

# LASEROVÁ HARFA

Projekt - Soustředění mladých fyziků a matematiků

## **Poděkování**

Chtěli bychom poděkovat Janu Sixtovi za odborné vedení a dohled při tvorbě projektu, připravené materiály a námět projektu. Poděkování patří také celému táboru a matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy, díky kterým bylo možné na projektu pracovat.

## **Anotace**

Projekt je zaměřený na návrh a výrobu laserové harfy, kterou lze využít pro přehrávání několika tónů přerušením světelné struny. Zabývá se návrhem senzorů, rozmítacího mechanismu pro laser, návrhem krabičky pro zařízení a zprovozněním nutného softwaru pro přehrávání hudby.

## **Klíčová slova**

Harfa, laser, hudba, 3D tisk, Arduino, MIDI

# OBSAH

<b>1 Úvod</b>	<b>4</b>
1.1 Harfa . . . . .	4
1.2 Zjednodušený princip fungování . . . . .	4
<b>2 Hardware</b>	<b>5</b>
2.1 Arduino NANO . . . . .	5
2.2 Laser . . . . .	5
2.3 Rozmítací mechanismus . . . . .	6
2.4 Senzor odrazu světla . . . . .	7
2.5 Kalibrační senzor . . . . .	8
2.6 Výstup MIDI . . . . .	9
2.7 Indikační LED . . . . .	9
2.8 Transpoziční tlačítko a pedál . . . . .	10
<b>3 Software</b>	<b>11</b>
3.1 Firmware zařízení . . . . .	11
3.1.1 Konfigurační soubor . . . . .	12
3.2 Přehrávání hudby . . . . .	12
<b>4 Mechanické provedení</b>	<b>13</b>
<b>5 Závěr</b>	<b>14</b>
<b>A Seznam elektronických příloh</b>	<b>17</b>
<b>B Zjednodušená technická specifikace</b>	<b>18</b>
B.1 Napájení . . . . .	18
B.2 Update firmwaru . . . . .	18
B.3 Doporučený externí software . . . . .	18
B.4 Použití . . . . .	18
B.5 Bezpečnostní upozornění . . . . .	18

# 1 ÚVOD

## 1.1 HARFA

Harfa je jeden z nejstarších známých strunných hudebních nástrojů [1]. V moderním podání můžeme struny nahradit například paprsky laseru a z původně tradičního nástroje tak udělat efektní hračku. Zařízení tedy může nejen vytvářet hudbu, ale také udělat skvělý vizuální dojem.

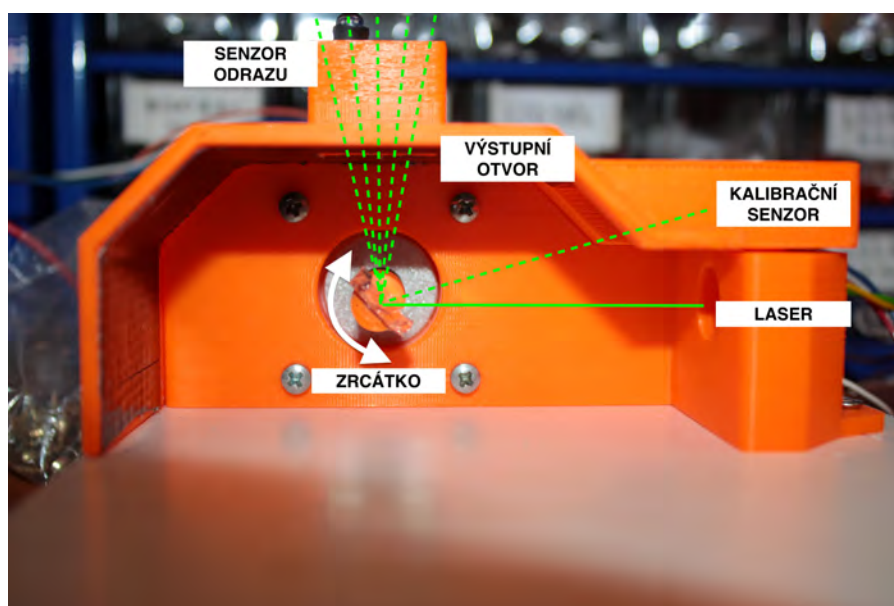
## 1.2 ZJEDNODUŠENÝ PRINCIP FUNKOVÁNÍ

Existují 2 typy přístupů, jak laserovou harfu zkonstruovat. Můžeme je rozdělit na:

- Rámovou, která pro každou strunu využívá vlastní sensor, který je uchycený naproti zdroji světla.
- Bezrámovou, která využívá pouze jediný laserový paprsek a jeden sensor.

My jsme se rozhodli vytvořit bezrámovou variantu, která je konstrukčně zajímavější. Jediný paprsek laseru je rozmítán otočným zrcátkem tak, aby zdánlivě tvořil několik strun. Při otáčení zrcátka mezi pozicemi laser zhasne, po otočení do správné pozice „blikne“. Pokud se tento proces opakuje s dostatečně vysokou frekvencí, člověku se zdánlivě před očima objeví několik strun.

Zařízení pomocí senzoru snímá množství světla, které na tento sensor z vrchu dopadá. Pokud „hudebník“ přeruší laserový paprsek, poměrně velké množství rozptýleného světla se od jeho ruky odrazí zpět do senzoru. Protože vždy může svítit maximálně jedna struna najednou, je možné přesně určit, která struna byla přerušena a vyvolat příslušnou reakci, například zahrát zvukový tón.

