



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

## MECHATRONICKÝ SYSTÉM PRO AUTOMATIZOVANÉ MONITOROVÁNÍ A OCHRANU VČELÍCH ÚLŮ

MECHATRONIC SYSTEM FOR AUTOMATED MONITORING AND PROTECTION OF BEEHIVES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Hahn

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Appel, Ph.D.

BRNO 2025

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>David Hahn</b>
Studijní program:	Mechatronika
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>Ing. Martin Appel, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Mechatronický systém pro automatizované monitorování a ochranu včelích úlů**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

V této bakalářské práci bude navržen, vyvinut a implementován mechatronický monitorovací systém pro včelí úl, založený například na platformě Raspberry Pi. Hlavním cílem je zabránit vniknutí invazivních druhů, jako jsou sršně asijské, případně invazi jiných včelstev, a sledovat klíčové environmentální parametry uvnitř úlu, jako jsou teplota a vlhkost, které ovlivňují zdraví a produktivitu včelstva. Systém bude rovněž měřit celkovou hmotnost úlu pro monitorování množství medu a umožní automatické ovládání ventilace a průduchů za účelem optimalizace mikroklimatu.

### **Cíle bakalářské práce:**

1. Navrhnout a implementovat mechatronický monitorovací systém pro včelí úl, založený například na platformě Raspberry Pi, který bude sledovat klíčové environmentální parametry uvnitř úlu, jako jsou teplota, vlhkost a celková hmotnost, s cílem optimalizovat mikroklima a monitorovat množství medu.
2. Vyvinout mechanismy pro ochranu včelího úlu před invazivními druhy, zejména před vniknutím sršní asijských a invazi jiných včelstev, včetně detekce neoprávněného přístupu a automatické reakce systému na tyto hrozby.
3. Implementovat automatické ovládání ventilace a průduchů na základě naměřených parametrů, aby bylo možné udržovat optimální podmínky pro zdraví a produktivitu včelstva prostřednictvím regulace mikroklimatu uvnitř úlu.

### **Seznam doporučené literatury:**

- [1] KOUBAA, A. Robot path planning and cooperation. New York: Springer, 2018.
- [2] W. Bolton. Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering. 7th edition. 2018. ISBN 978-1292250977.

[3] CORKE, P. Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB. Cham: Springer, 2017

[4] SICILIANO, A. Robotics modelling, planning and control. London: Springer 2009

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací systému pro sledování a řízení podmínek v úlu pomocí mikrokontrolérů a senzorů. Cílem je zvýšit ochranu včelstva před vnějšími hrozbami, jako jsou predátoři (např. sršni), a zároveň monitorovat klíčové parametry prostředí, jako je teplota, vlhkost a hmotnost úlu. Práce navrhuje hardwarové a softwarové řešení a zahrnuje praktickou implementaci. Systém umožňuje detekci hrozeb na základě zvukové analýzy a poskytuje vzdálený přístup k naměřeným datům.

## Summary

This bachelor thesis focuses on the design and implementation of a system for monitoring and controlling the conditions inside a beehive using microcontrollers and sensors. The main goal is to enhance colony protection against external threats, such as predators (e.g., hornets), and to track key environmental parameters including temperature, humidity, and hive weight. The thesis proposes a hardware and software solution and includes practical implementation. The system enables threat detection based on sound analysis and allows remote access to collected data.

## Klíčová slova

úl, včely, monitorování, senzor, mikrokontrolér, sršeň, automatizace, zvuková analýza, ochrana včelstva

## Keywords

beehive, bees, monitoring, sensor, microcontroller, hornet, automation, sound analysis, colony protection

## Bibliografická Citace

HAHN, D. *Mechatronický systém pro automatizované monitorování a ochranu včelích úlů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. 52 s., Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Appel, Ph.D..

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Martina Appela, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

**David Hahn**

Brno . . . . .

. . . . .

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Martinovi Appelovi, Ph.D., za cenné rady, odborné vedení a připomínky, které mi věnoval po celou dobu řešení práce. Dále děkuji své rodině a blízkým za podporu během studia.

**David Hahn**

# Obsah

Zkratky	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
<b>1 Úvod</b>	<b>12</b>
<b>2 Rešerše</b>	<b>13</b>
2.1 Život v úlu . . . . .	13
2.2 Výběr senzorů a komponent . . . . .	18
2.3 Algoritmy a Zapojení . . . . .	21
2.3.1 Rychlá Fourierova Transformace (FFT) . . . . .	21
2.3.2 Wheatstonův můstek . . . . .	22
<b>3 Návrh řešení</b>	<b>23</b>
3.1 Realizace . . . . .	23
<b>4 Hardware</b>	<b>24</b>
4.1 Hlavní řídicí jednotka . . . . .	24
4.1.1 Vstupy/Výstupy . . . . .	24
4.1.2 Napájení . . . . .	24
4.1.3 Ovládání a zobrazení dat . . . . .	25
4.1.4 Měřicí Sensory . . . . .	27
4.1.5 Ventilační systém . . . . .	29
4.2 Vedlejší řídicí jednotka . . . . .	31
4.2.1 Vstupy/Výstupy . . . . .	31
4.2.2 Napájení . . . . .	31
4.2.3 Měřicí Sensory . . . . .	32
4.2.4 Klapky výletu . . . . .	33
<b>5 Software</b>	<b>35</b>
5.1 Hlavní řídicí jednotka . . . . .	35
5.1.1 Schéma kódu . . . . .	36
5.1.2 Menu a ovládání . . . . .	37
5.1.3 Měřicí senzory . . . . .	38

5.1.4	Ventilační systém . . . . .	38
5.1.5	Automatické zásahy . . . . .	39
5.2	Vedlejší řídicí jednotka . . . . .	40
5.2.1	Schéma kódu . . . . .	40
5.2.2	Komunikace s hlavní jednotkou . . . . .	41
5.2.3	Klapka výletu . . . . .	41
5.2.4	Detekce hrozby . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Testování</b>	<b>42</b>
6.1	Frekvenční analýza . . . . .	42
6.1.1	Včela . . . . .	43
6.1.2	Čmelák . . . . .	43
6.1.3	Sršeň . . . . .	44
6.2	Testování systému a možné zlepšení . . . . .	46
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>47</b>
	<b>Seznam Zdrojů</b>	<b>48</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>52</b>

# Zkratky

**ADC** Analog-to-Digital Converter

**FFT** Fast Fourier Transform

**DC** Direct Current

**PWM** Pulse Width Modulation

**MQTT** Message Queuing Telemetry Transport

**UART** Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

**I<sup>2</sup>C** Inter-Integrated Circuit

**PLA** Polylactic Acid

**I/O** Input/Output

**LCD** Liquid Crystal Display

**TTL** Transistor-Transistor Logic

**USB** Universal Serial Bus

**SCL** Serial Clock Line

**SDA** Serial Data Line

**GND** Ground

**BTN** Button

**API** Application Programming Interface

**PGA** Programmable Gain Amplifier

**PCB** Printed Circuit Board

**RAM** Random Access Memory

**CPU** Central Processing Unit

# Seznam obrázků

2.1	Včelí plást z plodiště. Dostupné z [1]	13
2.2	Včely na úlu	14
2.3	Včely na výletu	14
2.4	Skládání medu	15
2.5	Včelí roj	16
2.6	lišaj smrtihlav	17
2.7	Fourierova transformace. Dostupné z [28]	21
2.8	Zapojení senzorů s HX711. Dostupné z [30]	22
3.1	Návrh řešení	23
4.1	Schéma zapojení hlavní řídicí jednotky	25
4.2	Hlavní řídicí jednotka vevnitř	26
4.3	Hlavní řídicí jednotka	26
4.4	Obrázek DHT senzoru se zátkou	27
4.5	Váhové senzory	28
4.6	Ventilace a průduchy	29
4.7	Průduchy	30
4.8	Mechanismus průduchů	30
4.9	Schéma zapojení vedlejší řídicí jednotky	31
4.10	Vedlejší řídicí jednotka vevnitř	32
4.11	Zapojení elektroniky	32
4.12	Mechanika Výletu	33
4.13	Celková konstrukce Klapky	34
4.14	Pohled na úl zepředu	34
5.1	Struktura kodu v Rp Pico	36
5.2	Struktura menu	37
5.3	Struktura kódu v ESP	40
6.1	Měřicí souprava	42
6.2	Zvukový rozbor včely	43
6.3	Zvukový rozbor čmeláka	43
6.4	Měření zvuku sršně	44
6.5	Zvukový rozbor sršně	44
6.6	Všechny záznamy z FFT	45

# Seznam tabulek

2.1	Dostupné mikrokontroléry . . . . .	18
2.2	Dostupné Senzory . . . . .	19
2.3	Dostupné ADC převodníky . . . . .	20

# 1 Úvod

V posledních letech dochází k výraznému poklesu počtu včelstev v důsledku kombinace několika negativních vlivů, jako jsou změny klimatu, šíření chorob, intenzivní používání pesticidů a nápor invazivních druhů, mezi které patří například sršeň asijská. Tento trend představuje závažný ekologický i ekonomický problém. Včely jsou klíčovými opylovači, jejichž činnost zásadně ovlivňuje biodiverzitu, úrodu zemědělských plodin i celkovou stabilitu ekosystémů. Oslabení nebo kolaps včelstev tak může mít dalekosáhlé důsledky nejen pro zemědělství, ale i pro běžný život člověka. Vzhledem k jejich nenahraditelné roli je nezbytné hledat moderní a účinné způsoby, jak včelstva chránit, podporovat jejich zdravý vývoj a vytvářet co nejvhodnější podmínky pro život i produkci medu.

Včelařství jako obor v posledních desetiletích prochází rychlou modernizací. Stále častěji se prosazují technologie umožňující automatizované sledování a řízení vnitřního prostředí úlu. Tyto inovace včelařům umožňují efektivněji reagovat na aktuální podmínky, včas detekovat nestandardní stavy a minimalizovat potřebu přímého zásahu. Vývoj takových systémů je však komplexní a vyžaduje propojení znalostí z oblasti biologie, sensoriky, elektroniky a softwarového inženýrství.

Cílem této práce je navrhnout a realizovat mechatronický monitorovací systém pro včelí úl, který bude sledovat klíčové environmentální parametry: teplotu, vlhkost a hmotnost úlu, s cílem optimalizovat mikroklima a usnadnit péči o včelstvo. Udržení stabilního a příznivého prostředí je důležité nejen z hlediska prevence houbových onemocnění, ale také pro zvýšení produktivity včelstva. Zjištění aktuální hmotnosti úlu navíc poskytuje cenné informace pro odhad množství medu, což včelaři umožňuje určit optimální čas pro jeho sklizeň a předejít situacím, kdy by včely své zásoby začaly samy spotřebovávat nebo by se zvýšila jejich rojová nálada.

Součástí navrženého řešení je také mechanismus pro automatickou ochranu před invazivními druhy, zejména sršní asijskou. Detekce probíhá na základě analýzy zvukového projevu hmyzu, který je snímán mikrofonom a zpracováván pomocí rychlé Fourierovy transformace. Na základě frekvenčního spektra je možné rozlišit přítomnost nežádoucích druhů a systém může v případě detekce hrozby podniknout adekvátní kroky k omezení jejich přístupu do úlu. Dalším obranným prvkem je zúžení výletového otvoru, které snižuje riziko loupeživého chování jiných včelstev a zvyšuje obranyschopnost úlu.

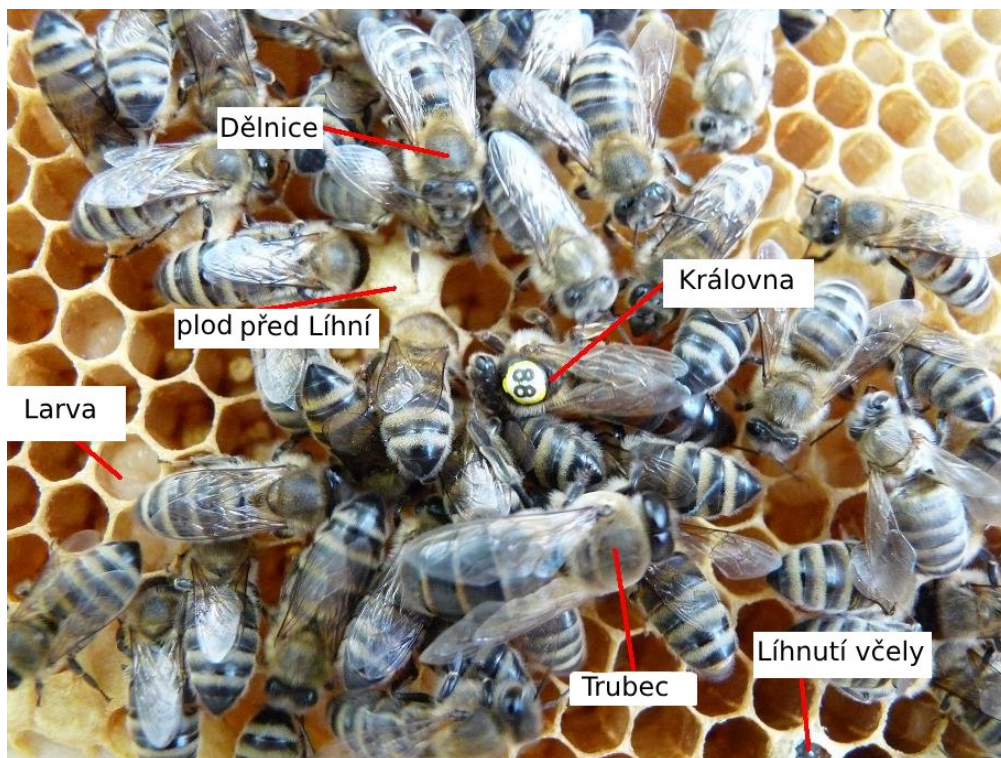
Výsledkem je funkční prototyp chytrého úlu, který využívá mikrokontrolér, připojené senzory a řízené mechanismy, a jehož funkčnost byla ověřena v rámci praktického testování. Tato práce dokumentuje celý proces návrhu, realizace a ověřování funkčnosti navrženého systému a zároveň představuje možné směry jeho dalšího vývoje. Navržené řešení může v budoucnu najít uplatnění nejen v menších včelařských provozech, ale i v komerčních systémech, kde by mohlo přispět ke zvýšení efektivity, stability a odolnosti včelstev vůči vnějším vlivům.

## 2 Rešerše

V posledních letech roste zájem o propojení včelařství s moderními technologiemi. Včely jsou ohrožovány různými chorobami a nepříznivými podmínkami, kterým lze předcházet vhodnými zásahy – ať už prostřednictvím léčiv, nebo regulací vnitřního prostředí úlu. Úkolem této rešerše je představit moderní technologie pro sledování stavu včelstev, přičemž hlavní důraz je kladen na senzory a automatické řízení, jež mohou významně napomoci zlepšení zdraví včel i celkové produktivity úlů.

### 2.1 Život v úlu

Včelí úl představuje složitě organizovanou sociální strukturu, v níž každá včela plní specifickou roli. V úlu dominuje jediná královna, jejíž hlavní funkcí je kladení vajíček a zajištění reprodukce. Trubci, samčí jedinci, slouží výhradně k oplodnění královny – po splnění této role hynou, případně jsou z úlu vyhnáni, protože nepřispívají k chodu včelstva a spotřebovávají cenné zásoby. Zbylé včely, dělnice, vykonávají veškeré práce spojené s chodem úlu – od péče o plod, přes stavbu pláství, až po sběr nektaru a obranu hnízda. Jednotliví jedinci jsou znázorněni na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Včelí plást z plodiště. Dostupné z [1]

Jestliže včelí královna, neboli matka, přestane plnit svou funkci – například v důsledku stáří, poranění nebo slabé vitality – je včelstvo schopné ji nahradit. Dělnice v takovém případě začnou vyživovat některé larvy speciální potravou, mateří kašičkou, čímž iniciují vývoj nové královny. Tento proces zajišťuje kontinuitu a stabilitu včelího společenství.

