



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

ELEKTRONICKÝ XYLOFON

ELECTRONIC XYLOPHONE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominika Weyrová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Marada, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Studentka: **Dominika Weyrová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Marada, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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:

Elektronický Xylofon

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vhodnou úlohou k propagačním účelům může být elektronický xylofon, který lze řídit například programovatelným automatem nebo elektronikou na bázi Arduino. Práce se bude zabývat návrhem a realizací elektronického xylofonu, který bude řízen elektronikou na bázi Arduino nebo zvoleným programovatelným automatem.

Cíle bakalářské práce:

1. Seznamte se s realizacemi elektronických xylofonů na internetu.
2. Proveďte konstrukční návrh elektronického xylofonu.
3. Zvolte vhodnou elektroniku pro řízení na bázi Arduino nebo PLC.
4. Navržené řešení realizujte, demonstруйте jeho funkčnost a zhodnoťte výsledky.

Seznam literatury:

NerdKits, http://www.nerdkits.com/videos/robotic_xylophone, přístup 22. listopadu 2015.

Dallas Personal Robotics Group, Dprg, <http://www.dprg.org/projects/2009-08a>, přístup 22. listopadu 2015.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a realizovat elektronický xylofon, který bude řízený elektronikou na bázi Arduino nebo vhodně zvoleným programovatelným automatem. Xylofon bude vhodný zejména k propagačním účelům.

ABSTRACT

The aim of this work is to design and implement an electronic xylophone, which will be driven by Arduino or appropriately chosen programmable controller. Xylophone will be particularly suitable for promotional purposes.

KLÍČOVÁ SLOVA

Xylofon, metalofon, posuvný registr, tranzistorové pole, solenoid, prut, plošný spoj, Arduino, Arduino Nano

KEYWORDS

Xylophone, metalophone, shift register, transistor array, solenoid, rod, DPS, Arduino, Arduino Nano.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

WEYROVÁ, D. *Elektronický Xylofon*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 34 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Marada, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat Ing. Tomáši Maradovi za odborné vedení mé bakalářské práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením Ing. Tomáše Marady, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25.5.2016

.....

Weyrová Dominika

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	REALIZACE ELEKTRONICKÝCH XYLOFONŮ	17
3	ELEKTRONICKÝ XYLOFON	19
3.1	Volba vhodného nástroje.....	19
3.1.1	Původ xylofonu	19
3.1.2	Akustika prutů.....	19
3.1.3	Výroba xylofonu	20
3.2	Řízení elektronického xylofonu	21
3.2.1	Vývojový kit na bázi Arduino.....	21
4	REALIZACE	23
4.1.1	ZAS GW 20+14 <i>alt/soprán</i>	23
4.1.2	Elektronický obvod	23
4.1.3	Výroba plošného spoje.....	26
4.1.4	Konstrukce	27
4.1.5	Zdrojový kód.....	28
4.1.6	Možnosti šetření paměti	30
5	ZÁVĚR.....	31
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	33

1 ÚVOD

Xylofon je úderný hudební nástroj skládající se ze soustavy laděných dřívků (kovových plíšků v případě metalofonu), tón vzniká úderem paličky do daného dřívka. Tento nástroj je vhodný předmět pro demonstraci možností řízení mechanických pohonů obvodu například programovatelným automatem nebo elektronikou na bázi Arduino.

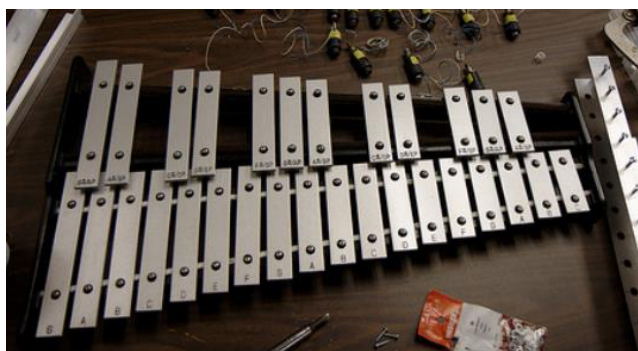
Cílem této bakalářské práce je vytvořit elektronickou soustavu schopnou zahrát libovolnou polyfonní melodii, práce se bude zabývat návrhem a realizací elektronického xylofonu. Problematika řešení spočívá ve volbě či případné výrobě vhodného nástroje, elektroniky a řízení, mechanické části a celkové konstrukci. Možnost využití elektronického xylofonu jsou například propagační účely, možné uplatnění je při dnech otevřených dveří na Fakultě strojního inženýrství VUT Brno.

V bakalářské práci dojde k porovnání již hotových realizací elektronického xylofonu, dále naváže teorie zabývající se původem xylofonu, akustikou prutů se dvěma podpěrami, možnostmi výroby nástroje a volbě vhodného řízení. Poté následuje návrh vlastní realizace, na závěr shrnutí výsledků.

2 REALIZACE ELEKTRONICKÝCH XYLOFONŮ

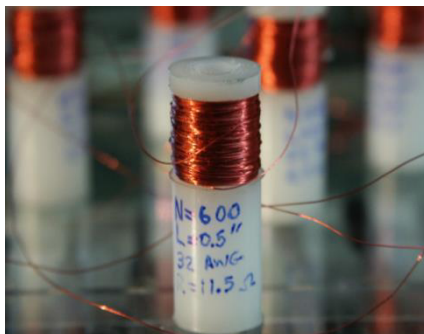
Elektronický xylofon je poměrně častý objekt realizace, na internetu lze najít velké množství různých způsobů řešení. Následuje porovnání dvou různých realizací.

