



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

**ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ**

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

**AUTONOMNÍ ÚL**

AUTONOMOUS HIVE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. JIŘÍ VÁCLAVIČ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. RNDr. PAVEL SMRŽ, Ph.D.**

**BRNO 2024**

## Zadání diplomové práce



154576

Ústav: Ústav počítačové grafiky a multimédií (UPGM)  
Student: **Václavič Jiří, Bc.**  
Program: Informační technologie a umělá inteligence  
Specializace: Inteligentní zařízení  
Název: **Autonomní úl**  
Kategorie: Vestavěné systémy  
Akademický rok: 2023/24

### Zadání:

1. Seznamte se s existujícími řešeními pro automatizaci činností spojených s včelařstvím.
2. Navrhněte systém, který s využitím existujících levných komponent, případně 3D tisku, dokáže realizovat princip (částečně) autonomního úlu.
3. Realizujte navržené řešení a konzultujte s odborníky praktické aspekty nasazení.
4. Změřte a vyhodnoťte parametry systému, zejména z pohledu energetické udržitelnosti, spolehlivosti a zpoždění zpracování jednotlivých požadavků.
5. Diskutujte dosažené výsledky a navrhňte možná budoucí vylepšení.

### Literatura:

- dle doporučení vedoucího

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- funkční prototyp řešení

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Smrž Pavel, doc. RNDr., Ph.D.**  
Vedoucí ústavu: Černocký Jan, prof. Dr. Ing.  
Datum zadání: 1.11.2023  
Termín pro odevzdání: 17.5.2024  
Datum schválení: 21.12.2023

## Abstrakt

Cílem této práce bylo sestavit elektronicky řízený úl. Zásadním prvkem projektu bylo provést důkladný výzkum stávajících IoT a dalších elektronických řešení využívaných ve včelařství. Bylo nezbytné analyzovat dostupné hardwarové a softwarové technologie, které by bylo možné aplikovat na danou problematiku, a vybrat ty, které jsou pro tento účel nejvhodnější.

Na základě získaných znalostí byly navrženy a pomocí 3D tiskárny zhotoveny jednotlivé části včelího úlu, které jsou speciálně upraveny, aby umožnily integraci jednotlivých senzorů. Nedílnou součástí řešení je také systém ventilace a vlastní návrh motorizovaných včelařských rámků, které umožňují samosběr medu. Senzorické výstupy a další data potřebná k informování včelaře o stavu kolonie jsou zobrazena na webovém serveru, kam jsou zasílána v rámci MQTT komunikace.

## Abstract

The aim of this work was to construct an electronically controlled beehive. A crucial element of the project was to conduct thorough research on existing IoT and other electronic solutions used in beekeeping. It was essential to analyze the available hardware and software technologies that could be applied to the given issue and select those most suitable for this purpose.

Based on the acquired knowledge, individual parts of the beehive were designed and manufactured using a 3D printer. These parts were specially modified to enable the integration of various sensors. An integral part of the solution is also the ventilation system and the custom design of motorized beekeeping frames, which allow for automatic honey collection. Sensor outputs and other data needed to inform the beekeeper about the colony's status are displayed on a web server, to which they are sent via MQTT communication.

## Klíčová slova

autonomie, IoT, včelí úl, včelařství, samosběr medu, 3D tisk, Arduino, senzory, webový server, monitorování včelstva, ThingsBoard

## Keywords

autonomy, IoT, beehive, beekeeping, self-collection of honey, 3D printing, Arduino, sensors, web server, bee colony monitoring, ThingsBoard

## Citace

VÁCLAVIČ, Jiří. *Autonomní úl*. Brno, 2024. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce doc. RNDr. Pavel Smrž, Ph.D.

# Autonomní úl

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana doc. RNDr. Pavla Smrže, Ph.D. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....  
Jiří Václavič  
17. května 2024

## Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce, panu doc. RNDr. Pavlu Smržovi, Ph.D., za odbornou konzultaci při realizaci této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat svému otci, Jiřímu Václavičovi, za jeho odborné rady v oblasti včelařství.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Existující řešení moderního včelařství</b>	<b>7</b>
2.1	Princip včelího úlu . . . . .	7
2.2	Monitoring a analýza chování včelstva systémem Beemon . . . . .	8
2.3	Automatizované sledování aktivity včelstva . . . . .	10
2.4	Nízkorozpočtové monitorování včelstva . . . . .	11
2.5	SCADA systém . . . . .	12
2.6	SEM systém . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Technologie využívané v IoT</b>	<b>14</b>
3.1	Protokol MQTT . . . . .	14
3.2	Protokol CoAP . . . . .	15
3.3	Protokol HTTP . . . . .	16
3.4	ThingsBoard . . . . .	16
3.5	3D tisk . . . . .	18
3.6	Modelářské motory . . . . .	20
3.7	Krokové motory . . . . .	22
3.8	Lineární aktuátor . . . . .	23
3.9	Arduino Uno . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Analýza současného stavu a návrh řešení</b>	<b>26</b>
4.1	Analýza systému Beemon . . . . .	26
4.2	Analýza systému Beehive observation . . . . .	27
4.3	Stanovení podcílů práce . . . . .	27
4.4	Srovnání filamentů . . . . .	28
4.5	Návrh řešení . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Implementace</b>	<b>34</b>
5.1	Vytváření modelů a 3D tisk . . . . .	34
5.2	Síťová komunikace . . . . .	40
5.3	Firmware mikrokontroléru Arduino Uno . . . . .	40
5.4	Nastavení upozornění pomocí Rule chain . . . . .	42
5.5	Grafické uživatelské rozhraní . . . . .	45
<b>6</b>	<b>Testování systému</b>	<b>46</b>
6.1	Testy jednotlivých částí úlu . . . . .	46

6.2	Celkový test funkčnosti úlu . . . . .	48
6.3	Shrnutí všech provedených experimentů . . . . .	50
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>51</b>
	<b>Literatura</b>	<b>52</b>
<b>A</b>	<b>Zapojení elektrického obvodu úlu</b>	<b>56</b>

# Seznam obrázků

2.1	Langstrothův úl . . . . .	8
2.2	Systém Beemon . . . . .	9
2.3	Struktura systému pro automatizované sledování včelstva . . . . .	10
2.4	Blokové schéma implementace alertu a komunikace . . . . .	12
3.1	Srovnání komunikačních modelů MQTT a CoAP . . . . .	16
3.2	Schéma systému platformy Thingsboard . . . . .	17
3.3	Schéma Thingsboard Rule Engine . . . . .	18
3.4	Popis částí FDM 3D tiskárny . . . . .	19
3.5	Princip SLA 3D tiskárny . . . . .	20
3.6	Popis servomotoru . . . . .	21
3.7	Popis částí krokového motoru . . . . .	22
3.8	Popis částí lineárního aktuátoru . . . . .	23
3.9	Popis mikrokontroléru Arduino Uno . . . . .	25
4.1	Blokové schéma práce . . . . .	28
4.2	Změna krystalové mřížky PLA během procesu žíhání . . . . .	30
4.3	Grafické uživatelské rozhraní. . . . .	33
5.1	Prvotní design úlu vytvořený ve Fusion 360 . . . . .	34
5.2	Finální vzhled vyrobeného úlu . . . . .	34
5.3	3D tisk části úlu na tiskárně Prusa MK3S . . . . .	35
5.4	Znázornění mechanismu vyrobeného aktuátoru . . . . .	36
5.5	Pájení Schottkyho diody ke spínači . . . . .	36
5.6	Průřez reálnou včelí pláští . . . . .	36
5.7	Průřez pláště vyrobené na 3D tiskárně . . . . .	36
5.8	Prvotní design rámků s pláští obsahující vysunující se lamely v každé komoře. . . . .	37
5.9	Prvotní design rámků vytisknutý na 3D tiskárně osazený lineárním aktuátorem se servomotorem. . . . .	37
5.10	Finální design rámků a pláště obsahující vysunující se středovou stěnu. . . . .	37
5.11	Finální design rámků vytisknutý na 3D tiskárně osazený lineárním aktuátorem s krokovým motorem. . . . .	37
5.12	Průřez boxem pro účely vizualizace odtokové komory . . . . .	38
5.13	Nástavek vyrobený na 3D tiskárně osazený motorizovanými pláštvi. . . . .	38
5.14	Model nástavku medník. . . . .	38
5.15	Nástavek medník vyrobený na 3D tiskárně. . . . .	38
5.16	Model nástavku plodiště. . . . .	39
5.17	Nástavek plodiště vyrobený na 3D tiskárně. . . . .	39
5.18	Model ventilačního nástavku . . . . .	39

5.19	Ventilační nástavek vyrobený na 3D tiskárně . . . . .	39
5.20	Model mateří mřížky . . . . .	39
5.21	Mateří mřížka vyrobená na 3D tiskárně . . . . .	39
5.22	Sekvenční diagram algoritmu pro mikrokontrolér . . . . .	42
5.23	Root chain . . . . .	43
5.24	Weight chain . . . . .	43
5.25	Temperature chain . . . . .	44
5.26	Humidity chain . . . . .	44
5.27	Voltage chain . . . . .	44
5.28	Grafické uživatelské rozhraní . . . . .	45
6.1	Vzniklé kritické události . . . . .	50
A.1	schema-elektroniky . . . . .	57



# Kapitola 1

## Úvod

Včela medonosná je jedním z nejdůležitějších druhů hmyzu na naší planetě. Opylování květů je nezbytné pro správný růst a vývoj flóry, a tedy i zachování života tak, jak jej známe. Včelí produkt, med je navíc pro svou chuť a zdravotní benefity konzumován lidmi stále ve větším množství. V současnosti je tedy velký tlak společnosti na zvýšenou produkci medu, aby byla uspokojena poptávka. Z tohoto důvodu se často stává, že včelaři nenechávají v plástvech nutné množství medu na přežití včelstva, a proto je následně musí dokrmovat pomocí cukru a jiných potravin, které však v dlouhodobém hledisku oslabují samotné organismy včel. Globální oteplování a další vnější faktory negativně ovlivňují přirozený ekosystém, což vede k tomu, že stále více včel podléhá nemocem a různým škůdcům, jako jsou varroáza, virové nákazy, včelí mor a podobně. Je nezbytné, aby včely byly více chráněny a byly vyvíjeny nové systémy poskytující elektronickou podporu včelařům. Včelařství je velice rigidní a mnozí včelaři si neuvědomují, že doba se mění, a proto je nezbytné, aby byly i včely na tuto změnu připraveny.

Cílem této práce je zkonstruovat autonomní úl, který se liší od komerčních řešení nižší cenou a jednoduchostí výroby. Úl bude vybaven elektronicky řízenou ventilací a systémem pro samosklizeň medu, což minimalizuje zásahy do prostředí včelí kolonie a sníží stresový faktor vyvolaný přímým kontaktem člověka s úlem.

V rámci tohoto projektu je do úlu umístěna řada senzorů, kdy je zároveň jejich výstup vizualizován ve webovém rozhraní, kde má včelař k dispozici všechny potřebné informace o stavu kolonie a není potřeba, aby musel provádět tak velký počet fyzických inspekcí úlu, jako tomu bylo doposud. Princip sběru medu je zcela inovován, kdy díky dvěma krokovým motorům a 3D tisku je vytvořen rámek se zabudovanou plaství, která umožňuje elektronicky řízené sklizení medu bez nutnosti vyjmutí samotných pláství.

Mou motivací k výběru a vypracování této práce byla záliba v 3D tisku, servomotorech, mikrokontrolérech a fascinace včelím světem. Mým osobním cílem bylo vytvořit unikátní projekt spojující dva na první pohled odlišné, ale pro mě zcela fascinující obory - informační technologie a včelařství. V tomto spojení jsem viděl obrovský potenciál pro inovaci tradičních včelařských procesů.

Dílčí kapitoly jsou vhodně členěny, aby byl čtenář seznámen se všemi pojmy a technologiemi předtím, než budou použity v rámci návrhu a implementace samotného úlu v navazujících kapitolách. Kapitola 2 se zabývá moderním včelařstvím a existujícími řešeními využívajícími IoT technologie. Kapitola 3 se věnuje 3D tisku, IoT technologiím, webovým serverům, senzorům a mikrokontrolérům. V kapitole 4 je provedena analýza existujících řešení, stanoveny cíle práce a parametry řešení. Kapitola 5 popisuje implementaci, při níž je zhotovena konstrukce úlu a následně je naprogramována a vytvořena softwarová část

řešení. Úl je jako celek uveden do provozu a v kapitole 6 jsou provedeny testy jednotlivých funkcionalit. Kapitola 7 shrnuje výsledky práce a uvádí možnosti jejího budoucího vývoje.

Postup práce byl konzultován s mým otcem, Jiřím Václavičem, odborníkem na včelařství.

## Kapitola 2

# Existující řešení moderního včelařství

V této kapitole je představen princip aktuálně nejpopulárnějšího designu včelího úlu typu Langstroth [8]. Většina stávajících včelařských IoT řešení je založena právě na tomto designu. Klíčovou částí kapitoly je detailní rešerše těchto projektů. Vzhledem k tomu, že v současné době existuje jen omezený počet řešení specificky zaměřených na včelařství, jsou zde zmíněny i projekty, které využívají IoT technologie a řešení, ale včelařství se nevěnují.

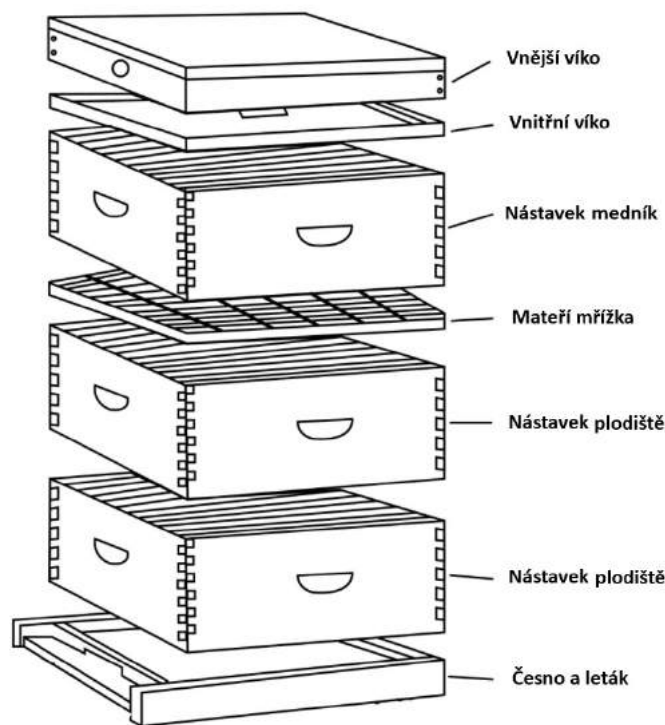
### 2.1 Princip včelího úlu

Včelaři používají různé nástroje a vybavení k péči o svá včelstva. Mezi klíčové nástroje patří včelí úly, které mohou být vyrobeny ze dřeva, plastu nebo polystyrenu, a existují různé typy, nejznámější je Langstrothův úl a Warreův úl [48]. Tyto dva základní koncepty jsou modulární, kdy je možné koupit nebo vyrobit pouze nezbytné části úlu a v budoucnu navyšovat jeho kapacity rozšiřováním jeho velikosti o další komponenty. Nejdůležitější částí úlu jsou tzv. nástavky, které se dají popsat jako boxy s volným prostorem uvnitř, které mají mezery ve spodní části, aby umožňovaly průchod samotných včel viz obrázek 2.1. Nástavky jsou obvykle 457 mm široké a 228 mm hluboké. Nástavky se dělí na dva hlavní druhy, medník a plodiště. Do medníku se vkládají jednotlivé rámky na nichž si včely dělnice budují své plástve a ukládají do nich med. V plodišti si včely také budují plástve, ale královna zde poté snaší vajíčka, ze kterých se líhne další generace včel. Aby královna nekladla vajíčka i v medníku, je využit oddělovač tzv. mateří mřížka. Mřížka znemožňuje královně vstup do vyšších pater úlu, jelikož královna jako jediná ze včel dosahuje téměř dvojnásobných rozměrů (24 cm) oproti rozměrům ostatních včel (11-14 cm).

Další podstatnou komponentou úlu je česno, což je část vyvýšená od země, která slouží jako ochrana proti pozemním škůdcům, stejně jako proti zimě a vlhkosti. Leták představuje část úlu, z níž včely vylétávají do okolí, nebo na ni přilétávají po sběru pylu a nektaru.

---

<sup>1</sup>Obrázek převzat z: [https://geelongbeekeepersclub.org.au/edit/images/langstroth\\_hive.png](https://geelongbeekeepersclub.org.au/edit/images/langstroth_hive.png)



Obrázek 2.1: Langstrothův úl<sup>1</sup>

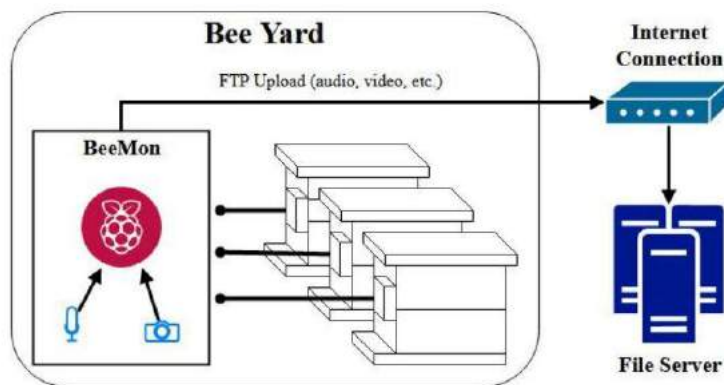
## 2.2 Monitoring a analýza chování včelstva systémem Beemon

Projekt Beemon [40] cílí na monitoring a analýzu aktivit ve včelích úlech pomocí kombinace hardwarových a softwarových komponent. Zaměřuje se na sběr dat z úlů, včetně videa, zvuku, teploty, vlhkosti a hmotnosti za účelem posouzení zdravotního stavu a chování včelích kolonií. Beemon kombinuje různé prvky, včetně hardwarových senzorů, softwaru (Py-Beemon), analýzy videa (BeeVee), analýzy zvuku (BeePhon) a nástrojů pro vizualizaci dat (BeeViz). Projekt také poskytuje monitorovací a výstražné informace v reálném čase prostřednictvím IoT dashboard. Jedním z hlavních cílů Beemonu je identifikace klíčových ukazatelů pro hodnocení zdraví včelího úlu na základě analýzy zvuků a videa.

Beemon využívá hardware, jako je Raspberry Pi, kameru, senzor teploty, vlhkosti a USB mikrofón, pro sběr dat a analýzu v reálném čase. Tento projekt zahrnuje metody strojového učení, jako jsou konvoluční neuronové sítě k analýze zvuků včel a jejich odlišení od pozadí. Důležitým aspektem projektu je také komunikace dat, která zahrnuje použití protokolu MQTT pro přenos nenáročných dat na IoT dashboard.

Beemon také umožňuje živý přenos videa a audia z úlů a poskytuje uživatelům přístup k archivovaným video a zvukovým souborům. Projekt má za cíl pomoci včelařům sledovat a porozumět chování jejich včelstev a získávat klíčové indikátory zdraví úlů. Tento interdisciplinární projekt spojuje prvky technologie, biologie a analýzy dat, aby podpořil péči o včely a podporu včelařství.

<sup>2</sup>Obrázek převzat z: [https://www.researchgate.net/figure/Beemon-Honey-Bee-Monitoring-System\\_fig1\\_339766390](https://www.researchgate.net/figure/Beemon-Honey-Bee-Monitoring-System_fig1_339766390)



Obrázek 2.2: Přenos dat v systému Beemon<sup>2</sup>.

První prototyp tohoto projektu vznikl jako diplomová práce [12], která řešila návrh systému s cílem automatizovat monitorovací procesy včelích úlů. Autor této práce chtěl přispět ke snížení ztrát včelí populace. Diplomová práce obsahovala přehled existujících pokusů o automatizaci monitorování včelích úlů a zdůrazňovala význam senzorického a kamerového snímání včelí aktivity. Tento způsob umožňoval minimalizovat narušení včelího prostředí lidským faktorem a umožňoval škálovatelnost celého systému.

