



UNIVERZITET U SARAJEVU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET  
ODSJEK ZA AUTOMATIKU I ELEKTRONIKU

## Dvopolozajna regulacija termičkog sistema sa grijačem

PREDMET:

- PRAKTIKUM AUTOMATIKE I INFORMATIKE -

Tim 1.3:

**Boračić Asija, 18954**

**Ćatić Hana, 18817**

**Džananović Naila, 18826**

Sarajevo, maj 2022.g.

## Sažetak rada

Rad obuhvata osnovne principe upravljanja sa naglaskom na dvopolozajnoj regulaciji. Dalje je na primjeru regulacije temperature u prostoriji sa termičkim sistemom sa grijaćem prikazan pristup realizaciji upravljanja. Predstavljen je model termičkog sistema. Proveden je postupak određivanja parametara sistema i određivanja statičke karakteristike odabranog senzora, u ovom slučaju NTC termistora, kroz eksperimentalna mjerena, koja su potom obrađena kroz programsko okruženje Matlab. Na osnovu prikupljenih podataka formiran je Simulink model koji održava temperaturu prostorije na zadanoj vrijednosti od  $46^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$  i izvršena simulacija sistema. Potom je formiran program za programabilni logički kontroler u okviru EasySoft paketa. Za kraj proveden je eksperiment kojim je potvrđena ispravnost formiranog sistema upravljanja.

## Abstract

This paper covers basics of control principles with focus on two-position regulation. Approach to creating control systems is demonstrated on the example of regulation of temperature, namely thermal system with a heater. Model of thermal system is present. Through experimental measurements and data analysis using software package Matlab system parameters along with static characteristic of chosen sensor - NTC thermistor were determined. Based on the results Simulink model of control system that would maintain the temperature of  $46^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$  was created. Using EasySoft software package programme for programmable logic controller was formed. Lastly through experiment the accuracy of the created control system was verified.



# Sadržaj

---

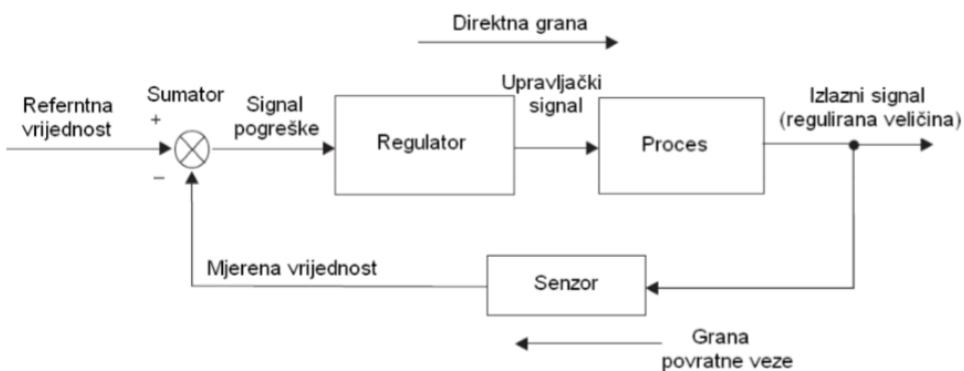
<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
1.	Opis problema . . . . .	2
2.	Pregled literature za vezane za opisani problem . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Dvopolozajna regulacija</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Model termičkog sistema</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Organizacija vježbe</b>	<b>8</b>
1.	Zadatak 1 . . . . .	8
2.	Zadatak 2 . . . . .	10
3.	Zadatak 3 . . . . .	12
3.1	Tranzistor . . . . .	12
3.2	Relej . . . . .	15
3.3	Logički krugovi . . . . .	16
3.4	PLC . . . . .	17
4.	Zadatak 4 . . . . .	20
5.	Zadatak 5 . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Realizacija vježbe</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>Korišteni algoritam/alat</b>	<b>28</b>
<b>7</b>	<b>Simulacijski rezultati</b>	<b>37</b>
1.	Postavke simulacije . . . . .	38
2.	Rezultati simulacije . . . . .	39
3.	Zaključak . . . . .	40
<b>8</b>	<b>Eksperimentalni rezultati</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>Zaključak i diskusija</b>	<b>45</b>

# Poglavlje 1



## Uvod

Osnova za kreiranje bilo kakvog sistema jeste naravno algoritam funkcionisanja objekta. Međutim, obzirom na to da najčešće u realnim uslovima postoje vanjski uvjeti koji utječu na sistem, bilo organizovani odnosno predvidljivi ili neorganizovani odnosno nepredvidljivi, dolazi do toga da se realizacija sistema ne svodi nužno na jednostavnu realizaciju algoritma funkcionisanja već je potrebno vršiti upravljanje. U tom slučaju potrebno je dovesti informaciju o trenutnom stanju sistema da bi se mogla izvršiti regulacija, odnosno napraviti odluka o tome šta je potrebno učiniti da bi se uspješno izvršio zadatok sistema, bez obzira da li je riječ o automatskom ili manuelnom upravljanju. Očigledno je u takvom slučaju riječ o upravljanju sa povratnom spregom (eng. *feedback control*). Osnovna shema ovakvog sistema upravljanja data je na slici 1.1. Primjećuje se da je ulaz u regulator, koji predstavlja upravljački uređaj, signal pogreške koji se formira u odnosu na referentnu vrijednost i mjerenu vrijednost, te da regulator generiše upravljački signal kojim se djeluje na proces sa ciljem postizanja referentne vrijednosti. Ono što je bitno jeste da kvalitet i tačnost samog upravljanja direktno zavise od tačnosti i kvaliteta samog mjernog uređaja, to jest upravljanje ne može biti kvalitetnije od samog senzora.



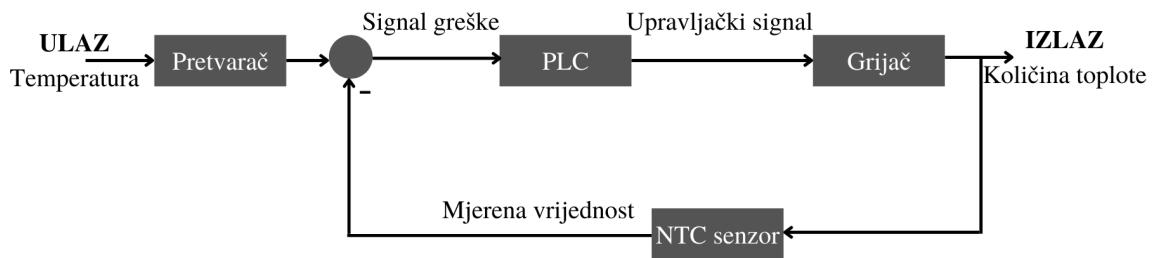
Slika 1.1: Shematski prikaz sistema upravljanja sa povratnom spregom [1]

Jedna od jednostavnijih i jeftinijih metoda upravljanja jeste dvopolozajna regulacija, koja se koristi u slučajevima kada nisu postavljeni strogi uslovi za izrazito male greške regulacije.

## 1. Opis problema

Za ostvarivanje dvopolozajne regulacije potrebno je prije svega odrediti parametre sistema za koji se kreira algoritam upravljanja. Potom je potrebno u ovisnosti od zadanog problema koji se sastoji od samog algoritma funkcionisanja objekta i zadane tačnosti upravljanja pogodno odabrati senzor, a za odabranii senzor prije upotrebe odrediti statičku karakteristiku. I tek potom na osnovu prikupljenih podataka formirati algoritam upravljanja.

S tim u vezi konkretni problem jeste realizacija dvopolozajne regulacije termičkog sistema sa grijaćem. Kako je navedeno prvo se određuju parametri termičkog sistema, koeficijent pojačanja i vremenska konstanta. Zagrijavanje i hlađenje u općem slučaju mogu biti opisani različitim diferencijalnim jednačima stoga se tretiraju kao zasebni procesi. Odabranii senzor je NTC pa je u odnosu na njega potrebno proračunati ostale komponente u odabranom mernom kolu, kao i odrediti njegovu statičku karakteristiku koja će biti korištena za proračun i kreiranje algoritma upravljanja. Na osnovu proračuna, snimljene karakteristike i određenih parametara bit će za provjeru kreiran i simuliran model termičkog sistema. Potom će biti kreiran program za regulator, u ovom slučaju PLC. Shematski prikaz opisanog sistema da je na slici 1.2.



Slika 1.2: Shematski prikaz sistema za regulaciju temperature u prostoriji

## 2. Pregled literature za vezane za opisani problem

Kao osnova za izradu ovog rada korištena su predavanja sa predmeta Praktikum automatike i elektronike, Linearni sistemi automatskog upravljanja, Elektronički elementi i sklopovi i Senzori i mjerjenja Elektrotehničkog fakulteta u Sarajevu. Pored toga za analizu dvopolozajne regulacije korištene su knjige "System Engineering and Automation: An Interactive Educational Approach" autora J.F. de Canete, C. Galiando i I. Garcia-Moral, te "Modern Control Engineering" autora K. Ogata. Za vršenje proračuna i osnovne ideje o sistemu koji se projektuje korištena je i knjiga "Projektovanje sistema automatske regulacije i upravljanja tehnoloških procesa" autora B. Matića. Za prikupljanje ilustracija korištene su razne web stranice.

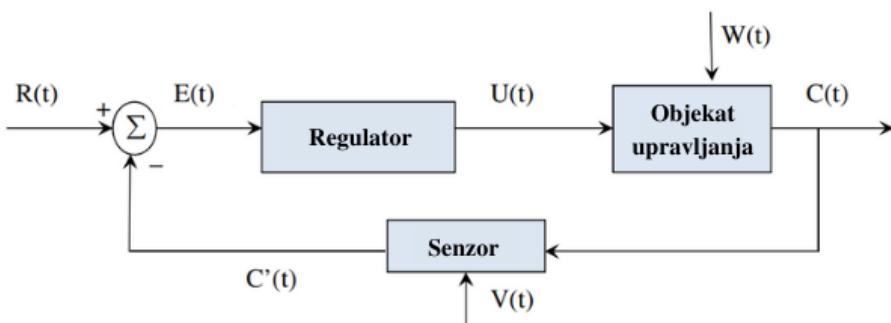
## Poglavlje 2



# Dvopolozajna regulacija

Upravljanje sistemima nije otkriće novog doba. Prvi historijski zapisi o sistemima upravljanja potiču čak iz trećeg stoljeća prije nove ere [2]. Signali sistema automatskog upravljanjanja jesu kako je prikazano na slici 2.1:

- $R(t)$  - referentna vrijednost koja se želi postići na izlazu,
- $C(t)$  - regulirana veličina, vrijednost na izlazu sistema,
- $C'(t)$  - mjerena vrijednost,
- $E(t)$  - greška regulacije, razlika između referentne i mjerene vrijednosti i predstavlja ulazni signal regulatora, koji ga potiče na rad i na osnovu kojeg on generira upravljački signal,
- $U(t)$  - upravljački signal koji djeluje na aktuator koji izvršava samo upravljanje,
- $W(t)$  i  $V(t)$  - perturbacije, vanjsko djelovanje na sistem.



Slika 2.1: Shematski prikaz sistema upravljanja sa povratnom spregom [2]

Sistemi automatske regulacije se dijele u nekoliko skupina prema upravljačkom djelovanju [3]:

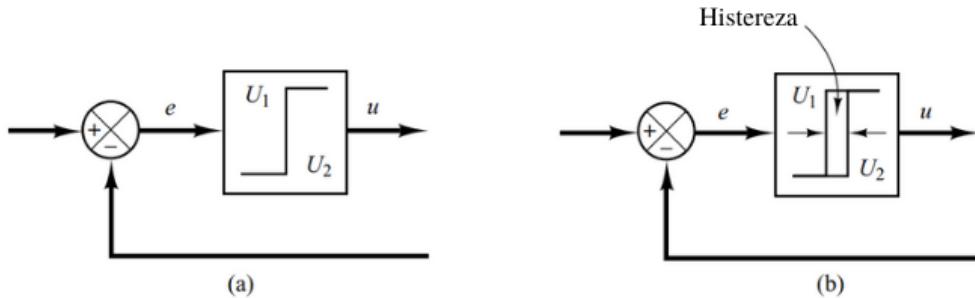
- dvopolozajni regulatori (eng. *two-position/on-off controller*),
- proporcionalni regulatori,
- integralni regulatori,

- derivantni regulatori,
- PI regulatori,
- PID regulatori.

Dvopolozajni regulatori su jednostavni i jeftini te upravo iz toga razloga često se primjenjuju. Kod ovakve regulacije postoje samo dva stanja na izlazu regulatora, najčešće samo logička "0" i logička "1". Neka su ta dva upravljačka signala  $U_1$  i  $U_2$ , a signal greške  $e(t)$ . Kod ovog tipa regulacije upravljački signal ostaje na minimalnoj ili maksimalnoj vrijednosti sve dok je signal greške pozitivan ili negativan odnosno [3]:

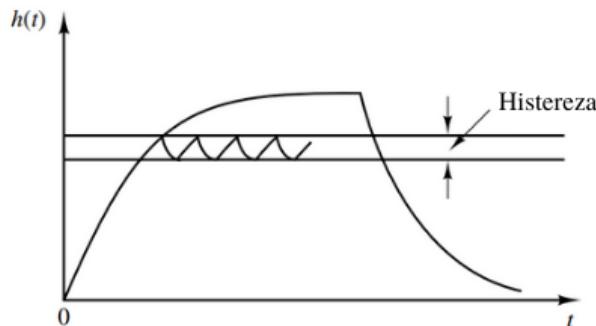
$$u(t) = \begin{cases} U_1 & \text{za } e(t) > 0 \\ U_2 & \text{za } e(t) < 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Na slici 2.2 a) i b) prikazane su blokovske sheme dvopolozajnog regulatora. U primjeru b) zbog histereze regulator zadržava izlaz  $u(t)$  na trenutnoj vrijednosti sve dok signal greške ne bude različit od nule. Histerezmože biti nepoželjna posljedica trenja ili zakašnjenja, ali kod dvopolozajne regulacije najčešće se svjesno formira da bi se spriječilo prečesto paljenje i gašenje mehanizama [3].



Slika 2.2: (a) Blok dijagram dvopolozajnog regulatora, (b) blok dijagram dvopolozajnog regulatora sa histerezom [3]

Kao posljedica postojanja histereze može se javiti osciliranje izlaznog signala oko zadane vrijednosti [2], pomenuto je prikazano na slici 2.3 za primjer regulacije nivoa tekućine u rezervoaru sa elektromagnetskim ventilom koji ima samo dva stanja, otvoren i zatvoren.

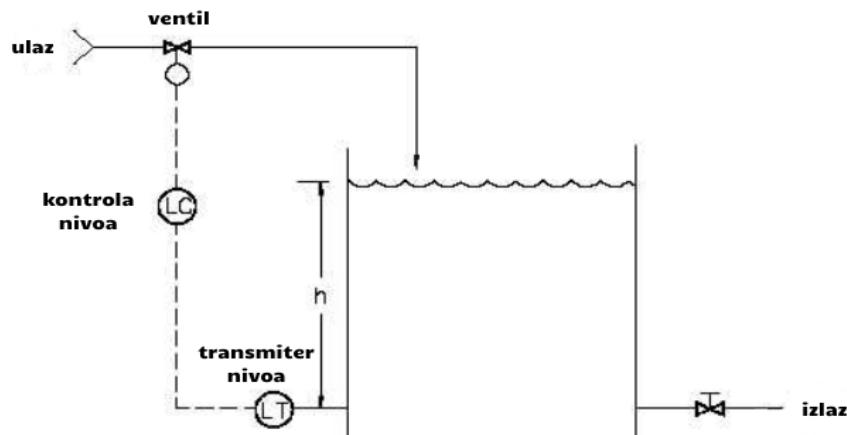


Slika 2.3: Grafički prikaz ovisnosti nivoa o vremenu za slučaj dvopolozajne regulacije nivoa tekućine u rezervoaru [3]

Smanjenje histereze direktno dovodi do smanjenja amplitude oscilacija na izlazu. Međutim, istovremeno dovodi i do povećanja broja paljenja i gašenja prekidača time smanjujući životni vijek komponenti. Nasuprot tome povećanje histereze će povećati amplitudu oscilacija, kao i vrijeme uključenja i isključenja. Slijedi da je dvopolozajna regulacija rješenje za sisteme kod kojih je dozvoljen neprecizan odziv [2]. S toga se u složenijim sistemima koriste neki od drugih regulatora, proporcionalni, integralni, PI ili PID regulatori.

## Realne aplikacije

Jedan od sistema čije se upravljanje vrši dvopozicionom regulacijom jeste sistem za regulaciju nivoa vode, prikazan na slici 2.4.



Slika 2.4: Sistem za regulaciju nivoa vode[4]

Ulas sistema je na neki način povezan sa dovodom vode (npr. pumpa), dok je na izlazu neka vrsta ventila. Varijabla upravljanja je nivo vode odnosno visina vodenog stuba, mjerena transmitemerom nivoa koji informaciju o trenutnom stanju šalje kontroleru. Kada se desi da se nivo vode spusti ispod željene vrijednosti, ovo stvara pozitivni signal greške koji uzrokuje otvaranje ulaza, odnosno dovodi dodatnu količinu vode sve dok nivo ne poraste na zadovoljavajuću visinu. Tada se šalje negativni signal greške koji za posljedicu ima zatvaranje ulaza. Ukoliko bi nivo vode bio više od željene vrijednosti, analogan proces bi se desio na izlazu sistema s tim da bi došlo do odvrtanja ventila na izlazu i izbacivanja tekućine.[4]

## Poglavlje 3



### Model termičkog sistema

---

Prije svega potrebno je formirati matematički model termičkog sistema pri čemu se može uzeti da se prenos toplote vrši konvekcijom i da se svi konduktivni prenosi mogu zanemariti.

Na osnovu zakona o održanju energije porast toplotne energije senzora je proporcionalan ulaznom toku toplote [5]:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT(t)}{dt} = q \quad (3.1)$$

Na osnovu ranije napravljene pretpostavke da se toplota prenosi isključivo konvekcijom slijedi da je:

$$q = h \cdot S \cdot (T_2 - T(t)) \quad (3.2)$$

gdje je  $m$  - masa,  $c$  - specifična toplota materijala,  $h$  - koeficijent prelaza toplote na površini. Na osnovu jednačina 3.1 i 3.2 dobija se:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT(t)}{dt} = h \cdot S \cdot (T_2 - T(t)) \quad (3.3)$$

$$\frac{m \cdot c}{h \cdot S} \cdot \frac{dT(t)}{dt} = T_2 - T(t) \quad (3.4)$$

$$\tau \cdot \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = T_2 \quad (3.5)$$

gdje je  $\tau$  vremenska konstanta kao posljedica postojanja inercije sistema. Rješenje diferencijalne jednačine 3.5 je dato kao:

$$T(t) = T_2 - (T_2 - T(0)) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.6)$$

Dalje je moguće proračunati vrijeme koje potrebno da se dosegne neka određena temperatura  $T_x$ .

$$\begin{aligned} T_x &= T_2 - (T_2 - T(0)) \cdot e^{-\frac{t_x}{\tau}} \\ e^{-\frac{t_x}{\tau}} &= \frac{T_2 - T_x}{T_2 - T(0)} \\ \frac{t_x}{\tau} &= \ln \frac{T_2 - T(0)}{T_2 - T_x} \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$t_x = \tau \ln \frac{T_2 - T(0)}{T_2 - T_x} \quad (3.8)$$

Primjenom Laplace transformacije na 3.5:

$$\begin{aligned}\tau \cdot (sT(s) - T(0)) + T(s) &= T_2 \\ T(s)(\tau s + 1) &= T_2 + \tau \cdot T(0) \\ T(s) &= \frac{T_2}{\tau s + 1} + \frac{\tau \cdot T(0)}{\tau s + 1}\end{aligned}\tag{3.9}$$

Uz nulte početne uslove se prema definiciji dobija prenosna funkcija sistema:

$$G(s) = \frac{T_2}{\tau s + 1}\tag{3.10}$$

Očigledno je da je  $T_2$  partikularno rješenje i da definira novo stacionarno stanje dok su  $\tau$  i homogeno rješenje posljedica dinamike samog sistema i definiraju prelazni proces.

