



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

NÁVRH BEZDRÁTOVÉ JEDNOTKY PRO OVLÁDÁNÍ KLAVÍRNÍHO PEDÁLU POMOCÍ POHYBU HLAVY

DESIGN OF A WIRELESS UNIT FOR CONTROLLING A PIANO PEDAL BY HEAD MOVEMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radovan Mylbachr

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Roman

Adámek

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Radovan Mylbachr
Studijní program:	Mechatronika
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Roman Adámek
Akademický rok:	2023/24

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

Návrh bezdrátové jednotky pro ovládání klavírního pedálu pomocí pohybu hlavy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat návrhem zařízení pro simulování sešlápnutí sustain pedálu u elektronických pian na základě pohybu hlavy hráče. Toto zařízení má umožnit používat pedály piana i osobám, které k tomu z různých důvodů nemohou používat vlastní nohy.

Zařízení se bude skládat ze dvou částí, které spolu budou bezdrátově komunikovat. První část zařízení, která bude snímat pohyb hlavy, bude mít hráč nasazenou na hlavě a druhá část bude připojena k pianu a bude simulovat sešlápnutí pedálu. Práce bude navazovat na první verzi tohoto zařízení, které bylo vyvinuto v Mechatronické laboratoři.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Analyzujte první verzi vyvinutého zařízení a zaměřte se na možné prvky, které je nutné upravit v nové verzi i na základě zpětné vazby od uživatelů.
- 2) Popište, jak fungují klavírní pedály k elektronickým pianům a navrhnete zařízení tak, aby bylo kompatibilním s co největším počtem zařízení různých výrobců.
- 3) Na základě analýzy navrhnete obě části zařízení popsané v zadání této práce. Zaměřte se hlavně na uživatelskou přívětivost zařízení, tedy aby bylo snadno použitelné, pohodlné k nošení, disponovalo intuitivním ovládacím rozhraním pro kalibraci a používání a vhodnou signalizací provozních stavů. Zvolte vhodný bezdrátový modul a způsob nabíjení obou bateriově napájených částí.
- 4) Ověřte celkovou funkčnost zařízení s ohledem na jeho dlouhodobou spolehlivost, intuitivnost použití a přesnost detekce sešlápnutí pedálu.

Seznam doporučené literatury:

[1] ZÁHLAVA, Vít. Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 9788073002664.

[2] VALÁŠEK, Michael. Mechatronika. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1276-X.

[3] NOSKIEVIČ, Petr. Modelování a identifikace systémů. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-722-50-0-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vývojem bezdrátové jednotky pro ovládání klavírního pedálu pohybem hlavy sloužícího zejména jako pomůcka pro handicapované hráče na elektronické klávesové nástroje. V rešeršní části se práce zaměřuje na již existující řešení a na popis fungování pedálů, které má bezdrátová jednotka za úkol nahradit. Praktická část práce se zabývá návrhem elektroniky, konstrukcí ochranného pouzdra a naprogramováním funkcí prototypu této jednotky a následnou analýzou funkčnosti a uživatelské přívětivosti.

Summary

The bachelor thesis deals with the development of a wireless unit for controlling a piano pedal by head movement serving mainly as an aid for disabled electronic piano players. In the theoretical research, the thesis focuses on existing solutions and on the description of the pedal function that the wireless unit is supposed to replace. The practical part of the thesis deals with the design of the electronics, the construction of the protective case and the programming of this unit's prototype, followed by an analysis of the functionality and user-friendliness.

Klíčová slova

klavírní pedál, pohyb hlavy, bezdrátová komunikace, PIC, inerciální měřicí jednotka, IMU

Keywords

piano pedal, head movement, wireless communication, PIC, inertial measurement unit, IMU

Bibliografická Citace

MYLBACHR, R. *Návrh bezdrátové jednotky pro ovládání klavírního pedálu pomocí pohybu hlavy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2024. 35 s., Vedoucí bakalářské práce: Ing. Roman Adámek.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Návrh bezdrátové jednotky pro ovládání klavírního pedálu pomocí pohybu hlavy* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Romana Adámka, s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

Radovan Mylbachr

Brno

.

Děkuji především svému vedoucímu Ing. Romanu Adámkovi za velkou ochotu a svědomitost projevenou při vedení mé bakalářské práce. Dále děkuji paní Lucii Tomečkové za půjčení pedálu k analýze a za celkový zájem o navržené zařízení. Velmi děkuji také paní Monice Velackové za uživatelské hodnocení vyrobeného prototypu. V neposlední řadě bych rád poděkoval i své rodině, přítelkyni Sáře a kamarádu Sebastianovi za podporu a zájem o tuto práci.

Radovan Mylbachr

Obsah

1	Úvod	8
2	Rešerše	9
2.1	Dostupná řešení	9
2.2	Průzkum trhu s digitálními piany a pedály	10
2.3	Kompatibilita	12
2.4	Analýza předchozí verze projektu	12
2.5	Koncept nové verze	13
3	Výsledky řešení	15
3.1	Popis fungování	15
3.1.1	Hlavní část	15
3.1.2	Snímací část	17
3.1.3	Komunikace mezi oběma částmi zařízení	17
3.2	Konstrukce prototypu	19
3.2.1	Deska plošných spojů	19
3.2.2	3D tisk krabičky	20
3.3	Firmware	24
3.3.1	Hlavní část	24
3.3.2	Snímací část	26
3.4	Hodnocení prototypu	28
3.4.1	Výsledné parametry	28
3.4.2	Uživatelské hodnocení	29
3.4.3	Diskuze	29
4	Závěr	31
	Seznam zkratk	32
	Literatura	33
	Seznam obrázků	34

1 Úvod

Klavírní pedál je důležitou součástí celého nástroje, bez které se od určité úrovně hry na tento nástroj nelze obejít. Obecně na klavírech a piánech můžeme nalézt pedály tři, tato práce se však zaměřuje na pravý pedál (tzv. sustain pedál), při jehož sešlápnutí znějí všechny hrané tóny déle. U mechanických klavírů je to způsobeno uvolněním strun, které jsou tak méně tlumeny, stejný efekt je však simulován i u elektrických pián. Důvodem k výběru právě tohoto pedálu je fakt, že se jedná o zdaleka nepoužívanější ze všech tří a efekt, který poskytuje, vylepšuje výsledný dojem z interpretace velkého množství skladeb.

Standardní ovládání nohama je ovšem nedosažitelné pro lidi s handicapem dolních končetin, což je značně limitující a demotivující. Tato práce se tedy věnuje alternativním možnostem ovládání pedálu u elektrických pián. Zatímco teoretická část se zabývá již existujícími řešeními a vzájemnou kompatibilitou mezi jednotlivými nástroji, praktická část se zaměří na vývoj prototypu bezdrátové jednotky pro ovládání klavírního pedálu pohybem hlavy využitelné handicapovanými hráči na elektrické piáno, která navazuje na již funkční verzi vyrobenou v mechatronické laboratoři.

2 Rešerše

2.1 Dostupná řešení

Vzhledem k poměrně malému počtu uživatelů není existujících řešení mnoho a zpravidla se jedná o kusovou výrobu pro individuální případy. Několik nalezených dostupných řešení se liší způsobem snímání i samotné aktivace pedálu.

Prvním z dostupných řešení jsou speciální úpravy od německého prodejce klavírů a pián Steingraeber & Söhne [1], který se vedle samotné výroby nástrojů věnuje i inovacím v této oblasti. Jednou z nich je i podpora handicapovaných hráčů na klávesové nástroje, pro které nabízí několik alternativních způsobů práce s klavírními pedály:

1. Snímače náklonu na cyklistické helmě:

Zařízení na obrázku 2.1 vlevo reaguje na pohyb hlavy doprava, doleva a dopředu, čímž si lze vybrat, zda se má stisknout levý pedál, pravý pedál nebo oba současně.

2. Tlačítka integrována ve speciálním nákrčníku:

Kombinace tří tlačítek (vlevo, vpravo a uprostřed), kde tlačítko vlevo stiskne levý pedál, tlačítko uprostřed ten pravý a levé tlačítko stiskne oba zároveň.

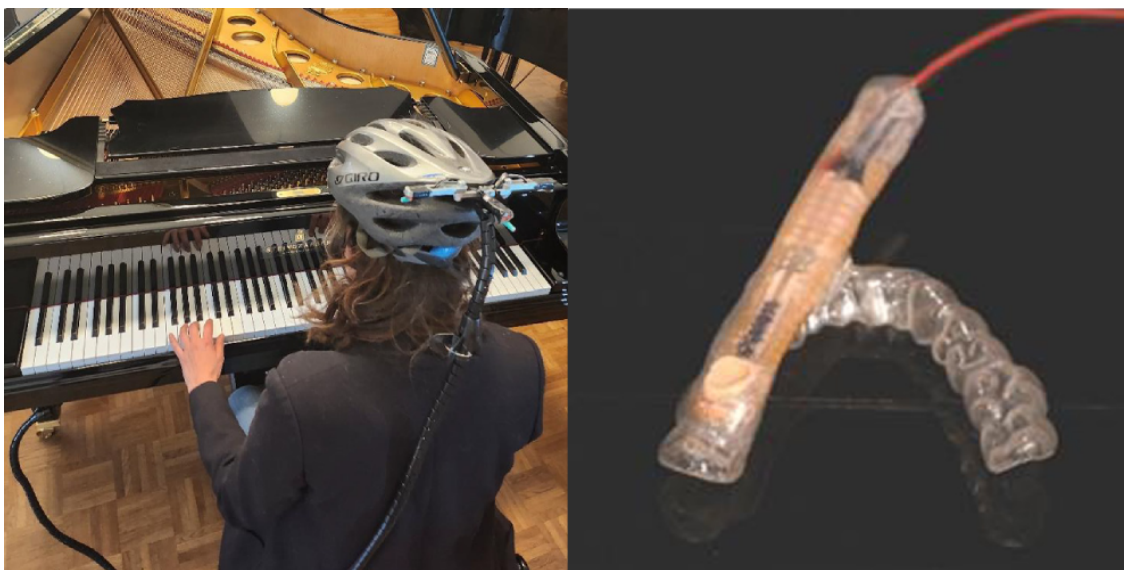
3. Senzor tlaku čelistí:

Pro jemnější ovládání je nabízeno i zařízení, které má hráč na klavír v ústech a které reaguje na stisk čelistí (obrázek 2.1 vpravo). Výhodou zde může být dobrá přesnost, protože člověk je schopen dobře regulovat sílu skusu. Nevýhodou je fakt, že pianista musí mít zařízení v ústech, což nemusí být po delší době příjemné.

Výrobce nabízí aktivaci fyzického pedálu u analogového klavíru buď pomocí mechanického aktuátoru, který nabízí spojitě nastavení stisku, nebo pomocí vložených elektromagnetů, které však dovolují pouze diskrétní ovládání, tedy pouze stav zapnuto a vypnuto.

