

# Sustav automatskog upravljanja temperature

---

**Brljafa, Mauro**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Istrian University of applied sciences / Istarsko veleučilište - Università Istriana di scienze applicate**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:212:921201>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-03**



image not found or type unknown

*Repository / Repozitorij:*

[Digital repository of Istrian University of applied sciences](#)



image not found or type unknown

**ISTARSKO VELEUČILIŠTE**  
**PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ POLITEHNIKE**  
**PULA**

**SUSTAV AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA**  
**TEMPERATURE**

**MAURO BRLJafa**

**ZAVRŠNI RAD**

**PULA, 2020.**

**ISTARSKO VELEUČILIŠTE**  
**PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ POLITEHNIKE**  
**PULA**

**SUSTAV AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA**  
**TEMPERATURE**

**ZAVRŠNI RAD**

Kolegij: Osnove automatskog upravljanja

Mentor: mr.sc. Eduard Lorencin

Student: Mauro Brljafa

MB: 0233006901

**PULA, 2020.**

## **ZAHVALA:**

Zahvaljujem mentoru mr. sc. Eduardu Lorencinu, na izdvojenom vremenu, korekcijama te na korisnim uputama i savjetima prilikom izrade završnog rada. Nadalje ovim putem se želim zahvaliti Istarskom Veleučilištu u Puli na kojem sam stekao potrebno znanje i vještine za izradu završnog rada te budući kako poslovni tako i privatni život.

Također zahvaljujem svojoj obitelji koja mi je bila podrška i oslonac kroz cijelo moje dugo školovanje.

## Izjava o samostalnosti izrade završnog rada

Izjavljujem da sam završni rad na temu „**Sustav automatskog upravljanja temperature**“ samostalno izradio uz podršku mentora mr. sc. Lorencin Eduard, koristeći navedenu stručnu literaturu i znanje stečeno tijekom studiranja. Završni rad je pisan u duhu hrvatskog jezika.

Student: Mauro Brljafa

Potpis: \_\_\_\_\_

# Sadržaj

Stranica

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Predmet istraživanja.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Cilj i svrha rada.....</b>	<b>1</b>
<b>1.3. Hipoteza rada.....</b>	<b>1</b>
<b>1.4. Metode rada .....</b>	<b>1</b>
<b>1.5. Struktura rada.....</b>	<b>2</b>
<b>2. TEHNIČKI SUSTAVI UPRAVLJANJA .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Podjela sustava upravljanja.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Sustav ručnog upravljanja.....</b>	<b>3</b>
2.2.1. Princip rada sustava ručnog upravljanja.....	4
2.2.2. Prednosti i nedostaci sustava ručnog upravljanja .....	5
<b>2.3. Sustav automatskog upravljanja.....</b>	<b>5</b>
2.3.1. Princip rada sustava automatskog upravljanja u zatvorenoj petlji .....	5
2.3.2. Princip rada sustava automatskog upravljanja u otvorenoj petlji .....	6
2.3.3. Prednosti i nedostaci sustava automatskog upravljanja .....	7
<b>3. AUTOMATSKO UPRAVLJANJE TEMPERATURE .....</b>	<b>8</b>
<b>3.1. Osnovna podjela i opis regulatora temperature .....</b>	<b>9</b>
<b>3.2. Električni grijač kao izvršni član .....</b>	<b>13</b>
<b>4. USPOREDBA ODZIVA SUSTAVA REGULIRANIH ON/OFF I PID REGULATOROM .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1. Matlab – Simulink .....</b>	<b>17</b>
<b>4.2. Sustav regulacije sa ON/OFF regulatorom.....</b>	<b>18</b>
<b>4.3. Sustav regulacije sa Pid regulatorom.....</b>	<b>19</b>
4.3.1. Određivanje parametara PID regulatora.....	20
<b>4.4. Rezultati simulacija sustava .....</b>	<b>23</b>

<b>5. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>27</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>28</b>
<b>POPIS SLIKA I TABLICA .....</b>	<b>29</b>

# **1. UVOD**

## **1.1. Predmet istraživanja**

Predmet istraživanja ovog završnog rada je primjena i ocjena različitih metoda automatskog upravljanja (regulacije) temperature.

## **1.2. Cilj i svrha rada**

Cilj ovog rada je prikazati principe rada i učinkovitost primjene različitih tipova regulacijskih članova u sustavu automatske regulacije temperature.

Svrha rada je pojasniti osnovna načela djelovanja sustava automatskog upravljanja temperature te olakšati odabir odgovarajućeg regulacijskog člana (regulatora) u realnim sustavima.

## **1.3. Hipoteza rada**

U sustavu automatskog upravljanja (regulacije) temperature, regulacijski član može imati strukturu PID regulatora kao i ON/OFF regulatora. Kompleksnija struktura PID regulatora u odnosu na ON/OFF regulator kao i postojeće iskustvo upućuju da će PID regulator biti učinkovitiji u regulaciji temperature.

## **1.4. Metode rada**

Istraživanjem literature stekao sam osobne spoznaje koje su vezane uz temu, sve to zahvaljujući induktivno-deduktivnoj metodi. Metodom analize istraživao sam nepoznate pojmove. Metodom dokazivanja nastojao sam dokazati točnost zadane hipoteze. U završnom radu sam metodom deskripcije opisivao različite procese i različite činjenice.



## **1.5. Struktura rada**

Rad je strukturiran na način da su u prvom dijelu opisani ručni i automatski sustavi upravljanja, te objašnjeni principi rada istih. Potom je prikazan princip djelovanja sustava automatskog upravljanja temperature i regulatora koji se najčešće koriste kod takvih sustava automatskog upravljanja, te električni grijač kao izvršni član koji je u nastavku korišten u usporedbi. Nakon toga je prikazan način djelovanja sustava upravljanog ON/OFF i PID regulatorima sa pripadajućim shemama primjenom programskog sustava MATLAB / SIMULINK. Te na kraju je zaključak rada.

## 2. TEHNIČKI SUSTAVI UPRAVLJANJA

Tehnički sustav upravljanja je skup uređaja koji upravlja, regulira ponašanje drugih uređaja u cilju utjecanja na neku fizikalnu veličinu nekog objekta. Potreba za regulacijom neke fizikalne veličine je u većini industrijskih pogona i kućanstava. U kućanstvu se sustavi najčešće koriste za regulaciju temperature ili osvjetljenja. U industrijskim pogonima veliki broj regulacijskih krugova upravlja fizikalnim veličinama strojeva ili materije koje prolaze kroz strojeve (regulirane veličine).<sup>1</sup>

### 2.1. Podjela sustava upravljanja

Sustave upravljanja moguće je podijeliti s obzirom na različite kriterije. Sustave u industriji, poljoprivredi, istraživačkim laboratorijima i kućanstvima. S obzirom na način upravljanja dijele se na sustave sa ručnim upravljanjem i sustave sa automatskim upravljanjem. S obzirom na strukturu regulacijske petlje razlikujemo sustave sa otvorenom petljom i sustave u zatvorenoj petlji (regulacijski sustavi).<sup>2</sup>

### 2.2. Sustav ručnog upravljanja

Sustav ručnog upravljanja je sustav u otvorenoj ili zatvorenoj petlji kojem je regulacijski član čovjek. Sustav ručnog upravljanja sa povratnom vezom se sastoji od članova i signala koji su prikazani na Slici 1.<sup>3</sup>

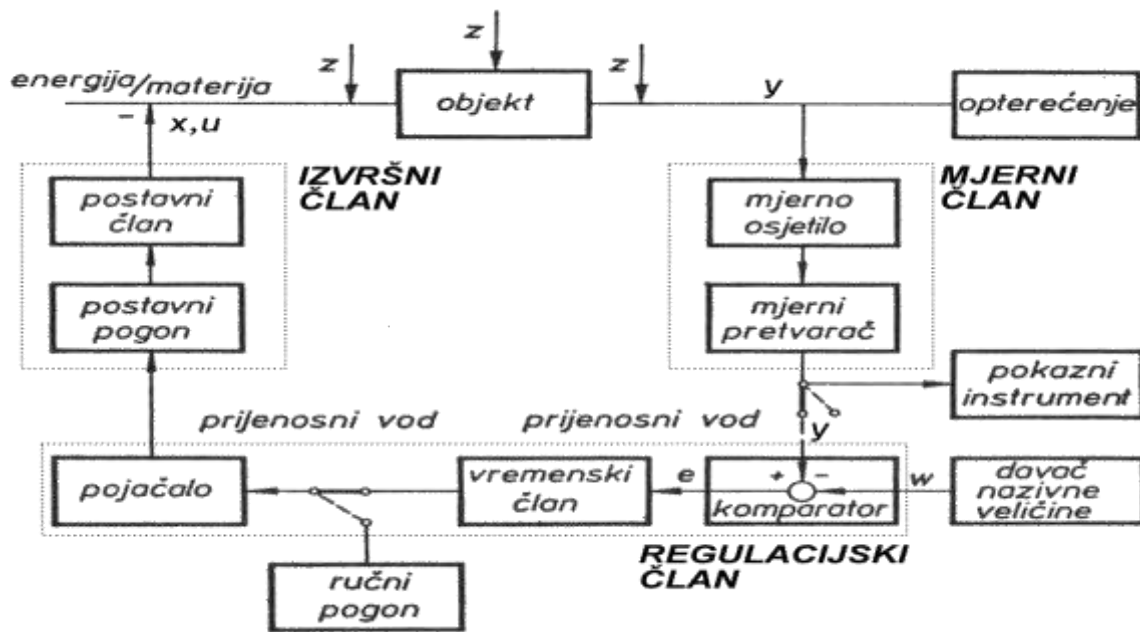
---

<sup>1</sup> mr.sc. Eduard Lorencin, **Prezentacije kolegija Osnove automatskog upravljanja**, Politehnika Pula, Pula, 2018.

<sup>2</sup> Instrumart <<https://www.instrumart.com/pages/283/temperature-controller-basics-handbook>> (10.5.2020.)

<sup>3</sup> Izvor: Autor

Slika 1.: Shema sustava ručnog i automatskog upravljanja u zatvorenoj petlji



Izvor: mr.sc. Eduard Lorencin, **Prezentacije kolegija Osnove automatskog upravljanja**, Politehnika Pula, Pula, 2018.

