ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

Katedra biomedicínské techniky

Systém na dávkování CO_2

System for CO_2 dosing

Bakalářská práce

Studijní program:	Biomedicínská a klinická technika
Studijní obor:	Biomedicínský technik

Autor bakalářské práce:	Aleš Hrudička
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Jana Štěpanovská

Kladno 2017

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Systém na dávkování CO_2“ vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Kladně 18.5.2017 …..……..……...

Aleš Hrudička

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Janě Štěpanovské za vedení mé práce a za čas, který mi věnovala.

ABSTRAKT

Systém na dávkování CO_2:

Tato práce se zabývá detekcí koncentrace CO_2 ve vodní nádrži a následnou regulací této koncentrace. První část pojednává o metodách měření a možnostech regulace CO_2 v komerční sféře. Také je zde popsána pH elektroda jako hlavní senzor v dané problematice. V další části je navrženo zařízení pro detekci a regulaci koncentrace CO_2. Součásti této práce je také ověření funkčnosti zařízení.

Klíčová slova:

měření CO_2, pH elektroda, elektromagnetický ventil, Arduino

ABSTRACT

System for CO_2 dosing:

This thesis deals with a detection of CO_2 concentration in water tank and a regulation of this concentration. First part describes methods of measurement and possible options for CO_2 regulation in commercial spaces. There is also a description of pH electrode as the main sensor in this matter. In the next part a device for detection and regulation of CO_2 is designed. Part of this thesis is also a verification of the device's functioning.

Keywords:

CO_2 measurement, pH electrode, electromagnetic valve, Arduino

Obsah

Seznam symbolů a zkratek VII

1 Úvod 1

2 Analýza současného stavu 1

2.1 Metody stanovení koncentrace CO_2 4

2.2 Měření pH elektrodou 7

3 Cíle práce 9

4 Metody realizace 10

4.1 Detekce koncentrace CO_2 11

4.2 Regulace koncentrace CO_2 19

4.3 Digitální sběr dat 23

4.4 Ověření funkčnosti 25

5 Výsledky 26

6 Diskuze 32

7 Závěr 35

Seznam použité literatury 36

Obsah přiloženého CD 38

Seznam příloh 39

Seznam symbolů a zkratek

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
a	mol/l	Aktivita
a_{H_2}	mol/l	Aktivita redukované formy
$a_{H^+}^2$	mol/l	Aktivita oxidované formy
c_A	mol/l	Koncentrace konjugované kyseliny
c_B	mol/l	Koncentrace zásady tvořící pufr
$c_{\mathrm{CO_2}}$	mol/l	Koncentrace oxidu uhličitého
c_p	mol/l	Koncentrace plynu
E	V	Elektrický potenciál elektrody
E^0	V	Standardní elektrodový potenciál
F	C/mol	Faradayova konstanta
k_H	(mol/l·atm)	Henryho konstanta specifická pro každý plyn
p_p	Pa	Parciální tlak plynu nad kapalinou
pK_A	–	Disociační konstanta
R	J/K·mol	Molární plynová konstanta
T	K	Teplota
z	–	Mocenství iontu
$[\mathrm{HCO_3^-}]$	mol/l	Alkalita roztoku
$[\mathrm{CO_2}]$	mol/l	Rovnovážná koncentrace oxidu uhličitého
$[\mathrm{H_2CO_3}]$	mol/l	Rovnovážná koncentrace kyseliny uhličité
γ	–	Aktivitní koeficient
$°dKH$	°něm	Německé stupně tvrdosti

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
AD	Analogově–digitální
DPS	Deska plošných spojů
HHR	Henderson–Hasselbalchova rovnice
PC	Personal computer
SMD	Surface mounted device – technologie pro povrchovou montáž
THT	Through hole technology – technologie pro klasickou montáž

1 Úvod

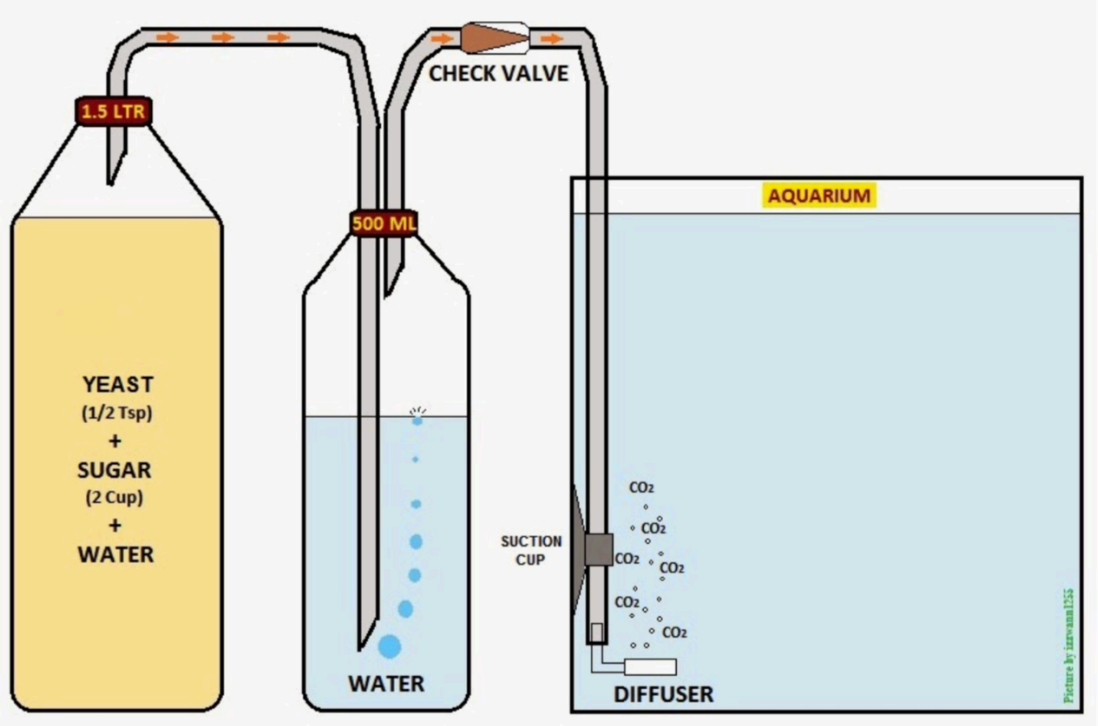
Jedním z důležitých modelových organismů v genetickém inženýrství je *Danio rerio* (česky danio pruhované). Tato akvarijní ryba je hojně využívána nejen genetickými inženýry, ale i v medicínských výzkumech ke studiu poruch vývoje embrya, nervové soustavy, nádorových onemocnění a dalších. Je žádoucí chovat zkoumaný organismus v pokud možno ideálních podmínkách, a proto podobně jako je pro náš organismus ideální homeostáza, je i pro chování modelových organismů vhodný systém se stálým vnitřním prostředím. Stěžejní složkou akvarijního systému je koncentrace CO_2 (mg/l), která je proměnná a závislá na vícero parametrech, tj. počtu ryb a rostlin, denní době, intenzitě osvětlení rostlin a samozřejmě kvalitě vody. Důležitý je CO_2 zejména pro růst rostlin, a proto ovlivňuje nepřímo životní prostředí dania i skrze ně. Vzhledem k tomu, že v přirozeném akvarijním systému je přes den hlavně nedostatek CO_2 (což je právě to, co by mohlo vést k ovlivnění zkoumaných modelových organismů), nabízí se vytvořit systém, který reguluje množství rozpuštěného oxidu uhličitého na optimální hladinu 20–25 mg/l [1–3].

2 Analýza současného stavu

V akvaristickém oboru existují řešení od primitivních doma sestavených dávkovačů, které pouze sytí vodu oxidem uhličitým produkovaným kvasinkami z lahve, až po sofistikované systémy s monitorováním a dávkováním CO_2, tzv. pH kontrolér sety, které přesně regulují koncentraci CO_2 [4].

Systém na sycení vody oxidem uhličitým pomocí procesu fermentace se skládá z lahve s kvasinkami a médiem (směs vody a cukru jako potravy). Kvasinky fermentují cukr na etanol a oxid uhličitý, který je hadičkovým systémem dodáván do akvária, viz obr. 1. Ačkoliv je tento systém velmi jednoduchý, není ideální z následujícího důvodu – nelze přesně řídit množství CO_2 dodané kvasinkami do akvária za jednotku času. Nevýhodou systému je také jeho neregulovatelnost, zvlášť při závadě, např. ucpání

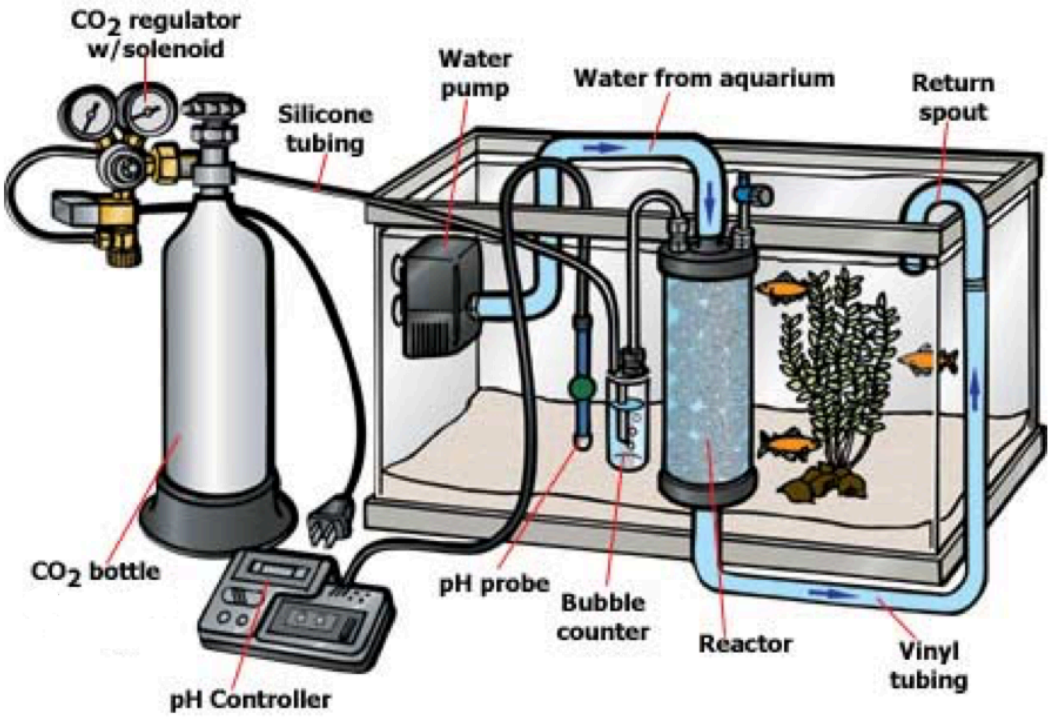
hadičky, může dojít k přetlakování oxidu v lahvi, protože kvasný proces nejde zastavit, a hrozí její vybouchnutí [5].



Obr. 1: Systém na sycení vody CO_2 pomocí lahve s kvasinkami. Obrázek převzat z [6].

Ne zcela ideálním řešením řízení koncentrace CO_2 v akvaristické praxi je jeho konstantní dodávání z tlakové lahve bez přímé zpětné vazby na regulační ventil. Při tomto způsobu regulace se hladina CO_2 kontroluje zhruba třikrát denně. Akvaristé k tomu využívají indikačních sloučenin (např. pH papírků) pomocí nichž měří *pH*, z čehož posléze vypočítají koncentraci CO_2 v jejich akváriu a podle potřeby dodávku uberou, nebo přidají. Systém se skládá pouze z tlakové lahve a hadičkového systému na dodání oxidu do akvária [7]. Tento způsob je nevhodný kvůli jeho nepřesnosti. Během dne hladina CO_2 nepravidelně kolísá a pouze občasným měřením nelze správně korigovat dodávku oxidu do akvária, resp. spolehlivě regulovat koncentraci CO_2 v akváriu. V našem zájmu je sestrojit zařízení, které bude podávat zpětnou vazbu z vodní nádrže častěji než třikrát za den, tj. alespoň každých pět minut [8].

Daleko efektivnější je systém na dodávání oxidu z tlakové lahve, kde informaci o koncentraci CO_2 v akváriu získá řídicí systém ze senzoru uvnitř akvária – pH kontrolér set, viz obr. 2. Skládá se z tlakové lahve, hadičkového systému na dodání CO_2 do akvária, řídicí jednotky – pH kontroléru, senzoru a také z elektromagnetického ventilu. Senzor předá informaci o koncentraci oxidu z akvária do řídicí jednotky, která vyhodnotí zda otevřít elektromagnetický ventil, nebo ho nechat uzavřený. Tímto způsobem se pomocí zpětné vazby přesně řídí hladina oxidu uhličitého v akváriu [9]. Ačkoliv jsou tato zařízení spolehlivá a přesná, důvody k nezakoupení převažují. Hlavním důvodem je uzavřenost těchto komerčních systému. Proces detekce a regulace CO_2 je řízen pH kontrolérem, který je pro účely celkové regulace akvarijního ekosystému nepoužitelný. Cílem této práce je zařízení, které jde dále díky přidání programového vybavení a periferních komponentů pro kontrolu teploty a osvětlení využít pro další projekty v rámci dokončení víceúčelového systému pro optimalizaci prostředí modelového organismu.



Obr. 2: Komerční pH kontrolér set pro řízení koncentrace CO_2. Obrázek převzat z [10].

Tabulka 1: Výhody a nevýhody uvedených systémů

systém	výhody	nevýhody
lahev s kvasinkami	jednoduché, levná konstrukce	nepřesné, nebezpečné, nelze využít pro celkové řízení
tlaková lahev bez zpětné vazby	jednoduché	nepřesné, nelze využít pro celkové řízení
pH kontrolér set se zpětnou vazbou	přesné	drahé, uzavřený systém, nelze využít pro celkové řízení

2.1 Metody stanovení koncentrace CO_2

Ke stanovení koncentrace CO_2 v roztoku by teoreticky stačila Henryho rovnice, viz vztah 1, která pracuje s hodnotou parciálního tlaku plynu nad hladinou a udává, že koncentrace plynu rozpuštěného v kapalině je přímo úměrná jeho parciálnímu tlaku nad hladinou [11]. Parciální tlak by se ovšem velmi obtížně měřil na takovou přesnost, s kterou bychom mohli dopočítávat koncentraci, a navíc nepočítá s produkcí oxidu uhličitého způsobenou akvarijními organismy.

$$c_p = k_H \cdot p_p, \tag{1}$$

kde c_p (mol/l) je koncentrace plynu, k_H (mol/l·atm) je pro každý plyn specifická konstanta, p_p (Pa) je parciální tlak plynu nad kapalinou.

