

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Немања Радумило

**Микропроцесорска мјерења у системима
регулације нивоа течности**

Завршни рад – I циклус студија

Ментор:

др Платон Совиљ, редовни професор

Бања Лука, јун 2025.



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
UNIVERSITY OF BANJA LUKA
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING



Немања Радумило

**Микропроцесорска мјерења у системима
регулације нивоа течности**

Завршни рад – I циклус студија

Ментор:

др Платон Совиљ, редовни професор

Бања Лука, јун 2025.



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
Студијски програм
МЕХАТРОНИКА

На основу поднесене пријаве Немање Радумила студента Машинског факултета Универзитета у Бањој Луци одређује се из предмета Мјерења у мехатроници слједећи:

ЗАДАТАК ЗАВРШНОГ РАДА

Назив теме: **МИКРОПРОЦЕСОРСКА МЈЕРЕЊА У СИСТЕМИМА РЕГУЛАЦИЈЕ НИВОА ТЕЧНОСТИ**

Опис проблема:

Микропроцесорски мјерни системи представљају дигиталне мјерне системе засноване на примјени микропроцесора или микроконтролера. Микропроцесорска мјерења у системима регулације нивоа представљају кључни елемент и основу уколико се жели постићи аутоматизовани процес допуњавања/пражњења, дојаве сигурносних упозорења и сигурносних акција против хаварија. Без поузданних мјерења, системи би радили ван оптималног опсега, што би довело до смањене енергетске ефикасности, краћег вијека трајања радне опреме (механички кварови), материјалних губитака и разних еколошких ризика.

Задатак:

Коришћењем ПИД контролера који се састоји од: микроконтролера, одговарајућег драјвера и одговарајућих мјерних модула потребно је пројектовати систем за аутоматску регулацију нивоа течности у резервоару. Потребно је да систем врши континуално мјерење нивоа течности помоћу ултразвучног сензора *HC-SR04*. Такође, као додатни мјерни модул, користити *Water Detect Click* сензор који ће служити као гранични прекидач за спречавање преливања воде преко горње ивице резервоара.

Бања Лука, 05.06.2025. године

Ментор - предметни наставник:

др Платон Совиљ, редовни професор

САДРЖАЈ

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Увод | 2 |
| 2. | Мјерење – Основни принципи | 5 |
| 2.1. | Мјерни сигнали..... | 6 |
| 2.2. | Мјерни инструменти..... | 7 |
| 2.2.1. | Аналогни мјерни инструменти | 9 |
| 2.2.2. | Дигитални мјерни инструменти..... | 10 |
| 2.3. | Сензори..... | 11 |
| 2.3.1. | Статичке карактеристике сензора..... | 12 |
| 2.3.2. | Динамичке карактеристике сензора | 14 |
| 2.3.3. | Сензори са прекидачким излазом..... | 14 |
| 2.3.4. | Сензори са импулсним излазом | 14 |
| 2.3.5. | Механички сензори | 14 |
| 3. | Мјерене величине | 15 |
| 3.1. | Мјерење удаљености (нивоа) ултразвучним сензором..... | 15 |
| 3.1.1. | Пиезоелектрични претварачи..... | 16 |
| 3.2. | Мјерење присуства течности кондуктометричким сензором | 18 |
| 4. | ПИД контролер..... | 21 |
| 4.1. | Одзив система у временском домену | 22 |
| 4.2. | ПИД контролер..... | 23 |
| 4.2.1. | Пропорционално дејство | 23 |
| 4.2.2. | Интегрално дејство | 23 |
| 4.2.3. | Деривативно дејство | 24 |
| 5. | Израда и имплементација система..... | 25 |
| 5.1. | Механичка израда макете пројекта..... | 26 |
| 5.2. | Избор и функција хардверских компоненти система | 28 |
| 5.2.1. | <i>Arduino UNO R3</i> | 28 |
| 5.2.2. | <i>Motor shield Adafruit V1 L293D</i> | 30 |
| 5.2.3. | <i>HC-SR04</i> ултразвучни сензор | 31 |
| 5.2.4. | <i>Water detect click</i> кондуктометрички сензор..... | 32 |
| 5.2.5. | <i>ZC-A40</i> пумпа..... | 33 |
| 5.2.6. | <i>LCD 16x2</i> са <i>I2C</i> модулом | 34 |
| 5.3. | Електрична шема и интеграција компоненти..... | 36 |
| 6. | Софтверска имплементација и тестирање система..... | 37 |
| 6.1. | Програмски оквир <i>Arduino IDE</i> | 37 |
| 6.2. | Тестирање функционалности система | 39 |
| 6.2.1. | Валидација рада ултразвучног сензора и ПИД алгоритма..... | 40 |
| 6.2.2. | Сигурносни механизам и алармни систем..... | 42 |
| 6.2.3. | Анализа одзива система путем <i>Serial Plotter</i> -а..... | 43 |
| 7. | Закључак..... | 45 |
| | Литература | 46 |

| | |
|----------------|----|
| Прилог 1 | 50 |
| Прилог 2 | 51 |
| Прилог 3 | 52 |
| Прилог 4 | 56 |

1. УВОД

Аутоматизација и континуално управљање технолошким процесима данас представљају темељ савремене индустрије и инжењерске праксе, омогућавајући прецизну контролу, оптимизацију ресурса и повећање сигурности у бројним апликацијама.

Од времена првих механичких регулационих уређаја, попут центрифугалног регулатора Џејмса Вата¹ за контролу довода горива, а тиме и брзине парних машина, до данашњих микрорачунарских система са сложеним управљачким алгоритмима, аутоматизовани системи доживјели су револуционаран развој. Тај развој је у највећој мјери потпомогнут иновацијама у пољима механике, електротехнике, електронике и информационог инжињеринга, те употребом истих тих иновација (контролних јединица, сензора и актуатора). Овиме се управо постигла адаптивност система на динамичке промјене окружења, односно могућност система да региструје и мјери динамичке промјене у реалном времену, а самим тим да на основу истих, изврши одређено управљање.

Историјски гледано, поред претходно наведених научних области и иновација унутар њих, уопштеније, развој аутоматизоване контроле везује се за открића у теорији динамичких система и математичком моделирању. Радови Џејмса Клерка Максвела² о стабилности регулационих система у 19. вијеку за вријеме његовог ангажмана на *King's College*-у у Лондону, где је Максвел надгледао експериментално утврђивање електричних јединица за *British Association for the Advancement of Science*, поставили су основе за стандарде за коришћење мјерних и контролних система у техничкој аутоматизацији. Такође, формулатија ПИД (пропорционално-интегрално-деривативног) управљачког алгоритма од стране Николаса Минорског³ 1922. године којег је Минорски развио док је радио као истраживач за амерички *Westinghouse Electric & Manufacturing Co.* Све претходно набројано представља само неке од главних историјских научних достигнућа који су допринијели развоју система аутоматског управљања за управљање динамичким системима, од индустријских процеса, преко роботике, па све до ваздухопловног и свемирског инжењерства [2, 3].

Сензорска технологија, као неопходни сегмент аутоматизације, доживјела је такође експоненцијални напредак. Ултразвучни, капацитивни, оптички и други сензори омогућавају прецизно мјерење и конверзију физичких величина, док њихова комбинација са микроконтролерима отвара могућности за адаптивну контролу и заштиту од критичних стања.

На примјер, ултразвучни сензори, засновани на времену простирања звучних таласа, пружају континуално мјерење нивоа без физичког контакта, што их чини идеалним за примјену у агресивним или стерилним срединама. Ипак, због потенцијалних грешака усљед сензорског шума или механичких оштећења, увођење додатних сигурносних елемената, попут прекидачких сензора за детекцију прелијевања, постаје готово

¹ Џејмс Ват (енг. James Watt), 1736 – 1819, био је шкотски инжењер и иноватор. Најпознатији је по изуму парне машине која је убрзала одвијање индустријских процеса. Као консултант *Glasgow Water Company*, Ват је допринијео у примени парних мотора у контролисаном пумпању воде, што представља рану форму система за аутоматску регулацију нивоа течности [1].

² Џејмс Клерк Максвел (енг. James Clerk Maxwell), 1831 – 1879, био је шкотски физичар и математичар. Познат је по својој теорији електромагнетизма која је показала да су светлосни зраци заправо електромагнетни таласи [2].

³ Николас Минорски (енг. Nicolas Minorsky), 1885 – 1970, био је руски математичар. Сматра се да је Минорски главни оснивач ПИД контролера [3].

неопходно. Оваква редундантност осигуруја робусност система и сигурност његовог исправног рада, спречавајући катастрофалне послецице у случају кварова.

У том контексту, системи за регулацију нивоа течности представљају кључну компоненту у индустрији хемијских процеса, енергетици, пољопривредној аутоматизацији и управљању воденим ресурсима, где је одржавање стабилног нивоа неопходно за ефикасност и ефективност система, оптималан рад и сигурност.

Циљ овог дипломског рада јесте представљање и опис дизајна и имплементације једног аутоматизованог микропроцесорског система за регулацију нивоа течности, који интегрише ПИД контролер у комбинацији са актуатором (пумпом) и ултразвучним сензором за прецизно мјерење и континуалну контролу нивоа. Додатно, с' циљем повећања сигурности, у систему је имплементиран *Water Detect Click* сензор, који дјелује као независни заштитни прекидач за искључивање пумпе у случају прекорачења задатог нивоа. Оваква архитектура не само што одражава принципе модерне индустријске аутоматизације - комбинујући континуалну контролу са дискретном сигурношћу - већ и истиче значај редундантности у критичним системима.

У другој глави дат је увид у основне принципе мјерења. Дефинисан је појам мјерења и његова важност при научним истраживањима и уопштеном технолошком развоју. Дефинисане су основне и изведене мјерне јединице утврђене *SI* системом јединица. Такође, приказани су аналогни и дигитални мјерни инструменти, сензори, њихове уопштене дефиниције, принципи рада, те њихове основне карактеристике.

У трећој глави обраћене су мјерене величине које се користе у систему за регулацију нивоа течности у резервоару. Фокус је на два типа мјерења: континуалном мјерењу удаљености до слободне површине течности ултразвучним сензором *HC-SR04* и дискретном детектовању присуства течности помоћу кондуктометричког сензора *Water detect click*. Оба сензора имају различиту намјену и принцип рада, али се у практичној реализацији пројекта користе као допуна један другом у циљу добијања поузданних и безбједних података о нивоу течности. Оваква комбинација омогућава ефикасно континуално управљање и додатну заштиту од екстремних стања као што су препуњавање течности у резервоару.

У четвртој глави приказане су основне карактеристике система аутоматског управљања са посебним акцентом на затворене системе са повратном спрегом, као и примјена ПИД контролера у тим системима. Детаљно је објашњено функционисање пропорционалног, интегралног и деривативног дејства, те њихов утицај на одзив и стабилност система. Посебна пажња посвећена је динамичком понашању система и важности правилног подешавања контролера у циљу елиминације грешке управљања и постизања жељеног понашања. Теоријска основа приказана у овом поглављу представља основу за имплементацију система за регулацију нивоа течности описаног у наредним главама.

У петој глави описана је механичка израда макете пројекта, која обухвата конструкцију двије међусобно повезане посуде формирани од ПММА плоча, прецизно исјечених и залијепљених у водоотпорну целину. Комплетан склоп монтиран је на дрвену подлогу са интегрисаним резервоарима, пумпом, дренажним системом и електричним омаром, чиме је формирана физичка основа за даље програмирање и пуштање система у рад.

У шестој глави детаљно је описана хардверска структура система регулације нивоа течности, укључујући избор и функцију сваке компоненте – од контролера *Arduino UNO*, преко ултразвучног и кондуктометричког сензора, моторног штита и пумпе, до *LCD* дисплеја са *I2C* интерфејсом. Приказана су сва електрична повезивања хардверских

компонената кроз електричне шеме, њихове карактеристике, као и разлози зашто је сваки елемент изабран у контексту реализације пројекта.

У седмој глави приказано је интегрисано развојно окружење *Arduino IDE* које је коришћено за развој, компајлирање и упload програма на микроконтролерску плочу *Arduino UNO*. Посебна пажња посвећена је опису функција програма, употреби релевантних библиотека, као и примјени уграђеног *Serial Plotter* алата за визуелизацију одзива система у реалном времену.

У осмој глави представљено је тестирање система за регулацију нивоа течности у резервоару, које је кључна фаза пројекта јер потврђује исправност рада хардверских и софтверских компоненти система. Циљ овог тестирања био је да се испита способност система да одржи задати ниво течности у горњем резервоару упркос сталним поремећајима, као што је континуално истицање воде, али и да се провјере сигурносни механизми који спречавају прелијевање. Током тестирања праћен је рад ултразвучног сензора и ПИД алгоритма, анализирана је стабилност система путем графичког приказа одзива на *Serial Plotter*-у, а посебна пажња посвећена је функционисању алармног система који активира сигурносни прекидач при прекорачењу критичног нивоа и ицкључује актуатор. На тај начин, осма глава обједињује и заокружује све кључне резултате тестирања и потврђује ефикасност пројектованог система.

Конечно, у оквиру прилога, доступан је програмски код неопходан за практичну реализацију наведених функција пројекта, те стандардна електрична шема повезивања хардверских електронских компоненти система.

2. МЈЕРЕЊЕ – ОСНОВНИ ПРИНЦИПИ

Појам мјерења, уопштено, може се описати као процес добијања и стицања одређених информација⁴, који се састоји од поређења мјерених (непознатих) са референтним (познатим) величинама, извршавања неопходних операција мјерења (методологије мјерења) и приказивања, односно представљања резултата у одговарајућем облику. Међутим, појам мјерења се такође може описати кроз практични, информатички и математички смисао [4].

Практична дефиниција мјерења подразумијева да је мјерење квантитативно одређивање вриједности неке физичке величине, поређењем са референтном вриједношћу те исте величине [4].

Информатичка дефиниција мјерења каже да је мјерење један информациони процес који обухвата поређење величине исте врсте, извршавање потребних математичких операција и представљање резултата мјерења у погодном облику [4].

Математичка дефиниција мјерења гласи: Мјерење је поступак којим се неком појавном својству објекта мјерења придржују квантитативне вриједности на такав начин да тачно описују то својство [4].

Примијетно је да све ове дефиниције појма мјерења имају многе заједничке конотације, па у целини посматрано, може се рећи да је мјерење једноставно: процес добијања информације на основу које се доноси одређена одлука (закључак). Да би се, као такав, поступак мјерења успјешно обавио, потребно је да мјерни задатак буде детаљно испланиран и организован у складу са циљевима мјерења. То у највећој мјери подразумијева да се за одређено мјерење користе адекватне методе и инструменти (мјерила). Вриједност коју мјерни уређај (мјерило) даје као резултат успјешно оствареног мјерног поступка назива се „показивање“ мјерила, или „индикација“ мјерила (енг. *indication of instrument*). Управо разлика у показивању и његовој намјени је направила разлику између мануелних и аутоматизованих система. Код мануелних система показивање мјерног инструмента би служило човјеку да изврши, или не изврши одређену акцију, док код аутоматских система „показивање“ које инструмент даје представља и користи се даље као сигнал који се додатно обрађује унутар управљачког система [4].

Да би се постигли јединствени критеријуми како у истраживачком раду тако и у производној и процесној индустрији, потребно је резултате мјерења исказати јединственим мјерним јединицама. У складу са тим формиран је међународни систем јединица (франц. *Système international d'unités*, енгл. *International System of Units*) који су, практично, прихватиле све земље свијета. Међународни систем јединица *SI* састоји се од:

- Основних мјерних јединица и
- Изведених мјерних јединица [4, 5].

У наставку, у табелама 1 и 2 приказане су основне и неке од изведенih мјерних јединица које су формиране унутар *SI* система на једанаестој генералној конференцији за мјере и тегове 1960. године и препоручене за све области физике и технике [4].

⁴ Под информацијом се, у општем смислу, подразумијева сазнање о неким претходно непознатим чињеницама, које се даље може представити у облику погодном за даљи пренос, чување и обраду. Информација може бити физичка величина, бинарни еквивалент физичке величине, звук, слика, знакови...итд [4].

Табела 1. Основне јединице *SI* система [4].

| Величина | Ознака | Мјерна јединица | Ознака | Усвојено |
|----------------------------|------------------|--------------------------------------|--------|----------|
| Дужина | l, x, r, \dots | метар (<i>meter</i>) | m | 1983. |
| Маса | m | килограм (<i>kilogram</i>) | kg | 1901. |
| Вријеме | t | секунда (<i>second</i>) | s | 1967. |
| Електрична струја | I, i | ампер (<i>ampere</i>) | A | 1948. |
| Термодинамичка температура | T | келвин (<ikelvin< i="">)</ikelvin<> | K | 1967. |
| Јачина свјетlostи | L_v | кандела (<i>candela</i>) | Cd | 1971. |
| Количина супстанције | n | мол (<i>mole</i>) | mol | 1979. |

Табела 2. Неке од изведенih мјерних јединица *SI* система [4].

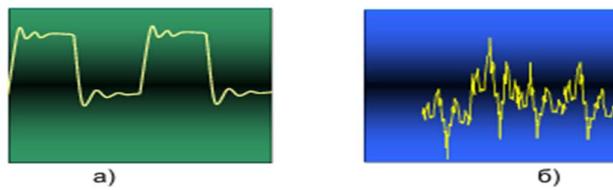
| Величина | Мјерна јединица | Ознака | Изражено другим изведеним јединицама | Изражено основним јединицама |
|----------------------|-----------------|----------|--------------------------------------|--|
| Сила | Нутн | N | - | $kg \cdot m \cdot s^{-2}$ |
| Притисак | Паскал | Pa | N / m^2 | $m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$ |
| Енергија, рад | Џул | J | Nm | $m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$ |
| Снага | Бат | W | J / s | $m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$ |
| Напон | Волт | V | W / A | $m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$ |
| Електрична отпорност | Ом | Ω | V / A | $m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$ |
| Магнетна индукција | Тесла | T | Wb / m^2 | $kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$ |
| Фреквенција | Херц | Hz | - | s^{-1} |

2.1. Мјерни сигнали

Сигнал представља, у најопштијем смислу, промјенљиву физичку величину која је функција времена и која са собом носи одређену информацију. Информације које сигнал са собом носи представљају квантитативне карактеристике тог сигнала које се још називају и информационим параметрима датог сигнала [4].

Сигнал који се може представити неком одређеном математичком функцијом времена назива се детерминистички сигнал (енг. *deterministic signal*). За детерминистички сигнал важи да је његову вриједност, на основу познавања законитости промјене информационих параметара, могуће одредити за произвољни тренутак у будућности. Такође, постоје и сигнали чије будуће вриједности (промјене) нису унапријед познате и не могу се предвидјети, те се такви сигнали називају случајни сигнали (енг. *random signals*) [4].

