



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

EXPERIMENTÁLNÍ MECHANICKO-ELEKTRICKÝ STRUNNÝ HUDEBNÍ NÁSTROJ

EXPERIMENTAL ELECTRO-MECHANICAL MUSICAL STRING INSTRUMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Svěrák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhý, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Jan Svěrák

ID: 192818

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Experimentální mechanicko-elektrický strunný hudební nástroj

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je realizovat experimentální mechanicko-elektrický strunný hudební nástroj; experimentálnost spočívá v neobvyklé konstrukci, kombinující niněru a elektrickou kytaru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] GUŠTAR, M. Elektrofony I. Uvniť, Praha, 2006. ISBN 978-80-239-8446-0.

[2] GUŠTAR, M. Elektrofony II. Uvniť, Praha, 2008. 518s. ISBN 978-80-239-8447-7.

Termín zadání: 1.2.2019

Termín odevzdání: 27.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhý, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je návrh a konstrukce prototypu experimentálního mechanicko-elektrického strunného hudebního nástroje neobvyklé konstrukce a dosahujícího mnoha zvukových barev. Návrh vychází z kombinace základních vlastností dvou existujících nástrojů, konkrétně niněry a elektrické kytary. První kapitola práce se zabývá teoretickým rozbohem dané problematiky. Ve druhé kapitole jsou popsány konstrukční i funkční vlastnosti jednotlivých součástí nástroje včetně odůvodnění použití daných principů a materiálů. Ve třetí kapitole jsou popsány změny původního návrhu a postup stavby nástroje. Ve čtvrté kapitole je výsledný nástroj zhodnocen z hlediska funkčnosti a jeho vlastností. V páté kapitole jsou navrženy změny v konstrukci nástroje, které by mohly odstranit či zmírnit problémy zjištěné realizací prototypu.

Klíčová slova

elektrofon, chordofon, elektrická kytara, niněra

Abstract

The goal of this thesis is to design and construct a prototype of an experimental electromechanical musical instrument of unusual construction and a plethora of achievable timbres. The design is based on a combination of fundamental attributes of two already existing instruments, namely the hurdy-gurdy and the electric guitar. The first chapter of this thesis analyzes the theoretical background of said problematics. The second chapter describes the construction and function of individual components, including the reasoning behind the chosen principles and materials. The third chapter describes the changes from the original design and the process of building the instrument. The fourth chapter evaluates the instrument in terms of functionality and its properties. The fifth chapter proposes changes in design which could eliminate or mitigate the problems revealed by the prototype.

Keywords

electrophone, chordophone, electric guitar, hurdy-gurdy

Bibliografická citace:

SVĚRÁK, Jan. *Experimentální mechanicko-elektrický strunný hudební nástroj*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118119>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhý, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Experimentální mechanicko-elektrický strunný hudební nástroj jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne 26. května 2019

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. MgA. Mgr. Danu Dlouhému, Ph.D. za odbornou pomoc a cenné rady při zpracování mé závěrečné práce.

V Brně dne 26. května 2019

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	1
1 Teoretický základ	3
1.1 Základní principy a rozdělení hudebních nástrojů.....	3
1.2 Strunné nástroje.....	3
1.3 Niněra.....	4
1.3.1 Konstrukce niněry	5
1.4 Elektrofony.....	6
1.4.1 Rozdělení elektrofonů.....	6
1.5 Elektrická kytara.....	7
1.5.1 Konstrukce elektrické kytary	8
1.5.2 Struny pro elektrickou kytaru.....	9
1.6 Snímače.....	10
1.6.1 Elektrostatické snímače	10
1.6.2 Piezoelektrické snímače.....	11
1.6.3 Elektromagnetické snímače.....	11
1.6.4 Optické snímače.....	12
1.7 Základní elektrické obvody pro úpravu signálu	13
1.7.1 Kmitočtové filtry	13
1.7.2 Zesilovače s OZ.....	15
1.7.3 Součtový zesilovač s OZ.....	15
1.7.4 Aktivní RC filtry s OZ.....	16
2 Návrh.....	18
2.1 Konstrukce	18
2.2 Snímače.....	19
2.2.1 Zapojení snímačů	20
2.3 Korekční zesilovač.....	21
3 Realizace	25
3.1 Změny původního návrhu	25
3.1.1 Konstrukce.....	25
3.1.2 Elektronika	25

3.2	Postup stavby	27
3.2.1	Stavba základních částí nástroje	27
3.2.2	Kompletace	28
3.2.3	Elektronika	30
3.3	Hotový nástroj	31
4	Zhodnocení nástroje	33
4.1	Problémy zjištěné při konstrukci	33
4.2	Problémy zjištěné po kompletaci	33
4.3	Ergonomie	34
4.4	Snímání a elektronika	35
4.5	Možnosti nástroje	35
5	Návrhy na zlepšení	37
	Závěr	38
	Literatura	39

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Princip elektrostatického snímače	10
Obr. 1.2 Princip piezoelektrického snímače	11
Obr. 1.3 Dolní propust RC (převzato z [7])	14
Obr. 1.4 Horní propust CR (převzato z [7]).....	14
Obr. 1.5 Pásmová propust RC (převzato z [7])	14
Obr. 1.6 a) Invertující zesilovač, b) neinvertující zesilovač s OZ (převzato z [7])....	15
Obr. 1.7 Součtový zesilovač (převzato z [7])	16
Obr. 1.8 Aktivní kmitočtový filtr s a) jednoduchou a b) rozvětvenou smyčkou zpětné vazby (převzato z [7]).....	17
Obr. 2.1 Návrh nástroje.....	19
Obr. 2.2 Schéma zapojení snímačů.....	21
Obr. 2.3 Schéma zapojení korekčního zesilovače	22
Obr. 2.4 Kmitočtová charakteristika modulu přenosu korekčního zesilovače	23
Obr. 3.1 Upravené schéma zapojení snímačů.....	26
Obr. 3.2 Upravené schéma zapojení ekvalizéru	26
Obr. 3.3 Základní díly krku	27
Obr. 3.4 Tělo s přilepeným krkem	28
Obr. 3.5 Uložení kolových smyčců.....	29
Obr. 3.6 Umístění piezoelektrického snímače.....	29
Obr. 3.7 Struník.....	30
Obr. 3.8 Hotový nástroj (pohled na přední část)	31
Obr. 3.9 Hotový nástroj (pohled na zadní část).....	32

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a následně zkonstruovat prototyp experimentálního mechanicko-elektrického strunného hudebního nástroje, jehož experimentálnost spočívá nejen v neobvyklé konstrukci a způsobu rozeznívání, ale také v množství dosažitelných zvukových barev.

Nové druhy hudebních nástrojů vznikají především dvěma způsoby. Prvním je vytvoření zcela nového konceptu na základě dříve nevyužívaných či neznámých principů, což se odehrává v souvislosti s technologickým pokrokem a objevy a výzkumem využití fyzikálních zákonitostí. Druhým, mnohem častějším způsobem je úprava či kombinace principů již existujících nástrojů. I touto cestou lze dojít k nezvyklým, případně i dříve neslyšeným zvukovým vlastnostem. Její výhodou je nezávislost na technologickém pokroku.

První kapitola bakalářské práce se zabývá teoretickým rozbohem dané problematiky. Nejprve jsou vysvětleny základní principy tvorby zvuku pomocí hudebních nástrojů, dále jsou pak popsány vybrané skupiny hudebních nástrojů a jejich zástupci jak z hlediska historického kontextu, tak konstrukčních postupů. Nakonec se tato kapitola zabývá popisem metod snímání zvuku hudebních nástrojů a základních elektrických obvodů pro úpravu snímaného signálu. Tím jsou popsány všechny principy, jejichž znalost je potřebná k pozdějšímu návrhu všech částí nástroje.

Ve druhé kapitole je na základě získaných poznatků proveden návrh experimentálního nástroje. Jsou zde popsány konstrukční i funkční vlastnosti jednotlivých součástí včetně odůvodnění použití daných principů a materiálů.

Ve třetí kapitole bakalářské práce je popsán postup stavby jednotlivých částí nástroje a jeho následné kompletace. Také jsou zde zaznamenány změny oproti návrhu provedeném v předchozí části a jejich odůvodnění. Změny se týkají nejen konstrukce nástroje a použitých materiálů, ale také zapojení elektroniky.

Ve čtvrté kapitole je výsledný nástroj zhodnocen z hlediska funkčnosti a jeho vlastností. Také jsou zde popsány problémy zjištěné při stavbě a následném testování.

V páté kapitole bakalářské práce jsou navrženy změny v konstrukci nástroje, které by mohly odstranit či zmírnit problémy popsané v předchozí části.

1 TEORETICKÝ ZÁKLAD

1.1 Základní principy a rozdělení hudebních nástrojů

Tisíce let vývoje různých kultur daly vzniknout nepřebornému množství různorodých hudebních nástrojů. I přes velké rozdíly mezi jednotlivými nástroji lze u naprosté většiny identifikovat části plnící tyto základní funkce:

- excitátor – mechanismus budící kmity oscilátoru (smyčec, kladívko, palička)
- oscilátor – kmitající část nástroje (struna, blána, jazýček)
- rezonátor – část nástroje přejímající a následně zesilující a upravující kmity oscilátoru (ozvučná deska či skříň, sloupec vzduchu)
- radiátor – část nástroje, která usměrňuje a vyzařuje akustické vlnění do okolí (ozvučný otvor)

Jednotlivé části nástroje však často neplní pouze jednu z těchto funkcí. Například rezonátor ve formě ozvučné desky plní i funkci radiátoru, neboť sám vyzařuje energii. Stejně se dá uvažovat i o struně či bláně, byť je množství vyzářené energie mnohem menší, než je tomu u rezonátoru.

Hudební nástroje lze rozdělit podle mnoha různých kritérií, například podle jakosti či barvy zvuku, materiálu použitého ke stavbě nebo způsobu hry. Nejčastěji se však užívá rozdělení podle typu oscilátoru: [1]

- chordofony – struna
- membranofony – blána
- aerofony – jazýček
- idiofony – samotné tělo nástroje
- elektrofony – elektrický obvod

1.2 Strunné nástroje

První zdokumentované strunné nástroje pochází již ze starověku. Především v řecké a římské kultuře hrály velmi důležitou roli lyra a harfa. V období středověku se pak stala nejen v Evropě jednou z nejrozšířenějších nástrojů loutna, kterou v 17. století začaly nahrazovat smyčcové nástroje. Koncem 19. a počátkem

20. století se do popředí dostala kytara, jež je dodnes jedním z nejužívanějších hudebních nástrojů. [1]

Jak již bylo zmíněno, oscilátorem je u chordofonů struna. Frekvenci dané harmonické složky kmitající struny je možné vyjádřit vzorcem (1.1), kde n je pořadí harmonické složky, l je délka kmitající části struny, F je síla, kterou je struna napnuta, a μ je délková hustota struny.