Oxid uhličitý se v akvaristické praxi proto stanovuje nepřímo pomocí znalosti hodnoty *pH* ve vodě akvária, protože reaguje s vodou podle rovnice: $CO_2 + H_2O \Rightarrow H_2CO_3 \Rightarrow HCO_3^- + H^+$ (čím více rozpuštěného oxidu ve vodě je, tím více se tvoří kyseliny a voda je kyselejší). Přepočet *pH* na koncentraci oxidu uhličitého v akváriu je možný pomocí Henderson–Hasselbalchovy rovnice (dále jako HHR, viz vztah 2). Rovnice v sobě zahrnuje závislost tlumivého roztoku na disociační konstantě kyseliny a poměru obou složek tlumivé soustavy (v našem případě uhličitanového pufru). Vztahy 3 a 4 jsou

aplikované HHR na uhličitanový pufr v akváriu. Kyselina uhličitá je velmi nestálá a je možné ji nahradit za koncentraci oxidu uhličitého, viz vztah 4. HHR je nejjednodušší možný způsob výpočtu *pH* pufru, avšak nejméně přesný, jelikož nezohledňuje iontové síly a aktivitní koeficient roztoku. Akvárium plné vody je ale velmi zředěný roztok a je možné tyto faktory zanedbat (aktivitní koeficient γ se prakticky rovná jedné, tudíž se aktivita a rovná koncentraci c podle vztahu $a = \gamma \cdot c$) [12–13].

$$pH = pK_A + \log\frac{c_A}{c_B}, \tag{2}$$

$$pH = 6{,}37 + \log\frac{[\mathrm{HCO_3^-}]}{[\mathrm{H_2CO_3}]}, \text{ resp.} \tag{3}$$

$$pH = 6{,}37 + \log\frac{[\mathrm{HCO_3^-}]}{[\mathrm{CO_2}]}, \tag{4}$$

kde *pH* (–) je výsledné *pH* systému, pK_A (–) je disociační konstanta kyseliny uhličité a je tabelována (pK_A = 6,37 při předpokládané teplotě 25 °C), c_A (mol/l) je koncentrace konjugované kyseliny, c_B (mol/l) je koncentrace zásady tvořící pufr, $[\mathrm{HCO_3^-}]$ (mol/l) je alkalita roztoku, $[\mathrm{H_2CO_3}]$ (mol/l) je rovnovážná koncentrace kyseliny uhličité a $[\mathrm{CO_2}]$ (mol/l) je rovnovážná koncentrace oxidu uhličitého.

Pro zjednodušení výpočtu se v akvaristice používá tzv. Tillmanova tabulka, viz obr. 3, která vychází z HHR rovnice (mimo jiné přepočtením alkality na německé stupně tvrdosti °*dKH*, což je jenom jiné vyjádření uhličitanové tvrdosti) a zohledňuje přepočet, viz vztah 5, na koncentraci CO_2 v mg/l z hodnoty *pH* v závislosti na uhličitanové tvrdosti °*dKH*, která je zjistitelná od dodavatele vody [14–15].

pH /°dKH	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	7,0	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	8,0
0,5	15	12	9,5	7,5	6,0	4,7	3,8	3,0	2,4	1,9	1,5	1,2	0,9	0,75	0,6	0,5	0,4	0,3	0,23	0,19	0,15
1	30	24	19	15	12	9,5	7,5	6,0	4,8	3,8	3,0	2,4	1,9	1,5	1,2	0,9	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3
1,5	45	36	28	23	18	14	11	9,0	7,1	5,7	4,5	3,5	2,8	2,3	1,8	1,4	1,1	0,9	0,7	0,6	0,45
2	67	42	53	27	33	21	17	13	11	8,4	6,7	5,3	4,2	3,3	2,6	2,1	1,7	1,3	1,0	0,8	0,7
2,5	75	60	38	47	30	24	19	15	12	9,4	7,5	6,0	4,7	3,8	3,0	2,4	1,9	1,5	1,2	0,9	0,8
3	90	71	57	45	36	28	23	18	14	11	9,0	7,1	5,7	4,5	3,6	2,8	2,3	1,8	1,4	1,1	0,9
3,5	105	83	68	53	42	33	26	21	17	13	11	8,3	6,6	5,2	4,2	3,3	2,6	2,1	1,7	1,3	1,0
4	133	106	84	67	53	42	33	27	21	17	13	11	8,9	7,6	5,7	4,8	3,0	2,6	1,9	1,5	1,2
5	150	120	95	75	60	47	38	30	24	19	15	12	9,5	7,5	6,0	4,7	3,8	3,0	2,4	1,9	1,5
6	193	153	121	96	77	61	48	38	30	24	19	15	12	10	8,0	6,0	4,9	4,0	2,9	2,3	1,8
8	257	204	162	129	102	81	65	51	41	32	26	20	16	13	10	8,0	6,0	5,0	3,8	2,9	2,4
10	321	255	203	161	128	102	81	64	51	40	32	25	20	16	13	10	8	6	5	4	3
12	386	307	244	193	154	122	97	77	61	49	39	31	24	19	15	12	10	8	6	5	4
14	450	357	284	225	179	142	113	90	71	57	45	36	28	22	18	14	11	9	7	6	4
16	500	397	315	250	199	158	125	100	79	63	50	40	31	25	20	16	12	10	8	6	5
18	562	447	355	282	224	178	141	112	89	71	56	45	35	28	22	18	14	11	9	7	6

Obr. 3: Tillmanova tabulka vyjadřující vztah mezi koncentrací CO_2, pH a alkalitou v akváriu. Obrázek převzat z [15].

Při hypoteticky naměřeném *pH* 7,40 a alkalitě 17,92 °něm, odpovídající kohoutkové vodě v Kladně (dle údajů od Středočeských vodáren), se bude výsledná koncentrace CO_2 v akváriu blížit ideální koncentraci:

$$c_{CO_2} = 12{,}84 \cdot °dKH \cdot 10^{(pK_A - pH)} \tag{5}$$

$$c_{CO_2} = 12{,}84 \cdot 17{,}92 \cdot 10^{6{,}37-7{,}40} = 21{,}47 \text{ mg/l}$$

pH se měří pomocí acidobazických indikátorů (využívajících organické sloučeniny zabarvující se různě v různém *pH*) nebo potenciometricky. Zapisování hodnot vyčtených z indikačních papírku nelze využít, a proto je lepší zvolit potenciometrickou metodu stanovení. V laboratorní praxi se pro přesné měření využívají kombinované iontově selektivní elektrody – pH elektrody [16–17].

2.2 Měření pH elektrodou

Hodnota *pH* je definována jako záporně vzatý logaritmus aktivity (koncentrace) vodíkových iontů. Elektroda na měření *pH* využívá iontově selektivní membránu, která v případě stanovení *pH* roztoku propouští pouze H^+ ionty (to je realizováno díky vyfouknuté baňce ze speciálního skla). Kvůli zjednodušení měření se vyrábí tzv. kombinovaná pH elektroda, která je spojením skleněné indikační pH elektrody a referenční argentchloridové elektrody. Jako vnitřní roztok se používá zředěná HCl. Z elektrody se uvolňují ionty Cl^-. V kyselém roztoku bude nadbytek H^+ iontů vázat více Cl^- iontů – větší spotřeba elektronů z měrné elektrody – kladné napětí vůči referenční elektrodě a akorát opačně, ale obdobně s ponořením do zásaditého roztoku [18].

Napětí je přepočteno na *pH* pomocí Nernstovy rovnice, která pojednává o závislosti potenciálu elektrody na aktivitě iontů, viz vztah 6, kde je Nernstova rovnice aplikována na pH elektrodu. U nízkých koncentrací lze aktivitu nahradit za koncentraci a dále za předpokladu, že je roztok ve standardním stavu (a_{H_2}= 1 mol/l), mocenství iontu z = 2, se po úpravě rovnice dá přímo vyjádřit *pH* měřeného roztoku závislé na napětí a teplotě, viz vztah 7 [19].

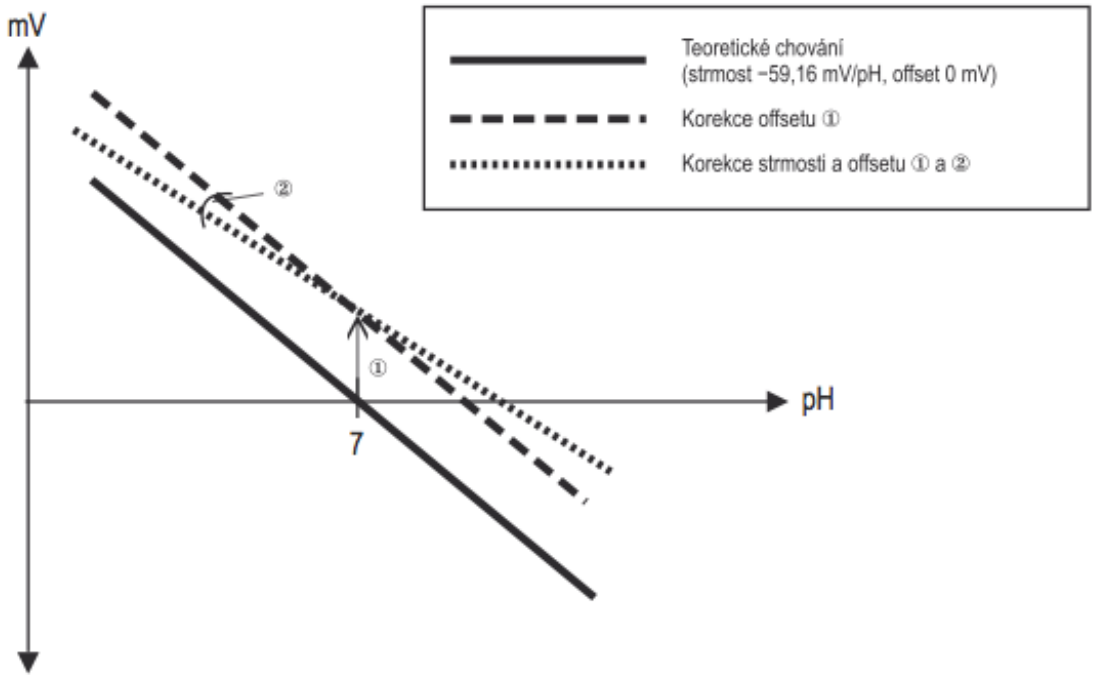
$$E = E^0 - \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot 2{,}303 \cdot \log \frac{a_{H_2}}{a_{H^+}^2}, \tag{6}$$

$$pH = \frac{E - E^0}{1{,}98 \cdot 10^{-4} \cdot T}, \tag{7}$$

kde E (V) je elektrický potenciál elektrody, E^0 (V) je standardní elektrodový potenciál, R (J/K·mol) je molární plynová konstanta, T (K) je teplota, z (–) je mocenství iontu, F (C/mol) je Faradayova konstanta, a_{H_2} (mol/l) je aktivita redukované formy, $a_{H^+}^2$ (mol/l) je aktivita oxidované formy.

Důležitou částí měření skleněnou elektrodou je kalibrace měřidla. Při ideálních 25 °C je strmost 59 mV/*pH* a při *pH* 7 je hodnota napětí 0 mV. V praxi je třeba elektrodu zkalibrovat – seřídit offset a strmost kvůli správnému přepočtu na *pH*, viz obrázek 4. Lze se setkat i s bezúdržbovými elektrodami, které se teoreticky kalibrovat nemusí, ale které mají malou životnost [20]. Běžné elektrody se tedy kalibrují ideálně před každým

měřením. Jedna z metod spočívá nejprve v ponoření elektrody do pufru o hodnotě *pH* 7,0 a nastavení obvodu tak, aby voltmetr vykazoval 0 mV, tím se nastaví offset na správnou hodnotu nula. V dalším kroku se elektroda ponoří do pufru o jiné hodnotě (např. o hodnotě blízké měřeným hodnotám) a nastaví se strmost (kompenzuje se okolní teplota). Uvedené kroky lze z důvodu ověření přesnosti kalibrace opakovat, dle čehož se kalibrace rozdělují typově na dvojité nebo trojité kalibrace [21].



Obr. 4: Korekce hodnot offsetu a strmosti. Obrázek převzat z [21].

3 Cíle práce

Cílem této práce je navrhnout a realizovat systém pro sledování a udržení koncentrace CO_2, který mát být součástí zařízení kontrolující a udržující ideální podmínky v nádrži pro *Danio rerio*.

Zařízení pro monitorování a řízení ideálních podmínek je sestrojeno na platformě Arduino, které slouží jako řídicí část, a dílčích jednotek, obsahující základní senzoriku a aktuátory ovlivňující jeden z následujících parametrů v systému:

- teplota
- hladina CO_2
- osvětlení

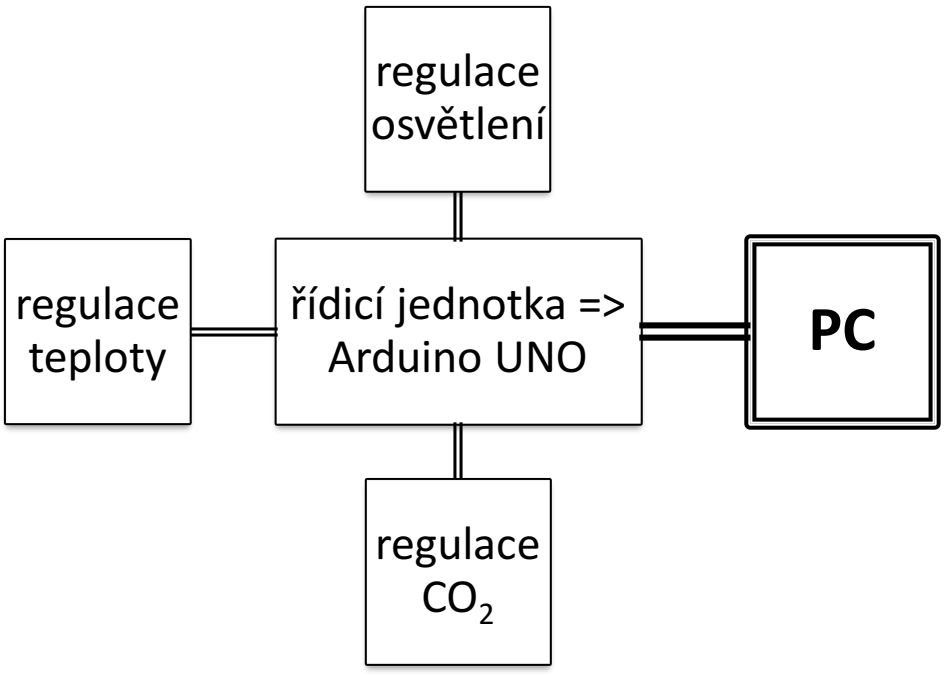
Zařízení musí splňovat následující parametry:

- možnost kontinuálního měření *pH* pro stanovení koncentrace CO_2
- vyhodnocovací systém fungující na platformě Arduino UNO (výrobce Atmel, CA, USA)
- možnost implementace zařízení do většího celku regulující více klíčových parametrů důležitých pro modelový organismus (viz schéma na obr. 5)
- regulace přítoku CO_2 do nádrže z tlakové lahve

Součástí práce je i pilotně ověřit funkčnost systému a zdokumentovat výsledky.

4 Metody realizace

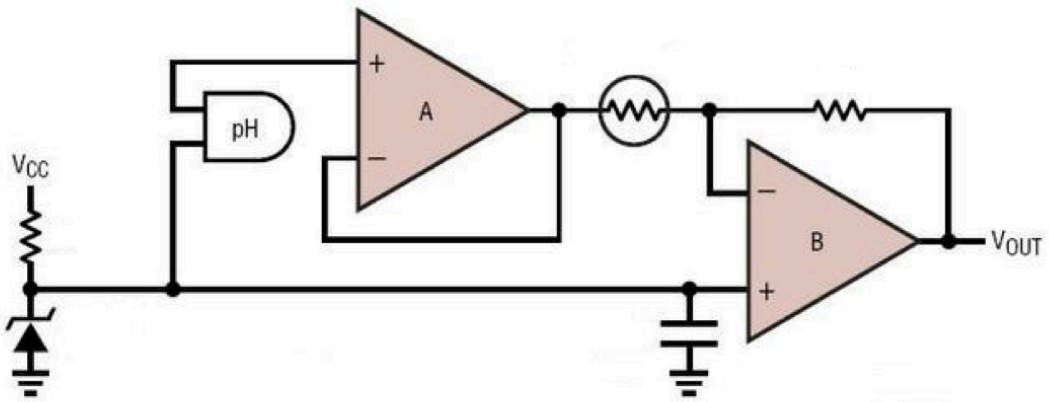
Systém pro dávkování CO_2 do nádrže lze rozdělit na dvě hlavní části – detekční část a regulační část. Řešení detekce koncentrace CO_2 je trojbodé. Spočívá nejprve v detekci *pH* pomocí měrné pH elektrody, následném upravení napětí z pH elektrody vytvořeným obvodem do hodnot přijatelných analog inputem Arduino UNO a konečném zaznamenání a přepočtu *pH* na koncentraci CO_2 mikrokontrolérem Arduino UNO, který bude také v rámci regulační části skrze relé desku ovládat elektromagnetický ventil kontrolující přívod CO_2 do vodní nádrže v závislosti na detekované koncentraci oxidu uhličitého. Hotové zařízení bude posléze možné sloučit s regulátory teploty a osvětlení díky faktu, že všechny tyto tři „podjednotky“ systému fungují na základě platformy Arduino UNO, a ovládat celé zařízení pomocí PC (fakultativně – po připojení napájení bude Arduino schopné s programovým vybavením ovládat zařízení i bez PC).



