



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NÁVRH A ZHOTOVENÍ ZAŘÍZENÍ OVLÁDAJÍCÍHO DŮLEŽITÉ PARAMETRY PROSTŘEDÍ AKVÁRIA ZALOŽENÉHO NA VYBRANÉM MIKROKONTROLERU

DESIGN AND FABRICATION OF A DEVICE CONTROLLING THE IMPORTANT PARAMETERS OF THE
AQUARIUM BASED ON THE SELECTED MICROCONTROLLER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Cagáň

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

BRNO 2024

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Adam Cagáň

ID: 195290

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a zhotovení zařízení ovládajícího důležité parametry prostředí akvária založeného na vybraném mikrokontroleru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se se zařízeními, které měří a kontrolují důležité parametry v akváriu. Na základě studie navrhnete komplexní zařízení, které bude splňovat všechny požadavky definované touto studií.

Zařízení bude napájeno ze sítě s použitím komerčního zdroje. Navrhnete i záložní zdroj energie z baterie, aby mikrokontroler mohl komunikovat s uživatelským rozhraním v případě výpadku síťového napájení.

Na vybrané platformě vytvořte web server s databází, do které by mikrokontroler zapisoval data, případně bude číst data zadané uživatelem.

Uživatel pomocí webového rozhraní může zobrazovat naměřené teploty v čase, nastavit požadovanou teplotu a měnit čas spínání osvětlení. Celé uživatelské rozhraní bude navrhnuté jako univerzální, tj. k hlavní platformě lze připojit další projekty s mikrokontrolerem (např. domácí meteo stanice, sledování parametrů skleníku atd.) a uživatel si zvolí, který projekt chce sledovat.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce..

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 21.5.2024

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práca sa zaoberá návrhom systému na regulovanie teploty vody v akváriu a meranie tvrdosti vody. V práci je popísaná tepelná analýza konkrétneho modelu akvária a simuláciou je stanovený požadovaný tepelný výkon. Následne je na základe tohto výkonu navrhnuté tepelné čerpadlo založené na Peltierovom module, ktoré doplnené o výmenníky tepla medzi vodou a vzduchom. Ďalej je v práci navrhnutá riadiaca jednotka založená na mikrokontroléri ESP32-S3. Riadiaca jednotka je doplnená o DC-DC menič, napájajúci tepelné čerpadlo, záložný zdroj energie pre mikrokontrolér a vstupný DC-DC menič. Na záver je navrhnuté webové rozhranie s databázou bežiacie na mikropočítači Raspberry Pi 4B, pomocou ktorého je možné meniť požadovanú teplotu vody, dobu osvetlenia akvária a zobrazovať merané parametre vody.

Kľúčové slová

akvárium, Peltierov modul, ESP32, DC-DC menič, web server, databáza

Abstract

This master's thesis describes design of the system, which automatically regulates water temperature in aquarium and measures water hardness. There is performed thermal analysis of specific model of aquarium, which defines required heat power. Based on this power Peltier module and heat exchangers are selected, that are part of designed heat pump. Thesis describes design of control unit based on ESP32-S3 microcontroller and complementary power supply circuit for Peltier module and uninterruptible power supply for microcontroller. Subsequently, there is designed web user interface running on Raspberry Pi 4B, which allows user to change desired water temperature, lighting interval and display measured water parameters.

Keywords

aquarium, Peltier module, ESP32, DC-DC converter, web server, database

Bibliografická citácia

CAGÁŇ, Adam. *Návrh a zhotovení zařízení ovládajícího důležité parametry prostředí akvária založeného na vybraném mikrokontroleru* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-07]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159929>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Jiří Háze.

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko študenta: *Bc. Adam Cagáň*

VUT ID študenta: *195290*

Typ práce: *Diplomová práca*

Akademický rok: *2023/24*

Téma záverečnej práce: *Návrh a zhotovení zařízení ovládajícího teplotu vody a dobu osvětlení akvária založeného na vybraném mikrokontroleru*

Prehlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, nezasiahol som nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: 21. mája 2024

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Jiřímu Házemu, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce.

V Brne dňa: 21. mája 2024

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ZOZNAM TABULIEK	10
ÚVOD	11
1. ZARIADENIA POUŽÍVANÉ V AKVARISTIKE	12
1.1 ZARIADENIA NA REGULÁCIU TEPLoty VODY.....	12
1.2 MERAČE TVRDOSTI VODY.....	13
2. VYBRANÉ PARAMETRE SLEDOVANÉ V AKVARISTIKE.....	15
2.1 TEPLota.....	15
2.2 TVRDOSŤ VODY	15
2.3 OSVETLENIE	16
3. NÁVRH TEPELNÉHO MODULU	17
3.1 KONŠTRUKCIA A PARAMETRE AKVÁRIA	17
3.2 ANALÝZA TEPELNEJ VÝMENY.....	17
3.2.1 Tepelný výkon P_C prenesený z okolia - režim chladienie	18
3.2.2 Tepelný výkon P_H prenesený do okolia – režim ohrievanie.....	19
3.3 PELTIEROV MODUL.....	21
3.3.1 Peltierov jav.....	21
3.3.2 Výber Peltierovho modulu	22
3.4 VÝMENNÍKY TEPLA	23
3.4.1 Výmenník Peltierov modul – voda.....	23
3.4.2 Peltierov modul – okolie	24
4. NÁVRH A KONŠTRUKCIA RIADIACEJ JEDNOTKY S ESP32-S3	25
4.1 SENZORY NA MERANIE TEPLoty A TVRDOSTI VODY.....	26
4.2 NAPÁJANIE 3,3V A ZÁLOŽNÝ ZDROJ	27
4.3 DC-DC MENIČ NAPÁJAJÚCI PELTIEROV MODUL	28
4.4 NÁVRH A OSADENIE DPS	29
5. MECHANICKÁ KONŠTRUKCIA	32
5.1 UPEVNIENIE DODATOČNEJ IZOLÁCIE	32
5.2 KONŠTRUKCIA TEPELNÉHO ČERPADLA	33
5.3 PUZDRO RIADIACEJ JEDNOTKY	34
5.4 UPEVNIENIE SENZOROV V AKVÁRIU	35
6. SOFTVÉR ESP32.....	36
6.1 OPERAČNÝ SYSTÉM FREERTOS	37
6.2 SYNCHRONIZÁCIA REÁLNEHO ČASU	38
6.3 PID REGULÁCIA OHREVVU / CHLADENIA VODY	39
6.4 MERANIE TDS.....	39
6.5 BEZPEČNOSTNÉ FUNKCIE.....	40
6.6 KOMUNIKÁCIA S WEBOVÝM ROZHRAŇM	41
7. WEBOVÉ ROZHRAŇIE A DATABÁZA	42

7.1	REGISTRAČNÝ FORMULÁR A PRIHLÁSENIE	42
7.2	ZÁPIS ÚDAJOV DO DATABÁZY	44
7.3	ZOBRAZOVANIE NAMERANÝCH ÚDAJOV	44
7.4	ŠTRUKTÚRA DATABÁZY	45
7.5	ZÁPIS ÚDAJOV DO ESP32	46
7.6	PRIDANIE ĎALŠÍCH PROJEKTOV	46
8.	VÝSLEDKY V PREVÁDZKE.....	47
8.1	REŽIM OHRIEVANIE	47
8.2	REŽIM CHLADENIE.....	49
8.3	MERANIE TDS.....	50
8.4	ANALÝZA Z POHLADU POTENCIÁLNEHO ZLEPŠENIA SYSTÉMU	51
8.4.1	<i>Vyšší výkon Peltierovho modulu.</i>	<i>51</i>
8.4.2	<i>Zvýšenie účinnosti výmenníkov tepla</i>	<i>52</i>
9.	ZÁVER.....	53
	LITERATÚRA.....	55
	ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	57
	ZOZNAM PRÍLOH.....	58

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1 Ohrievacie teliesko, prevzaté z [1]	12
Obrázok 2 Chladiaci modul s ventilátormi, prevzaté z [2]	13
Obrázok 3 Externý prietokový chladič, prevzaté z [3].....	13
Obrázok 4 Digitálny merač TDS, prevzaté z [8].....	14
Obrázok 5 Tepelný výkon P_C a teplotný gradient na sklenenej stene	19
Obrázok 6 Tepelný výkon P_H a teplotný gradient na dodatočnej izolácii	20
Obrázok 7 Ukážka Peltierovho modulu, prevzaté z [6]	21
Obrázok 8 Štruktúra Peltierovho článku	22
Obrázok 9 Grafické zobrazenie parametrov modulu MCTE1-19908L-S pri teplote zohrievanej strany 27 °C, prevzaté z [5].....	23
Obrázok 10 Štruktúra tepelnej trubice, prevzaté z [7]	24
Obrázok 11 Chladič CPU ako výmenník tepla, prevzaté z [10]	24
Obrázok 12 Blokový diagram navrhovaného systému	26
Obrázok 13 Sonda TDS SEN0244, prevzaté z [17]	27
Obrázok 14 Zapojenie DC-DC meniča napájajúceho Peltierov modul	29
Obrázok 15 Osadená DPS, vľavo: horná strana, vpravo: spodná strana	30
Obrázok 16 Testovacia zostava systému s osadenou dodatočnou izoláciou	32
Obrázok 17 Proces spájkovania trubíc	33
Obrázok 18 Vľavo: tepelné čerpadlo, vpravo: detail na Peltierov modul	34
Obrázok 19 Puzdro riadiacej jednotky	35
Obrázok 20 Upevnenie senzorov a tepelného čerpadla v akváriu.....	35
Obrázok 21 Vývojový diagram softvéru ESP32	37
Obrázok 22 Funkčný diagram webového rozhrania	42
Obrázok 23 Registračný formulár webového rozhrania	43
Obrázok 24 Prihlasovací formulár webového rozhrania.....	43
Obrázok 25 Zobrazenie nameraných údajov	45
Obrázok 26 Štruktúra databázy webového rozhrania	45
Obrázok 27 Voľba projektových nastavení	46
Obrázok 28 Merané teploty v režime ohrev, pracovné body OP2 a OP1	48
Obrázok 29 Merané teploty v režime ohrev, pracovný bod OP2	49
Obrázok 30 Merané teploty v režime chladenia	50
Obrázok 31 Meranie TDS	51
Obrázok 32 Rozdiel teplôt oboch strán Peltierovho modulu pri testovaní chladenia vody	52

ZOZNAM TABULIEK

3.1	Konštrukčné parametre akvária a materiálové parametre	17
3.2	Teploty vody a okolia v rôznych pracovných režimoch.....	18
3.3	Porovnanie tepelných prenesených výkonov bez a s dodatočnou izoláciou v simulácii	20
3.4	Parametre zvolených pracovných bodov	22
6.1	Tabuľka kritických limitov sledovaných úlohou taskSafety().....	40

ÚVOD

Akvaristika je populárna záľuba, ktorej sa ľudia venujú na rôznych úrovniach. Existujú vodné nádrže bez živočíchov, využívané ako nízkoúdržbové okrasné prvky, ale väčšinou zastúpenie majú nádrže so sladkovodnými živočíchmi. Práve pri akváriách s živým osadenstvom je potrebné sledovať parametre vody, ktoré závisia na konkrétnych živočichochoch. Téma tejto práce súvisí s chovom sladkovodných riasožravých kreviet rodu *Caridina*, ktoré vyžadujú špecifické parametre vody a sú pomerne náchylné na ich prudké zmeny. Jedným z dôležitých parametrov je teplota vody, ktorá okrem zdravia kreviet ovplyvňuje aj iné procesy v akváriu.

Táto práca sa zaoberá kompletným návrhom a praktickým zhotovením zariadenia regulujúceho teplotu vody v akváriu. Celý systém sa skladá z dvoch celkov. Prvý celok tvorí riadiaca jednotka tvorená mikrokontrolérom ESP32, rôznymi napájacími obvody a ďalšími perifériami, ktoré umožňujú ovládať dobu osvetlenia akvária a merať parametre vody. Súčasťou je tepelné čerpadlo založené na Peltierovom module, doplnené dvoma výmenníkmi tepla medzi vodou, modulom a okolím. Druhý celok tvorí mikropočítač Raspberry Pi, na ktorom beží webové rozhranie a databáza. Rozhranie umožňuje užívateľovi nastaviť požadovanú teplotu vody a interval osvetlenia akvária a zároveň graficky zobrazovať merané parametre vody.

1. ZARIADENIA POUŽÍVANÉ V AKVARISTIKE

V tejto kapitole sú popísané zariadenia, ktoré sa bežne používajú na reguláciu teploty a meranie tvrdosti vody. Význam týchto parametrov v akvaristike je popísaný v kapitole 2.

1.1 Zariadenia na reguláciu teploty vody

V prípade potreby ohrevu vody v akváriu je výber zariadení široký, cenové náklady sú oveľa nižšie v porovnaní so zariadeniami na chladenie vody. Dôvodom tejto skutočnosti je pomerne jednoduchá funkcia ohrievačov, ktoré fungujú na princípe premeny elektrickej energie v teplo na odporovom teliesku. Nastavenie teploty je možné pomocou termostatu.

Dostupné sú taktiež varianty v rôznych výkonoch pre akváriá od 20 l až po niekoľko stoviek litrov. Cena takéhoto telieska sa začína približne na 10 eurách.



Obrázok 1 Ohrievacie teliesko, prevzaté z [1]

Chladenie vody je na techniku oveľa náročnejšie, čo sa odzrkadľuje na užšej ponuke a vyššej cene takýchto výrobkov. Medzi najjednoduchšie zariadenia patria sústavy niekoľkých ventilátorov, ktoré miera prúd vzduchu na hladinu vody a tým prispievajú k väčšiemu vyparovaniu. Pri tejto skupenskej premene vody dochádza k spotrebovaniu tepla. Takýto systém dokáže znížiť teplotu len o niekoľko stupňov Celzia. Nevýhodou je hlučnosť a potreba častejšieho dopĺňania vody v nádrži. Regulácia teploty spočíva v zapojení externého termostatu, ktorý v závislosti na nastavení požadovanej teploty zapína a vypína sústavu ventilátorov, prípadne reguluje ich otáčky.



Obrázok 2 Chladiaci modul s ventilátormi, prevzaté z [2]

Ďalším typom sú externé prietokové chladiče vody, určené predovšetkým pre väčšie akvária s objemom od 50 litrov. Vďaka veľkému chladiacemu výkonu dokážu udržať teplotu vody pod 18 °C. Chladienie funguje na princípe skupenskej premeny chladiva a výmene tepla medzi vnútorným a vonkajším chladiacim okruhom, čo je podobný princíp, na akom fungujú bežné chladničky. Nevýhodou je rádovo vyššia cena oproti ventilátorovým modulom, ktorá môže ľahko prekročiť hodnotu celého akvária.



Obrázok 3 Externý prietokový chladič, prevzaté z [3]

Efekt chladienia aj zohrievania vody podľa potreby je možné dosiahnuť kombináciou vyššie spomenutých produktov.

Pri väčšom počte akvárií, napríklad u veľkochovateľov alebo v predajniach, dáva väčší zmysel investovať do riešenia na reguláciu teploty v miestnosti, v porovnaní s reguláciou teploty zvlášť pre každé akvárium.

1.2 Merače tvrdosti vody

Meranie tvrdosti vody sa vykonáva v pravidelných časových intervaloch, prípadne pri výmene vody a dodatočnom mineralizovaní. Najbežnejšími zariadeniami sú ručné

merače, ktoré za cenu do 10 eur majú veľkú vydrž batérie a úplne dostačujú pre bežné potreby akvaristu.



Obrázok 4 Digitálny merač TDS, prevzaté z [8]

Samotná regulácia tvrdosti je pomerne náročná a špecifická pre každý typ akvária, preto merače tvrdosti poskytujú len informatívnu funkciu. Zmena tvrdosti k nižším hodnotám môže byť dosiahnutá výmenou časti vody za filtrovanú vodu, nízka hodnota zasa pridaním minerálov určených pre chované živočíchy.

2. VYBRANÉ PARAMETRE SLEDOVANÉ V AKVARISTIKE

V tejto kapitole je popísané dôležité parametre vody a je stanovený ideálny rozsah teploty a tvrdosti vody pre chov riasožravých kreviet. Na základe týchto parametrov bude navrhnutá riadiaca jednotka, ktorej úlohou je parametre sledovať, regulovať a v prípade potreby informovať užívateľa o nepriaznivom stave.

2.1 Teplota

Teplota vody v akváriu s určitým oneskorením, závislým na jej objeme, približne kopíruje teplotu v miestnosti, v ktorej sa akvárium nachádza. V lokálnych podmienkach sa teplota v letných mesiacoch môže vyšplhať až na 26 °C v neklimatizovaných miestnostiach. V zimných mesiacoch je okolitá teplota závislá na nastavení termostatu vyhrievania. Dá sa predpokladať, že akváriá sa väčšinou nachádzajú v obývanej miestnosti, kde sa teplota udržiava aspoň na 20 °C.

Pre väčšinu sladkovodných živočíchov chovaných v akváriách je tento rozsah teplôt vyhovujúci. Pre chov sladkovodných kreviet rodu *Caridina* je ideálna stabilná teplota v rozsahu 23 – 24 °C, avšak dokážu prežiť aj vo vode s teplotou od 20 do 26 °C. Krevety pri ideálnej teplote vody dokážu prosperovať a množiť sa. Kolísanie teploty mimo tento rozsah a najmä náhle zmeny spôsobujú krevetám stres, ktorý môže končiť úhynom. [4]

2.2 Tvrdosť vody

Ďalším dôležitým parametrom vody v akvaristike je jej tvrdosť. Voda je polárne rozpúšťadlo, čo znamená, že sa v nej rozpúšťajú látky s iónovou a polárnou väzbou. Tieto látky sú štiepené na ióny s kladným a záporným nábojom, čo robí výsledný roztok elektricky vodivým. Vodivosť vody sa meria v jednotkách $\mu\text{S}/\text{cm}$, alebo v miligramoch rozpustenej látky na 1 liter vody (mg/l). V akvaristike sa používa jednotka ppm, ktorá udáva počet rozpustených častíc (iónov) na milión častíc (molekúl) vody. [8]

Vodivosť vody je možné merať pomocou jednoduchej sondy s dvoma elektródami umiestnenými v definovanej vzdialenosti od seba. Ohmovým zákonom je z napätia na elektródach a prúdu tečúcemu medzi nimi vypočítaný elektrický odpor, ktorého prevrátená hodnota sa rovná elektrickej vodivosti.

Hodnota TDS neudáva množstvo ani pomer konkrétnych látok rozpustených vo vode, v akvaristike sa využíva ako všeobecný parameter odzrkadľujúci celkovú zmenu kvality vody. V prípade úhynu živočícha, alebo náhleho odumretia rastliny sa začne množstvo rozpustených látok vo vode zvyšovať, čo má za následok prudké zvýšenie vodivosti. V tom prípade je potrebný zásah chovateľa a odstránenie príčiny problému.

Ideálna tvrdosť vody pri chove kreviet by sa mala pohybovať v hodnotách 150 – 200 TDS. V navrhovanom systéme je preto meranie tvrdosti vody využité na informovanie užívateľa pri prekročení tohto rozsahu. [4]

2.3 Osvetlenie

Osvetlenie akvária má priamy vplyv na osadenstvo, kvalitu vody a udržiavanie rovnováhy v ekosystéme. Dlhá doba osvetlenia má negatívny vplyv na krevety a zároveň spôsobuje rýchly rast rias. Naopak krátka doba osvetlenia neumožňuje rastlinám prosperovať. Je preto dôležité zabezpečiť primeranú dobu osvetlenia v pravidelných intervaloch.

Parametre osvetlenia, akými sú intenzita a farba svetla, závisia od pestovaných rastlín a chovaných živočíchov, prípadne figurujú ako estetický prvok v neosadených akváriách.

Akvárium, ktorým sa zaoberá táto práca, obsahuje externe napájané osvetlenie s ideálnymi svetelnými parametrami, ktoré nie je potreba meniť.

Navrhovaný systém preto funguje len ako časovač, ktorý bude pomocou relé spínať osvetlenie akvária v intervaloch zvolených užívateľom.

3. NÁVRH TEPELNÉHO MODULU

Z kapitoly 2.1 vyplýva, že navrhované zariadenie musí byť schopné vodu chladit' aj zohrievať. Z toho dôvodu sa javí ako vhodné využitie Peltierovho modulu, ktorý funguje na princípe tepelného čerpadla a je schopný pracovať v oboch smeroch čerpania, teda čerpania tepla do alebo von z akvária. Smer čerpania je určený polaritou napájania modulu.

