

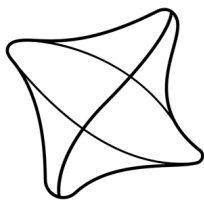
ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A INFORMAČNÝCH TECHNOLOGÍÍ**

Inštitút Aurela Stodolu

28260820221003

**PH CONTROLLER – MERANIE A REGULÁCIA
PH**



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A INFORMAČNÝCH TECHNOLOGIÍ**

Inštitút Aurela Stodolu

PH CONTROLLER – MERANIE A REGULÁCIA PH

BAKALÁRSKA PRÁCA

Študijný odbor:	informatika
Študijný program:	komunikačné a informačné technológie
Vedúci bakalárskej práce:	Ing. Pavel Šimon, CSc.
Pracovisko vedúceho práce:	Inštitút Aurela Stodolu

Liptovský Mikuláš, 2022

Marek Klement



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Fakulta elektrotechniky
a informačných technológií

Inštitút Aurela Stodolu

Akademický rok 2021/2022

ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Meno a priezvisko: KLEMENT Marek

Študijný odbor : informatika

Študijný program : komunikačné a informačné technológie

Téma bakalárskej práce: pH Controller – meranie a regulácia pH

Pokyny na vypracovanie bakalárskej práce

- Objasnite princípy merania pH faktoru
- Objasnite princíp regulácie pH prostredia
- Zostrojte pH Controller
 - o Zariadenie založiť na platforme arduino kompatibilnej (napr. ESP32)
 - o Merania ukladať on-line s využitím dostupnej komunikácie (WiFi siete alebo sériovej komunikácie)
 - o Hodnoty pH zobrazovať na displeji.

Vedúci bakalárskej práce:

Ing. Pavel ŠIMON, CSc. Inštitút Aurela Stodolu FEIT ŽU v Žiline

Dátum odovzdania bakalárskej práce: 16.05.2022

V Liptovskom Mikuláši dňa : 29.10.2021


doc. RNDr. Stanislav Jurečka, PhD.
riaditeľ

ANOTAČNÝ ZÁZNAM

Žilinská univerzita v Žiline

Fakulta elektrotechniky a informačných technológií

Katedra informačno-komunikačných technológií

Typ práce:	Bakalárska Práca
Meno a priezvisko:	Marek Klement
Akademický rok:	2021/2022
Názov práce:	pH Controller – meranie a regulácia pH
Počet strán:	59
Počet obrázkov:	40
Počet tabuliek:	4
Počet grafov:	0
Počet príloh:	1
Počet použ. lit.:	27

Anotácia v slovenskom jazyku : Cieľom tejto bakalárskej práce je zhotovenie pH regulátora pre zvolené prostredie, teda pre sladkovodnú nádrž. Súčasťou je popis meranej a regulovanej veličiny, navrhnutie periférie a zhotovenie funkčného regulátora. Na záver je zhotovený výrobok podrobený testom funkčnosti.

Annotation in foreign language (english) : The aim of this bachelor thesis is to make a pH regulator for the selected environment, so for a freshwater tank. Thesis includes a description of the measured and controlled dimension, desing of peripherals and construction of a functional controller. Finally, the finished product is subjected to a functionality test.

Kľúčové slová: pH, CO₂, regulácia, meranie

Vedúci bakalárskej práce: Ing. Pavel Šimon, CSc.

Dátum odovzdania ZP: 08.05.2022

POĎAKOVANIE

Moje poďakovanie patrí školiteľovi bakalárskej práce Ing. Pavel Šimon, CSc. za odbornú pomoc, pripomienky a usmerňovanie pri tvorbe práce.

ABSTRAKT

KLEMENT, Marek: pH Controller – meranie a regulácia pH. [Bakalárska práca]. Žilinská Univerzita v Žiline. Fakulta elektrotechniky a informačných technológií; Inštitút Aurela Stodolu. Vedúci práce: Ing. Pavel Šimon, CSc. Stupeň odbornej kvalifikácie: bakalár. Liptovský Mikuláš : FEIT UNIZA, 2022. 59 s.

Bakalárska práca sa zaoberá problematikou merania a regulácie pH faktoru. Cieľom bakalárskej práce je realizácia systému regulujúceho hodnotu pH v akváriu. Prvá kapitola práce opisuje spôsoby merania pH, spojitosť s koncentráciou CO₂ vo vode a takisto pH faktor samotný. Záver kapitoly predstavuje voľbu akým spôsobom bude regulácia vykonávaná. Druhú časť práce tvorí návrh jednotlivých častí všetkých potrebných periférií systému regulátora. V tretej časti sú obsiahnuté návrhy DPS a takisto sa čitateľ oboznámi so softvérovým vybavením systému. Záver je venovaný oživeniu a výsledným testom zostrojeného regulátora.

Kľúčové slová: pH , CO₂, regulácia , meranie

ABSTRACT

KLEMENT, Marek : pH Controller – measurement and regulation of pH. [Bachelor thesis]. University of Žilina. Faculty of Electrical Engineering and Information Technology; Institut of Aurel Stodola. Supervisor 's name: Ing. Pavel Šimon, CSc. Professional qualification level: Bachelor degree. Liptovský Mikuláš: FEIT UNIZA, 2022. 59 pages.

The Bachelor thesis deals with the issue of measuring and regulating the pH factor. The aim of the bachelor thesis is the implementation of a regulating system for pH value in the aquarium tank. The first chapter describes the methods of measuring pH, the connection with the CO₂ concentration in water and also the pH factor itself. The conclusion of the chapter is a choice of how the regulation will be performed. The second part of the work is the design of individual parts of all necessary peripherals of the controller system. The third part contains the PCB designs and the reader will also get acquainted with the software solutions of the system. The conclusion is devoted to the resurrection and final tests of the constructed controller.

Keywords: pH, CO₂, regulation, measurement

OBSAH

Anotačný záznam	4
PodĎakovanie	5
Abstrakt	6
Abstract	7
Obsah	8
Zoznam obrázkov a tabuliek	10
Zoznam skratiek	12
Zoznam symbolov	14
Úvod	15
1 Teoretický úvod	16
1.1 Obsah CO ₂ vo vode a spôsoby jeho merania	16
1.1.1 Permanentné meranie dropcheckerom	16
1.1.2 Meranie pomocou pH	17
1.2 pH faktor	17
1.3 Metódy merania pH faktoru	19
1.3.1 Acidobázické indikátory	19
1.3.2 Potenciometrické meranie	20
1.4 pH sonda so sklenenou elektródou	21
1.5 pH sonda s ISFET senzorom	22
1.6 Kalibrácia sondy	23
1.7 Riadenie v akvaristike	25
1.7.1 Spínacie hodiny	25
1.7.2 Smart zásuvky	25
1.7.3 PLC systém	25
1.7.4 Riadenie počítačom	26
1.7.5 Riadenie mikrokontrolérom	26
1.8 Zvolená metóda pre realizáciu	27
2 Koncept regulátora	28
2.1 Bloková schéma regulátora	28
2.2 pH sonda	29
2.3 Zosilňovač	30
2.3.1 Návrh zapojenia zosilňovača	31
2.4 Riadiaca časť – mikrokontrolér	32

2.4.1 Softvérové vybavenie	33
2.5 Výstupný výkonový stupeň	34
2.5.1 Návrh zapojenia výkonového stupňa	34
2.6 RTC obvod	35
2.7 Ovládacie tlačidlá	36
2.8 LCD displej	36
2.9 Zdrojová časť	37
3 Zostavenie pH regulátora	39
3.1 Návrh dosky plošných spojov	39
3.2 Vývojové prostredie programu	41
3.3 Softvérové spracovanie pH signálu	42
3.4 Prepočet koncentrácie obsahu CO ₂ z pH hodnoty	43
3.5 Kalibrácia sondy	44
3.6 Regulácia pH veličiny	46
3.7 Zobrazovanie dát na LCD displeji	47
3.8 Ukladanie dát online pomocou WiFi komunikácie	48
4 Realizácia pH regulátora	51
4.1 Oživovanie	51
4.2 Kalibrácia pH sondy po oživení	52
4.3 Test regulátora v kontinuálnej prevádzke	53
Záver	54
Zoznam použitej literatúry	55
Čestné vyhlásenie	58
Zoznam príloh na CD	59

ZOZNAM OBRÁZKOV A TABULIEK

Obr. 1.1 Ukážka sklenenej banky dropcheckeru	17
Obr. 1.2 Koncentrácia iónov v závislosti na pH hodnote	19
Obr. 1.3 Farebná škála pH stupnice	19
Obr. 1.4 Znázornenie potenciometrickej metódy merania pH	20
Obr. 1.5 Konštrukcia kombinovanej pH elektródy	22
Obr. 1.6 Štruktúra ISFET senzoru	23
Obr. 1.7 Graf závislosti generovaného napätia od pH hodnoty	23
Obr. 1.8 Graf nastavenia nulového bodu sondy	24
Obr. 1.9 Graf korekcie sklonu sondy	24
Obr. 1.10 Mikrokontrolér ESP32 na vývojovej doske	27
Obr. 2.1 Bloková schéma pH regulátora	28
Obr. 2.2 Použitá sonda E-201	30
Obr. 2.3 Schéma zapojenia zosilňovača	31
Obr. 2.4 Schéma zapojenia mikrokontroléra	33
Obr. 2.5 Schéma zapojenia výstupnej výkonovej časti	35
Obr. 2.6 Schéma zapojenia RTC obvodu	35
Obr. 2.7 Schéma zapojenia ovládacích tlačidiel	36
Obr. 2.8 Schéma zapojenia LCD displeja	37
Obr. 2.9 Fotografia osadeného I ² C prevodníka na LCD displeji	37
Obr. 2.10 Schéma zapojenia zdrojovej časti	38
Obr. 3.1 Návrh DPS pH regulátora	39
Obr. 3.2 Osadzovací plán pH regulátora strana TOP	40
Obr. 3.3 Osadzovací plán pH regulátora strana BOTTOM	41
Obr. 3.4 Vývojové prostredie Arduino IDE	42
Obr. 3.5 Funkcia pre softvérové spracovanie pH signálu	43
Obr. 3.6 Prepočet koncentrácie CO ₂ v softvéri pH regulátora	44
Obr. 3.7 Ukážka zobrazenia prepočítanej hodnoty na LCD	44
Obr. 3.8 Globálne premenné pre hodnotu pH roztokov	45
Obr. 3.9 Softvérový výpočet kalibračných hodnôt pH sondy	45
Obr. 3.10 Graf závislosti napätia zosilňovača od pH hodnoty	46
Obr. 3.11 Globálne premenné pre hodnotu hysterézie pH regulácie	46
Obr. 3.12 Ukážka podmienok z regulácie pH hodnoty	47
Obr. 3.13 Ukážka zobrazenia oboch režimov na LCD	48
Obr. 3.14 Priradenie parametrov WiFi komunikácie	49
Obr. 3.15 Snímka obrazovky vytvorenej online plochy	49

Obr. 3.16 Snímka obrazovky z aplikácie mobilného telefónu	50
Obr. 4.1 Fotografia osadenej DPS strana TOP a BOTTOM	51
Obr. 4.2 Vyobrazenie kalibračných hodnôt na LCD	52
Obr. 4.3 Graf závislosti napätia zosilňovača od pH hodnoty	52
Obr. 4.4 Výsledok 24-hodinovej prevádzky regulátora	53
Tab 1.1 Tillmanova tabuľka	17
Tab 1.2 Vplyv teploty na strmosť elektródy	25
Tab 2.1 Parametre sondy	29
Tab 4.1 Porovnanie hodnoty roztoku s meranou pH hodnotou	53

ZOZNAM SKRATIEK

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
AC/DC	Alternating to Direct Current	Menič napätia AC/DC
ADC	Analog to Digital converter	Analógovo/Digitálny prevodník
BLE	Bluetooth Low Energy	Bluetooth s nízkou spotrebou
BNC	Bayonet Neil-Concelman	Bajonetový koaxiálny konektor
C++	General-purpose programming language	Multiparadigmaticý programovací jazyk
CO₂	Carbon dioxide	Oxid uhličitý
DAC	Digital to Analog converter	Digitálne/Analógový prevodník
DPS	Printed circuit board	Doska plošných spojov
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory	Elektricky zmazateľná permanentná pamäť
FLASH	Flash EEPROM memory	Zrýchlený typ EEPROM pamäte
GND	Ground	Zem
GPIO	General purpose input/output	Vstup/Výstup na všeobecné účely
HMI	Human-Machine Interface	Rozhranie človek-stroj
I²C	Inter-Integrated Circuit	Sériové komunikačné rozhranie
I²S	Inter-IC Sound	Sériová zbernica
IC	Integrated Circuit	Integrovaný obvod
IDE	Integrated development environment	Vývojové prostredie programu
IoT	Internet of Things	Internet vecí
IrDA	Infrared Data Association	Komunikačný port na prenos dát pomocou infračerveného žiarenia
ISFET	Ion-sensitive field-effect transistor	Iónovo senzitívny tranzistor
LCD	Liquid-crystal display	Displej z tekutých kryštálov
LED	Light-emitting diode	Luminiscenčná dióda
MOSFET	Metal-oxide-semiconductor FET	Polom riadený tranzistor
NodeMCU	Node micro-controller unit	Nízko nákladová IoT platforma
OTA	Over-the-air programming	Bezdrôtové programovanie
OZ	Operational amplifier	Operačný zosilňovač
pH	Potential of hydrogen	Vodíkový exponent

PLC	Programmable Logic Controller	Programovateľný logický automat
R	Resistor	Rezistor
RTC	Real-time clock	Hodiny reálneho času
SCL	Synchronous clock	Hodinový signál
SDA	Synchronous data	Dátový kanál
SMD	Surface mount devices	Súčiastky povrchovej montáže
SPI	Serial Peripheral Interface	Synchrónne sériové periférne rozhranie
SRAM	Static random access memory	Statická pamäť s priamym prístupom
TIA	Totally Integrated Automation	Plne integrovaná automatizácia
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter	Zbernica pre asynchrónny sériový prenos dát
USB	Universal Serial Bus	Univerzálna sériová zbernica
UT	Carbonate hardness	Uhlíčitánová tvrdosť
VAC	Voltage alternating current	Striedavé napätie
VDC	Voltage direct current	Jednosmerné napätie
WiFi	Wireless Fidelity	Bezdrôtové pripojenie

ZOZNAM SYMBOLOV

Symbol	Jednotka	Význam symbolu
$AgCl$	[-]	Chlorid strieborný
c	[-]	Kalibračná hodnota v kalibračnej rovnici
cH^+	[-]	Katión
E	[V]	Merný potenciál
E_0	[V]	Štandardný potenciál
E_{ind}	[V]	Potenciál meranej elektródy
E_{ref}	[V]	Potenciál referenčnej elektródy
F	[C*mol ⁻¹]	Faradayova konštanta
f	[Hz]	Frekvencia
H^+	[-]	Vodíkový katión
H_2O	[-]	Chemické označenie vody
H_3O^+	[-]	Oxóniový katión
HCl	[-]	Kyselina chlorovodíková
I	[A]	Elektrický prúd
I_b	[A]	Prúd bázy
I_c	[A]	Prúd kolektoru
K_v	[mol/l] ²	Iónový súčin vody
m	[-]	Hodnota sklonu sondy v kalibračnej rovnici
OH^-	[-]	Hydroxylový anión
R	[J*mol ⁻¹ *K ⁻¹]	Univerzálna plynová konštanta
R	[Ω]	Elektrický odpor
SiO_2	[-]	Oxid kremičitý
T	[K]	Absolútna teplota
U	[V]	Elektrické napätie
x	[V]	Hodnota napätia na výstupe zosilňovača
y	[pH]	Hodnota pH v kalibračnej rovnici
ΔE	[V]	Rozdiel potenciálov

ÚVOD

Pre rastlinné akvárium, ktoré sa dá prirovnať k vlastnému jedinečnému ekosystému, je potrebný vhodný prístup a sofistikovanosť. Na rozdiel od prírody, ktorá ekologickú rovnováhu a prosperitu udržiava prirodzene, v akváriu je túto rovnováhu potrebné udržiavať umele. Vzhľadom k tomu, že dosiahnutie prirodzeného kolobehu spotreby a vytvárania živín v akváriu je takmer nemožné, boli v priebehu rokov vymyslené rôzne metódy pre udržanie vitality rastlín a akvária umele.

Základom pre zdravý a úspešný rast rastlín v akváriu je niekoľko faktorov. V prvom rade sa jedná o dostatočnú biologickú filtráciu, rozpadom organických látok vzniká amoniak, ktorý nitrifikačné baktérie majú za úlohu odbúravať a premieňať na dusíkaté látky. Ďalej je nutné zabezpečiť dostatočný pohyb vody v celej nádrži, pre okysličeniu a rovnomerné rozloženie živín. Ďalším dôležitým faktorom je správny pomer medzi intenzitou a spektrom osvetlenia, živinami a oxidom uhličitým (CO_2).

Cieľom tejto bakalárskej práce je navrhnúť a zostaviť akváriový pH regulátor, ktorý je pri akváriách a náročných rastlinách veľmi žiaducim prístrojom. Pri rastlinných akváriách je potrebné dosiahnuť užívateľom nastavené a stabilné hodnoty CO_2 vo vodnom stĺpci. Práca sa bude venovať zostrojeniu pH regulátora, ktorý bude podľa zadaných hodnôt kontinuálne udržiavať vhodnú koncentráciu CO_2 .

