

# Mjerenje i regulacija razine pomoću mikroupravljača i ultrazvučnog mjernog pretvornika

---

Jelinić, Ana

Master's thesis / Diplomski rad

2014

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, FACULTY OF FOOD TECHNOLOGY / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:109:921313>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**

REPOZITORIJ

PTF OS

PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK

dabar  
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Food Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK**

**ANA JELINIĆ**

**MJERENJE I REGULACIJA RAZINE POMOĆU MIKROUPRAVLJAČA I  
ULTRAZVUČNOG MJERNOG PRETVORNIKA**

DIPLOMSKI RAD

Osijek, srpanj, 2014.

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku  
Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek  
Zavod za procesno inženjerstvo  
Katedra za Modeliranje, optimiranje i automatizaciju  
Franje Kuhača 20, 31000 Osijek, Hrvatska

**Znanstveno područje:** Biotehničke znanosti  
**Znanstveno polje:** Prehrambena tehnologija  
**Nastavni predmet:** Automatizacija procesa  
**Tema rada** je prihvaćena na IV. sjednici Fakultetskog vijeća Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek održanoj 21. siječnja 2014.  
**Mentor:** *Doc. dr. sc. Frane Čačić Kenjerić*

### MJERENJE I REGULACIJA RAZINE POMOĆU MIKROUPRAVLJAČA I ULTRAZVUČNOG MJERNOG PRETVORNIKA

*Jelinić Ana, 154-DI*

#### Sažetak:

Cilj ovoga diplomskog rada bila je izvedba mjernog i regulacijskog uređaja razine temeljenog na Arduino Uno R3 platformi. Za mjerenje razine korišten je HC-SR04 model ultrazvučnog pretvornika kompatibilnog sa mikroupravljačem. Opisan je princip rada za metodu ultrazvučnog mjerenja i način rada ultrazvučnog pretvornika. Prikazani su i dijelovi mikroupravljača te je detaljno opisan cjelokupni sustav. Na temelju provedenih mjerenja i regulacije potvrđena je mogućnost brzog, jeftinog i jednostavnog razvoja prototipa sustava pomoću Arduino platforme. Uz navedeno, pri mjerenju udaljenosti ultrazvučnim pretvornikom postignuta je točnost mjerenja od 0,19 cm. Prema tomu, rezultati su u skladu sa specifikacijama proizvođača pri kojima je navedena maksimalna točnost do 0,3 cm u mjernom rasponu od 2 cm do 400 cm.

**Ključne riječi:** Mjerenje razine, mikroupravljač, ultrazvuk, regulacija razine

**Rad sadrži:** 42 stranice  
21 slika  
3 tablice  
2 priloga  
27 literaturnih referenci

**Jezik izvornika:** Hrvatski

#### Sastav Povjerenstva za obranu:

1. Izv. prof. dr. sc. Mirela Planinić	predsjednik
2. <i>Doc. dr. sc. Frane Čačić Kenjerić</i>	član-mentor
3. <i>Doc. dr. sc. Jasmina Lukinac-Čačić</i>	član
4. <i>Doc. dr. sc. Stela Jokić.</i>	zamjena člana

**Datum obrane:** 18. srpnja 2014.

**Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u** Knjižnici Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek, Franje Kuhača 20, Osijek.

---

## BASIC DOCUMENTATION CARD

GRADUATE THESIS

University Josip Juraj Strossmayer in Osijek  
Faculty of Food Technology Osijek  
Department of Process engineering  
Subdepartment of Modelling, Optimisation and Automation  
Franje Kuhača 20, HR-31000 Osijek, Croatia

**Scientific area:** Biotechnical sciences

**Scientific field:** Food technology

**Course title:** Process Automation

**Thesis subject** was approved by the Faculty Council of the Faculty of Food Technology Osijek at its session no. IV held on January 21<sup>st</sup>, 2014.

**Mentor:** *Frane Čačić Kenjeric*, PhD, assistant prof.

### Development of microcontroller and ultrasound based level measurement and regulation

*Jelinić Ana, 154-DI*

#### Summary:

The purpose of this study was development of Arduino Uno R3 microcontroller based level measurement and regulation. Level measurement was conducted along with HC-SR04 model of ultrasonic probe due to compatibility with a microcontroller. Basic principle of ultrasonic measurement as well as operating principle of a ultrasonic probe is described. A detailed description of system and main parts of microcontrollers are also presented. The possibility of developing inexpensive, fast and simple prototype of the system based on open-source Arduino platform is confirmed as a result of system measurements and regulation. In addition, the specified ranging accuracy of ultrasonic probe, that can reach up to 0.3 cm in a measurement range of 2 to 400 cm, was achieved and determined to be 1.9 cm, respectively.

**Key words:** Level measurement, microcontroller, ultrasound, level regulation

**Thesis contains:** 42 pages  
21 figures  
3 tables  
2 supplements  
27 references

**Original in:** Croatian

#### Defense committee:

- |  |              |
|--|--------------|
| 1. Mirela Planinić, PhD, associate prof.               | chair person |
| 2. <i>Frane Čačić Kenjeric</i> , PhD, assistant prof.  | supervisor   |
| 3. <i>Jasmina Lukinac-Čačić</i> , PhD, assistant prof. | member       |
| 4. <i>Stela Jokić</i> , PhD, assistant prof.           | stand-in     |

**Defense date:** July 18<sup>th</sup> 2014.

**Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in** Library of the Faculty of Food Technology Osijek, Franje Kuhača 20, Osijek.

## Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. TEORIJSKI DIO</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1. RAZINA</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2. ULTRAZVUČNO MJERENJE RAZINE</b> .....	<b>4</b>
<b>2.3. MIKROUPRAVLJAČI</b> .....	<b>7</b>
2.3.1. Struktura mikroupravljača .....	8
<b>2.4. SUSTAV AUTOMATSKE REGULACIJE</b> .....	<b>9</b>
2.4.1. Princip regulacije .....	10
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO</b> .....	<b>12</b>
<b>3.1. ZADATAK</b> .....	<b>13</b>
<b>3.2. MATERIJALI I METODE</b> .....	<b>13</b>
3.2.1. Arduino Uno R3 .....	13
3.2.2. Ultrazvučni mjerni pretvornik HC-SR04 .....	15
3.2.3. Releji .....	17
3.2.4. Elektromagnetski ventili .....	18
3.2.5. Spremnik .....	20
3.2.6. Algoritam upravljanja ON/OFF .....	21
3.2.7. Algoritam upravljanja PID regulatora.....	21
<b>4. REZULTATI I RASPRAVA</b> .....	<b>23</b>
<b>4.1. SUSTAV UPRAVLJANJA RAZINOM</b> .....	<b>24</b>
<b>4.2. PROGRAM MIKROUPRAVLJAČA</b> .....	<b>25</b>
<b>4.3. TESTIRANJE SUSTAVA</b> .....	<b>28</b>
<b>5. ZAKLJUČCI</b> .....	<b>32</b>
<b>6. LITERATURA</b> .....	<b>35</b>
<b>7. PRILOZI</b> .....	<b>38</b>

---

## Popis oznaka, kratica i simbola

$h$  – razina tekućine, [m]

$v$  – brzina širenja zvučnog vala, [m/s]

$f$  – frekvencija vala, [Hz]

$\lambda$  – valna duljina, [m]

$\gamma$  – adijabatski koeficijent, za zrak  $\gamma=1,4$  pri temperaturi od 20°C

$T$  – vrijeme, [s]

$c$  – brzina zvuka, [m/s]

$p$  – atmosferski tlak, [kPa]

$\rho$  – specifična težina zraka pri temperaturi od 22°C, [kg/m<sup>3</sup>]

CPU – procesor

SAR – sustav automatske regulacije

IDE – Arduino razvojna okolina

bit – znamenka binarnog brojevnog sustava

SRAM – statička radna memorija

DRAM – dinamička radna memorija

EEPROM - električno izbrisiva programibilna ispisna memorija

FLASH – vrsta EEPROM memorije, programska memorija

U/I – ulazne i izlazne jedinice

A/D – analogno-digitalni pretvornik signala

PWM – pulsno širinska modulacija

PID regulator – proporcionalno integracijsko derivacijski regulator

## **1. UVOD**

Mjerenje razine tekućine prisutno je u mnogim granama procesne industrije, no često zahtjeva dodatan utrošak vremena i ljudskog rada. Brzi razvoj elektroničke tehnologije omogućio je primjenu ekonomski prihvatljivijih metoda mjerenja, nadzora i kontrole u procesnoj tehnici. Mikroupravljači, kao dijelovi elektronskih uređaja i sustava doživljavaju ekspanziju i pojavljuju se u gotovo svim oblastima i djelatnostima (Sead i sur., 2012).

U ovome radu izveden je i opisan sustav mjerenja i regulacije razine temeljenog na Arduino Uno R3 platformi. Opisan je princip mjerenja razine ultrazvučnim mjernim pretvornikom, kao i karakteristike korištenog modela, HC-SR04. Navedena su načela rada drugih primjenjivih metoda za mjerenje razine kapljevina i sipkih tvari. Osim toga, opisani su osnovni dijelovi mikroupravljača. Kako bi se dobio uvid i opravdala važnost tehnološkog razvoja i nadogradnje prilikom provedbe procesnih mjerenja, pridruženi su i rezultati realiziranog sustava.



## **2. TEORIJSKI DIO**

## 2.1. RAZINA

Razina  $h$  [m] definira se kao visina stupca kapljevine ili sipkog materijala u nekom spremniku, reaktoru ili drugoj procesnoj jedinici. Pod terminom mjerenja razine podrazumijeva se indikacija položaja granice između dviju sredina različitih gustoća u odnosu na neku referentnu površinu. Mjerenje razine znači mjerenje udaljenosti između dviju paralelnih površina (Tomac, 2006). Pri tome, tekućina (fluid) definirana je kao tvar koja se pod djelovanjem smičnog naprezanja neprekidno deformira. Kapljevine su tvari koje neznatno mijenjaju volumen s promjenom tlaka pa smještene u posudu formiraju slobodnu površinu na granici s okolinom. U većini slučajeva, mogu se smatrati nestlačivima. Plinovi su za razliku od tekućina stlačivi i zatvoreni u posudu ispunjavaju čitav volumen posude. Takvo ponašanje tekućine (fluida) uzrokovano je relativno malim udaljenostima između molekula kapljevina i relativno velikim udaljenostima između molekula plinova, te pripadnih međumolekularnih sila koje djeluju na tim udaljenostima. Shodno tomu, stlačivost tekućine, specifična težina tekućine, gustoća te specifični volumen predstavljaju veličine koje su usko vezane uz mjerenje razine (Tomac, 2006).

Mjerenje razine u otvorenim i zatvorenim spremnicima u procesnoj je tehnici od temeljnog značenja. Pored temperature, protoka i tlaka, razina je jedan od najznačajnijih procesnih parametara (Schnake, 2006). Kao mjerna veličina razina predstavlja duljinu ( $h$ ) mjerenu u metrima, volumen (količinu) mjerenu u kubičnim metrima ( $m^3$ ) ili masu mjerenu u kilogramima (kg). Različite metode za mjerenja razine tekućina izvode se u svrhu prevencije pražnjenja i prelijevanja materijala iz procesnih posuda i silosa. Praćenje razine tvari u spremniku također pridonosi evidenciji zaliha te procjeni troškova u procesnoj tehnici. Veća ekonomičnost postiže se i praćenjem razine sipkih tvari te njihova nakupljanja prilikom procesa, smanjujući trošak čišćenja procesnih uređaja (Asyddin, 2013).

