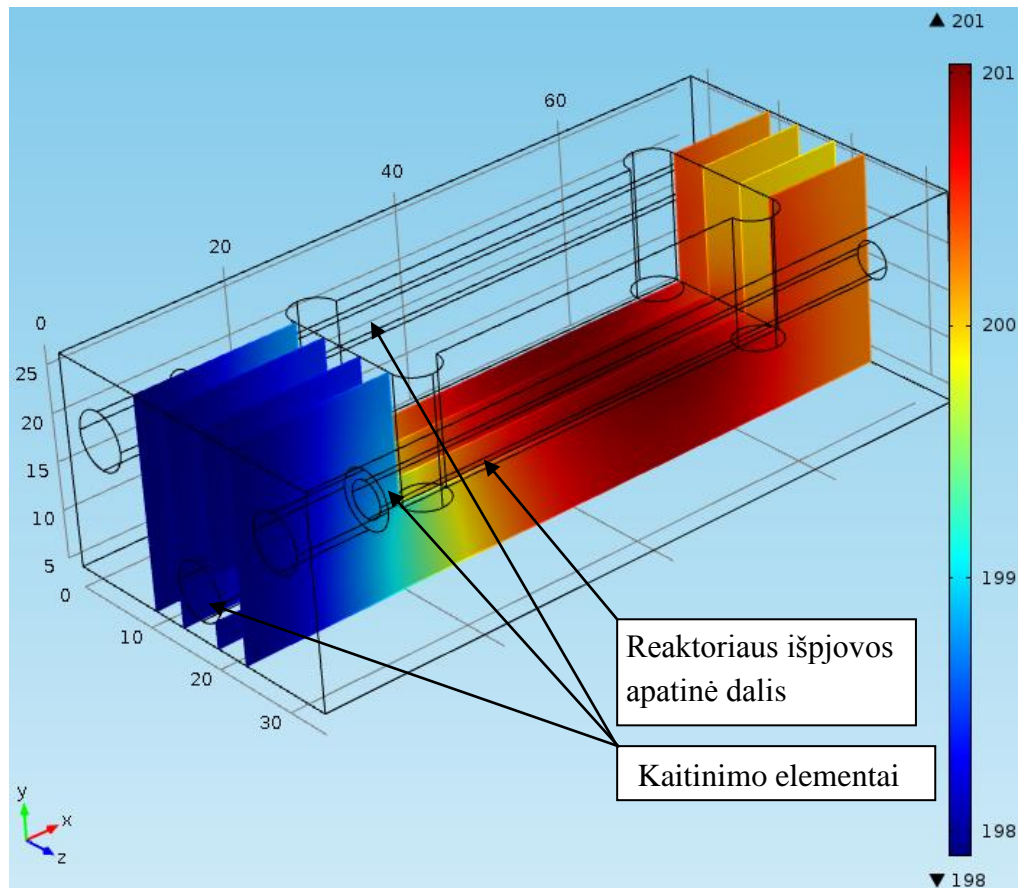
22 pav. Plokštelės modelis su trimis kaitinimo elementais

Plokštelės modeliui su trimis kaitinimo elementais nustatomos kaitinimo elementų sienelių išpjovos, kaip šilumos šaltiniai, nustatoma trijų kaitinimo elementų galia. 24 pav. pateiktas šilumos pasiskirstymas, kaitinant trijų kaitinimo elementų.



23 pav. Šilumos sklidimas plokštelėje, kaitinant trijų kaitinimo elementų

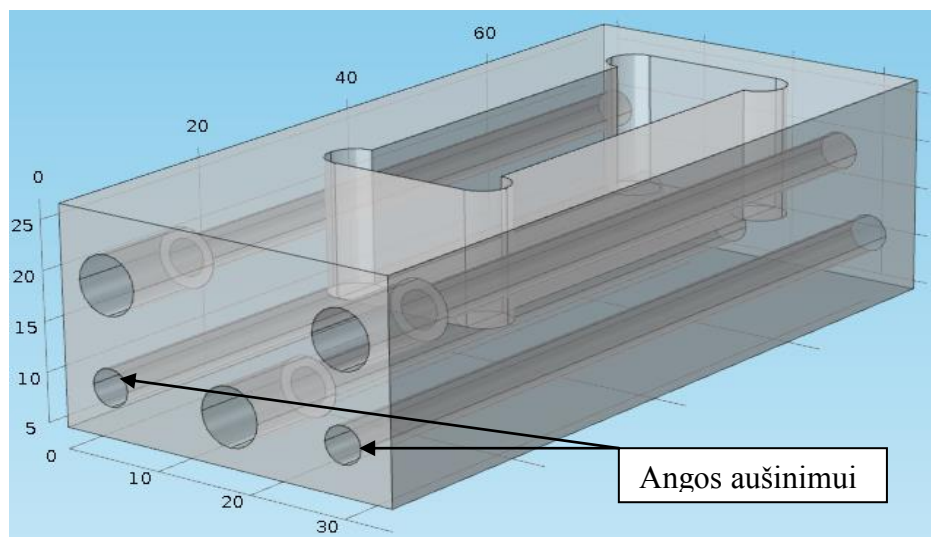
Pjūviai pateikti nuo kairės į dešinę pradedant 30 s, 1 min, 1 min 30 s, 2 min, 2 min 30 s, 3 min. Kaitinant trijų kaitinimo elementų, šilumos srautas pasiskirsto po visas išpjovos sieneles, taip pat ir reaktoriaus apatinę dalį. Po 3 minučių, pagal 24 pav. esančią temperatūros skalę, visa kaitinimo plokštelė pasiekia 200 – 201 °C, tai tenkina projektinę užduotį. Aiškesniam šilumos pasiskirstymui pateikiama kaitinimo plokštelė su išilginiais pjūviais (25 pav.).



24 pav. Šilumos sklidimas plokštelėje, kaitinant trijų kaitinimo elementų (išilgi pjūviai)

Pjūviai pateikti nuo kairės į dešinę pradedant 30 s, 1 min, 2 min, 3 min. Iš 25 pav. matome jog plokštelės reaktoriai po 3 minučių pilnai įkaitę.

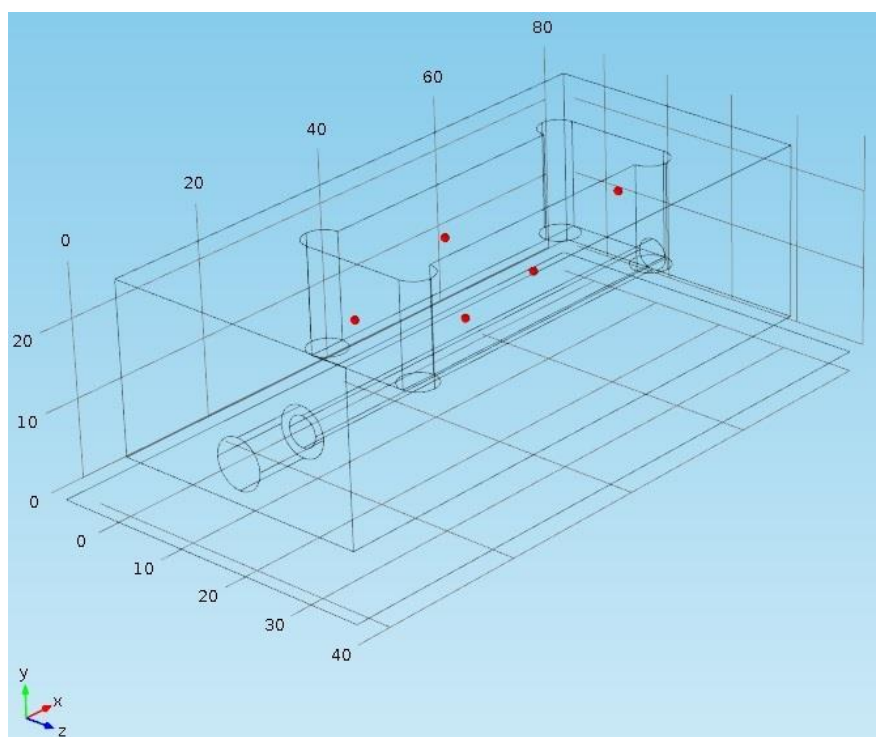
Plokštelėje numatomos dvi 30 mm skersmens aušinimo angos, kurios bus panaudojamos plokštelės aušinimui (26 pav.).



25 pav. Plokštelė su dvejomis angomis aušinimui

2.3.2 Kaitinimo plokštelės modelių palyginimas Comsol programoje

Kaitinimo plokštelės modelių palyginimui, paimta po tašką nuo kiekvienos kaitinamo reaktoriaus sienelės centro (visiems trims kaitinimo plokštelės modeliams) t.y. su vienu, dviem ir trimis kaitinimo elementais modelių. Duomenys surinkti ir apdoroti taip, kaitinimo reaktoriaus sienelės taškai matuojamai nuo 0 iki 360 sekundžių, kas 10 sekundžių, procesas vyksta 6 minutes. Žemiau matome, kaip atrodo modelis su vienu kaitimo elementu ir jame pažymėti reaktoriaus sienelių centrų taškai. Analogiškai taip padaroma ir su kitais dviem modeliais.



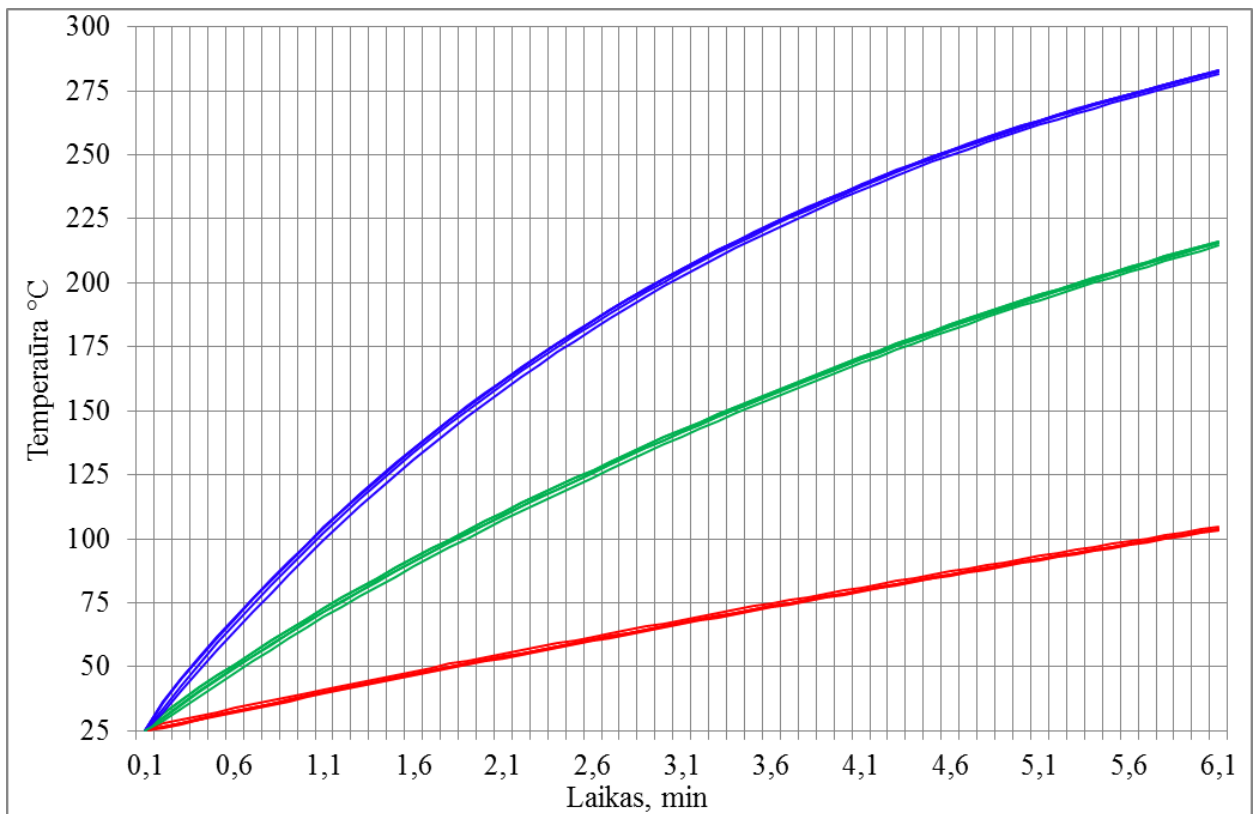
26 pav. Plokštelės su vieno kaitinimo elementu modelis, temperatūros taškai (analogiškai daroma ir su kitais dviem modeliais)