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (1.1)$$

Podle typu excitátoru lze strunné nástroje rozdělit do těchto kategorií:

- smyčcové – housle, violoncello
- trsací (drnkací) – kytara, harfa
- kladívkové – klavír, piano
- kolové – niněra

1.3 Niněra

V období raného středověku, pravděpodobně v 10. století, vznikl z tehdejších smyčcových nástrojů takzvaný organistrum. Jednalo se o velký hudební instrument ovládaný dvěma hráči. Funkci excitátoru plnilo namísto smyčce dřevěné kolečko otáčené pomocí připevněné kličky. Postupem času se tento nástroj začal vyrábět v menší podobě, která umožnila ovládnutí jediným hráčem.

Implementací nového typu kláves pak vznikla niněra, jež se v období renesance stala poměrně oblíbeným nástrojem. V 17. století, vlivem nástupu baroka a s tím spojenou změnou hudební estetiky, popularita niněry značně opadla. Byla pak spojována s nižšími třídami společnosti až do nástupu hudebního klasicismu ve druhé polovině 18. století, kdy ji opět začali využívat známí skladatelé. V tomto období také vznikaly další varianty tohoto nástroje, například maďarský tekerólant či španělská zanfoña, většina z nich si však mimo lidovou hudbu nenašla uplatnění. Zájem o niněru opět vzrostl až ve druhé polovině 20. století. [2]

1.3.1 Konstrukce niněry

Tělo nástroje tvoří ozvučná skříň, která může být loutnového (oblá zadní rezonanční deska) či kytarového typu (rovná zadní rezonanční deska). Na ní je umístěn struník, kobylka a pro niněru charakteristický excitátor ve formě kolového smyčce potřeného kalafunou pro větší třecí odpor, který je hřídelí spojen s kličkou na straně nástroje.

Struny jsou od struníku nataženy přes kobylku a smyčec ke kryté klávesové mechanice, na druhém konci jsou upevněny ladícími kolíky. V místě kontaktu se smyčcem jsou omotány ovčí vlnou či bavlnou, což zlepšuje tření a upravuje barvu zvuku. Stisknutím klávesy se ke strunám přiblíží tzv. praporek, čímž změní délku kmitající části struny a tím i výšku tónu. Umístění styku struny a praporku lze do určité míry ovlivnit jeho náklonem, což umožňuje úpravu intonace. Menzura¹ historických nástrojů se liší, obvykle se však pohybuje v rozmezí 30-35 cm.

Kromě těchto tzv. melodických strun má niněra obvykle i další struny, které neprochází klávesovou mechanikou a nelze tak u nich při hře upravovat výšku tónu. Označují se jako bordunové a slouží k obohacení harmonie. Pro účel vyřazení těchto strun ze hry je nutno zamezit jejich kontaktu se smyčcem, což se provádí uchycením strun k bočním dřevěným výstupkům, případně k výstupkům se žlábkou na vícestupňové kobylce. V pozdější fázi vývoje byly přidány další, tzv. harmonické struny, které nejsou v kontaktu se smyčcem a jsou rozeznívány vibracemi nástroje. Umisťují se na přední desku ozvučné skříně.

U některých typů niněry se objevuje zvláštní typ kobylky, tzv. le chien (francouzsky pes). Tato kobylka není pevně upevněna, nýbrž pouze zasunuta do bordunové kobylky, díky čemuž při rychlém pohybu smyčce drnčí o rezonanční desku nástroje a umožňuje tak zakomponování rytmických prvků do hry.

Niněry obvykle bývají celé vyrobeny ze dřeva s výjimkou kovové hřídele, případně i kovových praporků. U moderních nástrojů se občas objevují umělohmotné smyčce. Struny jsou obvykle vyráběny ze střev, v dnešní době se však používají i kovové. [3][4]

¹ délka nezkrácené (tj. nejdelší možné) kmitající části struny

1.4 Elektrofony

Od objevu elektřiny netrvalo dlouho, než se vědci začali zajímat o její aplikaci v hudebních nástrojích. Již v 18. a 19. století vznikaly hudební nástroje využívající elektřinu pro různé části signálového řetězce, až na výjimky však na hudební scéně nenašly uplatnění. Tento vývoj pokračoval i ve 20. století, kdy již mnohem častěji vznikaly nástroje, jež se staly běžnou součástí soudobé hudby. Některé z nich dokonce zavdaly vzniku zcela nových hudebních žánrů. Na přelomu 20. a 21. století se pak značně rozšířily hudební nástroje využívající číslicové systémy k tvorbě i následné úpravě zvuku.

Důležitou roli ve vývoji elektrofonů hrál také rozvoj záznamové techniky a rozhlasu v první polovině 20. století, kde bylo třeba převést akustický zvuk nástrojů na elektrický signál. Z počátku šlo pouze o snímání tradičních nástrojů mikrofony, zanedlouho se začaly objevovat nástroje s mikrofony již zahrnutými v konstrukci. Následoval vývoj jiných způsobů snímání kmitů specializovanými mechanicko-elektrickými převodníky, který do jisté míry trvá dodnes. [5]

1.4.1 Rozdělení elektrofonů

Elektrofony lze rozdělit podle různých kritérií. Daniel Forró ke kategorizaci používá princip jejich činnosti, zejména v ohledu na podíl elektřiny ve tvorbě zvuku.

Mechanicko-elektrické:

- Amplifikované nástroje – chvění vzduchu vyvolané radiátorem nástroje je snímáno mikrofony. Často jde o přizvučované akustické nástroje, např. klavír, housle nebo kytara.
- Elektrifikované nástroje – kmity oscilátoru nástroje jsou snímány mechanicko-elektrickými převodníky, jakými jsou např. elektromagnetické či piezoelektrické snímače. Do této kategorie patří například elektrická kytara či elektrický klavír (Fender Rhodes).

Elektromechanické:

- Kontaktní systémy – stisknutím kláves se spouští přehrávání přednahráných magnetofonových pásek, případně se jimi mění rychlost

přehrávání apod. Příkladem takového nástroje je Mellotron. Podobným způsobem byly využity i otáčející se kotouče s drážkami jako na gramodesce.

- Bezkontaktní systémy – jde o nástroje využívající elektromechanické rotační (případně posuvné) generátory. Nejznámějším zástupcem této skupiny jsou Hammondovy varhany.

Elektronické:

- Analogové nástroje – ke generování kmitů využívají elektrický oscilátor. Signál je dále upravován filtry, modulátory atd. Časté je použití aditivní harmonické syntézy. Do této skupiny patří např. theremin či rozličné analogové syntetizéry.
- Analogově-digitální nástroje – jedná se o analogové syntetizéry s digitální pamětí, do níž se ukládalo nastavení všech parametrů syntetizéru. Nebylo je tedy třeba znovu nastavovat ručně.
- Digitální nástroje – celý proces generování i zpracování zvukového signálu probíhá digitálně. Do této skupiny patří moderní syntetizéry a samplery. [6]

1.5 Elektrická kytara

Když se na počátku 20. století začala kytara uplatňovat v souborech s výrazně hlasitějšími nástroji (zejména šlo o bicí a žesťové nástroje), bylo třeba najít způsob k jejímu zesílení, aby se jim hlasitostí mohla vyrovnat. Nejdříve přišly konstrukční úpravy nástrojů, například zvětšení ozvučného otvoru. To však nestačilo a hudebníci začali snímat kytaru mikrofonom, avšak brzy začali hledat i jiné možnosti. První elektrifikované kytary byly například Gibson L-5 s elektrostatickým snímačem nebo Frying Pan s elektromagnetickým snímačem, které se však příliš neujaly. Mnohem úspěšnější byl Gibson ES-150, nástroj velmi podobný zmíněnému modelu L-5, ovšem se snímačem elektromagnetickým.

Elektrická kytara se v podobě, kterou dnes známe, objevila až v roce 1948 jako Fender Esquire, později přejmenovaná na Nocaster, Broadcaster a nakonec na Telecaster. Jedná se o nástroj s masivním dřevěným tělem a elektromagnetickými snímači. V roce 1952 ho následovala další ikonická kytara Gibson Les Paul a v roce

1954 Fender Stratocaster. To odstartovalo vývoj nespočtu různých typů elektrických kytar, který trvá dodnes. Tyto nástroje se staly neodmyslitelnou součástí mnoha hudebních žánrů, jak pro svůj charakteristický zvuk a univerzálnost zapříčiněnou rozmanitými možnostmi úpravy zvuku, tak i pro hráčskou nenáročnost. [5]

1.5.1 Konstrukce elektrické kytary

Většina elektrických kytar má na rozdíl od těch akustických masivní dřevěné tělo. Materiál, ze kterého je vyrobeno, nemá na zvukové vlastnosti nástroje ani zdaleka takový vliv, jako je tomu u akustických nástrojů. Nejčastěji se používá dřevo z olše, lípy, jasanu, javoru a mahagonu. Na těle pak najdeme kovovou kobylku, která může být pevně uchycená, ale běžná jsou i jednozvratná či dvojjzvratná tremola umožňující měnit výšku hraných tónů vychýlením a změnou tahu strun. Na kobylce jsou umístěny posuvné „kameny“, které umožňují individuální seřízení dohmatu (vertikální posuv) a intonace (horizontální posuv) pro každou strunu.

V těle kytary bývá dutina pro elektroniku, kterou obvykle tvoří jeden až tři elektromagnetické snímače, tři až pětipolohový přepínač snímačů, potenciometr hlasitosti a tzv. „tónová clona“ (většinou jde o filtr typu dolní propust). Důležitou součástí je také výstupní konektor, nejčastěji jde o 6,3 mm TS. Některé kytary obsahují i aktivní elektroniku, ať už jde o aktivní snímače nebo vestavěné předzesilovače. V tom případě je potřeba zajistit i zdroj napětí, obvykle se používá devítivoltová baterie.