## 2.2. ULTRAZVUČNO MJERENJE RAZINE

Primjenom ultrazvuka moguće je beskontaktno mjerenje razine kapljevina i sipkih tvari. Mjerni signal je razlika u vremenu između impulsa emitiranog iz izvora ultrazvuka i signala koji se nakon refleksije sa površine sipine ili kapljevine vraća u detektor. Na mjerenje mogu utjecati tlak te pare ili pjenjenje iznad medija. Instrument se povezuje on-line sa računalom

za nadzor i upravljanje procesom. Točnost metode mjerenja je 0.25 do 2% (Valter, 2007). Zvuk se prema fizikalnoj definiciji definira kao titranje u plinovitim, tekućim i krutim elastičnim tvarima. Zvučni valovi obuhvaćaju frekvencije unutar područja čujnosti od 16 Hz do 20 kHz. Područje frekvencije ispod frekvencije od 16 Hz naziva se infrazvukom a područje iznad 20 kHz ultrazvukom. Za sve vrste valova vrijedi relacija koja povezuje valnu duljinu i frekvenciju prema formuli **(1)**:

$$v = f \cdot \lambda \quad (1)$$

gdje je:

$v$  - brzina širenja zvučnog vala [m/s]

$f$  - frekvencija vala [Hz]

$\lambda$  - valna duljina [m].

Ultrazvuk zbog veće frekvencije ima manju valnu duljinu od zvuka, pa zbog toga pokazuje i različita svojstva (reflektivnost, transmisivnost i apsorpciju). Poput svih valova, brzina zvuka ovisi o sredstvu u kojem se širi (Horvat, 2008). Brzina zvuka koji se širi kroz zrak može se izračunati prema formuli **(2)**:

$$c = \sqrt{\frac{p \cdot \gamma}{\rho}} \quad (2)$$

gdje je:

$\gamma$  – adijabatski koeficijent (za zrak  $\gamma=1,4$  pri temperaturi od 20°C)

$c$  – brzina zvuka [m/s]

$p$  – atmosferski tlak [kPa]

$\rho$  – specifična težina zraka [kg/m<sup>3</sup>].

Ultrazvučna osjetila mogu se podijeliti na elektromagnetske primopredajnike i piezoelektrične. Elektromagnetski primopredajnici su zvučnici koji se sastoje od permanentnog magneta i zavojnice te membrane koja proizvodi (ili prima) zvuk. Pogodni su za frekvencije od 20 do 40 kHz i mogu stvarati snažne zvučne valove. Piezoelektrični primopredajnici rade na principu piezoelektričnog efekta. Piezoelektrični efekt je svojstvo nekih materijala, najčešće kristala, da induciraju napon kada su izloženi mehaničkom naprezanju. Efekat je prisutan i u obrnutom procesu, kada se piezoelektričnom materijalu narine napon, on se deformira. Svi tipovi su konstruirani za točno određenu frekvenciju te se prema podacima jačine zvučnih valova odabiru ultrazvučni primopredajnici (Horvat, 2008).

Mjerenje pomoću ultrazvučnog pretvornika bazira se na slanju ultrazvučnog vala iz ultrazvučnog osjetila do površine tekućine (**Slika 1**) te se mjeri vrijeme potrebno da se val odbije i vrati do osjetila. Osjetilo posjeduje i kompenzaciju utjecaja temperature, kojom se postiže otpornost mjernog rezultata na promjene vanjske temperature. Prema formuli (**3**) vidljivo je da je razina proporcionalna vremenu ( $T$ ) za koje val prijeđe od izvora do prijemnika.

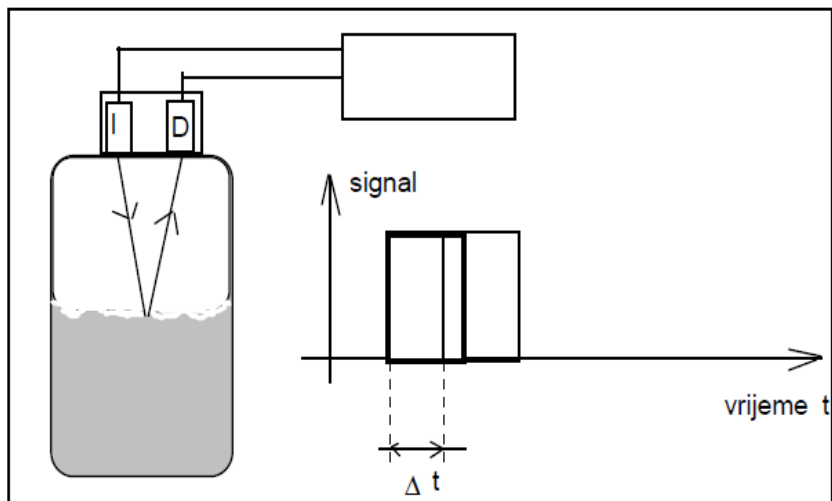
$$h = \frac{v}{2} \cdot T \quad (3)$$

gdje je:

$h$  – razina tekućine [m]

$v$  – brzina zvuka [m/s]

$T$  – vrijeme [s].



**Slika 1** Shematski prikaz načela ultrazvučnog mjerenja razine kapljevina ili sipina pomoću ultrazvuka (Kurtanjek, 2007).

### 2.3. MIKROUPRAVLJAČI

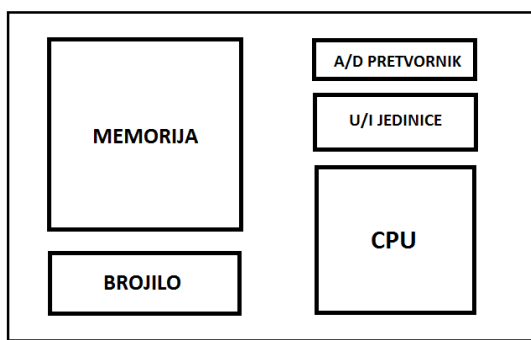
Mikroupravljači u svom temeljnom obliku predstavljaju računalni sustav sadržan na jedinstvenom integriranom sklopu. Kronološki razvoj mikroupravljača započeo je pojavom integriranih krugova, elektroničkih krugova izvedenih na mikročipu. Prvi takav radni integrirani krug nezavisno jedan od drugoga razvili su Jack Kilby radeći za poduzeće Texas Instruments i Robert Noyce iz poduzeća Fairchild Semiconductors (Saxena, 2007). Inicijativom japanskog poduzeća BUSICOM (Business computer corporation) u suradnji sa američkom kompanijom Intel pojavljuje se 1971. godine na tržištu prvi 4-bitni mikroprocesor pod nazivom Intel 4004. Nedugo potom, pojavljuju se i prvi 8-bitni mikroprocesori. Proizvođači koji su tada dominirali u proizvodnji mikroprocesora bili su Intel, Texas instruments, Motorola, MOS Technology te Zilog inc. (Matić, 2003).

Paralelno sa razvojem mikroprocesora 1971. godine se pojavljuju i prvi mikroupravljači, odnosno mikroprocesori sa integriranom memorijom. Prema institutu Smithsonian, nezavisno su ih izumili inženjeri iz tvrtke Texas instruments, Gary Boone i Michael Cochran (Stakem, 2013). Prema statističkim podacima iz 2013. godine najveći udio na današnjem tržištu mikroupravljača imaju tvrtke Renesas Electronics Corporation, Texas Instruments, Microchip, Intel Corporation, Atmel Corporation, Fujitsu semiconductors, Freescale

Semiconductor Inc. (bivša Motorola), Infineon Technologies AG (elektronicsnewsline.com, [5.6.2014.]).

### 2.3.1. Struktura mikroupravljača

Mikroupravljačem se može smatrati uređaj koji sadrži određene komponente mikroprocesorskog sustava u jednom čipu. Osnovna struktura mikroupravljača prikazana je na *Slici 2*. Osnovnu strukturu čine centralna procesna jedinica (CPU), određena količina integrirane memorije, ulazne i izlazne jedinice, analogno-digitalni pretvornik signala te brojilo (Sead i sur., 2012).



*Slika 2* Osnovna struktura mikroupravljača (Matić, 2007).

Procesor (CPU) je složeni sklop čija je primarna funkcija izvršavanje programa koji su pohranjeni u okviru memorije. Arhitektura mikroprocesora sastoji se od registara, aritmetičke logičke jedinice te instrukcijskog seta naredbi. Aritmetička logička jedinica vrši računanje, odnosno izvodi logičke i matematičke operacije. Pored toga, prilikom obrade podataka, CPU se koristi vlastitom unutrašnjom memorijom, registrima, koji omogućavaju bržu obradu, pohranjivanje i uzimanje podataka (Gridling, 2007). Instrukcijski set naredbi je kodirano naređenje za izvođenje određene računске operacije te određuje koliko će prostora memorije zauzeti programski kod.

Memorijska jedinica predstavlja dio mikroupravljača čija je funkcija pohrana podataka, očitavanje te mogućnost unosa podataka. U memoriji se nalazi program čije naredbe izvršava CPU koja uzima adresu memorijskog mjesta i čeka njen sadržaj. Za određeni ulaz dobiva se sadržaj adresiranog memorijskog mjesta (Matić, 2007). Memorija mikroupravljača

može se podijeliti na programsku i radnu memoriju. Izvedbe programske memorije (EEPROM, FLASH) ugrađene su na samom čipu ili kao vanjska memorija te služe za pohranu programskog koda. Izvedbe radne memorije (SRAM, DRAM) služe za pohranu i prikupljanje podataka i njihov sadržaj se može vrlo lako i brzo izmijeniti (Radić, 1988).

Sabirnica je skup paralelnih vodiča koji povezuje memoriju i procesor. Služi za prijenos električnih signala (podataka). Većina je mikroupravljača opremljena adresnom sabirnicom, podatkovnom i upravljačkom sabirnicom. Adresna sabirnica omogućuje vezu između procesora i memorijskih podsustava na mikroupravljaču. Podatkovna sabirnica koristi se za paralelno usmjeravanje podataka na različite podsustave unutar mikroupravljača, u obliku električnih signala koji predočavaju bitove podataka. Mikroupravljači obično na raspolaganju imaju podatkovne sabirnice širine (propusnosti) od 4, 8, 16, 32 ili 64 bita (Dogan, 2006).

Ulazne i izlazne jedinice su sklopovi za paralelni ulaz i izlaz podataka i sastavni dio svakog mikroupravljača. One povezuju procesor i periferne dijelove mikroupravljača. Primanjem i slanjem signala ponašaju se pri radu kao memorijsko mjesto putem kojeg mikroupravljač komunicira sa okolinom (Matić, 2007).

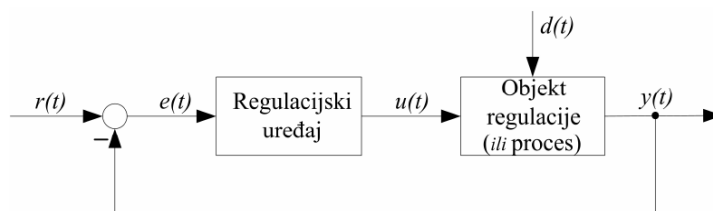
Analogno-digitalni pretvornik (A/D) dio je mikroupravljača koji vrši pretvorbu analognog signala u digitalni. Kako mnoge periferne vrijednosti nisu binarne, u obliku koji mikroupravljač prepoznaje, potrebno ih je pretvoriti u razumljivi uzorak. U tu svrhu je prisutan podsustav za analogno-digitalnu pretvorbu (ADC). Ovaj podsustav pretvara stalno varirajuće analogne signale iz vanjskog svijeta u binarni oblik pogodan za mikroupravljač (Matić, 2007).