V tejto kapitole je stanovený potrebný výkon Peltierovho modulu na základe výpočtu a simulácie modelu akvária v programe SOLIDWORKS. Neskôr je teoreticky popísaný Peltierov jav, konštrukcia a parametre Peltierovho modulu a na základe stanoveného požadovaného výkonu je vybraný konkrétny modul. Ďalej sú navrhnuté tepelné výmenníky, ktoré sú tepelne vodivo spojené s Peltierovým modulom a podieľajú sa na prenose tepla medzi vodou v akváriu, Peltierovým modulom a okolitým vzduchom.

3.1 Konštrukcia a parametre akvária

System chladenia a jeho parametre sú dimenzované na existujúce akvárium s osadenstvom. Akvárium je kvádrového tvaru s rozmermi dĺžka, šírka a výška rovnými 40, 20 a 25 cm. Objem vody je približne 20 litrov. Všetky steny akvária sú tvorené sklom s hrúbkou 4 mm. Z pohľadu prestupu tepla je zanedbaná podstava, ktorá je podložkou dostatočne tepelne izolovaná od okolia. Rovnako je zanedbaná výmena tepla na hladine vody spôsobená odparovaním a prúdením vzduchu. Tento jav je minimalizovaný krytom akvária.

Z dôvodu zníženia prestupu tepla bočnými stenami je akvárium vybavené dodatočnou tepelnou izoláciou. Táto izolácia je tvorená pridaním vonkajšej sklenenej steny, oddelenej od pôvodnej steny vzduchovou medzerou s hrúbkou 4 mm.

Obe konštrukcie boli vymodelované v programe SOLIDWORKS a následne bol v kapitole 3.2 porovnaný účinok dodatočnej tepelnej izolácie oproti pôvodnej konštrukcii akvária z pohľadu prestupu tepla.

V tabuľke 3.1 je určená veľkosť plochy S , na ktorej prebieha tepelná výmena, hrúbka skla d_s , hrúbka vzduchovej medzery d_v , koeficient tepelnej vodivosti skla λ_s a koeficient tepelnej vodivosti vzduchu λ_v . Tieto parametre sú použité vo výpočtoch v kapitole 3.2.

Tabuľka 3.1 Konštrukčné parametre akvária a materiálové parametre

S [m ²]	d_s [mm]	d_v [mm]	λ_s [W/m.K]	λ_v [W/m.K]
0,3	4	4	1	0,025

3.2 Analýza tepelnej výmeny

Oba navrhnuté modely boli podrobené tepelnej analýze. Výsledkom je celkový tepelný výkon P_C , ktorý je potrebné z akvária odvieť v režime chladenia a celkový

tepelný výkon P_H , ktorý je potrebné do akvária dodať v režime ohrievania.

Prestup tepla je modelovaný nastavením teploty T_A na 4 vonkajšie steny modelu, ktoré sú v kontakte so vzduchom v miestnosti a nastavením teploty T_V na vnútorné steny modelu, ktoré sú v kontakte s vodou v akváriu. Týmto spôsobom sa na stenách vytvoril teplotný gradient a v závislosti na tepelnej vodivosti materiálu je stanovený prenesený tepelný výkon.

V tabuľke 3.2 je definovaná teplota vody T_V a teplota okolia T_A v oboch režimoch funkcie tepelného čerpadla. Obe teploty vychádzajú z kapitoly 2.1 a odzrkadľujú najmenej priaznivý stav, ktorý môže z pohľadu nárokov na výkon tepelného čerpadla nastať.

Tabuľka 3.2 Teploty vody a okolia v rôznych pracovných režimoch

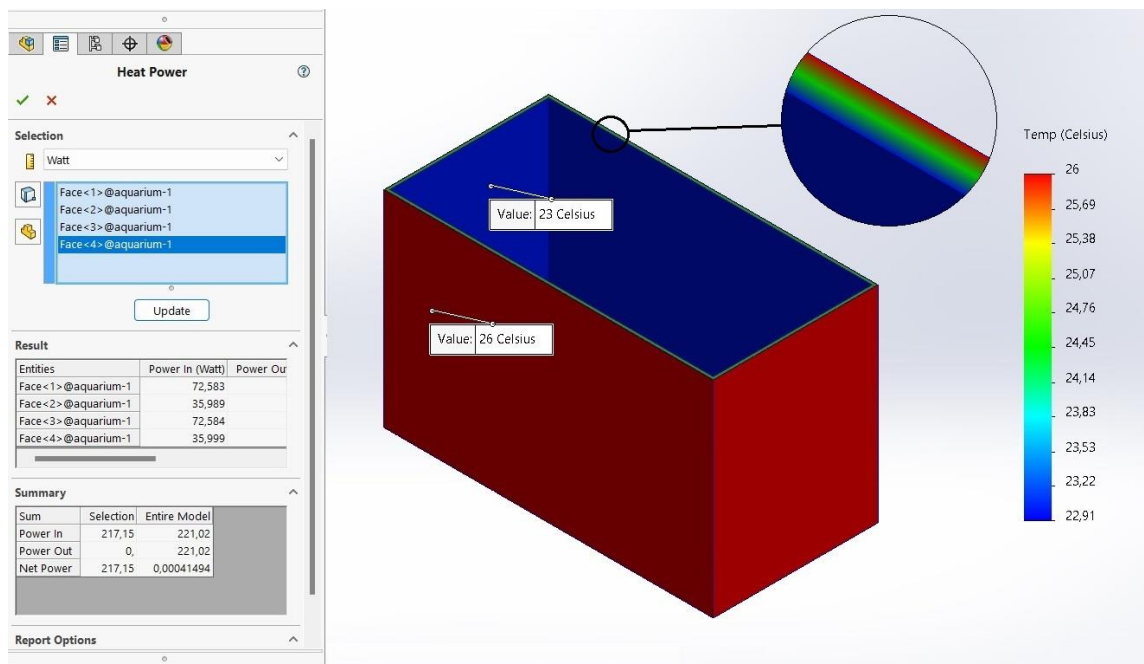
	T_V [°C]	T_A [°C]
Režim chladenie	23	26
Režim ohrievanie	24	20

3.2.1 Tepelný výkon P_C prenesený z okolia - režim chladenie

Celkový tepelný výkon P_C , ktorý vstupuje do akvária cez 4 bočné steny je možné vypočítať dosadením hodnôt z tabuľky 3.1 a tabuľky 3.2 do rovnice

$$P = \lambda_S \cdot \frac{S}{d_S} \cdot \Delta T = \lambda_S \cdot \frac{S}{d_S} \cdot |T_A - T_V| = 1 \cdot \frac{0,3}{0,004} \cdot |26 - 23| = 225 \text{ W} . \quad (3.1)$$

Výsledkom analýzy modelu v programe SOLIDWORKS je tepelný výkon 217,15 W prenesený plochou bočných stien pri danom rozdiel teplot. Na obrázku č. 5 je možné vidieť simulovaný tepelný výkon a teplotný gradient vytvorený na sklenenej stene akvária.



Obrázok 5 Tepelný výkon P_C a teplotný gradient na sklenenej stene

Pri použití dodatočnej izolácie je výpočet zložitejší, pretože je potrebné brať do úvahy dodatočnú izoláciu akvária zloženú z dvoch rôznych tepelne vodivých materiálov. Výpočet tepelného výkonu je založený na sériovom zapojení troch tepelných odporov. Tepelný odpor skla je určený rovnicou

$$R_{TH} = \frac{d}{\lambda \cdot S} = R_{THS} = \frac{d_S}{\lambda_S \cdot S} = \frac{0,004}{1 \cdot 0,3} = 13,33 \text{ mK/W} . \quad (3.2)$$

Dosadením parametrov vzduchu do tejto rovnice je vypočítaný tepelný odpor vzduchovej medzery $R_{THV} = 533,3 \text{ mK/W}$.

Celkový tepelný odpor dodatočnej izolácie je rovný súčtu tepelného odporu vzduchovej medzery a dvojnásobku tepelného odporu sklenenej steny. Tepelný výkon prenesený cez dodatočnú izoláciu je daný rovnicou

$$P = \frac{|\Delta T|}{R_{TH}} = \frac{|T_A - T_V|}{2 \cdot R_{THS} + R_{THV}} = \frac{26 - 23}{2 \cdot 13,33 \cdot 10^{-3} + 533,3 \cdot 10^{-3}} = 5,36 \text{ W} . \quad (3.3)$$

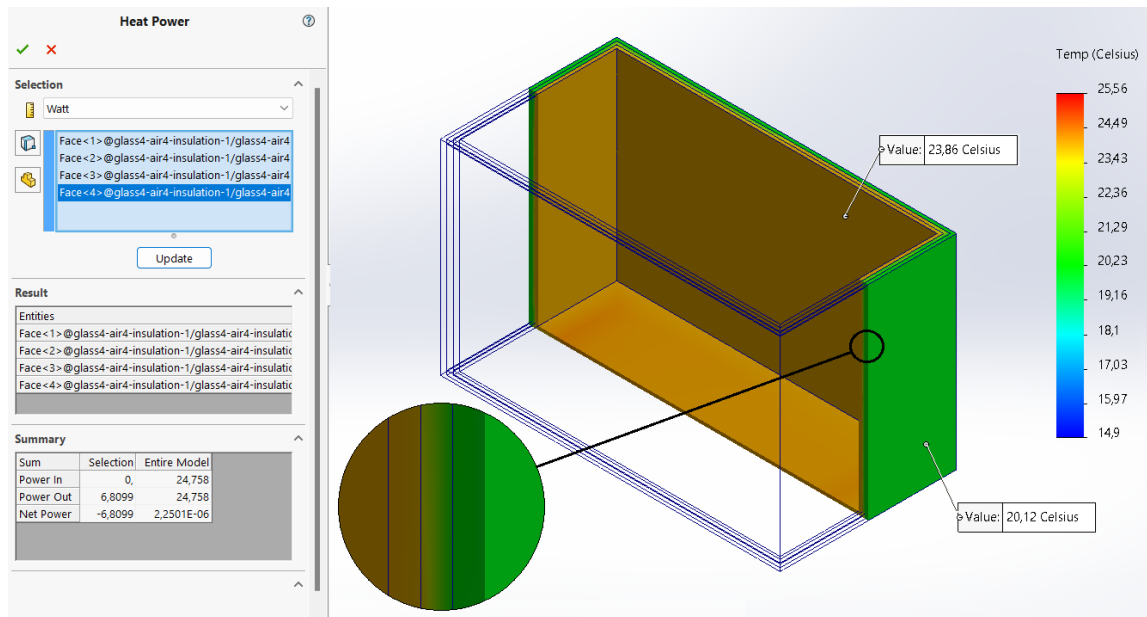
Je zrejme, že použitím dodatočnej izolácie bolo možné významne znížiť celkový prenesený tepelný výkon.

3.2.2 Tepelný výkon P_H prenesený do okolia – režim ohrievanie

Rovnakým spôsobom použitím rovnice 3.1 bol vypočítaný tepelný výkon, ktorý z akvária vystupuje, v režime ohrievanie. Veľkosť výkonu, ktorý je do akvária potrebné dodať je 300 W. Tepelnou analýzou bol na modeli simulovaný tepelný výkon 289,54 W.

Pri výpočte tepelného výkonu preneseného cez dodatočnú tepelnú izoláciu sú použité tepelné odpory vypočítané v kapitole 3.2.1 dosadením do rovnice 3.3. Rozdiel teplôt ΔT je v tomto prípade 4 °C. Vypočítaný tepelný výkon má veľkosť 7,14 W.

Simuláciou bola dosiahnutá veľkosť tepelného výkonu 6,81 W prenášaného dodatočnou izoláciou von z akvária.



Obrázok 6 Tepelný výkon P_H a teplotný gradient na dodatočnej izolácii

Na obrázku č. 6 je zobrazený výsledok simulácie preneseného tepelného výkonu von z akvária a teplotný gradient vytvorený na dodatočnej tepelnej izolácii. Je možné vidieť, že v dôsledku veľkého tepelného odporu vzduchu je najväčší teplotný rozdiel vytvorený práve na vzduchovej medzere.

Tabuľka 3.3 Porovnanie tepelných prenesených výkonov bez a s dodatočnou izoláciou v simulácii

	P_H [W] – Režim ohrevanie	P_C [W] – Režim chladenie
Bez izolácie	289,54	225
Dodatočná izolácia	6,81	5,36
ΔP [%]	- 97,65	- 97,61

Relatívna zmena preneseného tepelného výkonu, ktorú sa podarilo dosiahnuť dodatočnou tepelnou izoláciou, je daná rovnicou

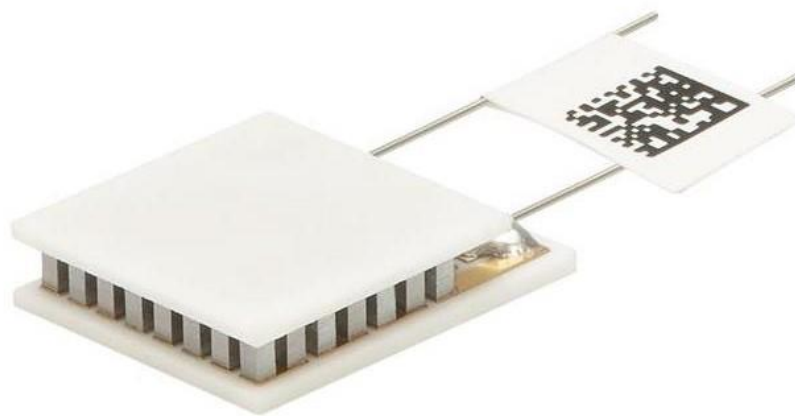
$$\Delta P_H = \frac{P_I - P_0}{P_0} \cdot 100\% = \frac{6,81 - 289,54}{289,54} \cdot 100\% \cong - 97,65 \%, \quad (3.4)$$

kde P_I je tepelný výkon prenesený cez dodatočnú izoláciu a P_0 je tepelný výkon prenesený bez dodatočnej izolácie. V oboch režimoch sa podarilo znížiť prenesený tepelný výkon približne o 97,6 %.

3.3 Peltierov modul

Peltierov modul je súbor niekoľkých Peltierových článkov, zapojených elektricky a tepelne tak, aby fungovali súčasne. To znamená, že pri určitej polarite tečie prúd jedným typom polovodiča od chladenej strany k zohrievanej strane a druhým typom polovodiča naopak. Peltierov jav je bližšie popísaný v kapitole 3.3.1.

Dôležité parametre, na základe, ktorých je možné vybrať vhodný modul pre túto aplikáciu sú tepelný výkon odvádzaný z chladenej strany a tepelný výkon, ktorý je potrebné odvieť zo zohrievanej strany. Zároveň je dôležitý elektrický pracovný bod a rozdiel teplôt oboch strán, pri ktorom sú tieto parametre stanovené. Hodnoty parametrov sú udávané v katalógových listoch jednotlivých modulov.



Obrázok 7 Ukážka Peltierovho modulu, prevzaté z [6]

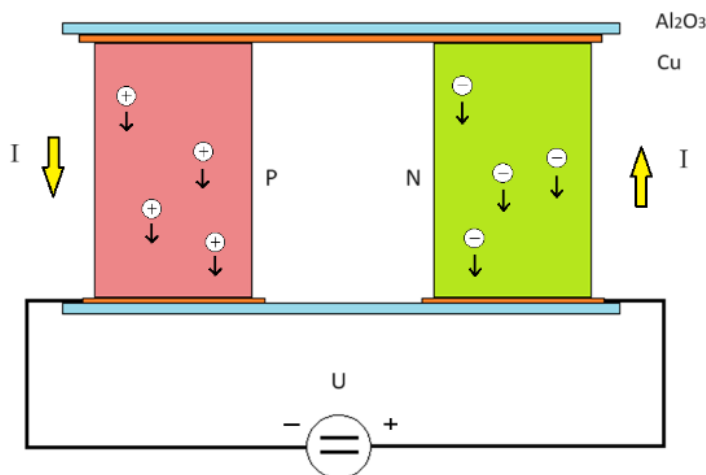
Prechodom prúdu celou štruktúrou vzniká stratový výkon, ktorý je nežiadúci a je potrebné ho zo zohrievanej strany odvieť spolu s chladiacim výkonom. Pomer chladiaceho a stratového výkonu udáva koeficient výkonnosti tepelného čerpadla COP (coefficient of performance). Vhodným nastavením pracovného bodu je možné dosiahnuť koeficient väčší ako 1, z čoho vyplýva, že modul odvádza z chladenej strany väčší tepelný výkon, než je výkon, ktorý je na túto činnosť potrebné vynaložiť.

3.3.1 Peltierov jav

Peltierov jav funguje na princípe prijímania alebo odovzdávania tepla elektrónmi na prechode dvoch rôznych polovodičov. V rôznych materiáloch existujú valenčné elektróny na energetických hladinách s rôznou energiou. Po priložení napätia na termoelektrickú dvojicu materiálov prechádzajú elektróny z materiálu, v ktorom majú vyššiu energiu do materiálu s nižšou energiou, pričom dochádza k uvoľňovaniu prebytočnej energie vo forme Jouleovho tepla. [9]

Pri zmene polarity napätia elektróny tečú z materiálu s energiou nižšou do materiálu s vyššou energiou a pri tom dochádza k odoberaniu tepelnej energie z okolia.

Štruktúra elementárnej časti Peltierovho modulu – Peltierovho článku je zobrazená na obrázku č. 8. Dva typy polovodičov sú umiestnené medzi dvoma doštičkami, najčastejšie tvorenými korundovou keramikou Al_2O_3 , ktorá má pomerne dobrú tepelnú vodivosť. Elektricky vodivé spojenie je tvorené kovovou vrstvou na keramike.



Obrázok 8 Štruktúra Peltierovho článku

Polovodičové materiály sú z pohľadu prenosu tepla zapojené paralelne a z pohľadu toku elektrického prúdu sériovo.

3.3.2 Výber Peltierovho modulu

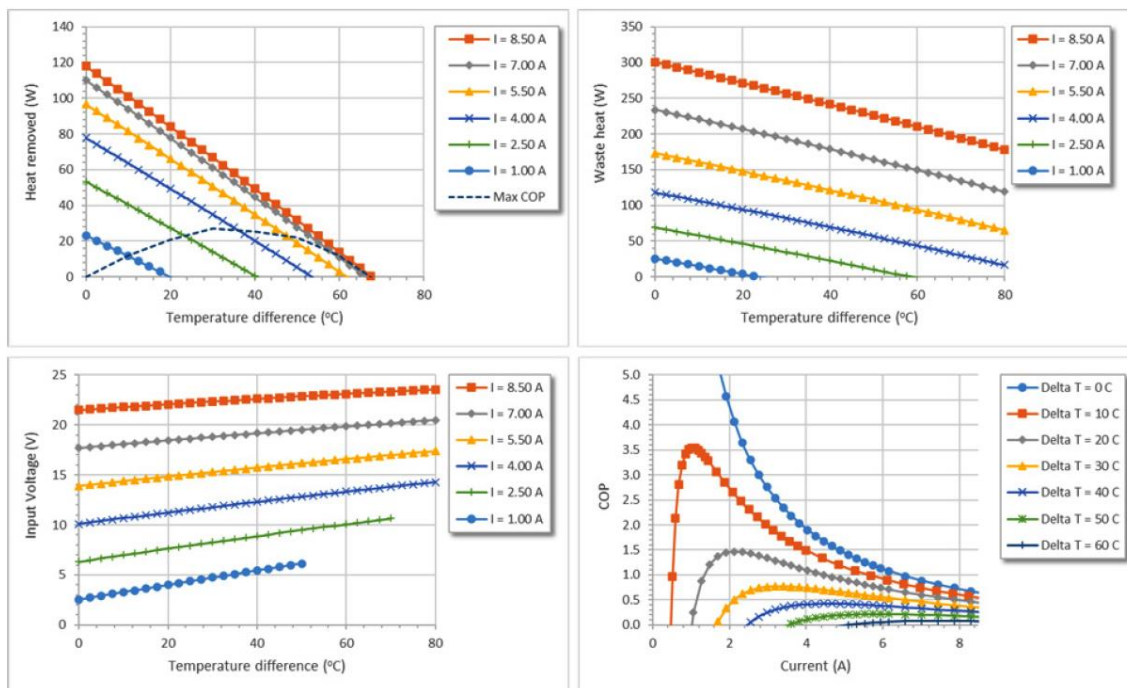
Pri výbere Peltierovho modulu je dôležité vychádzať z potrebného chladiaceho výkonu $P_C = 3,5 \text{ W}$ a potrebného ohrievacieho výkonu $P_H = 6,81 \text{ W}$, stanovených v kapitole 3.2.2. Zároveň je kladený dôraz na čo najvyšší koeficient výkonnosti COP. Výhodou vyššieho koeficientu výkonnosti je menšie odpadové teplo, ktoré je spolu s teplom z akvária potrebné chladičom odvieť do okolia. Dôsledkom sú menšie nároky na chladič a zároveň na napájací zdroj.

V cenovej hladine do 30 € bol vybraný modul MCTE1-19908L-S, ktorého parametre sú zobrazené na obrázku č. 9.