Krk nástroje, konstrukcí velmi podobný akustickým nástrojům, bývá k tělu přilepen nebo přišroubován. Musí být kvůli velkému tahu strun vyroben z pevného dřeva. Nejčastěji se proto používá javor nebo mahagon, poměrně zřídka pak můžeme najít i palisandrový krk. Zejména tepelná stabilita se dá zlepšit použitím více kusů dřeva s různými směry růstu, případně i různých druhů. Pro další zpevnění se používá aktivní kovová výztuha, tzv. „truss rod“. Jde o kovový hranol připevněný k maticím na kulatině. Díky protichůdným závitům se při utahování tento hranol ohýbá a působí proti tahu strun. Zejména u dražších a/nebo zakázkových nástrojů mohou být použity i pasivní výztuhy ve formě uhlíkových či duralových tyčí umístěných po stranách aktivní výztuhy. Na „tělo“ krku je přilepen

hmatník osazený pražci z oceli nebo slitiny niklu a mosazi. Jako materiál se nejčastěji používá palisandr, javor a eben.

Na konci krku je tzv. kytarová hlava, kde obvykle bývají umístěny ladící mechaniky (výjimku tvoří bezhlavé kytary, u kterých jsou součástí kobylky). Mezi krkem a hlavou je nultý pražec, občas nazývaný „ořech“. Dříve se vyráběl především ze zvířecích kostí nebo slonoviny, v dnešní době se častěji používá plast nebo grafit, méně pak kov (ocel či mosaz).

Menzura je většinou 648 mm podle kytary Fender Telecaster, často používaná je i 629 mm podle Gibson Les Paul. Zejména u nástrojů se sedmi a více strunami se pak používají delší menzury, například 686 mm či 711 mm.

1.5.2 Struny pro elektrickou kytaru

Na rozdíl od klasických nástrojů, jakými jsou smyčcové nástroje či španělská kytara, jsou vyráběny výhradně z kovu. To je nutné kvůli funkčnosti elektromagnetických snímačů. Tenčí struny obvykle tvoří pouze homogenní ocelový drát. Silnější struny se vyrábí ovinutím drátu okolo ocelového jádra. Vinutí může být z čisté oceli, stejně častá je však i ocel s příměsí niklu, chromu či kobaltu. Bronzová příměs se často používá u strun pro akustické kytary.

Vinutí strun může být kromě kulatého drátu (válnové – round wound) vyrobeno i z kovového pásku (hlazené – flat wound). Takové struny mívají kulatější zvuk a je výrazně omezeno tření mezi strunami a prsty, což má za následek potlačení ruchů vzniklých pohybem prstů. Vyrábějí se i polohlazené struny (half round). Jak již název napovídá, tento typ je kompromisem mezi válcovými a hlazenými strunami. Vyrábí se podobně jako válcové struny, ale jejich vinutí se obrousí, čímž vznikne poměrně hladký povrch.

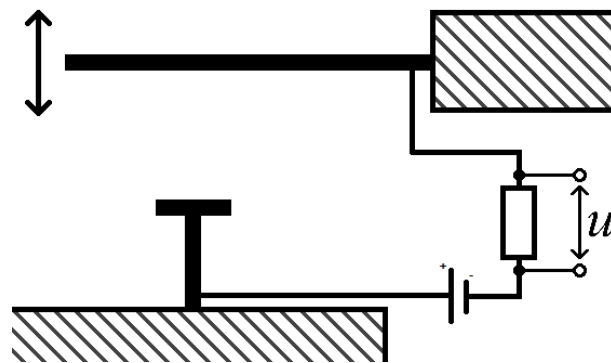
Tloušťka strun, materiál, typ vinutí, menzura nástroje a ladění určují tah jednotlivých strun. Do určité míry platí, že čím větší tah, tím stabilnější je ladění a bohatší zvuk s delším sustainem, je však fyzicky náročnější na takové struny hrát. Výběr tloušťky je tedy proces závislejší na osobních preferencích daného hudebníka a sestává z kompromisu mezi lehkostí hry a kvalitou zvuku.

1.6 Snímače

Snímače jsou jednou z nejdůležitějších součástí elektrické kytary, neboť způsob, kterým převádějí mechanické kmity strun na elektrický signál, výrazně ovlivňuje vlastnosti výsledného zvuku. V průběhu 20. století bylo vyvinuto hned několik typů mechanicko-elektrických převodníků využívající ke své funkci rozdílné fyzikální principy.

1.6.1 Elektrostatické snímače

V roce 1923 vyrobil Lloyd Allayre Loar (1886-1943) první kytaru s elektrostatickým snímačem. Jedná se o kondenzátor s jednou pohyblivou a jednou stacionární elektrodou. Pohyblivá elektroda je většinou ocelový či mosazný jazýček, který je na jedné straně ukotvený. K elektrodám je připojen zdroj polarizačního napětí, který mezi nimi vytváří elektrické pole. Kmitání pohyblivé elektrody mění kapacitu kondenzátoru, což vede ke změnám napětí na připojeném odporu odpovídajícím kmitání dané části nástroje.



Obr. 1.1 Princip elektrostatického snímače

Tento způsob snímání byl hojně používán v první polovině 20. století. Nutnost poměrně vysokého polarizačního napětí a velké přesnosti při výrobě i instalaci však vedla k nahrazení jinými typy snímačů. Elektrostatického principu se nadále využívá v kondenzátorových mikrofonech. [5]

1.6.2 Piezoelektrické snímače

V roce 1880 objevili Jacques a Pierre Curie piezoelektrický jev, tedy vznik elektrického napětí na některých krystalech při mechanickém namáhání. Objevili také jev opačný, tzn. přivedení napětí na tyto krystaly vede k jejich mechanické deformaci.

Piezoelektrické snímače pro hudební nástroje se objevily až v 60. letech 20. století. Skládají se ze dvou destiček, mezi nimiž je piezoelektrický materiál. Jedna destička je pevně připevněná k tělu nástroje, zatímco druhá je upevněná tak, aby se mohla pohybovat. Při vibracích nástroje pak pevně upevněná deska tyto vibrace okamžitě přejímá, zatímco volná deska se díky své setrvačnosti pohybuje se zpožděním. Tento pohyb způsobuje pnutí a stlačování piezoelektrického materiálu, který následně generuje elektrické napětí.



Obr. 1.2 Princip piezoelektrického snímače

K výrobě těchto snímačů se nejčastěji používá monokrystalický křemen či keramické sloučeniny. Obvyklé jsou dvě metody umístění – u kobyly, což zajišťuje vysokou odolnost vůči vzniku zpětné vazby, ale výsledný zvuk zachycuje především struny. Druhá metoda umísťuje snímač na ozvučnou desku, což vede k lepšímu zachycení zvuku celého nástroje, ale zvyšuje se náchylnost ke zpětné vazbě a snímání rušivých zvuků vznikajících při hře. [5] Piezoelektrické snímače se užívají zejména u akustických nástrojů, v elektrických kytarách se objevují zřídka.

1.6.3 Elektromagnetické snímače

Ve 30. letech 20. století zkonstruoval George D. Beauchamp (1899-1941) první elektromagnetický snímač nezávislý na fyzickém kontaktu s tělem nástroje. Tvoří ho cívka z vodivého materiálu a permanentní magnet umístěný okolo strun.

Kmitání strun narušuje magnetické pole snímače, což mění magnetický tok a tím dochází k indukci střídavého proudu na cívce.

O několik let později přišli Guy Hart, Alvino Rey, John Kutilek a Walter Fuller s podobným snímačem, který však byl celý umístěn pod strunami, což bylo mnohem praktičtější, neboť snímač nijak neomezoval hru. Skládá se z jedné cívky s magnetickým jádrem, jejíž pólové nástavce nad cívku vyčnívají a jsou tak v blízkosti strun. Nevýhodou tohoto snímače, označovaného jako jednocívkový snímač (anglicky single coil – SC), je náchylnost k přijímání elektromagnetického rušení. I přes to se rychle rozšířil a stal se jedním ze dvou nejpoužívanějších typů snímačů elektrických kytar.

Druhý typ navrhl a zkonstruoval na počátku 50. let Seth E. Lover (1910-1997) ve snaze odstranit zmíněnou citlivost na elektromagnetické rušení. K jednocívkovému snímači přidal druhou cívku s opačným vinutím a polaritou magnetického jádra. Jejich spojením se signály sečtou, což díky opačné polaritě cívek vede k potlačení rušivých signálů, opačná polarita magnetů pak zajistí sečtení signálů vzniklých kmitáním strun. Začal se proto označovat jako humbucker (HB). Vedlejším účinkem této konstrukce je jiný charakter zvuku než u jednocívkových snímačů, který se projevuje zejména úbytkem vyšších frekvencí.

K výrobě cívek elektromagnetických snímačů se převážně používá velmi tenký měděný drát v několika tisících závitěch. Permanentní magnety bývají vyrobeny z keramických sloučenin či slitiny AlNiCo (hliník, nikl, kobalt) v různých poměrech. Pólové nástavce můžou být buď samostatné pro každou strunu nebo průběžné (tzv. rails snímače).

1.6.4 Optické snímače

Na konci 60. let 20. století sestrojil Ronald R. Hoag optický snímač pracující na transmisním principu. Mezi zdrojem světla (obvykle LED dioda) a fotočlánkem je umístěna struna, jejíž kmity mění intenzitu osvětlení na fotočlánek a tím i výstupní elektrický proud.

O několik let později vytvořil John Joseph Ryczek bezkontaktní optický snímač pro hudební nástroje využívající reflexní princip, který byl znám už na konci 19. století. Paprsek ze světelného zdroje dopadá na odraznou plochu

umístěnou na kmitající části nástroje, která paprsek moduluje a odráží k přijímači s optoelektrickým převodníkem.

Poslední typ optického snímače vytvořili v 90. letech 20. století Christopher R. Willvox, Bradley W. Curtis a Bruce L. Kennedy. Jejich snímač pracuje na optickém principu. „Každá struna je osvětlována infračervenou LED diodou a stín struny dopadá na dvojici fotodetektorů. Při pohybu struny se mění poloha a velikosti stínů a tyto změny jsou fotodetektory převáděny na elektrické kmity, které jsou dále zpracovávány.“ [5]

Přestože nejsou optické snímače citlivé na elektromagnetické pole a vyznačují se vyrovnanou kmitočtovou charakteristikou, objevují se v hudebních nástrojích jen velmi vzácně.