### 2.2.1. Princip rada sustava ručnog upravljanja

Regulirana veličina  $y$  na izlazu staze ulazi u mjerni član koji se sastoji od mjernog osjetila i mjernog pretvarača. Mjerni član mjeri trenutnu vrijednost regulirane veličine i prosljeđuje je regulacijskom članu u prikladnom obliku. Različite inačice mjernih članova koriste se za mjerenje odgovarajući fizikalnih veličina reguliranih veličina (brzina, pomak, tlak, temperatura, itd.). Regulacijski član se sastoji od komparatora, vremenskog člana i regulacijskog pojačala. Regulacijski član je u ovom slučaju čovjek koji istovremeno ima ulogu komparatora, vremenskog člana i regulacijskog pojačala. Čovjek uspoređuje željenu veličinu sa reguliranom vrijednošću te na temelju osobne percepcije djeluje na izvršni član odnosno aktivira postavni pogon/član. Izvršni član je podsustav koji djeluje na objekt regulacije. Sastoji se od postavnog pogona i postavnog člana. Postavni pogon je obično motor koji upravlja postavnim članom, najčešće ventilom ili relejom koji propušta ili ne propušta struju. Proces je općenito skup aktivnosti kojima se ulazni elementi transformiraju u izlazne elemente sa specifičnim svojstvima, a sama transformacija određena je parametrima i ograničenjima. Proces je objekt kojem reguliramo neku veličinu. Proces može biti uređaj ili skup uređaja, npr. grijač, elektromotor, led lampa, zvučnici itd. Jasno je da

ovako reguliran sustav (na temelju čovjekove percepcije) ne može biti pretjerano točan niti pouzdan i održiv u vremenu pa se stoga uglavnom primjenjuje u svrhu testiranja uređaja automatizacije. <sup>4</sup>

### 2.2.2. Prednosti i nedostaci sustava ručnog upravljanja

Primjena sustava ručnog upravljanja je opravdana u primjerima kada je neophodna čovjekova prosudba, najčešće u postupcima nadgledanja automatiziranih kontrola.

Nedostaci sustava ručnog upravljanja su ponajviše u samom čovjeku. U određenim trenucima čovjek može biti neodgovorno odsutan ili postati krajnje nepouzdan. U takvim slučajevima sustav ostaje bez nadzora. Kao posljedica nedostatka koncentracije ili zabune postoji mogućnost da sustav od čovjeka dobije krivi napatuk što će za posljedicu imati neispravno djelovanje sustava, a u krajnjim slučajevima oštetiti postrojenje ili ozlijediti radnike ili korisnike. Brzina sustava ovisi o čovjekovoj reakciji.<sup>5</sup>

## 2.3. Sustav automatskog upravljanja

Sustav automatskog upravljanja je sustav sa povratnom vezom strukture prikazane na Slici 1. Regulacijski član je uređaj (električki, mehanički, elektromehanički, pneumatski ili hidraulički) koji ima zadatak regulirati jednu ili više veličina, odnosno u najboljoj mjeri pokušati reguliranu veličinu izjednačiti sa željenom vrijednošću. Automatski sustav djeluje autonomno pri čemu je prisustvo čovjeka svedeno na minimum.

### 2.3.1. Princip rada sustava automatskog upravljanja u zatvorenoj petlji

Zadaća sustava je održati reguliranu vrijednost oko neke željene vrijednosti (čvrsta regulacija) ili omogućiti da regulirana vrijednost što vjernije slijedi promjenjivu

---

<sup>4</sup> West-cs <<https://www.west-cs.com/news/what-is-a-temperature-control-system/>> (27.6.2020.)

<sup>5</sup> West-cs <<https://www.west-cs.com/news/what-is-a-temperature-control-system/>> (27.8.2020.)

referentnu vrijednost (slijedna regulacija). Regulacijski uređaj djeluje zajedno s regulacijskim objektom za pravilno odvijanje procesa regulacije. Za razliku od regulacijskog objekta kojemu su struktura i parametri određeni, struktura i parametri regulacijskog uređaja mogu se birati u svrhu postizanja optimalnog djelovanja sustava. Regulirana veličina  $y$  na izlazu iz staze dolazi do mjernog člana koji ima ulogu da mjeri trenutačnu vrijednost regulirane veličine i da je vodi dalje u prikladnom obliku. Regulacijski član se sastoji od komparatora, vremenskog člana i regulacijskog pojačala (Slika 1). Regulirana veličina iz mjernog člana ulazi u komparator gdje se uspoređuje s željenom (referentnom, vodećom) veličinom  $w$ . Razliku tih dvaju signala nazivamo regulacijsko odstupanje  $e$ . Regulacijsko odstupanje djeluje na vremenski član (regulator u užem smislu) u kojem se signal preoblikuje u skladu sa zahtjevima regulacijskog kruga. Regulacijsko pojačalo ima zadatak pojačati signal iz vremenskog člana budući da je u pravilu u samom početku bio malo energije te se prolaskom kroz pasivne sklopove dodatno oslabio. Izvršni član se sastoji od postavnog pogona i postavnog člana (Slika 1). Postavni pogon je obično motor koji upravlja postavnim članom, obično ventilom. Signal, kao postavna veličina ulazi u regulacijsku stazu i djeluje suprotno poremećajnoj veličini  $z$ .<sup>6</sup>

### 2.3.2. Princip rada sustava automatskog upravljanja u otvorenoj petlji

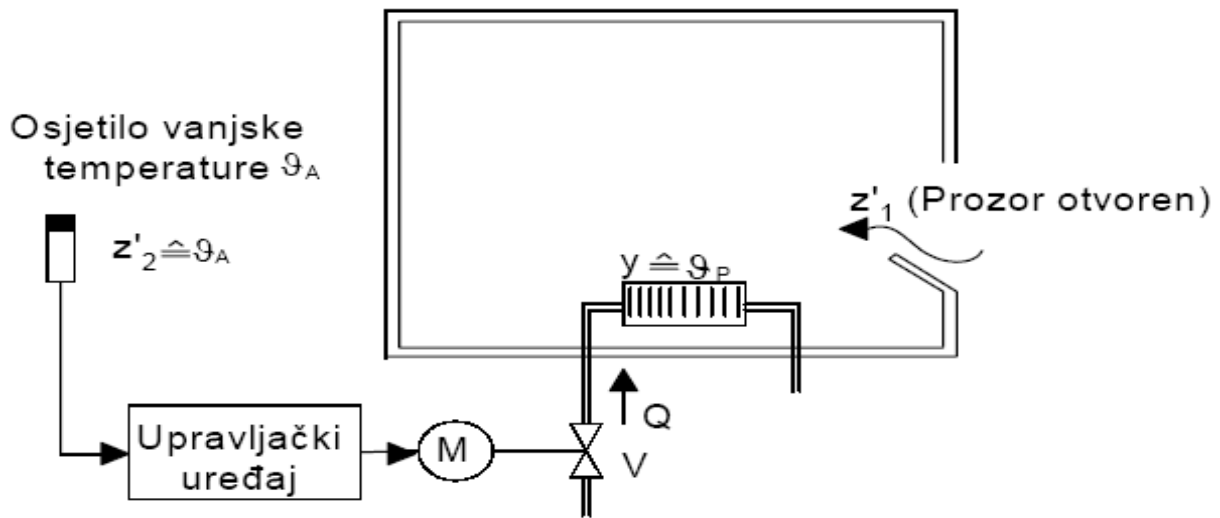
Sustav automatskog upravljanja u otvorenoj petlji djeluje na temelju unaprijed definiranih uvjeta i pravila. Sustav nema povratnu vezu te ne može usporediti trenutnu vrijednost regulirane veličine sa željenom vrijednošću. Kao posljedica toga, ovakav sustav ne može kompenzirati poremećaje koji nisu prethodno bili predviđeni. Na Slici 2 prikazan je primjer automatskog upravljanja temperature prostorije u otvorenoj petlji. Na primjeru možemo vidjeti da se mjeri vanjska temperatura  $\vartheta_A$ , a mjerni se signal dovodi na upravljački uređaj koji djeluje na postavni pogon, motor  $M$ , koji pomoću postavnog člana, ventila  $V$ , utječe na protok  $Q$  u radiator. Upravljanje u otvorenoj petlji ne može kompenzirati temperaturni poremećaj  $z'_1$  uvjetovan otvaranjem prozora<sup>7</sup>

---

<sup>6</sup> mr.sc. Eduard Lorencin, **Prezentacije kolegija Osnove automatskog upravljanja**, Politehnika Pula, Pula, 2018.

<sup>7</sup> mr.sc. Eduard Lorencin, **Prezentacije kolegija Osnove automatskog upravljanja**, Politehnika Pula, Pula, 2018.

Slika 2.: Primjer automatskog upravljanja u otvorenoj petlji



Izvor: mr. sc. Eduard Lorencin, **Prezentacije kolegija Osnove automatskog upravljanja**, Politehnika Pula, Pula, 2018.

### 2.3.3. Prednosti i nedostaci sustava automatskog upravljanja

Prednost sustava u otvorenoj petlji je jednostavnost izrade samog sustava. Također, sustav ostaje stabilan ako je kao takav projektiran. Nedostatak ovakvog sustava je u nelinearnosti i nemogućnosti kompenzacije nepredviđenih poremećaja. Zbog navedenih nedostataka vrlo se rijetko koriste u procesnoj industriji. Najčešće se koriste za upravljanje jednostavnijim procesima gdje performanse nisu odlučujuće.

Prednost sustava automatskog upravljanja u zatvorenoj petlji je prije svega mogućnost kompenzacije slučajnih poremećaja upravo zbog povratne veze i mogućnosti usporedbe regulirane veličine sa željenom. Negativnost sustava u zatvorenoj petlji je kompleksnost izrade pa tako i viši troškovi proizvodnje i održavanja. Jasno je da iziskuje stručnije operatere i tehničare za korištenje i održavanje istog. Nažalost, iako projektiran kao stabilan, sustav u zatvorenoj petlji može tijekom djelovanja postati nestabilan. Upravo iz tog razlog, poželjna je temeljita analiza sustava iz vidika robusnosti. Regulacijski sustavi nas okružuju u svim segmentima života, od procesne industrije, transporta, vojne i farmaceutske industrije, komunikacija pa sve do potrošačke elektronike i sustava u kućanstvima.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Illustrationprize <<https://illustrationprize.com/hr/62-difference-between-open-loop-amp-closed-loop-system.html>> (7.6.2020.)