Peltierov modul je v navrhovanom systéme prevádzkovaný v dvoch výkonových režimoch s nižším a vyšším výkonom. Rozdiel teplôt zohrievanej a chladenej strany je v oboch režimoch udržiavaný na $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Z grafov na obrázku č. 9 sú odčítané parametre dvoch pracovných bodov OP1 a OP2.

Tabuľka 3.4 Parametre zvolených pracovných bodov

Pracovný bod	I [A]	U [V]	P_C [W]	P_E [W]	COP [-]
OP1	1	3,5	11,5	3,5	3,3
OP2	2	6	35	12	2,7



Obrázok 9 Grafické zobrazenie parametrov modulu MCTE1-19908L-S pri teplote zohrievanej strany 27 °C, prevzaté z [5]

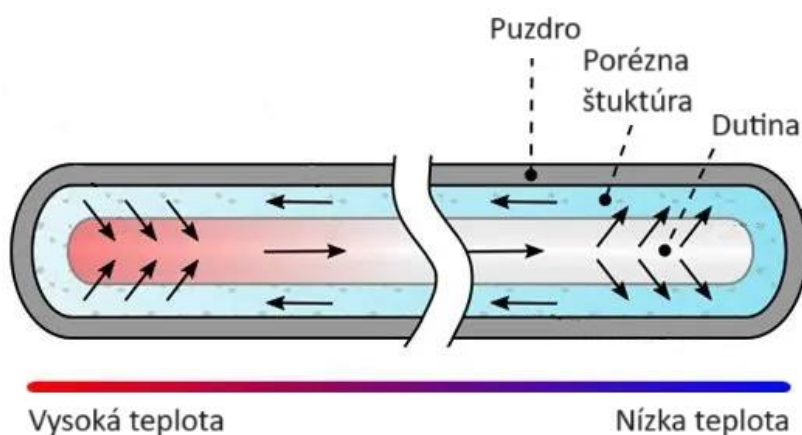
3.4 Výmenníky tepla

Súčasťou tepelného modulu sú dva výmenníky tepla, z ktorých sa jeden podieľa na výmene tepla medzi Peltierovým modulom a vodou v akváriu a druhý medzi Peltierovým modulom a okolím.

3.4.1 Výmenník Peltierov modul – voda

Pri tomto type výmenníku je kladený dôraz z veľkej časti na estetickú stránku, pretože sa bude nachádzať v akváriu. Zároveň je potrebné dodržať dobré tepelné vlastnosti. Vhodnou voľbou sú tepelné trubice, ktoré sa používajú aj v iných aplikáciách, kritických na prenos tepla.

Tepelné trubice fungujú na princípe fázovej premeny pracovného média, pri ktorej dochádza k prijímaniu a odovzdávaniu tepla na opačných koncoch trubice. Tepelná trubica má vo vnútri dutinu na ktorej povrchu je vytvorená porézna štruktúra pripomínajúca špongiu. Pri rozdielnych teplotách na oboch koncoch trubice dochádza k fázovej premeny pracovného média takým spôsobom, že na teplejšom konci dochádza k odparovaniu a na chladnejšom ku kondenzácii. Pracovné médium v plynnej fáze putuje dutinou ku chladnému koncu trubice, kde skondenzuje. Následne pôsobením kapilárnych javov v poréznej štruktúre putuje médium v kvapalnej fáze späť k teplému koncu. Pri odparovaní dochádza k odoberaniu tepla a pri kondenzácii dochádza k odovzdávaniu tepla pracovným médium. [7]



Obrázok 10 Štruktúra tepelnej trubice, prevzaté z [7]

Trubice majú pomerne malú styčnú plochu s vodou, ale núteným prúdeným vody, spôsobeným akváriovým filtrom, je možné účinnosť výmeny tepla zvýšiť.

Nevýhodou použitia trubíc v akváriu so sladkovodnými krevetami je fakt, že krevety patria do skupiny živočíchov, ktoré sú veľmi citlivé na meď, z ktorej je tvorené puzdro trubice. Ako preventívne opatrenie voči kontaminácii vody je použitý akrylový lak.

3.4.2 Peltierov modul – okolie

Na výmene tepla medzi Peltierovým modulom a okolím sa podieľa kovový rebrovitý chladič, ktorý sa bežne používa na chladenie procesorov. Efektivita prenosu tepla je zvýšená núteným prúdením vzduchu použitým ventilátorom.



Obrázok 11 Chladič CPU ako výmenník tepla, prevzaté z [10]

4. NÁVRH A KONŠTRUKCIA RIADIACEJ JEDNOTKY S ESP32-S3

Táto kapitola sa venuje návrhu riadiacej jednotky, ktorej úlohou je ovládanie regulácie teploty, spínanie osvetlenia a komunikácia s webovým rozhraním. Ďalej je popísaný návrh a proces osadenia DPS. Na záver sú zhrnuté chyby zistené pri testovaní a spôsoby ich riešenia.

Celá jednotka je rozdelená do troch funkčných blokov.

Hlavným prvkom jednotky je vývojová doska ESP32-S3-DevkitC, ktorá disponuje WiFi rozhraním. K mikrokontroléru (DPS) sú pripojené senzory teploty, TDS sonda, DAC prevodník a 2 polovodičové relé (solid state relay) AQH1213AX pre spínanie AC záťaže. Prvé relé je využité na spínanie osvetlenia, druhé relé je možné v prípade potreby využiť na spínanie ďalšieho zariadenia.

Maximálny prúd AC záťaže je limitovaný zvoleným typom relé hodnotou 600 mA RMS. Polovodičové relé bolo uprednostnené pred elektromagnetickým z dôvodu menej náročného typu budenia. Elektromagnetické relé obsahuje na vstupe cievku, ktorej budiaci prúd je rádovo v desiatkach niekedy až stovkách mA, čo presahuje prúdové možnosti jedného výstupu mikrokontroléru. Naopak zvolené polovodičové relé obsahuje integrovanú LED diódu s budiacim prúdom 20 mA vyhovujúcim požiadavkám mikrokontroléru. Navyše cievka predstavuje indukčnú záťaž, pri ktorej je potrebné ošetriť vznik spätne indukovaného napätia pri vypnutí, aby sa predišlo poškodeniu mikrokontroléru. Nevýhodou polovodičového relé je naopak nižší spínaný prúd, čo však pri bežnej technike využívanej v akvaristike nie je problém. [14]

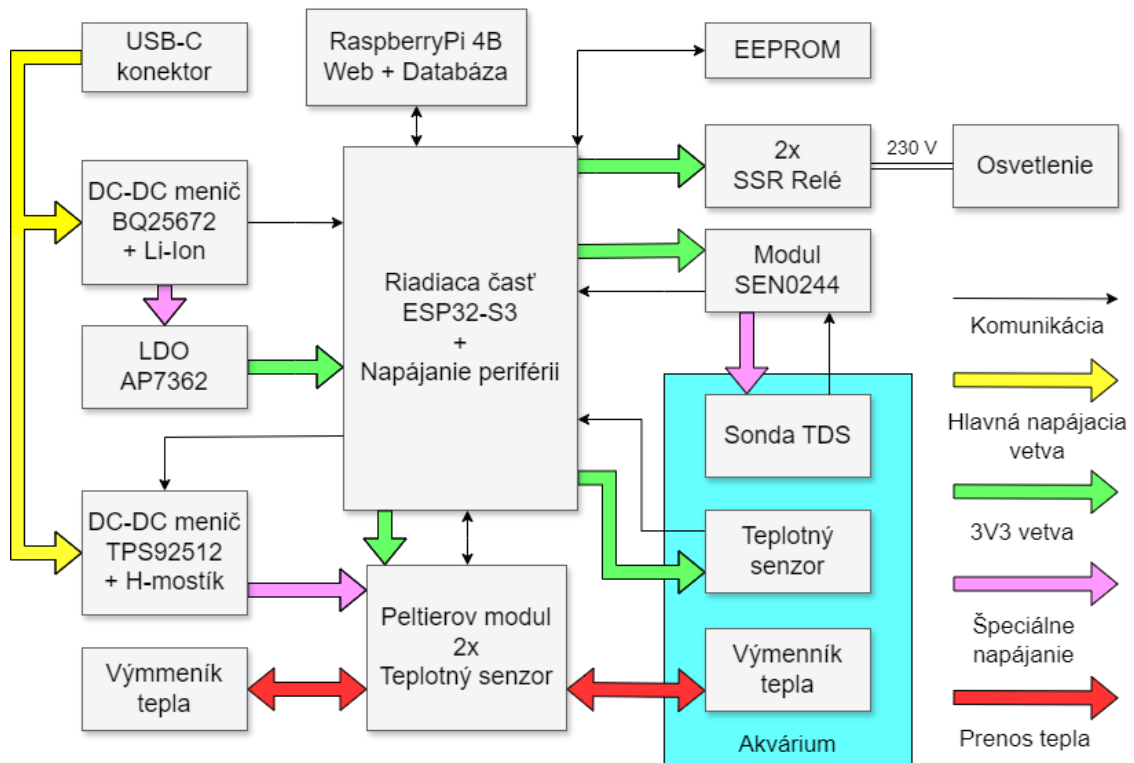
K mikrokontroléru je tiež pripojená externá pamäť EEPROM s kapacitou 16 kB, ktorá je využitá na uchovávanie užívateľských nastavení cez webové rozhranie.

Druhým funkčným blokom jednotky je obvod zabezpečujúci manažment batérie fungujúci zároveň ako znižujúci DC-DC menič. Spolu s Li-Ion článkom a lineárnym regulátorom tvoria hlavnú a záložnú napájaciu sústavu mikrokontroléru.

Tretí blok je tvorený DC-DC meničom napájajúcim Peltierov modul cez H-mostík, pomocou ktorého je cez mikrokontrolér možné voliť smer prúdu Peltierovým modulom a tým aj zmenu režimu chladenie / ohrev.

Napájanie systému zabezpečuje externý nezávislý napájací zdroj s výkonom minimálne 20 W a napätím 20 V. Po pripojení zdroja je navrhovaný systém schopný zdroj rozpoznať a prepnúť sa do pohotovostného stavu, v ktorom je možné napájať Peltierov modul. V prípade, že externý zdroj nie je pripojený, systém odoberá energiu zo záložného zdroja popísaného v kapitole 4.2, ten však nie je dostatočne výkonný, ani nemá dostatočnú kapacitu na napájanie tepelného čerpadla. Z toho dôvodu pracuje systém v obmedzenom režime, pričom funguje len meranie parametrov vody a komunikácia s užívateľským rozhraním.

Na obrázku č. 12 je zobrazený blokový diagram systému s navrhnutými perifériami a graficky rozlíšenými napájacími vetvami.



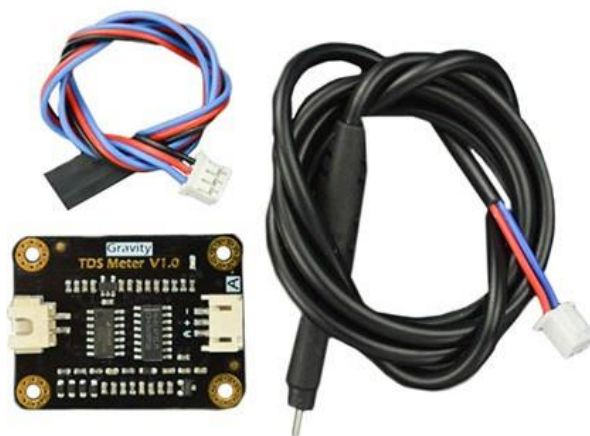
Obrázok 12 Blokový diagram navrhovaného systému

4.1 Sensory na meranie teploty a tvrdosti vody

Nevyhnutnou súčasťou celého systému sú teplotné senzory. Celkovo sú použité 4 digitálne senzory na snímanie teploty vody, teploty oboch strán Peltierovho modulu a teploty okolia.

Pri výbere senzoru snímajúceho teplotu vody bol zvolený senzor DS18B20 od firmy Maxim Integrated, ktorý je vodotesne zapuzdrený a dodáva ho firma DFRobot. Z dôvodu zachovania konzistencie návrhu sú použité rovnaké typy senzorov aj na meranie teploty okolia a Peltierovho článku, avšak v puzdre TO-92. Ďalším z dôvodov výberu tohto typu je jednoduché pripojenie a komunikácia s mikrokontrolérom pomocou zbernice 1-Wire. Výhodou je vysoká presnosť na úrovni $\pm 0,5$ °C a dobrá softvérová podpora v podobe viacerých knižníc v jazyku C++. Keďže sú senzory pripojené prakticky k jednému komunikačnému vstupu mikrokontroléru je ich potrebné pri vývoji softvéru určitým spôsobom rozlíšiť. Každý senzor má od výroby definované 64-bitové sériové číslo v pamäti ROM, podľa ktorého ho je možné identifikovať. Funkcia senzorov a ich umiestnenie sú stanovené od najmenšieho čísla po najväčšie v tomto poradí: teplota vody, teplota chladenej strany, teplota zohrievanej strany, teplota okolia. [16]

Na meraní tvrdosti vody sa podieľa modul SEN0244, taktiež od výrobcu DFRobot. Tento modul ponúka kompletne riešenie od ponornej sondy, cez zosilňovač signálu vrátane prepojovacích vodičov. Vzhľadom na jeho nízku cenu približne 7 eur sa javí ako lacnejšie riešenie v porovnaní s návrhom vlastnej meracej sondy. Výstupný analógový signál v rozsahu 0 až 2,3 V spracuje ADC prevodník integrovaný v mikrokontroléri ESP32.



Obrázok 13 Sonda TDS SEN0244, prevzaté z [17]

Vhodným umiestnením sondy je možné detegovať pokles hladiny vody pod určitú úroveň. V prípade poklesu hladiny natoľko, že sonda už nebude ponorená vo vode sa táto skutočnosť prejaví na výstupe nulovým napätím. Mikrokontrolér vyhodnotí tento stav ako nízku hladinu vody a informuje užívateľa.

4.2 Napájanie 3,3V a záložný zdroj

Ako záložný zdroj energie v navrhovanom systéme figuruje Li-Ion elektrochemický článok od firmy LG Chem so štandardným rozmerom 18650. Kapacita tohto článku dosahuje 3350 mAh a nominálne napätie dosahuje 3,63 V. Článok je možné prevádzkovať v rozsahu napätí 2,5 až 4,2 V, mimo tohto rozsahu existuje riziko nenávratného poškodenia.

Pri napájaní mikrokontroléru z Li-Ion článku je potrebné použiť LDO regulátor s vhodným výkonovým zaťažením a dostatočne malým úbytkom napätia. Pri výbere je dôležité vychádzať z pracovného napätia čipu ESP32 3,3 V. Minimálne napätie batérie, pri ktorom je navrhovaný záložný zdroj schopný dodávať energiu, je dané súčtom pracovného napätia čipu ESP32 a maximálneho úbytku napätia LDO regulátoru.

Bol zvolený LDO regulátor AP7362 od firmy Diodes Incorporated. Pri maximálnom výstupnom prúde 1,5 A dosahuje regulátor maximálny úbytok napätia len 190 mV, čo dovoľuje prevádzku batérie od napätia 3,49 V. [11]

Ako obvod zabezpečujúci manažment batérie bol zvolený integrovaný obvod BQ25672 v 29 vývodovom puzdre VQFN od firmy Texas Instruments. Obvod disponuje

rozhraním I²C a ďalšími digitálnymi vstupmi a výstupmi, ktorými je možné nastaviť rôzne pracovné parametre a komunikovať s mikrokontrolérom. Obvod má od výroby predvolené pracovné parametre vyhovujúce tejto aplikácii, preto sa táto práca ďalším nastaveniam nevenuje. [12]

4.3 DC-DC menič napájajúci Peltierov modul

Medzi hlavné požiadavky na navrhovaný DC-DC menič patria prúdy $I_{OP1} = 1 \text{ A}$ a $I_{OP2} = 2 \text{ A}$ definované v kapitole 3.3.2. Zároveň je nutné, aby bolo možné tieto prúdy nastaviť pomocou mikrokontroléru a taktiež deaktivovať celý DC-DC menič.

Ako riadiaci obvod meniča bol zvolený integrovaný obvod TPS92512 od firmy Texas Instruments. Menič založený na tomto obvode pracuje v znižujúcej topológii s konštantným prúdom na výstupe s maximálnou hodnotou 2,5 A.

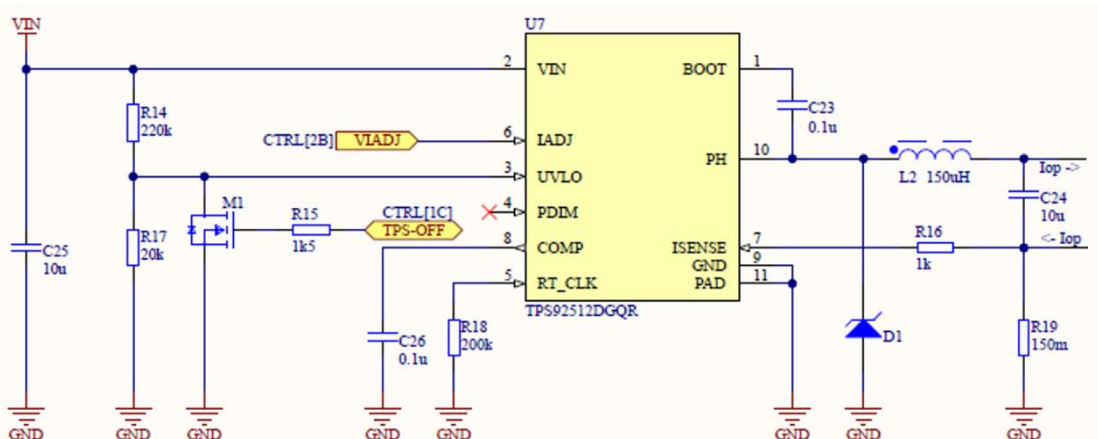
Požadovaný prúd je možné nastaviť napätím privedeným na vstup IADJ z DAC prevodníku. Keďže čip ESP32-S3 nedisponuje integrovaným DAC prevodníkom bol zvolený externý 8-bitový prevodník MCP4706A0T od firmy Microchip Technology ovládaný pomocou zbernice I²C.

Pre prúd I_{OP1} je podľa katalógového listu napätie na vstupe IADJ obvodu TPS92512 definované rovnicou

$$V_{IADJ-OP1} = 6 \cdot I_{OP1} \cdot R_{ISENSE} = 6 \cdot 1 \cdot 0,15 = 0,9 \text{ V} , \quad (4.1)$$

kde R_{ISENSE} je rezistor snímajúci prúd s odporom 0,15 Ω . Rovnakou rovnicou je pre prúd $I_{OP2} = 2 \text{ A}$ vypočítané napätie $V_{IADJ-OP2} = 1,8 \text{ V}$. V prípade, že nie je potrebné regulovať teplotu vody, je na hradlo tranzistoru M1 privedené napätie 3,3 V, čo spôsobí pokles napätia na vstupe UVLO (Under-Voltage Lockout). Tento stav obvod vyhodnotí ako nízke napájacie napätie a prepne sa do úsporného stavu, kedy do Peltierovho modulu nedodáva žiadny prúd. Parametre ďalších pasívnych prvkov meniča boli vypočítané na základe katalógového listu, tak aby vyhovovali tejto aplikácii. [13]

Vzhľadom na to, že smer čerpania tepla je určený polaritou napájania modulu, je dôležité zabezpečiť tok prúdu oboma smermi. Túto funkciu plní H-mostík DRV8231 od firmy Texas Instruments. Smer prúdu je možné voliť pomocou vstupov IN1 a IN2. [15]



Obrázok 14 Zapojenie DC-DC meniča napájajúceho Peltierov modul

4.4 Návrh a osadenie DPS

Všetky komponenty boli objednané od dodávateľa DigiKey, ktorý ponúka široký výber súčiastok v porovnaní s lokálnymi dodávateľmi. Preto nie je potrebné robiť kompromis medzi kvalitným návrhom a dostupnosťou súčiastky. Veľkou výhodou je tiež rýchla dodacia doba v rámci 3 až 4 pracovných dní a nulové prepravné náklady pri objednávke nad 50 €, čo pri takomto projekte nie je problém dosiahnuť.

Na návrh DPS bol využitý softvér Altium Designer. Pri návrhu bolo dôležité dodržať návrhové pravidlá stanovené výrobcom DPS - firmou JLCPCB, aby sa zabezpečila výrobitelnosť navrhutej štruktúry. Jedná sa predovšetkým o rozstupy medzi vodivými cestami, otvormi a komponentami, rozmery otvorov a ďalšie iné parametre. Minimálne a maximálne hodnoty týchto parametrov bolo potrebné zaviesť do návrhových pravidiel v programe Altium. Následne sa počas návrhu pomocou DRC (Design Rule Check) kontroly pravidelne overovalo dodržiavanie týchto pravidiel. Navyše bolo potrebné riadiť sa všeobecnými zásadami návrhu DPS.