7 lentelė

Kaitinimo reaktoriaus sienelių centrų koordinatės

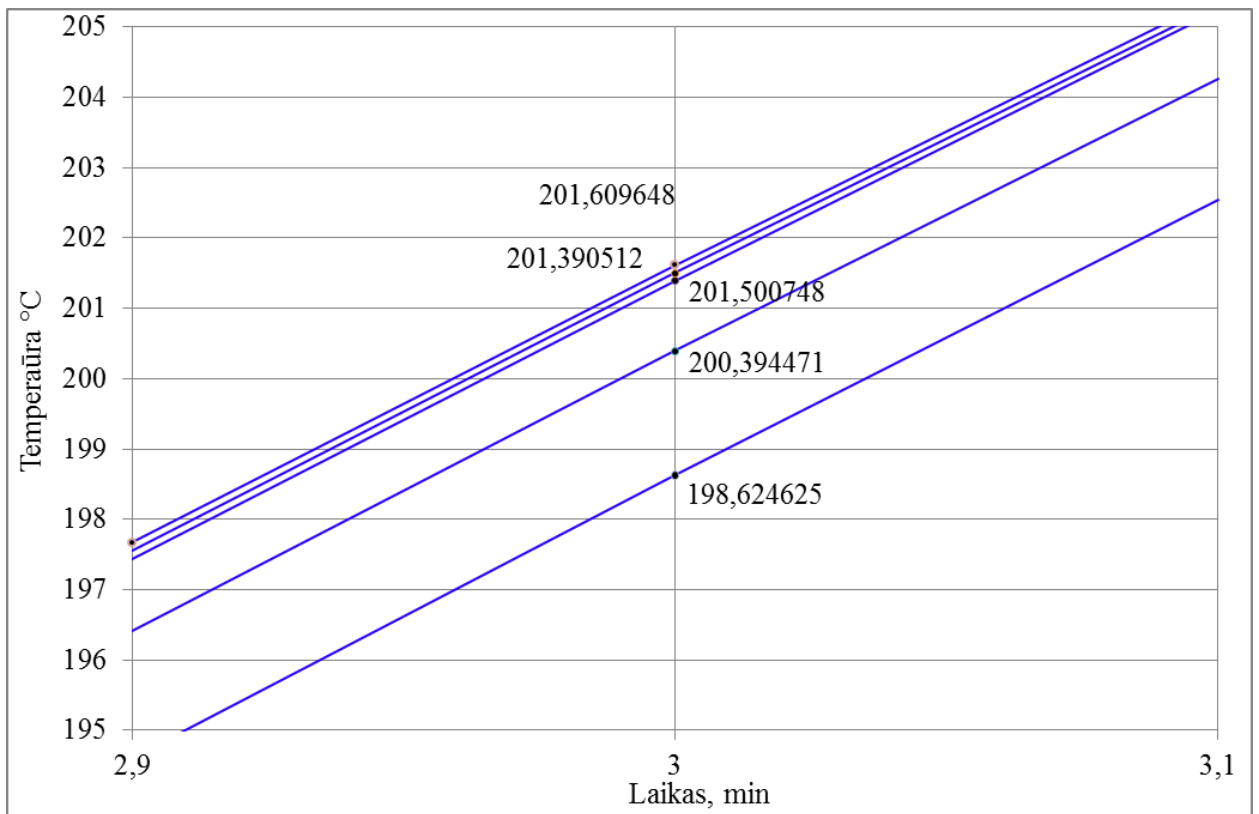
Koordinatės ašis Taško pav.	X, (mm)	Y, (mm)	Z, (mm)
Kairės sienelės	42	20	10,5
Galinės sienelės	64,5	20	17,5
Dešinės sienelės	42	20	24,5
Priekinės sienelės	19,5	20	17,5
Apatinės sienelės	42	13,5	17,5

Žemiau pateiktas reaktoriaus sienelių temperatūrų palyginimo grafikas.



27 pav. Kaitinimo plokštelės reaktoriaus temperatūrų palyginimo grafikas (raudona spalva – su vienu kaitinimo elementu plokštelės modelis, žalia spalva – dviejų kaitinimo elementų plokštelės modelis, mėlyna spalva – trijų kaitinimo elementų plokštelės modelis)

Iš grafiko matome kaitinimo plokštelės modelių palyginimą, t.y. temperatūros priklausomybę nuo laiko. Iš grafiko galime teigti, jog plokštelės modelis su vienu kaitinimo elementu net ir po dvigubai didesnio laiko nepasiekia reikiamos temperatūros, plokštelės reaktorių kaista lėtai. Tuo tarpu žalia spalva, plokštelės modelis su dviem kaitinimo elementais pasiekia reikiamą 200 °C temperatūrą po 5 minučių 40 sekundžių, tačiau tai netenkina vartotojo.



28 pav. Kaitinimo plokštelės su trimis kaitinimo elementais modelio temperatūros kitimas laike

Modeliuojamam plokštelės modeliui su trimis kaitinimo elementais 200 °C temperatūrą pasiekti pavyksta per 3 minutes, reaktoriaus centrai būna pasiekę tokią temperatūrą: apatinė dalis – 201,61 °C ; šoninės dalys – 201,40 °C ir 201,50 °C ; galinė dalis – 200,40 °C ; priekinė dalis (pažymėta grafike) – 198,63 °C. Kadangi duotoji užduotis yra 200 °C ± 3 °C , plokštelės modelis su trimis kaitinimo elementais galimas naudoti, nes telpa į reikiamas vartotojui ribas.

2.3.3 Kaitinimo plokštelės baigtinių elementų tinklelių palyginimas

Kadangi, modeliuojant su Comsol Multiphysics programa, reikia pasirinkti baigtinių elementų tinklelį, o tai gali įtakoti kaitinimo plokštelės temperatūrą ir kaitinimo laiką, reikia pasirinkti tinklelį atsižvelgiant į kompiuterio resursus, su kuriuo dirbama, taip pat ir plokštelės elementus, kad būtų gauti kuo tikslesni duomenys. 8 lentelėje pateikti galimi tinkleliai ir kiek elementų juos sudaro.

Kaitinimo plokštelės modelio baigtinių elementų skaičius pasirinkus skirtingus elementų dydžius

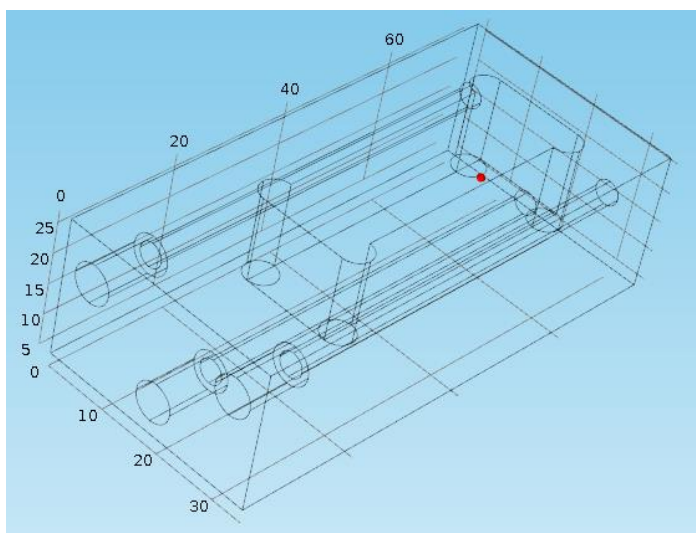
Elementų dydis	Kaitinimo plokštelės modelis baigtinių elementų metodu suskaidytas į:
Extremely coarse	3037 elementų
Extra coarse	4093 elementų
Coarser	7120 elementų
Coarse	14309 elementų
Normal	37824 elementų
Fine	76744 elementų
Finer	135202 elementų
Extra Fine	279328 elementų
Extremely Fine	769929 elementų

Iš 8 lentelės matome, kad elementų skaičius labai stipriai skiriasi, nuo mažiausiai turinčio tinklelio Extremely coarse - 3037 elementai, iki daugiausiai turinčio Extremely Fine 769929 elementų. Kadangi tai tik elementų skaičiai, o nematome kompiuterio skaičiavimo laiko, išskyrčiau tris tinklelius, kuriuos palyginsiu žemiau, tai yra mažiausiai turintis 3037 elementus, vidutinis (Normal), kuris turi 37824 elementus ir daugiausiai turintis 769929 elementus. Kompiuterio skaičiavimo laikai kaitinimo plokšteliai pateikti 9 lentelėje.