### 3. AUTOMATSKO UPRAVLJANJE TEMPERATURE

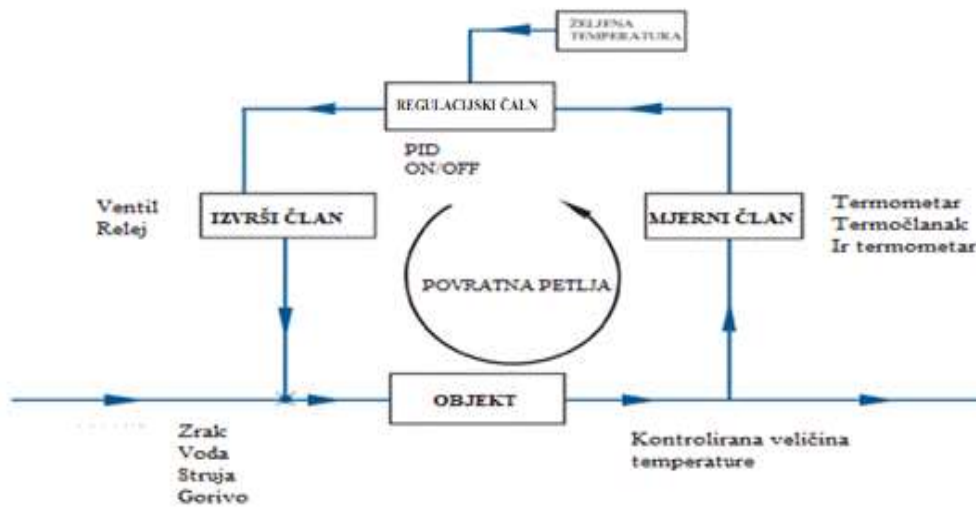
Sustav automatskog upravljanja temperature je proces u kojem se regulira temperatura samostalno i neovisno bez kontrole čovjeka. Jedina čovjekova uloga je odabir željene temperature. Na Slici 3 je prikazan sustav automatskog upravljanja temperature u kojem su prikazani sljedeći članovi: regulacijski član, izvršni član, regulacijski objekt i mjerni član. Postupak sinteze sustava započinje sa identifikacijom modela objekta te odabirom željenih karakteristika sustava u smislu stabilnosti, točnosti i dinamičkih karakteristika. Odabir željene temperature predstavlja vrijednost od koje regulirana vrijednost ne smije odstupati više od postavljenih granica. Željena temperatura uspoređuje se sa izmjerenom vrijednošću reguliranog signala. Razliku tih dviju vrijednosti nazivamo regulacijsko odstupanje  $e$ . Signal regulacijskog odstupanja se potom proslijeđuje regulacijskom članu (ON/OFF ili PID) koji temeljem regulacijskog algoritma generira upravljačku veličinu izvršnom članu. Izvršni član je u ovom primjeru grijač koji djeluje na objekt i nastoji izjednačiti vrijednosti željene i regulirane veličine. Mjerni član (najčešće korišteni su termometarski senzori, termočlanak) mjeri vrijednost regulirane veličine te ga pretvara u oblik pogodan za prijenos i daljnju obradbu. Sustav automatskog upravljanja temperature ima široki spektar korištenja od strojeva u industriji do kućanskih sustava regulacije temperature poput podnog grijanja, klima uređaja, centralnog grijanja ili kućanskih aparata kao što su peći i hladnjaci.<sup>9 10</sup>

---

<sup>9</sup> West-cs <<https://www.west-cs.com/news/what-is-a-temperature-control-system/>> (27.8.2019.)

<sup>10</sup> mr.sc. Eduard Lorencin, **Prezentacije kolegija Osnove automatskog upravljanja**, Politehnika Pula, Pula, 2018

Slika 3.: Shema sustava automatskog upravljanja temperature



Izvor: West-cs <<https://www.west-cs.com/news/what-is-a-temperature-control-system/>> (2.3.2020.)

### 3.1. Osnovna podjela i opis regulatora temperature

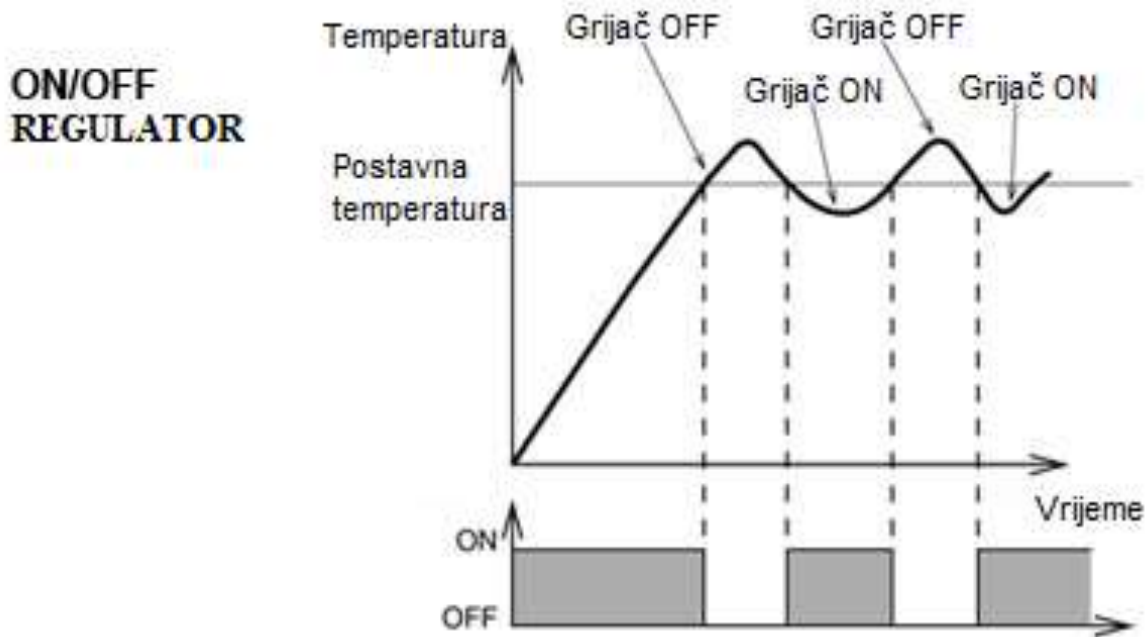
Regulacijski član ima neizostavnu ulogu u djelovanju automatske regulacije budući da regulacijskim algoritmom upravlja postupkom kompenzacije poremećaja. Postoji više vrsta regulatora temperature. Najčešće korišteni su PID i ON/OFF regulatori.

ON/OFF regulacija je najjednostavniji oblik regulacije temperature. Kod sustava regulacije temperature objekta, regulator će „dati nalog“ izvršnom članu (grijaču) da započne grijati, kada je izmjerena vrijednost regulirane veličine u objektu manja od željene vrijednosti, odnosno „ugasiti“ grijač kada se temperature izjednače ili je regulirana temperatura viša od željene (Slika 4). Ako se proces odvija brzo, radi sprječavanja oštećenja regulatora u rad se dodaje isključni diferencijal. Isključni diferencijal omogućava da temperatura prijeđe zadanu vrijednost za određenu vrijednost te se onda ponovno uključi ili kada se spusti ispod zadane vrijednosti za određenu vrijednost isključi. ON/OFF regulator se koristi gdje nije potrebna velika preciznost odnosno gdje se temperatura sporo mijenja. Primjeri primjene su temperaturni alarmi i hladnjaci.<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Omega <<https://www.omega.com/en-us/resources/temperature-controllers>> (2.3.2020.)



Slika 4.: ON/OFF regulacija



Izvor: Coulton <[https://www.coulton.com/res/on\\_off\\_control.png](https://www.coulton.com/res/on_off_control.png)> (2.3.2020.)

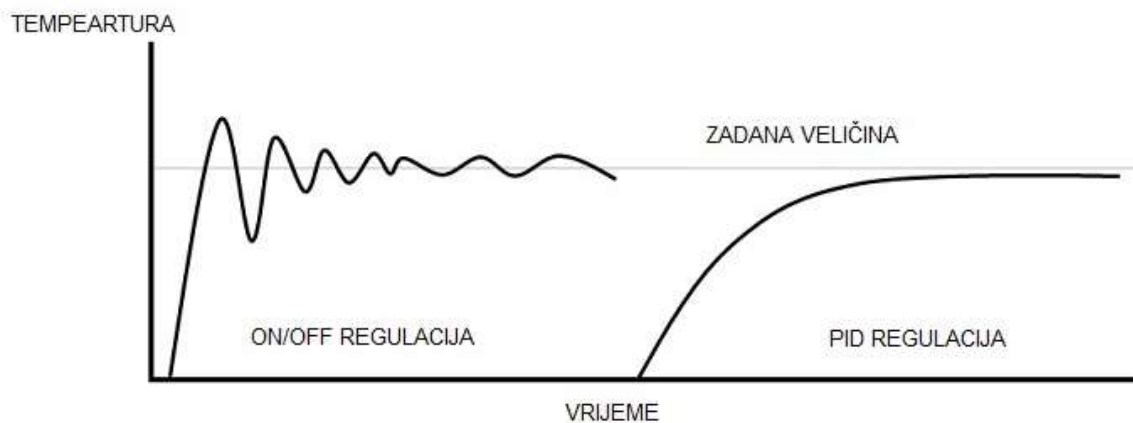
Povijest PID regulatora započinje u 17. st. kada Christiaan Huygens koristi takav uređaj za regulaciju razmaka između mlinskih kamena u vjetrenjačama. Razvoj PID regulatora nastavljen je izumom torpeda u 19. stoljeću te potrebom upravljanja uranjanjem i usmjeravanjem torpeda. 1922. godine prvi je puta znanstveno utemeljeno djelovanje PID regulatora potkrijepljeno analitičkim dokazima koji se i danas primjenjuju.