1.7 Základní elektrické obvody pro úpravu signálu

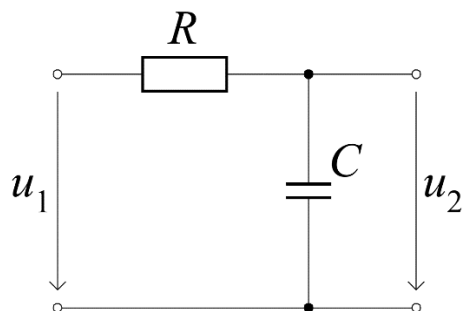
S rozvojem elektroniky přišlo i mnoho různých obvodů pro úpravu zvukového signálu. V této kapitole se však budu zabývat pouze těmi, které jsou relevantní vzhledem k mému návrhu.

1.7.1 Kmitočtové filtry

Běžně používaným obvodem nejen v elektrických kytarách jsou kmitočtové filtry, tj. lineární obvody upravující modulové a fázové kmitočtové charakteristiky procházejících signálů. Frekvenční složky, které obvody neovlivňují, se nachází v tzv. propustném pásmu, zatímco potlačené frekvenční složky leží v tzv. nepropustném pásmu. Kmitočtové filtry jsou často realizovány pomocí rezistorů a kondenzátorů. [7]

Prvním takovým filtrem je dolní propust RC, jejíž modulovou kmitočtovou charakteristiku lze vyjádřit vzorcem (1.2). Jedná se o dolní propust 1. řádu, modul její přenosové funkce tedy nad mezním kmitočtem klesá o 20 dB na každou dekádu.

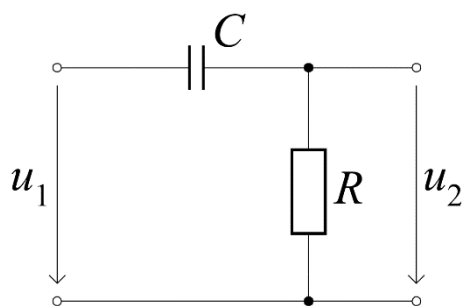
$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} \quad (1.2)$$



Obr. 1.3 Dolní propust RC (převzato z [7])

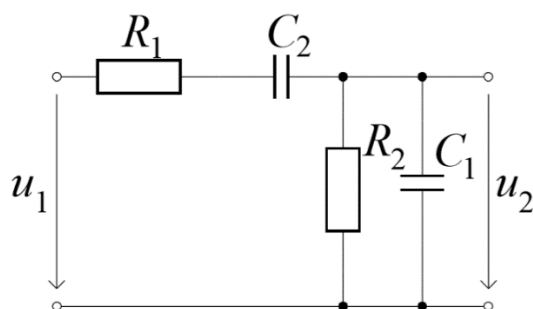
Druhým typem filtru je horní propust CR, jejíž modulovou kmitočtovou charakteristiku lze vyjádřit vzorcem (1.3). Jde o horní propust 1. řádu, tzn. modul její přenosové funkce se pod mezním kmitočtem zvyšuje se strmostí 20 dB/dek.

$$K(\omega) = \frac{\omega RC}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} \quad (1.3)$$



Obr. 1.4 Horní propust CR (převzato z [7])

Kombinací horní a dolní propusti můžeme vytvořit tzv. pásmovou propust. Existuje několik variant zapojení, jedno z nich je uvedeno na **Obr. 1.5**.



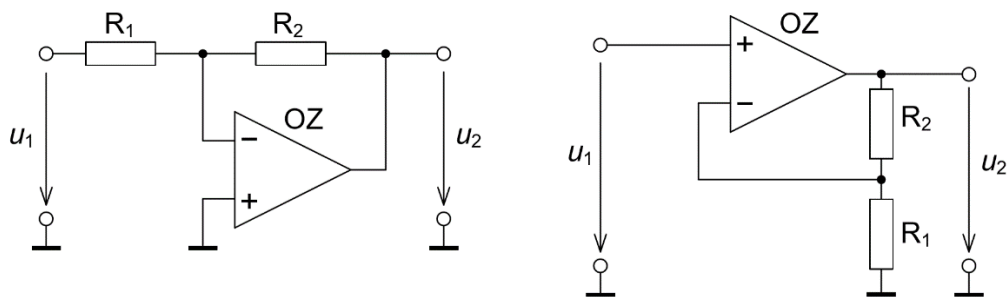
Obr. 1.5 Pásmová propust RC (převzato z [7])

1.7.2 Zesilovače s OZ

U operačních zesilovačů s diferenčním vstupem existují dvě možná uspořádání zpětnovazební sítě, konkrétně invertující a neinvertující zapojení. Výstupní napětí invertujícího zesilovače lze vyjádřit vzorcem (1.4), výstupní napětí neinvertující zesilovače pak obdobně vzorcem (1.5). [7]

$$u_2 = -\frac{R_2}{R_1} u_1 \quad (1.4)$$

$$u_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_1 \quad (1.5)$$

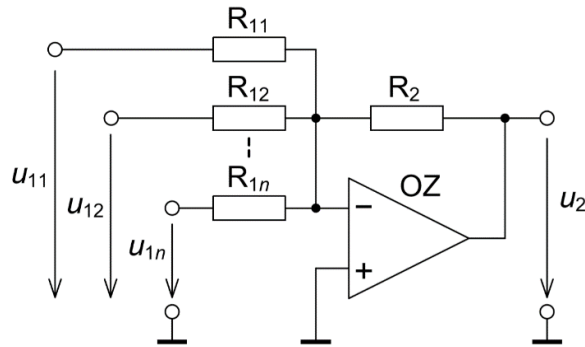


Obr. 1.6 a) Invertující zesilovač, b) neinvertující zesilovač s OZ (převzato z [7])

1.7.3 Součtový zesilovač s OZ

Jak již název napovídá, součtový zesilovač slouží ke sčítání napětí z více zdrojů. Základem tohoto obvodu je operační zesilovač v invertujícím zapojení. Výstupní napětí součtového zesilovače je možno vyjádřit vzorcem (1.6). [7]

$$u_2 = -R_2 \left(\frac{u_{11}}{R_{11}} + \frac{u_{12}}{R_{12}} + \dots + \frac{u_{1n}}{R_{1n}} \right) \quad (1.6)$$



Obr. 1.7 Součtový zesilovač (převzato z [7])

1.7.4 Aktivní RC filtry s OZ

Kmitočtové filtry lze realizovat i za použití aktivních prvků. Na rozdíl od pasivních filtrů umožňují vytvoření filtrů vyššího řádu a nejsou ovlivněny připojenou zátěží.

Prvním způsobem návrhu aktivních filtrů je soustředit pasivní část do jednoho bloku, aktivní část do druhého bloku a následně je vhodným způsobem propojit. Výhodou je minimalizace počtu aktivních prvků, nevýhodou jsou však zvýšené požadavky na stálost jejich vlastností a nesnadné nastavování pasivní části obvodu.

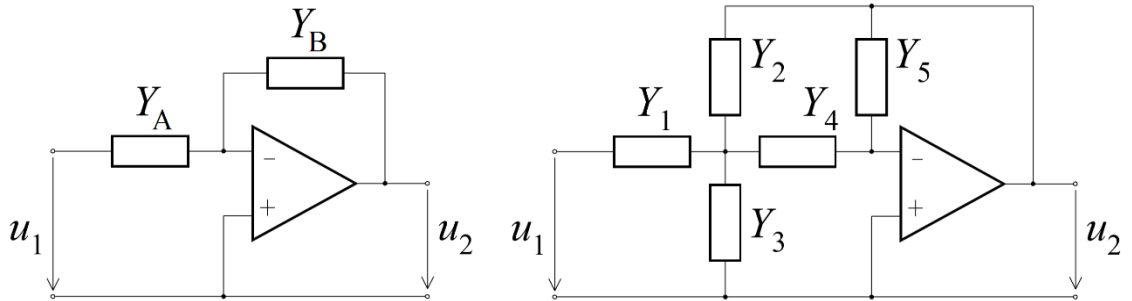
Druhý způsob využívá většího množství jednoduchých filtrů s aktivními i pasivními částmi. Při vhodném návrhu je tak třeba doladovat pouze dílčí jednoduché filtry, nikoliv celý aktivní filtr. [7]

Aktivní filtr s jednoduchou smyčkou zpětné vazby (**Obr. 1.8a**) je složen ze dvou pasivních dvojbranů RC, označených A a B, a operačního zesilovače v invertujícím zapojení. Přenosovou funkci tohoto filtru lze vyjádřit vzorcem (1.7), kde y_{21A} je přenosová vodivost dvojbranu A v přímém směru a y_{12B} přenosová vodivost dvojbranu B ve zpětném směru.

$$K(\bar{s}) = -\frac{y_{21A}}{y_{12B}} \quad (1.7)$$

Aktivní filtr s rozvětvenou smyčkou zpětné vazby je složen z více pasivních dvojbranů RC rozložených ve více zpětnovazebních cestách. Běžné zapojení takového filtru je na **Obr. 1.8b**. Přenosovou funkci tohoto filtru je možno vyjádřit vzorcem (1.8), kde Y_1 až Y_5 jsou admitance jednotlivých dvojbranů. [7]

$$K(\bar{s}) = -\frac{Y_1 Y_4}{Y_2 Y_4 + Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)} \quad (1.8)$$



Obr. 1.8 Aktivní kmitočtový filtr s a) jednoduchou a b) rozvětvenou smyčkou zpětné vazby
(převzato z [7])

2 NÁVRH

Návrh experimentálního nástroje vychází především z elektrické kytary a niněry. Hlavním cílem tohoto nástroje je zkombinovat hráčskou přívětivost a přizpůsobivost snímání zvuku elektrické kytary s charakteristickým zvukem a praktickým ovládním kolového smyčce niněry. Podobných zvukových kvalit je možno dosáhnout i tradičním smyčcem, který je však kvůli konstrukčním vlastnostem kytary nepraktický. Použitím hmatníku a absencí bordunových strun je docílena i větší nezávislost na tónině právě hrané skladby. Rozdělení nástroje na dvě samostatně ovládané části – harmonickou a melodickou – dále prohlubuje všestrannost instrumentu.

2.1 Konstrukce

Na masivním dřevěném těle je umístěn struník, kobylka a dvojice kolových smyčců. V horní části těla je umístěna dutina pro elektroniku. Protože je tělo poměrně rozměrné, zvolil jsem olšové dřevo, které je lehké a snadno se opracovává. Struník, který musí vydržet nemalý tah strun, je mosazný. Pro kobylku jsem zvolil ebenové dřevo, které je velice pevné.