Práca sa snaží oboznámiť čitateľa so základnými informáciami o problematike merania a regulácie pH, súčasťou bude úvod do regulácie v akvaristike a popis metód merania CO_2 a pH faktoru.

Obsahom tejto bakalárskej práce je rozbor všetkých nutných prvkov regulátora, vytvorenie vhodného hardvéru a zároveň vytvorenie softvéru pH regulátora. Záverom práce bude hotová DPS výrobku a výsledky testov regulátora.

1 TEORETICKÝ ÚVOD

V úvode práce sa budeme venovať spojitosti medzi množstvom CO_2 vo vodnom stĺpci a pH, opisu samotného pH faktoru a metódami jeho merania. Pri stavbe pH regulátora, bolo potrebné urobiť rozhodnutie, pomocou ktorého technicky dostupného spôsobu bude regulátor zostavený. Tomuto rozhodnutiu predchádzal prieskum používaných a dostupných elektronických systémov, ktoré sa venujú riadeniu a regulácii. Taktiež bolo potrebné zohľadniť požadované parametre, ako sú jednoduchosť, prehľadnosť a v neposlednom rade presnosť vybraného systému. Na záver bude vybratá najvhodnejšia metóda pre realizáciu pH regulátora na použitie v zvolenom prostredí, teda v akváriu.

1.1 Obsah CO_2 vo vode a spôsoby jeho merania

Ako už bolo na začiatku práce spomenuté, v rastlinnom akváriu je mimo iné faktory dôležité udržať správnu koncentráciu rozptýleného oxidu uhličitého (ďalej CO_2) vo vodnom stĺpci. Rastliny pri svojom raste spotrebávajú uhlík, ktorý je v CO_2 obsiahnutý, a za pomoci svetla produkujú kyslík. Tento proces sa nazýva asimilácia rastlín.

Plynný oxid uhličitý rozpustený vo vode tvorí slabú kyselinu uhličitú, následkom toho sa voda stáva kyslejšou a tým sa znižuje jej hodnota pH faktoru. Potrebná koncentrácia CO_2 vo vode sa udáva v jednotkách mg/l. Meranie tejto koncentrácie nie je možné riešiť priamo, je teda nutné zvoliť inú metódu merania [1].

1.1.1 *Permanentné meranie dropcheckerom*

Dropchecker (viď Obr. 1.1) je najjednoduchšie riešenie pre meranie obsahu CO_2 v akváriu. Jedná sa o sklenenú nádobu, do ktorej sa aplikuje indikačná kvapalina. Predstavuje kolorimetrické meranie a jeho funkcia je založená na princípe látkovej výmeny. Pri ponorení dropcheckeru do vody vzniká medzi aplikovaným roztokom a vodou vzduchová bublina, cez túto bublinu sa následne uvoľňuje plynné CO_2 z vody, a to sa vstrebáva do roztoku. Indikačná kvapalina reaguje na koncentráciu CO_2 zmenou svojho zafarbenia, modrá značí malú hodnotu, zelená značí optimálnu hodnotu a žltá vysokú hodnotu CO_2 .

Výhodou kolorimetrického merania je jednoduchosť, a taktiež možnosť priebežnej kontroly pri pohľade na nádrž, na druhej strane z princípu fungovania dropcheckeru plynie nevýhoda veľkej latencie merania [2].



Obr. 1.1 Ukážka sklenenej banky dropcheckeru

1.1.2 Meranie pomocou pH

Pokiaľ dokážeme zistiť uhličitanovú tvrdosť vody, či už od dodávateľa, alebo pomocou bežne dostupných kvapkových testov, máme možnosť využiť Tillmanovu tabuľku (Tab. 1.1). Tabuľka určuje prepočet medzi koncentráciou CO₂ v mg/l a pH, v závislosti na uhličitanovej tvrdosti. Optimálne hodnoty CO₂ v tabuľke sú vyznačené zelenou farbou, nízke hodnoty modrou a vysoké hodnoty žltou farbou [3,4].

Tab. 1.1 Tillmanova tabuľka[3]

dKH\pH	6	6,2	6,4	6,6	6,7	6,8	6,9	7	7,1	7,2	7,3	7,4	7,6	7,8	8
0,5	15	9,5	6	3,8	3	2,4	1,9	1,5	1,2	0,9	0,75	0,6	0,4	0,23	0,15
1	30	19	12	7,5	6	4,8	3,8	3	2,4	1,9	1,5	1,2	0,8	0,5	0,3
1,5	45	28	18	11	9	7,1	5,7	4,5	3,5	2,8	2,3	1,8	1,1	0,7	0,45
2	67	42	27	17	13	11	8,4	6,7	5,3	4,2	3,3	2,6	1,7	1	0,7
2,5	75	47	30	19	15	12	9,4	7,5	6	4,7	3,8	3	1,9	1,2	0,8
3	90	57	36	23	18	14	11	9	7,1	5,7	4,5	3,6	2,3	1,4	0,9
3,5	105	68	42	26	21	17	13	11	8,3	6,6	5,2	4,2	2,6	1,7	1
4	133	84	53	33	27	21	17	13	11	8,9	7,6	5,7	3	1,9	1,2
5	150	95	60	38	30	24	19	15	12	9,5	7,5	6	3,8	2,4	1,5
6	193	121	77	48	38	30	24	19	15	12	10	8	4,9	2,9	1,8
8	257	162	102	65	51	41	32	26	20	16	13	10	6	3,8	2,4
10	321	203	128	81	64	51	40	32	25	20	16	13	8	5	3
12	386	244	154	97	77	61	49	39	31	24	19	15	10	6	4
14	450	284	179	113	90	71	57	45	36	28	22	18	11	7	4
16	500	315	199	125	100	79	63	50	40	31	25	20	12	8	5
18	562	355	224	141	112	89	71	56	45	35	28	22	14	9	6

1.2 pH faktor

Je to Vodíkový exponent , vyjadruje číslo, ktoré udáva mieru kyslosti alebo zásaditosti vodného roztoku, označuje sa pH (potential of hydrogen). Stupnica nadobúda hodnoty od 0 po 14 , kde hodnoty pH 0 až 7 označujú kyslé roztoky a pH 7 až 14 zásadité roztoky.

Predstavuje koncentráciu oxóniových iónov (H_3O^+), pH hodnota je definovaná ako záporný dekadický logaritmus koncentrácie týchto iónov[9].

Všeobecne platí rovnica (1.1)[9]

$$pH = -\log(c_{H^+}) \quad (1.1)$$

kde c_{H^+} značí aktivitu iónu H_3O^+ .

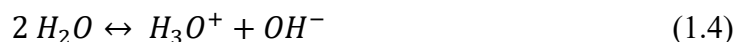
V praxi je teda jednoduchšie vyjadrovať koncentráciu týchto iónov v podobe čísel od 0 až po 14. V prípade že by táto definícia neexistovala, museli by sme koncentráciu vyjadriť napríklad v podobe vzťahu (1.2)[7].

$$c_{H^+} = 3,6 * 10^{-7} \text{ mol} * \text{dm}^{-3} \quad (1.2)$$

Záporný logaritmus tohto čísla (teda pH) je 6,44 a predstavuje pochopiteľne prijateľnejšie zapísané číslo. Najväčšia a najmenšia hodnota stupnice pH súvisí s iónovým súčinom vody, ktorého hodnota pri teplote 25°C je daná vzťahom (1.3)

$$K_v = 10^{-14} \text{ mol}^2 * \text{dm}^{-6} \quad (1.3)$$

Je to konštanta, ktorá vyjadruje disociácie vody podľa reakcie (1.4)

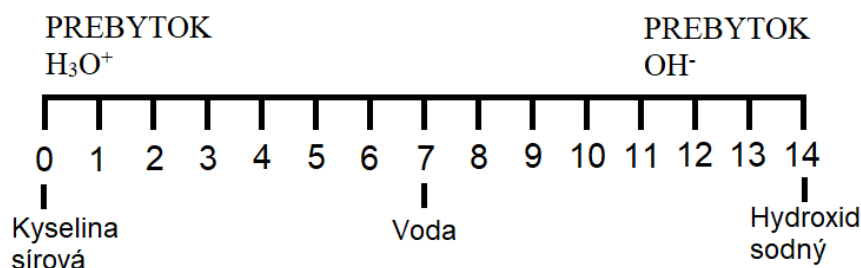


V neutrálnom vodnom roztoku je koncentrácia oboch iónov rovnaká (1.5)

$$c_{H^+} = 1 * 10^{-7} \text{ mol} * \text{dm}^{-3} \quad (1.5)$$

Záporný logaritmus čísla zo vzťahu (1.5) je rovný 7, a preto pH hodnota neutrálnych roztokov je rovná číslu 7. Roztoky s vyššou koncentráciou H_3O^+ iónov ako (1.5) sa nazývajú kyslé, ich pH je nižšie ako 7, roztoky s nižšou koncentráciou ako (1.5) sa nazývajú zásadité, majú teda vyššiu koncentráciu OH^- iónov.

Z uvedeného vyplýva, že čím je roztok kyslejší, tým je hodnota pH faktoru nižšia a naopak, čím je roztok zásaditejší, tým je hodnota pH faktoru vyššia (vid'. Obr. 1.2).



Obr. 1.2 Koncentrácia iónov v závislosti na pH hodnote[5]

V prírodnom prostredí sa v dôsledku neutralizačných reakcií obvykle nestretávame s extrémnymi hodnotami pH. Napríklad hodnotu pH vo vodných tokoch ovplyvňuje množstvo humínových kyselín, ktoré sa tvoria s nárastom odumierajúcich rastlín vo vode. Čím je ich množstvo väčšie, tým je voda kyslejšia [4,7].

1.3 Metódy merania pH faktoru

Existujú dve najpoužívanejšie metódy, ktorými dokážeme zmerať pH. Metódu merania volíme podľa požadovanej presnosti a spôsobu merania. Pre merania, kde nie je vyžadovaná vysoká presnosť a potrebujeme len orientačnú hodnotu pH, je vhodné zvoliť meranie pomocou indikátorových papierikov, alebo kvapkových acidobázických indikátorov. Pre dosiahnutie presnejších výsledkov, zvolíme inštrumentálnu metódu merania, pri ktorej je navyše potrebné vykonávať pravidelnú kalibráciu.

1.3.1 Acidobázické indikátory

Jedná sa o najpoužívanejšiu a zároveň najlacnejšiu metódu stanovenia pH hodnoty. Hlavné využitie má pre svoju nižšiu presnosť pri stanovení orientačnej hodnoty pH vodných roztokov. Princíp merania je založený na zmene zafarbenia indikátoru po pridaní do testovaného vodného roztoku. Meranú hodnotu určuje sám pozorovateľ, ktorý po sfarbení indikátoru porovnáva zmenu zafarbenia roztoku s farebnou ociachovanou predlohou (viď. Obr.1.3).



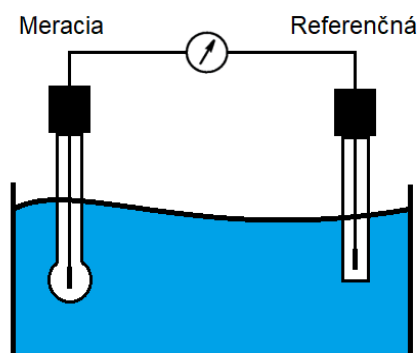
Obr. 1.3 Farebná škála pH stupnice[8]

Indikačné roztoky majú schopnosť meniť vnútorné usporiadanie väzieb v molekule v závislosti na pH prostredí. Táto zmena usporiadania sa prejaví zmenou farby indikačného roztoku. Pre úspešné meranie je nutné zmiešať definovaný objem vzorky s indikačnou kvapalinou, potom dochádza k neutralizácii vzorky. Súčasne s týmto chemickým javom, dochádza k zafarbeniu indikačného roztoku, farba vzorky odpovedá konkrétnej pH hodnote na priloženej škále. Najčastejšie používaný acidobázický indikátor je lakmus, extrahuje sa z istých druhov lišajníkov. Zmena farby lakmusu pri prechode z kyslého do zásaditého prostredia prebieha z červenej farby po modrú, v rozmedzí pH od 4,5 po 8,3 pri 25°C .

Meranie môže takisto prebiehať pomocou indikačného papierika, je to papier napustený lakmusovým odvarom ako indikačnou látkou. Pri ponorení papierika do testovanej kvapalnej vzorky dôjde k jeho zafarbeniu, ktoré odpovedá danému pH [5].

1.3.2 Potenciometrické meranie

Jedná sa o inštrumentálne meranie, najčastejšie realizované pomocou pH sondy. Základný prvok sondy potenciometrického merania je elektróda. Sondu tvoria dve samostatné elektródy, meracia a referenčná, ktoré spolu tvoria galvanický článok. Napätie tohto článku je úmerné meranej veličine. Meraciu elektródu môžeme nazvať taktiež indikačnou, jej potenciál je tvorený koncentráciou iónov H^+ v meranom roztoku. Druhá teda referenčná elektróda má konštantný elektrický potenciál. Podstatou potenciometrickej metódy merania je meranie elektrického potenciálu, ktorý vzniká medzi týmito dvoma elektródami (viď Obr. 1.4).



Obr. 1.4 Znáozornenie potenciometrickej metódy merania pH

Tento elektrický potenciál začne vznikať pri ponorení indikačnej elektródy do meraného roztoku. Záporne nabité elektróny, alebo kladné nabité jadrá, začnú prenikať do roztoku, potom sa zmení elektrická rovnováha a prebytok náboja na jednej strane elektródy spôsobí

vznik elektrického poľa. Začne vznikať rovnováha, ktorej zodpovedá rozdiel elektrického potenciálu sklenenej banky a meraného roztoku.

Nakoľko nie sme schopní zmerať absolútnu hodnotu vzniknutého potenciálu, výsledné pH sa meria voči referenčnej elektróde, platí teda vzťah (1.6)[9]

$$\Delta E = E_{ind} - E_{ref} \quad (1.6)$$

kde ΔE je rozdiel potenciálov, E_{ind} je potenciál meracej elektródy a E_{ref} potenciál referenčnej elektródy.

Veľkosť rozdielu elektrického potenciálu sklenenej banky a meraného roztoku je daná Nernstovou rovnicou, ktorá má tvar [6]

$$E = E_0 + 2,303 \frac{RT}{F} * \log(c_{H^+}) \quad (1.7)$$

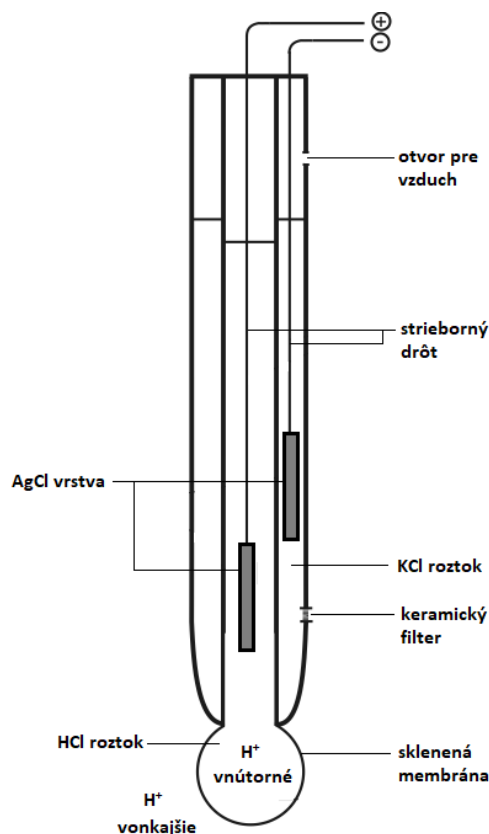
pričom E je merný potenciál, E_0 štandardný potenciál, R univerzálna plynová konštanta, T absolútna teplota, F Faradayova konštanta.

Najčastejšie používané meracie elektródy pre meranie pH sú iónovo-selektívne. Ich najdôležitejšiu súčasť tvorí semipermeabilná membrána oddeľujúca dva roztoky. Na tejto membráne vzniká elektrický potenciál, ktorý je daný prechodom iónov z roztoku s vyššou koncentráciou do roztoku s nižšou koncentráciou. Z dôvodu, že membrána je semipermeabilná, nosiče opačného náboja cez ňu nemôžu prejsť a vyrovnať tak rozdiel náboja. Na membráne je teda možné zistiť príslušný elektrický potenciál [9-11].

1.4 pH sonda so sklenenou elektródou

Typickým predstaviteľom je sklená elektróda citlivá na ióny H^+ . Elektróda sa skladá zo strieborného drôtika pokrytého vrstvou chloridu strieborného ($AgCl$), ktorý je ponorený v roztoku kyseliny chlorovodíkovej (HCl). Najčastejšie sa používa sklená elektróda v kombinácii s kalomelovou referenčnou elektródou. Sonda má aj pri dobrej izolácii vysoký vnútorný odpor (približne $10^9 \Omega$), z čoho plynú vysoké nároky na vyhodnocovaciu jednotku.

Hlavnou poruchovou veličinou je teplota, pričom závislosť elektródy na nej je lineárna. Sklená elektróda má širokú škálu aplikácií, dosahuje vysokú presnosť $\pm 0,01$ pH, má však obmedzený rozsah maximálne do pH 11. Životnosť elektródy je približne jeden rok a je citlivá na zmenu teploty.