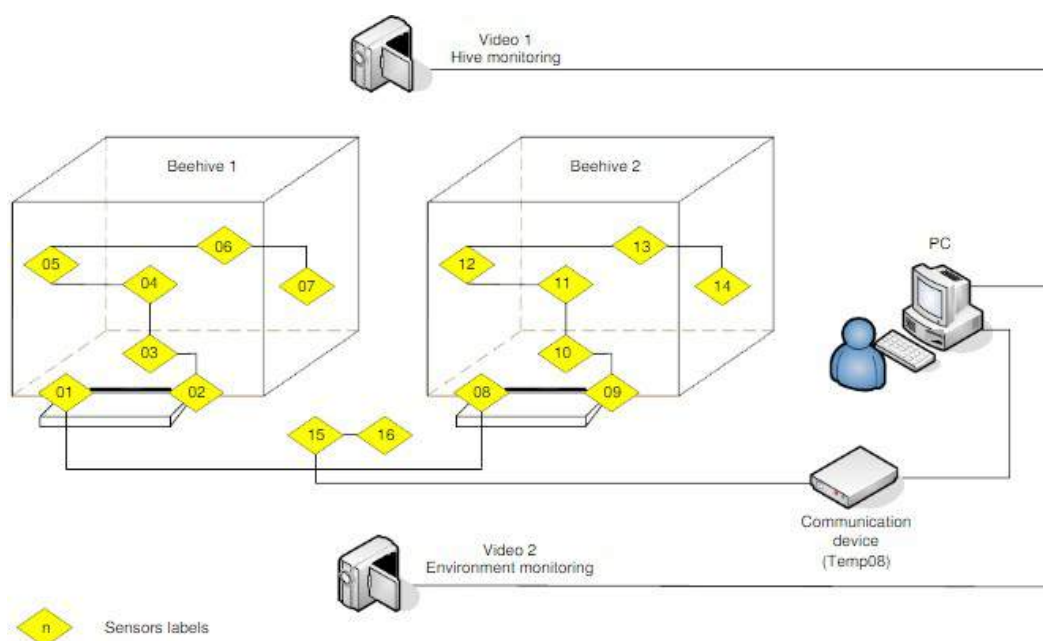
Dřívější metody monitorování včelích populací spočívaly v manuálním sčítání a označování včel pomocí lidského personálu, což bylo náročné a nepřesné. Tato práce ukazuje, že senzorické a kamerové snímání umožňuje efektivnější a přesnější sběr dat o včelích aktivitách, a to i ve velkém měřítku.

Práce se také zaměřuje na specifický problém spojený s periodickým zaznamenáváním zvukových nahrávek včel, který vychází z omezené kapacity paměti RAM. Autor tento problém řešil implementací dvou úrovní vyrovnávací paměti, přičemž první úroveň byla interní paměť čipu mikrokontroléru ATmega328P a druhá úroveň zahrnovala dva SRAM čipy synchronizované prostřednictvím multiplexorů a řídicích linek. Avšak autor uvádí, že toto řešení bylo provázeno významnou režií, což mělo za následek zpomalení přenosu dat. Vzhledem k omezeným zdrojům (časovým a finančním) není v současné době možné provést nějaké zlepšení hardwaru, které by tento specifický problém efektivně řešilo. Autor však naznačuje, že by tuto možnost rád prozkoumal v budoucnosti.

Dále se práce také věnuje problematice časování v Linuxu a jeho dopadu na interakci s nízkoúrovňovým hardwarem. Linux umožňuje usnutí procesu s pomocí systémového volání *nanosleep*, ale minimální čas spánku je závislý na hardware a nastavení jádra Linuxu. V operačním systému Raspbian, který běží na mikrokontroléru Raspberry Pi, byla minimální doba spánku kolem 150  $\mu$ s, což byla doba, které nevyhovovala všem sensorům. Možným řešením byla implementace *busy waiting*, která však výrazně zatížila CPU a omezila multitasking. Instalace opraveného jádra Linuxu pro *real-time* aplikace zlepšila minimální dobu spánku na přibližně 100  $\mu$ s, avšak chování tohoto jádra nebylo zcela stabilní a délka doby spánku byla opět pro některé senzory nedostatečná. Proto se autor zaměřil na použití mikrokontrolérů pro sběr dat od sensorů a přenos těchto dat na Raspberry Pi pomocí standardních protokolů jako UART nebo SPI, což umožňuje provádět časově citlivé operace mimo hlavní CPU a operační systém Raspberry Pi.

## 2.3 Automatizované sledování aktivity včelstva

Projekt autorů Meitalovs a spol. [28] se zabývá vývojem systému pro pozorování úlů včel s cílem detekovat příznaky blížícího se rojení včelstva. Rojení včel je přirozený způsob množení včelstev, ale v průmyslovém včelařství, kde se množení kontroluje, může znamenat snížení zisků. Identifikace předrojového stavu včelstva je proto důležitá. Systém pozorování úlů se skládá z tří podsystémů: 1) řídicího podsystému, 2) měřícího podsystému (teplota a relativní vlhkost) a 3) videozáznamového podsystému, viz. obrázek č. 2.3. Video sledování vstupu úlu a okolí se aktivuje při detekci neobvyklých změn mikroklimatu, což umožňuje zjistit důvody těchto změn (rojení, přímé sluneční světlo, déšť, silný vítr, hluk nebo jiné faktory). Rojení je přirozeným způsobem množení včelstev, ale v průmyslovém včelařství je třeba



Obrázek 2.3: Struktura systému pro automatizované sledování včelstva

tuto aktivitu kontrolovat. Bohužel neexistují snadno rozpoznatelné známky předrojového stavu, které by byly viditelné pro včelaře bez otevření úlu. Proto je potřeba monitorovat mikroklimatické změny v úlu, které by mohly naznačovat blížící se rojení. Tyto změny mohou být způsobeny různými faktory, včetně interních (jako je předrojový stav) a externích (jako déšť, vítr, hluk). Systém sleduje mikroklimatické změny a aktivuje videozáznam při významných změnách, což umožňuje později zjistit důvody těchto změn.

Testy jsou provedeny na dvou úlech umístěných v Lotyšsku. Systém dokázal zachytit změny teploty a vlhkosti v úlech i pod nimi a sledovat chování včel během dne. Při testování nedošlo k rojení, což značí dobré podmínky uvnitř úlu. Systém ukázal svoji schopnost detekovat změny mikroklimatu a reagovat na ně. Systém se ukázal jako replikovatelný, a proto může být umístěn na více úlů a poskytovat včelařům informace o stavu jejich včelstev.

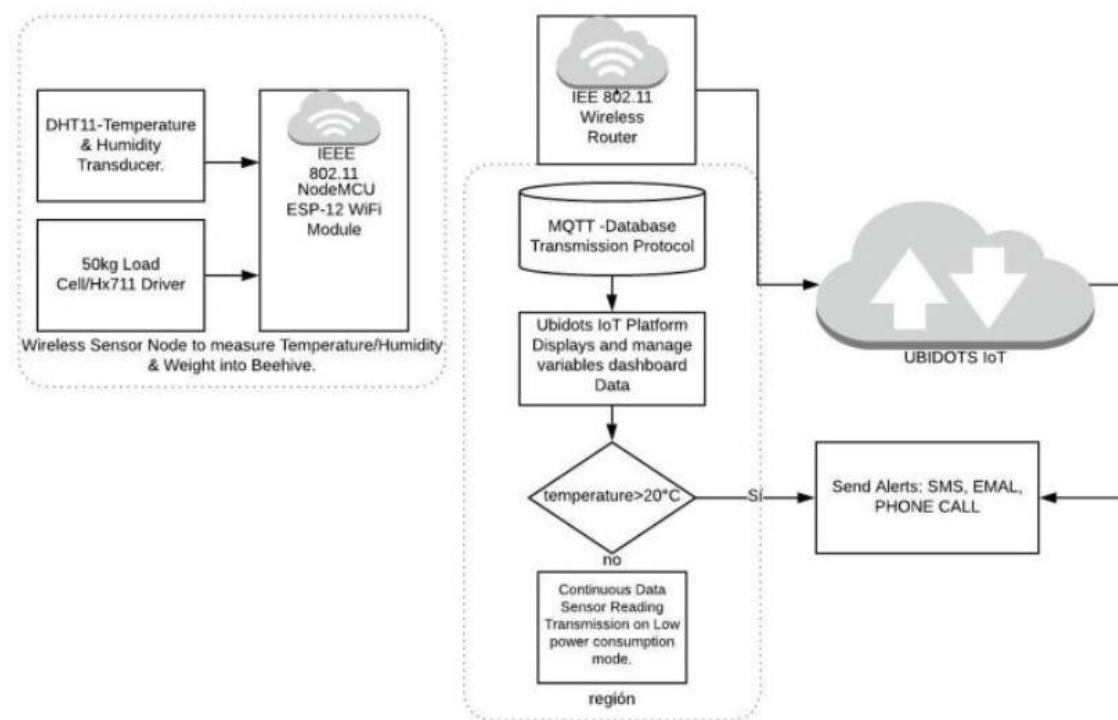
## 2.4 Nízkorozpočtové monitorování včelstva

Záměr autorů projektu [30] Isidro Zavaleta a spol. bylo vytvořit levné IoT zařízení, které by poskytovalo digitální podporu včelařství. Úvádějí pojem tzv. *Precision Beekeeping*, který se soustředí na monitoring včelí kolonie, redukci spotřeby zdrojů a maximalizaci produktivity. Tento novodobý trend je důležitý zejména, kvůli neustále měnícím se přírodním podmínkám způsobenými globálním oteplováním, znečištěným prostředím a velkým množstvím pesticidů v půdě, které mění chemické složení a zejména organické vlastnosti rostlin, dle kterých se včely navigují a hledají květy k opylování. Existuje řada profesionálních IoT řešení na podporu *Precision Beekeeping*, ale jejich cena se pohybuje v řádech stovky dolarů (BuzzBox Mini, HM-5 Hive Monitor), a proto se autoři rozhodli sestavit obdobný systém za zlomek ceny, konkrétně za 17 \$.

Existuje mnoho fyzikálních veličin, které mohou mít vliv nad produkci a zdraví včelstva jako jsou elektromagnetismus, magnetismus, gravitace, světelné podmínky atd., avšak k těm úplně nejzákladnějším patří teplota a vlhkost [1]. Při měření těchto veličin je možné např. pouze na základě zjištění nižší teploty detekovat menší množství zásob jídla v úlu, což je důležité zejména v zimních obdobích. Díky teplotě se dá také zjistit začátek páření královny a tvorba nové generace včel nebo teplota může sloužit k indikaci možného počátku rojení, kdy včely mají větší pravděpodobnost, že úl opustí a naleznou si vhodnější místo pro život. Konstatní pokles teploty také může značit vymírání populace. Vlhkost slouží jako korelovaný faktor teplot, kdy je možné na základě vyšších (či naopak nižších) teplot, potvrdit či vyvrátit tezi, že včely mají vhodné podmínky pro život, a tedy nehrozí jejich stěhování se jinam.

Mimo tyto fyzikální vlastnosti, které je nutné udržovat ve stabilních mezích, kvůli životnosti kolonie, je vhodné také měřit hmotnost celého úlu či jeho jednotlivých částí. Z tohoto údaje lze vyčíst nejen např. množství medových zásob či denní množství sklizenného nektaru, ale dá se i dopočítat celková velikost včelí populace, která závisí na velikosti denního úbytku právě těchto zásob jídla. Tento faktor je relevantní zejména v zimním období, kdy včely nesbírají nektar a nemohou se krmit během sběru. Z hmotnosti se dá také odhadnout začátek hibernace či také vznik roje, kdy se včelstvo začíná rychleji reprodukovat a poté se zhruba polovina včelstva z kapacitních důvodů rozhodne společně s novou královnou odtrhnout od staré kolonie a najít nové útočiště. Z hmotnosti včel se dá zjistit, kolik včel vyrazilo ráno na sběr nektaru, a tedy se dá predikovat denní přírůstek zásob [30].

Autoři využívají DHT11 senzor pro měření teploty, vlhkosti a také využívají tenzometrické můstky s amplifikátorem Hx711. Data jsou čtena zařízením ESP8266 a posílána do cloudového rozhraní Ubidots, který využívá JSON notaci. Na diagramu 2.4 lze vidět, že pro připojení do sítě je využit modul ESP-12 WiFi s podporou standardu IEEE 802.11 a zasílání dat je řízeno pomocí MQTT protokolu. Je implementován alert, který hlásí zda teplota klesla pod 20 °C, což informuje včelaře o vzniku abnormality v úlu.



Obrázek 2.4: Blokové schéma implementace alertu a komunikace

## 2.5 SCADA systém

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) [5][44] je systém, který umožňuje monitorování a řízení průmyslových procesů v reálném čase. Jeho hlavním cílem je poskytovat operátorům a inženýrům přehled o stavu a chodu zařízení, infrastruktury nebo celých systémů, aby mohli provádět potřebné úkony a rozhodnutí pro efektivní provoz a optimalizaci.

Vzhledem k tomu, že hlavním účelem této práce bylo zvýšit efektivitu a optimalizovat procesy ve včelařství prostřednictvím začlenění monitorovacích funkcí do včelího úlu, bylo nezbytné provést studii prací zabývajících se touto SCADA problematikou.

Jedna z odnoží této architektury s názvem IoT-SCADA využívá zejména IoT technologie při realizaci systému. Skládá se ze čtyř klíčových prvků. Prvním z nich jsou datové kolektory (senzory), které slouží k sběru dat. Druhým prvkem jsou RTUs (Remote Terminal Units), které sbírají a zpracovávají data ze senzorů. Třetím prvkem jsou MTUs (Master Terminal Units), což jsou IoT servery a platformy pro komunikaci s člověkem (human-machine komunikace). Posledním prvkem je mediátor, který je nezbytný pro komunikaci mezi RTUs a MTUs.

V článku autorů Lawrence O. Aghenta a M. Tariq Iqbal [3] je popsán způsob implementace Iot-based SCADA systému, který využívá ESP32 s OLED displejem pro vizualizaci dat senzorů. Systém je navržen ve dvou konfiguracích. V konfiguraci A je využito Raspberry Pi 2, které slouží jako MQTT Broker, který je implementován pomocí ThingsBoard aplikace pro IoT server. Mikrokontrolér je připojen k síti pomocí Ethernetového kabelu a umožňuje autorizovaným uživatelům v síti přistupovat k datům v databázi a zobrazovat je prostřednictvím speciálního serveru. Nicméně, tím, že je port tohoto serveru otevřený i pro celou



internetovou sítí, existuje riziko, že neautorizovaní uživatelé by mohli přistupovat k datům zvenčí.

Ve druhé konfiguraci se veřejný internet nepoužívá. Místo toho je vytvořena vlastní průmyslová síť pomocí Wi-Fi routeru. Pouze autorizovaní uživatelé v blízkosti mohou přistupovat k datům na serveru, který je připojen k tomuto routeru. Tímto způsobem se zabráňuje přístupu neautorizovaných osob k datům, což zvyšuje bezpečnost systému.

Hlavním záměrem autora bylo naprogramovat, nakonfigurovat hardwarové komponenty pro provoz a jejich propojení se solárním fotovoltaickým systémem v laboratoři MUN ECE. Realizace byla úspěšná díky analogovým sensorům a zařízení ESP32 OLED, které jsou připojeny k solárnímu fotovoltaickému systému a k platformě ThingsBoard IoT pro monitorování dat v reálném čase a řídicí akce. Lokální monitorování provozovatele dat z fotovoltaického systému je součástí navrženého SCADA řešení, umožněné pomocí obrazovky ESP32 OLED.

## 2.6 SEM systém

SEM (Smart Environment Monitoring) [17] je systém či soubor technologií určených k monitorování, analýze a řízení různých environmentálních parametrů a podmínek. Tyto systémy jsou klíčové pro efektivní správu a ochranu životního prostředí, zlepšení udržitelnosti a minimalizaci negativních dopadů na přírodní ekosystémy.

V článku autorů Silvia Liberata Ullo a G. R. Sinha [43] je mimo sensor kvality vzduchu, vody apod. zmíněn sensor teploty a vlhkosti jako jeden z nejpodstatnějších. Tento sensor slouží k monitorování mikroklimatických podmínek, jež mají významný vliv na různé aspekty životního prostředí a zemědělství. Tyto senzory umožňují sledování a zaznamenávání změn teploty a vlhkosti, což je zásadní pro pochopení a reakci na klimatické změny. V zemědělství například umožňují farmářům přizpůsobit zavlažovací systémy a plánování sklizní podle aktuálních podmínek, což maximalizuje úrodu a zefektivňuje využití zdrojů. V urbanistickém kontextu pomáhají tato data při plánování a řízení urbanistických prostorů tak, aby bylo možné lépe řídit vnitřní klima budov a zvyšovat celkovou pohodu obyvatel.

Senzory teploty a vlhkosti v systémech monitorování životního prostředí často využívají specifické komunikační protokoly a standardy pro optimalizaci sběru dat a jejich přenosu. Tyto senzory jsou obvykle propojeny s centrálními systémy prostřednictvím bezdrátových technologií jako je Zigbee nebo LoRaWAN, které umožňují efektivní a energeticky úsporný přenos dat na velké vzdálenosti. Protokol MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) je další běžně využívaný standard, který poskytuje lehký a efektivní mechanismus pro komunikaci mezi IoT zařízeními a serverem, což je klíčové pro real-time monitorování a analýzu dat. Tyto technologické aspekty umožňují sensorům nejen pasivní zaznamenávání teploty a vlhkosti, ale také aktivní reakce na změny prostřednictvím automatizovaných systémů, jako jsou systémy správy budov (BMS), které přizpůsobují vnitřní klimatické podmínky v reálném čase, čímž zvyšují efektivitu energetického využití a komfort obyvatel.

## Kapitola 3

# Technologie využívané v IoT

Termín *Internet věcí* (IoT) dosud nemá jednoznačnou definici, protože jde o relativně nový a dynamicky se rozvíjející obor informačních technologií, kde stále převládá nedostatek standardizace a normativních pravidel. Přibližně lze IoT definovat jako síť propojených výpočetních zařízení, senzorů a objektů, které mezi sebou komunikují a zpracovávají data s minimální lidskou intervencí [7].

V rámci této práce bude koncept IoT chápán jako síťové spojení senzorů měřících teplotu, vlhkost, tenzometrické hodnoty, řídicího systému ventilace a motorů. Tyto prvky budou vzájemně komunikovat a na základě přijatých informací provádět tři základní úkoly: sběr měř. dat, řízení ventilace a prezentace dat na webovém rozhraní.

Pro efektivní přenos dat je důležité vybrat vhodný komunikační protokol, jako jsou MQTT, CoAP a HTTP [47]. Rovněž je klíčové zvolit vhodné hardwarové komponenty, včetně senzorů, motorů, serveru, databáze a webového rozhraní. Tato kapitola představí konkrétní technologie, které budou dále analyzovány v kapitole 4 za účelem výběru nejvhodnějších pro finální implementaci projektu.

### 3.1 Protokol MQTT

Účelem protokolu Message Queue Telemetry Transport (MQTT) [39] je zprostředkovat komunikaci mezi aplikacemi a middleware na jedné straně a sítěmi a komunikačními prostředky na straně druhé.

Tento protokol je navržen tak, aby umožňoval efektivní komunikaci s omezenou šířkou pásma, což je ideální pro zařízení s nízkým výpočetním výkonem, nespolehlivým připojením a nízkou spotřebou elektrické energie.

Klíčovým prvkem architektury je *publish/subscribe* model, který umožňuje filtrovat jednotlivé informace dle témat a potřeb.

V kontextu Internetu věcí (IoT) jsou *publishers* koncové senzory, které se připojují k *broker* aplikaci a odesílají data v pravidelných časových intervalech, přičemž v mezech přecházejí do režimu spánku pro úsporu energie. *Subscribers*, neboli odběratelé, jsou aplikace, které mají zájem o konkrétní senzorická data a připojují se k *broker* aplikaci, aby obdržely nově přichozí data. Témata jsou reprezentována hierarchicky strukturovanými řetězci, což umožňuje efektivní filtrování informací.

Zabezpečení MQTT je převážně realizováno na úrovni *broker* aplikací, které mohou od klientů vyžadovat certifikáty nebo ověření pomocí uživatelského jména a hesla pro ustanovení připojení. Na transportní vrstvě je využíván protokol TCP [24], který funguje na bázi

klient-server, kde musí být každá příchozí zpráva potvrzena. TCP spojení může být dále šifrováno pomocí SSL/TLS, které využívá asymetrické šifrování.

## 3.2 Protokol CoAP

Constrained Application Protocol (CoAP) [37] je webový přenosový standard speciálně navržený pro použití v prostředích s omezenými zdroji, jako jsou nízkopříkonové nebo ztrátové sítě. Tento protokol je primárně určen pro aplikace stroj-stroj (M2M), jako jsou například chytré energeticky úsporné systémy, které automatizují základní operace.

CoAP poskytuje komunikační model *request/response*, který je koncipován, aby umožnil snadnou integraci do webového prostředí. Protokol má jednoduché rozhraní založené na HTTP a využívá RESTful model webové architektury.

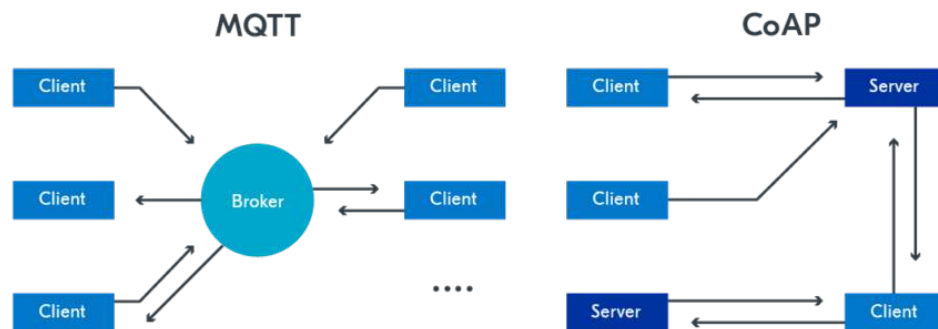
Representational State Transfer (REST) [35] obsahuje soubor základních pravidel nutných pro vývoj webových aplikací. Tato pravidla se soustředí na správu a přenos stavů systémových zdrojů.

