

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## ELEKTRONICKÝ ŘÍDICÍ SYSTÉM FOUKACÍ HARMONIKY

ELECTRONIC CONTROL SYSTEM OF MOUTH-ORGAN

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Pokorný

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D.

BRNO 2021

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Tomáš Pokorný

**ID:** 211169

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Elektronický řídicí systém foukací harmoniky

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Komplexně přepracujte elektronický systém pro řízení klávesové foukací harmoniky. Zaměřte se na vestavný systém řízení (Raspberry PI atd.). Systém vybavte nezbytnými akčními členy pro ovládání klapek hudebního nástroje a pro řízení a ovládání tlakového vzduchu. Systém navrhnete pro přehrávání MIDI souborů včetně implementace MIDI kláves.

1. Proveďte literární rešerši a internetový průzkum.
2. Navrhnete a zdůvodnete koncepci systému, definujte zvolené komponenty, navrhnete obvodové schéma.
3. Navrhnete a realizujete funkční vzorek zařízení.
4. Vytvořte programové vybavení pro nadřazený systém i pro vlastní zařízení.
5. Demonstrujte a ověřte plnou funkčnost zařízení a zhodnoťte dosažené výsledky.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Pavel Herout: Učebnice jazyka C, KOPP, 2004, IV. přepracované vydání, ISBN 80-7232-220-6

Dle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 4.8.2021

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D.

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **Abstrakt**

Práce je dokumentace k automatickému elektronicky řízenému systému, který ovládá klávesovou foukací harmoniku. Tato práce popisuje návrh a realizaci výsledného systému.

Práce je rozdělena na šest částí zabývajících se postupně literární rešerší a teoretickým rozborem, návrhem hardwarového řešení, realizací a vývojem softwaru.

## **Klíčová slova**

Foukací harmonika, automatický systém, Raspberry Pi, ATmega 165A, Python3

## **Abstract**

This paper is a documentation for automatic electronic system, that controls mouthorgan with keys. This paper describes design and realization of complete system.

This paper consists of six parts regarding literature review, theoretical analysis, hardware design, realization, and software development.

## **Keywords**

Mouthorgan, automatic, Raspberry Pi, ATmega 165A, Python3

## **Bibliografická citace**

POKORNÝ, Tomáš. Elektronický řídicí systém foukací harmoniky. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134823>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Zdeněk Bradáč.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** Tomáš Pokorný

**VUT ID studenta:** xpokor77

**Typ práce:** Bakalářská práce

**Akademický rok:** 2020/21

**Téma závěrečné práce:** Elektronický řídicí systém foukací harmoniky

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 30. června 2021

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Zdeňku Bradáčovi Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Děkuji také své rodině za cenné faktické a stylistické rady.

V Brně dne: 30. června 2021

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1. LITERÁRNÍ REŠERŠE .....</b>	<b>12</b>
1.1 HISTORIE HRACÍCH STROJŮ .....	12
1.1.1 <i>Flašinet</i> .....	12
1.1.2 <i>Pianola</i> .....	13
1.1.3 <i>Orchestrion</i> .....	13
1.2 ELEKTRONICKÉ HUDEBNÍ NÁSTROJE .....	14
1.2.1 <i>Compressorhead</i> .....	14
<b>2. PŮVODNÍ ŘEŠENÍ .....</b>	<b>15</b>
2.1 FOUKACÍ HARMONIKA.....	16
2.2 ELEKTROMAGNETICKÁ TÁHLA SAIA-BURGESS 195224-223 .....	16
2.3 KONCEPCE ELEKTRONIKY .....	17
<b>3. POŽADAVKY (CÍLE PRÁCE) .....</b>	<b>18</b>
3.1 UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ .....	18
3.2 SPÍNÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH TÁHEL.....	18
3.3 OVLÁDÁNÍ VZDUCHU .....	18
<b>4. NÁVRH.....</b>	<b>20</b>
4.1 KONCEPCE.....	20
4.1.1 <i>Arduino</i> .....	20
4.1.2 <i>ESP32</i> .....	20
4.1.3 <i>Zvolená koncepce</i> .....	20
4.2 RASPBERRY PI 3B+.....	21
4.3 MIKROKONTROLER .....	22
4.3.1 <i>ATmega 165A</i> .....	22
4.4 DRIVERY .....	23
4.5 REGULÁTOR TLAKU VZDUCHU .....	23
4.5.1 <i>Připojení regulátoru</i> .....	23
4.6 NAPÁJENÍ.....	24
4.7 KOMUNIKACE MEZI RPI A MCU .....	25
<b>5. REALIZACE .....</b>	<b>26</b>
5.1 OSAZENÍ DPS.....	26
5.2 DPS PŘIPOJENÍ REGULÁTORU VZDUCHU.....	26
<b>6. OŽIVENÍ .....</b>	<b>27</b>
6.1 OŽIVENÍ DPS .....	27
6.2 PŘÍPRAVA RPI.....	27
6.2.1 <i>Operační systém</i> .....	27
6.3 TEST KOMUNIKACE .....	28



6.4	TEST OVLÁDÁNÍ REGULÁTORU VZDUCHU.....	28
<b>7.</b>	<b>SOFTWARE.....</b>	<b>30</b>
7.1	MIDI.....	30
7.1.1	<i>Standard MIDI File</i> .....	31
7.2	PROGRAM RPI.....	32
7.2.1	<i>Knihovny</i> .....	32
7.2.2	<i>Server</i> .....	32
7.2.3	<i>Běh programu</i> .....	32
7.3	PROTOKOL KOMUNIKACE.....	33
7.4	PROGRAM MCU.....	34
7.5	UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ.....	35
7.6	AUTOMATICKÉ SPOUŠTĚNÍ.....	37
<b>8.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>38</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>39</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>41</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>42</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Elektronický flašinet model 12 [4].....	13
2.1	Náhled uchycení foukací harmoniky.....	15
2.2	Detail elektromagnetických táhel.....	16
2.3	Graf rychlosti táhla v závislosti na délce dráhy [7].....	17
4.1	Blokové schéma systému.....	21
4.2	Rozložení I/O sběrnice GPIO [8].....	22
4.3	Připojení řídicího vstupu regulátoru.....	24
5.1	Osazená DPS.....	26
6.1	Nastavení pojistek MCU.....	28
7.1	Analogie not, jejich frekvencí a čísla v MIDI [15].....	31
7.2	Vývojový diagram řídicího programu RPI.....	33
7.3	Vývojový diagram programu MCU.....	35
7.4	Hlavní stránka uživatelského rozhraní.....	36
7.5	Stránka s klaviaturou.....	36
7.6	Příkazy pro automatické spuštění.....	37

# SEZNAM TABULEK

6.1	Měření ovládacích signálů regulátoru tlaku .....	29
7.1	Komunikační protokol.....	34

# ÚVOD

Tato práce se zabývá návrhem řídicí elektroniky a softwaru pro řízení klávesové foukací harmoniky. Na takový systém může být nahlíženo jako na moderního následníka hracích strojů z dob minulých. Moderní technologie umožňují přehrávání hudby takřka kdykoliv a kdekoliv. Není třeba akustických hudebních nástrojů a hudebníků pro vytvoření zvukové kulisy na společenských akcích, jednoduše se pomocí reproduktorů přehraje digitálně zpracovaná hudba. Díky systému, jako je navrhován v této práci, je však možné přehrávání melodií přímo z hudebního nástroje, aniž by na něj člověk vůbec uměl hrát. Jedná se o další ze způsobů, jak lidstvu moderní technologie ulehčují život.

Cílem práce je přepracovat řídicí systém autonomně hrající klávesové foukací harmoniky, původně navrhovaný Ing. Irinou Trukhinou v její diplomové práci [1] tak, aby výsledný systém byl stabilní, spolehlivý a funkční. V práci bude popsán návrh všech komponent a programového vybavení potřebného pro realizaci celého řídicího systému.

Práce je rozdělena do několika kapitol. První kapitola se zabývá rešerší historie hracích strojů, ze kterých se postupně vyvinuly moderní nosiče hudby. V druhé kapitole je přiblíženo původní řešení systému, jeho nedostatky a naopak části, které mohou být využity pro nově navrhovaný systém. Ve třetí kapitole jsou pak stanoveny požadavky, ke kterým bude při návrhu systému řízení přihlíženo. Čtvrtá kapitola pojednává o samotném výběru vhodné koncepce systému a návrhu konkrétních prvků řízení dle požadavků třetí kapitoly. Pátá a šestá kapitola se věnuje fyzické realizaci a oživení hardwaru. Poslední, sedmá kapitola je zaměřena na vývoj softwaru a jeho fungování.

# 1. LITERÁRNÍ REŠERŠE

## 1.1 Historie hracích strojů

Automatizované hudební nástroje neboli hrací stroje se v Evropě poprvé objevily před více než 300 lety. Jeden ze strojů, který stál na počátku vývoje nahrávání a reprodukce hudby, je flašinet [2]. S tímto strojem si můžeme představit původní technologie, které později inspirovaly například vznik gramofonu.

### 1.1.1 Flašinet

Mezi první hrací stroje patří flašinet, jinak nazývaný kolovrátek. Tento mechanický hudební nástroj se v Evropě poprvé objevil v 17. století. První flašiny byly velké a nepřenosné a vyskytovaly se pouze v domech občanů vyšších vrstev. Později se však začaly vyrábět i flašiny menší, což umožnilo rozšíření flašinetů do ulic.

Flašinet se ovládá otáčením kliky. Rychlostí otáčení kliky se určovala rychlost přehrávání melodie. K této klice je pomocí ozubených převodů připojen měch, který vhání vzduch do píšťal (u menších, jednodušších nástrojů mohla být jen jedna píšťala s více otvory), podobných jako například ve varhanách. Zároveň je s klikou propojeno médium, na kterém je uložena melodie, kterou bude nástroj hrát.

Nejprve se jednalo o dřevěný válec, na kterém byly natlučené kolíčky tak, aby otáčením válce tlačily na klapky a tím spouštěly jednotlivé tóny. Výroba takových válců byla velmi náročná jak na zručnost, tak i časově. Tyto válce proto později nahradily buď děrované role z papíru nebo knížky podobné leporelu s dírkami. Tato média měli oproti dřevěným válcům několik výhod. Byly mnohem jednodušší a levnější na výrobu (jednoduše se duplikovali dle makety), jednodušeji se skladovaly a díky jinému způsobu aktivace jednotlivých píšťal (samotná díra v papíru sloužila jako klapka) také nedocházelo k opotřebení média. Na jeden válec, roli nebo knížku se většinou „naprogramovala“ jedna delší nebo několik kratších melodií a pro změnu sbírky melodií se médium většinou dalo vyměnit.

Z flašinetu se později vyvinuly další stroje, například orchestrion, pianola nebo fonograf a z něj následně gramofon. Tyto nástroje postupně flašinet vytlačily z oblíbenosti. Naposledy se hojně flašiny používaly jako vhodné živobytí pro vysloužilé invalidní vojáky, kteří se po válce kvůli zranění nemohli vrátit ke své původní profesi, a tak se živili hrou na flašinet a zpěvem.