Osnovna jedinica brojača (eng. timer) je brojilo kojeg čini 8-bitni ili 16-bitni registar. Brojilo kontrolira odvijanje procesa u određenim vremenskim intervalima. Koristi se za izvršavanje postavljenih instrukcija kašnjenja (eng. delay) ili ponavljanje određenih aktivnosti nakon definiranog vremena izvedbe (Matić, 2007).

#### **2.4. SUSTAV AUTOMATSKE REGULACIJE**

Automatska regulacija je znanost o održavanju ili promjeni stanja nekog sustava bez obzira na djelovanje poremećaja. Automatska regulacija jedno je od osnovnih načela na kojima je

utemeljena kibernetika, znanost o upravljanju u živoj i neživoj prirodi. Sustav prati i usmjerava tok prerade, odnosno regulira proizvodnju sustava. Osnovni blok dijagram sustava automatske regulacije prikazan je na **Slici 3**. Upravljanje sustavom automatske regulacije može biti ostvareno na različite načine, a ovisi o svrsi, obliku ulaznih veličina, vrsti gradnje procesa i zavisnosti ulaznih i izlaznih veličina (Tomac, 2006).

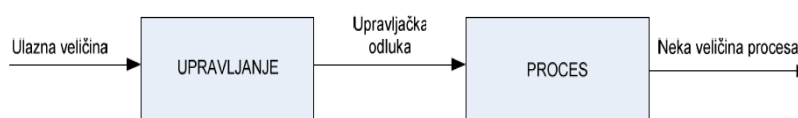


**Slika 3** Osnovni blok dijagram sustava automatske regulacije sa pripadajućim oznakama veličina sustava:  $r(t)$  - referentna veličina,  $e(t)$  - regulacijsko odstupanje,  $u(t)$  - postavna veličina,  $d(t)$  - poremećajna veličina i  $Y(t)$  - regulirana veličina (Petrić, 2012).

### 2.4.1. Principi regulacije

Razlikuju se dva temeljna principa regulacije, upravljanje i regulacija (Tomac, 2006).

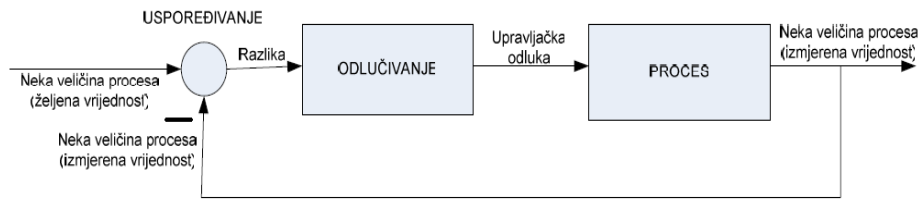
Upravljanje je proces u kojem jedna ili više ulaznih veličina u sustavu utječe na izlaznu veličinu prema zakonitostima koje su svojstvene tom sustavu. Informacija se prenosi u upravljačkom lancu ili otvorenom krugu prikazanom na **Slici 4** (Tomac, 2006).



**Slika 4** Upravljanje ili otvoreni krug (Petrić, 2012).

U otvorenoj petlji upravlja se unaprijed pri čemu izlazna veličina ne djeluje na ulaznu. Za razliku od regulacije, nema povratne veze koja će omogućiti usporedbu željene i stvarne vrijednosti niti popravljavanja upravljačke odluke na temelju promatranja odvijanja procesa (Petrić, 2012). Regulacija je proces u kojem izlazna veličina u sustavu djeluje povratno na ulaznu veličinu ili zadano stanje. Informacija se prenosi u regulacijskoj petlji ili zatvorenom krugu prikazanom na **Slici 5**.





**Slika 5** Regulacijska petlja ili zatvoreni krug (Petrić, 2012).

U zatvorenoj petlji izlazna veličina neprestano djeluje na ulaznu i obratno, upravlja se unatrag. U mnogim uređajima se radi tražene točnosti mora primijeniti zatvoreni sustav uz djelovanje smetnji. Univerzalna značajka regulacije je postojanje povratne veze (pozitivne ili negativne) kojom se prenosi informacija o stvarnoj ili realiziranoj veličini (Tomac, 2006).

### **3. EKSPERIMENTALNI DIO**

### 3.1. ZADATAK

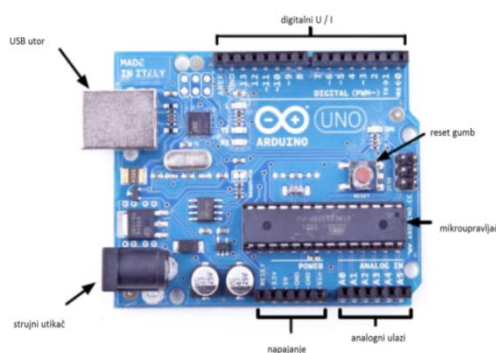
Izvedba mjernog i regulacijskog uređaja razine temeljenog na Arduino Uno R3 platformi. Za mjerenje razine korišten je HC-SR04 model ultrazvučnog pretvornika kompatibilnog sa mikroupravljačem.

### 3.2. MATERIJALI I METODE

#### 3.2.1. Arduino Uno R3

Arduino platforma je skup elektroničkih i softverskih komponenti koje se mogu jednostavno povezivati u složenije cjeline sa ciljem izrade poučnih elektroničkih sklopova. U osnovi, sve Arduino ploče sastoje se od mikroupravljača, integriranog sklopa za komunikaciju sa računalom, te perifernih elektroničkih dijelova za osiguravanje mogućnosti rada mikroupravljača. Sukladno tomu, Arduino se sastoji od računalne sklopovske podrške i programske podrške (Zenzerović, 2013). Arduino je također tehnologija otvorenog koda čija je platforma zasnovana na fleksibilnom korištenju hardvera i softvera (Smolčić, 2013).

Model mikroupravljača koji je korišten pri izradi ovog diplomskog rada jest Arduino UNO R3 prikazan na **Slici 6**. Odabran je upravo ovaj mikroupravljač jer je njegova upotreba jednostavna, moguće ga je programirati putem integriranog USB sučelja, a pomoću prilagođenog korisničkog sučelja i programirati njegov zadatak. Prednost Arduina je višenamjenska razvojna okolina. Arduino softver radi na većini korištenih operativnih sustava (Windows, Mac, Linux) te je pogodan za brzu implementaciju ideja (Banzzi, 2011).



**Slika 6** Arduino Uno R3 komponente (Schmidt, 2011).

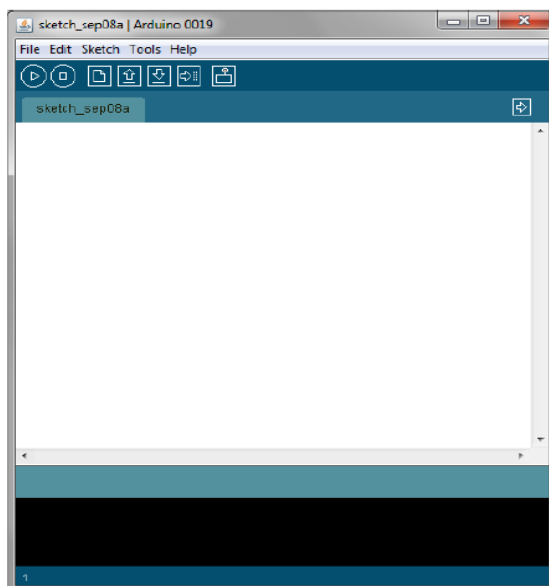
Arduino Uno R3 je mikrokontrolna ploča zasnovana na Atmega328 mikrokontroleru. Ima 14 digitalnih U/I pinova od kojih se 6 može koristiti kao PWM (tehnika dobivanja analognih vrijednosti preko digitalnih oblika) izlazi, 6 analognih ulaza, 16 MHz keramički oscilator, USB priključak, priključak za napajanje i tipku za reset. Sadržava sve što je potrebno kao podrška mikrokontroleru, jednostavno spajanje na računalo s USB kabelom te mogućnost napajanja s AC/DC adapterom ili baterijama. Detaljnije tehničke karakteristike prikazane su u **Tablici 1**.

**Tablica 1** Tehničke karakteristike Arduino Uno R3 modela

Parametar	Vrijednost
Mikroupravljač	ATmega328
Radni napon	5 V
Ulazni napon (preporučeno)	7 - 12V
Ulazni napon (ograničenje)	6 - 20V
Digitalni I/O Pinovi	14 (od čega 6 omogućava PWM izlaz)
Analogni Input Pinovi	6
DC Struja za I/O Pin	40 mA
DC Struja za 3,3 V Pin	50 mA
Flash Memorija	32 KB ( ATmega328) od čega se 0,5 KB koristi pri učitavanju i podizanju sustava
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	EEPROM 1 KB (ATmega328)
Brzina	16 MHz

Arduino programska podrška ili Arduino razvojna okolina (IDE, Integrated development environment) poseban je program koji omogućava pisanje programskog koda, tzv. „sketch-a“. Sketch koji se učitava na Arduino prevodi se pomoću prevoditelja (eng. compiler) u strojni programski jezik, u instrukcije po kojima mikroupravljač izvršava operacije. Za

korištenje razvojne okoline potrebno je preuzeti softver sa službene stranice i instalirati drivere za operativni sustav koji se koristi na računalu. Podešava se serijski port za komunikaciju uređaja na računalu i u Arduino razvojnoj okolini (**Slika 7**) kako bi se omogućila komunikacija između računala i mikroupravljača.



**Slika 7** Arduino korisničko sučelje (Margolis, 2011).

#### 3.2.2. Ultrazvučni mjerni pretvornik HC-SR04

HC-SR04 je model ultrazvučnog pretvornika kompatibilan sa Arduino platformom (**Slika 8**). Pretvornik (osjetilo) sastoji se od predajnika i prijemnika signala. Princip rada ultrazvučnog pretvornika temelji se na slanju ultrazvučnih signala iz predajnika. Valovi se odbijaju od mjerene površine i vraćaju do prijamnika. Mjerenjem vremena za koji signal prođe od odašiljača do prijamnika, uz poznavanje brzine zvuka određuje se udaljenost osjetila od površine tekućine ili sipkog materijala. Udaljenost se računa potom prema izrazu **(4)**.

$$Udaljenost = \frac{(Trajanje povratnog impulsa [s] \cdot brzina zvuka \left[\frac{m}{s}\right])}{2} \quad (4)$$

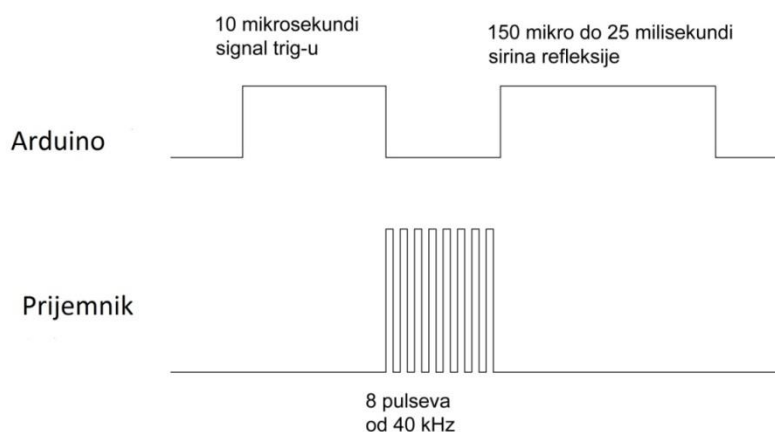
HC-SR04 nudi dobru točnost, ponovljivost rezultata i jednostavnost upotrebe. Osim toga, omogućava bez kontaktno mjerenje u opsegu od 2 do 400 centimetara uz preciznost mjerenja od oko tri milimetra. Dodatne tehničke karakteristike ultrazvučnog pretvornika HC-SR04 prikazane su u **Tablici 2** (Cytron Technologies Sdn. Bhd.). Dva osnovna dijela modula na

kojima se temelji princip rada su izvor ultrazvučnog signala, koji se aktivira putem TRIG pina (okidač) i prijemnika ultrazvuka koji generira signal na ECHO pinu (jeka). Mikroupravljačem šaljem signal od +5 V na *TRIG* pin modula u trajanju, minimalno, 10 mikrosekundi. Na taj način aktiviramo ultrazvučni predajnik koji odašilje 8 impulsa od 40 kHz i čeka njihovu refleksiju (**Slika 9**). Kada senzor registrira reflektirani impuls šalje podatke natrag mikroupravljaču preko *ECHO* pina. Navedeni podaci su zapravo vrijeme trajanja reflektiranog pulsa.