Obr. 5: Schématický nástin víceúčelového systému pro optimalizaci podmínek modelového organismu.

4.1 Detekce koncentrace CO_2

Použití multimetru ke změření vykazovaného napětí pH elektrodou je nevhodné nejen z důvodu nekompatibility se systémem, ale i proto, že H^+ ionty vytvářejí velice malý proud, který je běžným multimetrem velmi obtížné zaznamenat. Je tedy nutné vytvořit obvod, který bude zesilovat rozdíl potenciálů indikační a referentní elektrody a jehož výstupem bude zesílené napětí přivedené na vstup programovatelné desky, viz obr. 6. Obecně by měřící obvod se zesilovači měl mít odpor větší než vnitřní odpor elektrody alespoň o dva řády (sklo není dobrý vodič ani pro vodíkové ionty – elektroda má vnitřní odpor přibližně 10^8 Ω), proto je zásadní vstupní odpor zesilovače, který musí být v rámci desítek TΩ a kde bude vstupní proud v rámci fA. Původní myšlenka byla zapojit zesilovače v kaskádě, kde např. první bude zapojen jako sledovač napětí a další v rámci kalibrace pro nastavení strmosti a offsetu pomocí potenciometru. Tímto způsobem lze elektrodu kalibrovat a posouvat napětí generované pH elektrodou do hodnot přijatelných pro mikrokontrolér. Nadstavbou by dále bylo použití termistoru sloužícího pro korekci teploty [22].

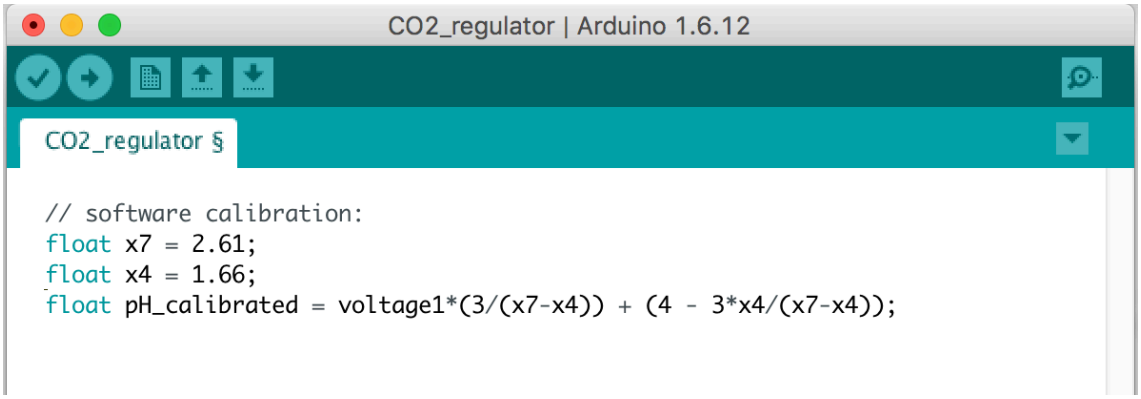


Obr. 6: Teoretický náčrt obvodu pH elektrody. Obrázek převzat a upraven z [23].

Jelikož nastavování potenciometru ručně pro kalibraci není uživatelsky přívětivé, byl potenciometr z konečného řešení vynechán. Kalibrace pH elektrody byla vyřešena softwarově. Nejprve je třeba změřit vykazované napětí v připravených pufrech o hodnotách *pH* 7,0 a *pH* 4,0. Napětí odečtené z pufru o *pH* 7,0, resp. *pH* 4,0 lze posléze využít ke konstrukci rovnice kalibrační křivky závislosti *pH* na vykazovaném napětí pH elektrodou. resp. obvodem. Výsledné *pH* měřeného roztoku bude vypočteno dosazením měřených napětí do rovnice kalibrační křivky. Při instalaci zařízení k potenciálnímu uživateli bude tedy nutné při kalibraci pH elektrody využít jednoduchý kód k prostému odečtení napětí při ponoření pH elektrody do příslušných pufrů, poznamenat si hodnoty napětí a poté přehrát původní „kalibrační kód“ kódem kompletním. Kalibrační programové vybavení je vyobrazeno na obr. 7 a 8.

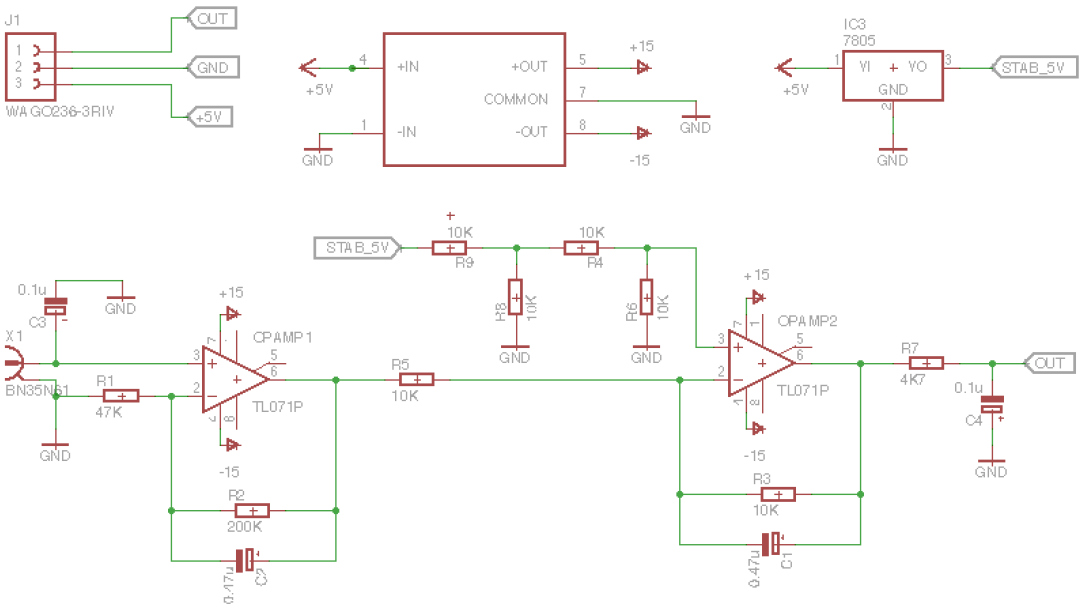
Mikrokontrolér Arduino UNO analogové vstupní napětí přepočte díky AD převodníku na hodnoty 0–1023 v závislosti na tom, jak velké vstupní napětí přijme. Pro práci a výpočty s napětím v rámci softwaru je tedy nutný přepočet těchto hodnot do rozmezí 0–5 V, viz obr. 7 [24].

Obr. 7: Samostatný kód pro výpis napětí po ponoření do příslušných pufrů

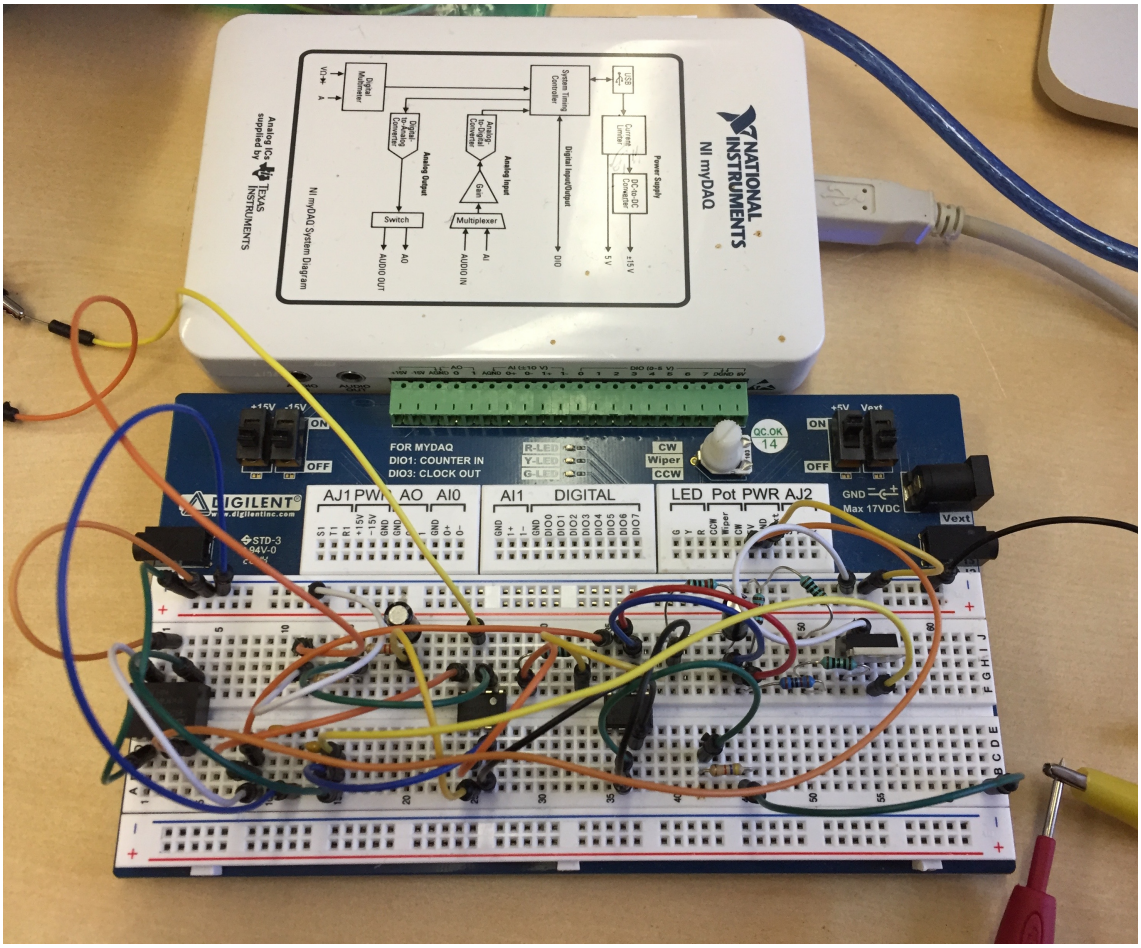


Obr. 8: Programové vybavení pro softwarovou kalibraci v rámci kompletního kódu

Finální podoba obvodu se skládá ze dvou zesilovačů, přičemž první je zapojen jako neinvertující zesilovač zesilující signál pH elektrody, která vysílá v závislosti na *pH* prostředí napětí v intervalu od -414–414 mV, a druhý jako diferenciální zesilovač posouvající napětí do hodnot 0–5 V, které vyhovují vstupu zařízení Arduino UNO, viz obr. 9. Tento obvod upraví napětí z elektrody a dle požadavků vyplívajících z vysokého vnitřního odporu pH elektrody má vstupní impedanci v rámci desítek TΩ, tedy o 2 řády vyšší než vnitřní odpor elektrody. Obvod byl nejprve navrhnut v prostředí CadSoft Eagle (USA) a později odladěn a vyzkoušen na nepájivém poli NI myDAQ (National Instruments, Austin, TX), viz obr. 10 [25].