Podľa možností boli všetky komponenty volené v puzdre SMT určeného pre povrchovú montáž. Výnimkou sú prevažne konektory, ktoré sú z dôvodu väčšej robustnosti a možnosti ľahšieho prepojenia s vnútornými vrstvami v montáži THT. V oblasti umiestnenia SSR relé boli vytvorené oddeľovacie medzery medzi spínanou časťou a spínacím obvodom. Na záver boli umiestnené 4 montážne otvory veľkosti M3.

Po odstránení všetkým DRC chýb boli vygenerované GERBER súbory a odoslané na výrobu.

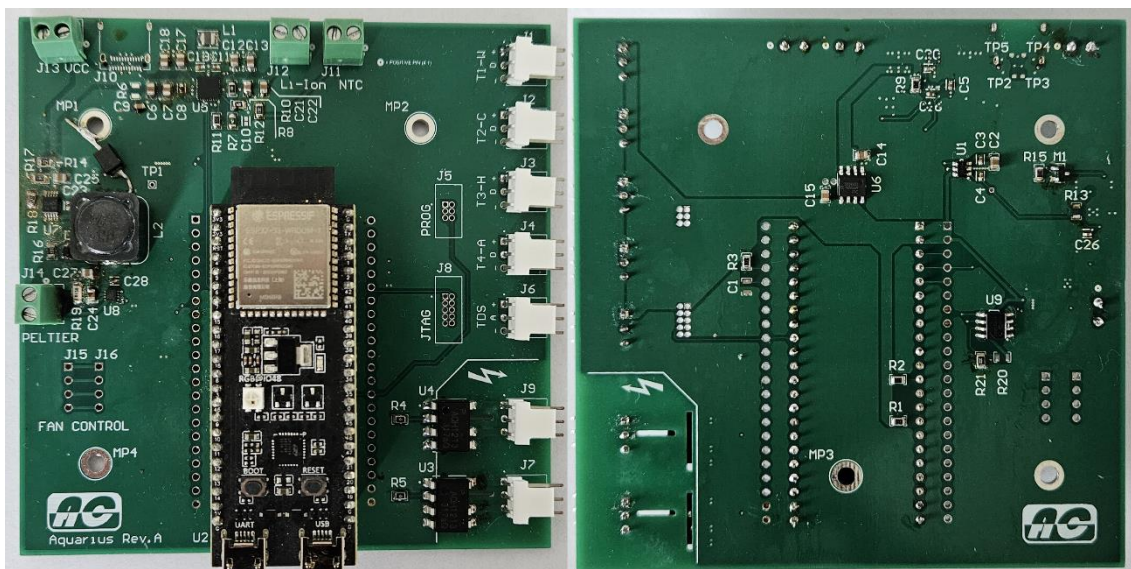
Pri procese osadenia boli využité viaceré metódy spájkovania. Na spájkovacie plošky DPS veľkosti 0402, 0805 a integrovaných obvodov bola na DPS nanosená spájkovacia pasta, do ktorej boli osadené súčiastky. Následne došlo pomocou horúceho vzduchu k pretaveniu pasty a zospájkovaniu súčiastok. Výhodou tejto metódy je samovystredenie puzdier vplyvom povrchového napätia roztavenej spájky. Väčšie súčiastky a konektory boli prispájkované ručnou spájkovačkou a trubičkovou spájkou.

Pri testovaní sa objavil problém s USB-C konektorom, ktorý spôsoboval skrat v dátových vývodoch pripojených k obvodu BQ25672. SMD vývody konektora majú veľmi malý rozstup, navyše je časť z nich skrytá pod puzdrom, tým pádom nebolo možné dôkladne identifikovať a eliminovať skraty. Dátová komunikácia nie je pre činnosť systému kritická, preto bol USB-C konektor odstránený a pre napájanie je využitý záložný konektor J13. Možným riešením v ďalšej revízii DPS je voľba konektora s THT vývodmi.

Druhým problémom bolo prehrievanie obvodu TPS92512 riadiaceho znižujúci DC-DC menič. Po určitom čase v prevádzke sa obvod prepol do úsporného režimu z dôvodu dosiahnutia kritickej teploty. Bolo zistené, že problém spočíval v nedostatočnom pretavení spájkovacej pasty medzi spodnou stranou obvodu a DPS. Tento kontakt slúži mimo uzemnenia obvodu predovšetkým na odvádzanie odpadkového tepla do DPS. Opätovným pretavením pasty horúcim vzduchom bol tento problém vyriešený.

Tretím problémom bolo nesprávne zvolenie veľkosti puzdra Schottkyho diódy D1 tohto meniča v porovnaní s puzdrom objednanej súčiastky. Dióda je preto provizórne prispájkovaná medzi vývod induktora a zem.

Niektoré konektory, napríklad J5 a J8 slúžia na pripojenie mikrokontroléru k externému programátoru ESP-PROG, ktoré vďaka integrovanému programátoru ESP-32-S3 nebolo potrebné osadiť. Konektory J15 a J16 sú určené na napájanie a riadenie otáčok ventilátora tepelného modulu, ktoré je plánované v budúcom vývoji. V súčasnom systéme je ventilátor napájaný externým zdrojom s napätím 12 V a pracuje v maximálnych otáčkach.



Obrázok 15 Osadená DPS, vľavo: horná strana, vpravo: spodná strana

Dodatočne bola k vývodu GPIO12 mikrokontroléru ESP32 pripojená červená LED dióda do série s rezistorom. Dióda je vyvedená na prednom okraji puzdra tak, aby bola viditeľná a jej funkciou je signalizácia chybových stavov popísaných v kapitole 6.5.

5. MECHANICKÁ KONŠTRUKCIA

Navrhnutý systém vyžaduje niekoľko mechanických riešení ako je upevnenie dodatočnej izolácie, konštrukcia tepelného modulu a zapuzdrenie riadiacej jednotky. Na návrh potrebných mechanických dielov bol využitý návrhový systém SOLIDWORKS. Modely boli následne zhotovené pomocou 3D tlače.

5.1 Upevnenie dodatočnej izolácie

Štyri sklenené steny izolácie boli zaobstarané kúpou ďalšieho akvária s rovnakými rozmerni ako pôvodné akvárium, odstránením spojovacieho silikónu a následným očistením. Podstava môže byť v prípade potreby využitá ako vrchný kryt akvária zabraňujúci usádzaniu prachu na hladinu vody a obmedzujúci prúdenie vzduchu na hladine.

Tieto steny bolo potrebné pripevniť k akváriu tak, aby vznikla od okolia izolovaná vzduchová medzera s hrúbkou 4 mm. Nie je potrebné aby táto medzera bola izolovaná vzduchotesne, dôležité je aby sa čo najviac obmedzilo prúdeniu a výmene vzduchu medzi medzerou a okolím.

Boli navrhnuté oddeľovacie spojky obopínajúce rohy akvária, na ktoré boli pomocou sanitárneho silikónu čiernej farby prilepené dodatočné sklenené steny. Sanitárny silikón bol zvolený z dôvodu relatívne pevného spoja medzi sklom a plastom, zároveň je v prípade potreby jednoduché spoj rozobrať, očistiť a vytvoriť znova. Čierna farba spojok a silikónu je zvolená tak, aby nepôsobila ako esteticky rušivý element.



Obrázok 16 Testovacia zostava systému s osadenou dodatočnou izoláciou

5.2 Konštrukcia tepelného čerpadla

V prvom kroku boli priložené tepelné trubice k medenému pliešku, ktorý plní funkciu styčnej plochy s Peltierovým modulom. Táto zostava bola uložená na vyhrievanú podložku. Ako spojivový materiál bola zvolená spájka so zložením Cín-Bizmut s nízkou teplotou tavenia 138 °C. Dôvodom je okrem dobrej tepelnej vodivosti a pevnosti hlavne nízka teplota tavenia. Maximálna prípustná teplota trubic tvorí 180 °C, čo vytvorilo pracovné okno v rozsahu 42 °C.

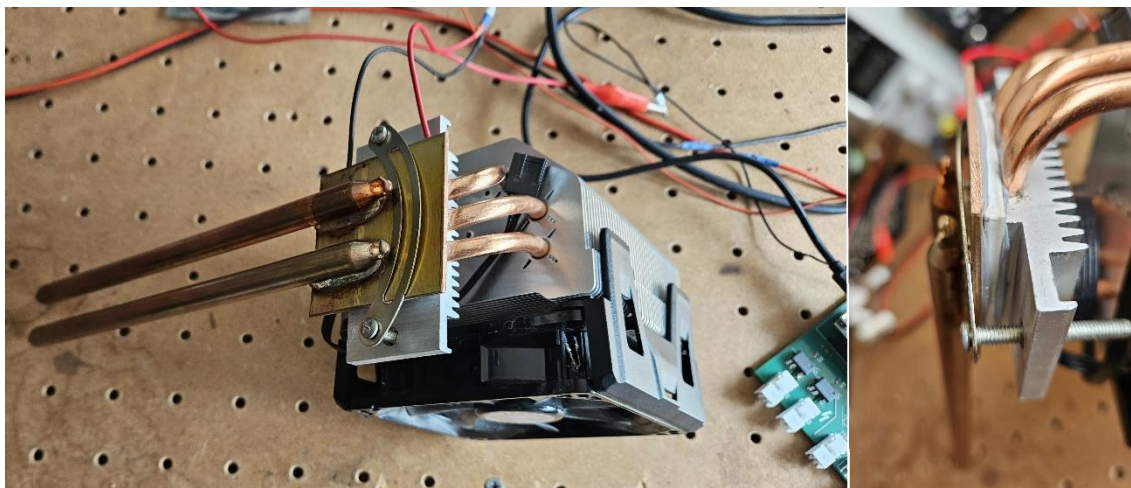
Pri procese spájkovania bolo žiadúce priblížiť sa hornej hranici tohto rozsahu a zároveň neprekročiť teplotu 180 °C, aby došlo k dostatočnému prehriatiu všetkých komponentov a roztaveniu spájky. Na viacerých miestach boli sledované teploty pomocou sady termočlánkov s výstupom k PC.

Vhodným aplikovaním dostatočného množstva tavidla došlo k roztečeniu a navzlínaniu spájky na všetkých styčných plochách medzi trubicami a plieškom. Zvyšky tavidla boli očistené izopropylalkoholom .



Obrázok 17 Proces spájkovania trubic

Plocha trubic, ktorá bude trvale ponorená vo vode bola pokrytá akrylovým lakom, aby sa zabránilo kontaminácii vody zlúčeninami medi. Akrylový lak má rádovo nižšiu tepelnú vodivosť ako meď, ale vzhľadom na dostatočne tenkú vrstvu je tento fakt zanedbateľný.



Obrázok 18 Vľavo: tepelné čerpadlo, vpravo: detail na Peltierov modul

Na medený pliešok aj na hliníkovú časť s ventilátorom boli pomocou lepidla pripevnené teplotné senzory DS18B20. Na styčnú plochu puzdra senzoru a chladiča bola nanosená teplovodivá pasta. Tieto senzory budú snímať približnú teplotu oboch strán Peltierovho modulu.

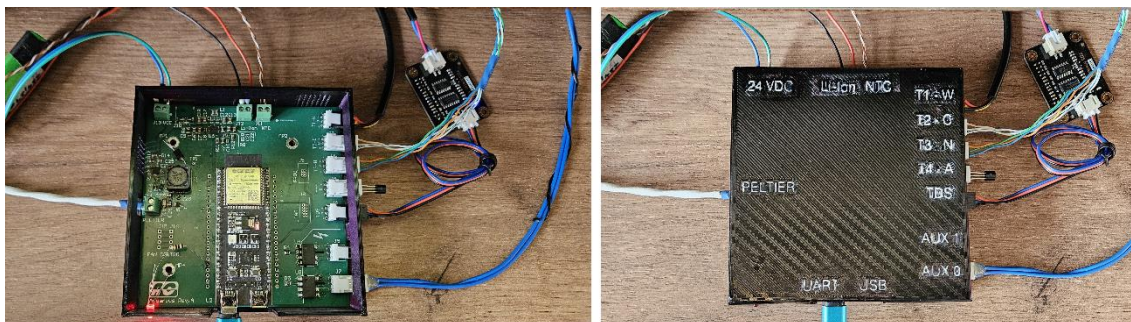
Celá zostava je pomocou kovovej konštrukcie postavená za zadnou stenou akvária v dostatočnej výške. Zavesenie na stenu akvária nebolo možné kvôli väčšej hmotnosti a potenciálnemu poškodeniu sklenenej steny. Detail na umiestnenie čerpadla je zobrazený na obrázku č. 20.

5.3 Puzdro riadiacej jednotky

Puzdro obsahuje otvory pre prívodné káble s konektormi, chladiace otvory a popis funkcie konektorov z vrchnej strany. Skladá sa z dvoch častí, ktoré sú spojené tromi skrutkami veľkosti M3. DPS je uložená v spodnej časti a pripevnená štvrtou skrutkou M3 pre pevné uloženie v prípade otvorenia vrchného krytu.

Na prednej strane sú tri kruhové otvory s priemerom 3 mm, z ktorých jeden využíva červená LED dióda. Zvyšné dva budú v budúcom vývoji využité LED diódami, ktorým budú priradené ďalšie informatívne funkcie.

Zostava puzdra s riadiacou jednotkou je zobrazená na obrázku č. 19.

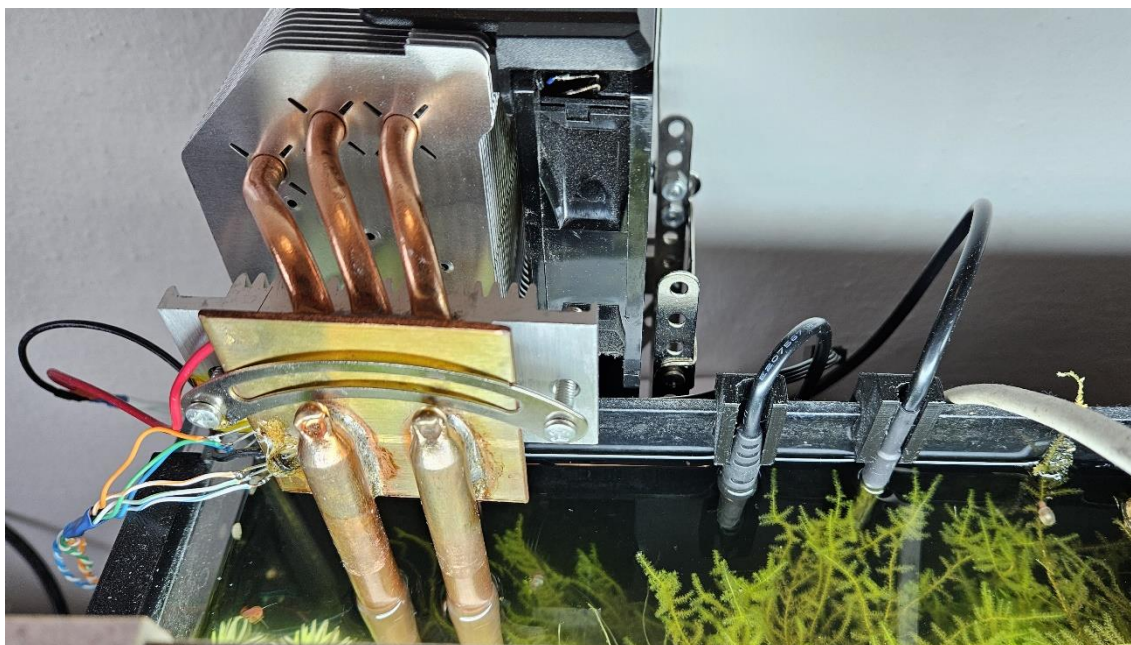


Obrázok 19 Puzdro riadiacej jednotky

5.4 Upevnenie senzorov v akváriu

Ako bolo uvedené v kapitole 4.1 v akváriu sa budú nachádzať dva senzory – senzor teploty a senzor (sonda) tvrdosti vody. Oba senzory je vhodné umiestniť do prúdu vody tvoreného akváriovým filtrom preto, aby meraná hodnota čo najviac zodpovedala priemernej hodnote v celom objeme. Navyše pri meraní nízkej hladiny je potrebné umiestniť sondu TDS do takej výšky, aby sonda pri poklese hladiny pod požadovanú úroveň nebola ponorená vo vode.

Existuje pravdepodobnosť, že časť držiakov senzorov bude počas prevádzky v kontakte s vodou, preto boli pomocou 3D tlače vytvorené z materiálu PETG, ktorý je nezávadný a vodoodolný.



Obrázok 20 Upevnenie senzorov a tepelného čerpadla v akváriu

6. SOFTVÉR ESP32

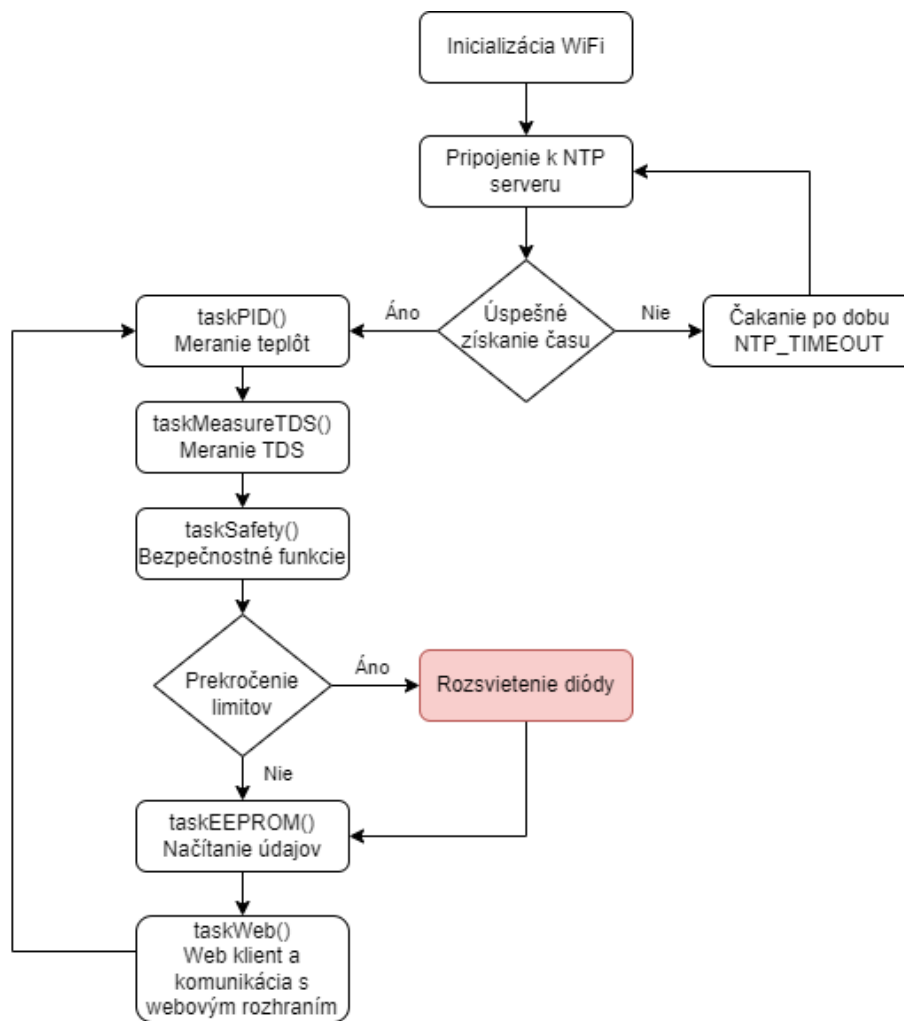
Medzi dva najpopulárnejšie programovacie rámce (framework) umožňujúce vývoj softvéru pre mikrokontrolér ESP32-S3 patria ESP-IDF a Arduino Core. ESP-IDF je balík nástrojov vyvíjaný firmou Espressif, ktorá stojí aj za mikrokontrolermi rady ESP. Výhodou ESP-IDF je plná podpora modulov ESP a úplná implementácia jazyka C/C++, čo z neho robí dobrú voľbu pri vývoji náročnejších aplikácií. Práca s týmto balíkom vyžaduje skúsenejšieho používateľa, čoho dôsledkom je menšia komunitná podpora.

Naopak, framework Arduino Core je vhodný pre začiatočníkov. Obsahuje niekoľko funkčných makier, ktoré uľahčujú písanie kódu, čo si však vyžaduje väčšie nároky na programovú pamäť. Pre Arduino framework existuje neporovnateľne väčšia komunitná podpora a väčšina výrobcov elektroniky poskytuje knižnice určené práve pre Arduino.

Pre vývoj softvéru riadiacej jednotky bol zvolený framework Arduino Core z dôvodu dobrej softvérovej podpory a malej náročnosti. Mikrokontrolér ESP32-S3 disponuje dostatočne veľkou pamäťou, zároveň softvér nepotrebuje využívať žiadne funkcie špecifické pre ESP-IDF, takže obmedzenia zvoleného rámca nie sú problém.