$V_{cc}$  pin za napajanje ultrazvučnog modula sa Arduinoom spaja se na +5 V, *TRIG* pin za aktivaciju mjerenja i *ECHO* pin povratnog signala na digitalne U/I portove mikroupravljača a GND pin za uzemljenje na istoimeni pin na Arduino platformi.



**Slika 8** Ultrazvučni pretvornik HCSR-04 (Cytron Technologies Sdn. Bhd., 2014).



**Slika 9** Prikaz slanja i refleksije impulsa od ultrazvučnog prijemnika do mikroupravljača (Cytron Technologies Sdn. Bhd., 2014).

**Tablica 2** Tehničke karakteristike ultrazvučnog pretvornika HCSR-04 (Cytron Technologies Sdn. Bhd., 2014).

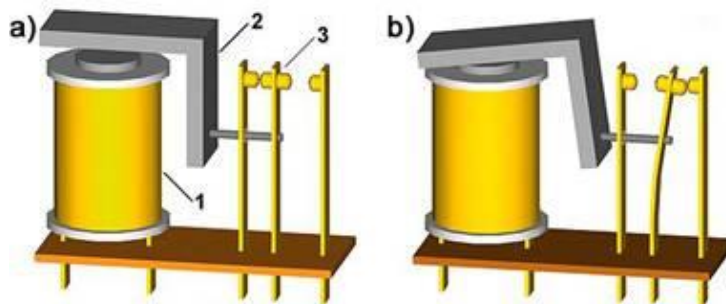
Pin za napajanje	VCC
Pin za aktivaciju mjerenja	Trig pin
Pin povratnog signala	Echo pin
Pin za uzemljenje	GND
Napajanje / Potrošnja struje	5V DC / < 2 mA
Efektivni ugao	< 15 °
Opseg mjerenja	2 cm do 400 cm
Dimenzije	45 mm x 20 mm x 15 mm

### 3.2.3. Releji

Releji su sklopni uređaji koji se aktiviraju od strane jedne ili više električnih veličina (napon, struja, snaga itd.). Svi releji uključuju se preko više vrsta kontakata. Putem releja i pomoćnih strujnih krugova djeluje se na druge uređaje radi upravljanja, mjerenja, signalizacije ili zaštite dijelova postrojenja. Koriste se za prekidanje ili uspostavu strujnog kruga pomoću elektromagneta koji otvara i zatvara strujne kontakte (Nikolić, 2012).

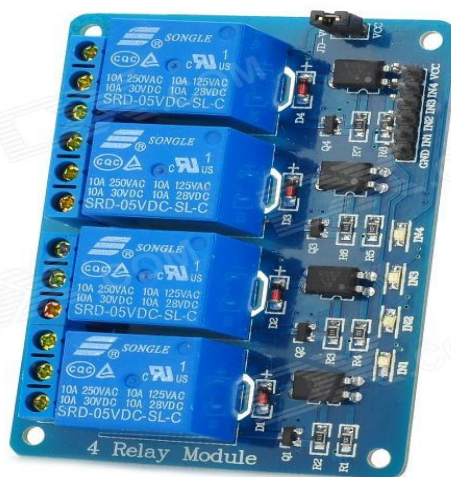
Releji su sačinjeni od jarma sa elektromagnetom koji privlači željeznu kotvu pri napajanju. Elektromagnet se obično sastoji od navoja bakrene žice na željenoj jezgri. Kada struja teče kroz žicu (primarni strujni krug) oko elektromagneta se stvara magnetsko polje koje privlači željeznu kotvu. Ona nosi na sebi električne kontakte koji otvaraju ili zatvaraju sekundarni strujni krug. Kada se struja kroz elektromagnet prekine on više ne privlači željeznu kotvu i ona se vraća u početni položaj, obično uz pomoć opruge. Na taj način, električni kontakti prekidaju ili uspostavljaju strujni krug u zavisnosti o tipu kontakta (**Slika 10**). Sukladno tome, razlikuje se normalno otvoreni i normalno zatvoreni kontakt (Nikolić, 2012).

Kontakti u relejima izvedeni su od platine ili srebra radi bolje vodljivosti električne struje, te mogu imati više parova kontakata. Osnovno (normalno) stanje releja je kada struja ne teče kroz elektromagnet tj relej je isključen.



**Slika 10** Prikaz isključenog (a) i uključenog releja (b) te dijelova od kojih se sastoji : 1) elektromagnet, 2) kotva, 3) kontakti.

Ako je određeni par kontakata normalno otvoren znači da su kontakti otvoreni kada je relej isključen (nema struje kroz elektromagnet) a zatvoreni kada je relej uključen. Obrnut je slučaj za normalno zatvorene kontakte (Nikolić, 2012). Za izradu rada korišten je relejni modul prikazan na **Slici 11**.

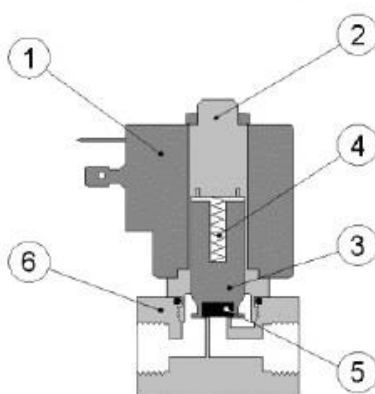


**Slika 11** Programabilni 4 kanalni relej modul za Arduino (<http://www.sainsmart.com/4-channel-5v-relay-module-for-pic-arm-avr-dsp-arduino-msp430-ttl-logic.html>), [25.3.2014.].

### 3.2.4. Elektromagnetski ventili

Elektromagnetski ventili služe za daljinsko uspostavljanje i prekidanje protoka radnog medija električnim putem. Osnovni dijelovi elektromagnetskog ventila prikazani su na **Slici 12**.

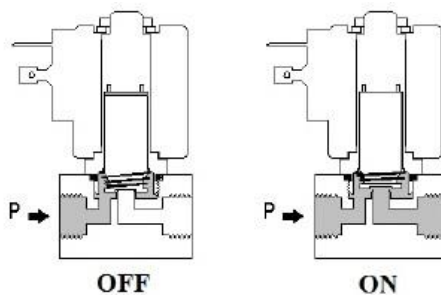




**Slika 12** Elektromagnetski ventil : svitak elektromagneta (1), jezgro elektromagneta ili klip (2), osovina (3), opruga (4), brtva (5), kućište (6), (Ravlić, 2004).

Prema funkciji razlikujemo dvije vrste elektromagnetskih ventila, normalno zatvoren (bez napona zatvoren i pod naponom otvoren) i normalno otvoren (bez napona otvoren, pod naponom zatvoren).

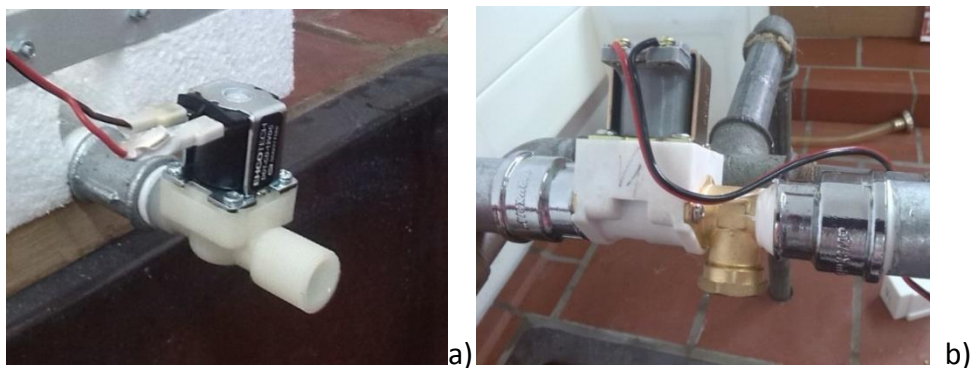
Prema načinu djelovanja ventili mogu biti sa izravnim ili kombiniranim djelovanjem, kojima za rad ne treba razlika tlaka između ulaza i izlaza, te servo ventili kojima je potrebna razlika tlakova (Ravlić, 2004).



**Slika 13** Djelovanje elektromagnetskog ventila (Ravlić, 2004).

Način djelovanja ventila prikazan je na **Slici 13**. Ventil ima ulazni i izlazni priključak u kućištu. Ako je normalno zatvoren, protok medija kroz ventil onemogućen je s brtvom. Kada elektromagnet dobije napon, brtva otvori protok medija kroz ventil. U slučaju kada je normalno otvoren, protok medija kroz ventil je otvoren. Kada elektromagnet dobije napon, brtva onemogućuje protok medija kroz ventil. U oba slučaja, djelovanjem magnetskog polja putem jezgre elektromagneta preko osovine ostvaruje se pritisak na brtvu (Ravlić, 2004). Za

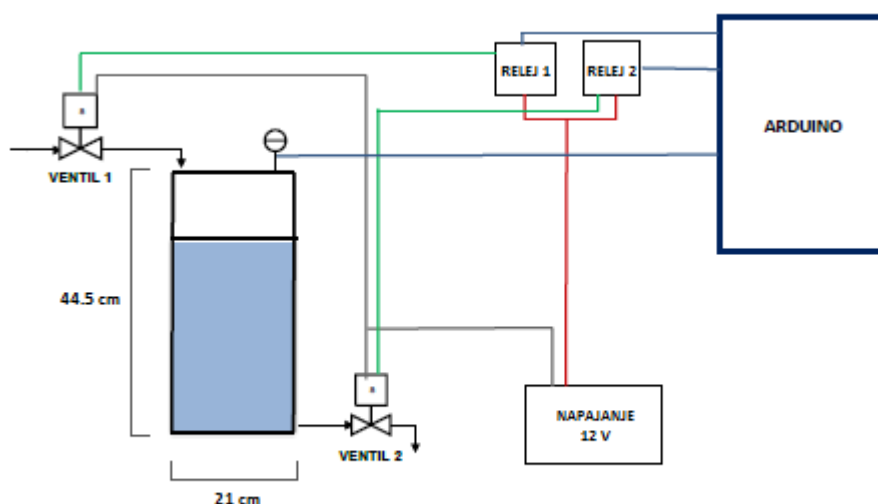
izradu rada korišten je gravitacijski ventil DDT-CD-12VDC tvrtke EHCOTECH i tlačni ventil TFW-1S tvrtke JDL prikazani na **Slici 14**. Osim toga, Arduino daje +5 V pa je za rad ventila korišten i dodatni izvor napajanja od 12 V.



