



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 HUDEBNÍ NÁSTROJ NEBO ZVUKOVÝ ZDROJ

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

František Borovička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhý, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: František Borovička

ID: 221461

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Experimentální hudební nástroj – elektroakustická harfa

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem je realizovat experimentální mechanicko-elektrický hudební nástroj, jehož kompletní návrh byl proveden v rámci semestrální práce. Neobvyklost řešení spočívá nejen ve vestavěných piezo snímačích a zesilovači, ale i v použitém materiálu a tlumící mechanice.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

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

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

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

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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

Práce se zabývá kompletním vývojem a výrobou elektrické harfy, která je obdařena novými experimentálními prvky. Tyto prvky jsou tlumicí systém, který otevírá hráči nové způsoby hry. Dále práce přináší použití neobvyklých materiálů, rozměrů a tvarů, nebo také princip snímání a následného zpracování zvukových vibrací.

Klíčová slova

Experimentální hudební nástroj, harfa, mosazný rám, elektrické vybavení, dřevěné obložení, tlumicí mechanismus.

Abstract

The work deals with the complete development and production of the electric harp, which is endowed with new experimental elements. These elements are a damping system that opens up new ways for players to play. Furthermore, the work brings the use of unusual materials, dimensions and shapes, or the principle of sensing and subsequent processing of sound vibrations.

Keywords

Experimental musical instrument, harp, brass frame, electrical equipment, wood paneling, damping mechanism.

Bibliografická citace

BOROVÍČKA, František. *Experimentální mechanicko-elektrický hudební nástroj nebo zvukový zdroj* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-12-06].

Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/138444>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Dan Dlouhý.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>František Borovička</i>
VUT ID studenta:	<i>221461</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2021/22</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Experimentální mechanicko-elektrický hudební nástroj nebo zvukový zdroj</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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: 30. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce doc. Ing. MgA. Mgr. Danu Dlouhému, Ph.D. za odbornou, pedagogickou a pohotovou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Rovněž děkuji mému otci Miroslavovi, mému kamarádovi Vojtěchu Hýžovi a firmě HaCase, za pohotovou a obětavou pomoc při realizaci prototypu nástroje.

V Brně dne: 13. prosince 2021

podpis autora

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
SEZNAM OBRÁZKŮ	11
SEZNAM TABULEK.....	13
ÚVOD	14
1. TEORETICKÁ ČÁST	15
1.1 HISTORIE HARFY	15
1.2 STRUNY.....	16
1.2.1 Výpočet délky struny	16
1.3 MATERIÁLY	17
1.3.1 Metalurgie.....	18
1.3.2 Dřeviny.....	18
1.4 SPOJE	19
1.5 MECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ.....	19
1.5.1 Tah, tlak	19
1.5.2 Krut.....	21
1.5.3 Střih.....	21
1.5.4 Ohyb.....	22
1.6 PIEZO ELEKTRICKÝ JEV	22
2. NÁVRH NÁSTROJE	23
2.1 STRUNY.....	23
2.2 VOLBA MATERIÁLU STRUN.....	23
2.3 VOLBA TŘÍDY PRŮMĚRU STRUN.....	23
2.4 VOLBA ZNAČKY STRUN	23
2.5 VOLBA STRUNY	24
2.5.1 Frekvenční rozsah nástroje	24
2.5.2 Výpočet minimální a maximální délky struny	25
2.6 NÁVRH RÁMU	25
2.7 VOLBA MATERIÁLU	25
2.8 KOMPLETOVÁNÍ RÁMU	26
2.8.1 Volba spojení	26
2.9 VOLBA LADÍČÍ MECHANIKY	27
2.10 TLUMÍČÍ MECHANISMUS	27
2.10.1 Tlumící mechanismus při hře	28
2.11 NÁVRH RÁMU	28
2.11.1 Výpočet celkového zatížení.....	28
2.11.2 Návrh polotovaru bočních nosníků – napětí v tlaku.....	29
2.11.3 Návrh polotovaru bočních nosníků – vychýlení z osy.....	30
2.11.4 Návrh polotovaru dolního nosníku – napětí v ohybu	31
2.11.5 Návrh polotovaru dolního nosníku – velikost průhybu	33
2.11.6 Návrh polotovaru dolního nosníku – kontrola na otláčení.....	34
2.11.7 Návrh polotovaru dolního nosníku – kontrola střihu	34
2.11.8 Návrh polotovaru dolního nosníku – analýza	35

2.11.9	Návrh polotovaru horního nosníku - napětí v ohybu.....	35
2.11.10	Návrh polotovaru horního nosníku – velikost průhybu.....	36
2.11.11	Návrh polotovaru horního nosníku – Kontrola střihu.....	36
2.11.12	Návrh polotovaru horního nosníku – analýza.....	37
2.12	TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY RÁMU.....	38
2.12.1	Povrchové úpravy.....	38
2.13	ELEKTRICKÉ VYBAVENÍ.....	38
2.14	PIEZO SNÍMAČ.....	38
2.14.1	Konstrukce snímače.....	39
2.14.2	Konstrukce testovacího rámu.....	39
2.14.3	Měření citlivosti snímače.....	40
2.15	NÁVRH ZESILOVAČE.....	41
2.15.1	Výpočet a volba parametrů zesilovače.....	41
2.15.2	Ověření návrhu měřením.....	44
2.16	CELKOVÉ SCHÉMA.....	46
2.16.1	Konstrukce přístroje.....	47
2.17	DŘEVĚNÉ OBLOŽENÍ.....	49
2.17.1	Volba dřeva.....	49
2.17.2	Postup vytváření výkresové dokumentace a montáž.....	49
2.17.3	Technologický postup výroby.....	50
2.18	POVRCHOVÉ ÚPRAVY + KONEČNÝ DESIGN.....	50
3.	POSTUP VÝROBY.....	51
3.1	MOSAZNÝ RÁM.....	51
3.1.1	Osazení horního nosníku.....	51
3.1.2	Montáž jednotlivých komponentů rámu.....	52
3.2	DŘEVĚNÉ OBLOŽENÍ.....	53
3.3	TLUMÍCÍ MECHANISMUS.....	55
3.4	ELEKTRICKÉ VYBAVENÍ A DOPLŇKY.....	56
4.	GENEROVÁNÍ ZVUKU A ANALÝZA ZVUKU.....	59
4.1	MOŽNOSTI HRY.....	59
4.2	ANALÝZA ZVUKU.....	61
4.2.1	Vliv obložení na barvu tónu.....	62
4.2.2	Porovnání snímačů.....	63
4.2.3	Vliv tlumícího mechanismu na barvu tónu.....	64
4.2.4	Analýza charakteristického zvukového spektra.....	65
4.2.5	Porovnání s ostatními nástroji.....	68
	ZÁVĚR.....	70
	SEZNAM PŘÍLOH.....	73

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně

Symboly:

f	frekvence	[Hz]
T	perioda	[s]
λ	vlnová délka	[m]
c	rychlost šíření zvuku ve vzduchu	[m/s]
x	pořadí počítané harmonické složky	[-]
F	skutečná tahová síla napnuté struny	[N]
l	délka struny	[m]
d	průměr struny	[m]
F_p	síla pružiny	[N]
ρ	hustota	[kg/m ³]
f_n	vlastní frekvence struny	[Hz]
P	tlak	[Pa]
S	plocha	[m ²]
σ_T	napětí v tahu	[Pa]
σ_{TDOV}	dovolené napětí v tahu	[Pa]
τ_k	napětí v krutu	[Pa]
M_k	kroutící moment	[N · m]
W_k	průřezový modul v krutu	[m ³]
τ_{kDOV}	dovolené napětí v krutu	[Pa]
τ_s	napětí ve stříhu	[Pa]
τ_{sDOV}	dovolené napětí ve stříhu	[Pa]
S_s	stříhaná plocha	[m ²]
τ_{sDOV}	dovolené napětí ve stříhu	[Pa]
σ_o	napětí v ohybu	[Pa]
M_o	maximální ohybový moment	[N · m]
W_o	průřezový modul v ohybu	[m ³]
σ_{oDOV}	dovolené napětí v ohybu	[Pa]
F_{strun}	skutečná tahová síla všech strun	[N]
n	počet strun	[-]
F_{strunk}	bezpečná celková tahová síla strun	[N]
k	koeficient bezpečnosti	[-]

S_{bn}	plocha průřezu bočního nosníku	$[m^2]$
a, b	strany průřezu bočního nosníku	$[m]$
S_{bnk}	bezpečný průřez bočního nosníku	$[m^2]$
S_o	největší otvor v bočním nosníku	$[m^2]$
l_{SN}	délka spodního nosníku	$[m]$
b, h	rozměry průřezu spodního nosníku	$[m]$
y_{max}	maximální průhyb	$[m]$
E	modul pružnosti v tahu	$[N/m]$
I	průřezový modul v ohybu	$[m^3]$
S_{ST}	styčná plocha mezi spodním a horním nosníkem	$[m^2]$
P_{DOV}	dovolené napětí na otlačení	$[Pa]$
τ_{sDN}	napětí ve stříhu dolního nosníku	$[Pa]$
σ_{oHN}	napětí v ohybu horního nosníku	$[Pa]$
τ_{sHN}	napětí ve stříhu horního nosníku	$[Pa]$
D	otvor pro upevnění horního nosníku	$[m]$
T	šířka profilu	$[m]$
C	kapacita	$[F]$
f_{0p}	frekvence pro polohu potenciometru vpravo	$[Hz]$
f_{0L}	frekvence pro polohu potenciometru vlevo	$[Hz]$
R	odpor	$[\Omega]$
A_u	zesílení	$[dB]$
f_{0vyp}	vypočítaná frekvence pro polohu běžce uprostřed	$[Hz]$
$f_{0střed}$	odečtená frekvence pro polohu běžce uprostřed	$[A]$

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.I - Znázornění rozdílu mezi tahem a tlakem.....	20
Obrázek 1.II - Obecný pevnostní diagram.....	20
Obrázek 1.III – Znázornění namáhání na krut.....	21
Obrázek 1.IV – Znázornění namáhání na střih.....	21
Obrázek 1.V – Znázornění namáhání na ohyb.....	22
Obrázek 2.I – Uskupení jednotlivých nosníků rámu.....	26
Obrázek 2.II – Zvolená ladící technika [mm]. Převzato z [19]......	27
Obrázek 2.III – Tlumící mechanismus.....	28
Obrázek 2.IV – Rozložení napětí v delším bočním nosníku v MPa.....	30
Obrázek 2.V - Vychýlení delšího bočního nosníku v mm.....	31
Obrázek 2.VI – Schématické zobrazení ohybového namáhání spodního nosníku [9].....	31
Obrázek 2.VII – zobrazení průřezu polotovaru [mm] [9].....	32
Obrázek 2.VIII – Průhyb dolního nosníku v ose namáhání [mm].....	33
Obrázek 2.IX – Vyjasnění ploch namáhaných na střih.....	34
Obrázek 2.X– Simulace bezpečnosti dolního nosníku.....	35
Obrázek 2.XI – Plocha průřezu horního nosníku [mm] [9].....	35
Obrázek 2.XII – Simulace průhybu horního nosníku [mm].....	36
Obrázek 2.XIII – Zobrazení bočního uchycení horního nosníku [mm].....	37
Obrázek 2.XIV - Simulace bezpečnosti horního nosníku.....	37
Obrázek 2.XV – Piezo snímač 15mm.....	39
Obrázek 2.XVI – Měníč na zkušební desce.....	39
Obrázek 2.XVII – Konstrukce provizorního rámu pro zjištění hodnot snímače.....	40
Obrázek 2.XVIII – Průběh signálu testovacího měření.....	41
Obrázek 2.XIX – Invertující zesilovač TLC272.....	42
Obrázek 2.XX - Závislost zesílení zesilovače (dB) na poloze běžce potenciometru (%).....	43
Obrázek 2.XXI – Kmitočtová charakteristika zesilovače pro plné zesílení.....	44
Obrázek 2.XXII – Kmitočtová charakteristika zesilovače pro střední zesílení.....	45
Obrázek 2.XXIII – Celkové schéma mixážního zesilovače.....	46
Obrázek 2.XXIV – Ovládací panel s potenciometry (přední strana).....	47
Obrázek 2.XXV – Ovládací panel s potenciometry (zadní strana).....	48
Obrázek 2.XXVI – Panel s výstupní konektorem a indikační LED diodou.....	48
Obrázek 2.XXVII – Schématické zobrazení dřevěného obložení.....	50
Obrázek 3.I – Jednotlivé díly rámu.....	51
Obrázek 3.II – Středící kolíky h7.....	51
Obrázek 3.III – Instalace ladících mechanismů.....	52
Obrázek 3.IV – Otvory pro uchycení strun na spodním nosníku.....	52
Obrázek 3.V – Kompletní rám.....	53
Obrázek 3.VI – Licování drážky s rámem.....	53
Obrázek 3.VII – Otvory spodního obložení.....	54
Obrázek 3.VIII – Tvarování obložení (hoblování).....	54
Obrázek 3.IX – Postupné tvarování obložení.....	54
Obrázek 3.X – Kompletní obložení.....	55
Obrázek 3.XI – Díly tlumícího mechanismu.....	56
Obrázek 3.XII – Deska plošného spoje elektrického vybavení.....	56
Obrázek 3.XIII – Osazena deska plošných spojů.....	57
Obrázek 3.XIV – Ovládací panely.....	57

Obrázek 3.XV – Plastové kryty snímačů	58
Obrázek 3.XVI – Ovládací panel před montáží	58
Obrázek 4.I – Schématicky naznačený ideální způsob hry	60
Obrázek 4.II – Ladění nástroje.....	61
Obrázek 4.III – Vliv obložení na barvu tónu	62
Obrázek 4.IV – Porovnání snímačů	63
Obrázek 4.V – Vliv zatlumení na vývoj časového spektra v čase	64
Obrázek 4.VI – Vliv tlumícího mechanismu na barvu tónu	65
Obrázek 4.VII – Zvukové spektrum tónů	66
Obrázek 4.VIII – Rozdělení spektra tónu do čtyř pásem	66
Obrázek 4.IX – Spektrogram analyzovaného tónu	68
Obrázek 4.X – Rozdíl průběhu signálů mezi el. a klasickou harfou	69
Obrázek 4.XI – Porovnání zvukového spektra s klasickou harfou	69

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.A – Přeladování strun pedály [3].....	16
Tabulka 1.B – Vlastnosti běžných barevných kovů [9], [10].....	18
Tabulka 1.C – Tvrdosti různých typů dřevin [11].....	19
Tabulka 2.A – parametry strun d'Addario třídy „Extra heavy“ [14]	24
Tabulka 2.B – délky nejdelších a nejkratších strun.....	25
Tabulka 2.C - Specifikace parametrů zesilovače	41
Tabulka 2.D – Rozpiska součástek ze schématu mixážního zesilovač (obrázek 2.XXIII)	47

ÚVOD

V dnešní době je hudební průmysl tlačěn kupředu takovou rychlostí, jakou bychom v dějinách hudby hledali marně. Tradiční nástroje, které si po staletí držely svou neměnnou podobu a barvu zvuku, najednou dostávají nové tvary, menší rozměry nebo také elektronické vybavení. Této proměně se nedokázala vyhnout ani vznešená královna mezi nástroji – líbezná harfa.

Již dnes se objevuje mnoho nejrůznějších pokusů o vytvoření přenosné elektrické harfy, která by byla schopna zastoupit tradiční nástroj, mimo jiné i v nonartificiální hudbě. Tato práce má přispět tomuto světovému vývoji experimentálním zkoušením nových materiálů, tvarů a prvků.

Největší přínos práce je jistě v novém typu snímání, který je u ostatních harf doposud naprosto neznámý. Jedinečnost navrhované harfy je jistě v hudební univerzálnosti a velikosti, která dopomůže dostat tento královský nástroj do běžnější hudební praxe.

Práce se zabývá kompletním návrhem nástroje, realizací vlastního prototypu a jeho stručným popisem. Vychází z teoretického úvodu a začíná volbou strun a návrhem experimentálních komponentů, mimo jiné i tlumícího mechanismu, který zatím harfa nepoznala. Dále následuje návržení rámu nástroje pro správně dimenzované zatížení a jeho kontrola. Následně práce popisuje výzkum a návrh elektrického vybavení a snímání. S pohledem na historii vývoje harf bylo konečně navrženo také dřevěné obložení, zajišťující zachování tradičního designu nástroje. V závěru práce je celý nástroj představen, také je zde provedena základní analýza barvy jeho tónu.

1. TEORETICKÁ ČÁST

V teoretické části jsou předestřeny základní fakta, týkající se následného návrhu nástroje.

1.1 Historie harfy

Harfa je obecně považována za jeden z nejstarších strunných hudebních nástrojů. Dalo by se říci, že první zvuk harfy vznikl s vynálezem luku, kdy vystřelení šípu rozeznělo tětivu. Tento nástroj se v tehdejší svět rychle rozšířil a stal se velice oblíbeným. To dosvědčují nejen kamenná vyobrazení z doby již 3000 let před Kristem, ale také biblické texty. Již okolo roku 1000 př. Kristem zpíval král David žalmy za doprovodu harfy, kterou tvořil dřevěný rám společně s nataženými střevy z dobytka, které sloužili jako struny.

Téměř o 2000 let později okolo 8. století se na Balkáně dostala harfa do rukou Keltů, kteří ji přinesli mimo jiné do Irska. Zde se harfa stala velmi oblíbeným nástrojem, protože právě v Irsku, a později také ve Skotsku se začali objevovat první lidoví umělci, kterým se říkalo bardové. Tito bardové skládali vlastní poezii, kterou za doprovodu harfy zpívali. Byli to právě oni, kteří přinesli harfu do zbytku Evropy.

Ve vrcholném středověku začíná být harfa vnímána jako vznešený nástroj. Ovládání nástroje se stává také i základním vzděláním šlechticů. V tomto období se harfy ujímají známí trubadúři, kteří popularitu a oblíbenost tohoto nástroje zvyšují. V této době se objevují i první zdařené pokusy o vylepšení nástroje. Začínají se vyrábět nejen krásně vyřezávané ruční harfy, ale také velké, téměř dva metry vysoké nástroje.

Ke konci 14. století, kdy začíná renesance a později baroko, se harfa z kulturního dění pomalu odebírá do pozadí, hlavně kvůli používání jiných dobových nástrojů jako je třeba loutna a cembalo. S příchodem rokoka a objevením háčkové harfy se opět tento nástroj dostává do popředí a stává se plnohodnotným nástrojem, jímž zůstává až dodnes. [1][2]

Ve středověku již existoval dvojí způsob ladění a objevovaly se harfy chromaticky tak diatonicky laděné. Velkým pokrokem ve vývoji nástroje bylo vynalezení háčkové harfy v 17-tém století v Tyrolsku. Tato harfa umožňovala přeladění tóniny předem připravenými háčky. Také jednotlivé struny bylo možné přeladit o půl tón výš přitisknutím k pražci na rezonančním bubnu.

Zlom nastal až v 18.ém století, kdy byla vyvinuta první „pedálová“ harfa a vidličkový mechanismus, který umožňoval po sešlápnutí pedálu přeladění strun. Tento objev byl patentován v roce 1810 francouzským nástrojařem Sébastienem Érardem. Tato harfa se používá dodnes. Má sedm pedálů o třech stupních, z nichž každý přeladuje jeden tón stupnice o půl tónu dolů a nahoru – jednotlivé pedály přeladují struny dle tabulky 1.A. Tyto harfy mají zpravidla 47 strun a jsou diatonicky laděné v Ces dur. Struny Ces jsou červené a Fes modré. [3]

Tabulka 1.A – Přeladování strun pedály [3]

Pozice	Pedály						
	První	Druhý	Třetí	Čtvrtý	Pátý	Šestý	Sedmý
Nahoře	Db	Cb	B	Eb	Fb	Gb	Ab
Uprostřed	D	C	H	E	F	G	A
Dole	D#	C#	H#	E#	F#	G#	A#

Na konci minulého století se začínají objevovat první elektrické harfy, které pracují na principu snímání jednotlivých strun pomocí snímačů. Mají nejrůznější tvary a velikosti. Jejich výhodou oproti klasickým harfám je jistě jejich menší hmotnost a velikost, protože nejsou obdařeny rezonančním bubnem. Také v posledních letech se objevují i nástroje, které se již jako harfa pouze tváří. Fungují například na principu změny odporu světelného paprsku a jejich zvuk je čistě digitální.

1.2 Struny

Zvuk harfy obvykle bývá čistý a plný, zároveň má struny silně napnuté, takže při hře je zapotřebí vynaložit větší sílu na rozkmitání strun.

Obecně platí, že výsledný tón dané struny je závislý na její tloušťce, hmotnosti a napínací síle. U vývoje koncertních harf je tendence použít co nejtěžší struny o velkých průměrech za použití vysoké napínací síly. Je to dáno tím, že tenké a lehké struny vytváří vysoké a pronikavé tóny, což se pochopitelně k náladě nástroje nehodí. Zatímco struny s větším průměrem, vyrobeny z materiálů s vysokou hustotou, jsou méně pružnější [4], proto vytváří krásnější a plnější barvu zvuku. Nevýhodu, kterou tento fakt sebou nese je, že je potřeba větší napínací síly struny a zároveň větší namáhání rámu nástroje.

Tedy pro dosažení ideální barvy zvuku, musí být zvoleny takové struny, které by byly vyrobeny z materiálu o vysoké hustotě s co největším průměrem vinutí a vysokou pevností v tahu. [5]

1.2.1 Výpočet délky struny

Délka struny je závislá na požadované frekvenci, tloušťce a hmotnosti. Lze vypočítat jednoduchým vztahem

$$f = \frac{1}{T}, \quad (1.1)$$

kde f je „rovna počtem kmitů neboli period T za jednu sekundu.“ [6] Každé kmitání (mimo vakuum) tvoří v prostotu vlnění a charakteristickou veličinou vlnění je vlnová délka

$$\lambda = c \cdot T, \quad (1.2)$$

kteřá udává vzdálenost, jakou šířící se vlna urazí za dobu jedné periody. [6] Je závislá na rychlosti šíření zvuku ve vzduchu – c a periodě T . Aby byl vyjádřen vztah mezi

frekvencí, vlnovou délkou a rychlostí šíření příčných vln v prostoru byl dosazen se vztah (1.1) do vztahu (1.2).

$$c = \lambda f \quad (1.3)$$

„Struna představuje pružné prostředí, ve kterém se šíří příčné vlnění, tj. kolmém směru k převažujícímu rozměru struny – délce.“ [6] Tuto příčnou vlnu lze popsat diferenciální pohybovou rovnicí (1.4).

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (1.4)$$

Vztah (1.3) byl dosazen do diferenciální pohybové rovnice (1.4) aby byl získán tzv. Taylorův vzorec, který mimo jiné popisuje vlastní frekvence struny,

$$f_n = \frac{x}{2 \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{F}{d}} \quad (1.5)$$

kde, x je pořadí počítané harmonické složky (bude počítáno s první harmonickou, proto za n bude dosazeno číslo 1), F tahová síla struny a d její hmotnost na jednotku délky. Ve vztahu (1.6) je tento parametr d rozepsán.

$$f_n = \frac{1}{d \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{F}{\pi \cdot \rho}} \quad (1.6)$$

Nakonec pro určení délky struny byla ze vztahu (1.6) vyjádřena délka

$$l = \frac{1}{f_n} \cdot \sqrt{\frac{F}{\pi \cdot \rho \cdot d^2}} \quad (1.7)$$

kde d je průměr struny a ρ její hustota.

1.3 Materiály

Materiály lze obecně dělit dle jejich vlastností do několika skupin:

Fyzikální vlastnosti – Mezi tyto vlastnosti patří například hustota, teplota tání a tuhnutí, délková a objemová roztažnost, vodivost, magnetismus atd...

Odolnost proti korozi – „Opotřebením a zničením součástí nastává v praxi nejen vlivy mechanickými ale i vlivy chemickými. Různá prostředí nebo chemické účinky některých kapalných a plyných látek působí postupné rozrušení materiálů. Tento jev nazýváme koroze.“ [7] U materiálů lze zkoumat například žárovzdornost, chemická odolnost proti kyselinám a zásadám, odolnost proti vodě či odolnost proti korozi za napětí.

Mechanické vlastnosti – „Materiály jsou při zpracování i při používání vystaveny různému namáhání, jako je tah, tlak, krut, stříh a ohyb. Tato jednotlivá namáhání obvykle nepůsobí samostatně, ale i v různých kombinacích. Materiál je tedy vystaven složenému namáhání. Například materiál je namáhán současně tahem, ohybem i krutem. Aby

materiál mohl odolávat těmto namáháním, musí mít určité vlastnosti, jako pevnost, tvrdost, pružnost, tvárnost aj.“ [7]

Technologické vlastnosti – Tyto vlastnosti udávají schopnosti materiálu při zpracovávání. Patří zde například tvárnost, lámavost, kovatelnost, obrobitelnost, svařitelnost, slévatelnost, odolnost proti opotřebení aj.

1.3.1 Metalurgie

Metalurgie je zabývá zpracováním kovů.

Ocel

V dnešní době je metalurgie ocelí silně rozvinutá. V tabulkách lze snadno najít různé třídy oceli, které se liší obsahem přísadových kovů nebo nekovů (tzv. legur). Dále se mechanické vlastnosti oceli mění podle obsahu uhlíku, který lze dle potřeby měnit, například v kyslíkových konvertorech nebo elektrických obloukových pecích.

Další významnou kapitolou, je tepelné zpracování kovových materiálů, které mění krystalickou mřížku. Patří zde například proces žhání, kalení, popouštění, cementování atd... I tyto procesy významně ovlivňují konečné vlastnosti materiálu. [8]

Barevné kovy

Nejčastěji se jedná o slitiny mědi. Tyto kovy mají své normy a značení a jejich použití je velmi rozsáhle stejně jako jejich vlastnosti dle přidávaných legur a způsobu zpracování. Přehled jejich přibližných obecných vlastností je rozepsán v tabulce 1.B.

Tabulka 1.B – Vlastnosti běžných barevných kovů [9], [10]

	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Hustota [kg · m ⁻³]	Tvrdost [HBV 10/1000]
Měď	180-220	78-100	8930	90
Mosaz	350-400	120-190	8650	111
Hliník	171-200	60-80	2700	104

1.3.2 Dřeviny

Existuje mnoho druhů dřevin s různými vlastnostmi. Každý typ dřeva má různé vlastnosti – pevnost, pružnost, tvrdost (viz tabulka 1.C) a jiné.

Tabulka 1.C – Tvrdosti různých typů dřevin [11]

<i>Tvrđost</i>	<i>Druh dřeva</i>
Velmi měkká	Smrk, borovice, limba, jedle, topol, vrba, lípa
Měkká	Modřín, douglaska, kleč, jalovec, břıza, olše, jíva, střemcha, teak
Středně tvrdá	Kaštan jedlý, platan, jilma, líska
Tvrdá	Dub, ořešák, javor , třešeň, jabloň, jasan, buk, hrušeň, švestka, akát, habr
Velmi tvrdá	Dřín, svída, ptačí zob, dub pýřitý, zimostřáz
Neobvyčejně tvrdá	Eben cejlonský, africký grenadil, duajak a jiné exotické dřeviny

1.4 Spoje

Obecně spoje lze dělit na rozebíratelné (šrouby, kolíky, klíny, pera...) a nerozebíratelné (svarové, tlakové, nýtové, pájené, lepené spoje atd...).

