

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Примењена механика и аутоматско управљање

Предмет: Пројектовање система аутоматског управљања

Број индекса: 391/2014

Немања З. Радовановић

**Пројектовање лабораторијског модела за праћење и
управљање температуре у дводимензионалном
температурском пољу**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

- 1. Проф. др Милан Матијевић - ментор**
- 2. Проф. др Радован Славковић**
- 3. Проф. др Драган Тарановић**

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Желим да се захвалим ментору проф. Матијевићу на избору занимљиве теме, приступу ресурсима Центра за примењену аутоматику, датом поверењу и слободи при изради овог рада.

Посебну захвалност дугујем др. Александру Рибићу, научном сараднику Института Михајло Пупин у Београду, чији је прототип лабораторијског модела коришћен као полазно идејно решење и који је био отворен за консултације и дискусије.

Највећу захвалност дугујем мојој породици на великој љубави, стрпљењу, разумевању и подршци током целокупног мог школовања.

Поставка задатка

Кандидат треба да развије техничко решење лабораторијског модела за надзор и управљање дводимензионалног температурског поља. Полази се од постојећег идејног и прототипског решења лабораторијског модела др Александра Рибиха, научног сарадника Института Михајло Пупин у Београду, које је у [1] коришћено за експерименталну верификацију. Кандидат треба да развије техничко решење лабораторијског модела за инжењерско образовање, чија је сврха надзор и визуелизација температурског поља, решавање проблема управљања (регулација температуре, праћење задате трајекторије, превазилажење ограничења система са чистим транспортним кашњењем, и сл.), и који је компатибилан са микроконтролерском рачунарском подршком (посебно обратити пажњу на производе домаће фирме Микроелектроника). Циљ коме се тежи је комерцијални производ за инжењерско образовање који је допуна јефтиним микроконтролерима и минирачунарима на тржишту (слично ЛЕГО комплетима, микроконтролер добија компатибилни објекат за примену, при чему је планиран микроконтролер са панелом за визуелизацију температурног поља). Незаобилазни аспекти пројектовања су безбедност и конфор при коришћењу лабораторијског модела (атрактивност дизајна, разумно време експерименталних одзива, визуелизација контролисаног температурног поља, придружени сет скелетон фајлова за коришћење лабораторијског модела, и слично). Поступак пројектовања полази од идејног решења и функционалног блок дијаграма лабораторијског модела, поступака моделирања и нужних симулација, избора компоненти (на основу прорачуна и симулација), па до интеграције и верификације прототипа. Пожељно је рад довести до нивоа документованости техничког решења.

Препоручена литература:

- 1) А.И. Рибих, М.Р. Матаушек, „A dead time compensating PID controller structure and robust tuning“, *Journal of Process Control* 22, 2012
- 2) А.Рибих, Прототип лабораторијског модела за управљање температуре у 2Д температурском пољу, Институт Михајло Пупин, Београд, 2016 (и договорене коменторске консултације са др Александром Рибихем, научним сардником)
- 3) Љубиша Драгановић, *Пројектовање САУ*, Лола Институт, 2000
- 4) М. Равлић, М. Матијевић, Д. Лазић, М. Ристановић, М. Стефановић, В. Цвјетковић и Н. Бабајић, „*Лабораторијски модел температурног процеса са кашњењем ПТ400 са управљањем и надзором преко Интернета*“, техничко решење [М85], Крагујевац, 2010

Садржај:

Списак ознака коришћених у раду	4
Резиме	5
1. Увод	6
2. Техничке спецификације и опис лабораторијског модела	8
3. Одређивање параметара лабораторијског модела	11
4. Симулација лабораторијског модела	13
4.1 Симулација аналитичког решења простирања топлоте	13
4.1.1 Задавање параметара симулације	14
4.1.2 Геометрија модела	15
4.1.3 Гранични услови	15
4.1.4 Решење у стационарном стању	15
4.1.5 Решење по времену	16
4.2 Симулациони модел заснован на методи коначних елемената	17
5. Израда лабораторијског модела	20
5.1 Сензори за мерење температуре	20
5.2 Грејач	24
5.3 Прилагодна електроника	24
5.4 Кућиште	26
5.5 Ардуино Нано	28
5.6 Електрична шема	30
6. Софтверско решење	31
6.1 Имплементација софтвера и снимање резултата	31
7. Експериментална верификација	34
7.1 Упоредивање графичких приказа термичких поља	34
7.2 Упоредивање резултата у дефинисаним тачкама простора	39
8. Одзив система на одскочни и хармонијски улаз. Функције преноса система	41
9. Закључак	52
Литература:	53
Додатак А: Код коришћен за израду софтвера	54
Додатак Б: Python скрипта	57

Списак ознака коришћених у раду

V	$[m^3]$	Запремина
ρ	$[\frac{Kg}{m^3}]$	Густина
m	$[Kg]$	Маса
E	$[J]$	Енергија
P	$[W]$	Снага
C	$[\frac{J}{KgK}]$	Специфични коефицијент топлоте
C_p	$[\frac{J}{KgK}]$	Коефицијент топлоте за плочицу одређених димензија
h_c	$[\frac{W}{m^2K}]$	Коефицијент конвекције
Q_c	$[W]$	Количина топлоте која се одаје конвекцијом
Q_r	$[W]$	Количина топлоте која се одаје радијацијом
Q_{con}	$[W]$	Топлотни губици настали конвекцијом
σ	$[\frac{W}{m^2K^2}]$	Штефан Болцманова константа
ϵ	$[\% \text{ } ^\circ C]$	Емисивност површине плоче
k	$[\frac{W}{mK}]$	Термичка кондуктивност материјала
T	$[^\circ C]$	Температура у тачки дефинисаној у простору
T_a	$[^\circ C]$	Температура околине
$\vec{q}$	$[\frac{W}{m^2}]$	Топлотни флуks
A	$[m^2]$	Површина плоче
t_z	$[m]$	Дебљина плоче
U	$[V]$	Напон
R	$[\Omega]$	Отпорност
I	$[A]$	Јачина струје

Резиме

У овом раду је описано пројектовање лабораторијског модела за праћење и контролу простирања топлоте дуж плоче. Описано је развијање идејног решења др Рибића до израде новог лабораторијског модела. Техничке карактеристике лабораторијског модела обухватају одабир материјала за плочу и њене димензије као и адекватан избор сензора, актуатора, прилагодне електронике и микроконтролера. Задате техничке карактеристике су пре израде модела проверене симулацијом како би били сигурни да је направљен добар избор свих елемената. Током пројектовања лабораторијског модела вођено је и рачуна о безбедности употребе зато је цела поставка спакована у кућиште како директан контакт са плочом или грејачем не би био могућ. Направљен је софтвер који на основи података са микроконтролера врши визуелизацију температурског поља и даје приказа температуре у задатим тачкама.

Кључне речи:

Пројектовање система аутоматског управљања, микороконтролери, надзор и управљање температурног поља, моделирање температурског поља.

1. Увод

У овом раду је представљен лабораторијски модел за праћење и управљање температуре у дводимензионалном температурском пољу. Лабораторијски модел је сачињен од алуминијумске плочице кроз коју се простира температура генерисана посредством грејача који се налази на једном крају плочице. Температуре у различитим тачкама температурског поља се читавају уз помоћ сензора који посредством микроконтролера шаљу вредности на обраду у рачунар. Лабораторијски модел је заснован на моделу описаном у [1], где је транзистор извор топлоте која се мери на другом крају плоче. Предности решења предложеног у овом раду наспрам [1] се огледају у:

- Мерењу температуре у више тачака (седам сензора)
- Бољој термичкој изолацији (цео модел се налази у кућишту, тако да ваздух из околине не долази у контакт са плочом)
- Побољшаној безбедности (евентуални корисник не може да приђе плочици која се греје, тиме избегавши опекотине)
- Прилагодној електроници која омогућава прикључивање модела на различите контролере
- Коришћењу грејача уместо транзистора као извора топлоте

Задаци које овај лабораторијски модел треба да испуни су:

- Модел се налази у компактном кућишту
- Уређај је безбедан за коришћење
- Рад са широким спектром микроконтролера
- Грејање плоче до 60°C у року од 5 минута
- Кашњење сензора и актуатора до 30 секунди

У другом поглављу рада је дат приказ идејног решења, приказ модела израђеног за потребе рада као и функционална блок шема модела.

У трећем поглављу одређени параметри лабораторијског модела.

Симулације лабораторијског модела описане у четвртој глави имају улогу потврђивања резултата добијених прорачуном и користе се као средство верификације експеримента.

У петој глави је дата спецификација елемента коришћених за израду лабораторијског модела, начин постављања сензора и грејача, елементи кућишта и склапање модела у једну целину. Такође је описана и рачунарска подршка експеримента и начин повезивања и напајања свих компоненти.

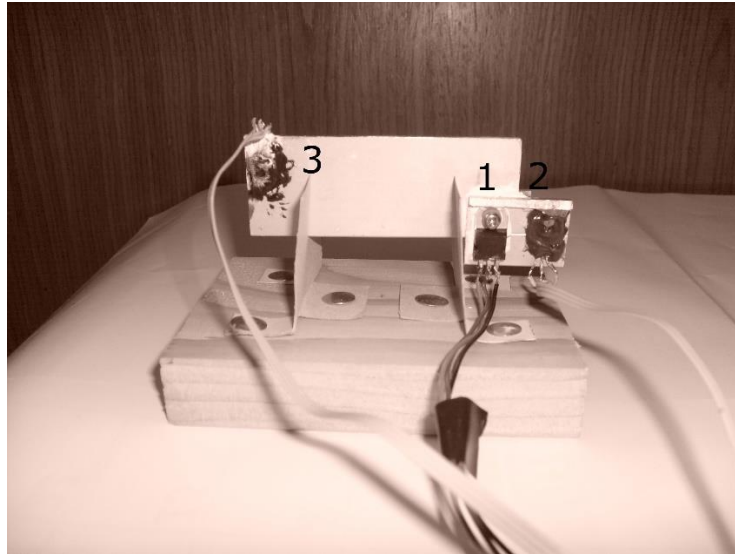
Кратак опис софтвера, као и пример његове употребе за снимање резултата дати су у шестој глави рада. Код коришћен за израду софтвера дат је у додатку рада.

У седмој глави се врши експериментална верификација система упоређивањем резултата добијених на више начина. Дато је упоређивање простирања температурског поља симулационог модела и експерименталног модела, затим степ одзив температуре у дефинисаним тачкама у простору у зависности од времена.

Одзив система на одскочни и хармонијски улаз као и преносна функција система приказани у глави осам.

2. Техничке спецификације и опис лабораторијског модела.

Лабораторијски модел, који је предмет овог рада, полази од прототипа лабораторијског модела са слике 1, а који је служио за експерименталну верификацију доктората А. Рибиха, сада научног сарадника Института Михајло Пупин у Београду [2].



Слика 1. Прототип лабораторијског модела чији је аутор др А. Рибих

Компоненте обележене на слици:

1. Грејач
2. Сензор температуре у близини грејача
3. Сензор температуре на крају плочице

Лабораторијски модел са слике 1 садржи и прилагодну електронику која омогућава сигналну компатибилност и повезивање сензора и грејача са АЦЦА картицом NI6008 која је путем *USB* кабла повезана са персоналним рачунаром. Софтверска подршка за надзор и управљање је софтверски пакет *Scilab* (<http://www.scilab.org>) .

Управљана величина је температура у тачки у којој је постављен сензор 3 – на крају алуминијумског профила, који се на почетку греје грејачем. Управљачка величина је снага грејача. Објекат управљања са слике 1 је прилагођен за каскадно управљање, тако што је омогућено и затварање унутрашње повратне спреге по температури на самом грејачу.

Циљ овог рада је да се, према идејном решењу са слике 1, пројектује и направи нови лабораторијски модел, следећих жељених техничких перформанси:

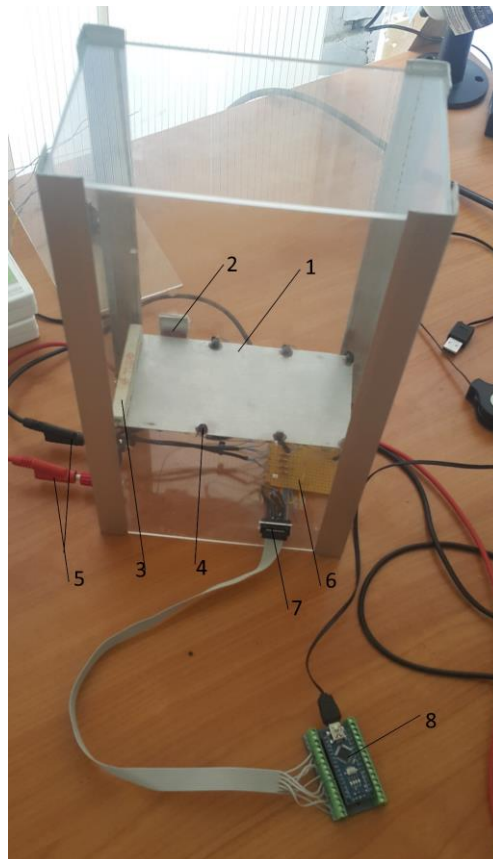
1. Омогућен надзор температуре у температурском пољу
2. Управљање температуре се врши путем управљања снаге грејача као у случају на слици 1

3. Лабораторијски модел је компактан, конфоран и безбедан за коришћење (температуре на површини плоче су у опсегу од 30 до 60 степени, прелазни процеси промена температуре на грејачу и сензорима температуре нису дужи од 30 секунди, компатибилност са микроконтролерском рачунарском подршком је остварена, остварен је надзор и визуелизација температурског поља, итд.)

На слици 2 је приказан постигнути исход рада – лабораторијски модел који је направљен.

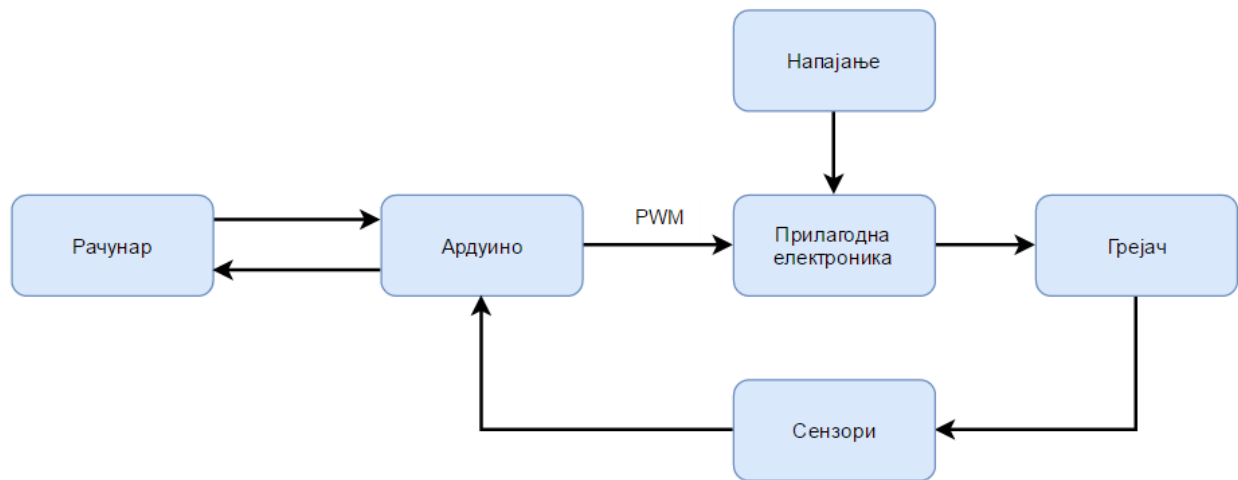
Компоненте направљеног лабораторијског модела су обележене на слици 2:

1. Алуминијумска плочица
2. Носачи плочице
3. Грејач
4. Сензори (давачи температуре)
5. Конектори за напајање грејача
6. Прото плоча са отпорницима
7. Десетопински конектор
8. Ардуино Нано (има улогу микроконтролера и врши аквизицију података за графички приказ)



Слика 2. Лабораторијски модел израђен за потребе рада

Веза између компоненти (ток енергије и информација) на претходној слици приказана је на блок дијаграму на слици 3.



Слика 3. Блок дијаграм повезивања компоненти лабораторијског модела

Са компјутера се преко *USB* порта доводи напајање на Ардуино који даље напаја сензоре постављене на плочици. Сензори шаљу сигнал на Ардуино који врши обраду сигнала и шаље информације потребне за визуелизацију рачунару где се помоћу софтвера врши графички приказ резултата. Грејач се напаја посебним напајањем, а тренутни напон на грејачу се контролише довођењем *PWM* сигнала са Ардуина на прилагодну електронику.

3. Одређивање параметара лабораторијског модела

Димензије плочице су изабране тако да:

- Плочица буде довољно дугачка да се сензори поставе на једнака растојања
- Плочица буде довољно широка да се грејач простире целом ширином, тиме редукујући проблем на феномен проласка топлоте кроз штап услед линијског извора топлоте
- Буде довољно компактна да процеси грејања не трају предуго

Изабрана плочица је димензија 150 x 75 x 1.5 mm. По избору плочице, потребно је прорачунати снагу дисипације грејача, и видети да ли постоји грејач који задовољава све услове (грејање за 5 минута плочице датих димензија). Уколико се не може наћи одговарајући грејач, потребно је вратити се на избор димензија плочице.

Запремина одабране плочице:

$$V = 0.000016875 \text{ m}^3 \quad (1)$$

Густина алуминијума је:

$$\rho = 2700 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad (2)$$

па самим тим и маса алуминијумске плочице је:

$$m = \rho V \quad (3)$$

$$m = 0.045 \text{ Kg} \quad (4)$$

Специфични коефицијент топлоте алуминијума је:

$$C = 910 \frac{\text{J}}{\text{KgK}} \quad (5)$$

за конкретну алуминијумску плочицу износи:

$$C_p = m C \quad (6)$$

$$C_p = 41.46 \frac{\text{J}}{\text{KgK}} \quad (7)$$

Да би се плоча угрејала за $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ потребна је енергија:

$$E = C_p \Delta T \quad (8)$$

$$E = 1244 \text{ J} \quad (9)$$

Предаја топлоте са грејача на плочицу треба да траје пет минута, с тога, потребна снага грејача за грејање плочице износи:

$$P = \frac{E}{t} \quad (10)$$

$$P = \frac{1244}{300} \frac{\text{J}}{\text{s}} \quad (11)$$

$$P = 4.15 \text{ W} \quad (12)$$

Пре одабира грејача потребно је урачунати топлотне губитке.

Конвекцијом са алуминијума се одаје:

$$Q_{con} = 2 (h_c A \Delta T) \quad (13)$$

- Q_{con} – Топлотни губици конвекцијом
- h_c – Коефицијент конвекције (за ваздух при малим брзинама је $12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$)
- A – Површина плоче
- ΔT – Разлика температуре између алуминијума и ваздуха

$$Q_{con} = 10.8 \text{ W} \quad (14)$$

Кад се додају губици који настају конвекцијом добија се да је потребан грејача снаге 14.95 W. Због неурачунатих губитака који настају радијацијом као први јачи изабран грејач је снаге 17 W.

4. Симулација лабораторијског модела

Како би се верификовала тачност одређених параметара лабораторијског модела направљене су симулације аналитичког решења простирања топлоте и симулација заснована на методи коначних елемената. Потреба за симулационом верификацијом настаје како би смо пре израде лабораторијског модела били сигурни да одабрани параметри (материјал, димензије, снага грејача) испуњавају задате услове.