Sustav sa negativnom povratnom vezom prvi je put primijenjen krajem 1920.-ih razvojem širokopoljnih pojačala za telefonsku industriju. 1930.-te je izumljena pneumatska regulacija sa povratnom vezom koja se temeljila na PID regulatoru. Pneumatska regulacija je postala standard u industriji i korištena je sve do pojave elektroničkih PID regulatora. Današnji PID regulatori rade pomoću računalnih softvera (PLC, DCS).<sup>12</sup>

<sup>12</sup> Bennet, S.: "A brief history of automatic control", **IEEE Control Systems Magazine**, IEEE, UK, Vol.16, No.3, June 1996., p. 17-25

Razlika u djelovanju PID regulatora u odnosu na ON/OFF regulator, vidljiva je na Slici 5. PID regulator je učinkovitiji u kompenzaciji poremećaja procesa (npr. Otvaranje vrata hladnjaka). PID regulator ima, za razliku od ON/OFF regulatora, mogućnost varijacije snage grijača ili hladila, odnosno mogućnost „finog“ podešenja utjecaja na reguliranu veličinu, kako se ona svojom vrijednošću približava željenoj vrijednosti. Postoje različite inačice PID regulatora: P, PI, PD i PID.

Slika 5.: Usporedba odziva sustava reguliranog ON/OFF i PID regulatorima

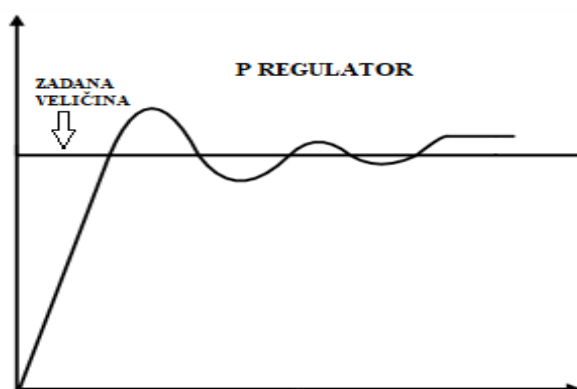


Izvor: Molecularrecipes

<<http://www.molecularrecipes.com/wpcontent/uploads/2014/06/PID.jpg>> (2.3.2020.)

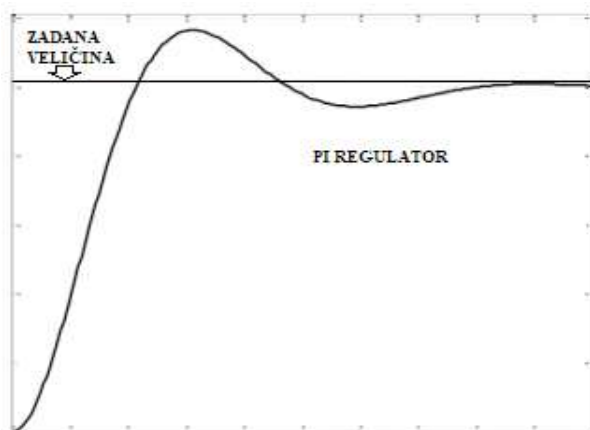
P regulator (Slika 6) se koristi za regulaciju jednostavnijih procesa, odnosno gdje je u regulacijskom sustavu dopuštena statistička pogreška. Željena brzina odziva i doseganje stacionarnog stanja se primjenom P regulatora dostižu relativno učinkovito. PD regulacija se koristi kada dinamika odziva P regulatora ne zadovoljava. I regulatori se primjenjuju u sustavima sa malim zahtjevima u smislu karakteristika regulacije. Iznimno su spori, no učinkoviti su u eliminaciji odstupanja u ustaljenom stanju. PI regulatori (Slika 7) predstavljaju dobar kompromis brzine odziva i statičke pogreške te se većina regulacijskih zahtjeva može se riješiti uporabom PI regulatora. Slika 8 najbolje prikazuje svojstva PID regulatora i njegovih izvedenica.

Slika 6.: Odziv P regulatora



Izvor: Circuitdigest < <https://circuitdigest.com/sites/default/files/inlineimages/u/PID-controller-Proportional-response.png>> (12.6.2020.)

Slika 7.: Odziv PI regulatora



Izvor: Posterus < [http://www.posterus.sk/wp-content/uploads/p16942\\_09\\_obr09-400x330.png](http://www.posterus.sk/wp-content/uploads/p16942_09_obr09-400x330.png)> (12.6.2020.)

Slika 8.: Svojstva PID regulatora i izvedenica

REGULATOR	STATISTIČKA GREŠKA	BRZINA ODGOVORA
P	DA	VISOKA
PD	DA	VRLO VISOKA
PI	NE	VISOKA
PID	NE	VRLO VISOKA

Izvor: autor

PID (proporcionalni integralni derivacijski) regulatori se najčešće koriste u industriji. PID regulator ima zadaću da signal regulacijskog odstupanja obradi prema proporcionalnom – integralnom – derivacijskom algoritmu te da generira upravljački signal izvršnom članu.<sup>13</sup>

Mjerni član u sustavu automatskog upravljanja temperature predstavlja uređaj za mjerenje temperature. Najčešće korišteni senzori su električni i živini termometri. Također se koriste otpornički elementi (promjenom temperature linearno im se povećava otpor), termo parovi.<sup>14</sup>

### 3.2. Električni grijač kao izvršni član

Povijest električkog grijača seže u 1880. god. kada je Thomas Edison patentirao žarulju. Međutim električni grijač je trebao izdržljiviju žicu sa visokim otporom. Kasnije u 1905. god. je Albert Leroy Marsh razvio leguru „chromel“ danas poznatu kao Nichrome. Legura je bila do 300 puta temperaturno izdržljivija od tadašnjih poznatih legura. U ranim 1900.-im god. se električni grijač počeo prihvaćati u kućanstvu i industriji. Od 1950. god. je većina modela grijača bilo prijenosno te je to postao popularan način grijanja u kućanstvima. Krajem 20. stoljeća električni grijači se konstrukcijski poboljšavaju te postaju sve učinkovitiji za upotrebu. Dolaskom digitalizacije grijači postaju više upravljivi i učinkovitiji, razlog tome je što se električni grijač upravlja pomoću računalnih čipova, te mogu izvršavati složene naredbe. Npr. uključivanje ili isključivanje u određeno vrijeme koje je prethodno određeno ili davanje naredba pomoću pametnih uređaja.<sup>15</sup>

Električni grijač je element koji električnu energiju pretvara u toplinsku energiju. Tu toplinsku energiju se može koristiti za obradu metala i njihovu termo kemijsku obradu. Osnovni princip rada električnog grijača je da struja prolazi kroz element koji je najčešće bakrena žica, u elementu nailazi na otpor, koji za rezultat ima zagrijavanje elementa. Ovi grijači su neovisni o smjeru struje. Ima mnogo vrsta grijača, a neki od njih su opisani u nastavku.<sup>16</sup>

---

<sup>13</sup> Optics control <<https://blog.opticontrols.com/archives/344>> (2.3.2020.)

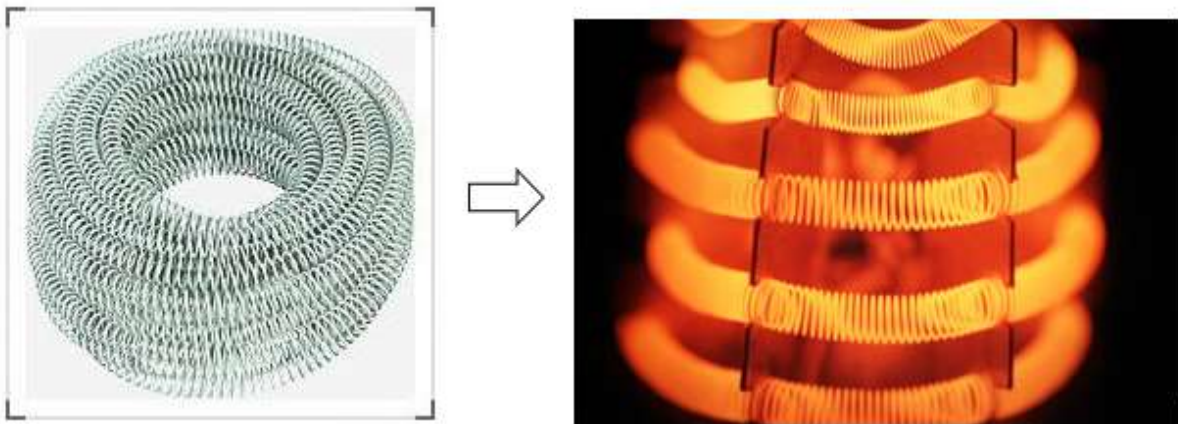
<sup>14</sup> VRHOVSKI, Z.: **Automatsko upravljanje analiza i sinteza linearnih kontinuiranih sustava**, Visoka tehnička škola u Bjelovaru, Bjelovar, 2013, str. 174-175

<sup>15</sup> Electric radiators direct <<https://www.electricradiatorsdirect.co.uk/news/the-history-of-electric-heating/>> (12.6.2020.)

<sup>16</sup> Explainthatstuff < <https://www.explainthatstuff.com/heating-elements.html> > (10.5.2020.)

Metalni elementi mogu biti žica ili vrpca, ravni ili namotani, ali najčešće se ih naziva otporna žica. Najčešće korišten materijal je Nichrome. Većina proizvođača grijača koristi ovaj materijal sa 80% nikla i 20% kroma. Nichrome je idealan materijal jer ima visoku otpornost i kada se zagrije tvori sloj koji štiti grijač od oksidacije te tako sprječava da se žica ne raspadne ili izgori. Na Slici 9 se može vidjeti kako izgleda žica prije zagrijavanja i kada je zagrijana. Koristi se također i FeCrAl žica, Cu Ni legure za grijanje na niskim temperaturama. Ovi elementi se koriste u uređajima za grijanje poput tostera, sušila za kosu, prijenosnih grijalica, podnih grijanja itd. <sup>17</sup>

Slika 9.: Prikaz žice prije zagrijavanja i za vrijeme zagrijavanja



Izvori:

<<https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTYJUP4g03IOMarv9w9yp e2ppaCSWQyzeEjJdzT35YRqAjPpyxZZg>> (12.2.2020.) i

<<https://ak9.picdn.net/shutterstock/videos/5455199/thumb/2.jpg>> (12.2.2020.)