На слици 1 налази се уопштени приказ примјера детерминистичког и случајног сигнала.



Слика 1. а) Детерминистички сигнал, б) Случајни сигнал [4].

Мјерни синал (енг. *measurement signal*) представља физичку величину која је временска функција мјерене величине и иста се обрађује уз помоћ мјерног инструмента (мјерила) на којем се могу приказати информациони параметри тог сигнала (амплитуда, фреквенција...итд.). На слици 2 приказан је општи блок-дијаграм мјерила [4].



Слика 2. Општи блок-дијаграм мјерног инструмента [4].

Дакле, на основу претходне дефиниције мјерног сигнала може се извршити класификација мјерних сигнална на двије основне врсте:

- Аналогни сигнали и
- дигитални сигнали [4].

Аналогни сигнал је физичка величина чији информациони параметар може, у било ком тренутку, да поприми било коју вриједност унутар одређеног непрекидног интервала вриједности. Другим ријечима, аналогни мјерни сигнал може у потпуности и непрекидно да прати вриједност друге мјерене физичке величине. Аналогни сигнал је непрекидан по вриједности и по времену (може да представља електрични модел било које макроскопске физичке величине). Такође, аналогни сигнали се још називају и „континуални“, јер је вриједност коју такав сигнал може да има, у било ком тренутку времена, одређена непреbroјивим скупом вриједности [4].

Дигитални сигнал представља физичку величину чији информациони параметар може да поприми само неку од вриједности из скupa већ унапријед дефинисаних дискретних вриједности. У савременој дигиталној електроници доминантни су дигитални сигнали који служе да представе бинарне величине (0 – низак напонски ниво, 1 – висок напонски ниво), они представљају основну подгрупу дигиталних сигнална и називају се бинарни сигнали. Информациони параметар (нпр. амплитуда) бинарног сигнала може да поприми само једну од двије дискретне вриједности [4].

2.2. Мјерни инструменти

Мјерења се изводе уз помоћ мјерних инструмената који су конципирани и конструисани тако да одговоре специфичним захтјевима различитих примјена. У склопу тих инструмената налазе се сензори који представљају примарне елементе задужене за детекцију и реакцију на физичке величине од интереса (мјерене физичке величине). Савремени инструментални мјерни системи повезани су у цјелину путем жичаних, оптичких или бежичних комуникационих мрежа. Њихова примјена обухвата широк спектар услова - од контролисаних лабораторијских средина до екстремних индустријских окружења, као што су нуклеарни и термоенергетски погони, те удаљене или недоступне локације, попут сателитских платформи и свемирских летјелица. Већина савремених инструмената генерише излазне сигнале у електричном облику, при чему оваква форма омогућава једноставну обраду, приказ, архивирање и пренос података у реалном времену [6].

Када се физичке величине претворе у електрични сигнал, релација између улазне промјенљиве и излазног сигнала сензора може се описати линеарном једначином облика:

$$y = a + bx \quad (1)$$

где је:

- y - излазни електрични сигнал,
- x - улазна физичка величина коју сензор мјери,
- a - вриједност офсета (пресјек на y -оси), која представља излазни електрични сигнал у случају нулте вриједности улаза и
- b - коефицијент осјетљивости сензора, односно мјера тога колико јединица сигнала се добија по јединици промјене улазне величине [6].

Ова једначина представља основни модел за калибрацију и интерпретацију података добијених од сензора коју мјерни инструмент користи [6].

Сваки мјерни инструмент, укључујући и сензоре као њихове примарне елементе, уноси са собом одређени ниво неизвијесности у мјерење. То значи да је сваки мјерни инструмент у мањој, или већој мјери подложен грешкама мјерења. Те грешке могу настати услед различитих фактора, што подразумијева конструкциона ограничења мјерног инструмента, временску деградацију компонената и калибрационе одступања истог, или утицај спољашњих фактора на процес мјерења, итд [6].

Грешка мјерења је по природи непозната и никада није у потпуности предвидљива, па самим тим не може се и у потпуности елиминисати. У том контексту, неопходно је да се грешке мјерења - које уопштено настају услед разних поремећаја које природа намеће - уз одређене технике мјерења и компензације тих грешака, доведу до занемарљивих вриједности у односу на промјене величине која се мјери [6].

Грешка мјерења може се уопштено представити формулом:

$$E = Y - R \quad (2)$$

где је:

- E - грешка мјерења,
- Y - стварна (измјерена) вриједност мјерене величине и
- R - референтна (жељена) вриједност мјерног инструмента [6].

Перформансе мјерних инструмената условљене су њиховим статичким и динамичким карактеристикама, а исте се најчешће изражавају кроз параметар тачности, који описује степен подударности измјерених вриједности са стварним (референтним) вриједностима мјерене физичке величине. Тачност мјерења описује колико је мјерни инструмент, или мјерни систем софистициран и способан да минимизира грешке мјерења. Тачност мјерног инструмента се изражава у мјерним јединицама мјерене физичке величине. Статичке карактеристике мјерних инструмената долазе до изражaja тамо где се манипулише са мјерним сигналима који спорије варирају, тј. код инертнијих и споријих система (нпр. систем регулације нивоа течности). Значај динамичких карактеристика мјерних инструмената доминира у случајевима када мјерени сигнали варирају брзо (нпр. електрични погонски системи) [7, 8].

Поред статичких и динамичких фактора, перформансе мјерних инструмената зависе и од особина као што су поновљивост и стабилност. Поновљивост представља способност инструмента да даје приближно исте резултате при више узастопних мјерења исте физичке величине у кратком временском интервалу. Са друге стране, стабилност мјерног инструмента указује на способност инструмента да очува своје карактеристике у дужем временском периоду, без потребе за рекалибрацијом [7].

Тачност мјерења може се унаприједити примјеном различитих метода корекције, укључујући калкулације, калибрацију, употребу калибрационих табела, емпиријских алгоритама, итд. У модерним мјерним системима, посебно са развојем дигиталне

електронике, овакве корекције се реализују софтверски и најчешће аутоматски, било унутар самог мјерног инструмента, било кроз повезане рачунарске системе [8].

Мјерни инструменти се у основи дијеле према начину представљања излазног сигнала на:

- Аналогне мјерне инструменте и
- дигиталне мјерне инструменте [7].

2.2.1. Аналогни мјерни инструменти

Аналогни мјерни инструмент даје излазни сигнал који се континуирано мијења у складу са промјеном физичке величине која се мјери. Излазни сигнал може да поприми бесконачно много вриједности унутар мјерног опсега за који је инструмент дизајниран. Другим ријечима, резолуција излазног сигнала је бесконачна у оквиру датог мјерног опсега аналогног инструмента. Нпр. аналогни волтметар један је од познатијих аналогних мјерних инструмената, јер се електричне величине попут напона и струје често мјере и испитују. Како се улазна вриједност напона мијења, казаљка на волтметру се помјера глатким и непрекидним покретом. Казаљка може заузети бесконачно много положаја унутар свог опсега кретања (мјерни опсег волтметра). Међутим, број различитих положаја казаљке које људско око може разликовати је строго ограничен, а та дискриминација зависи од тога колико је калибрисана скала волтметра велика и колико је „финог“ подијељена [9].

У аналогним инструментима, промјене у амплитуди, фази или фреквенцији мјерене физичке величине преносе корисне информације као директан одговор на физичке промјене исте те величине. Као и у случају са свим системима који преносе сигнале, постоје корисни сигнали који реагују на физичке појаве и нежељени сигнали који настају услед различитих облика шумова који захтјевају опсежно филтрирање и другу обраду сигнала [6].

На слици 3 приказан је један типичан аналогни мјерни инструмент - мултиметар⁵.



Слика 3. Аналогни мултиметар ESCOLA 100 [10].

⁵ Мултиметар је преносиви мјерни инструмент који се користи за мјерење основних електричних величина као што су напон, струја и отпор. Користи се најчешће у сервисирању, лабораторијама и у образовне сврхе [11].

2.2.2. Дигитални мјерни инструменти

Дигитални мјерни инструменти представљају мјерне уређаје који приказују резултате мјерења у облику бројчаних вриједности најчешће на седмосегментним дисплејима, ЛЦД екранима повезаним са рачунаром (управљачким системом), итд. Уместо казаљке и скале, што је случај код аналогних инструмената, дигитални мјерни инструменти приказују коначне бројчане вриједности које се могу мијењати искључиво у одређеним дискретним корацима. Ово омогућава већу тачност и једноставније читање података од стране оператора [12].

Дигитални мјерни инструменти захтјевају сложенију електронску структуру која се може представити најједноставније као ланац који се састоји респективно од:

- Сензора - који физичке величине (температура, напон, струја...) претварају у електричне сигнале,
- Појачавача сигнала (нпр. операционих појачала) – који служе за прилагодбу сигнала добијеног са сензора и његово постављање у опсег напона погодан за даљу обраду,
- А/Д конвертора – који аналогне сигнале претварају у дигиталне еквиваленте (дигиталне ријечи),
- Дигиталних дисплеја – који служе за приказ датих дигиталних вриједности [12].

Такође, некада само приказивање резултата мјерења није неопходно, већ је битније омогућити даљу повезаност А/Д конвертора са рачунаром ради чувања и даље обраде података. Нпр. за случај даљег управљања потребно је обезбиједити у ланцу након контролера и Д/А конвертор [12].

На слици 4 приказана је принципијелна шема аквизиције мјерног сигнала од стране дигиталног мјерног инструмента.



Слика 4. Принципијелна шема аквизиције мјерног сигнала од стране дигиталног мјерног инструмента [12].

Дигитални мјерни инструменти су преовладали у производној и процесној индустрији због своје могућности интеграције у индустриске интелигентне системе мјерења, веће прецизности у очитавању резултата мјерења, могућности аутоматске обраде података,...итд. На основу претходно наведеног, може се рећи да дигитални мјерни инструменти представљају темељ модерне технологије мјерења [7, 12].

На слици 5 приказан је дигитални мултиметар који служи за приказивање резултата мјерења карактеристичних електричних величина које фигуришу у Омовом⁶ закону.

⁶ Георг Сајмон Ом (енг. *Georg Simon Ohm*), 1789 - 1854, био је њемачки физичар познат по Омовом закону који гласи: Јачина електричне струје кроз проводник пропорционална је разлици потенцијала (напону) и обратно пропорционална отпору тог проводника [13].



Слика 5. Дигитални мјерни инструмент STANLAY 33D+ [14].

2.3. Сензори

Сензор је уређај који реагује на промјену неке физичке величине (нпр. температуре, положаја, притиска, свјетлости, влажности, хемијског састава...) и ту промјену претвара у други сигнал, погодан за анализу, обраду или интерпретацију – најчешће у електрични сигнал [15].

Како је претходно наведено за сигнале да су материјални носиоци информација разних физикалних величина, онда слиједи да се и сензори могу дефинисати као претварачи (енг. *transducers*) једног облика сигнала (енергије) у други. Најчешћи тип излазног сигнала сензора је електрични (напон, или струја), јер је електрични сигнал погодан за даљу анализу и процјену. Међутим, то не мора бити нужни случај када се узме у обзир да постоје пнеуматски сензори крајњег положаја чији је излаз пнеуматски – разлика притиска. Зато је често у употреби синоним „претварач“, или „мјерни претварач“ када се мисли на сензор. То претварање код сензора врши се увијек на ниском енергетском нивоу, тј. на информационом нивоу [15].

Када се говори о улози сензора у системима аутоматског управљања, сензор представља „чуло“ система. Он детектује тзв. спољашње надражје, односно промјене и информације о датим промјенама преноси до контролера, који затим обрађује добијене податке на основу којих шаље одговарајуће инструкције извршним компонентама (нпр. моторима, пумпама, вентилима, итд.) [16].

Једна од најбољих аналогија за систем аутоматског управљања је сам људски организам у којем сензоре представљају органи чула (нпр. очи, уши), управљачки систем представља човјеков мозак који прикупља информације (импулсе) од органа чула и шаље управљачке импулсе, док актуаторе представљају мишићи и екстремитети човјека [16].

Основна класификација сензора може се извршити на више начина и то:

- Према конструкцији у погледу детектовања сигнала,
- према врсти излазног сигнала,
- према физичкој величини која се мјери и
- према принципу рада [15, 16].

Приликом детектовања сигнала са објекта сензори могу бити конструисани тако да долазе, или не долазе у директан физички контакт са објектом, па према томе сензори се дијеле на:

- Контактне (крајњи прекидачи, сензори силе, итд.) и
- бесконтактне (ултразвучни сензори, инфрацрвени детектори, магнетни сензори, итд.) [15].

Према врсти излазног сигнала који сензори генеришу, сензори се могу подијелити на сензоре са:

- Прекидачким излазом,
- импулсним излазом,
- аналогним излазом у природном опсегу,
- аналогним излазом у стандарданом опсегу и
- излазом према комуникационим интерфејсима [15].

Табела 3. Класификација сензора према врсти мјерене физичке величине [16].

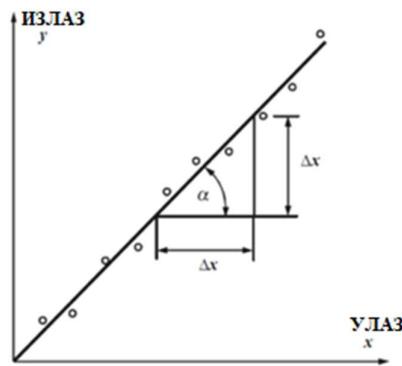
| Сензор | Мјерена физичка величина |
|-----------|--|
| Механички | Удаљеност, присуство (детекција) одређене материје, електрична проводљивост, помјерање, брзина, угао, маса, сила, притисак, итд. |
| Хемијски | Хемијски састав материје |
| Термички | Температура, топлота, специфични топлотни капацитет |
| Магнетни | Магнетни флукс, јачина магнетног поља |
| Оптички | Ниво освијетљености, боје |

Као што је већ наведено, најчешће, сензори претварају неелектричне физичке величине у електричне и то раде на основу различитих принципа. Према томе радни принцип који сензор користи за конверзију физичке величине служи и за његову класификацију, односно именовање. Тако сензор који функционише на основу Хол-овог ефекта се назива Холов сензор, или уколико генерише електрични сигнал на основу силе притиска (затезања) онда се назива пизоелектрични сензор и тако редом до капацитивних, индуктивних и осталих сензора [16].

Оно што је такође важно, поред класификације сензора, јесте опис њихових карактеристика. Сензори посједују карактеристике које могу да се подијеле на статичке и динамичке [15].

2.3.1. Статичке карактеристике сензора

Статичка карактеристика сензора представља однос (зависност) излазне и улазне физичке величине сензора у стационарном стању. Статичка карактеристика сензора се одређује експериментално тако што се сензору задаје позната улазна физичка величина, сачека се завршетак прелазних процеса и када наступи стационарно стање очитава се вриједност излаза. Након тога врши се неколико мјерења и резултати се уносе у дијаграм зависности улаз-излаз (Слика 6) [15].



Слика 6. Изглед статичке карактеристике сензора [15].

Са слике је евидентно да је статичка карактеристика права која се апроксимативно провлачи кроз резултате мјерења, тако да представља њихову линеарну апроксимацију. У пракси идеално би било имати сензор са што линеарнијом статичком карактеристиком јер је такав сензор поузданiji и прецизнији у предвиђању и интерпретацији мјерења. Линеарност статичке карактеристике сензора зависи од више фактора који се називају параметрима статичких карактеристика сензора [15].

Неки од параметара статичких карактеристика сензора, а који су битни за анализу реалних карактеристика коришћених сензора при изради пројекта регулације нивоа течности су:

- Мјерно подручје сензора – опсег вриједности улазне мјерене физичке величине за коју је сензор намијењен (нпр. 0 – 300 [bar]),
- Мјерни опсег сензора – алгебарска разлика најмање и највеће вриједности коју сензор може да мјери (нпр. за претходно мјерно подручје било би 300 [bar]),
- Тачност сензора – тачност сензора представља његову способност да у референтним условима приказује вриједности што ближе стварним вриједностима мјерене величине, а пошто се најчешће изражава у процентима у односу на читав мјерни опсег, избор сензора са адекватно прилагођеним опсегом мјереној величини од кључног је значаја, јер иста номинална тачност, услед непрецизно изабраног опсега, може резултовати знатно већим процентуалним одступањем при нижим вриједностима мјерене промјењиве,
- Осјетљивост сензора – представља однос прираштаја излазне величине и прираштаја улазне мјерене величине и изражава се формулом

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (3)$$

Другим ријечима, осјетљивост статичке карактеристике сензора представља нагиб статичке карактеристике. Дакле, ако сензор притиска мјерног опсега 5 [bar] на излазу даје 20 [mA] тада осјетљивост тог сензора притиска износи 4 [mA/bar].

- Осјетљивост сензора на поремећаје – описује промјене на излазу сензора за нулту улазну вриједност мјерене величине, или одступање, односно описује промјену осјетљивости сензора у зависности од спољњих утицаја,
- Резолуција сензора – минимална вриједност прираштаја улазне мјерене величине која ће изазвати промјену на излазу сензора [7, 15].

Такође, важно је напоменути да и напон напајања, те старење компоненти сензора утичу на метролошке карактеристике сензора [15].

2.3.2. Динамичке карактеристике сензора

Динамичке карактеристике сензора представљају такође важан аспект сензора, јер описују како сензор реагује на промјене мјерене величине током времена. Оне дефинишу понашање сензора у прелазном режиму, односно у периоду након нагле промјене улаза, па до стабилизације излаза. Динамичко понашање се најчешће описује преносном функцијом или моделом у простору стања, што омогућава анализу одзива у временском и фреквенцијском дому. Одговор сензора на одсјочну побуду (нпр. нагла промјена нивоа воде) показује колико брзо и прецизно сензор реагује без осцилација или кашњења. Нпр. у системима са спорим промјенама нивоа течности динамичке карактеристике не морају бити изузетно брзе, али стабилан и неосцилаторни одзив је од суштинске важности за прецизну регулацију [7, 15].

У наставку су описане неке од наведених квалификационих група сензора којима припадају и сензори кориштени при изради пројекта регулације нивоа течности.

2.3.3. Сензори са прекидачким излазом

Сензори са прекидачким излазом још се називају и бинарним прекидачима због природе излазног сигнала којег дају. Излазни сигнал може да има само двије вриједности код ових сензора (укључен/искључен, 0/1 и сл.), што се одређује ниским, односно високим напонским нивоом. Низак напонски ниво износи $0[V]$, док је висок напонски ниво $3,3[V]$, или $5[V]$ у зависности од подешавања сензора и контролера. Примјери сензора са бинарним типом излазног сигнала су: детектори нивоа, крајњи прекидачи, пресостати, биметални сензори, итд. У пракси, бинарни прекидачи се директно могу повезати са микроконтролером, ПЛК, или неким другим управљачким уређајем [15].