Pokud nedojde k vychování nové matky a stávající již není schopná klást oplodněná vajíčka, vzniká tzv. trubcokladné včelstvo. Některé dělnice začnou klást neoplozená vajíčka, ze kterých se líhnou pouze trubci, kteří však nepříspěvají k dalšímu rozvoji včelstva. Pokud je včelstvo jinak v dobrém stavu, je možné jej spojit s jiným silnějším včelstvem. V opačném případě je nutné včelstvo zlikvidovat. [2]

### Mikroklima v úlu

Včely, stejně jako jiní zástupci živočišné říše, reagují citlivě na teplotu a klimatické podmínky. V plodišti úlu musí být udržována přísná stabilita teploty a vlhkosti. Optimální teplota se uvádí okolo 35 °C a relativní vlhkost mezi 55 % a 65 % [2].

Pokud teplota v úlu, zejména v letním období, překročí optimální hodnotu, jsou včely schopny ji aktivně regulovat. Jak je patrné z obrázků 2.2 a 2.3, dochází k intenzivnímu větrání pomocí mávání křídlů. Tato činnost je však energeticky náročná a zaměstnává velkou část dělnic, které pak nemohou vykonávat jiné úkoly. V důsledku toho se snižuje celková produktivita včelstva.



Obrázek 2.2: Včely na úlu



Obrázek 2.3: Včely na výletu

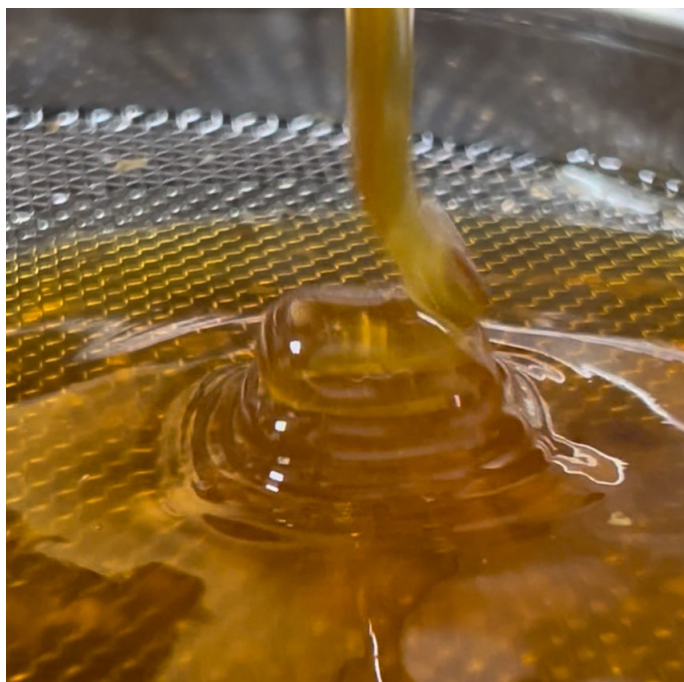
Změna vlhkosti v úlu může přispět k šíření různých onemocnění, zejména k rozvoji plísní. Mezi časté problémy patří například zvápenatění včelího plodu způsobeného houbou *Ascosphaera apis* nebo hniloba včelstva. [3]

Včasná detekce změn v prostředí úlu, jako je teplota a vlhkost, je klíčová pro prevenci chorob a udržení zdravého včelstva. Senzory umožňují nepřetržité sledování těchto parametrů a automatické vyhodnocování rizikových stavů. Tímto způsobem lze včas odhalit například přehřívání úlu nebo zvýšenou vlhkost, která může vést k rozvoji plísní. Integrace senzorických dat s chytrým řízením ventilace tak představuje významný krok směrem k udržitelnému a efektivnímu včelařství.

## Med

Med je hlavním produktem včelího hospodářství a představuje důležitý ukazatel produktivity včelstva. Vzniká z nektaru květin, který včely sbírají a následně ho upravují pomocí enzymů. Med je poté uložen do pláství, kde dochází k jeho dozrávání a zahušťování. Pokud je med vyzrálý a obsahuje méně než 18 % vody, včely med zavíčkují a je připraven k dlouhodobému skladování. Podle prohlídky takto včelař pozná, zda je včelstvo připraveno na sklizeň medu.

Obsah vody v medu lze měřit pomocí refraktometru. Pokud med obsahuje více než 20 %, není vhodný ke sklizni. Orientačně lze vlhkost medu posoudit také vizuálně, a to podle chování proudu medu dopadajícího do síta. V místě dopadu může být pozorovatelný tzv. Kayeův efekt [4] – jev, při kterém se proud viskózní kapaliny odrazí od povrchu stejné kapaliny a pokračuje stranou jako samostatný proud. V praxi se tento jev označuje jako „skládání medu“ a slouží jako indikátor jeho správné hustoty a nízkého obsahu vody. Daný jev lze vyzorovat na následujícím obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Skládání medu

Produkce medu závisí na mnoha faktorech, mezi něž patří počasí, dostupnost květin, síla včelstva, ale také stav mikroklimatu v úlu. Například dlouhodobé přehřívání či zvýšená vlhkost mohou negativně ovlivnit aktivitu dělnic a zhoršit produktivitu.

Z hlediska moderního včelařství je důležité sledovat nejen množství, ale i kvalitu medu. Kvalita medu závisí na řadě faktorů, mezi které patří zejména druh a stav aktuálně kvetoucí vegetace, ze které včely sbírají nektar.

Sledování váhy úlu může výrazně pomoci při určování produktivity a vhodného času sklizně. Pokud včelstvo již nemá dostatek prostoru pro ukládání medu, zvyšuje se u něj rojová nálada. V důsledku toho může dojít k rojení, tedy přirozenému způsobu rozšiřování včelstva, při němž část včel spolu s matkou úl opouští.

## Rojení

Jak již bylo zmíněno v předchozí sekci, tak rojení je přirozené rozšiřování včelstva. Matka spolu s částí včel opouští úl a zakládá nové včelstvo. Hlavní důvody ke zvyšování rojové nálady například jsou [2]:

- nedostatek prostoru v úlu pro rozšiřování a kladení vajíček,
- stará nebo slabá včelí královna,
- genetické tendence pro rojení,

Rojovou náladu lze v úlu rozpoznat podle řady příznaků, zejména podle výstavby matečnicků, tedy speciálních buněk určených k vychování nové matky. Následující obrázek znázorňuje včelí roj.



Obrázek 2.5: Včelí roj

Rojení se včelař obvykle snaží předejít, protože roj se může usadit na těžko přístupném místě, odkud jej již nelze získat zpět. V některých případech se včely ztrácejí úplně. Včely jsou pak mimo jiné naladěny spíše na rojení než na sběr medu, což výrazně snižuje jejich produktivitu. Rojení lze předcházet různými způsoby, zejména vložením prázdných rámků, jejichž výstavba zaměstná včelí dělnice. Tyto rámky bývají často zakladeny trubčím plodem. Po zaklazení a zavíčkování se rámeček obvykle odstraní a zlikviduje. Tento postup zároveň napomáhá v boji proti varroóze, protože roztoč *Varroa destructor* dává přednost právě trubčím buňkám.

Místo přirozeného rojení lze k rozšíření včelstva přistoupit cíleně vytvořením oddělků. Část včelstva se při tom přemístí do nového úlu spolu s mladou matkou. Aby se včely nevrátily do původního úlu, musí být dočasně uzavřeny, dokud si nezvyknou na nové prostředí a feromony nové královny.[2]

### Hrozby Včel

Včelí úl čelí mnoha hrozbám. Nejčastějším problémem, se kterým se včelstvo potýká, je nákaza varroázou, způsobená roztočem kleštíkem včelím (*Varroa destructor*). Tento parazit napadá larvy i dospělé včely, živí se jejich hemolymfou (přesněji řečeno tukovým tělesem), výrazně oslabuje jejich imunitu a přenáší různé viry, především virus deformovaných křídel (DWV). Bez vhodného zásahu včelstvo obvykle do roku zaniká. Léčba je však možná, například pomocí kyseliny mravenčí nebo kyseliny šťavelové [3].

Dalším významným problémem pro včelstvo jsou plísňová a houbová onemocnění. Mohou postihovat plod, dospělé včely, úlový materiál i med a ohrožují nejen zdraví včel, ale i hygienickou kvalitu produktů. Mezi hlavní příčiny patří vlhkost v úlu, která podporuje rozvoj těchto patogenů. Dobrá ventilace a suché umístění úlu výrazně snižují riziko výskytu těchto chorob. Příkladem je například vápenatění včelího plodu nebo plísně rodu *Aspergillus*, *Penicillium* a *Cladosporium* [2].

Hrozby včelstva však nejsou jen mikroskopické. Významnou roli hrají také predátoři. Včely loví například pták žluva hajní, která je aktivním predátorem létajícího hmyzu. Další významnou hrozbou je invazní sršeň asijská, která se v posledních letech rozšířila i do Evropy. Včely se proti ní samy bránit nedokážou, výjimkou jsou případy, kdy větší počet včel obalí sršeň a zvýšením teploty pomocí mávání křídel ji usmrtí. Přítomnost sršně způsobuje v úlu nervozitu a snížení produktivity. Sršně často vnikají do úlu za potravou, stejně jako některé druhy mūr, které škodí především na voskových plástech. Účinným obranným prvkem může být vhodná přední přepážka výletového otvoru, která omezuje přístup vetřelců do úlu [3].

Významnou hrozbou pro včelstvo může být i loupež ze strany jiných včelstev, která se snaží proniknout do cizích úlů za účelem krádeže zásob. K těmto útokům dochází zejména tehdy, pokud včelař po vytočení medu neposkytne včelám náhradu. Bez dostatečných zásob by totiž včely zimu nepřežily. Pomocí může zúžení předního výletu pomocí přepážky, které usnadní včelstvu obranu proti vetřelcům.

Na dalším obrázku 2.6 lze vidět usmrcenou mūru nalezenou ve včelím úlu. Podle svazu včelařů jde o druh lišaj smrtihlav.



Obrázek 2.6: lišaj smrtihlav

## 2.2 Výběr senzorů a komponent

Tato sekce se zabývá technickým vybavením použitým při realizaci projektu. Popisuje jednotlivé komponenty a jejich roli v rámci celého systému. Cílem je poskytnout přehled dostupných hardwarových prvků.

### Mikrokontrolér

Nejdůležitějším prvkem systému je mikrokontrolér, který slouží k řízení celého zařízení nebo jeho částí. V rámci tohoto projektu je odpovědný za zpracování vstupních dat ze senzorů, řízení výstupních prvků a zajištění komunikace mezi jednotlivými částmi systému. Mikrokontrolér také umožňuje použití algoritmů pro rozhodování na základě zvolených parametrů.

V následující tabulce 2.1 jsou zaznamenány dostupné mikrokontroléry:

Model	I/O	Analogové piny	PWM	Komunikace	Procesor	Cena [Kč]
ESP32-CAM [5]	9	1	2	Wi-Fi, BT, UART	2x Xtensa LX6 / 240 MHz	150
ESP32 [6]	34	18	až 16	Wi-Fi, BT, I2C, SPI, UART	2x Xtensa LX6 / 240 MHz	120
Raspberry Pi 4 [7]	26	0	2–4	Wi-Fi, BT, USB, I2C, SPI, UART	4x Cortex-A72 / 1.5 GHz	1500
Raspberry Pi Pico W [8]	26	3	až 16	Wi-Fi, I2C, SPI, UART	2x Cortex-M0+ / 133 MHz	130
Arduino Nano [9]	14	8	6	I2C, SPI, UART	1x ATmega328P / 16 MHz	100
Arduino UNO R4 [10]	14	6	6	I2C, SPI, UART	1x Renesas RA4M1 / 48 MHz	300

Tabulka 2.1: Dostupné mikrokontroléry

V tabulce jsou uvedeny vybrané mikrokontroléry spolu s jejich klíčovými technickými parametry, které umožňují posoudit jejich vhodnost pro danou aplikaci. Důležitým faktorem při výběru jsou nejen funkční schopnosti, ale také fyzické rozměry zařízení. Mikrokontroléry ESP32, ESP32-CAM, Raspberry Pi Pico W a Arduino Nano vynikají kompaktní konstrukcí, což je pro použití do navrhovaného systému značnou výhodou.

Na základě porovnání uvedených parametrů byl vybrán mikrokontrolér, který nejlépe splňuje požadavky dané aplikace z hlediska počtu vstupně-výstupních pinů, podpory komunikačních rozhraní a celkových rozměrů. Celkové technické řešení je navrženo s důrazem na spolehlivost, jednoduchost integrace a možnost budoucího rozšíření.

## Senzory

Pro spolehlivé snímání dat je důležité vybrat ideální senzor pro dané použití. Každý typ senzoru má specifické vlastnosti, které ovlivňují přesnost, rychlost odezvy, rozlišení a vhodnost nasazení v prostředí dané aplikace. Tato část se zaměřuje na senzory použité v projektu, jejich funkci, výhody a případná omezení.

Model	Senzor	Rozsah	Přesnost	Napájení	Cena [Kč]
DHT11 [11]	T + RH	0–50°C, 20–90%	±2°C, ±5% RH	3–5 V	30
DHT22 [12]	T + RH	–40–80°C, 0–100%	±0.5°C, ±2–5% RH	3–6 V	80
SHT31 [13]	T + RH	–40–125°C, 0–100%	±0.3°C, ±2% RH	2.4–5.5 V	150
BME280 [14]	T + RH + p	–40–85°C, 0–100%	±1°C, ±3% RH	1.8–3.6 V	130
SEN10245 [15]	Váha	do 50 kg	±0.05 kg (odhad)	5 V (s HX711)	90
GUANG CE YZC-131 [16]	Váha	do 10 kg	±0.01 kg (odhad)	5 V (s HX711)	130

Tabulka 2.2: Dostupné Senzory

kde:

- **T (Teplota):** Měření teploty v určitém rozsahu (např. °C).
- **RH (Relativní vlhkost):** Měření vlhkosti vzduchu v procentech (% RH).
- **p (Tlak):** Měření atmosférického tlaku v pascálech (Pa).

Tabulka 2.2 výše ukazuje srovnání různých senzorů pro měření teploty, vlhkosti a váhy, které mohou být použity v rámci projektu. Každý senzor je charakterizován svými hlavními vlastnostmi, jako je rozsah, přesnost, napájení a cena.

DHT11 a DHT22 jsou populární senzory pro základní aplikace měření teploty a vlhkosti, přičemž DHT22 je přesnější a má širší rozsah než DHT11. Senzory jako BME280 nebo SHT31 přinášejí ještě lepší přesnost a možnost měřit tlak vzduchu. Tenzometry, jako SEN10245, se používají pro měření síly a jsou vhodné pro aplikace, které vyžadují detekci tlaků nebo zatížení. Zvukové senzory nejsou v tabulce uvedeny, protože pro ně neexistuje jednotné měřítko srovnání. Příklady mikrofonů jsou:

- **GY 4466 [17]** – cenově dostupný a relativně přesný senzor.
- **MAX9814 [18]** – spolehlivější volba, i když o něco dražší než **GY 4466**.
- **Keyes KY-037 [19]** – méně spolehlivý, ale velmi cenově dostupný.