Rozebíratelný spoj má řadu výhod. Například je levný, snadno vyrobitelný, lze ho rozpojit, a hlavně neovlivňuje krystalickou mřížku spojovaných částí. Nevýhoda u tohoto spoje je v tom, že mezi styčnými plochami je tzv. hluché místo, kde je zvukovému vlnění kladen odpor.

Nerozebíratelný spoj má bezpochyby skvělou vlastnost a to takovou, že tvoří z více částí jeden celek bez hluchých míst. Také je lehce proveditelný a rychlý. Jeho mínus je v některých případech právě jeho nerozebíratelnost. Pokud by byl použit nerozebíratelný spoj prováděný za tepla (svar), dojde k přeměně krystalické mřížky a to může způsobit ztrátu pevnosti či změny zvukové vodivosti.

1.5 Mechanické namáhání

Každý aktivní díl je namáhán různým druhem namáhání. Téměř vždy se jedná o složené namáhání a aby nedošlo k trvalé deformaci součásti, je potřeba při jakémkoliv návrhu vypočítat takzvanou kontrolu prvku, při daném zatížení. Namáhání lze dělit na tah, tlak, krut, stříh a ohyb a může působit staticky, střídavě a mĳivě.

1.5.1 Tah, tlak

Tah a tlak jsou fyzikální veličiny, které popisuje síla zatížení na plochu – viz vzorec 1.8

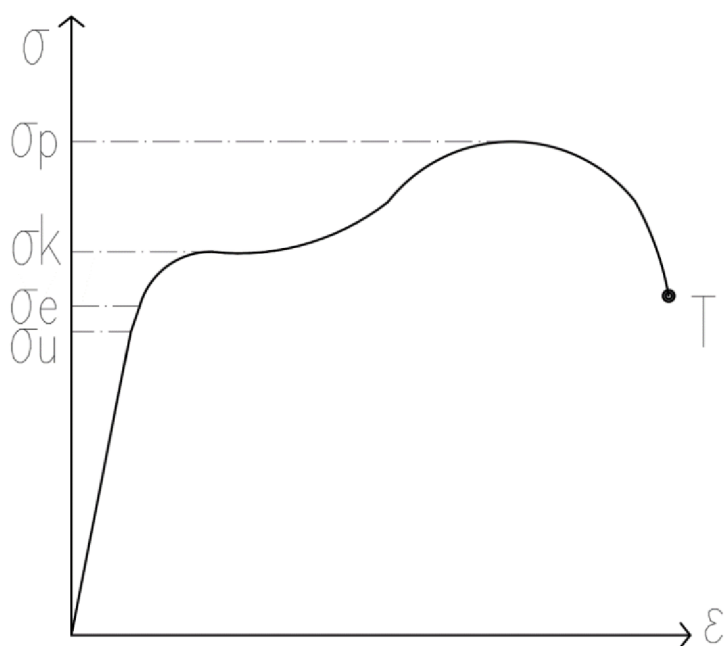
$$P = \frac{F}{S}, \quad (1.8)$$

kde F je zatěžující síla a S plocha průřezu počítaného prvku. Zda-li se jedná o tlak nebo tah, rozhoduje směr působící síly. Pokud síla směřuje směrem k ose obrobku, jedná se o tlak (viz obrázek 1.I)



Obrázek 1.I - Znázornění rozdílu mezi tahem a tlakem

Jakým způsobem se chová materiál při zvětšujícím se namáháním P , popisuje pevnostní diagram na obrázku 1.II.



Obrázek 1.II - Obecný pevnostní diagram

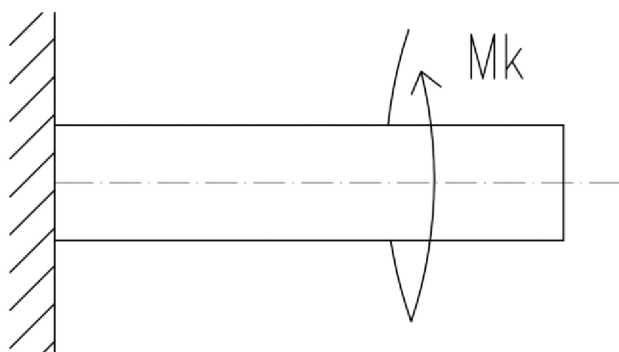
Na svislé ose diagramu je poměrné napětí v tahu a na vodorovné poměrné prodloužení. Poměrné proto, protože průřez namáhaného materiálu při zkoušce pevnosti tahem je v každé chvíli jiný a není možné v každém okamžiku zaznamenávat hodnoty prodloužení. Proto se vytvořila dohoda o tzv. poměrném prodloužení.

Na grafu obrázku I.II je několik bodů. Prvním z nich je σ_u , neboli mez úměrnosti, která určuje bezpečné zatížení. Hned za ním po směru křivky lze pozorovat bod elasticity σ_e , kdy po jeho překročení dochází k trvalým deformacím. Dalším bodem je mez kluzu σ_k . Při jeho překročení dochází v krystalické mřížce k rychlé ztrátě pevnosti a dojde k rychlému průtahu, jak můžeme pozorovat na křivce. σ_p značí mez pevnosti, která předestírá přetržení prvku. Dochází k velmi rychlé ztrátě pevnosti a materiál se roztrhne v bodě T. Proto jednotlivé prvky bývají dimenzovány na napětí v bodě úměrnosti σ_u neboli σ_{DOV} – viz vztah 1.9. [12]

$$\sigma_T = \frac{F}{S} \leq \sigma_{TDOV} \quad (1.9)$$

1.5.2 Krut

Namáhání krutem patří k méně častému namáhání. Setkáme se s ním zpravidla u rotačních součástí. Vyskytuje se tam, kde je krouťící moment – viz obrázek I.III.



Obrázek 1.III – Znázornění namáhání na krut

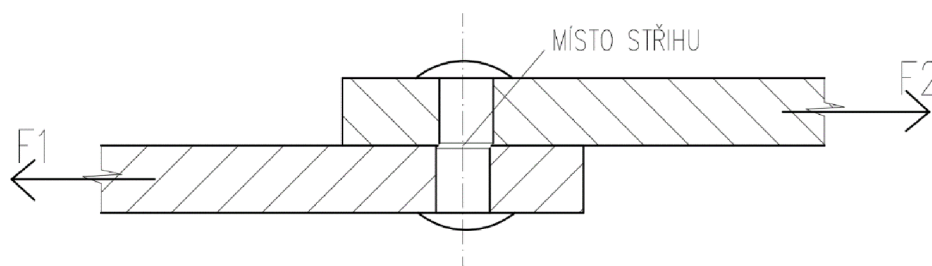
Velikost krutu se vypočítá dle vztahu (1.10)

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} \leq \tau_{KDOV}, \quad (1.10)$$

kde M_k je krouťící moment a W_k průřezový modul v krutu.

1.5.3 Střih

Namáhání střihem je poměrně časté. Vyskytuje se především v místech spojení, například nýtového spoje (viz obrázek I.IV). Při návrhu je nutné dělat kontrolu na střih, aby nedošlo k porušení součástí.



Obrázek 1.IV – Znázornění namáhání na střih

Napětí ve střihu se vypočítá dle vzorce (1.11)

$$\tau_s = \frac{F}{S_s} \leq \tau_{SDOV}, \quad (1.11)$$

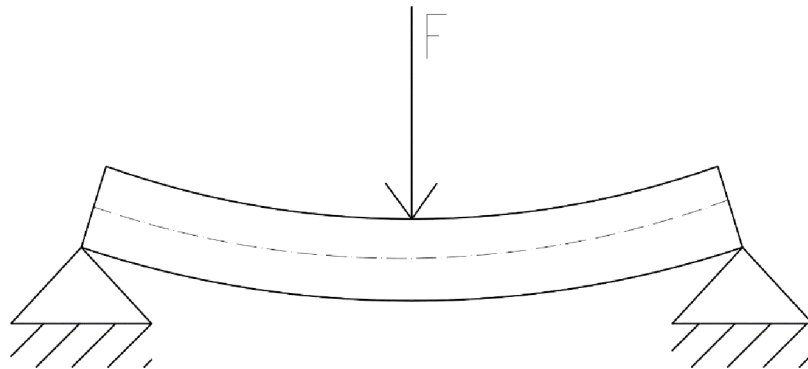
kde F je střižná síla a S_s stříhaná plocha.

1.5.4 Ohyb

Ohyb patří určitě k nejčastějšímu a možná také k nejznámějšímu mechanickému namáhání. Vzniká tam, kde působí síla jinak než vodorovně na osu součásti. Lze vyjádřit následujícím vztahem (1.12)

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \leq \sigma_{ODOV}, \quad (1.12)$$

kde M_o je maximální ohybový moment, W_o průřezový modul v ohybu a σ_{ODOV} je maximální dovolené napětí materiálu při statickém ohybovém zatížení. Vzniká tam, kde působí síla jinak než vodorovně na osu součásti (viz obrázek 1.V)



Obrázek 1.V – Znázornění namáhání na ohyb

1.6 Piezo elektrický jev

Piezo elektrický jev je schopnost krystalu (křemen, křišťál) generovat elektrické napětí. Využití je mnohostranné. Znám je přímý piezo elektrický jev (zapalovače, tenzometry, mikrofony, kytarové snímače apod.) a nepřímý (obrácený) piezo elektrický jev (lékařské sonografy, digitální tiskárny a jiné)

Piezo snímač je prvek, který dokáže převést mechanické vibrace na napětí. S výhodou se používá pro snímání akustických nástrojů (kytary, kontrabasy...). [13]

2. NÁVRH NÁSTROJE

Návrh nástroje slouží k určení všech parametrů dílčích prvků, které povedou k následné rychlé a jednoduché realizaci experimentálního nástroje.

2.1 Struny

Cílem práce je, aby se nástroj svými vlastnostmi přiblížil skutečné koncertní harfě nejen zvukem, ale také způsobem hry, a zároveň aby byl obdařen nezvyklými experimentálními prvky, které zajistí jeho výjimečnost.

Na této experimentální harfě bude použito 17 strun o stejné hustotě, materiálu a napínací síle. Výška frekvence jednotlivých tónů se bude měnit pouze díky rozdílné délce strun. Vzhledem k cenové dostupnosti a velkému výběru budou použity struny kytarové.

2.2 Volba materiálu strun

Nejdostupnější strunou s velkou hustotou je struna s bronzovým jádrem i vinutím o celkové hustotě 8600kg/m^3 . Na druhou struna bronz nemá vysokou pevnost v tahu-pouhých 200MPa , tudíž není možné namáhat struny takovou silou, jaká je u harfy běžná.

Mimo celobronzové oscilátory se vyrábí také struny s ocelovým jádrem a bronzovým vinutím v poměru 1:4. Ocelové jádro se obvykle vyrábí z nízkolegovaných ocelí tažené za studena s častou rekrystalizací. Takto zpracovaná ocel má pevnost v tahu $520\text{--}670\text{MPa}$ podle způsobu legování.

Vzhledem k tomu, že předpokládaný tah strun je větší než u jiných nástrojů, byly zvoleny bronzové struny s ocelovým jádrem i na úkor snížení celkové hustoty z 8600kg/m^3 na 8380kg/m^3 .

2.3 Volba třídy průměru strun

V dnešní době existuje mnoho tříd průměrů strun. Průměr struny se udává obvykle v palcích. Jak již bylo zmíněno-u harf je obecná tendence využít struny s co největším průměrem, aby barva byla plná a jemná. Proto byly zvoleny nejsilnější struny třídy „Extra heavy“.

2.4 Volba značky strun

Po rozumné úvaze a studiem nabídek předních výrobců strun byla zvolena značka d'Addario. Jedním z důvodů této volby je, že tento výrobce zveřejňuje kompletní informace o strunách (viz tabulka 2.A), které jsou nezbytné k výpočtům a správnému návrhu rámu.

Tabulka 2.A – parametry strun d'Addario třídy „Extra heavy“ [14]

Struna	Průměr		Tah
	palců	mm	kg
E	0,014	0,36	14,42
H	0,018	0,46	13,38
G	0,027	0,69	17,41
D	0,039	0,99	20,50
A	0,049	1,24	18,14
E	0,059	1,50	14,60
Tah celkem (kg)			98,45

V tabulce 2.A je možné pozorovat jednotlivé (výše zvolené) struny a jejich charakteristiku. Například struna E bude naladěna na tón e^1 při zatížení 14,42kg.

2.5 Volba struny

V teoretické části bylo zmíněno, že všechny struny nástroje musí mít stejné parametry a výsledná frekvence se bude měnit pouze dle celkové délky struny. Proto struna musí být volena tak, aby harfa hrála ve správném ladění a zároveň měla přijatelné rozměry. Kdyby například byla použita struna s malým průměrem, byla by harfa malinká. Naopak kdyby strunný oscilátor měl velký průměr, nástroj by pak dosahoval velkých a nepraktických rozměrů, které by nejen komplikovaly samotnou hru, ale také by zbytečně zvýšily hmotnost celého nástroje.

2.5.1 Frekvenční rozsah nástroje

Aby tedy byl zvolen ideální rozměr harfy, který by zajišťoval strunám správný frekvenční rozsah a hráči pohodlnou hru, bylo nutné zprvu vypočítat délky všech strun o jednotlivých průměrech z tabulky 2.A. Byla vypočítána délky nejdelší a nejkratší struny nástroje, které jsou dostatečné k určení úhlů v rámu. Po rozvaze se dospělo k názoru, že nástroj bude mít největší uplatnění, když bude mít základní ladění od tónu c^1 (261,63Hz) po tón e^2 (659,26Hz) v evropském chápání.

Toto rozhodnutí neznamená, že tato experimentální harfa již bude hrát pouze v tomto rozsahu, ale bude pro tento tónový rozsah navržena. Je ovšem dobré připomenout, že struny mají vysokou pevnost v tahu (až 670MPa) a při zvoleném ladění nedojde k trvalé deformaci. Proto bude možné struny mírně přeladovat – k tomu bude přizpůsobený i rám, který bude předimenzován dle koeficientu bezpečnosti. Také použití strun nižší třídy umožní nástroj přeladit o pár tónů výš, nebo za použití jiných průměrů strun přeladit do jiných oktáv.

Tento nástroj byl navržen tak, aby byla možnost libovolně ladit nástroj do chromatického i diatonického ladění za použití výše zmíněných metod.

2.5.2 Výpočet minimální a maximální délky struny

Pro určení délky struny, byl použit vztah (1.7) z teoretické části. Do tohoto vztahu byly dosazeny zvolené parametry struny z tabulky (2.A). Nejdelší struna je určena pro vytváření tónu c^1 při vlastní frekvenci $f_n = 261,63\text{Hz}$.

$$l_{max} = \frac{1}{261,63} \cdot \sqrt{\frac{144,2}{\pi \cdot 8380 \cdot 0,00036^2}}$$

$$l_{max} = 0,786\text{m} = 786\text{mm}$$

Stejným způsobem byly dosazeny do stejného vztahu (1.7) parametry stejné struny dle tabulky (2.A), ale tentokrát s vlastní frekvencí nejvyššího tónu nástroje $e^2 - 659,26\text{Hz}$.

$$l_{min} = \frac{1}{659,26} \cdot \sqrt{\frac{144,2}{\pi \cdot 8380 \cdot 0,00036^2}}$$

$$l_{min} = 0,312\text{m} = 312\text{mm}$$

Obdobně byly vypočítány minimální a maximální délky ostatních strun z tabulky 2.A – viz tabulka 2.B.

Tabulka 2.B – délky nejdelších a nejkratších strun

Struna	Délka pro $f_n = 261,63\text{ Hz}$ v mm	Délka pro $f_n = 659,26\text{ Hz}$ v mm
E	786	312
H	592	235
G	450	179
D	340	135
A	256	102
E	189	75

Dle výše uvedených důvodů a vhodné úvaze, byla zvolena struna G.

2.6 Návrh rámu

Rám tvoří srdce celého nástroje, proto musí splňovat několik podmínek. Nejen, že musí být dostatečně pevný, aby odolal velkému tahu strun, ale také musí být zvukově vodivý, aby dokázal s minimálním odporem a zkreslením šířit zvukové vibrace. Mimo tyto podmínky byla při návrhu snaha, aby jednotlivé části byly co nejlevnější a zároveň snadno vyrobitelné s možností rychlé a jednoduché montáže.

2.7 Volba materiálu

Při volbě materiálu rámu byl brán ohled na dvě základní vlastnosti – mechanické namáhání a zvukovou vodivost.

Přirozenou volbou materiálu pro rám by byla určitě ocel. Dle teoretického úvodu lze zvolit legovanou ocel, s takovým obsahem uhlíku a metodou tepelného zpracování tak, aby byly získány požadované vlastnosti oceli pro tento hudební nástroj.

Jelikož se jedná o experimentální nástroj, byly přehlednuty všechny výhody oceli a volba materiálu pro výrobu rámu se zúžila na barevné kovy, které u strunných nástrojů jsou většinou opomíjeny.

Nejlépe se vlna šíří v pevném materiálu s vysokou hustotou a tvrdostí, [4] proto po zhodnocení parametrů materiálů z tabulky 1.B byla zvolena mosaz 42 3222, která je dobrým kompromisem pevnosti a zvukové vodivosti.

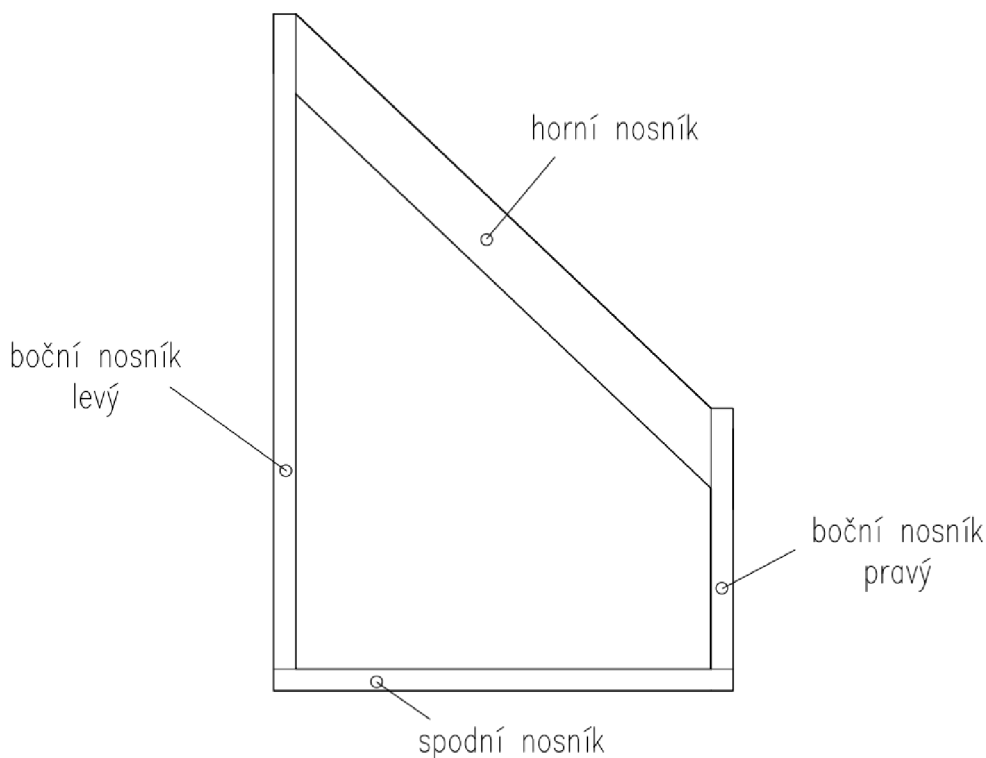
2.8 Kompletování rámu

Rám je tvořen čtyřmi částmi, které jsou nazývány nosníky (viz obrázek 2.I). Každá z těchto částí bude vyráběna samostatně a následně budou spojeny v jeden celek.

2.8.1 Volba spojení

Pro volbu správného polotovaru a tvorbu výrobních výkresů bylo nejprve potřeba vyjasnit, jakým způsobem budou jednotlivé nosníky k sobě upevněny.

Jelikož byla snaha o vytvoření pevného rámu, kde by se šířily zvukové vlny s nízkým odporem, byl zvolen dle teoretické části šroubový spoj s metrickými závity v kombinaci s nerozebíratelným spojem prováděný za pomoci epoxidového lepidla určeném pro mosaz.

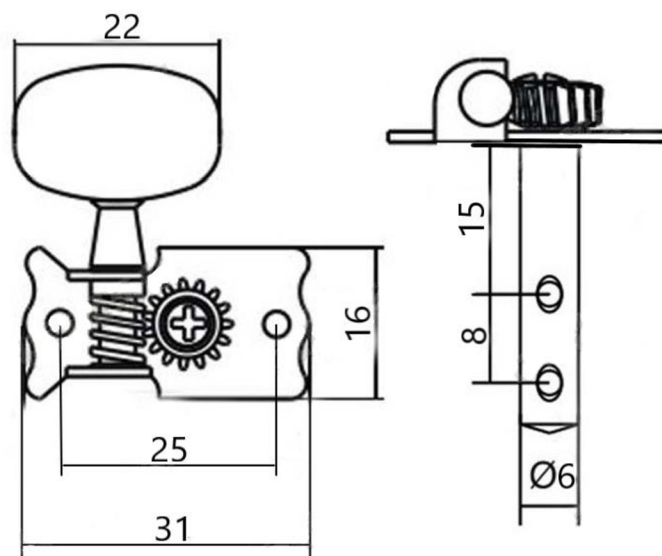


Obrázek 2.I – Uskupení jednotlivých nosníků rámu

2.9 Volba ladící mechaniky

Ladící mechanika má jednoduchý ale zároveň náročný úkol. Musí uživateli umožnit rychlé a jednoduché napínání strunu přesnou a stálou silou. Těchto mechanismů existuje celá řada – od jednoduchého šroubu s jemným stoupáním, až po mechanismus na způsob planetové převodovky. Vždy existuje možnost, vytvoření vlastního napínacího mechanismu, ale při této práci byla po konzultaci zvolena klasická šneková ladící mechanika, která se běžně používá u kytar a je k dostání v hudebních potřebách.

Každá struna bude mít svůj vlastní mechanismus, který bude umístěn na horním nosníku (viz obrázek 2.I). Z velkého internetového sortimentu byl vybrán jednoduchý mechanismus, jehož tvar a rozměry jsou na obrázku 2.II.



Obrázek 2.II – Zvolená ladící technika [mm]. Převzato z [19].

2.10 Tlumící mechanismus

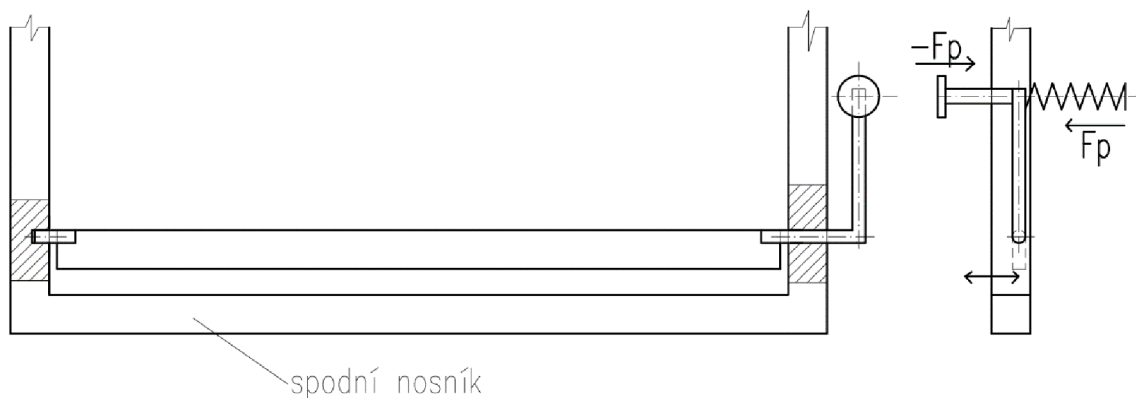
Jak již z názvu vyplývá, tak tlumící mechanismus slouží k útlumu strun. Mimo cimbál a klavír se s tlumícím mechanismem u strunných nástrojů setkáme jen zřídka – proto tento mechanismus z nástroje dělá skutečně nástroj experimentální, neboť otevře hráči nové způsoby hry.

Jelikož mechanismus nemá vliv na tvorbu barvy zvuku, bude vyroben z klasické oceli 11 370. Plocha mezi strunami a ocelí bude pokryta trocellenem. Tento materiál je podobný molitanu s větší tvrdostí, je zároveň skvěle přizpůsobivý a nízké opotřebení – tedy vysokou životnost. Po pokusu bylo zjištěno, že při přitlačení na strunu, trocellen rychle zabraňuje jejímu dalšímu kmitání a má tedy skvělé tlumící vlastnosti.

Tlumítko bude umístěno ve spodní části rámu a bude fungovat na principech pákového mechanismu (viz schématický obrázek 3.III). V klidné poloze ho bude udržovat tlačná pružina 02 6001 normy ČSN EN 13 906-1 [9] o vnějším průměru $D_e = 8\text{mm}$ a

délce 25mm s celkovou tlačnou silou $F_p = 35\text{N}$. Tato pružina bude umístěna mezi dřevěným rámem a vrchní částí páky mechanismu.

Tlumící mechanismus bude skrytý v přední části dřevěného obložení. Aktivuje se vyvinutím síly $-F_p$ protiběžné síly F_p (stlačením páčky). Po tomto procesu se přitlačí trocellen na struny a tak se struny utlumí.



Obrázek 2.III – Tlumící mechanismus

2.10.1 Tlumící mechanismus při hře

Instalace tlumícího mechanismu nejen umožní rychlý útlum zvukových vibrací všech strun, ale také možnost hudebního přednesu ve staccatu.

Bude se ovládat se pouze jedním prstem levé ruky (ukazovákem nebo prostředníkem). Zároveň levá ruka bude přidržovat při hře nástroj u těla a páka mechanismu bude umístěná přesně v těchto úchyťových místech zmíněné ruky. Proto použití tlumícího mechanismu při hře bude velmi intuitivní a jednoduché.

2.11 Návrh rámu

Rám bude namáhán statickou silou napnutých strun mezi spodním a horním nosníkem, viz obrázek 2.I. Horní nosník bude zatížen na ohyb, spodní na ohyb i stříh. Boční nosníky pak budou namáhány pouze na tlak.