# Poglavlje 4



# Organizacija vježbe

## 1. Zadatak 1

Data je logička funkcija 4.1 za koju je potrebno je odrediti tablicu istinitosti, realizirati je sa NI i NILI kolima kao i simulirati u okviru EASY SOFT-a.

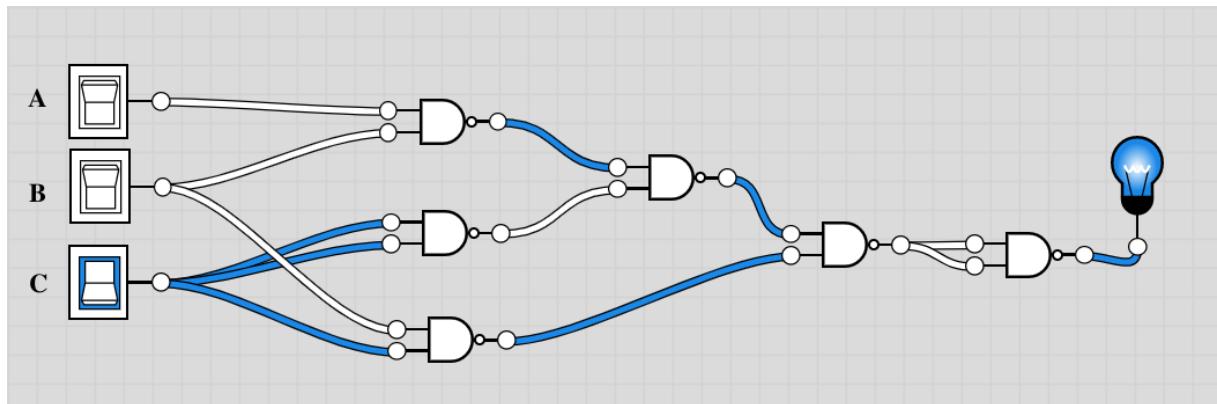
$$((A \wedge B) \vee C) \wedge \neg(B \wedge C) \quad (4.1)$$

a)

Logičku funkciju 4.1 moguće je zapisati kao:

$$\neg(\neg(\neg(\neg(A \wedge B) \wedge \neg C) \wedge \neg(B \wedge C))) \quad (4.2)$$

Logička funkcija 4.2 predstavljena je NI kolima na slici 4.1.

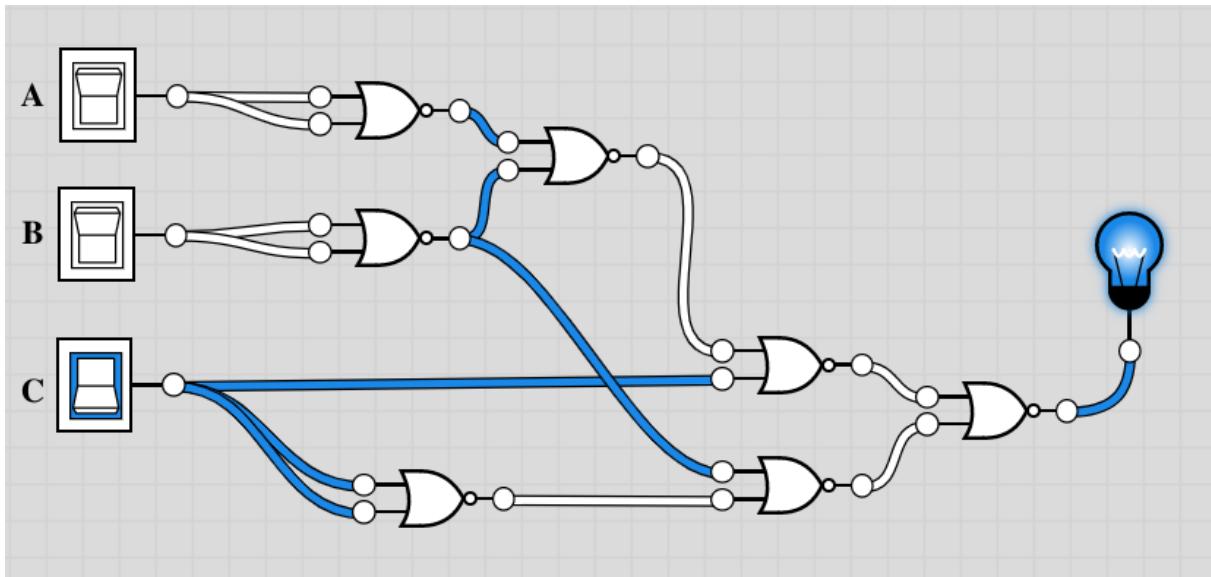


Slika 4.1: Simulacija logičke funkcije u EASY SOFT-u

Logičku funkciju 4.1 moguće je također zapisati i kao:

$$\neg(\neg(\neg(\neg A \vee \neg B) \vee C) \vee \neg(\neg B \vee \neg C)) \quad (4.3)$$

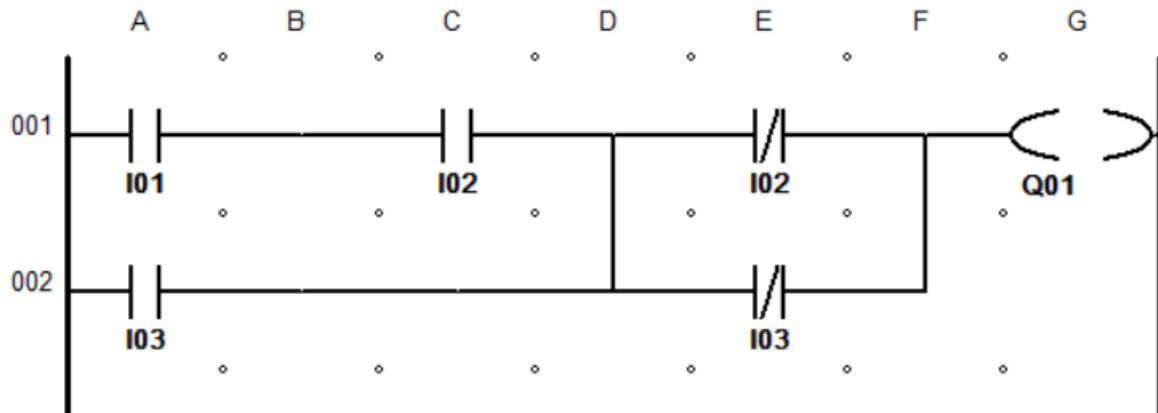
Logička funkcija 4.3 predstavljena je NILI kolima na slici 4.2.



Slika 4.2: Simulacija logičke funkcije u EASY SOFT-u

b)

Simulacija relacije 4.1 u okviru EASY SOFT-a data je na slici 4.3.

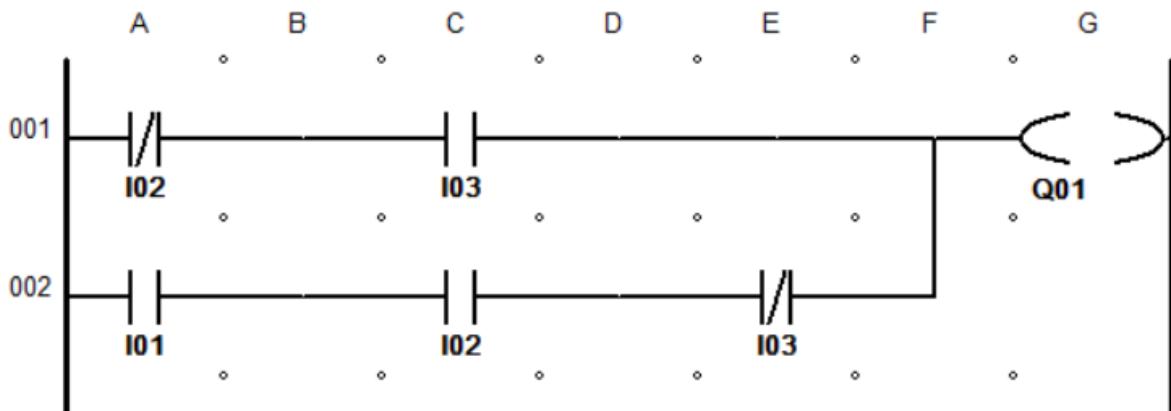


Slika 4.3: Simulacija logičke funkcije u EASY SOFT-u

Pojednostavljena relacija 4.1, koja se dobija primjenom osnova Boolove algebre glasi:

$$(C \wedge \neg B) \vee (A \wedge B \wedge \neg C) \quad (4.4)$$

Simulacija pojednostavljene relacije 4.4 u okviru EASY SOFT-a data je na slici 4.4.



Slika 4.4: Simulacija pojednostavljene logičke funkcije u EASY SOFT-u

c)

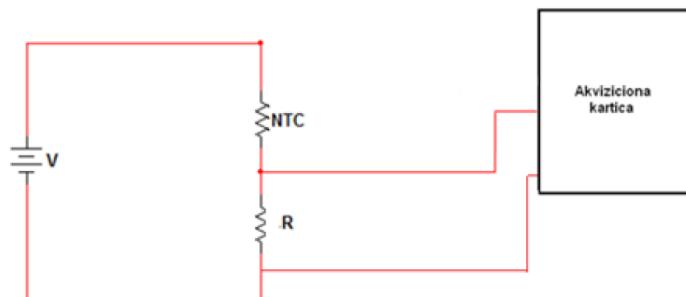
Tablica istinitosti za relaciju 4.1 data je u tabeli 4.1.

Tabela 4.1: Tablica istinitosti

A	B	C	$((A \wedge B) \vee C) \wedge \neg(B \wedge C)$
T	T	T	F
T	T	F	T
T	F	T	T
T	F	F	F
F	T	T	F
F	T	F	F
F	F	T	T
F	F	F	F

## 2. Zadatak 2

Zadato je električno kolo prikazano na slici 4.5 sa izvorom napona  $V = 6$  V, NTC otpornik kod kojeg se otpor mijenja sa promjenom temperature tako da je otpornost na  $20^{\circ}\text{C}$  jednaka  $10\text{k}\Omega$ , dok je ista pri temperaturi  $120^{\circ}\text{C}$  jednaka  $540\Omega$ . Vrijednost otpora R potrebno je odrediti uz dodatni uslov da je maksimalna struja u kolu jednaka  $18\text{mA}$ .



Slika 4.5: Prikaz sheme za akviziciju napona na NTC otporu

## Proračun otpornika R

Da bi se odredila vrijednost otpora R polazna relacija za naponski djelitelj je:

$$E = V \cdot \frac{R}{R(T) + R} \quad (4.5)$$

Imajući u vidu da je opseg napona na akvizicijskoj MCC kartici u rasponu od 0 V do 4 V, izlazni napon dostiže maksimalnu vrijednost za minimalnu vrijednost otpora NTC, koja iznosi  $540\Omega$ :

$$E = 6 \cdot \frac{R}{540 + R} < 4 \quad (4.6)$$

Iz prethodne relacije dobija se gornja granica za vrijednost otpornika  $R < 1080\Omega$ . Donja granica može se dobiti iz dodatnog uslova za maksimalnu vrijednost struje u kolu:

$$I_{max} = \frac{V}{R} < 18mA \quad (4.7)$$

Uvrštavanjem brojnih vrijednosti slijedi da donja granica otpora iznosi  $R > 333.33\Omega$ . Za finalnu vrijednost otpora koji će biti korišten odabrana je vrijednost  $R = 820\Omega$ . U slučaju kratkog spoja napon na MCC kartici će biti 0 V što je u opsegu vrijednosti na izlazu akvizicijske kartice, dok bi u slučaju prekida kola imali napon od 6 V koji jeste izvan opsega ali nije dovoljno velik da bi oštetio karticu.

## Relacija koja računa trenutnu temperaturu

Sljedeće što je potrebno je odrediti relaciju za računanje trenutne temperature u funkciji mjerne naponi ukoliko kao vezu temperature i otpora koristimo relaciju :

$$R(T) = k \cdot T + n \quad (4.8)$$

Koristeći vrijednosti otpornosti NTC otpornika zadate na  $20^{\circ}\text{C}$  i  $120^{\circ}\text{C}$  dobije se sljedeći sistem jednačina:

$$\begin{aligned} 10000 &= k \cdot 293.15 + n \\ 540 &= k \cdot 393.15 + n \end{aligned} \quad (4.9)$$

Rješavanjem ovog sistema doobiju se rezultati za vrijednosti :  $k = -94.6 \Omega/\text{K}$  i  $n = 37731.99\Omega$ , odakle slijedi da je tražena relacija ovisnosti temperature u funkciji napona :

$$R(T) = -94.6 \cdot T + 37731.99 \quad (4.10)$$

## Opseg i rezolucija

Mjerni napon za koji ćemo imati najveću tačnost uzimajući u obzir odabranu vrijednost otpornika kretat će se u rasponu od 0.467 V do 3.6176 V. Rezolucije se računaju na sljedeće načine :

$$R1 = \frac{120 - 20}{2^{12} - 1} = 0.02442 \frac{{}^{\circ}\text{C}}{\text{bit}} \quad (4.11)$$

$$R2 = \frac{120 - 20}{3617.6 - 467} = 0.0317 \frac{{}^{\circ}\text{C}}{\text{mV}} \quad (4.12)$$

## Osjetljivost

Osjetljivost mjerena u slučaju korištenja punog mjernog opsega MCC akvizicijske kartice računa se po relaciji :

$$S = \frac{V_{max} - V_{min}}{T_{max} - T_{min}} = \frac{4 - 0}{120 - 20} = 0.04 \frac{V}{^{\circ}C} \quad (4.13)$$

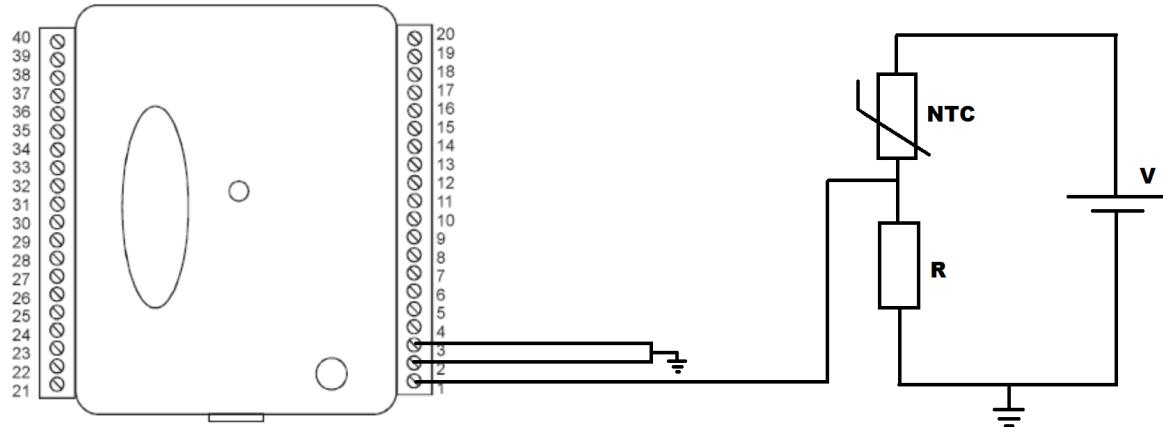
Budući da će rad sa odabranom vrijednošću otpornika u unaprijed određenom temperaturnom opsegu smanjiti taj naponski opseg, osjetljivost će iznositi:

$$S = \frac{V_{max} - V_{min}}{T_{max} - T_{min}} = \frac{3.6176 - 0.467}{120 - 20} = 0.0315 \frac{V}{^{\circ}C} \quad (4.14)$$

Obzirom na osjetljivost, napon je bolje mjeriti na fiksnom otporniku.

## Shema za SingleEnded mod

Na slici 4.6 prikazana je shema spajanja uz korištenje SingleEnded moda za mjerena. Razlika se ogleda u spajanju pinova 2 i 3 na masu (kratki spoj) dok na pin 1 dovodimo mjereni napon. Mase dijela kola i pinova 2 i 3 su zapravo ista tačka koja je u shemi nacrtana odvojeno radi preglednosti.



Slika 4.6: Prikaz sheme za SingleEnded mod mjerena

## 3. Zadatak 3

Potrebno je opisati funkcionalnost, navesti osnovne napomene o načinu upotrebe, prednostima i manama, načinu označavanja vrijednosti komponente te pronaći sve najvažnije izvedbe navedenih komponenti, što je dato u nastavku.

### 3.1 Tranzistor

Tranzistor je poluprovodnička komponenta otkrivena 1947. godine od strane tima istraživača: Vilijam Šokli, Volter Bratein i Džon Bardin, koji su uočili da bi ova komponenta mogla zamjeniti vakuumске cijevi. Sama riječ predstavlja skraćenicu od engleske sintagme TRANSfer resISTOR (u prevodu promjenljivi otpor) [6]. Sam tranzistor kao uređaj reguliše protok struje ili napona i u kolu se ponaša kao prekidač ili vrata za elektroničke signale.

Osnovna podjela tranzistora je na dva tipa:

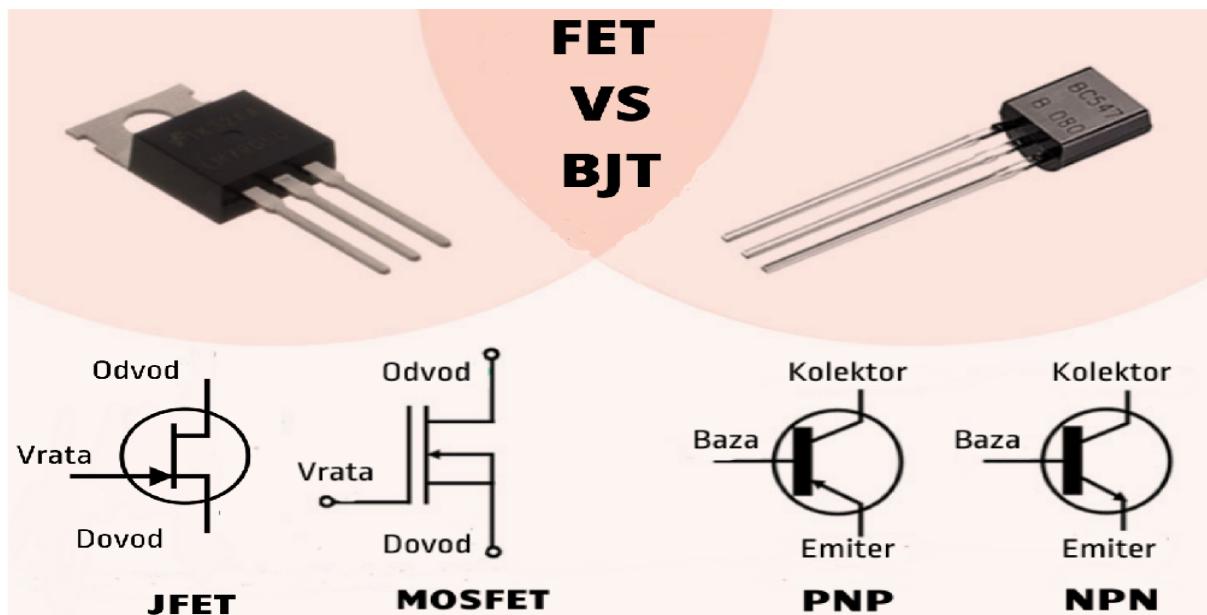
- bipolarni tranzistori (engl. *Bipolar Junction Transistor - BJT*), strujno upravljeni,
- tranzistori sa efektom polja (engl. *Field Effect Transistor - FET*), naponski upravljeni.

