

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Virtuální hudební nástroj

Richard Šarm

Bakalářská práce
2023

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Richard Šarm**
Osobní číslo: **I20064**
Studijní program: **B0714P060001 Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Virtuální hudební nástroj**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh virtuálního/elektronického hudebního nástroje, který možné ovládat bezdotykově pomocí gest jako při hře na skutečný nástroj. Práce samotná vybere vhodný typ nástroje, teoretická část práce se bude zabývat vhodnou detekcí gest, tedy stisku (aktivaci) virtuální struny, klávesy, klapky, případně jiného. Dále se teorie bude zabývat možnostmi generování tónu nástroje. Praktická část práce se pak bude zabývat návrhem, konstrukcí a ověřením vybraného nástroje.

Rozsah pracovní zprávy: **30-50**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: popis procesoru a instrukční soubor. Praha: BEN technická literatura, 2003.336 s. ISBN 978-80-7300-083-0.
- [2] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C. Praha: BEN technická literatura, 2003. 216 s. ISBN 978-80-7300-102-0.
- [3] VLACH, J. Řízení a vizualizace technologických procesů. Praha: BEN technická literatura, 2002. 160 s. ISBN 978-80-86056-66-X.
- [4] BRTNÍK, B. Základní elektronické obvody. Praha: BEN technická literatura, 2011. 156s. ISBN 978-80-7300-408-8
- [5] RIPKA, P.; TIPEK, A. Master Book of Sensors. Praha : BEN, 2003. ISBN 0-12-752184

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Rozsival**
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. listopadu 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **12. května 2023**

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Jan Pidanič, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. ledna 2023

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Mezholezích dne 6.2. 2022

Richard Šarm

Poděkování

Rád bych poděkoval své rodině a přátelům, kteří mě podporovali ve studiu a vždy představovali pilíř, o který jsem se mohl v každé situaci opřít. Dále bych chtěl poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Pavlovi Rozsívalovi za trpělivost a odborné konzultace k práci.

A samozřejmě také Bohu, jemuž nepochybně vděčím za pomoc při všech zkouškách ne jenom na půdě univerzity, ale také napříč životem.

Anotace

Cílem práce je návrh a konstrukce virtuálního/elektronického hudebního nástroje, který je možné ovládat bezdotykově. Práce obsahuje teoretickou část zabývající se zvolením vhodného typu nástroje, z něhož budeme konstrukčně vycházet, systémů a senzorů umožňující detekci hráčových gest a možnostmi generace tónu nástroje. V praktické části dojde k vybrání nejvhodnějších systémů, ke konstrukci hudebního nástroje a zhodnocení výsledku.

KLÍČOVÁ SLOVA

virtuální/elektronický hudební nástroj, senzory, generace tónů, detekce gest

Title

virtual musical instrument

Annotation

The thesis deals with the design and construction of a virtual/electronic musical instrument that can be controlled touch-free. The thesis contains a theoretical part dealing with the choice of a suitable type of instrument, from which we will build a structural basis, a system enabling the detection of player's gestures and the possibilities of instrument tone generation. In the practical part, the most suitable system will be selected, the musical instrument will be constructed and the result will be evaluated.

KEYWORDS

virtual/electronic musical instrument, sensors, gesture detection, tones generation

Obsah

Seznam obrázků.....	8
Seznam zkratk.....	9
Úvod.....	10
1 Možnosti detekce gest	11
1.1 Laserové senzory	12
1.2 Ultrazvukové senzory	13
1.3 Kamerová detekce.....	14
1.4 Vliv lidského těla	15
2 Konstrukční vzory.....	15
2.1 Harfa	16
2.2 Kytara	18
2.3 Theremin	20
3 Trocha hudební teorie	21
4 Tvorba zvuku.....	23
4.1 Aditivní (součtová) syntéza	23
4.2 Rozdílová (subtraktivní, analytická)	24
4.3 Modulační	25
4.3.1 Frekvenční modulace.....	25
4.3.2 Kruhová modulace.....	25
4.4 Tvarová syntéza	26
4.4.1 Nelineární tvarování.....	26
4.4.2 Přímé zadávání časového průběhu	27
4.4.3 Fázové zkreslení	27
4.5 Přehrávání nahraných tónů	28
4.6 Propojení se syntetizátorem	28
4.7 PSG chip	29
5 Vyzkoušené leč zavrhnuté metody	30
5.1 Princip optické brány	30
5.2 Generátor obdelníkového signálu	32
5.3 Konstrukční provedení.....	33
6 Hardware a software	34
6.1 Vývojové prostředí	34
6.1.1 Arduino IDE	34
6.1.2 FamiStudio	34
6.2. Mikroprocesory a periférie	35
6.2.1 ESP-WROOM-32	35
6.2.2 VL53L0X	36
6.2.3 I2C Sběrnice	37
6.2.4 SN 76489	38
6.2.5 Krystalový oscilátor TFTA680	38
6.2.6 Reprodukory	39
7 Zprovoznění	40
7.1 Schéma zapojení	41
7.2 Programování SN 76489	42
8 Prototyp finálního výrobku	45
9 Finální výrobek.....	46
Závěr.....	50
Použitá literatura.....	51

Seznam obrázků

Obrázek 1: Optická závora[1].....	12
Obrázek 2: Direct Time of Flight [2].....	12
Obrázek 3: charakteristiky snímacího rozsahu u ultrazvukových senzorů SICK [3]	13
Obrázek 4: Místnost s vyhrančenými plochami po jejichž narušení se spustí upozornění[4].....	14
Obrázek 5: Blokové schéma Thereminu [6].....	15
Obrázek 6: Typy laserových harf [7].....	17
Obrázek 7: Obrázek 3: Akustická kytara [8].....	19
Obrázek 8: Obrázek 4: Theremin.....	20
Obrázek 9: Tabulka tonů a jejich frekvencí [11].....	22
Obrázek 10: Aditivní (součtová) syntéza [12].....	23
Obrázek 11: Rozdílová syntéza [12].....	23
Obrázek 12: Nelineární tvarování signálu [12]	24
Obrázek 13: Přímé zadávání časového průběhu [12].....	26
Obrázek 14: Fázové skreslení [12].....	28
Obrázek 15: Laserový modul 5V [17].....	30
Obrázek 16: Laser s optikou 5V [17].....	30
Obrázek 17: Modul laserového snímače [17].....	31
Obrázek 18: Generátor obdelníkového signálu [17].....	32
Obrázek 19: Jednoduchá konstrukce kytarového krku s přidělanými senzory.....	33
Obrázek 20: ESP32 Wroom [17]	35
Obrázek 21: VL53L0X [21].....	36
Obrázek 22: Model I2C sběrnice [22].....	37
Obrázek 23: SN 76489 [23]	38
Obrázek 24: Konstrukce reproduktoru [25].....	39
Obrázek 25: Schéma zapojení.....	41
Obrázek 26: Tabulka tonů a jejich zápisu v hexadecimální soustavě.....	43
Obrázek 27: Adresy registrů [23]	44
Obrázek 28: Umístění pinů v datasheetu [23].....	44
Obrázek 29: Prototyp virtuálního hudebního nástroje.....	45
Obrázek 30:Tělo nástroje.....	46
Obrázek 31:Senzory vzdálenosti s připojenými vodiči.....	47
Obrázek 32:Wagosvorky tvořící propojovací uzle.....	47
Obrázek 33:Konstrukce je vytvořena tak aby bylo možné vrchní díl oddělit bez obav z vytrhnutí vodičů.....	47
Obrázek 34:Mikroprocesor s připojenými vodiči.....	48
Obrázek 35:PSG připojený k mikroprocesoru.....	48
Obrázek 36:Jack pro připojení reproduktorů.....	49

Seznam zkratek

dToF(direct Time of Flight)- Přímý čas letu

iToF(indirect Time of Flight)- Nepřímý čas letu

NES-Nintendo Entertainment System

PSG-Programovatelný zvukový generátor

CLK-Hodinový signál

SDA-Sériová datová linka

Úvod

Hudba je pro mnohé z nás nedílnou součástí našeho života. Pomáhá nám v relaxaci, inspiraci, vnitřnímu potěšení, vyjádření naší kultury a v některých případech nám poskytuje i jakési nostalgické propojení s časy dávno minulými. Jako vášnivý hráč na kytaru, náruživý posluchač hudby a elektrotechnik jsem se rozhodl propojit všechny tyto aspekty dohromady ve snaze vytvořit elektrický hudební nástroj, který se bude ovládat bezdotykově. Bezdotykové nástroje jsou v rámci hudebního průmyslu spíše raritou. Průměrný člověk by si pravděpodobně vybavil pouze jediný nástroj tohoto druhu, a to je theremin, který si dokázal získat díky velice specifickému zvuku čestné místo mezi hudebními nástroji. Zapálenější posluchači, zejména z řad elektronické muziky by si možná ještě vzpomněly na laserovou harfu, která se proslavila především díky specifickému vizuálnímu zpracování, nicméně faktem zůstává, že bezdotykové hudební nástroje nemají v hudebním průmyslu silné zastání.

Cílem práce je tedy navrhnout, sestavit a zprovoznit virtuální/elektronický nástroj, jenž se bude ovládat bezdotykově. To znamená, že části, které u klasických nástrojů hráč obsluhuje (struny, klapky, pedály) jsou zde nahrazeny systémem, reagujícím na gesta. Součástí práce je také zvolení, a v případě potřeby také sestavení zařízení, jehož úkolem je v závislosti na gestech generovat patřičné tóny.

1 Možnosti detekce gest

Tato kapitola má za úkol seznámit čtenáře s principy, jenž využívají bezdotykové senzory či kamerové systémy k detekce přerušení (v našem případě gestem hráče) a využitelnost těchto senzorů pro nahrazení „strun“ v rámci praktické části bakalářské práce. Zároveň s tím uvedeme výhody a nevýhody, jenž vyplívají z těchto principů

1.1 Laserové senzory

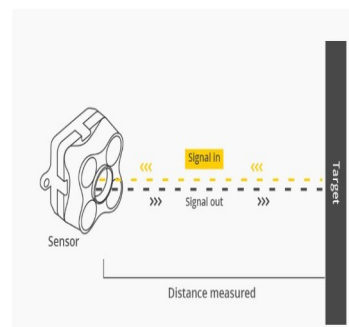
Základ tvoří vysílač laserového paprsku a přijímač (nejčastěji infračervená dioda), jenž detekuje tento paprsek a převádí přijaté záření na elektrickou veličinu, kterou pak vyhodnocuje příslušné zařízení. Přijímač může být v základu konstruován dvojím způsobem. Buď jako tzv. Optické závory(obr.1), kdy je přijímač umístěn na opačné straně než vysílač, nebo v režimu Time of Flight(ToF), kde vysílač i přijímač jsou umístěny vedle sebe. [1] [2]

Nejprve si představíme konstrukci optických závor. Vysílač vysílá laserový paprsek a přijímač se nachází v log.1 Pokud dojde k přerušení, přijímač změní stav na log. 0, a je detekováno přerušení. Aby tato detekce mohla fungovat, je potřeba využívat přijímačů, jenž snímají vlnovou délku odpovídající vlnové délce vysílačů. Dále si musíme uvědomit, že přijímače snímají také okolní světlo a může tedy docházet k nechtěným chybám. Máme několik možností, jak tento problém omezit. Můžeme například přijímač zapouzdřit tak, aby nebyl ovlivňován okolním světlem. V praxi však používáme poněkud komplikovanější, ale mnohem účinnější metodu. Vysílač pracuje v tzv. Impulsním režimu, tedy nesvítí konstantně, ale bliká definovanou frekvencí. Přijímač počítá záblesky a pokud dojde k vynechání (přerušení paprsku), vyhodnotí tento stav a přepne do log.0. [1]

Technologie dToF (Direct Time of Flight) funguje na principu odrazu infračerveného světla. Vysílač vysílá pulzy infračerveným laserem a systém měří čas, za který je odražený paprsek zachycen přijímačem. Další možností pro měření vzdálenosti je metoda iToF(indirect Time of Flight). IToF pracuje na principu měření fázového posunu frekvencí od odražených světelných impulsů. [2]