Tinklelių laikų ir elementų palyginimas

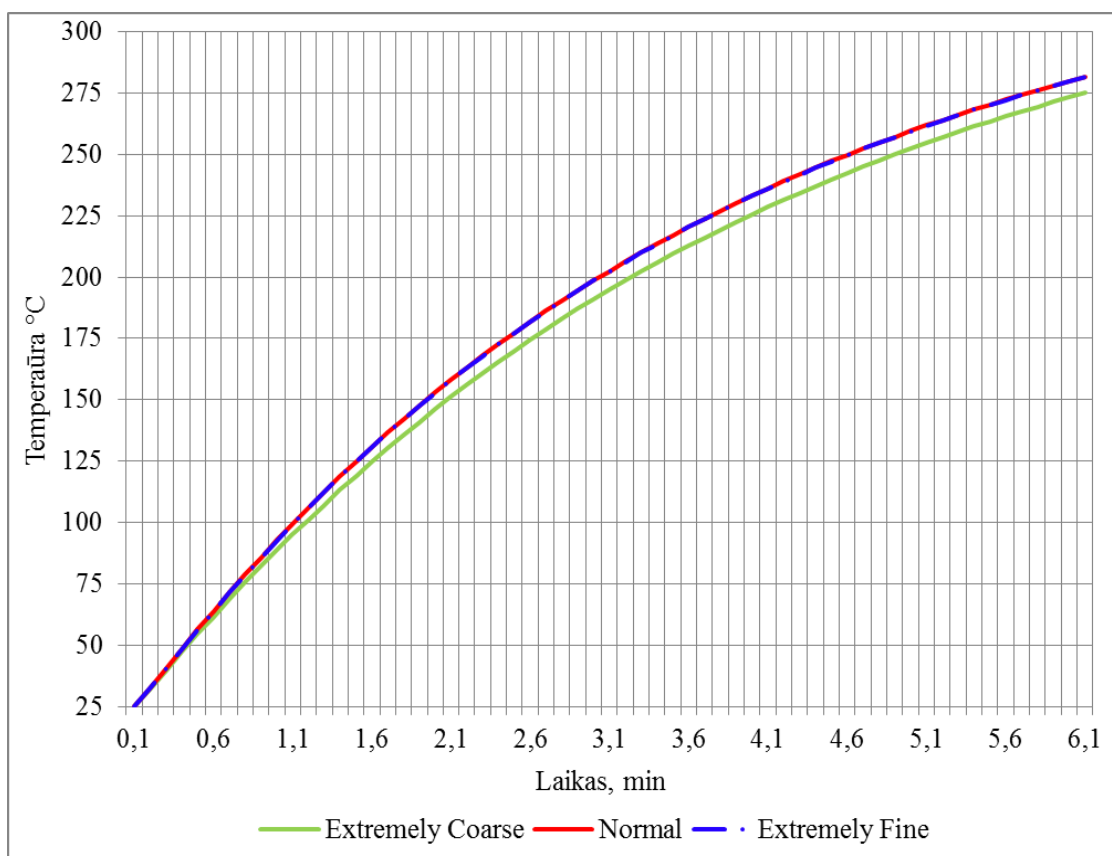
Elementų dydis	Elementų skaičius	Skaičiavimo laikas
Extremely coarse	Complete mesh consists of 3037 elements.	Solution time: 7 s
Normal	Complete mesh consists of 37824 elements.	Solution time: 84 s (1 minute, 24 seconds)
Extremely fine	Complete mesh consists of 769929 elements.	Solution time: 1714 s (28 minutes, 34 seconds)

Iš 9 lentelės matome, jog skaičiavimo skirtumai akivaizdūs, mažiausiai turintis tinklelis elementų suskaičiuoja kaitinimo plokštelės modelį vos per 7 sekundes, tuo tarpu daugiausiai turintis tinklelis elementų skaičiuos labai ilgai, 28 minutes ir 34 sekundes. Kad būtų lengviau pamatyti skirtumus, palyginau temperatūros kitimą viename taške esant skirtingiems tinkleliams pateiktiems 9 lentelėje.



29 pav. Kaitinimo reaktoriuje pasirinktas matavimo taškas

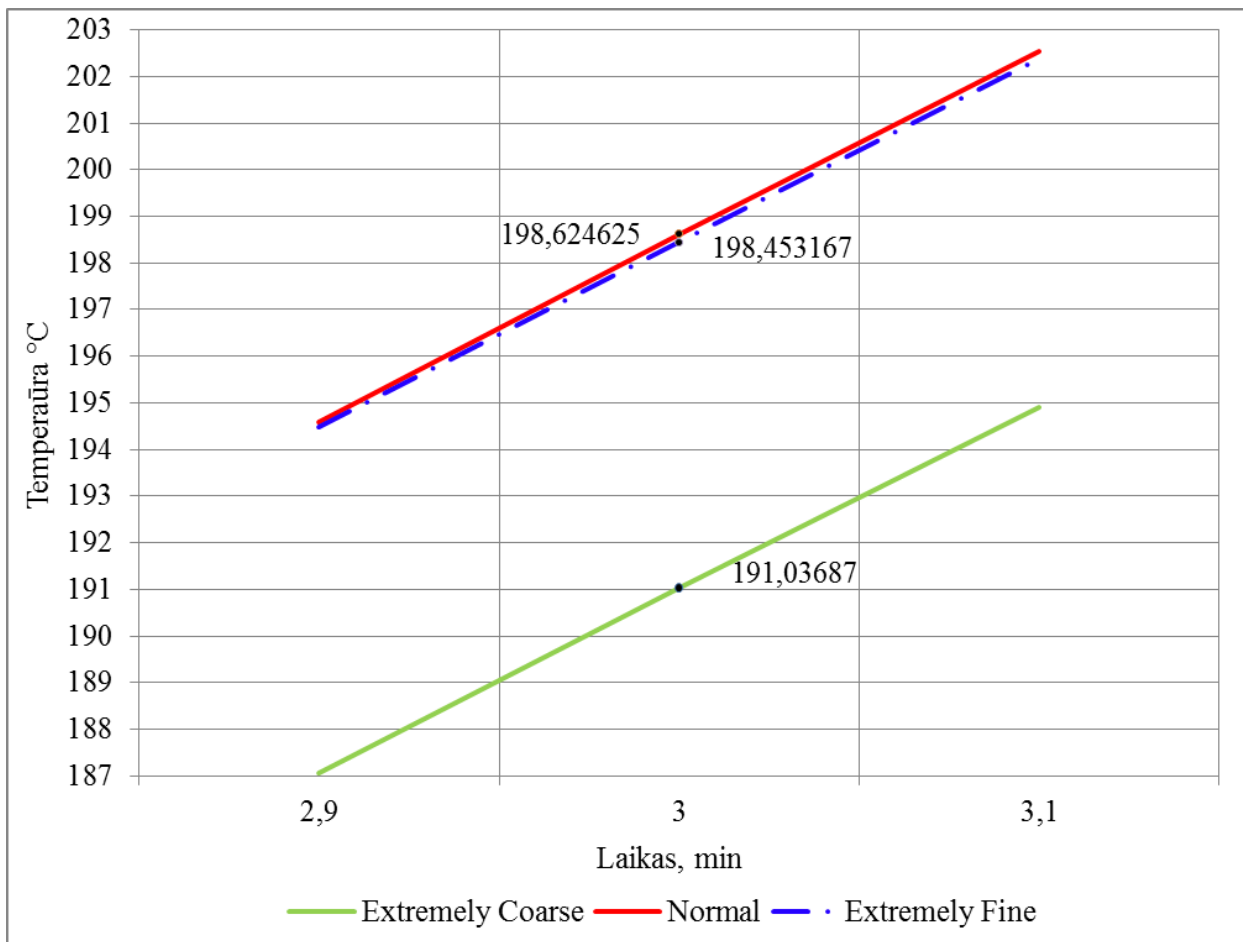
29 pav. matome pasirinktą tašką, kurio koordinatės: X ašimi - 65mm, Y ašimi - 13,5mm, Z - ašimi 13,3mm, nustatyti temperatūros rezultatai kas 10 sekundžių.



30 pav. Pasirinkto taško palyginimas skirtingais tinkleliais

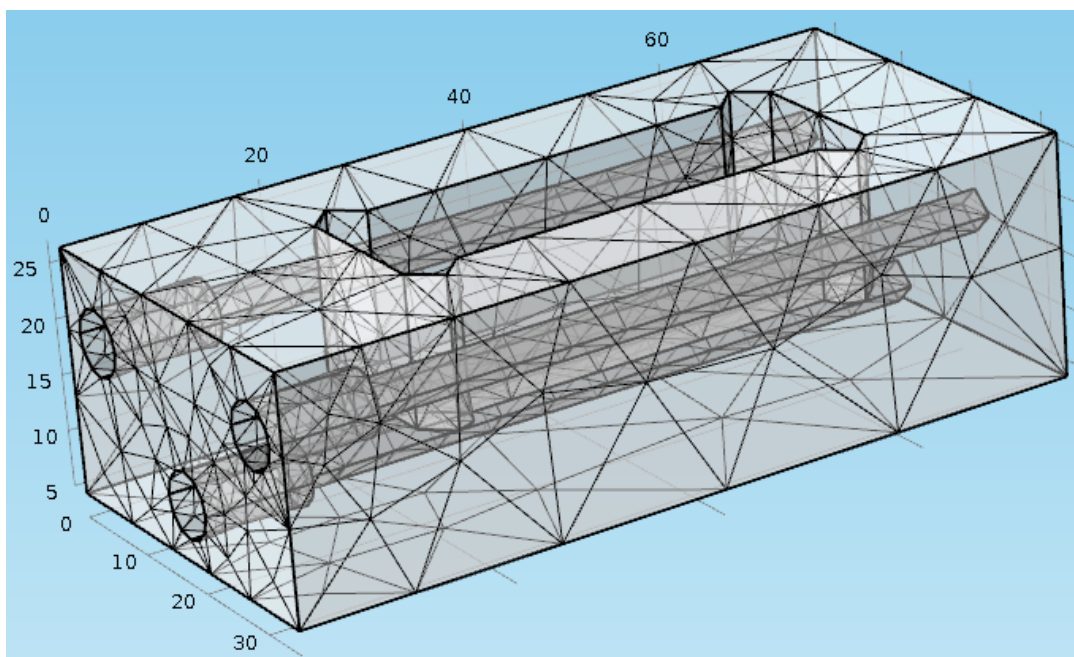
Iš grafiko matome, jog Extremely coarse tinklelio duomenys atsiskirę nuo kitų tinklelių duomenų, grafiko tiesė gerokai žemiau už kitas, taigi rodoma gerokai žemesnė temperatūra. Ši tinklelis naudoja mažiausiai taškų tai yra 3037 elementus, o tinkleliai Normal ir Extremely fine,

lipa vienas ant kito, kad ir taškų skaičius labai skirtingas, Normal – 37824 elementai, o Extremely fine – 769929 elementai, galime teigti, kad kaitinimo plokštelės modeliui pakanka Normal tipo tinklelio. Kadangi užduotis yra per 3 minutes pasiekti $200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, žemiau pateiktas grafikas (31 pav.) praėjus 3 minutėms su skirtingų tinklelių paklaidomis.