4.1 Симулација аналитичког решења простирања топлоте

За израду симулације коришћен је програмски пакет *Matlab*, односно његов додатак за решавање парцијалних диференцијалних једначина *PDE Toolbox*. [3]

Количина топлоте која се преноси кроз плочу по јединици површине конвекцијом је дефинисана као:

$$Q_c = h_c(T - T_a) \quad (15)$$

Где је:

- T_a – Температура околине
- T – Температура у задатој тачки
- h_c – Коефицијент конвекције

Количина топлоте која се преноси са површине плоче на околину радијацијом дефинисана је:

$$Q_r = \tau \sigma (T^4 - T_a^4) \quad (16)$$

Где је:

- σ – Штефан Болцманова константа
- τ – Емисивност површине плоче

Провођење топлоте је описано Фуријеовим законом. Густина топлотног флука је једнака негативном градијенту температуре на плочи помноженим коефицијентом проводљивости. Густина флука је једнака количини топлоте која прође кроз јединичну површину у једној секунди.

$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (17)$$

$$\vec{q} = \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{s}} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (18)$$

Густина топлотног флука се може написати и као:

$$\vec{q} = \rho C t_z \frac{\partial T}{\partial t} \quad (19)$$

Када се урачуна топлота која се доводи на плочу кондукцијом, и топлота која се одаје конвекцијом и радијацијом са плоче, добија се једначина:

$$\rho C t_z \frac{\partial T}{\partial t} - k t_z \nabla^2 T + 2Q_c + 2Q_r = 0 \quad (20)$$

Односно:

$$\rho C t_z \frac{\partial T}{\partial t} - k t_z \nabla^2 T + 2h_c T + 2\epsilon \sigma T^4 = 2h_c T_a + 2\epsilon \sigma T_a^4 \quad (21)$$

- ρ – Густина алуминијума
- C – Специфични коефицијент топлоте материјала
- t_z – Дебљина плоче
- k – Термичка кондуктивност материјала

4.1.1 Задавање параметара симулације

На основу избора материјала задају се специфичне карактеристике. Подешавање симулације је приказано у радном окружењу *PDE Toolbox*-а.

```
k = 263; % thermal conductivity of Al, W/(m-K)
rho = 2700; % density of Al, kg/m^3
specificHeat = 910; % specific heat of Al, J/(kg-K)
thick = .001; % plate thickness in meters
stefanBoltz = 5.670373e-8; % Stefan-Boltzmann constant, W/(m^2-K^4)
hCoeff = 1; % Convection coefficient, W/(m^2-K)
% The ambient temperature is assumed to be 300 degrees-Kelvin.
ta = 300;
emiss = .5; % emissivity of the plate surface
```

4.1.2 Геометрија модела

```
width = 0,075;
height = 0,15;
% define the square by giving the 4 x-locations followed by the 4
% y-locations of the corners.
gdm = [3 4 0 width 0 0 0 height height]';
g = decsg(gdm, 'S1', ('S1'))';

% Convert the DECSG geometry into a geometry object
% on doing so it is appended to the PDEModel
geometryFromEdges(pdem,g);

% Plot the geometry and display the edge labels for use in the boundary
% condition definition.
figure;
pdegplot(pdem,'EdgeLabels','on');
axis([-0.1 1.1 -0.1 1.1]);
title 'Geometry With Edge Labels Displayed';
```

4.1.3 Гранични услови

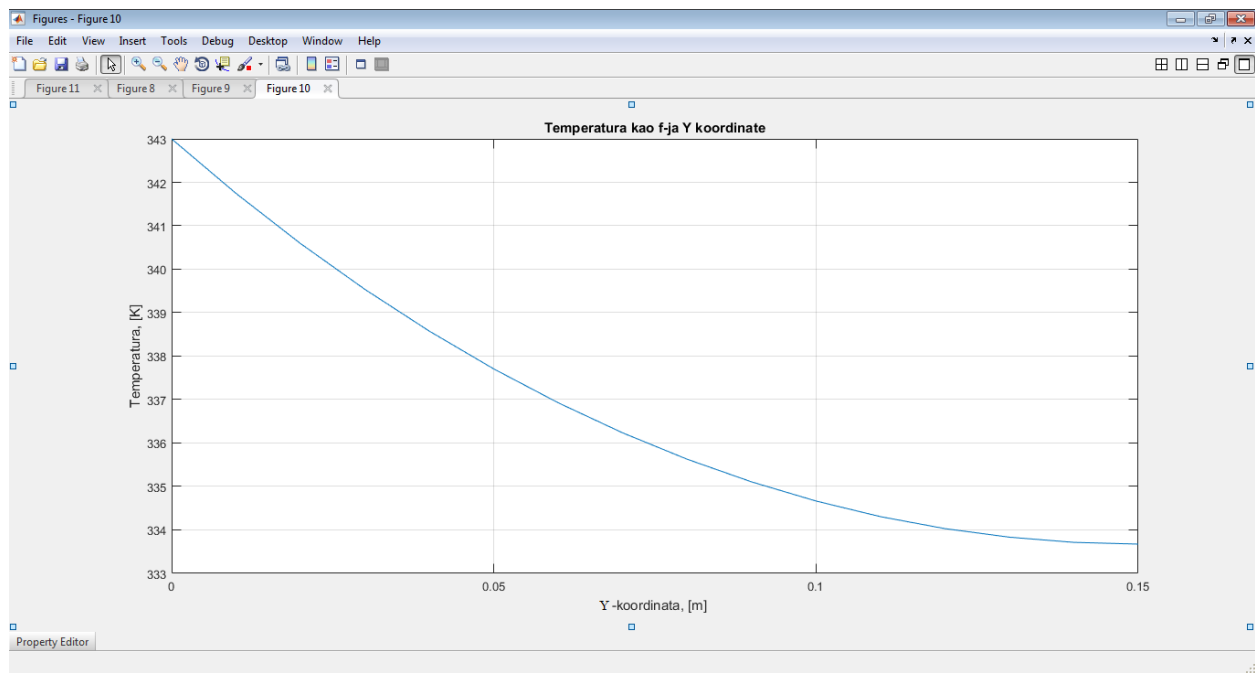
Температура на ивици плоче на којој се налази грејач је подешена на 70°C. На три ивице плоче на којима не постоје иницијалне температуре је примењена Нојманова контрола граничних услова, док је на свим елементима ивице на којој се налази грејач примењена Дирихлеова контрола граничних услова.

```
applyBoundaryCondition(pdem,'dirichlet','Edge',1,'u',1000);
```

4.1.4 Решење у стационарном стању

У овом решењу су приказане максималне температуре у тачкама када систем дође у стационарно стање. Добијени резултат је приказан на дијаграму на слици 4.

```
R = solvepde(pdem);
u = R.NodalSolution;
figure;
pdeplot(pdem,'XYData',u,'Contour','on','ColorMap','jet');
title 'Temperature In The Plate, Steady State Solution'
xlabel 'X-coordinate, meters'
ylabel 'Y-coordinate, meters'
axis equal
p = msh.Nodes;
plotAlongY(p,u,0);
title 'Temperature As a Function of the Y-Coordinate'
xlabel 'Y-coordinate, meters'
ylabel 'Temperature, degrees-Celsius'
fprintf('Temperature at the top edge of the plate = %5.1f degrees-K\n',
```

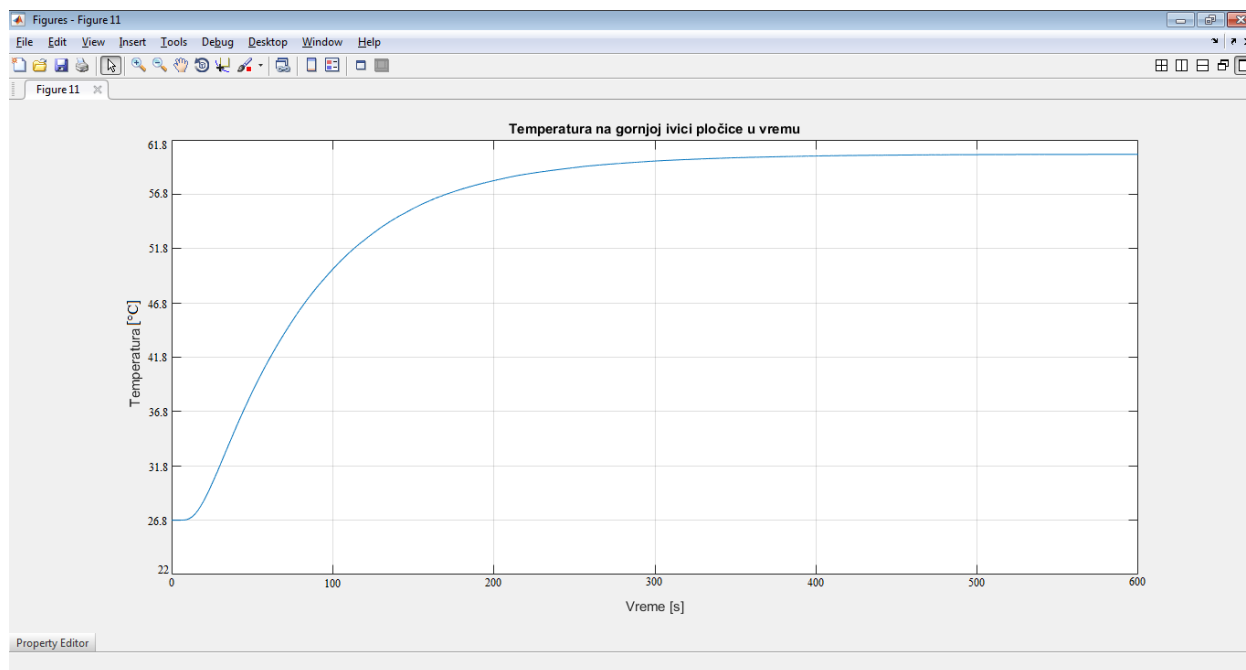


Слика 4. Приказ температура у различитим тачкама

4.1.5 Решење по времену

Температура у функцији од времена на ивици плоче насупрот грејача је приказана на слици 5.

```
specifyCoefficients(pdem,'m',0,'d',d,'c','c','a','a','f',f);
endTime = 6 00;
tlist = 0:50:endTime;
numNodes = size(p,2);
% Set the initial temperature of all nodes to ambient, 300 K
% Set the initial temperature on the bottom edge E1 to the value
% of the constant BC, 1000 K
setInitialConditions(pdem,1000,'edge',1);
% |solvepde| automatically picks the parabolic solver to obtain the solution.
R = solvepde(pdem,tlist);
u = R.NodalSolution;
title 'Temperature Along the Top Edge of the Plate as a Function of Time'
figure;
pdeplot(pdem,'XYData',u(:,end),'Contour','on','ColorMap','jet');
tlist(1,end));
xlabel 'X-coordinate, meters'
ylabel 'Y-coordinate, meters'
fprintf('\nTemperature at the top edge of the plate(t = %5.1f secs) = %5.1f degrees-K\n', ...
tlist(1,end), u(4,end));
```



Слика 5. Дијаграм простирања температуре у времену

Кашњење које се може видети на почетку дијаграма представља време потребно да грејач почне да преноси топлоту на плочу.

4.2 Симулациони модел заснован на методи коначних елемената

За израду симулационог модела коришћен је програмски пакет *FEMAP V11* са имплементираним *NX NASTRAN*, који има улогу решавања динамичких задатака.

Модел плочице је представљен *SOLID* тродимензионалним елементом ограничене површине. Мрежа модела је дефинисана у формату 15 x 15, односно цео модел је визуелно подељен на 225 елемената у којима се независно приказује температура у изабраном кораку. За материјал су задате специфичне карактеристике алуминијума :

- Специфична густина (ρ) - $2700 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
- Термичка проводљивост (K) - $263 \frac{\text{J}}{\text{mK}}$
- Специфични коефицијент топлоте (C) - $910 \frac{\text{J}}{\text{KgK}}$

Као почетни услов симулације дуж целе плоче задата је константна температура од 20°C. Грејач је постављене као оптерећење (топлотни извор), на нодовима на једном крају плочице. У симулацији је узето да је снага грејача 17 W. Друго оптерећење представља пренос топлоте са нодова на почетку плочице где је постављен топлотни извор ка нодовима на крају плочице, односно представља пренос топлоте са грејача на плочицу. Ово оптерећење је постављено у виду топлотног флукса везаног за топлотни извор.

Топлотни флуks представља количину топлоте која у јединици времена прође кроз неку површину и у овом случају може се представити помоћу Њутновог закона о хлађењу.

$$\vec{q} = hc \Delta t \quad (22)$$

Где је:

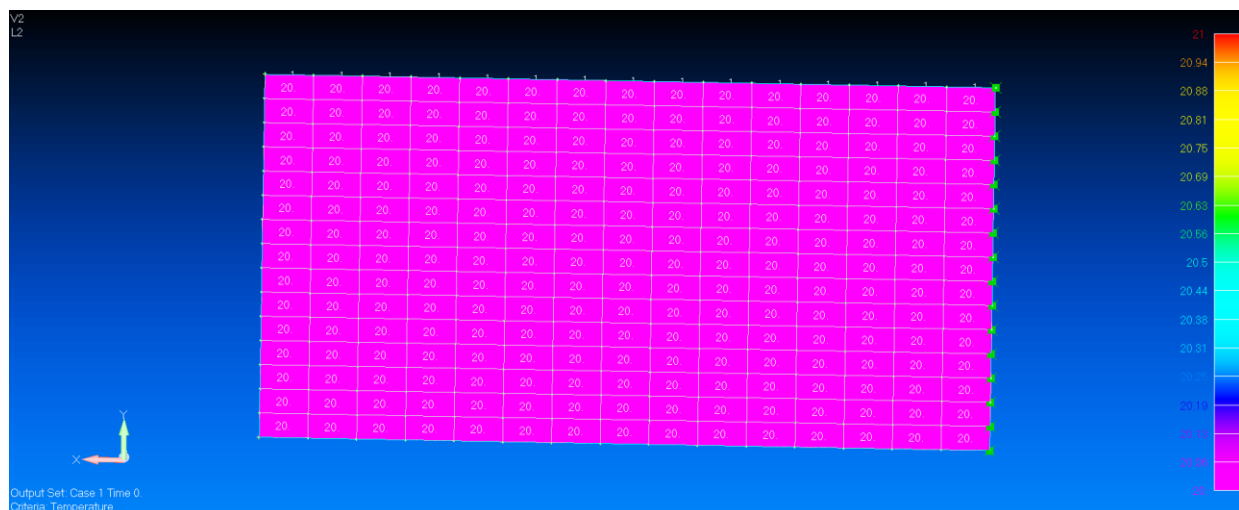
$$\Delta t = T - T_a \quad (23)$$

- $\vec{q}$ – Топлотни флуks
- hc – Коefицијент конвекције
- Δt – Разлика температуре грејача и температуре окружења

Њутнов закон се може применити у овом случају зато што се топлота са грејача на плочу преноси конвекцијом.

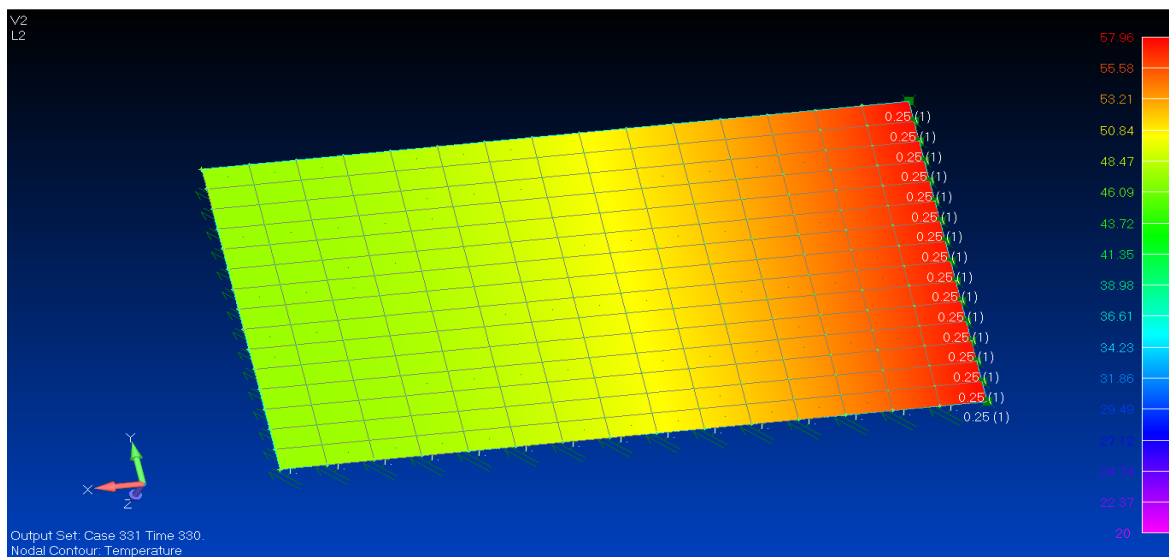
Симулација је пуштена у 330 корака како би време трајања симулације било ограничено на 330 секунди. Ово је време потребно да се лабораторијски модел плочице загреје на око 60°C у првој тачки мерења.

На слици 6 је приказан пример симулације у првом кораку, пре почетка грејања, док је температура у свим тачкама 20°C. На слици се може видети подела поља са приказаним температурама као и скала температуре на којој се вредности мењају са променом корака.



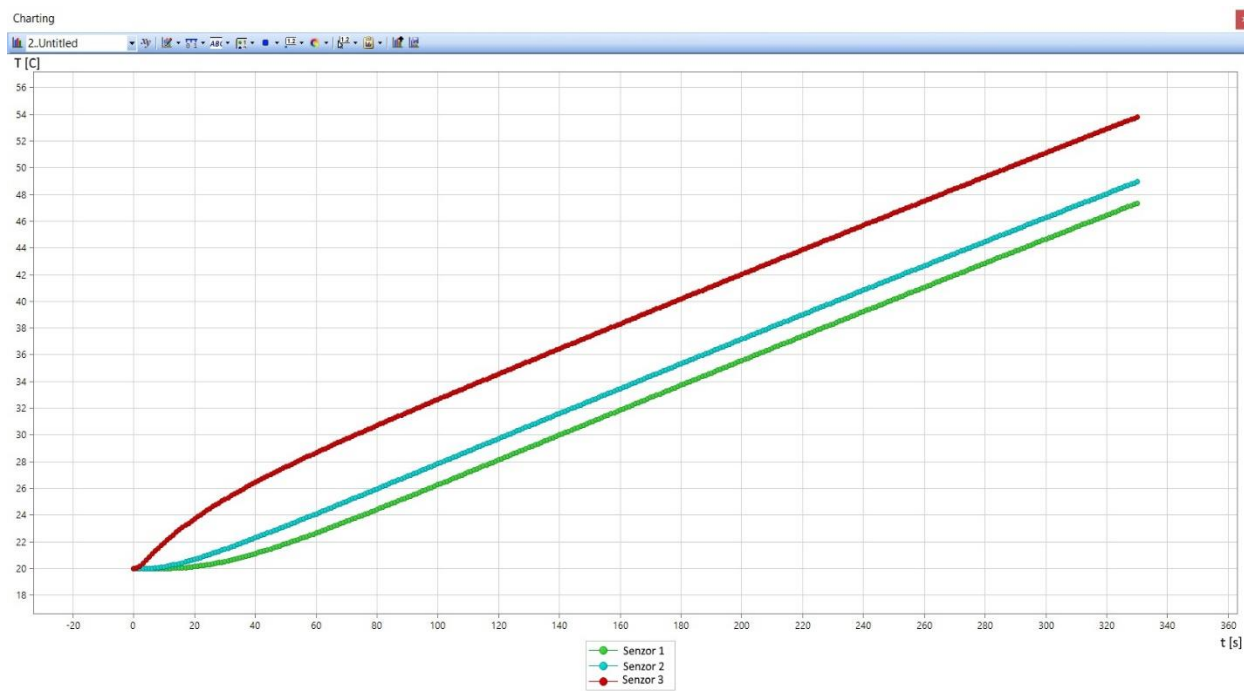
Слика 6. Пример симулације са приказаним вредностима температуре

У примеру на слици 7 приказан је резултат симулације у последњем кораку. У овом кораку температура испод грејача износи приближно 60°C.