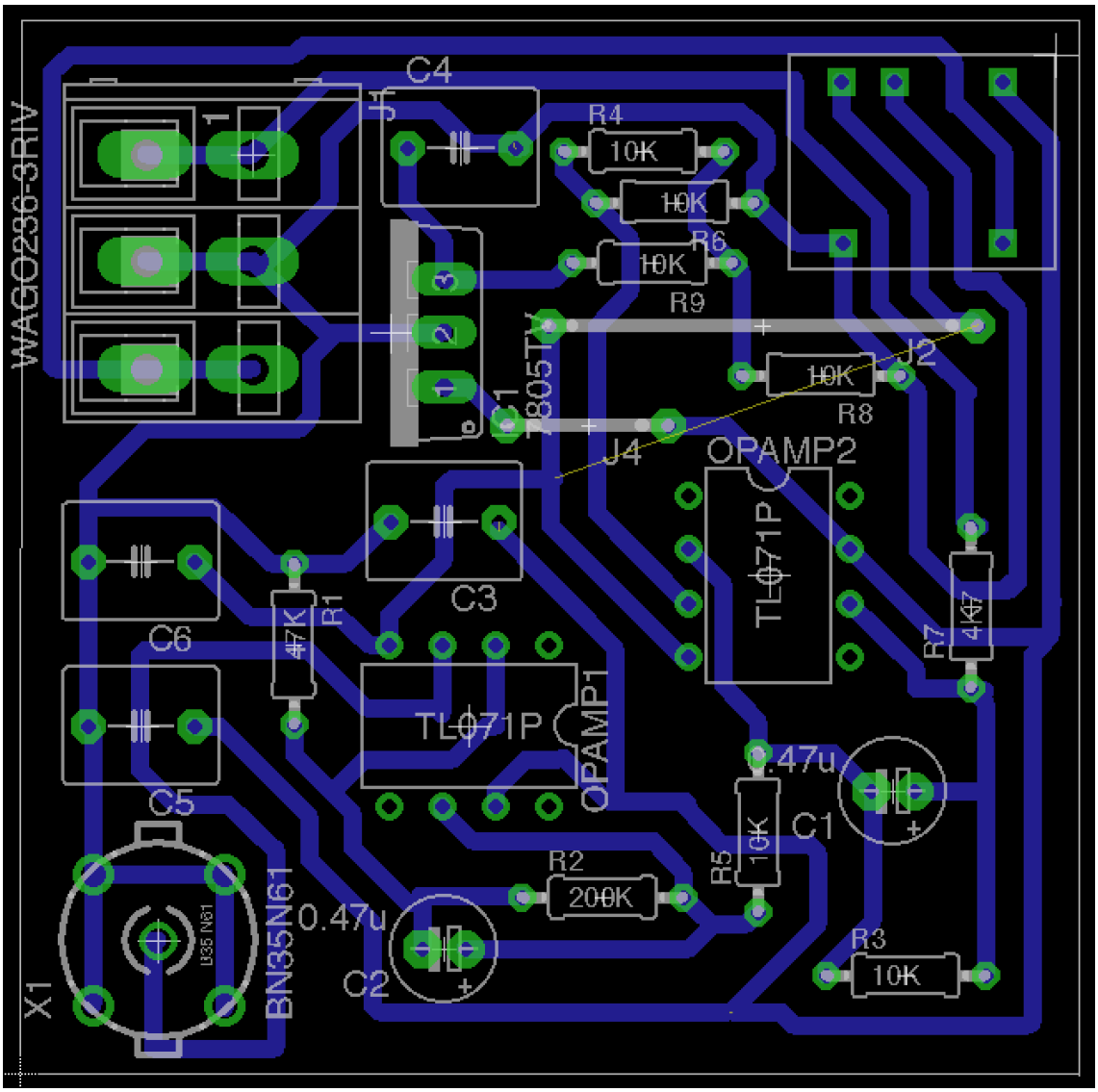


Obr. 9: Zesilovací obvod navrhnutý v prostředí CadSoft Eagle



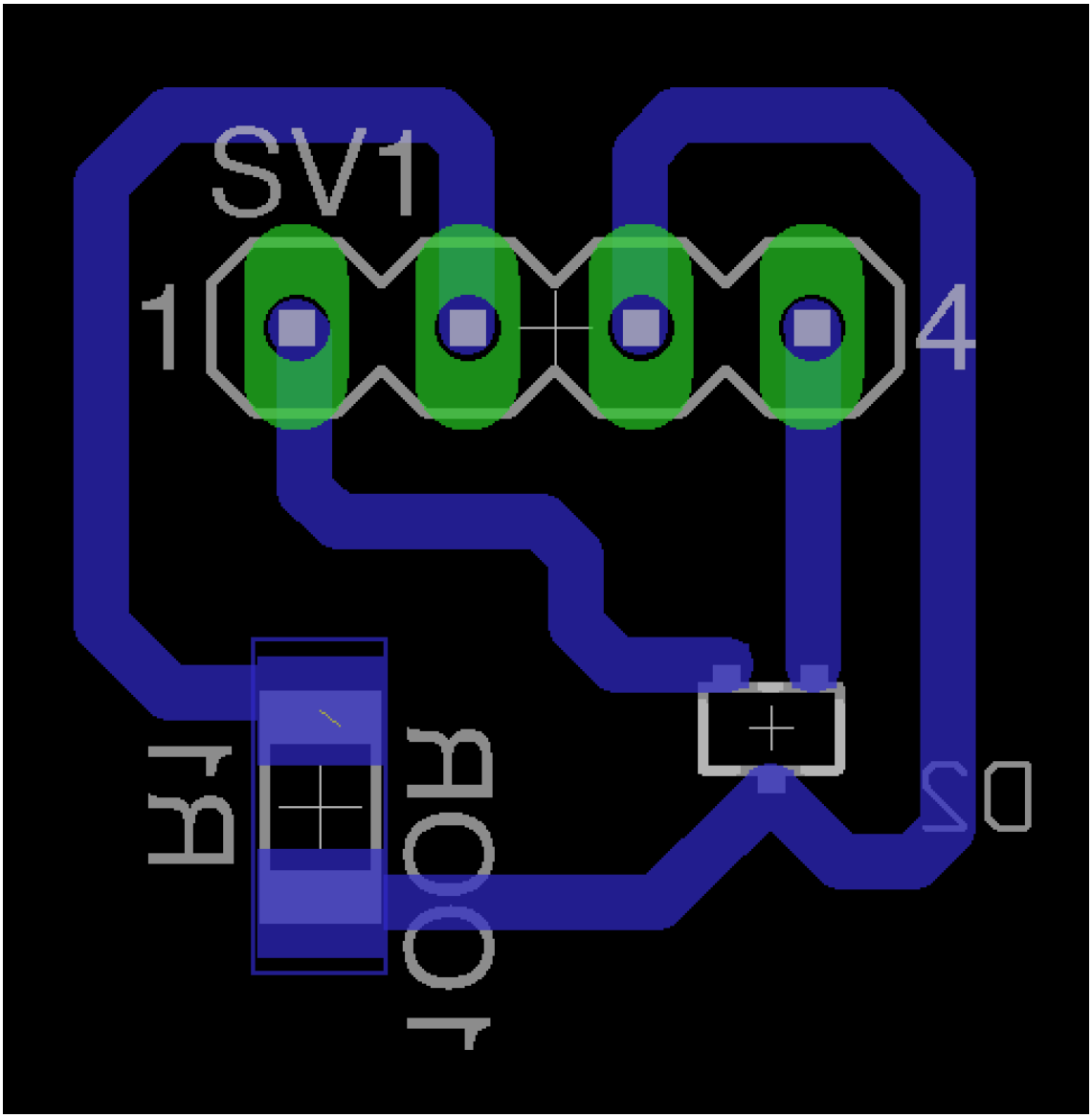
Obr. 10: Zesilovací obvod realizován na nepájivém poli

Jako zdroj napájení byl použit DC/DC měnič HN Power SIM1-0515D-DIL8 s 5V vstupem, které je schopné generovat zařízení Arduino UNO a který vstupní napětí konvertuje na ± 15 V potřebných k napájení obou zesilovačů. Pro stabilizaci vstupního napětí 5 V je použit regulátor LM7805. Stabilizované napětí je potřebné k dodání stabilního napětí na vstup diferenciálního zesilovače (ve schématu OPAMP2), který slouží jako napěťový offset posouvající signál do úrovně 0–5 V. Součástí zpětné vazby obou zesilovačů jsou i filtrační kondenzátory o hodnotách 0,47 μF. Vstup a výstup stabilizují kondenzátory o hodnotách 0,1 μF. Termistor nebyl ke korekci teploty použit. V nádrži bude udržováno 25 °C, což je teplota, na kterou je standardizovaná nejen pH elektroda, ale také rovnice HHR pro přepočet *pH* na koncentraci CO_2, viz kapitola 2.1. Ve stejném prostředí byla navrhnuta i DPS tohoto obvodu, všechny součástky jsou v pouzdře THT. Rozměry desky jsou 5x5 cm. Návrh DPS je znázorněn na obr. 11.



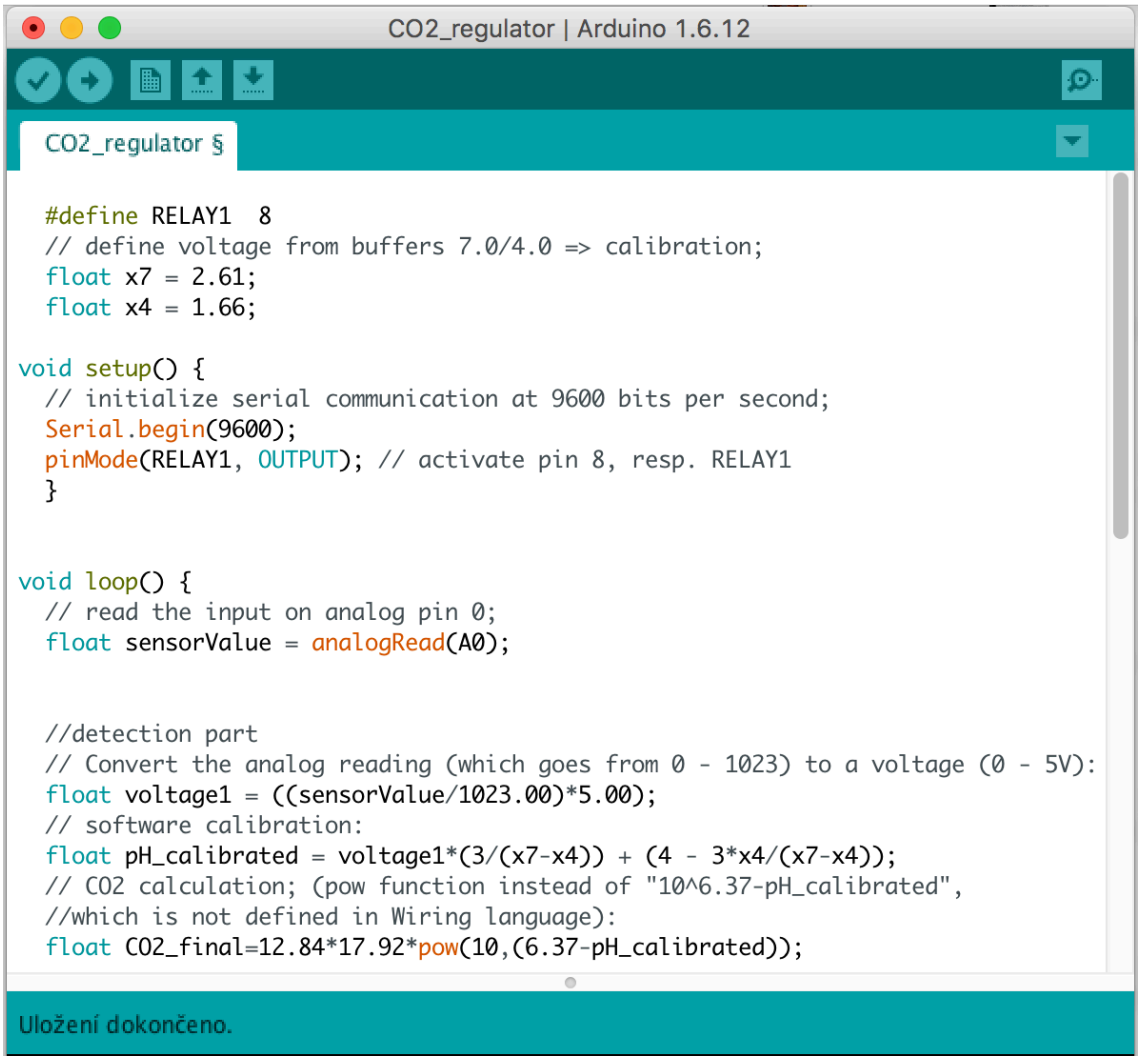
Obr. 11: Návrh DPS v prostředí CadSoft Eagle

Mezi obvod upravující napětí a vstup Arduina UNO bylo nutné zakomponovat ochranný prvek, který bude napětí udržovat v limitních rozmezích pro Arduino 0–5 V, jelikož při kalibrování (konkrétně při přesouvání z jednoho pufru do druhého) může vykazovat pH elektroda na vzduchu napětí mimo rozsah -414–414 mV, způsobující napětí větší, resp. menší než 5 V na výstupu obvodu se zesilovači, což by mohlo poškodit mikrokontrolér. Z tohoto důvodu byla navrhnuta další deska zajišťující výše zmíněné díky součástce se Schottkyho diodami BAT46W. Návrh DPS je na obr. 12. Součástky jsou kromě patice v SMD technologii. Rozměr desky je 2x2 cm.



Obr. 12: Návrh DPS na ochranu vstupu Arduina UNO v prostředí CadSoft Eagle

Dalším krokem v detekci koncentrace CO_2 je přepočet *pH* na koncentraci CO_2, který lze uskutečnit ze znalosti vztahu mezi °*dKH*/*pH* a koncentrací CO_2, viz kapitola 2.1. Celkové programové vybavení týkající se detekce koncentrace CO_2 znázorňuje obr. 13. Kód zahrnuje přepočet nutný kvůli AD převodníku, softwarovou kalibraci a přepočet na koncentraci oxidu uhličitého.



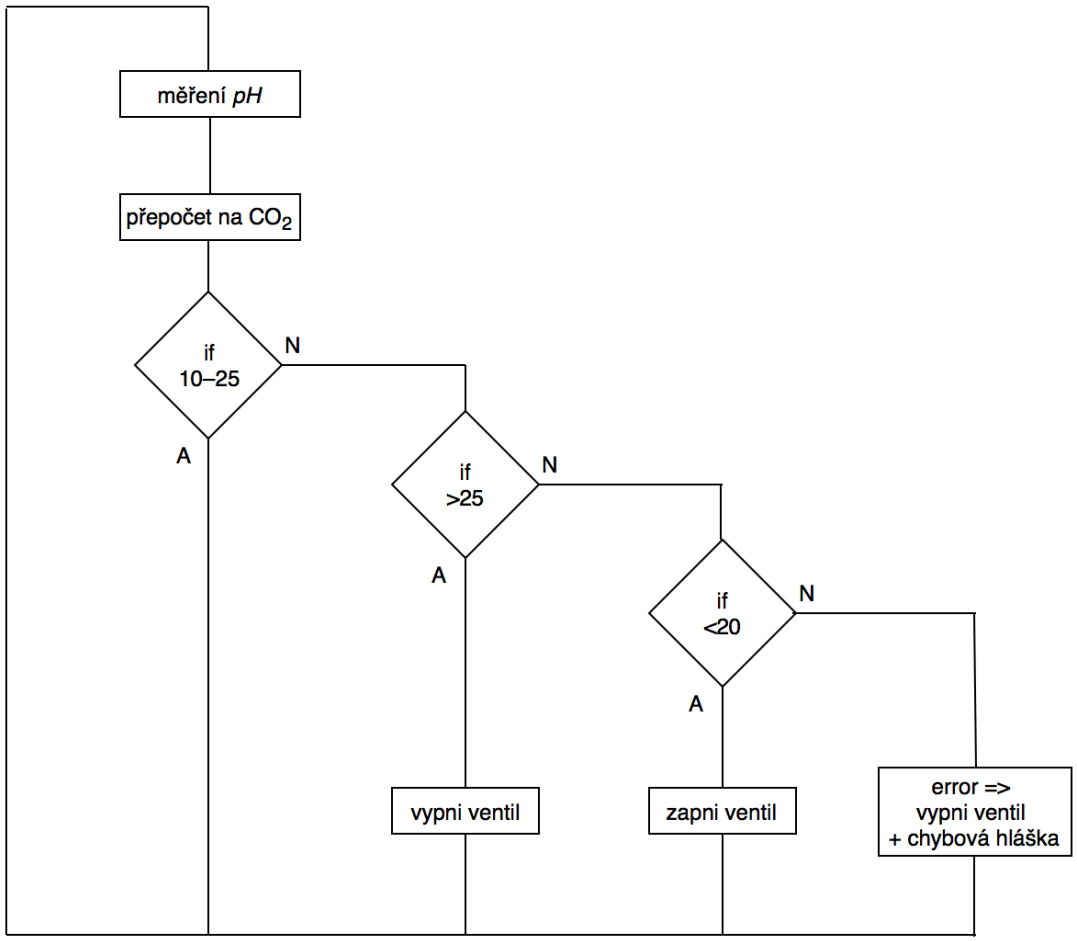
Obr. 13: Kód nahraný v mikrokontroléru Arduino UNO pro definování používaných pinů, zahájení sériové komunikace a detekci koncentrace oxidu uhličitého

4.2 Regulace koncentrace CO_2

Regulační funkce zařízení sloužící ke kontrole a řízení hladiny koncentrace CO_2 ve vodní nádrži byla realizována pomocí releové desky 4 Relay Module (SRD-05VDC Power Relay, Songle Relay Co.), elektromagnetického ventilu SMC EVT 307 (Radio Spares, Corby, UK), systému tlakových ventilů na dávkování oxidu do vodní nádrže z tlakové lahve a regulační části programového vybavení. Koncentrace CO_2 zaznamenaná předchozími detekujícími komponenty je vyhodnocena deskou Arduino UNO, která v případě zjištění nevhodné koncentrace vyšle napětí do releové desky. Propojení těchto dvou komponent je realizováno přes digital output desky Arduino UNO. Prostým vysláním nuly, resp. jedničky (LOW, resp. HIGH) z mikrokontroléru do releové desky lze ovlivnit výstup z releové desky, který je buď v sepnutém, nebo v rozepnutém stavu a který podle toho otevře, nebo ponechá zavřený elektromagnetický ventil (sepnutý obvod znamená otevření ventilu).