2.3.4. Сензори са импулсним излазом

Сензори са импулсним излазима мјерену физичку величину претварају у низ импулса константне амплитуде. Фреквенција и/или ширина импулса пропорционални су вриједности физичке величине која се мјери. Из овога слиједи да се нпр. ширина импулса (вријеме трајања између два импулса) може користити за одређивање егзактне вриједности мјерене физичке величине. Сензор са импулсним излазом као што је ултразвучни сензор еmitује ултразвучни талас кроз неки медијум. Када ултразвучни талас нађе на други медијум он се у потпуности, или дјелимично одбија (рефлектује) назад до ресивера сензора. По пријему одбијеног таласа, сензор шаље импулсни сигнал микроконтролеру и тако се мјери вријеме протекло од тренутка еmitовања до тренутка пријема одбијеног сигнала. Уз познато вријеме простирања ултразвучног таласа до медијума и брзину простирања звука кроз ваздух лако се израчујава и удаљеност од сензора до медијума који је изазвао echo [6, 15].

2.3.5. Механички сензори

Механички сензори представљају категорију сензора који служе за мјерење, или детекцију механичких величина као што су положај, помјерање, брзина, убрзање, сила, или присуство неког објекта. Они користе физичке ефекте као што су одбијање таласа, деформација материјала, контакт између сопствених физичких елемената и објекта, или повећање електричне проводљивости између сопствених елемената (електрода) ради еmitовања мјерљивог сигнала, најчешће у електричном облику. Тако нпр. сензор детекције присуства воде се заснива на мјерењу електричне проводљивости између сопствене дviјe електроде. У ужем смислу, хемијско испитивање флуида, као што је то случај са способношћу електричне проводљивости истог, у пракси се често класификује као механичка детекција присуства флуида [7, 17].

3. МЈЕРЕНЕ ВЕЛИЧИНЕ

У практичној реализацији пројекта: систем за регулацију нивоа течности у резервоару који се налази у склопу завршног рада: микропроцесорска мјерења у системима регулације нивоа течности изводе се следећа мјерења:

- Континуално мјерење удаљености до слободне површине течности помоћу ултразвучног сензора *HC-SR04* (континуално управљање нивоом) и
- мјерење присуства течности помоћу кондуктометричког сензора *Water detect click* (прекидачко управљање нивоом).

3.1. Мјерење удаљености (нивоа) ултразвучним сензором

Ултразвук представља механички звучни талас са фреквенцијом вишом од чујног опсега људског уха, односно изнад 20 [kHz] и своју примјену нашао је највише у инжењерству и медицини. У инжењерству је употребљен за мјерења разних величина попут удаљености, положаја, нивоа, протока, дебљине материјала, итд [6].

Основни принцип употребе ултразвука као алата за мјерење заснива се на техници времена проласка (енг. *time-of-flight technique*). Један од примјера поменуте технике, а која је кориштена у практичној реализацији пројекта, јесте тзв. импулс-ехо метода (енг. *pulse-echo method*). Ова метода се још назива и методом импулсног одијека. У овој методи, као што је већ претходно описано, ултразвучни талас се шаље кроз неки медијум који има своју одређену густину (најчешће ваздух). Када талас досегне други медијум, односно нађе на материју која је другачије густине од оне кроз коју се талас претходно простирао, онда се талас дјелимично, или у потпуности одбија о дати медијум. У физичком смислу, емитовање и пријем одбијеног таласа врши ултразвучни сензор који на себи има предајник (енг. *emitter*) и пријемник (енг. *receiver*). Предајник прослеђује електрични сигнал са типичном фреквенцијом од 40 [kHz] . Тај електрични сигнал, посредством пиезоелектричног интерног елемента унутар сензора се претвара у механичке вибрације исте фреквенције које потом стварају ултразвучне таласе који се простиру у смјеру у којем је предајник физички постављен [6].

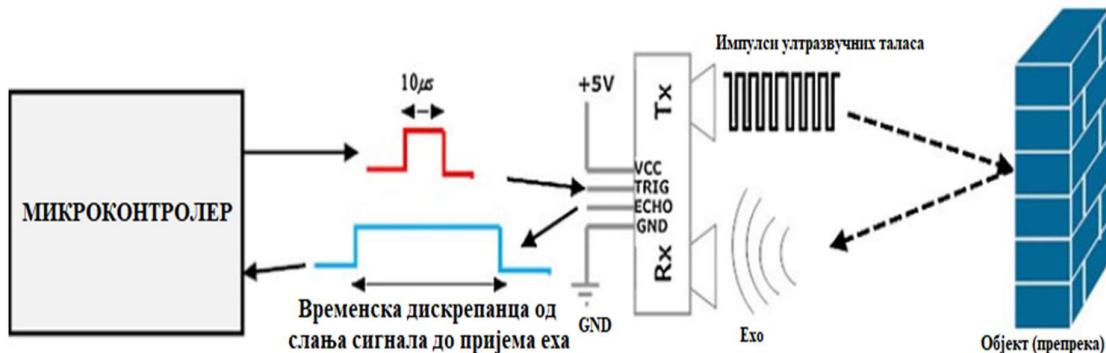
На једном од улазних пинова сензора, микроконтролер, посредством осцилатора, даје електрични импулсни сигнал сензору, а на основу датог сигнала сензор генерише ултразвучне таласе. Од пријема тог сигнала креће бројање, тј. рачунање времена простирања таласа. По пријему одбијеног таласа, сензор такође шаље импулсни сигнал микроконтролеру који сигнализира прекид рачунања времена, те се тиме завршава један циклус мјерења. Уколико је позната приближна брзина простирања звука кроз ваздух ($\approx 343 \text{ m/s}$) и одређено вријеме од тренутка емитовања до тренутка пријема ултразвучног таласа, тада се једноставним прорачуном може доћи до удаљености између сензора и медијума (објекта) који је изазвао дату рефлексију таласа. Формула за рачунање удаљености представља пређени пут као производ брзине и протеклог времена [6, 18].

$$d = c \cdot \frac{t}{2} \quad (4)$$

Вријеме трајања t се мора преполовити да би мјерење удаљености било тачно. Разлог томе је што је вријеме простирања ултразвучног таласа до препреке (медијума) половина од укупног протеклог времена од емитовања до пријема таласа на сензору [18].

Потребно је нагласити и да брзина простирања звука варира у зависности од супстанце кроз коју се звук простире, те од притиска, температуре и хемијског састава супстанце [18].

На слици 7 приказан је принцип рада ултразвучног сензора који мјери удаљеност по принципу протеклог времена [19].



Слика 7. Принцип рада ултразвучног сензора за мјерење удаљености [19].

У пракси, на *TRIG* пин сензора доводи се импулсни електрични сигнал са микроконтролера (не нужно од унутрашњег хардверског осцилатора, већ је то могуће реализовати и путем програма). Електрични импулси су обично трајања око $10[\mu\text{s}]$. Електрични импулси активирају интерни осцилатор унутар ултразвучног сензора који потом генерише серију електричних осцилација фреквенције око $40[kHz]$. Пиезоелектрични претварач који се налази унутар сензора претвара електричне импулсе у механичке осцилације, чиме долази до емитовања ултразвука [6].

Након што се талас одбије од препреке, пријемник (*ECHO* пин) у сензору детектује повратни талас и поново посредством пиезоелектричног претварача шаље назад сигнал микроконтролеру, који потом мјери трајање проласка (*time-of-flight*) и израчунава растојање [6].

3.1.1. Пиезоелектрични претварачи

Пиезоелектрични претварачи раде на принципу пиезоелектричног ефекта⁷ и веома су распрострањени у примјени код ултразвучних сензора. Они користе својство пиезоелектричних кристала (кварц – природни кристал, одређене керамике и полимери) који мијењају своје димензије када су изложени електричном пољу. Дакле, када се на пиезоелектрични претварач доведе пулсирајући напонски сигнал, претварач ће генерирати механичке вибрације изазване промјеном димензија кристала и све то у складу са фреквенцијом примљеног напонског сигнала. Због дате инверзијности пиезоелектричног ефекта пиезоелектрични претварачи могу бити и предајници и пријемници. На слици 8 приказан је изглед пиезоелектричног претварача кориштеног за ултразвучни сензор[6, 20].

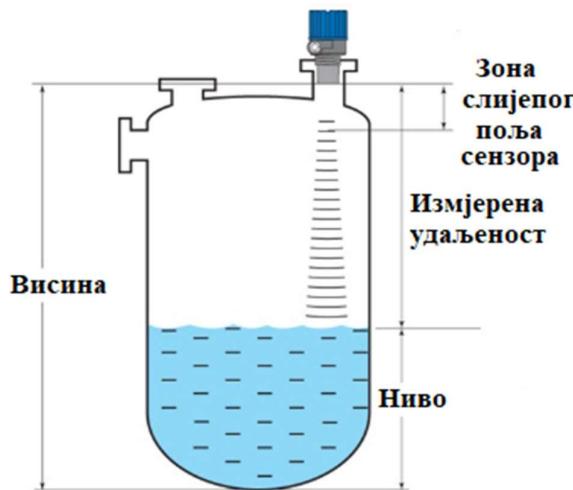


Слика 8. Пиезолектрични претварач на ултразвучном сензору HC-SR04 [21].

⁷ Пиезоелектрични ефекат представља способност одређених материјала да генеришу електрични напон као одговор на механичко напрезање и обратно, тј. да се механички деформишу при прикључењу на извор наизмјеничног напона [20].

Аналогно мјерењу удаљености, ултразвучно мјерење нивоа заснива се на истом принципу, само што је његова примјена специфично усмјерена на одређивање положаја слободне површине течности у резервоару. У овој примјени слободна површина течности представља баријеру која ће извршити одбијање ултразвучног таласа назад до сензора [22].

На слици 9 приказан је начин имплементације ултразвучног бесконтактног сензора при мјерењу нивоа течности у резервоару [23].



Слика 9. Имплементација бесконтактног ултразвучног сензора на резервоар испуњен течношћу [23].

Дакле, најбоље доказана имплементација ултразвучног бесконтактног сензора јесте на врху резервоара и то на начин да оса мјерења сензора буде усмјерена ортогонално у односу на очекивану слободну површину течности. На тај начин остварују се најпоузданији резултати мјерења, јер се минимизирају грешке настале од косих рефлексија, или неодговарајућих углова одбијања таласа. [22].

Како је положај сензора у овој имплементацији фиксиран на врху резервоара, измјерена удаљеност представља удаљеност од сензора до слободне површине течности (не ниво течности). Зато, да би се одредио тачан ниво, потребно је познавати габарите самог резервоара, тј. његову висину. Тако приликом програмирања и постављања жељеног нивоа, ниво ће представљати разлику између висине резервоара и удаљености коју је сензор измјерио [22].

Ултразвучни сензори овог типа су идеални за примјене где се тражи бесконтактно мјерење нивоа течности, без директног контакта са истом, као што је то случај са агресивним, љепљивим, или хигијенски осјетљивим течностима. Такође ови сензори су погодни тамо где се жели остварити континуално управљање нивоом због својих карактеристика брзог одзива, односно брзог придобијања информација о промјенама удаљености (индијектно нивоа) [22].

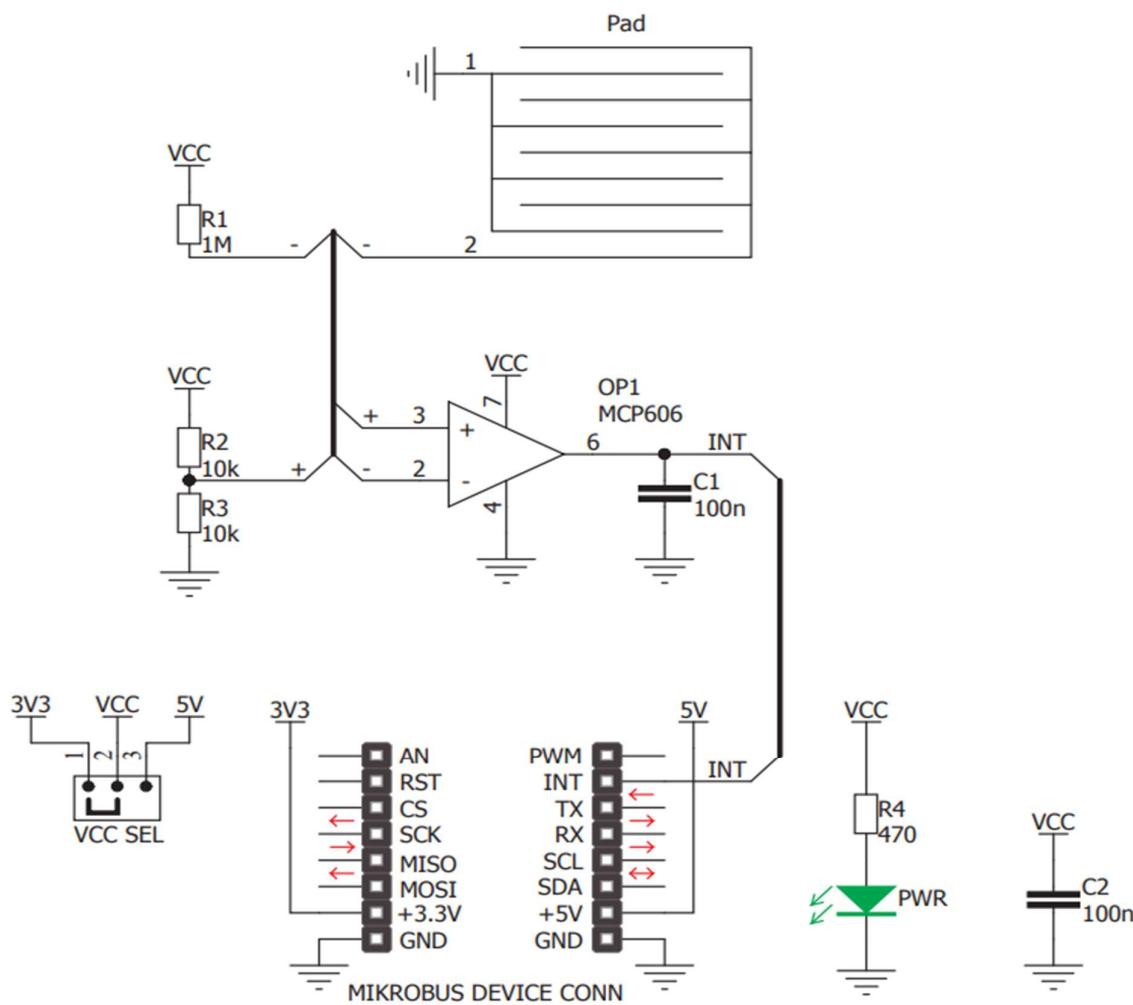
У пракси постоји нешто што се назива зона слијепог поља сензора (енг. *sensor blocking distance*). То је максимална удаљеност на којој сензор не може дати тачна мјерења, јер се на тој удаљености ултразвучни талас још увијек „развија“, или је рефлексија таласа на тој удаљености превише јака/непоуздана. То може представљати велики проблем за мјерење нивоа у резервоарима у којима се налазе агресивне течности попут киселина, или у резервоарима који су испуњени до пуног капацитета са великим шансом прелијевања. Зато се ови сензори готово увијек користе у комбинацији са прекидачким сензорима нивоа [24].

3.2. Мјерење присуства течности кондуктометричким сензором

Мјерење присуства течности кондуктометричким сензором спада у методе дискретног мјерења нивоа, јер сензор има могућност давања само двије бинарне вриједности у зависности од тога да ли је течност присутна, или не. Сензор даје дискретан сигнал у тренутку када ниво течности пређе неку критичну вриједност. У том контексту, сигнал са сензора може да се користи за аутоматску заштиту од препуњавања резервоара као тзв. *fail safe* сензор у случају малфункције примарних сензора за континуалну контролу нивоа, или као аларм у случају када ниво течности падне испод најмање дозвољене вриједности [25].

Имплементација кондуктометричког сензора има смисла само код проводних течности, као што је нпр. вода, јер сензор на себи има електроде које када су у ваздуху понашају се као отворен прекидач, а када су у проводној течности постају затворен прекидач [25].

На слици 10 налази се електрична шема која приказује унутрашњи састав компоненти једног кондуктометријског сензора који је кориштен при изради система за регулацију нивоа течности у резервоару, а који уједно најбоље може послужити за опис принципа рада самог сензора [26].



Слика 10. Електрична шема кондуктометричког сензора Water detect click [26].

Сензорска подлога (*pad*) је дио сензора који је предвиђен да долази у директан контакт са проводном течношћу. Када је *pad* сув његова отпорност тежи бесконачности и у комбинацији са отпорником $R1$ који има такође високу отпорност ($1 [M\Omega]$) он гради напонски дјелилац чији излаз се доводи на инвертујући улаз компаратора. Пошто је струја због велике отпорности отпорника $R1$ веома мала напон на инвертујућем улазу компаратора биће приближно једнак Vcc [17].

Отпорници $R2$ и $R3$ граде напонски дјелилац чији излаз се доводи на неинвертујући излаз компаратора. Излаз напона са напонског дјелиоца износи:

$$V_{ref} = V_{cc} \frac{R_3}{R_2 + R_3} = V_{cc} \frac{10[k\Omega]}{10[k\Omega] + 10[k\Omega]} = \frac{V_{cc}}{2} \quad (5)$$

Израз (5) показује да је за случај сухог *pad-a* сензора напон на инвертујућем улазу компаратора већи него на неинвертујућем:

$$(-)V_{cc} > (+)\frac{V_{cc}}{2} \quad (6)$$

Компаратор пореди те двије вриједности напона и за овај случај на излазу даје *LOW* (логичка нула) и ту вриједност доводи на дигитални пин *INT* [17].