**Slika 14** Gravitacijski ventil DDT-CD-12VDC tvrtke EHCOTECH a) i tlačni ventil TFW-1S tvrtke JDL b).

### 3.2.5. Spremnik

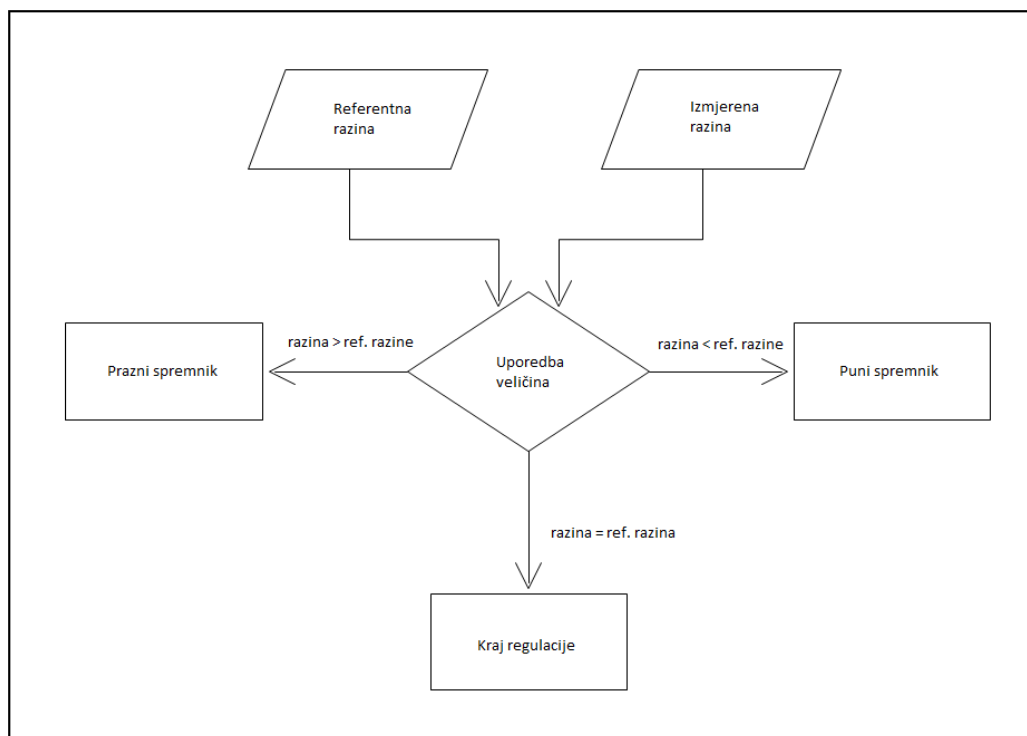
Spremnik je napravljen od pleksiglasa debljine 4 mm i aluminijskih L-profila 25 mm x 25 mm. Baza spremnika je dimenzija 210 mm x 210 mm, a visina spremnika je 450 mm. Ukupan volumen spremnika iznosi 20 litara. U dnu spremnika nalazi se ispustna cijev od 1/2" spojena pomoću koljena od 90°. Shema sustava sa spremnikom tekućine prikazana je na **Slici 15**.



**Slika 15** Shema sustava sa spremnikom.

### 3.2.6. Algoritam upravljanja dvopoložajnom regulacijom

Algoritam upravljanja temelji se na dva moguća izlazna signala iz regulatora, odnosno postavnog člana, uključen odnosno isključen. Regulator generira signal na temelju odnosa regulirajuće veličine i vodeće (zadane) veličine. U slučaju regulacije razine, kada je trenutna razina  $h(t)$  manja od zadane razine, tada se otvara napojni ventil, odnosno kada je razina veća od zadane razine tada se aktivira ispustni ventil na spremniku. Shema upravljanja je dana na **Slici 16**.



**Slika 16** Shema dvopoložajne regulacije.

### 3.2.7. Algoritam upravljanja PID regulatora

PID (proporcionalno integracijsko derivacijska) regulacija sastoji se od tri paralelno spojene komponente koje djeluju neovisno. Proporcionalni član daje veliku brzinu odziva i stalno pojačanje. Integracijski član daje točnost uklanjajući greške u ustaljenom stanju. Derivacijski član povećava brzinu odziva i sprječava veliko regulacijsko odstupanje. Algoritam PID regulatora opisan je jednačbom **(4)**.

$$Izlaz = K_p e(t) + K_I \int e(\tau) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (4)$$

gdje je:

$k_p$  – koeficijent pojačanja procesa

$k_i$  – koeficijent integracijskog djelovanja

$K_D$  – koeficijent derivacijskog djelovanja

$e$  – pogreška (razlika referentne veličine i mjerenja procesne varijable)

$T$  – vrijeme

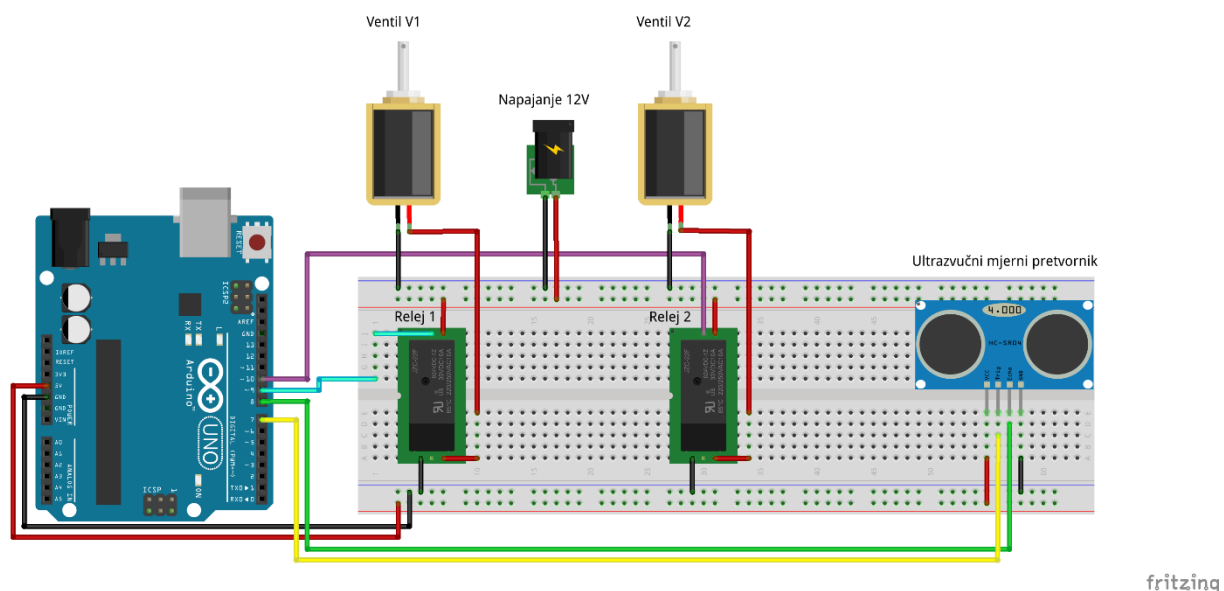
$\tau$  – varijabla integracije (vrijeme integralnog djelovanja).

Jednadžba se programski realizira u programirljivom uređaju, mikroupravljaču. Osnovni programski kod PID algoritma prikazan je u **Prilogu 2**.

## **4. REZULTATI I RASPRAVA**

#### 4.1. SUSTAV UPRAVLJANJA RAZINOM

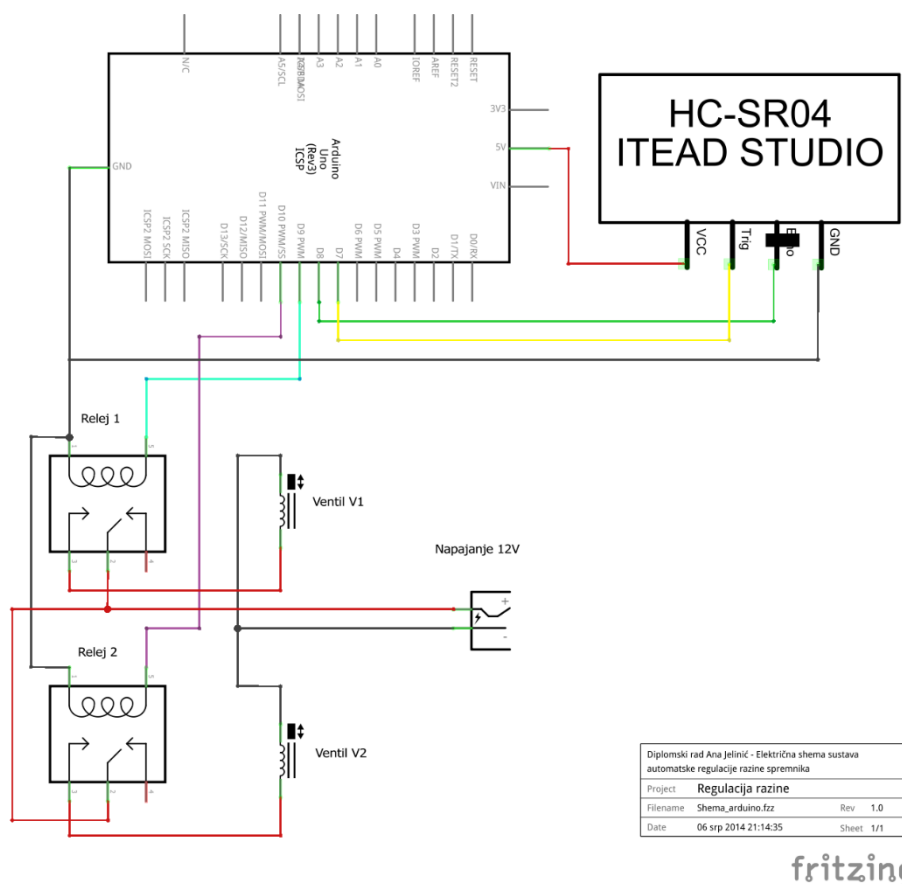
Razvijen je sustav mjerenja i regulacije razine vode u spremniku (*Slika 17*). Sustav se temelji na Arduino UNO R3 mikroupravljaču, relejnom modulu, dva elektromagnetska ventila, regulirajućeg izvora istosmjernog napona (0 V do 30 V) i spremnika. Elektromagnetski ventili se razlikuju po konstrukciji, napojni ventil V1, za dovod vode u spremnik predviđen je za radni predtlak te se spaja direktno na vodovodni priključak, a ventil V2 za ispuštanje vode iz spremnika je gravitacijski ventil, te ne zahtjeva određeni predtlak za rad. Primjena gravitacijskog ventila omogućuje ispuštanje tekućine iz spremnika od razine 0 mm vodenog stupca pa sve do maksimalnih 700 mm, što ne bi bilo moguće s uporabom ventila kakav je korišten u napojnom vodu zbog nedovoljnog pretlaka. Za upravljanje ventilima korištena su dva releja, R1 i R2, koji su priključeni na digitalne U/I portove Arduina Uno R3 broj 9 i 10. Releji i dodatno napajanje su nužni jer je za rad ventila potreban upravljački signal od 12 V, a digitalni U/I portovi na Arduina generiraju 5 V signale. Mjerenje razine tekućine izvedeno je pomoću ultrazvučnog mjernog pretvornika, HC-SR04, koji je priključen na digitalne U/I portove mikroupravljača (*TRIG* - port D7 i *ECHO* - port D8).