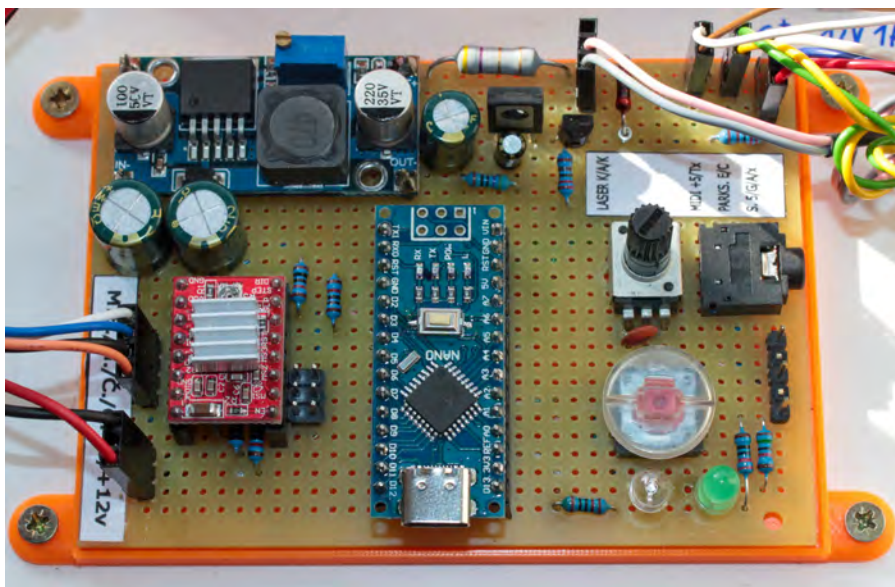


Obrázek 1.1: Zjednodušené schéma zařízení.

## 2 HARDWARE

### 2.1 ARDUINO NANO

Využíváme klon desky Arduino NANO, která je založená na čipu ATmega328 [2]. Pro projekt harfy jsme ho zvolili jako hlavní mikropočítač, který se stará o zpracování dat ze senzorů, řízení motoru, odesílání dat prostřednictvím MIDI apod. Spolu s dalšími klíčovými komponentami je Arduino NANO připevněné na řídicí desce vyrobené pomocí pájivého pole.



Obrázek 2.1: Řídící deska zařízení.

### 2.2 LASER

K vykreslování strun jsme použili zelený laser, který má vyšší výkon a lepší viditelnost, než běžně používané červené lasery. Červený laser (obrázek 2.2) jsme využili při prototypování.

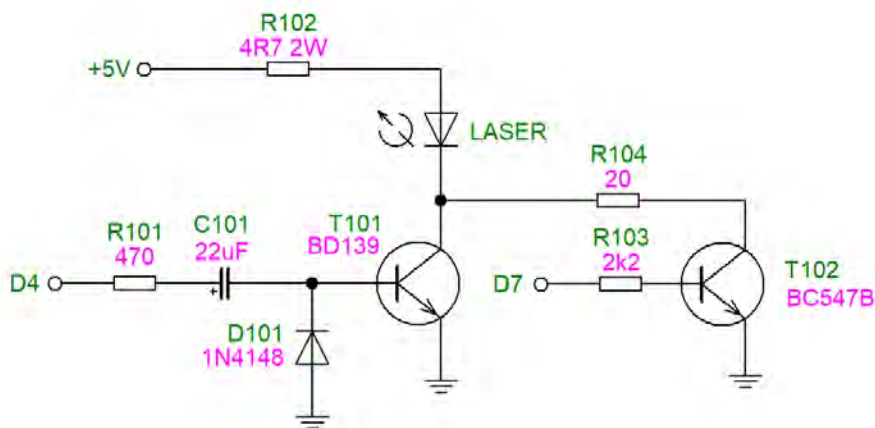


Obrázek 2.2: Prototyp, body červeného laseru na stěně.



Obrázek 2.3: Body zeleného laseru na stěně.

Jelikož paprsek využíváme pulzně, můžeme si dovolit využití vyššího výkonu (ovládací pin D4). Díky tomu je paprsek laseru pro lidské oko lépe viditelný. Abychom zabránili poškození laseru případným trvalým svitem při vyšším výkonu, v jeho budícím obvodu je implementován ochranný kondenzátor (ve schématu 2.4 označený C101), který omezuje maximální dobu souvislého svícení na několik milisekund. V případech, kdy není potřeba využívat vysoký výkon laseru, například při úvodní kalibraci, laser může operovat i s menším výkonem (tranzistor T102, ovládání pinem D7).