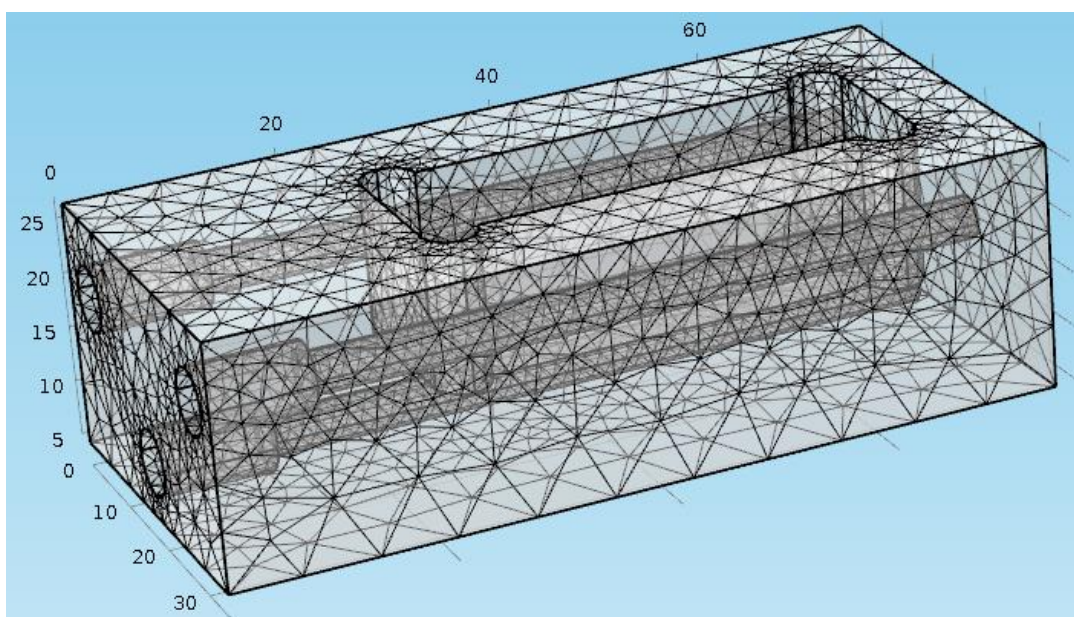


31 pav. Tinklelių paklaidų grafikas

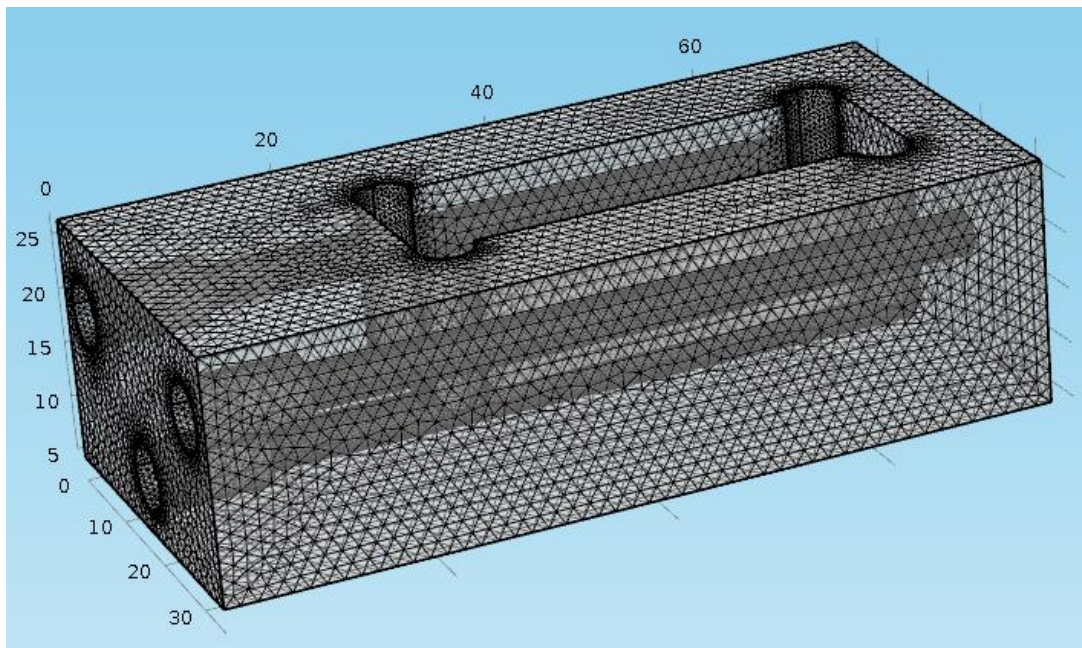
Galime teigti, kad Comsol programos tinklelio maksimumas yra Extremely Fine tinklelis (100%), tuo tarpu Normal tinklelis sudaro 99,91%, idealaus modelio, o Extremely Coarse tik 96,18%. Atsižvelgiant į temperatūros sąlygą $200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, galime teigti, kad tinklelis Normal (99,91%), kurio vertė $198,45\text{ }^{\circ}\text{C}$ tenkintinas, nes telpa į temperatūros ribas. Toliau pateikti kaitinimo plokštelės su trimis kaitinimo elementais palyginti tinklelių modeliai.



32 pav. Kaitinimo plokštelės Extremely coarse tinkelis



33 pav. Kaitinimo plokštelės Normal tinkelis

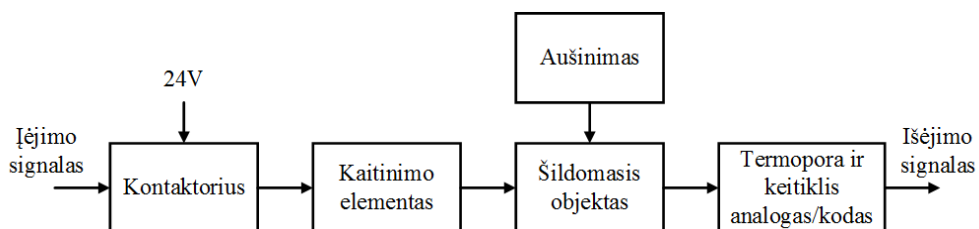


34 pav. Kaitinimo plokštelės Extremely Fine tinklelis

Normal tinklelio modelio skaičiavimo laikas 1 minutė 24 sekundės, palyginus su Extremely fine tinklelio modelio skaičiavimo laiku 28 minutės 34 sekundės, skaičiavimo laikų skirtumas yra labai didelis.

2.4 Matematinis kaitinimo plokštelės skaičiavimas Matlab terpėje

Norint paskaičiuoti kaitinimo plokštelės matematinį modelį, reikia žinoti visus proceso kintamuosius, t. y. reikiamą kaitinimo temperatūrą, šilumos perdavimo koeficientus, šilumos nuostolius, aplinkos temperatūrą ir t. t. Iš pradžių sudaroma blokinė valdymo sistemos schema, pagal kurią vyksta technologinis procesas. Kaitinamosios plokštelės temperatūros reguliavimo blokinė schema pateikta 36 pav.

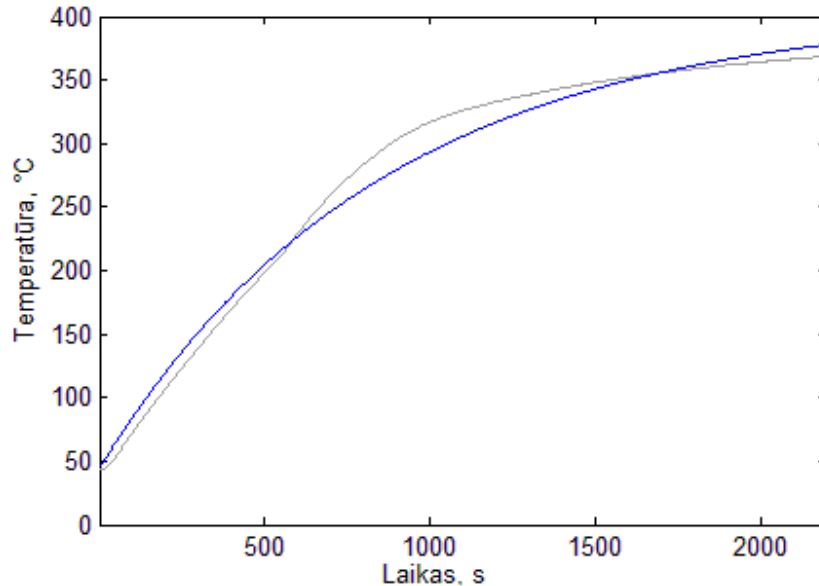


35 pav. Valdymo sistemos blokinė schema

Matematinio modelio sudarymui paskaičiuojama kaitinimo elemento perdavimo funkcija, kuri aproksimuota į matematinę išraišką [4]:

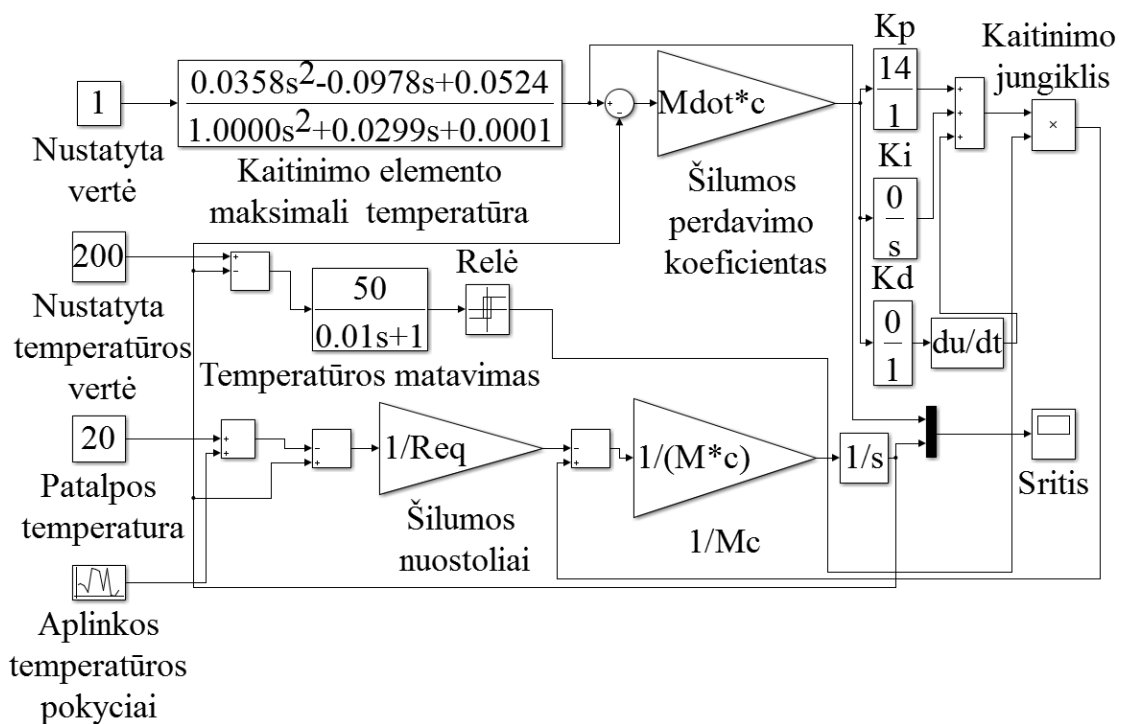
$$sildymas_m = \frac{0,0358 s^2 - 0,0978 s + 0,0524}{1,0000 s^2 + 0,0299 s + 0,0001} \quad (18)$$

čia $s = \frac{d}{dt}$ - Laplase operatorius.