Keramički i poluvodički materijal MoSi je vatrostalna keramika koja se prvenstveno koristi u grijaćim elementima (Slika 10). Ima umjerenu gustoću, a talište ima vrlo visoko 2030°C i električki je provodljivo. Na visokim temperaturama formira sloj koji štiti element od oksidacije. Područje primjene uključuje stakla, peći za toplinske obrade i poluvodičke difuzije peći. Materijal PTC je keramički materijal koji kako se zagrijava tako mu se otpor povećava. Taj materijal ima pozitivan koeficijent otpornosti što je rijetko među keramikom. Ovaj materijal se često koristi kao termostat. Kada je element hladan struja prolazi, a kako se zagrijava sve manje propušta struju sve do

<sup>17</sup> Explainthatstuff < <https://www.explainthatstuff.com/heating-elements.html> > (10.5.2020.)

granice kada ne propušta. Tanki slojevi ovog materijala se koriste u automobilskoj industriji za grijanje stražnjeg stakla.<sup>18</sup>

Slika 10.: Keramički grijač



Izvor: <[https://ke.jumia.is/JmS5o3kgiv\\_cVwz-NrxXSYNkGfE=/fit-in/500x500/filters:fill\(white\):sharpen\(1,0,false\):quality\(100\)/product/40/491001/1.jpg?8982](https://ke.jumia.is/JmS5o3kgiv_cVwz-NrxXSYNkGfE=/fit-in/500x500/filters:fill(white):sharpen(1,0,false):quality(100)/product/40/491001/1.jpg?8982)> (19.4.2020.)

Filmski grijači su vrsta otpornog grijača koji se rade na tankoj podlozi. Ovi grijači imaju razne prednosti u odnosu na uobičajene otporne elemente zasićene metalom, imaju poboljšanu temperaturnu ujednačenost, brzi toplinski odziv zbog niske toplinske mase, nisku potrošnju energije i široki raspon kompatibilnosti napona. Ovi grijači se mogu ispisati na različitim podlogama uključujući metalnu, keramičku, staklenu, polimernu ali najčešće se koriste aluminij 6061-T6 i nehrđajući čelik. Najčešća primjena je u ovlaživačima zraka, čajnicima, uređajima za toplinsko zagrijavanje, grijačima vode itd.<sup>19</sup>

Otporni grijači mogu se izrađivati od provodljivih PTC gumenih materijala gdje se otpornost eksponencijalno povećava s porastom temperature. Takav se grijač najčešće proizvodi za velike snage, a specifičnost grijača je da se brzo zagrijava do konstantne temperature. Ti grijači su točkasti samo regulirajući grijači i samo ograničavajući grijači. Samo regulirajući grijač znači da svaka točka grijača neovisno održava stalnu temperaturu bez potrebe za regulacijom elektronike. Samo

<sup>18</sup> King, G., A.: Ceramic Technology and Processing: A practical Working Guide, Noyes Publications, Twinsburg Ohio, 2002, str. 232

<sup>19</sup> Elpos <[http://www.elpos.hr/proizvodi-i-usluge/proizvodi/Grijaci\\_filmovi.aspx](http://www.elpos.hr/proizvodi-i-usluge/proizvodi/Grijaci_filmovi.aspx)> (12.6.2020.)

ograničavajući grijač znači da grijač nikada ne može prijeći određenu temperaturu u bilo kojoj točki i ne zahtijeva zaštitu od pregrijavanja.<sup>20</sup>

Kompozitni grijači su cjevasti elementi koji obično sadrže finu zavojnicu otporne žice koja je smještena u metalnoj cijevi i izolirana prahom magnezijevog oksida. Cijevi se provlače kroz kalup za komprimiranje praha i maksimiziranje prijenosa topline. To mogu biti ravne šipke ili savijene u obliku koji obuhvaća prostor koji se zagrijava. Toplinske žarulje sa žarnom niti obično se nalaze u grijačima hrane, kao dugi cjevasti oblik ili R40 reflektor lampama. Elementi keramičke jezgre koji se mogu ukloniti, koriste otporne žice namotane kroz jedan ili više cilindričnih keramičkih segmenata kako bi napravili potrebnu duljinu sa ili bez središnje šipke. Umetnuta u metalni omotač ili cijev zapečaćena na jednom kraju, ova vrsta elementa omogućuje zamjenu ili popravak bez provale u proces koji je uključen, obično zagrijavanje tekućine pod pritiskom.<sup>21</sup>

---

<sup>20</sup> GM Nameplate <<https://gmnameplate.com/company/blog/what-are-ptc-heaters>> (12.6.2020.)

<sup>21</sup> Heating elements <<https://www.heating-elements.com/>> (12.6.2020.)

## 4. USPOREDBA ODZIVA SUSTAVA REGULIRANIH ON/OFF I PID REGULATOROM

PID i ON/OFF regulatori su najčešće korišteni u temperaturnoj regulaciji. Usporedba odziva ovih dviju regulatora će se prikazati u nastavku pomoću programa Simulink.

### 4.1. Matlab – Simulink

Matlab je programski jezik visoke razine i interaktivna je okolina za numeričko i matrično računanje, te za vizualizaciju i programiranje. Prva verzija Matlab-a napisana je krajem 1970. godine na sveučilištima Novog Meksika i Stanforda. Pomoću Matlab-a mogu se analizirati podaci, izraditi algoritmi te stvoriti modeli i aplikacije. Jezik, alati i matematičke funkcije omogućuju brži rad nego s tablicama ili tradicionalnim programskim jezicima, kao što su C/C++ ili Java. Matlab se može koristiti za niz aplikacija, uključujući obradu signala i komunikacija, obradu sustava kontrole, ispitivanja i mjerenja, računalnih financija i računalne biologije. Simulink je grafički alat unutar Matlab programskog jezika koji omogućuje modeliranje, simulaciju i analizu dinamičkih sustava.<sup>22</sup>

Rad sa Simulinkom počinje ulaskom u matlab program u kojem je smješten simulink, koji se pokreće pritiskom na "prozor" simulink. Kad je simulink pokrenut unutar samog programa nalazi se knjižnica sa osnovnim komponentama koje su potrebne da se stvori blok. Nakon što je blok u cijelosti nacrtan i sve karakteristike blokova podešene tako da odgovaraju željenom sustavu, slijedi izvođenje simulacije. Prvo je potrebno odabrati željeno vrijeme trajanja simulacije, gdje se unesu početno i završno vrijeme simuliranja. Zatim se simulacija pokreće, a za vrijeme trajanja simulacije poželjno je držati prozor osciloskopa otvorenim, kako bi se moglo pratiti ponašanje izlazne varijable. Simulink knjižnica sadrži model PID regulatora kao i relej koji oponaša ON/OFF regulator.

---

<sup>22</sup> Mathworks <<https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/a-brief-history-of-matlab.html>> (10.5.2020.)



## 4.2. Sustav regulacije sa ON/OFF regulatorom

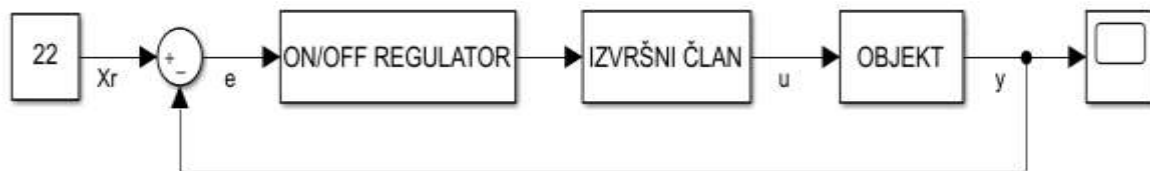
U nastavku je primijenjen ON/OFF regulator za regulaciju temperature u zatvorenoj petlji. Slika 11 prikazuje blokovsku shemu sustava ON/OFF regulacije, a osnovni članovi regulacijske petlje su:

- davač željene temperature (22)
- regulacijski član (ON/OFF)
- izvršni član
- objekt

Signali sustava reguliranog ON/OFF regulatorom su:

- $e$  – regulacijsko odstupanje
- $u$  – izvršna veličina
- $y$  – regulirana veličina
- $x_r$  – željena veličina<sup>23</sup>

Slika 11.: Shema sustava reguliranog ON/OFF regulatorom



Izvor: Izradio autor pomoću Matlaba Simulink-a

Izrada sheme počinje sa definiranjem objekta i regulatora. Ulazna vrijednost je željena temperatura u iznosu od 22°C koja se u komparatoru uspoređuje sa njezinom vrijednosti regulirane veličine. Razlika dviju veličina prosljeđuje se u regulator. Ako je izmjerena vrijednost regulirane veličine veća od željene vrijednosti, ON/OFF regulator daje signal izvršnom članu da ugasi grijač. Kada je vrijednost izlazne varijable niža od željene daje signal za paljenje grijača. Osciloskop u realnom vremenu prikazuje promjene vrijednosti regulirane veličine (izmjerene temperature).<sup>24</sup>

<sup>23</sup> Izvor: Autor

<sup>24</sup> Izvor: Autor

### 4.3. Sustav regulacije sa Pid regulatorom

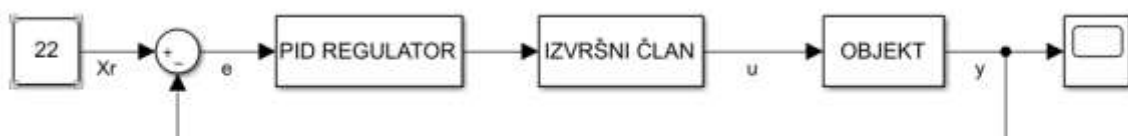
Kada želimo učinkovitu regulaciju temperature nerijetko posežemo za PID regulatorom. Za razliku od priproste logike ON/OFF regulatora, koji jednostavno pali ili gasi aktuator, PID regulacija primjenjuje korekciju na temelju proporcionalnih, integralnih i derivativnih izraza. Slika 12 prikazuje shemu sustava PID regulacije. Osnovni članovi regulacijske petlje su:

- davač željene temperature (22)
- regulacijski član (PID regulator)
- izvršni član
- objekt

Signalni sustava reguliranog PID regulatorom su:

- $e$  – regulacijsko odstupanje
- $u$  – izvršna veličina
- $y$  – regulirana veličina
- $x_r$  – željena veličina

Slika 12.: Shema sustava reguliranog PID regulatorom



Izvor: Izradio autor u programu Matlab Simulink

Za odabranu strukturu objekta i reguliranu veličinu potrebno je odabrati i strukturu regulatora. Željena temperatura regulirane veličine objekta je  $22^{\circ}\text{C}$ . Željena temperatura se u komparatoru uspoređuje sa izmjerenom vrijednosti regulirane veličine. Signal regulacijskog odstupanja se potom prosljeđuje u PID regulator gdje se obrađuje primjenom proporcionalne, integralne i derivacijske metode. Regulacijski signal se šalje izvršnom članu koji djeluje na objekt regulacije. Izvršni član se sastoji

od postavnog pogona (relej) i postavnog člana (električni grijač). U simulacijama je korišten otporni grijač sa otpornom žicom.<sup>25</sup>

#### 4.3.1. Određivanje parametara PID regulatora

Postoje različiti postupci za određivanje parametara PID regulatora. Najčešće se koriste metode podešavanja pomoću softverskih alata ili pak ručno podešavanje. Vrlo se često koristi i metoda Ziegler – Nichols.