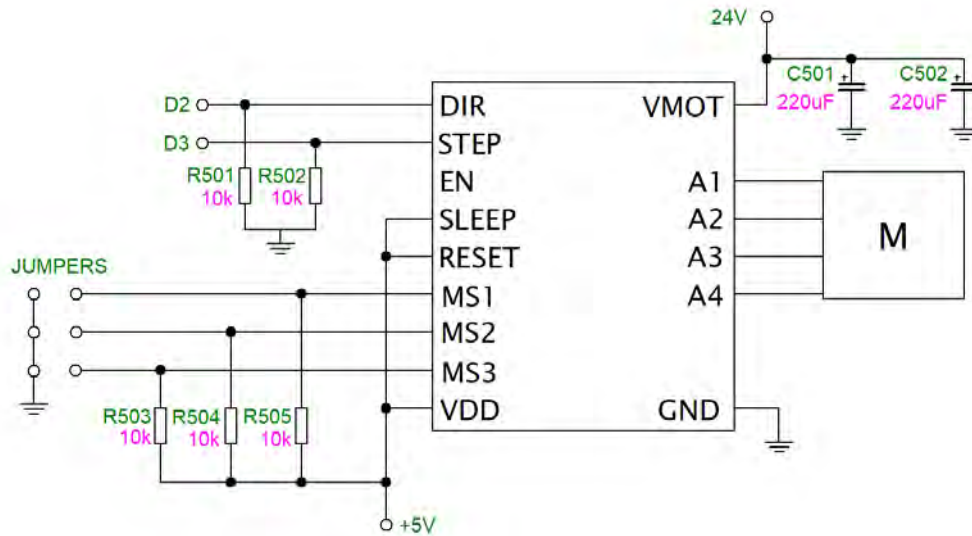


Obrázek 2.4: Schéma zapojení budícího obvodu laseru.

## 2.3 ROZMÍTACÍ MECHANISMUS

Paprsek laseru je rozmítán na celkem 5 strun, s odstupem 2. Rozmítací mechanismus se skládá z krokového motoru, na jehož konci hřídele je připevněno zrcátko.

Motor je ovládaný pomocí externího driveru A4988, který umožňuje využívat mikrokrokování až do 1/16. Jedná se o metodu, díky které lze krokový motor otáčet „jemněji“ o menší úhel, než je jeden plný krok (umožňuje rozdělit otočení o 1.8 při plném kroku na 16 menších kroků, přibližně po 0.11). Pro motor jsme zvolili napájení 12 V. Motor postupně otáčí zrcátkem, na každé pozici se laser na chvíli zastaví a rozsvítí.

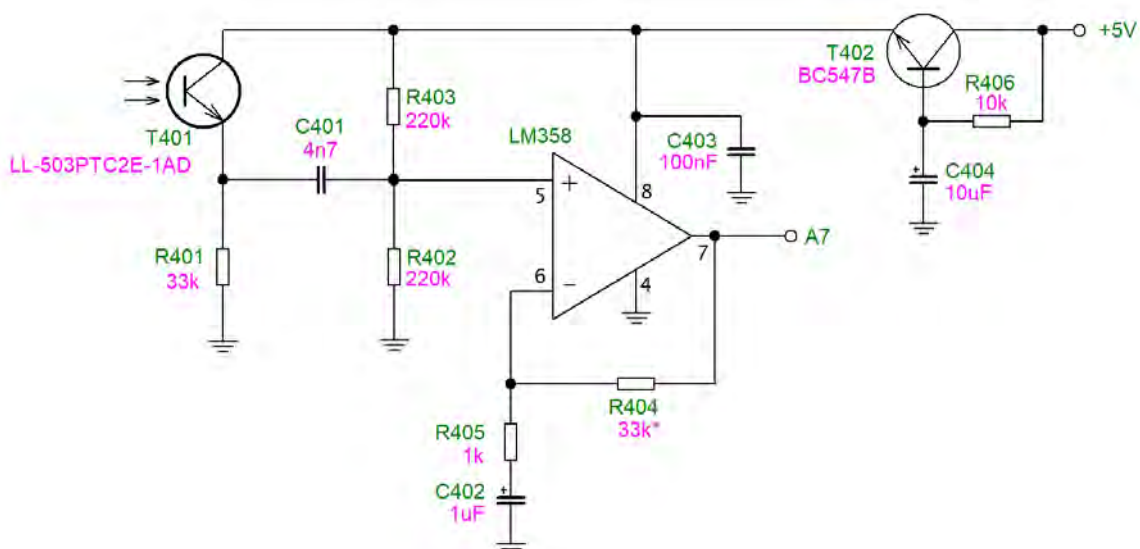


Obrázek 2.5: Schéma zapojení motoru.

Vlastnosti motoru jsou hlavní limitací obnovovací frekvence jednotlivých strun. Po každé úpravě polohy zrcátka je nutné okolo 20 milisekund vyčkat, než se po pohybu motor ustálí na pozici struny. Bez toho paprsky tvoří čáry, ne jasné body. Pomocí trimmeru na modulu driveru je také vhodné upravit množství proudu, které je přivedeno do motoru tak, aby se zabránilo vibracím, ale zároveň se motor mohl snadno otáčet bez ztráty kroků.

## 2.4 SENZOR ODRAZU SVĚTLA

Aby bylo možné co nejpřesněji detekovat množství odraženého světla, navrhli jsme vlastní senzorový modul. Využívá fototranzistor LL-503PTC2E-1AD, jeho výstup je zesílený operačním zesilovačem LM358.



Obrázek 2.6: Schéma zapojení senzoru odraženého světla.