Bipolarni tranzistori se dalje dijele na dva tipa, u zavisnosti od tipa oblasti poluprovodnika od kojeg su izrađeni. Tako postoji *npn* tranzistor koji se gradi od dvije oblasti *n* i jedne oblasti *p* tipa, kao i *pnp* tranzistor za koji važi suprotno.

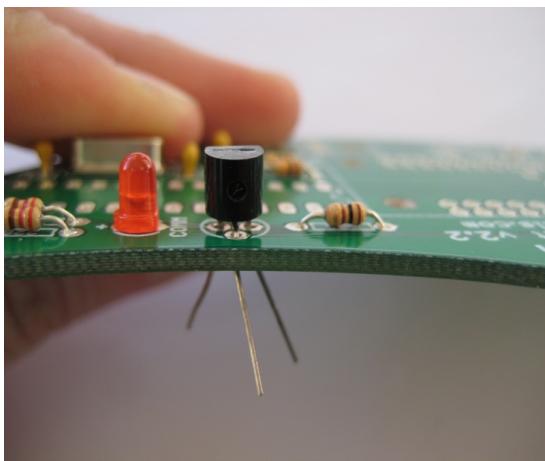
FET tranzistori se dijele prema načinu na koji se mijenja provodnost kanala, pa se tu mogu razlikovati spojni (JFET) i MOSFET tranzistori. Kod prvih se provodnost kanala mijenja promjenom poprečnog presjeka, dok se kod drugih mijenja koncentracija slobodnih nosilaca naelektrisanja [6]. Simboli za sve navedene tipove tranzistora zajedno sa izvodima te primjerom realne izvedbe prikazani su na slici 4.7.

Osnovne dvije izvedbe tranzistora su:

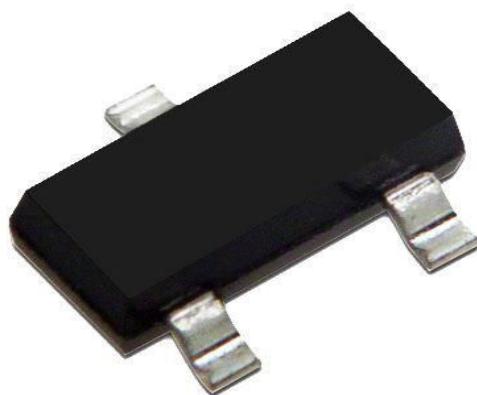
- *through-hole*, gdje su noge komponente umetnute kroz otvore štampane ploče i onda zalemljene na mjesto s druge strane ploče, što podrazumijeva da komponenta ima noge odnosno izvode. Ova izvedba bila je učestala u starijim dizajnima krugova, ali se danas može pronaći samo u aplikacijama snage. Sa njima su se studenti imali priliku sresti u dosadašnjem radu u laboratoriji. Primjer takvog tranzistora na pločici dat je na slici 4.8a.
- *surface-mount*, gdje je tranzistor zalemljen direktno na površinu štampane ploče. Na ovaj način je proizvodnja jeftinija. Češću primjenu ima na visokim frekvencijama i pri manjim snagama, mada se ovo komponente lakše odlome i manje su, pa je njihova identifikacija otežana [8]. Jednu izvedbu takvog tranzistora prikazana je na slici 4.8b.



Slika 4.7: Simboli i izgled FET i bipolarnih tranzistora[10]



(a) Through-hole na pločici [11]



(b) Surface-mount tranzistor [12]

Slika 4.8: Dvije izvedbe tranzistora

Tranzistori su danas neizostavni dio svih integrisanih krugova i najčešće se koriste u kompjuterskim memorijskim čipovima, za sve uređaje kao što su mikrofoni, kamere, telefoni. Koristi se još i kao prekidač, u oscilatornim krugovima te u krugu pojačala [7].

Kada su u pitanju prednosti tranzistora, treba istaći:

- mali su i finansijski vrlo isplativi,
- da bi funkcionalno potreban je nizak napon,
- dugotrajni su i brzi,
- lako se pale i gase.

U mane se može uvrstiti što[13]:

- se lako oštete uslijed visokog napona/velike struje,
- su temperaturno osjetljivi,
- su podložni uticaju radijacije,
- proizvodne tehnike su vrlo kompleksne.

Za obilježavanje tranzistora koriste se tri identifikacijska standarda : JEDEC, JIS i EECA.

JEDEC (engl. *Joint Electron Device Engineering Council* u slobodnom prevodu Udruženo vijeće inžinjerstva elektronskih uređaja) standard nastao je u Sjedinjenim Američkim Državama. Označavanje tranzistora po ovome standardu vrši se u formi **prefiks-broj**, gdje prefiks može biti jedna od vrijednosti 1N, 2N ili 3N (označavaju broj terminala uređaja koji može biti dva, tri ili četiri) te dvo-, tro- ili četverocifreni broj koji opisuje specifikacije uređaja.

JIS (engl. *Japanese Industrial Standard*, Japanski industrijski standard) označava tranzistore u formi **2SX<sub>B</sub>**, gdje je X slovo abecede koje može biti A,B,C,D,J ili K, u ovisnosti od vrste tranzistora (bipolarni ili unipolarni), te frekvencije na kojoj se koristi. Oznaka B predstavlja trocifreni ili četverocifreni broj koji zavisi od specifikacija tranzistora.

EECA (engl. *European Electronic Component Manufacturers Association*, Europska asocijacija proizvođača elektroničkih komponenti) koristi šablon označavanja u obliku **XYB**, gdje je

X slovo A, B ili C koje označava vrstu materijala od koje je komponenta napravljena (npr. A je za germanijum). Slovo Y može biti C, D, F, L, S ili U označava upotrebnu namjeru (npr. C je za tranzistore opšte namjere), dok B dio označava tri cifre koje opisuju strukturu komponente. Nekada se umjesto tri cifre koristi kombinacija slova i dvije cifre [9].

### 3.2 Relej

Relej je prekidač koji prekida i uspostavlja strujno kolo putem elektromagneta ili električnih signala iz vanjskih izvora. Postoje dva tipa kontakta releja: NO (normalno otvoreni engl. *normally open*) i NC (normalno zatvoreni engl. *normally closed*). Kod NO kontakata podrazumijeva se da su ti kontakti otvoreni kad je relej isključen (nije energetski pokrenut), a zatvoreni kad je relej uključen. Obrnuto važi za normalno zatvorene kontakte. Unutrašnjost elektromehaničkog releja prikazana je na slici 4.9a.

Normalno otvoreni kontakti mehaničkih releja obilježavaju se brojčanim oznakama 3 i 4 ili ukoliko ih ima više kombinacijom ovih brojki, dok se normalno zatvoreni kontakti obilježavaju brojčanim oznakama 1 i 2 ili kombinacijom [13]. Postoje podaci da je Nacionalna asocijacija proizvođača releja (engl. *The National Association of Relay Manufacturers*) definisala 23 različite forme električnih kontakata koji se mogu razlikovati u građi releja. Isti se obilježavaju uz pomoć kombinacije slova koje opisuju građu releja, pa tako postoji forma oznake **ABXY-PQ**, gdje:

- kombinacija slova AB može biti SP (engl. *Single Pole*) ili DP (engl. *Double Pole*) zavisno od broja krugova koji mogu kontrolisati;
- kombinacija slova XY također može biti ST (engl. *Single Throw*) ili DT (engl. *Double Throw*), ovisno od toga koliko pozicija može biti aktivirano;
- kombinacija slova PQ označava vrstu kontakta, te može biti NO ili NC [15].

Također postoje podaci o standardu DIN 72552, koji definiše numeričko označavanje releja, ali detalji u vezi toga neće biti objašnjeni u ovome radu. Slika 4.9a prikazuje unutrašnjost releja, dok na slici 4.9b možemo vidjeti izgled komponente releja, konkretno SPDT modela.

Releje možemo podijeliti po načinu napajanja (obični i polarizovani elektromagnetski releji), po funkciji (releji za opštu upotrebu, automobilski, telefonski, indukcioni, strujni itd.) te posebna kategorija releja, tzv. vremenski releji koje odlikuje unaprijed definisano kašnjenje prilikom uključivanja ili isključivanja kontakata [13].

Neke od prednosti releja su [13]:

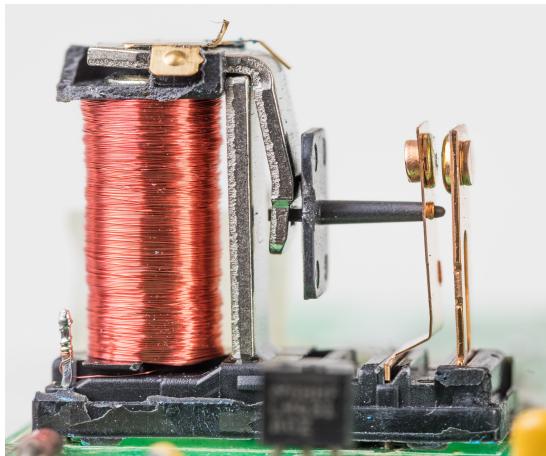
- sposobnost prilagođavanja različitim naponima,
- temperaturna nezavisnost (mogu raditi u rasponu temperature od -40°C do 80°C),
- jednostavni za održavanje,
- visok otpor između isključenih kontakata,
- mogu uključivati ili isključivati veći broj nezavisnih električnih kola.

Mane releja su [13]:

- zahtjevaju dosta prostora,

- ograničena im je brzina reagovanja (prosječno od 3ms do 17ms),
- osjetljivi su na uticaj prašine,
- javljaju se šumovi pri reagovanju.

Releji se koriste u kontrolnim postrojenjima, proizvodnji i automatizaciji. Koriste se za potrebe regulisanja kruga kroz pojedinačni signal minimalne snage i tamo gdje više krugova treba regulisati uz korištenje jednog signala. Također se mogu koristiti za povezivanje različitih uređaja i komponenti unutar mreže (npr. pri sinhronizaciji), za povezivanje transformatora na liniju mrežu, u automobilskoj industriji, za izolaciju naponskog kruga i signalizaciju preopterećenja ili kvarova, u kolima koja vrše osnovne operacije Booleove logike[14]. Danas su releji uveliko zamijenjeni elektroničkim uređajima koji su brži i lakši za korištenje.



(a) Unutrašnjost elektromehaničkog releja [15]



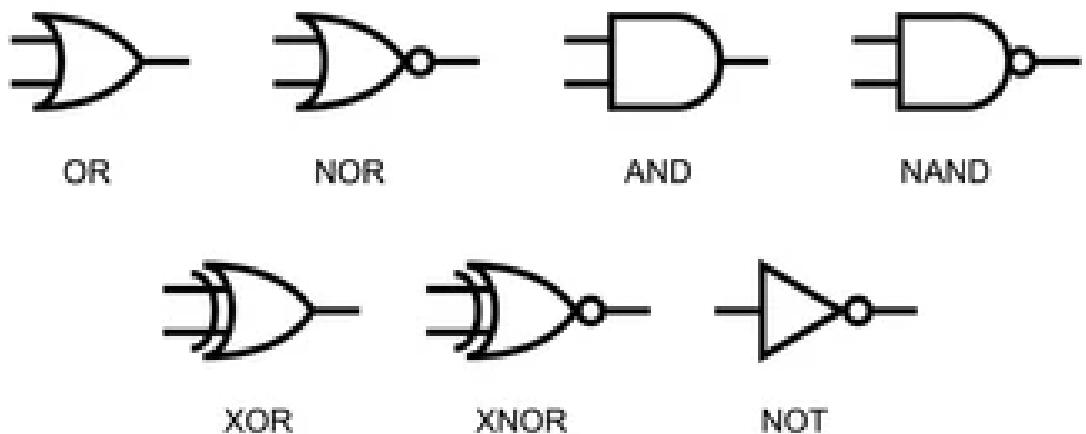
(b) SPDT relej [16]

Slika 4.9: Releji

### 3.3 Logički krugovi

Logički krugovi su bazne jedinice i blokovi koji grade digitalne sisteme. Koriste se za izvedbu logičkih operacija pri čemu se ponašaju kao prekidači. Sve logičke Booleove funkcije su implementirane upotrebom logičkih kola. Ona prihvataju određen broj ulaza i daju jedan izlaz, dobiven korištenjem tablice istinitosti koja prikazuje svaku moguću kombinaciju ulaza i odgovarajuće vrijednosti izlaza u tom slučaju.

Moguća su dva stanja : ON (za istinitu vrijednost, tzv. *true* koja se označava i kao '1') i OFF (za neistinitu vrijednost, tzv. *false*, označava se kao '0'). Postoji sedam vrsta logičkih kola a to su : AND, OR, NOT, NAND, NOR, XOR i XNOR kolo, s tim da su tri osnovna logička kola iz kojih je moguće implementirati sva ostala AND, OR i NOT kolo [17]. Simboli svih sedam logičkih kola, pomoću kojih ih razaznajemo, prikazani su na slici 4.10. Logička kola su implementirana korištenjem dioda ili tranzistora u prekidačkoj ulozi, ali također mogu biti konstruisana uz korištenje vakuumskih cijevi, elektromagnetsnih releja i sl.



Slika 4.10: Simboli logičkih kola [18]

Kao prednosti logičkih kola navode se:

- logičko '1' i '0' prepoznatljivo je i intuitivno što olakšava rad,
- logičke operacije se izvode uz pomoć Booleove algebre što pojednostavljuje dizajniranje kola i čini ga ekonomičnijim.

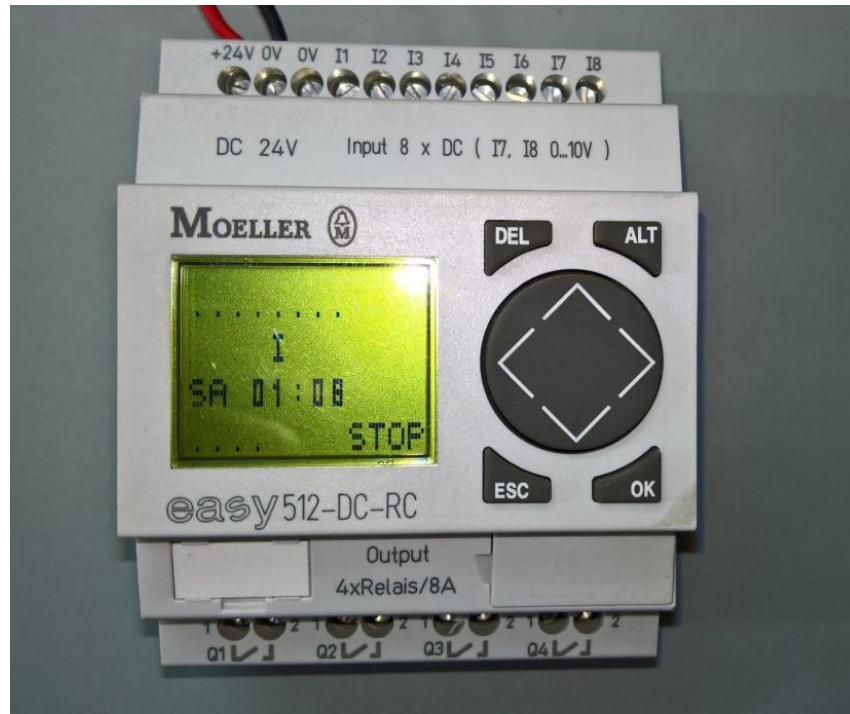
Mane logičkih kola su:

- radni napon je ograničen,
- između ulaza i izlaza javlja se kašnjenje.

Logička kola koriste se u procesnim krugovima, za implementaciju ulične rasvjete, protuprovalnih alarma, u TTL logici i CMOS krugovima, u prekidačima koji rade na pritisak dugmeta (kao što je npr. zvono). Osim toga, mogu se koristiti za pohranu podataka, te za omogućavanje rada funkcije prenosa podataka [17].

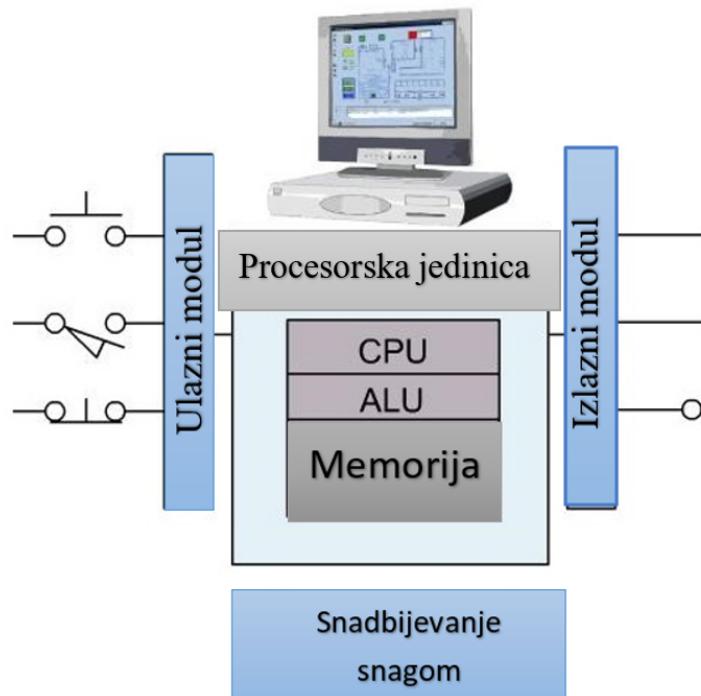
### 3.4 PLC

Programabilni logički kontroler (PLC) predstavlja industrijski kompjuterski upravljački sistem (slika 4.11) koji kontinualno prati stanje ulaznih uređaja i na osnovu njih uz pomoć prilagođenog programa donosi odluke koje kontrolišu stanje izlaznih uređaja. Gotovo svaka proizvodna linija ili proces mogu se uveliko poboljšati upotrebom ovakvog upravljačkog sistema. Međutim, najveća prednost u korištenju PLC-a je sposobnost promjene i replikacije operacije ili procesa tokom prikupljanja i prenošenja bitnih informacija. Još jedna velika prednost PLC sistema je što su modularni, odnosno moguće je kombinovati različite vrste ulaznih i izlaznih uređaja kako bi najbolje zadovoljili potrebe odgovarajuće aplikacije [21].



Slika 4.11: PLC MOELLER Easy 512-DC-RC

Postoje različite izvedbe PLC-a u zavisnosti od toga da li sadrže relej ili tranzistore, kao i od toga da li su na bazi AC ili DC izvora napajanja. Za izradu ove vježbe bitan je model Moeller easy 512-DC-RC, koji za svoj rad zahtijeva 24 V i sadrži reljni izlaz. Tipična hardverska struktura PLC uređaja prikazana je na slici 4.12 i sastoji se od centralne procesorske jedinice (CPU), ulaznih i izlaznih dijelova, memorije, dijela za napajanje i dijela za komunikaciju [22].



Slika 4.12: PLC uređaj sa svojim hardverskim dijelovima

Uloga CPU je da stalno provjerava PLC kontroler kako bi se izbjegle pogreške. Oni obavljaju funkcije uključujući logičke operacije, aritmetičke operacije i mnoge druge. Kada je riječ o memoriji, poznato je da CPU koristi fiksne podatke. Sistem (ROM) trajno pohranjuje podatke za operativni sistem. RAM pohranjuje informacije o statusu ulaznih i izlaznih uređaja, te vrijednosti mjerača vremena, brojača i ostalih internih uređaja. Dalje postoje i I/O dijelovi. Ulaz održava praćenje na terenskim uređajima koji uključuju senzore, prekidače. Tu su i O/P dijelovi, gdje izlaz ima kontrolu nad ostalim uređajima koji uključuju motore, pumpe, svjetla i solenoide. Većina PLC-ova radi na 220VAC ili 24VDC. Za unos programa u memoriju procesora koristi se uređaj za programiranje. Osnova rada PLC uređaja obuhvata kontinualno skeniranje i obradu podataka koji se odvijaju kružno u beskonačnoj petlji. Na osnovu promjene ulaza, PLC uređaj koriguje stanje izlaza na način koji je definisan u korisničnom programu [23].