Obrázek 1: Optická závora [1]

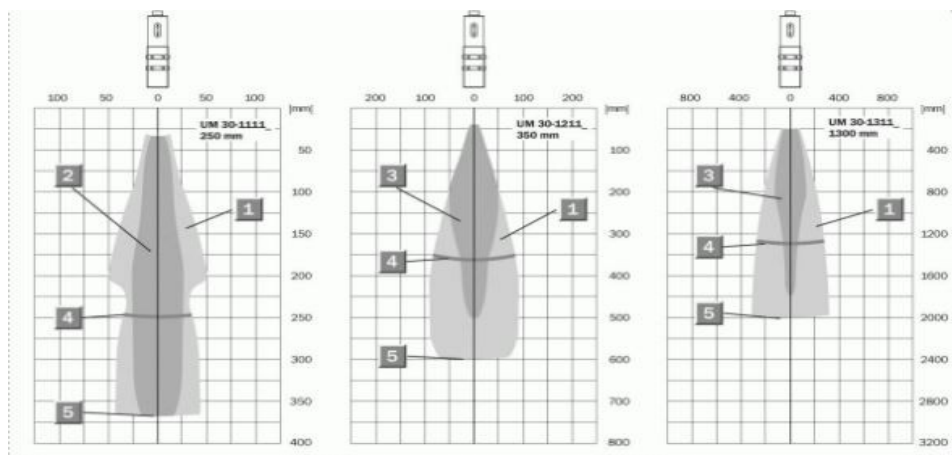


Obrázek 2: Direct Time of Flight [2]

1.2 Ultrazvukové senzory

Tyto senzory jsou založeny na principu vyslání ultrazvukové vlny. Tato vlna se odrazí, její odraz se vrátí zpátky k senzoru a ten podle uplynulé doby vyhodnotí vzdálenost předmětu. Samozřejmě nemusí jít nutně jenom o vzdálenost. Tyto senzory se používají ve velké míře pro detekci objektu jako takového, například v továrnách pro detekci kusu na pásu. Jejich velká výhoda spočívá v univerzálnosti použití. Dokáží velice efektivně detekovat bez ohledu na prach, povrch a vnější vlivy prostředí. Dokonce je možné pořídit vysílač a snímač zvlášť a vytvořit tedy podobný princip na jakém funguje optická brána.

Ultrazvukové senzory se jeví jako ideální pro nahrazení klávesových systémů u hudebních nástrojů jako je například klavír. U těchto nástrojů totiž nepotřebujeme snímat něco na větší vzdálenost a spíše potřebujeme zachytit přítomnost hráčova gesta do vzdálenosti pouhých cca dvou centimetrů. Pokud bychom chtěli snímat větší vzdálenosti narazíme na problém související s šířením zvukových vln. Jak můžeme vidět, tak na rozdíl například od laserového paprsku se vlna nešíří v úzkém paprsku, ale spíše v trychtýřovitém tvaru. Tedy s větší vzdáleností se vlna rozšiřuje do stran. Pokud bychom například zkusili využít ultrazvukové senzory u nástroje vycházejícího z tvaru kytary a nahradili bychom jimi struny, tak zjistíme, že by se vlny jednotlivých sensorů začali v určitých vzdálenostech prolínat do sebe, což by vedlo k chybám. A to je samozřejmě nežádoucí. [3]



Obrázek 3: Příklad různých charakteristik snímacího rozsahu / dosahu a šířky ultrazvukového paprsku, jak jej běžně výrobci udávají ve svých datasheetech - zde například snímače SICK. [3]

1.3 Kamerová detekce

Tato možnost se pohybuje na velice teoretické úrovni, přesto by mohla být pro určité aplikace použitelná. Pokud se podíváme na teorii detekce pohybu v rámci kamerového systému, tak zjistíme, že se nejedná o nic jiného, že porovnávání jednoho či více snímků vůči sobě. Pokud snímky nejsou identické a došlo ke změně rozložení pixelů tak víme, že kamera zachytila něco nového (něco přešlo před objektivem). Z tohoto hlediska bychom například dokázali ovládat jednu strunu virtuálního nástroje, která by „zahrála“ v okamžiku, kdyby kamera detekovala pohyb. To však není ani zdaleka dostatečné. Nicméně dnešní SW pro zpracování obrazu už jsou schopné rozdělit místo, které pozorují do sektorů a reagují na pohyb jen v těchto sektorech. Představme si tedy, že máme kameru, jenž snímá bílou desku o velikosti A2. Tato deska by z hlediska obrazu na kameře byla rozdělena řekněme do čtyř sektorů a v každém jednotlivém sektoru by reagovala na pohyb. Mohli bychom tedy naprogramovat SW tak, aby v případě, že dojde k detekci pohybu (gesto hráče) v sektoru 1, se ozval tón E. Pro sektro 2 by to byl tón H atd.

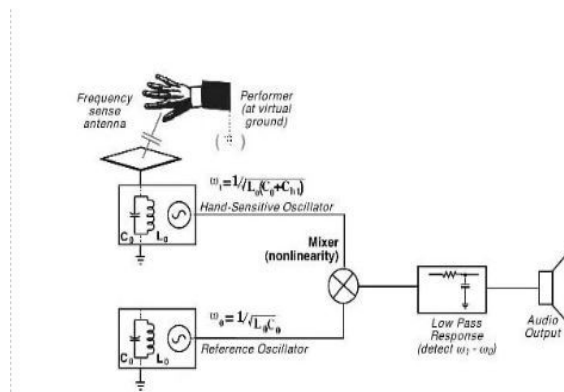
Toto řešení by samozřejmě nebylo z pozice hráče moc komfortní a nepřináší žádnou konkrétní výhodu oproti ostatním možným řešením. Nicméně je tu jedna věc, jenž by nás mohla lákat k sestrojení hudebního nástroje ovládaného přes kamerový systém- Množství lidí vlastníci hudební nástroj reagující na pohyb před kamerou není moc velké, takže pokud by jste se chtěli před svými přáteli blýsknout, je tento návrh rozhodně pro vás. [4] [5]



Obrázek 4: Místnost s vyhraničenými plochami po jejichž narušení se spustí upozornění[4]

1.4 Vliv lidského těla

Na světě pravděpodobně existuje pouze jediný nástroj využívající tohoto principu a to je Theremin, přesto však je tento systém nutno uvést v potaz, neboť byl takřikajíc průkopníkem v oblasti bezdotykového hraní na hudební nástroje. Základem je obvod tvořený oscilátorem, jenž vytváří periodický signál. Ze vzorce pro výpočet rezonanční frekvence vyplývá, že se změnou kapacity v obvodu dochází ke změnám rezonanční frekvence. Kapacitu nám v tomto případě představuje lidská ruka pohybující se v blízkosti antény. Změna kapacity je velmi malá (pikofarady) a oscilátor kmitá na frekvenci v rozsahu stovky kHz, tedy mimo slyšitelný rozsah. Proto musíme využít tzv. záznejový princip, tedy skládání dvou různých frekvencí. Musíme tedy do obvodu připojit další oscilátor s pevně danou frekvencí a frekvence sloučit. Výstupní signál je potom ještě potřebné dopravit do potřebné podoby. Poté dostáváme zvuk ve slyšitelném pásmu, jenž je však možné měnit změnou velmi malé kapacity. [6]



Obrázek 5: Blokové schéma Thereminu [6]

2 Konstrukční vzory

Abychom dokázali co nejlépe navrhnout princip, na kterém bude založena detekce gest, tak musíme stanovit, jak nástroj bude vypadat, tedy jakým hudebním nástrojem se při realizaci budeme inspirovat. Jinak budeme postupovat v případě, že budeme mít nástroj tvaru harfy a jinak v případě, že nám jako vzor poslouží kytara či piano. Samozřejmě je možné vytvořit si náš vlastní zcela unikátní tvar nástroje, ale to nám neposkytuje prakticky žádné výhody. V následující kapitole tedy provedeme rozbor jednotlivých tvarů nástrojů, navrhne možnosti nahrazení strun, klapek atd. pomocí gesta a vybereme optimální řešení.

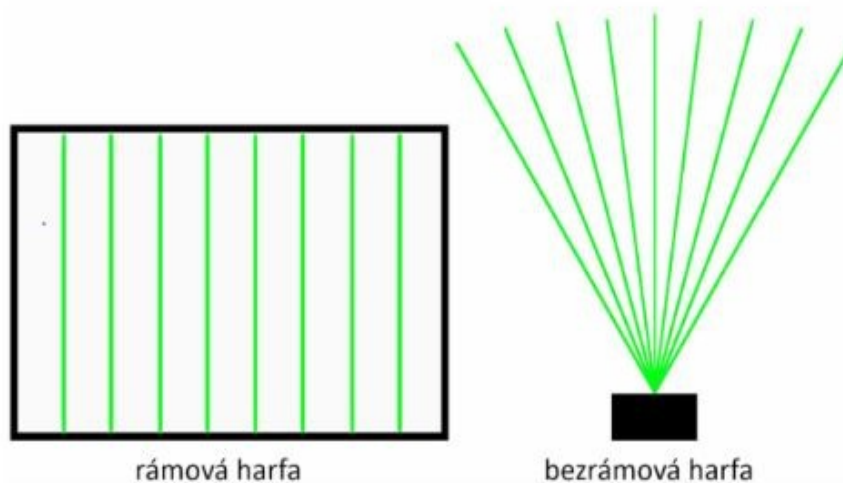
2.1 Harfa

Pokud bychom vycházeli z tvaru harfy, tak si řadu konstrukčních problémů můžeme značně ušetřit, neboť harfa využívající bezdotykových senzorů už byla sestrojena a značně ji proslavil hudebník Jeane-Michele Jarrem. Tento nástroj se dostal do většího povědomí pod názvem laserová harfa. Princip je založen na využití laserových senzorů připojených k řídicí jednotce. Využití laserových senzorů se ukázalo jako nejlepší řešení pro nahrazení strun hned z několika nezanedbatelných důvodů:

1. Laserové senzory nezabírají velké množství místa , tedy nástroj může být relativně malý
2. Pokud dobře zvolíme použité vysílače, tak je možné paprsky vidět pouhým okem, což nám dává lepší orientaci a z hlediska efektu to vypadá o poznání lépe.
3. V případě využití laserových senzorů vzdálenosti jsme schopni na jeden laser umístit větší množství tónů.

V případě, že dojde k přerušení paprsku, tak software toto přerušení vyhodnotí a spustí přehrání přednastaveného zvuku. Zvuk může být libovolný. Pokud bychom měli syntetizér či hudební knihovnu obsahující tóny kytary, flétny, klasické harfy, citery a více méně jakéhokoliv hudebního nástroje, máme možnost přehrání téměř neomezeného množství hudebních nástrojů. Nicméně je nutné si uvědomit, že laserová harfa, je určená spíše pro zaujetí diváku, a hrání jednoduchých melodií. Samozřejmě by bylo možné nastavit na jednu „strunu“ souzvuk více tónů, a tedy vytvoření akordu. Tímto způsobem bychom dokázali hrát na harfu i jednoduché písničky, nicméně bychom se zbavili možnosti hrát melodické doprovody.

Počet „strun“ u laserových harf se pohybuje v rozmezí 8-12. Tento počet nám umožní hraní jednoduchých melodií a relativně jednoduchou obsluhu nástroje. Jak můžeme vidět na obrázku 6. tak tradiční vzor harfy by bylo poněkud obtížné replikovat, a navíc i docela zbytečné. Je nutné si uvědomit, že elektrické nástroje všeobecně nepotřebují rezonanční skříně ani rezonanční otvory (slouží k zesílení a zkvalitnění zvuku), což vede k výraznému zjednodušení konstrukce. Výsledný nástroj tedy může být menší. Pro laserové harfy často volíme dva základní tvary konstrukce-rámovou a bezrámovou.