2.11.1 Výpočet celkového zatížení

Aby byly správně určeny všechny rozměry rámu, byla nejprve stanovena zatěžující síla. Jediná síla, která v rámu bude vznikat je síla tahová. Jak již bylo zmíněno-je to statická síla, kterou vytváří tah strun. Pro výpočet celkového zatížení budou sečteny všechny síly strun, viz vztah (2.1)

$$F_{strun} = F \cdot n, \quad (2.1)$$

kde F je síla jedné struny, n počet strun. Poté byla dosazena síla F do vztahu (2.1) dle tabulky 2.A pro výpočet skutečné hodnoty statického namáhání rámu

$$F_{strun} = 174,1 \cdot 17,$$

$$F_{strun} = 2960N$$

Kdyby ovšem rám byl navržen pro toto namáhání, mohlo by dojít k trvalé deformaci. Proto při výpočtech bylo třeba počítat s takzvanou bezpečnou silou. Je to skutečná síla zvětšená koeficientem bezpečnosti k (vztah 2.2).

$$F_{strunK} = F_{strun} \cdot k \quad (2.2)$$

Dle strojnických tabulek [9] pro statické namáhání mosazi byl koeficient bezpečnosti zvolen 2,8.

$$F_{strunK} = 2960 \cdot 2,8$$

$$F_{strunK} = 8287N$$

Síla, pro kterou je možné bezpečně navrhnout rám, aniž by hrozila jeho deformace je $F_{strunK} = 8287N$.

2.11.2 Návrh polotovaru bočních nosníků – napětí v tlaku

Pravý i levý nosník (viz obrázek 2.I), bude namáhán stejně. Proto byl počítán pouze jeden z nich a to ten větší, kvůli vyšší možnosti deformace. Pro návrh byl použit klasický vztah pro výpočet napětí v tlaku dle teoretické části (1.9), ze kterého byl vyjádřen vztah (2.4)

$$S_{bn} \geq \frac{F_{strunK}}{\sigma_{TDOV}} \quad (2.4)$$

kde S_{bn} je průřez nosníku, σ_{TDOV} je dovolené napětí v tahu a F_{strunK} skutečná síla všech strun zvětšená koeficientem bezpečnosti. σ_{TDOV} je rovno dle strojnických tabulek [9] 152,5MPa.

$$S_{bn} \geq \frac{8287}{152,5}$$

$$S_{bn} \geq 54,34mm^2$$

Protože boční nosníky budou mít obdélníkový průřez a budou opatřeny otvory pro kompletování S_o byla zvolena strana polotovaru $b = 20mm$. Poté byla potřeba zjistit minimální stranu, aby bylo možné dle ST [9] zvolit vhodný polotovar.

$$a = \frac{S_{bn}}{b} \quad (2.5)$$

Pro výpočet byl použit klasický vztah obsahu obdélníku, ze kterého byla vyjádřena strana a .

$$a = \frac{54,34}{20}$$

$$a = 2,717mm$$

Minimální průmět polotovaru je 20 x 2,717mm. Proto byl zvolen polotovar dle ST [9] pro delší boční nosník 20 x 5 x 485 ČSN 42 8624.02 a pro kratší boční nosník 20 x 5 x 175 ČSN 42 8624.02. Protože se jedná o polotovar tažený za studena, není potřeba připočítávat přídavek na obrábění mimo délku.

Nakonec byla provedena kontrola plochy polotovaru v místě, kde je vytvořen největší otvor o průměru 6mm. Pro tuto kontrolu byla vypočítána plocha S_{bnK} (kontrolovaná plocha bočního nosníku), která musí být větší než plocha S_{bn}

$$S_{bnK} = a \cdot b - S_o, \quad (2.6)$$

kde S_o je rovno průměru díry x její hloubce.

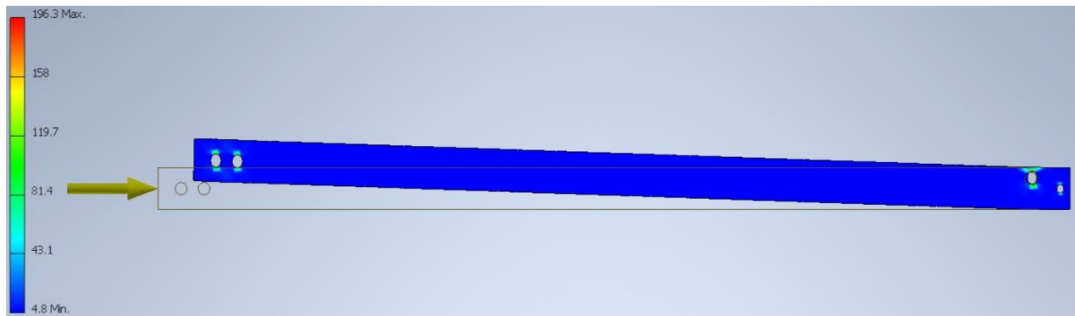
$$S_{bnK} = 5 \cdot 20 - 5 \cdot 6$$

$$S_{bnK} = 70mm^2$$

$$S_{bnK} > S_{bn} \quad (2.7)$$

Dle vzorec 2.7 nosník vyhovuje.

Z těchto rozměrů byly nakresleny výrobní výkresy, podle kterých byly vytvořeny simulace. Na obrázku 2.IV můžeme pozorovat dílčí napětí v celém bočním nosníku.

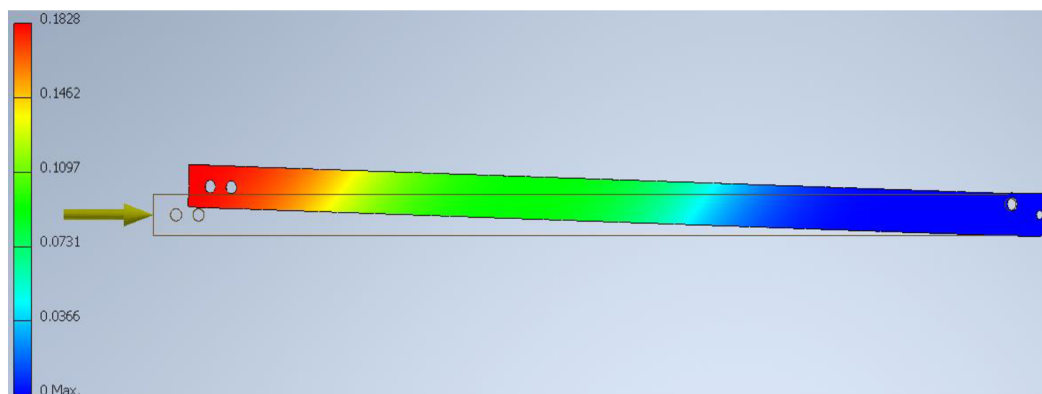


Obrázek 2.IV – Rozložení napětí v delším bočním nosníku v MPa

Podle modré barvy na obrázku 2.IV lze odečíst, že v bočním nosníku je napětí okolo 10MPa. Poblíž děr pozorujeme teplejší barvy, a tedy vyšší napětí zhruba od 100MPa po 140MPa. Takže ani v těchto místech skutečné napětí nepřekračuje dovolené napětí materiálu.

2.11.3 Návrh polotovaru bočních nosníků – vychýlení z osy

Na obrázku 2.IV lze pozorovat menší vychýlení z osy y, proto byla provedena simulace vychýlení (viz obrázek 2.V).



Obrázek 2.V - Vychýlení delšího bočního nosníku v mm

Na obrázku 3.V lze vidět, že vychýlení ve spodní části nosníku, kde je modrá barva je téměř nulové. V horní části – v místě barvy červené – je maximální vychýlení, které je rovno 0.1828mm a je tedy zanedbatelné. Proto navržené nosníky vyhovují.

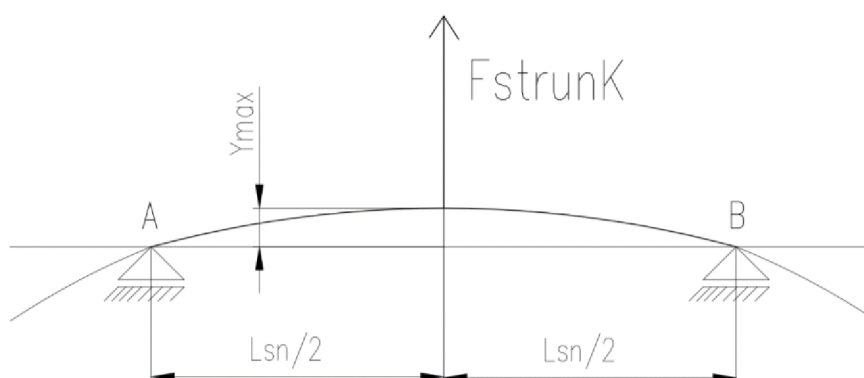
2.11.4 Návrh polotovarů dolního nosníku – napětí v ohybu

Dolní nosník (viz obrázek 2.I) slouží k uchycení strun a zároveň zde bude i prostor pro snímání signálu piezo snímačem. Bude namáhán na ohyb a stříh. Pro návrh byl použit klasický vztah výpočtu napětí v ohybu (1.12)

Pro další výpočty bylo nutné znát délku spodního nosníku $l_{SN} = 299\text{mm}$, která byla zvolena po součtu délek ladících mechanismů (viz obrázek 2.II) s přidavkem na montáž. Styčné plochy s bočními nosníky do této délky nebyly započítány. Nejprve ze vztahu (1.12) byl vyjádřen maximální ohybový moment (2.8)

$$M_O = \frac{F_{strunK} \cdot l_{SN}}{4}. \quad (2.8)$$

Důvod, proč je celý vztah lomen 4 vychází ze způsobu namáhání. Jelikož je zatěžující síla F_{strunK} rovnoměrně rozložena, soustředí se na jedno místo, místo největšího zatížení (viz obrázek 2.VI). Celková délka se dále dělí na dvě části a každá z těchto částí vzhledem k pevným vzpěrám je ještě o polovinu menší – proto po roznásobení zlomků vychází celý vztah lomen 4.



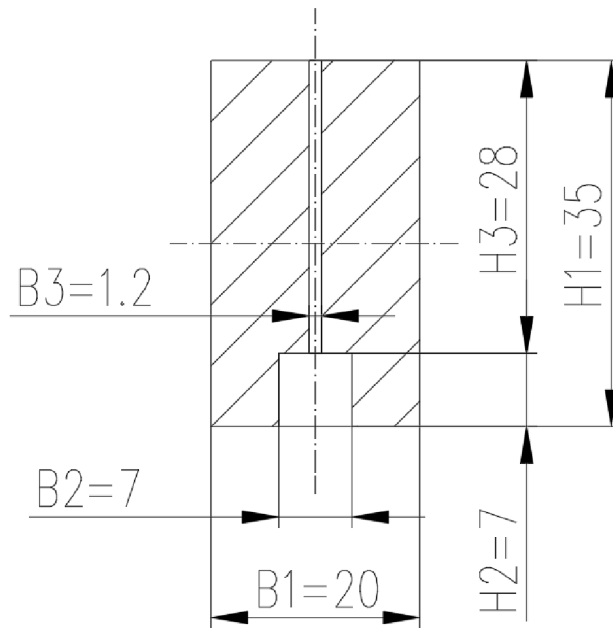
Obrázek 2.VI – Schématické zobrazení ohybového namáhání spodního nosníku [9]

Následně byl vyjádřen ze vzorce (1.12) průřezový modul v ohybu pro obdélníkový průřez (2.9)

$$W_0 = \frac{b \cdot h^2}{6}, \quad (2.9)$$

kde h a b jsou strany průřezu polotovaru (viz obrázek 2.VII). Aby bylo dosaženo požadovaných rozměrů nosníku, bylo potřeba nejprve zvolit vhodné rozměry a potom provést kontrolu, zdali tento zvolený průřez vyhovuje. Zvolené rozměry průřezu polotovaru byly zvoleny: $b = 20 \text{ mm}$ a $h = 35 \text{ mm}$.

Při výpočtu napětí v ohybu bylo nutné odečíst plochy děr (viz obrázek 2.VII), které budou sloužit pro uchycení strun, neboť tyto díry snižují celkovou únosnost nosníku.



Obrázek 2.VII – zobrazení průřezu polotovaru [mm] [9]

Oba vyjádřené vztahy (2.8) a (2.9) byly dosazeny do vztahu (2.7),

$$\sigma_0 = \frac{F_{strun} K^1 L_{SN}}{\frac{4}{\frac{b_1 \cdot h_1^2}{6} - \frac{b_2 \cdot h_2^2}{6} - \frac{b_3 \cdot h_3^2}{6}}}, \quad (2.10)$$

kde pod velkou zlomkovou čarou jsou tři zlomky, z níž poslední dva blíže určují plochy děr.

$$\sigma_0 = \frac{\frac{8287 \cdot 299}{4}}{\frac{20 \cdot 35^2}{6} - \frac{7 \cdot 7^2}{6} - \frac{1,2 \cdot 28^2}{6}}$$

$$\sigma_0 = 160,09 \text{ MPa}$$

Dovolené statické napětí v ohybu u mosazi je $\sigma_{DOV} = 180 \text{ MPa}$ [9]. Skutečné napětí σ_0 je menší než dovolené, proto zvolený průřez vyhovuje a pro výrobu spodního nosníku byl zvolen polotovar dle ST [9] 35 x 20 x 315 ČSN 42 8624.02.

2.11.5 Návrh polotovaru dolního nosníku – velikost průhybu

Průhyb nastává u jakékoliv součásti namáhané ohybem. Maximální průhyb je zobrazen na obrázku 2.VI pod zkratkou y_{max} . U většiny součástí není za potřebí tento průhyb počítat, ale u této experimentální harfy by velký průhyb mohl znamenat nejen deformaci rámu ale také změnu délky strun, což by vedlo k neustálému doladování již naladěných strun. Pro jeho určení byl použit klasický vztah (2.11) pro průhyb nosníku na pevných dvou základnách [9]

$$y_{max} = \frac{F_{strunK} \cdot l_{SN}^3}{48 \cdot E \cdot I}, \quad (2.11)$$

kde E je modul pružnosti v tahu daného materiálu, I je průřezový modul v ohybu, který popisuje vztah (2.12)

$$I = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} - \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} - \frac{b_3 \cdot h_3^3}{12}, \quad (2.12)$$

kde koeficienty b a h značí, obdobně jako ve vztahu (2.10), zvolené rozměry spodního nosníku (viz obrázek 2.V). Následně vztah (2.12) byl dosazen do rovnice (2.11).

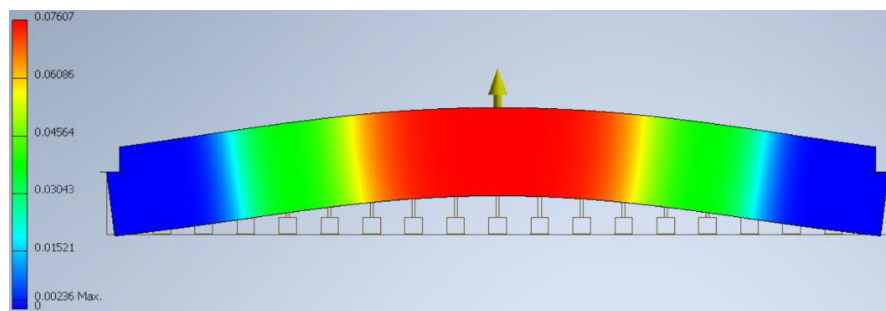
$$y_{max} = \frac{F_{strunK} \cdot l_{SN}^3}{48 \cdot E \cdot \left(\frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} - \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} - \frac{b_3 \cdot h_3^3}{12} \right)} \quad (2.13)$$

Modul pružnosti v tahu E byl zvolen dle ST [9] pro zvolený materiál.

$$y_{max} = \frac{8287 \cdot 299^3}{48 \cdot 0,95 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{20 \cdot 35^3}{12} - \frac{7 \cdot 7^3}{12} - \frac{1,2 \cdot 28^3}{12} \right)}$$

$$y_{max} = 0,0703mm$$

Průhyb y_{max} je tak malý, že může být zanedbán. Celý průběh průhybu v nosníku lze pozorovat na simulaci v obrázku 2.VIII, která ukazuje, že maximální průhyb y_{max} bude uprostřed nosníku. Na krajích, kde je modrá barva nebude průhyb téměř žádný, pouhých 0,00236mm.



Obrázek 2.VIII – Průhyb dolního nosníku v ose namáhání [mm]

2.11.6 Návrh polotovaru dolního nosníku – kontrola na otláčení

Aby nedošlo k trvalé deformaci na vztyčných plochách mezi spodním a bočním nosníkem, byla provedena kontrola na otláčení dle vzorce (2.14).

$$P = \frac{F_{strunK}}{S_{st} \cdot 2} \leq P_{DOV}, \quad (2.14)$$

kde S_{st} je styčná plocha (průřez bočního nosníku). Protože je síla rovnoměrně rozložena mezi dvě styčné plochy bočních nosníků, je podělena dvěma.

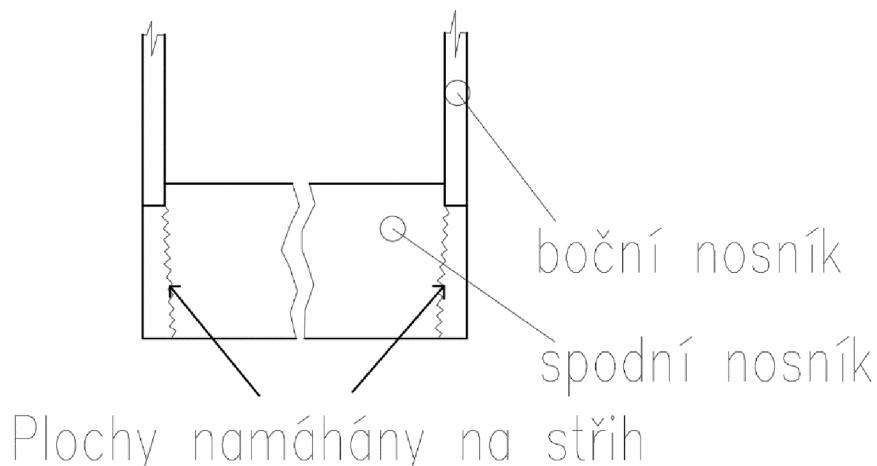
$$P = \frac{8287}{20 \cdot 5 \cdot 2}$$

$$P = 41,435 \text{ MPa} \leq P_{DOV}$$

P_{DOV} je dle ST [9] rovno 152,5 a tedy je větší než skutečný tlak – vyhovuje.

2.11.7 Návrh polotovaru dolního nosníku – kontrola stříhu

Protože je spodní nosník namáhán ve dvou místech na stříh, bylo potřeba zkontrolovat, zda nedojde k překročení meze stříhu. K výpočtu byl použit základní vztah pro výpočet napětí ve stříhu (1.11) dle teoretického úvodu. Na obrázku 2.IX pozorujeme, že stříhané plochy jsou dvě, proto čitatel bude lomen 2.



Obrázek 2.IX – Vyjasnění ploch namáhaných na stříh

Plocha S_s se vypočítá dle vzorce pro výpočet obsahu obdélníku. Jednotlivé strany byly navrženy ve výkresové dokumentaci.

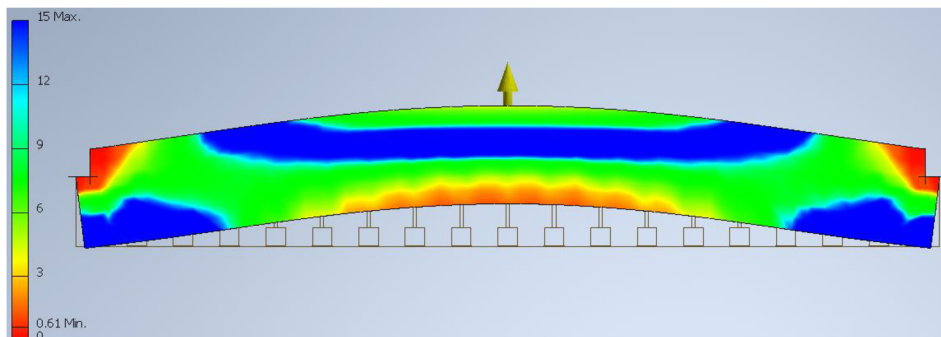
$$\tau_{sDN} = \frac{8287}{20 \cdot 25 \cdot 2}$$

$$\tau_{sDN} = 8,287 \text{ MPa}$$

τ_{sDOV} je dle ST [9] rovno 85MPa, proto nedojde ke stříhu a návrh vyhovuje.

2.11.8 Návrh polotovaru dolního nosníku – analýza

Pro lepší představu namáhání spodního nosníku byla vytvořena simulace bezpečnosti (viz obrázek 2.X)



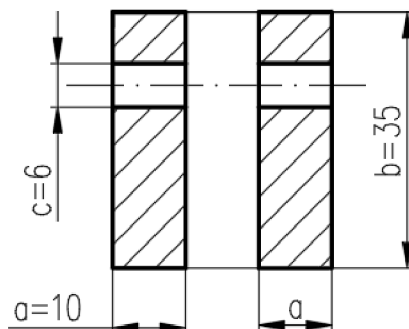
Obrázek 2.X– Simulace bezpečnosti dolního nosníku

Simulace na obrázku 2.X červenou barvou ukazuje, kde je díl namáhán nejvíce. Modrá barva představuje místa, kde je díl namáhán nejméně a podle osy vlevo lze odečíst, poměrové namáhání - například v místech modré barvy by nosník vydržel napětí až 15krát větší. Naopak v místech kontaktu bočních nosníků je namáhání největší a koeficient bezpečnosti se blíží k nule. Proto i nosník je navržen na předdimenzovanou zatěžující sílu.

2.11.9 Návrh polotovaru horního nosníku - napětí v ohybu

Horní nosník tvoří důležitou část rámu, protože určuje výsledné délky jednotlivých strun a to nejen úhlem, který svírá ale také ladící mechanikou, kterou je osazen. Třetí Newtonův zákon říká, že každé dvě tělesa na sebe působí stejně velkými silami opačného směru, proto namáhání horního nosníku bude stejné, jako u dolního. [15]

Pro návrh polotovaru byl využit stejný postup jako u dolního nosníku. Nejprve byl navržen ideální tvar nosníku a poté jeho rozměry byly dosazeny do rovnice (2.10), která byla pouze poupravena dle průřezu horního nosníku. Koeficienty b a h , byly nahrazeny koeficienty a , b , c (viz obrázek 2.XI).



Obrázek 2.XI – Plocha průřezu horního nosníku [mm] [9]

Upravený vztah pro výpočet namáhání na ohyb horního nosníku je roven

$$\sigma_{OHN} = \frac{\frac{F_{strunK} \cdot l_{SN}}{4}}{2 \cdot \left(\frac{a \cdot b^2}{6} - \frac{a \cdot c^2}{6} \right)} \leq \sigma_{ODOV}, \quad (2.16)$$

za a, b a c byly dosazeny hodnoty z obrázku 2.XI. I když horní nosník je nakloněn pod určitým úhlem a jeho délka je tedy větší, pak použitá délka při výpočtu se nemění, protože je počítáno se vzdáleností kolmou na zatěžující sílu.

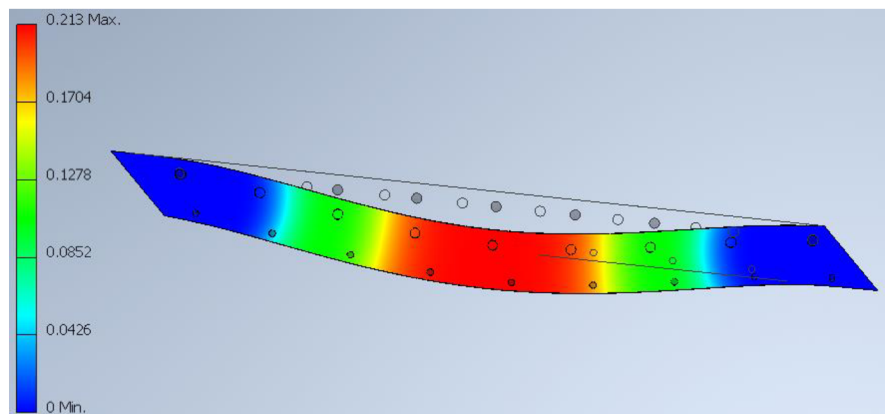
$$\sigma_{OHN} = \frac{\frac{8287 \cdot 299}{4}}{2 \cdot \left(\frac{10 \cdot 35^2}{6} - \frac{10 \cdot 6^2}{6} \right)},$$

$$\sigma_{OHN} = 156,3 \text{ MPa}$$

Napětí v ohybu horního nosníku je menší než napětí dovolené – nosník vyhovuje. Zvolený polotovar dle ST [9] je 35 x 30 x 470 ČSN 42 8624.02.

2.11.10 Návrh polotovaru horního nosníku – velikost průhybu

Jelikož horní nosník bude zatížen stejnou silou jako spodní, nebylo potřeba kontrolovat velikost průhybu, protože lze předpokládat, že výsledky by byly podobné jako u dolního nosníku. Ovšem pro zjištění, jakým způsobem se mění průhyb v horním nosníku proti dolnímu, byla vytvořena simulace (viz obrázek 2.XII), kde lze pozorovat mírné změny.

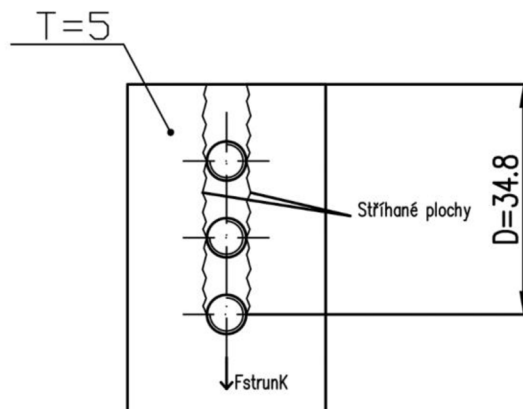


Obrázek 2.XII – Simulace průhybu horního nosníku [mm]

Ze simulace na obrázku 2.XII lze odečíst maximální průhyb horního nosníku. Po natažení všech strun dojde ve středu nosníků téměř k 0,27mm průhybu. Proto při ladění bude nutné, aby hráč vždy po naladění nástroje ještě překontroloval ladění hlavně prostředních strun.

2.11.11 Návrh polotovaru horního nosníku – Kontrola stříhu

Horní nosník bude upevněn třemi šrouby (viz obrázek 2.XIII), které budou mít tendenci se z rámu vyškubnout. Proto bylo potřeba nosník zkontrolovat, zda nedojde k přestřížení.



Obrázek 2.XIII – Zobrazení bočního uchycení horního nosníku [mm]

Pro vytvoření vztahu pro výpočet byl použit vztah (1.11)

$$\tau_{SHN} = \frac{F_{strunK}}{S_s \cdot 2} \leq \tau_{sDOV}, \quad (2.17)$$

kde parametry zůstávají stejné jako u vztahu (2.15) ale změnila se stříhaná plocha.

$$\tau_{SHN} = \frac{F_{strunK}}{D \cdot T \cdot 2 \cdot 2} \quad (2.18)$$

Ve vztahu (2.18) byl vyjádřen obsah stříhaných ploch dle obrázku 2.XIII.