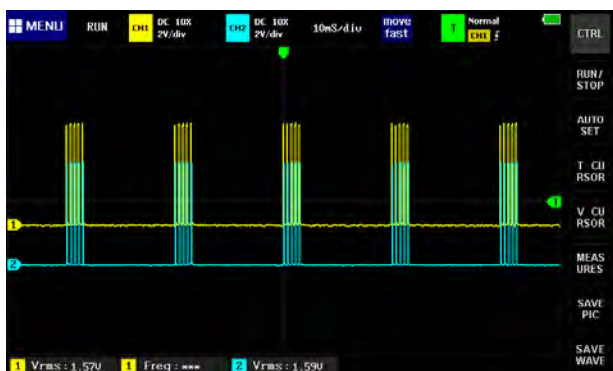


Rezistor R404 (schéma 2.6) na zpětné vazbě operačního zesilovače je osazen v patici pro snadnou výměnu hodnoty, od  $33\text{ k}\Omega$  do přibližně  $330\text{ k}\Omega$ , abychom pomocí něho mohli upravovat zisk senzoru. V aktuální konfiguraci je použito 34 násobné zesílení.

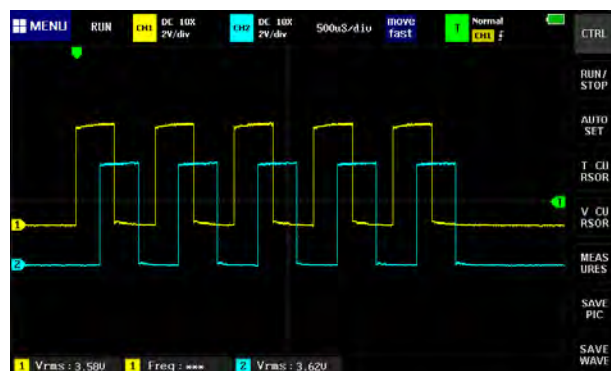
Po ustálení motoru na správné pozici se 5krát s frekvencí  $1.4\text{ kHz}$  rozsvítí laser a proběhne měření množství odraženého světla. Proces probíhá následujícím způsobem:

- Rozsvítí se laser.
- Proběhne měření a uloží se hodnota množství světla, které dopadá na senzor.
- Laser zhasne.
- Proběhne druhé měření, ve kterém se změří množství dopadajícího světla bez rozsvíceného laseru.
- Porovná se rozdíl stavu s rozsvíceným laserem a bez laseru, pokud je hodnota při rozsvíceném laseru výrazně větší, byl paprsek pravděpodobně přerušen a světlo se odráží zpět.

Díky tomuto přístupu lze poměrně přesně vyhodnotit rozdíl v hodnotě dopadajícího světla, aniž by výsledky byly ovlivněny cizím světelným rušením. Mezi jednotlivými kroky jsou udělané několika mikrosekundové pauzy tak, aby se například krátce po rozsvícení laseru hodnota na senzoru ustálila a měření tak bylo co nejpřesnější (obrázek 2.7b, žlutý kanál ukazuje napětí na laseru, na hranách napětí modrého kanálu probíhá měření světla dopadajícího na senzor).



(a) Pulzy laseru na každé pozici struny.

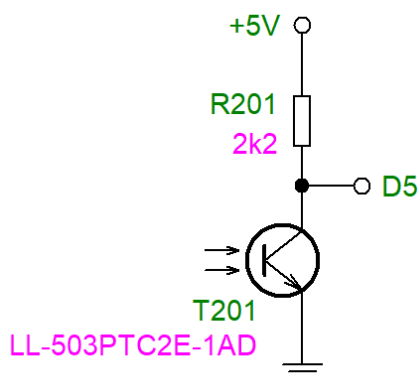


(b) Měření dopadajícího světla na jedné z pozic.

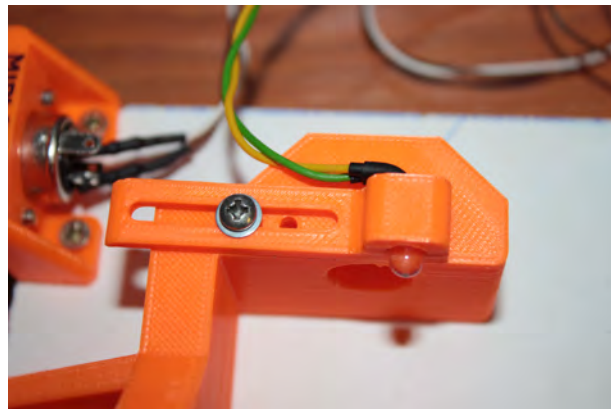
Obrázek 2.7: Vykreslení strun a měření odraženého světla - výstup z osciloskopu.

## 2.5 KALIBRAČNÍ SENZOR

Při spuštění zařízení není možné určit, v jaké pozici je krokový motor se zrcátkem právě natočený, proto jsme nad laser implementovali fototranzistor. Aby bylo možné operativně upravit jeho polohu vůči paprsku laseru, je uchycený v posuvné konstrukci (obrázek 2.8b). V prototypové verzi jsme využívali fototranzistorový modul pro Arduino, finální verze využívá fototranzistor LL-503PTC2E-1AD.



(a) Schéma zapojení kalibračního senzoru.



(b) Uchycení kalibračního senzoru na laser.

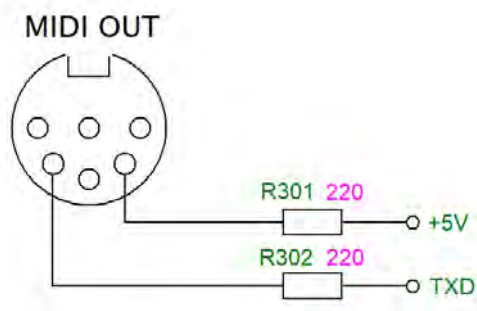
Obrázek 2.8: Kalibrační sensor.