Obrázek 6: Typy laserových harf [7]

Bezrámová harfa je technicky složitější, jelikož je většinou koncipována tak, že používá pouze jeden zdroj laserového paprsku, který se „rozdělí“ do několika dalších paprsků. Tohoto rozdělení paprsku je docíleno pomocí pozičně ovladatelného zrcátka, na které je namířen zmiňovaný laser. Zrcátko se naklápí do různých definovaných pozic a laser je zapnutý pouze v tu dobu, kdy je zrcátko přesně v těchto pozicích. Mezi těmito pozicemi je přepínáno velmi rychle, proto nelze přepínání zachytit lidským okem a všechny paprsky se nám jeví tak, jako kdyby svítily nepřetržitě. Pokud některý paprsek přerušíme například rukou, odražené světlo od dlaně je zachyceno světelným senzorem, který je časově synchronizován s ovládáním zrcátka. Lze tedy zjistit, v jaké pozici bylo zrcátko při detekci odraženého světla neboli který paprsek byl přerušen.

Rámový typ harfy je často realizován pomocí několika laserů, kde detekce přerušení paprsku je zajištěna například pomocí optických závor u jednotlivých laserů (strun).[7]

2.2 Kytara

Jedná se o jeden z nejznámější strunných dřevěných hudebních nástrojů. Přesto, že existuje mnoho způsobů jak můžeme kytary rozdělovat-např. elektrické, akustické, basové, dvanáctistrunné atd. tak tvar, z kterého můžeme vycházet je více méně neustále stejný. Pokud tedy do nich nepočítáme ony legendární kytary s dvojitým krkem, u nichž jak název napovídá máme o jeden krk navíc. Pro zjednodušení předpokládejme, že budeme pracovat s designem 6 strunné akustické kytary určené pro praváky.

Výhoda nástroje založeném na principu kytary spočívá ve schopnosti hrát až ve 3 oktávách(+/- pár dalších tónů v závislosti na počtu pražcůch, druhu kytary atd.) a to za minimálního využití senzorů. Ze své podstaty nám kytara tedy umožňuje zahrát zhruba 3 oktávy za využití pouze 6. senzorů . Na první pohled se tedy jedná o ideálního kandidáta, bohužel jak už to tak bývá, je to poněkud obtížnější než se na první pohled zdá. U kytary totiž nelze nahradit struny bezdotykovým systémem, aniž bychom pozměnili celkový způsob jakým na kytaru hrajeme.

Abychom pochopili, v čem spočívá problém nahrazením strun bezdotykovým systémem, musíme si nejdříve vysvětlit, jak se na kytaru hraje. Zjednodušeně, hráč pravou rukou hraje(brnká) na struny v místě ozvučného otvoru (kulatý otvor v těle kytary). Palec levé ruky je „opřený“ o krk a prsty zespoda mačkají místa mezi pražci, čímž vytváříme tóny. Tak a teď si představme, že chceme ukazováčkem levé ruky zmáčknout horní strunu. Ve své podstatě nezáleží na tom, v jakém místě se o to pokusíme, protože se projeví docela podstatný problém. Prst totiž alespoň částečně zakryje ostatní struny. V případě, že hrajeme na klasické struny, tak nám to nevádí, protože pravou rukou na ty struny nehrajeme a oni tedy nezní, ale v okamžiku, kdy struny nahradíme bezdotykovými senzory, tak senzor zkrátka aktivujeme (přerušíme).

Tento problém je však možné obejít v celku jednoduchým způsobem, který nicméně vyžaduje úpravu držení a způsobu hraní na kytaru. Jinými slovy-kytaru si musíme položit na zadní desku. V tomto způsobu hraní totiž přikládáme prsty na „struny“ ze shora a neovlivňujeme tedy další snímače.

Tento způsob držení nám umožňuje hrát pouze jednou rukou, což je ideální například pro hráče, jenž ztratili končetinu, či utrpěli její poškození. Pokud má hráč obě ruce v pořádku, tak druhou rukou může ovlivňovat například hlasitost, přepínat mezi zvukovými efekty atd. Popřípadě pokud je doopravdy zručný, tak může druhou rukou obsluhovat i jiný jednoduchý hudební nástroj, jenž je taktéž možné obsluhovat jednou rukou. [8]



Obrázek 7: Akustická kytara [8]

2.3 Theremin

Z hlediska thereminu můžeme uvažovat jako o nástroji který bychom se rovnou mohli pokusit sestavit, neboť už splňuje všechny potřebné podmínky z hlediska praktické části bakalářské práce. Jedná se o nástroj, na který se hraje bezdotykově a řadí se mezi první elektronické nástroje vůbec (vznikl roku 1920). První nápad pro konstrukci thereminu vznikl při výrobě alarmu fungujícím na principu rádiové technologie

Základem nástroje je hlavní anténa a dvojice generátorů. Jeden z nich je naladěný na konstantní ultrazvukový tón (170 kHz), druhý má frekvenční rádius mezi 168 kHz a 170 kHz. Hráč přiblížením ruky k anténě usměrňuje elektrické pole kapacitou vlastního těla a způsobuje rozladění druhého oscilátoru. Výsledkem je slyšitelný rozdílový tón. Theremin tak dosahuje rozsahu E2 až C5. Pozdější modely byly vybaveny i druhou anténou, kterou se dala ovládat hlasitost

Se zvukem thereminu se většina z nás už setkala aniž bychom si to uvědomovali. Z hudebního hlediska je jeho zvuk často připodobňován k ženskému hlasu či zpěvu ptáků. Pokud poněkud váháte s přiřazením k nějaké konkrétní skladbě, můžete si vybavit hlavní znělku ze seriálu Vraždy v Midsomeru či legendární skladbu z filmu Tenkrát na Západě. [9]



Obrázek 8: Theremin

3 Trocha hudební teorie

V této kapitola není naším cílem udělat ze čtenáře znalce hudební teorie. Pouze chceme vysvětlit pár základních pojmů, které umožní nezasvěceným lepší pochopení určitých aspektů návrhu hudebního nástroje.

Jak jistě všichni víme, tak hudební nástroje vydávají tóny, ale co je to vlastně tón? Kolik tónu existuje? Jak je dělíme? Proč ten samý tón zní jinak zahráný na klavíru a jinak na kytáře?

Z obecného hlediska bychom mohli tón definovat jako zvuk se stálou frekvencí přičemž jednotlivé tóny mají jinou frekvenci. Tyto tóny dále rozdělujeme do tzv. Oktáv. Oktáva je soustava dvanácti půltónů: C, Cis, D, Dis, E, F, Fis, G, Gis, A, Ais, H. Nejprve je nejdůležitější si lépe definovat co to oktáva vlastně je, jaký má vliv na frekvenci a jak nám její znalost umožní násobit frekvenční oblast, v které se budeme během hraní pohybovat.

Všechno začíná u tzv. Subkontra oktávy. Zde je první tón chromatické hudební stupnice (C) definován jako zvuk o frekvenci 16,351 Hz. Její poslední tón (H) má frekvenci 30,868 Hz. Zde dochází k velice zajímavému jevu. Pokud zdvojnásobíme frekvenci, u kteréhokoliv tónu, dostaneme ten samý tón akorát poposunutý o jednu oktávu. Z hlediska poslechu tyto tóny zní velice podobně, ale jsou jinak vysoké. Prakticky-vezmeme tón C (16,351 Hz) a zdvojnásobíme jeho frekvenci. Dostaneme ten samý tón C, ale v tomto případě je o jednu oktávu posunutý. A to je ve zkratce celý princip oktávy. Máme neustále 12 půltónů, ale jsou pokaždé jinak vysoké. Tento princip je znázorněn na tabulce níže. Z hlediska sluchu jsme limitováni schopností slyšet zvuky od 16 – 20 000Hz, nicméně v důsledku věku ztrácíme schopnost slyšet vyšší frekvence a to je důvod proč tabulka končí u frekvence 7902 Hz.[10] [11]

									A0 ~28	A#0 ~29	B0 ~31
C1 ~33	C#1 ~35	D1 ~37	D#1 ~39	E1 ~41	F1 ~44	F#1 ~46	G1 ~49	G#1 ~52	A1 55	A#1 ~58	B1 ~62
C2 ~65	C#2 ~69	D2 ~73	D#2 ~78	E2 ~82	F2 ~87	F#2 ~92	G2 ~98	G#2 ~104	A2 110	A#2 ~117	B2 ~123
C3 ~131	C#3 ~139	D3 ~147	D#3 ~156	E3 ~165	F3 ~175	F#3 ~185	G3 ~196	G#3 ~208	A3 220	A#3 ~233	B3 ~247
C4 ~262	C#4 ~277	D4 ~294	D#4 ~311	E4 ~330	F4 ~349	F#4 ~370	G4 ~392	G#4 ~415	A4 440	A#4 ~466	B4 ~494
C5 ~523	C#5 ~554	D5 ~587	D#5 ~622	E5 ~659	F5 ~698	F#5 ~740	G5 ~784	G#5 ~831	A5 880	A#5 ~932	B5 ~988
C6 ~1047	C#6 ~1109	D6 ~1175	D#6 ~1245	E6 ~1319	F6 ~1397	F#6 ~1480	G6 ~1568	G#6 ~1661	A6 1760	A#6 ~1865	B6 ~1976
C7 ~2093	C#7 ~2217	D7 ~2349	D#7 ~2489	E7 ~2637	F7 ~2794	F#7 ~2960	G7 ~3136	G#7 ~3322	A7 3520	A#7 ~3729	B7 ~3951
C8 ~4186	C#8 ~4435	D8 ~4699	D#8 ~4978	E8 ~5274	F8 ~5588	F#8 ~5920	G8 ~6272	G#8 ~6645	A8 7040	A#8 ~7459	B8 ~7902

Obrázek 9: Tabulka tónů a jejich frekvencí [11]

Výše zmíněné tóny jsou ze své podstaty všechny, které je možné zahrát. Můžeme se setkat s tóny, která jsou tzv. Snížené (Ces, Fes atd.) je potřeba si uvědomit, že jsou to pouze tóny nacházející se o jeden půltón níže. Pokud se setkáme například s tónem Fes-jedná se zároveň o tón E, pokud snížíme tón E, získáme tón Dis. Zde se přirozeně ptáme samy sebe, co se stane, když snížíme tón C. Dostaneme tón H, ale pro tentokrát je nutné si uvědomit, že jsme se dostali o jednu oktávu níže.

Důležitou vlastností zvuku je tzv. Barva, tedy zvukové zbarvení. To ovlivňuje charakteristické zvuky hudebních nástrojů, ale i lidských hlasů, zpěvu ptáků atd. Díky tomu dokážeme rozeznat například zvuk kytary od klavíru. Zvuk tónů je ovlivněn mnoha aspekty, materiálem struny, dřevem, rezonanční skříní a všechny tyto aspekty se promítají do finální barvy zvuku. Díky tomu dokážeme rozlišit původ zvuků. [10] [11]

4 Tvorba zvuku

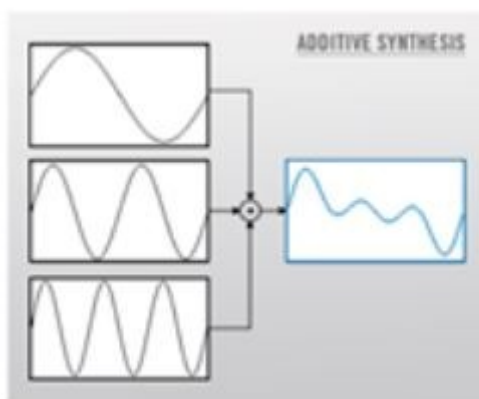
Na rozdíl od klasických hudebních nástrojů zde nejsme schopni vytvářet zvuk pomocí mechanických rezonančních prvků a musíme tedy využít možností úpravy elektronického signálu pomocí metod zvukových syntéz.