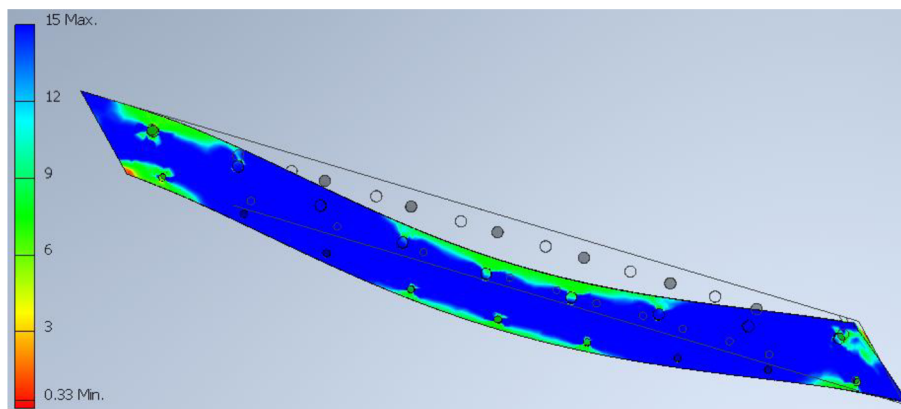
$$\tau_{SHN} = \frac{8287}{34,8 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 2}$$

$$\tau_{SHN} = 11,9 \text{ MPa}$$

τ_{sDOV} dle ST [9] je rovno 85MPa, proto nedojde ke stříhu a návrh vyhovuje.

2.11.12 Návrh polotovaru horního nosníku – analýza

Pro lepší představu namáhání horního nosníku byla vytvořena simulace bezpečnosti (viz obrázek 2.XIV)



Obrázek 2.XIV - Simulace bezpečnosti horního nosníku

Díky simulaci na obrázku 2.XIV můžeme pozorovat průběh zatížení dle koeficientu bezpečnosti v nosníku. Na tmavě modrých místech nosník bude namáhán jen minimálně a je tam až 15x předimenzován. V okolí děr lze pozorovat mírné zeslabení nosníku a nejvíce bude namáhán na koncích v místech, kde se nosník přičí k bočním nosníkům. Tam je nosník navržen téměř s nulovou tolerancí k bezpečné síle. Také v provedené simulaci bylo možné pozorovat zvětšené namáhání v místech šroubových spojů.

Dle simulace lze konstatovat, že nehrozí žádná trvalá deformace nosníku.

2.12 Technologický postup výroby rámu

Jednotlivé díly rámu budou vyrobeny na CNC 5-tiosem centru HERMLE cu20 za použití svěráku systému Lang o minimálním upnutí 3mm. Dosažená přesnost stroje je 0,1mm za použití tvrdokovových či destičkových fréz, závitníků, vrtáků atd... Tvorba programu bude provedena dle výrobních výkresů (z přílohy) za použití CAD CAM systému.

2.12.1 Povrchové úpravy

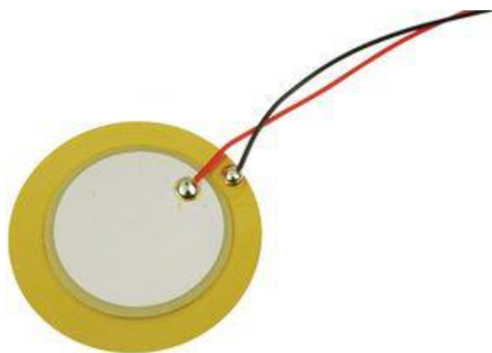
Povrch rámu bude broušený o drsnosti v rozsahu Ra 0,2–Ra 0,8. Mosaz podléhá oxidaci a rychle mění svou barvu a lesk, z tohoto důvodu bude rám potažen tenkou vrstvou bezbarvého laku, který nejen zabrání oxidaci, ale také zvýší odolnost proti otěru a tím také životnost nástroje.

2.13 Elektrické vybavení

Tento hudební nástroj, byl navržen tak, aby byl malý, lehký, přenosný a hlavně experimentální. Z těchto důvodů není opatřen žádným rezonančním bubnem, jak je u harf zvykem. Zesílení nástroje však bude probíhat elektronicky snímáním vibrací šířících se v mosazném rámu a dřevěném obložení a jejich následným zesílením.

2.14 Piezo snímač

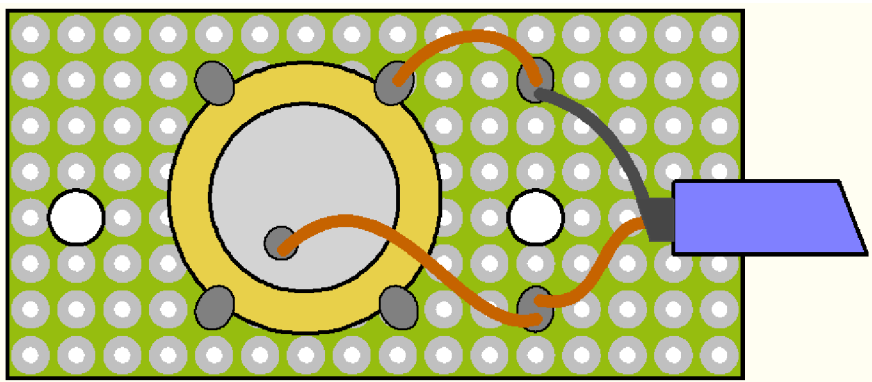
Cílem následujícího návrhu je ověřit možnost použití komerčně dostupného piezo snímače (piezoměniče) pro snímání vibrací rámu harfy a navrhnout základní zapojení zesilovače pro úpravu výstupního signálu měniče. Obvyklý průměr dodávaných měničů je 12 až 30 mm. Pro toto ověření byl vybrán snímač o průměru 15mm (typ KBI-1541 dodávaný firmou GME – kód 641-020) (viz obrázek 2.XV).



Obrázek 2.XV – Piezo snímač 15mm

2.14.1 Konstrukce snímače

Měnič nemůže být jen tak přilepen na rám, z důvodu možnosti rozebrání dřevěného obložení. Proto bylo vymyšleno náhradní řešení (viz obrázek 2.XVI), že měnič je připájen ve čtyřech bodech na zkušební desce o velikosti 20x40mm. Tak je zajištěno galvanické oddělení snímače od kovového rámu harfy při dosažení dobrého přenosu vibrací. Na desce jsou dva montážní otvory pro upevnění k rámu. Přívodní kabel je stíněný.

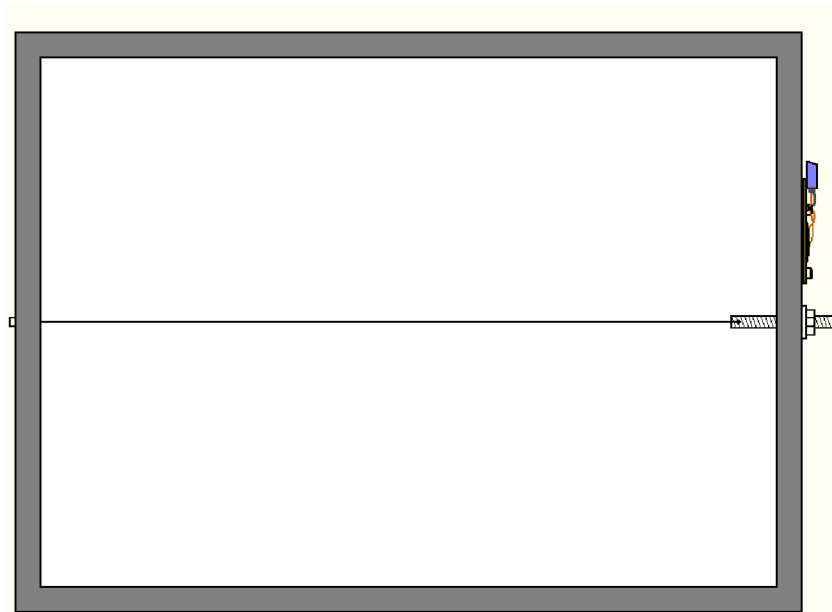


Obrázek 2.XVI – Měnič na zkušební desce

2.14.2 Konstrukce testovacího rámu

Pro návrh zesilovače je potřeba mít alespoň rámcovou představu o hodnotách, jaké je schopen piezo měnič vytvořit. Z tohoto důvodu byl navržen provizorní rám, který rámcově simuluje tvořený nástroj.

Rám o rozměrech 280 x 380mm byl vyroben z ocelových profilů o rozměru 28 x 13mm (viz obrázek 2.XVII).



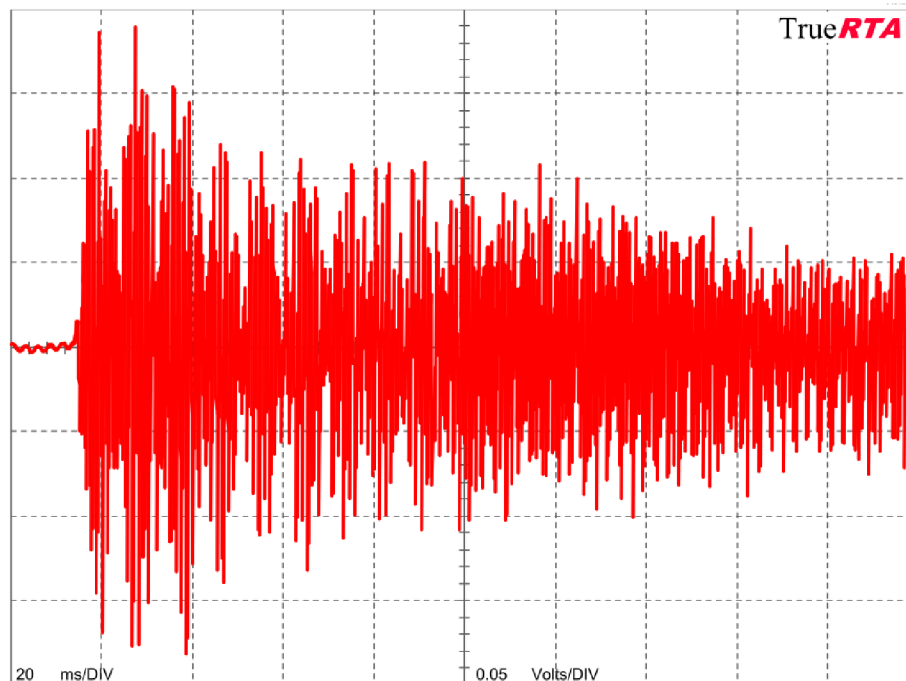
Obrázek 2.XVII – Konstrukce provizorního rámu pro zjištění hodnot snímače

Již výše zvolená struna je protažena dírkou v kratší straně rámu a upevněna k napínacímu šroubu. Snímač je upevněn pomocí dvou šroubů v pozici dle obrázku 2.XVII. Při měření byl použit měřící systém, který se skládal ze zvukové karty a PC s použitým programem TrueRTA, který umožňuje funkce osciloskop, frekvenční analyzátor a generátor.

2.14.3 Měření citlivosti snímače

Při testovacím měření byl snímač zatížen rezistorem o hodnotě $22\text{k}\Omega$ a připojen na vstup měřícího systému. Po napnutí struny napínacím šroubem byly snímány průběhy výstupního napětí při různé intenzitě „úhozu“. Na obrázku je uveden typický průběh. Počáteční hodnoty průběhu dosahují hodnoty 300 mV špička-špička, pak následuje delší úsek o hodnotě 200 mV špička-špička. Pro účely návrhu zesilovače bude počítáno s efektivní hodnotou vstupního $U = 100\text{ mV}$.

Na závěr byla změněna hodnota zatěžovacího rezistoru z $22\text{ k}\Omega$ na $100\text{ k}\Omega$ a poté na $10\text{ k}\Omega$. Tyto změny měly jen malý vliv na úroveň signálu. Znamená to, že snímač lze připojit k zesilovači, jehož vstupní odpor je větší než $10\text{ k}\Omega$.



Obrázek 2.XVIII – Průběh signálu testovacího měření

2.15 Návrh zesilovače

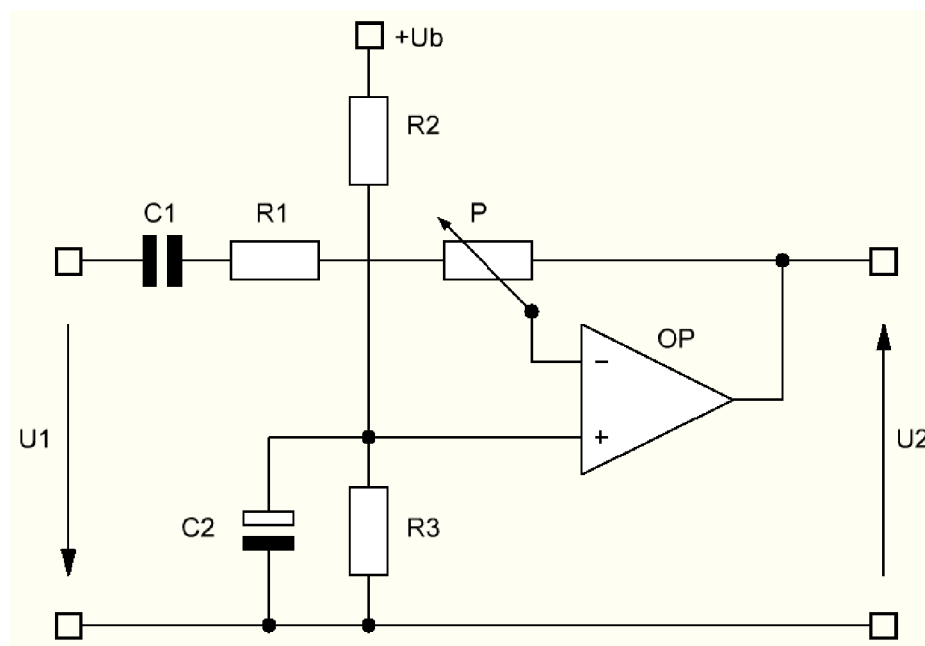
Zesilovač slouží k zesílení signálu ze snímače a případné kmitočtové korekci. Tato harfa má být přenosným nástrojem, proto bylo zvoleno napájení z baterie 9V. Je zde samozřejmý požadavek minimalizovat odběr obvodů.

Tabulka 2.C - Specifikace parametrů zesilovače

napájecí napětí	baterie 9V
vstupní odpor	10k Ω
maximální vstupní napětí	200mV
kmitočtová charakteristika	horní propust s kmitočtem 300Hz pro potlačení brumu

2.15.1 Výpočet a volba parametrů zesilovače

Požadavkům specifikace vyhovuje jednoduchý invertující zesilovač s operačním zesilovačem. Zvolen byl nízkopříkonový typ TLC272 (viz obrázek 2.XIX), který je určen pro aplikace s nesymetrickým napájením. Typické zapojení je na obrázku. Lineární potenciometr slouží k plynulému nastavení zesílení. [16]



Obrázek 2.XIX – Invertující zesilovač TLC272

V následujících řádcích jsou uvedeny bližší zvolené specifikace použitých součástek ve schématu na obrázku 2.XIX.

Rezistor R1 určuje minimální vstupní odpor zesilovače, dle specifikace byl zvolen $R1 = 10\text{k}\Omega$.

Potenciometrem P lze pro hodnoty $R1 = 10\text{k}\Omega$ a $P = 100\text{k}\Omega$ nastavit zesílení v rozmezí 0,1 až 10. Závislost zesílení na natočení potenciometru (0 až 90% natočení) je téměř logaritmická. V krajní poloze, kdy běžec je u výstupu zesilovače, dojde k úplnému potlačení signálu.

Kondenzátor C1 slouží ke stejnosměrné oddělení piezo snímače a spolu s rezistorem R1 a potenciometrem P tvoří horní propust [17], kterou popisuje vztah (2.19),

$$C1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{0L} \cdot R1} \quad (2.19)$$

kde f_{0L} značí frekvenci pro polohu potenciometru vlevo. Pro maximální zesílení zesilovače (běžec potenciometru je vlevo u rezistoru R1) byly dosazeny hodnoty pro pokles o 3dB na kmitočtu $f_{0L} = 300\text{Hz}$.

$$C1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 300 \cdot 10 \cdot 10^3}$$

$$C1 = 53\text{nF}$$

Byl zvolen nejbližší volně dostupný kondenzátor o hodnotě 47nF pro kmitočet $f_{0L} = 340\text{Hz}$.

Poté byla vypočítána frekvence f_{0P} pro minimálního zesílení dle vztahu (2.20)

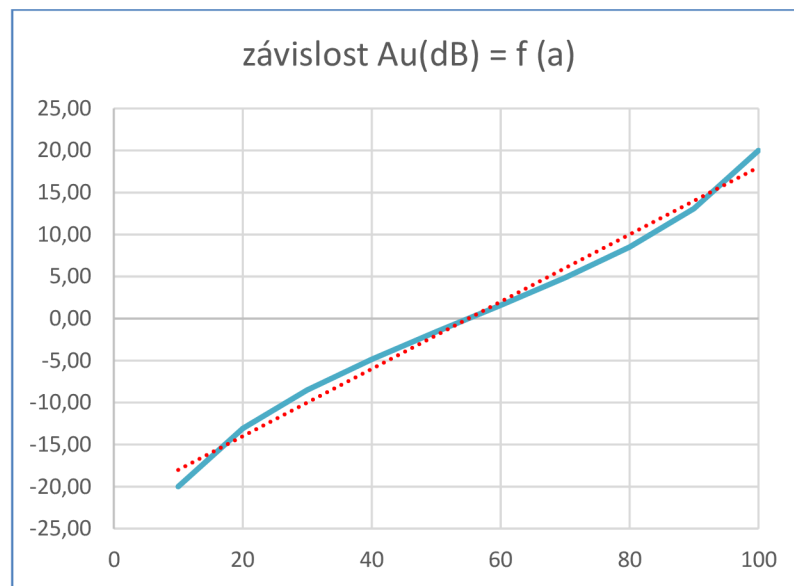
$$f_{0P} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C1 \cdot (R1 + P)}, \quad (2.20)$$

kde f_{0P} značí frekvenci pro polohu potenciometru vpravo.

$$f_{0P} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 47 \cdot 10^{-9} \cdot (10 \cdot 10^3 + 100 \cdot 10^3)}$$

$$f_{0P} = 30,78 \text{ Hz}$$

Pokles frekvence je o 3dB je na kmitočtu přibližně 31Hz. Znamená to, že čím větší zesílení zesilovače, tím výraznější potlačení brumu (viz obrázek 2.XX).



Obrázek 2.XX - Závislost zesílení zesilovače (dB) na poloze běžce potenciometru (%)

Dělič R2, R3 tvoří dva shodné rezistory a slouží k vytvoření polovičního napětí na neinvertujícím vstupu. Protože vstupní proud je nepatrný (zlomky μA) byl zvolen proud děličem 0,1mA. Celkový odpor děliče byl vypočítán dle klasického ohmova zákona (viz vztah (2.21))

$$R2 + R3 = \frac{U}{I}, \quad (2.21)$$

Kde U značí napájecí napětí baterie.

$$R2 + R3 = \frac{9}{0,1 \cdot 10^{-3}}$$

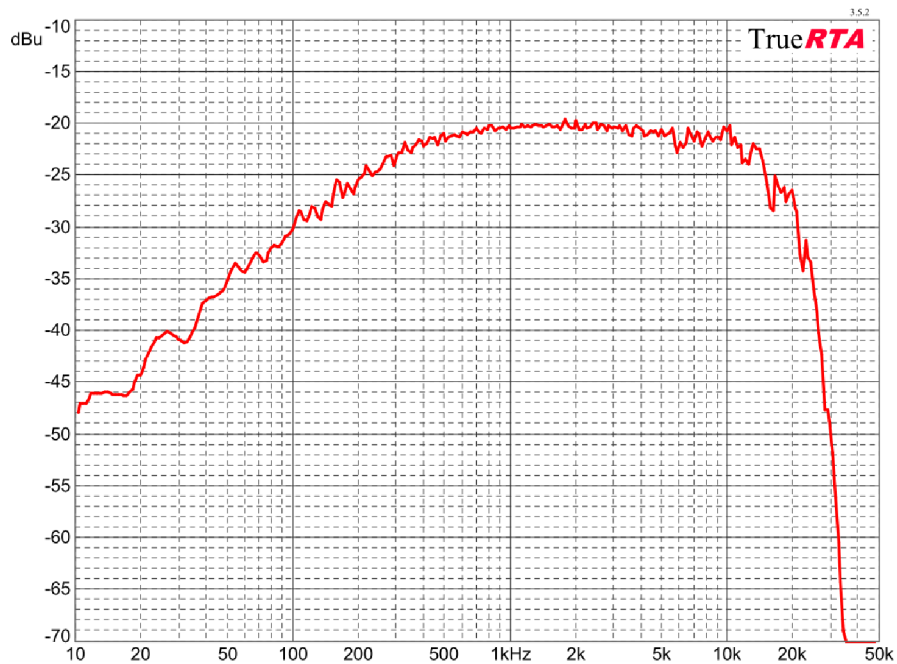
$$R2 + R3 = 90 \text{ k}\Omega$$

Velikosti rezistorů děliče byly zvoleny $R2 = R3 = 47 \text{ k}\Omega$.

Kondenzátor C2 je filtrační kondenzátor pro zlepšení stability napětí na neinvertujícím vstupu. Jeho hodnota byla zvolena $10 \mu\text{F}$ na napětí 10V.

2.15.2 Ověření návrhu měření

Zesilovač byl realizován na zkušební desce. Kmitočtové charakteristiky byly změřeny měřícím systémem TrueRTA, při vstupním napětí 0,1V.



Obrázek 2.XXI – Kmitočtová charakteristika zesilovače pro plné zesílení

Kmitočtová charakteristika pro plné zesílení (běžec potenciometru vlevo u rezistoru R1). Zesílení v decibelech bylo počítáno dle následujícího vzorce (2.22)

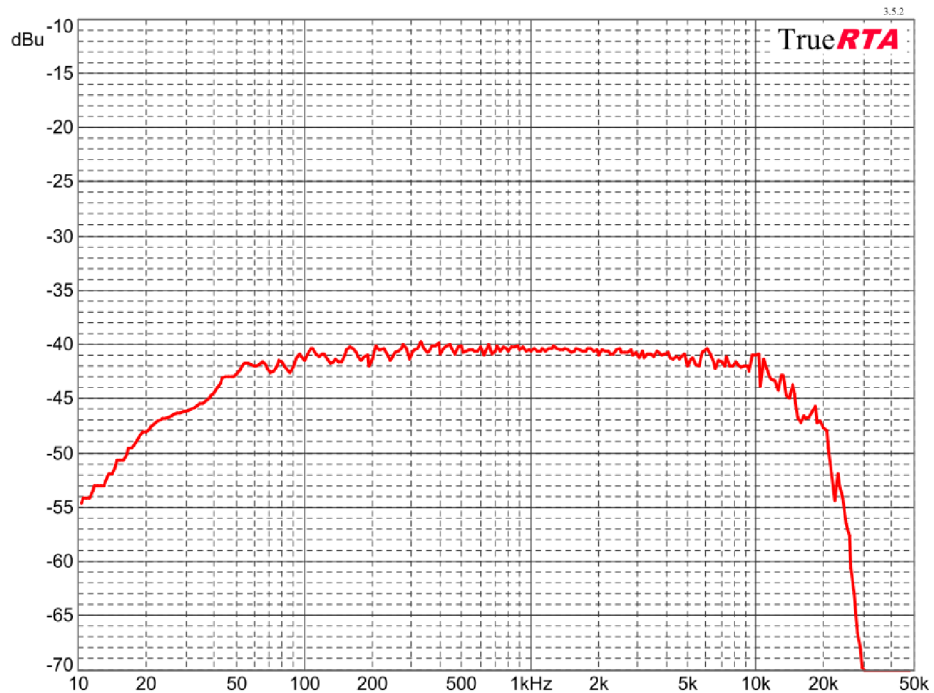
$$A_u = 20 \cdot \log \left(\frac{P}{R1} \right), \quad (2.22)$$

kde A_u značí napěťové zesílení zesilovače

$$A_u = 20 \cdot \log \left(\frac{100 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \right)$$

$$A_u = 20dB$$

Kmitočtová charakteristika odpovídá návrhu. Z grafu je zřejmé (viz obrázek 2.XXI), že se jedná o horní propust s kmitočtem asi $f_{0L} = 340\text{Hz}$.



Obrázek 2.XXII – Kmitočtová charakteristika zesilovače pro střední zesílení

Kmitočtová charakteristika pro polohu běžce přibližně uprostřed dráhy. Zesílení v decibelech bylo počítáno dle vztahu (2.23)

$$A_{u2} = 20 \cdot \log \left(\frac{0,5 \cdot P}{0,5 \cdot P + R1} \right), \quad (2.23)$$

kde konstanta 0,5 značí polohu jezdce uprostřed dráhy.

$$A_{u2} = 20 \cdot \log \left(\frac{0,5 \cdot 100 \cdot 10^3}{0,5 \cdot 100 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3} \right)$$

$$A_{u2} = -1,58dB$$

Naměřený průběh dokumentuje vypočtený pokles zesílení o 21,58dB. Pro polohu běžce potenciometru ve střední poloze byla stanovena hodnota kmitočtu f_{0vyp} dle vztahu (2.24)

$$f_{0vyp} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C1 \cdot (R1 + 0,5 \cdot P)}, \quad (2.24)$$

kde f_{0vyp} je vypočtená hodnota při střední poloze jezdce

$$f_{0vyp} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 47 \cdot 10^{-9} \cdot (10 \cdot 10^3 + 0,5 \cdot 100 \cdot 10^3)}$$

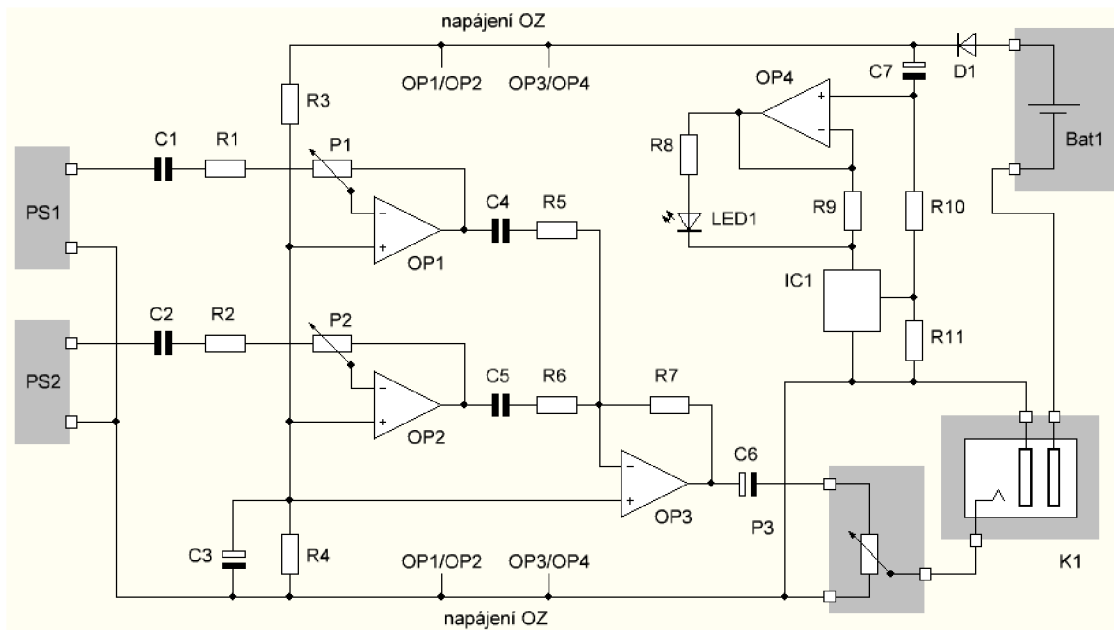
$$f_{0vyp} = 56Hz$$

Hodnota odečtena z grafu $f_{0střed} = 50Hz$ (viz obrázek 2.XXII) je v dobrém souladu s vypočtenou hodnotou.