Zajímavou volně dostupnou alternativou je aplikace MouthPedal [2], která je dostupná pro majitele zařízení značky Apple. Tato aplikace umí pomocí kamery s funkcí FaceID rozpoznat otevřená ústa uživatele a na základě této informace nastavit míru stisku pedálu. Toto řešení je ze své podstaty funkční pouze pro elektronické klávesové nástroje. Dle dostupné dokumentace je třeba telefon připojit přes bluetooth nebo wifi k laptopu, nebo tabletu. Toto zařízení je potom k piánu připojeno přes rozhraní MIDI (Musical Instrument Digital Interface), což je rozhraní, které se u elektronických pián objevuje často a je typické tím, že místo zvuku přenáší informaci o událostech, které hudebník vykonává, typicky úhoz klávesy nebo právě stisk pedálu. Dle kladných internetových recenzí se jedná o fungující řešení, které je ovšem bohužel omezeno pouze na zařízení značky Apple.

Poslední z nalezených řešení je zařízení vyvinuté organizací CanAssist [3], která spadá pod University of Victoria a která se specializuje na vývoj různých zařízení pro handicapované lidi. Jedním z nich je i pedál ovládaný pohybem hlavy, který byl organizací



Obrázek 2.1: Dostupná řešení firmy Steingraeber & Söhne [1], vlevo senzor náklonu na cyklistické helmě, vpravo senzor stisku čelistí

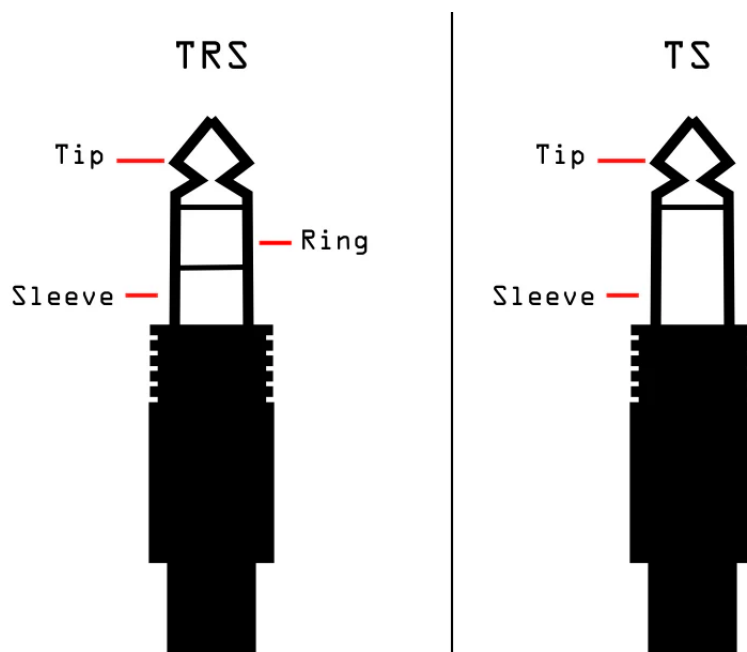
vyvinut pro handicapovanou studentku konzervatoře. Zařízení funguje s analogovým piánem, jehož pedál je stlačován pomocí mechanického aktuátoru. Tento aktuátor bezdrátově komunikuje s druhou částí, která je připevněna na hlavě pomocí čelenky a snímá předklon hlavy hráče na piáno.

2.2 Průzkum trhu s digitálními piano a pedály

Trh elektronických klávesových nástrojů lze v zásadě rozdělit na dvě kategorie: digitální piána a přenosné keyboardy. Digitální piáno se snaží více napodobit svoji analogovou variantu. Jedná se tedy o relativně velkou nepřenositelnou konstrukci. Obecně nabízí méně funkcí, prioritou je dobrý zvuk klavíru, rozsah 88 kláves a příjemný úhoz klapek, který má hráči navodit pocit hraní na opravdový klavír. Na druhou stranu keyboardy mají až na výjimky v podobě dražších nástrojů menší konstrukci a pouze 61 kláves. Zároveň stisk kláves je mnohem lehčí a odlišný od analogových pián. Nabízejí však mnoho funkcí, zvuků, doprovodů a jiných nastavení.

S pedály se to na trhu má podobně jako se samotnými nástroji. Lze tedy najít velké množství pedálů od různých výrobců. Mnoho digitálních pián má trojici pedálů již zabudovanou ve své nosné konstrukci. Samostatné pedály se prodávají jako doplněk zejména ke keyboardům, které svůj pedál v základu nemají. Ve většině případů je pedál připojen pomocí audio Jack konektoru. Tento konektor má tři základní části, které se označují jako Tip, Ring a Sleeve. Časté jsou i varianty, kde Ring úplně chybí, nebo kde jsou naopak tyto části dvě.

Konektor pedálů má nejčastěji jeden Ring (na obrázku 2.2 vlevo), popřípadě se jedná o konektor se dvěma vývody, tedy pouze s částí Tip a Sleeve (na obrázku 2.2 vpravo). Všechny varianty však fungují na stejném principu, kterým je změna odporu mezi dvěma částmi konektoru. I zde existují dva základní druhy.



Obrázek 2.2: Popis audio konektoru [4]

Prvním je spojitá varianta (obrázek 2.3), která vzhledově vypadá jako pedál u analogového piána. Funkčně se jedná v podstatě o potenciometr, který mění odpor v závislosti na stisku. Rozdíly mezi různými značkami se projevují tak, že nástroje některých značek, typicky značky Yamaha, reagují na změnu odporu z části Ring. U jiných nástrojů, například značky Roland, je informace o odporu snímána z části Tip, z čehož také vyplývá, že výsledný audio konektor může Ring postrádat. Sleeve vždy funguje jako společná zem. Tyto rozdíly však existují i mezi různými výrobky od stejných výrobců.



Obrázek 2.3: Spojitá varianta klavírního pedálu [5]

Druhá varianta je nespojitá (obrázek 2.4), nabízí pouze stav zapnuto a vypnuto, takže se jedná v podstatě o tlačítko. Pedály tohoto typu mají jednodušší konektor, který se skládá pouze ze dvou částí, Ring zde chybí.



Obrázek 2.4: Diskrétní varianta klavírního pedálu [6]

Některé pedály nabízejí i možnost prohodit polaritu, tedy přepínat mezi režimy Normally Open (NO) a Normally Closed (NC), čímž nastavíme, zda se pedálový efekt dostaví při zmáčknutí, nebo naopak při uvolnění pedálu. Toto nastavení však bývá často přítomné i v samotném klávesovém nástroji.

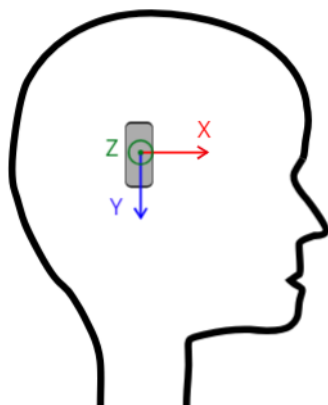
2.3 Kompatibilita

Z předchozí kapitoly plyne, že na trhu se objevuje více kombinací charakteristiky i zapojení pedálů a obecně tedy neplatí, že by všechny pedály byly kompatibilní se všemi nástroji. Univerzální pedál pro co největší množství nástrojů tedy musí obsahovat jak spojitě, tak diskrétní ovládání s možností přepínat mezi těmito dvěma režimy v závislosti na tom, které z nich je nástrojem podporováno. Při spojitěm režimu musí zároveň existovat možnost připojit proměnný odpor potenciometru jak na Ring, tak na Tip. Pro úplnost je vhodné přidat i přepínač polaritu NO/NC pro případ, že by toto nastavení nebylo v nástroji dostupné.

2.4 Analýza předchozí verze projektu

Jak již bylo zmíněno v úvodu, vyrobený prototyp navazuje na zařízení navržené v mechatronické laboratoři, díky kterému je pedál ovládán náklonem hlavy pianisty.

V jednotce je tedy zařazen akcelerometr a gyroskop, který snímá informace o zrychlení v ose X, respektive o úhlové rychlosti v ose Z. Tato data jsou zpracována v komplementárním filtru, ze kterého vystupuje hodnota náklonu hlavy. V závislosti na náklonu je na digitálním potenciometru nastavena hodnota odporu. Senzory jsou kalibrovány pomocí dvojice tlačítek, kdy se při zmáčknutí obou zároveň počítá po dobu jedné sekundy odchylka zrychlení a úhlové rychlosti. Zmáčknutím tlačítek zvlášť se potom nastavuje horní a dolní hranice rozsahu náklonu, ve kterém zařízení mění odpor.



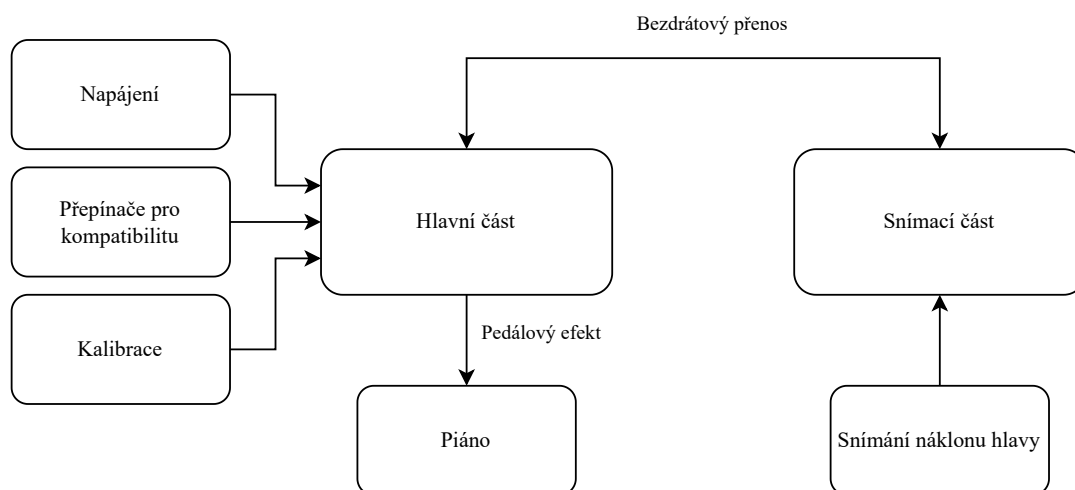
Obrázek 2.5: Umístění zařízení na hlavě

2.5 Koncept nové verze

Nová verze je v základním principu fungování podobná verzi původní. Schéma konceptu nové verze je na obrázku 2.6. Nové zařízení tedy také reaguje na náklon hlavy, který je stejným způsobem snímán za použití akcelerometru a gyroskopu. Požadavkem na novou verzi je však i kompatibilita se všemi značkami nástrojů, což znamená, že vedle digitálního potenciometru je přidán i digitální přepínač, který simuluje nespojitý typ pedálu. Vedle možnosti přepínat mezi diskretním a spojitým režimem je zároveň třeba zajistit i možnost přepínání variabilního konce potenciometru mezi částí Tip a Ring a možnost nastavení režimů NO/NC, jak bylo zmíněno v kapitole 2.3.