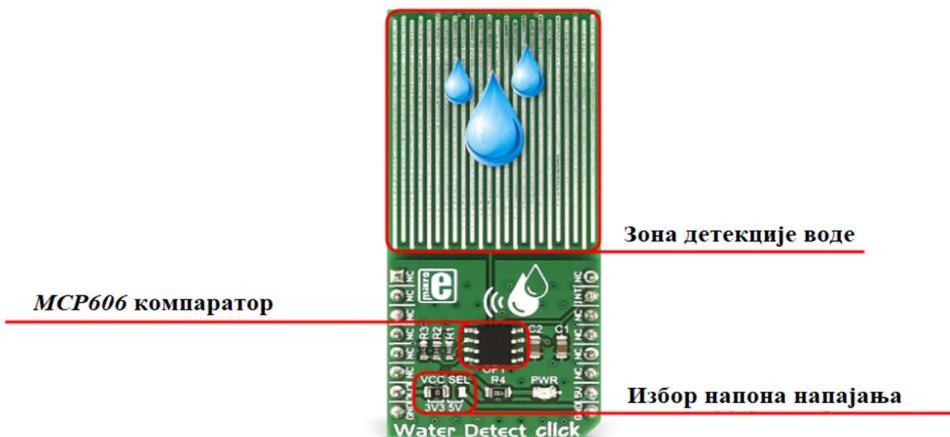
За случај да се сензорска подлога (*pad*) потопи у воду, или неку другу проводну течност, отпорност исте ће драстично пасти (приближно нули) и струја ће протећи кроз електроду, течност, па до друге електроде и практично ће струја порasti, а тиме и пад напона на отпорнику $R1$. У наставку то резултује падом напона на инвертујућем улазу компаратора приближно на нулу [17].

Излаз са напонског дјелиоца лијево који води на неинвертујући улаз компаратора остаје исти као и у претходном случају, међутим сада је његова вриједност већа од вриједности напона на инвертујућем улазу компаратора:

$$(-)V_{cc} \approx 0 < (+)\frac{V_{cc}}{2} \quad (7)$$

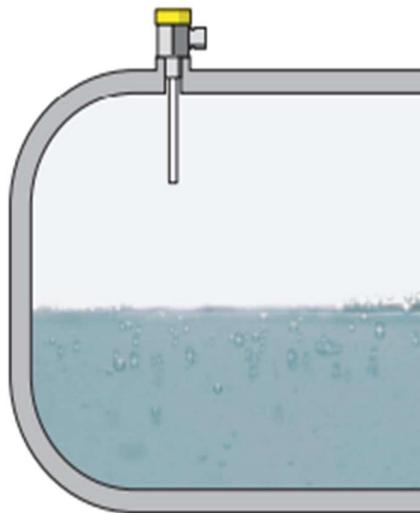
Компаратор пореди те двије вриједности напона и за овај случај на излазу даје *HIGH* (логичка јединица) и ту вриједност доводи на дигитални пин *INT*, односно та вриједност се даље прослеђује микроконтролеру и на основу ње се програмира управљање[17].

На слици 11 приказан је хардверски изглед кондуктометричког сензора [17].



Слика 11. Хардверски изглед кондуктометричког сензора [17].

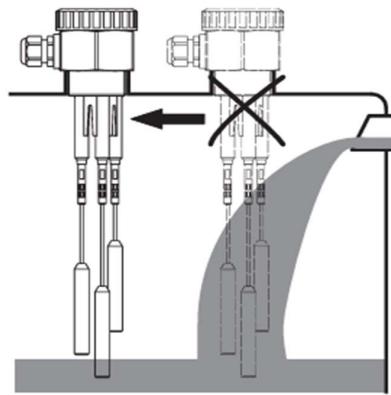
Постоје кондуктометрички сензори који уместо електрода на зони детекције течности користе сонде, проводнике, итд. Међутим, независно од конструкције детектујућег дијела сензора, његова примјена и имплементација у реалном систему је увијек иста. Основни начин имплементације сензора јесте на врх резервоара, где ће исти служити као осигурач против прелијевања уколико се догоди да друго мјерење унутар система закаже (*fail safe* сензор). На слици 12 приказан је један од начина имплементације сензора *EL1* произвођача *VEGA* [27].



Слика 12. Имплементација сензора *EL1* производа *VEGA* [27].

Поред претходно поменутог и приказаног начина имплементације, сензор се може поставити и на дно резервоара, па да у том случају служи као алармни сензор када више не долази у додир са течношћу. Док се резервоар скроз не испразни, сензор у том случају, због додира са течности, има све вријеме затворене контакте. Тада се у програму може подесити обрнута логика, тј. да управо уколико тај сензор у неком тренутку времена нема више контакта са течношћу (отворен прекидач), то буде услов за укључење актуатора (пумпе) [25, 27].

Још је потребно обратити пажњу и на начин уградње у зависности од дотока течности у резервоар, јер често резервоари имају доток течности са горње стране, па погрешно постављање сензора може довести до запљускивања истог, а тиме и нетачног мјерења. Примјер тога налази се на слици 13 где је приказана правилна и неправилна уградња сензора [27].



Слика 13. Правилан и неправилан начин уградње кондуктометричког сензора [27].

4. ПИД КОНТРОЛЕР

Систем аутоматског управљања (САУ) представља техничко-технолошки систем који дјелује независно од човјека при остваривању циљева (задатака) које је пред њега поставио инжењер – конструктор система. Систем аутоматског управљања може да врши одржавање (стабилизацију), или подешавање (регулацију) изабраних величина технолошког процеса без учешћа човјека [28].

Основна подјела система аутоматског управљања је на:

- Отворене системе (без повратне спрече),
- Затворене системе (са повратном спречом) и
- Комбиноване системе (обједињују отворене и затворене системе) [28].

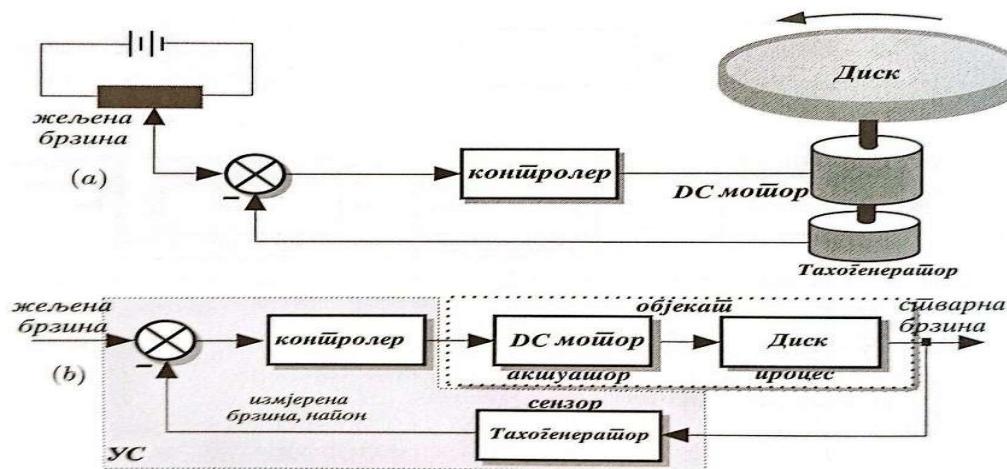
У литератури, а и у пракси када се помене систем аутоматског управљања највише се мисли на затворене системе, односно системе са повратном спречом, јер ти системи у својој основи имају мјерни систем за разлику од отворених система [28].

Отворени системи користе се за управљање у процесима у којима спољашњи утицаји на процес не постоје, или нису у потпуности значајни, или тамо где процес управљања са повратном спречом није технички изводљив. Такође се користе тамо где се поремећаји могу унапријед предвидјети и компензовати. Нпр. управљање корачним мотором који се на основу своје конструкције статора и ротора закреће за унапријед одређен корак (угао). Недостатак отворених система је управу у томе што било какав поремећај на излазу (на објекту управљања) неће бити компензован, односно управљачки сигнали система су функција само референце система [28].

Код затворених система мјерни систем мјери стварно стање на излазу система и прослеђује измјерену вриједност управљачком систему који већ посједује информације о референтној (жељеној) вриједности. Преко одређених алгоритама, управљачки систем прави разлику између стварне (измјерене) и референтне (жељене) вриједности и формира на основу тога управљачки сигнал. Сада је управљање функција и стварне и жељене вриједности, односно управљање је функција грешке која представља разлику стварне (y) и референтне (r) вриједности [29].

$$u = f(r, y) = f(e) \quad (8)$$

На слици 14 приказане су функционална и блок шема једног затвореног система АУ са управљањем брзином DC мотора [29].



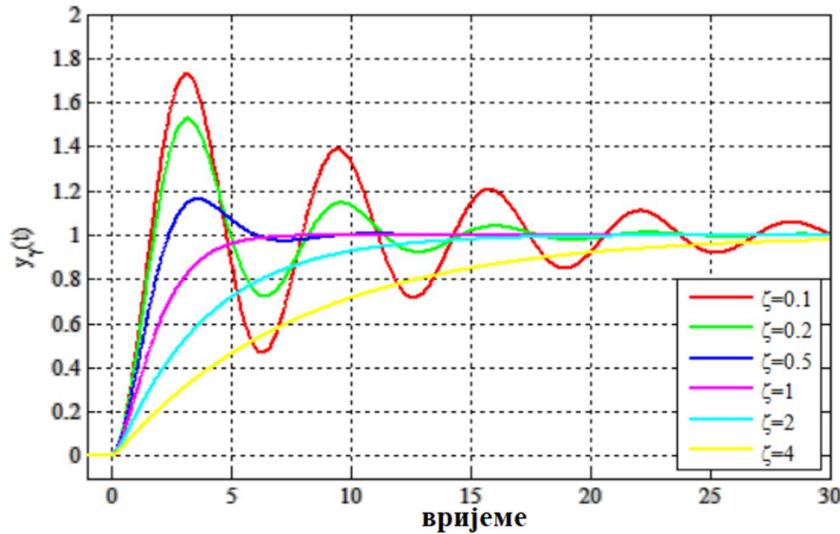
Слика 14. Затворени систем АУ, (а) функционална шема, (б) блок дијаграм [29].

Аналогно претходно приказаном систему могу се посматрати и сви остали затворени системи јер сви имају исти концепт, а то је управљање грешком. Управљачки сигнал је заправо грешка, односно разлика, или одступање стварне од задате величине. У овом примјеру потенциометром се задаје жељена брзина, али у физичком смислу потенциометром се задаје заправо референтни напон потребан за жељену брзину обртања DC мотора. Тахогенератор је сензор који мјери стварну брзину обртања вратила мотора и на свом излазу даје напон сразмјеран брзини обртања. Контролер врши поређење референтних и стварних вриједности напона на излазу и зависно од њихове разлике формира управљање. Док год постоји разлика између референтног и стварног напона, тј. док год постоји грешка постојаће и управљање, па ће се тако управљањем објекат временом „присилити“ на жељено понашање, а грешка ће тада постати нула [29].

4.1. Одзив система у временском домену

Одзив система (енг. *system response*) представља реакцију излазне величине система на одређени улазни сигнал, односно, како систем одговара на промјену улаза током времена. Одзив је резултат динамичких карактеристика система, попут инертности истог, пригушења, времена смирења, временске константе и др. Као побуда систему за испитивање одзива система доводи се одскочна – Хевисајдова⁸ функција, па се то још назива и испитивање одскочног одзива система [29].

Пригушење система представља мјеру колико је систем стабилан, али у исто вријеме и спор. Дакле систем са великим пригушењем има спорији одзив, али када достигне стационарно стање, онда се понаша стабилно. Пригушење се повећава са вањским оптерећењем и уопштеном инертности система, што је случај код споријих система као што су системи за регулацију нивоа течности. То је случај због саме природе течности и промјене њеног нивоа која не може да се деси брзо и нагло, као што нпр. може да се изврши промјена брзина обртања електричне машине. На слици 15 приказани су неки карактеристични одзиви система у зависности од пригушења система ζ . [29, 31].



Слика 15. Одскочни одзиви система у зависности од промјене пригушења ζ [31].

⁸ Оливер Хевисајд (енг. *Oliver Heaviside*), 1850 – 1925, био је британски инжењер и физичар познат по примјени оператора у анализи електричних кола и увођењу Хевисајдове функције, која се данас широко користи за описивање одскочних (енг. *step*) побуда у анализи динамичких система [30].

Као што се и види, системи са малим пригушењем могуће је да имају високе прескоке и подбачаје у прелазном стању одзива док не прође вријеме смирења и не наступи стационарно стање. Зато да би се направио компромис између брзине одзива и стабилности система мора се сваки систем засебно посматрати у погледу пројектовања. Такође, поред пригушења, на одзив система утичу додатне нуле и полови система [29].

4.2. ПИД контролер

У хемијској индустрији нпр. већина система се због врло спорих промјена и великих кашићења не могу моделовати као линеарни. Тај проблем се превазилази кориштењем стандардних индустриских контролера – ПИД контролера. Подешавањем параметара ових контролера (П, И и Д) добија се систем чије је стварно понашање веома блиско жељеном понашању система [29].

ПИД контролер представља синергију три контролера од којих сваки даје своје дејство систему и састоји се од:

- Пропорционалног контролера – пропорционално дејство (П),
- интегралног контролера – интегрално дејство (И),
- деривацијског контролера – деривативно дејство (Д) [29].

4.2.1. Пропорционално дејство

Боље понашање укупног система у погледу одзива и стабилности постиже се уколико је управљање $u(t)$ сразмјерно грешци $e(t)$, а та прилагодба се постиже додатном реалном константом, тј. појачањем контролера k_p , односно:

$$u(t) = k_p e(t) = k_p (r(t) - y(t)) \quad (9)$$

Пропорционалним дејством повећава се прескок система, у малој мјери смањује се стационарна грешка (грешка одзива у стационарном стању), редукује се релативна стабилност система, а вријеме раста се смањује (бржи одзив) [29].

4.2.2. Интегрално дејство

Побољшано отклањање стационарне грешке, односно елиминација исте постиже се контролером чије управљање $u(t)$ је у тренутку времена t сразмјерно интегралном појачању k_i и интегралу грешке $e(t)$ од почетног ($t_0 = 0$) до тог тренутка, дакле:

$$u(t) = k_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (10)$$

Док год грешка постоји и док је њена вриједност већа и члан интеграла из управљања ће бити већи, како се грешка буде смањивала достизањем стационарног стања члан интеграла ће бити у сваком кораку интеграције све мањи. Под претпоставком да су у стационарном стању и управљање и грешка константни, грешка излази испред интеграла и управљање онда зависи само од времена. Међутим, како грешка и управљање у стационарном стању морају остати непромјенљиви, то значи онда да је стационарна грешка једнака нули, јер би за сваку другу вриједност грешке управљање било промјенљиво [29].

Интегралним дејством повећава се прескок одзива система у прелазном стању, елиминише се стационарна грешка и редукује се релативна стабилност [29].

4.2.3. Деривативно дејство

Ако је $e(t)$ садашња грешка у тренутку t , онда је $e(t+T_d)$ грешка која касни за T_d у односу на t , тј. то је будућа грешка у тренутку $t+T_d$. Предвиђање грешке добија се преко линеарне интерполяције као:

$$e(t+T_d) \approx e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

Дакле, код деривацијског контролера управљање је сразмјерно деривацији тренутне грешке и деривативној константи k_d , односно:

$$u(t) = k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (12)$$

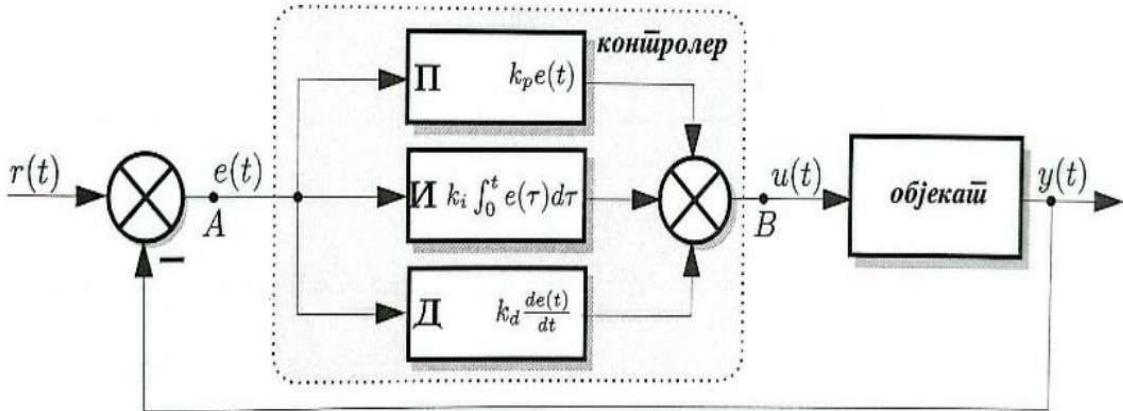
Деривативним дејством смањује се прескок одзива система у прелазном стању, добија се мала промјена стационарне грешке, стабилност система се побољшава за мале вриједности деривативне константе k_d , вријеме смирења система се смањује (бржи одзив) [29].

Ако се комбинују сва три основна, претходно наведена дјеловања, тј. ако се сва три контролера интегришу у један, тада се добија ПИД контролер. ПИД контролер генерише управљање које се мијења по закону:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (13)$$

Према томе, интеграљењем се узимају у обзир прошле вриједности грешке, пропорционално дејство узима садашњу вриједност грешке, док се деривацијом врши предикција будуће грешке [29].

На слици 16 приказан је блок-дијаграм ПИД контролера [29].



Слика 16. Блок-дијаграм структуре ПИД контролера [29].

5. ИЗРАДА И ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА СИСТЕМА

Након дефинисања основних принципа мјерења и начина на који се физичке величине могу претварати у електричне сигнале путем сензора, те након разматрања карактеристика и динамичког понашања мјерних елемената, даље су анализирани основи система аутоматског управљања са освртом на улогу ПИД регулатора у одржавању жељених вриједности процесних величина.

Разумијевање претходно наведеног, повратне спрете и динамичког временског одзыва система представља нужан корак у пројектовању ефикасног управљачког система. На основу свих претходних теоријских поставки, приступило се практичној реализацији система за регулацију нивоа течности у резервоару, уз употребу ултразвучног сензора за мјерење растојања и пумпе као извршног елемента, чиме се омогућава континуално и поуздано управљање процесом, тј. нивоом.

Израда система регулације нивоа течности у резервоару може се подијелити на четири кључна дијела, тј. на:

- Механичку израду макете резервоара - конструисање резервоара у програмском пакету *SolidWorks* од плексигласа (полиметилметакрилата), затим исијецање плексиглас плаоча ласером и израда носеће плоче и електричног ормарића за смештај електронике,
- Хардверско повезивање – повезивање ултразвучног сензора *HC-SR04* и кондуктометричког сензора *Water detect click*, пумпе *ZC-A40*, потенциометара (Π , I , D и НИВО), *LCD 16x2* и *I2C* модула међусобно и са контролером *Arduino UNO R3* у склопу са драјвером *Adafruit Motor Shield V1* методом лемљења и помоћу каблова са мушки/женским конекторима,
- Развој и имплементација софтвера – програмирање ПИД контролера, мјерног система и управљања пумпом помоћу микроконтролера и развојног окружења *Arduino IDE* и
- Тестирање и финална монтажа – трајно уградњивање елемената у ормарић и на носећу плачу методама лемљења, лијепљења и навојних веза, те пуштање система у рад.