V tejto kapitole sú popísané navrhnuté algoritmy a funkcie, ktoré sú usporiadané do celkov zvaných RTOS úlohy.

Na obrázku č. 21 je uvedený zjednodušený vývojový diagram softvéru. Postupnosť jednotlivých RTOS úloh je len ilustračná, reálna postupnosť je závislá na jednotlivých oneskoreniach úloh a RTOS systémovom plánovači (scheduler).



Obrázok 21 Vývojový diagram softvéru ESP32

6.1 Operačný systém FreeRTOS

Napriek tomu, že mikrokontrolér ESP32 disponuje dvojjadrovým procesorom, nie je vhodné využívať obe jadrá pre užívateľom vytvorený program. Dôvodom je, že prvé jadro je využívané pre bezdrôtovú komunikáciu a nesprávna implementácia by mohla túto funkciu narušiť.

Program navrhutej riadiacej jednotky preto využíva iba druhé jadro. V tomto prípade je vhodné využiť operačný systém reálneho času RTOS (real-time operating system). Pri bežnom programe vytvorenom vo frameworku Arduino Core beží celý program v hlavnej slučke loop(), kde sa jednotlivé inštrukcie vykonávajú postupne od začiatku až po koniec. Nevýhodou je načasovanie vykonania inštrukcií, spôsobené rôznymi oneskoreniami. Jedným z príkladov je použitie oneskorenia delay() pri meraní teploty v určitom intervale. Takéto oneskorenie zaberie celý výpočtový čas, ktorý by mohol byť využitý na inú funkcionality.

Práve tento problém rieši systém RTOS, ktorý umožňuje rozdelenie programu na takzvané úlohy, pričom stále platí, že sa v určitom čase vykonáva vždy len jedna úloha. Rozdielom však je, že pri pozastavení úlohy sa uvoľnia systémové zdroje pre ďalšie úlohy.

Program riadiacej jednotky je rozdelený do niekoľkých úloh, z ktorých každá je bližšie popísaná v nasledujúcich kapitolách. Všetky úlohy sú inicializované vo funkcii `setup()`, pričom hlavná slučka je prázdna. O časovanie a uprednostňovanie jednotlivých úloh sa stará plánovač (scheduler), ktorý je súčasťou knižnice RTOS.

Navyše je možné každej úlohe prideliť určitú prioritu. To je možné využiť v prípade, že systém obsahuje úlohy kritické pre jeho fungovanie a bezpečnosť. Konkrétnym príkladom z tohto návrhu je RTOS úloha `taskSafety()` s prioritou 1 popísaná v kapitole 6.5 a úloha `taskMeasureTDS()` s prioritou 3 z kapitoly 6.4. V tomto prípade je dôležitejšie uprednostniť úlohu sledujúcu kritické teploty Peltierovho modulu a prideliť jej systémové zdroje pred úlohou merajúcou TDS, ktorá nemá kritický význam na funkciu a bezpečnosť systému. Na základe podobnej úvahy boli pridelené priority všetkým RTOS úlohám v rozsahu 1 až 3.

6.2 Synchronizácia reálneho času

Systém využíva interný 136 kHz oscilátor implementovaný v module ESP32-S3 na udržiavanie reálneho času (RTC). Výhodou je kompletná integrácia bez potreby externých komponentov. Nevýhodou je pomerne malá stabilita kmitočtu v závislosti na teplote v porovnaní s riešením využívajúcim externý kryštál. [19]

Pri prvom spustení zariadenia, výpadku napájania alebo reštarte mikrokontroléru sa vykoná RTOS úloha `taskConnectWiFi()`, ktorá sa v prvom kroku pokúsi pripojiť k WiFi routeru pomocou prednastavených prihlasovacích údajov. Po úspešnom prihlásení si úloha vyžiada aktuálny čas a dátum z NTP servera (Network Time Protocol). Ak sa po určitom časovom intervale nepodari kontaktovať server úloha sa na dlhší časový interval pozastaví a prenechá systémové zdroje ďalším RTOS úlohám. Po uplynutí časového intervalu sa znova pokúsi získať aktuálny čas z NTP servera. V prípade, že sa podarí získať aktuálny čas úloha inicializuje interné RTC hodiny. Úloha navyše využíva nastavenie časového pásma, čo umožňuje automatické prepínanie medzi letným a zimným časom.

Súčasťou je aj funkcia obsluhujúca spínanie polovodičových relé AUX0 a AUX1 v nezávislých časových intervaloch definovaných cez webové rozhranie. K relé AUX0 je pripojené osvetlenie akvária a relé AUX1 je v súčasnosti trvalo vypnuté. V prípade výpadku hlavného napájania, keď systém odoberá energiu zo záložného zdroja sú obe relé deaktivované z dôvodu šetrenia energie. Tento stav je založený na predpoklade, že nie je napätie v sieti, z ktorej je napájané aj osvetlenie a preto nemá zmysel ho spínať.

6.3 PID regulácia ohrevu / chladenia vody

Pri softvérovom návrhu bolo dôležité navrhnúť spôsob riadenia tepelného čerpadla na základe požadovanej teploty vody. Výstupnými parametrami algoritmu sú výkon tepelného čerpadla a smer čerpania tepla, vstupnými parametrami sú požadovaná teplota vody a aktuálna teplota vody.

Algoritmus je obsiahnutý v RTOS úlohe `taskPID()`, ktorá využíva PID regulátor z knižnice `QuickPID` a ďalšie softvérové funkcie [21].

Funkcia `readTemp()` zmeria teplotu vody, okolia a oboch strán Peltierovho modulu a následne hodnoty uloží do globálnych premenných, odkiaľ sú dostupné pre všetky ďalšie funkcie.

V prvom kroku je stanovená chyba ako rozdiel požadovanej a aktuálnej teploty vody. Následne sa na základe znamienka a veľkosti chyby nastaví smer prúdu a výkon Peltierovho modulu. Ak je hodnota chyby kladná Peltierov modul je polarizovaný v kladnom smere, čím je zvolený režim ohrevu. V prípade zápornej chyby je modul polarizovaný v zápornom smere a funguje v režime chladenia. Súčasne je overovaná veľkosť chyby. Ak chyba prekročí desaťnásobok povolenej odchýlky, ktorá je definovaná konštantou `TEMP_MARGIN` s hodnotou 0,1 (°C), algoritmus zvolí vyšší výkon modulu, určený pracovným bodom OP2 v kapitole 3.3.2. Absolútna hodnota tejto chyby figuruje ako vstupná hodnota PID regulátoru.

Okrem vstupnej hodnoty vyžaduje PID regulátor inicializáciu jednotlivých ziskov, definovaných proporcionálnym koeficientom K_p , derivačným koeficientom K_d a integračným koeficientom K_i . Počas predbežného testovania sa vzhľadom na veľkú zotrvačnosť systému prejavili koeficienty K_d a K_i ako málo významné. Koeficient K_d bol eliminovaný nastavením nulovej hodnoty a koeficient K_i bol inicializovaný s hodnotou 1. Proporcionálny koeficient fungoval pomerne spoľahlivo pri hodnote $K_p = 100$.

V ďalšej časti algoritmu je spracovaný výstup PID regulátoru, ktorý naberá hodnoty v rozsahu 0 až 255. Vzhľadom na to, že z dôvodu efektivity je výhodné prevádzkovať Peltierov modul len v určitom pracovnom bode, bol zvolený spôsob riadenia výkonu podobný pulznej šírkovej modulácii PWM. Výstupná hodnota PID regulátoru je prevedená na časové intervaly v rozsahu 0 až 60 sekúnd s krokom 10 s, pričom perióda je 60 s. To znamená, že pri malej chybe je na výstupe PID regulátoru malá hodnota a Peltierov modul je napájaný po dobu 10 s a následne je deaktivovaný po dobu 50 s. Naopak pri veľkej odchýlke pracuje Peltierov modul konštantne.

6.4 Meranie TDS

Pre meranie tvrdosti vody bola využitá značná časť kódu poskytovaného výrobcom TDS sondy SEN0244 DFRobot. Pre zvýšenie presnosti merania je využité viacnásobné vzorkovanie (sampling). Funkcia s určitým časovým rozstupom zmeria 30 vzoriek,

pričom výsledná hodnota je medián tejto množiny. Funkcia zároveň využíva teplotne kompenzačný algoritmus s parametrami určenými výrobcom DFRobot. [20]

Rovnako ako ostatné funkcie je aj táto definovaná ako RTOS úloha s názvom `taskMeasureTDS()`.

6.5 Bezpečnostné funkcie

Celý systém je nutné monitorovať z pohľadu prekročenia limitu kritických parametrov definovaných samotným hardvérom a živočíchmi v akváriu. Na to slúži RTOS úloha `taskSafety()`, ktorá združuje viaceré monitorovacích funkcií.

Z pohľadu hardvérových obmedzení je to teplota jednotlivých strán Peltierovho modulu a zároveň maximálny rozdiel týchto teplôt. Rozsah pracovných teplôt modulu dosahuje - 40 až 90 °C. Maximálny rozdiel teplôt oboch strán je 68 °C [5]. Tieto parametre však prekračujú medze efektívneho pracovného bodu, na základe ktorého bol určený COP v kapitole 3.3.2. Preto boli zvolené prísnejšie parametre definované v tabuľke 6.1.

Ďalšie obmedzenia tvoria parametre vody akými sú teplota a vodivosť. Rozsah týchto parametrov je definovaný v kapitole 2.

Pre každý z týchto parametrov je vytvorená overovacia podmienka. Úloha využíva logický súčin všetkých podmienok, to znamená, že ak je aspoň jedna podmienka vyhodnotená ako „nepravda“ je nepravdivý aj celý súčin. V tom prípade je rozsvietená červená LED dióda, popísaná v kapitole 4.4 a je na užívateľovi aby bližšie problém identifikoval a eliminoval.

Tabuľka 6.1 Tabuľka kritických limitov sledovaných úlohou `taskSafety()`

Premenná	Popis	Hodnota
<code>TEMP_PELTIER_MAX</code>	Max. teplota x strany	50
<code>TEMP_PELTIER_MIN</code>	Min. teplota x strany	0
<code>TEMP_PELTIER_DELTA</code>	Max. rozdiel teplôt strán Peltierovho modulu	30
<code>TEMP_WATER_MAX</code>	Max. teplota vody	26
<code>TEMP_WATER_MIN</code>	Min. teplota vody	20
<code>TDS_MAX</code>	Max. hodnota vodivosti vody v ppm	200
<code>TDS_MIN</code>	Min. hodnota vodivosti vody v ppm	150

Parametre sú rozdelené do dvoch skupín. Zvýraznené limity sú kritické, ktorých prekročenie môže znamenať funkciu v neefektívnom pracovnom bode, v horšom prípade poškodenie modulu. Prekročenie nekritických limitov, môže mať negatívne dôsledky na osadenstvo akvária, pričom v prípade prekročenia teploty vody je úlohou zariadenia túto skutočnosť napraviť. V prípade prekročenia rozsahu TDS nemá zariadenie funkčnú schopnosť nápravy, preto je výstupom len informovanie užívateľa rozsvietením diódy.

6.6 Komunikácia s webovým rozhraním

Pre získavanie užívateľských nastavení, ako je požadovaná teplota vody a doba osvetlenia akvária, slúži úloha `taskWeb()`. Úloha vytvorí webového klienta (HTTP Client), ktorý je vďaka umiestneniu jednotky v spoločnej lokálnej sieti viditeľný pre Raspberry Pi.

Riadiaca jednotka v pravidelných časových intervaloch kontaktuje webové rozhranie a formou protokolu HTTP (HTTP Response) si vyžiada objekt vo formáte JSON popísaný v kapitole 7.5.

Následne objekt dekoduje pomocou knižnice `Arduino_JSON` a dekodované údaje zapíše do pamäte EEPROM. V prípade, že sa údaje v pamäti zhodujú so získanými údajmi k opätovnému prepísaniu nedôjde z dôvodu šetrenia zapisových cyklov pamäte.

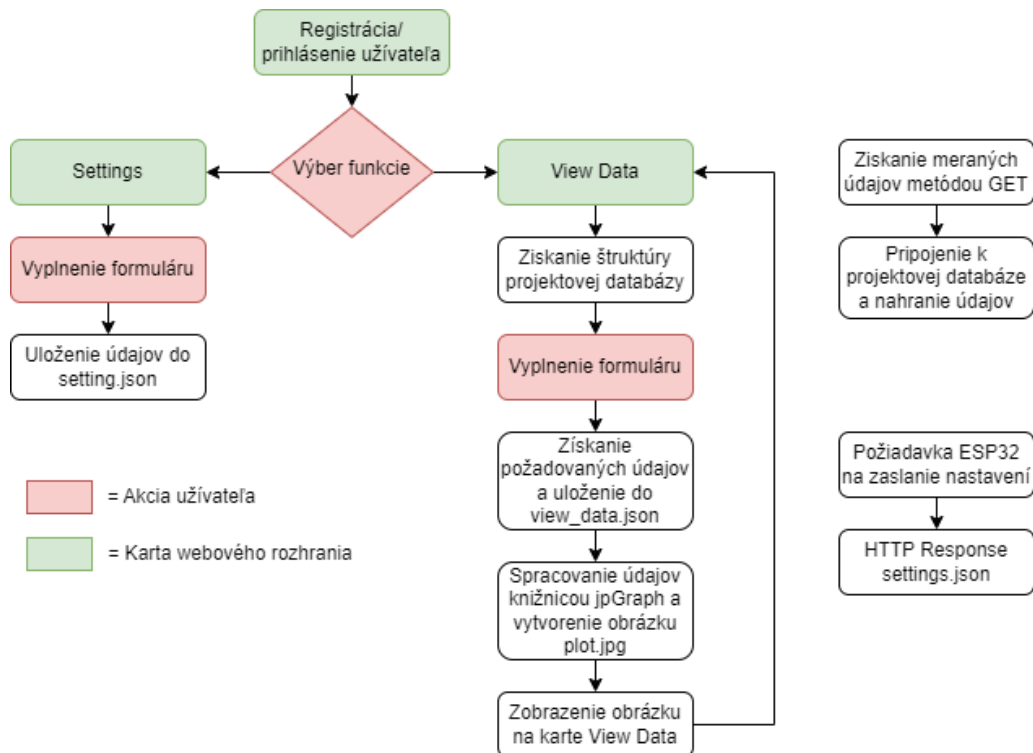
7. WEBOVÉ ROZHRAINIE A DATABÁZA

Táto kapitola sa venuje popisu webového rozhrania, jeho funkciám a komunikácií s riadiacou jednotkou.

Web a databáza bežia na mikropočítači Raspberry Pi 4B, pripojenom do spoločnej lokálnej siete s riadiacou jednotkou. Vzhľadom na to, že na mikropočítači beží operačný systém na báze Linux, bolo možné využiť balík softvérových nástrojov LAMP. V tejto sade sa nachádza Apache HTTP server, umožňujúci prevádzku web stránok, MySQL databáza a PHP programovací jazyk.

V budúcom vývoji je plánovaná prevádzka rozhrania dostupného cez internet, čo vyžaduje určité zabezpečenie proti potenciálnemu zneužitiu. Jednou z možností je vytvorenie registrovanej skupiny používateľov, ktorá bude mať prístup ku všetkým funkciám.

Na obrázku č. 22 je uvedený funkčný diagram webového rozhrania.



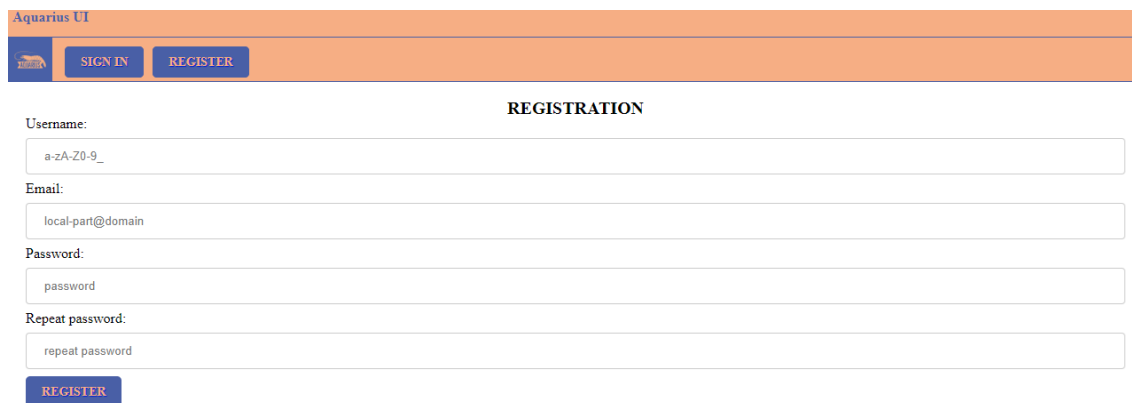
Obrázok 22 Funkčný diagram webového rozhrania

7.1 Registračný formulár a prihlásenie

Prvým predpokladom pre plnohodnotné využitie webového rozhrania je registrácia užívateľa. K tomu slúži karta „REGISTER“ s pripraveným formulárom. Kód, ktorý spravuje túto funkcionality využíva existujúce PHP funkcie na overenie požadovaných znakov a dĺžky užívateľského mena a správneho formátu emailovej adresy. Povolenými

znakmi sú malé a veľké písmená, číslice a znak „_“.

Po správnom vyplnení formuláru sú údaje uložené do tabuľky užívateľov v užívateľskej databáze. Z dôvodu zvýšenej bezpečnosti je heslo zašifrované algoritmom BCrypt, to znamená že v databáze sa nachádza namiesto reálneho hesla alfanumerický reťazec, ktorý sa pre prihlásenie nedá použiť.

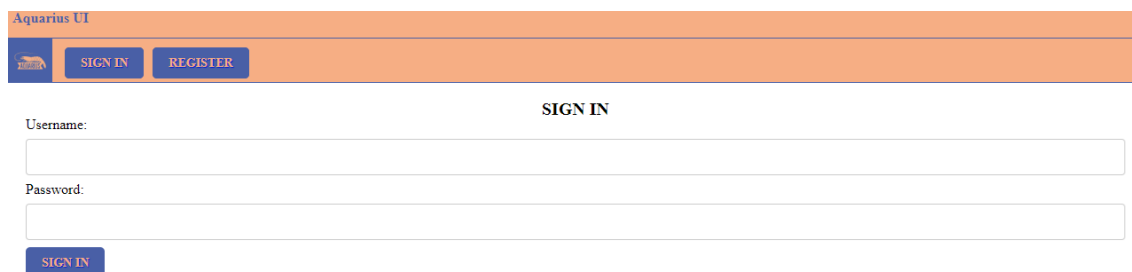


The screenshot shows a web interface for registration. At the top, there is a navigation bar with the text 'Aquarius UI' and two buttons: 'SIGN IN' and 'REGISTER'. Below this, the main heading is 'REGISTRATION'. The form consists of four input fields: 'Username' with a placeholder 'a-zA-Z0-9_', 'Email' with a placeholder 'local-part@domain', 'Password' with a placeholder 'password', and 'Repeat password' with a placeholder 'repeat password'. A blue 'REGISTER' button is positioned at the bottom left of the form.

Obrázok 23 Registračný formulár webového rozhrania

Celý webový kód je rozdelený do niekoľkých PHP súborov s rôznymi príponami, z ktorých je prevažná časť dostupná len po prihlásení. Toto obmedzenie tvorí druhý predpoklad pre plnohodnotné využitie webového rozhrania.

K prihláseniu slúži formulár na karte „SIGN IN“. Po vyplnení používateľského mena a hesla PHP kód heslo znova zašifruje algoritmom BCrypt a porovná ho s alfanumerickým reťazcom v databáze. V prípade zhody je vytvorené takzvané sedenie (session), po ktorom sú užívateľovi sprístupnené skryté karty.



The screenshot shows a web interface for signing in. At the top, there is a navigation bar with the text 'Aquarius UI' and two buttons: 'SIGN IN' and 'REGISTER'. Below this, the main heading is 'SIGN IN'. The form consists of two input fields: 'Username' and 'Password'. A blue 'SIGN IN' button is positioned at the bottom left of the form.

Obrázok 24 Prihlasovací formulár webového rozhrania

Zmyslom týchto dvoch funkcionalít je zabránenie neregistrovaným používateľom manipulovať s projektovými nastaveniami a zobrazovať merané údaje.

Zároveň je zamedzené registrovaným používateľom prístupovať k projektom, ktoré im nie sú pridelené.

7.2 Zápis údajov do databázy

Softvér bežiaci na ESP32 využíva dotazovaciu metódu GET protokolu HTTP, ktorá umožňuje pomocou textového reťazca prenášať údaje na webový server. PHP kód následne tento textový reťazec spracuje a odošle údaje do databázy MySQL.