2.16 Celkové schéma

Jelikož se jedná o experimentální strunný hudební nástroj, byla snaha navrhnout vhodné ovládání elektrického vybavení a možnost změny barvy zvuku. Na základě těchto požadavků bylo zvoleno, že nástroj bude snímán dvěma piezo snímači, kde jeden z nich bude přitlačen na dřevěné obložení a druhý z nich na mosazný rám. Každý z těchto snímačů bude mít na bočním panelu své ovládací prvky, které umožní zvolit hodnotu zesílení.

Dále nástroj bude osazen ovládacím prvkem celkového zesílení, který bude určovat výslednou sílu snímaného signálu. Toto vybavení bude napájeno 9V baterií. Výstupník konektorem bude běžný JACK 6,3mm. Celkové schéma, je na obrázku 2.XXIII.



Obrázek 2.XXIII – Celkové schéma mixážního zesilovače

Na obrázku 2.XXIII je zřejmé, že se jedná o malý mixážní zesilovač se dvěma vstupy doplněný o jednoduchý obvod signalizace stavu baterie. Zesílení signálu z piezo snímače (PS1) se nastavuje potenciometrem P1 a zesílení signálu z piezo snímače (PS2) potenciometrem P2. Na výstupu sčítacího zesilovače je sumární potenciometr hlasitosti.

Výstupní konektor K1 je stereofonní JACK 6,3mm (jak již bylo zmíněno). Zasunutím monofonního JACKU dojde k připojení baterie a tím k zapnutí přístroje. V okamžiku připojení dojde k rozsvícení LED1 na dobu, která je úměrná stavu baterie (krátké bliknutí signalizuje vybitou baterii). Jedná se o převzaté zapojení s obvodem TL431, hodnoty součástek byly stanoveny experimentálně.

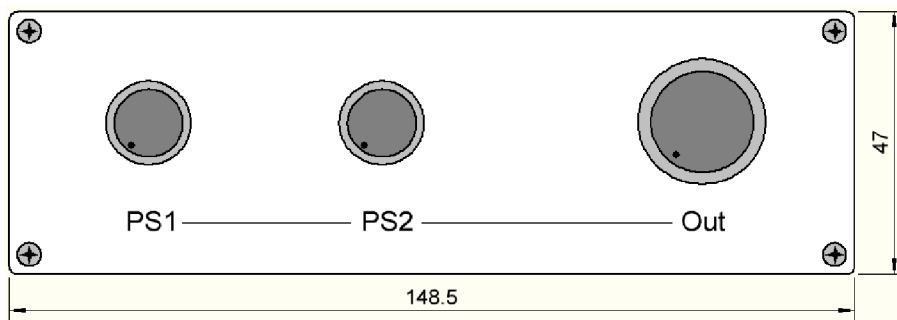
Tabulka 2.D – Rozpiska součástek ze schématu mixážního zesilovač (obrázek 2.XXIII)

C1, C2	kondenzátor 47nF
R1, R2	rezistor 10k Ω
P1, P2	lineární potenciometr 100k Ω
R3, R4	rezistor 47k Ω
C3	elektrolytický kondenzátor 10 μ F na napětí min. 10V
OP1, OP2	dvojitý operační zesilovač TLC272
C4, C5	oddělovací kondenzátor 10nF
R5, R6	rezistor 22k Ω
R7	rezistor k nastavení celkového zesílení
C6	oddělovací elektrolytický kondenzátor 10 μ F na napětí min. 10V
P3	logaritmický potenciometr 10k Ω
K1	stereofonní JACK 6,3mm
OP3, OP4	dvojitý operační zesilovač TLC272
IC1	TL431
C7	elektrolytický kondenzátor 100 μ F na napětí 10 min. 10V
R8	rezistor 1k Ω
R9	rezistor 3,9k Ω
R10	rezistor 56k Ω
R11	rezistor 27k Ω
LED1	červená led \varnothing 3mm
BAT1	baterie 9V

2.16.1 Konstrukce přístroje

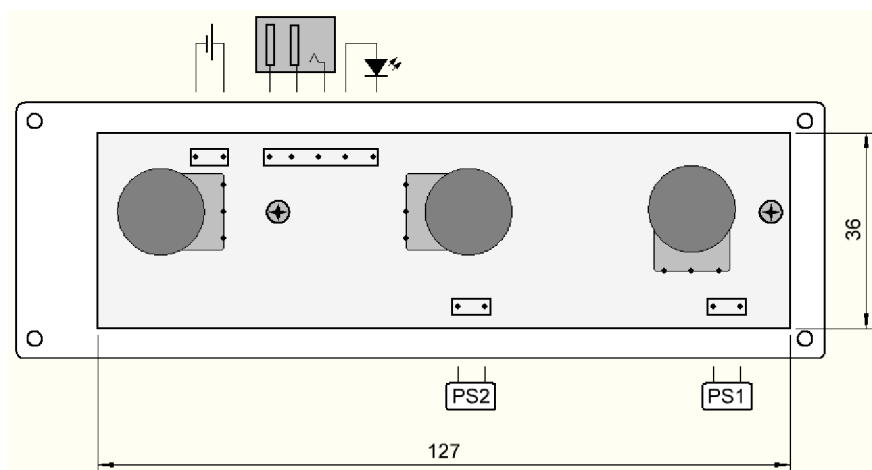
Celé elektrické vybavení bude uloženo v dřevěném obložení. Hlavní panel ponese desku elektroniky a ovládací prvky. Menší panel pak bude osazen výstupním konektorem a indikační LED stavu baterie. V obložení budou tyto panely umístěny tak, aby nijak neomezovali hráče při hře a zároveň aby hráč měl k ovládacím panelům jednoduchý přístup. Panely budou vyrobeny z duralového plechu o tloušťce stěny 2mm za použití ručních pákových nůžek a stojanové vrtačky.

Hlavní ovládací panel bude mít velikost 148,5 x 47mm (viz obrázek 2.XXIV).



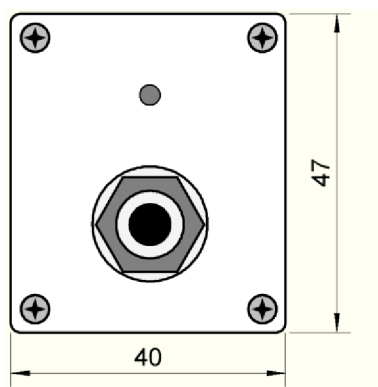
Obrázek 2.XXIV – Ovládací panel s potenciometry (přední strana)

Deska plošných spojů o velikost 127 x 36 mm (viz obrázek 2.XXV) je k panelu připevněna pomocí dvou distančních sloupků. Na desce jsou pájecí piny pro připojení baterie a pro připojení malého panelu nesoucího výstupní konektor a indikační LED. Panel se upevní k dřevěnému tělu harfy pomocí čtyř šroubků (viz obrázek 2.XXIV). Otvor v harfě má rozměry 131 x 40 mm a hloubku 25 mm.



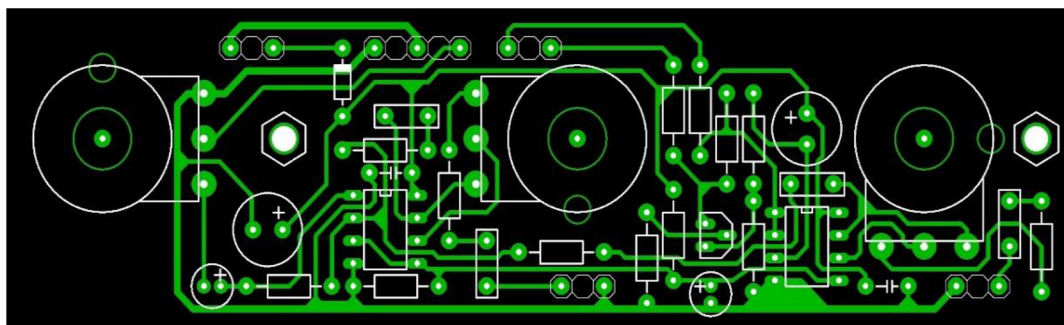
Obrázek 2.XXV – Ovládací panel s potenciometry (zadní strana)

Malý panel s výstupním konektorem a indikační LED má velikost 47 x 40mm je upevněn čtyřmi šrouby (viz obrázek 2.XXVI). Otvor v harfě má rozměry 32 x 26mm a jeho hloubka je 30mm.



Obrázek 2.XXVI – Panel s výstupním konektorem a indikační LED diodou

Dle schématu (viz obrázek 2.XXIII) byl vytvořen jednostranný plošný spoj (viz obrázek 2.XXVII), který bude vyroben dle standardních postupů na sklolaminátovou desku. Následné osazení proběhne obvyklým způsobem.



Obrázek 2.XXVII – Deska plošného spoje schématu z obrázku 2.XXVII

2.17 Dřevěné obložení

Dřevo k harfě neodmyslitelně patří, protože právě z tohoto materiálu se harfy vyráběly po staletí. U této experimentální harfy bude dřevěný materiál použit pro obložení ocelového rámu. Obložení umožní hráči příjemné držení nástroje, dopomůže k vytvoření krásné plné barvy zvuku a vytvoří konečný design.

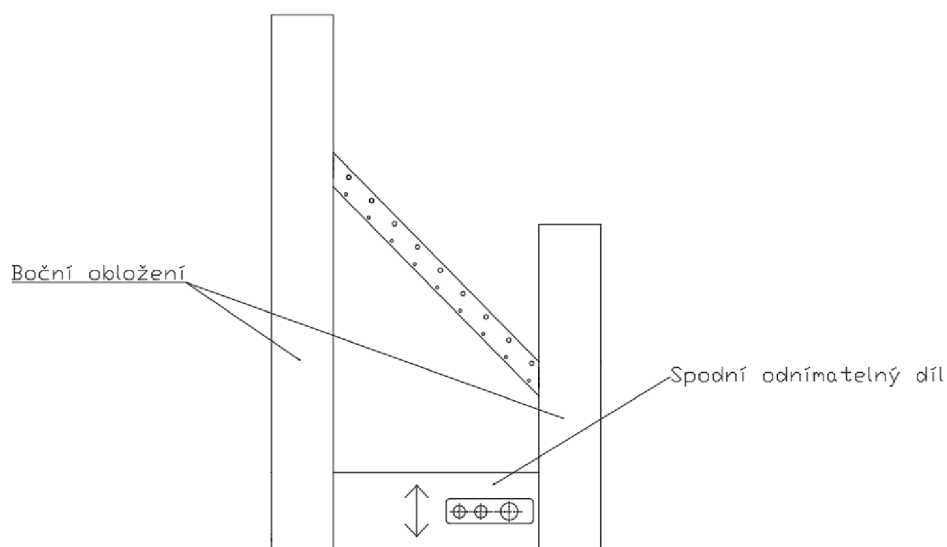
2.17.1 Volba dřeva

Jak je uvedeno v teoretickém úvodu, za materiál obložení byl zvolen javor. Dle tabulky 1.B se jedná o tvrdý materiál, často používaný pro výrobu hudebních nástrojů (mimo jiné i harf).

2.17.2 Postup vytváření výkresové dokumentace a montáž

Obložení se bude skládat ze tří profilů – dva boční, které budou připevněny k rámu nerozebíratelně a jeden spodní, který bude odnímatelný (viz obrázek 2. XXVIII). Při vytváření výkresové dokumentace bylo potřeba navrhnout otvory nejen pro osazení rámu, ale také pro ovládací panely, baterii a tlumícího mechanismu, který bude v obložení zabudován.

Spodní díl je odnímatelný kvůli možnosti instalace a případné korekci elektrického vybavení.



Obrázek 2.XXVII – Schématické zobrazení dřevěného obložení

Boční obložení (viz obrázek 2.XXVIII), bude k rámu pevně přilepeno dvousložkovým epoxidovým lepidlem. Spodní část (viz obrázek 2.XXVIII) bude přichycena k rámu šrouby M4 s imbusovou hlavou. Jeho přesnou polohu zajistí kolejnice na bocích.

2.17.3 Technologický postup výroby

U drážek a děr dřevěného obložení je předpokládána velká přesnost. Proto veškeré otvory budou vyrobeny na pětiosém CNC stroji (Homag Venture 316L, Houfek Fenix) vybavené dvouosou hlavou. Tento stroj je určen pro výrobu tvarově složitých dřevěných, kompozitních dílů a forem s přesností desetiny milimetru. [18]

Vnější tvar harfy bude tvořen experimentálně ruční prací pomocí pásové brusky a dalších ručních nástrojů.

2.18 Povrchové úpravy + konečný design

Životnost nástroje lze prodloužit vhodnou povrchovou úpravou, která může zabránit nejrozličnějším typům koroze či mechanickému poškození. Celý rám bude broušen na konečnou drsnost Ra0.2 a následně natírán. Za nátěr byla po zvážení různých typů barev zvolena kovářská černá, která je vhodná i pro dřevo a poskytuje vysokou ochranu proti korozi.

Celý nástroj tedy bude černo-mosazný. Pro lepší vzhled bylo navrženo, aby byl černý rám doplněn také malými prvky mosazné zlaté. Nakonec obložení bude přestříkáno bezbarvým lakem pro doplnění lesku a zvýšení ochrany.

3. POSTUP VÝROBY

Nástroj je zkonstruován tak, aby byla možná jednoduchá montáž dílčích částí. Jednotlivé komponenty byly vyrobeny na zakázku podle výkresů z přílohy dle navrženého výrobního procesu z návrhu.

3.1 Mosazný rám

Srdce nástroje – mosazný rám byl vyroben s vysokou přesností. Skládá se ze čtyř dílů (viz obrázek 3.I). Jelikož při výrobě mosazných profilů tažených za studena se používá silné chlazení olejem, který se postupně zadírá do materiálu, bylo potřeba jednotlivé komponenty řádně vyleštit. Vyleštěné díly pak byly nastříkány bezbarvým lakem, který bude bránit další oxidaci a narušování lesku rámu.



Obrázek 3.I – Jednotlivé díly rámu

3.1.1 Osazení horního nosníku

Horní nosník bylo nutné před montáží osadit důležitými komponenty. Nejprve středícími kolíky (viz obrázek 3.II), které byly vyrobeny s tolerancí h7 pomocí soustruhu. Tyto kolíky zajišťují stálou pozici strun tak, aby všechny svíraly rovnoběžný směr s bočními nosníky.



Obrázek 3.II – Středící kolíky

Kolíky byly lepeny do polopropustných předvrtaných děr pomocí dvousložkového epoxidového lepidla s kompenzačním kovovým materiálem. Dalšími důležitými prvky, které bylo nutné namontovat na horní nosník, byly ladící mechanismy. Do předvrtaných děr byly pomocí závitníku udělány závity M3. Montáž jednotlivých mechanismů potom byla velice jednoduchá – každý mechanismus byl po zasunutí na své místo zajištěn pouze dvěma šrouby s válcovou hlavou (viz obrátek 3.III),



Obrátek 3.III – Instalace ladících mechanismů

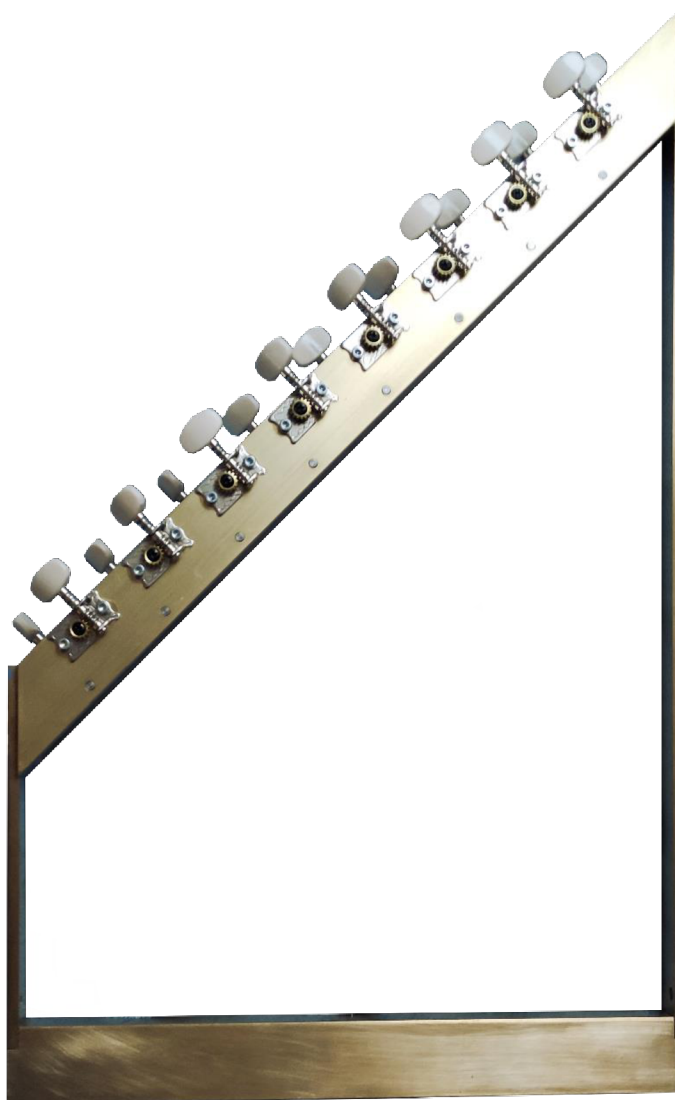
3.1.2 Montáž jednotlivých komponentů rámu

Jednotlivé komponenty rámu byly k sobě sešroubovány za použití dvousložkového epoxidového lepidla, které podstatně zvyšuje pevnost spoje. Horní díl (viz obrátek 3.III), který slouží jako nositel napínacích mechanismů a vystředění strun byl propojen pomocí bočních nosníků se spodním dílem (viz obrátek 3.IV), který je navržen pro spolehlivé ukotvení strun.



Obrátek 3.IV – Otvory pro uchycení strun na spodním nosníku

Po nanesení lepidla byly všechny šroubové spoje pevně dotaženy a poté očištěny od přebytečného nánosů. Tímto postupem vznikl pevný monolitní rám (viz obrátek 3.V).



Obrázek 3.V – Kompletní rám

3.2 Dřevěné obložení

Hrubé díly dle výkresu byly vyrobeny s pomocí firmy HaCase, která se zabývá zpracování dřeva. Tyto díly by se daly nazvat jako polotovary, s přesně vyfrézovanými otvory (viz obrázek 3.VI a 3.VII), které jsou určeny k dalšímu zpracování.



Obrázek 3.VI – Licování drážky s rámem



Obrázek 3.VII – Otvory spodního obložení

Další zpracování probíhalo spíše na umělecké úrovni, kdy pomocí ruční hoblovačky a pásové brusky bylo dosaženo konečných oblých tvarů jednotlivých dílů obložení. Způsob, jakým bylo při realizaci postupováno, je naznačen na obrázku 3.VIII a 3.IX.



Obrázek 3.VIII – Tvarování obložení (hoblování)



Obrázek 3.IX – Postupné tvarování obložení

Po kompletním vytvarování byl celý rám chemicky ošetřen černou barvou a boční díly byly přilepeny k rámu. Poslední úpravou obložení, bylo malování zlatých ornamentů, které byly vytvářeny pomocí šablony z malířské pásky. Tyto ornamenty dodávají harfě typický zámecký charakter a zvyšují designovou hodnotu nástroje. Po konečném nanesení několika vrstev bezbarvého laku vznikl ořeruvzdorný hladký povrch, který chrání konečný vzhled nástroje (viz obrázek 3. X).



Obrázek 3.X – Kompletní obložení

3.3 Tlumící mechanismus

Tlumící mechanismus tvoří několik dílů (viz obrázek 3. XI), které byly vytvořeny pomocí pětiosých frézek a soustruhu. Díky vysoké toleranční přesnosti výroby byla montáž velice snadná. Každý díl se pouze zastrčil, či zašrouboval na požadované místo. Celý mechanismus je uchycen ve spodní části rámu, ale jeho funkční část se skrývá v dřevěném obložení. Funkční částí se myslí ohybová páka napružená pružinou, která zajišťuje celý mechanismus v klidové poloze.

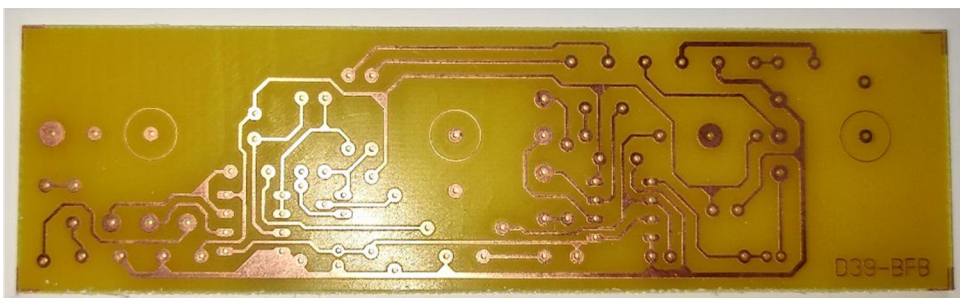


Obrázek 3.XI – Díly tlumícího mechanismu

Aktivní část tohoto mechanismu je umístěna v blízkosti strun. Při zmáčknutí páčky se tato aktivní část přiblíží ke strunám a ztlumí je. Na kontaktních plochách je přilepen trocenen pro lepší ztlumení.

3.4 Elektrické vybavení a doplňky

Elektrické vybavení bylo vyrobeno přesně podle návrhu, který byl popsán v dřívější části práce. Dle schématu bylo na objednávku zhotoveno několik kusů plošných spojů (viz obrázek 3. XII).



Obrázek 3.XII – Deska plošného spoje elektrického vybavení

Tato deska byla klasicky osazena navrženými součástkami (viz obrázek 3. XIII) pomocí cínu. Na jedné straně desky jsou hlavičky součástek a na druhé trčí pouze vývody potenciometrů. Poté byla deska změřena, odzkoušena, vyladěna a po těchto operacích byla připravena k instalaci.



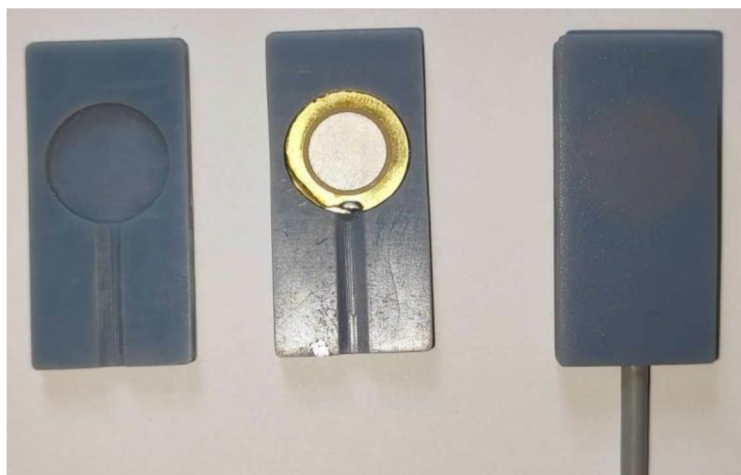
Obrázek 3.XIII – Osazena deska plošných spojů

Jedním z doplňků, který tvoří i důležitou technickou část harfy, jsou ovládací panely, které mají za úkol držet elektrické vybavení na svém místě. Tyto panely na nástroji jsou hned dva – větší pro ovládání potenciometrů a menší pro signalizaci stavu baterie a konektor. Byly zhotoveny z tvrzeného duralu dle praktických příruček zámečnického řemesla standardizovanými nástroji. Po celkovém vytvarování a patřičném děrování byly ošetřeny stejnou barvou jako obložení. Poslední operace na těchto panelech byla provedena na tříosé laserové gravírovačce, která díky vypálení nanesené barvy dala vznik popiskům pro uživatele (viz obrázek 3. XIV).



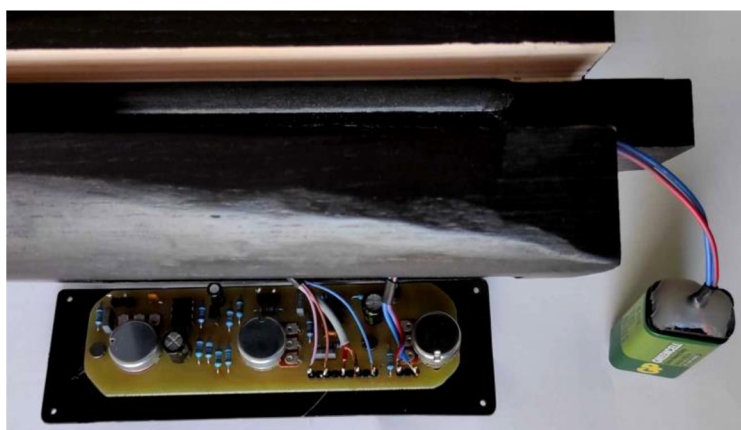
Obrázek 3.XIV – Ovládací panely

Ještě před instalací ovládacích panelů, bylo nutné připravit ostatní funkční prvky, jako konektor pro zapojení baterie ale hlavně pouzdra pro snímače. Tato pouzdra plní jednoduchou, ale důležitou funkci – chrání snímač před poškozením a udržují ho stále na stejném místě, což je pro udržení barvy tónů klíčové. Tyto kryty byly zhotoveny na 3D-tiskárně díky materiálu ABS (viz obrázek 3. XV).



Obrázek 3.XV – Plastové kryty snímačů

Když bylo vše připraveno, všechny komponenty se připájely k patřičným vývodům základové desky (viz obrázek 3.XVI) a byly uloženy do spodní části obložení. Jeden snímač byl přitlačen k obložení a druhý k rámu. Baterie byla uložena tak, aby byla snadná případná výměna.



Obrázek 3.XVI – Ovládací panel před montáží

Poslední a zároveň milou povinností bylo napnout výše navržené struny. Díky přesné konstrukci mosazného rámu to bylo velice snadné. Struna se provleče příslušnou dírou ve spodní části rámu, dále se ohne přes středící kolík, který zaručuje její rovnoběžnou polohu s bočními nosníky, a nakonec díky ladícím mechanismům je napnuta tak, aby vydávala požadovanou frekvenci.

Po této operaci byla celá harfa připravena k nahrání vzorků a následné zvukové analýze.