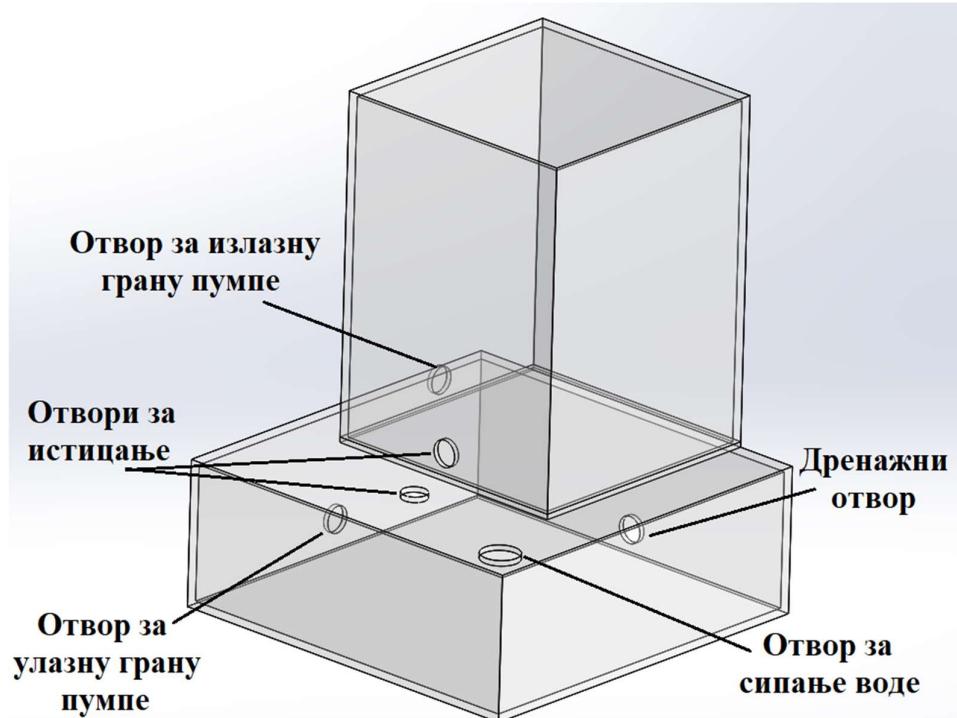
Израда система за регулацију нивоа течности у резервоару има практично и индустријско значење, јер омогућава аутоматизовано управљање нивоом без потребе за сталним надзором. Такви системи су посебно важни у процесној индустрији, системима за снабдијевање водом и многим другим областима где је контрола нивоа течности кључна за поуздан и ефикасан рад. Употребом сензора и микроконтролера омогућава се прецизно праћење промјена нивоа у реалном времену, реаговање на поремећаје, реаговање на промјене жељених параметара управљања и нивоа, као и могућност интеграције са другим управљачким и алармним системима.

Циљ овог пројекта је развој система за регулацију нивоа течности у резервоару, који обухвата примјену бесконтактног ултразвучног сензора за мјерење удаљености, контактног прекидачког сензора за мјерење присуства течности, актуатора (*DC* мотора и пумпе) за управљање протоком, као и ПИД контролера за постизање жељеног нивоа течности. Поред тога, систем обезбеђује визуелизацију параметара путем *LCD* екрана и омогућава тестирање понашања у реалним критичним условима.

У наставку пажња је укратко посвећена на механичку израду макете јер тај дио пројекта није покривен хардверском структуром која се углавном односи на хардвер електронских компоненти система. Остале тачке биће у засебним поглављима.

5.1. Механичка израда макете пројекта

Механичка структура резервоара се састоји од двије посуде постављене на дрвеној плочи, од којих је једна посуда (шира) у директном додиру са плочом, док је друга постављена са горње стране доње посуде. На слици 17 приказан је првобитни модел горњег и доњег резервоара измоделиран у програмском пакету *SolidWorks*.



Слика 17. Механичка структура резервоара пројекта регулације нивоа течности.

Резервоари су формирани од полиметилметакрилат плоча дебљине стјенке 5 [mm] које су претходно прецизно изрезане на ласерском уређају. Плоче су повезане нераздвојивом везом лијепљења двокомпонентним лјепилом и додатно на свим унутрашњим саставима заштићене водоотпорним силиконом.

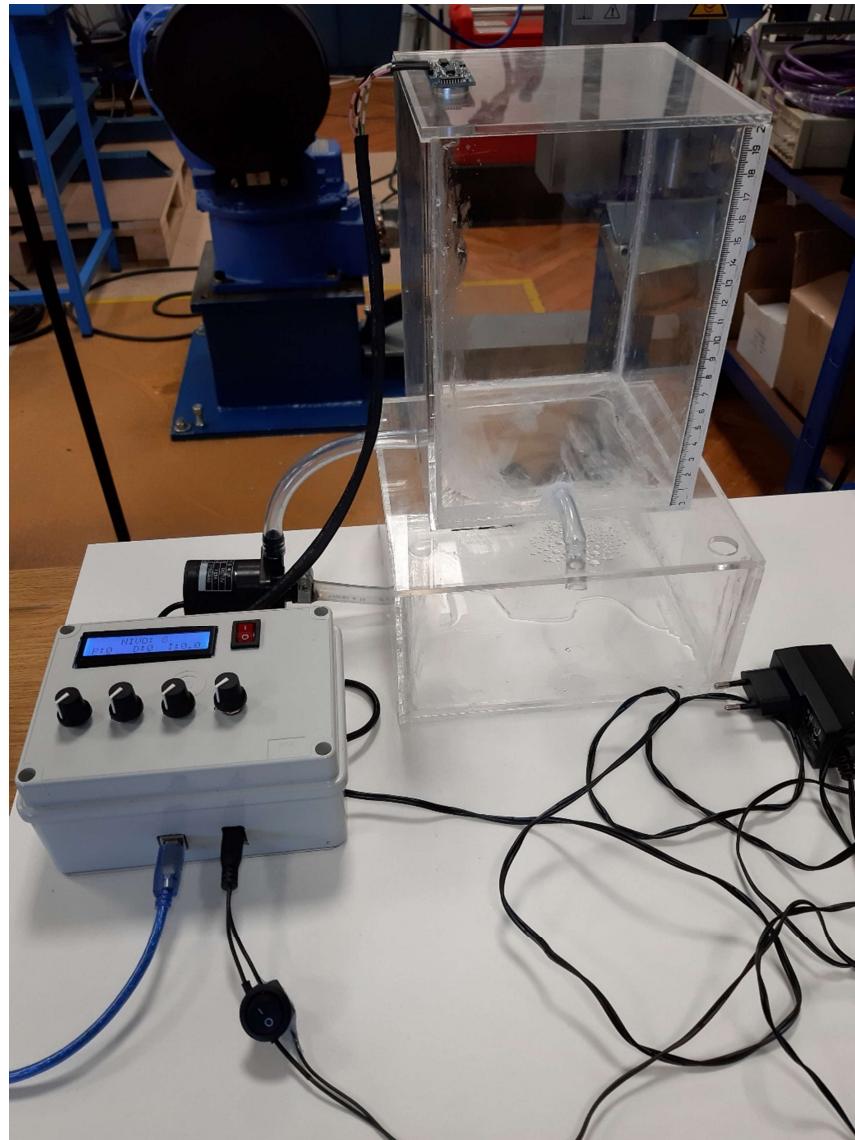
На задњој страни доње посуде налази се дренажни отвор који служи да се по завршетку тестирања пројекта вода испусти из доње посуде. При каснијем пројектовању у дренажни отвор уграђен је навој у који се приврђе заптивни вијак. Сликовита аналогија томе било би испуштање уља из картера аутомобила.

Кроз отвор за улазну грану пумпе, пумпа усисава течност из доњег резервоара мањим, или већим интензитетом, али константно у зависности од тога колика је грешка одступања стварног и жељеног (задатог нивоа).

Кроз отвор за излазну грану пумпе течност доспијева из пумпе у горњи резервоар. Управљање пумпом помоћу контролера ће надомјестити истицање течности из горње посуде, које у овом случају представља неки поремећај система, и одржавати задати ниво компензујући дати поремећај.

Отвори за истицање воде повезани су гуменим цријевом пречника 10 [mm] тако да се омогући константно истицање воде из горње у доњу посуду. Тиме се круг течности кроз систем затвара и систем може дуже вријеме да ради и да се посматра без опасности од прелијевања, цурења, итд.

На слици 18 приказан је изглед реалног пројекта након израде и монтирања резервоара на дрвену плочу, причвршћивања пумпе за плочу и причвршћивања електричног ормара за подлогу са повезаним електронским хардверским компонентама. Тиме је завршен дио механичке израде макете пројекта до програмирања, финалне монтаже и пуштања пројекта у рад.



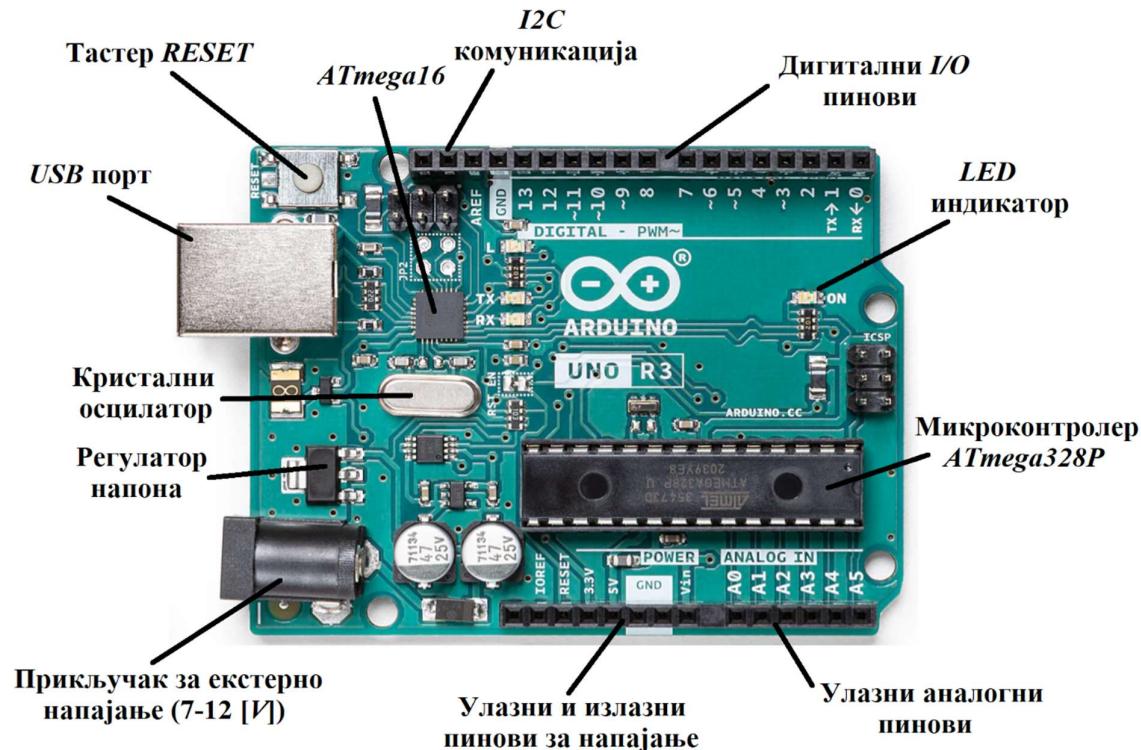
Слика 18. Изглед пројекта спремног за финално програмирање и тестирање.

5.2. Избор и функција хардверских компоненти система

5.2.1. Arduino UNO R3

Arduino Uno представља популарну микроконтролерску *PCB*⁹ плочу отвореног кода, развијену од стране италијанске компаније *Arduino*, која је позната у свијету по креирању хардверских и софтверских платформи за развој угађених аутоматизованих система. Захваљујући својој једноставности, поузданости и подршци велике заједнице, *UNO* је де факто постао стандард у едукацији, прототипизацији и хоби електроници. Његова приступачност и интуитивно програмирање чине га идеалним избором и за почетнике и за инжењере који развијају функционалне прототипове аутоматизованих система и процеса [32].

Плоча *Arduino UNO* је заснована на *ATmega328P* микроконтролеру са 8-битном архитектуром и располаже са 32 [KB] флеш меморије, 2 [KB] SRAM-а и 1 [KB] EEPROM меморије. Оваква конфигурација омогућава реализацију широког спектра пројекта – од једноставних система са ниском потрошњом енергије до сложенијих примјена које захтијевају ефикасну дигиталну обраду сигнала и комуникацију са другим уређајима. *Arduino UNO* подржава програмирање преко *USB* интерфејса и користи сопствено развојно окружење за развој штограмског кода (*Arduino IDE*) и компатибилан је са великим бројем додатних модула и шилдова. На слици 19 приказан је изглед плоче *Arduino UNO* контролера са неким од својих основних дијелова [33].



Слика 19. Изглед *PCB* плоче *Arduino UNO* контролера са основним дијеловима [33, 34].

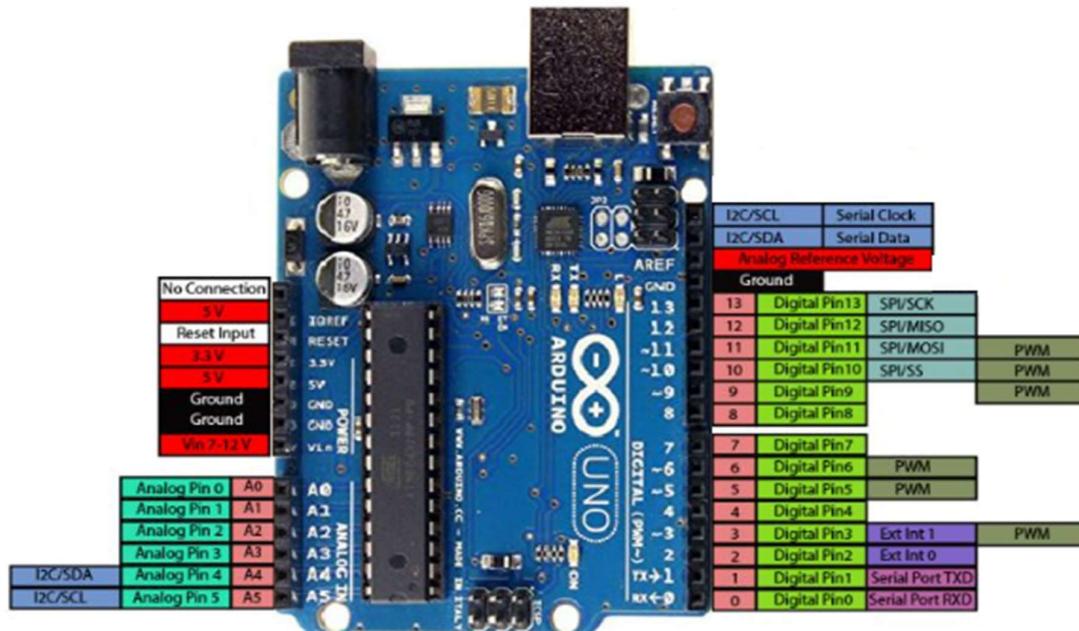
⁹ *PCB* (*Printed circuit board*) – представља плочу од непроводног материјала, најчешће фибергласа или епоксидне смоле, која служи као механичка основа и електрични носач за повезивање микроконтролера са осталим електронским компонентама, као што су транзистори, отпорници, кондензатори и интегрисана кола. На површини *PCB*-а налазе се проводне стазе (трагови бакра) које омогућавају стабилну, поуздану и прецизну електричну везу између елемената у електронском склопу [35].

Табела 4. Техничке карактеристике контролера *Arduino UNO* [33].

| | |
|--|--|
| Радни напон | 5 [V] |
| Препоручен улазни напон | 6 – 12 [V] |
| Број дигиталних I/O пинова | 14 (од којих је 6 за генерирање PWM-а) |
| Број аналогних улазних пинова | 6 |
| Једносмјерна струја по I/O пину | 20 [mA] |
| Једносмјерна струја за 3,3 [V] пин | 50 [mA] |
| Фреквенција тактног сигнала (енг. <i>clock speed</i>) | 16 [MHz] |

Серијска комуникација контролера са рачунаром омогућује се уз помоћ *USB* интерфејса. На тај начин постиже се једноставно преношење програмског кода са рачунара на микроконтролер кориштењем *Arduino IDE* интегрисаног развојног окружења. Уједно, за вријеме програмирања микроконтролера, преко *USB* интерфејса се са рачунара врши и напајање микроконтролера. За имплементације контролера у реалане системе, потребно је обезбиједити екстерно напајање преко приклучка за екстерно напајање (*DC barrel jack 7 - 12 [V]*). У том случају, регулатор напона који се налази на плочи, врши стабилизацију улазног једносмјерног напона на 5 [V] [34].

Повезивање контролера са различитим сензорима врши се помоћу аналогних и дигиталних улаза контролера. За случај повезивања контролера са сензором који даје аналогни излазни сигнал, на располагању су пинови A0 – A5 који уједно представљају улазе 10-битног А/Д конвертора микроконтролера *ATmega328P*. За случај повезивања контролера са сензором који даје дигитални излазни сигнал, на располагању су пинови 0 – 13. На слици 20 приказан је изглед тзв. *pinout* дијаграма контролера *Arduino UNO* [34].

Слика 20. PINOUT дијаграм *Arduino UNO* контролера [34].

Од 14 дигиталних пинова, неки имају специфичне функције и користе се за комуникацију са другим микроконтролерима и уређајима преко различитих протокола као што су *I2C*, *SPI* и *UART* [34].

Arduino Uno има 6 PWM пинова који се налазе на дигиталним пиновима и који се могу користити за управљање брзином DC мотора, јачином освјетљења LED диода, контролом серво мотора, итд. [34].