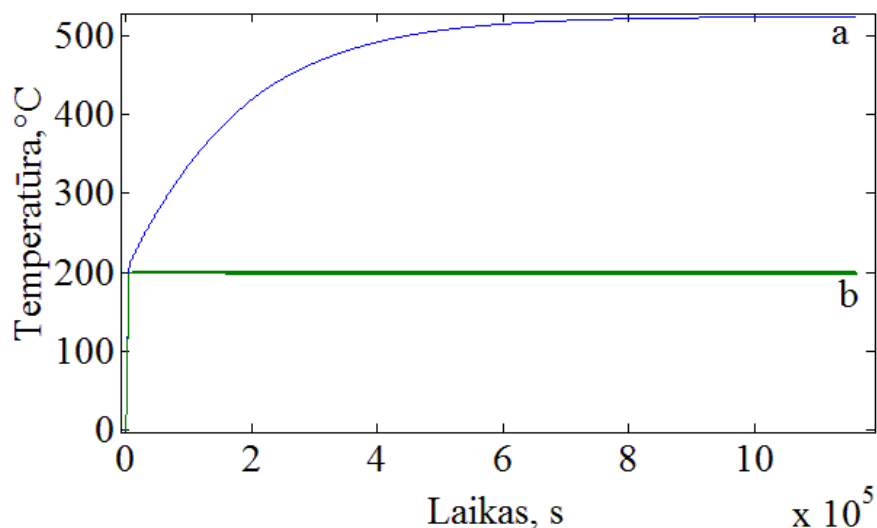
36 pav. Ketvirtosios eilės būsenų erdvės modelio išėjimo palyginimas (mėlyna spalva) su paskaičiuota kaitinimo elemento perdavimo funkcija (pilka spalva) [4]

Iš 37 pav. matome, kad kaitinimo elemento perdavimo funkcija yra panaši į ketvirtosios eilės būsenų erdvės modelio išėjimo kreivę (atitikimas yra 87,18%).

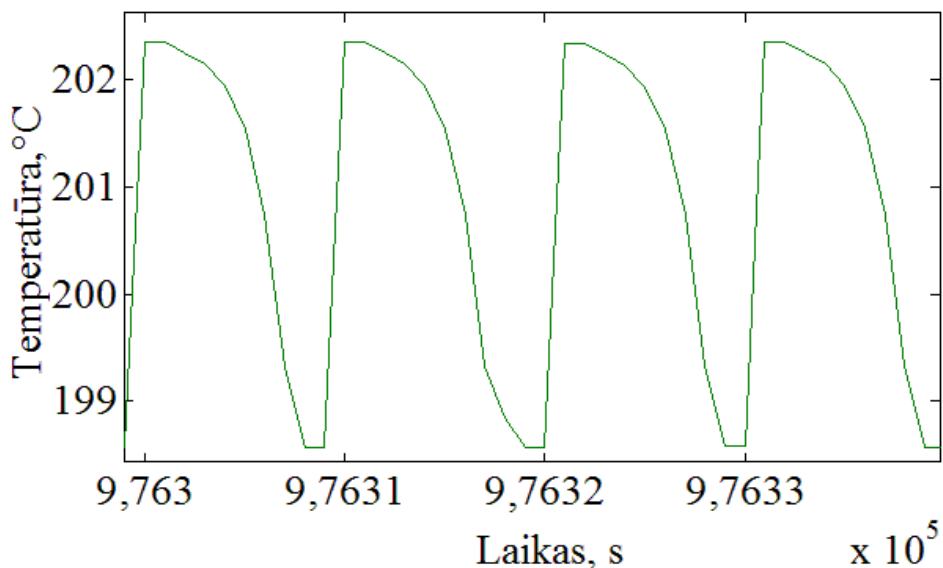


37 pav. Kaitinimo plokštelės Matlab matematinis modelis [8]

Matematinis modelis sudarytas paskaičiuvus kaitinimo elemento perdavimo funkciją, PID reguliatorių ir įvertinus termoporą, bei šilumos nuostolius (t. y. aplinkos temperatūrą, šilumos laidumą, šiluminę talpą ir tankį) (38 pav.). Pasirinkta naudoti reaktoriaus temperatūros palaikymui PID reguliatorių, nes apie tokią temperatūros kontrolę rašė Elena Grassi ir Kostas Tsakalis straipsnyje: PID valdiklio dažnio formavimas, krosnies temperatūros valdymas [2].



38 pav. Matlab matematinio modelio išėjimo signalo palyginimas: a – apskaičiuota maksimali kaitinimo elemento perdavimo funkcija; b – PID reguliatoriaus matematinio modelio kreivė

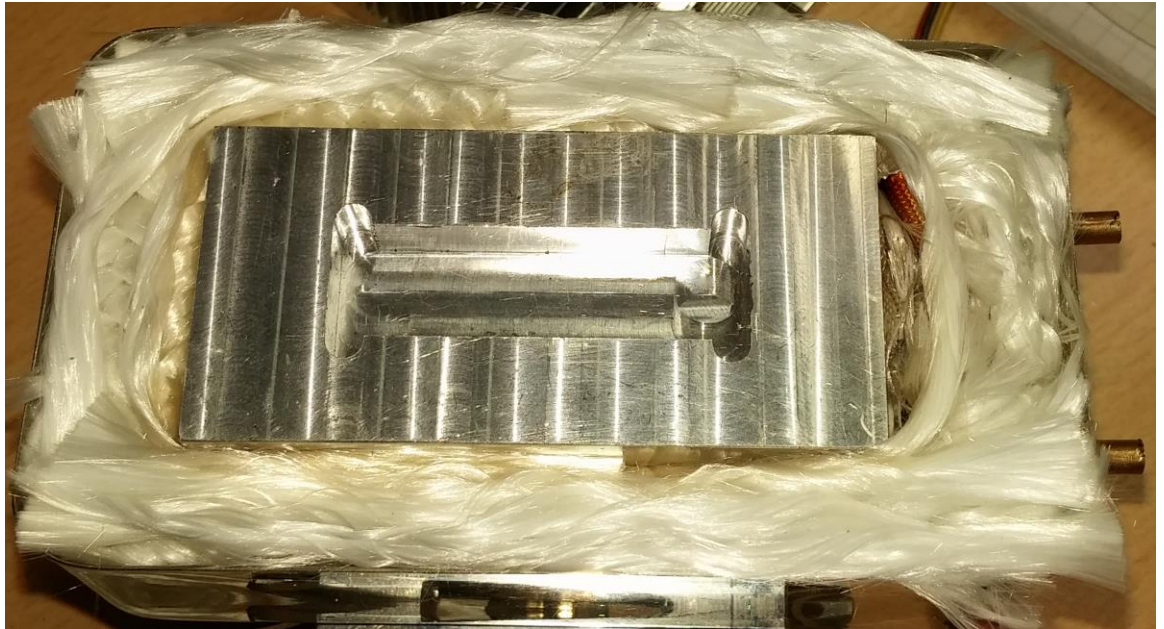


39 pav. PID signalo kitimas laike

40 pav. pateikta PID reguliatoriaus matematinio modelio kreivė, prie nustatytos 200°C temperatūros (svyravimas nuo 198,5 iki 202,5 °C (tikslumas +2,5; -1,5°C)).

2.5 Kaitinamosios plokštelės temperatūros valdymas ir parametrų tyrimas

Pati kaitinimo plokštelė patalpinta į metalinę dėžutę, aplink plokštelę pridėta karčiui atsparios stiklo pluošto virvės (41 pav.). Pravesti laidai į išorę kaitinimo elementams ir jutikliui prijungti. Taip pat išvesti vamzdeliai plokštelės aušinimui.



40 pav. Kaitinimo plokštelė patalpinta dėžutėje

Siekiant išvengti bereikalingų temperatūros nuostolių, plokštelės viršus uždengiamas, paliekama tik kaitinimo reaktoriaus išpjova, ir kad nebūtų sąlyčio tarp kaitinimo plokštelės ir dangtelio, panaudojama stiklo vata (42 pav.).



41 pav. Dešinėje dėžutės dangtelis su stiklo vata, kairėje uždarytoje dėžutėje kaitinimo plokštelė su pritvirtinta K tipo termopora prie kaitinimo reaktoriaus sienelių (pati dėžutės dangtelio išpjova bus patobulinta)

Kaitinimo reaktoriaus temperatūros kontrolė turi veikti greitai, tiksliai ir nepriklausomai nuo išorės temperatūros. Temperatūra valdoma prijungto temperatūros daviklio. Bandant kontroliuoti temperatūrą, pastebėta, jog nuo prijungto jutiklio šalia kaitinimo elemento temperatūra kyla ir krenta labai lėtai, o temperatūros jutiklis turi veikti greitai, ir kuo tiksliau reaguoti kartu su reaktoriaus sienelių temperatūra. Dėl to bandoma įterpti temperatūros daviklį per mažą skylutę į kaitinimo plokštelės centą, taip kad nemaišytų technologiniams procesams ir greitai reaguotų į temperatūros skirtumus. Šis metodas pasiteisino. Po to buvo atliekamas bandymas dedant kas kart jutiklį į kaitinimo reaktorių, bet, tai, tikrai nepatogus būdas, taigi nuspręsta jutiklį tvirtinti kaitinimo plokštelės centre.



42 pav. Temperatūros palyginimas

Atliktus bandymus pastebėta, jog gerai pritvirtinus prie plokštelės reaktoriaus sienelių K tipo termoporą skirtumas tarp kaitinimo plokštelės centre pritvirtintos tokios pat K tipo termoporos 1°C . Bandymams naudotas Vichy VC99 multimetras, kuris matavo plokštelės reaktoriaus temperatūrą, o .. pav. dešinėje valdiklio ekranas, kuriame žalia spalva matome esamą temperatūrą kaitinimo plokštelės centre, rodmenys gauti iš K tipo termoporos, o apačioje, oranžine spalva, nustatyta norima reaktoriaus temperatūra.

Nuolatinė įtampa kontroliuoja ribinį jungiklį, kad įjungtų ar išjungtų kaitinimą. Elektroniniai sistemos komponentai gali būti sukombinuoti už mažą kainą, t.y. visos temperatūros kontrolei naudojamas valdiklis, kuris reguliuoja kintamosios srovės stiprintuvą. Daugelis veiksnių daro įtaką sistemos darbui. Kaitinimo plokštelė ir jos reaktoriaus yra šildomi kaitinimo elementų, bet iš apačios temperatūra visada išlieka didesnė negu virš kaitinimo plokštelės. Nors duraliuminis yra geras spinduliuojantis, tačiau jis spinduliuoja menką energiją, palyginti su ta kuri atvyksta iš kaitinimo elementų. Maži kaitinimo elementų temperatūros

pokyčiai parodomi iš karto valdikio ekrane ir sistema reaguoja greitai. Temperatūros lygis tarp kaitinimo reaktoriaus ir valdomo proceso lygio yra procentu mažesnis, negu kontroliuojamas, santykinai mažėja kaitinimo plokštelės ir kaitinimo elementų šiluma su kaitinimo laiku. Dėl to, temperatūrai trukdo pastoviai didėti, ir sistema dirba pastoviu operacinės temperatūros laiku. Kaitinimo plokštelė ir toliau spinduliuos didelį šilumos kiekį, kai kaitinimo elementai bus išjungti, jeigu buvo pasiekta 50-200 °C temperatūra. Jei reaktorių nustatys mažesnei temperatūrai, negu buvo prieš tai, ir plokštelė bus dar neatvėsus, sistema neįsijungs, kol kaitinimo plokštelė neatvės iki mažesnės temperatūros. Tai gali užtrukti kelias minutes, jeigu nebus naudojamas priverstinis aušinimas. Kai tik galia yra pašalinama, šildymas sustoja akimirksniu, kol reaktoriaus išorinis paviršiaus centras iš apačios pasiekia tam tikrą išjungimui temperatūrą. Vidinio paviršiaus temperatūra pakyla sklandžiai į viršų ir išsilygina su santykinai maža viršijimo paklaida. Netolygus šildymas apačioje sukelia laikiną šilumos srautą centro link, kur jutiklis aptinka šilumą. Pagrindinė priežastis yra kaitinimo elementų temperatūros viršijimas maždaug 10-15 procentų mažiau pusiausvyros temperatūros. Apie tokią temperatūros kontrolę rašė Peters, Philip H. (2007 Balandžio 23d.) straipsnyje „A Portable Cool-Surface Induction Cooking Appliance“ tik naudojo įrenginį maisto ruošimui - kaitlentę. [1]

Šiame eksperimente naudota aparatūra:

Temperatūros kontrolei valdyti, reguliatorius Ohkura EC5500S (44 pav.).