Hlavními principy REST architektury jsou:

- **Klient-server architektura** - Oddělení zodpovědnosti mezi klientem, který se nezabývá ukládáním dat, a serverem, který neřeší uživatelské rozhraní.
- **Bezstavovost** - Každá žádost od klienta musí být samostatná a obsahovat všechny potřebné informace pro její zpracování. Stav relace je udržován na straně klienta.
- **Ukládání do cache** - Odpovědi mohou být označeny pro možnost ukládání do mezipaměti, buď implicitně nebo explicitně.
- **Systém vrstev** - Klient nemusí být schopen rozlišit, zda je připojen přímo k serveru nebo prostřednictvím proxy.
- **Jednotné rozhraní** - Zdroje jsou specifikovány v požadavcích, obvykle pomocí URI.

Služby, které dodržují tyto principy, jsou označovány jako RESTful [36]. Tyto služby používají standardní HTTP metody jako *GET* pro načítání zdrojů, *POST* pro jejich vkládání, *PUT* pro aktualizaci a *DELETE* pro odstranění. Typ média se vždy musí definovat přímo v HTTP hlavičce pro správné zpracování dat.

CoAP lze přirovnat k lehkému a rychlému HTTP protokolu, přičemž se liší tím, že funguje nad protokolem UDP (User Datagram Protocol) namísto TCP (Transmission Control Protocol). CoAP pakety jsou výrazně menší a tím jsou tedy i toky dat výrazně rychlejší. Přestože bylo zmíněno mnoho pozitivních vlastností, CoAP není zamýšlen jako náhrada za HTTP. Naopak, tento protokol představuje druhotnou verzi HTTP, která je speciálně optimalizována pro konkrétní potřeby IoT zařízení.



Obrázek 3.1: Srovnání komunikačních modelů MQTT a CoAP

### 3.3 Protokol HTTP

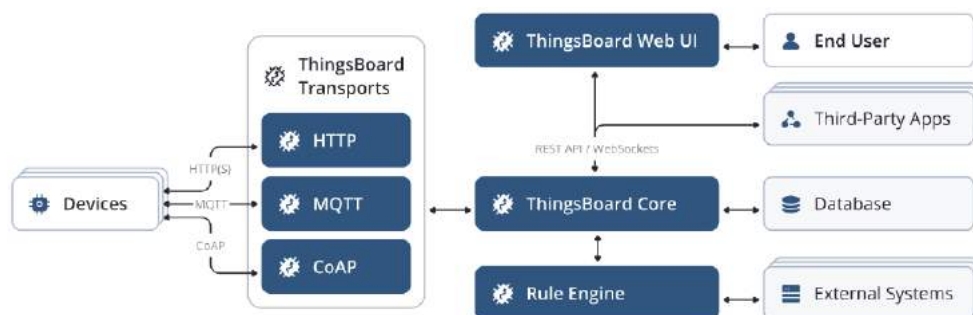
HyperText Transfer Protocol (HTTP) [27][15] byl vyvinut jako součást World Wide Web pro účely přenosu dokumentů. HTTP funguje na principu modelu *request/response* (žádost/odpověď), založeného na architektuře *klient/server*, kde webové prohlížeče, roboti a vyhledávače vystupují jako klienti, zatímco webový server představuje server. Klienti mohou přistupovat k datům uloženým na serverech prostřednictvím URL adres, které slouží k podávání žádostí typu *GET*, *PUT*, *DELETE*, *POST* a dalších. HTTP je charakterizován několika základními vlastnostmi, protokol je multiplatformní a během inicializační fáze vyžaduje specifikaci komunikačního formátu v MIME (Multipurpose Internet Mail Extensions) v hlavičce zprávy. HTTP je bezstavový protokol, což znamená, že jednotlivé požadavky jsou nezávislé a server neuchovává informace o historii předchozích požadavků. Tato charakteristika minimalizuje požadavky na ukládání dat na serveru a umožňuje, aby každá interakce začínala bez předchozí historie. To znamená, že každý nový požadavek je považován za samostatný a vyžaduje nové připojení.

Přestože HTTP poskytuje robustní základ pro webovou komunikaci, jeho bezstavovost a absence pokročilých funkcí jako jsou fronty, QoS (Quality of Service), persistentní zprávy a asynchronní odesílání, které jsou k dispozici v MQTT, činí HTTP méně vhodným pro aplikace v Internetu věcí (IoT). Tato omezení ztěžují použití HTTP pro scénáře, kde je vyžadována vyšší spolehlivost komunikace a schopnost efektivně zpracovávat aktualizace dat z mnoha zařízení v reálném čase.

### 3.4 ThingsBoard

ThingsBoard [41] je rozsáhlá open-source platforma pro správu a kontrolu dat v rámci Internetu věcí (IoT) viz schéma 3.2. Tato platforma je navržena tak, aby umožňovala efektivní sběr, zpracování, vizualizaci a správu dat. Využití ThingsBoard usnadňuje tvorbu inteligentních aplikací a automatizačních procesů, které jsou nezbytné pro úspěšnou implementaci různorodých scénářů v oblasti Internetu věcí (IoT).

<sup>1</sup>Obrázek převzat z: <https://2021.desosa.nl/projects/thingsboard/posts/4.-distribution/>



Obrázek 3.2: Schéma komunikace s platformou ThingsBoard<sup>1</sup>.

Z hlediska technologické infrastruktury je ThingsBoard postaven na Java 8 a podporuje širokou škálu standardních IoT protokolů, jako jsou MQTT, CoAP a HTTP. Platforma je kompatibilní s různými typy databází, včetně SQL, NoSQL a hybridních databází, což umožňuje uživatelům velkou míru flexibility při volbě ukládání dat. Tato variabilita je zásadní pro adaptabilitu platformy v různých aplikačních doménách.

Zásadním prvkem ThingsBoard jsou entity, které zahrnují zařízení, zdroje, uživatele, alarmy a další. Tyto entity jsou centralizovaně spravovány a ukládány v databázích, což zjednodušuje jejich správu a integraci. Telemetrická data, klíčový prvek pro IoT systémy, jsou ukládána ve formě časových řad. Tato data obsahují nejen atributy a statistiky, ale i časové řady sensorových odečtů a události, což je nepostradatelné pro monitorování a analýzu stavu zařízení.

V oblasti cenové politiky nabízí ThingsBoard dvě hlavní edice<sup>2</sup>: komunitní edici a profesionální edici. Komunitní edice je zdarma, open-source a je dostupná na oficiálních stránkách ThingsBoard a na platformě GitHub. Tato edice je ideální pro vývojáře a organizace, které chtějí testovat nebo implementovat základní IoT řešení bez počátečních investic.

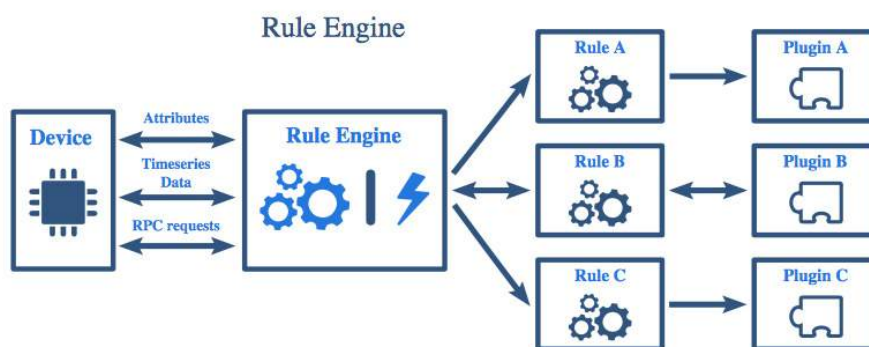
Profesionální edice přináší rozšířené funkce a je určena pro podniky vyžadující pokročilé nástroje pro správu, lepší podporu a další prémiové funkce, které jsou kritické pro komerční nasazení. Cena profesionální edice závisí na požadovaném rozsahu služeb a specifikacích projektu. Uživatelé si mohou vybrat z několika cenových plánů, které jsou strukturovány tak, aby odpovídaly různým úrovním podnikání a provozním požadavkům.

Architektura ThingsBoard je navržena s ohledem na škálovatelnost, odolnost proti chybám a efektivitu. Díky kombinaci back-endu napsaného v Javě a mikro-slужeb na bázi Node.js, ThingsBoard poskytuje robustní a spolehlivé prostředí pro různorodé aplikace v oblasti IoT. Tento návrh umožňuje podnikům implementovat ThingsBoard na různé infrastruktury, od malých místních serverů po rozsáhlé cloudové platformy.

## Rule Engine

Rule Engine [11] je klíčovou komponentou platformy ThingsBoard, která se zaměřuje na správu a automatizaci dat v rámci prostředí Internetu věcí (IoT). Tento modul umožňuje uživatelům navrhovat a implementovat inteligentní scénáře a akce reagující na data získaná ze sensorů a IoT zařízení viz 3.3.

<sup>2</sup>Informace platné ke dni 4.3.2024 dle webových stránek Thingsboard: <https://thingsboard.io/pricing/>



Obrázek 3.3: Schéma komunikace s platformou ThingsBoard<sup>3</sup>.

Architektura Rule Engine zahrnuje Rule Nodes (pravidlové uzly) a Rule Chains (pravidlové řetězce), které společně umožňují uživatelům definovat a zpracovat příchozí zprávy podle specifické logiky, kterou si sami určí. Tento systém je vysoce konfigurovatelný, což umožňuje uživatelům přizpůsobit zpracování dat i velmi komplexním potřebám.

Rule Engine nabízí schopnost nastavovat podmínky a vykonávat akce na základě analyzovaných dat. Uživatelé mohou vytvářet složité logické vazby mezi daty a spouštět různé akce v reálném čase, jako jsou odesílání upozornění, změny stavu zařízení, aktivace externích služeb, nebo integrace s dalšími systémy.

Podpora rozličných datových formátů včetně JSON, CSV a XML umožňuje Rule Engine efektivně analyzovat a zpracovávat data z různých zdrojů. To poskytuje uživatelům schopnost rychle reagovat na definované události a podmínky.

Další předností Rule Engine je možnost naplánování úkolů, což umožňuje automatizaci akcí na základě časově specifikovaných nebo událostmi řízených podmínek. Tato flexibilita umožňuje uživatelům efektivní správu a kontrolu nad specifickými aspekty jejich IoT prostředí.

### 3.5 3D tisk

Různé technologie 3D tisku přinášejí jedinečné výhody a mají specifická omezení. Mezi nejčastěji využívané metody patří: Fused Deposition Modeling (FDM) nebo Fused Filament Fabrication (FFF), která je preferována 71 % firem provozujících tuto technologii interně [14]. Následuje Selective Laser Sintering (SLS), s 42 % uživatelů využívajících ji především jako externí službu. Stereolitografie (SLA), kdysi dominantní technologie, je postupně nahrazována modernějšími metodami, avšak stále si udržuje významné postavení na trhu.

#### Fused Deposition Modeling (FDM)

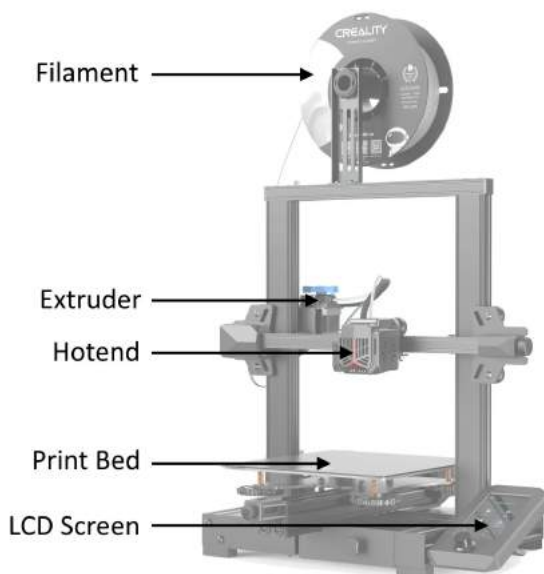
FDM [4][21] je jedním z nejpobulárnějších a nejrozšířenějších druhů 3D tisku. Tato metoda využívá termoplastické polymery, které jsou vloženy do tiskárny ve formě filamentu navytučeného na plastových cívkách. Materiál je pomocí krokového motoru v extruderu, vtlačen

<sup>3</sup>Obrázek převzat z: <https://www.researchgate.net/profile/Rute-Sofia/publication/337290669/figure/fig2/AS:825614097473536@1573853148041/Components-of-a-ThingsBoard-Rule-Engine-Module-2.ppm>

do Bowden trubice (Bowden tube), která ústí do žhavicí hlavy (hotend), kde dojde k roztavení materiálu a nanášení na zahřátou podložku. Jakmile je jedna vrstva dokončena, tak se žhavicí hlava posune o vzdálenost typicky 0,2 mm výše a tvoří se další vrstva než je dokončen celý výtisk, viz. obrázek 3.4.

FDM tisk je cenově dostupný, jednoduchý na pochopení a je vhodný na prototypování, malosériovou výrobu či slouží jako kutilská záliba.

Mezi výhody patří nízké náklady na pořízení tiskárny, široký výběr materiálů a relativně jednoduchá obsluha. Nicméně, povrchová kvalita výrobků, zejména u geometricky náročnějších a detailnějších objektů, je nižší než u velkovýroby vstřikovaným lisem nebo dalšími 3D tiskárny popsanými níže [4].



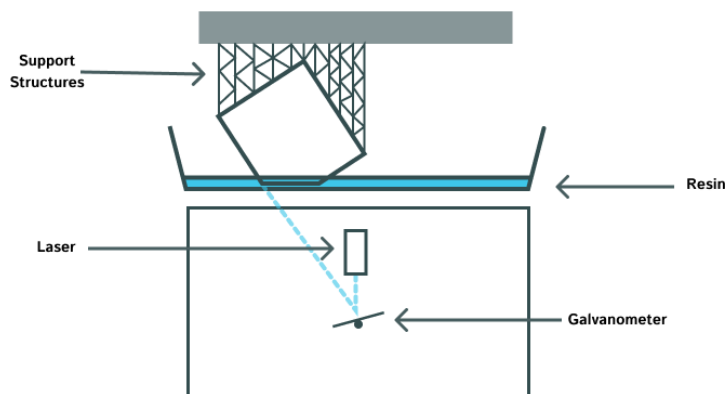
Obrázek 3.4: Popis částí FDM 3D tiskárny.

## Stereolithography (SLA)

SLA [4] je metoda 3D tisku, která využívá fotosenzitivní pryskyřice (Resin) a UV laseru k postupnému polymerizování materiálu. Tisková plocha je umístěna ve zkapalněné pryskyřici, které se při vytvrzení přilepí na podložku a následně se podložka u každé další vrstvy posune o pár milimetrů výš. Tento proces je opakován do té doby než je zhotoven celý objekt, který je u tohoto druhu tisku umístěn reverzně vůči centru gravitace 3.6. Tímto způsobem vytvořené modely často charakterizuje vysoká přesnost a hladký povrchem. SLA je často využívána při vytváření vzhledově dokonalých modelů sloužících zejména pro výstavní účely. Další využití je například v zubním průmyslu při výrobě protéz.

Přednosti SLA spočívají ve vysoké přesnosti, schopnosti vytvářet složité geometrické tvary a kvalitním povrchovém zpracování vytvořených objektů. Na druhou stranu náklady na pořízení a zejména výrobu pomocí SLA tiskárny jsou obvykle vyšší ve srovnání s FDM.

Novodobý výzkum technologie SLA ukázal [46], že se do ovzduší během tisku uvolňuje spousta těkavých organických sloučenin (VOC), které mohou být zdraví škodlivé. Celkové množství VOC bylo větší než u jiných typů 3D tisku, a některé z těchto látek mohou zůstat ve vzduchu i delší dobu po skončení tisku. Mezi hlavní emitované VOC patřily estery,



Obrázek 3.5: Princip SLA 3D tiskárny.

alkoholy, aldehydy, ketony, aromatické sloučeniny a uhlovodíky. Kvůli zdravotnímu riziku není tento druh tisku vhodný pro amaterské využití.

### Selective Laser Sintering (SLS)

SLS technologie využívá laser k sintrování tenké vrstvy práškového materiálu, typicky nylonu nebo kovů. Tato metoda umožňuje vytváření pevných a funkčních prototypů či finálních produktů a je oblíbená díky své schopnosti produkovat detailní a odolné výtisky [4].

Mezi hlavní výhody SLS patří schopnost tisknout bez nutnosti podpůrných struktur, což umožňuje realizaci komplexních geometrií. Tato technologie také podporuje použití mnoha druhů materiálů. Na druhou stranu, nevýhodami jsou relativně vysoké náklady na pořízení tiskárny, materiálu a také omezená paleta dostupných barev.

SLS technologie nachází uplatnění i v oblasti 3D tisku léků [16]. Tisk pomocí SLS umožňuje výrobu léků s přesně definovanou charakteristikou uvolňování účinných látek, což umožňuje přizpůsobení léčby individuálním potřebám pacientů. Dále SLS umožňuje výrobu léků s komplexní strukturou, která může efektivně regulovat rychlost a místo uvolnění léčiva v těle. Výzkumy potvrzují, že SLS dokáže tisknout léky s různými stupni uvolňování účinných látek bez negativního vlivu na stabilitu léčiva, což je klíčové pro účinnost léčby. Tato schopnost je nezbytná pro pokrok v personalizované medicíně, kde přesné dávkování a cílené uvolňování léčiv mohou výrazně zlepšit výsledky léčby pacientů.

## 3.6 Modelářské motory

Modelářské motory jsou speciální typy malých motorů navržených pro použití v modelářství, jako jsou RC (dálkově ovládané) modely aut, lodí, letadel, a další hračky nebo hobby modely. Tyto motory jsou optimalizovány pro velikost, váhu a výkon, aby vyhovovaly specifickým požadavkům daného modelu.

Základní dělení modelářských motorů [18] je na dva druhy AC a DC motory, které se dále dělí na krokové motory, servomotory a další. U motorů využívajících stejnosměrný proud (DC) [38] je frekvence otáček řízena napájecím napětím, kdy je přesné natočení dáno pomocí pulzní šířkové modulace (PWM). Motory pracují při vysokých otáčkách a nízkém točivém momentu, což vyžaduje použití převodovky. Hlavní výhodou stejnosměrných mo-

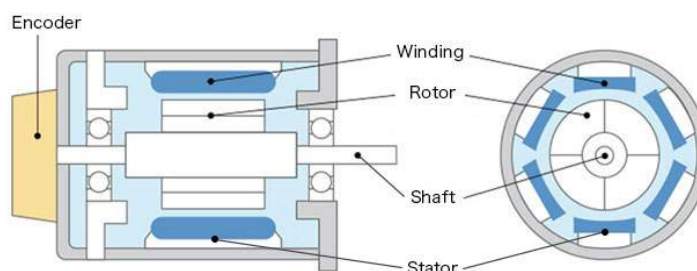


torů je jejich vysoký výkon v poměru k hmotnosti a nižší pořizovací cena. Avšak významnou nevýhodou těchto motorů je jejich značná náchylnost k elektromagnetickému rušení.

Dalším typem motorů jsou ty, které využívají střídavý proud (AC). U těchto motorů závisí rychlost otáček na frekvenci napájecího napětí. Mezi hlavní kategorie patří asynchronní motory, u kterých dochází ke skluzu mezi frekvencí napájecího napětí a otáčkami motoru, a tento skluz se mění v závislosti na zatížení motoru. Na druhou stranu, synchronní motory udržují otáčky synchronizované s frekvencí napájecího napětí, a to nezávisle na velikosti zatížení motoru.

## Servomotory

Servomotor [18] [9] kombinuje stejnosměrný motor, převodovku a řídicí elektroniku. Poskytuje možnost přesného natočení osy a je ovládán pulsy v rozmezí 1-2 ms při 50 Hz, s nebo bez zpětné vazby.



Obrázek 3.6: Popis částí servomotoru<sup>4</sup>.

Servomotor se skládá z rotoru a statoru, které jsou odděleny vzduchovou mezerou. Rotor je pevně spojen s otáčivou výstupní hřídelí. Stator je statická část motoru, která pomocí elektromagnetických cívek vytváří magnetické pole kolem rotoru a ten se díky tomu roztáčí.

Vnitřní zpětnovazební smyčka servomotoru zahrnuje snímač polohy nebo enkodér, který monitoruje aktuální polohu rotoru. Tato informace je předávána řídicí jednotce, která generuje signál na základě požadované polohy.

Řídicí jednotka servomotoru, pracující s analogovým nebo digitálním signálem, slouží k optimalizaci pohybu motoru a udržení přesné polohy nebo rychlosti.

Převodovka může být součástí servomotoru a slouží k přizpůsobení výstupního točivého momentu nebo otáček motoru podle konkrétních potřeb, aplikace.

Pro tuto diplomovou práci jsou podstatné zejména modelářské servomotory, které charakterizuje nižší cena, ale také nižší přesnost či výkon, který je však ve většině neprůmyslových aplikacích dostačující. V tabulce 4.2 níže je provedeno srovnání několika z nich.