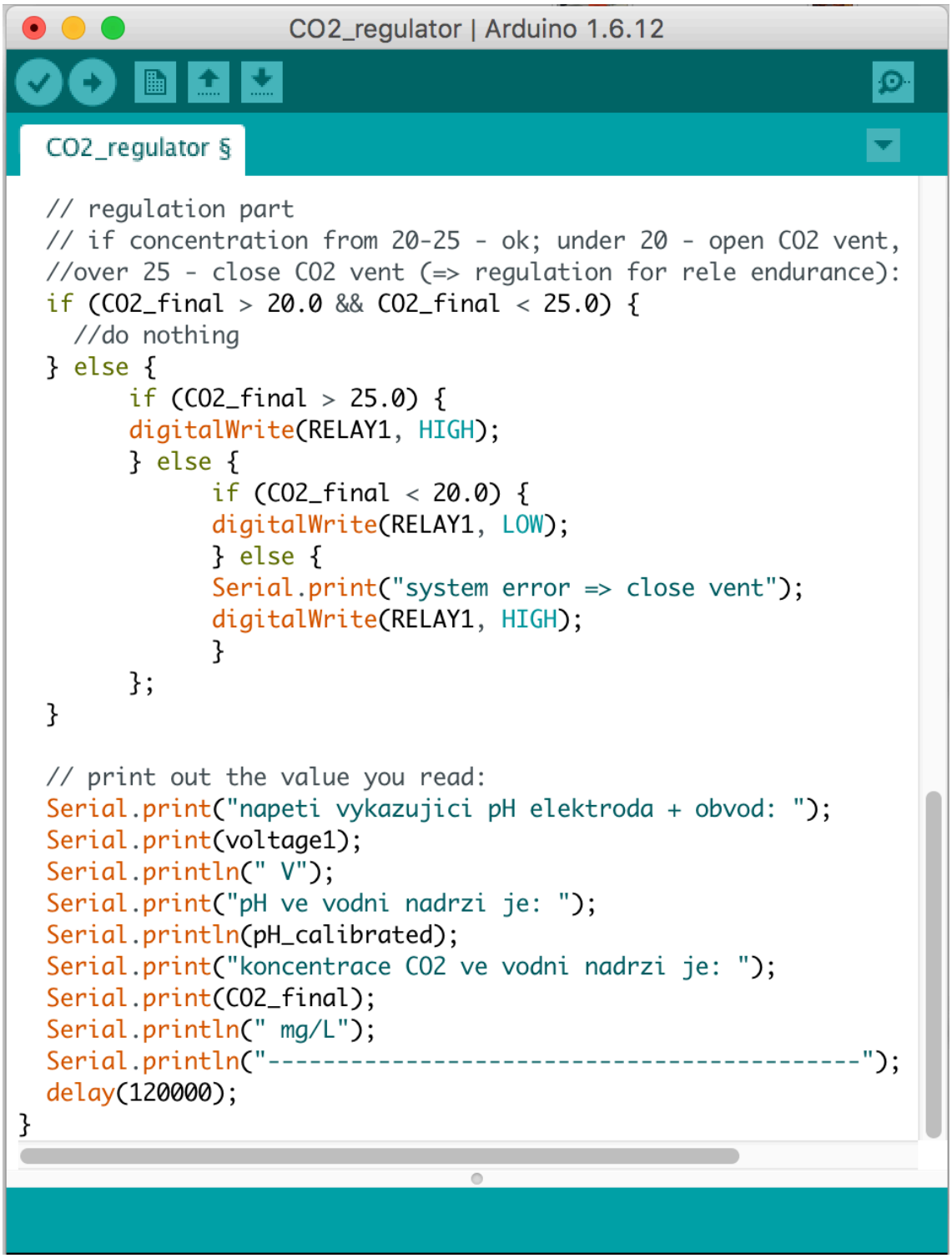
Elektromagnetický ventil tedy propouští CO_2 z tlakové lahve do vodní nádrže v případě, že je koncentrace uvnitř nádrže pod 20 mg/l. Pro prodloužení životnosti relé je důležité použít jako vhodnou koncentraci určité rozpětí hodnot koncentrace, mezi kterými bude aktuální koncentrace CO_2 kolísat. V případě striktního limitu, např. hranice 20 mg/l, by při poklesu hladiny koncentrace pod tuto hodnotu došlo k sepnutí relé a k otevření ventilu. Hladina CO_2 by se po několika vteřinách dostala přes limitní hranici, relé a následně ventil by rozepl, způsobující po krátké době opět pokles pod nastavený limit 20 mg/l, načež by se celý cyklus regulace opakoval. Časté opakování spínání relé a ventilu v rámci sekund z důvodu jedné limitní hranice by zapříčinilo rychlé zničení nejen ventilu, ale hlavně reléové desky, která má životnost v řádu jednotek tisíců sepnutí. Proto bylo určeno rozmezí koncentrace CO_2 20–25 mg/l, kdy v případě poklesu pod 20 mg/l relé sepne a způsobí otevření ventilu, který se zavře až po dosažení horní hranice 25 mg/l. Koncentrace bude poté pozvolna klesat až na spodní hranici 20 mg/l, kdy se ventil opět zapne. Tímto zásahem se zmenší počet sepnutí relé a výrazně se zvýší jeho životnost. Pro hypotetické vědecké účely, kde by se potenciálně nehledělo na počet zničených relé, ale spíše na přesnost udržení hladiny CO_2 na optimální hodnotě, lze použít prostou if–else podmínku, kde by se uživatel v argumentu odkazoval na porovnání aktuální koncentrace CO_2 a optimální. V našem případě bylo z výše uvedených důvodů nutné využít složitější

podmínkový řetězec, viz obr. 14, který zajistí oscilaci aktuální koncentrace oxidu v rozmezí 20–25 mg/l. Dalším důvodem pro nastavení tohoto rozmezí je skutečnost, že optimální hodnota koncentrace CO_2 pro *Danio rerio* bývá uváděna mezi 20 a 25 mg/l.



Obr. 14: Podmínkový cyklus pro zajištění větší životnosti komponent pro regulaci koncentrace CO_2

Programová část regulační funkce Arduina UNO se tedy sestává hlavně z podmínkového cyklu popsaného výše, zbytek se týká vypisování aktuálních hodnot vykazovaného napětí, *pH* a koncentrace CO_2 ve vodní nádrži pro informovanost uživatele při připojení k PC v režimu Serial monitor. Veškerý kód zahrnující regulaci je znázorněn na obr. 15.

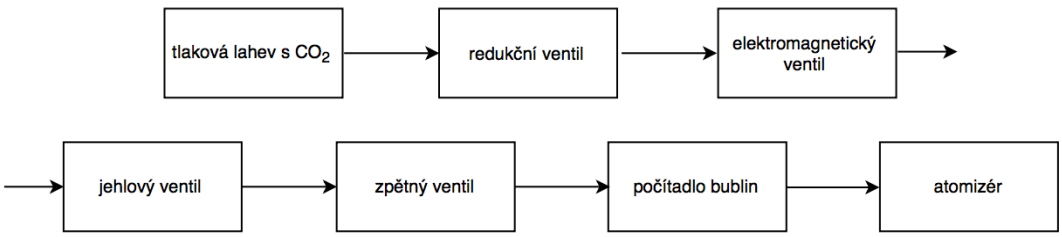


Obr. 15: Kód nahraný v mikrokontroléru Arduino UNO pro řízení hladiny koncentrace oxidu uhličitého a vypisování aktuálních hodnot

Jednotlivé komponenty, tj. deska upravující napětí z pH elektrody, deska s ochranným prvkem, Arduino UNO a relé deska, byly kvůli úhlednosti a lepšímu

zacházení se zařízením uloženy do elektroinstalační krabičky s vývody pro příslušné spojení relé desky s elektromagnetickým ventilem, napájením pro elektromagnetický ventil, s konektory pro pH elektrodu a PC + Arduino, s vypínačem a LED diodami indikujícími sepnutí ventilu a zapnutý, resp. vypnutý stav přístroje.

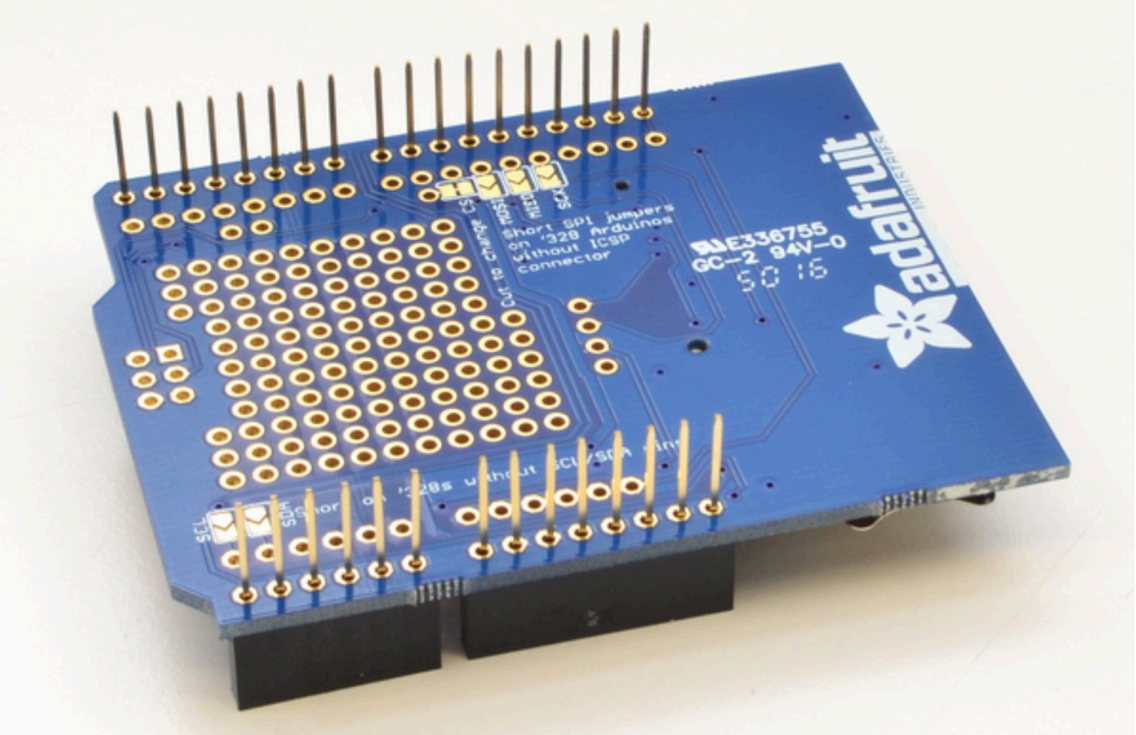
Samotné dávkování oxidu uhličitého bylo realizováno pomocí tlakové lahve obsahující CO_2, série tlakových ventilů a atomizéru pro rozprašování plynu na miniaturní bublinky, které se lépe rozpustí ve vodě. Pro snížení průtoku plynu z tlakové lahve je nutné zařadit redukční ventil. Jemné nastavení průtoku lze regulovat jehlovým ventilem, který bude vhodné použít pro nastavení rychlosti dávkování oxidu uhličitého do vodní nádrže při otevření elektromagnetického ventilu. Rychlost průtoku lze sledovat počítadlem bublin. Ideální rychlost dávkování bývá uváděna jako 12 bublin/min. Příliš rychlá změna oxidu ve vodní nádrži by totiž mohla modelové organismy negativně ovlivnit. Při dodávání plynu do akvária hrozí proniknutí vlhkosti až do tlakové lahve. V případě tlakové lahve plné CO_2 se po proniknutí vlhkosti do lahve tvoří v lahvi kyselina uhličitá, která je schopná poškodit lahev i redukční ventil, a proto je důležité mezi ostatní ventily a atomizér zařadit zpětný ventil. Dále pro spínání kontrolované platformou Arduino UNO je nutný už dříve zmíněný elektromagnetický ventil. Nahromaděný tlak před elektromagnetickým ventilem vytvoří při jeho otevření tlakový ráz, který spolehlivě utlumí jehlový ventil a který by naopak mohl poškodit zpětný ventil. Proto je nutné za elektromagnetický ventil zařadit ventil jehlový. Soustava pro samotné dávkování plynu do akvária je dle schématu na obr. 16 [26].



Obr. 16: Schéma propojení komponent tlakového setu

4.3 Digitální sběr dat

Pro zaznamenání naměřených dat byl použit modul Data Logger Shield, jehož součástí je slot pro paměťovou SD kartu. Modul je možné připevnit na Arduino UNO pomocí pinů, jejichž vývody jsou po připevnění totožné s piny Arduino UNO, viz obr. 17. Propojení komponent s mikrokontrolérem proto proběhne pomocí stejných pinů, které jsou ale v rámci modulu. Ukládání dat je důležité nejen z uživatelského hlediska pro případnou analýzu naměřených dat, ale také pro ověření zařízení a vyhodnocení fungování správné detekce a následného dávkování v rámci této bakalářské práce [27].



Obr. 17: Data Logger Shield (Atmel, CA, USA). Obrázek převzat z [27].

Programová část ukládání dat byla vyřešena zavoláním knihovny nutné pro práci s SD kartou, ujištěním přítomnosti SD karty ve slotu pomocí if–else podmínky, zavolání funkce SD.begin() a následným ukládáním hodnot koncentrace CO_2 do souboru data.csv, které bude možné případně použít k analýze naměřených dat [27]. Programové vybavení týkající se ukládání dat je znázorněno na obr. 18, kde je kvůli přehlednosti znázorněný jen kód pro ukládání dat bez detekční a regulační části programového vybavení. Tato část softwaru je ve finále zakomponována do kompletního kódu.

Obr. 18: Kód zajišťující ukládání dat na SD kartu Data Logger Shieldu

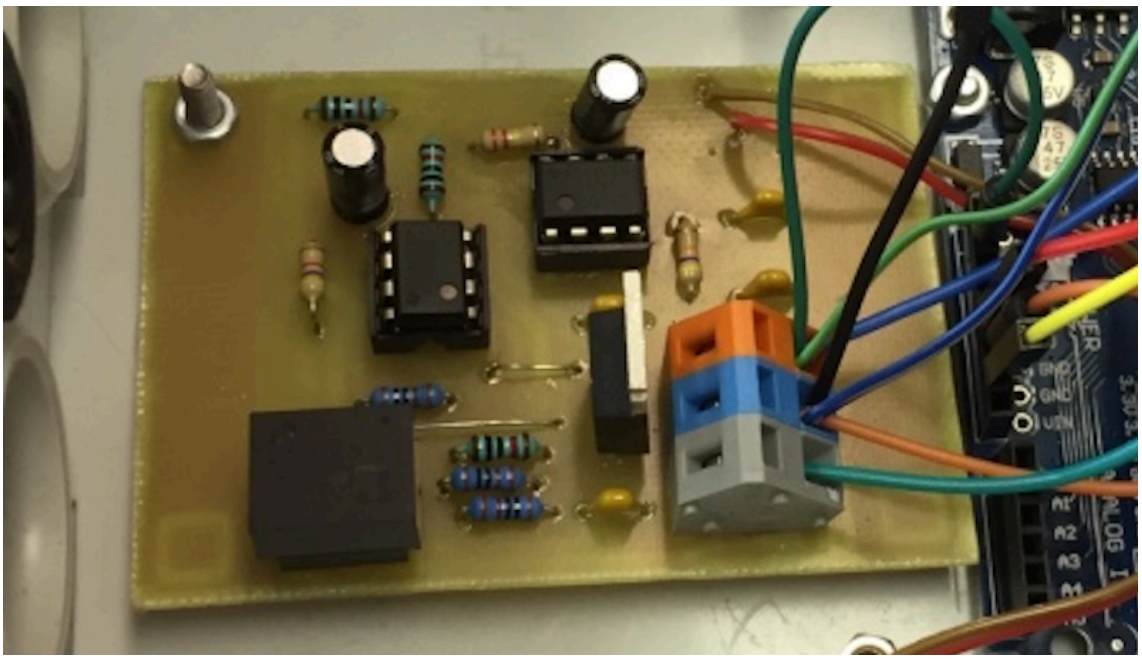
4.4 Ověření funkčnosti

Jelikož určení koncentrace CO_2 je po změření *pH* v akváriu pouze předmětem výpočtu, dá se předpokládat, že korektní zjištění *pH* vede ke správné detekci CO_2. Detekční schopnost zařízení byla proto ověřena porovnáním s komerčním pH metrem InoLab 720 (WTW, Weilheim, Germany) s teplotní kompenzací a v režimu dvojité kalibrace. Hodnoty z pH metru InoLab byly zapisovány každých pět minut. Měření proběhlo v rybniční vodě, kde by se podle předpokladů mělo *pH* pohybovat okolo hodnoty 7, stejně jako ve vodní nádrži pro modelový organismus. Testování trvalo jednu hodinu s tím, že v čase 0:50 se do vody přikapalo pár kapek 1M kyseliny octové při stálém míchání.