Sběratelé a fanoušci flašinetů u nás a převážně v zahraničí (Německo, Rakousko, ...), však od přelomu tisíciletí našli nový zájem a začali renovovat a elektrizovat flašiny. V Čechách se renovací a výrobou elektronických flašinetů (a jiných hudebních automatů) zabývá Olomoucká firma Organ Service [3]. Mezi její nové modely patří flašinet schopný přehrávat MIDI melodie z SD karty. K přehrávání melodie se sice stále používá klička,

avšak zvuk již nevychází z píšťal, ale z reproduktorů. Jeden z těchto flašinetů je na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1 Elektronický flašinet model 12 [4]

### 1.1.2 Pianola

Pianola je nástroj velmi podobný flašinetu. Zjednodušeně se jedná o automatický klavír. Mechanicky se liší od flašinetu tím, že využívá děr v papírovém pásu k aktivaci kladívek, které udeří do strun piana.

### 1.1.3 Orchestrion

Jeden z hudebních strojů, který svým vývojem navazuje na flašinet je orchestrion [5]. Jméno orchestrion obecně označuje hrací nástroje, které svými zvuky napodobují živou kapelu či orchestr. Tyto nástroje se těšily velké oblibě v 19. století, jako náhrada živé hudby v luxusních vilách a později v hostincích.

Hudební nástroje, které orchestriony běžně používaly jsou různé druhy píšťal, perkusní nástroje a často také piano (stejný princip jako u pianoly). Implementace tolika nástrojů však znamenala, že orchestriony nebyly přenositelné stroje.

V porovnání s flašinetou se orchestrionům dostalo několik zásadních vylepšení. Například již nebylo nutné otáčet klikou, aby nástroj hrál. Orchestriony měly totiž implementovaný hodinový strojek, který otáčel médii, na kterých byli uloženy písně. I dřevěné válce s hroty mohly být upraveny tak, že řady hrotů byly na válci namotány do spirály, čímž se prodloužila délka přehrávané písně.

Orchestriony byly postupně vytlačeny rozšířením reprodukováné hudby v podání gramofonu.

## 1.2 Elektronické hudební nástroje

Elektrifikace se začala v druhé polovině 20. století rozšiřovat i do oblasti hudebních nástrojů. Změnil se pohled na vytváření hudby, začaly vznikat nové žánry a staré žánry se transformovaly společně s novými trendy. Mezi nástroje, které v této době prošly znovuzrozením patří například elektrické kytary a baskytary. Díky elektromagnetickým snímačům, které mohou převádět mechanické kmity strun na elektrický signál, je možné různými modulacemi upravovat reprodukováný zvuk kytary jen stisknutím tlačítka.

Dalším skupinou nástrojů, které se v této době rozšířily jsou elektronická piana a syntezátory. Díky modulaci a syntéze zvuků byly takovými nástroji vytvářeny, prvně analogově a později digitálně, všechny myslitelné zvuky.

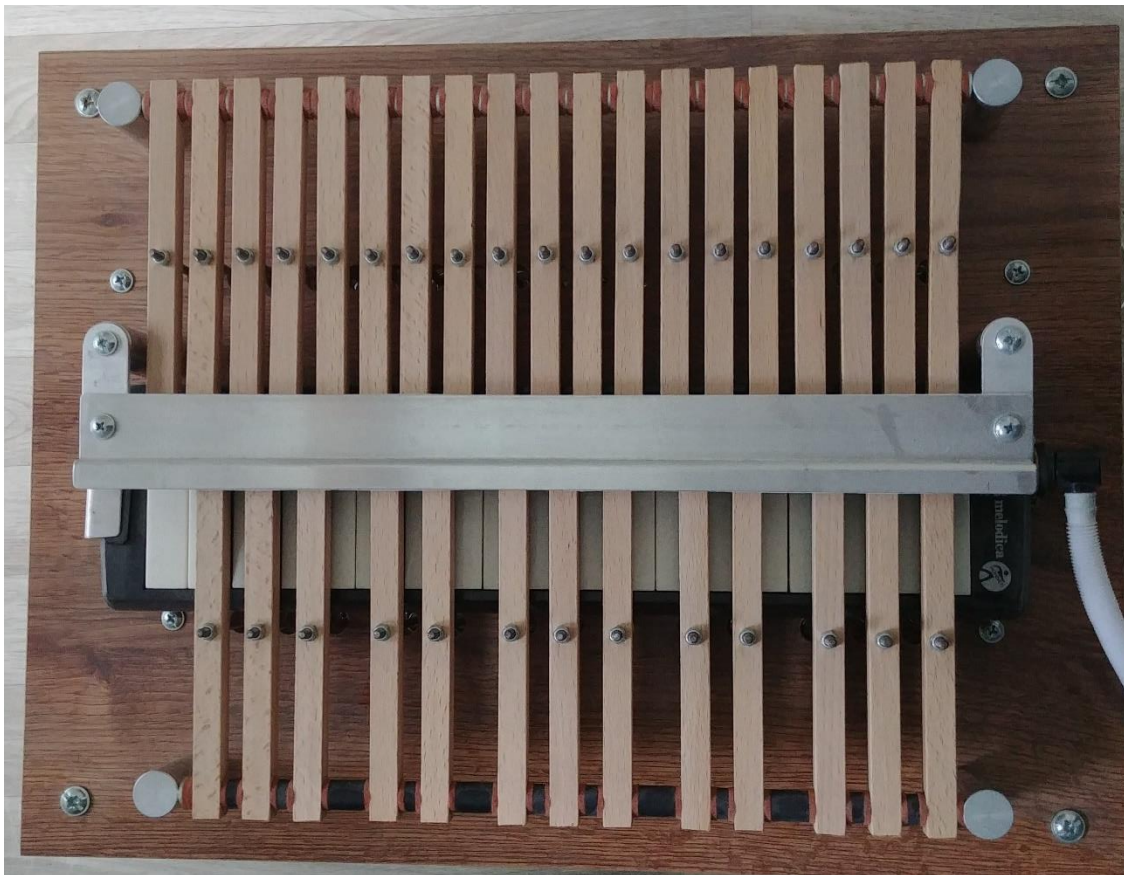
Po rozšíření osobních počítačů se svět hudby přesunul téměř kompletně do digitálního prostředí. Používají se stále fyzické hudební nástroje, ale nahrávání probíhá digitálně a různé úpravy nahraných stop si může každý udělat sám na svém počítači. Mnoho začínajících a menších kapel například bicí obvykle nenahrává, ale naprogramuje si je na počítači.

### 1.2.1 Compressorhead

K tématu automatických hracích strojů stojí za zmínku německá kapela robotů Compressorhead [6]. Jedná se o skupinu robotů hrajících na reálné hudební nástroje pomocí pneumatických a elektrických pohonů. Autoři těchto robotů, firma Robocross, je vytvářejí z recyklovaných dílů a s jejich výtvořou objíždějí hudební festivaly po celém světě. Mezi „hudebníky“ této kapely patří například 6 ruký bubeník, kytarista anebo pianista.

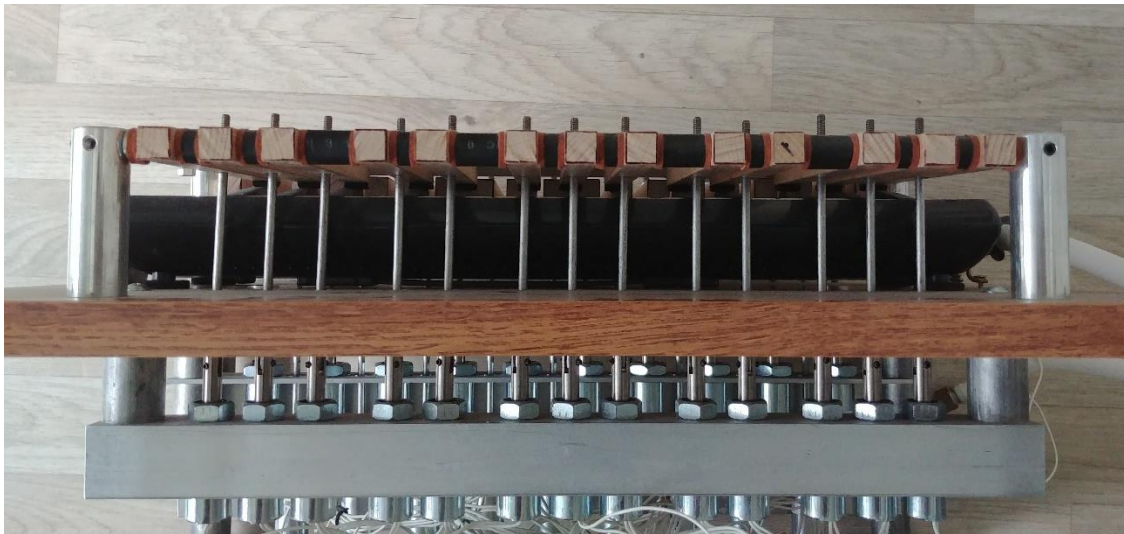
## 2. PŮVODNÍ ŘEŠENÍ

Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, návrhem podobného systému se zabývala Ing. Irina Trukhina ve své diplomové práci. Hardwarové řešení navržené inženýrkou však nefungovalo správně. Společně s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že uložení harmoniky (na obrázcích 2.1 a 2.2) s akčními členy bylo navrženo vhodně a je možné jej použít pro tuto práci.



Obrázek 2.1 Náhled uchycení foukací harmoniky





Obrázek 2.2 Detail elektromagnetických táhel

## 2.1 Foukací harmonika

Foukací harmonika je hudební nástroj oblíbený v žánrech jako country a folk. Zvuk se ve foukací harmonice vytváří tak, že hráč fouká do štěrbin, které směřují vzduch na různě dlouhé plátky (jazýčky), které se následně rozvibrují a tím vytváří jednotlivé tóny. Běžné foukací harmoniky mají dvě sady jazýčků, jedna sada jazýčků je aktivována foukáním do nástroje a druhá sada vdechováním vzduchu směrem z harmoniky.

Příbuzným nástrojem foukací harmoniky je foukací harmonika klávesová neboli melodika. Ta kombinuje akordeon a foukací harmoniku ve smyslu, že hráč fouká vlastním dechem, ale tóny jsou voleny mačkáním kláves. Oproti foukacím harmonikám, které jsou převážně diatonické, jsou melodiky výhradně chromatické.

Pro tuto práci byla použita melodika Hohner STUDENT 32. Tato harmonika je osazena 32 klapkami, což odpovídá rozsahu 2,5 oktávy (konkrétně  $f - C^3$ ). Tento rozsah je podobný například s altovým saxofonem, čehož můžeme využít při výběru vhodných melodií.