Dvojice studentů z Massachusettského technologického institutu zveřejnila na svém webu NerdKits.com svoji realizaci elektronického xylofonu. Nástroj je tvořen plíšky z hliníku o totožné šířce a tloušťce nařezanými do odlišných délek pro získání potřebných frekvencí. Rozsah stupnice je osm tónů (C^6 - C^7), tedy stupnice C dur. Ed Paradis a Steve Rainwater z Dallas Personal Robotics Group (dále DPRG) jako nástroj použili studentský set Pearl PK-600 2.5 Octave (obrázek 1) s chromatickou stupnicí o třiceti tónech (G^5 - C^8). Nástroj z NerdKits má tedy oproti nástroji DPRG mnohonásobně nižší náklady, avšak jeho použitelnost pro libovolnou skladbu není možná kvůli nízkému rozsahu a chybějícím půltónům. [1][2]



Obr. 1) Pearl PK-600 2.5 Octave [2]

Mechanickou část soustavy tvoří u obou xylofonů solenoidy, na každý tón je použit právě jeden solenoid, který při přivedeném napětí udeří do daného plíšku. Tvůrci z DPRG opět použili hotové součástky, a to 12V push-type solenoidy které po menších úpravách opatřili také pružinou, která po udeření zrychlí vrácení hlavy solenoidu do původní pozice. Studenti z NerdKits vytvořili solenoidy vlastní (obrázek 2). Kostru jejich solenoidu tvoří trubka z polyethylenu s vysokou hustotou nařezaná na válce shodných délek s výřezem pro namotání měděného drátu. Pohyblivé jádro je opatřeno permanentním magnetem z neodymu pro zvýšení magnetických účinků, hlava solenoidu se vrací do původní pozice působením gravitačních sil, jako ochrana před proudem vznikajícím při navrácení hlavy slouží paralelně zapojené diody, které proud spotřebují. Zde je opět patrné, že výhodou vyrobených solenoidů jsou nízké náklady. [1][2]



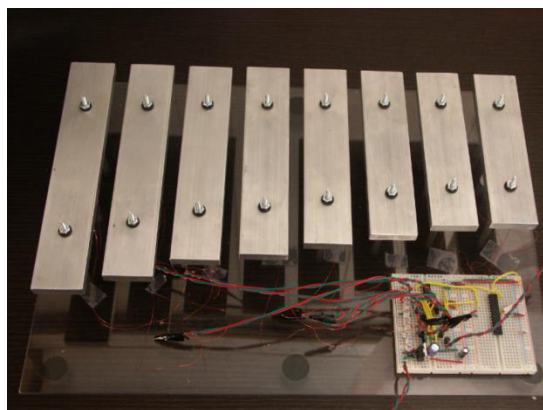
Obr. 2) NerdKits solenoid [1]

V NerdKits byly použity tranzistory typu MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), což jsou unipolární tranzistory řízené elektrickým polem. V obvodu slouží jako přepínač ovládaný mikrokontrolerem. Přidaná dioda spotřebuje proud, který vzniká při navrácení hlavy solenoidu do původní pozice. V DPRG jako vhodné řešení zvolili bipolární NPN tranzistorové pole. [1][2]

Řízení probíhá v obou případech pomocí mikrokontroleru ATmega od Atmelu, kdy DPRG používá vývojovou platformu Arduino Mega 2560 založenou na mikrokontroleru ATmega2560, jehož součástí je mimo jiné 54 digitálních vstupně-výstupních pinů, USB konektor a napájecí konektor. Na Arduino byly přidány MIDI porty, které umožňují ovládání xylofonu pomocí hudebního softwaru. Oproti tomu NerdKits používá vlastní platformu na bázi mikrokontroleru ATmega168 obsahující například USB konektor, napájecí konektor pro baterie a regulátor napětí. Pro rozšíření počtu výstupů je použit 8 bitový posuvný registr. [1][2]

V NerdKits probíhá napájení 9V adaptérem stejnosměrného proudu, při spuštění solenoidu může v obvodu dojít k snížení napětí, což může způsobit zastavení mikrokontroleru, případně poškození paměti, proto je napětí korigováno pomocí diody a elektrolytického kondenzátoru. [1]

DPRG využil k naprogramování kitu standardní vývojové prostředí Arduina. Software čte MIDI příkazy vycházející z MIDI portu, směřuje každý MIDI tón na správný digitální port a spouští připojený solenoid na 10ms. MIDI příkazy jsou posílány z notebooku s operačním systémem Linux, kde je možno programovat v reálném čase hudební programy s MIDI výstupem použitím programovacího jazyka Princeton's ChucK. Vzniká tak plně autonomní xylofon ovládaný počítačem. Zdrojový kód NerdKids xylofonu je napsán v jazyce C, obsahuje předdefinovanou sadu melodií uloženou přímo v paměti mikrokontroleru. [1][2]



Obr. 3) NerdKits celková realizace [1]

3 ELEKTRONICKÝ XYLOFON

K realizaci elektronického xylofonu je potřeba vhodný nástroj, konstrukce na mechanickou část obvodu, elektronický obvod a vhodné řízení.

3.1 Volba vhodného nástroje

Při volbě vhodného nástroje se nabízejí dvě řešení, a to výroba vlastního nástroje či jeho zakoupení. Výroba xylofonu je sice levná varianta, avšak výroba kvalitního nástroje je poměrně náročná, jelikož při nevhodné volbě materiálu, nepřesných rozměrech požadovaného prutu a nepřesném umístění uzlů vzniká nekvalitní tlumený zvuk. Zakoupení xylofonu představuje s dnešní nabídkou na trhu rychlé a poměrně výhodné řešení, kdy menší metalofony s 20 tóny chromatické stupnice pro pokročilejší muzikanty lze zakoupit za méně než 1000 Kč.

3.1.1 Původ xylofonu

Ačkoliv je xylofon jako nástroj hojně používán i dnes, jeho jednodušší verzi vytvořil již primitivní člověk. Nástroj se skládá z dřevěných destiček, každá z nich je podepřena ve dvou bodech – uzlech vibrace. Tón vznikne, když hudebník udeří paličkou do příčné destičky. Původ slova je z řeckého *xýlon*, v překladu „dřevo“, xylofonem bývá často označován nástroj z kovových destiček, přesněji *metalofon* nebo *zvonkohra*, v Česku výraz *xylofon* zdomácněl i pro nedřevěné nástroje. [5]

Metalofony, k jejichž vzniku došlo až při rozvoji zpracování bronzu, vznikly jako sofistikovanější verze nástroje. Jejich původ nesahá do pozdější doby než -900 n. l. Plíšky nástroje jsou umístěny na dřevěném rezonančním boxu. [5]

3.1.2 Akustika prutů

Prutem zde uvažuji těleso podlouhlého tvaru a jednotného materiálu na koncích oříznuté v rovinách kolmých k podélné ose tělesa, na níž leží také středy setrvačnosti příčných řezů.

V prutech probíhají tři typy vibrací:

- Podélné
- Torzní
- Laterální

Podélné vibrace jsou takové, při nichž podélná osa zůstává nehybná a příčné řezy vibrují tam a zpět ve směru kolmém k jejich rovinám. Hybná síla vzniká odporem prutu k tahu a tlaku.