V nasledujúcom reťazci sú definované 2 parametre, ktorým je vždy priradená určitá hodnota.

```
http://web/dataHandler.php?projectID=diplomka_pd&value1=tds&value2=155
```

Parameter „projectID“ definuje konkrétnu tabuľku v databáze. Databáza môže obsahovať niekoľko tabuliek, z ktorých každá bude špecifická pre konkrétny systém založený na ESP32. Ďalším takýmto systémom môže byť domáca meteostanica, alebo zariadenie na automatické zavlažovanie záhrady. Systému navrhovanému v tejto práci patrí tabuľka s názvom „diplomka_pd“.

Parameter „value1“ určuje akú veličinu systém požaduje zaznamenať a parameter „value2“ nesie hodnotu tejto veličiny. Po vložení údajov do databázy je pridaná časová značka.

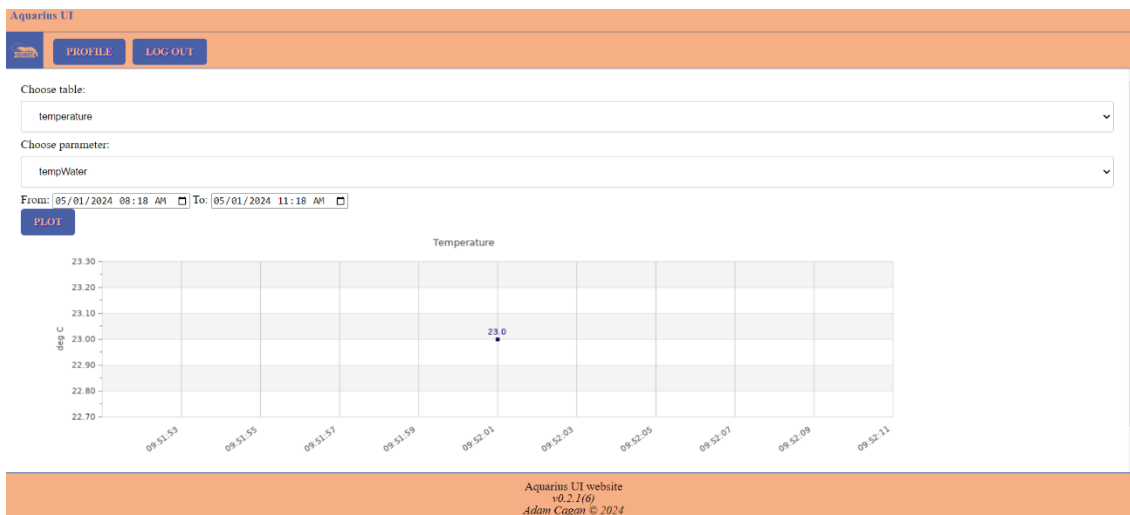
7.3 Zobrazovanie nameraných údajov

Po prihlásení do webovej stránky je možné tlačidlom prejsť na kartu „View Data“, ktorá dovoľuje užívateľovi pomocou jednoduchého formulára zvoliť druh a časové obdobie požadovaných údajov.

Po zvolení parametrov PHP kód kontaktuje databázu a vyberie zo zvolenej tabuľky všetky údaje za definované časové obdobie. Tieto údaje majú podobu vektoru nameraných hodnôt a vektoru časových značiek. Takto získané údaje funkcia uloží do súboru vo formáte JSON, v ktorom sú pripravené na ďalšie spracovanie.

Ďalšia funkcia vykresľujúca z údajov graf využíva knižnicu JpGraph [18]. Táto knižnica je napísaná v jazyku PHP a dokáže vykresľovať niekoľko typov grafov, ako napríklad bodový, stĺpcový alebo čiarový graf. Zároveň je možné pomerne pestro modifikovať zobrazovanú oblasť od typov značiek, cez formát osí až po farebnú škálu grafu.

Vo vytvorenej funkcii je potrebné znova načítať údaje do dvoch vektorov, ktoré sú priradené osiam X a Y. Následne sú vektory preposlané funkcii JpGraph s vopred nastaveným formátovaním zobrazovanej oblasti, ktorá vytvorí obrázok vo formáte JPG. V poslednom kroku je tento obrázok vykreslený na webovej karte. Príklad zobrazenia teploty vody za určité časové obdobie je zobrazený na obrázku č. 25.



Obrázok 25 Zobrazenie nameraných údajov

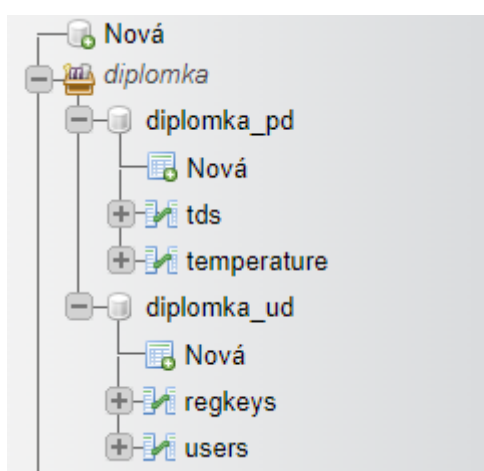
7.4 Štruktúra databázy

Celkovo sú definované dve databázy, prvá je databáza užívateľov a druhá je databáza konkrétneho projektu. V tomto prípade existuje len jedna databáza projektu „diplomka_pd“, ktorému sa venuje táto práca.

V užívateľskej databáze sa nachádza tabuľka s prihlasovacími údajmi a zoznamom projektov, ku ktorým majú jednotliví používatelia prístup.

Projektová databáza obsahuje tabuľku pre každú skupinu meraných veličín, v tomto prípade „tds“ a „temperature“. Jednotlivé tabuľky ďalej obsahujú unikátny identifikátor (číslo záznamu) časovú značku a hodnoty meraných veličín.

Do databázy je možné nahliadnuť, prípadne pridávať a upravovať údaje pomocou rozhrania phpMyAdmin, ktoré je súčasťou balíka LAMP.



Obrázok 26 Štruktúra databázy webového rozhrania

7.5 Zázpis údajov do ESP32

Na voľbu požadovanej teploty vody a času zopnutia a vypnutia osvetlenia slúži karta „SETTINGS“. Po vyplnení formuláru kód uloží údaje do súboru settings.json, odkiaľ sú ďalej pomocou protokolu HTTP odoslané do ESP32.



Obrázok 27 Voľba projektových nastavení

7.6 Pridanie ďalších projektov

V súčasnom stave je možné pridanie ďalších projektov rozšírením databázy manuálne pomocou webového rozhrania phpMyAdmin. Rovnako je tiež potrebné čiastočne upraviť kód webového rozhrania, aby nové projekty dokázalo správne rozpoznať.

Pridávanie projektov cez webové rozhranie a zároveň vylepšenie jeho univerzálnosti je plánované v budúcom vývoji.

8. VÝSLEDKY V PREVÁDZKE

Po skonštruovaní dodatočnej izolácie a zapojení riadiacej jednotky bol systém testovaný v reálnej prevádzke. Testovanie spočívalo v potvrdení dosiahnutia a udržania požadovanej teploty vody v oboch režimoch, definovaných v kapitole 3.2. Test bol čiastočne ovplyvnený okolitými podmienkami v čase merania. Najväčší vplyv mala teplota okolia a jej mierna fluktuácia počas doby merania, ktorá mala priamy vplyv na teplotu vody. Výmene tepla medzi okolím a Peltierovým modulom dopomáhal ventilátor, ktorý bežal počas celého testu na plný výkon. Výmene tepla v akváriu dopomáhal vzduchovací kameň, ktorý spôsoboval prúdenie vody okolo tepelných trubíc.

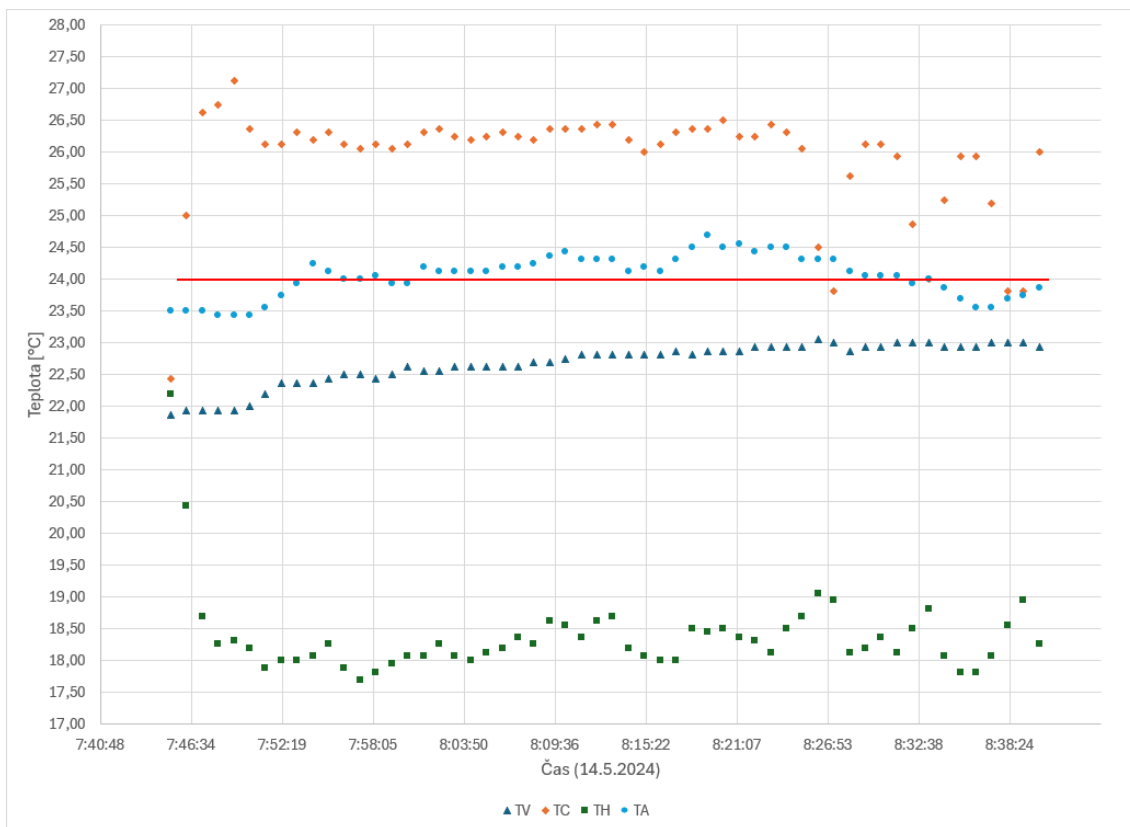
Počas testovania boli sledované teploty oboch strán Peltierovho modulu, ich rozdiel, teplota vody T_V a teplota okolia T_A . Požadovaná teplota vody je na grafoch označená červenou úsečkou. Pre zachovanie súladu so softvérom je označená teplota strany Peltierovho modulu v kontakte cez tepelný výmenník s vodou ako T_C a teplota strany v kontakte s okolím ako T_H . Ďalej boli merané hodnoty tvrdosti vody TDS a hodnota premennej FAULT_FLAG (FF), určujúcej prekročenie kritických hodnôt z tabuľky 6.1. Hodnoty boli zaznamenávané v minútových intervaloch od započatia testu do dosiahnutia požadovanej teploty vody.

8.1 Režim ohrievanie

Počas testovania režimu ohrev nedosahovala okolitá teplota hodnotu 20 °C , na ktorú je systém dimenzovaný a pôsobí naň najväčšia záťaž. Preto bola funkcia režimu testovaná len pri aktuálnych počiatkových podmienkach, daných teplotou vody $T_V = 21,9\text{ °C}$ a teplotou okolia $T_A = 23,5\text{ °C}$. Požadovaná teplota vody bola nastavená na 24 °C , čo od počiatkovej teploty tvorilo rozdiel $2,1\text{ °C}$.

Po spustení ohrevu pracovalo tepelné čerpadlo v pracovnom bode OP2. Podľa kapitoly 3.2. dosahuje ohrevný výkon $P_{H-OP2} = 47\text{ W}$ a je definovaný ako súčet chladiaceho P_C a stratového elektrického výkonu P_E . Po približne 40 minútach došlo k zohriatiu vody na rozdiel menší než 10-násobok hodnoty TEMP_MARGIN (absolútna hodnota odchýlky aktuálnej teploty vody od požadovanej s hodnotou $0,1\text{ °C}$), čo viedlo k zmene pracovného bodu z OP2 na OP1 s výkonom $P_{H-OP1} = 15\text{ W}$.

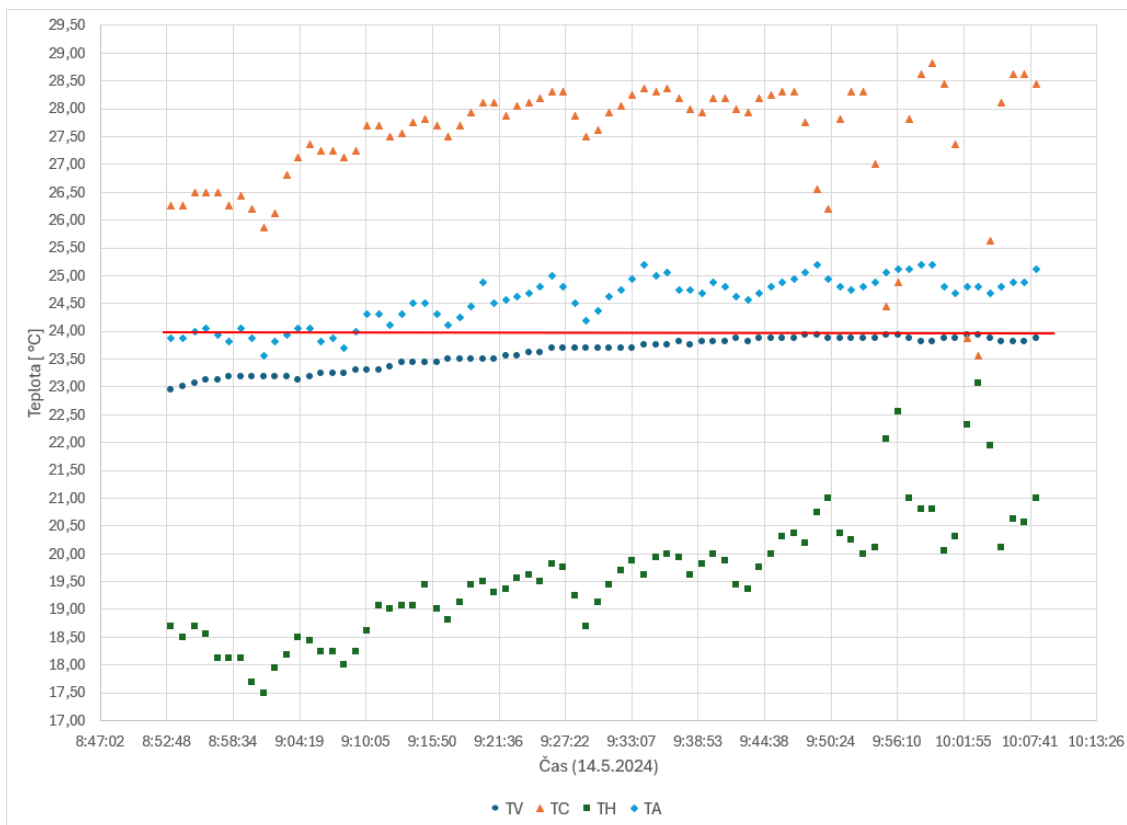
Na obrázku č. 28 je možné vidieť, že teplota vody sa ďalej nezvyšovala z dôvodu nedostatočného tepelného výkonu dodávaného v tomto pracovnom bode. Dôvodom môže byť nedostatočná tepelná výmena medzi tepelnými trubicami a vodou, prípadne nedostatočná kompenzácia výkonu odoberaného z akvária odparovaním vody na hladine.



Obrázok 28 Merané teploty v režime ohrev, pracovné body OP2 a OP1

Softvér bol upravený tak, aby čerpadlo pracovalo výlučne v bode OP2. Následne bol test znova spustený a výsledky sú uvedené na obrázku č. 29. V tomto prípade sa zvýšila teplota vody z 23 na 24 °C približne za hodinu. Po dosiahnutí požadovanej teploty dochádzalo k opakovanému vypnutiu a zapnutiu čerpadla vplyvom pohybu rozdielu požadovanej a reálnej teploty vody nad a pod hodnotu TEMP_MARGIN, to je možné vidieť aj na fluktuácii teplôt oboch strán Peltierovho modulu.

Teplota okolia v tomto čase dosahovala viac než 24 °C, to znamená, že voda prijímala teplo aj z okolia. Z toho dôvodu, napriek dosiahnutiu požadovanej teploty, nie je možné považovať výsledok testu za dostatočné overenie funkcie režimu ohrev.

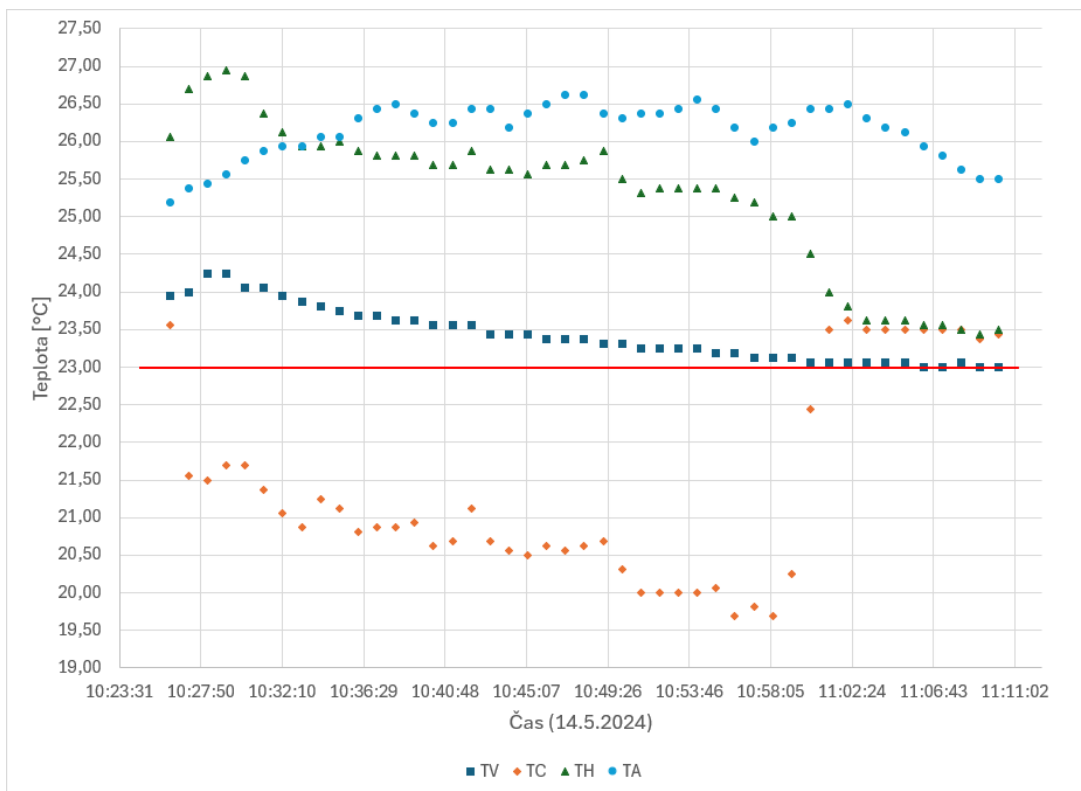


Obrázok 29 Merané teploty v režime ohrev, pracovný bod OP2

8.2 Režim chladenie

Počas testovania tohto režimu systém pracoval výlučne v pracovnom bode OP2 s chladiacim výkonom $P_{C-OP2} = 35$ W. Požadovaná teplota vody bola nastavená na hodnotu 23 °C a teplota okolia sa pohybovala na úrovni 25,5 °C, čo tvorilo vhodné podmienky pre plnohodnotné testovanie tohto režimu. Teplota vody však na začiatku testu dosahovala len 24 °C, čo pre význam testu nemá veľký vplyv. Dôležité je potvrdenie, že systém dokáže dosiahnuť požadovanú teplotu a udržiavať ju. Práve v tomto stave pôsobí na systém najväčšia záťaž. Tá je tvorená najväčším prestupom tepla cez steny akvária spôsobeným najväčším rozdielom teploty vody a okolia.

Na obrázku č. 30 je možné vidieť, že v priebehu približne 40 minút systém vychladil vodu na 23 °C a dokázal túto hodnotu udržiavať. To znamená že účinne kompenzoval tepelný výkon, vstupujúci do akvária pri teplote okolia 25,5 °, na základe čoho bol test považovaný za úspešný.