Ciklus rada PLC uređaja može se podijeliti u četiri faze [24]:

- obrada stanja ulaza,
- obrada programa,
- prenos obrađenog programa na izlaze,
- procesorsko organizacijsko vrijeme i komunikacija.

Prednosti PLC sistema [25]:

- mala fizička veličina,
- isplativo za kontrolu složenog sistema,
- pouzdanost,
- jednostavno označenje,
- veća fleksibilnost,
- mogućnost daljinskog upravljanja,
- jednostavnost održavanja.

Nedostaci PLC-a [25]:

- proizvođači PLC-a nude samo arhitekturu zatvorene petlje,
- softver i dijelovi jednog proizvođača ne mogu se lako koristiti u kombinaciji s dijelom drugog proizvođača,
- mora se dodati broj izbornih modula kako bi se povećala fleksibilnost i performanse,
- nisu isplativi za sisteme koji se mogu realizovati malim brojem releja,
- u poređenju sa relejnim sistemima PLC sistemi su dosta osjetljiviji na visoke temperature, vibracije i električne smetnje.

## 4. Zadatak 4

Statičkim objektom nazivamo onaj objekt koji ima osobinu da za ograničen ulaz uvijek nakon nekog vremena se uvijek uspostavlja stacionarno stanje, te da su prelazni procesi stabilni (za neograničeni ulaz poput jedinične nagibne funkcije ni statički blokovi ne dolaze u stacionarno stanje). [19]

Prenosna funkcija statičkog sistema prvog reda je:

$$G(s) = \frac{k_{ob}}{T_{ob}s + 1} \quad (4.15)$$

Laplace transformacija step funkcije amplitude  $B$ , odnosno  $x(t) = B \cdot 1(t)$  je:

$$G_1(s) = \frac{B}{s} \quad (4.16)$$

Tada je na osnovu relacija 4.15 i 4.16 odziv statičkog bloka prvog reda na datu odskočnu funkciju je:

$$Y(s) = G(s) \cdot G_1(s) = \frac{k_{ob}B}{(T_{ob}s + 1)s} \quad (4.17)$$

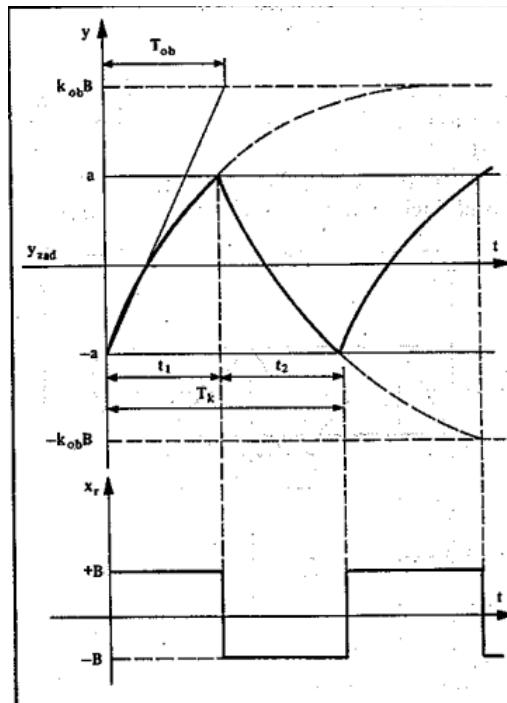
Primjenom inverzne Laplace transformacije dobija se:

$$y(t) = k_{ob}B(1 - e^{-\frac{t}{T_{ob}}}) \quad (4.18)$$

Na slici 4.13 prikazano je kvazistacionarno stanje regulirane veličine  $y$  i vremenski dijagram regulirajuće veličine  $x_r$  - simetrična četvrtka za koju vrijedi da su amplitude u pozitivnoj i negativnoj poluperiodi po amplitudi jednake. Zadana vrijednost regulirane veličine  $y_{zad}$  se nalazi u sredini raspona  $+k_{ob}B$  i  $-k_{ob}B$ .

Moguće je dalje zaključiti da histereza  $a$  definira amplitudu kvazioscilitornog stanja regulirane veličine:

$$\Delta y = 2a \quad (4.19)$$



Slika 4.13: Dijagrami promjene  $y$  i  $x_r$  za slučaj kada je statička karakteristika regulatora simetrična [20]

U trenutku  $t_1$  vrijedi da je  $y(t_1) = a$  za  $y(0) = -a$ . Na osnovu 4.18 slijedi:

$$y(t) = k_{ob}B - (k_{ob}B + a)e^{-\frac{t}{T_{ob}}} \quad (4.20)$$

$$y(t_1) = k_{ob}B - (k_{ob}B + a)e^{-\frac{t_1}{T_{ob}}} = a \quad (4.21)$$

Tada je na osnovu relacije 4.21 moguće odrediti  $t_1$ :

$$t_1 = T_{ob} \cdot \ln \frac{k_{ob}B + a}{k_{ob}B - a} \quad (4.22)$$

Slično se u trenutku  $t_2$  je  $y(t_2) = -a$  uz  $y(0) = a$  slijedi:

$$y(t) = -k_{ob}B + (k_{ob}B + a)e^{-\frac{t}{T_{ob}}} \quad (4.23)$$

$$y(t_2) = -k_{ob}B + (k_{ob}B + a)e^{-\frac{t_2}{T_{ob}}} = -a \quad (4.24)$$

Slijedi da se dobija:

$$t_2 = T_{ob} \cdot \ln \frac{k_{ob}B + a}{k_{ob}B - a} \quad (4.25)$$

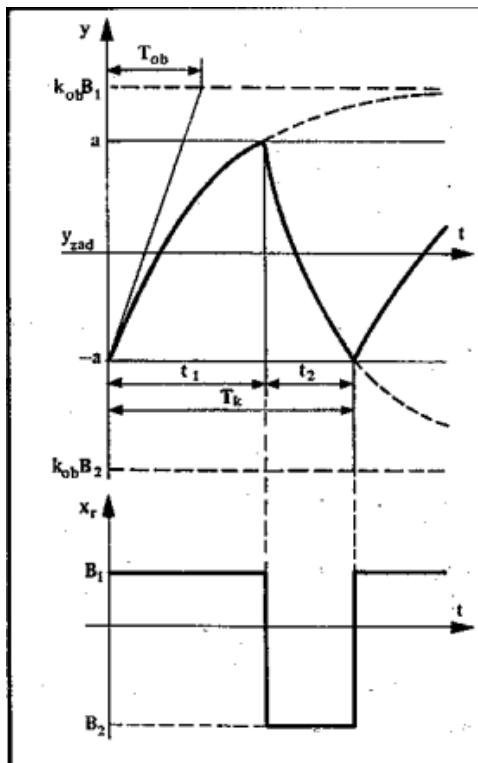
Tada na osnovu relacija 4.22 i 4.25 slijedi da:

$$T_k = 2t_1 \quad (4.26)$$

Slijedi da je frekvencija preključivanja:

$$n = \frac{2}{T_k} \quad (4.27)$$

Na slici 4.14 prikazano je kvazistacionarno stanje regulirane veličine  $y$  i vremenski dijagram regulirajuće veličine  $x_r$  - nesimetrična četvrтka za koju vrijedi da je amplituda u pozitivnoj poluperiodi  $B_1$  i u negativnoj poluperiodi  $B_2$ .



Slika 4.14: Dijagrami promjene  $y$  i  $x_r$  za slučaj kada je statička karakteristika regulatora nesimetrična[20]

Slično je za interval  $t_1$  vrijedi da  $y(t_1) = a$  uz  $y(0) = -a$  na osnovu 4.18 slijedi:

$$y(t) = k_{ob}B_1 - (k_{ob}B_1 + a)e^{-\frac{t}{T_{ob}}} \quad (4.28)$$

$$y(t_1) = k_{ob}B_1 - (k_{ob}B_1 + a)e^{-\frac{t_1}{T_{ob}}} = a \quad (4.29)$$

Tada je na osnovu relacije 4.21 moguće odrediti  $t_1$ :

$$t_1 = T_{ob} \cdot \ln \frac{k_{ob}B_1 + a}{k_{ob}B_1 - a} \quad (4.30)$$

Slično se u trenutku  $t_2$  je  $y(t_2) = -a$  uz  $y(0) = a$  slijedi:

$$y(t) = -k_{ob}B_2 + (k_{ob}B_2 + a)e^{-\frac{t}{T_{ob}}} \quad (4.31)$$

$$y(t_2) = -k_{ob}B_2 + (k_{ob}B_2 + a)e^{-\frac{t_2}{T_{ob}}} = -a \quad (4.32)$$

Slijedi da se dobija:

$$t_2 = T_{ob} \cdot \ln \frac{k_{ob}B_2 + a}{k_{ob}B_2 - a} \quad (4.33)$$

Tada na osnovu relacija 4.30 i 4.33 slijedi da:

$$T_k = t_1 + t_2 = T_{ob} \ln \frac{(k_{ob}B_1 + a)(k_{ob}B_2 + a)}{(k_{ob}B_1 - a)(k_{ob}B_2 - a)} \quad (4.34)$$

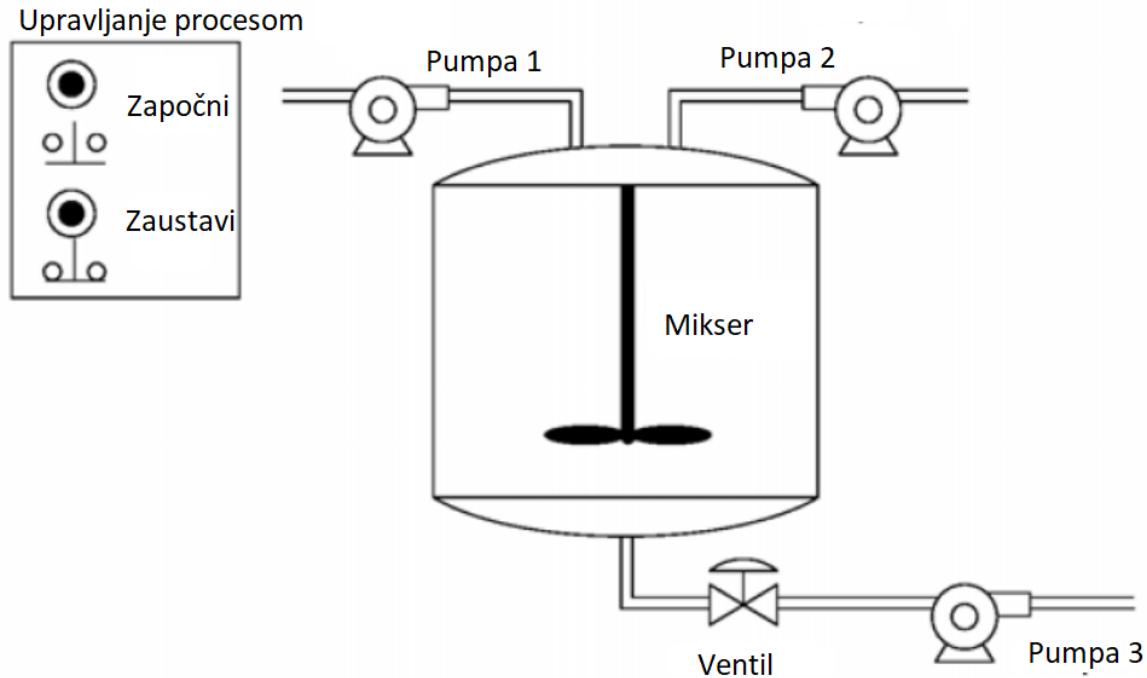
Slijedi da je frekvencija preključivanja:

$$n = \frac{2}{T_k} \quad (4.35)$$

Slijedi da bi smanjenje histereze dovelo do smanjenja amplitude oscilacija, što je poželjno sa gledišta tačnosti regulacije. Međutim isto dovodi ka smanjenju perioda oscilacija i time ka povećanju broja priključivanja regulatora, što je nepoželjno. Broj priključivanja je moguće smanjiti smanjenjem nivoa energije koji regulator komutira, pri tome je ograničeno činjenicom da energija primjenjena na objekt mora biti dovoljna da može kompenzirati i najveće smetnje koje se pojavljuju na objektu. S druge strane veoma male energije sužavaju i mogući dijapazon zadanih vrijednosti. Mora se uspostaviti kompromis između životnog vijeka izvršnog organa i tačnosti regulacije. Nasuprot tome povećanje vremenske konstante također povećava period oscilacija i smanjuje broj priključivanja, ali rijetko predstavlja stepen slobode za projektanta sistema automatskog upravljanja [20].

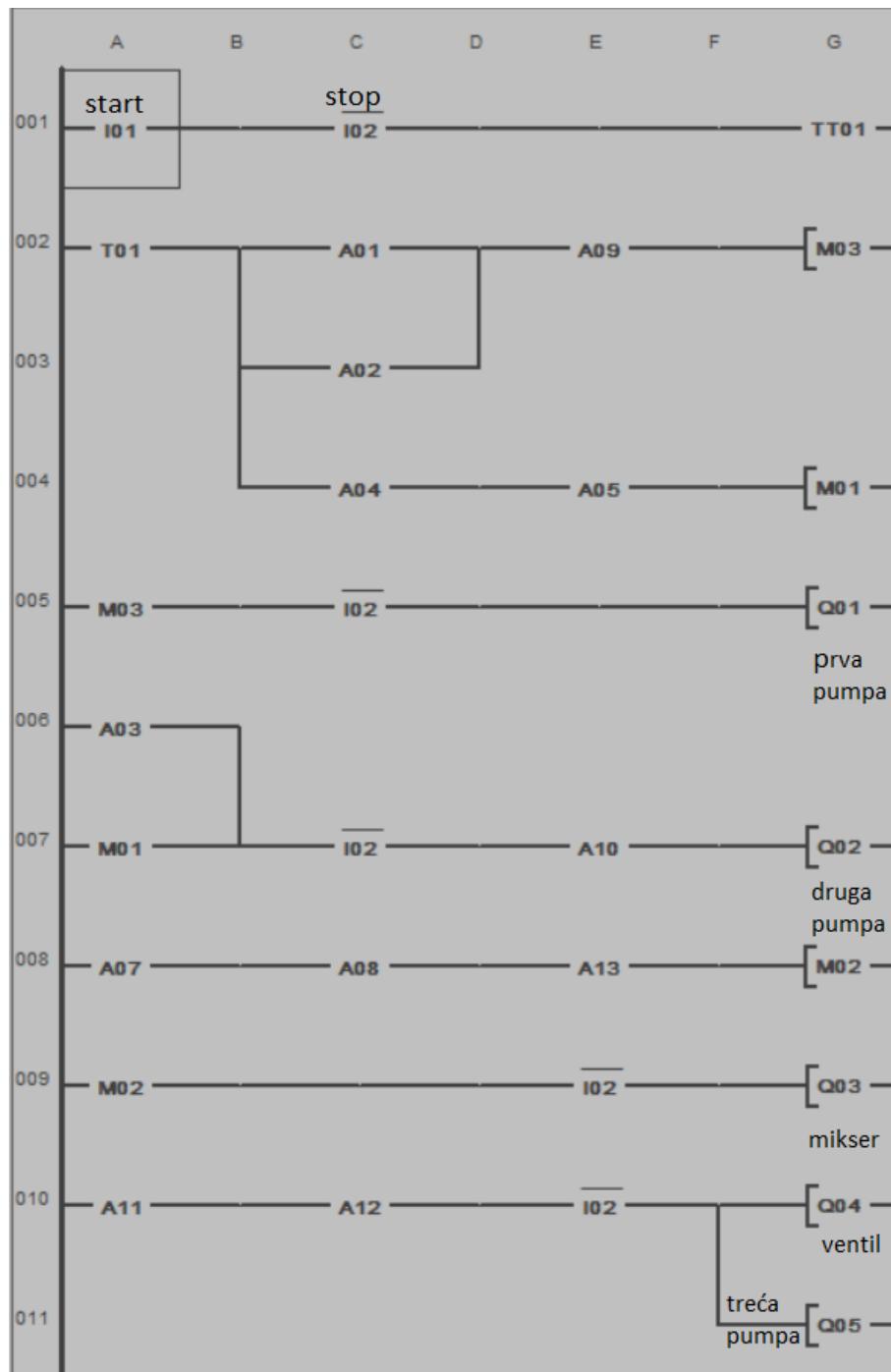
## 5. Zadatak 5

Potrebno je napisati program za PLC koji realizuje proces prikazan na slici 4.15.



Slika 4.15: Prikaz hemijskog postrojenja

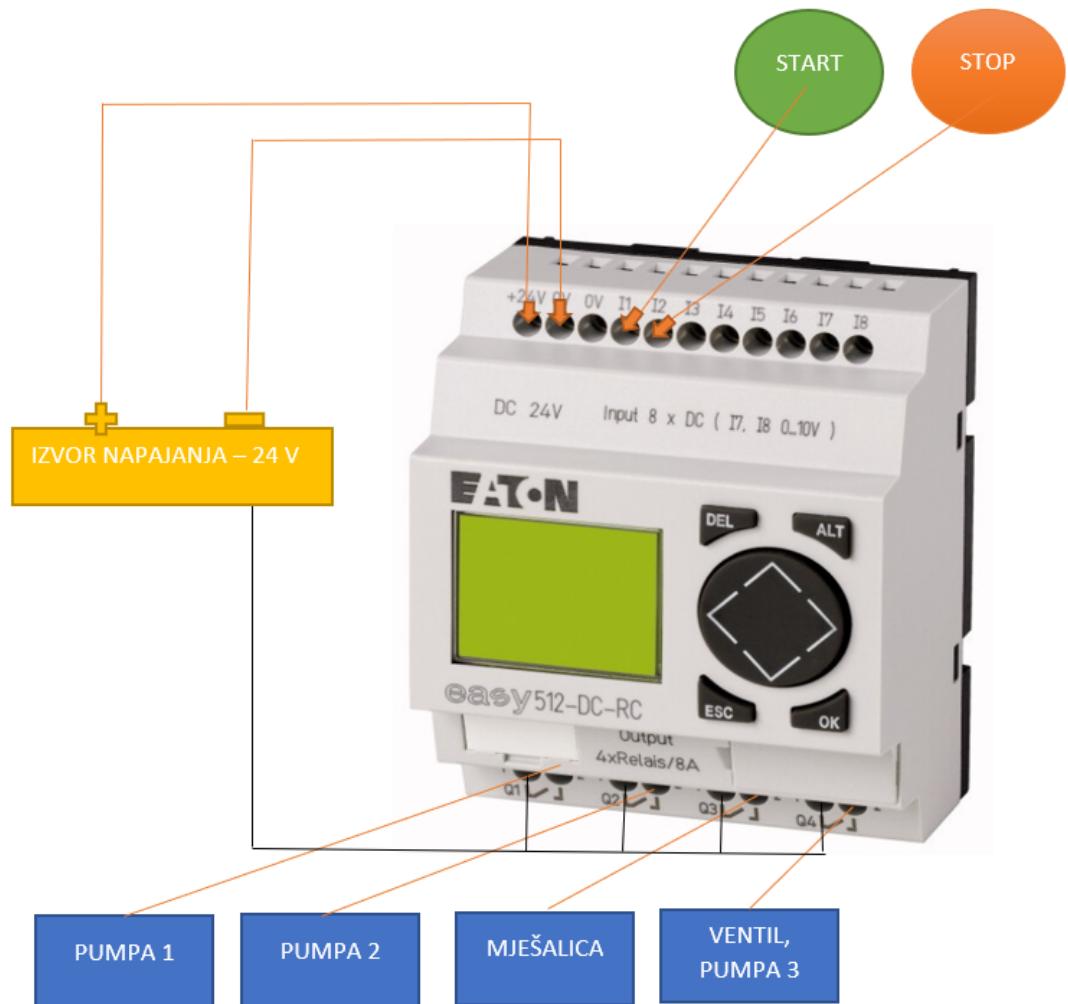
Postoje razni načini programiranja PLC uređaja. Najčešće se to izvodi uz pomoć ljestvičastih dijagrama (eng. ladder diagrams). Zastupljeno je i programiranje na nivou asemblera putem instrukcijske liste (eng. statement list), zatim funkcionalno blokovski dijagrami (eng. function block diagram). Također u upotrebi su i programski jezici kao što su: Pascal, C i BASIC. [24] U ovoj simulaciji korišten je ljestvičasti dijagram (slika 4.16). S lijeve strane se posmatra kao da je doveden '+' napon napajanja, dok s lijeve '-' , gdje je napravljena jasna analogija sa kolima. Lokiga je razvijena tako da 'AND' uslov predstavlja serijske veze na shemi, dok 'OR' uslovi bivaju predstavljeni paralelnim vezama. Postojao je i zahtijev o samoodržanju motora, kao i mogućnosti zaustavljanja sistema. Na tom principu su izvedeni svi motori u postrojenjima. Bitno je naglasiti da se ne radi o prekidačima, već o tasterima i da se pomoću njih motor zakreće/zaustavlja.