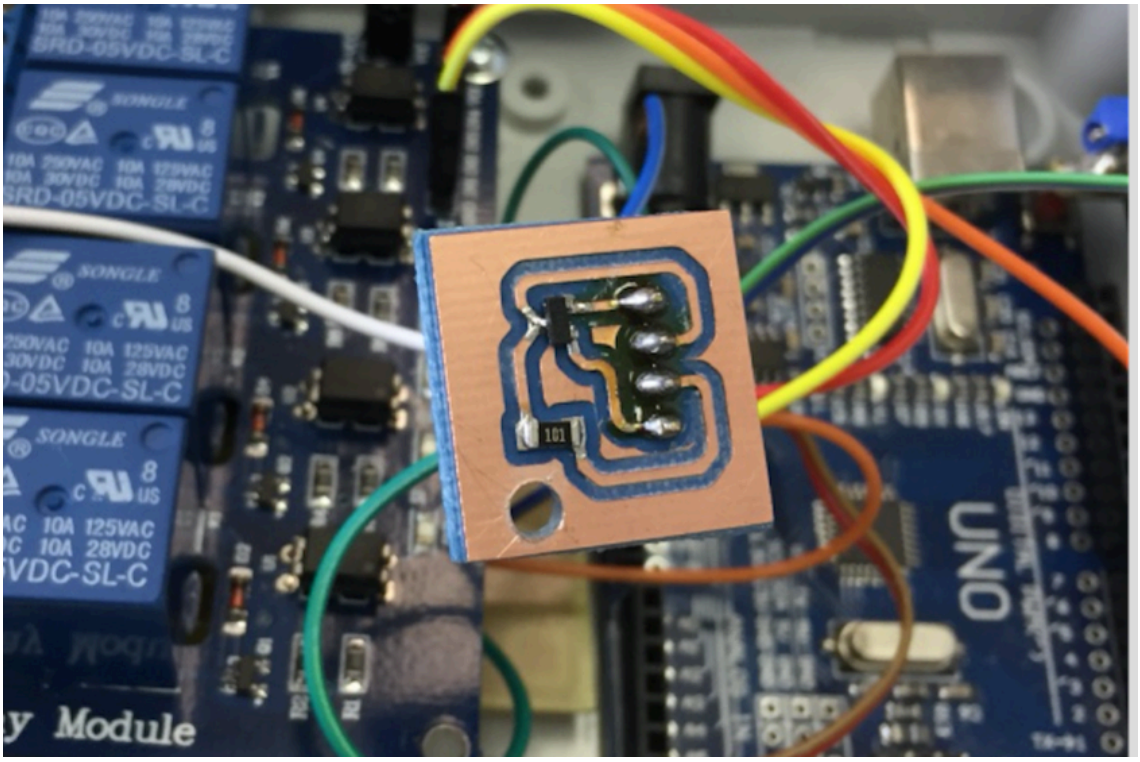
Ověření funkčnosti celého zařízení bylo uskutečněno 24hodinovým testováním ve vodní nádrži s rostlinami i akvarijními rybičkami. Měření bylo uskutečněno na základě sledování regulačního procesu hladiny CO_2 v akváriu až po ustálení koncentrace na hodnotách mezi 20–25 mg/l. Zařízení pro dávkování CO_2 bylo zkalibrováno a následně spuštěno krátce po načerpání čerstvé vody. V rámci obou měření byla teplota udržována na 25 °C pomocí akvarijního vytápění.

5 Výsledky

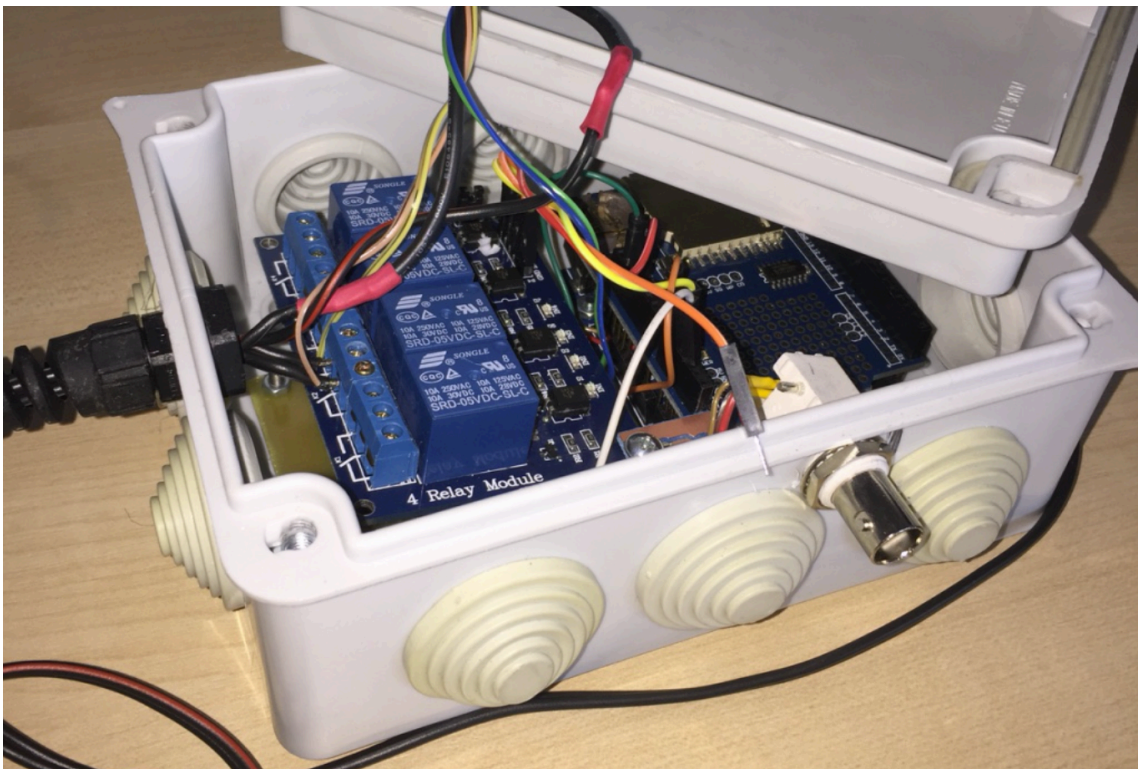
Vytvořené zařízení se skládá z desky plošných spojů pro úpravu a zaznamenání napětí generovaného pH elektrodou, viz obr. 19, desky plošných spojů s prvkem chránícím analogový vstup mikrokontroléru proti přepětí i podpětí, viz obr. 20, Arduina UNO pro zaznamenání, kontrolu a řízení koncentrace oxidu uhličitého ve vodní nádrži (+ programového vybavení nahraného do mikrokontroléru), Data Logger Shieldu pro ukládání naměřených dat do SD karty a relé desky nutné ke spínání elektromagnetického ventilu řídícího přívod CO_2 do nádrže. Relé deska byla usazena nad desku plošných spojů upravující napětí pomocí tří distančních sloupků. Všechny tyto komponenty jsou usazeny v šedé instalační krabičce, viz obr. 21.



Obr. 19: Deska plošných spojů pro úpravu napětí generované pH elektrodou

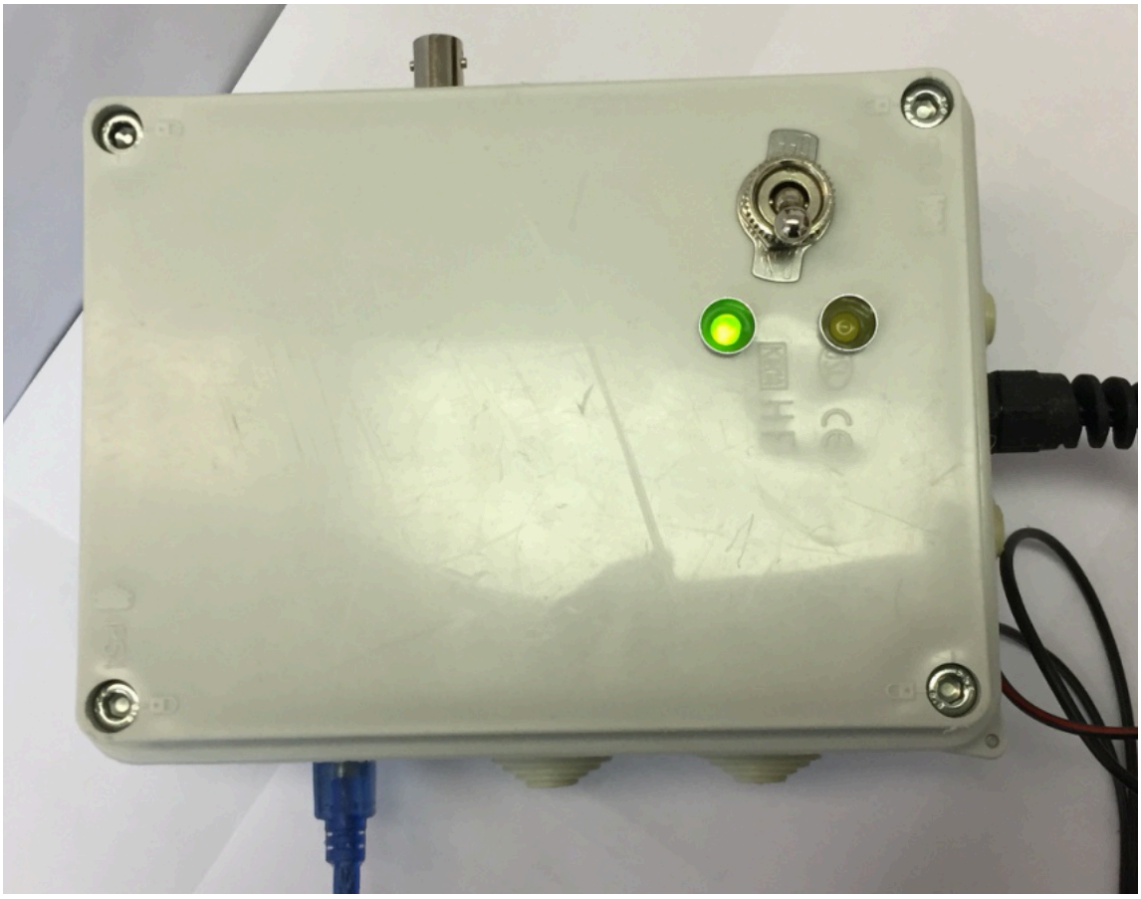


Obr. 20: Deska plošných spojů s ochranným prvkem



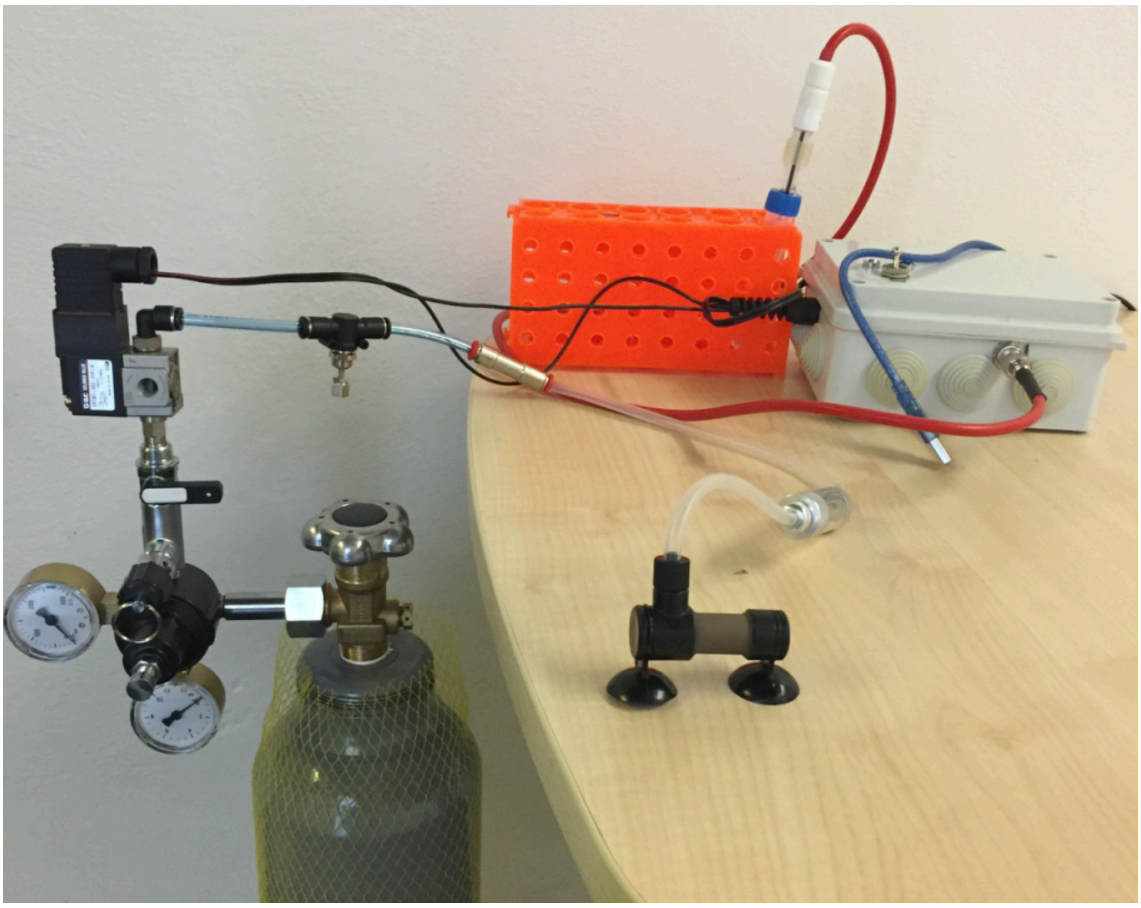
Obr. 21: Komponenty uložené v instalační krabičce

Do stěny krabičky byl pro snadnou manipulaci vsazen konektor BNC, vyvrtán otvor pro kabel USB k mikrokontroléru a vsazen vývod pro elektromagnetický ventil a jeho napájení. Vypínač zařízení byl dán na horní stranu krabičky společně s LED diodami indikujícími napájení Arduina a sepnutí elektromagnetického ventilu, viz obr. 22.