Po zapnutí zařízení se zrcátko otáčí tak dlouho, dokud paprsek laseru neposvítí na tento senzor. V tu chvíli je možné určit absolutní polohu a zrcátko může být otočeno směrem k výstupnímu otvoru harfy.

Při procesu kalibrace pozice zrcátka jsme měli problém s příliš vysokou citlivostí fototranzistoru. Pro aktivování stačil jakýkoliv odražený paprsek, například od kraje nebo zadní části zrcátka. Problém jsme vyřešili úpravou napájecího obvodu laseru (obrázek 2.4), do kterého jsme přidali možnost laser spouštět nejen s vysokým výkonem, ale i s nízkým výkonem pro pomocné funkce jako je právě kalibrace.

## 2.6 VÝSTUP MIDI

Harfa má DIN-5 konektor pro připojení externího zařízení, které je schopné přijímat MIDI příkazy. Využíváme pouze piny 4 a 5 připojené přes 220  $\Omega$  rezistory (obrázek 2.9), viz MIDI specifikace [3].



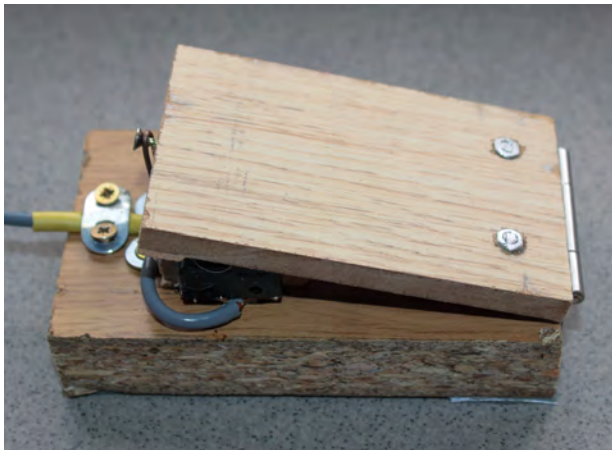
Obrázek 2.9: Zapojení MIDI konektoru.

## 2.7 INDIKAČNÍ LED

Na řídicí desce jsou také připojené dvě indikační diody. Zelená svítí v případě, že je harfa připojená ke zdroji napětí. Druhou, červenou diodu, lze využít například jako varovnou signalizaci rozsvíceného laseru a lze ji ovládat prostřednictvím pinu D8.

## 2.8 TRANSPOZIČNÍ TLAČÍTKO A PEDÁL

Aby bylo možné na harfě hrát více než 5 různých tónů, přidali jsme na řídicí desku tlačítko a JACK 3,5 mm konektor pro pedál, připojené k pinu D10. Pomocí nich je možné posunout hodnotu hraných tónů. Pedál je vyrobený ze dřeva.



(a) Pohled shora.



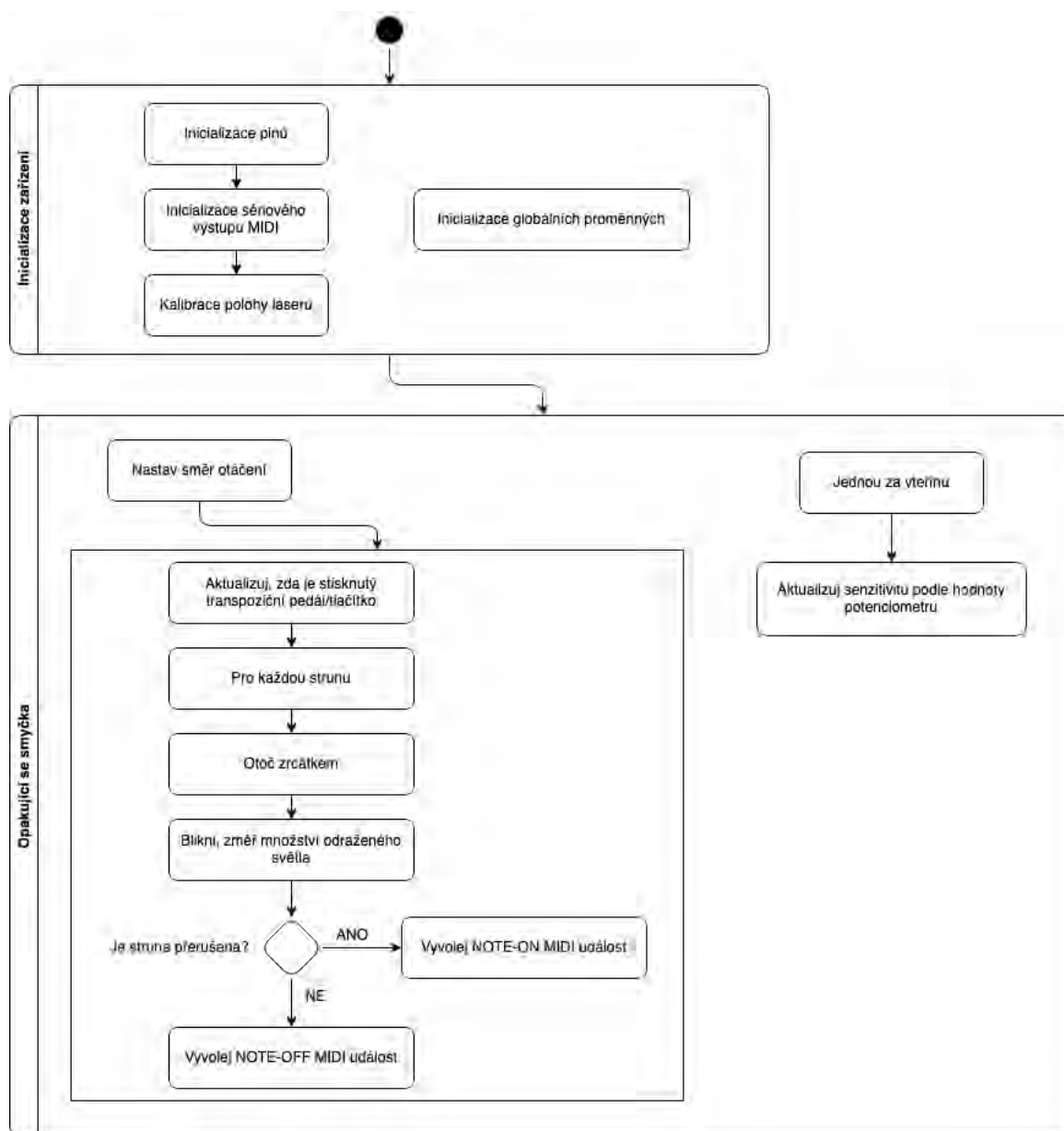
(b) Pohled z boku.