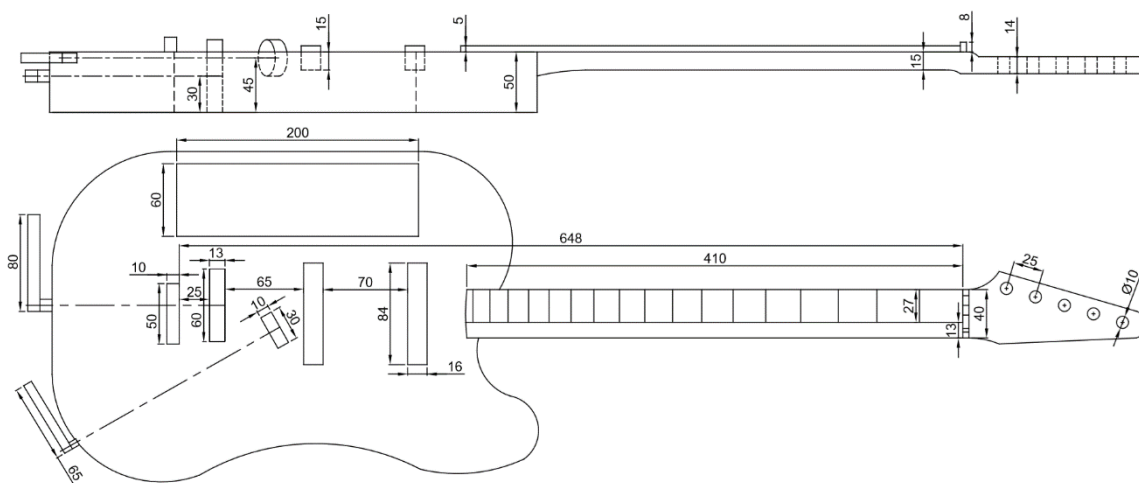
Zmíněné dva kolové smyčce jsou též ebenové z důvodu odolnosti. Jsou osazeny na ocelových hřídélích vyvedených mimo tělo nástroje, kde jsou k nim připevněny klíčky určené k ovládní. Z důvodu jejich přílišné blízkosti však není možné vést je paralelně, aniž by jedna z hřidel byla vynesena spojkou o několik centimetrů dále. To s sebou však nese značné obtíže při případných opravách nebo výměnách v rámci mechanismu smyčce. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl menší ze smyčců, a tím i jeho hřidel, naklonit o 30° směrem od druhého excitátoru, čímž je zajištěn dostatečný prostor pro manipulaci s oběma klíčkami a zároveň se nekomplikují zmíněné opravy mechanismu.

Krk nástroje připomíná kytarový krk, na rozdíl od něj se však směrem ke kobylce nerozšiřuje. Výraznější rozdíl představuje hmatník, který je rozdělen na dvě části. Vrchní část osazená pražci je určena k akordické hře, zatímco spodní, bezpražcová část slouží ke hře melodické. Kvůli velkému tahu strun je krk

z pevného javorového dřeva a stejně jako většina kytarových krků je vybaven nastavitelnou výztuhou. Na hmatník je použito palisandrové dřevo.

Konstrukce hlavy nástroje s pěti ladícími mechanikami taktéž vychází z elektrické kytary. Stejně jako kobylka je i nultý pražec z ebenového dřeva. Menzura instrumentu je 648 mm, což odpovídá kytarám typu Telecaster či Stratocaster.

Jak již bylo zmíněno, nástroj má dvě skupiny strun. Harmonické struny jsou tři, laděné v kvartách (E, A, d), zatímco melodické jsou pouze dvě, laděné v oktávě (e, e¹). Rozestupy harmonických strun jsou 8 mm, kdežto melodické struny, které jsou hrány zároveň (podobně jako například u dvanáctistrunné kytary), mají rozstup pouze 3 mm. Krajiní struny jsou vždy 5 mm od okraje hmatníku. S ohledem na vlastnosti kolového smyčce, menzuru a ladění jsem zvolil hlazené struny o tloušťkách² 48, 38 a 28 pro harmonické struny, pro melodické pak 20 a nevinnou strunu tloušťky 10.



Obr. 2.1 Návrh nástroje

2.2 Snímače

Volba snímačů je důležitou částí návrhu, neboť jakožto mechanicko-elektrické převodníky mají velký vliv na finální zvuk nástroje.

² Tloušťka kytarových strun se udává v tisícinách palce.

Jelikož elektrostatické snímače potřebují ke svému fungování poměrně velké polarizační napětí, a navíc nejsou běžně dostupné, jejich použití není příliš praktické.

Optické snímače nejsou běžně dostupné, jejich použití pro tento nástroj tedy není možné.

Elektromagnetické snímače jsou nejrozšířenějším způsobem snímání nejen u elektrických kytar, ale u elektrofonů obecně. Z důvodu jejich dostupnosti, snadné instalace a množství možných zapojení jsem proto zvolil dva dvojcívkové snímače umístěné cca 10 cm a 18 cm od kobylky. Kvůli netypickým rozestupům strun je vhodnější použití snímačů s průchozími pólovými nastavci, které umožní rovnoměrnější rozložení magnetického pole než modely s individuálními pólovými nastavci. Tyto snímače jsou nejčastěji dostupné ve verzi mini-humbucker, tzn. dvojcívkový snímač velikosti jednocívkového.

Jelikož se piezoelektrické snímače zvukovým charakterem podstatně liší od elektromagnetických snímačů a jsou poměrně dobře dostupné, jejich použití je vhodné pro rozšíření zvukových možností. Kvůli minimalizaci rizika vzniku zpětné vazby a snížení náchylnosti ke snímání rušivých zvuků je tento snímač umístěn pod kobylkou. Piezoelektrické snímače mají vysokou výstupní impedanci, bude tedy třeba použití aktivních prvků.

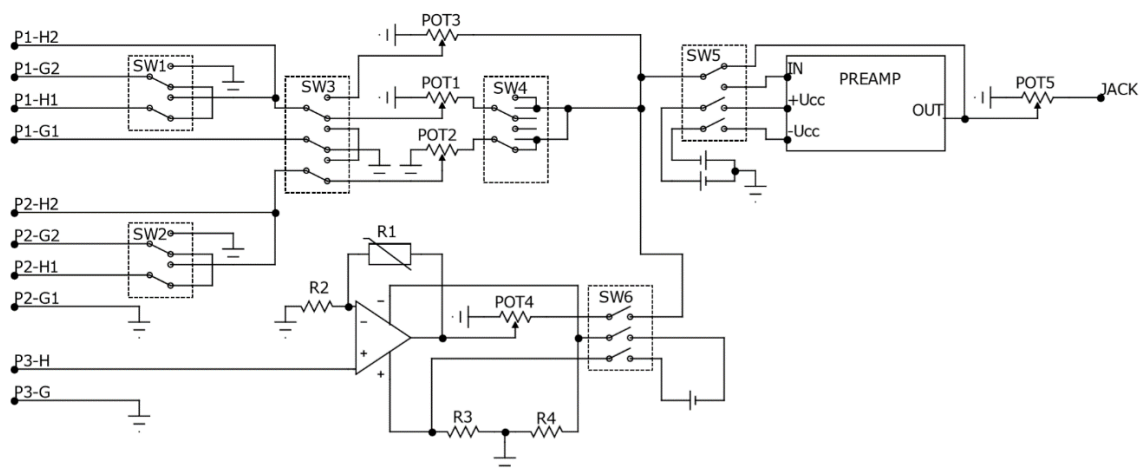
2.2.1 Zapojení snímačů

Při volbě zapojení jednotlivých snímačů jsem se snažil maximalizovat množství potenciálních zvukových barev. Jelikož jsou dvojcívkové elektromagnetické snímače (ve schématu označeny P1 a P2) běžně vybaveny vývody každé cívky zvlášť (ve schématu označeny H1-G1/H2-G2, H – hot, G – ground), nabízí se možnost spojit je do série či paralelně. Toto je realizováno DPDT přepínači SW1 a SW2. Stejný princip lze použít i na celé snímače, k čemuž slouží 3PDT přepínač SW3. Při paralelním zapojení jsou jednotlivé snímače vedeny na individuální hlasitostní potenciometry POT1 a POT2, následně jsou přivedeny na DP3T přepínač umožňující výběr každého snímače zvlášť či jejich paralelní spojení. V případě sériového spojení je kombinovaný signál veden na společný hlasitostní potenciometr POT3.

Piezoelektrický snímač (ve schématu označený P3), který má ve srovnání s elektromagnetickými snímači mnohem vyšší výstupní impedanci, je nejprve přiveden na neinvertující zesilovač s OP. Primárním účelem tohoto zesilovače je impedanční oddělení, odporovým trimrem R1 však lze nastavit zesílení o 0-6 dB. Za tímto zesilovačem je umístěn hlasitostní potenciometr POT4. Následuje 3PST přepínač SW6 sloužící k odpojení napájení zesilovače a zároveň odpojuje obvod piezoelektrického snímače od zbytku zapojení.

Za tímto přepínačem, resp. SW4/POT3 v případě elektromagnetických snímačů, je provedeno sečtení signálů z obou částí obvodu na společném uzlu. Sloučený signál je přiveden na 3PDT přepínač SW5, který umožňuje obejít korekčního předzesilovače a zároveň slouží jako vypínač jeho napájení. Obě signálové cesty jsou nakonec přivedeny na hlavní hlasitostní potenciometr POT5 a následně na výstupní 6,3 TS konektor.

Pomocí všech použitých přepínačů lze dosáhnout 24 různých zapojení, každé s odlišnými zvukovými kvalitami. Tyto možnosti dále rozšiřují použité potenciometry, jimiž lze nastavit různé poměry mezi signály z jednotlivých snímačů.