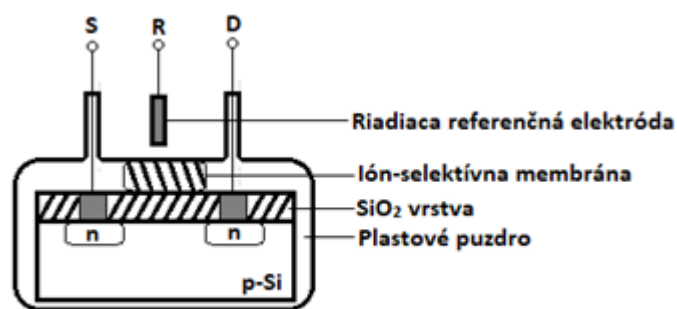


Obr. 1.5 Konštrukcia kombinovanej pH elektródy[12]

Nevýhody spojené s používaním dvoch samostatných elektród viedli k ich zlúčeniu do jednej, takzvanej kombinovanej elektródy (viď obr. 1.5). Postupom času bola vytvorená polymérovo-gélová elektróda, ktorá nahradila krehkú sklenú banku. Dosahuje však horšie výsledky ako klasická elektróda, presnosť sa pohybuje na úrovni $\pm 0,1$ pH, jej životnosť je približne pol roka a nie je určená na trvalé ponorenie [10-12].

1.5 pH sonda s ISFET senzorom

Pre spomenuté nevýhody sa začali vyvíjať polovodičové sondy, ich základ tvorí senzor ISFET. Základom senzoru je poľom riadený tranzistor MOSFET, ale medzi riadiacou elektródou a SiO_2 vrstvou je vložená iónovo-selektívna membrána. Aktivita iónov v roztoku ovplyvňuje veľkosť riadiaceho napätia, a tým sa mení aj veľkosť prúdu I_{DS} . Výhodou takéhoto snímača je, že nie je zo skla a vyžaduje len minimálnu údržbu, má však problémy s teplotou a driftom. Nevýhodou takejto sondy je aj niekoľko násobne vyššia obstarávacía cena [11].



Obr. 1.6 Štruktúra ISFET senzoru[11]

1.6 Kalibrácia sondy

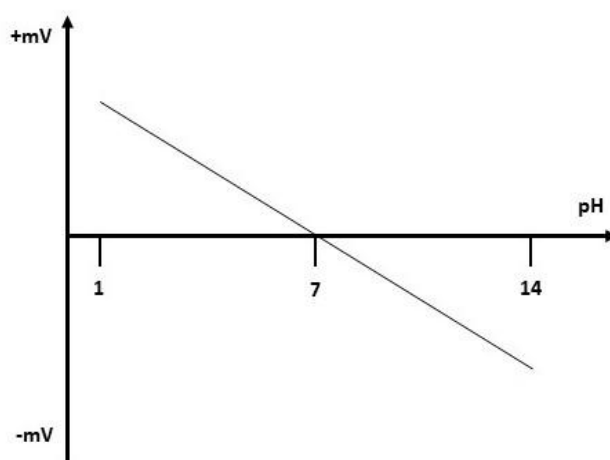
Aby sme dosiahli čo najvyššiu možnú presnosť merania, je pred meraním nutné vykonať kalibráciu sondy. V závislosti od použitia, je vhodné kalibráciu opakovať v pravidelných intervaloch. Najviac používaná kalibrácia je softvérová, vykonávaná vložением základných parametrov do softvéru pH metra.

Najčastejšie sa kalibrácia vykonáva v dvoch alebo troch bodoch, pomocou kalibračných práškov, ktoré slúžia na vytvorenie porovnávacích roztokov s presnou hodnotou pH.

Po dosadení konštánt do Nernstovej rovnice (1.8)[6]

$$E = E_0 + 2,303 \frac{8,314 \cdot 298,15}{96485} \cdot \log(c_{H^+}) = E_0 + 0,05916 \cdot \log(c_{H^+}) \quad (1.8)$$

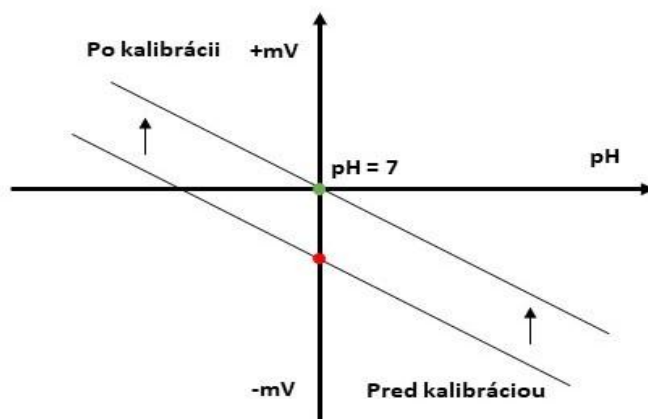
Vidíme, že zmena pH o jednu jednotku vyvolá rozdiel potenciálov o 59,16 mV, pri konštantnej teplote 25°C. Po odčítaní indikovaného a referenčného potenciálu dostávame pri hodnote $\text{pH} = 7$ napätie $U = 0\text{V}$ (viď Obr. 1.7).



Obr. 1.7 Graf závislosti generovaného napätia od pH hodnoty[6]

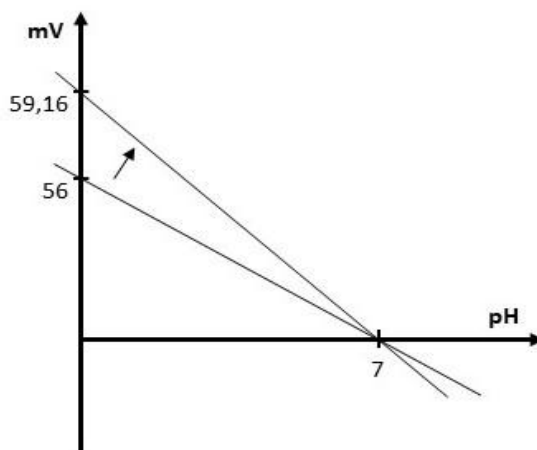
Takto sa určujú dva hlavné faktory sondy, ktoré nám slúžia k jej popisu:

- Asymetrický potenciál, krivka sa posunie paralelne k $\text{pH} = 7$, to znamená nastavenie nulového bodu – offsetu (viď obr. 1.8)



Obr. 1.8 Graf nastavenia nulového bodu sondy[6]

- Korekcia strmosti , elektronické pootočenie do $\text{pH} = 7$, pri hodnote 59,16 mV (viď obr. 1.9)



Obr. 1.9 Graf korekcie sklonu sondy[6]

Ako už bolo spomenuté, elektródy sú závislé na teplote, zároveň to môžeme vidieť aj vo vzťahu (1.7). Preto je pri aplikáciách s väčším teplotným rozsahom nutné túto závislosť vhodne kompenzovať. Teplotná kompenzácia nám umožňuje korigovať vplyv teploty na strmosť elektródy, konkrétne strmosti nám udáva tabuľka 1.2.

Tab. 1.2 Vplyv teploty na strmosť elektródy[13]

°C	mV/pH
0	54.2
25	59.2
50	64.1
75	69.1

Z tabuľky vyplýva, že teplotná závislosť sondy môže byť pri použití v akváriu zanedbaná. V nádrži sa totižto snažíme udržať teplotu konštantnú, vyskytuje sa zmena len okolo ± 1 °C, v dôsledku hysterezie ohrevu [6,13].

1.7 Riadenie v akvaristike

V nasledujúcej kapitole sú prebraté všetky dostupné možnosti riešenia regulácie. Sú tu rozobraté jednoduché nespojité možnosti riadenia, ale takisto zložitejšie programovateľné systémy. Po zohľadnení všetkých výhod a takisto nevýhod, bude vybratá vhodná metóda regulácie.

1.7.1 Spínacie hodiny

K riadeniu akvária je možné použiť jednoduché zásuvkové digitálne spínacie hodiny, ktoré svoju funkciu plnia spoľahlivo. Výhodou je možnosť nastavenia času s presnosťou na minútu, a taktiež záloha času pri výpadku elektrickej energie pomocou integrovanej batérie. Dajú sa využiť skoro vo všetkých prípadoch nespojitej regulácie, ako napríklad LED osvetlenie, dávkovanie CO₂, hnojenie a ohrev. Avšak pri regulácii viacerých zariadení týmto spôsobom, sa stáva systém neprehľadným [14].

1.7.2 Smart zásuvky

Podobne ako spínacie hodiny sa dajú použiť smart elektrické zásuvky, ktoré komunikujú cez rozhrania Wifi alebo Bluetooth. Ponúkajú napríklad možnosť nastavovania času zapnutia a vypnutia cez aplikácie v mobilných zariadeniach. Aplikácie bývajú prehľadné a jednoduché na nastavenie parametrov užívateľom.

Nevýhodou smart zásuviek je, že dokážu iba zapínať a vypínať dané zariadenia, a teda nemajú možnosť čítať parametre ako teplota alebo pH [14].

1.7.3 PLC systém

Riadenie na vyššej úrovni môžeme doceliť systémom PLC (programovateľný logický automat). PLC jednotky je možné programovať pomocou logických blokov, majú mnoho

funkcií a možnosť nastavenia rôznych spojitostí a podmienok. Na trhu existuje mnoho rôznych typov PLC jednotiek, najrozšírenejšie sú jednotky značky Siemens. Sú vybavené digitálnymi vstupmi a výstupmi, poprípadе analógovými vstupmi a výstupmi, ktoré prinášajú možnosť využiť ADC a DAC prevod. Spomenutý ADC prevod môže byť využitý napríklad na meranie a následné spracovanie teploty. Najdostupnejšie pre bežného užívateľa sú jednotky ako S7-1200, alebo Siemens LOGO!, ktoré môžu byť programované pomocou prostredia Siemens Step 7, pričom jednotlivé nástroje ako HMI panel a ďalšie sú integrované cez TIA portál. PLC jednotky ponúkajú veľkú rozšíriteľnosť modulov, tým pádom sa systém stáva univerzálnym pre rôzne potreby užívateľa.

Nevýhodou pri tomto riadení sa stáva vysoká obstarávacia cena zariadení [14].

1.7.4 Riadenie počítačom

Ďalšou možnosťou automatizácie v akvaristike je využitie klasického stolového počítača. Rozhranie pre komunikáciu s počítačom tvorí prevodník s mikroprocesorom. Celý proces riadenia tak zastrešuje počítač, procesor už len vykonáva dané príkazy ako zapni a vypni. V počítači sa dá napísať pomerne prehľadný program, ktorý bude pracovať s veľkou spoľahlivosťou. Tento koncept riadenia so sebou prináša viac negatíva ako pozitíva.

Vyššia obstarávacia cena, zároveň väčšia spotreba elektrickej energie, ktorá nie je zanedbateľná. Ďalej je to väčšia hlučnosť a nevyhnutná potreba väčšieho priestoru [14].

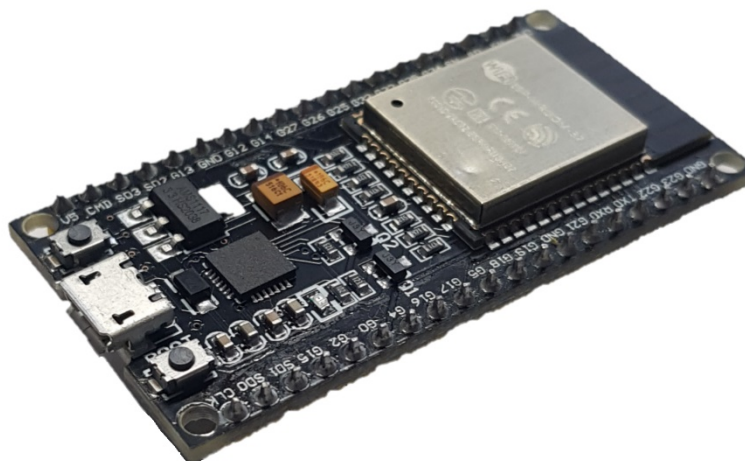
1.7.5 Riadenie mikrokontrolérom

Riadenie pomocou mikrokontrolérov je v dnešnej dobe veľmi rozšírené. Vďaka ich vysokej dostupnosti a nízkej cene, sú vhodné na riadenie behu širokého spektra aplikácií. Modul obsahujúci mikrokontrolér obsahuje riadiacu jednotku s množstvom základných periférií, a takisto port pre programovanie pomocou rôznych typov USB konektorov. Najrozšírenejšie programovacie moduly sú osadené mikrokontrolérmi ATmega328, prípadne ATmega2560, alebo ESP32. Hlavná funkcia mikrokontroléru spočíva v použití príslušajúceho hardwaru, ktorý užívateľ použije podľa svojich predstáv o funkcii daného celku.

Použitie mikrokontrolérov je veľmi rozsiahle, avšak technicky a časovo náročné. Z toho vyplývajú určité nevýhody, pokiaľ užívateľ nepremýšľa dopredu, napríklad pri vývoji dosky plošných spojov. V budúcnosti už nemusí byť možné rozšíriť funkciu daného systému [14].

1.8 Zvolená metóda pre realizáciu

Z tohto prehľadu vyplýva, že existuje mnoho možností ako danú reguláciu v akvaristike realizovať. Záleží už len na chovateľovi, čo od danej záľuby v chovateľstve očakáva, a aké má finančné možnosti. Každý z chovateľov má možnosť vybrať si podľa svojho uváženia a potreby, ktorá metóda riadenia je vyhovujúca jeho predstavám a požiadavkám.



Obr. 1.10 Mikrokontrolér ESP32 na vývojovej doske

Pri realizácii pH regulátora bolo potrebné zohľadniť všetky spomenuté aspekty v uvedenom prehľade. Regulátor je potrebné zostaviť finančne nenáročne, a takisto rozmerovo čo najkompaktnejšie. Dôležitá je tiež požadovaná výkonnosť vybraného systému, ktorá je dôležitá pri chode programu regulovania vybranej veličiny. Po teoretickom rozbere možností riadenia v akvaristike, bolo rozhodnuté, aké technické riešenie bude najvhodnejšie. Konečnou voľbou pri zostavení pH regulátora, je riadenie pomocou mikrokontroléru.

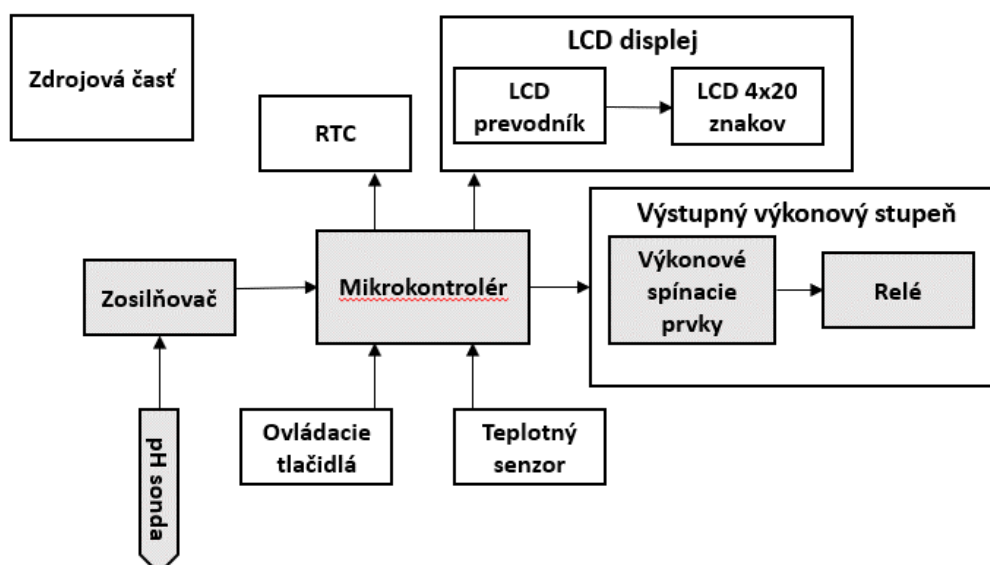
2 KONCEPT REGULÁTORA

Pri praktickom riešení koncepcie regulátora je nutné dbať na požiadavky vychádzajúce zo zadania práce, tak, aby boli naplnené predpoklady, ktoré boli spomenuté v teoretickom úvode. Pri návrhu konštrukcie pH regulátora pre akvaristické účely je potrebné zvážiť všetky možné dostupné technické riešenia. Z týchto možností je ďalej nutné urobiť optimálny výber prvkov, tak aby bolo vytvorené zariadenie plne funkčné, čo najviac presné, užívateľsky prijateľné a s čo možno najnižšou konečnou cenou.

2.1 Bloková schéma regulátora

Jadro pH regulátora je tvorené riadiacim systémom, ktorý je tvorený pomocou mikrokontroléru. Ku zvolenému mikrokontroléru sú potom ďalej pripojené ostatné periférie regulátora.

Ide o nasledujúce časti. Zosilňovač, ktorý má za úlohu zosilňovať výstupné napätie na konektore pH sondy. Aby bolo v budúcnosti dosiahnuté viacstranné využitie regulátora, v koncepcii návrhu je zahrnutý taktiež vstup teplotného senzoru. Ďalej vhodne prispôbené výstupy, ktoré budú regulovať priradenú veličinu. Spínacím prvkom týchto výstupov musí byť vhodne zvolené relé, alebo stykač. Predovšetkým budú slúžiť pre spínanie elektromagnetického ventilu tlakovej fľaše s plynným CO₂, ďalej napríklad pre ovládanie napájania ohrevu a svetla.