4.1 Aditivní (součtová) syntéza

Tato metoda je nejstarší a využívá principu Fourierovy řady. Jak nám napovídá samotný název, nejedná se o nic jiného, než o součet jednotlivých harmonických složek v sinusovém tvaru a neharmonických složek. Matematicky tento proces můžeme popsat takto.

$$f(t) = \sum_{k=1}^N A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k)$$

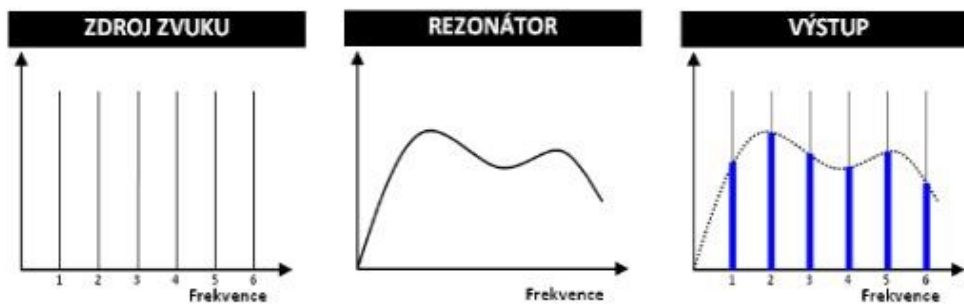
V praxi převedeme zvuk hudebního nástroje do spektrální oblasti. To nám umožní vidět přesné rozložení všech obsažených složek a jejich velikostí. Dále je potřeba si uvědomit, že jakýkoliv průběh bez ohledu na jeho složitost můžeme zkonstruovat pomocí kombinace mnoha jednotlivých sinusových signálů. Pokud bychom tedy měli dostatek sinusových generátorů, tak bychom dokázali s jejich pomocí zrekonstruovat zvuk, který jsme rozložili. A právě o to se v aditivní syntéze jedná. Co zní na papíře jednoduše je však z praktického hlediska komplikované. Pro jednoduché zvuky je tato syntéza nepochybně dobrá, ale čím více komplikovaný a frekvenčně bohatší zvuk máme, tím je jeho reprodukce složitější. Velká složitost je právě onen prvek, jenž způsobil, že tato metoda není komerčně rozšířena. [12] [13]



Obrázek 10: Aditivní (součtová) syntéza [12]

4.2 Rozdílová (subtraktivní, analytická)

V dnešní době se tato syntéza považuje za jednu z nejpoužívanějších a také nejúspěšnějších metod. I přes svoji jednoduchost si uchovává vysokou kvalitu. U aditivní syntézy se pracovalo se součtem velkého množství jednotlivých sinusových průběhů. Tato metoda přistupuje k problému z opačného konce. Místo toho abychom generovali jeden konkrétní signál, jenž chceme slyšet, tak generujeme širokopásmový signál, jehož konkrétní složku si poté skrze filtry vytáhneme. Syntetizátory zpravidla umožní zvolení průběhu, s kterým chceme pracovat. Tento princip se dá velice dobře pochopit na jednoduchém příkladu, jímž je náš vlastní hlas. Hlasivky zde zastávají funkci oscilátoru. Nos, hrdlo, ústa a jazyk zastupují filtry jenž tvarují výstupní zvuk do potřebné podoby. Hlasivky vydávají jeden stálý zvuk- Pomocí jazyka vytváříme písmena, z písmen slova atd. To je také důvod proč v případě ztráty jazyka člověk oněmí. Problém, jenž tato syntéza ukrývá je složitější naprogramování „věrnosti“ zvuku. Je velice obtížné naprogramovat zvuk, jenž by věrně odpovídal své předloze. Všeobecně je však tento problém zanedbatelný, neboť z praktického hlediska se tato syntéza využívá v naprosté většině dostupných nástrojů. [12] [13]



Obrázek 11: Rozdílová syntéza [12]

4.3 Modulační

Modulací označujeme proces, při kterém měníme parametr modulovaného signálu. Tento proces nám pomáhá upravovat zvuk do co nejvíce zvukomalebného vyznění. Příkladem nám může být tzv. Vibrato. Jedná se o zvukový efekt, při kterém hráč vytváří kolísavou změnu výšky tónu. Nejčastěji tento efekt vytváří kytaristé přimáčknutím a zvednutím struny.

Modulační syntéza se dělí na frekvenční, amplitudovou a kruhovou modulaci. V následujícím textu si o každé z nich řekneme podstatné informace. [12] [13]

4.3.1 Frekvenční modulace

Patří mezi nejnámější a nejrozšířenější. Pomocí tohoto typu modulace můžeme vytvářet jak harmonické, tak i neharmonické zvuky. Funkce je v zásadě jednoduchá. Představme si, že máme dva oscilátory O1 a O2. Na oscilátoru O1 nastavíme sinusový průběh, který chceme přehrát. Na oscilátoru O2 si nastavíme sinusový průběh, avšak nižší frekvence než je O1. Výsledný průběh oscilátoru O1 bude ovlivněn frekvencí oscilátoru O2. [12] [13]

4.3.2 Kruhová modulace

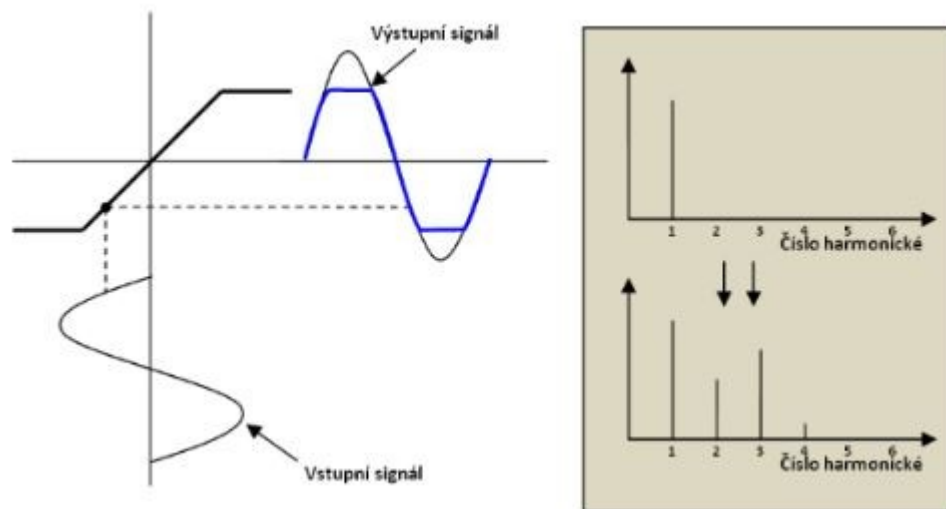
Název vznikl podle zapojení, jenž tvoří diody zapojené do kruhu. Princip spočívá v násobení vstupních signálů. Pokud násobíme dva vstupní signály, tak výsledkem bude signál jehož původní složky jsou potlačeny a dostáváme na výstupu součtovou a rozdílovou složku.[12] [13]

4.4 Tvarová syntéza

Tvarová syntéza se řadí mezi velmi populární a důležité druhy syntéz. Jak už nám napovídá její název funguje na principu upravení vstupního průběhu (obdelníkového, sinusového a pilového). Upravením vstupního průběhu dostaneme na výstupu požadovaný průběh. Z praktického hlediska je tvarová syntéza znázorňována na SW syntežátorech jako graf, na kterém upravujeme tvar signálu s jehož pomocí upravujeme vstupní průběh. Tvarovou syntézu dělíme na tři druhy. Nelineární tvarování, přímé zadávání časového průběhu a fázové zkreslení. [12] [13]

4.4.1 Nelineární tvarování

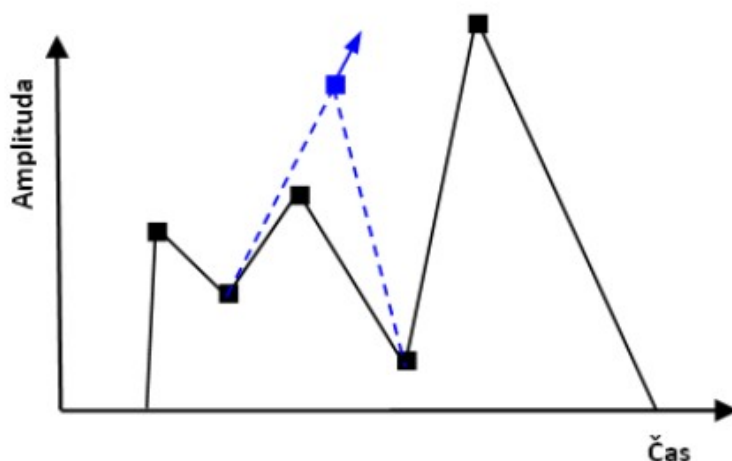
Zde využíváme nelineární obvodové charakteristiky, jenž nám ovlivňuje průběh. To má za následek vznik rozdílových a součtových složek, jenž nám přidání více harmonických. Výstupní signál tedy vykazuje přímou závislost na převodní charakteristice. [12] [13]



Obrázek 12: Nelineární tvarování signálu [12]

4.4.2 Přímé zadávání časového průběhu

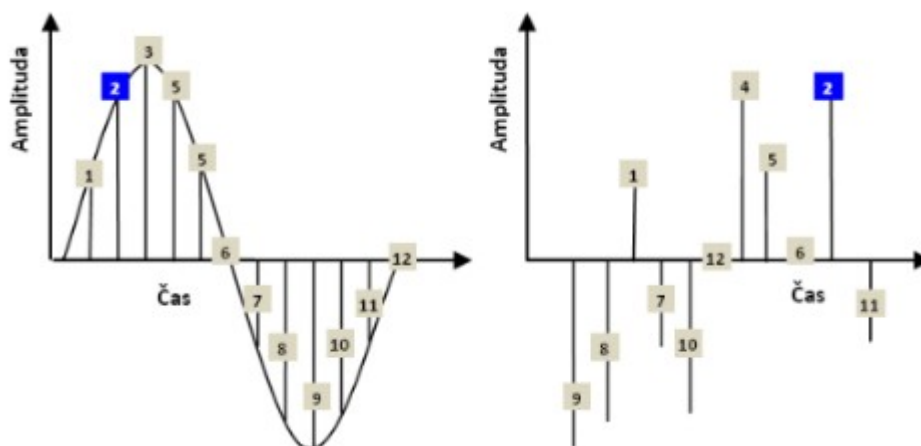
Pro lepší možnost ovládání syntézy je v mnoha SW syntezátorech grafické prostředí, v kterém můžeme tvar signálu libovolně měnit dle našich potřeb. Z toho vychází potřeba aby průběh, který měníme byl vyjádřen co nejjednodušeji. [12] [13]



Obrázek 13: Přímé zadávání časového průběhu [12]

4.4.3 Fázové zkreslení

S touto metodou jako první přišla společnost Casio v roce 1984. Jak už nám název napovídá, pokoušíme se dosáhnout potřebného tvaru vlny manipulací s její fází. Toho dosáhneme pomocí modulačního signálu. Z praktického hlediska potřebujeme oscilátor generující nosnou vlnu, jejíž fázi potom upravujeme za pomocí modulačního signálu z dalšího oscilátoru. Na první pohled je tato metoda velmi podobná frekvenční modulaci, nicméně je zde jeden zásadní rozdíl. V tomto případě jsou signály z oscilátoru synchronizovány po každém cyklu. Co to znamená? V okamžiku, kdy jeden z oscilátorů dokončí svůj cyklus, tak vynuluje periodu jiného oscilátoru a nastaví mu stejnou frekvenci. Tím se snažíme dosáhnout většího množství harmonických, jenž nám dopřávají lepší a bohatší zvukový výsledek. [12] [13]



Obrázek 14: Fázové zkreslení [12]

4.5 Přehrávání nahraných tónů

Další možností představuje možnost použití předehraných hudebních nástrojů jako harfa, housle, kytara, piano atd. Toto řešení by bylo ošetřeno v SW a bylo by možné pomocí přepínačů umístěných na ovládacím pultu přepínat mezi zvolenými nástroji. V tomto případě bychom potřebovali mikroprocesor s možností připojení reproduktoru a paměťové karty. Na této kartě by byli nahrány jednotlivé zvuky hudebních nástrojů v odpovídajícím formátu. Pokud bychom přerušili paprsek, ozval by se zvuk k němu přiřazený. Pro aplikaci tohoto řešení je vhodné použít mikrokontrolér obsahující I2S sběrnici, jenž je zaměřená především pro práci s audio zařízeními. [14]