### Převodníky

Při použití některých senzorů, zejména mikrofону nebo váhového senzoru, je vhodné využít převodník analogově-digitálního signálu (ADC) se zesilovačem. Důvodem je skutečnost, že výstup těchto senzorů je tvořen slabým analogovým signálem, který je nutné zesílit a převést do digitální podoby pro další zpracování mikrokontrolérem. Pokud by byl výstup připojen přímo na analogový vstup mikrokontroléru, nemusí být dosaženo požadované přesnosti měření. Důvodem je jednak nízká úroveň signálu a kvalita vestavěného ADC převodníku. Proto je vhodné použití externího ADC převodníku se zesilovačem, který umožní přesnější a spolehlivější zpracování analogového signálu. Následuje tabulka 2.3 s přehledem dostupných ADC převodníků.

Model	Počet kanálů	Rozlišení	Komunikace	Cena [Kč]
ADS1115 [20]	4	16 bit	I2C	80
ADS1015 [21]	4	12 bit	I2C	70
HX711 [22]	2 (diferenciální)	24 bit	Vlastní	40
MCP3008 [23]	8	10 bit	SPI	60
MCP3208 [24]	8	12 bit	SPI	90
INA219 [25]	1	12 bit	I2C	100

Tabulka 2.3: Dostupné ADC převodníky

Při výběru ADC převodníku pro váhové senzory je nejčastěji využíván modul HX711, který je navržený speciálně pro tento účel. Díky možnosti přímého připojení přes Wheatstoneův můstek je ideální pro senzory jako SEN10245, čímž umožňuje přesné měření hmotnosti. Naopak při zpracování signálů ze zvukových senzorů je výběr vhodného ADC klíčový pro následnou Fourierovu transformaci (FFT), která vyžaduje dostatečné rozlišení a rychlost vzorkování pro přesné spektrální vyhodnocení.

### Ostatní hardware

Jelikož část zadání obsahuje také řízení mikroklimatu ve včelíně, je nutné použití několika výstupních periférií. Zejména serv, DC motoru a ventilátoru. Serva jsou využita pro mechanické pohyby, jako je otevírání nebo zavírání předního výletu. Pro tento účel je ideální servo **SG90** [26], které nabízí dobrý poměr ceny a výkonu při dostatečném točivém momentu, je také poměrně malé, což je pro tuto práci výhodou. DC motory pak ovládají pohyb ventilačních průduchů, zatímco ventilátory zajišťují cirkulaci vzduchu a chlazení.

Důležitým komponentem je také H-můstek, který slouží k ovládní DC motoru a ventilátoru pomocí vstupního signálu. Tento obvod je zvláště užitečný v případech, kdy napětí na výstupu mikrokontroléru není dostatečně vysoké pro přímé napájení motoru. H-můstek umožňuje měnit směr otáčení motoru a řídit jeho rychlost, což je klíčové pro aplikace, kde je potřeba flexibilně řídit pohyb nebo ventilaci. Tím, že připojuje motor k napájecímu napětí přes čtyři spínače, umožňuje tento obvod efektivní a bezpečné řízení motoru i při nižších napětích mikrokontroléru.

Dalším užitým komponentem je step-down měnič, který slouží k přeměně vyššího napětí na nižší. Tento modul je velmi užitečný zejména v případech, kdy není k dispozici napájení odpovídající požadavkům mikrokontroléru. Step-down měniče umožňují efektivní regulaci napětí, čímž přispívají k stabilnímu a bezpečnému provozu celého systému.

## 2.3 Algoritmy a Zapojení

V této sekci jsou popsány klíčové algoritmy a zapojení použité v rámci této práce. Mezi nejdůležitější části patří algoritmus pro **Rychlou Fourierovu transformaci (FFT)** a zapojení podle **Wheatstonova můstku**.

### 2.3.1 Rychlá Fourierova Transformace (FFT)

Pro analýzu frekvenčního spektra akustického signálu z mikrofonu byl použit algoritmus rychlé Fourierovy transformace. FFT převádí diskrétní signál z časové domény do frekvenční domény, kde lze určit dominantní frekvence a amplitudy jednotlivých harmonických složek.

V této práci byla implementována rekurzivní verze algoritmu Cooley-Tukey, který zrychluje výpočet diskrétní Fourierovy transformace (DFT) z časové složitosti  $\mathcal{O}(N^2)$  na  $\mathcal{O}(N \log N)$ , přičemž  $N$  je počet vzorků. [27]

Základní rovnice DFT, která je pomocí FFT algoritmu efektivně počítána, je:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j2\pi kn/N}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.1)$$

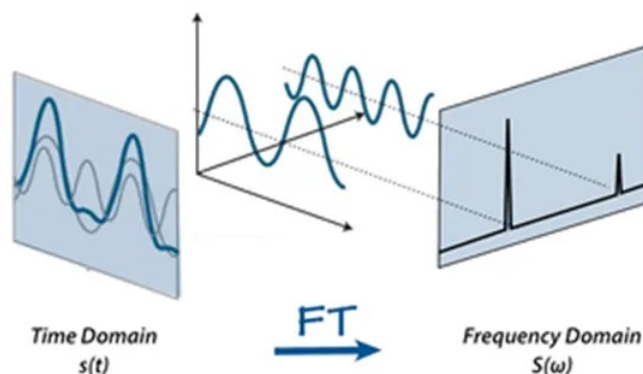
kde:

- $x_n$  je  $n$ -tý vzorek signálu,
- $X_k$  je  $k$ -tá frekvenční složka,
- $N$  je celkový počet vzorků,

Po výpočtu FFT jsou z komplexních výstupů spočítány amplitudy jednotlivých složek podle vzorce:

$$A_k = \frac{1}{N} \cdot \sqrt{\operatorname{Re}(X_k)^2 + \operatorname{Im}(X_k)^2} \quad (2.2)$$

Frekvenční složky se určují pouze z první poloviny spektra, protože druhá polovina je pro reálný signál symetrická.



Obrázek 2.7: Fourierova transformace. Dostupné z [28]

### 2.3.2 Wheatstonův můstek

Wheatstonův můstek je zapojení, které se používá pro měření velmi malých změn odporu, což je užitečné při měření změn hmotnosti v systému váhového senzoru. V této práci je Wheatstonův můstek využit pro detekci hmotnosti objektů ve včelím úlu. Tento obvod, který obsahuje čtyři rezistory, poskytuje velmi přesné hodnoty při měření napětí, které se mění v závislosti na váze na senzoru.

Ve váhovém senzoru jsou rezistory nahrazeny tenzometry, které mění svůj odpor v závislosti na mechanické deformaci (např. tlakem způsobeným vahou). Pokud jsou všechny čtyři větve můstku osazeny tenzometry, jedná se o tzv. plný můstek, který umožňuje kompenzaci teplotních vlivů a zvyšuje citlivost měření. [29]

Napětí na výstupu můstku je dáno vztahem:

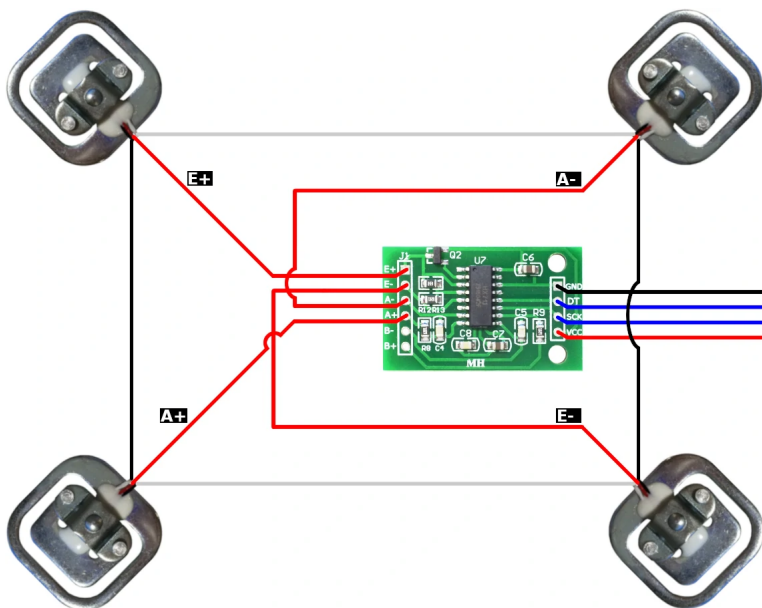
$$V_{\text{out}} = \left( \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot V_{\text{in}} \quad (2.3)$$

kde:

- $V_{\text{in}}$  je napájecí napětí můstku,
- $V_{\text{out}}$  je rozdílové napětí na výstupu,
- $R_1, R_2, R_3, R_4$  jsou rezistory v jednotlivých ramenech můstku.

Při rovnováze můstku je výstupní napětí  $V_{\text{out}} = 0$ . Při působení síly na senzor dojde ke změně některých odporů, což naruší rovnováhu a vznikne měřitelné napětí úměrné zatížení.

Pro zesílení a digitalizaci výstupního signálu z můstku je v této práci použit převodník HX711, který obsahuje přesný zesilovač s pevně nastaveným zesílením a 24bitový A/D převodník. Zapojení je znázorněno na dalším obrázku 2.8.



Obrázek 2.8: Zapojení senzorů s HX711. Dostupné z [30]

# 3 Návrh řešení

Cílem této práce je navrhnout systém pro sledování a řízení podmínek v úlu, včetně včasné detekce a reakce na vnější hrozby. K dosažení tohoto cíle byla navržena a realizována řídicí jednotka, která zajišťuje sběr dat ze sensorů a řízení výstupních periferií.

## 3.1 Realizace

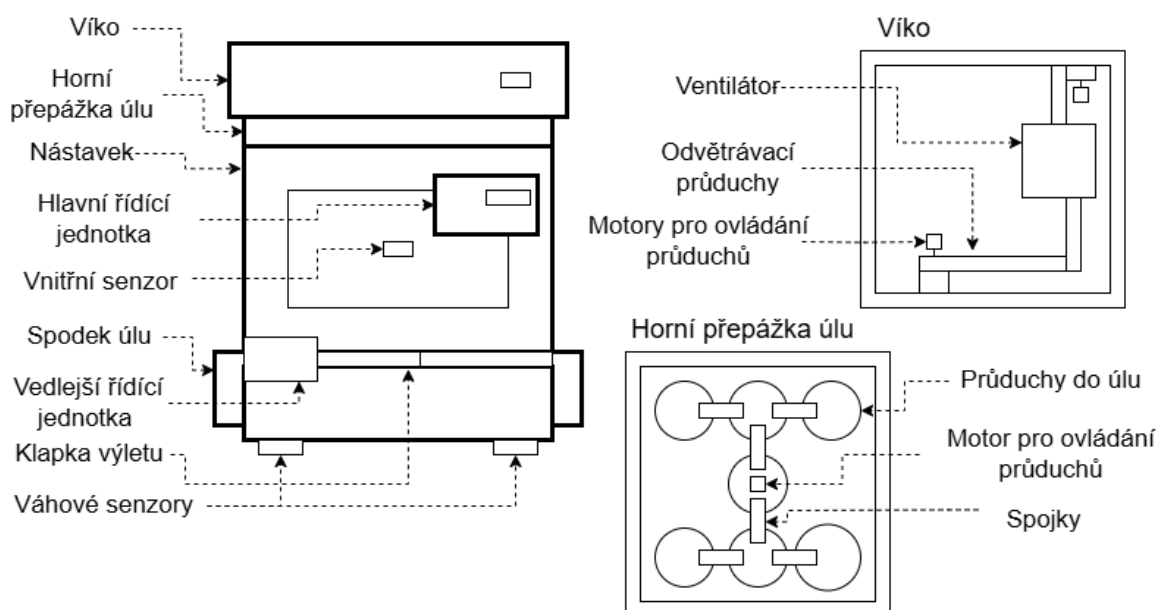
Řídicí jednotka je umístěna na boční straně úlu tak, aby k ní měl včelař snadný přístup. Zároveň slouží jako ovládací panel s vestavěným LCD displejem a tlačítky pro navigaci v menu. To bude fungovat jako základ systému.

Nezbytnou součástí systému jsou váhové senzory umístěné ve spodní části úlu, propojené s řídicí jednotkou. Dále jsou použity senzory teploty a vlhkosti pro měření jak uvnitř, tak vně úlu. Venkovní senzor je integrován přímo v řídicí jednotce, zatímco vnitřní senzor je umístěn v průduchu vedoucím do úlu.

Pro aktivní regulaci mikroklimatu (teploty a vlhkosti) je využívána oblast horního víka a horní přepážky úlu, kde jsou umístěny ventilátor a pohyblivá šoupátka ovládající ventilační průduchy.

Detekce a obrana proti vnějším hrozbám, zejména predátorům jako jsou sršni, je zajištěna vedlejší řídicí jednotkou. Ta je vybavena mikrofonem pro zvukovou detekci a servomotory, které ovládají klapky pro uzavírání výletového otvoru.

Celkové řešení je znázorněno na následujícím schématu.



Obrázek 3.1: Návrh řešení

# 4 Hardware

V této kapitole je popsán návrh a realizace hardwarové části projektu. Návrh konstrukce také představuje výběr komponentů, které jsou pro danou potřebu vhodné.

Většina konstrukčních prvků je, až na výjimky, vyrobená pomocí 3D tisku. Jako nejvhodnější materiál byl zvolen PLA, z důvodu nízkých požadavků na mechanickou či tepelnou odolnost a dostatečně detailní výsledek tisknuté součásti.

## 4.1 Hlavní řídicí jednotka

Tato podkapitola je věnována návrhu a realizaci samotné hlavní řídicí jednotky a jejích příslušných vstupních/výstupních periférií. Jako hlavní mikrokontrolér byl zvolen Raspberry Pi Pico W z tabulky 2.1. Z důvodu potřeby velkého počtu vstupních/výstupních pinů, zabudovaného Wi-Fi čipu, nízké ceny a obstojného výkonu. Na něm probíhá většina procesů celého projektu. K mikrokontroléru byl také dokoupen rozšiřovač pinů značky SB Components, pro jednoduché propojování vodičů v šroubovacích konektorech. Programování mikrokontroléru je umožněno mikroUSB portem na desce. Sestavení hlavní řídicí jednotky a jejích periférií je popsáno v následující části.