Název motoru	Rozměr (mm)	Hmotnost	Provozní napětí	Maximální točivý moment	Úhlová rychlost
SG90	23 x 23 x 12 mm	14 g	4,8 V - 6,0 V	1,2 kg · cm (4,8 V), 1,6 kg · cm (6,0 V)	7,48 rad / s (4,8 V), 8,73 rad / s (6,0 V)
MG90S	22,8 x 12,2 x 28,5 mm	13,4 g	4,8 V - 6,0 V	1,8 kg · cm (4,8 V), 2,2 kg · cm (6,0 V)	10,47 rad / s (4,8 V), 13,09 rad / s (6,0 V)
MG995	40 x 43 x 19 mm	69 g	4,8 V - 6,0 V	3 kg · cm (4,8 V), 15 kg · cm (6,0 V)	6,16 rad / s (4,8 V), 8,06 rad / s (6,0 V)

Tabulka 3.1: Specifikace tří typů modelářských servomotorů

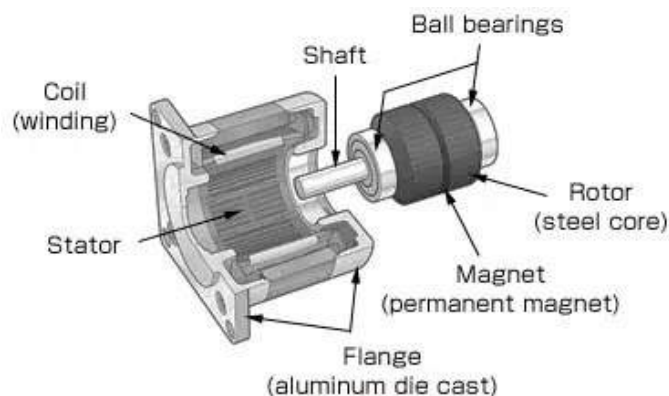
<sup>4</sup>Obrázek převzat z: <https://innovationelectric.in/servomotors.html>

### 3.7 Krokové motory

Krokové motory [18][45] umožňují nastavování polohy a rychlosti bez zpětné vazby. Na rozdíl od servomotorů, které vyžadují pečlivé nastavení a kalibraci, lze krokový motor rychle a jednoduše uvést do provozu a jejich efektivita je optimální do stanoveného zatížení, nad které může docházet ke ztrátě kroku a snížení přesnosti. Používá se zejména v průmyslu. Vyžaduje minimální údržbu po celou svou životnost a charakteristickou vlastností je otáčení hřídele po krocích, kde jedna otáčka odpovídá pevně definovanému počtu kroků.

Krokový motor (obr. 3.7) se skládá z pevné části, zvané stator, která obsahuje cívky pro generování elektromagnetického pole, a pohyblivé části, známé jako rotor, který reaguje na toto pole. Stator může být jednofázový nebo vícefázový podle konkrétní konfigurace motoru. Cívky na statoru generují elektromagnetické pole, které pohání pohyb rotoru. Ovládání pohybu a impulsů pro cívky na statoru zajišťuje řídicí elektronika, která může být integrována přímo do motoru nebo oddělena jako externí řídicí jednotka.

V tabulce níže 3.2 jsou porovnány základní parametry vybraných krokových motorů. Uvedené parametry jsou klíčové při výběru správného motoru.



Obrázek 3.7: Popis částí krokového motoru<sup>5</sup>.

Název motoru	Rozměr	Hmotnost	Provozní napětí	Jmenovitý <sup>6</sup> proud	Jmenovitý <sup>7</sup> točivý moment	Maximální točivý moment	Úhlová rychlost
<b>GA12-N20V100</b>	34 x 12 x 10 mm	10 g	12 V	0,07 A	2 kg · cm	16 kg · cm	8,37 rad/s
<b>GM25-370</b>	72 x 25 x 25 mm	101 g	9 V	1,2 A	3 kg · cm	9,5 kg · cm	15,71 rad/s
<b>JGA25-370</b>	68 x 25 x 25 mm	92 g	6 V	0,5 A	0,75 kg · cm	4 kg · cm	13,93 rad/s

Tabulka 3.2: Specifikace tří typů krokových motorů.

<sup>5</sup>Obrázek převzat z: <https://www.electricaltechnology.org/2016/12/stepper-motor-construction-types-and-modes-of-operation.html>

<sup>6</sup>Proud stanovený výrobcem, který může trvale protékat konektorem el. zařízením bez rizika přehřátí a poškození, zdroj: <https://elektrika.cz/terminolog/eterminologitem.2005-06-30.7803764816/view>.

<sup>7</sup>Točivý moment působící na hřídel motoru po neomezenou dobu (trvalý chod, zatížení) bez rizika přehřátí a poškození, zdroj: [https://www.tgdrives.cz/fileadmin/user\\_upload/download/TGQ\\_katalog\\_CZ\\_2019.pdf](https://www.tgdrives.cz/fileadmin/user_upload/download/TGQ_katalog_CZ_2019.pdf).

### 3.8 Lineární aktuátor

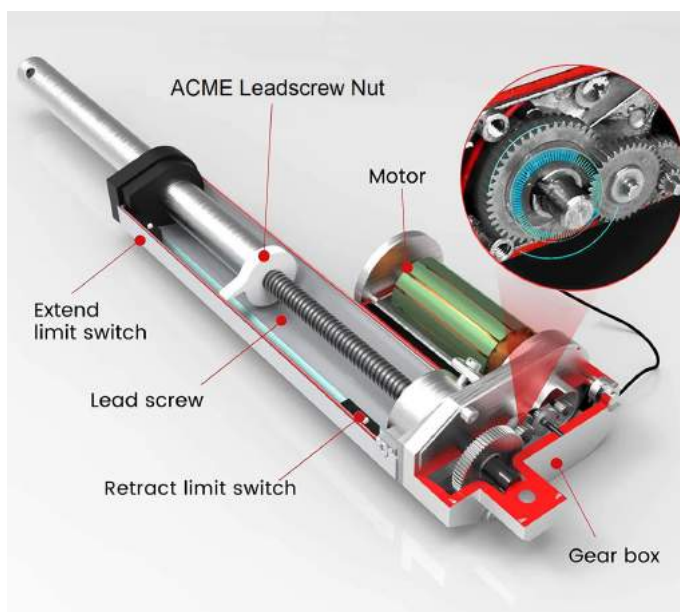
Lineární aktuátor [10] je přístroj, který slouží k převodu elektrické energie na lineární pohyb. Tento jev má v dnešní době mnoho využití např. v robotice slouží pro manipulaci robotických paží a manipulátorů, kdy umožňují zdvihání závaží, rotaci těla či například uchopování předmětů efektozem.

V hydraulice [2] aktuátor využívá procesu přeměny tlaku hydraulické kapaliny na pohyb pístu. Při vtlačování kapaliny do válce dochází k posunu pístu vpřed či vzad, čímž se vytváří lineární kinetický pohyb.

Nejbežněji se převádí rotační pohyb elektrického motoru na přímočarou hybnost za využití závitové tyče a převodovky, tedy soustavy ozubených kol viz obrázek č. 3.8. U této aplikace dochází k rotaci šroubovitého mechanismu, který posouvá matici a s ní spojenou tyč dopředu nebo dozadu, což vytváří lineární pohyb.

Další běžným mechanismem jsou lineární motory, které fungují na základě elektromagnetického pole, kde lineární pohyb vzniká na základě interakce mezi elektromagnetem a permanentním magnetem. Statorová část, která obsahuje cívky a feromagnetický materiál, je napevno umístěna na místě, zatímco rotorová část, která obsahuje permanentní magnety, je připevněna k pohyblivému tělesu. Když se na cívky statoru přivede elektrický proud, vytvoří se magnetické pole, které interaguje s permanentními magnety rotoru, což způsobuje pohyb rotoru a tím i pohyb celého aktuátoru.

Díky tomuto principu jsou lineární motory obvykle považovány za mechanicky jednodušší a spolehlivější ve srovnání s aktuátory, které zahrnují mechanické součástky jako šroubové mechanismy. To je zvláště užitečné v aplikacích, kde je potřeba vysoká přesnost, rychlost a spolehlivost pohybu.



Obrázek 3.8: Popis lineárního aktuátoru<sup>8</sup>.

<sup>8</sup>Obrázek převzat z:  
[https://www.firgelliauto.com/cdn/shop/products/linearactuatorexplodedview2\\_1450x.png](https://www.firgelliauto.com/cdn/shop/products/linearactuatorexplodedview2_1450x.png)

### 3.9 Arduino Uno

Arduino Uno je jednodeskový počítač založený na mikroprocesoru ATmega [6][22], což je klíčová komponenta umožňující širokou škálu technických aplikací. Mikroprocesor ATmega v Arduinu pracuje s frekvencí 16 MHz a je zasazen do architektury, která rozděluje paměť pro programový kód a data, což je charakteristické pro Harvardskou architekturu. Tato specifikace umožňuje rychlejší a efektivnější zpracování dat ve srovnání s tradičními von Neumannovou architekturou, což minimalizuje latenci při provádění instrukcí. Arduino Uno obsahuje 14 digitálních vstupně-výstupních pinů, z nichž 6 umožňuje realizaci pulzně šířkové modulace (PWM), což je technika užitečná pro ovládání motorů a LED diod. Dále jsou k dispozici 6 analogových vstupů, které mohou být využity pro různé senzory a jiné vstupní zařízení. Tato platforma také obsahuje několik komunikačních protokolů: UART, SPI a I2C, které umožňují efektivní výměnu dat mezi Arduinem a různými periferiemi nebo jinými mikrokontroléry viz obrázek č. 3.9.

#### Komunikační protokoly

- **UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) [32]:** Tento protokol je využíván pro asynchronní sériovou komunikaci mezi zařízeními. Využívá dva piny:
  - RX (receiving of data) - linka pro příjem dat
  - TX (transmission of data) - linka pro vysílání dat
- **SPI (Serial Peripheral Interface)[23]:** Protokol pro vysokorychlostní sériovou komunikaci, který využívá čtyři vodiče:
  - MOSI (Master Out, Slave In) - linka pro vysílání dat k periferním zařízením.
  - MISO (Master In, Slave Out) - linka pro příjem dat od periferních zařízení.
  - SCK (Serial Clock) - hodinový signál pro synchronizaci komunikace.
  - SS (Slave Select) - slouží k vybírání aktivního periferního zařízení.
- **I2C (Inter-Integrated Circuit) [26]:** Dvouvodičový komunikační systém navržený pro nízkorychlostní komunikaci mezi integrovanými obvody, který používá:
  - SDA (Serial DAta line) - linka pro zasílání dat.
  - SCL (Serial CLock line) - linka pro oznámení začátku a konce komunikace.

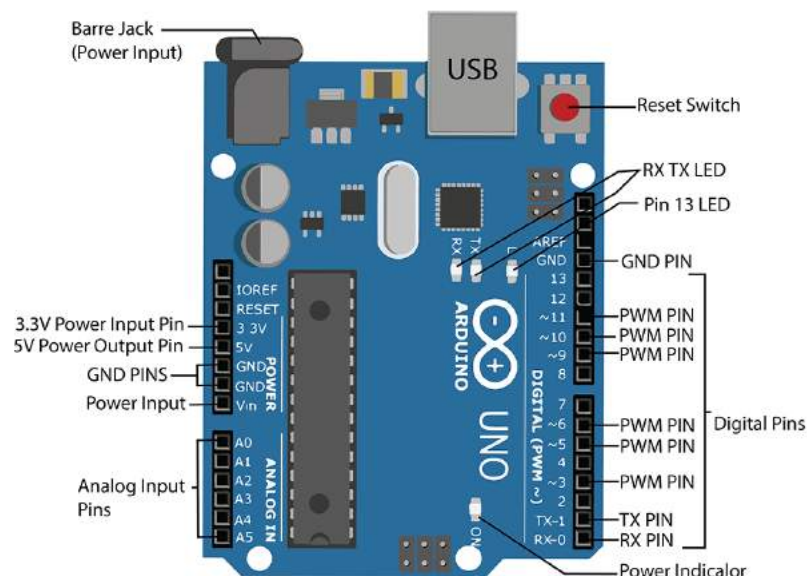
Arduino lze napájet přes USB port nebo pomocí externího zdroje napětí 9 V až 12 V prostřednictvím zdířky typu Jack. Tato flexibilita v způsobech napájení činí Arduino vhodným pro mobilní a stacionární aplikace, kde může být integrace do systémů a projektů rozmanitá.

Software platformy Arduino je distribuován jako open-source, což uživatelům umožňuje jeho volné modifikace a šíření. Hardwarová specifikace je vydávána pod licencí Creative Commons, což zajišťuje kompatibilitu s principy open-source filozofie i ve fyzické rovině. Tento přístup má za následek širokou uživatelskou a vývojářskou základnu, která neustále rozšiřuje možnosti využití této platformy prostřednictvím nových projektů, knihoven a tutoriálů.

---

<sup>9</sup>Obrázek převzat z:

<https://learn.thesempedia.com/wp-content/uploads/2018/08/Arduino-Pins-Description.png>



Obrázek 3.9: Popis mikrokontroléru Arduino Uno<sup>9</sup>.

Arduino podporuje programování za využití knihoven Wiring [34], což je framework založený na C++, speciálně navržený pro jednoduchost a efektivitu při programování mikrokontrolérů. Tento jazyk je uživatelsky přívětivý a umožňuje snadné zapojení do ekosystému Arduino. K dispozici jsou rozsáhlé knihovny, které usnadňují integraci širokého spektra modulů a senzorů, jako jsou GPS moduly, senzory teploty, vlhkosti, pohybu, a mnoho dalších.

Platforma je navíc podporována bohatým výběrem rozšiřujících modulů, které lze jednoduše připojit a konfigurovat. Tyto moduly (tzv. shieldy) rozšiřují funkčnost Arduina o další možnosti komunikace, jako je NFC/RFID, nebo o schopnost ovládání servomechanismů, motorů a dalšího vybavení.

Platforma Arduino je dostupná, kromě verze Uno, ještě v několika dalších modelech, které se liší svými technickými specifikacemi a zaměřením na různé typy projektů [25][19].

Model Arduino Mega nabízí rozšířenou paměť a větší počet I/O pinů, což jej činí vhodným pro náročnější aplikace, jako jsou rozsáhlé robotické projekty. Tento model je vybaven mikrokontrolérem ATmega2560, 54 digitálními I/O piny a 16 analogovými vstupy.

Pro mobilní a vestavěné aplikace je ideální Arduino Nano, který přichází v menším formátu, ale stále udržuje kompatibilitu s většinou běžných shieldů a modulů. Nano verze používá stejný čip jako Uno, ale v kompaktnějším provedení.

Arduino Leonardo se liší integrací USB komunikace přímo do mikrokontroléru, což umožňuje snadnější emulaci klávesnice nebo myši.

## Kapitola 4

# Analýza současného stavu a návrh řešení

V této kapitole jsou analyzovány nejpodstatnější části zmíněných již existujících IoT řešení z předchozí kapitoly 2 a za pomoci nabytých znalostí z kapitoly 3 je vytvořen návrh řešení, který je v následující kapitole implementován.

### 4.1 Analýza systému Beemon

Z informací uvedených v projektu lze vyvodit klíčová zjištění, která jsou aplikovatelná na řešení dané diplomové práce. Zásadním aspektem je optimální umístění senzorů tak, aby neinvazivně narušovaly prostor obývaný včelami. Důležité je také sledování stavu elektronických komponent, aby se předešlo jejich poškození vnějšími vlivy. Pro přenos nenáročných dat, jako jsou teplota a vlhkost, se doporučuje využití protokolu MQTT, který je především kvůli své rychlosti, malé velikosti datových paketů a nízké energetické náročnosti ideálním řešením. Pro ukládání dat je vhodné využít databázi MongoDB, nad kterou se provádějí následné analýzy dat. K monitorování událostí v úlu v reálném čase lze aplikovat open-source IoT platformu ThingsBoard. V rámci budoucího rozvoje konceptu chytrého úlu je možné zvážit implementaci kamer a mikrofónů pro provádění spektrální analýzy, zkoumání letových drah, počítání včel atd. Tyto rozsáhlejší datové soubory mohou být vstupem pro neuronovou síť, což poskytne včelaři sofistikovanější a přesnější nástroj pro predikci nemocí, krádeží, rojení a dalších potenciálních problémů v úlu.

Nezbytná je správná implementace časování, která optimalizací poměru mezi intervaly čekání a měření minimalizuje energetickou náročnost tím, že zařízení přechází do režimu spánku, pokud není aktivně využíváno. To je zásadní pro zachování dlouhé výdrže baterie. Je také potřeba vyrobít 3D tiskem ochranné pouzdro pro mikrokontrolér a další moduly s nastavením výplně materiálem ve slicer programu alespoň na 80 %, což je klíčové pro zvýšení odolnosti materiálu proti zteření. V projektu Beemon je detailně popsán mechanismus uzavírání pouzdra včetně těsnění, které je nutné pro ochranu elektronických součástek před vlhkostí, což představuje jedno z hlavních rizik pro tyto komponenty. Základní PLA není zcela vhodný díky své nižší odolnosti vůči dlouhodobému vystavení přírodním podmínkám. Ale zato je tento materiál cenově dostupný a poskytuje vysokou míru přesnosti finálních výtisků.

Pro ovládání univerzálních vstupních/výstupních pinů (GPIO) mikrokontroléru se doporučuje využít knihovna Wiring, která umožňuje řízení periférií včetně motorů a dalších senzorů. Tato knihovna je kompatibilní se systémy Raspberry Pi a Arduino.

## 4.2 Analýza systému Beehive observation

Níže zmíněná fakta mají přínos pro tuto diplomovou práci a jsou také využita při samotné tvorbě práce. Veškerá měření byla provedena v evropsky mírném klimatickém pásu v úle vyrobeného na 3D tiskárně pro včely medonosné, takže se výsledky dají přímo aplikovat i na řešení této práce.

Včely po čase pokryjí umístěné senzory propolisem a voskem, to však nijak negativně neovlivňuje měření, tento fakt je výhodný při implementaci této práce. K prevenci rojení je nutné znát vztah mezi venkovní teplotou a teplotou uvnitř hnízda a stěn úlu, a podle toho volit i vhodný izolační materiál úlu a optimálním umístění senzorů uvnitř úlu.

Pakliže se okolní teplota během dne mění v rozmezí 9 °C (14-23 °C) a je relativně nestabilní, tak teplota včelího hnízda je vyšší a je zcela stabilní a pohybuje se v rozmezí 2 °C (27-29 °C). Teplota stěn úlu se mění v rozmezí 5 °C (19-24 °C) a je poměrně stabilní. Pro tento klimatický pás byla v práci Beehive observation z velkého počtu naměřených dat odvozena rovnice, kdy dvojnásobek teploty stěny se rovná teplotě okolí. Při správném umístění a vzdálenosti čidel od sebe mají vnější podmínky zanedbatelný vliv na měření teplot uvnitř úlu vyrobeného z PLA, není třeba implementovat žádnou kompenzaci.

Pro vlhkost platí, že pokud se okolní relativní vlhkost během dne mění v rozmezí 30 % (65-95 %), tak relativní vlhkost včelího hnízda je nižší a pohybuje se v rozmezí 17 % (43-60 %). Relativní vlhkost stěn úlu se mění v rozmezí 12 % (55-67 %) a je poměrně stabilní. Obě čidla uvnitř úlu vykazují minimální ovlivnění okolní vlhkostí.

## 4.3 Stanovení podcílů práce

Na základě provedené analýzy a zadání diplomové práce byl stanoven celý koncept projektu a jednotlivé podcíle, které musí být splněny, aby byl splněn celkový cíl práce.

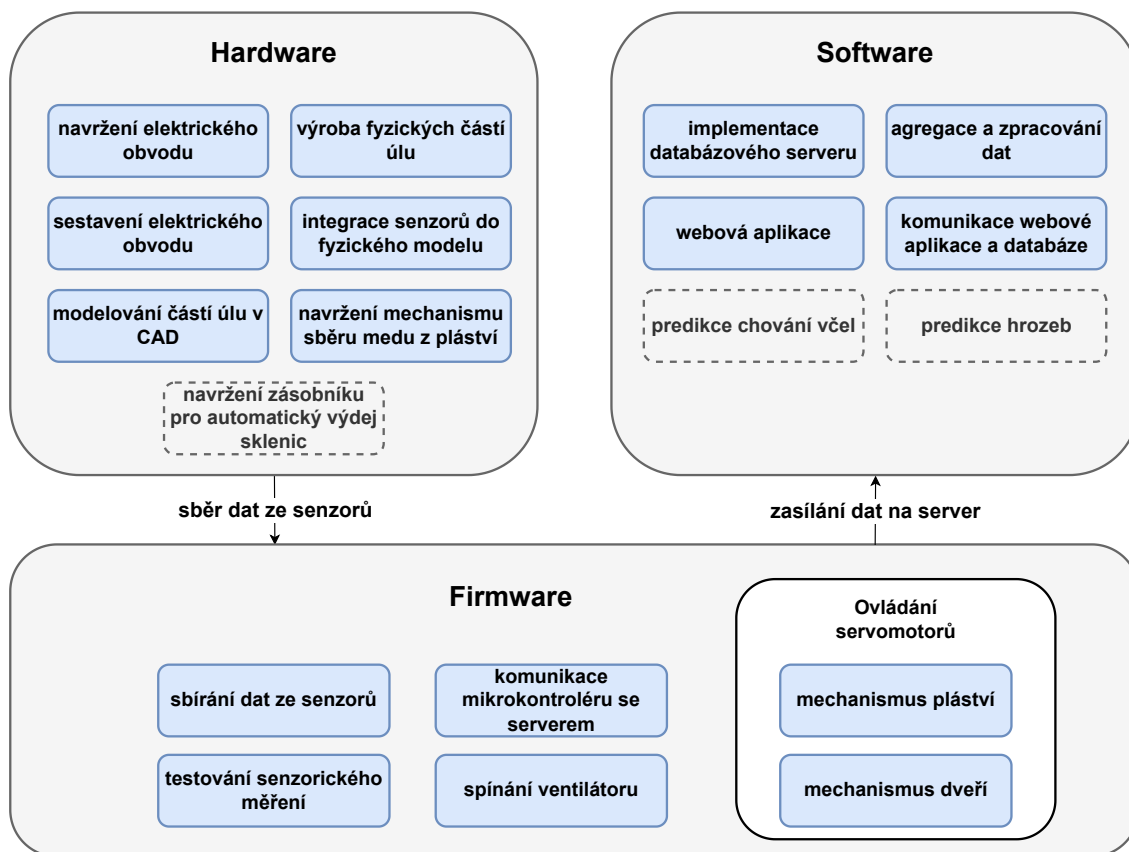
Výsledné zařízení musí být navrženo a zkonstruováno s ohledem na modularitu a snadnou znovureplikovatelnost. Bude tedy využit 3D tisk, který zcela splňuje tyto požadavky. Jelikož se jedná o prvotní verzi úlu, je potřeba dbát na nízkou cenu, a tedy je na místě použít *off the shelf* hobby komponenty. Autonomie systému se bude testovat v rámci měření přesnosti a rychlosti reakce systému na změny teplot a zaplnění jednotlivých pláství medem. Je nutné provést celkovou zátěž komunikační sítě i serveru a zároveň otestovat i zotavení se z chyb. V neposlední řadě je potřeba zkontrolovat správnou interpretaci a vizualizaci dat na webovém rozhraní.