Слика 7. Пример симулације са искљученим приказом температуре

Резултати симулације у дефинисаним тачкама у простору по времену приказани су на слици 8. За приказа резултата на дијаграму изабране су три тачке мерења са исте страна плочице на једнаким растојањима.



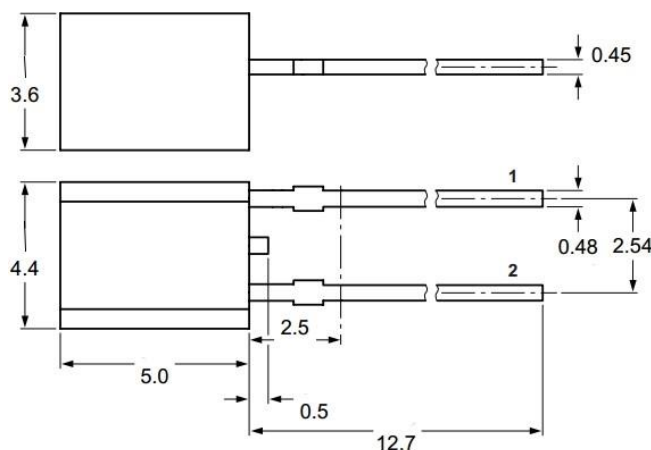
Слика 8. Резултати симулације у дефинисаним тачкама у простору

5. Израда лабораторijsког модела

Како би време трајања експеримента било сведено на прихватљиве границе било је потребно изабрати одговарајући материјал за израду плочице као и њене димензије. Изабрана је алуминијумска плочица димензија 150 x 75 x 1.5 mm. Плочица је израђена од алуминијума са приближно 2% нечистоћа. Ове карактеристике материјал обезбеђују да се плочица за мање од 5 минута загреје до 60°C на првој тачки мерења односно на 40°C на последњој тачки мерења постављеној на самом крају плочице. Ове температуре су постављене као граничне како би се спречило оштећење или повреде приликом вршења експеримента

5.1 Сензори за мерење температуре

Мерење температуре на самој плочи се врши сензорима КТУ81-1 произвођача Philips. Упрошћени изглед сензора и његове димензије су приказане на слици 9.



Слика 9. Упрошћени изглед и димензије сензора

Сензор је *PTC* типа, односно са повећањем температуре му се повећава отпорност. Гранични услови и карактеристике сензора су дате у табелама 1 и 2. [4]

Табела 1. Гранични услови сензора КТУ81-1

Симбол	Параметар	Услови	Мин	Макс	Јединица
I_{sen}	Стална струја на сензору	Температура окружења $T = 25^{\circ}C$	-	10	mA
		Температура окружења $T = 150^{\circ}C$	-	2	mA
T_{amb}	Мерни опсег сензора	-	-55	+150	$^{\circ}C$

Табела 2. Карактеристике сензора КТУ81-1

Симбол	Параметар	Услови	Мин	Сред	Макс	Јединица
R ₂₅	Отпорност сензора	I _{sen} = 1mA	990	-	1020	Ω
TC	Температурни коефицијент	-	-	0.79	-	%/K
R ₁₀₀ /R ₂₅	Однос отпора	T=100°C – 25°C	1.676	1.696	1.716	Ω
R ₋₅₅ /R ₂₅	Однос отпора	T=-55°C – 25°C	0.480	0.490	0.500	Ω
τ _{th}	Термичка временска константа	У ваздуху	-	30	-	s

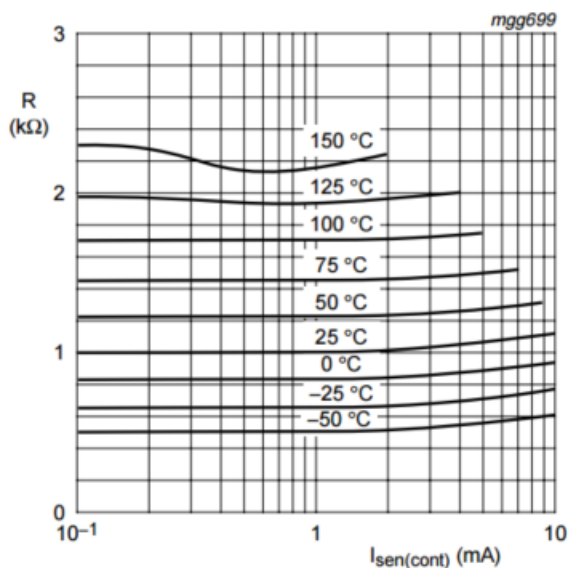
Термичка временска константа је време потребно да сензор достигне 63% укупне разлике у температури. На пример ако је сензор са температуре од 25°C премештен у окружење са температуром од 100°C време за које сензор постигне температуру од 72°C је термичка временска константа.

У табели 3 је приказан однос температурског коефицијента и отпора у зависности од мерене температуре, као и максимална очекивана температурска грешка.

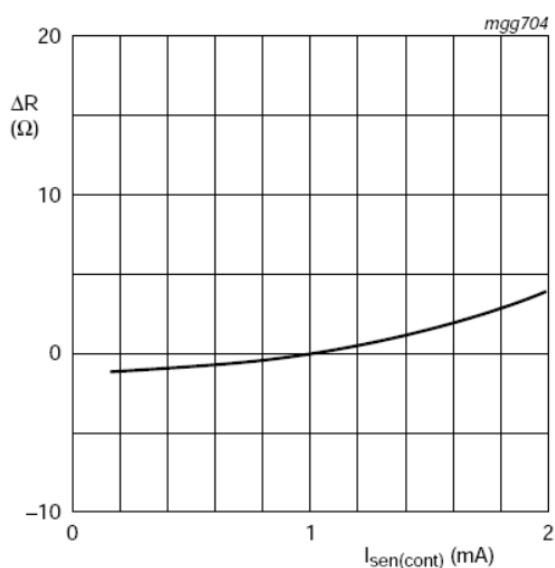
Табела 3. Температурни коефицијент и температурна грешка сензора КТУ81-1

Температура (°C)	Температурни коефицијент (%/K)	Отпор (Ω)			Температурна грешка (K)
		Мин	Сред	Макс	
10	0.83	874	886	898	±1.67
20	0.8	950	961	972	±1.41
25	0.79	990	1000	1010	±1.27
30	0.78	1029	1040	1051	±1.39
40	0.75	1108	1122	1136	±1.64
50	0.73	1192	1209	1225	±1.91
60	0.71	1278	1299	1319	±2.19
70	0.69	1369	1392	1416	±2.49
80	0.67	1462	1490	1518	±2.8
90	0.65	1559	1591	1623	±3.12
100	0.63	1659	1696	1733	±3.46
110	0.61	1762	1805	1847	±3.83
120	0.58	1867	1915	1963	±4.33
125	0.55	1919	1970	2020	±4.66
130	0.52	1970	2023	2077	±5.07
140	0.45	2065	2124	2184	±6.28
150	0.35	2145	2211	2277	±8.55

Функција отпорности сензора у зависности од струје и одступање отпорности сензора у зависности од струје управљања су графички приказани на дијаграмима на сликама 10 и 11. Мерење одступања сензора у зависности од управљачке струје је вршено на 25 °C.

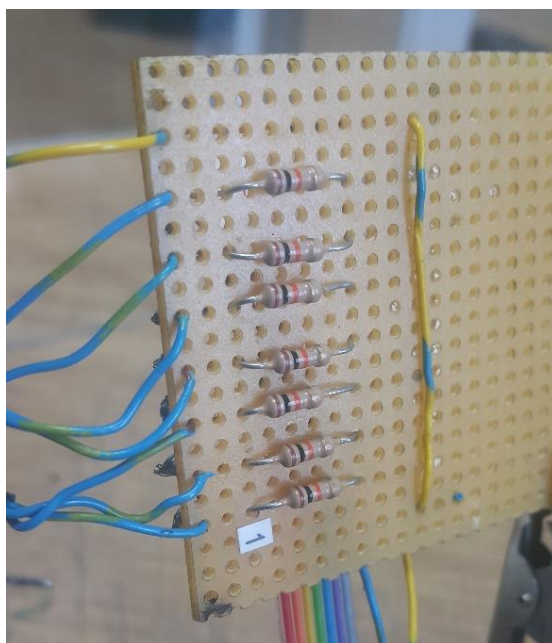


Слика 10. Промена отпора сензора у зависности од струје управљања



Слика 11. Одступање отпорности сензора у функцији струје управљања

Због позитивног температурног коефицијента сензора, односно пораста отпора са променом температуре, позитивно напајање сваког сензора појединачно се доводи преко отпорника од 1 KΩ, што се може видети на слици 12, који имају улогу делитеља напона, док је негативни крај напајања заједнички за све сензоре.



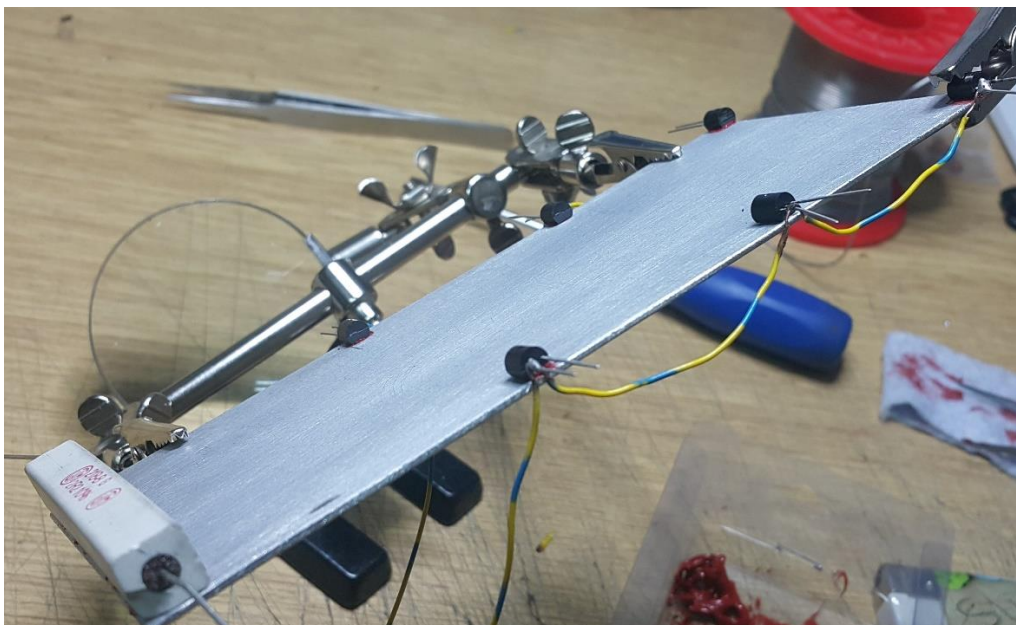
Слика 12. Отпорници коришћени као делитељи напона

У табели 4 су дате измерене отпорности сваког отпорника појединачно, које су унете као карактеристике сензора за који је везан отпорник.

Табела 4. Отпорности сензора

Редни број сензора	Отпорност (K Ω)
1	1.02
2	0.98
3	1.09
4	1.01
5	1.03
6	0.99
7	1.02

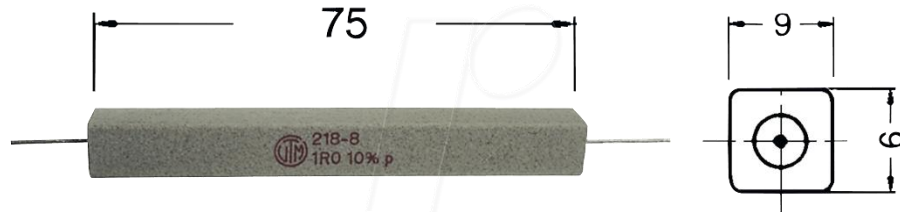
За праћење температуре користи се шест сензора постављених на страни плоче на којој се налази и грејач, распоред сензора је приказан на слици 13, док се седми сензор налази на супротној површини плоче и служи за мерење температуре грејача. Сви сензори су на плочу постављени лепљењем епокси смолом због доброг термичког контакта.



Слика 13. Распоред сензора на плочици

5.2 Грејач

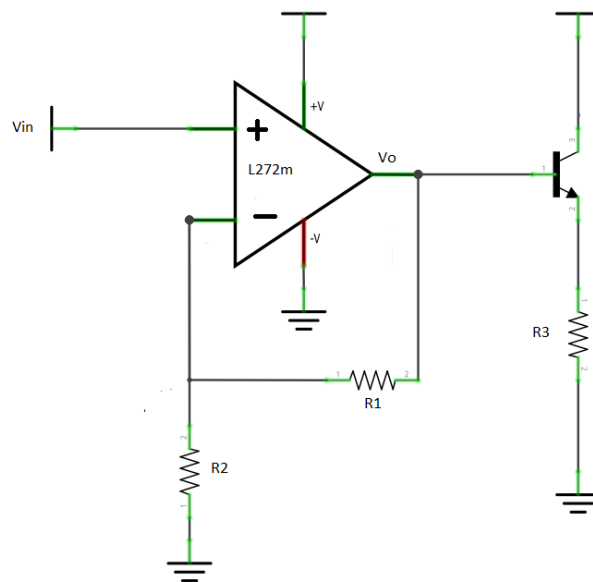
За грејач је изабран керамички отпорник, отпорности $2.2\ \Omega$ и снаге 17 W , слика 14. Грејач је као и сензори на плочу постављен лепљењем. Напајање грејача се доводи са спољног извора преко прикључака на кућишту.



Слика 14. Керамички отпорник са димензијама

5.3 Прилагодна електроника

Како би напајање грејача било контролисано *PWM* сигналом, у циљу спречавања прегревања, напајање са спољног извора се на грејач доводи преко кола које има улогу контролера напона чија је шема дата на слици 15.

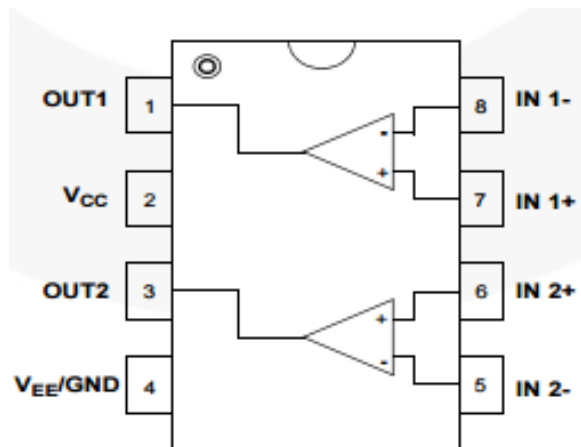


fritzing

Слика 15. Шема контролера напајања

Овако пројектован контролер напона нам омогућава директну контролу струје, самим тим и индиректну контролу напона на грејачу. Основне компоненте коришћене за израду контролера су операциони појачивач L272M и транзистор BU326A.

Осмопински операциони појачивач L272M изабран је зато што може да поднесе високе струје управљања.



Слика 16.1 Блок шема и распоред пинова L272M

Због великог грејања транзистора током рад контролер напона постављен је на прото плочу и налази се изван кућишта како не би утицао на рад лабораторијског модела.

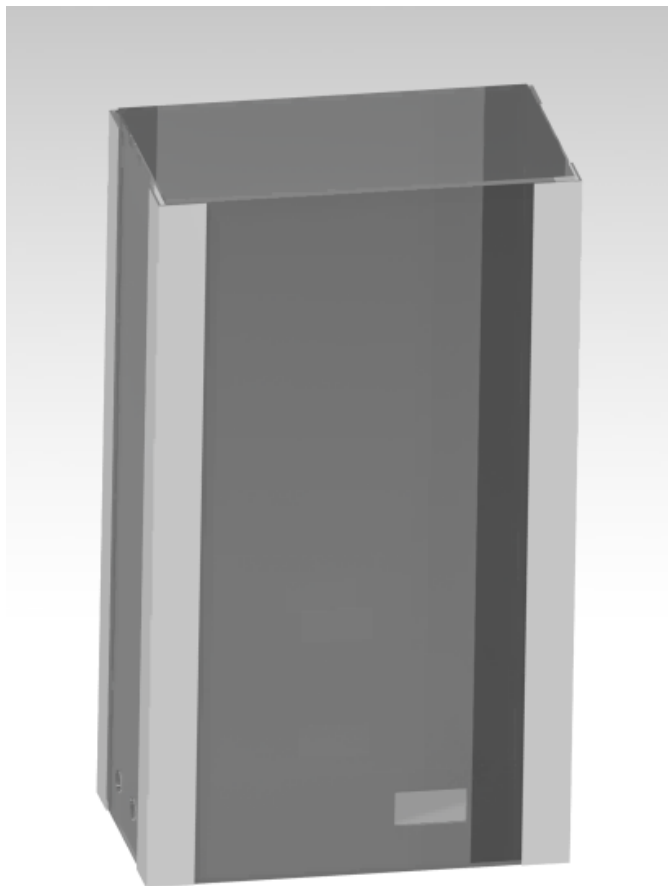
Улазни напон на контролер се обезбеђује са лабораторијског једносмерног напајања које се користи само за напајање грејача.



Слика 17. Напајање једносмерне струје

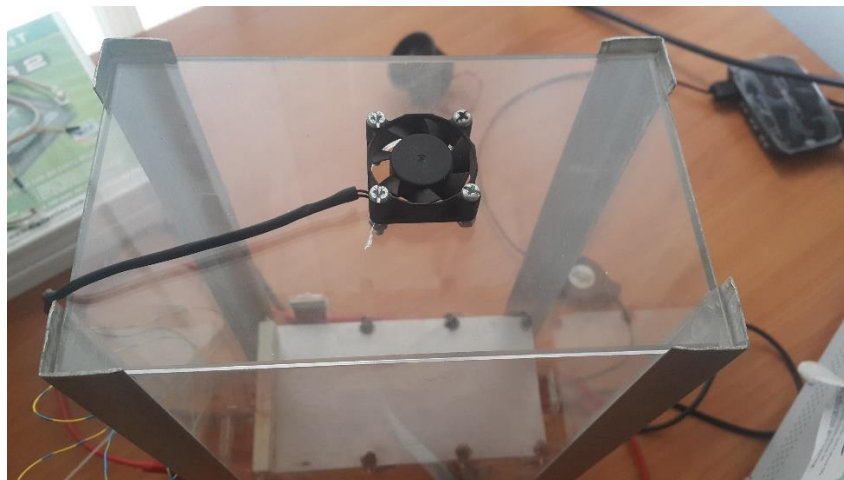
5.4 Кућиште

Затворено кућиште обезбеђује безбедну употребу модела, плексиглас дебљине 2 mm од кога су израђене странице кућишта је добар термички изолатор, тако да се током вршења експеримента топлота са плоче и грејача не преноси на странице кућишта. Тродимензионални модел кућишта моделиран у програмском пакету *Catia VR6* приказан је на слици 18.



Слика 18. Тродимензионални модел кућишта

Алуминијумски профили на страницама кућишта су постављени како би олакшали састављање и истовремено учврстили кућиште. Бочне и задња страница кућишта су спојене лепљењем док је предња учвршћења граничницима како би демонтажа била могућа. Поклопац кућишта такође није причвршћен због могућности замене, у случају када желимо да симулирамо спољне утицаје потпуно затворен поклопац се мења са поклопцем на коме се налази мали вентилатор, слика 19. Вентилатор на поклопцу кућишта може се користити и за потребе хлађења плоче када се прекине процес грејања.



Слика 19. Вентилатор на поклопцу кућишта

Плоча се у кућиште поставља на три алуминијумска носача у облику L профила. Површина носача на коју се поставља плоча је обложена термо отпорним силиконом како би се преношење топлоте са плоче на носаче смањило што је више могуће.