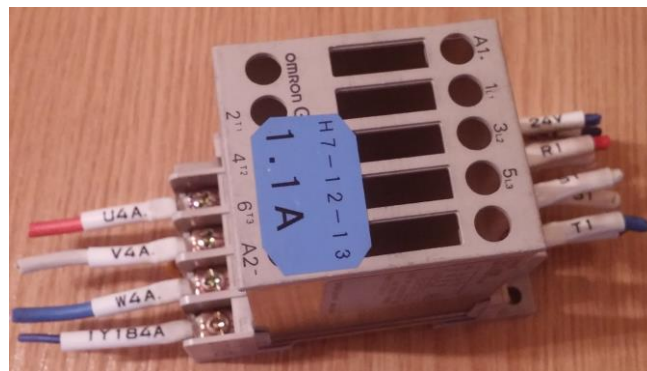
43 pav. Reguliatorius Ohkura EC5500S [9,10]

Regulatoriaus maitinimui, bei kaitinimo elementams naudotas maitinimo šaltinis Omron S82K-24024, kuris teikė kintamąją įtampą reguliatoriui – 230 V ir kaitinimo elementams – 24 V (45 pav.).



44 pav. Maitinimo šaltinis Omron S82K-24024

Kadangi kaitinimo elementai naudoja 24 V įtampą, kaitinimo elementų įjungimui ir išjungimui naudota relė Omron G3JC-2058L (46 pav.).



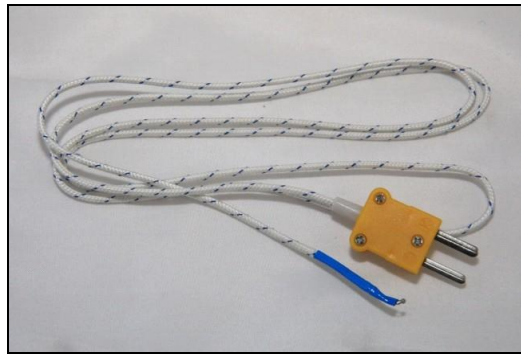
45 pav. Relė - Omron G3JC-2058L

Plokštelės kaitinimui naudoti keramikiniai kaitinimo elementai, kurių galia 80 vatų ir naudoja 24 V įtampą (47 pav.).

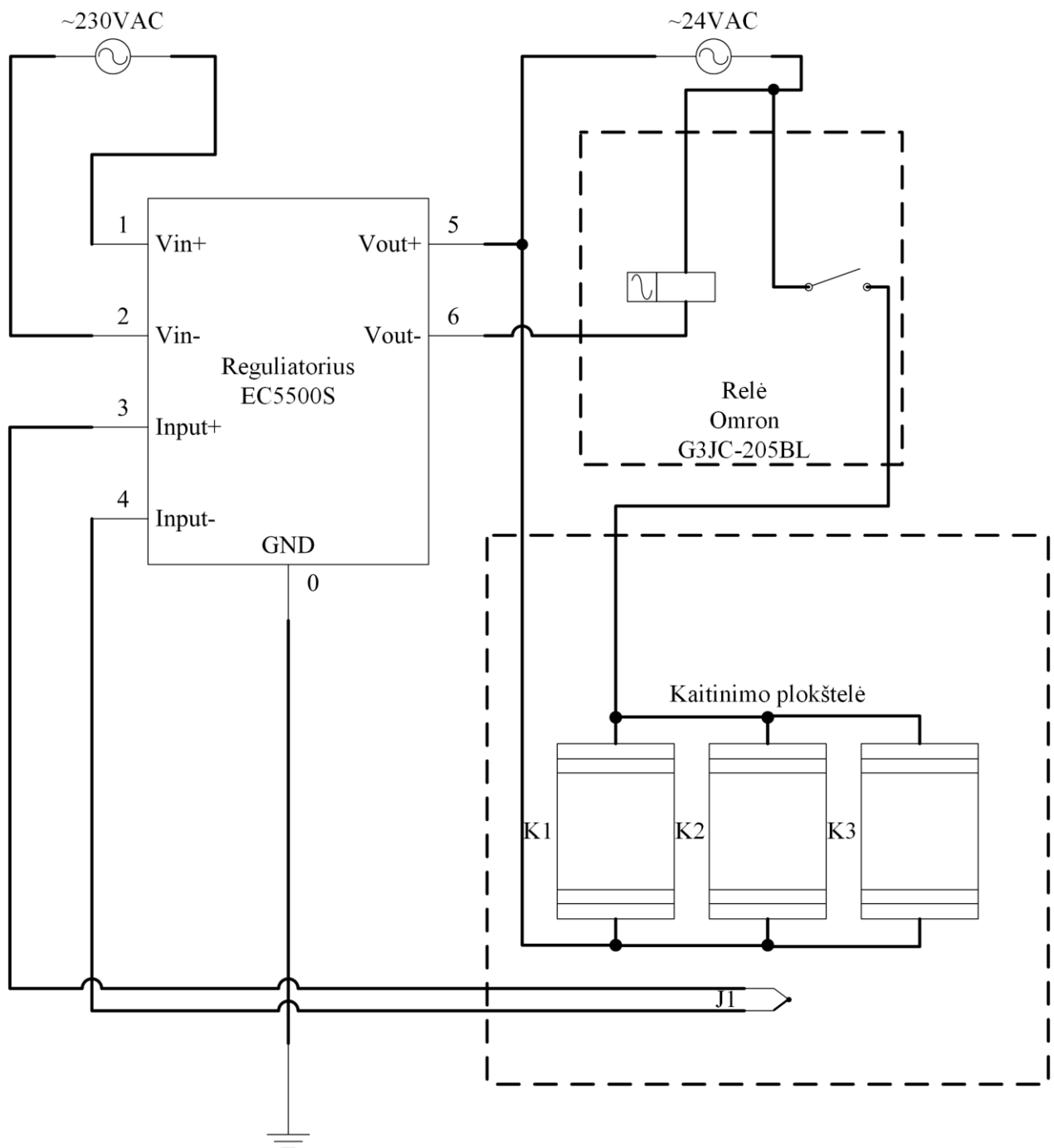


46 pav. Keramikinis kaitinimo elementas

Temperatūros duomenims surinkti ir plokštelės centro ir reaktoriaus sienelių naudotos K tipo termoporos (48 pav.).



47 pav. K tipo termopora



48 pav. Eksperimento principinė schema

Eksperimento principinė schemos veikimas: Plokštelę kaitina trys keramikiniai kaitinimo elementai sujungti lygiagrečiai, pajungti grandinėje per relę kurią maitina 24 voltų įtampa, ir valdo reguliatorius. Reguliatorius maitinamas iš Omron S82K-24024 šaltinio 230 voltų įtampa [12]. Reguliatorius gauna temperatūros rodmenis iš termoporos, kuri įtvirtinta į kiaurymę detalės centre.

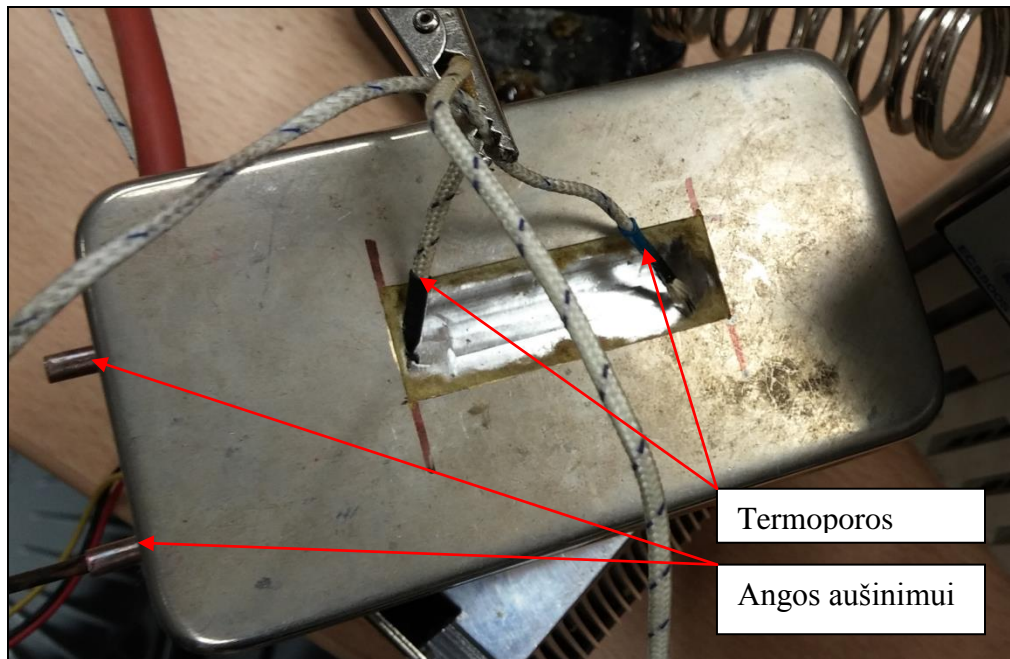
2.6 Kaitinimo plokštelės aušinimas

Kaitinimo plokštelės aušinimui panaudotas JUN AIR 6-15 (suspausto oro kompresorius, jį prijungus su oro žarnelėmis prie išvestų kaitinimo plokštelės aušinimo angų. Kadangi 200 °C temperatūra gali išlydyti prijungtą paprastą žarnelę, sujungimui su išvestais vamzdeliais panaudotos karščiui atsparios pramoninės silikoninės žarnos.