*Slika 17* Shema sustava upravljanja razinom

Napajanje mjernog pretvornika i zavojnica releja (upravljački signali) izvedeno je s Arduino Uno R3 portova (GND i +5 V).

Električna shema spajanja komponentata u sustavu dana je na **Slici 18**.



**Slika 18** Električna shema sustava upravljanja razinom u spremniku.

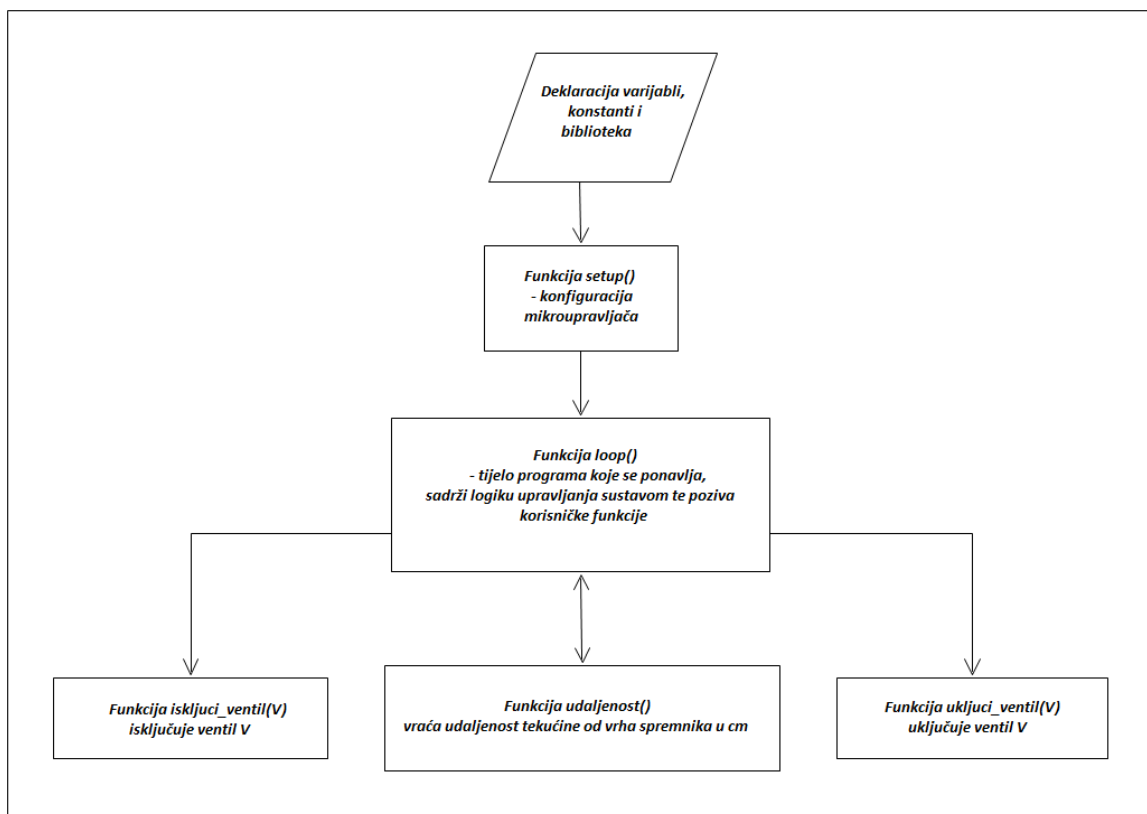
Cjelokupna elektronika sustava je učvršćena na poklopac spremnika, kroz koji je montiran ultrazvučni mjerni pretvornik i napojna cijev promjera 10 mm, koja je služi za smanjivanje pljuskanja tekućine prilikom punjenja spremnika.

## 4.2. PROGRAM MIKROUPRAVLJAČA

Da bi opisani sustav bio funkcionalan potrebno je napisati program koji će izvoditi mikroupravljač, a koji će objedinjavati funkcije mjerenja razine i upravljanja s izvršnim članovima u svrhu regulacije. Ostale funkcije koje program mora sadržavati jesu inicijalizacija sustava, komunikacija i sigurnosne mjere. Struktura programa za mjerenje i regulaciju razine dana je na **Slici 19**.

Arduino programi (Sketch) sastoje se od tri osnovna dijela, dijela deklaracije varijabli i vanjskih biblioteka, funkcije **setup()** u kojoj se podešavaju razni parametri (izvodi se samo

jednom na početku) i funkcije **loop()** koja predstavlja glavno tijelo programa i koja se ciklički izvodi (Banzzi, 2011.). Unutar funkcije **loop()** također se smještaju pozivi za korisnički definirane funkcije, a koje moraju biti definirane izvan funkcije **loop()**.



Slika 19 Shematski prikaz strukture programa mikroupravljača.

U **setup()** funkciji su konfigurirani ulazni i izlazni pinovi za spajanje mjernog pretvornika i postavnih članova. Osim toga, napravljena je i inicijalizacija serijske komunikacije te je definirana brzina prijenosa podataka u bitovima po sekundi (eng. baud rate). Serijska komunikacija služi za povezivanje Arduina s osobnim računalom, pomoću kojeg se mogu prikazivati podaci mjerenja razine i ručno upravljati sa sustavom (upravljanje ventilima).

Mjerenje razine izvedeno je unutar korisnički definirane funkcije **udaljenost()**. Funkcija se poziva unutar funkcije **loop()** i vraća udaljenost [**d**] tekućine od ultrazvučnog mjernog pretvornika HC-SR04 izraženu u centimetrima. Funkcija pomoću *brojača* izvodi zadani broj uzastopnih mjerenja vremena potrebnog da emitirani ultrazvučni signal se odbije od granice faza i ponovo registrira na ultrazvučnom prijemu (ECHO = HIGH). Jedno mjerenje se sastoji od postavljanja pinova trigPin i echoPin na LOW, pauze od 5 milisekundi [ms],



emitiranja ultrazvučnih impulsa u trajanju od 10 ms (trigPin = HIGH), te mjerenja vremena do prijema jeke (trenutak kada echoPin poprimi vrijednost HIGH). Srednja vrijednost vremena puta se izračuna tako da se kumulativno vrijeme odjeka podjeli s brojem mjerenja. Na ovaj način se smanjuje utjecaj smetnji koji se može javiti kod velikog broja uzastopnih pojedinačnih mjerenja. Dobiveno srednje vrijeme se pretvara u udaljenost [cm] na temelju poznavanja brzine širenja ultrazvuka (**Prilog 1**). Razina tekućine u spremniku potom je dobivena kao razlika maksimalne razine (42 cm) i izmjerene vrijednosti udaljenosti, u glavnoj petlji programa.

Zbog nedostatka uređaja za prikazivanje rezultata, iskorištena je mogućnost serijske komunikacije Arduino Uno R3 sustava, za spremanje rezultata mjerenja i ručno upravljanje s elektromagnetskim ventilima putem USB priključka. Slanje rezultata mjerenja s Arduina na bilo koji uređaj sposoban za serijsku komunikaciju (npr. osobno računalo) odvija se putem otvorenog serijskog porta podešenog u **setup()** funkciji, naredbom za ispis (**Prilog 1**). Primanje naredbi putem serijske veze postiže se čitanjem sadržaja među-spremnika otvorene serijske veze, te kroz usporedbu pročitane simbola primjenom *switch/case* naredbe s definiranim simbolima koji imaju za posljedicu izvođenja određenog dijela koda.

Upravljanje otvaranjem i zatvaranjem elektromagnetskih ventila riješeno je pomoću dvije funkcije, *uključi\_ventil(ventil)* i *isključi\_ventil(ventil)*. Funkcije se pozivaju s argumentom, koji određuje nad kojim ventilom se provodi uključivanje i isključivanje (**Prilog 1**).

Ove dvije funkcije čine osnovu za funkcije punjenja i pražnjenja spremnika. Naime, punjenje spremnika predstavlja zatvaranje ventila V2 i otvaranje ventila V1 a pražnjenje spremnika je postignuto kroz zatvaranje ventila V1 i otvaranje ventila V2 (**Slika 15**).

Najjednostavniji oblik regulacije, ON/OFF regulacija, rješava se lagano pomoću dosad opisanih razvijenih funkcija. Naime, jednostavnom usporedbom zadane razine tekućine u spremniku i trenutno izmjerene vrijednosti generira se upravljački signal. Usporedba se provodi primjenom *if/elseif* programskih struktura, te se pozivaju funkcije za punjenje ili pražnjenje spremnika, s obzirom je li razina manja ili veća od zadane.

Uporabom open source PID biblioteke u kojoj je implementiran algoritam PID regulatora, omogućuje jednostavno korištenje PID regulacije razine pozivom odgovarajuće funkcije i prosljeđivanjem parametara. Korištena biblioteka je dostupna na internetskoj stranici

<http://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary> i pisana je za primjenu PID regulatora za regulaciju analogne veličine s analognim izlazom s regulatora. Obzirom da elektromagnetski ventil zahtjeva digitalnu veličinu (otvoren/zatvoren) potrebno je izvršiti prilagodbu izlaza s PID algoritma. Modifikacija se temelji na vremenski proporcionalnom upravljanju, odnosno inačici upravljanja s trajanjem uključen/isključen upravljačkog signala (PWM – pulse width modulation). Vremenski proporcionalno upravljanje se realizira pomoću definiranja vremenskog intervala („prozora“), PID algoritam se podesi da regulirajući signal bude u rasponu od 0 do veličine prozora (veličina koju generira PID algoritam na temelju regulacijskog odstupanja). Određeni dio definiranog raspona odgovara isključenosti digitalnog izlaza, a ostatak raspona uključenosti digitalnog izlaza.

Opisani algoritmi upravljanja implementirani su zasebno u dvije verzije programa, koje se razlikuju samo u načinu regulacije razine. Izvorni kod programa dan je u prilogu (**Prilog 1**).

### 4.3. TESTIRANJE SUSTAVA

Nakon sklapanja sustava i programiranja mikroupravljača, sustav je podvrgnut testiranju. Izvršeno je mjerenje razine vode s ciljem utvrđivanja točnosti sustava s obzirom na specifikaciju proizvođača mjernog pretvornika HC-SR04. Testiranje točnosti mjerenja razine provedeno je na način da se razina smanjivala od 40 cm do 5 cm u koracima od 1 cm, uz bilježenje referentne razine i izmjerene razine pomoću ultrazvučnog mjernog pretvornika. Referentno mjerilo je bila mjerna traka s točnošću od  $\pm 0,5$  mm. Mjerenja su provedena više puta u paralelama, a rezultati jednog od provedenog mjerenja su dani u **Tablici 3**. Provedbom statističke analize vidljivo je da najveća apsolutna pogreška ( $P_a$ ) iznosi -0,46 cm, što predstavlja -5,75 % iskazano kao relativna pogreška ( $P_r$ ). Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja od referentne vrijednosti je  $0,19 \text{ cm} \pm 0,11 \text{ cm}$  što ukazuje na dobru točnost provedenih mjerenja. Dobiveni rezultati su u skladu s specifikacijama proizvođača koji navodi maksimalnu točnost od 0,3 cm u mjernom rasponu od 2 cm do 400cm (Cytron Technologies Sdn. Bhd., 2013).