4. GENEROVÁNÍ ZVUKU A ANALÝZA ZVUKU

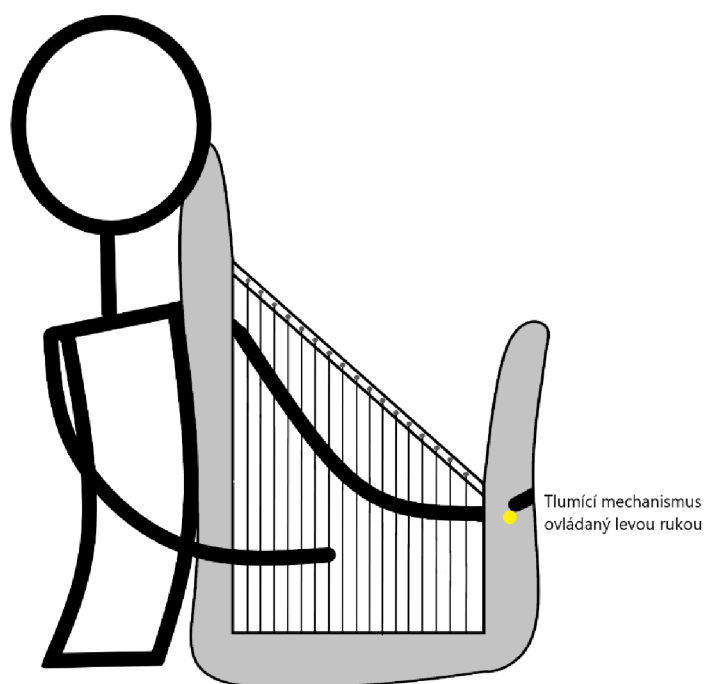
Jak je napsáno již na deskách práce, jedná se o zvukový zdroj – zajisté je tedy důležité zkoumat vlastnosti tohoto generovaného tónu. Zvuk harfy má většina z nás zafixován jako vznešený a jemný, možná trochu cinkavý ale v celku mohutný. Cílem práce sice nebylo vytvoření nástroje, který by imitoval zvuk klasické harfy (na to existují MIDI klávesy a nesčetné knihovny samplů), ale nedá se popřít, že snaha o vznešený tón, jehož generování by bylo velice podobné klasické harfě, se při vytváření práce objevuje mnohokrát.

Nástroj hráči nabízí svou konstrukcí, ale také svým charakterem mnohé možnosti hry a generování různých barev tónu. Díky použití dvou stejných snímačů umístěných na různých místech nástroje lze korigovat barvu tónu mixováním jejich poměrů. Další možnosti je způsob vytváření tónů prsty nebo použití tlumícího mechanismu, který nejen mění barvu tónů, ale ovlivňuje i jejich vývoj časového spektra v čase.

4.1 Možnosti hry

Generování tónů na této harfě je velice pestré. I když byl nástroj navržen tak, aby byly struny rozkmitávány prsty pravé ruky, je zde možností mnohem více. Než se ale pustíme do rozebírání experimentálních způsobů hry, bude zde představen takový způsob, který byl od návrhu zamýšlen jako ten nejvhodnější.

Tento způsob je určen hlavně pro praváky. Delší část obložení si hráč opře o levé rameno a levou rukou přimáčkne celý nástroj k hrudníku. Je nutné, aby dlaň byla v takové poloze, kdy pro ni bude přirozené, mačkat prostředníkem páku tlumícího mechanismu. V tomto rozpoložení má hráč volnou pravou ruku, kterou může generovat tóny. Zkrátka levá ruka nástroj drží a ovládá tlumení a pravá ruka hraje (viz obrázek 4. I). Tento způsob má velkou výhodu v tom, že je možné takto hrát, jak v sedě, tak i ve stoje.

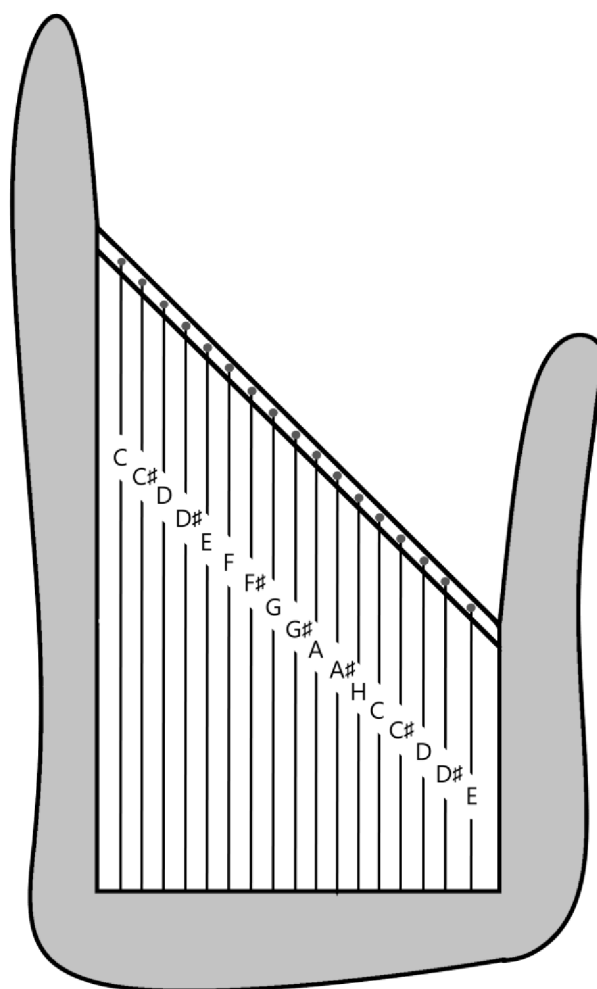


Obrázek 4.I – Schématicky naznačený ideální způsob hry

Další způsob je jakousi obdobou toho prvního. Rozdíl je v tom, že nástroj již nedrží levá ruka, ale je položen například na klíně, nebo je pověšen na popruhu či postaven na nějakém stojanu. To umožňuje rozkmit strun jak pravou, tak levou rukou, a tak lze vytvářet více tónů najednou. Nevýhodou tohoto způsobu je komplikovanější ovládání tlumení.

Samotný nástroj nabízí mnoho dalších způsobů hry. Například rozkmit strun něčím jiným než konečkami prstů. Například dřevěnou či kovovou paličkou. Tato možnost by jistě zajistila nové barvy zvuku. Nebo při napnutí menšího počtu strun by hráč mohl použít například i smyčec a podobně. Zkrátka možností je mnoho. Dovolte mi se zastavit ještě u způsobu, který byl předložen jako první.

Tento způsob nabízí nejefektivnější změnu barvy tónu přímo při hraní. Díky vhodnému uložení ovládacího panelu není problém během hry měnit hlasitost nebo barvu tónu. Lze tedy vytvářet jak frekvenční, tak amplitudovou modulaci (tremolo). Dále lze barvu tónu mírně měnit i pozici, na které je struna rozkmitána. Velkou výhodou nástroje je ale skutečnost, že se může používat jako nástroj doprovodný, nebo také jako nástroj sólový. Pro sólový vstup jdou struny naladit klidně po čtvrttónech a tím nástroj nabízí úžasné možnosti, se kterými se u běžných nástrojů nesetkáme. U doprovodných partů, kdy se bude pravděpodobně jednat o rozložené akordy, je doporučeno klasické ladění po půltónech (viz obrátek 4. II).



Obrázek 4.II – Ladění nástroje

4.2 Analýza zvuku

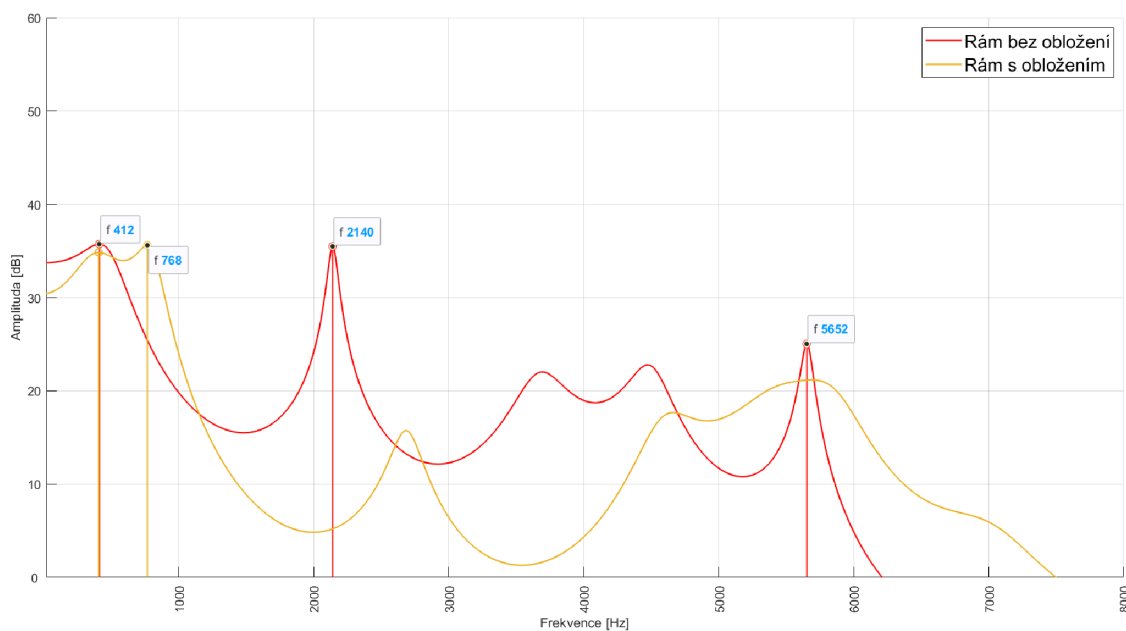
Jedná se o elektrický nástroj, a proto všechny vzorky k analýze nebyly nahrány mikrofonem, ale za pomoci zvukové karty, i když nástroj mírně vyzařuje i akusticky do prostoru. Díky přednostní realizaci elektrického vybavení byl nahrán nejprve zvuk rámu bez dřevěného obložení, po celkové montáži byly poté nahrány zvuky jednotlivých snímačů a jejich poměry. Také byl nahrán zvuk tónu při aktivování tlumícího mechanismu. Nakonec nás při analýze zajímalo porovnání s klasickou harfou. Analýza je velice důležitá, protože se z ní dá vyčíst, jakým způsobem ovlivňují barvu tónu určité prvky, ale hlavně analýza určí, jakým směrem se nástroj bude ubírat v hudební sféře.

Pro porovnávání naměřených vlastností nástroje byly vytvořeny grafy časového průběhu signálu a také frekvenční charakteristiky pomocí FFT a LPC transformace. LPC

transformace má výhodu v zobrazení obálek ve frekvenčním spektru signálu, dají se v ní tedy lépe pozorovat případné rozdíly. Grafy byly generovány pomocí dvou programů – Matlab a Room ex wizzard.

4.2.1 Vliv obložení na barvu tónu

Před trvalou montáží byl nahrán tón stejným způsobem jako po montáži. Díky těmto vzorkům se dala vytvořit LPC transformace (viz obrázek 4.III) a tak zhodnotit jaký vliv má dřevěné obložení na barvu tónu.



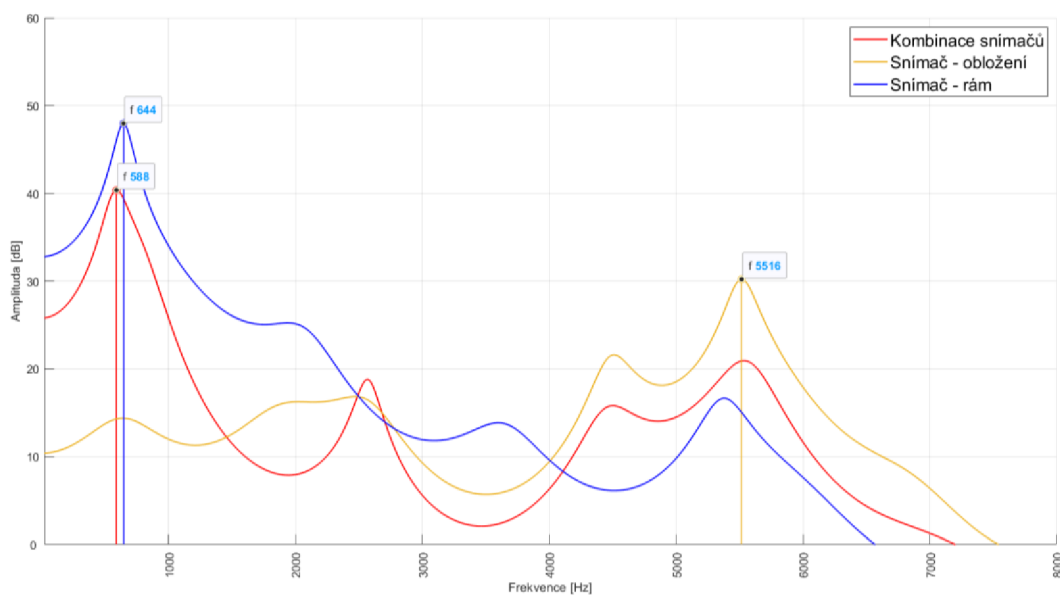
Obrázek 4.III – Vliv obložení na barvu tónu

Na změřeném tónu před přidáním obložení jsou patrné tři podstatné vrcholy. První vrchol je samozřejmě fundament, který se v podstatě nemění, jen u obložení není za fundamentem tak rychlý spád. Jinými slovy můžeme tvrdit, že dřevěné obložení přidává mohutnější zabarvení okolo fundamentu. Druhý vrchol s kmitočtem 2140Hz vzniká nejspíše rezonancí mosazného rámu a zároveň lze z grafu vyčíst, že dřevěné obložení ubralo barvu na středních kmitočtech a přidalo na vyšších. Poslední výrazný hrbol je na frekvenci 5652Hz.

Na rámu vznikají určité výrazné rezonance což vyplývá z vlastností kovových materiálů, většinu těchto rezonancí však umístění dřevěného obložení utlumí, jsou zde pak více patrné rezonance dřeva než tlumeného kovu. Dvě výrazné rezonance kovu se však svým způsobem objevují i v charakteristice tónu po umístění obložení se vrchol s kmitočtem 2140Hz posouvá na 2696Hz a rezonance na 5652Hz je patrná v zesílené charakteristice kolem tohoto kmitočtu. Nakonec je třeba zmínit zesílení na kmitočtu 768Hz, což je lehce inharmonický druhý násobek základního tónu, který přibývá až s dřevěným obložením.

4.2.2 Porovnání snímačů

Porovnáním snímačů se nemyslí porovnání jejich konstrukce či zapojení, protože jsou naprosto identické. Myslí se tím jejich uložení a frekvence jaké snímají. Jeden je pevně přitlačen k rámu a druhý se dotýká pouze obložení. Jak již bylo zmíněno, lze ovládat i jejich poměr, a proto je v LPC analýze (viz obrázek 4. IV) ideální poměr snímačů dle individuální psychoakustického testu.



Obrázek 4.IV – Porovnání snímačů

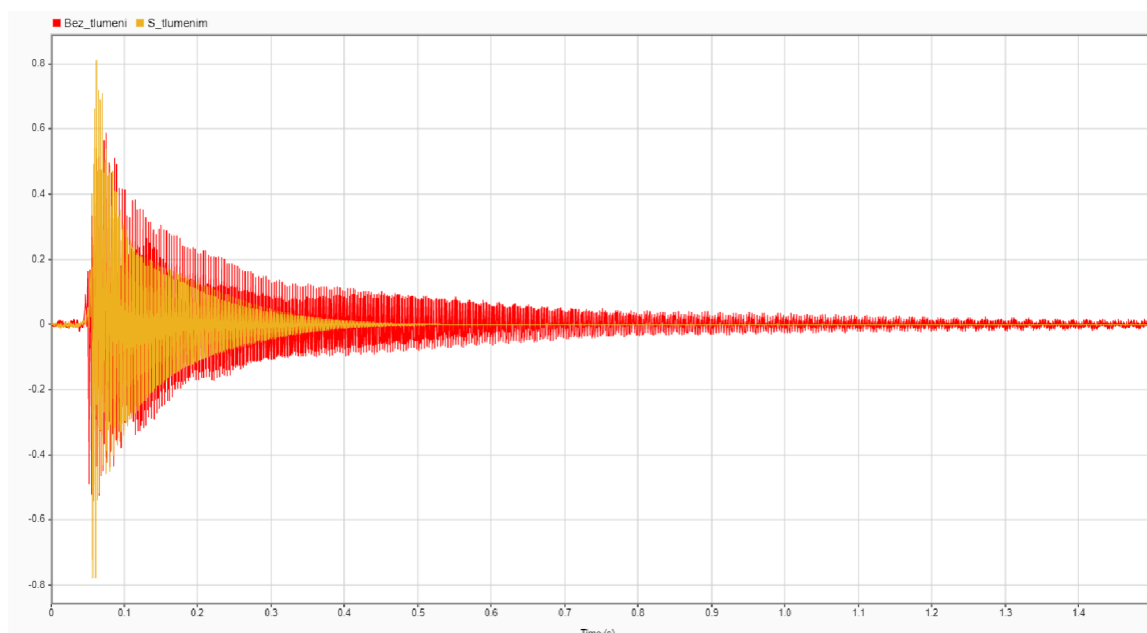
Na obrázku 4. IV lze pozorovat, jak moc dokáže ovlivnit spektrum pouhé přitlačení snímače k jinému materiálu. Snímač v obložení velice málo podporuje základní frekvenci tónu, naopak výrazně podporuje vyšší harmonické frekvence mezi pěti až šesti kHz. Generuje tedy cinkavou barvu tónu. Zajímavostí, která je z grafu zřejmá je přidání vlastní rezonance dřeva na kmitočtu 4508Hz. Tento snímač se chová s nadsázkou opačně než u rámu. U čidla, které je přitisknuto přímo k mosazné konstrukci, jsou výrazně podpořeny základní frekvence a díky nižší přítomnosti vysokých frekvencí je tón krásně zakulacený a jemný. Oba detektory frekvencí poskytují hráči naprosto rozdílnou barvu, tím pádem mixováním jejich poměrů lze výrazně měnit celkovou barvu.

U kombinace snímačů se využily vlastnosti snímače u rámu, a hlavně jeho výrazné posílení základní frekvence struny, tím se posílila jasnost a čitelnost tónu. Dále se využívá také zajímavé rezonance dřeva a jeho silnějšího zesílení oblasti kolem 5 a 6kHz, na kterou je lidský sluch nejvíce citlivý. Můžeme říct, že se jedná o ostrost tónu. Zajímavým jevem je vznikající zesílení na kmitočtu 2568Hz, které zhruba odpovídá 4té harmonické frekvenci, která podporuje jasnost tónu. To může být způsobeno tlumenou rezonancí mosazného rámu (viz předchozí porovnání). Při této kombinaci však vzniká ještě větší propad mezi 3-4kHz, který lze pozorovat na snímači umístěném v rámu. Tento propad je

jistě velká ztráta, protože na tyto frekvence je člověk v podstatě nejvíce zvyklý, ale možná i díky tomu se stává tón této harfy jedinečným. Kombinací vzniká tedy unikátní barva tónu, která využívá hlavně vlastností dřevěného obložení a jeho rezonancí, ze snímače přiloženého na mosazném rámu však používá to nejpodstatnější – zesílení fundamentu – základní frekvence, bez kterého by byl tón nejistý, nepříjemně cinkavý a nečitelný.

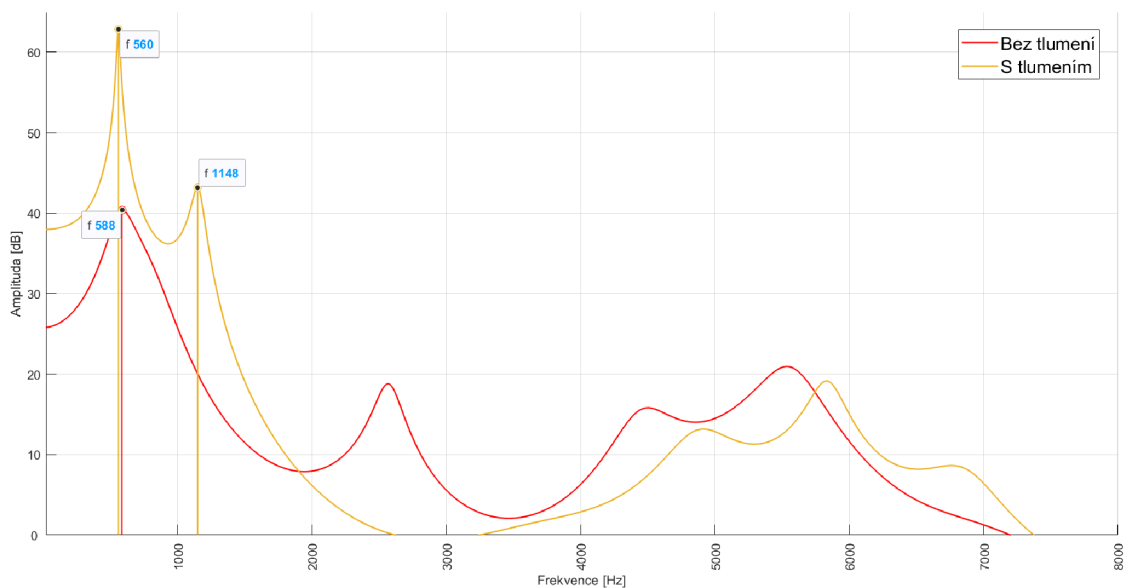
4.2.3 Vliv tlumícího mechanismu na barvu tónu

Tlumící mechanismus je asi největší přínos tohoto nástroje, jelikož u harfy byl použit snad poprvé. Tento mechanismus byl vytvořen pro rychlejší doznívání strun, a to se i podařilo, jak lze pozorovat (viz obrázek 4. V). Před samotným zhodnocením měření je nutno zdůraznit, že útlum je díky konstrukci a dorazům vždy stejný.



Obrázek 4.V – Vliv zatlumení na vývoj časového spektra v čase

Tlumení zkrátilo doznívání tónu o více než polovinu doby (viz obrázek 4. V), tón má tedy výrazně rychlejší pokles jeho intenzity. Také je vidět silnější attack, tedy rozkmit byl vytvořen za použití podstatně větší síly, počáteční intenzita tónu je tedy hlasitější. Ukazuje to na skutečnost, že při použití tlumení je potřeba si při hraní dávat pozor na intenzitu rozkmitu. Důležitým zjištěním je také ztráta lehkého kolísání v intenzitě – tlumený tón má až uměle pravidelný amplitudový pokles.

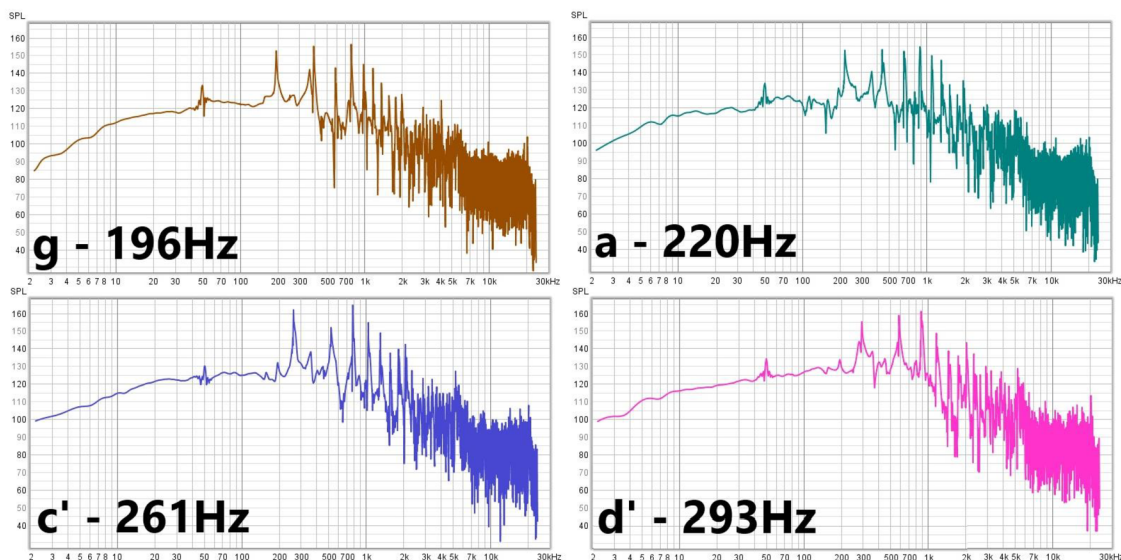


Obrázek 4.VI – Vliv tlumícího mechanismu na barvu tónu

Při hře si nelze nevšimnout, že použití tlumení mění i barvu tónu. Proto byla provedena LPC transformace (viz obrázek 4. VI), kde je spektrálně zobrazen vliv tlumení na barvu tónu. Je nutné na začátek zdůraznit, že měření bylo provedeno za stejného nastavení snímačů. Na obrázku 4. VI lze pozorovat, že při tlumeném tónu bylo více drknuto do struny, proto základní frekvence struny je u tlumeného tónu o víc jak 20dB hlasitější a je tedy třeba si tuto charakteristiku pomyslně o 20dB posunout dolů. U tlumeného tónu je zajímavé, že je zde velmi patrná druhá harmonická frekvence, která u tónu bez tlumení není vůbec zesílená. Od druhé harmonické frekvence již spektrum tlumeného tónu strmě klesá a je zde patrné pouze zesílení mezi 5 a 6kHz. Naopak tón bez použití tlumícího mechanismu má plnější již dříve popsanou barvu, je zde menší odstup vrcholu fundamentu od ostatních vrcholů oproti tlumeného tónu, který má výrazný pouze fundament a druhou harmonickou. Netlumený tón má tedy podstatně bohatší barvu – s ostrostí a větší jasností, díky zesílené 4. harmonické frekvenci.

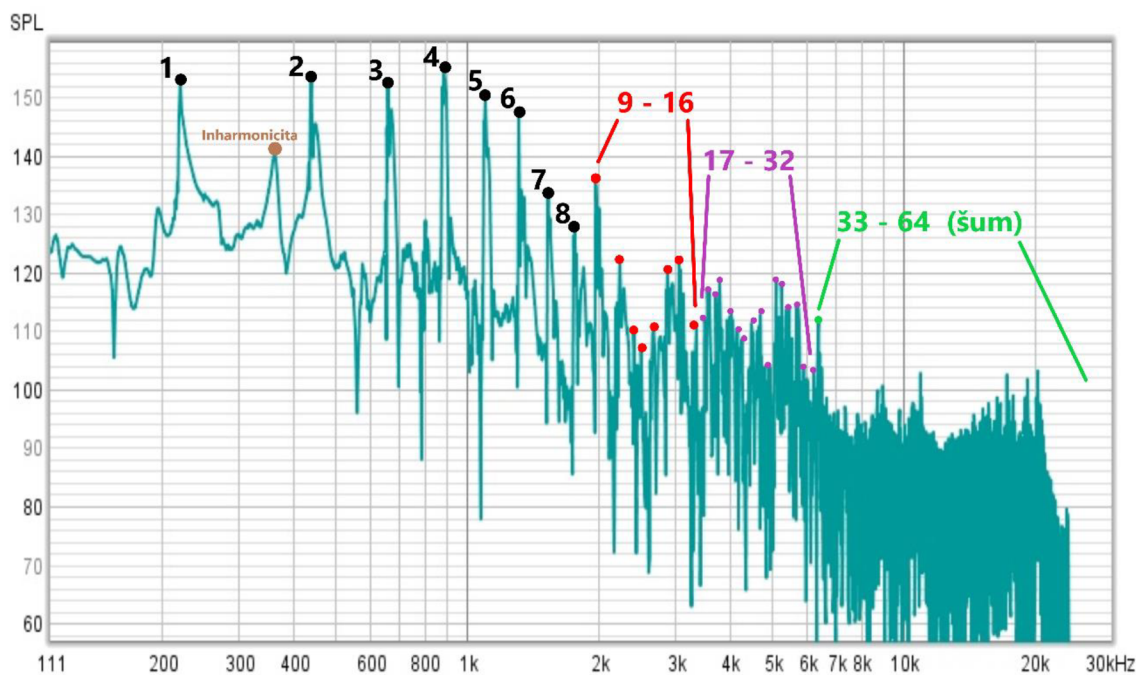
4.2.4 Analýza charakteristického zvukového spektra

Pro detailní analýzu charakteristické barvy tónu (viz obrázek 4. VII), byly pořízeny čtyři vzorky o různých frekvencích při stejném ideální nastavení poměrů potenciometrů jednotlivých snímačů.