Nová verze by měla přinést výhodu i v oblasti připojení, protože zatímco předchozí verze komunikuje celá drátově, nová verze by měla poskytnout lepší pohodlí pro uživatele v podobě bezdrátové komunikace mezi oběma částmi zařízení. První část, dále označená jako hlavní část, která je připojena k piánu audio konektorem, zajišťuje aktivaci pedálového efektu. Druhá část, dále označená jako snímací část, kterou má uživatel na hlavě, snímá úhel náklonu hlavy. Hlavní část by měla vedle vytváření pedálového efektu sloužit i jako nabíjecí stanice pro snímací část a zároveň by měla nabízet možnosti nastavení a kalibrace. Nezbytným cílem nové verze je i zachovat uživatelskou přívětivost stávajícího jednoduššího zařízení ve formě jasné indikace stavů, ve kterých se zařízení nachází, jednoduchého ovládání nabízených funkcí a pohodlného a pevného připevnění snímací části na hlavu uživatele.

Poslední změna by se měla odehrát v oblasti programování. Data ze senzorů jsou obdobně jako u minulé verze zpracovávána v komplementárním filtru. Zatímco původní verze je však celá napsána v Simulinku, software pro novou verzi by měl být napsán v jazyce C, který nabízí programátorovi více možností k naprogramování jednotlivých funkcí.



Obrázek 2.6: Schéma konceptu zařízení

3 Výsledky řešení

Praktickým cílem této práce je navrhnout a zrealizovat prototyp, které splňuje požadavky z kapitoly 2.5. Tato část se tedy věnuje popisu návrhu tohoto zařízení a také zhodnocení jeho vlastností.

3.1 Popis fungování

Schéma na obrázku 3.1 graficky popisuje výslednou realizaci prototypu. Fialové bloky znázorňují základní funkční prvky, červenými bloky jsou reprezentovány napájecí části zařízení a žlutě jsou označeny ovládací prvky. Ve schématu je naznačeno i funkční propojení jednotlivých bloků. Přesnějším popisu tohoto schématu se věnují následující tři podkapitoly, ve kterých jsou zvláště popsány jak obě části zařízení, tak i vzájemné propojení.

3.1.1 Hlavní část

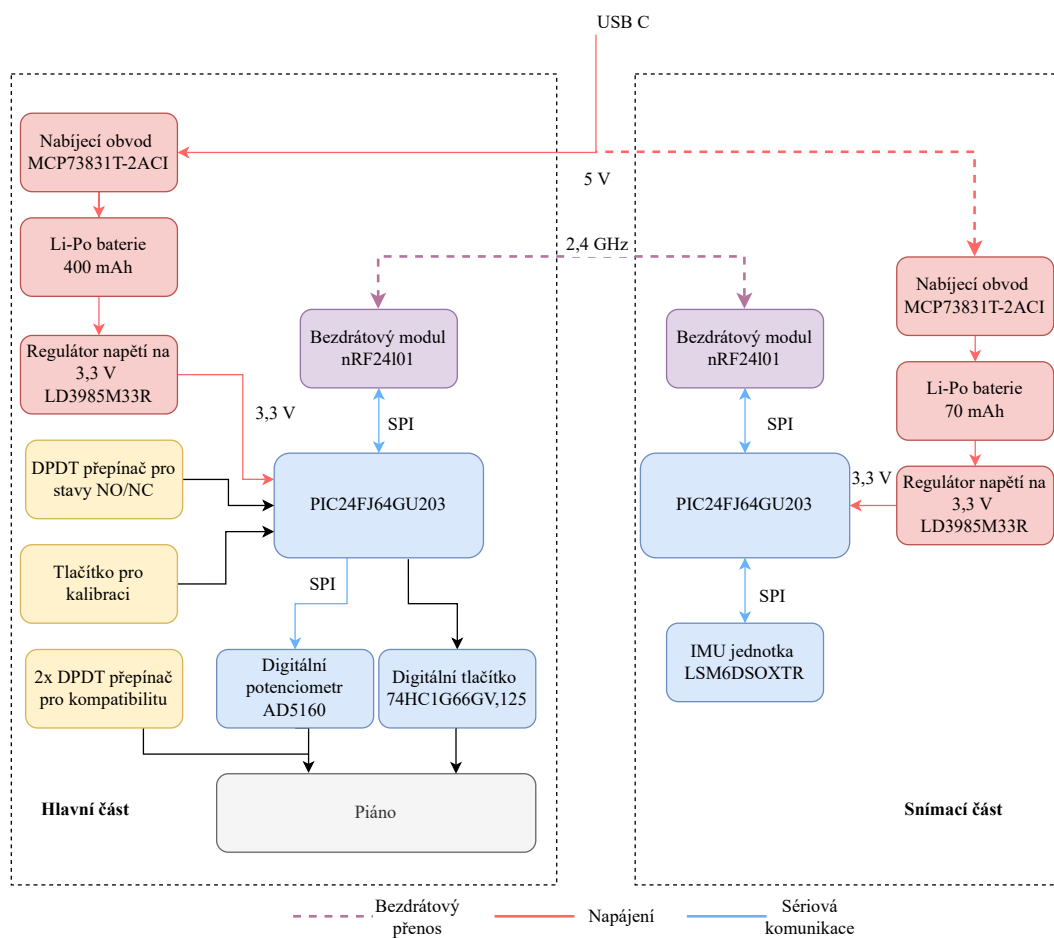
Základem zařízení je 16-bitový mikrokontrolér PIC24FJ64GU203 od firmy Microchip v kombinaci s 8MHz krystalovým oscilátorem. Tento mikrokontrolér nabízí všechny potřebné periférie, tedy sériovou komunikaci ve formě SPI a UART, dále analogově digitální převodník a funkce pro úsporu energie. Potřebné funkce lze navíc snadno namapovat na piny, které si zvolí sám uživatel. Programování je zajištěno externím programátorem PICkit od stejného výrobce.

Potřebná kompatibilita, která byla popsána v kapitole 2.3, je zajištěna dvěma posuvnými Double Pole, Double Throw (DPDT) přepínači. Zapojení lze vidět na obrázku 3.2. Na levé části obrázku vidíme jednotlivé konce audio konektoru. DPDT přepínač, který je na obrázku vlevo, zajišťuje změnu mezi spojitým a diskrétním ovládním tak, že vybere, zda se pro aktivaci pedálového efektu použije potenciometr, nebo číslicový Single Pole, Single Throw (SPST) přepínač.

V konfiguraci na obrázku 3.2 je zvolen spojitý režim, tedy aktivace pomocí potenciometru. Při přepnutí do diskrétního režimu se část Sleeve propojí s částí Ring a na lince Tip se objeví SPST přepínač, kterým je pedál ovládán. Druhý přepínač má svoji roli pouze v případě spojitého ovládní a volí, zda se proměnný odpor projeví na části Tip, nebo Ring.

Zvolený potenciometr je model AD5160, konkrétně 10k Ω provedení. Proměnný odpor je nastaven osmibitovou hodnotou, která je poslána z mikroprocesoru přes SPI. Při zvolení diskrétního ovládní je pedálový efekt ovládán číslicovým přepínačem NEXPERIA 74HC1G66GV,125. Přepínání je řízeno z mikroprocesoru pomocí logické úrovně na GPIO pinu, který je nastaven na 0, nebo 3,3 V.

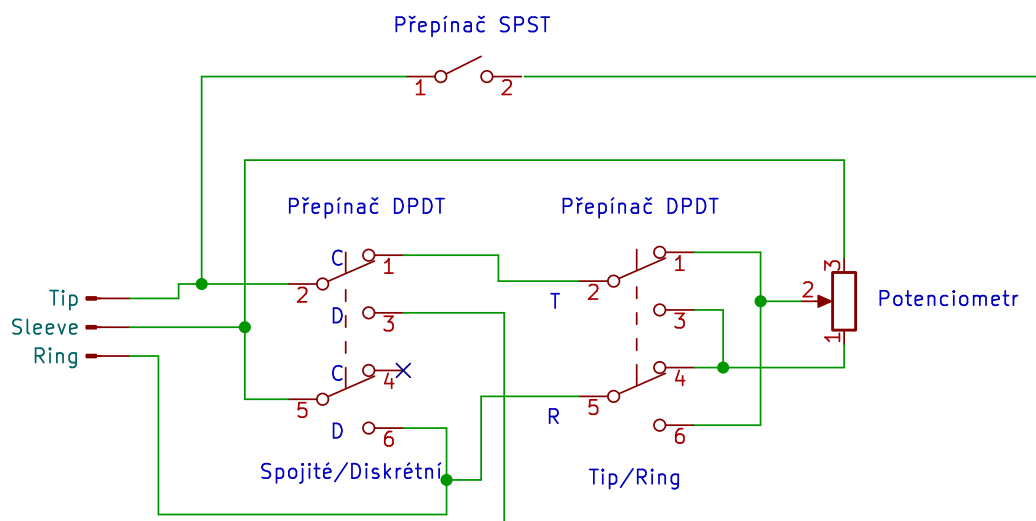
Vedle dvojice přepínačů, které zajišťují kompatibilitu, je v zařízení ještě jeden identický DPDT přepínač a jedno fyzické tlačítko. Přepínač slouží k volbě polarity spínání pedálu, tedy zda virtuální pedál bude při naklonění hlavy sešlápnut, nebo uvolněn. Tlačítkem si uživatel může zkalibrovat rozsah náklonu hlavy, ve kterém zařízení operuje.



Obrázek 3.1: Blokové schéma fungování zařízení

Zdrojem napětí pro tuto část zařízení je 400mAh lithium polymerová baterie s nominálním napětím 3,7 V a maximálním napětím 4,2 V. Baterie disponuje ochranou proti přepětí, která ukončí nabíjení při napětí přesahujícím 4,3 V, i ochranou proti podpětí, která baterii vyřadí při napětí nižším než 2,75 V. Napájecí napětí 3,3 V pro všechny ostatní části obvodu je nastaveno regulátorem napětí s nízkým úbytkem, konkrétně modelem LD3985M33R od STMicroelectronics.