### 4.1.1 Vstupy/Výstupy

Pro jednoduché propojování vstupních/výstupních periférií s mikrokontrolérem byly zvoleny JST XH konektory. Na obrázku 4.1 jsou konektory označeny následujícími způsoby:

- **Vent-prud** - výstup do H-můstku motorů a ovládání ventilace a prúdů (3 piny)
- **hx711** - vstup dat z váhového převodníku hx711 (2 Piny)
- **UART** - komunikace mezi mikrokontroléry (2 Piny)
- **dht-in** - vstup dat vlhkosti a teploty vně úlu (1 pin)

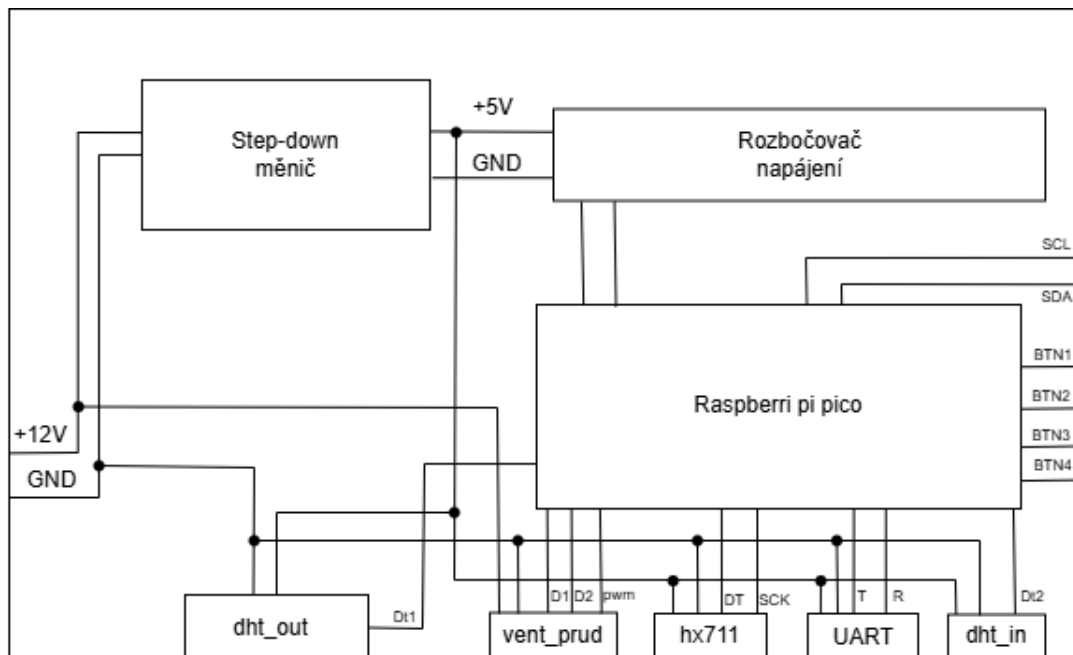
Dále se v obvodu nachází vstupy BTN 1-4 pro tlačítka a SDA,SCL výstupy pro zobrazování dat na displeji.

### 4.1.2 Napájení

Z potřeby lehkého propojení do sítě bylo zajištěno napájení této jednotky pomocí 12V adaptéru a vstup byl vyřešen pomocí samice DC konektoru. Napájení většiny periférií (serva, převodníky,...) a mikrokontroléru je 5V, bylo tedy nezbytné do projektu přidat step-down měnič s dostatečným výstupním proudem. Většina z výstupních JST konektorů obsahuje napájení 5V a GND, až na vent-prud, kde bylo napájení ponecháno na 12V. Vybraný modul H-můstku totiž obsahuje svůj měnič.

Aby nebyla potřeba zbytečného spojování vodičů, byla do schématu zařazena šroubovací svorkovnice pro rozbočování napájení. Jednotlivé komponenty jsou znázorněny ve schématu v obrázku 4.1.

Následující obrázek 4.1 vyjadřuje schéma hlavní řídicí jednotky.



Obrázek 4.1: Schéma zapojení hlavní řídicí jednotky

### Venkovní senzor teploty a vlhkosti

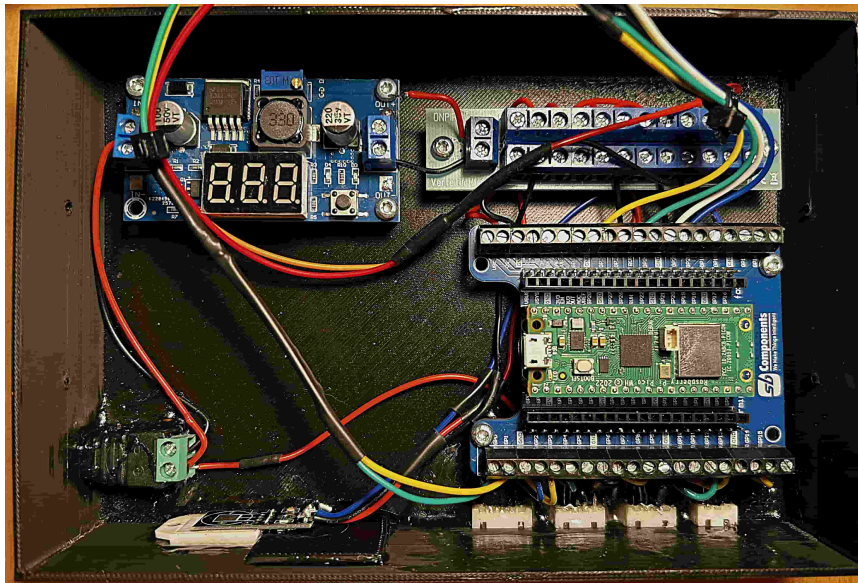
Dodatečná výbava této jednotky je také senzor okolního ovzduší. Byl zabudován přímo do řídicí jednotky, aby mohl vnitřní senzor porovnávat data s tímto externím a vyhodnocovat dobré závěry pro zásah do mikroklimatu úlu. Rozmezí měřené teploty podléhá místnímu klimatu, tudíž jako ideální senzor byl zvolen DHT22 (z tabulky 2.2) pro rozmezí od -40 °C do 80 °C, jeho jednoduchost, kompaktnost a dostupnost knihoven pro ovládání. Je napájen 5V z měniče a odesílá data přímo do Raspberry Pi Pico. Na obrázku 4.1 je tento komponent zobrazen jako dht-out.

#### 4.1.3 Ovládání a zobrazení dat

Ovládání této jednotky je vyřešeno pomocí 4 tlačítek na povrchu. Jsou 4 z důvodu lehkého budoucího pohybu v menu - Nahoru, Dolů, OK a Zpět. Tato tlačítka jsou propojena přímo na mikrokontrolér. Pull-down rezistor zde nebyl nutný, protože mikrokontrolér již na vstupech obsahuje vestavěné pull-down rezistory. Na schématu v obrázku 4.1 jsou vstupy znázorněny jako BTN 1-4.

Vedle tlačítek jednotka na povrchu také obsahuje LCD I<sup>2</sup>C displej pro zobrazení dat. Tento displej byl zvolen kvůli dostatečnému prostoru pro zobrazení (16x2), dostupnosti knihoven a snadnému propojení s Raspberry Pi Pico pomocí I<sup>2</sup>C komunikace. Bez ní by bylo nutné přivést z mikrokontroléru k displeji mnoho vodičů pro komunikaci. Na schématu v obrázku 4.1 jsou výstupy znázorněny jako SCL a SDA.

Následující obrázek 4.2 zobrazuje reálné a finální zapojení hlavní řídicí jednotky se všemi komponenty.



Obrázek 4.2: Hlavní řídicí jednotka vevnitř

Další obrázek 4.3 zobrazuje povrch hlavní řídicí jednotky s příslušnými tlačítky a LCD displejem pro zobrazení dat.



Obrázek 4.3: Hlavní řídicí jednotka

Příslušná konstrukce jednotky byla navržena tak, aby vyhověla všem zabudovaným komponentům pro jejich pevnou fixaci. Zároveň byla konstrukce navržena tak, aby odolala dešti. Návrh 3D modelu se nachází v příloze.

#### 4.1.4 Měřicí Senzory

V této sekci jsou popsány měřicí senzory, které byly nezbytné pro získání dat potřebných k práci. Výběr jednotlivých senzorů byl proveden s ohledem na potřeby tohoto projektu.

Následující části se věnují jednotlivým kategoriím senzorů. Konkrétně se jedná o senzory váhy, teploty a vlhkosti.

##### Senzor teploty a vlhkosti

Pro tento případ byl použit senzor DHT22 z tabulky 2.2, který byl již použit pro snímání teploty a vlhkosti mimo úl. Je to ideální volba pro tuto potřebu, nejen protože zároveň měří vlhkost a teplotu, ale je i kompaktní, levný a samotný senzor je umístěn do děrované krabičky, která by znemožňovala zalepení senzoru voskem či jinému poškození senzoru včelami. Tento senzor je důležitý pro celkové vyhodnocování klimatické situace v úlu.

Jako konektor pro tuto jednotku byl opět zvolen JST XH konektor, který je pomocí držáku připevněn přímo na zátku do nástavku včelího úlu. Tato volba umožňuje snadnou manipulaci se senzorem a jednoduché propojení s hlavní řídicí jednotkou. Zobrazení zátky se senzorem je na obrázku 4.4.



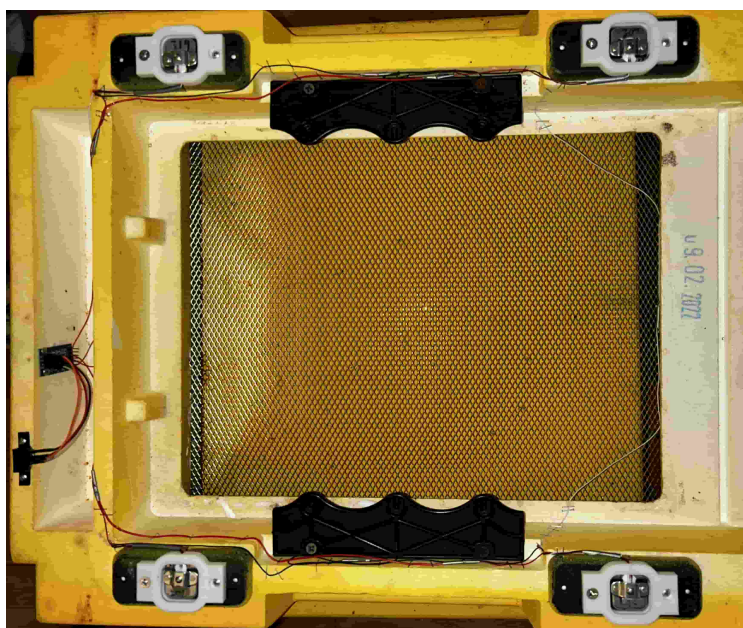
Obrázek 4.4: Obrázek DHT senzoru se zátkou

Jako místo měření byl zvolen střed nástavku, což je optimální vzhledem k konstrukci úlu. Senzor lze také umístit do jakéhokoli z nástavků, pokud jich úl obsahuje více. Na obrázku 4.14 je zobrazen celý úl obsahující jeden nástavek s implementovaným senzorem vlhkosti a teploty, s viditelným výstupem pod bílou zátkou.

### Senzor váhy

Pro sestavení senzoru váhy byl použit tensometr SEN 10245 z tabulky 2.2, který je vhodný díky vysoké nosnosti (50 kg) a jednoduchému zapojení do Wheatstonova můstku. Pro tento projekt bylo nutné použít alespoň 4 senzory, vzhledem k velké váze včelího úlu, která běžně přesahuje 130 kg v sezóně snůšky. Tato konfigurace také zajišťuje jednoduchou a stabilní konstrukci díky čtyřbodové opoře včelího úlu. Senzor váhy bude nejen měřit celkovou váhu úlu, ale primárně také odhad medu. Díky tomu může včelař lépe odhadnout, kdy je čas med sklídit.

Pro uchycení senzorů byly vytištěny nástavce, které lze snadno nainstalovat na spodní část úlu. Na obrázku 4.5 jsou zobrazeny nástavce se senzory uchycené na úlu.



Obrázek 4.5: Váhové senzory

Senzory jsou zapojeny do Wheatstonova můstku a následně připojeny k A/D převodníku. Ideální volbou je A/D převodník HX711 z tabulky 2.3. Vývod z něj zajišťuje JST XH konektor, který umožňuje snadné připojení senzoru k řídicí jednotce. Uchycen je ke spodní části úlu pomocí vytisknutého držáku.

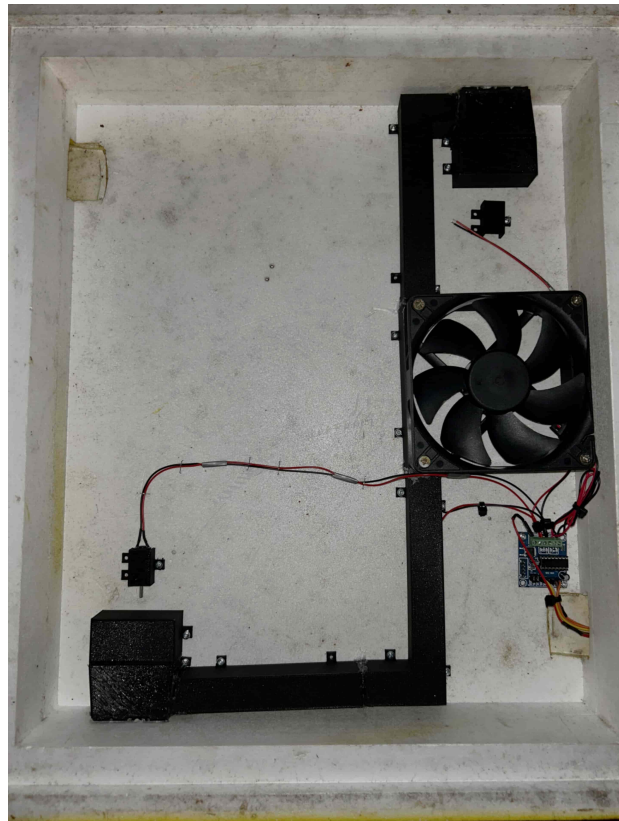
Při použití této metody je důležité zajistit, aby se senzory dotýkaly tvrdé podložky, která ideálně nepodléhá deformaci při zátěži úlu. Tímto zajistíme vysokou kvalitu měření a přesnost dat.

Celé řešení je navrženo s důrazem na snadnost instalace, jednoduché propojení s řídicí jednotkou a vysokou spolehlivost měření váhy včelího úlu. Jednotlivé návrhy 3D komponentů jsou umístěny v příloze.

### 4.1.5 Ventilační systém

Tato sekce popisuje návrh a sestavení ventilačního systému úlu. Hlavní složkou tohoto systému je H-můstek, přičemž nejideálnější volbou byl modul L9110S. Původně zvolený modul se ukázal jako nefunkční, a proto byl nahrazen vhodnější alternativou, Motor Drivem I293D. Navíc tento modul disponuje vlastním step-down měničem, takže nebylo nutné přidávat další vývody pro napájení logiky mikročipu. Je připojen na JST XH konektor, který je pomocí držáku upevněn na zátku průduchu úlu, stejně jako senzor DHT22 (viz obrázek 4.4). Díky tomu lze H-můstek snadno propojit s hlavní řídicí jednotkou. Tento systém je důležitý pro samotnou regulaci mikroklimatu v úlu, díky němuž můžeme účinně zlepšovat již zmíněné podmínky.

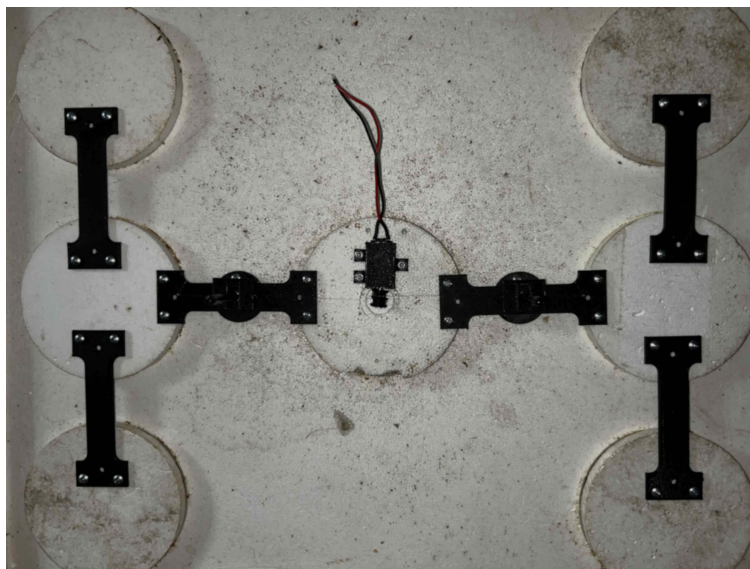
Pro ventilaci byl zvolen 12V DC ventilátor značky Sunon s výkonem 5,4 W, který zajišťuje dostatečný průtok vzduchu pro úl. Je připevněn na potrubní systém (viz obrázek 4.6), který odvádí vzduch přes průduch úlu ven. Na konci je opatřen ochrannou mřížkou, aby do ventilátoru nevniklo cizí těleso. Všechny tyto komponenty jsou umístěny v horním víku včelího úlu.