Při laterálním kmitání jsou periodické časy nezávislé na tloušťce prutu ve směru kolmém k rovině ohybu, v tomto případě se ale hybná síla, konkrétně odpor k ohybu, zvyšuje rychleji než tuhost v této rovině, a tudíž zvýšení tuhosti je doprovázeno zvyšující se intenzitou vibrací.

V případě podélných a laterálních vibrací jsou důležitými mechanickými parametry hustota materiálu a hodnota Youngova modulu pružnosti. Pro malá stlačení (natažení) platí Hookův zákon, podle něž se napětí mění v závislosti na natažení ϵ .

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

Kde Δl značí rozdíl výsledné délky a původní délky a l původní délku.

Dále platí:

$$T = q\varepsilon \quad (2)$$

Kde q značí Youngův modul pružnosti a T tlak nutný k vytvoření daného natažení.

Torzní vibrace se odvíjejí navíc podle dalšího parametru elasticity μ . [6]

3.1.3 Výroba xylofonu

Faktory ovlivňující frekvenci vibrací prutu jsou:

- Hustota
- Pružnost
- Tloušťka
- Délka

Prut s vyšší hustotou bude vibrovat na nižší frekvenci, protože je zde více hmoty bránící zrychlení, když se prut vrací z krajní polohy zpět. S pružností materiálu klesá frekvence, na které prut vibruje. Tenčí prut vibruje na nižší frekvenci z důvodu menší tuhosti. S rostoucí délkou prutu klesá frekvence z důvodu větší vzdálenosti, kterou musí vlna překonat. Proměnlivost frekvence v závislosti na délce je nejvhodnější vlastnost využitelná k výrobě prutů o dané frekvenci. [1][6]

Pro prut o dané frekvenci f a délce L platí:

$$f = \frac{k}{L^2} \quad (3)$$

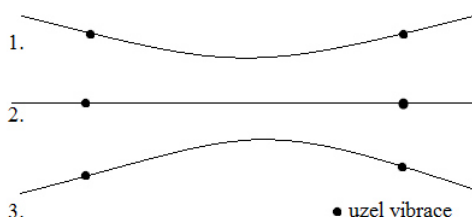
Dále pro dva pruty shodné šířky a tloušťky a nestejně délky L_1 a L_2 pro jejich frekvence:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{L_2^2}{L_1^2} \quad (4)$$

Při změření frekvence jednoho prutu je tedy možné dopočítat potřebné délky pro ostatní tóny.

$$L_2 = L_1 \sqrt{\frac{f_1}{f_2}} \quad (5)$$

Důležitým prvkem konstrukce je umístění podpěr do tzv. „uzlů“ vibrací – místa, kde dochází k nejmenšímu pohybu (teoreticky nulovému, obrázek 4), při vibracích tedy nebude docházet k tlumení zvuku o podpěry. U prutu se dvěma podpěrami je toto místo přibližně 22,4% od okrajů délky prutu. [1][6]



Obr. 4) Kmitání prutu

3.2 Řízení elektronického xylofonu

Řízení může probíhat například pomocí PLC (Programmable Logical Automat) či vývojové platformy. Dále bude pojednáváno o vývojovém kitu na bázi Arduino.

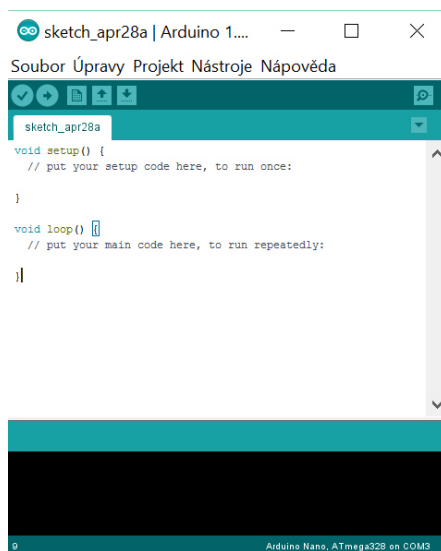
3.2.1 Vývojový kit na bázi Arduino

Dnešní trh vývojových platform nabízí širokou škálu desek a čipů, jako jsou mimo jiné samostatné čipy, které lze programovat za použití pouhého sériového kabelu, dále pak výkonné platformy obsahující množství přidaných komponentů. Zřejmě nejrozšířenější platformou je Arduino. Arduino je open-source (otevřený software) platforma založená na uživatelsky přístupném hardwaru a softwaru. Nabídka začíná u jednodušších méně výkonných desek a končí u obsáhlých platform obsahujících USB, HDMI, Ethernet či audio porty. [3][4]

První Arduino vzniklo v roce 2005 v italském Ivrea Interaction Design Institute jako jednoduchý a levný vývojový set pro studenty bez předchozích zkušeností s programováním a elektrotechnikou, kde se také uchytilo, a tak se jej tvůrci rozhodli poskytnout celému světu. Vznikla tak rozsáhlá komunita studentů, nadšenců i profesionálních programátorů, kteří sdílí své projekty a knihovny open-source programovacího prostředí Arduino. [3][4]

Výhoda Arduino je relativně nízká cena oproti ostatním vývojovým platformám. Přehledné a jednoduché programovací prostředí Arduino Software IDE (obrázek 5) je na rozdíl od běžných mikrokontrolerových systémů kompatibilní kromě operačního systému Windows také s Linuxem a Macintosh OSX. Open-source software a hardware umožňují rozšíření pomocí C++ knihoven či vylepšování modulu podle potřeby. [4]

Vývojové desky obsahují procesor od firmy Atmel a další komponenty podle typu platformy. Arduino ve spolupráci se společností Intel vytvořilo desku Intel Galileo založenou na 32b procesoru Intel® Quark SoC X1000 Application Processor, vznikla tak první Arduino deska založená na architektuře Intel®. [3][4]



Obr. 5) Arduino Software (IDE)

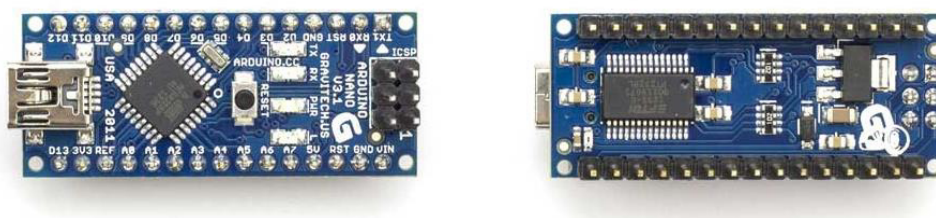
Arduino Nano (obrázek 6) je jedna z nejmenších verzí Arduino původně založená na procesoru ATmega168, nyní ATmega328, s taktem 16 MHz. Díky svým rozměrům je vhodná do projektů, v nichž je primárně důležitý malý rozměr platformy, proto je účelné jej použít pro řízení přenosného elektronického xylofonu.