4.6 Propojení se syntetizátorem

Jedním z dalších možností, při kterém bychom mohli využít nemalé množství syntéz je propojení laserové harfy se syntetizátorem. Pro naše potřeby by bylo nepraktické a zbytečné používat fyzický syntetizátor, takže bychom zvolili pouze SW syntetizátor. Jak to provést? Jak jistě víme, existují mikrokontroléry, jenž nám umožňují spuštění standartu bluetooth či wifi. Pokud bychom dokázali propojit daný mikrokontrolér se zařízením (mobil, tablet, notebook), na němž by byl nainstalovaný syntetizátor, mohli bychom využít všechny funkce, jenž by nám daný syntetizátor poskytl a nemuseli bychom se omezovat pouze na jednu konkrétní. [15]

4.7 PSG chip

Jedna z dalších možností, která byla hojně používána v počátcích herního průmyslu byla hudba, jejichž generace probíhala za pomoci kombinace oscilátoru, generujících různé druhy průběhů, jejichž výsledná směsice vytvářela jednoduchý, leč dostačující hudební doprovod. Tento postup zní podobně jako součtová syntéza, přesto tam můžeme nalézt rozdíly. Součtová syntéza využívá sinusové průběhy, jejichž kombinacemi lze replikovat téměř všechny existující zvuky. V tomto případě však můžeme využívat téměř všech tvarů průběhu (sinusové, pilové, trojúhelníkové a obdelníkové). Tyto průběhy se navzájem ovlivňují a vytváří velice specifické kombinace. Díky tomu můžeme pomocí kombinace dvou obdelníkových průběhů o rozdílných frekvencích (osobně jsem zkoušel kombinaci 147 a 220 Hz) vytvořit jednoduchý hudební motiv, do něhož pomocí třetího oscilátoru můžeme vnášet jednoduchou melodii. Tohoto systému využívali jedny z prvních herních konzolí.

Tento jednoduchý systém se stal kolebkou pro tzv. PSG (programmable sound generator) čipy. Jejich princip je založen právě na generování audio signálu za pomoci jednoduchých vlnových průběhů a šumu. Tyto čipy našli nezanedbatelné uplatnění v herních konzolích a stály za vznikem tzv. 8 bitové muziky, která je mezi mnohými fanoušky počítačových her stále populární a stále je možné najít skladatele, kteří tento systém využívají k tvorbě hudby.

Čip obsahuje množství kanálů, na nichž lze přehrávat předem dané průběhy. Počet kanálů a tvary průběhů se mohou lišit podle jednotlivých typů. Můžeme říci, že čím více kanálů čip má, tím jsme schopni dosáhnout lepšího hudebního efektu. Nicméně pokud bychom se poslechly určité množství skladeb vytvořených za pomoci PSG, zjistíme, že se v nich opakuje velmi podobný motiv, spočívající ve využívání specifických tvarů průběhů pro konkrétní části ve skladbách. Pokud bychom vzali několik hudebních skladeb pro konzole a analyzovali je přes osciloskop, zjistili bychom, že obdelníkový průběh se nejčastěji využívá pro melodickou stránku, zatím co trojúhelníkový průběh spolu se šumem vytvářejí hudební pozadí. [16]

5 Vyzkoušené leč zavrhnuté metody

V teoretické části bylo rozebráno velké množství metod, kterými je možné dosáhnout požadovaného výsledku. Jak jste nepochybně postřehli, tak každá metoda má své plusy a mínusy. Při návrhu konstrukce tedy vzniklo hned několik návrhů, jenž prošli testovací fází a zjistilo se, že nejsou pro dané řešení úplně nejvhodnější či dokonce nepoužitelné.

5.1 Princip optické brány

Jak bylo vysvětleno v teorii tak optická brána funguje na principu vysílače a přijímače. V okamžiku kdy je paprsek přerušen, přijímač tento stav vyhodnotí a dojde ke změně jeho stavu.

Jako vysílače byli zakoupeny a vyzkoušeny 2 typy laserů. Jeden samostatný laser 5V o vlnové délce 650nm (viz obr1) a ten samý laser doplněný o pouzdro s možností ručního zaostření (viz obr2.). Laser s možností zaostření ve výsledku nepřinášel podstatnou výhodu z hlediska snímání přijímačem, nicméně bylo zjištěno, že na rozdíl od samostatného laseru (obr.2) nedochází k jeho přehřátí. Samotný laser totiž vykazuje značné tepelné ztráty, což by mohlo vést k menší životnosti. Jednou z možností jak tepelné ztráty snížit je použít menší napájecí napětí, neboť laser je schopný fungovat i při napětí o velikosti 3.5V.



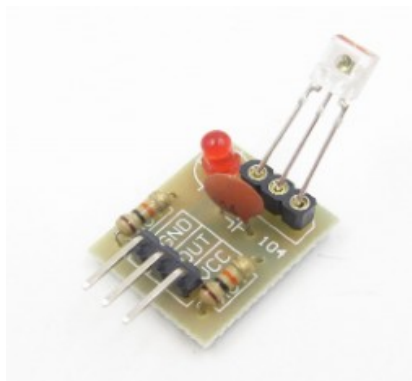
Obrázek 15: Laserový modul 5V [17]



Obrázek 16: Laser s optikou 5V [17]

Přijímač

Jako přijímač byl použit modul laserového snímače (obr.3).



Obrázek 17: Modul laserového snímače [17]

Výsledné zapojení se ukázalo jako funkční, nicméně z praktického hlediska nevyhovující. Jedním z problémů je citlivost laserového snímače na rušení způsobené okolním světlem a tedy není zajištěna správná funkce za každých podmínek. Další nevýhodou oproti výslednému řešení (laserový senzor vzdálenosti) je fakt, že z hlediska efektivity je pro hráče vyhovující rozestup senzorů ve vzdálenosti cca 10 cm. Pokud bychom tedy chtěli zahrát alespoň jednu oktávu (12 tónů), potřebovali bychom nástroj o velikosti 120cm, což je nevyhovující. I kdybychom se uskromnili řekněme o tři centimetry, dostali bychom se na velikost 86 cm centimetrů- což už je přívětivější, nicméně nebezpečí nechtěného přerušení jiného senzoru je vyšší. Navíc takového zapojení by vyžadovalo výrobu rámové harfy, která je robustnější a sama o sobě vyžaduje větší množství práce. Z celkového hlediska využití principu optické brány přinášelo více negativ oproti laserovému senzoru vzdálenosti

5.2 Generátor obdelníkového signálu

Původní plán bylo využít několik generátorů obdelníkového signálu ke generaci frekvencí odpovídajícím jednotlivým tónům v oktávě. Každý laser by jeden tento generátor ovládal, takže ve výsledku by jich bylo potřeba dvanáct na pokrytí celé oktávy. Popřípadě, by se jejich výstup dal upravit aby generoval sinusový signál, a využívali bychom tedy principu součtové syntézy (viz kapitola tvorba zvuku). Toto řešení se však ukázalo ve srovnání s využitím PSG čipu jako nepraktické. Ať už z hlediska nákladů, zabraného místa či celkového provedení.



Obrázek 18: Generátor obdelníkového signálu [17]

5.3 Konstrukční provedení

Nejdříve jsem uvažoval o výběru laserové harfy, protože se mi z konstrukčního hlediska zdála zajímavá a originální, nicméně tuto myšlenku jsem později zavrhl a upřednostnil jsem kytarovou konstrukci. Zdála se mi z celkového hlediska praktičtější a obsahuje daleko více výhod v porovnání s harfou. Pro mě osobně jako hráče na kytaru největší výhodou představovala možnost hrát na kytaru, jejíž struny by byly nahrazeny bezdotykovými senzory jen jednou rukou, což by bylo využitelné pro hráče, jenž v důsledku zranění či amputace končetiny nemohou obě ruce používat.

Nakoupil jsem tedy laserové senzory vzdálenosti, zprovoznil je a sestavil jsem v celku primitivní, ale pro vyzkoušení dostačující prototyp kytarového krku, který by senzory snímali a reagovali na přerušení hráčovým gestem. Bohužel bylo zjištěno, že tento model je v praxi víceméně nepoužitelný, a pokud ano, tak jen do vzdálenosti okolo 10cm. Pokud je vzdálenost větší, tak hráč není schopen přikládat ruce tak aby neaktivoval více senzorů najednou.

Teoreticky bychom druhou rukou mohli mačkat tlačítka, která by aktivovala vždy jen jednu konkrétní strunu a rušení druhých senzorů by tak nepřinášelo problémy, ale takový systém hraní nepřináší žádné výhody oproti klasické kytarě. Vrátil jsem se tedy ke konstrukčnímu návrhu vycházející z harfy.



Obrázek 19: Jednoduchá konstrukce kytarového krku s přidělanými senzory

6 Hardware a software

Pokud bychom chtěli vytvořit analogii k součástem, ze kterých se nástroj skládá tak nám více než dostatečně poslouží naše vlastní tělo. Hardware (mikroprocesor a součástky) by se dali přirovnat k našim končetinám a orgánům. Software je nutno přirovnat k oné neuchopitelné a tajemné esenci, jenž tvoří naše myšlenky, vydává rozkazy a tvoří naši osobnost jako celek. Naštěstí z technického hlediska je software daleko jednodušší a jeho tvoření nepředstavuje žádnou záhadu. Pojďme se tedy podívat na jednotlivé části našeho projektu ať už z hlediska fyzického tak i programového.

6.1 Vývojové prostředí

6.1.1 Arduino IDE

Volně stažitelné vývojové prostředí, s kterým začíná téměř každý, kdo se zajímá o elektrotechniku a mikroprocesorovou techniku. Název sice napovídá, že se jedná o prostředí určené speciálně pro arduino, ale bezproblému je v něm možné programovat i další druhy desek, mezi které řadíme i desky typu ESP 32. Nespornou výhodou prostředí je velké množství dostupných knihoven a velice vstřícné programovací prostředí. Navíc je k dispozici pro nejčastější operační systémy (Windows, Linux, macOS), takže ho může využívat téměř každý. [18]

6.1.2 FamiStudio

FamiStudio je hudební editor cílený převážně na skladatele a nadšence zaobírající se vytvářením NES muziky. Studio má k dispozici rozsáhlé množství skladeb, jimiž je možné se inspirovat ve vytváření vlastní hudby a díky uživatelskému rozhraní máme k dispozici přístup hudebnímu zápisu daných skladeb a to ne pouze jako jednotného celku, ale máme přístup ke každému kanálu zvlášť díky čemuž můžeme efektivněji přepisovat skladby do našeho programu. V praxi tak získáme hudební podkres, do kterého hráč vyhrává jen hlavní linku. Tento postup byl také použit ve finální ověření hudebního nástroje. [19]

6.2. Mikroprocesory a periférie

V této části rozebíráme konkrétní elektronické komponenty, jenž budou zabudované do vnitřku nástroje

6.2.1 ESP-WROOM-32

Jedná se o výkonný mikroprocesor, jenž můžeme využít pro širokou škálu aplikací, zejména v oblasti IoT. Jeho velká přednost oproti svým předchůdcům, mezi které můžeme řadit například ESP8266, spočívá ve větším výkonu, v počtu vstupů, výstupů a lepším možnostem využití Wi-Fi. V rámci studia jsem měl možnost s tímto mikroprocesorem pracovat v předmětu aplikace mikroprocesorů a velice jsem si ho oblíbil pro jeho široké možnosti a dobrý uživatelský přístup. Což mě také vedlo k tomu abych ho využil i přesto, že většinu jeho periférií nevyužijeme. Tedy aspoň pro zatím.