Slika 4.16: Prikaz sheme spojene u programu easySOFT

Za realizaciju korištena su dva digitalna ulaza, pet digitalnih izlaza, dvanaest analognih komparatora, jedan timing relay, te tri markera. Za dugme 'start' je odabran prvi digitalni ulaz, dok za 'stop' drugi. Digitalni izlazi su odabrani respektivno za prvu i drugu pumpu, mikser, te ventil i treću pumpu. Neizostavna komponente u simulaciji je i 'Timing relay', koji je korišten za praćenje vremena trajanja određenih procesa. Pomoću analognih komparatora razvijena je logika uz pomoć koje je omogućeno kontrolisanje sistema u željenom pravcu. Potreba za markerima se javila zbog ograničenosti samog programa. U jednoj liniji koda postoji maksimalan broj komponenti koji se može koristiti, te je u tom slučaju potrebno koristiti ovu komponentu. Oni predstavljaju memoriske lokacije u PLC-u i ukupno ih je 16 na raspolaganju. Čitav sistem je moguće zaustaviti u bilo kojem trenutku pritiskom na dugme "Stop", jer se pojavljuje kao

negirani ulaz. To bi značilo da kada je ovaj ulaz ožičen imamo logičku nulu. Moguće je vidjeti prikaz fizičke izvedbe ovog spajanja na slici ispod.



Slika 4.17: Prikaz ožičenja sistema

# Poglavlje 5



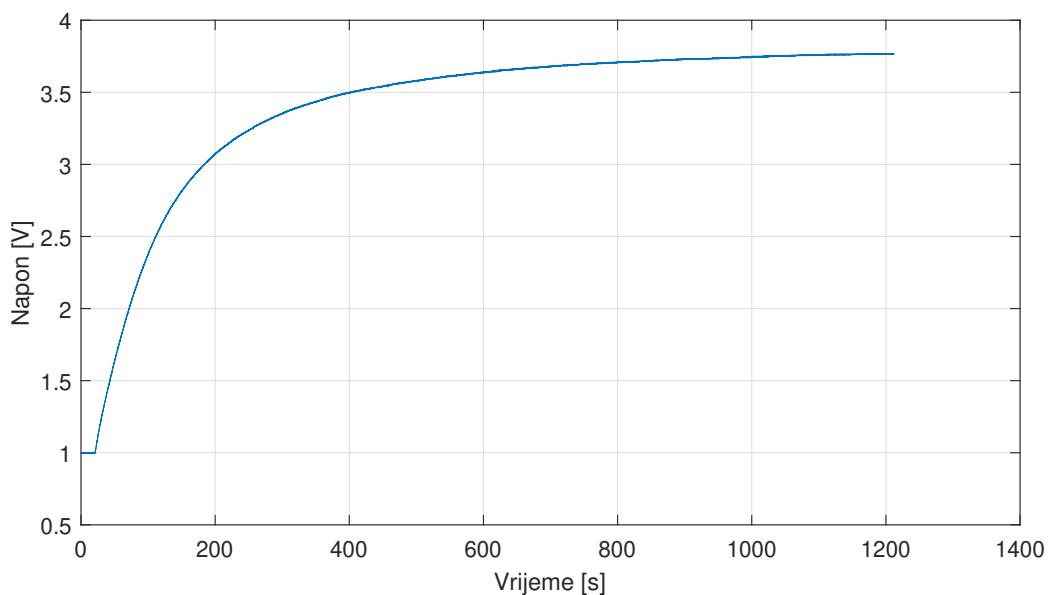
## Realizacija vježbe

---

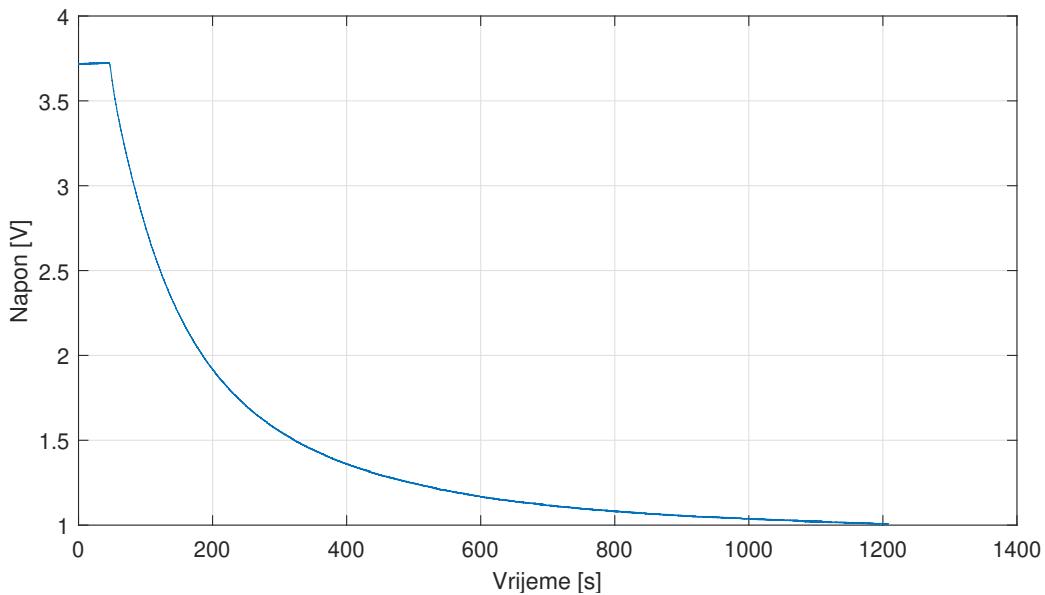
Da bi se sistemom moglo uspješno upravljati, u ovom slučaju konkretno vršiti regulaciju u određenom temperaturnom rasponu, osobine sistema moraju biti poznate. Stoga će na prvom terminu laboratorijske vježbe biti potrebno snimiti odziv sistema u dva slučaja, zagrijavanje i hlađenje. Za ove potrebe spojena je shema kao na slici 4.6, te je iskorišten vrlo jednostavan simulacioni model koji se sastoji iz samo tri bloka:

- blok za analogni ulaz (engl. *Analog input*), korišten za očitavanje napona na koji je povezana MCC akvizicijska kartica (koja zapravo mjeri napon na otporniku R);
- blok za slanje podataka u MATLAB prostor za rad (engl. *To workspace*), kako bi kasnije mogli biti obrađeni;
- grafički prikaz snimljenog odziva (engl. *Scope*), da bi se u realnom vremenu moglo posmatrati ponašanje odziva.

Snimljeni odzivi termičkog sistema sa grijачem u slučaju zagrijavanja prikazuje slika 5.1, dok je odziv u slučaju hlađenja prikazan na slici 5.2.



Slika 5.1: Odziv sistema prilikom zagrijavanja



Slika 5.2: Odziv sistema prilikom hlađenja

Pored snimanja odziva sistema bilo je potrebno snimiti i statičku karakteristiku senzora temperature NTC termistora jer je isti indikator temperature u našem sistemu. Snimanje je urađeno zagrijavanjem senzora u grijalici i praćenjem vrijednosti otpora pri temperaturama od  $25^{\circ}\text{C}$  do  $80^{\circ}\text{C}$ . Osim zagrijavanja, otpor je snimljen i za slučaj hlađenja NTC termistora da bi se provjerala histereza senzora.

Daljnji koraci obrade mjernih rezultata podrazumijevati će odabir načina aproksimacije karakteristike NTC senzora i proračun konstanti koje opisuju korišteni termički sistem.

# Poglavlje 6



## Korišteni algoritam/alat

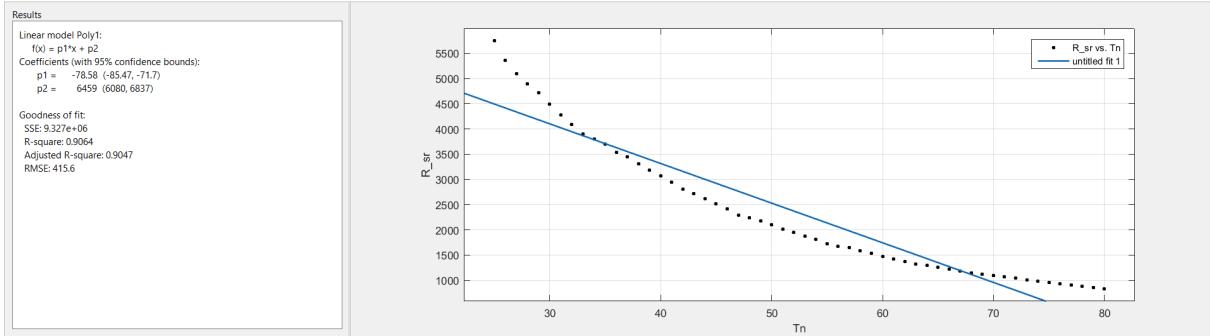
U termičkom sistemu u kojem se vrši regulacija kao temperaturni senzor korišten je NTC termistor. Da bi očitanja temperature mogla biti vjerodostojna, potrebno je snimiti karakteristiku senzora i izvršiti odgovarajuću aproksimaciju njegove radne krive. Kalibracija senzora vršena je uz pomoć grijalice, multimetra kojim je očitavan otpor i senzora za mjerjenje temperature koji se koristi kao referentni (ispravan je i daje tačnu vrijednost temperature). Bilježena je otpornost NTC termistora u opsegu od 25 °C do 80 °C uz korak od po 1 °C. Vrijednost otpora mjerena je i uzlazno i silazno. Sve očitane vrijednosti prikazane su u tabeli 6.1.

Tabela 6.1: Rezultati mjerjenja statičke karakteristike NTC termistora

T (°C)	Ruzl [kΩ]	Rsil [kΩ]	T (°C)	Ruzl [kΩ]	Rsil [kΩ]
25	5.75	5.75	53	1.7	2.045
26	5.37	5.34	54	1.633	1.995
27	5.01	5.18	55	1.56	1.89
28	4.8	4.98	56	1.5	1.845
29	4.58	4.87	57	1.52	1.78
30	4.24	4.74	58	1.46	1.722
31	4.1	4.45	59	1.402	1.659
32	3.95	4.22	60	1.35	1.597
33	3.77	4.04	61	1.29	1.55
34	3.62	3.97	62	1.27	1.485
35	3.54	3.87	63	1.2	1.443
36	3.33	3.732	64	1.2	1.388
37	3.25	3.654	65	1.161	1.365
38	3.06	3.556	66	1.132	1.32
39	2.93	3.439	67	1.1	1.272
40	2.87	3.27	68	1.064	1.238
41	2.7	3.179	69	1.035	1.203
42	2.57	3.036	70	1.028	1.175
43	2.5	2.928	71	1.003	1.138
44	2.4	2.834	72	0.983	1.1
45	2.32	2.704	73	0.952	1.063
46	2.22	2.623	74	0.933	1.033
47	2.157	2.435	75	0.903	1
48	2.1	2.39	76	0.888	0.98
49	2	2.349	77	0.866	0.948
50	1.93	2.286	78	0.837	0.92
51	1.84	2.18	79	0.818	0.897
52	1.77	2.125	80	0.798	0.866

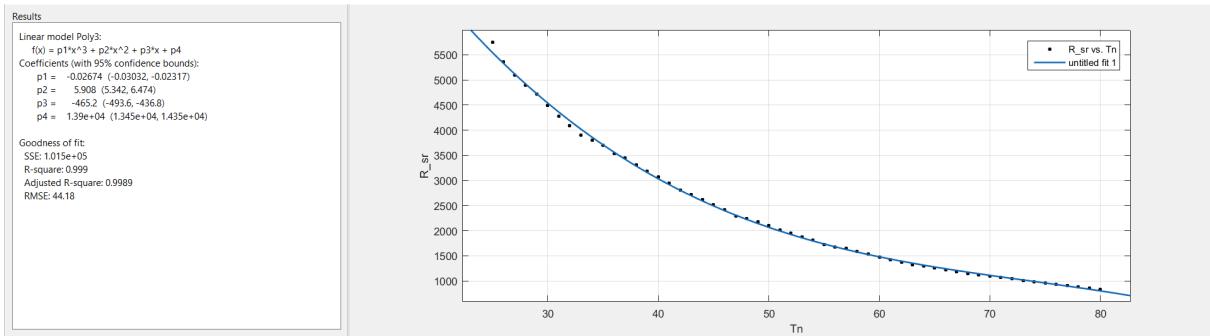
Nadalje je uz pomoć programskog paketa MATLAB pronađena srednja vrijednost otpora za svaku od temperaturu i sve daljnje obrade su vršene sa tim podacima. Da bi se pronašla naj-

bolja kriva koja opisuje karakteristiku senzora poslužio je alat Curve Fitting Tool programskog paketa MATLAB. Idealno bi bilo kada bi karakteristika bila linearna, tj. osjetljivost senzora ista na čitavom mjernom opsegu. Kao što se može vidjeti na slici ispod (slika 6.1), to nije slučaj. Parametar SSE (suma kvadratnih grešaka) ima vrijednost mnogo veću od 1, što nije dobar pokazatelj [27].



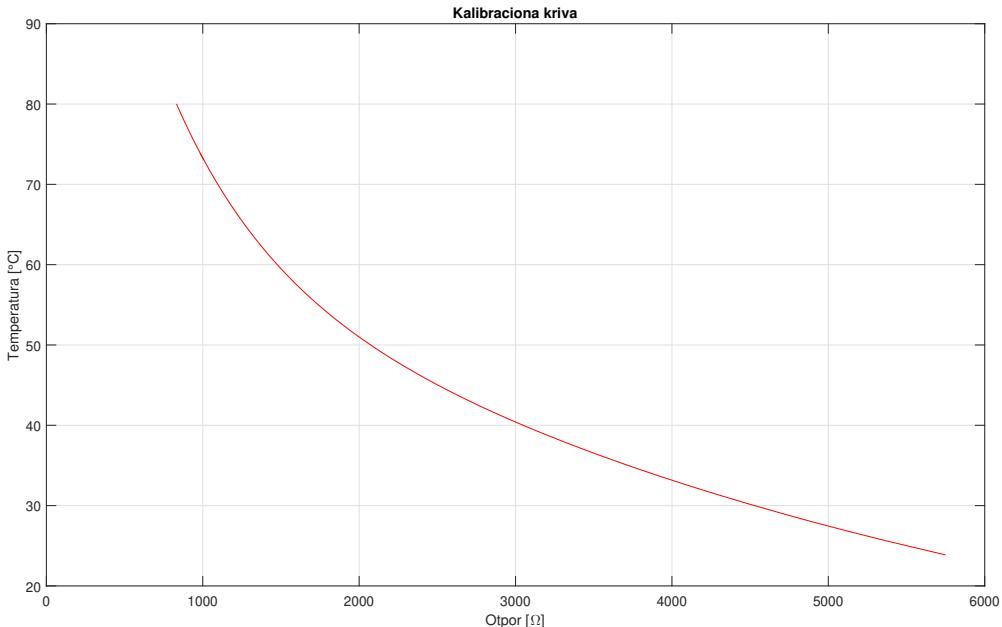
Slika 6.1: Aproksimacija senzora polinomom prvog reda

Za aproksimaciju senzora polinomom trećeg reda, zadovoljavajući su parametri kada je riječ o kalibracionoj krivoj (slika 6.2), ali ne i o radnoj krivoj.

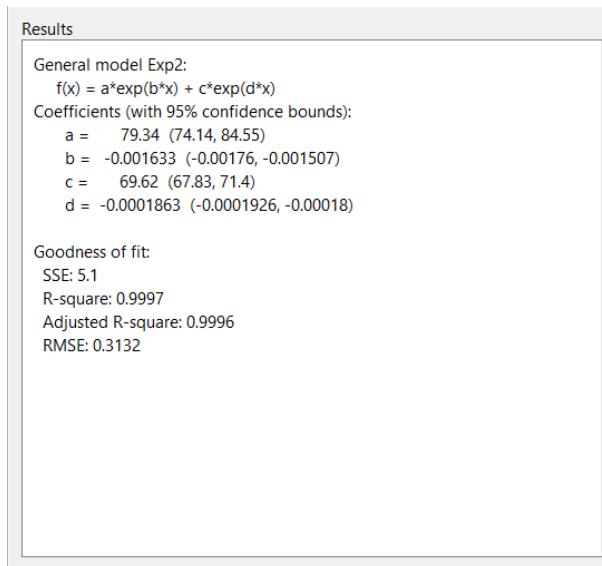


Slika 6.2: Aproksimacija senzora polinomom trećeg reda

Budući da nije postavljen strog zahtjev da karakteristika senzora bude linearizirana po dijelovima, odabran je eksponencijalni oblik (slika 6.3). Parametri bitni za detekciju kvalitete aproksimacije (SSE i RRE) imaju zadovoljavajuće iznose (slika 6.4).



Slika 6.3: Aproksimacija senzora eksponencijalnom funkcijom drugog reda



Slika 6.4: Parametri za aproksimaciju karakteristike eksponencijalnom funkcijom drugog reda

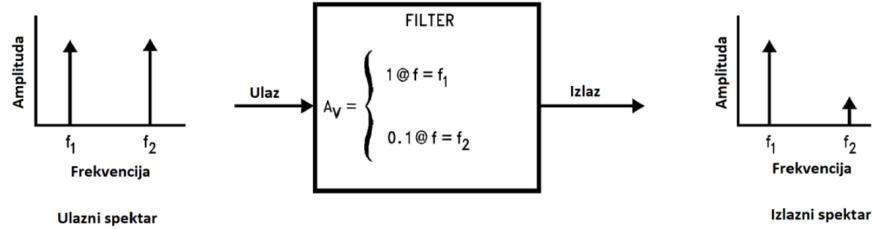
Jednačina koja opisuje zavisnost temperature od vrijednosti otpora sada glasi:

$$T = 79.34 \cdot e^{-0.001633 \cdot R} + 69.62 \cdot e^{-0.0001863 \cdot R} \quad (6.1)$$

Nakon kvalitetne kalibracije senzora, potrebno je obraditi podatke dobivene na laboratorijskoj vježbi. Kako je zadani vremenski korak bio relativno mali i zato što uslovi u laboratoriji nisu idealni (šum je uvijek prisutan), kao izlaz je dobiven veliki broj podataka, od kojih svi nisu od interesa (slike 5.1, 5.2). Treba razmotriti najbolji način da se ovi podaci usrednje. U nastavku će se kratko razmotriti uloga filtra.