Obrázek 2.10: Transpoziční pedál.

## 3 SOFTWARE

### 3.1 FIRMWARE ZAŘÍZENÍ

Firmware harfy je psaný v Arduino, v prostředí CLion. Je strukturovaný do několika modulů a separátního konfiguračního souboru. V projektu nevyužíváme žádné externí knihovny.



Obrázek 3.1: Velmi zjednodušené schéma firmwaru, v minimální verzi pro přehrávání hudby.

### 3.1.1 Konfigurační soubor

Významné konfigurační konstanty, pomocí kterých lze upravit časování, počet strun, úhly, nastavení pinů a podobně jsou umístěné v souboru config.h. Tóny jednotlivých strun lze nastavit prostřednictvím notePitches.h.

## 3.2 PŘEHRÁVÁNÍ HUDBY

Přehrávání hudby je řešeno externě, pomocí softwaru třetí strany, na počítači. Harfa odesílá informace o výstupním zvuku prostřednictvím MIDI (Musical Instrument Digital Interface) [4]. Jedná se o volně přístupný průmyslový standard, který umožňuje audio zařízením digitálně komunikovat, a to až na 16 kanálech. Pro náš projekt jsou z tohoto protokolu důležité 2 takzvané „MIDI události“, konkrétně události „NOTE-ON“ a „NOTE-OFF“. Pomocí nich může harfa přehrát nakonfigurované tóny.

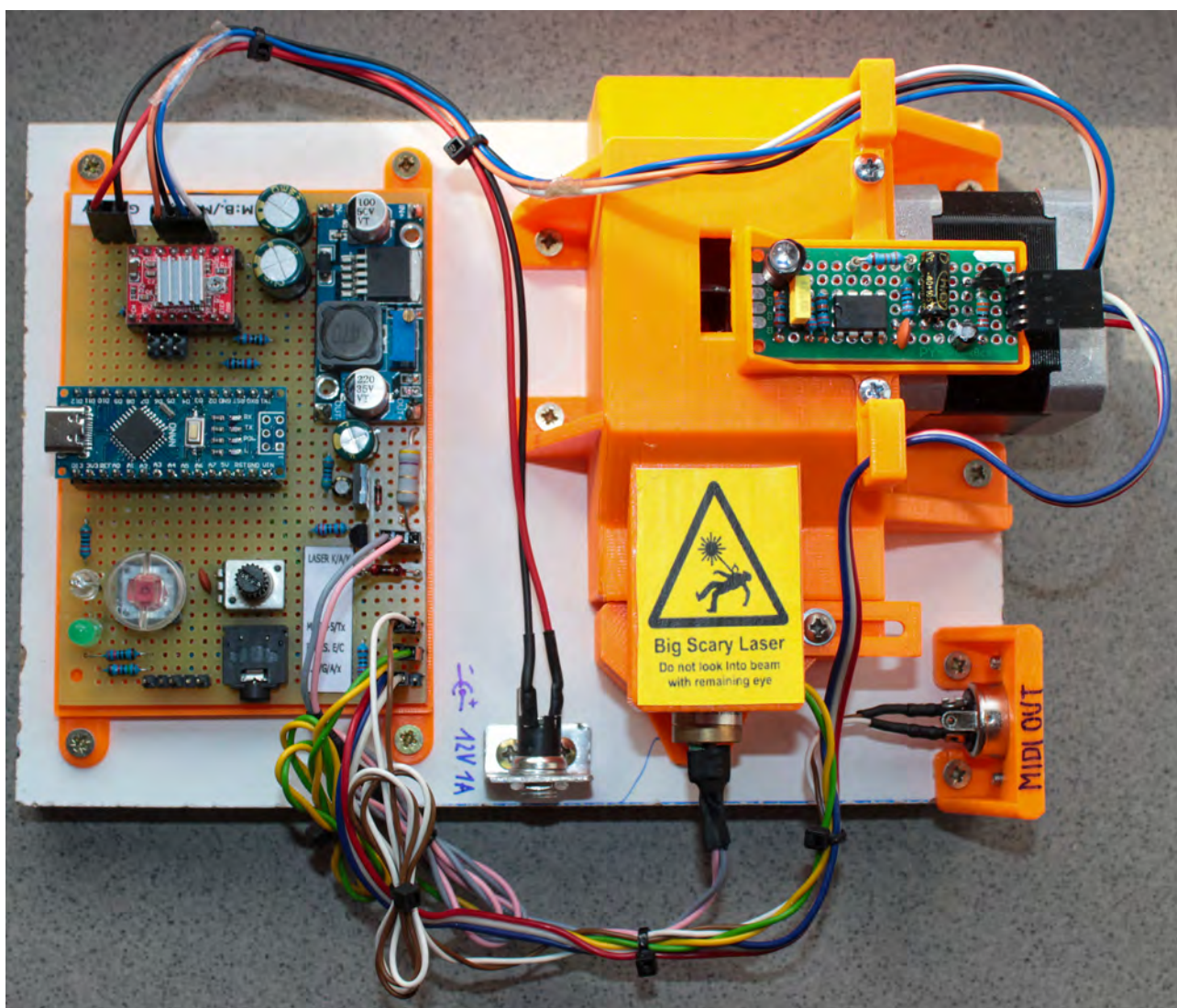
Jako externí software pro přehrávání tónů se nám velmi osvědčila aplikace GarageBand [5] (macOS), pro zařízení s Windows lze využít například MIDI-OX [6] nebo podobné.