## 2.2 Elektromagnetická táhla Saia-Burgess 195224-223

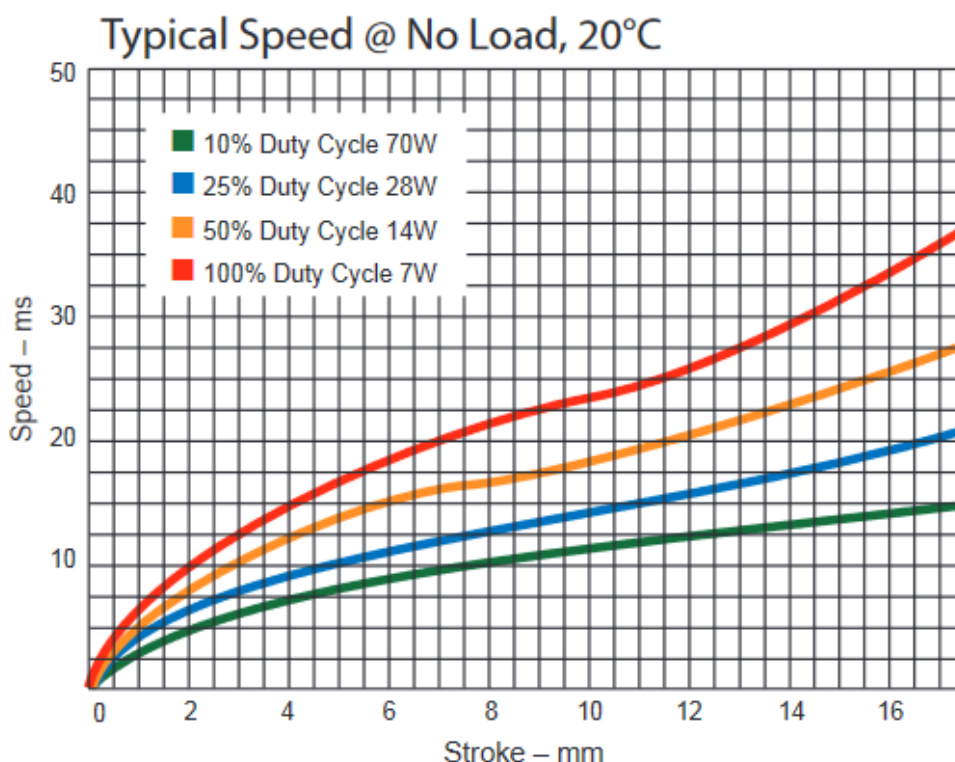
O stisk jednotlivých kláves se budou starat elektromagnetická táhla Saia-Burgess 195224-223 [7]. Tato táhla mohou být použita s různými hladinami řídicího napětí. Avšak spínání konstantním napětím výrobce doporučuje pouze při napětí 24 V. Navrhovaný řídicí systém tedy bude navrhnout tak, aby táhla byla spínána právě 24 V. Při tomto mohou být táhla stisknuta bez časového omezení.

Odběr aktivovaného táhla zjistíme ze vztahu

$$P_{SOL} = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = \frac{24^2}{83,5} = 6,9 \text{ W} , \quad (2.1)$$

kde U je napájecí napětí a R je odpor cívky táhla při 20 °C.

Maximální délka dráhy, kterou musí táhlo stisknout k aktivaci klávesy harmoniky je 3 mm. Z charakteristiky na obrázku 2.3 víme, že nezatíženému táhlu trvá 3 mm dráha 12 ms. Klávesy sice kladou mechanický odpor proti táhlu, pro zjednodušení však tento odpor zanedbáme. Při výpočtu doby zahrání noty od přijetí požadavku řídicím členem proto budeme maximální zpoždění táhla 12 ms.



Obrázek 2.3 Graf rychlosti táhla v závislosti na délce dráhy [7]

## 2.3 Koncepce elektroniky

Elektronika navržená Ing. Trukhinou byla založena na embedded platformě Raspberry Pi (dále jen „RPI“). RPI komunikovalo s adresovatelnými registry pomocí sériové I2C komunikace. Tyto registry spínaly drivery, které aktivovaly elektromagnetická táhla.

Výhody této koncepce jsou bohaté programové vybavení a výkon RPI.

Nevýhoda byla nedostatečná kapacita I2C sběrnice v kombinaci s registry, což vedlo k pomalému spínání kláves. I2C komunikace byla také rušena indukčností cívek elektromagnetických táhel. Z toho důvodu není tato koncepce pro tuto aplikaci vhodná.

### 3. POŽADAVKY (CÍLE PRÁCE)

Pro návrh systému je nutné nejprve stanovit požadavky na výsledný systém. Tyto požadavky byly vytvořeny tak, aby hotový systém splňoval všechny body zadání. Na základě těchto požadavků bude v dalších kapitolách této práce popsán návrh a následně realizace řešení řídicího systému.

Koncepce systému musí být vhodně zvolena tak, aby byla možná implementace všech stěžejních vlastností systému.

#### 3.1 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní bude navrženo tak, aby pomocí něj mohl uživatel přidat, odebrat, spustit a zastavit přehrávání MIDI souborů. Součástí uživatelského rozhraní také bude ovládání hlasitosti přehrávání a možnost aktivovat jednotlivé klávesy harmoniky zvlášť. Uživatelské rozhraní může být implementováno buď přímo na zařízení nebo bezdrátově pomocí aplikace či webové stránky.

#### 3.2 Spínání elektromagnetických táhel

Navrhovaná koncepce musí mít vhodný počet výstupů, kterými bude možno spínat všechna elektromagnetická táhla dostatečně rychle, aby zařízení stihlo aktivovat klávesy. Zařízení bude muset být pravděpodobně osazeno vhodnými podpůrnými obvody, aby bylo spínání možné.

Tempo 180 BPM (beats per minute) je v hudbě považováno za velmi rychlé, použijeme ho tedy jako maximální tempo, které by zařízení mělo bez problému hrát. Délku osminové noty  $t$ , která představuje polovinu doby, v tomto tempu spočítáme vztahem

$$t = \frac{60}{BPM \cdot 2} = \frac{60}{360} = 166 \text{ ms} \quad (3.1)$$

Šestnáctinová nota, kterou můžeme předpokládat jako nejkratší notu, kterou by zařízení běžně přehrávalo, by pak v tomto tempu trvala polovinu času, tedy 88 ms.

Spínání elektromagnetických táhel také musí být ošetřeno tak, aby indukčnosti cívek elektromagnetů nerušily řídicí systém.

#### 3.3 Ovládání vzduchu

V rámci systému musí být také implementováno ovládání vzduchu tak, aby při přehrávání nedocházelo ke slyšitelným změnám v hlasitosti, například při stisku více kláves. Změnou tlaku vzduchu bude zároveň uživateli umožněno změnit hlasitost přehrávání. Potřebný tlak vzduchu na vstupu melodiky není technicky výrobcem melodiky nijak specifikovaný a je dán zkušeností hudebníka, proto bude potřebný tlak na vstupu určen

experimentálně.

## 4. NÁVRH

Tato kapitola se zabývá návrhem řešení řídicího systému se zaměřením na zvolenou koncepci a použité komponenty. Po zvolení vhodné koncepce budou vybrány konkrétní použité prvky.

### 4.1 Koncepce

Při návrhu řídicí elektroniky bylo potřeba prvně vybrat koncepci, platformu, která bude využita.

#### 4.1.1 Arduino

Jedna z možných koncepcí navrhovaného systému je embedded platforma Arduino. Nejvhodnější by pravděpodobně byla deska Arduino Mega 2560, která nabízí dostatek digitálních vstupů/výstupů, včetně PWM výstupů. Tuto desku by bylo třeba rozšířit o Ethernetový nebo WiFi komunikační modul, nebo panel s displejem a tlačítky pro uživatelské rozhraní. Dále by bylo nutné přidat DPS (desku plošného spoje) s vhodnými drivery, pro spínání elektromagnetických táhel.

Tato koncepce pro tuto aplikaci není vhodná, jelikož má několik nevýhod. Koncepci nelze do budoucna rozšířit o další hudební nástroj. Programování 8bitového procesoru ATmega 2560, kterým je deska osazena, je sice díky dostupnosti volných knihoven relativně pohodlné, ale program pro řízení celého systému by byl pravděpodobně pro tuto platformu již moc složitý.

#### 4.1.2 ESP32

Integrované obvody firmy Espressif Systems rodiny ESP32 jsou další možnou platformou, kterou můžeme zvážit k použití pro řídicí systém. Tyto čipy mají integrované bezdrátové rozhraní WiFi a Bluetooth, které můžeme využít pro ovládání zařízení. K tomuto integrovanému obvodu by stejně jako k desce Arduino Mega 2560 musely být přidány drivery, které by byly schopné spínat elektromagnetická táhla.

Vzhledem k tomu, že základem ESP32 je již 32bitový kontrolér, nabízí tato platforma vyšší výkon a programovou vybavenost. Další výhodou je možnost osazení integrovaného obvodu na desku přímo navrženou pro konkrétní aplikaci.

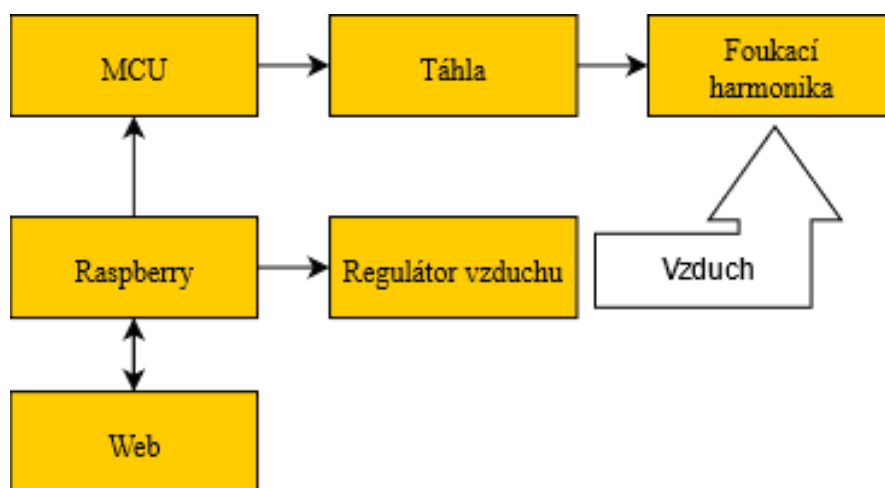
Tato koncepce nebyla pro tuto aplikaci vybrána, protože ESP32 má pouze 34 univerzálních vstupů/výstupů, což by sice pro tuto aplikaci hraničně stačilo, ale není možné s touto koncepcí provádět žádná rozšíření.

#### 4.1.3 Zvolená koncepce

Koncepce, která byla vybrána jako nejvhodnější, je kombinace desky Raspberry Pi jako hlavního řídicího členu a vhodného 8bitového mikrokontroleru s přidávanými drivery, který bude použit pro ovládání elektromagnetických táhel. Tato koncepce, naznačena

na obrázku 4.1, by měla zajistit potřebný výkon, programové možnosti a dostatečný počet vstupů a výstupů pro tuto aplikaci. Rozšíření zařízení o další hudební nástroj by také neměl být velký problém.