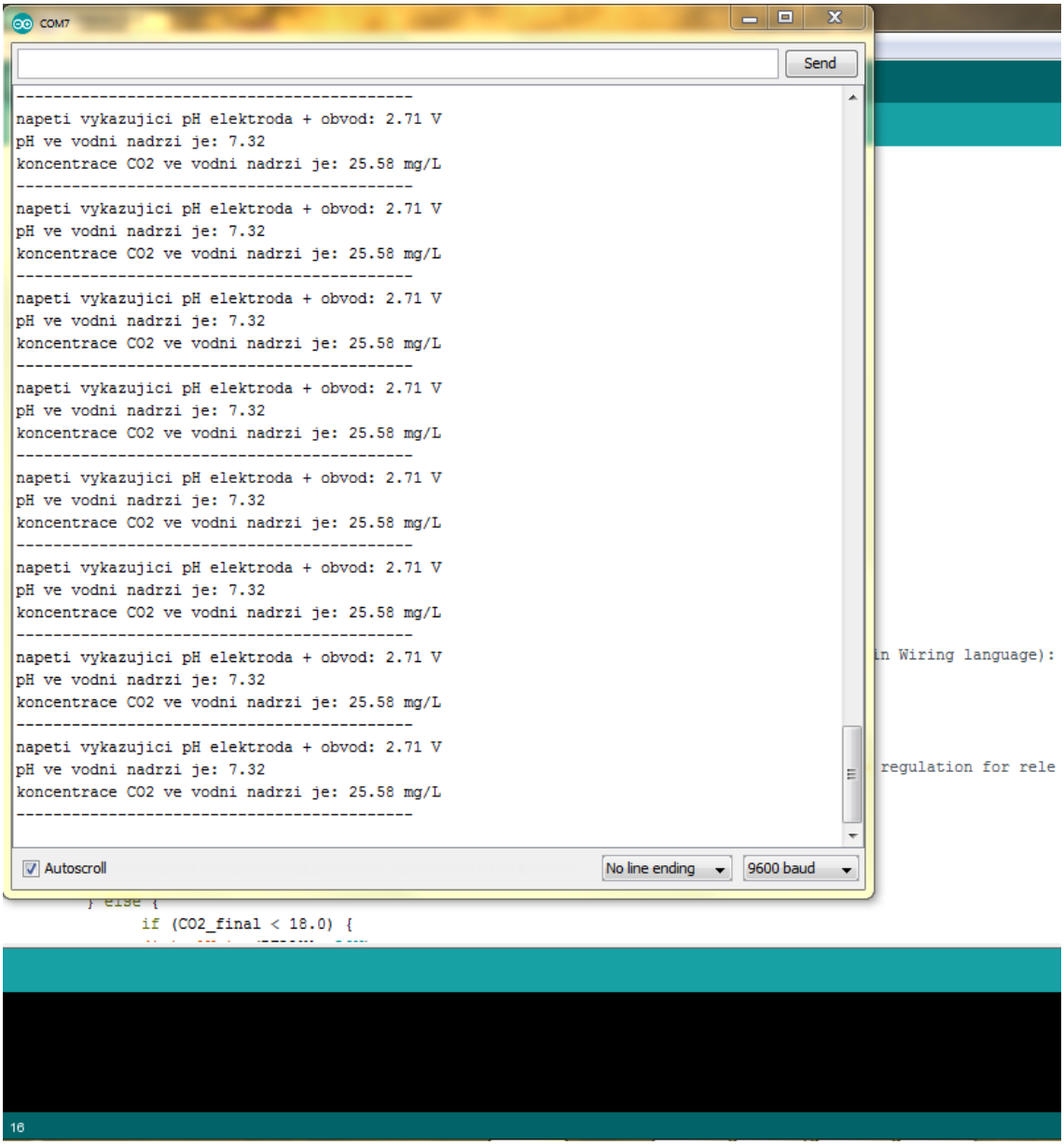
Obr. 22: Krabička s konektory vývody pro jednotlivé komponenty, vypínačem zařízení a LED indikátory

Součástí zařízení je také senzor v podobě pH elektrody a tlakový set s lahví CO_2 pro dávkování oxidu do nádrže, počítače bublin a atomizéru pro tvorbu miniaturních bublin, které jsou lépe rozpustitelné ve vodě. Celé zařízení je znázorněno na obr. 23.



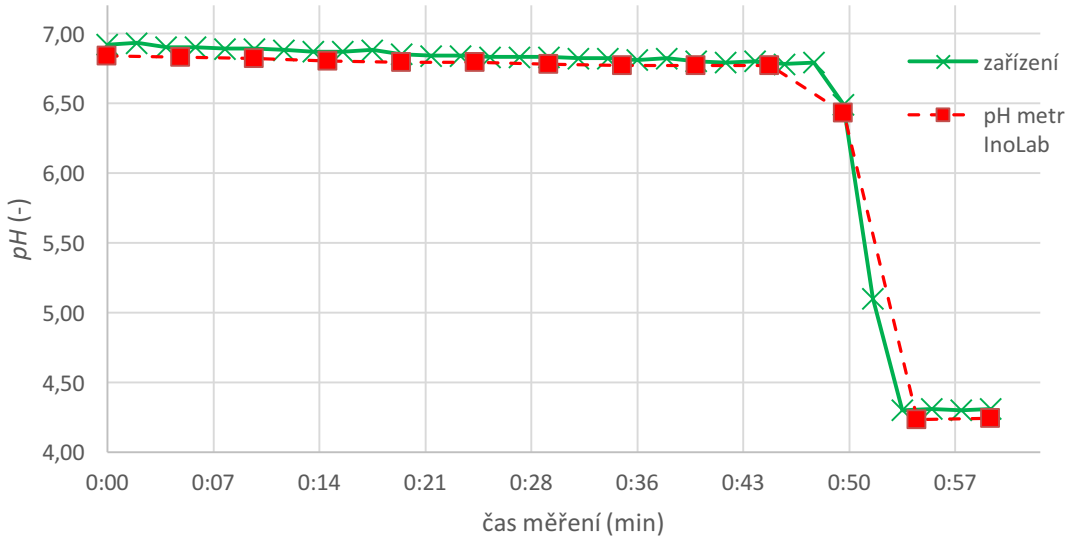
Obr. 23: Kompletní zařízení s počítadlem bublin a atomizérem

Zdrojový kód v jazyce Wiring je nahraný do programovatelné desky Arduino UNO. Kód v sobě zahrnuje v rámci detekční části úpravu napětí nutnou kvůli AD převodníku, softwarovou kalibraci pH elektrody, přepočet hodnoty *pH* na koncentraci CO_2 se započítáním faktoru tvrdosti kladenské vody z kohoutku a optimální teplotou pro *Danio rerio*. Regulační části programového vybavení se sestává z podmínkového řetězce nutného k prodloužení výdrže releové desky a kódu zajišťujícího výpis aktuálního napětí generovaného pH elektrodou po úpravě obvodem, aktuálního *pH* v akváriu a aktuální hladiny koncentrace CO_2 v akváriu v režimu Serial monitor zařízení Arduino UNO, viz obr. 24. Kód obsahuje také programovou část nutnou pro ukládání naměřených dat do SD karty Data Logger Shieldu.

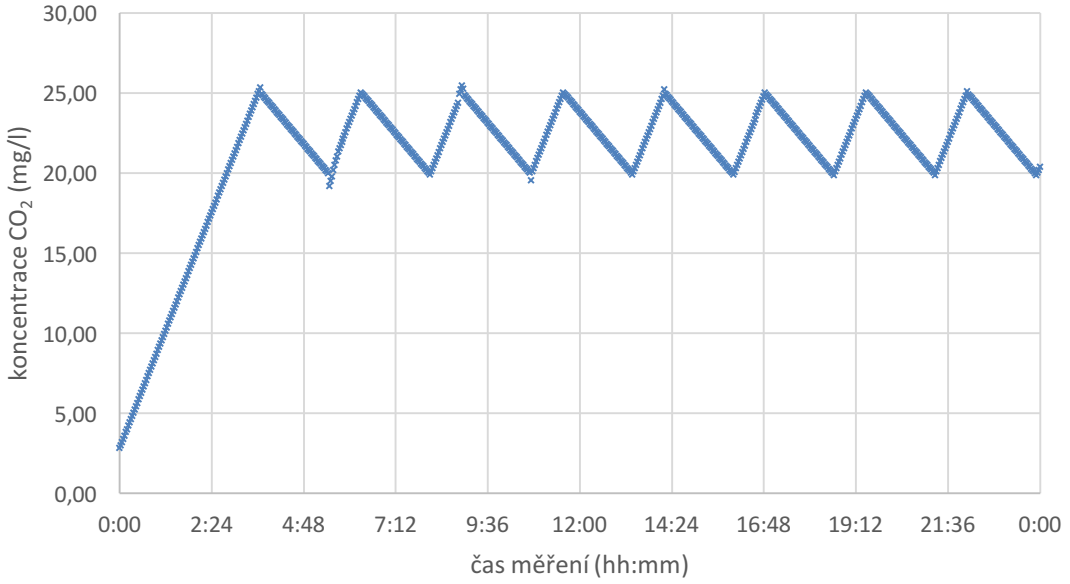


Obr. 24: Běžící program vypisující hodnotu napětí, pH a aktuální koncentraci CO_2 v režimu Serial monitor zařízení Arduino UNO

Porovnání přesnosti detekce bylo realizováno hodinovým porovnáním s komerčním pH metrem InoLab 720 (WTW, Weilheim, Germany), viz obr. 25. Maximální relativní odchylka byla 1,2 %. Ověření funkčnosti proběhlo v rámci 24hodinového měření v běžném domácím akváriu. Graf závislosti aktuální koncentrace na čase je na obr. 26.



Obr. 25: Graf porovnání přesnosti detekce pH s komerčním pH metrem InoLab



Obr. 26: Aktuální koncentrace CO_2 v akváriu v závislosti na době působení zapnutého zařízení

6 Diskuze

Hlavním cílem práce bylo navrhnout a realizovat systém založený na platformě Arduino UNO pro sledování a udržení koncentrace CO_2 ve vodní nádrži pro modelový organismus *Danio rerio* na optimální úrovni, ověřit funkčnost systému a zdokumentovat naměřené výsledky. Mezi hlavními parametry, které zařízení muselo splňovat, byla možnost kontinuálního měření hladiny CO_2, regulace přítoku CO_2 do nádrže z tlakové lahve podle aktuální koncentrace CO_2 a kombinovatelnost s komplexním zařízením pro udržování stálého prostředí (teplota, osvětlení, koncentrace CO_2) pro modelový organismus. Zařízení lze principálně rozdělit na detekční a regulační část.

V rámci detekční části zařízení je stěžejní kalibrace pH elektrody, která je uskutečněná softwarově díky pomocnému kódu určením vykazovaných napětí při měření v pufrech o *pH* 7,0 a *pH* 4,0 a následnému přepnutí a nahrání finálního kódu (upraveného podle zjištěných hodnot) do zařízení Arduino UNO. Tento proces je záležitostí několika minut a mohlo by se zdát, že je nevhodný pro uživatele, stejně jako zdržení kvůli manipulace s pufry, kde je nutné jejich ohřátí na standardní teplotu 25 °C, a jelikož pufry se skladují v lednici při teplotě zhruba 8 °C, tak jejich ohřátí trvá několik dalších minut. Ovšem při potenciální aplikaci zařízení na vodní nádrž uživatele lze předpokládat, že se kalibrace uskuteční při nainstalování zařízení nebo při případné údržbě uživatelem, která by probíhala např. jednou týdně. Dalším důvodem k vybrání softwarové metody kalibrace je snadnější postup. Kalibrace pH elektrody pomocí potenciometrů na diferenciálním zesilovači je prakticky velmi náročná a musel by při ní být zajištěn přístup k hlavní desce plošných spojů, kde by se potenciometr ve zpětné vazbě na diferenciálním zesilovači nacházel. Tento způsob kalibrace je proto snadnější a také bezpečnější. Eventuální uživatel nemusí mít elektrotechnické vzdělání, a proto je vhodnější zvolit postup kalibrace, při kterém nebude nutné otevírání krabičky a přístup k vnitřním částem zařízení. Toto je vhodné i z hlediska možného průniku vody do vnitřních obvodů při otevření krabičky u akvária. Dalším bezpečnostním prvkem je nastavení základního stavu elektromagnetického ventilu na zavřeno, tzn. ventil se otevře až při sepnutí relé – pro otevření elektromagnetického ventilu je nutná správná funkce zařízení a jeho napájení.

V případě poruchy, např. výpadku napájení, by v opačném případě ventil stále propouštěl do vodní nádrže CO_2 a usmrtil by tím modelový organismus.

Samotný přepočet ze znalosti *pH* a alkality ve vodní nádrži na koncentraci CO_2 skýtá několik nepřesností. Pokud uvažujeme optimální teplotu akvária 25 °C, na kterou je výpočet CO_2 nastaven a která bude realizována v rámci hotového komplexního systému na regulaci prostředí pro modelové organismy, zbývá nám vliv aktivitního koeficientu a iontové síly roztoku. Tyto parametry však bývají v akvaristické praxi zanedbány, jelikož ve výsledku nezpůsobují majoritní chyby (vodní nádrž je v podstatě velmi zředěný roztok, kde se aktivitní koeficient blíží hodnotě 1). V rámci bakalářské práce došlo k ověření přesnosti detekční části zařízení porovnáním naměřeného *pH* s *pH* naměřeným komerčním pH metrem InoLab 720 (WTW, Weilheim, Germany), kde maximální relativní odchylka vyšla 1,2 %. Tato nepřesnost může být způsobena výše zmíněným zjednodušením ohledně aktivitního koeficientu. Dalším faktorem způsobujícím odchylku může být zaokrouhlování hodnot AD převodníkem na analogovém vstupu Arduina UNO, zaokrouhlení v rámci desetinných míst mohou mít vliv na výsledný výpočet. Šum na obvodu upravujícím napětí byl po použití desky plošných spojů v porovnání s použitím nepájivého pole minimální.

Z obr. 26 je patrný vliv podmínkového cyklu začleněného do regulační části. Hodnoty po dosažení dolní meze nastavené optimální hladiny CO_2 stoupají na horní mez a po jejím dosažení klesnou opět na dolní mez a dále oscilují mezi dvěma hodnotami nastavenými v nahraném programovém vybavení platformy Arduino UNO. Tímto mechanismem je zajištěna delší trvanlivost relé desky a samotného elektromagnetického ventilu regulujícího přívod oxidu do vodní nádrže. Limitace tohoto stavového regulátoru jsou zřejmé. V laboratorních podmínkách, kde by byla striktně vyžadována konkrétní jedna hodnota, na které by se koncentrace CO_2 měla držet, by bylo zapotřebí použít přesnější, avšak daleko prostší metody. Rozvětvený if–else řetězec nutný pro oscilaci hodnot koncentrace mezi danými limity lze nahradit kvůli přesnosti regulace koncentrace CO_2 jednou if–else podmínkou obsahující v argumentu porovnání aktuální hodnoty a optimální hladiny koncentrace CO_2, viz kapitola 4.2.

S přihlédnutím k výsledkům z ověření přesnosti detekce hladiny koncentrace CO_2, kde maximální relativní odchylka vyšla 1,2 %, bylo ověření hotového zařízení realizováno 24hodinovým měřením, kde se sledoval průběh dávkování oxidu uhličitého do akvária s rostlinami i akvarijními rybičkami a zaznamenávaly se hodnoty koncentrace CO_2 dle nastavení v programovém vybavení vždy po 2 minutách, viz obr. 26. Pro konstrukci grafu byla použita data importovaná z SD karty Data Logger Shieldu, kam program zapisoval každou zaznamenanou hodnotu CO_2, viz kapitola 4.3. Z grafu je patrné, že hladina CO_2 byla po napuštění vodní nádrže (v čase 0 min) na zhruba 3 mg/l, jelikož ve vodě z kohoutku se příliš rozpuštěného oxidu uhličitého nenachází. Zařízení vyhodnotilo stav v akváriu jako příliš nízkou úroveň koncentrace CO_2 a sepnulo elektromagnetický ventil do pozice otevřeno. Koncentrace zhruba tři hodiny stoupala přibližně lineárně až k optimální úrovni. Rychlost dávkování je ovlivnitelná jehlovým ventilem, který reguluje průtok plynu z tlakové lahve, a může být sledována počítadlem bublin. Příliš rychlá změna koncentrace CO_2 není vhodná a tudíž je důležité v rámci tlakového setu jehlový ventil nastavit na průtok podle potřeb vyhovujících modelovému organismu, tj. přibližně 12 bublin/min. Po dosažení optimální úrovně hodnoty začaly podle předpokladu oscilovat v rozmezí 20–25 mg/l díky programovému vybavení mikrokontroléru Arduino UNO. Drobné překročení nastaveného limitu patrné z obr. 26 je způsobeno pravděpodobně tím, že CO_2 není napříč objemem kapaliny zcela rovnoměrně rozpuštěno.