## 4 MECHANICKÉ PROVEDENÍ

Pro zařízení jsme vymodelovali a za využití 3D tiskárny vytisknuli krabičku, která je nosným konstrukčním prvkem zařízení a brání případnému mechanickému poškození. Také funguje jako ochranný prvek před laserovým paprskem, který by potenciálně mohl způsobit například poranění zraku. Paprsek tak může ven ze zařízení svítit pouze prostřednictvím malého otvoru v horní části krabičky.

Protože je laser tak silný, že zvládá poměrně výrazně prosvítit i 3 mm širokou plastovou stěnu, je vnitřek krabičky polepený černou lepicí páskou, která nechtěné světlo dostatečně odstíní.

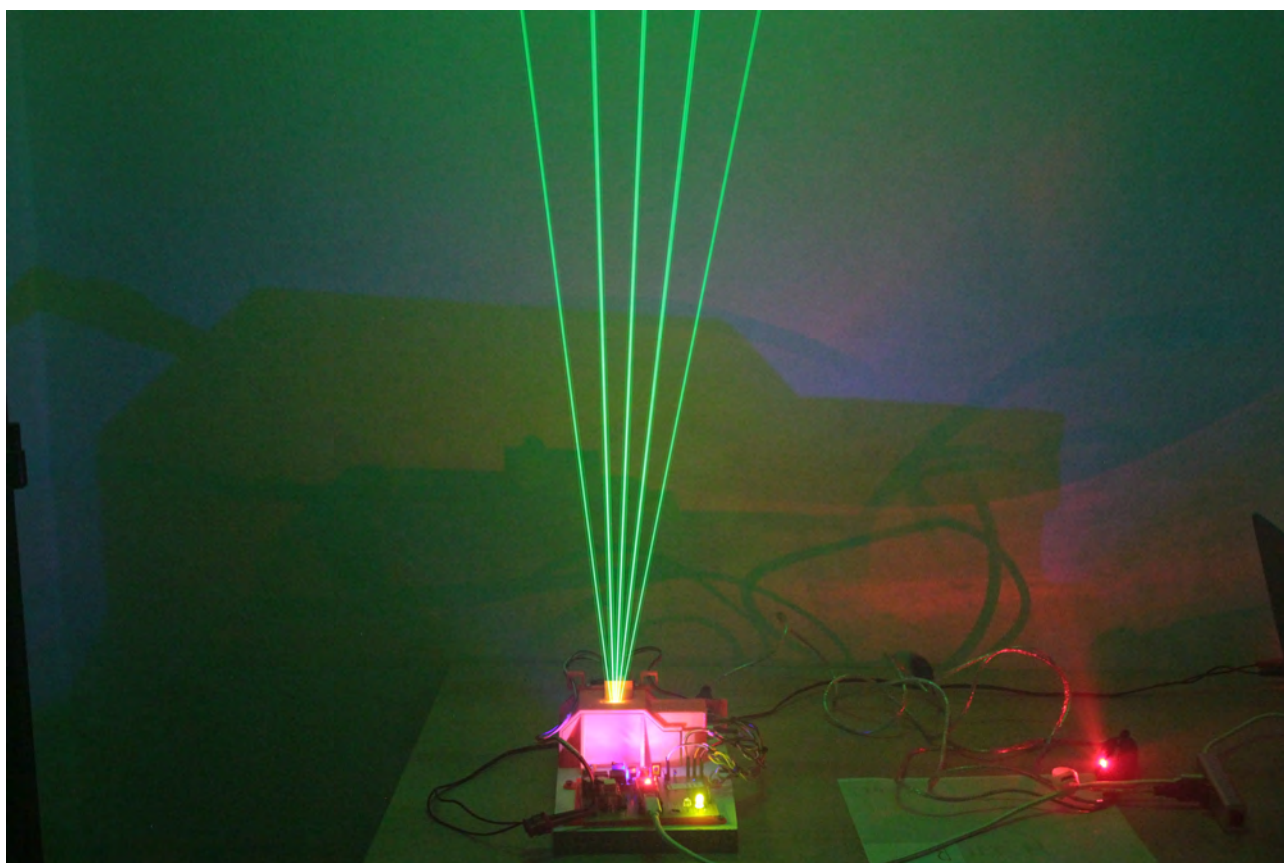
Motor, držáky a „vaničky“ pro senzory či desky jsou ke krabičce přišroubované šrouby M3, některé části jsou také lepené. Celá krabička je pak několika šrouby uchycena k dřevěné podložce.