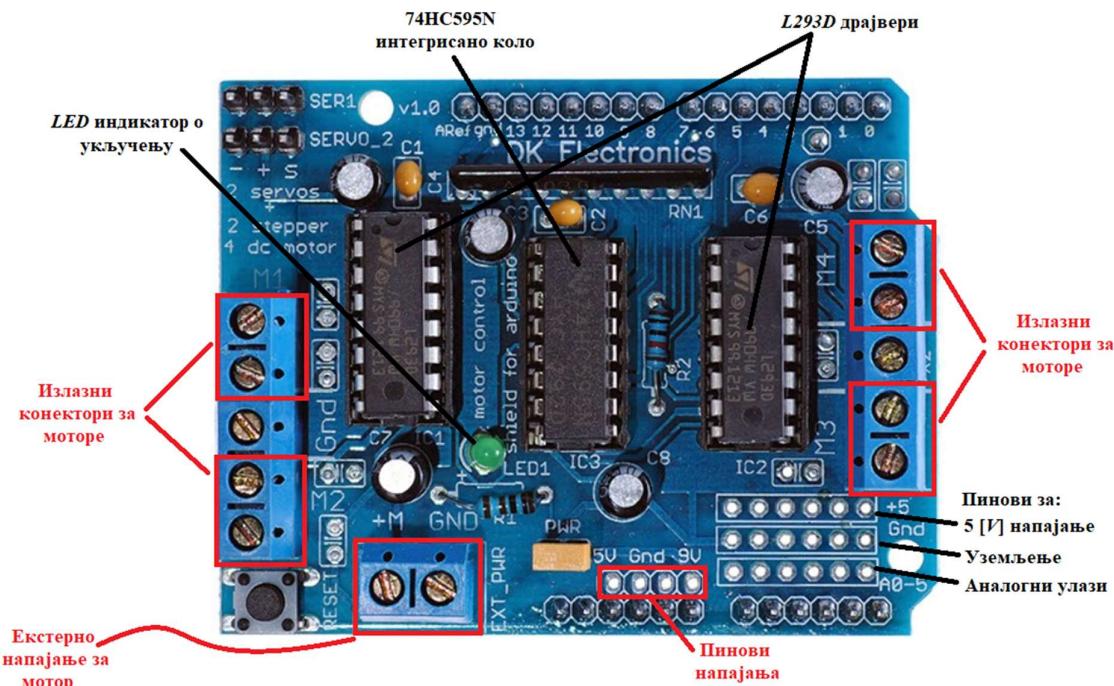
Још једна велика предност *Arduino UNO* плоче јесу *Arduino* штитови (енг. *shields*). Штитови представљају хардверске додатке који се директно повезују са пиновима *Arduino UNO* и проширују његове могућности. Штит се састоји од штампане плоче (*PCB*) са уgraђеним електронским компонентама и конекторима који омогућавају специфичну функционалност, као и одговарајућег софтвера који омогућава комуникацију те функционалности са *Arduino UNO* плочом. Једно од популарних рјешења јесте *motor shield* који се директно наслажа на *Arduino UNO* плочу и који служи најчешће за управљање DC и stepper моторима. Нешто више о конкретном моторном штиту у сљедећем поглављу [32].

5.2.2. Motor shield Adafruit V1 L293D

Моторни штит *Adafruit Motor Shield V1*, базиран на чипу *L293D* уgraђује се на плочу *Arduino UNO* преко конектора и пинова са горње стране. Штит је потребан контролеру зато што *Arduino* сам по себи нема доволну снагу да директно управља DC моторима, пумпама или другим снажнијим актуаторима. То произилази из чињенице да *Arduino* пинови могу да обезбиједе највише 40 [mA] струје (стандардно 20 [mA]), што није доволно за покретање актуатора кориштеног при изради пројекта, јер номинална струја DC мотора пумпе износи 1.05 [A] [36].

Такође, при директном повезивању мотора на *Arduino* могло би доћи до повратних струјних удара (енг. *back EMF*) који могу оштетити микроконтролер. *L293D* чип има интерне диоде за заштиту од повратног напона, што спречава оштећење *Arduino* контролера [37].

На слици 21 приказан је *Adafruit Motor Shield V1* са својим основним дијеловима.



Слика 21. Adafruit Motor Shield V1 са основним дијеловима и распоредом пинова [38].

L293D је интегрисани *H*-мостни драјвер (енгл. *H-bridge motor driver chip*) који служи за управљање једносмјерним (*DC*) моторима и малим корачним моторима. *L293D* омогућава контролу смјера обртања и укључивања/искључивања мотора, користећи нисконапонске логичке сигнале са *Arduino* контролера да управља вишим напонима и струјама потребним за моторе. Истовремено може управљати са два *DC* мотора, па се зато на плочи *Adafruit V1* штита користе два чипа (сваки за по два излазна моторна приклjučka: *M1, M2* и *M3, M4*) [37].

74HC595N служи за контролу *LCD*-а и било коју другу примјену где је потребно контролисати више дигиталних излаза [37].

Такође, сама плоча *Adafruit Motor Shield V1* обезбеђује додатне пинове за аналогне улазе, напајање од 5 [V] и уземљење [37].

Екстерно напајање за актуuator, независно од напајања са контролера, може се довести на конекторе за екстерно напајање (*EXT PWR*). Штит може примити напајање до 36 [V] на тим конекторима. Екстерно напајање се доводи када се жели постићи управљање актуаторима чији су номинални напон и снага већи од оних које сам контролер може да испоручи, као што је то био случај при изради овог пројекта где је актуuator пумпа са номиналним напоном од 12 [V] [37].

5.2.3. *HC-SR04* ултразвучни сензор

На слици 22 приказан је хардверски изглед ултразвучног сензора *HC-SR04* који је кориштен при изради система регулације нивоа течности у резервоару. У овој имплементацији сензор се користи за континуално управљање нивоом.



Слика 22. Ултразвучни сензор *HC-SR04* [39].

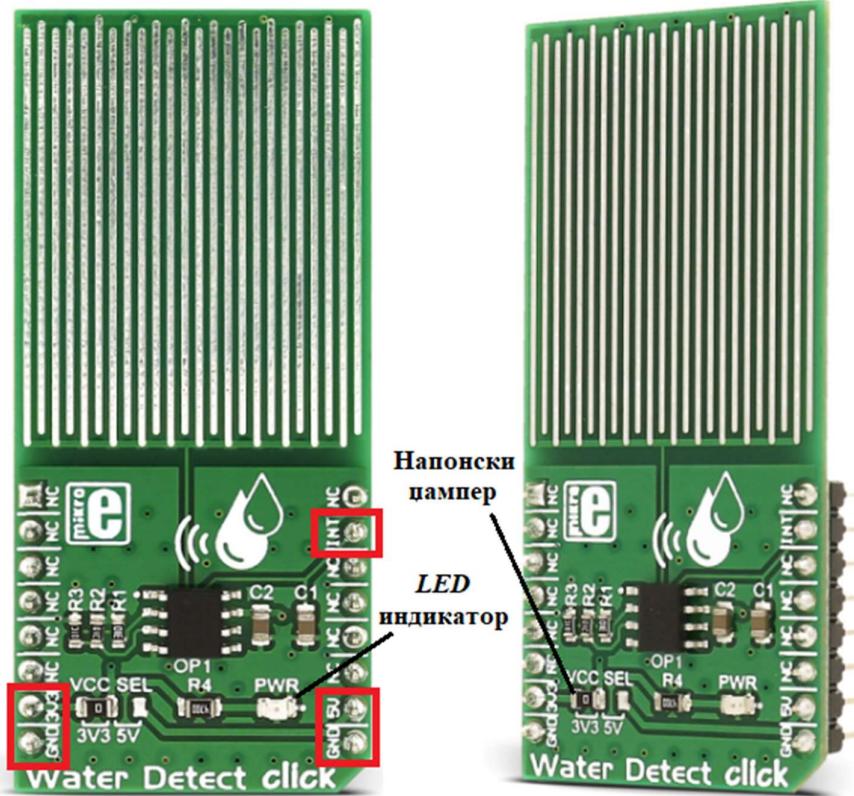
На пинове *TRIG* и *ECHO* *HC-SR04* сензора доводи се електрични импулсни сигнал са контролера, тако да се ти пинови повезују на дигиталне излазе, односно улазе контролера *Arduino UNO* (пинови 0 – 13). На пин *Vcc* доводи се напон од 5 [V] који служи за напајање интерних електричних кола сензора, а на пин *GND* доводи се уземљење са контролера [6].

Табела 5. Техничке карактеристике ултразвучног сензора *HC-SR04* [40].

| Произвођач | <i>Kuongshun Electronic</i> |
|-----------------------------|---|
| Радни напон | 5 [V] DC |
| Радна струја | 15 [mA] |
| Радна фреквенција | 40 [kHz] |
| Мјерно подручје | 2 [cm] – 4 [m] |
| Ширина улазног ел. импулса | 10 [μ s] |
| Ширина излазног ел. импулса | Пропорционална улазном импулсу и удаљености |

5.2.4. Water detect click кондуктометрички сензор

На слици 23 приказан је хардверски изглед кондуктометричког сензора *Water detect click* који је кориштен при изради система регулације нивоа течности у резервоару. У овој имплементацији, кондуктометрички сензор се користи као крајњи прекидач који искључује пумпу уколико ниво течности достигне неку критичну висину.



Слика 23. Кондуктометрички сензор *Water detect click* [17].

На пинове напајања, у зависности од тога како је напонски цампер сензора подешен, доводи се напон од 3,3 [V] и уземљење (црвени правоугаоник доле лијево), односно напон од 5 [V] и уземљење (црвени правоугаоник доле десно). Подешавање напонског цампера на *Water detect click* сензору врши се лемљењем контактне плочице између средњег и лијевог, или десног контакта у зависности од тога који се напон користи за напајање сензора. Фабрички, цампери код ових сензора се постављају на 3,3 [V], а пошто контролер *Arduino UNO* може да обезбиједи тај напон напајања, онда фабричке поставке сензора нису мијењане за потребе изrade пројекта [17].

INT пин (црвени правоугаоник горе десно) се повезује са контролером преко неког од дигиталних улаза истог. У зависности од напона напајања, сензор ће на *INT* пину, односно на дигиталном улазу контролера давати високо напонско стање (присуство воде) које је еквивалентно напону напајања, док ће ниско напонско стање бити једнако нули. Оно што је добро јесте то да контролер *Arduino UNO* препознаје и напон од 3,3 [V] и напон од 5 [V] као висок логички ниво. Тако да, конкретно за експлоатацију сензора у комбинацији са контролером *Arduino UNO* једино на шта се мора обратити пажња јесте да цампер на сензору буде адекватно подешен у складу са напоном напајања [17].

Остали контакти сензора *NC* (енг. *No Connect*) нису потребни за директно спајање сензора са контролером *Arduino UNO* [17].

5.2.5. ZC-A40 пумпа

Пумпа ZC-A40 користи се за пренос воде, горива, или других неагресивних течности (често у системима мањих фонтана, слабијих система за наводњавање и индустријских процеса под малим притисцима течности). На слици 24 приказан је изглед пумпе, њене улазне и излазне гране [41].



Слика 24. Пумпа ZC-A40 [41].

Пумпа ZC-A40 је мембранска, или тзв. пумпа са дијафрагмом. Погони се уз помоћ BLDC¹⁰ мотора на начин да је вратило мотора повезано са ексцентрично постављеним лежајем у склопу пумпе на који су даље постављене гумена облога и мале гумене мембрane респективно. Ексцентричним кретањем лежаја унутар пумпе долази до линеарног кретања мембрана унапријед-уназад. Мембрани се налазе улежиштене у отворима који су радијално распоређени око централне осовине и предвиђени за пролазак воде од улаза до коморе пумпе. Наизмјенично кретање мембрана подсећа на наизмјенично отварање/затварање вентила за пропуштање ваздуха, односно испуштање сагорјелих гасова из коморе за сагоријевање код СУС мотора. Помјерање мембране уназад (у правцу према електромотору) створиће вакуум који повлачи воду са улазне гране у комору. При усису, притисак у комори пада - улазни вентил се отвара (излазни се затвара). Исто тако помјерање мембране према напријед (у правцу супротно од електромотора) изазваће потискивање течности на излазну грану пумпе. При избацању, притисак расте - излазни вентил се отвара (улазни се затвара) [42, 43].

Дакле, важност принципа рада јесте управо у могућности контроле брзине обртања DC мотора, јер на тај начин се остварује контрола протока воде кроз пумпу бржим/споријим отварањем мембрана усљед већег/мањег броја обртаја електромотора [42].

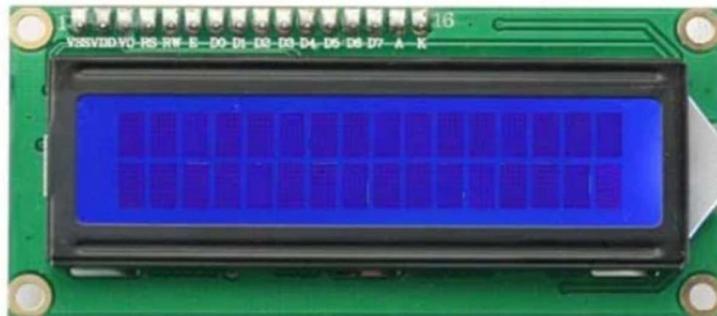
Табела 6. Техничке спецификације пумпе ZC-A40 [41].

| | |
|-------------------------|--|
| Номинални напон мотора | 12 [V] |
| Номинална струја мотора | 1,05 [A] |
| Проток | ~3–5 L/min (у зависности од висине дизања) |
| Пречник улазне гране | 13,5 [mm] |
| Пречник излазне гране | 11 [mm] |

¹⁰ BLDC- енг. Brushless DC Electric Motor, мотор једносмјерне струје без четкица [15].

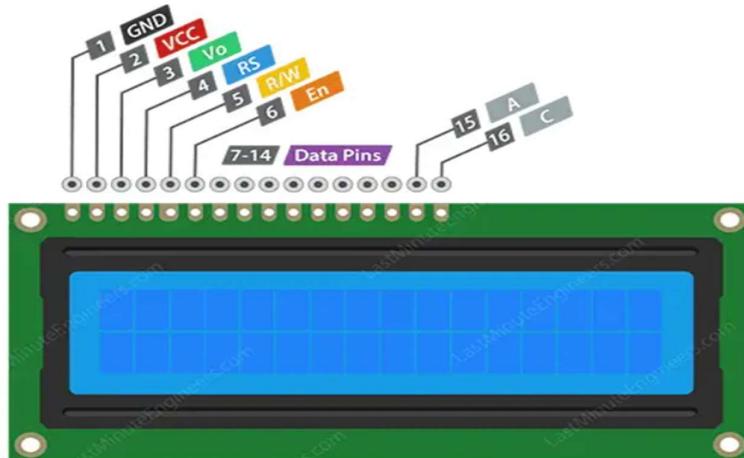
5.2.6. LCD 16x2 са I2C модулом

LCD (енг. *Liquid Crystal Display*) је дисплеј који се често користи у микроконтролерским пројектима за приказ текстуалних информација. Назив 16x2 означава да дисплеј има 2 реда и 16 колона, што значи да може приказати до 32 карактера (по 16 у сваком реду). На слици 25 приказан је изглед LCD 16x2 дисплеја са предње стране [44, 45].



Слика 25. Фронтални приказ LCD 16x2 дисплеја [45].

На слици 26 приказан је pinout дијаграм LCD 16x2 дисплеја [44].



Слика 26. PINOUT дијаграм LCD 16x2 дисплеја [44].

LCD 16x2 дисплеј на себи има 16 пинова од којих најмање 8 мора бити повезано са контролером да би дисплеј исправно функционисао уколико не користи неки додатни интерфејс попут I2C. Опис сваког од пинова је следећи:

- Пинови 1 и 2 су пинови за уземљење и напајање (5 [V]) респективно,
- Пин 3 (*Vo*) је пин за подешавање контраста на екрану,
- Пин 4 (*RS – Register Select*) одређује да ли ће подаци послати на LCD бити третирани као команда или као карактери (бинарна вриједност на пину),
- Пин 5 (*R/W – Read/Write*) одређује да ли се подаци шаљу на LCD, или се читају са њега (бинарна вриједност на пину),
- Пин 6 (*En - Enable*) за прихватање података од стране LCD-а,
- Пинови 7 – 14 служе за пренос података и команди на LCD (сваки пин по 1 бит),
- Пинови 15 и 16 (*A – Anode, C – Cathode*) служе за позадинско освјетљавање екрана, на аноду се доводи 5 [V], док се на катоду доводи уземљење [44].

Да би се број потребних пинова смањио, често се користи *I2C* интерфејс модул, који омогућава комуникацију између микроконтролера и дисплеја преко само 4 жица, односно 2 пина. Модул користи *I2C* експандер, најчешће *PCF8574*, који "преводи" *I2C* сигнал у паралелне сигнале потребне за рад *LCD* дисплеја. Веза између *I2C* адаптера и *LCD* дисплеја најчешће се остварује лемљењем. На слици 27 приказан је начин повезивања адаптера *I2C* са *LCD* дисплејом [46].



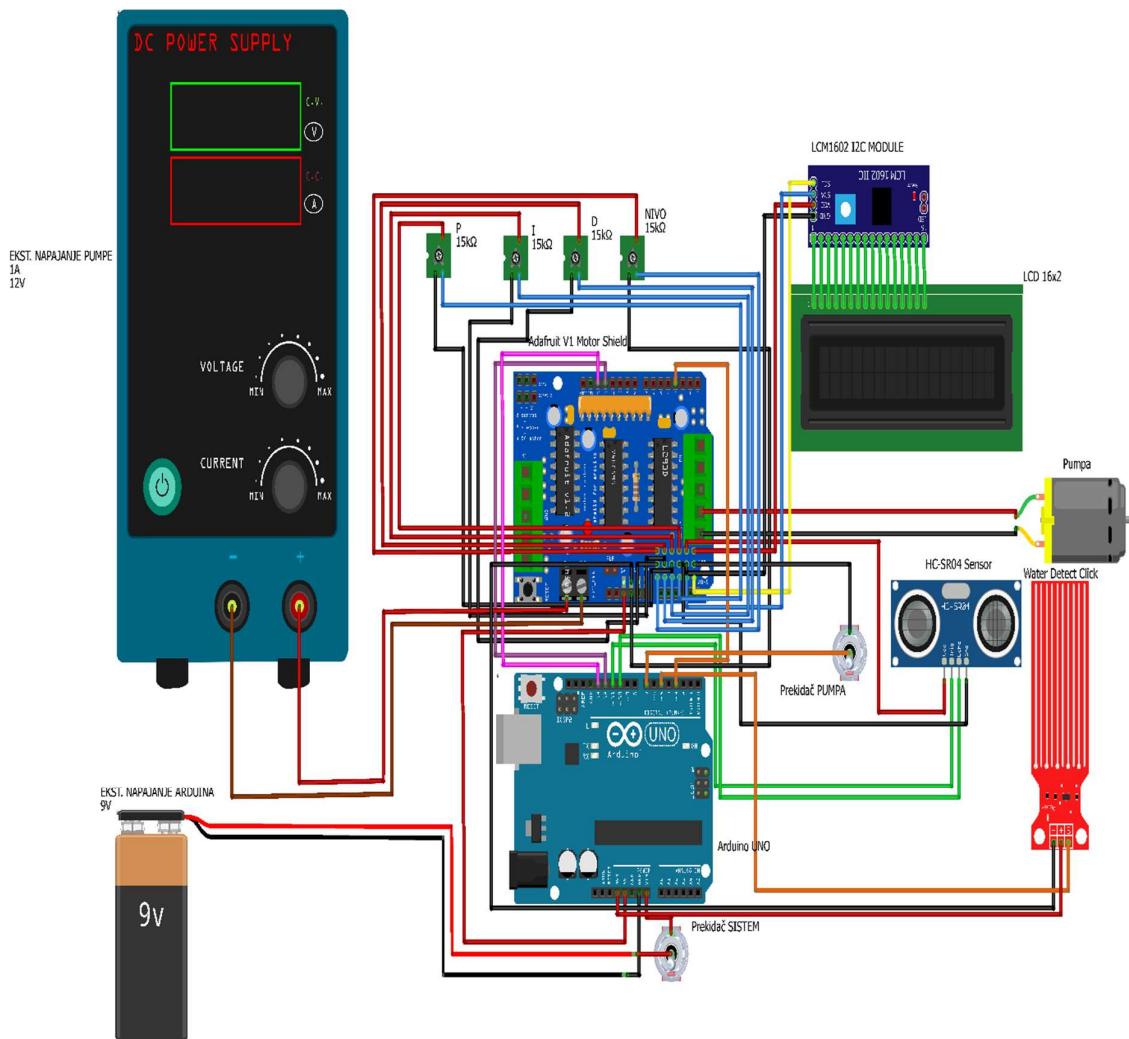
Слика 27. *LCD* дисплеј са *I2C* адаптером [45].