Obr. 2.1 Bloková schéma pH regulátora

Nachádza sa tu tiež užívateľské rozhranie, tvorené LCD displejom s I²C prevodníkom a ovládacími tlačidlami. Poslednou perifériou je obvod reálneho času, pomocou ktorého bude vytýčený čas regulácie pH, poprípade spínanie osvetlenia nádrže.

V blokovej schéme (viď. Obr. 2.1) sú znázornené všetky časti regulátora, sivé bloky označujú hlavný reťazec, ktorý tvorí zadanie práce. Tento reťazec predstavuje časti, ktoré sú potrebné pre meranie a reguláciu pH veličiny. Ostatné bloky (biele) sú pomocné, slúžia k lepšej manipulácii a obsluhu zariadenia. Napájací zdroj zariadenia tvorí samostatný blok, napájanie všetkých prvkov je tvorené jednosmerným napätím (VDC). Podrobnejší popis jednotlivých blokov sa nachádza v nasledujúcich kapitolách. K jednotlivým častiam regulátora sú taktiež priložené samostatné schémy, kreslené pomocou programu Eagle, značenie schém je štandardne v anglickom jazyku.

2.2 pH sonda

Pre meranie pH bude použitá sonda E-201. Základ sondy tvoria dve elektródy, meracia a referenčná, ktoré spolu tvoria kombinovanú elektródu. Referenčná elektróda je vyrobená zo strieborného drôtu obaleného v chloride striebornom. Telo sondy je z plastu a výstup tvorí koaxiálny kábel ukončený BNC konektorom. Merací rozsah sa pohybuje na celej škále pH stupnice, je možné merať hodnoty od 0 do 14 pH. Sonda je schopná pracovať v teplotnom rozsahu 0 až 60 °C, pri použití v akváriu teplota častokrát nepresahuje hranicu 30 °C, rozsah je teda plne postačujúci. Niektoré zo základných parametrov zvolenej sondy sú uvedené v tabuľke 2.1[15].

Tab. 2.1 Parametre sondy

Základné parametre sondy E-201	
merací rozsah :	0-14 pH
teplotný rozsah :	0 - 60 °C
nulový potenciál :	7 ± 0.5 pH (25 °C)
vstupná impedancia :	≤ 250 MΩ
čas odozvy :	≤ 5 sek.
čas stability :	≤ 1 min.

Vyššia teplota takisto znižuje životnosť sondy, pri akváriovej teplote sa pohybuje životnosť na úrovni dvanásť mesiacov. Čas odozvy sondy po vložení do meranej tekutiny činí približne päť sekúnd, meranie sa celkovo stabilizuje zhruba do jednej minúty [15].



Obr. 2.2 Použitá sonda E-201

2.3 Zosilňovač

Pre meranie pH je najvhodnejšia potenciometrická metóda, ktorá disponuje veľkou vysokou vstupnou impedanciou. Z tohto dôvodu je potrebné vo vstupnej časti umiestniť vhodný zosilňovač. Z predchádzajúcich kapitol môžeme usúdiť, že sonda sa chová ako zdroj napätia, hodnota napätia sa pohybuje okolo 59 mV/pH do kladných a záporných hodnôt od neutrálneho pH = 7. Pri použití regulátora v bežnom prostredí, kde hodnoty neprekračujú medze pH 5 - 8, môžeme zanedbať teplotné a ďalšie nesymetrie napätia na pH sonde. Výstupná hodnota impedancie sondy má vysokú hodnotu, pohybujúcu sa na hodnote okolo 10^7 - $10^9 \Omega$, je nutné tomu vstupnú časť pH regulátora prispôbiť.

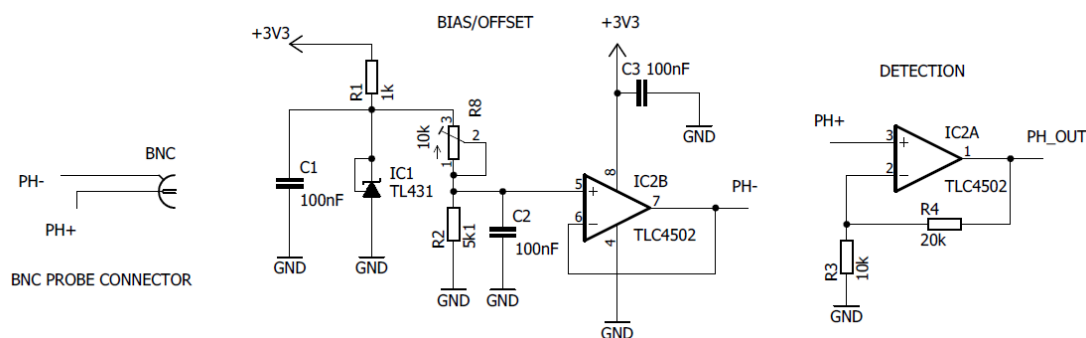
Zosilnenie nameranej hodnoty sa realizuje pomocou zosilňovačov. Vybraté zosilňovače musia mať rovnako veľký, v lepšom prípade o rád vyšší vstupný odpor ako použitá sonda. Ak by sme túto požiadavku nezohľadnili, môže dôjsť k ovplyvnenia vzniknutého napätia na výstupe sondy, čo spôsobí skreslenie, ktoré má za následok chybu merania. Na trhu existuje množstvo rôznych vhodných operačných zosilňovačov (ďalej OZ) pre dané použitie. Pre účel zosilnenia napätia z pH sondy je potrebné dbať zvýšenú pozornosť pri výbere OZ, ktorý musí disponovať požadovaným veľmi vysokým vstupným odporom.

Tento OZ musí byť zapojený tak, aby bolo možné nastaviť referenčnú úroveň napätia (offset). Táto referenčná úroveň sa používa, aby pri meraní nízkeho pH, ktoré tvorí zápornú hodnotu napätia na sonde, bol napäťový výstup zosilňovača kladný. Výstup pH sondy tvorí už spomenutý kábel s BNC konektorom, navyše má sonda veľmi vysoký odpor, tomu je

potrebné prispôbiť ďalej konštrukciu pri návrhu dosky plošných spojov. Podľa teórie zosilňovania veľmi veľkých impedancií, je nutné umiestniť OZ čo najbližšie ku BNC konektoru, najlepšie tak, aby bolo možné priamo prispájkovať nožičky konektoru na príslušný pin vstupu OZ. Tento úsek by nemal byť rušený okolitými vodivými cestami alebo súčiastkami, ideálne by mal byť ďalej celý zosilňovač odtienený [16].

2.3.1 Návrh zapojenia zosilňovača

Pri výbere operačného zosilňovača boli zvážené všetky dostupné možnosti, pomocou ktorých sa tento zosilňovač dá zrealizovať. Je potrebné zvoliť zapojenie, ktoré naplní požiadavky určené pre meranie signálu z pH sondy, čo znamená, že OZ disponuje veľmi vysokým vstupným odporom. Ďalej je nutné zohľadniť skutočnosť, že OZ v značnej miere ovplyvňuje meranie. Zároveň zosilňovač musí umožňovať nastavenie offsetu, ktorý sa hodí pre nasledujúce spracovanie nameranej a zosilnenej veličiny. Bolo teda zvolené zapojenie s jedným operačným zosilňovačom napájaným nesymetrickým napätím 3,3 V [17].



Obr. 2.3 Schéma zapojenia zosilňovača[17]

Hlavným prvkom zosilňovača zvoleným s ohľadom na požadované parametre je operačný zosilňovač IC2. Jedná sa o veľmi presný dvojité OZ typu TLC4502 od výrobcu Texas Instruments, má vnútornú štruktúru CMOS a nepotrebuje symetrické napájanie. Použitý zosilňovač má vysoký vstupný odpor $10^{12} \Omega$ a vstupný prúd činí hodnotu 1 pA. Sonda má spravidla už spomenutý odpor v rozmedzí od 10^7 - $10^9 \Omega$, vybraný zosilňovač je teda ideálny pre využitie meraní pH veličiny.

Prvá časť zosilňovača IC2A má za úlohu zosilniť signál pH sondy, do zápornej spätnej väzby má zaradený odpor R4, tento odpor určuje výsledné zosilnenie zosilňovača. Je nutné ho voliť tak, aby zosilnenie nebolo príliš veľké, a aby meraný signál OZ príliš neskresľoval. Druhá časť zosilňovača IC2B je zapojená ako napäťový sledovač. Táto časť má za úlohu posunúť úroveň napätia výstupu, z dôvodu, aby pri hodnote pH = 7 nebola hodnota nulová.

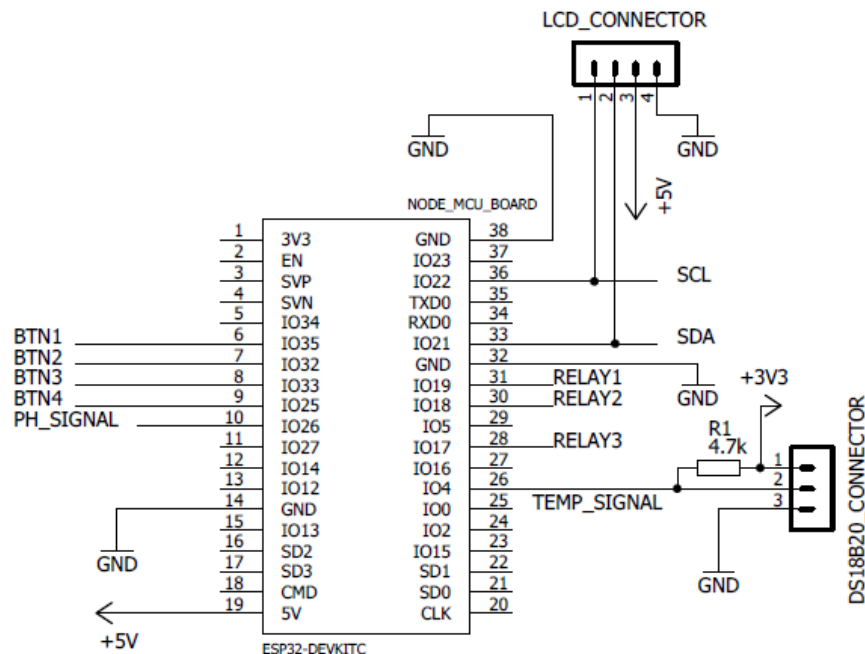
To je dosiahnuté pomocou referenčnej diódy TL431, zapojenej tak, aby poskytovala 2,5V referenčné napätie. Napäťový delič zložený z R8 a R2, ktorý je tvorený viacotáčkovým trimrom a pevným rezistorom, následne poskytne toto referenčné napätie OZ. Tento delič slúži na nastavenie hodnoty spomenutého napätia, bude využitý pri oživovaní a základnej kalibrácii zariadenia [17,18].

2.4 Riadiaca časť – mikrokontrolér

Kvôli pohodliu bola ako riadiaca časť celého pH regulátora zvolená vývojová doska s mikrokontrolérom ESP32 navrhnutá firmou ESPRESSIF. Modul používa dvojjadrový procesor, tvoria ho dve 32 bitové jadrá Xtensa LX6. Jadrá sú taktované na 80 MHz s možnosťou pretaktovania až na 240 MHz (v závislosti od verzie). Jedno z jadier zabezpečuje WiFi komunikáciu, druhé sa stará o beh užívateľského programu.

Najdôležitejšími vlastnosťami je prítomnosť vysielacích-prijímacích obvodov 2,4GHz, realizujúcich komunikáciu v štandarde WiFi (s rýchlosťou až 150Mbps), ako aj v štandarde Bluetooth (BT), v klasickej ako aj v energeticky úspornej BLE verzii. Z konštrukcie modulu plynie výhoda jednoduchého programovania pomocou implementovaného USB mini konektora. Doska obsahuje stabilizátor napätia AMS1117 na 3,3 V, a taktiež prevodník komunikácie USB-UART, ktorý tvorí čip CP2102. Týmto modulom sa predišlo problému s nedostatkom miesta, ktorý by pri zložitejšom programe a menšom mikrokontroléri mohol nastať.

Vybraný mikrokontrolér disponuje programovou pamäťou typu FLASH o veľkosti 4 MB, dátovou pamäťou typu SRAM o veľkosti 520 kB, a vstavanými mechanizmami na ochranu dát. Má 34 univerzálnych digitálnych vstupov/výstupov (GPIO), ktoré môžu plniť funkcie spojené s integrovanými blokmi ako: 12-bitový, 18-vstupový prevodník ADC, dva 8-bitové prevodníky DAC a 10 dotykových snímačov. Obvod ponúka obsluhu populárnych rozhraní ako SPI, I²C, I²S, UART, IrDA a ďalšie. Funkčnosť v rámci technológie ultra-low-power, umožňuje prácu pri veľmi nízkej spotrebe energie. Všetky spomenuté parametre predurčujú zvolený mikrokontrolér ako veľmi vhodné riešenie pre pH regulátor [19].



Obr. 2.4 Schéma zapojenia mikrokontroléra

K mikrokontroléru sú pripojené nasledujúce časti – vstupná meracia časť, teplotný senzor, výstupná spínacia časť, obvod reálneho času a užívateľské rozhranie. Toto rozhranie pozostáva z ovládacích tlačidiel a LCD displeja.

2.4.1 Softvérové vybavenie

Pre dosiahnutie vysokej kvality merania a regulácie zvolenej veličiny je potrebné nielen použitie prvotriednych meracích a obslužných obvodov regulátora, ale taktiež rovnako kvalitné softvérové riešenie merania a regulácie. Riadiaci program musí byť schopný zmerať a spracovať nameraný signál. Hodnota nameraného signálu musí byť stála, bez odchýlok spôsobenými rušeniami a ďalšími negatívnymi faktormi. Ďalšou dôležitou úlohou riadiaceho programu je regulácia regulovanej veličiny podľa presne nastavenej hodnoty užívateľom.

Takisto musí byť softvérové vybavenie užívateľsky prívetivé, vhodnou alternatívou je vytvorenie štruktúrovaného a prehľadného menu. Pred začiatkom vývoju riadiaceho programu regulátora bolo potrebné uvážiť, aké dostupné možnosti programovania mikrokontrolérov sú momentálne na trhu dostupné. Jedná sa o programovací jazyk a programátorské prostredie, ktoré bude na vývoj použité. Použitá alternatíva a vývoj samotného programu budú rozobraté v ďalších kapitolách tejto práce.

2.5 Výstupný výkonový stupeň

Ako bolo už viackrát spomenuté, výstup pH regulátora je nespojitý. Konštrukcia regulátora bude obsahovať tri reléové výstupy, takto dosiahne navrhnutý koncept väčšiu mieru využiteľnosti, ak sa užívateľ rozhodne jeho použitie rozšíriť. Regulácia množstva CO₂ je vykonávaná spínaním elektromagnetického ventilu tlakovej fľaše, ventil má dve polohy: otvorený a zatvorený.

Ďalšie periférie je nutné regulovať spínaním ich napájania, teda sieťového napätia. Aby bolo dosiahnuté spínanie rovnakého napätia na všetkých výstupoch, regulácia množstva CO₂ v nádrži je vykonávaná elektromagnetickým ventilom na napätie 230 VAC. Ventil má pri takomto napájaní veľmi nízky odber prúdu približne 27 mA, minimálne sa zahrieva a je ideálny pre predĺženie životnosti použitého spínacieho prvku. Pre ovládanie týchto výstupov pomocou mikrokontroléru, je potrebné tomuto požiadavku prispôbiť ich návrh.

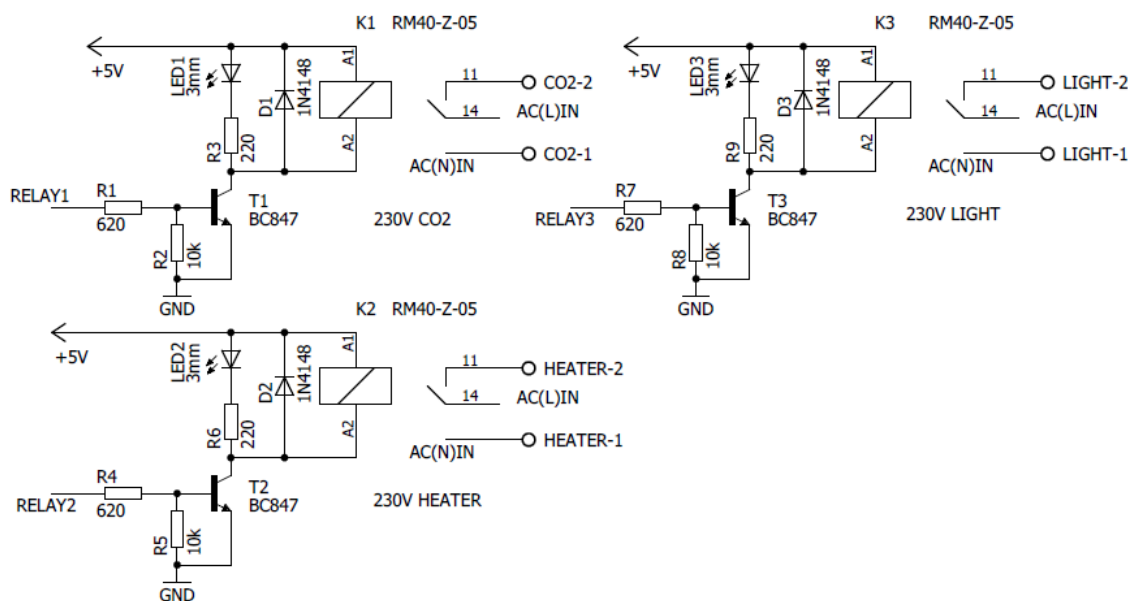
Riešenie tohto problému môže byť viac. Napríklad je možné priamo ovládať výstupom cievku relé. Tu však vzniká problém preťažovania a možného poškodenia výstupu mikrokontroléru.