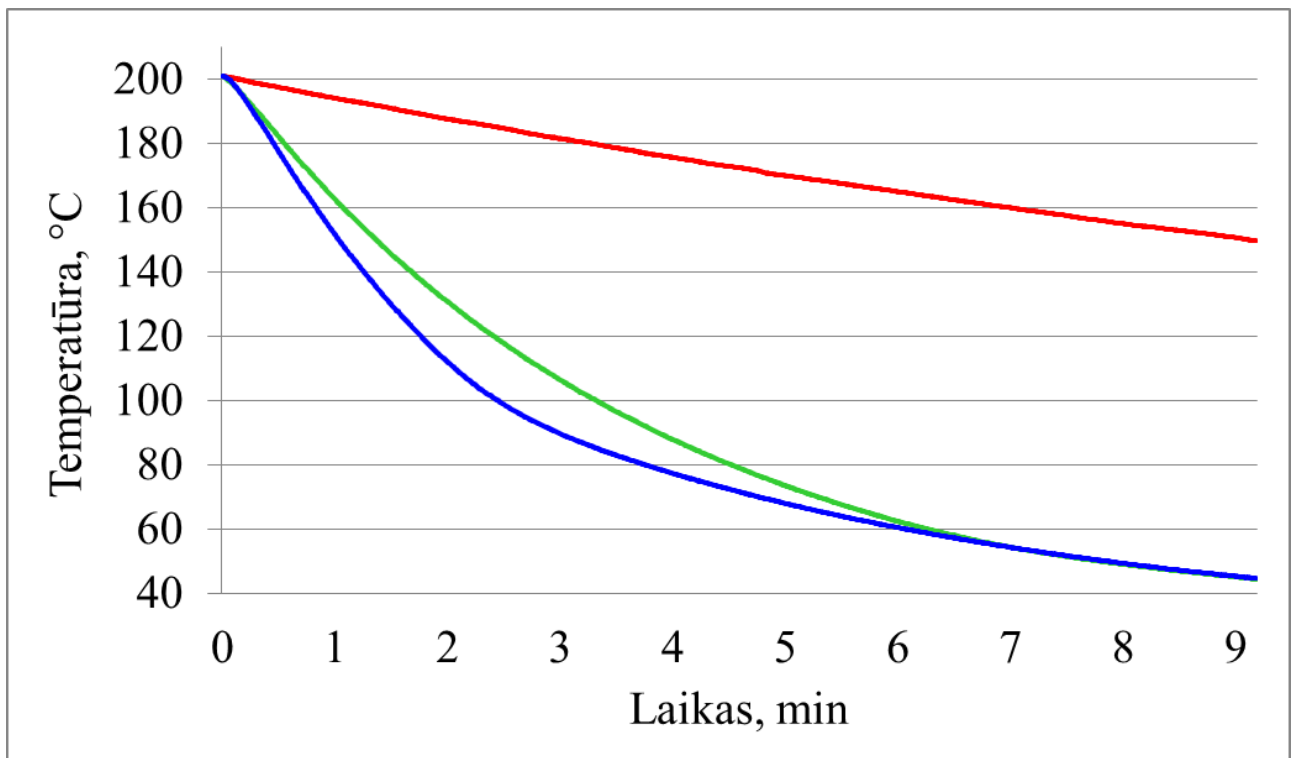
49 pav. Suspausto oro kompresorius JUN AIR 6-15

Kadangi svarbus kaitinimo plokštelės reaktoriaus paviršius, o valdiklis duomenis gauna iš kaitinimo plokštelės vidaus, atlikti matavimai su dvejomis termoporomis, pritvirtinus jas prie plokštelės kaitinimo reaktoriaus. Šįkart termoporos temperatūros duomenis siunčia dviem National Instruments SCC-TC03 serijos įvestiems moduliams, kurie pajungti prie NI SC-2345 kompiuterinės plokštės. Signalų apdorojimui surinkti, panaudota National Instruments labview programa. Duomenys surinkti 0,333 sekundės tikslumu [7, 11].



50 pav. Dvi termoporos plokštelės kaitinamojoje srityje

49 pav. Matome plokštelę, kuri patalpinta į dėžutę, viršuje išlindusios žnyplės, kurios laiko dvi K tipo termoporas, pritvirtinta taip, kad liestųsi su kaitinimo plokštelės reaktoriaus sienelėmis.

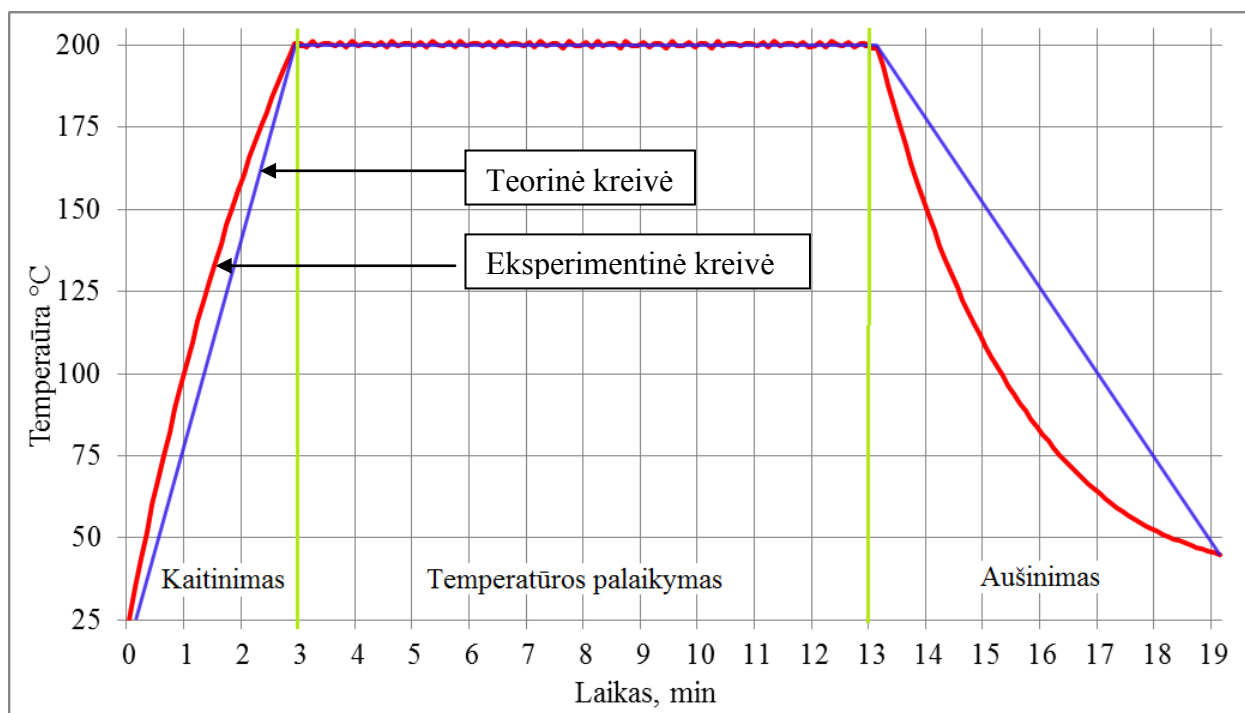


51 pav. Plokštelės kaitinimas iki 200 °C be aušinimo (raudona spalva), aušinimas 1 bar suspausto oro srautu (žalia spalva), 1,5 bar suspausto oro srautu (mėlyna spalva)

Iš grafiko, pateikto 51 pav. matyti, jog plokštelė be papildomo aušinimo vėsta labai ilgai, o aušinimo skirtumas tarp 1 ir 1,5 bar suspausto oro srautų ne ženkliai skiriasi.

2.7 Eksperimentinis automatizuoto kaitinimo plokštelės proceso palyginimas su teorine kreive

Norint palyginti automatizuotos kaitinimo plokštelės proceso tyrimą, reikia sujungti visus temperatūros ir laiko duomenis į viena tiesę, kaitinimo duomenis gautus Comsol Multiphysics programoje, PID reguliatoriaus temperatūros palaikymui gautus duomenis Matlab terpėje, Plokštelės aušinimo duomenis gautus National Instruments Labview programa. Visa tai sujungus, gaunamas grafikas, kuris palyginamas su teoriniu grafiku (51 pav.).



52 pav. Teorinis ir eksperimentinis tyrimo grafikas

51 pav. matome mėlyna spalva teorinę tiesę, kur plokštelės kaitinimas iki 200 °C (3 min), 200 °C temperatūros palaikymas (10 min), plokštelės aušinimas iki 44 °C (9 min 10 s). Raudona spalva matome praktinę kreivę, atliktą modeliuojant, skaičiuojant ir programuojant. Žalia spalva pažymėti technologiniai procesai, kaitinimas, temperatūros palaikymas ir aušinimas.

Visas automatizuotos kaitinimo plokštelės procesas (plokštelės kaitinimas, temperatūros palaikymas 10 min ir aušinimas) trunka 19 min 10s.

2.8 Skyriaus išvados

Atsižvelgiant į temperatūros pasiskirstymo plokštėje rezultatus, matome, kad geriausias yra trečiasis plokštelės kaitinimo variantas – su trimis kaitinimo elementais. Šiuo atveju palaikoma reikiama temperatūra visoje plokštelės reaktoriaus sienelėse po 3 minučių.

Plokštelės aušinimui būtinas aušinimas, nes per 9 minutes, savaiminis atvėsimas nuo 200 °C pasiekia tik 150 °C, o su 1 bar suspausto oro srautu per 9 minutes atvėsta iki 44 °C, plokštelę jau galima liesti ranka.

Pastebėta, jog naudojant Comsol Multiphysics programos paketą, norint pavaizduoti kaitinimo plokštelės temperatūros kitimo laike pjūvius, spalvų spektras visų pjūvių atrodo labai panašus. Geresnis ir informatyvesnis būdas yra – išsitraukti iš Comsol Multiphysics programos gautus duomenis ir sudaryti grafiką temperatūros skirtumo priklausomybę nuo laiko.

IŠVADOS

1. Norint, kad reaktoriaus sienelės tolygiai įkaistų iki 200°C temperatūros (paklaida ± 3 °C), reikalingas plokštelės modelis su mažiausiai trimis kaitinimo elementais.
2. Taikant baigtinių elementų metodą kaitinimo plokštei, Comsol Multiphysics programoje, galimas Normal tipo tinklelis, kuris stipriai neapkrauna kompiuterio ir kurio tikslumas, pagal programos maksimumą 99,91 %.
3. Nustatytas PID reguliatorius Matlab Simulink modelyje, kuriame plokštelės reaktoriaus kaitinimo elementų tikslumas +2,5 °C; -1,5 °C.
4. Norint gauti tikslius matavimo rezultatus, panaudota National Instruments Labview programa su papildoma įranga, kurios pagalba duomenys gauti 0,333 s tikslumu.
5. Atlikus bandymus, plokštelės kaitinimą Ohkura EC5500R valdikliu ir aušinimą keliais suspausto oro slėgiais, pastebėta, jog keičiant suspausto oro slėgius, oro slėgis didelės įtakos aušimo greičiui neturi.