Při návrhu se může snadno stát, že nás některá řešení nenapadnou či nemáme čas na prostudování jejich možností využití a z těchto důvodů je lepší už od začátku pracovat s mikrokontrolerem, který má široké množství funkcí. Například pokud bychom se rozhodli, že celý projekt postavíme na Arduinu a později bychom z nějakého důvodu chtěli přidat i možnost připojení na Wi-fi, bluetooth atd, bylo by potřeba dokoupit externí moduly, které to umožňují, což by stálo další peníze, bylo by potřeba nástroj rozebrat atd. Pokud bychom však už od začátku pracovali s ESP, jenž tyto funkce umožňuje, měly bychom o celou řadu problémů méně.

Navíc se jedná o mikrokontroler, jehož cena se pohybuje okolo 220 Kč. Což není velká cena a vzhledem k možnostem, které nabízí splňuje ono legendární přísloví: „Za málo peněz hodně muziky“. [20]



Obrázek 20: ESP32 Wroom [17]

6.2.2 VL53L0X

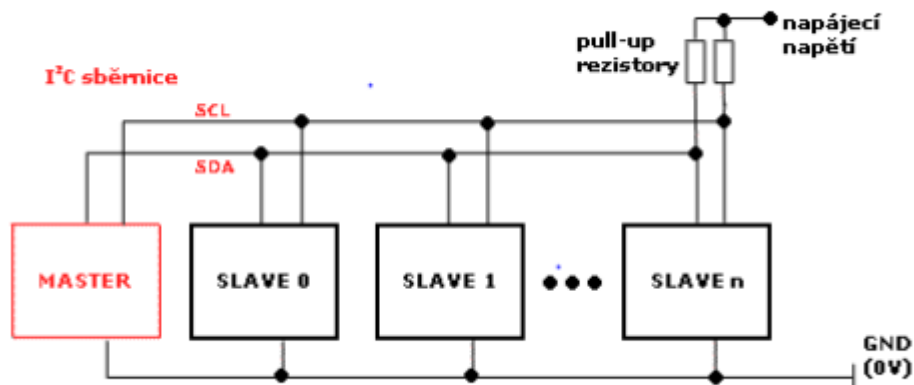
Senzor vzdálenosti založen na principu „Time of Flight“, což znamená, že určení vzdálenosti je založeno na časové prodlevě mezi odeslaným a zpětně přijatým laserovým paprskem. Jeho operační vzdálenost je mimo jiné závislá na povrchu, od kterého se paprsek odráží zpět a jsou velké rozdíly mezi bílým a tmavým povrchem, nicméně to nepředstavuje problém a experimentování s detekcí ruky prokázali, že pro použití je naprosto vyhovující. Při výběru konkrétního senzoru jsem se řídil cenou, přesností a počtem pinů, jenž bude jejich celkový počet zabírat. Senzor VL53L0X byl původně vybrán spíše jako experimentální model, na kterém jsem si chtěl jako první vyzkoušet na kolik je myšlenka realizovatelná a jaké chyby by se potencionálně mohli vyskytnout. Obzvláště jsem si nebyl jistý, zdali u snímačů umístěných od sebe do vzdálenosti 10 cm nedojde k jejich vzájemnému rušení. To se však ukázalo jako zbytečná obava a snímače při testech prokázali dostatečně dobré vlastnosti pro praktické použití. Navíc díky využití I2C sběrnice je možné nastavit SCL (Serial Clock line) a SDA(Serial Data line) pro všechny senzory společně. [21]



Obrázek 21: VL53L0X [21]

6.2.3 I2C Sběrnice

Sběrnice využívající modelu Master-Slave kde jedno zařízení (většinou mikrokontrolér) nastaveno jako Master a generuje hodinový signál (CLK). Ostatní připojená zařízení jsou v režimu Slave. Jeho obrovská výhoda spočívá v obousměrné komunikaci pouze na dvou vodičích, což nám v praxi ušetří velké množství pinů a výrazně zjednoduší celkové zapojení. A jak takový přenos probíhá? Každé zařízení Slave má definovanou svoji adresu. Konkrétní adresu každého typu zařízení je většinou možné dohledat v datasheetu. V případě, že máme zapojeno několik stejných čipů tak je nutné pro každý nastavit specifickou adresu. V okamžiku vysílání od Mastera zařízení přijímají data a podle nastavení adresy zjišťují, pro které konkrétní zařízení jsou data určena a jestli se jedná o čtení nebo o zápis.[22]



Obrázek 22: Model I2C sběrnice [22]

6.2.4 SN 76489

PSG čip vyrobený společností Texas Instruments byl navržen především pro použití v herních konzolích pro účel tvorby hudby a hudebních efektů, nicméně ho bylo možné najít i v domácích počítačích. Tento čip obsahuje 3 programovatelné generátory obdelníkového signálu a jednoho programovatelného generátoru šumu. Pro každý kanál je potřeba ještě nastavit hlasitost. V rámci praktické části bude použit jako generátor zvuku pro hudební nástroj. Čip ke správnému fungování generátorů potřebuje dodat externí hodinový signál, jenž dle manuálu činí 4Mhz.

Přesto, že doba pokročila a PSG čipy a hudba s nimi tvořená jsou spíše nostalgickou vzpomínkou na časy minulé, tak stále existuje početná fanouškovská komunita a skladatelé, jenž je stále využívají, či se alespoň inspirojí jejich zvukem a stále tvoří nové skladby. Je důležité si uvědomit, že audio výstup není sám o sobě dostatečně zesílený a pokud chceme hudbu poslouchat, tak musíme instalovat zesilovač. Záleží tedy zdali chceme mít reproduktory externí či zabudované. [23]



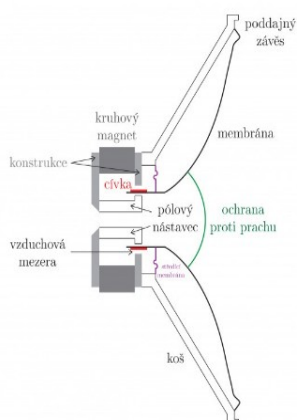
Obrázek 23: SN 76489 [23]

6.2.5 Krystalový oscilátor TFT680

Oscilátor využívá elektrostrikce (deformace krystalu pomocí napětí) k rozkmitání krystalu, který je nejčastěji z křemene, neboť se jedná o materiál s velice stabilními vlastnostmi a tedy stabilním kmitočtem. Vzhledem k tomu, že hudební nástroj bude určen pro vnitřní použití jsem se nemusel při výběru řídit provozní teplotou a specifikace zahrnovali pouze cenu a požadovanou frekvenci.[23]

6.2.6 Reprodukory

Nepostradatelnou součástí pro přehrání hudby z PSG čipu je zesilovač, nicméně zesílený signál musí jít do zařízení, jenž ho umožňuje přeměnit na zvuk, a to je samozřejmě reproduktor. S reproduktorem se setkal nepochybně každý, nicméně málokdo už ví, jak toto zařízení vlastně funguje po elektrické stránce. Základ tvoří magnet a cívka napojená na zesilovač. Cívka se nalézá ve vzduchové mezeře kde působí permanentní magnet. Průchodem střídavého proudu cívkou vzniká magnetické pole, na které pak působí magnetické pole permanentního magnetu. V závislosti na polaritě je pak cívka permanentním magnetem přitahována nebo naopak odpuzována. Na cívku je připevněná membrána, jenž je ovlivňována pohyby cívkou a v závislosti na pohybech. V závislosti na průchodu proudu cívkou tedy dochází k natahování a smršťování membrány. To má za následek vznik akustického tlaku, jenž se dále šíří v prostředí ve formě zvukové vlny. Jak bylo zmíněno tak audio výstup čipu SN 76489 potřebujeme zesílit pomocí zesilovače. Ten je integrovaný dnes už téměř ve všech reprosoustavách, což znamená, že pokud připojíme výstup na reprosoustavu, tak signál bude zesílen a dojde k přehrávání hudby. Samozřejmě je nutné dokoupit a zapojit redukci. V mém případě se jednalo o redukci jack 3.5 mm. Pokud bychom nechtěli být závislí na externích reproduktorech, a chtěli bychom mít interní reproduktory (zabudované dovnitř), je možné dokoupit samostatné zesilovače a na ně potom přepojit reproduktory. Nicméně pokud započítáme dopravu součástky, její samostatnou cenu, DPH a naši práci při zapojení, tak vyjde levněji si zajít do nejbližšího obchodu a koupit si levnou reprosoustavu, která odvede práci mnohem lépe a za více méně stejnou cenu. [25]

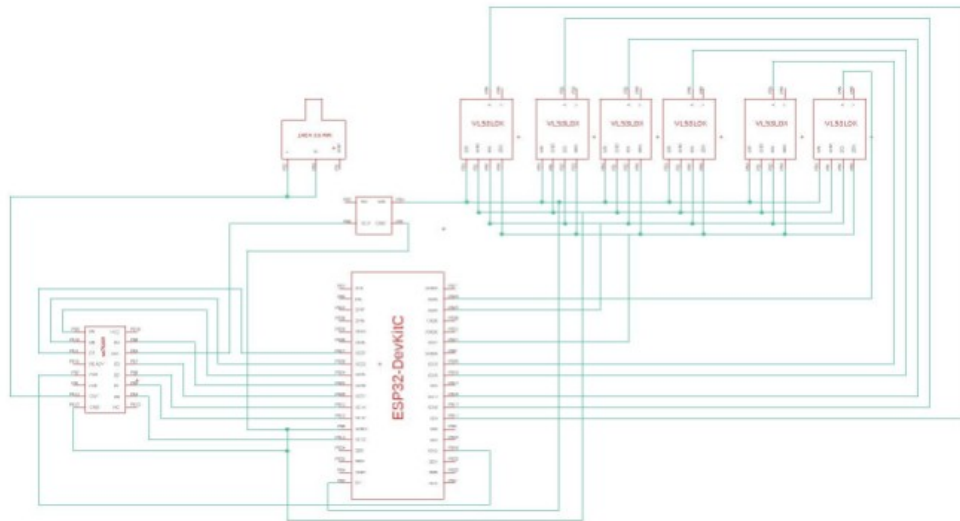


Obrázek 24: Konstrukce reproduktoru [25]

7 Zprovoznění

Z vyzkoušených metod se jako nejlepší konstrukční vzor ukázal model bezrámové laserové harfy. Nicméně druh funkce bylo nutné poněkud upravit. Místo toho abychom měli jeden zdroj laserového paprsku, který se „rozdělí“ do několika dalších paprsků, tak používáme šest laserových senzorů vzdálenosti. Každý senzor má programově přiřazeny čtyři vzdálenosti, po jejichž přerušení vydá harfa zvuk. Tyto vzdálenosti jsou rozděleny po deseti centimetrech, tedy každých deset centimetrů vydá harfa jiný tón. Jednotlivým senzorům jsou samozřejmě přiřazeny jiné tóny. Dostáváme tedy pokrytí 24 tónů, což znamená, že jsme schopni na našem nástroji zahrát dvě oktávy.

7.1 Schéma zapojení



Obrázek 25: Schéma zapojení

Základem je mikroprocesor ESP 32, na nějž jsou připojeny snímače vzdálenosti VL53L0X a PSG chip SN 76489. Snímače jsou umístěné na desce v rozestupu 10 cm od sebe. Tato vzdálenost se ukázala vyhovující jak z hlediska senzorů (nedochází ke vzájemnému rušení), tak i pro hráče samotného. Umožňuje totiž přerušování jednotlivých senzorů bez nebezpečí aktivace sousedících senzorů. V okamžiku přerušování dojde k vyslání předem definovaných bitů na vstupy SN76489. Jak můžeme vidět na schemátu zapojení, tak chip je napájen z mikroprocesoru a přijímá externí hodinový signál z oscilátoru. Po přivedení příslušných bitů dojde ke generaci zvukového signálu, který je vyveden na pin 7 (Audio Out). Odtud signál vedeme na konektor. Na tento konektor potom připojíme externí reproduktory obsahující zesilovač a nic nám nebrání v možnosti hraní.