RPI se bude starat o zpracování MIDI souborů, ovládání regulátoru vzduchu a také o webový server, pomocí kterého bude uživatel celé zařízení ovládat. RPI bude poté posílat pomocí sériové komunikace zprávy, které noty je třeba sepnout, do MCU. MCU podle instrukcí RPI bude ovládat drivery, které sepnou elektromagnetická táhla.



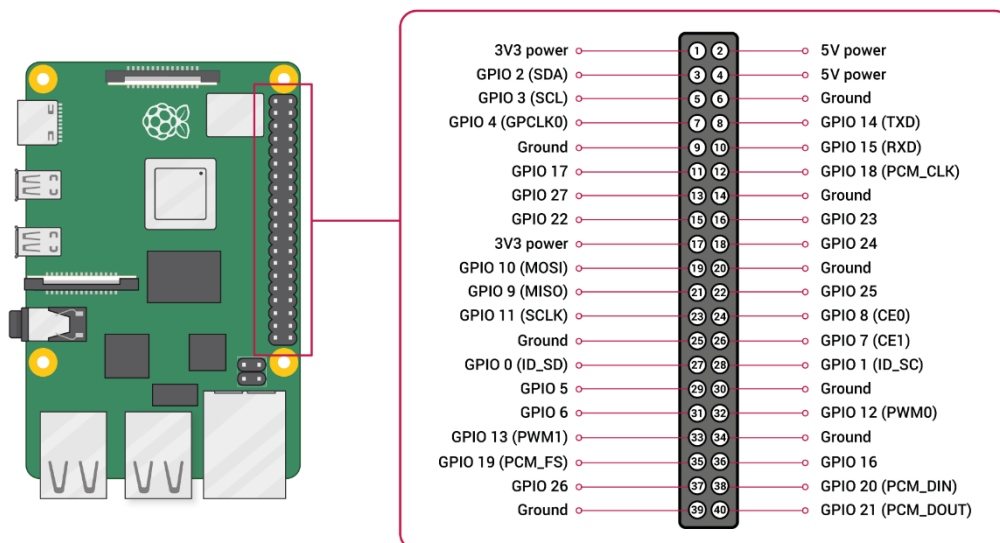
Obrázek 4.1 Blokové schéma systému

## 4.2 Raspberry Pi 3b+

Po zvolení koncepce bylo jako první třeba vybrat vhodnou desku platformy Raspberry Pi. Byla zvolena generace třetí, konkrétně model 3b+.

Tato deska je osazena 64bitovým procesorem architektury ARM se čtyřmi jádry Cortex-A53. Velikost operační paměti tohoto modelu je 1 GB. Díky grafické kartě je možno k RPI připojit monitor nebo televizi například pomocí HDMI.

Mezi fyzické rozhraní desky patří například čtyři USB porty, gigabitový Ethernet, 3,5mm jack (pro audio) a 40 pinů rozhraní GPIO (napájecí, digitální I/O, ...), na obrázku 4.2, využitelných pro velké aplikací dle potřeb programátora.



Obrázek 4.2 Rozložení I/O sběrnice GPIO [8]

Deska také podporuje bezdrátová rozhraní WiFi (802.11ac) a Bluetooth (4.2 BLE).

## 4.3 Mikrokontroler

Po konzultaci s vedoucím byla pro tento projekt nabídnuta již navržená (doc. Bradáčem) a vyrobená DPS osazená mikrokontrolerem (dále jen „MCU“) ATmega 165A. Schéma zapojení této desky je v příloze A. Samotná deska plošných spojů je pak v příloze B.

### 4.3.1 ATmega 165A

Mikrokontrolerem, který bude ovládat akční prvky projektu, je již zmíněný ATmega 165A [9] od firmy Atmel.

Jedná se o 8bitový MCU Advanced RISC architektury. Disponuje 16 KB flash paměti programu, 512 B EEPROM a 1 KB vnitřní SRAM paměti. Mezi vlastnosti periférií patří jeden 16bitový a dva 8bitové časovače/čítače, čtyři PWM kanály a 8kanálový, 10bitový AD převodník.

Komunikaci umožňuje pomocí USART, master/slave SPI anebo USI. Na desce jsou pak připravena k osazení programovací rozhraní ISP nebo JTAG.

Zdroj strojového času může být jak vnitřní, tak externí hodinový signál. Pro tuto aplikaci byl jako zdroj strojového času MCU zvolen piezoelektrický krystal laděný na frekvenci 11059200 Hz. Výběr této frekvence bude zdůvodněn v kapitole 4.7.

## 4.4 Drivery

Pro spínání elektromagnetických táhel je nutné použít drivery, protože výstupy MCU nejsou schopny dodání dostatečného napětí a proudu. Byly zvoleny drivery ULN2803A. Tyto drivery jsou vhodné díky dostatečně velkému spínanému napětí (až 50 V) a proudu (až 500 mA), jsou řízeny 5 V (může být až 3 V) a mají ochranu proti přenosu napěťových špiček z indukčních zátěží, jako jsou například elektromagnetická táhla.

Jeden driver je tvořen 8mi páry tranzistorů v Darlingtonově zapojení, které mohou být zapojeny paralelně pro větší spínaný proud. Maximální mařený výkon na 8mi párech tranzistorů je dle výrobce 2,25 W [10].

## 4.5 Regulátor tlaku vzduchu

Pro regulaci tlaku vzduchu byl na základě zvolené koncepce a požadavků vybrán elektro-pneumatický regulátor vzduchu firmy SMC, typ ITV1031-31F1N. Tento průmyslový regulátor tlaku vzduchu má následující parametry:

- Napájecí napětí: 24 V
- Vstupní (řídící) napětí: 0–10 V
- Vstupní tlak: 1 MPa
- Výstupní tlak: 0,005–0,5 MPa

Regulátor je pro tuto aplikaci vhodný, protože má dostatečný rozsah výstupního tlaku a díky integrované zpětné vazbě nebude třeba měřit tlak dodávaný do harmoniky. Regulátor se sám vnitřní logikou stará o udržování konstantního tlaku. Detaily ovládání regulátoru jsou zpracovány v kapitole 6.4.

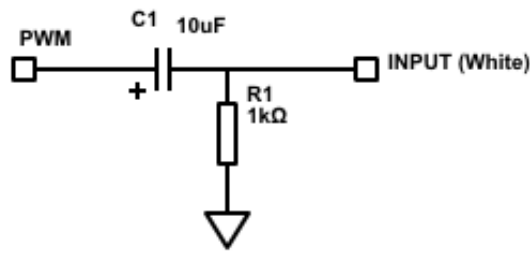
### 4.5.1 Připojení regulátoru

Pro ovládání regulátoru bylo třeba navrhnout převod na analogové napětí. K tomu bylo například možné využít DA převodník, což by bylo nejpřesnější řešení z hlediska ovládání regulátoru.

Další možností bylo také použití pulzní šířkové modulace (také PWM), v kombinaci s jednoduchým RC filtrem typu dolní propust, který z PWM odfiltruje složky vyšších harmonických frekvencí. Toto řešení se jevílo jako relativně jednoduché a levné, proto bylo zvoleno.

Jako zdroj PWM signálu bude použito RPI (GPIO piny). K propojení bude vytvořena DPS, zapojená dle obrázku 4.3.





Obrázek 4.3 Připojení řídicího vstupu regulátoru

## 4.6 Napájení

Zvolený řídicí systém bude mít více úrovní napájecího napětí. RPI bude třeba napájet zdrojem stejnosměrného napětí 5 V. Výrobce doporučuje, aby zdroj pro RPI byl schopný, při tomto napětí, dodat proud 3 A. Nejvhodnější napětí pro spínání elektromagnetických táhel je 24 V.

MCU může být dle výrobce napájen napětím v rozmezí 1,8 – 5,5 V. Pro propojení RPI a MCU sériovou komunikací by bylo nejvhodnější, aby byl MCU napájen 3,3 V, protože v této napěťové hladině pracuje GPIO na desce RPI. S tímto problémem však při návrhu DPS doc. Bradáč počítal a na desku přidal místo na převodník USART/USB, pomocí kterého můžeme zařízení propojit. Více o tomto převodníku v kapitole 4.7. Napájecí napětí MCU bude tedy 5 V. O převod napětí z 24 V na 5 V se bude starat lineární stabilizátor napětí L7805CV [11].

Nejvhodnější tedy bude, aby zařízení používalo dva zdroje napětí. Jeden pro RPI a druhý pro zbytek elektroniky.

Napájecí zdroj RPI byl vybrán běžný AC/DC adaptér s výstupním stabilizovaným stejnosměrným napětím 5 V/3 A, který bude k RPI připojen USB/microUSB kabelem.

Pro napájení zbylých částí systému bude použit průmyslový stejnosměrný 24V zdroj s maximálním výkonem 240 W, konkrétně model PS5R-SG24 od firmy IDEC. Zdroj má integrovanou ochranu proti zkratu a přetížení a je velmi stabilní.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2, jedno aktivované táhlo má odběr 6,9 W. Dle dokumentace výrobce může regulátor vzduchu odebírat proud o maximální velikosti 0,12 A. Maximální odběr regulátoru spočítáme pomocí vztahu

$$P_{REG} = U \cdot I = 24 \cdot 0,12 = 2,88 \text{ W} , \quad (4.1)$$

kde  $U$  je napájecí napětí, a  $I$  je maximální odebíraný proud. Maximální odebíraný proud můžeme tedy spočítat vztahem

$$P_{MAX} = P_{REG} + 32 \cdot P_{SOL} + 4 \cdot P_{DRV} = 2,88 + 32 \cdot 6,9 + 4 \cdot 2,25 = 232,05 \text{ W} , \quad (4.2)$$

, kde  $P_{REG}$  je odběr regulátoru vzduchu,  $P_{SOL}$  je odběr jednoho táhla a  $P_{DRV}$  je odběr jednoho driveru. Ostatní výkonové ztráty pro zjednodušení zanedbáme. Maximální odebíraný výkon zařízení při aktivaci všech 32 táhel je blízky maximálnímu odebíranému výkonu zdroje a může nastat situace, kdy by došlo k sepnutí ochrany proti přetížení. Tato situace by však v normálním provozu nenastala a uživatel by ji musel cíleně vytvořit spuštěním všech kláves najednou.

## 4.7 Komunikace mezi RPI a MCU

Komunikaci mezi RPI a MCU lze nejjednodušeji provést pomocí sériové USART komunikace. Jak již bylo zmíněno výše v kapitole 4.6, při napájení MCU napětím 5 V není možné propojit USART sběrnice mezi RPI a MCU přímo. Jedna z možností, jak tento problém vyřešit je využít obousměrný level convertor (konvertor úrovní), který by převáděl napěťovou úroveň komunikace, mezi zařízeními.