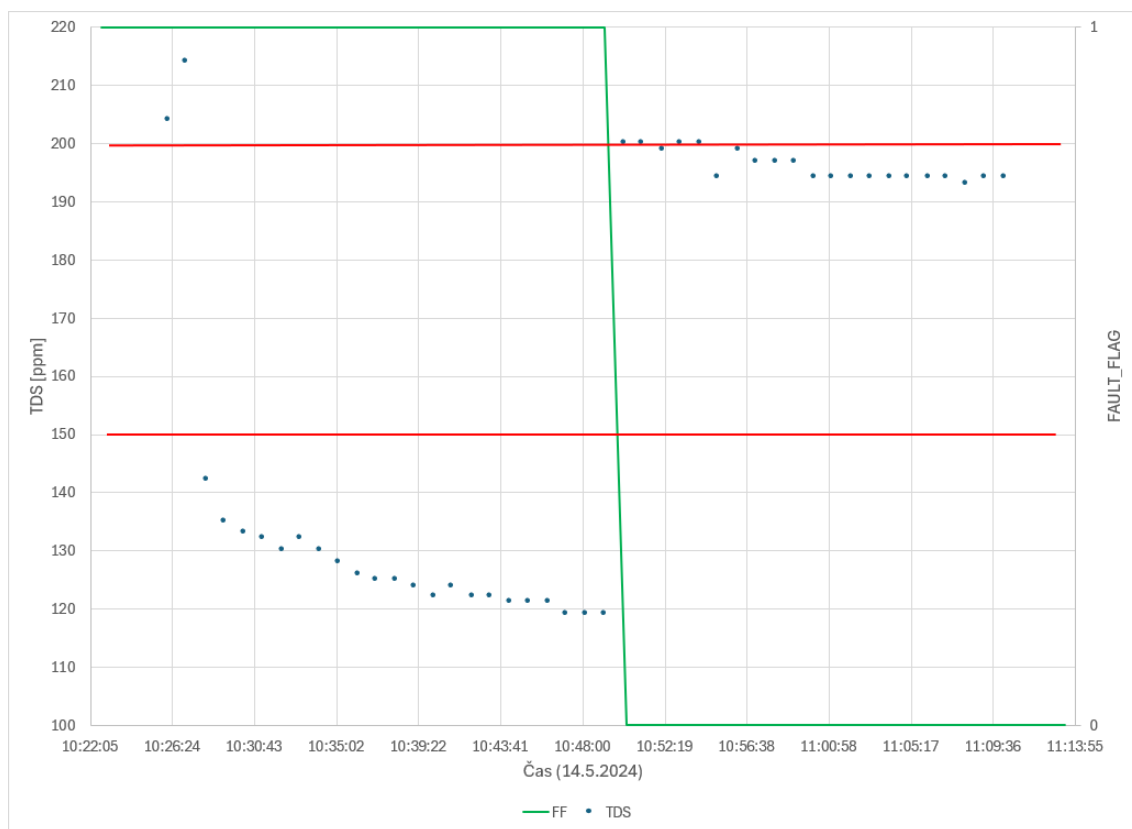
Obrázok 30 Merané teploty v režime chladenia

8.3 Meranie TDS

Pri meraní tvrdosti vody dochádzalo k prudkým a výrazným zmenám meraných hodnôt. Tvrdosť vody bola zároveň overovaná ručným meračom a počas testu sa pohybovala v rozmedzí 155 až 163 ppm (mierna zmena môže nastať vplyvom zmeny teploty, alebo vplyvom biologických procesov v akváriu).

Pôvod problému sa počas testu nepodarilo identifikovať.

Na obrázku č. 31 je demonštrovaná len bezpečnostná funkcia, ktorá pri prekročení rozsahu povoleného rozsahu TDS z tabuľky 6.1 zmení hodnotu premennej FAULT_FLAG na log. 1 a rozsvieti červenú diódu. Údaje boli merané počas testovania režimu chladienia a sú súčasťou prílohy B.



Obrázok 31 Meranie TDS

8.4 Analýza z pohľadu potenciálneho zlepšenia systému

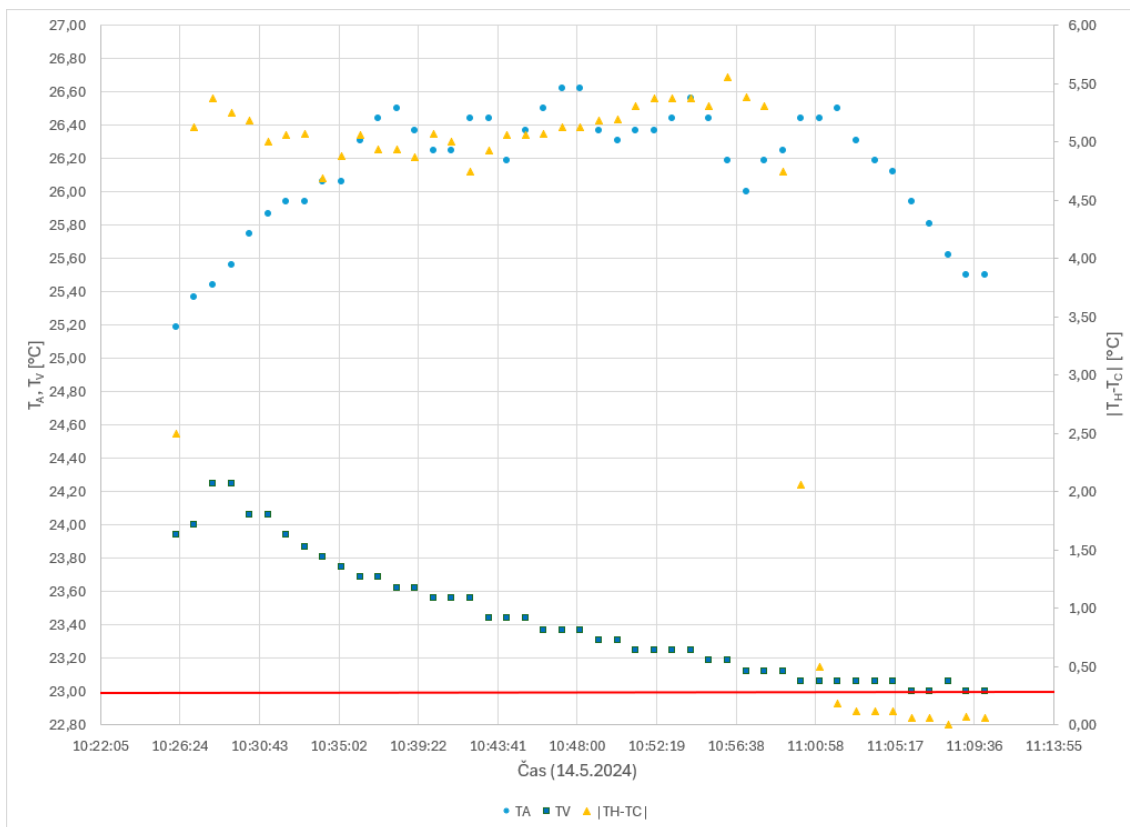
Z nameraných údajov je možné ďalej analyzovať účinnosť tepelnej výmeny a celkové chovanie systému z pohľadu možného zlepšenia v budúcom vývoji.

8.4.1 Vyšší výkon Peltierovho modulu.

Jeden z prvých indikátorov je rozdiel teplôt oboch strán Peltierovho modulu. Ako naznačuje graf na obrázku č. 9, koeficient výkonnosti COP rastie s klesajúcim rozdielom teplôt. Rovnako rastie aj maximálny dovolený výkon modulu.

Na obrázku č. 32 je zobrazený rozdiel teplôt v režime chladenie pri pracovnom bode OP2. Počas testu sa rozdiel teplôt držal na úrovni 5,5 °C, čo je približne polovica na ktorú bol systém dimenzovaný. Z toho vyplýva, že výmenníky tepla pracujú pomerne účinne a je tu potenciál možnej prevádzky modulu pri vyššom výkone.

Výhodou väčšieho výkonu je možnosť prevádzky vo väčšom rozsahu teplôt okolia než 20 až 26 °C. Pri väčšom výkone existuje potenciál využitia PID regulácie na zmiernenie zmeny teploty v čase, pretože veľká zmena môže spôsobovať stres živočíchom v akváriu.



Obrázok 32 Rozdiel teplôt oboch strán Peltierovho modulu pri testovaní chladenia vody

Vyšší výkon súčasne vyžaduje väčší odoberaný prúd z DC-DC meniča navrhnutého v kapitole 4.3. Keďže regulátor TPS92512 funguje v pracovnom bode OP2 ($I_{OP2} = 2 \text{ A}$) na hranici možností ($I_{OUTmax} = 2,5 \text{ A}$), bolo by nutné nahradiť obvod výkonnejším typom a zároveň zväziť predimenzovanie ďalších pasívnych komponentov tvoriacich tento blok.

8.4.2 Zvýšenie účinnosti výmenníkov tepla

Z grafu na obrázku č. 30 je vhodné si všimnúť rozdiel teplôt $T_H - T_A$ a $T_V - T_C$. Tieto hodnoty priamo odzrkadľujú účinnosť výmenníkov tepla. Je možné vidieť že rozdiel teploty okolia T_A a strany T_H je približne $2 \text{ }^\circ\text{C}$ počas celého testu a rozdiel teploty vody T_V a strany T_C je približne $3 \text{ }^\circ\text{C}$. Z toho vyplýva, že výmenník medzi chladenou stranou a vodou je menej účinný.

Potenciálnym zlepšením v tomto smere je použitie väčšieho počtu tepelných trubíc, čím sa zvýši kontaktná plocha s vodou.

V prípade výmenníku tepla s okolím neexistuje veľa možností zlepšenia, keďže bol zaobstaraný ako celok. Možnosťou by bolo zaobstaranie iného typu s väčšou plochou, prípadne s výkonnejším ventilátorom.

V aktuálnom prevedení bola ako teplovodivá pasta, použitá Arctic MX-4 s koeficientom tepelnej vodivosti na úrovni $8,5 \text{ W/mK}$. Ďalšie zlepšenie prenosu tepla môže byť dosiahnuté použitím vyššej rady s väčšou tepelnou vodivosťou.

9. ZÁVER

Cieľom tejto práce je návrh zariadenia automaticky regulujúceho teplotu vody v akváriu a dobu spínania osvetlenia. Ďalšou funkciou je meranie tvrdosti vody, doplnené o detekciu poklesu hladiny. Navrhnuté zariadenie ukladá namerané údaje do databázy, ktorá je užívateľovi dostupná cez webové rozhranie.

V prvej časti sú predstavené typické zariadenia dostupné na trhu, ktoré slúžia na regulovanie teploty vody a meranie tvrdosti, sú uvedené ich výhody a nevýhody. Následne je popísaná dôležitosť a význam týchto parametrov pre chov riasožravých kreviet, na ktorom je táto práca založená. Ideálna teplota vody pre chov týchto živočíchov je 23 – 24 °C. To je zároveň teplota, ktorú je navrhované zariadenie schopné udržiavať pri izbovej teplote v rozsahu 20 – 26 °C.

V ďalšej časti práce je analyzovaný model akvária s objemom 20 l z pohľadu tepelnej výmeny medzi vodou a okolím. V programe SOLIDWORKS sú navrhnuté dva modely akvária. Prvý model predstavuje obyčajné akvárium s hrúbkou sklenenej steny 4 mm. Druhý model je doplnený o dodatočnú tepelnú izoláciu tvorenú vzduchovou medzerou s hrúbkou 4 mm medzi dvoma sklenenými stenami. Cieľom dodatočnej izolácie je znížiť tepelný tok do a von z akvária, dôsledkom čoho sú menšie nároky na navrhovaný systém. Výsledkom analýzy je minimálny potrebný tepelný výkon tepelného čerpadla $P_H = 6,81$ W, ktorý je potrebný na udržanie teploty vody pri daných parametroch. Simuláciou bolo dokázané, že dodatočná izolácia znížila prenesený výkon približne o 97,6 % v porovnaní s modelom bez izolácie.

Na základe tohto výkonu bolo navrhnuté tepelné čerpadlo, založené na Peltierovom module, doplnené o výmenníky tepla medzi vodou a okolím schopné účinne pracovať v dvoch výkonnostných pracovných bodoch.

Ďalšia časť sa venuje návrhu riadiacej jednotky založenej na mikrokontroléri ESP32. Jej úlohou je monitorovanie teplôt, ovládanie tepelného čerpadla a zápis meraných hodnôt teploty a tvrdosti vody do databázy. Je navrhnutý DC-DC menič napájajúci Peltierov modul a záložný zdroj pre mikrokontrolér. Napájanie systému vyžaduje externý zdroj s napätím 20V a výkonom minimálne 20 W, ktorý nie je súčasťou tohto návrhu.

Neskôr bolo navrhnuté webové rozhranie s databázou, ktoré po registrácii užívateľa umožňuje graficky zobrazovať merané údaje za zvolené časové obdobie. Ďalšou funkciou rozhrania je nastavenie požadovanej teploty vody a doby osvetlenia akvária a následný zápis týchto hodnôt do riadiacej jednotky.

Po skonštruovaní jednotlivých častí systému bola funkcia overená v reálnej prevádzke. Počas testovania v reálnej prevádzke bolo zistené, že výkon v pracovnom bode OP1 nie je dostatočný a tak isto nie je žiadúca ani PID regulácia výkonu. Preto bol softvér upravený a zariadenie pracovalo výlučne v pracovnom bode OP2 s konštantným výkonom.

Pri testovaní režimu ohrev neboli podmienky ideálne na overenie funkčnosti pri najväčšej záťaži systému. Najväčšia záťaž v tomto režime pôsobí pri teplote okolia 20 °C, pričom počas testu dosahovala teplota viac ako 24 °C. To znamená, že pri požadovanej teplote vody 24 °C dochádzalo k prenosu tepla do akvária mimo tepelné čerpadlo taktiež z okolia. Kvôli tomu, napriek úspešnému dosiahnutiu požadovanej teploty vody, nebolo možné považovať výsledok testu za dostatočné overenie funkcie v tomto režime.

Pri testovaní režimu chladenie dosahovala teplota okolia približne 25,5 °C, čo je približne toľko, ako teplota (26 °C), pri ktorej pôsobí na systém najväčšia záťaž. Pri počiatkovej teplote vody 24 °C došlo k ochladeniu na požadovanú hodnotu 23 °C približne za 40 minút. Systém bol schopný požadovanú teplotu vody udržať na tejto hodnote dlhodobo a test bol považovaný za úspešný.

Na záver sú v práci na základe výsledkov prednesené potenciálne zlepšenia systému z pohľadu prenosu tepla tepelným čerpadlom.

LITERATÚRA

- [1] SENSEN GROUP CO., LTD. YRB Series Aquarium Glass Heater [online]. [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.sunsun-china.com/product/aquarium-accessories/yrb-series-aquarium-glass-heater-yrb-810-yrb-820-830-yrb-850.html>
- [2] INVITAL AQUA S.R.O. Chladiaci modul s dvoma ventilátormi [online]. [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.invitalshop.sk/chladiaci-modul-s-dvoma-ventilátormi>
- [3] INVITAL AQUA S.R.O. Chladiaci modul s dvoma ventilátormi [online]. [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.invitalshop.sk/resun-mini-chladic-200>
- [4] Chov a odchov náročnejších krevet rodu Caridina - Crystalek. Akvakus [online]. 2019 [cit. 2023-12-21]. Dostupné z: <https://www.akvakus.cz/vse-o-krevetach-a-akvaristice/chov-a-odchov-narocnejsich-krevet-rodu-caridina-crystalek/>
- [5] MULTICOMP PRO. Peltier cooler MCTE1-19908L-S. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/3671905.pdf>. [cit. 2023-12-21].
- [6] OptoTEC™ HTX Series HTX15-31-F2A-0909-TB-W2.25. LAIRD THERMAL SYSTEMS, INC. Laird Thermal Systems [online]. 2022 [cit. 2023-12-21] Dostupné z: <https://www.lairdthermal.com/datasheets/datasheet-HTX15-31-F2A-0909-TB-W2.25.pdf>
- [7] Heat Pipe Technology Explained. *Sterling Thermal Technology* [online]. 2022 [cit. 2023-12-21]. Dostupné z: <https://www.sterlingtt.com/2022/02/16/heat-pipe-technology/>
- [8] Čo je TDS pri meraní kvality vody. AQUANOVA [online]. 2023 [cit. 2023-12-21]. Dostupné z: <https://aquanova.sk/co-je-tds-pri-merani-kvality-vody/>
- [9] HALAS, M. Možnosti využitia termoelektrických meničů v elektroenergetice. Bakalárska práca. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2011, 46 stran
- [10] DIGIKEY. RAPID-100-2 [online]. [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.digikey.co.uk/en/products/detail/wakefield-vette/RAPID-100-2/9833729>
- [11] DIODES INCORPORATED. AP7362 1.5A, LOW QUIESCENT CURRENT, FAST TRANSIENT ULTRA-LOW DROPOUT LINEAR REGULATOR [online]. 2016 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/AP7362.pdf>
- [12] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. BQ25672 I2C Controlled, 1- to 4-Cell, 3-A Buck Battery Charger with Dual-Input Selector, MPPT for Solar Panels and Integrated ADC [online]. 2023 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25672.pdf>
- [13] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. TPS92512 2.5A Buck LED Driver with Integrated Analog Current Adjust [online]. 2021 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps92512.pdf>

- [14] PANASONIC INDUSTRY CO., LTD. AQ-H RELAYS. Online. 2022. Dostupné z: https://api.pim.na.industrial.panasonic.com/file_stream/main/fileversion/2787. [cit. 2023-02-08].
- [15] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. DRV8231 3.7-A Brushed DC Motor Driver with Integrated Current Regulation [online]. 2021 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8231.pdf>
- [16] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, INC. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer [online]. [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>
- [17] DIGIKEY. DFRobot SEN0244 [online]. 2021 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docus/2309/SEN0244_Web.pdf
- [18] JpGraph. Online. Dostupné z: <https://jpgraph.net/>. [cit. 2024-04-02].
- [19] ESPRESSIF SYSTEMS (SHANGHAI) CO., LTD. ESP32-S3 System Time. Online. Dostupné z: https://docs.espressif.com/projects/espressif/en/latest/esp32s3/api-reference/system/system_time.html. [cit. 2024-04-19].
- [20] DFROBOT. SEN0244 Gravity Analog TDS Sensor Meter For Arduino. Online. Dostupné z: https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_TDS_Sensor___Meter_For_Arduino_SKU__SEN0244. [cit. 2024-04-21].
- [21] QuickPID library. Online. 2023. Dostupné z: <https://github.com/Dlloyddev/QuickPID>. [cit. 2024-04-21].