Z hlediska softwaru nejprve inicializujeme jednotlivé senzory a přiřadíme jim unikátní adresy. Tento krok je nutný, neboť senzory jsou stejného typu a mají stejné defaultní adresy. Poté nadefinujeme jednotlivé piny, ke kterým senzory a PSG čip připojíme. Ve smyčce máme definované vzdálenosti, při kterých vyvoláme cyklus while. Tělo cyklu obsahuje příkaz posílající příslušné byty do PSG čipu, a příkaz, který na konci cyklu čte, jestli nedošlo ke změně vzdálenosti (vyvolané uživatelem). Pokud k ni došlo, dojde k ukončení cyklu a k přehrávání jiného tónu.

7.2 Programování SN 76489

Pro naprogramování čipu SN76489 je možné najít specifické knihovny, nicméně jsem se rozhodl, že čip budu programovat zápisem bitů na jednotlivé adresy. To samozřejmě vytváří otázku ohledně generování specifických tónů, tedy jak například dosáhneme toho, aby na kanálu jedna hrál tón C4. Nejdříve musíme využít vzorec uvedený v datasheetu tedy:

$$D0-D7 = clk/32*f$$

$$clk = \text{frekvence oscilátoru}$$

$$f = \text{frekvence tónu}$$

Pokud bychom tedy chtěli nastavit PSG chip aby hrál tón C4, tak budeme potřebovat znát jeho frekvenci. Ta se dá vyhledat velice jednoduše na internetu, nicméně Vám toto trápení ušetříme. Tónu C4 náleží frekvence 262Hz. Jak je ze vzorce patrné, potřebujeme ještě znát frekvenci oscilátoru, jenž v našem případě činí 4Mhz. Údaje dosadíme do vzorce

$$D0-D7 = 4000000 / (32*262) = 477$$

Výsledek 477 samozřejmě nic v této formě neřekne a je nutné ho převést do dvojkové soustavy.

$$477 = 0001\ 1101\ 1101$$

První byte určuje především registr, do kterého zapisujeme. Jak je vysvětleno na obrázku číslo 27, tak registr určuje na jakém kanálu budeme tón hrát a umožňuje nám nastavit hlasitost daného kanálu a šum. V našem případě budeme používat kanál číslo jedna. To znamená, že první čtyři bity budou 1000. Druhou polovinu prvního bytu tvoří už zápis čísla 477, které jsme převedli do binární podoby. Zde je nutno pamatovat na to, že v rámci zápisu binárních čísel postupujeme odzadu!

$$\text{První byte- } 1000\ 1101$$

$$\text{Druhý byte- } 0001\ 1101$$

V posledním kroku převedeme binární číslo do hexadecimální soustavy.

$$1000\ 1101 = 8D$$

$$0001\ 1101 = 1D$$

Pro jasnější představu pro jistotu uvedu ještě jeden příklad, v němž se snažíme vytvořit na prvním kanálu tón D4-294 Hz

$$D0-D7 = 4000000/32*294 = 425$$

$$425 = 0001\ 1010\ 1001$$

$$\text{První Byte} = 1000\ 1001 = 89$$

$$\text{Druhý Byte} = 0001\ 1010 = 1A$$

Na obrázku níže uvádím příklad využitých frekvencí tónu pro první kanál [22]

Pvní kanál	16
C3	8A 3B
Cis3	83 38
D3	82 35
Dis3	81 32
E3	85 2F
F3	8A 2C
Fis3	83 2A
G3	8D 27
Gis3	88 25
A3	88 23
Ais3	88 21
B3	8A 1F
C4	8D 1D
Cis4	83 1C
D4	89 1A
Dis4	81 19
E4	8A 17
F4	86 16

Obrázek 26: Tabulka tónů a jejich zápisu v hexadecimální soustavě

Spočítání první tabulky zabere trochu času, ale dobrá zpráva je, že z ní potom můžeme velice snadno dopočítat všechny ostatní kanály, protože jediné co měníme jsou první čtyři bity, které jsou navíc pro celý rozsah stejné. Nesmíme také zapomenout nastavit pro každý kanál hlasitost. To uděláme stejně jako v případě počítání adres pro zahrání jednotlivých tónů. Konkrétní byty pro zapsání jsou uvedeny v datasheetu. [22]

Čerpání z oficiálního datasheetu se ukázalo jako lehce problematické, neboť některé údaje jsou zde zapsány špatně. Například na obrázku „Adresy registrů“ si můžeme povšimnout, že adresa pro první frekvenční kanál a adresa pro jeho nastavení hlasitosti (Tone 1 Attenuation) mají stejnou adresu. Ve skutečnosti adresa pro nastavení hlasitosti má adresu 001.

6. DATA FORMATS

The formats required to transfer data are shown below.

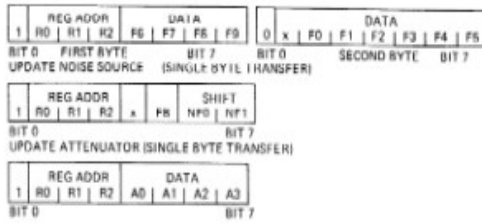
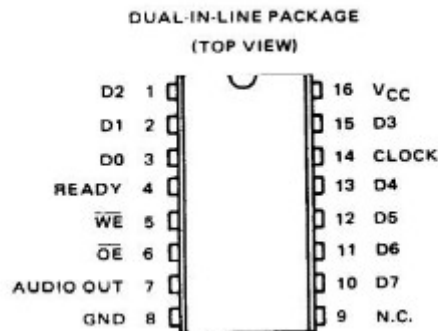


Table 4: REGISTER ADDRESS FIELD

R0	R1	R2	DESTINATION CONTROL REGISTER
0	0	0	Tone 1 Frequency
0	0	0	Tone 1 Attenuation
0	1	0	Tone 2 Frequency
0	1	1	Tone 2 Attenuation
1	0	0	Tone 3 Frequency
1	0	1	Tone 3 Attenuation
1	1	0	Noise Control
1	1	1	Noise Attenuation

Obrázek 27: Adresy registrů [23]



Obrázek 28: Umístění pinů v datasheetu [23]

8 Prototyp finálního výrobku

V této fázi bychom mohli označit náš hudební nástroj za funkční, neboť jsme schopni pouhými gesty ovládat nástroj a vydávat zvuk. Nicméně co kdybychom chtěli zahrát skladbu, která využívá všech kanálů PSG chipu? V případě SN 76489 by se tedy jednalo o tři kanály z nichž čtvrtý by ovládal hráč. Díky dvouvláknovému programování by bylo možné nastavit jedno vlákno tak aby přehrávalo určitý hudební doprovod, a na druhém vláknu by běžel program umožňující ovládání bezdotykových senzorů, které by umožňovali hráči tvořit vyhrávky do hudebního doprovodu. Naprogramujeme tedy podkres, který chceme aby se opakoval a vložíme jej do smyčky. Tímto způsobem jsme schopni hrát komplexnější skladby.

Před finálním zasazením a instalováním všech komponent do finální podoby bylo nutné udělat kompletní ověření funkce. K tomu posloužila primitivní konstrukce (lišta na kabely) upravená tak aby na ni bylo možné instalovat senzory vzdálenosti, napojené na ESP 32. Také bylo nutné se ujistit, zdali se nebudou vodiče navzájem ovlivňovat a vytvářet rušení. Tato obava se ukázala jako zbytečná. Vše fungovalo tak jak mělo a poslední co zbývalo bylo instalování všech součástí do finální schránky.



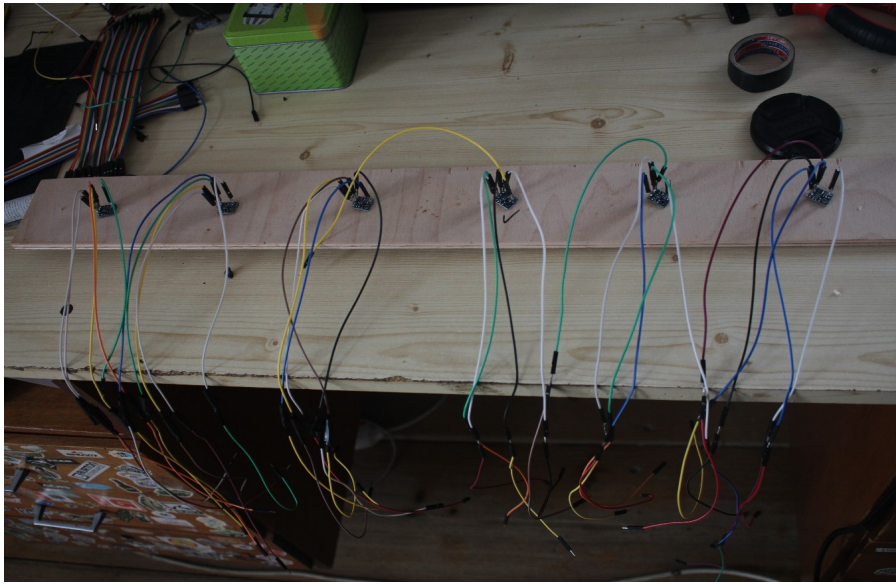
Obrázek 29: Prototyp virtuálního hudebního nástroje

9 Finální výrobek

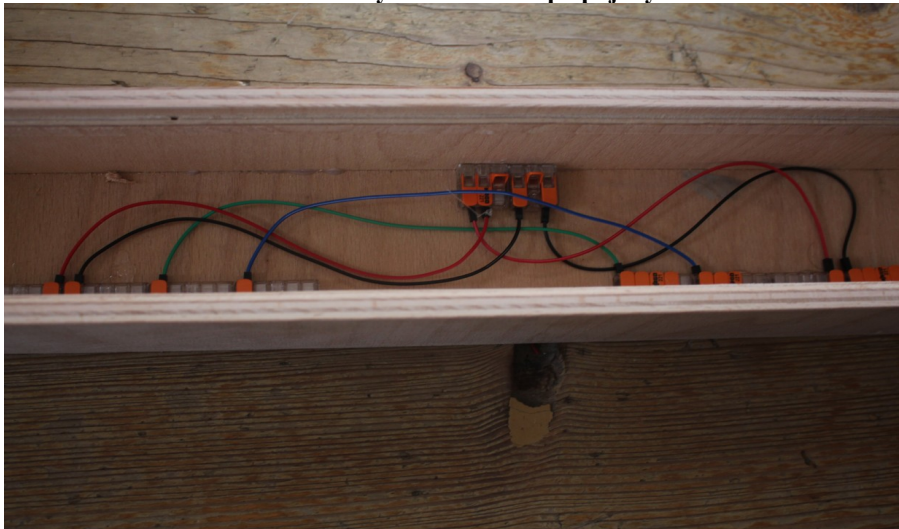
Po ověření funkčnosti všech částí na prototypu bylo potřeba vše zasadit do těla hudebního nástroje. Tato fáze obnášela vycentrování senzorů vzdálenosti tak, aby nedocházelo ke kolizím s dalšími senzory nebo s deskou hudebního nástroje. Jak můžeme vidět na obrázcích níže, tak senzory jsou zapuštěné, což jednak slouží jako ochrana proti jejich poškození, tak i jako pohledově hezký prvek. Propojení vodičů v rámci I2C sběrnice a uzlů pro napětí a zem je realizováno pomocí wago svorek. Horní deska, do které jsou senzory zapuštěné není k tělu nástroje připojena pomocí šroubů či jiných prvků, ale díky přesnému provedení drží na místě sama o sobě, což v případě závad umožňuje snadný přístup ke všem hardwarovým prvkům. V prvních fázích pro její vytažení sloužil pouze vrut (viz fotodokumentace), nicméně po otestování a všech finálních procedurách byl nahrazen estetičtěji vypadajícím madlem.