SDA (*Serial Data Line*) пин служи за двосмјерни пренос података између *master* уређаја (*Arduino*) и *slave* уређаја, у овом случају, *LCD* дисплеја са *I2C* адаптером. Сви подаци (бројеви, команде, адресе уређаја и регистара) се шифрују бит по бит и шаљу/примају преко овог пина. *SCL* (*Serial Clock Line*) пин служи за синхронизацију комуникације између *master* и *slave* уређаја. *Master* уређај генерише сигнал сата (*clock signal*) преко *SCL* пина, те сваки бит података који се шаље преко *SDA* се чита/пише на основу темпа овог сата [46].

У програмском окружењу *Arduino IDE* доступна је библиотека: *LiquidCrystal_I2C.h* која у себи садржи одређене функције којима је олакшано управљање самим *LCD* дисплејом. О датим функцијама и самом развојном окружењу *Arduino IDE* нешто више у глави 7 [46].

5.3. Електрична шема и интеграција компоненти

На слици 28 приказана је електрична шема повезивања хардеврских компоненти система регулације нивоа течности реализована у прорамском пакету *Fritzing*.



Слика 28. Електрична шема (Breadboard дијаграм) система регулације нивоа течности реализована у софтверском пакету *Fritzing*.

Електрична стандардна шема (енг. *Schematic view*) система регулације нивоа течности реализована такође у прорамском пакету *Fritzing* налази се у прилогу 4 завршног рада.

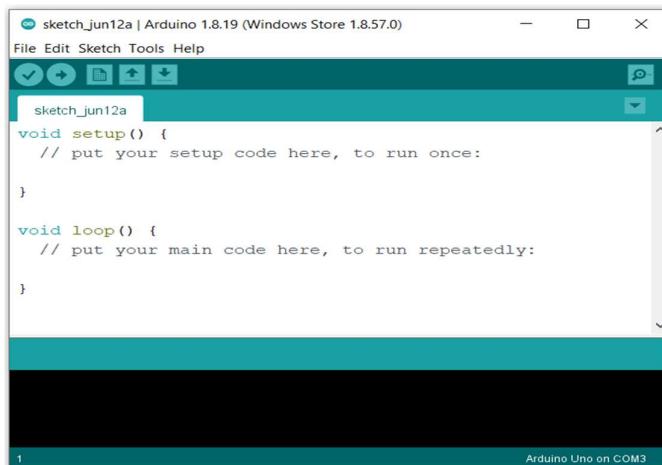
6. СОФТВЕРСКА ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА И ТЕСТИРАЊЕ СИСТЕМА

6.1. Програмски оквир *Arduino IDE*

Arduino IDE (енг. *Integrated Development Environment* – интегрисано развојно окружење) је софтверска апликација која обезбеђује кориснички прилагођено окружење за писање, компајлирање и упложавање кода на *Arduino* плоче. Она поједностављује процес програмирања микроконтролера и њихово повезивање са физичким светом. *Arduino IDE* се заснива на *C* програмском језику [47].

Интерфејс *Arduino IDE* софтвера обухвата уређивач текста, алатке за верификацију и упложење кода, конзолу за поруке и серијску комуникацију са уређајем (контролером). Кроз меније као што су *Sketch*, *Tools* и *File*, могуће је управљати библиотекама, подешавати плочу и *COM* порт, покренути серијски монитор, односно *serial plotter* за приказ одзива система, те форматирати код [47].

На слици 29 приказан је изглед нове скице *Arduino IDE* софтвера, тј. прозор који програм прикаже приликом првог отварања.



Слика 29. Почетни изглед *Arduino IDE* прозора.

Функција *void setup()* се само једном позива приликом извршавања програма и то на самом старту. Унутар *void setup()* функције врши се:

- иницијализација улаза/излаза система – *pinMode()*,
- покретање комуникације са осталим уређајима - *Serial.begin()*, *lcd.begin()*,
- подешавање почетног стања дисплеја, сензора, актуатора,
- подешавање иницијалних вредности променљивих,
- нпр. испис почетне поруке добродошлице на *LCD* или серијски монитор, итд [48].

Функција *void loop()* се непрекидно извршава након функције *void setup()* и у њој може да се врши:

- Континуирано читање података са сензора,
- Обрада података (нпр. ПИД израчун),
- Управљање актуаторима (нпр. пумпа, мотор) у реалном времену,
- Приказ резултата, или одзива (на *LCD* или *Serial Plotter*-у),
- Доношење одлука у реалном времену, итд [48].

Изван поменутих функција (изнад) врши се навођење *Arduino IDE* библиотека. *Arduino IDE* библиотеке су колекције кода које омогућавају програмерима да лако користе комплексне функције и компоненте у својим пројектима без потребе да поново пишу комплексан код. Постоје две врсте библиотека у *Arduino IDE*, а то су: уграђене (енг. *built-in*) и спољне (енг. *external*) библиотеке. Уграђене библиотеке су оне које су унапријед инсталирани у софтверу и аутоматски су доступне корисницима. Спољне, или екстерне библиотеке су оне које корисници морају ручно инсталирати путем менаџера библиотека [49]. Приликом израде пројекта регулације нивоа течности кориштене су следеће библиотеке:

- *AFMotor.h* и
- *LiquidCrystal_I2C.h*.

Библиотека *AFMotor.h* користи се за рад са *Adafruit Motor Shield*-ом и управљање DC мотором у склопу пумпе. Неке од функција које библиотека *AFMotor.h* омогућава су:

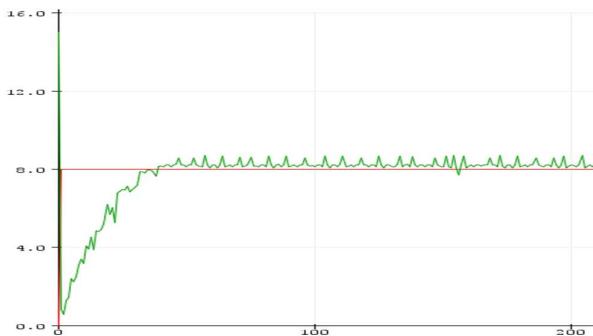
- *motor.setSpeed()* – користи се за постављање брзине обртања мотора,
- *AF_DCMotor motor(3)* – користи се за креирање објекта мотора на излазу M3 *Adafruit Motor Shield*-а,
- *motor.run(FORWARD)* – поставља један смјер обртања мотора,
- *motor.run(BACKWARD)* – поставља други смјер обртања мотора, итд [50].

Библиотека *LiquidCrystal_I2C.h* користи се за рад са *LCD* дисплејом. Неке од функција које библиотека *LiquidCrystal_I2C.h* омогућује су:

- *lcd.print()* – користи се за исписивање текста и вриједности промјењивих на екрану,
- *lcd.clear()* – користи се за брисање свега што је тренутно исписано на *LCD* екрану,
- *lcd.backlight()* – укључује позадинско освјетљење,
- *lcd.noBacklight()* – искључује позадинско освјетљење, итд. [46].

Још један занимљив и користан сегмент из *Arduino IDE* софтвера јесте уграђени алат *Serial Plotter*. Он омогућава графички приказ података који се преко серијске везе (*Serial Monitor*) шаљу са микроконтролера на рачунар у реалном времену. Овај алат трансформише низ бројева у визуелни приказ – у виду криве или више њих – што омогућава лакше праћење промјена, идентификацију грешака и анализу одзива система. Другим ријечима, на овај начин је омогућено праћење одзива система у реалном времену, односно да се рад система „види“ што је даље од непроцењиве важности када се ради тестирање и фино подешавање рада система преко параметара контролера [51].

На слици 30 приказан је одзив реалног система регулације нивоа, односно промјена излазне величине система (нивоа) са временом, а према задатој (референтној) величини.



Слика 30. Одзив реалног система регулације нивоа течности у *Arduino IDE Serial Plotter*-у.

6.2. Тестирање функционалности система

Тестирање функционалности система регулације нивоа течности у резервоару представља кључну фазу пројекта у којој се провјерава функционалност и ефикасност ПИД контролера, као и тачност мјерних података добијених од ултразвучног сензора и кондуктометричког прекидача. Циљ тестирања је да се утврди способност система да одржи жељени ниво течности у горњем резервоару упркос сталним поремећајима (истицању воде), и да при томе не дође до прелијевања. Тестирање је обухватило рад свих компоненти у реалном времену – од очитавања удаљености преко ултразвучног сензора, до актуирања пумпе у складу са израчунатим ПИД управљачким сигналом, све уз визуелни приказ излазних параметара на *LCD* екрану и пратећу графичку анализу одзива преко *Serial Plotter-a* у *Arduino IDE* развојном окружењу.

На слици 31 приказани су изгледи цјелокупног система за регулацију нивоа течности у резервоару са погледом одозго на уgraђени нетестирали систем и погледом са предње стране на тестиран уgraђен систем.



Слика 31. Цјелокупан систем за регулацију нивоа течности: а) Поглед одозго на нетестиран уgraђен систем, б) Поглед са предње стране на комплетно уgraђен и тестиран систем.

6.2.1. Валидација рада ултразвучног сензора и ПИД алгоритма

На почетку тестирања, систем се иницијализује кроз функцију *setup()* где се врши конфигурација улазно-излазних пинова микроконтролера, укључујући пинове за *TRIG* и *ECHO* ултразвучног сензора *HC-SR04*, пинове за потенциометре за подешавање *P*, *I* и *D* параметара, као и пин за потенциометар за задати ниво. *LCD* екран иницијализује се помоћу *I2C* адаптера и библиотеке *LiquidCrystal_I2C*, и приказује основне податке о нивоу, као и тренутне вриједности ПИД параметара.

На слици 32 приказан је изглед електричног ормара са *LCD* дисплејом и цјелокупног система на почетку тестирања система, тј. када још није покренута пумпа и течност се не налази у горњој посуди.



*Слика 32. Приказ електричног ормара са *LCD* екраном и цјелокупног система у истом тренутку времена на почетку тестирања система (прије покретања пумпе).*

Дакле, на *LCD* дисплеју приказане су вриједности задатог нивоа (*ZN*), стварног нивоа (*SN*) и *P*, *D*, *I* параметара ПИД контролера. Као што је евидентно са слике 32, на *LCD* дисплеју на почетку тестирања стварни ниво има неку одређену вриједност 0,58 изражену у центrima, односно око 5 [mm]. То је због немогућности да сва течност из горње посуде истекне слободним истицањем у доњу посуду, јер се отвор за истицање из горње посуде налази 5 милиметара изнад дна горње посуде. Стварни приказ тога види се и на слици 32 (десно) где је евидентирано присуство течности у горњој посуди у висини од приближно 5 милиметара, што даље потврђује тачно мјерење ултразвучног сензора при стартовању тестирања пројекта.

У *loop()* функцији, систем циклично мјери растојање до површине течности помоћу ултразвука, рачуна грешку као разлику стварног и задатог нивоа, и примјењује ПИД алгоритам да би се извршила регулација брзине рада пумпе. ПИД контролер користи четири потенциометра – један за сваку од компоненти (P , I , и D), и један за задавање референтног нивоа. Излаз алгоритма трансформише се у *PWM* сигнал којим се управља пумпом преко моторног штита *Adafruit V1*.

Због габаритних ограничења резервоара и обзиром да постоји константно истицање из горњег резервоара у доњи, ниво на којем се течност одржава налази се у распону од 8 до 12 центиметара, јер је екпериментално утврђено да је тај распон најпогоднији за показне сврхе и за оптималан рад пумпе.

На слици 33 приказан је изглед електричног ормара са *LCD* дисплејом и цјелокупног система у току рада система, тј. када систем достигне своје стационарно стање у погледу регулације нивоа.



Слика 33. Приказ електричног ормара са LCD екраном и цјелокупног система у истом тренутку времена у току рада система када је постигнут жељени задати ниво течности (стационарно стање система).

У стационарном стању очитавања сензора у зависности од P , I и D параметара контролера флуктуишу у одређеном распону, нпр. у једном тренутку сензор показује 8,12 за задати ниво од 8 центиметара, а у другом тренутку показује 8,72 центиметра. Међутим, и поред тога систем је у тим тренуцима стабилан и течност не мијења ниво. Разлог томе је што су системи за регулацију нивоа течности, попут овог, инертни и споро одговарају на измјерене вриједности са сензора. Другим ријечима, систем сам себе пригушује и филтрира дата очитавања, јер „не види“ и не може да препозна и одговори на брзе промјене у мјерењу сензора. Флуктуације сензора такође могу бити изазване феноменима које људско око не види, а то су температурне сметње, пјенушање течности на слободној површини воде, итд.

6.2.2. Сигурносни механизам и алармни систем

Уз основну регулацију, тестирали су и сигурносни механизми система. Кондуктометрички *Water Detect Click* сензор постављен је као крајњи прекидач и активира аларм уколико вода достигне критични ниво. У том случају, преко *INT* пина сензора се шаље сигнал микроконтролеру који тренутно зауставља пумпу и приказује алармну поруку на *LCD* екрану. Пумпа се у том случају зауставља све док *Water Detect Click* сензор има додир са водом.

На слици 34 приказан је изглед електричног ормара са *LCD* дисплејом и цјелокупног система у току рада када се изврши симулација пуног резервоара уз помоћ чаше са водом, тј. када *Water Detect Click* сензор систем додирне воду у чаши.



Слика 34. Приказ електричног ормара са *LCD* екраном и цјелокупног система у истом тренутку времена у току рада када се изврши симулација пуног резервоара уз помоћ *Water Detect Click* сензора и чаше са водом.

6.2.3. Анализа одзива система путем *Serial Plotter-a*

Подаци о стварном нивоу течности се преко *Serial* монитора шаљу на рачунар и у реалном времену графички приказују преко уgraђеног *Serial Plotter* алата. Ово је омогућило да се током тестирања уоче карактеристике одзива система – вријеме реаговања, присуство осцилација, вријеме смирења и стабилност нивоа након поремећаја. *Serial Plotter* омогућио је такође и фино подешавање ПИД параметара за постизање жељеног динамичког понашања система.

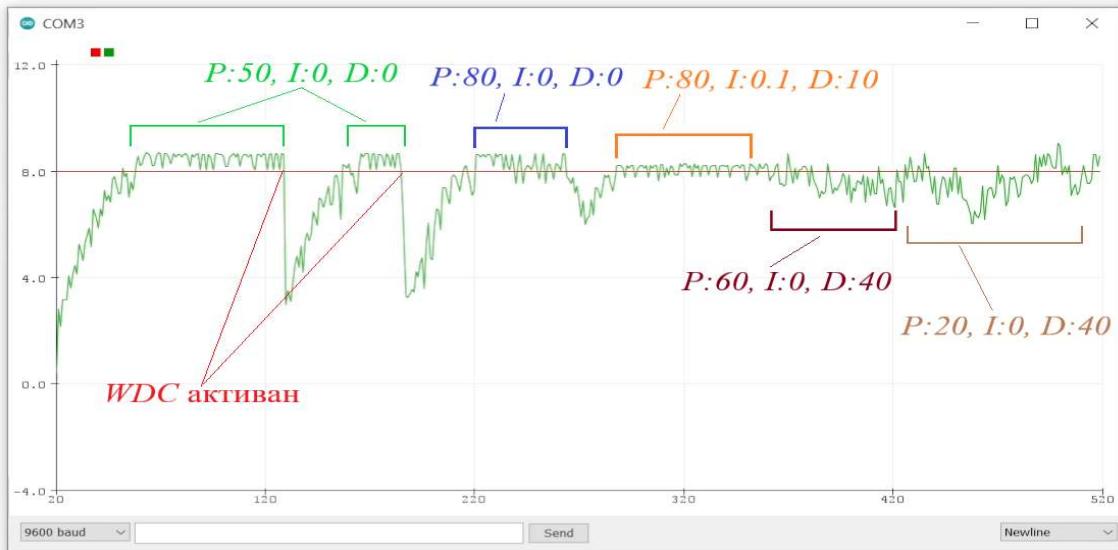
На слици 35 приказан је изглед одзива система након дужег рада са подешеним параметрима $P:50$, $I:0$ и $D:0$, односно са пропорционалним П регулатором.



Слика 35. Одзив система са датим Π , $И$ и $Д$ параметрима и периодом времена док је активан WDC сензор, тј. док је у додиру са водом.

Овај начин регулације је кориштен за тестирање пројекта завршног рада и показао је прилично добре резултате када се узме у обзир само одзив система. Ако се узме у обзир практична регулација нивоа овим начином, онда се може рећи да је систем дао одличне резултате у том случају, јер је обезбиједио одржавање течности на егзактно задатом нивоу.

На слици 36 приказан је цјелокупан одзив након дужег рада система и наизмјеничне промјене параметара П, И и Д контролера. Неке комбинације параметара давале су бољи, а неке лошији одзив система.



Слика 36. Различити одзиви система у зависности од промјене П, И и Д параметара контролера.

Са слике 36 је евидентно да је најбољи одзив система у датим комбинацијама показао пропорционално-интегрално-деривативни регулатор (П:80, И:0.1, Д:10).

При једном од претходних тестирања система тестиран је систем са пропорционално-интегралним регулатором који је показао најбоље резултате од свих претходних. Приказ одзива система са ПИ регулатором налази се на слици 37.