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

TDS	Množstvo rozpustených pevných látok
COP	Koeficient výkonnosti tepelného čerpadla
LDO	napät'ový regulátor
ADC	Analógovo-Digitálny prevodník
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
PHP	Hypertext Preprocessor
RTOS	Real-time operating system

Symboly:

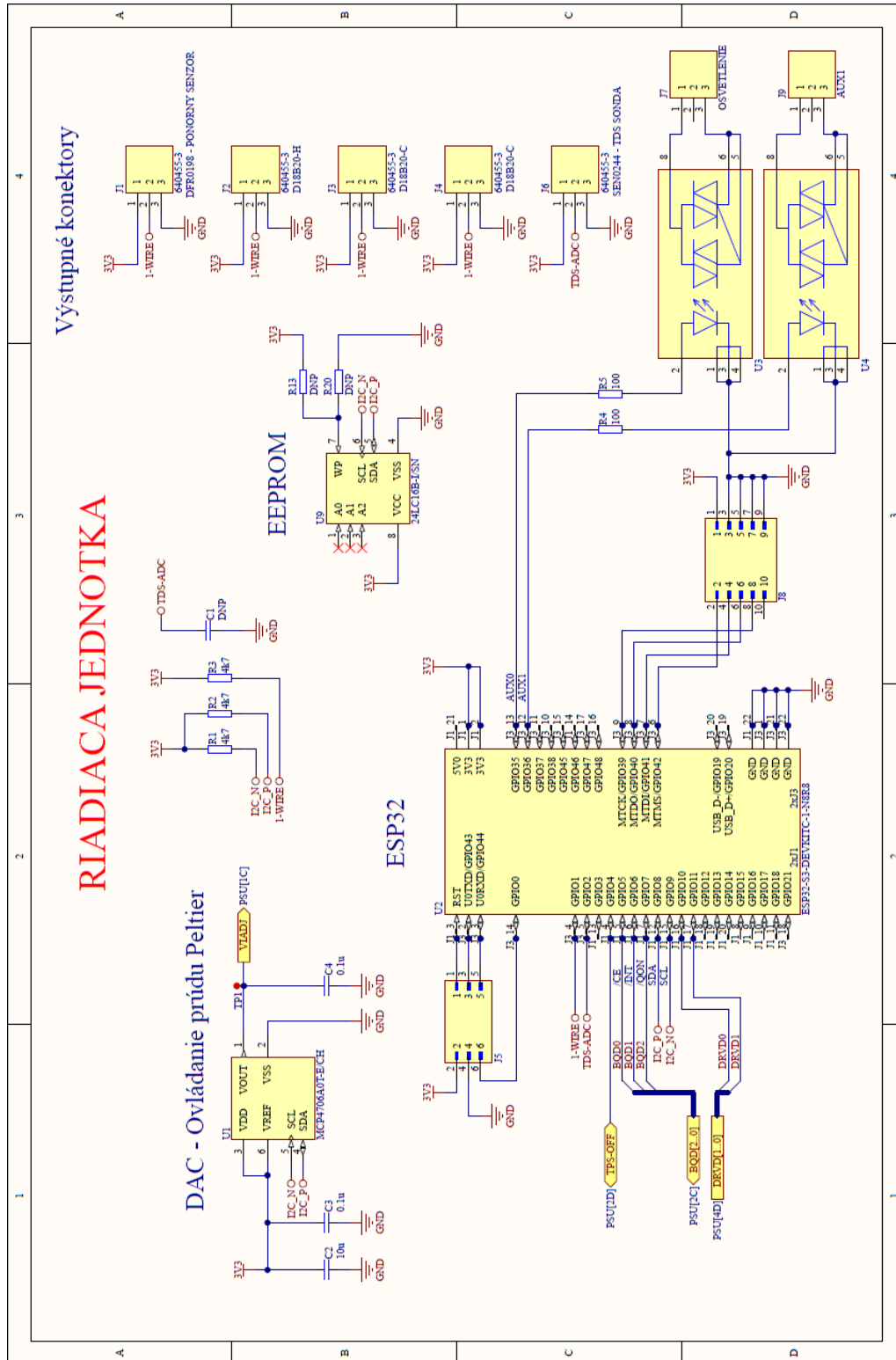
P_C, P_H	chladiaci výkon, ohrievací výkon	(W)
V	napätie	(V)
I	prúd	(A)
S	plocha akvária	(m ²)
d_s	hrúbka sklenenej steny akvária	(m)
d_v	hrúbka vzduchovej medzery	(m)
λ_s	koeficient tepelnej vodivosti skla	(W/m.K)
λ_v	koeficient tepelnej vodivosti vzduchu	(W/m.K)
R_{TH}	tepelný odpor	(K/W)
T_V, T_C, T_H, T_A	teplota vody, chladenej strany, ohrievanej strany, okolia	(°C)
TDS	tvrdosť vody	(ppm)

ZOZNAM PRÍLOH

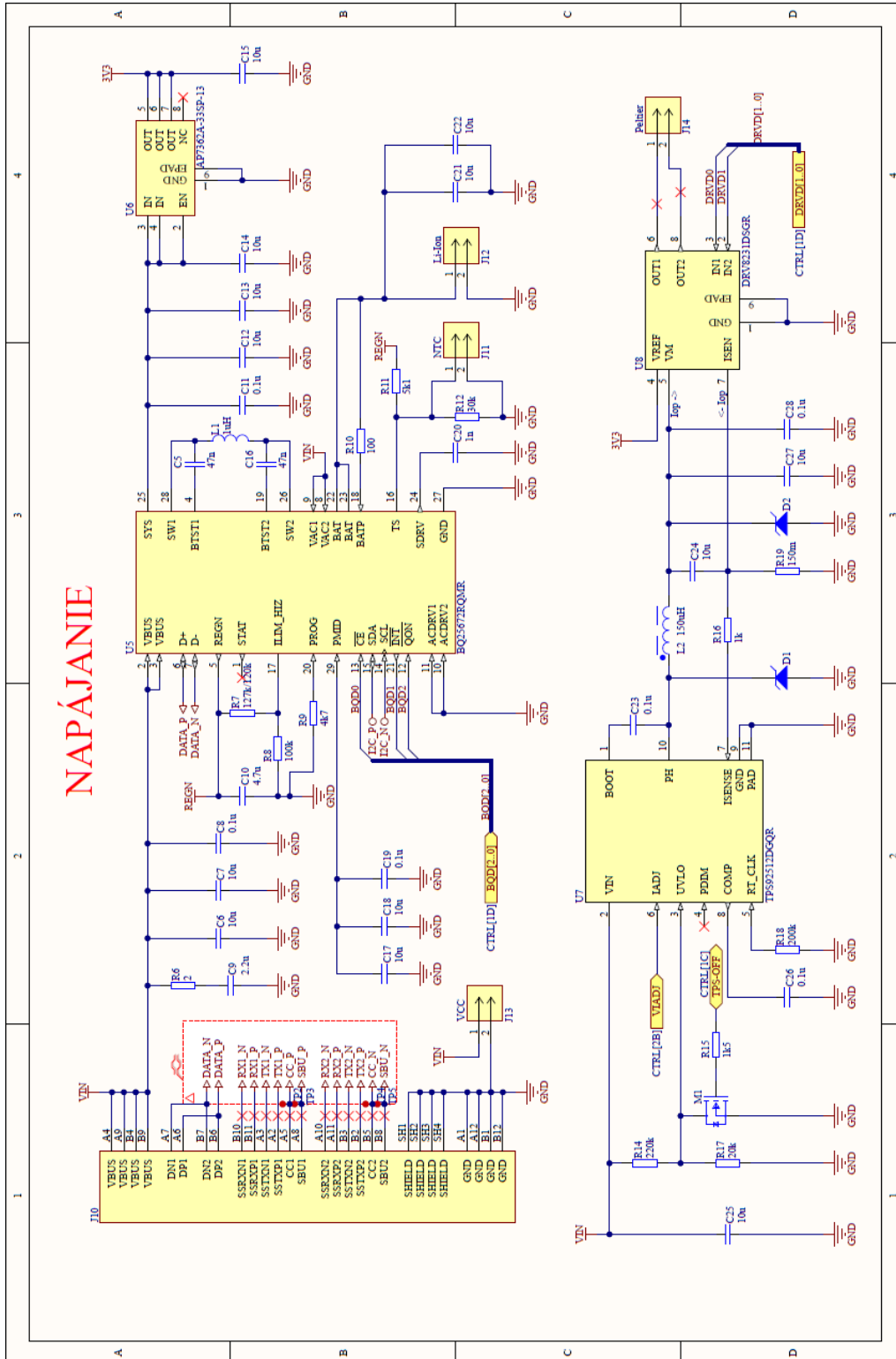
PRÍLOHA A - SCHÉMA ZAPOJENIA	59
PRÍLOHA B - NAMERANÉ HODNOTY V TETSOVANÍ.....	61

Příloha A - Schéma zapojenia

A.1 Schéma riadiacej jednotky



A.2 Schéma napájacích obvodov



Příloha B - Namerané hodnoty v testování

B.1 Údaje z testu ohrev 1

UNIX	Čas	T _V	T _C	T _H	T _A	TDS	FLT
1715672715	7:45:15	21,87	22,44	22,19	23,50	168	0
1715672775	7:46:15	21,94	25,00	20,44	23,50	168	0
1715672835	7:47:15	21,94	26,62	18,69	23,50	168	0
1715672895	7:48:15	21,94	26,75	18,25	23,44	168	0
1715672955	7:49:15	21,94	27,12	18,31	23,44	168	0
1715673015	7:50:15	22,00	26,37	18,19	23,44	188	0
1715673075	7:51:15	22,19	26,12	17,87	23,56	187	0
1715673135	7:52:15	22,37	26,12	18,00	23,75	187	0
1715673195	7:53:15	22,37	26,31	18,00	23,94	185	0
1715673255	7:54:15	22,37	26,19	18,06	24,25	185	0
1715673315	7:55:15	22,44	26,31	18,25	24,12	185	0
1715673375	7:56:15	22,50	26,12	17,87	24,00	185	0
1715673435	7:57:15	22,50	26,06	17,69	24,00	187	0
1715673495	7:58:15	22,44	26,12	17,81	24,06	187	0
1715673555	7:59:15	22,50	26,06	17,94	23,94	185	0
1715673615	8:00:15	22,62	26,12	18,06	23,94	185	0
1715673675	8:01:15	22,56	26,31	18,06	24,19	188	0
1715673735	8:02:15	22,56	26,37	18,25	24,12	188	0
1715673795	8:03:15	22,62	26,25	18,06	24,12	188	0
1715673855	8:04:15	22,62	26,19	18,00	24,12	188	0
1715673915	8:05:15	22,62	26,25	18,12	24,12	188	0
1715673975	8:06:15	22,62	26,31	18,19	24,19	188	0
1715674035	8:07:15	22,62	26,25	18,37	24,19	188	0
1715674095	8:08:15	22,69	26,19	18,25	24,25	190	0
1715674155	8:09:15	22,69	26,37	18,62	24,37	191	0
1715674215	8:10:15	22,75	26,37	18,56	24,44	191	0
1715674275	8:11:15	22,81	26,37	18,37	24,31	191	0
1715674335	8:12:15	22,81	26,44	18,62	24,31	191	0
1715674395	8:13:15	22,81	26,44	18,69	24,31	191	0
1715674455	8:14:15	22,81	26,19	18,19	24,12	191	0
1715674515	8:15:15	22,81	26,00	18,06	24,19	191	0
1715674575	8:16:15	22,81	26,12	18,00	24,12	194	0
1715674635	8:17:15	22,87	26,31	18,00	24,31	194	0
1715674695	8:18:15	22,81	26,37	18,50	24,50	194	0
1715674755	8:19:15	22,87	26,37	18,44	24,69	194	0
1715674815	8:20:15	22,87	26,50	18,50	24,50	191	0
1715674875	8:21:15	22,87	26,25	18,37	24,56	194	0
1715674935	8:22:15	22,94	26,25	18,31	24,44	194	0
1715674995	8:23:15	22,94	26,44	18,12	24,50	194	0

1715675055	8:24:15	22,94	26,31	18,50	24,50	194	0
1715675115	8:25:15	22,94	26,06	18,69	24,31	199	0
1715675175	8:26:15	23,06	24,50	19,06	24,31	194	0
1715675235	8:27:15	23,00	23,81	18,94	24,31	191	0
1715675295	8:28:15	22,87	25,62	18,12	24,12	191	0
1715675355	8:29:15	22,94	26,12	18,19	24,06	194	0
1715675415	8:30:15	22,94	26,12	18,37	24,06	193	0
1715675475	8:31:15	23,00	25,94	18,12	24,06	194	0
1715675535	8:32:15	23,00	24,87	18,50	23,94	194	0
1715675595	8:33:15	23,00	24,00	18,81	24,00	193	0
1715675655	8:34:15	22,94	25,25	18,06	23,87	193	0
1715675715	8:35:15	22,94	25,94	17,81	23,69	197	0
1715675775	8:36:15	22,94	25,94	17,81	23,56	200	0
1715675835	8:37:15	23,00	25,19	18,06	23,56	196	0
1715675895	8:38:15	23,00	23,81	18,56	23,69	194	0
1715675955	8:39:15	23,00	23,81	18,94	23,75	194	0
1715676015	8:40:15	22,94	26,00	18,25	23,87	194	0

B.2 Údaje z testu ohrev 2

UNIX	Time	TV	TC	TH	TA	TDS	FLT
1715676791	8:53:11	22,94	26,25	18,69	23,87	194	0
1715676851	8:54:11	23,00	26,25	18,50	23,87	194	0
1715676911	8:55:11	23,06	26,50	18,69	24,00	199	0
1715676971	8:56:11	23,12	26,50	18,56	24,06	200	0
1715677031	8:57:11	23,12	26,50	18,12	23,94	200	0
1715677091	8:58:11	23,19	26,25	18,12	23,81	200	0
1715677151	8:59:11	23,19	26,44	18,12	24,06	200	0
1715677211	9:00:11	23,19	26,19	17,69	23,87	202	1
1715677271	9:01:11	23,19	25,87	17,50	23,56	202	1
1715677331	9:02:11	23,19	26,12	17,94	23,81	200	0
1715677391	9:03:11	23,19	26,81	18,19	23,94	200	0
1715677451	9:04:11	23,12	27,12	18,50	24,06	200	0
1715677511	9:05:11	23,19	27,37	18,44	24,06	202	1
1715677571	9:06:11	23,25	27,25	18,25	23,81	200	0
1715677631	9:07:11	23,25	27,25	18,25	23,87	200	0
1715677691	9:08:11	23,25	27,12	18,00	23,69	202	1
1715677751	9:09:11	23,31	27,25	18,25	24,00	204	1
1715677811	9:10:11	23,31	27,69	18,62	24,31	204	1
1715677871	9:11:11	23,31	27,69	19,06	24,31	204	1
1715677931	9:12:11	23,37	27,50	19,00	24,12	204	1
1715677991	9:13:11	23,44	27,56	19,06	24,31	204	1
1715678051	9:14:11	23,44	27,75	19,06	24,50	204	1
1715678111	9:15:11	23,44	27,81	19,44	24,50	204	1
1715678171	9:16:11	23,44	27,69	19,00	24,31	204	1

1715678231	9:17:11	23,50	27,50	18,81	24,12	204	1
1715678291	9:18:11	23,50	27,69	19,12	24,25	204	1
1715678351	9:19:11	23,50	27,94	19,44	24,44	205	1
1715678411	9:20:11	23,50	28,12	19,50	24,87	204	1
1715678471	9:21:11	23,50	28,12	19,31	24,50	204	1
1715678531	9:22:11	23,56	27,87	19,37	24,56	205	1
1715678591	9:23:11	23,56	28,06	19,56	24,62	207	1
1715678651	9:24:11	23,62	28,12	19,62	24,69	130	1
1715678711	9:25:11	23,62	28,19	19,50	24,81	130	1
1715678771	9:26:11	23,69	28,31	19,81	25,00	130	1
1715678831	9:27:11	23,69	28,31	19,75	24,81	130	1
1715678891	9:28:11	23,69	27,87	19,25	24,50	130	1
1715678951	9:29:11	23,69	27,50	18,69	24,19	130	1
1715679011	9:30:11	23,69	27,62	19,12	24,37	132	1
1715679071	9:31:11	23,69	27,94	19,44	24,62	130	1
1715679131	9:32:11	23,69	28,06	19,69	24,75	130	1
1715679191	9:33:11	23,69	28,25	19,87	24,94	132	1
1715679251	9:34:11	23,75	28,37	19,62	25,19	133	1
1715679311	9:35:11	23,75	28,31	19,94	25,00	132	1
1715679371	9:36:11	23,75	28,37	20,00	25,06	132	1
1715679431	9:37:11	23,81	28,19	19,94	24,75	133	1
1715679491	9:38:11	23,75	28,00	19,62	24,75	132	1
1715679551	9:39:11	23,81	27,94	19,81	24,69	133	1
1715679611	9:40:11	23,81	28,19	20,00	24,87	133	1
1715679671	9:41:11	23,81	28,19	19,87	24,81	133	1
1715679731	9:42:11	23,87	28,00	19,44	24,62	133	1
1715679791	9:43:11	23,81	27,94	19,37	24,56	133	1
1715679851	9:44:11	23,87	28,19	19,75	24,69	133	1
1715679911	9:45:11	23,87	28,25	20,00	24,81	133	1
1715679971	9:46:11	23,87	28,31	20,31	24,87	133	1
1715680031	9:47:11	23,87	28,31	20,37	24,94	133	1
1715680091	9:48:11	23,94	27,75	20,19	25,06	133	1
1715680151	9:49:11	23,94	26,56	20,75	25,19	133	1
1715680211	9:50:11	23,87	26,19	21,00	24,94	133	1
1715680271	9:51:11	23,87	27,81	20,37	24,81	133	1
1715680331	9:52:11	23,87	28,31	20,25	24,75	132	1
1715680391	9:53:11	23,87	28,31	20,00	24,81	133	1
1715680451	9:54:11	23,87	27,00	20,12	24,87	135	1
1715680511	9:55:11	23,94	24,44	22,06	25,06	135	1
1715680571	9:56:11	23,94	24,87	22,56	25,12	133	1
1715680631	9:57:11	23,87	27,81	21,00	25,12	130	1
1715680691	9:58:11	23,81	28,62	20,81	25,19	130	1
1715680751	9:59:11	23,81	28,81	20,81	25,19	130	1
1715680811	10:00:11	23,87	28,44	20,06	24,81	132	1
1715680871	10:01:11	23,87	27,37	20,31	24,69	133	1

1715680931	10:02:11	23,94	23,87	22,31	24,81	136	1
1715680991	10:03:11	23,94	23,56	23,06	24,81	133	1
1715681051	10:04:11	23,87	25,62	21,94	24,69	133	1
1715681111	10:05:11	23,81	28,12	20,12	24,81	133	1
1715681171	10:06:11	23,81	28,62	20,62	24,87	132	1
1715681231	10:07:11	23,81	28,62	20,56	24,87	133	1
1715681291	10:08:11	23,87	28,44	21,00	25,12	133	1

B.3 Údaje z testu chladienie

UNIX	Time	T _V	T _C	T _H	T _A	TDS	FF	TH-TC
1715682371	10:26:11	23,94	23,56	26,06	25,19	204	1	2,50
1715682431	10:27:11	24,00	21,56	26,69	25,37	214	1	5,13
1715682491	10:28:11	24,25	21,50	26,87	25,44	142	1	5,37
1715682551	10:29:11	24,25	21,69	26,94	25,56	135	1	5,25
1715682611	10:30:11	24,06	21,69	26,87	25,75	133	1	5,18
1715682671	10:31:11	24,06	21,37	26,37	25,87	132	1	5,00
1715682731	10:32:11	23,94	21,06	26,12	25,94	130	1	5,06
1715682791	10:33:11	23,87	20,87	25,94	25,94	132	1	5,07
1715682851	10:34:11	23,81	21,25	25,94	26,06	130	1	4,69
1715682911	10:35:11	23,75	21,12	26,00	26,06	128	1	4,88
1715682971	10:36:11	23,69	20,81	25,87	26,31	126	1	5,06
1715683031	10:37:11	23,69	20,87	25,81	26,44	125	1	4,94
1715683091	10:38:11	23,62	20,87	25,81	26,50	125	1	4,94
1715683151	10:39:11	23,62	20,94	25,81	26,37	124	1	4,87
1715683211	10:40:11	23,56	20,62	25,69	26,25	122	1	5,07
1715683271	10:41:11	23,56	20,69	25,69	26,25	124	1	5,00
1715683331	10:42:11	23,56	21,12	25,87	26,44	122	1	4,75
1715683391	10:43:11	23,44	20,69	25,62	26,44	122	1	4,93
1715683451	10:44:11	23,44	20,56	25,62	26,19	121	1	5,06
1715683511	10:45:11	23,44	20,50	25,56	26,37	121	1	5,06
1715683571	10:46:11	23,37	20,62	25,69	26,50	121	1	5,07
1715683631	10:47:11	23,37	20,56	25,69	26,62	119	1	5,13
1715683691	10:48:11	23,37	20,62	25,75	26,62	119	1	5,13
1715683751	10:49:11	23,31	20,69	25,87	26,37	119	1	5,18
1715683811	10:50:11	23,31	20,31	25,50	26,31	200	0	5,19
1715683871	10:51:11	23,25	20,00	25,31	26,37	200	0	5,31
1715683931	10:52:11	23,25	20,00	25,37	26,37	199	0	5,37
1715683991	10:53:11	23,25	20,00	25,37	26,44	200	0	5,37
1715684051	10:54:11	23,25	20,00	25,37	26,56	200	0	5,37
1715684111	10:55:11	23,19	20,06	25,37	26,44	194	0	5,31
1715684171	10:56:11	23,19	19,69	25,25	26,19	199	0	5,56
1715684231	10:57:11	23,12	19,81	25,19	26,00	197	0	5,38
1715684291	10:58:11	23,12	19,69	25,00	26,19	197	0	5,31

1715684351	10:59:11	23,12	20,25	25,00	26,25	197	0	4,75
1715684411	11:00:11	23,06	22,44	24,50	26,44	194	0	2,06
1715684471	11:01:11	23,06	23,50	24,00	26,44	194	0	0,50
1715684531	11:02:11	23,06	23,62	23,81	26,50	194	0	0,19
1715684591	11:03:11	23,06	23,50	23,62	26,31	194	0	0,12
1715684651	11:04:11	23,06	23,50	23,62	26,19	194	0	0,12
1715684711	11:05:11	23,06	23,50	23,62	26,12	194	0	0,12
1715684771	11:06:11	23,00	23,50	23,56	25,94	194	0	0,06
1715684831	11:07:11	23,00	23,50	23,56	25,81	194	0	0,06
1715684891	11:08:11	23,06	23,50	23,50	25,62	193	0	0,00
1715684951	11:09:11	23,00	23,37	23,44	25,50	194	0	0,07
1715685011	11:10:11	23,00	23,44	23,50	25,50	194	0	0,06