LITERATŪROS ŠARAŠAS

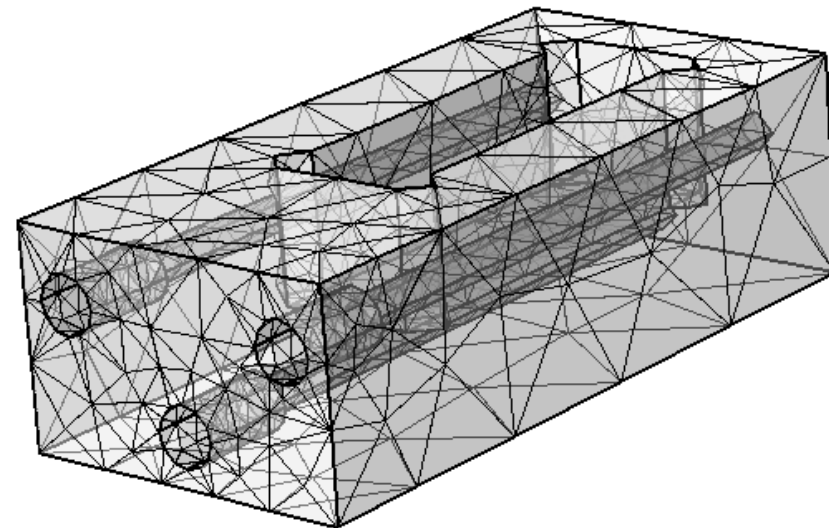
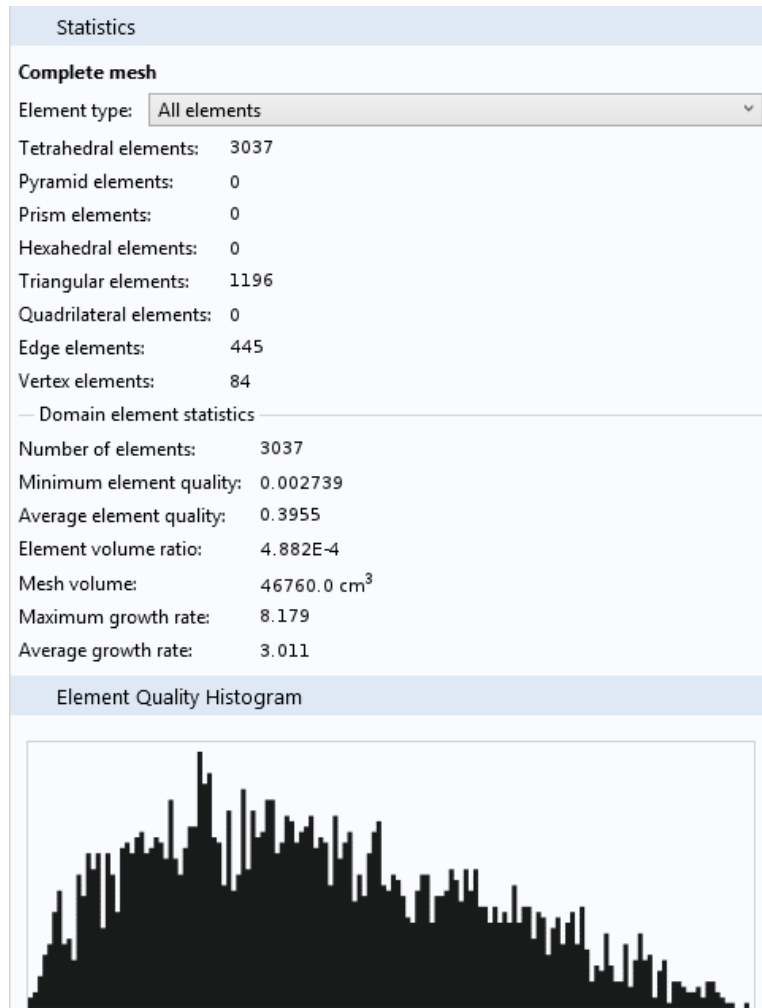
1. Peters, Philip H. (1974 lapkritis) A Portable Cool-Surface Induction Cooking Appliance Esamos versijos data (2007 Balandžio 23d.). Straipsnis: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4157682&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4157682> [žiūrėta 2015-03-20].
2. Elena Grassi ir Kostas Tsakalis (2000 rugsėjis) PID Controller Tuning by Frequency Loop-Shaping: Application to Diffusion Furnace Temperature Control. Straipsnis: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=865857>> [žiūrėta 2015-03-21].
3. Stepan Ozana, Martin Pies, Lukas Skovajsa, Radovan Hajovsky (2011) Modeling Heat Exchanger by FDM and FEM in C# and Comsol Multiphysics. Straipsnis: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6059213>> [žiūrėta 2015-03-23].
4. **Viržonis D.** Specializuotos inžinerinių skaičiavimų aplinkos : mokomoji knyga. – Kaunas: Technologija, 2010. p. 17-37. ISBN 9789955257691.
5. Comsol Multiphysics programinė įranga. Bendrosios paskirties modeliavimas šilumos perdavimas kietų kūnų. Prieiga per internetą: <<http://www.comsol.com/heat-transfer-module>> [žiūrėta 2014-12-20].
6. Comsol Multiphysics 4.4 vartotojo instrukcija. Šilumos perdavimo modeliavimas. Prieiga per internetą: <http://www2.humusoft.cz/ftp/comsol/guides/COMSOL_ReferenceManual.pdf> [žiūrėta 2015-03-20].
7. Vartotojo vadovas NI DAQ SC-2345/2350. National Instruments 2007. Prieiga per internetą: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/371064f.pdf>> [žiūrėta 2015-01-23].
8. Terminis namo modelis Matlab simulink programos pavyzdys. Prieiga per internetą: <<http://www.mathworks.com/examples/simulink/861-thermal-model-of-a-house>> [žiūrėta 2014-12-18].
9. Temperatūros valdiklio Ohkura EC5500S modelio aprašymas. Prieiga per internetą: <http://www.ohkura.co.jp/english/catalog-pdf/11_EC5500R.pdf> [žiūrėta 2015-01-25].
10. Ohkura EC5500S valdiklio instrukcija. Prieiga per internetą: <http://www.accutherm.com.tw/comm/upfile/d_090811_02581.pdf> [žiūrėta 2015-01-26].

11. SCC-TC serijos įvesties modulių vartotojo vadovas. Prieiga per internetą:
< <http://www.ni.com/pdf/manuals/371074c.pdf> > [žiūrėta 2015-01-26].
12. Maitinimo šaltinio Omron S82K-24024 instrukcija. Prieiga per internetą:
< http://www.omronkft.hu/pdf_en/s82k.pdf > [žiūrėta 2015-01-26].
13. **ALEKSA V.** Technologinių procesų automatizavimas : vadovėlis. - Kaunas:
Technologija, 2003. p. 254. ISBN 978-9955-25-505-5.
14. **ISERMANN R.** Mechatronic Systems: Fundamentals: knyga. - London : Springer:
Technologija, 2003. p. 357. ISBN 1852339306
15. **JANUŠEVIČIUS V. S.** Automatinis valdymas: teorija, uždaviniai, sprendimai. -
Kaunas: Technologija, 2003. p. 554. ISBN 9955-09-316-1.
16. Valdymo inžinerija. Prieiga per internetą:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Control_engineering> [žiūrėta 2015-03-12].
17. PID reguliatorius. Prieiga per internetą: < http://lt.wikipedia.org/wiki/PID_regulatorius >
[žiūrėta 2015-02-12].
18. PID apžvalga, susipažinimas. Prieiga per internetą:
<<http://www.expertune.com/tutor2.aspx>> [žiūrėta 2015-02-15].
19. **Jakubčionis M.** Šiluminės technikos pagrindai : mokomoji knyga. – Kaunas:
Technologija, 2011. p. 7-9, 13-14, 79-83. ISBN 978-9955-20-670-5.

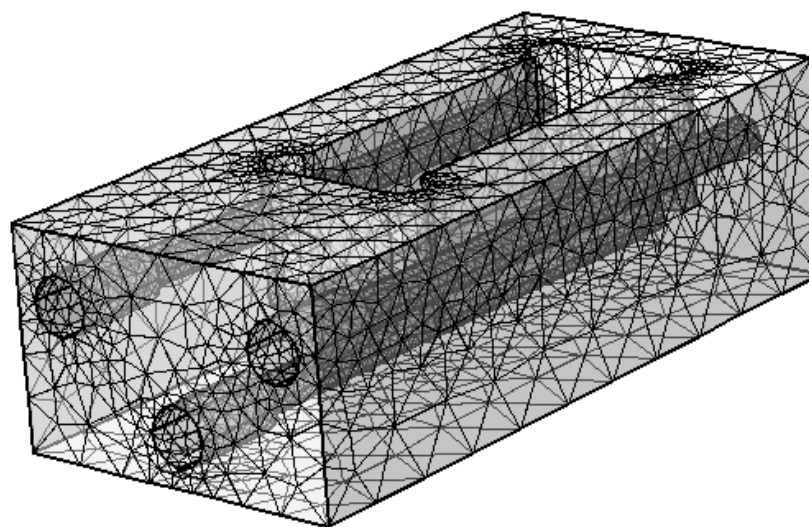
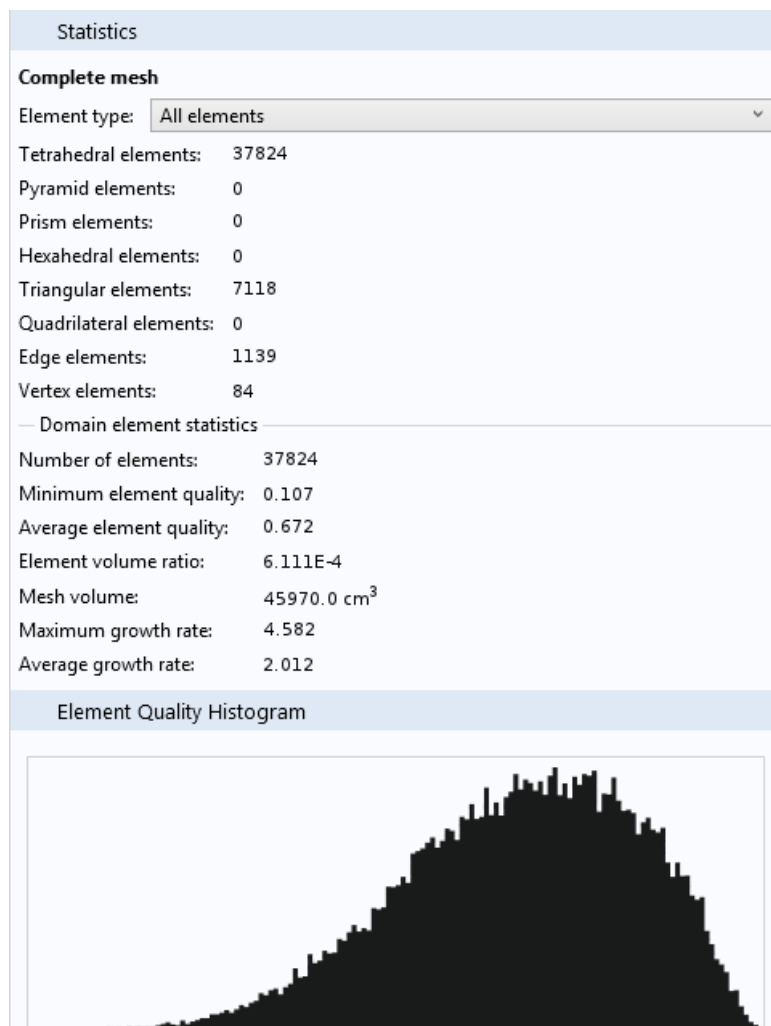
PRIEDAI

1. KAITINIMO PLOKŠTELĖS MODELIO BAIGTINIŲ ELEMENTŲ TINKLELIAI IR JŲ STATISTIKA

1.1 Baigtinių elementų tinklėms naudojant Extremely coarse elementų dydžius



1.2 Baigtinių elementų tinklelis naudojant Normal elementų dydžius



1.3 Baigtinių elementų tinklelis naudojant Extremely fine elementų dydžius