Nabíjení zajišťuje nabíjecí obvod MCP73831T-2ACI/OT od firmy Microchip. Tento konkrétní model má nastavené výstupní napětí na 4,2 V a nabíjecí proud je nastavitelný rezistorem, který je umístěn mezi dva vývody obvodu. Výrobce baterie doporučuje standardní nabíjecí proud o hodnotě 20 % kapacity, tedy 80 mA, a rychlé nabíjení proudem o hodnotě 50 % kapacity baterie, tedy 200 mA. Zvolen byl nabíjecí proud 100 mA, který je nastaven 10kΩ rezistorem u nabíjecího obvodu. Stav nabíjení lze zjistit pomocí jednoho z vývodů tohoto obvodu, na kterém je při probíhajícím nabíjení nastavena logická nula a při dokončeném nabíjení logická jednička. Ve stavu, kdy není dostupné nabíjecí napětí, nebo kdy je odpojena samotná baterie, je vývod nastaven do režimu vysoké impedance. Zdrojem napětí pro nabíjení je 5V napájecí linka z USB-C.



Obrázek 3.2: Obvod zajišťující kompatibilitu

3.1.2 Snímací část

Část zařízení, která snímá náklon hlavy, je v mnoha ohledech obdobná jako již popsaná část připojená k piánu. Základem je stejný 16-bitový mikrokontrolér PIC24FJ64GU203 s 8MHz krystalovým oscilátorem.

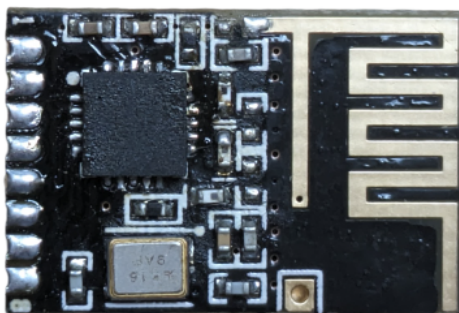
Místo přepínačů a potenciometru je zde však přítomna inerciální měřicí jednotka LSM6DSOXTR od STMicroelectronics, která v sobě obsahuje akcelerometr, gyroskop, magnetometr i teploměr, pro účely zařízení ovšem postačí gyroskop a akcelerometr. U snímací části jsou výhodné i malé rozměry součástky, která je dostupná v pouzdře typu LGA. Hodnoty zrychlení a úhlové rychlosti v jednotlivých osách lze vyčíst z registrů přes SPI zadáním požadavku na čtení společně s adresou daného registru. Jednotka má v sobě zabudované i filtry ve formě dolních a horních propustí, které zpracovávají výstupní data. Tyto filtry lze aktivovat zápisem do daného registru. Pro funkci zařízení postačí zrychlení v ose X a úhlová rychlost v ose Z, jak je patrné z obrázku 2.5.

Jako zdroj napětí zde figuruje podobná lithium polymerová baterie jako u hlavní části zařízení. Kvůli co nejmenší velikosti a hmotnosti má však baterie kapacitu pouze 70 mAh. Regulátor napětí i nabíjecí obvod jsou také stejné jako u hlavní části, nabíjecí proud je však vzhledem k menší kapacitě baterie nastaven na 20 mA.

3.1.3 Komunikace mezi oběma částmi zařízení

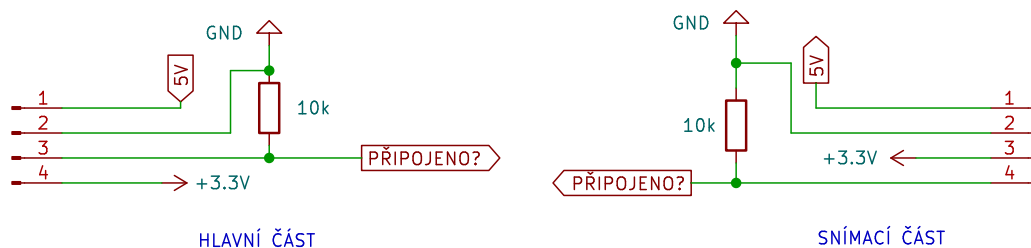
Důležitou funkční součástí je i bezdrátový přenos dat mezi oběma částmi. K tomu slouží dvojice bezdrátových modulů nRF24l01, které pracují na frekvenci 2,4 GHz a nabízejí rychlost přenosu až 2 Mbps. Tento modul se vyrábí ve třech velikostních variantách. Pro účely bezdrátové jednotky, kterou má uživatel na hlavě, byla zvolena nejmenší ze tří variant, která je na obrázku 3.3. Nespornou výhodou tohoto modulu je jeho nízká cena a k dispozici je navíc i knihovna právě pro 16bitové procesory PIC, která zjednodušuje programování a nastavení bezdrátového přenosu. Při inicializaci je třeba oba moduly

nastavit na stejnou přenosovou rychlost, která zde byla zvolena na nižší úroveň 1 Mbps z důvodu stále dostatečné rychlosti v kombinaci s lepší stabilitou přenosu. Každý modul je dále třeba nastavit do režimu odesílání, nebo přijímání. Modul však neumí odesílat a přijímat data zároveň. Dostupná knihovna dovoluje nastavit komunikaci do režimu master/slave, kde v případě výsledného zařízení pracuje hlavní část jako master a snímací část jako slave. Prakticky je snímací část v režimu přijímání dat a čeká na žádost od hlavní části. Jakmile tento příkaz obdrží, pošle odpověď ve formě přednastavené informace, kterou je ve většině případů informace o úhlu natočení. Následně opět čeká na další příkaz. Bezdrátové moduly komunikují s mikroprocesory přes SPI.



Obrázek 3.3: Bezdrátový modul nRF24101

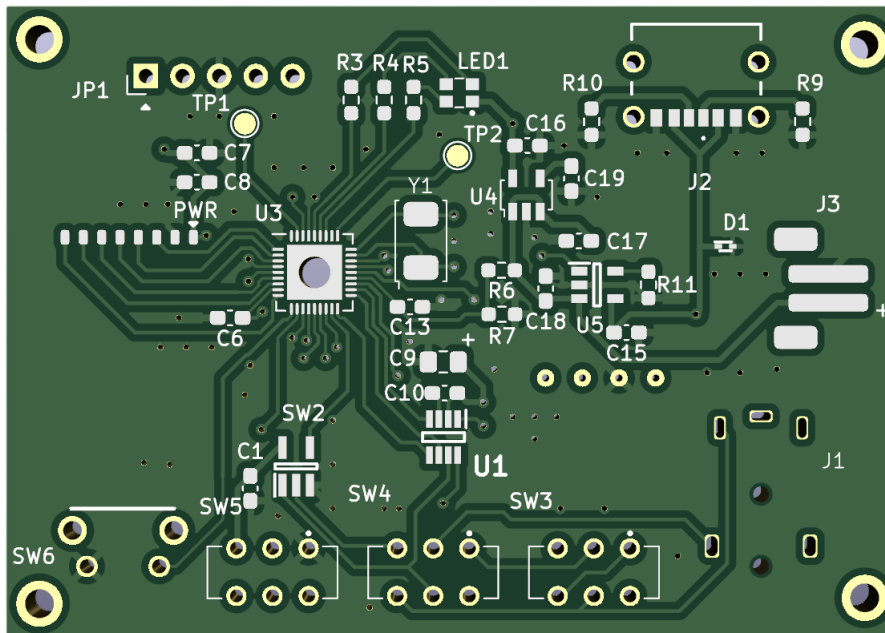
Dalším prvkem vzájemné spolupráce mezi oběma částmi zařízení je i fyzické propojení. Část k piánu funguje zároveň jako dok, ke kterému lze druhou část zařízení přichytit. Po přiložení obou částí k sobě se navzájem propojí čtyři kontakty, konkrétně 5V linka z USB, společná zem, napájecích 3,3 V a linka vedoucí na GPIO pin mikroprocesoru. Toto zapojení je znázorněno na obrázku 3.4. Obě části se uspí při detekci logické jedničky na svém GPIO pinu ve formě 3,3 V z druhé části zařízení. Při odpojení je logická úroveň nastavena na nulu díky 10k Ω pull-down rezistoru. Vzhledem k tomu, že USB konektor k nabíjení je přítomen pouze na hlavní části, při vzájemném připojení se přes 5V linku z USB nabíjí také snímací část.



Obrázek 3.4: Vzájemné propojení obou částí

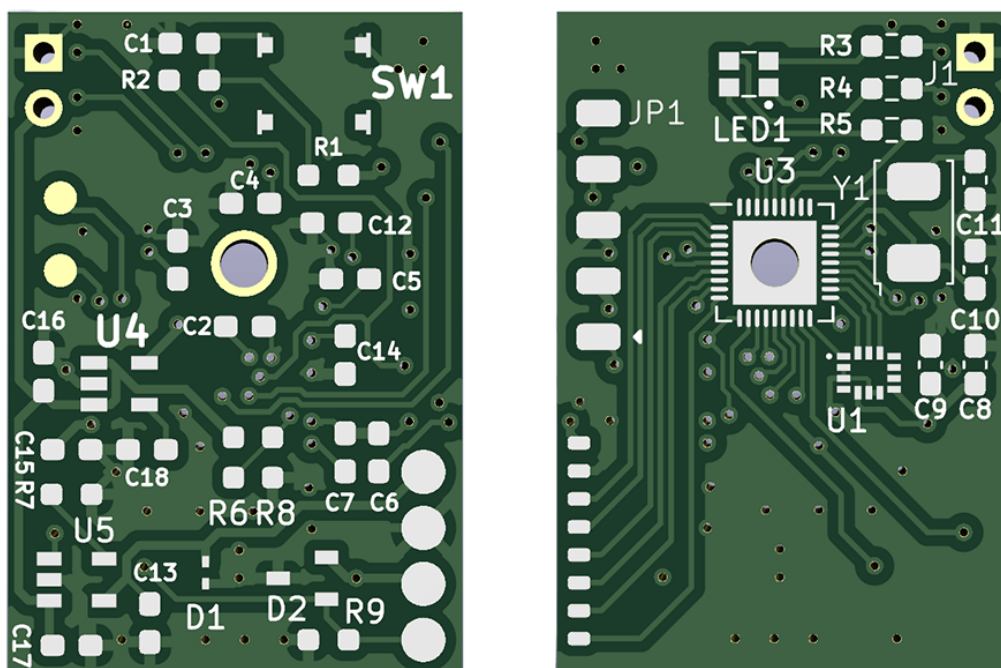
3.2 Konstrukce prototypu

3.2.1 Deska plošných spojů



Obrázek 3.5: DPS klavírní části

Deska plošných spojů (DPS) byla navržena v programu KiCad. U hlavní části zařízení nejsou striktní požadavky na velikost, proto zde stačilo dvouvrstvé provedení. Kromě povrchových ploch pro montáž jednotlivých integrovaných obvodů popsanych v kapitole 3.1.1 jako jsou mikroprocesor (U3), 8 MHz krystalový oscilátor (Y1), digitální potenciometr (U1), číslicový přepínač (SW2), nabíjecí obvod (U5) a regulátor napětí (U4) lze ve spodní části vidět i otvory pro montáž trojice přepínačů typu DPDT (pod označením SW3, SW4 a SW5). Dále se na desce nacházejí otvory pro kalibrační tlačítko vlevo dole (SW6), pro audio konektor v pravé dolní části (J1), pro konektor USB C vpravo nahoře (J2) a pro konektor k připojení baterie (J3). Pětice otvorů v levé horní části slouží k připojení programovacích pinů, ke kterým lze připojit externí programátor. Nalevo od mikroprocesoru se nachází osm plošek pro připojení bezdrátového modulu nRF24l01. Důležitým zdrojem informací je i indikační RGB LED, pro kterou je navržena čtveřice plošek uprostřed v horní straně desky plošných spojů. Posledním prvkem na DPS je čtveřice otvorů pro montáž kontaktů na pružině, které se nacházejí ve volném prostoru pod nabíjecím obvodem (U5) a kondenzátorem C15 a které slouží ke kontaktu s druhou částí zařízení.