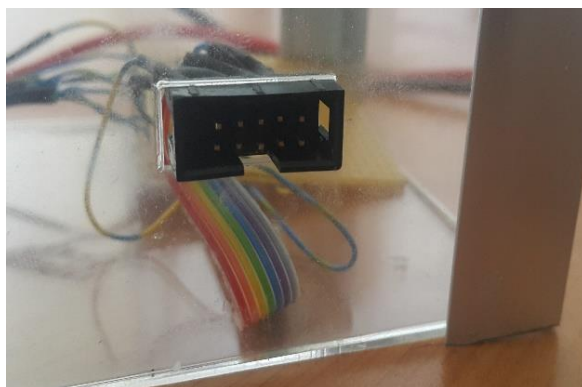


Слика 20. Носач плоче залепљен на страницу кућишта

На бочној страни кућишта се налазе прикључци за напајање грејача, који се могу видети на слици 21, док је на предњој страни направљен прорез за конекцију са аквизиционим уређајем. Конекција на аквизициони уређај и напајање сензора је остварена десето-пинским конектором, приказаним на слици 22. Због лакшег препознавања распореда сензора на плочици инсталација која се користи за повезивање са аквизиционим уређајем је направљена од снопа жица различитих боја где свака боја одговара другом сензору.



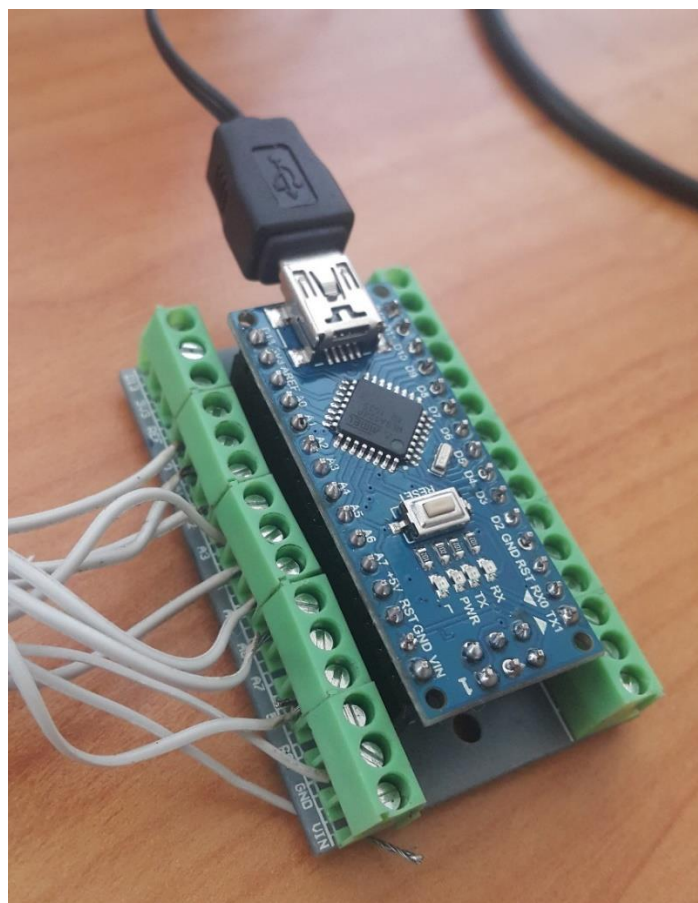
Слика 21. Прикључци за напајање грејача



Слика 22. Десетопински конектор

5.5 Ардуино Нано

Као микроконтролер и уређај за аквизицију података се користи Ардуино Нано, који је постављен у постоље са клеммама за лакше повезивање. Изглед Ардуина и постоља дат је на слици 23.



Слика 23. Ардуино Нано у постољу

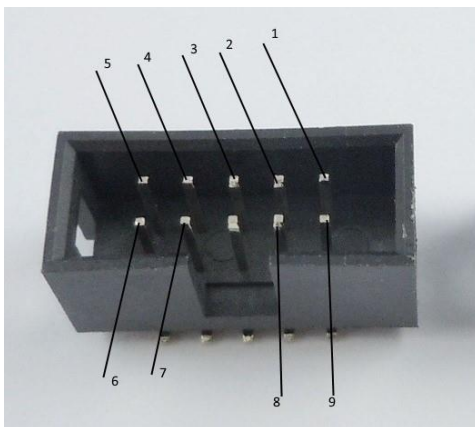
Ардуино Нано је мала и компактна плоча, базирана на Атмега 328 микроконтролеру, чије су спецификације: [5].

• Микроконтролер	Атмел Атмега 328
• Радни напон	5 V
• Препоручени улазни напон	7 – 12 V
• Максимални улазни напон	6 – 20 V
• Број дигиталних I/O пинова	14, 6 Обезбеђују <i>PWM</i> излаз
• Број пинова за аналогни улаз	8
• Резолуција А/Д конвертера	10 бита
• Опсег напона А/Д конвертера	0 – 5 V
• DC струја по I/O пину	40 mA
• Флеш меморија	32 KB
• SRAM	2 KB
• EEPROM	1 KB
• Радни такт	16 MHz

Ардуино се са рачунаром повезује путем *USB* порта. У овом раду ардуино се повезује на рачунар, али је компатибилан и за рад са рачунарима са микроконтролерском подршком (*raspberry pi*, *EasyMx PRO™ v7...*)

Ардуино се може напајати преко мини *USB* улаза, не регулисаним спољним напајањем од 6 до 20 V преко пина 30 и регулисаним спољним напајањем од 5 V преко пина 27. Сваки од 14 дигиталних пинова се може користити ко улаз или излаз коришћењем команде *pinMode()*, *digitalWrite()* и *digitalRead()*. Нано се може повезати на рачунар или други микроконтролер серијском везом преко пинова 0 (*RX*) и 1 (*TX*) или преко *USBa* и *FTDI* драјвера који обезбеђују виртуални порт рачунарском софтверу.

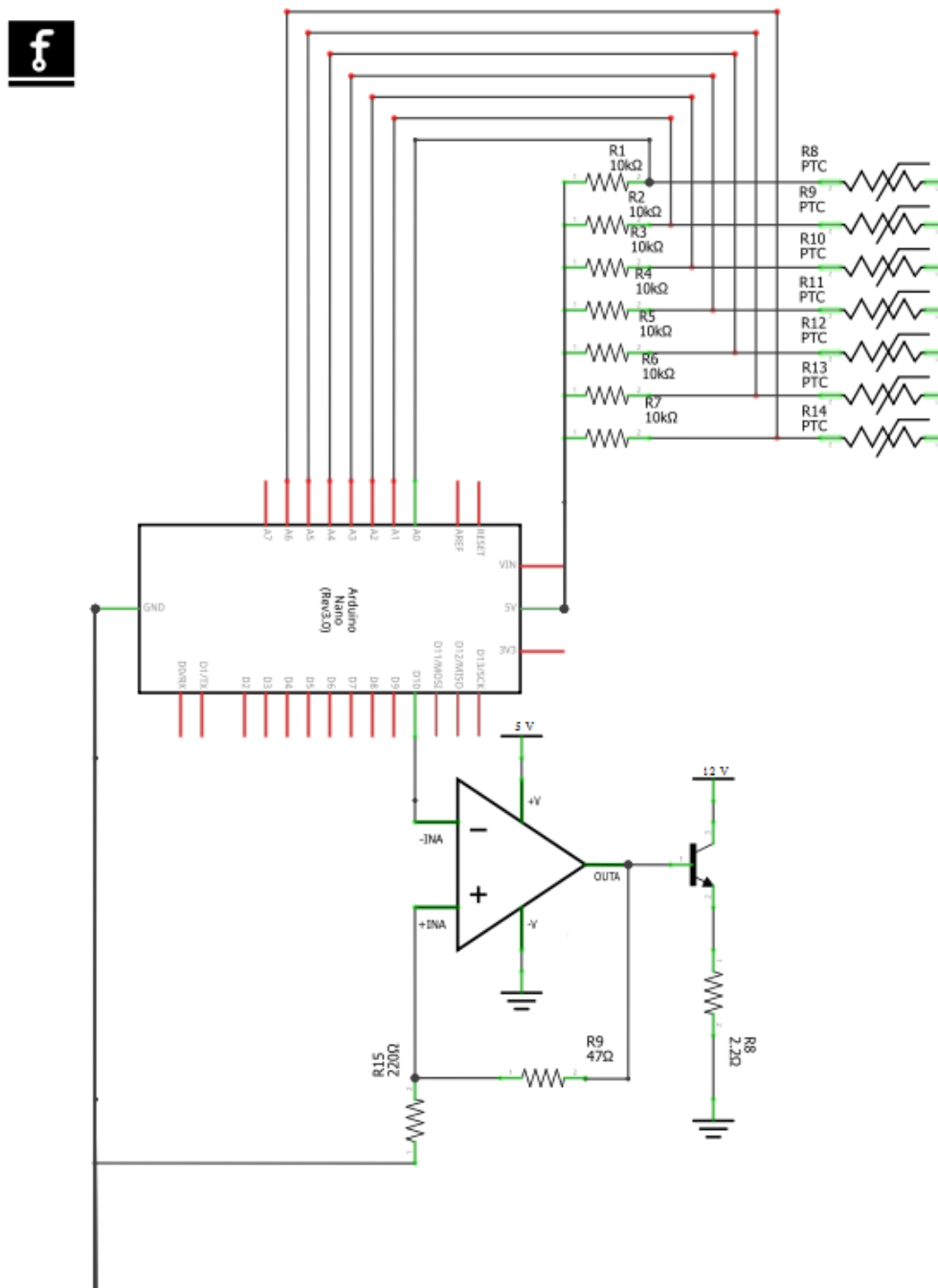
На слици конектора који се налази на кућишту модела, а преко кога Ардуино остварује комуникацију са сензорима и доводи напајање до њих, пинови су обележени бројевима. Пинови од 1 до 7 служе за комуникацију са сензорима док су пинови 8 и 9 позитивно напајање сензора и њихово уземљење.



Слика 24. Конектор за комуникацију Ардуина са сензорима

5.6 Електрична шема

Електрична шема повезивања свих компоненти укључујући прилагодну електронику и грејач приказана је на слици 25.

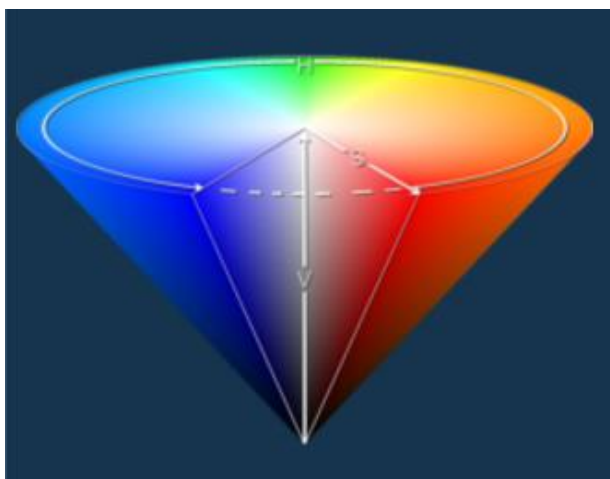


Слика 25. Електрична шема

6. Софтверско решење

Софтвер је писан у програмско језику *Processing (Java)*. Софтвер врши визуелизацију података, тако што прима податке са Ардуина путем *USB* серијске конекције. За комуникацију је задужена библиотека *Firmata* која омогућава контролу улаза и излаза на Ардуину путем, *USBa*.

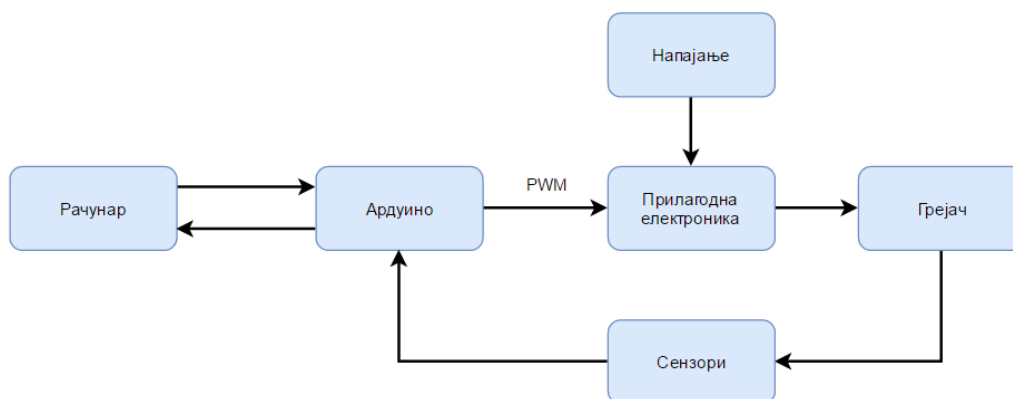
У софтвер је имплементирана *HSV* палета боја због бољег мапирања података. *HSV* палета боја представља нелинеарну трансформацију најчешће коришћене *RGB* палете. Односно избор боја се не заснива на једноставној комбинацији основних боја већ је дефинисан математичком трансформацијом. Најниже температуре су приказане љубичастом, а највише црвеном. Графички приказ *HSV* палете је дат на слици 26.



Слика 26. Графички приказ *HSV* палете боја

6.1 Имплементација софтвера и снимање резултата

Снимање резултата у реалном времену извршено је помоћу Ардуина и софтвера покренутог на компјутеру. Снимање је вршено у затвореном кућишту, како би се спољни утицаји свели на минимум, без додатно укључених поремећаја. На блок шеми, на слици 27, је приказано повезивање свих елемената који су потребни за снимање резултата.



Слика 27. Блок шема повезивања уређаја

Будући да су сензори термистори *PTC* (позитивни температурски коефицијент) типа, њихова отпорност расте када расте и температура околине у којој се налазе. Да би се измерила отпорност ових термистора, она се мора превести у напон тако што се прави отпорнички делитељ напона, где један отпорник има познату вредност, а други отпорник је термистор који се мери. Излазни напон из делитеља се прослеђује Ардуину, који софтверски налази температуру која одговара измереном напону. Излазни напон из делитеља напона се налази решавањем следеће једначине:

$$U_{izl} = U_{ul} \frac{R_T}{R_T + R} \quad (24)$$

Одавде, отпорност термистора је једнака:

$$R_T = R \frac{1}{\frac{U_{ul}}{U_{izl}} - 1} \quad (25)$$

Како напон има нелинеарну зависност од температуре трансформација се врши на основу: [4]

$$R_T = R_{REF} [1 + A(T - T_{ref}) + B(T - T_{ref})^2] \quad (26)$$

Одатле, температура је једнака:

$$T = \frac{A R_{REF} - 2B R_{REF} T_{REF} + \sqrt{4B R_{REF} R_T + (A^2 - 4B) R_{REF}^2}}{2B R_{REF}} \quad (27)$$

Обрађени подаци се преко *USB* порта прослеђују на рачунар где се помоћу софтвера визуализују и приказују у радном окружењу *Processing*.

Напајање грејача, обезбеђује грејачу напон од 6.1 V и једносмерну струју јачине 2.8 A. Овакве величине напона и струје дају грејачу потребну снагу од 17 W.

$$P = I U \quad (28)$$

- P – Снага грејача
- I – Јачина струје
- U – Напон

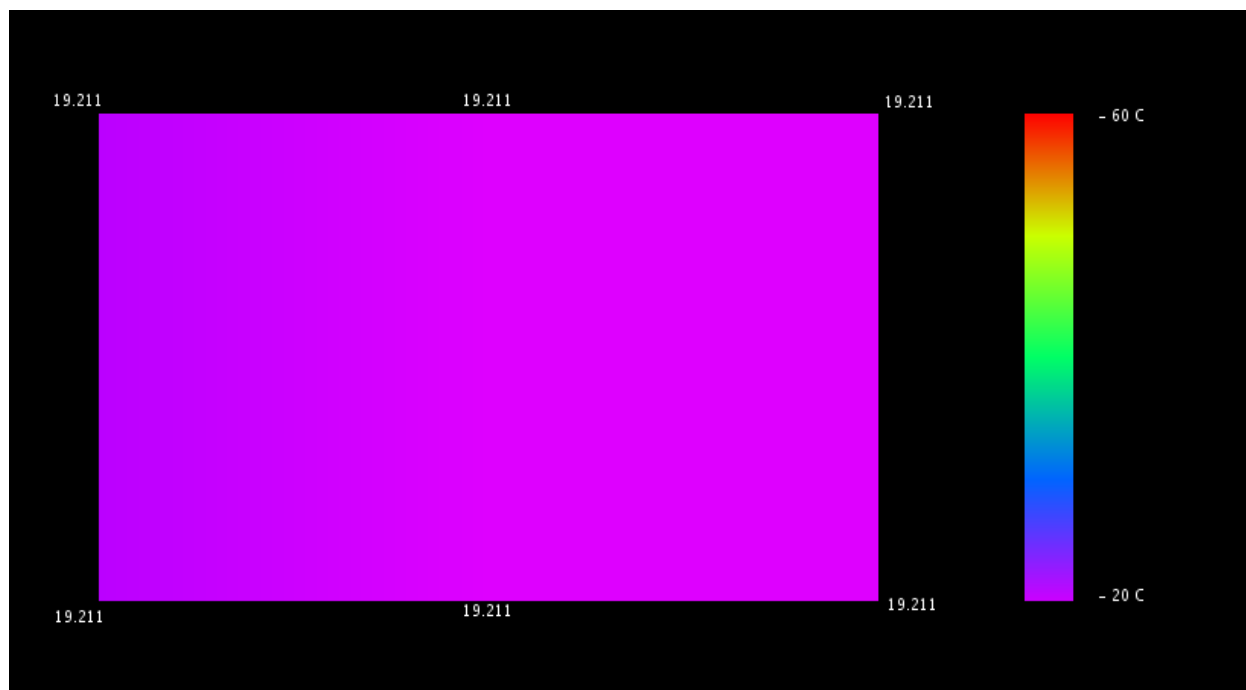
У овом случају напајање грејача је доведено директно са спољног извора а не преко контролера напона како би грејач константно радио пуном снагом од 17 W.

Резултати у реалном времену су снимани тако што је укључен грејач и покренут *Processing* на рачунару док је софтвер за снимање екрана правио слике *Processing* радног окружења на сваких 30 секунди.

На сликама 28 и 29 приказан изглед радног окружења *Processing* софтвера као и пример визуелизације података. Приказ визуелизације је направљен у првом кораку, односно пре укључивања грејача и почетка грејања плочице.



Слика 28. Изглед радног окружења *Processinga*



Слика 29. Пример снимања промене термичког поља

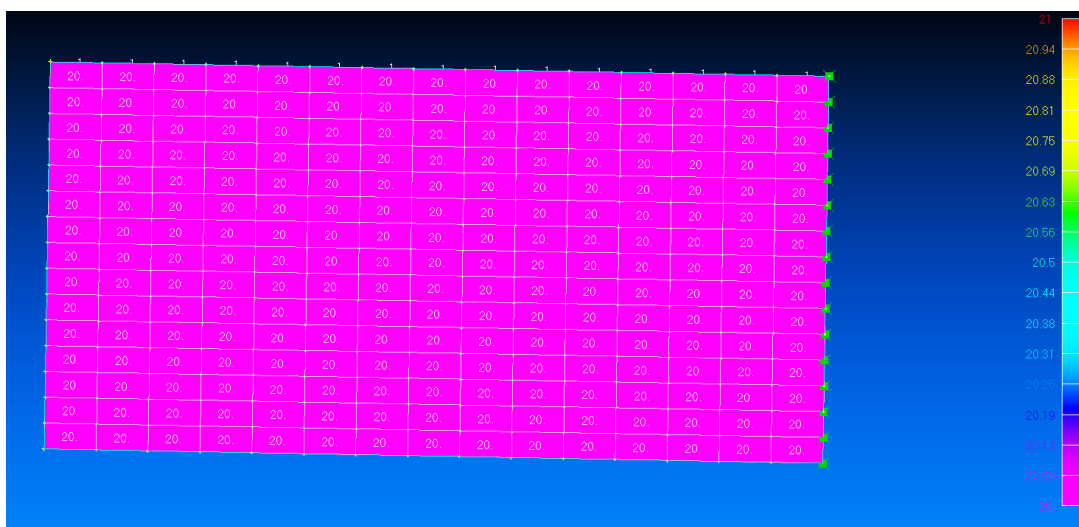
На примеру снимања термичког поља можемо видети да су тачне температуре на сензорима приказане у пољима поред графичког приказа плочице. Страна плочице ближа температурној скали је страна са које је постављен грејач.