Filter je sistem odnosno sklop koji signal doveden na ulazne stezaljke obrađuje tako da određene frekvencije dovedenog signala pojačava ili prigušuje, te tako obrađeni odnosno filtriran signal

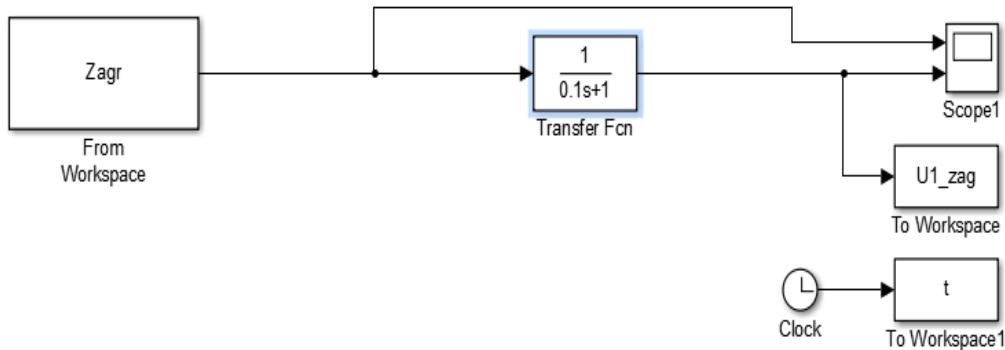
emitiše na izlaznim stezalkama. Filter je pojačalo čije pojačanje ovisi o frekvenciji [26]. Ako se govori o električnim filtrima onda se pod pojmom signala misli na struju ili napon. Slika 6.5 slikovito prikazuje ulogu filtra.



Slika 6.5: Princip rada niskopropusnog filtra

Filter može poslužiti za obradu signala, te se zbog toga može simulirati uz pomoć Simulink bloka 'Transfer function' [26]. Tom bloku zadaje se prenosna funkcija jednaka onoj koju ima i filter kojeg simuliramo. U ovom slučaju to je aperiodski blok prvog reda koji ima oblik prenosne funkcije dat relacijom 6.2. Na slici 6.6 prikazana je blok shema u Simulinku, gdje se može vidjeti niskopropusni filter, na koji se dovode podaci dobiveni u laboratoriji. Tu su i blokovi 'Scope' i 'To Workspace', kako bi dalje mogli pohraniti podatke te ih prikazati u realnom vremenu.

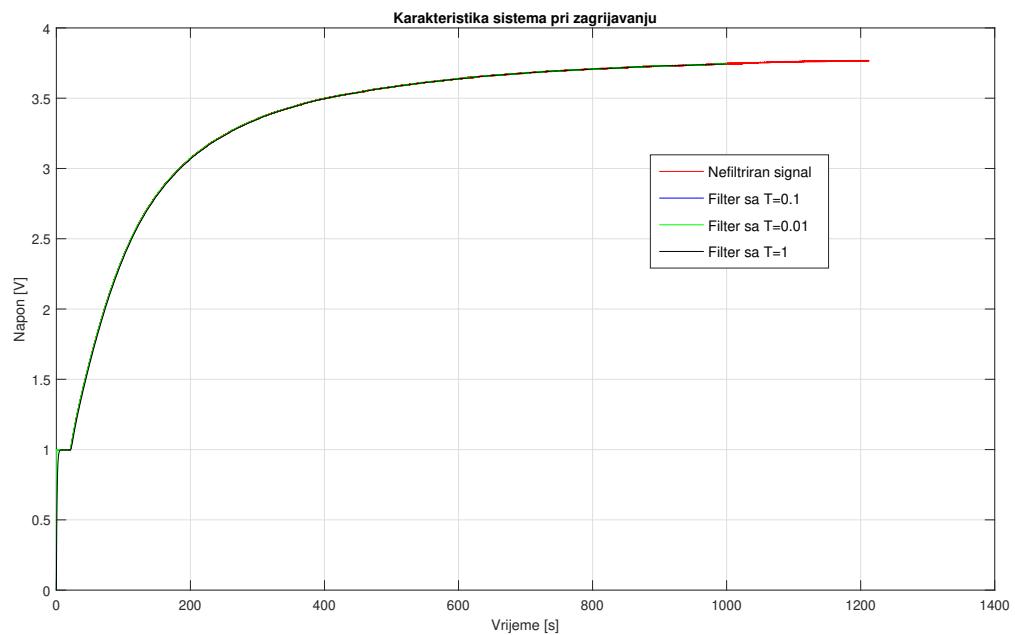
$$G(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (6.2)$$



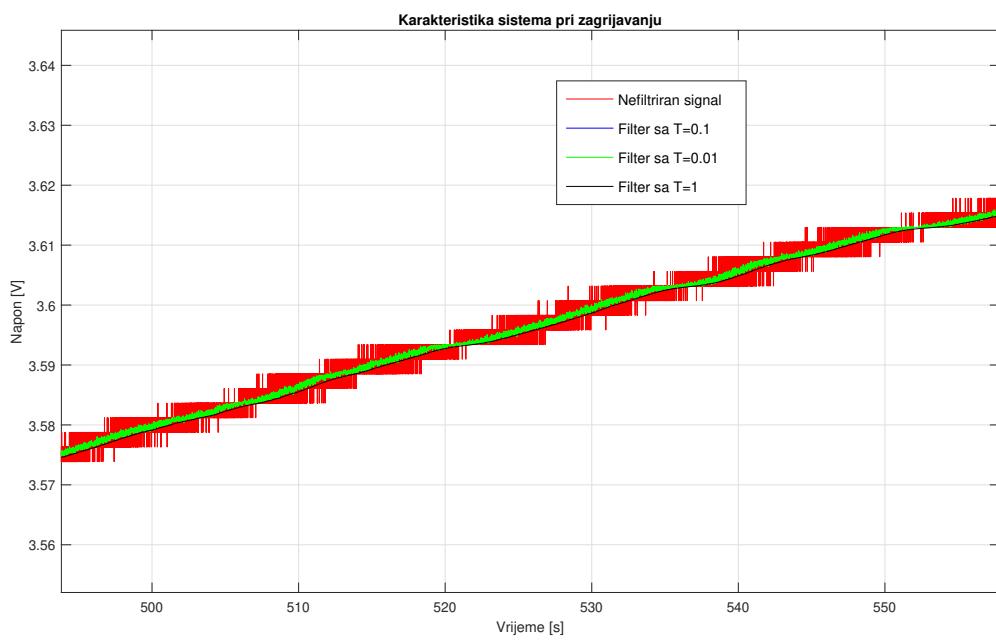
Slika 6.6: Blok shema Simulink modela

Da bi se moglo odrediti koji filter odgovara najbolje datom sistemu, potrebno je izvršiti detaljan proračun ili mijenjati parametar T, te na osnovu grafika doći do zaključka. Odabrana je druga

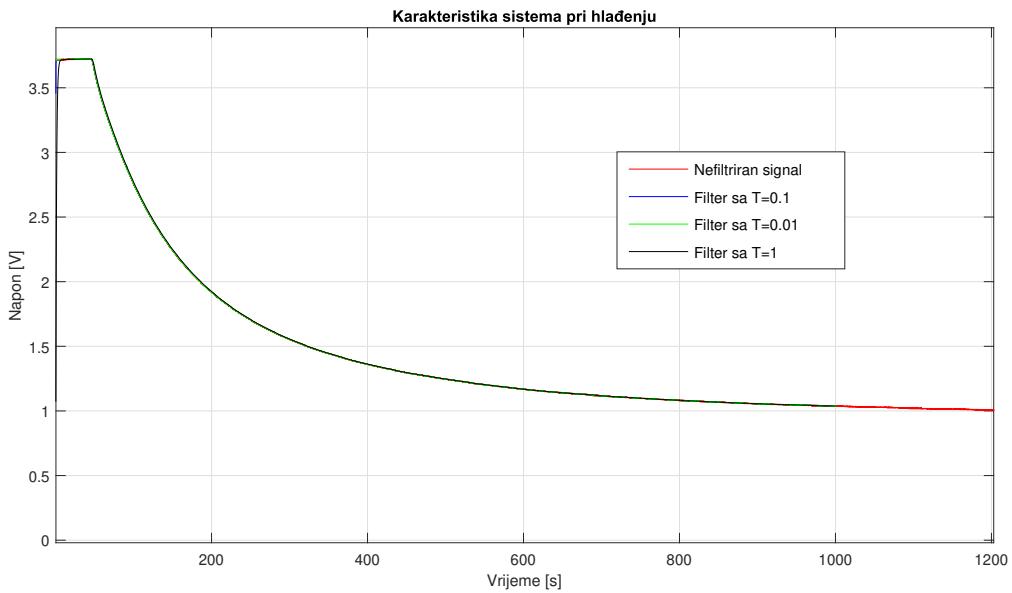
metoda. Razmatrane su tri različite vrijednosti za ovaj parametar ( $1$ ,  $0.1$  i  $0.01$ ) i dobiveni sljedeći grafici (slike 6.7, 6.8, 6.9, 6.10):



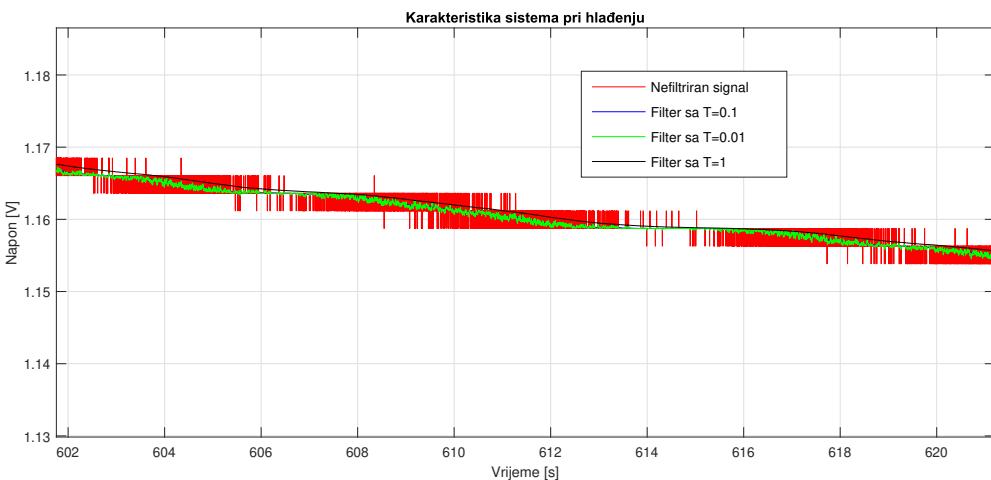
Slika 6.7: Signali pri zagrijavanju sistema



Slika 6.8: Različiti izlazi u zavisnosti od odabira parametra  $T$



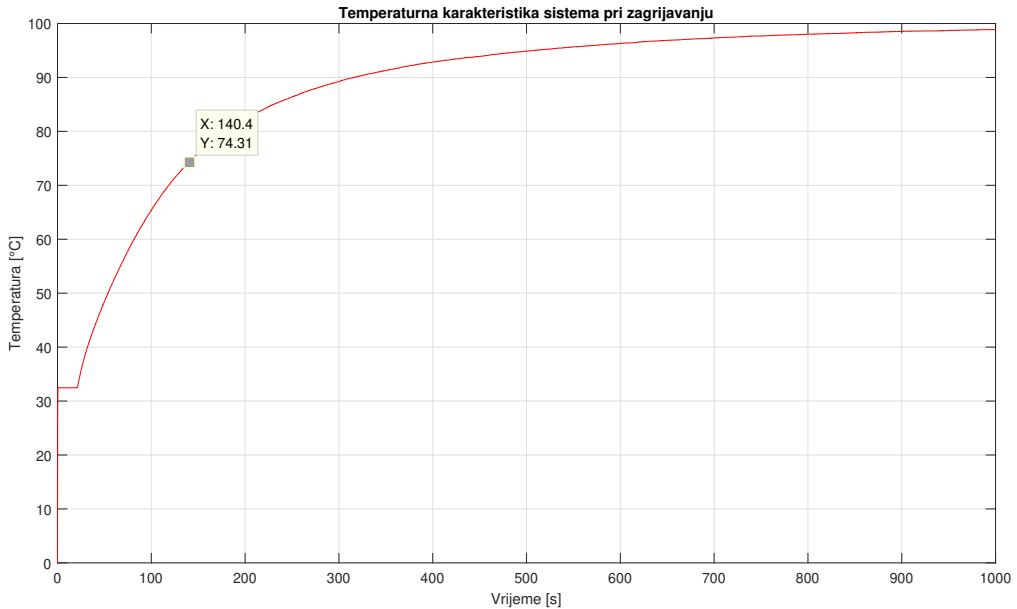
Slika 6.9: Signali pri hlađenju sistema



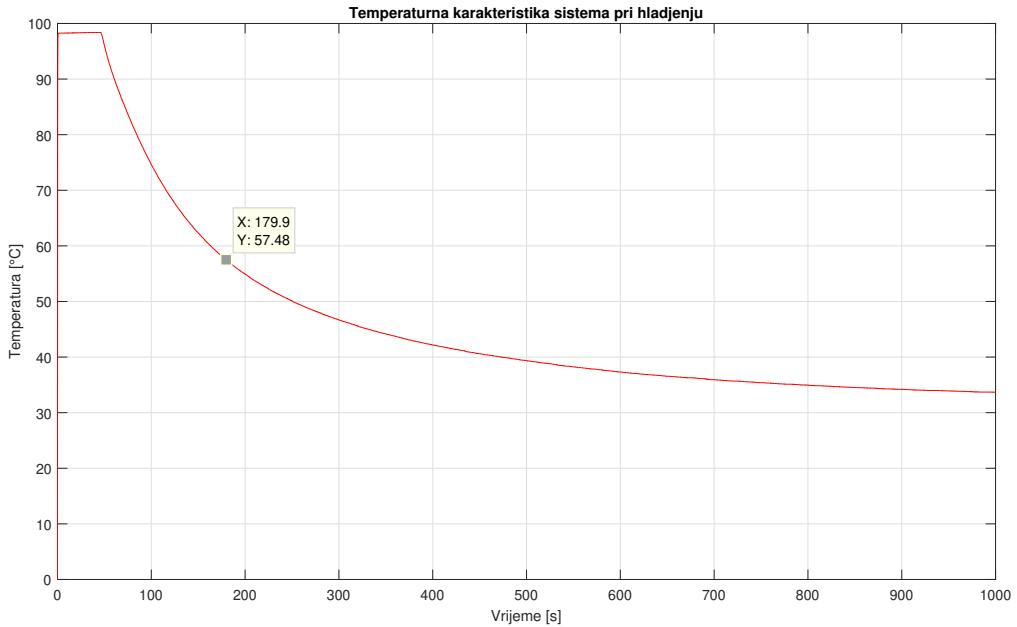
Slika 6.10: Različiti izlazi u zavisnosti od odabira parametra T

Opaža se da je prvi filter pokazao najbolje rezultate, odnosno najbolje opisuje srednju vrijednost. Zadnji filter ne prati dobro dinamiku sistema, dok sa drugim nije odbačen zadovoljavajući broj podataka. Prema rezultatima simulacije i mjerena filtra za zadanu primjenu da se zaključiti da filter čija je frekvencija  $f=10$  Hz postiže najbolje rezultate za filtriranje srednje vrijednosti signala. Daljnji proračuni i obrada se vrše sa podacima propuštenim kroz ovaj filter.

Nakon filtriranja potrebno je odrediti konstante koje opisuju dati termički sistem. Poznavajući karakteristiku NTC senzora i koristeći se relacijom 4.5 moguće je odrediti promjenu temperature u vremenu. Na slikama 6.11 i 6.12 su prikazani ovi grafici, a odatle se lako očitava stacionarno stanje, kao i 63% vrijednosti stacionarnog stanja.



Slika 6.11: Vrijednost pri  $t = \tau$  (63% vrijednosti novog stacionarnog stanja) kada se sistem zagrijava



Slika 6.12: Vrijednost pri  $t = \tau$  (63% vrijednosti novog stacionarnog stanja) kada se sistem hlađe

Upravo očitavanjem ovih podataka može se odrediti vremenska konstanta zagrijavanja i hlađenja sistema. Proračun je predstavljen sljedećim relacijama:

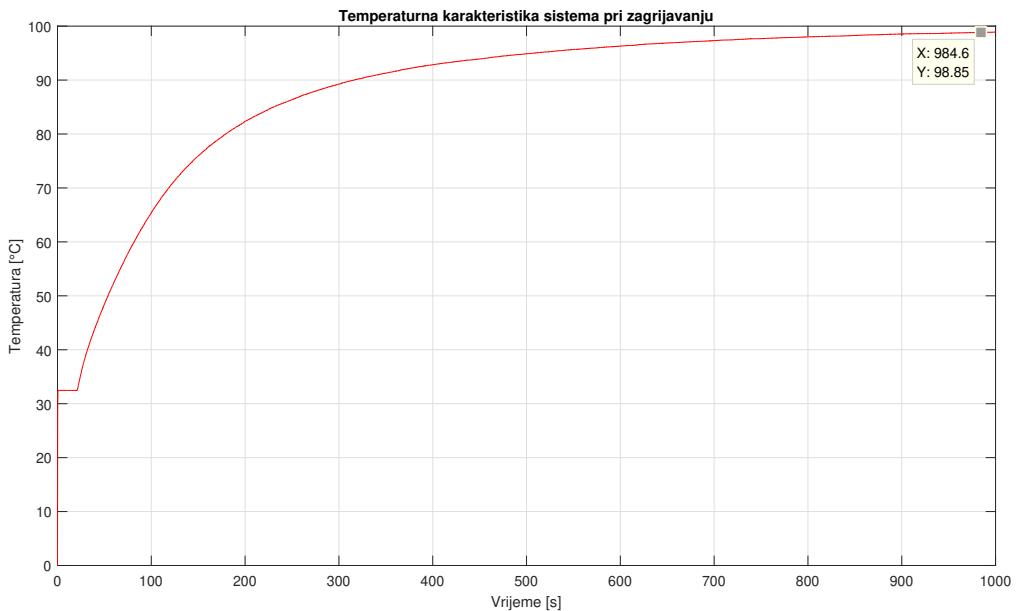
$$T = (98,88 - 32,46) \cdot 0,63 + 32,46 \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} T &= 74,3^{\circ}\text{C} \\ \tau_{zag} &= 140,4\text{s} \end{aligned} \quad (6.4)$$