Další možnost je výše zmíněný USB/USART převodník UB232R [12]. Tento převodník převádí sériovou komunikaci USB (ze strany RPI) na komunikaci USART (ze strany MCU). Mezi výhody převodníku patří široké rozmezí komunikačních rychlostí, napájení přímo z USB a podpora driverů napříč většinou operačních systémů.

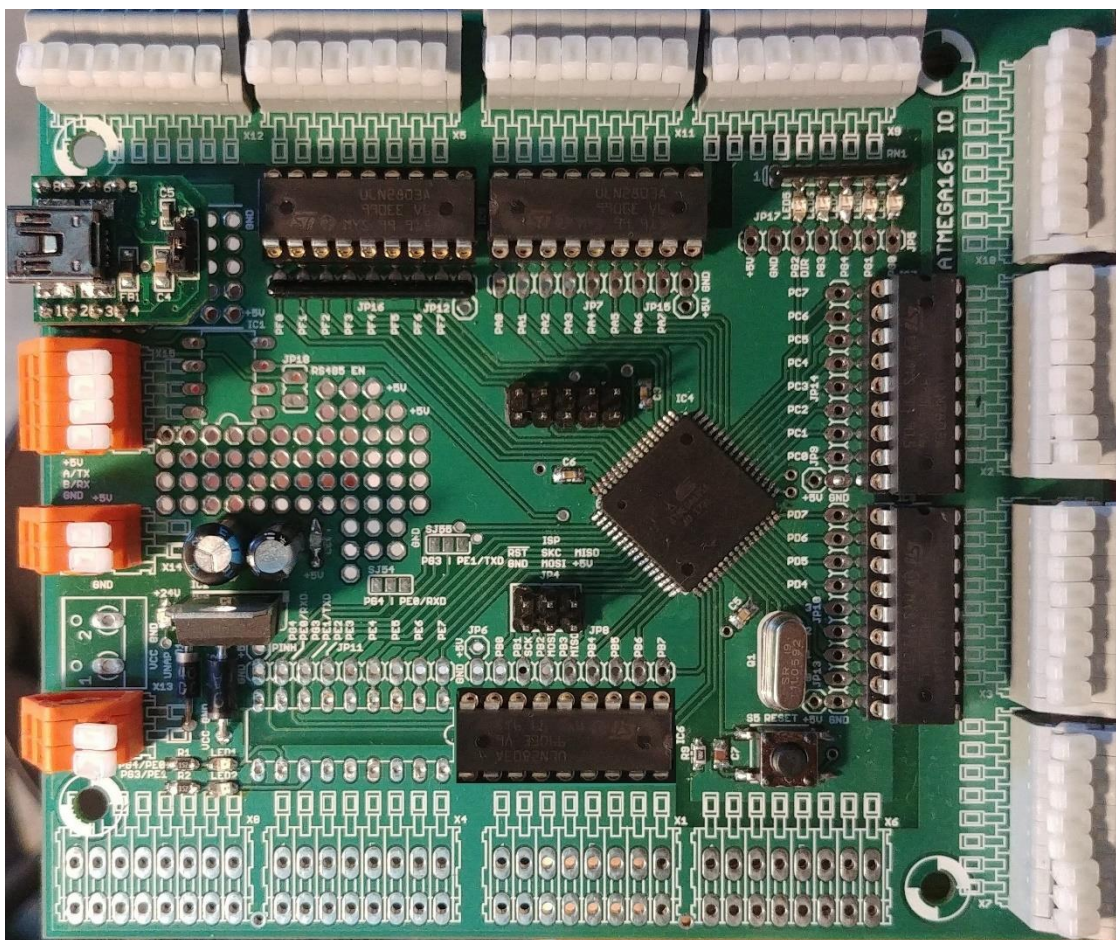
Rychlost komunikace bude 9600 baudů. Touto rychlostí mohou zařízení sériovou komunikací, při velikosti datové zprávy 8 bitů, mezi sebou přenést až 1200 B/s. S ohledem k této rychlosti byla vybrána frekvence oscilátoru MCU 11059200 Hz. Dělením této frekvence k rychlosti 9600 baudů totiž nevzniká chyba časování. Komunikace bude bez parity.

## 5. REALIZACE

Po dokončení návrhu všech potřebných částí byla zahájena realizace systému.

### 5.1 Osazení DPS

Osazení DPS, na obrázku 5.1, proběhlo bez větších problémů. Drivery ULN2803A s pouzdem DIP-18 byly osazeny do precizních patic, pro jednoduchou výměnu v případě selhání driveru. Výstupy, které nebudou využity nebyly osazeny.



Obrázek 5.1 Osazená DPS

### 5.2 DPS připojení regulátoru vzduchu

S ohledem na jednoduchost obvodu propojení PWM výstupu RPI a vstupu regulátoru byla pro realizaci tohoto obvodu zvolena univerzální deska s kulatými body na vývodové součástky.

Na této desce je rozděveno napětí zdroje mezi hlavní DPS a napájecí vodiče regulátoru. Dále je na této desce již zmíněný obvod z obrázku 4.3.

## 6. OŽIVENÍ

Před zahájením návrhu softwaru bylo třeba ověřit funkčnost DPS a vybavit RPI potřebným softwarem.

### 6.1 Oživení DPS

Po ověření, že jsou všechny potřebné součástky zapájeny na správném místě na desce, bylo možné přistoupit k ožívování MCU.

K programování MCU byl použit programátor AVRISP 2 [13], který byl k počítači připojen pomocí USB a k MCU pomocí 6pin headeru ISP rozhraní. Programátor AVRISP 2 je podporován například programem Microchip Studio (dříve Atmel Studio), který byl zvolen pro programování MCU. Pokud by byla potřeba při vývoji programu využít ladicích nástrojů, ISP programátor by musel být nahrazen rozhraním JTAG, které tuto funkci umožňuje. Header pro JTAG je pro tyto případy osazen.

Nejprve bylo vyzkoušeno nastavení MCU a správnost zapojení DPS pomocí jednoduchého kódu, který měl blikat LED na DPS. LED blikaly dle očekávání.

Další na řadě byl test spínání táhel. Všechna táhla byla připojena do příslušných portů na DPS (konkrétně do portů A, B, C, D a F) a byla vyzkoušena schopnost MCU táhla správně sepnout. Porty B a F byly zaplněny pouze z poloviny, protože bylo ponechán prostor pro využití alternativních funkcí části těchto portů. U portu B byly zůstaly volné piny PB4 – PB7 pro možnost využití jejich PWM funkce a u portu F zůstaly nevyužity piny PF4 – PF7, protože mohou sloužit pro rozhraní JTAG.

### 6.2 Příprava RPI

Nové RPI nemá od výrobce instalovaný žádný software. K novému RPI bylo nutné pořídit paměťové uložení (micro SD kartu), jelikož RPI samotné uložení nemá. Pro potřeby tohoto systému by měla být 4GB SD karta více než dostačující.

#### 6.2.1 Operační systém

Možných operačních systémů, které se dají na RPI používat, je celá řada. Může se jednat o verze běžně známých linuxových distribucí, například Ubuntu nebo Manjaro, upravených pro ARM procesory, nebo speciální distribuce pro konkrétní využití RPI, například OctoPi (řízení 3D tiskáren), RetroPi (emulace starších herních konzolí) nebo KodiOs (RPI jako multimediální stanice).

Pro potřeby tohoto projektu bude použita distribuce Raspberry Pi OS. Tento operační systém již obsahuje většinu softwaru pro plné využití všech funkcí RPI, není výkonově příliš náročný a mezi výhody patří pohodlné přepínání mezi grafickým a textovým prostředím.

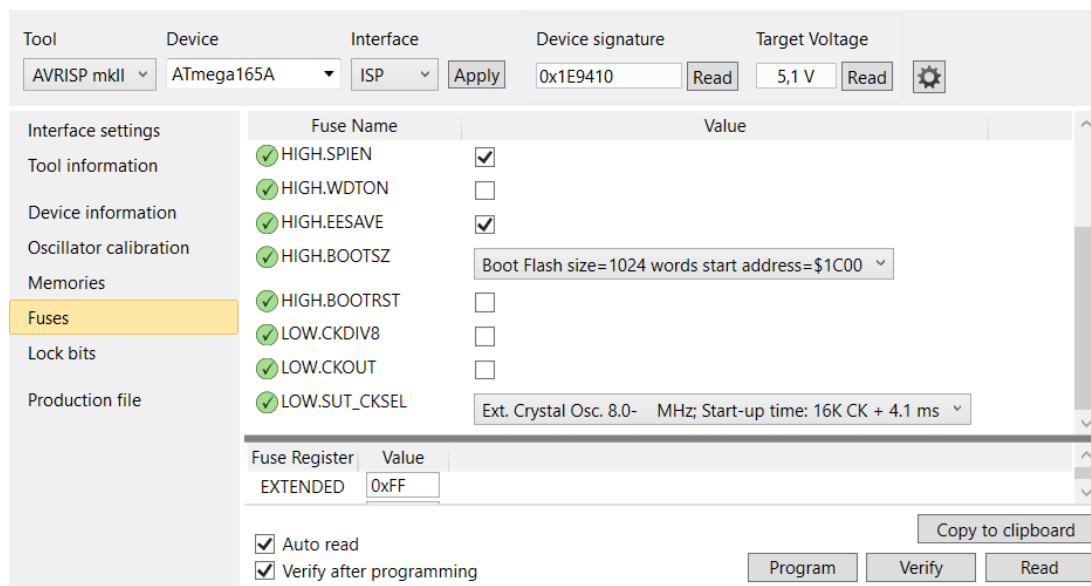
Pro vytvoření instalačního média (SD karty) operačního systému byl použit program Raspberry Pi Imager, který je vyvíjený přímo výrobcem RPI. Výhodou tohoto programu je možnost konfigurace užitečných nastavení, jako jsou přihlašovací údaje, nastavení Wifi nebo například povolení SSH protokolu. Po vsunutí SD karty a připojení napájení bylo RPI rovnou připojeno k síti a bylo možné se k němu v rámci této sítě připojit ze svého osobního počítače bez potřeby k RPI připojovat periferie a displej, aby se systém nakonfiguroval.

## 6.3 Test komunikace

Po oživení RPI a MCU byl zahájen test sériové komunikace.

Pro program MCU byl vytvořen jednoduchý program na základě příkladů z dokumentace. Program měl čekat na konkrétní zprávu od RPI a po přijetí této zprávy měl rozsvítit LED a odeslat odpověď do RPI. Z RPI byly následně odesílány vhodné zprávy, na které však MCU nereagoval. Zprávy přijaté z MCU do RPI také nebyly správné.

Při tomto testu bylo zjištěno, že časování MCU není správné. MCU totiž nepoužíval externí zdroj strojového času (piezoelektrický krystal na DPS), ale interní oscilátor. Změna tohoto zdroje byla následně provedena přepnutím pojistek MCU dle obrázku 6.1.