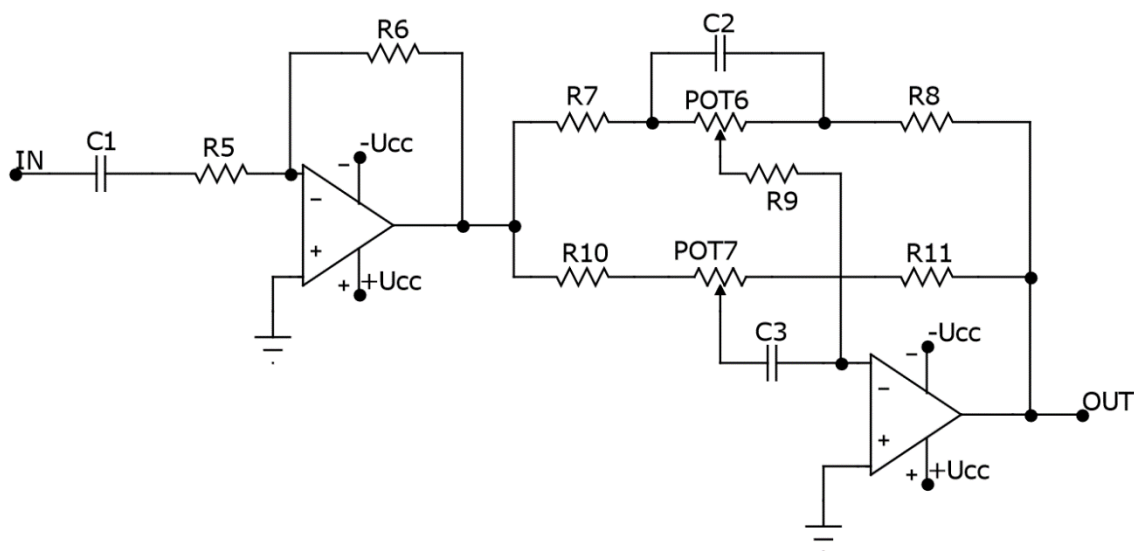
Obr. 2.2 Schéma zapojení snímačů

2.3 Korekční zesilovač

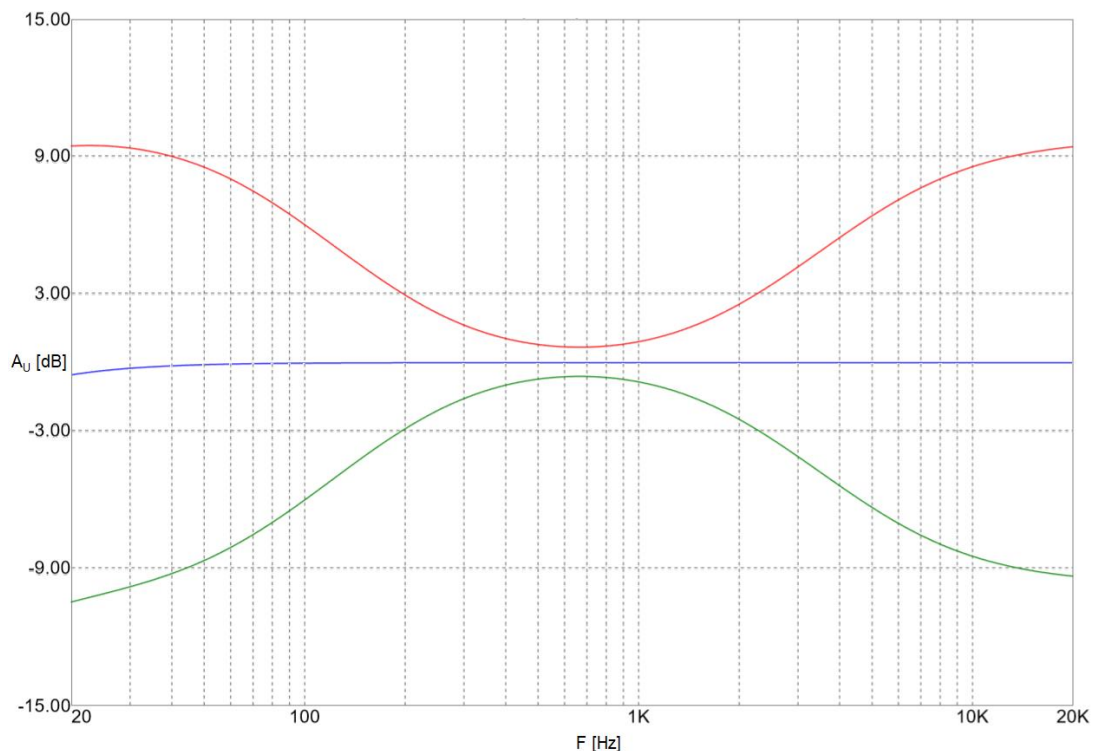
Pro další obohacení dosažitelných zvukových barev je do nástroje zabudován dvoupásmový korekční zesilovač. Jeho základem jsou dva invertující zesilovače

s OZ symetricky napájené dvěma devítivoltovými bateriemi. První zesilovač má jednotkový přenos a plní funkci bufferu, tj. impedančního oddělení.

Druhý zesilovač využívá principů aktivních kmitočtových filtrů k potlačení či zdůraznění nízkých, respektive vysokých kmitočtů. Pomocí potenciometrů POT6 (nízké kmitočty) a POT7 (vysoké kmitočty) lze nastavovat zesílení těchto pásem v rozsahu ± 9 dB. Mezní kmitočty jsou 200 Hz a 2,3 kHz. V grafu na **Obr. 2.2** jsou vykresleny modulové kmitočtové charakteristiky přenosu pro střední a obě krajní polohy potenciometrů.



Obr. 2.3 Schéma zapojení korekčního zesilovače



Obr. 2.4 Kmitočtová charakteristika modulu přenosu korekčního zesilovače

Ve střední poloze potenciometrů je tato charakteristika lineární s výjimkou velmi malého útlumu na kmitočtech pod 40 Hz způsobeného kondenzátorem C2. Vzhledem k velikost útlumu a faktu, že se nachází o oktávu níže, než leží první harmonická složka nejnižšího tónu, je však tato iregularita zanedbatelná.

Tab. 2.1 Použité součástky

kategorie	součástka	hodnota
přepínače	SW1, SW2	DPDT
	SW3, SW5	3PDT
	SW4	DP3T
	SW6	3PST
rezistory	POT1-5	1 M Ω
	POT6, POT7	50 k Ω
	R1	1 M Ω
	R2	1 M Ω
	R3, R4	10 M Ω

Tab. 2.2 Použité součástky (pokračování)

rezistory	R5, R6, R9, R10, R11	10 k Ω
	R7, R8	22 k Ω
kondenzátory	C1	2,2 μ F
	C2	47 nF
	C3	1,8 nF

3 REALIZACE

3.1 Změny původního návrhu

3.1.1 Konstrukce

Za účelem zlepšení ergonomie hry jsem se rozhodl tělo oproti původnímu návrhu zkrátit o 5 cm. Dále jsem přesunul dvě ladící mechaniky na druhou stranu hlavy, což umožnilo hlavu zmenšit a zlepšit tím stabilitu nástroje.

Kvůli rozměrům piezoelektrického snímače bylo třeba zvětšit kobylku. Vyřešil jsem to umístěním podložky pod hlavní část kobylky. Jelikož se s ebenem poměrně špatně pracuje, použil jsem pro tuto podložku palisandr. Přestože je měkčí než eben, je dostatečně tvrdý, aby se tlakem strun nijak nezdeformoval.

Během výroby kolových smyčců se projevila náchylnost vláken ebenu k odštípnutí. Při tvarování se z okraje odštípl poměrně velký kus dřeva zasahující přibližně 0,5 cm do poloměru. Jelikož by to nepříznivě ovlivnilo zvukové vlastnosti, musel jsem hledat jinou alternativu. Zvolil jsem technologii 3D tisku, která umožňuje výrobu velmi přesných součástek.

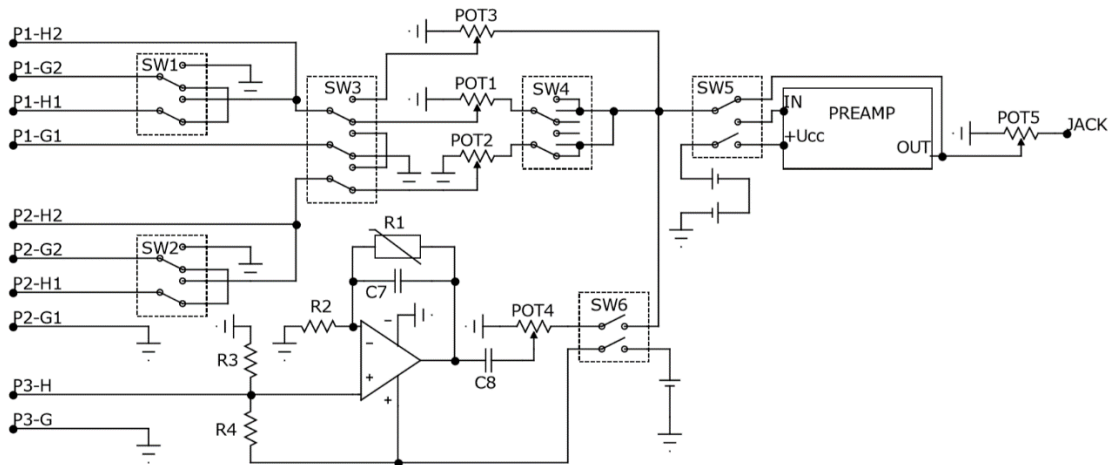
3.1.2 Elektronika

Jelikož by pásmo hloubek u ekvalizéru ovlivňovalo pouze jednu či dvě harmonické složky u nejnižších tónu, posunul jsem zvýšením kapacity kondenzátoru C3 na 22 nF mezní frekvenci tohoto pásma o oktávu výše, tzn. na 400 Hz.