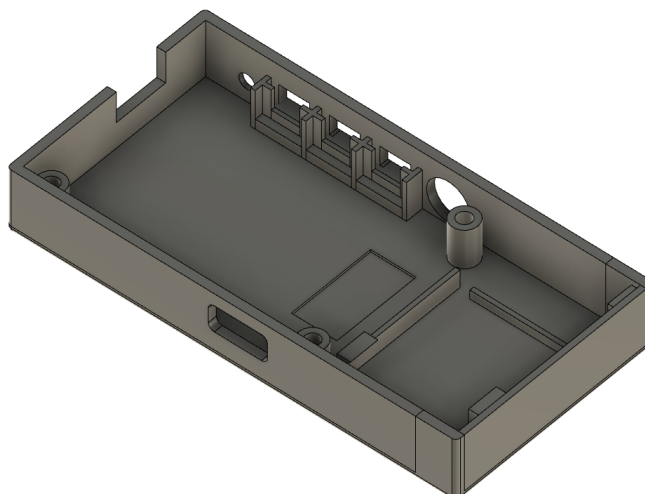


Obrázek 3.6: DPS snímací části (zezadu vlevo, zepředu vpravo)

U DPS snímací části je nezbytná co nejmenší výsledná velikost, proto zde bylo zvoleno čtyřvrstvé provedení. Na obrázku (3.6) vidíme montážní plochy pro některé stejné prvky jako u DPS hlavní části, tedy pro procesor (U3), nabíjecí obvod (U5) a regulátor napětí (U4), stejná je i indikační RGB LED. Hlavním rozdílem je inerciální měřicí jednotka (U1) na přední straně DPS pod mikroprocesorem. Čtyři plošky vpravo na zadní straně slouží jako protikus k pružinovým kontaktům na hlavní části, pět plošek pod označením JP1 na přední straně DPS je nachystáno k připojení programátoru.

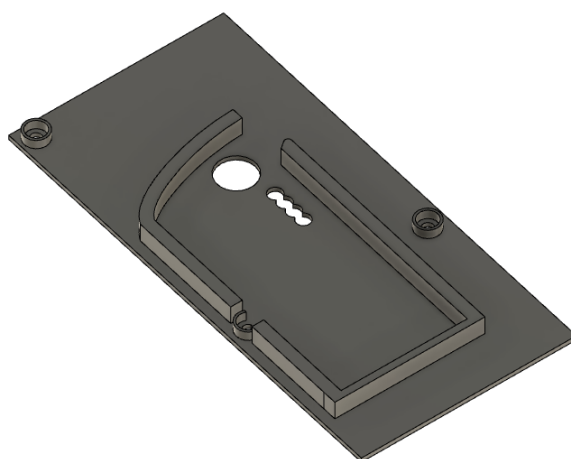
3.2.2 3D tisk krabičky

Návrhy pro 3D tisk byly vytvořeny v programu Autodesk Fusion 360. Při designu krabičky pro hlavní část, která je na obrázku 3.7, bylo třeba zejména správně navrhnout prostor pro připojení druhé části zařízení tak, aby bylo zajištěno spolehlivé propojení kontaktů na pružině se svými protikusy. DPS hlavní části tedy musí ležet co nejvýše v krabičce, aby kontakty vylézaly z co největší části ven. Otvory na okraji krabičky slouží buď k připojení audio kabelu a USB nebo k ovládání přepínačů a tlačítka. Tři válcovité výběžky s otvorem uprostřed slouží k montáži závitových vložek do plastu, do kterých jsou připevněny šrouby s metrickým závitem M2. Tyto šrouby fixují jak DPS, tak vrchní stranu krabičky. Oddělený prostor na pravé straně slouží k umístění baterie.



Obrázek 3.7: Krabička pro hlavní část

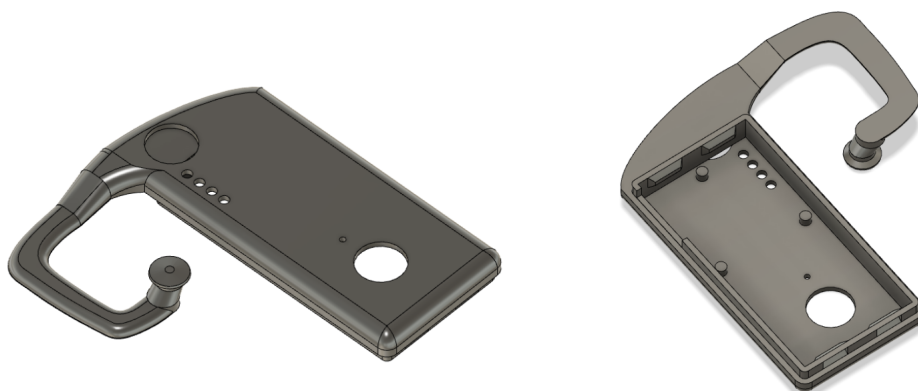
Model horní strany krabičky pro hlavní část je vidět na obrázku 3.8. Patrný je zejména obrys snímací části, která je z této strany upevněna k základní části zařízení pomocí dvou magnetů o průměru 8 mm a tloušťce 1 mm. Vzhledem k tomu, že pod horním krytem krabičky je přímo deska plošných spojů kvůli co nejvýše položeným pružinovým kontaktům, připevnění magnetu ze spodní strany krytu není možné. Je tedy třeba jeden z magnetů přilepit přímo do této horní strany krabičky, k čemuž slouží kruhový otvor. Druhý magnet lze připevnit ze spodní strany, protože pod tento otvor již DPS nesahá. Druhý otvor pro magnet tedy není nutné realizovat. Ze čtveřice spojených otvorů potom vystupují kontakty na pružině. Horní díl krabičky je připevněn stejnými šrouby, které fixují i desku plošných spojů. Rozměry krabičky hlavní části jsou 14,5 mm na výšku, 50 mm na šířku a nejdelší hrana měří 99 mm.



Obrázek 3.8: Horní strana krabičky pro hlavní část

Při návrhu krabičky pro snímací část, jejíž spodní část je na obrázku 3.9, je třeba brát

v potaz zejména spolehlivé a pohodlné uložení zařízení na hlavě uživatele. K tomu slouží zatočený výběžek, který se svým koncem zachytí v jamce pravého ušního boltce. Zbytek zařízení potom takto přidělán visí za uchem. Do dvou kruhových otvorů jsou vloženy magnety, kterými se zařízení přichytí k hlavní části. Čtyři malé otvory potom slouží k průchodu pružinových kontaktů na plošky DPS. Na horním i dolním okraji krabičky se nacházejí obdélníkové zářezy, do kterých lze zatlačit protikusy na horním krycím víčku. Výsledné rozměry této části jsou 48 mm na délku a 26 mm na šířku (měřeno bez zatočeného výběžku). Tloušťka zařízení je 6,7 mm.



Obrázek 3.9: Spodní díl krabičky snímací části

Výsledný vzhled obou krabiček vytisknutých z materiálu PETG i s osazenými magnety a základními deskami je na obrázcích 3.10 a 3.11.

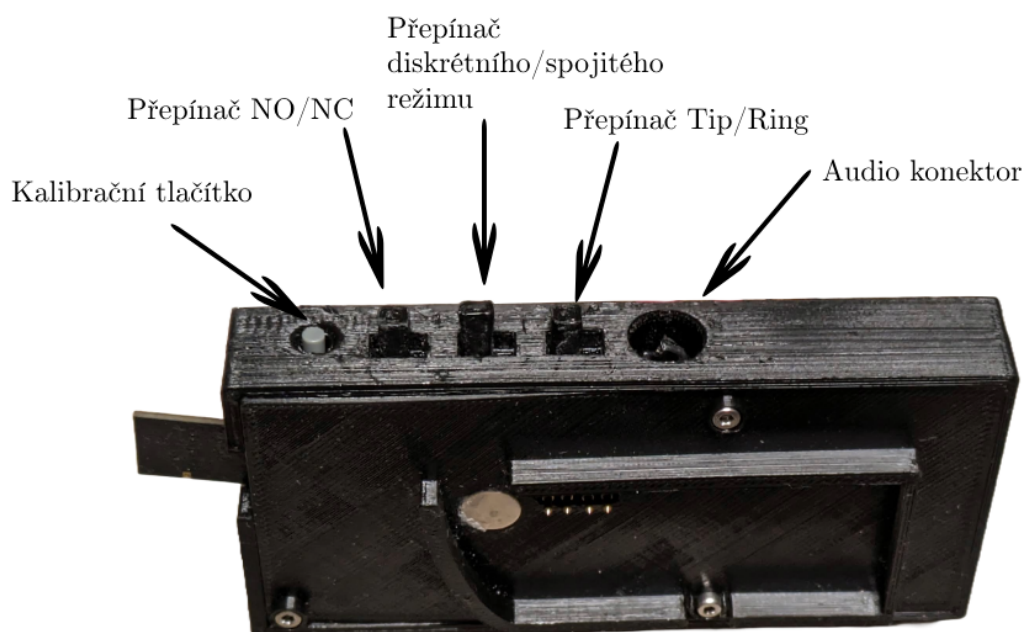


Obrázek 3.10: Výsledný vzhled hlavní části (vlevo odkryto, vpravo s víčkem)