Platforma obsahuje 8 analogových výstupů a 14 digitálních vstupně/výstupních pinů, 6 z nich podporuje výstup pulzní šířkové modulace. Piny operují s napětím 5 V a každý z nich poskytuje nebo přijímá maximálně 40 mA, součástí je pull-up rezistor o 20-50 k Ω . Některé z těchto pinů navíc nabízejí speciální možnosti, kupříkladu piny RX (příjem) a TX (odesílání) pro sériovou komunikaci a dva piny pro vnější přerušení. Doporučené vstupní napětí pinů je 7-12 V, limitní 6-20 V.

Arduino Nano operuje s 32kB flashovou pamětí určenou pro uložení zdrojového kódu, z toho 2kB jsou určeny pro proměnné. Obsahuje 2 kB paměti SRAM (Static Random Access Memory) a 1kB EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory).

Napájení probíhá pomocí Mini-USB konektoru, případně je možné napájet z externího 6-20V neregulovaného zdroje či 5V externího regulovaného. Automaticky je vybrán zdroj s nejvyšší hodnotou napětí. Ke komunikaci s počítačem, případně dalšími Arduiny nebo mikrokontrolery dochází pomocí sériové asynchronní linky. USB konektor umožňuje komunikaci a nahrávání programů z počítače.

Rozměry desky jsou 45x18 mm, hmotnost 5 g. [7]



Obr. 6) Arduino Nano [7]

4 REALIZACE

Celková soustava sestává z hudebního nástroje, vývojové desky Arduino rozšířené o potřebné součásti a elektronického obvodu s mechanickou částí (solenoidy), která rozezná nástroj a z vhodné konstrukce.

4.1.1 ZAS GW 20+14 alt/soprán

Jako vhodný nástroj byla zvolena zvonkohra ZAS GW 20+14 alt/soprán (obrázek 7) od české firmy G&W z Chebu. Tato zvonkohra pro pokročilé nabízí ve své cenové relaci a mezi neprofesionálními zvonkohrami vysoký rozsah tónů, který umožní zahrát vícehlasé skladby bez většího rozsahového omezení. Nástroj tvoří chromatická stupnice (každá osmi tónová oktáva obsahuje dvanáct shodných půltónů). Rozsah začíná na tónu C^1 a dosahuje tónu A^3 , tvoří necelé tři oktávy (34 tónů). Zvonkohra obsahuje 24 plíšků o šířce 25 mm. Plíšky jsou uloženy ve dvou řadách na dvou propojených rezonančních boxech ze smrkové překližky o tloušťce 5 mm.



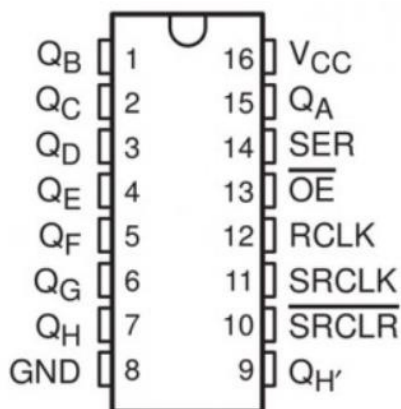
Obr. 7) ZAS GW 20+14 alt/soprán

4.1.2 Elektronický obvod

Řízení probíhá pomocí vývojové platformy Arduino Nano založené na mikrokontroleru ATmega328 od společnosti Atmel, tato deska byla zvolena díky svým kompaktním rozměrům. Jelikož zvonkohra obsahuje 34 tónů a pro každý tón je potřeba jeden digitální výstup z platformy, nabízí se jako vhodná možnost také Arduino MEGA, avšak rozměry této platformy nejsou pro použití do přenosného xylofonu vhodné a pořizovací cena této desky je oproti Arduino Nano téměř trojnásobná, deska nabízí další prvky, které by zůstaly nevyužity. Nedostatečný počet výstupů z Arduina je tedy vyřešen pomocí osmibitových posuvných registrů SN74HC595 od společnosti Texas Instruments.

Posuvný registr (obrázek 7) je soustava klopných obvodů, kterými se posílá logická informace pomocí hodinového signálu. Vstup informace je sériový, výstup paralelní. Každý posuvný registr SN74HC595 umožňuje rozšíření digitálních výstupů na osm (Q_A - Q_H) za použití tří až pěti výstupů z Arduina. Tři digitální výstupní piny jsou napojeny na vstupy posuvného registru SER (posílání dat), SRCLK (hodinový signál) a SCLK (přepínání mezi zápisem a spuštěním výstupů). Ve chvíli, kdy je hodnota na pinu SCLK logická nula, posouvá se logická hodnota z pinu SER pomocí hodinového signálu SRCLK. Pin OE (vypnutí výstupů) je možné uzemnit a pin SRCLR (vyčištění registrů) trvale připojit na napětí, avšak toto zapojení způsobuje náhodné výstupy z outputů během nabíhání programu v Arduinu, kdy se můžou

sepnout až všechny výstupy zaráz, což by přetížilo obvod, proto jsou tyto dva piny zapojeny na další dva digitální piny z Arduina. Posuvné registry lze navíc zapojit kaskádově se společným hodinový signálem za použití výstupu Q_H pro posílání přetečené informace do navazujícího posuvného registru a tak lze z pěti výstupů z platformy získat potřebný počet výstupů celkově. Jmenovité napětí posuvných registrů je 2-6 V. V obvodu je použito celkem pět posuvných registrů, které dohromady vytváří 40 výstupů. [8]



Obr. 8) Posuvný registr SN74HC595 [8]

Jako spínače slouží bipolární tranzistorové pole ULN2803A DIP18 značky TOSHIBA. Pole se skládá z osmi dvojic bipolárních NPN tranzistorů a obsahuje ochranné diody. Výstupní proud je 500 mA.