7. Експериментална верификација

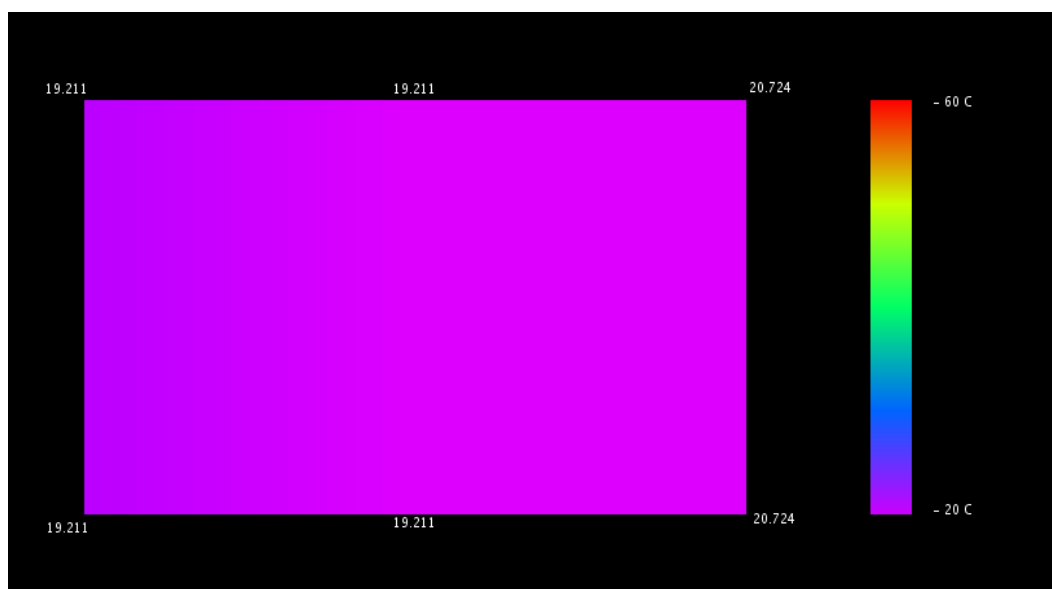
7.1 Упоређивање графичких приказа термичких поља

Овом методом упоређивања су представљене просторне промене температурног поља као и разлике између идеализованог процеса у симулацији и процеса са утицајем окружења лабораторијског модела.

Упоређивање је вршено у корацима од 30 секунди од почетног стања, одмах по укључивању грејача, до тренутка када температура на првом сензору до грејача достигне приближно 60°C.

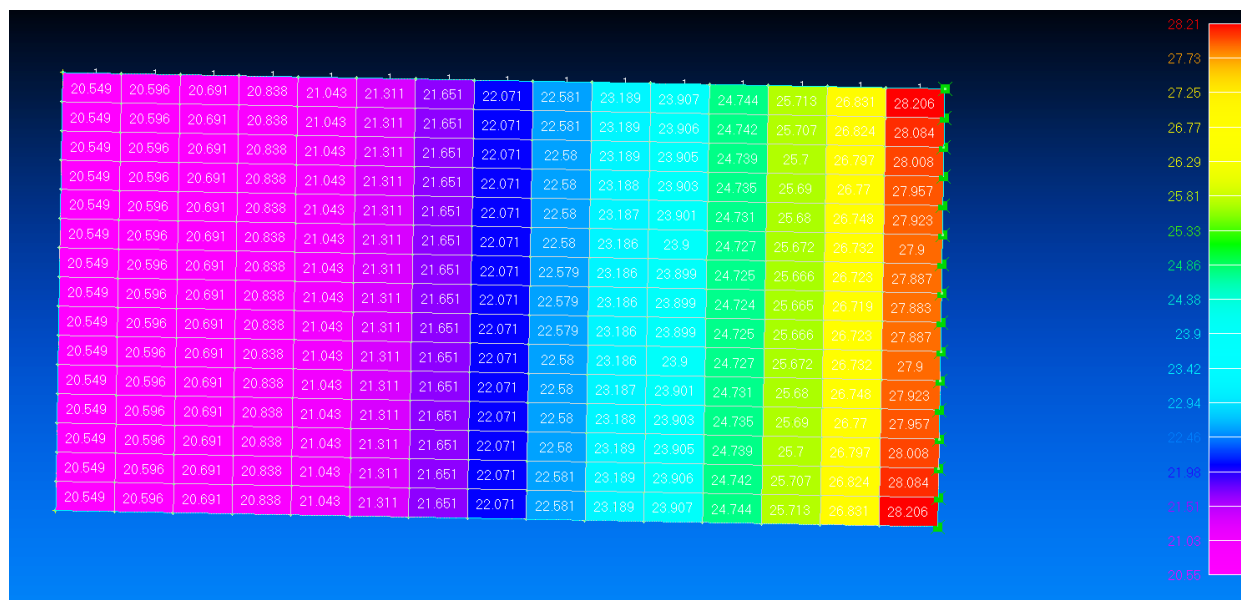


Слика 30. Први корак симулације

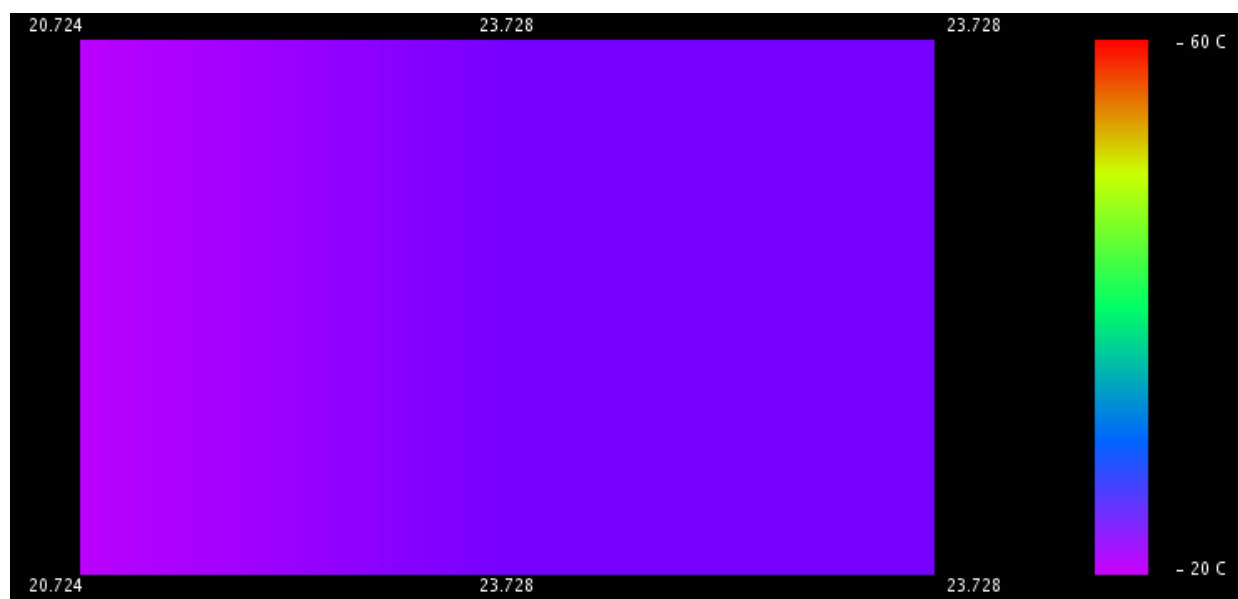


Слика 31. Први корак снимања у реалном времену

На сликама 30 и 31 су приказани резултати у првом кораку, одмах након укључивања грејача и почетка загревања. Како је симулација идеализован процес температура у свим тачкама је тачно 20°C, што није случај на реалном моделу где можемо видети да постоји разлика у температурама на сензорима у различитим тачкама.



Слика 32. Други корак симулације (30 секунди).

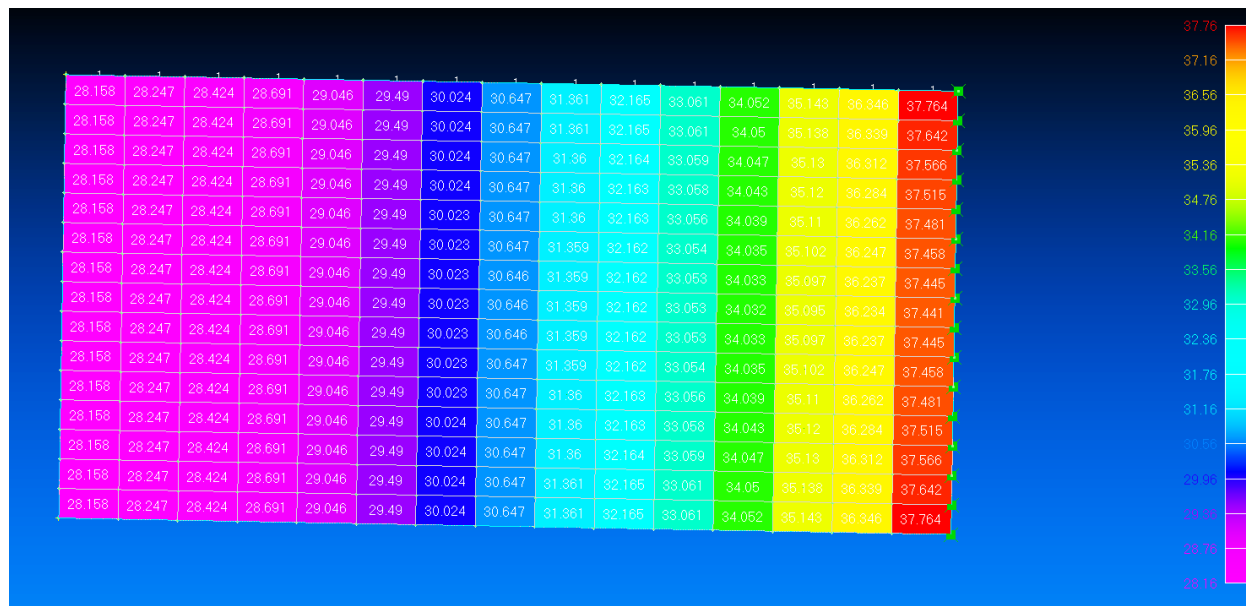


Слика 33. Други корак мерења (30 секунди)

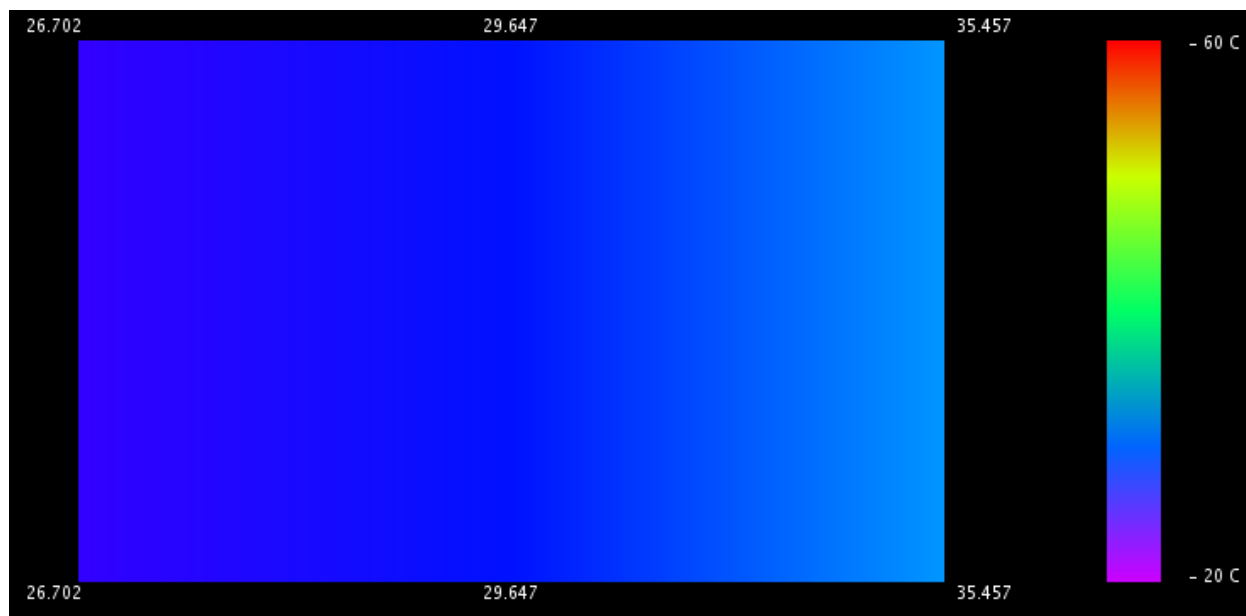
У другом кораку, приказаном на сликама 32 и 33, односно након 30 секунди рада грејача можемо приметити да су температуре у првим и последњим тачкама мерења приближно исте.

Док је температура средње тачке мерења доста виша од температуре приказаној на симулацији. Ово не слагање настаје као последица грешке мерења.

Треба још напоменути да су 5, 10 и 15 вертикално поље мреже у симулацији поља приближно сразмерна распореду сензора на експерименталном моделу.



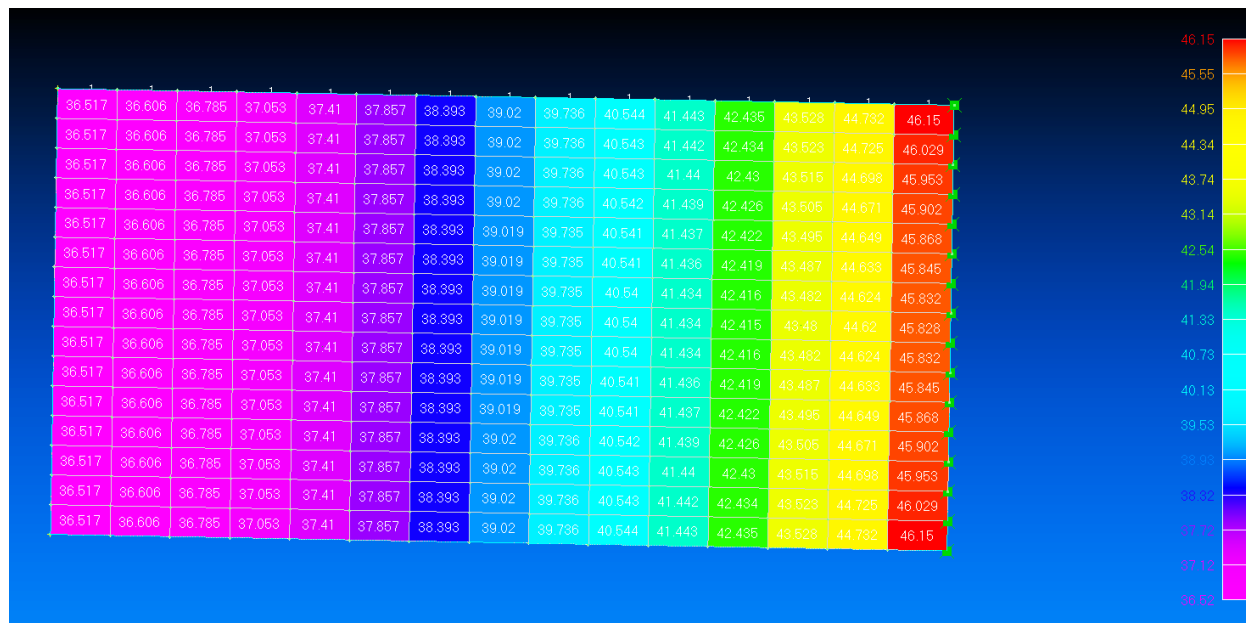
Слика 34. Приказ температурског поља у симулацији након 120 секунди



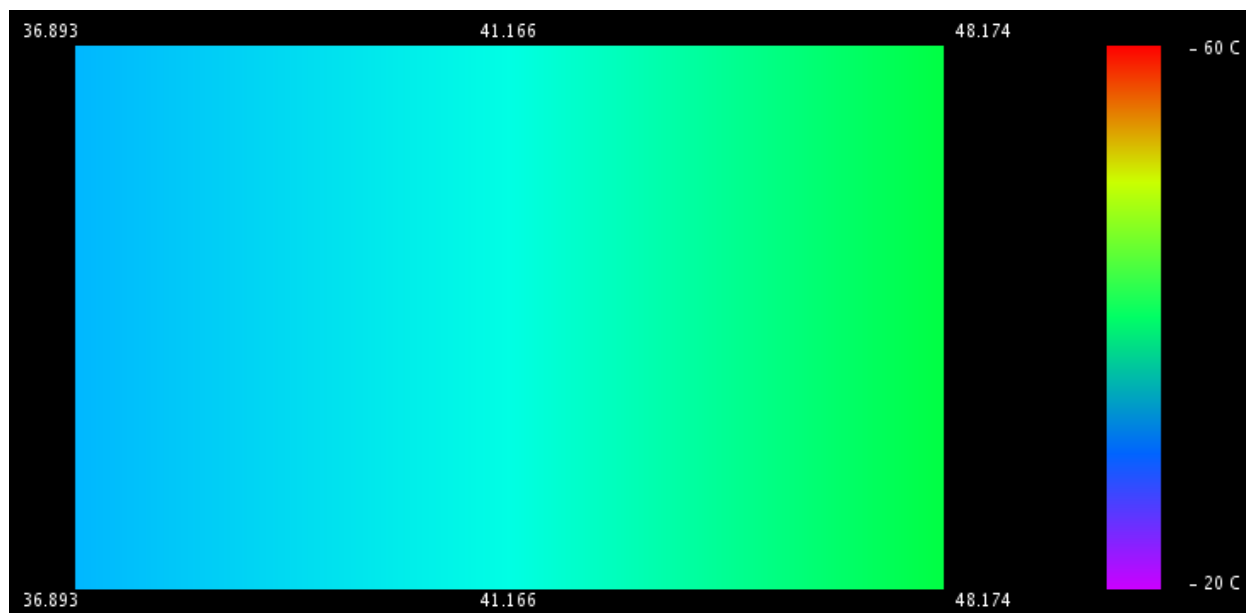
Слика 35. Приказ температурског поља експерименталног модела након 120 секунди

Након 120 секунди мерења можемо приметити да су температуре на средишњим тачкама мерења приближно исте, док је температура експерименталног модел у првој тачки мерења виша од температуре приказане на симулацији. У овом кораку за разлику од прве две тачке, трећа тачка мерења на моделу показује нижу температуру од оне која се може видети на симулацији.

Ова разлика настаје због идеализације грејача у симулацији. У симулацији је задата снага од 17 W и грејач одмах почиње да греје пуном снагом, односно нема кашњења у виду времена које је потребно грејачу на реалном моделу да се загреје до исте температуре. Графички прикази ових поља су дати на сликама 34 и 35.