Obrázek 4.VII – Zvukové spektrum tónů

Na obrázku 4. VII lze jasně vidět, že spektra si jsou velice podobná. Proto k podrobnější analýze byl vybrán pouze druhý vzorek malého *a* o základní frekvenci 220Hz. Nejprve bylo celé spektrum malého *a* rozděleno do čtyř pásem (viz obrázek 4. VIII).

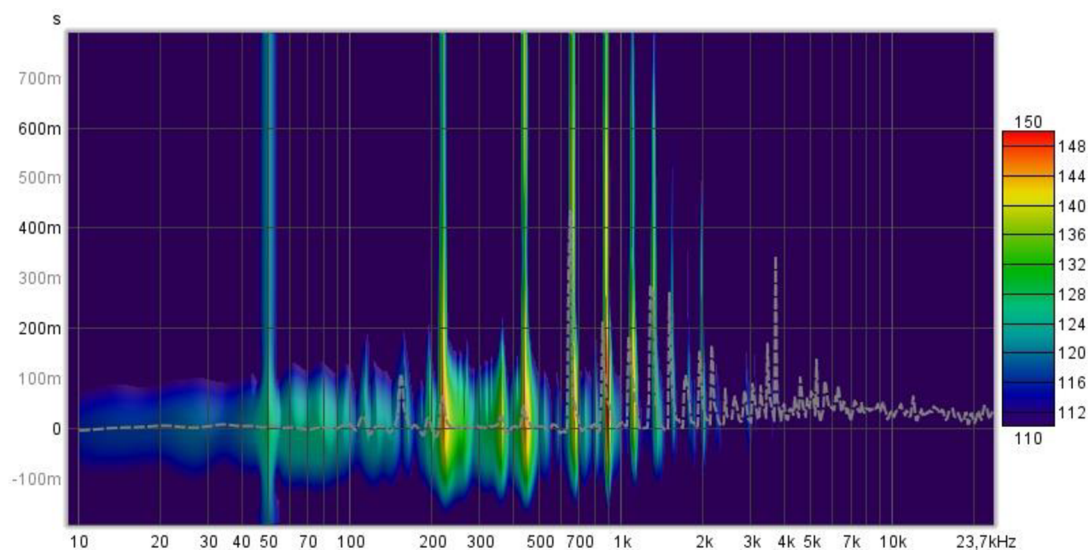


Obrázek 4.VIII – Rozdělení spektra tónu do čtyř pásem

První pásmo se nachází od 1. – do 8. harmonické. Mírně výraznější jsou zde sudé harmonické, proto je tón hodně mohutný a jasný. Co se týče lichých harmonických, nejsou až tak výrazné jako sudé, ale své zastoupení zde mají. Proto má tón i svou vlastní specifickou barvu, i když není tak výrazná. **Druhé pásmo** se nachází od 9té do 16té

harmonické, má tedy frekvenci 1980Hz – 3300Hz, tedy od tónu H3 až po tón Gis4. Spektrum má poměrně vysokou intenzitu a tím přidává průraznost tónu. **Třetí pásmo** se nachází od 17té do 32té harmonické, tedy ve frekvenčním pásmu od 3520Hz – 6272Hz, tedy od tónu A4 až po tón G5. Protože některé části spektra tohoto pásma mají silnou intenzitu, poukazuje na zvýšení cinkavosti. **Čtvrté pásmo** se nachází od 33té do 64té harmonické a začíná tedy na frekvenci 6492Hz, ale konec tohoto pásma nejde zcela určit, protože je zde silný šum. Celé toto spektrum je téměř celé neharmonické a nevnímáme ho už jako žádný tón. Nemá barvu ani mohutnost, dává tónu něco jako šumový podtext. Na spektru je tento šum dobře rozeznatelný. Na první pohled se jedná o růžový šum, neboli kmitající šum a je přímo úměrný převrácené hodnotě frekvence. Tento šum hlavně vytváří diody v zesilovači harfy. Protože šum má odstup od fundamentu před 50dB, je poměrně tichý. Mimo růžový šum, zde můžeme vidět také stopy bílého a červeného šumu.

Pásmo, které ovšem nejvíce ovlivňuje celkovou barvu tónu, je bezpochyby první. Proto je vhodné toto spektrum rozebrat podrobněji. Na obrázku 4. VIII jsou v první pásmu jednotlivé harmonické popsány čísly 1 – 8 a ty to čísla identifikují jednotlivé harmonické. **První** harmonická, neboli fundament, se nachází na frekvenci 220Hz a je velice výrazná, proto je tón nosný a stálý. **Druhá** harmonická je rovněž silně výrazná a mohutná. Je v čisté oktávě od fundamentu a zastupuje zde slavné komorní A – 440Hz. **Třetí** harmonická přidává barvě tupý nádech, který skvěle podporuje další barvotvorné intervaly. Její intenzita dokáže stále dobře konkurovat ostatním harmonickým složkám. Jedná se o tón *e*2, neboli čistou kvintu o oktávu výš. **Čtvrtá** harmonická je se svou intenzitou dokonce hlasitější než fundament. Tato část spektra přidává typickou jasnost tónu elektrické harfy. Tuto složku ovlivňuje především kovový rám nástroje ale také rezonance v obložení na vyšších kmitočtech. Odpovídá tónu *a*2 (880Hz), což je druhá oktáva od fundamentu. **Pátá** by se dala nazvat lepidlem. Jakoby slévala dohromady ostatní harmonické a zjemňovala celý zvuk. Leží o dvě oktávy a tercii výš vůči fundamentu. Poslední tři harmonické z prvního pásma, šestá až osmá, výrazně ovlivňují jasnost tónu. Zhodnocením složek prvního pásma harfa vytváří nosný ale zároveň jasný zvuk. Nelze opominout silnou inharmonicitu na frekvenci 50 a 360Hz (viz obrázek 4. VII a 4. VIII). Tyto složky jsou vytvořeny vlastní resonancí nástroje a dodávají každému tónu typický charakter tohoto nástroje. Nosnost těchto inharmonicit, ale také harmonických složek lze pozorovat na obrázku 4. IX.



Obrázek 4.IX – Spektrogram analyzovaného tónu

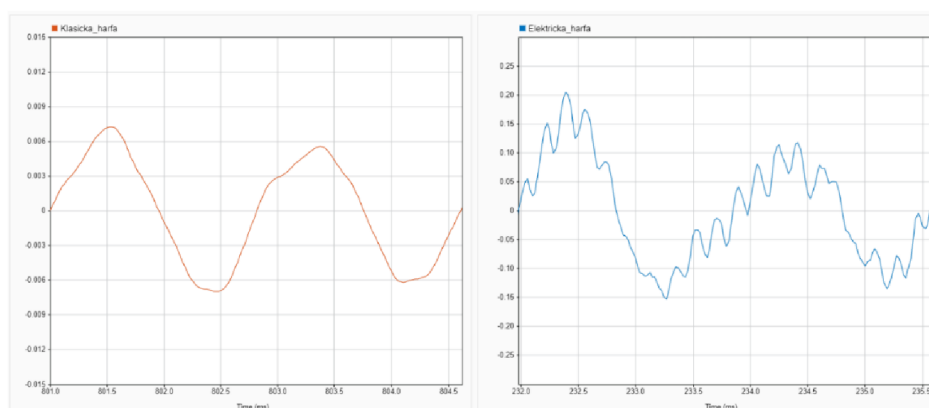
Na spektrogramu lze krásně vidět intenzity jednotlivých harmonických, jak byly rozebrány výše. Tím se analýza potvrdila. Ale tento spektrogram (viz obrázek 4. IX) nabízí ještě nový unikátní pohled. Ukazuje, které složky spektra v čase setrvávají nejdéle. Dalo by se říct, že po prvních 100ms (attack) slyšíme pouze první pásmo a inharmonicity. Tedy nosnou a charakteristickou barvu tvoří převážně harmonické frekvence prvního pásma.

4.2.5 Porovnání s ostatními nástroji

Nástroj je díky svým možnostem a charakteristické barvě zvuku dobře připraven na začlenění se mezi ostatní všeobecně přijímané nástroje. Pokud by byl nástroj naladěný v malé oktávě, měl by podobnou barvu s většinou drnkacích nástrojů (kytara, koto, mandolína...) a tak by se mohl postavit na jejich místo. Synchronní by byl s nástroji jako je například o violoncello, violu, flétny a podobně. Tato elektrická harfa by při hře s těmito nástroji jistě vyniknula hlavně při hře v legátu buď jako nástroj doprovodný (například s flétnou), nebo i jako sólový v kombinaci například se smyčcovým kvartetem, protože má rozdílné, a tudíž při souzvuku čitelné spektrum. Naopak jsou i nástroje, s kterými nástroj bude barevně v menší kolizi a bude docházet k maskování. Jedná se například o elektrické kytary (i basové), dále bude hůře čitelný v kombinaci s některými průraznými dechovými nástroji ve vyšších polohách jako je klarinet, saxofon, trubka aj.

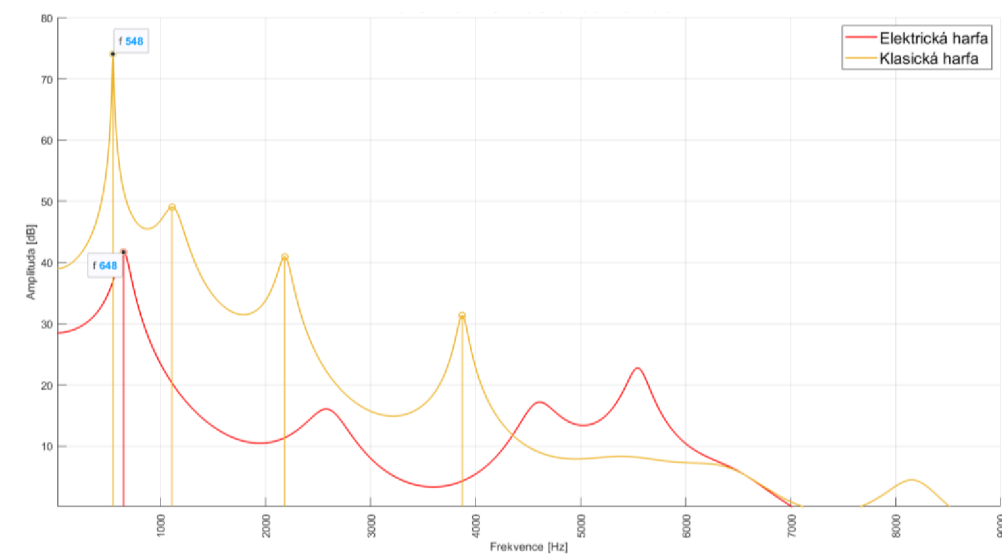
Porovnání, které je ale nejvíce žádoucí je s klasickou harfou. Otázka zní, zda může tento nástroj konkurovat i staletí starému a osvědčenému nástroji. Pokud by se měla hodnotit konstrukce, tato elektrická harfa nabízí menší rozměry a váhu – tím pádem jednodušší přepravu. Jednou z největších nevýhod je absence přeladovacího mechanismu tzv. pedálů. Ale má jiné možnosti jako změnu barvy tónu, využití elektrických efektů nebo také použití nástroje jako generátoru signálu pro MIDI. Konstrukční nevýhodou ale je, že nemá silné akustické vyzařování do prostoru a nenabízí možnost přeladování

během hry, má také menší počet strun. Z hlediska barvy tónu lze rozdíl vidět na obrázku 4. X a 4. XI.



Obrázek 4.X – Rozdíl průběhu signálů mezi el. a klasickou harfou

Na grafu jsou dvě periody signálu – vlevo klasické harfy a vpravo experimentální harfy. Klasická harfa se svým průběhem blíží sinusovému průběhu signálu, zatímco elektrická obsahuje větší počet harmonických frekvencí a blíží se tak vzdáleně pile. Další rozdíly ve spektru lze pozorovat na obrázku 4. XI.



Obrázek 4.XI – Porovnání zvukového spektra s klasickou harfou

Na obrázku 4. XI lze pozorovat, že intenzita harmonických frekvencí klasické harfy se téměř lineárně zeslabuje. Oproti experimentální harfě, která díky svému dřevěnému obložení přidává i vyšší frekvence okolo pěti až šesti kHz. Díky všem těmto poznatkům lze konstatovat, že klasická harfa je výborná pro rozklady akordů, složitější hru a doprovázení dalších nástrojů. Experimentální harfa svou zajímavou a komplikovanější barvou umožňuje i sólovou hru, u ní však vše záleží na použité kombinaci snímačů, je tedy univerzálnější a umožňuje vlastní realizaci a nastavení dle interpreta.

ZÁVĚR

Cílem práce byl kompletní návrh, výroba a analýza experimentální harfy za účelem vytvoření nových prvků, které by přispěly k vývoji nových nástrojů. V první části práce byla předestřena základní teoretická fakta. Na základě těchto skutečností byl vytvořen vlastní návrh nástroje a jeho funkční prototyp se stručným popisem jeho zvukových a hudebních možností. Nástroj je v mnoha ohledech originální a tím i inovační. Hráči nabízí možnost rychlého útlumu strun, intuitivní změnu barvy zvuku či hlasitosti, mnoho způsobu hry a mnoho dalšího. Tímto byl cíl práce splněn.

Literatura

- [1] ČÍŽEK, Bohuslav. *Hudební nástroje*. Praha: Aventinum, 2002. ISBN 80-7151-211-7.
- [2] MELKUS, Libor. *Hudební nástroje symfonického orchestru*. 3. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1958.
- [3] KLEŇHA, Jiří. *Harfenictví v Čechách: historie vandrovních muzikantů z Nechanic*. Praha: Granit, 1998. ISBN 80-85805-69-3.
- [4] Struny + Jak vybrat? - Recenzer.cz. *Recenzer.cz - Nezávislé RECENZE a TESTY 2021* [online]. Copyright © Converso Group s.r.o., 2021 [cit. 07.12.2021]. Dostupné z: https://www.recenzer.cz/struny/?gclid=EAIaIQobChMIhpqSjfqN9AI VyR3Ch0Aewv1EAAYASAAEgLquPD_BwE
- [5] *Strunné nástroje*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1980. Prozatímní učební dokumenty učebních oborů.
- [6] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-297-8.
- [7] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [8] HLUCHÝ, Miroslav, Oldřich MODRÁČEK a Rudolf PAŇÁK. *Strojírenská technologie 1 - 2. díl: Metalografie a tepelné zpracování*. 2. vyd. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-7183-140-9.
- [9] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [10] *Matematické, fyzikální a chemické tabulky: pro střední školy*. Praha: Ottovo nakladatelství, 2015. ISBN 978-80-7451-472-2.
- [11] Vlastnosti dřeva | Dřevo NB, s.r.o.. *Výroba štípaného dřeva | Dřevo NB, s.r.o.* [online]. [cit. 07.12.2021] Dostupné z: <https://www.drevonb.cz/palivove-drevo/vlastnosti-dreva/>
- [12] MRŇÁK, Ladislav a Alexander DRDLA. *Mechanika: Pružnost a pevnost*. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1980. ISBN 04-005-80.
- [13] PETRŽÍLKA, Václav a Josef Bartoloměj SLAVÍK. *Piezoelektrina a její použití v technické praxi ...*. V Praze: Jednota českých matematiků a fyziků, 1940. Cesta k vědě (Jednota českých matematiků a fyziků).
- [14] *Artsooptools* [online]. Klášterec nad Ohří, Útočiště 49: Jitka Kůsová, [cca 2005] [cit. 07.12.2021]. Dostupné z: <https://www.artsooptools.cz/slozka/tah-strun/>
- [15] ŠTOLL, Ivan, Jiří TOLAR a Igor JEX. *Klasická teoretická fyzika*. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2017. ISBN 978-80-246-3545-3.
- [16] PŘF:F5090 Elektronika (2a). *Informační systém* [online]. [cit. 07.12.2021]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/sci/jaro2017/F5090/um/E17_P8

- [17] Jednoduché pásmové propusti. *Úvodní stránka* [online]. Copyright © 2008 [cit. 07.12.2021]. Dostupné z: <https://barts.cz/domains/barts.cz/index.php/elektronika/obvody/68-jednoduche-pasmove-propusti>
- [18] CNC Obrábění - HaCase s.r.o.. *Úvod - HaCase s.r.o.* [online]. Copyright © [cit. 07.12.2021]. Dostupné z: <http://www.hacase.cz/cnc-obrabeni#prettyPhoto>
- [19] 3R3L Guitar Tuning Pegs Keys Machine Heads Tuners For Acoustic Folk Classical Guitar,FTSK JS BT|tuner satellite|machine wash bath mattuner tv - AliExpress [online]. Copyright © [cit. 11.12.2021]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/1911462106.html>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – ZÁVISLOST ZESÍLENÍ NA POLOZE POTENCIOMETRU

Příloha B – BOČNÍ NOSNÍK P

Příloha C – BOČNÍ NOSNÍK L

Příloha D – SPODNÍ NOSNÍK

Příloha E – HORNÍ NOSNÍK 01

Příloha F – HORNÍ NOSNÍK 02

Příloha G – TLUMÍCÍ MECHANISMUS 01

Příloha H – TLUMÍCÍ MECHANISMUS 02

Příloha CH – TLUMÍCÍ MECHANISMUS 03

Příloha I – TLUMÍCÍ MECHANISMUS 04

Příloha J – SPODNÍ OBLOŽENÍ

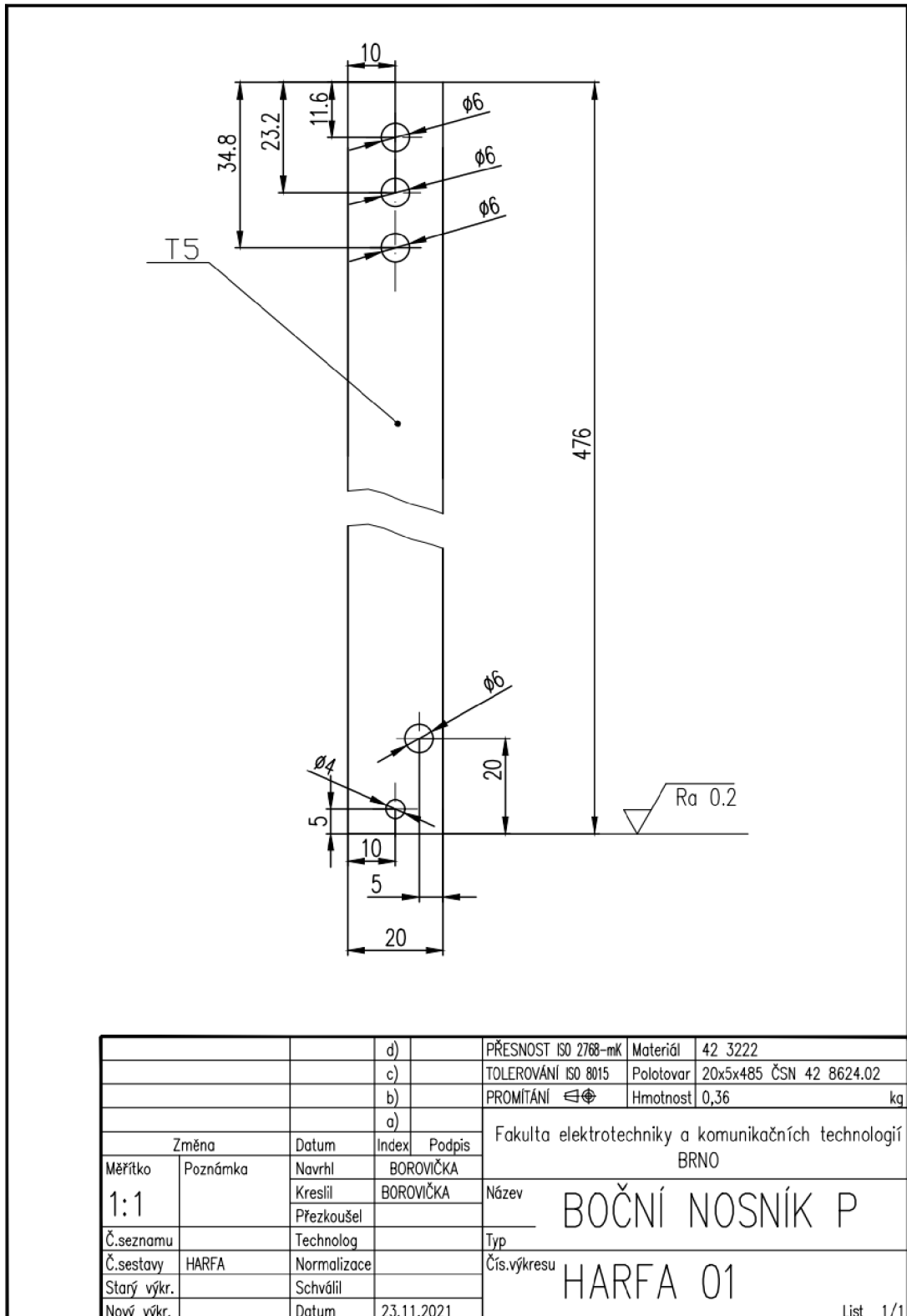
Příloha K – LEVÉ OBLOŽENÍ

Příloha L – PRAVÉ OBLOŽENÍ

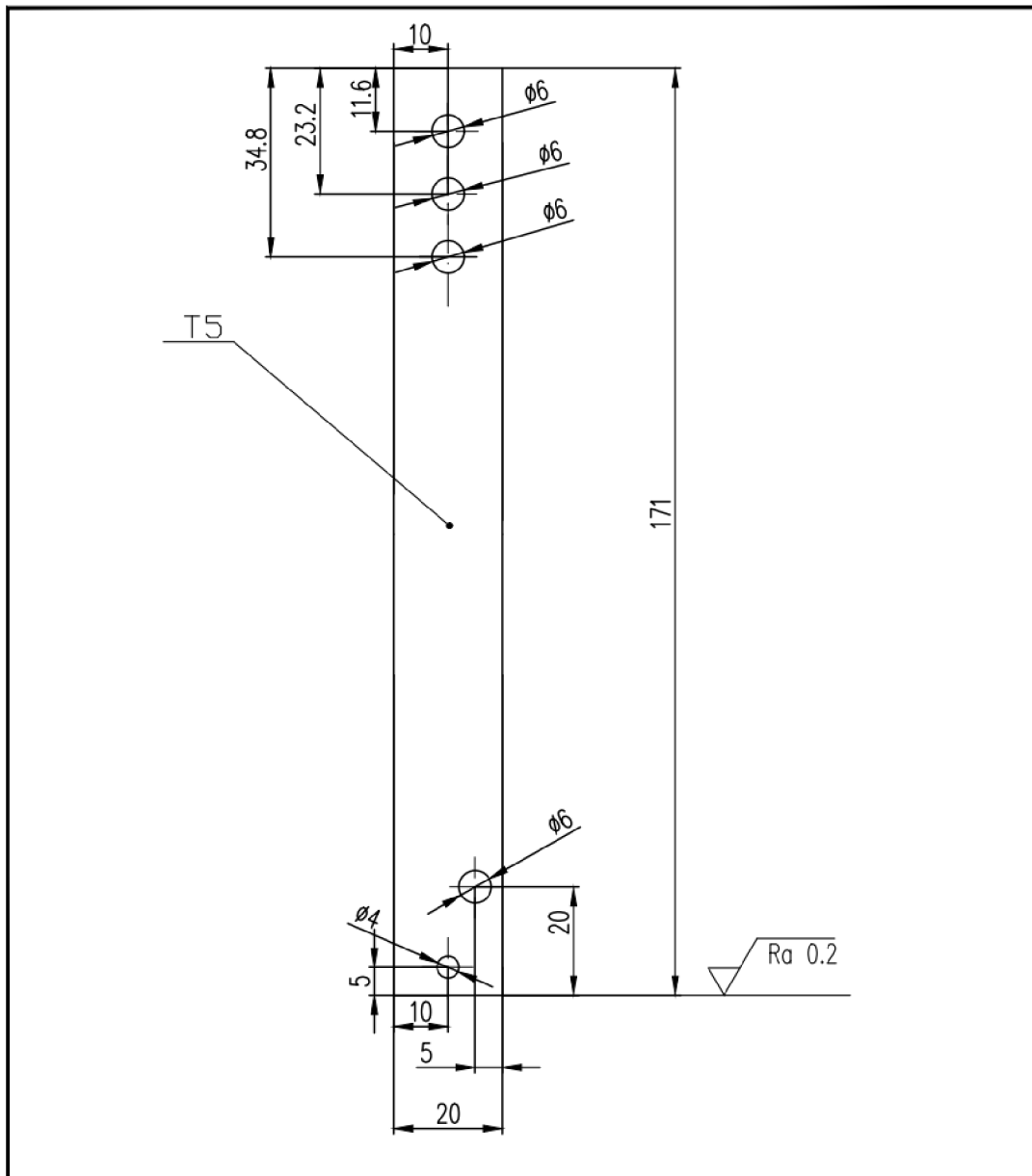
A. ZÁVISLOST ZESÍLENÍ NA POLOZE POTENCIOMETRU

	a (%)	a	1-a	Au	Au (dB)
běžec vlevo	0	0,001	0,999	0,0009	-60,82
	10	0,100	0,900	0,1000	-20,00
	20	0,200	0,800	0,2222	-13,06
	30	0,300	0,700	0,3750	-8,52
	40	0,400	0,600	0,5714	-4,86
	50	0,500	0,500	0,8333	-1,58
	60	0,600	0,400	1,2000	1,58
	70	0,700	0,300	1,7500	4,86
	80	0,800	0,200	2,6667	8,52
	90	0,900	0,100	4,5000	13,06
běžec vpravo	100	1,000	0,000	10,0000	20,00