Obrázek 3.11: Výsledný vzhled snímací části

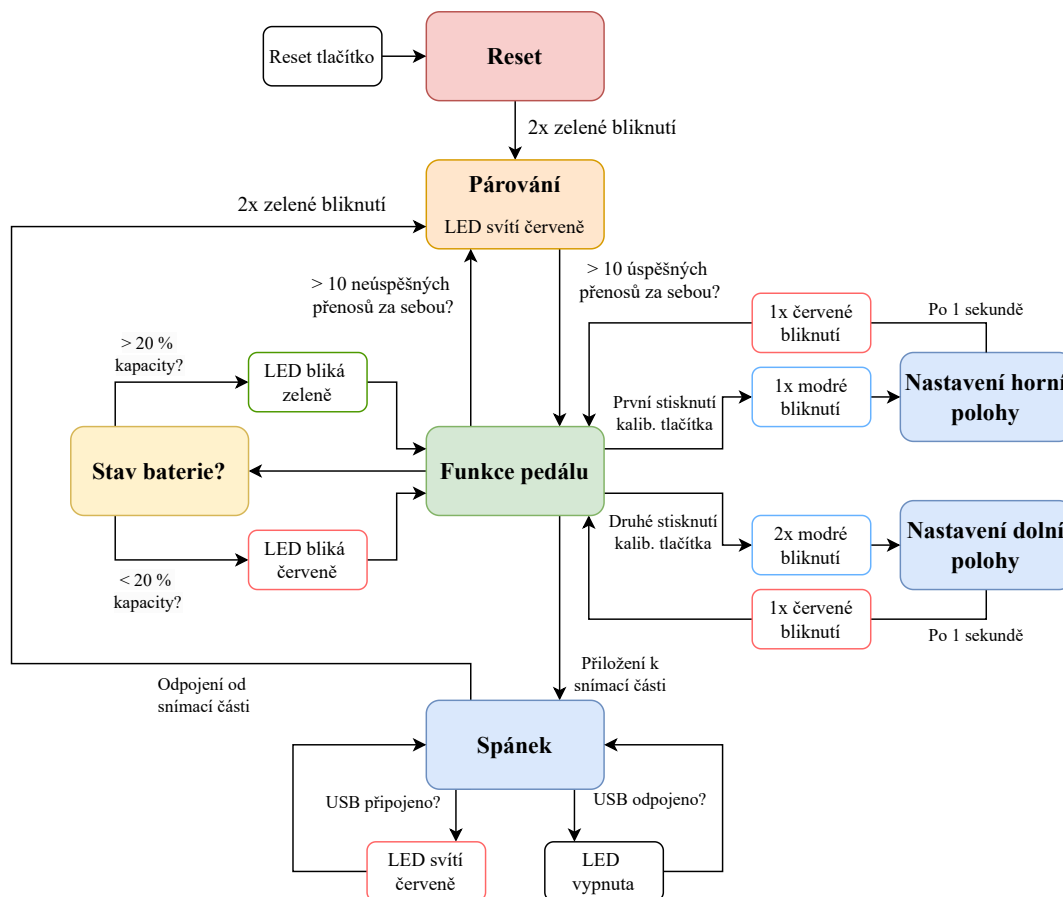
Jednotlivé ovládací prvky jsou patrné z obrázku 3.12. Ze stejného pohledu jako na obrázku 3.12 je přepínačem NO/NC v levé pozici nastaven režim NC a v pravé pozici NO. Prostřední přepínač nastaví v pozici vlevo diskretní režim, při přepnutí doprava je funkční spojitý režim. Poslední z přepínačů potom nastaví při přepnutí vlevo jako aktivní část Ring a pozicí vpravo je připojen variabilní odpor potenciometru na část Tip.



Obrázek 3.12: Popis ovládacích prvků hlavní části

3.3 Firmware

3.3.1 Hlavní část



Obrázek 3.13: Schéma stavů hlavní části

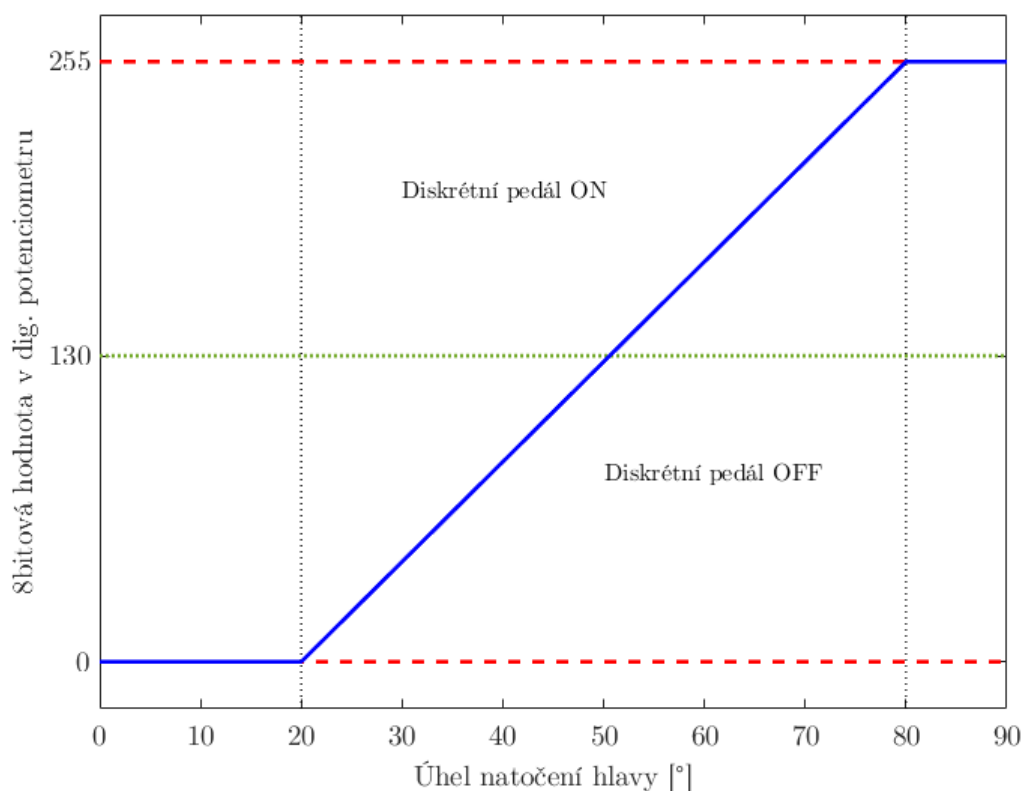
Firmware pro obě části zařízení je naprogramován v jazyce C v prostředí MPLAB X IDE, které je vyvinuto přímo výrobcem tohoto procesoru, tedy firmou Microchip. Na obrázku 3.13 je znázorněno stavové schéma, které popisuje chování hlavní části zařízení.

Při resetování, nebo při odpojení od snímací části je vyvoláno přerušení, které probudí procesor. Po zapnutí je probuzen i bezdrátový modul a zařízení přejde do režimu párování, což je indikováno dvojitým zeleným bliknutím LED. V tomto stavu se snímací částí posílá jednoduchá zpráva ve formě čísla jedna, na kterou by měla snímací část odpovědět také odesláním čísla jedna. Ve stavu párování svítí RGB LED červeně. Při úspěšné výměně deseti jedniček za sebou zařízení přejde do základního stavu, ve kterém funguje jako pedál. Zařízení monitoruje i neúspěšné přenosy a pokud by těchto přenosů nastalo po sobě více než deset, zařízení přejde zpět do stavu párování. Tento stav může nastat, pokud by se snímací část například oddálila na příliš velkou vzdálenost, nebo pokud by se její baterie vybila.

Základní stav, ve kterém zařízení funguje jako klavírní pedál, je uživateli indikován pravidelným zeleným bliknutím RGB LED v intervalu tří sekund. Před bliknutím je vždy

vyčtena úroveň napětí na baterii z AD převodníku, ze které je pomocí známého koeficientu daného odporovým děličem mezi procesorem a baterií a funkčního rozsahu baterie od 3,3 V do 4,2 V určena úroveň nabití baterie v procentech. Při úrovni menší než 20 % se zelené blikání RGB LED změní na blikání červené, aby byl uživatel o nízké úrovni informován.

Pro simulování funkce klavírního pedálu je třeba pravidelně počítat osmibitovou hodnotu, která je následně poslána digitálnímu potenciometru. K výpočtu této hodnoty je zapotřebí informace o nastaveném rozsahu, stejně jako hodnota náklonu, o kterou si hlavní část při každém cyklu požádá část snímací. Výsledná hodnota, která je poslána digitálnímu potenciometru, je vypočítána na základě lineární funkce, jejíž příklad pro funkční rozsah 20° až 80° je na obrázku 3.14. Lineární funkce je saturována na hodnotách 0 a 255, aby nedošlo k přetečení 8bitové proměnné. Stejně osmibitové číslo je použito i při diskretním ovládní pedálu, protože logická hodnota na číslicovém spínači závisí na tom, zda je toto číslo větší, nebo menší než 130, tedy než přibližně polovina z 255. Digitální potenciometr i přepínač fungují současně, protože software sám o sobě neví, jestli je zvolen spojitý, nebo diskretní režim. Tato volba závisí čistě na poloze přepínačů v obvodu zajišťujícím kompatibilitu, který je na obrázku 3.2.



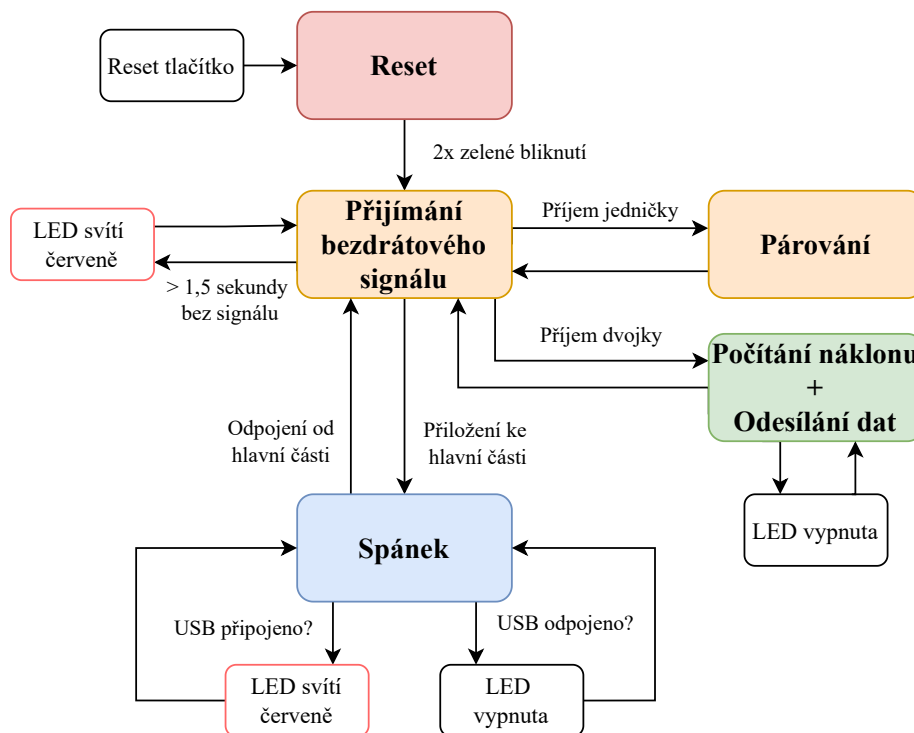
Obrázek 3.14: Funkce přiřazující hodnotu dig. potenciometru pro funkční rozsah 20° až 80°

Ve stavu fungování pedálu je možné zmáčknout kalibrační tlačítko pro volbu funkčního rozsahu. Při prvním zmáčknutí zařízení uvědomí uživatele jedním modrým bliknutím LED a přejde do stavu nastavení horní funkční hranice. V tomto stavu čeká jednu sekundu, aby měl uživatel čas pro napolohování hlavy do chtěné polohy. Po tomto časovém intervalu hlavní část požádá o úhel náklonu a tato hodnota je uložena. Uložení je indikováno krát-

kým červeným zasvícením indikační LED. Nastavení dolní hranice funguje obdobně. Při druhém zmáčknutí kalibračního tlačítka však zařízení blikne modře dvakrát, aby uživatel věděl, že je nastavována dolní hranice rozsahu. Poté zařízení opět čeká jednu sekundu, během které uživatel natočí hlavu do chtěné polohy, a následně je dolní funkční hranice uložena. Při opětovném zmáčknutí si uživatel znovu volí horní hranici rozsahu. Koeficienty lineární funkce na obrázku 3.14 jsou závislé na nastaveném rozsahu fungování, a proto je jejich hodnota přepočítána při každém zmáčknutí kalibračního tlačítka.