Kod ručnog podešavanja se parametri za proporcionalni, integralni i derivacijski član postavljaju na temelju iskustva. U Tablici 1. prikazano je koje su najčešće početne vrijednosti parametara PID regulatora.

Tablica 1.: Najčešće početne vrijednosti parametara PID regulatora za različite procesne varijable

Procesne varijable	K (Pojačanje)	Ti (Integralno vrijeme, min)	Td (Derivacijsko vrijeme, min)
Protok	0.8	0.2	0.0
Nivo	1.0	10.0	0.0
Pritisak	2.0	0.5	0.0
Temperatura	1.0	3.0	0.2

Izvor: Automatika <<https://www.automatika.rs/baza-znanja/teorija-upravljanja/inicijalno-podesavanje-pid-regulatora.html>> (12.5.2020)

Postoje dvije inačice određivanja parametara metode PID regulatora po Ziegler-Nicholsu. Prva metoda temelji na dovođenju sustava na granicu stabilnosti. Sastoji od četiri koraka. U prvom koraku se regulator postavlja tako da se isključe integralni i derivacijski članovi te se ostavi samo proporcionalni član. Potom se pojačanje  $K_R$  proporcionalnog dijela regulatora pojačava dovoljno dugo dok odziv ne dobije oblik trajnih oscilacija (granična stabilnost). Pojačanje pri kojim nastaju trajne oscilacije nazivamo kritičnim pojačanjem regulatora ( $K_{kr}$ ). U trećem koraku se određuje (mjeri) iznos periode kritičnih oscilacija ( $T_{kr}$ ). U posljednjem, četvrtom koraku se na temelju

<sup>25</sup> Izvor: Autor

kritičnih trajnih oscilacija i kritičnog iznosa periode određuju ostale vrijednosti regulatora ( $T_D$ ,  $T_I$ ,  $K_R$ ) uz pomoć Tablice 2.<sup>26</sup>

Tablica 2.: Tablica vrijednosti prema prvoj inačici Ziegler-Nichols metoda

Tip regulatora	Vrijednosti parametara regulatora		
	$K_R$	$T_I$	$T_D$
P	$0,5 K_{rkr}$	-	-
PI	$0,45 K_{rkr}$	$0,85 T_{kr}$	-
PID	$0,6 K_{rkr}$	$0,5 T_{kr}$	$0,12 T_{kr}$

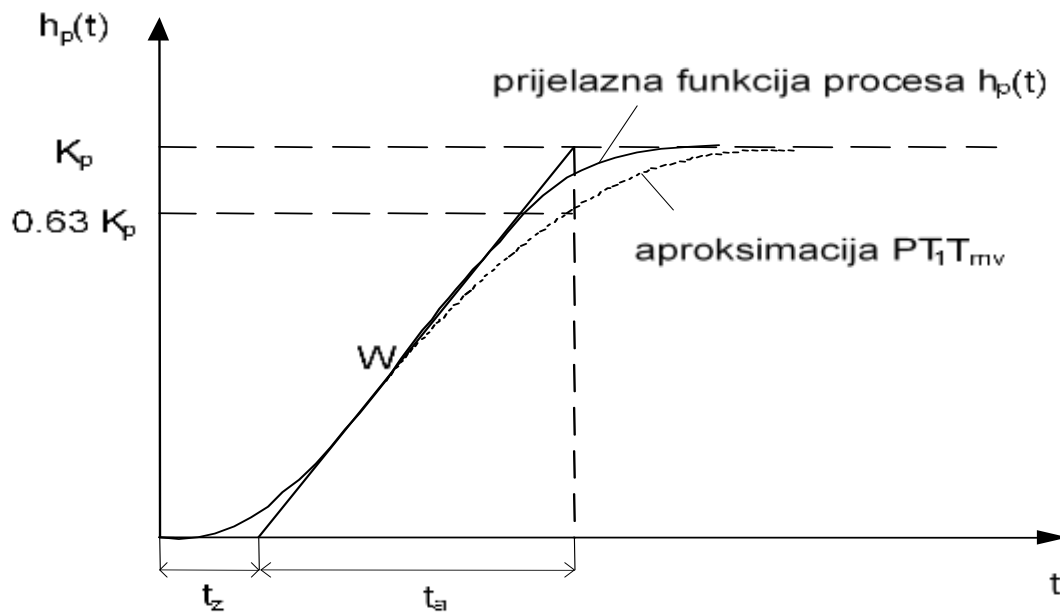
Izvor: < <https://www.automatika.rs/baza-znanja/teorija-upravljanja/podesavanje-pid-regulatora-ziegler-nicholsa-metodom.html>> (12.5.2020.)

Druga varijanta određivanja parametara PID regulatora po Ziegler-Nichols metodi ne zahtjeva dovođenje odziva regulacijskog kruga u stanje neprigušenih oscilacija odnosno dovođenje sustava u stanje granične stabilnosti. Ova metoda se zove metoda prijelazne funkcije. Temelji na nagibu tangente u točki infleksije  $K_p/t_a$  i vremenu zadržavanja  $t_z$  prijelazne funkcije. Određuje se prema Slici 13. Potrebno je očitati vrijeme porasta ( $t_a$ ), vrijeme zadržavanja ( $t_z$ ) i koeficijent pojačanja procesa ( $K_p$ ). Nakon toga se iz Tablice 3 se određuju ostali parametri PID regulatora. Ovakav način određivanja parametara PID regulatora se nije pokazao dovoljno učinkovitim te se u današnje vrijeme radije primjenjuju određena softverska rješenja. Uporaba računalnih simulacija uvelike pripomaže u stjecanju dragocjenih informacija o reguliranom sustavu.<sup>27</sup>

<sup>26</sup> Automatika <<https://www.automatika.rs/baza-znanja/teorija-upravljanja/podesavanje-pid-regulatora-ziegler-nicholsa-metodom.html>> (13.5.2020.)

<sup>27</sup> Auromatika <<https://www.automatika.rs/baza-znanja/teorija-upravljanja/podesavanje-pid-regulatora-ziegler-nicholsa-metodom.html>> (13.5.2020.)

Slika 13.: Aproximacija odziva procesa s korištenjem tangente u točki infleksije



Izvor: < <https://bib.irb.hr/datoteka/197923.CTS13.pdf> > (13.5.2020)

Tablica 3.: Tablica vrijednosti za drugu inačicu metode po Ziegler Nichols-u

Tip regulatora	Vrijednosti parametara regulatora		
	$K_R$	$T_I$	$T_D$
P	$1 / K_s * t_a / t_z$	-	-
PI	$0,9 / K_s * t_a / t_z$	$3 t_z$	-
PID	$1,2 / K_s * t_a / t_z$	$2 t_z$	$0,5 t_z$

Izvor: < <https://www.automatika.rs/baza-znanja/teorija-upravljanja/podesavanje-pid-regulatora-ziegler-nicholsa-metodom.html> > (12.5.2020.)

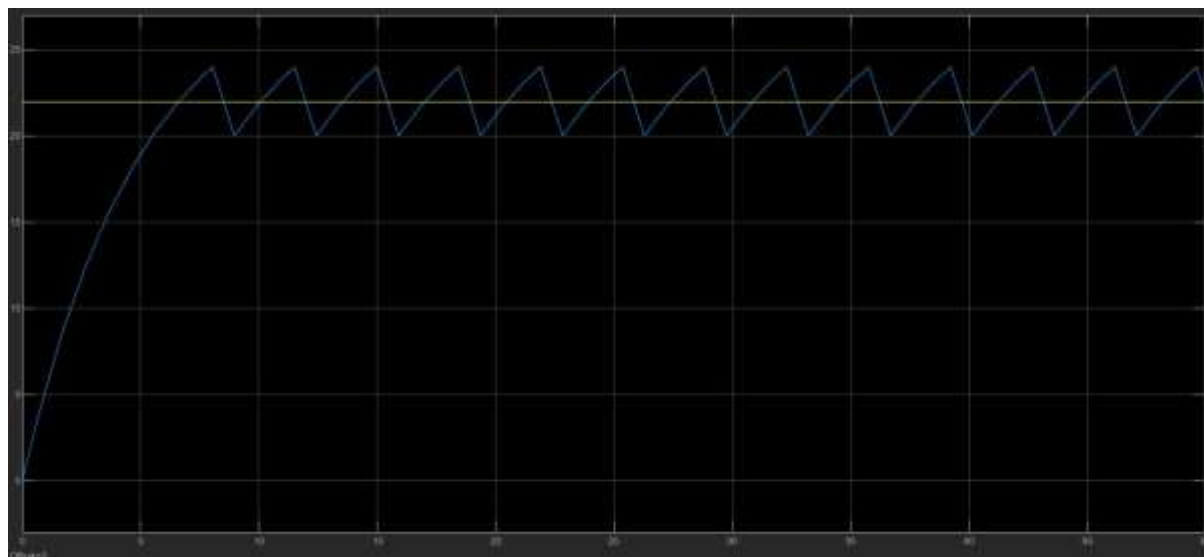
Softverski modeli određuju optimalne parametre regulatora za odabrani sustav. Postoje i računalni postupci koji temelje na Ziegler-Nichols metodama.<sup>28</sup>

<sup>28</sup> Auromatika <<https://www.automatika.rs/baza-znanja/teorija-upravljanja/podesavanje-pid-regulatora-ziegler-nicholsa-metodom.html>> (13.5.2020.)