Obrázek 6.1 Nastavení pojistek MCU

## 6.4 Test ovládání regulátoru vzduchu

Ke správné funkčnosti celého systému bylo třeba určit potřebné hladiny tlaku vzduchu, kterým bude harmonika zásobována. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.5, regulátor vzduchu bude ovládán RPI pomocí PWM a filtru typu dolní propust. Při testování byl

vstupní tlak do regulátoru 0,5 MPa. Tlak byl záměrně zvolen nižší, aby mohlo být zařízení používáno i se slabším kompresorem.

PWM signál z RPI má délku periody 1,25 ms (frekvence signálu 800 Hz) a amplitudu 3,3 V. Zkoušením různých stříd PWM signálu byly stanoveny 3 základní úrovně hlasitosti přehrávání, nízká, střední a vysoká. Pomocí osciloskopu byla následně změřena efektivní hodnota napětí na výstupu filtru, viz. tabulka 6.1. Výstup z filtru byl sice zašuměný, ale na funkčnosti regulátoru tlaku se tato nedokonalost neprojevovala.

Tabulka 6.1 Měření ovládacích signálů regulátoru tlaku

Hlasitost [-]	Střída [%]	U <sub>RMS</sub> [mV]
Nízká	1,9	50
Střední	3,2	100
Vysoká	5,7	180

Po určení základních hodnot hlasitostí byl určen přírůstek tlaku, který je třeba ke kompenzaci stisknutí více kláves. Odhadem bylo obecně stanoveno, že při každé další stisknuté klávese je třeba zvýšit střidu PWM signálu o asi 0,2 %. Tak bude zajištěna konstantní hlasitost i při stisku více kláves naráz.

Při měření bylo také stanoveno, že při střídě vyšší 5,7 % již není slyšitelný rozdíl mezi jednou stisknutou klávesou a deseti. Tato hranice tedy byla stanovena jako maximální a při přehrávání na vysokou hlasitost nebude tlak přidáván.

## 7. SOFTWARE

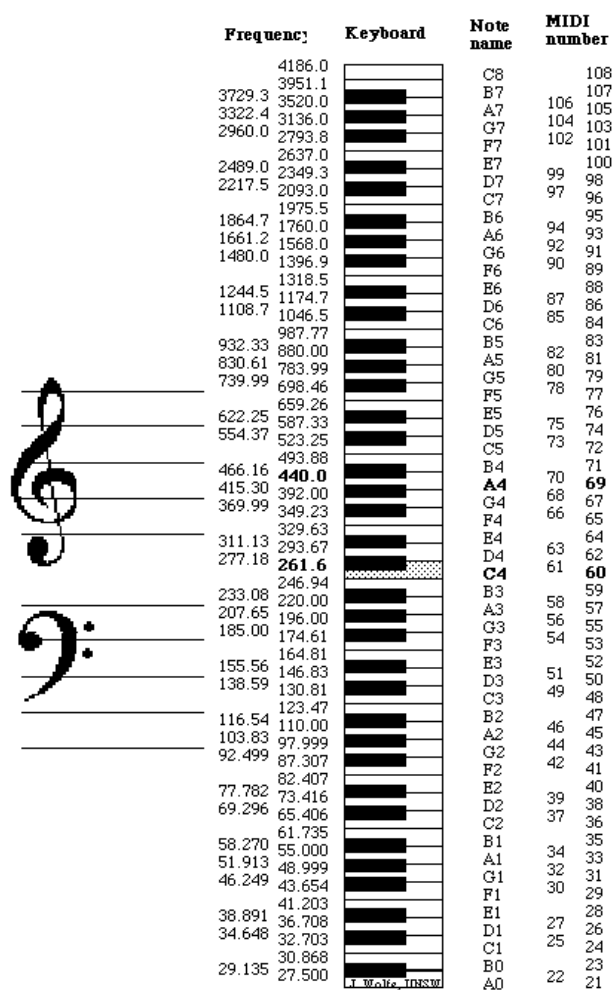
Poté, co byla vyzkoušena funkčnost hardwaru, byl zahájen vývoj softwaru.

### 7.1 MIDI

MIDI [14] neboli *Musical Instrument Digital Interface* je mezinárodně rozšířený standard, který vznikl v 80. letech minulého století v USA a jeho cílem bylo vytvořit volně dostupný standard pro komunikaci mezi hudebními nástroji různých výrobců. Do té doby totiž každý výrobce hudebních nástrojů používal svůj vlastní standard komunikace mezi nástroji, což omezovalo hudebníky ve výběru nástrojů. Pro standard MIDI vzniklo sdružení výrobců MMA (MIDI manufactures association), které otevřeně rozhoduje o věcech týkajících se tohoto standardu.

MIDI může nést informace až o 16 stopách různých nástrojů. Jednotlivé akce jsou uloženy jako tzv. zprávy, které obsahují informace o aktivaci konkrétní noty, její hlasitosti, délky trvání, vibrata, pozice (levý či pravý stereo kanál) a další. Tyto informace jsou přenositelné z původního nástroje (například z piana) na kterýkoliv jiný nástroj právě díky elektronickým syntezátorům nebo počítačům. Hudebník může nahrát melodii na piano a v postprodukci skladby může stejná melodie znít jako hraná například na akordeon.

Na obrázku 7.1 je vidět analogie mezi jednotlivými notami a jejich vyjádřením v MIDI. V kapitole 2.1 je zmíněný rozsah foukací harmoniky jako  $f - C3$ . Z důvodu odlišného názvosloví je tento rozsah také možné normovat dle anglosaské hudební nauky jako  $F3 - C6$ .



Obrázek 7.1 Analogie not, jejich frekvencí a čísla v MIDI [15]

### 7.1.1 Standard MIDI File

Se vznikem standardu MIDI vznikl mimo jiné také standardizovaný formát souborů, který by vhodně ukládal jednotlivé zprávy a umožnil jednoduché nahrávání a práci s MIDI formátem. Standardní formát souborů pro MIDI má příponu .mid. Tyto soubory jsou velmi úsporné, což pomohlo jejich rozšíření. Písňe jsou uloženy jako sekvence jednotlivých zpráv. Obsahují zároveň informace o časování jednotlivých akcí a jsou díky tomu jednoduše čitelné i na méně výkonném hardwaru. Soubory se skládají z hlavičky a těla.

V hlavičce souboru jsou obsaženy informace jako název skladby, počet stop (jednotlivých nástrojů), tempo, a typu uložené písňe. Tyto typy písňi jsou následující:

1. Typ 0 – všechny zprávy jsou uloženy v jedné stopě
2. Typ 1 – všechny stopy začínají ve stejný okamžik
3. Typ 2 – každá stopa je nezávislá na ostatních (málo používaný)



V těle jsou uloženy jednotlivé stopy, které začínají nultým řádkem s informací o nástroji, poté následují jednotlivé zprávy typu note-on a note-off.

I když MIDI soubory nesou i informace o dynamice (síle) zahrané noty, nebude tato funkce do programu implementována. Pro možné budoucí revize systému by však implementace této funkce mohla být vhodnou možností zvýšení kvality přehrávání melodií.

## 7.2 Program RPI

Pro program RPI bylo možné zvolit ze dvou vhodných jazyků, C a Python. Každá z těchto variant má své výhody a mimo fakt, že program v jazyce C by byl pravděpodobně výkonově méně náročný, byla volba jednoho z těchto jazyků otázkou osobní preference.

Zvolen byl programovací jazyk Python3.

### 7.2.1 Knihovny

Pro samotné zpracování MIDI a komunikace s MCU a regulátorem tlaku byly použity 3 hlavní knihovny.

Knihovna pigpio [16] byla použita pro ovládání PWM výstupu. Konkrétně byla využita funkce `set_PWM_dutycycle`(číslo pinu, střída), kterou se nastavuje střída na vybraném pinu.

Knihovna serial [17] byla použita pro sériovou komunikaci s MCU. Vzhledem k tomu, že RPI zprávy pouze posílá, mimo inicializační funkce byla použita pouze funkce `write()`.

Knihovna mido [18] byla použita pro práci s MIDI soubory. Z této knihovny byla velmi vhodná funkce `play()` objektu `MidiFile`. Tato funkce načte MIDI soubor a vrátí noty přesně s takovými časovými rozdíly, jako mají noty být zahrané.

### 7.2.2 Server

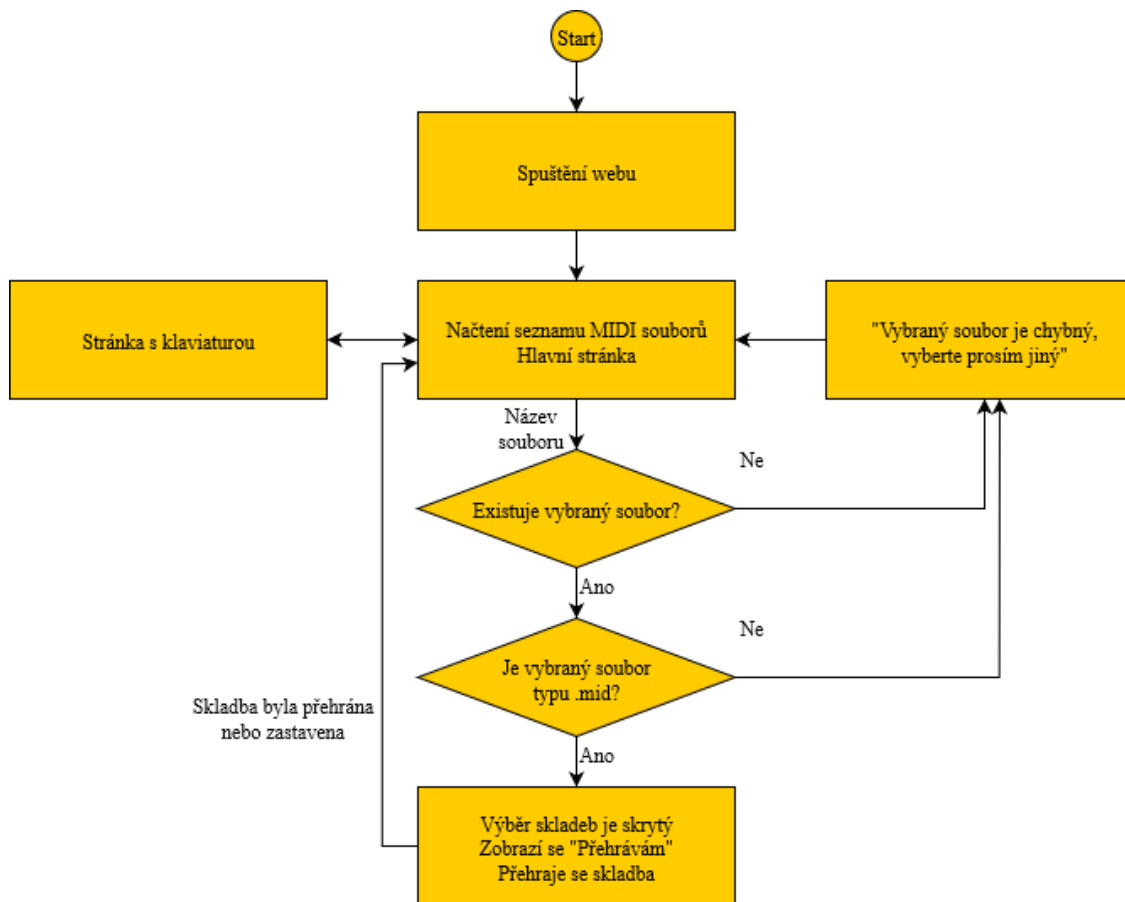
Pro lokální webový server byl použit rámec webových aplikací Flask [19]. Ten byl navržen, aby byl jednoduchý pro laiky, ale zároveň nabízel dostatečné možnosti pro komplexnější řešení. Flask používá nízko úrovně rozhraní WSGI (konkrétně knihovny `Workzeug`) a šablonovací systém Jinja2. Tento rámec byl zvolen díky pohodlnému propojení Python3 aplikací s webovým serverem.