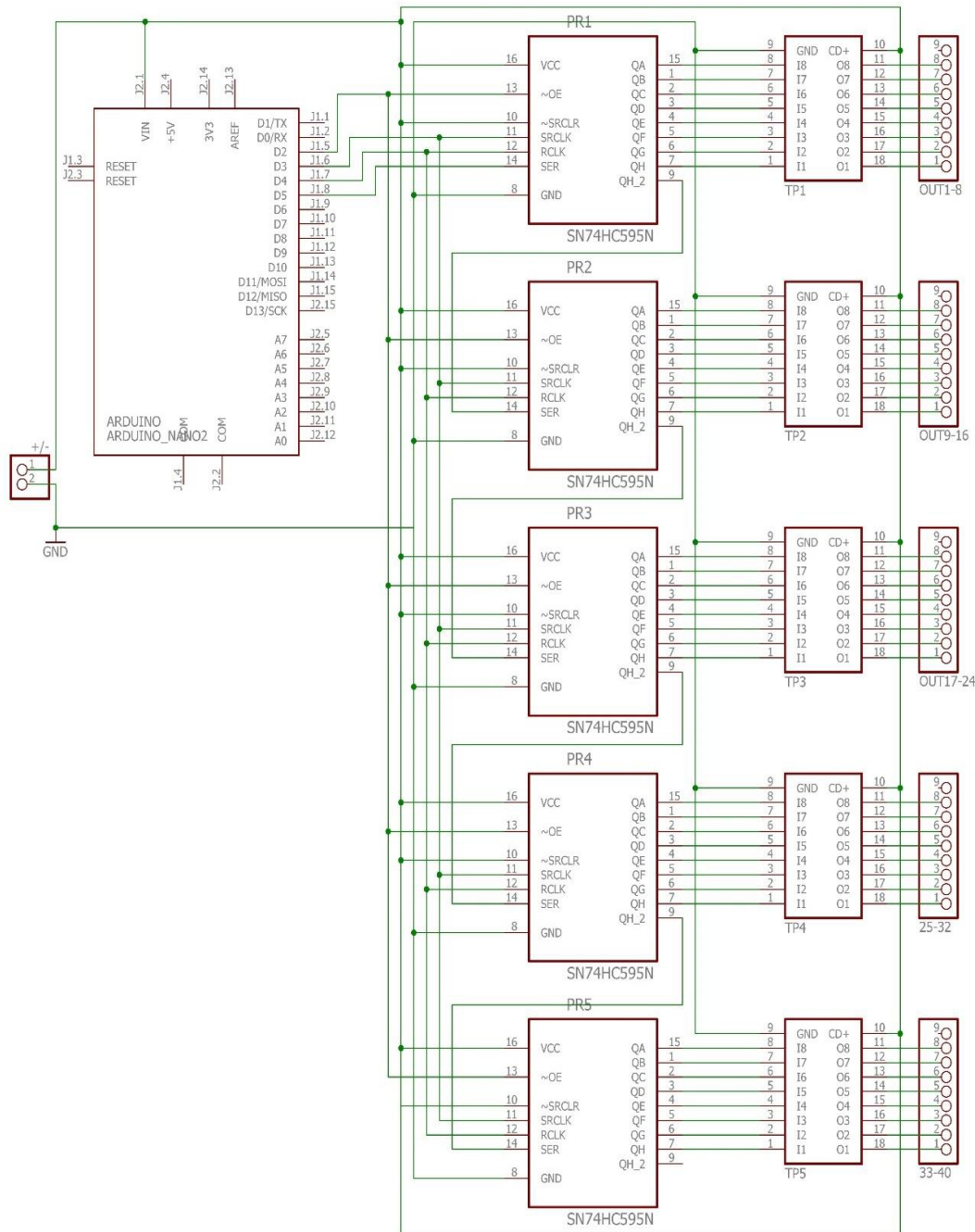
Mechanickou část obvodu tvoří jednosměrné solenoidy (obrázek 9) s otevřeným pouzdem a návratovou pružinou. Rozměry solenoidu jsou 37x20x26 mm, průměr hlavy 2,5 mm, přesah 3,5 mm. Jmenovité napětí 12 V, síla až 2800 g.



Obr. 9) Solenoid

Schéma zapojení (obrázek 10) zobrazuje vývojovou platformu Arduino jenž je napájena skrze pin VIN, určený k externímu napájení. Limitní napětí na tomto pinu je 6-20 V. Dále čtyři digitální vstupně/výstupní piny D2, D3, D4 a D5. Pin D2 propojuje všechny OE vstupy posuvných registrů a slouží k zakázání výstupu z nich. D3 je propojen se všemi SRCLK registry a spíná společný hodinový signál. D4 je opět společný pro všechny posuvné registry a slouží k přepínání mezi fází nahrávání logické hodnoty do posuvných registrů a jejím výstupem. Pin D5 je napojen na vstup SER prvního posuvného registru a posílá logickou informaci, zde následně dochází k přetečení dat přes výstup Q_H do vstupu SER navazujícího posuvného

registru. Toto kaskádovitě zapojení pak pokračuje až do pátého posuvného registru, v němž zůstává pin Q_H volný. Všechny SRCL vstupy posuvných registrů sloužící k vyčištění hodnot registrů jsou napojeny na zdroj napětí (k čištění registrů tedy nedochází). Výstupy Q_A - Q_H ze všech posuvných registrů jsou napojeny na vstupy tranzistorových polí a to tak, že výstup Q_H je napojen na vstup I_1 , Q_G na I_2 atd., nedochází tedy ke zbytečnému křížení spojů na desce plošného spoje. Výstupy z tranzistorových polí jsou propojeny se svorkovnicemi, které slouží k upevnění GND kabelů ze solenoidů. K propojení celého obvodu se zdrojem napětí pak slouží svorka +/-.