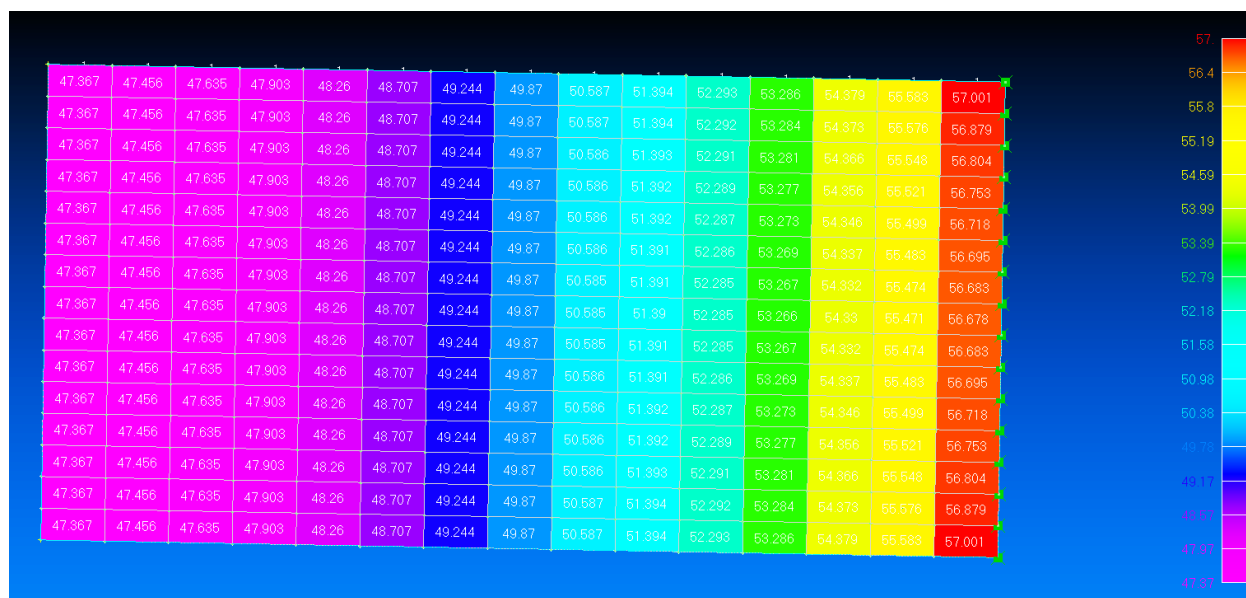


Слика 36. Приказ температурног поља у симулацији након 210 секунди

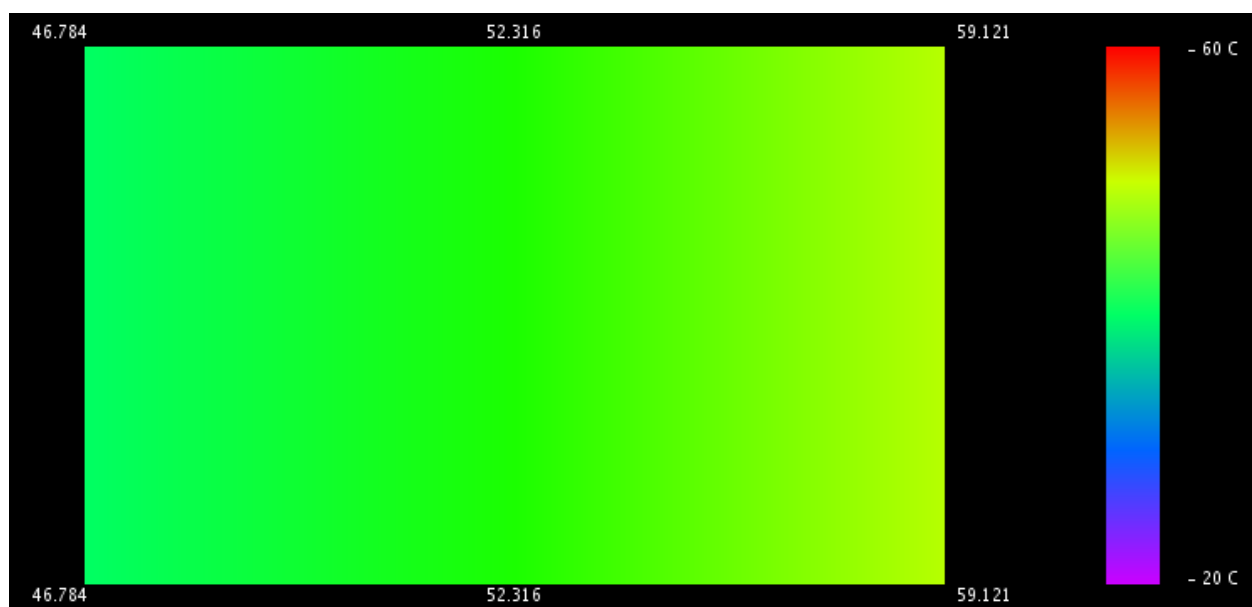


Слика 37. Приказ температурног поља експерименталног модела након 210 секунди

Слике 36 и 37 приказују температурска поља након 210 секунди мерења. Температуре у последњим тачкама мерења су се изједначиле, што нам показује колико је заправо кашњење грејача у односу на симулирани извор топлоте.



Слика 38. Приказ температурског поља у симулацији након 330 секунди



Слика 39. Приказ температурског поља експерименталног модела након 330 секунди

У последњем кораку мерења, након 330 секунди грејања, температура коју показује први сензор је знатно већа од температуре коју показује приближно поље у симулацији. У другој тачки мерења та разлика се смањује све до треће тачке где су температуре приближно исте. Разлике у температури у прве две тачке мерења можемо објаснити као последицу идеализованог процеса у симулацији.

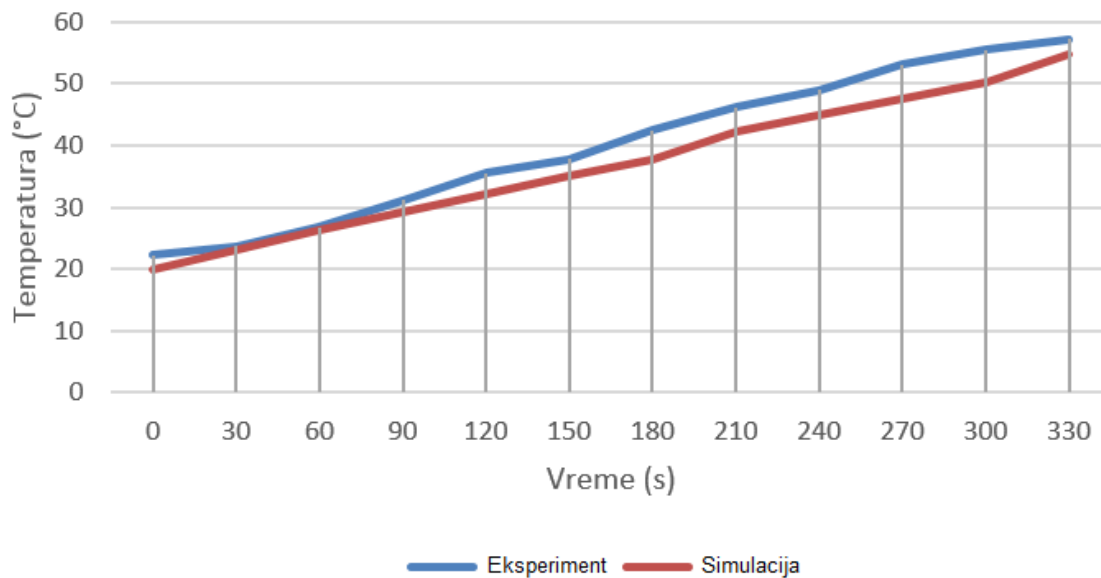
Наиме иако су задате специфичне карактеристике алуминијума оне су теоретске и могу варирати у материјалу употребљеном за израду плочице. Осим идеализованог материјала знатни утицај има и идеализација окружења у коме се он налази.

Поред утицаја идеализације симулације треба обратити пажњу и на утицај временске константе сензора. Време потребно сензору да измери температуру и ту информацију пошаље на Ардуино може утицати на мале разлике температуре.

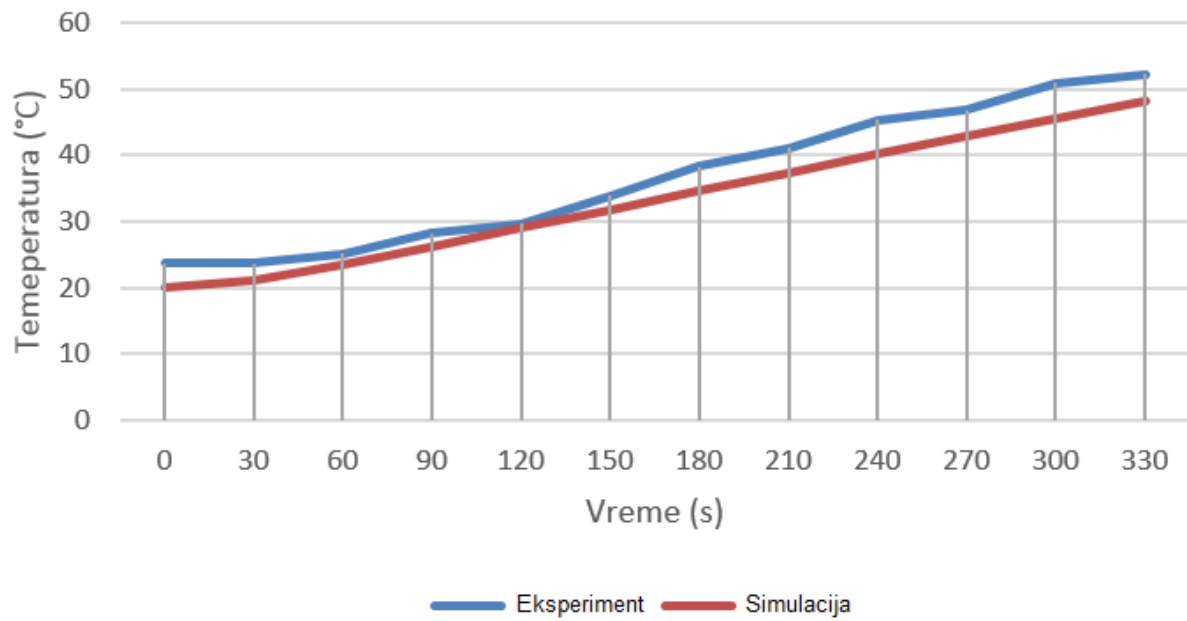
Иако постоје разлике у температурама које показују сензори експерименталног модела и које се могу прочитати са симулације грешка мерења је у прихватљивим границама. У тренутку када постоји највећа разлика у температурама грешка износи 11%.

7.2 Упоредивање резултата у дефинисаним тачкама простора

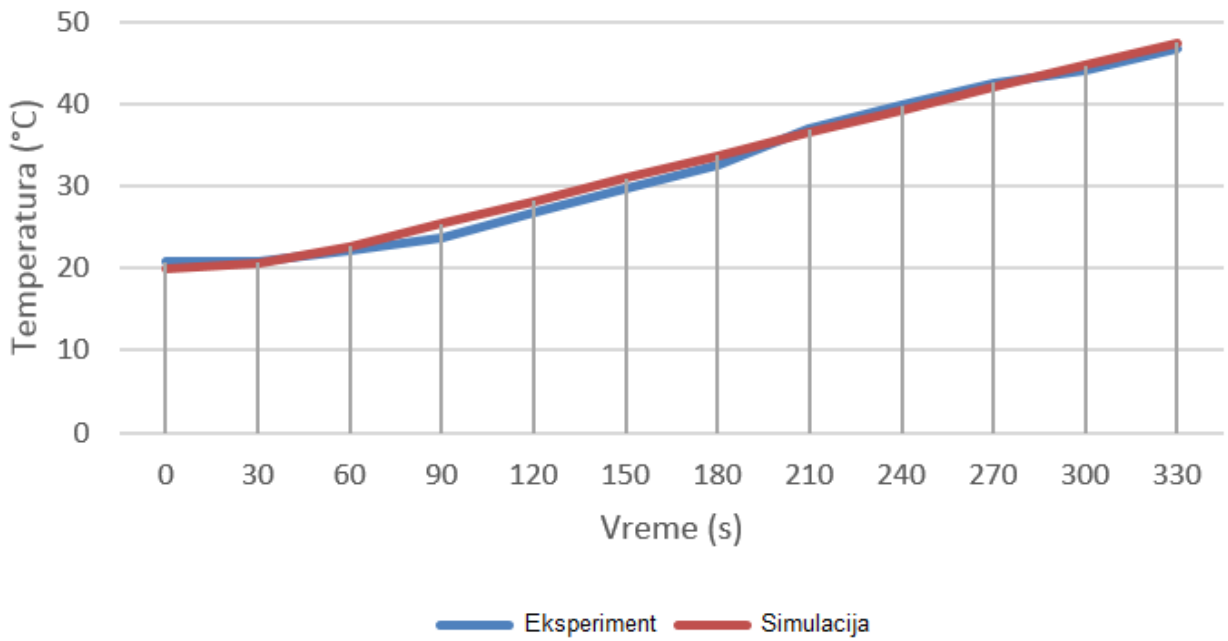
Упоредивање резултата у дефинисаним тачкама по времену представљено је на дијаграмима за три тачке мерења. За просторно дефинисане тачке изабрани су мерна места са исте стране плочице на подједнаким удаљеностима. На сваком од дијаграма представљени су резултати мерења у једној тачки симулације и експерименталног модела.



Слика 40. Резултати мерења у првој тачки



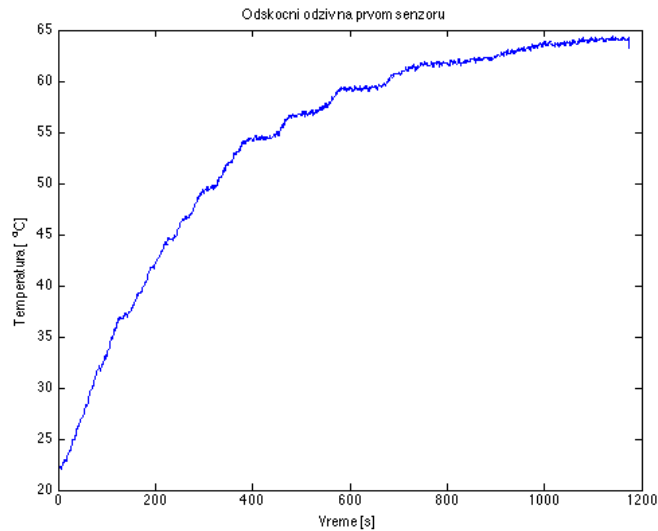
Слика 41. Резултати мерења у другој тачки



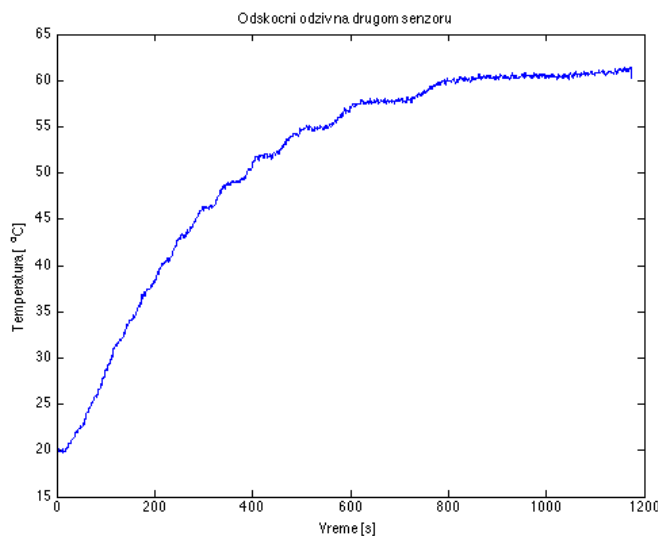
Слика 42. Резултати мерења у трећој тачки

8. Одзив система на одскочни и хармонијски улаз. Функције преноса система

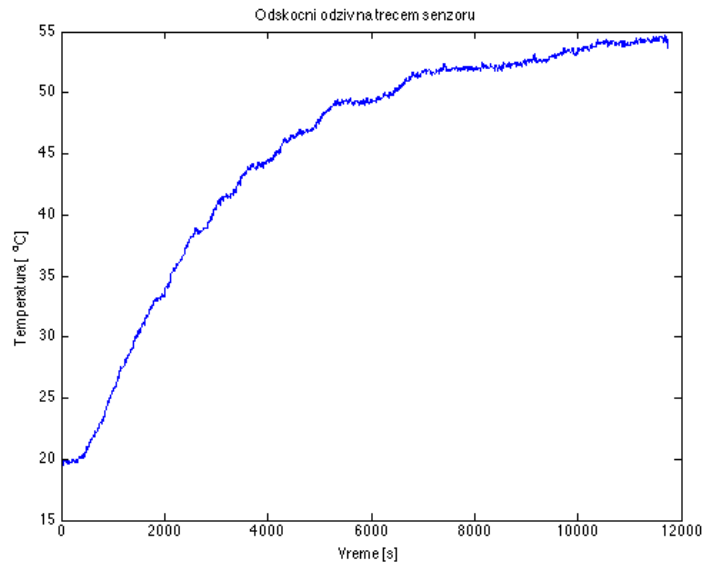
Из одскочног одзива система је могуће закључити његове карактеристике у временском домену као што су појачање, кашњење система, временска константа система [9]. Мерење излаза система је вршено на три различита растојања на плочици, и резултати се могу видети на следећим сликама.



Слика 43. Одзив система на јединични одскочни одзив на позицији 1



Слика 44. Одзив система на јединични одскочни одзив на позицији 2



Слика 45. Одзив система на јединични одскочни одзив на позицији 3

Са слика је могуће видети да се систем грејач-сензор понаша као систем првог реда са кашњењем, стога је могуће наћи функције преноса од грејача до појединачних сензора.

Функције преноса ће имати облик:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s} \quad (29)$$

Где је:

- $Y(s)$ – Излаз система
- $X(s)$ – Улаз система
- K – Појачање (Представља однос између вредности излаза система у стационарном стању и вредности улаза у систем)
- T_s – Временска константа (Временска константа је време потребно систему да достигне 63% вредности до стационарног стања)
- τ – Време кашњења

Узевши у обзир облик функције преноса, из експерименталних резултата је могуће написати функције преноса за тачке мерења на различитим растојањима (три сензора са исте стране плочице).