B. BOČNÍ NOSNÍK P

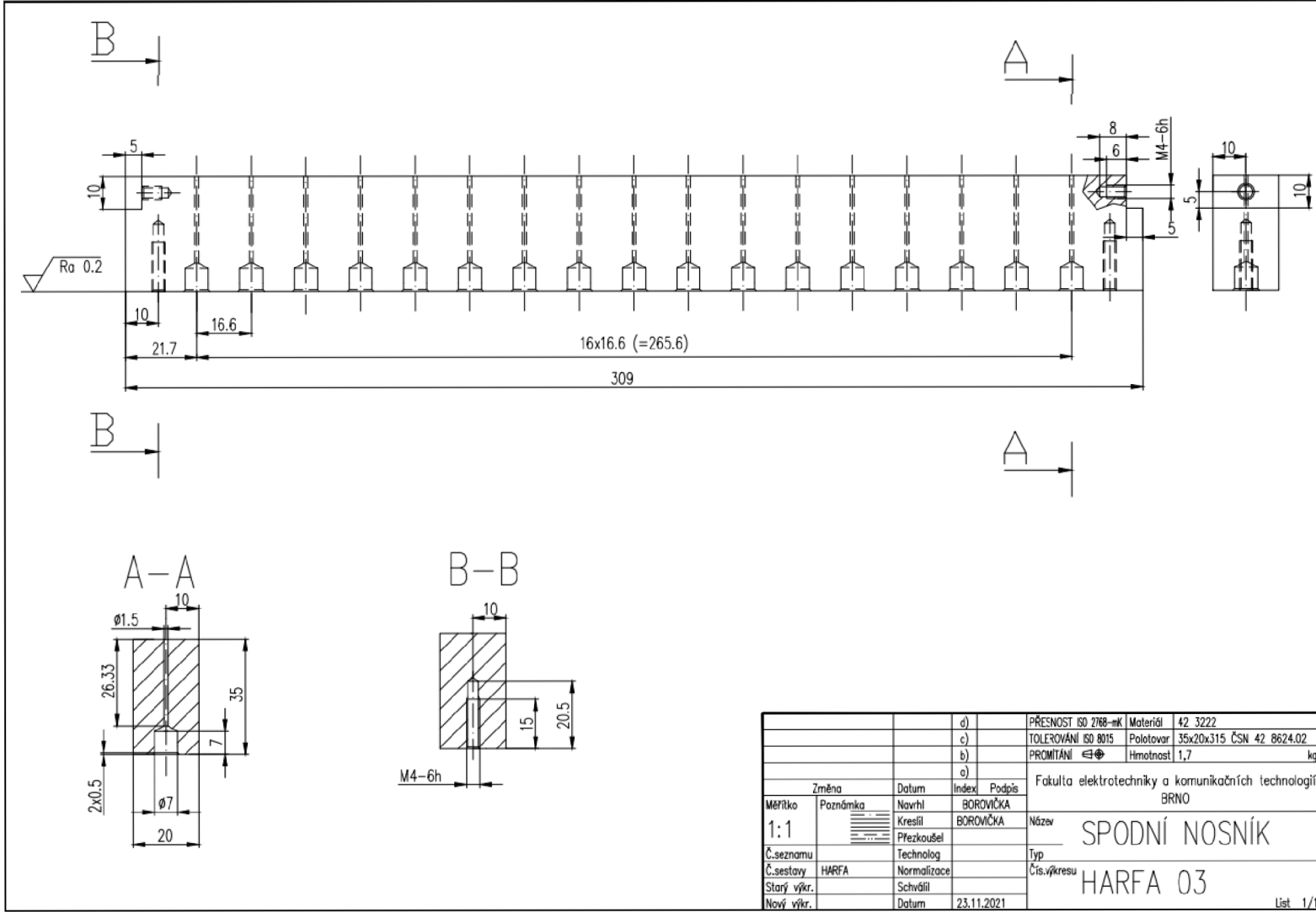


C. BOČNÍ NOSÍK L



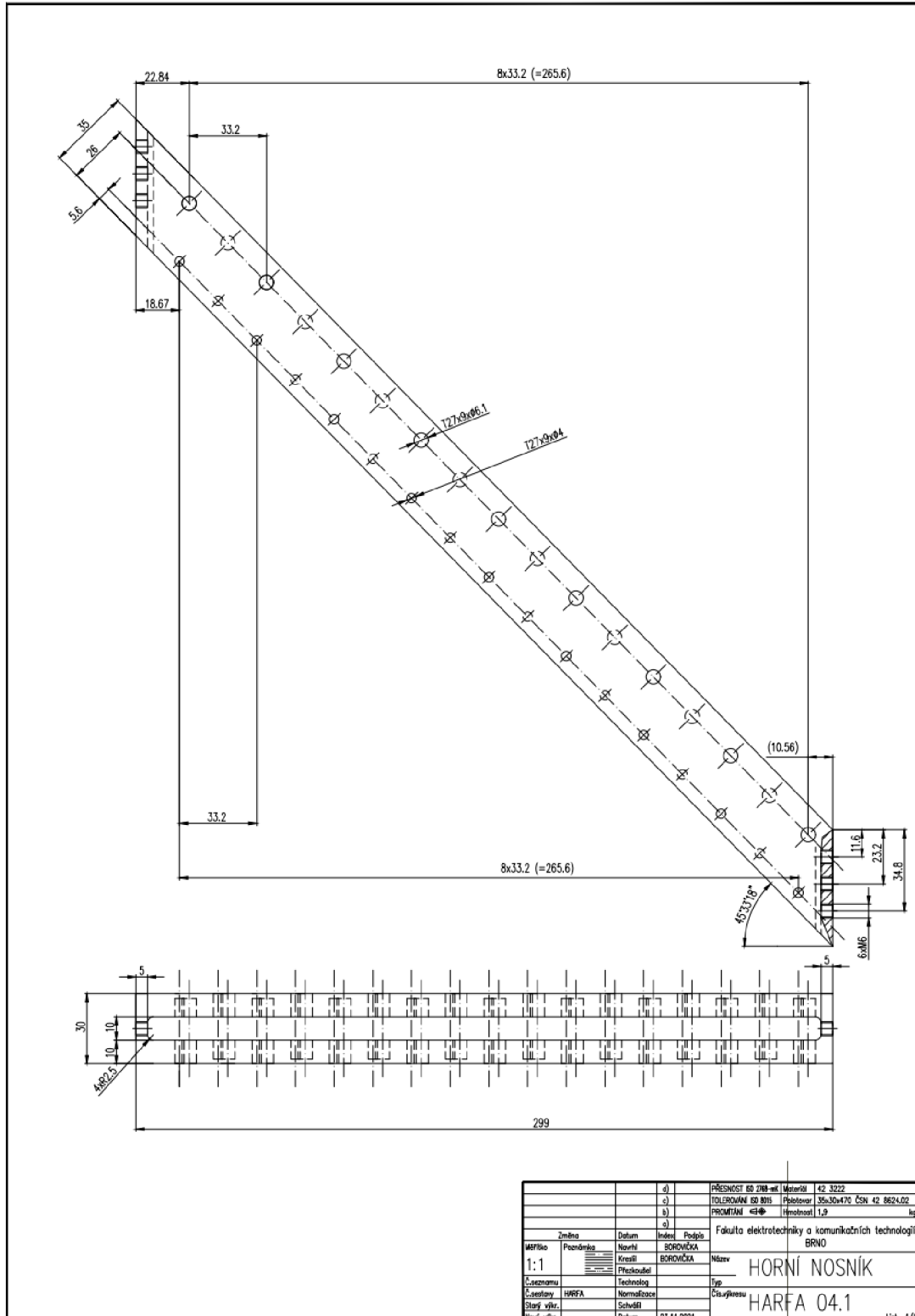
			d)		PŘESNOST ISO 2768-mK	Materiál	42 3222
			c)		TOLEROVÁNÍ ISO 8015	Polotovar	20x5x175 ČSN 42 8624.02
			b)		PROMÍTÁNÍ M	Hmotnost	0,16 kg
			a)		Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií BRNO		
	Změna	Datum	Index	Podpis	Název BOČNÍ NOSNÍK L		
Měřítka	Poznámka	Navrhl	BOROVIČKA				
1:1		Kreslil	BOROVIČKA		Typ Čís.výkresu HARFA 02		
Č.seznamu		Přezkoušel					
Č.sestavy	HARFA	Technolog			List 1/1		
Starý výkr.		Normalizace					
Nový výkr.		Schválil					
		Datum	23.11.2021				

D. SPODNÍ NOSNÍK



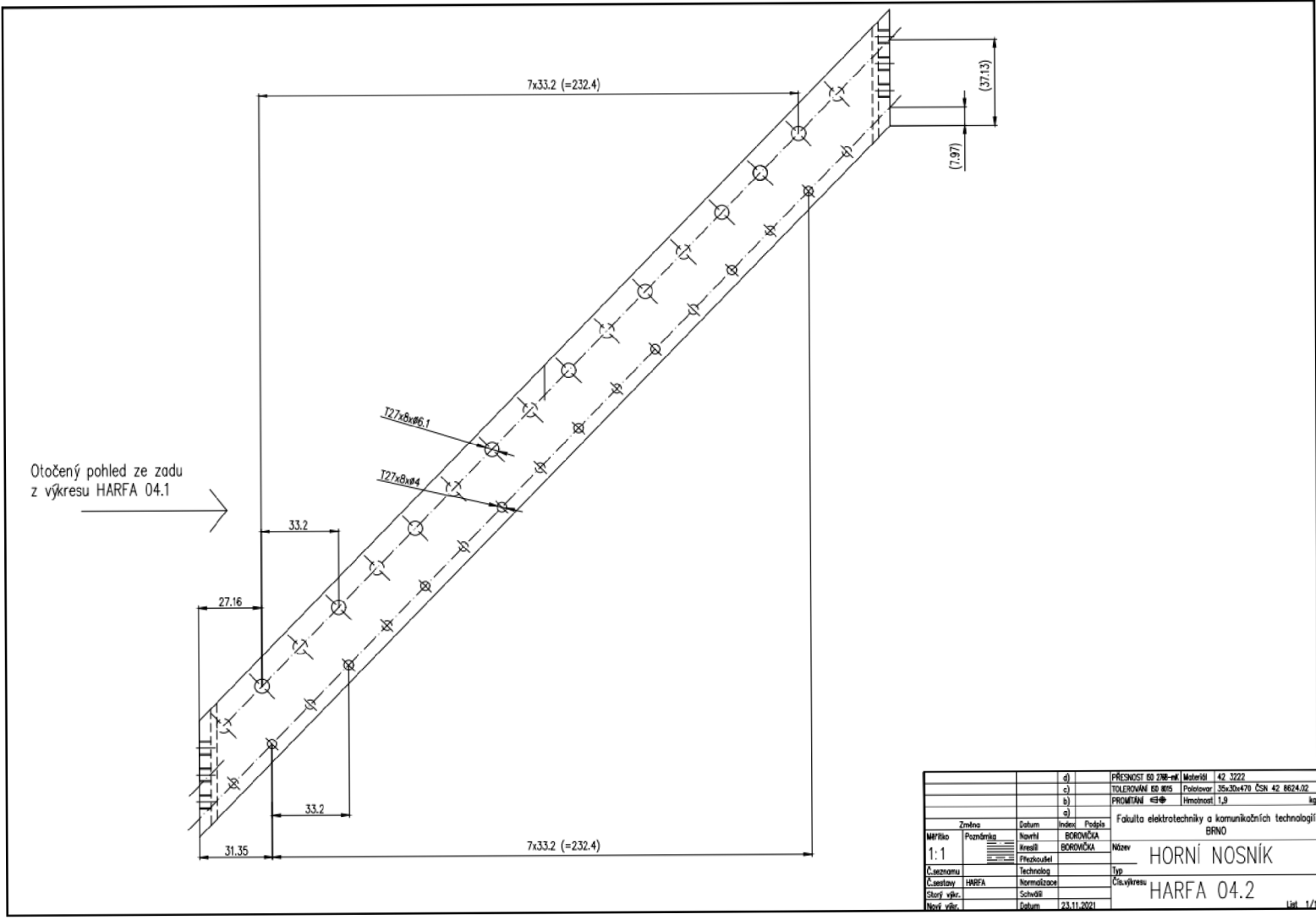
		d)		PŘESNOST ISO 2768-mK	Materiál	42 3222
		c)		TOLEROVÁNÍ ISO 8015	Polotovary	35x20x315 ČSN 42 8624.02
		b)		PROMĚTÁNÍ	☺	Hmotnost 1,7 kg
		a)				
	Změna	Datum	Index	Podpis	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií BRNO	
Měřítko 1:1	Poznámka	Navrhl	BOROVÍČKA	Kreslil	BOROVÍČKA	Název SPODNÍ NOSNÍK
Č.seznamu	HARFA	Přezkoušel		Technolog		Typ HARFA 03
Starý výkr.		Normalizace		Schválil		Čís.výkresu
Nový výkr.		Schválil		Datum	23.11.2021	List 1/1

E. HORNÍ NOSNÍK 01

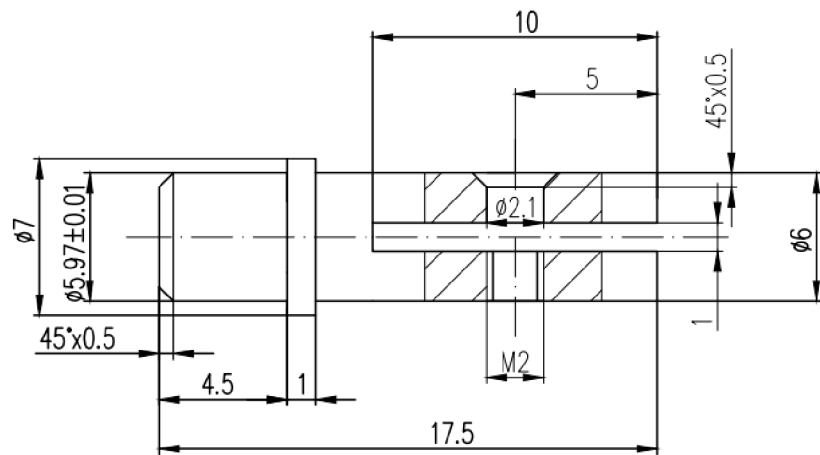


	d)	PŘESNOST	ISO 2108-01	Material	42 3222
	c)	TOLEROVÁNÍ	ISO 8015	Přibor	35x30x470 ČSN 42 8624.02
	b)	PROMĚTY	45°	Hmotnost	1,9 kg
	a)				
	Změna	Datum	Index	Podpis	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií BRNO
MF/Bo	Podpis	Nazev	SCHÖNICKA	Název	HORNÍ NOSNÍK
1:1		Kreslí	BOHONICKA	Typ	HARFA 04.1
Číslo	HRFA	Norma	Edic	Číslo	1/1
Starší	vtr.	Schv	Edi		
Nový	vtr.	Datum	23.11.2001		

F. HORNÍ NOSNÍK 02



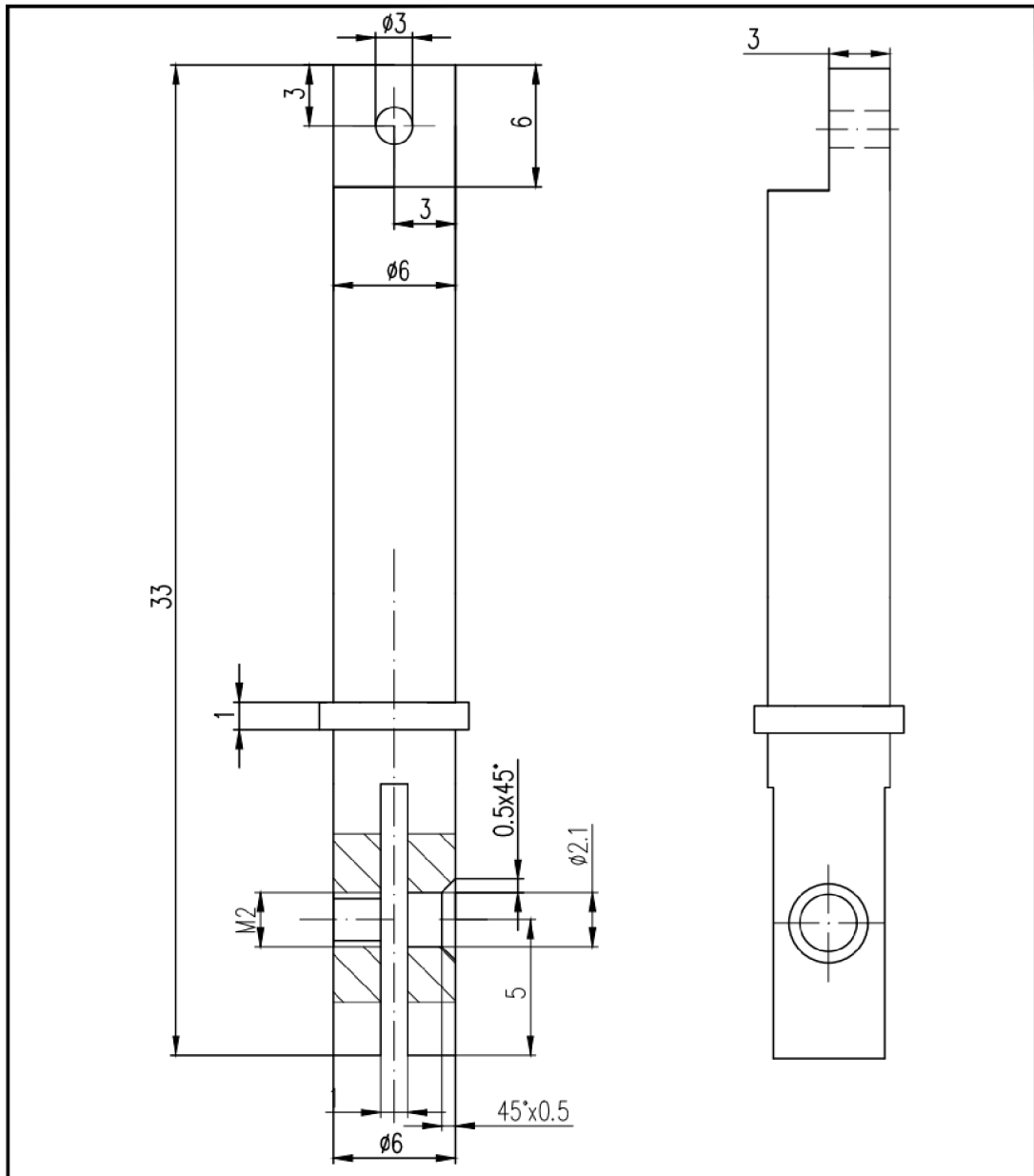
G. TLUMÍČÍ MECHANISMUS 01



		d)		PŘESNOST ISO 2768-mK	Materiál	11 373
		c)		TOLEROVÁNÍ ISO 8015	Polotovar	ø8 x 20 ČSN 42 5510.12
		b)		PROMÍTÁNÍ $\text{M} \begin{smallmatrix} \text{L} \\ \text{S} \end{smallmatrix}$	Hmotnost	0,1 kg
		a)		Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií BRNO		
Změna	Datum	Index	Podpis			
Měřítka	Poznámka	Navrhl	BOROVÍČKA	Název	TLUMICI MECH 1	
5:1		Kreslil	BOROVÍČKA	Typ		
Č.seznamu		Přezkoušel		Čís.výkresu	HARFA 05	
Č.sestavy	HARFA	Normalizace				
Starý výkr.		Schválil				
Nový výkr.		Datum	23.11.2021			

List 1/1

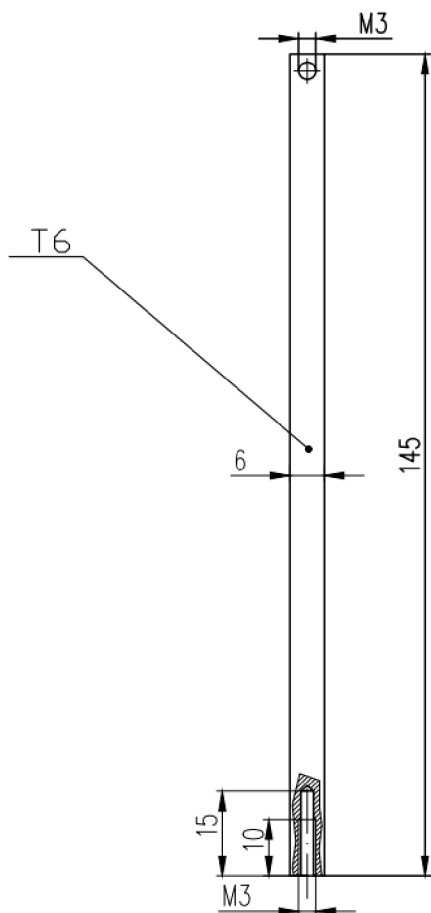
H. TLUMÍČÍ MECHANISMU 02



		d)		PŘESNOST ISO 2768-mk	Material	11 373
		c)		TOLEROVÁNÍ ISO 8015	Polotovar	Ø8 x 40 ČSN 42 5510.12
		b)		PROMÍTÁNÍ $\begin{matrix} \text{⊖} \\ \text{⊕} \end{matrix}$	Hmotnost	0,15 kg
		a)		Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií BRNO		
Změna	Datum	Index	Podpis			
Měřítka	Poznámka	Navrhl	BOROVÍČKA	Název	TLUMICI MECH 2	
Č.seznamu		Kreslil	BOROVÍČKA	Typ		
Č.sestavy	HARFA	Přezkoušel		Čís.výkresu	HARFA 06	
Starý výkr.		Technolog				
Nový výkr.		Normalizace				
		Schválil				
		Datum	23.11.2021			

List 1/1

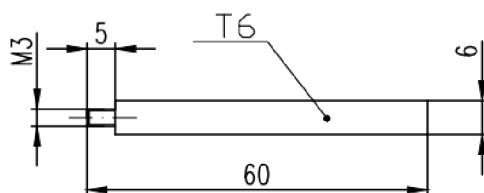
CH. TLUMÍCÍ MECHANISMUS 03



		d)		PŘESNOST ISO 2768-mK	Materiál	11 373
		c)		TOLEROVÁNÍ ISO 8015	Polotovar	6 x 150 - ČSN 45 6520.12
		b)		PROMÍTÁNÍ $\left[\begin{array}{c} \ominus \\ \oplus \end{array} \right]$	Hmotnost	0,15 kg
		a)		Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií BRNO		
	Změna	Datum	Index	Podpis	Název TLUMICI MECH 3	
Měřítko	Poznámka	Navrhl	BOROVÍČKA	Kreslil		
5:1		Přezkoušel				
Č.seznamu		Technolog			Typ	
Č.sestavy	HARFA	Normalizace			Čís.výkresu	HARFA 07
Starý výkr.		Schválil				
Nový výkr.		Datum	23.11.2021			

List 1/1

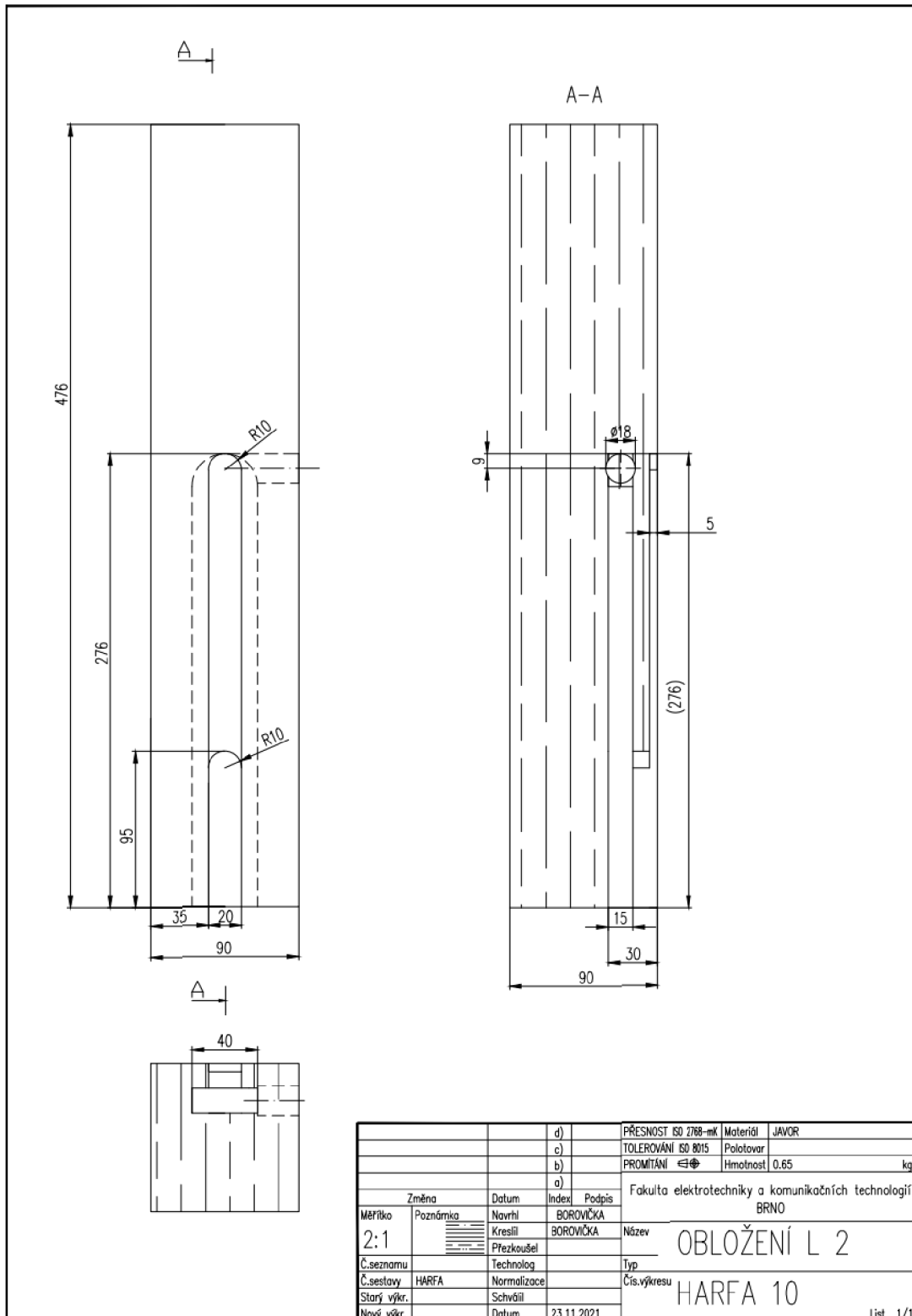
I. TLUMÍCÍ MECHANISMUS 04



		d)		PŘESNOST ISO 2768-mK	Materiál	11 373
		c)		TOLEROVÁNÍ ISO 8015	Polotovar	6 x 65 – ČSN 45 6520.12
		b)		PROMÍTÁNÍ $\begin{matrix} \leftarrow \oplus \\ \leftarrow \ominus \end{matrix}$	Hmotnost	0,15 kg
		a)		Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií BRNO		
Změna		Datum	Index	Podpis	Název TLUMICI MECH 4	
Měřítko	Poznámka	Navrhl	BOROVÍČKA	Kreslil		
5:1		Přezkoušel				
Č.seznamu		Technolog			Typ	
Č.sestavy	HARFA	Normalizace			Čís.výkresu	HARFA 08
Starý výkr.		Schválil				
Nový výkr.		Datum	23.11.2021			

List 1/1

K. LEVÉ OBLOŽENÍ



L. PRAVÉ OBLOŽENÍ