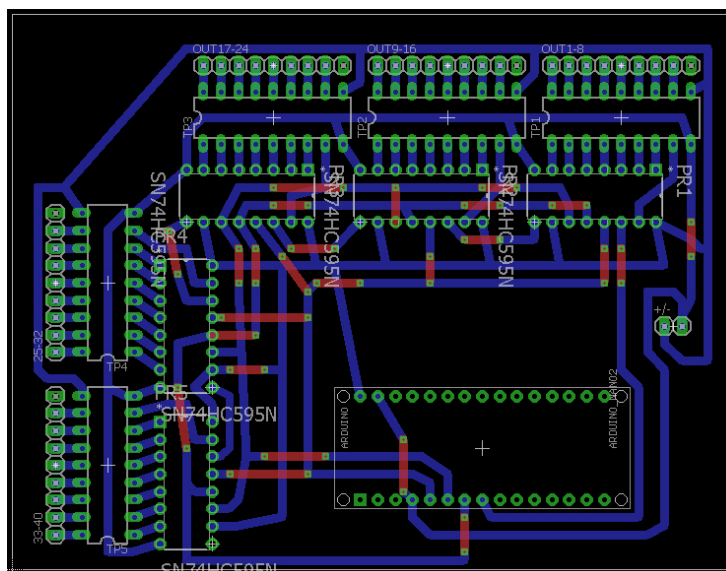


Obr. 10) Schéma zapojení

4.1.3 Výroba plošného spoje

Výroba plošného spoje je provedena metodou nažehlení toneru. K výrobě je potřeba cuprexitová deska potřebných rozměrů zbavena veškerých nečistot a mastnoty, laserová tiskárna, barevné lepicí papíry, leptací roztok, schéma desky, žehlička a podložky.

Schéma plošného spoje (obrázek 11) je vytvořeno v programu vytvořeného v programu Eagle CS 7.5.0. Spojky jsou vykresleny linkou o šířce 1,27 mm. Větší šířka byla zvolena kvůli principu výroby plošného spoje, kdy je snaha omezit pravděpodobnost vadného nažehlení toneru či při nedostatečné šířce spoje vyleptání nevhodného místa.



Obr. 11) Schéma plošného spoje

Postup spočívá ve vytisknutí schématu plošného spoje v laserové tiskárně v režimu nejvyšší kvality na lepidlovou stranu barevného lepicího papíru. Je třeba dbát na nízkou vlhkost vzduchu (případně papíru), jinak hrozí jeho omotání a nalepení uvnitř tiskárny. Schéma musí být vytištěno zrcadlově. Pro tento obvod nelze vytvořit jednovrstvý spoj, vytisknuta je tedy první vrstva (modrá) a vrstva druhá (červená) bude následovně propojena při pájení.

Schéma se umístí na pevnou podložku překrytou pružnějším materiálem natisknutým tonerem vzhůru. Cuprexitová deska se položí měděnou stranou na toner, následně se překryje papírem, který slouží jako ochrana pro plochu žehličky. Žehlení na střední teplotě nabídky žehličky probíhá minutu bez přtlaku k prohrátí desky, následně s přtlakem cca 2 kg další minutu.

Deska je po svém úplném vychladnutí vložena do čisté vody na cca 5 minut než se rozmočí papír. Papír je následně očištěn tak, aby nedošlo k poškození nažehleného toneru.

Osušená deska se vloží do leptacího roztoku (v našem případě chlorid železitý), doba leptání asi 100 s. Toner je po leptání odstraněn ředidlem. Do hotové desky jsou vyvrtány otvory a deska je osázena dutinkovou lištou pro vyjímatelné umístění Arduina, posuvnými registry a tranzistorovými poli.

4.1.4 Konstrukce

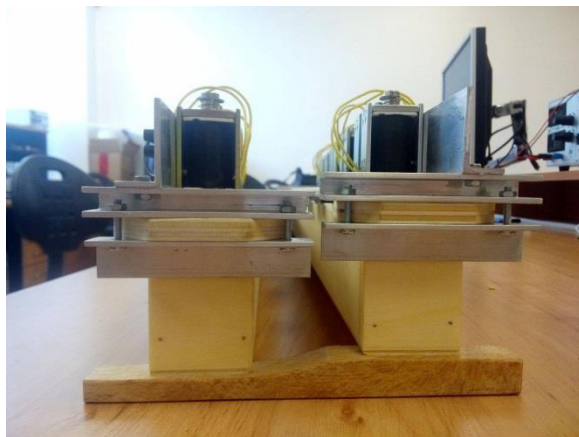
Konstrukce slouží k upevnění solenoidů nad dané plíšky a využívá původní konstrukci nástroje bez větších zásahů. Tóny jsou na nástroji rozděleny do dvou řad, v přední části se nachází 20 celých tónů a v zadní 14 půltónů.

Konstrukce se skládá ze dvou hliníkových rámu profilu L s rozměry 30x15x2 mm o délce 660 mm, které slouží jako nosníky pro solenoidy a kabeláž. Na tento rám jsou přišroubovány solenoidy (obrázek 12) a oboustrannou lepicí páskou upevněny svorkovnice propojující kabely ze solenoidů s elektronickým obvodem.



Obr. 12) Konstrukce xylofonu, pohled shora

Ke stažení a upevnění velkého množství kabelů jsou použity plastové stahovací pásky. Dále je konstrukce tvořena čtyřmi hliníkovými U profily, s rozměry 20x10x2 mm, dva o délce 78 mm pro kratší strany xylofonu a dva o délce 148 mm pro delší. Tyto tyče spolu se stejným počtem L profilů s rozměry 15x15x2 mm také o délkách 148 mm a 78 mm tvoří svěráky (obrázek 13), které upevňují celou konstrukci na dřevěné krajní lišty nástroje, aniž by bylo potřeba do nich vrtat. Svěráky je možné vypodložit pro získání optimální polohy hlav solenoidů tak, aby při udeření hlavy solenoidu do daného plíšku nebyla snížena kvalita tónu případným tlumením.



Obr. 13) Pohled z boku

4.1.5 Zdrojový kód

Zdrojový kód pro řízení obvodu je napsán v programu Arduino software IDE programovacím jazykem Arduino. Z Arduino software lze program nahrát přes USB kabel do Arduina. Zdrojový kód je zaměřen především na šetření dynamické paměti a univerzálnosti pro nahrávání libovolných skladeb, ať už ručním vložení pole dat přímo do kódu, nebo po drobné úpravě kódu pomocí sériové komunikace s počítačem. Pro zadávání proměnných je použit způsob, který se přibližuje zadávání tónů do klasické notové osnova. V Arduino software IDE chybí debugger, proto je obtížné hledat místo, kde napsal programátor logickou chybu. Simulace xylofonu při programování probíhala na nepájivém poli, na němž byly kaskádově zapojeny tři posuvné registry SN74HC595 a pro každý tón jedna LED dioda, bliknutí signalizovalo zahrání tónu.

Proměnné jsou nahrány v poli, pro každou notu jsou potřebné dva údaje – typ noty, doba jejího trvání (je-li požadován vícehlas, doba všech současně znějících tónů krom tónu, který je zapsán jako poslední, je nulová, poslední má pak zapsanou hodnotu doby, která udává dobu všech tónů tohoto akordu), případně dynamika.