Osim statičkih mjerenja razine, provedeni su i mjerenja razine tijekom punjenja spremnika, s različitim protocima. Protok (dotok) reguliran je otvorenošću ventila na gradskom priključku, na koji je spojen napojni vod sustava. Mjerenja su izvršena za otvorenost ventila od  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  i

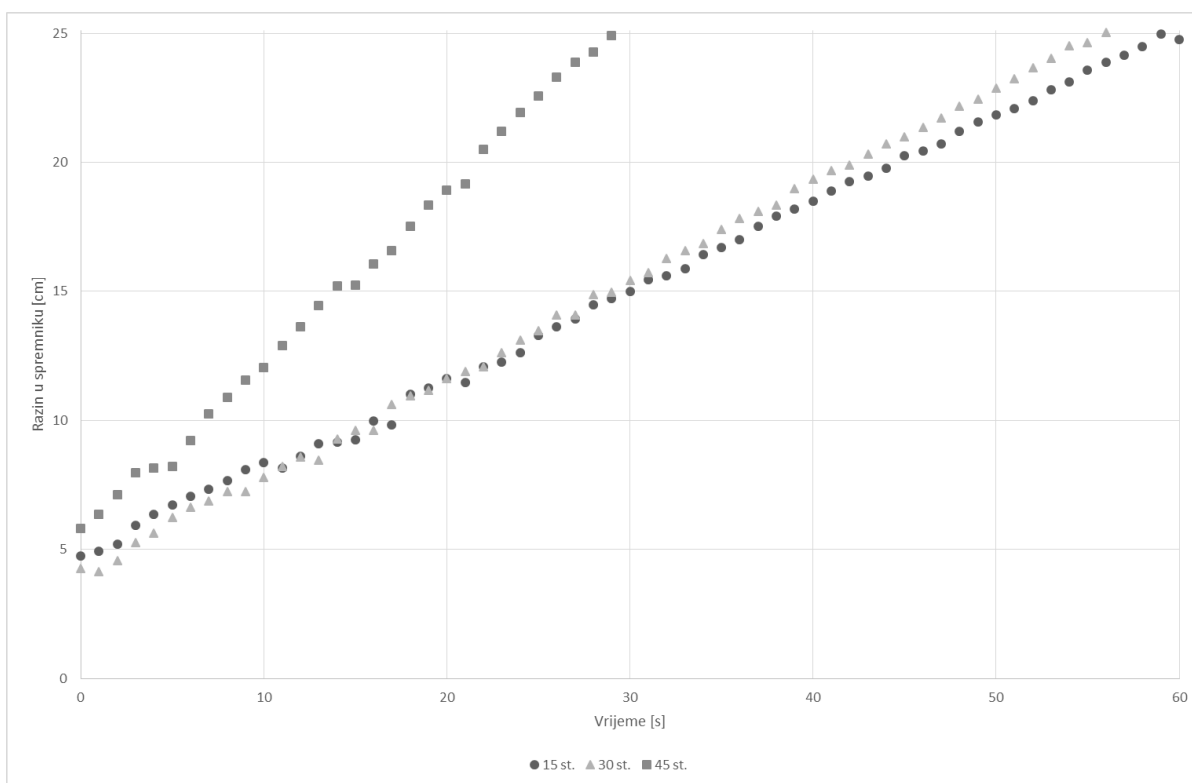
45°, što odgovara izračunatim protocima od 8,5 L/min, 9,8 L/min i 17,4 L/min. Protoci su izračunati iz poznatih dimenzija spremnika i promjene razine tijekom dinamičkih mjerenja.

**Tablica 3** Rezultati mjerenja razine pomoću HC-SR04 mjernog pretvornika

h_ref [cm]	h1 [cm]	h2 [cm]	h 3 [cm]	h_sred [cm]	h_SD [cm]	Pa[cm]	Pr
40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	0,00	0,00	0,00%
39,00	39,31	39,32	39,12	39,25	0,11	0,25	0,64%
38,00	38,26	38,11	38,32	38,23	0,11	0,23	0,61%
37,00	36,98	37,06	37,07	37,04	0,05	0,04	0,10%
36,00	36,35	36,06	26,06	36,21	0,21	0,20	0,57%
35,00	34,87	34,95	35,02	34,95	0,08	-0,05	-0,15%
34,00	34,01	33,87	34,01	33,96	0,08	-0,04	-0,11%
33,00	32,96	32,89	32,85	32,90	0,06	-0,10	-0,30%
32,00	31,89	31,96	31,88	31,91	0,04	-0,09	-0,28%
31,00	30,73	30,85	30,91	30,83	0,09	-0,17	-0,55%
30,00	29,86	29,79	29,81	29,82	0,04	-0,18	-0,60%
29,00	29,23	28,83	28,87	28,98	0,22	-0,02	-0,08%
28,00	27,81	27,50	27,92	27,74	0,22	-0,26	-0,92%
27,00	26,81	26,50	26,74	26,68	0,16	-0,32	-1,17%
26,00	25,75	26,11	25,93	25,93	0,18	-0,07	-0,27%
25,00	24,75	24,86	24,82	24,81	0,06	-0,19	-0,76%
24,00	24,10	24,10	23,70	23,97	0,23	-0,03	-0,14%
23,00	22,97	22,80	22,82	22,86	0,09	-0,14	-0,59%
22,00	21,79	21,77	21,81	21,79	0,02	-0,21	-0,95%
21,00	20,75	20,68	20,59	20,67	0,08	-0,33	-1,56%
20,00	19,73	19,72	19,73	19,73	0,01	-0,27	-1,37%
19,00	18,68	18,67	18,74	18,70	0,04	-0,30	-1,60%
18,00	17,79	17,68	17,69	17,72	0,06	-0,28	-1,56%
17,00	16,82	16,67	16,68	16,72	0,08	-0,28	-1,63%
16,00	15,60	15,62	15,65	15,62	0,03	-0,38	-2,35%
15,00	14,72	14,70	14,70	14,71	0,01	-0,29	-1,96%
14,00	14,03	13,66	13,62	13,77	0,23	-0,23	-1,64%
13,00	12,67	12,62	12,60	12,63	0,04	-0,37	-2,85%
12,00	11,99	11,59	11,85	11,81	0,20	-0,19	-1,58%
11,00	10,87	10,61	10,59	10,69	0,16	-0,31	-2,82%
10,00	10,25	10,01	9,97	10,08	0,15	0,08	0,77%
9,00	8,61	8,61	9,14	8,79	0,31	-0,21	-2,37%
8,00	7,52	7,49	7,61	7,54	0,06	-0,46	-5,75%
7,00	7,41	7,00	6,96	7,12	0,25	0,12	1,76%
6,00	6,12	5,60	5,59	5,77	0,30	-0,23	-3,83%
5,00	4,71	4,98	4,85	4,85	0,14	-0,15	-3,07%

Dinamička mjerenja razne (mjerenje razine tijekom punjenja/pražnjenja spremnika) ukazala su da zbog dimenzija spremnika dolazi do smetnji prilikom mjerenja zbog generiranja valova na površini tekućine. Stoga je za rad sustava preporučljivo koristiti manje protoke. Punjenje spremnika prikazano je na **Slici 20**.

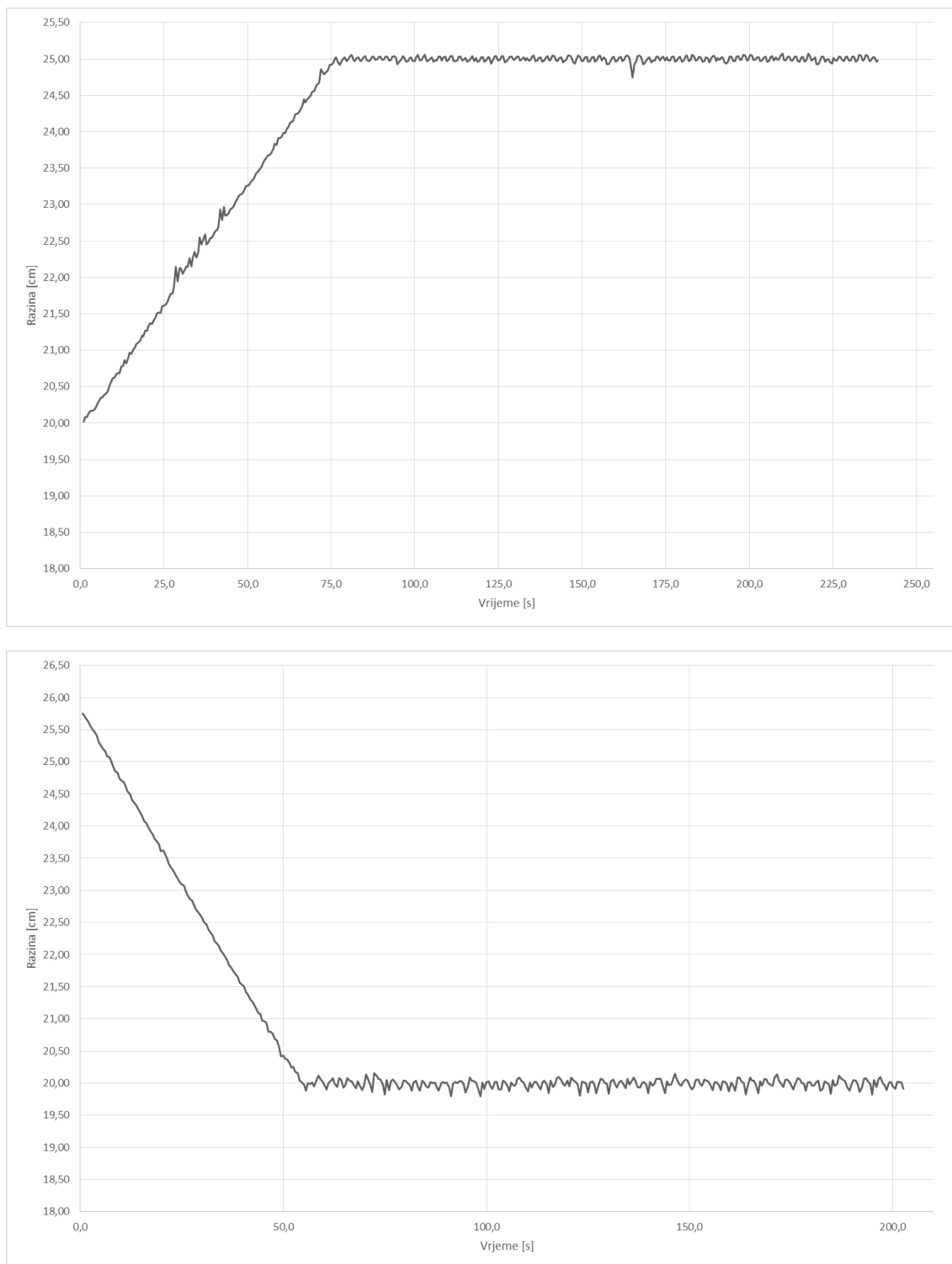
Testiranje regulacijske funkcije sustava provedeno je na način zadavanja skokovite promjene referentne razine programski, te praćenja odziva sustava u vremenu. Prvi testirani upravljački sustav je baziran na dvopoložajnoj regulaciji, jednostavan je po načinu funkcioniranja, te ovisi u velikoj mjeri o brzini i točnosti mjernog i postavnih članova. Sukladno očekivanju, odziv sustava je određen njegovim fizičkim dimenzijama, odnosno dolaznim i odlaznim protocima tekućine.



**Slika 20** Dinamika punjenja spremnika pri različitoj otvorenosti napojnog ventila.

Točnost dvopoložajne regulacije je dominantno određena točnošću mjerenja razine, i nalazi se unutar granice  $\pm 0,2$  cm od zadane vrijednosti u svim provedenim mjerenjima. Ovakav rezultat je postignut zbog malih vremenskih konstanti postavnih (ventila) i mjernog člana (ultrazvučni mjerni pretvornik) u odnosu na vremensku konstantu spremnika tekućine.