Obrázek 4.1: Mechanické provedení zařízení.

## 5 ZÁVĚR

Podarilo se nám sestavit funkční zjednodušený prototyp, který jsme následně vylepšili do plnohodnotné laserové harfy. Zařízení promítá paprsky strun a na jejich přerušení reaguje zasláním příslušného zvukového tónu prostřednictvím MIDI.



Obrázek 5.1: Výsledek projektu - funkční harfa.

Drobnými nedostatky harfy jsou špatná detekce odrazu od pravé struny, která je s největší pravděpodobností způsobena neideálním úhlem dopadu světla na senzor. Harfa je také špatně použitelná v místnostech s nízkým (a obvykle bílým) stropem. V takových případech je nutné velmi jemně upravovat citlivost senzoru na co nejoptimálnější hodnotu.

Pro zařízení se také nabízí hned několik dalších potenciálních vylepšení. Příkladem může být třeba automatická kalibrace citlivosti senzoru při spuštění zařízení. Daly by se také softwarově vytvořit různé úvodní světelné efekty při spuštění harfy, například postupné rozevření strunového vějíře. Také by se dalo implementovat tlačítko navíc, při jehož zmáčknutí by se například posunula výška tónů. Představitosti se meze nekladou a v případě harfy by se případných dalších vylepšení dalo vymyslet nespočet.

## LITERATURA

- [1] Co je to harfa *TopMuzika.cz* [online]. 2021 [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: <https://www.topmuzika.cz/magazin/co-je-harfa/>
- [2] Arduino NANO. *Arduino.cc* [online]. [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>
- [3] MIDI Specifications. *MIDI Association* [online]. [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: <https://www.midi.org/specifications/midi-2-0-specifications/midi2-core>
- [4] What is MIDI. *WhatIs.com* [online]. [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/MIDI-Musical-Instrument-Digital-Interface>
- [5] GarageBand. *Apple.com* [online]. [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: <https://www.apple.com/mac/garageband/>
- [6] MIDI-OX. *Midiox.com* [online]. [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: <http://www.midiox.com/>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Zjednodušené schéma zařízení. . . . .	4
2.1	Řídící deska zařízení. . . . .	5
2.2	Prototyp, body červeného laseru na stěně. . . . .	5
2.3	Body zeleného laseru na stěně. . . . .	6
2.4	Schéma zapojení budícího obvodu laseru. . . . .	6
2.5	Schéma zapojení motoru. . . . .	7
2.6	Schéma zapojení senzoru odraženého světla. . . . .	7
2.7	Vykreslení strun a měření odraženého světla - výstup z osciloskopu. . . . .	8
2.8	Kalibrační sensor. . . . .	9
2.9	Zapojení MIDI konektoru. . . . .	9
2.10	Transpoziční pedál. . . . .	10
3.1	Velmi zjednodušené schéma firmwaru, v minimální verzi pro přehrávání hudby. . . . .	11
4.1	Mechanické provedení zařízení. . . . .	13
5.1	Výsledek projektu - funkční harfa. . . . .	14

## A SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH

1. Zdrojový kód firmwaru
2. Zdrojové soubory schémat programu ProfiCAD
3. Krátká videoukázka zařízení

## B ZJEDNODUŠENÁ TECHNICKÁ SPECIFIKACE

### B.1 NAPÁJENÍ

Požadované napětí:  $12 \pm 1$  V

Doporučená proudová zátížitelnost zdroje: 1 A

### B.2 UPDATE FIRMWARE

Prostřednictvím USB-C. Při uploadu nového firmwaru je potřeba odpojit MIDI převodník.

### B.3 DOPORUČENÝ EXTERNÍ SOFTWARE

GarageBand (macOS) [5]

MIDI-OX (Windows) [6]

Je vyžadováno použití převodníku z MIDI na USB.

### B.4 POUŽITÍ

Harfu doporučujeme provozovat v šeru, nejlépe v úplné tmě. Cizí zdroje světla mohou naetivně ovlivnit spolehlivost senzorů. Pro nejlepší zážitek je vhodné v místnosti vytvořit mlhu.

### B.5 BEZPEČNOSTNÍ UPOZORNĚNÍ

Pozor! Obsahuje laserový zdroj. **Vyhýbejte se zásahu očí přímým paprskem.** Nikdy se nedívejte do optiky laseru v provozu! Nikdy nepozorujte laser optickou soustavou, například dalekohledem! Hrozí trvalé poškození zraku! Doporučujeme zabránit přístupu dětem, osobám pod vlivem omamných a psychotropních látek. Pracoviště musí být označeno náležitými štítky varujícími před laserovým zářením.