K řízení obvodu jsou použity čtyři digitální vstupně/výstupní piny Arduina nastavené jako výstupy. Pin D4 slouží k přepínání mezi stavem nahrávání logické hodnoty do posuvných registrů a stavem, kdy se logická hodnota zobrazí na výstupech. Logická hodnota vycházející z pinu D5 se posouvá do posuvných registrů pomocí hodinového signálu na pinu D3 a vestavěné funkce `shiftOut()`. Pin D2 zakazuje výstupy z posuvných registrů před začátkem skladby, kdy posuvné registry posílají náhodné hodnoty.

Program obsahuje dvě hlavní smyčky, smyčka *while* postupně projíždí proměnné (název tónu, doba trvání) z pole tónů a následně zahraje tón, do ní vnořená smyčka *do while* obsahuje strukturu *if, if else* v níž dochází k poskládání bytů, jenž budou nahrány do posuvných registrů. Logická informace každého tónu má rozsah 34 bitů, z nichž právě jeden bit má hodnotu 1, ostatní 0. Vzor nabízí výčet devíti bytů, z nichž jdou kombinací poskládat všechny tóny, jsou to byty 100000000, 010000000, 00100000, 00010000 atd. a byte zaplněný pouze nulami. Akord vzniká součtem binárních hodnot tónů, součet se opakuje, dokud je zadána doba nulová, poté již neplatí podmínka smyčky *do while* a dojde k zahrání akordu (tónu). Uživatelsky definovaná funkce *playChord()* naplní posuvné registry výslednou hodnotou a následně spustí logickou informaci na výstupy. Doba, po kterou jsou výstupy aktivní, ovlivní sílu drnkutí do daného prutu, avšak přesáhne-li určitou hodnotu, hlava solenoidu způsobí útlum zvuku. Poté funkce *pause()* naplní posuvné registry logickou hodnotou 0, při spuštění výstupů není zahrán žádný tón a tento stav setrvává po dobu určenou skladbou.

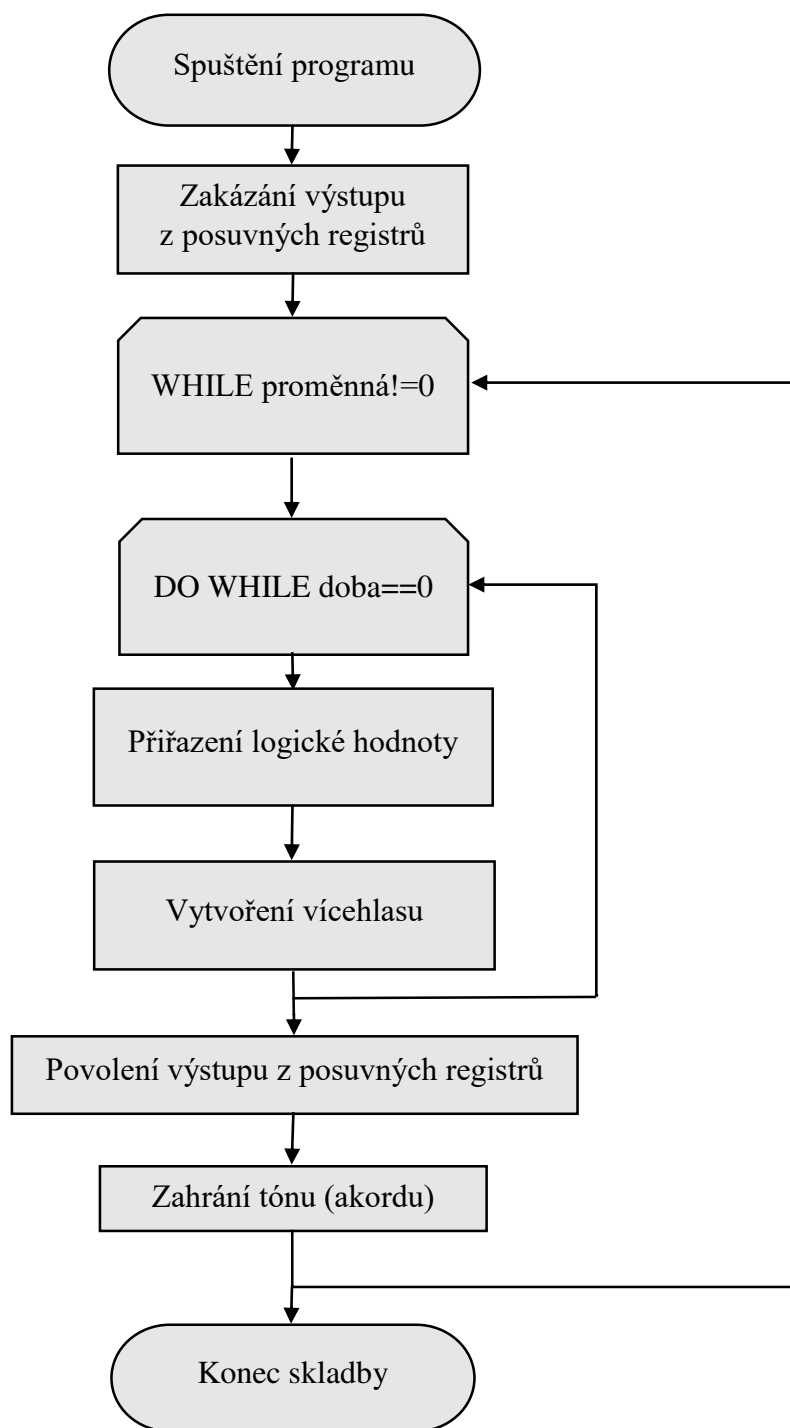
Z podstaty úderného nástroje vyplývá, že doba trvání tónu je vlastně pauza, během níž doznívá tón vzniklý. Pro výpočet trvání jednotlivých tónů, případně akordů, slouží rovnice, jenž přepočítává zadanou hodnotu délky tónu (akordu). Délka tónu je zadaná klasickým způsobem zadávání not do notové osnova, tedy 0,25 (¼) pro notu čtvrt'ovou, 1 pro notu celou atd. Tempo udává počet čtvrt'ob za minutu.