#### 4.4. Rezultati simulacija sustava

Simulacija odziva ON/OFF regulatora se radi prema sustavu opisanom u poglavlju 4.2. U simulaciji odziva sustava vođenog ON/OFF regulatorom (Slika 14.) može se primijetiti prebačaj od  $2^{\circ}\text{C}$  iznad željene vrijednosti ( $22^{\circ}\text{C}$ ) i podbačaj od  $2^{\circ}\text{C}$  ispod željene vrijednosti. Te oscilacije dolaze jer se u sustavu koristi relej, te takvi uređaji ne mogu imati brze vremenske intervale za uključivanje i isključivanje, razlog tomu je sam princip rada ON/OFF regulatora koji je objašnjen u poglavlju 3.1. Na Slici 14 simulaciji odziva ON/OFF regulatora žutom crtom je prikazana željena temperatura dok je plavom crtom prikazan odziv sustava.<sup>29</sup>

Slika 14.: Simulacija odziva sustava vođenog ON/OFF regulatorom u programu Simulink



Izvor: Autor

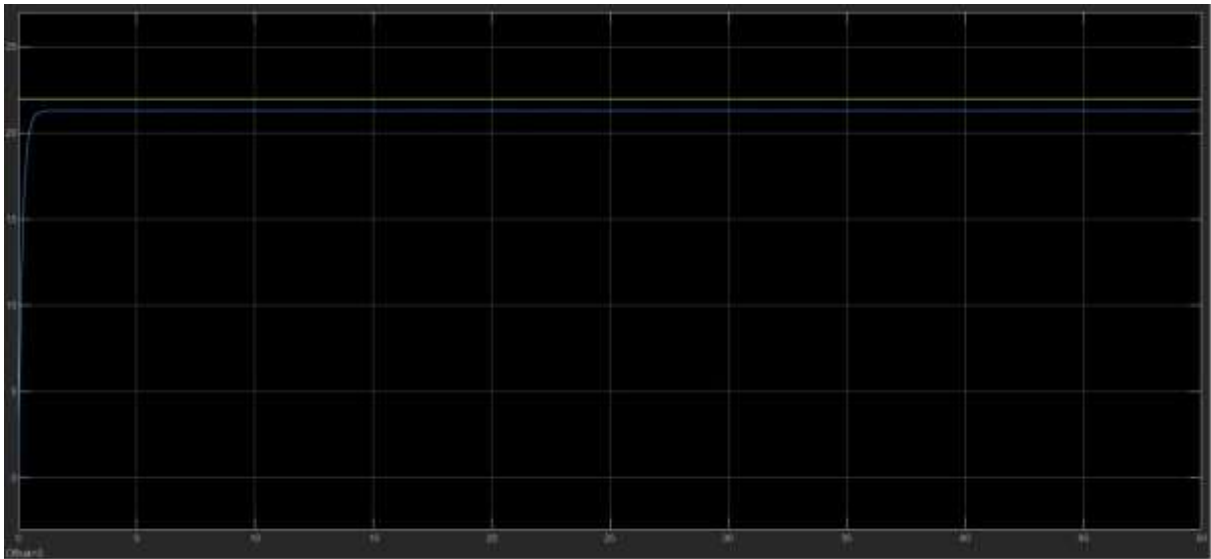
U simulaciji odziva sustava vođenog P regulatorom (Slika 15.) može se vidjeti da sustav brzo reagira ali ima trajno regulacijsko odstupanje od  $2^{\circ}\text{C}$  što je karakteristično za P regulator. Simulacija sustava je rađena prema shemi na Slici 16. Odziv sustava iznosi  $21^{\circ}\text{C}$  koji je označen plavom linijom na Slici 15 dok je željena temperatura označena žutom linijom i iznosi  $22^{\circ}\text{C}$ . Sustav Simulinka s obzirom na sustav je postavio parametar P regulatora na  $P=0.594$ .<sup>30</sup>

---

<sup>29</sup> Izvor: Autor

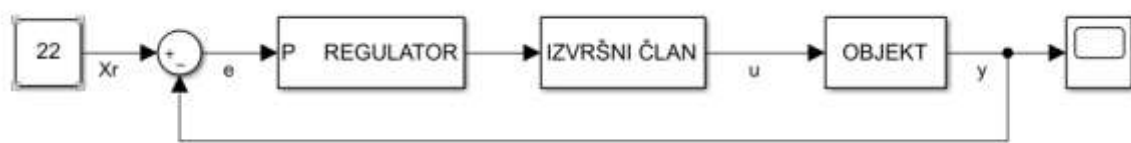
<sup>30</sup> Izvor: Autor

Slika 15.: Simulacija odziva sustava vođenog P regulatorom u programu Simulink



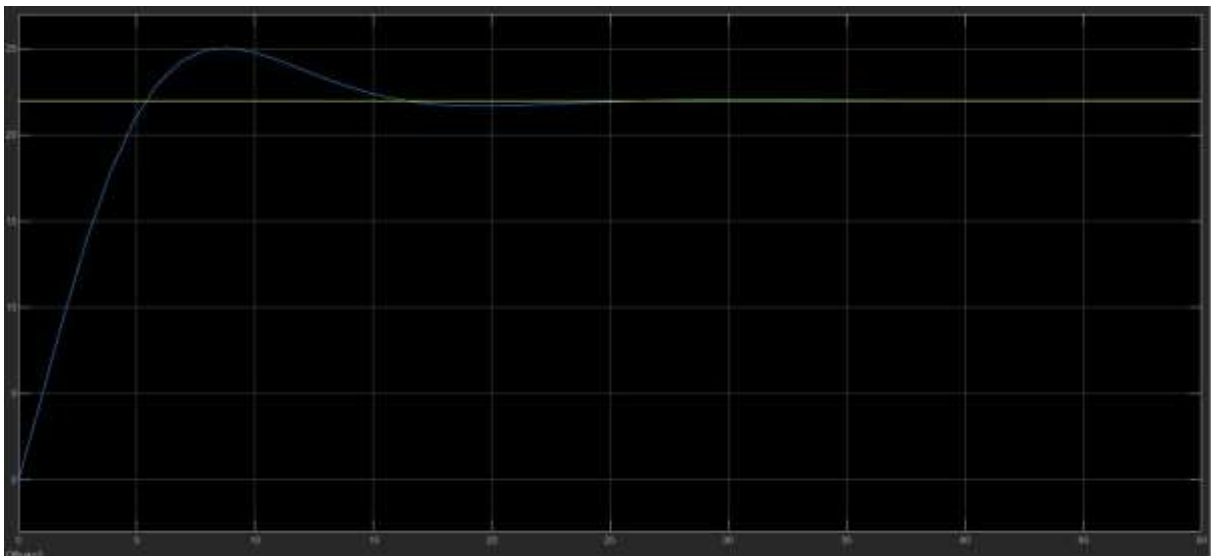
Izvor: Autor

Slika 16.: Shema sustava vođenog P regulatorom



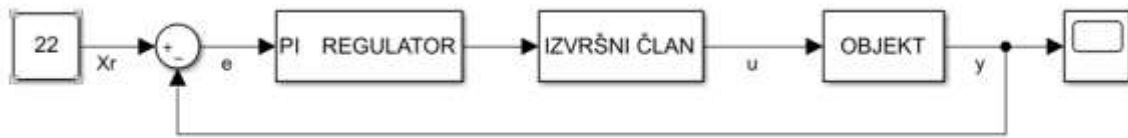
Izvor: Izradio autor u programu Matlab Simulink

Slika 17.: Simulacija odziva sustava vođenog PI regulatorom u programu Simulink



Izvor: Autor

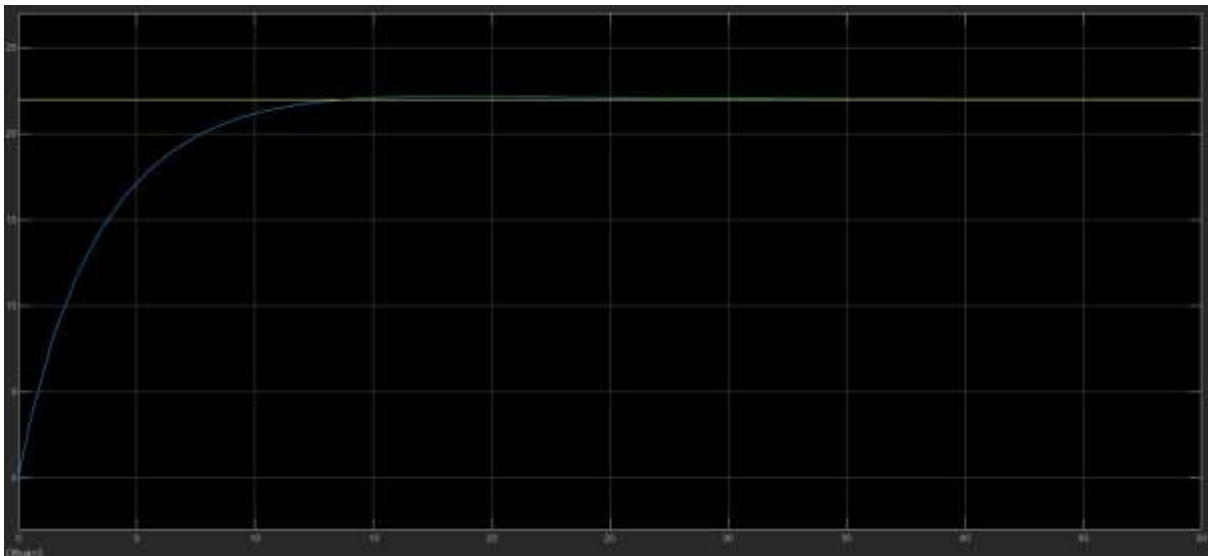
Slika 18.: Shema sustava sa PI regulatorom