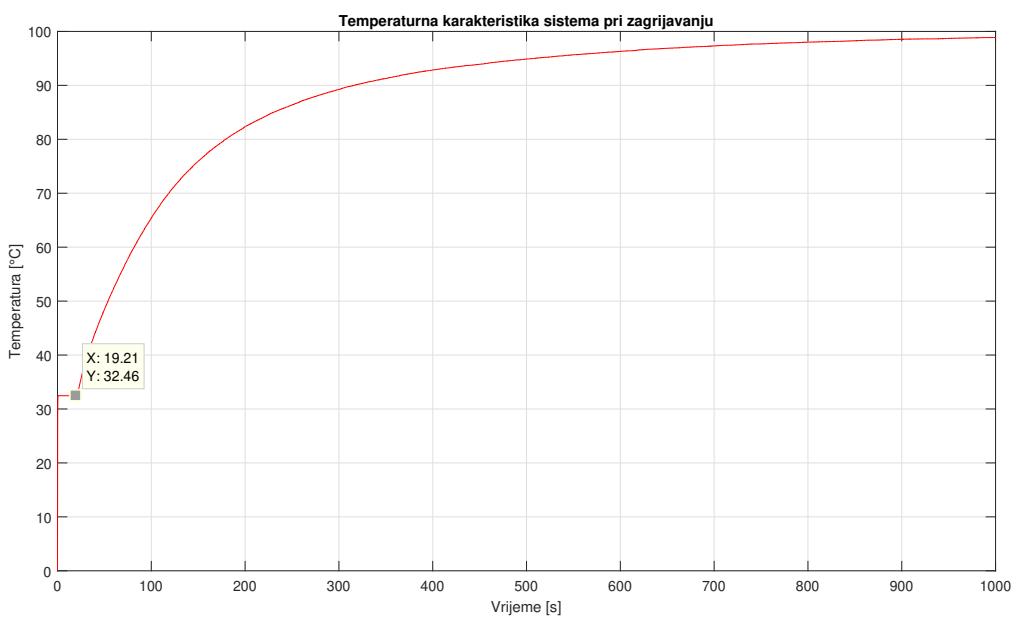
$$T = (98,26 - 33,67) \cdot 0,63 - 33,66 \quad (6.5)$$

$$T = 57,562^\circ C \\ \tau_{hl} = 179,9 s \quad (6.6)$$

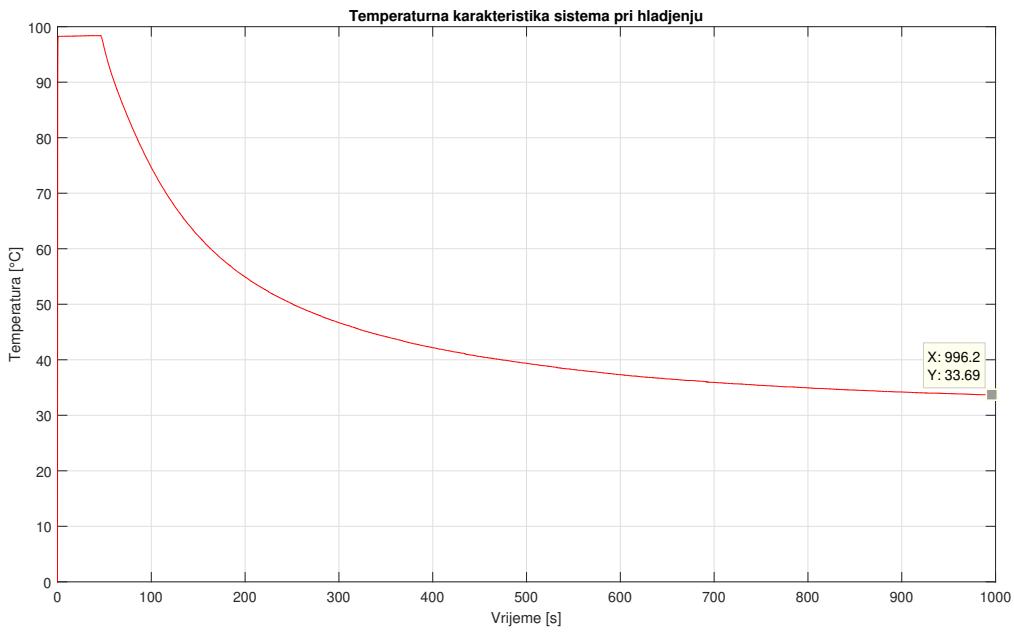
Vrijednosti u karakterističnim tačkama prikazane su na sljedećim graficima (slike 6.13, 6.14, 6.15 i 6.16):



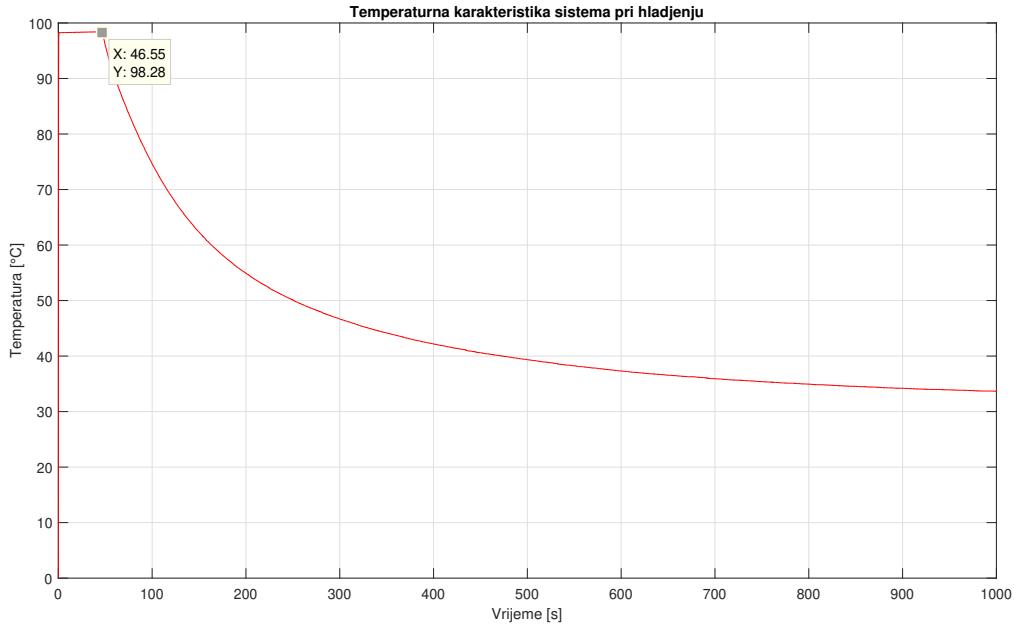
Slika 6.13: Očitavanje novog stacionarnog stanja uzlazne karakteristike



Slika 6.14: Očitavanje početne vrijednosti uzlazne karakteristike



Slika 6.15: Očitavanje novog stacionarnog stanja silazne karakteristike



Slika 6.16: Očitavanje početne vrijednosti silazne karakteristike

Konačno, prenosne funkcije koje opisuju dati sistem pri njegovom zagrijavanju i hlađenju date relacijama ispod:

$$G(s) = \frac{98.88}{140.4s + 1} \quad (6.7)$$

$$G(s) = \frac{33.67}{179.9s + 1} \quad (6.8)$$

# Poglavlje 7



## Simulacijski rezultati

---

Prenosna funkcija termičkog sistema data je relacijom 4.15. U općem slučaju je proces zagrijavanja i hlađenja opisan različitim prenosnim funkcijama, preciznije različiti su koeficijenti pojačanja i vremenske konstante, kako je objašnjeno u poglavlju organizacija vježbe u zadatku 4. Pomenuti koeficijenti i vremenske konstante su određene na osnovu provedenih mjerena na prvom terminu u laboratoriji odnosno odziva termičkog sistema i statičke karakteristike što je dato u poglavlju 6. Također je bitno pomenuti da u općem slučaju postoji i zakašnjenje sistema, pa je ako je  $G(s)$  prenosna funkcija sistema bez kašnjenja, prenosna funkcija sistema sa kašnjenjem  $G_1(s)$ :

$$G_1(s) = G(s) \cdot e^{-T_s} \quad (7.1)$$

U razmatranom sistemu je kašnjenje zanemarivo stoga će se u nastavku kao prenosna funkcija sistema razmatrati prenosna funkcija  $G(s)$  bez kašnjenja kako je da to u 4.15. Prenosna funkcija za slučaj zagrijavanja je:

$$G_z(s) = \frac{k_z}{T_z s + 1} \quad (7.2)$$

Prenosna funkcija za slučaj hlađenja je:

$$G_h(s) = \frac{k_h}{T_h s + 1} \quad (7.3)$$

Potrebno je dalje odrediti diferencijalnu jednačinu kojoj odgovara prenosnoj funkciji 4.15, odnosno prenosnim funkcijama 7.2 i 7.3.

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{k_{ob}}{T_{ob}s + 1} \\ G(s)(T_{ob}s + 1) &= k_{ob} \\ T_{ob}sG(s) + G(s) &= k_{ob} \end{aligned} \quad (7.4)$$

Primjenom inverzne Laplace transformacije:

$$T_{ob}\dot{x}(t) + x(t) = k_{ob} \quad (7.5)$$

Primjenom Kelvinove metode potrebno je izdvojiti najstariji izvod uz koji treba da stoji jedinični koeficijent.

$$\dot{x}(t) = \frac{k_{ob}}{T_{ob}} - \frac{x(t)}{T_{ob}} \quad (7.6)$$

Kada se slično primjeni na 7.2 i 7.3 dobija se:

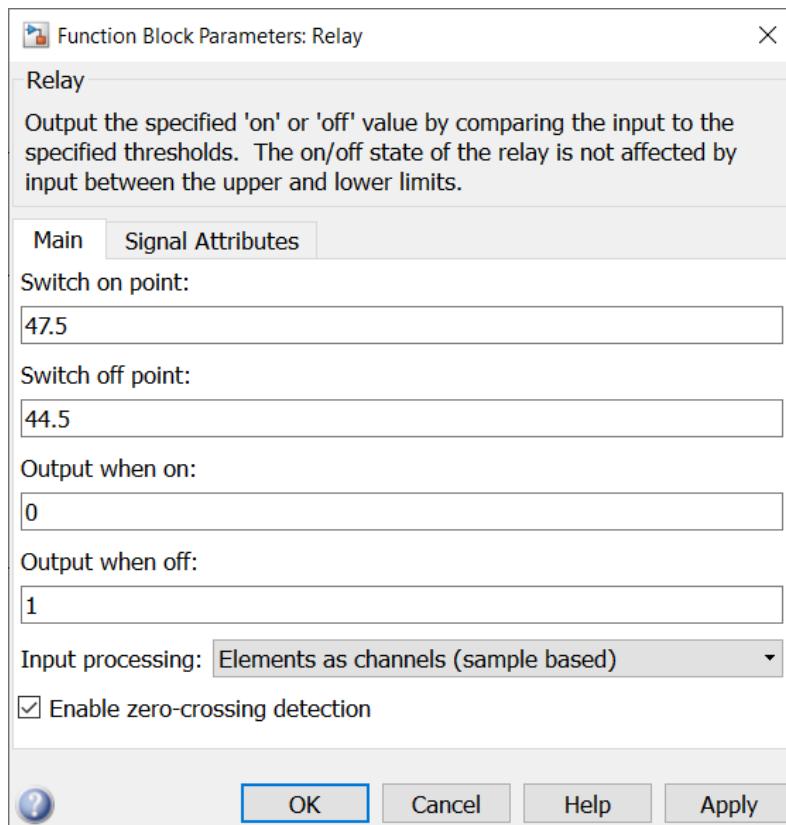
$$\dot{x}(t) = \frac{k_z}{T_z} - \frac{x(t)}{T_z} \quad (7.7)$$

$$\dot{x}(t) = \frac{k_h}{T_h} - \frac{x(t)}{T_h} \quad (7.8)$$

Relacije 7.7 i 7.8 su neophodne za formiranje modela termičkog sistema.

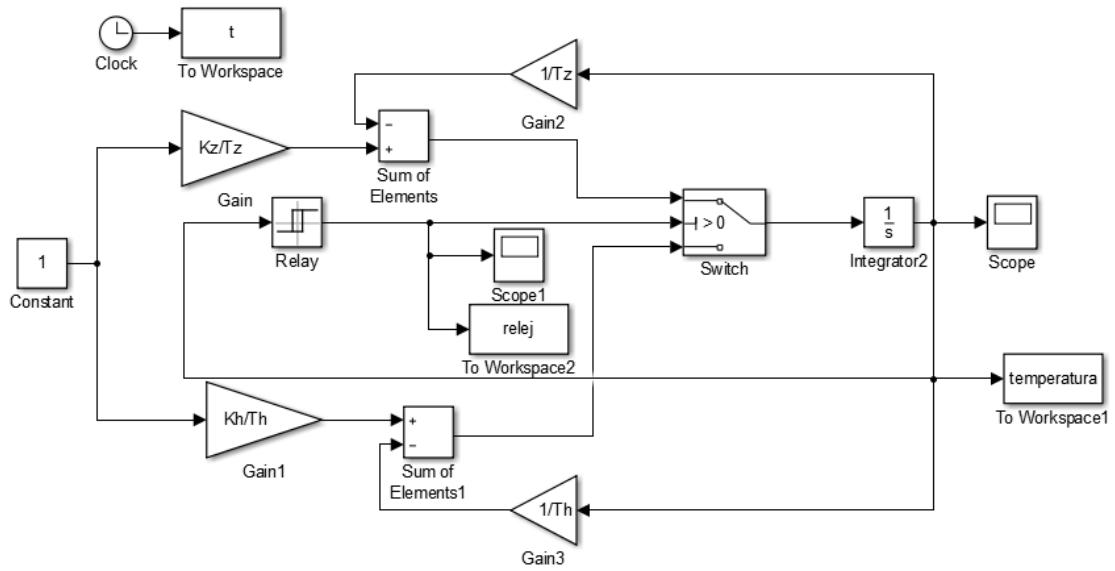
## 1. Postavke simulacije

Simulacijski model se formira na osnovu 7.7 i 7.8 te parametara sistema kako su određeni u poglavlju 6. Bitne su postavke bloka koji određuje da li je potrebno upaliti ili ugasiti grijач na osnovu trenutne temperature i zadanih parametara naravno u zavisnosti od toga da li temperatura raste ili opada (eng. *Relay*). Postavke datog bloka date su na slici 7.1. Gornja granica je zadana  $47.5^{\circ}\text{C}$ . U trenutku kada je dosegnuta je potrebno ugasiti grijач stoga je izlazna vrijednost u ovom slučaju logička "0". Slično donja granica je zadana  $44.5^{\circ}\text{C}$ , te je u trenutku kada je dosegnuta prilikom opadanja temperature potrebno upaliti grijач pa je izlazna vrijednost ovog bloka u ovom slučaju logička "1".



Slika 7.1: Parametri simulacije za blok releja

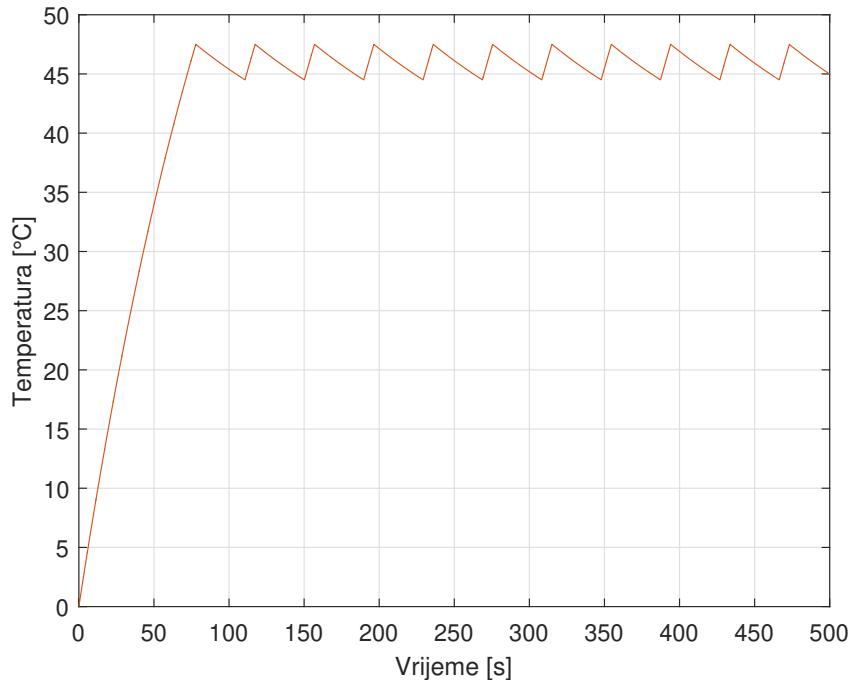
Bitno je napomenuti da je početna vrijednost za blok integratora nula. Na modelu je predviđeno slanje odziva u radni prostora Matlab okruženja da bi se omogućio rad sa rezultatima simulacije. Simulink model ovog termičkog sistema da je na slici 7.2.



Slika 7.2: Simulink model termičkog sistema

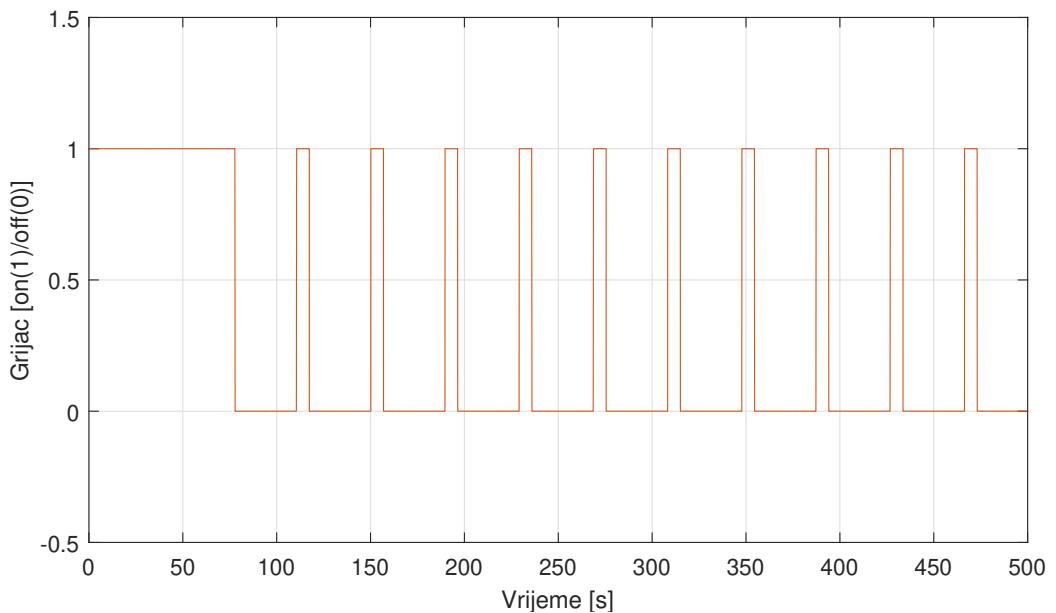
## 2. Rezultati simulacije

Rezultati simulacije sa postavkama koje su date ranije prikazani su na slici 7.3.



Slika 7.3: Parametri simulacije za blok releja

Izlaz releja, odnosno koliko dugo grijач treba da bude upaljen i koliko treba da bude ugašen u odnosu na trenutno stanje sistema da bi se ostvarila regulacija oko zadane temperature od  $46^{\circ}\text{C}$  sa histerezom od  $3^{\circ}\text{C}$  prikazan je na slici 7.4.



Slika 7.4: Parametri simulacije za blok releja

### 3. Zaključak

Na osnovu rezultata simulacije prikazanih na slici 7.3 moguće je zaključiti da odziv sistema zadovoljava zadani opseg promjene temperature u okolini  $46^{\circ}\text{C}$  sa histerezom od  $3^{\circ}\text{C}$ , stoga se simulacija i proračun mogu smatrati uspješnim. Također primjećuje se da je vrijeme hlađenja duže u odnosu na vrijeme zagrijavanja sistema i posljedično vremenski interval u kojem je uključen grijач mnogo kraći u odnosu na vremenski interval u kojem je grijач isključen, što je posljedica karakteristika same prostorije.