2.5.1 Návrh zapojenia výkonového stupňa

Pri návrhu pH regulátora bolo použité druhé riešenie, kde je cievka elektromagnetického relé spínaná pomocou tranzistoru. Spínanie relé nemôže byť realizované priamo výstupom mikrokontroléru, keďže sú výstupy dimenzované na obmedzený prúd pri určitom napätí. Pri ESP32 predstavujú maximálne výstupné hodnoty pinov napätie 3,6 V a prúd 40 mA [19].

Vzhľadom k potrebe napájania ostatných periférii napätím 5 V, bolo rozhodnuté, že bude použité relé s cievkou na napätie 5 V. Pre zosilnenie zvoleného výstupného pinu mikrokontroléru je použitý tranzistor BC847 zapojený so spoločným emitorom. Báza je pomocou 10 k Ω odporu pripojená na zem, tento odpor má zabezpečiť spoľahlivé rozopnutie tranzistoru. V zapojení bolo nutné vypočítať hodnotu bázového odporu tak, aby tranzistor pracoval v režime saturácie.

Podľa vstupných a výstupných charakteristík tranzistoru zistených z katalógového listu [20], bola vypočítaná hodnota bázových odporov $R_{(1,4,7)} = 620 \Omega$. Pri tejto hodnote odporu bude tiecť do bázy tranzistoru prúd $I_b = 5,3 \text{ mA}$ a tranzistor bude v saturácii pri prúde kolektoru $I_c = 100 \text{ mA}$, čo je dostačujúce pre väčšinu použiteľných relé. Pre splnenie požiadaviek regulátora bolo vybraté relé RM40-Z-05.

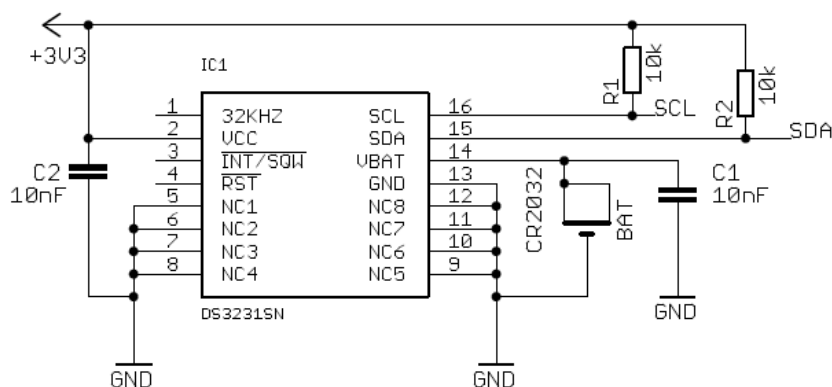


Obr. 2.5 Schéma zapojenia výstupnej výkonovej časti

Odpor cievky relé má 125Ω , je konštruovaná na napätie 5 V a jej odber činí 40 mA [21]. Relé má doplnenú paralelne s cievkou ochrannú diódu, takisto je v obvode doplnená LED dióda pre indikáciu zopnutého stavu príslušného relé.

2.6 RTC obvod

Z dôvodu vymedzenia doby regulácie, je do návrhu pH regulátora zaradený obvod reálneho času, ktorý bude podľa nastavenia túto dobu zaisťovať. Pre tento účel bol zvolený integrovaný obvod DS3231SN s napájacím napätím maximálne 5,5 V. Tvorí ho integrovaný oscilátor s teplotnou kompenzáciou, nie je teda nutné do návrhu zaradiť kryštál, tým sa zvyšuje dlhodobá presnosť času. S mikrokontrolérom bude obvod reálneho času komunikovať pomocou I²C zbernice, takisto ako prevodník LCD displeja, pripojením vodičov SCL a SDA [22].

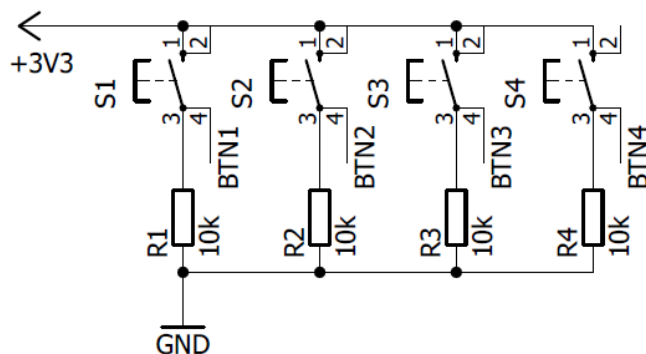


Obr. 2.6 Schéma zapojenia RTC obvodu[22]

V prípade výpadku napájania je meranie času zabezpečené pomocou batérie pripojenej na batériový vstup obvodu, tento vstup obmedzuje vybíjanie batérie iba pre potreby obvodu a znemožňuje jej vybíjanie ďalšími perifériami [22].

2.7 Ovládacie tlačidlá

K mikrokontroléru sú pripojené celkovo štyri tlačidlá, montáž tlačidiel je v prevedení priamo do DPS. Dve tlačidlá zastávajú funkciu plus a mínus, slúžia na orientáciu v menu a nastavovanie požadovaných hodnôt regulátora. Ďalšie dve tlačidlá majú funkciu potvrdenia a návratu. Logická úroveň 0 všetkých tlačidiel je realizovaná pomocou externých „pull-down“ rezistorov. Vstupné piny zvoleného mikrokontroléru majú maximálne napätie 3.6 V, obvod tlačidiel je preto napájaný napätím 3.3 V.

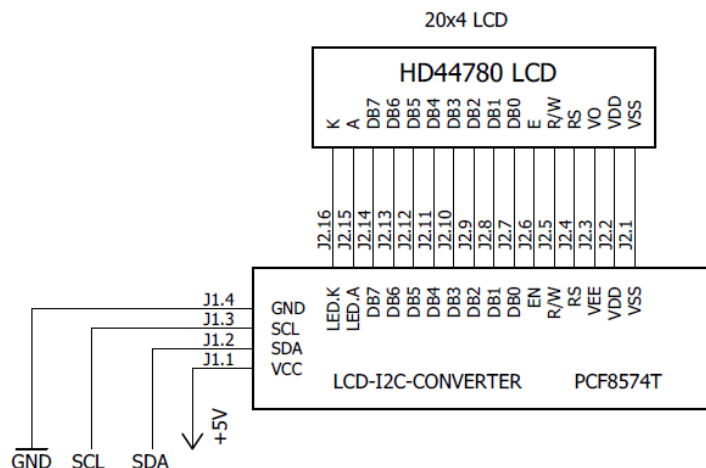


Obr. 2.7 Schéma zapojenia ovládacích tlačidiel

2.8 LCD displej

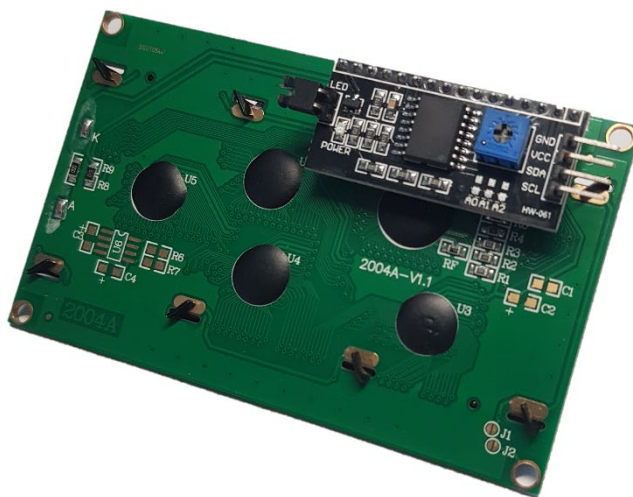
S dôrazom na jednoduchosť a kvalitu zobrazenia, bol zvolený alfanumerický displej RC2004A-BIW-ESX, ktorý disponuje štyrmi riadkami pri dvadsiatich znakoch na riadok. Zvolený displej obsahuje taktiež modré podsvietenie, ktoré zabezpečuje lepšiu čitateľnosť vypísaných údajov. Ďalej je vybavený integrovaným radičom ST7066U, ktorý je kompatibilný s radičom HD44780.

Komunikácia displeju s mikrokontrolérom môže prebiehať viacerými spôsobmi. Jedným z možných spôsobov je pripojenie LCD pomocou dvanástich vodičov, šesť vodičov zabezpečuje dátový prenos, ďalších šesť napájanie LCD a podsvietenia. Tento spôsob je však zbytočne zložitý, a navyše ubera množstvo použiteľných pinov mikokontroléru. Ďalším spôsobom je možnosť využiť hotový I²C prevodník s čipom PCF8574.



Obr. 2.8 Schéma zapojenia LCD displeja

Pri tomto spôsobe zapojenia LCD sú potrebné len štyri vodiče. Dva vodiče tvoria napájanie 5V a GND, ďalšie dva vodiče SCL a SDA tvoria I²C zbernicu. Základná adresa prevodníka je 0x20, pomocou osadenia nulových odporov na prepojky A0-A2 sa dá adresa jednoducho zmeniť. Výhodou je tiež osadený trimer, ktorý slúži na reguláciu jasú podsvietenia displeja [23].

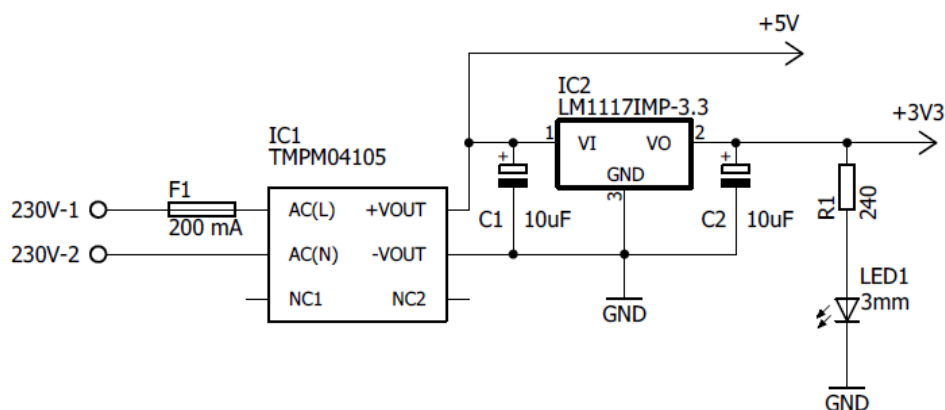


Obr. 2.9 Fotografia osadeného I²C prevodníka na LCD displeji

2.9 Zdrojová časť

Z dôvodu spínania výstupnej časti pomocou sieťového napätia 230 VAC, je toto napätie privedené priamo na DPS. Napájanie periférii regulátora je tvorené napätiami 5V a 3,3V, preto boli uvažované viaceré možnosti spracovanie sieťového napätia. Jednou

z možností je použitie stabilizovaného zdroja, kde pomocou transformátora transformujeme sieťové napätie na nižšiu hodnotu. Následne je usmernené graetzovým mostíkom a filtrované kondenzátorom. Ďalej je potrebné lineárnym stabilizátorom typu LM7805 upraviť napätie na požadovaných 5 V. Tento spôsob však vyžaduje viac priestoru na DPS, navyše vznikajúce tepelné straty na stabilizátore znižujú jeho účinnosť.



Obr. 2.10 Schéma zapojenia zdrojovej časti

Ďalšou možnosťou je použitie AC/DC spínaného zdroja. Ideálnou voľbou je plne zapuzdrený model TMPM04105 od výrobcu Traco Power. Má veľmi kompaktné rozmery, disponuje ochranou proti skratu a preťaženiu, výhodou je aj montáž zdroja priamo do DPS. Napájacie napätie tohto modelu je univerzálne, pohybuje sa v rozmedzí 90 – 264 VAC. Výstupné napätie je 5 V, zdroj dokáže dodať maximálne prúd 800 mA, čo je pre použitie v pH regulátore plne dostačujúce.

Za zdrojom je zaradený stabilizátor s nízkym úbytkom napätia LM1117IMP-3.3, tento stabilizátor má za úlohu znížiť napätie pre potrebu vybraných periférií regulátora na 3,3 V. Ako ochranný prvok je na primárnej strane umiestnená 200 mA poistka. Poslednou časťou je indikácia napájania DPS tvorená indikačnou LED [24].

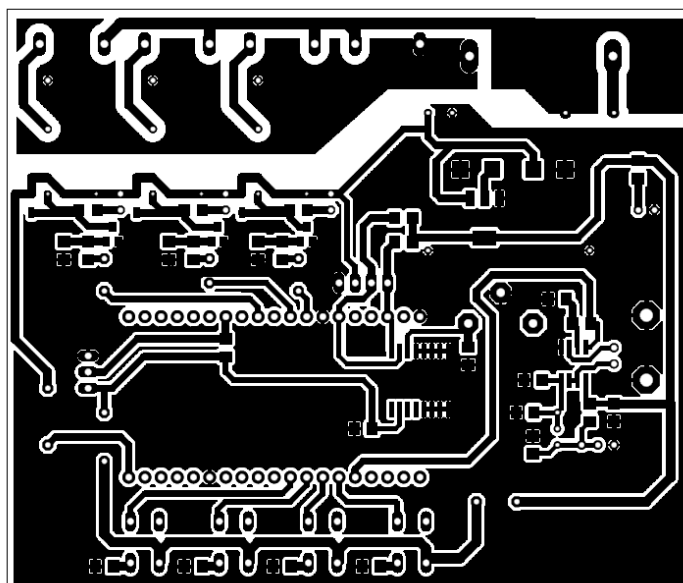
3 ZOSTAVENIE PH REGULÁTORA

Po vytvorení konceptu regulátora a navrhnutí všetkých príslušných obvodov nasledovalo nakreslenie celkovej schémy pH regulátora. Z celkovej schémy bola vytvorená doska plošných spojov s prislúchajúcim osadzovacím plánom. Ďalej bolo navrhnuté softvérové riešenie pre spracovanie pH signálu, reguláciu pH signálu, kalibráciu sondy a užívateľské prostredie v podobe menu.

3.1 Návrh dosky plošných spojov

Celková schéma zariadenia vo verzii A3 sa nachádza na priloženej digitálnej prílohe. Vstupy alebo výstupy mikrokontroléra v tejto schéme sú ukončené názvami. Tieto názvy odkazujú na konkrétne pripojenia, takto sa stala celková schéma prehľadnou a jednoduchou.

Z tejto schémy bola navrhovaná doska plošných spojov. Na začiatku návrhu DPS boli zvažované viaceré možnosti koncepcie. Jednou z možností je navrhnutie samostatných dosiek periférií, ktoré by sa zasúvali do riadiacej dosky pomocou päťíc. Pri tomto spôsobe je výhodou možnosť ľahko upravovať prípadné chybné návrhy obvodov. Nevýhodou tu je vznik problémov tvorených prechodovým odporom kontaktov päťíc, takisto by bola výsledná doska celkovo väčších rozmerov.

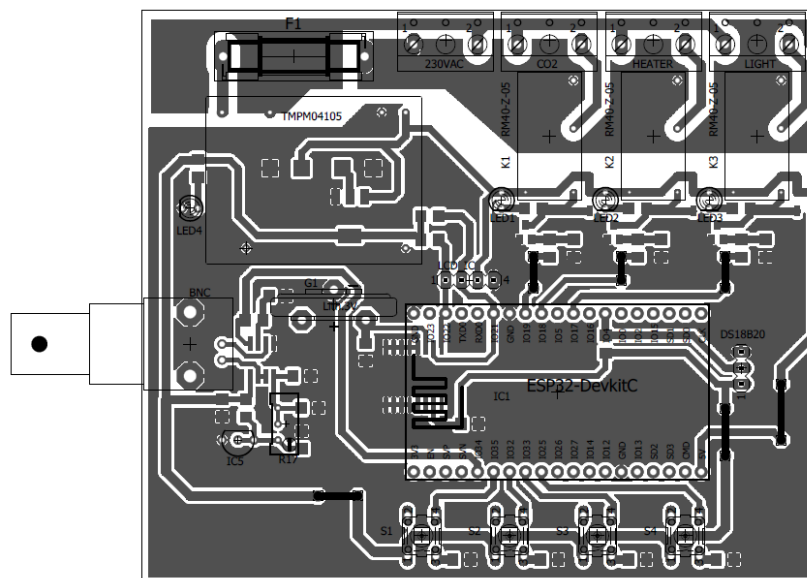


Obr. 3.1 Návrh DPS pH regulátora

Pre zachovanie čo najmenších rozmerov DPS je navrhnutá jediná doska, ktorá obsahuje všetky periférie. Väčšina použitých súčiastok je v puzdách určených na povrchovú montáž, jedná sa teda o súčiastky typu SMD. Rozmiestnenie jednotlivých komponentov na DPS je navrhnuté s ohľadom na univerzálnosť a prehľadnosť.