Слика 37. Стабилан одзив система са ПИ регулатором.

Тестирањем система је потврђено да систем успјешно одржава ниво течности унутар задатих граница, реагује на поремећаје у систему, а сигурносни механизми спрјечавају прелијевање. Комбинација хардвера и софтвера показала се поузданом, а графички прикази и LCD интерфејс омогућили су интуитиван надзор и анализу рада у реалном времену.

7. ЗАКЉУЧАК

Аутоматизација и континуално управљање технолошким процесима представљају кључни елемент савремене индустрије, омогућавајући прецизну контролу, оптимизацију ресурса и повећање сигурности. Овај рад је истражио и имплементирао један модификован систем за регулацију нивоа течности у резервоару, користећи микропроцесорски управљачки систем са ПИД алгоритмом, ултразвучним сензором за континуално мјерење нивоа и кондуктометријским сензором као заштитним елементом.

Експериментални резултати су показали да ПИД контролер ефикасно одржава жељени ниво течности, компензујући поремећаје уз минималне осцилације. Ултразвучни сензор *HC-SR04* показао се као поуздано рјешење за бесконтактно мјерење, док је *Water Detect Click* сензор осигурао сигурност система активирајући аларм при прекорачењу нивоа. Интеграција свих ових елемената омогућила је стварање робусног система са редундантним мјерним методима, што је од суштинске важности за критичне индустријске и неиндустријске апликације.

Имплементација система потврдила је значај теоријских основа мјерења и аутоматског управљања, посебно у погледу динамичког понашања система и утицаја параметара П, И и Д контролера на стабилност и брзину одзива. Додатно, кориштење *Arduino* платформе и развојног окружења *Arduino IDE* олакшало је прототипирање, тестирање и визуелизацију података, што указује и потврђује погодност ових алата за едукацију и индустријску примјену.

Овај пројекат демонстрира могућност креирања јефтиних, али ефикасних система за аутоматизацију, са потенцијалном примјеном у бројним областима, од процесне индустрије до управљања воденим ресурсима. Даљи развој система би се могао усмјерити на унапређење тачности сензора, оптимизацију алгоритма и интеграцију са *IoT* платформама за даљинско управљање и анализу података.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Џејмс Ват, биографија, [Online], доступно на: <https://www.britannica.com/biography/James-Watt/Later-years> [приступљено: 04.05.2025.]
- [2] Џејмс Клерк Маквел, биографија, [Online], доступно на: <https://www.britannica.com/biography/James-Clerk-Maxwell> [приступљено: 04.05. 2025.].
- [3] Николас Минорски, биографија, [Online], доступно на: <https://kalopa.com/blog/2023-04-02-nicolas-minorsky-father-of-the-pid-controller> [приступљено: 04.05.2025.].
- [4] Петар Бошњаковић, *Умеће мерења*, Висока школа електротехнике и рачунарства струковних студија, Београд, 2011.
- [5] Цветан Гавровски, *Основи на мерната техника*, Интерна скрипта ЕТФ, Скопје, 2003.
- [6] John. G. Webster, *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, CRC Press, 1999.
- [7] S. Kamakshaiah, Pannala Krishna Murthy, J. Amarnath, *Electrical Measurements and Measuring Instruments*, Dreamtech Press, 2013.
- [8] Subhas C. Mukhopadhyay, *Intelligent Sensing, Instrumentation and Measurements*, Springer, 2013.
- [9] Analog measuring instrument, [Online], доступно на: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/analog-instrument> [приступљено: 27.05.2025.].
- [10] ESCOLA 100 analog measuring instrument, [Online], доступно на: https://www.3bscientific.com/ba/analogue-multimeter-escola-100-1013527-u8557380-3b-scientific,p_809_26947.html [приступљено: 27.05.2025.].
- [11] Аналогни мултиметар основе, [Online], доступно на: <https://www.weschler.com/blog/advantages-of-an-analog-multimeter/>
- [12] Herbert Bernstein, *Measuring Electronics and Sensors, Basics of Measurement Technology, Sensors, Analog and Digital Signal Processing*, Springer 2021.
- [13] Георг Сајмон Ом, биографија, [Online], доступно на: <https://www.britannica.com/biography/Georg-Ohm>, [приступљено: 30.05.2025.].
- [14] STANLAY 33D+ digital measuring instrument, [Online], доступно на: <https://www.stanlay.in/electrical-test-and-measurement-equipment/digital-multimeters/33d+-palm-size-digital-multimeter/#tab6> [приступљено: 30.05.2025.].
- [15] Бојан З. Кнежевић, *Актуатори и сензори*, Универзитет у Бањој Луци, Машински факултет, 2023.
- [16] Lingsong He, Bo Feng, *Fundamentals of Measurement and Signal Analysis*, Springer 2022.

- [17] Water detect click сензор, [Online], доступно на: <https://www.mikroe.com/water-detect-click>, [приступљено: 31.05.2025].
- [18] Jenny Terzic, Edin Terzic, Romesh Nagarajah, *Ultrasonic Fluid Quantity Measurement in Dynamic Vehicular Applications*, Springer 2013.
- [19] Ultrasonic sensor working principle, [Online], доступно на: https://www.researchgate.net/figure/Working-principle-of-an-ultrasonic-sensor_fig1_304822025 [приступљено: 31.05.2025.].
- [20] Пиезоелектрични ефекат, [Online], доступно на: <https://www.nanomotion.com/nanomotion-technology/the-piezoelectric-effect/> [приступљено: 31.05.2025.].
- [21] Пиезоелектрични претварач, [Online], доступно на: <https://www.manorshi.com/114db-40KHz-Ultrasonic-Piezoelectric-Transducer-Ultrasonic-Sensor-pd40648866.html> [приступљено: 31.05.2025.].
- [22] Stephen Milligan, *Understanding Ultrasonic Level Measurement*, Momentum Press, 2013.
- [23] Principle of ultrasonic level measurement, [Online], доступно на: <https://instrumentationblog.com/ultrasonic-level-transmitter/> [приступљено: 31.05.2025.].
- [24] Sensor blocking distance, [Online], доступно на: <https://www.automation.com/en-us/articles/february-2021/level-measurement-technology-blocking-distances> [приступљено: 01.06.2025.].
- [25] Драган К. Станковић, *Сензори, Физичко техничка мјерења*, Београдски универзитет, 1997.
- [26] Water detect click schematic, [Online], доступно на: <https://download.mikroe.com/documents/add-on-boards/click/water-detect/water-detect-click-schematic.pdf> [приступљено: 01.06.2025.].
- [27] EL1, VEGA, Conductive level sensor, [Online], доступно на: <https://www.vega.com/en/products/product-catalog/switching/conductive/el-1> [приступљено: 01.06.2025.].
- [28] Чедомир Милосављевић, *Теорија аутоматског управљања 1*, Универзитет у Источном Сарајеву, 2008.
- [29] Михајло Ј. Стојчић, *Основе аутоматског управљања*, Универзитет у Бањој Луци, Машички факултет, 2017.
- [30] Оливер Хевисайд, биографија, [Online], доступно на: <https://www.britannica.com/biography/Oliver-Heaviside> [приступљено: 01.06.2025.].
- [31] System response, [Online], доступно на: <https://lpsa.swarthmore.edu/Transient/TransInputs/TransStep.html> [приступљено: 01.06.2025.].

- [32] What is Arduino UNO? An overview of Arduino's most popular microcontroller dev board, [Online], доступно на: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/arduino-uno-product-overview> [приступљено: 02.06.2025.].
- [33] What is Arduino UNO? Pictures, features and specifications, [Online], доступно на: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3> [приступљено: 02.06.2025.].
- [34] What is Arduino UNO? Features and specifications, [Online], доступно на: <https://robu.in/what-is-arduino-uno/> [приступљено: 02.06.2025.].
- [35] What is a PCB controller and its role in core control circuit, [Online], доступно на: <https://www.sierraassembly.com/blog/what-is-pcb-controller-and-its-role-in-core-control-circuit/> [приступљено: 02.06.2025.].
- [36] Adafruit motor shield V1 description, [Online], доступно на: <https://www.adafruit.com/product/81#description> [приступљено: 02.06.2025.].
- [37] Adafruit motor shield V1 technical specifications and description, [Online], доступно на: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-motor-shield.pdf> [приступљено: 02.06.2025.].
- [38] Adafruit motor shield V1 picture, [Online], доступно на: <https://www.aranacorp.com/en/control-several-motors-with-motor-shield-v1-and-arduino/> [приступљено: 02.06.2025.].
- [39] Ultrasonic sensor picture, [Online], доступно на: <https://www.sparkfun.com/ultrasonic-distance-sensor-hc-sr04.html> [приступљено: 02.06.2025.].
- [40] Technical characteristics of HC-SR04, [Online], доступно на: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf> [приступљено: 02.06.2025.].
- [41] ZC-A40 pump characteristics, [Online], доступно на: <https://www.ebay.com/itm/135162105270> [приступљено: 02.06.2025.].
- [42] ZC-A40 pump working principle, [Online], доступно на: <https://www.youtube.com/watch?v=C48y8shG4sw> [приступљено: 02.06.2025.].
- [43] ZC-A40 pump working principle, [Online], доступно на: <https://www.pentair.com/content/dam/extranet/web/nam/shurflo/data-sheets/pds-4008-101-X65.pdf> [приступљено: 02.06.2025.].
- [44] LCD 16x2 characteristics, [Online], доступно на: <https://lastminuteengineers.com/arduino-1602-character-lcd-tutorial/> [приступљено: 03.06.2025.].
- [45] LCD 16x2 picture, [Online], доступно на: <https://store.arduino.cc/products/16x2-lcd-display-with-i-c-interface> [приступљено: 03.06.2025.].
- [46] LCD with I2C module, [Online], доступно на: <https://soldered.com/hr/learn/kkm-lcd-16x2/> [приступљено: 03.06.2025.].

- [47] Arduino IDE, what is it?, [Online], доступно на: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/arduino-ide-v1-basics/> [приступљено: 03.06.2025.].
- [48] Arduino IDE, void setup and void loop functions explained, [Online], доступно на: <https://roboticsbackend.com/arduino-setup-loop-functions-explained/> [приступљено: 03.06.2025.].
- [49] Arduino IDE library [Online], доступно на: <https://www.theengineeringprojects.com/2018/10/introduction-to-arduino-ide.html> [приступљено: 03.06.2025.].
- [50] Arduino IDE library *AFMotor.h* [Online], доступно на: <https://docs.arduino.cc/libraries/adafruit-motor-shield-v2-library/> [приступљено: 03.06.2025.].
- [51] Arduino IDE Serial Plotter [Online], доступно на: <https://www.instructables.com/Ultimate-Guide-to-Arduino-Serial-Plotter/> [приступљено: 03.06.2025.].

ПРИЛОГ 1

```
#include <AFMotor.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

AF_DCMotor motor(3);
LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, 16, 2);

#define trigPin 10 // Povezivanje UZV senzora
#define echoPin 13 // Povezivanje UZV senzora
#define PREKIDAC 7
#define WATER_DETECT_CLICK_PREKIDAC 5

int offset = 128;
int potPin = A0;
int potPin1 = A1;
float potPin2 = A2;
int potPin3 = A3;
float lasterror = 0;
float lasti = 0;
float currenti;
unsigned long r;
unsigned long t;
unsigned long t_prev = 0;
float dt;
bool alarmAktivan = false;

//Serial plotter
unsigned long current_time = millis() - r;
float min_level = 0.0;
float max_level = 15.0;
```

ПРИЛОГ 2

```
void setup() {  
    Serial.begin (9600);  
    pinMode(trigPin, OUTPUT);  
    pinMode(echoPin, INPUT);  
    pinMode(12, OUTPUT);  
    pinMode(A0, INPUT);  
    pinMode(A1, INPUT);  
    pinMode(A2, INPUT);  
    pinMode(A3, INPUT);  
    pinMode(PREKIDAC, INPUT); // PIN7 prekidac  
    pinMode(WATER_DETECT_CLICK_PREKIDAC, INPUT);  
  
    Serial.print("Y,");  
    Serial.print(min_level);  
    Serial.print(',');  
    Serial.print(max_level);  
    Serial.println();  
  
    lcd.begin();  
    lcd.setCursor(4, 0);  
    lcd.print("PROJEKAT");  
    lcd.setCursor(0,1);  
    lcd.print("REGULACIJA NIVOA");  
    delay(3000); // Prikazivanje poruke 3 sekunde  
    lcd.clear(); // Brisanje LCD ekrana  
  
    lcd.setCursor(0, 0);  
    lcd.print("ZN:");  
  
    lcd.setCursor(7, 0);  
    lcd.print("SN:");  
  
    lcd.setCursor(0, 1);  
    lcd.print("P:");  
  
    lcd.setCursor(6, 1);  
    lcd.print("D:");  
  
    lcd.setCursor(11, 1);  
    lcd.print("I:");  
}
```

ПРИЛОГ 3

```
void loop() {
    // Prvo provjeri senzor za vodu
    if (digitalRead(WATER_DETECT_CLICK_PREKIDAC) == HIGH) {
        if (!alarmAktivan) {
            lcd.clear();
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("STOP! VODA!      ");
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print("WDC SENZOR AKTIV");
            alarmAktivan = true;
        }
        // Zaustavi motor i izadi iz loop-a
        motor.setSpeed(0);
        digitalWrite(12, HIGH);
        return; // Izlazi iz loop() funkcije, ne izvršava ostatak koda
    }
    else if (alarmAktivan) {
        lcd.clear();
        // Ponovno postavi početni prikaz
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("ZN:");
        lcd.setCursor(7, 0);
        lcd.print("SN:");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("P:");
        lcd.setCursor(6, 1);
        lcd.print("D:");
        lcd.setCursor(11, 1);
        lcd.print("I:");
        alarmAktivan = false;
    }
    int potValue = analogRead(A0);
    int mappedValue = map(potValue, 0, 1023, 100, 0); // Mapiranje na opseg
0-100
    int roundedValue = round(mappedValue / 10.0) * 10; // Zaokruživanje na
deset
    int kp = constrain(roundedValue, 0, 100); // Ogranicavanje vrijednosti na
opseg 0-100
    int potValue1 = analogRead(A1);
    int mappedValue1 = map(potValue1, 0, 1023, 50, 0);
    int roundedValue1 = round(mappedValue1 / 10.0) * 10;
    int kd = constrain(roundedValue1, 0, 100);

    float potValue2 = analogRead(A2);
    float mappedValue2 = map(potValue2, 0, 1023, 10, 0); // Mapiranje na
opseg 0-10
    float ki = mappedValue2 / 10.0; // Podjela sa 10 za dobijanje decimalnih
vrijednosti od 0 do 1

    int potValue3 = analogRead(A3);
    int setpoint = map(potValue3, 0, 1023, 20-12, 20-8);

    float duration, distance, error, errororderiv, errorint, output;
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    delayMicroseconds(2);

    digitalWrite(trigPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
```

```
digitalWrite(trigPin, LOW);

duration=pulseIn(echoPin, HIGH);
distance=(duration/2)*0.0344;
error=distance-setpoint;
errorderiv=(error-lasterror)/0.5;
r=millis();
t = r* 1000;
dt=t-t_prev;
currenti=lasti+(dt*(error+lasterror)/2);

if ( (error > 1) || (error < - 1)){
    output=offset+kp*error+kd*errorderiv;
    lasterror=error;
    t_prev=t;
}
else{
    output=offset+kp*error+kd*errorderiv+ki*currenti;
    lasterror=error;
    t_prev=t;
}

//NIJE DOZVOLJENO PREKORACENJE BRZINE
if(output>255){
    output=255;
}

//NE DOZVOLJAVA DA NEGATIVNI OUTPUT PREDJE U POZITIVNU VRIJEDNOST
if(output<0){
    output=0;
}

//KADA JE PREKIDAC UKLJUCEN PUMPA SE GASI
if (digitalRead(PREKIDAC) == HIGH ||
digitalRead(WATER_DETECT_CLICK_PREKIDAC) == HIGH) {
    output=0;
}
else {
    output=output;
}

//ISPIS NIVOA KOJI SE ZADAJE NA POTENCIOMETRU
lcd.setCursor(3, 0);
char strN[6]; // Kreiranje prazanog niza karaktera
int nivo = 20 - setpoint;

if (nivo >= 10) {
    sprintf(strN, sizeof(strN), "%d", nivo);
} else {
    sprintf(strN, sizeof(strN), " %d", nivo);
}
lcd.print(strN); // Ispisi konvertovane vrijednosti

//ISPIS NIVOA KOJI MJERI SENZOR
lcd.setCursor(10, 0);
lcd.print(19.4-distance);

//ISPIS KP
lcd.setCursor(2, 1);
char strKp[6];
```

```
if (kp == 100) {
    sprintf(strKp, sizeof(strKp), "%d", kp);
} else {
    sprintf(strKp, sizeof(strKp), "%d ", kp);
}
lcd.print(strKp);

//ISPIS KD
lcd.setCursor(8,1);
char strKd[6];
if (kd == 10) {
    sprintf(strKd, sizeof(strKd), "%d", kd);
} else {
    sprintf(strKd, sizeof(strKd), "%d ", kd);
}
lcd.print(strKd);

//ISPIS KI
lcd.setCursor(13,1);
lcd.print(ki);

//Serial plotter
float level = constrain(19.4 - distance, min_level, max_level);
// Slanje podataka preko serijske veze ka računaru
Serial.print("D,");
Serial.print(current_time);
Serial.print(20-setpoint);
Serial.print(',');
Serial.print(level);
Serial.println();

if (digitalRead(WATER_DETECT_CLICK_PREKIDAC) == HIGH && !alarmAktivan) {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("STOP! VODA!      ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("WDC SENZOR AKTIV");
    alarmAktivan = true;
    return;
}
else if (digitalRead(WATER_DETECT_CLICK_PREKIDAC) == LOW && alarmAktivan)
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("ZN:");
    lcd.setCursor(7, 0);
    lcd.print("SN:");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("P:");
    lcd.setCursor(6, 1);
    lcd.print("D:");
    lcd.setCursor(11, 1);
    lcd.print("I:");
    alarmAktivan = false;
}

digitalWrite(12, HIGH);
analogWrite(3, output);
motor.run(FORWARD); /*Zadajem funkciju koja okreće motor naprijed
*NAPOMENA: Ne može raditi bez funkcije setSpeed.*/
```

```
motor.setSpeed(output); /*Funkcija kontrolise brzinu motora. Brzina se  
kreće od 0 do 255, pri čemu je 0 isključeno, a 255 maksimalna moguća  
brzina.*/  
delay(500);  
}
```

ПРИЛОГ 4