Při detekci přiložení snímací části přejde zařízení do stavu spánku. V tomto stavu je nejdříve poslán bezdrátovému modulu příkaz k uspání. Následně je podle logické úrovně na nabíjecím obvodu zjištěno, zda probíhá nabíjení baterie. V kladném případě je navíc nastaveno červené svícení indikační LED. Potom již přejde do režimu spánku i samotný mikroprocesor. Přerušení, které procesor opět probudí, je vyvoláno při změně logické úrovně na jednom ze dvou sledovaných pinů, tzv. Interrupt on Change (IOC). Jeden z těchto pinů je připojen k vývodu logiky nabíjecího obvodu. Druhý sleduje přítomnost druhé části zařízení, na obrázku 3.4 se jedná o linku pod číslem tři. Při probuzení vlivem změny logické úrovně na nabíjecím obvodu je vyhodnoceno, zda začalo, nebo skončilo nabíjení, a indikační LED se náležitě rozsvítí červeně, respektive zhasne. Potom zařízení přejde zpět do režimu spánku. Pokud je přerušení vyvoláno oddělením snímací části, přejde zařízení do stavu párování. Tento přechod je doprovázen dvojitým zeleným bliknutím,

3.3.2 Snímací část



Obrázek 3.15: Schéma stavů snímací části

Na obrázku 3.15 je vidět stavové schéma snímací části. Přechod mezi stavy je ovládán instrukcemi od základní části. Při zapnutí zařízení je probuzen i bezdrátový modul nastavený do režimu slave, který přijímá bezdrátově přenášená data. Hlavní část v závislosti na tom, v jakém se nachází stavu, posílá buď zprávu s číslem jedna, nebo s číslem dvě.

Číslo jedna si snímací část přeloží jako žádost o párování a jako odpověď pošle také číslo jedna, aby potvrdila úspěšný bezdrátový přenos dat. Číslo dva je potom vyhodnoceno jako žádost o úhel náklonu, odpovědí snímací části je tedy právě tato hodnota ve stupních.

Náklon je v každém cyklu programu vypočítán na základě informací z inerciální měřicí jednotky v komplementárním filtru [7] [8]

$$\Theta_{n+1} = \Theta_{acc,n} \cdot \alpha + (1 - \alpha) \cdot [\Theta_n + T \cdot \dot{\Theta}_{gyrz,n}], \quad (3.1)$$

kde $\Theta_{acc,n}$ je odhad náklonu z translačního zrychlení v ose x a $\dot{\Theta}_{gyrz,n}$ je úhlová rychlost v ose z měřená z gyroskopu. Odhad náklonu $\Theta_{acc,n}$ lze vypočítat z translačního zrychlení pomocí vztahu

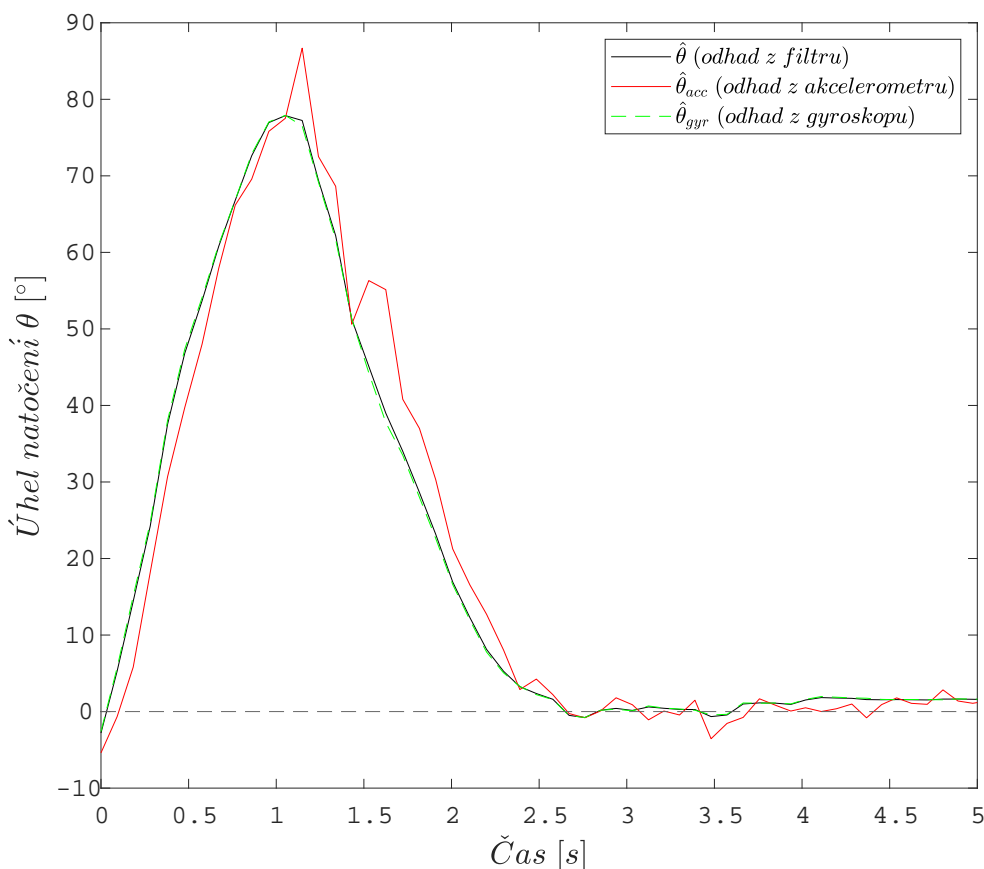
$$\Theta_{acc,n} = \arcsin\left(\frac{a_x}{g}\right), \quad (3.2)$$

kde a_x je lineární zrychlení v ose x dostupné z akcelerometru a g je tíhové zrychlení. Pro numerickou integraci úhlové rychlosti v komplementárním filtru je třeba znát rozdíl časů T mezi předchozím a aktuálním výpočtem. K tomu slouží časovač, který během fungování zařízení měří uplynulý čas v milisekundách. Obvyklá hodnota pro tento rozdíl je okolo 90 ms. Konstanta α byla empiricky nastavena na hodnotu 0,07, při které bylo dosaženo nej přesnějších výsledků.

Na obrázku 3.16 je vidět graf fungování komplementárního filtru, který byl pořízen při testování a hledání ideální konstanty α . DPS snímací části byla nejprve zvednuta, pootočena o zhruba 80 ° a po otočení byla zpět položena na rovnou podložku pro zajištění vodorovné polohy. Je vidět, že odhad natočení z akcelerometru je poměrně zašumělý a v časech 1,2 s a 1,5 s jsou patrné poměrně velké odskoky. Z toho důvodu je z velké části preferován odhad úhlu z gyroskopu, který je dán postupným integrováním úhlové rychlosti. Z této skutečnosti plyne volba konstanty α na hodnotu 0,07. Nevýhodou odhadu z gyroskopu je fakt, že se vždy integruje i určitá chyba, která by po určité době způsobila nezanedbatelnou odchylku. Jako kompenzace zde slouží právě odhad náklonu z akcelerometru.

Indikace stavů směrem k uživateli pomocí LED je zajištěna dalším časovačem. Ten je nastaven tak, že při dosažení času 1,5 sekundy zapne červené svícení na indikační diodě. Pokud probíhá přenos informací o úhlu, je indikační LED vypnuta a při každém odeslání úhlu je časovač resetován, aby hodnoty 1,5 sekundy nedosáhl. Tímto způsobem je vyhodnoceno, zda se zařízení nachází ve stavu párování, nebo v základním funkčním stavu, ve kterém odesílá úhel náklonu hlavy.

Přechod do režimu spánku i detekce nabíjení a z něj vycházející světelná indikace zde fungují zcela stejně jako u hlavní části zařízení. Před uspaním procesoru je však navíc poslán příkaz k vypnutí akcelerometru a gyroskopu, které by zbytečně odebíraly proud z baterie i během spánku.



Obrázek 3.16: Zpracování dat v komplementárním filtru

3.4 Hodnocení prototypu

3.4.1 Výsledné parametry

Základními praktickými a měřitelnými parametry pro koncové uživatele tohoto zařízení jsou výdrž baterie, doba nabíjení a dosah bezdrátové komunikace. O něco hůře kvantifikovatelné jsou potom parametry jako intuitivnost a stabilita připevnění snímací části k hlavě.

Co se týče výdrže baterie, slabším článkem zařízení je v tomto ohledu jednoznačně snímací část, která je nucena z důvodu kompaktní velikosti využívat pouze 70mAh baterii. Dle datových listů jednotlivých součástí obvodu je celkový odběr proudu této části 15 mA, což znamená výdrž okolo čtyř a půl hodin na jedno nabití. Pro prototyp byl zvolen konzervativní nabíjecí proud 17 mA, přes který se baterie dle výrobce nabije za 8 hodin.

Hlavní část, která využívá baterii s podstatně větší kapacitou 400 mAh, má paradoxně menší odběr proudu, který činí 14 mA. Tomu by odpovídala výdrž přes 28 hodin, což je ale v praxi nereálná hodnota. Hlavní část bude totiž vždy dobít ve chvíli, kdy se vybije část snímací a uživatel ji nechá dobít. Při nabíjení snímací části se totiž zároveň nutně připojí k nabíjecímu napětí i část hlavní. Za úvahu by stála možnost nabíjet snímací část z velké kapacity baterie hlavní části, při přiložení obou dílů k sobě bez nutnosti připojovat USB C. Tímto řešením se však tato práce nezabývala. Nabíjení proudem 100 mA znamená dobu nabití okolo 8 hodin, což je stejně jako u snímací části poměrně dlouhá doba.