Функција преноса грејач - прва тачка мерења:

$$G_1(s) = \frac{44.37}{288s+1} e^{-1.51s} \quad (30)$$

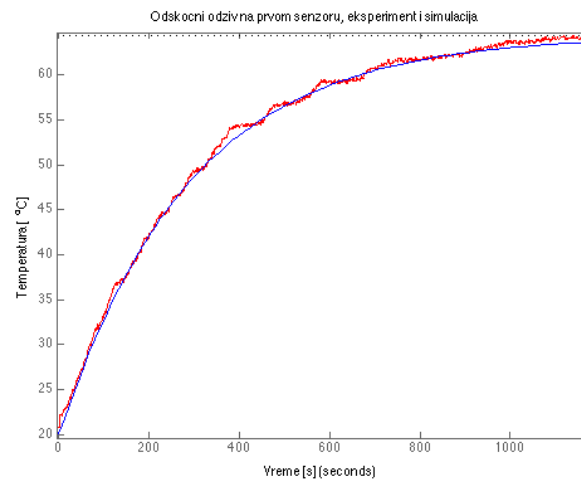
Функција преноса грејач - друга тачка мерења:

$$G_2(s) = \frac{41.47}{291.8s+1} e^{-21.6s} \quad (31)$$

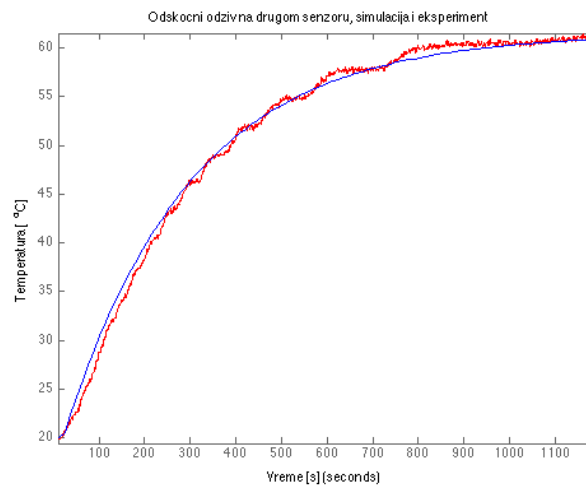
Функција преноса грејач - трећа тачка мерења:

$$G_3(s) = \frac{35.08}{276.9s+1} e^{-47.9s} \quad (32)$$

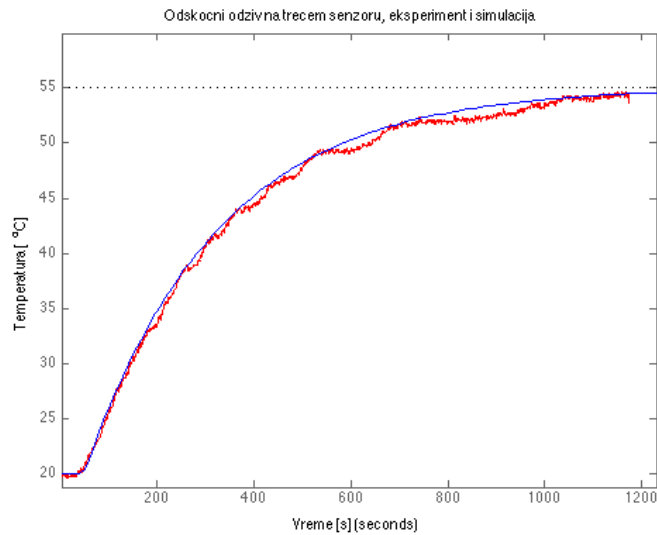
На следећим графицима је могуће видети поређење резултата добијених експериментом и оних који су добијени симулацијом над идентификованим моделом. Црвеном бојом су представљени резултати добијени експериментом, а плавом резултати идентификованог модела.



Слика 46. Одскочни одзив на првом сензору, експеримент и идентификувани модел



Слика 47. Одскочни одзив на другом сензору, експеримент и идентификувани модел

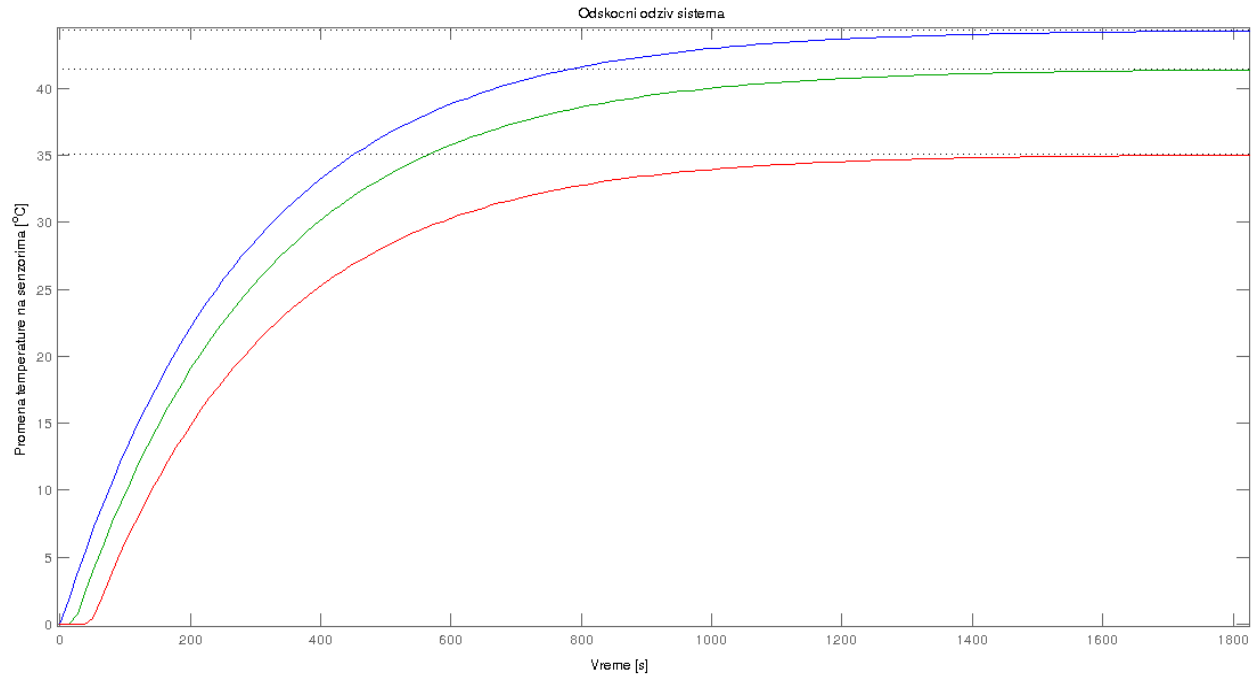


Слика 48. Одскочни одзив на трећем сензору, експеримент и идентификувани модел

Из слика 46, 47 и 48 се може видети да се резултати добијен експериментом и симулациони резултати доста поклапају (поклапање у свим тачкама је више од 80%).

На дијаграму на слици 49 је приказано симулирано простирање топлоте кроз плочицу у три тачке мерења добијено уз помоћ идентификованих функција преноса.

Плавом бојом је представљен први сензор најближи грејачу, зеленом сензор на средини плочице и црвеном сензор најудаљенији од грејача на супротном крају плочице.



Слика 49. Простирање топлоте кроз плочицу

Следећа битна карактеристика система јесте одзив система на хармонијски улаз, преко чега је могуће добити фреквенцијске карактеристике система. Фреквенцијске карактеристике система се могу добити експериментално, пуштањем хармонијског улаза облика:

$$x(t) = A + B\sin(\omega t) \quad (33)$$

Где је:

- A – Офсет
- B – Амплитуда синусоиде
- ω – Учестаност у радијанима по секунди

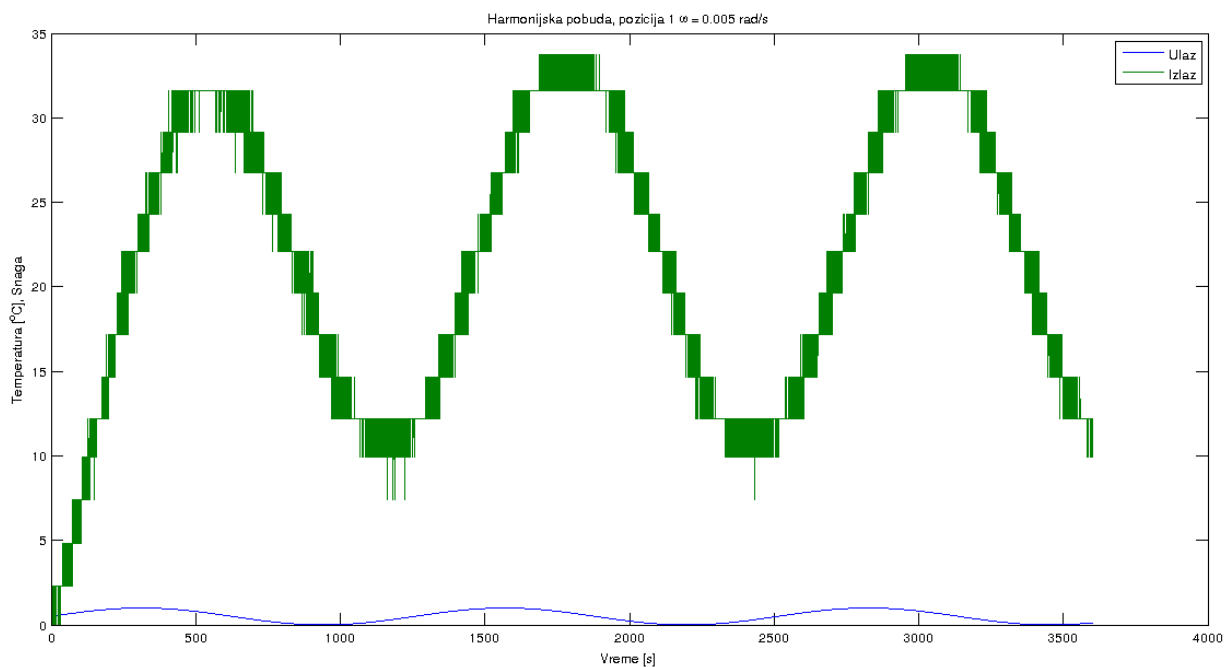
Тако што се учестаност повећава и мери се излаз система. Из тако добијених резултата, могуће је наћи два битна параметра, и то фреквенцијску пропусност, и фазно-фреквенцијску карактеристику. Фреквенцијска пропусност је одређена граничном учестаношћу ω и представља учестаност на којој амплитудно фреквенцијска карактеристика пада на 70.7% своје вредности на учестаности $\omega=0$. Вредност амплитудно фреквенцијске карактеристике на учестаности $\omega=0$ одговара статичком појачању система.

У случају типичних динамичких система се може рећи да се они понашају као НФ филтери и да је у подручију пропусног опсега репродукција улазног сигнала задовољавајућа. У конкретном случају система првог реда фреквенцијска учестаност је одређена учестаношћу:

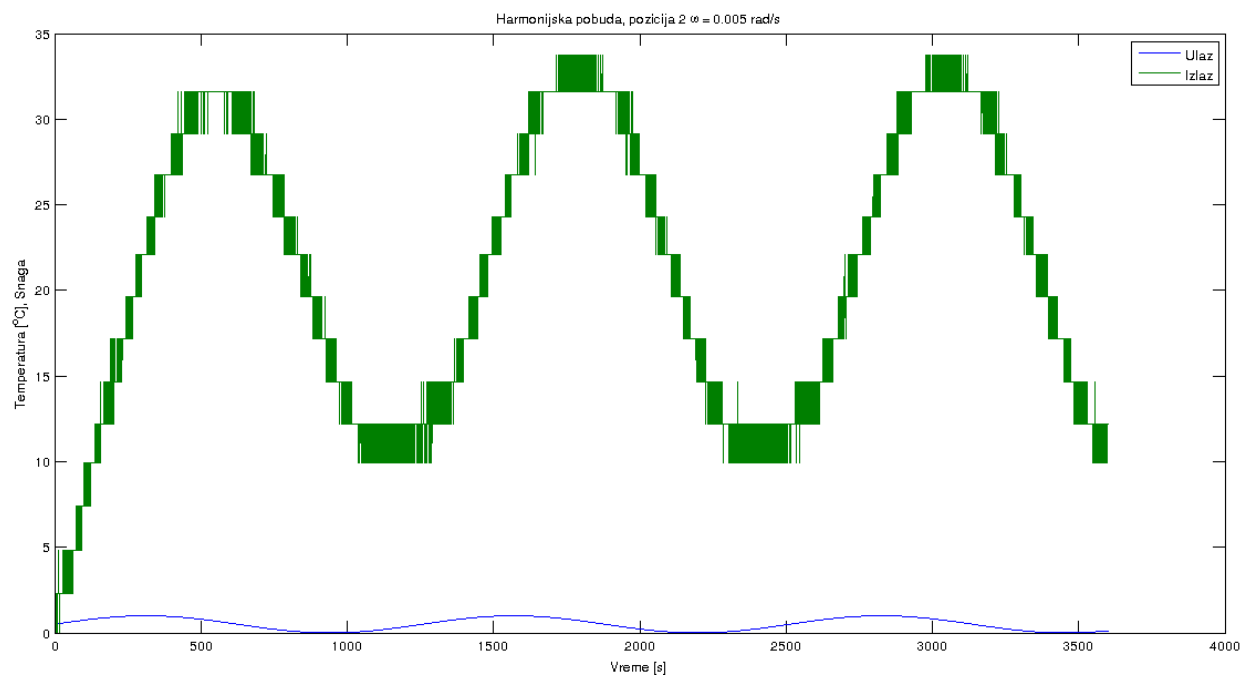
$$\omega = \frac{1}{T_0} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (34)$$

Фазно-фреквенцијска карактеристика система садржи информацију колико излазни хармоник учестаности ω фазно касни у односу на улазни.

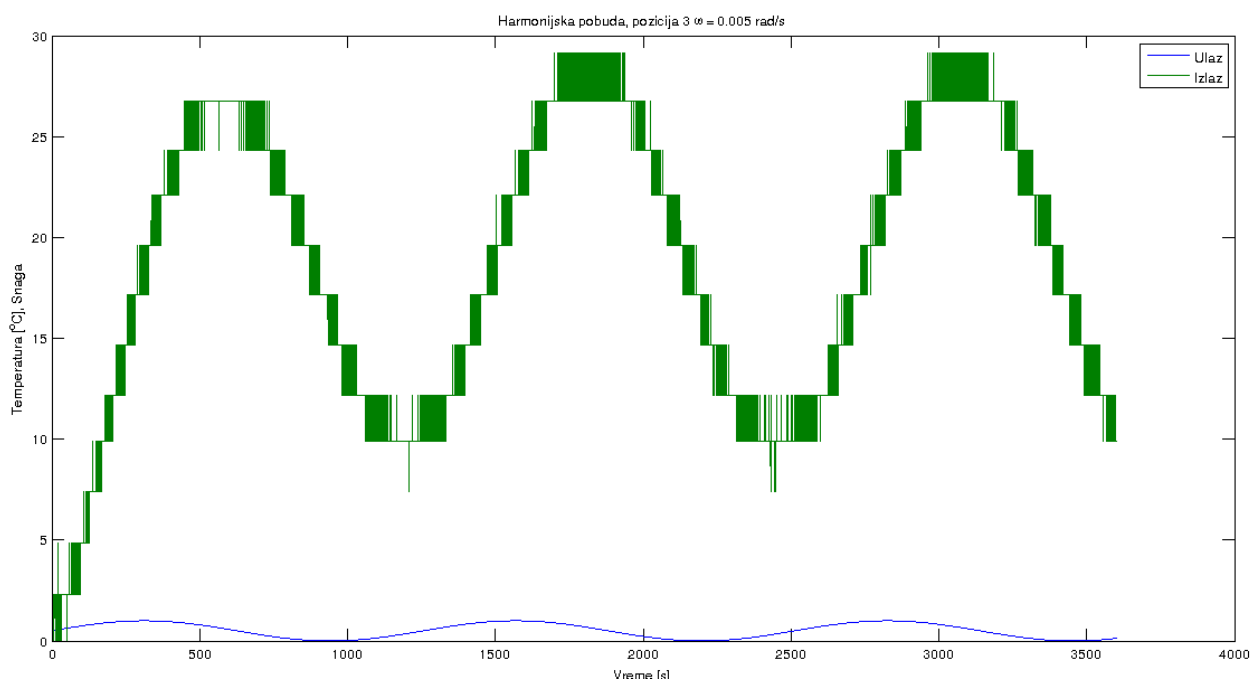
Као и у случају са одзивом на одскочни улаз експеримент одзива на хармонијски улаз је вршен у три тачке мерења на различитим растојањима. У експерименту је задата учестаност $\omega = 0.005 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$.