Obrázek 4.6: Ventilace a průduchy

Na obou vzduchových vývodech je připevněn 12V DC motor s převodovkou, který funguje jako lineární aktuátor. Pomocí šroubovice a matky vysouvá a zasouvá polystyrenové zátky, které utěšňují úl z vnější strany. Tyto zátky jsou zobrazeny v černém pouzdře na obrázku 4.6. To je nezbytné pro zimní období, kdy je třeba co nejvíce zaizolovat včelí úl.

Další část průduchů je umístěna na horní přepážce úlu, kde je celkem 7 kruhových průduchů do vnitřku úlu. Na spodní straně jsou opatřeny mřížkou, která brání vniknutí včel do prostoru horního víka, a z vrchu mají polystyrenové zátky. Pro odvětrávání je nutné všechny polystyrenové zátky zvednout, a naopak v zimním období jimi opět zaizolovat úl. Průduchy jsou zobrazeny na obrázku 4.7. Zátky jsou spojeny pomocí lehké spojky, aby se zvedaly všechny současně.



Obrázek 4.7: Průduchy

Nejideálnější řešení pro zdvih polystyrenových zátek se jeví použití silonového vlasce, který se navíjí na hřídel 12V DC motoru. Vlasce je připevněn na každé straně a provlečen přes tyč, která zároveň určuje směr pohybu celého mechanismu. Zkracováním délky vlasce dochází také ke zkrácení vzdálenosti mezi spojkou zátek a vrcholem tyčky, čímž se celá konstrukce zvedá. Konstrukce je znázorněna na obrázku 4.8.



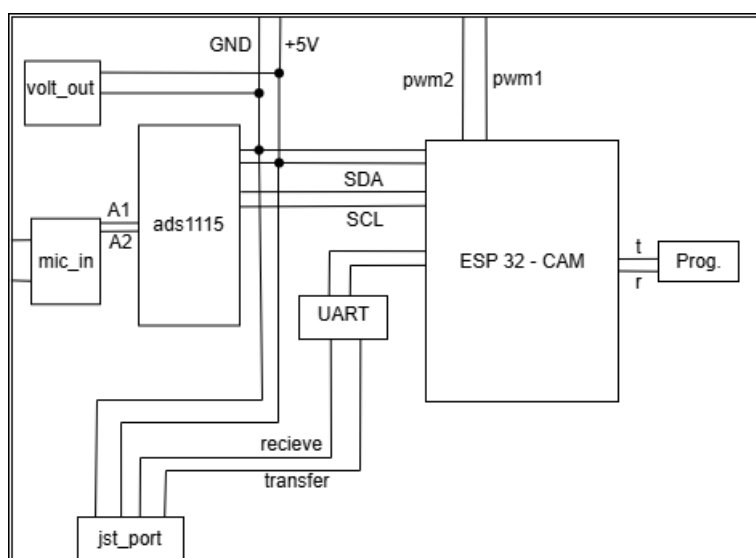
Obrázek 4.8: Mechanismus průduchů

Celé řešení je navrženo s důrazem na jednoduchost, jednoduchou instalaci, spolehlivým otvíráním a zavíráním průduchů a efektivním odvětráváním. Jednotlivé návrhy 3D komponentů se nacházejí v příloze.

## 4.2 Vedlejší řídicí jednotka

Tato podkapitola se věnuje tvorbě vedlejší řídicí jednotky a jejímu příslušnému periferní vybavení. Jako hlavní komponent této jednotky byl zvolen mikrokontrolér ESP32-CAM z tabulky 2.1. Disponuje nejen Wi-Fi a vysokou rychlostí, ale také vstupem pro kameru, která by mohla být potenciálně použita k rozpoznávání sršňů pomocí obrazu. Programování tohoto mikrokontroléru provedeme pomocí USB TTL UART převodníku. Na obrázku 4.9 jsou zobrazeny porty pro připojení označené jako Prog. a volt-out.

Do DPS byl také integrován převodník ADS1115 z tabulky 2.3, který převádí analogový vstup z mikrofonu a pomocí I<sup>2</sup>C komunikace následně posílá data do mikrokontroléru. Tento typ modulu byl vybrán, protože umožňuje připojení více mikrofonů a obsahuje zesilovač. Mikrokontrolér a převodník jsou uchyceny pomocí pájení na desku plošných spojů. Ostatní komponenty této jednotky jsou popsány v sekcích níže.



Obrázek 4.9: Schéma zapojení vedlejší řídicí jednotky

### 4.2.1 Vstupy/Výstupy

Pro propojení s hlavní jednotkou jsem opět použil konektor JST XH. Na obrázku 4.9 se nachází pod zkratkou jst-port. Tímto konektorem se mikrokontrolér a ostatní periferie napájejí a také obsahuje vodiče pro UART pro již zmíněnou komunikaci s hlavní jednotkou.

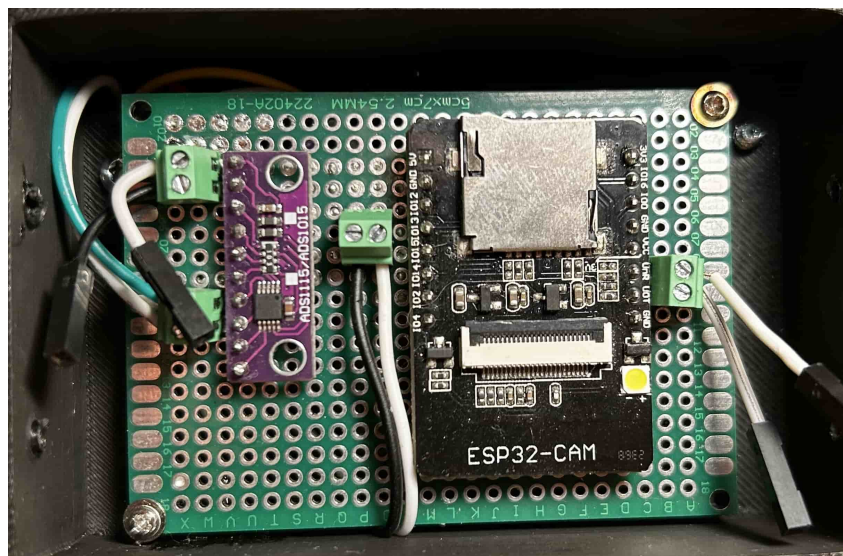
Dps také disponuje vstupem, na obrázku 4.9 se zkratkou mic-in, určenou pro analogový vstup mikrofonu do ads1115 převodníku. Dále schéma obsahuje výstupy pwm1 a pwm2 pro ovládání předního výletu a také již zmíněný vstup Prog. a volt-out pro programátor.

### 4.2.2 Napájení

Jak již bylo zmíněno, vedlejší řídicí jednotka se napájejí z JST konektoru. Poté je po desce rozvedeno napětí 5 V, které napájejí nejen mikrokontrolér, ale i převodník, serva a mikrofon.

Pokud není připojen programátor, je doporučeno zařadit na volt-out kondenzátor s vhodnou kapacitou, pro vyrovnání občasných proudových špiček vyvolaných servo motory a pro klidný chod mikrokontroléru.

V následujícím obrázku 4.10 můžeme vidět reálné a finální zapojení vedlejší řídicí jednotky uvnitř.

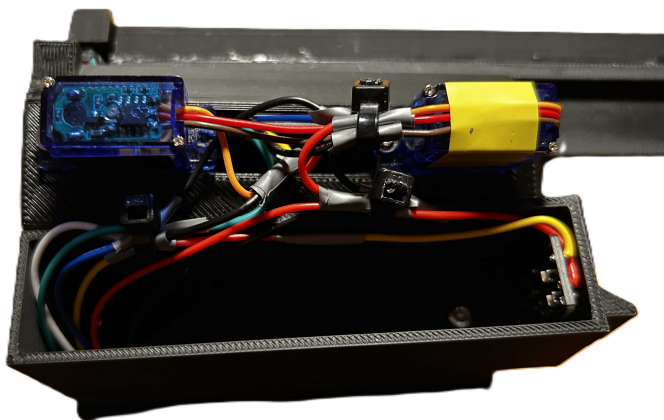


Obrázek 4.10: Vedlejší řídicí jednotka vevnitř

### 4.2.3 Měřící Senzory

V této sekci jsou popsány senzory, které jsou nezbytné pro získání dat. Jediným a zároveň velmi důležitým senzorem je modul mikrofonu CMA-4544PF-W s integrovaným zesilovačem MAX9814 z tabulky 2.2. Tento modul byl vybrán díky své dostupnosti, nastavitelnosti zesílení signálu a ceně. Pro zajištění lepší přesnosti dat jsou použity dva mikrofony. Tato data jsou poté zpracována pro detekci potenciální hrozby úlu.

Mikrofony jsou připojeny k převodníku ADS1115 z tabulky 2.3, který slouží k dalšímu zpracování signálu. Na obrázku 4.11 je zobrazeno zapojení elektroniky, kde je modul mikrofonu umístěn v pravém dolním rohu. Na obrázku 4.12 je vidět mikrofon vlevo nahoře.

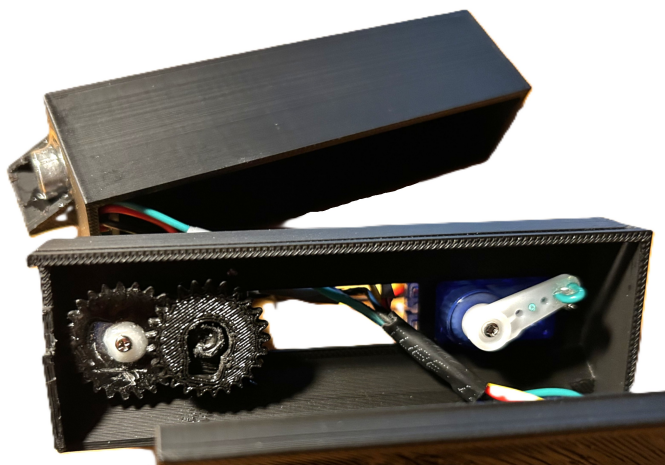


Obrázek 4.11: Zapojení elektroniky

#### 4.2.4 Klapky výletu

Tato sekce se věnuje tvorbě konstrukce klapky výletu. Přední výlet obsahuje dvě klapky (jednu vertikální a jednu horizontální), čímž je možné nezávisle ovládat šířku a výšku výletu. Každá klapka se hodí k pohybu při různých situacích. Například pro zamezení vniknutí sršně stačí zmenšit výšku výletu, zatímco při invazi jiných včelstev je výhodné zmenšit šířku, aby se napadené včely dokázaly ubránit.

Pohyb těchto klapek je zajištěn čtyřmi servomotory. Pro tuto aplikaci byla vybrána serva SG90, která se osvědčila svou spolehlivostí a dostupností na trhu. Jejich zapojení je zobrazeno na obrázku 4.11. Jedna dvojice serv pomocí jednoduchého kulisového mechanismu zvedá a pokládá vertikální klapku, zatímco druhá dvojice funguje jako lineární akční člen s převodem 2,5, což zvyšuje dosah pohybu klapky. Vybraná serva mají totiž rotaci omezenou na 180 stupňů. Konstrukce mechanismu pro serva je znázorněna na obrázku 4.12.



Obrázek 4.12: Mechanika Výletu

Pro zajištění symetrie a požadovaného malého rozměru celé konstrukce bylo nutné upravit serva pro otočení pohybu. Tohoto efektu by šlo dosáhnout otočením PWM signálu do servomotorů pomocí jednoduchého tranzistorového invertoru. Nicméně, pro úsporu součástek bylo zvoleno jednodušší řešení tohoto problému.

Jelikož servo motor obsahuje potenciometr, který mění odpor v závislosti na otočení, je servo schopno zjistit svou polohu. Pomocí regulátoru se servo dostane na požadovanou polohu. Pro otočení chodu stačí prohodit dva krajní vývody potenciometru. Dalším důležitým krokem je otočení polarity napájení motoru, jinak se servo bude snažit dorovnat a regulační odchylka by se neustále zvětšovala. Tento problém je však eliminován dorazy, které chrání potenciometr.

Pro zjednodušení, malý design a nenáročnost montáže je klapka přímo spojena s vedlejší řídicí jednotkou. Po namontování všech potřebných součástí a komponentů je finální podoba klapky předního výletu zobrazená na obrázku 4.13.



Obrázek 4.13: Celková konstrukce klapky

Díky zarážkám na okraji klapky ji lze snadno zasunout před přední výlet ve včelím úlu. Na dalším obrázku 4.14 je zobrazená samotná klapka předního výletu, dále JST konektor pro senzor vlhkosti a teploty a také JST konektor pro váhový senzor.



Obrázek 4.14: Pohled na úl zepředu

Celková konstrukce byla navržena s důrazem na jednoduchost, snadnou instalaci a odolnost proti dešti. Jednotlivé návrhy 3D komponentů se nacházejí v příloze.

# 5 Software

Tato kapitola popisuje softwarové řešení navrženého systému a jeho klíčové funkce. Jsou zde uvedeny klíčové funkce nezbytné pro jeho správnou činnost, způsob komunikace mezi jednotlivými komponentami a použité algoritmy.

Program je rozdělen mezi dva výše zmíněné mikrokontroléry, které fungují nezávisle na sobě a vzájemně komunikují prostřednictvím rozhraní UART. Na základě přijaté zprávy pak mikrokontrolér vyšle odpovídající odpověď nebo provede příslušnou akci.

## 5.1 Hlavní řídicí jednotka

Na této jednotce běží hlavní část programu. Po spuštění se inicializují všechny potřebné knihovny, definují se použité I/O piny a spustí se funkce pro přípravu jednotky k provozu.

Prvotní funkcí programu je ověření dostupnosti Wi-Fi signálu. Pokud je Wi-Fi v dosahu, zařízení se připojí k síti a naváže spojení s MQTT serverem. Zároveň proběhne synchronizace aktuálního data a času. V případě nedostupnosti Wi-Fi se čas synchronizuje pouze pomocí uloženého textového souboru, což umožňuje zařízení zhruba určit, ve kterém období se nachází. Při tomto procesu se využívá knihoven `urequests.py` a `umqtt-simple.py` dostupných z [31].