Primjer odziva sustava na skokovite promjene zadane razine u iznosu od  $\pm 5$  cm dan je na **Slici 21**.



**Slika 21** Odziv sustava pri promjeni zadane razine za 5 cm i -5 cm

## **5. ZAKLJUČCI**

Na osnovi rezultata istraživanja provedenih u ovom radu, mogu se izvesti sljedeći zaključci:

1. Na temelju Arduino Uno R3 razvojne platforme uz korištenje ultrazvučnog mjernog pretvornika HC-SR04 moguće je razviti sustav mjerenja i regulacije razine.
2. Otvorenost Arduino platforme i veliki krug korisnika omogućuju brzi, jeftini i jednostavan razvoj prototipnog sustava.
3. Ultrazvučni mjerni pretvornik HC-SR04 je jednostavan za korištenje i povezivanje s mikroupravljačima, te omogućuje mjerenje razine (udaljenosti) s deklariranom točnošću.
4. Arduino razvojna okolina (Sketch, IDE) omogućuje jednostavno razvijanje i ispravljanje programa.
5. Prednost mikroupravljača, uz nisku nabavnu cijenu, jest mogućnost implementacije različitih algoritama upravljanja.





## **6. LITERATURA**

- Arduino Playground: *PID library*. <http://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary> [22.5.2014.]
- Asyiddin N: *Level measurement*. [http://piyushpanchal2007.mynetworksolutions.com/images/2\\_LEVEL.pdf](http://piyushpanchal2007.mynetworksolutions.com/images/2_LEVEL.pdf) [15.5.2014.]
- Banzzi M: *Getting started with Arduino*. Make:Books, Sebastopol, USA, 2011.
- Cytron Technologies Sdn. Bhd.: *Product User's Manual – HC-SR04 Ultrasonic Sensor*.  
Cytron Technologies Sdn. Bhd., Johor, Malaysia, 2013.
- Dogan I: *Microcontroller Based Applied Digital Control*. John Wiley & Sons Ltd,  
Chichester, England, 2006.
- Electronic news line: *Top microcontrollers companies in the world*. [electronicsnewslines.com/457/list-of-top-microcontroller-companies-in-the-world.html](http://electronicsnewslines.com/457/list-of-top-microcontroller-companies-in-the-world.html) [5.6.2014.]
- Gridling G, Weiss B: *Introduction to microcontrollers*. Vienna University of Technology,  
Vienna, Austria, 2007.
- Horvat G: *Ultrazvučno mjerenje i regulacija razine sa ATMEGA8535*.  
*Diplomski rad*. Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2007.
- Rahul K: <http://www.globalindustryanalysis.com/> [29.5.2014.]
- Kurtanjek Ž: *Mjerenje i vođenje procesa*. Prehrambeno-biotehnološki fakultet, Zagreb, 2007.
- Margolis M: *Arduino Cookbook*. Michael Margolis and Nicholas Weldon, Sebastopol,  
USA, 2011.
- Matić N: *PIC Microcontrollers*. <http://groups.csail.mit.edu/lbr/stack/pic/pic-microcontrollers.pdf> [15.4.2014.]
- Nikolić M: *Releji*. <http://www.automatika.rs/baza-znanja/teorija-upravljanja/releji.html>,  
[11.3.2014.]
- Petrić J: *Automatska regulacija: uvod u analizu i sintezu*. Fakultet strojarstva i brodogradnje,  
Zagreb, 2012.
- Radić D: *Informatika*. <http://www.informatika.buzdo.com/index.html> [2.6.2014.]
- Ravlić V: *Automatika*. Velibor Ravlić, Zagreb, 1997.

Sainsmart: *4 channel relay module*. <http://www.sainsmart.com/4-channel-5v-relay-module-for-pic-arm-avr-dsp-arduino-msp430-ttl-logic.html> [25.3.2014.]

Saxena NA: *Monolithic Concept and the Inventions of Integrated Circuits by Kilby and Noyce*. Nano Science and Technology Institute, USA, 2007.

Schmidt M: *Arduino –Pragmatic programmers*. USA, 2011.

Schnake J: *Liquid Level Measurement Basics 101*, Endress+Hauser, USA, 2006.

Smolčić J: *Razvoj platforme za upravljanje sustavom autonomnih tuševa*.  
Stručni studij Politehnika, Split, 2013.

Stakem PH: *4- and 8-bit Microprocessors: Architecture and history*. PRRB Publishing, 2013.

Sead K, Huseinbegović S: *Projektovanje mikroprocesorskih sistema*.  
Elektrotehnički fakultet, Sarajevo, 2012.

Tomac J: *Mjerenje, regulacija i automatizacija, I.dio: Mjerenja*. Prehrambeno-tehnološki fakultet, Osijek, 2006.

Tomac J: *Mjerenje, regulacija i automatizacija, II.dio: Automatska regulacija*.  
Prehrambeno-tehnološki fakultet, Osijek, 2006.

Valter Z: *Procesna mjerenja*. Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2007.

Zenzerović P: *Uvod, instalacija Arduino softvera i provjera rada mikrokontrolera*. Hrvatska zajednica tehničke kulture, Zagreb, 2013.

## **7. PRILOZI**

## Prilog 1 Izvorni kod programa mikroupravljača s dvopoložajnom regulacijom razine

```

/*
#####
Autor: Ana Jelinić
Mentor: doc. dr. sc. Frane Čačić Kenjeric
Diplomski rad: Mjerenje i regulacija razine primjenom mikroupravljača
Kolegij: Automatizacija procesa PE124
Datum: svibanj, 2014. godine
Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek
#####
*/

// definicija konstanti

#define echoPin 8 // Echo Pin
#define trigPin 7 // Trigger Pin
#define V1 9 // ventil 1 na releju 1 - napojni
#define V2 10 // ventil 2 na releju 2 - ispustni

// definicija varijabli

int maxRazina = 42; // zadana maksimalna razina tekućine
int minRazina = 10; // zadana minimalna razina tekućine
float distance; // udaljenost
float razina = maxRazina; // razina tekućine u spremniku
float zadanaRazina = 20; // razina u (cm) koju treba regulirati u spremniku
unsigned int brojac; // brojac za broj mjerenja

// obvezna funkcija setup()-postavke sustava

void setup() {

  Serial.begin(9600); // inicijalizacija serijske komunikacije s brzinom od
  9600 bit/s

  // konfiguracija U/I pinova mikroupravljača

  pinMode(trigPin, OUTPUT); // digitalni izlaz za aktivaciju HC-SR04 mjernog
  pretvornika
  pinMode(echoPin, INPUT); // digitalni ulaz s HC-SR04 mjernog pretvornika (za
  mjerenje vremena emitiranje/prijem)
  pinMode(V1, OUTPUT); // digitalni izlaz - aktivacija releja 1 za upravljanje
  Ventil 1
  pinMode(V2, OUTPUT); // digitalni izlaz - aktivacija releja 2 za upravljanje
  Ventil 2

  // početni postav - ventili su zatvoreni - sigurnost

  digitalWrite(V1, LOW); // ventil 1 zatvoren
  digitalWrite(V2, LOW); // ventil 2 zatvoren
  brojac = 0; // inicijalizacija brojac na 0
  Serial.println("Vrijeme (s) \t Udaljenost (cm)"); // zaglavlje za podatke
}

// obvezna funkcija loop()-tijelo programa

```

```

voidloop() {

//poziv funkciji za mjerenje udaljenosti

    distance = udaljenost();
//izračunaj razinu u spremniku

    razina =maxRazina- distance;

//ispis rezultata putem serijske veze

Serial.print(brojac);
Serial.print("\t");
Serial.println(razina);

//dvpoložajna regulacija - if...elseif struktura

if(razina >=maxRazina)// Prvo provjera dali se spremnik pun
{

// isključi napojni ventil i signaliziraj da je spremnik pun

Serial.println("Spremnik je pun, zatvram ventil V1");
iskljuci_ventil(V1);
}

elseif(razina <=minRazina)// provjera dali je spremnik prazan
{

//ukoliko je spremnik prazan ne dopusti daljnje otvaranje ventila V2

Serial.println("Spremnik je ispražnjen, zatvaram vetil 2, potrebno
punjenje");
iskljuci_ventil(V2);
ukljuci_ventil(V1);
}

//puni spremnik, ako razina manja od zadane puni spremnik, zatvori odvod

elseif(razina <zadanaRazina)
{
ukljuci_ventil(V1);
iskljuci_ventil(V2);
}

//prazni spremnik, razina veća od zadane, isključi dovod, uključi odvod

elseif(razina >zadanaRazina)
{
ukljuci_ventil(RELAY_2);
iskljuci_ventil(RELAY_1);
}

delay(2000);// pauza od 2 sek
brojac=brojac++;//inkrementiranje brojača za jedan
} // kraj funkcije loop()

//funkcija udaljenost() mjeri udaljenost granice faza tekućina/plin od
pokrova spremnika

```

```

float udaljenost() {
int i;//brojac
float
  t =0;// definiranje varijable za vrijeme
float udaljenost=0;// početna vrijednost udaljenosti
int br_mjerenja=10;// broj uzastopnih mjerenja iz kojih se računa srednja
vrijednost
for(i=0; i<br_mjerenja; i++){
// inicijalizacija i aktivacija mjernog pretvornika HC-SR04
digitalWrite(trigPin,LOW);
digitalWrite(echoPin,LOW);
delay(500);
digitalWrite(trigPin,HIGH);//počni odašiljanje
delay(100);// pričekaj 10 milisekundi
digitalWrite(trigPin,LOW);// pestani odašiljanje
  t= t +pulseIn(echoPin,HIGH);//ukupnom vremenu dodaj vrijeme od
povrata jeke
delay(500);//pričekaj malo - pa ponovi
}
  t = t /br_mjerenja;// srednje vrijeme potrebno za povrat jeke
  udaljenost = t /58.2;// 22 stupnja temperatura, zadana vrijednost
return udaljenost;
}

//funkcija za uključivanje ventila spojenog na određeni relej

voidukljuci_ventil(int V) {
digitalWrite(V,HIGH);
Serial.print("\t");
Serial.print("Uključen ventil :");
switch(V) {
case V1:
Serial.println(" V1");
break;
case V2:
Serial.println(" V2");
break;
}
}

//funkcija za uključivanje ventila spojenog na određeni relej

voidiskljuci_ventil(int V) {

digitalWrite(V,LOW);
Serial.print("\t");
Serial.print("Isključen ventil :");
switch(V) {
case V1:
Serial.println(" V1");
break;
case V2:
Serial.println(" V2");
break;
}
}

```

## Prilog 2 Kod algoritma PID regulacije

```
unsigned long lastTime; // definiranje varijabli
double Input, Output, Setpoint;
double errSum, lastErr;
double kp, ki, kd;
void Compute()
{
    unsigned long now = millis(); // računanje vremena od zadnjeg proračuna
    double timeChange = (double)(now - lastTime);

    double error = Setpoint - Input; // izračun pogrešaka varijabli
    errSum += (error * timeChange);
    double dErr = (error - lastErr) / timeChange;

    // jednažba algoritma PID regulatora koja se
    // koristi za izračun izlazne veličine
    Output = kp * error + ki * errSum + kd * dErr;

    lastErr = error;
    lastTime = now; // zadana je pohrana prethodnih vrijednosti
} // varijable

void SetTunings(double Kp, double Ki, double Kd) // podešavanje P, I i D člana
{
    kp = Kp;
    ki = Ki;
    kd = Kd;
}
```