Слика 50. Хармонијска побуда на позицији првог сензора

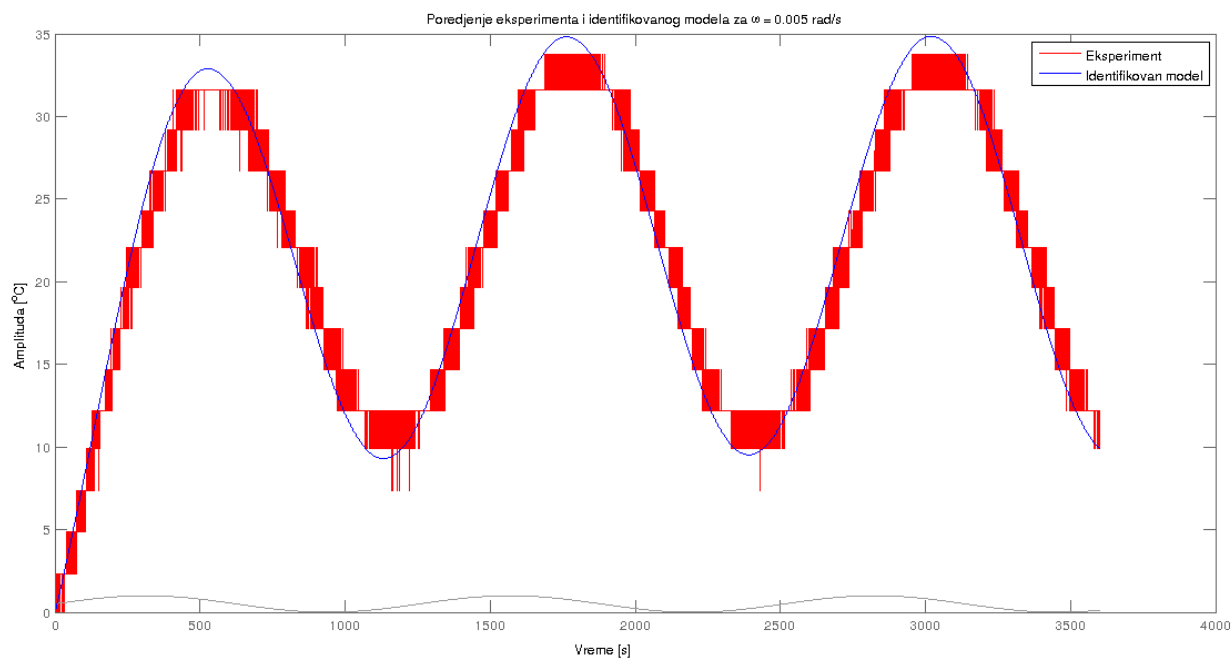


Слика 51. Хармонијска побуда на позицији другог сензора

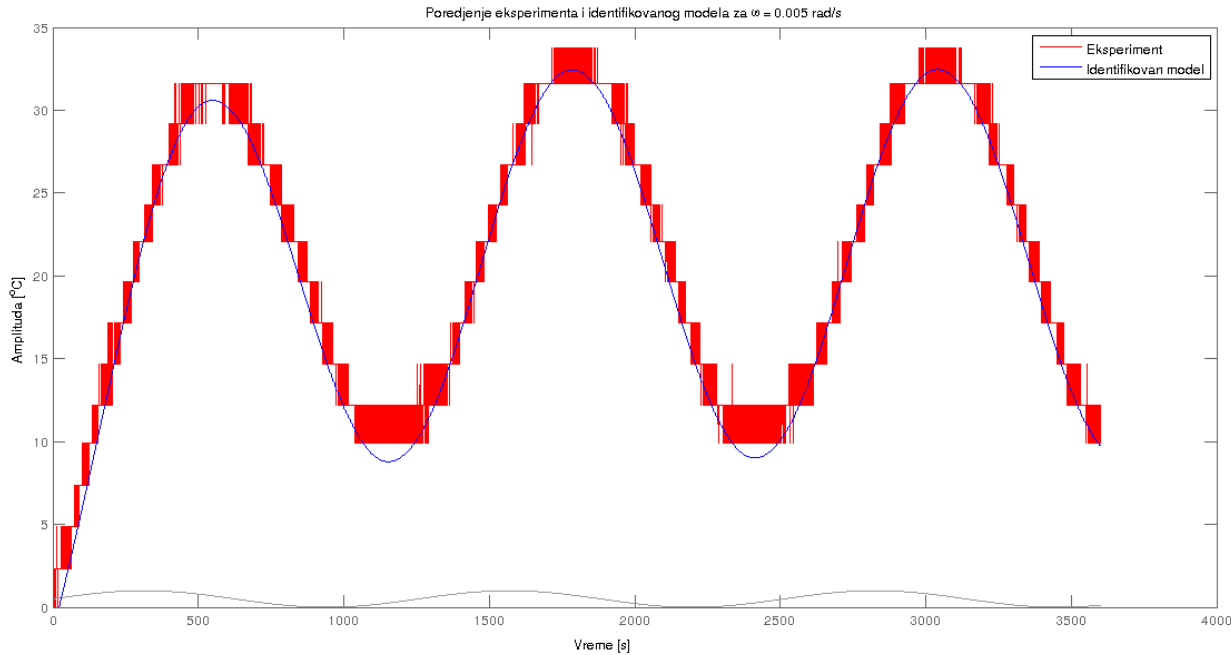


Слика 52. Хармонијска побуда на позицији трећег сензора

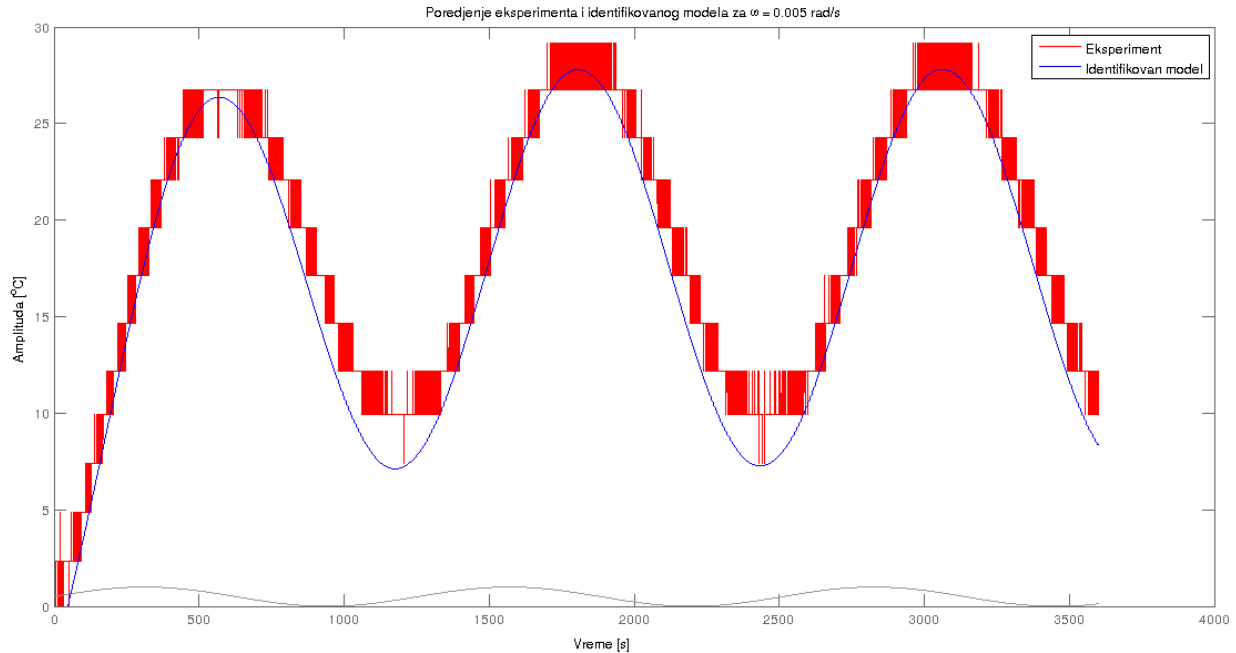
Поређење резултата добијених експериментом и симулационих резултата идентификованог приказано је на сликам 53, 54 и 55.



Слика 53. Хармонијска побуа на првом сензору, експеримент и идентификовани модел



Слика 54. Хармонијска побуа на другом сензору, експеримент и идентификовани модел



Слика 55. Хармонијска побуа на трећем сензору, експеримент и идентификовани модел

Будући да идентификоване функције преноса верно осликавају реални систем, анализе у фреквенцијском домену је могуће извести на њима. За то се користе Бодеоуи дијаграми. Бодеоуи дијаграми представљају амплитудно фреквенцијску и фазно фреквенцијску карактеристику система на графички начин. За амплитудно фреквенцијску карактеристику, користи се логаритамска скала и по апсциси и по ординати, где се на апсциси налазе учестаности, а на ординати појачање изражено у децибелима (dB).

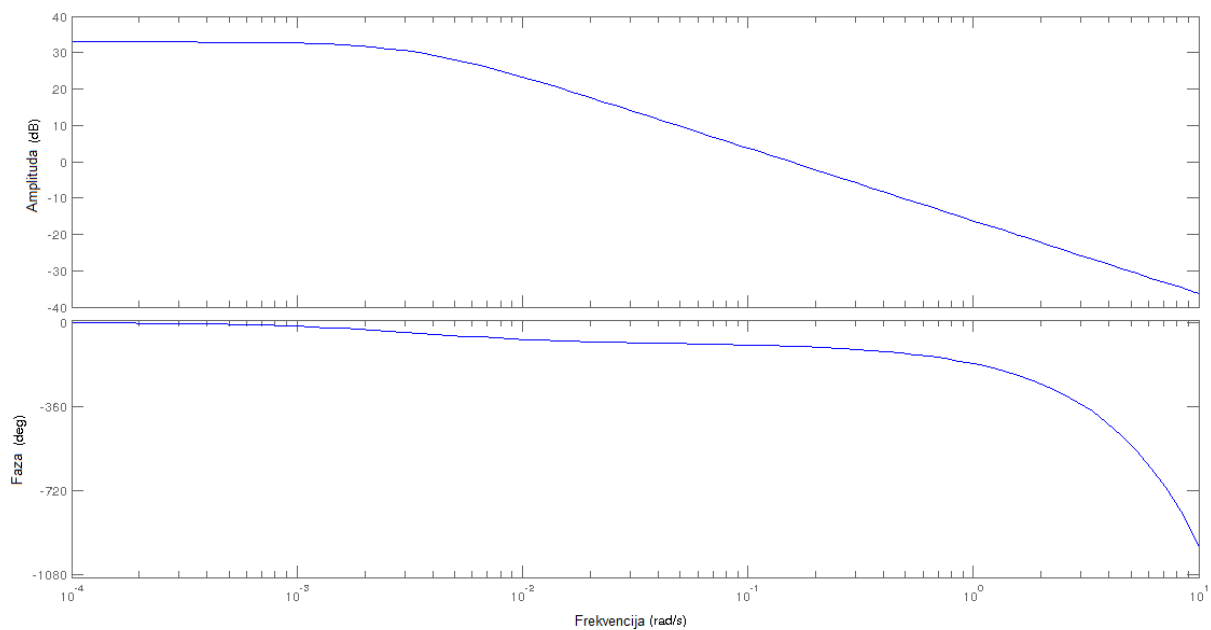
Појачање се рачуна по формули:

$$M = 20 \log_{10} \frac{Y}{U} \quad (35)$$

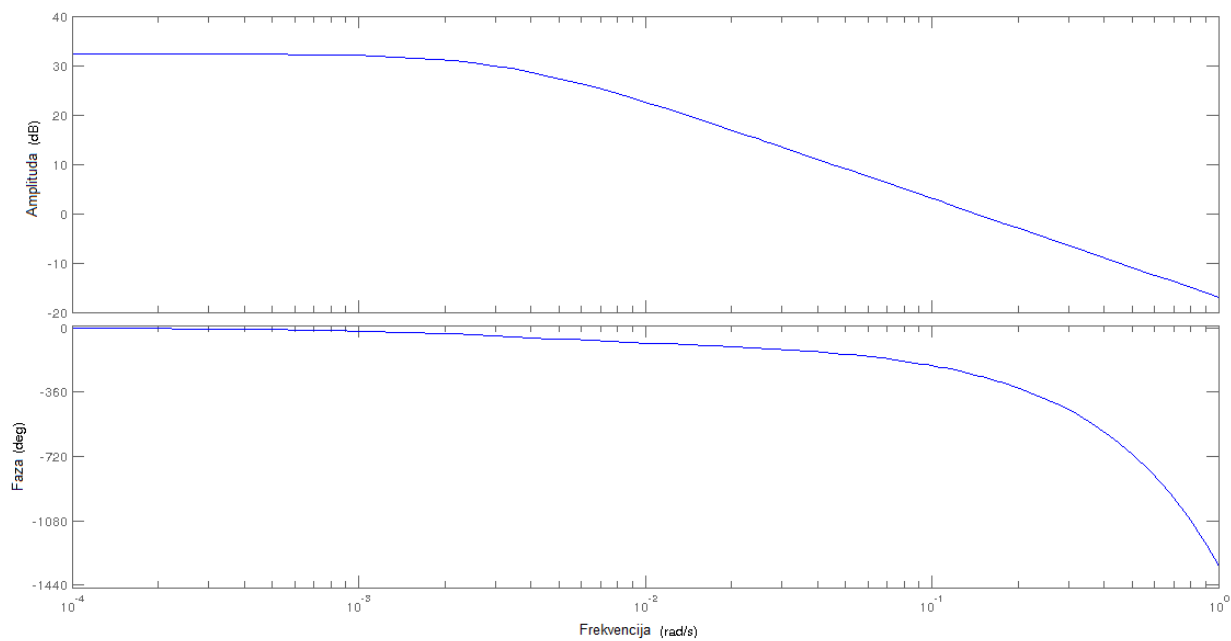
Где је:

- M – Појачање
- Y – Излаз из система
- U – Улаз у систем

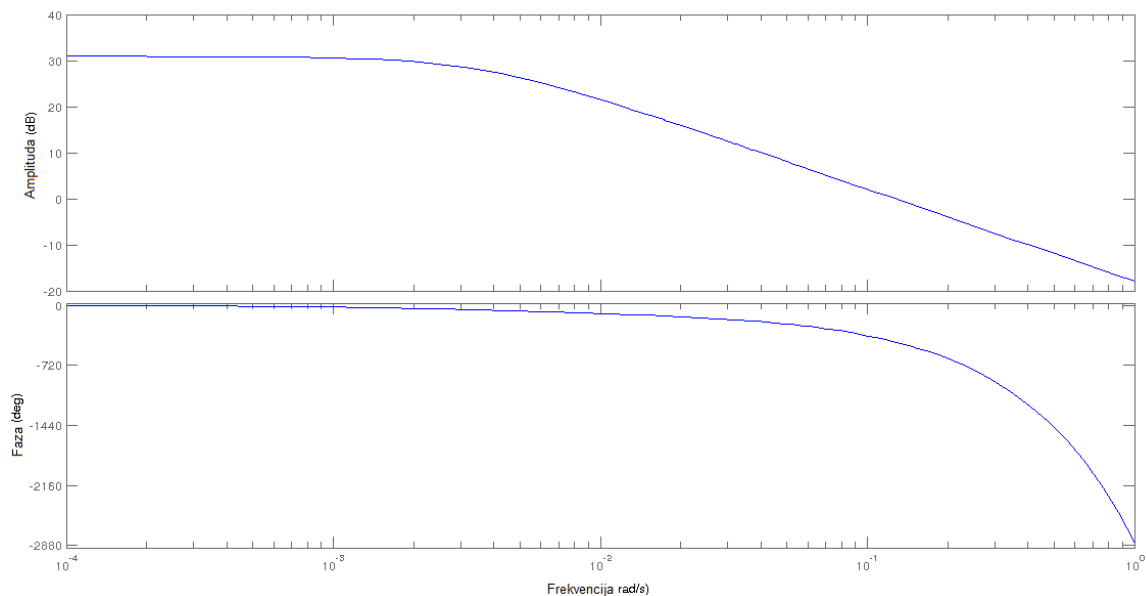
Фреквенцијска пропусност система је она учестаност на Бодеоуом дијаграму на којој појачање падне за 3 dB у односу на статичко појачање (при $\omega = 0$). Други дијаграм представља фазно-фреквенцијску карактеристику, где је на ординати приказано фазно кашњење у односу на учестаност (апсциса). Ордината је линеарна, апсциса је логаритамска. На сликама 56, 57 и 58 су приказани Бодеоуи дијаграми за три тачке мерења.



Слика 56. Бодеои дијаграми за прву тачку мерења



Слика 57. Бодеои дијаграми за другу тачку мерења



Слика 58. Бодеои дијаграми за трећу тачку мерења

Појачање система нема утицаја на пропусни опсег система. Он највише зависи од временске константе система. Фреквенцијска карактеристика ова три система је видно сличнија него временска карактеристика, због тога што су временске константе приближно исте. Могуће је видети да се фазе за сва три система разликују, а то је због различитог кашњења сва три система.

Пропусни опсези су:

- Систем 1: $0.0035 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
- Систем 2: $0.0034 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
- Систем 3: $0.0036 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

9. Закључак

Задатак овог мастер рада је пројектовање и израда лабораторијског модела који је применљив у настави, што је и реализовано.

Описан је поступак пројектовања, израде и примене лабораторијског модела. Поступак пројектовања и израде има намену омогућавања поновљивости израде модела. Симулација омогућава олакшан избор најпогоднијих материјала и димензија плочице. Упоредивањем резултата простирања топлоте се уочава разлика између идеализованог симулационог модела и реалног система. Такође је установљена и процентуална грешка која може помоћи при усавршавању симулације како би разлике између ње и реалног модела биле смањене.

Рад је концептуалног карактера и као такав подложен је даљим променама и усавршавањима у циљу постизања техничког решења лабораторијског модела погодног за комерцијалну употребу. Како би се скратило време трајања експеримента могуће је одабрати плочицу других димензија и попречног пресека као и грејач веће снаге. Могуће је испробати и друге методе идентификације система. Такође аквизициони уређај Ардуино Нано може бити повезан неким од микроконтролерских рачунара, попут “Raspbeery Pi” или “NI USB” картице, уместо са компјутером. За сам приказ простирања топлотног поља уместо на рачунару може се користити неки од додатних екрана или тач панела намењених за повезивање са мини рачунарима.

Литература:

- [1] А.И. Рибих, М.Р. Матаушек, „A dead time compensating PID controller structure and robust tuning“, *Journal of Process Control* 22, 2012
- [2] Рибих Александар, „Наставак развоја ПИД регулатора“, *Зборник радова симпозијум INDEL*, Бања Лука, 2010
- [3] <http://www.mathworks.com/help/pde/examples/nonlinear-heat-transfer-in-a-thinplate.html?prodcode=PD&language=en> (22.03.2016)
- [4] <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/157223/PHILIPS/KTY81-1>, (5.07.2016)
- [5] <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano> (7.07.2016)
- [6] L. Ljung, "System Identification: Theory for the User", 2nd Ed., Prentice Hall, 2006
- [7] Н. Hjalmarsson, "From experiment design to closed loop control", *Automatica*, Vol. 41, 2005, pp.393-438.
- [8] А.И. Рибих, „ГПДОП Регулатор – наставак развоја ПИД регулатора“, *Зборник радова 54. Конференције ЕТРАН*, Доњи Милановац, 2010
- [9] М. Матијевић, Г. Јакуповић, Ј. Цар, „Рачунарски подржано мерење и управљање“, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008
- [10] <http://cpa.fin.kg.ac.rs/weblab/index#/>
- [11] <http://cpa.fin.kg.ac.rs/weblab/index#/labId/Upravljanje%20temperaturom%20u%20dvodimenzionalnom%20temperaturskom%20polju>

Додатак А: Код коришћен за израду софтвера

```
import processing.serial.*;
import cc.arduino.*;

Arduino;

void setup() {
    size(840,480, P3D);

    noStroke();

    colorMode(HSB, 1);

    arduino = new Arduino(this, Arduino.list()[0], 57600);
}

void draw() {
    float[] temp = new float[7];
    float[] boja = new float[7];
    for (int i = 0; i < 7; i++){

        float a = 0.00001874*1000;
        float b = 0.007884*1000;
        float ukty = arduino.analogRead(i) / 1023.0 * 5;
        float c = 1000 - 9900*ukty/(5-ukty);
        float delta = b * b - 4 * a * c;
        float delta1 = sqrt (delta);
        float x2 =(-b + delta1)/(2 * a);
        temp[i] = x2 + 25 ;
        boja[i] = 1 - map(temp[i], 20, 60, 0.2, 0.8);
    }
}
```

```

}

    background(0);

    fill(1,0,1);

    textSize(10);

    text(temp[2], 580, 75);
    text(temp[2], 580, 410);
    text(temp[0], 300, 75);
    text(temp[0], 300, 410);
    text(temp[1], 30, 75);
    text(temp[1], 30, 410);
    text("- 60 C", 720, 85);

    text("- 20 C", 720, 400);


scale(320);
translate(0.2,0.25);

    beginShape();

    fill(boja[1], 1, 1); vertex(0, 0); // Gornji levi
    fill(boja[0], 1, 1); vertex(0.8, 0);
    fill(boja[2], 1, 1); vertex(1.6, 0);

    fill(boja[5], 1, 1); vertex(1.6, 1);
    fill(boja[4], 1, 1); vertex(0.8, 1);
    fill(boja[3], 1, 1); vertex(0, 1); // Donji levi

```

```

println (arduino.analogRead(6)/1024.0);

endShape();
translate(0.2,0);
beginShape();

fill(0,1,1); vertex(1.7, 0); //gornja leva tacka skale
fill(0,1,1); vertex(1.8, 0); //gornja desna tacka skale
fill(0.2,1,1); vertex(1.8, 0.2*1.25); //gornja leva tacka skale
fill(0.2,1,1); vertex(1.7, 0.2*1.25); //gornja desna tacka skale
fill(0.2,1,1); vertex(1.7, 0.2*1.25); //gornja leva tacka skale
fill(0.2,1,1); vertex(1.8, 0.2*1.25); //gornja desna tacka skale
fill(0.4,1,1); vertex(1.8, 0.4*1.25); //gornja leva tacka skale
fill(0.4,1,1); vertex(1.7, 0.4*1.25); //gornja desna tacka skale
fill(0.4,1,1); vertex(1.7, 0.4*1.25); //gornja leva tacka skale
fill(0.4,1,1); vertex(1.8, 0.4*1.25); //gornja desna tacka skale
fill(0.6,1,1); vertex(1.8, 0.6*1.25); //gornja leva tacka skale
fill(0.6,1,1); vertex(1.7, 0.6*1.25); //gornja desna tacka skale
fill(0.6,1,1); vertex(1.7, 0.6*1.25); //gornja leva tacka skale
fill(0.6,1,1); vertex(1.8, 0.6*1.25); //gornja desna tacka skale
fill(0.8,1,1); vertex(1.8, 0.8*1.25); //gornja leva tacka skale
fill(0.8,1,1); vertex(1.7, 0.8*1.25); //gornja desna tacka skale
endShape();
}

```

Додатак Б: Python скрипта

Python скрипта коришћена за пуштање одскочног и хармонијског улаза.

```
from pyfirmata import Arduino, util
import random
import math
from time import sleep
board = Arduino('com4')
iterator = util.Iterator(board)
iterator.start()
time = 0
k=1
pin11 = board.get_pin('d:11:p')
#konstante
a = 0.00001874*1000
b = 0.007884*1000
ukty=0.0
omega = 10
vreme = 1200
for i in range(6):
    board.analog[i].enable_reporting()
f = open("rad.txt", "w")
for i in range(vreme*10):
    t = []
    for i in range(6):
        board.analog[i].enable_reporting()
```

```

    if board.analog[i].read() == None:
        ukty = 1
    else:
        ukty = board.analog[i].read()*4.99999
    c = 1000 - 9900*ukty/(5-ukty)
    delta = b*b - 4*a*c
    delta1 = math.sqrt(abs(delta))
    x2 = (delta1 - b)/(2*a)
    temp = x2 + 25
    t.append(temp)

k = 1

pin11.write(k)

f.write("{0}, {1}, {2}, {3}, {4}, {5}, {6}, {7} \n".format(time,
k, t[0], t[1], t[2], t[3], t[4], t[5]))

print "{0}, {1}, {2}, {3}, {4}, {5}, {6}, {7} \n".format(time, k,
t[0], t[1], t[2], t[3], t[4], t[5])

sleep(0.1)

time += 0.1

f.close()

```