V hlavní smyčce programu se následně v předem definovaných intervalech (podle potřeby) spouštějí následující funkce:

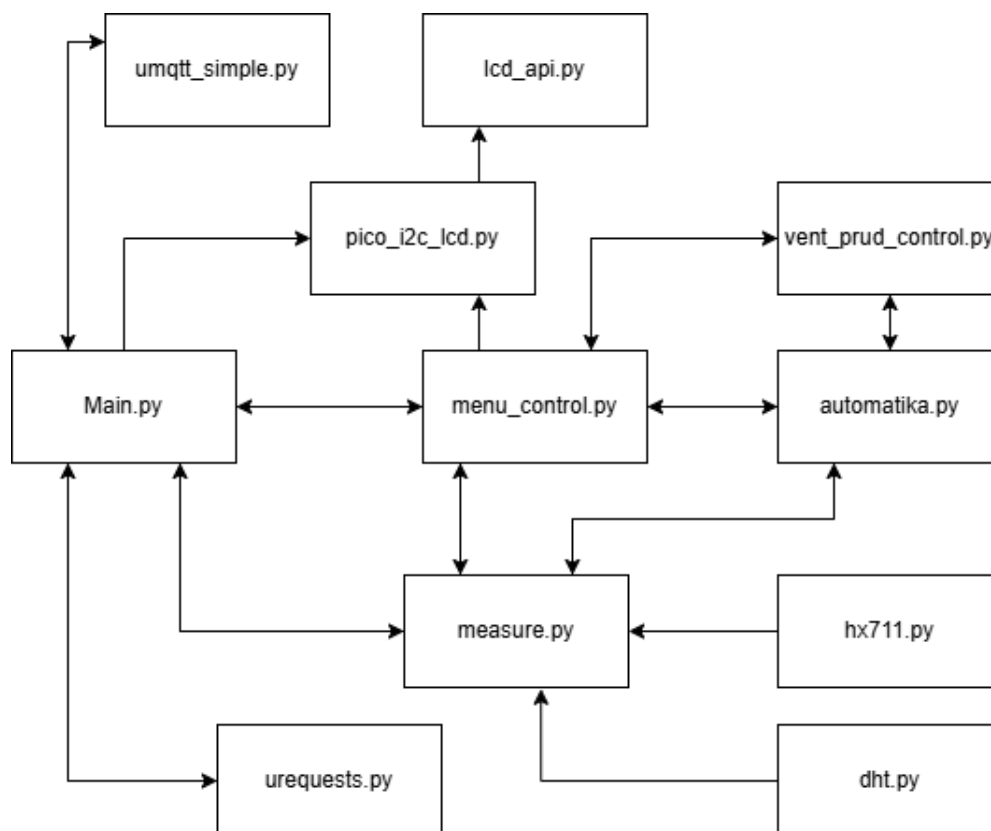
- synchronizace data a času do textového dokumentu (každé 2 minuty),
- zásahy systému za účelem optimalizace vnitřních podmínek (každé 2 minuty),
- měření hmotnosti úlu a množství medu (každých 20 minut),
- odesílání dat o úlu na MQTT server (každých 10 minut),
- aktualizace zobrazovaných dat v menu (každých 5 sekund),
- automatické vypnutí displeje a následné uzamknutí zařízení při neaktivitě (každých 30 sekund a pouze při neaktivitě).

Součástí programu je také bezpečnostní mechanismus, který při uzamčeném zařízení vyžaduje zadání předem definované kombinace tlačítek ve správném pořadí. Tento prvek slouží jako ochrana proti neoprávněnému přístupu.

Program rovněž zahrnuje další podpůrné funkce nezbytné pro provoz zařízení, jako je ukládání a načítání dat z textových souborů, zpracování přerušení od tlačítek a vykonání odpovídajících funkcí.

### 5.1.1 Schéma kódu

Hlavní jednotka využívá značné množství knihoven, které zajišťují funkčnost jednotlivých částí systému. V úvodu programu jsou všechny potřebné knihovny inicializovány a následně propojeny tak, aby mezi sebou mohly efektivně spolupracovat. Struktura jejich vzájemné komunikace je znázorněna na následujícím schématu v obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Struktura kódu v Rp Pico

Použité knihovny:

- `umqtt-simple.py` [31] – komunikace s MQTT serverem,
- `urequests.py` [31] – odesílání HTTP požadavků,
- `hx711.py` [22] – komunikace s váhovým senzorem přes převodník HX711,
- `dht.py` [31] – komunikace se senzorem teploty a vlhkosti,
- `pico-i2c-lcd.py` a `lcd-api.py` [32] – ovládání LCD displeje přes sběrnici I<sup>2</sup>C,
- `measure.py` – měření hmotnosti, teploty a vlhkosti,
- `vent-prud-control.py` – řízení ventilátoru a prúdů,
- `automatika.py` – automatické zásahy pro regulaci vnitřních podmínek,
- `menu-control.py` – ovládání menu a koordinace ostatních knihoven.

### 5.1.2 Menu a ovládání

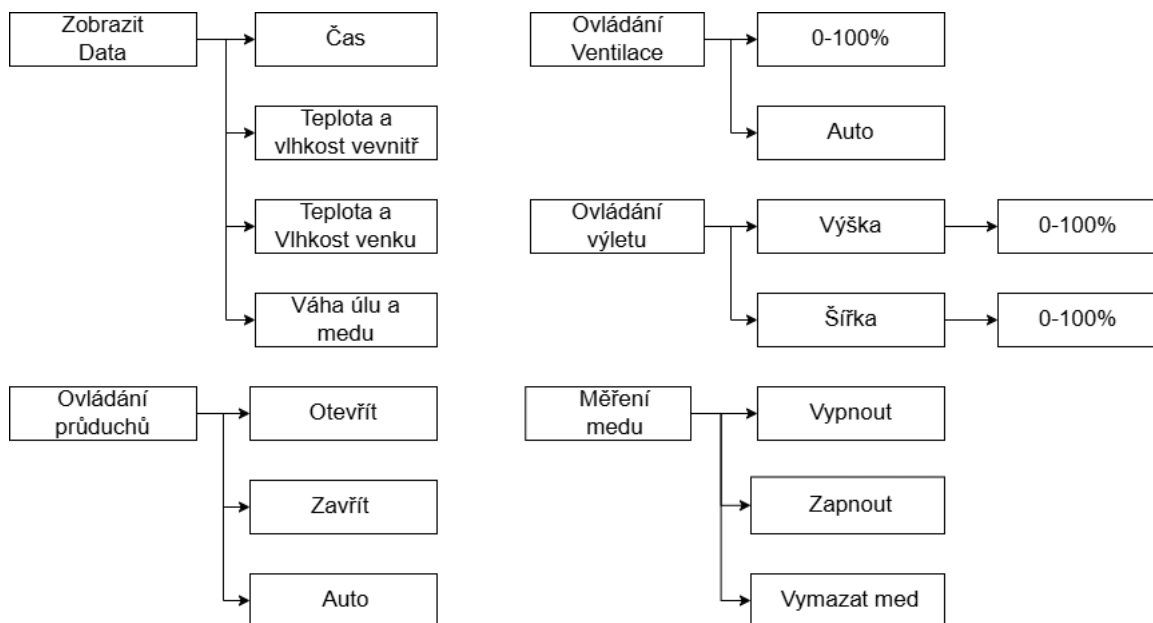
Pro jednodušší a přehlednější ovládání systému bylo do řídicí jednotky implementováno menu. Zobrazuje se na LCD displeji a ovládá se pomocí fyzických tlačítek. Menu slouží uživateli ke snadnému přístupu k důležitým funkcím systému, jejichž ovládání by jinak vyžadovalo přímý zásah do kódu nebo vzdálenou komunikaci. Navíc je menu zabezpečeno pomocí kódu, který je realizován ve formě správné kombinace tlačítek.

Ovládání menu zajišťuje knihovna `menu-control.py`, která obsahuje funkce pro pohyb mezi jednotlivými položkami a vyvolávání příslušných akcí dle požadavků uživatele. Umožňuje následující operace:

- zobrazení aktuálních naměřených dat,
- ovládání ventilátoru,
- ovládání bočních průduchů,
- ovládání přední výletové klapky (výškový a šířkový pohyb),
- aktivaci nebo deaktivaci režimu vážení medu.

Při nastavování některých prvků se na LCD displeji zobrazuje jejich aktuální stav, například výkon ventilátoru v procentech nebo pozice pohyblivých částí, čímž je uživateli umožněn lepší přehled. Ovládání displeje je zajištěno knihovnami `pico-i2c-lcd.py` a `lcd-api.py` dostupné z [32].

Struktura menu je vidět na následujícím obrázku 5.2:



Obrázek 5.2: Struktura menu

### 5.1.3 Měřicí senzory

Pro správné fungování úlu a optimalizaci zásahů je nezbytné průběžně sledovat hodnoty mikroklima v úlu, jako je hmotnost, teplota a vlhkost. Tyto hodnoty poskytují důležité informace o stavu včelstva a jeho produkci, a tvoří základ pro automatizované rozhodování systému.

K měření hmotnosti je použit váhový senzor připojený přes převodník HX711, který je řízen pomocí knihovny `hx711.py`, jedná se o upravenou verzi dostupnou z [33]. Komunikace s převodníkem probíhá prostřednictvím pinů DT (datový signál) a SCK (hodinový signál). Váhové senzory jsou zapojeny do Wheatstoneova můstku připojeného k převodníku. Tento senzor poskytuje informace o hmotnosti úlu, což umožňuje sledovat nárůst množství medu.

Senzory teploty a vlhkosti DHT22 jsou řízeny knihovnou `dht.py` dostupnou z [31]. Komunikace probíhá přes 1 datový pin, a měření se provádí vždy při zobrazení dat na displeji nebo při automatických zásazích pro regulaci vnitřních podmínek.

Všechny měřicí operace jsou centralizovány v knihovně `measure.py`, která poskytuje jednotné rozhraní pro získání aktuálních dat a funkce pro ukládání a načítání dat o hmotnosti úlu a medu. Knihovna rovněž umožňuje zapnutí/vypnutí režimu vážení medu. Hodnota se odvozuje z rozdílu hmotnosti mezi dvěma měřeními. Data o hmotnosti úlu a množství medu se ukládají do textových souborů. Data váhy medu jsou kritická pro odhad další sklizně medu.

### 5.1.4 Ventilační systém

Regulace podmínek v úlu je zajištěna pomocí ventilačního systému, který se skládá z ventilátoru a pohyblivých zářezek ovládaných určitým mechanismem. Ovládání probíhá prostřednictvím knihovny `vent-prud-control.py`, která poskytuje funkce pro řízení otáček ventilátoru a otevírání či zavírání průduchů v úlu. Tato funkce se využívá pro regulaci mikroklimatu v úlu.

Ventilátor je napájen napětím 12 V a řízen pomocí PWM signálu z mikrokontroléru, který je poté v H-můstku převeden na požadované napětí. PWM signál pro řízení ventilátoru je generován s frekvencí 20 kHz. Větrací zářezky jsou poháněny stejnosměrným 12 V motorem rovněž poháněným PWM signálem se stejnou frekvencí, pro zpomalení mechanismu z důvodu menší šance zaseknutí.

Ventilační systém zároveň umožňuje manuální ovládání prostřednictvím uživatelského menu, kde lze ovládat výkon ventilátoru a otevírání nebo zavírání průduchu.

### 5.1.5 Automatické zásahy

Pro zajištění vhodných podmínek uvnitř úlu je nezbytné nejen monitorovat teplotu a vlhkost, ale také na základě těchto údajů aktivně zasahovat. Systém proto obsahuje mechanismus pro automatizované řízení prostředí, který na základě měřených hodnot provádí vhodné akce.

Automatický zásah se provádí vždy, když aktuální hodnoty teploty nebo vlhkosti překročí předem definované meze. Na základě těchto hodnot systém vyhodnotí vhodnou reakci, například otevření průduchů nebo zvýšení výkonu ventilátoru, a následně ji provede. Tento mechanismus je řízen knihovnou `automatika.py`, která na základě vstupních dat rozhoduje o konkrétním typu zásahu pro udržení optimálních vnitřních podmínek v úlu. Funkci automatických zásahů je možné v menu ručně zapnout nebo vypnout.

Použité zásahy:

- **Zimní období (říjen–březen)** – průduchy jsou automaticky uzavřeny; ventilace je vypnuta.
- **Letní období (duben–září)** – průduchy jsou otevřeny, průduchy se uzavřou, pokud teplota klesne pod 20 °C; ventilace se aktivuje podle teploty a vlhkosti.
- **Regulace teploty (v létě):**
  - Teplota nad 45 °C → ventilace 75 %
  - Teplota nad 40 °C → ventilace 50 %
  - Teplota nad 35 °C → ventilace 25 %
  - Teplota pod 35 °C → ventilace vypnuta
- **Regulace vlhkosti (v létě):**
  - Vlhkost nad 75 % → ventilace 75 %
  - Vlhkost nad 70 % → ventilace 50 %
  - Vlhkost nad 65 % → ventilace 25 %
  - Vlhkost pod 65 % → ventilace vypnuta
- **Měření medu** – aktivní automaticky v období od dubna do srpna; mimo toto období je režim vážení deaktivován a data se smažou.

Regulace teploty je nastavena na 35 °C a vlhkost 65 % . Ideální vlhkost a teplota se ale v závislosti na poloze v úlu mohou lišit. Zmíněné hodnoty jsou uvedeny pro optimální podmínky pro plodiště včelstva [2].

Dalším typem automatického zásahu je reakce na hrozby. Systém detekuje, pokud se v blízkosti úlu nachází zdroj zvuku s frekvencí v rozmezí 140 až 180 Hz, a zareaguje snížením klapky předního výletu, čímž zabrání vniknutí sršňů. V období zvýšeného rizika napadení z jiného včelstva systém reaguje na vysokou hladinu hluku zúžením výletového otvoru, aby se napadené včely mohly lépe bránit. Tato funkce je realizována na vedlejší řídicí jednotce a její ovládání i detekce jsou popsány v sekcích 5.2.3 a 5.2.4. Odhad frekvence signálu je podrobně popsán v sekci 6.1.

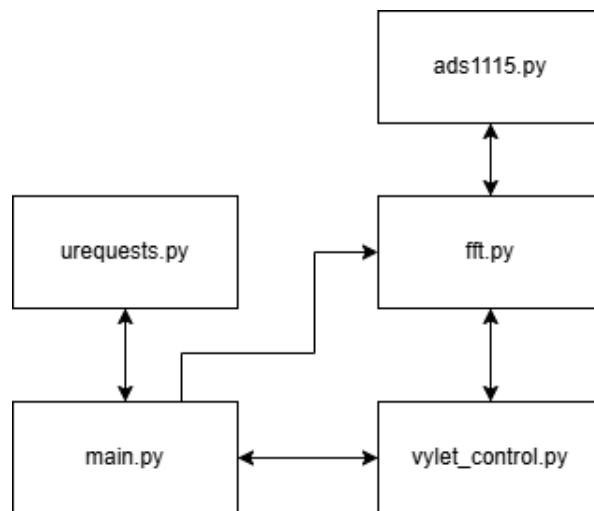
## 5.2 Vedlejší řídicí jednotka

Tato jednotka obsahuje druhou část programu, která běží na ESP 32 CAM. Po spuštění se chová obdobně jako hlavní jednotka – inicializuje I/O porty a potřebné knihovny a snaží se synchronizovat čas, buď prostřednictvím Wi-Fi, nebo z textového souboru uloženého v paměti.

V hlavní smyčce probíhá v pravidelných intervalech synchronizace času (stejně jako u hlavní jednotky) a následně analýza signálu pomocí FFT, na jejímž základě jednotka vyhodnocuje, zda úlu neohroží nebezpečí.

### 5.2.1 Schéma kódu

Vedlejší jednotka využívá také několik knihoven, které zajišťují správnou funkci systému. Na následujícím obrázku je znázorněna jejich vzájemná komunikace a propojení. Schéma je znázorněno na dalším obrázku 5.3.