# Poglavlje 8

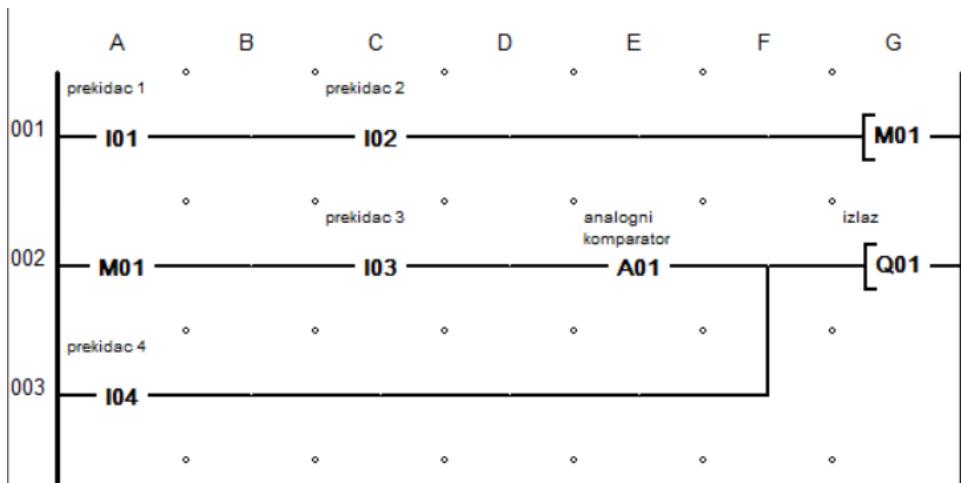


## Eksperimentalni rezultati

Realizacija dvopolozajne regulacije uz korištenje PLC-a vršena je u softverskom alatu *easysoft 6 Basic*. Djelovanje regulatora opisuje sljedeća logika :

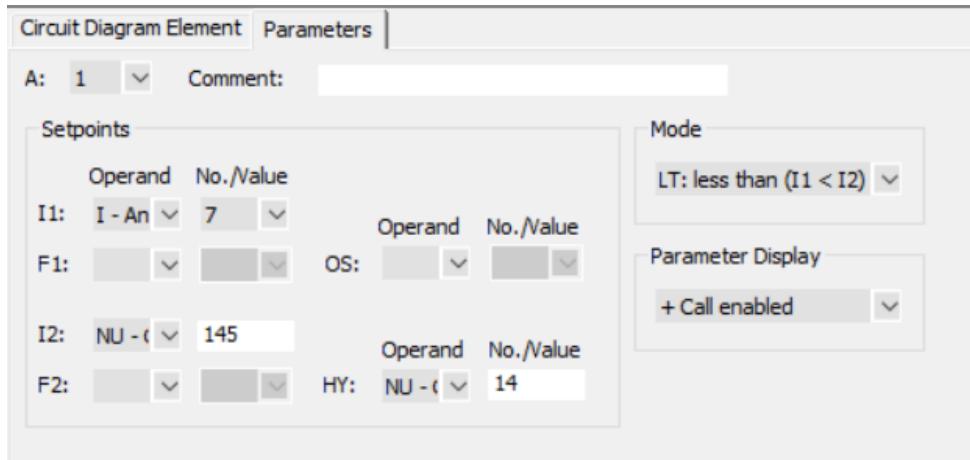
- prekidač P1, spojen na digitalni ulaz I1 PLC-a, omogućava korištenje grijачa;
- prekidač P2, spojen na digitalni ulaz I2 PLC-a, omogućava aktiviranje grijачa (uz uslov da je P1 aktivan);
- prekidač P3, spojen na digitalni ulaz I3 PLC-a, uključuje regulator;
- prekidač P4, spojen na digitalni ulaz I4 PLC-a, omogućava rad grijачa neovisno o ostalim prekidačima.

Ljestvičasti dijagram (engl. ladder diagram) regulacije kreiran u easysoftu predstavljen je na slici 8.1:



Slika 8.1: Ljestvičasti dijagram regulacije

Za automatsku regulaciju najbitnije je ispravno podesiti parametre analognog komparatora označenog na dijagramu sa A01, koji je povezan na ulaz I7 PLC-a (na koji će se dovoditi napon sa fiksног otpornika R). Na slici 8.2 prikazani su parametri analognog komparatora koji će biti detaljnije pojašnjeni.



Slika 8.2: Parametri analognog komparatora

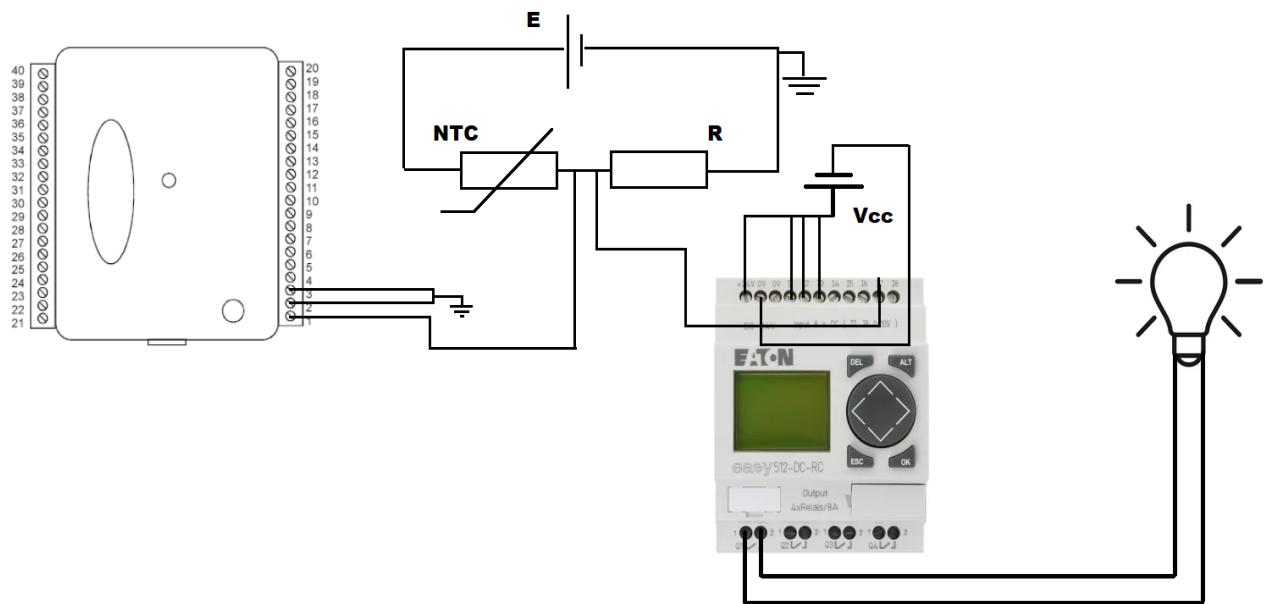
Na ulaz I7 PLC-a dovodi se napon sa otpornika R, koji je proporcionalan temperaturi termičkog sistema u kojem vršimo regulaciju. Vrijednost tog napona poredi se sa numeričkom konstantom koja za željenu temperaturu regulacije iznosi 145, te se unosi i vrijednost histereze koja iznosi 14. Potrebno je očitati vrijednosti napona pri željenim temperaturama regulacije (po postavci projektnog zadatka  $46^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ), snimljene na prvom terminu laboratorijske vježbe. Dodatno treba iskoristiti činjenicu da PLC koristi 10-bitni A/D konvertor, što znači da ulazni napon u opsegu od 0 V do 10 V opisuju 1024 bita. To daje relaciju 8.1 uz pomoć koje se mogu odrediti sve vrijednosti korištene za parametre analognog komparatora.

$$n = \frac{V}{10} \cdot 1024 \quad (8.1)$$

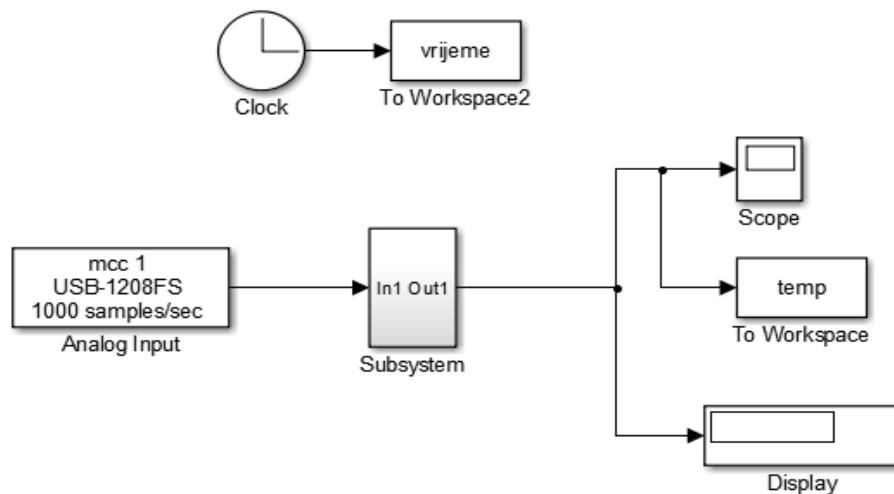
Tri vrijednosti temperature od interesa iznose  $44.5^{\circ}\text{C}$ ,  $46^{\circ}\text{C}$ , te  $47.5^{\circ}\text{C}$ . Za ove tri temperaturu snimljene su vrijednosti napona koje redom iznose 1.46 V, 1.52 V i 1.59 V. Korištenjem relacije 8.1 dobiju se tri vrijednosti : 149, 156 i 163. Parametar 156 prvobitno je iskorišten kao numerička konstanta s kojom se vrši poređenje vrijednosti na ulazu I7, dok je drugi parametar odnosno širina histereze proračunat kao razlika početne i krajnje vrijednosti koje odgovaraju naponima na temperaturama koje predstavljaju gornju i donju granicu regulacije :

$$HY = 163 - 145 = 14 \quad (8.2)$$

Dolaskom u laboratoriju prvo je bilo potrebno spojiti sistem analogno shematskom prikazu na slici 8.3. Nakon spajanja sistema, osim programa pisanih u easysoft-u korištena je i simulacija kreirana u softverskom alatu Simulinku programskog paketa MATLAB, prikazana na slici 8.4. Svrha simulacije je prikaz trenutne vrijednosti temperature (proračunata formulom na osnovu napona na otporniku R u bloku podistema, engl. Subsystem) kako bi se mogla pratiti vjerodostojnost regulacije, te snimanje vrijednosti histereze regulacije da bi se eksperimentalni rezultati mogli porediti sa onim simulacijski dobivenim.

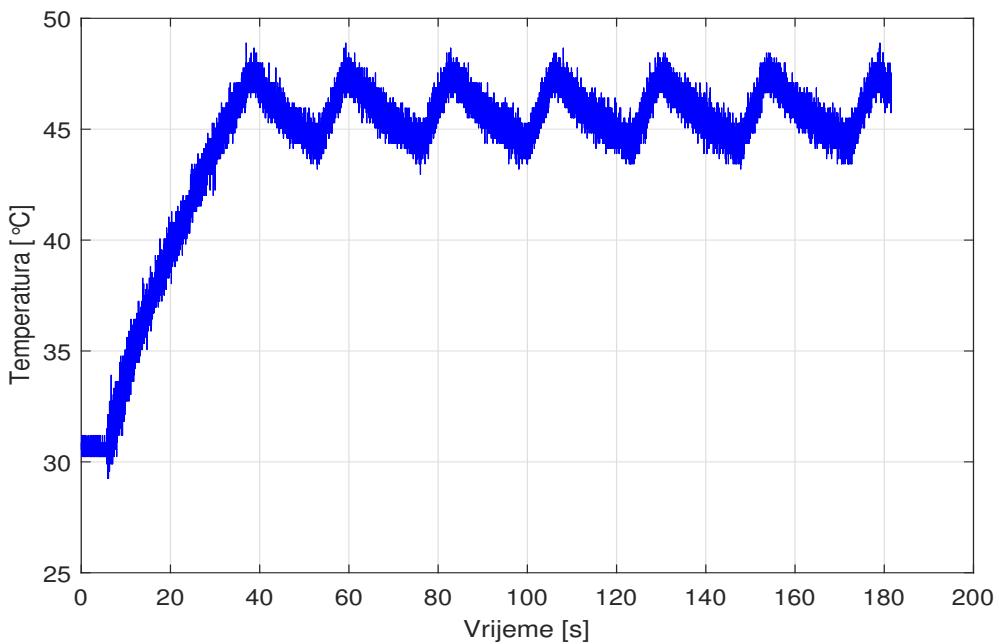


Slika 8.3: Shema spoja PLC-a, akvizicijske kartice i termičkog sistema



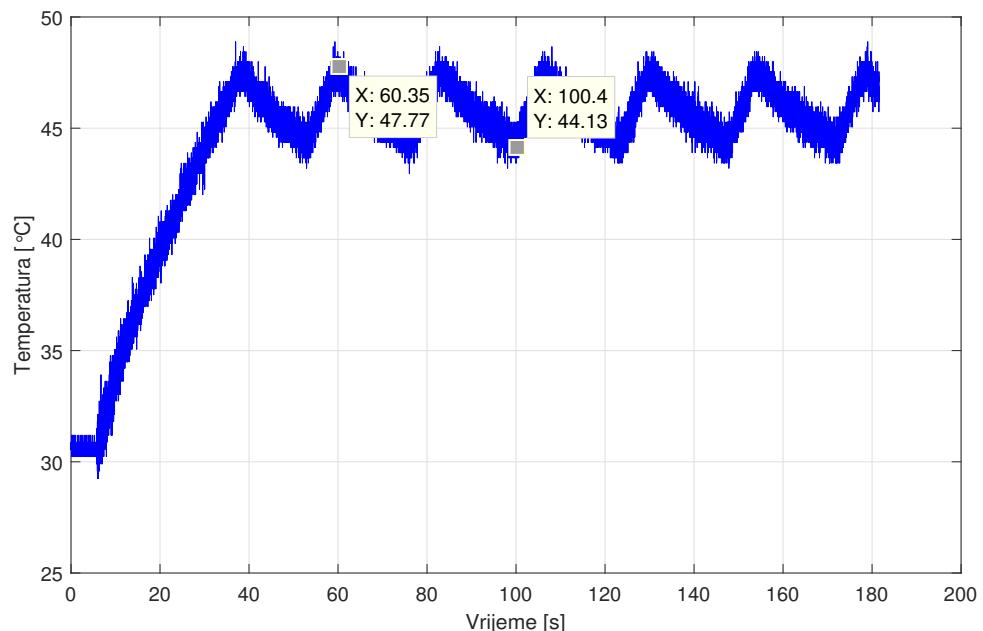
Slika 8.4: Simulacija za očitavanje temperature

Inicijalno pokretanje simulacije pokazivalo je odstupanje želenog opsega regulacije za više od dva stepena Celzijusa, što nije bilo poželjno te je vrijednost parametra numeričke konstante u analognom komparatoru smanjena na 145. Za takvu vrijednost i nepromjenjenu širinu histereze postignut je željeni temperaturni opseg. Pretpostavka je da prvo bitno proračunata vrijednost nije odgovorala zbog same greške koja se unosi aproksimacijom karakteristike NTC otpornika, kao i korištenjem izvora od 5.9 V umjesto inicijalno korištenih 6V. Pokretanje simulacije i programa u easysoftu istovremeno dalo je rezultate :



Slika 8.5: Eksperimentalno snimljena promjena temperature

Jasno je vidljivo da je oblik promjene temperature očekivan i da se podudara sa oblikom dobijenim simulacijom, te da su vrijednosti u željenom rasponu od otprilike 44 do 48°C. Vremenski interval hlađenja je nešto duži od intervala zagrijavanja. Tačne vrijednosti temperatura na donjoj i gornjoj granici prikazuje slika 8.6. Vrijednosti kada je gornja granica u pitanju kreću se između 47.5 do 48°C, dok se donja granica kreće oko 44°C. Ova odstupanja su dovoljno mala da budu zanemariva za trenutne potrebe regulacije, pa se ista može smatrati uspješno sprovedenom.



Slika 8.6: Prikaz gornje i donje granice temperature

## Poglavlje 9



## Zaključak i diskusija

---

Poklapanje eksperimentalnih i simulacijskih rezultata implicira da su i snimanje karakteristika korištenog termičkog sistema i proračuni zadovoljavajuće tačno odraženi. Naravno, u obzir treba uzeti i greške koje se javljaju pri svakom mjerenu, te one koje su posljedica vršenja aproksimacija pri obradi mjernih rezultata. Eksperimentalno dobiven raspon temperature unutar kojeg se vrši regulacija malo je veći od onoga traženog, međutim kako su odstupanja otprilike jedan stepen Celzijusa zanemariva su. Za aplikacije u kojima se zahtijeva veća tačnost, potrebno je dobro razmisiliti o načinu aproksimacije statičke karakteristike NTC otpornika, jer od njega zavisi cjelokupna tačnost sistema. Ovaj rad predstavlja dobru podlogu za upoznavanje sa pojmom dvopolozajne regulacije, daje teoretska razmataranja zakonitosti na kojima se ista zasniva, te detaljno opisuje mogućnost regulisanja temperature u jednostavnom termičkom sistemu. Kao takav može poslužiti za eventualna daljnja razvijanja.



## Literatura

---

- [1] *Regulatori*, pristup 21.5.2022.<https://www.stem.ba/arduino-elektronika/tutorijali/item/332-regulatori>
- [2] Javier Fernandez de Canete et al, *System Engineering and Automation: An Interactive Educational Approach*, Springer, Berlin, 2011.
- [3] Katsuhiko Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, 2010
- [4] *Two Position Controller*, pristup 23.5.2022.<https://www.electricalandcontrol.com/two-position-controller-2/>
- [5] Tarik Uzunović, *Predavanja na predmetu: Senzori i mjerjenja*, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Sarajevu, akademska 2021/22 god.
- [6] Senad Huseinbegović, *Predavanja na predmetu: Elektronički elementi i sklopovi*, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Sarajevu, akademska 2021/22 god.
- [7] *Uses of Transistor*, pristup 10.5.2022. <https://www.vedantu.com/physics/uses-of-transistor>
- [8] *Intro to Electronic Components: Transistors*, pristup 10.5.2022. <https://maker.pro/custom/tutorial/intro-to-electronic-components-transistors>
- [9] *Transistor* <https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor>
- [10] *Understanding the Difference Between BJT and MOSFET and How to Select the Right One for Your Designs*, pristup 10.5.2022. <https://circuitdigest.com/article/understanding-the-difference-between-bjt-and-mosfet-and-how-to-select-the-right-one-for-your-designs>
- [11] *Kits: Assemble*, pristup 10.5.2022. <https://www.botanicalls.com/kits/assemble/>
- [12] *BSS123 MOSFET 100V Transistor N Channel SMD SOT23*, pristup 10.5.2022. <https://www.switchelectronics.co.uk/bss123-mosfet-100v-transistor-n-channel-smd-sot23>

- [13] *Releji*, pristup 10.05.2022 <https://www.automatika.rs/baza-znanja/teorija-upravljanja/releji.html>
- [14] *Različite vrste releja i njihovi principi rada*, pristup 10.05.2022 <https://hr.jf-parede.pt/different-types-relays>
- [15] *Relay*, pristup 10.5.2022. <https://en.wikipedia.org/wiki/Relay>
- [16] *12 Volt Single-Pole Double-Throw Relay SPDT Relay 20Amp*, pristup 10.5.2022. <https://www.firgelliauto.com/products/12-volt-single-pull-double-throw-relay>
- [17] *Logic Gates – Types, Working Principle, Application, Advantage*, pristup 10.5.2022.
- [18] *Shutterstock*, pristup 10.5.2022. <https://www.shutterstock.com/image-vector/digital-logic-gate-symbols-black-isolated-449422498> <https://electricalfundablog.com/logic-gates-types-working-principle/>
- [19] *Predavanja na predmetu: Linearni sistemi automatskog upravljanja*, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Sarajevu, akademska godina 2021/22
- [20] Božidar Matić, *Projektovanje sistema automatske regulacije i upravljanja tehnoloških procesa*, Svjetlost Sarajevo, 1989
- [21] *Uses of PLC*, pristup 10.5.2022. <https://www.amci.com/industrial-automation-resources/plc-automation-tutorials/what-plc/>
- [22] *Eaton easy 512-DC-RC*, pristup 10.5.2022. <https://www.conrad.com/p/eaton-easy-512-dc-rc-274109-plc-controller-24-v-dc-198192>
- [23] *Introduction to PLC hardware*, pristup 10.5.2022. <https://engineerscommunity.com/t/introduction-to-plc-hardware/11277>
- [24] Marin Šepac, *Programljivi logički kontroleri*, Filozofski fakultet sveučilišta u Rijeci, 2016. god.
- [25] *What are the advantages and disadvantages of PLC?*, pristup 10.5.2022. <https://forumautomation.com/t/what-are-the-advantages-disadvantages-of-plc/2430>
- [26] Kruljac, Luka *Parametri električkih filtera*, Osijek, 2018. god.
- [27] MathWorks, “MATLAB”, pristup 20.5.2022. <https://www.mathworks.com/>