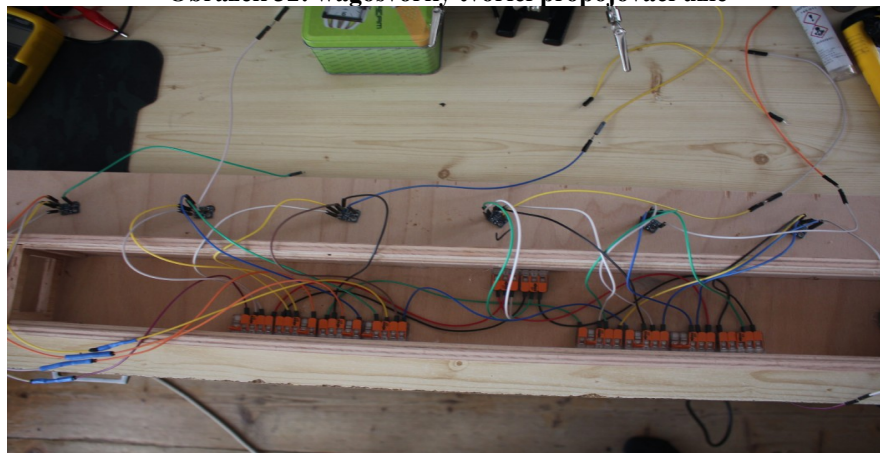
Obrázek 30: Tělo nástroje



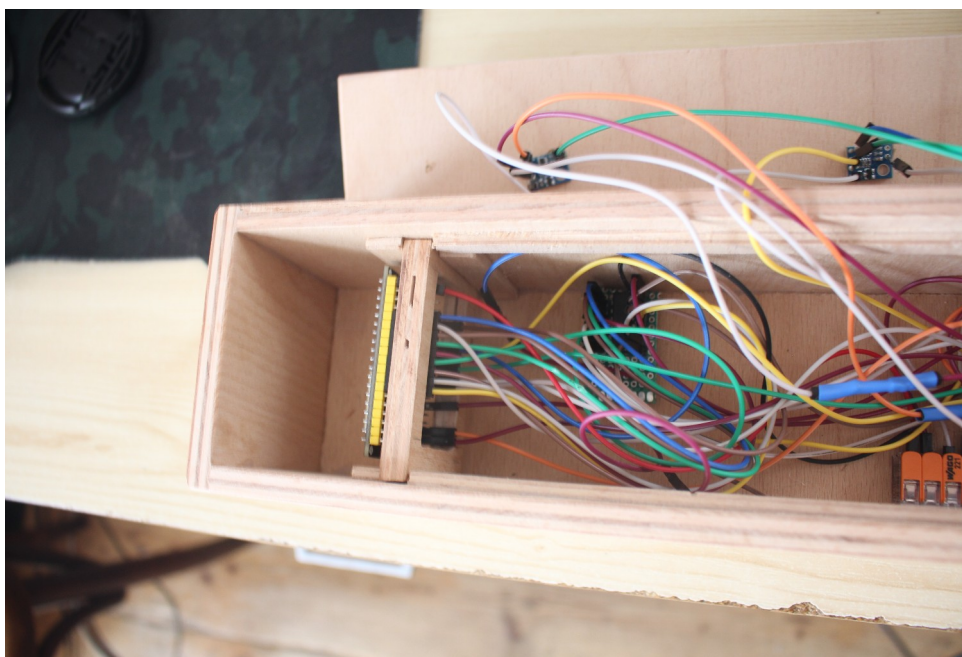
Obrázek 31: Senzory vzdálenosti s připojenými vodiči



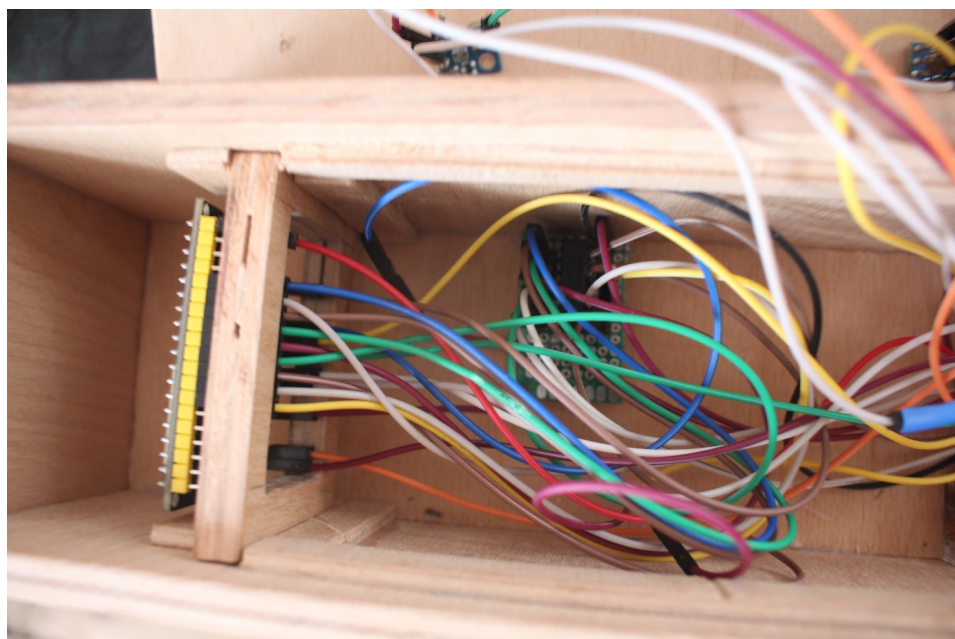
Obrázek 32: wago svorky tvořící propojovací uzel



Obrázek 33: Konstrukce je vytvořena tak aby bylo možné vrchní díl oddělit bez obav z vytrhnutí vodičů



Obrázek 34: Mikroprocesor s připojenými vodiči



Obrázek 35: PSG připojený k mikroprocesoru



Obrázek 36: Jack pro připojení reproduktorů

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo sestavení elektronického hudebního nástroje, jenž se ovládá bezdotykově.

V teoretické části nejdříve představujeme čtenáři možné konstrukční vzory, kterými se inspirujeme při navrhování výrobku. Dále se věnujeme možnostem bezdotykových senzorů a systémů, které by umožnili nahradit u vybraného nástroje strunu, klapky, klávesy či jakékoliv další prvky, které hráč ovládá, aby nástroj tvořil hudbu. Poté čtenáře seznamujeme se základy hudební teorie, díky které porozumí základním nárokům na hudební nástroj, odborným termínům a vlastnostem zvuku. Poslední kapitola teoretické části je zasvěcena možnostem generování zvuku.

V praktické části volíme konkrétní řešení a seznamujeme čtenáře s hardwarem a softwarem, jenž budeme používat. Jak jistě víme, tak při návrhu téměř jakéhokoliv projektu zvažujeme možná řešení, testujeme jak by fungovali a čas od času nesplní naše požadavky či se ukáží jako méně účinná, než jiná. První kapitolu praktické části věnuji těmto slepým uličkám, které se ukázali jako méně účinné či z praktického hlediska nepoužitelné. Dále vysvětlujeme, jak spolu v rámci programu jednotlivé periférie komunikují.

Výsledné zapojení a jeho funkci ověřujeme na jednoduchém prototypu kde potvrzujeme, že vše funguje tak jak má. Po ověření funkce na prototypu následuje vsazení všech komponent do finálního pouzdra.

Výsledkem bakalářské práce je tedy hudební nástroj vzhledově vycházející z podoby bezrámové laserové harfy, jenž využívá laserových senzorů vzdálenosti k nahrazení mechanických, či jinak konstrukčně řešených systémů ke tvoření zvuku. Jako zdroj zvuku je v práci použit programovatelný hudební generátor (PSG) SN76489 od firmy Texas Instrument napojený na mikroprocesor ESP-WROOM-32. Nástroj v závislosti na drobných programových úpravách dokáže hrát jak jednoduché, tak i složitější hudební melodie. Jednotlivé ukázky jsou společně se softwarem nahrány v příloze.

Použitá literatura

[1] Světelné závory. Infrasensor [online]. Vřesová 571, Horní Jirčany 252 42 Jesenice u Prahy: infrasensor [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.infrasensor.cz/telcosensors/svetelne-zavory.html>

[2] Time-of-Flight principle. In: Terabee [online]. Saint-Genis-Pouilly [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.terabee.com/time-of-flight-principle/>

[3] ANTONÍN, Vojáček. Ultrazvukové senzory přiblížení - funkce, provedení, použití. In: Automatizace.hw [online]. 2017 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/ultrazvukove-senzory-priblizeni-funkce-provedeni-pouziti.html>

[4] LINE CROSSING. In: Megapixall [online]. 8950 SW 74th Ct 2201 a 78, Miami, FL 33156: megapixall [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.megapixall.com/camera-analytics/line-crossing.html>

[5] Line Crossing (Tripwire) With The Admiral And Imperial NVRs. In: Getscw [online]. [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.getscw.com/knowledge-base/admiral-video-analytics/line-crossing>

[6] Domáci-theremin. Hwlibre [online]. 2019 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.hwlibre.com/theremin-casero/>

[7] PETR, Holý. Laserová harfa. nám. Čs. legií 565, 530 02 Pardubice I, 2020. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Jiří Roleček.

[8] Kytara. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kytara>

[9] TOMÁŠ, Nový. Těremínka – bezdotykový hudební nástroj [online]. Sedláčkova 214, 301 00 Plzeň 3, 2015 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18868/1/Bakalarska%20prace_Tomas

%20Novy_2015.pdf. Bakalářská práce. Západočeská Univerzita v Plzni.

[10] Co je to tón a jak ho poznáme?. In: Hudebnilekce [online]. Eliášova 479/15, Praha 6, 160 00.: Hudební lekce [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://hudebnilekce.cz/wp-content/uploads/2016/08/1A-v%C3%BDukov%C3%A9-materi%C3%A1ly.pdf>

[11] Online Tone Generator. In: Szynalski [online]. [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.szynalski.com/tone-generator/>

[12] Metody zvukové syntézy: JAK VYTVOŘIT ZVUK. In: Elektronicka-hudba.telotone [online]. 2013 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <http://elektronicka-hudba.telotone.cz/clanky/metody-zvukove-syntezy>

[13] URBAN, Ondřej. Instrumentář elektroakustického zvuku. V Praze: Akademie múzických umění, 2007. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-115-5.

[14] Sound with ESP32 – I2S Protocol. In: Dronebotworkshop [online]. dronebotworkshop, 2022 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://dronebotworkshop.com/esp32-i2s/>

[15] Kontinuumlab [online]. kontinuumlab, 2022 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.kontinuumlab.com/>

[16] Zvukové čipy osmibitové éry: dokončení. In: Root [online]. Milady Horákové 116/109 160 00 Praha 6: root, 2009, 2009 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/zvukove-cipy-osmibitove-ery-dokonceni/>

[17] Laskakit [online]. Na Jamách 1472, Rychnov nad Kněžnou 516 01: laskakit, 2016 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/>

[18] Arduino IDE [online]. [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/software>

- [19] FamiStudio. Famistudio [online]. 2020 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://famistudio.org/>
- [20] Vývojová deska ESP32 2,4GHz Dual-Mode Wi-Fi + Bluetooth modul antény. In: Dratek [online]. Termesivy 41, 58001 Havlíčkův Brod: dratek [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/1581-esp-32s-esp32-esp8266-development-board-2.4ghz-dual-mode-wifi-bluetooth-antenna-module.html>
- [21] VL53L0X. In: Laskakit [online]. Plan-les-Ouates: STMicroelectronics, 2016 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/user/related_files/vl53l0x.pdf
- [22] Stručný popis sběrnice I2C. In: Vyvoj.hw [online]. Formanská 296, 149 00 Praha 4 - Kateřinky: HW server, 2000 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbernice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eeeprom-24lc256>
- [23] SN76489. In: Segaretro [online]. Japan: Sega Networks, 2023 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://segaretro.org/SN76489>
- [24] Oscilátory. In: Sse-najizdarne [online]. Na Jízdárně 30, 702 00 Ostrava [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: https://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/studijni_materialy/ov/uc_text_oscil%C3%A1tory.pdf
- [25] VYŠINSKÝ, Tomáš. Zvuková technika a elektroakustika. In: Vovcr [online]. Technická 2 160 00 Praha 6 - Dejvice, 2020 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.vovcr.cz/odz/tech/586/page00.html>
- [26] BERKA, Štěpán. Elektrotechnická schémata a zapojení. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN ISBN978-80-7300-229-9.