### 7.2.3 Běh programu

Po spuštění programu `main.py` se spustí webový server, který načte hlavní stránku uvedenou na obrázku 7.4, a na ní zobrazí seznam `.mid` souborů načtený ze složky `songs`. Poté program čeká na akci uživatele. Ten může buď spustit přehrávání MIDI souboru, přidat nebo odebrat `.mid` soubor, zvolit hlasitost přehrávání, zapnout vzduch nebo přepnout na stránku s klaviaturou, na obrázku 7.5.

Následně, co uživatel vybere soubor, který chce přehrát, proběhne kontrola, jestli daný soubor existuje a jestli je soubor typu .mid. Poté se cesta k souboru předá funkci `play_song` v programu `komAMidi.py`, která nastaví na regulátoru tlaku zvolenou úroveň hlasitosti a postupně pošle jednotlivé noty do MCU pomocí sériové komunikace. V průběhu přehrávání může uživatel skladbu zastavit, čímž se vypne vzduch a MCU se pošle znak pro vynulování všech výstupů. Uživatelské rozhraní se pak přepne zpět na hlavní stránku.

Pokud uživatel přepne na stránku s notami, může opět pomocí tlačítka zapnout vzduch dle zvolené hlasitosti a poté volit jednotlivé noty, které budou aktivovány.



Obrázek 7.2 Vývojový diagram řídicího programu RPI

### 7.3 Protokol komunikace

Pro komunikaci mezi RPI a MCU byl vytvořen primitivní komunikační protokol. Ten se skládá z 65 8bit zpráv, viz. tabulka 7.1. Zjednodušeně se v protokolu objevují tři druhy zpráv, zapni notu, vypni notu a vynuluj výstupy. Druh zprávy může MCU rozlišit dle 3 nejvyšších bitů, jak je naznačeno v tabulce 7.1.

Tabulka 7.1 Komunikační protokol

Akce	Zpráva (0x)	Zpráva (0b)
Zapni notu f	0x20	0b00100000
Zapni notu fis	0x21	0b00100001
...	...	...
Zapni notu C <sub>3</sub>	0x3F	0b00111111
Vypni notu f	0x40	0b01000000
Vypni notu fis	0x41	0b01000001
...	...	...
Vypni notu C <sub>3</sub>	0x5F	0b01011111
Vynuluj vše	0x72	0b01110010

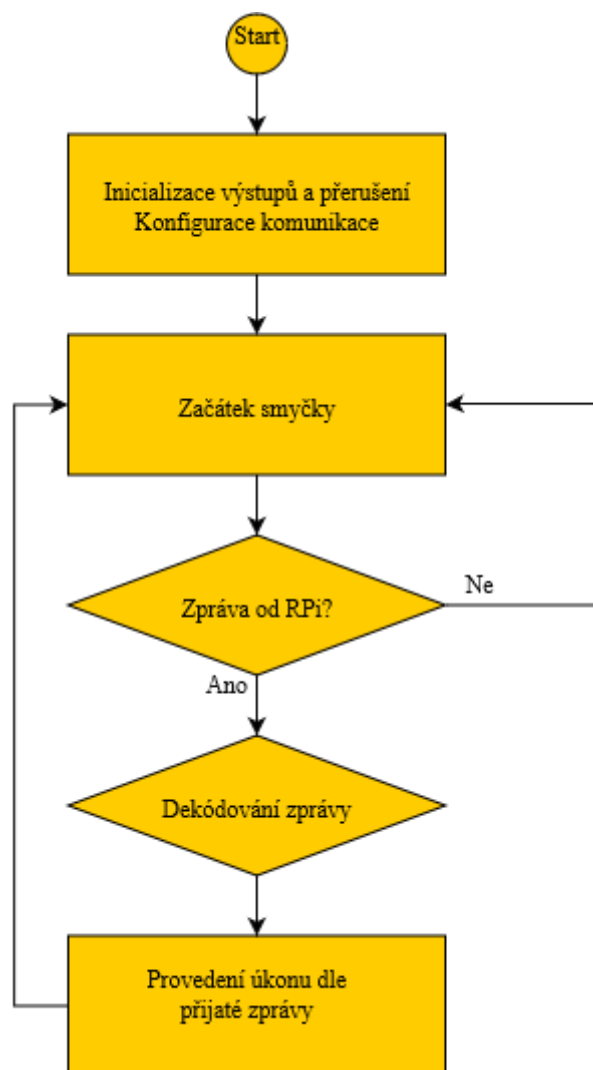
Protokol komunikace je sice velmi jednoduchý a nepokrývá například možnost ztráty jednoho nebo více bytů. I přes relativně nízkou rychlost komunikace mezi RPI a MCU byl datový tok dostatečný pro předávání dat (not). Nebylo třeba tento protokol nijak optimalizovat, při přehrávání se neobjevily žádné chyby.

## 7.4 Program MCU

Program MCU byl napsán v jazyce C. Vývojový diagram programu je na obrázku 7.3.

Po zapnutí spuštění programu MCU proběhne nejprve nastavení výstupů, sériové komunikace a povolení přerušení. Poté již běží nekonečná smyčka. K přijetí zprávy je použita rutina obsluhy přerušení, která je spuštěna příslušným vektorem přerušení. Ta uloží přijatou zprávu z registru UDR0 a nastaví flag FI\_Serial\_rx, že proběhla rutina obsluhy přerušení.

Pokud je FI\_Serial\_rx „true“, MCU zavolá funkci pro dekódování zprávy, která provede příslušnou akci dle protokolu. Poté se FI\_Serial\_rx opět nastaví do „false“ a MCU opět čeká na další zprávu.



Obrázek 7.3 Vývojový diagram programu MCU

## 7.5 Uživatelské rozhraní

Webová stránka uživatelského rozhraní je psána v jednoduchém značkovacím jazyce HTML v kombinaci se skriptovacím jazykem JavaScript.

JavaScript byl použit pro funkce jako přidání a odebrání skladeb ze složky, tlačítka not na stránce klaviatury nebo pro zobrazení seznam skladeb. Na obrázcích 7.4 a 7.5 jsou již výše zmíněné stránky pro ovládání.

## Název písně

- GameOfThrones1.mid
- GameOfThrones2.mid
- MixPisni.mid
- Piratizkaribiku.mid
- Piratizkaribiku2.mid
- SuperMarioBros.mid

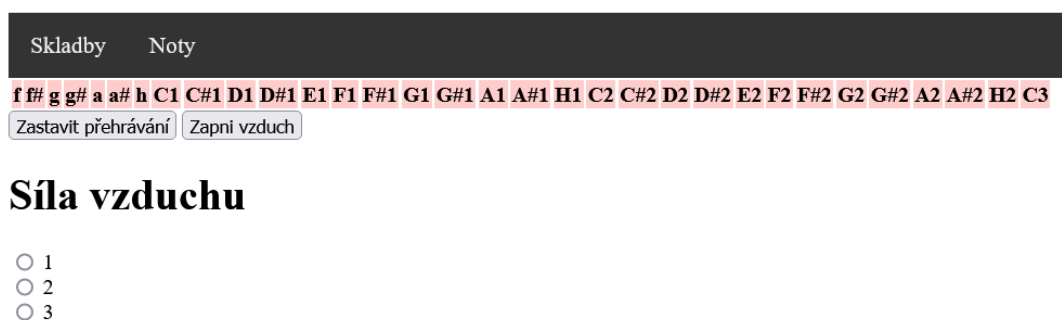
## Nahrajte .mid skladbu

- Soubor nevybrán.
- 
- 
- 

## Síla vzduchu

- 1
- 2
- 3

Obrázek 7.4 Hlavní stránka uživatelského rozhraní



Obrázek 7.5 Stránka s klaviaturou

## 7.6 Automatické spouštění

Poslední detail potřebný pro dokončení systému je nastavení automatického spouštění programu v RPI. Toho bylo docíleno přidáním několika příkazů, na obrázku 7.6, na konec shellového skriptu `.bashrc`, který je spuštěn vždy, když naběhne systém nebo je otevřeno okno terminálu.

```
echo Running at boot
sudo pigpiod #spusti pigpio daemon
cd /home/pi/Harmonika/AutonomniHarmonika #prejde do slozky s programem
python3 /home/pi/Harmonika/AutonomniHarmonika/main.py #spusti program
```

Obrázek 7.6 Příkazy pro automatické spuštění

## 8. ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrzení funkčního elektronického systému řídicího foukací harmoniku. Tento systém byl vybaven akčními členy pro ovládání klapky harmoniky a pro řízení a ovládání tlaku vzduchu. Systém byl navržen pro přehrávání MIDI souborů a ovládání jednotlivých kláves. Všechny na počátku stanovené cíle byly popsanou realizací bakalářské práce naplněny.

V teoretické části práce byla zpracována literární rešerše a internetový průzkum, návrh a zdůvodnění koncepce řídicího systému a definice zvolených komponent. Poté byla v práci popsána realizace a oživení navrženého systému. V praktické části projektu byla vytvořena hardwarová část (osazení desky plošných spojů) a bylo vytvořeno programové vybavení pro nadřazený systém a podružné členy. Celý systém byl zprovozněn a bylo pořízeno video systému v provozu, které lze nalézt v elektronické příloze této práce a online [20].

Navržený systém funguje bez zjevných problémů. Po výběru MIDI souboru ve webovém rozhraní přehraje systém zvolenou skladbu přesně dle očekávání. Díky rozšířené logice udržuje systém konstantní hlasitost i při stisku více kláves, čímž systém přidává dojmu, že na harmoniku hraje skutečný hudebník.