**Pro účely ověření splnění těchto cílů musí zařízení nabývat následujících vlastností, které budou také otestovány:**

- Modulární konstrukce.
- Replikovatelný design.
- Použití levných komponentů a 3D tisku.
- Funkční systém samosběru medu.

- Autonomie v rámci ventilace a sklizně medu.
- Komunikace zařízení a webového rozhraní.
- Stabilita databáze a serveru.
- Funkční uživatelské rozhraní včetně korektní vizualizace.

Na základě stanovených cílů a provedené analýzy bylo vytvořeno blokové schéma práce viz. obrázek 4.1, které je důležité při provádění samotné realizace.



Obrázek 4.1: Blokové schéma práce

## 4.4 Srovnání filamentů

V době návrhu je také nutné vybrat materiál pro výrobu. Proto je provedena analýza jednotlivých filamentů a vybrán ten nejvhodnější z nich. Jelikož model bude využit v převážně venkovních přírodních podmínkách je nutné kromě potřeb jako je přesnost a roztažnost, rozšířit nároky na materiál zejména v oblasti tepelné odolnosti a ekologického dopadu. Následující přehled v tabulce 4.1 provádí srovnání několika běžně používaných typů filamentů na základě těchto kritérií.



Tabulka 4.1: Srovnání filamentů pro 3D tisk ve venkovních podmínkách

Filament	Tepelná odolnost	Roztažnost (tisk)	Ekologický dopad	Venkovní odolnost
PLA	50°C	Nízká	Velmi příznivý	Nízká
HD-PLA (po žíhání)	130°C	Vysoká	Příznivý	Vysoká
H-PLA	100°C	Nízká	Příznivý	Vysoká
PETG	68°C	Střední	Střední	Střední
ABS/ASA	100°C	Vysoká	Nepříznivý	Vysoká

## 4.5 Návrh řešení

Ze stanovených dílčích podcílů řešení vyplývá, že je nutné využít 3D tisk. K výrobě je využita dvojice tiskáren – Ender3 a Prusa MK3S s tiskovou plochou 220 x 220 x 250 mm a 250 × 210 × 210 mm. Při vytváření modelů je nutná brát v potaz malý rozměr tiskové plochy oproti realné šířce částí Langstrothova úlu, viz kapitola 2, sekce 2.1.

Vzhledem k tomu, že projekt je zaměřen na menší populaci včel a cílem je vytvořit hlavně funkční řešení a nikoliv velký objem medu, velký ekonomický profit, je možné redukovat rozměry základního modelu na čtvrtinu původní velikosti a tím se také značně sníží náklady na výrobu. Po provedení redukce však stále velikost modelu přesahuje maximální rozměry tiskové plochy a to zhruba dvojnásobně, což vyžaduje rozdělení jednotlivých částí modelu na poloviny pomocí vertikální řezu. Do konstrukce modelu jsou následně integrovány speciální spojovací prvky (čepy), které umožňují obě poloviny po vytisknutí v místě řezu opět pevně zafixovat, a to bez nutnosti použití lepidla nebo jiných spojovacích materiálů. Spoje jsou odděleny vzduchovou mezerou o velikosti 0.15 mm, což se ukázalo jako ideální hodnota pro vytvoření spojů s dostatečnou pevností.

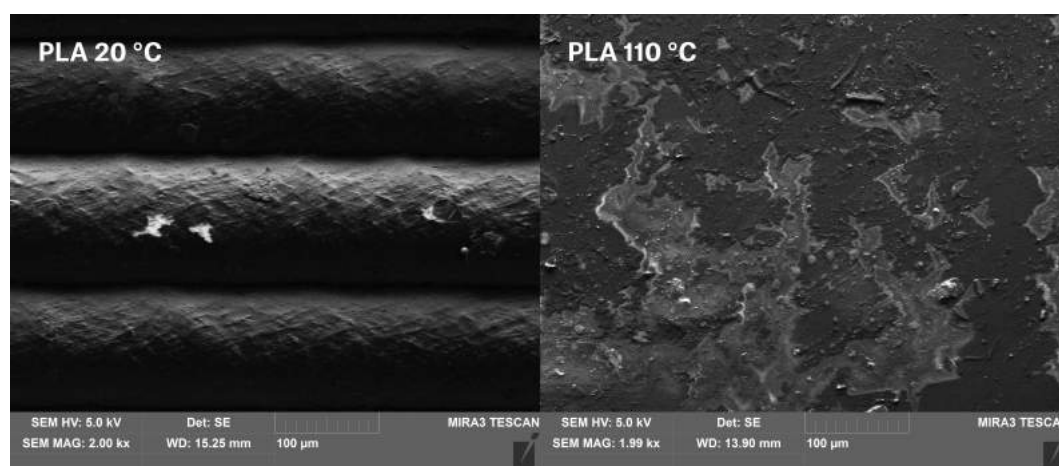
### Separace úlu na jednotlivé části

Za pomoci cloud-based CAD softwaru Fusion 360 jsou vytvořeny modely jednotlivých částí, konkrétně česna a letáku, nástavku plodiště, nástavku medník, vnitřního a vnějšího víka. Vnější víko obsahuje motorizovanou záklopku, která současně s dvojicí ventilátorů koriguje teplotu v úlu. Vnitřní víko bude rozšířené o část se sloty na uchycení mikrokontroléru a přídatných modulů nutných pro ovládání motorů. Medník obsahuje motorizované rámky, které umožňují výtoku medu z pláství. Při modelování je vytvořen potrubní systém odtoku medu, který je sveden mimo úl. Motory jsou z každé strany rámky a jsou pevně upevněny ke spodní straně nástavku, kde je vytvořena mezikomora pro svod medu a vodičů, které jsou izolovány přepážkou. V medníku je vytvořena ochranná krabička na senzor teploty a vlhkosti, která je umístěn na boku stěny.

### Výběr vhodného materiálu

Veškeré modely jsou exportovány ve formátu *3mf* a převedeny pomocí slicer programu PrusaSlicer na G-kód 3D tiskárny. V průběhu výrobního procesu je jako primární materiál pro výrobu prototypu využíván filament typu PLA (kyselina polymléčná), který je cenově nejvýhodnější a také poskytuje vysokou přesnost a nízkou smrštitelnost při tisku, viz 4.1.

Na druhou stranu není tento filament příliš odolný vůči venkovním vlivům a zejména vysoká teplota (vyšší než 50 °C) může způsobit deformaci celého modelu. Proto je finální model zhotoven z derivátu PLA, z materiálu H-PLA či HT-PLA (Heatresistant PLA), který si zachovává pozitivní vlastnosti PLA, ale navíc je odolnější. Tento filament disponuje stejně jako PLA nízkou smrštitelností během tisku a nízkou závadností vůči životnímu prostředí, protože je biodegradabilní a pro výrobu se využívá kukuřičný škrob, cukrová třtina či jiný obnovitelný zdroj [29]. Do tohoto filamentu jsou navíc přidány aditiva, která zlepšují fyzikální vlastnosti, ale na druhou stranu částečně snižují nezávadnost vůči životnímu prostředí, která však ve srovnání s ostatními druhy filamentů zůstává nadprůměrná. H-PLA má zvýšenou odolnost vůči venkovním vlivům a zejména vůči vyšší teplotě, kdy je odolnost materiálu navýšena až na 110 °C. Obdobnými vlastnosti disponuje také filament HD-PLA (High-Density/High-Definition PLA), kdy je jeho teplotní odolnost dokonce zvýšena na 131 °C [33]. Pro zlepšení jeho fyzikálních vlastností je nutné, aby se změnila i krystalová mřížka tohoto materiálu, proto se musí aplikovat žíhání, viz obrázek č. 4.2. Materiál se vystaví na kratší dobu vyšší teplotě (okolo 80 °C) obvykle se k tomu využívá pec či horkovzdušná trouba. Během tohoto procesu dochází také k výraznému smrštění materiálu, a proto jej není vhodné využít pro výrobu modelů přesných rozměrů.



Obrázek 4.2: Pohled elektronovým mikroskopem na krystalovou mřížku materiálu PLA před (vlevo) a po provedení žíhání<sup>2</sup>.

Při žíhání 3D tištěných objektů dochází k reorganizaci molekulární struktury polymerů. V procesu se teplota materiálu zvyšuje na teplotu skelného přechodu, což umožňuje molekulám plastu uspořádat se do stabilnější a pevnější struktury. Tyto změny mohou vést k lepší mechanické a teplotní odolnosti. Žíhaný materiál také může získat vyšší krystalinitu, pokud teplota dosáhne dostatečně vysokých hodnot, ale bez překročení bodu tání. Důsledkem může být zvýšení tuhosti a snížení vnitřního pnutí. Při tomto procesu dojde také k mírné deformaci ve všech osách, což není vhodné pro mechanické části, u kterých je vyžadována vysoká přesnost [20].

Pro výrobu úlu byl tedy vybrán filament tepelně odolný filament od značky Aurapol, který nese obchodní název HT110.

<sup>2</sup>Obrázek převzat z: [https://blog.prusa3d.com/cs/jak-zesilit-svuj-vytisk-zihanim\\_31088/](https://blog.prusa3d.com/cs/jak-zesilit-svuj-vytisk-zihanim_31088/)

## Elektronika a zapojení obvodu

Sběr senzorických dat je proveden pomocí jednodeskového počítače Arduino Uno. Teplotní a vlhkostní data jsou měřena pomocí senzoru DHT22. Jelikož Arduino Uno nedisponuje zabudovaným Wifi vysílačem, je využit ESP-01 ESP8266 Wifi modul od výrobce Sparkfun. Jako senzor hmotnosti je využit tenzometr napojený na dvoukanálový ADC převodník HX711. Pro motorizaci rámků je vybrán krokový motor JGA25-370 6 V, který disponuje adekvátním výkonem pro splnění požadovaných funkcí. Dvojice těchto motorů bude zajišťovat pohyb stěny rámků. Motory jsou napojeny na 4-kanálový motor driver shield L293D. Se zaměřením na jednoduchost řešení je využito kontaktní nepájivé pole, kde jsou shieldy paralelně zapojeny. Motory se v obvodu vždy pojí do páru a dokážou pak generovat točivý moment až  $8 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ , viz tabulka č. 3.2 v kapitole č. 3. Ventilační systém úlu obsahuje 5 ventilátorů a 1 servomotor, který zajišťuje pohyb ventilačních dveří. Zapojení celého obvodu je znázorněno v příloze A.

## Výpočet maximálních nákladů na provoz úlu

Při maximální spotřebě 66 W, která je dána příkonem všech zařízení v daný moment (ventilátory, motory, mikrokontrolér, shieldy) by úl provozovaný nepřetržitě 24 hodin v kuse České republiky provedeme výpočet spotřeby energie a následných nákladů za 1 den provozu při letošní aktuální ceně elektřiny, která je v roce 2024 8,76 Kč/KWh<sup>3</sup>.

Spotřeba elektrické energie (kWh) je dána vztahem:

$$\text{Spotřeba energie (kWh)} = \frac{\text{Příkon (W)} \times \text{Doba (h)}}{1000} = \frac{66 \times 24}{1000} = 1,584 \text{ kWh}$$

Náklady na energii (Kč) jsou dány vztahem:

$$\text{Náklady (Kč)} = \text{Spotřeba energie (kWh)} \times \text{Cena za kWh (Kč)} = 1,584 \times 8,76 = 13,88 \text{ Kč}$$

Náklady na energii nepřetržitého provozu tohoto zařízení při maximální spotřebě by byly za 24 hodin přibližně 13,88 Kč.

## Výpočet nákladů na výrobu úlu

Při výpočtu je zanedbána cena elektrické energie na provoz 3D tiskárny a amortizace či další náklady spojené s dopravou. Dále je zanedbána cena šroubů, vodičů či jiného materiálu použitého pro spojení plastových či elektrických částí. Při tvorbě prototypu byl také využit běžný materiál PLA pro prvotní tisk a kalibraci jednotlivých komponent, aby se snížily náklady a finální model se mohl vyrobit bez problému z dražšího materiálu PLA HT110. Pro nákup elektrických komponent a filamentů byly využity mainstreamové e-shopy, kterou jsou uvedené v zápatí. Vše bylo zakoupeno během období 1. 1. 2024–30. 1. 2024.

---

<sup>3</sup>E.ON - jednotarifová sazba (pro malou spotřebu) D01: <https://oenergetice.cz/energostat/ceny-aktualne/elektrina>

<sup>6</sup>Komponent zakoupen na e-shopu: <https://www.laskakit.cz/>

<sup>6</sup>Komponent zakoupen na e-shopu: <https://www.mateza.cz/>

<sup>6</sup>Komponent zakoupen na e-shopu: <https://www.alza.cz/>

Název komponenty	Počet	Cena za jednotku	Cena celkem
Arduino UNO R3 (Klon) <sup>4</sup>	1	188 Kč	188 Kč
ESP-01 ESP8266 WIFI modul <sup>4</sup>	1	98 Kč	98 Kč
4-kanálový motor driver shield L293D <sup>4</sup>	3	68 Kč	204 Kč
DHT22 modul <sup>4</sup>	1	178 Kč	178 Kč
Motor JGA25-370 6V <sup>4</sup>	6	178 Kč	1068 Kč
AD Převodník Modul HX711 <sup>4</sup>	1	28 Kč	28 Kč
SNH 61803 2RS Jednořadá kuličkové ložisko <sup>5</sup>	6	68 Kč	408 Kč
Auropol PLA HT110 filament 1 kg <sup>6</sup>	4	799 Kč	3196 Kč
Servomotor MG995	1	138 Kč	138 Kč
<b>Celková cena</b>		<b>5506 Kč</b>	

Tabulka 4.2: Cena jednotlivých komponent použitých pro výrobu úlu

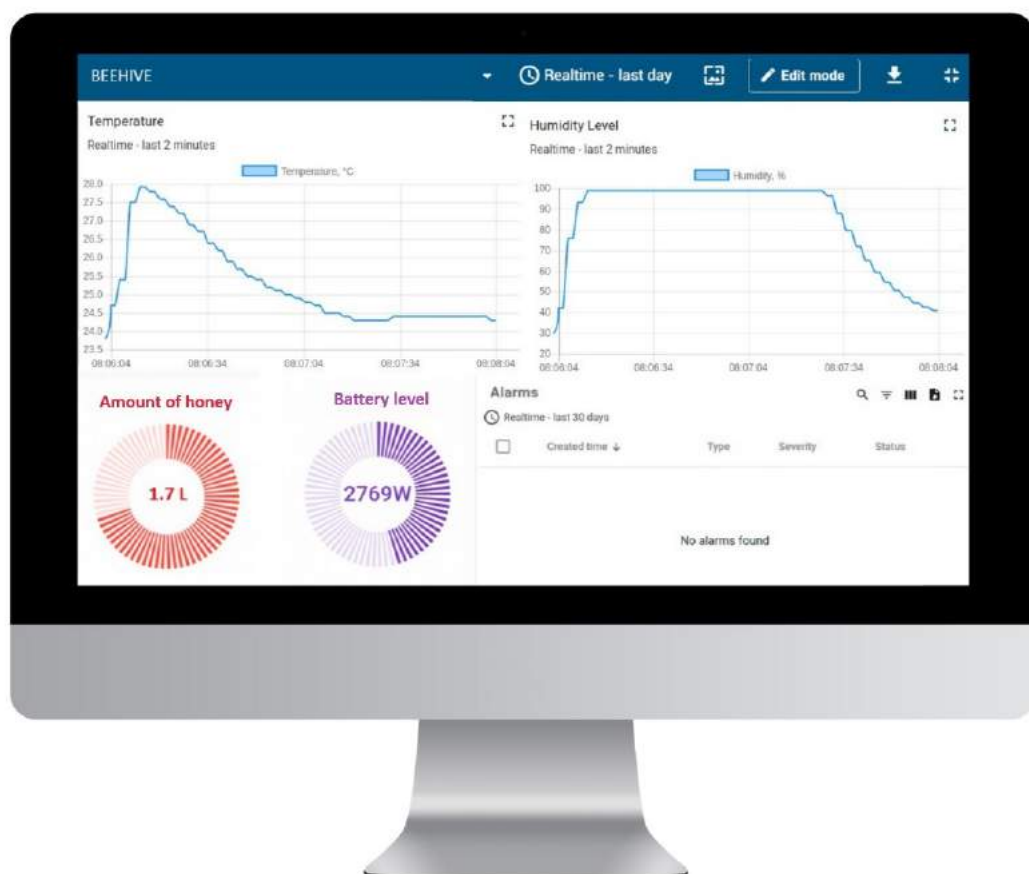
## Návrh programové části

Funkce pro ovládání koncových zařízení jsou naprogramovány v jazyce C++ emulovaného pro Arduino IDE. Pro komunikaci s webovým rozhraním je zvolen protokol MQTT kvůli jeho ideálním vlastnostem pro realizaci IoT projektu. Přednosti tohoto protokolu jsou popsány v kapitole 3, sekci 3.1.

## Návrh uživatelského rozhraní

Bylo navrženo uživatelské rozhraní, viz. obrázek 5.28, které graficky znázorňovat vývoj teplotních a vlhkostních hodnot. Uživatel má možnost vyčíst z GUI aktuální plnost a množství medu v plástvích a také stav nabití akumulátoru. V neposlední řadě obsahuje výpis všech kritických událostí, které v úlu nastaly. UI Mocup na obrázku 5.28 byl vytvořen v aplikaci Canva za využití obrázků widgetů přímo z rozhraní platformy ThingsBoard<sup>7</sup>.

<sup>7</sup>Odkaz: <https://www.canva.com/>



Obrázek 4.3: Grafické uživatelské rozhraní.

## Kapitola 5

# Implementace

### 5.1 Vytváření modelů a 3D tisk

Návrh celkového modelu úlu byl proveden v CAD softwaru Fusion 360. Během modelování byl prvotní inspirací model Langstrothova úlu, který byl rozdělený na jednotlivé logické celky (části), jež byly modelovány jako samostatné komponenty.

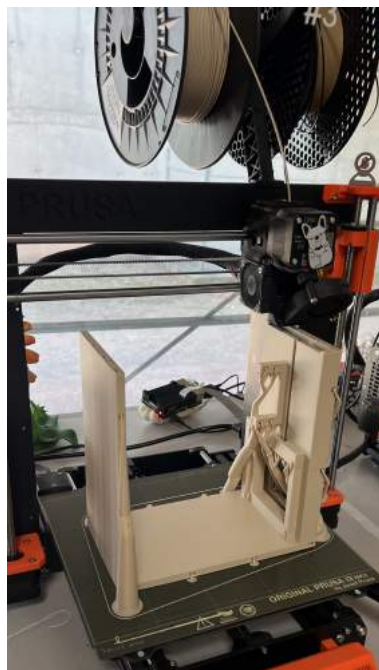


Obrázek 5.1: Prvotní design úlu vytvořeného ve Fusion 360.



Obrázek 5.2: Finální vzhled vyrobeného úlu

Po dokončení všech konstrukčních částí dle specifikací, bylo zahájeno přizpůsobení úlu, aby splňoval všechny implementační požadavky. V prvním kroku bylo nutné zmenšit celkové rozměry modelu na polovinu, což bylo nezbytné vzhledem k omezené tiskové ploše 3D tiskárny o rozměrech 220 x 220 mm. Redukce velikosti úlu vedlo k významnému snížení výrobních nákladů. Ačkoliv redukce měřítka úlu na polovinu samo o sobě, neumožňuje tisk komponent v jednom kuse, usnadňuje alespoň samotnou realizaci projektu. Navíc, jednotlivé komponenty byly rozděleny na menší části a opatřeny spojovacími čepy, které po sestavení zajišťují pevné spojení jednotlivých segmentů.