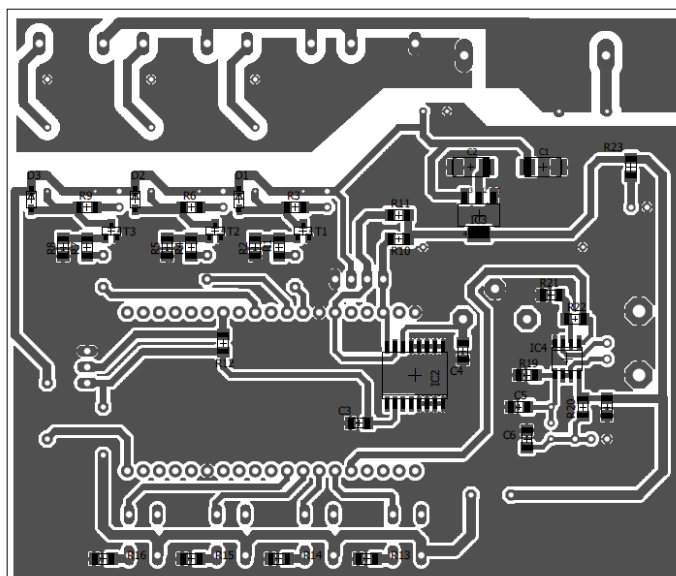
Aby boli splnené požiadavky z teórie zosilňovania, je operačný zosilňovač pH signálu umiestnený čo najbližšie k BNC konektoru. Ostatné časti zosilňovača sa nachádzajú v jeho bezprostrednej blízkosti. Na doske je namiesto poistky s drôtovými vývodmi osadené poistkové puzdro, v prípade poruchy zariadenia a prepálenia poistky sa dá výmena realizovať bez nutnosti odpájkovať poškodený diel.

DPS obsahuje tiež niekoľko indikačných LED, diódy zabezpečujú prehľadnosť v prípade potreby rýchlej vizuálnej kontroly určených stavov. Teplotný senzor a LCD displej nie je možné umiestniť priamo na DPS, tieto dve časti sa preto pripájajú pomocou konektorov. Vývojová doska s mikrokontrolérom je vsunutá do DPS pomocou kolíkovej lišty s rastrom 2,54 mm. Pri oživovaní výrobku je potrebné vybrať mikrokontrolér z dosky, takto je zabezpečená jednoduchá manipulácia.



Obr. 3.2 Osadzovací plán pH regulátora strana TOP

Jednoduchšie osádzanie súčiastkami počas výroby DPS je zabezpečené pomocou vytvorených osadzovacích plánov. Plány pozostávajú z vyobrazenia puzdier všetkých použitých komponentov.



Obr. 3.3 Osadzovací plán pH regulátora strana BOTTOM

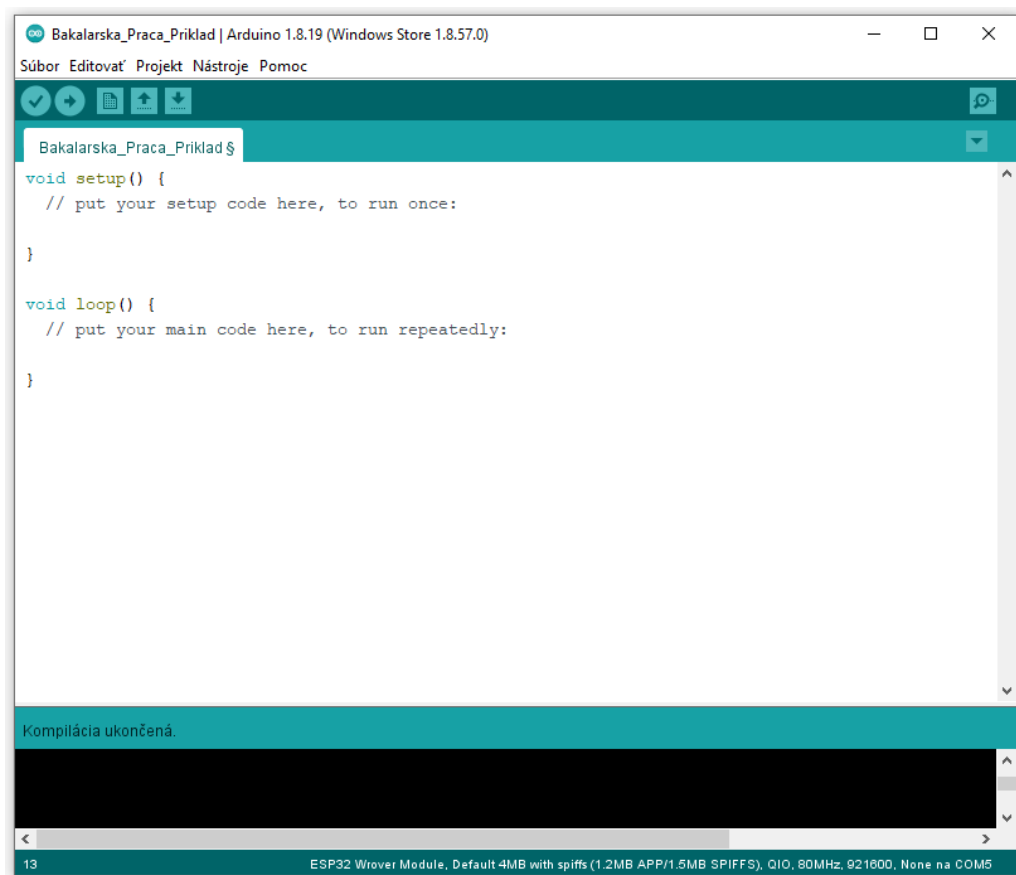
Každý komponent zahrnutý v plánoch má takisto pre lepšiu prehľadnosť zobrazené menné označenie. Zoznam všetkých použitých komponentov pri výrobe a osadzovaní DPS je uvedený v prílohách.

3.2 Vývojové prostredie programu

Pri výbere programovacieho jazyka a integrovaného vývojového prostredia pre vytvorenie softvéru pH regulátora, bola hlavnou prioritou jednoduchosť jazyka, prehľadnosť napísaného programu a následné bezproblémové nahratie do kontroléru. Pre splnenie uvedených kritérií bolo zvolené integrované vývojové prostredie Arduino IDE používajúce jazyk Wiring.

Ide o jazyk veľmi podobný C++, pôvodne vznikol pre vývojový kit podobný Arduino. Jazyk sleduje maximálnu jednoduchosť a zrozumiteľnosť pre užívateľa, ktorý s prostredím pracuje. Syntakticky je možné použiť všetky znalosti nadobudnuté z C jazykov, jedná sa napríklad o zložené zátvorky, bodkočiarky, alebo definície funkcií a premenných. Netreba zabudnúť, že jazyk Wiring vyžaduje mikrokontrolér s napáleným zavádzacím programom, NodeMCU vývojové dosky ho však vo väčšine prípadov už obsahujú.

Na rozdiel od jazyka v programe C, ktorý má hlavnú funkciu s názvom *main()* jednu, v prostredí Arduino IDE máme tieto funkcie dve, nazývajú sa *setup()* a *loop()*. Po spustení programu v prítomnosti napájania mikrokontroléra sa vo funkcii *setup()* vykonávajú programátorom definované inicializácie, vo funkcii *loop()* prebieha nekonečná slučka [25].



Obr. 3.4 Vývojové prostredie Arduino IDE

Arduino IDE poskytuje takisto možnosť vytvorenia alebo použitia už vytvorených knižníc, knižnice sa definujú pred spomenutými funkciami. Prostredie je primárne tvorené pre dosky s mikrokontrolérmi ATmega, avšak jeho širokospektrálne použitie umožňuje programovať aj náš mikrokontrolér ESP32 [25].

3.3 Softvérové spracovanie pH signálu

Vzhľadom k nepresnostiam meraní, ktoré môžu vzniknúť napríklad rušením, bolo nutné do programu spracovania pH signálu zahrnúť spriemerovanie. Pomocou tohto spôsobu dosiahneme ustálenie nameranej hodnoty. Ďalšie spracovanie signálu prebieha s už spriemerovanou hodnotou, takto sa hodnota pH stáva stabilnejšou.

```
//===== FUNKCIA ČÍTANIA MERANEJ PH HODNOTY =====//

void readPH(){
    avgValue=0; // Priradenie nulovej hodnoty premennej avgValue
    for(int i=0;i<10;i++) // Štruktúra pre načítanie hodnôt poľa
    {
        pHavg[i]=analogRead(pHpin); // Čítanie analógového pinu
        delay(10); // 10ms medzi čítaniami
    }

    for(int i=0; i<9; i++) // Štruktúra pre zoradenie veľkosti výsledkov
    {
        for(int j=i+1; j<10; j++)
        {
            if (pHavg[i] > pHavg[j])
            {
                temp = pHavg[i];
                pHavg[i] = pHavg[j];
                pHavg[j] = temp;
            }
        }
    }

    for (int i=2; i<8; i++) // Štruktúra pre vynechanie prvých a posledných dvoch vzoriek
    {
        avgValue += pHavg[i];
    }
    //--- Napätie pinu mikrokontroléra(priemerná hodnota * napätie / počet úrovní ADC / 6 ---//
    pHvoltage =(float)avgValue * 3.3 / 4095 / 6;

    //--- Prepčet výslednej pH hodnoty sklon*napätie pinu + kalibračná hodnota ---//
    pHvalue = slope*pHvoltage + calib_value;
}

```

Obr. 3.5 Funkcia pre softvérové spracovanie pH signálu[26]

Vo funkcii čítania pH signálu *readPH()* je v prvom kroku priradená nulová hodnota premennej *avgValue*. Následne sa pomocou štruktúry *for* načíta do poľa *pHavg[i]* desať vzoriek v intervaloch desať milisekúnd. Potom sa pomocou ďalších dvoch štruktúr *for* zoradia namerané výsledky podľa veľkosti. Prvé dve a posledné dve vzorky sa spravidla vynechajú, vynechanie zvyšuje presnosť merania pre výpočet priemeru. Po určení priemeru sa potom výsledná hodnota pomocou výpočtov prevedie na pH hodnotu, získaná hodnota sa ďalej využije pri riadení a zobrazovaní na displeji [26].

3.4 Prepočet koncentrácie obsahu CO₂ z pH hodnoty

V teoretickom úvode bola popísaná metóda nepriameho zistenia koncentrácie CO₂, jedná sa o už spomenutú Tillmanovu tabuľku. Pri softvérovom riešení určenia tejto koncentrácie je nutné regulátorom prepočítavať jej hodnotu, je možné tak popísanú tabuľku využiť. Najvhodnejšie riešenie je určiť koncentráciu pomocou matematického vzťahu. Zvolený bol vzťah (3.1), pri porovnaní výsledných hodnôt z uvedeného vzťahu a hodnôt v Tillmanovej tabuľke (Tab1.1) sa výsledky takmer nelíšia.

Rovnica prepočtu koncentrácie CO₂ (3.1)

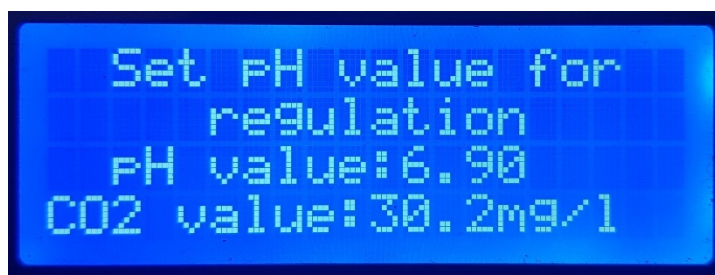
$$CO_2 = 3,25 * UT * 10^{(7-pH)} [mg/l] \quad (3.1)$$

Tento vzťah je využitý v programe pH regulátora pri zobrazovaní hodnôt na displeji počas zadávania hodnoty pH pre reguláciu. Hodnota uhličitanovej tvrdosti je zadaná ako globálna premenná *KHvalue*, vychádza z predpokladu, že sa jej hodnota ďalej meniť nebude. Následne je pomocou prepočtu zobrazená hodnota koncentrácie CO₂ na displeji (vid'. Obr. 3.7), užívateľ tak vie počas nastavovania pH hodnoty aká bude koncentrácia CO₂ v akváriu.

```
//--- Prepočet koncentrácie CO2 z rovnice CO2 = 3,25 * KHvalue * 10^(7 - pH) ---//  
  
CO2pow = 7 - pHregulate;           // Prepočet koncentrácie CO2  
CO2square = pow(10,CO2pow);        // Prepočet koncentrácie CO2  
CO2value = 3.25 * KHvalue * CO2square; // Prepočet koncentrácie CO2
```

Obr. 3.6 Prepočet koncentrácie CO₂ v softvéri pH regulátora

Zobrazenie tejto koncentrácie je veľmi žiaducim prvkom zostaveného regulátora. Pri nesprávnom nastavení pH, z ktorého by plynula veľká koncentrácia CO₂, by mohlo dôjsť k zaduseniu osadenstva nádrže.



Obr. 3.7 Ukážka zobrazenia prepočítanej hodnoty na LCD

3.5 Kalibrácia sondy

Po uvážení všetkých výhod bola zvolená a naprogramovaná softvérová kalibrácia, prispela k tomu skutočnosť, že sonda časom mení svoje hodnoty a je potrebné ju pravidelne kalibrovať. Softvérové riešenie kalibrácie tak zabezpečuje jednoduchú a presnú alternatívu.

Ofset neutrálnej pH hodnoty sa vykonáva pomocou viacotáčkového trimra R17. Najskôr sa vykoná skrat na BNC konektore, následne sa trimrom nastaví ofset sondy, hodnota v našom prípade napätie približne 2,5 V. Dané napätie prislúcha neutrálnej hodnote pH = 7. V ďalších krokoch sa vykonáva softvérová kalibrácia sondy. Sonda sa postupne vkladá do kalibračných roztokov, v trojbodovej kalibrácii majú roztoky hodnoty pH 4,01, 7,01 a 10,01. Na trhu existuje viacero druhov kalibračných roztokov o iných pH hodnotách, preto sú pre

hodnoty roztokov vytvorené globálne premenné. V prípade použitia roztokov o iných hodnotách je možné tieto hodnoty jednoducho prepísať.

```
//===== GLOBÁLNE PREMENNÉ =====//

//----- V prípade použitia roztokov s inou hodnotou potrebné zmeniť hodnoty!! -----//
float pH4liquid = 4.01;      // Hodnota kalibračného roztoku pH4
float pH7liquid = 7.01;      // Hodnota kalibračného roztoku pH7
float pH10liquid = 10.01;    // Hodnota kalibračného roztoku pH10
```

Obr. 3.8 Globálne premenné pre hodnotu pH roztokov

Pre kalibráciu bola vytvorená funkcia *ProbeCalibration()*, v ktorej sa vykonáva prepočet hodnôt, s ktorými ďalej pracuje funkcia čítania pH hodnoty. Funkcia pri každom kroku vypíše kalibračné inštrukcie pozostávajúce z umiestnenia sondy do príslušného roztoku. Takisto sa tu nachádzajú inštrukcie pre očistenie sondy demineralizovanou vodou medzi jednotlivými čítaniami, takto sa predíde kontaminácii a zmene pH roztokov. Po načítaní napätí jednotlivých roztokov nasleduje prepočet kalibračných parametrov.

```
//----- Výpočet kalibračných hodnôt pomocou rovnice y = mx + c -----//
//----- Kde y = hodnota pH roztoku , m = slope , x = hodnota napätia roztoku -----//

slope1 = (pH4liquid-pH10liquid)/(pH4voltage-pH10voltage); // Prepočet m1 = (4.01 - 10.01)/(pH4voltage - pH10voltage)
slope2 = (pH4liquid-pH7liquid)/(pH4voltage-pH7voltage);   // Prepočet m2 = (4.01 - 7.01)/(pH4voltage - pH7voltage)
slope3 = (pH7liquid-pH10liquid)/(pH7voltage-pH10voltage); // Prepočet m3 = (7.01 - 10.01)/(pH7voltage - pH10voltage)

slope = (slope1+slope2+slope3)/3;                          // Výpočet priemernej hodnoty m

calib_value1 = (abs(slope1*pH10voltage - pH10liquid));      // Prepočet c1 = absolutná hodnota(m1*pH10voltage - 10.01)
calib_value2 = (abs(slope2*pH7voltage - pH7liquid));       // Prepočet c2 = absolutná hodnota(m2*pH7voltage - 7.01)
calib_value3 = (abs(slope3*pH10voltage - pH10liquid));      // Prepočet c3 = absolutná hodnota(m3*pH10voltage - 10.01)

calib_value = (calib_value1+calib_value2+calib_value3)/3;   // Výpočet priemernej hodnoty c
```

Obr. 3.9 Softvérový výpočet kalibračných hodnôt pH sondy

Prepočet je realizovaný pomocou rovnice (3.2)[27]

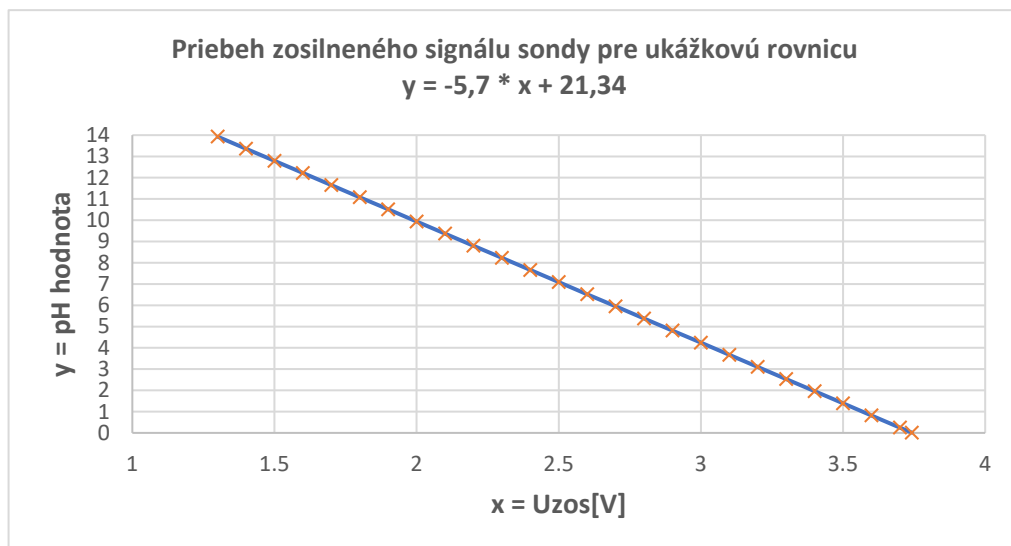
$$y = m * x + c \quad (3.2)$$

kde y je pH hodnota, m sklon sondy, x zosilnené napätie sondy a c je kalibračná hodnota.