Obrázek 5.3: Struktura kódu v ESP

Použité knihovny:

- `urequests.py` [31] - Odesílání HTTP požadavků
- `ads1115.py` [34] - komunikace s mikrofonom skrz převodník ADS1115
- `fft.py` - implementace rychlé Fourierovy transformace (FFT)
- `vylet-control.py` - ovládání přední klapky výletu

Tyto knihovny představují základní softwarové moduly vedlejší řídicí jednotky a zajišťují její plnou funkčnost. Jejich strukturované uspořádání umožňuje snadnou údržbu kódu a případné rozšiřování systému.

### 5.2.2 Komunikace s hlavní jednotkou

Komunikace mezi jednotkami je zajištěna pomocí rozhraní UART, jak již bylo zmíněno. Na vedlejší řídicí jednotce je implementován systém příkazů, které určují, jaké akce má jednotka vykonat po obdržení zprávy přes UART. Na základě těchto příkazů jednotka vrací aktuální polohu výletové klapky v horizontálním i vertikálním směru a je schopna upravit šířku nebo výšku otvoru v závislosti na přijatém požadavku.

Formát příkazů je navržen jako jednoduchý textový řetězec, který obsahuje klíčové slovo a parametr. Například příkaz CHECK-Width vyžádá aktuální šířku klapky, zatímco příkazy jako High-75 nebo High-50 nastaví horizontální pozici na požadovanou hodnotu ve stupních. Samotné ovládání klapky se nachází v další sekci.

### 5.2.3 Klapka výletu

Klapka výletu je mechanicky ovládána dvěma páry servopohonů typu SG90, které umožňují řízení v obou osách – vertikální (výška) a horizontální (šířka) otevření. Servopohony jsou řízeny prostřednictvím PWM signálu, který určuje jejich aktuální pozici.

PWM signál pro řízení servopohonů je generován s frekvencí 50 Hz. Pomocí softwarového nastavení je možné definovat konkrétní polohy výletové klapky v závislosti na vstupních podmínkách (například přítomnost hrozby detekované pomocí FFT analýzy).

Tento systém umožňuje jak automatické zavírání při detekci hrozby, tak ruční ovládání prostřednictvím uživatelského rozhraní. Jak se klapka užívá, je znázorněno v další sekci.

### 5.2.4 Detekce hrozby

Detekce hrozby je na této jednotce implementována pomocí metody rychlé Fourierovy transformace (FFT), která rozkládá zvuk na jednotlivé frekvence a jejich amplitudy. Na základě těchto informací je možné odhadnout, zda se v okolí úlu nachází sršně. Pokud systém detekuje přítomnost sršně, automaticky zareaguje snížením výšky předního výletu, čímž zamezí jejímu průchodu dovnitř úlu.

Zvukový signál z mikrofonu je veden do analogově-digitálního převodníku (ADC), odkud je pomocí sběrnice I<sup>2</sup>C přenášen do mikroprocesoru. Zpracování signálu zajišťuje knihovna `ads1115.py` dostupná z [20], která zprostředkovává čtení dat z převodníku ADS1115 a poskytuje je ve formě digitálních hodnot. Fourierova transformace probíhá následně v knihovně `fft.py`, která vrací frekvence a k nim náležité amplitudy.

Zvuk sršně se typicky pohybuje v rozsahu frekvencí 135–180 Hz, zatímco frekvence zvuku včely je vyšší, přibližně v intervalu 220–300 Hz. Tento rozdíl ve frekvenčním spektru poskytuje dostatečně spolehlivý parametr pro jejich odlišení. Tato data nám poskytlo testování, které je popsáno v následující kapitole 6.

V období podzimu, kdy je včelstvo více ohroženo vykrádáním zásob jinými včelami, dokáže systém rozpoznat náhlé zvýšení aktivity ve svém okolí. Tento stav je indikován výrazným nárůstem akustického signálu, který signalizuje přítomnost cizích včel. V takovém případě dojde ke zúžení šířky výletového otvoru, což umožňuje včelstvu efektivněji kontrolovat přístup a bránit se proti vetřelcům.

Pro detekci této aktivity systém sleduje amplitudovou úroveň signálu z obou mikrofonů. Pokud tato úroveň překročí předem stanovený práh po dobu cirka 5 sekund, dojde k zásahu. Toto časové zpoždění slouží k minimalizaci falešných poplachů způsobených krátkodobým hlukem nebo běžným pohybem včel.

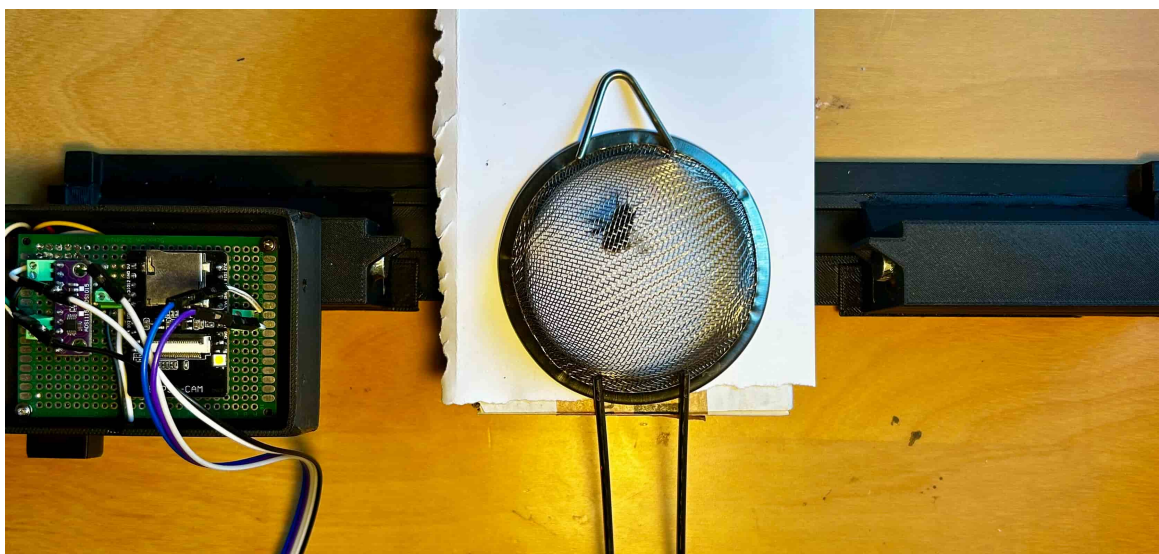
## 6 Testování

Cílem této kapitoly je poskytnout přehled o výsledcích testování celého systému – z hlediska hardwaru, softwaru, celkové účinnosti, a především také otestování a změření frekvenčních spekter jednotlivých druhů hmyzu, která jsou klíčová pro jejich rozpoznání pomocí zvukové analýzy.

### 6.1 Frekvenční analýza

Pro posouzení efektivity rozpoznávání sršní byl analyzován zvuk zachycený mikrofonom, zpracovaný pomocí FFT. Následně byly výrazné frekvence určeny jako očekávané hodnoty pro jednotlivé druhy hmyzu.

Jako měřicí souprava byla použita klapka předního výletu, k níž byl v blízkosti umístěn hmyzí jedinec určený k měření. Naměřená data byla následně přenesena prostřednictvím rozhraní UART do skriptu v prostředí MATLAB, který zajišťoval jejich vykreslení (skript se nachází v příloze). Měřicí souprava je znázorněna na obrázku 6.1.

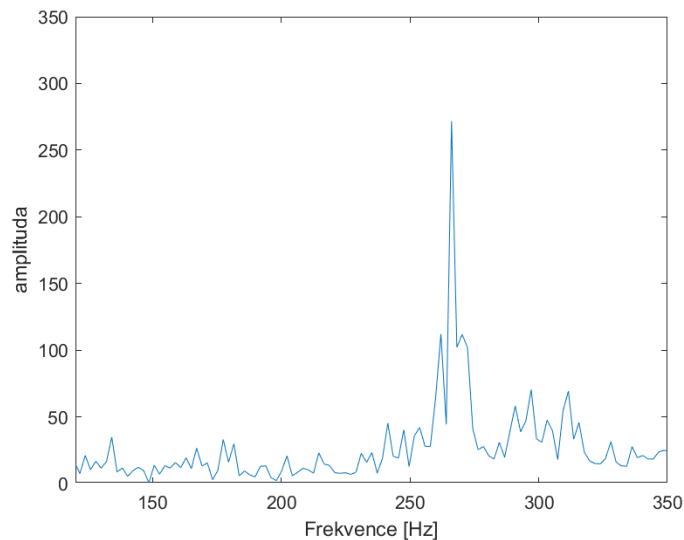


Obrázek 6.1: Měřicí souprava

Pro účely tohoto měření bylo nezbytné jednotlivé jedince předem odchytit. Zatímco odchyt včely nepředstavoval žádný problém, v případě sršně asijské se jednalo o prakticky nemožný úkol. Jako náhradní varianta proto posloužil odchyt sršně obecné (evropské), jehož zvukový projev je uváděn jako mírně hlubší ve srovnání se sršní asijskou. Pro určení horní hranice frekvenčního spektra byl dále zvolen čmelák zemní, který svou velikostí i zvukovými projevy tvoří přechod mezi včelou a sršní, a může tak posloužit jako horní mez frekvenčního rozsahu sršně asijské.

### 6.1.1 Včela

Nejprve byl měřen jedinec včely. Analýzu jeho zvukového projevu pomocí rychlé Fourierovy transformace lze vidět na obrázku 6.2.

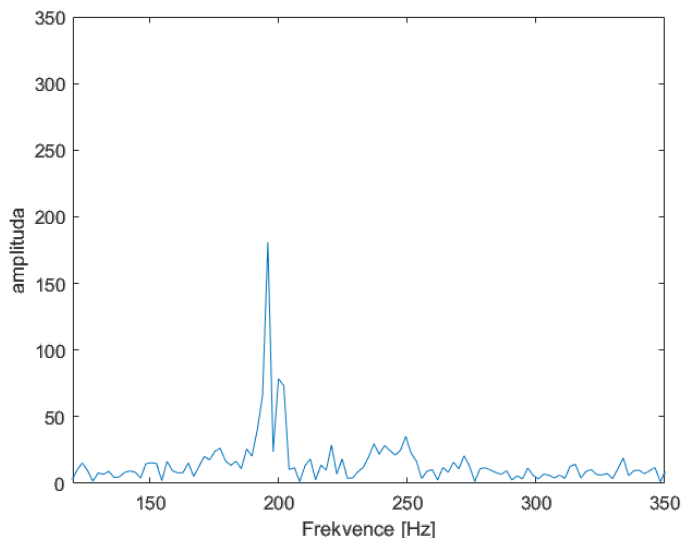


Obrázek 6.2: Zvukový rozbor včely

Tento graf byl zvolen jako nejvíce reprezentativní pro analýzu zvukového projevu včely. Zvukový signál se mezi jednotlivými jedinci mírně liší, a to v závislosti na různých faktorech, jako je například přítomnost pylu na těle. Nosná frekvence se však ve všech případech pohybovala v rozmezí 220–300 Hz. Včela se během měření nacházela v bezprostřední blízkosti mikrofonu, což odpovídá zaznamenané amplitudě signálu.

### 6.1.2 Čmelák

Jako druhý byl měřen čmelák zemní, jehož frekvenční analýzu lze vidět na následujícím obrázku 6.3.

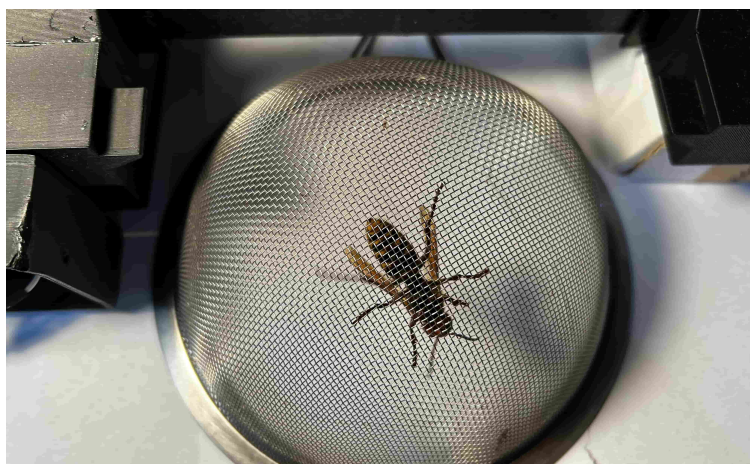


Obrázek 6.3: Zvukový rozbor čmeláka

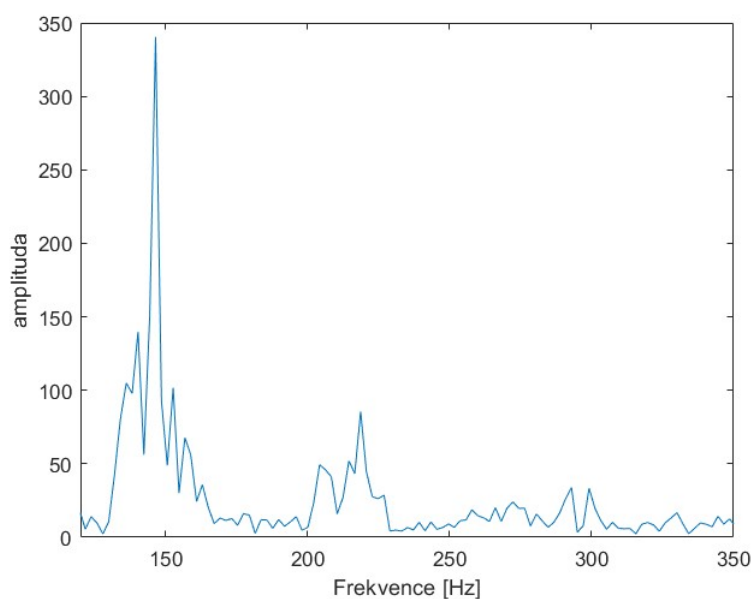
U více jedinců byla zaznamenána odchylka v poloze dominantní frekvence, což lze přičíst individuálním rozdílům mezi jednotlivými jedinci stejně jako u včel. Rozmezí těchto frekvencí se pohybovalo přibližně mezi 180 a 220 Hz.

### 6.1.3 Sršeň

Na rozdíl od sršně asijské je odchyt sršně obecné možný, avšak stále velmi náročný. Z tohoto důvodu byl zpočátku použit zvukový záznam dostupný na internetu, který byl přehráván do mikrofону. Později se však podařilo odchytit jednoho jedince a provést vlastní zvukovou analýzu. Výsledná data se od záznamu liší, jak bylo očekáváno, vlastní zaznamenaný zvuk poskytl výrazně kvalitnější a přesnější frekvenční spektrum. Akustický záznam pořízený z odchyceného jedince lze vidět v obrázku 6.5 a zmíněný jedinec lze pozorovat na obrázku 6.4.