Posledním ze zmíněných měřitelných parametrů je dosah bezdrátové komunikace. Při měření byly obě části spárovány a následně byla jedna od druhé oddalována do chvíle, kdy hlavní část přešla zpět do režimu párování. Výsledný dosah činil 10 m, což je pro účely tohoto zařízení více než dostačující.

3.4.2 Uživatelské hodnocení

Prototyp zařízení byl vyzkoušen i svou budoucí uživatelkou, která zařízení testovala na dvou piánech od různých výrobců. Zařízení fungovalo bez problému s oběma dvěma značkami. Pozitivní hodnocení dostal design, zejména s ohledem na to, že snímací část pod delšími vlasy téměř nelze vidět, i způsob nabíjení, kde byla vyzdvihnuta možnost nabíjet obě části zařízení naráz. S designem souvisí i jeden neduh, tedy že se zařízení aktivovalo samo od sebe, i když s ním nebylo manipulováno. Dle slov autorky recenze se však jedná o minimální problém vzhledem k tomu, že stačilo zařízení od sebe oddělit a opětovně spojit, čímž byl problém vyřešen.

Co se týče samotné aktivace pedálu, tak oproti předchozí verzi zařízení je zde třeba větší pohyb hlavy, aby se pedál zapnul. Autorka recenze však připouští, že se může jednat o problém způsobený nevhodným nastavením rozsahu, který by se dal vyřešit nalezením vhodnější funkční pozice.

Posledním bodem recenze je problém s nastavením polarity. Po připojení k piánu značky Kurzweil zařízení zapínalo pedál ve chvíli, kdy měla uživatelka hlavu vzpřímenou. Tlačítko na změnu polarity však nepomohlo, řešením bylo připojit zařízení až k zapnutému piánu a poté již byla polarita správná.

3.4.3 Diskuze

Návrh zařízení byl převeden do praxe v podobě plně funkčního prototypu, na kterém však bylo zjištěno několik nedostatků, které by bylo vhodné v budoucnu vylepšit.

Jako první bych zmínil nabíjení baterií, které v praxi trvá poměrně dlouho. Nabíjecí proud 17 mA pro snímací část, respektive 100 mA pro hlavní část, by bylo možné zvednout na 35 mA, respektive 200 mA, což je výrobcem baterie udávaná hodnota pro rychlé nabíjení, které by mělo zabrat pouze 2,5 hodiny, což je pro koncového uživatele mnohem příjemnější hodnota.

S napájením souvisí i další bod, kterým je dosah bezdrátové komunikace, který je při stávající hodnotě okolo 10 možná až zbytečně velký vzhledem k tomu, že v praxi se od sebe zařízení nevzdálí více než na dva metry. Mohlo by tedy být výhodné snížit výkon bezdrátových modulů, což použitá knihovna i samotné moduly dovoluují, a dosáhnout tak nižšího odběru proudu a s tím spojené vyšší výdrže baterie. Kladně může být však hodnocena kvalita připojení, které je navázáno přibližně po jedné sekundě od spuštění a následně vykazuje stabilní a nerušený chod.

U fyzického zpracování může být pozitivně ohodnoceno připevnění snímací části do přichystaného prostoru hlavní části. Zařízení se po přiblížení k protikusu připevní s dostatečnou silou, která zamezuje oddělení i při prudších pohybech, což působí příjemným a kvalitním dojmem. V recenzi bylo zmíněno samovolné spuštění, což může být způsobeno špatným elektrickým spojením pružinových kontaktů s ploškami na protikus. Řešením by zde mohlo být přidání vodivých distančních válečků na aktuální pozice plošek na snímací části. Tímto způsobem by se zmenšila vzdálenost mezi pružinovými kontakty a dosedací plochou, což by zajistilo silnější stisknutí pružiny a stabilnější elektrické připojení. U konstrukce bych navrhoval přehodnotit i materiál, ze kterého je vyrobena zejména

krabíčka snímací části, protože tvrdý materiál PETG vytváří na zakončení nosného záhybu poměrně ostré hrany, které mohou být při delším nošení nepohodlné. Mimo to je však příjemná nízká hmotnost a poměrně malé výsledné rozměry, díky kterým zařízení nijak nepřekáží, což bylo pozitivně hodnoceno i autorkou recenze.

V posledním bodě hodnocení bylo zmíněno nefunkční tlačítko změny polarity. Při osobním testování této funkce jsem však žádný problém nepocítil, proto v tuto chvíli nelze jasně určit, zda se jedná o hardwarovou, nebo softwarovou chybu.

Hlavní funkcionalitou zařízení je však samozřejmě nahrazení skutečného klavírního pedálu. Otestován byl jak diskrétní, tak spojitý režim. U spojitého režimu bylo citelné menší zpoždění při náběhu pedálového efektu, což je nejspíš dáno volbou funkce, která nastavuje hodnotu potenciometru v závislosti na náklonu hlavy, viz obrázek 3.14. Namísto dosavadní lineární funkce by mohla být vhodnější nějaká forma funkce logaritmické, která by zajistila rychlejší náběh odporu už od malých úhlů náklonu. Při diskrétním ovládní byl tento problém o dost méně citelný, ovšem přehodnocení dané funkce by pomohlo i zde, protože při rychlejším počátečním náběhu funkce by se aktivovala i diskrétní forma pedálu o něco dříve. Tento problém byl popsán i autorkou recenze, která zmiňovala nutnost o něco většího pohybu hlavy pro dosažení pedálového efektu v porovnání s předchozí verzí. Celkově je však zařízení při hře plně využitelné a po chvíli trénování a zvykání si na tento způsob ovládní jsem byl schopen se zařízením zahrát skladbu, u které běžně používám standardní pedál ovládaný nohou.

4 Závěr

V rámci bakalářské práce byla navržena a sestrojena bezdrátová jednotka pro ovládání klavírního pedálu pohybem hlavy, která je určena zejména pro handicapované hráče na elektrická piána. Zařízení bylo koncipováno jako vylepšená verze stávajícího zařízení, které bylo vyrobeno v mechatronické laboratoři.

Součástí práce byla rešerše, která sloužila jako zdroj informací pro pochopení fungování klavírních pedálů a pro správné nastavení kompatibility mezi výsledným zařízením a piány od různých výrobců. Nechyběla ani analýza předchozí verze zařízení, ze které společně s dalšími informacemi z rešeršní části vyplynul koncept nové verze této jednotky.

Praktická část práce se zabývala výrobou prototypu, který se skládá ze dvou částí. První z nich sbírá data pomocí IMU, na základě kterých počítá náklon, a druhá zajišťuje aktivaci pedálu digitálním potenciometrem, nebo číslicovým přepínačem. Navrženo bylo zároveň nastavení funkčního rozsahu a způsob nabíjení obou částí přes USB. Pro zařízení byla vyrobena deska plošných spojů a plastová krabička s ohledem na uživatelskou přívětivost, kompaktnost a výslednou pohodlnost při užívání. Popsáno bylo i fungování mikroprocesoru a jeho naprogramování v jazyce C.

Všechny cíle práce byly splněny, jelikož fungování zařízení bylo zhodnoceno uživatelkou předchozí verze této jednotky, která potvrdila funkčnost prototypu a ocenila zejména kompaktnost a jednoduchost použití. Pro nedostatek ve formě malého, avšak při hře zaznamatelného zpoždění, bylo společně s ostatními nápady na vylepšení navrhuto řešení v diskuzi na konci práce.

Seznam zkratek

NO Normally Open

NC Normally Closed

DPDT Double Pole, Double Throw

SPST Single Pole, Single Throw

DPS Deska plošných spojů

IOC Interrupt on Change

IMU Intertial Measurement Unit

Literatura

- [1] *Steingraeber pedal systems for wheelchair users* [online]. 2008. [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://www.steingraeber.de/en/innovationen/pedal-devices-for-pianists-in-wheelchairs/>.
- [2] *MouthPedal* [online]. 2024. [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://apps.apple.com/us/app/mouthpedal/id6448126913>.
- [3] *Head-Activated Piano Pedal* [online]. 2011. [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://www.canassist.ca/EN/main/programs/our-technologies/museum/piano-arts.html>.
- [4] *Cable Conundrum: WTF is TRS?* [online]. 2020. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://noiseengineering.us/blogs/loquelic-literitas-the-blog/cable-conundrum-wtf-is-trs>.
- [5] *YAMAHA FC 3A* [online]. 2024. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://kytary.cz/yamaha-fc-3a/HN126291/>.
- [6] *KORG PS-3* [online]. 2024. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://kytary.cz/korg-ps-3/HN115399/>.
- [7] *Complementary filters* [online]. 2022. [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: https://vanhunteradams.com/Pico/ReactionWheel/Complementary_Filters.html.
- [8] *Complementary Filter - Sensor Fusion #2 - Phil's Lab #34* [online]. 2021. [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=BUW20dAtzBw>.

Seznam obrázků

2.1	Dostupná řešení firmy Steingraeber & Söhne [1]	10
2.2	Popis audio konektoru [4]	11
2.3	Spojité varianta klavírního pedálu	11
2.4	Diskrétní varianta klavírního pedálu	12
2.5	Umístění zařízení na hlavě	13
2.6	Schéma konceptu zařízení	14
3.1	Blokové schéma fungování zařízení	16
3.2	Obvod zajišťující kompatibilitu	17
3.3	Bezdrátový modul nRF24l01	18
3.4	Vzájemné propojení obou částí	18
3.5	DPS klavírní části	19
3.6	DPS snímací části (zezadu vlevo, zepředu vpravo)	20
3.7	Krabička pro hlavní část	21
3.8	Horní strana krabičky pro hlavní část	21
3.9	Spodní díl krabičky snímací části	22
3.10	Výsledný vzhled hlavní části (vlevo odkryto, vpravo s víčkem)	22
3.11	Výsledný vzhled snímací části	23
3.12	Popis ovládacích prvků hlavní části	23
3.13	Schéma stavů hlavní části	24
3.14	Funkce přiřazující hodnotu dig. potenciometru pro funkční rozsah 20° až 80°	25
3.15	Schéma stavů snímací části	26
3.16	Zpracování dat v komplementárním filtru	28

Přílohy

Přílohy uvedené v externím souboru

- Zdrojové soubory pro DPS hlavní části
- Zdrojové soubory pro DPS snímací části
- Knihovny a zdrojové kódy v C pro hlavní část
- Knihovny a zdrojové kódy v C pro snímací část
- 3D modely krabiček obou částí ve formátu STEP