Vypočítané hodnoty sa zobrazia po kalibrácii na displeji, z hodnôt je potom možné overiť či je priebeh merania lineárny. Pre znázornenie danej charakteristiky bola uvažovaná vzorová rovnica (3.3).

$$y = (-5,7) * x + 21,34 \quad (3.3)$$

Z rovnice (3.3) je vytvorený graf (viď. Obr. 3.10), kde jasne vidíme, že meranie má lineárny priebeh. V prípade, ak bola kalibrácia vykonaná korektne a priebeh merania je lineárny, kalibračné hodnoty máme možnosť uložiť do EEPROM pamäte. Tieto hodnoty budú uchované až do ďalšieho spustenia kalibrácie [27].



Obr. 3.10 Graf závislosti napätia zosilňovača od pH hodnoty

3.6 Regulácia pH veličiny

Vzhľadom k tomu, že by počas regulácie mohlo dochádzať k príliš častému spínaniu elektromagnetického ventilu tlakovej fľaše, bola do funkcie regulácie zavedená hysterézia. Túto hysteréziu je možné ľubovoľne nastaviť podľa potreby prepísaním jej hodnoty vo vytvorenej globálnej premennej *hysteresispH*.

```
//===== GLOBÁLNE PREMENNÉ =====//

float hysteresispH = 0.1;    // Hodnota hysterézie
float PHmax = 0;            // Hodnota na prepočet pHvalue+hysteresis
float PHmin = 0;            // Hodnota na prepočet pHvalue-hysteresis
```

Obr. 3.11 Globálne premenné pre hodnotu hysterézie pH regulácie

Vo funkcii pre automatickú reguláciu pH veličiny *pHregulatorAuto()* sa najskôr pričíta a odčíta hodnota nastavenej hysterézie k požadovanej hodnote pH veličiny nastavenej užívateľom. Následne sa táto hodnota uloží do dvoch premenných *PHmax* a *PHmin*, ktoré sa porovnávajú s aktuálnou meranou pH hodnotou. Týmto spôsobom dôjde k spínaniu ventilu v okamžiku dosiahnutia požadovanej hodnoty pH s pričítanou, respektíve odčítanou hysteréziou.

Hodnota pre reguláciu pH sa nastavuje vo funkcii *pHvalueSettings()*, pomocou tlačidiel hore a dole sa hodnota mení o 0,1 pH s vyobrazením na displeji. Maximálna a minimálna hodnota pH pre reguláciu je obmedzená, predstavuje hodnoty 4 až 10. V akváriu sa pH

pohybuje medzi hodnotami 6 až 8, a teda môžeme povedať, že obmedzenie rozsahu plne postačuje pre použitie regulátora v zvolených podmienkach.

```

PHmax = pHregulate + hysteresispH;           // pričítanie hysterézie k nastavenej hodnote pH
PHmin = pHregulate - hysteresispH;           // odčítanie hysterézie od nastavenej hodnoty pH

if(ON_Time < OFF_Time){                      // Podmienky vymedzenia času regulácie
    if(Time >= ON_Time && Time < OFF_Time){    // Podmienky vymedzenia času regulácie
        digitalWrite(Relay3, HIGH);          // Zapne Relé
        if(pHvalue > PHmax){                  // Ak hodnota pH prekročí max hodnotu zapne relé
            digitalWrite(Relay1, HIGH);       // Zapne Relé
        }
        if(pHvalue < PHmin){                  // Ak hodnota pH podkročí min hodnotu vypne relé
            digitalWrite(Relay1, LOW);         // Vypne Relé
        }
    }
    else if(Time >= OFF_Time){                // Podmienky vymedzenia času regulácie
        digitalWrite(Relay1, LOW);            // Vypne Relé
        digitalWrite(Relay3, LOW);           // Vypne Relé
    }
    else{                                     // Podmienky vymedzenia času regulácie
        digitalWrite(Relay1, LOW);           // Vypne Relé
        digitalWrite(Relay3, LOW);           // Vypne Relé
    }
}

```

Obr. 3.12 Ukážka podmienok z regulácie pH hodnoty

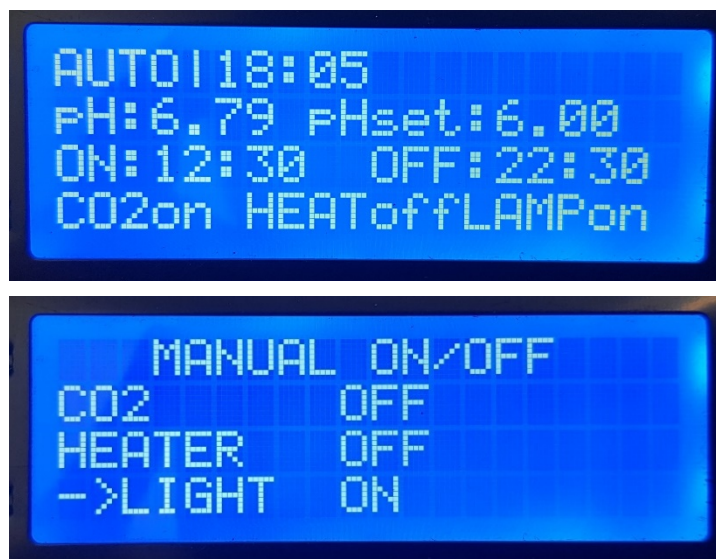
Ďalej bolo nutné vymedziť čas regulácie, a to z dôvodu, aby bola splnená požiadavka dodávania plynného oxidu uhličitého počas zapnutého osvetlenia nádrže. Tento čas je možné nastaviť užívateľom pomocou funkcie *SettingTime()*, potom sa podľa nastaveného času riadi výstup pre spínanie osvetlenia a takisto tento čas vymedzuje možnosť spínania elektromagnetického ventilu.

Po nastavení času sa vypíšu zadané hodnoty na displeji, kde má možnosť užívateľ overiť správnosť zadaných časových údajov. Všetky nastavované hodnoty majú možnosť uloženia do EEPROM pamäte, uložené hodnoty sa budú uchovávať až kým ich užívateľ nezmení.

3.7 Zobrazovanie dát na LCD displeji

Pri navrhovaní softvéru bola zohľadnená požiadavka zobrazovať pH hodnoty na displeji, takisto bolo prioritou, aby bolo zobrazovanie parametrov prehľadným a jednoduchým. Hodnota meraného pH sa zobrazuje výhradne v automatickom režime regulátora. Automatický režim ďalej zobrazuje aktuálny čas, hodnotu pH definovanú užívateľom, čas vymedzenia regulácie a v poslednom rade stav jednotlivých výstupov.

Po odchode z automatického režimu má užívateľ možnosť v manuálnom režime regulátora ovládať jednotlivé výstupy samostatne pomocou tlačidiel. Po odchode z oboch režimov sa všetky výstupy prepínajú do vypnutého stavu.



Obr. 3.13 Ukážka zobrazenia oboch režimov na LCD

Súčasťou automatického režimu bude taktiež regulácia ohrevu. Táto periféria zatiaľ nebola doprogramovaná a takisto sa mýňa zadaniu bakalárskej práce. Jedná sa iba o rozšírenie možností vytvoreného regulátora.

3.8 Ukladanie dát online pomocou WiFi komunikácie

Ďalšou z požiadaviek bolo ukladanie a zobrazovanie dát online pomocou dostupnej komunikácie, ktorú ponúka vybraný mikrokontrolér. Pre svoju jednoduchosť a široký dosah signálu bola zvolená komunikácia pomocou WiFi siete. Po výbere siete boli preskúmané možnosti na trhu, kde a ako sa dané dáta budú ukladať.

Zvolená bola platforma Blynk, jedná sa o plne integrovanú platformu pre IoT zariadenia, ktorá umožňuje ukladať dáta na online cloud. Platforma ponúka možnosť ukladať dáta s určitými obmedzeniami zadarmo, čo je veľkou výhodou pre pH regulátor, kde majú ukladania dát online iba informačný charakter. Takisto obsahuje veľké množstvo pomôcok ako sú stupnice, grafy, zobrazovanie stavov a ďalšie, ktoré boli využité pri tvorbe plochy.

Pre správny chod programu bolo potrebné ako prvé riadky softvéru zahrnúť dáta z vytvorenej šablóny. Následne sa priradili parametre WiFi siete a takisto autorizačný kód vytvoreného projektu. Ďalej bola zahrnutá nevyhnutná knižnica zabezpečujúca WiFi komunikáciu *WiFi.h* spolu s knižnicou *BlynkSimpleEsp32.h*.


```
//===== PH KONTROLÉR PROGRAM =====//

#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPLiAj0_fDF"           // ID šablóny vytvorenej online
#define BLYNK_DEVICE_NAME "pH Controller"          // Meno zariadenia vytvorené online
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "Autorizacny kod online"   // Autorizačný kód zariadenia online

//===== POUŽITÉ KNIŽNICE =====//

#include <BlynkSimpleEsp32.h>                       // Knižnica online ukladania dát na Blynk
#include <WiFi.h>                                    // Knižnica WiFi komunikácie

//===== AUTORIZÁCIA PRE PRIPOJENIE NA BLYNK CLOUD =====//

char auth[] = "Priradenie autorizacneho kodu";      // Autorizácia pre online cloud

//===== WIFI PRIPOJENIE =====//

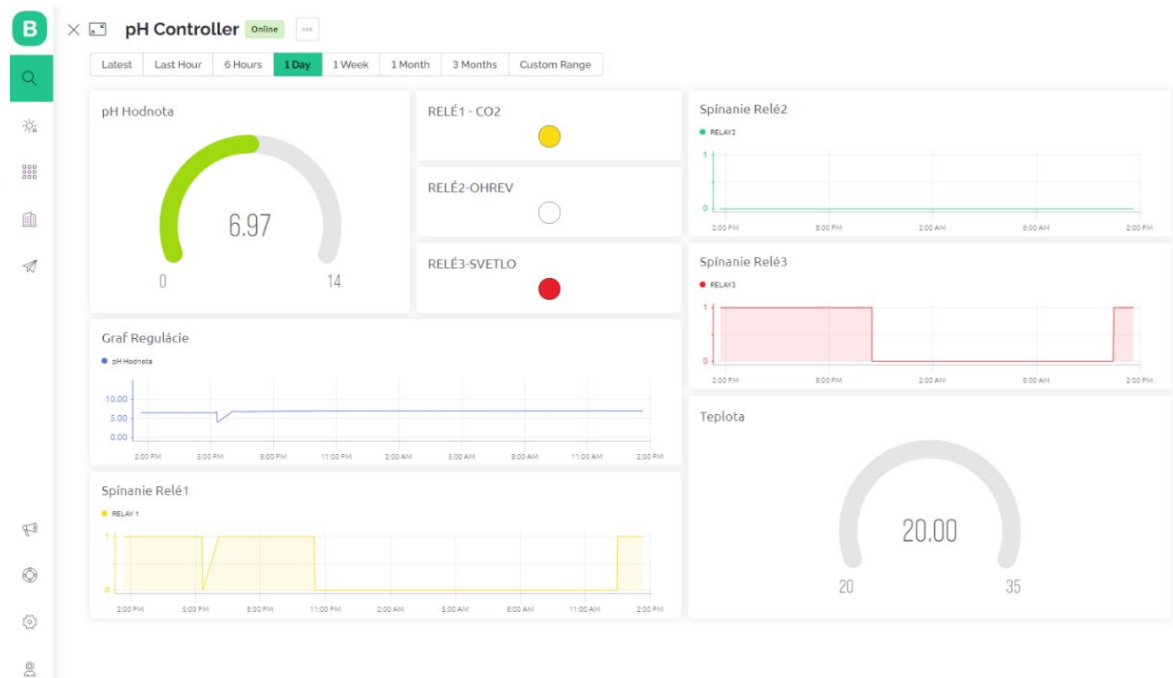
char ssid[] = "Nazov WiFi";    // Názov WiFi siete
char pass[] = "Heslo WiFi";    // Heslo WiFi siete

//===== DEFINÍCIE PINOV =====//

WidgetLED led1(V1);    // Priradenie virtuálneho pinu V1 pre led1
WidgetLED led2(V2);    // Priradenie virtuálneho pinu V2 pre led2
WidgetLED led3(V3);    // Priradenie virtuálneho pinu V3 pre led3
```

Obr. 3.14 Priradenie parametrov WiFi komunikácie

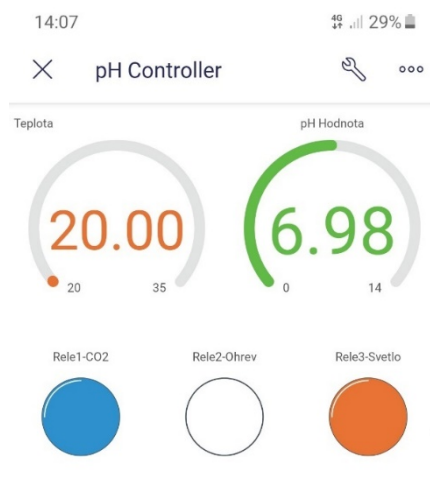
Po vytvorení online šablóny, konfigurácii nástrojov ovládacej plochy a vytvorení virtuálnych pinov, boli všetky náležitosti pre odosielanie dát zahrnuté v softvéri mikrokontroléra. Odosielanie údajov online sa vykonáva iba v automatickom režime pH regulátora, nakoľko v iných režimoch nie je potrebné tieto hodnoty sledovať.



Obr. 3.15 Snímka obrazovky vytvorenej online plochy

Vo webovej šablóne je pre zobrazenie pH hodnoty využitá stupnica, taktiež je táto hodnota zbieraná v podobe grafického vyobrazenia. Takto sa pri kontinuálnej prevádzke dá jednoducho odsledovať plynulosť chodu nastavenej regulácie.

Vybratá platforma ponúka aj mobilnú aplikáciu Blynk IoT , kde sa po nastavení pracovnej plochy zobrazujú ukladané dáta online na mobilnom telefóne (viď. Obr. 3.16). Výhodou aplikácie je, že sa beh pH regulátora a teda samotného akvária dá skontrolovať prakticky kdekoľvek.



Obr. 3.16 Snímka obrazovky z aplikácie mobilného telefónu

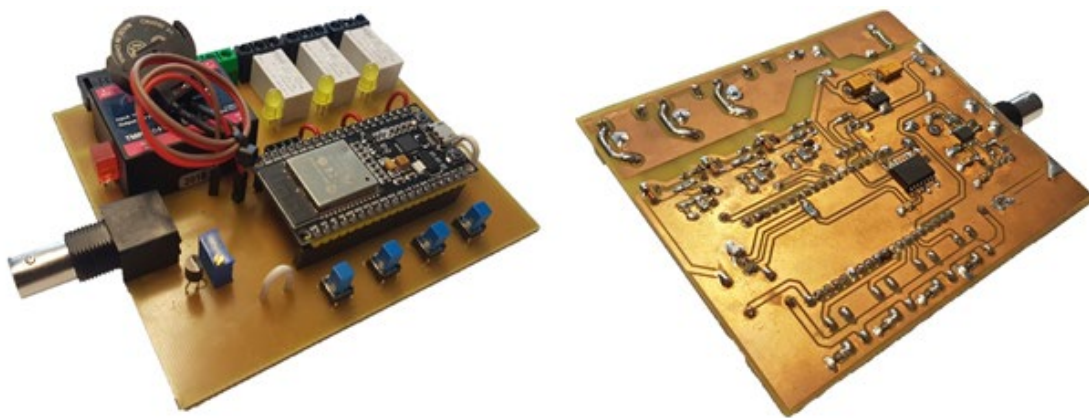
4 REALIZÁCIA PH REGULÁTORA

Po vytvorení návrhu DPS a navrhnutí softvéru pH regulátora nasledovalo jeho zostavenie. V pôvodnom návrhu bolo ako spínací prvok zahrnuté relé Omron rady G5Q. Tento typ však bol v čase vyrábania DPS mimo skladové zásoby u internetových predajcov, následkom čoho bola upravená schéma a DPS s iným typom relé. Ako bolo spomenuté vyššie, doska bola vyrábaná ručne, v podstate sa jedná o prototyp a po otestovaní môže dôjsť k malým úpravám zariadenia.