Obrázek 5.3: 3D tisk částí úlu na tiskárně Prusa MK3S

Samotný tisk částí úlu viz obrázek č.5.3 využíval téměř vždy celou tiskovou plochu a bylo nutné přidat 5 mm širokého okraje (brim) kolem celého výtisku během *slicing* procesu, aby se zabránilo odlepení výtisku od podložky. V případě, že model obsahoval převisy, byly tyto části podepřeny organickými podporami, které oproti běžným mřížkovým podporám vedly k redukci použitého materiálu a zlepšení kvality finálního výtisku.

Celkový rozměr sestaveného úlu je 54,2 x 21,0 x 33,8 cm. Níže jsou detailně popsány jednotlivé části.

### Výroba lineárního aktuátoru

Lineární aktuátor, který je důležitou komponentou při výrobě motorizovaných pláští, je zhotoven za využití krokových motorů. Model je založen na existujícím modelu od Michaela Rehtina<sup>1</sup>. Samotný model byl upraven tak, aby odpovídal rozměrům úlu a použitému krokovému motoru JGA25-370. Došlo také k úpravě polohy spínače, který určuje limitní meze pohybu aktuátoru. Aby bylo možné umístit aktuátor na stranu rámku s pláštvi, byla přidána kolejnice, která se zasouvá do žlábků na boku rámku.

Obrázek č. 5.4 znázorňuje vyrobený lineární aktuátor včetně převodovky, závitové tyče a kuličkového ložiska. Pro správnou funkčnost limitních spínačů bylo nutné připájet Schottkyho diody viz obrázek č. 5.5.

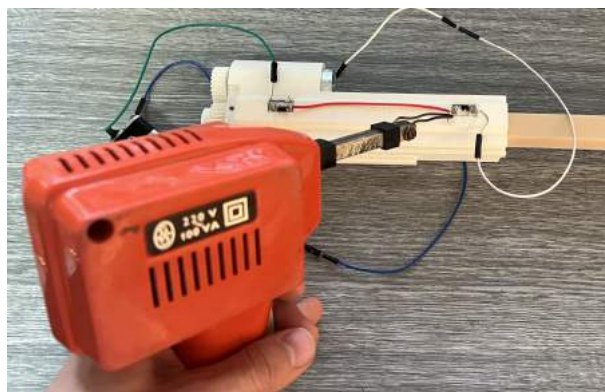
### Výroba rámků a pláští

Pro systém samosběru medu byl navržen originální design rámku a pláští. Prvotní koncept designu předpokládal zasunutí spodní části každé komory. Implementace tohoto návrhu by zahrnovala použití desítek lamel, které by se zasunuly současně, čímž by v dolní části

<sup>1</sup>Odkaz na zdroj původního lineárního aktuátoru:  
<https://www.youtube.com/watch?v=-C9e--3nvro&t=458s>



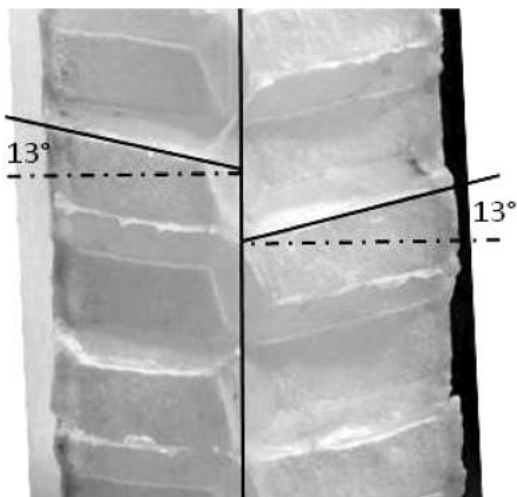
Obrázek 5.4: Znárodnění mecha-nismu vyrobeného aktuátoru.



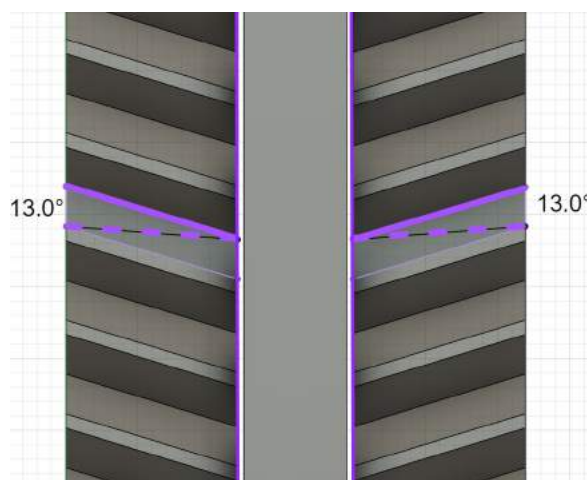
Obrázek 5.5: Pájení Schottkyho diody ke spí-nači.

každé komory vznikl prostor určený pro odtok medu. Avšak tento model obsahoval příliš mnoho mechanických součástí, které během testování (viz kapitola č. 6) prokázaly nízkou spolehlivost celého mechanismu kvůli zvýšenému výskytu tření. Z těchto důvodů byl finální model sběru nakonec modifikován do podoby, která je popsána v dalším odstavci.

Druhá verze rámmu využívá systému dvou lineárních aktuátorů, které umožňují vysunutí středové stěny mezi plástvemi. Tato stěna zadržuje med v každé z komor, které jsou nakloněny pod úhlem  $13^\circ$ , viz obrázek č. 5.7. Sklon je založen na skutečné hodnotě, kterou mají včely při stavbě pláství, viz obrázek č. 5.6. [31]. Sklonění komor přispívá k lepšímu rozložení hmotnosti a zvyšuje pevnost jednotlivých buněk, neboť významná část hmotnosti je přenášena na středovou stěnu.



Obrázek 5.6: Průřez reálnou včelí pláství s vyznačenou hodnotou sklonu komor<sup>3</sup>.

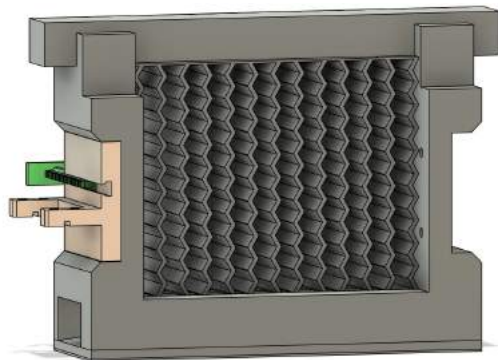


Obrázek 5.7: Průřez pláství vyrobené na 3D tiskárně s vyznačenou hodnotou sklonu komor.

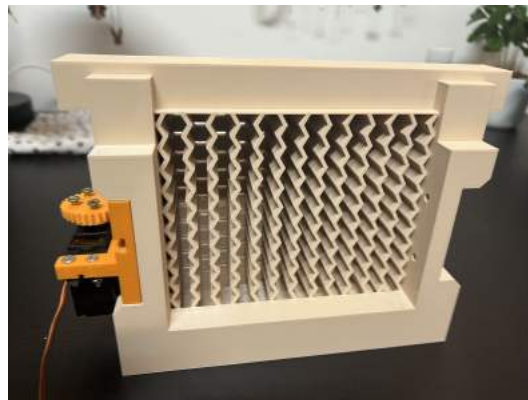
<sup>3</sup>Obrázek převzat z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13592-020-00807-9/figures/1>



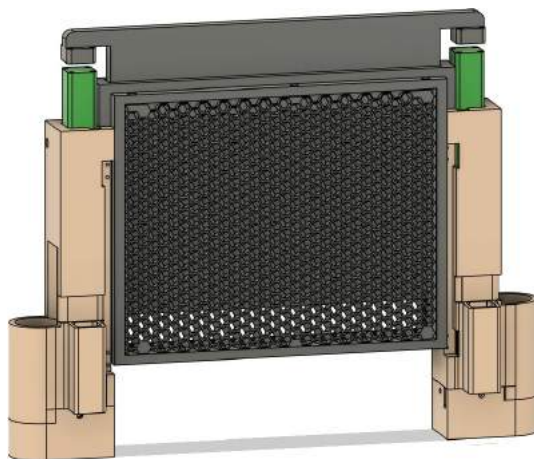
Jakmile je vysunuta stěna, začne med vytékat ze všech komor do prostředního odtokového kanálku, kde steče do jednoho proudu, který směřuje ven z úlu do připravené zavařovací sklenice. Po odčerpání medu, tedy až hmotnost rámků klesne pod stanovenou hodnotu, se prostřední stěna opět zasune.



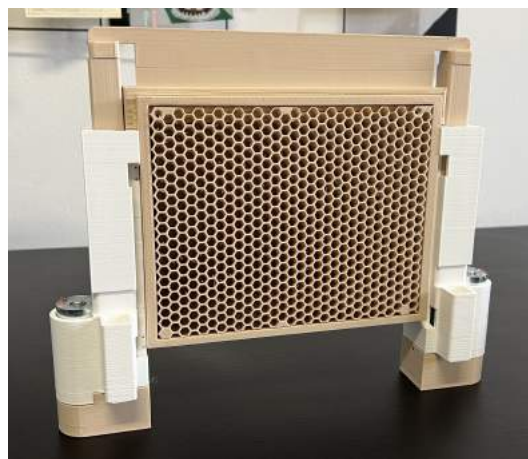
Obrázek 5.8: Prvotní design rámků s pláství obsahující vysunující se lamely v každé komoře.



Obrázek 5.9: Prvotní design rámků vytisknutý na 3D tiskárně osazený lineárním aktuátorem se servomotorem.



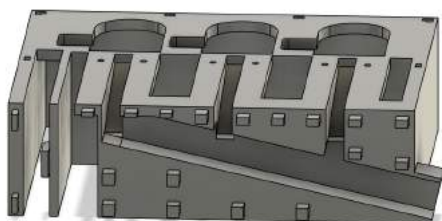
Obrázek 5.10: Finální design rámků a plástve obsahující vysunující se středovou stěnu.



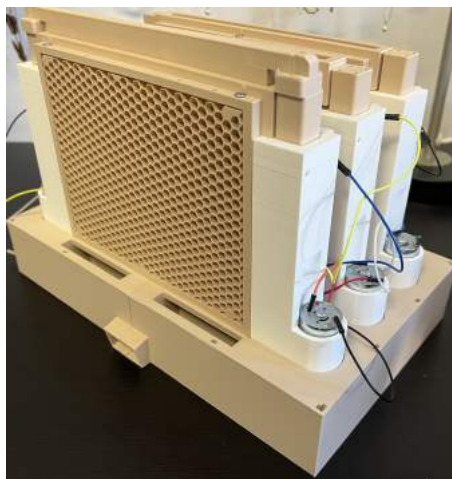
Obrázek 5.11: Finální design rámků vytisknutý na 3D tiskárně osazený lineárním aktuátorem s krokovým motorem.

## Výrobu nástavku se zabudovaným systémem komor

Pro účely realizace procesu sklizně medu, bylo nezbytné rozšířit původní konstrukci včelího úlu o speciální nástavek, který umožňuje odtok medu ven z úlu. Byl vytvořen nový model nástavku, který nejenže splňuje funkci odtoku medu, ale zároveň poskytuje montážní prostor pro lineární aktuátory a stabilní upevnění rámků s plástvemi. V poslední řadě design boxu obsahuje prostor určený pro průchod kabeláže vedoucí k mikrokontroléru.



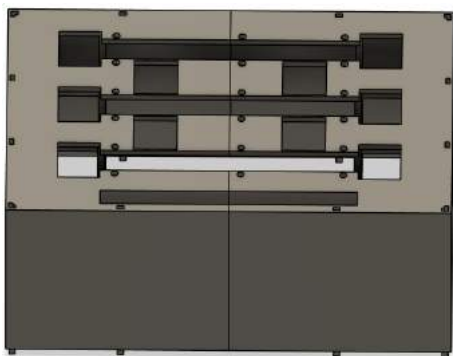
Obrázek 5.12: Průřez boxem pro účely vizualizace odtokové komory



Obrázek 5.13: Nástavek vyrobený na 3D tiskárně osazený motorizovanými plástvemi.

### Výroba nástavku medník

Nástavek je připevněn přímo na box s plástvemi a poskytuje jim ochranu vůči vnějším vlivům. V horní části nástavku je vyhrazen prostor viz obrázek č. 5.14, který umožňuje vysunutí středových komor pláství do prostoru ventilačního nástavku během procesu sklizně medu. V této části jsou také čtyři otvory pro upevnění malých ventilátorů, které mají za úkol posouvat čerstvý vzduch z ventilačního nástavku do středu úlu, což přispívá k internímu ochlazení úlu.



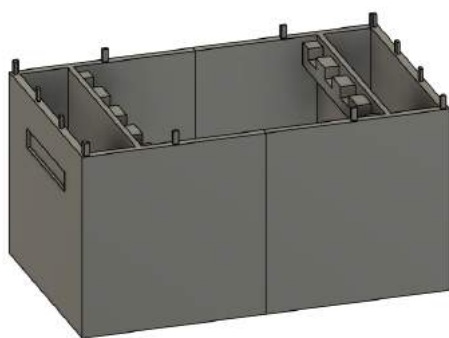
Obrázek 5.14: Model nástavku medník.



Obrázek 5.15: Nástavek medník vyrobený na 3D tiskárně.

### Výroba nástavku plodiště

Model na obrázku č. 5.16 zobrazuje vzhled nástavku, který je rozdělen na 3 komory. Prostřední, největší část slouží pro vložení nemotorizovaných rámků. Tyto rámy jsou včelami využívány k budování pláství, které jsou určeny pro naklazení vajíček královny. Pro uchytení rámků jsou vytvořeny upevňovací žlábký. Dvě boční komory jsou určeny pro uchování veškeré elektroniky úlu, včetně mikrokontroléru, shieldů a dalších komponent.



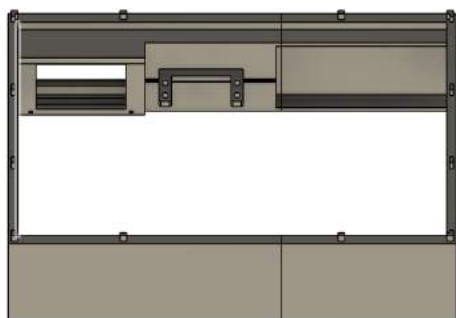
Obrázek 5.16: Model nástavku plodiště.



Obrázek 5.17: Nástavek plodiště vyrobený na 3D tiskárně.

### Výroba ventilačního nástavku

Do ventilačního nástavku byl přidán ventilační otvor viz obrázek č. 5.18, který se bude otvírat za pomoci servomotoru v rámci ventilační procedury. Poblíž otvoru je místo pro upevnění ventilátoru, který se také spustí pouze v rámci probíhající ventilace.



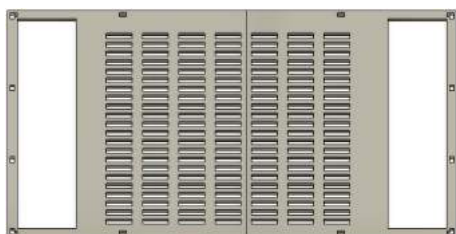
Obrázek 5.18: Model ventilačního nástavku.



Obrázek 5.19: Ventilační nástavek vyrobený na 3D tiskárně.

### Výrobu mateří mřížky

Mateří mřížka viz obrázek č. 5.20 znemožňuje vstup královně do nástavku medník, aby zde nenakladla vajíčka a tím blokovala ukládání medu do pláství. Dimenze otvorů v mřížce mají standardní velikost [13] 18,1 x 4,3 mm.



Obrázek 5.20: Model mateří mřížky.



Obrázek 5.21: Mateří mřížka vyrobená na 3D tiskárně.

## 5.2 Síťová komunikace

Pro připojení mikrokontroléru Arduino k internetové síti je využit modul *ESP8266 ESP-01 WIFI TCP/IP*. Konfigurace WiFi sítě je realizována pomocí AT příkazů<sup>4</sup>, které jsou odesílány přímo z mikrokontroléru do ESP-01 modulu prostřednictvím softwarového sériového portu využitím knihovny *SoftwareSerial.h*. Tento přístup umožňuje mikrokontroléru komunikovat s ESP-01 na jiných pinech než jsou výchozí Arduino Uno sériové piny, aniž by došlo ke kolizi s hardwarově definovanými sériovými porty (RX, TX), které jsou typicky vyhrazeny pro programování a ladění. Při konfiguraci WiFi spojení je nutné prvně nastavit ESP-01 modul do režimu klienta pomocí příkazu *AT+CWMODE=1*. Tento režim umožňuje zařízení připojit se k existující WiFi síti jako běžný klient, což je nezbytné pro následné připojení k síti, které je realizované příkazem *AT+CWLAP=<SSID>,<password>*, kde *<SSID>* a *<password>* jsou nahrazeny konkrétními údaji přístupového bodu, k jehož síti se zařízení snaží připojit.

Celý proces připojení k WiFi je synchronní a zahrnuje čekání na odezvu od ESP-01 modulu, aby se potvrdilo úspěšné připojení. Pokud modul vrátí odpověď *OK*, je to indikace, že připojení bylo úspěšné. V opačném případě kód detekuje chybu a informuje uživatele prostřednictvím sériového výstupu.

Po úspěšném připojení k WiFi síti je iniciováno spojení s MQTT ThingsBoard serverem. To je dosaženo otevřením TCP spojení pomocí AT příkazu *AT+CIPSTART* a následnou konfigurací MQTT CONNECT paketu, který obsahuje potřebné parametry jako typ protokolu, verze protokolu, keep alive interval a autentizační token. Token je zde klíčový pro autentizaci s MQTT brokerem, a je součástí payloadu CONNECT paketu.

Odeslání MQTT paketu je provedeno s využitím příkazu *AT+CIPSEND*, který explicitně specifikuje délku odesílaného paketu. Po úspěšném obdržení výzvy symbolizované znakem *">"*, což signalizuje připravenost modulu k příjmu dat, je kompletní paket odeslán do sítě. Tento postup zajišťuje, že data jsou odesílána pouze po potvrzení připravenosti modulu, čímž se minimalizuje riziko chyby při přenosu.

Při MQTT komunikaci je Arduino v roli *publisher*a připojeno k *brokerovi* platformy ThingsBoard 3.4. Uživatel zaujímá roli *subscriber*a jsou mu ve výstupní aplikaci vytvořené v platformě Thingsboard vizualizována jednotlivá senzorická měření, informace o sběru medu a další podstatné údaje. Mimo jiné má uživatel možnost na dálku vykonat akce ventilace a sklizeň.