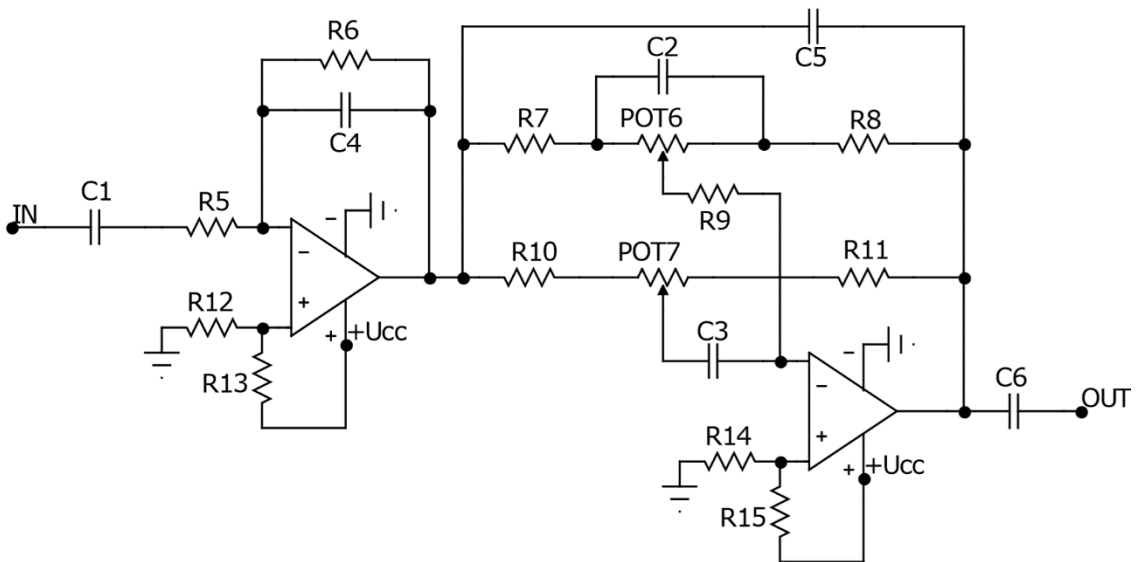
Kvůli nedostatečné dostupnosti 3PDT/3PST prepínačů jsem byl nucen použít v aktivní části obvodu nesymetrické napájení namísto symetrického, jak je uvedeno v původním návrhu. Aby zesilovače správně pracovaly s kladným i záporným vstupním napětím, bylo třeba ke vstupnímu signálu přičíst stejnosměrnou složku odpovídající polovině rozsahu napájecího napětí. Abych zamezil přenosu stejnosměrného napětí na vstup připojeného zařízení (např. zvukové karty), bylo třeba za jednotlivými aktivními obvody (tj. buffer piezoelektrického snímače a dvoupásmový ekvalizér) přidat filtr typu horní

propust s velmi nízkým mezním kmitočtem. Ta je realizována kondenzátory C6, resp. C8, a za nimi umístěnými potenciometry POT4, resp. POT5.

Dále byl do zpětné vazby každého z operačních zesilovačů přidán kondenzátor s velmi malou kapacitou (C4, C5, C7), který by měl zamezit oscilaci na vysokých kmitočtech, která by vedla k saturaci daného zesilovače.



Obr. 3.1 Upravené schéma zapojení snímačů



Obr. 3.2 Upravené schéma zapojení ekvalizéru

3.2 Postup stavby

3.2.1 Stavba základních částí nástroje

Nejdříve jsem slepením tří kusů javorového dřeva vytvořil základ krku. Prostřední díl je 6,5 mm široký a je do něj vybroušen profil výztuhy, kterou díky tomu stačilo do krku vložit bez nutnosti frézování drážky. Na krk jsem následně nalepil hmatník s vyřezanými drážkami pro pražce. Dále jsem v oblasti hlavy přilepil další dva kusy dřeva a tímto vzniklou plochu jsem vyřezal do konečného tvaru hlavy. Tuto plochu jsem následně zbrousil o cca 5 mm, aby byly ladící mechaniky níže než nultý pražec, a vyvrtal jsem otvory pro ladící mechaniky. Dále jsem vytvaroval profil krku a osadil hmatník pražci, čímž byl krk téměř dokončen. Nakonec jsem přilepil nultý pražec a vybrousil do něj drážky pro struny.



Obr. 3.3 Základní díly krku

Dalším krokem bylo slepení tří bloků olšového dřeva. Prostřední díl je 4 cm široký a je v něm vybroušen žlábek pro usazení krku. Po nakreslení tvaru na tělo jsem ho vyřezal a zabrousil. Následně jsem vyfrézoval otvory pro elektroniku, snímače a kolové smyčce. Poté jsem k tělu přilepil připravený krk.



Obr. 3.4 Tělo s přilepeným krkem

Kolové smyčce byly z tvrzeného polyethylentereftalátu (PET-G) vytištěny na 3D tiskárně, stejně jako průchodky pro ocelové osy smyčců a jejich uchycení k ovládacím klíčům.

3.2.2 Kompletace

Při kompletaci jsem nejprve umístil kolové smyčce, přilepil průchodky os k tělu a uchytil ovládací klíčky. Po zakrytí dutin os jsem přilepil kobylku, pod níž je umístěn piezoelektrický snímač. Kobylku bylo třeba dotvarovat, především pak vybrousit drážky pro struny. Dále jsem osadil elektromagnetické snímače a hardware, tj. ladící mechaniky a kolíky pro uchycení popruhu. Následně jsem na kolové smyčce aplikoval vrstvu kalafuny, která značně zvyšuje jejich třecí odpor a je proto nutná k rozkmitání strun. Posledním krokem před osazením elektroniky bylo natažení strun a jejich naladění. Jelikož se při zvyšování tahu ohýbal krk, bylo to třeba kompenzovat přitahováním výztuhy krku, aby struny stále ležely na smyčcích. Následně jsem pomocí proužků papíru umístěných do drážek v kobylce upravil výšky strun tak, aby na smyčce nepřiléhaly příliš silně, což by vedlo ke kmitání strun pouze mezi pražcem a smyčcem, nikoliv kobylkou.



Obr. 3.5 Uložení kolových smyčců



Obr. 3.6 Umístění piezoelektrického snímače



Obr. 3.7 Struník

3.2.3 Elektronika

Kabely snímačů jsou skrz tělo vyvedeny na zadní stranu nástroje a následně do dutiny pro elektroniku.

Většinu aktivních částí obvodu (tzn. buffer piezoelektrického snímače a dvoupásmový ekvalizér) jsem umístil na pájecí propojovací pole. Všechny potenciometry a přepínače jsem umístil na ovládací panel. Abych ušetřil místo na ovládacím panelu, sloučil jsem SW1 s POT1 a SW2 s POT2 za použití push-pull potenciometrů, tj. součástek kombinujících potenciometr a DPDT přepínač. Obvod je zapojen podle **Obr. 2.3** a **Obr. 3.1**. Jelikož mají potenciometry POT6 a POT7 průměr osy odpovídající imperiálním mírám ($0,635 \text{ mm} = \frac{1}{4} \text{ palce}$), musel jsem pro ně použít jiný knoflík.

Tab. 3.1 Použité součástky v hotovém nástroji

kategorie	součástka	hodnota/typ
přepínače	SW1, SW2, SW5	DPDT
	SW3	3PDT
	SW4	DP3T
	SW6	DPST

Tab. 3.2 Použité součástky v hotovém nástroji (pokračování)

rezistory	POT1, POT2	1 M Ω log, DPDT push-pull
	POT3-5	1 M Ω log
	POT6, POT7	50 k Ω linear
	R1	1 M Ω
	R2	1 M Ω
	R3, R4, R12-15	10 M Ω
	R5, R6, R9, R10, R11	10 k Ω
	R7, R8	22 k Ω
kondenzátory	C1, C6, C8	2,2 μ F
	C2	47 nF
	C3	22 nF
	C4, C5, C7	15 pF
OZ		NE5534P
snímače	elektromagnetické	Belcat BHS-95, BHS-95N
	piezoelektrický	Fire&Stone P-2

3.3 Hotový nástroj



Obr. 3.8 Hotový nástroj (pohled na přední část)



Obr. 3.9 Hotový nástroj (pohled na zadní část)

4 ZHODNOCENÍ NÁSTROJE

4.1 Problémy zjištěné při konstrukci

Ebenové dřevo se při stavbě projevilo jako problematický materiál. V návrhu bylo zvoleno kvůli jeho extrémní tvrdosti, což je však nevýhoda při opracovávání. Velmi těžko se brousí a je náchylné k odštípnutí třísek v případě opracovávání v rovině kolmo na vlákna dřeva.

Umístění osy většího smyčce je potenciálně problematické z hlediska oprav či úprav, neboť je osa zapuštěna poměrně hluboko do těla. Přístup k ní, respektive ke spoji se smyčcem a průchodkám, v nichž je uložena, je tudíž možný jen po odstranění nemalého množství dřeva, jež dutinu zakrývá. Daný úsek by před úpravou bylo třeba vyfrézovat a následně zakrýt novým, na míru vyřezaným kusem dřeva, což je značně nepraktické a v případě opakovaných úprav potenciálně i finančně náročné. Nad touto osou se nachází kobylka a struník, jež by též bylo třeba odstranit. V případě kobylky by to mohlo vést k jejímu znehodnocení, neboť je k tělu přilepena.

4.2 Problémy zjištěné po kompletaci

Nezanedbatelný problém se ukázal v samotném principu mého návrhu. Po přitlačení strun k hmatníku jsou struny zároveň silněji přitlačeny ke smyčci, což vede ke kmitání struny mezi daným pražcem (či prstem v případě bezpražcové části) a smyčcem, nikoliv mezi pražcem a kobylkou. Kmitající část struny je tudíž zkrácena, což vede ke zvýšení frekvence daného tónu. Všechny tóny kromě otevřených strun jsou tudíž rozladěny směrem nahoru od přibližně 1,5 půltónu v případě prvního pražce až po přibližně 4 půltóny na posledním (17.) pražci.

Poměrně zanedbatelným problémem je použití stejného typu ladících mechanik na obou stranách hlavy. Ladění strun na spodní straně se kvůli tomu provádí otáčením kolíků opačným směrem, než je běžné, což může mírně komplikovat proces ladění.

Dalším problémem spojeným s laděním nástroje je velký tah strun. U běžných niněr se při ladění jednotlivých strun ostatní struny oddálí od smyčce

jejich přesunutím do méně hluboké drážky na kobylce. Jelikož má můj nástroj kovové struny pod poměrně velkým tahem, jejich ukotvení (struník) je blízko u kobylky a drážky v kobylce jsou 2 až 5 mm hluboké, tento postup by vyžadoval větší sílu, než je běžný hráč schopen vyvinout. Navíc by se tím dále zvýšil tah strun, což by mohlo vést k jejich prasknutí. Vyřešil jsem to nadzdvihnutím strun až za smyčcem (směrem ke krku) pomocí 18 mm vysokých kolíků, do nichž byl pro lepší uchycení struny vybroušena drážka.

Jako nepraktické se ukázalo umístění výstupního konektoru na ovládací panel v horní části nástroje. Kabel propojující nástroj s připojeným zařízením tak musí být veden přes horní okraj na zadní stranu nástroje, kde může tlačit na tělo hráče, což znepříjemňuje hru. Nevýhodou tohoto umístění je také snížená stabilita kabelu.

Poslední problém se objevil až po několika hodinách testování, kdy se větší smyčec začal zadržávat o struny a přestal se s pohybem kličky otáčet. Smyčec byl k ose přilepen, lepidlo však nevydrželo vlivem příliš velké třecí síly strun na obvod smyčce a utrhlo se. Při snížení třecí síly (např. odkloněním jedné či dvou strun od smyčce) osa přestane prokluzovat a smyčec se znovu začne otáčet díky velmi těsnému spojení s osou, znamená to však výrazné snížení funkčnosti.