4.1 Oživovanie

Pri oživovaní výrobku sa vyskytol problém s vypaľovaním ochrannej poistky. Za vznikom tejto poruchy stál chybný SMD rezistor jedného z ovládacích tlačidiel, ktorý vykazoval skoro nulovú hodnotu odporu. Po výmene sa porucha už neopakovala. Ďalej sa pri testovaní zosilňovača pri nízkom pH dostávalo napätie na pine mikrokontroléru do vysokých hodnôt okolo 3,22V. Z katalógového listu mikrokontroléru [19] bolo zistené, že pri napätiach nad 3,1V prestáva byť ADC prevod lineárny, čo môže mať za následok chybné vyhodnotenie merania.

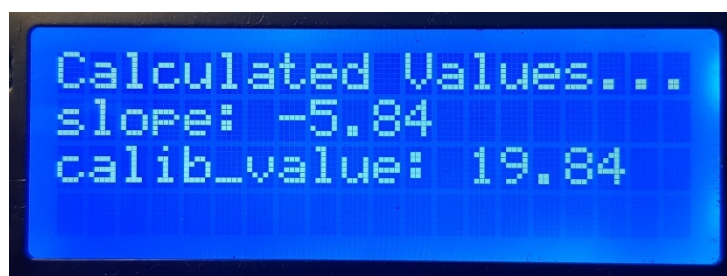
Táto porucha sa odstránila zmenou rezistoru napäťového deliča tvoreného trimrom R17 a rezistorom R19. Pôvodná hodnota rezistoru R19 bola zmenená na 4,3 k Ω . Po tejto zmene sa dal offset zosilňovača nastaviť na nižšie napätie, tak sa hodnota zosilneného napätia pri nízkom pH nedostávala tak vysoko. Ďalšie problémy sa už nevyskytli, regulátor mohol byť tak podrobený kalibrácii sondy.



Obr. 4.1 Fotografia osadenej DPS strana TOP a BOTTOM

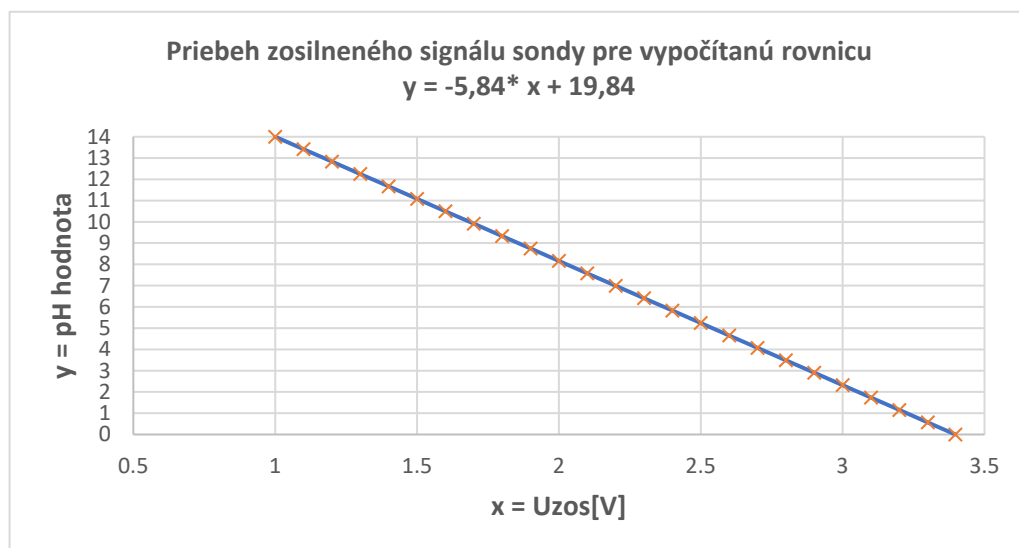
4.2 Kalibrácia pH sondy po oživení

Bezprostredne potom ako bol regulátor úspešne oživený nasledovala kalibrácia sondy. Ako bolo v predchádzajúcej kapitole spomenuté, pre korektné meranie sa musel nastaviť ofset zosilňovača na nižšiu hodnotu ako 2,5 V. Následne po úprave deliča napätia činil nastavený ofset pri neutrálnom pH = 7 hodnotu 2,2V. Po kalibrácii sondy boli vypočítané kalibračné hodnoty zobrazené na displeji, ich hodnoty sú uvedené na nasledujúcom obrázku (viď. Obr. 4.2).



Obr. 4.2 Vyobrazenie kalibračných hodnôt na LCD

Pomocou týchto hodnôt sa dalo výpočtom cez uvedenú kalibračnú rovnicu overiť, či má zosilňovač lineárnu charakteristiku. Z vypočítaných hodnôt bol zostrojený graf (viď. Obr. 4.3) v rozmedzí maximálneho a minimálneho pH. Napätie týchto pH hodnôt po zosilnení sa pohybuje v rozmedzí 1 až 3,38V. Mikrokontrolér je teda schopný spracovať zosilnené napätia sondy vlozenej do roztokov s ľubovoľnou pH hodnotou.



Obr. 4.3 Graf závislosti napätia zosilňovača od pH hodnoty

Po kalibrácii bolo overené aké hodnoty pH pri meraní kalibračných roztokov budú zobrazené na displeji. Zobrazené hodnoty sú uvedené v tabuľke 4.1, z tejto tabuľky vidíme,

že presnosť sondy sa pri navrhnutej softvérovej kalibrácii pohybuje na úrovni približne $\pm 0,1$ pH. Pri nízkej obstarávacej cene použitej sondy je výsledná presnosť na veľmi dobrej úrovni.

Tab. 4.1 Porovnanie hodnoty roztoku s meranou pH hodnotou

Hodnota roztoku	Hodnota zobrazená
4,01	3,89
7,01	7,06
10,01	9,91

4.3 Test regulátora v kontinuálnej prevádzke

Vykonanie kalibrácie znamenalo nastavenie ďalších parametrov regulátora. Pre správny prepočet koncentrácie CO_2 bola kvapkovým testom zmeraná a nastavená uhličitanová tvrdosť vody v globálnej premennej. Prebehlo taktiež nastavenie času vypnutia a zapnutia regulátora, nastavenie regulovanej pH hodnoty a následne uloženie týchto parametrov do EEPROM pamäte. Simulovanie podmienok prevádzky prebehlo v testovacej nádrži o veľkosti približne dva litre. Nádrž obsahovala pH sondu spolu s CO_2 difúzorom, ktorý bol napojený na tlakovú fľašu s elektromagnetickým ventilom. Lepšie priblíženie výsledku testu je vyobrazené na nasledujúcom obrázku (viď. Obr. 4.4).



Obr. 4.4 Výsledok 24-hodinovej prevádzky regulátora

Výsledok ukázal pri 24 hodinovej prevádzke zostrojeného regulátora bezproblémový a bezporuchový chod. Hodnota žiadaného pH sa pohybovala v rámci nastavenej hodnoty s hystereziou.

ZÁVER

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo navrhnúť a zostrojiť pH regulátor pre použitie v sladkovodnej nádrži. Prvú časť práce tvorí stručný teoretický úvod. Zaoberá sa najmä problematikou merania koncentrácie oxidu uhličitého a pH hodnoty. Druhou časťou je praktický rozbor riešenia, v ktorom sú prebraté možnosti realizácie regulátora.

Po preštudovaní všetkých možných riešení bol zvolený ako jadro projektu mikrokontrolér ESP32. Z blokovej schémy boli navrhnuté všetky potrebné periférie regulátora. Následne bolo rozhodnuté, že sa bude celý koncept nachádzať na jednej doske plošných spojov. Rozhodnutie vzniklo na základe myšlienky zachovania čo najmenších možných rozmerov výsledného zariadenia. Takto bola zostavená a oživená jedna kompletná doska so všetkými perifériami.

V obvode nastal pri oživení problém s opakovaným vypaľovaním ochrannej poistky. Príčina poruchy bola po dôkladnej analýze objavená a odstránená. Pri následnej skúšobnej kalibrácii bol zistený nedostatok v podobe nevhodného offsetu neutrálnej pH hodnoty. Postupnou úpravou súčiastok okruhu zosilňovača bol problém odstránený.

Výsledné parametre regulátora vychádzajúce zo samotného merania a testovania sú viac než uspokojivé. Regulátor netrpí v celom rozsahu merania pH hodnoty ani najmenšou nelinearitou. Takto navrhnutý regulátor je plne dostačujúci pre použitie v akvaristike na reguláciu koncentrácie oxidu uhličitého.

K záveru práce boli taktiež implementované rozšírenia. Jedná sa o meranie a reguláciu teploty a návrat do automatického režimu po výpadku napájania. Ako posledné rozšírenie je plánované zahrnúť do softvéru OTA programovanie pomocou WiFi siete. Výsledkom práce je multifunkčné zariadenie, ktoré spĺňa základné požiadavky pre použitie v nepretržitej prevádzke.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] PELIKÁN, V. 2002. *OXID UHLIČITÝ – CO₂ a jak jej dostat do vody*. [online]. 2002 - [cit. 2022-01-20]. Dostupné na internete:
<https://planta.aquariana.cz/CO2_01.htm>
- [2] MALESKA, K. 2014. 7 Things You Need To Know About Drop Checkers In *co2art.eu*. [online]. 2014 - [cit. 2022-01-25]. Dostupné na internete:
<<https://www.co2art.eu/blogs/blog/13591641-7-things-you-need-to-know-about-drop-checkers>>
- [3] ŠPETA, R. 2008. *Všetchno, co ste chtěli vědět o vodě...* [online]. 2008 – [cit. 2022-01-28]. Dostupné na internete:
<<https://www.akvarista.cz/web/clanky/tisk/?id=183>>
- [4] NOVAK, I. 2007. *Základy CO₂*. [online]. 2007 - [cit. 2022-02-01]. Dostupné na internete:
<<https://www.akvarko.cz/clanky.php?str=58>>
- [5] JOKL, V. a kol. 1989. *ANALYTICKÁ CHÉMIA*. 1.vyd. Martin: Vydavatel'stvo Osveta, 1989. 363 s. SÚKK 1562/I-88.
- [6] ŽÁK, Z. 2005. Kvalita měření pH – TEORIE A PRAXE. In *CHEMagazín*. ISSN: 1210- 7409, 2005, roč. 15, č. 6, s. 22-23.
- [7] JESENÁK, K. 2007. Aké sú minimálne a maximálne hodnoty pH ?. In *Quark*. ISSN: 1337-8422, 2007, roč. 13, č.10, s. 22. Dostupné na internete:
<https://fns.uniba.sk/fileadmin/prif/chem/kag/Zam-Jesenak/clanky/pdf/15._Ake_su_minimalne_a_maximalne_hodnoty_pH.pdf>
- [8] ŠPRT 2019. pH – kyseliny a zásady In *sprt.sk*. [online]. 2019 - [cit. 2022-02-05]. Dostupné na internete:
<<https://sprt.sk/ph-kyseliny-a-zasady/>>
- [9] Mettler Toledo. 2007. *Průvodce teorií měření pH*. [online]. 2007 - [cit 2022-02-05]. Dostupné na internete:
<<https://www.mt.com/cz/cs/home/library/guides/lab-analytical-instruments/pH-Theory-Guide.html>>

- [10] VINŠOVÁ, H. – ZACHAŘ, P. – ZÁRUBA, K. *Potenciometrické měření pH*. Ústav analytické chemie, VŠCHT Praha. [online]. [cit. 2022-02-06]. Dostupné na internetu: <https://uanlch.vscht.cz/files/uzel/0012437/0007~M44PyC_RLfBQ0FUwMjC0AAA.pdf?redirected>
- [11] BALOGH, R. 2003. Potenciometrické merania. In *AT&P JOURNAL*. ISSN: 1335-2237, 2003, roč. 10, č. 8, s. 7-8. Dostupné na internetu: <<https://www.atpjournals.sk/buxus/docs/atp-2003-08-07.pdf>>
- [12] VEJRAŽKA, M. 2009. *Skleněná elektroda*. [online]. 2017 - [cit. 2022-02-10]. Dostupné na internetu: <https://www.wikiskripta.eu/w/Sklen%C4%9Bn%C3%A1_elektroda>
- [13] ŠÁTEK, M. 2009. *Měření pH v akvaristice*. [online]. 2009 - [cit. 2022-02-10]. Dostupné na internetu: <<https://www.akvarko.cz/clanky.php?str=109>>
- [14] ŠÁTEK, M. 2007. *Možnosti řízení a automatizace v akvaristice*. [online]. 2007 - [cit. 2022-02-12]. Dostupné na internetu: <<https://www.akvarko.cz/clanky.php?str=52>>
- [15] EPITRAN. Electrode Specifications. [online]. [cit. 2022-02-13]. Dostupné na internetu: <<https://www.epitran.it/ebayDrive/datasheet/E201-BNC.pdf>>
- [16] PUNČOCHÁŘ, J. 2002. *Operační zesilovače v elektronice* 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. 495 s. ISBN 80-730-0059-8.
- [17] Arduino Forum. 2017. *pH sensor detection circuit design*. [online]. 2017 - [cit. 2022-02-15]. Dostupné na internetu: <<https://forum.arduino.cc/t/ph-sensor-detection-circuit-design/478631>>
- [18] Texas Instruments. 1998. *TLC 4502 Precision CMOS Rail to Rail Output Operational Amplifier*. [online]. 2001 - [cit. 2022-02-15]. Dostupné na internetu: <<https://www.ti.com/product/TLC4502?keyMatch=TLC4502#tech-docs>>
- [19] Espressif Systems. 2022. *ESP32 Series Datasheet*. [online]. 2022 - [cit. 2022-02-16]. Dostupné na internetu: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>

- [20] CDIL. 2020. *NPN SILICON PLANAR EPITAXIAL TRANSISTORS*. [online]. 2020 - [cit. 2022-02-16]. Dostupné na internete:
<https://static1.squarespace.com/static/5416a926e4b09de8832655bc/t/5fb8929a2cbb3411d982e5ad/1605931699142/BC846_848.pdf>
- [21] RELPOL. *RM40-3021-85-1005*. [online]. [cit. 2022-02-16]. Dostupné na internete:
<<https://www.relpol.pl/en/Products/Miniature-PCB-power-relays/Relay-RM40/2611684-RM40-3021-85-1005>>
- [22] MaximIntegrated. 2015. *DS3231 Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/ TCXO/ Crystal*. [online]. 2015 - [cit. 2022-02-18]. Dostupné na internete:
<<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf>>
- [23] Texas Instruments. 2016. *PCF8574 8-bit 2.5- to 5.5V I2C/SMBus I/O expander with interrupt*. [online]. 2016 - [cit. 2022-02-19]. Dostupné na internete:
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8574.pdf?ts=1651360619730&ref_url=https%253A%252F%252Fmicrodigisoft.com%252F>
- [24] TracoPower. 2021. *TMPM 04105 Datasheet*. [online]. 2021 - [cit. 2022-02-21]. Dostupné na internete:
<https://www.tracopower.com/sites/default/files/products/datasheets/tmp_tmpm_datasheet.pdf>
- [25] TME. 2020. *ARDUINO, ČILI MIKROKONTROLÉRY PRO KAŽDÉHO*. [online]. 2020 - [cit. 2022-02-23]. Dostupné na internete:
<<https://www.tme.eu/cz/news/library-articles/page/42541/arduino-cili-mikrokontrolery-pro-kazdeho/>>
- [26] DRATEK. 2017. *Modul a sonda pro měření pH*. [online]. 2017 - [cit. 2022-02-25]. Dostupné na internete:
<<https://navody.drateg.cz/navody-k-produktum/modul-a-sonda-pro-mereni-ph.html>>
- [27] CABALLERO, D. 2017. *How to use a pH sensor with Arduino*. [online]. 2017 - [cit. 2022-03-01]. Dostupné na internete:
<<https://scidle.com/how-to-use-a-ph-sensor-with-arduino/>>

ČESTNÉ VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som zadanú bakalársku prácu vypracoval samostatne, pod odborným vedením vedúceho bakalárskej práce Ing. Pavel Šimon, CSc. a používal som len literatúru uvedenú v práci.

V Liptovskom Mikuláši dňa 8. mája 2022

.....

Marek Klement

ZOZNAM PRÍLOH NA CD

Priložené CD obsahuje:

- Bakalársku prácu – pH Controller-meranie a regulácia pH.pdf
- Celkovú schému pH regulátora A3verziu – Schéma_regulátor_A3.pdf
- Zdrojový kód – firmware mikrokontroléru – pHregulator.ino
- Zoznam použitých súčiastok – Zoznam_súčiastok.pdf
- Predlohu pre tlač DPS a osadzovacie plány – pHregulatorDPS.rar
- Fotografiu vyhotovenia pH regulátora – pH regulátor fotografia.bmp