7 Závěr

V rámci předložené bakalářské práce byly zpracovány postupy a metody detekce a regulace *pH* a koncentrace CO_2 ve vodní nádrži.

Výstupem práce je návrh a vyhotovení zařízení, které po korektní kalibraci detekuje aktuální hladinu koncentrace CO_2 pomocí pH elektrody, desky plošných spojů upravující a detekující napětí generované pH elektrodou, desky plošných spojů s prvkem chránícím analogový vstup mikrokontroléru Arduino UNO proti přepětí i podpětí. Platforma Arduino UNO také detekuje a přepočítává hodnotu *pH* na hodnotu koncentrace CO_2 a vyhodnocuje vhodnost aktuální koncentrace CO_2. Regulační funkce zařízení je kromě tlakového setu zajištěna díky programovému vybavení platformy Arduino UNO, která přímo v návaznosti na detekované hodnoty ovlivňuje elektromagnetický ventil, který kontroluje přívod oxidu uhličitého z tlakové lahve do vodní nádrže. Obě desky plošných spojů, Arduino UNO, relé deska a Data Logger Shield jsou umístěny v krabičce s vypínačem, indikátory LED, konektorem a vývody pro další komponenty zmíněné výše. Hotové zařízení pracuje na základě řízení regulace díky platformě Arduino UNO, a proto je přímo vhodné pro použití v celku s regulátory osvětlení a teploty za účelem totálního udržení stálých podmínek pro modelový organismus *Danio rerio.*

Funkčnost zařízení byla ověřena nejprve v rámci detekční přesnosti porovnáním s komerčním pH metrem InoLab 720, kde maximální relativní chyba byla 1,2 %. Prokázání správnosti regulace proběhlo v rámci 24hodinového měření ve vodní nádrži s rostlinami i akvarijními rybičkami, kde se sledovala aktuální koncentrace oxidu uhličitého po výměně vody v akváriu. Koncentrace CO_2 lineárně stoupala po zhruba tři hodiny od hodnoty typické pro kladenský vodovod po nastavené rozmezí ideální hodnoty, ve kterém po zbylou dobu oscilovala.

Seznam použité literatury

[1] VELDMAN, Matthew B a Shuo LIN. Zebrafish as a Developmental Model Organism for Pediatric Research. Pediatric Research. 64, 470-476. DOI: 10.1203/PDR.0b013e318186e609. ISSN 0031-3998.

[2] Sprague, J., Clements, D., Conlin, T., Edwards, P., Frazer, K., Schaper, K., Segerdell, E., Song, P., Sprunger, B., Westerfield, M. 2003The Zebrafish Information Network (ZFIN): the zebrafish model organism database Nucleic Acids Res . 31241–243

[3] LELLÁK J.; KUBÍČEK F. *Hydrobiologie.* Vydání první. Praha: Karolinum, 1992. 260 s.

[4] SCHLIEWEN, Ulrich. Vaše akvárium. 2012. ISBN 978-80-7236-801-3.

[5] Základy CO2 v akváriu. Rostlinna–akvaria.cz [online]. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: https://www.rostlinna-akvaria.cz/zaklady-co2-v-akvariu-40

[6] MY DIY CO2. Eazy One Aquarium [online]. 2014 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: http://eazyoneaquarium.blogspot.cz

[7] Ing Karel Krček, Akvaristická Technika , ed. 1., Nakladatelství technické literatury, n. p., 1986, ISBN 04-301-86

[8] SCHEURMANNOVÁ, I. *Sladkovodní akvárium – Jak na to.* První české vydání. Praha: Vašut, 2002.144 s. ISBN 80-7236-136-8

[9] CLARKE, M.; WEST, I. *TheCompleteAquariumGuide.*Cologne: KonemannVerlagsgesellschaftmbH, 2000. 288s. ISBN 3-8290-1736-7

[10] Fully Automatic CO2 Injection Systems: how to set up: Drs. Foster & Smith Educational Staff. Doctors Foster and Smith [online]. , 1-2 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: http://www.drsfostersmith.com/pic/article.cfm?articleid=527

[11] ATKINS, P a Julio DE PAULA. Fyzikální chemie. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013, xxvi, 915 s. ISBN 978-80-7080-830-6.

[12] DE LEVIE, Robert. The Henderson–Hasselbalch Equation: Its History and Limitations. Journal of Chemical Education. 2003, **80**(2), 146. DOI: 10.1021/ed080p146.

[13] Bartoš, M., Šrámková, J., Staněk, V., Renger, F., & Kalous, J. (2004). Analytická chemie I. *Univerzita Pardubice*.

[14] PITTER, Pavel. KONCEPCE NEUTRALIZAČNÍCH KAPACIT V HYDROCHEMII A TECHNOLOGII VODY. Chemické Listy. 1999, (93), 509–511.

[15] REJLKOVÁ, Markéta. Tillmanova tabulka. Akvárium. KLUB.AKVA.SK, 2006, (2), 25.

[16] Vinšová, H., P. Zachař, and K. Záruba. "Potenciometrické Měření pH." *Laboratoř analytické chemie I–Seznam prací a návody ke stažení. Praha: Ústav analytické chemie VŠCHT Praha* (2010).

[17] Měření *pH* v akvaristice. Akvarko.cz [online]. 23.3.2003. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: http://www.akvarko.cz/clanky.php?str=109

[18] KERRIDGE, Phyllis Margaret Tookey. The Use of the Glass Electrode in Biochemistry. Biochemical Journal. 1925, **19**(4), 611–617. DOI: 10.1042/bj0190611.

[19] Klouda, P.: Moderní analytické metody. Nakladatelství Pavel Klouda. Ostrava 2003.

[20] ŽÁK, Z. Kvalita měření pH – TEORIE A PRAXE. CHEMagazín, 2005, roč. 15, č. 6, s. 22-23. ISSN: 1210- 7409.

[21] METTLER-TOLEDO AG, ANALYTICAL. Průvodce měřením *pH* - teorie a praxe laboratorních pH aplikací. 10/2007. [cit. 2017-04-24]. Dostupné také z: www.mt.com/education-line

[22] PUNČOCHÁŘ, J. Operační zesilovače v elektronice. 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 495 s. ISBN 80-730-0059-8.

[23] Low Bias Current Amplifiers. Linear Technology [online]. 2016 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: http://www.linear.com/solutions/1191

[24] Arduino Board UNO Device Atmega328P (Atmel- 8271J-AVR-ATmega-Datasheet_11/2015) Date: November 2015. ATMEL.

[25] Vedral, Josef, and Jan Fischer. *Elektronické obvody pro měřící techniku*. České vysoké učení technické, 2004.

[26] MARTINICE, Petr. CO2 z tlakové lahve - skládáme si svůj set [online]. 2013 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: https://rybicky.net/clanky/1177-co2-z-tlakove-lahve-skladame-si-svuj-set-z-overenych-levnych-komponent

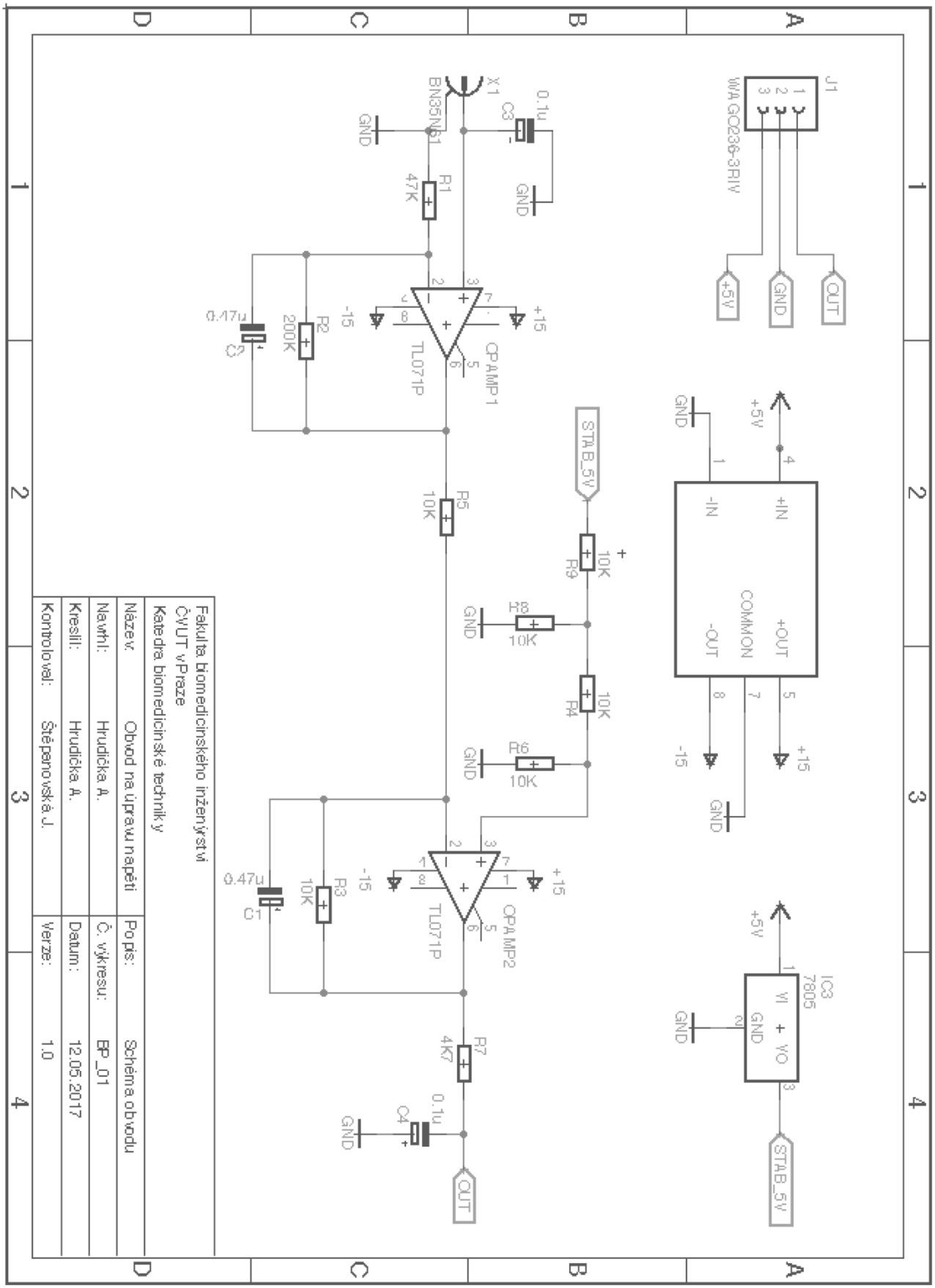
[27] EARL, Bill. Adafruit Data Logger Shield [online]. Adafruit, 2017 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-data-logger-shield.pdf

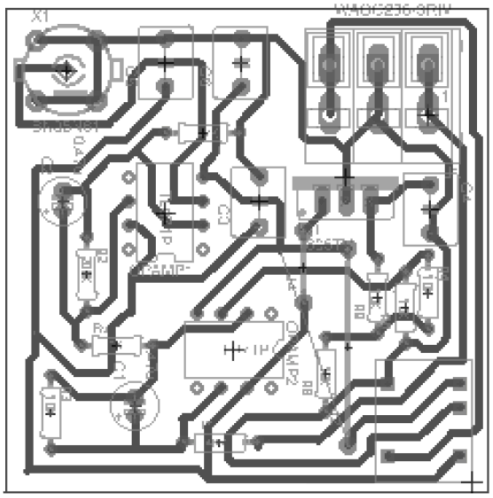
Obsah přiloženého CD

1) klíčová slova
2) abstrakt česky
3) abstrakt anglicky
4) naskenované zadání práce
5) kompletní bakalářská práce
6) použitý kód v jazyce Wiring
7) výkresy schémat obvodů a DPS

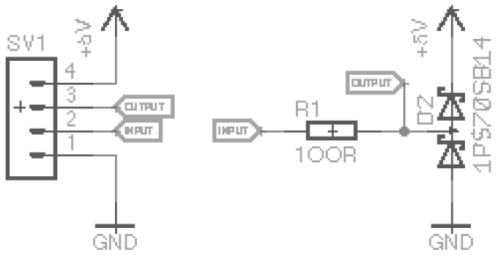
Seznam příloh

Číslo výkresu	Název
BP_01	Obvod na úpravu napětí
BP_02	DPS na úpravu napětí
BP_03	Obvod s ochranným prvkem
BP_04	DPS s ochranným prvkem

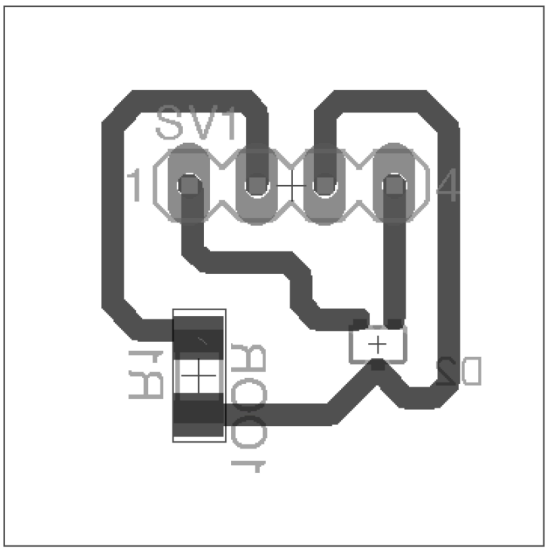

J1
WA GC236-3R1V
+5V
GND
OUT
IC3
7805
VI
GND
VO
STAB_5V
+IN
-IN
COMMON
+OUT
-OUT
+15
-15
X1
BN35N61
C3
0.1u
R1
47K
C2
0.47u
R2
200K
CPAMP1
TL071P
R5
10K
STAB_5V
R9
10K
R8
10K
R4
10K
R6
10K
C1
0.47u
R3
10K
CPAMP2
TL071P
R7
4K7
C4
0.1u
Fakulta biomedicínského inženýrství
ČVUT v Praze
Katedra biomedicínské techniky
Název: Obvod na úpravu napětí
Popis: Schéma obvodu
Navrhl: Hrudička A.
Č. výkresu: BP_01
Kreslil: Hrudička A.
Datum: 12.05.2017
Kontroloval: Štěpanovská J.
Verze: 1.0



Fakulta biomedicínského inženýrství ČVUT v Praze Katedra biomedicínské techniky			
Název:	DPS na úpravu napětí	Popis:	Deska plošných spojů
Navrhl:	Aleš Hrudička	Č. výkresu:	BP_02
Kreslil:	Aleš Hrudička	Datum:	12.05.2017
Kontroloval:	Jana Štěpanovská	Verze:	1.0



Fakulta biomedicinského inženýrství ČVUT v Praze Katedra biomedicínské techniky			
Název:	Obvod s ochranným prvkem	Popis:	Schéma obvodu
Navrhl:	Hrudička A.	Č. výkresu:	BP_03
Kreslil:	Hrudička A.	Datum:	12.05.2017
Kontroloval:	Štěpanovská J.	Verze:	1.0



Fakulta biomedicínského inženýrství ČVUT v Praze Katedra biomedicínské techniky			
Název:	DPS s ochranným prvkem	Popis:	Deska plošných spojů
Navrhl:	Aleš Hrudička	Č. výkresu:	BP_04
Kreslil:	Aleš Hrudička	Datum:	12.05.2017
Kontroloval:	Jana Štěpanovská	Verze:	1.0