4.3 Ergonomie

Z hlediska ergonomie hry nejsou s nástrojem žádné závažné problémy. Profil krku nástroje přibližně odpovídá kytarovému profilu D. Jelikož je hmatník experimentálního nástroje užší než kytarové hmatníky, mohlo by při úchopu docházet ke křečím v dlani. Ponechal jsem proto krk silnější, čímž se tento nepříznivý efekt kompenzuje. Tvar hmatníku, který na rozdíl od jiných strunných nástrojů není zaoblený, nemá negativní vliv na ergonomii hry. Vykrojení u napojení krku na tělo je dostatečně velké a umožňuje pohodlný přístup k posledním pražcům. Díky možnosti kompenzace tahu strun aktivní výztuhou je možné dosáhnout přijatelného dohmatu (tj. vzdálenosti strun od pražců či samotného hmatníku v případě bezpražcové části) po celé délce krku.

Díky vykrojení na spodní straně je poměrně pohodlná i hra v sedě. Hmotnost nástroje je rovnoměrně rozložena a nástroj se tak nepřevažuje.

Zkrácení těla oproti původnímu návrhu zlepšuje pohodlí hry i pro hráče menší postavy, neboť se zmenšila vzdálenost mezi prvními pražci a klíčkami ovládající smyčce. Hráč se tudíž nemusí příliš natahovat.

Umístění kolíků pro uchycení popruhu se ukázalo jako vhodné. Při hře ve stoje popruh nepřekáží hře a je situován tak, že nepřekáží ani tělo hráče. Pokud není nástroj zavěšen příliš nízko, je přístup ke hmatníku i ovládacím klíčkám zcela bezproblémový.

4.4 Snímání a elektronika

Různé kombinace snímačů a jejich zapojení vytvářejí dle předpokladu mnoho možností co se týče barvy zvuku. Při paralelním zapojení elektromagnetických snímačů je výsledný zvuk „světlejší“ oproti sériovému zapojení, tzn. vyšší harmonické složky jsou výraznější. Obdobný rozdíl je i v paralelním/sériovém zapojení jednotlivých cívek snímačů. Snímač blíže ke krku má mírně kulatější zvuk než druhý snímač. Rozdíl mezi nimi by byl tím větší, čím dále od sebe by byly umístěny.

Piezoelektrický snímač zvukové možnosti dále rozšiřuje odlišným charakterem zvuku. Jeho nevýhodou je zřetelná přítomnost rušivých zvuků, například tření otáčejících se os smyčců o průchodky.

Dvoupásmový ekvalizér umožňuje další rozšíření dosažitelných zvukových barev, případně jejich přizpůsobení potřebám hráče či skladby.

4.5 Možnosti nástroje

Jelikož se struny jejich přimáčknutím ke hmatníku rozladí (jak popsáno výše), značně se komplikuje hra z hlediska intonace. Hra na opražcované části hmatníku je v rovnoměrně temperovaném ladění s výjimkou otevřených strun a flažoletů prakticky nemožná. Na bezpražcové části hmatníku to možné je, hráč však musí upravit prstoklad tak, aby korespondoval s menzurou vyměřenou mezi nultým pražcem a kolovým smyčcem. Kromě rovnoměrně temperovaného ladění je na

bezpražcové části hmatníku snadné použít i různá mikrotonální ladění. Opražcovaná část jiné než mikrotonální intervaly takřka neumožňuje.

Z hlediska techniky pravé ruky jsou možnosti nástroje velmi podobné niněře. Rychlost otáčení smyčce ovlivňuje dynamiku nástroje (rychlejší otáčení vede k hlasitějšímu, ostřejšímu zvuku, pomalejší otáčení naopak vytváří zvuk tišší, měkčí barvy), střídavým otáčením a zastavováním smyčce lze hrát staccato.

Jak bylo zmíněno v předchozí části, piezoelektrický snímač je citlivý i na jiné zvuky než jen kmitání strun, což lze využít k dalšímu rozšíření možností nástroje, jako je vytváření perkusivních zvuků či nejrůznějších ruchů.

Jednou z hlavních výhod kolového smyčce je možnost kontinuálního zvuku. U elektrických kytar jej lze do určité míry dosáhnout běžným smyčcem, který se však vzhledem ke konstrukci kytary nespolehlavě ovládá. Navíc je potřebná výměna smyky (tj. změna směru pohybu smyčce), což je slyšitelné a může to vést i ke krátké pomlce. Druhou možností je tzv. EBow neboli elektrický smyčec, který struny rozechvívá vytvářením elektromagnetického pole, komerčně dostupné varianty však nedokáží rozeznávat více strun najednou. Kolový smyčec umožňuje zcela spojitý zvuk i v případě vícezvuku.

Díky snímání pomocí piezoelektrického a elektromagnetických snímačů lze nástroj snadno připojit k nejrůznějším efektovým procesorům, což značně rozšiřuje již tak bohatou paletu zvukových barev. Vhodné jsou například efekty obohacující harmonické spektrum (distortion, exciter), efekty pracující s časovou složkou (phase shifter, flanger) či různé modulátory (tremolo).

5 NÁVRHY NA ZLEPŠENÍ

Pro zlepšení přístupnosti osy hlavního smyčce by bylo vhodné zakrýt dutinu odnímatelným kusem dřeva, tzn. upevnit jej například pomocí vrutů namísto lepidla. Ideální by bylo umístění tohoto krytu na zadní stranu nástroje místo přední, neboť by při jeho vyjmutí nebylo třeba odstranit kobylku a struník.

Jelikož při zmáčknutí strun na hmatníku struny kmitají mezi daným pražcem a smyčcem, je třeba s tímto jevem počítat již při návrhu. Řešením může být přesunutí smyčce na pozici kobylky a samotnou kobylku (případně i struník) posunout dále dozadu. Také je třeba prohloubit drážky v kobylce, aby struny na smyčec doléhaly s dostatečnou silou i v případě otevřených strun. Smyčec by tak efektivně sloužil i jako kobylka ve smyslu pevného uzlu na konci kmitající struny. Druhým, obdobným řešením je upravit rozestupy mezi pražci tak, aby odpovídaly menzuře vyměřené mezi nultým pražcem a smyčcem. I v tomto případě by bylo třeba prohloubit drážky v kobylce.

Zřejmým řešením problému protichůdného otáčení kolíků ladících mechanik je použití opačně orientovaných mechanik na spodní straně hlavy. Druhým řešením je realizace původního návrhu, tj. umístění všech ladících mechanik na vrchní straně hlavy.

Dále by bylo vhodné přemístit výstupní konektor na spodní polovinu nástroje, ať už na přední či spodní straně. V každém případě je třeba mít na paměti umístění klíček, aby nedocházelo k jejich kolizi s připojeným kabelem.

Za účelem zabránění prokluzování osy ve smyčci by bylo třeba použít silnější a spolehlivější upevnění spoje než pouhé lepidlo. Vhodným řešením by mohlo být například prodloužení osy 1-2 cm za smyčec, následné zahnutí tohoto konce a jeho zachycení v připravené drážce ve smyčci. Druhou možností by mohl být jiný tvar průřezu osy v místě spojení se smyčcem a otvoru ve smyčci než kruhový. Další možností je použití osy se závitem a upevnění smyčce pomocí matic.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce byl návrh a následná konstrukce prototypu experimentálního mechanicko-elektrického strunného hudebního nástroje, jehož experimentálnost spočívala nejen v neobvyklé konstrukci a způsobu rozeznívání, ale také v množství dosažitelných zvukových barev. Základem návrhu je kombinace vlastností dvou existujících nástrojů, konkrétně historické niněry a dnešní tzv. elektrické kytary.

První kapitola bakalářské práce se zabývala teoretickým rozborem dané problematiky, jež obsahoval základní principy tvorby zvuku pomocí hudebních nástrojů, popisy vybraných skupin hudebních nástrojů a jejich zástupců z hlediska historického kontextu a konstrukčních postupů, metody snímání zvuku hudebních nástrojů a základní elektrické obvody pro úpravu snímaného signálu. Získané poznatky byly nezbytné k pozdějšímu návrhu všech částí nástroje.

Ve druhé kapitole byl na základě získaných vědomostí navržen experimentální hudební nástroj. Byly zde popsány konstrukční i funkční vlastnosti jednotlivých součástí včetně odůvodnění použití daných principů a materiálů.

Ve třetí kapitole bakalářské práce byl popsán postup stavby jednotlivých částí nástroje a jeho následné kompletace. Také zde byly zaznamenány změny oproti návrhu provedeném v předchozí části a jejich odůvodnění. Změny se týkaly nejen konstrukce nástroje a použitých materiálů, ale také zapojení elektroniky.

Ve čtvrté kapitole byl výsledný nástroj zhodnocen z hlediska funkčnosti a jeho vlastností. Také zde byly popsány problémy zjištěné při stavbě a následném testování.

V páté kapitole bakalářské práce byly navrženy změny v konstrukci nástroje, které by odstranily či zmírnily problémy popsané v předchozí části.

Návrhem experimentálního strunného hudebního nástroje, následnou realizací prototypu a zhodnocením jeho funkčnosti a vlastností bylo dosaženo cíle této bakalářské práce.

Literatura

- [1] MODR, Antonín. *Hudební nástroje*. 3. vyd., Praha: SNKLHU, 1954.
- [2] PALMER, Susann a Samuel PALMER. *The hurdy-gurdy*. North Pomfret, Vt.: David & Charles, c1980. ISBN 0-7153-7888-0.
- [3] MUSKET, Doreen. *Hurdy-Gurdy Method*. England: Muskett Music, 1998. ISBN 0-946993-07-6.
- [4] KADLÍČKOVÁ, Barbora. *Niněra v českém prostředí se zaměřením na exempláře ze sbírky Českého muzea hudby* [online]. Brno, 2018 [cit. 2018-11-15]. Dostupné z: <<https://is.muni.cz/th/ok183/>>. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Filozofická fakulta. Vedoucí práce Petr Kalina.
- [5] GUŠTAR, M. *Elektrofony I*. Uvnitř: Praha, 2006. ISBN 978-80-239-8446-0.
- [6] FORRÓ, Daniel. *Musitronika: elektroakustické hudební nástroje*. Brno: Janáčkova akademie múzických umění v Brně, 2004. ISBN 80-85429-39-x.
- [7] VRBA, K. *Analogová technika*. Vysoké učení technické v Brně, 2012, s. 1-202. ISBN: 978-80-214-4458-4. (cs)