## 5.3 Firmware mikrokontroléru Arduino Uno

Algoritmus č. 1 níže popisuje automatizovaný systém pro ovládání ventilace a motorů v úlu. Systém používá senzory teploty a hmotnosti k monitorování a řízení ventilátorů a servomotorů. Ventilátory a motory jsou aktivovány nebo deaktivovány podle předdefinovaných prahových hodnot teploty a hmotnosti. Ventilátory jsou v sepnutém stavu do té doby než teplota uvnitř úlu opět klesne pod daný práh. Servomotor se aktivuje současně s ventilátory, aby umožnil otevření ventilačního otvoru. Krokové motory se spustí pouze během sklizně medu, kdy se po otevření pláství čeká, než med z pláství vyteče (30 min), poté se komory

---

<sup>4</sup>AT (Attention) příkazy jsou sada instrukcí používaných k ovládání a komunikaci s modemy a některými dalšími zařízeními. Tyto příkazy jsou standardizované pro telekomunikační zařízení. Byly původně vyvinuty pro modemy v 80. letech 20. století, ale jejich použití se rozšířilo na různá zařízení, zejména na ty, které zahrnují bezdrátové komunikace, jako jsou mobilní telefony a mikrokontroléry s bezdrátovými moduly (například ESP8266 nebo ESP32)[42].

opět uzavřou. Algoritmus je také pro lepší vizualizaci znázorněn v sekvečním diagramu č. 5.22

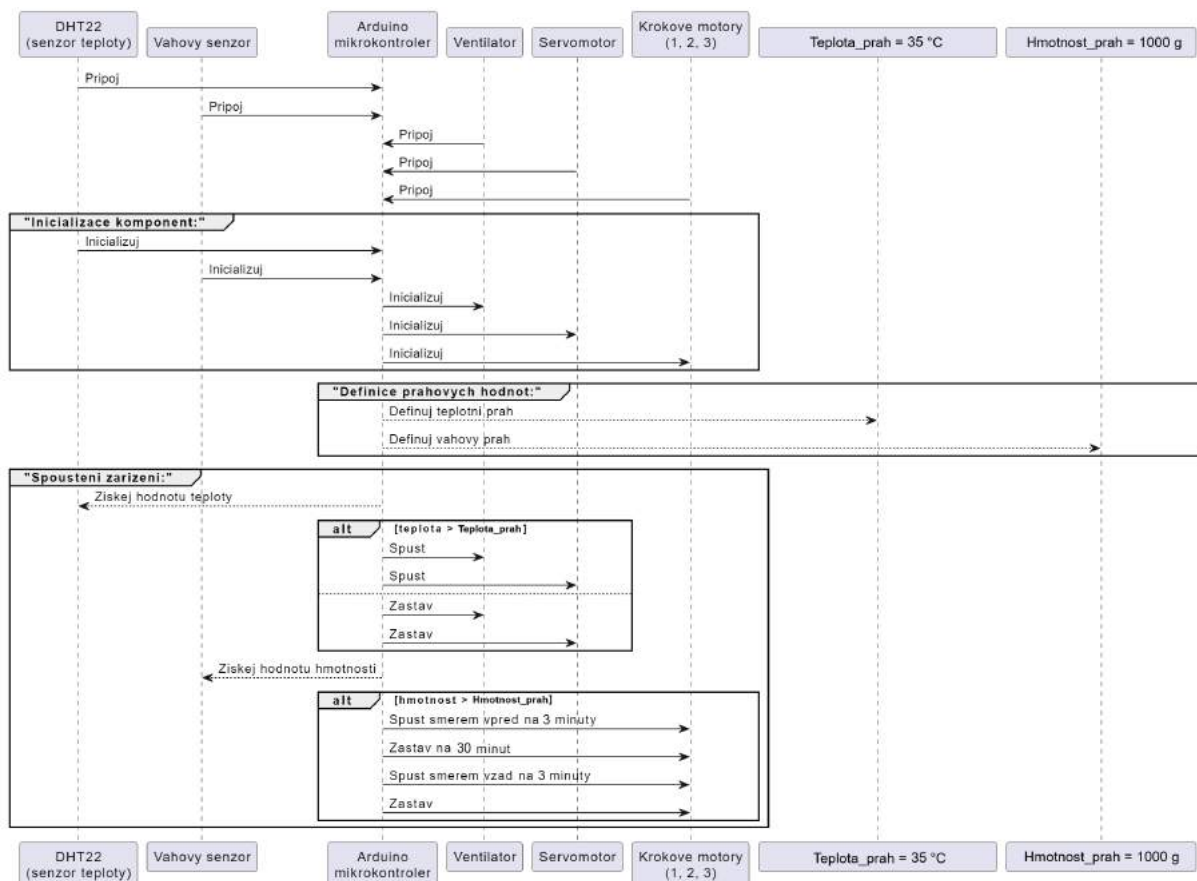
---

**Algorithm 1** Automatické ovládání ventilace a motorů pláství

---

```
1: Inicializace všech komponent
2: Definice teplotního prahu ( $T_{\text{plota\_prah}} = 35^{\circ}\text{C}$ )
3: Definice hmotnostního prahu ( $H_{\text{motnost\_prah}} = 1000\text{ g}$ )
4: while 1 do
5:   Obdržení hodnot teploty z DHT22:
6:   if  $\text{teplota} > T_{\text{plota\_prah}}$  then
7:     Spust ventilátor
8:     Spust servomotor
9:   else
10:    Zastav ventilátor
11:    Zastav servomotor
12:   Obdržení hodnoty hmotnosti z váhového senzoru:
13:   if  $\text{hmotnost} > H_{\text{motnost\_prah}}$  then
14:     Spust krokové motory směrem vpřed na 3 minuty
15:     Zastav krokové motory na 30 minut
16:     Spust krokové motory směrem vzad na 3 minuty
17:     Zastav krokové motory
18:   Časové zpoždění před dalším měřením
19:    $\text{delay}(2000\text{ ms})$ 
```

---



Obrázek 5.22: Sekvenční diagram algoritmu pro mikrokontrolér

## 5.4 Nastavení upozornění pomocí Rule chain

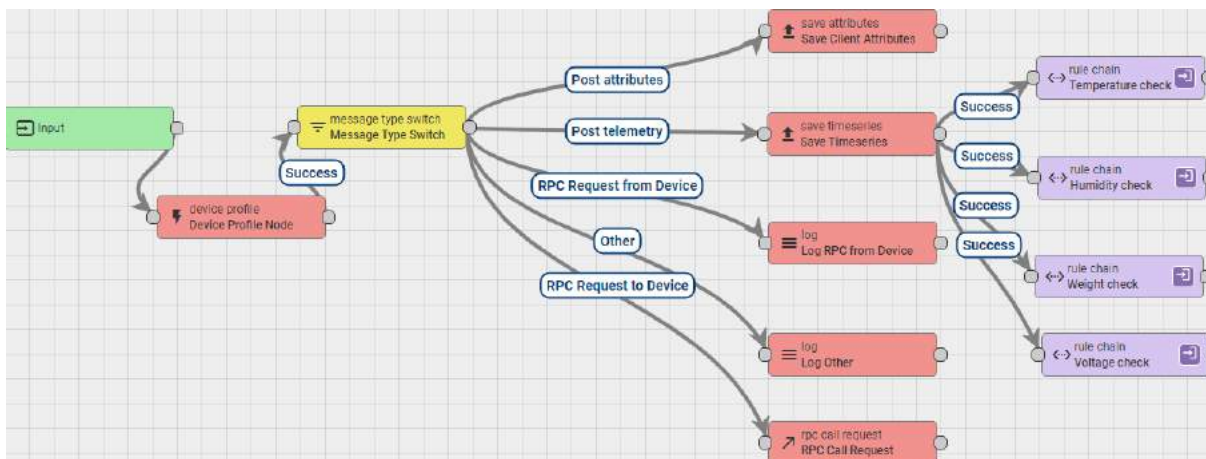
Rule chains (pravidlové řetězce) v platformě ThingsBoard jsou konstruovány tak, aby zvládaly různé aspekty monitorování úlu, včetně hlídání kritických hodnot teploty, vlhkosti, hmotnosti a napětí zdroje. Včasné upozornění včelaře je klíčové pro záchranu včelstva a minimalizaci ztrát.

Na obrázku č. 5.23 je zobrazena základní struktura logiky pro přijímání a zpracování dat ze vstupního zařízení (mikrokontroléru) neboli tzv. *root chain* (kořenový řetězec). Vstupní bod, označený jako *Input*, přijímá data ze zařízení a směřuje je do uzlu *Message Type Switch*. Uzel klasifikuje příchozí data podle jejich typu – telemetrická data, atributy, RPC požadavky a další. V závislosti na typu zprávy jsou data poslána do příslušných návazných uzlů.

Pokud se jedná o telemetrická data, jsou směrována do uzlu *Post Telemetry*, který zajišťuje ukládání těchto dat do time series databáze prostřednictvím uzlu *Save Timeseries*. Pro atributy zařízení je vytvořená cesta přes *Post Attributes*, který data předává uzlu *Save Client Attributes*, jenž zajistí jejich ukládání.

Další důležitou částí jsou uzly pro zpracování RPC komunikace, které zahrnují *RPC Request from Device* a *RPC Request to Device*, tyto uzly umožňují vzájemnou komunikaci mezi serverem a zařízením.



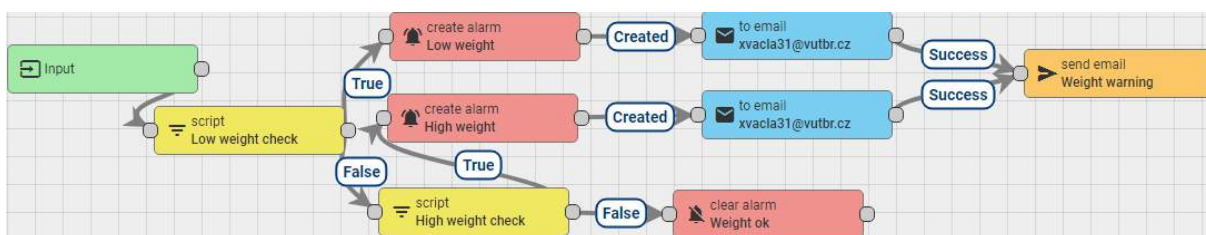


Obrázek 5.23: Struktura root chain

Po úspěšném zpracování telemetrických dat následuje aktivace specifických rule chains, jmenovitě *Temperature Check*, *Humidity Check*, *Weight Check*, a *Voltage Check*. Tyto rule chains jsou připojeny k výstupu *Success* uzlu *Save Timeseries*. Aktivace těchto rule chains nastává v momentě, kdy jsou telemetrická data úspěšně zpracována a následně uložena v databázi. V těchto dodatečných rule chains jsou data analyzována pomocí specifických skriptů, které ověřují, zda hodnoty nepřekročily nastavené limity pro teplotu, vlhkost, váhu a napětí zdroje. Při detekci jakýchkoli anomálií nebo překročení limitních hodnot jsou generovány poplachu a odesílány varovné e-maily.

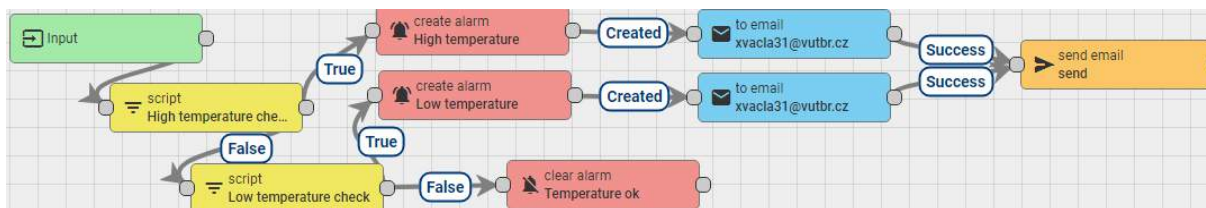
V rámci dodatečných rule chains se k ověřování kritických hodnot využívají skripty, kde každý každý má nastavenou specifickou hodnotu prahu měřené veličiny.

Rule chain pro váhu (weight) viz obrázek č. 5.24 je navržen tak, aby detekoval, když váha úlu přesáhne 1000 g. Tato situace může ukazovat na potenciální problémy, jako je neúspěšné sklizení medu nebo nárůst počtu včel. Pokud tato situace nastane, systém automaticky generuje poplach a odesílá e-mailové varování. Pokud váha úlu zůstane v normálním rozmezí, je poplach automaticky zrušen.



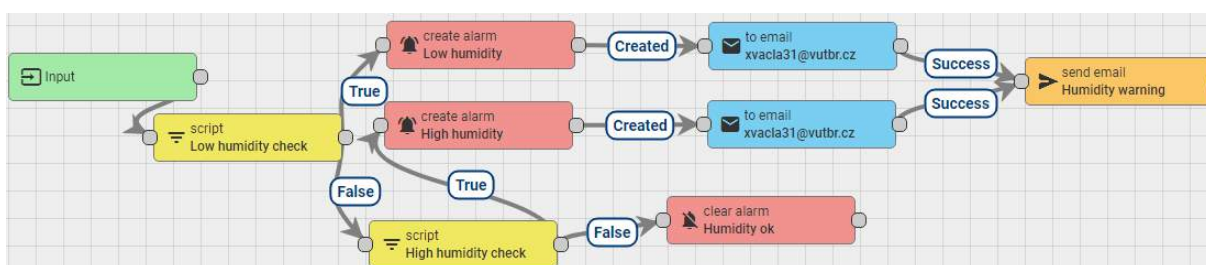
Obrázek 5.24: Struktura weight chain

V Rule chain pro teplotu (temperature) viz obrázek č. 5.25 jsou nastaveny dvě klíčové prahové hodnoty – vysoká teplota 35 °C a nízká teplota 5 °C. Pokud teplota v úlu překročí horní limit, vyvolá to vytvoření poplachu a odeslání varování e-mailem o vysoké teplotě. Naopak, pokles teploty pod dolní limit způsobí podobnou akci pro nízkou teplotu. Teploty v mezích těchto prahů vedou k zrušení všech aktivních poplachů týkajících se teploty.



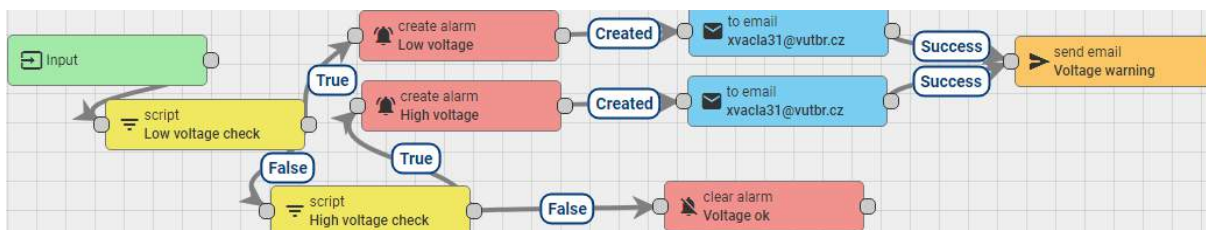
Obrázek 5.25: Struktura temperature chain

Podobně jako teplota, vlhkost (humidity) viz obrázek č. 5.26 má nastavené limity na 70% pro vysokou vlhkost a 5% pro nízkou vlhkost. Překročení kteréhokoli z těchto limitů vyvolá vytvoření poplachu a odeslání příslušného varovného e-mailu, buď o vysoké nebo nízké vlhkosti. Je-li vlhkost udržována v rozmezí těchto hodnot, systém ruší všechny poplachy spojené s vlhkostí.



Obrázek 5.26: Struktura humidity chain

Rule chain viz obrázek č. 5.27 pro monitorování napětí zdroje reaguje na hodnoty mimo bezpečné rozmezí mezi 1 V a 10 V. Jak vysoké, tak nízké napětí může signalizovat problémy s elektrickými zařízeními v úlu. Při detekci vysokého napětí nad 10 V nebo nízkého napětí pod 1 V systém vytváří poplach a okamžitě odesílá varovací e-mail. Stabilní napětí v normálním rozmezí vede ke zrušení příslušných poplachů.



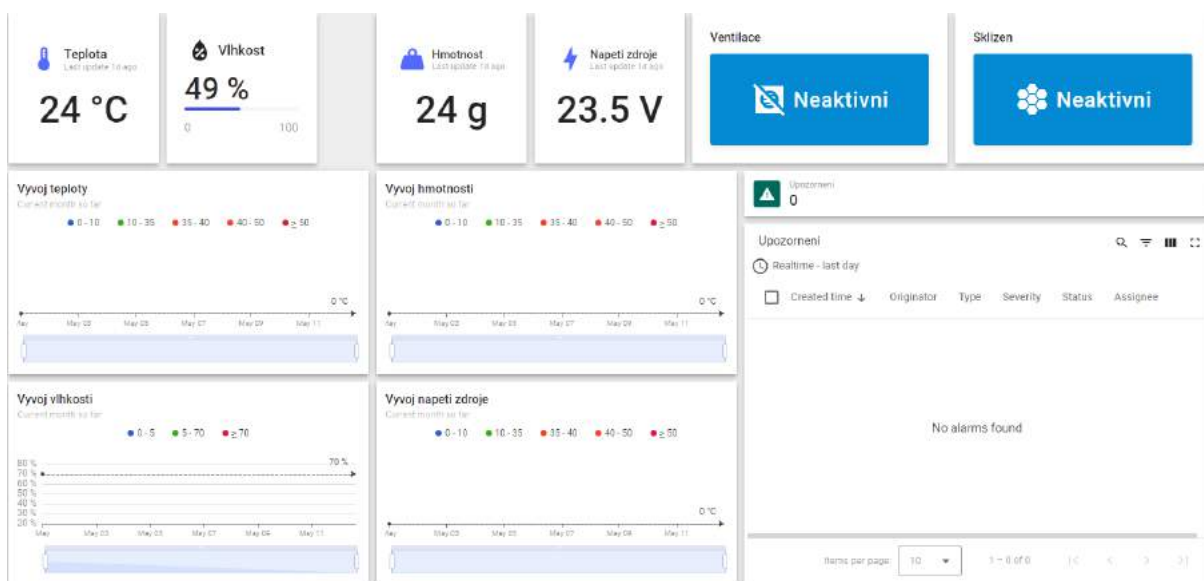
Obrázek 5.27: Struktura voltage chain



## 5.5 Grafické uživatelské rozhraní

Základem grafického uživatelského rozhraní (GUI) viz obrázek č. 5.28 je *dashboard*, který zobrazuje v reálném čase data teploty, vlhkosti, hmotnosti a napětí napájecího zdroje. Tyto data jsou zobrazena jak ve formě aktuálních hodnot, tak prostřednictvím trendových grafů, které pomáhají uživatelům rychle interpretovat časový vývoj měřených parametrů.

Na pravé straně GUI jsou situovaná dvě tlačítka - *Ventilace* a *Sklizen*. Tyto dva interaktivní prvky slouží pro spouštění nebo zastavení automatizovaných procesů. Ventilace aktivuje soustavu ventilátorů a také servomotor, který zajišťuje otevření ventilačních dvířek. Tlačítko *Sklizen* aktivuje mechanismus pro extrakci medu, jehož hlavním prvkem jsou motorizované plástve.



Obrázek 5.28: Grafické uživatelské rozhraní

## Kapitola 6

# Testování systému

V této kapitole je proveden detailní test jednotlivých částí řešení. Experimenty byly prováděny v simulovaných podmínkách uvnitř budovy, bez přítomnosti včel. Hlavním důvodem těchto podmínek byla skutečnost, že během testování ještě neprobíhala letní sezóna, a tedy nebylo možné úl otestovat v reálných podmínkách.

### 6.1 Testy jednotlivých částí úlu

#### Testování mechanismu pláství

Cílem experimentu bylo otestovat úplné zasunutí lamel plástve v případě vyvolání akce *Sklizeň*. Během testování první verze mechanismu pláství došlo k problémům. Celý systém měl obsahovat 110 lamel, ale již při vložení poloviny z nich docházelo ke vzniku příliš velkého tření a motory nebyly schopny poskytovat dostatečný výkon, aby mechanismus fungoval. Experiment první verze pláství skončil neúspěchem. Na základě tohoto výsledku bylo třeba mechanismus zcela změnit.

Druhá verze pláství popsána v kapitole č. 5 v sekci č. 5.1 byla navržena s důrazem na větší přiblížení se přirozeným podmínkám v přírodě. Z každé strany plástve je lineární aktuátor, který řídí pohyb středové stěny po vertikální ose. Cílem experimentu je zjistit, zda se lineární aktuátory úspěšně aktivují a vyzvednou stěnu do patřičné výšky, aby med mohl z pláství volně vytéct. Poté aktuátor opět stěnu zasune a vrátí se do startovní pozice.

Během testování byly zkoumány všechny tři plástve a med z nich úspěšně vytekl do středové komory. Test ukázal, že se jedná o poměrně dlouhý proces trvající až jednu hodinu. Při prvním naplnění a vyprázdňení pláství se zjistilo, že pouze malé množství medu se dostane mimo úl do připravené sklenice. Avšak během následných opakování testu bylo pozorováno, že med vytéká stále snadněji. Tento efekt je způsoben tím, že již nashromážděný med snižuje frikci pro další přitékající med, což mu umožňuje snadnější průchod ven. Test prokázal částečné splnění požadované funkcionality.

#### Testování komunikace Arduina a ThingsBoard serveru

Cílem tohoto testování je ověřit, zda MQTT komunikace mezi ThingsBoard a Arduino Uno funguje správně a zda jsou data správně přijata. Klíčovým předpokladem je, že všechny komponenty systému jsou správně nakonfigurovány, včetně MQTT brokeru, ThingsBoard serveru a Arduino, a že nimi existuje stabilní síťové připojení.

Bylo provedeno 8 testů, které byly rozloženy do různých časových úseků s minimálním odstupem jedné hodiny mezi jednotlivými testy. Tento rozvrh byl zvolen za účelem eliminace potenciálního vzájemného ovlivnění výsledků testů. Při každém testu bylo zasláno 20 zpráv a měřila se nejen celková úspěšnost, ale i latence systému. Pro přesné měření byla využita časová razítka.

Tabulka 6.1: Výsledky testování systémové komunikace

Test č.	Latence (ms)	Počet chyb	Úspěšnost (%)
1	50	0	100
2	55	0	100
3	49	1	95
4	52	1	95
5	60	2	90
6	48	0	100
7	55	1	95
8	53	3	85

Na základě dat prezentovaných v tabulce č. 6.1 výše lze usoudit, že testovaný systém vykazuje obecně dobré výsledky v oblasti latence a účinnosti. Latence systému se pohybovala mezi 52,75 ms, což naznačuje, že reakční doba systému je konzistentně rychlá a bude možné implementovat do systému interaktivní prvky jako jsou tlačítka, které budou umožňovat včelaři reakce na vzniklé události v reálném čase.

Úspěšnost přijetí zpráv byla většinou velmi vysoká, tedy výskyt chyb byl minimální. Ojedinelý výskyt chyb může být připsán dočasným výpadkům lokálního WiFi signálu. Tento výsledek ukazuje, že komunikační linka mezi ThingsBoard a Arduino Uno je stabilní a spolehlivá.

## Testování robustnosti a zátěžový test databáze

Cílem bylo testovat, jak systém a Time-series databáze zvládne zvýšené množství dat odesílaných v krátkém časovém intervalu. Data byla generována a odesílána z Arduino Uno mikrokontroléru s rozdílnou frekvencí zasílání zpráv, přičemž každé měření obsahovalo hodnoty teploty, vlhkosti, hmotnosti a napětí. K měření latence byla využita časová razítka.

Tabulka 6.2: Výsledky latence zátěžového testu systému a databáze

Frekvence odesílání dat	Průměrná doba odezvy (ms)
Každých 60 s	55
Každých 30 s	56
Každých 20 s	60
Každých 10 s	77
Každých 5 s	92

Z tabulky č. 6.2 lze vypočítat, že i při zasílání zpráv s intervalem 20 s se latence systému téměř nezměnila. Avšak, pokud je interval mezi odesílanými zprávami ještě zkrácen, pozorujeme významný nárůst výsledné latence zpracování. Při intervalu odesílání 1 s dochází k přetížení a následnému selhání systému. Vzhledem k tomu, že Arduino bude zasílat aktualizované informace v minimálních intervalech 3 min, lze konstatovat, že frekvence odesílání zpráv nebude mít negativní vliv na stabilitu a výkonnost systému.