Pro dobu trvání tónu (akordu) v řádu milisekund tedy platí:

$$\frac{doba}{0.25} * \frac{60000}{tempo} = trvání [ms] \quad (6)$$

Kde doba a tempo jsou hodnoty načtené z pole zadaných proměnných.

Vývojový diagram (obrázek 14) zobrazuje průběh programu. Smyčka *do while* proběhne alespoň jednou, kdy k neutrální hodnotě přičte požadovaný tón a v případě vícehlasu se tento součet opakuje až do vytvoření hotového akordu. Poté program ze smyčky vyskočí a zahráje tón (akord), počká po dobu trvání tónu použitím funkce *delay()* a pokračuje nahráním další proměnné z pole zadaných hodnot. Smyčka *while* nahrávání proměnných probíhá až do chvíle, kdy je pole prázdné, tehdy skladba končí.



Obr. 14) Vývojový diagram programu

4.1.6 Možnosti šetření paměti

Dynamická paměť Arduino Nano dokáže pojmut celkem 2 048 bytů. Tato paměť je dostačující pro běžné programy, avšak pro zahrání vícehlasé polyfonní melodie na tomto xylofonu, je v závislosti na délce a počtu záraz hrajících tónů ve vícehlasu využito velké množství paměti pro globální proměnné. Délka skladby je tak značně omezena. Při použití datového typu *float* by jeden zahráný tón spotřeboval 8 bytů, pětitónový akord tedy 40. Rozdělení pole se zadanými proměnnými na pole s tóny (*char*) a dobami (*float*) sníží velikost spotřebované paměti na jeden tón na 5 bytů, což je pořád příliš vysoká hodnota.

Možnost, jak ušetřit více paměti, je jednoduché zakódování údajů o tónu do sedmiciferného čísla dekadické soustavy. Jeden tón pak při datovém typu *unsigned int* zabere pouze 2 byty a do čísla je možné zakódovat i dynamiku tónu (akordu). Na čísle 2 011 603 bude dále uveden postup získání hodnot.

Poslední dvě cifry určují tón, první tón xylofonu má přiřazen číslo 1, poslední 34. Použitím operátoru *%* (*modulo*) a dělitele 100 je získána právě hodnota určující tón, v našem případě je to 3, tedy D₁.

$$2\ 011\ 603 \% 100 = 3 \quad (7)$$

Následně je číslo vyděleno 100, čímž se odstraní poslední dvě cifry a znovu probíhá operace *%100*. Získáváme dělitele zlomku s délkou noty (v tomto případě je nota šestnáctinová):

$$\frac{2\ 011\ 603}{100} \% 100 = 16 \quad (8)$$

Po opětovném vydělení 100 následuje opět operace *%100*, získáváme hodnotu 1, po složení zlomku 1/16.

$$\frac{20\ 116}{100} \% 100 = 1 \quad (9)$$

Na závěr už stačí vydělit 100 a získáváme hodnotu dynamiky, tedy sílu, s jakou má solenoid udeřit. Budou-li povoleny tři možnosti dynamiky a to *piano* (nejslabší), *mezzoforte* a *forte* (nejsilnější), číslo 2 011 603 bude určovat šestnáctinovou notu D₁ s dynamikou *mezzofo*

5 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo sestavit elektronický xylofon, který může sloužit například k propagačním účelům Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně.

Nejprve proběhlo seznámení a porovnání již řešených elektronických xylofonů. Elektronický xylofon NerdKits dbá především na jednoduché a nenákladné řešení, kde je kladen důraz na co největší didaktičnost. Oproti tomu xylofon DPRG nabízí řešení univerzálnější a nákladnější, počet jeho tónů převyšuje NerdKits téměř 4x a ovládání pomocí MIDI vstupů vytváří z nástroje autonomní hudební jednotku.

Následoval teoretický popis celé soustavy zahrnující původ nástroje, úvod do problematiky akustiky prutů, způsob výroby vlastních ozvučných prutů patřičné frekvence a možnosti řízení.

Samotná realizace proběhla na zakoupeném xylofonu ZAS GW 20+14 *alt/soprán*. Elektronický obvod je tvořen posuvnými registry SN74HC595, tranzistorovými poli ULN2803, pro řízení je použita vývojová platforma Arduino Nano. Obvod je realizován na plošném spoji. Metoda nažehlování toneru se nejeví jako nejvhodnější způsob výroby plošného spoje. Tisk toneru na lepicí papír nevyšel ve dvou tiskárnách ze tří, papír se připekl a zasekl uvnitř tiskárny. Následně bylo při nažehlování obtížné odhadnout dostatečný přítlak, teplotu a dobu žehlení tak, aby se toner nažehlil korektně.

Zvuk vzniká úderem hlav solenoidů do požadovaných plíšků xylofonu. K upevnění solenoidů a kabelů slouží hliníková konstrukce, která je navržena tak, aby nebylo nijak destruktivně zasahováno do původního nástroje, při odstranění konstrukce zůstává xylofon neporušen.

Program nahraný v Arduinu postupně přehrává (případně skládá do vícehlasu) v daném tempu noty zadané v poli proměnných. K navrženému šetření paměti bohužel nedošlo, protože při testování základních matematických operací, jejichž výsledek byl určen k rozsvícení jedné určité testovací diody, byly vykazovány neočekávané výstupy.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Robotic Xylophone* [online]. NerdKits, 2011 [cit. 2016-04-22] Dostupné z: http://www.nerdkits.com/videos/robotic_xylophone/
- [2] *DPRG: Autonomous Glockenspiel* [online]. Dallas Personal Robotics group, 2006 [cit. 2016-04-24] Dostupné z: <http://www.dprg.org/projects/2009-08a/>
- [3] VODA, Z. a Tým HW Kitchen. *Průvodce světem Arduina*. Bučovice: Nakladatelství Martin Stříž, 2015. ISBN 978-80-87106-90-7.
- [4] *Arduino* [online]. Arduino, 2016 [cit. 10-05-2016] Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- [5] SACHS, Curt. *The history of musical instruments*. New York: Dover Publications, Inc., 2006. ISBN 0-486-45265-4
- [6] RAYLEIGH, J. W. S. *The Theory Of Sound*. London: Macmillan and CO., 1877.
- [7] *Arduino Nano*. [online]. Arduino, 2016 [cit. 2016-05-31]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano>
- [8] CD74HC595 [datasheet online]. Texas Instruments Incorporated, 2004 [cit. 25-05-2016] Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/425/118/74hc595-datasheet-1.pdf> datasheet