Izvor: Izradio autor u programu Matlab Simulink

Kod sustava automatskog upravljanja temperature sa PI regulatorom simulacija odziva (Slika 17.) prikazuje da je potrebno više vremena kod uključivanja regulatora da se postigne željena vrijednost. Simulacija odziva sustava (Slika 17) prikazuje prebačaj od 3°C zbog sporog uključivanja te potom sporijeg stabiliziranja sustava. Parametri PI regulatora koji je postavio Simulink su  $P=0,0347$  i  $T_I=0,0209$  s. Parametre koje je odabrao Simulink su preporučeni za ovaj sustav. Na Slici 18. je prikazana shema sustava prema kojoj je rađena simulacija odziva sustava sa PI regulatorom.<sup>31</sup>

Slika 19.: Simulacija odziva sustava sa PID regulatorom u programu Simulink



Izvor: Autor

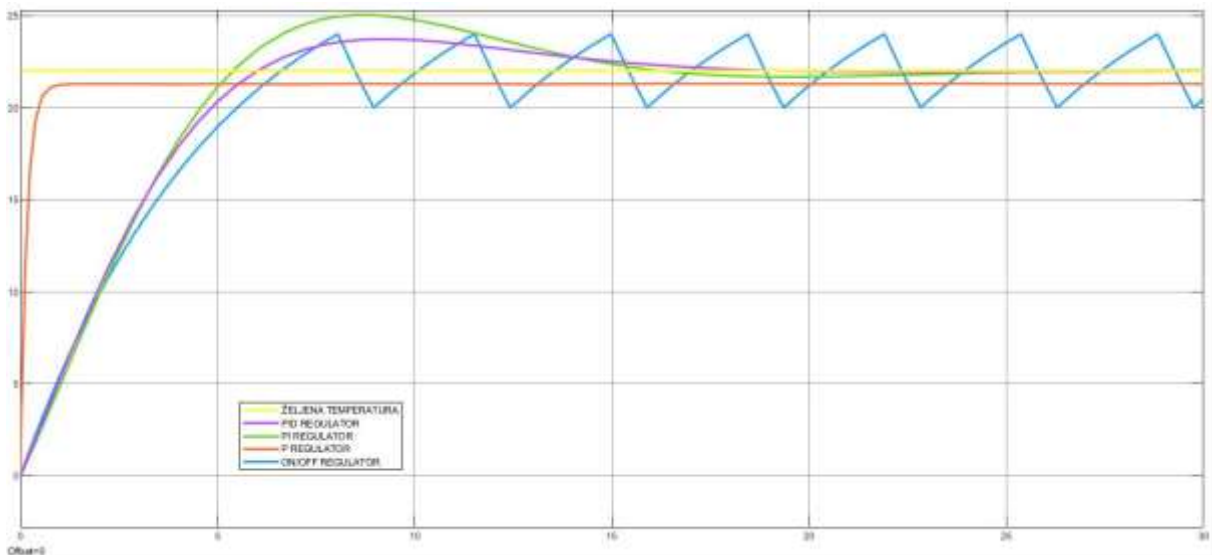
Simulacija odziva sustava sa PID regulatorom je rađena prema shemi sustava sa PID regulatorom u poglavlju 4.3. Simulacija odziva (Slika 19.) sa PID regulatorom prikazuje brže vrijeme stabiliziranja od uključivanja do postizanja željene vrijednosti od 22°C. Derivacijski član ima ulogu u PID regulatoru da povećava brzinu odziva i

<sup>31</sup> Izvor: Autor



sprečava veliko regulacijsko odstupanje. Maksimalni prebačaj kod PID regulatora iznosi  $22,5^{\circ}\text{C}$ , što je malo uspoređujući ga sa prijašnjim simulacijama odziva sustava sa ON/OFF, P i PI regulatorima. Automatski određeni parametri PID regulatora putem Simulink softvera su:  $P= 0.0474$ ,  $T_I= 0.0108\text{s}$  i  $T_D= 0.0151\text{s}$ .

Slika 20.: Simulacije odziva sustava vođenih ON/OFF, P, PI, PID regulatorima u programu Simulink



Izvor: Autor

Simulacije odziva regulatora prikazuju na Slici 20. da se za najjednostavnije sustave može koristiti ON/OFF regulator zbog njegovog jednostavnog korištenja, implementiranje u sustave i jeftinije proizvodnje. ON/OFF regulator prikazuje kod uključivanja i isključivanja prebačaj odnosno podbačaj od  $2^{\circ}\text{C}$  do  $-2^{\circ}\text{C}$  od željene vrijednosti  $22^{\circ}\text{C}$ . Ako bi se ON/OFF regulator postavio na brže vrijeme uključivanja i isključivanja došlo bi do oštećenja samog regulatora. P regulator u tom slučaju može brže reagirati od ON/OFF regulatora što možemo vidjeti na simulaciji odziva regulatora (Slika 20.). Problem kod P regulatora je trajno regulacijsko odstupanje koje ako želimo precizan sustav to nije dobro. Tada se u sustav ubacuje integralni regulator te PI regulator sada može postići željenu vrijednost, ali sporije se stabilizira od početnog uključivanja. Dodavanje derivacijskog člana taj se problem rješava te na Slici 20. kod simulacije odziva može se vidjeti kako je PID regulator precizniji od ostalih regulatora na kojima se prethodno simuliralo odzive.

## 5. ZAKLJUČAK

Iz simulacija možemo vidjeti da se za regulaciju temperature može koristiti PID i ON/OFF regulator, ali se PID regulator pokazao preciznijim. ON/OFF regulator ima prebačaj i podbačaj, može se primjenjivati kod sustava gdje nije potrebna preciznost odziva. Dok su P regulatori adekvatni i mogu održati nazivnu veličinu unutar određene tolerancije. Međutim kad se želi postići zadana temperatura što preciznije oni nisu dovoljno dobri što se može vidjeti iz prijašnjih simulacija. Dodavanje I regulatora sustav postaje tromiji ali dobivamo prebačaj od 3°C te potom stabiliziranje na željenu vrijednost. Sa PI regulatorom se dobiva na otklanjanju statičke pogreške. Dok PID regulator ima najbolji odziv na sustav upravljanja temperaturom što se može vidjeti iz prethodnih simulacija.

To dovodi do zaključka da je PID regulator najpogodniji kod sustava koji iziskuju preciznost, PI regulatori se mogu koristiti kod većine sustava u kojima nije potrebna velika preciznost. ON/OFF i P regulatori imaju najmanju preciznost što zbog uređaja kod ON/OFF regulatora ili trajnog regulacijskog odstupanja kod P regulatora.

## LITERATURA

Automatika <<https://www.automatika.rs/baza-znanja/teorija-upravljanja/podesavanje-pid-regulatora-ziegler-nicholsa-metodom.html>> (13.5.2020.)

Bennet,S.: "A brief history of automatic control", **IEEE Control Systems Magazine**, IEEE, UK, Vol.16, No.3, June 1996., p. 17-25

Electric radiators direct <<https://www.electricradiatorsdirect.co.uk/news/the-history-of-electric-heating/>> (12.6.2020.)

Explainthatstuff < <https://www.explainthatstuff.com/heating-elements.html> > (10.5.2020)

GM Nameplate <<https://gmnameplate.com/company/blog/what-are-ptc-heaters>> (12.6.2020.)

Heating elements <<https://www.heating-elements.com/>> (12.6.2020)

Illustrationprize <<https://illustrationprize.com/hr/62-difference-between-open-loop-amp-closed-loop-system.html>> (7.6.2020)

Instrumart <<https://www.instrumart.com/pages/283/temperature-controller-basics-handbook>> (10.5.2020)

King, G., A.: Ceramic Technology and Processing: Apractical Working Guide, Noyes Publications, Twinsburg Ohio, 2002, str. 232

Mathworks <<https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/a-brief-history-of-matlab.html>> (10.5.2020)

Mr.sc. Eduard Lorenci, **Prezentacije kolegija Osnove automatskog upravljanja**, Politehnika Pula, Pula, 2018

Omega<<https://www.omega.com/en-us/resources/temperature-controllers>>(2.9.2019)

Optics control <<https://blog.opticontrols.com/archives/344>> (2.9.2019.)

VRHOVSKI,Z.: **Automatsko upravljanje analiza i sinteza linearnih kontinuiranih sustava**, Visoka tehnička škola u Bjelovaru, Bjelovar, 2013, str. 174-175

West-cs <<https://www.west-cs.com/news/what-is-a-temperature-control-system/>> (27.8.2019)

## POPIS SLIKA I TABLICA

Slika 1.: Shema sustava ručnog i automatskog upravljanja u zatvorenoj petlji.....	4
Slika 2.: Primjer automatskog upravljanja u otvorenoj petlji.....	7
Slika 3.: Shema sustava automatskog upravljanja temperature .....	9
Slika 4.: ON/OFF regulacija .....	10
Slika 5.: Usporedba odziva sustava reguliranog ON/OFF i PID regulatorima.....	11
Slika 6.: Odziv P regulatora .....	12
Slika 7.: Odziv PI regulatora .....	12
Slika 8.: Svojstva PID regulatora i izvedenica.....	12
Slika 9.: Prikaz žice prije zagrijavanja i za vrijeme zagrijavanja.....	14
Slika 10.: Keramički grijač.....	15
Slika 11.: Shema sustava reguliranog ON/OFF regulatorom.....	18
Slika 12.: Shema sustava reguliranog PID regulatorom .....	19
Slika 13.: Aproksimacija odziva procesa s korištenjem tangente u točki infleksije....	22
Slika 14.: Simulacija odziva sustava vođenog ON/OFF regulatorom u programu Simulink.....	23
Slika 15.: Simulacija odziva sustava vođenog P regulatorom u programu Simulink .	24
Slika 16.: Shema sustava vođenog P regulatorom .....	24
Slika 17.: Simulacija odziva sustava vođenog PI regulatorom u programu Simulink	24
Slika 18.: Shema sustava sa PI regulatorom .....	25
Slika 19.: Simulacija odziva sustava sa PID regulatorom u programu Simulink .....	25
Slika 20.: Simulacije odziva sustava vođenih ON/OFF, P, PI, PID regulatorima u programu Simulink.....	26
Tablica 1.: Najčešće početne vrijednosti parametara PID regulatora za različite procesne varijable .....	20
Tablica 2.: Tablica vrijednosti prema prvoj inačici Ziegler-Nichols metoda .....	21
Tablica 3.: Tablica vrijednosti za drugu inačicu metode po Ziegler Nichols-u.....	22