## 6.2 Celkový test funkčnosti úlu

Při tomto komplexní experimentu je vyvolána řada událostí a očekává se adekvátní odpověď systému při řešení těchto situací.

### Testování automatického spuštění fáze sklizeň

Hlavním cílem experimentu bylo automatizované spuštění sklizně při dosažení 90% plnosti pláství, tato prahová hodnota bylo později upravena na 35% z důvodů zmíněných v posledním odstavci. Systém využívá tenzometry pro měření plnosti, které komunikují s mikrokontrolérem. Mikrokontrolér následně ovládá krokové motory, jež pohánějí lineární aktuátor pro vertikální pohyb středové stěny, která zadržuje med. Tento med poté může vytečet systémem kanálků do připravené sklenice. Jelikož je soustava čtyř tenzometrů umístěna pod celým úlem, bylo nezbytné odečíst váhu prázdného úlu od celkové hmotnosti. Výsledky měření hmotnosti byly současně verifikovány tím, že byl úl umístěn na běžné potravinové váze, která má maximální měřitelnou hodnotu 20 kg s přesností na 1 g.

Tabulka 6.3: Tabulka % přesnosti zahájení fáze sklizeň

Test č.	Spuštění sklizně při % zaplnění pláství	Odchylka od prahu (%)
1	38	+3
2	5	-30
3	11	-24
4	10	-25
5	7	-28
6	12	-23
7	14	-21
8	11	-24

Celkové provedení testu bylo obtížné, zejména kvůli nutnosti simulovat reálné podmínky ručním naléváním medu do pláství. Tento postup vyžadoval velkou přesnost, aby nedošlo k nechtěnému vytečení medu. Kromě toho v reálném prostředí včely při ukládání medu do pláství současně produkují voskové zátky, které zabraňují jeho vytečení na druhé straně. Vzhledem k těmto faktorům bylo rozhodnuto stanovit nižší prahovou hodnotu plnosti pláství na 35 %, od které se následně odvíjelo spuštění automatické sklizně.

Během všech testů byl krokové motory úspěšně aktivovány a med z pláství vytekl. Z výsledků testu v tabulce č. 6.3 lze usoudit, že systém není přesný a existuje relativně velká odchylka od prahové hodnoty. Chyba je způsobena zejména hromaděním medu v odtokovém

kanálku. Jakmile je však kanálek naplněn, med vytéká zcela dle očekávání. Pro vylepšení systému je vhodné závest kalibrační fázi. Během této fáze by se provedla řada naplnění a vyprázdnění pláství za účelem naplnění kanálku, poté by se aktualizovala hodnota prahu dle aktuální naměřené hmotnosti.

### Testování automatického spuštění fáze ventilace

Cílem experimentu je, aby při překročení prahové teploty 40 °C uvnitř úlu, byla spuštěna ventilace a také byl úspěšně otevřen ventilační otvor. Ventilace musí být v provozu do té doby než teplota klesne pod stanovený práh. Bylo provedeno 10 pokusů přičemž, všechny byly úspěšné. Měření bylo vždy verifikováno za pomoci digitálního teploměru. V 6.4 níže lze vidět zpoždění reakce systému na zvýšenou teplotu, která přesahuje prahovou hodnotu. V tabulce je také zapsána velikost odchylky od prahové hodnoty v době, kdy byla zahájena ventilace.

Tabulka 6.4: Reakce systému na zvýšení teploty

Test č.	Zpoždění reakce (s)	Odchylka od prahu (°C)
1	20	2,4
2	11	1,6
3	15	1,8
4	19	2,5
5	13	1,6
6	33	3,1
7	25	2,8
8	18	1,9
9	24	2,8
10	5	1,2

Na základě výsledků provedeného experimentu lze konstatovat, že reakce systému na změnu teploty byla v rozmezí desítek sekund s průměrnou hodnotou 17,8s. Zpoždění je způsobeno zejména pomalou reakcí senzoru DHT22 na rychlé změny teploty. Vzhledem k tomu, že systém bude aktivní převážně během letních dnů od ránu až do večera, je toto zpoždění považováno za zanedbatelné s porovnáním s délkou provozní doby. Reakce systému je dostatečná a zpoždění v přijatelných mezích, a proto je tento test úspěšný.

### Testování vzniklých alertů

Cílem experimentu je, aby systém správně vyvolal daný alert při vzniklé kritické události (extrémní teplota, vlhkost, hmotnost,...). Alert je zasílán serverem na email klienta pomocí SMTP protokolu.

Během testování byly kritické události odesílány pomocí linuxového příkazu *curl -POST*, což umožnilo simulovat vstupní kritické hodnoty. Reakce všech *rule chain* byly v souladu s očekáváním, a výsledná upozornění jsou zobrazena na obrázku č. 6.1. Na základě typu události je možné určit, které konkrétní problémy byly identifikovány.

Filter: Active		For all time		
<input type="checkbox"/>	Created time ↓	Originator	Type	Severity
<input type="checkbox"/>	2024-05-13 09:22:36	<a href="#">UI</a>	Spatná TEPLOTA v ulu	Critical
<input type="checkbox"/>	2024-05-13 09:22:36	<a href="#">UI</a>	Spatna HMOTNOST ulu	Critical
<input type="checkbox"/>	2024-05-13 09:22:36	<a href="#">UI</a>	Spatná NAPETI v ulu	Critical
<input type="checkbox"/>	2024-05-13 09:22:36	<a href="#">UI</a>	Spatná VLHKOST v ulu	Critical

Obrázek 6.1: Vzniklé kritické události

Dále bylo ověřeno, že po zaslání nekritických dat do systému došlo k automatickému vymazání všech předchozích upozornění daného typu. Tento postup potvrzuje správnou funkčnost a dynamickou reakci systému na změnu stavu vstupních dat.

### 6.3 Shrnutí všech provedených experimentů

Během testování byla potvrzena vysoká přesnost senzorického měření a nízká latence v komunikaci mezi mikrokontrolérem a serverem. Uživatelské rozhraní přesně zobrazovalo data čtená senzory, a systém spolehlivě reagoval na detekované události zasláním emailové notifikace a aktualizací stavového widgetu. Z testování však také vyplývá, že měření hmotnosti pláství vykazuje nižší přesnost, což je způsobeno umístěním tenzometrů na spodní straně úlu. Pro budoucí vylepšení by bylo vhodné implementovat systém, který umožňuje měřit hmotnost každé plástve nezávisle, což by zvýšilo přesnost a efektivitu automatického spouštění sklizně medu.

## Kapitola 7

# Závěr

V této práci byl úspěšně vytvořen elektronicky řízený úl, který implementuje hardwarové a softwarové prvky umožňující efektivní kontrolu a správu včelařských operací. Byl vytvořen unikátní systém pro samosběr medu a funkční systém ventilace. V rámci webového rozhraní je včelař informován o všech senzorických měřeních a prostřednictvím e-mailu je upozorněn na jakoukoli detekovanou abnormalitu.

Na základě provedené rešerše byla vypracována analýza a stanoven optimální postup práce. Implementační fáze zahrnovala vytvoření modelů jednotlivých komponent úlu v CAD softwaru Fusion 360, následný 3D tisk těchto komponent a programování firmware pro mikrokontrolér, který řídí senzory a motory. Komunikace mezi serverem a webovým rozhraním byla implementována s využitím IoT platformy ThingsBoard. Všechny komponenty byly nejdříve testovány individuálně a poté integrovány do kompletního systému, který byl také podroben testování.

Provedené experimenty ukázaly vysokou přesnost senzorů a efektivní komunikaci s uživatelským rozhraním, které spolehlivě reaguje na změny. Došlo k identifikaci menších nedostatků v přesnosti měření hmotnosti pláství a toto zjištění poskytuje impuls pro další vylepšení systému. Umístění tenzometrů přímo pod jednotlivé plástve by v budoucnu mohlo značně zvýšit přesnost měření. Testování v simulovaných podmínkách prokázalo spolehlivost systému, avšak vzhledem k tomu, že vývoj probíhal mimo včelařskou sezónu, nebylo možné provést ověření v reálném prostředí. Proto bude systém v budoucnu podroben testům přímo v terénu za skutečných operativních podmínek.

Tato práce otevírá široké možnosti pro další vývoj zejména v oblasti softwaru a hardwaru. V rámci softwaru by bylo vhodné rozšířit systém o implementaci jednoduché neuro-nové sítě, která by asistovala včelaři v rozhodování o detekci anomálií a dalších zásadních úkonech spojených se životními procesy včel, včetně detekce varroázy a dalších nemocí. V hardwarové komponentě by mohly být do úlu integrovány cukrové zásobníky pro automatické dávkování potravy během zimních měsíců. Navrhuje se také zahrnutí systému vytápění jednotlivých částí úlu pomocí malých přímotopů nebo vytápění podlah PCB desek s integrovanými teplovodivými prvky, podobně jako je tomu u technologií 3D tisku. Současný projekt je závislý na připojení k elektrické síti, avšak pro zvýšení soběstačnosti by bylo vhodné zkoumat možnosti integrace solárních panelů či jiných zdrojů obnovitelné energie do systému.

Projekt má velký potenciál, a proto bude dále rozvíjen a testován v reálných podmínkách ve spolupráci s místními včelaři. Na základě získané zpětné vazby bude rovněž prováděna jeho další optimalizace.

# Literatura

- [1] ABOU SHAARA, H. F. et al. Impact of physical factors on activities of honey bees: potential hazards and future perspectives. *Environmental and Experimental Biology*. Damanshour, Egypt: [b.n.]. 2018, sv. 16, s. 285–290. DOI: 10.22364/eeb.16.19.
- [2] ACORN, E. et al. Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators with muscle-like performance. *Science*. Washington, D.C.: [b.n.]. 2018, sv. 32, s. 61–65. DOI: 10.1126/science.aao6139. ISSN 1860-2134.
- [3] AGHENTA, L. O. a IQBAL, T. Design and implementation of a low-cost, open source IoT-based SCADA system using ESP32 with OLED, ThingsBoard and MQTT protocol. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*. St. John's, Kanada: American Institute of Mathematical Sciences (AIMS). 2019, sv. 4, č. 1, s. 57–86. DOI: 10.3934/ElectrEng.2020.1.57.
- [4] ALL3DP. *The 7 Main Types of 3D Printing Technology* [online]. Mnichov, Německo: All3DP, leden 2023 [cit. 2024-15-01]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>.
- [5] AUTOMATION, I. *What is SCADA? Supervisory Control and Data Acquisition* [online]. Folsom, Kalifornie: Inductive Automation Inc., 2023 [cit. 2024-18-01]. Dostupné z: <https://inductiveautomation.com/what-is-scada>.
- [6] BADAMASI, Y. A. *The Working Principle Of An Arduino*. Abuja, Nigérie: ICECCO, 2014 [cit. 2022-23-04]. DOI: 10.1109/ICECCO.2014.6997578.
- [7] BERTE, D.-R. Defining the IoT. *Proceedings of the International Conference on Business Excellence*. San Francisco, Kalifornie: [b.n.]. Květen 2018, sv. 12, s. 118–128. DOI: 10.2478/picbe-2018-0013.
- [8] BOECKMANN, C. *Langstroth, Horizontal Top Bar, and Warré Hives* [online]. Dublin, Irsko: Yankee Publishing, Inc, listopad 2023 [cit. 2024-15-02]. Dostupné z: <https://www.almanac.com/beekeeping-101-types-of-beehives>.
- [9] CAMERON, N. ESP32 Formats and Communication: Application of Communication Protocols with ESP32 Microcontroller. In: Berkeley, Kalifornie: Apress, 2023. DOI: 10.1007/978-1-4842-9376-8. ISBN 978-1-4842-9376-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9376-8>.
- [10] CAO, X., ZHANG, M., ZHANG, Z. et al. Review of Soft Linear Actuator and the Design of a Dielectric Elastomer Linear Actuator. *Acta Mechanica Solida Sinica*. Wu-chan, Čína: [b.n.]. 2019, sv. 32, s. 566–579. DOI: 10.1007/s10338-019-00112-8. ISSN 1860-2134.



- [11] CHEN, K. An Adaptable IoT Rule Engine Framework for Dataflow Monitoring and Control Strategies. *ArXiv*. Peking, Čína: [b.n.]. 2023, abs/2310.05493, s. 15. DOI: 10.48550/arXiv.2310.05493. ISSN 0141-3910.
- [12] CRAWFORD, M. *Automated collection of honey bee hive data using the raspberry pi*. Boone, Severní Karolína, 2017. Diplomová práce. Appalachian State University. Dostupné z: [https://libres.uncg.edu/ir/asu/f/Crawford,%20M\\_2017%20Thesis.pdf](https://libres.uncg.edu/ir/asu/f/Crawford,%20M_2017%20Thesis.pdf).
- [13] CUSHMAN, D. *Excluder Types* [online]. Liss, Velká Británie: [b.n.], 2023 [cit. 12.3.2024]. Dostupné z: <http://www.dave-cushman.net/bee/excludertypes.html>.
- [14] ERRERA, R. *3D Printing Statistics* [online]. Camden County, New Jersey: Tone Buzz, říjen 2022 [cit. 2024-15-03]. Dostupné z: <https://www.tonerbuzz.com/blog/3d-printing-statistics/>.
- [15] FIELDING, R. T., NOTTINGHAM, M. a RESCHKE, J. *HTTP/1.1*. Reston, Virginia: RFC Editor, červen 2022. DOI: 10.17487/RFC9112. Dostupné z: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9112>.
- [16] FINA, F. et al. Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines. *International Journal of Pharmaceutics*. 2017, sv. 529, č. 1, s. 285–293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.06.082>. ISSN 0378-5173. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378517317305902>.
- [17] HAJI, S. H. a SALLOW, A. B. IoT for Smart Environment Monitoring Based on Python: A Review. *Asian Journal of Research in Computer Science*. May 2021, sv. 9, č. 1, s. 57–70. DOI: 10.9734/ajrcos/2021/v9i130215. Dostupné z: <https://journalajrcos.com/index.php/AJRCOS/article/view/168>.
- [18] HUGHES, A. a DRURY, B. *Electric motors and drives: fundamentals, types and applications*. 4th. Oxford, Velká Británie: Newnes, 2013. ISBN 0080983324.
- [19] ISMAILOV, A. S., JO‘RAYEV, Z. B. et al. Study of arduino microcontroller board. *Science and Education*. 2022, sv. 3, č. 3, s. 172–179.
- [20] KOČÍ, J. *How to improve your 3D prints with annealing* [online]. Praha, Česká republika: PrusaResearch, 2024 [cit. 1.2.2024]. Dostupné z: [https://blog.prusa3d.com/cs/jak-zesilit-svuj-vytisk-zihanim\\_31088/](https://blog.prusa3d.com/cs/jak-zesilit-svuj-vytisk-zihanim_31088/).
- [21] KRISTIAWAN, R. B. et al. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*. 2021, sv. 11, č. 1, s. 639–649. DOI: 10.1515/eng-2021-0063. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>.
- [22] KUMAR, R., ROOPA, A. a SATHIYA, D. P. Arduino ATMEGA-328 microcontroller. *Int. J. Innov. Res. Electr. Electron. Instrum. Control Eng.* 2015, sv. 3, č. 4, s. 27–29.
- [23] KUNDU, M. a KUMAR, A. A Review on Low Power SPI Protocol. *International Journal of VLSI Design and Communication Systems (IJVDCS)*. Mullana, India: [b.n.]. 2014, sv. 2, s. 193–195.

- [24] LEUNG, K.-C. a LI, V. Transmission control protocol (TCP) in wireless networks: issues, approaches, and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*. 2006, sv. 8, č. 4, s. 64–79. DOI: 10.1109/COMST.2006.283822.
- [25] LOUIS, L. Working principle of Arduino and using it as a tool for study and research. *International Journal of Control, Automation, Communication and Systems (IJCACS)*. 2016, sv. 1, č. 2, s. 21–29. DOI: 10.5121/ijcacs.2016.1203.
- [26] MANKAR, J., DARODE, C., TRIVEDI, K., KANOJE, M. a SHAHARE, P. Review of I2C protocol. *International Journal of Research in Advent Technology*. Citeseer. 2014, sv. 2, č. 1.
- [27] MDN. *An overview of HTTP* [online]. San Francisco, California: Mozilla Corporation, říjen 2023 [cit. 2024-09-01]. Dostupné z: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/Overview>.
- [28] MEITALOV, J., HISTJAJEV, A. a STALIDZANS, E. Automatic Microclimate Controlled Beehive Observation System. *8th International Scientific Conference 'Engineering for Rural Development'*. Leden 2009, s. 265–271.
- [29] MURARIU, M. a DUBOIS, P. PLA composites: From production to properties. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2016, sv. 107, s. 17–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.04.003>. ISSN 0169-409X.
- [30] OCHOA, I. Z., GUTIERREZ, S. a RODRÍGUEZ, F. Internet of Things: Low Cost Monitoring BeeHive System using Wireless Sensor Network. *IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV)*. 2019, I. DOI: 10.1109/ICEV.2019.8920622.
- [31] OEDER, S. D. The upward tilt of honeycomb cells increases the carrying capacity of the comb and is not to prevent the outflow of honey. *Apidologie*. 2020, sv. 52, č. 2, s. 174–185. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13592-020-00807-9>.
- [32] PEÑA, E. a LEGASPI, M. G. Uart: A hardware communication protocol understanding universal asynchronous receiver/transmitter. *Visit Analog*. 2020, sv. 54, č. 4, s. 1–5.
- [33] PÉTER, T., LITAUSZKI, K. a KMETTY Ákos. Improving the heat deflection temperature of poly(lactic acid) foams by annealing. *Polymer Degradation and Stability*. 2021, sv. 190, s. 109646. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2021.109646>. ISSN 0141-3910.
- [34] RAMON, M. C. *Arduino IDE and Wiring Language*. Berkeley, CA: Apress, 2014. 93–143 s. ISBN 978-1-4302-6838-3. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-1-4302-6838-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4302-6838-3_3).
- [35] RICHARDS, R. *Representational State Transfer (REST)*. Berkeley, CA: Apress, 2006. 633–672 s. ISBN 978-1-4302-0139-7. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-1-4302-0139-7\\_17](https://doi.org/10.1007/978-1-4302-0139-7_17).
- [36] RICHARDSON, L. a RUBY, S. *RESTful web services*. Sebastopol, California: O'Reilly Media, Inc., 2008. 454 s. ISBN 0596529260.

- [37] SHELBY, Z. et al. *The Constrained Application Protocol (CoAP)* [RFC 7252]. RFC Editor, červen 2014. DOI: 10.17487/RFC7252. Dostupné z: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc7252>.
- [38] SINGH, B. State of the Art on Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives. *Journal of Power Electronics*. 2009, sv. 9, č. 1, s. 1–17. ISSN 1598-2092.
- [39] SONI, D. a MAKWANA, A. A survey on mqtt: a protocol of internet of things (iot). Chennai, Indie: [b.n.]. duben 2017, sv. 20, s. 173–177.
- [40] TASHAKKORI, R. et al. Beemon: An IoT-based beehive monitoring system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021, sv. 190, s. 12. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106427. ISSN 0168-1699. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169921004440>.
- [41] THINGSBOARD. *ThingsBoard documentation* [online]. New York City, New York: ThingsBoard Inc., 2024 [cit. 2024-15-03]. Dostupné z: <https://thingsboard.io/docs/>.
- [42] TIAN, D. et al. ATtention Spanned: Comprehensive Vulnerability Analysis of AT Commands Within the Android Ecosystem. Baltimore, MD: USENIX Association. srpen 2018, s. 273–290. Dostupné z: <https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity18/presentation/tian>.
- [43] ULLO, S. L. a SINHA, G. R. Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors. *Sensors*. 2020, sv. 20, č. 11. DOI: 10.3390/s20113113. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/11/3113>.
- [44] YADAV, G. a PAUL, K. Architecture and security of SCADA systems: A review. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2021, sv. 34, s. 100433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2021.100433>. ISSN 1874-5482. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874548221000251>.
- [45] YILMAZLAR, E. et al. Design of Stepper Motor Control Interface with Embedded Systems. *International Journal Of Engineering Research And Development*. 2018, sv. 14, č. 06, s. 17–22.
- [46] ZHANG, Q. et al. Emissions and Chemical Exposure Potentials from Stereolithography Vat Polymerization 3D Printing and Post-processing Units. *ACS Chemical Health & Safety*. 2022, sv. 29, č. 2, s. 184–191. DOI: 10.1021/acs.chas.2c00002.
- [47] ÇORAK, B. H. et al. Comparative Analysis of IoT Communication Protocols. *International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*. 2018, s. 1–6. DOI: 10.1109/ISNCC.2018.8530963.
- [48] ŠEFČÍK, J. *Začínáme včelařit*. 1. vyd. Brno, Česká republika: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-4857-3.

## Příloha A

# Zapojení elektrického obvodu úlu

---

<sup>1</sup>Schéma vytvořeno v aplikaci Fritzing <https://fritzing.org/>