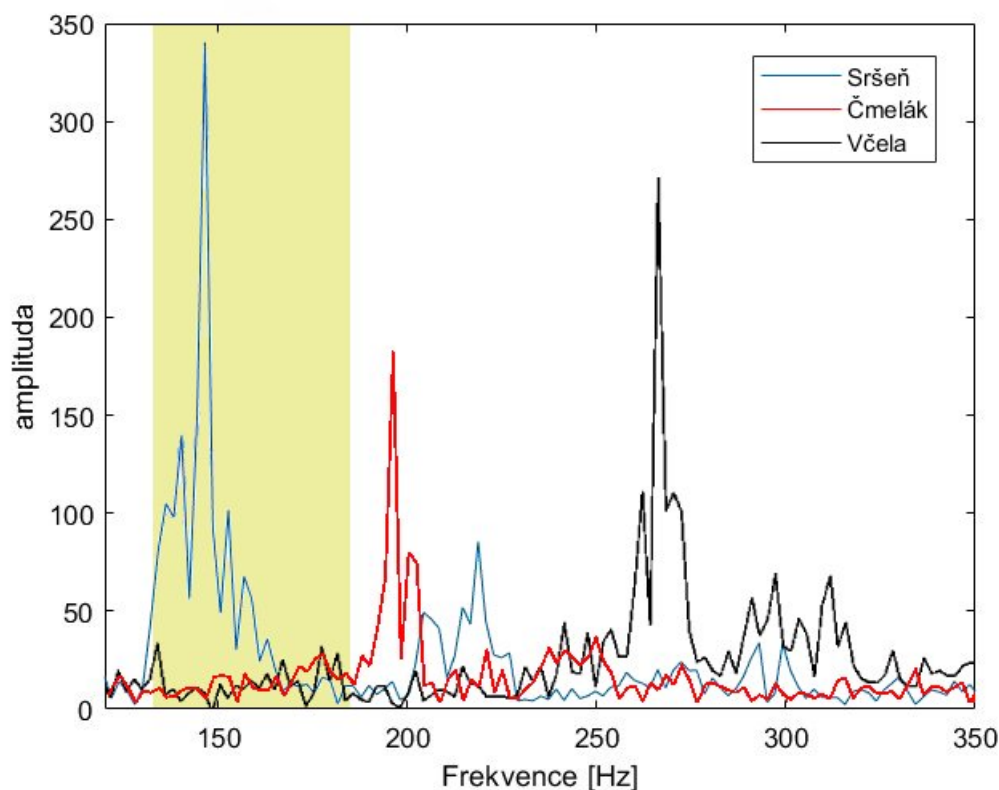


Obrázek 6.4: Měření zvuku sršně



Obrázek 6.5: Zvukový rozbor sršně

Jak u zvukového záznamu staženého z internetu, tak i u reálně pořízeného záznamu šlo pozorovat dominantní nosnou frekvenci doplněnou o několik vyšších harmonických složek. Například na obrázku 6.5 je patrné, že hlavní frekvence se pohybuje v rozmezí 140–160 Hz, přičemž přidružené harmonické složky (každá s výrazně nižší amplitudou) se vyskytují s periodicitou přibližně 70–80 Hz. Tento jev by mohl být využit jako charakteristický rys při identifikaci zvuku sršně. Je však nutné upozornit, že uvedený záznam pochází od sršně obecné, a není tedy zaručeno, že stejné spektrální vlastnosti budou platit i pro sršně asijskou.



Obrázek 6.6: Všechny záznamy z FFT

Na základě provedeného testování lze konstatovat, že zvukové projevy jednotlivých druhů hmyzu se odlišují zejména svou dominantní nosnou frekvencí, případně přítomností dalších harmonických složek. Včely vykazovaly nosnou frekvenci v rozmezí 220–300 Hz, čmeláci se pohybovali přibližně mezi 180–220 Hz a u sršně obecné byla hlavní frekvence zaznamenána v intervalu 140–160 Hz. Také se u ní navíc opakovaně vyskytovaly harmonické složky s periodicitou přibližně 70–80 Hz, což může být využitelné při její akustické identifikaci.

Výstupem z tohoto testování je tedy předpoklad, že sršeň asijská, jejíž přímý záznam se nepodařilo pořídit, bude mít svůj akustický projev rovněž v oblasti nižších frekvencí. S vysokou pravděpodobností v rozmezí hodnot zaznamenaných u sršně obecné a čmeláka zemního. Identifikace této invazivní sršně by tak mohla být založena na přítomnosti frekvencí v daném rozsahu od 135 do 180 Hz. Tato oblast je označena žlutě v obrázku 6.6.

## 6.2 Testování systému a možné zlepšení

Systém nebyl dosud podroben dlouhodobému testování v reálném provozu, a tudíž nebylo možné získat rozsáhlejší data pro vyhodnocení jeho účinnosti v čase. Přesto však již první fáze nasazení ukázala několik významných výhod. Mezi hlavní přednosti patří přehledné uživatelské rozhraní, které umožňuje intuitivní ovládání všech funkcí systému včetně zobrazení dostupných dat.

V oblasti detekce nebezpečí v prostoru výletu nebyl doposud zaznamenán výskyt hrozby, a proto nebylo možné zhodnotit reakční schopnost systému v případě výskytu ohrožení v prostoru výletu. Naopak systém pro automatickou regulaci teploty a vlhkosti již reagoval na změny prostředí a nyní čeká na zhodnocení dlouhodobého dopadu těchto zásahů na kondici včelstva.

Zobrazení váhových údajů poskytuje včelaři základní přehled o vývoji hmotnosti úlu. Vzhledem k omezenému množství aktuálně dostupných dat však zatím nelze z těchto údajů vyvozovat průběh produkce medu. Reálný obsah medu bude možné určit až po vytočení medu. Významnou výhodou je také možnost sledování všech klíčových parametrů na dálku prostřednictvím internetu, což významně usnadňuje péči o včelstvo.

Možnosti dalšího rozvoje systému zahrnují například rozšíření funkčnosti o dálkové ovládání všech prvků přes internet, například vytvoření aplikace, která bude pokrývat všechny potřeby. Za přínosné lze rovněž považovat zavedení mechanismu pro jednotlivé otevírání a zavírání horních polystyrenových víček v prostoru vrchní přepážky, což by mohlo pomoci s jemnější regulací ventilace a klimatu v úlu. Další potenciální funkcí by mohlo být sledování spotřeby zásob z dokrmovací baňky, což by včelaři umožnilo lépe odhadnout potřebu dalšího příkrmování.

## 7 Závěr

Tato práce se zabývala návrhem a realizací chytrého mechatronického systému pro sledování i řízení podmínek ve včelím úlu a obranu proti vetřelcům. Byly splněny tři hlavní cíle práce: návrh monitorovacího systému pro měření teploty, vlhkosti a hmotnosti úlu; zavedení metod pro detekci a potenciální reakci na výskyt invazivních druhů, zejména sršně asijské; a automatická regulace ventilace pro udržování vhodného mikroklimatu. Návrh systému vycházel z potřeb současného včelařství a z trendu směřujícího k digitalizaci a automatizaci chovu včelstev.

Byl vyvinut systém založený na platformách Raspberry Pi Pico W a ESP32-CAM. Systém s Raspberry Pi Pico W je schopen získávat data pomocí senzorů vlhkosti, teploty a hmotnosti a zároveň reagovat na aktuální podmínky regulací mikroklimatu uvnitř úlu pomocí ventilátoru a otevírání či zavírání průduchů. Zobrazení a ovládání prvků systému je řešeno pomocí interaktivního menu zabezpečeného heslem proti neoprávněnému přístupu. Data jsou navíc přenášena pomocí komunikace prostřednictvím MQTT protokolu na server, což umožňuje vzdálené sledování dat přes internet. Sensory hmotnosti jsou užitečné jak pro určení aktuální váhy medu, tak i pro spolehlivý odhad vhodného okamžiku ke sklizni. Pokud včelař sklizeň neprovede včas, mohou včely zásoby spotřebovat, nebo se zvýší rojová nálada.

Systém založený na ESP32-CAM se zaměřuje zejména na zvukovou analýzu prostředí včelího úlu. Na základě frekvenční analýzy zvukového projevu dokáže systém identifikovat přítomnost sršně, jejíž dominantní frekvence byla během testování určena v rozmezí 135–185 Hz. V případě výskytu této frekvence systém aktivuje servomotory a dočasně sníží přední výlet, čímž znemožní vetřelci vstup do úlu. Další bezpečnostní funkcí je zúžení vletového otvoru pro ochranu proti loupeživému chování jiných včelstev, což včelám umožní lépe bránit vlastní úl. Systémy spolu komunikují přes UART.

Celkový systém byl lehce otestován a lze říci, že navržený systém je plně funkční a představuje praktický nástroj pro moderní včelaře, který může přispět ke zvýšení produktivity a zdraví včelstev. Výsledky této práce potvrzují, že spojení klasického včelařství s mechatronikou a moderními technologiemi přináší nové možnosti a otevírá cestu k přesnějšímu, šetrnějšímu a efektivnějšímu řízení chovu včel.

Do budoucna se nabízí celá řada možností rozšíření, například vzdálené ovládání pomocí mobilní aplikace, pokročilejší klasifikace hmyzích druhů za využití metod strojového učení a rozpoznávání obrazu, nebo sledování spotřeby krmiva. Rovněž by bylo vhodné provést dlouhodobé testování v reálných podmínkách včelího úlu a ověřit odolnost systému za různých klimatických a provozních podmínek. Vhodným směrem je i analýza historických dat pro predikci chování včelstva.

# Seznam Zdrojů

- [1] BOHANKA, Včely. *Ze života včel*. 2024. Dostupné také z: <https://vcelybohanka.webnode.cz/ze-zivota-vcel/>.
- [2] BIENEFELD, Kaspar. *Včelařství krok za krokem*. 4. vyd. Ed. KAŠPAR, Jaroslav. Přel. ŠTORKÁNOVÁ, Anna. Český Těšín: Vydavatelství VIKEND s. r. o., 2022. ISBN 978-80-7433-343-9. Překlad z německého originálu *Imkern Schritt für Schritt*, Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co. KG, Stuttgart, 2005.
- [3] NEŠETRÍLOVÁ, Klára. *Včela medonosná a její nemoci a škůdci*. Brno, 2018. Dipl. pr. Masarykova univerzita, Pedagogická fakulta, Katedra fyziky, chemie a odborného vzdělávání. Vedoucí práce Ph.D. MGR. PETR PTÁČEK.
- [4] SHARP, Nicole. *The Kaye Effect*. 2014. Dostupné také z: <https://fyfluidynamics.com/2014/10/those-who-have-poured-viscous-liquids-like-syrup/>. Přístup: 2025-05-07.
- [5] ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32-CAM Datasheet*. 2020. Dostupné také z: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-cam\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-cam_datasheet_en.pdf). Rev. 1.0.
- [6] ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32 Series Datasheet*. 2022. Dostupné také z: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf). Version 3.9.
- [7] RASPBERRY PI FOUNDATION. *Raspberry Pi 4 Model B Datasheet*. 2020. Dostupné také z: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/rpi-4-reduced-schematics.pdf>.
- [8] RASPBERRY PI FOUNDATION. *Raspberry Pi Pico W Datasheet*. 2022. Dostupné také z: <https://datasheets.raspberrypi.com/picow/pico-w-datasheet.pdf>.
- [9] ARDUINO LLC. *Arduino Nano – Technical Specs*. 2015. Dostupné také z: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>.

- [10] ARDUINO LLC. *Arduino Uno Rev3 – Technical Specs*. 2015. Dostupné také z: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>.
- [11] AOSONG ELECTRONICS CO., LTD. *DHT11 Temperature and Humidity Sensor*. 2018. Dostupné také z: <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>.
- [12] AOSONG ELECTRONICS CO., LTD. *DHT22 Temperature and Humidity Sensor*. 2010. Dostupné také z: <https://cdn.sparkfun.com/assets/f/7/d/9/c/DHT22.pdf>.
- [13] SENSIRION AG. *SHT3x-DIS Humidity and Temperature Sensor*. 2022. Dostupné také z: [https://sensirion.com/media/documents/213E6A3B/63A5A569/Datasheet\\_SHT3x\\_DIS.pdf](https://sensirion.com/media/documents/213E6A3B/63A5A569/Datasheet_SHT3x_DIS.pdf).
- [14] BOSCH SENSORTEC. *BME280 Combined Humidity, Pressure and Temperature Sensor*. 2022. Dostupné také z: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>.
- [15] SPARKFUN ELECTRONICS. *SEN-10245 Load Sensor - 50kg*. 2010. Dostupné také z: <https://www.mouser.com/ProductDetail/SparkFun/SEN-10245?qs=WyAARYrbSnaF3tJl7uQu7A%3D%3D>.
- [16] GUANGCE SENSOR CO., LTD. *YZC-131A Load Cell Datasheet*. 2018. Dostupné také z: <https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/YZC-131A.pdf>.
- [17] ADAFRUIT INDUSTRIES. *Electret Microphone Amplifier - MAX4466 with Adjustable Gain*. 2013. Dostupné také z: <https://www.adafruit.com/product/1063>.
- [18] ANALOG DEVICES. *MAX9814: Microphone Amplifier with AGC and Low-Noise Microphone Bias*. 2016. Dostupné také z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max9814.pdf>.
- [19] JOY-IT. *KY-037 High Sensitivity Sound Detection Module*. 2020. Dostupné také z: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1284505/JOY-IT/KY-037.html>.
- [20] TEXAS INSTRUMENTS. *ADS1115: 16-Bit Analog-to-Digital Converter with PGA and Comparator*. 2022. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>.

- [21] TEXAS INSTRUMENTS. *ADS1015: 12-Bit Analog-to-Digital Converter with PGA and Comparator*. 2022. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/gpn/ADS1015>.
- [22] AVIA SEMICONDUCTOR. *HX711: 24-Bit Analog-to-Digital Converter for Weigh Scales*. 2010. Dostupné také z: [https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711\\_english.pdf](https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf).
- [23] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *MCP3008: 10-Bit Analog-to-Digital Converter with SPI Interface*. 2001. Dostupné také z: <https://www.microchip.com/en-us/product/mcp3008>.
- [24] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *MCP3208: 12-Bit Analog-to-Digital Converter with SPI Interface*. 2002. Dostupné také z: <https://www.microchip.com/en-us/product/mcp3208>.
- [25] TEXAS INSTRUMENTS. *INA219: Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor with I<sup>2</sup>C Interface*. 2022. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/gpn/INA219>.
- [26] TOWER PRO. *SG90 9g Micro Servo Motor Datasheet*. 2013. Dostupné také z: [https://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/DE1\\_EE/stores/sg90\\_datasheet.pdf](https://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/DE1_EE/stores/sg90_datasheet.pdf).
- [27] NTI AUDIO. *Fast Fourier Transformation FFT - Basics* [online]. 2023. [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transform-fft>.
- [28] BISWAS, Dibyendu. *Fourier Transform*. 2020. Dostupné také z: <https://dibyendubiswas.medium.com/fourier-transform-70ae1b7ec252>.
- [29] TEXAS INSTRUMENTS. *Bridge Measurement Systems* [online]. 2006. [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ml/slyp163/slyp163.pdf>.
- [30] LUUK, Indrek. *50kg Load Cells with HX711 and Arduino. 4x, 2x, 1x Diagrams*. 2020. Dostupné také z: <https://circuitjournal.com/50kg-load-cells-with-HX711>.
- [31] GEORGE, Damien P. *MicroPython Drivers*. 2016. Dostupné také z: <https://github.com/micropython/micropython-lib>. MIT License.

- [32] T-622. *MicroPython driver for I2C LCD backpack*. 2021. Dostupné také z: <https://github.com/T-622/RPI-PICO-I2C-LCD>. MIT License.
- [33] HAMMELRATH, Robert. *MicroPython Driver for HX711 Load Cell Interface*. 2017. Dostupné také z: <https://github.com/robert-hh/hx711>. MIT License.
- [34] HAMMELRATH, Robert; DOPIERALSKI, Radomir. *MicroPython Driver for ADS1115*. 2017. Dostupné také z: <https://github.com/robert-hh/ads1x15>. MIT License.

# Seznam příloh

Přílohy obsahují následující materiály:

- **Kód** – kompletní zdrojový kód této práce nahraný v souboru: `kod`
- **Modely** – soubory 3D modelů použité při návrhu prototypu zařízení nahrané v souboru: `modely`