## LITERATURA

- [1] TRUKHINA, Irina. *Elektronický systém řízení hudebního nástroje* [online]. Brno, 2014 [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/31323>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Zdeněk Bradáč.
- [2] Barrel organ. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Barrel\\_organ](https://en.wikipedia.org/wiki/Barrel_organ)
- [3] Organ-service. *Organ-service* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <http://www.organ-service.cz/o-firme-organ-service.htm>
- [4] Model 12. *Organ-service* [online]. [cit. 2021-7-28]. Dostupné z: <http://www.organ-service.cz/images/fotky/hudebni-automaty/13/ukazky/obrazy/3.jpg>
- [5] Orchestrion. *Wikipedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Orchestrion>
- [6] Compressorhead. *Robocross-machines* [online]. [cit. 2021-7-28]. Dostupné z: <https://robocross-machines.com/robot-punk-band/>
- [7] *75M-STA-EN: Pull Tubular Solenoids* [online]. [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/e6f2be922f2eef5ff85325c47e73bd7a/75M-STA-EN.pdf>
- [8] GPIO-Pinout-Diagram-2. *Raspberrypi* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/images/GPIO-Pinout-Diagram-2.png>
- [9] ATmega165A/PA/325A/PA/3250A/PA/645A/P/6450A/P [DATASHEET]. *Microchip* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/atmel-8285-8-bit-avr-microcontroller-atmega165a\\_pa\\_325a\\_pa\\_3250a\\_pa\\_645a\\_p\\_6450a\\_p\\_datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/atmel-8285-8-bit-avr-microcontroller-atmega165a_pa_325a_pa_3250a_pa_645a_p_6450a_p_datasheet.pdf)
- [10] Eight darlington arrays – ULN2802A. *TME* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/6c3544f25783a73089e777c74fb41384/ULN2802A.pdf>
- [11] Datasheet – L78. *Datasheet.octopart* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://datasheet.octopart.com/L7805CV-STMicroelectronics-datasheet-7264666.pdf>
- [12] UB232R. *FTDI chip* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: [https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Modules/DS\\_UB232R.pdf](https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Modules/DS_UB232R.pdf)
- [13] AVRISP mkII. *Microchip* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/developmenttools/ProductDetails/PartNO/ATAVRISP2>



- [14] Musical Instrument Digital Interface. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Musical\\_Instrument\\_Digital\\_Interface](https://cs.wikipedia.org/wiki/Musical_Instrument_Digital_Interface)
- [15] *Notesinvert* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/graphics/notesinvert.GIF>
- [16] Pigpio library. *Abyz.me* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://abyz.me.uk/rpi/pigpio/>
- [17] PySerial. *Read The Docs* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: [https://mido.readthedocs.io/en/latest/midi\\_files.html](https://mido.readthedocs.io/en/latest/midi_files.html)
- [18] Mido – MIDI objects for Python. *Readthedocs* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://mido.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- [19] Flask Documentation. *Flask* [online]. [cit. 2021-7-21]. Dostupné z: <https://flask.palletsprojects.com/en/2.0.x/>
- [20] *Videoukázka elektronického řídicího systému foukací harmoniky* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://youtu.be/XWfb-TZ4w9g>

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
BPM	Beats per minute (Údery za minutu)
DPS	Deska plošného spoje
RPI	Raspberry Pi
USB	Universal serial bus (Univerzální sériová sběrnice)
GPIO	General purpose input output (Univerzální vstup/výstup)
PWM	Pulzně šířková modulace
MCU	Mikrokontroler
I/O	Input/Output (Vstup/Výstup)
I2C	IIC (Internal-integrated circuit bus)
USART	Univerzální synchronně asynchronní přijímač-vysílač
ADC	Analog-digital convertor (Analogově-digitální převodník)
SPI	Serial peripheral interface (Sériové periferní rozhraní)
USI	Universal serial interface (Univerzální sériové rozhraní)
ISP	In-system programmer
LED	Light-emitting diode (elektroluminiscenční dioda)
SD	Secure digital
SSH	Secure shell
WSGI	Web server gateway interface
HTML	Hypertext Markup Language

## Symboly:

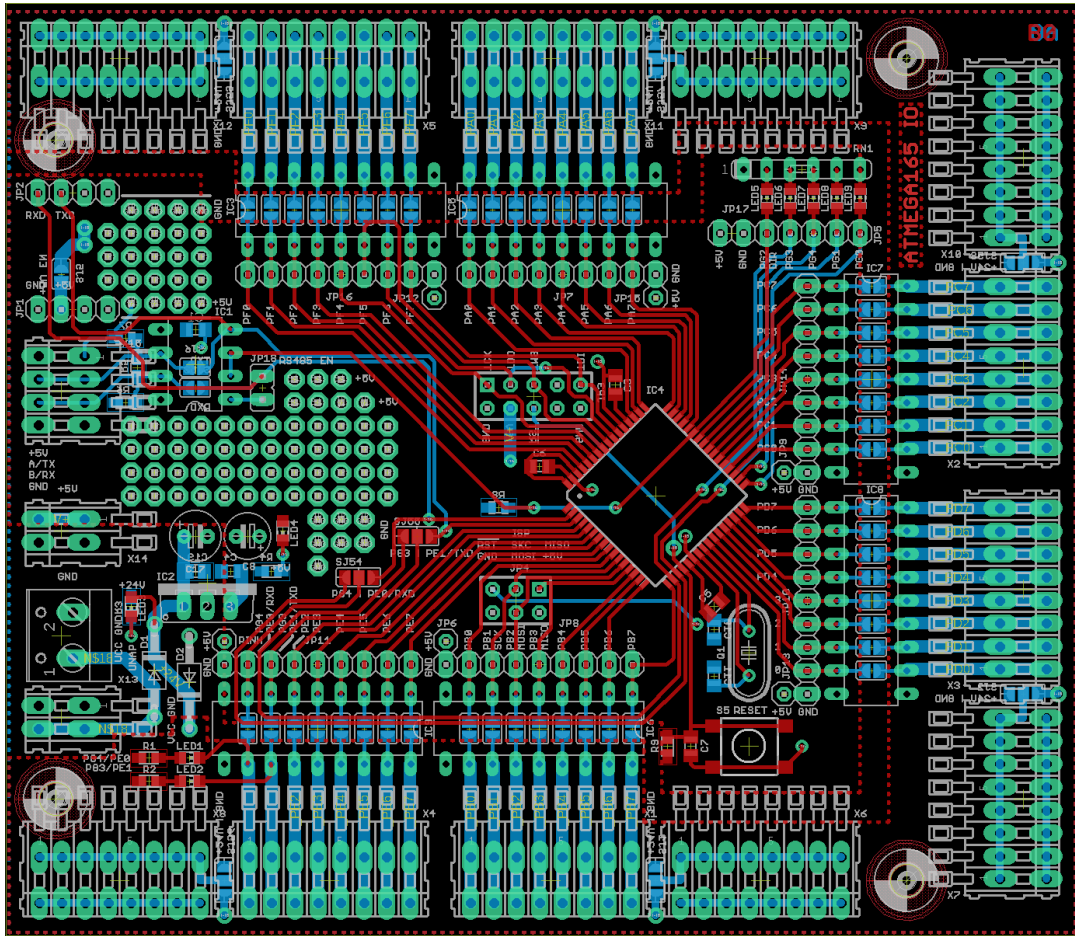
$U$	napětí	(V)
$I$	proud	(A)
R	odpor	( $\Omega$ )
P	výkon	(W)
ms	milisekundy	(ms)
f	frekvence	(Hz)
B	byte	(-)
P	pascal	(P)

## **SEZNAM PŘÍLOH**

<b>PŘÍLOHA A - SCHÉMA ZAPOJENÍ DPS .....</b>	<b>43</b>
<b>PŘÍLOHA B - DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ .....</b>	<b>44</b>
<b>PŘÍLOHA C - SEZNAM SOUČÁSTEK .....</b>	<b>45</b>
<b>PŘÍLOHA D - OBSAH ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY .....</b>	<b>47</b>



# Příloha B - Deska plošných spojů



## Příloha C - Seznam součástek

<b>Rezistory</b>			
<b>Označení</b>	<b>Počet</b>	<b>Hodnota [<math>\Omega</math>]</b>	<b>Pouzdro</b>
R1, R2, R3	3	1500	SMD 0805
R4, R6, R7	3	750	SMD 0805
R5	1	130	SMD 0805
R8,R9	2	10000	SMD 0805
SJ2, SJ6, SJ53, SJ56, SJ57, SJ58, SJ59	7	0	SMD 0805
R1	1	1000	Axiální
RN1	1	5x 330	-
<b>Kondenzátory</b>			
<b>Označení</b>	<b>Počet</b>	<b>Hodnota [F]</b>	<b>Pouzdro</b>
C1, C3, C4, C5, C6, C19	5	100n/50V	SMD 0805
C7	1	4,7n	SMD 0805
C8, C1	2	10u/16V	Radiální
C10, C11	2	33p	SMD 0805
C17	1	100u/35V	Radiální
<b>Diody</b>			
<b>Označení</b>	<b>Počet</b>	<b>Typ</b>	<b>Pouzdro</b>
D1	1	1N4007 – Usměrňovací	Axiální
D2	1	P6KE27A – Zenerova	Axiální
LED1-9	9	KP-2012 SGC	SMD 0805
<b>Integrované obvody</b>			
<b>Označení</b>	<b>Počet</b>	<b>Typ</b>	<b>Pouzdro</b>
IC2	1	L7805CV	TO220
IC3, IC6, IC7, IC8, IC9	5	ULN2803A	DIP18
IC4	1	MEGA165A	TQFP-64
IC3, IC6, IC7, IC8, IC9	5	Precizní patice	DIL18
<b>Konektory</b>			
<b>Označení</b>	<b>Počet</b>	<b>Typ</b>	
X13, X14	4	WAGO 233-502	
X15	1	WAGO 233-504	
X1, X2, X3, X5, X6, X7, X8, X10, X11, X12	10	WAGO 233-208	

<b>Ostatní</b>		
<b>Typ</b>	<b>Počet</b>	<b>Popis</b>
Raspberry Pi 3b+	1	Minipočítač Raspberry Pi 3 model B+ 64-bit 1GB
QM 11,059 MHz	1	Piezoelektrický krystal
S2G40	1	Kolíková lišta 2x20, rozteč 2,54 mm
TD-03XA	1	Mikrospínač SMD
PS5R-SG24	1	Průmyslový zdroj
VSZ-05-03 USB A	1	Adaptér 5V/3A 15W
UB232R	1	Převodník UART/USB

## **Příloha D - Obsah elektronické přílohy**

- flaskProject – program RPI
- MCUprogram – program MCU
- Blokové schéma.png – blokové schéma systému
- bokohled.jpg – detail zařízení z boku
- fotoDPS.jpg – fotografie osazené DPS
- IO.brd – DPS
- IO.sch – zapojení DPS
- nahled.jpg – fotografie zařízení
- Videoukázka\_xpokor77.mp4 – video systému v provozu
- Vývojový diagram\_MCU.png – vývojový diagram programu MCU
- Vývojový diagram\_RPI.png – vývojový diagram programu RPI
- web\_main.png – obrázek úvodní stránky uživatelského rozhraní
- web\_noty.png – obrázek stránky s klaviaturou